

长江经济带空气质量的时空分布特征及影响因素

黄小刚^{1,2,3}, 邵天杰^{1*}, 赵景波^{1,2}, 曹军骥², 岳大鹏¹, 吕晓虎⁴ (1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院地球环境研究所, 气溶胶化学与物理重点实验室, 陕西 西安 710061; 3. 山西师范大学地理科学学院, 山西 临汾 041004; 4. 汉中市生态环境局, 陕西 汉中 724200)

摘要: 基于 2015~2018 年空气质量实时监测数据, 研究了长江经济带 AQI 的时空变化特征, 从大气污染物排放量和气象因素两方面选取评价指标, 利用地理探测器揭示了长江经济带 AQI 分布的影响因素及其季节变化。结果表明: 2015~2018 年长江经济带空气质量总体趋于改善, 平均超标率由 19.8% 降至 16.2%, 除 O₃ 超标率上升外, 其余常规监测指标均有不同程度的下降。2017 年开始 O₃ 的超标率超过 PM₁₀, 成为长江经济带仅次于 PM_{2.5} 的大气污染物。AQI 月变化曲线大体呈 U 型, 具有冬春高、夏秋低的特点。长江经济带空气质量改善主要体现在冬、秋两季, O₃ 浓度的上升使夏季空气超标率上升, 春季变化不大。AQI 和空气超标率总体呈东高西低、北高南低的分布特征, 其中上海、江苏、安徽中北部和浙江北部污染最严重, 湖北中部和成渝地区其次, 云南、贵州和四川西部空气质量良好。春夏季 AQI 的差异主要表现为东西向, 秋冬季则主要表现为南北向。污染物排放量因子对长江经济带 AQI 分布有显著的正向影响, 气象因子的影响方向则随季节变化而变化。全年和春、秋、冬 3 季 AQI 的分布格局主要由大气污染物排放量决定, 夏季气象因子的影响力则更大。

关键词: 空气质量; 时空变化; 影响因素; 季节差异; 长江经济带

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)02-0874-11

Spatial-temporal distribution of air quality and its influencing factors in the Yangtze River economic belt. HUANG Xiao-gang^{1,2,3}, SHAO Tian-jie^{1*}, ZHAO Jing-bo^{1,2}, CAO Jun-ji², YUE Da-peng¹, LYU Xiao-hu⁴ (1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China; 4. Hanzhong City Ecological Environment Bureau, Hanzhong 724200, China). *China Environment Science*, 2020,40(2): 874-884

Abstract: In this paper, spatial-temporal features of the air quality index (AQI) in Yangtze River economic belt were studied by the real-time monitoring data on air quality from 2015 to 2018, and emissions of air pollutants and meteorological factors were taken as two evaluating indicators to reveal the factors and their seasonal variation to the distribution of AQI in the target regions by geographical detector. The air quality of Yangtze River economic belt was improving from 2015 to 2018 with an average ratio of days beyond standard decreased to 16.2% from 19.8%, and the rest of monitoring indicators were decreasing more or less except a rising ratio of days beyond standard for O₃. In terms of the ratio of days beyond standard, PM₁₀ was overtook by O₃ and became the second most significant pollutant following PM_{2.5} for Yangtze River economic belt since 2017. The monthly variation curve for AQI showed a "U" model, which was higher in winter and spring and lower in summer and autumn. The improving mentioned was particularly witnessed in winter and autumn. And the rising concentration of O₃ then led to a rising ratio of days beyond standard in summer, but a minus variation was seen in spring. AQI and ratio of days beyond standard presented a pattern of being higher in the east and north, and lower in the west and south. And the most polluted area covered Shanghai, Jiangsu, central and northern Anhui, and northern Zhejiang, then followed by central Hubei and Chengdu-Chongqing area, and the air quality was good in Yunnan, Guizhou, and western Sichuan. The variation of AQI in spring and summer was mainly presented when studied on east-west direction while it turned to south-north direction in autumn and winter. Factors to emissions of pollutants had a positive influence on the distribution of AQI in target areas, while there was a seasonal variation when it came to the direction of the influence by meteorological factors. The distribution of AQI in the whole year, spring, autumn and winter was mainly determined by the emission factors of air pollutants, while a more powerful influence was seen by meteorological factors in summer. Factors to emissions of pollutants had a positive influence on the distribution of AQI in target areas, while there was a seasonal variation when it came to the direction of the influence by meteorological factors. Whether for the whole year, spring, autumn or winter, the distribution of AQI was decided by the volume of air pollution pollutant, and a more powerful influence was seen by meteorological factors in summer.

Key words: air quality; temporal-spatial distribution; influencing factors; seasonal variation; Yangtze River economic belt

收稿日期: 2019-08-02

基金项目: 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室项目(KLACP-2018-01);国家自然科学基金资助项目(41671213);中央高校基本科研业务费资助专项项目(GK201803055)

* 责任作者, 副教授, tjshao2010@126.com

长江经济带覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南和贵州等 11 个长江沿岸省市,面积约 $2.05 \times 10^6 \text{ km}^2$,约占全国陆地面积的 21.4%,人口和生产总值均超过全国的 40%,是我国重要的人口密集区和产业承载区,长期以来高强度的开发使区域内环境污染问题严重,大气污染尤为突出.根据《2017 年中国气候公报》^[1],2017 年江淮、江汉、江南中北部、四川盆地等都出现过大范围、持续性霾过程,其中江淮大部在 2016 年 12 月 30 日~2017 年 1 月 7 日甚至出现持续性重度霾.加快推进长江经济带大气污染治理,提高城市空气质量,已成为区域经济实现绿色发展的迫切要求.

目前,国内外学者从不同时空尺度和不同角度对长江经济带大气污染物的变化规律及影响因素做过广泛的研究.有学者以上海^[2]、南京^[3]、杭州^[4]、武汉^[5]、重庆^[6]、徐州^[7]等重要城市为研究对象,研究 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 等主要大气污染物的变化规律,并通过统计学方法分析气象因素对大气污染物的影响或与污染物间的关系.也有学者以长三角城市群^[8-9]、长江中游城市群^[10]、成渝城市群^[11-12]等区域单元或整个长江经济带^[13-14]为研究对象,研究大气污染物的时空变化规律,并从自然条件和社会经济等方面构建评价指标,探索其影响因素.现有研究主要针对某一大气污染物,以空气质量指数(AQI)来衡量长江经济带大气污染整体状况及影响因素的研究相对较少^[15].对污染物空间分布影响因素的研究多从年均值角度出发,对社会经济或污染物排放量方面的影响因素的季节差异关注较少.因此,本文基于 2015~2018 年空气质量实时监测数据,研究长江经济带 AQI 的时空变化特征,并从气象因素和主要污染物排放清单两方面选取评价指标,利用地理探测器揭示长江经济带空气质量分布的影响因素及其季节差异,为长江经济带大气污染防治提供参考.

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

空气质量监测数据来源于全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>),研究时段为 2015 年 1 月 1 日~2018 年 12 月 31 日,数据统计有效性按《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[16]执行.长江经济带在全国城市空气质量实时发布平

台上发布的监测城市共 141 个,由于诸暨等 5 个城市部分年份数据缺失较多,不符合数据统计有效性要求而被剔除,本文实际评价的城市共 136 个.AQI 污染等级评价标准按《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 633-2012)^[17]执行,即 0~50 为优、51~100 为良、101~150 为轻度污染、151~200 为中度污染、201~300 为重度污染、>300 为严重污染,轻度及以上污染为空气质量超标.

