成勤,王清龙,岳岩裕,等.2024.2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$变化特征及主要影响因素分析[J].暴雨灾害,43(3):342-351. CHENG Qin, WANG Qinglong, YUE Yanyu, et al. 2024. Analysis of $PM_{2.5}$ variation characteristics and main influencing factors in the Yangtze River Basin from 2016 to 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters, 43(3):342-351 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-192

2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$变化特征及主要影响因素分析

成勤[1,2],王清龙[1,2],岳岩裕[3,4],湛甜[3,4],王凯[3,4]
(1. 三峡国家气候观象台,宜昌 443000;2. 湖北省宜昌市气象局,宜昌 443000;
3. 武汉区域气候中心,武汉 430074;4. 金沙国家大气本底站,武汉 430074)

摘　要: 研究长江流域$PM_{2.5}$浓度变化特征和主要影响因素,可为优化流域大气环境协同治理政策提供参考。利用2016—2021年长江流域110个地市级以上城市国控站点$PM_{2.5}$浓度数据,应用Theil-Sen趋势分析和Mann-Kendall统计检验方法,分析了$PM_{2.5}$浓度时空变化特征,并基于环境气象评估指数(EMI),定量分析了"十三五"期间(2016—2020,下同)和"十四五"开局之年(2021)气象条件和减排措施对$PM_{2.5}$浓度变化的相对贡献,结果表明:(1) 2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$浓度分布空间差异大,高值区位于岷沱江南部、汉江流域东部至洞庭湖流域东部,低值区位于金沙江流域上中游。(2) "十三五"期间长江流域主要城市$PM_{2.5}$浓度逐年下降,年变率达-3.62 $\mu g \cdot m^{-3} \cdot a^{-1}$。2021年长江流域约四成区域$PM_{2.5}$浓度增大,主要分布在长江流域上游和洞庭湖流域。(3) 长江流域上游城市$PM_{2.5}$变化受气象条件影响较大,中游和下游城市受排放影响较大。(4) "十三五"期间气象条件变化和减排措施对$PM_{2.5}$浓度上升的贡献率分别为-16.54%和-14.00%,气象条件变化和减排措施均有利于$PM_{2.5}$浓度下降。与上一年相比,"十四五"开局之年减排措施总体有利于$PM_{2.5}$浓度下降(贡献率为-5.84%),但不利气象条件(贡献率为4.49%)抵消了部分减排效果,使得$PM_{2.5}$浓度降幅较小。

关键词: 长江流域;$PM_{2.5}$;环境气象评估指数;气象条件
中图法分类号: P401　　**文献标识码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-192

Analysis of $PM_{2.5}$ variation characteristics and main influencing factors in the Yangtze River Basin from 2016 to 2021

CHENG Qin[1,2], WANG Qinglong[1,2], YUE Yanyu[3,4], ZHAN Tian[3,4], WANG Kai[3,4]

(1. *Three Gorges National Climate Observatory, Yichang* 443000; 2. *Yichang Weather Bureau, Yichang* 443000;
3. *Wuhan Regional Climate Center, Wuhan* 430074; 4. *Jinsha National Atmospheric Background Station, Wuhan* 430074)

Abstract: Studying the variation characteristics and main influencing factors of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River Basin from 2016 to 2021 could provide references for optimizing the policy of collaborative governance of the atmospheric environment in the basin. Using the $PM_{2.5}$ concentration data from 110 national stations in the Yangtze River Basin from 2016 to 2021, the temporal and spatial variation characteristics of $PM_{2.5}$ were analyzed with the Theil-Sen trend analysis and Mann-Kendall statistical test methods. Combined with the Environmental Meteorological Assessment Index (EMI), the relative contributions of the two main influencing factors including the meteorological conditions and emission reduction measures, to the changes in $PM_{2.5}$ concentration changes during the "13th Five-Year Plan" period (2016—2020) and the first year of the "14th Five-Year Plan" (2021) were quantitatively analyzed. The results were as follows. (1) Significant spatial variations in $PM_{2.5}$ concentration distribution were found in the Yangtze River Basin was uneven in 2016-2021. The high-value areas were in the eastern part of the Hanjiang River Basin extending southward to the eastern part of the Dongting Lake Basin and the southern part of the Mintuo River, While the low-value area was in the upper and middle reaches of the Jinsha River Basin. (2) During the "13th Five-Year Plan" pe-

收稿日期: 2023-09-15;**定稿日期:** 2024-01-29
资助项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-084);湖北省气象局科技发展基金项目(2020J02,2022Y17);三峡局地气候监测项目(SK2023019);中国气象局气象能力提升联合研究专项(23NLTSZ009)
第一作者: 成勤,主要从事气象灾害预报预警及其影响评价研究。E-mail: 550992002@qq.com
通信作者: 王清龙,主要从事气象数据保障及数据挖掘应用研究。E-mail: longtsing@cug.edu.cn
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

riod, $PM_{2.5}$ concentration in major cities of the Yangtze River Basin decreased year by year, with an annual variation rate of $-3.62\mu g \cdot m^{-3} \cdot a^{-1}$. However, $PM_{2.5}$ concentration about 40% of the Yangtze River Basin region increased in 2021, which was mainly distributed in the upper reaches of the Yangtze River Basin and Dongting Lake Basin. (3) The $PM_{2.5}$ in the western part of the basin was greatly affected by meteorological conditions, while the eastern part was greatly affected by emission sources and other factors. (4) Meteorological conditions and emission reduction measures during the "13th Five-Year Plan" period were conducive to the decrease of $PM_{2.5}$ concentration.Their contribution rates to the increase of $PM_{2.5}$ were −16.54% and −14.00%, respectively. Compared with the previous year, the emission reduction measures in 2021 were generally beneficial to the decrease of $PM_{2.5}$ concentration (contribution rate of −5.84%), but adverse meteorological conditions (contribution rate of 4.49 %) offset part of the emission reduction effects, making a slight decrease in the $PM_{2.5}$ concentration.

Key words: Yangtze River Basin; $PM_{2.5}$; environmental meteorology index; meteorological conditions

引 言

长江流域包括金沙江、岷沱江、嘉陵江、汉江、太湖、鄱阳湖、洞庭湖、乌江和长江干流，其中干流分上游、中游和下游，湖北宜昌市以西为上游，宜昌市至江西湖口县为中游，湖口县至出海口为下游。长江流域因其独特的自然环境和地理位置，已成为我国综合实力雄厚、战略支撑作用最大的经济带之一。近年来，由于过度依赖传统发展模式，长江流域大气污染等环境问题已经成为制约可持续发展的热点问题(张中浩等，2022)。以$PM_{2.5}$为主的各类空气污染物，不仅对人们的生活质量和身体健康造成了严重的危害(杨昆等，2016；刘玲等，2024)，同时由于吸收和散射太阳辐射，对全球气候变化产生了重要影响(Wessels et al.，2010)。2014年长江中下游部分地区$PM_{2.5}$污染天数超过100 d，个别城市甚至超过200 d(Zhu et al.，2019)。2017年长江流域140个监测城市中，117个$PM_{2.5}$浓度未达到国家二级标准，亟需开展流域尺度的灰霾防治模式与机制研究。

