

“双碳”背景下长三角地区碳排放情景模拟研究

李建豹¹ 黄贤金² 揣小伟² 孙树臣³

(1. 南京财经大学公共管理学院, 江苏南京 210023;

2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京 210023;

3. 聊城大学环境与规划学院, 山东聊城 252059)

【摘要】: 长三角地区是中国经济发展的引擎之一, 碳排放量位居中国前列, 合理模拟长三角地区碳排放量, 有助于中国碳减排目标的实现。基于改进的 IPAT 模型, 模拟了 2015—2060 年长三角地区碳排放量, 结果表明: 基准情景下, 上海、江苏、浙江和长三角地区的碳排放分别在 2020 年、2025 年、2030 年和 2025 年达到峰值, 碳排放量分别为 166.430 百万吨、1034.391 百万吨、457.954 百万吨和 1650.570 百万吨; 低碳情景下, 碳排放均在 2020 年达到峰值; 高碳情景下, 仅上海在 2030 年达到峰值, 江苏、浙江和长三角地区碳排放均无法在 2030 年达到峰值。长三角地区作为优化开发区, 应以基准情景作为发展的下限, 以低碳情景作为发展的上限, 确保社会经济平稳健康可持续发展。同时, 根据长三角地区各省市现状, 提出了低碳发展策略, 以期长三角地区低碳发展, 顺利实现碳中和, 提供决策参考。

【关键词】: 碳排放峰值 IPAT 模型 情景模拟 长三角地区

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)11-013-06

温室气体排放引起的全球变暖问题, 受到各国政府的广泛关注。人类活动碳排放是引起全球变暖的主要原因之一。中国已成为世界第一大碳排放国, 2009 年中国政府提出, 2020 年碳排放强度比 2005 年下降 40%~45%, 并将其作为约束性指标纳入国民经济和社会发展的中长期规划, 2014 年中国正式提出到 2030 年左右中国碳排放量有望达到峰值。2015 年中国向联合国气候变化框架公约秘书处提交了应对气候变化国家自主贡献文件《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》, 提出了到 2030 年碳排放强度比 2005 年下降 60%~65% 等目标。2020 年中国政府承诺, 力争 2030 年前实现碳排放峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。为了实现以上碳减排目标, 各级政府应制定科学合理的碳减排政策, 以指导碳减排工作, 而预测碳排放是制定碳减排政策的基础。

基金项目: 国家自然科学基金项目“多尺度视角下长三角地区城镇化碳排放效应及调控策略研究”(41901245); 江苏省高校哲学社会科学一般项目“多尺度视角下城镇化对碳排放影响机理及调控策略研究——以江苏省为例”(2019SJA0254)

第一作者简介: 李建豹, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 研究方向为城镇化碳排放、土地利用与规划。E-mail: lijianbao888@126.com

通讯作者简介: 黄贤金, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为自然资源与区域土地利用变化。E-mail: hxj369@nju.edu.cn

学者们利用不同方法对碳排放量进行预测分析,主要包括 STIRPAT 模型^[1-3]、情景分析法^[4-6]、IPAT 模型^[7-9]、LEAP 模型^[10-11]、蒙特卡洛动态模拟^[12]、中国能源环境综合政策评价模型^[13]、ARIMA 模型、BP 神经网络组合模型^[14]和系统动力学模型^[15-17]。黄蕊等^[1]使用 STIRPAT 模型和情景分析法预测了江苏省能源消费碳排放量发现,当人口和经济低速增长,技术高速增长时,2020 年碳排放量预测值为 202.81 兆吨。朱宇恩等^[7]使用改进的 IPAT 模型预测了 2015—2040 年山西省能源碳排放发现,GDP 在低速和中速发展情景下,碳排放可在 2030 年前达到峰值,而在高速增长情景下,2015—2040 年碳排放未出现峰值。Shan 等^[10]使用 LEAP 模型模拟了不同情景下 2020 年与 2030 年能源的初始和最终需求发现,2020 年最初能源需求为 4840~5070 兆吨,2030 年为 5580 兆吨~5870 兆吨,所有发展情景下,均能实现碳排放强度下降 40%~45%的目标。刘云鹏等^[12]运用蒙特卡洛动态模拟预测了 2030 年居民生活消费碳排放情况发现,碳排放的最大值为 64.27 亿吨。姜克隽等^[13]使用中国能源环境综合政策评价模型预测了中国 2050 年能源需求和温室气体排放发现,未来能源需求和温室气体排放呈明显增加趋势。赵成柏和毛春梅^[14]利用 ARIMA 模型和 BP 神经网络组合模型,预测了中国碳排放强度的变化,结果表明,2020 年中国碳排放强度比 2005 年下降了 34%。韩楠^[15]构建了碳排放系统动力学模型,预测了未来中国碳排放的发展趋势发现,在资本、劳动力及创新等要素的综合调控下,能够实现 GDP 增加的同时,碳排放量下降。

