

乌鲁木齐市空气污染时空分布特征及其与气象因素相关分析

盛永财^{1,2}, 孜比布拉·司马义^{1,2,3}, 王英鹏¹, 王显^{1,2}, 李颖^{1,2}

1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046
2. 新疆大学 智慧城市与环境建模普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046
3. 新疆大学 绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 基于乌鲁木齐市7个检测站点实测数据(参照《环境空气质量标准》规定的6项常规监测污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃)的24小时/8小时国家二级标准和AQI分级标准),对乌鲁木齐市2016年空气质量做变化趋势分析。结合乌鲁木齐市气象要素和城市发展数据对乌鲁木齐市空气质量影响因素做相关分析,然后利用层次分析法(AHP)对乌鲁木齐市环境空气污染时空分布特征的影响因素做评价分析。研究结果有:(1)乌鲁木齐市2016年1月,轻度污染天气占整月的3%、中度污染天气占26%、严重污染天气占32%、重度污染天气占39%;工业园区集中的米东区是乌鲁木齐市空气污染最严重的城区。(2)乌鲁木齐市的城区空气污染物因子和同期气象因素相关性显著;(3)重要污染企业的空间分布对乌鲁木齐市空气污染空间分布起到绝对的影响作用。

关键词: 空气质量; 相关分析; 层次分析法; 乌鲁木齐市

Spatiotemporal distribution pattern of ambient air pollution and its correlation with meteorological factors in Urumqi

SHENG Yongcai^{1,2}, ZIBIBULA·Simayi^{1,2,3}, WANG Yingpeng¹, WANG Xian^{1,2}, LI Ying^{1,2}

1. College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China
2. Key Laboratory of Xinjiang University Intellectualizing City and Environment Modeling Department of Education, Urumqi 830046, China
3. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Background, aim, and scope With the rapid development of urbanization, characteristics of air pollution has changed from soot type to mixed mode in China. Urumqi was in the list of the 10 cities that reported the worst air quality during the first nine months in 2016, according to a report published by the Ministry of Environmental Protection. The study aimed at discovering the main influencing factors of the air pollution in Urumqi. **Materials**

收稿日期: 2017-12-27; 录用日期: 2018-06-11

Received Date: 2017-12-27; Accepted Date: 2018-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770750); 国家留学基金委创新型人才国际合作培养项目(留金美[2017]7751号); 新疆维吾尔自治区地方公派出国留学成组配套项目(117/40299006)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (31770750); Funded by the China Scholarship Council for Innovative Talents International Cooperation Training Project (Liu Jinmei [2017] No. 7751); Group Supporting Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region Pay for Study Abroad (117/40299006)

通信作者: 孜比布拉·司马义, E-mail: zibibulla3283@sina.cn

Corresponding Author: ZIBIBULA·Simayi, E-mail: zibibulla3283@sina.cn

引用格式: 盛永财, 孜比布拉·司马义, 王英鹏, 等. 2018. 乌鲁木齐市空气污染时空分布特征及其与气象因素相关分析[J]. 地球环境学报, 9(4): 323-333.

Citation: Sheng Y C, ZIBIBULA·Simayi, Wang Y P, et al. 2018. Spatiotemporal distribution pattern of ambient air pollution and its correlation with meteorological factors in Urumqi [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(4): 323-333.

