



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

加速气候韧性 基础设施建设

ACCELERATING CLIMATE-RESILIENT
INFRASTRUCTURE INVESTMENT IN CHINA

丁宏宇，余甜，奚文怡，鹿璐，房伟权，曹颖，匡舒雅，崔莹，周杰侯，刘慧心，
许吟隆，李阔



国家应对气候变化战略研究和国际合作中心
National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation (NCSC)



中央财经大学绿色金融国际研究院
International Institute of Green Finance, CUFE

WRI.ORG.CN



校对
谢亮 hippie@163.com

设计与排版
张烨 harryzy5204@gmail.com

<https://doi.org/10.46830/wriipt.21.00031>

目录

V 序

VII 执行摘要

XIII Executive Summary

1 第1章 正当其时： 加强气候韧性基础设施建设

- 1 全球亟须加强气候适应工作
- 2 中国行动，刻不容缓
- 3 研究目的和范围

7 第2章 警钟已鸣： 中国基础设施面临严峻气候风险

- 7 未来气候风险的发展趋势
- 10 对典型案例地区气候风险的预测

19 第3章 一举三利： 气候韧性基础设施建设带来三重红利

- 19 气候韧性基础设施成本效益评估方法学
- 21 气候韧性基础设施建设代表性案例投资回报收益分析
- 31 将气候韧性基础设施建设代表性案例推广到全国的重要意义

37 第4章 丰翼纳新： 加强气候韧性基础设施融资创新

- 37 气候韧性基础设施资金供需不匹配
- 39 探索气候韧性基础设施融资机制
- 42 中国案例地区融资机制设计经验借鉴与建议
- 47 推进中国气候韧性基础设施投融资的路径与策略

52 第5章 总结和建议

56 注释

58 参考文献

图目录

图1	国内外开展气候变化适应工作的进展	2
图2	气候变化风险概念示意图	3
图3	气候韧性基建案例选择标准	4
图4	1961—2020年全国夏季高温日数历年变化	8
图5	2009—2019年中国农作物因旱受灾面积和直接经济损失	8
图6	2014—2020年中国主要气象灾害受灾面积占总受灾面积比例	9
图7	2001—2019年中国气象灾害发生次数	9
图8	1980—2020年中国沿海海平面变化	10
图9	未来宁夏地区平均温度和年降水量变化	11
图10	宁夏地区干旱指数空间分布	12
图11	2020年武汉市代表水文站降水量过程线图	13
图12	特征年份年降水量对比图	13
图13	武汉市暴雨日数空间分布	14
图14	武汉市暴雨强度空间分布	14
图15	武汉市暴雨强度概率分布	15
图16	未来气候情景下武汉市暴雨洪涝风险空间分布	15
图17	各案例成本和效益计算项目	20
图18	气候韧性基础设施损益分析框架	21
图19	2012—2016年武汉市洪涝灾害直接经济损失	25
图20	大鹏新区2020年（左）和2035年（右）建成区和不同类型岸线分布	27
图21	典型气候韧性基建项目投资收益结果	30
图22	暴雨洪涝灾害风险及关键城市分布图	32
图23	中国沿海省份每平方千米人口、GDP产值和全社会固定资产投资额	34
图24	2016—2040年全球及主要国家基础设施建设资金缺口	38
图25	中国适应气候变化各领域资金供需情况	39
图26	2017年发展中国家基础设施建设资金来源占比	39
图27	2017—2018年适应气候变化资金来源占比	40
图28	2017年7家多边开发银行适应气候变化资金使用方式	40
图29	韧性债券结构	43
图30	韧性影响力债券结构	46
图31	政府推动气候韧性基础设施投融资的实施路径	49
图32	构建推进气候韧性基建行动的机制和平台	55

表目录

表 1	干旱等级、农业生产减产率划分表	12
表 2	大鹏湾未来风暴潮最高潮位及频次	16
表 3	宁夏农业节水灌溉设施项目投资损益和敏感性分析结果	23
表 4	灰绿基础设施分类	24
表 5	武汉气候韧性基建项目投资损益和敏感性分析结果	27
表 6	深圳灰绿结合海堤项目投资损益和敏感性分析结果	29
表 7	武汉海绵城市类PPP项目概况	45
表 8	案例地区项目建设出资方和主要受益方	48



序

在即将过去的一年里，全世界经历了一系列惊人的、毁灭性的极端天气事件。7月，发生在中国河南省的洪灾导致302人死亡，造成的直接经济损失高达1142.69亿元。德国、比利时和荷兰持续数天的大雨导致洪水泛滥，共造成200多人死亡。与此同时，北美地区遭受了破纪录的热浪和火灾，而世界各地的沿海城市也受到风暴潮的威胁。随着全球气温上升，对人民生命财产造成惨重损失的事件正越来越频繁地发生。

根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）最新发布的报告，全球平均气温相比于工业化前水平上升1.5摄氏度的时间，比之前的预测提早10年，这意味着我们将面临更剧烈的气候波动和更多的极端天气事件。为了保护人民的生命财产免受灾难性的、不可逆转的损害，所有国家和地区都迫切需要加快对气候适应措施的投资。全球适应委员会最近发布的一份重要报告估计，投资气候韧性基础设施可以在全球带来接近1:5的成本效益比。

作为受极端天气事件影响最为严重的国家之一，中国在探索适应气候变化解决方案方面可以发挥领导作用。已经开始实施的“十四五”规划，以“新基建”作为未来发展的重点方向之一，这为中国加快建设气候韧性基础设施提供了机遇。将气候适应措施纳入新基建的设计和建设中，不仅有助于提高中国基础设施应对未来气候变化影响的韧性，而且有助于在新冠肺炎疫情后的经济复苏中创造就业机会，促进经济发展。

世界资源研究所发布的旗舰报告分析了中国投资气候韧性基础设施可获得的回报，并探讨了潜在的融资创新，以填补未来五年内气候韧性基础设施建设面临的年均近5000亿元的资金缺口。本报告以宁夏农业节水灌溉设施、武汉海绵城市建设和深圳绿灰结合海堤建设为研究案例，计算了这些气候韧性基础设施可以带来的三重红利，即规避未来损失、经济效益、社会和环境效益。结果表明，在气候韧性基础设施上每投资1元，在30年内可获得2-20元的回报。

世界资源研究所希望本报告的研究结果能够为中国正在编制的《国家适应气候变化战略2035》提供参考，在“十四五”期间推动各级政府加速开展气候适应行动，并为相关政策制定者和研究人员提供具体的研究基础和方法框架，以促进气候韧性基础设施的推广。



阿尼·达斯古普塔
总裁兼首席执行官
世界资源研究所



执行摘要

主要结论

- 2021年8月, 联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布的报告指出, 全球温升将有可能在未来20年内就突破1.5°C, 未来升温加速趋势明显, 由此给地球生态系统带来的一些变化已不可逆转。各国必须加大温室气体的减排力度, 以减缓升温加速趋势, 同时亟须加大气候适应工作的力度, 以增强气候韧性, 降低气候风险损失。
- 本报告系统地对气候风险以及相应气候韧性基础设施进行定义和分析, 在国内尚属首次。通过案例研究, 本报告着重分析预测了宁夏、武汉和深圳三个地区未来面临的农业干旱、城市内涝和沿海风暴潮等典型气候风险, 并深入探讨了大力推广气候韧性基础设施的必要性。
- 本报告采用三重红利 (规避未来损失、经济效益、社会环境效益) 分析框架, 系统地分析了三个地区的气候韧性基础设施 (分别是节水灌溉设施、海绵城市和灰绿结合海堤) 的投资收益, 发现每投资1元, 未来30年共计可产生2~20元的收益。
- 在全国范围内因地制宜地推广宁夏、武汉、深圳三个地区的气候韧性基础设施建设 (以下简称气候韧性基建) 意义重大, 其中, 农业节水灌溉设施建设可保障国家粮食安全, 海绵城市建设可降低城市内涝灾害风险, 而灰绿结合海堤建设有助于抵抗风暴潮对沿海地区的侵袭。
- 中国气候韧性基建面临严重的资金供需不匹配问题, 为提高中国基础设施的气候适应能力, 未来五年内需要弥补近5000亿元的年均资金缺口, 亟须通过大量资金投入和有效的融资手段来缓解气候韧性基建遇到的资金难题。
- 宁夏、武汉、深圳三个地区可以通过韧性债券、政府和社会资本合作、韧性影响力债券试点等方式拓宽融资渠道。同时, 政府和金融机构需要根据不同气候韧性基建项目的成本效益, 切实规划投融资的实施路径与推进策略。

背景

全球升温趋势强劲，现有减排措施与行动难以缓解愈演愈烈的气候变化风险。为有效降低极端气候灾害带来的经济财产损失，各国特别是发展中国家亟须加快、加强对气候适应工作的投入。如果国际社会不立即采取气候适应行动，全球农业增产可能会受限，缺少水资源的人口数量可能会剧增，沿海城市亿万人口可能会被迫迁徙，造成每年超过1万亿美元（折合6.5万亿元）的损失（GCA，2019）。中国是受气候变化影响最显著的国家之一，预计未来以干旱、洪涝和风暴潮为主的气候风险将不断加剧，极大地威胁人民生命财产及粮食安全。

面对严峻形势，中国需要进一步强化适应气候变化的政策和行动。全球范围内的气候适应工作与减排工作相比存在滞后性，虽然中国政府很早就提出要适应气候变化，但中国适应气候变化的政策和监管体系并不完善。气候适应工作涉及的领域广泛，必须因地制宜地制定更清晰的行动计划，推进全国气候变化适应工作的开展。

加快气候韧性基建正当其时。2021年是落实《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》（以下简称“十四五”规划）和“30·60”双碳目标的开局之年，是适应和管理气候危机、向零碳社会迈进的关键窗口期。同时，2021年也是新冠肺炎疫情后经济重建的关键时间节点。中国已将全面实现新基建目标作为一项重要任务纳入“十四五”规划，如果可以尽早将增强气候韧性、适应气候变化纳入新基建的投资、规划与建设过程中，不仅能更有效地规避未来气候变化可能造成的损失，同时也能提供新的经济发展和就业机会，保护生态环境，增进人民福祉。

关于本报告

本报告通过选取典型案例，聚焦分析未来三种气候风险以及相应的气候韧性基建项目，系统地评估了韧性投入可能带来的效益，并探索气候韧性基础设施创新的融资方案和机制。期望相关研究结论能对《国家适应气候变化战略2035》的编纂工作有所贡献，支持并推动“十四五”期间政府部门适应气候变化的相关工作，同时，为未来政策制定者及相关研究者进一步完善适应工作提供分析基础与可行性建议。

本报告由世界资源研究所（WRI）牵头，联合国家应对气候变化战略研究和国际合作中心（NCSC）、中央财经大学绿色金融国际研究院（IIGF）共同撰写，其中WRI主要负责对气候韧性基础设施投资案例进行成本效益分析，

NCSC主要负责分析基础设施面临的气候风险，IIGF主要负责梳理和分析气候韧性基础设施创新的融资方案和机制。

关键分析

未来中国基础设施面临的气候风险加剧

基础设施作为人类社会赖以生存和发展的一般物质条件，正面临愈发频繁的极端气候事件的侵袭。同时，随着社会环境的变化，基础设施对这些危害的暴露度和脆弱性也不断增强。气候变化导致的连续干旱、洪涝、风暴潮和台风、大风、强降雪、冰冻、暴雪以及极端高温等灾害，直接影响灌溉、供排水、堤坝、能源、交通、通信等基础设施系统的正常运转。随着中国经济迅速发展，城市化率和人口密度的不断提高，基础设施对气候灾害的暴露度和脆弱性不断加剧。因此，有必要进一步识别不同关键基础设施系统面临的不同气候风险，并针对不同风险，对相应基础设施系统实行有效防护，提升其应对未来气候变化风险的能力。

本报告通过案例研究法，以宁夏、武汉和深圳为典型案例地区，重点分析了未来对中国基础设施影响最频繁和最广泛的三种气候风险，包括干旱、洪涝和风暴潮：

- **宁夏**地处西北内陆，水资源有限，长期遭受干旱威胁。当地农业发展依赖黄河水灌溉，与此相关的水利灌溉设施极易受到气候变化影响。本报告发现，未来三十年间，宁夏大部分地区干旱风险较高，农作物面临减产风险。为缓解干旱压力，宁夏需要增强农业灌溉系统的抗旱能力，大面积推广节水灌溉措施。
- **武汉**位于东南沿海与内陆的过渡地带，水域面积广阔，同时降水充沛，梅雨期长，暴雨量大，暴雨强度相对较高，因此极易造成江水暴涨，城区雨水无法排出，加剧城市内涝风险。通过模拟未来暴雨日数和暴雨强度两个降水指标的变化，本报告发现，武汉的暴雨威胁主要集中在主城区及其周边地区，但在气候变化加剧的情景下，武汉大部分地区暴雨日数及强度呈现明显增加态势，相应的暴雨威胁也随之加重。因此，武汉亟须加强城市排水系统的韧性建设，增强城市应对洪涝灾害的能力。
- **深圳**位于东南沿海地区，其中大鹏半岛海岸沿线是全国台风登陆最频繁、遭受风暴潮灾害综合风险最严重的地区之一。本报告结合已有研究和大鹏新区海洋灾害统计，发现受气候变化影响，大鹏新区未来海平面上升加剧，高潮位呈显著上升趋势，风暴潮灾害的次数、强度和发生时间跨度均有一定程度增加，从而加重对基础设施、经济活动和生态资产的破坏，威胁沿海居民生命安全，因此，必须加强海岸线的气候韧性建设。

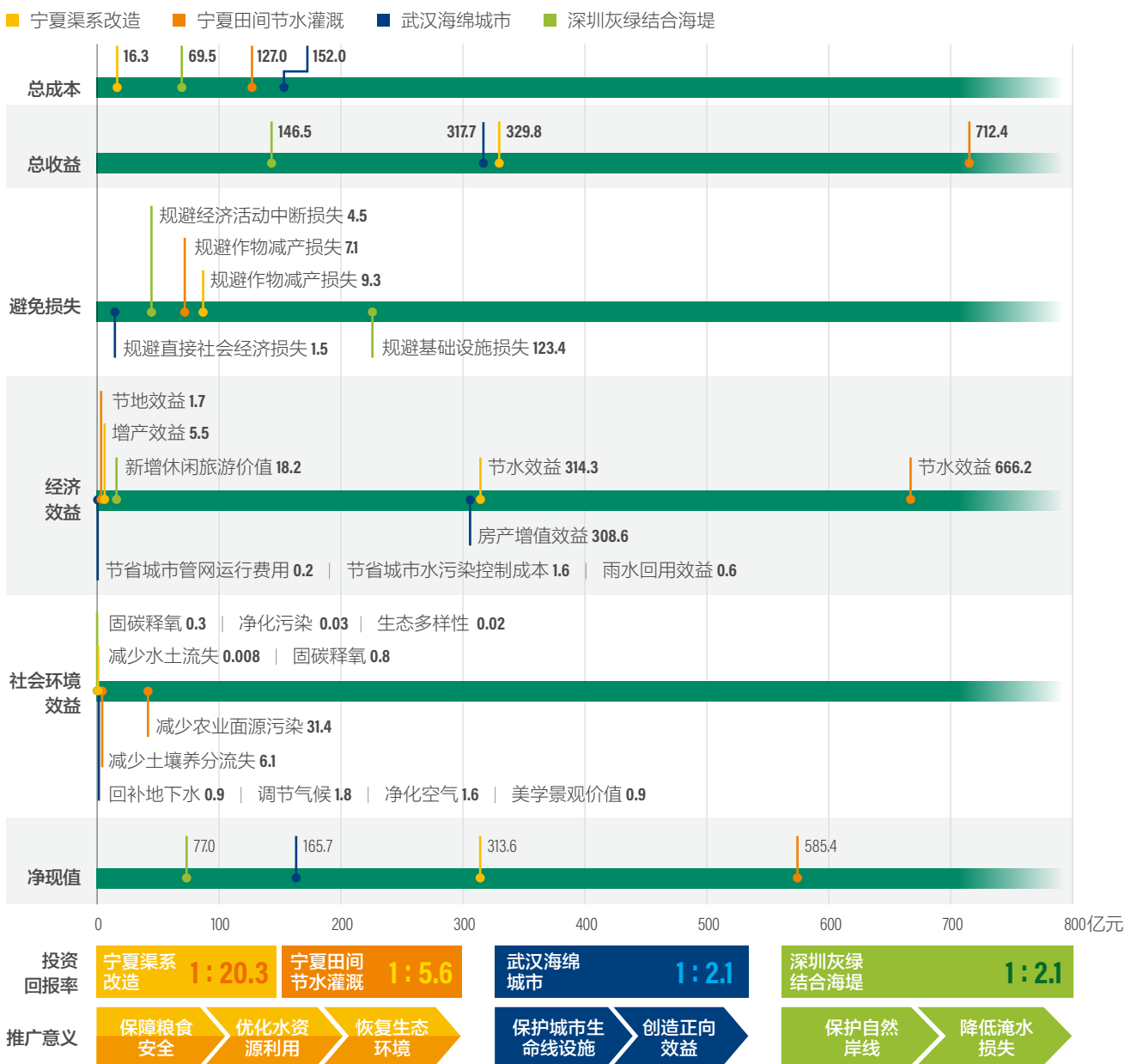
典型气候韧性基建案例投资回报高，具备推广意义

气候韧性基建投入可带来规避未来损失、经济效益和社会环境效益等三重红利。为突出气候韧性基建的额外性（即由于增加韧性建设而带来的额外收益部分），本报告采用情景分析法，假设地方政府在应对未来气候风险时可能采取两组不同措施，即“无韧性基线情景”和“韧性情景”，并对比分析了投入气候韧性基建可产生的额外成本和效益。

本报告根据三重红利分析框架，并针对案例需求及

具体效益类别采用不同的经济评估方法进行量化分析，分别测算了宁夏节水灌溉基础设施、武汉海绵城市基础设施和深圳灰绿结合海堤基础设施带来的效益，并结合投入成本，计算得出各项目的净现值和效益成本比。综合考虑长期气候变化风险的不确定性，以及气候韧性基础设施存在的生命周期，本报告以30年（2020—2050年）作为时间周期，采用6%折现率，计算了气候韧性基础设施在一个生命周期内的成本和收益。各项目具体计算的效益类别及计算结果见图ES-1，分析结果显示，三个项目的总收益均大于总成本，气候韧性基础设施的投资能够在长期获得较高回报，具有长期的投资价值。

图 ES-1 | 典型气候韧性基建项目带来的三重红利及投资回报结果



注：鉴于气候风险的不确定性，选取最具代表性的结果，即测算区间中值进行展示。宁夏农业节水灌溉渠系改造项目涉及全区有效灌溉面积的23.4%，田间节水灌溉项目涉及全区有效灌溉面积的19%；武汉海绵城市项目数据为青山与四新示范区项目结果；深圳灰绿结合海堤项目数据为大鹏新区项目结果。

将宁夏、武汉、深圳三个地区的气候韧性基础设施在全国范围内因地制宜地进行推广具有重要意义。特别地，在全国受农业干旱影响的地区推广宁夏农业节水灌溉设施，可以同时保障国家粮食安全及农民生计，优化当地水资源利用效率，节约的水资源还有助于恢复当地的生态环境；在内陆城市推广建设武汉的海绵城市项目，有助于保护城市生命线设施，提高现代化城市的舒适度，助力实现建设美丽中国的目标，同时还能创造其他多项经济和社会环境效益；在沿海地区推广深圳的灰绿结合海堤设施，不仅可以增强海岸线应对风暴潮的能力，降低沿海城市被潮水淹没的损失，还有助于保护沿海地区的生物多样性，为地方经济低碳转型提供新的契机。

气候韧性基础设施建设资金缺口巨大，亟须创新融资渠道和机制

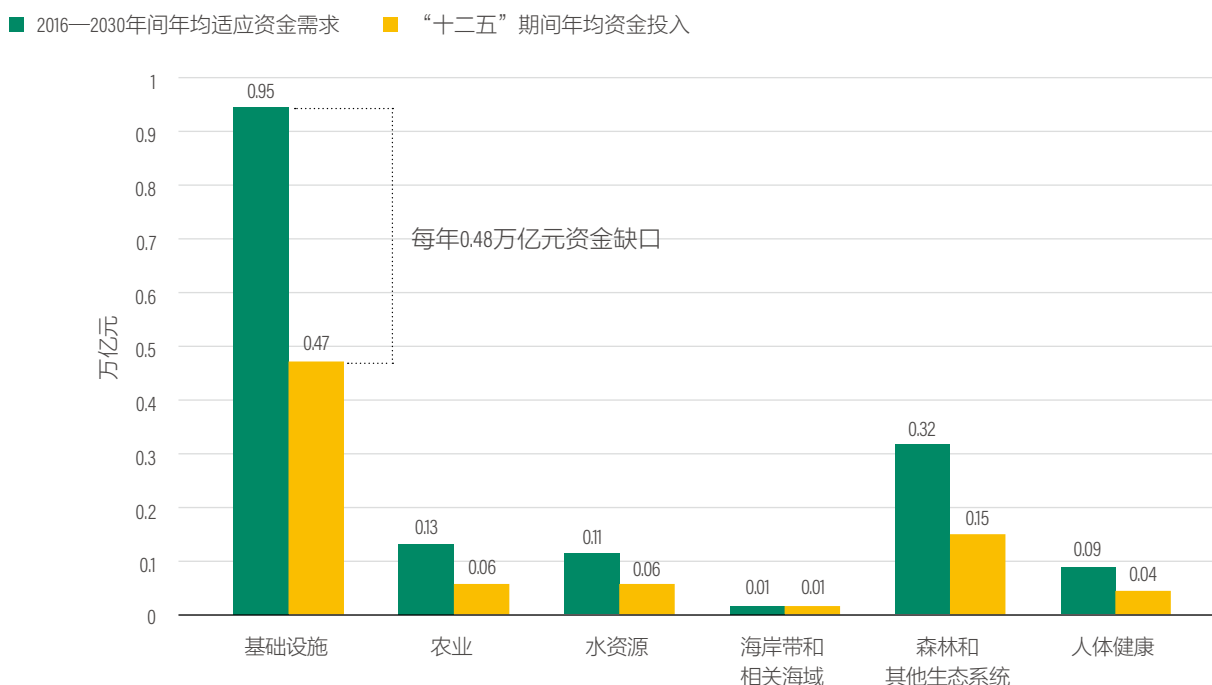
目前，全球乃至中国在气候韧性基建方面的资金都较为紧缺。预计全球气候韧性基础设施投资未来每年平均资金缺口约为6000亿美元（折合39000亿元），而适应气候变化投资每年资金缺口约为1000亿美元（折合6500亿元）以上。作为两者的重要结合，气候韧性基建不仅面临资金短缺，同样还面临如何将资金引入韧性领域的难题。与此同时，全面提高中国基础设施的气候适应能力将会在未来五年

内带来近5000亿元的年均资金缺口（见图ES-2）。气候韧性基建遇到的资金难题亟须通过大量的资金投入和有效的融资手段进行缓解。

气候韧性基建融资仍以公共资金为主，撬动社会资本的能力有限，亟须拓宽融资渠道。当前资金供给主要来自公共部门，私营部门参与不足，各类金融工具创新亦不足，无法满足越来越庞大的气候韧性基建融资需求。针对三个案例地区面临的不同地理条件、经济条件与自然灾害风险条件等，本报告选取国际项目作为参照，从创新融资机制和规划实施路径等方面，对案例地区开展气候韧性基建投融资提出建议。

- **宁夏农业节水灌溉设施**可以由开发性银行、商业银行发行韧性债券吸引大量社会资金后，通过贷款等方式为相关项目提供融资，同时建立绩效评估机制，确保资金得到合理运用。
- **武汉海绵城市项目**可以通过建设雨洪收储激励机制或推广政府和社会资本合作等模式撬动社会资本，拓宽融资渠道。
- **深圳大鹏新区**可以考虑发行韧性影响力债券以撬动社会资本，并积极推动新增红树林等生态项目，通过碳汇开发与交易的方式推动生态效益变现。

图 ES-2 | 中国适应气候变化各领域资金供需情况



政策建议

基于以上分析，本报告概括总结了推广气候韧性基建面临的主要挑战，表ES-1针对各项挑战提出了具体的政策建议。此外，落实推动气候韧性基建的行动需要建立完善的机制保障，包括完善的政策体系、评估体系、监管执行机制，以及部门间协调机制，为不同层级政府和部门之间的行动提供机制和平台支持，同时促进和加强国际合作。

表 ES-1 | 气候韧性基建面临的挑战和政策建议

	气候韧性基建面临的挑战	政策建议
提高社会对未来气候风险的认识	对不同地区、不同类型的基础设施面临的潜在气候风险认识不足，缺乏完整的与基础设施直接相关的数据和系统评估气候风险的方法	· 识别不同关键基础设施系统面临的气候风险，将应对气候变化融入城乡规划的理念和实践中，强化适应气候变化理念 · 制定气候韧性基础设施技术标准 · 强化气候变化影响监测和风险预警，完善适应气候变化工作机制 · 开展适应气候变化宣传教育，提升公众适应气候变化的理念与素质
完善气候韧性项目的价值评估和流转体系	对气候韧性基础设施的价值认识不足，缺乏对额外性的系统认识和清晰的价值定义，缺乏价值评估的理论基础和方法，以及价值转化体系	· 确立气候韧性基建项目的价值评估方法、核算准则和审计流程 · 探索建立气候韧性基建项目的价值流转体系
拓展气候韧性基础设施的融资渠道	气候韧性基建面临融资难的问题，特别是公共资金总量不足，而正外部性投资的价值实现缺乏抓手，难以吸引社会资本；同时，金融工具创新不足，公共资金撬动社会资本渠道不通，且存在财政和信用方面的限制	· 加快建立国家和地方层级的气候投融资项目库，挖掘高质量的气候韧性基建项目 · 支持气候韧性基建投融资机制的开发与创新，强化各行业气候风险的披露、监测与管控 · 提高地方政府的财政激励力度，探索更能有效撬动社会资本的融资模式



ENGLISH HIGHLIGHTS

HIGHLIGHTS

- In August 2021, the latest report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) suggests that the 1.5°C global warming threshold is likely to be breached in the next 20 years. If such warming continues, it will result in irreversible impacts on nature and ecosystems. While continuous efforts are essential to mitigate climate change, we must simultaneously accelerate the investment in climate adaptation to build resilience to climate change and reduce any associated damage.
- This report systematically defines and analyzes climate risks and the corresponding climate-resilient infrastructures (CRI) in China. Building on three case studies, it evaluates future agricultural drought risks, urban waterlogging and coastal storm surges faced respectively by three locations – Ningxia, Wuhan and Shenzhen – and discusses in depth the necessity of promoting CRI.
- Based on a triple-dividend (i.e. avoid damage loss, economic benefit, and social and environmental benefit) framework, this report systematically analyzes the return on investment of three types of CRI – namely water-saving irrigation facilities, sponge city construction, and grey-green sea dike construction – in the three case study areas. Our estimate suggests that every RMB 1 invested can generate RMB 2-20 of returns over a period of 30 years.
- Scaling up CRI more broadly in China is extremely important. For instance, the adoption of water-saving irrigation facilities nationwide can ensure national food security; sponge city construction can protect inland cities against storm water damage; green-grey sea dike protection can strengthen coastal resilience and protect coastal populations against storm surges.
- China faces significant financial shortfalls for CRI. We must quickly fill the annual funding gap of nearly RMB 500 billion over the next five years, by leveraging private capital and developing new financing mechanisms.
- The three case studies suggest that innovative financial instruments – such as Resilience Bonds (RB), Public Private Partnerships (PPP) and Resilience Impact Bonds (RIB) – can create effective new finance streams to fund CRI. Specific financing strategies developed by local governments and financial institutions must be informed by cost-benefit analyses.

Background

With the worrying increase in the global average temperature, current climate mitigation efforts are deemed insufficient to cope with the increasing climate risks. To minimize the potential economic losses from extreme weather events, the world urgently needs to accelerate investment in climate adaptation strategies, especially in developing countries. If immediate action on climate adaptation is not undertaken, constraints will be placed on global agricultural production, populations without access to drinking water will rise, and force millions living in coastal cities to migrate. Together, they will lead to approximately US\$1 trillion in economic losses every year. China is among the countries that are most affected by climate change. With the increased frequency of extreme weather events, it is expected that climate risks – mainly droughts, floods and storm surges – will continue to intensify in the future, threatening food security, as well as people's lives and property.

In the face of this grim situation, China needs to further strengthen its policies

and actions to adapt to climate change.

However, global action on adaptation is lagging. Despite the long-standing notion, the development of policy and a monitoring system for climate adaptation in China is still in its infancy. Since climate adaptation covers a wide range of areas, we need sector specific and localized action plans to advance national climate adaptation efforts.

The window of opportunity for accelerating CRI development in China is now.

The year 2021 marks the beginning of China's 14th Five-Year Plan. It also marks the start of efforts to meet President Xi's "dual carbon" goals of peaking emissions by 2030 and becoming carbon neutral before 2060. As the country starts to implement its post-COVID-19 economic recovery plan, the government could consider directing more financial resources to areas which can build resilience to climate change. The 14th Five-Year Plan and the Long-Term Goals for 2035 have set a new infrastructure construction as a priority. China must seize this opportunity. If climate-adaptation measures can be integrated into the design and construction of new infrastructure,



China will not only become resilient in the face of future climate change, but also gain new economic advantages and create new employment opportunities that can benefit its people.

About This Report

This report focuses on the three types of climate risk – namely agricultural drought risk, urban waterlogging and coastal storm surges – that China is most likely to face in the future. We assess the expected costs and benefits associated with CRI investment and explore potential financing instruments and mechanisms that could help leverage finance for CRI projects. The findings of this study are expected to inform *China's National Climate Change Adaptation Strategy 2035*, accelerate climate adaptation action across governments at all levels during the 14th Five-Year Plan, and equip policymakers and researchers with a concrete research base and methodological framework to advance climate adaptation actions.

This report is conducted by the World Resources Institute (WRI), in collaboration with the

National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation (NCSC) and the International Institute of Green Finance (IIGF) from the Central University of Finance and Economics. In particular, NCSC leads the analysis of future climate risks, WRI pilots the cost-benefit analysis, and IIGF is responsible for the analysis of potential financial mechanisms for CRI projects.

Key Findings

China's Infrastructure faces increasing risks from climate change

Infrastructure that supports all sorts of social activities and economic growth faces increasing climate risks in the future. Meanwhile, social demographic changes also expose infrastructure to natural hazards, making it more vulnerable. Hazardous events – such as continuous droughts, floods and waterlogging, storm surges and typhoons, hurricanes, strong snowfall, freezing, blizzards, and high temperatures – will accelerate under climate change and directly affect the operations of infrastructure systems, such as energy, transportation, communications, water supply and



drainage. As a result of China's rapid economic growth, urbanization rates and population densities continue to rise, meaning that infrastructure becomes ever more exposed and vulnerable to climate change. Therefore, it is important to clearly identify specific climate risks faced by different key infrastructure systems in order to develop plans that can effectively protect these systems against climate change and enhance climate resilience accordingly.

This report focuses on three case study areas, namely Ningxia, Wuhan and Shenzhen, and analyzes the most frequent and widespread events – such as droughts, waterlogging and storm surges – that could affect Chinese infrastructure in the future.

■ **Ningxia** is a province in northwestern China. With limited access to water, its inhabitants suffer from chronic drought. Local crop irrigation relies heavily on the Yellow River, which has suffered serious runoff reduction under climate change impacts. As a result, the related irrigation systems are extremely vulnerable to climate change. Our research suggests that in the next 30 years most areas in Ningxia will face increased risks from drought that could seriously impact crop yields. In order to alleviate the problem, Ningxia needs to strengthen the drought resistance of its agricultural irrigation systems and improve water-saving irrigation measures.

■ **Wuhan** is a city in central China, located in the transition zone between the southeast coast and the inland. Situated on the Yangtze River, Wuhan also gets abundant amounts of rainfall, characterized by a long rainy season, heavy rainfall, and frequent intensive rainstorms. During rainy seasons, the surrounding rivers can easily surge, which makes it difficult to discharge storm water and increases the risk of urban waterlogging. By simulating the changes during significant rainstorm days and the intensity of rainstorms, our findings indicate that the Wuhan metropolitan areas and its surrounds will suffer greatly from continued rainstorms. As climate change intensifies, the frequency and intensity of these rainstorms will also increase significantly, leading to increased threats from flooding. City authorities

need to improve the climate resilience of urban drainage systems and enhance prevention measures for waterlogging.

■ **Shenzhen** is a city on China's southern coast. Under the governance of Shenzhen municipality, the Dapeng Peninsula is one area which suffers greatly from frequent typhoon landings and storm surges. Building off the existing research and statistics on marine disasters in the area, this research suggests that, from the impact of climate change, the region will face accelerated sea-level rises, high tide-level rises, and more frequent, intensive and long-lasting storm surges. This will consequently aggravate the damage to coastal infrastructure, disrupt economic activity, damage coastal ecosystems, and threaten people's safety. Therefore, building a more climate-resilient coastline is both urgent and necessary.

CRI projects are worth scaling up due to the high return on investment

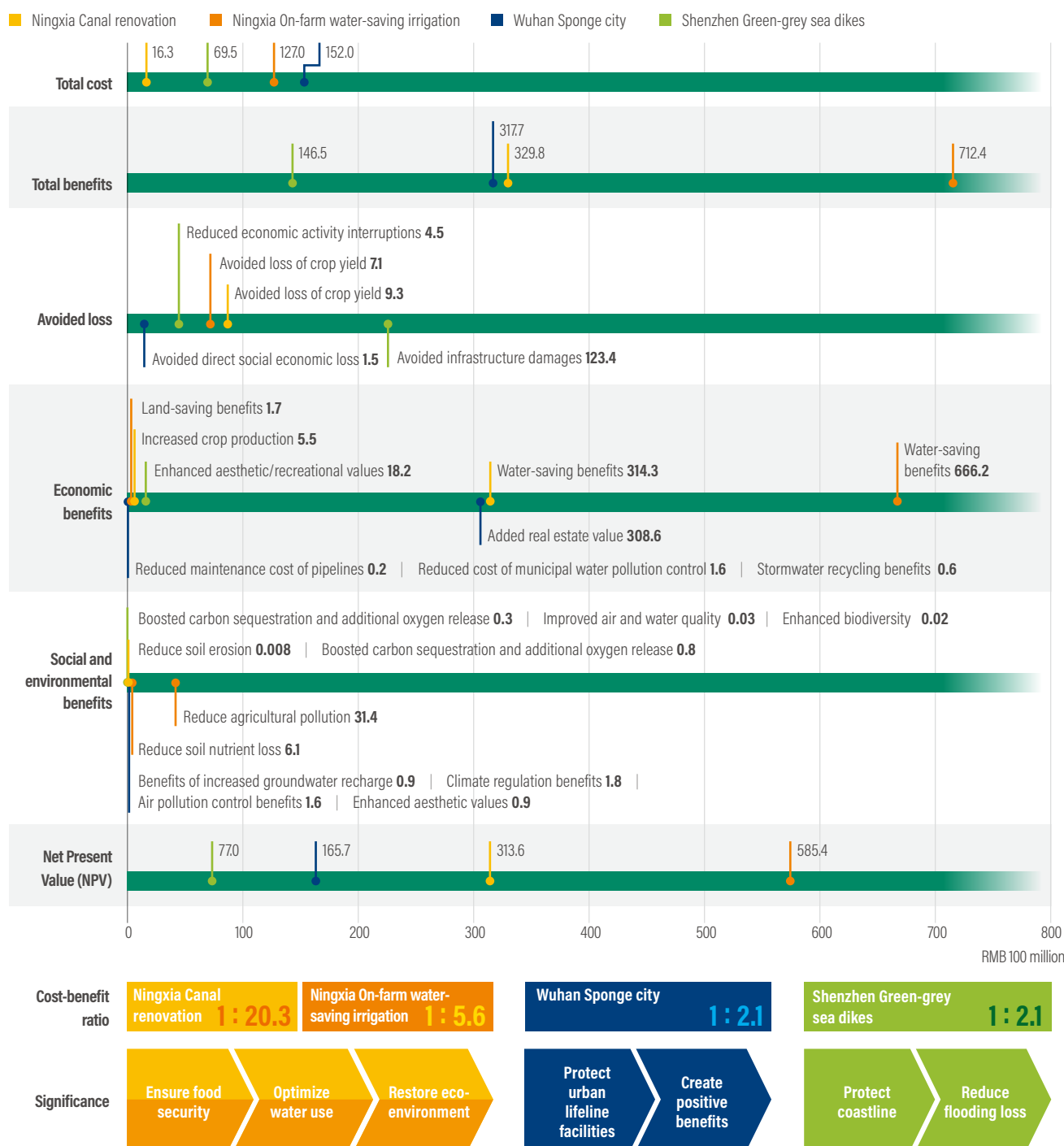
Investment in CRI can lead to triple dividends, including avoided losses from damage, economic benefits, and social and environmental benefits. This report develops two scenarios to better understand and quantify the additionality of CRI (that is, the additional benefits brought by more resilient construction). More specifically, the scenarios distinguish between a "Baseline Scenario", which assumes that no action will be undertaken by local governments towards resilient construction; and a "Resilient Construction Scenario", which assumes that local governments will proactively invest in climate resilient infrastructure to mitigate future climate risks. By comparing the costs and benefits associated with the two scenarios, we can assess the additional benefits generated by CRI investment.

Following the triple dividend analytical framework, we apply different economic evaluation methods to assess the specific benefits of CRI in each of the three case study areas, namely the water-saving irrigation facilities in Ningxia, the sponge city infrastructure in Wuhan, and the grey-green sea dikes in Shenzhen. We

then estimate the net present value and cost-benefit ratio of each case, taking into account construction costs. Considering the uncertainty of climate risks in the long term and the typical life cycle of CRI, this report chooses a period of 30 years (2020-2050) and a six-percent

discount rate for the cost-benefit analysis. Figure ES-1 shows detailed benefits for each case study and the results of the cost-benefit analysis. In conclusion, the total benefits of the three cases are greater than the total costs, and the return on investment is relatively high.

Figure ES-1 | The results of triple dividends and return on investment brought by typical CRI



Note: In view of the uncertainty of future climate risks, the median values of the calculation range are displayed as the representative results. The canal renovation project in Ningxia's water-saving irrigation program accounted for 23.4% of the total irrigated area of the province, and the on-farm water-saving irrigation project accounted for 19.1% of the total irrigated area; The Wuhan case focuses on Qingshan and Sixin pilot projects; The Shenzhen case focuses on the sea dikes in Dapeng District.

It is strategically important to scale up the CRIs in Ningxia, Wuhan, and Shenzhen to the whole country.

In particular, Ningxia's resilient water-saving irrigation facilities can be replicated in other regions that also suffer from risks associated with drought. These will not only protect farmers' incomes and ensure food security against climate change, but also improve water utilization efficiency. The water saved can be used to restore degraded ecosystems. Similarly, Wuhan's sponge city project could help other inland cities threatened by waterlogging. In particular, it can help protect urban infrastructure, improve the livability of cities and contribute to the national goal of building a beautiful China, whilst also generating other economic, social and environmental benefits. Finally, the grey-green sea dikes in Shenzhen sets an example for other coastal cities, that strengthened coastal resilience will not only allow a city to better cope with storm surges and reduce losses from tidal damage, but also protect biodiversity and provide new opportunities for the low-carbon transition of the local economy.

