



安全与环境学报
Journal of Safety and Environment
ISSN 1009-6094, CN 11-4537/X

《安全与环境学报》网络首发论文

题目: 2015—2019 年长三角PM_{2.5}时空变化特征及其影响因子分析
作者: 陈优良, 邹文敏
DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021
收稿日期: 2021-03-11
网络首发日期: 2021-07-23
引用格式: 陈优良, 邹文敏. 2015—2019 年长三角PM_{2.5}时空变化特征及其影响因子分析. 安全与环境学报. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2021>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

2015—2019 年长三角 $PM_{2.5}$ 时空变化特征及其影响因子分析

陈优良, 邹文敏

(江西理工大学土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 基于 $PM_{2.5}$ 站点数据, 研究了 2015—2019 年长三角 24 个城市 $PM_{2.5}$ 时空格局的变化过程, 运用地理探测器的方法揭示了自然因子和社会经济因子对长三角 $PM_{2.5}$ 变化的影响状况。结果显示: (1) 研究期间, $PM_{2.5}$ 年均值核密度曲线峰值持续向左移动, 表明长三角 24 个城市空气质量整体好转; 季节核密度曲线显示长三角 $PM_{2.5}$ 季节变化具有夏天<秋天<春天<冬天的特点; 冬季大气污染改善明显。(2) 截至 2019 年底, 研究区 $PM_{2.5}$ 年均值都达到 $55\mu g/m^3$ 以下, 但超过四分之三的地区仍存在不同程度的超标现象, $PM_{2.5}$ 均值仍具有西北较高, 东南较低的空间格局。(3) $PM_{2.5}$ 高值区由皖中向皖南转移; 低值区向西扩展至绍兴, 形成东临舟山、北至宁波、西连绍兴、南达台州的低值聚集区。对比江苏和安徽, 浙江和上海空气质量更优。(4) 自然因子对 $PM_{2.5}$ 变化影响程度比社会经济因子高; 平均气温、平均风速和相对湿度与 $PM_{2.5}$ 呈显著负相关, 技术扶持水平对 $PM_{2.5}$ 变化具有负向影响, 能源消耗与工业化水平对 $PM_{2.5}$ 变化具有正向影响; 任意两个因子的交互作用对 $PM_{2.5}$ 变化影响均大于单一因子的独自作用, 自然因子和社会经济因子的交互效应对长三角 $PM_{2.5}$ 变化起关键性作用。

关键词: 环境学; $PM_{2.5}$; 时空变化; 影响因子; 地理探测器

中图分类号: X511 **文献标志码:** A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2021

$PM_{2.5}$ 作为大气污染物的重要组成部分, 严重影响人类身体健康甚至会引发疾病^[1-3]。长三角是世界六大城市群之一, 经济发达、城市化水平高, 但由于资源消耗大、人类活动强度高等原因, 区域内 $PM_{2.5}$ 污染问题突出^[4-5]。2013 年, 中国东部地区发生了严峻的雾霾污染事件, 长三角三省市的空气质量指数达到严重污染级别, 对居民生产生活造成了重大影响^[4]。基于对雾霾污染现状的有效应对和防控, 我国于 2013 年 在全国范围内共建设 612 个 $PM_{2.5}$ 监测站点, 并从 2014 年起每日向公众发布 $PM_{2.5}$ 实时监控数据, 这为我国 $PM_{2.5}$ 时空分布研究奠定了基础。2017 年, 毛婉柳等^[6]首次使用我国地面监测数据研究了 2015 年长三角 $PM_{2.5}$ 时空分布的特点。之后必科娜等^[7]也利用 $PM_{2.5}$ 监控数据研究了 2013—2016 年长三角 $PM_{2.5}$ 时空演化特征, 发现研究期间长三角 $PM_{2.5}$ 污染具有转好的趋势。2018 年, 为提高空气质量改善效率, 国务院颁发实施打赢蓝天保卫战三年行动计划, 将进一步减少污染细颗粒物浓度设为计划实施目标, 长三角作为蓝天保卫战计划实施的重点目标区域, 探讨近几年长三角 $PM_{2.5}$ 空间分布状况具有极其重要的现实意义。通过长三角 $PM_{2.5}$ 时空变化规律, 可以对加重 $PM_{2.5}$ 污染的影响因子进行深度剖析, 为 $PM_{2.5}$ 防控措施的实施提供参考依据。

目前, 众多学者开展了长三角 $PM_{2.5}$ 影响因子的研究, 如柏玲等^[8]运用相关系数法研究了长三角 $PM_{2.5}$ 影响因素, 发现相对湿度是导致 $PM_{2.5}$ 污染的重要因子; 毛婉柳等^[6]和孙丹丹等^[9]同样利用相关系数法研究, 发现降水量和风速是影响长三角 $PM_{2.5}$ 变化的气象要素; 杨冕等^[10]运用计量模型分析发现人口密度和公共交通运输是造成长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度升高的重要原因。以上研究所使用的方法主要是揭示因变量与自变量之间单一的线性关系, 忽略了地区空间差异性。地理探测器方法是考虑到地物空间分异性, 探讨影响地物背后驱动因素的地学统计方法, 较于以往研究 $PM_{2.5}$ 影响因素的方法, 具有可用于探测某地区 $PM_{2.5}$ 全局驱动力、解释不同因子对 $PM_{2.5}$ 交互作用力、对影响因子共线性免疫等优点。王昭等^[11]和黄小刚等^[12]虽然考虑了空间的非平稳性, 但是相关研究发现长三角空气污染是受多种因素影响^[13], 综上所述, 前人的研究均描述了单一风险因子对 $PM_{2.5}$ 变化的影响程度, 并未考虑到两种或以上的驱动因子对 $PM_{2.5}$ 变化的交互作用, 而地理探测器的交互探测能检测任意两个风险因子对 $PM_{2.5}$ 变化的作用影响, 并将作用影响量化。

基于此, 以长三角 24 个地级市为研究单位, 采用 $PM_{2.5}$ 实时监测数据, 综合利用空间自相关分析、核密度估计方法, 从空间、时间两大维度揭示 2015—2019 年长三角 $PM_{2.5}$ 的时空变化特征, 运用地理探测器方法分析各影响因子与 $PM_{2.5}$ 的关

收稿日期: 2021-03-11

基金项目: 江西省教育厅科技项目(GJJ170522); 赣州市重点研发计划项目(赣市科发[2018] 50 号)。

作者简介: * 陈优良 (1978-), 男, 副教授, 研究方向为时空数据挖掘. E-mail: gis_public@163.com

系和对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响强度，以此为长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 污染综合治理与相关环境政策的实施提供精准有效的科学依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区域