and methods Based on the daily air pollution levels (6 regular monitoring pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO , O_3) concentrations, and air quality index (AQI) classification standard) in January 2016 in Urumqi, analyzing temporal and spatial distribution of air pollution in Urumqi by GIS. Main materials including the concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO , O_3 (Xinjiang Department of Environmental Protection, <http://124.117.235.202:8011/>), meteorological factors (China Meteorological Administration, <http://data.cma.cn/user/toLogin.html/>), and Landsat 8 TM image of Urumqi (Geospatial Data Cloud, <http://www.gscloud.cn/>). Combing analytic hierarchy process (AHP) with land use classification and distribution of important pollutant enterprises, by correlation analysis of air pollution factors and meteorological factors to evaluate the influencing factors of air pollution distribution characteristics in Urumqi. **Results** The research showed that lightly polluted, moderately polluted, severely polluted, heavily polluted days accounted for 3%, 26%, 32%, 39% of the whole month in January 2016 respectively. Midong District was the most polluted area, there were significant correlations between air pollution factors and meteorological factors. **Discussion** This research studied the temporal and spatial distribution characteristics of air pollution in Urumqi and its correlation with meteorological factors. The coldest month (January) of Urumqi in 2016 was selected as the study period. Firstly, the temporal and spatial distribution of air pollutant factors and temporal variation of meteorological factors in Urumqi were analyzed. Secondly, correlation analysis was carried out on pollutants and meteorological factors, and it was found that meteorological factors had significant effects on air pollutant factors. Finally, the air pollution assessment model of Urumqi was constructed by AHP, and the relationship of air pollution with land use, important pollutant enterprises and meteorological factors in Urumqi was further analyzed. In the study, some impacts that led to special cases were ignored, for example, breeze and calm wind. **Conclusions** Land use (weighting coefficient was 0.0852), important pollutant enterprises (weighting coefficient was 0.7375) and meteorological factors (weighting coefficient was 0.1773) were the main influencing factors of air pollution in Urumqi. **Recommendations and perspectives** Pollutant discharge type should be considered when the government regulate the pollution emissions to deal with the air pollution.

Key words: air quality; correlation analysis; analytic hierarchy process; Urumqi

原环保部 2016 年 10 月 13 日向媒体发布 2016 年前 9 个月空气质量排名相对较差的 10 大城市, 乌鲁木齐市上榜。随着城市化速度的加快, 我国空气污染特征从传统的煤烟型污染向“复合型”污染转变 (何建军等, 2016a)。城市大气不仅受到局地污染源分布的影响 (贺祥等, 2016), 还受土地利用类型 (许珊等, 2015)、“城市热岛效应” (朱焱等, 2016)、“山谷风热力环流” (董群等, 2017) 和气象因素 (何建军等, 2016b) 等的影响; 其中污染源分布是空气污染的根本原因 (黄成等, 2011), 不利于污染物扩散的气象因素是造成空气污染物浓度增加的直接原因 (崔玉航等, 2017)。国外学者在气象因素对空气质量影响方面的研究有: 气象因素对与空气质量的驱动机制的研究 (Mishra et al, 2016), 昼夜变化和季节变化对空气质量的影响 (Shrestha et al, 2016; Singh et al, 2015), 不同时期车辆排放污染浓度对空气质量的影响 (Kumar et al, 2016) 等。国内学者多集中于

对气象因素与空气污染物相关性研究, 研究区多集中于东部沿海地区 (陈淳祺等, 2013; 周兆媛等, 2014)、经济发达地区 (张媛媛等, 2016) 和大型城市群 (廖志恒等, 2014)、对西部内陆经济欠发达地区的相关研究较少。乌鲁木齐市作为新疆首府, 是我国向西开放的桥头堡, 是闻名世界的国际陆港城市, 其发展与挑战并存, 且担负责任重大。在此背景下, 乌鲁木齐市的健康发展尤为重要, 其发展很大程度上受到大气环境的影响, 所以对乌鲁木齐市大气环境承载力的研究是非常有必要的。

1 材料与研究方法

1.1 数据来源

本文选取乌鲁木齐市官方公布的 7 个监测站 (表 1) 2016 年 1 月每天的 AQI, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 浓度, 数据来自新疆维吾尔自治区环境质量信息发布平台 (<http://124.117.235.202:8011/>)。同期气象观测数据来自乌鲁木齐市国家

基本气象站 (WMOID = 51463) (<http://data.cma.cn/user/toLogin.html/>), 选取的气象因素有气压 (0.1 hPa)、温度 (°C)、相对湿度 (%)、降水量 (0.1 mm)、风速 (0.1 m·s⁻¹)、日照时数 (h), 各数值为 24 小时日均数值。土地利用分类数据来自

地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 乌鲁木齐市 Landsat 8 TM 影像数据, (TM 影像数据信息: 数据标识: LC81430292015246LGN00, 条带号: 143、行编号 29, 中心经度: 87.2719、中心纬度: 44.608, 日期: 2015-09-03, 云量: 0.11)。

表 1 乌鲁木齐市环境空气质量监测控点布设位置
Tab.1 Locations of monitoring sites for ambient air quality in Urumqi

