

刘逢璐, 廖建军. 长江中游城市群空气质量时空特征及影响因素[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(10): 172-186. Liu Fenglu, Liao Jianjun. Spatial-temporal distribution characteristics and influencing factors of air quality in urban cluster along middle reach of Yangtze River[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(10): 172-186.

长江中游城市群空气质量时空特征及影响因素

刘逢璐¹, 廖建军^{2*}

(1. 南华大学建筑学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 南华大学设计艺术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:明确空气质量的时空分布特征及其背后驱动因素,对有效预防、控制及治理大气污染有重要理论价值。文章基于2015年1月-2019年12月长江中游31个城市空气环境数据(AQI和6项常规监测污染物浓度),运用统计分析法、克里金空间插值法分析城市空气质量时空分布特征;采用空间自相关方法检验污染物空间依赖性和异质性,并借助空间回归模型和地理探测器识别影响空气质量的因素及其影响力。结果表明:(1)2015-2019年长江中游城市群AQI整体下降,除O₃浓度呈增长趋势外,其他5种污染物浓度均表现出下降趋势;季节上AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和SO₂浓度呈现“冬高夏低”的特点,O₃与之相反;近5年导致空气污染的首要污染物为PM_{2.5}、PM₁₀和O₃;AQI及PM_{2.5}、PM₁₀浓度空间分布呈“西北高,东南低,中间过渡”格局,而O₃浓度呈“北高南低”特征,CO浓度为“西高东低”,SO₂和NO₂则集中分布在局部地区。(2)AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、O₃具有空间依赖和溢出效应,CO、SO₂空间上有集聚趋势,NO₂无明显空间相关性;(3)AQI与PM_{2.5}、PM₁₀、O₃污染物浓度具有显著正相关,不同污染物之间也表现出一定的关联性;(4)二三产业比值、工业废气排放量、民用汽车拥有量是影响AQI及6项污染物浓度的共同因素,而气温、风速、降雨量、相对湿度、城镇化率、地区GDP、建成区面积、绿化覆盖率以及路网密度指标对不同污染物影响存在差异;自然因素中气温、降雨量,社会经济中工业废气排放量、二三产业比值、民用汽车拥有量对空气质量影响力较高,而绿化覆盖率、路网密度等城市空间建设方面因素作用力相对较弱。

关键词:空气质量; 时空特征; 空间自相关; 影响因素; 空间回归模型; 地理探测器

中图分类号:X51 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.1016.21.338 **文章编号:**1003-6504(2021)10-0172-15

Spatial-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of Air Quality in Urban Cluster Along Middle Reach of Yangtze River

LIU Fenglu¹, LIAO Jianjun^{2*}

(1. School of Architecture, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. School of Design Art, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: To clarify the temporal and spatial distribution characteristics of air quality and the driving factors is of theoretical values for the effective prevention, control and treatment of air pollution. This research is based on the air environment monitoring data (incl. AQI and six pollutants concentrations routinely monitored) during the period from January 2015 to December 2019, covering 31 cities in the middle reach of the Yangtze River. Statistical analysis and Kriging spatial interpolation are used to analyze the spatial and temporal distribution characteristics of urban air quality; the spatial auto-correlation method is adopted to examine the spatial dependence and heterogeneity of pollutants, and spatial regression models and geographic detectors are used to identify factors affecting air quality and their influence. The research presents AQI of the urban cluster in the middle reaches of the Yangtze River decreases overall from 2015 to 2019, except for the increasing trend of O₃ concentration, the concentrations of the other five pollutants all show a downward trend; seasonal concentrations of AQI, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ and SO₂ present the fact that the characteristics of higher in winter and lower in summer, but O₃ is opposite to that. PM_{2.5}, PM₁₀ and O₃ are the primary pollutants that have caused air pollution in the past five years; the spatial distribution of AQI, PM_{2.5} and PM₁₀ is higher in the northwest and lower in the southeast, while O₃ is higher in the north and lower in the south, CO is higher

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2021-05-10; 修回 2021-08-20

基金项目: 湖南省社会科学基金项目(17YBA344); 湖南创新型省份建设专项创新平台: 湖南省健康城市营造工程技术研究中心(2019TP2072); 衡阳市社会科学基金重大项目(2018A003)

作者简介: 刘逢璐(1994-), 女, 硕士, 主要研究方向为城市生态规划, (电子信箱) 506661312@qq.com; *通讯作者, 女, 教授, 主要研究方向为城市生态规划, (电子信箱) 596002610@qq.com。

in the west and lower in the east, and SO_2 , NO_2 are concentrated in local areas. AQI, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and O_3 are spatially depended and of spillover effects, CO and SO_2 show a spatial accumulation trend, while NO_2 has no obvious spatial correlation. There is a significant positive correlation between AQI and the concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and O_3 , and as well a certain correlation exists among the different pollutants. The ratio of secondary and tertiary industries, industrial waste gas emissions, and the number of civilian cars are common factors that affect the AQI and the concentrations of the six pollutants, while there exist discrepancies in the impacts imposed on different pollutants by climate parameters temperature, wind speed, rainfall and relative humidity, in addition, by the urbanization rate, regional GDP, built-up district area, green coverage, and road network density; the natural factors i.e. temperature and rainfall, and the socio-economical factors such as industrial waste gas emissions, the ratio of secondary and tertiary industries, and civilian cars, etc. exert higher influence on the air quality, while the influences of the green coverage, road network density in urban space construction are relatively weak.

Key words: air quality; temporal and spatial characteristics; spatial auto-correlation; influencing factors; spatial regression model; geographic detectors

近几十年来高消耗、高污染、低效率、粗犷型的增长方式带来了一系列生态环境问题,其中大气污染尤为突出。据统计,2013年1月,北京雾霾天数高达26 d^[1];2016年冬季南北方将近188万 km²的国土同时遭遇雾霾侵袭^[2];2019年发布的《中国生态环境状况公报》显示我国全年污染天数比例占28%,超过50%地级以上城市尚未满足国家规定的空气质量标准^[3]。大气污染不仅阻碍城市社会经济发展,还会对人体呼吸道和心血管等方面造成危害,进而影响人体健康。因此明确大气污染的时空变化规律及其相关驱动因素,对有效防治空气污染、提升空气质量、促进城市可持续发展具有重要意义。

目前国内外学者从不同尺度和角度对空气污染时空变化特征及其驱动因素进行了研究,其中在全国层面上,张向敏等^[4]分析了中国九大区域343个城市AQI时空分布特征;刘华军等^[5]探究了中国161个城市6种常规监测污染物的空间分布格局及其动态演进过程;邹金慧等^[6]以全国15个重点旅游城市为对象,探讨其 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布规律;区域层面上,徐冰焯等^[7]分析了浙江省近10年空气中 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 变化趋势;何振芳等^[8]探讨了河北省空气质量AQI的时空变化特征;丁镭^[9]、吕桅桅^[10]等先后研究了湖北省空气质量的演化格局与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征;樊建勇等^[11]探讨了江西省 $\text{PM}_{2.5}$ 污染时空变化特征;此外,杨兴川^[12]、刘海猛^[13]、程钰^[14]、郭鑫^[15]等以京津冀城市群为研究对象,对其大气污染的时空特征与影响因素进行了探究;湛社霞^[16]以粤港澳大湾区为对象探讨了常规污染物变化趋势;另外还有研究分别对长江经济带^[17-20]、长江三角洲城市群^[21-23]、长江中游城市群^[24,25]、汾渭平原^[26]、成渝地区^[27]的空气质量时空分布特征进行探讨;城市层面上,研究集中在北京^[28]、重庆^[29]、西安^[30]、厦门^[31]等重要城市的主要大气污染物的变化规律。空气污染影响驱动因素的探讨主要包

括自然条件、社会经济以及城市空间建设水平方面,其中自然条件因素主要包括气温、气压、日照时数、降水量、空气湿度、风速、地形等方面^[8,10-12,21,26,31];社会经济方面包括人口密度、城市化水平、公交发展、产业结构、能源消耗以及工业废气排放、机动车尾气排放等^[32-39];城市空间建设方面包括城市用地扩张、用地类型与结构等^[40,41]。

综上所述,国内学者在空气污染时空变化特征、影响因素分析等方面均取得丰硕的成果。但从研究内容上看,多数集中在空气质量指数(AQI)或某单一污染物的时空变化及驱动因素,忽视了不同污染物之间的关联性以及不同污染物影响因素的差异性;研究方法上多采用相关系数或经典线性回归(OLS)分析潜在影响因素,较少考虑污染物地理空间上的依赖性对分析结果带来的偏差;另外研究对象也多关注重点城市以及以京津冀、长江经济带、长三角城市群等为主的典型区域,专门针对长江中游城市群空气质量的研究较少。基于此,本文以长江中游城市群31个城市为研究对象,运用统计分析法、克里金插值法探究空气质量AQI及6项主要污染物的时空分布特征,采用空间自相关检验AQI以及不同污染物在空间上是否存在依赖性和异质性,最后从自然条件、社会经济、城市空间建设3个方面选取评价指标,采用回归空间回归模型与OLS对照分析,得出影响空气质量的因素,并借助地理探测器识别不同污染物影响因子的贡献力,从而为进一步有效预防、控制及治理区域大气污染提供科学依据。

1 研究区域概况

长江中游城市群,位于长江经济带中部,承东启西、连接南北,是长江经济带重要组成部分,也是国家级城市群之一,由武汉都市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群组成,涵盖湖北、湖南、江西3省28个地级

市和3个省辖县级市,土地面积约为31.7万 km²。2017年区域人口达到1.25亿,占全国总人口的9%,地区GDP为7.9万亿元,占全国GDP总量的9.6%,在我国区域经济发展中占据重要地位。长江中游城市群也是我国生态环境较为敏感的地区,目前区域处于快速发展阶段,并且承接了部分发达地区高能耗高污染等产业的转移,导致区域发展面临着环境保护和绿色可持续发展双重压力。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

文中所用数据涉及空气质量、自然条件、社会经济发展以及城市空间建设4类(表1),其中空气质量评价指标包含2015–2019年空气质量综合指数(AQI)以及PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、SO₂、NO₂、CO等6项常规监测的

