

文章编号:1006-2467(2023)07-0928-11

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.524

基于 Mann-Kendall 趋势检验的 城市能源碳达峰评估方法

陈 赞¹, 沈 浩¹, 王晓慧¹, 赵文恺¹
潘智俊¹, 王佳裕¹, 李思源², 韩 冬²

(1. 国网上海浦东供电公司 总师室(互联网办公室), 上海 200122;

2. 上海理工大学 电气工程系, 上海 200093)

摘 要: 能源是城市碳排放的重要组成, 评估城市能源碳达峰是践行国家“双碳”战略的必要手段。为此, 针对城市能源的碳排放水平, 提出了一种基于 Mann-Kendall 趋势检验的能源碳达峰评估方法。通过构建涵盖能源碳排放量、清洁能源发电量、交通电能替代量等要素的碳监测体系, 结合历史数据计算城市的能源碳排放总量。鉴于能源碳排放具有季节性和随机性, 采用 Mann-Kendall 趋势检验法, 建立城市能源碳达峰判断模型, 衡量不同时期区域碳排放水平。以上海某行政区为例, 从年度、季度视角, 判断该区域的能源碳达峰状态。计算结果表明, 基于年度数据, 该地区在 2020 年已实现能源碳达峰; 基于季度数据, 夏季与秋季已实现能源碳达峰, 春季和冬季仍处于平台期。该方法可应用于评估城市级的碳达峰状态, 为检验各省市的碳达峰进程提供参考。

关键词: 能源碳监测体系; Mann-Kendall 趋势检验; 城市能源; 碳达峰

中图分类号: TK 01+2

文献标志码: A

Assessment Method for Urban Energy Carbon Emission Peak Based on Mann-Kendall Trend Test

CHEN Yun¹, SHEN Hao¹, WANG Xiaohui¹, ZHAO Wenkai¹
PAN Zhijun¹, WANG Jiayu¹, LI Siyuan², HAN Dong²

(1. Director of the Head Office (Internet Office), State Grid Shanghai Pudong Electric Power Supply Company, Shanghai 200122, China; 2. Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Energy is an important component of urban carbon emissions. Assessing the peak of urban energy carbon is a necessary means to implement the national “double carbon” strategy. For this reason, this paper proposes an energy carbon peaking assessment method based on Mann-Kendall trend test for carbon emission of urban energy. By constructing a carbon monitoring system covering elements such as energy carbon emissions, clean energy generation, and transportation electric energy substitution, the total energy carbon emissions of the city are calculated by combining historical data. In view of the seasonality and randomness of energy carbon emissions, the Mann-Kendall trend test was used to establish

收稿日期: 2021-12-21 修回日期: 2022-02-21 录用日期: 2022-04-11

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5209212100AC)

作者简介: 陈 赞(1982-), 高级工程师, 主要从事分布式能源、电网数字化转型及双碳技术研究等。

通信作者: 韩 冬, 副教授; E-mail: han_dong@usst.edu.cn.

a model for determining urban energy carbon peaking and to measure regional carbon emissions in different periods. Taking an administrative region in Shanghai as an example, the peak status of energy carbon in this region is judged from the perspective of year and quarter. The results show that based on the annual data, the region has reached its peak energy carbon in 2020. Based on quarterly data, peak energy carbon has been achieved in summer and autumn, while spring and winter are still in plateau. The methods proposed in this paper can be used to assess the carbon peak status in the city, and provide a reference for examining the carbon peak process in other provinces and cities.

Key words: energy carbon monitoring system; Mann-Kendall trend test; urban energy; carbon peaking

温室气体浓度对气候和生态系统的影响较为复杂,其浓度升高而带来如气候变暖等负面影响受到国际社会关注,也是重要科学研究问题之一。气候变暖背景下,由于原地球气候平均态的改变,极端天气现象变得更为显著和频发,且强度增强^[1],严重威胁人类生存。美国环境保护署认定,二氧化碳等温室气体是空气污染物。人类大规模地排放温室气体,是造成全球变暖的主要原因。为减小能源碳排,国际社会采取了诸多减排行动,如在未来全球气候变化治理体系中使用碳交易机制等^[2]。在国际层面,中国采取了积极的态度。中国政府在《巴黎协定》的基本框架下,提出了碳排放总量在 2030 年达到峰值、碳排放强度要求 2030 年比 2005 年单位 GDP 碳排放要下降 60%~65% 的目标^[3]。2020 年 9 月,习近平总书记在第 75 届联合国大会上,郑重承诺“碳达峰、碳中和”的目标;二氧化碳排放力争于在 2030 年前达到峰值,在 2060 年前实现碳中和。当下全球正遭受温室气体含量不断上升带来的负面影响,因此针对全球能源碳达峰的研究势在必行。

为响应国家绿色低碳、高质量发展的号召,需构建电力市场及碳市场双重手段协同发展的市场机制,控制和减少温室气体排放、推动经济发展方式向绿色低碳转型,利用市场力量实现“碳达峰与碳中和”的发展目标^[4]。通过研究二氧化碳排放问题,可以更好地发挥碳市场力量。学术界针对温室气体排放问题做出大量相关研究,Grossman 和 Krueger 于 1991 年指出了环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve,EKC)理论,并提出可通过调整经济发展趋势完成预期碳排放减少目标的措施^[5];文献[6]中使用 VENSIM 软件构建了一套关于甘肃省碳排放预测的系统动力学模型,可模拟不同情况下的碳达峰值及时间;文献[7]中通过耦合气候变化经济学中的经典模型(Regional Integrated model of Climate and the Economy,RICE)和长期能源替代规划系统模型(Long-range Energy Alternatives Plan-

