

# 解码中国省级交通领域 2012—2019年二氧化碳排放

DECIPHERING CHINA'S PROVINCIAL TRANSPORT CARBON EMISSIONS: STATUS QUO AND GROWTH TRENDS

薛露露 刘岱宗

## 执行摘要

### 主要结论

- 为协助各地区了解各自交通碳排放的异同，制定“差异化”交通领域减排行动方案，本研究通过“自上而下法”计算了2012—2019年中国省级交通直接碳排放。
- 全国2/3省份2019年省级交通碳排放占能源活动碳排放的比例呈增长态势。在经济发达或第三产业占比较大的省份，交通碳排放在全行业碳排放中的占比已超过20%，成为主要排放源之一。
- 2019年，东部地区交通碳排放最高；2012—2019年，中部和西部交通碳排放增速最快。多数省份交通碳排放增长与经济增长呈弱脱钩。
- 省级交通领域化石燃料消费结构、排放驱动因素等指标在2012—2019存在较大区域差异。在上海市、北京市和海南省，2019年交通碳排放以航空煤油为主，其他省份以汽油和柴油为主。
- 受核算方法、统计数据制约，省级交通碳排放核算的部分结果存在不确定性，应统一与明确核算方法并完善统计数据基础，并定期编制地方交通碳排放清单。

### 研究问题

为实现碳达峰与碳中和目标，从中央到地方正在积极制定交通领域低碳行动方案。由于中国各地社会经济发展阶段差异大、交通运输需求增速不同，交通碳排放水平各异，地方交通领域低

## 目录

执行摘要 .....	1
Executive Summary .....	2
1. 背景 .....	4
2. 研究方法 .....	6
3. 结果 .....	8
4. 省级交通碳排放不确定性讨论 .....	21
5. 关于本文主要结论的政策讨论 .....	23
附录1. 交通领域低碳行动目标汇总 .....	24
附录2. 东部、西部、中部、东北地区及经济人口特点 .....	27
附录3. 跨边界交通碳排放归属划分方法 .....	28
附录4. 各省份交通碳排放增长动因的实证回归分析 .....	29
附录5. Tapio脱钩指数 .....	35
参考文献 .....	37
致谢 .....	39

“工作论文”包括初步的研究、分析、结果和意见。“工作论文”用于促进讨论，征求反馈，对新事物的争论施加影响。工作论文最终可能以其他形式进行发表，内容可能会修改。

**引用建议：**薛露露、刘岱宗著. 解码中国省级交通领域2012—2019年二氧化碳排放. 2023. 工作论文, 北京: 世界资源研究所. <https://doi.org/10.46830/wriwp.22.00109>

碳行动方案的编制，既要确保国家目标的达成，也要兼顾地方的差异性。

然而，由于交通碳排放核算统计体系不完善、核算方法不一致，地方政府无论在交通碳排放清单核算，还是交通领域减排目标设置及减排政策制定方面，仍面临挑战。例如，由于统计数据基础薄弱，地方交通碳排放核算存在不确定性，地方政府难以识别交通领域主要排放源，设定减排目标，并有针对性地制定本地化的减排政策。此外，由于各省份对交通碳排放源及核算方法的选用存在差异，这也影响国家政府追踪与比较各地交通碳排放情况。

本文采用公开数据及统一的交通碳排放核算方法，对国内各省份2012—2019年交通直接碳排放进行摸底，以支持“差异化”交通领域减排行动方案制定。同时，为提升地方交通碳排放核算结果的确定性，本文也对省级交通领域碳排放核算方法及统计数据基础提出了完善建议。

## 结论

本文开创性地计算了2012—2019年中国省级交通碳排放，结果显示：

- **2019年，中国多数省份的交通碳排放在全行业（能源活动相关）碳排放中的占比正在增加，交通领域逐渐成为重要排放源。**在经济发达或第三产业占比较大的省份，交通碳排放在全行业碳排放中的占比甚至已超过20%。
- **2019年，东部地区交通碳排放最高；2012—2019年，中部和西部交通碳排放增速最快。**交通碳排放最高的5个省份为广东省、江苏省、山东省、辽宁省和四川省，占全国交通碳排放的1/3。增速最快的省份为贵州省、青海省、湖南省和江西省。
- **交通领域化石燃料消费结构存在较大区域差异。**在上海市、北京市和海南省，2019年交通碳排放以航空煤油为主。在广东省、浙江省等14个省份（以东部地区为主），交通碳排放以汽油为主。在山东省、江西省等13个省份（以中西部地区为主），交通碳排放则以柴油为主。
- **拉动各省份交通碳排放增长的动因不同。**虽然各省份的交通碳排放主要受经济发展、人口增长、产业结构升级与城镇化多重因素影响，但中部地区交通碳排放增长更多由经济增长拉动，而西部地区和东北地区主要则由城镇化和人口变化带动。
- **25个省份交通碳排放增长与经济增长开始呈现弱脱钩。**但在交通碳排放增速快的中西部地区，不仅人均交通碳排放在快速上升，单位GDP交通碳排放也未明显下降，交通碳排放与经济增长呈现较强的增长耦合关系。

为协助各省份更好地核算交通碳排放，制定减排措施，本文建议国家和各省份的有关部门：

- **统一与明确核算方法并完善统计数据基础。**在核算方法方面，明确核算对象与排放源、明确跨边界交通碳排放的归属地划分方法及统一核算方法。在统计数据方面，增加对非营运交通的能耗统计，完善企业上报数据的要求（如区分国际交通、生物燃料与子行业的能耗），加强交通能耗统计的验证工作。在交通碳排放清单编制方面，地方政府（至少省级政府）应自某一基准年起，定期编制交通领域碳排放清单，便于其了解交通领域排放现状，识别主要排放源，并有针对性地制定相关减排政策。
- 对交通已经逐渐成为主要排放源的省份，**碳达峰方案编制应更侧重交通领域的低碳行动。**
- **全国交通领域减排的重点地区，既需侧重现有交通碳排放较大的东部省份，也需关注增速快且仍处于增长耦合阶段的中西部省份。**
- **在制定交通低碳行动路线时，应根据排放源构成、碳排放量与增速的不同，差异化地制定减排施策。**

## EXECUTIVE SUMMARY

### Highlights

- To help subnational governments understand the magnitude of transport carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions and support their development of CO<sub>2</sub> peaking actions, this study uses the “top-down” method to quantify direct transport CO<sub>2</sub> emissions for 30 Chinese provinces during 2012 and 2019.
- In two-thirds of China’s provinces in 2019, the share of transport CO<sub>2</sub> emissions was larger than the share on the national level. For provinces where the transport sector has risen to the top emissions source, their emissions peaking action plans should place more emphasis on the transport sector.
- In 2019, provinces in the eastern region had the highest levels of transport CO<sub>2</sub> emissions, and provinces in the western and central regions were characterized by the most rapid transport emissions growth during 2012 and 2019.
- Provincial transport emissions differ by sources of emissions: in Beijing and Shanghai, domestic

aviation emissions represented the largest shares, whereas in the eastern provinces, passenger car emissions consisted of the largest shares.

- Estimates for provincial transport CO<sub>2</sub> emissions are uncertain. We recommend improving statistical data collection and standardizing the transport emissions accounting method. Likewise, official subnational transport emissions inventories should be required and updated annually from a base year.

## Research question

To decarbonize the transport sector to attain China's goals of carbon peaking before 2030 and carbon neutrality before 2060, the national and subnational governments in China are actively developing action plans for CO<sub>2</sub> peaking before 2030 for key sectors, including transport.

It is crucial that subnational governments understand the current magnitude of their (particularly provincial) transport sector emissions, the historic trends, and the sources of emissions when developing contextualized transport decarbonization action plans; as the saying goes, “you can't improve what you don't measure.” However, like in many emerging economies, the lack of reliable statistical data and consistent emissions accounting methods causes subnational governments to hit roadblocks when developing transport emissions inventories and sectoral decarbonization road maps. For example, without reliable statistics and consistent emissions accounting methods in China, estimates of subnational transport CO<sub>2</sub> emissions are uncertain and inconsistent. Therefore, it is challenging for provincial governments to evaluate the current magnitude of transport emissions, identify major emissions sources, and develop localized transport decarbonization plans. It is also difficult for national governments to understand and compare transport emissions across provinces.

## Our approach

This study uses the top-down emissions accounting method to quantify direct transport CO<sub>2</sub> emissions for 30 Chinese provinces during 2012 and 2019. The estimated provincial emissions, emissions intensity in terms of gross domestic product (GDP), emissions per capita, sources of emissions, and driving forces of emissions growth are used to inform the development

of tailored local transport decarbonization plans and to provide recommendations to improve the certainty of subnational transport emissions estimations. The top-down accounting method employs the apportioning ratios from the *Guidelines on the Development of Provincial Carbon Emission Peak Action Plans* (consultation version) (Ministry of Ecology and Environment 2021), which reclassifies a certain percentage of fuel consumption (from private cars, light-duty trucks, and some heavy-duty trucks) from the nontransport sectors to the transport sector. The input data are provincial energy balances (National Statistical Bureau 2013–2020) and localized carbon emissions factors. The possible causes of the uncertainty associated with provincial transport emissions estimations are also analyzed..

## Policy implications

Based on estimates of transport CO<sub>2</sub> emissions for 30 provinces between 2012 and 2019, this study reveals the following findings:

- During 2012 and 2019, most of China's provinces witnessed growing shares of transport CO<sub>2</sub> emissions in the total provincial direct emissions, and the transport sector became an important source of CO<sub>2</sub> emissions on the provincial level. For economically advanced provinces or provinces with large shares of tertiary industry, the transport sector rose to the top emissions source.
- In 2019, the eastern region had the highest transport CO<sub>2</sub> emissions, and the western and central regions witnessed the most rapid emissions growth. The top five provinces with the largest transport emissions were Guangdong, Jiangsu, Shandong, Liaoning, and Sichuan; together, they represented one-third of China's transport CO<sub>2</sub> emissions. On the other hand, the central and western provinces experiencing the most rapidly growing emissions were Guizhou, Qinghai, Hunan, and Hubei.
- Provinces have different transport emissions breakdowns. In Shanghai and Beijing, domestic aviation was the largest source of transport emissions. In Guangdong, Zhejiang, and 12 other provinces (mainly eastern regions), passenger cars were the major contributor of transport emissions, whereas trucks were the primary contributor of transport emissions in the central and western regions.

- The driving forces behind transport CO<sub>2</sub> emissions growth vary across regions. On the national level, increases in transport CO<sub>2</sub> emissions were attributable to multiple factors, including economic and population growth, economic structural shift, and urbanization. However, on the regional level, the growth in transport emissions in the central region was driven primarily by economic growth, whereas in the western and northeastern regions it was fueled by urbanization and population changes.
- Although transport emissions intensity (in terms of GDP) had been declining in most of the provinces, transport emissions per capita had increased rapidly. The only exceptions were the central and western provinces: transport CO<sub>2</sub> emissions per capita had increased rapidly, and transport CO<sub>2</sub> emissions per unit of GDP also showed no signs of decreases

To help different provinces better quantify transport CO<sub>2</sub> emissions and inform the development of transport decarbonization action plans, this study recommends the following actions:

- National government should create unified transport emission accounting methodology for provincial transport emission accounting, expanding the coverage of transport fuel consumption statistics, distinguishing among domestic and international transport fuel consumptions as well as transport biofuel consumptions, and mandate the quality assurance and quality control process. Official subnational transport emissions inventories should be required and be annually updated from a base year.
- For provinces where the transport sector has become the largest source of CO<sub>2</sub> emissions, their action plans for carbon dioxide peaking before 2030 should place greater emphasis on the transport sector.
- National government should not only pay attention to the east provinces with largest transport CO<sub>2</sub> emissions, but also provide resources and build capacities in the central and west provinces with the most rapid emission growth.
- Provincial governments should have differentiated treatments on transport sector decarbonization, based on sources of transport emissions and growth paces.

## 1. 背景

虽然根据最新国家温室气体排放清单，2014年中国交通领域二氧化碳排放（以下或简称“碳排放”）仅占能源活动排放的9.2%（生态环境部 2018），但根据美国与欧盟的经验，随着电力与工业领域碳排放的达峰与逐渐下降，交通领域碳排放占能源活动排放的占比将持续增加（EEA 2020；EPA 2020）。所以，减少交通领域的碳排放，扭转不断增长的排放曲线，对中国实现碳达峰和碳中和目标至关重要。

为化解这一挑战，从中央到地方正在积极制定碳达峰碳中和的政策体系，包括《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（中共中央和国务院 2021）、《2030年前碳达峰行动方案》（国务院 2021）等总体指导方针及具体领域的行动方案，包括交通领域的绿色低碳行动方案（见附录1）。

由于交通碳排放核算统计体系不完善、核算方法不一致，地方政府无论在交通碳排放清单核算，还是交通领域减排目标设置及减排政策制定方面，仍面临挑战，包括：

- 地方交通碳排放核算及清单编制：由于统计数据基础薄弱，地方交通碳排放核算存在不确定性，且地方政府没有定编制交通领域二氧化碳排放清单、追踪评价减排目标落实情况的机制。
- 地方交通领域减排目标设置及减排政策制定：由于缺乏交通碳排放的核算数据基础，地方政府难以识别交通领域主要排放源，设定本地化减排目标，并有针对性地制定减排政策。

此外，由于各省份对交通碳排放源及核算方法的选用不一，存在明显差异（专栏一），这也影响国家政府追踪与比较各地交通碳排放情况。

事实上，中国各地社会经济发展阶段差异大、运输需求增速不同，交通碳排放水平也存在差异，因而有必要制定“差异化”交通领域减排行动方案。本文采用公开数据及统一的交通碳排放核算方法，对国内各省份2012—2019年交通直接碳排放进行“摸底”，分析省份交通碳排放量及增速的异同以及对国家交通碳排放的贡献。同时，为提升地方交通碳排放核算结果的确定性，本文也对省级交通领域碳排放核算方法及统计数据基础提出了完善建议。

专栏 1 | 交通碳排放源与核算方法讨论

为了解各地交通碳排放采用的排放源与核算方法，作者以问卷形式对国内10个省市了解本地交通碳排放核算的机构（共27位受访者）开展调研。调研采用“便利抽样”法，涉及东、中、西部不同发展阶段的省市，调研问题主要为交通碳排放源与核算方法选取（见专栏图1）。其中，4名受访者表示本省/市尚未开展交通碳排放核算工作，其余已开展交通碳排放核算的省/市中：

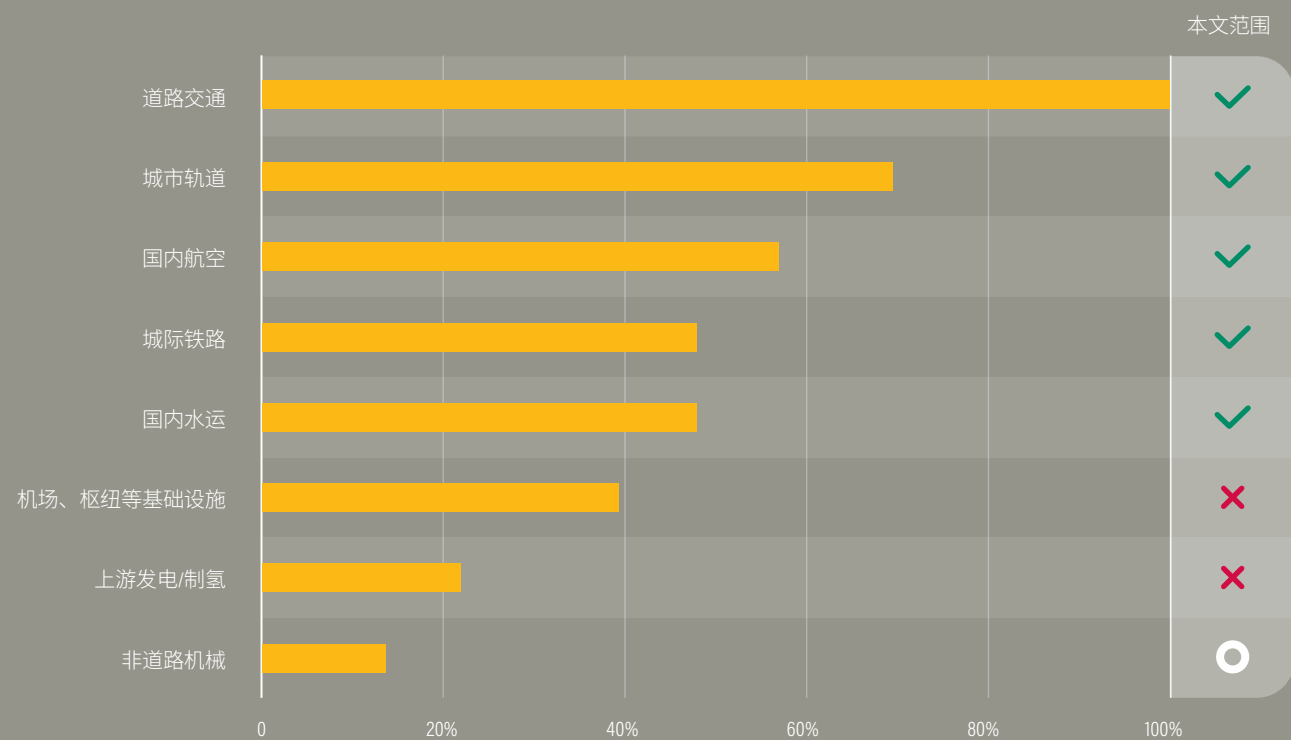
除道路与城市轨道交通外，被调查地区在交通碳排放核算过程中，较少涉及航空、铁路、水运、上游发电、基础设施与非道路机械的排放。

16位受访者（占比为59%）表示，所在地区在开展交通碳排放核算时多采用“自上而下法”与“自下而上法”相结合的方法。

在跨边界交通碳排放归属地划分方面，半数以上受访者表示会采用多种方法进行划分，如地理边界法、自上而下（能源平衡表）法与居民活动法。

所以，本文结论只适于第2节的核算排放源与方法，也是现有公开数据能支持的结论。若核算的排放源或方法发生变化，交通碳排放结果可能与本文不一致。

专栏图 1 | 部分省市交通碳排放核算的排放源与本研究的对比



说明：百分比代表所有受访者中，对该领域开展碳排放核算的受访者数量。“✓”表示本文覆盖的行业，“✗”表示不在本文范围内的行业，“○”表示无法确认是否包含非道路机械。

