

中国基础设施隐含碳的动因识别与演化模拟

——以公路和电力基础设施为例

占妍泓, 周炯梁, 孙传旺

摘要: 基础设施是兼具公共性、通用性和基础性的重大工程, 也是内含巨大隐含碳的固定资产。面对日益趋紧的碳排放空间约束, 合理控制基础设施隐含碳的增长对于碳减排具有重要意义。本文基于存量和增量的双重视角, 以公路和电力基础设施为例对 1993—2023 年间我国基础设施隐含碳进行了测算分解, 并对基础设施隐含碳的演化情景进行了模拟分析。结果表明, 2023 年我国公路和电力基础设施隐含碳的存量水平约为 45.34 亿~56.77 亿吨。基础设施隐含碳的增量分解显示, 资本规模、物质规模和产出规模是隐含碳的主要促增因素, 资本碳强度和物质强度则是主要促降因素。且相较电力基础设施, 规模因素和强度因素对于公路基础设施隐含碳的影响更大。进一步研究发现, 在不同情景中, 2030 年前基础设施隐含碳的存量水平将逐年上涨, 而隐含碳的增量演变路径存在较大差异。在考虑低碳科技创新的技术改进情景中, 基础设施隐含碳的增量在 2030 年前将稳步下降, 但在其他情景中将持续上涨。本文的研究对于统筹基础设施的存量和增量, 推进基础设施低碳发展具有启示意义。

关键词: 基础设施; 隐含碳; 碳排放空间; 因素分解; 情景模拟

中图分类号: F299.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2026)01-0102-20

一、引言

党的二十届四中全会明确提出构建现代化基础设施体系, 加强基础设施统筹规划, 优化布局结构, 促进集成融合。基础设施是经济社会运行的关键支撑, 对于推动高质量发展具有补短板、调结构、惠民生的重要实效。作为基础设施建设大国, 我国在交通、能源和水利等基础设施领域取得了举世瞩目的显著成就。其中, 公路和电力网络作为经济系统的骨架, 是我国优先发展的关键性基础设施^[1]。截至 2024 年底, 我国公路总里程接近 550 万公里, 220 千伏及以上输电线路约达 95 万公里, 高速公路和电网规模长期稳居世界第一。但在碳排放的空间约束日益趋紧之际, 不容忽视的一点是, 公路、电力等基础设施也是资源消耗和碳排放的基本单元^{[2][3]}, 其具体形成是以消耗大量碳密集型物质材料 (如钢铁、铝材、水泥等) 为代价的^{[4][5][6][7][8]}。包括公路在内的交

基金项目: 国家自然科学基金青年学生基础研究项目“数字基础设施促进新能源产业高质量发展的机理研究和效应评估”(723B2021); 国家社会科学基金重大项目“能源供给侧与需求侧协同绿色低碳发展机制与实现路径研究”(21&ZD109)

作者简介: 占妍泓, 东南大学经济管理学院 (江苏南京 211189); 周炯梁, 厦门大学经济学院 (福建厦门 361005); 孙传旺 (通讯作者), 厦门大学经济学院, cw_sun@foxmail.com

通部门以及电力部门的碳排放更是占我国碳排放总量的一半以上^{[4][5]}。本文重点关注公路、电力等基础设施的隐含碳排放(简称“基础设施隐含碳”),即基础设施建设及更新改造所使用的建筑材料在开采、制造、运输、使用等生命周期阶段所产生的碳排放^{[9](P20)[10][11]}。这类碳排放因建筑工程的形成而被“隐含”于基础设施之中。值得关注的是,基础设施隐含碳具有两方面的独特属性。其一,从存量看,基础设施以物质工程形式存在,且通常具有数十年的使用寿命,故其隐含碳会在存量物质工程中不断积累、沉淀,具有显著的物质依附性与长期存续性。因此,对于基础设施隐含碳的研究,首先需要了解基础设施隐含碳的存量水平(即某个时点隐含碳的历史累计量)。其二,从增量看,基础设施并非静态存在,而是在改建、扩建、维修与拆除等更新过程中不断演进,从而推动其隐含碳持续增长。因此,要科学判断基础设施隐含碳的演化趋势,还需要厘清基础设施隐含碳的增量幅度(即某个时期隐含碳的增加量)如何变化及其驱动因素。

基于存量水平与增量变化的双重视角对基础设施隐含碳的形成机理与演进规律进行解析,对于推动基础设施体系低碳转型与碳达峰碳中和具有重要意义。从物质和碳的角度看,无论是公路、电网等传统设施,还是城际高铁、特高压等新型设施,基础设施的建设发展都伴随着大量的高碳建筑材料投入。面向“双碳”目标,既要统筹基础设施的存量和增量,从材料端和工艺线等方面推动基础设施低碳转型,减缓基础设施隐含碳的增长,更要充分利用好基础设施这类含有巨大隐含碳的固定资产,放大基础设施的碳效用^{[12]①}。特别是在当前我国城市化进程尚未完成、基础设施建设需求高企且碳排放空间约束趋紧的现实背景下,亟需对我国基础设施隐含碳进行测算,研究分析基础设施隐含碳的关键驱动因素及潜在演化路径,进而为制定基础设施的有效减排战略,推动构建绿色低碳的现代化基础设施体系提供有益参考。

在现有文献中,已经有许多学者围绕基础设施隐含碳的规模估计、演化趋势及驱动因素开展了大量研究。虽然不同类型或不同地区的基础设施隐含碳存在水平差异^{[10][13]},但过去20年来,基础设施隐含碳总体上呈现出加速增长趋势^[14]。特别是城市化进程的加速带来了基础设施建设需求的显著增长,从而推动基础设施隐含碳快速上升^[15]。本质上看,基础设施隐含碳的增长主要源于其建设过程中的能源投入和物质材料使用不断累加^{[11][16]}。在基础设施隐含碳的测算方面,多数文献的基本思路是先估计出基础设施消耗的物质规模,再估算出相应物质消耗产生的碳排放。目前,用于估计物质材料消耗量的方法主要有两类:一是自上而下的系统分解模型^{[17][18]};二是自下而上的物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)方法^{[19][20]}。其中,物质流分析方法可以更加细致地反映具体产品类别中的物质来源及其结构特征,因此在测算基础设施物质存量时被广泛使用^[21]。此外,在碳排放驱动因素的研究方面,现有文献的典型做法是采用Kaya恒等式和对数迪氏指数分解(Log Mean Divisia Index, LMDI)等传统模型对碳排放进行分解^{[22][23]}。但这类指数分解形式受限于恒等关系式,往往局限于几类固定变量^[17],难以反映绝对量因素和相对量因素对于碳排放的共同影响。这不仅可能导致关键因素对碳减排的重要作用被严重忽略,更难以揭示物质规模等因素对基础设施隐含碳的潜在影响。

本文以公路和电力基础设施为例^②,首先基于物质流分析方法对1993—2023年我国基础设施隐含碳的存量水平进行测算。在此基础上,采用广义迪氏指数分解法(Generalized Divisia Index

① 本文认为,广义上的碳效用泛指碳资产所带来的经济社会效益。狭义上,碳效用可以理解为沉淀有大量隐含碳的基础设施、房屋建筑等固态资产所带来的经济和服务效益(如经济产出以及运输、住房等服务供给)。在具体研究中,可以采用单位隐含碳所对应的GDP、公共服务供给等指标进行测度。

② 这主要是基于两个考虑:其一,完善健全的交通和电力网络共同构成了经济系统的骨架,是需要优先发展的关键性基础设施^{[1][24]};其二,公路和电力基础设施的建设与维护过程以消耗大量碳密集型物质(如钢铁、水泥、铝材等)为特征^{[11][13]},具有较强的代表性与典型性。

Method, GDIM)对基础设施隐含碳的增量进行分解,识别增量变化的主要驱动因素。进一步地,本文还运用蒙特卡洛方法,研究了2030年前我国基础设施隐含碳的演化情景。

相较于已有研究,本文的可能边际贡献在于:第一,重新审视基础设施与碳排放之间的关系,进一步从存量和增量的双重视角揭示基础设施的碳排放影响,有助于为合理分配基础设施建设的碳排放空间、加快基础设施的绿色低碳转型提供学理依据;第二,在基础设施隐含碳的增量分解与动因识别中,创新性地引入物质规模、物质碳强度与物质强度三个与基础设施物质消耗相关的重要因素,建立起物质材料与基础设施隐含碳的直接关联,有助于为基础设施建设的碳减排政策制定提供参考;第三,将蒙特卡洛方法与情景分析相结合,厘清了基础设施隐含碳的演化情景以及碳减排的贡献因素,对识别“双碳”目标下我国基础设施的低碳转型路径具有启示意义。

本文其余部分的结构安排如下:第二部分为基础设施隐含碳的存量测算;第三部分为基础设施隐含碳的增量分解;第四部分讨论我国基础设施隐含碳的演化趋势;第五部分总结结论,并提出相应的政策启示。

二、基础设施隐含碳的存量测算:以公路和电力基础设施为例

理论上,基础设施隐含碳包括沉淀在基础设施中的所有物质材料的历史累计碳排放。但由于数据限制,已有研究在实践中多数仅基于一种或几种主要物质来估算基础设施的隐含碳^[25]。基于数据可得性,本文以公路和电力基础设施为例对我国基础设施隐含碳的存量水平进行测算。根据基础设施的主要建设用材,本文在测算上述两类基础设施隐含碳时,主要考虑水泥、沥青、砂砾、钢铁、铜、铝六类物质。其中,水泥、钢铁和铝是能源消耗与二氧化碳排放的主要部门^[26],因此具有较强的代表性。

(一) 测算方法

本文采用分类核算再汇总的思路对基础设施隐含碳的存量水平进行测算。公路设施方面,根据公路的主要用材、使用任务与功能定位,本文以水泥、沥青、砂砾为物质边界,并以等级公路(包括高速公路、一级公路、二级公路、三级公路和四级公路五类)为系统边界来测算公路基础设施隐含碳的存量。电力设施方面,考虑到水泥、钢铁、铜、铝是主要建设用材,本文以这四类材料为隐含碳测算的物质边界。系统边界则考虑承担电力生产、转化以及分配功能的技术设施,包括发电站(含火力、水力、风力、太阳能发电站与核电站)、交流输电线路、直流输电线路和变电站四类。

