



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

附录

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/wript.21.00031>



目录

- 2 附录 I
基于不同气候风险的气候韧性基础设施类型举例
- 4 附录 II
中国气候变化的总体特征
- 10 附录 III
案例未来气候风险模型预测方法
- 12 附录 IV
生态系统服务价值评估方法 / 工具
- 13 附录 V
各案例项目介绍及计算方法

附录I

基于不同气候风险的气候韧性基础设施类型举例

风险 分类	现有基础设施增加气候韧性的措施		新建基础设施增加气候韧性的措施		项目与实践 举例
	结构性措施	非结构性措施	传统基础设施	自然基础设施	
城市内涝	对道路进行透水铺装改造；调整能源基础设施设计高度	修订气象灾害防护标准；建立完善灾害预警应急系统	修建沿河堤坝；额外修建抽水泵站；修建调节池、滞蓄池	增加湿地面积；修建雨水花园；增加绿色屋顶	中国30个“海绵城市”建设试点城市*
台风与风 暴潮	增加海堤高度和强度	改进选址；实施导航预警系统	修建沿海海堤结构；设置海岸与城市建筑间的防浪墙与缓冲带	增加基于生态系统的适应设施（如种植红树林带）	深圳市大鹏新区韧性海岸线项目建设；海南省东寨港红树林国家级自然保护区
连续干旱	对农业灌溉系统进行防蒸发和节水配套改造	科学调整种植制度及种植方式；选用抗旱力强的品种	修建水库；修建跨流域调水工程	增加植被覆盖面积以涵养水源	宁夏农业高效节水灌溉工程；宁夏贺兰山生态葡萄园建设（葡萄种植更适应当地干旱气候）

风险 分类	现有基础设施增加气候韧性的措施		新建基础设施增加气候韧性的措施		项目与实践举例
	结构性措施	非结构性措施	传统基础设施	自然基础设施	
沙尘暴	退耕还林（还草）；定期检查、加固、修复生产设施；施工方通过覆盖、固化、绿化、洒水等措施降尘	更新选址标准；加强大风预警监测	为强风区植被修建防风障	修建综合防护林体系	“三北”防护林生态工程（1979—2050）
强降雪、冰冻、暴雪	对关键基础设施进行抢修与防冻改造	实施导航预警系统；调配人力对交通基础设施进行安全巡检；及时排查隐患，防止次生灾害损失	/	/	/
极端高温天气	建筑、交通系统增设空气冷却系统	改进并使用更能忍受高温的设计标准	/	增加绿地面积与湿地面积、缓解城市热岛效应	上海市中心城区23万平方米的延安中路绿地建设
森林火灾	在基本交通基础设施（如道路、铁路等）旁安装防火屏障；对森林周边电力基础设施进行检查与抢修	增强在气候变暖背景下森林火灾引发机制研究；加强森林火灾预警监测能力；加强事故责任落实	/	/	四川省凉山彝族自治州西昌市“3·30”森林火灾事件调查
永久冻土融化	在路基处铺设工业保温层；修建隧道混凝土衬砌五层防水保温层	使用永久冻土稳定技术	在少数极不稳定冻土地段修建低架旱桥；在冻土区域建设排水设施，防止地下冰融化导致路基下沉	/	青藏铁路“以桥代路”；昆仑山隧道混凝土衬砌措施

* 注：目前由财政部、住房和城乡建设部、水利部三部委共同组成评审专家组评审的中国海绵城市试点城市共计30个，分别为2015年的迁安、白城、镇江、嘉兴、池州、厦门、萍乡、济南、鹤壁、武汉、常德、南宁、重庆、遂宁、贵安新区和西咸新区；2016年的福州、珠海、宁波、玉溪、大连、深圳、上海、庆阳、西宁、三亚、青岛、固原、天津、北京。来源：财政部2021年4月发布的《关于开展系统化全域推进海绵城市建设示范工作的通知》，http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/26/content_5602408.htm

附录II

中国气候变化的总体特征

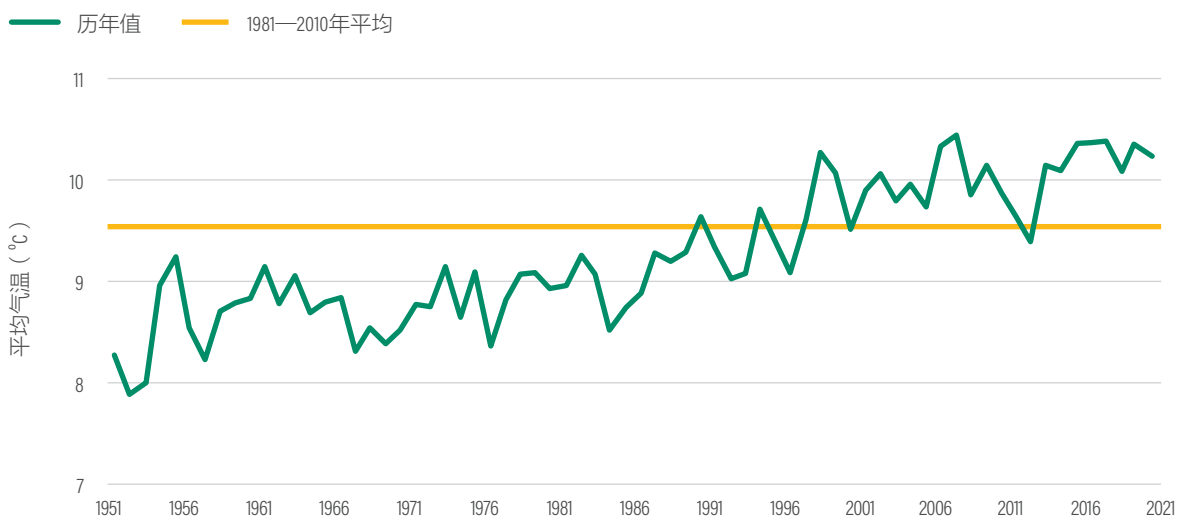
近年来，气候变化引起社会各界的广泛关注。《中国气候变化蓝皮书（2021）》显示，全球气候系统变暖仍在持续，主要温室气体平均浓度均创新高。在温度变化背景下，水分循环和蒸散也发生了明显变化，并表现出一定的区域性特征（Baker et al., 2019）。中国降水总量变化不大，但区域分布差异明显（王艳姣、闫峰，2014）。气候变化增加了中国极端气候事件发生的频率和强度，对自然生态系统和人们的生产生活产生重要影响（吴绍洪、尹云鹤，2012；李东欢等，2017）。

1. 气温的变化特征

1951—2020年，中国年平均气温呈显著上升趋势，2020年全国平均气温 10.25°C ，较常年偏高 0.7°C ，略低于2019年，为1951年以来第8高温年份（图 II-1）。

全国各季节的平均气温与常年同期平均气温差值计算结果显示，2020年中国四季气温均偏高，冬季（2019年12月—2020年2月）全国平均气温为 -2.2°C ，

图 II-1 | 1951—2020年全国平均气温历年变化



来源：中国气象局，2021

较常年同期偏高1.2℃；春季（2020年3月—2020年5月）全国平均气温为11.5℃，较常年同期偏高1.1℃；夏季（2020年6月—2020年8月）全国平均气温为21.5℃，较常年同期偏高0.5℃；秋季（2020年9月—2020年11月）全国平均气温为10.5℃，较常年同期偏高0.5℃，冬春偏暖显著（图II-2）。

从空间分布上看，全国多年平均气温空间分布大致以淮河—秦岭—青藏高原东南边缘沿线为界（图II-3），与中国1月0℃等温线和800 mm等降水量线大体一致，界线以南气温高于15℃，是中国高温区域的主要分布地区，界线以北是中国低温区域的主要分布区（王斌等，2019）。

通过计算平均气温距平，可以直观地体现气温与常年平均气温的差距。在气象上，气温距平值主要用来确定某个时段或时次的数据相对于该数据的某个长期平均值（如30年平均值）是高还是低，即计算时期内一系列平均气温与总平均气温的差值。平均气温距平0.5℃表明该地区平均气温相对于该地区常年平均气温偏高0.5℃。2020年，除重庆气温偏低外，全国其余30个省份（不含港澳台）气温均偏高（图II-4），其中，江西、浙江、广东、福建四省份为1961年以来历史最高，江苏和云南为第3高。全国六大区域气温均较常年偏高（图II-5），其中华南偏高0.7℃，为1961年以来历史第3高。