CRI faces a huge funding gap, we need to quickly identify new financing channels and mechanisms to leverage finance

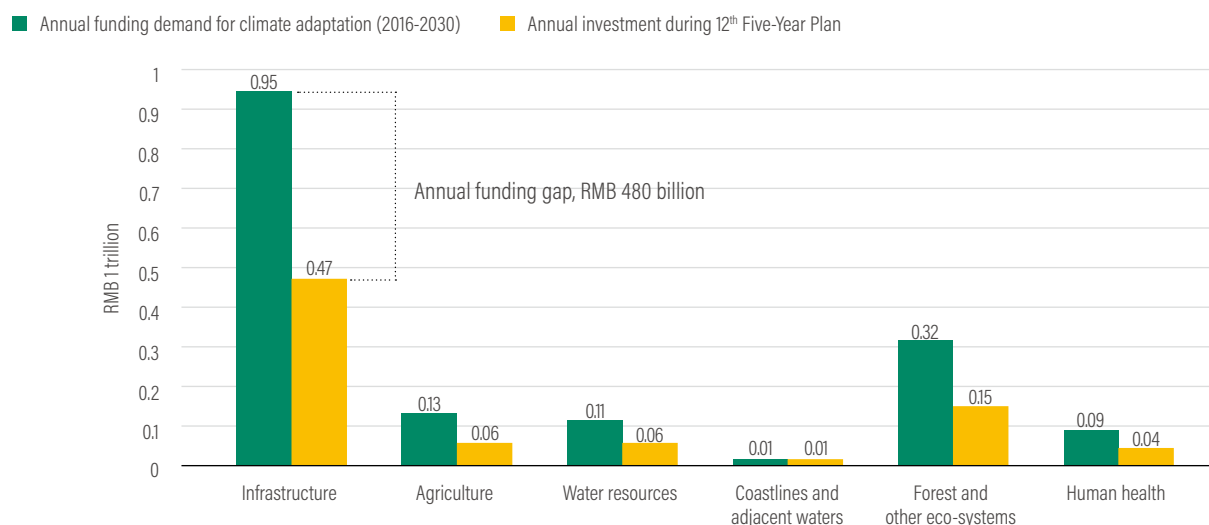
Currently, the world and China face shortfalls in CRI funding. The funding gap for global infrastructure investment in

the future is about US\$600 billion per year, whereas the funding gap for climate adaptation is about US\$100 billion each year. CRI also faces challenges in infrastructure investment and climate adaptation. In China, improving the climate resilience of infrastructure will result in an annual funding gap of nearly RMB500 billion in the next five years (see Figure ES-2). A large amount of capital investment and effective financing methods are urgently required to alleviate the financial difficulties encountered in the construction of CRI.

The financing of CRI is still dominated by public finance, with a limited capacity to leverage private capital. There is an urgent need to broaden financing channels. The current capital supply comes primarily from the public sector, lacking the participation of the private sector. There are also limited innovative financial instruments to meet the increased financing needs of CRI. Taking into account specific geographical conditions, the social economic context, and climate risks, this report leverages international experiences to showcase how potential innovative financing mechanisms could help Ningxia, Wuhan and Shenzhen to increase funding for their climate projects. For instance,

- **Ningxia** could collaborate with development banks and commercial banks to issue

Figure ES-2 | **China's climate change adaptation funds supply and demand in various fields**



Resilient Bonds to attract private capital, which could then be used to provide loans for qualified water-saving irrigation projects. In the meantime, a performance evaluation mechanism should be established to monitor fund operations.

- **Wuhan** could develop an incentive mechanism to encourage rainwater collection or create a trust fund that could blend finance from both public and private capital.
- **Dapeng district of Shenzhen** could issue Resilient Impact Bonds to leverage private capital. In addition, carbon trading mechanisms could turn ecological benefits, such as carbon credit generated from mangrove restoration, into monetary benefits.

Policy recommendations

This report discusses the main challenges facing CRI investment as well as the concrete actions the Chinese government can take to address them (See Table ES-1). Additionally, China urgently needs to develop a dedicated inter-ministerial coordination mechanism to accelerate the uptake of, and investment in, climate adaptation measures at all levels. This mechanism could support the development of a comprehensive policy system, an evaluation system, and a supervision and execution mechanism to advance climate adaptation actions and coordinate between different government levels and departments. Finally, this mechanism could also play a role in facilitating international collaboration and building capacity on CRI.

Table ES-1 | **Challenges faced by CRI and policy recommendations**

	Challenges faced by CRI	Policy recommendations
Improve our understanding of climate risks	There is a systematic misunderstanding of the differences in climate hazards faced by different types of infrastructures across regions, and a lack of complete databases and methodological frameworks for assessing the relevant climate risks	• Identify specific climate risks faced by different critical infrastructure systems and integrate climate adaptation into the concept design and implementation of urban and rural planning • Develop technical standards for CRI • Strengthen the monitoring and early-warning systems of climate risks and improve the mechanisms to accelerate climate adaptation • Educate the public about climate risks, and improve their ability to cope with them
Quantify and realize the economic value of CRI	Comprehensive misunderstanding of the economic value and additionality associated with CRI, and a lack of a theoretical foundation for conducting economic valuations and a system for value conversion to inform decisions	• Develop standard economic valuation frameworks, accounting standards and audit procedures for CRI projects • Establish a value conversion system to help fundraising initiatives for CRI projects
Accelerate financing for CRI	CRI financing is constrained by limited public finance. It is hard to attract private capital, as most of the benefits provided by CRI are enjoyed by multiple stakeholders, which is difficult to be translated into tangible investment returns for private investors. There is insufficient innovation in financial instruments to leverage private capital. The current fiscal system provides more financial and credit constraints	• Accelerate the establishment of climate-related investment project libraries at both national and local levels, and explore high-quality CRI projects • Support the research and development of new financing mechanisms to support CRI, and strengthen the disclosure, monitoring and control of climate risks in various industries • Encourage local governments to increase fiscal incentives and explore new financing mechanisms that can better leverage private capital



前方积水
行人车辆绕行

第一章

正当其时： 加强气候韧性 基础设施建设

1.1 全球亟须加强气候适应工作

2021年8月，联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，以下简称IPCC）发布的报告指出，《巴黎协定》提出的到本世纪末控制升温1.5℃的目标难以实现，全球升温加速，由此给地球生态系统带来的一些变化已不可逆转（IPCC，2021）。气候变化导致极端天气加剧，不但威胁人民的生命财产安全，也会造成生产活动停止，带来巨大经济损失。为最大程度减少气候变化可能带来的损害，全球亟须加强气候适应工作。气候适应以减轻和管理气候变化风险为主，是气候减缓的互补性战略，二者相辅相成（IPCC，2014）。

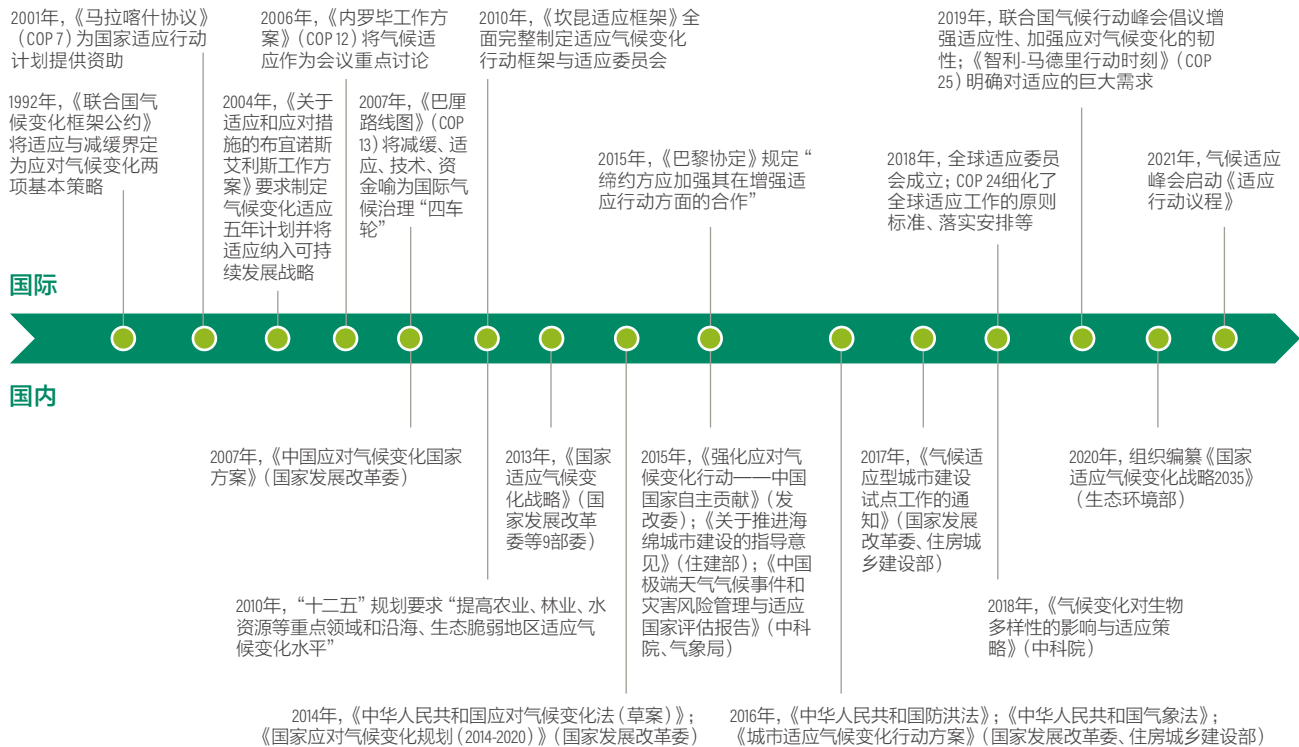
全球适应委员会（Global Commission on Adaptation，GCA）2019年发布的全球旗舰报告《即刻行动：积极应对气候变化，呼吁全球领导力》（以下简称GCA旗舰报告）指出，如果国际社会不立即采取气候适应行动，到2050年，气候变化及其影响可能导致全球农业产量下降30%；缺水资源的人口（每年至少一个月处于缺水状态）数量将从36亿迅速增长到50亿；海平面上升与更为剧烈的海岸洪水可能迫使沿海城市的亿万人口离开家园，沿海城市地区遭受的损失每年超过1万亿美元（折合6.5万亿元）；特别地，对于发展中国家，到

2030年，气候变化可能致使超过1亿人处于贫困线以下（GCA，2019）。

在中国，气候变化的影响更为显著，呈现出气候极端性增强，区域生态环境不稳定性加大的发展趋势（中国气象局气候变化中心，2020）。20世纪90年代中后期以来，中国极端高温和暴雨日数明显增多，登陆中国的台风平均强度波动增强（中国气象局气候变化中心，2020）。频繁发生的极端天气事件极大地加剧了中国面临的气候风险，尤其是干旱、洪涝和风暴潮风险。据测算，在“最坏的气候变化情景”下，21世纪末高温热浪发生的频率可能会增加三倍，这将影响中国西部干旱半干旱地区的水资源可用性，受干旱影响的农田面积可能会增加2.5倍以上（谢伏瞻等，2019）；同时，中国暴雨洪涝造成的直接经济损失将达到1120亿美元（折合7280亿元），是2006—2018年的4倍（Jiang et al., 2020）；气候变暖和海平面上升未来将加剧中国沿海地区的台风风暴潮灾害，以上海为例，在极端潮位情景下城市几乎全被淹没，经济总损失预计高达2036亿元（殷杰，2011）。

然而，包括中国在内，全球的气候适应政策推行工作进展缓慢（见图1）。国际社会从1992年首次提及气候适应到2018年制定细化的工作原则，历时26年。目前虽形成了一个较为清晰完整的行动

图 1 | 国内外开展气候变化适应工作的进展



来源：曹格丽、姜彤，2010；陶蕾，2014

框架与制度体系，但相较气候变化减缓行动，仍存在相当程度的滞后。2021年举办的气候适应峰会（Climate Adaptation Summit 2021）展示了全球适应气候变化的指导与解决方案，并提供《适应行动议程》作为到2030年迈向适应气候变化的未来十年的路线图。由此，国际社会不断展现加强气候适应工作的决心。相比之下，中国政府虽早在1994年发布的《中国21世纪议程》中就首次提出了适应气候变化的概念，但政策实施至今仍处于起步阶段，亟须进一步完善适应气候变化的立法、政策和监管体系，并制定更清晰的行动计划，以及从中央到地方和各部门之间的协调机制，推进全国气候变化适应工作的开展（杨秀、付琳，2018）。

1.2 中国行动，刻不容缓

气候变化适应工作涉及粮食生产、自然环境、水资源、城市、灾害风险管理等诸多关键领域，而加强基础设施的气候韧性建设对规避气候风险造成的生命财产损失尤为重要。对此，GCA旗舰报告明确指出基础设施系统亟须纳入未来气候适应行动，并授权有关部门进行适应行动设计，动员私营部门投资，做好财政准备，将

基础设施受气候变化影响造成的损耗降到最低（GCA，2019）。作为全球适应委员会发起国之一，以及引领全球基建发展的大国，中国在基础设施领域提早针对气候适应工作增加投入具有重大意义，一方面可以提升国内基建应对气候变化的韧性，另一方面通过“一带一路”项目可带动全球气候韧性基建的发展。

2021年是加大气候韧性基建投资力度的重要时间点，发展气候韧性基建面临许多重要机遇。一方面，为应对2020年全球新冠肺炎疫情大流行对经济的影响，中国从2021年开始落实各项经济刺激计划，正式启动2020年初提出的以新基建为导向的发展目标。这将成为未来拉动中国经济发展的重点之一，同时也为气候韧性基建投资提供新的契机。另一方面，“十四五”规划明确指出中国未来的经济发展重心将从高速增长转向高质量发展，积极推动实现更具韧性、更低碳的发展目标，以配合有待更新的国家自主贡献，从而保障实现碳达峰和碳中和的目标。

2020年，生态环境部等部门启动编制《国家适应气候变化战略2035》，这对未来中国应对气候变化工作具有指导性意义。中国可以充分利用这一有利契机，全面提升气候适应在整个应对气候变化战略中的重要性，并

促进将气候韧性措施纳入新基建的投资、规划与建设过程中，这不仅能更有效地规避未来因气候变化风险加剧可能导致的损失，同时也能提供新的经济发展和就业机会，保护生态环境，增进人民福祉。

此外，加强在气候适应领域的国际合作也给中国带来诸多机遇。一方面，国际机构呼吁所有出资人和多边开发银行增加对气候适应和韧性工作的资金支持，这为扩大中国气候韧性基建项目融资渠道，开发新融资工具带来机遇。另一方面，通过加强国际多边合作，中国不但可以借鉴其他地区的良好经验，也可通过“一带一路”工程项目，落实已有或正在实施的气候韧性建设实践成果，助力全球特别是发展中国家的气候韧性基建工作。

1.3 研究目的和范围

气候变化加剧带来巨大的不确定性，为提高基础设施适应气候变化的能力，有必要对未来基础设施面临的气候风险进行预测，从而为韧性建设指明方向。与此同时，中国一些地区已经或计划投资加强气候韧性基建，以应对日益剧烈的气候灾害。然而，投资的效益如何，这些气候韧性基建是否具有在全国推广的意义，仍是有待回答的问题。此外，气候韧性基建体量大，运营周期长，需要大量资金，如何融资也成为未来推动气候韧性基建发展的难题。为解决这些问题，本报告聚焦分析未来中国基础设施面临的主要气候风险，同时评估气候韧性基础设施投资带来的成本和收益，并针对气候韧性基建投资提出创新融资机制和实施路径，以期相关研究结

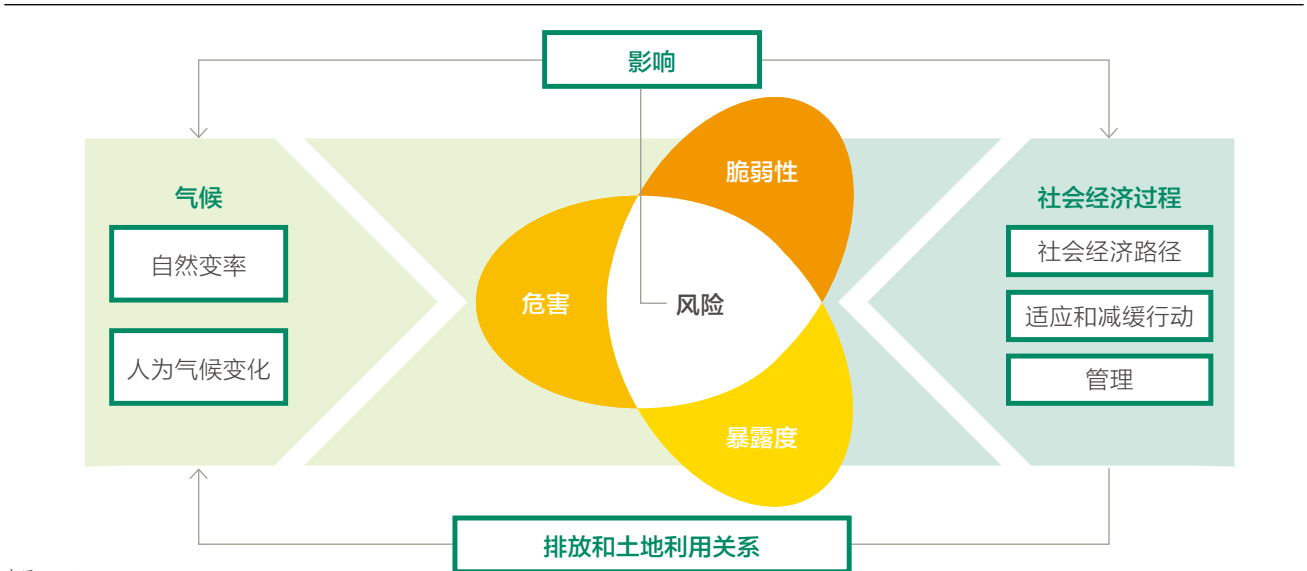
论能对《国家适应气候变化战略2035》的编制工作有所贡献，为气候适应相关研究、政策和融资方案的制定提供研究基础与可行性建议。

1.3.1 基础设施面临的气候风险

气候变化引起的极端天气事件频繁发生，对自然生态系统、人类正常生产生活以及经济社会发展造成严重威胁与破坏。同时，保证人类生产生活正常进行的基础设施也会相应地承受更大的气候风险压力。特别地，气候变化导致的连续干旱、洪涝、风暴潮和台风、大风、冰冻、暴雪以及极端高温等灾害，会直接影响灌溉、供排水、堤坝、能源、交通、通信等基础设施系统的正常运转。

IPCC发布的第五次评估报告第二工作组报告《气候变化2014：影响、适应和脆弱性》认为，气候风险是经危害、暴露度和脆弱性三方面相互作用后产生的（图2）。危害是指气候变化相关事件或趋势造成的人员伤害和其他健康影响，以及对财产、基础设施、生计、服务设施和环境资源造成的损害和损失；暴露度是指人类、物种、生计、生态系统、环境服务和各种资源、基础设施，以及经济、社会或文化资产出现在受严重影响地区的程度；脆弱性指的是受到不利影响的倾向和趋势，包含敏感度、易感性、缺乏应对和适应能力等多个元素。因此，对基础设施面临的气候风险进行分析，除了与气候变化相关的不确定性以外，还应该包括基础设施的暴露度和脆弱性分析。

图 2 | 气候变化风险概念示意图



来源：IPCC，2014

在气候变化不确定性无法控制的情况下，降低暴露度和脆弱性是加强基础设施适应气候变化工作的重中之重。值得注意的是，对于不同的气候危害，各种基础设施的暴露度也存在不同。随着中国经济迅速发展，城镇化率不断提高，人口结构和流动聚集性发生变化，与人口社会经济活动息息相关的基础设施面临气候灾害的脆弱性不断加剧。因此，有必要进一步识别不同关键基础设施系统面临的气候风险，并相应加强气候韧性建设，对基础设施系统实行有效防护。

1.3.2 气候韧性基础设施的定义及边界

根据经济合作与发展组织（Organization for Economic Co-operation and Development, 简称OECD）的定义，在规划、设计、建造和运行各环节为基础设施增加额外的韧性，从而使其适应不断变化的气候条件，这样的基础设施称为气候韧性基础设施（Climate-resilient infrastructure）。它不但可以承受或降低恶劣气候灾害造成的破坏，并可以在灾后迅速恢复，从而确保气候适应力成为基础设施整个生命周期中的一个持续过程。与此同时，气候韧性基础设施还可以提高基础设施提供服务的可靠性，延长设施的使用寿命，并保护设施的预期效用（OECD，2018）。基于基础设施所应对的气候风险进行判断，气候韧性基础设施可因地制宜地采取不同措施与设施类型去适应气候变化（附录 I）。

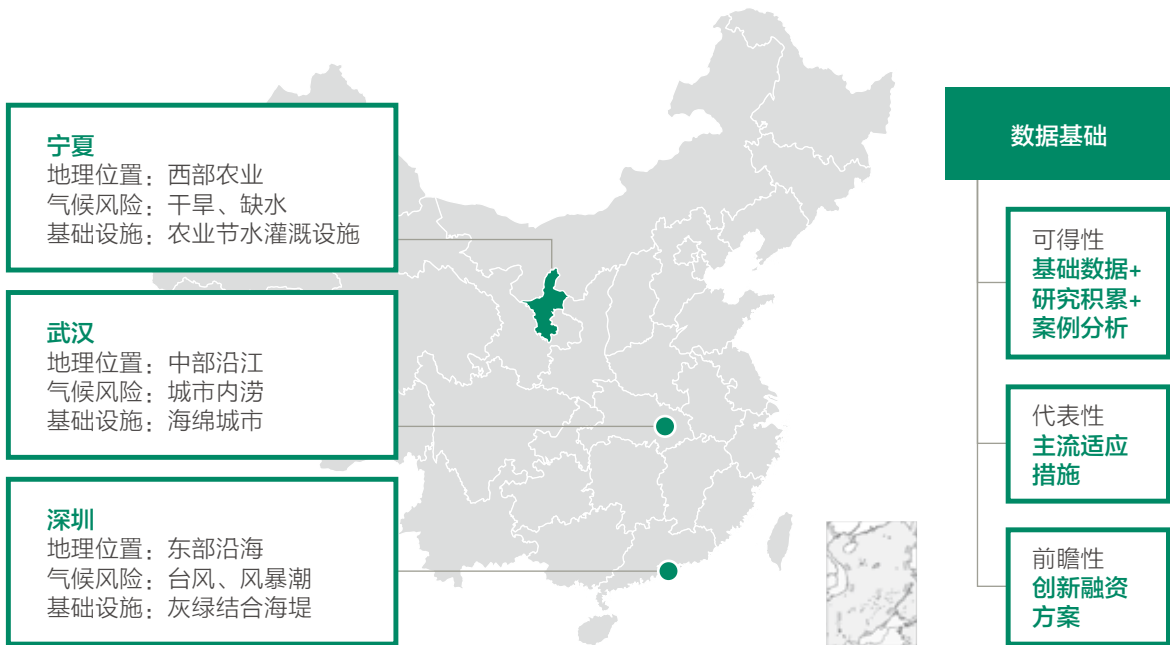
结合OECD的研究，本报告将气候韧性基础设施分为两种。一种是对现有基础设施增加韧性措施提高额外性¹：针对不同气候风险对现有基础设施进行改造，即工程建设的结构性措施（如对已有海堤进行加强加高），或对现有管理方式进行改进，即范围更广的非结构性措施，包括政策、管理、教育等（United Nations Development Programme，2011）。另一种是对新建基础设施增加气候韧性建设：新建基础设施在计划、设计、建造和运营中应该考虑增加韧性措施，以应对生命周期内可能发生或加剧的气候风险，并加快灾后恢复的速度，新建设施可以包括传统的基础结构（如防卫屏障工程或其他工程）以及自然基础设施（如湿地、红树林防洪建设等其他基于自然的解决方案）（OECD，2018）。

1.3.3 案例选择

本报告利用案例研究法，重点分析未来对中国影响最频繁和最广泛的三种气候风险及相应的关键气候韧性基础设施，包括宁夏的干旱风险及农业节水灌溉设施、武汉的内涝风险及海绵城市、深圳的风暴潮风险及灰绿结合海堤等。本报告在进行案例选择时，主要考虑气候风险、地理区位和数据基础等因素（图3）。

宁夏位于中国西北干旱半干旱地区，生态环境脆弱，经济发展相对落后，农业生产仍是当地人口主要的

图 3 | 气候韧性基建案例选择标准





生计来源。干旱一直以来威胁着农业生产，也是导致当地农民相对贫困的主要因素之一。由此，宁夏成为中国西北干旱缺水的农业产区在未来建设气候韧性基础设施以应对干旱风险的代表性地区。为帮助宁夏缓解缺水现状，除了政府积极推进水资源管理相关试点工作以外，各种多边开发银行和非政府组织在当地开展了相当多的节水灌溉工作，这为本报告进一步分析宁夏建设气候韧性基础设施提供了基础数据。

武汉作为长江经济带重要城市，一直以来饱受城市内涝灾害的困扰。为解决该问题，武汉成为首批中国海绵城市建设试点城市。武汉海绵城市工程经过数年建设，已经初具成效。同时，武汉市政府对气候适应工作非常重视，在2019年已经完成了初步的气候韧性风险分析，相关信息为本报告提供了良好的研究基础。武汉作为海绵城市的成功代表，其在适应方面取得的成果对其他受内涝风险影响严重的城市具有借鉴意义。

深圳位于中国东南沿海地区，长期以来受到台风和风暴潮等灾害影响，预计未来气候变化带来的风险会加剧当地海岸带的脆弱性，为此，深圳正在规划建设具有气候韧性的海堤设施。作为东部沿海经济发达城市的代表，深圳在气候适应性投资方面具有前瞻性和创新性，在灰绿结合海堤建设中率先采用目前国际倡导的灰绿结合的生态堤坝建设方式。通过量化该类型气候韧性基建

可能带来的效益，可有效促进红树林等基于自然的解决方案在其他沿海城市和地区的推广。

综上所述，本报告选取的案例代表了中国东、中、西部地区典型的气候风险类型，也囊括了上述不同类型的气候韧性基础设施，同时兼顾农村与城市、农业与工商业等不同经济部门。本报告希望通过对上述三个案例地区的分析，勾勒出全国气候韧性基建投资的概况，从而为决策者提供有科学依据的建议。

1.3.4 报告分析框架

本报告的分析框架如下：第二章分析了全国最具代表性的气候风险的特征，并通过气候模型具体分析预测了案例地区未来面临的典型气候风险的发展趋势，量化分析了主要气候变化指标，为后面气候韧性基建的成本效益分析奠定了基础。第三章结合对案例地区的气候变化预测分析，采取不同的经济评估方法，量化了各案例地区通过投入气候韧性建设可能规避的未来损失，以及由此带来的经济效益、社会环境效益等三重红利，并分析将案例项目推广到全国其他地区的意义。第四章进一步分析了未来气候韧性基建投资的资金缺口，并结合各案例项目投融资实际情况和国际上类似项目的融资经验，为各案例地区提出创新的融资机制及实施路径。第五章结合本报告的研究结果，为中国加强推广气候韧性基建提出具体政策建议。



第二章

警钟已鸣： 中国基础设施面 临严峻气候风险

基础设施系统作为社会赖以生存发展的一般物质条件，在适应气候变化工作中占据重要地位。然而，要构建气候韧性基础设施，首先需要识别基础设施在当前和未来主要面临的气候变化带来的危害，同时需要更好地理解 and 把握基础设施对这些危害的暴露度和脆弱性。本章总结了未来中国基础设施面临的主要气候风险的发展趋势，并预测了典型案例地区的基础设施未来可能面临的气候风险。

2.1 未来气候风险的发展趋势

自 20 世纪 80 年代以来，中国气候灾害影响范围逐渐扩大，影响程度日趋严重，由此造成的直接经济损失不断增加。随着气候灾害影响范围扩大和人口经济总量增长，基础设施及其相关的各类承灾体的暴露度也在不断增大。中国人口老龄化、高密度化和高流动性，社会财富的快速积累和防灾减灾基础薄弱，导致各类气候灾害的承灾体脆弱性趋于增大（中国气象局，2015）。因此，为保护广大人民的生命财产安全，在全国范围内加快气候韧性基建势在必行。

由于篇幅限制，本报告没有对全国气候风险走势进行建模分析，仅根据中国气象局发布的《中国气候公报》总结梳理了近年来中国常见的不同类型的极端气候灾害事件，通过对历史趋势的分析，佐

证未来气候风险可能加剧的推论。另外，附录 II 对中国气候变化的总体特征进行了梳理，供读者参考。

2.1.1 极端高温天气加剧农业干旱风险

近年来，中国气候变暖趋势日益明显，且极端高温事件偏多。如图 4 所示，自 21 世纪以来，全国平均高温日数（日最高气温达 35℃ 及以上的日数）始终高于 1961—2010 年的平均高温日数，且存在不断增加的趋势（虚线为全国夏季高温日数变化趋势线）。

不断增加的极端高温事件会增加潜在的干旱风险。从空间分布来看，中国西北荒漠地区发生旱情时间最长，其次是青藏高原地区和内蒙古草原地区（张棋等，2021）。研究表明，西北地区的标准化降水蒸散（SPEI）指数呈现出逐年下降的趋势，说明该地区的干旱情况正在逐渐加重（滕怀颐、冯克鹏，2021）。

持续高温天气造成的干旱会严重影响农业生产，导致农作物产量降低（赵德法等，2004；张强等，2014；赵路伟，2016）。2009—2019 年中国农作物因旱受灾面积呈现下降的趋势（图 5），中国旱灾防御工作取得了显著成效，但是旱灾的受灾面积占总受灾面积的比例仍位列第一（图 6），这说明中国还存在较为严重的干旱灾害，保障旱区群众生活用水和农业灌溉用水需求仍然非常重要。

图 4 | 1961—2020年全国夏季高温日数历年变化

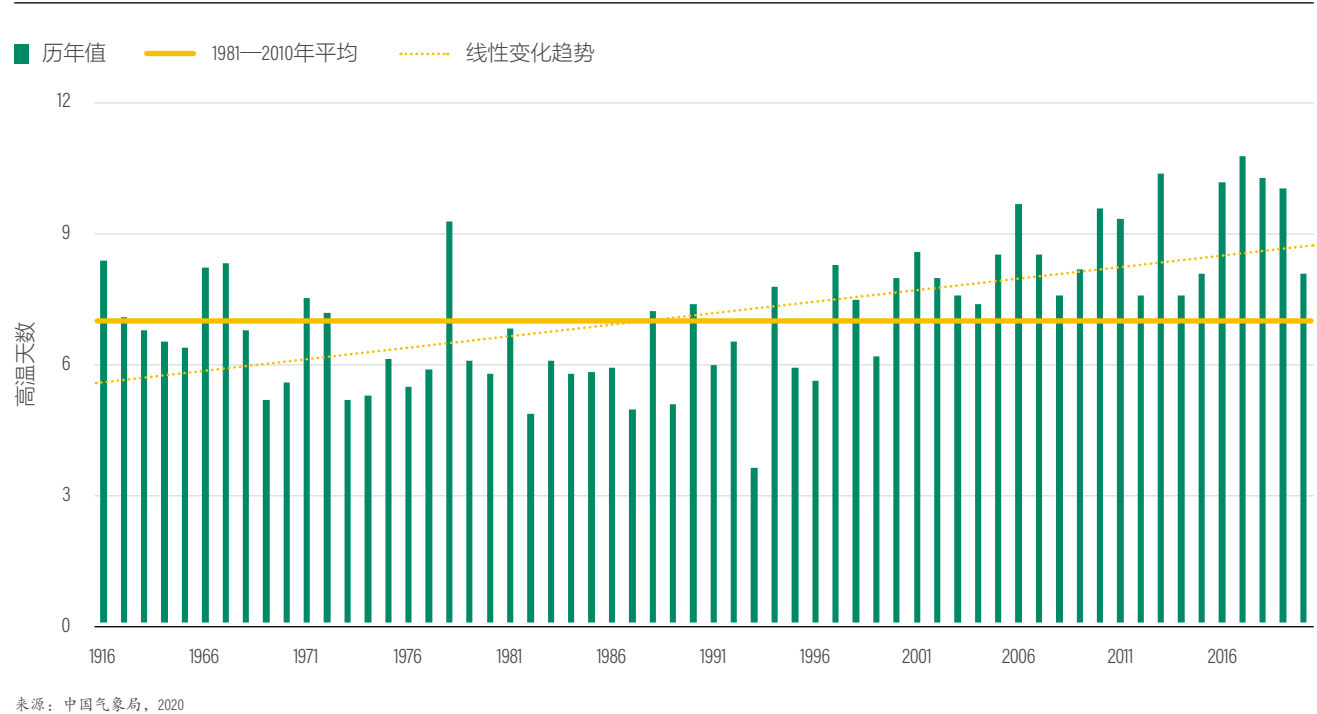


图 5 | 2009—2019年中国农作物因旱受灾面积

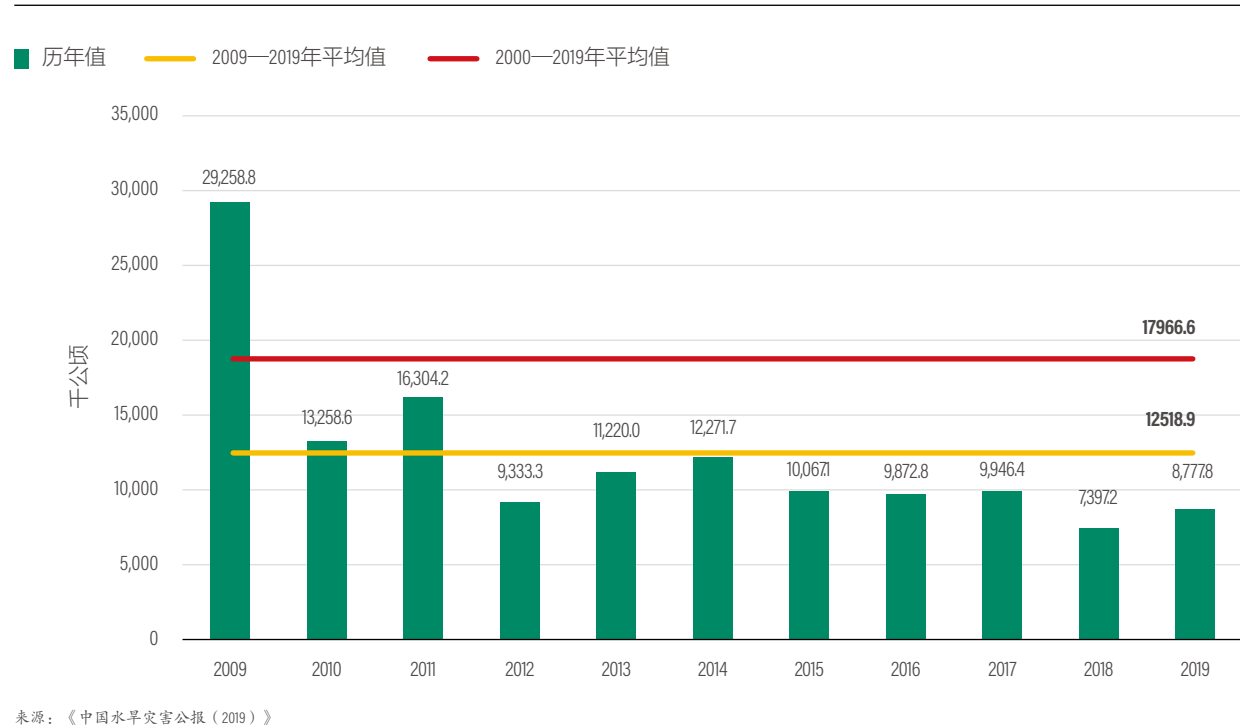
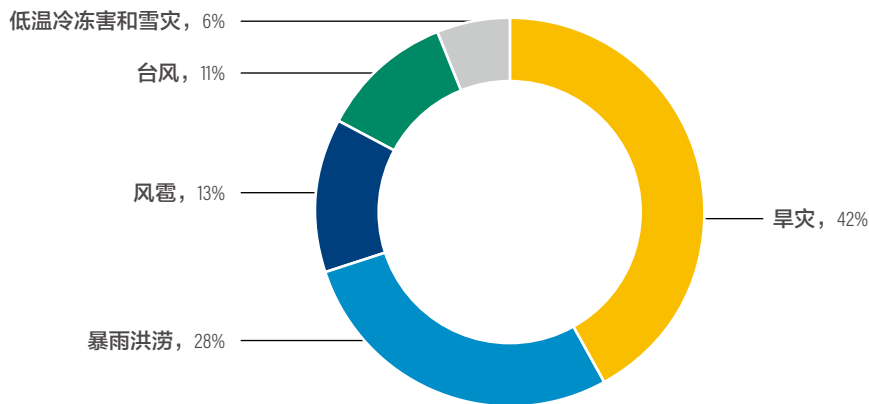


图 6 | 2014—2020年中国主要气象灾害受灾面积占总受灾面积比例



来源：根据《中国气候公报 2014-2020》公布数据制图

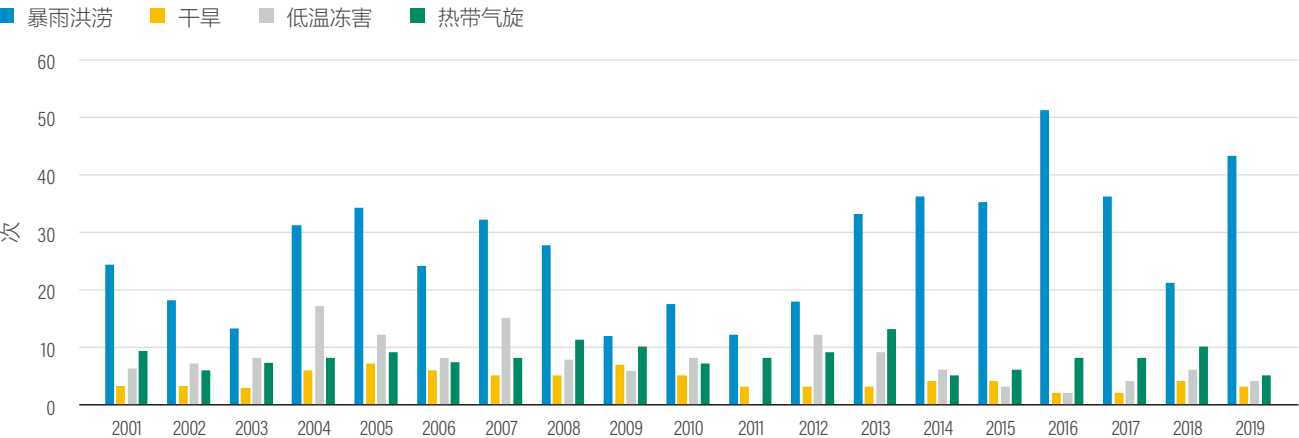
2.1.2 极端降水频繁加剧城市内涝风险

从历史数据看，中国极端降水事件的频率和强度均呈现出不断增加的趋势（刘昌新等，2021），在区域尺度上，越干旱的地区极端降水增加的趋势越大，较湿润的东部地区降水强度更高（陈星任等，2020）。长江中下游地区降水更趋向于极端化，对极端降水的贡献主要来自降水日出现的较大日降水量（周莉等，2017）。中国持续出现的极端降水事件一定程度上反映了某些地区爆发洪涝灾害的可能性（陈星任等，2020）。在全球变暖的影响下，受东亚夏季风环流和大气层结不稳定性等因素的影响，中国未来极端降水事件的频率和强度还会有继续增加的趋势（陈活泼，2013）。

极端降水引发的洪涝灾害往往会导致河水泛滥、堤坝垮塌、耕地和人畜等被淹没，严重时则会造成巨大的生命财产损失。根据中国气象局历年发布的《中国气候公报》，本报告总结梳理了2001—2019年中国主要气象灾害发生次数，其中暴雨洪涝灾害发生次数历年均位列第一（图7），受灾面积占总受灾面积的比例仅次于干旱（图6）。

严重的内涝灾害会导致城市基础设施损毁，困扰人们的正常生产生活，阻碍人类社会的进步与发展。2021年7月，中国郑州遭受特大暴雨灾害，造成292人遇难，188.49万人受灾，直接经济损失达532亿元²。这也意味着城市的健康发展需要提升基础设施对内涝灾害的防御能力，最大限度地降低内涝灾害的不利影响。

