

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0008

李清瑶,张勇,胡民泉,等.“双碳”目标实现的省域实践:以浙江为例[J].生态与农村环境学报,2024,40(2):191-204.

LI Qing-yao,ZHANG Yong,HU Min-quan,et al.Provincial Practice of Achieving the "Dual Carbon" Target: Taking Zhejiang Province as an Example [J].Journal of Ecology and Rural Environment,2024,40(2):191-204.

“双碳”目标实现的省域实践：以浙江为例

李清瑶¹, 张勇¹*, 胡民泉², 俞洁¹ (1. 中国计量大学经济与管理学院, 浙江 杭州 310018; 2. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 浙江省实现碳达峰碳中和的目标是贯彻党中央提出的新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求。研究基于浙江省 2000—2019 年能源消费等统计数据,以长期能源替代规划系统模型(LEAP)和可拓展的随机性环境影响评估模型(STIRPAT)相结合,识别浙江省碳排放主要影响因素,构建并预测 6 种不同情景下浙江省 2015—2060 年的碳排放趋势、达峰时间和减排路径。结果表明,能源结构升级、能效提升和数字经济深耕高碳排放产业是浙江省当前低碳转型发展的关键驱动力。浙江省实现“双碳”目标需要所有终端能源使用部门实现低碳转型,优先考虑电力、工业和交通部门,其次是商业、居民生活、住宅、农业等部门。在各项节能减排举措的综合作用下,部分电力替代(PES)情景和综合电力替代(CES)情景下浙江省碳达峰时间分别为 2024 和 2025 年,达峰总量分别为 3.88 亿和 3.70 亿 t,可如期实现碳中和。考虑到进行碳统计时存在碳泄漏问题,浙江省应从 PES 情景出发,力争于 2025 年达到碳峰值,逐步提升可再生能源在其外购电中的比例,同时发挥数字经济在低碳治理中的作用,采取谨慎的碳中和路径过渡到 CES 情景,通过各终端能源使用部门利用碳捕捉、碳封存等降碳技术,如期甚至提早实现碳中和。

关键词: 双碳目标; STIRPAT 模型; LEAP 模型; 减排路径

中图分类号: X32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2024)02-0191-14

Provincial Practice of Achieving the "Dual Carbon" Target: Taking Zhejiang Province as an Example. LI Qing-yao¹, ZHANG Yong¹*, HU Min-quan², YU Jie¹ (1. College of Economics and Management, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Zhejiang Province's achievement of carbon peak and carbon neutrality is an internal requirement for implementing the new development concept, building a new development pattern, and promoting high-quality development, as proposed by the central government. Based on statistical data on energy consumption in Zhejiang Province from 2000 to 2019, a combination of the LEAP model and the STIRPAT model was used as a research tool to identify the main factors influencing carbon emissions in Zhejiang Province and to predict the carbon emission trends, peak time, and emission reduction paths for six different scenarios from 2015 to 2060. The results show that upgrading the energy structure, improving energy efficiency, and deepening the digital economy in high-carbon industries are the key driving forces for Zhejiang Province's current low-carbon transformation and development. To achieve the "Dual-Carbon" target, all end-use energy sectors need to achieve low-carbon transformation, with priority given to the electricity, industry, and transportation sectors, followed by commerce, residential life, housing, agriculture, and other sectors. With the comprehensive effect of various energy-saving and emission reduction measures, the carbon peak time for the Partial Electricity Substitution (PES) scenario and the Comprehensive Electricity Substitution (CES) scenario in Zhejiang Province is 2024 and 2025, respectively, with peak emissions of 388 million and 370 million tons, achieving carbon neutrality as scheduled. Considering the problem of carbon leakage in carbon accounting, Zhejiang Province should start from the PES scenario, strive to reach the carbon peak in 2025, gradually increase the proportion of renewable energy in its purchased electricity, and at the same time, play the role of the digital economy in low-carbon governance. From 2030 to 2035, it should accelerate the transition to the

收稿日期: 2023-01-05

基金项目: 浙江省软科学研究计划重点项目(2020C25033); 浙江省科技计划软科学重点项目(2020C25030)

*通信作者 E-mail: zhfk@cjlu.edu.cn

CES scenario, and achieve carbon neutrality as scheduled, or even earlier, by using carbon capture, carbon storage, and other decarbonization technologies in various end-use energy sectors.

Key words: double carbon target; STIRPAT model; LEAP model; emission reduction pathway

改革开放以来,受中国化石能源需求井喷式增长的驱动,碳排放总量呈现快速增长趋势,温室气体排放结构性问题也日益严峻^[1]。为践行“绿水青山就是金山银山”的可持续发展战略,在完成减污降碳环境目标的基础上探索高质量发展路径,实现党的二十大提出的广泛形成绿色生产生活方式、碳排放达峰后稳中有降、美丽中国目标基本实现的使命,要以供给侧结构性改革为主线^[2],各省域、各行业需在规定时间内实现绿色低碳发展方式的转变,明确降碳重点领域和方向,下活减污降碳这盘棋^[3]。

低碳发展表象是生态环境问题,核心是能源问题,实质是发展问题。在此背景下,相关学者陆续从不同角度开展碳排放预测及碳达峰时间的相关研究。在区域方面,HAO等^[4]基于中国近40a来碳排放数据构建碳排放动态模型,预测发现人均可支配收入和火力发电的增加将导致碳排放大量增加,且提高可再生能源比重是使我国碳排在2030年达到峰值的有效途径,峰值为12.276亿t;李莉等^[5]基于峰值模型和情景模拟法研究认为,在中低发展模式下新疆地区碳排放将于2025年达到峰值,而在其他发展模式下,由于环境规制的强度较弱,碳达峰出现的时间将会延迟;杜涵蓓等^[6]采用Kaya碳排放恒等式和长期能源替代规划系统模型(LEAP)预测南京市某辖区可于2030年前实现碳达峰目标,且人均生产总值和能源强度是影响主城区碳排放的重要因素。行业层面,LU等^[7]采用粒子群优化算法(PSO)和反向传播神经网络模型(BP)对中国重化工业碳排放量进行预测,结果表明在预设的缓解情景下,重化工业及其相应子行业的碳排放可以如期实现碳达峰;LI等^[8]基于4种不同情景对中国建筑业的碳峰值预测,除去低碳节能情景和技术突破情景,其他情景均无法如期实现碳达峰;苏钊贤等^[9]对黄河流域交通运输业碳排放驱动因素和碳排放趋势进行预测,发现交通运输强度、单位周转量能耗对碳排放增长起抑制作用,且不同情景下交通运输碳排放存在明显差异。

目前,由于选取的计算模型原理不同,容易导致现有研究碳排放预测理论模型的碳排放量被高估或低估。如何将宏观层面和微观层面相结合开展区域碳排放核算和预测有待突破。随机性环境

影响评估模型(STIRPAT)由人类对自然环境影响的经济学方程模型(IPAT)发展而来,主要从宏观层面描述人类社会系统与自然环境之间的复杂关系,被广泛应用于碳排放峰值预测研究。而LEAP模型是基于微观层面的长期能源替代规划系统模型,该模型在能源政策制定和气候变化评估中得到广泛应用。

作为可充分体现中国特色社会主义制度优越性的经济强省,浙江不仅是共同富裕示范区的典型区域,还存在能源消费大省、能源资源小省的困境。虽然浙江省重污染项目较少,第三产业已占据绝对主导地位,在高质量发展方面具备较好基础,但也面临能源消费总量和碳排放总量较高等问题,亟需在明确碳减排重点领域的基础上制定合理化减排路径,以平稳实现低碳转型。因此,该研究采用改进的STIRPAT模型和LEAP模型,基于情景分析法探究浙江省碳排放变化趋势、主要影响因素、重点减排领域及如期甚至提前实现“双碳”目标的路径,为其他省域实现碳达峰碳中和提供参考和借鉴。同时对比现有其他研究,发现存在以下异同:首先,现有研究多聚焦于浙江省“双碳”目标的减排重点领域,而就减碳路径的相关研究分析较少,且现有研究大多忽略了数字技术发展对浙江省碳减排的助力;其次,现有研究大多只考虑区域直接碳排放,而忽视了进口电力、煤炭产生的间接碳排放,笔者在探索浙江实现“双碳”目标的途径时,不仅考虑了地理边界内的直接碳排放,还考虑了从浙江省外转移的电力所造成的间接碳排放;第三,现有研究多采用多元线性回归方程预测碳排放趋势,此类模型可能会低估技术进步的减排潜力,从而高估碳排放量。该研究则基于STIRPAT模型和LEAP模型相结合的能源排放模型,研究不同政策情景下浙江省碳排放的未来趋势,为浙江省碳减排提供更全面、实用的政策建议。

1 研究方法 with 情景设置

1.1 数据来源

研究根据数据可获得性以及最新的各类能源和社会经济规划的时间范围,选取2015年作为基期,预测期为2020—2060年,关键时间点的选取参考吴唯等^[10]的研究,确定为2020、2025、2030和

2060年。研究范围涵盖浙江省能源的终端消费、输送以及相关的能源加工转化部门,相关数据主要包括能源历史消费数据和情景设置参数。相关历史数据和变量来源于《浙江省统计年鉴》《浙江自然资源与环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国生态环境统计年鉴》等,更详细的现状数据来自课题组对相关管理部门的调研访谈。此外,能源的碳排放因子源于 LEAP 模型中的技术和环境数据库。