图 II-2 | 2020年各季节平均气温与常年同期平均气温差值

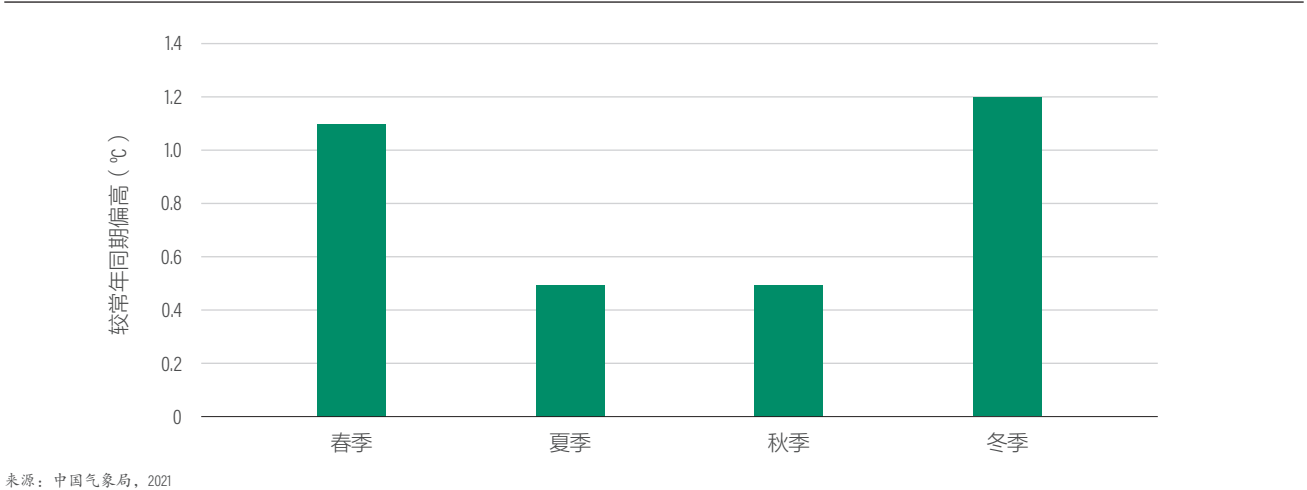


图 II-3 | 全国多年平均气温空间分布

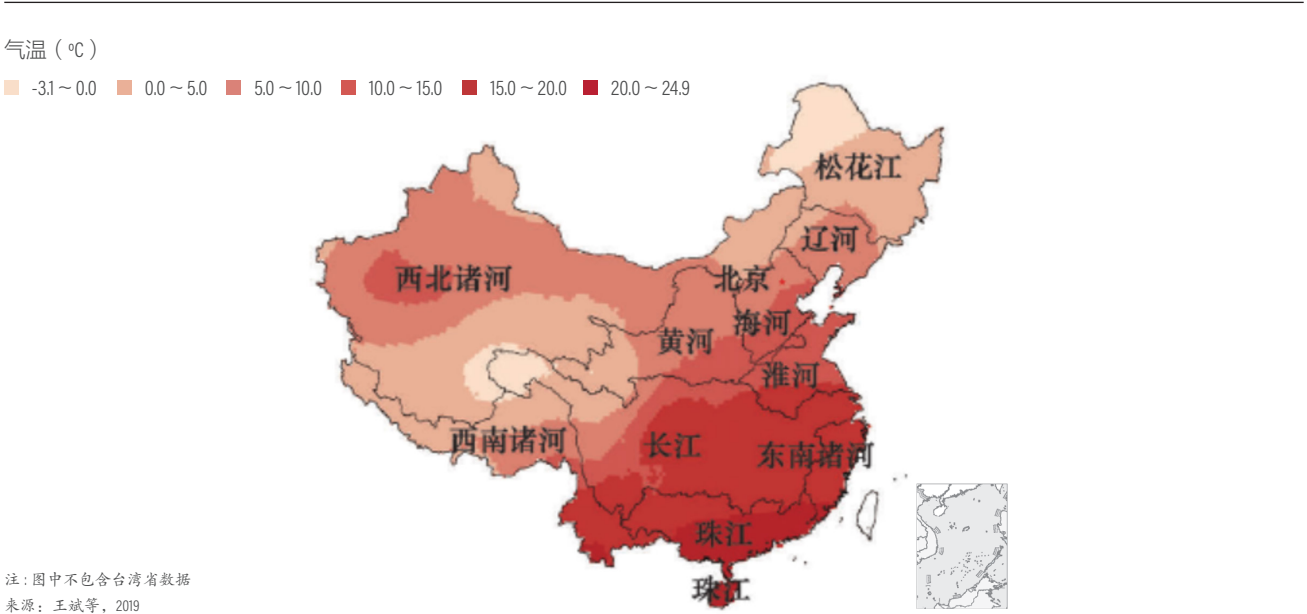
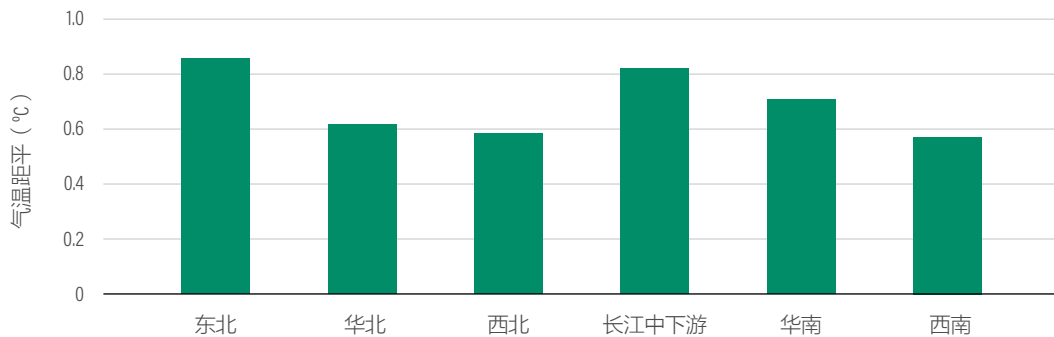


图 II-4 | 2020年各省份（不含港澳台）平均气温距平



来源：中国气象局，2021

图 II-5 | 2020年各区域平均气温距平



来源：中国气象局，2021

相关研究也表明，全国年平均气温总体表现为上升趋势，不同地区的冷暖期存在一定的差异，近20~30年属于偏暖期，表明中国气温也呈变暖趋势，且纬度越高，变暖趋势越明显（王斌等，2019）。

2. 降水量的变化特征

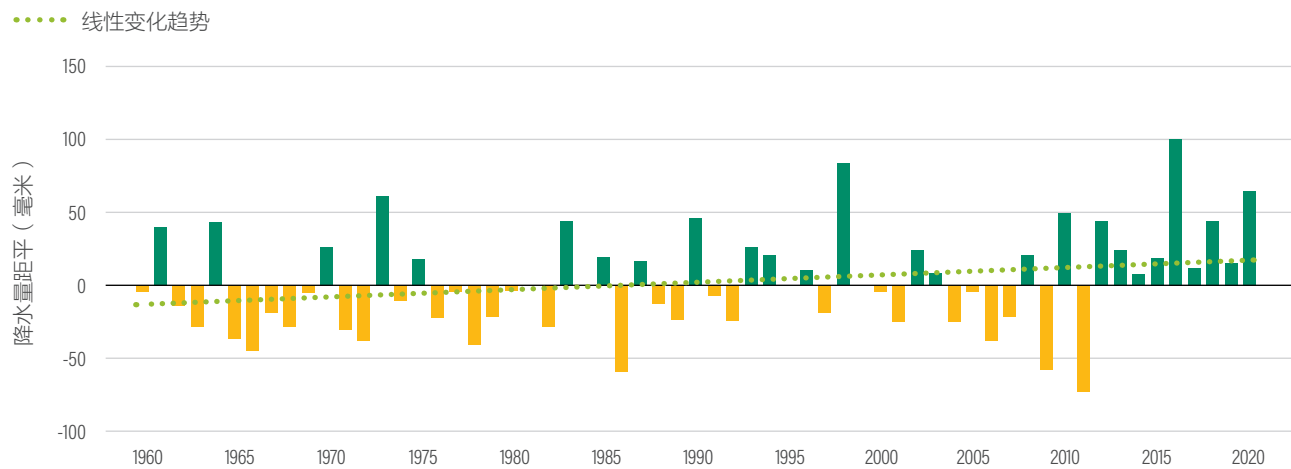
1961—2020年，中国平均年降水量呈微弱增加趋势，且年代际变化明显。2016年、1998年和1973年是排名前三位降水最高值年份，2020年全国平均降水量为694.8毫米，较常年偏多10.3%，比2019年偏多7.6%，为1951年以来第四高（见图II-6）。2011年、1986年和2009年是排名前三位的降水最低值年份。20世纪80—90年代中国平均年降水量以偏多为主，21世纪初10年总体偏少，2012年以来降水持续偏多（图II-6）。

全国各季节的平均降水量与常年同期平均降水量距平百分率计算结果显示，2020年中国冬、夏、秋三季降水偏

多，春季降水偏少（中国气象局，2021）。冬季（2019年12月—2020年2月）全国平均降水量为55.5毫米，较常年同期偏多35%；春季（2020年3月—2020年5月）全国平均降水量为137.0毫米，较常年同期偏少5%；夏季（2020年6月—2020年8月）全国平均降水量为373.0毫米，较常年同期偏多15%，为1961年以来同期第二高值；秋季（2020年9月—2020年11月）全国平均降水量为135.1毫米，较常年同期偏多13%（图II-7）。其中，降水量距平百分率计算方法为（实际值—同期历史均值）/同期历史均值。

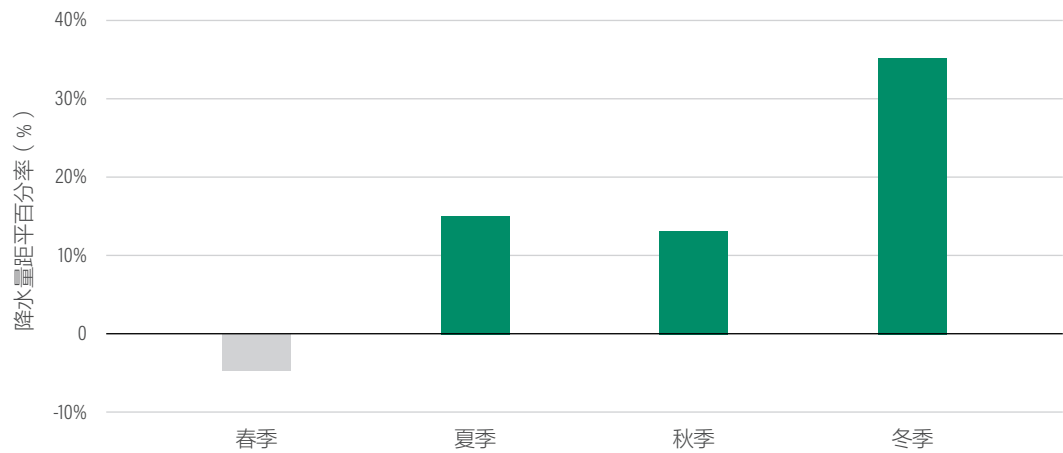
从空间分布上看，2020年全国区域及流域降水量均以偏多为主，全国六大区域中，除华南降水量（1569.5毫米）较常年偏少6%以外，其余降水量均偏多。其中，东北（745毫米，偏多27%）和长江中下游（1618.2毫米，偏多21%）降水量均为1961年以来次多，华北（503.1毫米）偏多13%，西南（1114.6毫米）和西北（421.2毫米）均偏多10%（图II-8）。

图 II-6 | 1961—2020年中国平均年降水量距平



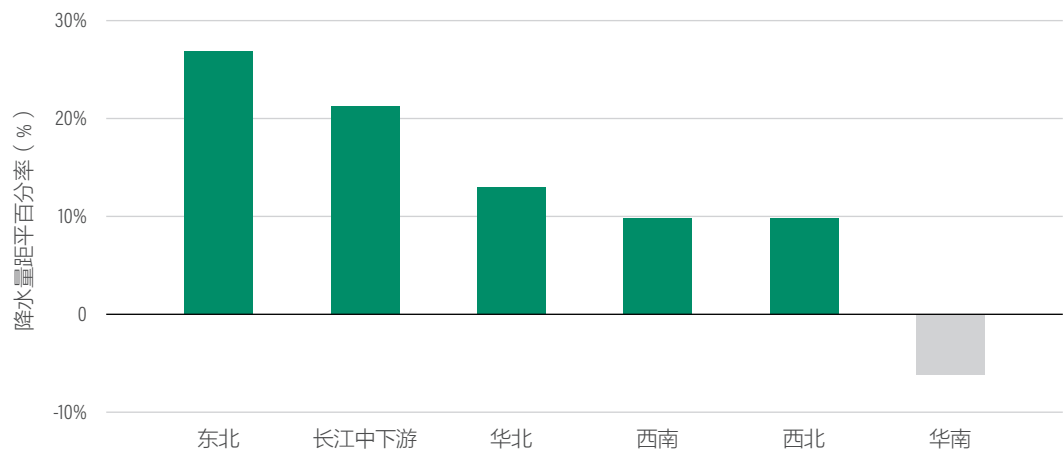
来源：中国气象局气候变化中心，2020；中国气象局，2020；中国气象局，2021