大气污染物浓度,数据从城市空气质量实时发布平台网站(<http://106.37.208.233:20035/>)以及各省生态环境厅发布的生态环境公报获取,并通过Excel换算成相应的月均值、季均值、年均值。自然条件指标选取2019年的年均气温、相对湿度、降雨量以及风速,数据来源于中国气象数据网站(<http://data.cma.cn>)。社会经济发展方面包含以下指标:人口密度,用来反映城市人口聚集程度;城镇化率,表征社会综合发展水平;城市GDP,衡量经济发展水平;二三产业比值,反映城市经济结构;实际利用外资占GDP比重,代表城市经济开放程度;公交车辆数,衡量城市公共交通发展水平;工业废气排放量、民用汽车拥有量,分别表示工业以及汽车交通带来的污染。城市空间建设水平指标包括建成区面积、绿化覆盖率、路网密度,以上数据均来自2020年各省及各城市统计年鉴。

表1 数据类型、指标选取与数据来源一览表
Table 1 List of data types, indicators selected and data sources

数据分类	选取指标(单位)	数据来源
空气质量	AQI(无量纲)、PM _{2.5} 、PM ₁₀ 、O ₃ 、SO ₂ 、NO ₂ 、CO浓度 (除CO浓度单位为mg·m ⁻³ ,其他均为μg·m ⁻³)	全国城市空气质量实时发布平台 各省生态环境质量公报
自然条件	气温(℃)、相对湿度(%)、降雨量(mm)、风速(m·s ⁻¹)	中国气象数据网
社会经济发展	人口密度(人·km ⁻²)、城镇化率(%)、城市GDP(亿元)、实际利用外资占GDP比重、二三产业产值比、工业废气排放量(t)、民用汽车拥有量、公交车辆数	《中国城市建设统计年鉴》、《湖北省统计年鉴》、《湖南省统计年鉴》、《江西省城市统计年鉴》及各城市统计年鉴
城市空间建设	建成区面积(km ²)、绿化覆盖率(%)、路网密度(km·km ⁻²)	

2.2 研究思路与方法

本文研究思路与方法如图1所示。

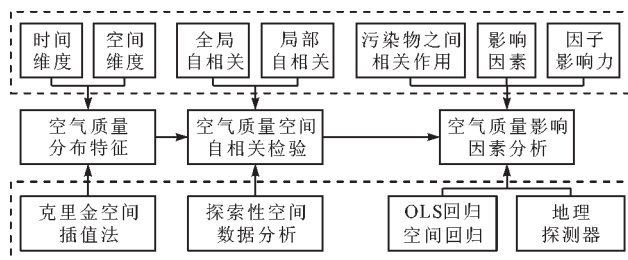


图1 研究思路与框架
Fig.1 Research Framework

2.2.1 克里金空间插值法

空间插值法是一种将不连续的样本点数据转换为连续变化的面数据的方法,也是可视化研究某一现象属性在整个区域空间分布特征的重要方法。其中反距离权重法(IDW)、规则样条函数法(CRS)、克里金法(Kriging)是3种较为常用的方法^[42]。通过对比验证,克里金法的插值精度整体最优,插值结果可靠性最高。因此本文选用克里金插值法来表征AQI以及6项常规污染物浓度空间分布特点。该方法计算公式如下:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (1)$$

式(1)中, n 为已知样本点的数量; $Z(X_i)$ 为已知第

i 个样本点AQI或者不同污染物浓度的观测值; λ_i 为观测值对应的权重, $Z(X_0)$ 为插值点 X_0 上的估算值。

2.2.2 空间相关性检验

2.2.2.1 全局自相关

由于大气的扩散作用,距离较近的城市之间大气污染物通常会相互影响。本文借助全局莫兰指数(Moran's I)来检验AQI以及6项污染物全局空间自相关性,具体公式如下:

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

式(2)中, n 为研究城市样本的数量; x_i 、 x_j 为城市 i 、 j 在选取某空气污染物变量时对应的观测值; W_{ij} 为空间权重矩阵。 I 的取值范围为 $[-1, 1]$,当 $I > 0$ 时,表示该项变量观测值呈正相关,即该变量在研究区域空间上趋于集聚分布; $I < 0$ 时,则为负相关,即该变量在空间上呈现离散分布; $I = 0$ 表示不相关,表现在空间上独立随机分布。 I 绝对值越大,表示空间集聚或离散性越强^[4, 18]。同时采用统计的 Z 得分对全局莫兰指数进行显著性评估^[4],计算公式如下:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (3)$$

式(3)中, $E(I)$ 、 $\text{Var}(I)$ 分别代表全局Moran's I 的

期望值和方差。

2.2.2.2 局部自相关

运用局部空间自相关可以反映局部某一城市与周边地区城市空气质量的异质性与不稳定性。局部Moran's I 计算公式如下:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式(4)中,字母含义同公式2,局部Moran's I 的显著性检验同上。在通过检验的前提下,局部Moran's $I > 0$,代表研究区域内部存在高-高集聚或低-低集聚区;局部Moran's $I < 0$,表示研究区域内部存在高-低集聚或低-高集聚区。

2.2.3 空间回归模型

目前常用的空间回归模型主要有空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)。SLM通过研究因变量之间的相关性,探讨因变量的空间溢出效应或邻居扩散效应;SEM模型能够度量邻接地区因变量的误差冲击对本地区观察值的影响程度,2种模型计算公式分别如式(5)和式(6)所示:

$$y = X\beta + \rho W_y + \varepsilon \quad (5)$$

$$y = X\beta + \varepsilon, \varepsilon = \lambda W_\varepsilon + \mu \quad (6)$$

式(5)、(6)中, y 为因变量; β 为自变量 X 相关系数; ρ 表示空间滞后因变量 W_y 系数; W 为因变量空间权重矩阵; ε 为随机误差项; λ 表示空间误差相关系数; W_ε 为误差项的空间矩阵; μ 为正态效应的随机误差标量。

2.2.4 地理探测器

地理探测器是由因子探测、交互探测、风险探测和生态探测4个模块构成的用于识别某一地理现象空间分异性及其背后驱动因素的统计工具^[43]。本文借助因子探测部分来分析不同影响因素对空气质量影响力的大小,使用前需要先将数值型变量转换成类型

变量,本文采用分位数法将各因素进行分层,依次导入地理探测器进行分析,分别得出各影响因素对AQI或不同污染物的影响力,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^H N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (7)$$

式(7)中, q 表示某项探索性因子对变量AQI或不同污染物浓度的影响力; $h=1, 2, \dots, H$, H 表示探索性因子的分层数; N 为样本城市的总个数; N_h 代表某项探索因子在 h 层所具有的城市样本个数; σ^2 为研究区域AQI或不同污染物浓度的方差; σ_h^2 为 h 层的AQI或不同污染物浓度方差。 q 值范围为 $[0, 1]$,并且 q 值越大代表该项因子对AQI或不同污染物浓度影响力越大。

3 结果与分析

3.1 空气质量时空变化

3.1.1 基于时间维度的空气质量变化特征

3.1.1.1 年际变化特征

图2显示,近5年长江中游城市群AQI年均值在73~84,整体变化幅度平稳;6项常规监测污染物中,只有 O_3 年均浓度呈上升趋势,由 $85.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升至 $98.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$;其他5种污染物整体表现出下降趋势,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 年均浓度呈现先降后升整体下降的特征; NO_2 年均浓度则表现出先升后降的特征; SO_2 和 CO 年均浓度呈连年下降趋势。5年来长江中游城市群空气优良率由76.33%增长至80.2%,轻度污染率由17.27%下降至16.36%,中度污染占比由4.13%减至2.32%,重度及以上污染率由2.26%下降到1.12%。空气中排名前3位的首要污染物依次为 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 ,其中以 $\text{PM}_{2.5}$ 作为首要污染物出现的污染天数占比为32.94%~54.4%,伴有连年不断下降的趋势; PM_{10} 为首要污染物出现的污染天数占比在16.22%~23.16%,呈现先降后升的特征; O_3 作为首要污染物出现的污染天数占比20.54%~45.87%,且有不断上升趋势。



图2 2015-2019年长江中游城市群空气质量年际变化

Fig.2 Annual variation of air quality in the middle reaches of the Yangtze River from 2015 to 2019

3.1.1.2 季节变化特征

图3显示,2015–2019年长江中游城市群AQI季节均值在73~101波动,冬季出现峰值,春季有所降低,夏季最低,秋季又开始缓慢上升;6项污染物浓度中PM_{2.5}季节均值为28.6~73.8 μg/m³,PM₁₀季节均值为50.1~105.5 μg/m³,SO₂为13.1~20.0 μg/m³,NO₂季节均值为16.9~36.4 μg/m³,O₃季节均值为57.1~108.6 μg/m³,CO季节均值为0.89~1.26 mg/m³,其中PM_{2.5}、CO、NO₂、PM₁₀和SO₂季节均值均呈现冬季最高、夏季最低

的特点,但污染物PM_{2.5}、CO、NO₂浓度秋季大于春季,而PM₁₀和SO₂浓度表现出春季大于秋季的特征,污染物O₃季节均值与上述5种污染物相反,呈现夏季>春季>秋季>冬季的特点。不同季节空气污染程度存在差异,其中夏季受污染程度最低,平均优良率达到91.19%;其次为春季,空气优良率为87.53%;再次为秋季,空气优良率81.48%;冬季污染程度最高,空气优良率为58.01%,轻度污染率28.37%,中度污染率8.52%,重度及以上污染率达到5.1%。

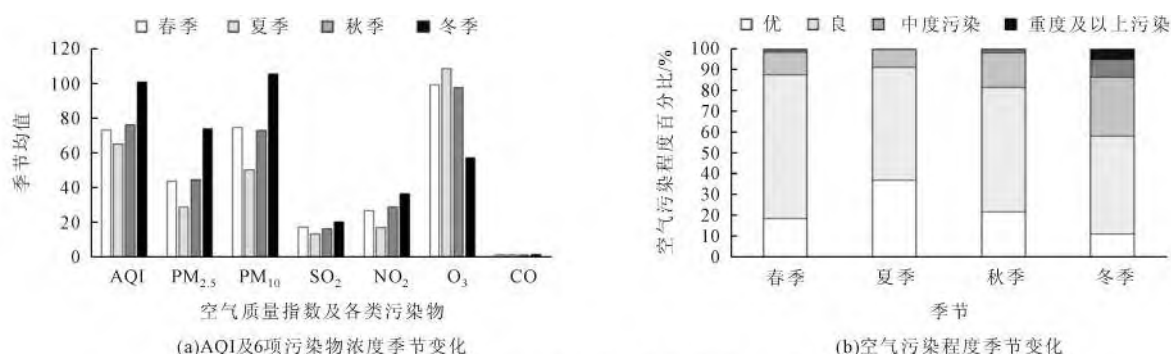


图3 2015–2019年长江中游城市群AQI及6项污染物浓度与空气污染程度季节变化

Fig.3 Seasonal variations of AQI and 6 pollutants and pollution degree in the middle reaches of the Yangtze River from 2015 to 2019