监测站点 Monitoring site	所属区 District	经度 Longitude	纬度 Latitude
收费所 Toll House	天山区 Tianshan District	87°36'24.864"	43°45'01.258"
三十一中学 No.31 Middle School	水磨沟区 Shuimogou District	87°39'10.084"	43°50'41.549"
监测站 Check Station	新市区 New District	87°33'30.877"	43°51'41.215"
铁路局 Railway Bureau	新市区 Mew District	87°32'08.344"	43°47'41.894"
七十四中学 No.74 Middle School	头屯河区 Toutunhe District	87°23'12.594"	43°52'53.767"
新疆农科院农场 Xinjiang Academy of Agricultural Sciences Farm	新市区 New District	87°29'03.588"	43°59'05.716"
米东区环保局 Midong District Environmental Protection Agency	米东区 Midong District	87°38'56.545"	43°57'41.894"

1.2 主要研究方法

1.2.1 大气环境质量指数计算及划分标准

《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ 633—2012) 及《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 是根据保护和改善生态环境、生活环境、人体健康而制定。AQI 具体计算如下 (高庆先等, 2015; 潘本锋和李莉娜, 2016):

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \quad (1)$$

式中: $IAQI_p$ 指污染项目 P 的空气质量分数; C_p 为污染项目 P 的浓度; BP_{Hi} 为相应标准浓度的上限值, BP_{Lo} 为相应标准浓度的下限值, $IAQI_{Hi}$ 为与 BP_{Hi} 对应的空气质量分指数, $IAQI_{Lo}$ 为与 BP_{Lo} 对应的空气质量分指数。

$$AQI = \max \{IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \dots, IAQI_n\} \quad (2)$$

式中: AQI 为空气质量分指数, n 为污染物项目。由上式可知, 如果多个污染项目的空气质量分指数都超标, 那么 AQI 为污染项目的空气质量分指数最大的一个。

根据环境空气质量标准, 可以将环境空气质量指数 AQI 分为六个等级 (表 2)。环境空气质量指数越大, 环境空气质量指数级别就越高, 说明污染程度越严重, 越不利于人类的身体健康。

表 2 环境空气质量等级标准
Tab.2 Ambient air quality standards

空气质量指数 Air quality index (AQI)	空气质量指数级别 Air quality index level	空气质量指数类别 Air quality index category
0—50	一级 One-level	优 Excellent
51—100	二级 Two-level	良 Good
101—150	三级 Three-level	轻度污染 Lightly polluted
151—200	四级 Four-level	中度污染 Moderately polluted
201—300	五级 Five-level	重度污染 Heavily polluted
>300	六级 Six-level	严重污染 Severely polluted

1.2.2 反距离权重法

反距离权重 (IDW) 法插值是一种在 GIS 应用中方便、成熟的研究区域性环境污染物质空间分布的插值方法 (段平等, 2014; 李凯等, 2016), IDW 法以插值点与样本点之间的距离为权重进行加权平均, 离插值点越近的样本点赋予的权重越大; 该方法的缺点在于依赖距离程度较大, 所以误

差也会因距离的加长而变大, 修补方法是指定距离幂值越小, 对距离较远的点产生的影响越大, 能模拟出更加平滑的曲面 (Oktavia et al, 2016)。通过 GIS 空间插值, 可以将离散的点转化为连续变化的平滑曲面, 更好地模拟地理要素空间分布特征; 用 GIS 做 AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃ 的 IDW 空间插值, 能够直观地看到乌鲁木齐市城区的 AQI 及污染因子的时空分布特征。

1.2.3 相关分析

相关分析的作用在于揭示地理要素之间相互关系的密切程度, 而地理要素之间相互关系密切程度的测定, 主要是通过对相关系数的计算来完成 (李琛等, 2017)。对于两个要素 x 与 y , 如果他们的样本值分别为 x_i 与 y_i ($i=1, 2, \dots, n$), 则它们之间的相关系数被定义为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: r_{xy} 为 x 与 y 之间的相关系数; \bar{x} 、 \bar{y} 分别表示两个要素样本值的平均值, 即:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

相关系数 r_{xy} 是表示两要素之间的相关程度的统计指标, 它的值介于 $[-1, 1]$, $r_{xy} > 0$, 表示正相关, 即两要素同向相关; $r_{xy} < 0$, 表示负相关, 即两要素异向相关。 r_{xy} 的绝对值越接近于 1, 表示两要素的