大气污染物排放清单数据来源于中国多尺度排放清单模型(MEIC)网站(<http://www.meicmodel.org/>),MEIC 是一套自下而上覆盖 700 多种人为排放源的中国大气污染物和温室气体排放清单模型^[18],由清华大学开发和维护.MEIC 提供的排放清单由于污染物类型较齐全、精度较高,已在污染原因分析、空气质量预报预警、空气污染达标规划等方面获得了较为广泛的应用^[19].MEIC 提供的大气污染物和温室气体网格化排放清单共 10 种,本文选择其中的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 、挥发性有机物(VOCs)、 PM_{10} 、CO 和 SO_2 等 6 种作为评价指标.2008 年以来,MEIC 每 2a 公布一次大气污染物网格化排放清单,最新公布的年份为 2016 年.

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)发布的中国地面气候资料月值数据集.2016 年长江经济带在该数据集上的气象站点共 288 个,将各站点观测指标按季度和年统计后,使用 Anuspline 软件插值成栅格,再使用 ArcGIS 10.2 提取各城市的气象数据.

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关分析 由于大气的传输作用,相邻地区的大气污染物通常相互影响,其分布常具有空间自相关性.本文采用全局莫兰指数(Moran's I)来测度长江经济带 AQI 的空间自相关性.公式如下^[20]:

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

式中: x_i 、 y_i 为城市 i 、 j 的 AQI; n 为城市数量; W_{ij} 为空间权重矩阵; \bar{x} 为 AQI 的平均值. $I \in [-1, 1]$, $I > 0$ 表示正相关,即 AQI 相似的城市趋于集聚分布(高-高或低-低分布); $I < 0$ 表示负相关,即 AQI 相似的城市趋于离散分布(高-低或低-高分布); $I = 0$ 表示不相关,AQI 趋于离散分布. $|I|$ 越大,表示空间自相关性越强.

全局 Moran's I 的显著性采用 Z 统计量进行检验, 公式如下:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (2)$$

式中: $E(I)$ 、 $\text{VAR}(I)$ 分别为全局 Moran's I 的数学期望和变异系数。

1.2.2 冷热点分析 虽然全局 Moran's I 能判别 AQI 的集聚模式, 但无法识别集聚的具体位置. 本文使用 Getis-Ord G_i^* 来识别长江经济带 AQI 集聚的具体位置, 公式如下^[21]:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d)x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (3)$$

式中: x_j 为城市 j 的 AQI; n 为城市数量; W_{ij} 为空间权重矩阵; d 为距离尺度。

对 $G_i^*(d)$ 检验的标准化统计量为:

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{VAR}(G_i^*)}} \quad (4)$$

式中: $E(G_i^*)$ 、 $\text{VAR}(G_i^*)$ 分别为 $G_i^*(d)$ 的数学期望和变异系数. 若 $Z(G_i^*)$ 为正且显著, 表示城市 i 是 AQI 高值集聚区(热点), 反之则为 AQI 低值集聚区(冷点)。

1.2.3 地理探测器 地理探测器是用于探测空间分异性驱动力的一种统计学方法^[22], 能有效识别因子变量是否对结果变量的空间分布产生影响. 最早由 Wang 等^[23]提出, 目前已在自然环境、经济环境、社会环境等获得广泛和有效的应用^[24-25]. 本文使用地理探测器研究污染物排放量因子和气象因子对长江经济带 AQI 空间分异的解释力大小, 计算公式如下^[22]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中: q 表示某探测因子对 AQI 空间分异的解释

力; $h=1, 2, \dots, L$ 表示探测因子的分层数; N 表示城市数量; N_h 表示探测因子在层 h 的城市数量; σ^2 表示长江经济带 AQI 的方差; σ_h^2 表示层 h 的 AQI 方差. $q \in [0, 1]$, 值越大表示该因子对 AQI 空间分异的解释力越强。

由于地理探测器只能探测类型变量, 对于数值型变量, 探测前需要先离散化, 本文使用分位数法将各探测因子等分为 5 层. 此外, 由于地理探测器无法识别探测因子的影响方向, 本文采用相关分析确定: 如果探测因子与 AQI 呈正相关, 则确定为正向影响, 在 q 值前标“+”; 如果探测因子与 AQI 呈负相关, 则确定为负向影响, 在 q 值前标“-”; 否则为影响方向不明确, 不标记符号。

2 结果与讨论

2.1 长江经济带空气质量的时间变化特征

2015~2018 年长江经济带空气质量总体趋于改善(表 1), 年均 AQI 由 77 降至 72, 平均超标率由 19.8% 降至 16.2%. 6 项常规监测指标中, PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂ 等 5 项指标的浓度和超标率均有不同程度的下降, 其中 SO₂ 降幅最大, 年均浓度由 21 μg/m³ 下降至 12 μg/m³, 下降了 42.9%, 近 4a 已基本无超标现象发生; PM_{2.5} 和 PM₁₀ 其次, 年均浓度分别由 49, 77 μg/m³ 下降至 39, 63 μg/m³, 分别下降了 20.8% 和 17.5%, 超标率分别由 15.4% 和 7.2% 下降至 8.8% 和 3.6%; CO、NO₂ 变化最小, 降幅分别为 0.1 mg/m³ 和 1 μg/m³, 近 4a 来 CO 超标也较少发生, NO₂ 超标率则在 0.9%~1.3% 间变化. 只有 O₃ 出现了上升, 年均浓度由 83 μg/m³ 上升至 92 μg/m³, 超标率由 5.1% 上升至 7.2%. 在此消彼长之下, 2017 年开始 O₃ 的超标率超过 PM₁₀, 成为长江经济带仅次于 PM_{2.5} 的大气污染物。

表 1 2015~2018 年长江经济带 AQI 变化情况

Table 1 Variation of AQI from 2015 to 2018 in the Yangtze River economic belt

年份	AQI		PM _{2.5}		PM ₁₀		SO ₂		CO		NO ₂		O ₃	
	平均值	超标率 (%)	浓度 (μg/m ³)	超标率 (%)	浓度 (μg/m ³)	超标率 (%)	浓度 (μg/m ³)	超标率 (%)	浓度 (mg/m ³)	超标率 (%)	浓度 (μg/m ³)	超标率 (%)	浓度 (μg/m ³)	超标率 (%)
2015	77	19.8	49	15.4	77	7.2	21	0.0	1.0	0.0	30	1.0	83	5.1
2016	75	19.1	45	14.0	73	6.2	18	0.0	0.9	0.0	30	1.0	86	5.0
2017	76	19.7	44	12.8	72	5.2	15	0.0	0.9	0.0	31	1.3	91	6.8
2018	72	16.2	39	8.8	63	3.6	12	0.0	0.9	0.0	29	0.9	92	7.2