鉴于公路和电力基础设施建成后进行整体拆除的可能性较低,本文基于两类设施建造和翻新过程中的物质材料投入及内含的相应碳排放来测算基础设施隐含碳的存量水平。本文首先采用自下而上的物质流分析方法^[27],估计第 t 年各类基础设施建设的物质消耗需求,如式(1)和式(2)所示:

$$MS_{l,t} = \sum_r (MS_{l,t-1}^r + NC_{l,t} \times MI_l^r + RE_{l,t} \times MI_l^r) \quad (1)$$

$$RE_{l,t} = \sum_{ct}^{t-1} DEM_l(ct, t) \times NC_{l,ct} \quad (2)$$

其中, r 、 l 分别为物质种类和基础设施类型。式(1)中的 $MS_{l,t}$ 为 t 年 l 类设施的隐含物质存量, $MS_{l,t-1}^r$ 则为 $t-1$ 年 l 类设施隐含的 r 类物质存量。 $NC_{l,t}$ 为 t 年新建的 l 类设施规模^①。 MI_l^r 即为相应设施类型的物质材料强度(即每单位基础设施的物质消耗量)。 $RE_{l,t}$ 为 t 年 l 类设施的累计翻

① 公路设施规模以公路里程和路面宽度相乘所得的公路面积衡量。电力设施规模的衡量方式因类而异,发电站和变电站以装机总量衡量,交/直流输电线路则以线路里程长度衡量。

新量, 即从 l 类设施初始建成的年份 ct 到年份 t 之间, 每年翻新维护的规模累加。

始建于 ct 年的 l 类设施在 t 年翻新的概率 $DEM_l(ct, t)$ 可以根据 l 类设施的使用年限, 利用正态分布函数估算得出, 如式 (3) 所示。

$$DEM_l(ct, t) = \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t - ct - LT_l)^2}{2\delta_l^2}\right] dt \quad (3)$$

其中, LT_l 为 l 类设施的平均使用年限, δ_l 为相应的标准差, 将其设为平均使用年限的 30% [21]。

进一步地, 可得基础设施隐含碳为:

$$CE_t = \sum_l \sum_r (MS_{l,t}^r \times c^r) \quad (4)$$

其中, CE_t 为第 t 年基础设施隐含碳的存量水平, c^r 为物质材料 r 的碳排放系数。

(二) 数据来源

1. 基础设施规模及物质材料强度。公路设施方面, 本文使用的等级公路里程数据来源于国家统计局和 CEIC 数据库; 等级公路路面宽度来源于《公路工程技术标准》(JTG B01—2003); 公路物质材料强度 (每平方米公路的物质消耗量) 以及等级公路平均使用年限来自《公路水泥混凝土路面设计规范 JTG-D40-2015》。电力设施方面, 发电站和变电站的装机容量以及输电线路的里程长度来源于《中国电力统计年鉴 (1993—2024)》和国家能源局公开数据。各类电力设施物质材料强度及使用年限来源于现有研究 [28]。

2. 物质碳排放系数。由于测算边界、工艺技术和测算方法等存在差异, 不同研究给出的物质碳排放系数有所不同。本文对于物质碳排放系数的选择主要基于三个原则: 一是综合考虑不同研究的碳排放系数差异, 将系数范围设定在某个区间, 以避免选择单一系数造成偶然性偏差; 二是系数选择尽量以其生命周期内的完全碳排放为准, 既能反映物质生产、使用等过程的直接排放, 又能反映该物质生产耗用其他上游原材料所引起的间接排放; 三是尽量选择衡量单位物质材料生产的二氧化碳排放量的排放系数, 在数据不可得的情况下, 选择同时考虑其他温室气体的二氧化碳当量排放系数近似替代。

综合而言, 两类基础设施的物质碳排放系数如表 1 所示。

(三) 结果分析

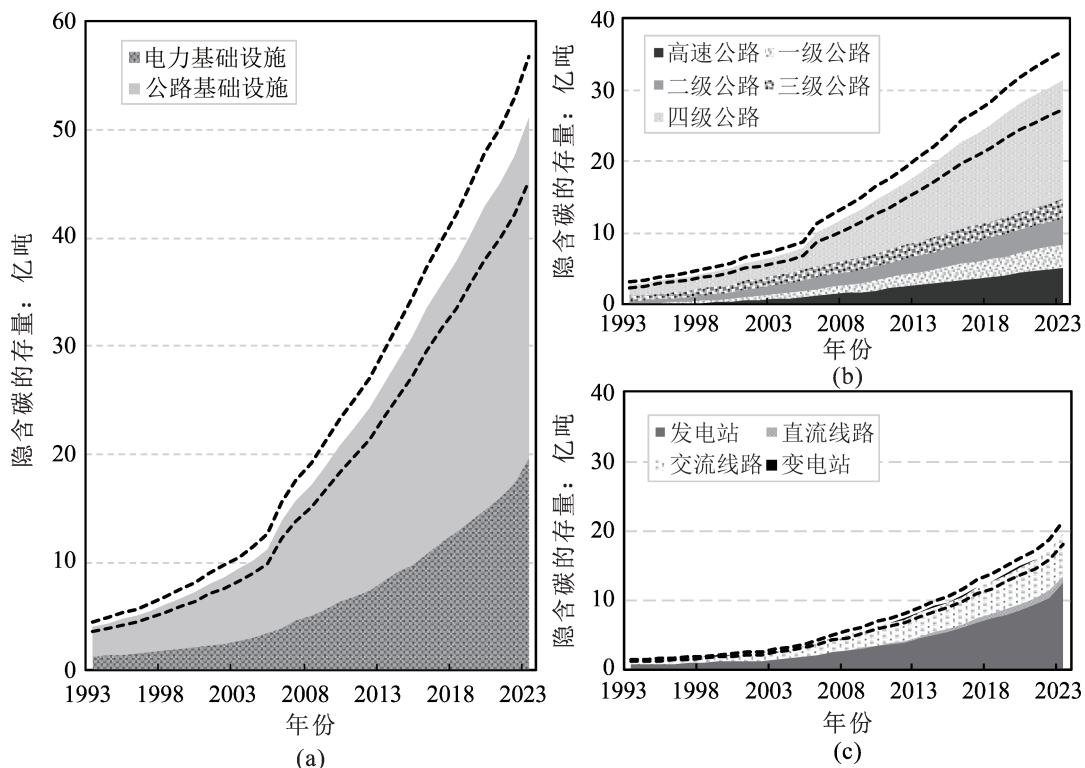
1. 基础设施隐含碳的存量水平及结构特征。图 1 (a) 绘制了公路和电力基础设施隐含碳的存量增长趋势。2023 年, 我国公路和电力基础设施隐含碳的合计存量约为 45.34 亿~56.77 亿吨。根据测算的平均值, 1993—2023 年两类基础设施隐含碳的存量增长超过 11 倍, 反映出我国基础设施建设的高碳发展趋势。

从设施类型结构看, 公路基础设施隐含碳的存量较大但增速较缓。1993—2023 年期间, 公路基础设施隐含碳的存量由 2.76 亿吨上升至 31.37 亿吨, 大约增长 10 倍。其中, 四级公路隐含碳的存量最大, 占比超过一半 [如图 1 (b) 所示]。其背后原因是, 四级公路在我国公路系统中长期占据主导地位, 历年四级公路里程占公路总里程的比重均在 50% 以上。相较于公路设施, 同期电力基础设施隐含碳的存量增长则超过 14 倍, 由 1.31 亿吨增长至 19.68 亿吨。其中, 发电站和交流输电线路隐含碳的存量均处于较高水平 [如图 1 (c) 所示]。这主要是由于这两类电力设施的规模较大, 且在建设过程中广泛采用水泥、钢铁、铝等高碳物质材料。从物质材料结构看, 本文测算的平均值显示, 水泥是基础设施隐含碳的最主要来源 [如图 2 (a) 所示]。在 1993—2023 年间, 水

表 1 物质碳排放系数

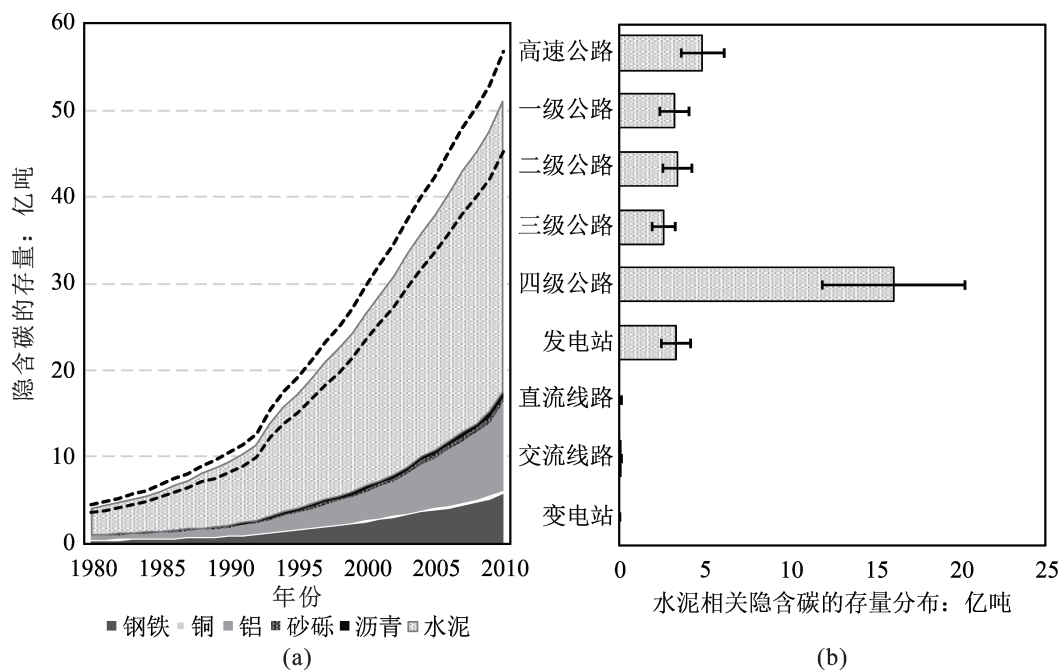
物质材料	碳排放系数 ($t \text{ CO}_2/t$)
水泥	0.54~0.70 ^{[29][30]}
沥青	0.14~0.19 ^{[9](P38)[31]}
砂砾	0.002~0.003 ^{[9](P38)[32][33]}
钢铁	1.80~2.10 ^{[19][26][34][35]}
铜	3.42~5.88 ^{[36][37][38]}
铝	14.70~16.70 ^{[39][40]}