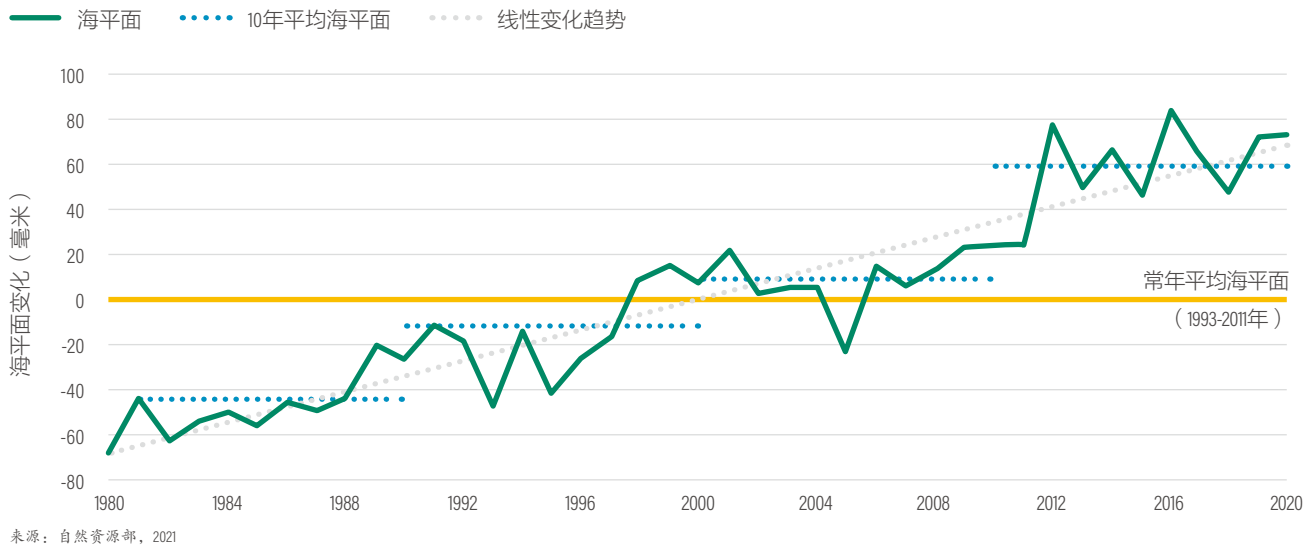
图 7 | 2001—2019年中国气象灾害发生次数



来源：谢伏瞻等，2020

注：台风是热带气旋的一种，达到“台风”或“飓风”的等级需为中心风力达到每小时118公里或以上的热带气旋。

图 8 | 1980—2020年中国沿海海平面变化



2.1.3 全球变暖加剧海平面上升及风暴潮风险

在气候变暖背景下，全球平均海平面呈持续上升趋势，给人类社会的生存和发展带来严重挑战。近40年来，中国沿海海平面呈加速上升趋势，随着城市化进程加快，沿海地区面临的海平面上升风险进一步加大。《2020年中国海平面公报》对海平面的监测和分析结果表明，中国沿海海平面变化总体呈波动上升趋势。1980—2020年，中国沿海海平面上升速率为3.4毫米/年，高于同时段全球平均水平。从10年平均海平面来看，2011—2020年平均海平面处于近40年最高位，比1981—1990年平均海平面高约105毫米（图8）。预计未来30年，中国沿海海平面将上升55~170毫米（自然资源部，2021）。

上升后的海平面将为狂风巨浪提供较高的水面基础，导致台风的频率和强度增加，进而加剧了台风风暴潮的危险性，对海岸带和海洋生态系统造成严重影响（封珊、徐长乐，2014）。风暴潮等海洋灾害不仅直接破坏建筑物和威胁人类生命安全，还会带来次生灾难，严重威胁交通安全和居民生活安全。中国能源基础设施中有相当一部分位于海岸线上，其中包括能源码头、发电厂、炼油厂以及接收石油和天然气的各种设施。海平面上升及风暴潮可能会破坏能源系统基础设施设备，大大缩短能源系统设施的使用寿命，提升运维成本。因此，中国沿海城市应关注海岸防护设施，并提高城市基础设施应对气候变化的能力，减少各类海洋灾害造成的不利影响。

2.2 对典型案例地区气候风险的预测

本报告针对三个典型案例地区，具体分析了宁夏回族自治区农业灌溉设施面临的干旱风险、武汉市城市排水系统面临的洪涝风险和深圳市大鹏新区海岸线面临的台风和风暴潮风险。以1986—2005年为基准时段，本报告分别采用气候模型预测了宁夏和武汉在两种未来典型温室气体排放浓度情景（RCP4.5与RCP8.5）³下，到2050年时段（2041—2060年）极端天气事件的变化趋势，并结合各地区人口社会经济情况，简要分析了各地区关键基础设施及相关主体对气候危害的暴露度和脆弱性。针对深圳市，主要基于历史灾害数据及文献研究，对大鹏新区2021—2050年风暴潮发生频次和强度进行了情景预测。

2.2.1 未来宁夏农业灌溉设施面临的气候风险

宁夏回族自治区位于中国西北内陆干旱地区，是全国水资源最少的省份之一。当地降水稀少，蒸发强烈，地表水资源非常有限，长期遭受干旱威胁，地区经济社会的发展和生态环境的维护主要依赖黄河水，通过遍布区内的输水储水设施实现有效供给。2020年黄河水占宁夏不同水源供水总量的89.4%，其他依次为地下水（8.7%）、当地地表水（1.2%）和非常规水（0.7%）（宁夏水利厅，2021）。这意味着输送黄河水的基础设施成为保障宁夏经济社会正常运转的生命线。

1. 宁夏农业灌溉现状

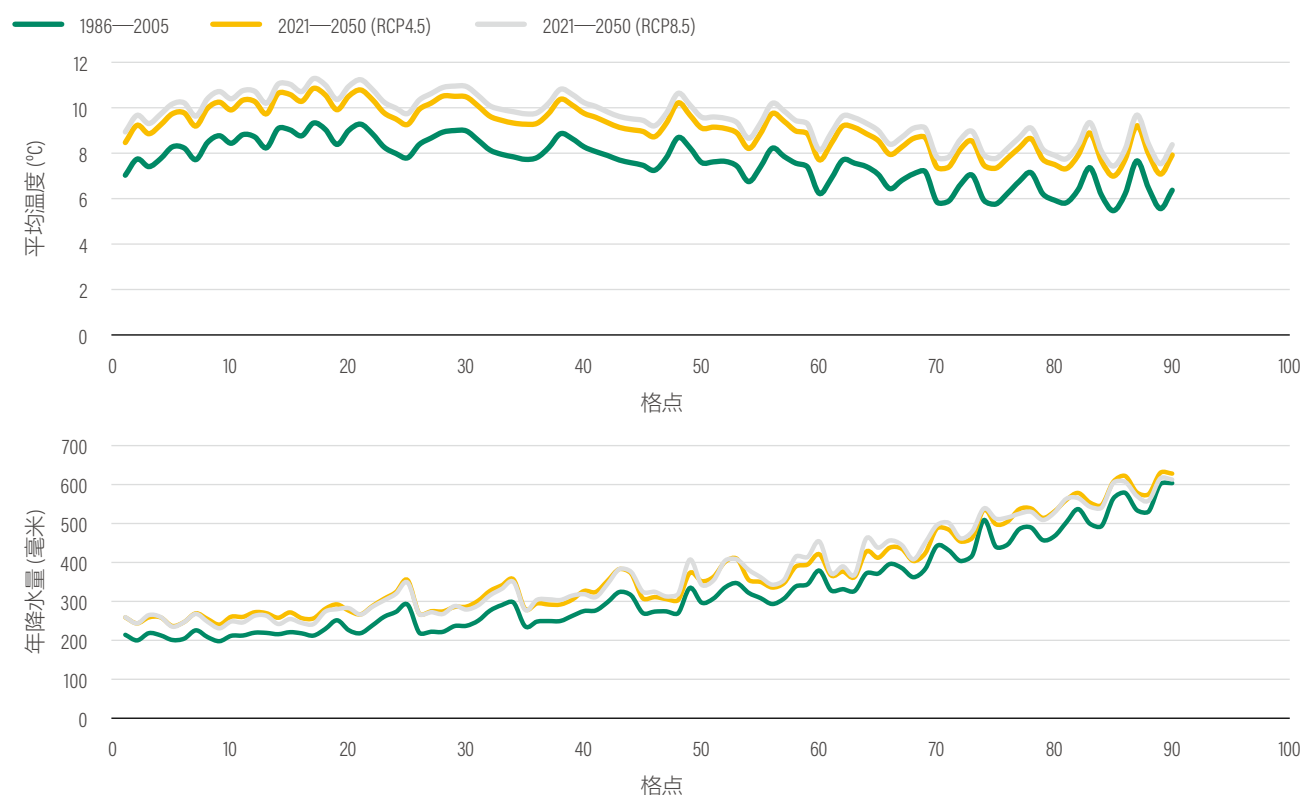
从农业来看，2018年宁夏总耕地面积中有86%的土地是旱田，而这些旱田中，只有不到30%是水浇地（宁夏统计局，2019）。2019年，全区作物种植结构中，高耗水作物（水稻、玉米、小麦等）播种面积占农作物总播种面积的比例接近60%，农林牧渔业总产值占全区生产总值的比例达16%，相对高于全国其他省份，其中农业总产值占农林牧渔业总产值的比例最高，达57%（宁夏统计局，2020）。由此可见，宁夏农业（尤其是种植业）对干旱灾害的暴露度较大，而支撑农业生产的灌溉系统也成为对干旱暴露度最高的基础设施之一。从人口、水资源和灌溉水利用效率来看，宁夏农业对干旱的脆弱性也相对较高。2019年宁夏第一产业从业人员比例超过50%，农业生产的稳定关系到全区大部分人口的生计。就水资源而言，全区农业取水量常年稳居榜首，占总取水量的90%以上，农业耗水量同样超过80%，且受气候变化影响较大（宁夏水利厅，2021）。与农业取耗水比例高相对应的是全区灌溉水有效利用系数较低，耕地亩均用水量相对较高，这无疑加剧了宁夏农业灌溉设施对干旱的脆弱性。

2. 未来干旱预测的分析方法与结果

针对宁夏未来面临的干旱灾害，本报告首先对该地区的气候平均态进行分析，主要考虑了年平均温度、降水量等因子变化，采用了国际通用的PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) 模型（关于该模型的具体介绍见附录III）。基于经过偏差订正后的区域气候模式PRECIS（分辨率25千米×25千米）的温度、降水等模拟数据，年平均温度（图9）初步研究结果表明：在RCP4.5（低排放）情景下，2021—2050年时段宁夏地区平均温度相较于基准时段（1986—2005年）升高1.36~1.53℃；RCP8.5（高排放）情景下，2021—2050年时段宁夏地区平均温度相较于基准时段（1986—2005年）升高1.80~1.94℃。年降水量（图11）初步研究结果表明：RCP4.5情景下，2021—2050年时段平均年降水量较基准时段（1986—2005年）增加24~62毫米，增加了4%~24%；RCP8.5情景下，2021—2050年时段平均年降水量较基准时段（1986—2005年）增加9~90毫米，增加了1.5%~25.1%。

尽管未来宁夏地区降水量呈增加趋势，但面临的干旱灾害主要受气温变化影响，因此本报告基于PRECIS

图 9 | 未来宁夏地区平均温度和年降水量变化



注：横坐标代表宁夏地区每个格点，格点分辨率为25km/0.25°×0.25°，格点序号从西北到东南依次排列

逐日温度、降水量、辐射等模拟数据，采用Hargreaves模型计算了宁夏地区潜在蒸散量（具体计算方法见附录III）。在此基础上，本报告结合自然降水量，进一步通过构建相对湿润度指数作为干旱指数分析了基于自然因素的宁夏地区农业干旱风险（具体计算方法见附录III）。从干旱指数的变化情况（图10）来看：在1986—2005年的基准时段内，宁夏地区干旱从南往北加重，除了宁夏南部的固原市干旱发生较少外，中北部的中卫市、吴忠市、银川市和石嘴山市等地大部常年发生轻度至重度干旱。而在RCP4.5和RCP8.5情景下，未来三十年间，宁夏大部地区的降水量和潜在蒸散量都将有所增加，除了固原市南部地区干旱指数减小但仍然没有达到干旱发生的阈值，其余大部地区干旱指数有所增加即干旱程度有所减轻，但干旱指数值仍然较小，干旱程度仍以轻度或重度干旱为主，干旱风险依然较高，农业干旱造成的作物减产率普遍在0%~30%（见表1）。

近年来，随着农业种植结构大力调整和节水力度不断加强，宁夏农业用水效率也逐渐提高。2020年，农业取水量占全区取水量的比例较往年降低近6%，达总取水量的83.5%。耕地实际灌溉亩均用水量由2000年1213立方米降低至2020年的591立方米，但仍高出黄河流域平均水平（319立方米）和全国平均水平（356立方米）（宁夏水利厅，2021；水利部，2021）。同时，随着人口增加，城镇化、工业化和生态文明建设的推进，宁夏用水需求日益增加，水资源供需矛盾将更加突出，预计未来农业灌溉系统应对干旱灾害的脆弱性也日益加剧。尽管宁夏取水问题有望于2030年通过南水北调西线供水得到改善，但未来十年内解决地区水资源供需矛盾，应对潜在增加的干旱风险，仍要走内部挖潜之路，从基础设施角度来看需要增强农业灌溉系统的抗旱能力，大面积推广节水灌溉措施。

图 10 | 宁夏地区干旱指数空间分布

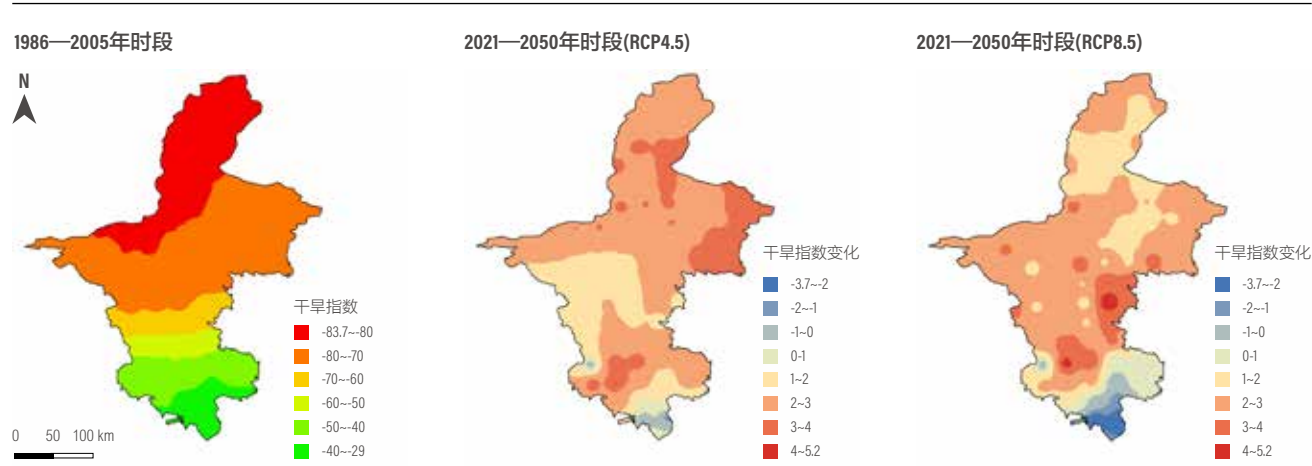


表 1 | 干旱等级、农业生产减产率划分表

干旱等级	干旱指数	减产率(%)
无旱	> -40	无
轻旱	(-65,-40]	0 ~ 10
中旱	(-80,-65]	10 ~ 20
重旱	(-95,-80]	20 ~ 30
特旱	<= -95	> 30

注：本报告采用国家标准《气象干旱等级》（GB/T 20481—2017）与《农业干旱等级》（GB/T 32136—2015）计算相应的作物减产率。

2.2.2 未来武汉城市排水系统面临的气候风险

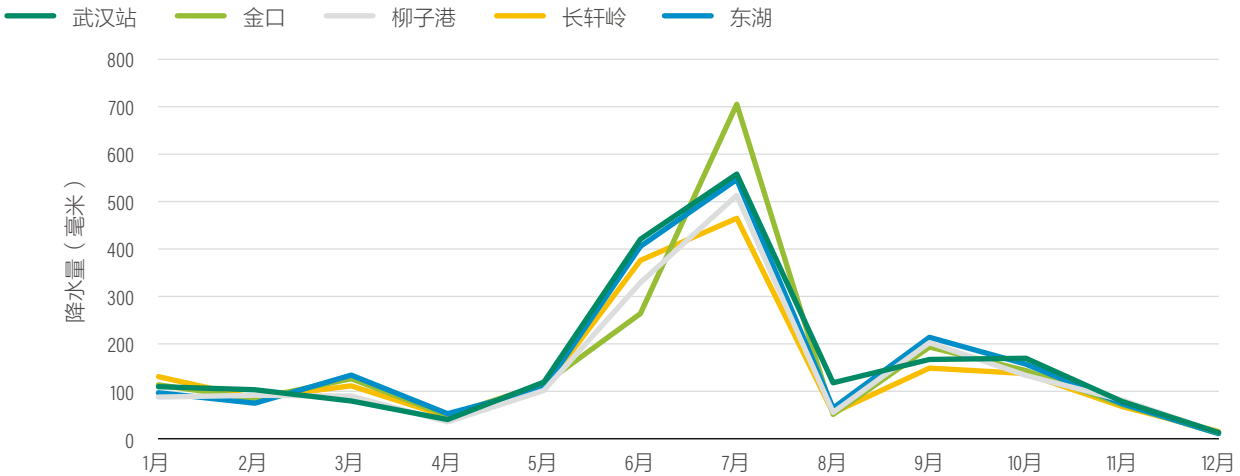
1. 武汉市内涝发生现状

武汉位于东南沿海与内陆的过渡地带，属于亚热带东南季风气候区，主要气候特点为降水充沛，在夏季尤其突出（图11），其梅雨期长，暴雨量大，暴雨强度相对较高。武汉市降雨量多年均值为1240.6毫米，年降雨量较大的特征年份有1954年、1983年、1998年、2016年、2020年，其中2020年年降水量1928.3毫米，排在具有历史观测数据以来的第二位（武汉市水务局，2021）（图12）。武汉市东湖是中国最大的城中湖，最大湖容为1.24亿立方米，按武汉市多年平均降水1240.6毫米和武汉市土地面积计算，武汉年均降水可达106.31亿立方米，相当于86个东湖的水量。

同时，武汉市区水系发达、江河纵横，以贯穿市区的长江、汉江为主干的多个水系支流构成了武汉庞大的水网，市区内还分布着166个大小不一的湖泊，其水域总面积达191.12平方千米，占市域面积的四分之一。武汉发达的水系结合雨季长、暴雨量大等特点，易造成江水暴涨，城区雨水无法排入江河、湖泊，从而加剧城市内涝风险。

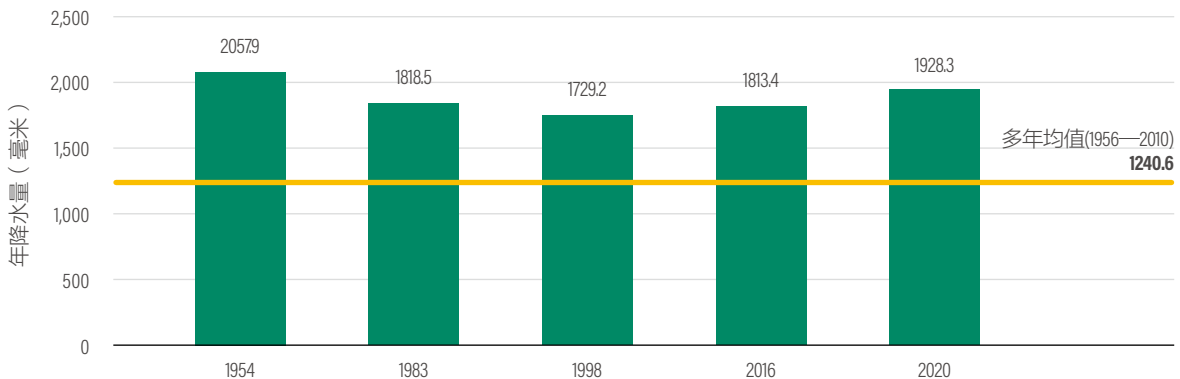
导致武汉市内涝的因素众多：一是极端天气影响，除了上述提到的降雨量多，武汉还易受厄尔尼诺影响，出现长时间强降雨，厄尔尼诺事件发生的次年，长江流域和江南地区极易发生洪涝灾害（许臣思，2017）；二是地形地势原因，武汉地处江汉平原东部、长江中下游，地势较低，因此连续强降雨会导致长江中下游水位迅速上涨，有时水位远高于地面平均高度；三是人为因素影响，随着城市大规模开发，硬化路面比例迅速上

图 11 | 2020年武汉市代表水文站降水量过程线图



来源：武汉市水务局，2021

图 12 | 特征年份年降水量对比图



来源：武汉市水务局，2021

升，自然土壤逐渐被不透水层覆盖，削弱了自然土壤及绿地对降水的吸收渗透功能，增加了雨水地表径流量，从而增加了城市内涝风险，同时由于城市内排水管网先期设计标准偏低、排水系统建设与维护不完善，也会严重影响城市的排水效果。

2. 未来内涝风险预测的分析方法与结果

针对武汉市面临的洪涝风险，本报告选取暴雨日数 R50（日降水量50毫米以上的天数，单位：天）和暴雨强度（暴雨日的平均降水强度，单位：毫米/天）两个降水指标，反应武汉市未来所面临的洪涝危险。基于经过偏差订正后的区域气候模式 PRECIS（分辨率25千米×25千米）的降水模拟数据，计算了未来武汉市暴雨日数与暴雨强度的变化情况（图13、图14）。从暴雨日数的变化趋势来看，在未来30年间（2021—2050年），暴雨日数在RCP4.5（低排放）情景下整体呈现增加的态势，其中武汉中北部暴雨日数为3.3~3.7天，较基准时段（1986—2005年）增加了0.2~0.7天，而南部地区暴雨日数为2.9~3.3天，

较基准时段减少了0.1~0.6天；在RCP8.5（高排放）情景下，空间分布与RCP4.5情景呈现相反趋势，与基准时段相比明显增加，暴雨日数达3.1~4.2天，增加了0.1~0.9天。从暴雨强度的变化趋势来看，2021—2050年间，RCP4.5情景下暴雨平均强度为66.3~73.1毫米/天，较基础时段有所降低，约1~2毫米/天，而RCP8.5情景下暴雨平均强度达68.7~78.4毫米/天，较基础时段增加1~3毫米/天。综合不同时段下暴雨强度概率分布情况（图15），本报告发现在未来气候情景下暴雨强度在70毫米/天以上的频率逐渐增加。

基于暴雨日数与暴雨强度分析武汉市面临的暴雨洪涝风险，整体上武汉中部沿长江地区暴雨洪涝风险较其他区域更为严峻，这与两种情景下暴雨的强度及空间分布密切相关⁴。综合来看（图16），RCP4.5（低排放）情景下，武汉面临的暴雨威胁主要集中在主城区及其周边地区；在RCP8.5（高排放）情景下，由于武汉大部分地区暴雨日数及强度呈现明显加重态势，导致武汉面临的暴雨威胁呈现加重态势。

图 13 | 武汉市暴雨日数空间分布

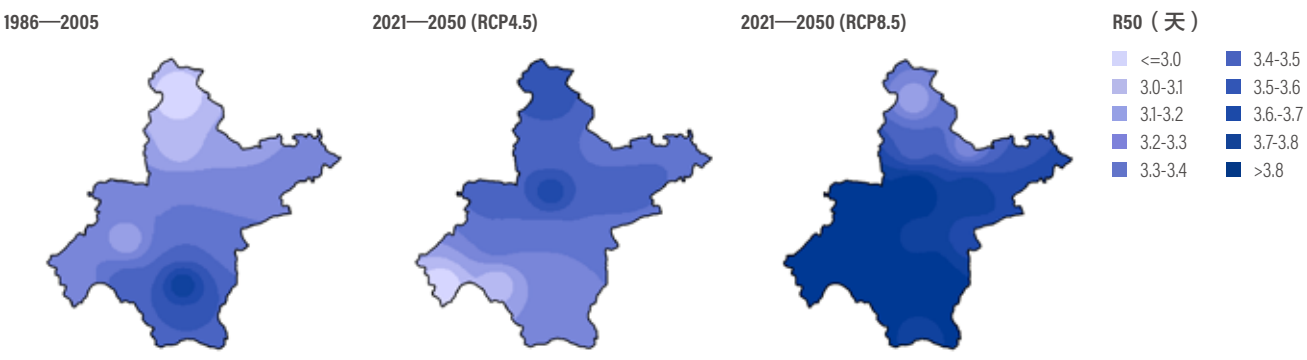


图 14 | 武汉市暴雨强度空间分布

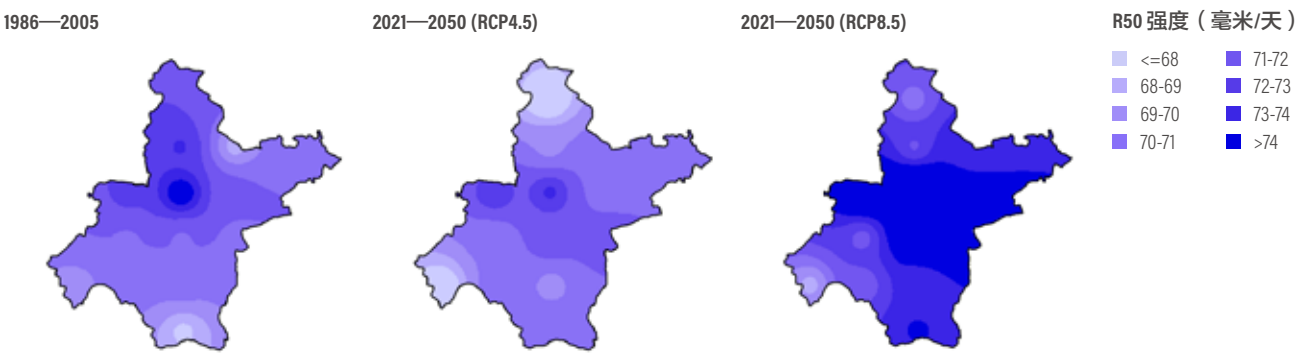
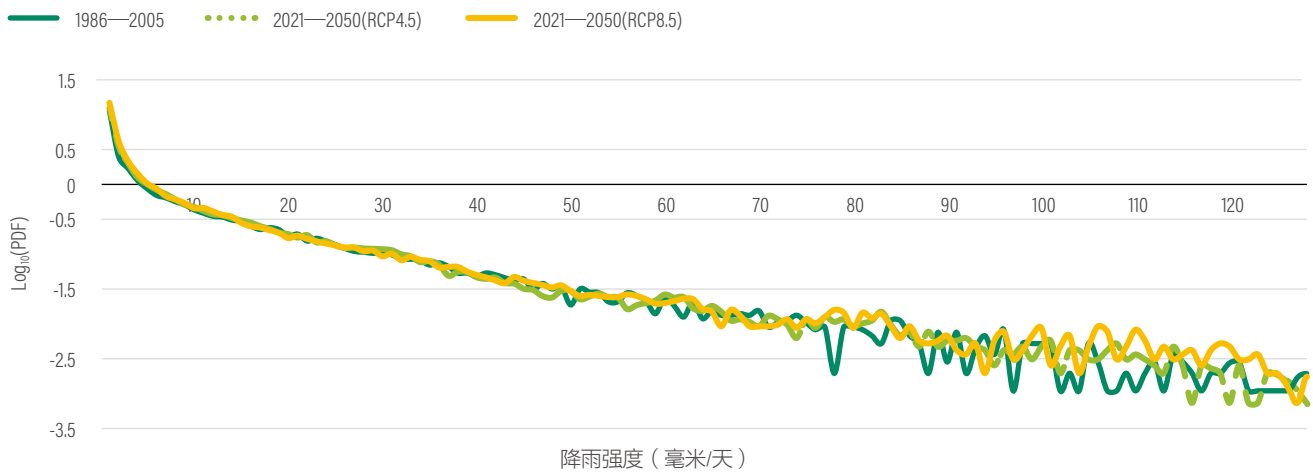
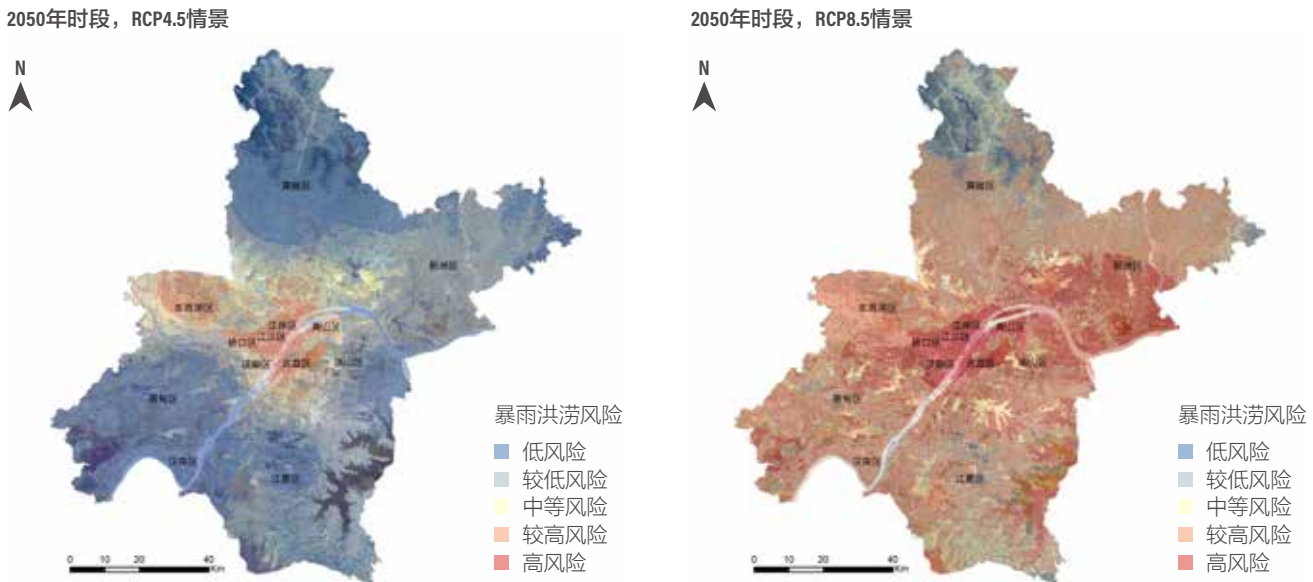


图 15 | 武汉市暴雨强度概率分布



来源：PRECIS 模型结果作图

图 16 | 未来气候情景下武汉市暴雨洪涝风险空间分布



来源：PRECIS 模型结果作图

一方面暴雨威胁呈现加剧之势，另一方面大规模的城市扩张导致大量道路建设，越来越多沥青马路等不透水表层覆盖着城市表面，大大降低了地表的透水性，城市排水能力正经受极大压力。当遭遇强降雨时，若道路网密度过大、排水管道密度过小，则短时间内无法将雨水排出，容易在城市低洼处发生内涝现象，从而增加了城市洪涝的脆弱性。因此，为降低城市洪涝灾害发生，应提高城市排水系统的韧性，增强城市应对洪涝灾害的能力。

2.2.3 未来深圳海岸线面临的气候风险

1. 深圳市受风暴潮影响现状

中国是世界上遭受海洋灾害影响最严重的国家之一（自然资源部海洋预警监测司，2020），风暴潮灾害的频繁程度居世界首位，风暴潮灾害造成的损失占海洋灾害损失的60%以上，成为海洋灾害之首，在人员伤亡方面超过地震等陆上灾害（李阔，李国胜，2017）。广东

是中国遭受海洋灾害影响最严重的省份之一，风暴潮、海浪、海岸侵蚀等灾害均有不同程度的发生。风暴潮是指由热带气旋、温带气旋、海上飚线等风暴过境所伴随的强风和气压骤变而引起的叠加在天文潮位之上的海面震荡或非周期性异常升高（降低）现象，分为台风风暴潮和温带风暴潮两种。广东遭遇的风暴潮以台风风暴潮为主（广东省自然资源厅，2020）。

本报告侧重于研究深圳遭受风暴潮灾害较为严重的大鹏半岛海岸沿线。该地区位于深圳市东南，东临大亚湾，西抱大鹏湾，遥望香港新界，拥有优越的交通区位、生态条件和海洋资源，森林覆盖率近78%，野生植物种类占深圳市的70%、广东省的26%。辖区海岸线长128千米，约占深圳市的二分之一，深圳市56个沙滩中的54个都分布于此，其中西涌海滩被评为“中国最美八大海岸”之一。大鹏新区基于自身优势，以旅游、生物、海洋为特色产业，构建了全面向海的发展格局（大鹏新区政府，2020）。

同时，大鹏新区处于热带、亚热带季风区，易受西太平洋和南海台风风暴潮影响，是全国台风登陆最频繁、遭受风暴潮灾害综合风险最严重的地区之一（张悦等，2017）。近年来，伴随沿海城市的城镇化进程加快和以灰色基础设施为主的海岸工程增加，海岸带的生态环境遭到严重破坏，海洋气候灾害的暴露人口和经济损失居高不下。广东省近五年平均每年有5个台风为深圳带来风雨影响（深圳市气象局，2019），其中2016年的“妮妲”、2017年的“天鸽”和2018年的“山竹”都为大鹏半岛带来了严重的系统性基础设施损失。

在全球气候变暖背景下，中国沿海地区高潮位呈显著上升趋势，风暴潮灾害的次数、强度和发生时间跨度均有一定程度的增加。据1954—2012年的潮位记录数据统计，中国沿海极值水位的增长速率达每年2.0~14.1毫米，受气候变化的影响显著（Feng et al., 2014）。20世纪90年代以来，中国沿海大部分港口100年一遇的设计高潮位已被实测潮位超过（陈奇礼等，1995）。已有研究表明：海平面上升0.3米，广州黄埔港100年一遇风暴潮水位将降为30年一遇（黄镇国等，2003）；而海平面上升0.5米，广州附近海岸100年一遇风暴潮水位则降为20年一遇（杨桂山等，1995）。由于海平面上升，至2050年，100年一遇的极值水位的重现期将变为10~30年一遇；至2100年，1000年一遇的极值水位重现期将缩短为10年一遇，气候变化引起的海平面上升将显著缩短极值水位的重现期（Wu et al., 2016）。

2. 未来风暴潮风险预测的分析方法与结果

结合已有研究文献（聂宇华等，2016；何蕾等，2019；王康发生等，2011；丁瑞，2018；冯伟忠等，2013），本报告对深圳市大鹏半岛未来风暴潮潮位进行梳理分析，在设计超强台风作用下，大鹏湾可能最高潮位达到3.0米以上，浪高达到4~5米，甚至5米以上。由于风暴潮发生机理的复杂性，目前全球尚不能够准确预测未来气候变化情景下不同区域具体时段风暴潮发生的次数与强度，为了有效降低未来风暴潮灾害所带来的损失，国际上通常通过设定不同强度风暴潮发生情景进行灾害损失预测。假设未来可能出现的风暴潮的频次和强度将随时间的推移而增加，本报告结合广东沿海风暴潮文献的研究成果，推测了大鹏湾未来气候变化情景下2021—2030年与2031—2050年不同重现期风暴潮位（表2）。

表 2 | 大鹏湾未来风暴潮最高潮位及频次

重现期/规模	2021—2030年		2031—2050年	
	最高潮位（毫米）	频次	最高潮位（毫米）	频次
100年一遇	2550 ~ 6435	1	3020 ~ 6510	1
50年一遇	2420 ~ 5725	1	2802 ~ 5800	2
10年一遇	2110 ~ 4035	2	2288 ~ 4110	4

数据来源：根据已有文献数据推测所得（聂宇华等，2016；何蕾等，2019；王康发生等，2011；丁瑞，2018；冯伟忠等，2013）。

整体看来，深圳地区未来风暴潮潮位有增加的趋势，该地区位于南海北面，气候变暖导致珠三角海平面上升趋势明显，未来风暴潮潮位上升将更为显著，可以预见受灾范围必将扩大，因此有必要加强对风暴潮灾害的监测、防御管理。大鹏新区风暴潮增水将会对城市基础设施造成严重的破坏，导致电力中断、生活用水中断、通信中断、交通混乱等局面，使得正常的经济活动和居民基本生活需求无法得到保障。此外，风暴潮到来时可引起滨海湿地面积迅速减小，而风暴潮过后，湿地面积也容易被海水侵蚀而缓慢萎缩，造成当地生态系统服务功能恶化。因此，该地区加大力度建设更具气候韧性的基础设施显得尤为迫切和必要。





第三章

一举三利： 气候韧性基础设施 建设带来三重红利

针对未来可能面临的气候风险，各地区实际上已经或计划加强气候韧性基建投资。然而，相对于加强基础设施适应气候变化能力的紧迫性，气候韧性基建投资规模和力度还远远不够，其原因之一在于政府部门、投资者和社会公众对这些设施的效益缺乏综合全面认识，因此缺乏加大投资的动力。本章侧重经济分析，采用系统的经济分析框架和具体的评估手段，量化气候韧性基建的投资收益。

3.1 气候韧性基础设施成本效益评估方法学

3.1.1 三重红利经济分析框架及成本效益评估方法

气候适应行动可以带来包括规避未来损失、经济效益和社会环境效益等三重红利（GCA, 2019; Brandon et al., 2021）。针对气候韧性基建，规避未来损失是指投资增强气候适应韧性措施可以规避或降低未来因气候灾害造成的基础设施损毁、经济行为中断所造成的人民经济财产损失。经济效益是指通过投资气候韧性措施而降低气候风险对生产力的影响，并通过推动创新而带来的新增经济价值。例如，滴灌节水设施可大幅度降低农业灌溉用水需求，使农业产

出在旱季仍能得到保障；同时，节约的水源可用于扩大灌溉面积以增加农业产出，亦可出售给其他高产值产业（如工业）满足其用水需求，从而提高经济效率并创造更高的经济价值。社会环境效益是指气候韧性措施中常包含基于自然的解决方案（Nature-based Solutions）可对社会和自然环境带来积极影响。例如，在沿海地区保护、修复或扩大红树林建设可以为近海地区的海洋生物（包括鱼类和鸟类）提供栖息地，不但使生物多样性和生态系统得到保护和恢复，也可促进沿海地区旅游业的发展，为当地居民提供新的就业机会和收入。同时，红树林可以有效固碳释氧，并减轻海岸侵蚀，从而加强海堤强度。

本报告根据三重红利框架将气候韧性基础设施的效益分类，并根据效益的特点和数据可获性采取不同的经济价值评估方法进行量化分析。针对气候韧性基建带来的外部性收益，特别是非市场化收益的评估，具体经济评估方法参见附录IV。其中，各案例具体计算的效益项目见图17。根据这些类别的成本和收益，计算得出气候韧性基建投资的净现值和效益成本比。

3.1.2 气候韧性基础设施建设损益分析的时间周期和折现率

本报告中将气候韧性基建损益分析的时间周期定为30年（即2021—2050年），分析结果汇报集中在两

图 17 | 各案例成本和效益计算项目

		宁夏-渠系改造	宁夏-田间节水灌溉	武汉-海绵城市	深圳-灰绿结合海堤
+	规避未来损失	规避作物减产损失	规避作物减产损失	规避直接 社会经济损失	规避基础设施损失 规避经济中断损失
	经济效益	节水效益 增产效益	节水效益 节地效益	节省城市管网运行费用 节省城市水污染控制成本 雨水回收效益 房产增值效益	新增休闲旅游价值
	社会环境效益	减少水土流失 固碳释氧	减少土壤养分流失 减少农业面源污染	回补地下水 调节气候 净化空气 美学景观价值	固碳释氧 净化污染 生物多样性
		气候韧性基础 设施建设成本	固定资产投资成本 新增年运营维护成本	固定资产投资成本 新增年运营维护成本	固定资产投资成本 新增年运营维护成本

个时间节点（即2030年、2050年）。30年分析周期与其他气候模型分析的100年周期相比较短，但这一选择主要考虑到长期气候变化风险的不确定性，且当前科技变化日新月异，也将影响未来基础设施的升级更新。与此同时，气候韧性基础设施也存在生命周期，从建设施工到建成投入运营，不同类型的基础设施生命周期不同，从最低的7~10年（如透水路面）到最高50~70年（如海底防护）。本研究因为涉及多个不同基建系统的改造，而非单一设施重建，为方便横向比较，折中选取30年为气候韧性基础设施的一个生命周期进行成本收益分析。