3.1.1.3 月变化特征

图4~6显示,2015–2019年长江中游城市群AQI月变化大体呈“U”形,每年1月份和12月份出现峰值,7、8月最低;空气污染程度月变化也在不断波动,优良率高的月份多集中在3、4、7、8月,污染率较高的多集中在1、2、12月。6项空气污染物浓度各月变化也存在差异,其中PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、CO浓度变化规律也都呈“U”形分布,6–8月份浓度最低,11月到次年2月浓度最高;而O₃月浓度变化规律与上述4种污染物相反,表现为高浓度值集中在5–9月,低浓度值集中在12、1、2、11月,呈倒“U”形分布的特点;SO₂月浓度无明显变化规律,整体在7、8月浓度较低,但有时候某些月份会出现波动性变化;6种污染物中,PM_{2.5}、PM₁₀作为首要污染物的污染天数多出现在每年1–4月,

10–12月,而O₃作为首要污染物的污染天数集中在5–9月,且伴随O₃浓度的不断上升,以O₃作为首要污染物的污染天数也在不断增加。

3.1.2 基于空间维度的空气质量分布特征

3.1.2.1 AQI及6项污染物空间分布特征

利用ArcGIS进行普通克里金插值分析,得到2015、2017、2019年长江中游城市群AQI及2015–2019年6项不同污染物年均值空间分布(图7)。AQI及PM_{2.5}、PM₁₀浓度分布整体呈现出“西北高,东南低,中间过渡”的格局,浓度较高的地区在湖北襄阳、宜昌和荆门部分地区,浓度较低地区分布在景德镇、上饶以及鹰潭,而中部武汉、孝感、黄冈以及长沙、株洲、湘潭片区AQI以及PM_{2.5}、PM₁₀浓度相比附近周边地区略高;SO₂浓度较高地区集中在江西萍乡、新余、鹰潭以

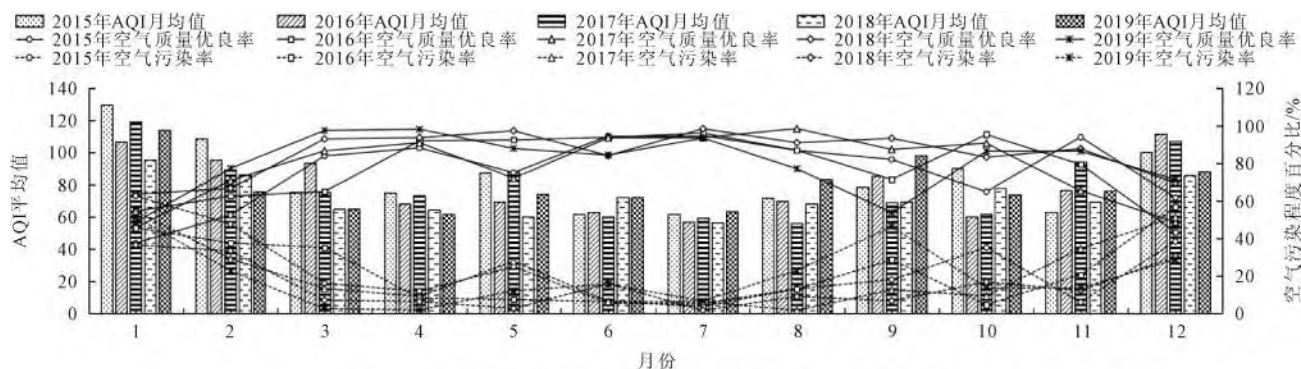


图4 2015–2019年长江中游城市群AQI及空气污染程度月变化

Fig.4 Monthly changes of AQI and pollution degree in the middle reaches of the Yangtze River from 2015 to 2019

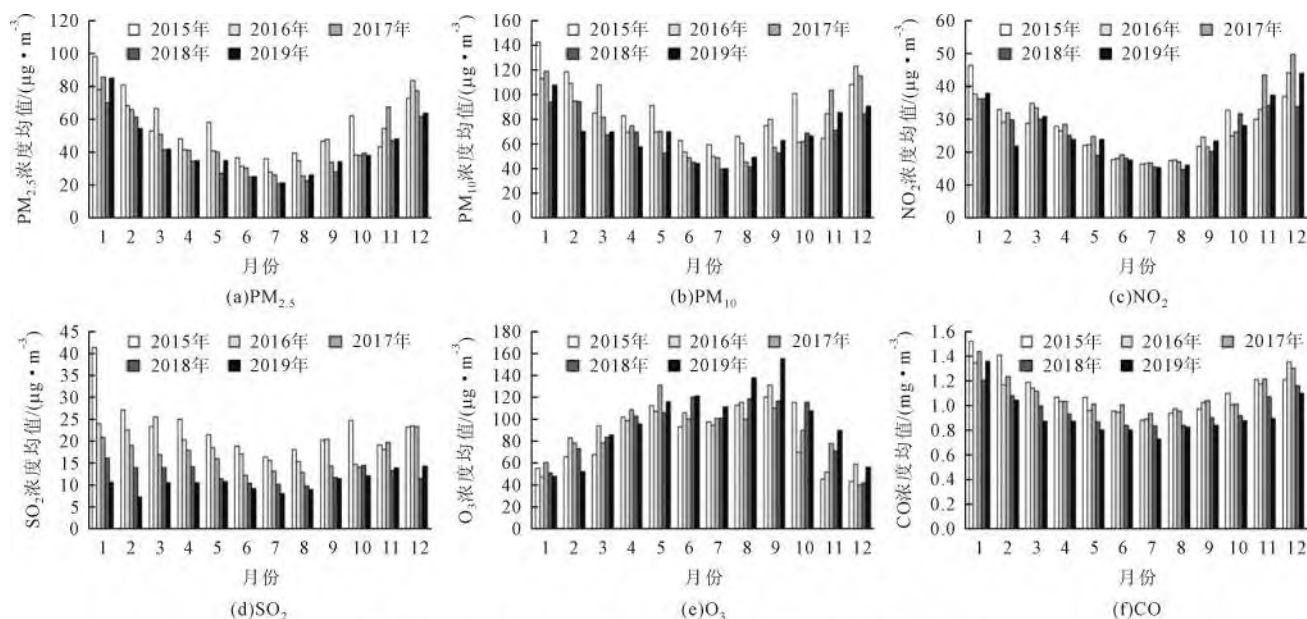


图5 2015-2019年长江中游城市群6项空气污染物浓度月变化
Fig.5 Monthly changes of 6 pollutants concentration in the middle reaches of the Yangtze River from 2015 to 2019

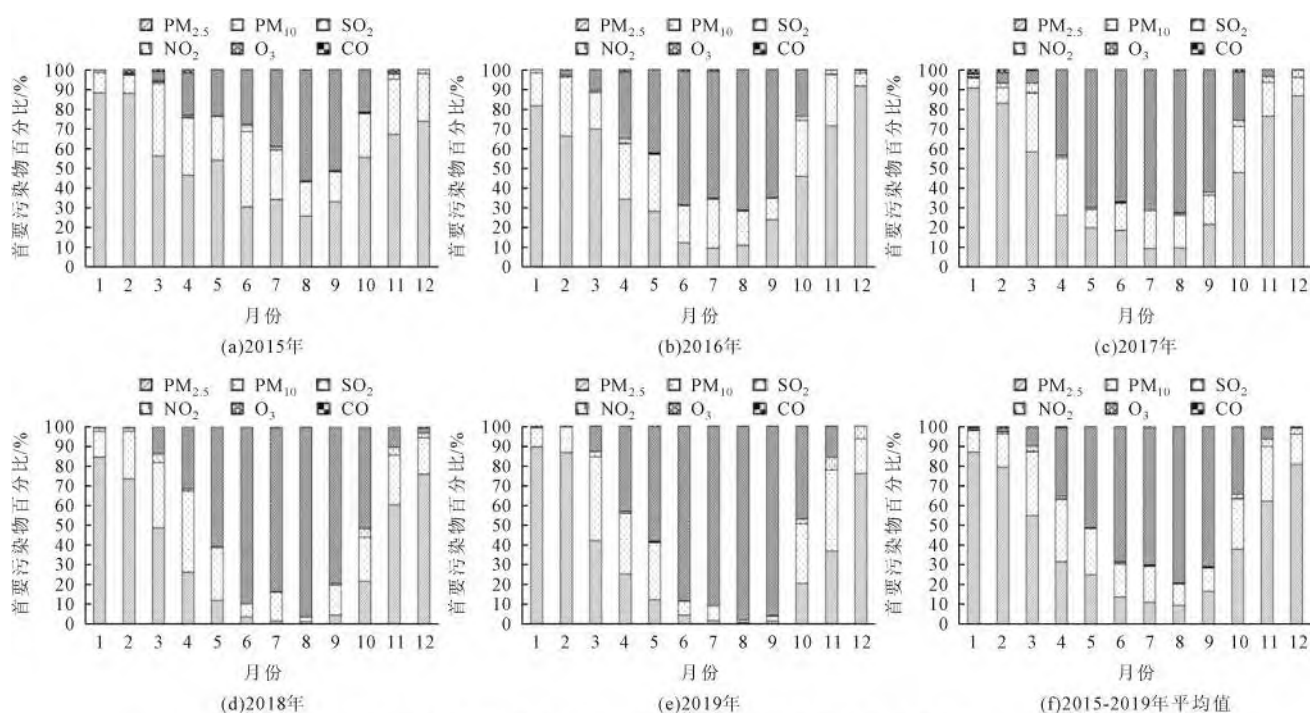


图6 2015-2019年长江中游城市群首要污染物构成月变化
Fig.6 Monthly proportion of primary pollutants in the middle reaches of the Yangtze River from 2015 to 2019