注: 资料来源: 作者整理。



注：图中的两条虚线分别为隐含碳的存量估计区间。资料来源：作者绘制。

图1 1993—2023年基础设施隐含碳的存量水平及结构组成(按设施类别)



注：图（a）中的两条虚线以及图（b）中的条形图顶部横线表示隐含碳的存量估计区间。资料来源：作者绘制。

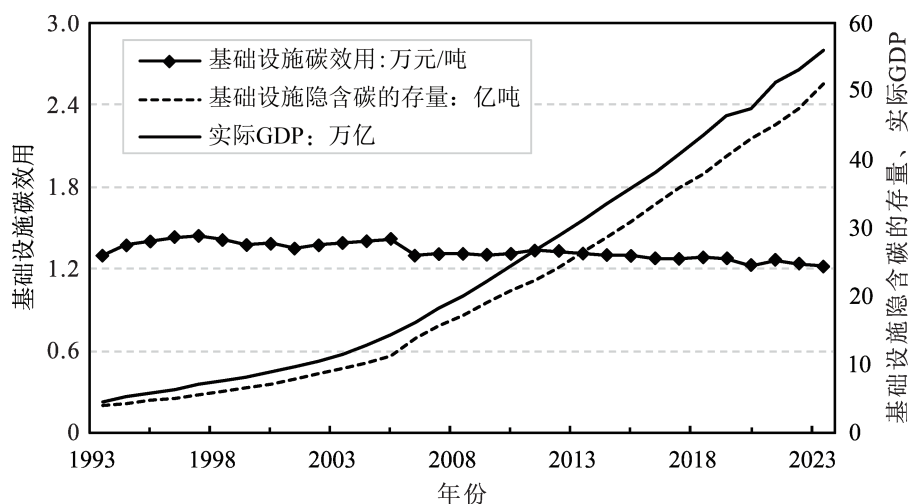
图2 1993—2023年基础设施隐含碳的存量水平及结构组成(按物质类别)

泥碳排放占基础设施隐含碳的比重均在65%以上。这主要因为水泥是国民经济各产业部门中除了火电之外碳排放量最大的产业^[30]。就分布而言，水泥消耗产生的碳排放主要沉淀在公路（尤其是四级公路）和发电站中[如图2（b）所示]。同期，碳排放系数较高的钢铁和铝消耗带来的隐含碳

也较大, 其存量水平增长分别超过12倍和21倍。值得关注的是, 铜消耗引致的隐含碳虽然较低, 但其存量增速最高, 约为27倍。

2. 基础设施碳效用: 隐含碳与经济增速的联动趋势分析。从流量角度而言, 基础设施投资对于经济增长的促进作用最终将受限于边际报酬递减规律。但从存量角度审视, 基础设施作为具有大量隐含碳的物质工程, 可被视为一种以固态形式存在的碳资产, 具有长期服务社会发展、支撑经济运行的碳效用^[12]。鉴于此, 本文进一步绘制了1993—2023年我国基础设施隐含碳的存量水平与经济发展水平的趋势图, 并将单位基础设施隐含碳的存量水平所对应的国内生产总值作为基础设施碳效用的衡量指标。该值越大, 表明基础设施的碳效用越大。

如图3所示, 1993—2023年间我国基础设施隐含碳的存量变化与实际GDP的变动特征非常相似, 二者均呈现出稳定的上升趋势。分阶段看, 1993—2005年的实际GDP增速快于基础设施隐含碳的存量增速, 推动基础设施碳效用呈上升趋势, 表明基础设施作为碳资产的利用效率有所提高。2006—2023年间, 基础设施碳效用水平相对稳定, 但有轻微走低趋势, 说明基础设施这一碳资产对经济增长的支撑作用和拉动效应有所下降, 这一发现也与现有研究^[41]相一致。上述结果反映出, 面向低碳转型下的经济高质量发展, 亟需进一步提高存量基础设施的服务能效, 尽量维护、延续和提升基础设施的碳效用^[12]。



注: 基础设施碳效用=实际GDP/基础设施隐含碳的存量水平, 该值越大, 表明碳效用越高。为保证数据可比性, GDP调整为2000年不变价。资料来源: 作者绘制。

图3 1993—2023年我国基础设施碳效用、基础设施隐含碳的存量与实际GDP的变化趋势

三、基础设施隐含碳的增量分解与动因识别

(一) 因素影响机理与分解模型选择

1. 因素影响机理。考虑到节能减排成效主要体现在增量水平上^[42], 且基础设施隐含碳的存量演化趋势取决于增量的增长速度, 本文进一步对基础设施隐含碳的增量进行了分解, 以识别其主要驱动因素。

在碳排放分解的相关研究中, 传统的指数分解模型多数是以Kaya恒等式为基础, 聚焦于讨论能源消费碳强度、能源强度等因素的作用, 而较少考虑到物质消耗因素对碳排放的影响。不同于以往相关文献, 本文在基础设施隐含碳的增量分解中特别引入了物质规模、物质碳强度与物质强度三个与物质材料消耗直接相关的因素。这主要是基于以下三方面考虑。

第一, 相比能源消费因素, 考察物质消耗因素如何影响基础设施隐含碳的增量, 有助于从材料端为基础设施建设的碳减排政策制定提供直接参考。基础设施的重要特性之一是以物质资本的形式在社会经济系统中不断积累^[43]。在长时间尺度下, 资源有限性决定了水泥、钢铁、铝等物质材料的生产量和使用量等流量指标具有明显的达峰过程。因此, 与能源消费量直接挂钩的物质规模变化会直接引起基础设施隐含碳的增量变化。

第二, 物质碳强度衡量了基础设施物质材料生产和使用等过程的低碳程度, 可以较好地反映节能减排技术发展与能源消费结构变化等多重因素如何作用于基础设施隐含碳的增量。一方面, 如果节能减排技术被广泛应用于降低水泥、钢铁、铝等工业的能耗强度, 那么其物质碳强度也会有所降低; 另一方面, 能源结构的持续优化有助于降低主要工业部门的能源消费碳强度, 进而削弱基础设施隐含碳的增量与物质材料的消耗规模之间的强相关关系, 这可由物质碳强度的变化所反映。

第三, 物质强度衡量了基础设施行业单位增加值的物质消耗量, 反映的是基础设施建设材料的利用效率。在基础设施隐含碳的增量分解中, 关注物质强度比关注能源强度更具直接意义。其一, 基础设施主要是以物质工程形式存在, 物质材料消耗对于基础设施及其在建成后所具备的经济服务功能具有直接贡献^[26]。其二, 在现有技术水平和能源结构下, 基础设施隐含碳的增量幅度在很大程度上取决于水泥、钢铁、铝等高耗能物质消耗量是否达峰。

此外, 鉴于基础设施长期以来是我国固定资产投资的重点领域, 而投资带来的资本深化是碳排放的重要促增因素, 因此本文在基础设施隐含碳的增量分解中, 进一步引入资本规模、资本碳强度和资本效率三个因素^[42]。其中, 资本规模反映了基础设施投资规模变化如何影响隐含碳的增量; 资本碳强度衡量基础设施投资的低碳程度; 资本效率则反映要素配置效率对碳排放的影响。

2. 分解模型选择。在方法选择上, 鉴于LMDI模型存在的缺陷, 本文采用广义迪氏指数分解法 (Generalized Divisia Index Method, GDIM)^[44]。该方法可以灵活识别碳排放的驱动因素, 尤其是能同时反映多组绝对量因素和相对量因素对碳排放的共同作用, 可以较好弥补现有指数分解方法的不足。

具体而言, 令 CE 为基础设施隐含碳的增量, GV 为基础设施行业增加值, M 为基础设施隐含物质的增量, K 为基础设施投资形成的资本增量 (即新增资本存量); $GCI = CE/GV$, 表示产出碳强度; $MCI = CE/M$, 表示物质碳强度; $KCI = CE/K$, 表示资本碳强度, 则基础设施隐含碳的增量可以写为:

$$CE = GV \times GCI = M \times MCI = K \times KCI \quad (5)$$

类似地, 令 $MI = M/GV$, 表示物质强度; $KE = GV/K$, 表示资本效率, 则有下列等式成立:

$$GV \times GCI - M \times MCI = 0 \quad (6)$$

$$GV \times GCI - K \times KCI = 0 \quad (7)$$

$$M - GV \times MI = 0 \quad (8)$$

$$GV - K \times KE = 0 \quad (9)$$

以函数 $CE(X)$ 表征因素 X 如何影响基础设施隐含碳的增量, 且令式 (6) ~ 式 (9) 分别对 GV 、 GCI 、 M 、 MCI 、 K 、 KCI 、 KE 、 MI 八个因子求偏导, 可以构造由相关因素组成的雅可比矩阵 Ω_x :

$$\Omega_x = \begin{pmatrix} GCI & GV & -MCI & -M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ GCI & GV & 0 & 0 & -KCI & -K & 0 & 0 \\ -MI & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -GV \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -KE & 0 & -K & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

根据GDIM的原理, 基础设施隐含碳的增量变化可以分解成各个因素贡献加总的形式:

$$\Delta CE [X|\Omega] = \int_T \nabla CE'(I - \Omega_X \Omega_X^+) dX \quad (11)$$

其中, T 表示时间跨度; $\nabla CE = (GCI\ GV\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$; I 表示单位矩阵; “+”表示广义逆矩阵; 若雅可比矩阵 Ω_X 中的列为线性无关, 则 $\Omega_X^+ = (\Omega_X^T \Omega_X)^{-1} \Omega_X^T$ 。

