

基于 STIRPAT 模型的浙江省碳排放峰值预测分析

赵慈¹ 宋晓聪¹ 刘晓宇¹ 沈鹏¹ 陈忱¹ 刘磊²¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012;

2. 生态环境部环境工程评估中心, 北京 100012)

【摘要】: 为应对全球气候变暖问题, 我国提出 2030 年前实现碳达峰的目标。为探究该目标实现的可达性, 以浙江省为例, 充分考虑人口、人均 GDP、碳排放强度、能源消耗强度、能源结构、产业结构等因素对碳排放的影响, 建立了修正的 STIRPAT 模型, 经过实证分析发现该模型精确度良好, R^2 值达到 0.982, 能够很好地预测未来浙江省的碳排放。设定三种情景对浙江省二氧化碳排放峰值时间进行预测, 结果表明: 基准情景、低碳情景和强化低碳情景下浙江省均能在 2030 年前实现碳达峰目标。通过分析模型系数发现人口、能源结构、人均 GDP 是影响浙江省碳减排的主要因素。

【关键词】: STIRPAT 模型 浙江省 碳排放量 情景预测

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)06-029-06

自 1978 年以来, 浙江省全省生产总值增长了约 500 倍^[1]。然而, 经济的快速增长与大量能源的消耗有着千丝万缕的联系, 同时也导致了温室气体排放量的高速增长^[2]。在所有温室气体中, CO_2 排放占比高达 90% 以上, CO_2 的减排对减缓气候恶化具有重要影响, 因此, 控制 CO_2 排放量引起了越来越多的关注^[3]。实际上, 近 10 年来, 中国一直是世界上最大的 CO_2 排放国^[4], 中国 CO_2 排放量约占全球总排放量的 29%^[5]。为了缓解国内环境恶化和国际气候谈判带来的双重压力, 我国在发布的“中美气候变化联合声明”中宣布了温室气体排放目标, 目标的核心内容是承诺到 2030 年或更早使 CO_2 排放量达到峰值^[6], 在七十五届联合国大会上习近平主席再一次宣布, 中国力争在 2030 年前实现 CO_2 排放达峰^[7]。

为此, 各行业、各省市都在紧急编制碳达峰行动方案, 发布碳达峰目标。浙江省作为中国的经济强省, 绿色产业规模位居全国前列, 在绿色环保方面一直是国内的排头兵, 而是否能够在“碳达峰、碳中和”的绿色低碳发展新征程中继续发挥领头羊作用对于全国区域的碳达峰、碳中和至关重要。为实现碳达峰这一目标, 了解碳排放现状, 分析影响因素, 预测碳排放峰值和未来碳排放量, 就成了碳减排工作的当务之急。

国内外学术界已有大量关于中国整体、区域和省级层面的碳排放预测研究。从中国整体层面来讲, 据国际能源署^[8]预测, 我国预计在 2025 年实现碳达峰, 此时的 CO_2 排放量为 96.8 亿吨。而在 Nature Sustainability 发表的中美合作研究^[9]通过分析我国现行减排政策和结构模型预测, 发现我国在 2030 年前能实现 CO_2 的排放峰值。Ma 等^[10]基于 Kaya-LMDI 模型分析了各种驱动因素对中国能源消耗碳排放的影响, 发现经济的快速发展和城市化的加速不利于减少碳排放, 降低能耗, 调整行业内部结构, 完善经济政策体系, 是促进未来中国低碳发展的重要手段。Su&Lee^[11]引入理论和实证模型估算了中国温室气体排放峰值。结果表明,

作者简介: 赵慈, 硕士, 工程师, 研究方向为规划环评。E-mail: zhaoci07@163.com; 刘磊, 硕士, 高级工程师, 研究方向为“三线一单”、规划环评研究、项目环评技术评估等。E-mail: leiliu2004@126.com

基金项目: 宁波市重大科技攻关项目“典型工业炉窑协同处置二次灰渣技术与示范”(2021ZDYF020047); 中国环境科学研究院中央财政科技计划结余经费专项项目“钢铁行业全生命周期碳排放及减排潜力评估研究”(2021-JY-07)