ning model, LEAP),并通过设置 3 种情景动态模拟了 2020—2050 年的中国碳达峰路径及全球气候变化趋势,研究表明 3 种情形下碳排均呈“倒 U 型”曲线。其中,供给侧结构性改革情景下,中国碳排放峰值水平最低,且将于 2029 年最早达峰;文献[8]中采用 Kaya 模型对湖北省农业碳排放的影响因素进行了实证研究,结果表明农业经济发展水平对湖北省农业碳排放有较大的驱动作用;文献[9]中采用对数平均迪氏分解法(Logarithmic Mean Divisia Index,LMDI)对 1995—2017 年我国能源消费碳排放变化的影响因素进行分解,运用可拓展的随机性环境影响评估模型(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology, STIRPAT)对未来 3 种情景下我国的能源碳排放进行预测,结果表明在政策照旧的情况下,2030 年将不能实现碳达峰目标;文献[10]中使用 Tapio 脱钩模型对 2000—2015 年中国高耗能行业碳排放的脱钩状态进行研究,结果表明碳排放的脱钩状况呈现出从扩张性负脱钩阶段经过缓慢调整阶段,逐步过渡到弱脱钩阶段的发展态势,强脱钩虽然有所体现,但不明显;文献[11]中采用 Logistic 模型对中国 30 个省区碳排放进行了预测,研究结果为除宁夏外各省区预测值和实际值之间的平均误差仅为 6.22%,由此验证了 Logistic 模型的准确性;文献[12]中使用优化后的投入产出 I-O 模型进行了情景分析,以确保经济结构的平衡性达到最佳效果,结果表明到 2030 年,中国的碳排放峰值可以达到 12.41 Gt。综上所述,学术界对城市碳达峰的研究基础主要为情景分析法,通过建立 LEAP、Kaya、LMDI、STIRPAT 等模型,用于预测碳排放达峰的峰值、时间以及筛选影响碳排放的关键因素。上述方法曾被应用于各行业的碳排放预测研究,对帮助企业有效开展碳交易具有一定的指导意义。但此类模型对数据的精度要求较高,且皆应用于对未来不同情景假设下城市碳排放的预测,不能应用于评估城市碳排放的当前状态。

Mann-Kendall 趋势分析检验法对于样本数据的精确程度要求不高,允许数据在真实值附近波动,具有计算简便的特性,能够基于历史数据,对地区或企业的碳排放水平做出判断.因此将构建基于 Mann-Kendall 趋势检验法的城市能源碳达峰模型,研究分析城市或地区的碳排放规律.

针对城市碳达峰状态问题,本文建立了城市能源碳达峰模型.首先,利用城市或地区的用电量、发电量、清洁能源发电量和交通电能替代量等区域能源的核心要素搭建能源碳排监测体系,构造城市能源碳排放计算方法;其次,依据统计学方法,基于指定地区历史能源碳排放数据,通过 Mann-Kendall 趋势分析检验法判断时间序列是否存在下降趋势.最后,构建了基于 Mann-Kendall 方法的能源碳达峰判断模型,为我国城市碳达峰判断标准提供科学依据和决策参考,对国家“双碳”战略的落地具有推动和指导作用.

1 模型构建

首先对城市或地区的能源电力发展数据进行碳排计算,得到能源碳排数据.其次,根据统计学,采用 Mann-Kendall 趋势检验法研究能源碳排放变化的趋势,并基于条件判断函数构建城市能源碳排达峰状态判断模型,对城市是否实现能源碳达峰做出相对准确的判断.

1.1 能源碳排放计算

根据《上海市温室气体排放核算与报告技术文件》^[13],能源碳排放计算总体可以分为 3 个部分:能源碳排、清洁能源碳减排以及交通电能替代碳减排.能源碳排指:基于上海市供能的实际情况,排除清洁能源发电外的能源碳排放量.清洁能源一般是指在新技术基础上加以开发利用的可再生能源,包括太阳能、水能、风能等.相比于传统能源,清洁能源最大的优点即资源丰富,且环境污染率极低,因此是未来能源发展的主要趋势.交通电能替代碳减排指新能源汽车或主要采用电力驱动的汽车替代传统汽车而减少的碳排放量,新能源汽车本身不排放大气污染物,故推广电动汽车是节能减排的重要措施之一^[14].

碳排总量的计算公式如下:

$$C = C_1 - C_2 - C_3 \quad (1)$$

式中: C_1 为能源碳排量; C_2 为清洁能源减排量; C_3 为交通电能替代减排量.

1.1.1 能源碳排 由于排放的温室气体排放核算范围包括其与生产经营活动相关的直接排放和间接

排放,因此能源碳排计算可分为两个部分.

直接排放是指发电机组、热电联产机组和供热机组等生产系统燃烧消耗煤炭、柴油、燃料油和天然气等化石燃料产生的温室气体排放,可由下式计算:

$$D = \sum_{i=1}^N D_i = \frac{44}{12} \sum_{i=1}^N E_i L_i C'_i O_i \quad (2)$$

式中: D 为直接排放量; D_i 为第 i 种化石燃料的排放量; N 为化石燃料种类的数量; E_i 为该化石燃料的消费量; L_i 为该化石燃料的低位热值; C'_i 为该化石燃料的单位热值含碳量; O_i 为该化石燃料的氧化率.其中,针对不同化石燃料的 L_i 、 C_i 和 O_i 数值可参考《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[15].

间接排放是指排放主体因使用外购的电力和热力等所导致的温室气体排放,可由下式计算:

$$D' = \sum [(100\% - \beta) E_p P_{EM}] \quad (3)$$

式中: D' 为间接排放量; β 为市政供电的清洁能源占比; E_p 为不含清洁能源上网电量的用电量; 电力排放因子 $P_{EM} = 7.88 \times 10^{-4} \text{ t}/(\text{kW} \cdot \text{h})$.

根据式(2)和式(3),能源碳排量可通过下式计算得到:

$$C_1 = D + D' \quad (4)$$

1.1.2 清洁能源发电减排 21 世纪以来,由于世界各国大规模开发利用化石能源,导致煤炭、天然气等传统能源价格不断上涨,另一方面,传统燃料发电排放大量温室气体,对环境气候产生不利影响^[16].由于传统能源枯竭和环境恶化带来的双重压力,大规模清洁能源并网势必成为未来电力系统的发展方向^[17].近年来,我国清洁能源的发展进程迅速,水电装机的容量不断增加,风力发电和光伏发电新增装机量皆位列世界第一^[18].在 1.1.1 节的能源碳排计算中,由于自发自用的清洁能源电量(即不上网清洁能源发电)抵扣了部分用电量,电力间接碳排已减去了自发自用电量的间接碳排.在本节中,清洁能源发电减排主要指企业光伏、风力发电、生物质等清洁能源上网部分的减排量.计算公式如下:

$$C_2 = E_g P_{EM} \quad (5)$$

式中: E_g 为清洁能源上网电量.