以往学者多关注能源碳排放峰值^[1,2,17],忽略了工业碳排放,但工业碳排在总碳排放中占有较大比例,忽略工业碳排放会导致碳排放预测值偏低。现有研究尺度多为省域^[1,7,11]或国家^[8,9,16],以城市群为研究尺度的相对较少,城市群是中国碳排放的重要来源,对中国碳减排目标的实现具有重要意义。长三角城市群是中国最大的城市群,已跻身于国际公认的六大世界级城市群。2019 年,长三角城市群碳排放量占中国的 13.6%,是中国碳排放的重要来源区域。《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》要求进行低碳发展。因此,结合长三角地区各省市的发展现状,参照现行长三角地区各省市国民经济和社会发展第十四个五年规划的目标及第十三个五年规划的目标完成情况,设置基准情景、低碳情景和高碳情景,基于改进的 IPAT 模型,模拟 2015—2060 年长三角地区各省市的能源和工业碳排放量(下文中的“碳排放”一律指“能源和工业碳排放”),并提出相应的碳排放控制策略,以期为长三角地区低碳调控提供决策参考。

1 数据来源

能源消费总量和用于计算碳排放量的化石燃料消费数据源于 2001—2020 年《中国能源统计年鉴》,化石燃料消耗类型主要包括原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、石脑油、沥青、润滑油、炼厂干气、其他石油制品、原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、其他焦化产品、煤焦油和天然气等。地区生产总值和工业产品产量源于 2001—2020 年《中国统计年鉴》。人口来源于 2001—2020 年《江苏统计年鉴》《浙江统计年鉴》和《上海统计年鉴》。平均货币工资和平均实际工资指数源于 EPS 数据平台的中国区域经济数据库。

2 碳排放峰值预测模型构建

2.1 IPAT 模型

IPAT 模型被广泛应用在能源和碳排放领域中,受国内外学者的青睐,可将碳排放分解为不同因子的乘积形式,其表达式如下:

$$C = P \left(\frac{G}{P} \right) \left(\frac{C}{G} \right) \quad (1)$$

式中：C 为碳排放量；P 为人口；G 为国内生产总值。综合分析现有研究成果，选择碳排放的主要影响因素，对 IPAT 模型进行改进，预测碳排放量。研究表明，碳排放不仅与经济产出和能源消费情况有关，还与产业结构和科技进步等因素密切相关^[18]。产业资本收益率与人均劳动报酬是引起产业结构演变的直接原因，而产业技术进步是引起产业资本收益率与人均劳动报酬变动的直接原因，是引起产业结构变化的间接原因。产业技术进步与产业劳动者报酬变动之间的相关性较强，可决系数为 0.91^[19]。因此，可用 0.91 与产业劳动报酬变动率的乘积表示产业技术进步率，表示技术进步与产业结构演进情况^[20]。IPAT 模型需要预测人口的变动情况，而对人口的预测可能会导致研究结果存在一定误差，因此，选择直接预测国内生产总值，减少预测变量，可适当减少模型误差，其表达式如下：

$$C = G \left(\frac{E}{G} \right) \left(\frac{C}{E} \right) (1 - 0.91f) \quad (2)$$