关系越密切, 越接近于 0, 表示两要素的关系越不密切。

1.2.4 层次分析法

层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 把研究对象作为一个系统, 按照分解、比较判断、综合的思维方式进行决策 (张建国和庞赞, 2017); 它将决策者的思维过程条理化、数量化, 便于计算, 容易被人们所接受, 所需要的量化数据较少, 对问题的本质、其所涉及的因素及其内在关系分析的比较透彻、清楚 (冷苏娅等, 2017)。用 AHP 法对乌鲁木齐市城区空气质量影响因素做评价分析, 能够对其影响因素重要性排名。

1.3 研究区概况

乌鲁木齐市地处中亚中心, 是世界上离海洋最远的城市, 其地理坐标为东经 $86^{\circ}46'10''$ — $88^{\circ}59'48''$, 北纬 $42^{\circ}54'16''$ — $44^{\circ}58'16''$; 乌鲁木齐市受中温带大陆性干旱气候控制, 最热在 7、8 月, 平均气温为 25.7°C , 最冷在 1 月, 平均气温为 -15.2°C 。乌鲁木齐市土地利用状况 (图 1a) 主要有工业用地、林地、耕地、未利用地、建设用地和水体等, 乌鲁木齐市的城区构成、空气质量检测站点分布和重要污染物企业分布如图 1b 所示。2015 年底, 乌鲁木齐市建成区面积为 429.96 平方公里, 建成区绿化覆盖率为 40.3%; 总人口为 266.83 万人, 人均 GDP 达到 74340 元。

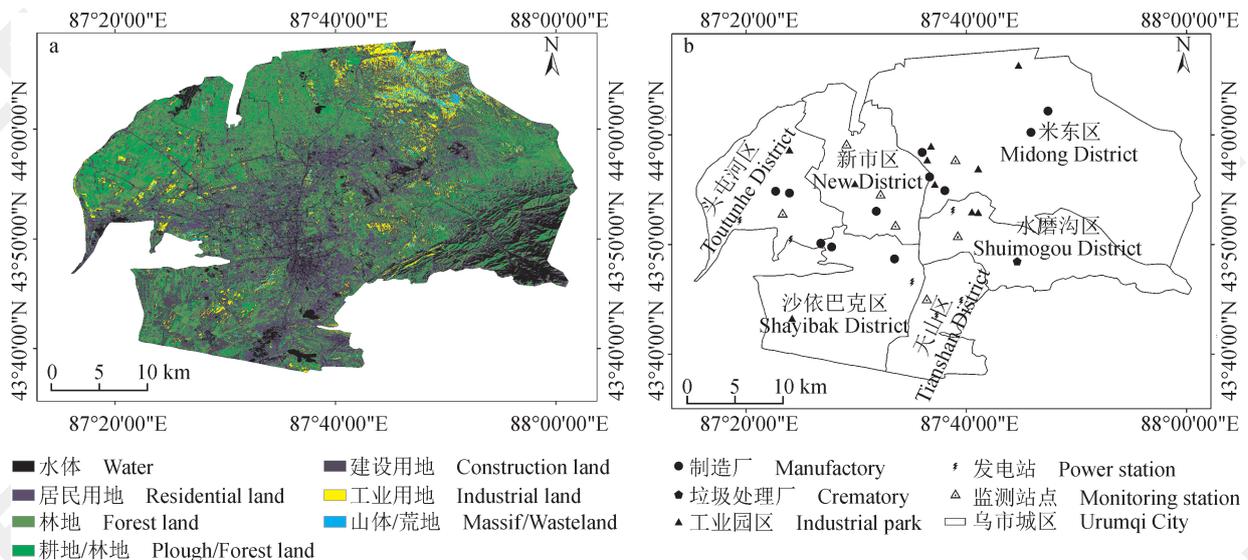


图1 乌鲁木齐市重要污染物企业分布与土地利用

Fig.1 Distribution of important pollutant enterprises and land use classification in Urumqi

2 结果与分析

2.1 空气污染时空分布现状

2.1.1 空气污染时间分布特征

由图2可以看出, 2016年1月份乌鲁木齐市AQI及污染物因子(除CO外)变化趋势明显。AQI、PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂变化趋势基本同步, 在4日、11日、20日、24日、29日都出现峰值, 其中29日AQI、PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂同时达到最高峰; SO₂在1—17日波动较小, 17日之后出现大幅度