来源：作者调研整理。

## 2. 研究方法

本文聚焦省级与地区级交通领域二氧化碳排放量（简称“交通碳排放”）的分析，其中：

- “省份”包括30个省、自治区、直辖市，不含香港特别行政区和澳门特别行政区、台湾省及西藏自治区。在省份基础上，本文也聚类到地区层面进行分析（地区分类见附录2，国家统计局 2011）。由于市县级统计数据可得性差，本文不涉及该层级的分析。
- 时间跨度为2012—2019年。2019年为能源平衡表最新年份。由于第三次经济普查后对2000—2013年国家能源平衡表进行修订（全国能源消费上调约10%）时，未同步修订省份能源平衡表（国家统计局能源统计司 2014, Liao等 2019），所以，本文各省份2012—2013年交通碳排放与后续年份可能不一致。

本文涉及的交通领域碳排放源包括国内道路、铁路、水运和航空等领域营运及非营运交通工具在燃料燃烧过程中产生的碳排放，不包括：

- 尾气净化和润滑油燃烧产生的碳排放<sup>1</sup>。由于缺乏各省份尿素和润滑油消费量统计数据，且该部分排放通常较小，因而可忽略不计。
- 发电与制氢、燃料炼化产生的碳排放。根据《政府间气候变化专门委员会（IPCC）国家温室气体清单指南（2006版）》（IPCC 2006），该排放属于电力与工业领域排放；同时，目前国内能源平衡表中较难识别或尚未统计各地新能源汽车的耗电量/耗氢量（薛露露和刘岱宗 2022）。
- 国际航空、航海产生的碳排放以及管道运输产生的碳排放。国际航空、航海产生的碳排放不计入国家碳排放总量，而是作为“备忘”条目单独报告（IPCC 2006）。管道运输产生的碳排放量小，本文暂不将其纳入研究范围。最后，虽然非道路机械排放属于交通碳排放，但本文是否包括非道路机械仍是未知，取决于中国交通能耗统计与能源平衡表拆分系数（生态环境部2021）是否计入非道路机械。

本文主要基于“自上而下”法，通过各类交通燃料消耗量、燃料低位发热量与碳排放因子计算碳排放（公式1）。这也是IPCC唯一推荐的国家交通碳排放核算方法（IPCC 2000）。

$$E_{\text{燃烧-CO}_2} = \sum FC_i \times NCV_i \times EF_i \quad (\text{公式1})$$

式中：

$E_{\text{燃烧-CO}_2}$ 为燃烧化石燃料产生的碳排放，单位为吨；  
 $FC_i$ 为交通燃料*i*的消费量，单位为吨或万立方米；  
 $NCV_i$ 为交通燃料*i*的低位平均发热量，单位为百万千焦/吨或百万千焦/万立方米；

$EF_i$ 为交通燃料*i*的碳排放因子，单位为吨二氧化碳/百万千焦。

其中，交通燃料消耗量来自《中国能源统计年鉴》国家/省份能源平衡表（实物量）（国家统计局能源统计司2013—2020）。由于能源平衡表中“交通运输、仓储和邮政业”仅涉及营运交通的能耗统计，不含私家车等非营运车辆能耗，为获得完整的交通燃料消费量，本文采用目前常见做法，用《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南（征求意见稿）》（生态环境部2021a）中提出的划分系数将其他领域的部分能耗拆分到交通领域<sup>2</sup>。低位发热量与碳排放因子来自《省级温室气体清单编制指南（试行）》（国家发展改革委 2011）。本地车辆与异地车辆的跨边界出行排在排放归属地的划分上，采用“本地运输企业燃料消耗法”，即根据交通燃料的终端用户（如道路运输企业）注册地划分碳排放归属地（薛露露和刘岱宗 2022，见附录3）。

值得注意的是，由于省份能源平衡表没有扣减国际航空和航海的能耗，且国内仍缺乏各省份国际燃料舱的公开能耗统计数据（见表1），本研究将上述方法得到的交通能耗再减去“境内飞机和轮船在境外的加油量”，以消除国际燃料舱对各省份交通碳排放的影响。但由于该方法并不准确<sup>3</sup>，可能会导致省级交通碳排放的不确定性。

在各省份2012—2019年交通碳排放基础上，本文对交通碳排放在全行业碳排放中的占比、与经济的脱钩情况，以及交通碳排放增长的驱动因素一一进行了分析。分析方法与数据说明如下：

### ■ 交通碳排放在全行业碳排放中的占比分析

这一占比为交通碳排放占全行业碳排放的比例。其中，全行业碳排放为能源活动产生的直接排放（省级层面范围一排放）。本文采用直接排放的原因是交通碳排放为直接排放（不计入电力、氢气排放），为保持口径一致，全行业能源活动碳排放也相应地采用直接排放。

全行业碳排放的计算方法参照奚文怡等（2017）的分行业、分能源品种的核算方法。能源活动数据基于各省份能源平衡表；各行业排放因子基于《2005中国温室气体清单研究》、《省级温室气体清单编制指南（试行）》、折标准煤系数等来源。该方法计算的国家2005年和2012年能源活动碳排放与官方数据（国家发展改革委2012；生态环境部2018）仅差1.3%和2.2%（奚文怡等2017）。

### ■ 交通碳排放与经济的脱钩情况分析

基于Tapio脱钩模型（Tapio2005），并以2012—2019年各省份2012年不变价GDP（国家统计局2012—2019）为衡量经济增长的指标，本文进一步分析了各省份交通碳排放与经济增长的脱钩指数（ $e$ ）。由于脱钩指数与基准年选取有关，本文分别计算了兩

表 1 | 交通运输对应的能源平衡表拆分情况

交通能耗	能源平衡表拆分情况
汽油	= 四 (1) × 80% + 四 (2) × 79% + 四 (4) + 四 (5) × 98% + 四 (6) × 98% + 四 (7) × 99%
柴油	= 四 (1) × 10% + 四 (2) × 26% + 四 (4) + 四 (7) × 95%
电力热力	不考虑
其他能源类型	= 四 (4)

说明：表中数字对应能源平衡表中序号如下，(1)为“农林牧渔水利业”，(2)为“工业”，(3)为“建筑业”，(4)为“交通运输仓储业”，(5)为“批发和零售业”，(6)为“生活消费”，(7)为“其他”。

来源：生态环境部 (2021a)。

个基准年 (2012年、目标年上一年) 的脱钩指数 (公式 2)：

$$e = \frac{\% \Delta CO_2}{\% \Delta GDP} = \frac{(CO_{2t} - CO_{2n}) / CO_{2n}}{(GDP_t - GDP_n) / GDP_n} \quad (\text{公式 2})$$

式中：

$e$  为脱钩指数，基于数值的分类见附录 5-表 1；

$CO_{2n}$  为基准年 (2012年或  $t-1$ ) 的交通碳排放， $CO_{2t}$  为目标年 ( $t$ ) 的交通碳排放，单位为吨；

$GDP_n$  和  $GDP_t$  分别为基准年 (2012年或  $t-1$ ) 与目标年 ( $t$ ) 的 GDP，单位为亿元。

### 交通碳排放增长的驱动因素分析

交通碳排放增长受多重驱动因素影响。第一，Liu 和 Feng (2020) 及 Marrero 等 (2021) 指出，经济发展与人口增长都会带来交通碳排放的增长，但当经济发展到一定阶段，交通碳排放会与经济增长脱钩 (Shuai 等 2019; Foster 等 2021)。第二，与电力和工业不同，交通碳排放不会随产业结构升级而减少，相反，第三产业比重提高有可能拉高其排放 (冯旭杰等 2012; 孙岩等 2020; Liu & Feng 2020)。第三，城镇化也会影响交通碳排放：由于城市居民的交通碳排放高于农村居民，因此交通碳排放会随着城镇化比例的提升而增加，但当城镇化水平达到一定程度，交通碳排放会与城镇化脱钩 (Foster 等 2021)。第四，交通碳排放也受油价影响：油价高的时候，碳排放一般更低 (Marrero 等 2021; Foster 等 2021)。最后，减排政策 (如新车燃油经济性标准、新能源汽车推广等) 也有助

于减少交通碳排放 (Foster 等 2021)。

为识别驱动各省份的 2012—2019 年交通碳排放增长的动因，本研究以各省份 2012—2019 年交通碳排放为被解释变量，以各省份 2012—2019 年 GDP (2012 年不变价)、人口、城镇化率、全国平均汽油价格<sup>4</sup> (不考虑省份间差异)，以及第一、第二和第三产业在 GDP 中的占比等指标为解释变量 (国家统计局 2012—2019; 金投网 2022) (描述性统计见附录 4)，做面板回归。虽然减排政策对交通碳排放也有影响，但较难定量衡量，故不在本文考虑范畴。

本文的实证方程主要参考理论与实证模型中关于交通碳排放增长动因的建模 (Mishra 2013; Foster 等 2021) 得到 (公式 3)：

$$\begin{aligned} \ln Emissions_{i,t} = & c_i + \alpha_1 GDP_{i,t} + \alpha_2 GDP\_SQ_{i,t} + \alpha_3 POP_{i,t} \\ & + \alpha_4 AGR_{i,t} + \alpha_5 TER_{i,t} + \alpha_6 Urb_{i,t} \\ & + \alpha_7 Urb\_SQ_{i,t} + \alpha_8 Price_{i,t} + \omega_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \end{aligned} \quad (\text{公式 3})$$

式中： $i$  和  $t$  分别指省份与年份； $GDP_{i,t}$  和  $GDP\_SQ_{i,t}$  分别指省份  $i$  在年份  $t$  的 GDP 与 GDP 的平方， $POP_{i,t}$  为省份  $i$  在年份  $t$  的人口数量； $AGR_{i,t}$  和  $TER_{i,t}$  分别指省份  $i$  在年份  $t$  的第一产业和第三产业在 GDP 中的占比； $Urb_{i,t}$  和  $Urb\_SQ_{i,t}$  分别为省份  $i$  在年份  $t$  的城镇化率和城镇化率的平方； $Price_{i,t}$  为省份  $i$  在年份  $t$  的汽油价格； $\varepsilon_i$ 、 $\mu_t$ 、 $\varepsilon_{i,t}$  为相应的残差项。

为避免变量间的共线性问题，本文基于变量间相关性分析，在公式 3 (对应实证方程 1) 基础上增加实证方程 2 和 3 (见附录 4)。后将综合实证方程 1、2 和 3 的结果，判断各解释变量的显著性。

### 3. 结果

#### 3.1 各省份交通碳排放

##### 2019年交通领域碳排放量

根据世界资源研究所“全球气候观察”2019年数据，中国交通碳排放在全球交通碳排放中的占比达11%，次于美国（21%）。

分地区看，中国东部地区交通碳排放明显高于其他地区——2019年交通碳排放在全国交通碳排放中的占比达43%（见图1）。分省份看，广东省、江苏省、山东省、辽宁省和四

川省的交通碳排在2019年位居全国前五位，这五个省份2019年交通碳排放之和占全国交通碳排放的32%。

##### 2012—2019年交通碳排放变化趋势

中国是全球交通碳排放增速较快的国家之一（Foster等2021）：根据2005年和2014年国家温室气体清单（国家发展改革委2012；生态环境部2018），2005—2014年，中国交通碳排放年均增长率（R）<sup>5</sup>高达7.5%。

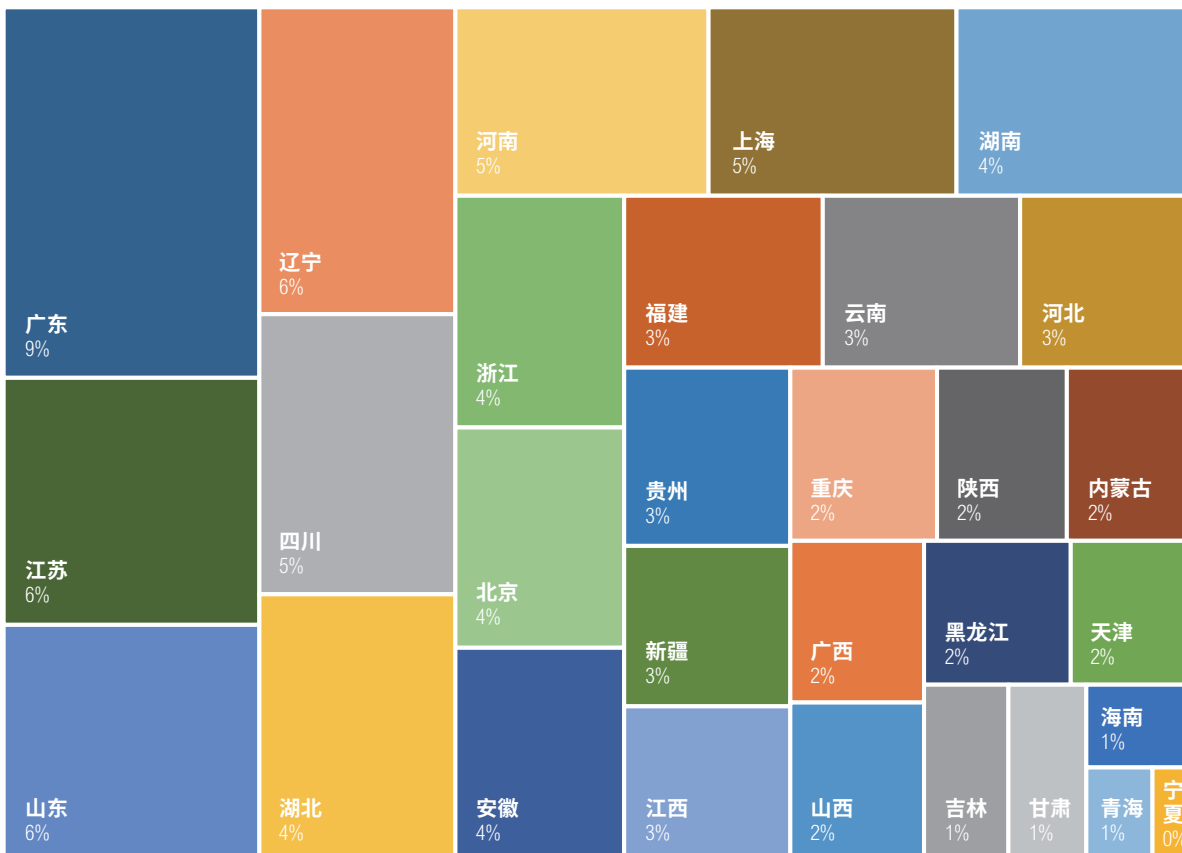
2012—2019年，中国交通碳排放增速以中部地区和西部地区最快（见图2）。中部地区增速为各地区之首（R=7.4%）；西部地区

图1 | 2019年各地区、各省份的交通碳排放占比

##### a. 各地区占比



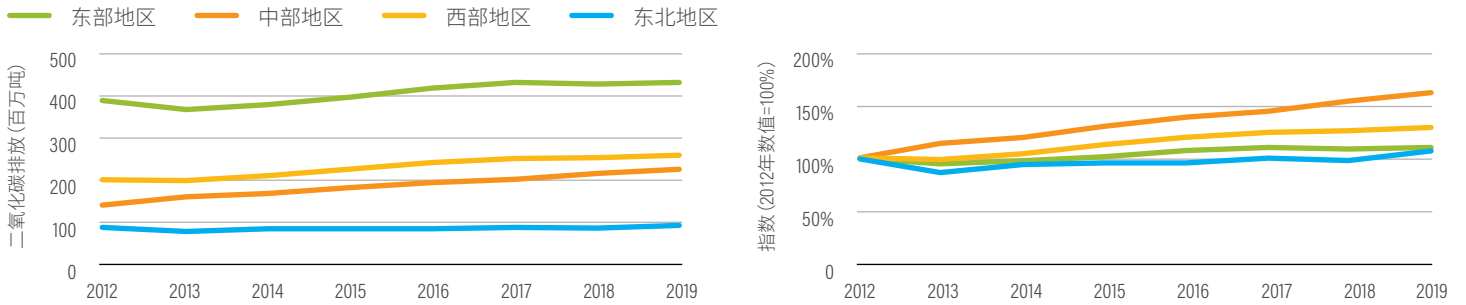
##### b. 各省份占比



来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。



图 2 | 2012—2019年各地区的交通碳排放变化



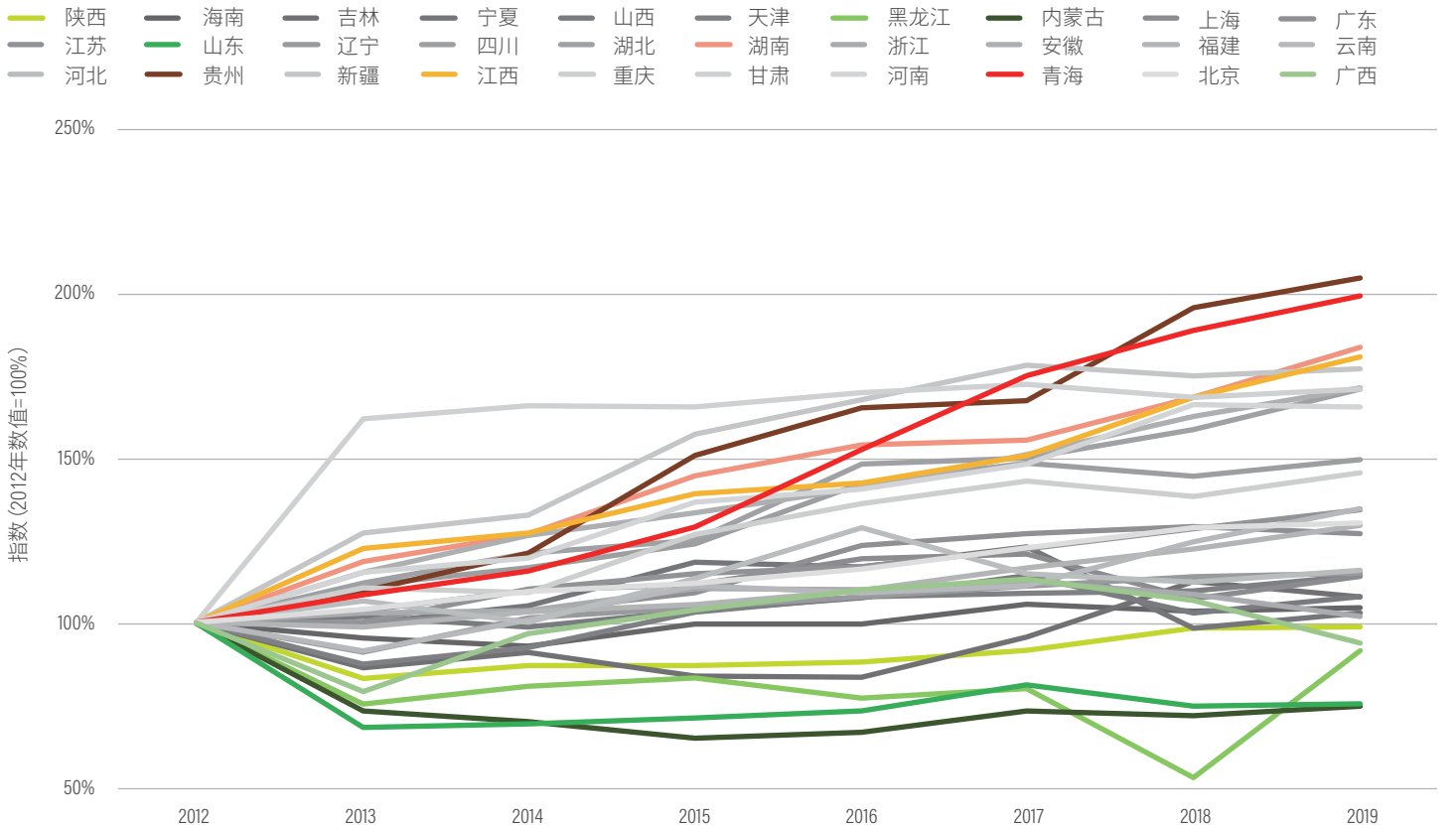
来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