到 2028 年,中国碳排放可能达到峰值,估计为 117.70MtCO₂e。从政策层面研究发现,碳定价和全国碳排放交易计划是促进能源过渡和清洁煤技术的最重要手段。褚力其等^[12]应用 GDIM 分析了 1985—2017 年我国农业方面碳排放的驱动因素,发现财政支出规模作为第一驱动力,贡献率达到 39.28%。此外,设定动态情景预测我国在政策规制和绿色低碳情景下均能在 2030 前实现农业排放碳达峰。不同学者有关国家层面 CO₂ 排放峰值时间预测略有不同,但基本都在 2030 年之前。从区域层面分析,邓小乐和孙慧^[13]设置 8 种情景对西北五省(新疆、宁夏、陕西、青海和甘肃)的碳排放趋势进行了预测,在 2030 年前西北五省若要实现碳达峰,关键在于碳排放强度的控制。刘彦迪^[14]基于广义迪氏指数分析了影响我国东部、中部、东北部和西部四个区域 CO₂ 排放的因素,发现能源消耗、经济发展、人均碳排放、单位 GDP 碳排放强度均是影响 CO₂ 排放的主要因素。同时,分情景预测四大区域碳达峰时间,在最优路径下东部和东北部于 2025 年率先达峰,西部和中部于 2030 年达峰。曹丽斌等^[15]使用柯布-道格拉斯函数预测了“新冠”疫情影响下长三角城市群 CO₂ 排放达峰时间,已有 19 个城市具备在 2025 年前达峰的条件,其中就包括浙江省宁波、湖州、杭州、嘉兴和温州 5 个城市。臧宏宽等^[16]研究了 2015—2019 年京津冀城市群经济发展与碳排放的脱钩情况,并结合世界资源研究所^[17]提出的达峰判断理论,判定北京、天津、承德、唐山、石家庄和邯郸目前已实现碳达峰,其他城市 CO₂ 排放量还处于增长状态,还未实现达峰。就具体省份而言,赵荣钦等^[18]通过 STIRPAT 模型以及情景分析法预测了河南省包含能源消费、食物消费、农业活动和废弃物四方面在内的碳排放峰值,发现在低碳情景下河南省在 2030 年前不能实现碳达峰目标,如果同时考虑碳吸收补偿,即可在 2030 年前实现碳达峰。马彩云等^[19]使用灰色预测模型预测了 2017—2021 年安徽省建筑业碳排放量,研究表明其直接碳排放量仍未达到峰值。王磊^[20]基于投入产出模型预测天津市 2015 年 CO₂ 排放量为 69729 万吨,是仅考虑终端产品消费产生的碳排放量的 2.75 倍,由此表明中间产品消费导致的碳排放也不容忽视。

目前,还没有相关文献从全省层面对浙江省碳排放峰值进行预测分析,此外结合情景分析法的 STIRPAT 模型,使用简单方便,能够考虑多种因素影响,同时,该模型克服了 Kaya 方程和 IPAT 模型的缺陷(所有因素以相同的比例影响碳排放),已被多个学者用来预测碳排放^[11,13,18,21,22]。因此,本文以浙江省为例,运用改进的 STIRPAT 模型,选择六个因素作为自变量:人口(P)、人均 GDP(A)、碳排放强度(T)、能源消耗强度(P_e)、能源结构(E_s)、产业结构(I_s),运用回归检验(PLS 法)进行实证分析,并结合情景预测法对 2020—2030 年浙江省碳排放量进行预测,以期对浙江省低碳发展提供参考。

1 研究方法和数据

1.1 研究方法和模型构建

碳排放量的预测是确定最佳碳排放路径的关键问题。IPAT 模型通过反映人口,富裕度和技术的综合影响来预测一个国家的碳排放量^[23]。York 等^[24,25]通过比例效应假设研究指明了 IPAT 模型的局限性,同时,对 IPAT 模型进行了改进得到随机效应模型(STIRPAT)。STIRPAT 模型,即公式(1)的基础是研究人口、财富和技术对环境的随机效应的回归分析^[26]。

$$\ln C = a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + h \quad (1)$$

式中: a、b、c、d 代表各指标的弹性系数。

扩展的 STIRPAT 模型表示为:

$$\ln C = a + b \ln P + c \ln (GDP/P) + d \ln T + e \ln P_e + f \ln E_s + g \ln I_s + h \quad (2)$$

式中:全国碳排放量(C)单位为万吨;人口(P)单位为万人;人均 GDP(A)单位为万元/人;碳排放强度(T)单位为吨/万元、能

源消耗强度(P_s)单位为吨标煤/万元、能源结构(E_s)为百分比%; 产业结构(I_s , 第二产业占比)为百分比%; e 、 f 、 g 代表各指标的弹性系数; h 表示误差。