因此, 基础设施隐含碳的增量变化可以分解为八种效应之和: ΔCE_{GV} 、 ΔCE_M 、 ΔCE_K 、 ΔCE_{GCI} 、 ΔCE_{MCI} 、 ΔCE_{KCI} 、 ΔCE_{MI} 、 ΔCE_{KE} 。其中, 绝对量因素 ΔCE_{GV} 、 ΔCE_M 和 ΔCE_K 分别衡量了产出规模变化、物质规模变化、资本规模变化如何影响基础设施隐含碳的增量变动; 在剩余的相对量因素中, ΔCE_{GCI} 、 ΔCE_{MCI} 和 ΔCE_{KCI} 用于刻画产出碳强度、物质碳强度和资本碳强度变化如何作用于基础设施隐含碳的增量变化; ΔCE_{MI} 为物质强度变化带来的基础设施隐含碳的增量变化, ΔCE_{KE} 则衡量资本效率变动引起的基础设施隐含碳的增量变动。

鉴于数据可得性, 本文以1997年为基期, 对历年基础设施隐含碳的增量进行分解^①。其中, 基础设施隐含碳(物质)的增量数据可由本文第二部分的测算数据计算得出; 基础设施行业^②的增加值数据根据历年《中国工业统计年鉴》和投入产出表数据推算得出; 基础设施的资本增量数据在永续盘存法的基础上测算得到^[45]。为了确保数据的可比性, 基础设施增加值和资本增量均平减为2000年不变价。

(二) 分解结果及讨论

图4展示了基础设施隐含碳的增量变动情况。自1998—2023年, 基础设施隐含碳的增量变动

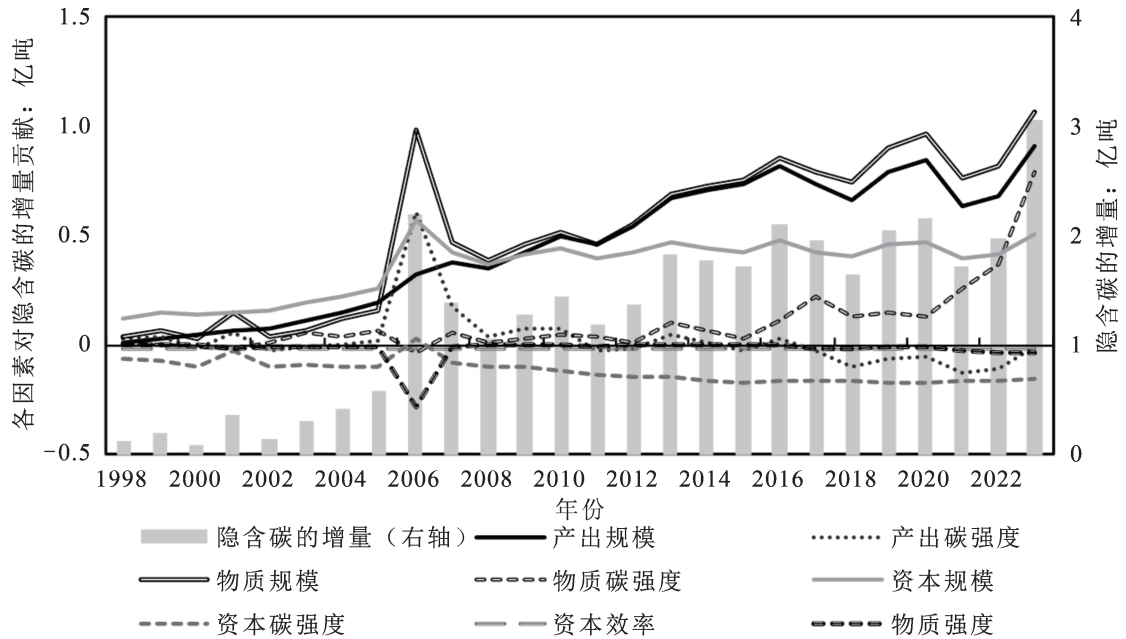


图4 历年基础设施隐含碳的增量分解与动因识别(1998—2023)

总体呈上升趋势。与1997年相比, 2023年基础设施隐含碳的增量提高了3.03亿吨。其中, 隐含碳的增量在2006年出现了高位增长。这与2006年起农村公路纳入等级公路统计里程以及我国在“十一五”期间实施的“五年千亿元”农村公路建设工程直接相关。此外, 2006年以来我国城市化进

① 即历年隐含碳的增量相对于1997年隐含碳的增量的变化值。

② 电力行业主要指电力生产产业和电力供应业; 公路行业指公路运输业。

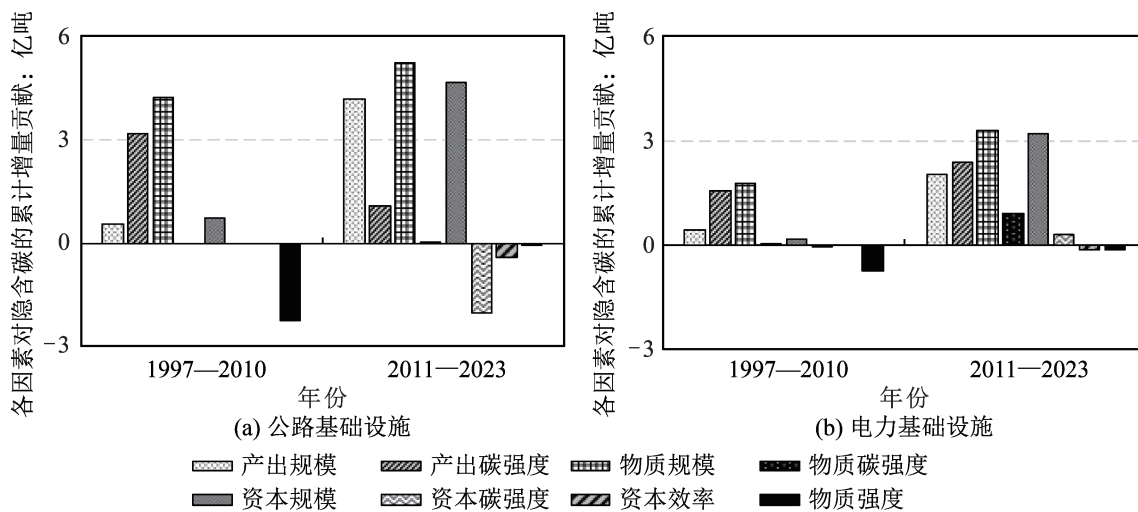
程的持续加快也催生了大规模基础设施投资，拉动了水泥、钢铁等重工业行业的蓬勃发展，进一步推动基础设施隐含碳的增量快速上涨。

从图4可以看出，物质规模（ M ）、产出规模（ GV ）和资本规模（ K ）三大因素对基础设施隐含碳的增量上涨影响最大。数值上看，相比于1997年，物质规模增加所带来的隐含碳的增量由1998年的0.04亿吨上涨到2023年的1.07亿吨，年均增速为13.83%。产出规模的扩大整体推高了基础设施隐含碳的增量，说明经济增长和基础设施隐含碳具有较强的关联效应。资本规模变化导致的隐含碳的增量在2006年达到顶峰，此后略微呈下降趋势，并在2023年达到了0.50亿吨。值得注意的是，物质碳强度（ MCI ）也促使隐含碳的增量在2015年之后出现了较为明显的上升趋势，说明现阶段我国低碳发展和节能减排仍然具有较大改善空间。此外，资本碳强度（ KCI ）和物质强度（ MI ）两大因素降低了基础设施隐含碳的增量幅度，且物质强度的促降效应主要体现在2010年之前。

从材料端审视，基础设施隐含碳主要来源于水泥、钢铁、铝材等建筑材料的生产、加工和使用过程。考虑到不同工业化阶段的发展模式、生产工艺和能效水平差异对建筑材料生产制造过程的碳排放具有较大影响，本文进一步将样本期划分为工业化前期（1997—2010年）和工业化后期（2011—2023年）两个阶段^[46]，分别对不同阶段内基础设施隐含碳的累计增量进行分解。结果显示^①，与工业化前期相比，产出规模（ GV ）、物质规模（ M ）和资本规模（ K ）等规模因素对基础设施隐含碳的促增效应在工业化后期显著增长。但产出碳强度（ GCI ）的促增效应有所下降，而资本碳强度（ KCI ）和资本效率（ KE ）的促降效应明显增强。此外，物质碳强度（ MCI ）在工业化后期表现为促增效应，且物质强度（ MI ）的促降效应有所下降。

（三）异质性分析

考虑到不同基础设施的投资结构与建设用材存在较为明显的差异，碳减排策略理论上需要根据其发展特征进行相应调整，因此本文进一步对两类基础设施隐含碳的累计增量进行分解剖析，结果如图5所示。



注：资料来源：作者绘制。
图5 公路和电力基础设施隐含碳的累计增量分解与动因识别

规模效应方面，各因素对公路和电力基础设施隐含碳的累计增量均保持一致的影响方向，产出规模（ GV ）、物质规模（ M ）与资本规模（ K ）仍是主要促增因素，说明基础设施建设的“规模

^① 限于篇幅，未展示具体结果，留存备索。

效应”显著存在。对比发现, 相较电力基础设施, 公路基础设施的“规模效应”更大。以资本规模为例, 其对公路基础设施隐含碳的累计增量的促增效应在工业化前期约为电力基础设施的4.8倍, 在工业化后期也接近1.5倍。可能解释是公路基础设施的建设规模与投资体量远大于电力基础设施。1997—2023年, 公路和电力基础设施资本增量的累计变动分别约为1 190.31亿元和791.89亿元, 公路投资规模超过电力投资规模的1.5倍。上述结果说明, 投资规模扩张与基础设施隐含碳的增量上涨具有较强的联动作用。

强度因素方面, 资本碳强度 (KCI) 对于两类基础设施隐含碳的累计增量具有差异化影响。具体而言, 资本碳强度对公路隐含碳的累计增量呈现出先促增后促降的影响趋势, 而对电力隐含碳的累计增量则产生了相反影响。特别是在工业化后期, 资本碳强度的促降效应明显增强, 直接降低了公路隐含碳的增量。此外, 物质强度 (MI) 对两类基础设施隐含碳的累计增量虽然均表现出了促降效应, 但对公路隐含碳的影响更为明显。物质碳强度 (MCI) 和资本效率 (KE) 的促降效应则较弱。

四、基础设施隐含碳的演化情景

(一) 分析思路与情景设定

1. 分析思路。考虑到物质强度 (MI) 和物质碳强度 (MCI) 是本文重点关注的影响因素, 且基础设施隐含碳的增量上涨主要由投资规模 (K) 所驱动, 因此本文基于上述因素, 首先模拟未来基础设施隐含碳的增量演化情景, 进而分析基础设施隐含碳的潜在存量水平。