另外，本报告成本收益分析中采用6%的社会折现率。由于本报告所涉及的三个项目具有公益性强、以政府财政资金为主要来源等特点，因此将相关气候韧性基建项目按照公益建设项目的贴现率进行处理。中国一般的基础设施建设项目通常采用8%的社会折现率进行评价（国家发展改革委，2006），然而对于具有社会公益性质的建设项目可以采用6%的社会折现率进行评价⁵（水利部，2013）。折现起始年限根据各项目具体规划及开工建设年限而定。

考虑到未来面向私有资金的融资需求，本报告使用10%的社会折现率进行敏感性分析。社会折现率反映了项目投资效益的时间偏好，它直接影响着项目的经济可行性判断。社会折现率越高，投资人越注重短期内的收益情况；反之，则更注重长期收益。但由于基础设施的公共属

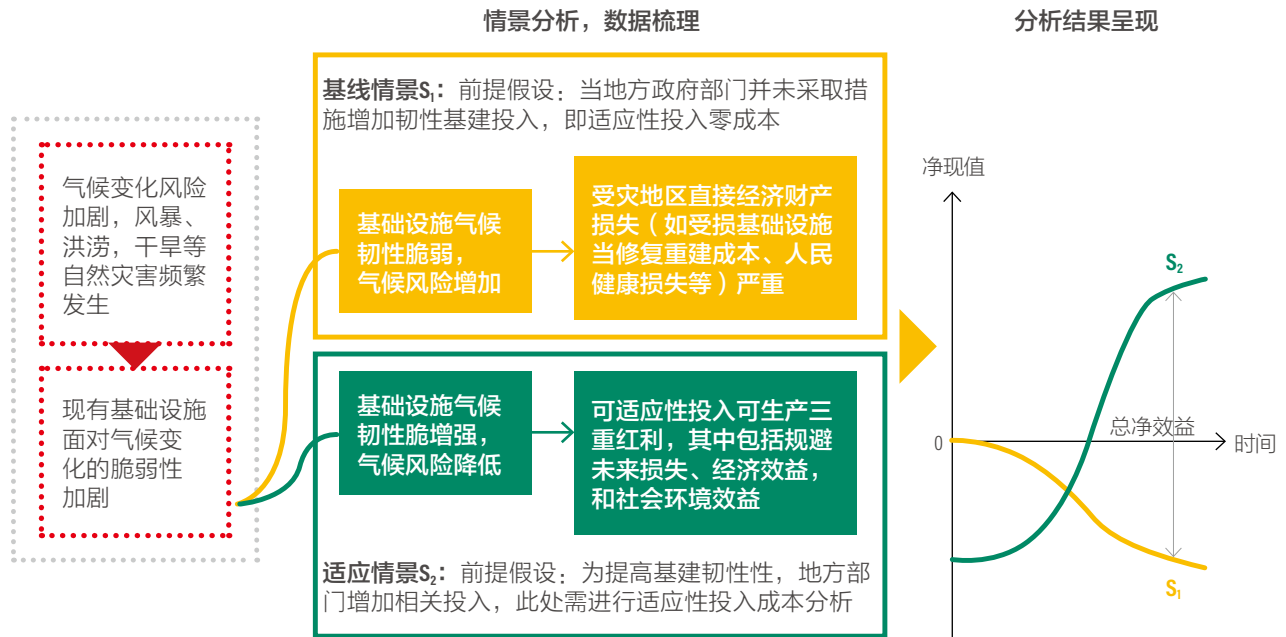
性，本报告中选用的社会折现率均低于商业投资建设中一般采用的社会折现率。

3.1.3 气候韧性基础设施建设投资损益分析框架

第二章对两种排放情景（RCP4.5 和RCP8.5）下的气候风险分析表明，未来三个案例地区基础设施面临的气候风险加剧显著，现有的基础设施脆弱性加强。因此，本章经济分析的重中之重是分析气候韧性基建带来的额外气候适应效果，并计算与此相关的额外成本和额外收益。这也是气候适应研究的重点和难点。为解决这一问题，本报告将政府部门在应对未来气候风险时可能采取的不同措施分成两组情景（图18）。

- 基线情景S1——无新增韧性投入情景，假设政府部门未采取措施增加气候韧性基础设施，即气候适应投入成本为零。在未来气候变化的作用下，由于缺乏气候韧性基础设施的保护，原有基础设施面临的气候风险加大，受灾地区的直接经济财产损失严重。
- 适应情景S2——加强韧性投入情景，假设政府部门为适应气候变化，投资建设气候韧性基础设施，因此产生适应性投入成本。在同样的气候变化作用下，由于当地基础设施气候韧性增强，所面临的气候风险降低，可以避免S1情景下产生的损失。同时，气候韧性基建中的额外措施还可能带来其他经济收益和社会环境收益。

图 18 | 气候韧性基础设施损益分析框架



基于以上两种情景，本报告对气候韧性基建投资的成本和收益作以下分类：气候韧性基建投资的成本主要是在 S_2 情景下投资建设气候韧性基础设施的成本，包括固定资产投资以及韧性基础设施在其寿命期内的运营维护成本；气候韧性基建投资带来的收益包括回避或降低 S_1 情景下遭受的经济财产损失，也即三重红利中的规避未来损失，以及投资可能带来的其他经济收益和社会环境收益。

管理性韧性措施不在本报告分析之列。

宁夏农业节水灌溉设施建设包括渠系改造和田间灌溉工程建设两个方向。渠系改造主要是改造老化的灌溉输水设施，以减少输水过程中因渗漏和蒸发造成的水资源浪费，从而提高水资源利用率，并降低未来气候变化导致的干旱危害。就田间灌溉而言，传统的沟灌、漫灌等方式水资源利用率低，且容易造成耕地养分流失和土壤板结。采用高效节水灌溉技术（如管灌、喷灌和微灌技术），可以实现田间精准灌溉，达到节水目的。针对这两个方向，本报告选取的两个项目（即中型灌区节水配套改造项目和田间高效节水灌溉项目，具体介绍见附录V）是在宁夏原有农业灌溉设施的基础上增加额外韧性建设以应对农业干旱风险。新增的适应设施将提高输水效率及灌溉水的利用系数，从而节约灌溉水资源，保证在气候变化可能造成的持续干旱天气情况下仍然有水可用，进而保障作物灌溉。两个项目均从2016年开始施工，建设时间为2~5年，项目建成后预期可实现年新增节水量3.5亿立方米，项目建设和110处惠及宁夏9个国家级贫困县，85处涉及全国新增千亿斤粮食生产能力建设规划确定的粮食生产重点县。

2. 评估方法及计算结果

本报告以项目规划公布的数据为基础，通过文献研究、实地调研等方法，详细计算了项目的成本和三重红利

3.2 气候韧性基础设施建设代表性案例投资回报收益分析

3.2.1 宁夏农业节水灌溉设施

1. 宁夏气候韧性基础设施建设项目介绍

为应对气候变化，2008年宁夏回族自治区成立应对气候变化及节能减排工作领导小组。2018年自治区发展改革委印发《宁夏回族自治区应对气候变化“十三五”规划（修订本）》，在积极促进减排以减缓气候变化的同时，自治区政府还提出适应气候变化的能力目标，并针对农业应对气候变化所带来的干旱风险提出具体解决方案，其中包括继续加强农业基础设施建设、推进调整作物种植结构和种植制度、选育抗逆品种、遏制草原荒漠化加重趋势等四个方面。本报告重点关注农业节水灌溉设施，其他

以及相应的投资回报率（项目成本和收益的详细计算结果，以及具体计算方法和数据来源见附录 V）。

■ 宁夏农业节水灌溉设施项目的成本分析

宁夏农业节水灌溉设施项目成本包括两部分，即固定资产投资和新增年运营维护成本。其中，固定资产投资根据项目建设进度分年度投资，新增年运营维护成本主要指项目运行期每年新增加的运行和维护费用，主要包括工程维护费、人员工资及福利费、燃料动力费，以及其他费用。根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》公布的建设项目国民经济评价指标，本报告对各项新增年运营维护成本进行了预估。由于田间节水灌溉项目建设完成后主要由农田运营方负责维护，因此本报告还估算了每年维护更换田间灌溉设备需要投入的资金。计算结果显示，两个气候韧性基础设施项目的总投资约143亿元，其中固定资产投资约42亿元，运营维护费用总计约101亿元。

■ 宁夏农业节水灌溉设施的三重红利分析

□ **规避未来损失⁶**，指项目建设完成后，灌溉面积可在未来气候变化背景下得到保障，从而减少或避免干旱风险加剧可能带来的作物减产或绝收损失。由于影响经济作物种植的不确定因素较多，而相比之下宁夏粮食作物生产结构及价格浮动比较固定，因此本报告只考虑粮食作物受气候变化风险影响可能受到的减产损失。考虑到未来气候风险的不确定性，本报告根据第二章对宁夏地区干旱等级的预测，即未来宁夏地区农业干旱以轻旱到重旱为主，分别取轻旱和重旱对应的减产范围的中位数界定未来灌区内粮食作物的减产率，可能为5%~25%。通过估算适应项目所保障的四种粮食作物的灌溉种植面积，并结合预测的作物亩均减产率以及粮食作物的市场价值，本报告估计渠系改造和田间节水灌溉项目每年可以避免的粮食作物减产价值分别为0.3亿~1.5亿元和0.2亿~1.2亿元。

□ **经济效益**，指除可避免损失外，农业节水灌溉设施可提高灌溉节水总量，增加灌溉面积创收，进而导致宁夏地区水源使用增值，其中包括节水效益、增产效益、节地效益三个方面。

节水效益，指农业节水灌溉设施项目带来的年新增节约水量可创造的经济效益。由于宁夏水价被低估，无法反映当地水资源稀缺情况（钟丽锦等，2015），本报告采用水资源影子价格计算新增节约水量可能带来的效益。其中，影子价格计算

的是每单位的灌溉节约水量转用于工业生产（即水权转换⁷），使工业增加值得以保障而带来的经济效益。预计未来宁夏工业部门的用水需求将逐年递增，然而工业用水指标增长有限，因此，新增用水需求量只能通过水权转换得到满足⁸。两个项目预计每年新增节约水量达3.5亿立方米⁹。如果其中一部分通过水权转换用于满足当地工业发展需求，那么按照每单位取水量对应的万元工业增加值计算，本报告预计渠系改造项目和田间节水灌溉项目可分别保障每年价值约36.8亿元和78.6亿元的工业增加值免受未来干旱风险的影响，对地方经济发展影响深远。

增产效益，指渠系改造带来的新增节约水量可以确保并扩大现有灌溉面积，从而通过增加可灌溉耕地面积实现增产。通过宁夏回族自治区每亩土地的平均净收益计算，新增灌溉面积预计每年可以创造价值约5200万元的收益。

节地效益，指通过田间节水灌溉项目提升灌区内土地灌溉效率，从而带来经济收益。同样以单亩土地平均净收益计算，该项目创造节地效益约1700万元。

□ **社会环境效益**，指农业节水灌溉设施通过对灌溉系统的改造达到减少水土流失，减少土壤养分流失、固碳释氧、减少农业面源污染等环境效益，从而增进社会福祉。

减少水土流失和减少土壤养分流失：渠系改造项目可以有效增加灌区内的植被面积，特别是渠旁林带、田间林网、经济林、牧草等植被的面积。区内林草覆盖率增加，水土流失问题也会相应得到改善，从而降低下游河道及水库的清淤成本。另外，田间节水灌溉项目大面积推广管灌、喷灌和滴灌技术，可以避免传统的沟灌和大水漫灌造成的耕地土壤养分流失，从而实现环境收益。其中一部分收益来自避免因土壤养分流失而额外需要施加有机肥和化肥产生的成本，另一部分则来自避免水土流失给河流水库带来的清淤成本。通过替代成本法，本报告计算得出渠系改造项目控制水土流失可带来的年收益约7.5万元，田间节水灌溉减少土壤养分流失可带来的年收益约0.6亿元。

固碳释氧¹⁰：由于渠系改造项目完成后，灌区内植被面积，尤其是防护林、经济林和牧草面积增加，可以发挥森林/草地固碳作用，增加碳汇。根据宁夏水利厅预计的中型灌区内新增的防护

林、经济林和牧草面积，本报告分别计算了渠系改造项目通过森林固碳和草地固碳带来的价值。由于缺少计算经济林固碳潜力的数据，本报告仅计算灌区内增加的防护林和牧草面积增加的碳汇，结果显示项目新增的防护林和牧草面积平均每年固碳释氧的价值达290万元。

减少农业面源污染：田间节水灌溉项目采用的管灌、喷灌和滴灌技术可以实现田间水肥一体化管理，通过精准灌溉不仅可以给作物补充水分，还能最有效地给作物施肥甚至施药。这种管理方式可以减少农药和化肥下渗到地下含水层，从而可以避免产生面源污染。根据已有研究对中国农业面源污染带来的成本的估算，本报告计算得出田间节水灌溉项目减少农业面源污染带来的收益每年高达3亿元。

其他社会环境效益：此外，农业节水灌溉设施的建造项目惠及宁夏所有9个国家级贫困县（2015年），以及5个全国新增千亿斤粮食生产能力建设规划确定的粮食生产重点县。前面估算的避免粮食减产可以保障农民收入，并达到减贫和保障粮食安全的目的。项目实施后节约的水量如果用于回灌地下水，可增加河道生态用水，从而起到调节地下水位、恢复河道湿地生态的作用。另外，改善灌区内的灌溉条件可以起到提高土壤固碳潜力的作用。灌区土壤有机碳密度与灌溉时间之间有较强的相关性，灌溉耕作时间越长，土壤有机碳密度越高（董林林等，2015）。已有研究

显示，在降水较少的干旱和半干旱地区，合理灌溉可以使土壤有机碳含量提高11%~35%（曹丽花等，2016）。由于缺少相关数据，本报告暂不量化这些社会环境效益。

3. 宁夏农业节水灌溉设施建设投入的经济损益分析

■ 农业节水灌溉设施项目的投资回报率

基于以上测算的项目投入以及项目建设完成后每年带来的收益，本报告以6%的社会折现率分别计算渠系改造项目和田间节水灌溉项目从2016—2048年间的总投入和总收益。受未来气候变化不确定性影响，农业节水灌溉设施规避的未来损失将受气候风险大小影响，在3.1亿~15.4亿元间浮动。但由于两个项目呈现较高的回报率主要得益于经济效益中的节水效益，因此气候风险变化对项目净现值的影响不明显。如表3所示，渠系改造项目的净现值预计约为313.6亿元，如果气候风险低，则净现值也偏低，最低为307.4亿元；如果气候风险高，则净现值最高可达319.7亿元。该项目效益成本比达20.3，即每投入1元可获得20.3元的效益；相比之下，田间节水灌溉项目的净现值更高，达585.4亿元，但由于投入较大，效益成本比只有5.6，即每投入1元可获得5.6元的效益。

■ 敏感性分析

采用10%的社会折现率进行敏感性分析，结果显示，渠系改造项目和田间节水灌溉项目的净现值仍然为正，虽较6%社会折现率下计算所得的成本收益比有所降低，但回报仍然稳健。

表 3 | 宁夏农业节水灌溉设施项目投资损益和敏感性分析结果

周期：30年，单位：亿元

项目	总成本	规避未来损失	经济效益	社会环境效益	净现值	效益成本比
社会折现率6%						
渠系改造	16.3	9.3（3.1~15.4）	319.7	0.8	313.6（307.4~319.7）	20.3（19.9~20.7）
田间节水灌溉	1270	71（2.4~11.8）	6678	375	585.4（580.7~590.1）	5.6（5.6~5.6）
敏感性分析（社会折现率10%）						
渠系改造	13.6	5.4（1.8~9.0）	169.1	0.5	161.4（157.8~165.0）	12.8（12.6~13.1）
田间节水灌溉	82.7	4.1（1.4~6.8）	349.9	21.6	292.8（290.1~295.5）	4.5（4.5~4.6）

3.2.2 武汉海绵城市基础设施

1. 武汉海绵城市项目介绍

为有效解决内涝问题，2013年武汉市启动了《武汉市中心城区排水设施建设三年攻坚行动计划》，计划于3年内重点治理城市排水系统，提高城市排水能力。2015年1月，武汉市政府印发了《武汉市中心城区排涝、治污、供水两年决战行动计划》，以期通过改扩建污水处理厂、建设300千米污水管网、推进雨污水管网改造等工作，进一步治理城市内涝问题。

随着国家2014年开启海绵城市建设专项工作，武汉市也于2015年4月正式入选国家首批“海绵城市”建设试点，积极探索本着城市低影响开发（Low Impact Development）为原则、灰绿基础设施相结合的治水新模式，应对未来日益增强的气候风险（见表4）。与以往纯灰色模式不同，海绵城市建设中加入基于自然的解决方案（Nature-based Solution），既可弥补传统泵站、管网基础设施排水能力不足的问题，减轻其排水压力，又在原有防洪排水设施的基础上增加额外韧性措施，可充分发挥生态系统对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用。因此，新增的绿色韧性基础设施能够增加雨水入渗、蓄积量，控制雨水径流量，从而可以缓解气候变化导致的洪涝灾害风险加剧问题。

武汉市海绵城市建设以“2+N”的模式开展，率先打造青山和四新两个示范区，并推动其他各区开展海绵化改造。截至2020年，武汉市已完成180平方千米（彭照，2020）城市建设工作，占武汉市建成区面积¹¹的22%，实现了武汉市到2020年全市建成区面积的20%达到海绵城市标准的目标。武汉市还将进一步推动全市海绵城市建设工作，按照国家《关于推进海绵城市建设的指导意见》（国务院办公厅，2015）中的工作目标，争取到2030年全市建成区80%以上面积达到海绵城市的要求。

基于武汉市海绵城市建设进展以及数据可得性，本报告将主要关注已经完成建设的两个示范区。两示范区面积

达38.8平方千米，共建设288项海绵城市建设相关工程，涉及市政道路、小区公建、公园绿地、城市水系、城市管渠5类项目，具体项目介绍见附录V。通过近五年的建设，两示范区防洪排涝能力显著提升，过去常见的渍水点得以消除；同时，雨水经过自然生态系统的过滤、渗透等净化后，减轻了城市水污染，示范区内主要水体水质都有所改善，化学需氧量（COD）等主要指标基本能够达到IV类水体水质要求。海绵城市的建设还增加了示范区的水域面积以及绿化面积，提升了城市品质，改善了生态环境。

2. 评估方法及计算结果

为了体现气候适应工作的额外性，本报告将仅聚焦海绵城市建设过程中的绿色基础设施建设，不考虑传统灰色基础设施的改造与建设工程¹²。本报告以项目规划公布的数据以及气候模型数据为基础，通过文献研究与调研等方法，详细计算了项目的成本和三重红利收益，以及相应的投资回报率（项目成本和收益的测算结果，以及具体测算方法和数据来源见附录V）。

■ 武汉海绵城市建设的成本分析

武汉市海绵城市试点建设项目成本包括两部分，即固定资产投资和每年运营维护成本。根据《武汉市海绵城市建设试点工作实施方案》，三年内武汉市投资162.9亿元用于青山与四新示范区的试点建设工作。本报告剔除传统灰色基建城市管渠建设的13亿元投入，仅考虑新增绿色基建所需的固定资产投资，约为150亿元。对于运营维护成本，由于缺少海绵城市运营维护的相关资料，本报告使用日常维护海绵城市（如公园绿地）的人工成本进行推算，并暂不考虑相关的物料成本，由此计算出2020—2050年间运营维护总成本约为2.0亿元。因此，武汉市海绵城市试点建设项目中气候韧性基础设施总成本约为152亿元。

■ 武汉海绵城市建设的三重红利分析

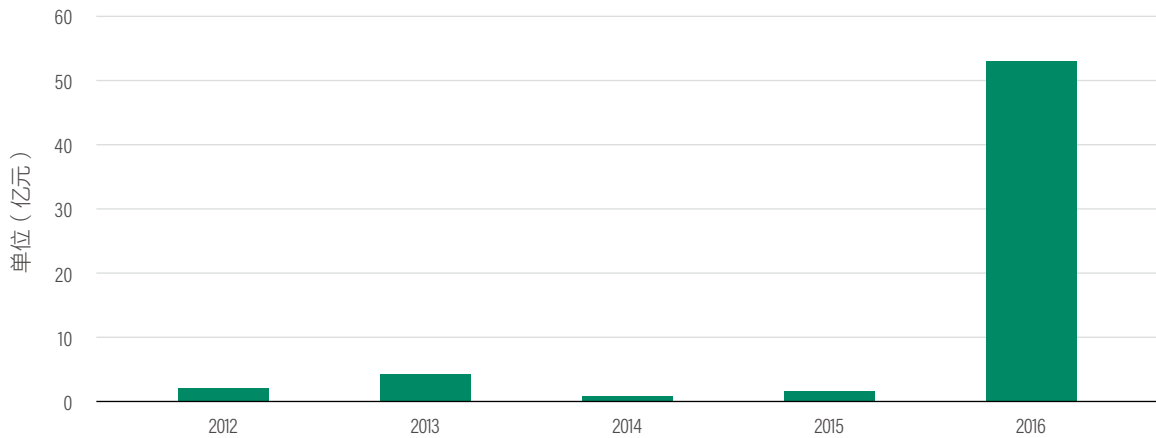
□ **规避未来损失**，指海绵城市建设将可以促进雨水渗透、调蓄，减少地表雨水径流，有效缓解城市

表 4 | 灰绿基础设施分类

	灰色基础设施	绿色基础设施
类别	泵站、污水收集管网、排水管网、渗井、调蓄池	下沉式绿地、绿色屋顶、透水铺装、生物滞留设施、植草沟、公园绿地、雨水花园、生态驳岸、人工湿地、雨水补给湿地

来源：《武汉市海绵城市建设技术指南（试行）》（武汉市城乡建设委员会，2016）

图 19 | 2012—2016年武汉市洪涝灾害直接经济损失



雨季防洪的巨大压力，使城市具备应对大流量雨洪的能力，避免洪涝灾害造成的直接社会经济损失，包括由于强降雨及内涝所导致的交通出行受阻、户外作业暂停，以及城市基础设施受到冲击与损毁等损失。例如，2016年6月30日至7月6日武汉市经历了特大暴雨导致的洪涝灾害，累计降雨量达560.5毫米，突破了武汉自有气象记录以来周持续降水量的最大值，造成了严重的社会经济损失（图19）。此次持续强降雨导致的洪涝灾害造成的直接经济损失达58.2亿元（其中农业直接经济损失为25.7亿元）。

本报告根据历史多年暴雨量与损失量数据进行了回归分析，推算出暴雨量与损失规模的关系。第二章表明，未来由于气候变化，预计武汉暴雨及洪水的强度和频率将会持续增加。基于模型预测数据可推算出RCP4.5情景和RCP8.5情景下未来30年间累积暴雨量，进而基于回归函数可推算出未来由于暴雨洪涝事件所导致的总损失预期值（剔除农业直接经济损失¹³）。而通过海绵城市相关基础设施，尤其是绿色基础设施建设，可以提升径流控制率，将规避外排水量的幅度提高43%，使内涝的风险大幅度降低，从而减少相应的经济损失，因此，本报告假设提升径流控制率可以相应规避同等比例的损失。同时，由于缺乏城区范围内具体的损失数据，本报告根据示范区面积占武汉市面积（剔除农业用地面积）的比例进行损失的折算，最终推算出海绵城市绿色基础设施建设未来每年可避免两个示范区的直接社会经济损失约为1001万~1007万元。

□ **经济效益**，指通过海绵城市中绿色基础设施的蓄水、净水、绿化等功能可以节约的成本支出与

创造的直接经济收益，主要包括管理成本节约收益、污染控制成本节约收益、雨水回用效益、房产增值效益。

减少管网运行管理费用（即管理成本节约收益）：海绵城市建设项目中的绿色基础设施（如透水铺装、透水路面、下沉式绿地等）能够促进雨水吸收，将部分雨水引流到湖泊或雨水滞留池中，因而能够减少进入市政管网中的雨水，缓解市政管网的排水压力，降低市政管网日常运营及维护成本。基于未来30年武汉市年均降水量约为1401~1466毫米¹⁴的预测，结合市场价格法可计算得出两示范区每年节省的城市管网运行费用约为102.7万~107.5万元。

节省城市水污染控制成本（即污染控制成本节约收益）：城市雨洪可导致城市水污染，主要有点源污染、面源污染和内源污染。绿色基础设施能够减少雨水径流量，进而减少污水进入河流，削减水体污染。同时，项目建设中的绿地、湿地等具有净化功能，能够净化水体，因此也可以减少水体中的污染物。相应地，城市水体污染物的减少将可以节省城市控制水污染所需的成本。根据《武汉市海绵城市建设试点工作绩效自评报告》，海绵城市建设将主要控制COD、总磷（TP）和氨氮（NH₃-N）三种污染物，并计划每年削减COD 3554吨，总磷37吨，氨氮431吨。采用替代成本法可计算得出海绵城市建设每年能够节省城市水污染控制成本1073.0万元。

雨水回用效益：海绵城市建设项目中的雨水收集设施（如透水铺装、绿色屋面、蓄水池等）能够有效收

集屋面雨水、广场雨水、绿地雨水和污染较轻的路面雨水等，经净化处理后可作为中水直接进行回收利用，并主要用于居民及工厂企业用水、城市绿化浇灌、路面冲洗等，因此雨水回用具有经济效益。根据《武汉市海绵城市建设试点工作绩效自评报告》，两示范区雨水年利用量达424.3万立方米。参考北京市中水价格，可估算武汉市中水价格约为0.89元/立方米，根据市场价格法可计算得到项目每年的雨水回用效益为377.7万元。

房产增值效益：海绵城市建设增加了项目示范区内绿地面积，当地居住环境质量也随着这些生态资源的增加而相应提升。随着生活水平的提高，人们也越来越重视生活环境的质量，良好的自然环境资源作为一种稀缺资源也将对房地产产生较大的影响，环境质量所具有的独特外部效益也成为房地产价格提升的原因之一。通过分析武汉市住宅价格与绿地率的关系，并参考文献(Jiao et al., 2010)，估算得到武汉市绿化率每增加1%，其每平方米住宅价格将在2016—2020年项目建设期内逐年平均增加0~546元不等，进而可计算得到绿色基础设施建设所带来的房产增值效益约为308.6亿元。

□ **社会环境效益，**指海绵城市建设试点项目通过相关配套设施可回补地下水，以及通过新增草地、林地、湿地调节气候、提供美学景观等产生的环境及社会效益。根据《武汉市海绵城市专项规划》数据推算，两示范区内海绵城市建设新增绿地744公顷。

回补地下水：海绵城市建设项目中基础设施（如透水砖铺装、生物滞留设施、渗透塘等）能够提高雨水入渗量，而入渗的雨水能够有效补充地下水。地下水作为居民生活用水、工业用水和农田灌溉用水的重要水源，具有诸多使用价值，同时还具有科研文化服务等非使用价值。根据闫丹丹等（2019）对地下水生态系统服务价值的研究成果，经CPI指数换算得到地下水生态价值为5.16元/立方米。基于气候模型降雨量数据估算可得，武汉市年雨水下渗量大约为539.3万~564.4万吨，每年回补地下水将产生625.7万~654.8万元的综合效益。

调节气候：海绵城市建设增加了项目示范区内的绿地面积，而绿地中的生态资源对区域气候具有调节作用，可以缓解城市热岛效应、增加降水等。例如，草地和林地中的植物叶片通过蒸腾作用挥发其从土壤中吸收的大量水分，提高空气湿度，降低周围气温。基于谢高地等（2015）的研究结果，估算绿

地的气候调节价值约为1.5万元/公顷，项目每年可产生的气候调节价值约为1233.3万元。

净化空气：同时，绿地一般还具有维持大气化学组分平衡、调节吸收二氧化硫和氮氧化物等空气污染物、固碳释氧、滞留灰尘等方面的价值。例如，草地和林地构成的绿色空间对烟尘和粉尘有明显的阻挡、过滤和吸附作用，具有空气净化功能。根据谢高地等（2015）的研究结果，估算绿地的气体调节和净化环境价值约为1.3万元/公顷，武汉市两示范区内的海绵城市建设项目每年可产生的净化空气价值为1113.5万元。

美学景观价值：除了直接的环境效益，草地、林、湿地等自然生态系统还具有一定的非物质价值，比如为人们提供观赏、休憩、运动场所的休闲娱乐功能，以及其他文化、艺术、科研教育等方面的价值。通过城市中自然要素与人工要素的协调配合，海绵城市建设相关基础设施将可以显著增强城市整体美感和自然性，营造良好的景观生态布局，为城市创造无形的社会收益。根据谢高地等（2015）的研究结果，经换算后得到绿地的美学景观价值约为7227.5元/平方，由此可得到武汉市海绵城市建设项目每年可产生的景观价值约为600.1万元。

其他潜在收益：此外，海绵城市的建设还将产生其他积极的效果。例如，武汉的城市湖泊在先蓄后排的内涝防治措施中发挥了重要的作用，海绵设施源头径流控制降低了入湖径流，减轻了湖泊的调蓄压力及相关费用；海绵城市通过减缓洪涝灾害，将可以降低相关的健康风险，如传染性疾病、慢性疾病、心理疾病的发病率；海绵城市建设中包括诸多公园、生态岸线的建设，良好的生态环境能够增加地区的生物多样性；海绵城市建设还可以带动其他相关行业的发展，如开发透水铺装的新材料、生物滞留设施的填料等，将可以带来创收、增加就业等。然而，以上效益由于情况的复杂性以及可获得数据的有限性，较难开展定量分析，因此未在本研究中进行测算。

3. 武汉海绵城市绿色基建项目成本效益分析

■ 海绵城市项目的投资回报率

基于以上成本效益测算，本报告以6%的社会折现率计算武汉市海绵城市示范区中绿色基础设施建设项目的总投入与总收益。由于未来气候变化的不确定性，项目的三重红利分析结果会随着武汉未来降雨水平的波动而变化。因此，研究结果给出了RCP4.5和RCP8.5情景下的结果区间，并以区间中值作为最

表 5 | 武汉气候韧性基建项目投资损益和敏感性分析结果

周期：30年，单位：亿元

项目	总成本	规避未来损失	经济效益	社会环境效益	净现值	效益成本比
社会折现率6%						
海绵城市	151.95	1.48（1.48~1.49）	310.91（310.91~310.92）	5.30（5.27~5.32）	165.75（165.73~165.78）	2.09（2.091~2.091）
敏感性分析（社会折现率10%）						
海绵城市	151.35	1.05（1.04~1.05）	310.24（310.24~310.24）	3.74（3.73~3.76）	163.68（163.66~163.70）	2.08（2.081~2.081）

具代表性的参考值。如表5，本项目总收益约为317.5亿元，相较于总成本151.9亿元，净现值可达165.6亿元，投资回报比为1:2.09，即每投入1元将产生约2.1元的收益。其中，项目的主要成本为固定资产投资支出，而收益主要来自房地产增值所带来的经济效益。值得注意的是，由于房地产增值效益主要受绿地面积影响，而与降雨量以及社会折现率¹⁵的相关性较弱，因此房地产增值估值没有以区间形式呈现，但由于其相对其他收益而言，经济效益巨大，导致经济效益估值区间缩小至可忽略不计。

虽然海绵城市初期工程建设的投入成本体量巨大，但是综合其产生的三重红利，开展此项工作可为城市发展带来较高的收益，并将产生显著的净收益。

■ 敏感性分析

通过对社会折现率采取敏感性分析发现，即使采取较高的社会折现率（10%），武汉海绵城市的投资净现值仍

然为正，效益成本比大于1，表明投资建设海绵城市对私有资金仍具有吸引力。特别是海绵城市一系列的城市配套设施将提升市区整体的环境和生活品质，使房地产增值。

3.2.3 深圳灰绿结合海堤

1. 深圳灰绿结合海堤项目介绍

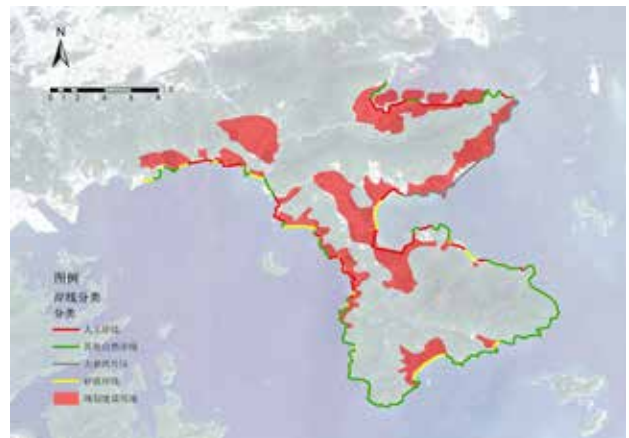
受限于已经划定的自然保护区范围和高山陡坡的地形，2020年大鹏新区城市建成区多分布于低海拔的滨海和山间小平原地区（图20）。而根据《深圳市海岸带综合保护与利用规划（2018—2035）》显示，未来大鹏还将继续向低海拔、风暴潮脆弱地区扩展城市发展边界¹⁶。随着未来气候变化的加剧，城市建成区域可遭受的气候风险也将加大。因此，加强大鹏新区灰绿结合海堤建设对保护民众生命财产安全及稳定社会经济有重大意义。

图 20 | 大鹏新区2020年（左）和2035年（右）建成区和不同类型岸线分布

2020



2035



来源：WRI 根据 2020 年 Landsat 8 卫星遥感数据、《深圳市海岸带综合保护与利用规划（2018—2035）》叠加 2018 年深圳市海岸线修测数据制图

大鹏新区海堤加固重建包括三期工程，其中包括2012年和2015年的深圳市东部海堤重建工程（一期、二期），将部分分散海堤的相应防洪（潮）标准提升至与规划相符的50年一遇（深圳市税务局，2010；深圳市人居环境委员会，2014）。但是，自2016年以来，大鹏新区遭受超强台风袭击的次數明显增加，尤其是2018年9月超强台风“山竹”（1983年以来影响深圳最严重的台风），“形成了极大风、极大雨、极大浪、极大潮等多层叠加”，造成原有海堤和河堤损毁、海水倒灌、园林树木损毁、道路边坡失稳滑坡、房屋倒塌和内涝等复合型城市灾害（深圳市气象局，2019；罗武章等，2019）。

为了修复和重建被台风“山竹”摧毁的海堤设施，大鹏新区在2019年形成了一套以灰色基础设施（即传统堤坝建设）加绿色基础设施（红树林修复等）为特色的三期生态海堤建设方案，并将重建堤防标准提升到了200年一遇（深圳市税务局，2020）。

本案例以大鹏新区近期两次海堤建设标准为分析对象，评估海堤建设标准从50年一遇提升到200年一遇、设计方案从灰色基础设施为主转为灰绿结合后，产生的社会、经济、环境等效益的变化，为中国其他沿海城市进行类似海堤基础设施重建和加固提供参考（具体情景参数请参见附录V）。

2. 评估方法及计算结果

本项目依托开源卫星遥感数据、大鹏新区公开的中长期规划，以及深圳市东部海堤重建工程（一期、二期和三期）的公开工程和设计资料，辅以文献研究、专家访谈以及实地调研等方法，对基准情景和气候韧性情景下大鹏半岛海堤工程的成本和效益进行了详细测算（项目成本效益的计算方法和数据来源请参见附录V）。

■ 大鹏新区灰绿结合海堤成本分析

在本项目中，深圳市灰绿结合海堤基础设施的成本主要包括固定资产投资和每年的运营维护费用。其中，固定资产投资费用的估算根据大鹏新区政府公开的多项海堤重建工程预决算资料整理而成，预计建设防潮标准达到50年一遇的灰色海堤工程基础设施投资约为28.9亿元，防潮标准达到200年一遇的灰绿结合海堤工程基础设施投资约为56.6亿元。研究估算显示，至2050年，大鹏新区气候韧性基建投资约为56.6亿元，运营维护费约为25.5亿元，成本总计约82.1亿元。

■ 大鹏新区灰绿结合海堤的三重红利分析

□ 规避未来损失

由第二章分析可知，气候变暖、海平面上升、

超强台风等风险因素叠加，将会导致深圳大鹏新区可能遭受更加严重的风暴潮袭击和波浪损失。因此，加强海岸线韧性建设，提高海堤建设标准至200年一遇，将规避大部分遭遇50年一遇以上极端风暴潮时海堤被冲毁的风险，减少越堤高浪给低海拔建成区带来的淹没损失，降低风暴潮期间及灾后修复中由于旅游中断所导致的经济损失。

规避基础设施损失¹⁷：主要包括两部分，即海堤冲毁重建成本和低海拔建成区的固定资产淹没损失。本报告根据2020年Landsat 8卫星遥感影像、数字高程模型（DEM）、OpenStreetMap等开源数据，并结合《大鹏新区保护与发展综合规划（2013—2020）》和《深圳市海岸带综合保护与利用规划（2018—2035）》等中长期规划，对大鹏新区2050年建设用地增长速度和分布、固定资产投资规模等指标进行了预测¹⁸。根据表2-5中对大鹏新区未来风暴潮潮高和频次的预测，并参考欧盟的全球洪水损失公式（European Commission Joint Research Centre, 2016）进行损失测算。本报告以堤坝挡水高度为基础，预测风暴高潮潮位的最低值、最高值和平均值，以建设用地海拔高度为基础，计算风暴潮可能带来的堤坝安全风险和建设用地上固定资产淹水损失。本报告使用影子价格和重置成本测算海堤建设标准提升的效益，结果显示，受风暴潮强度和波浪高度区间影响，大鹏新区灰绿结合海堤建设在2021—2050年间平均每年可有效避免淹没损失9.8~27.2亿元。

规避经济活动中断损失：大鹏沿海低洼地区经济活动将以旅游为主，本报告分析发现大鹏半岛的旅游旺季与台风高发期高度重合，经济活动中断带来的日损失是全年平均值的两倍。因此，提高海堤韧性建设可以减少旅游业受台风风暴潮事件的风雨影响，在减少海岸带滨海景观区的安全隐患的同时，缩短海洋灾害事件后的经济活动中断期，保障大鹏旅游业正常发展。本报告使用市场价值等方法进行测算发现，由于灰绿结合海堤缩短极端海洋灾害导致的经济活动中断时间，平均每年可避免经济损失3945万元。

□ 经济效益¹⁹

灰绿结合的气候韧性海堤通过增加基于自然的解决方案可以营造更高质量的滨海景观，吸引更多游客，增加空间的旅游休憩价值，提高当地旅游收入。新营造的红树林生态系统不仅会为海堤周边水生和底栖动物提供良好的生长环境，还

会为东半球国际候鸟提供越冬场、迁徙中转站和繁殖场所，能够带来良好生态景观，为大鹏新区未来旅游发展创造新的经济发展机会。本报告以近期大鹏游客抽样调查和“十三五”期间大鹏旅游产业发展趋势为基础，参考《陆地生态系统生产总值（GEP）核算技术指南1.0》（生态环境部环境规划院，2020），使用旅行费用法对于景观更加丰富的生态海堤所提供的额外旅游价值进行测算。结果显示，2021—2050年间，灰绿结合海堤平均每年新增的经济价值约为1.4亿元。

社会环境效益

以红树林为主的绿色基础设施将会带来额外的社会和环境收益，具体体现在固碳释氧、减少污染，以及增加生物多样性等方面。

固碳释氧：海岸线红树林恢复工程可增加碳汇收益。本报告根据国际上红树林恢复成本的荟萃研究（Bayraktarov et al., 2016），以东部海堤重建（三期）预算为依据，对于生态海堤项目下红树林的恢复面积进行了预估，并基于净生态系统生产力法（Net ecosystem productivity, NEP）（彭聪娇等，2016）和市场价值法（生态环境部环境规划院，2020）对新增红树林固定二氧化碳和释放氧气的价值量进行测算。结果显示，2021—2050年灰绿结合海堤平均每年可以为大鹏新区带来133万元的固碳价值和19万元的释氧价值。