波动; O₃在所有污染物因子中波动变化最大, 在6日、20日、29日出现三个高峰值: 16 μg·m⁻³、13 μg·m⁻³和12 μg·m⁻³; CO在所有污染物因子中变化最为稳定, 无明显变化趋势。整体而言, 空气污染程度在本月前12天波动幅度不大, 13—23日呈现稳定发展状态, 24日开始出现大幅度波动上升, 且AQI、PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂的最高值出现在月末; 其中轻度污染天气占整月的3%、中度污染天气占26%、严重污染天气占32%、重度污染天气占39%。

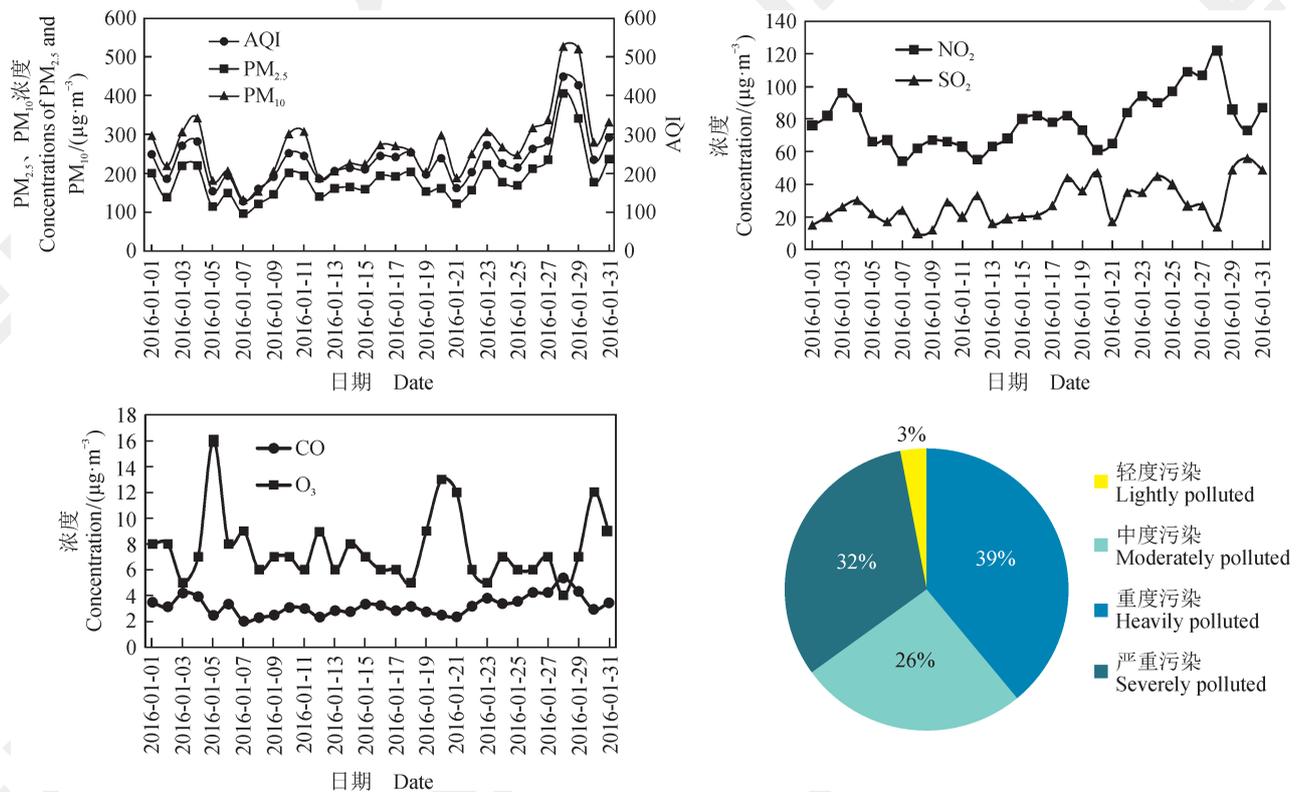


图2 乌鲁木齐市AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃浓度变化
Fig.2 Variation of AQI and concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, O₃ in Urumqi

