

# 我国省域碳排放特征识别及类型划分

王鹏,冯相昭,王敏\*,安祺,杨儒浦,赵梦雪

(生态环境部环境与经济政策研究中心,北京 100029)

**【摘要】**本文核算了我国30个省区市2000—2018年化石能源消费产生的碳排放,运用Mann-Kendall(MK)趋势检验法,探讨了碳排放的时空演变特征及其类型划分。研究表明:我国碳排放维持了“东部高、西部低,北部高、南部低”的空间格局,且东北部、中部、东部碳排放存在聚集效应,高、低排放省区市之间的差异近年来有所增大;同时,我国碳排放强度呈现显著的下降趋势,其空间特征与碳排放量空间特征存在一定差异。依据碳排放时间演变特征可将30个省市区分为显著减少(如北京、天津等)、减少趋势(如上海、湖北等)、增加趋势(如河北、山东等)和显著增加(如山西、新疆等)四种类型。以上研究结果系统识别了30个省区市碳排放量的时空变化特征,并对碳排放变化趋势进行了分类,能够为我国设定省级碳达峰目标和制定碳减排政策提供更为充分的科学依据和决策支撑。

**【关键词】**碳排放;时空特征;类型划分;碳达峰;Mann-Kendall 检验

中图分类号:X22;X3 文献标识码:A 文章编号:1673-288X(2021)03-0031-06 DOI:10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202103007

气候变化是人类面临的重大而紧迫的全球性挑战,我国已成为全球应对气候变化的重要参与者、贡献者和引领者<sup>[1]</sup>。习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。各省区市是国家兑现碳达峰、碳中和承诺的行动主体,合理制定各省区市减排策略是我国实现碳达峰、碳中和目标的关键,而精准识别各省区市碳排放量时空特征则是实施碳减排策略的基础。许多学者的研究已在省级尺度上评价了中国碳排放量的空间格局特征,并从时间跨度上分析了不同区域的排放趋势<sup>[26]</sup>。李建豹等的研究表明,中国省域人均碳排放量存在明显的集聚特征,且存在显著的区域差异,东北部人均碳排放量明显高于西南部<sup>[5]</sup>。WANG Shaojian 等基于省域的碳排放量动态面板数据分析指出,各省份单位GDP碳排放量的演变受城市化发展、工业化水平、产业结构调整、能源消费结

构等因素影响,省域差异呈现明显的增强趋势<sup>[6]</sup>。随着城市级碳排放核算能力的不断提高,近年来有学者从城市尺度探究了我国碳排放量的时空演变特征<sup>[7]</sup>。杨青林等基于285个地级市2013年的截面数据分析指出,我国城市碳排放量总体上呈“东部高、西部低,北部高、南部低”的空间格局,且京津冀经济区、成渝经济区、长江三角洲经济区和东北工业经济区是高碳排放聚集地;从城市碳排放强度上看,则大体呈“西高东低”的特征<sup>[7]</sup>。

需要指出的是,伴随着社会经济的快速发展,我国碳排放时空特征近年来的变化仍然有待研究。本文在核算30个省区市2000—2018年化石能源消费产生的碳排放量(简称“碳排放量”)基础上,识别了各地碳排放量、碳排放强度和人均碳排放量的时空变化特征,并对碳排放量的变化趋势进行分类,以期为我国设定碳排放目标和制定碳减排政策提供充分的科学依据和决策支撑。

**作者简介:**王鹏,助理研究员,博士,研究方向为大气污染与气候变化

**通讯作者:**王敏,副研究员,硕士,研究方向为大气环境规划与气候变化

### 1 研究方法与数据来源

化石能源的燃烧是 CO<sub>2</sub> 排放的主要来源。本文核算碳排放量所用化石能源消费数据来源于 2000—2018 年《中国能源统计年鉴》中 30 个省区市(不含西藏自治区、香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省)的“地区能源平衡表”。所涉及的能源类型包括“地区能源平衡表”中 17/25 种(2000—2009 年)/(2010—2018 年,不包括高炉煤气、转炉煤气)化石能源,涉及“地区能源平衡表”“终端消费量”中农、林、牧、渔、水利业,工业,建筑业,交通运输、仓储和邮政业,批发、零售业和住宿、餐饮业,生活消费,以及能源加工转换过程中火力发电和供热等 8 个部门的 CO<sub>2</sub> 排放,最终取和作为各省区市化石能源消费产生的碳排放量,核算公式如下所示:

$$CE_i = \sum_{i=1} E_i \times EF_i$$

式中,CE<sub>i</sub> 为碳排放总量;E<sub>i</sub> 和 EF<sub>i</sub> 分别为第 i 种化石能源和对应的碳排放因子,化石能源的碳排放因子采用国家温室气体清单数据。

为量化识别 30 个省区市 2000—2018 年碳排放量的变化趋势,基于 R 语言,采用 Mann-Kendall (MK) 检验法,定量反映各省区市 2000—2018 年、

2005—2018 年、2010—2018 年、2015—2018 年碳排放变化趋势的显著性。同时,结合条件函数识别各省区市 2000—2018 年碳排放最大值出现的年份及出现最大值后的年数,并对最大值年至 2018 年碳排放的变化趋势进行 MK 趋势检验。基于上述检验结果,对碳排放变化趋势类型进行划分。

### 2 结果分析

#### 2.1 碳排放空间格局分析

图 1 给出了 2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年 30 个省区市的碳排放量。自 2005 年至 2018 年,全国大部分省区市碳排放量呈现增加趋势,特别是山西、新疆、安徽等省区碳排放量增加趋势明显。2018 年,山东、河北和江苏的碳排放量最大(已达 8 亿吨以上),其次是内蒙古、辽宁、广东、河南、山西、新疆、安徽、浙江等省区(在 4 亿吨至 8 亿吨之间),海南、青海、北京、天津、重庆、宁夏、甘肃等省区市的碳排放相对较少(不到 2 亿吨)。同时,2018 年 30 个省区市碳排放量维持了“东部高、西部低,北部高、南部低”的空间格局。从整体空间分布上看,我国东北部、西北部、东部省区市碳排放存在一定聚集效应,且高排放与低排放省区市之间的差异近年来变得更大。

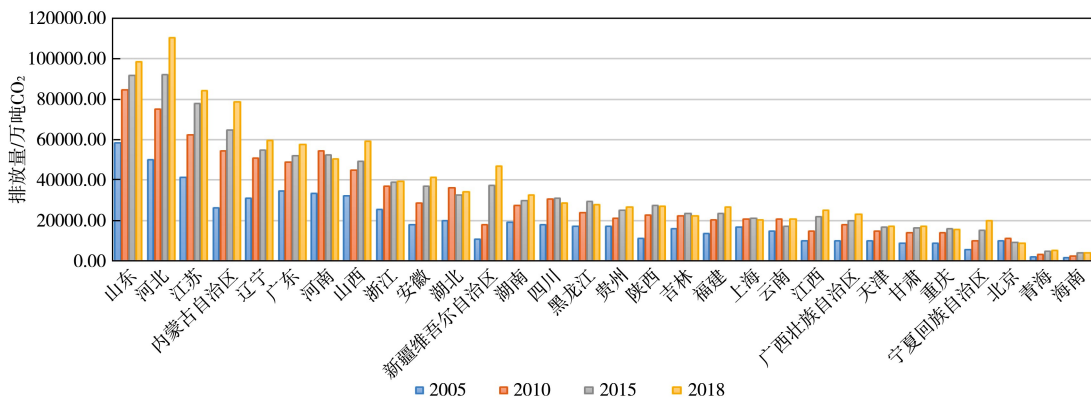


图 1 30 个省区市主要年份碳排放量

结合人均碳排放量演变(图 2),宁夏、内蒙古、山西、新疆、河北、辽宁等省区人均碳排放增加趋势明显。2018 年,宁夏、内蒙古的人均碳排放最大(在 20 吨/人以上),山西、新疆、辽宁次之(在 10 吨/人以上),四川、云南、广西等省区人均碳排放相对较少(不到 5 吨/人)。总体看,各省