长江三角洲是我国东部沿海重要经济发展区，位于北纬 $32^{\circ} 34'$ 至 $29^{\circ} 20'$ 。本文选取了长三角 24 个主要城市，包括池州、南京、苏州、芜湖、无锡、常州、镇江、泰州、杭州、宁波、嘉兴、舟山、扬州、绍兴、台州、湖州、合肥、南通、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、上海、宣城。 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点共 118 个，上海、浙江、安徽与江苏分别有 10 个、30 个、34 个、44 个(图 1)。

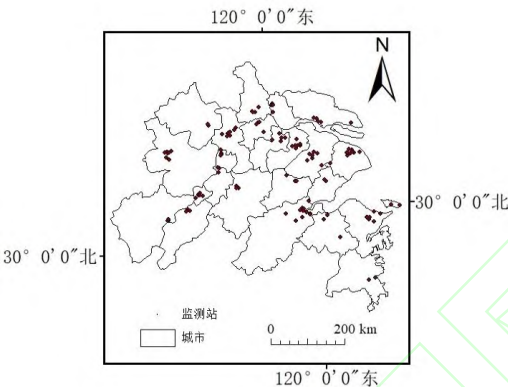


图 1 长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站空间分布

Fig.1 Spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ monitoring stations in Yangtze River Delta

1.2 数据来源与预处理

$\text{PM}_{2.5}$ 数据来源于国家环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn>)。在参考文献[8-13]分析 $\text{PM}_{2.5}$ 形成原因的基础上选取 2018 年的 4 个自然因子和 5 个社会经济因子，自然因子包括平均气温、平均风速、相对湿度与降水量；社会经济因子包括人口密度、工业化水平、技术扶持水平、能源消耗与人均 GDP。工业化水平用第二产业产值占 GDP 的比重表示，能源消耗用人均供气量表示，技术扶持水平用科技支出占 GDP 表示^[5]。社会经济因子数据主要来源于 2018 年的《中国城市统计年鉴》，自然因子数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。

为保证 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据的有效性，本文按照《环境空气质量标准》(GB3095—2012)^[14]中的有关规定，对 $\text{PM}_{2.5}$ 数据进行了预处理：① $\text{PM}_{2.5}$ 日均值：取一天 24 小时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的算术平均值，若日监测数据缺失超过 4 小时以上的数据，则当天数据无效，进行剔除；② $\text{PM}_{2.5}$ 季均值：取一个季节日均值浓度的算术平均值，若季度监测数据缺失超过 8 天以上数据，则当季数据无效，进行剔除；③ $\text{PM}_{2.5}$ 年均值：取一年当中日均值浓度的算术平均值，若年监测数据缺失超过 30 天以上，则当年数据无效，进行剔除。通过数据整理发现 2015—2019 年，分别有 358 天、361 天、362 天、344 天、357 天符合 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值的计算要求；每年的 4 个季度均达到季均值的计算要求，5 年均达到年均值的计算要求。

1.3 核密度估计

核密度估计是在概率论中估计未知的密度函数，并且是非参数检验方法之一。核密度估计方法不利用有关数据分布的先验知识，对数据分布不附加任何假定，是一种从数据样本本身出发研究数据分布特征的方法。本文使用预处理获得的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值和 $\text{PM}_{2.5}$ 季均值，利用核密度估计方法探究长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 数据的分布特点。借助 Stata 软件对 2015—2019 年长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值和 $\text{PM}_{2.5}$ 季均值进行核密度估计，分别绘制出不同年份 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值的核密度估计曲线与季节核密度估计曲线，以此研究 24 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时序演变特征。

1.4 空间自相关方法

空间自相关是指在空间中，不同空间单元之间的相同属性具有相关性。由于 $\text{PM}_{2.5}$ 在大气流动中具有区域联动性，因此运用全局空间自相关和局部空间自相关的方法探讨 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间聚集性特征及其演变规律。

1.4.1 全局空间自相关

全局空间自相关可以描述 $\text{PM}_{2.5}$ 空间格局的总体特征，其计算式如下：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (1)$$

其中, I 为 '全局莫兰指数, n 是研究区域内地域单元总数, w_{ij} 是空间权重矩阵的元素值, x_i 是地域单元 i 的 x 变量值。 I 取值范围在-1-1 之间, $I>0$ 表示该空间事物的属性取值分布具有正相关性, 说明各单元 $PM_{2.5}$ 均值的空间分布趋向于高值区与高值区聚集、低值区与低值区聚集; $I<0$ 表示该空间事物的属性取值分布具有负相关性, 即 $PM_{2.5}$ 均值的空间分布具有高值区与低值区聚集的特点; $I=0$ 表示空间事物的该属性取值不存在空间相关, 即空间随机分布。

1.4.2 局部空间自相关

局部自相关是分析 $PM_{2.5}$ 在局部区域的聚集分布情况, 其计算公式如公式 (2), 式中 V 为每个研究单位的局部莫兰指数, 其余符号的意义与式(1)相同:

$$V = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

1.5 地理探测器

地理探测器的核心思想是假如某个自变量和因变量之间具有解释关系, 则自变量和因变量会呈现出相似的空间分布^[15], 自变量和因变量的相似度可以用地理探测器中的 q 值度量。为了探究影响 $PM_{2.5}$ 变化的因子及各因子对 $PM_{2.5}$ 变化的影响程度, 研究使用地理探测器的功能包括: (1) 因子探测; (2) 交互作用探测。

1.5.1 因子探测

因子探测是衡量影响因子多大程度上解释了长三角 $PM_{2.5}$ 的空间异质性, 用 q 值衡量, q 取值为[0, 1], q 值越大表示该影响因子和 $PM_{2.5}$ 空间分布越相似, 即对 $PM_{2.5}$ 空间分布影响越强。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^l \frac{N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}}{1} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

式中: $h = 1, \dots, n$ 为影响因子的分类; N_h 、 N 为子单元和全部单元的 $PM_{2.5}$ 的总值, σ_h^2 和 σ^2 分别是单元 h 和全部单元 $PM_{2.5}$ 值的方差。

1.5.2 交互作用探测

交互作用探测是检测任意两个影响因子之间的相互作用是否对 $PM_{2.5}$ 变化产生影响, 以此来判断对 $PM_{2.5}$ 变化产生影响的因子是单独起作用或是共同起作用。

2 结果分析

2.1 $PM_{2.5}$ 时序变化特征

2.1.1 $PM_{2.5}$ 年时序规律分析

2015—2019 年长三角 $PM_{2.5}$ 年均值呈下降趋势, 由 $53.16 \mu g/m^3$ 下降至 $39.66 \mu g/m^3$ 下降了 25%。从图 2 可以看出: ①不同年份曲线最左侧的起始值都相差不大, 最右侧的值逐渐向左边移动, $PM_{2.5}$ 核密度峰值从 $57 \mu g/m^3$ 下降至 $42 \mu g/m^3$ 表明长三角 24 个城市空气质量整体好转。②不同年份曲线形态差异较大, 2016 年和 2015 年相比, 曲线的峰值变高且左移, 说明该时期 $PM_{2.5}$ 污染开始好转; 2017 年和 2016 年相比, 曲线峰值降低, 单峰变成双峰, 区间变化较大, 呈现较为明显的两极化现象; 2018 年和 2017 年相比, 双峰变成单峰, 峰值变高且略向右移动, 区间变化减小; 2019 年和 2018 年相比, 曲线峰值持续变高且左移, 峰值对应的核密度值是历年来最高, 表明 $PM_{2.5}$ 低值区域的面积不断扩大。