净化污染：灰绿结合海堤多层生态堤坝设计能够吸收、过滤、阻隔和分解海堤周边公路等基础设施带来的多种水体和大气污染物，其中包括磷、铜、锰、锌、铅的化合物，以及氨氮、二氧化硫和氟化物等。本报告参考2021年2月发布的《深圳市生态系统生产总值核算技术规范》（DB 4403/T 141—2021）

（深圳市市场监督管理局，2021）提供的方法，以及（于晓玲 et al., 2009；赵晟 et al., 2007；李怡，2010）等学者对于深圳及附近海域红树林污染物净化能力的测度研究，对于生态堤坝对大气污染物和水体污染物的净化量和净化价值进行了测算。结果显示，2021—2050年灰绿结合海堤平均每年净化各种污染物节约的治理价值达到16万元。

增加生物多样性：灰绿结合海堤包含的红树林湿地生态系统是生物资源量最丰富的生态系统之一（何斌源等，2007），统能够提供多种生态服务功能，显著提升了生物多样性的保护能力。本报告参考《陆地生态系统生产总值（GEP）核算技术指南1.0》，使用Shannon-Weiner指数法测算红树林生态恢复面积的物种保育价值量，根据《红树林造林技术规程》（DB 33/T 920—2014）中的补植和验收规定（浙江省质量技术监督局，2014），估算显示2021—2050年，灰绿结合海堤平均每年将带来72万元的物种保育价值。

3. 深圳大鹏新区灰绿结合海堤的经济损益分析

损益分析结果

本报告以6%的社会折现率计算深圳大鹏气候灰绿结合海堤建设的总投入和总收益。因为气候风险的高度不确定性，不同研究对于未来大鹏海岸线可能面对的波浪高度有较大差异，因此测算出的可规避损失在一个较大区间波动。本报告采用预测潮位区间的平均值作为最具代表性的结果。如表6所示，灰绿结合的灰绿结合海堤在2021—2050年间可带来的效益成本比超过2，即每投入1元将带来超过2元的收益。研究显示，气候韧性海堤超过90%的收益分来自可避免的损失和经济收益。其中，红树林等新增绿色基础设施虽然占比较少，但这部分生态资产的长期增值可观。

表 6 | 深圳灰绿结合海堤项目投资损益和敏感性分析结果

周期：30年，单位：亿元						
项目	总成本	规避未来损失	经济效益	社会环境效益	净现值	效益成本比
社会折现率6%						
灰绿海堤	69.5	1279（81.7~252.4）	18.2	0.4	770（30.9~201.6）	2.1（1.4~3.9）
敏感性分析（社会折现率10%）						
灰绿海堤	65.7	679（38.6~134.1）	12.1	0.3	14.6（-14.7~80.8）	1.2（0.8~2.2）

■ 敏感性分析

本报告采用10%的社会折现率进行敏感性分析，结果表明，大鹏新区灰绿结合海堤项目的效益成本比在1.2左右，投资收益较为稳健。考虑到一般海堤的设计寿命高达50年，使用寿命可能更长，在全生命周期视角下，深圳灰绿结合海堤的收益会比目前的预测结果更加积极。

3.2.4 投资收益结果分析

本报告采用三重红利分析方法，发现上述三个案例项目都具有较高的效益成本比，即每投入1元，最高可获得20.3元的回报，最低能获得2.09元的回报，（见图21）。具体来看，宁夏节水灌溉项目和武汉海绵城市建设项目的效益主要来源于经济效益，而深圳灰绿结合海堤项目的效益主要来源于避免未来损失。调整社会折现率进行敏感性分析之后，各项目的效益成本比仍然较高，对于私营部门仍具备一定的投资吸引力，但本报告的分析也存在局限性。

首先，各案例间的收益差异与各项项目的特点有关，同时也反映当前的计算相对保守，而目前气候模型很难预测未来气候变化风险的上限，造成气候韧性设施建设标准远低于可应对极端气候事件的需求。就宁夏农业节水灌溉项目而言，受数据可获性和未来该地区发展不确定性的影响，在计算规避未来损失时仅考虑粮食作物，由于粮食作物经济价值较低，因此避免损失的效益本身被低估。从历史数据来看，《中国气象灾害年鉴（2009）》（中国气

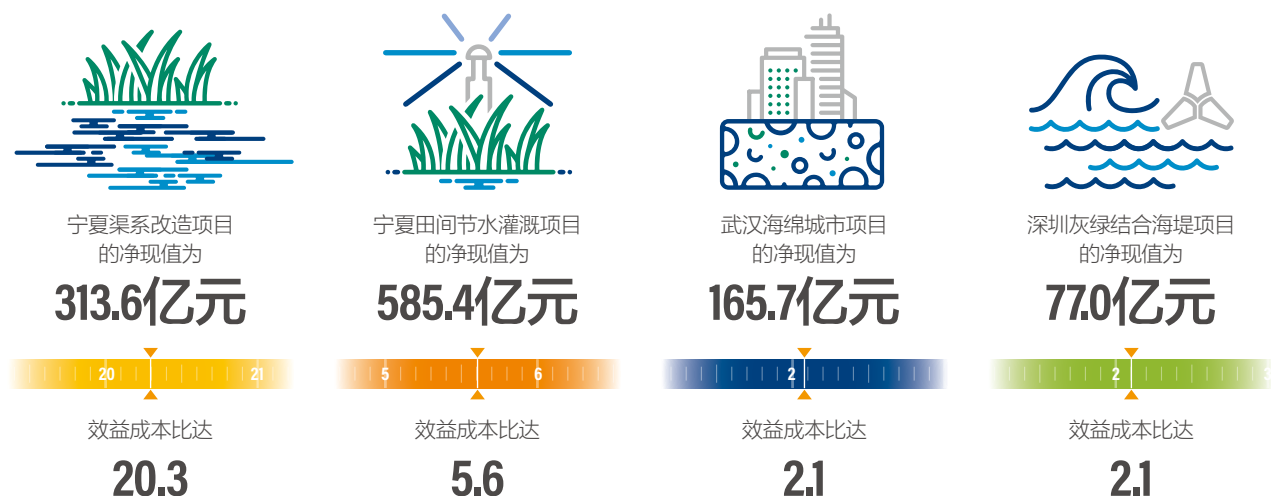
象局，2010）显示，2009年宁夏大部分地区干旱达到重旱和特旱等级，由此造成的农业经济损失达14亿元，为过去20年之最。如果将其换算成2020年的价值，2009年全区因干旱造成的农业经济损失高达18.5亿元，大大超出本报告计算的节水灌溉项目每年可避免的损失。

武汉海绵城市的案例也存在着类似问题。本报告中仅考虑了绿色基础设施所发挥的气候韧性作用，而事实上绿色基础设施只能规避掉部分损失，防洪抗涝还需要依赖海绵城市项目中的灰色基础设施的共同作用。此外，本研究中的对象为两个示范区，其规模相对较小，因此可以规避的损失规模有限。按照《关于推进海绵城市建设的指导意见》的规划，到2030年城市建成区80%的面积都将达到海绵城市的要求，届时海绵城市建设所规避的未来损失将大幅增长。值得说明的是，2021年7月发生的“7.20”特大暴雨事件给作为省级海绵城市建设试点城市的郑州市造成了高达532亿元的直接经济损失，主要是由于此次暴雨事件的高度极端性，超过了目前国内海绵城市建设标准所能应对的范畴，不代表海绵城市建设无法有效规避损失（Xi & Ding, 2021）。随着海绵城市建设标准的提升以及覆盖面积的扩大，其在规避未来损失方面将发挥更大的作用。

与宁夏节水灌溉和武汉海绵城市项目相比，深圳灰绿结合海堤近90%的效益来自避免沿海低洼地区基础设施淹水损失和极端情况下低标准海堤水毁重建损失。IPCC近年报告显示，科学研究对于全球气候变化趋势的预测较

图 21 | 典型气候韧性基建项目投资收益结果

典型气候韧性基建项目投资在未来30年里可获得的回报：



为准确，但是对于极端气候事件发生频次和强度的预测稍显保守。在充分考虑中长期气候风险不确定性加剧的情况下，灰绿结合海堤规避未来损失的收益和占比都有可能进一步增加，公益属性进一步加强，然而这部分收益却存在无法形成现金流回哺基础设施的问题。

另外，气候适应工作不能单纯依靠气候韧性基础设施的投入，还应该结合第一章介绍的其他管理性措施，从多角度、多层面入手，全面系统地适应气候变化可能带来的影响。例如，宁夏应着眼未来，加大农业结构调整力度，推动农业高质量发展的政策不断得到落实²⁰，大力开发节水抗旱的作物品种，提高经济作物种植和畜牧业的比例，采取轮耕和多样化种植，全面增加农业气候韧性，应对未来加剧的干旱风险。海绵城市建设方面，硬件设施建设固然重要，但还需要管理性措施的配合才能发挥更大的作用。2021年7月郑州的特大暴雨事件就暴露了灾害预警系统不够及时有效、民众对于灾害自救知识掌握不足等问题。因此，地方政府要加强机制建设，提高应急知识储备与管理，综合提高快速应灾和灾后重建的能力。

除了规避未来损失以外，气候韧性基础设施具有非常可观的经济效益，如果能找到合适的方法实现效益转化，势必将为投资者提供可观的回报。灰绿结合海堤成本效益评估显示，设施带来的优质海岸带生态景观虽然具有经济和社会环境效益，但是与宁夏和武汉项目相比，存在收益主体分散、筹资难等问题。换言之，政府承担了基础设施的绝大部分建设和维护成本，但如果不能拓宽融资渠道，很可能限制建设灰绿结合海堤等公益性基础设施的标准的提高，最终导致防护力度不够，导致政府、居民、商户三方利益的共同损失。

3.3 将气候韧性基础设施建设代表性案例推广到全国的重要意义

本报告选取的三个案例基本囊括中国各地区基础设施面临的最广泛、最频繁的气候风险。其涵盖的气候韧性基建项目均具备较好的投资回报，如果能在全国各地因地制宜地推广，可以有效降低气候风险造成的基础设施破坏损失，保障人民生命财产安全。

3.3.1 在干旱地区推广节水灌溉气候韧性基础设施

研究显示，中国未来升温态势明显，干旱风险将呈现增多增强趋势，未来华北、西北地区干旱呈现常态化，

东北、长江中下游及西南地区气象干旱呈现明显增加趋势（李阔，许吟隆，2019）。此外，不合理的人类活动（如地下水超采，河流上下游无序争水）将加剧干旱风险影响，而社会经济薄弱和生态环境脆弱地区受干旱灾害危害程度更大。因此，在这些地区大力推广节水灌溉等气候韧性基础设施意义重大。

目前，中国现存的15.1亿亩旱地主要分布在秦岭——淮河以北，北方16省份旱地面积达11.2亿亩，占全国旱地总面积的74%（甘肃省人民政府公报，2020）。和宁夏类似，北方旱地主要分布在干旱半干旱地区，极易受干旱灾害影响。同时，北方旱区是中国主要粮食产区，提供了全国58%的粮食，因此未来气候变化加剧将严重威胁中国的粮食安全（瞿剑，2021）。人均粮食产量超过国际公认的400千克粮食安全线的16个省份中，有10个位于北方地区，中国粮食供应基本呈现“北粮南运”的格局（林小昭，2020）。值得注意的是，这些地区基本和上述受到干旱灾害影响的地区重合。将粮食从东北三省、河南、河北、山东等主产区运往主销售区广东、福建、浙江等省份，实际上是“缺水地区给不缺水地区输送粮食”。如果计算这些粮食生产的“水足迹”，相当于每年北方向南方输送了500亿~600亿立方米的“虚拟水”，这一数据远高于南水北调工程东、中线设计的年调水量300多亿立方米（瞿剑，2021）。

同时，北方地区的耕地仅保有全国19%的水资源，且已有水资源得到很大程度的开发利用，大部分地区水资源利用率超过50%，某些地区高达70%~80%（甘肃省人民政府公报，2020）。水资源节流基本成为保障北方旱地粮食生产免受干旱影响的唯一出路。即使是在南方水资源较丰富的地区，如预计未来干旱会加剧的长江中下游地区和西南地区，当地红壤旱地具有较低的有效含水量，且土壤覆盖浅，遇季节性干旱，耕地含水量将会出现骤降。由于缺少蓄水设施，且作物种植全靠降水，这些地区的干旱农田在雨水充足时便可以丰收，干旱时便出现严重减产。如果采取有效适应措施加强农田水利基础设施建设，提高旱耕地灌溉面积，可进一步提高土壤肥力，极大地发挥农业增产潜力。

因此，在受气候变化影响呈现干旱加剧态势的北方旱作地区推广实施农业节水灌溉设施，具有保障全国粮食安全的重要战略意义，在南方季节性干旱地区推广农业节水灌溉设施，同样有利于稳定当地农作物产量。与此同时，中国北方干旱半干旱地区和南方丘陵山区也是社会经济相对落后地区和生态环境脆弱地区，在这些地区发展农业节水灌溉设施有助于提高当地农民收入，防止返贫，节约的农业用水也可以用作生态用水，起到恢复当地生态环境的作用。

为发展农业节水灌溉，1998年中国启动实施全国大中型灌区续建配套与节水改造，截至2019年，中国节水灌溉工程面积达5.14亿亩，占总灌溉面积的46.3%（刘诗平，2019）。然而，一些粮食主产区的节水灌溉工程建设仍有较大发展空间。以河南省为例，全省亩均水资源量不足全国平均水平的1/4，存在4200多万亩旱地（农业农村部，2020）。在水资源已成为制约农业发展重要“瓶颈”的背景下，河南省有效灌溉面积为8000多万亩，占耕地面积的66%，而节水灌溉面积为2700多万亩，占有有效灌溉面积的比例不到35%，占耕地面积的比例不到25%（农业农村部，2020），需要继续推进节水灌溉设施建设，提高节水灌溉面积比例。

由此可见，在全国干旱地区推广宁夏农业节水灌溉设施项目的理念和技术，包括输水系统中的渠道防渗，田间管灌、喷灌和微灌技术，水权转换制度等，前景广阔但任重道远。特别值得一提的是，对于经济欠发达的易旱地区而言，尽管建设节水灌溉设施的投资回报率很高，但是还

是存在一次性投资大、对农技人员和动力资源需求高的困难。为解决节水设施的融资问题，当地政府可以向宁夏学习，通过水权转换机制调动当地提高农业灌溉水资源利用效率的积极性，通过水资源转移使用，实现水资源分配的经济优化，从而创造更大的经济增加值，促进当地GDP增长。

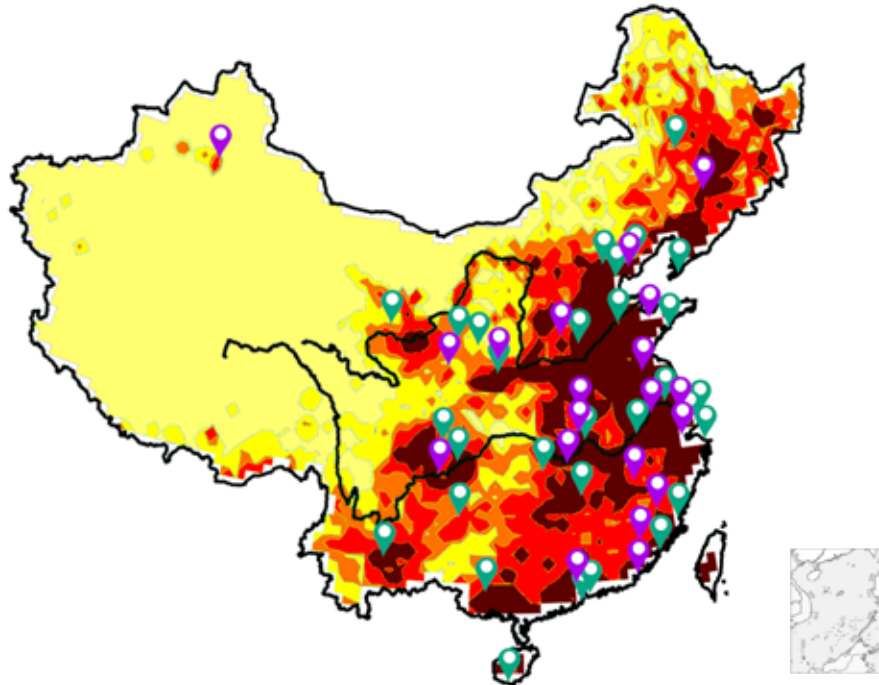
3.3.2 长江经济带及东南沿海地区推广海绵城市建设

受全球气候变化的影响，未来预计中国极端降水事件将整体增加，但区域差异明显，南方加重而北方缓解，因此城市排水压力呈现南部高而北部低的情况（陆咏晴，2018），并且近年来长江中下游地区的极端降水指数呈上升趋势，其中降水强度上升趋势最为明显。未来长江流域的极端降水情况仍将持续上升（潘欣等，2017），因此强降雨所带来的城市内涝风险也将显著上升。如图22所示，未来至本世纪中叶，中国暴雨洪涝灾害风险，即中

图 22 | 暴雨洪涝灾害风险及关键城市分布图

21世纪中期洪涝灾害风险预估（RCP4.5）

■ V ■ IV ■ III ■ II ■ I ■ 0
 ● 2015—2016年海绵城市建设试点城市 ● 2021年海绵城市建设示范城市



来源：WRI 制图；暴雨洪涝灾害风险分布底图来自《未来中国地区的暴雨洪涝灾害风险预估》（李柔珂，2018），选取 21 世纪中期（2046—2065 年）中国 RCP4.5 排放情景下 10 年重现期的分析结果



高风险区（IV级）以及高风险区（V级）²¹，主要集中在中东部地区及沿海地区，长江、黄河流域的中下游地区均处在高风险区内。

如第二章所提到的，暴雨洪涝事件将对城市生命线基础设施、交通、农业等各方面产生不利影响，造成极大的损失。2010年以来，中国于2010年、2013年和2016年由于洪涝灾害造成的直接经济损失均达到了3000亿元以上（水利部，2019），而未来持续增强的气候风险将会进一步加剧中国水安全、粮食安全、生态安全等问题。

目前，中国正在积极推动气候适应型城市 and 海绵城市试点工作，以期提升城市应对气候变化与灾害事件的韧性。2015—2016年期间全国已有30个城市成为国家级海绵城市建设试点城市，开展了5~6年的深度水治理工作。同时，各个省份也在同步推动省级海绵城市建设试点，目前国内已有上百个城市开展了相关建设工作。2021年，国家发布了《关于开展系统化全域推进海绵城市建设示范工作的通知》，从省级试点城市中进一步选取了20个示范城市全面推进海绵城市建设工作²²，再次表明国家对海绵城市建设的重视程度。

如图22展示，中国国家级海绵城市建设试点城市与示范城市分布较为均匀，除内蒙古、西藏外，其他各省份

（不含港澳台地区）均有设立。以上城市的选取主要考虑了中国东、中、西部社会经济发展水平以及南北方气候的差异，尽可能涵盖了大、中、小不同规模的城市，同时还可以发现，以上城市基本均处于暴雨洪涝灾害中高风险、高风险地区。

未来，地处中高风险、高风险地区城市均应高度重视海绵城市建设工作。尤其是东部沿海地区以及沿江地区城市，这些城市通常为人口、经济密集型城市，其经济发展水平较好，基础设施建设水平较高，一旦受到极端气候事件的影响，其可能遭受的潜在损失较其他经济落后地区也更大。因此，正如2021年3月实施的《中华人民共和国长江保护法》第六十八条规定，长江流域县级以上地方人民政府均应加快建设海绵城市。其他地区也应尽早开展气候适应型城市建设，开启城市海绵化改造，增加绿色基础设施，充分发挥生态系统的韧性功能，从而规避未来损失，并创造正向的经济、社会与环境效益。

而对于经济基础薄弱、还处在发展建设阶段的城市，应采取武汉市四新示范区的模式，在新城建设的过程中就同步融入海绵城市建设等气候韧性基础设施的理念，充分认识城市内涝对城市发展的不利影响，提出具有前瞻性和针对性的规划方案，从而帮助城市从容应对未来的气候变化风险，缓解城市的排水压力。

3.3.3 在沿海地区推广灰绿结合海堤建设

基于自身经济社会基础和未来发展定位，大鹏新区选择通过建设灰绿结合的生态海堤并提高堤防标准，以加强气候韧性，抵御加剧的气候风险。案例折射出城市对于绿色基础设施、基于自然的解决方案（NbS）等新兴气候韧性建设措施的接受度日益提高，同时也反映了沿海地区在建设抵御风暴潮、台风等海洋灾害基础设施方面的滞后。

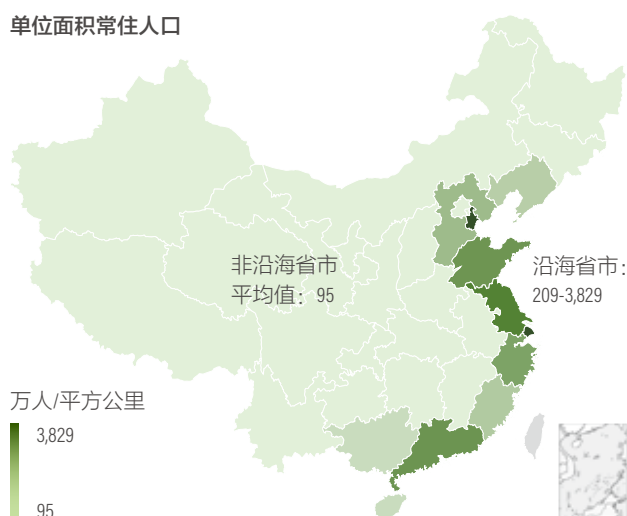
本报告采用IPCC危险度、承险体暴露度与脆弱性的三维气候风险管理框架（IPCC，2014）分析中国沿海地区的海洋灾害风险，发现：

- 海洋灾害的危险度在不断增高：近40年来，受到全球气候变暖的影响，中国沿海海平面加速上升，以风暴潮、海浪等为主的海洋灾害发生频次和强度明显提高（自然资源部，2020）。
- 沿海地区的气候暴露度在逐年增加：中国在西太平洋沿岸国家中拥有最长的海岸线，沿海11个省份²³凭借13%的国土面积（国家发展改革委、水利部，2017）聚集了全国43%的人口，创造了53%的国民生产总值，吸引了45%的全社会固定资产投资，是全国人口最稠密、经济最活跃、设施最密集的地区（图23）。分省统计数据显示，中国沿海地区的人口密度是非沿海地区的2.2~40.3倍；每平方千米固定资产投资规模为1.1~27.3倍，每平方千米GDP产出为1.6~108.1倍。近年来，中国沿海地区每年的风暴潮直接经济损失都在百亿元左右（英晓明、赵明利，2020），另据估算，在天文大潮与风暴潮耦合叠加的极端情况下，全国2050年海洋经济的淹没损失可能超过3.5万亿元，占海洋生产总值的9.4%（张平等，2017）。
- 沿海地区的脆弱性在持续上升：沿海地区是中国城镇化开展最早、进程最快的区域。高强度的人类活动不仅带来大量的温室气体和污染物排放，影响局地气候，还通过海岸人工化、沿岸挖沙等改变下垫面的行为，降低了海岸带自然生态系统的防潮洪能力，导致该地区对于海洋灾害和极端性天气事件的抵御能力不断下降（冯爱青等，2016；吴涛等，2007；罗鑫玥、陈明星，2019）。

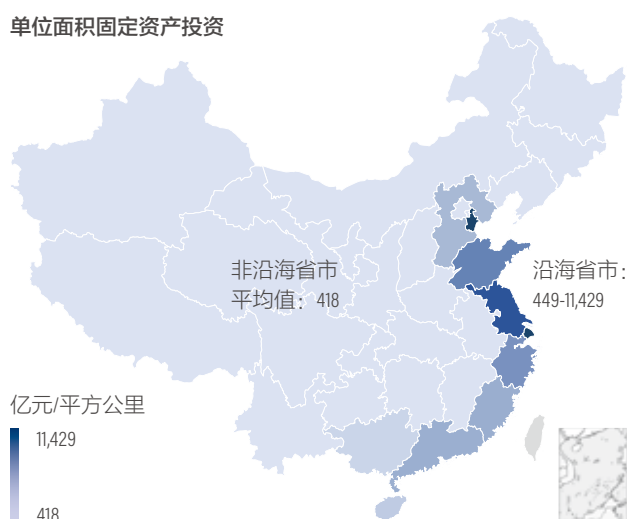
海堤建设维护标准与沿海地区防洪防潮需求存在较大差距的问题已经受到国家和地方的重视。截至2015年底，中国建成海堤1.45万千米，尚有约4000千米具有防潮任务的海岸线缺少海堤保护。同时，建成海堤也存在建设标准偏低、设施维护不完善等问题，总计达标海堤长度约6182千米，除了部分重要城市重点堤段防御标准达到50~100年一遇以上，其余地区防潮标准仍不足20年一

图 23 | 中国沿海省份每平方千米人口、GDP产值和全社会固定资产投资额

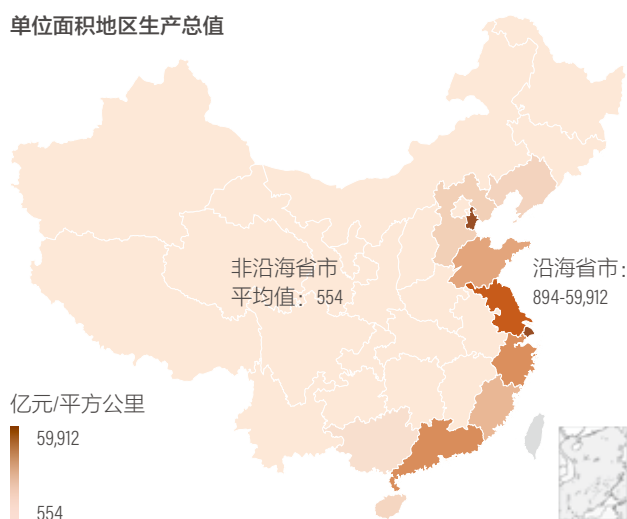
单位面积常住人口



单位面积固定资产投资



单位面积地区生产总值



注：2019年国内生产总值和常住人口分省统计，2017年全社会固定资产投资分省统计
数据来源：国家统计局

遇（国家发展改革委、水利部，2017）。2017年7月，国家发展改革委和水利部联合编制发布了《全国海堤建设方案》，提出用10年左右时间加强海堤建设，“使受台风风暴潮威胁严重的重要城市、重要经济开发区的防潮安全得到基本保障”的总体目标。

此次以大鹏新区灰绿结合海堤案例折射出城市对于绿色基础设施、基于自然的解决方案（NbS）等新兴气候韧性建设措施的接受度日益提高，但也侧面反映了沿海地区在建设抵御风暴潮、台风等海洋灾害基础设施方面的滞后。如果可以尽早加强和提升海堤等抵御海洋气候风险的基础设施的气候韧性，那么高风险地区的固定资产淹水损失和经济活动中断损失就可能被降低。海堤防护能力的缺口不仅随着气候风险的不确定性、极端灾害发生频次和强度增加而扩大，也随着当地经济社会发展和人口增加而拉大。及时的气候韧性海堤等基础设施建设是保障沿海地区安全地立身于海、积极地向海发展的根本前提。另外，相比传统海堤建设，大鹏的经验表明，灰绿结合的气候韧性海堤会促进绿色经济，创造新的发展机会，并可能通过经济转型为当地带来更多的多元化和高质量的就业岗位。





第四章

丰翼纳新： 加强气候韧性 基础设施融资创新

气候风险给经济社会带来的潜在威胁愈发显著。为了更好地适应气候变化，避免或减少气候变化风险导致的经济社会损失，政府机构、国际组织和社会各界人士已提高对气候韧性基础设施项目的关注度，开展了以金融手段助力气候韧性基建的相关研究与实践。本章将围绕如何助力中国气候韧性基础设施投融资这一问题，回顾国内外在气候韧性基础设施资金供需和机制创新方面的情况，分析案例地区气候韧性基础设施融资的可行方案，并讨论推动气候韧性基础设施投融资的路径与策略。

4.1 气候韧性基础设施资金供需不匹配

现有数据表明，国际上对于全球气候韧性基础设施投资缺口测算的数据较为翔实，均体现了资金缺口较大、项目建设供需不匹配的情况。相对而言，中国相关的研究分析资料较为匮乏，但同样反映出该领域资金较为紧缺的现状。

4.1.1 全球气候韧性基础设施资金供应不足

气候韧性基建资金需求跟随整体基建规模变动。随着发展中国家经济发展和城镇化水平不断提高，基建需求也进一步增加。学术机构和国际组织对全球每

年基础设施建设所需资金进行了测算，并在此基础上从可持续发展的角度探讨了基础设施建设的资金需求。牛津经济研究院 (Oxford Economic) 和全球基础设施中心 (GIH) 研究数据显示，2016—2040年，全球基础设施投资需求预计将累计达到94万亿美元 (折合611万亿元)，平均每年3.7万亿美元 (折合24.1万亿元)；在此基础上，为了保障联合国可持续发展目标下的供水和供电需求，2040年前的投资总需求将进一步增加3.5万亿美元 (折合22.8万亿元)，将每年的资金需求提高至3.9万亿美元 (折合25.4万亿元) (Oxford Economic & Global Infrastructure Hub, 2017)。

考虑基础设施建设的韧性因素，由哥伦比亚、埃塞俄比亚、印度尼西亚、韩国、挪威、瑞典和英国七国倡导成立的独立机构全球气候和经济委员会 (The Global Commission on the Economy and Climate) 测算，全球在2016—2030年内需要约93万亿美元 (折合604.5万亿元) 建设低碳且具有气候韧性的基础设施，平均每年需要投入6.2万亿美元 (折合40.3万亿元) (Amar Bhattacharya et al., 2015)。超过40家金融、研究等各类机构发起成立的城市气候融资领导联盟 (CCFLA) 有关研究发现，城市占据全球基础设施建设超过70%的需求，在基准 (BAU) 情景下的资金需求每年为4.1万亿~4.3万亿美元 (折合26.7万亿~28.0万亿元)；为了保证城市基础设施的

气候韧性，还需要9%~27%的额外投资，即0.4万亿~1.1万亿美元（折合2.6万亿~7.2万亿元）（CCFLA，2015）。

同时，世界各地对适应气候变化和气候韧性基础设施的投资规模仍然远远低于资金需求。从全球基础设施投资来看，GIH预计到2040年，全球基础设施投资缺口将达到15万亿美元（折合97.5万亿元），对应每年平均缺口约为6000亿美元（折合39000万亿元）。其中，美国、中国、巴西将是基础设施资金缺口的主要来源，预计将在2040年前分别达到3.8万亿美元（折合24.7万亿元）、1.9万亿美元（折合12.4万亿元）和1.2万亿美元（折合7.8万亿元）（图24）（Infrastructure Outlook，2021）。在巨大的资金缺口下，基础设施建设面对的问题将不仅是如何引导更多资金投入，而同时需要考虑的是现有或新建基础设施如何能够更好地抵御潜在的气候影响，鼓励资金流向能够提高基础设施韧性的项目。

气候韧性基础设施的资金缺口巨大，不仅体现在基础设施建设资金的缺口，更体现在适应气候变化资金的匮乏。气候政策倡议组织（CPI）数据显示，2017—2018年度，全球适应气候变化资金增长至年均约300亿美元（折合1950亿元），仅占全球气候资金的5%，绝大多数气候资金仍流向减缓气候变化领域（Climate Policy Initiative，2020）。相较于UNEP所估算的1400亿~3000亿美元（折合9100亿~19500亿元）未来十年年均适应气候变化资金需求，适应气候变化资金的供给仍然十分有限。虽然已有九家多边开发银行（MDBs）宣誓在2025年前为中低收入国家资助500亿美元（折合3250亿元），并将其中投向适应气候变化的资金提高到180亿美元（折合117亿元），但适应气候变化仍然面临超过现有资金供给额6倍的缺口（World Bank，2021）。

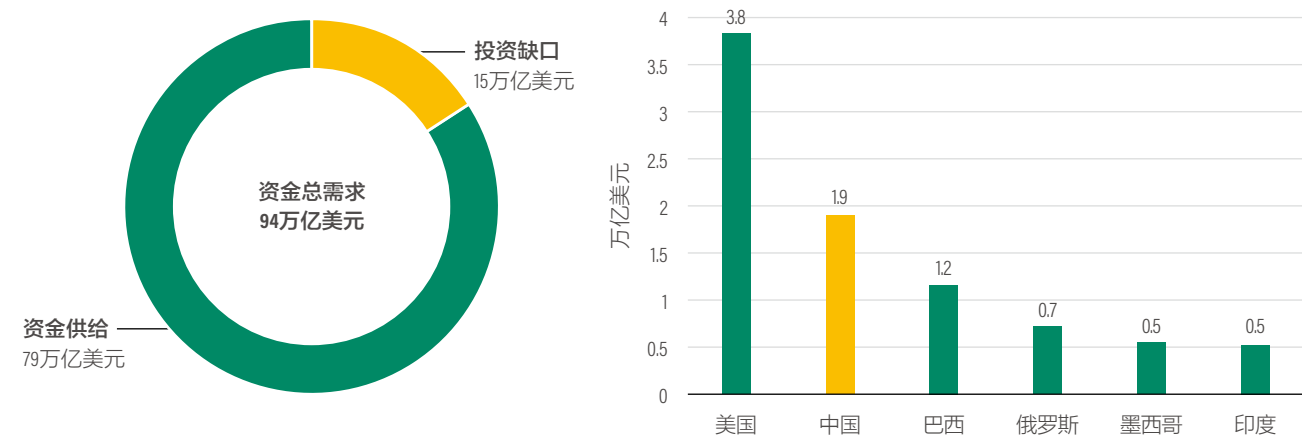
总体来看，全球基础设施投资未来每年平均资金缺口约为6000亿美元（折合39000亿元），适应气候变化投资每年资金缺口约在1000亿美元（折合6500亿元）以上。作为两者的重要结合，气候韧性基础设施不仅面对基础设施建设的资金短缺，同样还面对如何将资金引入气候韧性领域的难题，是现存对于开展气候韧性基础设施投融资的重大挑战。

4.1.2 国内气候韧性基础设施投资面临较大资金缺口

中国对于气候韧性基建相关话题的研究较为有限，在2015年向联合国递交国家自主贡献文件后，社会各界才普遍提高了对于建设气候韧性基础设施的关注。然而，更多的关注集中于气候韧性项目的规划和实施方面，较少涉及投融资领域。国内少量专家学者对于中国气候资金需求中的适应气候变化部分进行了测算，并由此形成了对气候韧性基建资金需求的大致描述。

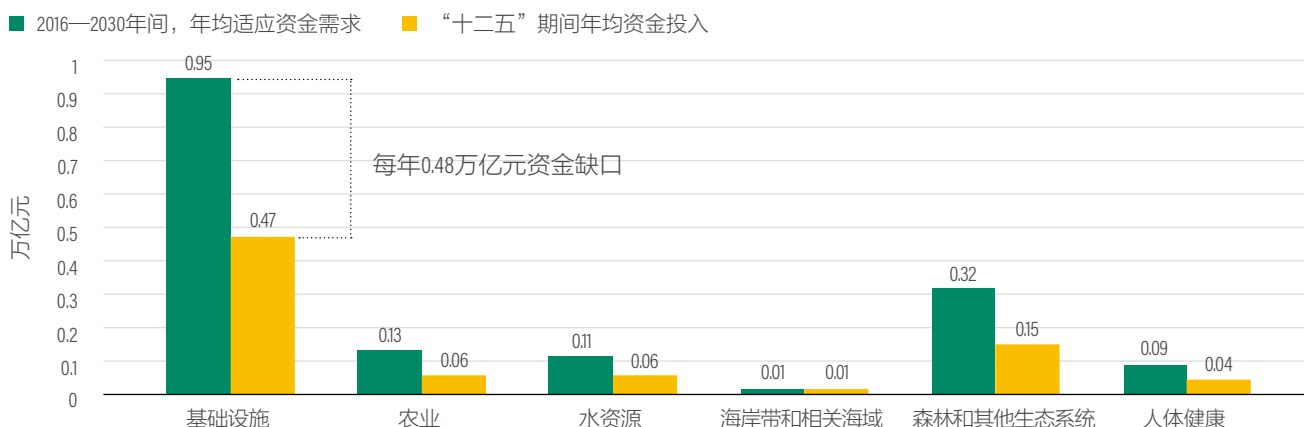
2019年，国家应对气候变化战略研究和国际合作中心联合清华大学现代管理研究中心的专家学者开展了中国实施2030年应对气候变化国家自主贡献的资金需求研究。该研究对于适应气候变化资金需求的测算采取自下而上的方式，选取了基础设施、农业、水资源、海岸带和相关海域、森林和其他生态系统、人体健康这六大重点领域，根据各行业固定资产投资数据，分别结合专家判断和相关文献分析适应气候变化投资占相关总行业投资比重，并根据气候风险所预测的资金需求增长速率测算得出各领域截至2030年前的适应气候变化资金需求。研究结果显示，基础设施投资的适应气候变化资金占比约为5%，对

图 24 | 2016—2040年全球及主要国家基础设施建设资金缺口



注：资金供给的预测假设为各国继续按照目前的趋势进行投资；投资需求在考虑各国差异性的基础上以各国与最优表现所匹配的投资需求计量。
数据来源：Global Infrastructure Hub

图 25 | 中国适应气候变化各领域资金供需情况



数据来源：柴麒麟、傅莎等，2019

应2016—2030年资金需求约为14.2万亿元，主要来自交通运输、信息、水利、气象、电力、热力等领域加强风险管理、完善灾害应急、系统和科学规划城市生命线系统等工作（柴麒麟等，2019）。

测算适应气候变化资金缺口时，该报告采用了相同的方法学和口径对历史资金投入状况进行了回溯。估算得出，“十二五”期间，基础设施领域新增适应气候变化资金投入约2.35万亿元，平均每年0.48万亿元，与上述测算的2016—2030年年均约0.95万亿元的资金需求相比，中国仍可能在基础设施气候韧性建设方面每年面临0.48万亿元的资金缺口（见图25）。从该研究结果中可以得出结论，为提高中国基础设施的气候适应能力，各方专家和学者普遍认同需要约为5%的额外资金投入，这一需求将会在未来五年内带来年均近5000亿元的资金缺口，亟须通过大量的资金投入和有效的融资手段缓解气候韧性基础设施项目遇到的资金难题。

4.2 探索气候韧性基础设施融资机制

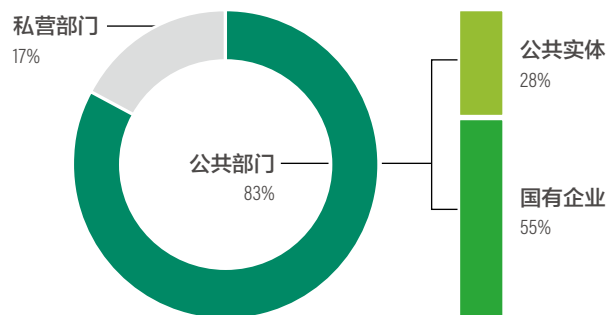
气候韧性基础设施融资在全球范围内均遇到一定困难。气候韧性基础设施公益性强，具有显著的正外部性，而项目投融资通常以项目本身的经济回报为基础，二者矛盾导致气候韧性基础设施融资在国际和国内均呈现资金不足的局面。当前，气候韧性基建项目资金供给主要由公共部门提供，私营部门参与不足，各类金融工具创新亦不足。由于仅靠公共资金无法满足气候变化不断加剧的背景下越来越庞大的气候韧性基建融资需求，因此需要探索可持续的融资机制，大量撬动社会资金，吸引社会广泛参与。

撬动社会资金一方面需要规划、识别并建设能够提供足够经济回报的项目，另一方面也需要探索合适的融资工具与融资机制，拓宽社会资金参与的渠道。当前世界上已开展对适用于气候韧性基础设施的创新融资机制的研究与讨论，部分机制与工具已有实践经验，对中国推动解决相关气候韧性项目建设中融资困难的问题具有重要借鉴意义。