图 II-7 | 2020年中国不同季节降水量距平百分率



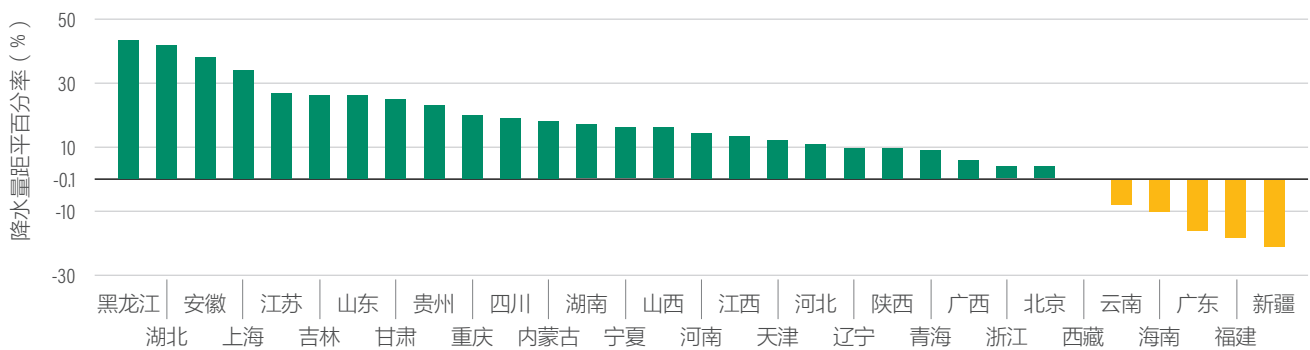
来源：中国气象局，2021

图 II-8 | 2020年中国不同区域降水量距平百分率



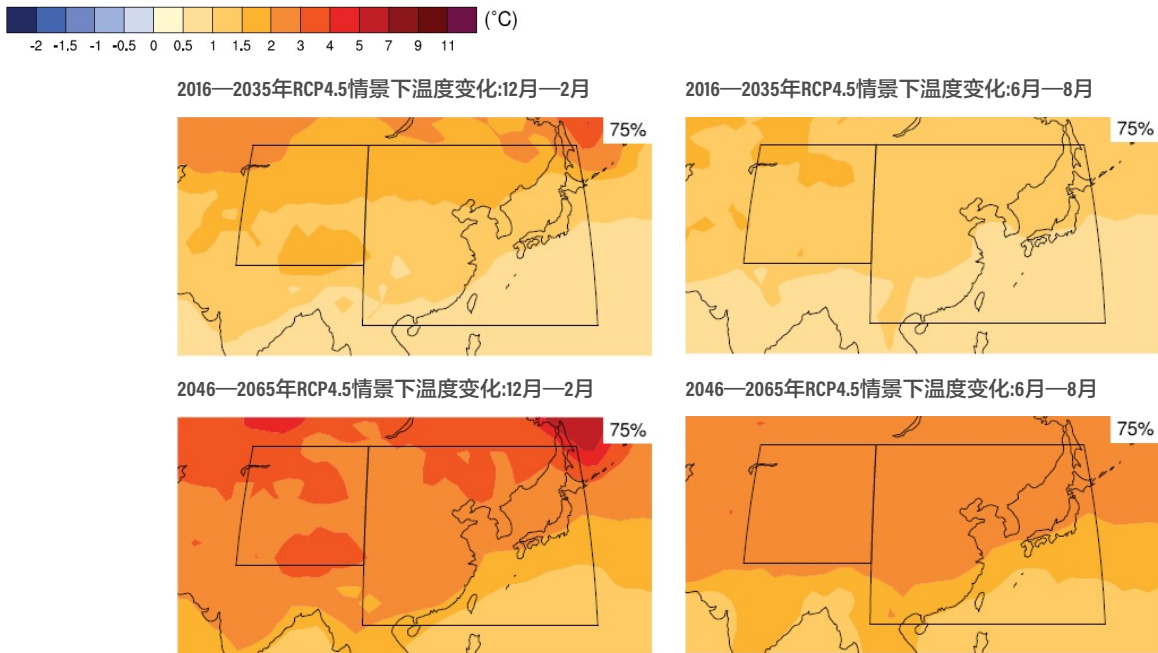
来源：中国气象局，2021

图 II-9 | 2020年各省份（不含港澳台）降水量距平百分率



来源：中国气象局，2021

图 II-10 | RCP4.5情景下东亚地区气温变化预估



来源：IPCC，2014

2020年，全国共有25个省份降水量较常年偏多，其中，黑龙江偏多43%、湖北偏多42%、安徽偏多38%、贵州偏多23%，均为1961年以来最高值；四川偏多19%，为历史第二高值（图 II-9）。5个省份降水量较常年偏少，其中，新疆偏少21%、福建偏少18%、广东偏少16%。西藏降水量与常年持平。

3. 未来气候变化趋势

未来气候变化具有不稳定性 and 不确定性，这加剧了预测未来气候灾害的难度，CMIP是世界气候研究计划（World Climate Research Programme, WCRP）组织开展的国际耦合模式比较计划，研究结果主要用于预估未来气

候变化特征和分析气候变化趋势（赵彦茜等，2019）。目前已启动了六个阶段的试验计划，经历了CMIP1、CMIP2、……、CMIP6几个阶段。CMIP计划提供的气候变化模拟和预估数据直接为IPCC评估报告提供了技术支撑（周天军等，2019），其中IPCC第六次评估报告所用的主要工具就是CMIP6的地球系统模式（赵宗慈等，2018）。

IPCC第五次评估报告以1986—2005年平均气温为基准，采用CMIP5气候模式预估东亚地区在RCP4.5情景下未来气温变化，如图 II-10所示。上面两幅图分别代表2016—2035年RCP4.5情景下东亚地区每年12月至次年2月和每年6至8月的气温变化；下面两幅图分别代表2046—2065年

RCP4.5情景下东亚地区每年12月至次年2月和每年6至8月的气温变化。由图 II -10可知，在RCP4.5情景下，中国未来不同时段的气温变化幅度均有不同程度的增加，2046—2065年时段气温变化幅度大于2016—2035年，冬季（每年12月至次年2月）气温变化幅度大于夏季（每年6至8月），高纬度地区气温变化幅度也明显高于低纬度地区。

相关研究表明，中国未来平均气温将呈现逐步上升的趋势，这一特点较为符合IPCC评估报告的结论和全球气候变暖的背景（Chen & Frauenfeld, 2014；Wang & Chen, 2014；敖雪等，2017；张娇艳等，2017；梁玉莲、延晓冬，2016）。CMIP5气候模式预估的中国未来气温变化趋势也表现出较为显著的时空变化特征，其中，空间变化特征表现为高纬度地区增暖程度明显高于低纬度地区。杨绚等（2014）的研究结果表明未来中国北方地区的平均气温升高速率为0.28℃/10a，气温变化程度远大于南方地区，高纬度地区增温幅度较大，与IPCC报告结论一致；时间变化特征表现为冬季气温增幅高于其他季节。王晓欣等（2019）的研究结果表明，中国各季节平均气温上升1.6~2.1℃，其中冬季增幅最大，为2.1℃，夏季增幅为1.7℃，冬季增温幅度高于夏季，符合IPCC第五次评估报告结果和过去百年观测结果（Ding et al., 2007）。

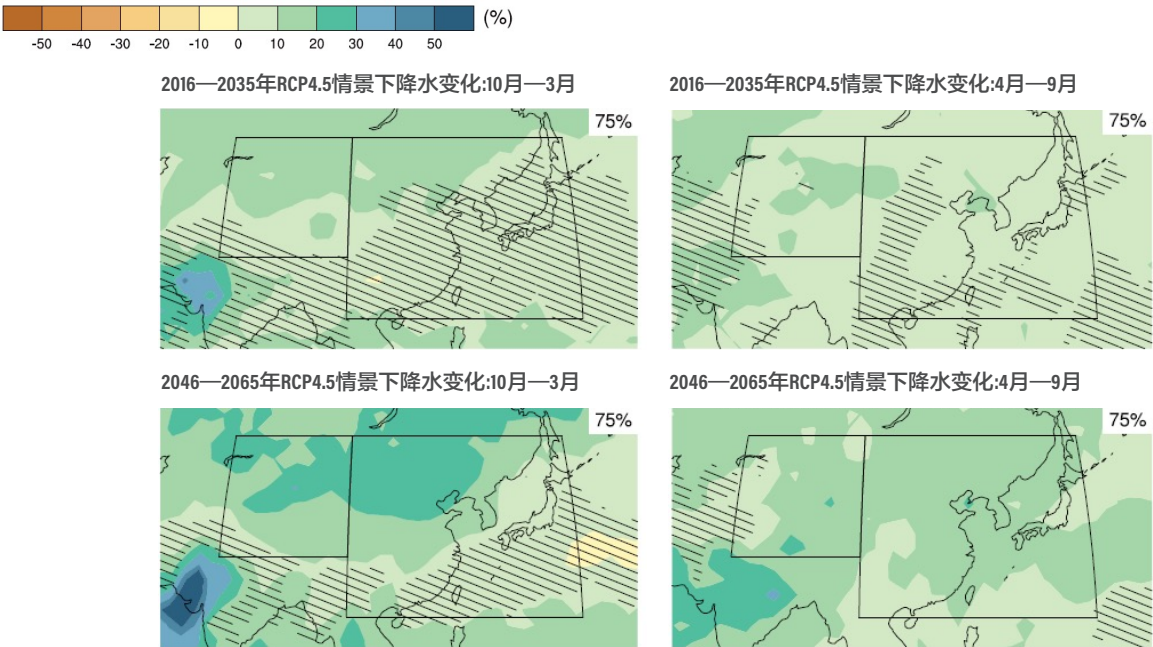
IPCC第五次评估报告以1986—2005年平均降水量为基准，采用CMIP5气候模式预估东亚地区在RCP4.5情景下未来降水量变化，如图 II -11所示，上面两幅图分别代表

2016—2035年RCP4.5情景下东亚地区每年10月至次年3月和每年4至9月的降水量变化，下面两幅图分别代表2046—2065年RCP4.5情景下东亚地区每年10月至次年3月和每年4至9月的降水量变化。由图 II -11可知，在RCP4.5情景下，中国未来不同时段的降水量变化幅度均有不同程度的增加，2046—2065年时段的降水量变化幅度大于2016—2035年时段，每年10月至次年3月降水量的变化幅度大于每年4至9月，高纬度地区降水量变化幅度大于低纬度地区。

相关研究表明，降水量与平均气温成正相关关系，伴随着平均气温的升高，降水量也呈现出增加趋势，预估中国降水量普遍增多（杨绚等，2014；敖雪等，2017；张娇艳等，2017），其分布特征也与气温预估结果类似，均体现出较为明显的时空分布特征。空间分布特征表现为高纬度地区的降水量变化程度大于低纬度地区，中国北部尤其是西北地区的降水量增多非常显著，明显大于江淮流域及其他以南地区（杨绚等，2014）；时间变化特征表现为夏季降水量增幅大于其他季节，多数地区表现出冬秋弱春夏强的变化特征（赵彦茜等，2019）。

但是，由于不同气候模式的气候敏感度存在差异，即对未来温室气体排放的响应过程存在很大的不确定性（张丽霞等，2019），CMIP5气候模式对于温度变化的预测结果可信度较高，而对于降水量变化的预测结果则存在很大的不确定性，最后的结论可能存在差异（王晓欣等，2019；梁玉莲、延晓冬，2016；程雪蓉等，2016）。

图 II-11 | RCP4.5情景下东亚地区降水量变化



来源：IPCC，2014

案例未来气候风险 模型预测方法

PRECIS模型

本报告采用国际通用的PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) 模型对宁夏和武汉的气候平均态进行分析。针对宁夏案例使用经过偏差订正后的区域气候模式 PRECIS模拟了宁夏未来温度和降水量变化, 同时使用经过偏差订正后的区域气候模式 PRECIS模拟了武汉市未来降水量变化情况, 并据此计算了武汉市暴雨日数与暴雨强度两个关键要素。

PRECIS模型是英国气象局哈德雷 (Hadley) 气候中心开发的区域气候模式 (RCM) 系统 (Jones et al., 2004), 界面友好, 可以在全球任何区域设置, 以获得局地高分辨率的RCP情景, 大大地方便了需要进行气候变化影响评估而不具备气候方面专业背景的研究人员。在PRECIS模型的发展过程中, 除了在英国乃至欧洲进行了模拟试验之外, 在中国也进行了诸多气候情景模拟和影响评价的尝试工作, 如宁夏、云南、广西、内蒙古等省份, 以及东北、华北等地区 (许吟隆等, 2003和2006; 杨红龙等, 2010; 陈楠等, 2007; 梁驹等, 2014; 纪潇潇等, 2015; 杜尧东等, 2014), 取得了显著的效果。经过近20年本地化发展, PRECIS模型对中国区域模拟能力十分突出, 统计分析显示, 除在高温值部分模拟结果略偏高之外, 其他温度段模拟结果与观测值的统计分布曲线吻合度很高; 对最高气温和最低气温的模拟结果与平均气温的模拟结果很相似, 但对低温的模拟结果与观测值符合得更好, 表明该模型整体上对低温的模拟效果较

好。总体上来看, PRECIS模型对气温的模拟能力要优于对降水量的模拟能力, 对低温极端事件及极端降水事件的模拟能力较强。

HARGREAVES模型方法

本报告基于PRECIS逐日气温、降水量、辐射等模拟数据, 采用Hargreaves模型方法计算宁夏地区潜在蒸散量 (详细计算结果见表III-1):

$$ET_{o-Har} = \frac{k}{\lambda} (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T_{mean} + 17.8) R_a$$

其中, ET_{o-Har} 为潜在蒸散量, λ 为潜热系数 (一般取 2.45 MJ/kg), k 为调整系数 (一般取 0.0023), T_{max} 、 T_{min} 、 T_{mean} 、 R_a 分别最高气温、最低气温、平均气温、辐射。

具体参考Hargreaves&Samani (1985)对该方法的研究, 以及Feng et al.(2017)和Wu et al.(2021)使用该方法估算中国西南地区蒸散量的研究。

相对湿度 (干旱指数)

针对宁夏案例, 本报告在计算潜在蒸散量基础上, 结合自然降水量 (P), 进一步通过构建相对湿度指数作为干旱指数 (D), 分析了基于自然因素的宁夏地区农业干旱风险:

$$D = \frac{P - ET_{o-Har}}{ET_{o-Har}} \times 100$$

其中, D 小于 0 代表降水不能满足蒸散的需求、且 D 越小代表干旱程度加重。

表 III-1 | 宁夏地区未来气温、降水量与潜在蒸散量预测

参数	升温幅度 (°C)		降水量增加量 (毫米)		潜在蒸散量增加量		(蒸散量 - 降水量) / 降水量	
时段	2030年时段	2050年时段	2030年时段	2050年时段	2030年时段	2050年时段	2030年时段	2050年时段
RCP4.5 情景	1.32	2.01	38.65	40.58	53.84	8758	39.12	115.80
RCP8.5 情景	1.60	2.82	24.12	84.14	64.82	112.57	168.79	33.79

