

# 长三角一体化区域建筑业碳达峰预测与减排研究

卢昱杰<sup>1,2</sup>, 何凌云<sup>1</sup>, 李佩娴<sup>3,4</sup>, 宋广翰<sup>1</sup>, 杨晓露<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 4. 同济大学高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为研究长三角地区建筑业碳排放趋势及减排路径, 建立了随机森林与回归分析相结合的建筑业碳排放模型, 针对长三角地区进行了基准情景和减排情景分析。结果表明, 长三角建筑业总体在 2035 年实现碳达峰, 上海和浙江可以在未采取额外减排措施的情况下, 于 2030 年前实现建筑业碳达峰。至 2060 年, 常规减排措施可减少 47.84%~60.99% 的碳排放, 其中“减少新建, 以改代拆”的减排力度最大, 可以减少 13.54%~18.65% 的碳排放; 一体化政策可以在常规减排的基础上再减少 2.71%~18.34% 的碳排放; 在各减排措施理想化实施的条件下, 长三角各地建筑业需要借助外部措施(例如社会电力清洁化)再减排 13.26%~17.12%, 从而达到 2060 年碳中和。该结论可为其他一体化区域的建筑业低碳发展提供研究思路和依据。

**关键词:** 区域一体化政策; 碳排放预测; 减排路径; 施工碳排放; 回归分析; 随机森林

中图分类号: X322; F426.92

文献标志码: A

## Carbon Peak Prediction and Emission Reduction in Construction Industry of Yangtze River Delta Under Regional Development

LU Yujie<sup>1,2</sup>, HE Lingyun<sup>1</sup>, LI Peixian<sup>3,4</sup>, SONG Guanghan<sup>1</sup>, YANG Xiaolu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Ecology and Energy-saving Study of Dense Habitat of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To study the trends and reduction pathways of carbon emissions in the construction industry of the Yangtze River Delta region, this paper establishes a carbon emission model combining random forest and regression analysis. Baseline and emission reduction scenarios for the Yangtze River Delta region are analyzed. The results show that the overall construction industry in the Yangtze River Delta will reach its carbon peak by 2035. Shanghai and Zhejiang can achieve their carbon peak in the construction industry by 2030 without taking additional mitigation measures. By 2060, conventional reduction measures can reduce carbon emissions by 47.84% to 60.99%, with the most significant reduction achieved through "reducing new construction and replacing demolition with renovation," which can reduce emissions by 13.54% to 18.65%. Integrated policies can further reduce carbon emissions by an additional 2.71% to 18.34% on top of conventional reductions. Under the ideal implementation of various mitigation measures, the construction industry in different areas of the Yangtze River Delta will need to rely on external measures (such as green social electricity) to further reduce emissions by 13.26% to 17.12%, achieving carbon neutrality by 2060. The findings from this study can provide research ideas and a basis for low-carbon development in the construction industry of other integrated regions.

**Keywords:** regional integration policy; carbon prediction; carbon reduction path; construction carbon emissions; regression analysis; random forest

作为负责任的全球最大发展中国家, 中国政府承诺力争在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳

收稿日期: 2023-09-11

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3801700); 国家自然科学基金青年科学基金(52108090); 国家自然科学基金面上项目(52078374); 中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XZ-21); 上海市科委科技支撑碳达峰与碳中和专项(22dz1207800, 22dz1207100)

第一作者: 卢昱杰, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能建造、低碳与节能建筑等。

E-mail: lu6@tongji.edu.cn

通信作者: 李佩娴, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为绿色低碳建筑、可持续建成环境等。

E-mail: lipx@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

中和。建筑业作为高能耗产业,其碳排放量不容小觑。据《中国建筑能耗研究报告(2020)》分析2020年中国建筑领域全过程碳排放总量达49.3亿吨,占中国碳排放总量的51.3%。建筑业节能降碳目标是实现中国“双碳目标”的关键一步,而建筑业作为长三角的支柱性产业之一<sup>[1-2]</sup>,不仅为长三角带来经济成就也带来巨大的减碳压力。长三角一体化<sup>[3-4]</sup>区域内形成了建筑业全过程产业链,代表了中国建筑业的未来发展方向,研究长三角一体化区域建筑业的碳排放减排路径可以为制定中国建筑业减排政策提供思路与依据。

目前世界各地的一体化区域都在探索和实践更有效的减排路径。区域协同发展已体现出对碳减排的正面作用。从国际典型湾区的能源消费总量达峰时间来看,达峰时间大体早于所在国家<sup>[5]</sup>。2021年欧盟的碳排放交易体系已进入第4阶段<sup>[6]</sup>,通过配套机制和成员国内部的政策法律及措施等,协同实现2030年的减排目标。国际三大典型湾区也制定了以生态环境保护为重点,以能源协同发展为特征的中长期减排路径<sup>[5]</sup>。其中旧金山湾区针对湾区的温室气体排放发布了《2017年湾区清洁空气计划》,该计划中包括规则制定工作、政策倡议、地方政府合作伙伴关系、外联、赠款和激励措施等250多个具体实施行动。日本政府通过制定全国性港口发展计划,规划东京湾区一体化发展,同时配合能源改革、区域集中供能等措施来进一步实现在《京都议定书》中所承诺的减排目标<sup>[7]</sup>。

现阶段针对区域碳排放的研究方法大致包括三类:①为情景分析,通过对导向政策的量化设置情景参数来模拟区域一体化发展情景,与其他情景进行对比可以分析出对区域内部的影响<sup>[8]</sup>。②为空间溢出模型,即采用空间回归模型衡量结构效应对碳排放的溢出影响<sup>[9]</sup>。③为博弈模型,即通过构建博弈模型来模拟演示区域内各部分的演化过程<sup>[10]</sup>。情景分析多用于研究复杂系统的不确定性问题,空间溢出模型侧重于碳排放在区域间的流动,博弈模型常用于政策设计。本文重在讨论长三角这一复杂系统的一体化减排问题,采用情景分析方法可以更明确一体化减排对各个地区所产生的正负效应,从而帮助各地区选择合适的减排措施。

情景分析中的一个关键环节是建立碳排放预测模型。目前模型分为两类。①为白箱模型如回归模型、系统动力学、STIRPAT、LEAP等,不仅反映输入—输出关系,也反映过程状态。②是黑箱模型如

随机森林、GRNN、FLN等,只有输出—输入关系,用神经网络来替代其过程计算。白箱模型主观性较强,黑箱模型准确率高但可解释性较差。

本文以中国长三角一体化区域为研究对象,创新性地研究协同发展下的区域建筑业施工阶段碳排放与减排路径,研究内容包括预测未来施工面积、建筑业碳达峰预测、一体化减排情景分析,重点关注区域内部的相互影响并提出减排建议。为减少主观选取因素而导致的不确定性并保留模型的透明度,本文采用结合随机森林与回归模型的黑白结合模型,既保证预测的准确率,又能识别主要影响因素。研究结果对于探索可复制、可推广的区域一体化建筑业低碳发展新模式具有重要意义。

## 1 研究方法

本文的碳排放模型分为两部分:①施工面积回归模型,用于预测未来施工面积;②情景分析,通过设置不同情景下施工面积回归模型自变量、单位能耗、碳排因子等参数,对建筑业碳排放进行预测,具体流程如图1所示,图中,A代表施工面积; $i$ 表示不同的情景; $j$ 表示施工面积的类别; $k$ 表示不同类型能源。

### 1.1 施工面积回归模型

为了便于理解施工面积及其影响因素之间的关系,选用回归分析模型,将施工面积作为因变量进行分析和预测。

基于已有文献总结建筑业碳排放的影响因素,并综合考虑数据的可获得性与计算口径的一致性,收集了4个地区9个变量的2000—2021年历史值用于回归分析,部分缺失数据通过线性插值填充。9个初始试验变量的定义见表1。为降低异方差的影响,对全部变量进行了对数处理。本文所用数据主要来源于各地区统计年鉴、《中国能源统计年鉴》、《省级温室气体清单编制指南(试行)》以及《2010年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子》。为提高施工面积回归模型的准确率,选择对数据的异常值和噪声具有高容忍度的随机森林<sup>[11]</sup>模型对9个变量进行筛选,筛选出的重要变量如图2所示。