具体而言, 可以将基础设施隐含碳的增量写成如式 (12) 所示的形式:

$$CE = K \times \frac{CE}{K} = K \times \frac{GV}{K} \times \frac{M}{GV} \times \frac{CE}{M} = K \times KE \times MI \times MCI \quad (12)$$

进一步地, 可以得到基础设施隐含碳的增量变化速度为:

$$\varphi_{CE} = (1 + \varphi_K) \times (1 + \varphi_{KE}) \times (1 + \varphi_{MI}) \times (1 + \varphi_{MCI}) - 1 \quad (13)$$

由式 (13) 可知, 基础设施隐含碳的增量幅度主要由投资规模、投资效率、物质强度和物质碳强度的增速变化共同决定。在此基础上, 通过合理设定各个影响因素的未来变化趋势, 即可得到未来基础设施隐含碳的潜在增量。

2. 情景设定。为识别合理的减排路径, 本文在设定各因素潜在变化率时考虑了三类情景, 包括基准发展情景、政策发展情景和技术改进情景, 并对基础设施隐含碳的增量在不同情景下的变化趋势进行相应分析。具体而言, 本文主要采用蒙特卡洛方法对2024—2030年的基础设施隐含碳的增量进行模拟, 并将2023年作为各个不同情景的起始年份。蒙特卡洛方法可以充分考虑各因素增速变化的不确定性, 通过分析相关变量演化的概率分布, 识别目标变量的最大可能演变路径, 因此便于和情景分析有效结合, 对基础设施隐含碳的增量演化趋势进行合理预判。

各个情景的基本设定思路如下。

(1) 基准发展情景。该情景是基于基础设施的发展规律, 结合各因素的历史变化趋势进行外推所得到的可能情景。主要思路是假定技术发展水平不变, 且不采取新的工艺改进与节能减排措施, 而是参考各个因素的历史增速变动情况, 对2024—2030年的因素变化率进行设定。本文以五年为一个阶段, 分段设定各因素的潜在年均变化率。具体而言, 本文首先计算出各因素在1997—2023年、2003—2023年、2008—2023年、2013—2023年、2018—2023年的年均变化率。在此基础上, 将2024—2030年各因素潜在年平均变化率的最小值及最大值对应设定为上述5个时期中的最

小值和最大值。对于介于中间的三个年均变化率，本文考虑到因素演变的惯性趋势，将距离2024—2030年最近时期的年均变化率作为各因素潜在年均变化率的中间值，具体的增速设定如表2所示。

表2 基准发展情景的增速设定(%)

影响因素	2024—2030年		
	最小值	中间值	最大值
K	4.94	10.13	12.77
KE	-3.89	-1.89	0.26
MI	-7.48	-3.30	-3.08
MCI	3.17	3.36	13.61

(2) 政策发展情景。在此情景下，本文进一步考虑经济社会的低碳发展趋势和2030年前碳达峰目标，重点梳理和分析政府出台的相关政策，并根据政策文件在经济增长、资源消耗以及公路和电力基础设施建设投资等方面的相关规划性指标和约束性目标，对各因素的潜在年均变化率进行设定，如表3所示。

表3 政策发展情景的增速设定(%)

影响因素	2024—2030年		
	最小值	中间值	最大值
K	8.12	9.12	10.12
KE	-4.75	-3.75	-2.75
MI	-2.88	-0.88	1.12
MCI	-3.19	-2.79	-2.39

具体而言，各因素潜在增速的设定过程如下。

资本规模(K)的增速设定。电力建设投资方面，根据中电联规划发展部的预测数据和中国电力建设企业协会发布的《中国电力建设行业年度发展报告2022》，“十四五”和“十五五”期间我国年度电力建设投资分别约为1.06万亿元和1.43万亿元。公路建设投资方面，根据《国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知》(国发〔2021〕27号)、《加快建设交通强国五年行动计划(2023—2027年)》(交规划发〔2023〕21号)以及中共中央和国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》(2021年第8号)，公路网作为今后一段时期的建设重点，有望保持较高增速。基于上述政策文件和“十三五”期间公路里程实际增速和投资额，本文推算“十四五”和“十五五”期间年均公路建设投资约为2.08万亿元和2.18万亿元。在此基础上，可以得到在满足政策目标约束下，2024—2030年两类基础设施总投资增速约为9.12%，本文将此作为资本规模潜在变化率的中间值。资本规模潜在变化率的最小值和最大值，在中间值的基础上分别调减和调增1个百分点得到^[42]。

资本效率(KE)的增速设定。根据历史增长规律，1997—2023年公路和电力行业增加值占全国增加值的比重基本稳定在5%，因此可用全国经济增速近似推测公路和电力行业增加值增速。参考2021—2023年全国GDP实际增速和现有研究关于“十四五”时期和“十五五”时期我国潜在经济增长率的预测结果^[47]，本文设定2024—2030年公路和电力行业增加值的增速中间值为5.03%。进一步地，结合上文对于资本规模的增速设定，可以得到资本效率潜在变化率的中间值为-3.75%。类似地，资本效率潜在变化率的最大值和最小值在中间值的基础上上下浮动1个百分点得到。

物质强度 (MI) 的增速设定。考虑到基础设施建设的物质需求主要取决于基础设施建设规模, 而电力需求增速与电力基础设施规模增长具有较高的一致性, 本文基于中国电力建设企业协会预测的 2024—2030 年用电量增速, 将电力基础设施物质规模的潜在增速设定为 3.94%。受限于数据可得性, 本文假定 2024—2030 年公路物质规模的潜在增速与 2011—2020 年相同, 为 4.12%。在此基础上, 根据历年公路和电力设施物质规模在总物质规模中的占比, 得到 2024—2030 年两类基础设施总物质规模的潜在变化率为 4.10%。进一步地, 基于上文对于基础设施行业增加值变化率的预测, 可以得到物质强度潜在年均变化率的中间值为 -0.88%。考虑到施工建设的不确定性, 物质强度潜在变化率的最小值和最大值分别在中间值的基础上向下和向上调整 2 个百分点。

物质碳强度 (MCI) 的增速设定。本文测算结果表明, 基础设施隐含碳的增量约有 90% 由钢铁、水泥以及有色金属 (主要指铝和铜) 所引致。根据《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》(工信部联原〔2022〕6号), 到 2025 年我国将完成 80% 以上的钢铁超低排放改造, 吨钢综合能耗降低 2% 以上。现有研究^[48]认为, 在高需求叠加强化控排的情景下, 2025 年和 2030 年我国吨钢碳强度将分别下降到 1.61 和 1.41。本文使用的钢铁碳排放系数中间值约为 1.95, 据此可以近似推算出 2024—2030 年钢铁碳强度的年均增速约为 -2.95%。根据《四部门关于印发建材行业碳达峰实施方案的通知》(工信部联原〔2022〕149号) 与 2020 年我国水泥行业碳强度 (约为 0.576~0.617)^{[49][50]}, “十四五”期间水泥需求仍存在上升空间, 引致相应碳排放有所上涨, 但水泥产量和碳排放将在“十五五”时期趋于平缓。基于此, 本文推算得出 2024—2030 年我国水泥碳强度的年均增速约为 -0.64%。《“十四五”循环经济发展规划》(发改环资〔2021〕969号) 提出 2025 年我国再生有色金属产量达到 0.2 亿吨。根据《有色金属行业碳达峰实施方案的通知》(工信部联原〔2022〕153号) 的主要目标, 推算得出 2025 年我国有色金属总供应量约为 0.83 亿吨。中国有色金属工业协会预测我国有色金属产业将于 2025 年左右达到碳排放峰值 7.5 亿吨左右, 结合 2020 年我国有色金属实际供应量和碳排放量, 可推算得到 2021—2025 年有色金属碳强度增速的中间值约为 -4.44%。鉴于“十五五”期间再生铝和再生铜产量将逐步增加, 推动有色金属碳排放持续下降, 因此本文设定 2026—2030 年有色金属碳强度的中间值增速为 -5.44%。在此基础上, 结合钢铁、水泥和有色金属碳排放在基础设施隐含碳的增量中的占比, 本文估计得到 2024—2030 年基础设施物质碳强度的增速变化为 -2.79%。物质碳强度增速的最小值和最大值分别基于中间值上下浮动 0.4 个百分点得到^[42]。

(3) 技术改进情景。技术改进对于基础设施隐含碳的影响可能兼具促增效应和促降效应的双重属性。促增效应方面, 当前我国正处于构建现代化基础设施体系的全面部署阶段, 以科技创新为引领的传统基础设施转型升级与新型基础设施建设发展加速推进^[51]。以电力基础设施为例, 在加快构建新型能源体系的背景下, 我国特高压关键技术接连取得重大突破, 推动特高压电网建设全面展开。伴随着《国家发展改革委 国家能源局关于促进新能源消纳和调控的指导意见》(发改能源〔2025〕1360号) 等一系列文件相继实施, 预计“十五五”时期特高压输电设施以及变电站等电力基础设施将保持高强度投资和建设, 由此可能推动基础设施隐含碳的增量有所上涨。

促降效应方面, 作为节能减排的关键支撑, 绿色低碳技术的改进与突破对于提升资源利用效率和降低关键物质材料的碳排放强度具有重要作用^[52]。《国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》(国发〔2021〕23号) 强调, “十五五”期间要在绿色低碳技术取得关键突破, 并支持已取得突破的绿色低碳关键技术开展产业化示范应用, 加快推动钢材、建材、有色金属等行业开展节能降碳改造。在此背景下, 单位基础设施建设的物质材料投入以及相应物质的碳强度有望得到较为显著的下降, 有利于从材料端减少基础设施隐含碳的增长幅度。