次之 ( $R=3.9\%$ )；虽然东部地区交通碳排放量最大，但排放增速趋于缓和 ( $R=1.6\%$ )；东北地区的增速最低 ( $R=1.1\%$ )。

分省份来看，26个省份交通碳排放呈上升趋势，且各省份之间交通碳排放增速差异明显，省份间年均增速的变异系数 ( $C\cdot V$ )<sup>6</sup>达109%，高于地区间年均增速 $C\cdot V$ 的79%（各省份交通行业碳排放情况见专栏二）：

■ 2012—2019年交通碳排放增速排名前四位的省份为贵州省 ( $R=10.8\%$ )、青海省 ( $R=10.3\%$ )、湖南省 ( $R=9.1\%$ )和江西省 ( $R=8.8\%$ )。尽管如此，包括内蒙古自治区、山东省、黑龙江省、陕西省、广西壮族自治区在内的五个省份，2012—2019年交通碳排放呈下降趋势（原因见第4章）。

图 3 | 2012—2019年各省份交通碳排放指数



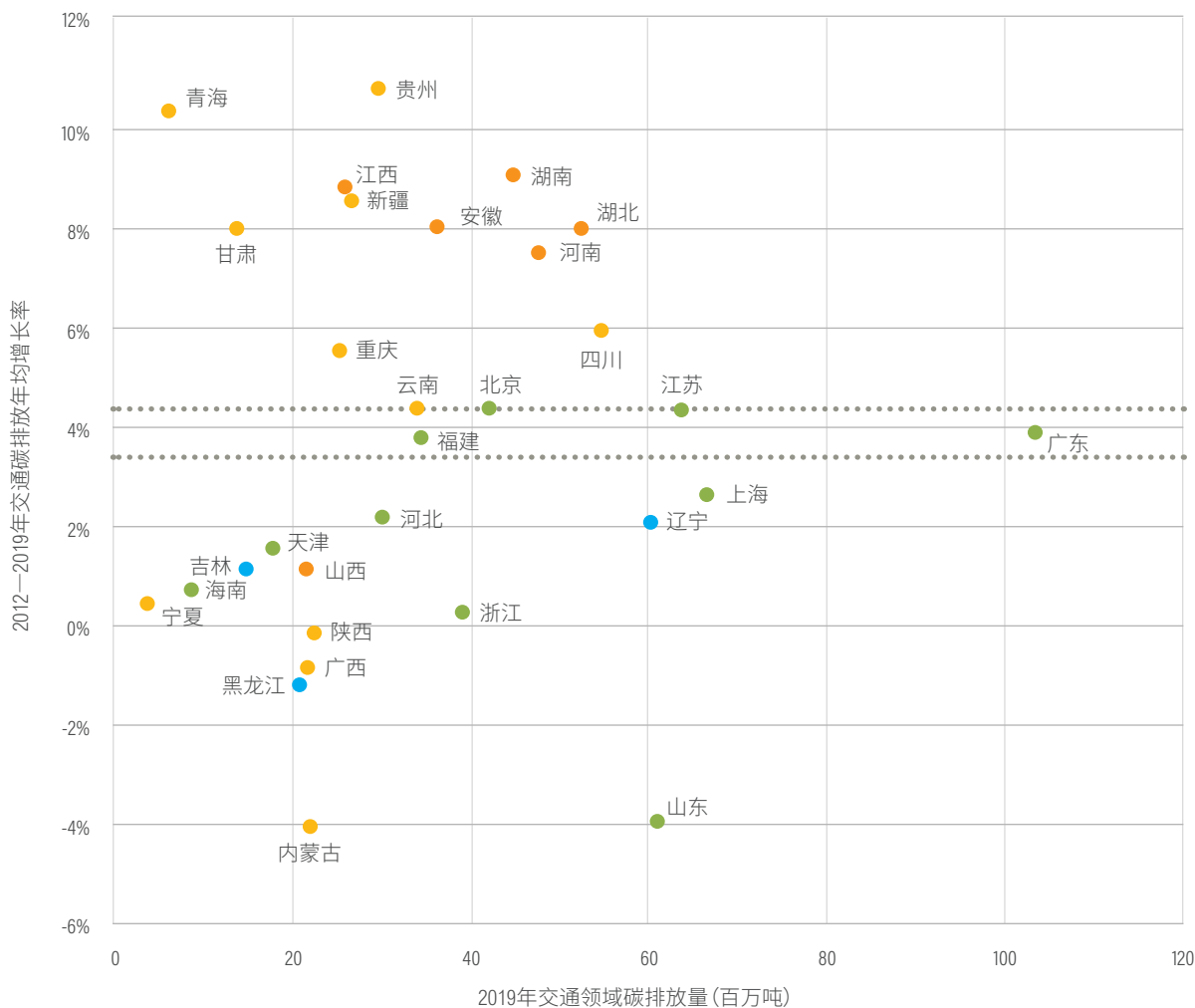
来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

- 交通碳排放量大的省份，增速呈两极分化。例如，东部省份交通碳排放增速正趋于放缓，但中部省份（如湖北省、河南省）排在加速（ $R$ 为6%~8%，见图4）。
- 交通碳排放量小的省份，增速也在两极分化。部分碳排放量小的省份（如青海省、贵州省）增速为全国之首（ $R$ 为8%~10%）。然而，也不乏宁夏回族自治区、海南省等省份，排放增速始终徘徊在较低水平（ $R$ 为1%以内）。

鉴于此，不同碳排放水平与增速的省份应考虑差异化的减排措施：对交通碳排放量大但增长缓慢的省份，考虑到未来增量有限，减排措施应更侧重存量管理，如存量车辆/船舶的新能源置换、低碳替代燃料的使用等。对排放量小但增长迅速的省份，考虑到未来增量空间大，减排措施应更注重增量管理，如控制新增机动车数量、促进航空出行向铁路出行转移、提高新能源汽车在新车销量中的占比等。对排放量大且增长迅速的省份（如湖南省、河南省），有必要对存量、增量都进行重点管理。

图 4 | 各省份2019年交通碳排放量与2012—2019年交通碳排放年均增长率 $R$ 的关系

● 东部地区 ● 中部地区 ● 西部地区 ● 东北地区



说明：黑线为2012—2019年全国平均增速±0.5%。

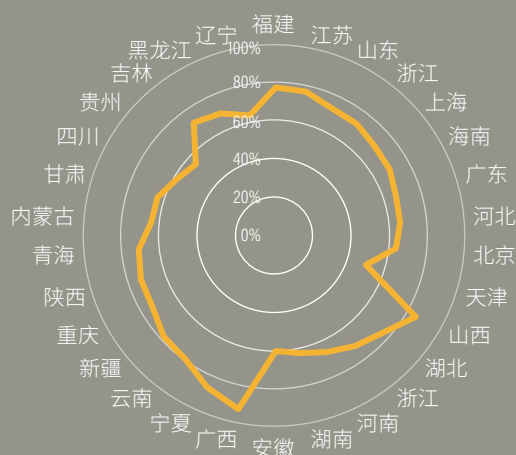
来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

专栏 2 | 各省份交通行业碳排放的讨论

根据部门职责范畴不同，交通运输碳排放一般可分成两个核算口径：交通行业碳排放与交通领域碳排放。交通行业碳排放指交通运输部门管辖范围内的营运交通工具产生的碳排放。所以，其能耗统计——即能源平衡表中“交通运输、仓储和邮政业”，仅包括运营交通工具的能耗（国务院2007）。交通领域碳排放指交通运输部门所有交通工具产生的碳排放，原则上与IPCC（2006）的核算口径一致，既包含营运交通工具产生的碳排放，也包含私家车、总设计质量4.5吨以下轻微型货车、非营运性中重型货车、非道路机械等非营运交通工具产生的碳排放。虽然本研究侧重各省份交通领域碳排放核算，但也对各省份交通行业碳排放进行了核算，其结果显示：

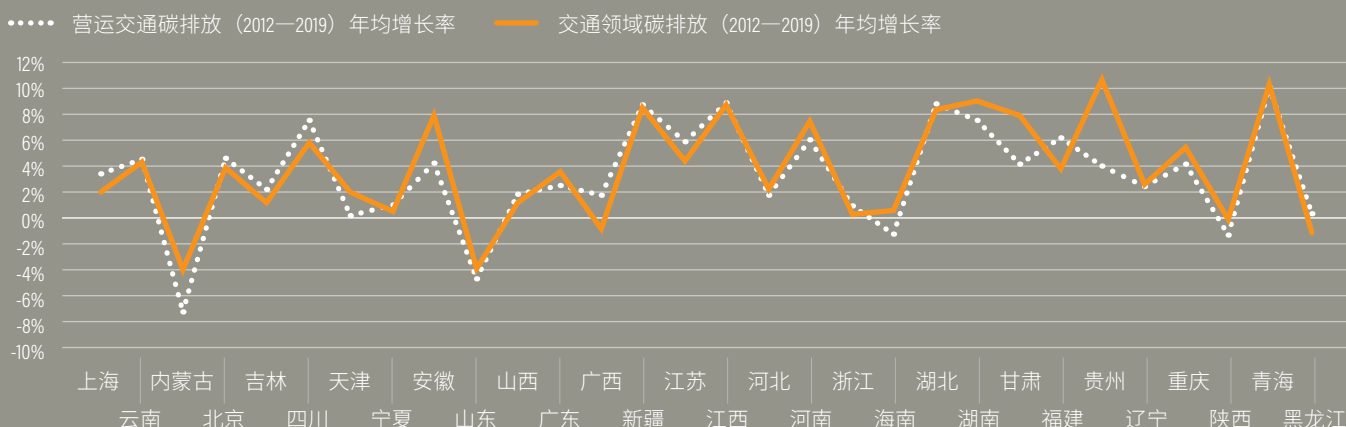
- 2019年，全国层面营运交通碳排放（即交通行业碳排放）在交通领域碳排放中占比较高，达75%。省份层面营运交通碳排放占交通领域碳排放占比多落入64%~76%的区间内（见专栏图2）；其中，营运交通碳排放占比最高和最低的省份分别是广西壮族自治区（93%）和天津市（50%）。
- 2012—2019年，多数省份的营运交通碳排放也呈现增长态势，且各省份营运交通碳排放年均增长率与其交通领域碳排放年均增长率几乎一致（见专栏图3）。仅少数省份（如贵州省和福建省）的营运交通碳排放年均增长率显著低于或高于其交通领域碳排放年均增长率。

专栏图 2 | 2019年各省份营运交通碳排放占交通领域碳排放中的占比



来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

专栏图 3 | 2012—2019年各省份营运交通和交通领域碳排放的年均增长率



来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

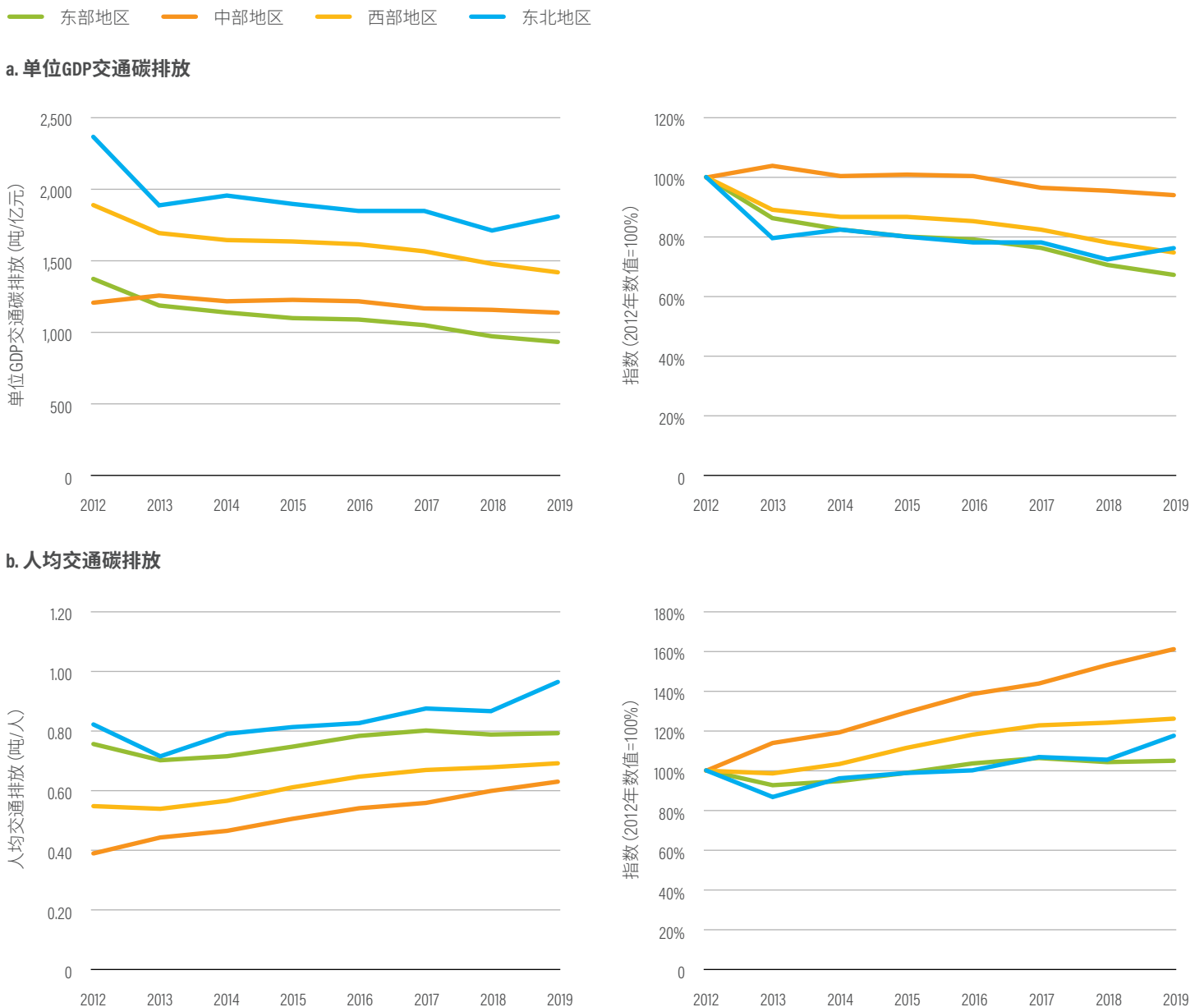
### 3.2 各省份单位GDP交通碳排放与人均交通碳排放

从全球来看，中国单位GDP交通碳排放与人均交通碳排放处于较理想的水平：根据Foster等（2021）的研究，中等收入国家的单位GDP交通碳排放要高于发达国家，而人均交通碳排放要低于发达国家。然而，虽同属于中等收入国家，中国的单位GDP交通碳排放较低——几乎与发达国家相当；人均交通碳排放也低于一些中等收入国家，如巴西、墨西哥。

从地区来看，无论单位GDP交通碳排放，还是人均交通碳排放，东北地区都是最高的（见图5）。中部地区人均交通碳排放最低，单位GDP交通碳排放也较低，仅高于东部地区。

然而，在变化趋势上，中部地区和西部地区尤其值得关注。其中，中部地区单位GDP交通碳排放下降速度最慢（2019年较2012年仅下降约6%），人均交通碳排放增幅最快（2019年较2012年增长约60%）。西部地区也呈类似特点。

图 5 | 2012—2019年各地区的单位GDP交通碳排放与人均交通碳排放变化



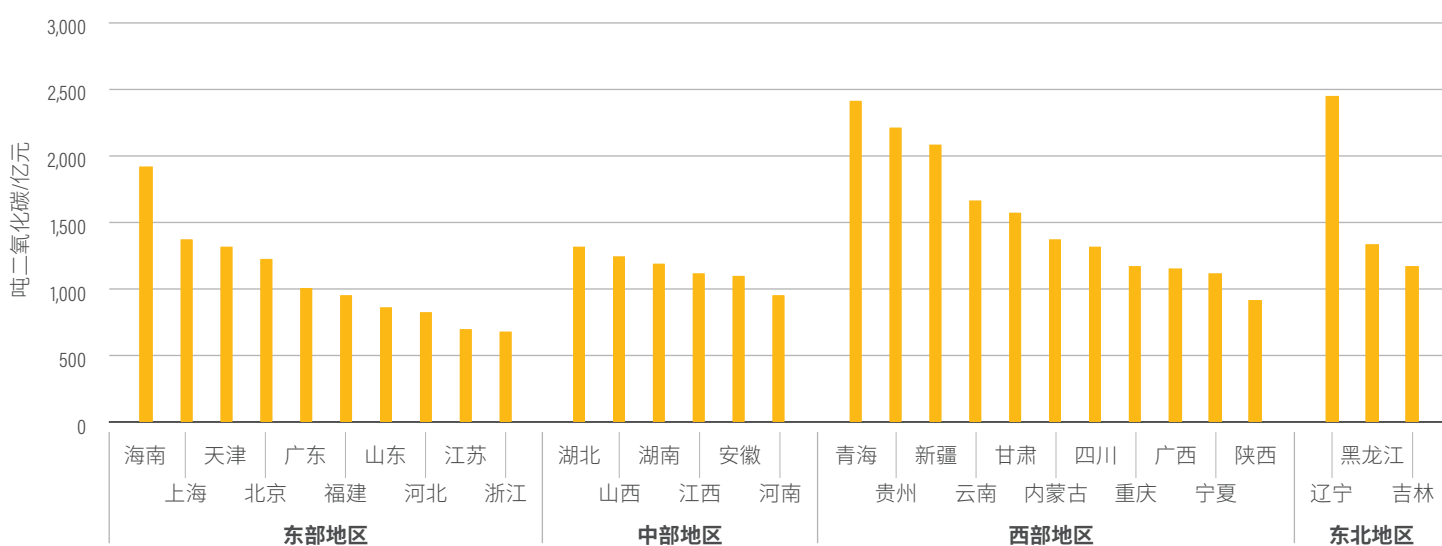
来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）与国家统计局相关数据（2012—2019）计算。