4.2.1 国内外现有融资渠道

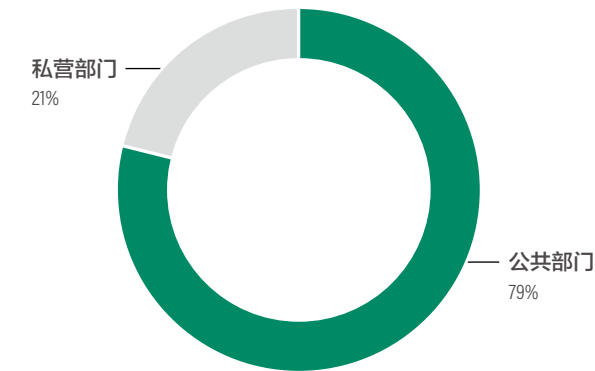
公共资金是气候韧性基础设施融资的最主要来源。当前世界上对气候韧性基础设施融资规模的直接统计较少，但基础设施建设资金来源与适应气候变化资金来源可以作为参照。如图26所示，2017年发展中国家基础设施建设资金有55%来自国有企业，28%来自政府部门等公共实体，仅17%来自私营部门；如图27所示，2017—2018年全球来自公共部门的适应气候变化资金占比高达79%，仅21%来自私营部门。气候韧性基础设施目前撬动社会资本的能力有限，亟须拓宽融资渠道。

图 26 | 2017年发展中国家基础设施建设资金来源占比



数据来源：世界银行，2020

图 27 | 2017—2018年适应气候变化资金来源占比



数据来源：CPI，2020

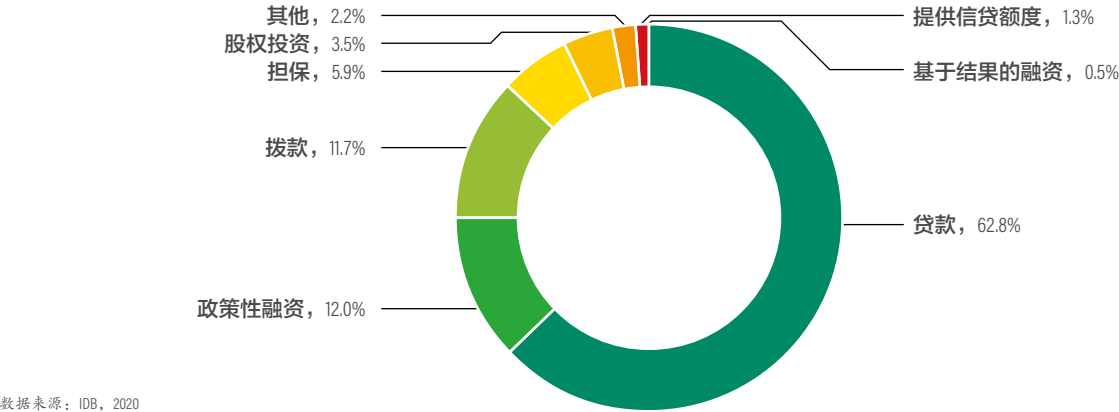
从全球视角来看，基础设施作为回报比较稳定的资产类型，正受到全球投资人的密切关注。气候韧性基础设施投资者的偏好具有相似性，希望增加对能够产生长期稳定收益的资产的投资，在低利率的环境下提高投资收益率，同时希望使投资资产信息透明、投资组合多元化，加强风险规避能力，并寻求应对通胀的更好方法。基础设施具有周期长、回报稳定等特性，与投资者需求和偏好高度匹配，因此国际上气候韧性基础设施融资渠道主要有政府资助、开发性金融机构投资、养老金与社保基金投资等公共资金支持，以及保险公司投资与公私合营（PPP）项目建设等撬动社会资本的机制。国内气候韧性基础设施融资渠道除通过PPP引入社会资本外，仍主要依靠政府拨款、本地银行与多边开发银行贷款以及国企投资等公共资本。具体内容如下：

1. 政府支出。政府财政支出是气候韧性基建的最重要资金来源之一。由于气候韧性基础设施的公共属性

和区域性特征，各国通过建立基金、设立项目计划、划拨专项资金等方式，为相关项目提供直接拨款、财政补助、低息贷款、税务减免等各式资助。国内政府财政支出的形式主要有转移支付、发行专项债和股权投资。财政部和各省份财政部门设立基础设施建设专项资金，通过转移支付方式为基础设施建设提供支持；各地地方政府也通过发行专项债为项目筹措所需资金。例如，深圳市发展改革委员会与财政局等部门共同设立深圳市基础设施投资基金，整体规模达2000亿元，通过股权投资方式推进基础设施建设市场化运作，撬动更多社会资本参与基础设施建设、增强气候韧性。国外也通常有国家层面设立的基础设施投资与建设计划，如美国联邦紧急措施署（FEMA）设立的“建设韧性基础设施和社区（BRIC）”计划和美国环保署（EPA）与州政府设立的“净水州循环基金（CWSRF）项目”，分别通过拨款与低息贷款方式支持气候韧性基建；欧盟委员会成立“恢复和韧性基金（RRF）”，通过拨款与贷款方式提供支持；德国则在国家层面，由德国联邦财政部批准建立“德国恢复和韧性计划（GRRP）”，以补助、税务减免等方式促进基础设施建设，增强气候韧性。

2. 开发性金融机构资金支持。开发性金融机构在全球应对气候变化工作中扮演着重要的角色，也是适应气候变化资金的主要来源，主要通过提供贷款为项目融资。由于开发性金融机构的开发性属性，其资助主体主要是公共部门，2019年占比达到92%。2019年，非洲开发银行（AfDB）、亚洲开发银行（ADB）、欧洲复兴开发银行（EBRD）、欧洲投资银行（EIB）、美洲开发银行（IDB）、伊斯兰开发银行（IsDB）和世界银行集团（WBG）等全球7家多边开发银行提供的适应气候变化资金总额为1494亿美元（折合9711亿美元），资金使用方式如图28所示：

图 28 | 2017年7家多边开发银行适应气候变化资金使用方式



数据来源：IDB，2020

由图28可见,开发性金融机构绝大多数资金以传统方式提供,其中近三分之二的资金通过贷款向项目方提供;另外,拨款、政策性融资各占12%,担保和股权投资共占10%。特别地,共6800万美元(折合4.4亿元)的资金以创新的和基于结果的融资²⁴方式提供信贷额度,虽然目前占比较小,但为未来更多创新融资工具产生奠定了良好基础。

3. 传统融资工具应用。目前债券、基金与保险均在气候韧性基础设施中有所应用。债券凭借着其直接的融资方式、灵活的期限设置、较大规模的融资额和适宜的融资成本,成为气候韧性基建项目选择的典型融资工具之一;受益于国内外细分和创新债券类型的发展,绿色债券、气候债券和具有创新意义的环境影响力债券等都可作为气候韧性基础设施项目的融资工具。2016年9月,华盛顿特区水务和污水处理局(DC Water)发行了环境影响力债券(EIB),用于资助基于自然的雨水基础设施,采用“基于结果付费”的方式为环境项目提供前期资金。

基金是为气候韧性基础设施提供资金支持的另一种重要融资工具。各国、各地区政府及国际组织等正积极筹建基础设施基金、绿色基金与发展基金,其中气候投资基金(CIF)、气候适应和技术转移基金(CRAFT)是两项具有标志意义的基金。CIF是全球唯一专门以多边开发银行作为执行机构的多边气候基金,启动了耗资12亿美元(折合78亿元)的“气候韧性试点项目”(PPCR),支持发展中国家和地区制定气候韧性战略发展规划,并协调多边开发银行的优惠贷款和赠款。CRAFT是全球首家致力于促进气候韧性和适应气候变化的私营部门投资基金,由全球环境基金(GEF)、北欧发展基金(NDA)、欧洲投资银行(EIB)提供资金支持,基金所投向的公司均是已经研发并可提供气候韧性技术和解决方案的公司,且有一定的市场需求和收益保障。

保险是一种重要的风险融资工具,可作为一种风险转移手段,将气候风险转移给更有能力管理和持有这些风险的代理商,包括(再)保险公司、风险管理企业、公共代理商和资本市场,也可以通过对气候风险更高的基础设施收取更高的保费,倒逼相应基础设施增强气候韧性建设。保险可在事前对基础设施气候风险定价,在灾难发生的情况下,作为高效且低成本的融资工具和问题解决方案。对于由私营部门出资的气候韧性基础设施,保险常常被用于在建设或运营期间减少项目因潜在风险所承受的损失,以提高私人资本的风险承担能力,典型产品包括巨灾保险、农业保险等。但在大多数的发展中国家,基础设施建设项目中还很少用到用于规避灾难风险的保险产品。

4. 其他融资工具应用。除传统融资工具外,当前在气候韧性基础设施领域也有其他渠道提供资金支持。由于公共部门面对的气候风险逐渐增高,建设气候韧性基础设施

的急迫性和资金需求与日俱增,但却往往面临公共资金短缺的挑战。在此情况下,PPP可被视为适用于此类项目的一类融资机制,特别是这些合作模式涉及分担技术创新成本或提供可能对社会资本有吸引力的现金流时。日本、印度、肯尼亚等地已探索以PPP模式开展气候韧性基建,并在合同设计中充分考虑了公共资金和社会资本对于风险承担的分配。例如,在日本案例中,合同就明确规定,因地震、暴雨等不可抗力产生的项目损失将由政府部门承担。

一些国际流行的生态环境定价机制也可为气候韧性基建提供资金支持,如碳税和碳市场。碳市场配额拍卖收益往往是气候韧性基建项目一个资金来源,在欧盟的配额拍卖收益中,至少50%应被用于资助应对气候变化相关项目。西班牙便曾利用配额拍卖收益支持交通类基础设施的气候韧性建设。加拿大艾伯塔省法律规定,征收碳税的收入可用于“减少温室气体排放或支持艾伯塔省适应气候变化的能力的相关举措”。此外,气候韧性项目,尤其是基于自然的解决方案也可以产生碳汇,可在碳市场上出售以获得经济收益。

4.2.2 适用于气候韧性基础设施的创新融资机制

当前已有多项创新融资机制被提出,以促进气候韧性基础设施融资,其中比较典型的包括直接促进韧性建设的韧性债券、韧性影响力债券与韧性服务公司等工具或机制,也有保险连接贷款等有助于扩大韧性投资的模式,以及本地基础设施销售附加税等扩大收入来源并用于专项支出的政府融资手段。具体内容如下:

1. 基于事件的保险(Event-based Insurance)。

基于事件的保险是以快速理赔为目的的保险,它对事件进行保险而不是对建筑物等特定资产进行保险。与传统保险不同,被保险方无须证明所蒙受损失的价值即可立即获得赔付。基于事件的保险的优势是赔付的即时性和灵活性,可以在极端事件发生后立即为被保险方提供资金,使其能在最需要的时点进行支出。在国内,这一工具也已有应用。自2015年起,广东省不断推进巨灾保险,以触发巨灾的参数如连续降雨量、台风等级等作为支付赔偿的依据。目前,该保险已覆盖广东全省(不含深圳)18个地市,累计实现保费收入约8亿元,完成赔款超过10亿元(中国保险网,2021a)。2018年12月,瑞士再保险公司与中航安盟财产保险公司共同为四川省阿坝藏族羌族自治州茂县政府设计了国内首例县级基于事件的巨灾保险,瑞士再保险公司设置了便于快速理赔的指数化触发机制,不需要复杂的事后定损。2019年8月20日,茂县发生泥石流、山洪、山体坍塌等自然灾害,灾情严重。2019年8月26日,茂县政府收到首笔50万元快速理赔款,并立即用于灾后救助和生产生活恢复(应雯雯,2020)。

2. 韧性债券 (Resilience Bond)。韧性债券是一种新型风险相关融资工具，基于巨灾债券的现有模型并进行拓展，同时也考虑了韧性措施的影响，起到风险转移的作用。巨灾债券出现于20世纪90年代。1992年5级飓风安德鲁重创美国佛罗里达州，1994年洛杉矶发生6.7级北岭地震，保险公司和再保险公司对冲集中风险的资本需求增加，1994年，首支巨灾债券由汉诺威再保险股份有限公司作为主要发起人发行，成为将巨灾发生后巨额赔款支出的风险转移给债券投资者的新工具，同时也使债券投资者获得与巨灾相关的投资收益。巨灾债券的特征是有条件支付，在预先设置的灾害强度或损失赔偿数额达到后，就将减少本金及债息偿还或完全不偿还。韧性债券在巨灾债券的基础上针对韧性项目所具有的自然灾害抵御能力进行额外设计，测算有无韧性项目的两种情况下发生灾难时预期损失的差异，这种差异构成了可用于为项目本身提供资金的“韧性返利”(resilience rebate)。与仅在严重灾害发生时才生效的巨灾债券不同，韧性债券为基础设施等项目增加韧性额外性提供激励措施。

3. 韧性影响力债券 (Resilience Impact Bond, RIB)。韧性影响力债券是与韧性债券完全不同的融资工具，本质上是一项合约，旨在提高项目在物理、运营和财务层面的韧性。项目投资者承担韧性项目建设所需的成本，并通过达到合同约定中的效果或完成合同约定中的行动，实现项目预期的韧性效益，向签订协议的韧性项目受益方收回本金并取得收益。韧性影响力债券已有实践经验，相关案例分析将在后文具体展开。

4. 保险连接贷款 (Insurance-linked Loan Package, ILLP)。保险连接贷款主要适用于来自开发性金融机构的优惠性贷款，通过把预期需要支付的所有保险费用的净现值整合进初始贷款额中而获得更多额度的开发性金融机构优惠贷款，并通过成立基金运作这一部分保险费进行对韧性的再投资，以及通过增加韧性、降低风险、节省保险费支出来实现收益。

5. 韧性服务公司 (Resilience Service Company, ReSCo)。韧性服务公司与能源服务公司 (ESCO) 模式类似，能源服务公司承担初始投资成本，通过节省的能源支出获取收益。韧性服务公司则承担气候韧性基础设施投资的初始成本，并通过由于韧性提高而节省的保险费支出获取收益。

6. 区域韧性信托基金 (Regional Resilience Trust Funds)。区域韧性信托基金是由地方官员管理的基金，可以通过贷款或赠款来资助减少气候风险的基础设施项目。这些资金最初可以由房地产转让税或财产和意外伤害保险附加费等筹资机制提供，但是随着时间的推移将能够慢慢成为自续的基金。

7. 非从价特别评估 (Non-ad Valorem Special Assessments)。非从价特别评估对特定区域内的不动产征收费用，所筹集的收入必须用于为该不动产提供收益，而不是使整个社区受益的一般性收益，可用于为降低受灾风险的气候韧性基础设施项目提供资金。非从价特别评估对不动产所有人征收费用，并用于投资使这些不动产受益的项目，收益稳定，具有为大型基础设施项目投资的潜力。

8. 本地基础设施销售附加税 (Local Infrastructure Sales Surtax)。在获得地方管理机构的多数成员与多数选民的通过之后，地方政府可征收本地基础设施销售附加税，通过对普通商品增加征税而获得来源广泛的资金，所筹集的资金专门用于基础设施规划与建设。由于税源广泛，本地基础设施销售附加税可筹集数量可观的资金用于气候韧性基建。

上述金融工具在中国均有良好发展前景，其中部分已在中国有实际应用案例。例如，基于事件的保险所采用的指数保险模式已在云南、黑龙江、广东等地试点，其快速理赔的特点为救灾活动与经济恢复提供了良好保障。作为韧性债券“基础”的巨灾债券正在发展，中国再保险(集团)股份有限公司(以下简称“中再集团”)已表示未来五年内将在国内发行巨灾债券，为分散巨灾风险提供新的方式。拓宽巨灾风险多元化的分散渠道，巨灾债券若成功发行，将为韧性债券在中国的发行提供参考经验。区域韧性信托基金和本地基础设施销售附加税主要由地方政府主导，在结合中国实际情况进行修改与完善之后，将可以为地方政府提供促进韧性基建的新渠道。

4.3 中国案例地区融资机制设计经验借鉴与建议

相比美国、欧盟等发达金融市场，中国的金融市场起步较晚、经验不足，存在诸多亟待完善的地方，对气候韧性基础设施及上述专门金融工具缺乏定义与相关标准，监管体系不健全，通过金融服务气候韧性基建发展的落实难度较大。针对本报告主要讨论的宁夏、武汉与深圳三地区所面临的不同地理条件、经济条件与自然灾害风险条件等，本章结合国际气候韧性基础设施融资实践，分别选取摩洛哥赛伊思储水项目、纽约绿色雨洪基础设施激励计划项目和路易斯安那环境影响力债券试点项目作为参照，进行案例分析，由此对案例地区开展气候韧性投融资提出实施规划与融资机制创新建议。

4.3.1 宁夏农业节水灌溉设施项目

在本报告分析的三个项目中，宁夏农业节水灌溉设施项目具有最好的经济效益，主要通过节水、节地与增产三

方面得到体现。同时，该项目可以有效规避未来气候变化情景下由于干旱加剧导致的粮食作物减产风险，从而保障粮食安全，并且还有助于减少农业污染与水土流失等，产生环境与社会效益。宁夏渠系改造项目的建设成本主要来自中央和地方财政、宁夏水利厅拨款等公共资金，而田间节水灌溉项目需要当地农户承担部分运营维护成本。

针对韧性投资的特殊性以及本项目仍然以公共资金为主的特点，**建议参考摩洛哥赛伊斯储水项目（Saïss Water Conservation Project）的经验，通过发行韧性债券撬动社会资本投资，促进宁夏韧性农业建设。**

摩洛哥的气候条件、地形地貌，以及面临的气候难题（如水资源缺乏）和适合的气候韧性项目（可持续水资源开发、灌溉技术改良等）都和宁夏相似。目前，降雨与河流量匮乏导致摩洛哥过量开采地下水资源，同时也对农业生产造成极大负面影响。摩洛哥赛伊斯储水项目旨在每年为摩洛哥提供超过1亿立方米用于灌溉的可持续水资源，同时提供滴灌等先进有效的节水灌溉技术，提高其农业灌溉系统的气候韧性。项目于2017年4月启动，预计于2023年1月完成。

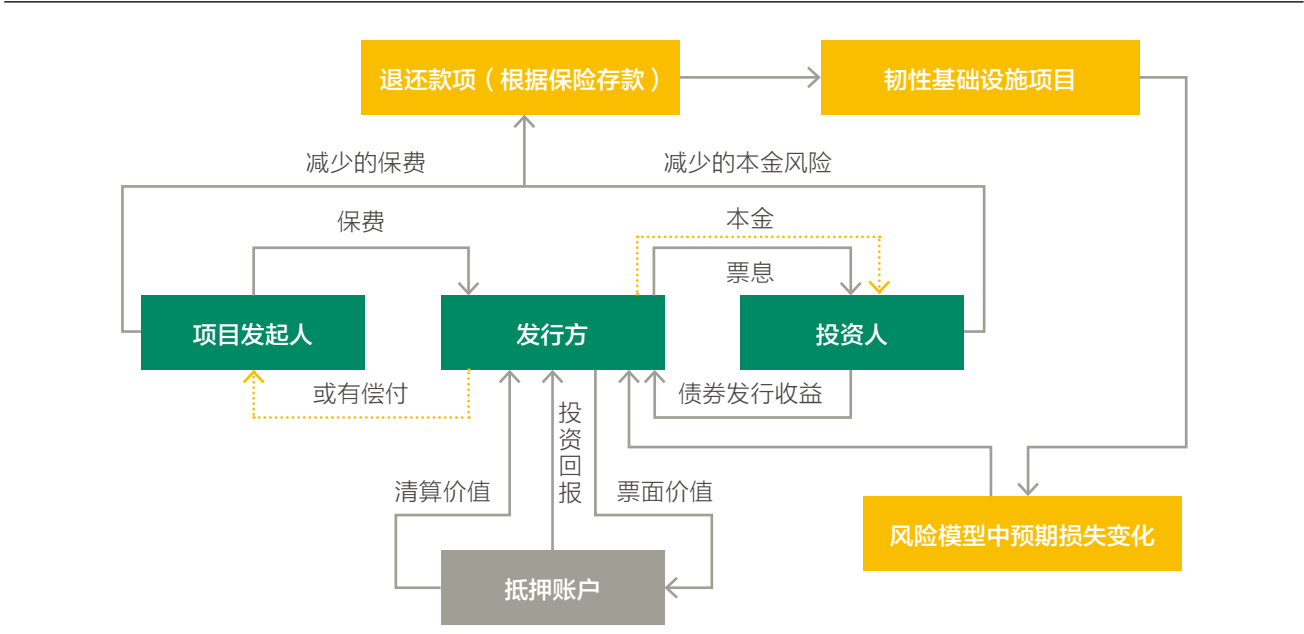
该项目融资由欧洲复兴开发银行（EBRD）和绿色气候基金（GCF）共同提供，其中EBRD提供1.2亿欧元（折合9亿元）贷款，GCF提供0.3亿欧元（折合2.4亿元）赠款（Zgheib, 2017）。此前，EBRD曾发行世界上

第一单韧性债券，共筹集7亿美元（折合45.5亿元），用于为水利、能源、交通与城市建设等气候韧性基础设施项目、气候韧性商业运营项目及气候韧性农业与生态系统项目提供融资，不仅包括新建项目，也包括EBRD现有项目。当前，EBRD已为70亿欧元（折合525亿元）气候韧性项目提供资金支持，其中也包括摩洛哥赛伊斯储水项目（Bennett, 2019）。

相比之下，虽然宁夏农业节水灌溉设施项目经济效益很好，渠系改造项目每1元投资可获得20.3元的效益，在保守估算下田间节水灌溉项目每1元投资也可获得5.6元总效益（参见3.2.1），但对于项目本身及社会资本投资者来说其价值实现方式却不够清晰。节水效益占总效益比重最高，但如何将节水效益带来的工业增加值转化为参与韧性项目投资的社会资本投资者的经济回报，需要应用相关工具进一步实现价值转化。韧性债券正是这类工具，可通过提前量化韧性与非韧性基础设施效益之差，从而为社会资本投资者提供韧性建设带来的经济回报。

如图29所示，巨灾债券可通过连接保险市场与资本市场，为巨灾保险提供偿付保障与风险分散。在巨灾债券中，项目发起人（投保人）向发行方（如保险公司与再保险公司）支付保费，在巨灾发生时获得偿付；发行方发行巨灾债券，在资本市场吸收资金并向债券投资人支付利息。韧性债券在巨灾债券的基础上对存在韧性项目的情况下所面临的预期损失进行重新定价。由于韧性项目降低了

图 29 | 韧性债券结构



注：绿色部分为巨灾债券结构，橙色部分为在巨灾债券基础上增加的韧性债券结构；实线表示无条件支付，虚线表示有条件支付。

风险事件造成的预期损失，韧性债券投资人也将愿意接受比巨灾债券更低的票息，而投保人也可以支付更少的保费。票息定价的差异代表了韧性项目通过减少资本市场上债券的预期损失而提供的金融价值，减少的保费反映了韧性项目给投资人带来的本金风险下降。通过对二者的精确计算与合理定价，由二者共同为韧性项目建设提供资金，从而实现增强气候韧性的目的。发行韧性债券可以为新建农业韧性项目融资，也可以为现有在建、运行中的各类韧性项目融资。考虑到宁夏项目前期数十亿元的固定投入和较长的运行期限，单独的韧性债券不足以覆盖，也可以首先借助财政资金和开发性金融机构资金组建投资基金，并吸引社会资本进入，在项目运行期间通过发行多期韧性债券筹集资金，用于弥补运营维护成本。

韧性债券以巨灾债券为基础，并要求对风险进行精确测算。由于国内巨灾债券发行实践经验较少、韧性债券相关价值测算难度较高与法律层面界定不清晰等原因，大环境下中国尚不具备大规模应用韧性债券的基础。此前，仅中再集团旗下全资子公司中再产险曾于2015年在境外发行中国第一只以地震风险为保障对象的巨灾债券（丁锋，2015）。2020年12月，中再集团党委副书记、总裁和春雷表示将有序推动巨灾保险证券化，“十四五”期间有望发行巨灾债券（中国保险网，2021b）。

未来，宁夏可同中再集团等具有巨灾债券开发、应用经验的企业合作，开展韧性债券试点工作，主要试点工作内容可包括攻克韧性债券精确定价的难题，以及建立健全法律、政策与执行层面的韧性债券监管体系，共同探索气候变化背景下将韧性项目货币化并通过金融产品定价的方式为韧性项目提供资金的新融资模式。

4.3.2 武汉海绵城市项目

武汉海绵城市项目不仅可以带来显著的社会环境效益，并减少气候变化背景下越发频繁的自然灾害带来的损失，也可以产生良好的经济效益。虽然截至2020年武汉已完成180平方千米的海绵城市建设，但要实现2030年的总体目标需要建设三倍于目前面积的海绵城市，意味着未来仍需要投入大量资金，需要运用更多金融工具与创新模式完成融资。

鉴于武汉面临的融资项目与纽约绿色雨洪基础设施激励计划项目相似，**建议参考纽约市在推广公私合营PPP模式与雨洪收储激励机制方面的经验，撬动私有资本，推动武汉海绵城市建设。**

纽约与武汉在很多方面较为相似，都是人口密集的巨型城市，哈德逊河流经纽约，长江、汉江流经武汉。随着气候

变化加剧，二者都受到越来越不可预测的极端降雨的威胁，降水规模增大，强度提高，更易引起市区排水不畅和洪涝灾害等，进而导致建筑损坏、交通瘫痪和人员伤亡。武汉的年均降水量约为纽约的1.5倍²⁵，且由于气候类型差异，武汉夏季降水显著多于其他季节，更应在吸收先进经验的基础上进一步创新与优化解决城市内涝问题的方案。

为应对极端降雨天气，美国很多城市都已开始建设与改造基于吸收和储蓄雨水的绿色基础设施，也因此面临巨大的资金需求，近80%的资金都需要社会资本投入（大自然保护协会，2016）。自2010年以来，纽约市环境保护局（NYC DEP）已投资约10亿美元（折合65亿元）用于绿色基础设施建设，旨在管理其雨水和减少由暴雨等引起的污水溢流事件（NACWA，2021）。纽约对参与绿色基础设施改造的社会资本进行激励，制定鼓励更多私人投入雨水收集设施改造的措施。一方面，纽约市拓展已有的绿色基础设施补助计划（Green Infrastructure Grant Program）；另一方面，评估并建立私有房产雨水收集改造激励计划（Private Property Retrofit Incentive Program），还专门设立机构研究如何提升现有雨水收集系统的有效性。

绿色基础设施补助计划旨在通过强化PPP模式的应用，提高城市对强降水、洪灾等灾害的适应能力。由纽约市政府为愿意在私有房产内部、花园、房顶及周围等区域建造符合规定的有利于蓄水、排水且不容易导致水污染的绿色设施的业主提供补助，补助最高可达500万美元（折合3250万元）。同时，纽约市政府要求收到补助的业主签署一份维护相关绿色基础设施20年的协议，确保设施长期有效。

私有房产雨水收集改造激励计划旨在激励业主建设吸收、利用及储蓄雨水的绿色基础设施。该项目面向规模较大的私有房产等，通过将原来不可下渗的地面装修为绿色雨水管理基础设施，促进雨水的利用、渗透、蒸发、分布式存储，并大幅减少污染，增加“绿色化英亩”（Greened Acre，每绿色化英亩等于管理102.8立方米雨水），对增加200绿色化英亩及以上（约等于2万立方米雨水）的业主提供补助等形式的激励。²⁶

类似理念也正在被其他城市采用。例如，美国费城原本对不透水面积每平方英尺每月收费约12美分，但允许建设雨洪设施的私人业主对雨洪收费享有最高达80%的抵扣，并通过其他配套激励计划使得绿色化英亩的建设成本大幅下降，降幅超过60%（大自然保护协会，2016）。

相比之下，武汉海绵城市项目的建设成本大量集中于前期的固定资产投资，而后期的效益主要体现在房产增值和

表 7 | 武汉海绵城市类PPP项目概况

项目名称	阶段开始时间	所属行业细分	运作方式	拟合作期限(年)	投资金额(万元)	回报机制
湖北省武汉市青山示范区海绵城市（南干渠片区）项目	2016.12	海绵城市	BOT	10	127448	政府付费
湖北省武汉市大东湖核心区污水传输系统工程	2017.04	海绵城市	BOT	13	302910	政府付费
武汉市沙湖港及周边环境综合整治等PPP项目	2019.02	海绵城市	TOT+BOT	17	166462	可行性缺口补助

资料来源：财政部政府和社会资本合作中心

雨水回用方面。对实现房产增值效益而言，由于中国土地国有，且与美国的住宅、建筑格局不同，武汉海绵城市建设不能完全套用美国模式，但是可以借鉴纽约、费城等城市的成功经验，通过建设雨洪收储激励机制与推广PPP等模式撬动社会资本，可有效拓宽融资渠道。政府应鼓励房地产开发商在开发的时候就将海绵城市纳入设计与建设考量，并在相关PPP项目建设中作为可行性补偿与使用者付费的基础。在激励机制方面，政府可以通过项目分拆的方式对愿意在房地产范围内建设绿色设施的开发商与业主提供补助，并签署相应的维护协议，促进相关设施长期良好运行。

国内海绵城市类PPP项目发展模式较为单一。截至2020年底，全国共实施84个海绵城市类PPP项目，其中有3个在武汉，见表7，其运作方式仅包括BOT和TOT²⁷，回报机制主要为政府付费与可行性缺口补助，尚未探索使用者付费机制。这表明武汉尚未充分实践海绵城市建设的PPP途径，对社会资本撬动力度、多样化收益途径有进一步探索空间。

为更好地实现雨水回用，可以参考湖南长沙市雨水交易试点经验并建立类似交易机制，由小区等具备收储能力的单位进行雨水收储并出售，由雨水处理公司净化处理并进一步出售给市政、环卫等部门及有需求的企业或用于地下水回补，促进实现雨洪收储的经济价值（长沙晚报网，2020）。

4.3.3 深圳灰绿结合海堤项目

深圳灰绿结合海堤项目主要效益来自规避未来损失，公益属性强，与宁夏、武汉项目中经济效益占主导不同，因而对社会资本的吸引力相对不足。目前深圳项目建设的

出资几乎完全由深圳市政府及深圳市水务局承担，如果能吸引可从规避财产损失中受益的企业与居民出资，可促进更大范围、更具气候韧性的海岸线建设。目前，**路易斯安那环境影响力债券试点项目就为深圳提供了可供参考的解决方案**，通过将利益受到保护的企业、居民等纳入项目出资对象，从而将预期可以避免的损失转化为项目资金，拓宽多元化筹资渠道。

路易斯安那环境影响力债券试点项目地点靠近新奥尔良市。新奥尔良市与深圳自然条件类似，南临墨西哥湾，地处密西西比河三角洲旁，海岸线漫长且较为破碎，面临严重的海岸线侵蚀与湿地破坏等环境风险，并由此导致更严重的洪水、土地损失、风暴潮等多种自然灾害。同时，两地均面临严重的台风、飓风袭击风险，且人口众多，对海岸线韧性建设与生态保护修复的需求相似。

通过对飓风、洪水保护、供水、水质提升、娱乐和渔业等各种因素进行估算，密西西比河三角洲的湿地和其他生态系统能够产生的价值约为每年150亿~580亿美元（折合975亿~3770亿元），平均每花费1美元保护海岸带将能够创造约17美元的总产出。对此，路易斯安那州2017年提出了一项在未来50年间投资500亿美元（折合3250亿元）用于海岸带气候韧性增强计划，但是预计可用的公共资金仅90亿~120亿美元（585亿~780亿元）。因此，路易斯安那州海岸保护与修复机构（Coastal Protection and Restoration Authority, CPRA）通过发行环境影响力债券（Environmental Impact Bond, EIB），引入社会资本。

环境影响力债券是一种创新融资形式，投资者购买债券，偿还额度与是否实现预期成果有关，好处是其结果导向

的融资模式可促进资金高效利用，同时可将未来可避免的损失用于当下的融资，扩大融资规模。该债券曾被用于为一项约3.38平方千米的湿地修复试点项目提供融资，作为路易斯安那州海岸总体规划的一部分。环境影响力债券包括两级绩效支付结构以提高资金效率，吸引沿海私人企业参与投资并从中受益。在约定期限结束时，将通过湿地恢复是否成功进行衡量，达到基础目标时支付基础额度，超额完成目标时根据超额情况支付绩效款项，目标未达到时则不需要向承包商与投资者付款。具体而言，本项目期限为10~15年，超额绩效付款为350万~800万美元（2275万~5200万元），承包商与投资者都可从超额绩效中获益，目标为至少恢复585英亩湿地（共835英亩）（EDF，2020）。工程基础资金由CPRA支付，而“绩效”，即实现更高标准的建设成果则由私营资本支付，从而起到通过公共资金撬动私营资本的效果，为海岸线提供具备气候韧性额外性的基础设施。

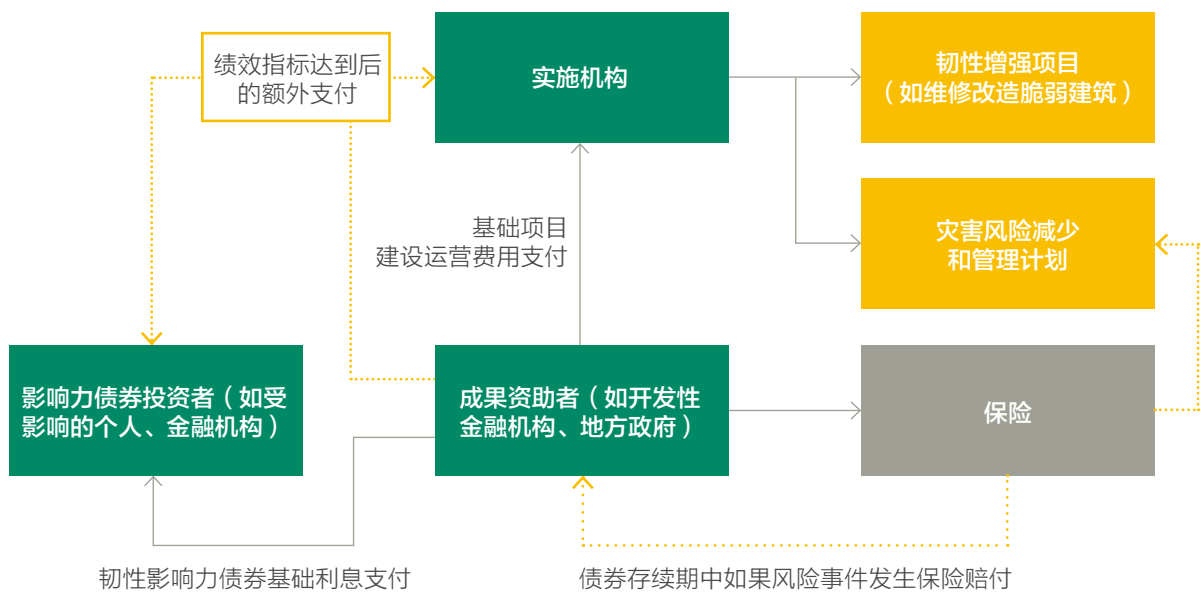
相比之下，深圳项目主要收益来源于避免的损失价值，但也具有一定的新增景观旅游价值等经济收益，存在开发多种融资渠道的潜力。首先，深圳可以借鉴环境影响力债券试点项目的相关经验，以海岸修复、湿地保护、促进防洪与淡水资源保护等气候韧性提升目标作为项目基础，发行与之类似的韧性影响力债券（RIB），提高撬动社会资本的力度，吸引在沿海地区拥有资产并面临损失的企业、个人等投资，将预期可避免损失的财产转化为项目建设资金，通过以结果为导向的融资方式促进资金运用效

率提高并实现预期目标。其次，深圳对景观改造和商业开发等盈利潜力较强的项目可以采用PPP模式，引入合格的社会资本，助力将生态资产转化为商业资产。此外，对新增红树林等生态项目，也可以通过碳汇开发与交易的方式推动生态效益变现。

如图30所示，韧性影响力债券建立的基础在于成果资助者与投资者在债券设计与募集项目的实际韧性效果上达成一致，任务与还款计划、奖励计划及预设的绩效指标挂钩。资产保险、运营、维护的责任移交到负责的机构手中。在债券发行周期中，成果资助者审核成果，根据工作完成情况和项目情况，完成最终还款。

值得注意的是，目前中国并没有关于韧性影响力债券或环境影响力债券的相关立法，对类似金融工具讨论最多的是与之结构类似但目的不同的社会影响力债券，但也大多停留在概念评析与国外经验借鉴层面。2016年12月，山东省沂南县发布了中国首单“社会效应债券”，主要用于扶贫，但2018年11月，财政部认为其违反了关于严禁以政府购买服务名义变相举债的要求，因此并未实施成功（林文漪等，2021）。未来，深圳可推动韧性影响力债券试点建设，与相关金融机构合作，重新设计符合自身条件与需求的产品、模式与绩效指标，并完善相关法律与监管要求，通过建设合理地将预期损失转换成建设资金的模式，切实激发社会资本的参与动力。

图 30 | 韧性影响力债券结构



注：绿色部分为巨灾债券结构，橙色部分为在巨灾债券基础上增加的韧性债券结构；实线表示无条件支付，虚线表示有条件支付。

4.3.4 案例地区气候韧性投融资实施规划建议

气候韧性基础设施具备的正外部效应要求对气候韧性基础设施项目的融资不应仅以经济收益评价其成本效益，而应将人类可能在气候变化背景下为气候韧性不足的基础设施付出的代价纳入分析，将规避未来损失、经济效益、社会和环境效益纳入项目整体的收益考量。同时，开发相关融资机制与工具将经济效益以外的效益体现出来，也是吸引投资者的重要方式。

整体来说，由于气候韧性基础设施对政府部门和市场投资者来说存在定位差别，各地区在推动气候韧性基础设施项目时需要关注不同项目的具体特点。从市场投资的角度分析，气候韧性基础设施作为一种新型的资产类别，整体风险收益率不高，预期现金流不确定，对市场投资者的吸引力较为有限。而从经济学的角度进行分析，由于气候韧性基础设施所带来的正外部效应可由社会成员共同享用，其从概念上属于纯粹公共产品或准公共产品的范畴，对社会的整体效益较为显著。纯粹公共产品的供应是政府参与经济活动的重要内容，也是增进社会福利的必要举措，政府因此需要承担推动气候韧性基建的主要作用。然而，考虑到在气候变化背景下气候韧性基建的庞大资金需求，项目投资又急需社会资本的大力支持，政府部门可以在准公共产品类型气候韧性基础设施的供给方面协同市场机构共同发挥作用，灵活利用并开拓创新市场化投融资机制。

考虑到不同城市在气候风险暴露、应对气候变化工作进展、绿色金融体系建设等方面的差距，本报告将从宏观规划与指引、支持韧性项目开发、大力提供金融支持三个方面提出建议，以供案例地区在韧性投融资实施规划中进行参考：

1.宏观规划与指引。案例地区应当在对当地气候变化总体特征、极端气候灾害事件、未来气候变化趋势、基础设施风险分类进行充分分析的基础上，形成加强基础设施气候韧性的总体规划方案，为各类气候韧性基建提供政策依据。该方案可在该地区相关规划的框架下进行，由此明确空间规划、适应措施等具体工作。同时，设定韧性标准或提出韧性建设指引。韧性标准是指导产业发展的重要手段。建议参考《绿色建筑评价标准》（GB/T 50378—2014）等国内外基础设施建设标准体系，形成政府采购的规范性要求，并引导社会资本投入气候韧性基建。

2.支持韧性项目开发。项目短缺同样是抑制韧性基础设施投融资的重要因素。地方政府应积极支持营利性良好或具有显著气候效益的基础设施项目开发，并在气候投融资项目库的基础上建设和完善韧性基础设施项目库。地方政府可对达到一定标准或韧性效益的项目提供资金奖励，

并对基础设施项目的韧性建设提供技术支持，以此鼓励与气候韧性建设相关的技术发展。案例地区面临的气候风险并不是单一的，例如深圳同样对海绵城市建设存在需求，而武汉则面临热浪频率增加的风险，可因地制宜在当前项目以外开发更多韧性项目，拓宽社会资金参与渠道并更好地防范气候风险。