附录IV

生态系统服务价值 评估方法/工具

方法/工具	描述
生产函数方法	
生产函数法	估计生态系统服务对提供现有市场上交易的另一种服务或商品有多大贡献
市场价格法	估计在商业市场上交易的生态系统产品或服务的经济价值
旅行费用法	估计生态系统（和生物多样性）或休闲场所的经济使用价值。假设休闲场所的价值与成本（直接费用和时间机会成本）相关，休闲场所的质量或数量变化（由生物多样性和生态系统的变化引起）可以通过估计访问该场所的需求函数来推断
显示性偏好方法	
内涵资产定价法	采用商品在某一环境方面的隐性需求信息，评估相关商品（如房地产）某一非市场特征（如风景美观性）对市场价格的影响。该方法已被广泛应用于评估环境质量的改变如何影响人们购买房产的意愿
陈述性偏好方法	
意愿调查法	采用问卷调查，询问受访人愿意为增加或加强生态系统服务支付多少价格，或者他们在多大程度上愿意接受生态系统损失或退化
联合分析/选择实验法	以调查问卷为基础，向受访者提供两种或更多的生态服务选择，估计人们对改进生态系统服务的付费意愿
成本评估方法	
替代成本法	估算用人工技术取代生态系统服务所产生的成本
避免损失成本法	估算用于保护生态系统免受进一步破坏的基础设施或措施的支出

来源：根据 Ding et al., 2017 第 44 页表 3.2 翻译而来

各案例项目介绍 及计算方法

宁夏案例

项目介绍

表 V-1 | 宁夏农业节水灌溉设施项目案例介绍

	渠系改造：中型灌区节水配套改造项目		田间节水灌溉：田间高效节水灌溉项目
	重点中型灌区（3万~30万亩）	一般中型灌区（1万~5万亩）	
基线情景	原有灌溉输水渠系设施老化，供水能力下降，灌溉效益衰减，输水过程中发生的渗漏和蒸发造成水资源浪费，灌溉耕地面临干旱缺水风险		采用传统的沟灌、漫灌方式，水资源利用效率低下，浪费严重，田间灌溉面临缺水甚至无水可灌的风险
适应情景	对原有灌溉输水渠系设施进行改造，提高灌区渠系输水效率和灌溉水利用系数，实现节水，保障灌区覆盖的耕地面积免受干旱影响		以高效节水灌溉技术替代原有灌溉方式，提高灌溉水利用系数，实现节水，保障覆盖的耕地面积免受干旱影响
建设目标	完成25处重点中型灌区灌排渠系的节水改造及节水灌溉技术的应用，到2020年，新增及恢复灌溉面积17.7万亩，改善灌溉面积213.7万亩，发展节水灌溉面积231.4万亩，每年新增节水量1.1亿立方米，灌区渠系输水效率由0.57提高到0.62，灌溉水利用系数由0.54提高到0.59	完成12处一般中型灌区灌排渠系的节水改造及节水灌溉技术的应用，到2018年，新增及恢复灌溉面积6.3万亩，改善灌溉面积13.1万亩，发展节水灌溉面积19.3万亩，每年新增节水量779.6万立方米，灌区渠系输水效率由0.57提高到0.62，灌溉水利用系数由0.54提高到0.59	实施240处高效节水灌溉项目，到2020年发展高效节水灌溉面积175.07万亩，其中发展喷灌15.2万亩，管灌12万亩，微灌147.9万亩，灌溉水利用系数提高到0.53以上，亩均节水137立方米，形成每年2.39亿立方米的节水能力

数据来源：《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》和《宁夏高效节水灌溉“十三五”规划》

表 V-1 | 宁夏农业节水灌溉设施项目案例介绍（续）

气候韧性基建项目	渠系改造：中型灌区节水配套改造项目		田间节水灌溉：田间高效节水灌溉项目
	重点中型灌区（3万~30万亩）	一般中型灌区（1万~5万亩）	
建设内容	灌区干支渠道的衬砌防渗、输水渠道的管道化铺设、干支沟道的整治、干支渠沟管道配套建筑物改造、水源及渠首工程改造和量水设施建设		建设泵站321座，配套机井1058眼，建设蓄水池295座，配套喷灌机组36台，铺设输水管道1100万米，铺设滴灌管76亿米
建设年限	2016—2020年		2016—2020年
运营年限	28年		28年
涉及重点地区	项目建设其中9处涉及国家级贫困县，另外8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		项目建设其中92处涉及国家级贫困县，另外75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
设计灌溉面积和粮食产量	中型灌区占宁夏有效灌溉面积的23.4%，粮食产量占全区粮食总产量的14.4%		发展的高效节水灌溉面积占宁夏有效灌溉总面积的19.1%，其中粮食作物面积达48%，高效节水灌溉从经济作物向玉米、马铃薯为主的粮食作物发展

数据来源：《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》和《宁夏高效节水灌溉“十三五”规划》

计算方法

总成本计算

表 V-2 | 总成本计算

项目	渠系改造	田间节水灌溉	数据来源
固定资产投资	总计146115.05万元，分2~5年投入	总计327386.43万元，分5年投入	《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》，2015；《宁夏高效节水灌溉“十三五”规划》，2015
新增年运营维护费用	工程维护费 固定资产投资 ×1.2%=1753.39万元	维护更换田间灌溉管道 每年投入500元/亩×175.07万亩=87535万元	《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》，2015；《宁夏高效节水灌溉“十三五”规划》，2015
	人员工资及福利费 185人×1.5万元/人=277.5万元	由农户自行运营维护，不单独计算工资及福利费	《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》，2015
	新增燃料动力费 新增年耗电量约724.58万千瓦时×电费影子价格0.29元/千瓦时=210.13万元	新增年耗电量35千瓦时/亩×电费影子价格0.29元/千瓦时×175.07万亩=1776.96万元	《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》，2015；《宁夏高效节水灌溉“十三五”规划》，2015；辽宁省建平县水务局，2014）
	其他费用 固定资产投资 ×0.55%=803.63万元	无其他费用	《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》，2015

注：本报告所有案例计算中涉及的价格均通过CPI指数换算成2020年当年价，在此统一说明，以下在介绍其他案例计算方法时不再单独解释。

总收益计算

1. 规避未来损失

(1) 定义：规避未来损失是指项目建设完成后，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导致的作物减产或绝收损失。

(2) 计算方法：采用市场价格法，可避免减产损失 = $\sum_{k=1}^n C \times (a_k \times A) \times Y_k \times P_k$ 。

其中，C表示灌溉效益分摊系数，k表示作物种类，总共有n种作物， a_k 表示作物种植面积占灌区内总灌溉面积的比例，A表示灌区总灌溉面积， Y_k 表示相较于基准年份到2050年作物每年平均减产量， P_k 表示2019年粮食作物的市场价格。

(3) 研究假设：a.本报告仅估算项目涉及灌区内粮食作物在气候变化基准情景（1986—2005年）下未来每年可能产生的干旱减产损失。根据本报告第二章的预测结果，宁夏地区干旱等级以轻旱到重旱为主，研究分别取轻旱和重旱对应的作物减产范围的中位数，假设未来灌区内粮食作物减产范围为5%~25%。b.本报告假设项目建成后，灌区内的粮食作物不会再遭受干旱造成的减产损失。c.由于项目涉及灌区内各种粮食作物的种植面积数据缺失，因此以宁夏全区各种粮食作物总种植面积占全区总灌溉面积的比例表示 a_k 。d.根据宁夏水利厅发布的高效节水灌溉“十三五”规划报告，灌溉效益分摊系数C取0.5。

(4) 数据来源（表V-3）

2. 经济效益

■ 节水效益

(1) 定义：节水收益指通过水权转换将项目新增节约

水量转换给工业企业使用后能保证当地工业部门产出的工业增加值。

(2) 计算方法：采用影子价格法，

$$\text{节水收益} = \sum_{t=1}^n W \times (1+q)^{n-t} \times q \times Z \times \delta \times V。$$

其中，n表示年份，可取1~28，W表示基准年份（2020年）的工业增加值，q表示工业增加值增速，Z表示2020年万元工业增加值取水量， δ 表示年水权转换量比例，V表示水资源转换后的影子价格。

(3) 研究假设：a.自2004年起宁夏开始水权转换试点，节约的农业灌溉用水可以通过签订合同转换给工业企业使用，然而项目建成后实际有多少水量能够转换尚缺乏数据，因此本报告假设未来宁夏工业部门用水指标不变，该部门每年新增用水需求只能通过水权转换的形式得到满足。由此，项目每年的水权转换量即等同于未来宁夏工业部门每年新增用水需求量。b.由于中国水价尤其是灌溉水价很低，市场价格并不能很好地反映极度缺水的宁夏地区水资源的价值（钟丽锦等，2015），因此本报告拟采用水资源转换后的影子价格（V），即计算每立方米水平均产生的工业增加值。根据《2020年宁夏水资源公报》公布的数据， $V=305.8$ 元/立方米。c.本报告使用未来宁夏每年工业增加值的增量和万元工业增加值取水量预测未来宁夏工业部门每年新增用水需求量。据刘伟和陈彦斌（2021）的预测，未来30年中国年均实际GDP增速需要达到4.6%，才能实现到本世纪中叶人均GDP达到发达经济体平均水平的目标。由于工业增加值增速和GDP增速高度相关且发展趋势基本一致（国家发展改革委经济研究所，2010），因此在计算未来宁夏每年工业增加值的增量时，本报告以2020年为起始年份，假设每年工业增加值的增速（q）=4.6%。万元工业增加值取水量（Z）采用2020年数据（当年价），即32.7立方米/万元，并假设未来保持不变。

表 V-3 | 规避作物减产损失的计算

作物种类 (K)	作物种植比例 (A_k)	BAU情景下作物年平均减产范围 (Y_k ，吨/亩)	作物价格 (P_k ，元/吨)	数据来源
小麦	9.35%	$0.43 \times 5\% \sim 0.43 \times 25\%$	2610	杨勤等,2009; 王连喜等,2013; 陈璐,2016; 李剑萍等,2009; 《宁夏统计年鉴2020》; 宁夏粮食和物资储备局2020年粮食市场分析
水稻	5.90%	$0.60 \times 5\% \sim 0.60 \times 25\%$	2820	
玉米	26.00%	$0.48 \times 5\% \sim 0.48 \times 25\%$	2570	
土豆	8.04%	$0.13 \times 5\% \sim 0.13 \times 25\%$	1200	

表 V-4 | 节水效益的计算

项目	基准年份（2020）年 工业增加值 （W，亿元）	年水权转换量比例 （ δ ，%）	水资源转换后的 影子价格 （V，元/立方米）	数据来源
渠系改造		32%	305.8	《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》；《宁夏高效节水灌溉“十三五”规划》；《2020年宁夏水资源公报》；《宁夏回族自治区2020年国民经济和社会发展统计公报》
田间节水灌溉	1283.69	68%	305.8	

表 V-5 | 增产效益的计算

项目	新增及恢复灌溉面积 （I，万亩）	新增防护林面积 （F，万亩）	农作物年均净收益 （B，元/亩）	数据来源
渠系改造	24	2.99	450	《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》

表 V-6 | 节地效益的计算

项目	项目涉及总灌溉面积 （M，万亩）	增加的土地利用率 （U）	农作物年均净收益 （B，元/亩）	数据来源
田间节水灌溉	175.07	2%	450	《宁夏高效节水灌溉“十三五”规划》

d. 渠系改造项目和田间节水灌溉项目各自的水权转换量比例（ δ ）按其每年新增节约水量的比例计算。

（4）数据来源（表 V-4）

■ 增产效益

（1）定义：对渠系改造项目而言，项目完成后可以在灌区原有灌溉面积的基础上新增及恢复灌溉面积。这一新增及恢复的灌溉面积产出的作物的价值称为该项目的增产收益。

（2）计算方法：采用市场价格法，
增产收益 = $(I - F) \times B \times C$ 。

其中，I表示新增及恢复的灌溉面积，F表示新增防护林面积，B表示农作物年均净收益，C表示灌溉效益分摊系数。

（3）研究假设：a. 项目涉及的新增灌溉面积在项目实施前无法得到有效灌溉，本报告假设这部分面积的作物之前的产出价值趋近于0。b. 农作物年均净收益（B）为450元/亩，灌溉效益分摊系数（C）为0.5。c. 由于新增