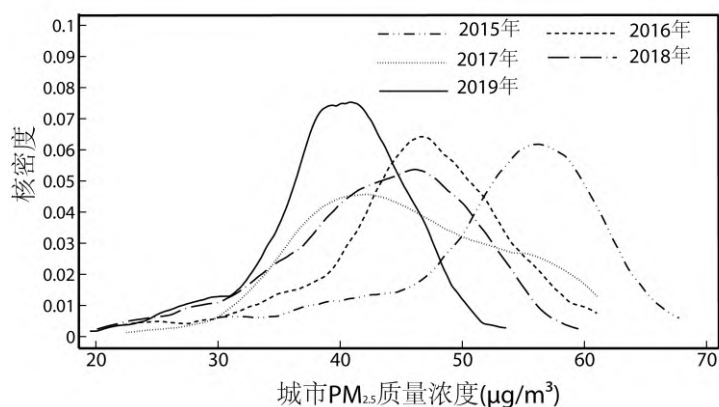
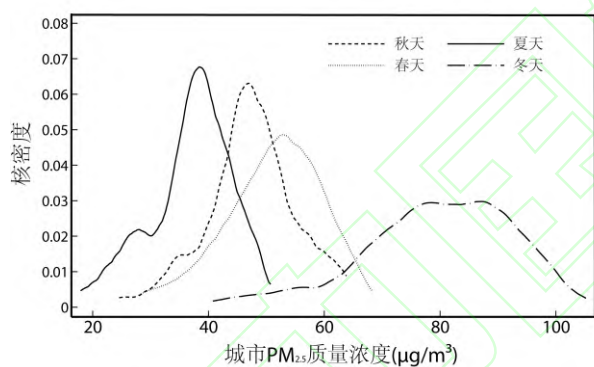


图 2 2015—2019 年长三角 $PM_{2.5}$ 年均值密度曲线

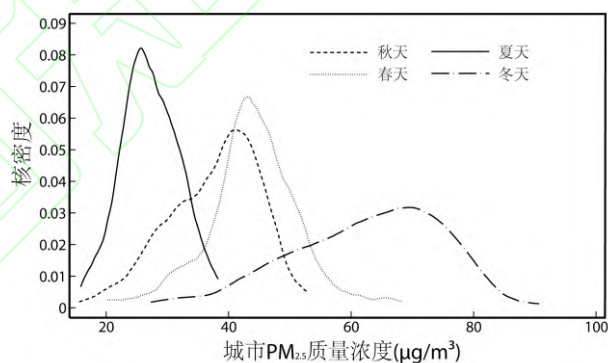
Fig.2 Density curve of $PM_{2.5}$ annual mean value in Yangtze River Delta from 2015 to 2019

2.1.2 $PM_{2.5}$ 季节时序规律分析

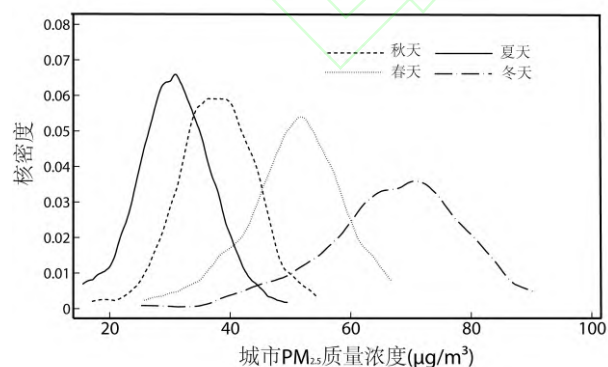
如图 3 所示, 长三角 2015—2019 年的季节核密度曲线图呈出一致的规律, 各年份曲线峰值所处季节从左往右依次都是夏天、秋天、春天、冬天, 说明 $PM_{2.5}$ 浓度的变化具有非常鲜明的季节性特征, 呈现出夏天<秋天<春天<冬天的特点。研究期间, 夏季、秋季、春季、冬季的核密度曲线峰值均向左移动, 夏季峰值由 $40\mu g/m^3$ 减少为 $25\mu g/m^3$ 、春季峰值由 $55\mu g/m^3$ 减少为 $45\mu g/m^3$ 、秋季峰值由 $42\mu g/m^3$ 减少为 $32\mu g/m^3$ 、冬季峰值由双峰 $78\mu g/m^3$ 和 $89\mu g/m^3$ 减少为单峰 $62\mu g/m^3$, 其中, 冬季峰值下降最明显。



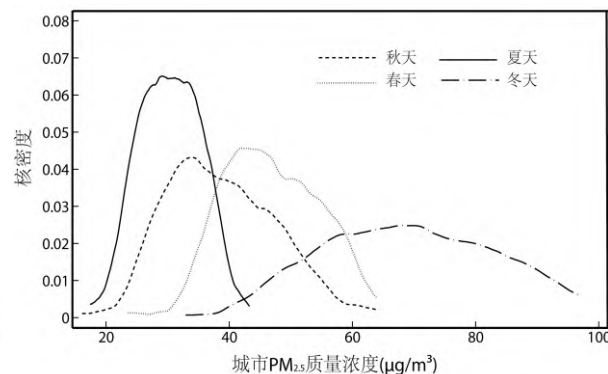
(a) 2015 年



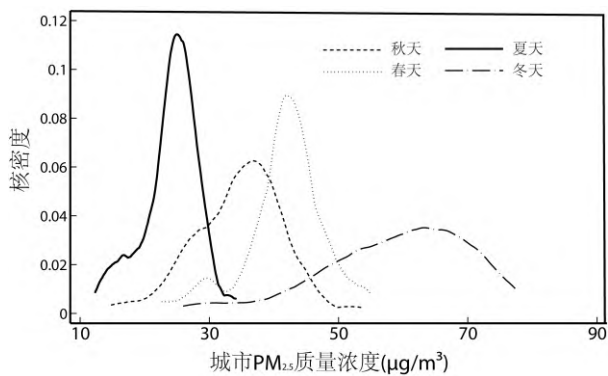
(b) 2016 年



(c) 2017 年



(d) 2018 年



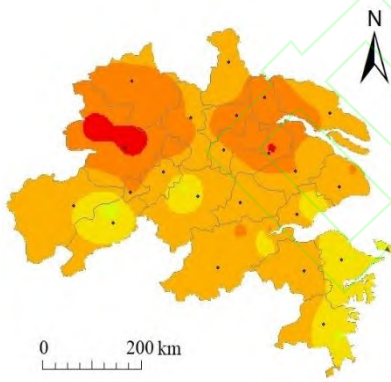
(e) 2019 年

图 3 2015—2019 年长三角 $PM_{2.5}$ 季均值密度曲线

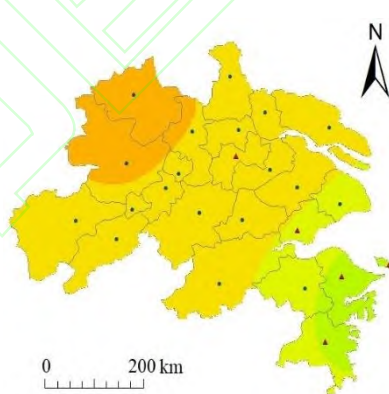
Fig.3 Density curve of $PM_{2.5}$ seasonal mean value in Yangtze River Delta from 2015 to 2019