1.2 研究方法

1.2.1 STIRPAT 及其改进模型

作为研究能源经济和碳排放峰值的重要方法之一,STIRPAT 模型能分解各影响因素,也允许将各系数作为参数进行估计。STIRPAT 模型的基本形式如式(1)所示,取式(1)两侧的对数可得到式(2)。

$$I = aP^b A^c T^d, \quad (1)$$

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T. \quad (2)$$

式(1)~(2)中, I 为环境负荷; P 、 A 和 T 分别为人口规模、经济富裕程度和技术水平^[11]; a 为常数项; b 、 c 、 d 分别为 P 、 A 、 T 的指数项。由于不同研究的目的和需求存在差异,可适当对 STIRPAT 模型进行改进^[12]。目前浙江省碳排放问题在很大程度上是现有能源总量、经济发展要求和环境承载力难以匹配。在这种情况下,建立一个同时考虑环境、能源

和经济系统指标的扩展 STIRPAT 模型十分必要。

在能源指标选择方面,由于浙江省能源转型具有一次能源清洁化、二次能源电气化以及能源节约与效率提升的全社会化的特点,借鉴 HUANG 等^[13]相关研究,STIRPAT 模型中的能源指标方面选取清洁能源消费比重(E)、电气化率(R)、能源强度(I)来分别表征能源系统的特征。在经济系统指标方面,参考 SHAFIK 等^[14]的研究成果,采用人均 GDP (A)、外商直接投资(F)、第三产业比重(T)、环境污染治理投资占 GDP 比重(V)、省域人口数量(P)作为评价指标。2019年10月浙江省入选首批国家数字经济创新发展试验区,作为数字经济发展的领跑者,浙江省始终将数字经济作为“一号工程”发展^[15],因此构建 STIRPAT 模型中的经济指标体系时,参考徐维祥等^[16]的研究,加入数字技术发展水平(X)。另外,为检验二氧化碳库兹涅茨曲线假说,将人均 GDP 分解为一次方项、二次方项与三次方项^[17]。环境系统的评价指标为浙江省碳排放总量(C)。模型的初步设置如式(3)所示:

$$\ln C = \beta_0 + \beta_1 \ln A + \beta_2 \ln A^2 + \beta_3 \ln A^3 + \beta_4 \ln E + \beta_5 \ln R + \beta_6 \ln I + \beta_7 \ln F + \beta_8 \ln T + \beta_9 \ln V + \beta_{10} \ln X + \beta_{11} \ln P. \quad (3)$$

式(3)中, $\beta_1 \sim \beta_{11}$ 分别为相关变量的弹性系数; β_0 为常数项。相关参数的实际值变化如图1所示。

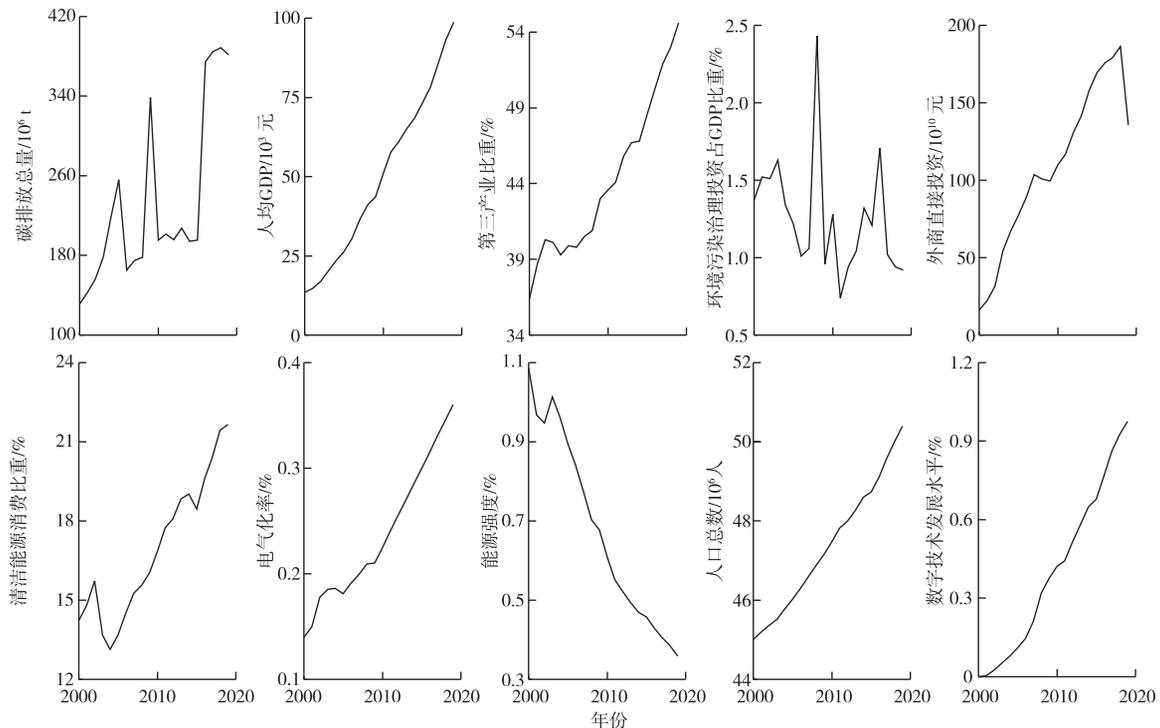


图1 2000—2020年浙江省各项指标变化

Fig. 1 Changes in various indicators in Zhejiang Province from 2000 to 2020

1.2.2 LEAP 模型及相关原理

根据浙江省能源生产和消费的特点构建 LEAP-Zhejiang 模型,该模型主要由终端部门能源需求模块、加工转化投入产出模块和损失模块构成^[18]。终端部门能源消费模块包括住宅、商业、交通、工业等,加工转化投入产出模块包括发电、输电等的生产和供应,能源输送损失模块包括电力、天然气等输送损失。这些变量的未来预测数值可在模拟情景中依据《浙江省节能降耗和能源资源优化配置“十四五”规划》等相关能源政策,结合趋势外推法和 BP 神经网络模型进行预测设定。电力部门能源消费单独计算。各部门碳排放量可根据能源消耗量和能源碳排放因子计算,具体公式如下:

$$S_t = A_t \times E_t, \quad (4)$$

$$S_i = S_t \times P_i, \quad (5)$$

$$C = \sum_t \sum_i S_i \times F_i. \quad (6)$$

式(4)~(6)中, S_t 为 t 部门终端能源消费量,万 t(以标准煤计); A_t 为 t 部门活动水平,%; E_t 为能源强度,包括农业、工业、商业、其他第三产业等终端部门,万元 \cdot t⁻¹(以标准煤计); S_i 为 t 部门能源 i 的终端能

源消费量,万 t(以标准煤计); C 为碳排放总量,百万 t(以标准煤计),该指标可用物理指标(产品产量等)衡量,也可用经济指标(工业增加值等)衡量; P_i 为 t 部门 i 种能源占比,%; F_i 为第 i 种能源的 CO₂ 排放因子,t \cdot GJ⁻¹(以 CO₂ 计)。

1.3 情景设置

近年来浙江省出台了一系列能源和环境政策,旨在通过清洁能源消费和提高能源效率来保护环境,相关文件名称和具体目标如表 1 所示。在相关政策计划的推动下,考虑传统能源结构变化、社会经济、产业转型等因素影响,浙江省碳减排政策聚焦内容可概括为 6 个方面:电力部门大规模开发、可再生能源利用、交通电气化、能源利用效率提升、终端能源使用部门的部分和综合电力替代。因此,基于浙江省碳减排政策聚焦点设计 6 种相关政策情景:基准(BAU)情景、交通电气化(TE)情景、可再生能源开发(RED)情景、能效提升(EEI)情景、部分电力替代(PES)情景和综合电力替代(CES)情景,情景内涵和关键指标参数在关键时间点的数值详细解释见表 2。参数取值见表 3~7。

表 1 浙江省主要减排政策及具体目标

Table 1 Main emission reduction policies and specific objectives in Zhejiang Province

相关政策	具体目标
《浙江省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》	地区生产总值增长年均 5.5% 及以上,常住人口城镇化率达 75% 左右,第三产业增加值稳步提升
《浙江省能源发展“十四五”规划》	电气化水平持续提升,电能占终端用能比重达到 40% 左右;全省 6 000 kW 以上火电平均发电煤耗控制在 280 g \cdot kWh ⁻¹ 以下,电网综合线损率保持先进水平
《浙江省大气污染防治行动计划》	加大省外电源合作开发力度,充分发挥外来电基地的积极作用,实现年“外电入浙”规模保持稳定
《浙江省工业领域碳达峰实施方案》	在新建厂房、商业建筑等推进建筑光伏一体化,新增分布式光伏装机容量 645 万 kW 以上
《浙江省“十四五”节能减排综合工作方案》	能源消费总量得到合理控制,全省单位生产总值能源消耗比 2020 年下降 14.5%,煤炭消费总量比 2020 年下降 5% 左右
《浙江省节能降耗和能源资源优化配置“十四五”规划》	“十四五”期间,单位服务业增加值电耗下降至 236 kWh \cdot 万元 ⁻¹
《浙江省“十四五”节能减排综合工作方案》	“十四五”期间,省主城区公共交通领域车辆(应急保障和特殊需求车辆除外)新能源化率达到 80%,全省更新淘汰“国四”以下排放标准老旧营运柴油货车 4 万辆
《浙江省“十四五”节能减排综合工作方案》	城镇新建公共建筑和居住建筑设计节能率提升至 75% 以上,全面执行绿色建筑标准
《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实施意见》	到 2025 年,绿色建材在新建建筑中的应用比例达到 70%,到 2030 年提高到 80%
《浙江省“十四五”节能减排综合工作方案》	力争钢铁、建材、石化、化工、有色金属等重点领域能效标杆水平产能比例达 50%
《浙江省节能降耗和能源资源优化配置“十四五”规划》	到 2025 年,装配式建筑在新开工建筑面积中占比 35%
《浙江省能源发展“十四五”规划》	城乡居民天然气气化率达到 40% 以上,基本实现城乡用能服务均等化