及上饶部分地区,而武汉、咸宁、长沙等中部片区 SO_2 浓度较低; NO_2 主要集中分布在武汉及周边城市、长株潭城市群以及南昌等经济较为发达的地区; O_3 浓度分布呈现“北高南低”的特征,高浓度地区主要在湖北的荆州、荆门、咸宁、湖南的岳阳、常德、益阳以及江西的九江,低浓度地区分布在株洲、萍乡以及新余和吉安部分地区。 CO 浓度在区域西部城市较高,特别在湖北孝感、鄂州、黄石以及湖南娄底尤为明显,而东部江西景德镇、鹰潭和上饶等地浓度较低。

3.1.2.2 长江中游城市群不同城市首要污染物频次结构

2015-2019年长江中游城市群首要污染物出现频次排名前3的污染物分别为 $\text{PM}_{2.5}$ (42.61%)、 O_3 (35.41%)、 PM_{10} (20.06%),而 NO_2 、 CO 、 SO_2 出现频次占比依次为 1.39%、0.31%、0.22%。不同城市首要污染物比例结构存在差异(图8)。近5年来, $\text{PM}_{2.5}$ 出现频率最高的区域分布在湖北武汉、荆州、孝感、荆门、鄂州、黄石、襄阳、宜昌、湖南岳阳、株洲、常德、湘潭、长沙、衡阳、娄

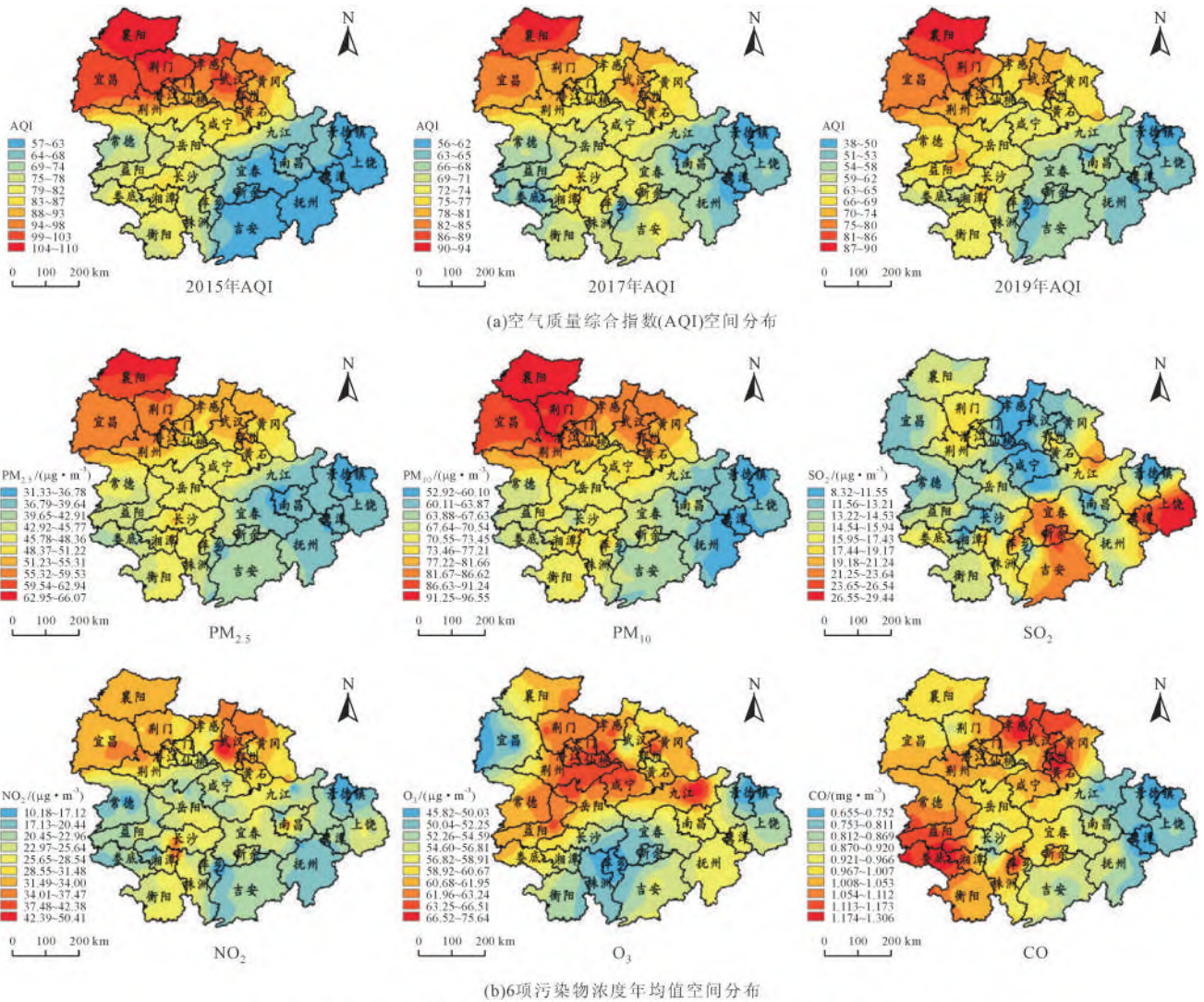


图7 2015-2019年长江中游城市群AQI及6项污染物浓度年均值空间分布
Fig.7 Spatial distribution of AQI and 6 pollutants in the middle reaches of the Yangtze River from 2015 to 2019

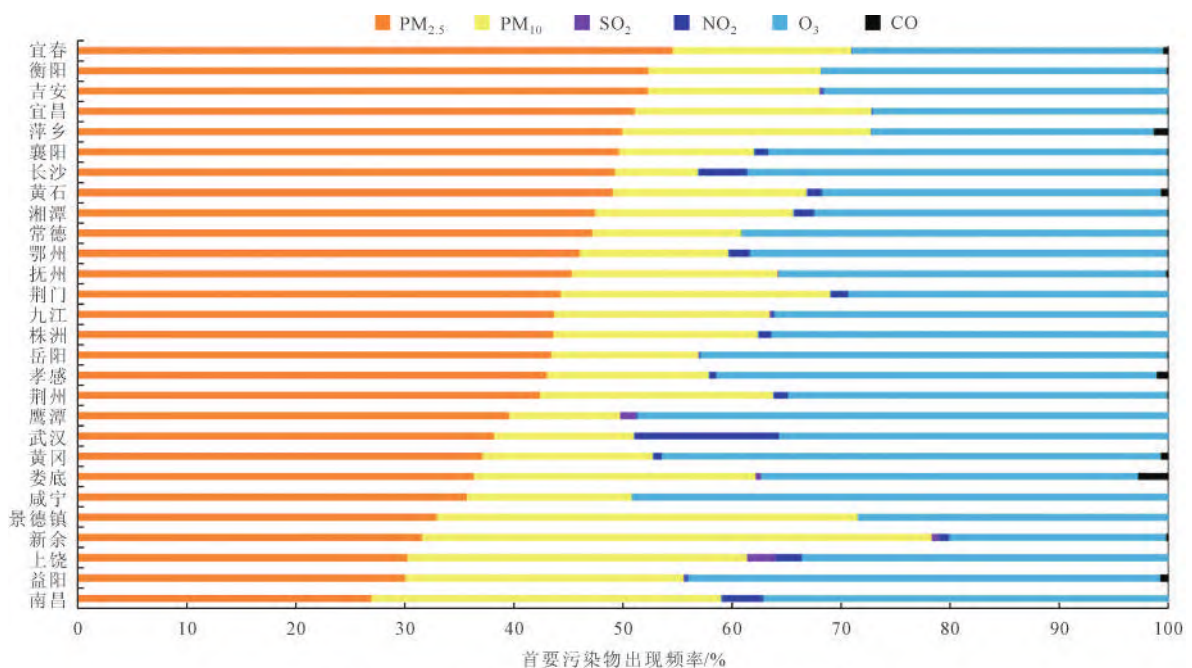


图8 2015-2019年长江中游各城市首要污染物频次结构
Fig.8 Frequency structure of primary pollutants in the middle reaches of the Yangtze River from 2015 to 2019

底以及江西九江、抚州、萍乡、吉安和宜春;PM₁₀出现频率最高的地区主要在江西新余、景德镇;O₃出现频率最高的区域集中在江西南昌、上饶、鹰潭,湖南益阳以及湖北黄冈、咸宁。

3.2 空间自相关检验

3.2.1 全局自相关

对2015–2019年长江中游城市群AQI以及6项污染物进行全局空间自相关分析,结果如表2所示。除SO₂外,AQI和其他5项污染物5年的全局Moran's *I*均大于0,其中AQI、PM_{2.5}、PM₁₀的*p*值均小于0.01,O₃的全局Moran's *I*在2017年置信度为90%,其他

4年的置信度为99%,表明长江中游城市群AQI以及PM_{2.5}、PM₁₀、O₃污染物在空间上具有显著的正相关性,空间分布存在明显的集聚特征;CO在2015年和2019年的全局Moran's *I*置信度为99%,2018年置信度为95%,2016和2017年的置信度均小于90%;SO₂全局Moran's *I*在2015年小于0,随后4年均大于0且呈增长趋势,并且2017、2018、2019年分别在5%、1%、1%水平通过显著性检验,说明随着时间推移,SO₂在空间上逐渐呈集聚的趋势;NO₂的全局Moran's *I* 5年均未通过显著性检验,说明NO₂空间上并不存在明显的依赖性和溢出效应。

表2 2015–2019年长江中游城市群AQI及6项污染物全局Moran's *I*
Table 2 Global Moran's *I* of AQI and 6 pollutants in Middle Yangtze River from 2015 to 2019

变量	Moran's <i>I</i>					Z-score					<i>p</i>				
	2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019
AQI	0.788	0.637	0.445	0.546	0.706	7.044	5.842	4.270	6.010	6.407	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PM _{2.5}	0.683	0.543	0.335	0.480	0.574	6.647	4.947	3.236	4.505	5.325	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
PM ₁₀	0.790	0.458	0.324	0.405	0.461	7.077	4.618	3.096	3.867	4.329	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
SO ₂	-0.05	0.101	0.197	0.342	0.276	-0.19	1.251	2.224	3.260	2.705	0.844	0.211	0.026	0.001	0.007
NO ₂	0.096	0.041	0.040	0.144	0.141	1.160	0.650	0.644	1.560	1.539	0.246	0.516	0.520	0.119	0.124
O ₃	0.389	0.296	0.177	0.524	0.520	3.797	3.076	1.878	5.241	5.291	0.000	0.002	0.060	0.000	0.000
CO	0.355	0.014	0.108	0.230	0.289	3.369	0.411	1.268	2.326	2.830	0.001	0.681	0.205	0.020	0.005