2.2 $PM_{2.5}$ 空间维度变化特征

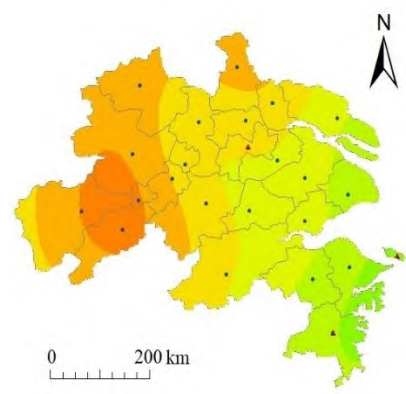
《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中将环境功能区分为两类：第一类主要是指自然保护区、风景名胜区及其他需要特殊保护的区域；第二类包括了居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区。长三角人口分布密集、城镇化率较高，故参考第二类环境功能区的年均质量浓度限值（小于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）进行评价。研究发现^[7, 16-17]较于其它的插值方法，克里金插值法对 $PM_{2.5}$ 空间模拟的精度更高、更接近真实值。因此本文选用克里金插值的方法对长三角各站点 $PM_{2.5}$ 年均值进行空间插值，并依据插值的结果研究 $PM_{2.5}$ 空间格局的变化。研究期间，长三角 $PM_{2.5}$ 污染已得到显著改善(图 4)，达标区域从舟山扩展至宁波、台州、湖州、绍兴。但根据质量限制标准，长三角四分之三的城市 $PM_{2.5}$ 年均值均存在不同比例的超标现象， $PM_{2.5}$ 年均值仍呈现“西北高、东南低”的空间格局^[2]。2015 年，除舟山市外，其它城市 $PM_{2.5}$ 都存在不同程度的超标现象。2016 年，各城市 $PM_{2.5}$ 年均值都出现了不同程度的下降，平均降幅为 $8.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2017 年，除安庆、池州为代表的皖南部分地区 $PM_{2.5}$ 均值有所增加，其他城市 $PM_{2.5}$ 年均值都存在不同程度的下降；2018 年， $PM_{2.5}$ 年均值 $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上的区域大面积缩减；2019 年，研究城市 $PM_{2.5}$ 年均值都达到 $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。



(a) 2015 年



(b) 2016 年



(c) 2017 年

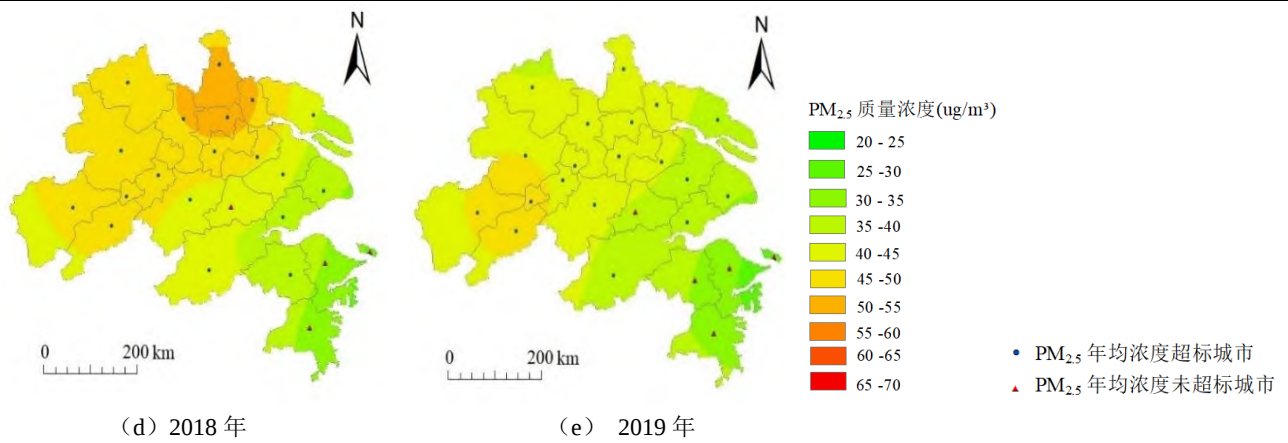


图 4 2015—2019 年长三角地区 $PM_{2.5}$ 年均值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ annual mean value in Yangtze River Delta from 2015 to 2019

2.3 $PM_{2.5}$ 空间集聚与趋势分析

2.3.1 $PM_{2.5}$ 全局空间自相关

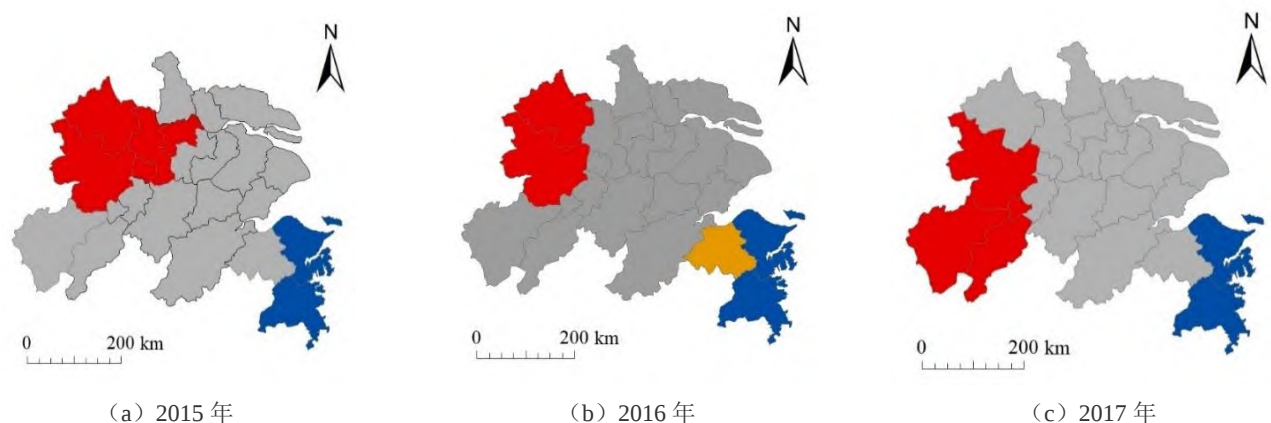
2015—2019 年 $PM_{2.5}$ 年均值的全局莫兰指数依次是 0.49、0.5、0.57、0.71、0.76，均通过 1% 显著性检验（表 1），表明长三角 24 个城市 $PM_{2.5}$ 年均值连续 5 年均呈现显著的空间正相关关系，存在明显高值聚集区和低值聚集区。