2 结果与分析

2.1 STIRPAT 模型回归结果

直接对非平稳时间序列数据进行建模易出现

伪回归现象,需要对变量数据的对数进行单位根检验^[19]。若数据稳定可以进行下一步分析,否则需要进行协整性检验。对每个变量进行单位根检验后,输出结果如表 8 所示。原始变量的平稳性并不存

在,仅原始变量 $\ln V$ 平稳,其余变量在经过一阶差分后均变为一阶单整序列。

表 2 各情景内涵详细解释

Table 2 Detailed explanation of the connotation of each scenario

政策情景	相关说明
BAU 情景	现有的节能减排政策是固定的;各关键指标的选取基于表 1 中的现有政策和对相关管理部门的访谈结果,关键指标数值的参数变化则采用 BP 神经网络模型、无偏灰色马尔科夫链模型和趋势外推法相结合进行预测 ^[20-21]
TE 情景	对浙江省的未来交通发展、能源消耗和排放情况进行全面分析 ^[22] ,在 BAU 情景的基础上,结合政策导向,增加电力在交通部门终端能源中的使用,优化交通出行方式,大力发展新能源-氢能公共电动汽车,提升大中城市中心城区绿色出行比例;实施货运“公转铁”“公转水”,调整各种交通方式在整个交通运输体系中的构成和占比;交通部门的单位运输周转量能耗将显著下降
EEl 情景	在 BAU 情景基础上,基于现有政策和文献 ^[23-25] ,拟设定所有建筑物都将进行节能改造,大规模使用被动式住宅和低能耗建筑;火电厂平均供电标准煤耗显著下降,电网综合线损率达全国先进水平,传统高耗能行业能效显著提升
RED 情景	基于现有政策、对能源管理部门的访谈和文献 ^[26] ,设定能源绿色转型显著提升,清洁能源迅速发展,燃气锅炉将逐步被新能源机组和电锅炉所取代,通过“强非化、扩气电、稳煤电、增外电”做好以电力供应为重点的能源保障
PES 情景	TE、EEl 和 RED 情景相结合的综合场景
CES 情景	基于 PES 情景加大其他部门的电力替代力度,大力提升电能占终端部门用能比例和居民电气化率

表 3 各情景基本指标参数设置

Table 3 Basic indicator parameter settings for each scenario

关键时间节点(年)	$A_1/\%$	$A_2/\text{万人}$	$A_3/\text{万人}$	$A_4/\%$
2015	8.0	3 206.66	1 666.68	48.6
2020	3.6	3 659.82	1 609.18	55.8
2025	6.0	3 809.36	1 569.78	58.0
2030	5.5	3 937.35	1 481.79	60.0
2060	5.0	4 256.29	1 325.49	65.0

A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 分别代表 GDP 增长率、城镇人口、农村人口、第三产业占比;基准年为 2015 年。

因此,进一步采用 Johansen 协整检验考察非平稳变量的数据(表 9)。在显著性水平为 1% 时,变量间存在长期协整关系并可用于回归分析。通过模型(3)所示的 STIRPAT 模型对各变量进行回归,发

现 $\ln A^3$ 和 $\ln P$ 不显著。去掉 $\ln A^3$ 及 $\ln P$ 后的回归曲线及结果见图 2 及表 10。

表 10 表明,构建的扩展 STIRPAT 模型 R^2 为 0.883,接近于 1,即模型精确度较高,方程各变量的显著性水平良好。变量 $\ln R$ 不显著,表明目前浙江省电力替代减排效果显著性尚不明显。就目前而言,浙江省的电力生产以化石燃料为主,尽管电力替代会通过降低化石燃料的能源消耗从而降低碳排放,但同时会提高对电力的需求,从而通过发电环节造成一定程度的间接碳排放。随着浙江省可再生清洁能源的快速发展及出台的一系列减污降碳发展规划,预计发电的间接碳排放量将继续下降,电力替代的减排效果将日益突出。变量 $\ln X$ 负向显著则表明浙江省能源双碳数智平台建设在全国属于领先地位。

表 4 BAU 情景指标参数设置

Table 4 BAU scenario indicator parameter settings

关键时间节点(年)	$B_1/\%$	$B_2/\%$	$B_3/\%$	$B_4/\%$	$B_5/\%$	$B_6/\%$	$B_7/\%$	$B_8^{1)}$	$B_9^{2)}$	$B_{10}/\%$	$B_{11}/\%$	$B_{12}/\%$	$B_{13}/\%$	$B_{14}/\%$	$B_{15}^{3)}$	$B_{16}/\%$	$B_{17}/\%$
2015	40.0	48.6	20.4	31.0	65	60	16	0.44	284	25.2	4.24	40.3	40.1	18.3	178	25.4	25
2020	70.0	43.6	23.4	33.0	70	65	19	0.41	295	36.1	3.71	52.1	39.0	20.3	203	30.5	30
2025	80.0	42.1	24.1	33.8	75	70	25	0.36	280	40.0	3.55	58.6	31.3	24.0	236	31.5	40
2030	82.5	40.6	24.8	34.6	77	75	35	0.31	265	45.0	3.45	62.6	30.0	30.0	246	32.5	50
2060	85.0	39.1	25.5	35.4	80	80	45	0.26	250	60.0	3.15	65.6	27.0	36.0	276	35.0	60

B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 、 B_7 、 B_8 、 B_9 、 B_{10} 、 B_{11} 、 B_{12} 、 B_{13} 、 B_{14} 、 B_{15} 、 B_{16} 、 B_{17} 分别代表公共交通工具新能源化率、公路在整个交通运输体系中占比、水路在整个交通运输体系中占比、铁路在整个交通运输体系中占比、公共建筑和居住建筑设计节能率、绿色建材在新建建筑中应用比、装配式建筑在新开工建筑面积中占比、单位 GDP 能耗、6 000 kW 以上火电平均发电煤耗、电能占终端用能比、电网综合线损率、清洁能源电力装机占比、煤炭占一次能源消费比、非化石能源占一次能源消费比、单位服务业增加值电耗、居民生活电气化率、居民生活天然气气化率; 1) 单位为 $t \cdot \text{万元}^{-1}$; 2) 单位为 $g \cdot \text{kWh}^{-1}$; 3) 单位为 $\text{kWh} \cdot \text{万元}^{-1}$; 基准年为 2015 年。

将大数据、区块链、人工智能等数智技术与碳达峰碳中和的实践融合创新,数字技术在传统产业

节能降耗中的应用正逐步强化。产业数字化赋能对碳排放的影响链可归纳为数字经济→传统产业

的数字化赋能→市场整合、企业优胜劣汰→优化企业创新投入和创新绩效→高能源利用和碳减排效率→地区碳减排的逻辑链。

表 5 TE 情景指标参数设置

Table 5 TE scenario indicator parameter settings

关键时间节点(年)	$C_1/\%$	$C_2/\%$	$C_3/\%$	$C_4/\%$	$C_5/\%$
2015	33.3	60	48.6	20.4	31.0
2020	70.0	70	43.6	23.4	33.0
2025	90.0	80	42.1	24.1	33.8
2030	95.0	85	40.6	24.8	34.6
2060	100.0	90	39.1	25.5	35.4

C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 分别代表公共交通工具新能源化率、城市中心城区绿色出行比例、公路运输在整个交通运输体系中的占比、水路运输在整个交通运输体系中的占比、铁路运输在整个交通运输体系中的占比;基准年为 2015 年。

表 6 EEI 情景指标参数设置

Table 6 EEI scenario indicator parameter settings

关键时间节点(年)	$D_1/\%$	$D_2/\%$	$D_3/\%$	$D_4^{1)}$	$D_5^{2)}$	$D_6^{3)}$	$D_7^{3)}$	$D_8^{3)}$	$D_9/\%$
2015	65	60	16	0.44	298	5.0	2.2	2.9	4.24
2020	70	65	19	0.41	295	5.4	2.6	3.3	3.71
2025	75	70	35	0.36	280	4.9	2.1	2.8	3.55
2030	77	75	50	0.31	265	4.7	1.8	2.4	3.25
2060	80	80	65	0.26	250	4.4	1.6	2.3	3.05

D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 、 D_9 分别代表公共建筑和居住建筑设计节能率、绿色建材在新建建筑中应用比、装配式建筑在新开工建筑面积中占比、单位 GDP 能耗、火电厂平均供电标准煤耗、货车单位运输周转能耗、客车单位运输周转能耗、船舶单位运输周转能耗、电网综合线损率;基准年为 2015 年; 1) 单位为 $t \cdot \text{万元}^{-1}$; 2) 单位为 $g \cdot \text{kWh}^{-1}$; 3) 单位为 $\text{kg} \cdot \text{万 t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