3.2.2 局部自相关

上述全局Moran's *I*指数结果表明了长江中游城市群AQI以及6项污染物整体是否存在空间自相关性,但未能揭示区域各城市AQI及不同污染物的空间集聚现象。因此选取2019年AQI及6项污染物浓度,分析各城市的空间集聚特征(图9)。结果显示,AQI在局部空间上也存在着明显的集聚特征,其中高-高型集聚城市全部分布在湖北境内,低-低集聚城市集

中在江西省内,湖南省境内8个城市均未表现出显著的相关性,表明这些城市的空气质量没有明显的空间极化特征;PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、SO₂、NO₂、CO污染物中,表现为高-高集聚型城市数量依次为5、11、6、2、2、3个,除SO₂污染物的高-高集聚型城市分布在江西新余和吉安,其余均集中在湖北境内,这些处于高-高地区的城市各种污染物浓度水平高、集聚性强,与周边地级市空气污染联系较为密切;低-低集聚型城市数量依

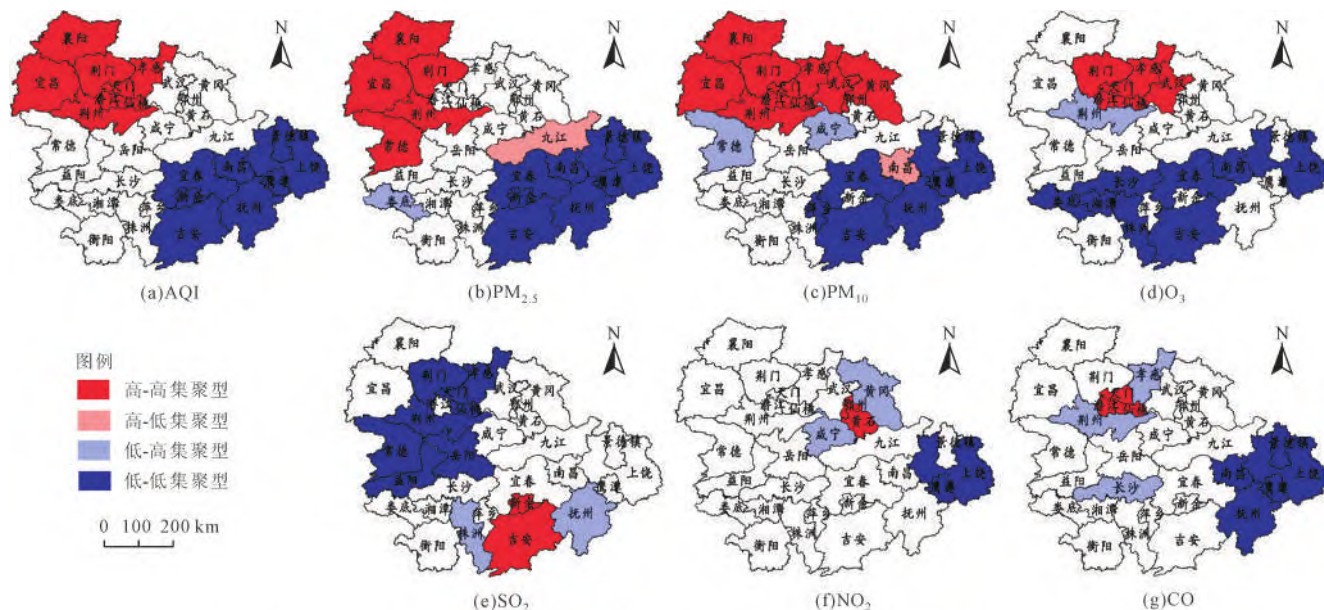


图9 2019年长江中游城市群AQI及6项污染物局部自相关分析
Fig.9 Local autocorrelation analysis of AQI and 6 pollutants in Middle Yangtze River in 2019

次为8、6、8、8、3、5个,多数集中在江西省城市,这类城市污染水平低、空气污染集聚性较弱;而表现为负相关的低-高型城市数量分别为1、2、1、2、2、3个,另外PM_{2.5}和PM₁₀负相关中还分别存在1个高-低集聚型城市。通常处于高-低或低-高地区的城市空气污染现象主要与城市自身运行有关,受周边城市影响较小。

3.3 空气质量影响因素分析

3.3.1 AQI及6项污染物之间关联性分析

利用 Pearson 系数对 2015-2019 年长江中游城市群 AQI 及 6 项污染物浓度年均值进行统计分析(表 3)。结果显示,AQI 与 SO₂之外的其他 5 种污染物均表现出明显的正相关性,其中与 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃相关系

数均大于 0.5,说明了近 5 年来以 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃作为空气首要污染物对区域城市空气质量影响最大。不同污染物之间也具有一定的关联性,其中 PM_{2.5}、PM₁₀之间呈现显著的正相关性($p < 0.01$),且两者均与 NO₂、SO₂、CO 污染物浓度存在较强的正向作用($p < 0.05$),此外,O₃与 PM₁₀之间也呈现显著的正相关性($p < 0.1$),而与 CO、SO₂、NO₂之间表现显著的负相关($p < 0.1$)。上述结果与前人^[21,25]研究结论类似,一般情况下空气中硫氧化物、氮氧化物、碳氧化物增多时,它们会和挥发性有机化合物(VOCs)等互相作用,促进可吸入颗粒物的形成,造成 PM_{2.5}、PM₁₀浓度升高;另外在紫外线辐射强的条件下会消耗 NO₂、SO₂、CO 等前体物产生光化学反应,进一步转化为二次污染物 O₃。

表 3 AQI 及 6 项污染物浓度指标相关性分析
Table 3 Correlation analysis of AQI and 6 pollutants concentration

	系数/显著性	AQI	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
AQI	N		0.815***	0.775***	0.114	0.396***	0.540***	0.365***
	Sig.		0.000	0.000	0.159	0.000	0.000	0.000
PM _{2.5}	N	0.815***		0.868***	0.185**	0.389***	0.067	0.314***
	Sig.	0.000		0.000	0.021	0.000	0.406	0.000
PM ₁₀	N	0.775***	0.868***		0.237***	0.375***	0.142*	0.466***
	Sig.	0.000	0.000		0.003	0.000	0.078	0.000
SO ₂	N	0.114	0.185**	0.237***		0.085	-0.365***	0.022
	Sig.	0.159	0.021	0.003		0.295	0.000	0.783
NO ₂	N	0.396***	0.389***	0.375***	0.085		-0.145*	-0.011
	Sig.	0.000	0.000	0.000	0.295		0.072	0.888
O ₃	N	0.540***	0.067	0.142*	-0.365***	-0.145		-0.197**
	Sig.	0.000	0.406	0.078	0.000	0.072*		0.014
CO	N	0.365***	0.314***	0.466***	0.022	-0.011	-0.197**	
	Sig.	0.000	0.000	0.000	0.783	0.888	0.014	

注:***在 0.01 级别相关性显著;**在 0.05 级别相关性显著;*在 0.1 级别相关性显著。

3.3.2 AQI 及 6 项污染物的影响因素

选取 2019 年自然条件、社会经济以及城市空间建设方面的指标数据,探究其对 AQI 及 6 项污染物影响。由于空间自相关检验中,污染物 NO₂ 浓度不存在空间自相关,因此影响因素模型仍然保持 OLS 回归。而 AQI 及其他 5 种污染物均通过了空间自相关检验,则采用空间回归模型,以考察不同变量与空气质量的关联性,并对每一个回归根据拉格朗日乘数检验进一步选择特定的空间回归形式(滞后或误差)。同时为验证空间回归模型的合理性,加入 OLS 回归作为对照,通过对数似然值(LL)、赤迟准则值(AIC)、施瓦茨准则值(SC)3 个拟合度指标判断 2 种模型的合理性,其中 LL 值越大,AIC 和 SC 值越小,表示模型的拟合效果越好。由表 4 可以看出,空间回归模型拟合程度优于 OLS 回归,说明空间地理效应在空气质量影响因素分析中不可忽视。

回归结果显示,自然影响因素方面,气温、相对湿

度、降水、风速与 AQI 呈现显著的相关性且均在 0.01 水平下通过检验,表明自然因素对本区域整体空气质量有明显影响,其中降水量对 AQI 表现出负向影响,其他均为正向作用。对于不同污染物,气温与 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、O₃均呈明显的正相关,说明气温上升加重了本地区可吸入颗粒物和气体污染。相对湿度分别在 0.01、0.1 水平下与 PM_{2.5}、O₃呈现出较强的相关性,但对两者影响方向不同,相对湿度越高,PM_{2.5}浓度越大,而 O₃浓度越小。已有研究表明^[18]高湿度会使空气中中小粒径气溶胶粒子吸收水汽后粒径增长,从而转化成 PM_{2.5},而水汽的消光作用影响太阳辐射,有助于减少 O₃的光化学反应,导致 O₃浓度下降。降雨量与 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂之间有显著的负相关($p < 0.01$),说明雨水对气体污染物或颗粒物有着稀释和沉降冲刷作用,因而一定程度上能够改善空气污染现象。此外,风速与 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、O₃呈现明显的正相关($p < 0.05$),说明风速越大,这些污染物在空气中浓度越高。

表 4 AQI 及 6 项污染物浓度影响因素回归结果
Table 4 Regression results of influencing factor of AQI and 6 pollutants