及恢复的灌溉面积中有部分是防护林，因此不存在作物产出。

（4）数据来源（表 V-5）

■ 节地效益

（1）定义：田间节水灌溉项目完成后可以提高灌区内土地利用效率，从而实现节约用地，由此带来的收益即为节地收益。

（2）计算方法：采用市场价格法，
节地收益 = $M \times U \times B$ 。

其中，M表示项目涉及的总灌溉面积，U表示项目建成后拟提高的土地利用率，B表示农作物年均净收益。

（3）研究假设：田间节水灌溉项目建成后，项目覆盖的土地利用率将提高2%，而农作物年均净收益为450元/亩。

（4）数据来源（表 V-6）

3. 社会环境效益

■ 减少水土流失及减少土壤养分流失

(1) 定义：渠系改造项目可以增加灌区内渠旁林带、经济林、防护林和牧草面积，提高灌区内林草覆盖比例，从而减少水土流失；田间节水灌溉项目改大水漫灌为喷灌、管灌和微灌，可以避免对耕地土壤的侵蚀，从而减少耕地养分和水土流失。因此，气候韧性基础设施可以实现减少水土流失的社会环境收益。

(2) 计算方法、研究假设和数据来源（表 V-7）

■ 固碳释氧

定义：渠系改造项目完成后，灌区内防护林、经济林和牧草面积增加可以带来增加碳汇及释放氧气的收益。

计算方法：采用生物量和碳排放社会成本法（增加碳汇）、影子价格法（释放氧气）。

增加碳汇收益（防护林）= $f \times F \times VG_i \times \overline{SVD} \times \overline{DEF} \times \overline{C_c} \times P_c$

其中， f 表示植树造林成林率， F 表示新增树林面积， VG_i 表示在第*i*林龄组（共分5个林龄组）下每公顷树林的年均生长量， $\overline{SVD}$ 表示基本木材密度， $\overline{DEF}$ 表示生物量转换量， $\overline{C_c}$ 表示含碳系数， P_c 表示碳排放社会成本。

增加碳汇收益（牧草）= $G \times C_r \times P_c$

其中， G 表示新增牧草种植面积， C_r 表示牧草年均固碳速率， P_c 表示碳排放社会成本。

释放氧气收益 = $\frac{M_{O_2}}{M_{CO_2}} (f \times F \times VG_i \times \overline{SVD} \times \overline{DEF} \times \overline{C_c} + G \times C_r) \times P_{oxy}$

其中， M_{O_2} 表示氧气分子量， M_{CO_2} 表示二氧化碳分子量， P_{oxy} 表示工业制氧价格。

(3) 研究假设：a. 由于缺乏相应数据，本报告暂

表 V-7 | 减少水土流失及减少土壤养分流失效益的计算

项目	渠系改造	田间节水灌溉
计算方法	成本替代法，收益 = $\beta \times R \times S$ 其中， β 表示项目增加的植被覆盖面积占宁夏植被覆盖总面积的比例， R 表示水土流失减少幅度， S 表示河流水库清淤成本	成本替代法，收益 = $M \times L \times D + M \times E \times D$ 其中， M 表示项目涉及总灌溉面积， L 表示耕地养分流失率， E 表示水土流失到下游的比率， D 表示水土流失的成本，包括养分流失成本和清淤成本
研究假设	a. 项目每年减少水土流失带来的收益等于每年因缺少植被覆盖引起水土流失给下游河流水库带来的清淤成本 b. $\beta = 0.25\%$ 。项目改造的水渠长192738千米，假设渠旁各增加1米的绿化带，增加的渠旁林带面积达3.85平方千米。项目完成后灌区内新增经济林、防护林和牧草面积达89.43平方千米。据国家统计局2019年数据，宁夏森林和草地总覆盖面积达37955.23平方千米，因此可计算 β	a. 项目每年减少水土流失带来的收益可以使用两部分成本进行替代，一部分为减少土壤养分需要额外施用肥料的成本，另一部分为水土流失后河流水库需要支付的清淤成本 b. 根据已有研究，计算中假设宁夏耕地每年水土流失率为50吨/公顷，不同养分流失率不同。节水灌溉项目建成后，灌区内的耕地水土流失可以完全避免 c. 减少土壤养分的成本根据化肥的市场价格进行计算，主要包括有机肥、氮肥和磷肥
数据	水土流失减少幅度（ R ）为456吨/平方千米；清淤成本（ S ）为3.1元/吨	项目涉及总灌溉面积（ M ）为175.07万亩；耕地养分流失率（ L ）中，土壤有机质损失率为0.3吨/公顷，氮元素损失率为0.02吨/公顷，磷元素损失率为0.03吨/公顷；水土流失到下游的比率（ E ）为50吨/公顷；水土流失的成本（ D ）为有机肥800元/吨，氮肥1748元/吨，磷肥2200元/吨，清淤成本3.1元/吨
来源	Zhou et al, 2006;Liang et al, 2016；《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》；国家统计局，2019	Zhao et al, 2020; Liang et al, 2016;《宁夏高效节水灌溉“十三五”规划》；农业农村部，2019

不计算新增经济林的碳汇价值，仅考虑防护林和牧草增加碳汇的收益。b. 新增防护林计划分5年种植，每年种植20%。由于防护林大多数为快熟杨树林，本报告将防护林按种植年限分成五个林龄组，分别计算各组年均生长量和生物量。根据《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》，计算生物量的因子分别取杨树的参数 $\overline{SVD} = 0.378$, $\overline{DEF} = 1.446$, $C_c = 0.496$ 。c. 根据已有研究，牧草种植年限不同，每年固碳速率存在差异。d. 碳价格使用美国计算的碳排放社会成本

(US Environmental Protection Agency, 2016; US Government, 2021)，原价格以美元为单位，本报告采用OECD提供的汇率数据计算了人民币价格（见表V-10）。e. 新增的防护林和牧草通过光合作用吸收二氧化碳同时释放氧气，根据氧气和二氧化碳的分子量32、44计算释放氧气量，采用工业制氧价格（ $P_{oxy} = 400$ 元）作为影子价格计算释放氧气的价值（梁鸿等，2016）。

(4) 数据来源（表V-8，表V-9，表V-10）

表 V-8 | 树林固碳量的计算

林龄组	植树造林成林率 (F, %)	新增树林面积 (F, 公顷)	年均生长量 (VG, 立方米/公顷)	数据来源
幼龄林 (0~5年)	63.2%	1990.27	3.04	马振华、李才文, 2019;《第九次全国森林资源清查宁夏森林资源清查成果(2015年)》;《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》;宁夏中型灌区基本信息表
中龄林 (6~10年)			0.96	
近熟林 (11~15年)			0.19	
成熟林 (16~20年)			0.08	
过熟林 (21~30年)			0.01	

表 V-9 | 牧草固碳量的计算

牧草种植年份	新增牧草种植面积 (G, 公顷)	牧草年均固碳速率 (C, 吨二氧化碳/公顷)	数据来源
0~2年	3262.53	0	邵传可, 2013;《宁夏中型灌区节水配套改造“十三五”规划》;宁夏中型灌区基本信息表
3~10年		2.9	
11~30年		3.2	

表 V-10 | 2016—2050年碳排放社会成本（ P_c ，元/吨）

年份	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
价格	305	311	337	352	352	359	366	373	380	387
年份	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
价格	394	408	415	422	428	435	442	449	456	463
年份	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
价格	477	484	491	498	504	511	518	532	539	546
年份	2046	2047	2048	2049	2050	-	-	-	-	-
价格	553	560	567	580	587	-	-	-	-	-

表 V-11 | 减少农业面源污染的效益计算

项目	2019年全区农业总产值 (O, 亿元)	农业面源污染成本占农业总 产值的比例 (C)	数据来源
田间节水灌溉	330.78	8%	Tang et al., 2016; 国家统计局, 2019

■ 减少农业面源污染

(1) 定义：田间节水灌溉项目可以通过水肥一体化管理措施为农作物施肥施药，这可以减少传统施肥施药方式带来的农业面源污染。

(2) 计算方法：采用替代成本，减少农业面源污染的收益 = $\gamma \times O \times C$ 。

其中， γ 表示项目涉及的农作物种植面积占宁夏农作物总种植面积的比例，O表示2019年宁夏全区农业总产值，C表示农业面源污染成本占农业总产值的比例。

(3) 研究假设：a. 本报告假设项目减少农业面源污染

的收益等于污染产生的成本。b. 根据已有研究，在BAU情景下，每年施用化肥农药导致的面源污染的成本占农业总产值的8%。节水灌溉项目完成后，灌区内的农业面源污染可以完全避免；c. $\gamma = 11.55\%$ 。田间节水灌溉项目涉及的种植面积为175.07万亩，宁夏全区农作物总种植面积达1515.6万亩，由此可计算 γ 。

(4) 数据来源（表 V-11）

武汉案例

项目介绍

表 V-12 | 武汉海绵城市试点建设项目案例介绍

气候韧性 基建项目	武汉市海绵城市试点建设项目	
	青山示范区 (23平方千米) (旧城改造)	四新示范区 (15.5平方千米) (新城建设)
基线情景	以传统灰色建筑为主；由于泵站与配套管网设施蓄排水能力将逐渐不足，区域硬化面积逐步扩大，雨水径流将增大，城市洪涝风险加剧	
适应情景	灰、绿基础设施相结合，对城市道路、建筑、绿地等采用低影响开发模式，发挥自然生态系统的渗、蓄、滞、净、用、排功能，减少雨水地表径流量	
建设目标	水域面积不缩小，生态岸线率不低于50%，水面保持率达100%；蓄排平衡，能有效应对50年一遇大雨，汛前湖泊水位控制达标率达100%，年径流总量控制率不低于70%，主干排水管网能力基本达到3年一遇；能有效应对百年一遇洪水，防洪堤达标率达100%；消除黑臭水体，同时各水体COD指标达到Ⅳ类，面源污染削减率达50%；雨水资源利用率达5%	水域面积不缩小，生态岸线率达75%，水面保持率达100%；蓄排平衡，能有效应对50年一遇大雨，年径流总量控制率不低于80%，主干道路排水能力达到3年一遇；能有效应对百年一遇洪水，防洪堤达标率达100%；出口水质优于上游水质，主要水体COD指标达到Ⅳ类，污水收集、处理和排放达标率达100%，面源污染削减率达50%；雨水资源利用率达5%
建设内容	市政管网改造、泵站建设及水系整治，污水收集管网、泵站的改造与建设，雨水集中收集处理设施以及滞蓄净化海绵设施的建设，生态驳岸建设及各类湿地修复，河道生态断面控制以及渠道清淤、断面整治扩宽	
建设年限	2015—2020年	

来源：WRI 基于《武汉市海绵城市专项规划》与《武汉市海绵城市建设试点工作绩效自评报告》整理

表 V-13 | 总成本计算

项目	武汉市海绵城市试点区建设	数据来源
固定资产投资	两示范区总投资162.9亿元，剔除灰色基建（城市管渠）投资13亿元，剩余149.9亿元计入本报告的固定资产投资	《武汉市海绵城市建设试点工作实施方案》
新增年运营维护费用	参考湖南省常德市海绵城市项目，按其项目面积与运营维护人员数量换算出武汉市海绵城市示范区项目维护人员数量，薪资参考常德海绵城市项目。 该项费用=289人×48000元/年=13872000元	Liang X., 2018

计算方法和数据来源

总成本计算：

由于本报告未能获得武汉市海绵城市示范区项目建设运营的实际支出数据，因此仅能参考试点投资的规划数据并进行相关假设。（表V-13）

总收益计算：

1. 规避未来损失

(1) 定义：规避未来损失是指海绵城市建设项目中气候韧性基础设施能够促进雨水渗透、调蓄，有效控制雨水径流率，因此能够缓解城市洪涝灾害，进而避免洪涝灾害造成的直接社会经济损失，如城市基础设施破坏、相关行业经济活动受限等。

