

碳达峰路径与智力城镇化

何 珍 吴志强 王紫琪 何 睿 姬凌云 马春庆 邓雪媛

提 要 研究显示碳达峰与城镇化成熟期时间上高度重合,碳达峰国家达峰时的城镇化率均值在74%左右,因此如何把握城镇化与碳达峰的精准关系极为重要。基于全球198个国家和地区1960—2018年社会经济及碳排放数据,引入机器学习算法,探寻世界国家碳达峰路径与智力型、体力型城镇化路径分化的内在关系,找出智力型国家碳达峰的关键衡量指标,并进一步分析智力型国家的创新驱动因子对其达峰路径的影响机制,以此为智慧创新的碳达峰道路提供借鉴。提出碳达峰路径的五种橄榄曲线,并指出中国未来的碳达峰道路必须由双层智慧进行控制,即达峰曲线的智慧设计,以及曲线内部造成不同走向的智力关键要素含量的设计。在国家2030年碳达峰总目标下,需结合地方差异性设计各个城市和区域的特殊曲线,制定各自的智慧策略。

关键词 碳达峰路径;智力城镇化;碳排放强度;创新驱动因子;碳排放强度预测模型;橄榄曲线

中图分类号 TU984 文献标识码 A
DOI 10.16361/j.upf.202106005
文章编号 1000-3363(2021)06-0037-08

作者简介

何 珍,上海同济城市规划设计研究院有限公司,规划师,hezhen@tjupdi.com
吴志强,同济大学建筑与城市规划学院,中国工程院院士,高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室,教授,博导,通讯作者,wus@tongji.edu.cn
王紫琪,同济大学建筑与城市规划学院,硕士生
何 睿,同济大学建筑与城市规划学院,博士生
姬凌云,同济大学建筑与城市规划学院,博士生;北方工业大学,副教授,注册规划师
马春庆,上海同济城市规划设计研究院有限公司副主任,高级工程师
邓雪媛,苏州科技大学规划系,副教授

Path to Peak Emissions and Smart Urbanization

HE Zhen, WU Zhiqiang, WANG Ziqi, HE Rui, JI Lingyun, MA Chunqing, DENG Xueyuan

Abstract: This study shows that the time of hitting emission peaks coincides with that of reaching urbanization maturity, and the average urbanization rate of carbon-peak countries is about 74%. It is very important to recognize these relationships. Based on socioeconomic data and carbon emission data of 198 countries and regions from 1960 to 2018, this paper uses the machine learning algorithm to explore the interrelationship between the path to peak emissions and the different strategies of smart vs. physical urbanization, and seek out the key impact factors of smart urbanization globally. Furthermore, the paper analyzes the mechanism of innovation factors for smart urbanization countries in their respective process of reaching emission peaks so as to provide a reference for China. This paper puts forward five theoretical olive-shaped curves of peak emission path, and points out that China's future path will be determined by a double-layered wisdom, that is, the layer of intelligent design of the peak curve and the design of key elements of intelligence that shapes different trends within the curve. There are huge regional differences in natural conditions, industrial structures, and capacities in scientific and technological innovation in East, West, South and North China. Under the overall national goal of reaching the emission peak in 2030, it is necessary to design appropriate curves for each city and region and formulate its own smart strategies.

Keywords: path to peak emissions; smart urbanization; carbon emission intensity; innovation driving indicators; carbon emission intensity prediction model; olive-shaped curves

1 研究背景

1.1 背景一:我国的承诺

我国在第七十五届联合国大会上正式宣布将力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。到2030年只有不到10年的时间,而中国仍是一个发展中大国,努力实现中高速增长也是国家发展的核心目标。因此中国碳达峰路径不是一条两点之间的简单直线,而是精准的曲线选择,是中国特色的、地方特点的、永续发展之必然要求。

国内目前的研究议题主要围绕能源结构(胡鞍钢,2021;程路,等,2016;柴麒敏,等,2015^①、产业结构(Elzen,等,2016;韩梦瑶,等,2017^②)、经济发展(Niu,等,2016;鲁成钢,等,2021;张德元,2021;王勇,等,2017^③)等方面展开,对于优化中国碳达峰路径具有重要的参考价值。近年来碳排、碳达峰在城市规划领域关注度也不断增加,主要围绕低碳城市,从概念内涵、目标策略、指标体系、核算方法以及各层级空间规划(潘海啸,2008;顾朝林,2009,2012;陈飞,2009;李迅,2011;邹德慈,2010;张赫,2021;熊健,等,2021^④)等方面展开了一系列研究与实践,取得了丰富

表 1 截至 2020 年全球 53 个碳达峰国家/承诺达峰国家及其达峰时间

Tab. 1 53 emission-peak countries / emission-peak commitment countries by 2020 with their corresponding year of reaching emission peaks

年份	碳达峰国家/承诺碳达峰国家
1990 年及以前	阿塞拜疆、白俄罗斯、保加利亚、克罗地亚、捷克、爱沙尼亚、格鲁吉亚、德国、匈牙利、哈萨克斯坦、拉脱维亚、摩尔多瓦、挪威、罗马尼亚、俄罗斯、塞尔维亚、斯洛伐克、塔吉克斯坦、乌克兰
1991—2000 年	英国、黑山共和国、卢森堡、立陶宛、法国、波兰、瑞典、芬兰、荷兰、丹麦、比利时、哥斯达黎加、摩纳哥、瑞士、
2001—2010 年	爱尔兰、密克罗尼西亚、奥地利、葡萄牙、澳大利亚、加拿大、希腊、意大利、西班牙、美国、圣马力诺、斯洛文尼亚、列支敦士登、冰岛、塞浦路斯
2011—2020 年	巴西、日本、韩国、马耳他、新西兰

数据来源：WRI.