1.1.3 交通电能替代减排 交通电能替代指新能源汽车通过电力储存技术,利用电能驱动汽车,按照所耗电量换算为发电厂的排放.新能源汽车主要包括纯电动汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池汽车等^[19].相比于传统燃油汽车,一方面,新能源汽车具有巨大的储能作用,可以削峰填谷^[20];另一方面,新能源汽车的二氧化碳排放显著减少.此外,相

同量的原油送至电厂用于发电供给新能源汽车,其能量利用率要比经过精炼为汽油供给燃油汽车更高.因此,新能源汽车有绿色环保、节省能源的优点.随着新能源汽车技术日益成熟和完善,电动汽车等新能源汽车正逐渐进入市场并被大众接受^[21],推动交通电能替代有利于缓解环境和能源危机带来的压力.由于交通工具使用燃油的碳排放核算边界不清晰,所以在 1.1.1 节能源碳排计算中未计及交通工具使用的燃油,而将电动汽车替代燃油汽车减少的碳排放量作为交通电能替代减排.这一做法与《广东省自行车骑行碳普惠方法学》^[22]原理保持一致.交通电能替代减排可理解为:在新能源汽车与燃油汽车行驶同样里程下,新能源汽车相比燃油汽车减少的碳排放量.公式如下:

$$C_3 = C_{CO_2} + C_{N_2O} + C_{CH_4} \quad (6)$$

$$C_{CO_2} = \frac{44}{12} E_C M_{\rho_{oil}} L_{HO} C_C O_{oil} \frac{O_{Hk}}{100} \quad (7)$$

$$C_{N_2O} = E_C M P_{N_2O} G_{N_2O} \quad (8)$$

$$C_{CH_4} = E_C M P_{CH_4} G_{CH_4} \quad (9)$$

式中: C_{CO_2} 为 CO_2 排放量; C_{N_2O} 为 N_2O 折 CO_2 排放量; C_{CH_4} 为 CH_4 折 CO_2 排放量; E_C 为新能源汽车充电量; 平均度电里程 $M=5 \text{ km}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; 燃油汽车百公里油耗 $O_{Hk}=8.9 \text{ L}$; 汽油密度 $\rho_{oil}=0.73 \text{ kg/L}$; 汽油低位热值 $L_{HO}=4.48 \times 10^{-5} \text{ TJ/kg}$; 单位热值含碳量 $C_C=8.9 \text{ t/TJ}$; 汽油氧化率 $O_{oil}=98\%$; N_2O 排放因子 $P_{N_2O}=6 \text{ mg/km}$; CH_4 的排放因子 $P_{CH_4}=57 \text{ mg/km}$; G 为温室效应潜能值, $G_{N_2O}=310$, $G_{CH_4}=21$.

1.2 Mann-Kendall 趋势分析检验法

Mann-Kendall 趋势检验法是世界气象组织在气象研究中推荐的方法,在水文序列趋势的统计分析与判断领域广为应用^[23],曾被应用于分析地区降水量时空分布特征、水文变化分析等问题^[24-25],在其他领域有应用于发动机性能预测分析等研究^[26].该方法的优点是不需要样本数据遵循某种规律,且存在部分异常值也不会对整体分析结果造成过大干扰.该方法涉及的关键核心概念是两个测量值之间的差值是大于、等于还是小于 0,分析和计算简便且实用性强,故适用于多种非正态分布的样本数据^[27].由于 Mann-Kendall 方法可用于分析持续增长或下降趋势(单调趋势)的时间序列数据,且适用于多数分布,故可以应用于研究城市碳达峰状态问题中.

在用 Mann-Kendall 趋势检验法分析时,时间序列样本 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是 n 个独立、随机同分布

的数据,假设 H_0 是表示这些样本数据不存在趋势,备选假设 H_1 则是双边检验,对于所有的 $i, j \leq n$,同时 $i \neq j$, x_i 和 x_j 的分布是不同的,那么检验的统计变量 S 计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (10)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Mann 和 Kendall 证明,当 $n \geq 8$ 时,统计量 S 大致服从正态分布,其均值为 0,方差为

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^g t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (12)$$

式中: g 表示分组数,序列相同元素分为一组; t_i 表示第 i 个结点的范围.通过变换统计量 S 为 Z_{mk} ,使得对于大样本数据, Z_{mk} 能近似满足标准正态分布:

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{S-1}{(V(S))^{1/2}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{(V(S))^{1/2}}, & S < 0 \end{cases} \quad (13)$$

在选择双边趋势检验的条件下,选定置信水平 α ,倘若 $|Z_{mk}| \geq Z_{1-\alpha/2}$,那么将拒绝原假设 H_0 ,即在置信水平 α 上,样本数据按时间序列存在明显的上升或下降趋势.双边检验下,当 Z_{mk} 的绝对值大于等于 1.64、1.96、2.57 时,表示分别通过了信度为 90%、95%、99% 显著性检验.同时,衡量趋势大小的指标可以用 β 来表示:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right), \quad \forall j < i \quad (14)$$

式中: $\text{Median}()$ 为中位数函数, $1 < j < i < n$. 当 $\beta > 0$ 时,代表样本数据呈上升趋势; $\beta < 0$ 则表示呈下降趋势.

置信水平 α 的取值依据具体样本量的大小来定,若样本量比较小,如仅含有数十例,则 α 取 0.05; 若样本量比较大,如含有上百例,则 α 可取 0.01; 假设样本量非常大,如含有上千甚至更多例,则 α 可以取 0.001 或更小的数值.

1.3 能源碳达峰判断

碳达峰的判断可以分成历史和未来两种判断标准.在历史判断中,要求该地区的历史碳排放峰值高于最近 5 年内碳排放峰值,即历史碳排放峰值出现的时间超过 5 年,否则认为该地区未达峰.在未来判断标准中则要求城市保证未来的排放水平会低于历

史水平^[28]. 本文主要研究能源碳达峰的历史判断.