变量	AQI		PM _{2.5}		PM ₁₀	
	OLS	空间滞后	OLS	空间滞后	OLS	空间误差
X1	13.283	19.501***	4.172	7.297*	33.869**	27.543***
X2	10.404	13.003***	10.152*	11.012***	13.282	11.848
X3	-29.354***	-26.123***	-18.232**	-16.981***	-44.306***	-38.279***
X4	16.170**	15.996***	12.985**	12.691***	11.531	9.811**
X5	-7.997	-5.148	-4.990	-2.672	-15.058	-18.589
X6	8.931	6.997	9.577***	7.558**	3.928	9.813
X7	-47.068	-71.965***	-23.090	-32.418	-94.134	-108.895***
X8	0.469	0.852	2.527	2.904	-6.203	-7.550
X9	15.629**	14.444***	12.620**	11.853***	18.315**	17.220***
X10	22.207	19.856**	12.158	9.777**	44.757**	50.774***
X11	40.181**	25.467**	37.484***	26.319***	25.984	18.006*
X12	-38.190	-2.324	-40.010	-17.946	31.043	52.824
X13	33.125	40.469***	17.618	19.824	10.376	0.951
X14	-9.678	-2.854	-6.083	-1.279*	-8.385	-10.063*
X15	5.965	4.595*	5.382	4.856**	8.050	9.641*
R ²	0.876	0.907	0.875	0.894	0.763	0.815
LL	-80.931	-77.810	-73.736	-71.910	-91.952	-90.156
AIC	193.863	189.619	179.471	177.820	215.904	212.311
SC	216.807	213.997	202.415	202.198	238.848	235.255

变量	SO ₂		NO ₂		O ₃		CO	
	OLS	空间误差	OLS	OLS	空间滞后	OLS	空间误差	
X1	4.516	3.040	14.096*	9.254*	5.607*	-0.046	-0.112	
X2	-3.305	2.844	9.949	-11.452	-11.499**	0.249	0.230	
X3	1.540	-1.359	-18.327**	7.913	8.808	0.118	0.187	
X4	3.076	2.660***	9.562	5.880	7.292**	0.013	0.003	
X5	3.287	0.419	2.473	4.011	3.731	-0.103	-0.102	
X6	3.229	6.868***	12.131*	-20.001**	-18.566	0.308	0.450***	
X7	15.943	-1.333	-20.094	22.542	18.131	-0.551	-1.267	
X8	2.643	0.603	-0.045	2.841	4.836	-0.255	-0.290	
X9	-1.737	2.641*	4.759*	1.197	1.206*	0.161	0.108**	
X10	9.768	19.224***	22.845*	17.129	17.806*	0.760*	1.0127***	
X11	-2.258	3.494*	10.723*	22.692	13.800*	0.635	0.618**	
X12	-13.008	-0.176	-13.758	49.091	39.858	0.050	0.609	
X13	-13.005	-16.604	16.636	-26.493	-22.774	-0.762	-0.938	
X14	1.576	6.870	-4.368	-3.211	-2.617	-0.307	-0.411***	
X15	-0.204	1.827	-0.222	2.166	2.457	0.022	0.054	
R ²	0.716	0.934	0.786	0.605	0.691	0.499	0.640	
LL	-59.616	-51.938	-74.189	-82.920	-80.353	27.592	30.106	
AIC	151.232	135.877	180.378	197.840	194.706	-23.184	-28.212	
SC	174.176	158.820	203.322	220.783	219.083	-0.240	-5.268	

注: X1(年均气温)、X2(相对湿度)、X3(年均降水量)、X4(年均风速)、X5(人口密度)、X6(城镇化率)、X7(城市 GDP)、X8(实际利用外资占 GDP 比重)、X9(二三产业比值)、X10(工业废气排放量)、X11(民用汽车拥有量)、X12(公交车辆数)、X13(建成区面积)、X14(绿化覆盖率)、X15(路网密度); *、**、***分别表示在 0.1、0.05、0.01 水平下通过显著性检验。

社会经济因素方面,人口密度、实际利用外资占比以及公交车辆数与空气质量各项指标均未通过显著性检验,而二三产业比值、工业废气排放量以及民用汽车拥有量对 AQI 及 6 种污染物均表现出明显的正相关,说明城市的产业结构、工业废气排放以及交通尾气污染是造成本区域空气质量下降的重要原因。城镇化率与 PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 呈显著正相关,说明城镇化水平提高,会给本区域大气环境带来严重的负面影响。大量农村人口流入城市,为了容纳这些人口和维持城市正常运行,不仅消耗更多能源,还要完善各项基础设施建设,施工建设过程产生的大量烟尘废气,会导致大气污染加重^[36]。城市 GDP 与 AQI、PM₁₀ 表现为显著的负相关($p < 0.01$),说明区域经济发展水平起到了促进大气环境改善作用。根据 EKC 理

论,经济发展与环境的关系呈倒“U”型曲线,当经济发展到达一定水平,随着产业转型升级,高效清洁能源的推广以及环境治理资金增加,将会使城市空气环境状况有所好转^[35,38]。

城市空间建设方面,建成区的面积与 AQI 呈现显著的正相关,路网密度与 AQI、PM_{2.5}、PM₁₀ 之间也存在较强的正相关。城市建成区的扩张,一方面会占用周边生态用地,导致气候的变化,加剧城市热岛效应,从而会对空气污染产生不利影响^[34],另一方面建成区面积的增大,拉长了城市居民日常通勤的距离,同时路网密度的增加,提高了机动车的可达性,使得居民选用机动交通方式出行的频率增多,因而会产生更多尾气排放,使得 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度上升^[44]。绿化覆盖率对 PM_{2.5}、PM₁₀、CO 表现出显著的负向影响,说明

城市中建设一定规模的绿地不仅能够净化CO有害气体,还可以吸附空气中颗粒物,对改善城市空气污染具有积极作用。

3.3.3 基于地理探测器的不同影响因素影响力分析

确定不同污染物影响因素基础上,利用地理探测器进一步识别不同影响因素对空气质量的影响程度,本文采用分位数法,将3.3.2节所得影响因素转换为类型变量后,将其与不同污染物浓度分别导入地理探测器模型,得出各污染物影响因素的影响力 q 值百分率(图10)。结果显示,AQI影响因素中降水量和气温影响力最高, q 值百分率达50%以上,其次为工业废气排放量、城市GDP、平均风速、民用汽车拥有量, q 值百分率在20%~30%,而二三产业比值、建成

区面积、路网密度影响力相对较弱,分别为18.2%、16.7%、16.3%;不同污染物中,PM_{2.5}受降水量和气温影响最为明显,其后为城镇化率、平均风速、工业废气排放量,民用汽车拥有量、二三产业比值、绿化覆盖率、路网密度 q 值百分率相差不大,而相对湿度影响力最低;PM₁₀影响因素 q 值百分率从高到低依次为降水量(55.3%)、工业废气排放量(32.3%)、气温(26.0%)、平均风速(23.7%)、二三产业比值(16.9%)、民用汽车拥有量(16.2%)、路网密度(15.8%)、绿地覆盖率(15.2%)、地区GDP(11.0%);SO₂受工业废气排放量影响最为明显, q 值百分率为32.8%,其次是平均风速(24.6%)、二三产业比值(19.9%),民用汽车拥有量(16.2%)和城镇化率(13.9%)影响较弱;NO₂受降水量

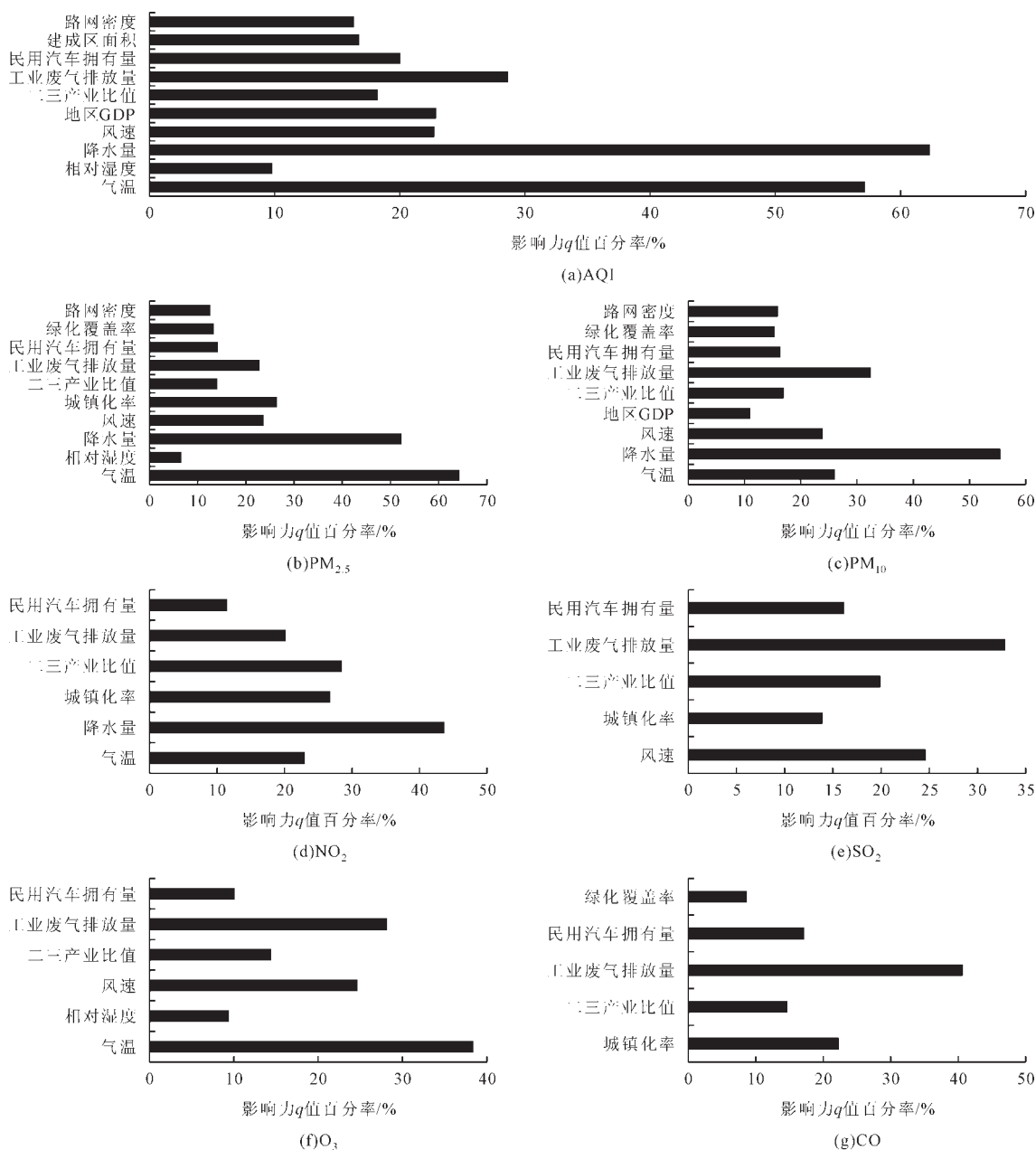


图10 AQI及6项污染物浓度不同影响因素影响力探测结果
Fig.10 Detection results of different influence factors of AQI and 6 pollutants