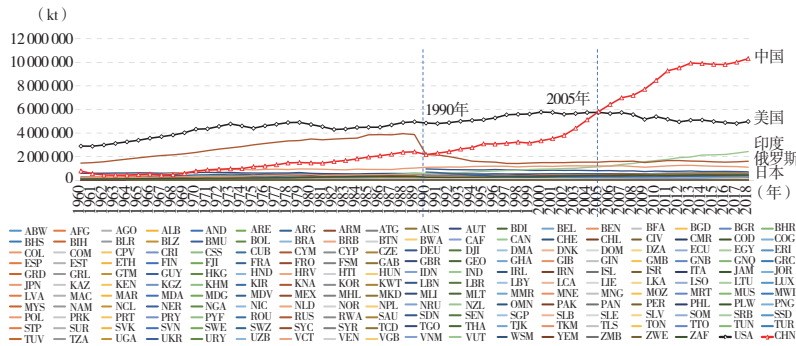


图 1 1960—2018 年各国碳排放演变趋势

Fig. 1 Trends of carbon emissions in countries from 1960 to 2018, figure source: drawn by author
资料来源：作者自绘，数据来源：世界银行^⑥

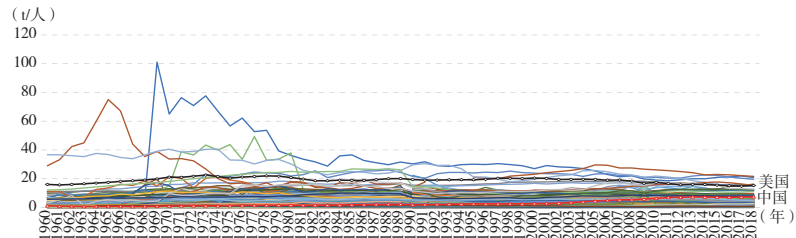


图 2 1960—2018 年各国人均碳排放演变趋势

Fig. 2 Trends of carbon emissions per capita in countries from 1960 to 2018
资料来源：作者自绘，数据来源：世界银行.

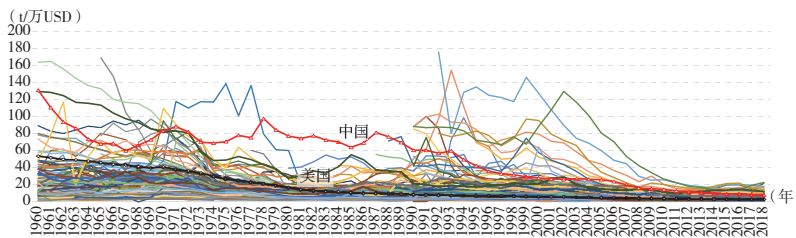


图 3 1960—2018 年各国历年碳排放强度演变趋势

Fig. 3 Trends of annual carbon emission intensity in countries from 1960 to 2018
资料来源：作者自绘，数据来源：世界银行.

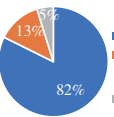
成果。但是对于城镇化路径与碳达峰和碳中和的内在关系缺少系统的关联研究。

本文按照作者提出的体力城镇化与智力城镇化两条道路（吴志强，等，2015）的不同模式，使用 198 个国家和地区的 1960—2018 年社会经济与碳排放数据，引入机器学习算法，探索世界国

家碳达峰路径与智力型、体力型城镇化路径分化的内在关系，找出了智力型国家碳达峰的关键衡量指标，分析了智力型城镇化国家的创新驱动因子对该类国家碳达峰路径的影响机制，以此为中国智慧创新的碳达峰道路提供借鉴。

此外，对于城市创新力与碳排放的关

2018 年世界各国
碳排放占比情况



50 个碳排主体国家达峰
与未达峰碳排放占比

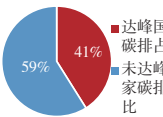


图 4 2018 年世界各国碳排放占比、50 个主要碳排国中达峰与未达峰国碳排放占比

Fig. 4 Proportion of carbon emissions by countries in 2018 and proportion of carbon-emission peak and non-peak countries among 50 major carbon emission countries

资料来源：作者自绘，数据来源世界银行.

联研究，缺乏定量研究。本文将城市创新力与碳排做大数据分析，并利用机器学习的手段揭示两者之间的内在联系，走创新、科技的高附加值经济道路，将使国家走向理性的发展道路，为城市未来发展提供科学支撑路径。

1.2 背景二：各国碳达峰状态

世界资源研究所数据显示^⑤，截至 2020 年，实现碳达峰/承诺碳达峰的国家一共 53 个，如表 1 所示，其中包括了美国、俄罗斯、日本、德国、韩国、加拿大、巴西、英国和法国等国家。

1.3 背景三：各国碳排放演变趋势

1960—2018 年 198 个国家和地区碳排放演变历程显示，各国碳排之间的状态正在分化，一部分国家已经实现碳达峰，如图 1 所示，而中国和印度为代表的新兴国家的碳排在持续快速增长，但增速近年来开始放缓，还有一大部分国家的碳排维持在相对较低的水平。中国碳排量 1990 年超过俄罗斯，2005 年超过美国，位列世界第一。

从 1960 年到 2018 年各国人均碳排上看（图 2），总体上世界人均碳排量呈波动中下降。我国虽然碳排总量排世界第一，并在 2016 年以后还在攀升，但是对比 2018 年中美两国人均碳排量显示，美国人均碳排达到 15.2t/人，远高于中国人均碳排 7.4t/人，两国人均碳排量差值达到 7.8t/人左右。

从每万美元 GDP 吨碳排量（碳排强度）观察（图 3），1960—2018 年各国碳排强度总体呈波动下降趋势。中国碳排强度从 2005 年开始持续下降，2018 年中国碳排强度为 7.4t/万 USD，对比同时期美国 2.4t/万 USD、日本 2.2t/万 USD、德