AQI 月变化曲线大体呈 U 型, 具有冬春高、夏

秋低的特点(图 1). 12 月或 1 月 AQI 最高, 此后波动

下降,6~10 月维持在相对较低的水平,11 月后快速升高,完成 1a 的周期变化.近 4a 冬、春、秋和夏季的 AQI 平均值分别为 93、76、66、64,超标率分别为 34.7%、16.7%、11.6%和 12.1%,冬季显著高于其他季节.2015~2018 年长江经济带 AQI 的下降主要体现在冬、秋季,春季变化不大,夏季则略有上升.冬季 AQI 平均值由 2015 年的 99 降至 2018 年的 84,下降了 15.4%;秋季由 69 下降至 62,下降了 10.7%;春季保持在 75 左右,基本不变;夏季由 64 上升至 67,上升了 4.8%.秋、冬季 AQI 的下降主要由 PM_{2.5}、PM₁₀ 超标率的快速下降引起,其中冬季 PM_{2.5}、PM₁₀ 的超标率分别由 38.4%、21.2%下降至 25.4%和 10.5%,分别下降了 12.9%和 10.7%,秋季 PM_{2.5}、PM₁₀ 的超标率分别由 9.9%、3.5%下降至 4.7%和 1.7%,分别下降了 5.2%和 1.7%,其余污染物变化不大.夏季 AQI 的上升则主要由于 O₃ 超标率的上升引起,O₃ 超标率由 2015 年的 8.2%上升至 2018 年的 14.5%,上升了 6.3%.尽管同期 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的超标率分别由 2.8%、0.6%下降至 0.1%和 0.0%,但 O₃ 超标率的上升仍使夏季 AQI 整体上升.

引起大气污染的首要污染物主要是 PM_{2.5} 和 O₃(图 2),2015~2018 年以 PM_{2.5} 和 O₃ 为首要污染物的污染天数占总污染天数的比例为 95.5%~96.7%.其中以 PM_{2.5} 为首要污染物的污染天数主要发生在 10 月~次年 3 月,以 O₃ 为首要污染物的污染天数主

要发生 4 月~9 月.随着 PM_{2.5} 浓度的下降和 O₃ 浓度的上升,以 O₃ 为首要污染物的污染天数比例明显上升,持续时间也明显延长.以 PM_{2.5} 为首要污染物的污染天数比例已由 2015 年的 73.5%下降到 2018 年的 52.3%,以 O₃ 为首要污染物的污染天数比例则由 23.2%上升到 43.3%,有超越 PM_{2.5} 的趋势.以 O₃ 为首要污染物的污染天数比例大于以 PM_{2.5} 为首要污染物的污染天数比例的月份则由 2015 年的 4~9 月延长至 2018 年的 4~10 月,且各月以 O₃ 为首要污染物的污染天数比例在持续增加.

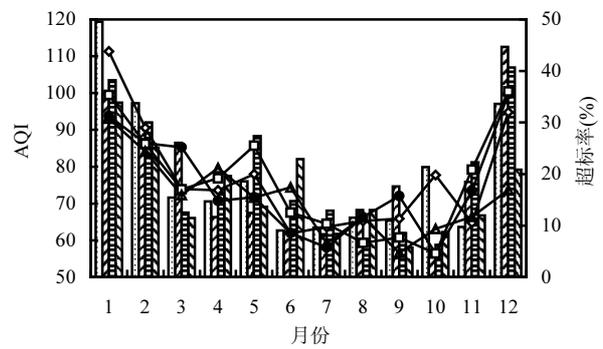


图 1 2015~2018 年长江经济带 AQI 和超标率的月变化
Fig.1 Monthly variation of AQI and the percentage of days beyond standard from 2015 to 2018 in the Yangtze River economic belt

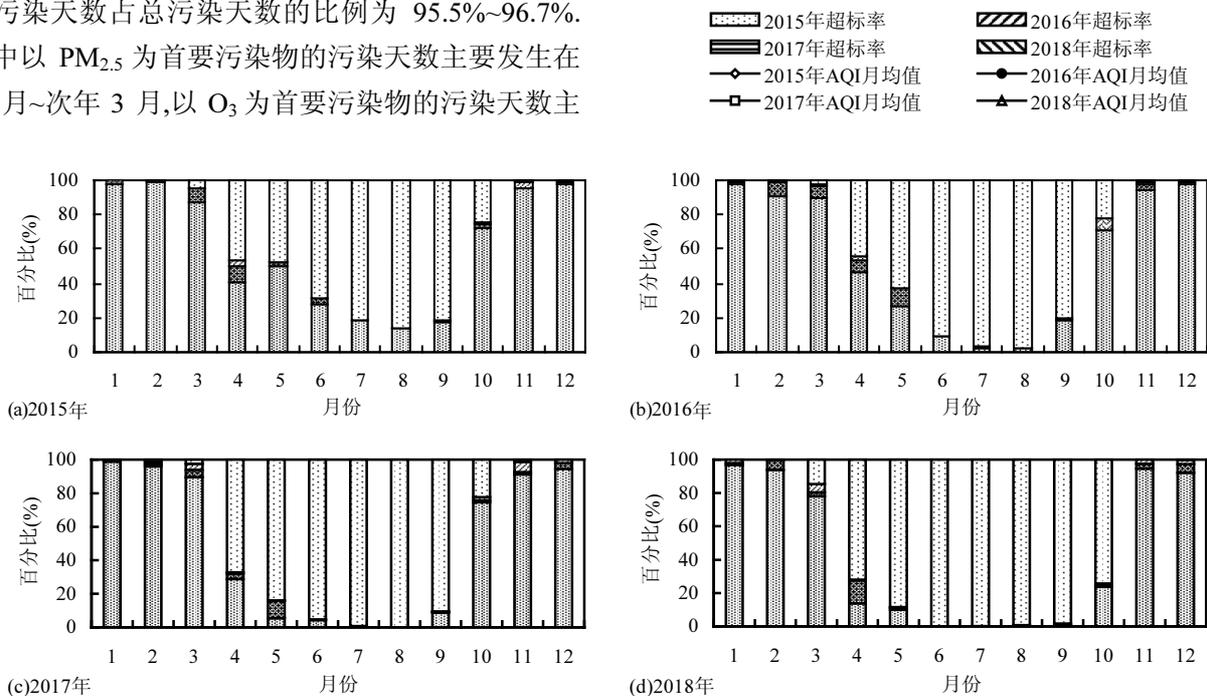


图 2 2015~2018 年长江经济带首要污染物的比例构成
Fig.2 Proportion of primary pollutants from 2015 to 2018 in the Yangtze River economic belt

□ O₃ ▨ NO₂ ▩ CO ▤ SO₂ ▧ PM₁₀ ▦ PM_{2.5}

2.2 长江经济带空气质量空间分布及变化特征

长江经济带 AQI 和空气超标率总体呈东高西低、北高南低的分布特征(图 3a、图 3b)。从东西向看,东部的江苏、安徽、上海和浙江 AQI 最高,近 4a 平均值为 82,平均超标率为 25.5%。其中,上海、江苏、安徽中北部和浙江北部污染最严重,许多城市超标率在 30.0%以上。中部的湖北、湖南和江西其次,近 4a AQI 平均值为 77,平均超标率为 19.5%。其中,湖北中部以武汉为中心的区域最严重,平均超标率达 28.9%。西部的四川、重庆、云南和贵州 AQI 最低,近 4a AQI 平均值为 65,平均超标率 10.0%。西部高污染城市主要集中在成渝城市群,核心区域平均超标率达 24.6%,其余地区空气质量良好,超标率多在 5%以下。从南北向上看,北部江苏、上海、安徽、湖北、