(2) 计算方法：采用回归测算法。避免的直接社会经济损失= $L \times \Delta Rm$ 。

其中， L 为示范区内未来可能产生的洪涝灾害损失，主要基于历史多年暴雨量与损失量数据进行回归分析，推算出暴雨量与损失规模的关系，同时基于气候模型预测数据可推算出RCP4.5和RCP8.5情景下未来30年间武汉的累计暴雨量，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； ΔRm 为外排雨量可规避的最大增幅，代表气候韧性基础设施项目可规避损失的效率。

(3) 研究假设：a.首先基于1986—2016年每日降雨量数据以及过去洪涝事件的影响幅度，发现1998年和2016年两次特大洪涝灾害事件都具有两日连续强降雨的气象特征，因此认为连续两日强降雨才会造成较大的洪涝损失，单日强降雨并不足以产生显著的损失。通过识别过去历年连续两天降雨量之和的最大值，以及相应年份的洪涝损失数据，可发现损失规模随着降雨量的增加呈指数增长的趋势（图V-1）。

b.基于《城市洪涝灾害风险管理能力调研报告》获得2012—2016年武汉市洪涝灾害损失的历史统计，以上损失为全市层面的损失，包括城市基础设施破坏等经济财产损失

图 V-1 | 降雨量与洪涝损失间的关系

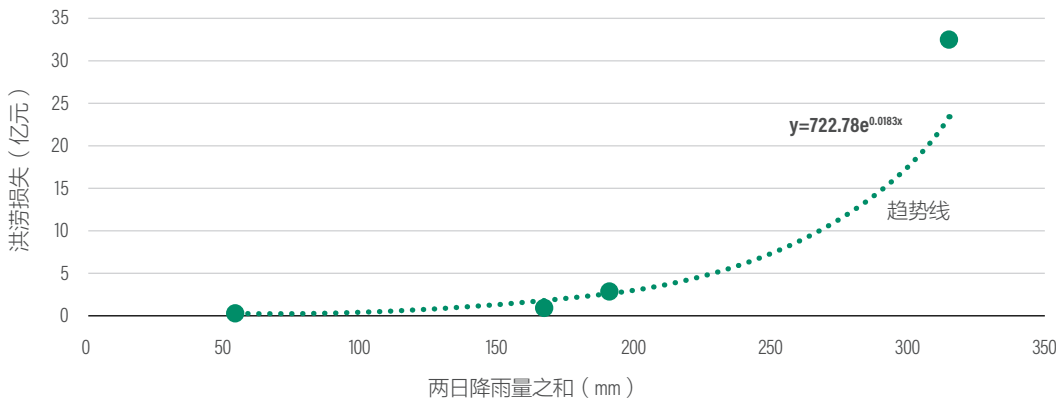


表 V-14 | 规避未来损失的计算

示范区内未来可能产生的洪涝灾害损失 (L, 亿元)	外排雨量可规避的最大增幅 (ΔRM)	数据来源
3.40 ~ 3.43	43%	武汉市气候模型预测数据、《武汉市海绵城市建设试点工作绩效自评报告》、《武汉市第三次全国农业普查主要数据公报》

和社会经济活动中断所造成的经济损失。由于两示范区不涉及农业活动，因此在进行回归分析时，剔除历史灾害数据中的农业直接经济损失。c.假设这些相关的损失与相应区域的面积有关，因此需用武汉市未来总损失预期值乘以示范区面积占武汉市总面积（剔除农业用地面积）的比例，得到两示范区可能面临的损失。由于可获得数据的有限性，目前仅能基于《武汉市第三次全国农业普查主要数据公报》获得2016年的武汉市耕地、实际经营的林地与牧草地面积数据，假设农业用地面积为三者面积之和。d.海绵城市的建设还包括传统灰色基础设施，且泵站、地下管渠也发挥了有效的防洪作用。由于本报告仅考虑气候韧性基础设施，即低影响开发系统下的绿色基础设施，因此，规避的损失仅需体现此部分设施所作用的幅度。本报告假设用两示范区建设所规避外排雨量的最大幅度（43%）代表相应基础设施的防洪效率。

(d) 数据来源（表V-14）

2. 经济效益

■ 减少管网运行管理费用

(1) 定义：海绵城市的建设通过增加雨水渗透、收集及调蓄，可以有效减少进入市政管网的雨水，缓解市政管网雨水天的排水压力，有助于降低市政管网的运营及维护成本。

(2) 计算方法：采用市场价格法。减少管网运行管理费用 = $\theta \times D \times \Delta R_c \times A \times P_o$ 。

其中， θ 为径流系数； D 为未来30年年均降雨量，基于武汉市气候模型预测获得，取RCP4.5和RCP8.5情景下的降雨水平为区间上下限； ΔR_c 为年径流量削减率； A 为汇水面积； P_o 为管网运行及水处理费用。最终费用为两示范区分别计算加总而得。

(3) 研究假设：参考《海绵城市建设效益量化及综合评价》取污水处理费的三分之一，根据武汉市2016年发布的文件，居民用水污水处理费为1.1元/立方米，非居民用水及特种行业用水污水处理费为1.37元/立方米，再根据《2019年武汉市水资源公报》中不同类型用水量的比例，可取两种价格均值作为平均污水处理费。

(4) 数据来源（表V-15）

■ 节省城市水污染控制成本

(1) 定义：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，也可以减少水体中的污染物。因此，海绵城市建设项

表 V-15 | 管网管理成本节约收益的计算

示范区	径流系数 (θ)	年径流量削减率 (ΔR_c)	汇水面积 (A, 平方千米)	未来30年年均降雨量 (D, 毫米)	管网运行及水处理费用 (P_o , 元/立方米)	数据来源
四新区		12.7%	15.5			武汉市气候模型预测数据、《武汉市海绵城市建设试点工作绩效自评报告》、《海绵城市建设效益量化及综合评价》（孙文婧，2020）
青山区	0.55	4.3%	23.06	1401 ~ 1466	0.45	

表 V-16 | 水污染控制成本节约收益的计算

COD处理成本 (P_1 , 元/千克)	TP处理成本 (P_2 , 元/千克)	NH ₃ -N处理成本 (P_3 , 元/千克)	COD污染当量 (q_1 , 千克)	TP污染当量 (q_2 , 千克)	NH ₃ -N污染当量 (q_3 , 千克)	COD削减量 (Q_1 , 吨)	TP削减量 (Q_2 , 吨)	NH ₃ -N削减量 (Q_3 , 吨)	数据来源
0.7	0.175	23.9	1	0.25	0.8	3554	37	431	各污染物处理成本及污染当量来自《排污费征收使用管理条例》，两区数据来源于《武汉市海绵城市建设试点工作绩效自评报告》，2018

目能够减少水污染，进而节省控制城市水污染所需成本。

(2) 计算方法：采用替代成本法。节省城市水污染控制成本 = $\sum_{i=1}^n q_i \times Q_i \times P_i$ 。

其中， q_i 为污染物当量值； Q_i 为各污染物的削减量； P_i 为各污染物的处理成本； i 为污染物的种类。

(3) 研究假设：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、TP和NH₃-N三种污染物，并计划两示范区内每年削减COD 3554吨，TP37吨，NH₃-N431吨。

(4) 数据来源（表V-16）

■ 雨水回用效益

(1) 定义：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业企业用水、城市绿化浇灌、路面冲洗、景观用水等，因此雨水回用具有经济效益。

(2) 计算方法：采用市场价格法。雨水回用效益 = $Q_s \times P_r$ 。

其中， Q_s 为项目所产生的雨水年利用量的增量； P_r 为武汉市中水价格。

(3) 研究假设：a.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增量达424.3万立方米。b.通过公开资料无法获得武汉市中水价格，因此本报告以北京市的再生水（即中水）价格和两城市污水处理费价格的比值估算了武汉的中水价格。c.绿色基建项目所净化的污水也可以进行回收利用，并创造相应的经济效益，但由于无法从武汉市污水回用量中拆分出绿色基建项目产生的污水回用量，因此无法单独评估这部分效益。

(4) 数据来源（表V-17）

■ 房产增值效益

(1) 定义：海绵城市建设增加了项目示范区内绿地面积，而这些自然生态系统能提升当地环境质量，创造独特的外部效益，进而会提升周边房地产价值。

(2) 计算方法：采用内涵资产定价法。
房产增值效益 = $S \times \Delta P$ 。

表 V-17 | 雨水回用效益的计算

项目所产生的雨水年利用量的增量 (Q_s , 万立方米)	武汉市中水价格 (P_r , 元/立方米)	数据来源
424.3	0.89	《武汉市海绵城市建设试点工作绩效自评报告》

其中， S 为两示范区的居民住房面积； ΔP 为绿地周围商品房价格增量。

(3) 研究假设：a.用海绵城市建设新增的城市绿地面积表示绿色基建的影响，主要考虑新增城市公园对于所处城区内的青山和四新示范区的影响。根据《武汉市海绵城市专项规划》，划定城市公园面积约19平方千米，折算两示范区新增城市公园面积约0.9平方千米，2016—2020年建设期内新增公园绿地率增加了2.34%，假设四年间每年增加0.58%。b.参考文献（Jiao et al., 2010）得到武汉市绿化率每增加1%，每平方米住宅价格将平均增加546元。但通过分析武汉市2016—2020年的实际商品房均价，发现部分年份每平方米房价增幅小于546元，因此对房价与绿地率的变化系数按实际房价增幅变化趋势进行折算。例如，2020年房价实际低于2019年房价，假设绿地率对房价贡献为0。2016—2020年间，武汉市绿化率每增加1%，每平方米住宅价格逐年分别增加546元、355元、242元、0元。c.由于缺乏两示范区的住房面积数据，本报告参考《海绵城市建设效益量化及综合评价》做法，假设两示范区内商品房的平均层数为4层，乘以武汉市住宅用地建筑密度（30%），再乘以两个示范区的总面积，以得到住房面积（46.2平方千米）。d.假设住房面积在项目建设期间保持不变。

(4) 数据来源（表V-18）

3. 社会环境效益

■ 回补地下水

(1) 定义：海绵城市建设项目中的绿色基础设施（如透水砖铺装、下沉式绿地、生物滞留设施、渗透塘、渗井、干式植草沟和渗管/渠等）能够提高雨水入渗量，而入渗的雨水能够有效补充地下水，由于地下水具有诸多使用价值，因此能够产生相应的社会环境效益。

(2) 计算方法：基于市场价格法和旅行费用法测算。
回补地下水效益 = $V \times P \times B$ 。

其中， V 为年雨水入渗量； P 为地下水生态价值； B 为雨水入渗回补地下水系数。

(3) 研究假设：a. 通过武汉市不同气候情景下未来年均降雨量（1401~1466mm）、两示范区面积及雨水下渗量占比（10%），可估算得武汉市年雨水下渗量大约为539.3万~564.4万立方米。b.参考文献《海绵城市建设效益量化及综合评价》，假设雨水入渗回补地下水系数为0.225。c.根据闫丹丹等人（2019）对地下水生态系统服务价值的研究成果，经CPI指数换算后得到地下水生态价值为5.16元/立方米。

(4) 数据来源（表V-19）

表 V-18 | 房产增值效益的计算

两示范区的居民住房面积值 (S , 平方千米)	单位面积商品房价格增量 (ΔP , 元/平方米)	2016—2020年新增公园绿地率	数据来源
46.2	0-546.0	2.34%	《海绵城市建设效益量化及综合评价》(孙文婧, 2020)、《城市规划定额指标暂行规定》、《关于进一步加强武汉市居住用地建设强度管理的通知》、历年《武汉市绿化状况公报》、《Geographic Field Model based hedonic valuation of urban open spaces in Wuhan, China》(Jiao et al., 2010)、安居客网站

表 V-19 | 回补地下水效益的计算

年雨水入渗量 (V , 万立方米)	地下水生态价值 (P , 元/立方米)	雨水入渗回补地下水系数 (B)	数据来源
539.3~564.4	5.16	0.225	《海绵城市建设效益量化及综合评价》(孙文婧, 2020)、《地下水生态系统服务价值评估》(闫丹丹, 2019)

■ 调节气候

(1) 定义：海绵城市建设增加了项目示范区内的草地、林地、湿地面积，而这类生态资源对区域气候具有调节作用，如缓解城市热岛效应、增加降水等，因而具有相应的环境效益。