长江流域$PM_{2.5}$的分布特征与影响因素受到广泛关注。长江流域$PM_{2.5}$浓度呈现“东高西低”的特征(刘雅婷，2022)，时空集聚效应明显，高值聚集区主要分布在长江流域中部及东北部地区，低值聚集区主要分布在人烟稀少、经济不发达的长江流域西部地区(周亮等，2017；刘雅婷，2022；王丽丽等，2022)。了解$PM_{2.5}$的影响因素是合理制定相关环境政策和控制措施的基础和前提。$PM_{2.5}$浓度主要受污染物排放量和气象条件两方面因素的影响。$PM_{2.5}$主要来源于汽车尾气、工业活动、生物质和煤炭燃烧等一次源，以及其它气体污染物经复杂化学反应形成的二次源(韩立建，2018)，与人口集聚(Lin et al.，2014)、能源消费结构(韩立建，2018)、经济增长速度(杨昆等，2016)等社会经济活动密切相关。在下垫面特性和排放源相对稳定的前提下，$PM_{2.5}$浓度的长期变化受气象条件影响较大(Zhang et al.，2019；Chen et al.，2020；朱燕等，2021)，在污染严重的东北、华北平原和四川盆地，风速和湿度对$PM_{2.5}$浓度的影响较大；对于发达的长三角和珠三角地区，风速、湿度、降水是主导气象因素；在部分内陆城市，温度是主导因素；而在部分沿海城市，气压有主导影响(Chen et al.，2018)。因各地社会经济和自然条件不同，$PM_{2.5}$主导影响因素也不尽相同(Zhang et al.，2019；Chen et al.，2020)，量化空气质量改善过程中气象条件和减排等经济因素的相对贡献，对于评估减排措施实施效果、科学制定污染防控措施具有重要意义。其中，刘洪利等(2018)基于气象条件和减排措施两类因素，通过数值模拟计算得到环境气象评估指数(Environmental Meteorology Index，EMI)，实现了两类因素对$PM_{2.5}$浓度变化影响的定量分析，相对于其它污染气象条件指数，其物理意义更加明确，得到了较为广泛的应用(Gong et al.，2021；梅梅等，2021)。

长江流域现有的$PM_{2.5}$相关研究多侧重于长时间序列(岳岩裕等，2016；危诗敏等，2021；陈优良和邹文敏，2022)或污染严重时段(武威等，2020)，对其在国民经济重要发展阶段$PM_{2.5}$特征的研究较少，且缺乏对影响因素的定量评估。“十三五”期间(2016—2020)为国务院《“十三五”生态环境保护规划》和《长江经济带生态环境保护规划》落实的关键时期，流域空气质量改善初见成效(王秋红等，2021)，但仍面临着气象条件大部相对不利和空气污染排放规模依然较大的双重压力(张欢等，2023)。2021年为“十四五”开局之年，同时也是《长江经济带生态环境保护规划》效能评估的关键节点。鉴于此，本文分析了长江流域地市级以上城市“十三五”期间至“十四五”开局之年$PM_{2.5}$变化特征，并基于环境气象评估指数(EMI)，定量分析了气象条件和减排措施的相对贡献，以期为优化流域内大气环境协同治理政策、提高联防联控成效提供支持。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用的资料包括：(1) 长江流域110个地市级以上城市(以下简称主要城市)789个国控站点(表示国家级别的检测监督站点)月平均$PM_{2.5}$质量浓度(以下简

称浓度)资料,来源于中国空气质量在线监测分析平台(http://www.aqistudy.cn),用于分析长江流域$PM_{2.5}$浓度变化特征;(2) 长江流域主要城市环境气象评估指数(EMI)数据,来源于长江流域气象中心,由长江流域主要城市国控站点EMI插值所得,插值方式为反距离权重法(曹凯鑫等,2020),用于分析气象和减排措施对长江流域$PM_{2.5}$浓度变化的贡献。以上数据时间分辨率均为月,时间跨度均为2016年1月—2021年12月。长江流域主要城市、流域内国控站点及流域划分如图1所示。

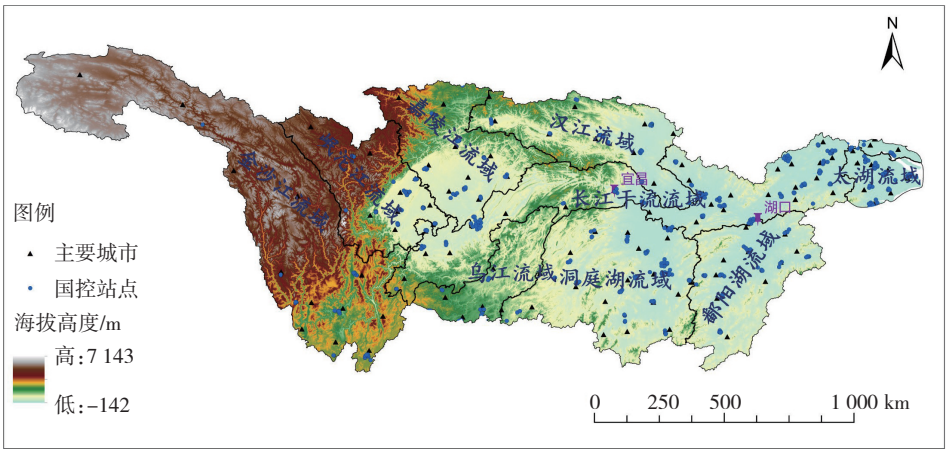


图1 长江流域主要城市、国控站点及流域划分(宜昌、湖口分别为长江中游、下游的分界点)

Fig. 1 The spatial distribution of major cities, environmental monitoring sites and basin divisions in the Yangtze River Basin (Yichang and Hukou are the demarcation points of the middle and lower reaches of the Yangtze River respectively)

1.2 研究方法

1.2.1 气象条件评估指数及定量分析

文中将大气温度、大气湿度、风场、大气压力、降水量、云量、辐射场等多种气象要素的综合作用称为气象条件。EMI是指在排放不变的前提下,气象条件改变导致$PM_{2.5}$浓度变化的指数,能够定量表征气象条件变化对$PM_{2.5}$浓度变化的贡献。根据气象行业标准《$PM_{2.5}$气象条件评估指数(EMI)》(QX/T 479-2019),EMI(记为I_{EM})计算方法如下

$$I_{EM_t}=I_{EM_{t0}}+\int_{t0}^{t}(I_E+I_T+I_D)\mathrm{d}t \tag{1}$$

其中,I_E、I_T和I_D分别表示地表交换层的排放沉降项、水平和垂直方向的大气输送项以及垂直扩散项。可以看出,EMI是气象条件影响下,气溶胶排放、沉降、传输和扩散等过程的综合指数。EMI越大,表示气象条件越不利于近地面$PM_{2.5}$稀释与扩散;反之,越有利。

参照基于EMI的气象条件对$PM_{2.5}$浓度贡献的定量分析方法,可以定量分离气象条件和排放等人为影响的贡献(Gong et al.,2021;梅梅等,2021),计算公式见式(2)~(4)

$$R_{a(x,y)}=\frac{A_y-A_x}{A_x}\times 100\% \tag{2}$$

$$R_{emi(x,y)}=\frac{I_{EM_y}-I_{EM_x}}{I_{EM_x}}\times 100\% \tag{3}$$

$$R_{b(x,y)}=\frac{B_y-B_x}{B_x}\times 100\%=\left(\frac{A_y/A_x}{I_{EM_y}/I_{EM_x}}-1\right)\times 100\% \tag{4}$$

其中,x和y年相同时段$PM_{2.5}$浓度分别为A_x、A_y,单位为μg·m^{-3},排放率为B_x、B_y,单位为mg·m^{-3}·s^{-1},I_{EM_x}、I_{EM_y}表示不同年份气象条件贡献的无量纲综合指数。$R_{a(x,y)}$为y年相对x年的$PM_{2.5}$浓度变化率,$R_{b(x,y)}$表征与x年相比,y年排放变化对$PM_{2.5}$浓度变化的贡献率,$R_{emi(x,y)}$表征与x年相比,y年气象条件变化对$PM_{2.5}$浓度变化的贡献率。$R_{b(x,y)}$或$R_{emi(x,y)}$为正值,则表示y年排放或气象条件相对于x年的变化不利于$PM_{2.5}$浓度的降低,反之则有利于$PM_{2.5}$浓度的降低。