基于条件判断函数和 Mann-Kendall 趋势检验法来构建一个能源碳达峰状态综合判断模型, 如图 1 所示. 首先, 通过城市基础能源数据计算出能源碳排放总量, 若碳排放峰值出现在近 5 年内, 则判定为未达峰. 一方面, 国际上“历史二氧化碳排放达峰判断”的相关标准主要包括以下要求: 该地区碳排放与新一期清单相比已达到最高水平; 在碳排放达到峰值后的 5 年内, 地区碳排放量至少减少 10%; 地区公开承诺将在未来继续无条件减排^[29]. 另一方面, 城市能源碳排在达峰后, 需要一段时间来检验该峰值是否为虚假达峰, 且若数据量太少也会对 Mann-Kendall 趋势检验的准确程度造成一定影响^[30], 这是由于数据不足而做出的判断. 若峰值出现在 5 年后, 则采用 Mann-Kendall 趋势检验. 若结果表明在峰值年份后, 二氧化碳排放量有显著的下降趋势, 则可以认定该城市完成碳达峰; 反之碳排放不存在显著的变化趋势, 则判定该城市处于平台期. 平台期指城市碳排在某个时间点到达峰值后, 碳排放可能在一定范围内波动, 随后步入平稳下降阶段, 在未出

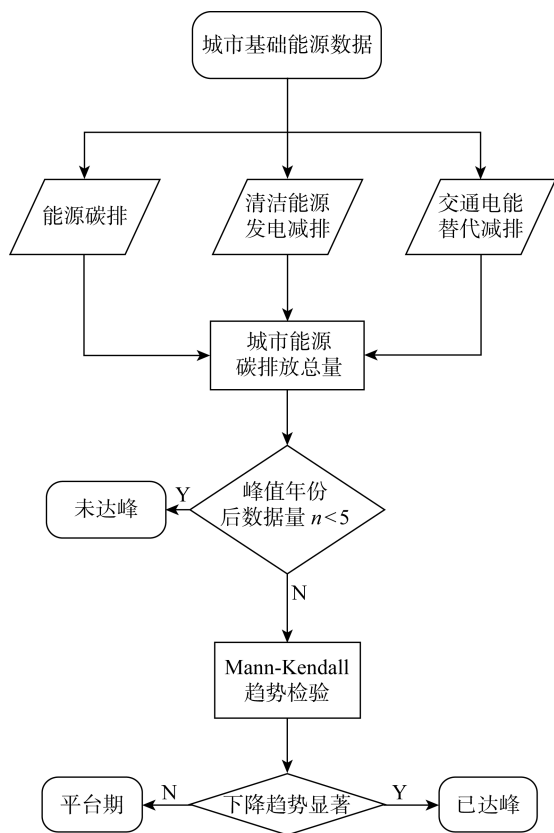


图 1 能源碳达峰综合判断模型

Fig. 1 Comprehensive judgment model of energy carbon peaking

现明显下降趋势前的时期称为平台期. 在平台期时, 由于经济因素、极端气象等自然因素干扰, 碳排放量仍有上升的可能, 难以判断是否完成碳达峰的目标, 有可能在今后出现新的峰值, 所以需要综合考虑人均碳排放、GDP 碳强度等因素, 对该城市未来的碳排放趋势进行预测^[31]. 根据城市自身条件提出更严格的减排措施以及更激进的减排目标, 早日完成碳达峰的任务.

2 算例分析

为验证本文所提的能源碳达峰分析模型的有效性, 以上海某行政区和上海市为实际案例, 分析其近 10 年的能源碳排数据, 测算该地区是否达到碳达峰. 其中, 电力、燃气和燃油等能源类数据来源于 2010—2020 年由中国统计出版社出版, 作者为上海市统计局的《上海统计年鉴》、属地政府部门和公用企事业单位. 应注意的是, 由于上海市电气化程度高, 其他能源占比较低, 所以在本文算例中, 二氧化碳的排放计算仅考虑化石能源中的电气部分.

2.1 二氧化碳直接排放评估

整理该地区 2010 年至 2020 年间的天然气消耗量、发电总量和市外调入电量等能源数据. 依据 1.1.1 节中的能源碳排计算方法, 计算出 C_1 如图 2 所示. 由图 2 可发现, 近 10 年能源碳排量整体较为稳定, 峰值出现于 2020 年, 最大年份后的数据量并不超过 5 个, 故该地区的能源碳排处于未达峰状态.

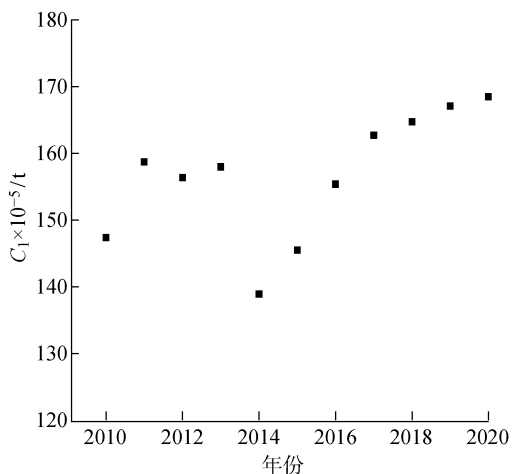


图 2 上海某行政区的能源碳排量

Fig. 2 Energy carbon emissions in an administrative region in Shanghai

2.2 能源二氧化碳总排放评估

2.2.1 测算能源碳排总量 整理该地区 2010 年至 2020 年间的天然气消耗量、发电总量、市外调入电

量、清洁能源发电量、售电量与新能源汽车耗电量等能源数据.依据 1.1 节中的碳排放计算方法,首先计算出 C_1 、 C_2 与 C_3 ,如图 3 所示.由图 3 可发现,近 10 年,能源碳排量逐年稳定,增量较低,较为稳定;清洁能源减排量与交通电能替代减排量爆发式增长,归功于我国的相关节能减排政策,极大程度提升了我国节能减排的发展进程.由能源碳排量、清洁能源减排量与交通电能替代减排量计算该地区 10 年间的能源碳排总量,如图 4 所示.由图 4 可知,2011 年,该地区能源碳排总量达到峰值,且最大年份后的数据样本量大于 5,因此可认为 2010 年该地区为能源碳排上升期.研究 2011 年至 2020 年间的发展,判断该地区是否实现碳达峰.