表 1 2015—2019 年长三角 $PM_{2.5}$ 年均值的全局莫兰指数及其检验

年份	2015	2016	2017	2018	2019
全局莫兰指数	0.49	0.5	0.57	0.71	0.76
P 值	0.007	0.008	0.001	0.001	0.001
Z 值	2.6252	2.8223	3.4953	5.0913	5.6229

2.3.2 $PM_{2.5}$ 局部空间自相关

如图 5 显示，2015 年，滁州、合肥、南京、镇江、马鞍山属于高值区，宁波、舟山、台州属于低值区；2016 年，高值区面积有所收缩，主要包括滁州和合肥，低值区不变并出现了高低聚集区域—绍兴；2017 年，高值区开始向安徽南部转移，而低值区仍保持宁波、舟山、台州不变；2018 年，高值区转移至江苏中部，低值区向西扩大至绍兴；2019 年，高值区转回至安徽南部，低值区不变。从省际来看，安徽和江苏历来都出现过 $PM_{2.5}$ 高值区， $PM_{2.5}$ 污染更严重，而浙江和上海则从未出现过 $PM_{2.5}$ 高值区，且低值区面积有所扩大，说明浙江和上海的空气质量是优于安徽和江苏的。



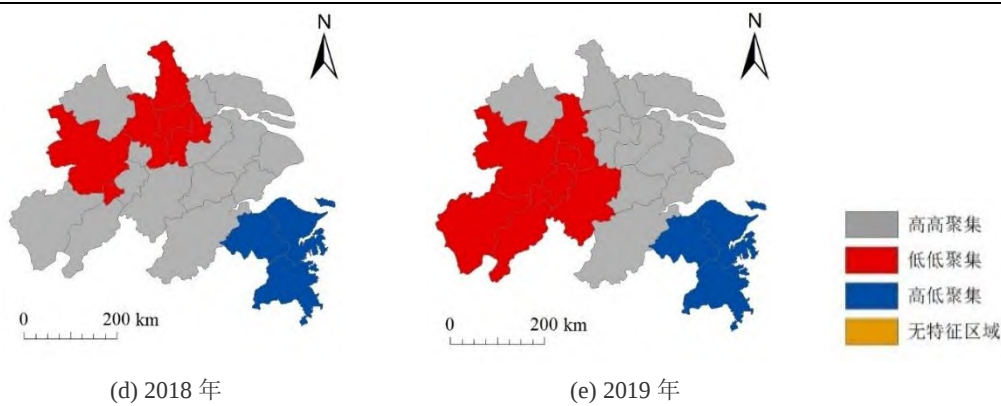


图 5 2015—2019 年长三角 $PM_{2.5}$ 年均值空间集聚性分布

Fig.5 Spatial agglomeration distribution of $PM_{2.5}$ annual mean value in Yangtze River Delta from 2015 to 2019

2.4 $PM_{2.5}$ 驱动因素分析

2.4.1 因子探测分析

在自然因子中,平均气温、平均风速、平均相对湿度的 p-value 均通过 5%显著性检验,降水量的 p-value 没有通过显著性检验。其中,平均气温对 $PM_{2.5}$ 变化影响最大,从空间上看(图 6a), $PM_{2.5}$ 年均值与平均气温具有相反的空间分布趋势,东南地区平均气温较高,同时空气污染也相对较轻;从时间上看,研究期间,长三角夏季空气质量在四个季节中一直稳居第一。事实上,气温的上升有利于大气颗粒物活性增强,便于大气污染物扩散,使得 $PM_{2.5}$ 浓度降低,因此气温较高的区域,对应空气质量一般也较好^[8]。

其次是平均风速,平均风速与 $PM_{2.5}$ 空间分布具有较强的负相关性,东部地区风速较大,对应空气质量也较好,这是因为风速较大时,可以加快污染物的稀释与净化作用,达到降低空气颗粒物浓度的效果。第三是相对湿度,当空气中相对湿度较大时, $PM_{2.5}$ 颗粒物四周会被水分包围,在重力作用下发生沉降从而降低 $PM_{2.5}$ 浓度^[18]。

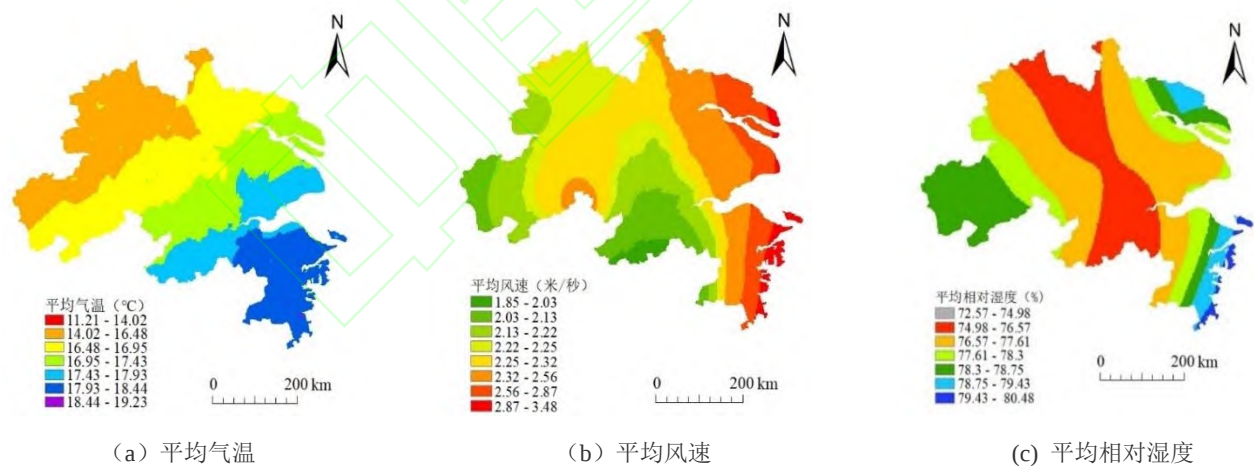


图 6 气象因素空间分布情况

Fig.6 The spatial distribution of meteorological factors

在社会因子中,技术扶持水平、能源消耗和工业化水平的 p-value 均通过 5%显著性检验,人均 GDP 和人口密度的 p-value 没有通过显著性检验。技术扶持水平代表某个地区技术创新水平,技术创新带来的技术进步可以提高能源利用率与污染治理水平,有助于空气质量改善。技术不成熟会导致工业企业粗放式发展,引发资源消耗带来的回弹效应^[5],使得 $PM_{2.5}$ 污染加重。结合实际,以浙江和安徽为例,表 2 是浙江和安徽两省不同部门技术经费投入的统计,显而易见,安徽省技术经费投入是少于浙江省的,而从 $PM_{2.5}$ 空间分布来看,浙江省空气质量是优于安徽省的。