1.2.2 趋势分析与显著性检验

文中在分析$PM_{2.5}$浓度年变化趋势时,采用了Theil-Sen趋势分析法。Theil-Sen趋势度(S)(Sen,1968)的计算公式为

$$S=\mathrm{median}\left(\frac{x_j-x_i}{j-i}\right)\ (1<i<j<n) \tag{5}$$

其中,S为$PM_{2.5}$的变化趋势;median为中位数函数;i、j为时间序数;x_i、x_j分别为第i、j年的$PM_{2.5}$。当$S>0$时,表明$PM_{2.5}$呈增加趋势;当$S<0$时,表明$PM_{2.5}$呈减少趋势;当S=0时,表明变化趋势不明显。

文中在对$PM_{2.5}$浓度年变化趋势进行显著性水平检验时,采用了Mann-Kendall统计检验法。Mann-Kend-

all统计检验法是一种监测时间序列变化趋势的检验方法，可用来检验气候、水文、植被等时间序列变化趋势的显著性(徐勇等，2022)。对于给定的置信水平α，当标准化统计量$|Z| > Z_{1-\alpha/2}$时，可以认为在α水平上，$PM_{2.5}$浓度时间序列有显著变化趋势。文中将0.1(不显著变化与微显著变化)、0.05(微不显著变化与显著变化)、0.01(显著变化与极显著变化)定义为$PM_{2.5}$浓度变化显著性(p)的置信水平阈值(陈赟等，2023)。根据趋势分析与显著性检验结果，$PM_{2.5}$浓度变化趋势可表示为极显著下降($S<0$，$p\leqslant0.01$)、显著下降($S<0$，$0.01<p\leqslant0.05$)、微显著下降($S<0$，$0.05<p\leqslant0.1$)、不显著下降($S<0$，$p>0.1$)、无变化($S=0$)、极显著上升($S>0$，$p\leqslant0.01$)、显著上升($S>0$，$0.01<p\leqslant0.05$)、微显著上升($S>0$，$0.05<p\leqslant0.1$)和不显著上升($S>0$，$p>0.1$) 9个等级。

1.2.3 相关性分析

对$PM_{2.5}$浓度和EMI进行皮尔逊相关性分析，以便揭示$PM_{2.5}$浓度和综合气象条件的相关密切程度，其计算方法(徐勇等，2022)如下

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}) \tag{6}$$

式中，r_{xy}为$PM_{2.5}$浓度与EMI的皮尔逊相关系数；x表示$PM_{2.5}$浓度，y表示EMI；$\bar{x}$、$\bar{y}$分别是$PM_{2.5}$浓度和EMI的均值。r_{xy}的取值范围为[−1,1]，其绝对值越接近1，表示两者相关性越强。

2 结果与分析

2.1 $PM_{2.5}$浓度的空间分布特征

2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$浓度空间分布情况如图2所示。$PM_{2.5}$浓度空间分布不均、集聚效应明显(刘雅婷，2022)，存在两个高值区(A和B)和一个低值区(C)(以下称为重点区域)。高值区A位于汉江流域东部向南延伸至洞庭湖流域东部，即南阳盆地–江汉平原–洞庭湖平原及南部丘陵，为冷空气携带颗粒物南下的通道(朱燕等，2021)，大值中心位于江汉平原东部，中心浓度值为55~60 μg·m^{-3}。高值区B位于岷沱江南部的成渝城市群，中心浓度值为50~55 μg·m^{-3}。该区域工业发达、人口密集，污染物排放量大，大气环境容量远小于平原城市(Liao et al.，2017)，且逆温频发(危诗敏等，2021)、局地环流显著(杨显玉等，2020)，排放及气象条件均有利于$PM_{2.5}$高值区的形成。低值区C位于金沙江流域上中游，$PM_{2.5}$平均浓度值为13~20 μg·m^{-3}。空间分布特征与全国城市2013年以来的环境监测资料分析结果基本一致(杨昆等，2016；刘晟东等，2020；梅梅等，2021)。

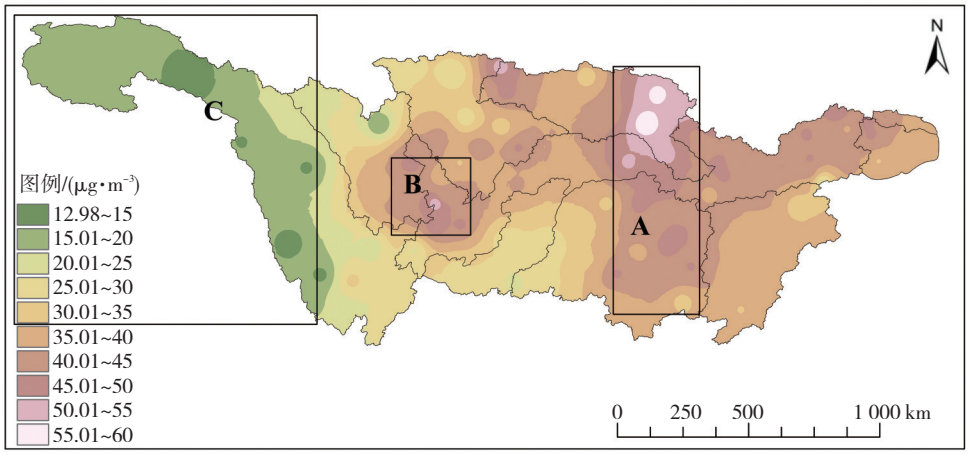


图2 2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$浓度空间分布(A、B框表示$PM_{2.5}$浓度高值区，C框表示低值区)

Fig. 2 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River Basin during 2016–2021 (A and B represent high-value areas of $PM_{2.5}$ concentration, and C represents the low-value area)

2.2 $PM_{2.5}$浓度的时间变化特征

2.2.1 2016—2021年$PM_{2.5}$浓度年变化趋势

2016—2021年长江流域沿线城市$PM_{2.5}$浓度逐年变化情况如图3所示。从中可见，2016—2021年$PM_{2.5}$浓度均值为37.39 μg·m^{-3}，最大值出现在2016年(45.34 μg·m^{-3})，最小值出现在2021年(30.40 μg·m^{-3})，总体呈下降趋势，年变率为−3.26 μg·m^{-3}·a^{-1}，与我国主要城市$PM_{2.5}$浓度变化规律一致(姜磊等，2018；陈优良和邹文敏，2022)。其中2016—2020年$PM_{2.5}$浓度呈明显下降趋势，变率达−3.62 μg·m^{-3}·a^{-1}，而2021年$PM_{2.5}$浓度为30.40 μg·m^{-3}，与2020年相比，仅降低了0.51 μg·m^{-3}·a^{-1}，年间下降趋势不再明显。

2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$浓度变化趋势及其显著性水平如图4所示。可见$PM_{2.5}$浓度变率在−6.46~1.21 μg·m^{-3}·a^{-1}之间(图4a)，除金沙江、岷沱江和乌江流域局部外，绝大部分区域$PM_{2.5}$浓度下降，占总面积的99.94%，其中递减率大于3 μg·m^{-3}·a^{-1}的占61.44%，主要分布在金沙江以东的大部区域。由显著性检验结