2.1.2 空气污染空间分布特征

根据新疆维吾尔自治区环境质量信息发布平台所公布的乌鲁木齐市监测站点分布, 利用2016年1月各污染物因子的月均值通过ArcGIS做IDW插值分析(图3)。据图3, PM_{2.5}的高值中心位于米东区, 两个低值中心分别位于水磨沟区和新市区; PM₁₀的高值中心位于米东区, 两个低值中心分别位于新市区与天山区; NO₂的高值中心位于米东区, 只有一个低值中心位于新市区; SO₂在米东区、天山区和头屯河区出现三个高值中心, 在

新市区出现低值中心; CO在米东区与新市区(监测站)出现高值中心, 其它城区都在低值区; O₃的高值中心位于米东区 and 头屯河区, 低值中心位于新市区和天山区。乌鲁木齐市六个城区中, 米东区是空气污染最严重的城区。

再次借助ArcGIS对六个污染物因子的专题地图做“重分类”和“叠加分析”, 得到六个污染物因子的综合分布, 以《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633—2012)、《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)和表2为参照,

将污染物因子综合分布图分为六类, 得到结果如图 4 所示。可以看出, 乌鲁木齐市 2016 年 1 月的空气污染严重地区在米东区和新市区(监测站),

新市区与水磨沟区一小部分地区空气污染相对较低; 整个城市的大部分地区处在空气质量中度污染状态。

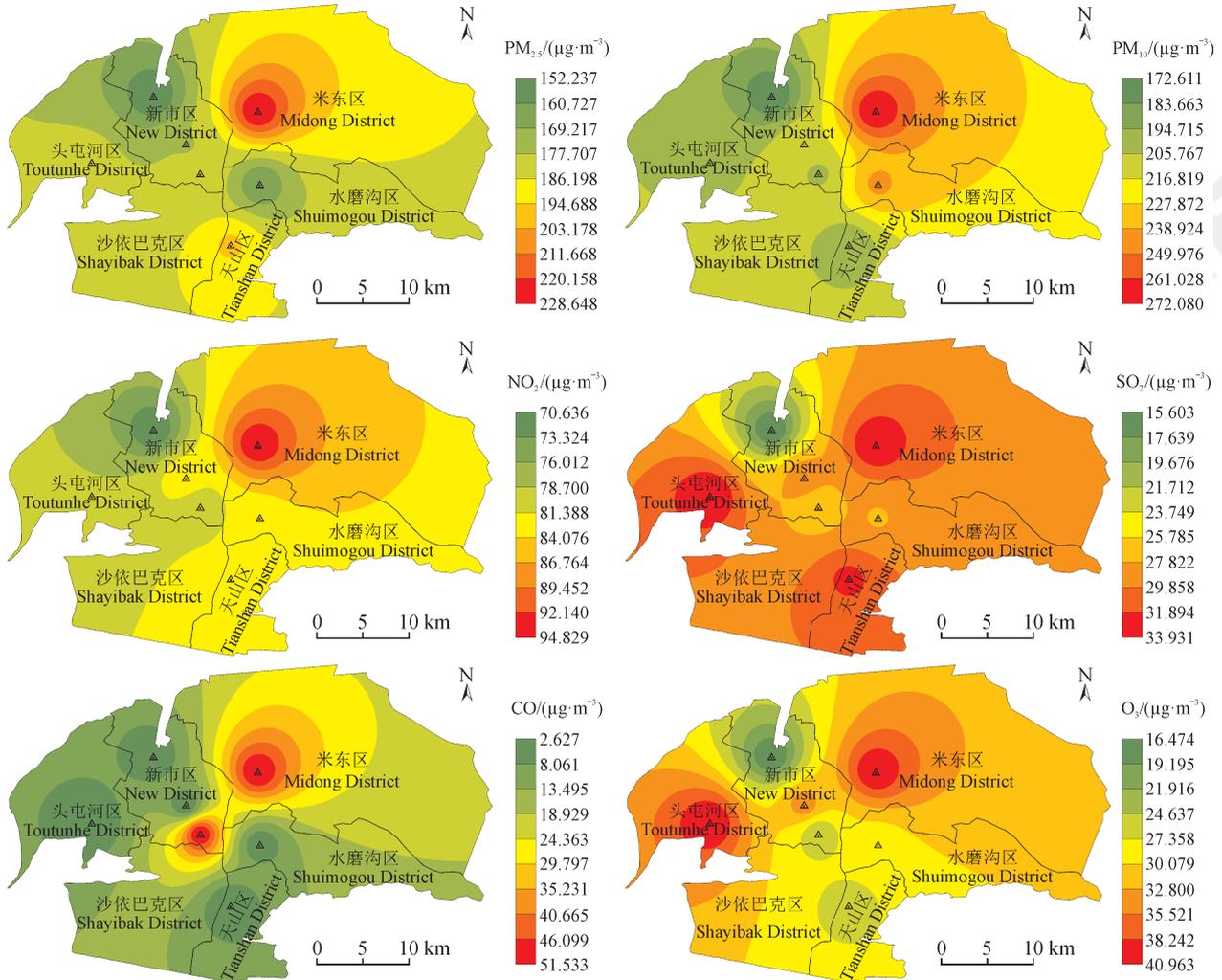


图 3 乌鲁木齐市 7 个监测站点污染因子空间插值图
Fig.3 Space interpolation of pollution factors at the 7 monitoring sites in Urumqi

2.2 AQI 与气象因素的相关分析

2.2.1 乌鲁木齐市气象因素分析

由图 5 可以看出, 乌鲁木齐市 2016 年 1 月的气压变化明显, 1—11 日平稳发展, 13 日出现小峰值, 15 日开始波动上升, 22 日达到本月的最高值 9349×0.1 hPa, 之后迅速下降, 27 日达到本月最低值 9109×0.1 hPa 后又迅速上升。温度的变化幅度明显, 2 日为本月最高值 -2.8 °C, 3—9 日温度波动幅度明显, 9—17 日缓慢下滑, 17 日出现低峰值 -15.4 °C, 19—25 日温度迅速下降, 27 日后回升且