3.大力提供金融支持。首先，创建投资平台和支持基金。在通过政府财政资金对气候韧性基础设施项目进行支持以外，可充分借助开发性金融机构资金，搭建投资平台和创投基金，引导公共和社会资本流向气候韧性基建项目。其次，为项目开展提供风险分担措施，借助风险分摊机制（如购买保险、为项目提供担保、PPP等）提高项目的信用水平，降低社会资本的投资风险。最后，不断提高气候韧性基础设施项目的投融资能力，包括创新气候资金的筹措机制，探索气候韧性的价值实现路径等，结合当地实际情况，因地制宜地探索韧性债券、韧性影响力债券与雨洪收储激励措施等新型融资机制的应用，使社会资金参与渠道更加畅通。

4.4 推进中国气候韧性基础设施投融资的路径与策略

气候韧性基础设施相较于常规的投融资标的，在盈利能力、投资目的、投资回报方式等方面具有明显的差异性，需要根据其成本效益情况切实规划投融资的实施路径与推进策略。本节将结合气候韧性基础设施项目在成本效益方面的理论与实践，把政府和金融机构作为主要研究对象，通过对气候韧性基础设施价值实现模式的探究，研究分析政府推动气候韧性基础设施投融资的实施路径，以及金融机构落实气候韧性基础设施投融资的决策机制。

4.4.1 气候韧性基础设施建设成本效益变现模式的探索

成本效益决定着项目对资本的吸引能力。对于气候韧性基础设施项目来说，成本效益的分析方法同样适用，且是项目必要性的重要佐证。本报告在评估气候韧性基础设施项目成本效益过程中所采用的三重红利法，便是融合韧性项目对他人和社会造成的市场化及非市场化影响，将规避未来损失、经济、社会环境三类效益纳入项目整体收益考量，这为有意投资于气候韧性基础设施项目的政府部门、公共主体以及负责任投资者提供了项目成本效益测算的重要依据。

气候韧性基础设施项目在理论测算中均表现出良好的效益成本比。Hallegatte et al. (2019) 研究发现气候韧性基础设施项目的效益成本比在96%的情景高于1，在50%

的情景下高于4，说明韧性投资在绝大多数情况下收益水平较高。同样，在本报告的测算下，三个案例中，气候韧性基础设施项目的效益成本比均高于1，展现了气候韧性基础设施项目在合理规划前提下的经济可行性。然而，规避未来损失、社会环境效益依旧缺少相应的价值实现机制，在目前的投融资环境下难以满足资本市场的价值衡量准则；同时，经济效益的实现也存在众多假设前提，在实际项目的执行中难以有效变现，需要探索有效的成本效益转化模式。

在项目的三重红利当中，损失避免是气候韧性基建的基本诉求，也是部分气候韧性基建的主要效益来源，准确量化规避未来损失对气候韧性基建的决策者尤为重要。从风险的角度分析，韧性项目建设能够提升基础设施的抗风险能力，减少在风险发生情形下的经济损失，从一定程度上也是意外事件损失分摊的一种财务安排，其本质与保险的概念相符合。因此，为推动气候韧性基础设施投融资，需要首先明确此保险行为的投保人和受益人，即气候韧性基建的出资方与受益方。本报告第三章通过对案例情况进行分析，发现气候韧性基础设施规避未来损失的受益方可分为政府、公众和其他经营主体三类。其中，公众受益于气候韧性基建带来的人身财产受气候风险影响的降低，其他经营主体受益于经济生产损失的减少。政府是气候韧性基建普遍的受益方，其原因有二：一方面，政府代表着公众的基本利益，保障地方民众的安全即是政府部门的主要诉求；另一方面，经营主体的效益改善对应税收和地区产值的提升，同样会对地方财政产生积极的作用。由此，在三个案例中，政府均是气候韧性基建的主要出资方（见表8）。

其次，经济效益是决定社会资本对气候韧性基础设施项目投入的关键因素。对于经济效益在三重红利中占比较高的项目来说，其吸引社会资本的能力也相应较高。例如，在宁夏案例中，除中央和地方政府之外，工业企业和农户同样参与到项目投资中，其原因是项目建设所带来的增产效益和节地效益将对农户的经济收入产生积极影响，而项目节约的用水指标可以转让给工业企业使用，进而为工业企业创造额外的增加值。而在武汉的案例中，海绵城市建设所带来的生态价值可提升周边房产价值，这为开发商带来了大量潜在的经济效益，也是项目公司进行项目投资的重要动力来源。但对于以深圳为代表的众多城市来说，气候韧性基建的经济效益还是难以与传统基础设施相比，更多的项目效益体现在规避未来损失以及社会环境效益。对于此类项目，选择合适的融资渠道，以公共资金引导社会资金流入可能将是项目融资的主要模式。

最后，社会环境效益是气候韧性基建项目中公共属性较强的部分效益，其主要受益方是公众，难以直接吸引特定资本方针对该类效益进行投资。同时，由于该部分效益难以以经济价值进行衡量，案例项目中社会环境效益仅占据总体效益的极小比例。为实现此部分效益的有效转化，除了加强公共资金的投入和引导外，还可参考生态产品价值实现的理论与实践机制，将项目社会环境效益逐步转化为经济效益，从而引导更多资本的投入。

综上所述，韧性基建项目的成本效益在理论上具有良好表现，但与实际操作相比还存在差距，需要加快成本收益变现模式的探索，拓宽融资渠道。对于项目在三维度

表 8 | 案例地区项目建设出资方和主要受益方

三重红利	宁夏		武汉		深圳	
	出资方	受益方	出资方	受益方	出资方	受益方
规避未来损失		地方政府、农户		公众、武汉市城市管理执法委员会、武汉市水务局		政府、居民以及深圳旅游产业相关经营者
经济效益	中央和地方政府、宁夏水利厅、农户	工业企业、农户	PPP项目公司、武汉市园林和林业局	武汉市水务局、房地产开发商、私人业主	政府、深圳市水务局	旅游产业相关经营者、周边居民
社会环境效益		公众		公众、武汉市水务局		公众（全体市民、游客、周边居民）

来源：根据各项目实际情况整理

上产生的红利，应分别通过明确规避未来损失的责任承担方、锁定经济效益的主要受益方、探索社会环境效益的价值实现工具等，优化韧性基础设施项目的效益实现流程。政府部门以及有关金融机构应当深入推动发掘各方对于韧性基础设施的需求，形成科学的实施和决策机制，有效支持项目成本效益的转化。

4.4.2 政府推动气候韧性基础设施投融资的实施路径

政府是城市韧性建设的责任承担方，也是推动气候韧性基础设施投融资最为关键的主体之一。地方政府应明确推动气候韧性基础设施投融资的实施路径，将韧性思维融入战略规划和项目评价之中，制定韧性相关标准，并培养韧性项目的开发与组织能力，增强政府资金的引导作用，逐步构建“政府主导-市场组织-社会参与”的城市气候韧性基建机制。

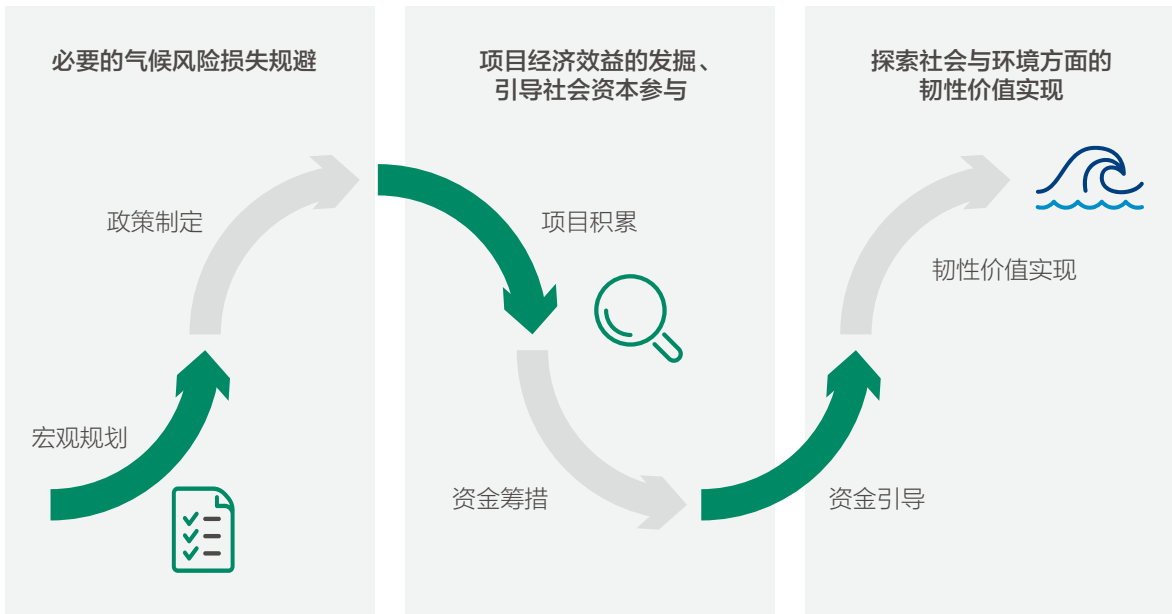
在推动气候韧性基础设施投融资的具体实施路径上，政府部门可以从宏观规划、政策制定、项目积累、资金筹措、资金引导以及韧性价值实现六个维度依次展开，具体内容如图31所示：

1.宏观规划。为提高韧性基建宏观规划的充分性和有效性，政府首先要制定跨部门和跨级别的规划程序。在跨部门方面，应敦促不同职能政府部门间形成有效的沟通合作机制，充分吸收气象、地质、水文、生态、经济、农业、健康等多领域专家学者的建议，科学地制定系统性区域规划方案。在跨级别方面，为保证不同层级政府之间目标与标准的一致性，较高层级的政府部门应对地方政府规划起到指导和引领作用，保证地理位置相近和气候风险相似政府之间的充分交流，采取有效协同措施，寻求基础设施建设效用的最大化。

同时，政府应规范规划流程。其中具体的气候韧性基础设施规划内容可包括（但并不局限于）：风险识别（判断区域面临的主要气候风险）、风险评估（模拟计算气候风险导致的预估损失）、韧性保障（明确气候韧性基础设施主要建设类型、区域范围和设施标准）、空间规划（使发展远离高风险地区）和金融支持（保障韧性建设的资金来源）。

2.政策制定。为保证后续实施方案的有效推进，政府部门进而应制定区域气候风险防范和基础设施建设规则。依据气候风险水平和预估损失情况，相关部门应首

图 31 | 政府推动气候韧性基础设施投融资的实施路径



来源：根据本报告整理

先设定基础设施建设的韧性基线，通过监管要求和经济标准的形式进行强制性约束或软性引导，支持气候韧性基建和气候适应型投融资，例如通过一定的建筑标准对项目设施进行规范，或在政府采购或财政优惠政策中明确项目的韧性要求。

3.项目积累。气候韧性基础设施项目的开发应由政府部门引导、社会部门参与，由此对气候韧性基建形成项目积累，为后续的投融资提供高质量的项目标的。可以探索建设气候韧性基建项目库，鼓励韧性建设相关科学技术的落地使用，促进韧性项目的开发与试点。开展气候韧性基础设施项目可以从新建和更新两个角度出发，在常规基础设施项目建设中引入战略性的环境韧性评估，保证新增基础设施项目的韧性；对老旧基础设施开展定期检查，改善存量基础设施的气候韧性，组织安排必要的基础设施修葺。

4.资金筹措。应首先按照气候风险评估和气候韧性效益对气候韧性基础设施项目进行分类，进而由政府部门结合项目类别和项目收益决定公共部门出资比例。充分发挥地方财政预算收入对气候韧性基建的资金支持作用，积极申请财政专项资金支持当地韧性建设；还可寻求国内外金融机构的优惠资金，引进对韧性收益有投资需求的战略性

投资者。此外，可适时考虑通过对土地开发征税、征收碳税、利用碳市场收益的方式积累韧性建设基金。

5.资金引导。政府应当继续通过直接资助、资金激励、提供低息贷款、提供担保等方式支持韧性建设，持续探索创新融资机制，引导更多社会资本投入气候韧性基建领域。同时，还应呼吁全社会形成气候风险意识，提高适应类项目占气候项目的比重，支持或引导气候资金投资于具有典型韧性建设效果、但难以通过其他方式获得融资的项目。金融监管相关部门还应鼓励和引导金融机构开展金融产品和服务创新，为社会资本的资金投入创造便捷的投融资渠道。

6.韧性价值实现。政府、金融机构等可进一步探索将气候韧性基建与基于自然的解决方案有机结合的生态化城市韧性建设路径。同时，优化生态产品的定价与交易机制，形成并完善统一的生态系统生产总值（GEP）核算体系，完善碳汇等生态产品的核算与交易体系，以改善生态产品的变现能力。还可加快建立生态补偿机制，提高气候韧性基建项目的收益能力。此外，政府部门作为气候韧性价值实现的牵头主体，可以探索研究气候韧性价值的量化评估方式，以服务支持、资金供给、绩效考核等方式逐步落实气候韧性价值的实现和流转。



4.4.3 金融机构气候韧性基础设施投融资决策机制

从金融机构的角度分析，气候韧性基础设施作为基础设施中具有气候韧性特征的资产类别，其投资优势在于可以降低现有资产中的气候风险，并体现了投资者环境、社会和治理（ESG）的投资理念。在中国新基建投资愈发火热的当下，如何将新旧基础设施建设与公共事业及社会保障相融合，顺应全球可持续发展的目标路径，将是金融机构参与气候韧性基础设施投融资的重要考虑。

与政府部门一致，金融机构开展气候韧性基础设施投融资也应以气候风险的分析为基础，在基础设施的资产类别中识别出对气候风险具有显著脆弱性的项目类别，并关注相应领域的韧性投资。根据金融机构开展投融资活动的目标差异，可以将金融机构分为开发性金融机构和其他金融机构两类。开发性金融机构以推动经济社会发展和落实政府政策目标为原则，是气候韧性基础设施项目的主要支持主体。相比之下，其他金融机构对项目营利性的需求更高，可通过转变投资策略和投资模式，参与气候韧性基础设施投融资的风险管理。

具体来说，在气候韧性基础设施投融资过程中，开发性金融机构可以形成如下的决策机制：

- **建立完善的风险筛查框架：**识别气候风险敏感性和脆弱性较为显著的基础设施类别，针对性地开展项目投资，提高社会的气候风险适应能力。
- **提供项目开发支持：**对项目开发与筹备提供帮助，包括在项目的环境影响评价方面加强专业意见指导、支持项目设计、优化韧性影响、提供风险减缓技术援助等。
- **提供低成本的资金支持：**在完善的项目筛选和项目支持体系的基础上，通过捐赠、低息贷款、项目担保等方式为项目融资提供资金支持，持续创新资金支持模式，并吸引更多社会资本。

其他各类金融机构则应当探索融资模式和工具的创新，逐步形成支持气候韧性基建的市场化机制，同时分散和管理投资风险，具体决策机制如下：

- **完善投资风险评估框架：**健全项目开发前的背景研究，全面评估项目所面临的环境风险、政策风险以及金融风险等。
- **改变投资策略，推动气候韧性基础设施投融资：**可采取多种方式，如将某些负面公司剔除、将韧性因素纳入财务分析、进行影响力投资并为具有明确韧性用途

的项目提供资金、利用股权影响企业行为并引导其进行气候韧性基础设施投资等。

- **开发面向气候韧性基础设施投融资的金融产品：**开发气候信贷、气候债券、气候韧性债券、影响力债券以及气候指数产品等，提高市场投资者对此类资产类别的关注度，拓展市场开展韧性投资的有效渠道。
- **分散投资风险：**通过建立混合型投资，提高投资组合的风险收益表现，这样既可促进不同类型机构间的合作，扩大融资范围，降低融资成本，又能加强资本的流动性，分散投资风险。此外，还可利用保险、气候指数产品等工具对冲气候韧性基础设施项目的投资风险。



第五章

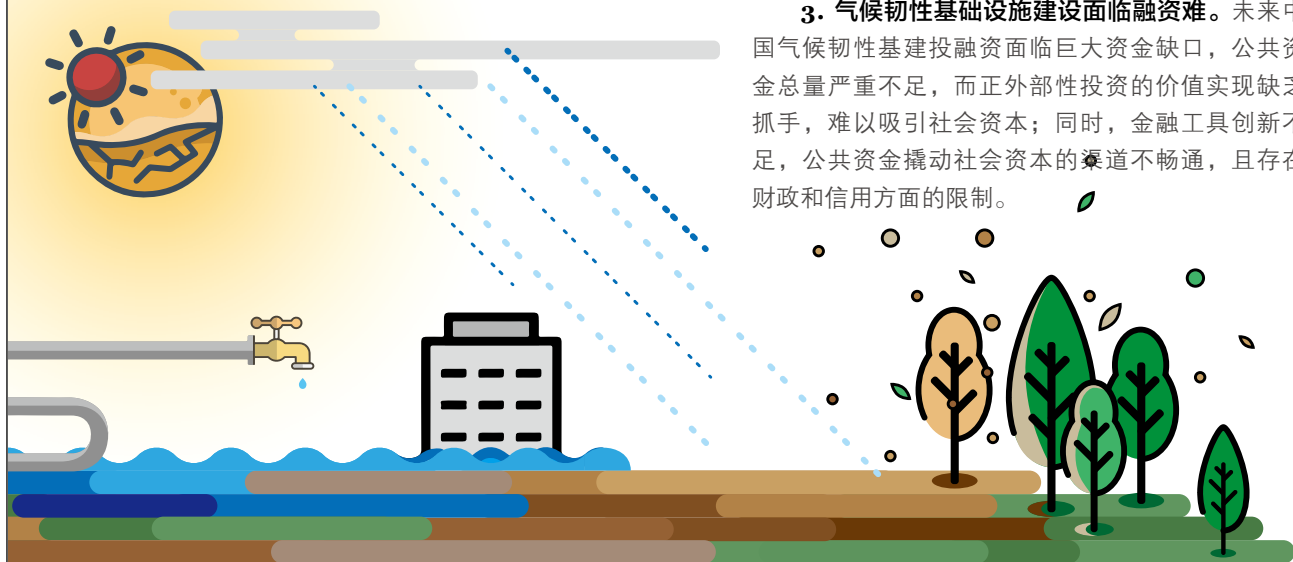
总结与建议

前文分析表明，未来中国乃至全球范围内的气候风险加剧趋势强劲，加快对气候韧性基建的投入势在必行，以最大程度降低未来气候风险对人民生命财产造成的损失。本报告对典型气候风险进行案例分析，采用三重红利的分析框架和系统的经济评估方法，量化了已有或在建气候韧性基础设施的成本效益。分析发现，气候韧性基建不仅能起到规避未来损失的作用，还能带来诸多经济和社会环境效益，投资气候韧性基建可以带来较好的回报。尽管如此，目前中国气候韧性基建投资仍面临资金供需不匹配的问题，亟须创新拓展融资渠道。特别地，本研究发现，目前中国推动气候韧性基建发展主要面临三个方面的困难：

1. 对不同地区、不同类型的基础设施面临的潜在气候风险认识不足。不同地区、不同类型的基础设施面临的气候灾害存在巨大差异，而现有研究对这些差异缺少系统性认识，同时缺乏完整的与基础设施直接相关的数据和系统地评估气候风险的方法。对基础设施未来面临的气候风险认识不足，容易忽视加强基础设施韧性建设的必要性。

2. 对气候韧性基础设施的价值认识不足。气候韧性基础设施在全球乃至中国都还属于一个相对较新的概念，尽管其投资回报收益较高，且具有长期性，但大众对气候韧性基础设施很多重要的外部性价值的认识仍然有限。这一方面是因为气候韧性基础设施所带来的额外价值很难从一般的非韧性基础设施中剥离出来，因此极易被忽略；另一方面也因为缺乏清晰的价值定义和评估理论基础与方法，以及价值转化体系。

3. 气候韧性基础设施建设面临融资难。未来中国气候韧性基建投融资面临巨大资金缺口，公共资金总量严重不足，而正外部性投资的价值实现缺乏抓手，难以吸引社会资本；同时，金融工具创新不足，公共资金撬动社会资本的渠道不畅通，且存在财政和信用方面的限制。



针对气候韧性基建面临的困难，本报告第三、四章通过研究分析为推动气候韧性基建发展提供了有针对性的行动建议，可以总结为以下几个主要方面：

1. 提高社会对未来气候风险的认识

- 识别不同关键基础设施系统面临的气候风险，将应对气候变化融入城乡规划的理念和实践中，强化适应气候变化理念。从实施层面来看，需要从国家层面制定相应政策法规，加强各职能部门之间的协调合作，发挥各部门对规划项目的审批权限作用，进而在地方强化适应气候变化理念。与此同时，大力推广学习各地以及国内外的成功经验。
- 制定气候韧性基础设施技术标准。结合极端天气气候事件，加强城乡基础设施防灾抗灾能力建设，提升关键基础设施灾害设防标准，制定统一的气候韧性基础设施技术标准。
- 强化气候变化影响监测和风险预警，完善适应气候变化工作机制，促进跨领域合作与协同创新。建立健全从中央到地方的适应气候变化监测预警机制，支持重点地区（如特大城市、省会城市、中心城市、城市群，以及其他易受气候灾害影响的脆弱地区）构建监测预警模型，进一步完善极端天气事件等的监测网络，建立完善、高效的监测预警系统、应急救援体系和物资保障体系。
- 开展适应气候变化宣传教育，提高公众的适应气候变化理念与素质。充分运用传统媒体和新型媒介加强气候灾害科普宣传教育，不断提升全社会的气候风险防范意识和能力。

2. 完善气候韧性项目的价值评估和流转体系

- 确立统一的气候韧性项目价值评估方法、核算准则和审计流程。
- 探索建立气候韧性项目价值流转体系，鼓励各级政府设立韧性基础设施专项资金，支持第三方机构自发提供韧性服务，实现社会环境价值向经济价值的转变。

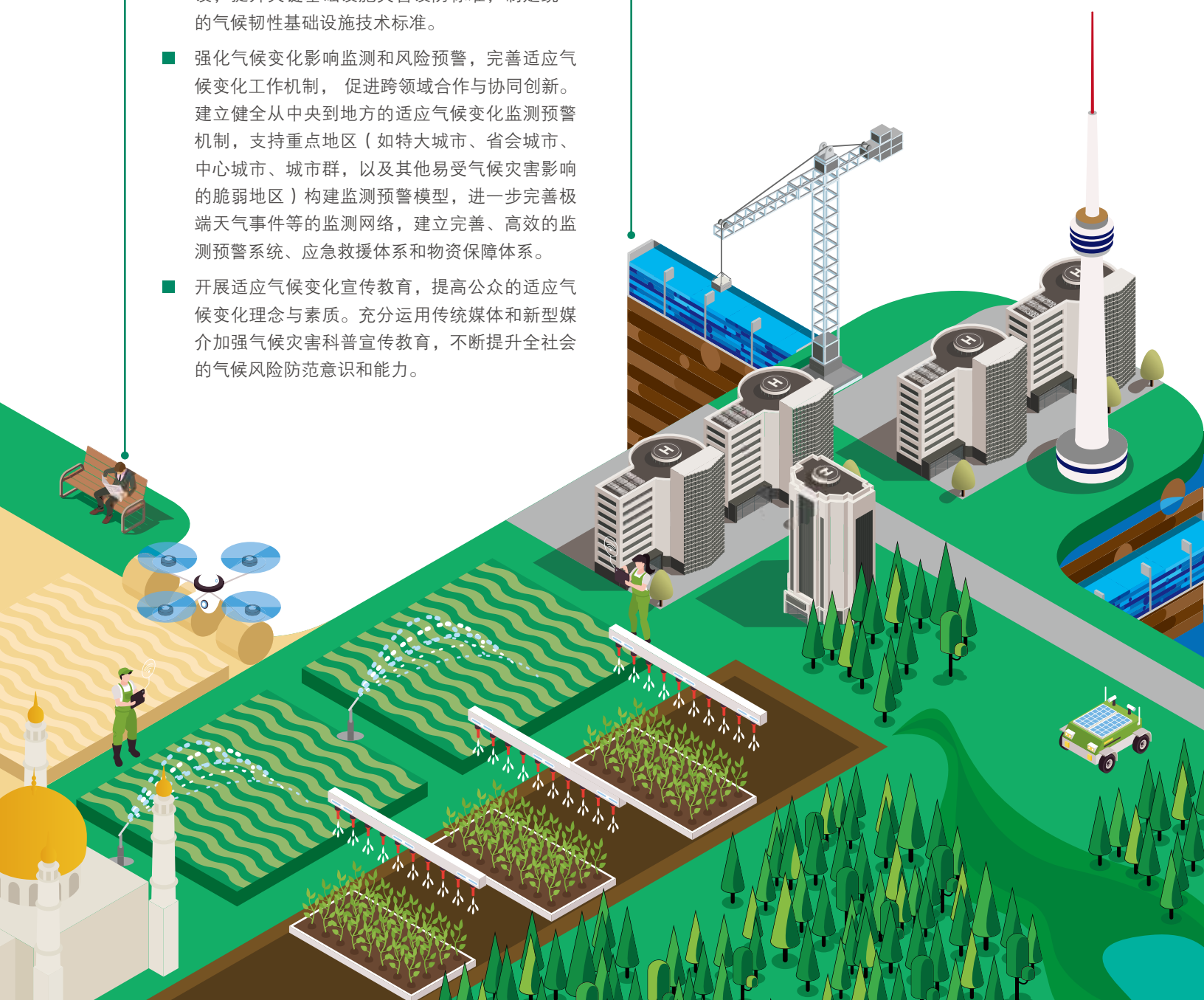
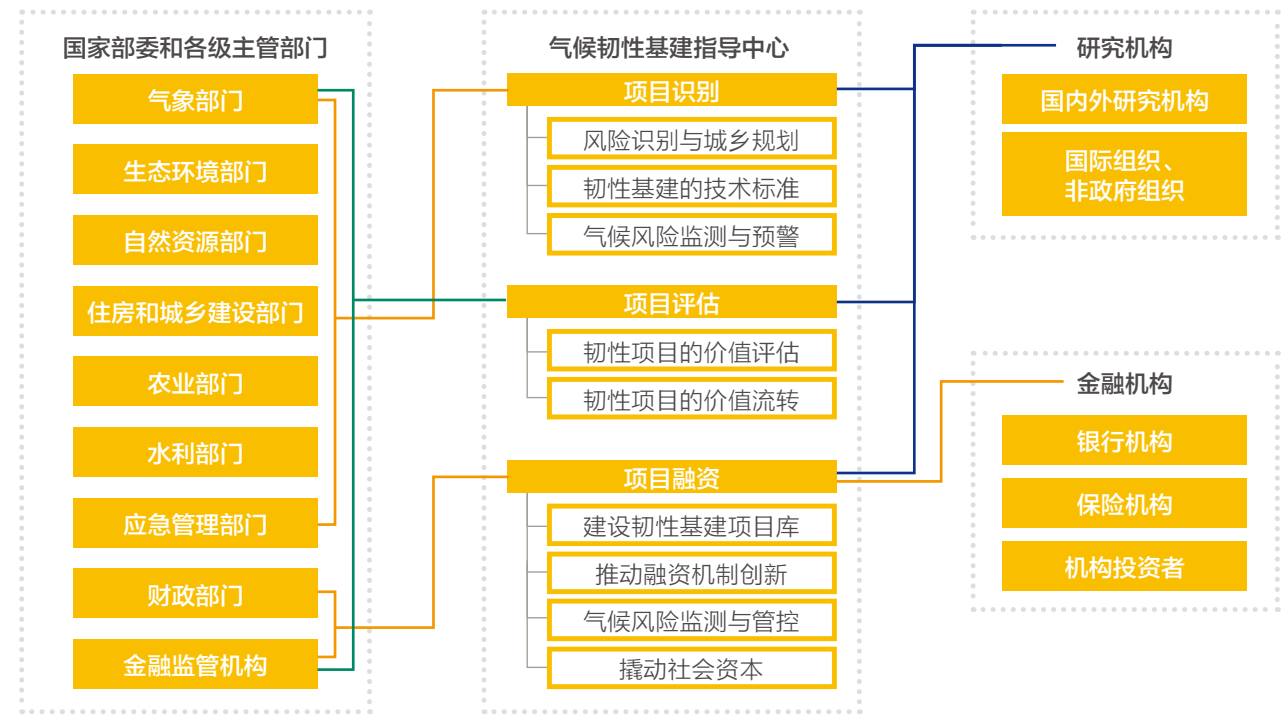


图 32 | 构建推进气候韧性基建行动的机制和平台



3. 拓展气候韧性基础设施的融资渠道

- 加快建立国家和地方层级的气候投融资项目库，挖掘高质量的韧性基建项目。
- 支持气候韧性基建融资机制的开发与创新，强化各行业气候风险的披露、监管与控制。
- 提高地方政府的财政激励力度，探索更能有效撬动社会资本的融资模式。

4. 推动气候韧性基础设施建设的机制保障

- 首先要建立较为完善的政策体系、完整统一的评估体系，以及高效有力的监管和执行机制。这包括制定法律和行政法规，保障加强基建韧性的措施得到实施。
- 同时规范气候韧性基础设施项目在立项、评估、融资和建设等各环节中的操作。根据基础设施对气候风险的高暴露度和高脆弱性，优先设定气候韧性基建目标和规划，保证各地区、各类别、各等级的气候韧性基建有序推进。
- 需要构建统一的协调机制（图32），为不同部门 and 不同层级之间的行动提供机制和平台支持，具体推动韧性基建项目的识别、评估和融资等三个方面的工作，并协调中央与地方政府以及金融机构之间的关系，促进和加强国际合作。



注释

1. 额外性是指对基础设施采取额外韧性措施增加其适应未来气候变化风险的能力，因此相对于不采取措施的基线情景（Business As Usual）是额外的。
2. 参考 http://news.cnr.cn/native/city/20210802/t20210802_525550674.shtml
3. RCP（Representative Concentration Pathways）指代表性浓度路径，是一组包含全部温室气体和气溶胶以及化学活性气体排放和浓度以及土地利用或土地覆盖的时间序列情景。RCP4.5是一种中等稳定排放路径，辐射强迫到2100年稳定在4.5 W/m²，RCP8.5是一种高排放路径，辐射强迫到2100年大于8.5 W/m²（IPCC，2008）。
4. 未来暴雨时空变化极为复杂，并不一定是排放情景越高，降雨就越多，也可能更为干旱。一方面，相对于温度，降雨更易受到诸多因素（如地形、风、太阳辐射、局地对流等）的影响，不确定性更高；另一方面，不同气候模型之间存在很大的不确定性，因此对未来暴雨风险需要根据实际情况具体分析。
5. 社会折现率的选取实质是在权衡当期收益更重要还是未来收益更重要，随着气候变化的影响日益迫近，选择相对高的社会折现率也体现了适应性投资的紧迫性。
6. 在效益计算中，规避未来损失存在被低估的问题。受数据可获性影响，本报告仅考虑项目可以避免粮食作物减产的损失，而忽略了灌区内经济作物因得到有效灌溉而避免遭受的减产损失。
7. 宁夏自2004年起就开始试行水权转换机制。在试点灌区内，工业企业可与灌区签订合约，将其直接投资节水改造设施所节约下来的用水指标转移到工业项目上，从而扩大工业用水指标，使相关的工业增加值得到保障。水权转换既可以解决工业用水难的问题，同时也能提高水资源利用效率，最终达到优化水资源配置的目的。
8. 本报告采用定额法估计未来宁夏工业部门年新增用水需求，假设宁夏年工业增加值增速为4.7%，万元工业增加值取水量未来保持不变。由于未来用水效率提高，取水量实际上会降低，因此本报告估计的新增用水需求可能比实际高。
9. 在计算节水效益时，本报告使用的是项目新增节水而非节水总量。新增节水是在节水总量的基础上减去灌区内因新增灌溉面积、改变作物种植结构以及养育防护林而额外使用的水量。
10. 节水灌溉项目覆盖的灌区内林草面积的增加，可以起到增加碳汇和释放氧气的作用，然而这不全是节水改造项目带来的效益。除了灌溉水源以外，优质林草品种投入和养护管理等因素也会影响林草植被的生长，进而影响其增加碳汇和释放氧气的效益。要独立体现节水配套项目建设带来的额外效益，还需要进一步研究灌溉水源在多大程度上可以促进林草生长并发挥固碳释氧的作用。
11. 建成区指市行政区范围内经过征收的土地和实际建设发展起来的非农业生产建设用地，它包括市区集中连片的部分，以及分散在近郊区与城市有着密切联系，具有基本完善的市政公用设施的城市建设用地。参考《中国城市建设统计年鉴2019》，武汉市2019年建成区面积为812.39平方千米。
12. 管网改造、泵站建设等灰色基础设施事实上也具有韧性建设的功能，但由于其属于城市防洪规划的历史组成部分，适应未来气候变化的额外性未能充分体现，因此本报告只着重分析绿色韧性基建及其配套设施所带来的额外性。
13. 考虑到两示范区不存在农业用地，故剔除相关的农业直接经济损失。因此，本研究汇报的损失结果相对较小。
14. 基于第二章的武汉市气候情景分析推算，采用RCP4.5和RCP8.5情景下的降雨量预测区间。
15. 固定资产投资与房地产增值效益的测算周期主要为项目建设期，因此不需要对未来成本效益进行折现测算。
16. 大亚湾片区使用灰色表示，相关岸线以及核用地不在本研究分析框架内。
17. 因为东部海堤重建（三期）项目的施工方案并未被公开，仅基于目前的公开信息，工程防护风暴潮等海洋灾害带来的可避免损失可能因未计算降低减蚀促淤和未计算减少洪涝带来的基础设施服务中断损失等而被低估。
18. 用地分析显示，2020年和2035年中长期规划中大鹏半岛处于海堤保护范围内的低海拔建成区域以居住、商业和民宿等混合利用为主，研究假设2030—2050年该区域用地结构与2035年规划保持一致。
19. 因为缺少大鹏半岛渔业养殖、捕捞和红树林保育关联的实地研究，所以红树林带来的渔业增值未被纳入此次研究。同时，建设标准更高、自然环境更好的韧性海堤带来的周边商业房产溢价，因为缺少较为准确的测算，也未被纳入此次研究。

20. 参考对2020年宁夏回族自治区一号文件的解读, http://www.nxnews.net/sz/nxdj/202002/t20200229_6611809.html
21. 《未来中国地区的暴雨洪涝灾害风险预估》(李柔珂, 2018)对地区人口和生产总值面对暴雨洪涝灾害的风险进行加权计算, 得到各个时期中国地区暴雨洪涝灾害风险指数(0~1), 根据风险指数数值将暴雨洪涝灾害风险划分为5个等级, 即I级(0, 0.0005]、II级(0.0005, 0.03]、III级(0.03, 0.1]、IV级(0.1, 0.3]、V级(0.3, 1]。
22. 2021年系统化全域推进海绵城市建设的首批示范城市包括唐山市、长治市、四平市、无锡市、宿迁市、杭州市、马鞍山市、龙岩市、南平市、鹰潭市、潍坊市、信阳市、孝感市、岳阳市、广州市、汕头市、泸州市、铜川市、天水市、乌鲁木齐市。
23. 此处沿海省份定义为有海岸线的省份, 即辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西、海南等11个省份(不含港澳台地区)。
24. 基于结果的融资是为项目或服务的实施提供资金的一种形式, 作为解决委托代理问题的一种尝试, 即提供资金的委托人在取得预定的结果后向实施项目或提供服务的代理人付款。通过为代理人设置金钱激励, 使其将委托人的目标作为自己的目标来追求, 从而使委托人的目标与代理人的目标相一致。资料来源: Grittner, 2013。
25. 参考数据来源: <https://en.climate-data.org/>
26. 平均而言, 1英亩土地每年能收集100万加仑雨水。若土地不能透水, 所有雨水只能通过排水系统, 携带污染物最终排入河流; 若对不透水地表进行管理, 一个“绿色英亩”能够降低80%~90%的雨水污染。“绿色英亩”按管理的雨水体积进行计量, 一个“绿色英亩”等效于降在1英亩“流域”上的1英寸雨水, 也即27158加仑(102.8立方米)受控制/管理的雨水。资料来源: Brooks (2012), Green City, Clean Waters: The Philadelphia Story. https://nacto.org/wp-content/uploads/2012/10/BrooksJessica_NACTO.pdf
27. BOT (Build-Operate-Transfer)模式即建设-运营-移交模式, 指政府将规划的工程交由社会资本投资兴建, 经营一段时间之后再转由政府经营。TOT (Transfer-Operate-Transfer)模式即移交-运营-移交模式, 指政府将建设好的项目的经营权有偿转让给社会投资人, 社会投资人在约定期限内通过经营回收全部投资并获得回报, 期满后将项目运营权交还政府。

参考文献

1. Amar Bhattacharya et al. 2015. Driving sustainable development through better infrastructure: Key elements of a transformation program. <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/07/07-sustainable-development-infrastructure-v2.pdf>
2. Brookings. 2015. <http://www.brookings.edu/research/papers/2015/07/sustainable-development-infrastructure-bhattacharya>
3. Bai, J., Y. Meng, R. Gou, J. Lyu, Z. Dai, X. Diao, H. Zhang, Y. Luo, X. Zhu, and G. Lin. 2021. Mangrove Diversity Enhances Plant Biomass Production And Carbon Storage In Hainan Island, China. *Functional Ecology* 35, no. 3: 774-786. Wiley.
4. Bayraktarov, E., M. Saunders, S. Abdullah, M. Mills, J. Beher, H. Possingham, P. Mumby, and C. Lovelock. 2016. The Cost And Feasibility Of Marine Coastal Restoration. *Ecological Applications* 26, no. 4: 1055-1074. Wiley.
5. Bennett. 2019. World's first dedicated climate resilience bond, for US\$ 700m, is issued by EBRD. <https://www.ebrd.com/news/2019/worlds-first-dedicated-climate-resilience-bond-for-us-700m-is-issued-by-ebrd.html>
6. Brandon C. et al. 2021 (Forth coming). The Triple Dividend of Building Climate Resilience: Taking Stock, Moving Forward. Working paper. World Resources Institute.
7. Brooks. 2012. Green City, Clean Waters: The Philadelphia Story. https://nacto.org/wp-content/uploads/2012/10/BrooksJessica_NACTO.pdf
8. CCFLA. 2015. The State of City Climate Finance. <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=2201&menu=35#:~:text=The%20State%20of%20City%20Climate%20Finance%20report%20makes%20five%20recommendations,%2C%20climate%20resilient%20urban%20infrastructure.&text=Urban%20areas%20account%20for%20over,all%20global%20greenhouse%20gas%20emissions>
9. Chen, L., and O. Frauenfeld. 2014. Surface Air Temperature Changes Over The Twentieth And Twenty-First Centuries In China Simulated By 20 CMIP5 Models. *Journal Of Climate* 27, no. 11: 3920-3937. American Meteorological Society.
10. Chen M P. 2020. Progress and outlook of adaptation negotiation under the United Nations Framework Convention on Climate Change. *Climate Change Research*, 16 (1): 0-0.
11. Climate Policy Initiative (CPI). 2020. Global Landscape of Climate Finance 2019. <https://www.climatepolicyinitiative.org/publication/global-landscape-of-climate-finance-2019/>
12. CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) and UNISDR (UN Office for Disaster Risk Reduction). Economic Losses, Poverty & Disasters: 1998-2017, 2018. <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/61119>
13. Ding, H., Faruqi, S., Wu, A., Altamirano, J. C., Ortega, A. A., Cristales, R. Z., ... & Verdone, M. 2017. Roots of prosperity: The economics and finance of re-storing land. https://files.wri.org/d8/s3fs-public/roots-of-prosperity_0.pdf
14. Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, Xu Y, Luo Y, Li Q P, Zhang J. 2007. Detection, Causes and Projection of Climate Change over China: An Overview of Recent Progress. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007(06):954-971.
15. EDF. 2020. Financing resilient communities and coastlines. https://static1.squarespace.com/static/5d5b210885b4ce0001663c25/t/5d8bb6ab609d4674de41a915/1569437360150/EIB_Report_August2018.pdf
16. European Commission Joint Research Centre. 2016. Global Flood Depth-Damage Functions: Methodology and the Database with Guidelines. LU: Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/16510>
17. Feng, X., and M. Tsimplis. 2014. Sea Level Extremes at the Coasts of China. *Journal Of Geophysical Research: Oceans* 119, no. 3: 1593-1608. American Geophysical Union (AGU).
18. Feng, Y., Jia, Y., Cui, N., Zhao, L., Li, C., & Gong, D. 2017. Calibration of Hargreaves model for reference evapotranspiration estimation in Sichuan basin of southwest China. *Agricultural Water Management*, 181, 1-9.
19. Global Commission on Adaptation. 2019. Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience. <https://gca.org/reports/adapt-now-a-global-call-for-leadership-on-climate-resilience/>
20. Grittner AM. 2013. Results-based Financing: Evidence from performance-based financing in the health sector. Discussion Paper. <https://www.oecd.org/dac/peer-reviews/Results-based-financing.pdf>
21. Hallegatte et al. 2019. Strengthening New Infrastructure Assets – A Cost-Benefit Analysis. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31916>
22. Hargreaves GH, Samani ZA .1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl Eng Agric*, 1(2):96-99.
23. IDB. 2019. 2020 Joint Report on Multilateral Development Banks' Climate Finance. <https://www.isdb.org/publications/2020-joint-report-on-multilateral-development-banks-climate-finance>
24. Infrastructure Outlook, 25-05-2021 <https://outlook.gihub.org>