表 7 RED 情景指标参数设置

Table 7 RED scenario indicator parameter settings

关键时间节点(年)	$H_1/\%$	$H_2/\%$	$H_3/\%$	$H_4^{1)}$	$H_5/\%$	$H_6/\%$
2015	40.3	16.0	52.4	178	25.4	25
2020	52.1	20.3	39.0	203	30.5	30
2025	58.6	30.0	35.0	236	35.0	40
2030	68.6	60.0	30.0	246	45.0	45
2060	78.6	80.0	20.0	276	65.0	55

H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 、 H_6 分别代表清洁能源电力装机占比、非化石能源消费比重、煤炭占一次能源消费比重、单位第三产业增加值电耗、居民电气化率、居民天然气化率; 1) 单位为 $\text{kWh} \cdot \text{万元}^{-1}$; 基准年为 2015 年。

浙江省数字技术的普惠性主要体现于对省内各行业提供数字支持,如采用智能能源管理系统,利用传感器和数据分析技术监测建筑物、工厂等的能源使用情况,识别能源浪费和优化能源使用;交通方面运用双碳数字化能源管理平台,实现能耗精

细化管理,从而避免能源浪费等,即良好的数字创新环境和先进的数字创新水平有助于浙江省充分释放数字经济的节能减排效应价值。回归结果表明,人均 GDP 对碳排放增长存在显著促进作用,人均 GDP 每增加 1%,总碳排放量就会增加约 1.823%;环境污染治理投资和清洁能源消费增加则显著促进浙江省碳减排,环境污染治理投资每增加 1%,总碳排放量减少 0.772%;清洁能源消费比例每提升 1%,总碳排放量减少 1.149%。

表 8 单位根检验结果

Table 8 Unit root test results

检验变量	检验类型	ADF 值	5%临界值	结论
$\ln A$	(C,T,1)	-0.434	-3.600	不平稳
$\Delta \ln A$	(C,T,2)	-3.987	-3.625	平稳
$\ln T$	(C,T,1)	-1.266	-3.240	不平稳
$\Delta \ln T$	(C,T,2)	-4.187	-3.600	平稳
$\ln R$	(C,T,1)	-2.169	-3.460	不平稳
$\Delta \ln R$	(C,T,2)	-3.699	-3.600	平稳
$\ln I$	(C,T,1)	-1.888	-3.530	不平稳
$\Delta \ln I$	(C,T,2)	-3.720	-3.650	平稳
$\ln F$	(C,T,1)	-1.694	-3.600	不平稳
$\Delta \ln F$	(C,T,2)	-3.915	-3.670	平稳
$\ln E$	(C,T,1)	-1.965	-3.580	不平稳
$\Delta \ln E$	(C,T,2)	-3.780	-3.750	平稳
$\ln V$	(C,T,1)	-4.289	-3.600	平稳
$\ln X$	(C,T,1)	-2.642	-3.620	不平稳
$\Delta \ln X$	(C,T,2)	-3.284	-3.650	平稳
$\ln P$	(C,T,1)	-1.022	-3.600	不平稳
$\Delta \ln P$	(C,T,2)	-3.708	-3.600	平稳

变量 A 、 T 、 R 、 I 、 F 、 E 、 V 、 X 、 P 分别代表人均 GDP、第三产业比重、电气化率、能源强度、外商直接投资、清洁能源消费比重、环境污染治理投资占 GDP 比重、数字技术发展水平、省域人口数量;检验类型中的 C 和 T 分别表示带有常数项和时间趋势项,1 和 2 表示滞后阶数, Δ 表示一阶差分; ADF 值为增广迪基-富勒检验统计量。

表 9 Johansen 协整检验结果

Table 9 Johansen cointegration test results

原假设 H_0	临界值	P 值
无协整关系	127.20	0.000
最多 1 个协整	37.88	0.001
最多 2 个协整	13.04	0.041

2.2 不同政策情景下浙江省碳排放预测

图 3~4 分别代表了浙江省 2015—2060 年基于 STIRPAT 和 LEAP-Zhejiang 在不同情景下的碳排放总量。将 2 个模型对 2015—2020 年碳排放总量预测结果与中国碳核算数据库 (CEADs) 进行比较,发现预测结果与实际结果平均误差率较小。因此,LEAP-Zhejiang 模型和扩展的 STIRPAT 模型的模拟结果可信度较高。

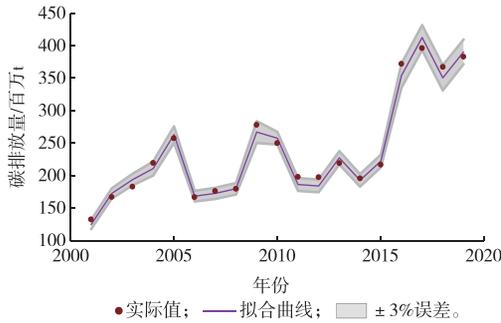


图2 STIRPAT模型回归曲线

Fig. 2 STIRPAT model regression curve

表10 回归分析结果

Table 10 Regression analysis results

变量名称	变量对数	系数值	标准误	P值
人均GDP平方项(A^2)	$\ln A^2$	3.200	0.466	0.316
人均GDP(A)	$\ln A$	1.823	0.061	0.059
外商直接投资(F)	$\ln F$	-0.843	0.642	0.064
第三产业比重(T)	$\ln T$	-1.083	0.356	0.297
环境污染治理投资占GDP比重(V)	$\ln V$	-0.772	0.231	0.003
数字技术发展水平(X)	$\ln X$	-0.809	0.350	0.005
省域人口数量(P)	$\ln P$	1.309	0.886	0.009
清洁能源消费比重(E)	$\ln E$	-1.149	0.434	0.006
电气化率(R)	$\ln R$	-0.818	0.052	0.126
能源强度(I)	$\ln I$	1.482	0.195	0.057
常数项		1.213	0.274	0.001

由图3~4可知,浙江省的碳排放总量从2019年到2020年略有下降,主要原因可能是受疫情影响。随着经济复苏,消费和出行增加,浙江省碳排放总量开始反弹。在PES和CES情景下,碳排放将在2025年达到峰值,而在其他4种情景下,碳排放持续增长且不存在峰值。显然,在TE、RED和EEI这类单一政策情景下,浙江省无法抑制碳排放量的持续攀升,更无法实现碳中和。只有在PES和CES综合情景下,排放总量才会经历从上升到下降的过程。因此,在确定降低碳排放方向和路径方面应综合考虑多个减排部门而非单一部门。

STIRPAT和LEAP模型在碳排放预测上的数值差距是由模型的特性造成的。STIRPAT模型从宏观角度研究能源问题,它可能低估技术进步带来的减排潜力。相比之下,LEAP模型则可能低估技术的局限性,从而高估技术的驱动力。在“双碳”目标的刚性约束下,各种绿色减排技术有望进步。相比较而言,LEAP-Zhejiang模型的预测结果可能更符合浙江省未来的发展趋势,故基于LEAP模型对各终端部门的能源使用情况进行预测模拟。由图4可知,在各项节能减排举措的综合作用下,PES和CES

情景下浙江省碳达峰时间分别为2024和2025年,达峰总量分别为3.88亿和3.70亿t。图5汇总了6种情景下不同终端部门的能源消费总量,其中电力部门能源需求居于首位,其次为工业、交通、商业、居民生活、农业等,且仅有CES和PES情景下能源消费量经历先上升后下降的过程。

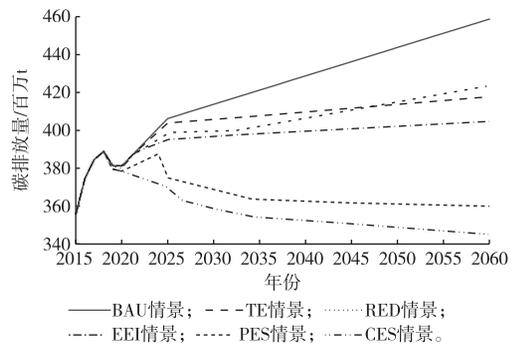


图3 基于STIRPAT模型预测的2015—2060年浙江省碳排放量

Fig. 3 Carbon emissions in Zhejiang Province from 2015 to 2060 based on the STIRPAT model

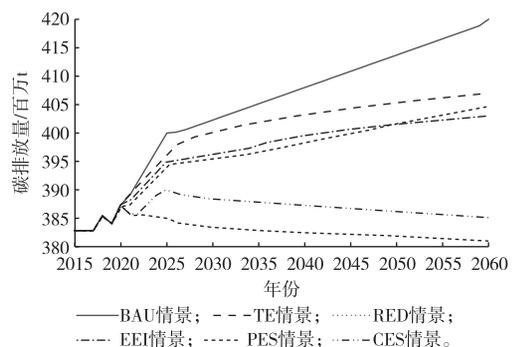


图4 基于LEAP模型预测的2015—2060年浙江省碳排放量
Fig. 4 Carbon emissions in Zhejiang Province from 2015 to 2060 based on the LEAP model