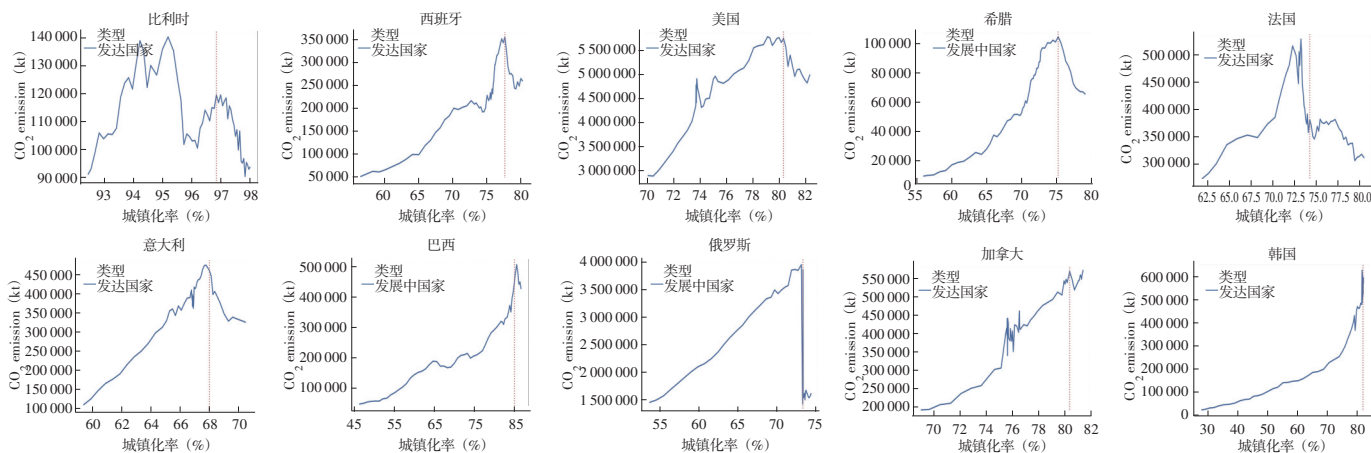


图5 第一种类型曲线

Fig. 5 The first type of curve

资料来源：作者自绘，数据来源世界银行。

国1.8t/万USD，可见中国碳排强度与世界主要发达国家还存在较大差距。

1.4 背景四：世界主要碳排放国家

本文分析2018年世界各国碳排量占比情况（图4），发现碳排量最大的50个国家的碳排总和占全球198个国家和地区的总碳排量95%以上，其中G20的19个国家的总碳排量占全球碳排量82%，对全球碳排影响巨大。其中截至2018年有22个国家已实现碳达峰，其碳排量占比为41%；28个国家还未实现达峰，其碳排量占比59%。

2 智力型国家城镇化道路与碳达峰路径关系

2.1 22个主要碳排放国家碳达峰路径与城镇化发展关系

按照智力城镇化与体力城镇化的一般规律，以25 000USD作为划分线（吴志强，2015），进一步考察22个达峰的主要碳排放国家2018年人均GDP情况，发现其中有13个达峰国家属于智力型，9个达峰国家为体力型。碳排放与城镇化发展呈现出高度相关性。22个国家达峰时期对应的城镇化率均值在74%左右。

细化分析各国达峰路径与城镇化发展关系，发现主要呈现出三种类型的曲线^⑦：第一种类型曲线，达峰前快速提升，达峰后快速下降，该类型国家有比利时、西班牙、美国、希腊、法国、意大利、巴西、俄罗斯、加拿大、韩国等（图5）；第二种类型曲线，达峰前先快速

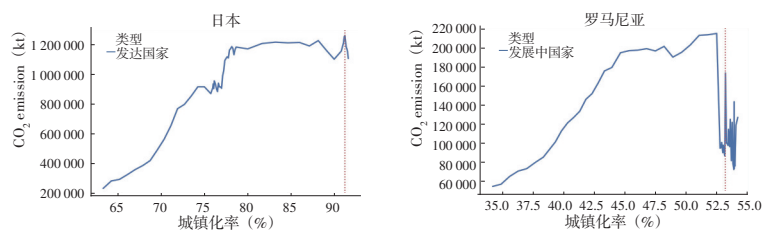


图6 第二种类型曲线

Fig. 6 The second type of curve

资料来源：作者自绘，数据来源世界银行。

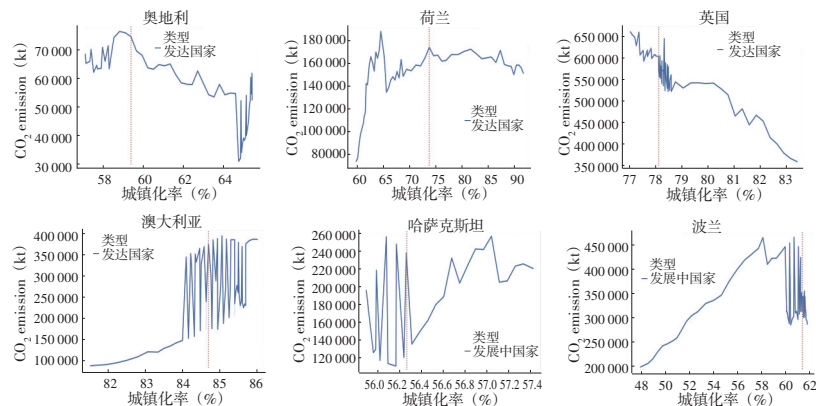


图7 第三种类型曲线

Fig. 7 The third type of curve

资料来源：作者自绘，数据来源世界银行。

提升然后进入缓坡段，达峰后快速下降，该类型国家有日本、罗马尼亚（图6）；第三种类型曲线，达峰前波动变化，达峰后波动下降，该类型国家有奥地利、荷兰、英国、澳大利亚、哈萨克斯坦、波兰（图7）。

2.2 智力城镇化下的碳达峰路径关键衡量指标

进一步探究22个国家达峰路径的内

在差异性，分别分析智力型国家、体力型国家在达峰时的各自特征。13个智力型碳达峰国家在其达峰时期对应的城镇化率、碳排强度、人均碳排等数据显示（表2）：①城镇化率均值为78.42%，表明其城镇化达到相对高的成熟阶段；②碳排强度均值为3.74t/万USD，表明其经济发展与碳排基本实现脱钩；③人均碳排强度均值为11.74t/人。

9个体力型典型碳达峰国家在其达峰

表2 13个智力型碳达峰国家达峰时期情况

Tab. 2 Conditions of 13 emission peak countries by smart urbanization in their peak years

国家	官方公布 达峰时间 (年)	达峰时 城镇化率 (%)	达峰时碳排 强度 (t/万 USD)	达峰时人均 GDP (USD)	达峰时人均 碳排 (t/人)	收入 水平	智力 城镇化	G20 国家
德国	1990	73.12	5.40	22 282.92	12.03	高收入水平	是	是
法国	1991	74.23	3.00	21 687.41	6.50	高收入水平	是	是
英国	1991	78.11	5.00	19 852.02	9.93	高收入水平	是	是
比利时	1996	96.85	4.28	27 469.72	11.76	高收入水平	是	否
荷兰	1996	73.64	3.86	28 975.25	11.20	高收入水平	是	否
奥地利	2003	59.38	2.84	32 260.36	9.17	高收入水平	是	否
澳大利亚	2006	84.70	5.03	36 042.30	18.12	高收入水平	是	是
西班牙	2007	77.74	2.41	32 502.85	7.84	高收入水平	是	否
意大利	2007	67.97	2.08	37 817.66	7.86	高收入水平	是	是
加拿大	2007	80.40	3.89	44 695.76	17.37	高收入水平	是	是
美国	2007	80.27	3.96	48 135.78	19.06	高收入水平	是	是
韩国	2013	81.78	4.36	27 166.97	11.85	高收入水平	是	是
日本	2013	91.23	2.44	40 488.05	9.89	高收入水平	是	是
均值	/	78.42	3.74	32 259.77	11.74			

资料来源：作者自绘，数据来源：世界银行。

表3 9个体力型碳达峰国家达峰时期情况

Tab. 3 Conditions of 9 emission peak countries by physical urbanization in their peak years