因此, 综合考虑特高压等技术发展与节能减排技术改进, 本文在政策发展情景的基础上, 进

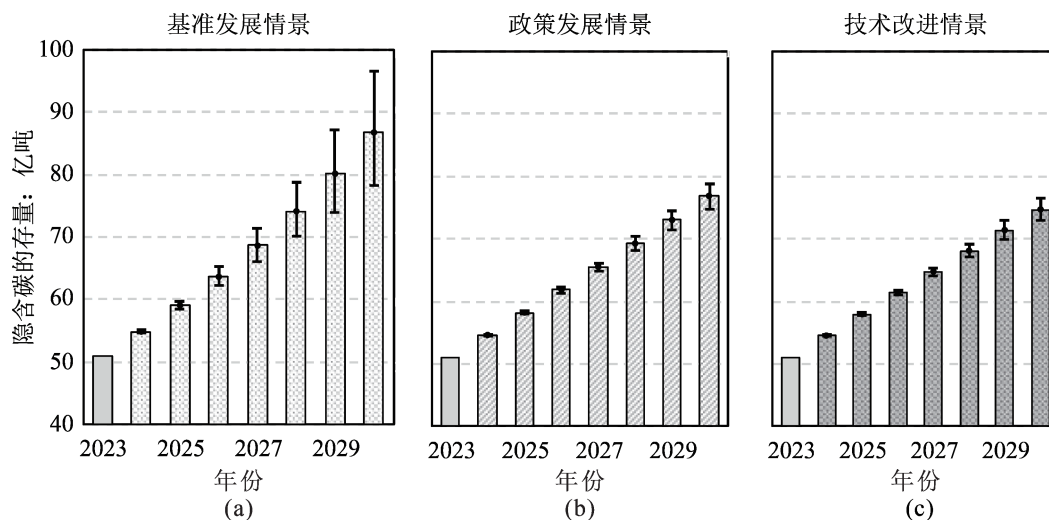
一步对2024—2030年各类因素潜在变化率的中间值进行强化调整。具体而言，在资本规模（ K ）与资本效率（ KE ）增速设定上，参考既有文献的做法^[42]，将投资效率和资本投入的潜在增速上调1个百分点，以反映资本利用效率的提升效应与投资结构的优化效应。同时，考虑技术进步对能源与物质消耗的影响以及绿色低碳技术推广与能源结构优化的协同效应^[53]，在假设物质投入（ M ）下调1%、经济产出（ GV ）上调1%的前提下，推算物质强度（ MI ）整体下调约2个百分点。此外，基于技术进步情况下能源强度会下降约4.23%^[54]与能源碳强度增速会增加约0.2%的假设^[53]，进一步结合上文物质强度（ MI ）的下调幅度，将物质碳强度（ MCI ）的增速下调约2个百分点，如表4所示。

表4 技术改进情景的增速设定(%)

影响因素	2024—2030年		
	最小值	中间值	最大值
K	9.12	10.12	11.12
KE	-3.75	-2.75	-1.75
MI	-4.88	-2.88	-0.88
MCI	-5.19	-4.79	-4.39

(二) 结果分析与讨论

1. 基础设施隐含碳的存量演化趋势。基于上述的情景假设，本文采用蒙特卡洛方法预测基础设施隐含碳的增量，进而得到其潜在存量水平。在已知变量取值范围和最可能出现结果但未知其概率分布的情况下，选择三角分布较为合理^[42]。本文中各因素潜在年均变化率最可能出现的结果即表2至表4的中间值。为此，本文选择三角分布建立起最小值、中间值和最大值之间的概率分布关系。模拟过程则是随机抽取各变量在取值区间的任意值，并给出所有的可能结果及概率分布。本文使用Matlab软件对基准发展情景、政策发展情景以及技术改进情景下基础设施隐含碳的增量进行了10万次模拟。在此基础上，通过结合起始年份（2023年）基础设施隐含碳的存量水平与历年增量数据，即可得到2024—2030年基础设施隐含碳的存量预测值。为直观展示基础设施隐含碳的存量演化趋势，本文结合模拟结果的概率分布，绘制了不同情景下隐含碳的存量水平及95%的上下置信区间，如图6所示。



注：浅灰色柱形代表起始年份（2023年）基础设施隐含碳的存量；灰色图案柱形及圆点代表基础设施隐含碳的存量在2024—2030年间的最大可能演化路径，柱形顶部实线为95%水平的上下置信区间。资料来源：作者绘制。

图6 基础设施隐含碳的存量演化趋势

图6表明,在基准发展情景中,基础设施隐含碳的存量将出现快速上涨。到2030年,基础设施隐含碳的存量达78.17亿~96.66亿吨的水平,最大可能存量值为86.76亿吨,接近2023年存量水平的1.6倍。而在政策发展情景中,基础设施隐含碳的存量增速有所放缓,到2030年最有可能达到76.81亿吨,较基准发展情景显著下降,且其浮动区间也明显缩窄,说明我国政府采取的一系列减排举措和制定的相关规划性、约束性目标能够显著减缓基础设施隐含碳的存量增长。在技术改进情景中,基础设施隐含碳的存量增速进一步放缓,2030年最大可能出现的存量水平约为74.66亿吨,较政策发展情景略有下降,但降幅较小。考虑到新基建的加速推进会增大基础设施投资规模及隐含碳的存量,因此,可以降低物质强度和物质碳强度的绿色低碳技术创新可能是减缓基础设施隐含碳增长的重要助推手。

表5进一步汇报了基础设施碳效用在不同情景下的变动情况。可以发现,在2024—2030年间,基础设施的碳效用整体有所下降,表明基础设施隐含碳的存量增速快于实际GDP增速。同时,碳效用的年均降幅在基准发展情景、政策发展情景以及技术改进情景中依次递减,分别达到2.66%、0.95%和0.55%。尤其在技术改进情景中,年均降幅显著小于基准发展情景。由于假设物质强度与物质碳强度在该期间的降速更快,上述结果表明,低碳技术创新对于提升基础设施碳效用具有明显的积极作用。考虑到碳减排的现实需要以及碳效用的下降趋势,下一阶段仍有必要对基础设施建设采取更加严格的减排政策和更大力度的规制举措。

表5 不同情景下的基础设施碳效用(万元GDP/吨)

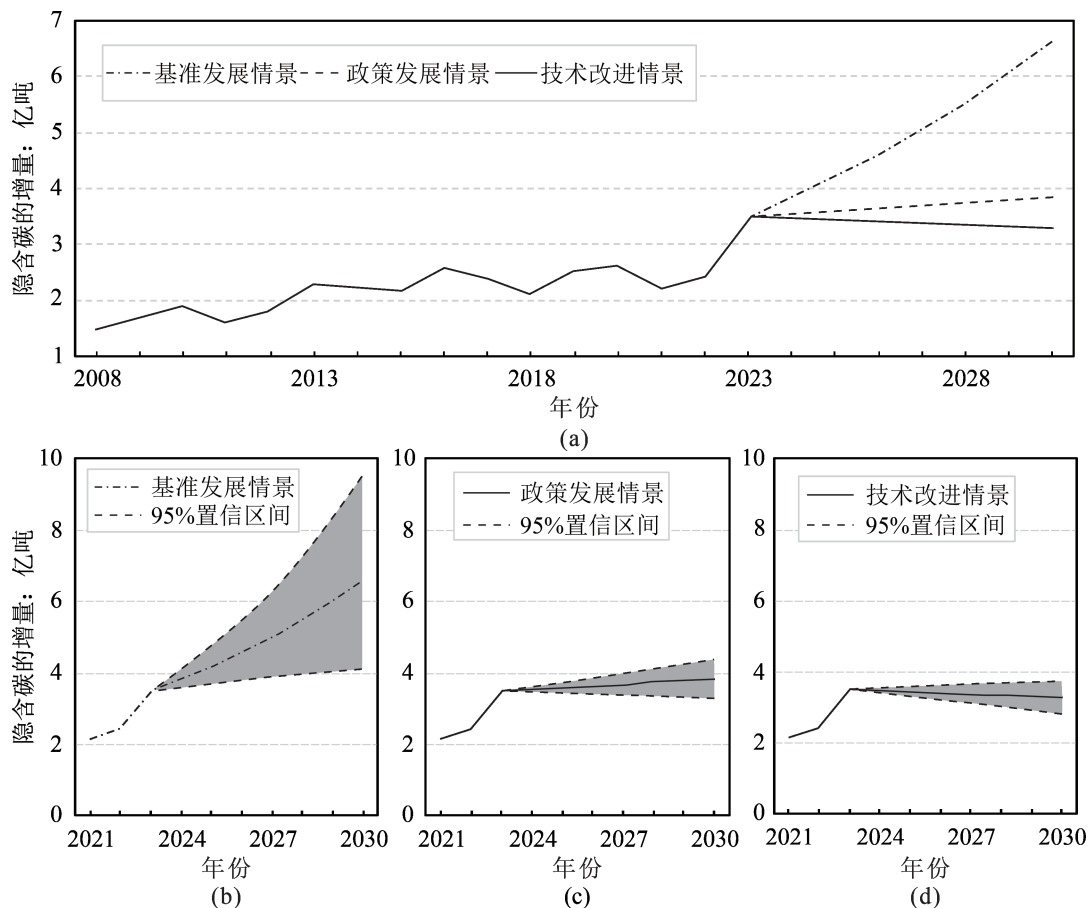
年份	基准发展情景		政策发展情景		技术改进情景	
	基础设施碳效用	年均增速	基础设施碳效用	年均增速	基础设施碳效用	年均增速
2024	1.193 7	-2.66%	1.199 8	-0.95%	1.201 5	-0.55%
2025	1.167 4		1.184 9		1.189 6	
2026	1.139 5		1.172 9		1.181 7	
2027	1.108 9		1.162 1		1.175 8	
2028	1.076 3		1.152 6		1.172 0	
2029	1.042 9		1.145 2		1.171 0	
2030	1.008 3		1.138 9		1.171 7	

注:基础设施碳效用=实际GDP/基础设施隐含碳的存量。

2. 基础设施隐含碳的增量演变路径。鉴于基础设施隐含碳的存量演化趋势与增量变化直接相关,因此本文也绘制了不同情景下基础设施隐含碳的增量演变路径,如图7所示。

在基准发展情景中,基础设施隐含碳的增量将出现较大幅度的增长。在不采取节能减排举措的情况下,2030年前我国基础设施隐含碳的增量将保持较高增速。2030年,基础设施隐含碳的增量最有可能达到6.61亿吨,并在4.11亿~9.59亿吨的区间浮动。以最有可能出现的数值进行计算,2024—2030年基础设施隐含碳的增量年均增长9.5%。上述结果表明,若延续历史发展趋势而不采取相应的减排措施,基础设施隐含碳的增量在2030年前会出现高速增长,不利于我国实现碳达峰目标。因此,有必要采取节能减排举措,加快摆脱粗放式的基础设施建设模式。