25. IPCC. 2018. Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
26. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
27. Jiao, L., Y. Liu. 2010. Geographic Field Model Based Hedonic Valuation Of Urban Open Spaces In Wuhan, China. *Landscape And Urban Planning* 98, no. 1: 47-55. Elsevier BV.
28. Jiang, Tong, Buda Su, Jinlong Huang, et al. 2020. "Each 0.5°C of Warming Increases Annual Flood Losses in China by More than US \$60 Billion." *Bulletin of the American Meteorological Society* 101, no. 8 (2020): E1464-E1474.
29. Jones R G, Noguier M, Hassell D C, et al. 2004. Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS[M]. U K: Met office Hadley Centre.
30. Liang, C., S. Xin, W. Dongsheng, Y. Xiuying, and J. Guodong. 2016. The Ecological Benefit-Loss Evaluation In A Riverine Wetland For Hydropower Projects – A Case Study Of Xiaolangdi Reservoir In The Yellow River, China. *Ecological Engineering* 96: 34-44. Elsevier BV.
31. Liang, X. 2018. Integrated Economic And Financial Analysis Of China'S Sponge City Program For Water-Resilient Urban Development. *Sustainability* 10, no. 3: 669. MDPI AG.
32. Malik, A., Rahim A., Sideng, U., et al. 2019. Biodiversity Assessment of Mangrove Vegetation for the Sustainability of Ecotourism in West Sulawesi, Indonesia. *AACL Bioflux* 12: 1458-66.
33. NACWA .2021. New York City reaches out to its customers to propel Green Infrastructure investment. <https://www.nacwa.org/news-publications/news-detail/2021/06/28/new-york-city-reaches-out-to-its-customers-to-propel-green-infrastructure-investment>
34. OECD. 2018. Climate-resilient Infrastructure, OECD Environment Policy Paper No.14, OECD Publishing, Paris, <http://www.oecd.org/environment/cc/policy-perspectives-climate-resilient-infrastructure.pdf>
35. Oxford Economic & Global Infrastructure Hub. 2017 Global Infrastructure Outlook. <https://www.oxfordeconomics.com/recent-releases/Global-Infrastructure-Outlook>
36. Peng, T., J. Wang, and Z. Huang. 2019. Analysis Of Rainfall Features And Calculation Of Rainfall Pattern Of Short Duration Rainstorm In Wuhan, China. *Tecnología Y Ciencias Del Agua* 10, no. 4: 01-17. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
37. Peng Y, K. Reilly. 2020. Using Nature to Reshape Cities and Live with Water: An Overview of the Chinese Sponge City Programme and Its Implementation in Wuhan. <http://growgreenproject.eu/using-nature-reshape-cities-live-water-overview-chinese-sponge-city-programme-implementation-wuhan/>
38. Swiss Re. 2020. Sigma 2/2020: Natural Catastrophes in Times of Economic Accumulation and Climate Change. <https://www.swissre.com/institute/research/sigma-research/sigma-2020-02.html>
39. Tang, K., C. Gong, D. Wang. 2016. Reduction Potential, Shadow Prices, And Pollution Costs Of Agricultural Pollutants In China. *Science Of The Total Environment* 541: 42-50. Elsevier BV.
40. The Climate Action Tracker Thermometer. 2020. <https://climateaction-tracker.org/global/cat-thermometer/>
41. US Environmental Protection Agency. 2016. Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf
42. United States Government. 2021. Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990. https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocument_SocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf
43. United Nations Development Programme. 2011. Paving the Way for Climate-Resilient Infrastructure: Guidance for Practitioners and Planners. New York. https://librarywmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=6629#YWP9FhrPIPY
44. Wang L., W. Chen. 2014. A CMIP5 multimodal projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. *International Journal of Climatology*, 34(6):2019-2078.
45. World Bank. 2016. Emerging Trends in Mainstreaming Climate Resilience in Large Scale, Multi-sector Infrastructure PPPs. https://library.pppknowledgehub.org/attached_files/documents/2874/original/Mainstreaming_Climate_Resilience.pdf?1459201479
46. World Bank. 2019. Lifelines - The Resilient Infrastructure Opportunity. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31805>

47. World Bank. 2021. Enabling Private Investment in Climate Adaptation & Resilience: Current Status, Barriers to Investment and Blueprint for Action. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35203>
48. WRI. 2019. Unlocking the Potential for Transformative Climate Adaptation in Cities. Available at: <https://wrirosscities.org/research/publication/unlocking-potentialtransformative-climate-adaptation-cities>
49. Wu, S., A. Feng, J. Gao, M. Chen, Y. Li, L. Wang. 2016. Shortening the Recurrence Periods of Extreme Water Levels Under Future Sea-Level Rise. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 31, no. 10: 2573-2584. Springer Science and Business Media LLC.
50. Wu, Z., N. Cui, B. Zhu, et al. 2021. Improved Hargreaves Model Based on Multiple Intelligent Optimization Algorithms to Estimate Reference Crop Evapotranspiration in Humid Areas of Southwest China. *Atmosphere*, 12(1), 15.
51. Xi W., H. Ding. 2021. After the flood. *China Daily*. <http://www.chinadaily.com.cn/a/202108/16/WS6119af4fa310efa1bd668e82.html>
52. Zgheib (2017). EBRD provides a €120 million loan to the Morocco Saïss Water Conservation Project. <https://www.ebrd.com/news/2017/ebd-provides-a-120-million-loan-to-the-morocco-saïss-water-conservation-project.html>
53. Zhao, J., X. Feng, L. Deng, Y. Yang, Z. Zhao, et al. 2020. Quantifying the Effects of Vegetation Restorations on The Soil Erosion Export and Nutrient Loss on The Loess Plateau. *Frontiers in Plant Science* 11. Frontiers Media SA.
54. Zhou, Z., Z. Shanguan, D. Zhao. 2006. Modeling Vegetation Coverage and Soil Erosion in The Loess Plateau Area of China. *Ecological Modelling* 198, no. 1-2: 263-268. Elsevier BV.
55. 敖雪, 翟晴飞, 崔妍, 等. 2017. 东北地区气候变化CMIP5模式预估. *气象科技*, 45(2):298-306.
56. 保尔森基金会, 老牛基金会, 红树林基金会. 中国红树林保护及恢复战略研究报告. 深圳: 保尔森基金会. 2020. <https://paulsoninstitute.org.cn/wp-content/uploads/2020/06/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E7%BA%A2%E6%A0%91%E6%9E%97%E4%BF%9D%E6%8A%A4%E4%B8%8E%E6%81%A2%E5%A4%8D%E6%88%98%E7%95%A5%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%8A%A5%E5%91%8A%E2%80%94%E6%91%98%E8%A6%81%E7%89%88.pdf>
57. 曹格丽, 姜彤. 2010. 中国适应气候变化的政策、行动与进展. 社会科学文献出版社.
58. 曹丽花, 刘合满, 杨东升. 2016. 农田土壤固碳潜力的影响因素及其调控(综述). *江苏农业科学*.16-20.
59. 柴麒麟, 傅莎, 温新元等. 2019. 中国实施2030 年应对气候变化国家自主贡献的资金需求研究. *中国人口·资源与环境*. 29 (4): 1 - 9.
60. 长沙晚报网.2020. 雨水资源资产化! 中国首笔雨水资源水权交易在长沙完成. <https://www.icswb.com/h/168/20201212/689127.html>
61. 陈雷. 2003. 节水灌溉是一项革命性的措施. *中国节水灌溉网* <http://www.jszg.com.cn/Index/Display.asp?NewsID=1528>
62. 陈璐. 2016. 气候变化对宁夏中部干旱带玉米生产影响的模拟研究. 南京: 南京信息工程大学.
63. 陈楠, 许吟隆, 陈晓光等. 2007. PRECIS模式对宁夏气候变化情景的模拟分析. *第四纪研究*.27(3):332-338.
64. 陈奇礼, 陈特固. 1995. 海平面上升对中国沿海工程的潮位和波高设计值的影响. *海洋工程*. (01):1-7
65. 陈星任, 杨岳, 何佳男等. 2020. 近60年中国持续极端降水时空变化特征及其环流因素分析. *长江流域资源与环境*. 29(09):2068-2081.
66. 陈活泼. 2013. CMIP5模式对21世纪末中国极端降水事件变化的预估. *科学通报*. 58(08):743-752.
67. 程雪蓉, 任立良, 杨肖丽等. 2016. CMIP5多模式对中国及各分区气温和降水时空特征的预估. *水文*. 36(04):37-43.
68. 大自然保护协会. 2016. 2016前瞻中国海绵城市政策. https://www.sohu.com/a/64171758_384269
69. 丁锋. 2015. 中国首只巨灾债券境外成功发行. *财新*. <https://finance.caixin.com/2015-07-14/100828613.html>
70. 丁瑞. 2018. 未来条件变化对琼州海峡及邻近海域风暴潮的影响分析. 华南理工大学
71. 董林林, 于东升, 张海东等. 2015. 宁夏引黄灌区土壤有机碳密度时空变化特征. *生态学杂志*. 34(8): 2245.
72. 杜尧东, 杨红龙, 刘蔚琴. 2014. 未来RCPs情景下珠江流域降水特征的模拟分析. *热带气象学报*. 03:495-502.
73. 范航清, 何斌源, 王欣等. 2017. 生态海堤理念与实践. *广西科学*. 24(5): 427-34, 440.
74. 封珊, 徐长乐. 2014. 全球气候变化及其对人类社会经济影响研究综述. *中国人口·资源与环境*. 24(S2):6-10.
75. 冯爱青, 高江波, 吴绍洪等. 2016. 气候变化背景下中国风暴潮灾害风险及适应对策研究进展. *地理科学进展*. 35(11): 1411-19. <https://doi.org/10.18306/dlkxjz.2016.11.011>
76. 冯伟忠, 张娟, 游大伟等. 2013. 被高估的“海平面上升对珠江口风暴潮灾害评估影响”的原因探析. *热带地理*. 33(05):640-645.

77. 高涛涛, 殷淑燕, 王水霞. 2018. 基于SPEI指数的秦岭南北地区干旱时空变化特征. 干旱区地理. 41(04):761-770.
78. 甘肃省人民政府公报. 2020. 关于发展抗旱节水灌溉新技术的情况 <http://www.gansu.gov.cn/art/c103795/c104459/c104466/202007/210186.shtml>
79. 国家发展改革委经济研究所. 2010. 中国经济: 宏观经济分析与监管改革研究. 经济科学出版社.
80. 国家发展改革委、水利部. 2017. 全国海堤建设方案, 发改农经. [2017] 1426号.
81. 国家基本建设委员会. 1980. 城市规划定额指标暂行规定
82. 国家林业局. 2015. 第九次全国森林资源清查宁夏森林资源清查成果 (2015年)
83. 国家统计局. 2019. 分省年度数据. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>
84. 国家质量监督检验检疫总局. 2017. 气象干旱等级. GBT20481-2017. <https://cmdp.ncc-cma.net/download/Drought/GBT20481-2017.pdf>
85. 国民经略. 2021. 2020年中国内地TOP30城市GDP排行榜. <http://news.cnfol.com/guoneicaijing/20210206/28691185.shtml>
86. 国务院. 2008. 排污费征收使用管理条例 (国务院令字第369号)
87. 国务院办公厅. 2015. 国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见. 国办发 [2015] 75号.
88. 广东省人民代表大会常务委员会. 2017. 广东省人民代表大会常务委员会关于广东省大气污染物和水污染物环境保护税适用税额的决定.
89. 广东省自然资源厅. 2020. 2019年广东省海洋灾害公报.
90. 郭倩. 2021. 新基建项目竞相上马 十万亿投资大幕将启. <https://finance.chinadaily.com.cn/a/202104/13/WS6074f01da3101e7ce-9748caf.html>
91. 何斌源, 范航清, 王瑁等. 2007. 中国红树林湿地物种多样性及其形成. 生态学报. 27(11): 4859-70.
92. 何蕾, 李国胜, 李阔等. 2019. 珠江三角洲地区风暴潮灾害工程性适应的损益分析. 地理研究. 38(02):427-436.
93. 黄镇国, 张伟强, 陈奇礼等. 2003. 海平面上升对广东沿海工程设计参数的影响. 地理科学. (01):39-41.
94. IPCC. 2008. 为分析排放、气候变化、影响和对策, 迈向新情景 <https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios-zh.pdf>
95. IPCC. 2014. 气候变化2014: 影响、适应和脆弱性 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_zh-1.pdf
96. 纪潇潇, 刘昌波, 潘婕等. 2015. PRECIS模拟系统对中国地面气温变化的QUMP集成预估. 气候与环境研究. 20(5):500-510
97. 李东欢, 邹立维, 周天军等. 2017. 全球1.5℃温升背景下中国极端事件变化的区域模式预估. 地球科学进展. 32(4): 446-457.
98. 李皓宇, 彭逸生, 刘嘉健等. 2016. 粤东沿海红树林物种组成与群落特征. 生态学报. 36(1): 252-60. <https://doi.org/10.5846/stxb201408031548>
99. 李剑萍, 杨侃, 曹宁等. 2009. 气候变化情景下宁夏马铃薯单产变化模拟. 中国农业气象. 30(03): 407.
100. 李阔, 李国胜. 2017. 气候变化影响下2050年广东沿海地区风暴潮风险评估. 科技导报. 35(05):89-95.
101. 李阔, 许吟隆. 2019. 气候相关灾害新特征分析与气候变化致贫关键风险评估. <https://www.oxfam.org.cn/index.php?c=article&id=3245>
102. 李柔珂, 李耀辉, 徐影等. 2018. 未来中国地区的暴雨洪涝灾害风险评估. 干旱气象. 36(03):341-352.
103. 李怡. 2010. 广东省沿海防护林综合效益计量与实现研究. 博士学位论文. 北京. 北京林业大学.
104. 联合国. 2019. 气候行动倡议 <https://www.un.org/zh/climate-change/climate-action-coalitions>
105. 梁鸿, 潘晓峰, 余欣繁等. 2016. 深圳市水生态系统服务功能价值评估. 自然资源学报. 31(9): 1474-87. <https://doi.org/10.11849/zrzyxb.20151107>
106. 梁驹, 潘婕, 王长桂等. 2014. 基于PRECIS的西北太平洋热带气旋生成情景预估. 热带气象学报. (3):542-550
107. 梁玉莲, 延晓冬. 2016. RCPs情景下中国21世纪气候变化预估及不确定性分析[J]热带气象学报. 32 (2): 183-192.
108. 辽宁省建平县水务局. 2014. 节水滴灌是干旱半干旱地区农业发展的必由之路. <http://www.jsqg.com.cn/Files/PictureDocument/20140612134302695200734454.pdf>
109. 林文漪, 孙艳, 赵兴宇. 2021. 社会影响力债券在中国. 复观律师事务所.
110. 林小昭. 2020. 中国粮食地图: 黑豫鲁位居前三 “北粮南运” 趋势明显. <http://www.chinanews.com/gn/2020/08-17/9266684.shtml>
111. 刘昌新, 张海玲, 吴静. 2021. 基于SSPs情景的中国极端降水影响评估. 环境保护. 49(08):29-34.

112. 刘诗平. 2019. 中国灌溉面积达11.1亿亩 正在建设一批现代化灌区. http://www.xinhuanet.com/2019-07/30/c_1124817344.htm#:~:text=%E6%88%AA%E8%87%B3%E7%9B%AE%E5%89%8D%EF%BC%8C%E5%85%A8%E5%9B%BD%E8%8A%82%E6%B0%B4%E4%BA%86%3E4%B4%BF%E5%A4%9A%E4%BA%A9%E3%80%82
113. 刘伟, 陈彦斌. 2021. “两个一百年” 奋斗目标之间的经济发展: 任务、挑战与应对方略. 中国社会科学. http://www.cssn.cn/index/index_focus/202104/t20210425_5329052.shtml
114. 陆咏晴, 严岩, 丁丁等. 2018. 我国极端降水变化趋势及其对城市排水压力的影响. 生态学报. 38(05):1661-1667.
115. 罗武章, 宋磊, 何容杰等. 2019. 台风“山竹”作用下城市复合型灾害调查报告. 浙江水利科技. 222(2): 16-22.
116. 罗鑫玥, 陈明. 2019. 城镇化对气候变化影响的研究进展. 地球科学进展. 34(9): 984-97. <https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2019.09.0984>
117. 马振华, 李才文. 2019. 西北干旱地区人工造林保存和成林状况影响因素分析. 林业资源管理.
118. 民政部国家减灾中心、联合国开发计划署驻华代表处. 2017. 城市洪涝灾害风险管理能力调研报告.
119. 聂宇华, 汤超莲, 程泽梅. 2016. 21世纪末珠江口深圳最高潮位重现期值预估. 热带地理. 36(06):901-905.
120. 宁夏回族自治区粮食和物资储备局. 2021. 2020年粮食市场分析.
121. 宁夏回族自治区水利厅. 2021. 2020年宁夏水资源公报.
122. 宁夏回族自治区水利厅. 2016. 宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划
123. 宁夏回族自治区水利厅. 2016. 宁夏高效节水灌溉“十三五”规划
124. 宁夏回族自治区水利厅. 2021. 宁夏中型灌区基本信息表.
125. 宁夏回族自治区统计局. 2019. 宁夏统计年鉴.
126. 宁夏回族自治区统计局. 2020. 宁夏统计年鉴.
127. 宁夏回族自治区统计局. 2021. 宁夏2020年国民经济和社会发展统计公报
128. 农业农村部. 2019. 2019年12月鲜活农产品供需形势分析月报. http://202.127.45.101/ztl/nybrl/rfxx/202001/t20200117_6336178.htm
129. 农业农村部. 2020. 河南省农业节水灌溉面积达2700万亩. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202011/t20201106_6355890.htm
130. 欧阳志云, 靳乐山. 2018. 面向生态补偿的生态系统生产总值 (GEP) 和生态资产核算. 北京: 科学出版社.
131. 潘欣, 尹义星, 王小军. 2017. 1960 ~ 2010年长江流域极端降水的时空演变及未来趋势. 长江流域资源与环境. 26(03):436-444.
132. 彭聪姣, 钱家炜, 郭旭东等. 2016. 深圳福田红树林植被碳储量和净初级生产力. 应用生态学报. 27: 2059-65.
133. 彭照. 2020. 武汉: 确保到2030年八成以上建成区达到海绵城市标准. 央广网. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1687051007910093977&wfr=spider&for=pc>
134. 瞿剑. 2021. 58%粮食来自北方干旱缺水地区, 可持续吗. 中国科技网. http://stdaily.com/index/kejixinwen/2021-01/28/content_1075918.shtml
135. 邵传可. 2013. 不同管理模式下人工苜蓿地固碳效应分析. 西安科技大学.
136. 深圳市大鹏新区发展和财政局社会经济调查中心. 2021. 大鹏新区2020年1-12月经济运行简析.
137. 深圳市大鹏新区政府. 2020. 大鹏概况. 大鹏新区政府在线.
138. 深圳市大鹏新区政府. 2021. 统计年鉴2013-2019. 大鹏新区政府在线.
139. 深圳市大鹏新区文体旅游局. 2018. 2018年第三季度大鹏新区旅游经济运行情况报告.
140. 深圳市东部海堤重建工程 (三期). 2020.
141. 深圳市规划和自然资源局. 2018. 深圳市海岸带综合保护与利用规划 (2018—2035).
142. 深圳市气象局. 2019. 2018年深圳市气候公报.
143. 深圳市人居环境委员会. 2014. 深圳市东部海堤重建工程 (二期) 报告表环境影响评价报告公示. <https://max.book118.com/html/2019/0318/7105003044002014.shtm>
144. 深圳市市场监督管理局. 2021. 深圳市生态系统生产总值核算技术规范, DB4403/T-2021 § (2021).
145. 深圳市水务局. 2010. 东部海堤重建工程 (一期) 环境影响情况分析评价评估报告书简本. <https://max.book118.com/html/2015/0814/23328493.shtm>
146. 生态环境部环境规划院, 中国科学院生态环境研究中心. 2020. 陆地生态系统生产总值 (GEP) 核算技术指南 (1.0版). http://www.caep.org.cn/zclm/sthjyjjhszx/zxdt_21932/202101/W020210122402035975103.pdf
147. 水利部. 2013. 水利建设项目经济评价规范 (SL 72-2013).
148. 水利部. 2020. 中国水旱灾害公报2019.
149. 水利部. 2021. 中国水资源公报2020.

150. 孙文婧. 2020. 海绵城市建设效益量化及综合评价——以宁夏固原市为例. 西安理工大学.
151. 陶蕾. 2014. 国际气候适应制度进程及其展望. 南京大学学报 (哲学·人文科学·社会科学版), 51(02):52-60+158.
152. 滕怀颐, 冯克鹏. 2021. 基于SPEI干旱指数的西北地区干旱时空分布. 农业与技术, 41(08):887-893.
153. 王斌, 李鹏, 徐国策等. 2019. 中国一级流域年气温的时空变化特征. 资源科学, 41(01):152-163.
154. 王康发生, 尹占娥, 殷杰. 2011. 海平面上升背景下中国沿海台风风暴潮脆弱性分析. 热带海洋学报, 30(06):31-36.
155. 王连喜, 刘静, 李琪等. 2013. 气候变化对宁夏水稻的影响及适应性研究. 地球科学进展, 28(11): 1248-1256.
156. 王艳姣, 闫峰. 2014. 1960-2010年中国降水区域分异及年代际变化特征. 地理科学进展, 33(10):1354-1363.
157. 王晓欣, 姜大膀, 郎咸梅. 2019. CMIP5多模式预估的1.5℃升温背景下中国气温和降水变化. 大气科学, 43(05):1158-1170.
158. 吴绍洪, 尹云鹤. 2012. 极端事件对人类系统的影响. 气候变化研究进展, 8(2): 99-102.
159. 吴涛, 康建成, 李卫江等. 2007. 中国近海海平面变化研究进展. 海洋地质与第四纪地质, 27(4): 123-30
160. 武汉市城乡建设委员会、武汉市国土资源和规划局、武汉市水务局、武汉市园林和林业局. 2016. 武汉市海绵城市建设技术指南 (试行).
161. 武汉市规划研究院. 武汉市海绵城市专项规划. http://www.wpd.cn/project-3-i_11332.htm
162. 武汉市人民政府. 2018. 武汉市海绵城市建设试点工作绩效自评报告.
163. 武汉市人民政府办公厅. 2016. 武汉市海绵城市建设试点工作实施方案.
164. 武汉市统计局. 2018. 武汉市第三次全国农业普查主要数据公报.
165. 武汉市水务局. 2020. 武汉市水资源公报2019.
166. 武汉市水务局. 2021. 武汉市水资源公报2020.
167. 武汉市园林和林业局. 2021. 2020年武汉市绿化状况公报.
168. 武汉市自然资源和规划局. 2020. 关于进一步加强武汉市居住用地建设强度管理的通知.
169. 谢伏瞻, 刘雅鸣, 陈迎等. 2019. 气候变化绿皮书: 应对气候变化报告. 北京: 社会科学文献出版社.
170. 谢伏瞻, 刘雅鸣, 陈迎等. 2020. 气候变化绿皮书: 应对气候变化报告. 北京: 社科文献出版社.
171. 谢高地, 张彩霞, 张雷明等. 2015. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 30(08):1243-1254.
172. 许臣思. 2017. 面向雨洪问题的城市可持续发展方式分析——以武汉市为例. 建筑与文化, (05):78-79.
173. 许吟隆, 薛峰, 林一骅. 2003. 不同温室气体排放情景下中国21世纪地面气温和降水变化的模拟分析. 气候与环境研究, 8(2):209-217.
174. 许吟隆, 张勇, 林一骅等. 2006. 利用PRECIS分析SRES B2情景下中国区域的气候变化响应. 科学通报, 51(17):2068-2074.
175. 闫丹丹, 沙金霞, 刘彬等. 2019. 地下水生态系统服务价值评估. 水电能源科学, 37(2).
176. 杨桂山, 施雅风. 1995. 海平面上升对中国沿海重要工程设施与城市发展的可能影响. 地理学报, 50(4): 302-309.
177. 杨红龙, 许吟隆, 张镭等. 2010. SRES A2情景下中国区域21世纪末平均和极端气候变化的模拟. 气候变化研究进展, 6(3):157-163.
178. 杨勤, 许吟隆, 林而达等. 2009. 应用 DSSAT 模型预测宁夏春小麦产量演变趋势. 干旱地区农业研究, 27 (2): 41-48.
179. 杨秀, 付琳. 2018. 国际社会适应气候变化政策机制设计的经验、启示及建议. 《气候战略研究》简报 2018 年第 20 期 <http://www.ncsc.org.cn/yjcg/dybg/201904/W020190424560175281806.pdf>
180. 杨绚, 李栋梁, 汤绪. 2014. 基于CMIP5多模式集合资料的中国气温和降水预估及概率分析. 中国沙漠, 34(03):795-804.
181. 殷杰. 2011. 中国沿海台风风暴潮灾害风险评估研究. 华东师范大学, 1:1-2.
182. 应急管理部. 2021. 应急管理部发布2020年全国自然灾害基本情况.
183. 英晓明, 赵明利. 2020. 广东省风暴潮海洋灾害特征及风险防控对策研究. 海洋开发与管理, 6: 30-33.
184. 应雯雯. 2020. 中国次生灾害风险及保险启示. 瑞士再保险.
185. 于晓玲, 李春强, 王树昌等. 2009. 红树林生态适应性及其在净化水质中的作用. 热带农业工程, 33(2): 19-23.
186. 张娇艳, 李扬, 吴战平等. 2017. RCPs情景下贵州省气候变化预估分析. 气象科技, 45(1):108-115.
187. 张莉, 郭志华, 李志勇. 2013. 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展. 应用生态学报, 24(4): 1153-1153.
188. 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. 2019. CMIP6情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述. 气候变化研究进展, 15(05):519-525.

189. 张平, 孔昊, 王代锋. 2017. 海平面上升叠加风暴潮对 2050 年中国海洋经济的影响研究. 海洋环境科学. 46(1): 129-35.
190. 张强, 韩兰英, 张立阳等. 2014. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. 地球科学进展. 29(01):80-91.
191. 张棋, 许德合, 丁严. 2021. 基于SPEI和时空立方体的中国近40年干旱时空模式挖掘. 干旱地区农业研究. 39(03):194-201.
192. 张悦, 李珊珊, 陈灏等. 2017. 广东省台风灾害风险综合评估. 热带气象学报. 33(2): 281-88.
193. 张梓太, 张乾红. 2010. 国际气候适应制度的滞后性及其发展障碍.
194. 赵德法, 王安乐, 陈朝辉. 2004. 持续高温的发生规律对农业生产的影响. 山西农业科学. (01):76-78.
195. 赵路伟. 2016. 重庆市高温灾害风险评价研究. 西南大学. 2016.
196. 赵晟, 洪华生, 张珞平. 2007. 中国红树林生态系统服务的能值价值. 资源科学. 29(1): 147-54.
197. 赵彦茜, 肖登攀, 柏会子. 2019. CMIP5气候模式对中国未来气候变化的预估和应用. 气象科技. 47(04):608-621.
198. 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 2018. 从检验CMIP5气候模式看CMIP6地球系统模式的发展. 气候变化研究进展. 14(06):643-648.
199. 浙江省质量技术监督局. 2014. 红树林造林技术规程. DB 33/T 920-2014 § (2014). <http://www.zjsis.com/upload/2014/3/2715544150.pdf>
200. 钟丽锦, 付晓天, 箫心恬等. 2015. 宁夏水压力分析与对策建议. 世界资源研究所.
201. 中国保险网. 2021a. 广东巨灾保险已覆盖全省18个地市 五年累计实现保费收入约8亿元. <http://www.china-insurance.com/yc/20210818/59393.html>
202. 中国保险网. 2021b. 中再集团总裁和春雷: 推动保险业供给侧创新为“平安中国”保驾护航. <http://m.china-insurance.com/qiye/bxgs/20210302/52837.html>
203. 中国气象局. 2015. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告.
204. 中国气象局. 2020. 2019年中国气候公报.
205. 中国气象局. 2021. 2020年中国气候公报.
206. 中国气象局. 2010. 中国气象灾害年鉴 (2009) .
207. 中国气象局气候变化中心. 2020. 中国气候变化蓝皮书2019.
208. 中国气象局气候变化中心. 2021. 中国气候变化蓝皮书2020.
209. 中国人大网. 2018. 中华人民共和国环境保护税法-附表一: 环境保护税税目税额表. 附表二: 应税污染物和当量值表. http://www.npc.gov.cn/zgrdw/npc/xinwen/2018-11/05/content_2065629.htm
210. 中国银行保险监督管理委员会. 2020. 第266场银行业保险业例行新闻发布会 <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/gbwxwfbh/xwfbh/38176/Document/1695747/1695747.htm>
211. 中国质量认证中心武汉分中心. 2019. 武汉市气候变化风险评估报告.
212. 住房和城乡建设部. 2020. 中国城市建设统计年鉴2019.
213. 周莉, 兰明才, 蔡荣辉等. 2018. 21世纪前期长江中下游流域极端降水预估及不确定性分析. 气象学报. 76(01):47-61.
214. 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 2019. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述. 气候变化研究进展. 15(05):445-456.
215. 自然资源部. 2020. 中国海洋灾害公报2019.
216. 自然资源部. 2021. 2020年中国海平面公报.

致谢

在本报告编写及出版的过程中，有诸多专家、同事提供了大力支持，并提出了宝贵的意见与建议。作者由衷感谢以下人士：

包括世界资源研究所的领导与同事：

方莉、刘哲、蒋小谦、邱诗永、周李焕、李博、窦瑞云、徐靖寒、张黛阳、Carter Brandon。

外部专家（按专家姓氏拼音排序）：

陈金强 亚洲开发银行

陈志华 生态环境部气候司对外合作与交流处

戴 青 独立顾问

廖夏伟 世界银行集团

向 飞 中国人民财产保险公司责任保险事业部

许红梅 国家气候中心

杨明祥 中国水利水电科学研究院水资源研究所

叶燕斐 中国银保监会政策研究局

叶祖达 香港中文大学中国城市住宅研究中心、北京大学城市规划与设计中心

张 翔 武汉大学

此外，感谢城市中国计划总监张耕田、深圳市环境科学院生态与可持续发展研究所孙芳芳、杨梦婵、Arcadis凯谛思中国哈文梅、宁夏清洁发展机制环保服务中心程志对数据收集和研究方法的支持，实习生金萌、王贵淇、朱豫礼、刘欣悦、李镒对研究工作的支持，感谢谢亮对文章的编辑校对及张烨对文章的排版设计。

最后感谢全球适应委员会 (Global Commission on Adaptation)，以及包括荷兰外交部、丹麦外交部、瑞典国际发展合作机构在内的WRI战略合作伙伴对本项目提供资助。

作者介绍

世界资源研究所

丁宏宇是世界资源研究所经济中心高级环境经济学家。
邮件: helen.ding@wri.org

余甜是世界资源研究所经济中心初级经济分析师。
邮件: tian.yu@wri.org

奚文怡是世界资源研究所中国气候与能源部副研究员。
邮件: wenyi.xi@wri.org

鹿璐是世界资源研究所中国可持续城市部副研究员。
邮件: lu.lu@wri.org

房伟权是世界资源研究所中国副首席代表。
邮件: weekean.fong@wri.org

国家应对气候变化战略研究和国际合作中心

曹颖是国家应对气候变化战略研究和国际合作中心政策法规部研究员。邮件: caoying@ncsc.org.cn

匡舒雅是国家应对气候变化战略研究和国际合作中心政策法规部助理研究员。邮件: kuangsy@ncsc.org.cn

中央财经大学绿色金融国际研究院

崔莹是中央财经大学绿色金融国际研究院助理院长。
邮件: yingcui@rccef.com.cn

周杰侯是中央财经大学绿色金融国际研究院研究员。
邮件: zhoujieyu@iigf.com.cn

刘慧心是中央财经大学绿色金融国际研究院研究员。
邮件: liuhuixin@iigf.com.cn

中国农业科学院

许吟隆是中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员。邮件: xuyinlong@caas.cn

李阔是中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所助理研究员。邮件: likuo@caas.cn

关于世界资源研究所

世界资源研究所是一家独立的研究机构，其研究工作致力于寻求保护环境、发展经济和改善民生的实际解决方案。

我们的挑战

自然资源构成了经济机遇和人类福祉的基础。但如今，人类正以不可持续的速度消耗着地球的资源，对经济和人类生活构成了威胁。人类的生存离不开清洁的水、丰饶的土地、健康的森林和安全的气候。宜居的城市和清洁的能源对于建设一个可持续的地球至关重要。我们必须在未来十年中应对这些紧迫的全球挑战。

我们的愿景

我们的愿景是通过对自然资源的良好管理以建设公平和繁荣的地球。我们希望推动政府、企业和民众联合开展行动，消除贫困并为全人类维护自然环境。

我们的工作方法

量化

我们从数据入手，进行独立研究，并利用最新技术提出新的观点和建议。我们通过严谨的分析、识别风险，发现机遇，促进明智决策。我们重点研究影响力较强的经济体和新兴经济体，因为它们对可持续发展的未来具有决定意义。

变革

我们利用研究成果影响政府决策、企业战略和民间社会行动。我们在社区、企业和政府部门进行项目测试，以建立有力的证据基础。我们与合作伙伴努力促成改变，减少贫困，加强社会建设，并尽力争取卓越而长久的成果。

推广

我们志向远大。一旦方法经过测试，我们就与合作伙伴共同采纳，并在区域或全球范围进行推广。我们通过与决策者交流，实施想法并提升影响力。我们衡量成功的标准是，政府和企业的行动能否改善人们的生活，维护健康的环境。

关于国家应对气候变化战略研究和国际合作中心 (NCSC)

国家应对气候变化战略研究和国际合作中心（以下简称国家气候战略中心）是直属于生态环境部的正司级事业单位，是应对气候变化司的主要技术支撑机构，是国内唯一的、国家级的从事气候变化战略研究和国际合作的研究机构，也是我国应对气候变化的国家级战略研究机构和国际合作交流窗口。

国家气候战略中心在应对气候变化政策、法规、战略、规划等方面开展研究；承担国内履约、统计核算与考核、碳排放权交易管理、国际谈判、对外合作与交流等方面的技术支持工作；同时开展应对气候变化智库对话、宣传、能力建设和咨询服务，并承担清洁发展机制项目管理等工作。中心作为支撑机构参与国家低碳省市试点、低碳城镇、气候适应型城市的遴选、评估和相关政策研究等工作，对地方应对气候变化行动、实践和政策体系等方面具有丰富的研究经验，取得了大量研究成果，为我国应对气候变化领域的战略规划、政策制定等提供决策支撑。

作为应对气候变化战略研究和国际合作领域的国家级智库，国家气候战略中心在重大项目顶层规划和设计、项目流程管理、项目经费管理、人员管理和成果管理等方面拥有完善的体制机制和管理能力。近年来，承担了国家重点基础研究发展计划（973计划）、科技部“十二五”科技支撑计划项目、“十三五”科技部国家重点研发计划项目、中国清洁发展机制基金赠款项目、国家应对气候变化业务经费等国家部委和国际机构项目200多项，先后承担了国家低碳发展宏观战略项目管理办公室、全球适应中心办公室、世行PMR项目办公室等多项中央财政和国际项目管理职能，在大型平台建设和运行以及大型项目管理方面积累了丰富经验。

关于中央财经大学绿色金融国际研究院

中央财经大学绿色金融国际研究院（以下简称“绿金院”）是国内首家以推动绿色金融发展为目的的开放型、国际化的研究院，2016年9月由天风证券股份有限公司捐赠设立。绿金院依循“绿色共赢、协同创新、服务社会”的宗旨，秉承“高质量成果、独立性研究、广泛影响力和公益性教育”的信念，通过管理机制创新，交叉创新方向培育，绿色金融学科建设，富有责任感的绿色金融人才培养，以及国内外战略机构合作，建成具有鲜明创新学科特色的专业智库。致力于在更高层次上实现创新，从而更好地服务于中国未来金融体系与社会发展的道路探索、理论研究与制度建设。

任务与使命

研究

建立和拓展绿色金融、气候金融、能源金融和养老金融学科体系，形成独具特色的研究方向。支持前沿课题研究，鼓励交叉合作，承担更高级别的国际、国家级科研项目。发表具有高层次水平及影响力的相关领域研究成果。

咨询

发挥智库功能，为政府提供政策咨询，提交有价值的政策建议报告；为金融机构、事业单位和企业等提供切实可行的可操作研究服务。

转化

促进相关领域科研成果的创新与实践，打通由科研成果向创新金融产品转化的道路。实现科研成果的创新价值，助力金融机构与企业提升创新能力。

培养

通过中央财经大学长期积淀的人才培养优势，建设多层次人才培养体系，设定高层次、高水平人才的培养和激励机制，为中国经济社会的绿色转型贡献有生力量。

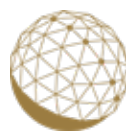
交流

探索通过多样化的平台和渠道，支持相关领域跨界、跨行业、跨机构的多方位交流，推动相关学科的学者和学生拓展科研事业。

传播

通过绿金院团队的建设，利用精准、灵活的传播手段和全媒体渠道，向全球传播相关领域优秀中英文研究成果，向国际、国内介绍和推广中国绿色金融的实践，建设权威的中国绿色金融传播基地。

资助方



GLOBAL
COMMISSION ON
ADAPTATION



Ministry of Foreign Affairs of the
Netherlands



MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS
OF DENMARK



图片说明

Cover 摄图网; pg. i 摄图网; pg. iv 摄图网; pg. vi flickr/cimmyt; pg. xii
Unsplash/Przemyslaw Strojnski; pg. xiv flickr/pyre1124; pg. xv flickr/pyre1124;
pg. xv flickr/95387537@N05; pg. xx 摄图网; pg. 5 摄图网; pg. 6 Unsplash/
billow926; pg. 17 worldlandscapearchitect.com; pg. 18 摄图网;
pg. 33 Unsplash/Willem Chan; pg. 36 flickr/paintdraw;
pg. 50 Unsplash/Shengpengpeng Cai; pg. 52 摄图网; pg. 54 graphic/Harry.

世界资源研究所（WRI）出版物，皆为针对公众关注问题而开展的适时性学术性研究。
世界资源研究所承担筛选研究课题的责任，并负责保证作者及相关人员的研究自由，同时积极征求和回应咨询
团队及评审专家的指导意见。若无特别声明，出版物中陈述观点的解释权及研究成果均由其作者专属所有。



Copyright 2021 World Resources Institute. 版权所有

本产品由创用（Creative Commons）4.0许可授权，许可副本参见<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

世界资源研究所（美国）北京代表处
北京市东城区东中街9号
东环广场写字楼A座7层K-M室
邮编：100027
电话：+86 10 6416 5697
WWW.WRI.ORG.CN

<https://doi.org/10.46830/wriipt.21.00031>