3 讨论

3.1 考虑碳泄漏的浙江省碳排放分析

世界资源研究所(WRI)将二氧化碳排放划分为3个核算范围:地理边界内的所有直接排放,即范围1;地理边界内购买的非本地电力产生的间接排放,即范围2;由于本地生产或经济活动而在外地发生的其他间接排放,即范围3^[27]。目前在碳排放量核算方面普遍运用3种方法:排放因子法、质量平衡法和实测法。前2种方法依据计算规则,能够反映碳排放发生地直接燃烧所产生的温室气体排放以及因购买能源产生的温室气体的实际排放量,即可

通过排放因子法和质量平衡法核算获得区域范围1和范围2的碳排放量。实测法则基于排放源的实测基础数据,包括现场测量与非现场测量2种方式,此方法可对范围3的碳排放进行精确核算。然而,鉴

于实测工作装置设备成本高昂且工作量大,大部分企业缺乏相关配置,数据可得性难以实现,因此在范围3碳排放的统计方面存在困难。

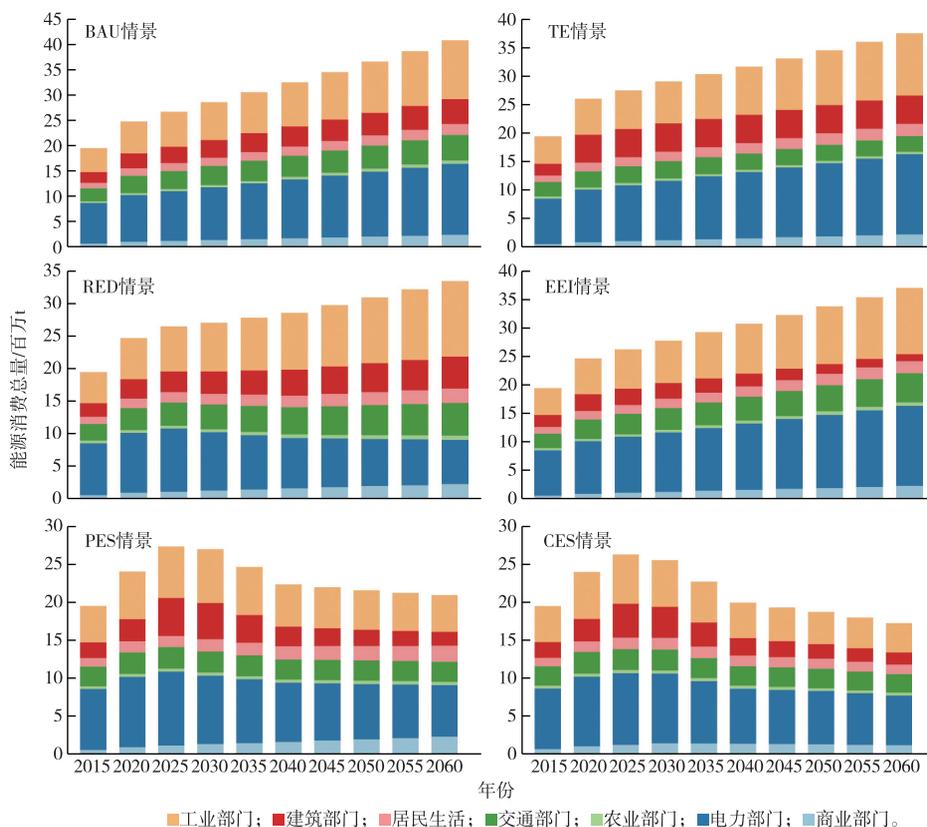


图5 基于LEAP模型预测的6种政策情景下浙江省不同部门的能源消费总量
Fig. 5 Total energy consumption of different sectors under six policy scenarios in Zhejiang Province based on the LEAP model

目前已有相关研究多数采用排放因子法和质量平衡法对区域碳排放进行详细核算,核算方法成熟度较高^[28]。为弥补现有研究大多未考虑范围2碳泄漏量的不足,研究拟考虑浙江省范围2碳泄漏量的核算,相关数据主要来源于中国碳核算数据库、《中国能源统计年鉴》《中国电力统计年鉴》等。现有研究普遍采用排放因子法和质量平衡法对区域内范围1的碳排放进行核算。虽然浙江省尚未出台二氧化碳排放核算标准,但可参考自2021年1月1日施行的《北京市地方标准:二氧化碳排放核算与报告要求》,依据该标准提供的外购热力、电力引起碳排放量(C_h)的计算公式,进而计算出浙江省范围2的碳排放(C_e)。

$$C_h = D_h \times F_h, \quad (7)$$

$$C_e = D_e \times F_e. \quad (8)$$

式(7)~(8)中, D_h 为外购热力,GJ; D_e 为电力量,MWh; F_h 和 F_e 分别为两者的碳排放系数,其值分别为 $0.11 \text{ t} \cdot \text{GJ}^{-1}$ 和 $0.604 \text{ t} \cdot \text{MWh}^{-1}$ (以 CO_2 计)。

通过上述2个公式可计算出2020年浙江省进口热力及电力产生的间接碳排放量约为91万和4262万t。与进口电力的间接碳排放相比,进口热力的间接碳排放较小,且浙江发布的《2021年度全省电量平衡表》中计划外购电量1840亿kWh,占全社会用电量的35%,因此需重点研究外购电力的碳泄漏问题。基于《浙江省可再生能源发展“十四五”规划》《浙江省能源发展“十四五”规划》等,结合STIRPAT模型、人工神经网络(ANN)和LEAP模型,构建外购电的定量预测模型、逻辑思维图及神经网络多元函数拟合预测模型图(图6~7)^[29]。



图 6 外购可再生能源电力规模逻辑图

Fig. 6 Logic diagram of the scale of purchased renewable energy electricity

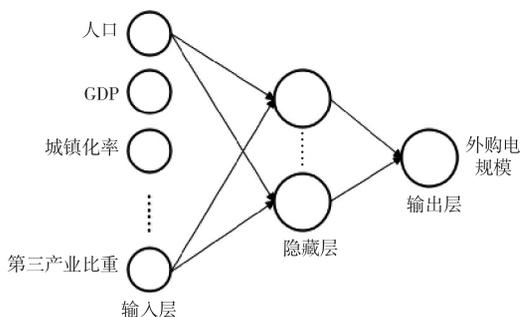


图 7 神经网络多元函数拟合预测模型

Fig. 7 Neural network multivariate function fitting prediction model

在 STIRPAT 模型中结合 3.1 和 3.2 节相关内容分析,将人口、GDP、第三产业比重等影响变量作为输入层,用来构建外购电量预测模型,外购电规

模作为输出层。由于设定的 6 种情景外购电需求不同,且外购电对不同情景中的主要变量影响也不同,因此在预测模型架构中设置隐藏层,以更有效地代表不同情景外购电需求规模。外购电规模对不同情景的具体影响如表 11 所示。

结合预测的 6 种不同情景外购电规模和式 (8),得出不同情景下浙江省碳排放的变化(图 8)。考虑外购电力引起碳泄漏时 BAU 场景下浙江省碳排放会显著上升,说明直接碳排放核算方法大大低估了电力进口省份碳排放量而高估了电力出口省份碳排放量。此外,考虑外购电时浙江省碳排放的变化趋势在不同情景下也不同。在 PES 和 CES 情景下,浙江省碳排放量将分别在 2025 和 2026 年达到峰值。

表 11 在外购绿色电力影响下各情景相关变化

Table 11 Relevant changes in various scenarios under the impact of outsourced green power

政策情景	相关说明
BAU 情景	表 5 各项参数基本不变
TE 情景	在表 6 基础上进一步提高交通领域电气化,城市中心城区绿色出行比例提升,营运客车、货车、出租车、私家车等电力车型比例进一步提升
EEl 情景	在表 7 基础上逐步关停火电厂、减少火电机组,火电厂平均供电能耗降低,电网综合线损率进一步优化,住宅部门运用化石能源比例进一步下降
RED 情景	外购电给清洁能源发展提供空间,在表 8 基础上逐步降低化石能源消费比重,进一步提升居民电气化率
PES 情景	上述 TE 情景、EEl 情景、RED 情景相结合
CES 情景	在 PES 情景的基础上大力提升电能占终端部门用能比和居民电气化率

已有研究表明,外购电是缓解当地用电压力的重要措施,但一般外购电引起的碳排放易被忽视^[30]。为进一步研究外购电力结构对浙江省碳排放的影响,参照 HUANG 等^[13]的方法,模拟不同比例下绿色外购电碳排放总量,结果如图 9 所示。随着进口电力中可再生能源比例的增加,且当该比例大于 60%时,CES 情景下的碳排放量与 PES 情景差距不明显。2020 年浙江省外购电力中可再生能源的比例仅为 14.2%,远低于 60%,这表明考虑间接碳排放产生的影响时,可再生能源在外购电力中的比例将对浙江省碳减排的政策制定和降碳路径产生重大影响,即减排政策既和浙江省本身产业结构紧密相关,也和外购电出口省份可再生能源发电占

比息息相关。

3.2 碳中和路径分析

当考虑碳泄漏和能源经济发展的惯性时,不建议采取 CES 情景下的碳减排政策,原因如下:首先,2020 年浙江省外购电占全社会用电量比例近 4 成,CES 情景下的综合电力替代预计将进一步提高电力需求,导致外购电占比份额进一步增加,将对省电网的可靠性和稳定性构成巨大挑战。且已有研究表明,电力需求的急遽提升对电网安全和成本疏导等因素要求极高,需要建设更加坚强、智能的电力配套设施,也将助推输配外购电、用电成本的增加^[31]。其次,由于中国电力系统以煤电为主,2020 年浙江省进口电力中可再生能源的比例仅为