重庆和四川 6 省市近 4a AQI 平均值和平均超标率分别为 84 和 25.7%,显著高于南部浙江、江西、湖南、贵州和云南 5 省的 64 和 10.7%。

2015~2018 年,除安徽、江西 AQI 略有上升,其余省市都有不同程度的下降(图 3c、图 3d)。其中湖北、上海、浙江降幅最大,AQI 分别下降了 14、14 和 11,超标率分别下降了 12.1%、11.7%和 8.0%。湖南、重庆、四川降幅其次,AQI 分别下降了 8、7 和 7,超标率分别下降了 7.6%、1.1%和 4.2%。江苏、贵州、云南降幅最小,AQI 分别下降了 5、3、2,超标率分别下降了 3.4%、1.6%和 1.5%。安徽和江西 AQI 分别上升了 6 和 1,超标率分别上升了 6.3%和 1.1%。总体上,除了安徽中北部外,空气污染严重的城市空气质量多有改善,但未改变空气质量的整体分布格局。

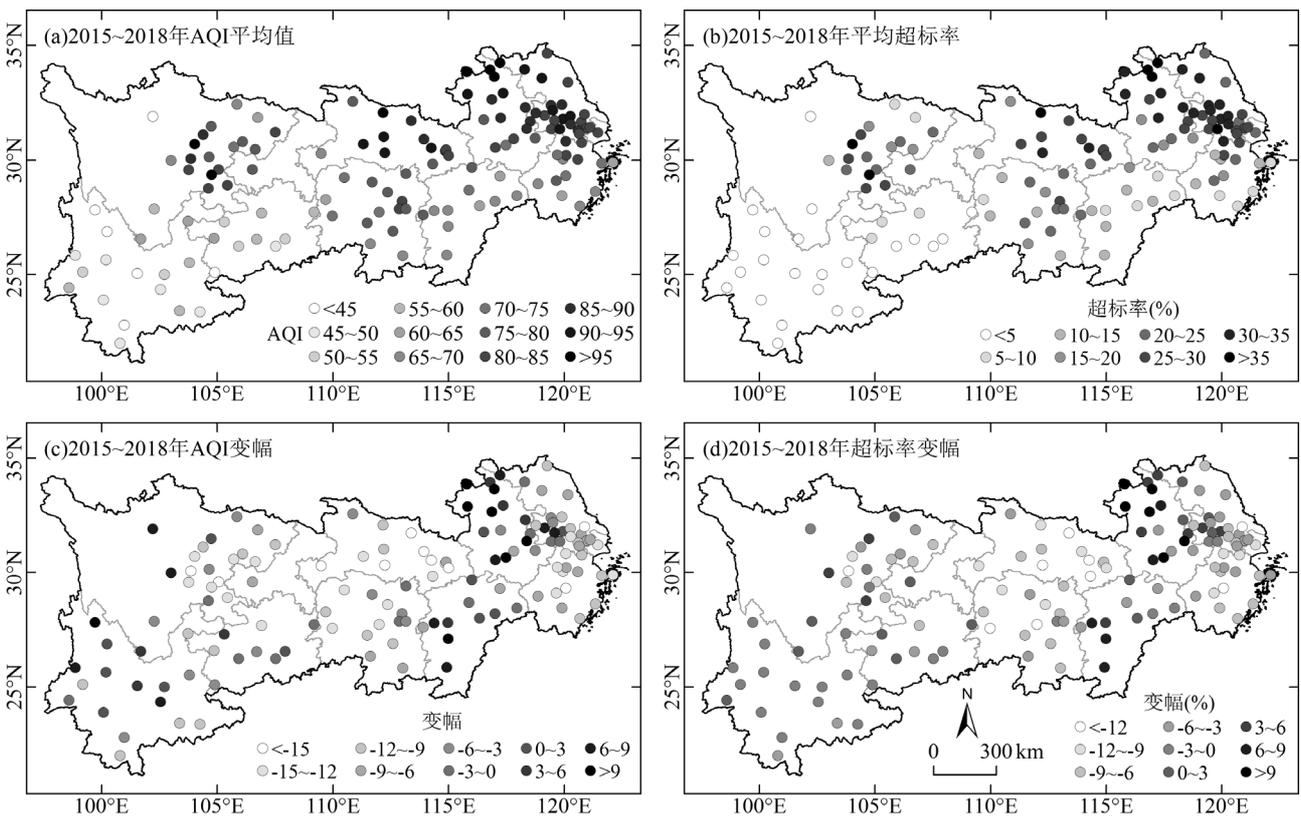


图 3 2015~2018 年长江经济带 AQI 的空间分布和变化

Fig.3 Spatial distribution and variation of AQI from 2015 to 2018 in the Yangtze River economic belt

从 2016 年大气超标率的季节变化来看(图 4),冬季污染最严重,超标率和污染范围显著高于其他季节,超标率大于 20%的城市共 104 个,遍布除云南和贵州外的地区。其中安徽北部、湖北中部及成渝地区部分城市超标率达 50%以上。春季污染

明显减弱,高污染范围向长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群收缩,超标率大于 20%的城市降至 50 个,主要分布在江苏、安徽北部、湖北中部和成渝地区,超标率大于 50%的城市消失。夏季污染程度继续减弱,污染范围进一步缩小。超标

率大于 20%的城市降至 22 个,主要分布在上海、江苏南部和浙江北部等长三角城市群核心区域及成渝城市群的核心地区.秋季超标率开始上升,污

染范围向西、向北扩大.超标率大于 20%的城市增加至 35 个,主要分布在安徽北部、湖北中部、湖南中部和成渝地区.