区人均碳排放量差异也较大,大部分省区市为增加趋势,人均碳排放量呈现西北、东北高,南方低的分布特征。进一步分析发现,虽然我国各自治区间碳排放存在明显的差异性,但是对于资源禀赋、发展情况相似的地区,人均碳排放情况也相似,如新疆、宁夏、内蒙古等自治区。

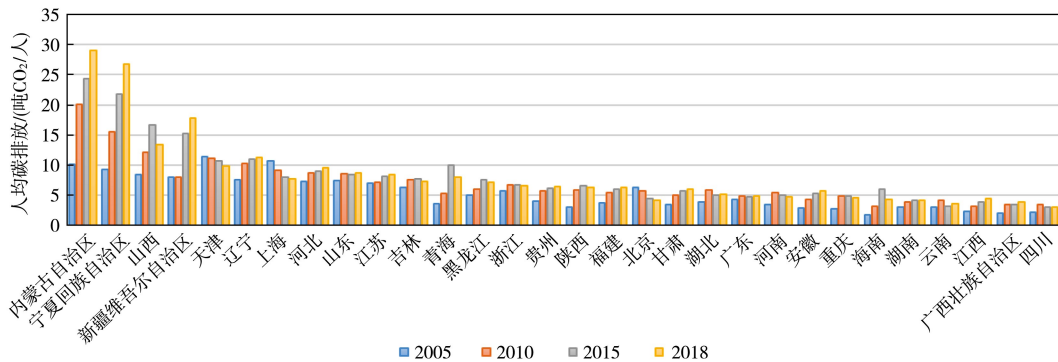


图2 30个省区市主要年份人均碳排放

图3给出的是30个省区市主要年份碳排放强度空间格局(即单位GDP碳排放量)。从碳排放强度的空间演变特征来看,我国碳排放强度整体呈现显著的下降趋势。随着京津冀地区、中部省份、长三角地区、珠三角地区的产业结构、能源结构等调整优化,这些地区的碳排放强度2010年

至2018年显著降低,但相对全国其他地区仍然偏高,而我国西部省区市碳排放强度2015年后已维持在较低水平。比较各省区市碳排放量分布格局(对比图1和图3),两者也存在一定差异,这表明在碳减排政策措施制定实施时,需因地制宜综合考虑不同省区市的碳排放总量和强度特征。

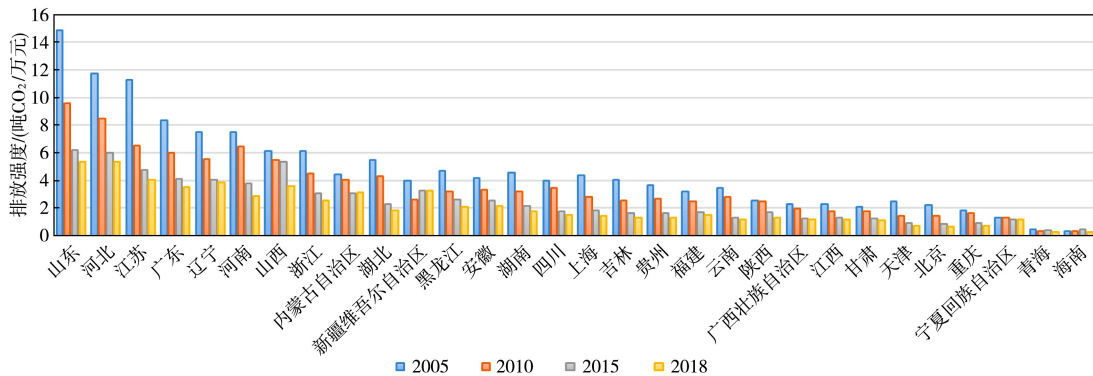


图3 30个省区市主要年份碳排放强度

## 2.2 碳排放变化类型划分

采用MK趋势检验方法对2000—2018年、2005—2018年、2010—2018年、2015—2018年四个时段各省区市碳排放量随时间的变化趋势进行了分析,如表1所示。2000—2018年,29个省区市(北京市增加不显著)碳排放均为显著增加;2005—2018年,北京市碳排放表现为显著减少,河南、云南2个省为增加趋势但不显著,其余27个省区市均为显著增加;2010—2018年,北京、吉林、河南、四川、湖北、云南6个省市碳排放表现为明显减少,天津、上海、陕西3个省市也表现出减少趋势,其余21个省区市均为显著增加或增加但不显著;2015—2018年,北京、吉林、河南、四川的碳排放减少较为明显,山西、江苏、安徽、广西、