影响最强(43.6%),其后为二三产业比值、城镇化率、气温, q 值百分率依次为28.5%、26.8%、22.9%,相较之下,民用汽车拥有量影响力较低(11.4%); O_3 影响因素中气温影响力最高(38.4%),其次为工业废气排放量(28.1%)、平均风速(24.6%)、二三产业比值(14.5%)、民用汽车拥有量(10.1%),相对湿度对臭氧浓度影响相对最小,仅为9.4%;CO影响因素 q 值百分率从高到低依次为工业废气排放量(40.5%)、城镇化率(22.2%)、民用汽车拥有量(17.1%)、二三产业比值(14.5%)、绿化覆盖率(8.6%)。

4 讨论

通过对长江中游城市群空气质量影响因素分析可以发现,不同的影响因素对不同大气污染变量影响并不完全相同,其中本文结果显示气温对AQI具有正向作用,这一结果与部分研究相反^[8,21,25],但与黄小刚等^[18]在研究长江经济带空气质量影响因素所得结论一致,虽然高温能使空气中污染物在水平输送和垂直扩散的能力增强,有利于降低污染物的堆积,但同时也会促进空气中污染物发生繁杂的光化学反应,加速臭氧等二次污染物的形成。此外高温有利于促进氮氧化物、硫化物以及VOCs等气态污染物向 $PM_{2.5}$ 转化,从而导致空气质量下降,这一点在本文分析气温对 $PM_{2.5}$ 、 O_3 影响时也得到了佐证。另外关于风速对空气质量的影响,本文结果发现风速越大,AQI及 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染物浓度越高,该结论与何振芳等^[8]和郑小华等^[26]分别研究河北省和汾渭平原空气质量影响因素所得结果存有差异。通常情况下认为,风速越大越有利于本地污染物的扩散,空气质量越好,然而也有部分研究^[18,24,25]表明风速过大也会给对其周边城市造成输入型污染。另外有关人口密度与空气质量的之间的关系,本文结果表明人口密度与AQI及6种污染物均未表现出显著的相关性,可能是由于人口密度对不同城市空气质量作用存在差异,已有研究^[33]发现城市人口密度对大气污染影响存在一个阈值,当城市人口密度小于1 000人/ km^3 ,人口密度与空气污染呈正相关,超过后两者便呈负相关。目前长江中游城市群中人口密度处于阈值上下的城市几乎各占一半,以至于人口密度整体影响并不显著。此外关于实际利用外资和公交发展对大气污染的影响,柏玲等^[17]在研究长江经济带空气质量社会经济影响因素时表示,实际利用外资越多,城市经济开放程度越高,外资的流入不仅对本地产业升级有所帮助,还会提高本地生产技术和形成科学的管理体系从而对环境起到保护作用。王斌会等^[39]对31个省会城市(直辖市)空气质量影响

因素实证研究中表示,公共交通能显著改善城市空气质量,年末实有公交车辆数的增多,可以有效增加空气质量达二级及以上的天数。然而本文结果中实际利用外资占GDP比重和公交车辆数未呈现显著的相关性,究其原因可能是研究空间尺度不同,以上学者研究空间涉及东、中、西3个地区的城市,不同地区经济发展差异明显;而本研究集中在长江中游城市群,除武汉、长沙、南昌及个别城市经济开放程度较高,公共交通较为发达外,其他城市未表现出较大差异,而造成相关性结果不显著。

5 结论

(1)2015–2019年长江中游城市群AQI总体呈现下降趋势,空气优良率不断提升,除 O_3 浓度在年际变化上呈现增长趋势外,其他5种污染物浓度均表现出下降的趋势;在季节变化上,AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 和 SO_2 浓度呈现“冬高夏低”的特点,而 O_3 与之相反;此外 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 是引起大气污染的首要污染物。空间分布上,AQI以及 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度分布整体呈现出“西北高,东南低,中间过渡”的格局, O_3 浓度分布呈现“北高南低”的特征,CO浓度分布特征为西高东低,而 SO_2 和 NO_2 集中分布在局部片区,其中 SO_2 浓度较高地区集中在江西萍乡、新余、鹰潭以及上饶, NO_2 主要集中分布在武汉、长株潭以及南昌等经济较为发达的地区。

(2)在全球自相关分析中,长江中游城市群AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 浓度5年均表现出显著的空间正相关,CO在特定年份通过了空间正相关检验, SO_2 随着时间推移在空间上相关性越发显著,而 NO_2 没有明显的空间相关性,以上说明各城市在空气质量以及大多数污染物存在空间依赖性;局部自相关分析中AQI处于高–高集聚型、低–低集聚型的城市数量较多,而6项污染物中除了高–高型、低–低型之外,还存在一定数量的低–高型、高–低集聚型城市,因此需要进一步加强污染物区域统筹治理与局部地区的重点管控。

(3)AQI及6种污染物浓度相关性分析中,除 SO_2 之外,AQI与其他5种污染物均有显著的正相关性,其中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 相关系数最大;不同污染物之间也有一定的关联性,其中 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 正相关性最强,且两者均与 NO_2 、 SO_2 、CO浓度之间存在较强的正向作用;而 O_3 与CO、 SO_2 、 NO_2 之间有较强的负相关。

(4)AQI及6项污染物的影响因素互有异同,其中二三产业比值、工业废气排放量、民用汽车排放量为共同影响因素且均为正向作用,而气温、风速、降雨量、相对湿度、城镇化率、地区GDP、建成区面积、绿化

覆盖率以及路网密度指标在不同污染物的影响中表现出一定的差异性;在各因素影响方面,自然条件中的气温、降雨量,社会经济中的工业废气排放量、二三产业比值、民用汽车拥有量对空气质量影响力较高,而绿化覆盖率、路网密度等城市空间建设方面因素作用力相对较弱。

[参考文献]

- [1] 穆泉,张世秋. 2013年1月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估[J]. 中国环境科学, 2013,33(11):2087-2094.
Mu Quan, Zhang Shiqiu. An evaluation of the economic loss due to the heavy haze during January 2013 in China[J]. China Environmental Science, 2013,33(11):2087-2094.
- [2] 方怡青,曲凌雁. 城市空间形态与空气质量相关性研究综述[J]. 现代城市研究, 2018,33(8):88-94.
Fang Yiqing, Qu Lingyan. Study on the correlation between urban form and air quality[J]. Modern Urban Research, 2018,33(8):88-94.
- [3] 中国生态环境部. 2019年中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中国生态环境部, 2020.
Ministry of Ecology and Environment of China. China Ecological Environment Bulletin in 2019[R]. Beijing: Ministry of Ecological Environment of China, 2020.
- [4] 张向敏,罗桑,李星明,等. 中国空气质量时空变化特征[J]. 地理科学, 2020,40(2):190-199.
Zhang Xiangmin, Luo Sen, Li Xingming, et al. Spatio-temporal variation features of air quality in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020,40(2):190-199.
- [5] 刘华军,杜广杰. 中国城市大气污染的空间格局与分布动态演进:基于161个城市AQI及6种分项污染物的实证[J]. 经济地理, 2016,36(10):33-38.
Liu Huajun, Du Guangjie. Spatial pattern and distributional dynamics of urban air pollution in China: an empirical study based on AQI and six sub-pollutants of 161 cities[J]. Economic Geography, 2016,36(10):33-38.
- [6] 邹金慧,徐飞雄,邹滨,等. 中国重要旅游城市雾霾时空特征[J]. 热带地理, 2018,38(1):143-150.
Zou Jinhui, Xu Feixiong, Zou Bin, et al. Spatial-temporal characteristics of haze in the key tourism cities of China[J]. Tropical Geography, 2018,38(1):143-150.
- [7] 徐冰焯,俞洁,沈叶民. 近10年浙江省城市环境空气质量变化趋势及影响因素分析[J]. 环境污染与防治, 2017,39(6):610-615.
Xu Bingye, Yu Jie, Shen Yemin. Analysis on the variation trend and influence factors of ambient air quality in Zhejiang Province during recent ten years[J]. Environmental Pollution & Control, 2017,39(6):610-615.
- [8] 何振芳,郭庆春,刘加珍,等. 河北省大气污染时空变化特征及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2021,36(2):411-419.
He Zhenfang, Guo Qingchun, Liu Jiazhen, et al. Spatio-temporal variation characteristics of air pollution and influencing factors in Hebei Province[J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(2):411-419.
- [9] 丁镭,刘超,黄亚林,等. 湖北省城市环境空气质量时空演化格局及影响因素[J]. 经济地理, 2016,36(3):170-178.
Ding Lei, Liu Chao, Huang Yalin, et al. Spatial and temporal characteristics of urban ambient air quality and its main influence factors in Hubei Province[J]. Economic Geography, 2016,36(3):170-178.
- [10] 吕桅桅,李兰. 湖北省主要观测站PM_{2.5}污染特征及气象要素的影响分析[J]. 生态环境学报, 2018,27(11):2073-2080.
Lyu Weiwei, Li Lan. PM_{2.5} pollution characteristics in main observation stations in Hubei and the impact analysis of meteorological factors[J]. Ecology and Environmental Science, 2018,27(11):2073-2080.
- [11] 樊建勇,黄玲,李翔翔. 2015-2018年江西省PM_{2.5}污染时空变化特征及气象成因分析[J]. 生态环境学报, 2020,29(6):1165-1172.
Fan Jianyong, Huang Ling, Li Xiangxiang. Analysis of the characteristics of the spatial-temporal variations of PM_{2.5} pollution and the meteorological causes in Jiangxi Province from 2015 to 2018[J]. Ecology and Environmental Science, 2020,29(6):1165-1172.
- [12] 杨兴川,赵文吉,熊秋林,等. 2016年京津冀地区PM_{2.5}时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10):1747-1754.
Yang Xingchuan, Zhao Wenji, Xiong Qiulin, et al. Spatio-temporal distribution of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) area in 2016 and its relationship with meteorological factors[J]. Ecology and Environmental Science, 2017,26(10):1747-1754.
- [13] 刘海猛,方创琳,黄解军,等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2018,73(1):177-191.
Liu Haimeng, Fang Chuanglin, Huang Jiejun, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(1):177-191.
- [14] 程钰,刘婷婷,赵云璐,等. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量时空演变与经济社会驱动机理[J]. 经济地理, 2019, 39(10):183-192.
Cheng Yu, Liu Tingting, Zhao Yunlu, et al. Spatiotemporal evolution and socioeconomic driving mechanism of air quality in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas (“2+26” cities)[J]. Economic Geography, 2019,39(10):183-192.
- [15] 郭鑫,李红柳,杨崧铤,等. 2013-2018年京津冀地区环境空气质量变化趋势研究[J]. 环境与发展, 2019,31(12):119-120.
Guo Xin, Li Hongliu, Yang Yuhong, et al. The study on the change trend of ambient air quality in Beijing-Tianjin-He-