(2) 计算方法：基于意愿调查法测算。
调节气候 = $Sg \times Pg-climate$ 。

其中， Sg 为新增绿地面积； $Pg-climate$ 为单位绿地面积气候调节价值。

(3) 研究假设：a.根据原武汉市国土资源和规划局、武汉市规划研究院发布的《武汉市海绵城市专项规划》，划定城市公园面积约 19 平方千米，高速公路及快速路防护绿地约 64 平方千米，铁路防护绿地约37 平方千米，重大市政公园设施防护绿地约37 平方千米，共计新增约 157平方千米绿地。由于缺乏详细资料，无法区分绿地中草地、林地、湿地各自的面积，因此仅能用绿地面积进行核算。用武汉建成区新增绿地面积乘以示范区占整个建成区面积的比例，估算出两个示范区的新增绿地面积。b.草地、林地和湿地的气候调节价值参考谢高地等人的研究（2015），该研究评估了全国草地、林地等不同生态系统各类功能的价值。鉴于仅有绿地总面积数据，因此用草地、林地和湿地的平均价值作为绿地的气候调节价值。由于缺少武汉市特定的数据，因此采用全国平均价值水平进行计算。

(4) 数据来源（表V-20）

表 V-20 | 调节气候效益的计算

新增绿地面积 (Sg , 公顷)	草地调节气候价值 (元/公顷)	森林调节气候价值 (元/公顷)	湿地调节气候价值 (元/公顷)	单位绿地面积调节气候价值 ($Pg-climate$, 元/公顷)	数据来源
744.04	14017.75	18275.87	12263.4	14852.3	《武汉市海绵城市专项规划》、《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》（谢高地，2015）

表 V-21 | 净化空气效益的计算

新增绿地面积 (Sg , 公顷)	草地净化空气价值 (元/公顷)	森林净化空气价值 (元/公顷)	湿地净化空气价值 (元/公顷)	绿地所带来的净化空气价值 ($Pg-air$, 元/公顷)	数据来源
744.04	9929.95	11565.07	18735.75	13410.3	《武汉市海绵城市专项规划》、《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》（谢高地，2015）

■ 净化空气

(1) 定义：该效益指海绵城市建设中的绿地维持大气化学组分平衡，调节吸收二氧化硫、氮氧化物等空气污染物，处理废物(如去除、分解多余养分和化合物)，滞留灰尘，固碳释氧等方面的价值，为城市创造环境效益。

(2) 计算方法：基于意愿调查法测算。
净化空气 = $Sg \times Pg-air$ 。

其中， Sg 为新增绿地面积； $Pg-air$ 为绿地所带来的净化空气价值。

(3) 研究假设：a. 面积数据同上述假设。b.各类生态系统的净化空气价值参考谢高地等人的研究（2015），处理方法同上。

(4) 数据来源（表V-21）

■ 美学景观价值

(1) 定义：海绵城市建设项目中草地、林地、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价值，以及其他文化、艺术、科研教育等方面的价值，为城市创造无形的社会收益。

(2) 计算方法：基于意愿调查法测算。
美学景观价值 = $Sg \times Pg-aesthetics$ 。

其中， Sg 为新增绿地面积； $Pg-aesthetics$ 为绿地平均美学景观价值。

表 V-22 | 美学景观价值的计算

新增绿地面积 (Sg, 公顷)	草地美学景观价值 (元/公顷)	森林美学景观价值 (元/公顷)	湿地美学景观价值 (元/公顷)	绿地所带来的美学景观价值 (Pg-aesthetics, 元/公顷)	数据来源
744.04	2588.94	2980.69	16112.75	72275	《武汉市海绵城市专项规划》、《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》(谢高地, 2015)

(3) 研究假设: a. 面积数据同上述假设。B. 绿地的美学景观价值处理同上。

(4) 数据来源 (表V-21)

深圳案例

项目介绍

表 V-23 | 深圳市灰绿结合海堤项目案例分析情景设置

	基线情景：灰色海堤	气候韧性情景：灰绿结合生态海堤
建设目标	深圳市东部海堤重建工程（一期、二期）属水利工程项目，建设目的是提高海堤设防标准，通过海堤边休闲景观带的建设，恢复海堤原有保护功能，使之成为东部沿海具有特色的旅游景观点	深圳市东部海堤重建工程（三期）包括海堤工程、景观工程和相应的配套工程，采用了“三重防护、生态海堤”的总体理念，通过海堤重建、景观改造、海岸生态修复等措施，提升海堤防御能力和滨水景观品质，保障区域民众生命财产安全及社会经济稳定发展，助力大鹏新区打造滨海生态旅游度假区
设计标准	防潮（洪）50年一遇	防潮（洪）200年一遇
建设内容	1.按照原有堤线对海堤进行重建和加固，修复台风风暴潮带来的挡墙开裂等情况，增加消浪设施，减少越浪情况 2.整治加固后堤顶沿岸设置绿色休闲带，因地制宜设置景观栏杆、休闲步道、休闲绿化带，提升滨海景观和游人安全 3.因为工程改变了东部海堤沿岸原有的自然生态面貌，代之以结构单一的人工生态系统，沿岸生态系统的多样性和稳定性将受到一定影响 4.堤坝施工过程可能会对水生生态环境（包括底栖生物、浮游生物等）产生可恢复的损害	1.建立灰绿结合的“外堤”，通过衰减波浪、减少海蚀和增强沉积等方式构建富有增长弹性的外部生态防护系统 2.建立加高的“中堤”，阻止风暴潮及高浪 3.建立“内堤”，建立基于海绵城市的绿地网络，增加城市生物多样性和景观带，包括：在海堤堤顶巡堤路和休闲广场采取海绵透水铺装，减少径流量；以及设置生态草沟，代替传统沟渠排水，兼具景观性和减少雨水或者雨水冲刷带来的面源污染等措施 4.建造沙滩花园、亲水平台等节点，为游客提供安全、优美的游览休憩空间
堤坝总长	44千米	44千米
建设年限	假设：大鹏半岛所有海堤在2020年均已达到防潮（洪）50年一遇的建设标准	假设：大鹏半岛所有海堤可以在2021年提升到防潮（洪）200年一遇的建设标准
使用年限	50年	50年
分析节点	近景2030年、远景2050年	近景2030年、远景2050年

表 V-24 | 堤坝基础设施建设投资

情景	每1米长的海堤的平均造价 ($V_{ave.cons}$, 万元)	所需建设海堤长度 ($L_{seawall}$, 米)	海堤基础设施建设投资总额 ($F_{replacement}$, 万元)
基线情景：50年重现期	6.6	44000	289353
气候韧性情景：200年重现期	12.9	44000	565716

测算方法和数据来源

总成本计算

1. 海堤基础设施建设投资

基线情景海堤建设成本参考深圳市东部海堤重建工程的政府公开预决算文件，去除了其中单价明显偏低的抢险修复工程，选择深圳东部海堤重建项目（一期）、官湖海堤重建项目作为基线情景海堤建设成本参考项目；选择深圳东部海堤重建（三期）杨梅坑示范段项目作为韧性情景海堤建设成本参考项目。经CPI指数调整后，基线情景下海堤工程平均每米造价为6.6万元，44千米海堤的基础设施投资为28.9亿元；气候韧性情景下海堤平均每米造价为12.9万元，基础设施投资为56.6亿元。

$$F_{replacement} = V_{ave.cons} \times L_{seawall}$$

其中， $F_{replacement}$ 指堤坝基础设施建设投资总额； $V_{ave.cons}$ 指每米海堤的平均造价； $L_{seawall}$ 指所需建设海堤长度。（表V-24）

2. 海堤维护和运营成本

基线情景海堤维护成本：根据2021年深圳市水务局专项资金立项文件，参考深圳市东部海堤重建工程管养（2021年度）项目的成本等比例扩大，管养内容包括安保巡查、堤防维修养护、陆域和消能区保洁、挡潮闸运行管理等，成本总计约3393万元。考虑到海堤的其他可能发生费用，将基线情景海堤维护成本定为项目总投资额的2%，即5787万元/年。

气候韧性情景维护成本：参考基线情景海堤的管养成本和可能产生的其他成本，为大部分灰色基础设施的年度维护设定预算；为新增绿色基础设施的年度维护费用增加约1倍的维护预算，将气候韧性情景下海堤的维护成本定为项目总投资额的2%，约为11314万元/年。因为红树林等绿色基础设施在成林后维护成本会大幅缩减，考虑到国内养

护补植的要求，研究假设5年后绿色基础设施的维护成本减半，则气候韧性情景下海堤的维护成本约为8551万元/年。

总收益计算

1. 规避未来损失

■ 可规避的基建损失

定义：可规避的基建损失是指项目建成后可避免的台风风暴潮等造成的基础设施破坏所导致的损失。该成本包括固定资产洪灾损失和海堤重建成本。

计算方法：采用影子价格和重置成本进行计算。

$$F_{infra} = F_{damage-drpth} + F_{replacement}$$

其中， F_{infra} 表示可以规避的基础设施损失总额； $F_{damage-drpth}$ 指根据极端事件强度和风险区固定资产淹没水深计算的固定基础设施洪灾损失； $F_{replacement}$ 指台风风暴潮损毁海堤的重建成本。

研究假设：a.本报告不考虑2021—2050年大鹏遭遇重现期超过200年台风风暴潮的情况。b.本项目不考虑台风风暴潮伴随的风雨影响造成的损失，因为这些损失无法通过建设气候韧性海堤避免。

(1) $F_{damage-drpth}$ 固定资产洪灾损失

定义：可通过项目建设避免的越堤海浪造成的建成区固定资产淹水损失。

计算方法：采用影子价格法进行计算。

a.风暴潮重现期<100年，海堤未受到实质性损害，越过基线情景堤坝高度（2.58米）的波浪造成基础设施损失：

$$F_{damage-drpth} = \sum_e^{w-2.58} (0.1466 \times (w-2.58-e) + 0.2857) \times (P_e \times V_{ave})$$

b.风暴潮重现期≥100年，海堤发生严重损毁，海拔在以下的建成区都遭受洪水损失：

$$F_{damage-drpth}=\sum_e^w(0.1466\times(w-e)+0.2857)\times(P_e\times V_{ave})$$

其中， $F_{damage-drpth}$ 指海水淹没造成的固定资产损失； w 指风暴潮潮位高度； e 指建成区海拔高度； P_e 指海拔为 e 米的建成区域面积； V_{ave} 指大鹏建成区域内固定资产平均价值。参考欧盟联合研究组发布的《全球洪水水深-损失公式：方法学和数据库指南》，基于亚洲居住区洪水损失数据推导。（表V-25）

(2) $F_{replacement}$ 海堤重建成本

定义：海堤遭到极端台风风暴潮事件袭击而导致严重损毁，需要进行原标准重建而产生的支出。本报告使用重

置成本法计算在韧性海堤建成后避免的海堤重建支出。

计算方法：采用重置成本法进行计算。

$$F_{replacement} = V_{ave.cons} \times L_{seawall}$$

其中， $V_{ave.cons}$ 指1米长海堤的平均造价； $L_{seawall}$ 指所需建设海堤长度。

研究假设：a.假设2021年大鹏已经建成了防御50年一遇及以下风暴潮的海堤设施。b.2021—2030年间发生的百年一遇以及以上的台风风暴潮事件并不会使堤坝产生严重损毁；2031—2050年间发生的百年一遇以及以上的台风风暴潮事件会使目前建设标准为50年一遇的海堤产生严重损毁，需要恢复重建。（表V-26）