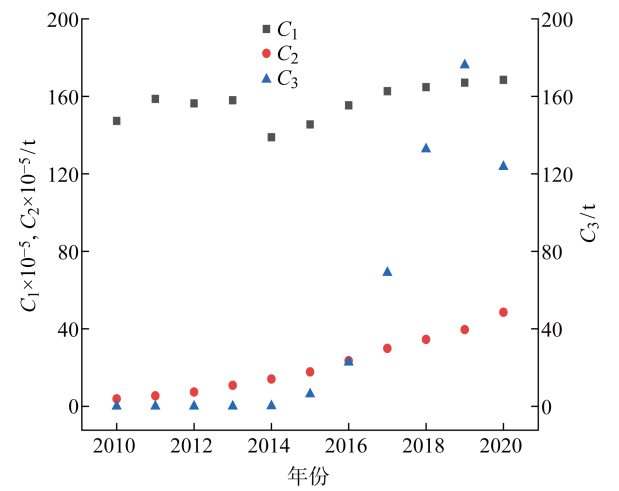


图 3 上海某行政区的能源碳排量、清洁能源减排量与交通电能替代减排量

Fig. 3 Energy carbon emission, clean energy emission reduction and transportation electricity replacement emission reduction in an administrative region in Shanghai

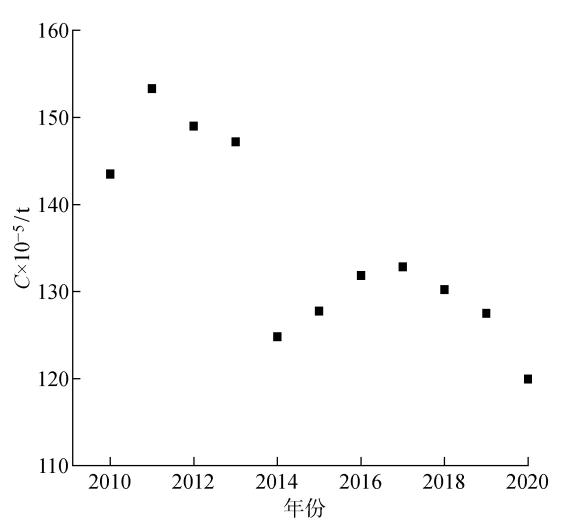


图 4 上海某行政区的能源碳排总量

Fig. 4 Total energy and carbon emissions in an administrative region in Shanghai

2.2.2 能源碳排总量的能源碳达峰趋势研究 判断该地区近自 2011 年至 2020 年间的能源碳达峰情况,基于测算的能源碳排总量结果,应用 1.3 节提出的 Mann-Kendall 趋势检验方法判断该地区各年份的状态.其中,2011 年为碳排放峰值年份,故以 2011 年为基准年,对后续年份做趋势检验分析,研究结果如表 1 所示.表中: P 表示该发展趋势的显著性水平,若 P 值越小,说明该趋势的显著性水平更高,拒绝原假设的概率越大.

图 5 至图 8 分别为 S 、 $V(S)$ 、 Z_{mk} 和 P 具体数据显示.由表 1 可发现,2011 年能源碳排总量为峰值;分析图 5 至图 8,2012 年至 2019 年间, Z_{mk} 值处于 0 至 -1.75 间振荡,绝对值小于 1.96,故该地区的能源碳排总量并无任何趋势,且 P 值在 0.09 至 1.00 间振荡,未小于 0.05,由此可得出于 2011—2019 年

表 1 该地区近 9 年的 Mann-Kendall 趋势检验分析结果

Tab. 1 Analysis results of Mann-Kendall trend test for the last 9 years in this area

年份	S	$V(S)$	Z_{mk}	P	发展趋势
2012	-1	1.00	0.00	1.00	无趋势
2013	-3	3.65	-1.03	0.31	无趋势
2014	-6	8.66	-1.71	0.09	无趋势
2015	-8	16.66	-1.72	0.09	无趋势
2016	-9	28.34	-1.51	0.12	无趋势
2017	-9	44.32	-1.19	0.22	无趋势
2018	-12	65.33	-1.36	0.17	无趋势
2019	-18	92.00	-1.75	0.09	无趋势
2020	-27	125.00	-2.33	0.02	下降趋势

间该地区能源碳排总量处于平台期;在 2020 年, Z_{mk} 值为 -2.33 ,绝对值大于 1.96 ,且 P 值为 0.02 ,小于 0.05 ,故可认为该地区于 2020 年能源碳排处于已达峰状态.

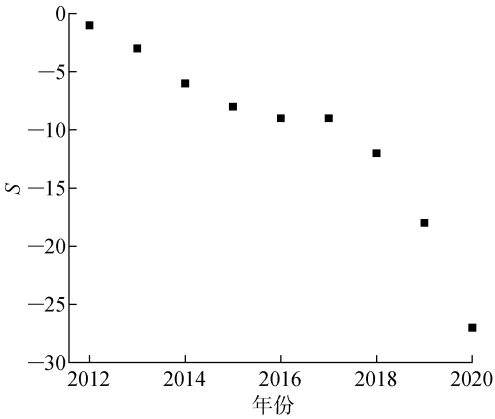


图 5 Mann-Kendall 趋势检验的统计量
Fig. 5 Statistics for Mann-Kendall trend test

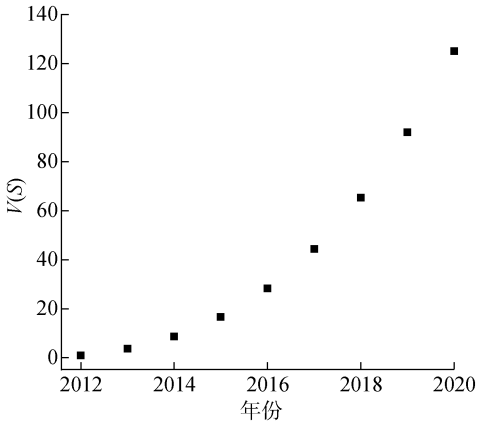


图 6 Mann-Kendall 趋势检验的统计量方差
Fig. 6 Statistical variance of Mann-Kendall trend test

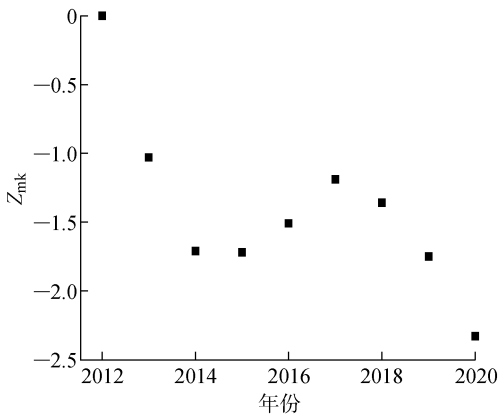


图 7 Mann-Kendall 趋势检验的检验值
Fig. 7 Check values of Mann-Kendall trend test

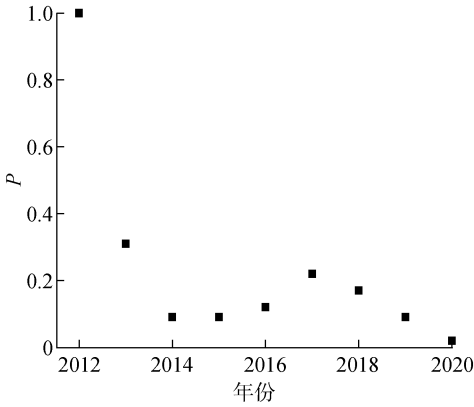


图 8 Mann-Kendall 趋势检验的 P 值
Fig. 8 P values of Mann-Kendall trend test

综上,总结该地区 2010 年至 2020 年间的能源碳排总量趋势,该地区于 2010 年碳排处于上升期;2011 至 2019 年能源碳排处于平台期;2020 年能源碳排处于已达峰状态.因此,该地区未来应继续维持当前能源碳排总量达峰,政府应出台持续减少碳排放量,提升新能源消纳的政策方针.