式中：E 为能源消费总量；E/G 为单位国内生产总值能耗，C/E 为能源碳排放强度；f 为劳动者报酬率；其他变量与式（1）中的含义相同。

2.2 情景设置

选择 2015 年为基年，根据长三角地区各省市的发展现状与国民经济和社会发展第十三个五年规划及国民经济和社会发展第十四个五年规划的目标，将 GDP、单位国内生产总值能耗、能源碳排放强度和技术因素设置为以下三种情景。

基准情景：充分考虑国民经济和社会发展第十三个五年规划的完成情况及国民经济和社会发展第十四个五年规划的目标，结合当前经济发展新常态的现状，以国民经济和社会发展第十四个五年规划为指导，进行严格的节能减排，引进先进低碳技术，淘汰落后产能，提高能源利用效率，降低单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放量。

低碳情景：在基准情景的基础上，更加注重引进先进低碳技术，增加低碳技术投资，政府、企业和个人均具有较强的低碳意识，优化产业结构，转变经济发展模式，优化能源消费结构，单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放的降幅较大，能源利用效率得到大幅度提高。

高碳情景：不完全按照国民经济和社会发展第十四个五年规划的要求，虽关注碳排放问题，单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放不断下降，但更注重经济发展速度。

2.2.1 国内生产总值

研究长时间序列，应考虑价格和物量变化对国内生产总值（GDP）的影响，因此，与 GDP 相关的变量均转换为 2000 年不变价，如单位 GDP 能耗、平均工资和 GDP 等。2019 年，上海的 GDP（2000 年不变价）为 25152.147 亿元，江苏的为 61448.829 亿元，浙江的为 38333.894 亿元，江苏和浙江的 GDP 均在全国前四，是经济总量较大的省份。

在长三角地区，经济发展处于全国领先水平，其中，上海市“十二五”期间，GDP 年均增速为 7.5%，“十三五”规划中将 GDP 年均增速降至 6.5%以上，而实际 GDP 年均增速为 6.7%，由此可知，近五年来，上海市 GDP 增速已明显下降。在上海市“十四五”规划中，将 GDP 平均增速设定为 5%。依据经济的发展现状

及五年规划目标，上海市 GDP 增速的情景设定如表 1 所示。

表 1 不同情景下上海市国内生产总值增长速度

时间	低碳情景	基准情景	高碳情景
2015—2020 年	0.060	0.065	0.070
2020—2025 年	0.045	0.050	0.055
2025—2030 年	0.040	0.045	0.050
2030—2035 年	0.035	0.040	0.045
2035—2040 年	0.030	0.035	0.040
2040—2045 年	0.025	0.030	0.035
2045—2050 年	0.020	0.025	0.030
2050—2055 年	0.015	0.020	0.025
2055—2060 年	0.010	0.015	0.020

表 2 不同情景下江苏省国内生产总值增长速度

时间	低碳情景	基准情景	高碳情景
2015—2020 年	0.070	0.075	0.080
2020—2025 年	0.050	0.055	0.060
2025—2030 年	0.045	0.050	0.055
2030—2035 年	0.040	0.045	0.050
2035—2040 年	0.035	0.040	0.045
2040—2045 年	0.030	0.035	0.040
2045—2050 年	0.025	0.030	0.035
2050—2055 年	0.020	0.025	0.030
2055—2060 年	0.015	0.020	0.025

表 3 不同情景下浙江省国内生产总值增长速度

时间	低碳情景	基准情景	高碳情景
2015—2020 年	0.065	0.070	0.075
2020—2025 年	0.050	0.055	0.060
2025—2030 年	0.045	0.050	0.055
2030—2035 年	0.040	0.045	0.050
2035—2040 年	0.035	0.040	0.045
2040—2045 年	0.030	0.035	0.040
2045—2050 年	0.025	0.030	0.035
2050—2055 年	0.020	0.025	0.030
2055—2060 年	0.015	0.020	0.025