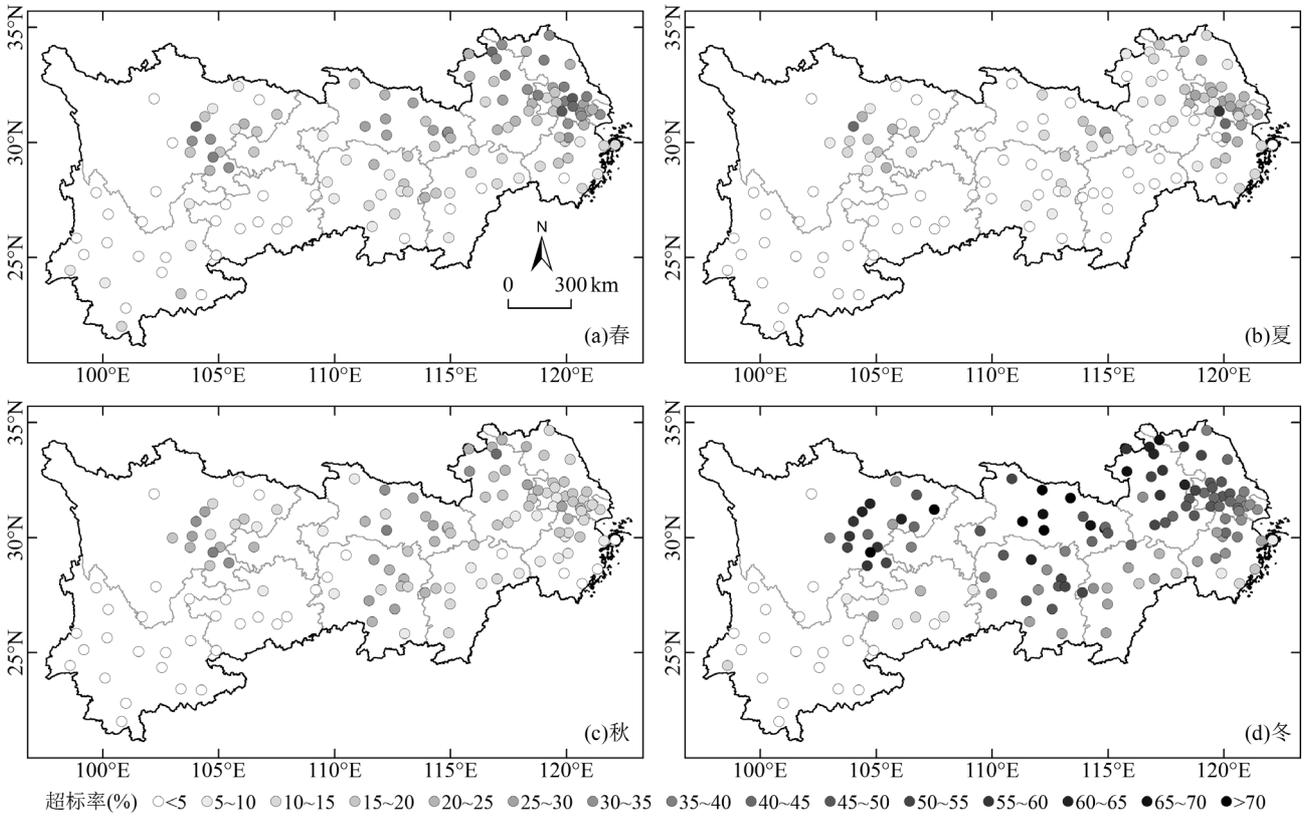


图 4 2016 年长江经济带空气超标率的季节变化

Fig.4 Seasonal variation of the rate of days beyond standard in the Yangtze River economic belt in 2016

2.3 空间集聚特征

分别计算长江经济带 2015~2018 年 AQI 的全局 Moran's I ,并以 2016 年为例计算各季节 AQI 的全局 Moran's I (表 2).结果显示,全局 Moran's I 均大于 0,且通过了 0.01 的显著性检验,表明长江经济带 AQI 具有显著的正的空间自相关性,空间分布呈高-高集聚或低-低的集聚模式.

采用 Getis-Ord G_i^* 识别 AQI 集聚的位置(图 5).结果发现,2015~2018 年长江经济带 AQI 的冷、热点分布特征大体相同,均呈东热西冷的格局,热点和冷点呈东北-西南对角分布.热点主要分布在江苏、上海、安徽中北部和浙江北部,进一步证实这些地区已形成持续连片的高污染区.冷点主要分布在贵州、云南和四川西部,是长江经济带空气质量优良区.此外,湖北中部和成渝地区也有热点分布,但年际变化较大,均随空气质量的好转而呈减弱趋势.

表 2 2015~2018 年长江经济带 AQI 全局 Moran's I
Table 2 Moran's I of AQI in the Yangtze River economic belt from 2015 to 2018

时间	2015	2016	2017	2018	2016 年			
					春	夏	秋	冬
Moran's I	0.540	0.473	0.513	0.622	0.551	0.584	0.360	0.385
Z-score	16.616	14.628	15.819	19.104	16.982	18.024	11.209	11.930
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

以 2016 年为例,利用 Getis-Ord G_i^* 分析长江经济带 AQI 空间集聚的季节演变特征(图 6).结果显示,冷点位置相对稳定,但热点的季节变化明显.春、夏、秋、冬 4 季的冷点都主要分布在贵州和云南.春季热点广泛分布在江苏、上海、安徽中北部和浙江北部,夏季向长三角城市群核心区域收缩,秋、冬季则向北迁移、向西扩展,主要分布在长江经济带北部.整体来看,春、夏季长江经济带 AQI 的差异主要表现为东西向的差异,秋、冬季则主要表现为南北向差异.经计算,其余年份也有类似的季节变化规律.

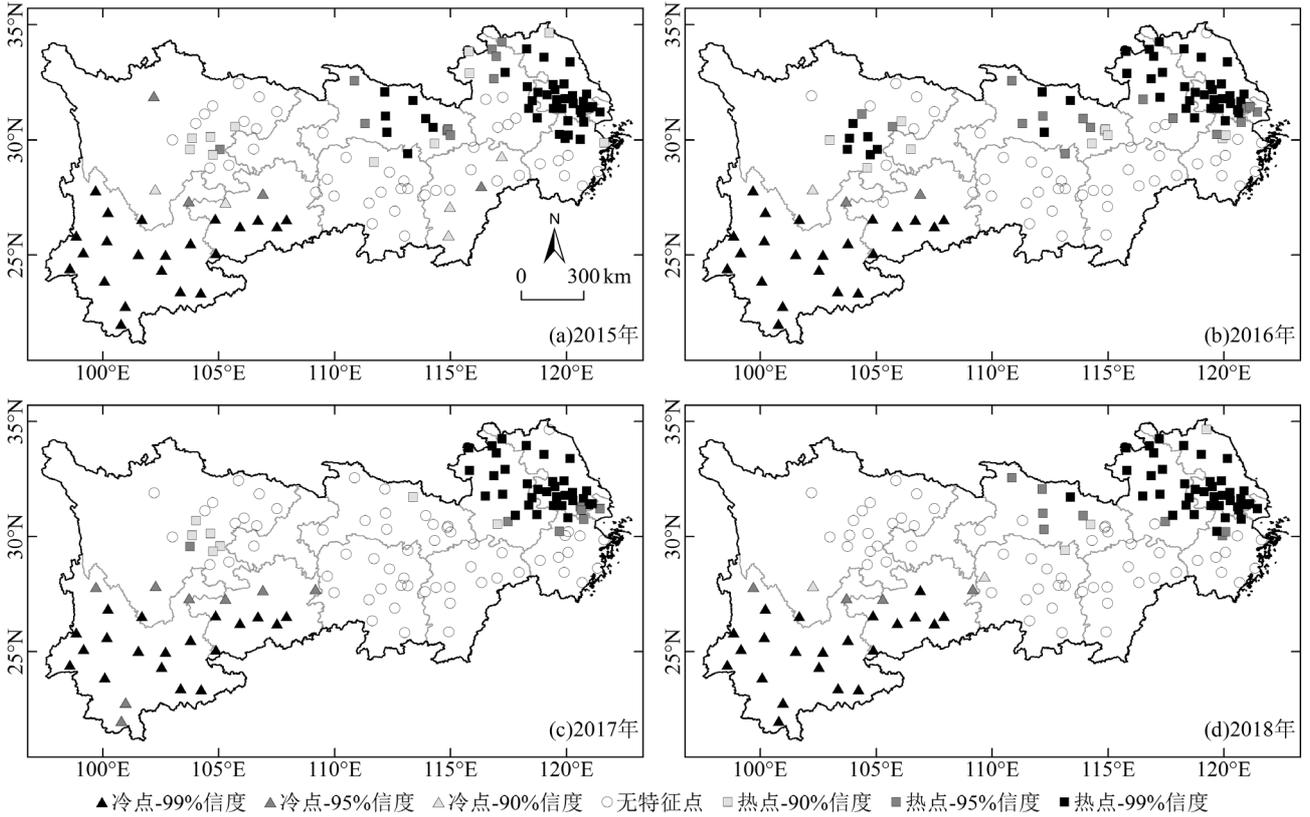


图5 2015~2018年长江经济带AQI冷热点空间分布

Fig.5 Spatial agglomeration of AQI in the Yangtze River economic belt from 2015 to 2018