新疆等省区增加较为明显。

进一步采用条件函数识别各省区市2000—2018年碳排放最大值出现的年份及出现最大值后的年数,并对最大值年份至2018年的变化趋势进行了MK检验,结果见表1。综合上述四个时段及碳排放出现最大值后的MK检验结果,将30个省区市碳排放类型划分为显著减少、减少趋势、增加趋势、显著增加四种,划分结果及依据如表2所示。显著减少类型包括北京、天津、吉林、河南、四川5个省市,划分依据是碳排放出现最大值后满5年,Z值为负且检验结果显著。减少趋势类型包括上海、湖北、重庆、云南、陕西5个省市,划分依据是出现最大值后满5年,Z值为负,但检验结果不显著;或不满足最大值后5年,但

表1 30个省区市碳排放量变化的MK检验结果

地区	Z 值				最大值 年份	最大值后 年数	Z 值 峰值年份—2018
	2000—2018	2005—2018	2010—2018	2015—2018			
北京	0.20991***	-3.1752***	-3.232***	-1.019	2010	8	-3.0929***
天津	4.6881***	2.9562***	0	0	2013	5	-2.2045**
河北	5.6677***	4.4891***	2.8149***	1.019	2018	0	—
山西	5.4577***	4.1606***	2.1894**	1.6984*	2018	0	—
内蒙古	5.1779***	3.8321***	1.5639	1.6984*	2018	0	—
辽宁	5.3878***	4.1606***	2.1894**	1.019	2018	0	—
吉林	4.0583***	1.9708**	-1.7724*	-1.019	2011	7	-2.7034***
黑龙江	4.898***	4.1606***	2.3979**	0	2016	2	—
上海	4.758***	3.0657***	0.10426	-1.019	2013	5	-0.73485
江苏	5.8776***	4.8176***	3.4405***	1.6984*	2018	0	—
浙江	5.1779***	3.7227***	1.3553	1.019	2018	0	—
安徽	5.8776***	4.8176***	3.4405***	1.6984*	2018	0	—
福建	4.898***	3.2847***	0.52129	0.33968	2018	0	—
江西	5.8776***	4.8176***	3.4405***	1.6984	2018	0	—
山东	5.2478***	3.8321***	1.5639	0.33968	2018	0	—
河南	3.7085***	1.4234	-2.8149***	-1.019	2011	7	-1.7146*
湖北	4.1983***	2.2993**	-1.1468	1.019	2011	7	0.24495
湖南	5.3178***	3.9416***	1.7724*	1.019	2017	1	—
广东	5.3878***	4.0511***	1.9809**	1.6984*	2018	0	—
广西	5.3178***	4.2701***	2.3979**	1.6984*	2018	0	—
海南	5.6677***	4.5986***	3.0235***	1.019	2018	0	—
重庆	4.1283***	2.8467***	0	-0.3397	2012	6	0
四川	4.0583***	2.1898**	-1.3553	-1.019	2013	5	-1.7146*
贵州	5.3878***	4.0511***	2.3979**	0.33968	2017	1	—
云南	3.6385***	1.6423	-1.1468	1.6984*	2012	6	-1.5029
陕西	4.828***	3.1752***	0.31277	-0.3397	2014	4	—
甘肃	5.1079***	3.6132***	1.3553	0	2018	0	—
青海	5.8977***	4.3796***	3.0235***	0	2016	2	—
宁夏	5.3878***	4.3796***	2.6064***	0.33968	2017	1	—
新疆	5.8076***	4.927***	3.649***	1.6984*	2018	0	—