表 2 2018 年浙江省和安徽省工业企业、高等院校、研究机构和其它部门的技术经费支出（单位：亿元）

Table 2 Technology expenditures of industrial Enterprises、higher learning Institutions、research institute and other departments in Zhejiang and Anhui in 2018

省份	工业企业	高等院校	研究机构	其它部门	总和
浙 江	1147.39	72.36	47.41	178.53	1145.69
安 徽	417.66	9.06	60.82	4.04	491.59

数据来源：2018 年《浙江统计年鉴》、《安徽统计年鉴》

长三角工业生产使用的污染型能源主要是原煤，对比不同地区 $PM_{2.5}$ 污染状况与工业生产消耗的原煤量，发现二者空间分布具有相似性。2018 年，上海、浙江、江苏和安徽原煤消耗量分别为 484.97、13629.28、24066.07、17096.13 万吨，原煤消耗量越大的省份， $PM_{2.5}$ 污染就越严重。比较长三角各区域工业化水平与 $PM_{2.5}$ 年均值，发现两者在空间上基本是保持一致的，如表 3 所示，上海、浙江、江苏和安徽第二产业产值与生产总值比重大小表现为安徽>江苏>浙江>上海，而 $PM_{2.5}$ 年均值也呈现相近的分布格局。如 $PM_{2.5}$ 值较高的区域主要集中在安徽和江苏，上海和浙江 $PM_{2.5}$ 污染较轻。 $PM_{2.5}$ 浓度与工业化的关系不仅表现在产业规模上，与产业结构同样具有很大的关系^[1]。粗钢、焦炭、生铁和硫酸等工业产品的生产对环境会造成较高的污染，增加 $PM_{2.5}$ 浓度，而这些高污染产品的生产地也主要聚集于安徽和江苏，是造成安徽和江苏 $PM_{2.5}$ 污染严重的重要原因。

表 3 2018 年上海市、浙江省、江苏省、安徽省高污染产品产量与原煤消费量

Table 3 High-polluting product output and Raw coal consumption of Shanghai, Zhejiang, Jiangsu and Anhui in 2018

省份	原煤消费量（万吨）	第二产业产值/生产总值（%）	焦炭(万吨)	粗钢(万吨)	生铁(万吨)	硫酸(万吨)
上海	484.97	0.29	549.28	1640.25	1490.06	8.62
浙江	13629.28	0.41	208.88	1350.67	835.48	303.9
江苏	24066.07	0.44	1611.02	12017.09	7347.59	318.23
安徽	17096.13	0.46	1167.17	3222.46	2530	625.15

数据来源：2018 年《上海统计年鉴》、《江苏统计年鉴》、《浙江统计年鉴》、《安徽统计年鉴》、《中国统计年鉴》

所有通过显著性检验的影响因子的 q 值范围是 0.22~0.74(图 7)。在 6 个风险因子中，其影响程度大小依次为平均气温（0.74）> 平均风速（0.66）> 平均相对湿度（0.45）> 技术扶持水平（0.44）> 能源消耗（0.33）> 工业化水平（0.22）。显然相对于社会因子，自然因子对长三角 $PM_{2.5}$ 变化影响程度更大。

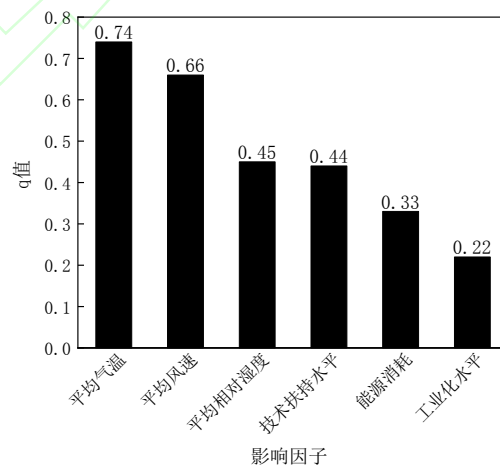


图 7 2018 年长三角 $PM_{2.5}$ 因子探测的 q 值

Fig.7 The q value of $PM_{2.5}$ factor detection of Yangtze River Delta in 2018

2.4.2 交互作用探测分析

交互探测结果（表 4）表明任意两个影响因子交互后比单一因子对 $PM_{2.5}$ 影响的作用大，且作用影响显著增强，如技术扶持水平与其他因子交互后对 $PM_{2.5}$ 变化影响的 q 值均达到 0.7 以上，影响程度显著大于技术扶持水平的单独作用(0.44)，由此解释作用于长三角 $PM_{2.5}$ 空间分布的影响因子并不只是单一因子而是多种因子。不难发现，平均气温和能源消耗交互作用后对 $PM_{2.5}$ 变化影响的 q 值最大为 0.821，说明该两个风险因子的相互作用对 $PM_{2.5}$ 变化的影响是最大的。另外，其它影响较大的交互作用因子有：能源消耗与技术扶持水平(0.808)、能源消耗与平均相对湿度(0.763)、平均气温与平均风速(0.748)。

表 4 2018 年长三角 $PM_{2.5}$ 交互探测

Table 4 $PM_{2.5}$ interactive detection of Yangtze River Delta in 2018

	技术扶持水平	能源消耗	工业化水平	平均相对湿度	平均气温	平均风速
技术扶持水平	0.44					
能源消耗	0.808	0.33				
工业化水平	0.775	0.631	0.215			
平均相对湿度	0.719	0.763	0.687	0.442		
平均气温	0.804	0.821	0.789	0.799	0.735	
平均风速	0.748	0.78	0.722	0.716	0.797	0.663

3 讨论

2015-2019 年长三角 $PM_{2.5}$ 年均值逐年下降，大部分区域 $PM_{2.5}$ 污染得到有效治理与防控，说明有关政策措施的实施起到了重要作用。值得关注的是，从近几年发展趋势看，安徽和江苏空气质量的改善是非常明显的，已由 $PM_{2.5}$ 高污染聚集地转为 $PM_{2.5}$ 低污染区，究其原因，可能与产业升级有关。如表 5 示，研究期间，江苏与安徽两省第三产业产值与总产值比重是逐年上升的，相反，工业总产值与总产值比重是依次下降的。地理探测结果显示较于社会经济因子，自然因子对长三角 $PM_{2.5}$ 变化影响程度更大，与姚荣鹏等研究结论一致^[19]。