2.3 各季节能源二氧化碳总排放评估

2.3.1 测算各季节能源碳排总量 设定该地区春季为 3 至 5 月,夏季为 6 至 8 月,秋季为 9 至 11 月,冬季为 12 至 2 月.统计该地区 2010 年至 2020 年间各年份各季节的能源碳排总量,分析各季节是否实现碳达峰.各年份各季节能源碳排总量如图 9 所示.可发现,春季能源碳排总量于 2011 年达到峰值,可应用 Mann-Kendall 趋势检验测算春季的能源碳排总量是否达峰.同理,夏季、秋季和冬季分别于 2011 年、2011 年和 2013 年达到峰值,均可应用 Mann-Kendall 趋势检验测算各季节的能源碳排总量是否达峰.

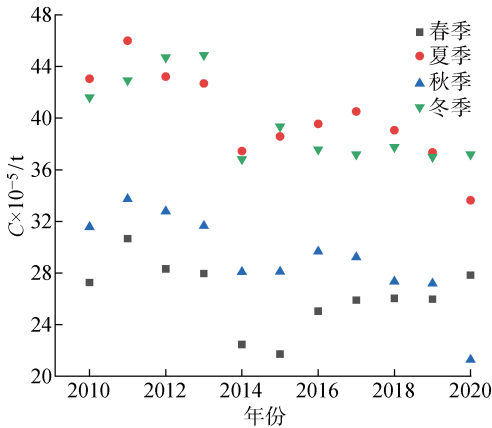


图 9 该地区各年份各季节能源碳排总量
Fig. 9 Total energy carbon emissions of each season in each year in this area

2.3.2 各季节能源碳排总量的碳达峰趋势研究

判断该地区近自 2011 年至 2020 年间各季节的碳达峰情况,基于 2.3.1 节测算的各季节能源碳排总量结果,应用 Mann-Kendall 趋势检验方法判断各季节的碳达峰状态,趋势研究结果如表 2 所示。

观察表 2,该地区春季的 Z_{mk} 值为 -0.54 ,绝对值小于 1.96 ,且 P 值为 0.590 ,未小于 0.05 ,故该地区春季的能源碳排总量并无任何趋势,由此可得该地区于 2020 年春季的能源碳排总量仍处于平台期;该地区夏季的 Z_{mk} 值为 -2.50 ,绝对值大于 1.96 ,且 P 值为 0.010 小于 0.05 ,故该地区夏季的能源碳排总量呈现下降趋势,故可认为该地区于夏季的能源碳排总量处于已达峰状态;该地区秋季的 Z_{mk} 值为 -3.04 ,绝对值大于 1.96 ,且 P 值为 0.002 小于 0.05 ,故该地区秋季的能源碳排总量呈现下降趋势,故可认为该地区于秋季的能源碳排总量处于已达峰状态;该地区冬季的 Z_{mk} 值为 -1.11 ,绝对值小于 1.96 ,且 P 值为 0.270 ,未小于 0.05 ,故该地区冬季的能源碳排总量并无任何趋势,由此可得该地区于 2020 年冬季的能源碳排总量仍处于平台期。

综上,总结该地区 2010 年至 2020 年间各季节的能源碳排总量趋势,该地区的春季与冬季的能源碳排总量仍处于平台期;夏季与秋季的能源碳排总量处于已达峰状态。因此,该地区未来应针对春季与冬季,制定响应的政策方针,从而更显著的降低春冬两季的碳排总量数值。

2.4 上海市能源二氧化碳总排放评估

2.4.1 测算上海市能源碳排总量 通过搜集上海市 2010 年至 2020 年电力能源数据,统计各年份二氧化碳排放总量,能够分析上海市能源产业当前是否实现碳达峰。上海市能源碳排总量 C_{SH} 如图 10 所示。由图可见,上海市近 11 年碳排放量前期较为稳定,2013 年之后波动较大,在 2016 至 2018 年快速下降后,出现小幅度回升的趋势;历史碳排峰值出现在 2015 年。

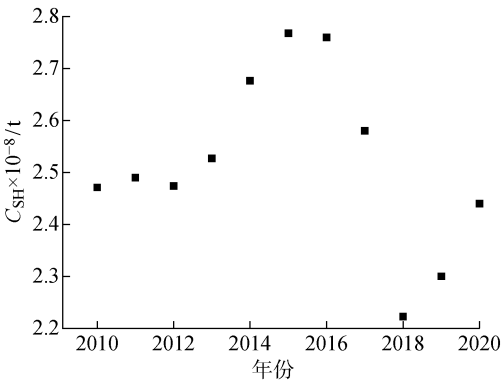


图 10 上海市能源碳排总量
Fig. 10 Total energy carbon emissions in Shanghai

2.4.2 上海市能源碳排总量的碳达峰趋势研究

判断上海市 2015 年至 2020 年城市能源碳达峰情况,基于 2.4.1 节测算结果,应用 Mann-Kendall 趋势检验方法判断上海市碳达峰状态。趋势研究结果如表 3 所示。

表 2 该地区各季节的 Mann-Kendall 趋势检验分析结果

Tab. 2 Analysis results of Mann-Kendall trend test of each season in this area

季节	S	V(S)	Z_{mk}	P	发展趋势
春	-7	125.00	-0.54	0.590	无趋势
夏	-29	125.00	-2.50	0.010	下降趋势
秋	-35	125.00	-3.04	0.002	下降趋势
冬	-10	65.33	-1.11	0.270	无趋势