注:Z 值为正时,表示碳排放量表现为增长趋势,反之则意味着碳排放量未表现出增长趋势;\*\*\*、\*\*和\* 分别表示达到 0.01、0.05 和 0.1 的显著性水平。

表2 30个省区市碳排放量变化趋势类型划分

类型	三种化石能源消费碳排放	确定依据
显著减少	北京、天津、吉林、河南、四川	出现最大值后满 5 年,Z 值为负且检验结果显著
减少趋势	上海、湖北、重庆、云南、陕西	出现最大值后满 5 年,Z 值为负,但检验结果不显著;或出现最大值后不满 5 年,但四个时段 Z 值表现为逐渐减少并转负
增加趋势	河北、内蒙古、辽宁、黑龙江、浙江、福建、江西、山东、湖南、海南、贵州、甘肃、青海、宁夏	最大值后年数小于 5,四个时段 Z 值均为正但至多三个检验结果显著
显著增加	山西、江苏、安徽、广东、广西、新疆	最大值后年数小于 5,四个时段 Z 值均为正且检验结果显著

四个时段 Z 值表现为逐渐减少并转负。增加趋势类型包括河北、内蒙古、辽宁、黑龙江、浙江、福建、江西、山东、湖南、海南、贵州、甘肃、青海、宁夏 14 个省区,划分依据是最大值后年数小于 5,四个时段 Z 值均为正但至多三个检验结果显著。显著增加类型包括山西、江苏、安徽、广东、广西、新疆 6 个省区,判定依据是碳排放出现最大值后不满足 5 年,四个时段 Z 值均为正且检验结果显著。从四种类型的省区市碳排放量时间序列变化看,显著减少类型的省区市碳排放量达到峰值后基本稳定下降,而减少趋势类型省区市的碳排放量达到峰值后,呈现平台式演变或波动式下降;对于显著增加类型的省区市,其碳排放量变化曲线尚未出现明显峰顶,且基本稳定上升,而属于增加趋势的省区市碳排放量呈现波动式上升或峰顶初步显现。

### 3 结论与讨论

本文在核算 30 个省区市 2000—2018 年碳排放的基础上,量化分析了碳排放的时空演变特征,并综合运用条件函数和 MK 检验对碳排放变化类型进行了划分。主要结论包括:

一是碳排放量、人均碳排放量空间分布格局基本一致,但与碳排放强度差异较大。2018 年,30 个省区市碳排放量维持了“东部高、西部低,北部高、南部低”的空间格局,且我国东北部、中部、东部省区市碳排放存在聚集效应,高、低排放省区市之间的差异近年来有所增大;人均碳排放量与碳排放总量格局相似,大部分省区市表现为增加趋势,总体呈现出西北、东北高,南方低的分布特征;碳排放强度整体呈现显著的下降趋势。因此,在对各省区市提出碳减排目标要求或制定碳减排政策措施时,需综合考虑其碳排放总量、人均碳排放量和碳排放强度的时空变化特征。

二是 30 个省市碳排放量变化可分为显著减少、减缓趋势、增加趋势和显著增加四种类型。显著减少类型包括北京、天津、吉林、河南、四川 5 个省市,碳排放量达到峰值后基本稳定下降;减少趋势类型包括上海、湖北、重庆、云南、陕西 5 个省市,碳排放量达到峰值后,呈现平台式演变或波动式下降;增加趋势类型包括河北、内蒙古、辽宁、

黑龙江、浙江、福建、江西、山东、湖南、海南、贵州、甘肃、青海、宁夏 14 个省区,碳排放量呈现波动式上升或峰顶初步显现;显著增加类型包括山西、江苏、安徽、广东、广西、新疆 6 个省区,碳排放量变化曲线尚未出现明显峰顶,且基本稳定上升。