2.2.2 单位国内生产总值能耗

2011年,《“十二五”控制温室气体排放工作方案》确定了“十二五”期间中国各省份单位国内生产总值能耗下降指标,上海、江苏和浙江单位国内生产总值能耗的下降目标均为18%。2019年,上海、江苏和浙江的单位国内生产总值能耗分别为0.465吨/万元、0.529吨/万元和0.584吨/万元。2016年,《“十三五”控制温室气体排放工作方案》明确了“十三五”时期中国各省份单GDP能耗下降目标,其中,上海、江苏和浙江单位GDP能耗的下降目标均为17%。在“十二五”和“十三五”期间,上海、江苏和浙江的单位GDP能耗下降目标均相同,因此,假设2015—2060年上海、江苏和浙江具有相同的单位GDP能耗下降目标。参照单位GDP能耗的下降速度,设置2015—2060年长三角地区的单位GDP能耗下降速度如表4所示。

表4 不同情景下的单位国内生产总值能源消耗降低速度

时间	低碳情景		基准情景		高碳情景	
	累积降低	年均降低	累积降低	年均降低	累积降低	年均降低
2015—2020年	-0.180	-0.039	-0.170	-0.037	-0.160	-0.034
2020—2025年	-0.170	-0.037	-0.160	-0.034	-0.150	-0.032
2025—2030年	-0.160	-0.034	-0.150	-0.032	-0.140	-0.030
2030—2035年	-0.150	-0.032	-0.140	-0.030	-0.130	-0.027
2035—2040年	-0.140	-0.030	-0.130	-0.027	-0.120	-0.025
2040—2045年	-0.130	-0.027	-0.120	-0.025	-0.110	-0.023
2045—2050年	-0.120	-0.025	-0.110	-0.023	-0.100	-0.021
2050—2055年	-0.110	-0.023	-0.100	-0.021	-0.090	-0.019
2055—2060年	-0.100	-0.021	-0.090	-0.019	-0.080	-0.017

2.2.3 技术因素和能源碳排放强度

假设未来40年不发生飞跃性的技术变革,利用不变价工资增长曲线的斜率表征科技进步率。计算2000—2019年上海平均货币工资(2000年不变价),对平均货币工资取对数,绘制平均货币工资曲线(图1)。由图1可知,可决系数为0.981,劳动者报酬率变动系数 f 为0.093,技术进步值为0.085,社会科技从创新到推广大约需要5年。如果技术进步值为8.5%,技术因素的影响系数 k 为91.5%,每年的技术影响为98.2%。以2015年为基期,设定技术因素的影响系数为1,按照每年的技术影响为0.982,依次计算出2015—2060年上海技术因素的系数(表5)。由图2可知,2000—2019年上海能源消费与碳排放拟合曲线的可决系数为0.781,2000—2019年能源碳排放强度为1.411。同理,可计算出2015—2060年江苏和浙江技术因素的系数(表5)。2000—2019年江苏和浙江能源碳排放强度为3.139和2.083。