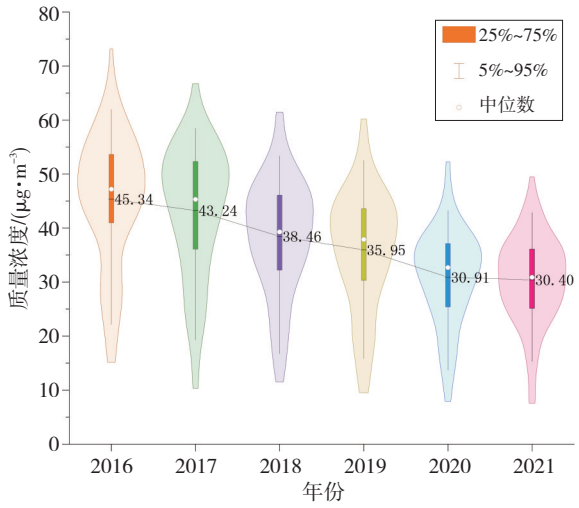


图3 2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$浓度的年际变化

Fig. 3 Variation of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River Basin during 2016–2021

果(图4b)可知,$PM_{2.5}$浓度下降趋势总体显著,其中极显著下降和显著下降的部分共占总数的74.26%,极显著下降的占28.12%,主要分布在金沙江流域中部、汉江流域、长江中游干流区间和太湖流域。而$PM_{2.5}$浓度无变化和变化不显著的仅占总数0.09%。区域A变率均值为−3.17 μg·m^{-3}·a^{-1},其中极显著或显著下降的部分占56.25%;区域B变率均值为−4.24 μg·m^{-3}·a^{-1},其中极显著或显著下降的部分占66.67%;区域C变率均值为−2.17 μg·m^{-3}·a^{-1},其中极显著或显著下降的部分占62%。

2.2.2 “十三五”期间及“十四五”初年$PM_{2.5}$浓度变化

为了了解长江流域《“十三五”生态环境保护规划》和《长江经济带生态环境保护规划》关键阶段$PM_{2.5}$浓度变化情况,以下将分别分析长江流域2016—2020年和2020—2021年$PM_{2.5}$浓度变化特征。图5a—d为2016—2020年长江流域逐年$PM_{2.5}$浓度变率,可见

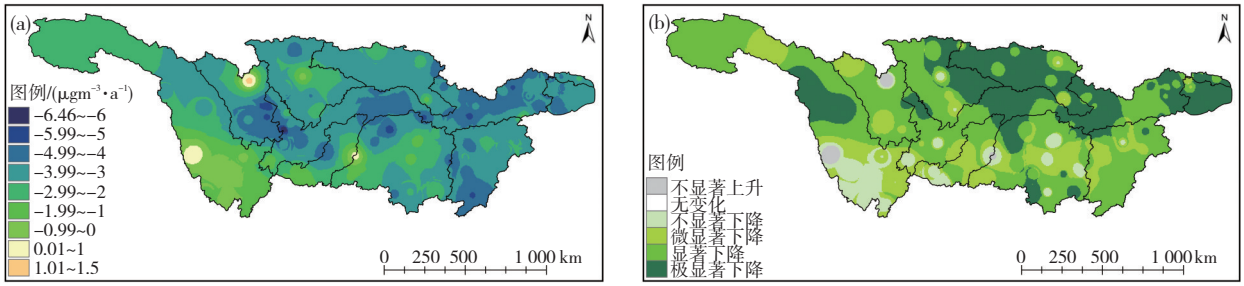


图4 2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$浓度变化趋势(a)及显著性检验(b)的空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of (a) variation trend and (b) significance test of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River basin during 2016–2021

2016—2020年$PM_{2.5}$浓度下降的面积占比分别为70.91%、82.73%、80.91%和95.45%,可见“十三五”期间长江流域大部$PM_{2.5}$浓度逐年下降,且下降范围总体增大,尤其是2020年下降范围最大。图5e为2020年与2016年相比$PM_{2.5}$的浓度变率($R_{a(2016,2020)}$),可见$R_{a(2016,2020)}$均值为−30.57%,其中$R_{a(2016,2020)}$为−60%~−40%的区域占长江流域总面积17.27%,以金沙江流域中北部最明显,下降幅度达50%以上;其次为岷沱江−长江上游干流区间−乌江流域,$R_{a(2016,2020)}$为−50%~−35%,占长江流域总面积33.64%;其余大部$R_{a(2016,2020)}$为−35%~−25%。

图5f为2021年与2020年相比$PM_{2.5}$的浓度变率($R_{a(2020,2021)}$),可见,虽然2021年$PM_{2.5}$浓度总体呈下降趋势,但下降的幅度($R_{a(2020,2021)}$均值为−0.51 μg·m^{-3})和范围(下降的范围占比为62.73%)较前4 a明显减小。空间上$PM_{2.5}$呈现西升东降的分布特征,下降的区域主要集中在嘉陵江以东的汉江流域、长江中游和下游干流区间、太湖流域以及鄱阳湖流域,升高的区域主要在嘉陵江以西的金沙江流域大部、岷沱江流域、乌江流域以及洞庭湖流域大部,其中岷沱江北部和乌江中部上升幅度达20%以上。

2.3 气象条件变化与减排措施的相对贡献

2.3.1 $PM_{2.5}$与EMI相关性

大气环境治理措施和气象条件变化是影响大气污染物浓度变化的两大决定因素,其中排放变化是内因,气象条件是外因(Zhang et al., 2019;梅梅等,2021)。分析2016—2021年长江流域沿线城市EMI年际变化特征(图略),发现2016—2019年气象条件变化不大,EMI逐年小幅下降,下降速率约为0.01 a^{-1},均值为2.64;2020年气象条件有了明显改善,EMI(2.27)较过去4 a均值下降了14.02%;2021年气象条件总体变差,EMI升高至2.36,较2020年升高了3.95%。由以上分析可以看出,EMI与$PM_{2.5}$年际变化趋势大体一致。

由长江流域$PM_{2.5}$浓度与EMI的相关系数计算结果(图6a)可知,$PM_{2.5}$浓度与EMI呈正相关,相关系数为正的占总数99.16%,其中相关系数大于0.5的占总数93.11%,相关系数大于0.7的占总数64.85%,相关系数大于0.8的占总数32.74%。由显著性水平检验结果(图6b)可知,显著性水平优于0.05的占总数的56.43%,主要分布在相关系数0.7以上的区域,显著性水平优