表 V-25 | 固定资产洪灾损失的计算

参数	计算方法	假设	数据来源
w （浪高）	综合多种海洋风险因素下，2021—2050年大鹏地区不同重现期风暴潮的潮位	参见表2	参见表2
e （建成区海拔高度，m） P_e （海拔为米的建成区面积）	1. 2020年不同海拔的建成区面积来自Landsat 8 卫星遥感数据解译结果 2. 基于《深圳市海岸带综合保护与利用规划（2018—2035）》计算出2035年大鹏地区建设用地分布，并使用2020—2035年大鹏地区建成区增长速度和分布，作为预测2050年大鹏地区建成区分布的基础	1. 2035年大鹏新区建设用地的增长和分布与《深圳市海岸带综合保护与利用规划（2018—2035）》保持一致 2. 2036—2050年大鹏新区建设用地增长和分布变化趋势与2020—2035年保持一致	1. Landsat8 卫星遥感数据30m×30m，拍摄日期为2020-09-22，数据标识为LC81210442020266LGN00 2. “地理空间数据云” GDEM V2 30M 分辨率数字高程数据 3. 《深圳市海岸带综合保护与利用规划（2018-2035）》
V_{ave} （建成区固定资产价值）	根据瑞士再保险公司对于暴露于极端气候事件的固定资产减值评估方法(Swiss Re, 2020)，考虑到多种固定资产的预计寿命，本报告使用大鹏地区15年累计固定资产投资额作为推算风险区固定资产价值的基础，其中：2020年大鹏新区固定资产价值=2012—2020年大鹏新区累计固定资产投资额（大鹏新区独立统计数字从2012年开始）；2050年大鹏新区固定资产价值=2035—2050年大鹏新区累计固定资产投资额	1. 大鹏新区内的固定资产投资在建设用地上平均分布 2. 相关历史统计数字使用CPI 指数调整 3. 考虑到中国经济中长期发展增速放缓，假设2021—2050年大鹏地区固定资产投资增速匀速降为与2016—2020年水平的一半	1. 大鹏新区2013—2019年统计年鉴 2. 大鹏新区2020年1—12月经济运行简析

表 V-26 | 海堤重建成本的计算

情景	1米长的海堤的平均造价 （ $V_{ave.cons}$ ，万元）	所需建设海堤长度 （ $L_{seawall}$ ，米）	海堤基础设施建设投资总额 （ $F_{replacement}$ ，万元）
基线情景：50年重现期	6.6	44000	289353
气候韧性情景：200年重现期	12.9	44000	565716

表 V-27 | 经济活动中断损失的计算

参数	计算方法	假设	数据来源
年均每日游客量 ($N_{t-daily}$, 人)	考虑到2012—2020年大鹏地区年均游客复合增长率, 及三亚、舟山等类似旅游地区年游客总量, 以1500万人次作为2050年大鹏地区年旅游人数预测值	1.假设海堤基础设施影响区域的经济活动以旅游为主, 并且这些活动对于台风风暴潮等气候事件十分敏感 2.因为大鹏游客日均消费额相比当地旅游产业规划的预测偏低, 且大鹏正在进行旅游基础设施提升建设, 所以假设2021—2050年大鹏游客的日均消费额会有稳定增长	1.大鹏新区2013—2019年统计年鉴 2.大鹏新区2020年1—12月经济运行简析 3.2018年第三季度大鹏新区旅游经济运行情况报告
游客日均支出 ($C_{t-daily}$, 元/人)	使用大鹏地区旅游人数、旅游收入和游客过夜率等指标综合测算 参考2012—2020年大鹏地区旅游收入复合增长率作为2021—2050年游客日均支出增长率的测算基础。假设2021—2050年大鹏新区旅游收入的复合增长率将匀速降为2012—2020年的一半		
游客强度 ($I_{tourist}$)	台风期(5—11月)日均游客量与年日均游客量的比值	假设大鹏未来的旅游淡季规律与历史数据(2016—2017年)保持一致	2017年大鹏游客抽样调查
所需恢复时间 (R_i , 天)	$R_i=0$, 风暴潮事件重现期<50年, 灾后恢复时间为0; $R_i=3$, 50年≤风暴潮事件重现期<100年, 灾后恢复时间需要3天; $R_i=10$, 风暴潮事件重现期≥100年, 灾后恢复时间至少需要10天	为不高估基础设施灾损带来的经济活动中断损失, 此处保守估计了旅游活动恢复时间, 实际基础设施恢复时间远远超出此处假设	

■ 经济活动中断损失

(1) 定义: 项目建成后得以避免的旅游相关经济活动中断损失。这部分时间损失来自于台风风暴潮等极端海洋灾害带来的海堤基础设施修复。

(2) 计算方法: 采用市场价格法进行计算。

$$Fecon-interruptions = N_{t-daily} \times C_{t-daily} \times I_{tourist} \times R_i$$

其中, $N_{t-daily}$ 指年均每日游客数量; $C_{t-daily}$ 指游客平均每日支出; $I_{tourist}$ 指游客强度; R_i 指所需恢复时间, 根据台风风暴潮事件强度调整。(表V-27)

2. 经济效益

(1) 定义: 相比灰色海堤, 灰绿结合生态海堤尤其是新增的景观化的绿色基础设施带来的休闲旅游业价值。

(2) 计算方法: 采用旅行费用法进行计算。

$$V_r = r \times \sum_{j=1}^n C_j \times C_i$$
$$C_j = C_{tcj} \times C_{lfj} \times C_{efj}$$

其中, V_r 表示深圳大鹏地区的旅游休闲价值(元/年); r 表示受到景观化绿色基础设施吸引的游客比例; N_j 表示 j 地到核算地区旅游的总人数(人/年); $j=1, 2, \dots$ 表示来被核算地点旅游的游客所在区域; 表示来源地总数; C_j 表示来自 j 地的游客平均支出的旅游费用(元/人), 其中包括游客从 j 地到核算区域的交通费用, 食宿花费 C_{lfj} 和门票费用 C_{efj} 。(表V-28)

3. 社会和环境效益

■ 固碳释氧

(1) 定义: 灰绿结合的生态堤坝比传统堤坝新增绿化面积带来的碳汇和释放氧气收益。

(2) 计算方法: 采用碳汇(净生态系统生产力, NEP)、释氧(影子价格)进行计算。

$$V_{co2} = \frac{S_{man} \times C_{stock} \times C_{i,price}}{i} + G_{NEP} \times S_{man} \times C_{i,price}$$

其中, S_{man} 指项目恢复的红树林面积(ha), C_{stock} 指红树林固碳潜力(吨/公顷); $C_{i,price}$ 指在第 i 年全球碳排放的社会成本(元/吨); G_{NEP} 指红树林生态系统净生产力(吨/公顷·年)(表V-29)

表 V-28 | 经济效益的计算

参数	计算方法	假设	数据来源
景观化绿色基础设施吸引的游客比例 (r)	5%	保育良好的红树林等额外景观化绿色基础设施的生态系统服务价值会随着时间的增加而升高,但因为缺少中国修复红树林休闲旅游价值的实证观察研究,此处采取保守估计,假设红树林等绿色基础设施吸引游客比例在2021—2050年保持不变	
各地游客人数 (N_i) 各地游客旅游支出 (C_i)	根据2017年大鹏新区游客抽样调查结果中的游客结构和群体旅游行为特征,套用2020年旅游产业统计结果数据计算	1.假设2021—2050年大鹏地区游客结构与历史抽样调查结果一致 2.游客量增长趋势与经济活动中断损失部分保持一致	1.2017年大鹏游客抽样调查 2.大鹏新区历年游客接待情况 3.12306等出行网站
交通费用 (C_{tcj})	根据大鹏抽样调查游客来源地统计,使用高铁和航班价格计算	1.假设2021—2050年大鹏地区游客结构与历史抽样调查结果一致 2.假设2021—2050年该项支出与游客旅游支出增长趋势保持一致	
食宿花费 (C_{hfj}) 门票费用 (C_{efj})	根据大鹏游客抽样调查结果计算	假设2021—2050年该项支出增长与游客旅游总支出保持一致	

表 V-29 | 增加碳汇的计算

参数	计算方法	假设	数据来源
项目恢复的红树林面积 (S_{man} , 公顷)	根据基线情景和气候韧性情景基建成本的差值,以及红树林等绿色基础设施的单位面积恢复成本,预测项目可能恢复的红树林面积	假设基线情景和气候韧性情景基础设施投资的主要成本差异来自绿色基础设施	1.基线情景和气候韧性情景基础设施建设成本参见成本计算中“堤坝基础设施建设投资” 2. Bayraktarov et al., 2016
红树林固碳能力 (C_{stock} , 吨/公顷)	476.7	假设新恢复的红树林与深圳福田自然红树林保护区的红树林有相同级别的固碳能力	张莉等,2013
红树林生态系统净生产力 (C_{NEP} , 吨/公顷·年)	6	假设项目恢复的红树林的年度净碳影响与深圳福田自然红树林保护区的红树林相似,并且在2021—2050年内保持不变	彭聪姣等,2016
碳排放的社会成本 (C_{lprice} , 元/吨)	1.根据2016年EPA发布的碳排放社会成本2021—2050年逐年数据计算 2.使用OECD汇率数据转化为2020年人民币价值 3.2021—2050年碳的社会成本计算结果参考宁夏碳汇计算内容		1. US Environmental Protection Agency, 2016; US Government, 2021; 2. OECD美元-人民币汇率换算数据: https://data.oecd.org/conversion/exchange-rates.htm#indicator-chart

表 V-30 | 释放氧气的计算

参数	计算方法	假设	数据来源
氧气分子量 (M_{O_2}) 二氧化碳分子量 (M_{CO_2})	$M_{O_2} = 32$ $M_{CO_2} = 44$		/
工业制氧价格 ($C_{oxy\ price}$, 元/吨)	400	工业制氧的成本价格在 2021—2050年保持稳定	梁鸿等, 2016

$$V_{O_2} = M_{O_2} / M_{CO_2} \times C_{ENP} \times S_{man} \times C_{oxy\ price}$$

其中 M_{O_2} 指氧气的分子量； M_{CO_2} 指二氧化碳的分子量； $C_{oxy\ price}$ 指工业制氧价格（元/吨）。（表V-30）

■ 空气和水体污染物净化效益

（1）定义：项目完成后，增加的红树林等绿色基础设施净化对水体和空气中污染物的治理价值。

（2）计算方法：采用市场价格进行计算。

$$V_{pollution} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i \times S_{man}}{E_i} \times C_i$$

其中， $V_{pollution}$ 指红树林的污染物净化价值， n 表示统计的污染物种类， R_i 指每公顷红树林的年净化能力（千克/公顷·年）， E_i 指污染物 i 的污染当量值， C_i 指污染物 i 的环境保护税。（表V-31）

■ 生物多样性效益

（1）定义：项目建成后，依据香农维纳 (Shannon Wiener) 指标估算的红树林等绿色基础设施的生物多样性价值。

（2）计算方法： $V_{bio} = C_{bio} \times S_{man}$

其中， V_{bio} 表示红树林等绿色基础设施的生物多样性价值； C_{bio} 指红树林等绿色基础设施的Shannon Wiener指数对应的价值量。

根据基于深圳和大鹏新区红树林的生物多样性指数评价 (李皓宁等, 2016)，以及对于在生态旅游区播种、幼苗和成熟红树林生物多样性的观察测评可以得出。受到人类活动的干扰，红树林各个生长阶段的Shannon-Wiener指数会有波动，但是会保持在一个中等水平 (Malik et al., 2019)。因此，项目推测，在红树林恢复的初期，相关地区已经开始有生物多样性效益，并且会长期保持稳定。（表V-32）

表 V-31 | 空气和水体污染物净化效益

污染物种类	污染物净化能力 (千克/公顷·年)	定价思路	数据来源
总铜	0.13	当量0.1, 每当量2.8元	1. 《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》 2. 《环境保护税税目税额表》 3. 《应税污染物和当量值表》 4. 于晓玲等, 2009 5. 赵晟等, 2007 6. 李怡, 2010
总锰	23.76	当量0.2, 每当量2.8元	
总锌	0.67	当量0.2, 每当量2.8元	
总铅	0.08	当量0.025, 每当量2.8元	
总磷	10 ~ 20	当量0.25, 每当量2.8元	
氨氮	150 ~ 250	当量0.8, 每当量2.8元	
二氧化硫	150	当量0.95, 每当量1.8元	
氟化物	9.3	当量0.87, 每当量1.8元	

表 V-32 | 生物多样性效益

等级	Shannon-Wiener指数 (C_{bio})	单价(元/公顷·年)
I	$C_{bio} \geq 6$	66760
II	$5 \leq C_{bio} < 6$	53410
III	$4 \leq C_{bio} < 5$	40060
IV	$3 \leq C_{bio} < 4$	26700
V	$2 \leq C_{bio} < 3$	13350
VI	$1 \leq C_{bio} < 2$	6680

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。



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>