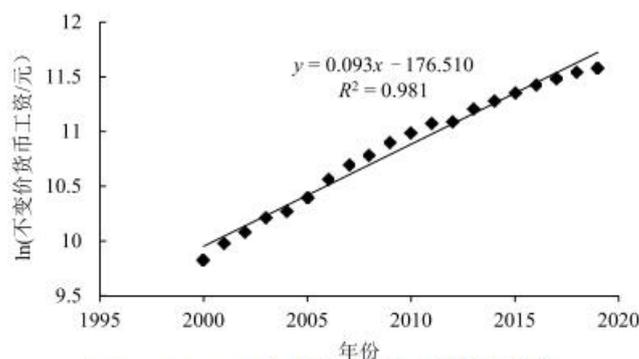


图1 2000—2019年上海不变价工资拟合曲线

表 5 2015—2060 年长三角地区技术因素系数

年份	上海	江苏	浙江	年份	上海	江苏	浙江
2015	1.000	1.000	1.000	2038	0.659	0.659	0.723
2016	0.982	0.982	0.986	2039	0.647	0.647	0.713
2017	0.964	0.964	0.972	2040	0.635	0.635	0.703
2018	0.947	0.947	0.959	2041	0.624	0.624	0.693
2019	0.930	0.930	0.945	2042	0.612	0.612	0.683
2020	0.913	0.913	0.932	2043	0.601	0.601	0.674
2021	0.897	0.897	0.919	2044	0.591	0.591	0.664
2022	0.881	0.881	0.906	2045	0.580	0.580	0.655
2023	0.865	0.865	0.893	2046	0.569	0.569	0.646
2024	0.849	0.849	0.881	2047	0.559	0.559	0.637
2025	0.834	0.834	0.868	2048	0.549	0.549	0.628
2026	0.819	0.819	0.856	2049	0.539	0.539	0.619
2027	0.804	0.804	0.844	2050	0.530	0.530	0.611
2028	0.790	0.790	0.833	2051	0.520	0.520	0.602
2029	0.775	0.775	0.821	2052	0.511	0.511	0.594
2030	0.762	0.762	0.809	2053	0.501	0.501	0.585
2031	0.748	0.748	0.798	2054	0.492	0.492	0.577
2032	0.734	0.734	0.787	2055	0.484	0.484	0.569
2033	0.721	0.721	0.776	2056	0.475	0.475	0.561
2034	0.708	0.708	0.765	2057	0.466	0.466	0.553
2035	0.695	0.695	0.754	2058	0.458	0.458	0.545
2036	0.683	0.683	0.744	2059	0.450	0.450	0.538
2037	0.671	0.671	0.733	2060	0.442	0.442	0.530

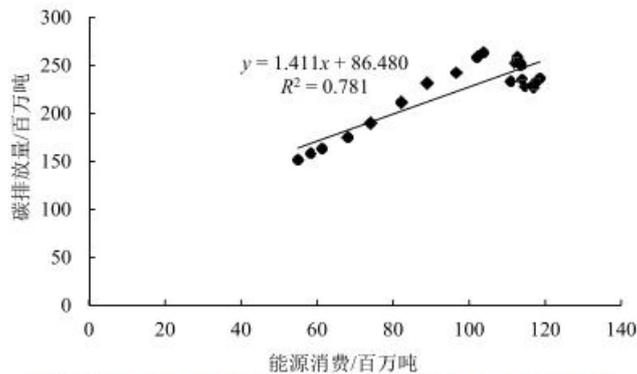


图2 2000—2019年上海能源消费量与碳排放量拟合曲线

3 预测结果及分析

为了验证模型的准确性，选择基准情景，比较 2015—2019 年碳排放实际值与预测值的差异（表 6）。由表 6 可知，2015—2019 年长三角地区碳排放的误差分别为-4.556%、-3.296%、-1.301%、1.152%、-1.346%，模型误差均在 5%以内，表明改进的 IPAT 模型具有较好的精度和可信性，适合预测长三角地区碳排放。

表 6 2015—2019 年长三角地区碳排放预测模型精度验证

年份	实际值/百万吨	预测值/百万吨	误差
2015	1590.506	1518.036	-4.556
2016	1593.991	1541.455	-3.296
2017	1585.879	1565.248	-1.301
2018	1571.320	1589.420	1.152
2019	1635.993	1613.979	-1.346

由表 7 和图 3 可知，在基准情景下，上海、江苏、浙江和长三角地区的碳排放分别在 2020 年、2025 年、2030 年和 2025 年达到峰值，碳排放量分别为 166.430 百万吨、1034.391 百万吨、457.954 百万吨和 1650.570 百万吨，表明长三角地区严格按照五年规划要求，能够在 2030 年前实现碳排放峰值。2060 年，上海、江苏、浙江和长三角地区的碳排放量分别为 99.007 百万吨、743.607 百万吨、375.459 百万吨和 1218.073 百万吨。国务院印发的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中明确提出要有效控制碳排放总量，支持优化开发区域率先达到碳排放峰值。长三角地区作为国家重要的优化开发区域之一，生态环境问题日益凸显，应该在区域低碳转型方面发挥积极的引领示范作用。因此，长三角地区应该在五年规划的基础上，实施更加严格的碳减排政策。

表 7 长三角地区碳排放峰值时间及大小

地区	基准情景		低碳情景		高碳情景	
	年份	峰值/百万吨	年份	峰值/百万吨	年份	峰值/百万吨
上海	2020	166.430	2020	160.879	2030	175.678
江苏	2025	1034.391	2020	996.188	2040	1161.936
浙江	2030	457.954	2020	427.460	2045	545.963
长三角地区	2025	1650.570	2020	1584.527	2040	1873.537