基于筛选后变量对4个地区的施工面积做线性回归分析,尝试了3种回归模型:岭回归(ridge regression)、LASSO回归(least absolute shrinkage and selection operator)和偏最小二乘回归PLSR(partial least squares regression)。通过检查3种模型

表 1 施工面积预测的相关变量描述

Tab.1 Description of the variables involved in construction area forecasting

变量类别	变量符号	变量	变量定义	筛选出的重要变量( $X_i$ )	来源
因变量	AREA	施工面积/ 万 $m^2$	施工的全部房屋建筑面积,包括本期新开工的房屋面积、上期跨入本期继续施工的房屋面积、上期停缓建在本期恢复施工的房屋面积、本期竣工的房屋面积及本期施工后又停缓建的房屋面积。	/	/
自变量	ALSP	人均居住面积/ $m^2 \cdot \text{人}^{-1}$	按居住人口计算的平均每人拥有的房屋使用面积中专供居住的面积	是	参考文献 [12—13]
	POP	地区总常住人口/ 万人	居住在本乡镇街道且户口在本乡镇街道或户口待定的人;居住在本乡镇街道且离开户口登记地所在的乡镇街道半年以上的人;户口在本乡镇街道且外出不满半年或在境外工作学习的人。	是	
	HH	地区总户数/万户	户口在本地区所辖行政区划范围内的常住户口总数	是	
	CR	城镇化率/%	城镇人口占总人口(包括农业与非农业)的比重	是	
	PGDP	人均GDP/元·人 $^{-1}$	人均地区生产总值	是	
	TIS	第三产业占比/%	第三产业产值/总产值	是	
	SIS	第二产业占比/%	第二产业产值/总产值	是	
	UR	城镇登记失业率/%	城镇登记失业人员数与城镇单位就业人员、城镇单位中的不在岗职工、城镇私营企业主、个体户主、城镇私营企业和个体就业人员、城镇登记失业人员之和的比。	否	
	UP	城镇登记失业人口/万人	在劳动年龄内,有劳动能力无业而要求就业,并在当地就业服务机构进行失业登记的城镇常住人员。	否	

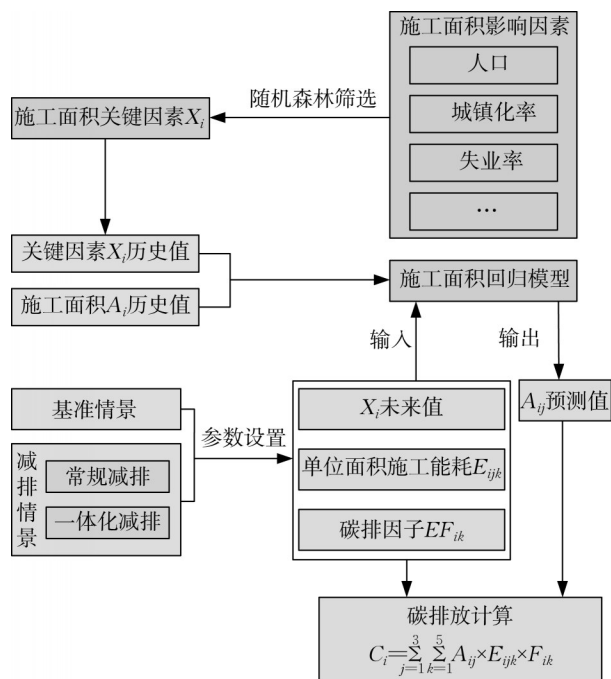


图 1 计算流程图

Fig.1 Methodology workflow.

的 VIF 方差膨胀系数(variance inflation factor)值、误差值等方式选择误差最小的回归模型作为各地区最终的施工面积预测模型。

上海、江苏、浙江和安徽的施工面积回归模型如式(1)~(4)所示。为了在稀疏条件下更接近真实的发展趋势,本文选择 savgol\_filter 平滑方式进行平滑。其中 AREA 表示施工面积,ALSP 表示人均居住面积,POP 表示常住人口,CR 表示城镇化率,PGDP 表示人均 GDP,SIS 表示第二产业产值占比,

TIS 表示第三产业产值占比,HH 表示户数。

上海:

$$\text{LNAREA} = 4.741 + 5.577\text{LNALSP} - 0.255\text{LNPOP} - 1.99\text{LNCR} - 0.199\text{LNPGDP} + 0.622\text{LNSIS} \quad (1)$$

江苏:

$$\text{LNAREA} = -60.255 - 1.37\text{LNALSP} + 7.828\text{LNPOP} - 0.208\text{LNCR} + 1.16\text{LNPGDP} - 1.373\text{LNTIS} \quad (2)$$

浙江:

$$\text{LNAREA} = -44.699 + 0.618\text{LNALSP} + 3.397\text{LNPOP} - 0.056\text{LNCR} + 0.962\text{LNPGDP} + 3.724\text{LNSIS} \quad (3)$$

安徽:

$$\text{LNAREA} = -18.537 + 0.488\text{LNALSP} + 2.825\text{LNHH} + 0.741\text{LNCR} + 0.255\text{LNPGDP} \quad (4)$$

## 1.2 情景设置

设置了基准情景和减排情景两种情景。基准情景指保持现有发展趋势达到的建筑业发展水平,用于预测碳达峰。减排情景指政府和企业采取一系列减排措施达到的建筑业碳排放水平,本文将讨论常规减排与一体化减排两种减排方式。各情景下的建筑业碳排放按式(5)计算。

$$C_i = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 A_{ij} \times E_{ijk} \times F_{ik} \quad (5)$$