- bei Region during 2013–2018[J]. *Environment and Development*, 2019,31(12):119–120.
- [16] 湛社霞. 粤港澳大湾区常规大气污染物变化趋势与影响因素研究[D]. 广州:中国科学院大学, 中国科学院广州地球化学研究所, 2018.
- Zhan Shexia. Research on Changing Trend and Influencing Factors of Conventional Air Pollutants in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [17] 柏玲,姜磊,周海峰,等. 长江经济带空气质量指数的时空特征及驱动因素分析:基于贝叶斯空间计量模型的实证[J]. *地理科学*, 2018,38(12):2100–2108.
- Bai Ling, Jiang Lei, Zhou Haifeng, et al. Spatio-temporal characteristics of air quality index and its driving factors in the Yangtze River Economic Belt: an empirical study based on Bayesian spatial econometric model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018,38(12):2100–2108.
- [18] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等. 长江经济带空气质量的时空分布特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2020,40(2):874–884.
- Huang Xiaogang, Shao Tianjie, Zhao Jingbo, et al. Spatial-temporal distribution of air quality and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt[J]. *China Environmental Science*, 2020,40(2):874–884.
- [19] 杨冕,王银. 长江经济带PM_{2.5}时空特征及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017,27(1):91–100.
- Yang Mian, Wang Yin. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017,27(1):91–100.
- [20] 柏玲,姜磊,周海峰,等. 长江经济带空气质量指数时空异质性及社会经济影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2019,26(2):312–319.
- Bai Ling, Jiang Lei, Zhou Haifeng, et al. Spatiotemporal heterogeneity of air quality index and its socio-economic factors in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(2):312–319.
- [21] 陈优良,李亚倩. 长三角PM_{2.5}和O₃变化特征及与气象要素的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2021,30(2):382–396.
- Chen Youliang, Li Yaqian. Characteristics of O₃ and PM_{2.5} and its relationship with meteorological factors in Yangtze River Delta[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(2):382–396.
- [22] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等. 长三角城市群臭氧浓度的时空分异及驱动因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2019,28(6):1434–1445.
- Huang Xiaogang, Shao Tianjie, Zhao Jingbo, et al. Spatio-temporal differentiation of ozone concentration and its driving factors in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019,28(6):1434–1445.
- [23] 黄小刚,赵景波. 2016年长三角城市群O₃浓度的时空变化规律[J]. *中国环境科学*, 2018,38(10):3611–3620.
- Huang Xiaogang, Zhao Jingbo. Spatial-temporal variation of ozone in Yangtze River Delta urban agglomeration in 2016[J]. *China Environmental Science*, 2018,38(10):3611–3620.
- [24] 柏玲,姜磊,陈忠升. 长江中游城市群PM_{2.5}时空特征及影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018,27(5):960–968.
- Bai Ling, Jiang Lei, Chen Zhongsheng. Spatio-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018,27(5):960–968.
- [25] 郭雯雯,陈永金,刘阁,等. 2016–2019年长江中游城市群空气质量时空变化特征及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2020,29(10):2034–2044.
- Guo Wenwen, Chen Yongjin, Liu Ge, et al. Analysis on the characteristics and influencing factors of air quality of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River in 2016 to 2019[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2020,29(10):2034–2044.
- [26] 郑小华,李明星,刘慧,等. 汾渭平原空气质量的时空特征及其与气象因子的关系[J]. *环境科学学报*, 2020,40(11):4113–4121.
- Zheng Xiaohua, Li Mingxing, Liu Hui, et al. Spatiotemporal characteristics of air quality and their relationships with meteorological factors over the Fenwei Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020,40(11):4113–4121.
- [27] 曾德珩,陈春江. 成渝城市群PM_{2.5}的时空分布及其影响因素研究[J]. *环境科学研究*, 2019,32(11):1834–1843.
- Zeng Deheng, Chen Chunjiang. Spatial-temporal characteristics and influence factors of PM_{2.5} concentrations in Chengdu–Chongqing urban agglomeration[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019,32(11):1834–1843.
- [28] 崔继宪,郎建奎,陈添,等. 2016年北京市空气质量特征及PM_{2.5}传输规律[J]. *北京工业大学学报*, 2018,44(12):1547–1556.
- Cui Jixian, Lang Jianlei, Chen Tian, et al. Characteristics of Beijing's air quality and regional transport of PM_{2.5} in 2016[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018,44(12):1547–1556.
- [29] 陈攀秋,王健力,杨平恒. 2014年重庆市大气污染物浓度变化特征及其与气象条件的关系[J]. *西南大学学报:自然科学版*, 2016,38(10):147–153.
- Chen Zhiqiu, Wang Jianli, Yang Pingheng. Variation characteristics of atmospheric pollutants concentration in the urban area of Chongqing in 2014 and the relationship with meteorological conditions[J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2016,38(10):147–153.

- [30] 王叶琳,程燕,严璐,等. 2010–2018年西安市大气污染物变化特征分析[J]. 地球环境学报, 2020,11(1):99–111.
Wang Yelin, Cheng Yan, Yan Lu, et al. Characteristics of variations of atmospheric pollutants over Xi'an during 2010–2018[J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(1): 99–111.
- [31] 肖建能,杜国明,施益强,等. 厦门市环境空气污染时空特征及其与气象因素相关分析[J]. 环境科学学报, 2016,36(9): 3363–3371.
Xiao Jianneng, Du Guoming, Shi Yiqiang, et al. Spatiotemporal distribution pattern of ambient air pollution and its correlation with meteorological factors in Xiamen City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,36(9):3363–3371.
- [32] 马素琳,韩君,杨肃昌. 城市规模、集聚与空气质量[J]. 中国人口·资源与环境, 2016,26(5):12–21.
Ma Sulin, Han Jun, Yang Suchang. Urban scale, agglomeration and air quality[J]. China Population, Resources and Environment, 2016,26(5):12–21.
- [33] 张淑平,韩立建,周伟奇,等. 城市规模对大气污染物 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响[J]. 生态学报, 2016,36(16):5049–5057.
Zhang Shuping, Han Lijian, Zhou Weiqi, et al. Impact of urban population on concentrations of nitrogen dioxide (NO_2) and fine particles($\text{PM}_{2.5}$) in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(16):5049–5057.
- [34] 李小帆,邓宏兵,谢伟伟. 武汉城市圈城镇化水平和大气污染的关系研究:基于灰色关联和空间计量方法[J]. 城市规划, 2019,43(5):67–72.
Li Xiaofan, Deng Hongbing, Xie Weiwei. Analysis of the relationship between urbanization and air pollution in Wuhan metropolitan area: based on the gray correlation and spatial panel econometric model[J]. City Planning Review, 2019,43 (5):67–72.
- [35] 丁镭. 中国城市化与空气环境的相互作用关系及EKC检验[D]. 武汉:中国地质大学, 2016.
Ding Lei. Investigating the Environment Kuznets Curve and Interaction Relationship Between China's Urbanization and Air Environment[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [36] 李茜,宋金平,张建辉,等. 中国城市化对环境空气质量影响的演化规律研究[J]. 环境科学学报, 2013,33(9):2402–2411.
Li Qian, Song Jinping, Zhang Jianhui, et al. Dynamics in the effect of China's urbanization on air quality[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013,33(9):2402–2411.
- [37] 杨昆,杨玉莲,朱彦辉,等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染与社会经济的空间关系及成因[J]. 地理研究, 2016,35(6):1051–1060.
Yang Kun, Yang Yulian, Zhu Yanhui, et al. Social and economic drivers of $\text{PM}_{2.5}$ and their spatial relationship in China [J]. Geographical Research, 2016,35(6):1051–1060.
- [38] 蔺雪芹,王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J]. 地理学报, 2016,71(8):1357–1371.
Lin Xueqin, Wang Dai. Spatio-temporal variations and socio-economic driving forces of air quality in Chinese cities[J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(8):1357–1371.
- [39] 王斌会,王术. 我国城市空气质量影响因素的实证研究:基于中国31个主要城市面板数据的分析[J]. 福建农林大学学报:哲学社会科学版, 2015,18(6):29–33.
Wang Binhui, Wang Shu. Empirical study on factors affecting China's urban air quality—evidence from the panel data of China's 31 major cities[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Philosophy and Social Science Edition, 2015,18(6):29–33.
- [40] 王桂林,张炜. 中国城市扩张及空间特征变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响[J]. 环境科学, 2019,40(8):3447–3456.
Wang Guilin, Zhang Wei. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China [J]. Environmental Science, 2019,40(8):3447–3456.
- [41] 贾倩,叶长盛. 中国35个大中城市建设用地结构与空气质量的典型相关分析[J]. 中国农学通报, 2019,35(25):84–93.
Jia Qian, Ye Changsheng. Canonical correlation analysis of composition of urban development land and air quality in 35 large and medium-sized cities in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019,35(25):84–93.
- [42] 丁卉,余志,徐伟嘉,等. 3种区域空气质量空间插值方法对比研究[J]. 安全与环境学报, 2016,16(3):309–315.
Ding Hui, Yu Zhi, Xu Weijia, et al. Comparative study of the three spatial interpolation methods for the regional air quality evaluation[J]. Journal of Safety and Environment, 2016,16(3):309–315.
- [43] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017,72(1):116–134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116–134.
- [44] 袁满. 城市空间形态与空气污染治理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019:33–74.
Yuan Man. Urban Spatial Form and Air Pollution Control [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 33–74.