1.2 数据来源和说明

本文碳排放数据来自中国碳排放数据库, 各变量来自历年浙江省统计年鉴(表 1)。

表 1 STIRPAT 模型数据说明

数据名称	数据说明	来源
碳排放量(C)	CO ₂ 排放量	中国碳排放数据库
人口(P)	浙江省年末常住人口	浙江省统计年鉴
人均 GDP(A)	年末常住人口 GDP(2005 年不变价)	浙江省年鉴数据计算
碳排放强度(T)	碳排放 GDP(2005 年不变价)	浙江省年鉴数据计算
能源消耗强度(P_s)	能源消耗量 GDP(2005 年不变价)	浙江省年鉴数据计算
能源结构(E_s)	煤炭消耗量能源消耗总量	2005 年依据中国能源统计年鉴数据计算, 2006—2017 年来自浙江省统计数据库
产业结构(I_s)	第二产业附加值 GDP	浙江省统计年鉴

扩展的 STIRPAT 模型实证数据来源于历年的浙江省统计年鉴^[1]和《中国能源统计年鉴 2006》^[27], 对所选指标进行整理, 得到如表 2 所示的数据。

表 2 2005—2017 年浙江省碳排放及相关指标

年份	碳排放量 /万吨	人口 /万人	人均 GDP /(万元/人)	碳排放强度 (吨/万元)	能源消耗强度 /(吨标煤/万元)	能源结构 /%	产业结构 /%
2005	26735.37	4990.90	2.61	2.05	0.92	57.62	53.40
2006	30217.94	5071.80	2.93	2.03	0.89	62.63	54.20
2007	32615.74	5154.90	3.30	1.92	0.85	65.75	54.30
2008	33875.49	5212.40	3.59	1.81	0.81	63.81	54.10
2009	35196.87	5275.50	3.87	1.72	0.76	63.2	52.00
2010	37576.71	5446.51	4.19	1.65	0.74	61.3	51.60
2011	39862.27	5463.00	4.56	1.60	0.72	60.8	51.10

2012	38359.35	5477.00	4.91	1.43	0.67	58.3	49.60
2013	38756.09	5498.00	5.30	1.33	0.64	56.8	48.60
2014	38079.47	5508.00	5.70	1.21	0.60	54.4	48.90
2015	38150.13	5539.00	6.12	1.13	0.58	52.4	47.40
2016	37917.65	5590.00	6.52	1.04	0.56	50.8	45.60
2017	40144.00	5657.00	6.94	1.02	0.54	49.8	44.40

2 基于扩展后 STIRPAT 模型实证分析

通过查阅文献发现多重共线性是 STIRPAT 模型的主要缺点^[28]，而通过偏最小二乘回归 (PLS) 可以解决这一问题^[29]。首先需要分析各因素间的相关性，然后对自变量进行降维提取主成分 (因子分析法)，最后进行回归求得 STIRPAT 模型。

2.1 变量相关性分析

对本文中的 6 个自变量进行因子分析，KMO 和巴特利特检验和相关性矩阵如表 3~表 5 所示。由表 3 分析可知，KMO 检验值为 0.788，根据表 4 KMO 检验度量标准^[30]判断 6 个变量适合做因子分析。巴特利特球形度检验的 $P < 0.001$ ，拒绝原假设，说明表 5 不同于单位矩阵，各个变量间存在相关性可以做因子分析^[28]。

表 3 KMO 和巴特利特检验

KMO 取样适切性量数		0.788
巴特利特球形度检验	近似卡方	188.953
	自由度	15
	显著性	0.000

表 4 KMO 检验度量标准

值的范围	适合程度	值的范围	适合程度
大于 0.9	非常适合	0.6~0.7	勉强适合
0.8~0.9	很适合	0.5~0.6	不太适合
0.7~0.8	适合	小于 0.5	不适合

表 5 相关性矩阵

变量		P	A	T			
相关性	P	1.000	0.973	-.918	-0.953	-0.699	-0.883
	A	0.973	1.000	-.979	-0.995	-0.796	-0.939
	T	-0.918	-0.979	1.000	0.993	0.892	0.973
	P _s	-0.953	-0.995	0.993	1.000	0.848	0.960
	E _s	-0.699	-0.796	0.892	0.848	1.000	0.928
	I _s	-0.883	-0.939	0.973	0.960	0.928	1.000
显著性(单尾)	P		0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
	A	0.000		0.000	0.000	0.001	0.000
	T	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000
	P _s	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000
	E _s	0.004	0.001	0.000	0.000		0.000
	I _s	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