在政策发展情景中,基础设施隐含碳的增量显著下降,且上下浮动区间明显收窄。2030年的基础设施隐含碳的增量约为3.30亿~4.36亿吨,最大可能达到3.82亿吨,相较基准发展情景的水平下降超过40%。2024—2030年基础设施隐含碳的增量年均增长放缓至1.2%。这一结果意味着政府加强对基础设施建设投资及相关建筑材料的节能减排管控,是防止基础设施隐含碳快速增长的必要途径。然而,该情景中基础设施隐含碳的增量仍然保持上升趋势,说明还需要进一步提升节能减排成效,采取更为严格的降碳措施。



注：资料来源：作者绘制。

图7 2024—2030年基础设施隐含碳的增量演变路径

在技术改进情景中，基础设施隐含碳的增量在2024—2030年呈现平缓下降趋势。至2030年，基础设施隐含碳的增量将降低至2.83亿~3.75亿吨，最有可能出现在3.28亿吨的水平，与2023年较为接近。上述结果表明，科技创新，尤其是低碳技术创新有助于推动基础设施隐含碳的增量下降，有效减缓基础设施隐含碳的增长。

3. 政策发展情景和技术改进情景下的因素贡献分解。上文的分析表明，基础设施隐含碳的增量在政策发展情景与技术改进情景中会显著放缓。为厘清基础设施隐含碳的增量影响因素及其贡献差异，本文以2023年为基期，进一步利用GDIM对2024—2030年政策发展情景和技术改进情景下隐含碳的累计增量进行分解^①。由于各类情景中的增速设定及模拟结果为区间值，本文选取最有可能出现的碳排放结果进行分解，如图8所示。

在政策发展情景中，2024—2030年间基础设施隐含碳的累计增量变动约为1.23亿吨。其中，产出规模（GV）、物质规模（M）和资本规模（K）对基础设施隐含碳的增量仍然具有显著的促增效应。产出规模和物质规模的促增作用较为接近，分别为1.35亿吨和1.25亿吨，资本规模引致的增量规模则大约为1.56亿吨。基础设施隐含碳的增量下降主要受益于产出碳强度（GCI）、物质碳强度（MCI）和资本碳强度（KCI）的改善，三者对基础设施碳减排的贡献分别达到-0.94亿吨、-0.83亿吨和-1.09亿吨。资本效率（KE）和物质强度（MI）对于基础设施隐含碳的增量也具

^① 这是政策发展情景和技术改进情景充分考虑了政策约束和技术进步的双重影响，能够更准确地反映基础设施隐含碳的增量演变路径。

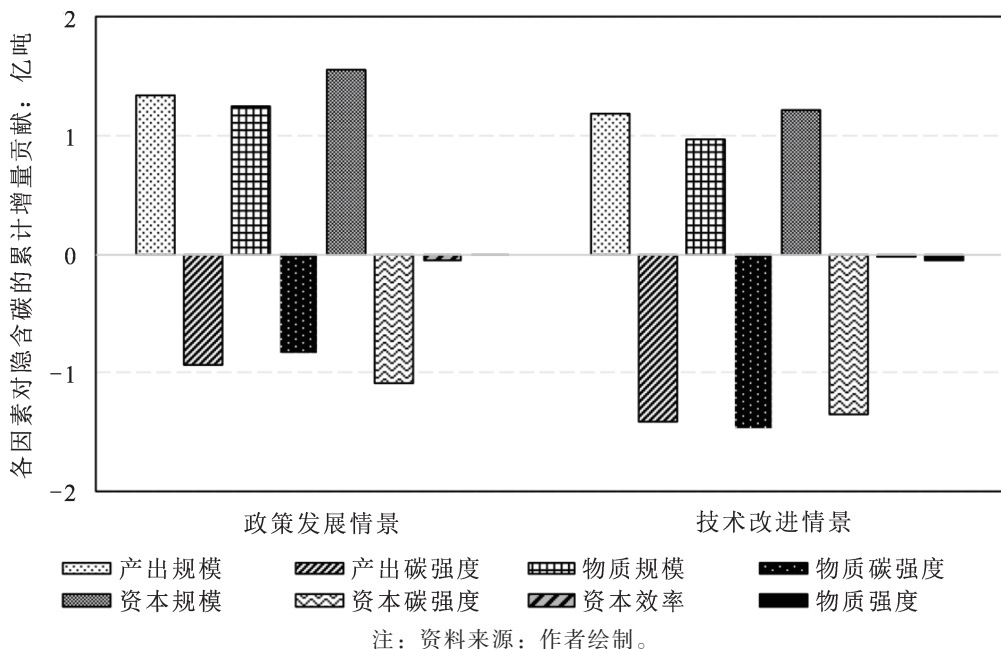


图8 2024—2030年基础设施隐含碳的增量分解

有促降效应，但贡献较小。

在技术改进情景中，各因素贡献在方向上与政策发展情景基本保持一致。产出规模（GV）、物质规模（M）和资本规模（K）等规模因素的促增效应均有所减小，且主要促降因素的作用得到显著增强。其中，物质碳强度的促降效应最大，达到-1.47亿吨，贡献增幅为76.35%；产出碳强度的促降效应次之，为-1.41亿吨，贡献增幅达到50.78%；资本碳强度的促降效应为-1.34亿吨，其对降低基础设施隐含碳的增量贡献相对较小，为22.90%。以上分解结果再次表明，节能低碳领域的技术突破对于基础设施隐含碳的增量下降具有关键作用，可以在保障产出规模增长的前提下更大程度地促进基础设施的碳减排。因此，需要更加注重基础设施领域的节能降碳技术研发及推广应用，赋能基础设施绿色升级。

五、研究结论和政策启示

作为经济社会运行的重要基石和具有巨大隐含碳的固定资产，基础设施理应率先承担必要的减排责任，为推动我国高质量发展和“双碳”目标实现提供坚强支撑。本文基于物质流分析方法，以公路和电力基础设施为例对我国基础设施隐含碳的存量进行测算，并采用广义迪氏指数分解方法（GDIM）对1997—2023年基础设施隐含碳的增量进行分解。进一步地，本文还采用蒙特卡洛方法，从存量和增量的双重视角对2030年前我国基础设施隐含碳的演化路径进行模拟分析，并识别了碳减排的主要贡献因素。研究发现以下几点。第一，2023年我国基础设施隐含碳的存量水平约为45.34亿~56.77亿吨。物质规模、产出规模和资本规模显著推动基础设施隐含碳的增量上涨，且物质规模的促增效应最为明显；相应地，资本碳强度和物质强度显著促进基础设施隐含碳的增量下降，而产出碳强度、资本效率的促降效应较弱。第二，公路和电力基础设施隐含碳的增量驱动因素存在显著区别，具体表现为：规模因素对公路隐含碳的增量产生了更大的促增效应；资本碳强度对公路隐含碳的增量具有先促增后促降的影响，而对电力隐含碳的增量影响正好相反。第三，在不同情景中，2024—2030年基础设施隐含碳的存量逐年上涨，但隐含碳的增量演化路径存

在较大差异。在基准发展情景和政策发展情景中，基础设施隐含碳的增量将持续增长，最大可能年均增速分别为9.5%和1.2%；在技术改进情景中，综合考虑新基建发展和低碳技术创新，基础设施隐含碳的增量稳步下降，并有很大可能在2030年降低到2023年的相近水平。且相比政策发展情景而言，技术改进情景中产出碳强度、资本碳强度和物质碳强度等强度因素的促降作用更强，说明低碳技术创新是推动基础设施碳减排的关键路径。

本文的研究结论对于制定基础设施的碳减排策略，推动基础设施低碳发展具有一定的启示意义。第一，应当重视规模因素和强度因素对基础设施隐含碳的综合影响，推动基础设施实现质的有效提升和量的合理增长。一方面，要警惕投资等规模因素扩张对基础设施隐含碳的促增效应。可以考虑将碳排放绩效指标纳入基础设施投资项目立项与审批环节，在基础设施专项债、PPP项目管理中建立碳约束机制，注重提升基础设施的投资质量和投资效率，强化基础设施投资的绿色低碳导向。另一方面，要加快提高基础设施建设材料的资源利用效率。特别是要加速推动钢铁、铝和水泥等相关行业的节能行动和低碳转型，通过绿色制造体系建设、资源循环利用、CCUS应用等措施，降低物质碳强度和物质强度，增强这些关键因素对于基础设施隐含碳的促降效应。

第二，应该统筹基础设施的存量和增量，兼顾基础设施本身的高碳属性和服务功能，延续、提升基础设施的碳效用。对于存量基础设施，需要着力提高利用效率，延续、提升其经济社会效益，推动老旧基础设施绿色改造与智能化管理，建立全生命周期的基础设施碳核算与监测机制。对于增量基础设施，则应重视基础设施结构优化，基于不同基础设施隐含碳的影响因素差异，因类施策制定相应的碳减排方案。公路基础设施领域，应重视优化投资结构和项目布局，科学评估新增项目的交通需求与碳排放绩效，防止以投资拉动为主导的盲目扩张。可以考虑重点向运输效率高、能耗低的路网节点和瓶颈路段倾斜投资，推动存量道路的提质改造与数字化管理，从而实现投资增长与碳效用提升的协同。电力基础设施方面，考虑到其建设用材主要以钢铁、铝材、铜等高碳物质材料为主，应将节能降碳要求贯穿于全生命周期。尤其是要重点推动上游材料行业的低碳冶炼和绿色转型，加快推广高强度轻质合金材料、回收再生材料等新型低碳建材。同时，在电力工程建设环节，也应强化设计阶段的碳绩效评估和资源配置优化，提高单位物质投入的能源与碳利用效率，降低电力基础设施建设的物质强度和碳强度。

第三，应当协同推进传统和新型基础设施建设，加快技术迭代和演进升级，进一步增强基础设施碳减排的科技支撑。同时，应加快发挥新型基础设施的创新驱动作用和数字服务功能，加速新旧基础设施融合发展，以新技术赋能传统基础设施绿色转型。例如，车联网可以对公路基础设施的状态进行监控和预测，从而实现道路交通的实时调度，优化交通流量的能耗行为；智慧能源基础设施通过人工智能和大数据技术精准识别终端高耗能环节，优化电力负荷与调度，实现能源消费结构的低碳转型。此外，考虑到以降低物质强度和物质碳强度为代表的低碳技术改进对于减少基础设施隐含碳的增量具有关键作用，应该引导传统和新型基础设施建设领域的相关企业加大低碳科技攻关的研发投入。可以考虑适度加强相关的财税政策激励和投融资支持，加快完善绿色低碳技术的认证和评估体系，为相应的科技成果转化和产业化发展创造有利条件。

参考文献

- [1] Esfahani, H. S., M. T. Ramirez. Institutions, infrastructure, and economic growth[J]. *Journal of Development Economics*, 2003(2).
- [2] Dai, J., R. Alvarado, S. Ali, et al. Transport infrastructure, economic growth, and transport CO₂ emissions nexus: Does green energy consumption in the transport sector matter?[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023(14).