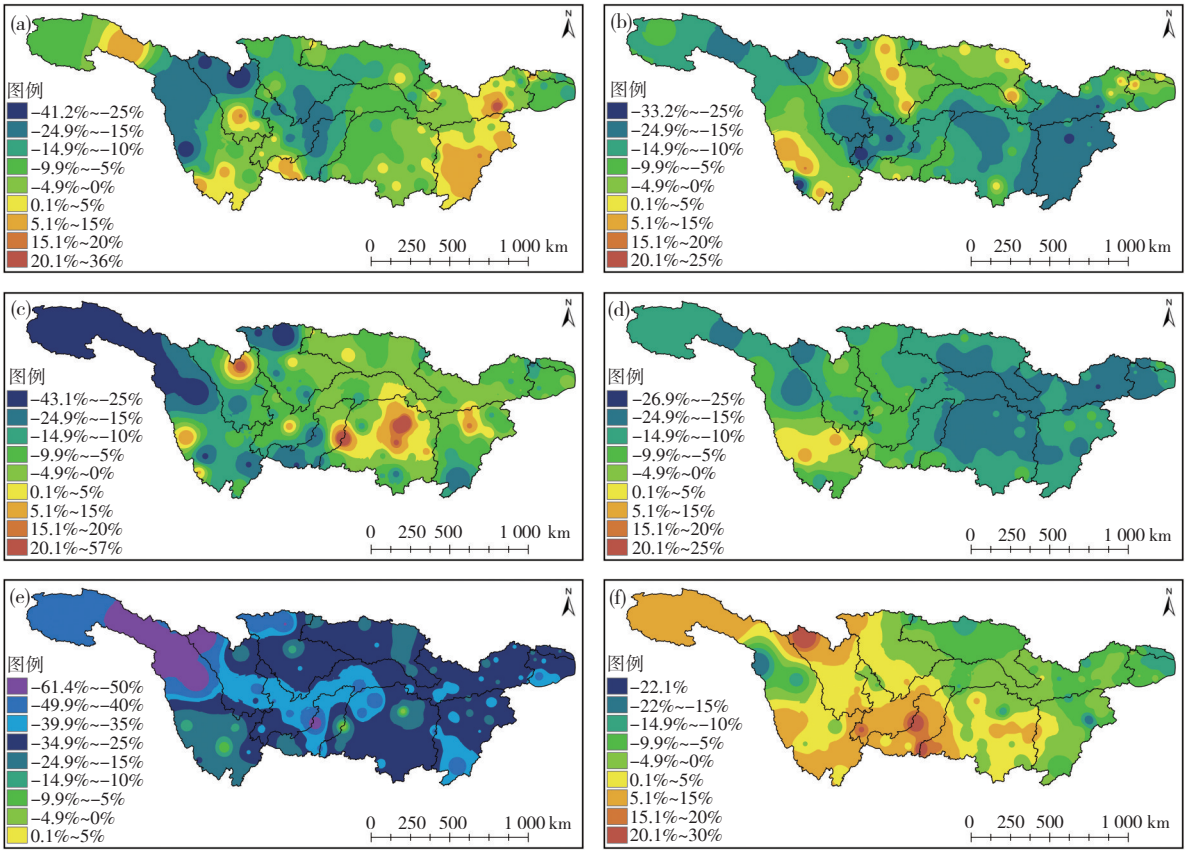


图5 长江流域2016—2020年$PM_{2.5}$浓度逐年变化率(a—d)，2020年与2016年相比$PM_{2.5}$浓度变化率(e)、2020—2021年$PM_{2.5}$浓度变化率(f)

Fig. 5 (a–d) The annual change rate of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River Basin from (a) 2016 to (d) 2020, (e) the change rate of $PM_{2.5}$ concentration in 2020 compared with 2016, (f) the change rate of $PM_{2.5}$ concentration in 2020–2021

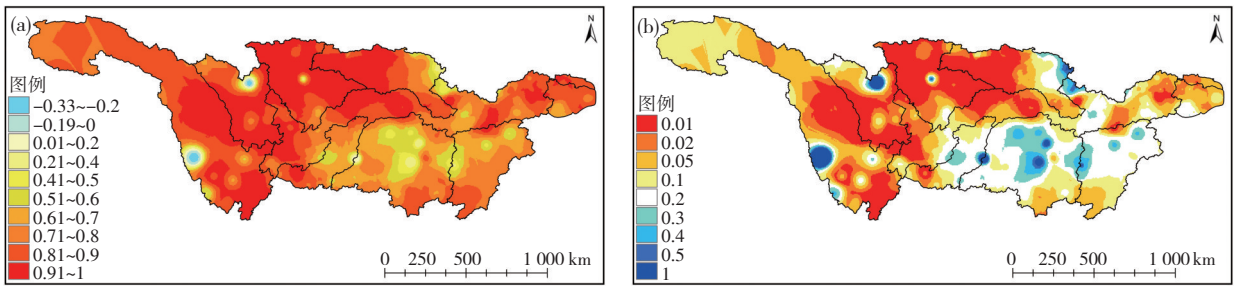


图6 2016—2021年长江流域$PM_{2.5}$浓度与EMI相关系数(a)及显著性水平(b)的空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of (a) correlation coefficient and (b) significance level between $PM_{2.5}$ concentration and EMI in the Yangtze River Basin during 2016—2021

于0.01的占总数的15.29%，主要分布在相关系数0.8以上的区域，主要包括汉江西部至金沙江流域东部、上游干流区间部分地区以及下游干流区间和太湖流域局部。汉江流域东部及中游干流区间、乌江流域大部以及两湖流域大部未通过0.1显著性水平检验，约占总面积的30%。

高值区域A的$PM_{2.5}$浓度与EMI的相关系数为0.63，但通过显著性水平0.05检验的面积仅占20%，即大部地区气象条件改变趋势与$PM_{2.5}$不一致；区域B的相关系数为0.59，通过显著性水平0.05检验的面积达89.20%，即气象条件对$PM_{2.5}$变化影响显著；区域C的相关系数为0.63，通过显著性水平0.05检验的占56.67%，大部受气象条件影响显著。

由以上分析可知，气象条件对$PM_{2.5}$变化的影响作用空间差异大。包括区域B、C在内的汉江西部至金沙江流域东部等地二者相关系数达0.8以上，即气象条件变化可以较好地反映$PM_{2.5}$浓度变化。而包括区域A在内的汉江流域东部、中游干流区间、乌江流域大部以及两湖流域大部受减排等其它因素影响更显著，与赵伟等(2022)“十三五”期间我国中东部空气质

量变化受能源消耗影响显著、西部地区受气象等其它因素影响显著的结论相近。

2.3.2 $R_{a(2016,2020)}$气象条件变化和减排相对贡献

在气象和减排等因素共同作用下，与2016年相比2020年长江流域全境$PM_{2.5}$浓度下降，$R_{a(2016,2020)}$均值为−30.57%(图5e)。从同时段的气象条件变化率($R_{emi(2016,2020)}$)(图7a)可见，长江流域$R_{emi(2016,2020)}$数值均为负，均值为−16.54%，即全流域气象条件变化均有利于$PM_{2.5}$浓度下降。其中嘉陵江流域及以西的大部区域气象条件对$PM_{2.5}$变化影响最大，$R_{emi(2016,2020)}$达−40.6%~−20%；洞庭湖流域南部及鄱阳湖流域大部$R_{emi(2016,2020)}$为−20%~−15%；金沙江流域北部、汉江流域、长江中下游干流区间、太湖流域以及洞庭湖流域北部$R_{emi(2016,2020)}$为−15%~−5%。从同时段的减排变化率($R_{b(2016,2020)}$)的空间分布(图7b)可见，长江流域减排等举措总体有利于$PM_{2.5}$下降，$R_{b(2016,2020)}$平均值为−14.78%。其中长江流域中东部和金沙江流域北部减排措施影响最大，尤其是金沙江北部和长江中下游地区，$R_{b(2016,2020)}$小于−20%，最小值达−37.54%。嘉陵江流域大部、金沙江流域南部减排措施不利于$PM_{2.5}$下降，$R_{b(2016,2020)}$为正值，但数值较小，均在20%以下。

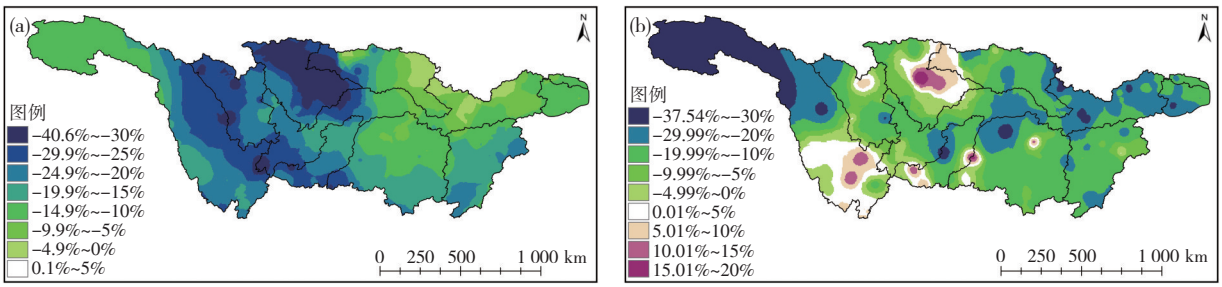


图7 2020年与2016年相比长江流域气象条件变化率$R_{emi(2016,2020)}$ (a)及排放变化率$R_{b\ (2016,2020)}$ (b)的空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of (a) the change rate of meteorological conditions $R_{emi(2016,2020)}$ and (b) the change rate of emission $R_{b(2016,2020)}$ in the Yangtze River Basin in 2020 compared with 2016