从表 5 可看出大部分变量间存在高度相关性。其中 A 与 T、P_s、I_s之间存在很高的负相关性，相关性达到-0.979、-0.995、-0.939。T 与 P_s、I_s之间存在很强的正相关性，相关性达到 0.993、0.973。P_s和 E_s、I_s之间也存在高度正相关，其中，P_s和 I_s的相关性(0.960)高于 P_s和 E_s的相关性(0.848)，这说明产业结构的优化和能源结构优化相比更有利于能耗的降低。

2.2 因子分析及模型参数确定

因子分析结果见表 6。从表 6 分析可知，提取前 2 个成分即可充分解释所有变量对碳排放的影响，这 2 个主成分分别解释总方差的 93.091%和 5.976%，方差累计贡献率达到 99.067%。

表 6 总方差解释

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积/%	总计	方差百分比	累积/%	总计	方差百分比	累积/%
1	5.585	93.091	93.091	5.585	93.091	93.091	3.394	56.570	56.570
2	0.359	5.976	99.067	0.359	5.976	99.067	2.550	42.497	99.067
3	0.034	0.574	99.642						
4	0.020	0.326	99.968						
5	0.001	0.022	99.989						

6	0.001	0.011	100.000						
---	-------	-------	---------	--	--	--	--	--	--

提取方法：主成分分析法。

然后进行回归分析，计算得到 STIRPAT 模型为：

$$\ln C = 3.1581 + 0.7234 \ln P + 0.0625 \ln A - 0.0280 \ln T - 0.0740 \ln P_s + 0.2408 \ln E_s + 0.0066 \ln I_s \quad (3)$$

从上述回归方程分析可知，各因素对碳排放影响程度为：人口>能源结构>能源消耗强度>人均 GDP>碳排放强度>产业结构。即在其他变量一定的情况下，人口每增长 1%，碳排放量增长 0.72%；煤炭比重每增长 1%，碳排放量增长 0.24%；人均 GDP 每增长 1%，碳排放量增长 0.06%；二次产业比重每增长 1%，碳排放量增长 0.01%。碳排放强度和能源消费强度系数为负，对碳排放具有负向作用，这虽然与经济理论相悖，但是与张哲等^[29]、孙文静^[31]、宋晓晖等^[32]研究结论相似，这是由于指标选取不够全面造成的，也反映出浙江省对于碳排放相关活动监管力度的不足^[31]以及碳排放相关指标信息公开的透明度较低。

2005—2017 年浙江省实际碳排放量与模型拟合结果见图 1，拟合数值与真实值的误差比见表 7，除 2005 年的拟合结果误差绝对值大于 10%外，其他年份拟合结果误差绝对值均在 10%以内，与同类研究相比^[28]，误差较小在可接受范围内。

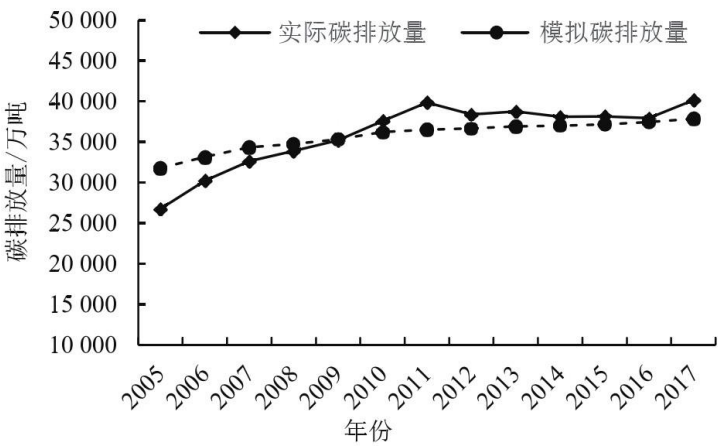


图 1 浙江省 2005—2017 年实际碳排放与 STIRPAT 模型模拟碳排放

表 7 碳排放模型拟合数值与实际值对比分析

年份	实际碳排放量	模拟碳排放量	误差比
2005	26735.37	31777.17	-18.86%
2006	30217.94	33139.01	-9.67%
2007	32615.74	34340.88	-5.29%