式中:  $C$  表示建筑业碳排放;  $A$  表示施工面积;  $E$  表示单位面积施工能耗;  $F$  表示碳排因子。

计算碳排放需要对 4 类参数进行设置,即施工



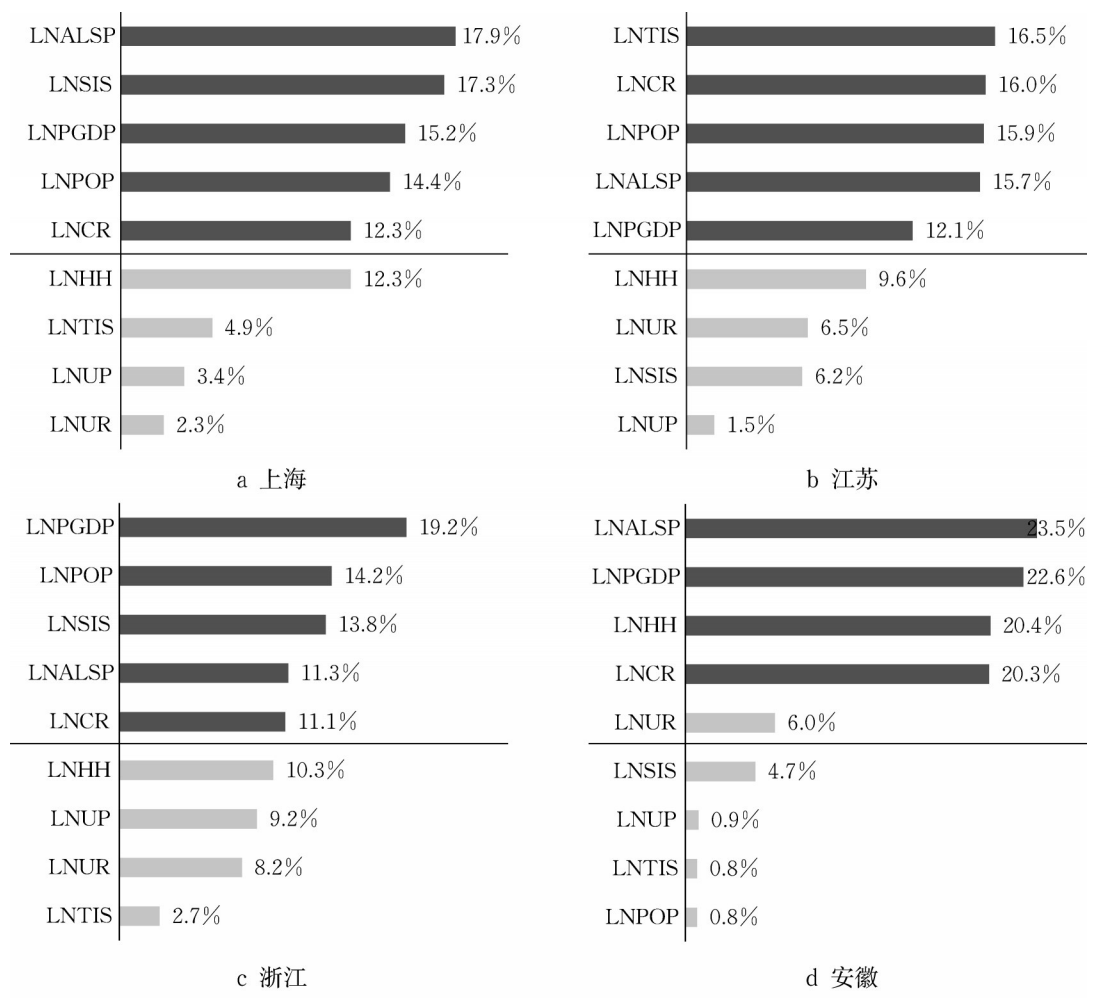


图 2 随机森林筛选出的施工面积重要影响因素  
Fig.2 Variables selected by Random Forest algorithm

面积、碳排因子、单位面积施工能耗及能源结构。本文将施工面积分解为 $A_n$ 新建施工面积、 $A_d$ 拆除重建面积和 $A_{ic}$ 改建扩建面积,为此需要设置新建面积占比、拆除重建面积占比和改建扩建面积占比。此外施工面积值需要将施工面积自变量代入到回归模型中得到,所以也需要对施工面积回归模型的自变量参数进行设置。施工面积的单位施工能耗 $E$ 分为新建施工单位面积能耗 $E_n$ 、拆除施工单位面积能耗 $E_d$ 以及改建扩建施工单位面积能耗 $E_{ic}$ 。本文中的能源结构需要设置建筑业中主要使用的煤、油、天然气、热、电 5 种能源的使用占比。相应地,也需要设置煤碳排因子 $F_c$ 、油品碳排因子 $F_o$ 、天然气碳排因子 $F_g$ 、热力碳排因子 $F_l$ 和电力碳排因子 $F_e$ 。

减排情景中的参数根据减排措施设置。首先通过文献调研归纳了 6 条常规减排措施和 6 条一体化减排措施,再通过情景分析定量分析相关措施的减排潜力。情景分析的参数设置见第 3 节。

## 2 长三角建筑业碳达峰预测

### 2.1 基准情景假设

基准情景具体指在施工面积、能源强度、建材能耗、施工技术等参数均保持现有发展趋势的情况下预测建筑业的碳排放发展情况。具体参数设置如下。

(1) 施工面积

施工面积预测模型的自变量根据现有规划及发展趋势设置,具体设置如表 2 所示,表中 N/A 指模型不含其中参数,无需设置。未来施工面积的 3 部分(新建面积、拆除重建面积、扩建改建面积)占比缺少直接数据,本文根据 3 种项目的投资占比确定各施工面积占比,上海的新建面积占 66%、扩建改建面积占 24%,拆除重建面积占 10%;江苏的三者占比分别为 60%、35%、5%;浙江分别为 64%、30%、6%;安徽分别为 55%、37%、8%。

(2) 碳排因子

本文参照发达国家碳排因子设置 2035 年长三角

表 2 基准情景下施工面积回归模型的自变量设置

Tab.2 Variables' setting for the construction area regression model under the baseline scenario

自变量	上海	江苏	浙江	安徽
ALSP	参考日本等发达国家现有值及规划值设置,设置上限值 $30\text{m}^2\cdot\text{人}^{-1}$ 与2060年稳定值 $25\text{m}^2\cdot\text{人}^{-1}$ 。根据现有趋势发展,达到上限值后开始趋于稳定值。	参考英法等发达国家现有值设置,设置上限值 $55\text{m}^2\cdot\text{人}^{-1}$ 与2060年稳定值,其中江苏和安徽为 $45\text{m}^2\cdot\text{人}^{-1}$ ,浙江为 $55\text{m}^2\cdot\text{人}^{-1}$ 。根据现有趋势发展,达到上限值后开始趋于稳定值。		
POP	根据《上海市城市总体规划(2017—2035年)》设置2035年规划值2 500万人口,根据国家人口发展战略研究报告设置2050年设定值2 430万人。中间年份插值计算,2051—2060年根据趋势发展。	比照浙江省规划值设置2035年规划值9 100万人,根据国家人口发展战略研究报告设置2050年设定值8 600万人。中间年份插值计算,2051—2060年根据趋势发展。	根据浙江省国土空间规划设置2035年规划值7 400万人,根据国家人口发展战略研究报告设置2050年设定值7 000万人。中间年份插值计算,2051—2060年根据趋势发展。	N/A
HH	N/A	N/A	N/A	总户数=总常住人口/每户人数;总常住人口设置依据参考其他省市;参考日本国家设置2060年每户人数2.5人,中间年份插值计算。
CR	参考发达国家设置2060年设定值95%;中间年份插值计算。	根据《江苏省“十四五”新型城镇化规划》设置2025年规划值75%、2035年规划值80%;同时参考发达国家设置2060年设定值85%;中间年份插值计算。	根据《浙江省高质量推进农业转移人口市民化实施方案(征求意见稿)》设置2025年规划值75%、根据《浙江省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》设置2035年规划值80%;同时参考发达国家设置2060年设定值85%;中间年份插值计算。	根据《安徽省新型城镇化规划(2021—2035年)》设置2025年规划值63%、2035年规划值75%;同时参考发达设置2060年设定值80%;中间年份插值计算。
PGDP	根据现有的趋势发展,合理外推。			
SIS	参考发达国家设置下限值12%根据现有趋势发展,达到下限值后开始保持不变。	N/A	参考发达国家设置下限值22%根据现有趋势发展,达到下限值后开始保持不变。	N/A
TIS	N/A	参考发达国家设置上限值80%根据现有趋势发展,达到上限值后开始保持不变。	N/A	N/A

地区的煤、油、天然气、热碳排因子,同时,根据中国电网<sup>[14]</sup>提出的假设“2050年单位电量碳排放强度将降至2019年的1/4左右”,设置2050年的电力碳排因子。2021—2049年插值计算,2051—2060年按照趋势线性外推。4地的碳排因子未来值如图3所示。

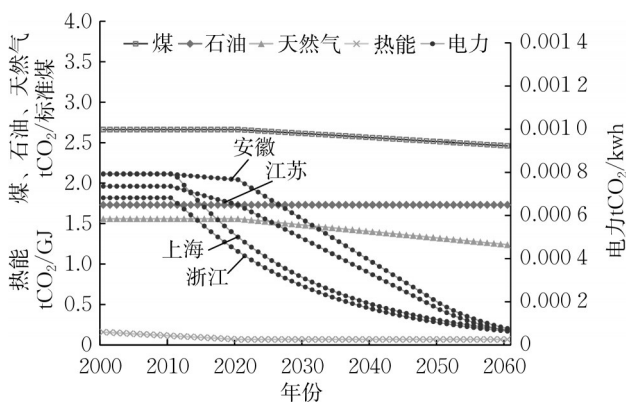


图 3 碳排因子设定

Fig.3 Carbon factors' setting

### (3)单位面积施工能耗

将新建工程的单位面积施工能耗设为 $E$ ,拆除

重建工程的单位面积能耗 $D_E=1.1E$ ,扩建改建的单位面积能耗 $T_E$ 设为 $0.6E$ 。此外,未来施工现场机械化程度提高、单位施工面积机械数量增加,预计导致单位面积施工能耗逐年增加1%;另一方面,施工机械效率提升,即单位能耗建造能力提高,预计可使单位面积施工能耗逐年降低1%。两者效果叠加,本文预计在基准情景下,单位面积施工能耗保持不变。