对于两个高值区和一个低值区来说(表1)，$PM_{2.5}$浓度均明显下降，$R_{a(2016,2020)}$平均值为−28.23%，气象条件和减排措施变化均有利于$PM_{2.5}$浓度下降，$R_{emi(2016,2020)}$和$R_{b(2016,2020)}$分别为−17.43%和−10.8%。东部的高值区A的减排影响(−13.74%)大于气象条件(−11.45%)，西部区域B、C的气象条件变化影响大于减排作用，其中高值区B的$PM_{2.5}$下降最多(−36.41%)，气象条件影响也最大(−23.98%)，$R_{emi(2016,2020)}$数值约为$R_{b(2016,2020)}$的两倍。

表1 2020年与2016年相比，长江流域$PM_{2.5}$高值区(A、B)和低值区(C)$PM_{2.5}$浓度变化率$R_{a(2016,2020)}$、气象条件变化率$R_{emi(2016,2020)}$和排放变化率$R_{b(2016,2020)}$

Table 1 The change rate of $PM_{2.5}$ concentration $R_{a(2016,2020)}$, the change rate of meteorological conditions $R_{emi(2016,2020)}$ and the change rate of emission $R_{b(2016,2020)}$ in the high-value area (A, B) and low-value area (C) of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Basin in 2020 compared with 2016

区域	$R_{a(2016,2020)}$/%	$R_{emi(2016,2020)}$/%	$R_{b(2016,2020)}$/%
A	−25.20	−11.45	−13.74
B	−36.41	−23.98	−12.44
C	−23.08	−16.87	−6.21

2.3.3 $R_{a(2020,2021)}$气象条件变化和减排相对贡献

与2020年相比，2021年$PM_{2.5}$总体小幅下降，但近四成区域呈上升趋势。从同时段的气象条件变化率($R_{emi(2020,2021)}$)的空间分布(图8a)可见，除汉江流域、下游干流区间、金沙江流域部分地区外，长江流域近70%的区域$R_{emi(2020,2021)}$为正，全流域均值为4.49%，气象条件总体不利于$PM_{2.5}$浓度下降。但$R_{emi(2020,2021)}$数值不大，仅汉江流域西北部至金沙江东部的部分地区数值大于10%。从图8b可见，长江流域约80%的地区同时段的减排变化率($R_{b(2020,2021)}$)为负值，均值为−5.84%，减排等措施总体有利于$PM_{2.5}$浓度下降，其中金沙江流域中部和鄱阳湖流域东部$R_{b(2020,2021)}$小于−20%。而

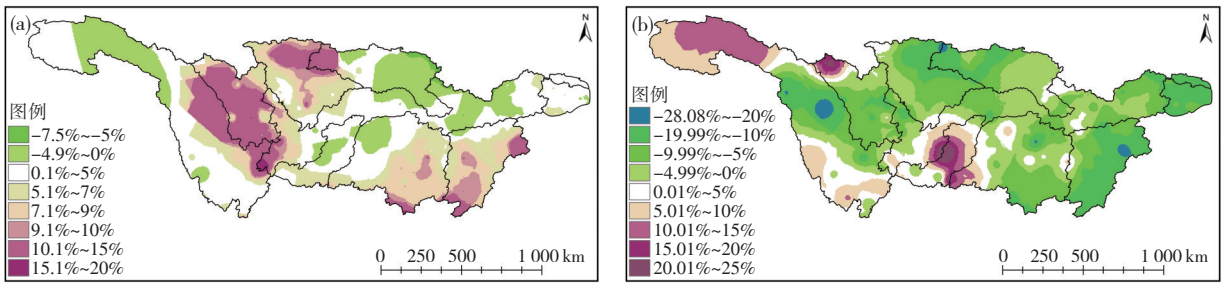


图8 2020—2021年长江流域气象条件变化率$R_{emi(2020,2021)}$ (a)及排放变化率$R_{b(2020,2021)}$ (b)的空间分布

Fig. 8 The spatial distribution of (a) the change rate of meteorological conditions $R_{emi(2020,2021)}$ and (b) the change rate of emission $R_{b(2020,2021)}$ in the Yangtze River Basin from 2020 to 2021

乌江流域中部和岷沱江流域西北部$R_{b(2020,2021)}$最高,达20%以上。

对于高值区A、B和低值区C来说(表2),与2020年相比,2021年区域A减排措施有利于$PM_{2.5}$浓度下降($R_{b(2020,2021)}$为-4.35%),而不利的气象条件($R_{emi(2020,2021)}$为4.20%)部分抵消了减排的效果,使得$PM_{2.5}$浓度下降幅度较小($R_{a(2020,2021)}$为-0.15%)。同样,区域B的不利气象条件($R_{emi(2020,2021)}$为8.44%)抵消了减排的效果($R_{b(2020,2021)}$为-5.69%),并造成$PM_{2.5}$浓度上升了2.75%。区域C的气象条件和减排措施变化均不利于$PM_{2.5}$的下降,导致$PM_{2.5}$浓度上升了7.24%。

表2　2020—2021年长江流域$PM_{2.5}$高值区(A、B)和低值区(C)$PM_{2.5}$浓度变化率$R_{a(2020,2021)}$、气象条件变化率$R_{emi(2020,2021)}$和排放变化率$R_{b(2020,2021)}$

Table 2 The change rate of $PM_{2.5}$ concentration $R_{a(2020,2021)}$, the change rate of meteorological conditions $R_{emi(2020,2021)}$ and the change rate of emission $R_{b(2020,2021)}$ in the high-value area (A, B) and low-value area (C) of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Basin from 2020 to 2021

区域	$R_{a(2020,2021)}$/%	$R_{emi(2020,2021)}$/%	$R_{b(2020,2021)}$/%
A	-0.15	4.20	-4.35
B	2.75	8.44	-5.69
C	7.24	0.98	6.26

3 结论与讨论

本文利用2016—2021年长江流域110个地市级以上城市国控站点$PM_{2.5}$浓度监测数据,采用Theil-Sen趋势分析法和Mann-Kendall统计检验法,分析$PM_{2.5}$浓度变化特征;在此基础上,分析基于大气温度、大气湿度、风场、大气压力、降水量、云量、辐射场等气象条件的环境气象评估指数(EMI)与$PM_{2.5}$浓度的相关性,着重分析"十三五"期间(2016—2020年)和"十四五"开局之年(2021年)气象条件和减排措施的改变在$PM_{2.5}$浓度变化中的相对贡献。得到如下主要结论:

(1) 从逐年变化特征可知,2016—2020年长江流域$PM_{2.5}$浓度逐年下降,变率达-3.62 $\mu g \cdot m^{-3} \cdot a^{-1}$,其中金沙江流域中北部$PM_{2.5}$浓度下降幅度最大,共下降了50%以上。2021年$PM_{2.5}$浓度下降趋势不再明显,与2020年相比仅降低了0.51 $\mu g \cdot m^{-3} \cdot a^{-1}$,下降的区域主要位于长江流域中游和下游。

(2) $PM_{2.5}$浓度变化的主要影响因素空间差异大。汉江西部至金沙江流域东部等地$PM_{2.5}$浓度变化与环境气象评估指数(EMI)关系密切,汉江流域东部、中游干流区间、乌江流域大部以及两湖流域大部受减排等其它因素影响更显著。

(3) "十三五"期间气象条件和减排措施均有利于$PM_{2.5}$浓度下降,全流域$PM_{2.5}$浓度下降。与2020年相比,2021年减排措施总体有利于$PM_{2.5}$浓度下降,但气象条件不利,综合作用使得$PM_{2.5}$总体小幅下降。