2008	33875.49	34753.68	-2.59%
2009	35196.87	35323.46	-0.36%
2010	37576.71	36196.60	3.67%
2011	39862.27	36501.17	8.43%
2012	38359.35	36656.34	4.44%
2013	38756.09	36901.70	4.78%
2014	38079.47	37005.29	2.82%
2015	38150.13	37156.23	2.61%
2016	37917.65	37452.06	1.23%
2017	40144.00	37864.98	5.68%

3 浙江省碳排放预测研究

3.1 情景分析和参数设定

为了更全面地预测浙江省 CO₂ 排放情况，本文从经济社会发展和减排相关的两类因素考虑设定了三种碳排放情景。(1)基准情景，参考浙江省目前应对气候变化以及能源相关的政策文件，按照常规发展速度预测人口、人均 GDP、碳排放强度、能源消耗强度、能源结构、产业结构 6 个因素的变化。(2)低碳情景，以基准情景为基础，除推行各项气候变化应对和能源优化政策外，还要加强低碳转型，在碳排放强度、能源消耗强度、能源结构、产业结构方面取得一定突破。(3)强化低碳情景，基于低碳情景进一步加强调控，积极出台各项低碳措施，在碳排放强度、能源消耗强度、能源结构、产业结构方面取得重大进展，浙江省将全面开启低碳发展之路。

使用 STIRPAT 模型，确定人口、人均 GDP、碳排放强度、能源消耗强度、能源结构、产业结构 6 个碳排放影响因素，并设定低、中、高三种变化率来对各影响因素进行预测，三种碳排放预测情景下各因素变化速度见表 8。

表 8 三种碳排放预测情景下各因素变化速度

数据名称	基准情景	低碳情景	强化低碳情景
人口 (P)	高	中	低
人均 GDP (A)	高	中	中
碳排放强度 (T)	低	中	高
能源消耗强度 (P _s)	低	中	高
能源结构 (E _s)	低	中	高

产业结构 (I_s)	低	中	高
----------------	---	---	---

人口 (P): 根据联合国预测, 设定 2021—2025 年浙江省人口低、中、高年均增长率分别为 0.82%、1.12%、1.34%; 2026—2030 年低、中、高年均增长率 0.34%、0.66%、1.04%; 2031—2035 年低、中、高年均增长率-0.15%、0.19%、0.68%。

人均 GDP (A): 以 2005 年不变价计, 浙江省自 2005 年以来, 人均 GDP 呈上升趋势, 但是增长率逐渐下降。同时, 考虑“新冠”疫情影响, 设定 2021—2025 年中速率和高速率年均增长率分别为 5.8%和 6.3%; 2026—2030 年中速率和高速率年均增长率 5.00%和 5.3%; 2031—2035 年中速率和高速率年均增长率 4.00%和 4.3%。

碳排放强度 (T): 根据浙江省能源发展“十二五”“十三五”“十四五”规划要求, 碳排放强度 2015 年比 2010 年降低 19%, 2020 年比 2015 年降低 18%, 2025 年比 2020 年下降 18%, 2020—2030 年的年均下降率为 3.89%。以此为基准设定低速率为 3.89%, 高速率为 4.85%, 中速率为 4.36%。

能源消耗强度 (P_s): 根据浙江省能源发展“十二五”“十三五”“十四五”规划要求, 能耗强度 2015 年比 2010 年降低 18%, 2020 年比 2015 年降低 15%, 2025 年比 2020 年降低 13.5%, “十四五”期间的年均下降率为 2.86%。按照此变化趋势设定基准情景下 2030 年比 2025 年下降 11.5%, 年均下降率 2.41%; 2035 年比 2030 年下降 9%, 年均下降率为 1.87%。以此为基准设定“十四五”“十五五”“十六五”中速下降率分别为: 3.20%、2.86%、2.41%, 高速下降率分别为 3.43%、3.20%、2.86%。

能源结构 (E_s): 根据浙江省能源发展“十四五”规划(征求意见稿), 设定 2020 和 2025 年浙江省煤炭占能源消费量比重分别为 42.8%和 33.5%, 2021—2025 年年均下降率 4.78%, 2026—2035 年年均下降率 5.00%; 中速率为 2021—2025 年年均下降率 5.27%, 2026—2035 年年均下降率 5.49%; 高速率为 2021—2025 年年均下降率 5.51%, 2026—2030 年年均下降率 5.7%, 2031—2035 年年均下降率 6.36%。