表 3 上海市 Mann-Kendall 趋势检验分析结果

Tab. 3 Analysis results of Mann-Kendall trend test in Shanghai

年份	S	V(S)	Z_{mk}	P	发展趋势
2016	-1	1.00	0.00	1.00	无趋势
2017	-3	3.67	-1.04	0.30	无趋势
2018	-6	0.12	-1.70	0.09	无趋势
2019	-8	16.67	-1.71	0.09	无趋势
2020	-9	28.33	-1.50	0.13	无趋势

观察表 3, 2020 年时 Z_{mk} 值为 -1.50 , 绝对值小于 1.96 ; P 值为 0.13 , 未小于 0.05 , 可见在 2015 年碳排总量出现峰值后, 上海市并未出现显著的下降趋势, 整体碳排放水平处于平台期。上海市作为国际化的大都市, 明确要在 2025 年前实现碳达峰的目标, 从当前来看仍有一定挑战, 需要借鉴和梳理已达峰城市的经验, 结合自身实际情况优化城市达峰路径, 提倡低碳生活, 实现经济发展和环境保护的共同进步。

3 结论

首先构建了城市能源碳排放的计算体系, 通过该体系可将用气、用电、发电等能源数据转换成相应碳排放数据。随后建立了一种基于 Mann-Kendall 趋势检验模型, 判断城市能源碳排放趋势以及碳达峰状态, 为城市碳达峰的政策制定提供技术支撑和理论指导。最后分析了上海某行政区的能源碳排放量与碳排总量, 主要结论如下:

(1) 本文所构建的能源碳监测体系计及了清洁能源加大投入的现实情况, 提出了量化能源碳排放量的计算方法, 提供能源碳排放核算标准的判断依据。

(2) 年度数据结果显示该地区于 2010 年能源碳排处于上升期, 2011 至 2019 年能源碳排处于平台期, 2020 年能源碳排处于已达峰状态。

(3) 季度数据结果显示该地区春季与冬季的能源碳排处于平台期; 夏季与秋季的能源碳排处于已达峰状态。

(4) 上海市数据结果显示上海能源碳排于 2015 年达到峰值后, 至 2020 年仍处于平台期。

同时该方法也存在一定的局限性, 对于历史碳排放峰值出现在 5 年内的情况并不适用, 且只能从当前时间节点回顾历史信息, 评估城市当前的碳达峰状态, 不能对未来进行预测。后续研究工作将完善该模型, 解决 Mann-Kendall 方法中可能存在的时间序列间的自相关性, 研究未来城市碳排趋势, 实现对历史与未来一体化的评估。

本文提出的城市能源碳达峰评估方法为城市碳排放水平状态评估提供了宏观与定量的判断依据, 与统计学方法进行有机结合, 能够进一步推动城市碳排放核算体系和碳达峰评估方法的标准化进程。

参考文献:

[1] 黄超明, 刘海龙. 气候变暖如何影响天气变化[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(Sup. 1): 72-73.

HUANG Chaoming, LIU Hailong. How will the weather change along with global warming? [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55 (Sup. 1): 72-73.

[2] 黄以天. 国际碳交易机制的演进与前景[J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 2016, 24(1): 28-37.

HUANG Yitian. Evolution and prospect of International carbon trading mechanisms [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2016, 24(1): 28-37.

[3] 张华. 低碳城市试点政策能够降低碳排放吗? ——来自准自然实验的证据[J]. 经济管理, 2020, 42(6): 25-41.

ZHANG Hua. Can low carbon city construction reduce carbon emissions? Evidence from a quasi-natural experiment [J]. *Business Management Journal*, 2020, 42(6): 25-41.

[4] 张森林. 基于“双碳”目标的电力市场与碳市场协同发展研究[J]. 中国电力企业管理, 2021(10): 50-54.

ZHANG Senlin. Research on coordinated development of power market and carbon market based on “double carbon” goal [J]. *China Power Enterprise Management*, 2021 (10): 50-54.

[5] KUZNETS S. Economic growth and income inequality [J]. *American Economic Review*, 1955, 45(1): 1-28.

[6] 郭志玲. 甘肃省碳排放峰值预测与应对策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

GUO Zhiling. Study on peak prediction of carbon emission and control strategies in Gansu Province [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[7] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 639-651.

HONG Jingke, LI Yuanchao, CAI Weiguang. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model [J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 639-651.

[8] 李庚欣, 胡纯, 梅运军, 等. 基于 Kaya 模型的湖北省农业碳排放时空特征及影响因素研究[J]. 绿色科技, 2020(4): 217-220.

LI Gengxin, HU Chun, MEI Yunjun, et al. Study on the spatiotemporal characteristics and impact factors of agricultural carbon emissions in Hubei based on Kaya Model [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2020(4): 217-220.

[9] 王利兵, 张赟. 中国能源碳排放因素分解与情景预测[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 1-9.