(4) 长江流域$PM_{2.5}$浓度空间上存在两个高值区和一个低值区,高值区位于南阳盆地-江汉平原-洞庭湖平原及南部丘陵一带(高值区A)和成渝城市群(高值区B),低值区位于金沙江流域上中游(低值区C)。"十三五"期间,高值区和低值区$PM_{2.5}$浓度均大幅下降。与2020年相比,2021年不利气象条件部分抵消了减排的有利效果,使得高值区A的$PM_{2.5}$浓度下降幅度较小,高值区B的$PM_{2.5}$浓度小幅上升;而低值区C的气象条件和减排措施均不利,导致$PM_{2.5}$浓度上升了7.24%。

治理措施影响$PM_{2.5}$污染源变化,气象条件影响$PM_{2.5}$的扩散和清除。利用EMI指数不仅可以定量评价国民经济重要发展阶段大气污染治理措施效能,在预测长期气候变化趋势的基础上,还可以预测重大活动期间和重点防范时段的$PM_{2.5}$变化趋势,为制定科学合理的环境治理措施提供依据。

参考文献(References):

曹凯鑫,汤猛猛,葛建鸿,等.2020.大气污染物PM2.5缺失数据插值方法的比较研究:基于北京市数据[J].环境与职业医学,37(4):299-305. Cao K X, Tang M M, Ge J J, et al. 2020. Comparison of methods to interpolate missing PM2.5 values: Based on air surveillance data of Beijing [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 37(4):299-305 (in Chinese). doi:10.13213/j.cnki.jeom.2020.19740

陈优良,邹文敏.2022. 2015—2019年长三角PM 2.5时空变化特征及其影响因子分析[J].安全与环境学报,22(1):476-485. Chen Y L, Zou W M. 2022. Temporal-spatial characteristics of PM 2.5 and impact factors analysis in Yangtze River Delta from 2015 to 2019 [J]. Journal of Safety and Environment,22(1):476-485 (in Chinese). doi:10.13637/j.issn.1009-6094.2021

陈赟,沈浩,王晓慧,等.2023.基于Mann-Kendall趋势检验的城市能源碳达峰评估方法[J].上海交通大学学报,57(7):928-938. Chen Y, Shen H, Wang X H, et al. 2023. Assessment method for urban energy carbon emission peak based on Mann-Kendall trend test [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 57(7):928-938 (in Chinese). doi:10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.524

韩立建.2018.城市化与PM2.5时空格局演变及其影响因素的研究进展[J].地理科学进展,37(8):1011-1021. Han L J. 2018. Relationship between urbanization and urban air quality: an insight on fine particulate dynamics in China [J]. Progress in Geography,37(8):1011-1021 (in Chinese). doi:10.18306/dlkxjz.2018. 08.001

姜磊,周海峰,赖志柱,等. 2018.中国城市PM 2.5时空动态变化特征分析:2015—2017年[J].环境科学学报, 38(10):3816-3825. Jiang L, Zhou H F, Lai Z Z, et al. 2018. Analysis of spatio-temporal characteristic of PM 2.5 concentrations of Chinese cities: 2015-2017 [J]. Acta Sci-

entiae Circumstantiae,38(10):3816–3825(in Chinese). doi:10.13671/j.hjkxxb.2018.0211

刘洪利,龚山陵,何建军,等.2018.环境气象评估指数EMI原理及应用[C]// 第35届中国气象学会年会:371–374. Liu H L, Gong S L, He J J, et al. 2018. The theory and application of evaluation on meteorological condition index for air pollution [C]// The 35th Annual Meeting of China Meteorological Society,371–374 (in Chinese)

刘玲,殷华,仲杰,等.2024.宿迁市PM2.5积累机制及重污染天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,18(1):156–164. Liu L, Yin H, Zhong J, et al. 2024. Accumulation mechanism of PM2.5 and the causes of serious pollution weather in Suqian city, China [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):156–164 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2024.01.020

刘晟东,史君楠,程勇,等.2020.中国典型城市群PM 2.5污染特征研究进展[J].环境科学研究, 33(2):243–251. Liu S D, Shi J N, Cheng Y, et al. 2020. Review of pollution characteristics of PM 2.5 in Chinese representative megacities [J]. Research of Environmental Sciences,33(2):243–251(in Chinese). doi:10.13198/j.issn.1001–6929.2019.08.29

刘雅婷.2023.长江流域绿地景观格局对PM2.5的削减效应研究[D].武汉:武汉工程大学. Liu Y T. 2023. Reduction effect of green space landscape pattern on PM2.5 in the Yangtze River Basin [D]. Wuhan:Wuhan Institute of Technology (in Chinese). doi:10.27727/d.cnki.gwhxc.2023.000695

梅梅,徐大海,朱蓉,等.2021.减排措施与气象因子对2013—2019年中国大陆地区$PM_{2.5}$浓度变化的贡献[J].环境科学学报,41(7):2519–2529. Mei M, Xu D H, Zhu R, et al. 2021. Contributions of emission reduction measures and meteorological factors to the changes in PM 2.5 concentration over mainland China from 2013 to 2019 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,41(7):2519–2529 (in Chinese). doi:10.13671/j.hjkxxb. 2020.0501

王丽丽,刘笑杰,李丁,等.2022.长江经济带$PM_{2.5}$空间异质性和驱动因素的地理探测[J].环境科学,43(3):1190–1200. Wang L L, Liu X J, Li D, et al. 2022. Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of PM2.5 in the Yangtze River Economic Belt [D]. Environmental Science,43(3):1190–1200 (in Chinese). doi: 10.13227/j.hjkx.202106113

王秋红,李维杰,王勇,等.2021.基于LMDI的城市化不同阶段$PM_{2.5}$浓度影响因素——以我国5个特大城市群为例[J].中国环境科学,41(11):5069–5078. Wang Q H, Li W J, Wang Y, et al. 2021. Socio–economic factors of $PM_{2.5}$ concentrations in different urbanization stages based on LMDI: A case study of China's five mega–large urban agglomerations [J]. China Environmental Science,41(11):5069–5078(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000–6923.2021.11.013

危诗敏,冯鑫媛,王式功,等.2021.四川盆地多层逆温特征及其对大气污染的影响[J].中国环境科学,41(3):1005–1013. Wei S M, Feng X Y, Wang S G, et al. 2021. Characteristics of multi–layer inversions in Sichuan Basin and their influences on air pollution [J]. China Environmental Science,41(3):1005–1013 (in Chinese). doi:10.19674/j.cnki.issn1000–6923.2021.0112

武威,顾佳佳,鲍玉辉. 2020.漯河一次持续性重污染过程成因及传输特征分析[J].暴雨灾害, 39(3):259–268. Wu W, Gu J J, Bao Y H. 2020. Analysis of causes and transport characteristic of a continuous heavy pollution weather event in Luohe [J]. Torrential Rain and Disasters,39(3):259–268 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2020.03.006

徐勇,黄雯婷,窦世卿,等.2022. 2000—2020年西南地区植被NDVI对气候变化和人类活动响应特征[J].环境科学,43(6):3230–3240. Xu Y, Huang W T, Dou S Q, et al. 2022. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in southwest China from 2000 to 2020 [J]. Environmental Science,43(6):3230–3240 (in Chinese). doi:10.13227/j.hjkx.202108107

杨昆,杨玉莲,朱彦辉,等.2016.中国PM 2.5污染与社会经济的空间关系及成因[J].地理研究,35(6):1051–1060. Yang K, Yang Y L, Zhu Y H, et al. 2016. Social and economic drivers of PM 2.5 and their spatial relationship in China [J]. Geographical Research,35(6):1051–1060 (in Chinese). doi:10.11821/dlyj201606005