产业结构 (I_s): 根据浙江省 2005—2020 年二次产业结构变化, 设定低速率为 2021—2025 年年均下降率 3.70%, 2026—2035 年年均下降率 4.50%; 中速率为 2021—2025 年年均下降率 4.10%, 2026—2035 年年均下降率 5.30%; 高速率为 2021—2025 年年均下降率 4.30%, 2026—2035 年年均下降率 5.50%。

3.2 浙江省碳排放峰值预测

碳排放达峰不是表示某一年 CO_2 排放量达到峰值, 而是指从这一年开始某一地区碳排放量出现稳定下降的趋势^[29]。从图 2 分析可知, 基准情景、低碳情景和强化低碳情景下浙江省分别于 2028 年、2025 年和 2023 年达到峰值, 峰值分别为 3.93、3.87 和 3.85 亿吨。其中基准情景下, 2020—2028 年浙江省碳排放呈缓慢增长趋势, 于 2028 年达到排放峰值, 比 2005 年碳排放量提高了 47.07%; 2028—2035 年碳排放量开始缓慢下降, 到 2035 年达到 3.87 亿吨。低碳情景下, 2020—2025 年期间浙江省碳排放量处于小幅波动状态, 于 2025 年达到排放峰值; 2025—2035 年碳排放开始迅速降低。强化低碳情景下, 浙江省碳排放于 2023 年达峰, 比基准情景下的达峰时间提前了 5 年, 2023 年后碳排放迅速下降, 至 2035 年降到 3.51 亿吨。

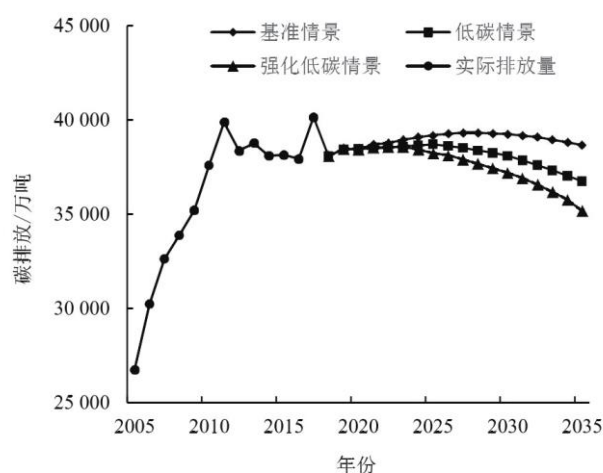


图2 浙江省三种情景下碳排放峰值预测

4 结论与建议

人口、能源结构、人均 GDP、产业结构对碳排放均具有正向促进作用，其中，人口、能源结构、人均 GDP 是浙江省碳减排的主要影响因素。情景预测分析结果表明，浙江省在基准情景、低碳情景和强化低碳情景下分别于 2028 年、2025 年和 2023 年达到 CO₂ 峰值，但是峰值大小排序为：基准情景下 CO₂ 峰值>低碳情景 CO₂ 峰值>强化低碳情景 CO₂ 峰值。

基于以上结论，提出以下建议：(1) 加快能源结构调整，降低煤炭占比，加大生物质能、天然气等低碳能源和核电、水电及其他无碳能源开采利用的技术研发力度，构建多元化的低碳能源体系。(2) 人口作为影响浙江省碳排放的重要驱动力，应从提高人口质量，构建绿色低碳生活方式方面来弱化其影响力。提高人口质量进而促进社会技术进步，减少能源消耗，降低碳排放。提高人民环保意识，倡导全民节能减排，构建绿色低碳生活方式。(3) 优化产业结构，降低二产比例。加大科技创新研发力度来助力产业转型升级，完善配套的政策措施来加强政府的宏观调控和引领作用。

参考文献:

- [1] 浙江省统计局. 2020 年浙江统计年鉴 [EB/OL]. (2020-10-28). https://zjjcmspublic.oss-cn-hangzhou-zwynet-d01-a.internet.cloud.zj.gov.cn/jcms_files/jcms1/web3077/site/flash/tjj/Reports1/2020-%E7%BB%9F%E8%AE%A1%E5%B9%B4%E9%89%B4/indexcn.html.
- [2] Zhu Q Y, Li X C, Li F, et al. Analyzing the sustainability of China's industrial sectors: A data-driven approach with total energy consumption constraint[J]. Ecological Indicators, 2021, 122(4): 107235.
- [3] 刘彦君. 京津冀地区碳排放峰值预测与分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [4] Wu L P, Chen Y, Feylizadeh M R, et al. Estimation of China's macro-carbon rebound effect: Method of integrating data envelopment analysis production model and sequential Malmquist-Luenberger index[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 1431-1442.
- [5] 中国科学院兰州文献情报中心. 科学研究动态监测快报——气候变化科学专辑 [EB/OL]. [2019-02-15]. <http://www.>

rcees.ac.cn/xwzx/kydt/201910/P020191009381921492528.pdf.