碳排放量与经济发展水平、人口增长、城市化水平、产业结构和能源结构等密切相关<sup>[13]</sup>,进一步量化识别影响碳排放变化的主要因素,有助于更好解释不同省区市之间的碳排放量差异。下一步,可结合对 30 个省区市碳排放量时空变化特征及碳排放变化的类型划分,综合考虑各省区市能源消费、经济发展、产业结构等方面的现状水平,提出一个兼顾区域资源禀赋差异、经济社会发展不同阶段的碳达峰判定标准,从而为有效判定碳达峰状态、识别有条件的地区以及科学安排地区梯次达峰提供充分的科学依据和决策支撑。

#### 参考文献:

- [1] 项目综合报告编写组.《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J].中国人口·资源与环境,2020,30(11):1-25.
- [2] 尹娟娟,袁进.山西省重点行业碳排放特征及低碳发展策略[J].环境与可持续发展,2014,39(03):140-143.
- [3] 张雷,黄园渐,李艳梅,等.中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J].资源科学,2011,32(02):211-217.
- [4] 郑林昌,付加锋,李江苏.中国省域低碳经济发展水平及其空间过程评价[J].中国人口·资源与环境,2011,21(07):80-85.
- [5] 李建豹,黄贤金,吴常艳,等.中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析[J].经济地理,2015,35(11):21-28.
- [6] WANG S J, FANG C L, WANG Y. Spatiotemporal variations of energy-related CO<sub>2</sub> emissions in China and its influencing factors: an empirical analysis based on provincial panel data[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 505-515.
- [7] 杨青林,赵荣钦,丁明磊,等.中国城市碳排放的空间格局及影响机制:基于 285 个地级市截面数据的分析[J].资源开发与市场,2018,34(09):1243-1249.
- [8] 禹湘,陈楠,李曼琪.中国低碳试点城市的碳排放特征与碳减排路径研究[J].中国人口·资源与环境,2020,30(07):1-9.
- [9] 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):1-5,43.
- [10] 蔡博峰,王金南,杨姝影,等.中国城市 CO<sub>2</sub> 排放数据集研

- 究:基于中国高空间分辨率网格数据[J].中国人口·资源与环境,2017,27(02):1-4.
- [11] 蔡博峰.基于0.1°网格的中国城市CO<sub>2</sub>排放特征分析[J].中国人口·资源与环境,2012,22(10):151-157.
- [12] 马翠梅.中国外购电温室气体排放因子研究[M].北京:中国环境出版社,2020.
- [13] 冯相昭,邹骥.中国CO<sub>2</sub>排放趋势的经济分析[J].中国人口·资源与环境,2008,18(03):43-47.

## The characteristics of carbon emission and its classification at provincial level in China

WANG Peng, FENG Xiangzhao, WANG Min<sup>\*</sup>, AN Qi, YANG Rupu, ZHAO Mengxue

(Policy Research Center for Environment and Economy, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Based on the carbon emission accounting method and Mann-Kendall test, the spatio-temporal characteristics of fossil fuel-related carbon emissions from 30 provinces in China during the period of 2000 to 2018 are investigated and classified. The main findings are as follows: the spatial pattern of carbon emissions in China maintains a “high in the east and north, low in the west and south” distribution, accompanying an aggregation effect over the northeast, middle and east parts of China. It is also noteworthy that the differences between high-emission and low-emission provinces have become larger in recent years. In addition, the carbon emission intensity has declined significantly, for which its pattern differs from the carbon emission pattern. The carbon emission for the 30 provinces can be classified into four groups, namely significant decrease group (e.g. Beijing, Tianjin et al.), decrease trend group (e.g. Shanghai, Hubei et al.), increase trend group (e.g. Hebei, Shandong et al.) and significant increase group (e.g. Shanxi, Xinjiang et al.), according to the time evolution of the carbon emission calculated during 2000—2018 for each province. The abovementioned results have identified the temporal and spatial characteristics of carbon emissions in various provinces, autonomous regions and municipalities, and classified changes in carbon emissions, which can provide a more adequate scientific basis and decision support for setting carbon emissions targets and formulating carbon emission reduction policies.

**Keywords:** carbon emission; spatio-temporal characteristics; type classification; carbon emission peaking; Mann-Kendall test