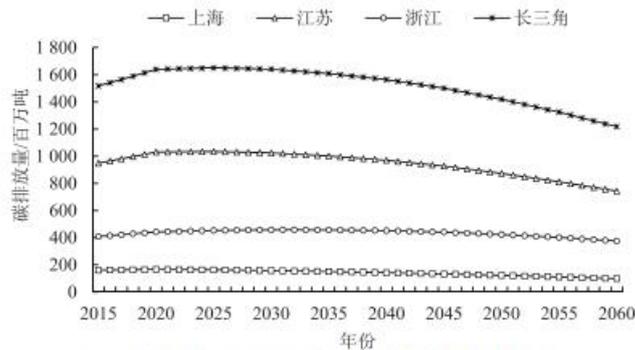


图 3 基准情景下长三角地区碳排放变化趋势

由表 7 和图 4 可知，在低碳情景下，上海、江苏、浙江和长三角地区碳排放均在 2020 年达到峰值，碳排放量分别为 160.879 百万吨、996.188 百万吨、427.460 百万吨和 1584.527 百万吨，相比基准情景，上海的达峰年份仍为 2020 年，江苏、浙江和长三角地区的达峰年份分别提前 5 年、10 年和 5 年，达峰的碳排放量分别降低了 5.551 百万吨、38.203 百万吨、30.494 百万吨和 66.043 百万吨。2060 年，上海、江苏、浙江和长三角地区的碳排放量分别为 71.842 百万吨、540.207 百万吨、272.729 百万吨和 884.778 百万吨。因此，低碳情景能够确保长三角地区碳排放峰值提前实现，且碳排放量相对较低。

由表 7 和图 5 可知，在高碳情景下，上海、江苏、浙江和长三角地区分别在 2030 年、2040 年、2045

年和 2040 年达到碳排放峰值，达峰时的碳排放量分别为 175.678 百万吨、1161.936 百万吨、545.963 百万吨和 1873.537 百万吨，相比基准情景，达峰时间均有所推迟，无法在 2030 年前达到碳排放峰值，且达峰的碳排放量分别增加了 9.248 百万吨、127.545 百万吨、88.009 百万吨和 222.967 百万吨。2060 年，上海、江苏、浙江和长三角地区的碳排放量分别为 136.271 百万吨、1022.315 百万吨、516.239 百万吨和 1674.825 百万吨。因此，高碳情景无法保证 2030 年前长三角地区实现碳排放峰值。

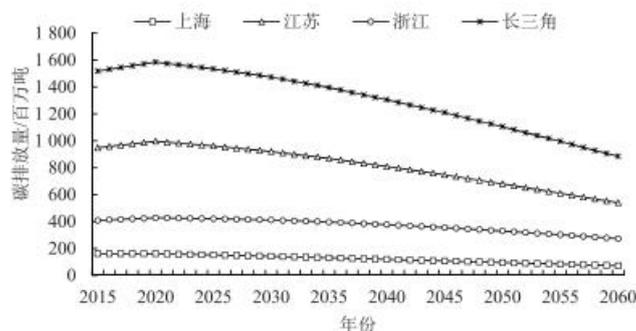


图4 低碳情景下长三角地区碳排放变化趋势

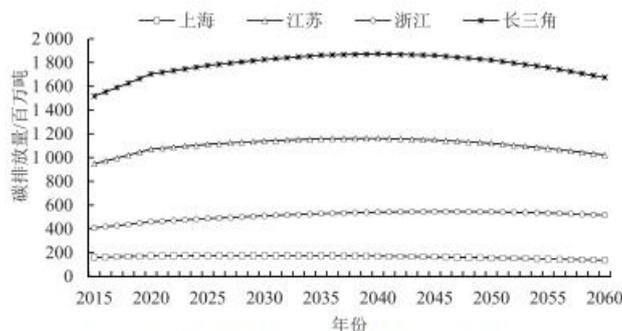


图5 高碳情景下长三角地区碳排放变化趋势

在三种情景中，基准情景按照五年规划进行设定，长三角地区能够在 2030 年前实现碳排放峰值，碳排放量相对较大，为 1650.570 百万吨。长三角地区作为优化开发区域之一，要率先达到碳排放峰值，可能需要在基准情景和低碳情景之间选择一种比较适合的发展路径，将基准情景作为最佳可能范围的下限，将低碳情景作为最佳可能范围的上限。