从省份来看，各省份单位GDP交通碳排放、人均交通碳排放的差异明显，C·V分别达36%和83%（见图6）。东部地区省份单位GDP交通碳排放最低，但人均交通碳排放明显较高——尤其是特大城市（如上海市、北京市），人均交通碳排放最高（原因见第4章分析）。

在变化趋势方面，2012—2019年，以中西部为主的9个省份的变化趋势堪忧：不仅人均交通碳排放快速上升，单位GDP交通碳排放也未明显下降，个别省份甚至有上升的趋势（见图7中标注为红色的省份）。剩下21个省份中，以东部地区为主的省份处于理想状态——不仅单位GDP交通碳排放以最快的速度下降，人均交通碳排放增幅也相对较小（见图7中标注为黄色的省份）。

图 6 | 2019年各省份单位GDP交通碳排放与人均交通碳排放

a. 单位GDP交通碳排放

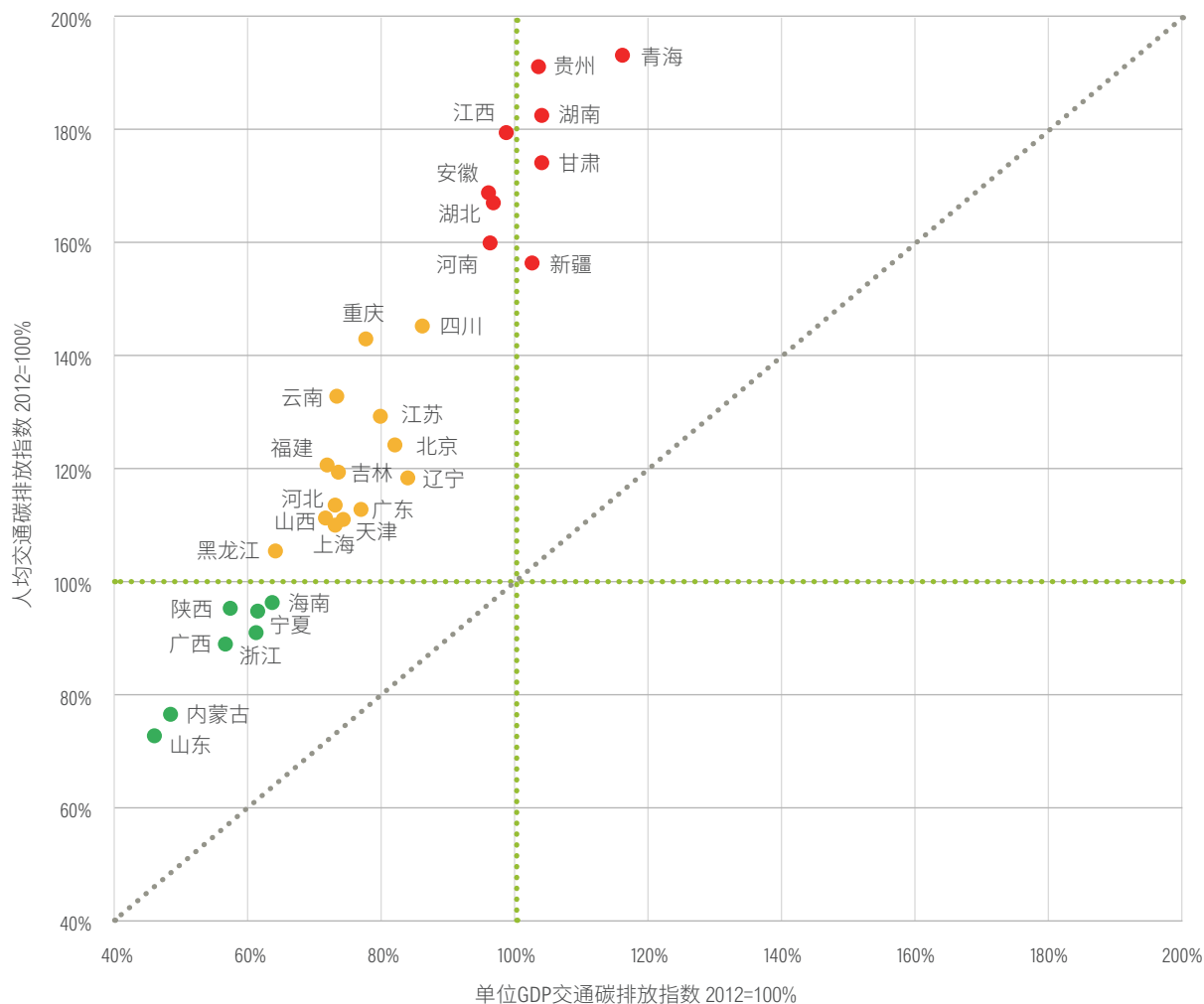


b. 人均交通碳排放



来源：作者根据国家统计局能源统计司（2013—2020）、国家统计局（2012—2019）相关数据计算。

图 7 | 2012—2019年单位GDP交通碳排放指数与人均交通碳排放变化分析



说明：图中比例表示 2019 年各省份人均交通碳排放与碳排放强度相对 2012 年（假设各省份 2012 年数据 =100%）的比例关系。比例越高，表示 2019 年相对 2012 年增幅越大。●表示 2012—2019 年人均交通碳排放上升，排放强度几乎无变化的省份；●表示人均交通碳排放上升，排放强度下降的省份；●表示人均交通碳排放与排放强度都下降的省份。

来源：作者根据国家统计局能源统计司（2013—2020）与国家统计局（2012—2019）相关数据计算。

### 3.3 各省份交通碳排放在全行业碳排放中的占比

中国交通碳排放在全行业碳排放中的占比不高：2014 年为 9.2%（生态环境部 2018）。

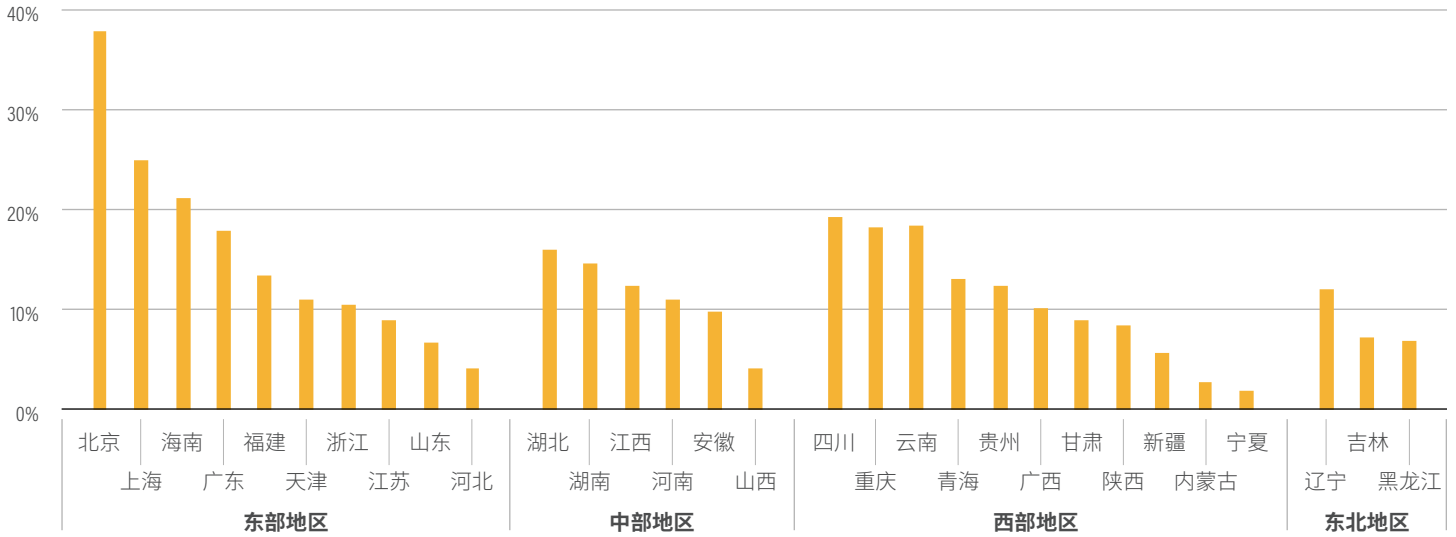
从地区来看，2019 年东部地区交通碳排放在全行业碳排放中的占比高于其他几个地区，达 12%；中部地区、东北地区和西部地区的占比分别为 11%、10% 和 9%。各地区间，交通碳排放在全行业碳排放中的占比差异较小，C-V 仅有 13%。

从省份来看，2019 年交通碳排放在各省份能源活动中占比更高，且差异较大，C-V 达 68%：

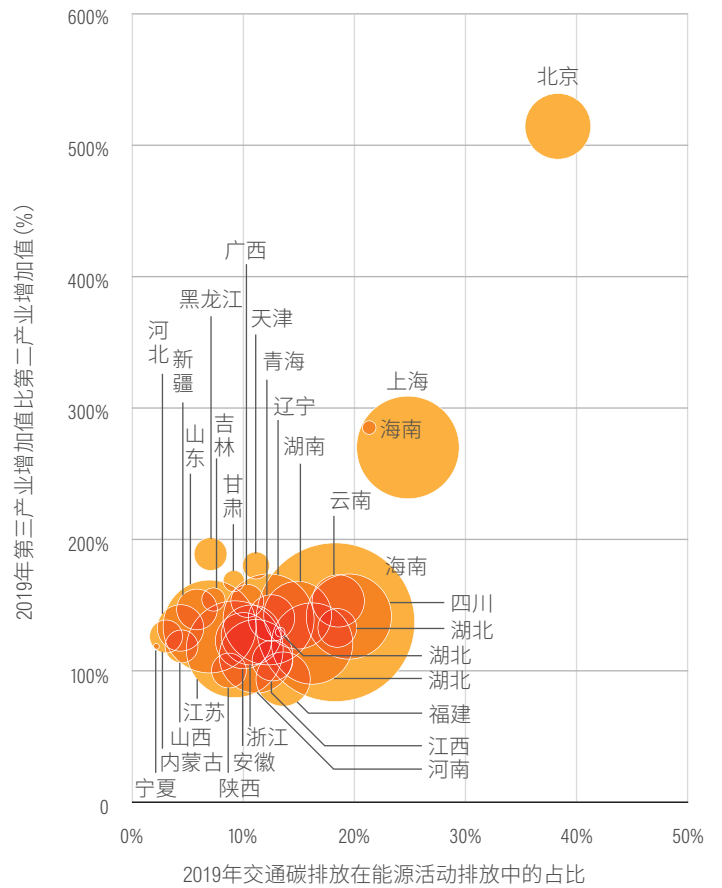
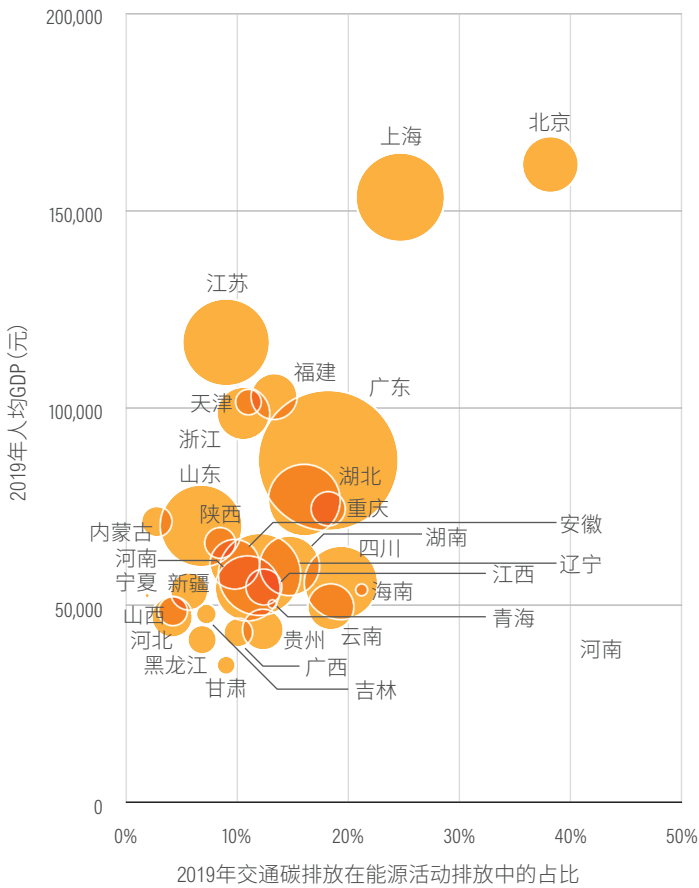
- 在经济发达或第三产业占比较大的省份，如北京市、上海市和海南省，2019 年交通碳排放在全行业碳排放中的占比超过 20%。此外，19 个省份的交通碳排放在全行业碳排放中的占比也已超出 10%——高出全国比例。这说明，大部分省份的交通绿色低碳行动对其碳达峰工作有更重要的意义。
- 在能源生产大省（如山西省）或在以工业为支柱产业的省份（如河北省），交通碳排放在全行业碳排放中的占比低，为 3%~4%，说明在这些省份，电力与工业领域仍为当地最大排放源。

图 8 | 2019年交通碳排放在各省份能源活动排放中的占比

a. 交通碳排放在各省份能源活动排放中的占比



b. 交通碳排放在各省份能源活动排放中的占比与人均GDP、产业结构的关系



说明：气泡大小为总能源活动碳排放量。

来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

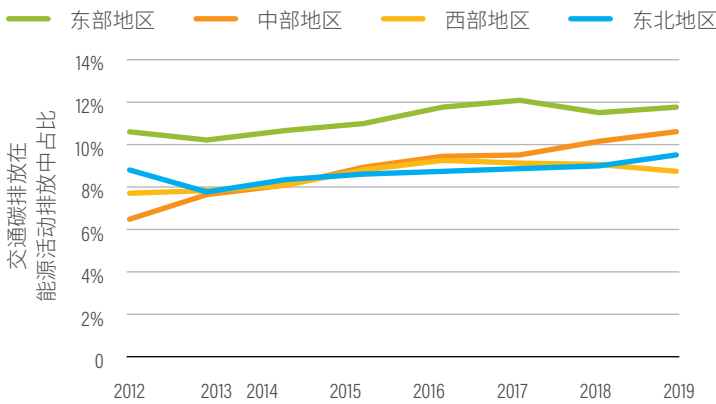
随着经济增长、产业结构升级，交通碳排在能源活动排放中的占比在逐年增加。在地区层面，交通碳排在能源活动排放中的占比增幅不明显（见图9）：2019年东部、西部与东北三个区域的排放占比仅比2012年提高1%左右；中部地区增幅略大，2019年较2012年提高了5%。

在省份层面，近三分之二的省份2012—2019年交通碳排在在全行业碳排放中的占比提高幅度大于1%，增幅比地区层面更明显（见图10）。其中，北京市、四川省和湖北省的增幅最大：北京市

上升了12%，四川省和湖北省上升了8%。但仍有包括前述山东省、内蒙古自治区等在内的7个省份的交通碳排在在全行业中的占比在下降（原因见第4章分析）。

鉴于不同省份交通碳排在能源活动排放中的占比有较大差异且增速不同，有必要差异化对待交通领域减排工作。特别交通运输领域已经成为主要排放源的省份，其碳达峰方案编制应更侧重交通领域的绿色低碳行动。