国家	官方公布 达峰时间 (年)	达峰时城镇 化率 (%)	达峰时碳排 强度 (t/万 USD)	达峰时人均 GDP (USD)	达峰时人均 碳排 (t/人)	收入水平	智力 城镇化	G20 国家
白俄罗斯	1990	65.98	46.12	2124.84	9.80	中高收入水平	否	否
罗马尼亚	1990	53.22	44.27	1680.71	7.44	高收入水平	否	否
捷克	1990	75.22	36.88	3941.50	14.54	高收入水平	否	否
乌克兰	1990	66.76	84.54	1569.76	13.27	中低收入水平	否	否
哈萨克斯坦	1990	56.27	88.21	1647.46	14.53	中低收入水平	否	否
俄罗斯	1990	73.39	41.87	3493.97	14.63	中高收入水平	否	是
波兰	1992	61.36	36.40	2459.02	8.95	高收入水平	否	否
希腊	2007	75.20	3.28	28 782.26	9.44	高收入水平	否	否
巴西	2012	84.92	1.83	12 394.17	2.27	中高收入水平	否	是
均值	/	68.04	42.60	6454.85	10.54			

资料来源：作者自绘，数据来源世界银行。

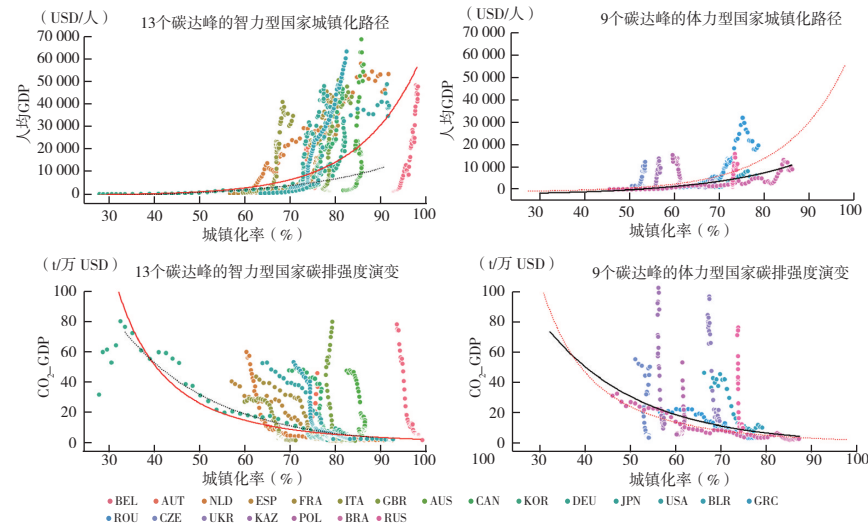


图8 智力型、体力型碳达峰国家的城镇化路径、碳排强度演变对比

Fig. 8 Comparison of urbanization path and carbon emission intensity between countries of smart urbanization and physical urbanization

资料来源：作者自绘，数据来源：世界银行。

时期对应的城镇化率、碳排强度、人均碳排等数据显示（表3）：①城镇化率均值68.04%，表明其城镇化接近成熟阶段；②碳排强度均值为42.60t/万USD，

表明其经济发展与碳排尚未实现脱钩；③人均碳排强度均为10.54t/人。

两种类型的国家在其达峰时期对应的城镇化率数值表明，碳达峰时期与城

镇化成熟期具有高度重合性，同时也说明碳达峰路径也是城镇化发展智力还是体力的关键分化期（图8）。对比这两类国家达峰时的人均碳排、碳排强度，发现这两类国家的人均碳排并未体现出明显差异性（11.74t/人 vs 10.54t/人），而碳排强度具有显著差异性（除巴西、希腊等两国外）。

第一类智力型国家在达峰时的碳排强度均值在3.74t/万USD左右，第二类体力型国家达峰时的碳排强度均值在42.60t/万USD左右，说明碳排强度是衡量一个国家的经济发展与碳排脱钩，从能源消耗型向创新高质量产出、低能耗转型的关键指标，是智力城镇化下的达峰路径的关键衡量指标。

2030年中国城镇化预计达到74%左右，这段窗口期，是中国转型到智力城镇化的关键时期，也是碳达峰的关键期。达峰后碳排下降，如果未能实现发展路径的转型，势必会对中国未来发展造成影响。2018年中国碳排强度在7.4t/万USD左右，参考智力型国家的碳达峰时期该指标均值，中国2030年实现碳达峰时的碳排强度需进一步下降至3.7t/万USD以下，也就是说2018年碳排强度要减少一半，以实现经济发展与碳排脱钩，中国未来的发展亟需走向智慧创新的低碳发展道路。

3 智力型国家智慧碳达峰路径实证研究

3.1 基于机器学习建构创新驱动——碳排强度模型

大幅度提升国家自主创新能力是城镇化走上创新驱动的“智力型”道路最为关键的因素（吴志强，2015）。智力城镇化道路的主要特征集中表现在“智力化”，与科技、资本、精英人群等智力发展要素息息相关（吴志强，2018）。本研究聚焦13个智力型碳达峰国家，探究智力要素对碳排强度的影响机制。数据来源于世界银行公布1980年以来的相关数据，选取表征国家智力投入、智力主体、智力产出的5项指标，包括R&D占比、高等学校录取率、科研人员数、科技论文数、国内申请发明专利数等创新相关指标，作为自变量——模型输入数据集；

国家碳排强度 (t/万 USD) 作为因变量—模型输出数据集 (图9)。利用机器学习算法建构创新驱动—碳排强度模型, 分析智力型达峰国家碳排下降、高质量发展的创新关键驱动要素及其作用机制。

为了进一步研究创新驱动因子如何影响碳排强度, 本研究引入机器学习 XGBOOST 模型, 建构智力型国家的创新驱动—碳排强度预测模型, 探寻其内在数值规律。XGBOOST (CHEN Tianqi, 2016) 是提升树模型 (tree boosting) 的一种, 提升树模型算法的思想是将许多弱分类器集成在一起, 形成一个强分类器, 该算法已经在大量的机器学习和数据挖掘实践中被广泛应用与认可。研究引入多重判定系数 R^2 测定 XGBOOST 模型的拟合程度。

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}$$

其中, R^2 为多重判定系数, SSR 为回归平方和, SSE 为残差平方和, SST 为总离差平方和, y 为真实值, $\hat{y}$ 为预测值, $\bar{y}$ 为平均值。 $0 \leq R^2 \leq 1$, R^2 越接近 1, 回归拟合程度越高, 反之, R^2 越接近 0, 拟合程度越低。