### (4)施工现场能源结构

在电气化趋势下,未来建筑业电力消耗增加,油减少,煤趋零。预计在基准情景下,至2060年,电力占比达到50%、油品占比达到50%、煤炭占比达到0%,中间年份的各能源占比按线性插值。

## 2.2 碳达峰预测结果

浙江和上海达峰时间早且峰值较低,江苏省的达峰时间最晚且峰值较高。图4展示了长三角地区的建筑业达峰情况。

浙江碳排放已经达到峰值。分析《浙江省统计年鉴》中各市区县的施工面积可以发现,浙江施工面积减少主要是因为绍兴市2019年、2020年的施工面积减少较多,从2018年的62 534万 $\text{m}^2$ 降至2019年48

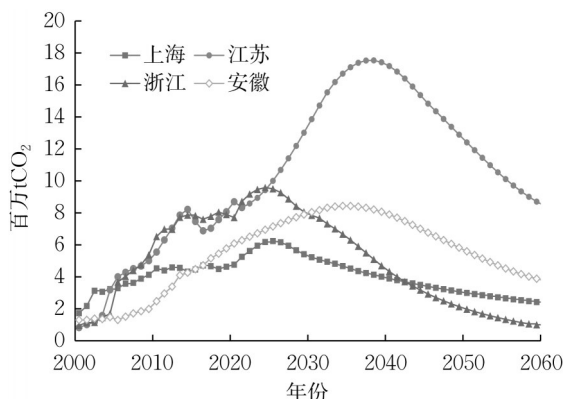


图4 长三角地区建筑业碳排放预测

Fig.4 Predicted carbon emissions for the construction industry under the baseline scenario

089万 $\text{m}^2$ ,2020年降至41 473万 $\text{m}^2$ 。绍兴实施控制施工面积的相关政策如《绍兴古城保护利用条例》,施工面积减少,说明政策对碳排放的影响十分明显。

上海碳达峰路径较为平缓,峰值不明显。2000年至2020年,上海施工面积增长了1 504%,是同时期长三角中增长幅度最大的地区。但是20年间的碳排只增长了203%,是增长幅度最小的地区。主要原因可归结于上海单位施工能耗减少了77.8%,在长三角地区中降低最明显。其他地区可借鉴上海对施工能耗控制的相关经验和技术。

安徽碳达峰时间较晚。分析发现,相较于长三角其他地区,安徽处于快速发展阶段。以2020年为例,安徽城镇化率为58%,而同年上海的城镇化率为92%,江苏为73%,浙江为72%。在2035年之前,由于人均GDP和城镇化率等变量持续增长,导致安徽的施工面积大幅增加,建筑业碳达峰年份将晚于2030年。

江苏碳达峰时间也较晚,其峰值也远高于长三角其他地区。主要原因是江苏人口基数较大。2000年江苏有常住人口7 327万人,是同年上海的4.5倍,浙江的1.5倍,安徽的1.2倍,且近几年仍呈上涨趋势。江苏的建筑业减排需要以调整施工面积为主,同时调整能源结构、减少单位能耗来提前碳达峰的时间。

### 3 长三角建筑业碳减排分析

减排情景指政府和企业采取一系列减排措施达到的建筑业碳排放水平。本节将讨论常规减排与一体化减排两种减排方式。其中常规减排措施指参照政府出台文件<sup>[15-27]</sup>并结合已有研究归纳出的减排措施,包括以下几个方面:减少新建面积,以改建代替拆除重建,调整并优化建筑业的能源结构,发展节能和

施工技术以降低单位施工面积所需的能耗。一体化减排指综合考虑长三角一体化政策影响的建筑业减排情景。根据长三角一体化发展相关文件<sup>[28-29]</sup>将一体化的影响总结为6种:标准一体化、数据一体化、技术一体化、市场一体化、经济一体化和城镇一体化。其中标准、数据、技术与市场一体化主要影响减排技术措施;经济与城镇一体化主要影响施工面积。后文将首先阐释各减排措施的概念和相关参数设置,然后讨论常规减排措施和一体化减排措施的减排潜力。

#### 3.1 减排措施设置

本文考虑的常规减排措施有6类:①减少新建面积,以改代拆:在减少新建建筑规模、严格控制总量的同时对既有建筑进行功能完善和提升改造,即降低新建面积与拆除重建面积占比,增加改建扩建面积占比;②提高清洁电使用:增加建筑施工中清洁电能的使用占比;③智慧施工:智慧施工所代表的数字化系统管理可以促进施工现场节能、节水、节材,从而减少单位面积施工能耗;④施工工艺改革:通过优化施工流程、精益施工方法以及优化建筑结构的方式来减少单位面积施工能耗,如发展装配式、优化施工措施等;⑤使用节能机械:将高能耗机械替换为节能机械从而减少单位面积施工能耗;⑥电气化:提高建筑施工中电能的使用占比。常规减排措施关键年份的设置如表3所示,其中关键年份之间的数据通过插值计算。

一体化减排措施是指考虑考虑6个一体化对常规减排措施的影响,根据政策文件调整各参数设置。

(1)标准一体化:提高清洁电使用率。长三角一体化战略中提到“发挥上海龙头带动作用”、“标准互认”及“绿色一体化发展”等理念。由于实施了标准互认的理念,预计区域内的清洁电使用率将提高至上海的标准,故将2060年长三角其他地区清洁电的使用率也设置为27%<sup>[27]</sup>。

(2)数据一体化:提升数字化施工水平。数据一体化的推行将建立区域信息共享。建筑业发展指标数据、信用体系、市场监管等信息的共享和互通互联,将会提升数字化施工水平,从而加快智慧施工的发展。智慧施工可提高施工现场节能、节水、节材效果,因此预计2025年单位面积施工能耗降低0.25%,至2035年,单位面积能耗降低0.5%。

(3)技术一体化:改革施工工艺。《上海市装配式建筑“十四五”规划》中提出上海会同长三角区域主管部门,推动三省一市形成统一开放的建筑市场环境,不断增强装配式建筑行业发展的整体性和协同



表 3 减排措施参数设置表  
Tab.3 Variables' setting under the emission reduction scenario

减排措施	减排指标	常规减排	
		关键年份数据取值	依据
① 减少新建,以改代拆	3类面积占比	2060年:新建面积占比为30.52%;扩建改建面积占比为65.19%;拆除重建面积占比为4.29%	参考发达国家水平设置 <sup>[30-31]</sup>
② 提高清洁电使用	清洁电使用占比	2060年清洁电使用占比: 上海27%、江苏7.5%、 浙江14.07%、安徽5.25%	根据各地碳达峰方案等政府相关文件设置 <sup>[27]</sup>
③ 智慧施工		2025年单位面积施工能耗降低0.1%; 2035年单位面积施工能耗降低0.3%; 2036年单位面积施工能耗不再降低。	根据各地碳达峰方案等政府相关文件设置 <sup>[27]</sup>
④ 施工工艺改革	单位面积施工能耗年降低率	地区 2025年 2035年 2060年 上海0.136 9%,0.470 2%0.023 6% 江苏0.189 9%,0.523 3%0.030 2% 浙江0.164 0%,0.497 3%,0.026 9% 安徽0.155 3%,0.488 6%,0.022 9%	设定装配率每提升1%,单位面积施工能耗降低值(上海0.009%、江苏降低0.023%、浙江降低0.017%、安徽降低0.007%) <sup>[32-33]</sup> 。并根据十四五规划等政府文件 <sup>[24-25,34-36]</sup> 设定各省市未来装配率。同时预计2035年达到施工措施最优。
⑤ 使用节能机械		地区 2040年 2060年 上海0.89%1.43% 江苏0.37%0.90% 浙江0.37%0.90% 安徽0.34%0.87%	参考太阳能塔吊的节能效果,设定节能机械每台每年大约能减少0.76t标煤 <sup>[15]</sup> ;同时参考新能源汽车的普及率设定节能施工机械的普及率。
⑥ 电气化	电力占比	2035年电力占比为47%,2060年电力占比为63%	参考国家电网报设置 <sup>[14]</sup>