图 9 | 2012—2019年交通碳排在各地区能源活动排放占比变化



来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

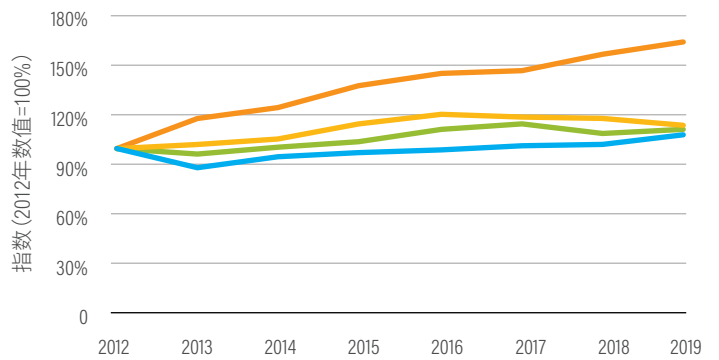
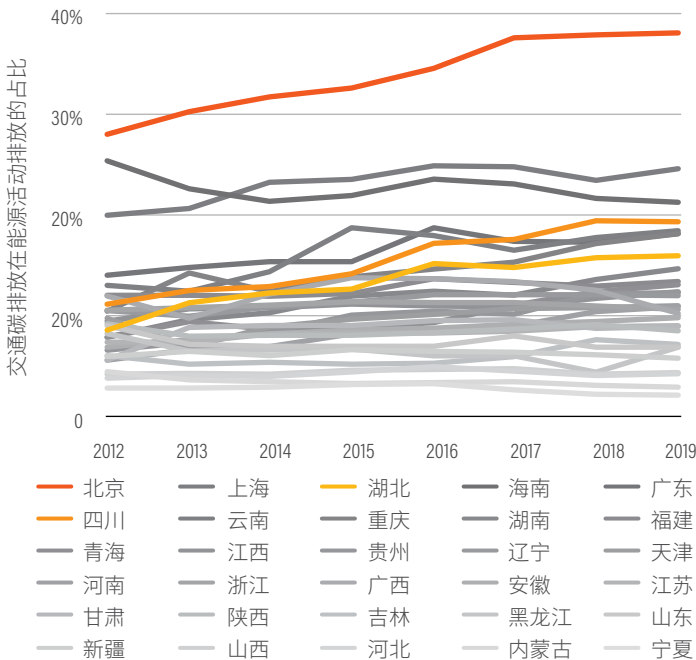
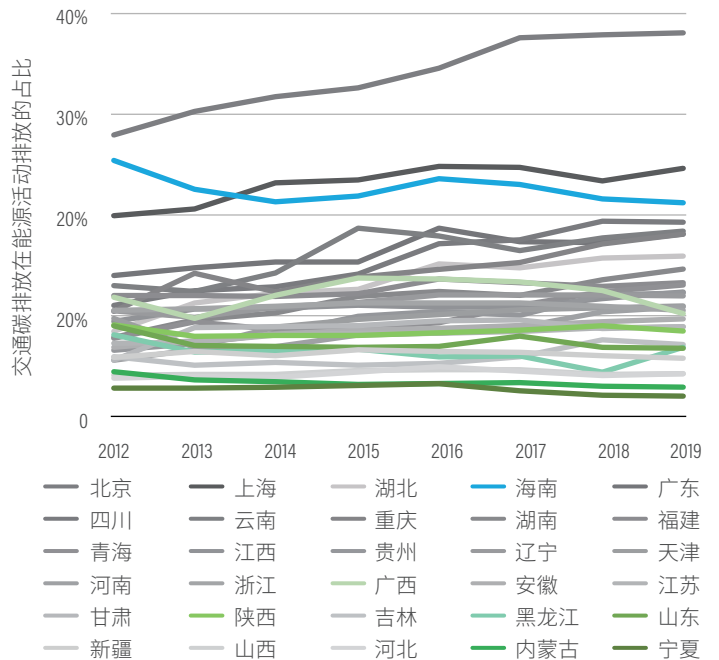


图 10 | 2012—2019年各省份交通碳排在能源活动排放中的占比变化

a. 交通碳排放占比升幅大的省份



a. 交通碳排放占比降幅大的省份



来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。



### 3.4 各省份交通化石燃料消费结构

识别交通领域内不同行业碳排放量，有助于减排政策更有的放矢。虽然目前能源平衡表不能区分具体行业的能耗，但交通化石燃料与具体行业间存在对应关系：

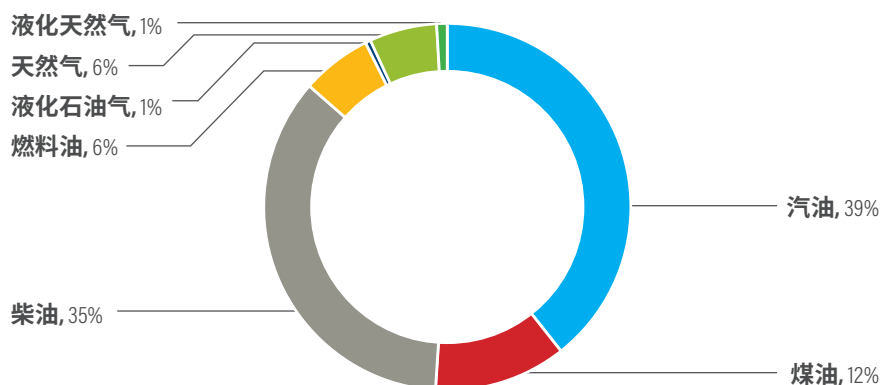
- 汽油：主要为乘用车，少量为轻型商用车、采用往复发动机的飞机。
- 柴油：主要为柴油货车，少量为内河及沿海船舶、非道路机械、内燃机车。
- 煤油：主要为采用涡轮发动机和冲压发动机的飞机（如大多商用航空飞机）。
- 燃料油：主要为内河、沿海船舶。

- 天然气<sup>8</sup>：主要为中重型商用车、内河和沿海船舶及出租车。
- 液化石油气：主要为营运性车辆。

2019年中国交通化石燃料的主要构成为汽油、柴油、煤油、天然气<sup>9</sup>与燃料油，这五类燃料在交通碳排放中的占比高达98%（见图11）。其中，汽油消费量最高，产生的碳排放占交通碳排放的39%；柴油次之，排放占比为35%。

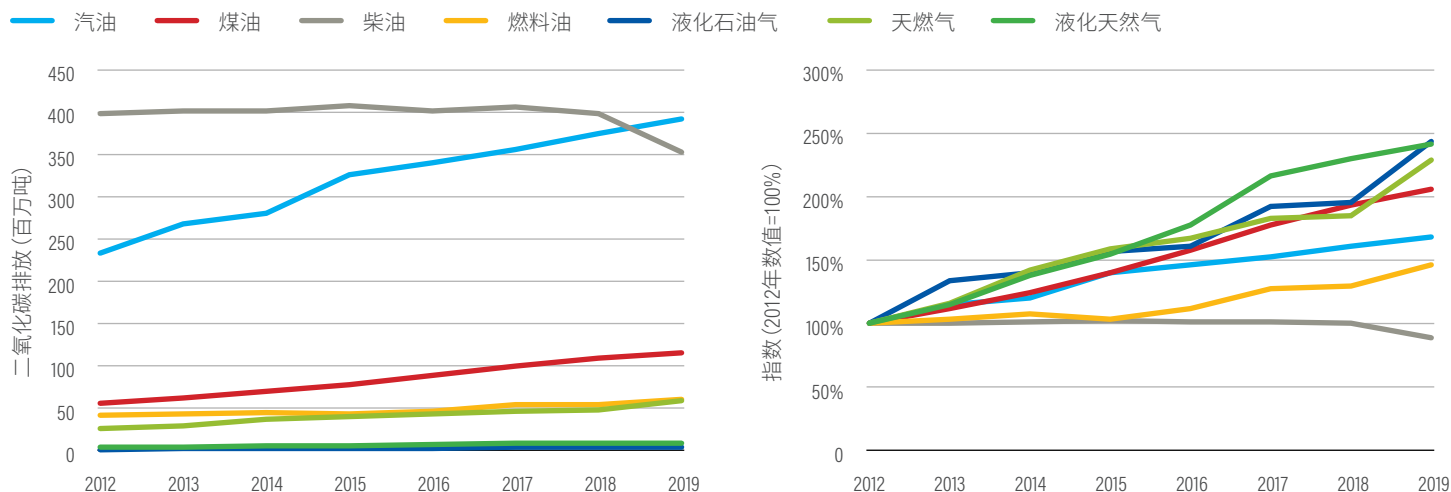
在变化趋势方面，虽然柴油在2012—2018年一直为交通领域最大碳排放源，但其排放自2018年起转增为降，并被汽油赶超；而汽油排在2012—2019年的增速（ $R=7.7%$ ）始终高于柴油（ $R=-1.7%$ ）（见图12）。这说明，如果交通能耗数据准确，乘用车对交通碳排放的贡献在逐渐增加。除汽油外，煤油排放增速是国内主要交通用油<sup>10</sup>中最快的（ $R=10.9%$ ），甚至超过汽油，说明航空排放呈高速增长的态势。

图 11 | 2019年全国交通化石燃料碳排放构成



来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

图 12 | 2012—2019年全国交通化石燃料对应碳排放变化趋势



来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

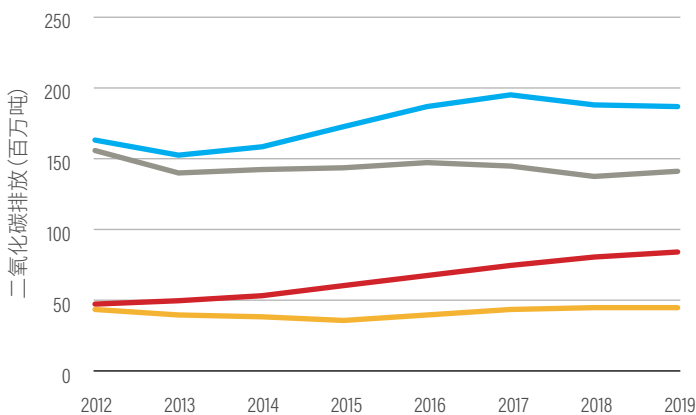
地方交通化石燃料能耗结构与国家不同。如图13所示，在东部地区，绝大部分省份以汽油消费为主（仅山东省例外），2019年汽油对应碳排在交通碳排放中占比高达41%，且仍在增长，而柴油则在小幅下降。在中部地区，2019年汽油和柴油对应碳排放占比大致相当，各占44%~48%，且增长均较快。西部地区

和东北地区虽然曾以柴油碳排放为主，但增速已经放缓，而汽油碳排放增速加快。对增速较快的航空煤油而言，东部地区是中国2019年航空煤油的主要消费地。但中部地区和西部地区（如湖北省、云南省）2012—2019年航空煤油的年均增长速度则为各地区之首。

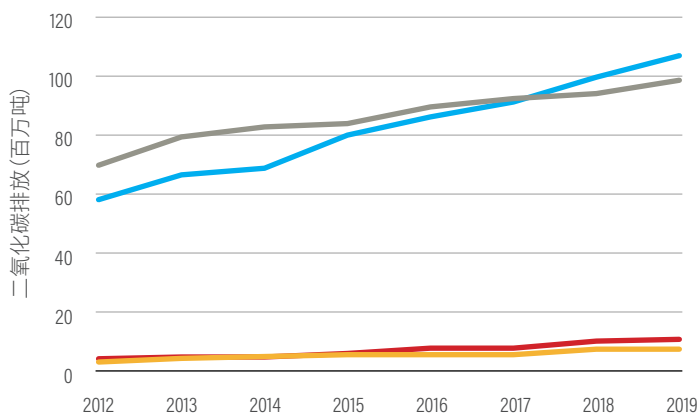
图 13 | 2012—2019年各地区交通化石燃料对应碳排放变化

汽油 煤油 柴油 燃料油

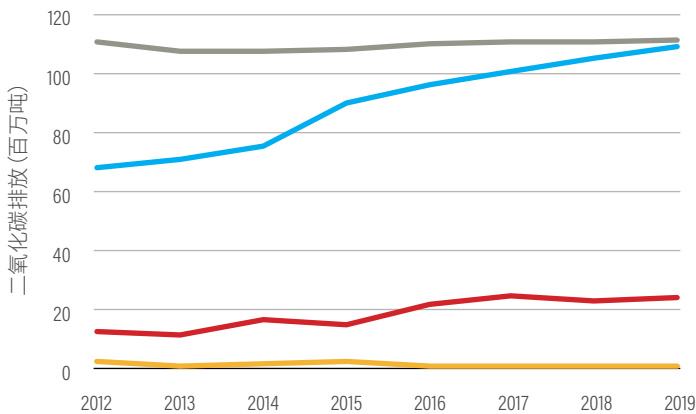
a. 东部地区



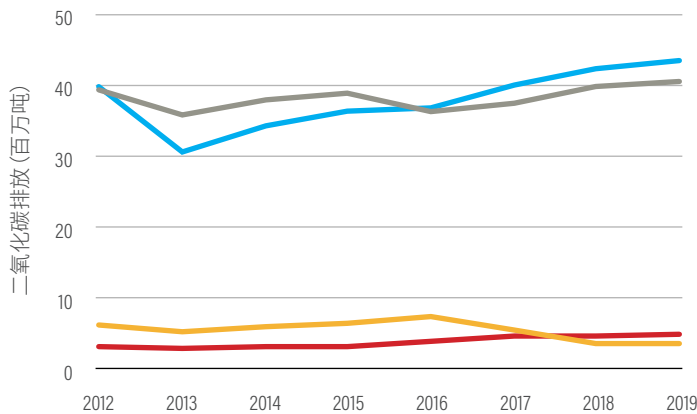
b. 中部地区



c. 西部地区



d. 东北地区



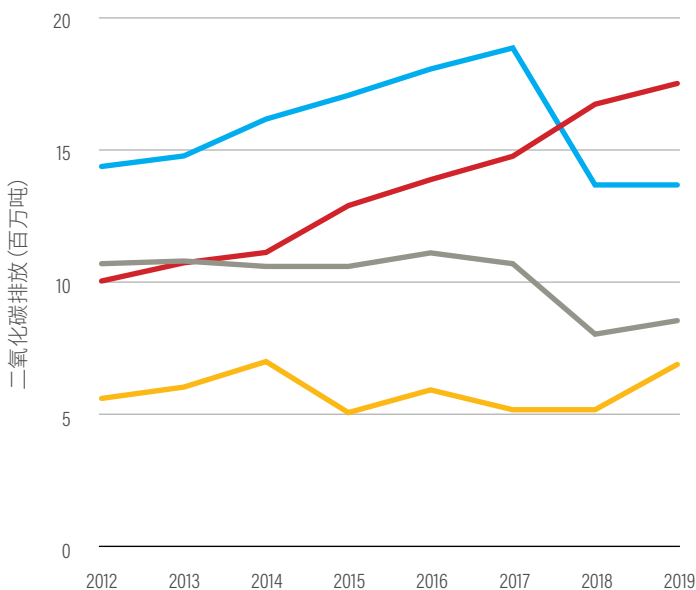
	汽油		柴油		煤油		燃料油	
	2019 占比	2012—2019 R	2019 占比	2012—2019 R	2019 占比	2012—2019 R	2019 占比	2012—2019 R
东部地区	42%	2%	36%	-1%	68%	9%	80%	0%
中部地区	24%	9%	25%	5%	8%	14%	13%	12%
西部地区	24%	7%	28%	0%	19%	10%	1%	-14%
东北地区	10%	1%	10%	0%	4%	7%	6%	-8%

来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

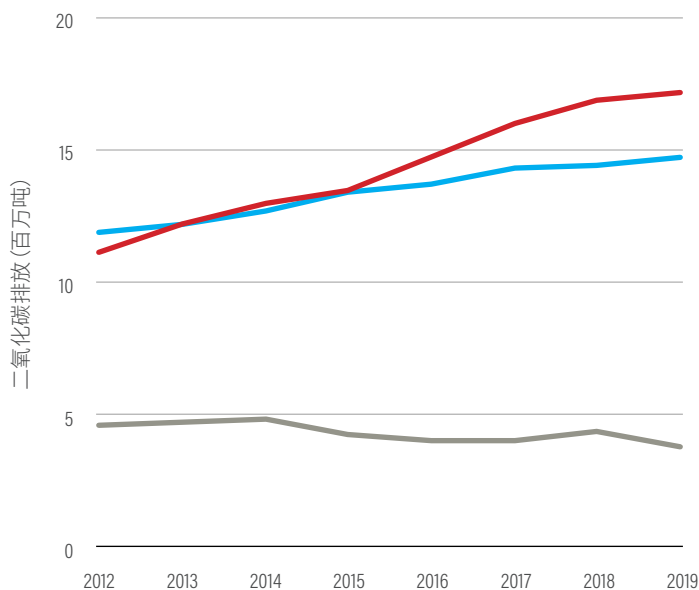
图 14 | 2012—2019年北京市和上海市交通化石燃料对应碳排放变化

— 汽油 — 煤油 — 柴油 — 燃料油

## a. 上海市



## b. 北京市



说明：北京燃料油消耗少，这里忽略不计。

来源：作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）计算。

在省份层面，各省份交通化石燃料消费结构差异显著：上海市、北京市和海南省的2019年交通碳排放以航空煤油为主（见图14），其他27个省份中，14个省份（如广东省、浙江省）的2019年交通碳排放以汽油为主，剩下13个省份（如山东省、江西省）以柴油为主。此外，全国25个省份2012—2019年汽油排放的增幅大于柴油排放，这说明多数省份乘用车在交通碳排放中的贡献在扩大。

鉴于各地交通能耗结构差异大，不同交通行业增速差异明显，有必要根据交通主要排放源的不同，有针对性地制定交通低碳行动方案。

### 3.5 驱动交通碳排放增长的因素

#### 3.5.1 交通碳排放与经济成长的脱钩分析

基于Tapio脱钩模型分析各省份交通碳排放与GDP的脱钩情况，其结果显示：中国各省份2012—2019年经济增长与交通碳排放主要表现出三种关系：增长耦合（GC）、弱脱钩（W-DE）和强脱钩（S-DE）（见表2）。其中，20个省份（主要

是东部地区和部分中部、西部地区）从增长耦合过渡到弱脱钩阶段，即相对于GDP增长，交通碳排放增速正在放缓。但青海省、江西省等5个中部和西部地区的省份仍处于增长耦合阶段——即相对于GDP增长，交通碳排放增长更快。最后，内蒙古自治区、山东省等5个省份已经从增长耦合阶段跨越式地发展到强脱钩阶段，即虽然GDP在2012—2019年快速增长，但交通碳排放已转为下降，其原因可能与碳排放核算结果存在偏差有关（见第4章分析）。

放眼全球，交通碳排放与经济脱钩普遍存在挑战：即便在高收入国家，大多数国家在1990—2018年仍处于弱脱钩状态，仅有个别国家（如德国、日本和新加坡）实现了强脱钩；而众多中等收入国家仍处于增长耦合阶段（Foster等2021）。在国内，由于大部分省份已跨越增长耦合阶段，进入弱脱钩阶段，中国各省份交通碳排放与经济脱钩程度整体优于中等收入国家的水平。对少数处于增长耦合阶段的中部和西部地区省份，应在低碳产业发展和交通脱碳方面同时发力。对已经发展到强脱钩阶段的省份，虽然有必要巩固现有成果，但也有必要审视交通能耗统计的可靠性，避免延误转型时机。