WANG Libing, ZHANG Yun. Factors decomposi-

- tion and scenario prediction of energy-related CO₂ emissions in China[J]. **Electric Power Construction**, 2021, 42(9): 1-9.
- [10] 王杰. 中国高耗能行业碳排放的脱钩和影响因子研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- WANG Jie. Study on the decoupling relationship and influencing factors of carbon emissions in China's energy-intensive industry[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [11] 杜强, 陈乔, 杨锐. 基于 Logistic 模型的中国各省碳排放预测[J]. **长江流域资源与环境**, 2013, 22(2): 143-151.
- DU Qiang, CHEN Qiao, YANG Rui. Forecast carbon emission of provinces in China based on logistic model[J]. **Resources and Environment in the Yangtze Basin**, 2013, 22(2): 143-151.
- [12] SU Y, LIU X, JI J, *et al.* Role of economic structural change in the peaking of China's CO₂ emissions: An input-output optimization model[J]. **Science of the Total Environment**, 2021, 761: 143306.
- [13] 上海市发展和改革委员会. 上海市温室气体排放核算与报告技术文件: SH/MRV-002-2012[S]. 上海: 上海发改委, 2012.
- Shanghai Municipal Development and Reform Commission. Shanghai greenhouse gas emission accounting and reporting technical document: SH/MRV-002-2012 [S]. Shanghai: Shanghai Municipal Development and Reform Commission, 2012.
- [14] 陈玉珊, 秦琳琳, 吴刚, 等. 基于渐消记忆递推最小二乘法的电动汽车电池荷电状态在线估计[J]. **上海交通大学学报**, 2020, 54(12): 1340-1346.
- CHEN Yushan, QIN Linlin, WU Gang, *et al.* On-line state of charge estimation for battery in electric vehicles based on forgetting factor recursive least squares[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2020, 54(12): 1340-1346.
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委办公厅关于印发首批 10 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL]. (2013-10-15) [2021-12-21]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960_ext.html.
- National Development and Reform Commission. Notice of the general office of the national development and reform commission on printing and distributing the accounting methods and reporting guidelines for greenhouse gas emissions of the first 10 industrial enterprises (for trial implementation) [EB/OL]. (2013-10-15) [2021-12-21]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960_ext.html.
- [16] 刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. **中国电机工程学报**, 2022, 42(2): 515-524.
- LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2022, 42(2): 515-524.
- [17] 李玲芳, 陈占鹏, 胡炎, 等. 基于灵活性和经济性的可再生能源电力系统扩展规划[J]. **上海交通大学学报**, 2021, 55(7): 791-801.
- LI Lingfang, CHEN Zhanpeng, HU Yan, *et al.* Expansion planning of renewable energy power system considering flexibility and economy[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(7): 791-801.
- [18] 游广增, 汤翔鹰, 胡炎, 等. 基于典型运行场景聚类的电力系统灵活性评估方法[J]. **上海交通大学学报**, 2021, 55(7): 802-813.
- YOU Guangzeng, TANG Xiangying, HU Yan, *et al.* Flexibility evaluation method for power system based on clustering of typical operating scenarios[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2021, 55(7): 802-813.
- [19] 阿迪拉·阿力木江, 蒋平, 董虹佳, 等. 推广新能源汽车碳减排和大气污染控制的协同效益研究——以上海市为例[J]. **环境科学学报**, 2020, 40(5): 1873-1883.
- ADILA Alimujiang, JIANG Ping, DONG Hongjia, *et al.* Synergy and co-benefits of reducing CO₂ and air pollutant emissions by promoting new energy vehicles: A case of Shanghai[J]. **Acta Scientiae Circumstantiae**, 2020, 40(5): 1873-1883.
- [20] 王从飞, 曹锋, 李明佳, 等. 碳中和背景下新能源汽车热管理系统研究现状及发展趋势[J]. **科学通报**, 2021, 66(32): 4112-4128.
- WANG Congfei, CAO Feng, LI Mingjia, *et al.* Research status and future development of thermal management system for new energy vehicles under the background of carbon neutrality[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2021, 66(32): 4112-4128.
- [21] 龚小祥, 常思勤, 蒋李晨, 等. 电动汽车新型线控制动单元及其控制系统[J]. **上海交通大学学报**, 2016, 50(3): 395-400.
- GONG Xiaoxiang, CHANG Siqin, JIANG Lichen, *et al.* A novel brake-by wire unit and control system for electric vehicle[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2016, 50(3): 395-400.

- [22] 广东省发展和改革委员会. 广东省自行车骑行碳普惠方法学: 2019001-V01 [S]. 广东: 广东省发改委, 2019.
- Guangdong Provincial Development and Reform Commission. Guangdong province cycling carbon inclusion methodology: 2019001-V01 [S]. Guangdong: Guangdong Provincial Development and Reform Commission, 2019.
- [23] MALLICK J, TALUKDAR S, ALSUBIH M. *et al.* Analysing the trend of rainfall in Asir region of Saudi Arabia using the family of Mann-Kendall tests, innovative trend analysis, and detrended fluctuation analysis[J]. **Theoretical and Applied Climatology**, 2021, 143, 823-841.
- [24] 符艳红, 谢世友, 高洁. 基于 Mann-Kendall 法的嘉陵江流域降水量时空分布规律[J]. **西南大学学报(自然科学版)**, 2018, 40(6): 132-139.
- FU Yanhong, XIE Shiyu, GAO Jie. Temporal and spatial distribution of precipitation in Jialing River basin based on Mann-Kendall method [J]. **Journal of Southwest University (Natural Science)**, 2018, 40(6): 132-139.
- [25] 白瑞泉, 周子江, 吴昊, 等. 基于 Mann-Kendall 法的大运河枫桥站水文变化分析[J]. **长江技术经济**, 2021, 5(Sup. 1): 103-105.
- BAI Ruiquan, ZHOU Zijiang, WU Hao, *et al.* Hydrological variation analysis of Fengqiao station of grand canal based on Mann-Kendall method [J]. **Technology and Economy of Changjiang**, 2021, 5 (Sup. 1): 103-105.
- [26] 王佳, 王博. 基于改进蚁群算法和 Mann-Kendall 法的涡桨发动机性能预测[J]. **航空动力学报**, 2022, 37 (6): 1306-1313.
- WANG Jia, WANG Bo. Performance prediction of turboprop engine based on improved ant colony algorithm and Mann-Kendall method [J]. **Journal of Aerospace Power**, 2022, 37(6): 1306-1313.
- [27] NYIKADZINO B, CHITAKIRA M, MUCHURU S. Rainfall and runoff trend analysis in the Limpopo river basin using the Mann Kendall statistic[J]. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, 2020, 117: 102870.
- [28] 张立, 谢紫璇, 曹丽斌, 等. 中国城市碳达峰评估方法初探[J]. **环境工程**, 2020, 38(11): 1-5.
- ZHANG Li, XIE Zixuan, CAO Libin, *et al.* Discussion on evaluation method on carbon dioxide emissions peaking for Chinese cities [J]. **Environmental Engineering**, 2020, 38(11): 1-5.
- [29] C40. 27 cities have reached peak greenhouse gas emissions whilst populations increase and economies grow [R/OL]. (2018-09-13)[2021-12-21]. https://www.c40.org/press_releases/27-cities-have-reached-peak-greenhouse-gas-emissions-while-populations-increase-and-economies-grow.
- [30] GILBERT R O. Statistical methods for environmental pollution monitoring [M]. New York: John Wiley and Sons, 1987: 209.
- [31] 杨涛, 方莉, 王海林. 北京市某区碳排放总量核算及达峰判定[J]. **节能与环保**, 2021(8): 37-39.
- YANG Tao, FANG Li, WANG Hailin. Total carbon emission accounting and the determination of carbon peak at the district and county scale [J]. **Energy Conservation & Environmental Protection**, 2021(8): 37-39.

(本文编辑: 王一凡)