杨显玉,易家俊,吕雅琼,等.2020.成都市及周边地区严重臭氧污染过程成因分析[J].中国环境科学,40(5):2000–2009. Yang X Y, Lu Y Q, Wang Y R, et al. 2020. Impact of synoptic patterns on regional ozone pollution in Sichuan Basin [J]. China Environmental Science,40(5):2000–2009 (in Chinese). doi:10.19674/j.cnki.issn1000–6923.2020.0226

岳岩裕,王晓玲,张蒙晰,等.2016.武汉市空气质量状况与气象条件的关系[J].暴雨灾害,35(3):271–278. Yue Y Y, Wang X L, Zhang M X, et al. 2016. Air quality condition in Wuhan and its relationship to meteorological factors [J]. Torrential Rain and Disasters,35(3):271–278(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2016.03.010

张欢,吴瑛祖,梅煜臻,等.2023.我国空气质量的时空变化及其城市群分布特征[J].环境经济研究,8(3):46–65. Zhang H, Wu Y Z, Mei Y Z, et al. 2023. The spatial–temporal changes of air quality and distribution characteristics of urban agglomerations in China:the study on the effectiveness of air pollution control in China since the 13th Five–Year Plan Period [J]. Journal of Environmental Economics,8(3):46–65 (in Chinese). doi:10.19511/j.cnki.jee.2023.03.003

张中浩,聂甜甜,高阳,等.2022.长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究[J].长江流域资源与环境,31(5):1086–1100. Zhang Z H, Nie T T, Gao Y, et al. 2022. Study on temporal and spatial characteristics of coupling coordination correlation between ecosystem services and economic–social development in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,31(5):1086–100 (in Chinese). doi:10.11870 /cjlyzyy–hj202205013

赵伟,刘昊铮,蒲海霞.2022.中国"十三五"期间空气质量时空演变特征及社会经济驱动力[J].西南大学学报(自然科学版),44(9):99–109. Zhao W, Liu H Z, Pu H X. 2022. The spatiotemporal evolution and socio–economic driving forces of air quality in China during the 13th Five–Year Plan Period [J]. Journal of Southwest University, 44(9):99–109(in Chinese). doi:10.13718/j.cnki.xdzk.2022.09.011

周亮,周成虎,杨帆,等.2017.2000–2011年中国$PM_{2.5}$时空演化特征及驱动因素解析[J].地理学报,72(11):2079–2092. Zhou L, Zhou C H, Yang F, et al. 2017. Spatio–temporal evolution and the influencing factors of $PM_{2.5}$ in China between 2000 and 2011 [J]. Acta Geographica Sinica,72(11):2079–2092 (in Chinese). doi:10.11821/dlxb201711012

朱燕,赵天良,白永清,等.2021.两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响[J].环境科学,2(10):4669–4677. Zhu Y, Zhao T L, Bai Y Q, et al. 2021. Characteristics of atmospheric particulate matter pollution and the unique wind and underlying surface impact in the Twain–Hu Basin in Winter [J]. Environmental Science,2(10):

4669-4677 (in Chinese). doi:10.13227/j.hjkx.202103050

Chen Z Y, Chen D L, Zhao C F, et al. 2020. Influence of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations across China: A review of methodology and mechanism [J]. Environment International, 139:105558. doi: 10.1016/j.envint.2020.105558

Chen Z Y, Xie X M, Cai J, et al. 2018. Understanding meteorological influences on PM2.5 concentrations across China: a temporal and spatial perspective [J]. Nature reviews Cancer,18(8):5343-5358. doi: 10.5194/acp-18-5343-2018

Gong S, Liu H, Zhang B, et al. 2021. Assessment of meteorology vs. control measures in the China fine particular matter trend from 2013 to 2019 by an environmental meteorology index [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(4):2999-3013. doi:10.5194/acp -21-2999-2021

Liao T T, Wang S, Ai J, et al. 2017. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ during the Winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. Science of the Total Environment,584: 1056-1065. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.160

Lin G, Fu J, Jiang D, et al. 2014. Spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,11(1):173-186. doi:10.3390/ ijerph110100173

Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Ken-dall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association,63(324): 1379-1389. doi:10.1080/ 01621459.1968.10480934

Wessels A, Birmili W, Albrecht C, et al. 2010. Oxidant generation and toxicity of size-fractionated ambient particles in human lung epithelial cells [J]. Environmental Science and Technology,44(9):3539-3545. doi:10.1021/es9036226

Zhang X, Xu X, Ding Y, et al. 2019. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM 2.5 mass reduction in key regions in China[J]. Science China Earth Sciences,62:1885-1902. doi:10.1007/s11430-019-9343-3

Zhu W W, Wang M C, Zhang B B. 2019. The effects of urbanization on $PM_{2.5}$ concentrations in China's Yangtze River economic Belt: new evidence from spatial econometric analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 239. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118065

（责任编辑　何明琼）

《暴雨灾害》征稿简则

《暴雨灾害》是中国气象局武汉暴雨研究所主办的中文学术期刊，主要刊载与暴雨、强对流天气及其次生灾害相关的最新研究成果和综合评述。本刊为中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)双月刊，欢迎国内外从事大气科学研究和气象业务、服务的科技工作者投稿。

1 来稿要求

1) 论点明确、文字精练、数据可靠。其书写顺序为：中文题名(不超过20个汉字)、作者姓名、单位、摘要(400字左右，一般应包含研究目的、资料、方法、结果和结论)、关键词(4～8个为宜)；英文题名、作者姓名、单位、摘要、关键词；正文；结论与讨论；参考文献。

2) 论文具体格式请参考本刊网站下载中心的《暴雨灾害》论文投稿模板，或参考本刊网站首页最新发表的论文。投稿时，只需上传论文word文档，“版权转让协议及伦理声明”待论文录用后另行提交。

3) 论文首页脚页处附各类资助项目名称(编号)和第一作者姓名、主要研究领域、E-mail。第一作者下方可列一位通信作者姓名、主要研究领域、E-mail，通信作者对该文负有学术责任。

4) 来稿中计量单位一律采用中华人民共和国法定计量单位。

5) 所附插图、表格宜少而精，图表应随文给出，并提供英文图(表)题。一篇论文插图不宜超过10幅，要求图像清晰；附表一般应制成三线表(表中数据宜采用word文档录入)。图(表)中的量和单位用“/”隔开，物理量用斜体，并注明图(表)号、图(表)题、图(表)注以及符号文种、大小写、正斜体、黑白体、上下脚码等。

6) 本刊参考文献采用著者-出版年制，具体参见本刊网站下载中心的“《暴雨灾害》参考文献引用和著录格式”。

2 投稿须知

1) 请勿一稿多投。稿件初审时限为40 d。修改稿务必在45 d内修回(另有约定除外)；否则，视作自动撤稿。若6个月内未见刊用通知，稿件可自行处理。

2) 请作者通过本刊网站(http://www.byzh.org.cn)提交稿件并查询稿件处理进展。

3) 本刊编辑可能会对录用稿件作适当的文字性和技术性删改处理，不同意者，请书面说明。

4) 本刊已入编中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网、数字化期刊群万方数据库、中文科技期刊数据库、博看网及中国核心期刊(遴选)数据库。来稿一经录用，将同时被光盘版和数据库收录。若作者不同意收录，请来稿时说明。

5) 本刊对录用稿件收取论文版面费。印刷出版后一次性支付稿酬(包含纸质版、数字版稿酬以及网络版著作权使用费)，并赠送当期《暴雨灾害》2册。

3 通联方式

来信(函)请寄至“430205湖北省武汉市东湖高新技术开发区金融港二路6号《暴雨灾害》编辑部”，也可通过邮箱(byzh7939@163.com)或电话(027-81804908，81804915，81804935)联系。

微信扫一扫
关注《暴雨灾害》