表 5 2015—2019 年江苏与安徽省第三产业产值与总产值比重和工业总产值与总产值比重（%）

Table 5 Jiangsu and Anhui Province tertiary industry output value as a percentage of GDP and industrial output value as a percentage of GDP from 2015 to 2019

	年份	第三产业产值/生产总值 (%)	工业总产值/生产总值 (%)
安徽	2015	44.5	35.1
	2016	46.7	33.9
	2017	48.6	32.8
	2018	50.8	31.3
	2019	50.8	30.9
江苏	2015	47.6	40.4
	2016	49.5	39.2
	2017	49.7	39.3
	2018	50.4	38.7
	2019	51.3	38

数据来源：2015—2019 年《江苏统计年鉴》、《安徽统计年鉴》

平均气温、平均风速和相对湿度都是影响 $PM_{2.5}$ 变化的气象因子，均与 $PM_{2.5}$ 呈负相关。这与部分研究结论不相符，如黄俊等^[20]探讨 $PM_{2.5}$ 污染特征与气象因子关系时发现， $PM_{2.5}$ 与风速、气温和降水呈负相关，与相对湿度和气压呈正相关。宋海啸等^[21]研究徐州市区 $PM_{2.5}$ 与气象因子关系时发现， $PM_{2.5}$ 与相对湿度相关性不明显，与温度、风速呈负相关，与气压呈正相关。因此，在研究 $PM_{2.5}$ 与气象因子相关性时，需考虑区域地理位置与时间效应，不能一概而论。实际上，研究区 $PM_{2.5}$ 年均

值与气象要素空间分布并非完全一致,如研究地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的区域对应相对湿度并非是最小的,原因在于影响 $\text{PM}_{2.5}$ 变化的气象因素是同时起作用的,在不同交互作用力下,影响结果也可能会截然不同。根据交互探测结果,相对湿度与平均气温相互作用 q 值达到 0.79,远大于相对湿度单独作用于 $\text{PM}_{2.5}$ 变化的 q 值。

基于 $\text{PM}_{2.5}$ 时空格局变化与影响因子研究,针对长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的防控与治理提出以下建议:(1) 加强区域科技创新水平,淘汰落后产能设备,创新清洁高效低污染生产技术,落实高效技术到工业生产,发展与环保齐头并进;有关政府应着重推进环保型科技人才的培养和实行高质量科研产出奖赏制度,营造“百家齐放”的技术创新局面。(2) 调整优化粗钢、焦炭、生铁等高污染产品的产业结构,加强产业升级,严格控制煤炭等高污染能源消费用量,加快推进新能源利用;建立健全工业企业环境污染承担责任制,加强长三角三省市环境监督和治理制度。(3) 进一步健全区域联防联控、共享共治协作机制,促进区域空气环境可持续发展。

4 结论

(1) 长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值呈逐年下降的趋势, $\text{PM}_{2.5}$ 核密度峰值从 $57\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降至 $42\mu\text{g}/\text{m}^3$,表明长三角 24 个城市空气质量整体好转; $\text{PM}_{2.5}$ 季节变化具有夏天<秋天<春天<冬天的特点,且冬季大气污染改善明显。

(2) 截至 2019 年底,达标城市从舟山扩展至宁波、台州、湖州和绍兴,研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值都达到 $55\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,但根据最低质量标准值,超过四分之三的地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值仍存在不同程度的超标现象, $\text{PM}_{2.5}$ 年均值仍呈现“西北高、东南低”的空间格局。

(3) $\text{PM}_{2.5}$ 具有显著的聚集性特征,存在高值聚集区和低值聚集区,并有明显的动态变化特点。高值区由皖中向皖南转移,面积有所增加。低值区从宁波、舟山、台州向西扩展至绍兴,形成东临舟山、北至宁波、西连绍兴、南达台州的低值聚集区。对比江苏和安徽,浙江和上海空气质量更优。

(4) 因子探测显示较于社会因子,自然因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 变化影响程度更高;平均气温、平均风速和相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈显著负相关;技术扶持水平对 $\text{PM}_{2.5}$ 变化具有负向影响,能源消耗与工业化水平对 $\text{PM}_{2.5}$ 变化具有正向影响;交互探测分析表明任意两个因子交互作用后对 $\text{PM}_{2.5}$ 变化的影响程度均大于单一因子的独自作用,其中平均气温和能源消耗交互作用对 $\text{PM}_{2.5}$ 变化影响最大。

参考文献:

- [1] Sun Yueshan (孙乐山), YE Xiaofang(叶晓芳), YE Rongju(叶荣菊), et al. Analysis of the effect of $\text{PM}_{2.5}$ on inflammatory of factors of hospital patients with cardiovascular diseases[J]($\text{PM}_{2.5}$ 对心血管疾病住院患者炎症因子的影响分析[J]). Geriatr Health Care(老年医学与保健), 2020, 26(4):591-593.
- [2] CHEN Youliang(陈优良), LI Yaqian (李亚倩). Analysis of air quality and its influential factors on both sides of Huhuanyong Dividing Line[J](胡焕庸线两侧空气质量状况及影响因素分析[J]). Journal of Safety and Environment(安全与环境学报), 2020, 20(6): 2424-2432.
- [3] CUI Yongxue(崔永学), ZHANG Yang(张杨), WANG Liheng(王丽珩), et al. Burden of Disease Caused by Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ Pollution in Jinan, China, in 2013 and 2017[J](2013 年和 2017 年济南市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的疾病负担研究[J]). Journal of Environmental Hygiene(环境卫生学杂志), 2020, 10(6):559-568.
- [4] WANG Zhenbo(王振波), FANG Chuanglin(方创琳), XU Guang(许光), et al. Spatial-temporal characteristics of the $\text{PM}_{2.5}$ in China in 2014[J](2014 年中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空变化规律[J]). Acta Geographica Sinica(地理学报), 2015, 70(11):1720-1734.
- [5] WANG Zhenbo(王振波), Liang Longwu(梁龙武), Wang Xujing(王旭静). Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of $\text{PM}_{2.5}$ in Chinese urban agglomerations [J](中国城市群地区 $\text{PM}_{2.5}$ 时空演变格局及其影响因素[J]). Acta Geographica Sinica(地理学报), 2019, 74(12):2614-2630.
- [6] MAO Wanliu(毛婉柳), XU Jianhua(徐建华), LU Debin (卢德彬), et al. An analysis of the Spatial-temporal pattern and influencing factors of $\text{PM}_{2.5}$ in Yangtze River Delta in 2015[J](2015 年长三角地区城市 $\text{PM}_{2.5}$ 时空格局及影响因素分析[J]). Resources and Environment in the Yangtze Basin (长江流域资源与环境), 2017, 26(2):264-272.