表 2 | 中国各省份2012—2019年交通碳排放与经济增长脱钩指数

地区 / 省份		2012—13	2013—14	2014—15	2015—16	2016—17	2017—18	2018—19	2012—19
东部地区	山东	S-DE	W-DE	W-DE	W-DE	GC	W-DE	W-DE	S-DE
	北京	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	天津	S-DE	GC	GC	GC	W-DE	W-DE	GC	W-DE
	河北	GC	S-DE	GC	GC	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	上海	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	S-DE	GC	W-DE
	江苏	W-DE	GC	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	浙江	W-DE	W-DE	W-DE	S-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	福建	S-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	广东	S-DE	W-DE	W-DE	GC	W-DE	W-DE	S-DE	W-DE
	海南	S-DE	S-DE	GC	S-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
中部地区	山西	W-DE	S-DE	SND	GC	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	安徽	GC	GC	GC	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	河南	GC	W-DE	GC	W-DE	W-DE	GC	W-DE	W-DE
	湖北	GC	W-DE	W-DE	GC	W-DE	W-DE	GC	W-DE
	湖南	GC	W-DE	GC	W-DE	W-DE	GC	GC	GC
	江西	GC	W-DE	GC	W-DE	W-DE	GC	GC	GC
西部地区	内蒙古	S-DE	S-DE	S-DE	W-DE	GC	S-DE	W-DE	S-DE
	广西	S-DE	GC	GC	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	S-DE
	陕西	S-DE	W-DE	S-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	S-DE
	云南	S-DE	GC	GC	S-DE	W-DE	GC	W-DE	W-DE
	重庆	GC	S-DE	GC	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	四川	GC	W-DE	GC	GC	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	贵州	W-DE	W-DE	GC	GC	W-DE	GC	W-DE	W-DE
	宁夏	S-DE	GC	GC	S-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE
	新疆	GC	W-DE	GC	GC	W-DE	W-DE	W-DE	GC
	甘肃	GC	W-DE	S-DE	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE	GC
	青海	W-DE	GC	GC	GC	GC	W-DE	W-DE	GC
	东北地区	黑龙江	S-DE	GC	SND	S-DE	GC	W-DE	GC
吉林		S-DE	GC	S-DE	S-DE	GC	GC	W-DE	W-DE
辽宁		S-DE	GC	GC	GC	W-DE	W-DE	W-DE	W-DE

说明：绿色为强脱钩（S-DE），黄色为弱脱钩（W-DE），红色为增长耦合（GC），灰色为强负脱钩（SND）。

来源：作者根据国家统计局能源统计司（2013—2020）与国家统计局（2012—2019）相关数据计算。

### 3.5.2 交通碳排放增长动因的面板回归

为更全面地分析各省份交通碳排放增长动因，本文进而采用第2节所述的面板回归方法对全国各省份交通碳排放增长做驱动因素分析。由于区域不均衡性，不同地区交通碳排放变化趋势不同，动因也可能存在差异，因此，在全国30个省份回归分析的基础上，本文也分别对东部、中部、西部和东北四个地区做面板回归。具体实证结果如下：

**各省份交通碳排放增长的动因：**首先，在回归模型的选取上，本文采用Hausman检验确定回归方程采用固定效应还是随机效应，检验结果表明，方程1、2和3都无法拒绝随机效应模型<sup>11</sup>，因此，选择随机效应模型。

由附表4-2可知，2012—2019年间，中国各省份的交通碳排放主要受经济发展、人口变化、产业结构调整与城镇化等多重因素影响。其中，经济发展（GDP）和城镇化的影响是非线性的，即早期随着经济发展和城镇化水平提高，各省份交通碳排放先增长；当经济发展与城镇化达到一定程度时，交通碳排放转而下降。相反，人口变化与产业结构调整对交通碳排放的影响则是线性的。特别是产业结构调整方面，交通碳排放会随着产业结构升级（即第一产业占比下降、第三产业占比上升）而增加。但值得注意的是，与其他解释变量在三个实证方程都统计上显著不同，产业结构升级仅在实证方程2中显著。

**分地区交通碳排放增长的动因：**由附表4-3可得，东部地区各省份2012—2019年交通碳排放增长的动因同样受经济发展、人口变化、产业结构调整、城镇化影响。但东部地区经济发展（GDP）与城镇化的影响并不是非线性关系：首先，GDP增长对东部地区交通碳排放增长的影响并不显著，仅在方程1中通过10%的显著性检验；其次，东部地区的城镇化更是已与碳排放脱钩，呈负相关关系（因此，三个实证方程中未考虑城镇化的平方）。

中部地区交通碳排放增长则主要受经济发展影响，GDP在实证方程1、2、3中均通过了1%的显著性检验，且GDP对中部地区碳排放的拉动作用（GDP的回归系数）也大于国家层面的拉动作用。其他变量对中部地区交通碳排放的影响均在统计上不显著。

东北地区与西部地区交通碳排放增长动因与其他地区略有不同，主要受人口变化与城镇化的影响。而西部地区交通碳排放的增长则主要受城镇化和人口变化影响；其中，城镇化对西部地区碳排放增长的拉动作用（城镇化的回归系数）远高于国家层面。东北地区则主要受人口变化影响，这可能是受到东北地区人口数量下降以及重点省份（如黑龙江）交通碳排放下降的影响。

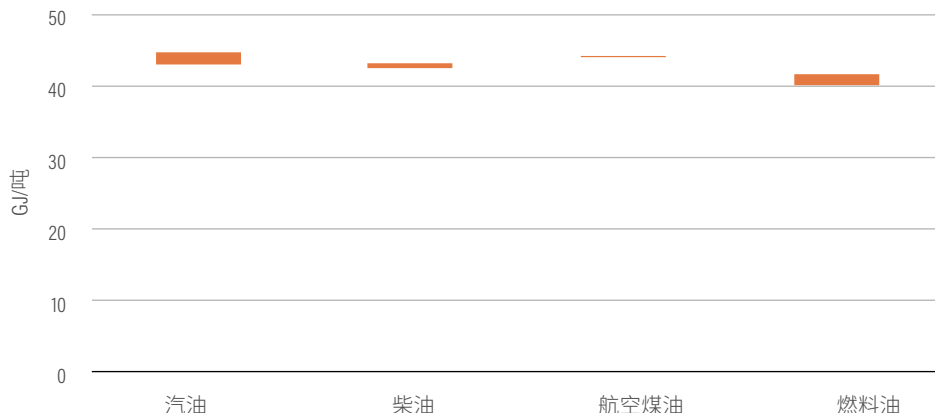
由于不同地区交通碳排放增长的驱动因素不同，在预测未来交通需求/排放时，可能需要对不同动因赋予不同权重。值得注意的是，本文没有考虑减排政策等解释变量，若纳入减排政策等解释变量，上述动因的实证结果可能发生变化。

## 4. 省级交通碳排放不确定性讨论

本文计算交通碳排放存在偏差，所以，上述部分结论可能存疑，如2012—2019年内蒙古自治区等省份的交通碳排放已与经济增长脱钩并持续下降等。

交通碳排放的不确定性主要源于活动水平、燃料低位发热量等数据的不确定性（IPCC 2000）。其中，本地化的燃料低位发热量值主要来自《陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》（国家发展改革委2015a）、《中国民用航空企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》（国家发展改革委2015b）、《省级温室气体清单编制指南（试行）》（国家发展改革委2011）。汇总可见，与电力、工业行业不同，交通行业燃料低位发热量相对确定，C-V在1%~3%左右，与文献（Shan等2020）结论一致（见图15）。

图 15 | 交通领域燃料低位发热量



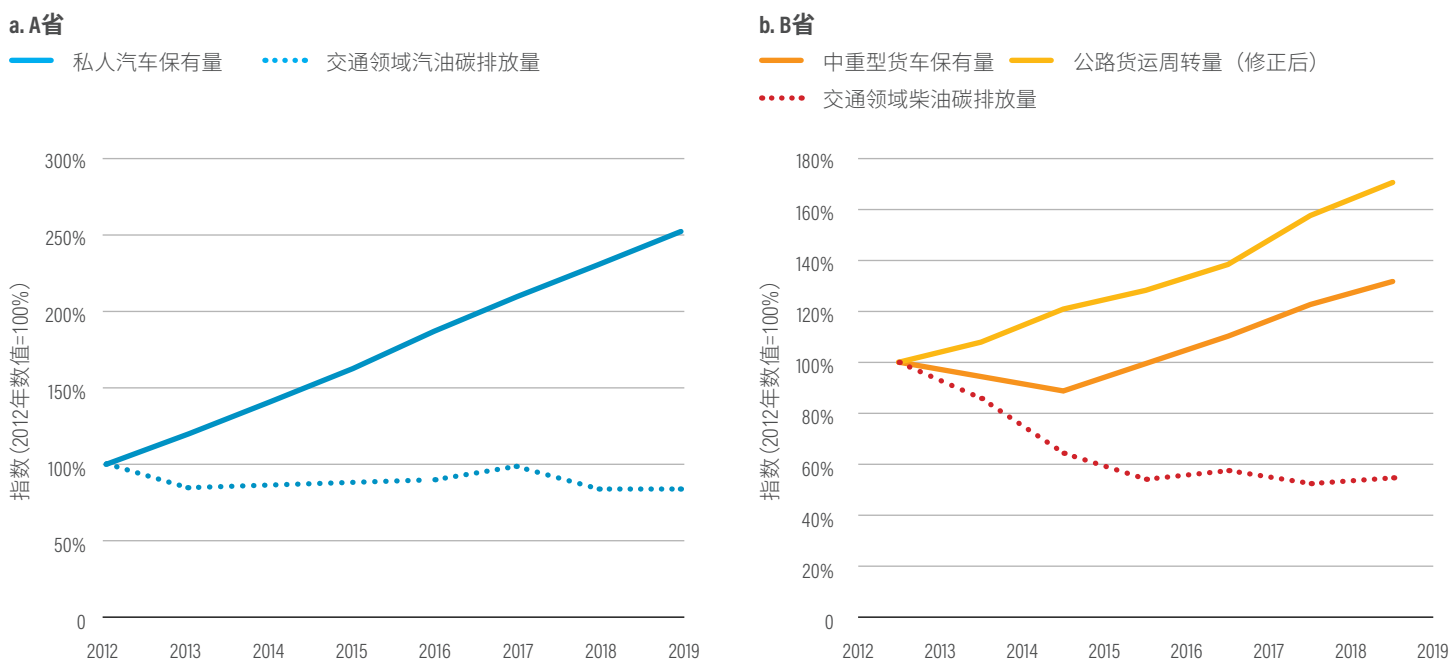
来源：国家发展改革委2011、2015a和2015b。

所以，交通碳排放测算的不确定性的主要来源于活动水平，即交通能耗统计与能源平衡表拆分系数，具体包括（IPCC 2000）：

- **核算排放源与方法：**在排放边界方面，中国现有省级交通碳排放核算方法及能耗统计与IPCC（2006）有出入。例如，各省份的交通能耗统计仍包含国际航空和航海的能耗，且各省份统计部门未披露其国际燃料舱的能耗。按照本文的处理方法（见第2节）会导致一部分国际航空航海排放未扣减，影响交通碳排放的准确性。在排放方法方面，现有核算方法指南也未就跨边界交通碳排放的归属地划分问题提供统一的解决方案。能源平衡表根据企业注册地划定航空与水运跨边界排放的归属，由于上海和北京吸引了全国多数规模较大的航空公司注册，所以，采用“自上而下”的本地运输企业能耗法，会导致航空碳排放放在交通碳排放中的占比及人均交通碳排放过高。
- **生物燃料统计：**根据IPCC（2006），交通领域生物燃料的燃烧排放应计入农业与土地利用。所以，在交通能耗统计中，需将生物燃料消费量与其掺混的汽柴油消费量分开；如果不分开，可能会高估地方交通碳排放水平。虽然2020年中央政府搁置了大规模推广生物燃料的计划，但生物燃料的推广可能对各地历史排放有影响：截至2017年，中国乙醇汽油消费量已占全国汽油消费量的1/5（国家能源局 2017），十余个省份计划或已推广乙醇汽油（国务院2018）。

- **能耗统计：**全社会终端能耗可能存在统计偏差。以A省为例，2019年A省私家车保有量较2012年上升153%，但交通汽油消费对应的排放却下降了16%（见图16）。由于2019年交通汽油在A省全社会汽油消费中占比已接近100%，说明交通汽油消费已达到上限，因此，很可能是全社会汽油消费统计有偏差，存在本地车辆在外地加油、企业上报数据有误、数据扩样过程存在误差，或部分车辆在“黑加油站”加油等情况。
- **能源平衡表拆分系数：**将一套能源平衡表拆分系数应用到地方，且不随时间推移而变化，也是造成交通碳排放不确定的可能因素之一（薛露露和刘岱宗 2022）。以B省为例，2019年交通柴油消费产生的排放较2012年下降60%，有悖于同期B省公路货运周转量增长70%与中重型货车保有量增长32%的现实情况（见图16）。虽然这其中存在全社会终端能耗统计的偏差（同期B省全社会柴油消费下降49%），但交通柴油消费更快的降幅表明，终端柴油消费正从交通转移到居民生活：2019年，B省居民生活柴油消费占比从1%上升到13%，远高于1%的全国平均水平（国家统计局能源统计司 2020）。

图 16 | 典型省交通碳排放不确定性分析



来源：汽油碳排放量和柴油碳排放量为作者根据国家统计局能源统计司相关数据（2013—2020）与本文核算方法计算。其他数据来自国家统计局（2012—2019）。由于公路货运周转量的统计口径在2013年、2019年进行了调整，所以，本文去除2012年值并对2013—2018年数据做了修正，将口径统一到2019年。

## 5. 关于本文主要结论的政策讨论

尽管本文计算的各省份交通领域碳排放存在偏差，但也揭示出鉴于区域间不均衡，各省份交通碳排放差异大的趋势，因此本文建议：

大部分省份交通绿色低碳行动对其碳达峰工作有更重要的意义。全国2/3省份的交通碳排放占能源活动相关排放中的占比高于国家平均水平。在经济发达或第三产业占比较大的省份，交通碳排放在全行业碳排放中的占比甚至已超过20%，成为主要排放源之一。在这些地区，碳达峰方案编制应更侧重交通领域。

现阶段交通领域减排的重点地区，既需侧重现有交通碳排放量大的东部省份，也需关注增速快的中西部省份：

- 在排放量方面，2019年，东部地区交通碳排放最高，占全国交通碳排放总量的43%。交通碳排放排名前五位的省份是广东省、江苏省、山东省、辽宁省和四川省，在全国交通碳排放总量中的占比超过1/3。
- 在增速方面，虽然2018年中国单位GDP交通碳排放与人均交通碳排放在全球均处于较低水平，但受经济发展、人口变化、城镇化与产业结构调整等因素影响，26个省份2012—2019年交通碳排放快速增长，以中部地区和西部地区尤为显著，甚至个别中西部省份的交通碳排放与经济增长呈现较强的增长耦合关系。

根据碳排放量与增速的不同，可以考虑制定差异化减排措施：对交通碳排放量大但增速放缓的东部省份，减排措施可更侧重存量管理；对碳排放量小且增速大的西部地区，减排措施可侧重对增量排放的控制；对排放量大且增速大的地区，需兼顾存量与增量排放的控制。

现阶段，交通领域减排的重点行业应因地制宜。在上海市、北京市和海南省，2019年交通碳排放量及增长推手以航空排放为主；包括广东省、浙江省在内的14个省份（以东部地区为主），交通碳排放以汽油为主；包括山东省、江西省在内的13个省份（以中西部地区为主），交通碳排放以柴油为主。所以，在制定交通低碳行动路线时，应根据排放源构成，差异化地制定减排施策。

最后，为协助各地更好地了解交通碳排放，国家发展改革委等部门2022年出台了《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》，提出“统一制定全国及省级地区碳排放统计核算方法”，“组织开展全国及各省级地区年度碳排放总量核算”。本文建议有关部门：

- 在核算方法方面，明确核算对象与排放源，明确跨界交通碳排放的归属地划分方法，统一核算方法与不确定性分析方法。

- 在统计数据方面，增加对非营运交通的能耗统计，完善企业上报数据的要求（如区分国际交通、生物燃料与子行业的能耗），加强交通能耗统计的验证工作。
- 在交通碳排放清单编制方面，地方政府（至少省级政府）应自某一基准年起，定期编制交通领域碳排放清单，便于其了解交通领域排放现状，识别主要排放源，并有针对性地制定减排政策。

## 附录1：交通领域低碳行动目标汇总

国家《2030年前碳达峰行动方案》（国务院 2021）及各省份碳达峰实施方案中，交通领域的绿色低碳行动目标见附表1-1。

附表 1-1 | 已出台的国家与各省份碳达峰实施方案中交通领域绿色低碳行动目标汇总

国家/省份	行动目标		
	运输工具装备低碳化	绿色高效运输体系	绿色基础设施建设
2021年10月， 国务院印发 《2030年前碳达峰行动方案》	重点任务（五）		
	到2030年，新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降9.5%左右，国家铁路单位换算周转量综合能耗比2020年下降10%。陆路交通运输石油消费力争2030年前达到峰值	“十四五”期间，集装箱铁水联运量年均增长15%以上 到2030年，城区常住人口100万以上的城市绿色出行比例不低于70%	到2030年，民用运输机场场内车辆装备等力争全面实现电动化
2022年8月， 海南省人民政府印发《海南省碳达峰实施方案》	重点任务（四）		
	到2025年，公共服务和社会运营领域新增和更换车辆使用清洁能源比例达100%。到2030年，全岛全面禁止销售燃油汽车。除特殊用途外，全省公共服务领域、社会运营领域车辆全面实现清洁能源化，私人用车新增和更换新能源汽车占比达100%	“十四五”期间，公水联运集装箱比例年均增长15%以上 到2030年，三亚等城市绿色出行比例达70%以上	
2022年7月， 吉林省人民政府印发《吉林省碳达峰实施方案》	重点任务（五）		
	到2030年，当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右，营运车辆单位换算周转量碳排放强度比2020年下降8.5%左右	到2030年，长春市、吉林市绿色出行比例不低于70%	到2025年，全省力争建成充（换）电站500座，充电桩数量达到1.2万个
2022年7月， 上海市人民政府印发《上海市碳达峰实施方案》	重点任务（五）		
	到2025年，燃料电池汽车应用总量突破1万辆，个人新增购置车辆中纯电动车辆占比超过50%。公交车、出租车、公务车、环卫车、邮政车、租赁车、市区货运车有适配车型的，新增或更新车辆原则上全部使用纯电动或燃料电池汽车；到2035年，小客车纯电动车辆占比超过40% 到2030年，主力船型新船设计能效在2020年基础上提高20%，清洁能源动力船舶占比力争达到5%以上。持续提升飞机燃油效率，逐步提高生物质燃料使用占比 到2030年，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降9.5%左右	到2025年，港口集装箱水水中转比例达52%，海铁联运箱量翻一番 到2025年，轨道交通市区线和市域（郊）铁路运营里程达到960千米。到2025年，中心城绿色交通出行比例达到75%；到2035年，达到85%	“十四五”期间新建充电桩20万个，到2025年，港口泊位岸电设备全覆盖，集装箱码头岸电设施使用率达到30%，邮轮码头岸电设施使用率和港作船舶岸电使用率力争达到100%，具备接电条件的机场地面辅助电源设施全覆盖 到2025年，港口新增和更新作业机械采用清洁或新能源，机场新增或更新场内用车辆采用新能源