4 结论与建议

4.1 结论

参照长三角地区社会经济发展现状和五年规划目标，分别设置基准情景、低碳情景和高碳情景，以 2015 年为基期，运用改进的 IPAT 模型预测了长三角地区 2015—2060 年的碳排放，分析了不同情景下碳排放峰值出现的时间及大小，经分析主要得出以下结论：

(1) 基准情景下，上海、江苏、浙江和长三角地区的碳排放分别在 2020 年、2025 年、2030 年和 2025 年达到峰值，碳排放量分别为 166.430 百万吨、1034.391 百万吨、457.954 百万吨和 1650.570 百万吨；低碳情景下，上海、江苏、浙江和长三角地区均在 2020 年达到碳排放峰值，碳排放量分别为 160.879 百万吨、996.188 百万吨、427.460 百万吨和 1584.527 百万吨；高碳情景下，上海、江苏、浙江和长三角地区分别在 2030 年、2040 年、2045 年和 2040 年达到碳排放峰值，碳排放量分别为 175.678 百万吨、1161.936 百万吨、545.963 百万吨和 1873.537 百万吨。

万吨、545.963 百万吨和 1873.537 百万吨。

(2) 比较出现碳排放峰值的时间和大小可知,在基准情景和低碳情景下,长三角地区碳排放峰值分别出现在 2025 年和 2020 年。长三角地区作为优化开发区,为积极响应国家“支持优化开发区域率先达到碳排放峰值”的号召,应以基准情景作为发展的下限,以低碳情景作为发展的上限,在确保长三角地区社会经济平稳健康可持续发展的前提下,积极发展低碳经济。

(3) 2060 年,上海、江苏、浙江和长三角地区的碳排放量,在基准情景下,分别为 99.007 百万吨、743.607 百万吨、375.459 百万吨和 1218.073 百万吨;在低碳情景下,分别为 71.842 百万吨、540.207 百万吨、272.729 百万吨和 884.778 百万吨;在高碳情景下,分别为 136.271 百万吨、1022.315 百万吨、516.239 百万吨和 1674.825 百万吨,表明 2060 年长三角地区碳排放仍然较高,要实现碳中和,需降低碳排放的同时,提升碳汇能力。

4.2 政策建议

碳排放受多种因素影响,包括经济发展、产业结构、技术水平和能源消费结构等因素,基于以上研究结论,提出以下政策建议:

第一,加快转变经济发展方式,推动产业结构优化升级。经济发展进入新常态,应该注重经济发展质量和效率,转变经济发展模式。上海作为长三角地区经济发展的中心,应该充分整合长三角地区资源,积极发展以金融业为中心的现代服务业,增加高附加值产业比重,充分发挥其引领示范作用,引领外围地区社会经济的平稳健康可持续发展。江苏碳排放占长三角地区碳排放总量的一半以上,由于其第二产业比例相对较高,尤其是重工业比例较高,碳排放量相对较大,碳减排难度较大,是长三角地区碳排放的重点调控区,应注重产业结构调整,降低第二产业比例,尤其是重工业比例,淘汰高排放、高污染和高耗能产业,增加第三产业比例,转变经济增长方式,发展低碳经济。

第二,采用先进低碳技术,降低单位 GDP 能耗。通过限制能耗水平、排放额度和可再生能源发电配额等,限制高能耗、高排放和高污染企业发展,督促其改进生产工艺,淘汰落后技术,采用先进低碳技术,进行低碳技术创新。上海作为长三角地区的中心,应充分发挥其辐射带动作用,积极向江苏和浙江输出先进低碳技术,并给予资金和技术人员的支持,引领其走低碳发展之路。

第三,优化能源消费结构,控制能源消费总量。积极发展新能源和清洁能源,发挥长三角地区靠近沿海的优势,充分利用水能、风能、潮汐能和核能等。尤其是浙江,能源相对匮乏,对外依赖度较大,应根据自身能源优势,优化能源消费结构,大力发展风电和生物质能源;提倡“煤改气”和“煤改电”,加快能源低碳转型,采用清洁煤炭技术,减少煤炭直接消费量。