14.2%。随着电力进口的增加,相应电力出口省份产生更多碳排放,碳排放负外部性更加强烈。

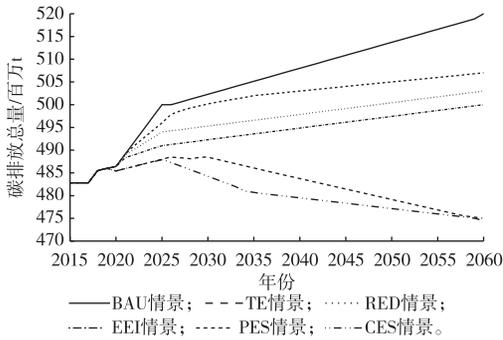


图8 考虑碳泄漏的浙江省碳排放预测
Fig.8 Carbon emissions in Zhejiang Province considering carbon leakage

自“双碳”目标提出以来,中国五大电力公司分别发布实现“双碳”目标的行动方案,例如中国华电集团将于2025年实现清洁能源发电装机占比60%;中国华能集团和国家电力投资集团的绿色电力装机目标都是达到75%,其他发电集团计划于2035年实现清洁能源装机比达70%。若其他电力企业据此效仿,预计2030—2035年浙江省外购电中可再生能源的比例将达到60%。可行的碳减排路径下的碳排放量如图10所示,其中OPQR区域是浙江省一组可行的碳中和路径,基于2030年可再生能源在进口电力中的比例达到60%的假设,OP可定义为最积极的碳中和途径,曲线RQ是较为谨慎的碳中和路径。若可再生能源在进口电力中的比例到2035年达60%,其总碳排放量如图11所示。

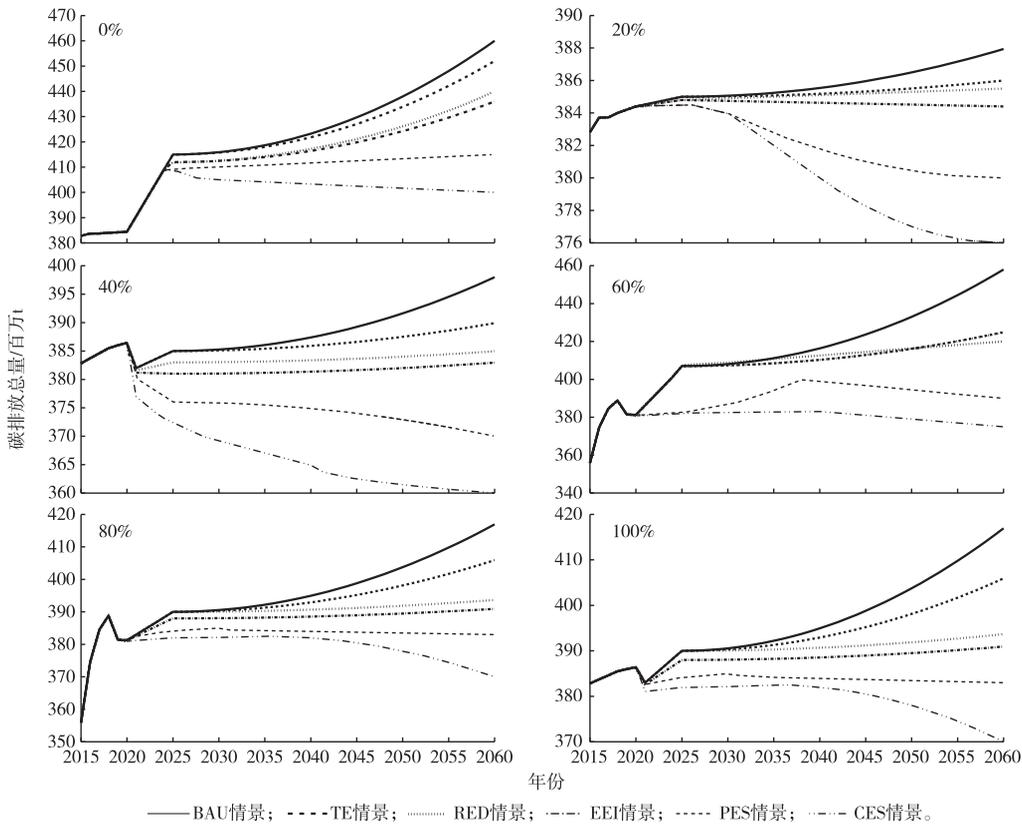


图9 不同可再生能源进口比例下的浙江省碳排放量预测
Fig.9 Carbon emissions of Zhejiang Province under different import ratios of renewable energy

CES与PES情景碳中和路径中碳泄漏量表现为四边形DEFG和ABDC,两者差距较小。由于合适的减碳方案对降低浙江省碳泄漏起着重要作用,同时考虑到CES情境下减碳路径成本高昂,当存在碳预算约束且CES情景下减碳路径及PES情景下减碳路径两者之间的碳泄漏差异不大时,后者方案

可能更加适合实施。相关学者认为受国家可再生能源财政补贴政策调整影响,浙江省将面临用能成本上升的新挑战^[32]。目前电力生产供应是浙江省最大的碳排放源,需电力部门实现低碳甚至完全脱碳^[33]。由于风电、光伏项目落地难,核电建设周期长且存在邻避效应,新型电力系统尚未建立等原

因,尤其加上俄乌危机冲击,可再生能源难以成为能源供应的主力。因此浙江省应立足能源资源禀赋,发展可再生能源和提升能效,而扩大外购电利用,通过调整外购电电力结构是可行的过渡选择。由此可以得出以下结论:浙江省应从 PES 情景开始,努力于 2025 年达到碳排放峰值,根据外购电力中可再生能源的比例,采取谨慎的碳中和路径向 CES 情景过渡,并最终通过各终端能源消费部门实现低碳转型,发挥数字技术在低碳治理中的作用,结合碳捕捉和碳封存等低碳技术,于 2060 年实现碳中和,政策力度需要根据成本效益进行科学规划。

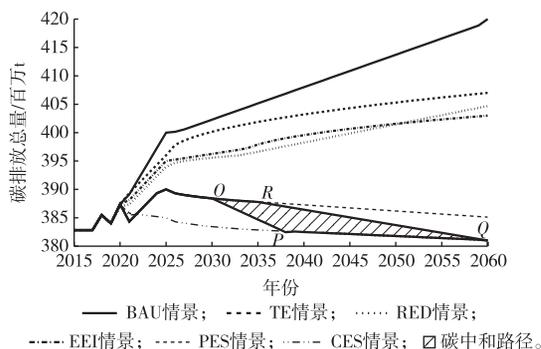


图 10 范围 1 中可行的碳中和途径及其碳排放
Fig. 10 Possible carbon neutrality pathways and their carbon emissions in scope 1

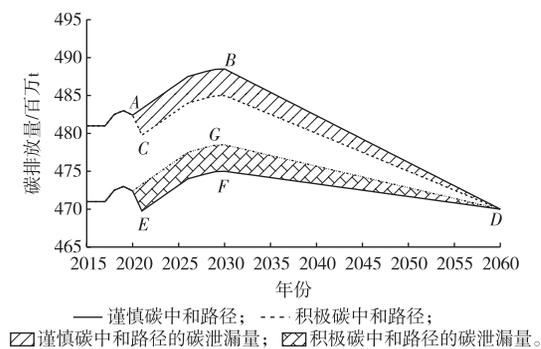


图 11 主动及谨慎碳中和途径及其范围 1、2 中的碳排放
Fig. 11 Proactive and cautious carbon neutrality pathways and their carbon emissions in scope 1 and 2

3.3 进一步分析

不同研究对于区域城市化程度对碳排放的影响存在争议^[34-35]。部分学者认为,城市化是区域碳排放增加的积极因素,而另一部分学者则认为,城市化程度与碳排放量呈负相关。由于研究构建的 6 种情景均基于城市人口稳步提升,也即城市化程度逐渐提高,因此后者观点与该研究结果不谋而合。这一差异可归因于浙江省城市化的独特特征。自

浙江省部署并实施“发挥八个方面的优势”以及“推进八个方面的举措”(八八战略)以来,进一步发挥其生态优势和城乡协调发展优势,基于“紧凑型城市”发展理念,引领产业结构从第二产业向第三产业转型,促进产业结构高级化。随着浙江省城市化的稳步推进,非城市居民身份上转变为城市居民的同时也实现了由原来从事能源密集型制造业向从事服务业等低能耗活动的转变。城市化兼顾发展效益和环境效益,是社会经济发展可持续发展的必然选择,这解释了浙江省新型城市化发展对碳排放的负向机制。但由表 10 中的回归结果可知,人口因素作为影响碳排放的传统要素,表现出总人口增长带来碳排放增加的显著趋势。因此应提高非城市居民对低碳生活和绿色消费的认识,这对遏制碳排放具有重大意义。

已有研究表明,浙江省各排放部门中工业部门能源消耗比重较高^[36],笔者研究结果与其一致。浙江省煤炭消费基数低、结构好、散煤少,主要能耗集中在工业发电方面。第四次工业革命的一个重要特征即绿色能源与信息化、网络化、数字化和智能化的深度融合。浙江省作为数字经济发展的“重要窗口”,应发挥本省数字化优势,以数字化改革撬动全面深化改革,引领能源领域深层次系统性重塑,用数字化轻资产破解能源重资产传输时空损耗难题,优化能源消费结构和提升能效,推动浙江省工业从高碳化到低碳化发展、从有碳到无碳发展的重大转型。