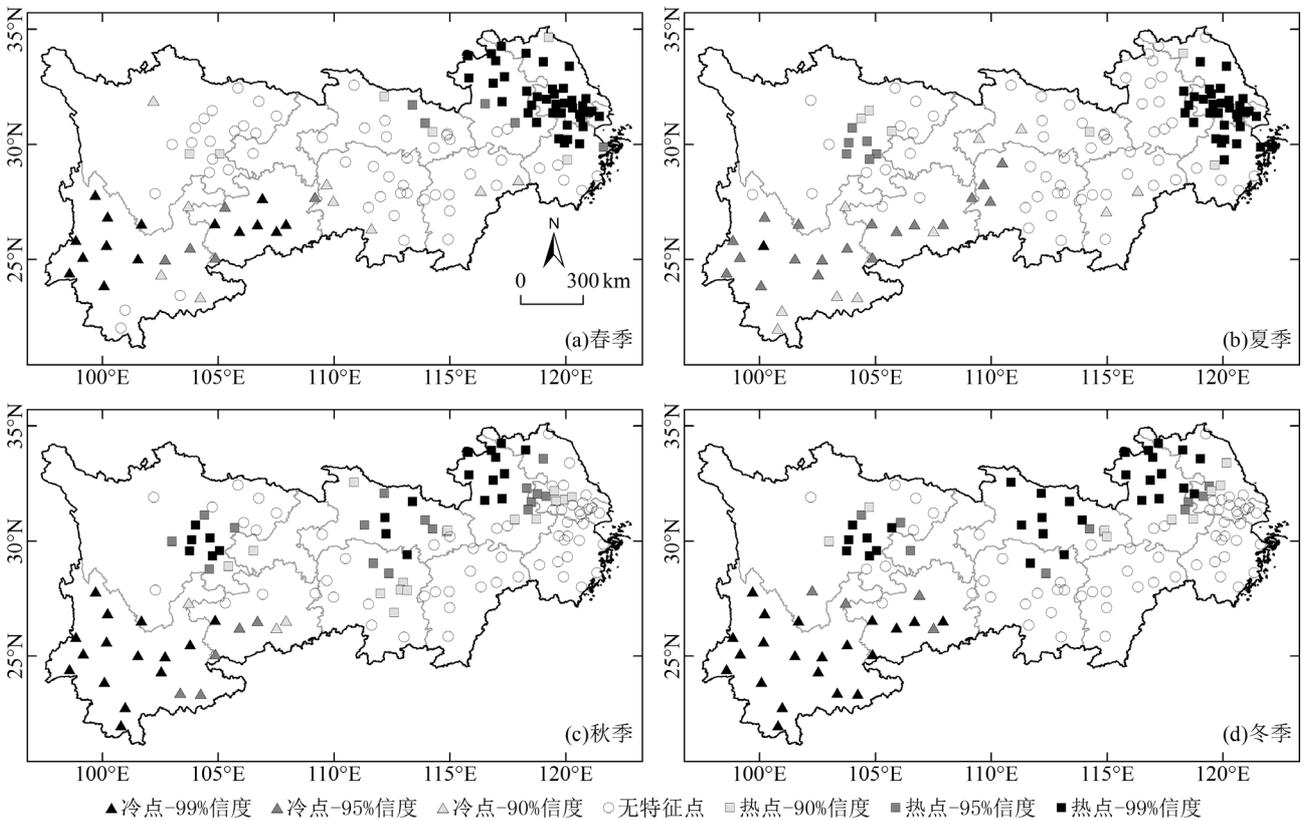


图6 2016年长江经济带AQI冷热点分布的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of the spatial agglomeration of AQI in the Yangtze River economic belt in 2016

2.4 空气质量分布的影响因素

利用地理探测器对 2016 年长江经济带 AQI 年均值分布的影响因素进行探测.结果表明(表 3),除年降水量外,其余因子的影响力均通过了显著性检验,对长江经济带 AQI 的分布均有显著影响.各因子中,只有日照时数呈负向影响,其余因子均呈正向

影响.污染物排放量因子的影响力明显大于气象因子,除 SO_2 排放量外,各因子的 q 值均大于气象因子.可见,长江经济带空气质量空间分布格局主要由大气污染物排放量决定,气象条件对局部空气质量有一定的调节作用,这是 AQI 具有东高西低特征的根本原因.

表 3 影响因素地理探测结果

Table 3 Results of geographical detector analysis

时间	$\text{PM}_{2.5}$ 排放量	NO_x 排放量	VOCs 排放量	PM_{10} 排放量	CO 排放量	SO_2 排放量	气温	日照时数	降水量	相对湿度	风速
全年	+0.215**	+0.345**	+0.404**	+0.169**	+0.293**	+0.105*	+0.105*	-0.149**	0.060	+0.113**	+0.126**
春季	+0.176**	+0.363**	+0.403**	+0.187**	+0.221**	+0.120**	-0.131**	+0.168**	-0.097*	+0.188**	+0.141**
夏季	+0.175**	+0.328**	+0.416**	+0.172**	+0.228**	+0.108**	+0.436**	+0.345**	0.023	-0.095*	+0.243**
秋季	+0.187**	+0.225**	+0.300**	+0.175**	+0.237**	+0.108**	+0.085*	-0.176**	0.013	0.048	+0.142**
冬季	+0.175**	+0.250**	+0.273**	+0.158**	+0.236**	+0.090*	-0.216**	-0.111**	+0.171**	+0.077*	+0.075*

注: **、* 分别表示通过了 0.01 和 0.05 水平的显著性检验.

污染物排放量因子中,VOCs 排放量和 NO_x 排放量的影响力最大, q 值分别为 +0.404** 和 +0.345**.这可能与其特征有关,一方面它们是光化学反应生成 O_3 的最主要的 2 种前体物^[26];另一方面它们还能通过复杂化学反应生成 $\text{PM}_{2.5}$,是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要二次源^[27].可见 VOCs 和 NO_x 排放量对以 O_3 为主要首要污染物的夏季和以 $\text{PM}_{2.5}$ 为主要首要污染物的冬季均有影响,因而对空气质量有最大的识别度.CO 排放量、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量和 PM_{10} 排放量的影响力其次, q 值分别为 +0.293**、+0.215** 和 +0.169**.CO 既是 O_3 前体物,本身又是主要的大气污染物监测指标, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放量则对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度有直接影响,因而对 AQI 分布均有显著的影响. SO_2 排放量的影响力最小, q 值为 +0.105*.这可能与近年来 SO_2 浓度的快速下降有关, SO_2 超标已较少发生,对空气质量的影响较小.