第四,提高植被碳汇,同时加强长三角沿海地区的海洋碳汇。浙江林地面积较大,植被碳汇较高,应充分利用海洋资源,发展海洋生物产业和海洋经济,努力提升海洋碳汇能力。上海植被碳汇能力增加较快,应充分发挥其引领示范作用。同时,积极发挥上海碳排放交易所的作用,促进碳汇能力提升。江苏应引进上海和浙江提高碳汇的技术,同时增加技术投资。

参考文献:

[1]黄蕊,王铮,丁冠群,等.基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J].

地理研究, 2016 (4): 781-789.

[2] Fang K, Tang Y Q, Zhang Q F, et al. Will China peak its energyrelated carbon emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese Provinces [J]. Applied Energy, 2019, 255: 113852.

[3] Su K, Lee C M. When Will China achieve its carbon emission peak? A scenario analysis based on optimal control and the STIRPAT model [J]. Ecological Indicators, 2020, 112: 106138.

[4] Yan Q Y, Wang Y X, Li Z Y, et al. Coordinated development of thermal power generation in Beijing-Tianjin-Hebei Region: Evidence from decomposition and scenario analysis for carbon dioxide emission [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 1402-1417.

[5] Niu D X, Wang K K, Wu J, et al. Can China achieve its 2030 carbon emissions commitment? Scenario analysis based on an improved general regression neural network [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118558.

[6] 马海良, 张红艳, 吴凤平. 基于情景分析法的中国碳排放分配预测研究[J]. 软科学, 2016(10): 75-78.

[7] 朱宇恩, 李丽芬, 贺思思, 等. 基于 IPAT 模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测[J]. 资源科学, 2016 (12): 2316-2325.

[8] Li F F, Xu Z, Ma H. Can china achieve its CO2 emissions peak by 2030? [J]. Ecological Indicators, 2018, 84: 337-344.

[9] Sun Z R, Liu Y D, Yu Y N. China' s carbon emission peak pre-2030: Exploring multi-scenario optimal low-carbon behaviors for China' s regions [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 963-979.

[10] Shan B G, Xu M J, Zhu F G, et al. China' s energy demand scenario analysis in 2030 [J]. Energy Procedia, 2012, 14: 1292-1298.

[11] Zhang X Y, Chen Y H, Jiang P, et al. Sectoral peak CO2Emission Measurements and a long-term alternative CO2mitigation roadmap: A case study of Yunnan, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247: 119171.

[12] 刘云鹏, 王泳璇, 王帆, 等. 居民生活消费碳排放影响分析与动态模拟预测[J]. 生态经济, 2017 (6): 19-22.

[13] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国 2050 年低碳情景和低碳发展之路[J]. 中外能源, 2009 (6): 1-7.

[14] 赵成柏, 毛春梅. 基于 ARIMA 和 BP 神经网络组合模型的我国碳排放强度预测[J]. 长江流域资源与环境, 2012 (6): 665-671.

[15] 韩楠. 基于供给侧结构性改革的碳排放减排路径及模拟调控[J]. 中国人口·资源与环境, 2018 (8):

47-55.

[16] Liu D N, Xiao B W. Can China achieve its carbon emission peaking? A scenario analysis based on STIRPAT and system dynamics model [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 647-657.

[17] Ma Y Y, Zhang Z X, Zhang F F, et al. How might Shandong achieve the 2030 CO₂ emissions target? A system dynamics analysis from the perspective of energy supply-side structural reform in China [J]. *International Journal of Global Warming*, 2019, 17(4): 357-372.

[18]高振宇, 王益. 我国生产用能源消费变动的分解分析[J]. *统计研究*, 2007 (3): 52-57.

[19]吕炜. 美国产业结构演变的动因与机制——基于面板数据的实证分析[J]. *经济学动态*, 2010 (8): 131-135.

[20]杜强, 陈乔, 陆宁. 基于改进 IPAT 模型的中国未来碳排放预测[J]. *环境科学学报*, 2012 (9): 2294-2302.