在此基础上, 利用机器学习可解释性算法, 计算预测模型中各创新驱动因子的 SHAP 值 (Molnar Christoph, 2021), 根据 SHAP 值对各因子的重要性进行排序, 挖掘影响国家碳排强度的关键因子, 并进一步分析各因子分别对碳排强度的影响特征及其作用机制。

3.2 智力型碳达峰国家创新驱动要素及其作用机制

利用 XGBOOST 算法构建智力型国家的创新驱动—碳排强度预测模型, 训练数据集为总数据集的 80%, 测试数据集为总数据集的 20%, 用 R^2 测度模型准确性。测试阶段 R^2 达到 0.9 以上, 说明模型拟合程度高, 通过验证。统计各因子 ShapValue 值, 结果如图 10 所示, 贡献度由高到低依次为: 科技论文数/百万人、高等学校录取率、国内申请发明专利数/百万人、R&D 占比、科研人数/百万人。

进一步分析各创新驱动因子对碳排强度的影响, 如图 11—13 所示, 发现创新驱动因子对碳排强度的影响表现为非线性特征, 且存在一定的阈值区间, 当

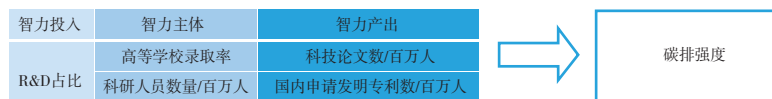


图 9 智慧碳达峰路径的创新驱动因子

Fig. 9 Innovation factors of smart path toward emission peak
资料来源: 作者自绘。

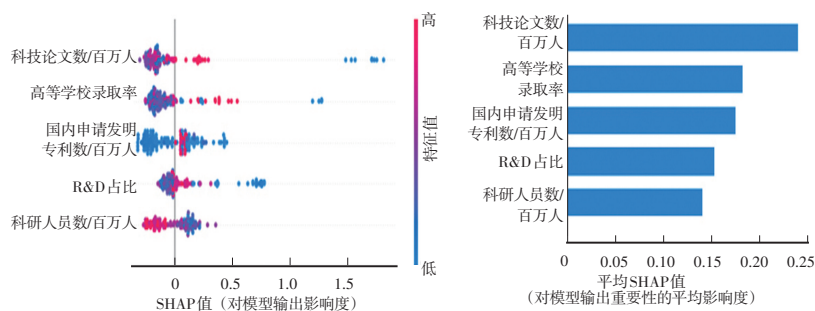


图 10 基于碳排强度预测模型的智慧碳达峰国家关键影响要素分析

Fig. 10 Analysis of key influencing factors of smart emission peak countries based on carbon emission intensity prediction model

资料来源: 作者自绘。

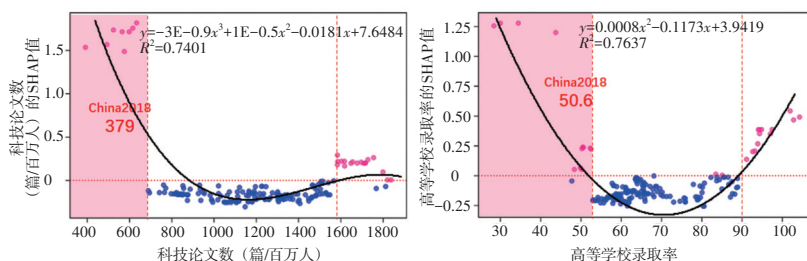


图 11 科技论文数/百万人、高等学校录取率的作用机制

Fig. 11 Influence factor of number of scientific papers per million people and admission rate of colleges and Universities
资料来源: 作者自绘。

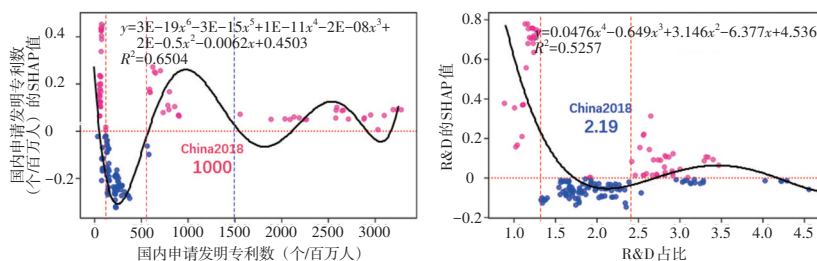


图 12 国内申请发明专利数/百万人、R&D 占比的作用机制

Fig. 12 Influence factor of number of domestic invention patents applied per million people and R & D proportion
资料来源: 作者自绘。

因子数值超过一定阈值区间时, 对碳排强度的影响趋势显著变化, 各因子影响机制也呈现出一定差异性。

科技论文数/百万人对碳排强度的影响趋势呈现为三个区间段, 拟合曲线趋势为逐渐递减后, 有较小幅度的回升。第一个区间段为正向影响区间, 对应阈值为 700 篇/百万人以内; 当超过该阈值,

进入第二个负向影响区间段, 该因子对碳排强度影响为负向; 而当这一数值超过 1600 篇/百万人后, 进入第三个正向影响区间段, 但正向影响相对于第一个区间弱化很多。模型结果显示最佳影响区间为 [700, 1600], 对比中国 2018 年科技论文数/百万人为 379 篇/百万人, 尚处于第一个正向影响区间, 表明中国的科技

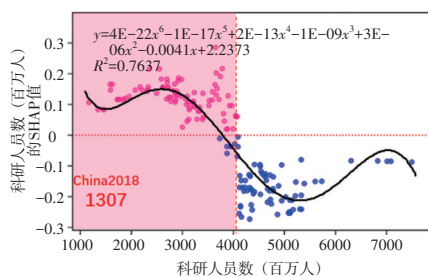


图13 科研人数/百万人的作用机制

Fig. 13 Influence factor of scientific research population per million
资料来源：作者自绘。

论文发表数量有待进一步提升，以进入最佳影响区间。

高等学校录取率对碳排强度的影响呈现出三个区间段，拟合曲线的趋势为U型曲线。第一个区间段为正向影响区间，对应阈值为56%以内；第二个区间段为负向影响区间，对应阈值范围为[56%, 90%]；当超过90%以后，进入第三个正向影响的区间段，随着该因子的增加，表现出对碳排强度增加显著的正向影响特征。对照中国2018年高等学校录取率(50.6%)情况，还有待进一步提升以进入最佳影响区间。