气象因素中, q 值最大的是日照时数,为 -0.149**.日照时数呈负向影响,可能与 $\text{PM}_{2.5}$ 对能见度的影响有关.日照时数长虽然有利于光化学反应,对 O_3 浓度的上升有正向作用.但长江经济带的主要首要污染物是 $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{2.5}$ 能严重降低能见度,减少日照时数,因而与空气质量呈负相关关系.风速、相对湿度和气温的 q 值其次,分别为 +0.126**、+0.113** 和 +0.105*.相对湿度对空气质量的影响表现为 2 个相反的方面:一方面,相对湿度高有利于粒径为 0.005~0.050 μm 的大气气溶胶粒子吸湿增长,最终转化形成 $\text{PM}_{2.5}$ ^[28],

因而与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有正相关关系;另一方面,高湿环境不仅利于 O_3 的干沉降^[11],其蕴含的自由基还与 O_3 反应消耗 O_3 ^[29],此外水汽的消光机制也能影响太阳辐射,降低 O_3 的光化学反应效率^[11],因而与 O_3 浓度有负相关关系.相对湿度呈正向影响,说明从全年来看,相对湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响更大.气温对空气质量的影响也有完全相反的 2 个方面,一是高气温利于光化学反应,引起 O_3 浓度上升^[30],促进 NO_x 、 SO_2 、VOCs 等气态污染物向 $\text{PM}_{2.5}$ 转化^[31],引起 AQI 升高;二是高气温利于空气对流,利于大气污染物的扩散,而冬季低气温则易形成静稳天气,利于大气污染物的积累^[32],这是冬季空气质量更差的原因之一.气温的影响方向为正向,说明从全年来看,在 AQI 的空间分异上,气温的主导作用是促进 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 等二次污染物的形成,刘海猛等^[32]和黄小刚等^[33]分别研究京津冀和汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响因素时也得出过类似的结论.一般认为,风和降水是改善空气质量的重要气象因素.因为风有利于污染物扩散,风速越大,扩散能力越强,空气质量越好.降水则对污染物有显著的冲刷作用^[34],降水天气的空气质量一般要好于非降水天气.然而,本研究中风速呈正向影响,降水量的影响力不显著,均与传统认识相悖.这可能与研究的尺度大小有关.从单个城市来看,许多研究表明风和降水量均与污染物浓度有显著的负相关关系^[2,4].从城市群尺度来看,除核心城市外,多数城市经济发展水平的差异相对较小,污染物排

放量的差异也相对较小,风和降水量与城市群空气质量一般也有显著的负相关关系^[9,32].但长江经济带横跨东、中、西部,东西部经济发展水平差异较大,污染物排放量的东西差异非常明显.以 PM_{2.5} 排放量为例,2016 年东、中、西部的平均排放密度分别为 238.0,165.7,112.2kg/km²,东部约为西部的 2.1 倍.风速、降水量的分布也大体表现为东高西低,其中 2016 年东、中、西部的平均风速分别为 2.3,1.9,1.7m/s,年均降水量分别为 1744.7,1678.7,1116.1mm,与污染物排放量在空间分布上呈正相关.风和降水量虽然对局部空气质量的改善有重要作用,但并未改变长江经济带空气质量的总体分布格局,因而其空间分布的相关性评价结果为正或不显著.此外,风对上风向城市大气污染物有扩散作用的同时,也可能对下风向城市造成输入型污染,引起污染物浓度升高,一些下风向城市污染物浓度可能与风速有正相关关系.且本文对风和降水量统计的时间尺度为年或季节,时间尺度较长,与污染物浓度关系的很多信号可能被平滑或掩盖掉.这可能也是风和降水量的评价结果与传统认识相悖的原因.

2.5 空气质量分布影响因素的季节差异

按季节对各因子的影响力进行探测(表 3),以识别各季节影响空气质量的主导因素.结果显示,各季节的主导因子差异较大.春季影响力最大的 3 个因子分别为 VOCs、NO_x 和 CO 排放量, q 值分别为 +0.403^{**}、+0.363^{**}和+0.221^{**};夏季为气温、VOCs 排放量和日照时数, q 值分别为+0.436^{**}、+0.416^{**}和+0.345^{**};秋季为 VOCs、CO 和 NO_x 排放量, q 值分别为+0.300^{**}、+0.237^{**}和+0.225^{**};冬季为 VOCs、NO_x 和 CO 排放量, q 值分别为+0.273^{**}、+0.250^{**}和+0.236^{**}.可见,春、秋和冬季污染物排放量因子的影响力显著大于气象因子,影响力最大的 3 个因子均为污染物排放量因子.但夏季气象因子的影响力更大,影响力最大的 3 个因子中有 2 个为气象因子.

从影响因子的影响方向来看,污染物排放量因子在各个季节均呈正向影响,但气象因子的影响方向多随季节变化而变化.其中,气温的变化最明显,在夏、秋季为正向影响,在冬、春季为负向影响,且是夏、冬季影响力最大的气象因子.日照时数在春、夏季呈正向影响,秋、冬季呈负向影响.相对湿度在夏季呈负向影响,在冬、春季呈正向影响,秋季影响力

未通过显著性检验.与年均值评价结果相似,平均风速的影响力多为正向,降水量的影响力多不显著,这与研究空间尺度有关,并非其真实作用的反映.污染物排放量因子的影响方向虽不随季节变化,但其影响力的季节差异明显.总体上看,VOCs、NO_x 和 CO 排放量等 O₃ 前体物因子的影响力大体为夏季大、冬季小,PM_{2.5} 排放量的影响力冬季大、夏季小,PM₁₀ 和 SO₂ 排放量则春季大、冬季小.

空气质量影响因素的季节变化与主要首要污染物的季节变化有关.夏季的主要首要污染物是 O₃, VOCs、NO_x、CO 等前体物是光化学反应的物质基础,气温、太阳辐射是光化学反应的重要环境条件^[35],因而夏季 VOCs 排放量、NO_x 排放量、CO 排放量、气温和日照时数对空气质量有最大的正向影响力.而水汽对 O₃ 具有沉降和清除作用^[11],则是夏季相对湿度呈负向影响的主要原因.秋末到春初的主要首要污染物是 PM_{2.5},因而 PM_{2.5} 排放量的影响力最大.此时气温的主导作用是影响空气对污染物的扩散能力,气温高的地区空气扩散能力相对较强,空气质量相对较好,因而其影响力呈负向.相对湿度的影响方向转为正向与其有助于气溶胶粒子的吸湿增长有关,日照时数转为负向则与 PM_{2.5} 对能见度的影响有关.

3 结论

3.1 2015~2018 年长江经济带空气质量总体趋于改善,平均超标率由 19.8%降至 16.2%.PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO、NO₂ 等 5 项常规监测指标均有不同程度的下降.但 O₃ 逆势而升,2017 年开始超标率超过 PM₁₀,成为长江经济带仅次于 PM_{2.5} 的大气污染物.