附表 1-1 | 已出台的国家与各省份碳达峰实施方案中交通领域绿色低碳行动目标汇总(续)

国家/省份	行动目标		
	运输工具装备低碳化	绿色高效运输体系	绿色基础设施建设
2022年9月， 天津市人民政府印发《天津市碳达峰实施方案》	重点任务（五）		
	到2025年，新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的25%左右，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降5%左右。到2030年，新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的50%左右，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降9.5%左右。陆路交通运输石油消费力争2030年前达到峰值	“十四五”时期，集装箱海铁联运量年均增长达到15% 到2025年，绿色出行比例达到75%以上；到2030年，绿色出行比例达到80%左右	到2025年，天津港靠港船舶岸电使用率力争达到100%。创建“低碳码头”试点，推进港口太阳能、风能等分布式能源建设。到2025年，天津港生产综合能源单耗低于2.74吨标准煤/万吨吞吐量 到2030年，天津滨海国际机场场内通用车辆全面实现电动化，具备条件的特种车辆设备力争全面实现电动化
2022年7月， 江西省人民政府印发《江西省碳达峰实施方案》	重点任务（四）		
	到2025年，公交车、出租汽车（含网约车）中新能源汽车占比分别达到72%、35%。到2030年，营运车辆、船舶单位换算周转量碳排放强度比2020年分别下降10%、5%	到2025年，集装箱铁水联运量年均增长15%。到2030年，水路和铁路货运量占比达到23% 到2030年，城区常住人口100万以上的城市绿色出行比例不低于70%	到2030年，民用运输机场场内车辆装备等力争全面实现电动化
2022年9月， 辽宁省人民政府印发《辽宁省碳达峰实施方案》	重点任务（四）		
	到2025年，新增城市公交、出租车新能源或清洁能源车辆比例基本达到100%	到2025年，集装箱海铁联运量占港口集装箱吞吐量比例达到15%	
2022年10月， 北京市人民政府印发《北京市达峰实施方案》	重点任务（四）		
	“十四五”时期市属公交车（山区线路及应急保障车辆除外）、巡游出租车（社会保障和个体车辆除外）、新增轻型环卫车（无替代车型除外）全面实现新能源化，办理货车通行证的4.5吨以下物流配送车辆（不含危险品运输车辆、冷链运输车辆、邮政机要通信车和郊区邮路盘驳邮政车）基本使用新能源汽车，推动氢燃料汽车规模化应用 到2025年，新能源汽车累计保有量力争达到200万辆，公交、巡游出租、环卫等公共领域用车基本实现电动化。到2030年，当年新增新能源、清洁能源动力交通工具比例不低于40%，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降10%	到2025年，中心城区绿色出行比例达到76.5% 到2030年，中心城区绿色出行比例力争达到78%	推动航空运输企业加强节能减碳管理，加强新能源航空器和可持续航空燃料研发应用。提升机场运行电动化智能化水平，除消防、救护、加油、除冰雪、应急保障等车辆外，机场场内车辆设备力争全面实现电动化 在符合条件的地铁车辆段和检修场、公交场站设施、停车设施、高速公路边坡闲置空间、服务区及隔音墙等交通基础设施建设光伏发电系统

附表 1-1 | 已出台的国家与各省份碳达峰实施方案中交通领域绿色低碳行动目标汇总(续)

国家/省份	行动目标		
	运输工具装备低碳化	绿色高效运输体系	绿色基础设施建设
2023年1月， 四川省人民政府 印发《四川省 碳达峰实施 方案》	重点任务（五）		
	<p>推进主要港口港作机械、物流枢纽和园区内车辆装备电动化更新改造，到2030年基本实现电动化</p> <p>到2030年，当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例（不含摩托车）达到40%左右，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降9.5%左右，省内铁路单位换算周转量综合能耗比2020年下降10%</p> <p>陆路交通运输石油消费力争“十五五”末进入峰值平台期</p>	<p>“十四五”期间，全省集装箱铁水联运年均增长率达到15%</p> <p>到2030年，常住人口100万以上的城市中心城区绿色出行比例达到70%</p>	<p>到2025年，基本完成集装箱船、滚装船、2000载重吨及以上干散货船和多用途船等的受电设施改造，重点港口码头全部完成岸电设施改造，实现快充站（换电站）覆盖80%的高速公路服务区及50%的公路客运枢纽站。到2030年，实现高速公路服务区充（换）电设施全覆盖，民用运输机场内车辆装备等全面实现电动化</p>
2023年2月，广 东省人民政府 印发《广东省 碳达峰实施方 案》	重点任务（六）		
	<p>到2030年，当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右，电动乘用车销售量力争达到乘用车新车销售量的30%以上，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降10%，铁路单位换算周转量综合能耗比2020年下降10%，陆路交通运输石油消费力争2030年前达到峰值。</p>	<p>到2025年，港口集装箱铁水联运年均增长率达15%。</p> <p>到2030年，城区常住人口100万以上的城市绿色出行比例不低于70%。</p>	<p>到2030年，民用运输机场场内车辆装备等力争全面实现电动化。</p>
2023年2月，河 北省人民政府 印发《河北省 碳达峰实施方 案》	重点任务（七）		
	<p>到2030年，城市公共交通领域新增的机动车基本采用新能源和清洁能源，营运车辆及船舶单位换算周转量碳排放强度比2020年下降9.5%左右。陆路交通运输石油消费力争2030年前达到峰值。</p>	<p>“十四五”期间，港口集装箱铁水联运量年均增长15%以上。</p> <p>到2030年，城区常住人口100万以上城市绿色出行比例不低于70%。</p>	<p>到2030年，民用运输机场场内车辆装备等力争全面实现电动化。</p> <p>到2025年，港口5万吨级以上专业化泊位（不含危化品泊位）岸电覆盖率达到80%。</p>

说明：红色高亮部分为高于国家《2030年前碳达峰行动方案》目标的地方低碳行动目标。

来源：作者根据国务院（2021）、福建省人民政府（2022）、海南省人民政府（2022）、吉林省人民政府（2022）、上海市人民政府（2022）、天津市人民政府（2022）、江西省人民政府（2022）、辽宁省人民政府（2022）、北京市人民政府（2022）、四川省人民政府（2023）、广东省人民政府（2023）、河北省人民政府（2023）相关信息汇总。

## 附录2：东部、西部、中部、东北地区及经济人口特点

中国东部、西部、中部和东北地区的分类及经济人口发展特点见附表2-1。

附表 2-1 | 东部、西部、中部和东北地区的分类及经济人口发展特点

	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
省份	北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南	山西、安徽、江西、河南、湖北和湖南	内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆	辽宁、吉林和黑龙江
2019年GDP (亿元, 2012年 不变价)	469,446	201,117	184,908	53,188
2012—2019年 GDP年均增速	7.5%	8.2%	8.3%	5.1%
2019年人口 (万人)	55,062	36,573	38,045	9,980
2012—2019年 人口年均 增速	1.0%	0.3%	0.5%	-1.1%
2019年人均 GDP (元, 2012年 不变价)	85,257	54,991	48,602	53,294

来源：国家统计局（2012—2019）。

## 附录3：跨边界交通碳排放归属划分方法

根据薛露露和刘岱宗（2022）对《城市温室气体核算国际标准》（世界资源研究所等2014）提出的四种划分跨边界交通碳排放归属地的方法的本地化调整，在核算各省份交通碳排放时，可以采用如下四种跨边界交通碳排放归属方法（见附图3-1）：

### ■ “自上而下”方法：

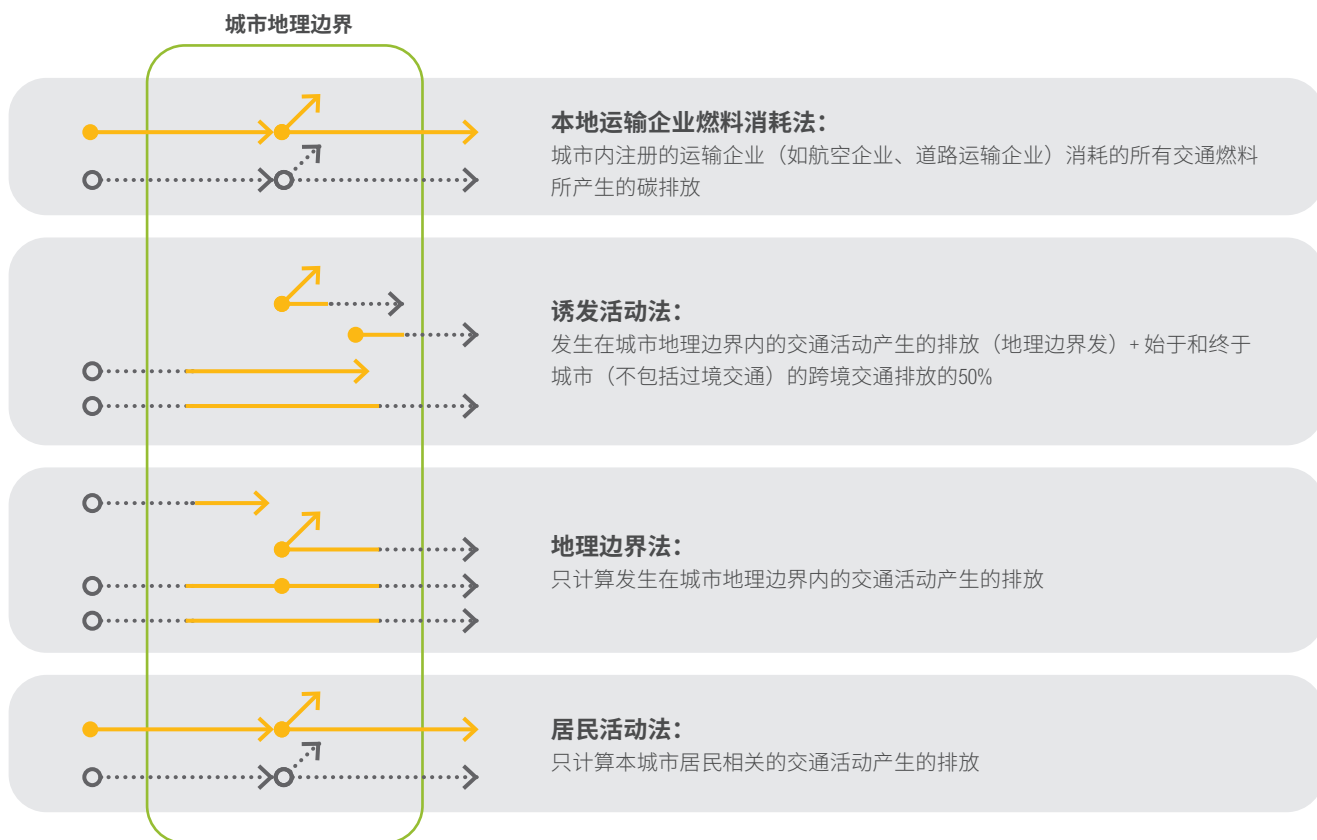
1. **本地运输企业燃料消耗法：**计算城市内注册的运输企业（如航空企业、道路运输企业）消耗的所有交通燃料所产生的碳排放。

### ■ “自下而上”方法：

2. **诱发活动法：**计算发生在城市地理边界内的交通活动产生的碳排放（地理边界法）+ 始于和终于城市（不包括过境交通）的跨境交通碳排放的50%。
3. **地理边界法：**只计算发生在城市地理边界内的交通活动产生的碳排放，不考虑车辆注册地。另外，过境交通的碳排放<sup>12</sup>也计算在内。
4. **居民活动法：**按车辆/其他交通工具的注册地（或乘客的居住地）划分跨边界交通碳排放归属。

附图 3-1 | 四种跨边界交通碳排放归属方法

—— 计算    ..... 不计算



来源：作者基于 GPC（世界资源研究所等 2014）改编。

## 附录4：各省份交通碳排放增长动因的实证回归分析

本文回归分析主要解释变量的描述性统计，见附表4-1。

本文主要解释变量之间相关性分析如附图4-1所示。所有解释变量间，第二产业与第三产业有最大的负相关性，负相关系数高达-0.84；其次，GDP和人口相关性也较高，相关系数达0.81；而第一产业与城镇化率也有较大负相关性，负相关系数达-0.74；最后，剩下的解释变量之间的相关系数不高，所以，这些解释变量的共线性干扰

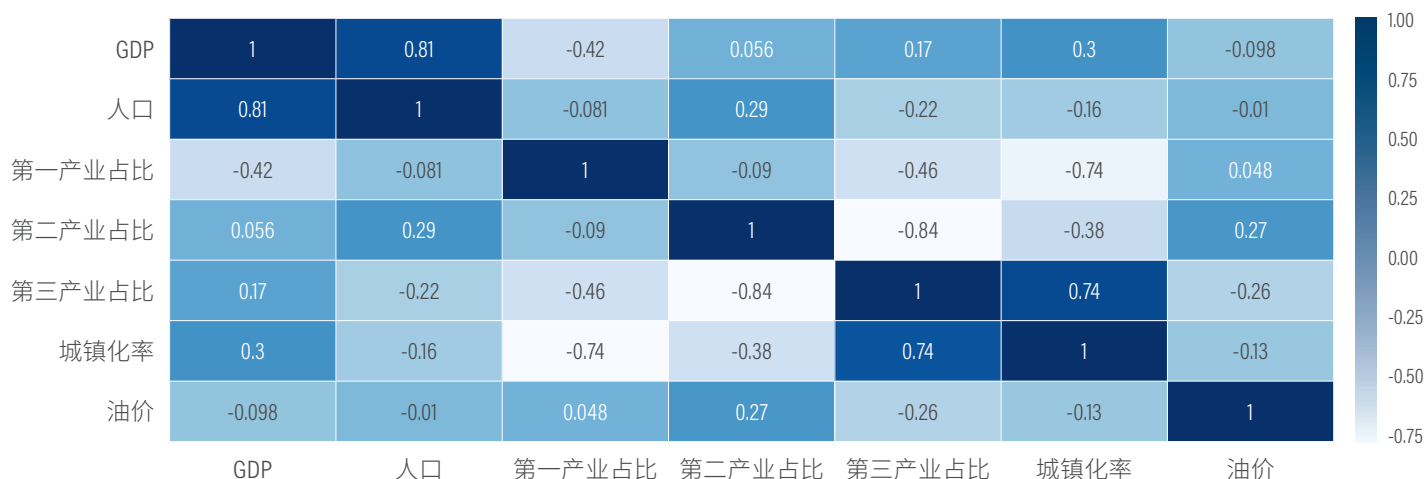
的影响可以忽略。鉴于这些变量的（负）相关性高，文中实证估计中，不考虑第二产业占比（因为其和第一、三产业占比加总等于1，与常数项共线性），且不将第一产业与城镇化率同时置于同一回归。因为大多文献将GDP与人口通常放在一个回归中，且本文中二者在同一回归中不影响相互统计显著性，所以，在回归中没有将这两个变量拆开。

附表 4-1 | 主要解释变量的描述性统计

	GDP (亿元, 2012年 不变价)	人口 (万人)	第一产业 占比	第三产业 占比	城镇化率	油价 (元/升)
均值	24067	4580	10%	47%	59%	6.56
标准差	18851	2866	5%	9%	12%	0.73
最小值	1529	571	0%	31%	36%	5.56
最大值	94388	12489	25%	84%	90%	7.52

来源：作者根据国家统计局（2012—2019）相关数据计算。

附图 4-1 | 主要解释变量之间的相关性分析



来源：作者根据国家统计局（2012—2019）相关数据计算。

附表 4-2 | 全国:各省份交通碳排放与驱动因素的回归结果

	实证方程 1	实证方程 2	实证方程 3
常量	0.7029 ( 0.4646 )	2.3045*** ( 0.2345 )	0.5111 ( 0.4384 )
GDP	1.17E-05* ( 5.95E-06 )	2.33E-05*** ( 5.72E-06 )	1.27E-05** ( 5.81E-06 )
GDP平方	-9.49E-11** ( 4.01E-11 )	-1.64E-10*** ( 3.96E-11 )	-9.93E-11** ( 3.93E-11 )
人口	0.0002*** ( 3.09E-05 )	0.0001*** ( 2.93E-05 )	0.0002*** ( 3.13E-05 )
第一产业占比	-0.0072 ( 0.0075 )	-0.0159** ( 0.0076 )	×
第三产业占比	-0.0001 ( 0.0028 )	0.0049* ( 0.0027 )	-9.67E-05 ( 0.0028 )
城镇化率	4.4011*** ( 1.4574 )	×	4.6642*** ( 1.4609 )
城镇化率平方	-2.2950* ( 1.3138 )	×	-2.4526* ( 1.3239 )
油价	-0.0122 ( 0.0113 )	-0.0179 ( 0.0117 )	-0.0106 ( 0.0111 )
AR-squared	0.6934	0.7041	0.6927
OBS	240	240	240
固定效应、随机效应模型检验			
Hausman检验 ( Prob > chi2 )	-10.490	-99.062	-26.065
p值	1.000	1.000	1.000
结论	随机效应	随机效应	随机效应

说明: 括号中数值为标准差, “\*”表示  $p < 0.1$ , “\*\*”表示  $p < 0.05$ , “\*\*\*”表示  $p < 0.01$ , “×”表示无。

来源: 作者计算。

附表 4-3 | 东部地区:各省份人均交通碳排放与驱动因素的回归结果

	实证方程 1	实证方程 2	实证方程 3
常量	5.5560*** ( 0.8609 )	3.0211*** ( 0.3734 )	3.8046*** ( 0.5773 )
GDP	1.05E-05* ( 6.19E-06 )	6.48E-06 ( 6.28E-06 )	9.15E-06 ( 6.46E-06 )
GDP平方	-1.29E-11 ( 4.00E-11 )	-3.04E-11 ( 3.90E-11 )	-1.71E-11 ( 4.18E-11 )
人口	-3.48E-05 ( 8.58E-05 )	8.88E-05** ( 3.80E-05 )	-1.70E-05 ( 8.94E-05 )
第一产业占比	-0.0586** ( 0.0221 )	-0.0227* ( 0.0127 )	×
第三产业占比	0.0076* ( 0.0043 )	0.0025 ( 0.0042 )	0.0088* ( 0.0044 )
城镇化率	-2.9533*** ( 0.8943 )	×	-1.1739* ( 0.6181 )
油价	-0.0217* ( 0.0128 )	-0.0135 ( 0.0138 )	-0.0162 ( 0.0132 )
AR-squared	0.5177	0.4871	0.4639
OBS	240	240	240
固定效应、随机效应模型检验			
Hausman检验 ( Prob > chi2 )	24.469	3.116	1.31E-09
p值	0.002	0.874	0.074
结论	固定效应	随机效应	固定效应