性,逐步打破行业发展的地域藩篱,落实长三角区域预制构件共管共治和协调共享制度。得益于技术一体化的发展,长三角其他地区的装配率会进一步提升,据此设定2060年装配率为:江苏99%、浙江95%、安徽90%。技术一体化也会促使施工临时措施与结构设计更快达到最优程度。

(4)市场一体化:提高节能机械使用率。《框架协议》<sup>[29]</sup>提出构建建筑业一体化市场体系逐步消除行政壁垒,降低制度性交易成本,统一市场准入标准和机制,逐步取消各地准入门槛,改善营商环境。合理推测,未来长三角地区建筑节能机械的普及率会向最高者看齐,因此设置2060年长三角地区的节能机械普及率均达到18.75%。同时随着节能机械技术的发展,其机械节能程度也势必有所提升,设定节能机械每台每年大约能减少0.86t标煤。

(5)经济一体化:缩小区域内经济差距。根据《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中提到的“2025年中心区人均GDP与全域人均GDP差距缩小到1.2:1”、“到2035年城乡区域差距明显缩小,公共服务水平趋于均衡”的发展目标调整施工面积预测模型自变量中各省市人均GDP的设置。

(6)城镇一体化:提高城镇化率。根据《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中“城市群同城化水平进一步提高,各城市群之间高效联动”的城乡区域协调发展目标调整施工面积预测模型自变量中各省市城镇化率的设置。将江苏、浙江、安徽2060年城镇化率设定值分别从85%,85%,80%提升到90%,

90%,85%。

3.2 常规减排措施的效果

减排措施的主要效果是相比于基准情景提前碳达峰时间和减少峰值碳排放量。2060年4个省市的减排效果分别为上海60.99%、江苏50.09%、浙江52.39%、安徽47.38%(图5)。在各减排措施中,“减少新建,以改代拆”减排效果最明显,2060年可以减少13.54%~18.65%的碳排放(图6)。“减少新建,以改代拆”也意味着减少传统建筑,增加绿色节能建筑,减少建筑运营阶段碳排放。“使用节能机械”、“施工工艺改革”和“智慧施工”三种减排措施在计算模型中表现为降低单位能耗,其短期内减排效果不明显但长期减排效果突出。以“施工工艺改革”为例,2060年上海地区“施工工艺改革”可以减少6.81%的碳排,其减排量是2030年的4.029倍,这个比例在江苏为3.696,浙江为3.841,安徽为4.043。“提高清洁电使用”与“电气化”优化施工现场能源结构,是实现建筑业碳中和关键措施。

3.3 一体化减排措施的效果

一体化减排措施可促使长三角地区整体碳达峰时间从2035年提前至2028年,碳峰值降低256万t,2060年碳排放减少至567万t。结果显示,一体化政策可以在常规减排的基础上再减少2.71%~18.34%的碳排(图7),且一体化政策影响各减排措施的减碳量(对比图6和图8)。具体而言,标准一体化、数据一体化、技术一体化、市场一体化利于减碳,而经济一体化、城镇一体化会导致一些地区碳排放增加。

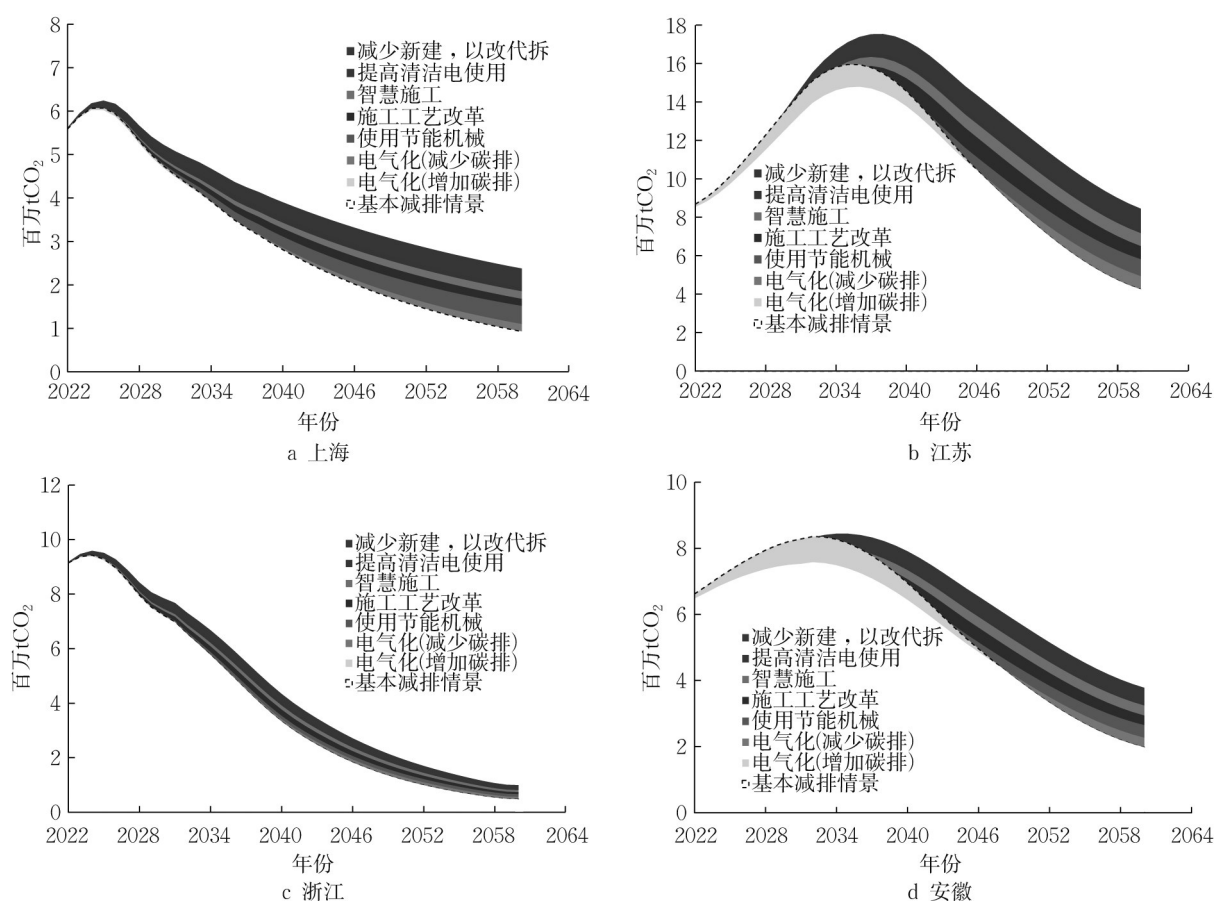


图5 常规减排情景下各地区减排路径

Fig.5 Emission reduction paths by region under the emission reduction scenario

“标准一体化”对于江苏和安徽的减排作用较为明显,分别可在常规减排的基础上再减少4.01%和5.02%的碳排放。“标准一体化”通过对标上海的绿色施工标准和经验,可以减少长三角其他地区的试错成本,加快长三角地区绿色施工的发展。“数据一体化”对于上海和浙江的减排作用较为明显,分别可再减少4.89%和4.72%的碳排放。数据一体化的实施将促进各地区的信息数据交流,技术和信息上的互通和开发将加快智慧施工的发展。“技术一体化”短期减排效果明显。相关政策的实施不仅可以推动装配式施工等绿色施工技术的发展,还可以加快单位施工能耗达到最优值。以2030年为例,“技术一体化”帮助长三角地区在常规减排的基础上额外减少31.79万吨的建筑业碳排放。市场一体化”远期减排效果突出。“市场一体化”的实施将优化长三角地区施工机械的营商环境,提升节能机械的普及率。至2060年,节能机械在长三角地区的使用率预计将达到18.75%,同年长三角地区可额外减少28.77万吨碳排放。