实现净零碳排放,需大规模扩大电力使用,在尽可能多的经济部门实现电气化。浙江省新型城市化发展要求推动形成绿色低碳交通运输体系,优化运输结构、提高运输组织效率,主要体现在以下两点:一是实现公共交通的全面电气化,实现公共交通清洁能源车辆全覆盖,既能大幅度提高运输量和运输效率,又能做到零排放;二是普及城市轨道交通。浙江省努力打造省域“1 小时左右交通圈”,使居住区和其余区域之间的平均交通距离更短,从而减少交通领域碳排放;三是加大新能源汽车对传统燃油车的替代效应,优化传统模式,打造“绿色出行”低碳生活新模式。

在绿色建筑方面,浙江省城镇绿色建筑面积占新建建筑面积比例较高,在推动城市化发展的同时重视绿色建筑标准的建设,其中城镇绿色建筑中公共建筑占比更高^[37],分析原因,主要是相关标准中明确规定公共建筑应按照二星级以上绿色建筑强制性标准进行建设。

3.4 模型方法及结果不确定性分析

研究采用 STIRPAT 模型和 LEAP 模型相结合, 基于情景分析法以识别浙江省碳排放主要影响因素, 预测未来的碳排放趋势。而情景分析法是通过假设、模拟等手段生成未来情景, 易受现有政策措施、技术水平等影响, 从而对碳排放的影响因素考虑不全面, 对浙江省如期甚至提前实现双碳目标的支撑作用较弱。浙江省作为“绿水青山就是金山银山”理念的发源地和率先实践地, 研究中的模型预测基于现有的低碳技术水平和政策文件, 对于低碳技术发展与数字技术相结合导向的能效提升、可再生能源发展等的预判存在局限性。且随着浙江省不断推动绿色低碳技术转化利用、通过数智控碳积极发展低碳能源, 未来可能出现新的低碳技术和产业, 这将极大影响碳排放的实际情况, 可能造成碳排放量和碳达峰碳中和时间节点预测值与实际值存在一定偏差。政府对于低碳投资项目的调整也是一个不确定因素, 未来浙江省政府加大对绿色低碳投资项目和协同技术应用的财政支持可能会导致对于碳排放控制目标和途径的影响发生变化, 从而影响目前模型的预测结果。在数据模拟方面, 由于情景设置中化石能源消费及生产活动强度下降的时间节点大致相同, 这取决于现有能源消耗趋势预测的未来区域能源发展水平, 且由于浙江省暂未出台碳核算标准, 核算间接碳排放时参考的地方标准并非浙江省的核算标准, 因此在数值精准度方面有待提升, 需要结合未来浙江省相关碳核算标准进一步进行统计。

4 结论与建议

4.1 结论

在温室效应日趋严重的今天, 绿色低碳可持续发展已成为国际社会广泛共识。为如期甚至提早实现“双碳”目标, 中国各省域依照自身发展现状制定碳减排路径势在必行。研究基于扩展的 STIRPAT 模型和 LEAP-Zhejiang 模型, 以浙江省域为例, 旨在分析节能减排政策对能源需求及碳排放的影响, 充分挖掘节能减排的潜力, 研究浙江省碳排放影响因素识别、排放趋势、达峰时间和减排路径, 得出以下结论:

(1) 基于扩展的 STIRPAT 模型研究显示, 环境污染治理投资、清洁能源消费比重增加和数字经济发展可显著促进浙江省碳减排, 能源结构升级、能效提升和数字经济深耕高碳排放产业是浙江省当前低碳转型发展的重点动力。具体数值为相关变

量比例每提升 1%, 碳排放总量分别减少 0.772%、1.149% 和 0.809%。人均 GDP 对碳排放增长存在显著促进作用, 平衡经济发展活力和降低碳排放的功能性协调是浙江省低碳绿色发展需要考虑的问题。

(2) 采用 LEAP-Zhejiang 和 STIRPAT 模型对 2015—2060 年浙江省 6 种情景下碳排放进行预测。结果显示, 2 类模型均表明仅 CES 和 PES 情景可于 2030 年前实现碳达峰, 且碳排放总量达峰后呈下降趋势, 在探究实现双碳路径方面应综合考虑多个减排部门而非单一部门。未来浙江省低碳转型的重点应该首先放在电力部门, 其次是工业、交通、商业、居民生活、住宅、农业等部门。

(3) 浙江省减排路径和政策的制定不仅与其产业结构密切相关, 还受到进口电力中可再生能源比例的显著影响。考虑到碳泄漏和转化成本问题, CES 场景下的减排路径很难迅速实现。浙江省应从 PES 情景开始, 努力在 2025 年实现碳达峰。根据外购电力中可再生能源的比例, 采取谨慎的碳中和路径向 CES 情景的过渡, 并通过各终端能源使用部门利用碳捕捉、碳封存等降碳技术, 于 2060 年前实现碳中和。

4.2 建议

为促进浙江省“双碳”目标如期甚至提前实现, 主要建议如下:

(1) 加大环境污染治理投资, 增加清洁能源消费比重和数字经济发展, 推动能源结构升级、能效提升和数字经济深耕高碳排放产业。在能源结构升级、能效提升和数字经济深耕高碳排放产业方面加大投资力度, 以作为低碳转型的重点动力。政府可采取一系列激励措施, 例如提供优惠贷款、税收减免等, 鼓励企业和个人投资环保领域、清洁能源领域和数字经济领域。

(2) 政府应制定综合减排措施, 可以通过制定差别化的碳减排政策来促进各部门的碳减排, 同时加强能源转型和技术创新, 推动全社会实现低碳绿色发展。政府应该制定合理的产业政策, 引导企业从高碳排放产业向低碳排放产业转型。同时, 还应该鼓励低碳生活方式的普及。

(3) 加大浙江省非化石能源发电的占比, 鼓励可再生能源的规模化和多样化使用, 从供应侧减少碳排放。考虑到进口电力中可再生能源比例的显著影响, 浙江省应在电力采购方面增加可再生能源比例, 减少对传统化石能源的依赖。

(4) 鼓励各终端能源使用部门采用碳捕捉、碳

封存等降碳技术,通过减少碳排放和增加碳储存实现减排目标。浙江省政府可以加大对这些技术的研发和应用的支持力度,平衡经济发展活力和降低碳排放的功能性协调,加强经济发展与环境保护的协调管理,促进经济社会可持续发展。

由于研究时间和数据的限制,研究存在以下3个不足之处,可进行进一步讨论和研究:

(1)从科学性角度出发,研究对浙江省未来政策措施、技术水平等情景假设的理论基础不足,随着节能减排方案的不断出台,未来应更新相关政策场景。

(2)需要在未来研究中进一步考虑研究构建的6种情景所带来的经济成本,如电网升级、建筑翻新和维护,以及发电厂的容量储备等。

(3)碳捕捉、碳封存和生态固碳等碳吸收技术的应用性有待进一步探索。

参考文献:

- [1] 曾诗鸿,李根,翁智雄,等.面向碳达峰与碳中和目标的中国能源转型路径研究[J].环境保护,2021,49(16):26-29.[ZENG Shi-hong, LI Gen, WENG Zhi-xiong, et al. Research on China's Energy Transformation Path for Peak Carbon Dioxide Emissions and Carbon Neutralization [J]. Environmental Protection, 2021, 49(16):26-29.]
- [2] 汪克亮,许如玉,张福琴,等.生态文明先行示范区建设对碳排放强度的影响[J].中国人口·资源与环境,2022,32(7):57-70.[WANG Ke-liang, XU Ru-yu, ZHANG Fu-qin, et al. Impact of Ecological Civilization Demonstration Areas on Carbon Emission Intensity [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(7):57-70.]
- [3] 陈金晓.“双碳”目标下的经济循环:循环低碳化与低碳循环化[J].经济学家,2022(9):78-87.[CHEN Jin-xiao. Economic Cycle under the Goal of "Double Carbon": Low Carbon Cycle and Low Carbon Cycle [J]. Economist, 2022(9):78-87.]
- [4] HAO J H, GAO F, FANG X Y, et al. Multi-factor Decomposition and Multi-scenario Prediction Decoupling Analysis of China's Carbon Emission under Dual Carbon Goal [J]. Science of the Total Environment, 2022, 841:156788.
- [5] 李莉,董棒棒,敬盼.环境规制背景下新疆能源碳排放峰值预测与情景模拟研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(11):1444-1452.[LI Li, DONG Bang-bang, JING Pan. Prediction and Scenario Simulation of Energy Carbon Emission Peak in Xinjiang under the Background of Environmental Regulation [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(11):1444-1452.]
- [6] 杜涵蓓,赵立君,刘臣炜,等.基于LEAP模型和KAYA模型的主城区碳达峰预测及不确定性分析[J].生态与农村环境学报,2022,38(8):983-991.[DU Han-bei, ZHAO Li-jun, LIU Chen-wei, et al. Prediction of Peaking Carbon Dioxide Emissions in Main City Areas Based on LEAP Model and KAYA Model and Analyses on Its Uncertainty [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(8):983-991.]
- [7] LU C, LI W, GAO S B. Driving Determinants and Prospective Prediction Simulations on Carbon Emissions Peak for China's Heavy Chemical Industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 251:119642.
- [8] LI B, YANG J C, SUN W. Can Expanding Cultural Consumption Improve Urban Air Quality? An Analysis Based on China's Cultural Consumption Pilot Policy [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 20(1):642.
- [9] 苏钊贤,张国兴.黄河流域水权交易实践探索、瓶颈制约与突破路径[J].华北水利水电大学学报(社会科学版),2022,38(2):27-32.[SU Zhao-xian, ZHANG Guo-xing. Practical Exploration, Restriction Bottleneck and Breakthrough Path of Water Rights Trading in the Yellow River Basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Social Science Edition), 2022, 38(2):27-32.]
- [10] 吴唯,张庭婷,谢晓敏,等.基于LEAP模型的区域低碳发展路径研究:以浙江省为例[J].生态经济,2019,35(12):19-24.[WU Wei, ZHANG Ting-ting, XIE Xiao-min, et al. Research on Regional Low Carbon Development Path Based on LEAP Model: Taking Zhejiang Province as an Example [J]. Ecological Economy, 2019, 35(12):19-24.]
- [11] 刘茂辉,岳亚云,刘胜楠,等.基于STIRPAT模型天津减污降碳协同效应多维度分析[J].环境科学,2023,44(3):1277-1286.[LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, et al. Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model [J]. Environmental Science, 2023, 44(3):1277-1286.]
- [12] 孙敬水,陈稚蕊,李志坚.中国发展低碳经济的影响因素研究:基于扩展的STIRPAT模型分析[J].审计与经济研究,2011,26(4):85-93.[SUN Jing-shui, CHEN Zhi-rui, LI Zhi-jian. A Research on Influencing Factors of Low-carbon Economy Development in China: An Analysis Based on the Extended STIRPAT Model [J]. Journal of Audit & Economics, 2011, 26(4):85-93.]
- [13] HUANG R, ZHANG S F, WANG P. Key Areas and Pathways for Carbon Emissions Reduction in Beijing for the "Dual Carbon" Targets [J]. Energy Policy, 2022, 164:112873.
- [14] SHAFIK N, BANDYOPADHYAY S. Economic Growth and Environmental Quality: Time-series and Cross-country Evidence [R]. Washington DC, USA: World Bank, 1992.
- [15] 丁松,李若瑾.数字经济、资源配置效率与城市高质量发展[J].浙江社会科学,2022(8):11-21,156.[DING Song, LI Ruo-jin. Digital Economy, Resource Allocation Efficiency and High-quality Urban Development [J]. Zhejiang Social Sciences, 2022(8):11-21,156.]
- [16] 徐维祥,周建平,刘程军.数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J].地理研究,2022,41(1):111-129.[XU Wei-xiang, ZHOU Jian-ping, LIU Cheng-jun. The Impact of Digital Economy on Urban Carbon Emissions: Based on the Analysis of Spatial Effects [J]. Geographical Research, 2022, 41(1):111-129.]
- [17] 刘晓燕.基于STIRPAT模型的工业能源消费碳排放影响因素分析[J].生态经济,2019,35(3):27-31.[LIU Xiao-yan. Study on Influencing Factors of Carbon Emissions from Industrial Energy

- Consumption Based on STIRPAT Model[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(3): 27-31.]
- [18] EMODI N V, EMODI C C, MURTHY G P, *et al.* Energy Policy for Low Carbon Development in Nigeria: A LEAP Model Application [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 247-261.
- [19] 张文华. 面向系统灵活性的高比例可再生能源电力规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021. [ZHANG Wen-hua. Research on High Proportion Renewable Energy Power Planning for System Flexibility[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.]
- [20] 张宁, 黄伟琼. 基于马尔科夫链改进无偏灰色 Verhulst 的中长期负荷预测模型[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2015, 37(4): 396-399, 404. [ZHANG Ning, HUANG Wei-qiong. Long Term Load Forecasting Model Based on Markov Chain Improving Unbiased Grey Verhulst [J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2015, 37(4): 396-399, 404.]
- [21] 张钊, 王京华, 甘珍夕, 等. 新冠肺炎疫情下武汉封城令对交通流的影响; 以浙江省为例[J]. *交通运输研究*, 2020, 6(3): 23-29. [ZHANG Zhao, WANG Jing-hua, GAN Zhen-xi, *et al.* Effect of Wuhan Lockdown on Traffic Flow in COVID-19 Epidemic: Evidence from Zhejiang [J]. *Transport Research*, 2020, 6(3): 23-29.]
- [22] 张英, 沈蕊文. 绿色节能建筑经济评价及例证[J]. *生态经济*, 2011, 27(3): 138-140. [ZHANG Ying, SHEN Bi-wen. Economic Problems Study and Exemplify of Green Energy-saving Building [J]. *Ecological Economy*, 2011, 27(3): 138-140.]
- [23] ZHU B, ZHOU W J, HU S Y, *et al.* CO₂ Emissions and Reduction Potential in China's Chemical Industry [J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4663-4670.
- [24] ZHANG P F, CAI W Q, YAO M T, *et al.* Urban Carbon Emissions Associated with Electricity Consumption in Beijing and the Driving Factors [J]. *Applied Energy*, 2020, 275: 115425.
- [25] YAN Y, LI Q, LI X, *et al.* Regional Heterogeneity of Haze Kuznets Curve in Chinese Cities [J]. *Statistics and Decision-making*, 2021, 37(2): 60-64.
- [26] 杨皎, 董晔. 基于 STIRPAT 模型的新疆环境压力影响因素分析; 以能源消耗为例[J]. *能源环境保护*, 2021, 35(4): 85-91. [YANG Jiao, DONG Ye. Analysis of Influencing Factors of Environmental Stress in Xinjiang Based on STIRPAT Model: Taking Energy Consumption as an Example [J]. *Energy Environmental Protection*, 2021, 35(4): 85-91.]
- [27] ISO 14064-3, Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard [S].
- [28] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 696-708. [ZHANG Qi-feng, FANG Kai, XU Ming, *et al.* Review of Carbon Footprint Research Based on Input-output Analysis [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4): 696-708.]
- [29] 张文华, 闫庆友, 何钢, 等. 气候变化约束下中国电力系统低碳转型路径及策略[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(1): 18-26. [ZHANG Wen-hua, YAN Qing-you, HE Gang, *et al.* The Pathway and Strategy of China's Power System Low-carbon Transition under the Constraints of Climate Change [J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(1): 18-26.]
- [30] 刘颖, 唐夏菲, 蔡晔, 等. 考虑省间交易与源荷互动协调的新能源消纳机制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(2): 16-22. [LIU Ying, TANG Xia-fei, CAI Ye, *et al.* Renewable Energy Consumption Mechanism Considering the Coordination of Inter-provincial Transactions and Source-load Interaction [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(2): 16-22.]
- [31] BRANDER M, GILLENWATER M, ASCUI F. Creative Accounting: A Critical Perspective on the Market-based Method for Reporting Purchased Electricity (Scope 2) Emissions [J]. *Energy Policy*, 2018, 112: 29-33.
- [32] 葛少云, 曹雨晨, 刘洪, 等. 考虑可靠性约束的综合能源微网供能能力评估[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7): 31-37. [GE Shao-yun, CAO Yu-chen, LIU Hong, *et al.* Evaluation of Energy Supply Capability for Multi-energy Microgrid Considering Reliability Constraint [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7): 31-37.]
- [33] 周子青, 邓晖, 房乐, 等. 新能源参与浙江电力现货市场的交易机制与效益分析[J]. *浙江电力*, 2022, 41(8): 41-48. [ZHOU Zi-qing, DENG Hui, FANG Le, *et al.* New Energy Market Trading Mechanism and Benefit Analysis of Zhejiang Electricity Spot Market [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2022, 41(8): 41-48.]
- [34] 马伟波, 赵立君, 王楠, 等. 长三角城市群减污降碳驱动因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(10): 1273-1281. [MA Wei-bo, ZHAO Li-jun, WANG Nan, *et al.* Study on Driving Factors of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(10): 1273-1281.]
- [35] 仇宽彪, 杜涵蓓, 张龙江, 等. 基于降温效应的长三角核心城市城区绿地节能减碳价值研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(10): 1282-1289. [QIU Kuan-biao, DU Han-bei, ZHANG Long-jiang, *et al.* Study on the Value of Energy Saving and Carbon Reduction of Urban Green Space in Core Cities of Yangtze River Delta Based on Cooling Effect [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(10): 1282-1289.]
- [36] JIANG H Q, ZHANG X A, SHAO X X, *et al.* How do the Industrial Structure Optimization and Urbanization Development Affect Energy Consumption in Zhejiang Province of China? [J]. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1889.
- [37] 纪荣婷, 黄言秋, 程虎, 等. “绿水青山就是金山银山”实践创新基地碳汇量核算及碳排放影响因素研究; 以浙江省宁海县为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(8): 1002-1009. [JI Rong-ting, HUANG Yan-qiu, CHENG Hu, *et al.* Calculation of Carbon Sink and Influencing Factors of Carbon Emission in the "Lucid Waters and Lush Mountains are Invaluable Assets" Practice and Innovation Bases: The Case Study of Ninghai County [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(8): 1002-1009.]

作者简介: 李清瑶(1998—), 女, 山东淄博人, 研究方向为低碳与可持续发展。E-mail: quinnliqingyao@163.com

(责任编辑: 陈 昕)