说明: 括号中数值为标准差, “\*”表示  $p < 0.1$ , “\*\*”表示  $p < 0.05$ , “\*\*\*”表示  $p < 0.01$ , “×”表示无。

来源: 作者计算。

附表 4-4 | 中部地区:各省份人均交通碳排放与驱动因素的回归结果

	实证方程 1	实证方程 2	实证方程 3
常量	0.3424 ( 2.1179 )	2.0109*** ( 0.3477 )	0.4075 ( 2.0862 )
GDP	7.03E-05*** ( 1.49E-05 )	7.53E-05*** ( 1.00E-05 )	7.37E-05*** ( 1.11E-05 )
GDP平方	-6.31E-10*** ( 1.83E-10 )	-6.28E-10*** ( 1.63E-10 )	-6.71E-10*** ( 1.39E-10 )
人口	-2.06E-05 ( 4.88E-05 )	-5.17E-05*** ( 1.82E-05 )	-2.49E-05 ( 4.66E-05 )
第一产业占比	0.0045 ( 0.0129 )	0.0033 ( 0.0117 )	×
第三产业占比	0.0014 ( 0.0050 )	0.0019 ( 0.0049 )	0.0004 ( 0.0041 )
城镇化率	5.1788 ( 6.8710 )	×	5.3065 ( 6.7852 )
城镇化率平方	-4.1242 ( 6.0517 )	×	-4.3804 ( 5.9398 )
油价	0.0210 ( 0.0235 )	0.0142 ( 0.0215 )	0.0204 ( 0.0232 )
AR-squared	0.9335	0.9324	0.9333
OBS	240	240	240
固定效应、随机效应模型检验			
Hausman检验 ( Prob > chi2 )	-18.823	-15.919	-8.958
p值	1.000	1.000	1.000
结论	随机效应	随机效应	随机效应

说明: 括号中数值为标准差, “\*”表示  $p < 0.1$ , “\*\*”表示  $p < 0.05$ , “\*\*\*”表示  $p < 0.01$ , “×”表示无。

来源: 作者计算。



附表 4-5 | 西部地区:各省份人均交通碳排放与驱动因素的回归结果

	实证方程 1	实证方程 2	实证方程 3
常量	-1.6933* ( 0.9594 )	-1.4034 ( 1.2955 )	-1.5006 ( 1.1010 )
GDP	3.58E-05 ( 2.19E-05 )	1.26E-05 ( 1.94E-05 )	-3.17E-05 ( 2.17E-05 )
GDP平方	-6.39E-10* ( 3.27E-10 )	-3.49E-10 ( 2.97E-10 )	3.22E-10 ( 3.22E-10 )
人口	0.0002*** ( 0.0001 )	0.0011*** ( 0.0004 )	0.0004 ( 0.0004 )
第一产业占比	0.0379** ( 0.0160 )	0.0094 ( 0.0190 )	×
第三产业占比	0.0060 ( 0.0053 )	0.0102* ( 0.0051 )	0.0014 ( 0.0054 )
城镇化率	8.9199*** ( 3.0154 )	×	10.2956*** ( 2.8003 )
城镇化率平方	-7.0009** ( 2.9394 )	×	-6.7272** ( 2.6617 )
油价	-0.0034 ( 0.0243 )	-0.0312 ( 0.0224 )	-0.0195 ( 0.0200 )
AR-squared	0.6594	0.4856	0.6063
OBS	240	240	240
固定效应、随机效应模型检验			
Hausman检验 ( Prob > chi2 )	-2001.173	60.989	32.757
p值	1.000	9.58E-11	6.81E-05
结论	随机效应	固定效应	固定效应

说明：括号中数值为标准差，“\*”表示 $p < 0.1$ ，“\*\*”表示 $p < 0.05$ ，“\*\*\*”表示 $p < 0.01$ ，“×”表示无。

来源：作者计算。

附表 4-6 | 东北地区:各省份人均交通碳排放与驱动因素的回归结果

	实证方程 1	实证方程 2	实证方程 3
常量	11.9040 ( 33.0921 )	1.2557* ( 0.6361 )	-12.0462 ( 35.1074 )
GDP	-1.35E-04 ( 4.98E-04 )	5.67E-05 ( 7.38E-05 )	-4.34E-04 ( 5.38E-04 )
GDP平方	8.36E-11 ( 1.20E-08 )	2.04E-10 ( 2.00E-09 )	8.90E-09 ( 1.27E-08 )
人口	0.0006** ( 0.0002 )	0.0004*** ( 0.0001 )	0.0006** ( 0.0003 )
第一产业占比	-0.0244** ( 0.0108 )	-0.0220* ( 0.0107 )	×
第三产业占比	-0.0074 ( 0.0081 )	-0.0069 ( 0.0081 )	-0.0191** ( 0.0070 )
城镇化率	-42.4796 ( 111.0336 )	×	39.5650 ( 117.5084 )
城镇化率平方	46.5783 ( 83.9016 )	×	-16.0702 ( 88.6810 )
油价	-0.0084 ( 0.0486 )	0.0072 ( 0.0502 )	-0.0176 ( 0.0543 )
AR-squared	0.9684	0.9606	0.9576
OBS	240	240	240
固定效应、随机效应模型检验			
Hausman检验 ( Prob > chi2 )	0.572	2.003	5.790
p值	1.000	0.960	0.671
结论	随机效应	随机效应	随机效应

说明: 括号中数值为标准差, “\*”表示  $p < 0.1$ , “\*\*”表示  $p < 0.05$ , “\*\*\*”表示  $p < 0.01$ , “×”表示无。

来源: 作者计算。

## 附录5：TAPIO脱钩指数

Tapio模型将脱钩关系划分成8种类型(见附表5-1)。其中,强脱钩(即经济增长、碳排放下降)是可持续发展的模式,弱脱钩具有一定可持续发展的前景,其余皆为不可持续模式。

附表 5-1 | Tapio脱钩指数

脱钩状态		脱钩指数			
		$\Delta CO_2$	$\Delta GDP$	脱钩指数 $e$	可持续发展程度
负脱钩	弱负脱钩 (WND)	<0	<0	$0 \leq e < 0.8$	低
	强负脱钩 (SND)	>0	<0	$e < 0$	低
	扩张负脱钩 (END)	>0	>0	$e > 1.2$	低
脱钩	衰退脱钩 (R-DE)	<0	<0	$e > 1.2$	低
	强脱钩 (S-DE)	<0	>0	$e < 0$	高
	弱脱钩 (W-DE)	>0	>0	$0 \leq e < 0.8$	中等
耦合	衰退耦合 (RC)	<0	<0	$0.8 \leq e \leq 1.2$	低
	增长耦合 (GC)	>0	>0	$0.8 \leq e \leq 1.2$	低

来源：作者基于 Tapio (2005) 调整。

---

## 注释

1. 即柴油车的尿素添加剂在选择性催化还原器中与尾气反应产生的碳排放。
2. 由于上游发电/制氢排放属于电力/工业部门，因此，交通工具与基础设施的用电、供热均不计入本文交通领域的核算范围。
3. 除境内飞机和轮船在境外加油外，境内飞机和轮船为国际出行在境内的加油也应扣减。
4. 由于数据可得性有限，本文采用广东省汽油价格替代全国汽油价格进行计算。另外，由于汽油与柴油价格变化走势几乎一致，存在较强共线性，文本仅考虑汽油价格。
5. 年均增长率，用R表示。
6. 变异系数为标准差与平均值之比。变异系数越大说明差异越大。
7. 能源活动排放是化石燃料排放，不含工业生产过程排放、废弃物排放、土地利用排放，以及土地利用变化和林业排放。
8. 含液化天然气。
9. 含液化天然气。
10. 包括汽油、柴油、煤油和燃料油。
11. 固定效应模型是将各省份的个体特征作为解释变量。
12. 根据《城市温室气体核算国际标准》，该方法还包含国际交通碳排放。

## 参考文献

- EEA (European Environment Agency). 2020. "EEA Greenhouse Gases—Data Viewer." Copenhagen: EEA.
- EPA. 2020. "Greenhouse Gas Inventory Data Explorer." Washington, DC: EPA. <https://cfpub.epa.gov/ghgdata/inventoryexplorer/>.
- Foster, V., Dim, J.U., Vollmer, S., Zhang, F. 2021. Understanding Drivers of Decoupling of Global Transport CO<sub>2</sub> Emissions from Economic Growth: Evidence from 145 Countries. The World Bank Policy Research Working Paper. No. 9809. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/36427> License: CC BY 3.0 IGO.
- Liao, H., Wang, C., Liu, Y.N., Gao, Y.X., Wang, F.Z. 2019. Revision on China's energy data by sector and fuel type at provincial level. Energy Efficiency. 12. 1-13. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-018-9690-0>.
- Liu, Y., Feng, C. 2020. Decouple transport CO<sub>2</sub> emissions from China's economic expansion: A temporal-spatial analysis, Transportation Research Part D: Transport and Environment. 79:102225. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102225>.
- Marrero, A.S., Marrero, G.A., González, R.M., Rodríguez-López, J. 2021. Convergence in road transport CO<sub>2</sub> emissions in Europe, Energy Economics, 99:105322. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105322>.
- Mulholland, E., J. Teter, P. Cazzola, Z. McDonald, and B.P. Ó Gallachóir. 2018. "The Long Haul towards Decarbonising Road Freight – A Global Assessment to 2050." Applied Energy 216 (C): 678–93. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.058>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2000. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit, Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Kanagawa, Japan, 2000.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge University Press, Cambridge (2006).
- ITF (International Transport Forum). 2012. (Database.) *OECD. Stat. Paris: ITF*. <http://stats.oecd.org/index.aspx>.
- Shan, Y., Huang, Q., Guan, D. et al. 2020. China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016–2017. Scientific Data 7, 54. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0393-y>.
- Shuai, C., Chen, X., Wu, Y., Zhang, Y., & Tan, Y. (2019). A three-step strategy for decoupling economic growth from carbon emission: Empirical evidence from 133 countries. Science of The Total Environment, 646, 524–543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.045>.
- SLOCAT. 2021. Transport and Climate Change Global Status Report – 2nd edition. <https://tcc-gsr.com/>
- Tapio, P. 2005. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. Transport Policy, 12(2): 137-151.
- World Resources Institute (世界资源研究所). Climate Watch. Historical GHG Emissions. 2022. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>
- Xue, L., Liu, D.Z. 2022. Toward Credible Transport Carbon Dioxide Emissions Accounting in China. World Resources Institute Working Paper. <https://doi.org/10.46830/wriwp.22.00015en>.
- 北京市人民政府. 2022. 北京市人民政府关于印发《北京市碳达峰实施方案》的通知. [http://fgw.beijing.gov.cn/fgwzgwkg/zcgk/sjbmghfwj/bjszf-wj/202210/t20221014\\_2836238.htm](http://fgw.beijing.gov.cn/fgwzgwkg/zcgk/sjbmghfwj/bjszf-wj/202210/t20221014_2836238.htm)
- 国家统计局. 2011. 东西中部和东北地区划分方法. [http://www.stats.gov.cn/tzjc/zthd/sjtjr/dejtjkfr/tjpk/201106/t20110613\\_71947.htm](http://www.stats.gov.cn/tzjc/zthd/sjtjr/dejtjkfr/tjpk/201106/t20110613_71947.htm). (访问日期: 2022年10月).
- 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社. 2013.
- 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社. 2014.
- 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社. 2015.
- 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社. 2016.
- 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社. 2017.
- 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社. 2018.
- 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社. 2019.
- 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社. 2020.
- 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2012. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M].北京: 中国经济出版社. 2014.
- 国家发展改革委. 2011. 省级温室气体清单编制指南(试行).
- 国家发展改革委. 2015. 陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行). <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/W020190905506438255108.pdf>.
- 国家发展改革委. 2015. 中国民用航空企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行). <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/W020190905508187976253.pdf>.
- 国家发展和改革委员会能源所研究课题组. 2017. “十三五”及2030年交通部门节能目标研究. <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-20170301-1-zh>.
- 国家发展改革委、国家统计局、生态环境部. 2021. 关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202208/P020220819537968476486.pdf>.

国家能源局.2017.能源局就《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》问答.http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/13/content\_5224736.htm.

国务院.2007.国务院批转节能减排统计监测及考核实施方案和办法的通知.http://www.gov.cn/zhengce/content/2008-03/28/content\_4949.htm.

国务院.2021.2030年前碳达峰行动方案.http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\_5644984.htm

国务院常务会议.2018.李克强主持召开国务院常务会 部署进一步推进缓解小微企业融资难融资贵政策落地见效等.http://www.gov.cn/premier/2018-08/22/content\_5315707.htm.

海南省人民政府.2022.海南省人民政府关于印发海南省碳达峰实施方案的通知.https://www.hainan.gov.cn/hainan/zmghnwj/202208/6c5d8bad-000c479582fc3c51a39999b8.shtml.

吉林省人民政府.2022.吉林省人民政府关于印发吉林省碳达峰实施方案的通知.http://xxgk.jl.gov.cn/szf/gkml/202208/t20220801\_8528190.html.

江西省人民政府.2022.江西省人民政府关于印发江西省碳达峰实施方案的通知.http://www.jiangxi.gov.cn/art/2022/7/18/art\_4975\_4032897.html.

上海市人民政府.2022.上海市人民政府关于印发《上海市碳达峰实施方案》的通知.https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20220728/75468067a4a-848139d2a2eed16ce9e11.html.

生态环境部.2018.中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告.https://www.mee.gov.cn/ywyz/ydqhbh/wsqtkz/201907/P020190701765971866571.pdf.

生态环境部.2021.省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南（征求意见稿）.

生态环境部.2021.中国移动源环境管理年报 2021.https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202109/W020210910400449015882.pdf.

四川省人民政府.2023.四川省人民政府关于印发四川省碳达峰实施方案的通知.https://www.sc.gov.cn/10462/zfwjts/2023/1/5/39c7928fe869401cb18df-118f37abb8c.shtml.天津市人民政府.2022.天津市人民政府关于印发天津市碳达峰实施方案的通知.https://www.tj.gov.cn/zwgk/szfwj/tjsrmzf/202209/t20220914\_5987984.html.

中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京：中国统计出版社.2012.

中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京：中国统计出版社.2013.

中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京：中国统计出版社.2014.

中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京：中国统计出版社.2015.

中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京：中国统计出版社.2016.

中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京：中国统计出版社.2017.

中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京：中国统计出版社.2018.

中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京：中国统计出版社.2019.

中共中央，国务院.2021.中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见.http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\_5644613.htm.

冯旭杰，孙全欣，钱堃，等.2012.区域综合交通运输需求与产业结构的协整关系分析[J].交通运输系统工程与信息.Vol.6:10-16.doi:10.3969/j.issn.1009-6744.2012.06.002.

黄羿，李冬梅，李永田，等.交通运输业碳排放的时空变化特征及影响因素——基于全国与经济区域层面[J].环境保护科学, 2021, 47(4): 62-70. doi:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.04.010.

蒋小谦，房伟权，庄贵阳，等.2013.城市温室气体核算工具2.0.世界资源研究所温室气体核算体系系列报告.https://wri.org.cn/research/greenhouse-gas-accounting-tool-chinese-citiespilot-version-10（访问日期：2022年10月）.

金投网.2022.今日广东汽油价格.https://www.cngold.org/crude/guangdong.html（访问日期：2022年10月）.

孙岩，张昱，刘学敏.北京市交通碳排放的驱动因素分析——基于城市发展视角[J].城市与环境研究,2020(01):81-95.doi:CNKI:SUN:CSHY.0.2020-01-006.

奚文怡，蒋小谦，房伟权，2017.中国气候变化目标进展分析.世界资源研究所工作论文.https://wri.org.cn/research/performance-tracking-chinas-climate-actions（访问日期：2022年10月）.

薛露露，刘岱宗.2022.迈向碳中和目标：中国道路交通领域中长期减排战略.世界资源研究所研究报告.https://wri.org.cn/research/decarbonizing-china-road-transport-sector.（访问日期：2022年10月）.

## 致谢

本研究是国家自主贡献亚洲交通倡议项目（NDC Transport Initiative for Asia，NDC-TIA）的产出。该项目支持中国、印度和越南乃至全球各国全面开展交通减排战略研究，提升交通低碳发展的雄心。国家自主贡献亚洲交通倡议项目是国际气候倡议（IKI）的一部分。德国联邦经济和气候保护部（BMWK）根据德国联邦议院决议，为国际气候倡议提供支持。该项目中国部分实施方包括德国国际合作机构（GIZ）、国际清洁交通委员会（ICCT）和世界资源研究所（WRI），项目也得到德国交通转型智库（AGORA）在德国的支持。欲了解更多项目信息，请访问项目网站<https://www.ndctransportinitiativeforasia.org/>。

作者向为本研究提供支持与意见的专家表示诚挚的感谢，包括世界资源研究所蒋小谦、张依倩、刘康杰、张黛阳，国家发展和改革委员会能源研究所朱松丽，国家应对气候变化战略研究和国际合作中心马翠梅，北京交通发展研究院程颖，以及世界银行陈杨。作者还要特别感谢世界资源研究所房伟权博士与刘哲博士对本研究提供的指导。

作者感谢为本研究做了大量文献搜集与数据分析工作的世界资源研究所同事周伟琪及优秀实习生吴潇晗、李镛。感谢Emilia Suarez、赵雨滋、张烨和谢亮提供的研究支持、项目管理、编辑及排版支持。

## 作者介绍

**薛露露**，中国交通项目总监，世界资源研究所（美国）北京代表处。邮箱：[Lxue@wri.org](mailto:Lxue@wri.org)

**刘岱宗**，中国可持续城市部门主任，世界资源研究所（美国）北京代表处。

## 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。

支持机构：



on the basis of a decision  
by the German Bundestag



Copyright 2023 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/>