3.2 AQI 月变化曲线大体呈 U 型,具有冬春高、夏秋低的特点.PM_{2.5} 等指标的下降使冬、秋季空气超标率明显下降,但 O₃ 的上升使夏季空气超标率上升,春季变化不大.

3.3 AQI 和空气超标率大体呈东高西低、北高南低的分布特征,其中上海、江苏、安徽中北部和浙江北部污染最严重,湖北中部和成渝地区其次,云南、贵州和四川西部空气质量良好.春、夏季 AQI 的差异主要表现为东西向,秋、冬季则主要表现为南北向.

3.4 全年和春、秋、冬 3 季 AQI 的分布格局主要由大气污染物排放量决定,气象因子对局部空气质

量有调节作用,但夏季气象因子的影响力更大.大气污染物排放量因子在各个季节对 AQI 分布均有显著的正向影响,但影响力随季节变化而变化,气象因子的影响力和影响方向均有明显的季节差异.

参考文献:

- [1] 中国气象局.2017 年中国气候公报 [R]. 北京: 中国气象局, 2018: 1-50.
China Meteorological Administration. China climate bulletin in 2017 [R]. Beijing: China Meteorological Administration, 2018:1-50.
- [2] Xu J M, Chang L Y, Qu Y H, et al. The meteorological modulation on PM_{2.5} interannual oscillation during 2013 to 2015 in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,572:1138-1149.
- [3] 贺祥,林振山.基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 [J]. *环境科学*, 2017,38(1):22-32.
He X, Lin Z S. Interactive effects of the influencing factors on the changes of PM_{2.5} concentration based on GAM model [J]. *Environmental Science*, 2017,38(1):22-32.
- [4] Li K W, Chen L H, Ying F, et al. Meteorological and chemical impacts on ozone formation: A case study in Hangzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2017,196:40-52.
- [5] Zeng P, Lyu X P, Guo H, et al. Causes of ozone pollution in summer in Wuhan, Central China [J]. *Environmental Pollution*, 2018,241:852-861.
- [6] Su R, Lu K D, Yu J Y, et al. Exploration of the formation mechanism and source attribution of ambient ozone in Chongqing with an observation-based model [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(1):23-32.
- [7] 张宇静,赵天良,殷翀之,等.徐州市大气 PM_{2.5} 与 O₃ 作用关系的季节变化 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(6):2267-2272.
Zhang Y J, Zhao T L, Ying C Z, et al. Seasonal variation of the relationship between surface PM_{2.5} and O₃ concentrations in Xuzhou [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(6):2267-2272.
- [8] 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 X G, Zhao J B. Spatial-temporal variation of ozone in Yangtze River Delta urban agglomeration in 2016 [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(10):3611-3620.
- [9] 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 X G, Shao T J, Zhao J B, 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.
- [10] 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):25-33.
Bai L, Jiang L, Chen Z S. 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):25-33.
- [11] 曹庭伟,吴锴,康平,等.成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2018,38(4):1275-1284.
Cao T W, Wu K, Kang P, et al. Study on ozone pollution characteristics and meteorological cause of Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(4):1275-1284.
- [12] 吴浪,周廷刚,温莉,等.基于遥感数据的 PM_{2.5} 与城市化的时空关系研究——以成渝城市群为例 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(9):244-254.
Wu L, ZHao T G, Wen L, et al. Study on spatio-temporal relationship between PM_{2.5} and urbanization based on remote sensing data——A case study of Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018,27(9):244-254.
- [13] Li J B, Huang X J, Kwan M P, et al. The effect of urbanization on carbon dioxide emissions efficiency in the Yangtze River delta, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,188:38-48.
- [14] 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 M, Wang Y. 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.
- [15] 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 L, Jiang L, Zhou H F, 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.
- [16] GB 3095-2012 环境空气质量标准 [S].
GB 3095-2012 Ambient air quality standards [S].
- [17] HJ 633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S].
HJ 633-2012 Technical regulation on ambient air quality index (on trial) [S].
- [18] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009,9(14):5131-5153.
- [19] 何斌,梅士龙,陆琛莉,等.MEIC 排放清单在空气质量模式中的应用研究 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(10):3658-3668.
He B, Mei S L, Lu C L, et al. The application of MEIC emission inventory in air quality model [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(10):3658-3668.
- [20] Cliff A D, Ord J K. *Spatial Processes: Models and Applications* [M]. London: Pion Limited, 1981:1-260.
- [21] 靳诚,陆玉麒.基于县域单元的江苏省经济空间格局演化 [J]. *地理学报*, 2009,64(6):713-724.
Jin C, Lu Y Q. Evolvement of spatial pattern of economy in Jiangsu province at county level [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(6):713-724.
- [22] 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 J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [23] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors based

- health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(1):107-127.
- [24] 杨智威,陈颖彪,吴志峰,等.粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模 [J]. *资源科学*, 2019,41(6):1154-1166.
Yang Z W, Chen Y B, Wu Z F, et al. Spatial pattern of urban heat island and multivariate modeling of impact factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area [J]. *Resources Science*, 2019, 41(6):1154-1166.
- [25] 黄小刚,赵景波,曹军骥,等.中国城市 O₃ 浓度时空变化特征及驱动因素 [J]. *环境科学*, 2019,40(3):120-1131.
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, et al. Spatial-temporal variation of ozone concentration and its driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2019,40(3):120-1131.
- [26] Yang Y C, Liu X G, Zheng J, et al. Characteristics of one-year observation of VOCs, NO_x, and O₃ at an urban site in Wuhan, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019,79(5):297-310.
- [27] 曹宁,黄学敏,祝颖,等.西安冬季重污染过程 PM_{2.5} 理化特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(1):32-39.
Cao N, Huang X M, Zhu Y, et al. Pollution characteristics and source apportionment of fine particles during a heavy pollution in winter in Xi'an City [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(1):32-39.
- [28] 宋明,韩素芹,张敏,等.天津大气能见度与相对湿度和 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的关系 [J]. *气象与环境学报*, 2013,29(2):34-41.
Song M, Han S Q, Zhang M, et al. Relationship between visibility and relative humidity, PM₁₀, PM_{2.5} in Tianjin [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013,29(2):34-41.
- [29] Finlayson B J, Pitts J N. Photochemistry of the polluted troposphere [J]. *Science*, 1976,192(4235):111-119.
- [30] Coleman L, Martin D, Varghese S, et al. Assessment of changing meteorology and emissions on air quality using a regional climate model: Impact on ozone [J]. *Atmospheric Environment*, 2013,69(69): 198-210.
- [31] Sabetghadam S, Ahmadi Givi F. Relationship of extinction coefficient, air pollution, and meteorological parameters in an urban area during 2007 to 2009 [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014,21(1):538-547.
- [32] 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 H M, Fang C L, Huang J J, 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.
- [33] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等.汾渭平原 PM_{2.5} 浓度的影响因素及空间溢出效应 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(8):3539-3548.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, et al. Influence factors and spillover effect of PM_{2.5} concentration on Fen-wei Plain [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(8):3539-3548.
- [34] 张振华. PM_{2.5} 浓度时空变化特性、影响因素及来源解析研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2014.
Zhang Z H. Research on spatial and temporal variation characteristics, factors, and source apportionment of PM_{2.5} [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [35] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等.气象因素和前体物对中国东部 O₃ 浓度分布的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(6):2273-2282.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, et al. Impact of meteorological factors and precursors on spatial distribution of ozone concentration in Eastern China [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(6):2273-2282.

作者简介: 黄小刚(1978-),男,广西桂林人,副教授,博士,主要研究方向为生态环境评价与治理.发表论文 9 篇.