国内申请发明专利数/百万人对碳排强度的影响呈现出三个区间段，拟合曲线为波动下降曲线。第一个区间为正向影响趋势区间，对应阈值为125件/百万人以内，该区间正负影响均存在，但正向影响趋势更显著；第二个区间为负向影响区间，对应阈值范围为[125, 500]；第三个区间为正向影响区间，但影响特征随着该因子的数值增加，正向影响波动下降，尤其是超过1500以后，正向影响显著下降。对比中国2018年的国内申请发明专利数/百万人为1000，按照模型分析结果显示，中国的国内申请发明专利数提升50%及以上后，将降低对碳排强度的正向影响。

R&D占比对碳排强度影响表现为三个区间段，拟合曲线为逐渐递减。第一个区间为正向影响区间，对应阈值为小于1.3%左右；第二个区间为负向影响区间，对应阈值范围[1.3%, 2.4%]；超过2.4%以后进入第三个区间，该区间为正向影响趋势区间。对照中国2018年R&D占比为2.19%，处于负向影响区间。

科研人数/百万人对碳排强度也有

一定影响，其特征表现为两个区间段，阈值为4000人/百万人，当低于该阈值，对碳排强度影响为正向；当超过该阈值，为负向影响区间。对照中国2018年的科研人数/百万人为1307，仅为该阈值的1/3左右，尚有很大提升空间。

4 中国特色智慧创新的碳达峰路径

第一，本研究显示国家碳达峰与其城镇化发展之间是有规律可循的，这对城市研究、城市规划来说，抓住这一规律可以让我们快速把握从国家到城市的碳达峰相关规律。

第二，从碳达峰国家数据来看，其达峰时的城镇化率均值在74%左右，按照中国城镇化发展趋势来看，预计中国2030年可达到城镇化率74%左右，因此我们的研究证明中国碳达峰把时间点放在2030年，从世界各国城镇化规律来说是可以找到科学依据的。

第三，在城镇化率达到74%之前，如何把握城镇化与碳达峰的精准关系是极为重要的。我们应该在未来10年城镇化过程中尽量减少导入城市的碳排工业和新民工，使得每一个城镇化率百分点的提升都带来更大的劳动生产率以及带来更低的百万产值的碳排量。

第四，在碳达峰之前的关键10年的城镇化路径还可以有5种走法，即橄榄曲线1、2、3、4、5，如图14所示。

(1) 橄榄曲线1，如图15所示，在整个发展过程中，提前达到碳达峰，后半程有非常大的余量，并且从整体创造的财富来看，远远高于后面的曲线，这是一条最主动的曲线。

(2) 橄榄曲线2，如图16所示，提前五年接近达峰值并保持在一定的水平上，为2030年以后的碳排下降做够高原平台，这也是一条非常优秀的曲线。

(3) 橄榄曲线3，如图17所示，是一种粗放的、非年度控制的直线，把2020年与2030年进行了直接挂钩，是一条直线，但考虑到各个省、地区、城市的具体发展水平的差异性，是不可能走出这样的直线的，一定会在这条直线上下摆动。

(4) 橄榄曲线4，如图18所示，把2020年到2025年的前段保持在一个相对

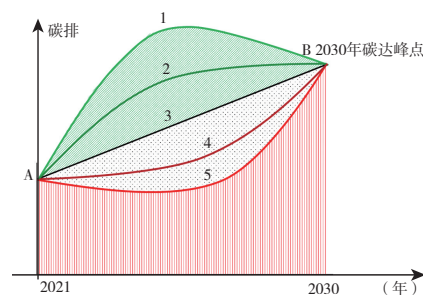


图14 理论曲线——橄榄曲线1—5

Fig. 14 Theoretical curve - Olive-shaped curve 1-5
资料来源：作者自绘。

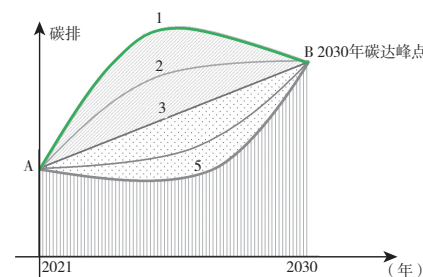


图15 理论曲线——橄榄曲线1

Fig. 15 Theoretical curve - Olive-shaped curve 1
资料来源：作者自绘。

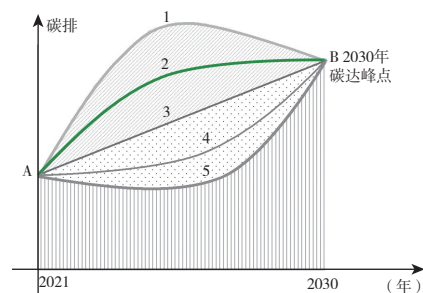


图16 理论曲线——橄榄曲线2

Fig. 16 Theoretical curve - Olive-shaped curve 2
资料来源：作者自绘。

低的高度上，到最后5年快速增长，达到碳排高峰点，实际上是损失了时间，损失了劳动生产率的提升机会，也损失了经济的效益，这是一种后觉醒模式，是特别需要提醒的。

(5) 橄榄曲线5，如图19所示，这是五种曲线中最愚昧的，不仅没有把碳达峰的政策用好，还在国家总体层面最后达峰之前快速提升至高峰点，对一个地区、一个城市来说，会造成对达峰后的碳排下降不留任何余地，更重要的是，会造成时间、资源和劳动效率提升机会的巨大挥霍，这是必须高度警惕并杜绝的一条曲线。

第五，碳达峰和城镇化的关系，虽

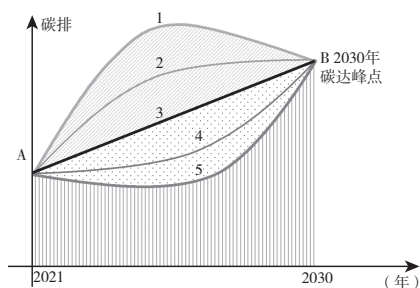


图17 理论曲线——橄榄曲线3

Fig. 17 Theoretical curve - Olive-shaped curve 3
资料来源：作者自绘。

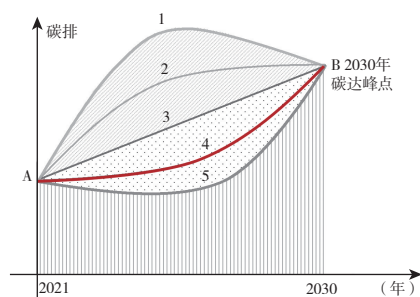


图18 理论曲线——橄榄曲线4

Fig. 18 Theoretical curve - Olive-shaped curve 4
资料来源：作者自绘。

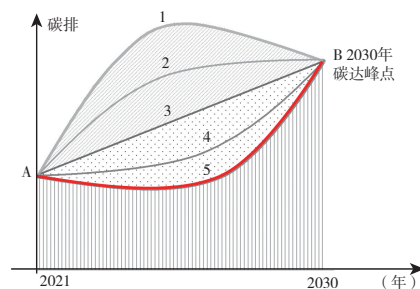


图19 橄榄曲线5

Fig. 19 Theoretical curve - Olive-shaped curve 5
资料来源：作者自绘。

然已经有不少文章在揭示国别的差异，但本文重点在于在剖析达峰过程中，不仅是对各国历史数字的回归分析，更重要的是为中国未来碳达峰路径进行智慧的设计。中国碳达峰路径必须由双层智慧来进行控制：第一层智慧，曲线的走向的智慧设计，如上面第四点所讨论的五种曲线；第二层智慧，曲线内部造成不同走向的智力含量，本文在这里主要列举了城镇化智力含量的五个要素：