- [3] 唐葆君, 许沛响, 于芳, 等. 电力基础设施碳排放核算及减排潜力评估——以特高压交流工程为例[J]. 煤炭经济研究, 2024(1).
- [4] 刘建国, 朱跃中, 田智宇. “碳中和”目标下我国交通脱碳路径研究[J]. 中国能源, 2021(5).
- [5] Li, Y., X. Yang, E. Du, et al. A review on carbon emission accounting approaches for the electricity power industry[J]. *Applied Energy*, 2024, 359.
- [6] 朱于珂, 宋依纯. 考虑数字经济的城市能源回弹效应研究: 经验测算与形成机制[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025(2).
- [7] Bumby, S., E. Druzhinina, R. Feraldi, et al. Life cycle assessment of overhead and underground primary power distribution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010(14).
- [8] 张金喜, 苏词, 王超, 等. 道路基础设施建设中的节能减排问题及技术综述[J]. 北京工业大学学报, 2022(3).
- [9] 白静. 中国基础设施隐含碳时空变化特征及驱动因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [10] Jia, S., M. Liu. Embodied GHG emissions of high speed rail stations: Quantification, data-driven prediction and cost-benefit analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 366.
- [11] Ge, Z., Y. Geng, W. Wei, et al. Embodied carbon emissions induced by the construction of hydropower infrastructure in China[J]. *Energy Policy*, 2023, 173.
- [12] 潘家华. 碳中和: 需要颠覆性技术创新和发展范式转型[J]. 三峡大学学报(人文社会科学版), 2022(1).
- [13] Suwondo, R., M. Keintjem, A. D. Nataadmadja, et al. Towards greener highway infrastructure: Evaluating the embodied carbon and cost efficiency of rigid pavement designs[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2024(12).
- [14] Han, Y., H. Li, J. Liu, et al. Life cycle carbon emissions from road infrastructure in China: A region-level analysis[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 115.
- [15] Zhao, Y., X. Duan, M. Yu. Calculating carbon emissions and selecting carbon peak scheme for infrastructure construction in Liaoning Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 420.
- [16] 杜传忠, 曹雅慧, 孟天赐. 工业智能化影响中国工业绿色转型: 机制与效应[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025(3).
- [17] Müller, D. B., G. Liu, A. N. Løvik, et al. Carbon emissions of infrastructure development[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013(20).
- [18] Wei, W., J. Li, B. Chen, et al. Embodied greenhouse gas emissions from building China's large-scale power transmission infrastructure[J]. *Nature Sustainability*, 2021(8).
- [19] Kalt, G., P. Thunshim, D. Wiedenhofer, et al. Material stocks in global electricity infrastructures—An empirical analysis of the power sector's stock-flow-service nexus[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 173.
- [20] Na, H., Z. Qiu, J. Sun, et al. Revealing cradle-to-gate CO₂ emissions for steel product producing by different technological pathways based on material flow analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 203.
- [21] Huang, C., J. Han, W. Q. Chen. Changing patterns and determinants of infrastructures' material stocks in Chinese cities[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 123.
- [22] 李国昊, 肖进. 中国电力部门脱碳的驱动因素变化: 基于碳交易机制的视角[J]. 系统工程理论与实践, 2023(8).
- [23] 岳婷, 周静, 龙如银, 等. 中国城市居民生活碳排放因素分解与减碳潜力分析[J]. 系统工程理论与实践, 2024(12).
- [24] 张贵, 程一诺, 冯奎. 京津冀交通一体化高质量建设与区域经济发展耦合研究[J]. 区域经济评论,

2025(5).

- [25] Balaguera, A., G. I. Carvajal, J. Albertí, et al. Life cycle assessment of road construction alternative materials, a literature review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 132.
- [26] 李钢, 廖建辉. 基于碳资本存量的碳排放权分配方案[J]. *中国社会科学*, 2015(7).
- [27] Han, J., W. N. Xiang. Analysis of material stock accumulation in China's infrastructure and its regional disparity[J]. *Sustainability Science*, 2013(8).
- [28] Li, F., Z. Ye, X. Xiao, et al. Material stocks and flows of power infrastructure development in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 160.
- [29] 刘立涛, 张艳, 沈镭, 等. 水泥生产的碳排放因子研究进展[J]. *资源科学*, 2014(1).
- [30] 沈镭, 赵建安, 王礼茂, 等. 中国水泥生产过程碳排放因子测算与评估[J]. *科学通报*, 2016(26).
- [31] 章毅, 刘伟杰. 建设期沥青混凝土路面能耗与碳排放分析[J]. *公路*, 2015(1).
- [32] Liu, T., R. Zhao, Z. Xie, et al. Carbon emissions from accumulated stock of building materials in China[J]. *Building and Environment*, 2023, 240.
- [33] Yu, B., Q. Chen, N. Li, et al. Life cycle assessment of urban road networks: Quantifying carbon footprints and forecasting future material stocks[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 428.
- [34] 邹安全, 罗杏玲, 全春光. 基于 EIO~LCA 的钢铁产品生命周期碳排放研究[J]. *管理世界*, 2013(12).
- [35] Hasanbeigi, A., M. Arens, J. C. R. Cardenas, et al. Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the United States[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 113.
- [36] Kuckshinrichs, W., P. Zapp, W. R. Poganietz. CO₂ emissions of global metal-industries, the case of copper[J]. *Applied Energy*, 2007(7-8).
- [37] Chen, J., Z. Wang, Y. Wu, et al. Environmental benefits of secondary copper from primary copper based on life cycle assessment in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 146.
- [38] Dong, D., L. van Oers, A. Tukker, et al. Assessing the future environmental impacts of copper production in China, implications of the energy transition[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274.
- [39] 武娟妮, 万红艳, 陈伟强, 等. 中国原生铝工业的能耗与温室气体排放核算[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010(3).
- [40] 张文娟, 李会泉, 陈波, 等. 中国原铝冶炼行业温室气体排放模型[J]. *环境科学研究*, 2013(10).
- [41] 廖茂林, 许召元, 胡翠, 等. 基础设施投资是否还能促进经济增长? ——基于 1994—2016 年省际面板数据的实证检验[J]. *管理世界*, 2018(5).
- [42] 邵帅, 张曦, 赵兴荣. 中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J]. *中国工业经济*, 2017(3).
- [43] 张超, 王韬, 陈伟强, 等. 中国钢铁长期需求模拟及产能过剩态势评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018(10).
- [44] Vaninsky, A. Factorial decomposition of CO₂ emissions: A generalized Divisia index approach[J]. *Energy Economics*, 2014, 45.
- [45] 胡李鹏, 樊纲, 徐建国. 中国基础设施存量的再测算[J]. *经济研究*, 2016(8).
- [46] 黄群慧. 中国的工业化进程: 阶段、特征与前景[J]. *经济与管理*, 2013(7).
- [47] 中国社会科学院宏观经济研究中心课题组. 未来 15 年中国经济增长潜力与“十四五”时期经济社会发展主要目标及指标研究[J]. *中国工业经济*, 2020(4).
- [48] 汪旭颖, 李冰, 吕晨, 等. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022(2).
- [49] 贺晋瑜, 何捷, 王郁涛, 等. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022(2).
- [50] 白玫. 中国水泥工业碳达峰、碳中和实现路径研究[J]. *价格理论与实践*, 2021(4).

- [51] 於世为, 胡星, 何露, 等. 新型能源体系的内涵诠释、逻辑必然与要素解析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025(4).
- [52] 郎慧慧. 论新质生产力的大生态观[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025(1).
- [53] 林伯强, 刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略[J]. 经济研究, 2010(8).
- [54] 朱永彬, 王铮, 庞丽, 等. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测[J]. 地理学报, 2009(8).

Drivers Identification and Evolution Simulation of Embodied Carbon Emissions in China's Infrastructure

— A Case Study of Road and Power Infrastructures

ZHAN Yan-hong, ZHOU Jiong-liang, SUN Chuan-wang

Abstract: Infrastructures are significant engineering characterized by public, universal, and foundational features. They are also fixed assets that contain substantial embodied carbon emissions. Faced with increasingly stringent constraints on carbon emissions, reasonable control of embodied carbon growth in infrastructure is of significant importance for carbon reduction. This article assesses and decomposes the carbon stocks and carbon increments of China's infrastructures during 1993—2023, taking the road and power infrastructure as examples. The evolution scenarios of carbon stocks and carbon increments are simulated and analyzed. The results indicate that: Firstly, China's road and power infrastructures are estimated to embody a carbon stock of approximately 4.534 billion to 5.677 billion tons in 2023. The capital scale, material scale, and output scale are the main factors that drive the carbon increments up in infrastructures, while the driving down factors are capital carbon intensity and material intensity. Secondly, compared with power infrastructures, both the scale and intensity factors have more significant impacts on the changes in road infrastructures' carbon stocks. Thirdly, under different scenarios, infrastructure-related carbon stock in China is expected to exhibit a sustained upward trend through 2030. However, the evolution paths of carbon increments vary significantly. Under the scenario considering technological improvements related to new infrastructure development and low-carbon technology innovation, the carbon increments in infrastructures are projected to decline steadily before 2030. While in other scenarios, the carbon increments will continue to grow. The findings of this paper provide important insights for balancing the stock and increment of infrastructure and promoting low-carbon development of infrastructure.

Key words: infrastructures; embodied carbon; carbon emission space; factor decomposition; scenario simulation

(责任编辑 孙洁)