[6]Wang S J,Liu X P.China' s city-level energy-related CO₂ emissions:Spatiotemporal patterns and driving forces[J]. Applied Energy, 2017, 200(15):204-214.

[7]解振华. 坚持积极应对气候变化战略定力继续做全球生态文明建设的重要参与者、贡献者和引领者[N]. 中国环境报, 2020-12-14(02).

[8]International Energy Agency.World energy outlook 2018[EB/OL]. (2018-11-13).<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.

[9]Wang K J.China' s CO₂ peak before 2030 implied from characteristics and growth of cities[J].Nature Sustainability, 2019, 2:748-754.

[10]Ma X J,Wang C X,Dong B Y,et al.Carbon emissions from energy consumption in China:Its measurement and driving factors[J]. Science of The Total Environment, 2018, 648:1411-1420.

[11]Su K,Lee C M.When will China achieve its carbon emission peak?A scenario analysis based on optimal control and the STIRPAT model[EB/OL]. (2020-10-12).<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X20300753?via%3Dihub>.

[12]褚力其, 姜志德, 任天驰. 中国农业碳排放经验分解与峰值预测——基于动态政策情景视角[J]. 中国农业大学学报, 2020(10): 187-201.

[13]邓小乐, 孙慧. 基于 STIRPAT 模型的西北五省区碳排放峰值预测研究[J]. 生态经济, 2016(9): 36-41.

[14]刘彦迪. 2030 年中国碳排放达峰区域性预测与影响因素分析[D]. 济南: 山东大学, 2020.

[15]曹丽斌, 李明煜, 张立, 等. 长三角城市群 CO₂ 排放达峰影响研究[J]. 环境工程, 2020(11): 33-38.

[16]臧宏宽, 杨威杉, 张静, 等. 京津冀城市群二氧化碳排放达峰研究[J]. 环境工程, 2020(11): 19-24.

[17]World Resources Institute.Mitigation goal standard[EB/OL]. (2014-11-19).<https://www.wri.org/research/mitigation-goal-standard>, 2014.

[18]赵荣钦, 刘薇, 刘英, 等. 基于碳收支核算的河南省碳排放峰值预测[J]. 水土保持通报, 2016(4): 78-83.

[19]马彩云, 徐林, 赖茂宇, 等. 基于灰色预测模型的安徽省建筑业碳排放量预测[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2019(1): 89-94.

[20]王磊. 基于投入产出模型的天津市碳排放预测研究[J]. 生态经济, 2014(1): 52-56.

[21]渠慎宁, 郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010(12): 10-15.

[22]胡哲太, 苏飞. 基于 STIRPAT 模型的杭州市能源消费碳排放预测[J]. 北方经贸, 2013(12): 80-84.

[23]Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth[J]. Science New Series, 1971, 171 (3977): 1212-1217.

[24]York R, Rosa E A, Dietz T. Bridging environmental science with environmental policy: Plasticity of population, affluence, and technology[J]. Social Science Quarterly, 2002, 83(1): 18-34.

[25]York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and Impact: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46 (3): 351-365.

[26]Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence, and technology[J]. Human Ecology Review, 1994, 1 (2): 277-300.

[27]国家统计局. 2006 年中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.

[28]马宇恒. 东北地区 2030 年碳排放达峰路径研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

[29]张哲, 任怡萌, 董会娟. 城市碳排放达峰和低碳发展研究: 以上海市为例[J]. 环境工程, 2020(11): 12-18.

[30]陈希镇. 现代统计分析方法的理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

[31]孙文静. 陕西省人口因素对碳排放影响研究及全面放开二孩情景预测[D]. 西安: 西北大学, 2018.

[32]宋晓晖, 张裕芬, 汪艺梅, 等. 基于 IPAT 扩展模型分析人口因素对碳排放的影响[J]. 环境科学研究, 2012(1): 109-115.