“经济一体化”与“城镇一体化”会增加浙江与安

徽的碳排放,分别在常规减排的基础上增加了16.80%和12.95%碳排放。这导致浙江的一体化减排最终只比常规减排减少了2.71%的碳排放。分析发现,由于“经济一体化”与“城镇一体化”加速了江浙皖的人均GDP与城镇化发展,从而导致三地施工面积增加,进而导致碳排放增加。一体化政策下上海的建筑业碳排与经济和城镇化已呈现出脱钩的状态。江浙皖地区建筑业碳排与人均GDP和城镇化率呈正相关,“经济一体化”与“城镇一体化”的作用一方面是协同区域的发展,避免出现以上海为中心的单核圈结构,另一方面则是为了加快江浙皖地区的发展进程。为推进江浙皖建筑业碳排与经济脱钩,应优化升级产业结构,加快进入服务经济与创新经济阶段。在经济发展的同时防止建筑业碳排增长过快,可参考上海脱钩经验与绿色施工相关技术,尽快将施工能耗强度降低至先进水平,实现建筑业的高质量、可持续发展。

为研究长三角建筑业的碳中和路径,本文还进行了碳中和情景分析。该情景进行最乐观的假设,即建筑业主动减排措施力度在合理范围内调整为最



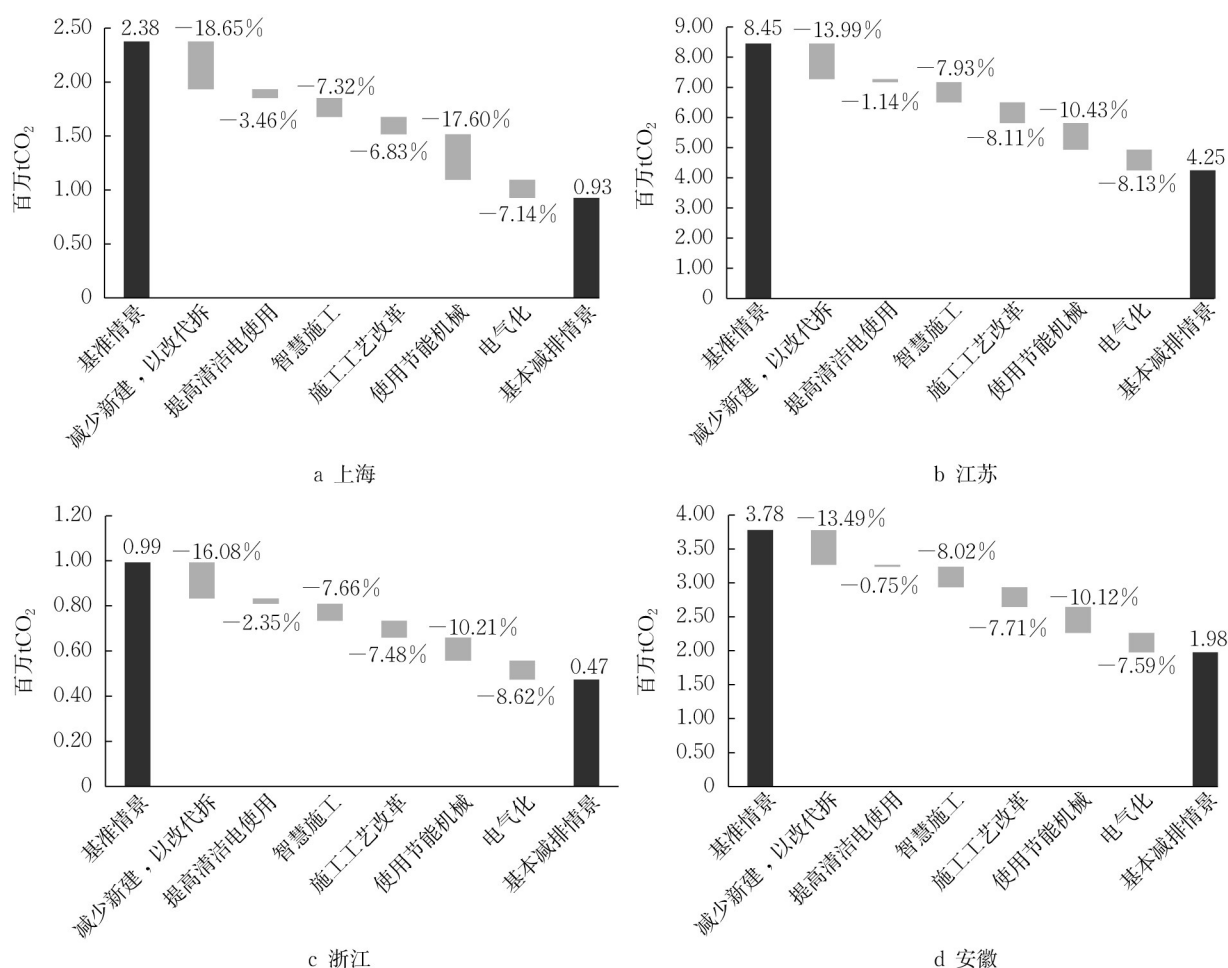


图6 常规减排情景下2060年减排措施效果

Fig.6 Contribution of emission reduction measures in 2060 under the emission reduction scenario

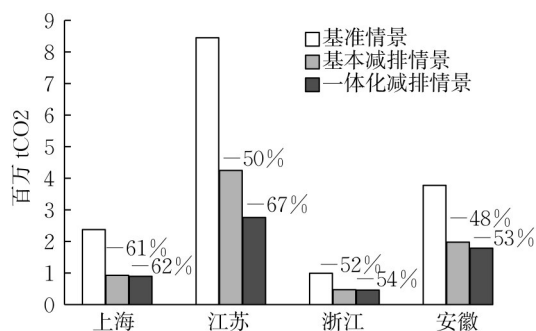


图7 2060年3种情景碳排对比(图中百分数为相对基准情景的减排率)

Fig.7 Comparison of the carbon emissions in 2060 between three scenarios (Percentages in the figure are emission reduction rates relative to the baseline scenario)

大。结果发现,仅依靠建筑业主动减排措施,2060年较难实现碳中和,长三角建筑业需要借助外部减排措施实现碳中和目标,例如通过社会电力清洁化降低电力碳排因子(图9)。

## 4 结论与建议

本文模拟了长三角一体化政策下的区域内部关系,预测了区域一体化政策下建筑业碳排放发展趋势。通过考虑区域内不同要素间的相互作用、量化同一政策下不同地区的相互影响,为区域碳排放研究提供新的视角,提升区域碳排放可信度。

研究发现,一体化协同减排对长三角区域建筑业十分必要。根据测算,基准情景下长三角区域建筑业将于2035年达峰,常规减排措施可以降低328万吨的区域峰值,而一体化措施不仅可以降低峰值,还可以使长三角区域建筑业提前7年达峰从而实现2030年前碳达峰的目标。同时,为实现建筑业2060年碳中和目标,必须结合建筑业减排措施和社会减排措施。电气化和提高清洁电使用是实现建筑业碳中和的必要措施。为助力长三角一体化地区建筑业实现双碳目标,具体建议如下。