A，国家科技产出密度：该项指标采用每百万人的科技论文数为衡量指标；

B，国家高等教育普及率：该项指标采用高等学校录取率为衡量指标；

C，国家创新密度：该项指标采用每

百万人国内申请发明专利人数为衡量指标；

D，国家创新投入密度：该项指标采用R&D占GDP的比重为衡量指标；

E，国家科研人员密度：该项指标采用每百万人中科研人员数量为衡量指标。

第六，基于以上五项指标，从中国城镇化走向智力道路并贡献碳中和的角度上来看，其发展路程是有所差异的：

(1) 从国家科技产出的衡量指标来观察，我国百万人科技论文数量近年得到了快速的提升，从2000年的42篇，提升到2018年的379篇，但是从降低碳排放强度的贡献率角度上来看，达到最佳贡献区间需超过百万人700篇，尚有翻倍的距离。因此国家的科技产出还需加紧努力，尤其是我国发达地区的科技产出可以为该城市和地区的劳动生产所消耗的碳排放的大规模下降做出重大贡献。

(2) 从国家高等教育普及率的衡量指标来观察，我国高等教育录取率从改革开放以来得到了极大提升，从1984年的2.02%，提升到2018年的50.60%，接近最佳贡献阈值56%。随着国家高等教育普及率的进一步提升，将为我国碳排放的大规模下降作出积极贡献。

(3) 从国家创新密度的衡量指标来观察，我国百万人国内申请发明专利数近年得到了快速的提升，从1985年的4件，提升到2018年的1000件，但从贡献率角度来看，该指标还需要提升50%以上，以促进碳排放强度的降低。因此国家的创新密度提升还需要加大努力，尤其是在我国发达地区的创新密度的提升将对该地区的消耗碳排放的大规模下降作出重大贡献。

(4) 从国家创新投入密度的衡量指标来观察，我国R&D占比近年得到了较大的提升，从1996年的0.56%，提升到2018年的2.19%，从贡献率角度看，该指标位于最佳贡献区间。因此总体上应保持国家创新投入力度，对于欠发达地区应加大创新投入密度，以为我国整体实现碳达峰、碳中和作出积极贡献。

(5) 从国家科研人员密度的衡量指标来观察，我国百万人中科研人员数近年得到了较大的提升，从1996年的438人，提升到2018年的1307人，但是从贡献率角度上来看，距达到最佳贡献区间

需超过4000人/百万人，还有两倍的差距。因此应加大力度培养国家科研人才，同时优化国家人才政策以吸引和留住科研人员，这对我国未来走向低碳高质量智慧的发展道路非常关键。

5 结语

本文讨论的是城镇化发展、国家智力创新水平和国家碳达峰三者之间的关联，并深入到智力城镇化中五个关键要素的精准分析、规律总结和未来推演。在中国2030年碳达峰的总目标下，需要根据我国的东中西部、南北方的自然条件、产业结构以及科技创新力的影响等自身差异性特点，利用智能规划手段精准设计各个城市和各个地区的特殊曲线，制定各自的智慧策略，防止走上前文所提到的橄榄曲线4，并杜绝走上橄榄曲线5，尽量走出橄榄曲线1和2。

注释

- ① 胡鞍钢等明确提出了控制能源消耗总量及增速约束性目标、大幅度提升非化石能源占一次能源消费比重、大幅度消减煤炭生产量和消费量等建议。程路、柴麒敏等认为，能源结构调整是中国2030年前实现碳排放达到峰值目标的主要举措。
- ② Elzen等基于能源及土地利用模型对2030年中国碳排放进行了预测，认为中国当前的减排政策不足以保障在2030年实现峰值，需要更加积极的产业结构调整。韩梦瑶等利用变系数面板模型，分析中国与世界主要国家碳排放的影响因素的异同，其中城市化率、可再生能源占比等对于碳排放降低均有着显著的作用。
- ③ Niu等的模拟结果显示，中国若希望在2030年前实现碳排放达峰，需要适当放缓经济增长速度。鲁成钢等对全球主要国家/地区的碳达峰和碳中和进行了比较分析，认为我国面临着过渡期短、经济发展水平总体不高、排放基数大、资源禀赋不足、成本高昂等诸多挑战和困难。张德元等通过借鉴日本、欧盟等发达国家和地区的碳减排经验，提出把发展循环经济作为我国实现碳达峰和碳中和的重要途径之一。王勇等构建包含气候保护函数的七部门CGE模型，模拟评估中国在2025年、2030年和2035年实现碳排放达峰的经济影响，提出2030年是中国碳排放达峰的最佳时间点。
- ④ 潘海啸等基于低碳排放的发展观，从区域规划、城市总体规划和详细规划三个层次分析了规划编制方法和技术标准，提出

“低碳城市”目标下的城市规划编制建议。顾朝林等在研究了气候变化、碳排放与城市化过程相互交织的关系后,提出低碳城市规划是我国低碳城市发展的关键技术之一。顾朝林等基于哈尔滨市2030年GDP总量和CO₂排放强度目标,提出哈尔滨市2030年碳排放结构调整规划。陈飞等从国内外低碳城市的理论内涵出发,建立模型指标及评价标准,定量化研究了城市发展过程中的碳排放量,并以此确定城市未来低碳发展目标及策略。李迅等提出中国城市可持续发展需要通过低碳、生态、绿色的城市转型得以实现。邹德慈等从城镇化与能耗关系出发,提出走低碳城镇化发展新路径。张赫等提出空间规划视角下县级城市差异化控碳思路。熊健等发现空间规划作为重要的干预手段被纳入整体路线图,并在交通、建筑、土地利用等关键领域发挥了减碳排、增碳汇的重要作用。