- [7] Mi Kena(宓科娜), Zhuang Rulong(庄汝龙), Liang Longwu(梁龙武), et al. Spatio-temporal evolution and characteristics of PM_{2.5} in the Yangtze River Delta based on real-time monitoring data during 2013-2016 [J](长三角 PM_{2.5} 时空格局演变与特点---基于 2013-2016 年实时监测数据[J]). Geographical Research(地理研究), 2018, 37(8):1641-1654.
- [8] BAI Ling(柏玲), JIANG Lei(姜磊), CHEN Zhongsheng(陈忠升). Spatio-Temporal Characteristics of PM_{2.5} and Its Influencing Factors of the Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River[J](长江中游城市群 PM_{2.5} 时空特征及影响因素研究[J]). Resources and Environment in the Yangtze Basin (长江流域资源与环境), 2018, 27(5):960-968.
- [9] SUN Dandan(孙丹丹), YANG Shuyun(杨书运), WANG Tijian(王体健), et al. Characteristics of O₃ and PM_{2.5} and its impact factors in Yangtze River Delta. Journal of the Meteorological Sciences[J](长三角地区城市 O₃ 和 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析[J]). Journal of the Meteorological Sciences(气象科学), 2019, 39(2):164-177.
- [10] YANG Mian(杨冕), WANG Yin(王银). Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt[J](长江经济带 PM_{2.5} 时空特征及影响因素研究[J]). China population, resources and environment(中国人口·资源与环境), 2017, 27(1):91-100.
- [11] WANG Zhao(王昭), YAN Xiaobing(严小兵). Temporal-Spatial Evolution of PM_{2.5} and Driving Factors in Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J](长江三角洲城市群 PM_{2.5} 时空演变及影响因素[J]). Resources and Environment in the Yangtze Basin (长江流域资源与环境), 2020, 29(7):1497-1506.
- [12] HUANG Xiaogang (黄小刚), ZHAO Jingbo (赵景波), CAO Junji (曹军骥), et al. Evolution of the Distribution of PM_{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors[J](长江经济带 PM_{2.5} 分布格局演变及其影响因素[J]). Environmental Science(环境科学), 2020, 41(3):1013-1024.
- [13] GUO Chunying(郭春颖), SHI Runhe(施润和), ZHOU Yunyun(周云云), et al. Analysis on risk factors of air pollution over the using remote sensing and geographical detector[J](基于遥感与地理探测器的长江三角洲空气污染风险因子分析[J]). Resources and Environment in the Yangtze Basin(长江流域资源与环境), 2017, 26(11):1805-1814.
- [14] GB3095-2012, Ambient air quality standards[S](环境空气质量标准[S]). (Beijing)北京: (China Environmental Science Press) 中国环境科学出版社, 2012.
- [15] WANG Jinfeng(王劲峰), XUN Chengdong(徐成东). Geodetector: Principle and prospective[J](地理探测器:原理与展望[J]). Acta Geographica Sinica(地理学报), 2017, 72(1):116-134.
- [16] ZHOU Shuling(周淑玲). Comparison of spatial interpolation methods for PM_{2.5} concentration distribution in Fuzhou City [J](福州市 PM_{2.5} 浓度分布的空间插值方法比较[J]). Environment And Development(环境与发展). 2018, 30(6):177-179.
- [17] ZHANG Xinwen(张馨文). Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of PM_{2.5} in Henan Province from 2014 to 2018 Based on Spatial Interpolation Algorithm [J](基于空间插值算法的 2014—2018 年河南省 PM_{2.5} 时空分布及演变特征研究[J]). Journal of Henan Science and Technology(河南科技). 2019, (8):151-155.
- [18] XU Jie(徐杰), KUANG Hanwei(匡汉伟), WANG Guoqiang(王国强), et al. Analysis of the relationship between PM_{2.5} and air relative humidity[J](PM_{2.5} 与空气相对湿度间关系浅析[J]). Agriculture and Technology(农业与技术), 2017, 37(9): 148-149.
- [19] YAO Rongpeng(姚荣鹏), ZHANG Bo(张勃), WANG Libin(王立兵), et al. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and driving factors over central and eastern China between 2015 and 2019[J](2015-2019 年中东部地区 PM_{2.5} 时空演变及其驱动力[J]). Chinese Journal of Ecology(生态学杂志), 2020, 10.13292/j.1000-4890.202103.004.
- [20] HUANG Jun(黄俊), WANG Chaoqun(王超群), ZHOU Baoqin(周宝琴), et al. Characteristics of PM_{2.5} pollution and its relationship with meteorological factors in Guangzhou[J](广州 PM_{2.5} 污染特征及与气象因子的关系分析[J]). Environmental Pollution & Control(环境污染与防治), 2020, 42(2):176-186.
- [21] SONG Haixiao (宋海啸), YU Shouchao(于守超), ZHAI Fu-shun(翟付顺), et al. Study on the Correlation Between PM_{2.5} Concentration and Meteorological Factors in Xuzhou City[J](徐州市区 PM_{2.5} 浓度与气象因素的相关性研究[J]). Journal of Changchun Normal University(长春师范大学学报), 2020,39(4): 112-116+142.

Temporal-spatial characteristics of PM_{2.5} and impact factors analysis in Yangtze River Delta from 2015 to 2019

CHEN You-liang, ZOU Wen-min

(School of Architecture and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,

Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Based on the hourly PM_{2.5} data, this paper studied the PM_{2.5} temporal-spatial characteristics in 24 cities of Yangtze River Delta from 2015 to 2019, revealing the influence of natural factors and socio-economic factors on PM_{2.5} changes by geographic detector. The results show that: (1) During the study period, the peak value of PM_{2.5} annual average nuclear density curve shifted to the left, indicating that improvement in air quality in 24 cities of Yangtze River Delta. The seasonal nuclear density curve shows that PM_{2.5} change in Yangtze River Delta has the characteristic of summer < autumn < spring < winter. Significant improvement in air pollution of winter. (2) As of the end of 2019, the PM_{2.5} annual mean value of all cities have reached below 55 µg/m³, but more than four-fifths of the cities' PM_{2.5} annual mean value still have exceeded limiting value. PM_{2.5} mean value still has a spatial pattern of higher in the northwest and lower in the southeast. (3) The high-value area of PM_{2.5} shifted from central Anhui to southern Anhui. The low-value area expanded westward to Shaoxing, forming the low-value area with Zhoushan in the east, Ningbo in the north, Shaoxing in the west, and Taizhou in the south. Compared with Jiangsu and Anhui, Zhejiang and Shanghai have better air quality. (4) Natural factors have a higher degree of influence on PM_{2.5} change than socio-economic factors. Average temperature, average wind speed and relative humidity are negatively correlated with PM_{2.5}. The level of technical support has a negative impact on PM_{2.5} changes. Energy consumption and industrialization level have a positive impact on PM_{2.5} change. The interaction of any two factors has greater impact on PM_{2.5} changes than a single factor alone. The interactive effects of natural factors and socio-economic factors play a key role in the PM_{2.5} change in Yangtze River Delta.

Key words: environmentalology ; PM_{2.5}; temporal-spatial change; impact factors; geographical detector

CLC number: X511 **Document code:** A