(1)建议在建筑业建立协同减排机制,要求上下

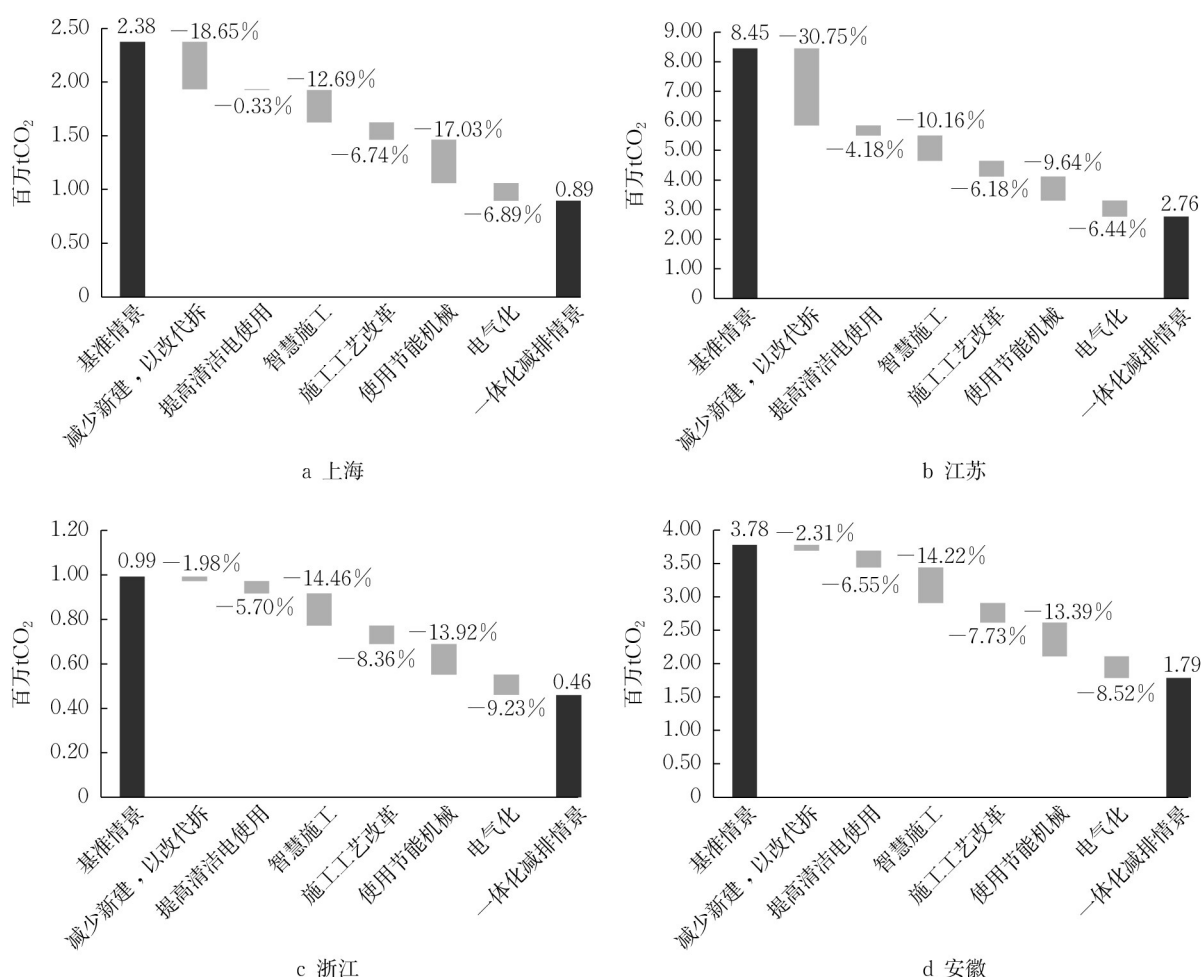


图8 一体化减排情景下2060年减排措施效果

Fig.8 Contribution of emission reduction measures in 2060 under the integrated emission reduction scenario

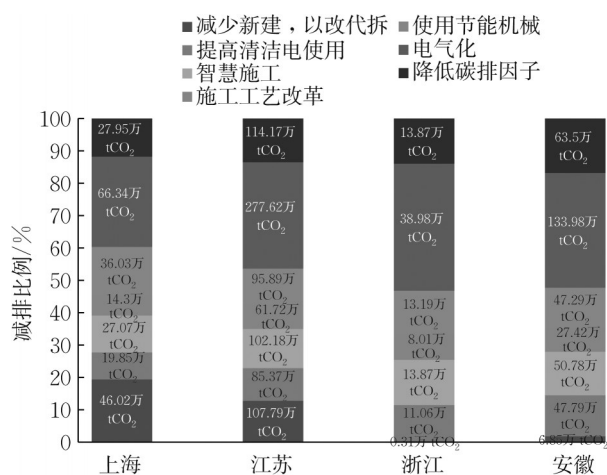


图9 碳中和情景下2060年减排措施的减排比例

Fig.9 Contribution of carbon reduction measures under the carbon neutral scenario in 2060

游产业设定计划共同减排。例如在建筑业上游执行“总量控制”及“以改代拆”,从规划层面控制新建面积,加强既有建筑的绿色低碳改造,将年改造面积提

升至当年施工面积的60%以上,将年拆除面积控制在当年施工面积的5%以内。同时在投资阶段增加“绿色低碳金融”等鼓励型政策,逐步建立建筑业碳交易体系。在建筑业下游产业实行激励政策,利用税收、财政补贴等手段引导企业发展绿色创新技术,以获取技术优势,将相关产业绿色发明数量增加至80%以达到国际水平。

(2)建议制定建筑施工合理用电目标。根据各地实际情况,通过政策补贴或规范要求等形式增加施工现场电力使用占比。针对施工现场传统能源机械使用占比较高的情况,建议以减免税收等政策鼓励施工单位使用节能机械代替高能耗机械,争取至2040年节能机械普及率达11%以上。同时逐步引入清洁电,使2030年因清洁电的使用减少2%以上的施工碳排放。

(3)建议发展绿色施工技术。建议江浙皖要求新建项目100%实施绿色施工标准,同时通过政策补贴等形式提高新建建筑装配率、提高单体建筑预

制率,争取2030年装配率提升16%以上。监管重点由粗放的保持新建建筑装配率转向提高预制率和提升装配式工艺等方面。

#### 作者贡献声明:

卢昱杰:论文构思,确定论文的主体方向与研究目的;  
何凌云:开展研究,撰写论文;  
李佩娴:设计研究方法,指导研究活动,修改论文;  
宋广翰:修改论文;  
杨晓露:提供资源与研究数据。