- ⑤ https://www-carbonbrief-org.translate.google/analysis-wri-data-suggests-emissions-have-already-peaked-49-countries?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=zh-CN&_x_tr_hl=zh-CN&_x_tr_pto=nui,sc
- ⑥ <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT>
- ⑦ 德国、捷克、白俄罗斯、乌克兰等因暂缺碳达峰前数据未列入。

参考文献 (References)

- [1] 柴麒敏,徐华清.基于IAMC模型的中国碳排放峰值目标实现路径[J].中国人口·资源与环境,2015,25(6):37-46.(CHAI Qi-min, XU Huaqing. Realization path of China's carbon emission peak target based on IAMC model[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(6): 37-46.)
- [2] 陈飞,诸大建.低碳城市研究的内涵、模型与目标策略确定[J].城市规划学刊,2009(4):7-13.(CHEN Fei, ZHU Dajian. Connotation, model and target strategy determination of low carbon city research[J]. Urban Planning Forum, 2009(4): 7-13)
- [3] CHEN Tianqi, GUESTIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system[R]. 2016.
- [4] 程路,邢璐.2030年碳排放达到峰值对电力发展的要求及影响分析[J].中国电力,2016,49(1):174-177.(CHENG Lu, XING Lu. The requirements and impacts of carbon emission peaking in 2030 on electric power development[J]. China Electric Power, 2016, 49(1): 174-177.)
- [5] ELZEN M, FEKETE H, HÖHNE N, et al. Greenhouse gas emissions from current and enhanced policies of China until 2030: carbon emission speak before 2030[J]. Energy Policy, 2016, 89: 224-236.
- [6] 顾朝林,刘宛,郭靖,等.哈尔滨2030预规划低碳导向方案调整研究[J].城市规划学刊,2012(4):36-43.(GU Chaolin, LIU Wan, GUO Jing, et al. Study on the adjustment of Harbin 2030 pre planning low carbon oriented scheme[J]. Urban Planning Forum, 2012(4): 36-43.)
- [7] 顾朝林,谭纵波,刘宛,等.气候变化、碳排放与低碳城市规划研究进展[J].城市规划学刊,2009(3):38-45.(GU Chaolin, TAN Zongbo, LIU Wan, et al. Research progress on climate change, carbon emission and low-carbon urban planning[J]. Urban Planning Forum, 2009(3): 38-45.)
- [8] 韩梦瑶,刘卫东,唐志鹏,等.世界主要国家碳排放影响因素分析——基于变系数面板模型[J].资源科学,2017,39(12):2420-2429.(HAN Mengyao, LIU Weidong, TANG Zhipeng, et al. Analysis of influencing factors of carbon emissions in major countries in the world based on variable coefficient panel model[J]. Resources Science, 2017, 39(12): 2420-2429.)
- [9] 胡鞍钢.中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.(HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology(Social Science Edition), 2021, 21(3): 1-15.)
- [10] 李迅,刘琰.低碳、生态、绿色——中国城市转型发展的战略选择[J].城市规划学刊,2011(2):1-7.(LI Xun, LIU Yan. Low carbon, ecology and green —— a strategic choice for China's urban transformation and development[J]. Urban Planning Forum, 2011(2): 1-7.)
- [11] 鲁成钢,莫菲菲,陈坤.主要国家碳达峰、碳中和比较分析[J].环境保护,2021,49(S2):89-93.(LU Chenggang, MO Feifei, CHEN Kun. Comparative analysis of carbon peak and carbon neutralization in major countries[J]. Environmental Protection, 2021, 49(S2): 89-93.)
- [12] Molnar Christoph.可解释机器学习——黑盒模型可解释性理解指南[M].朱明超,译.北京:电子工业出版社,2021.(MOLNAR C. Interpretable machine learning —— a guide to interpretable understanding of black box model[M]. ZHU Mingchao, translate. Beijing: Electronic Industry Press, 2021.)
- [13] NIU S, LIU Y, DING Y, et al. China's energy systems transformation and emissions peak[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 782-795.
- [14] 潘海啸,汤葐,吴锦瑜,等.中国“低碳城市”的空间规划策略[J].城市规划学刊,2008(6):57-64.(PAN Haixiao, TANG Zhen, WU Jinyu, et al. Spatial planning strategy of "low carbon city" in China[J]. Urban Planning Forum, 2008(6): 57-64.)
- [15] 王勇,王思东,毕莹.不同情景下碳排放达峰对中国经济的影响——基于CGE模型的分析[J].资源科学,2017,39(10):1896-1908.(WANG Yong, WANG Endong, BI Ying. Impact of peak carbon emissions on China's economy under different scenarios: based on CGE model[J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1896-1908.)
- [16] 吴志强.论新时代城市规划及其生态理性内核[J].城市规划学刊,2018(3):19-23.(WU Zhiqiang. On urban planning in the new era and its ecological rational core[J]. Urban Planning Forum, 2018(3): 19-23.)
- [17] 吴志强,杨秀,刘伟.智力城镇化还是体力城镇化——对中国城镇化的战略思考[J].城市规划学刊,2015(1):15-23.(WU Zhiqiang, YANG Xiu, LIU Wei. Intellectual urbanization or physical urbanization —— strategic thinking on China's urbanization[J]. Urban Planning Forum, 2015(1): 15-23.)
- [18] 熊健,卢柯,姜莹莹,等.金昱.“碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J].城市规划学刊,2021(4):74-80.(XIONG Jian, LU Ke, JIANG Ziying, et al. Research and THINKing on the compilation of land spatial planning under the goal of "carbon peak and carbon neutralization"[J]. Urban Planning Forum, 2021(4): 74-80.)
- [19] 张德元.欧盟、日本碳减排路径对我国具有重要借鉴意义[J].中国经贸导刊,2021(15):50-51.(ZHANG Deyuan. The path of carbon emission reduction of EU and Japan has important reference significance for China[J]. China Economic and Trade Guide, 2021(15): 50-51.)
- [20] 张赫,王睿,于丁一,等.基于差异化控碳思路的县级国土空间低碳规划方法探索[J].城市规划学刊,2021(5):58-65.(ZHANG He, WANG Rui, YU Dingyi, et al. Exploration of county-level land space low-carbon planning method based on differentiated carbon control[J]. Urban Planning Forum, 2021(5): 58-65.)
- [21] 邹德慈.中国城镇化发展要求与挑战[J].城市规划学刊,2010(4):1-4.(ZOU Deci. Requirements and challenges of China's urbanization development[J]. Urban Planning Forum, 2010(4): 1-4.)