#### 参考文献:

- [1] 魏后凯, 年猛, 李玢. “十四五”时期中国区域发展战略与政策[J]. 中国工业经济, 2020(5): 5.  
WEI Houkai, NIAN Mang, LI Le. "China's regional development strategies and policies in the 14th Five-Year Plan period[J]. China Industrial Economy, 2020(5): 5.
- [2] 洪银兴, 王振, 曾刚, 等. 长三角一体化新趋势[J]. 上海经济, 2018(3): 122.  
HONG Yinxing, WANG Zhen, ZENG Gang, *et al.* New trend of Yangtze River Delta integration[J]. Shanghai Economy, 2018(3): 122.
- [3] 中共中央国务院印发长江三角洲区域一体化发展规划纲要[N]. 人民日报, [2019-12-02].  
CPC Central Committee and State Council issue outline of plan for integrated development of Yangtze River Delta Region [N]. People's Daily, [2019-12-02].
- [4] 余思勤, 孙佳会. 长三角港口群与城市群协调发展分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(9): 1335.  
YU Siqin, SUN Jiahui. Analysis on coordinated development of port cluster and urban agglomeration in Yangtze River Delta[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2021, 49(9): 1335.
- [5] 国际典型湾区能源发展经验启示[EB/OL]. [2023-05-04]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1702792824292600060&wfr=spider&for=pc>.  
Insights from the experience of energy development in a typical international bay area [EB/OL]. [2023-05-04]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1702792824292600060&wfr=spider&for=pc>.
- [6] MARTIEN P T, GUHA A, NEWMAN S, *et al.* Greenhouse gas source detection and attribution in the San Francisco Bay Area of California using a mobile measurement platform[C]// Proceedings of AGU Fall Meeting, San Francisco: American Geophysical Union, 2017: 2459-2459.
- [7] 日本城市能源利用与节能减排[EB/OL]. [2023-05-05]. <http://www.xbzhaopin.com/gongwenfanwen/2022/0716/101235.html>.  
Energy use and energy conservation in Japanese cities [EB/OL]. [2023-05-05]. <http://www.xbzhaopin.com/gongwenfanwen/2022/0716/101235.html>.
- [8] ZHAO Bin, WANG Tianyang, JIANG Zhe, *et al.* Air quality and health cobenefits of different deep decarbonization pathways in California[J]. Environmental, 2019, 53(12): 7163.
- [9] ZHOU Kaile, YANG Jingna, YANG Ting, *et al.* Spatial and temporal evolution characteristics and spillover effects of China's regional carbon emissions[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: 116423.
- [10] 汪明月, 刘宇, 杨文珂. 环境规制下区域合作减排演化博弈研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(2): 158.  
WANG Mingyue, LIU Yu, YANG Wenke. Research on the evolutionary game of regional co-operation in emission reduction under environmental regulation[J]. China Management Science, 2019, 27(2): 158.
- [11] Breiman L. Random forests[J]. Machine, 2001, 45(5): 32.
- [12] ZHU L, DAI C, YAN Z, *et al.* Prediction of civil building scale in China based on system dynamics model[J]. Building, 2022, 50(5): 127.
- [13] 潘毅群, 魏晋杰, 汤朔宁, 等. 上海市建筑领域碳中和预测分析[J]. Heating, 2022, 52(8): 18.  
PAN Y Q, WEI J J, TANG S N, *et al.* Predictive analysis of carbon neutrality in Shanghai's building sector [J]. Heating, 2022, 52(8): 18.
- [14] 张宁, 邢璐, 李苏秀, 等. 我国能源发展六大判断和电力发展六大判断[N]. 国家电网报, [2019-01-22].  
ZHANG N, XING L, LI S X, *et al.* Six judgements on China's energy development and six judgements on electricity development[N]. State Grid News, [2019-01-22].
- [15] IMAM R, AYADI O. Powering electric tower cranes by solar energy for sustainable construction[J]. International Journal of Construction Management, 2020, 22(13): 2614.
- [16] 江亿. 建筑领域的低碳发展路径[J]. 建筑, 2022(14): 50.  
JIANG Yi. Low-carbon development paths in the construction sector[J]. Architecture, 2022(14): 50.
- [17] TABRIZIKAHOU A, NOWOTARSKI P. Mitigating the energy consumption and the carbon emission in the building structures by optimization of the construction processes [J]. Energies, 2021, 14(11): 3287.
- [18] 胡姗, 张洋, 燕达, 等. 中国建筑领域能耗与碳排放的界定与核算[J]. 建筑科学, 2020, 36(S2): 288.  
HU Shan, Zhang YANG, YAN Da, *et al.* Definition and accounting of energy consumption and carbon emissions in China's building sector[J]. Building Science, 2020, 36(S2): 288.
- [19] 中国电力企业联合会. 中国电气化年度发展报告 2021[R]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021  
China Electricity Council. China electrification annual development report 2021 [R]. China Building Materials Industry Press, 2021
- [20] 上海市人民政府. 上海市碳达峰实施方案[R]. 上海: 上海市人民政府, 2022.  
Shanghai Municipal People's Government. Shanghai peak carbon implementation programme [R]. Shanghai: Shanghai Municipal People's Government, 2022.
- [21] 中国大数据网双碳大数据与科技传播联合实验室. 中国双碳大数据指数白皮书(2022)[R]. 北京: 中国大数据网双碳大数据与科技传播联合实验室, 2022.  
China Big Data Network Joint Laboratory on Double Carbon Big Data and Science and Technology Communication. China dual carbon big data index white paper (2022) [R]. Beijing:



- China Big Data Network Joint Laboratory on Double Carbon Big Data and Science and Technology Communication, 2022.
- [22] 工业和信息化部,国家发展改革委,生态环境部.工业领域碳达峰实施方案[R].北京:工业和信息化部,国家发展改革委,生态环境部.2022.
- Ministry of Industry and Information Technology of Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission of Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Ministry of Ecology and Environment of Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Implementation programme for carbon peaking in the industrial sector [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission of Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Ministry of Ecology and Environment of Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2022.
- [23] 安徽省人民政府.安徽省“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划[R].合肥:安徽省人民政府,2022.
- Anhui Provincial People's Government. Anhui Province "14th Five-Year Plan" building energy efficiency and green building development plan [R]. Hefei: Anhui Provincial People's Government, 2022.
- [24] 安徽省住建厅.安徽省“十四五”装配式建筑规划[R].合肥:安徽省住建厅,2021.
- Anhui Provincial Department of Housing and Construction. Anhui Province "14th Five-Year Plan" assembly type building [R]. Hefei: Anhui Provincial Department of Housing and Construction, 2021.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部.“十四五”建筑业发展规划[R].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2022.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. The "14th Five-Year Plan" for the development of the construction industry [R]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2022.
- [26] 江苏省住房和城乡建设厅.江苏省“十四五”绿色建筑高质量发展规划[R].南京:江苏省住房和城乡建设厅,2021.
- Jiangsu Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Jiangsu Province "14th Five-Year Plan" for high-quality development of green buildings [R]. Nanjing: Jiangsu Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, 2021.
- [27] 上海市人民政府.上海市能源发展“十四五”规划[R].上海:上海市人民政府,2022.
- Shanghai Municipal People's Government. Shanghai energy development "14th Five-Year Plan" [R]. Shanghai: Shanghai Municipal People's Government, 2022.
- [28] 中华人民共和国国务院.长江三角洲区域一体化发展规划纲要[R].北京:中华人民共和国国务院,2019.
- State Council of the People's Republic of China. Outline of the Plan for the integrated development of the Yangtze River Delta Region [R]. Beijing: State Council of the People's Republic of China, 2019.
- [29] 上海市住房和城乡建设管理委员会;浙江省住房和城乡建设厅;江苏省住房和城乡建设厅;安徽省住房和城乡建设厅.长三角地区建筑业一体化高质量发展战略协作框架协议[R].湖州:上海市住房和城乡建设管理委员会;浙江省住房和城乡建设厅;江苏省住房和城乡建设厅;安徽省住房和城乡建设厅,2020.
- Shanghai Municipal Commission of Housing and Construction, Zhejiang Provincial Department of Housing and Construction, Jiangsu Provincial Department of Housing and Construction, Anhui Provincial Department of Housing and Construction. Framework agreement on strategic collaboration for integrated and high-quality development of the construction industry in the yangtze river delta region [R]. Huzhou: Shanghai Municipal Commission of Housing and Construction; Zhejiang Provincial Department of Housing and Construction; Jiangsu Provincial Department of Housing and Construction; Anhui Provincial Department of Housing and Construction, 2020.
- [30] The European Parliament and the Council. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council strategy for the sustainable competitiveness of the construction sector and its enterprises [R]. Brussels: The European Parliament and the Council, 2012.
- [31] Federal Statistical Office. Construction and housing | federal statistical office [EB/OL]. [2022-09-05]. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/en/home/statistics/construction-housing.html>.
- [32] TENG Yue, LI Kaijian, PAN Wei, *et al.* Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies [J]. Building, 2018, 132: 125.
- [33] MINUNNO R, O' GRADY T, MORRISON GM, *et al.* Investigating the embodied energy and carbon of buildings: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments [J]. Renewable, 2021, 143: 110935.
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房和城乡建设部标准定额司关于2020年中国装配式建筑发展的通知[R].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2020.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Department of Standards and Quotas, on the development of assembled buildings in China in 2020 [R]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2020.
- [35] 上海市住房和城乡建设管理委员会.上海市装配式建筑“十四五”规划[R].上海:上海市住房和城乡建设管理委员会,2021.
- Shanghai Municipal Commission of Housing and Construction. Shanghai assembly building "14th five-year plan" [R]. Shanghai: Shanghai Municipal Commission of Housing and Construction, 2021.
- [36] 浙江省住房和城乡建设厅.浙江省推进钢结构装配式住宅试点工作方案[R].杭州:浙江省住房和城乡建设厅,2019.
- Zhejiang Provincial Department of Housing and Construction. Pilot work programme for promoting steel structure assembled houses in Zhejiang Province [R]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Department of Housing and Construction, 2019.