变化平稳。相对湿度整月处于平稳发展状态, 5 日以后相对湿度都在 80% 以上。降水量出现的天数占了 1 月份的 30%, 且降雨天降水量都在 30000×0.1 mm 以上。1 月风速变化极不稳定, 月均风速为 $1.319 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 日照时数在 4 个小时以上的天数为 50%, 21—29 日连续出现日照时数大于 5 个小时。

2.2.2 污染物因子与气象因素的相关分析

通过公式 (3) 和公式 (4) 对污染物因子和气象因素做相关分析, 得到结果如表 3 所示。可以看出, PM_{2.5} 与气压、温度、相对湿度、降水量、风速和日

照时数都呈负相关, 其中 $PM_{2.5}$ 与降水量在 0.05 水平上呈显著负相关。 PM_{10} 与气压、温度、相对湿度、降水量、风速和日照时数都呈负相关, 其中 PM_{10} 与降水量在 0.05 水平上呈显著负相关。 NO_2 与气压、温度、相对湿度、降水量、风速呈负相关, 与日照时数呈正相关; 其中 NO_2 与温度和降水量在 0.01 水平上呈显著负相关, 与相对湿度在 0.05 水平上呈显著负相关, 与日照时数在 0.05 水平上呈显著正相关。 SO_2 与气压和相对湿度呈正相关, 与温度、降水量、风速和日照时数呈负相关; 其中 SO_2 与气压在 0.05 水平上呈显著正相关, 与温度在 0.01 水平上呈显著负相关。 CO 与气压、温度、相对湿度、降水量、风速呈负相关, 与日照时数呈正相关; 其中 CO 与相对湿度和降水量在 0.05 水平上呈显著负相关。 O_3

与气压、温度、相对湿度、降水量、风速呈正相关, 与日照时数呈负相关。

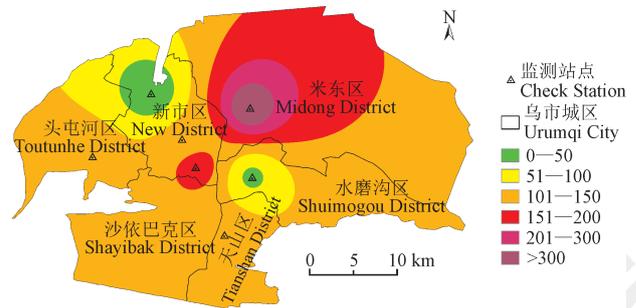


图4 乌鲁木齐市7个监测站点 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3) 叠加
Fig.4 Overlay of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO and O_3 concentrations at the 7 monitoring sites in Urumqi

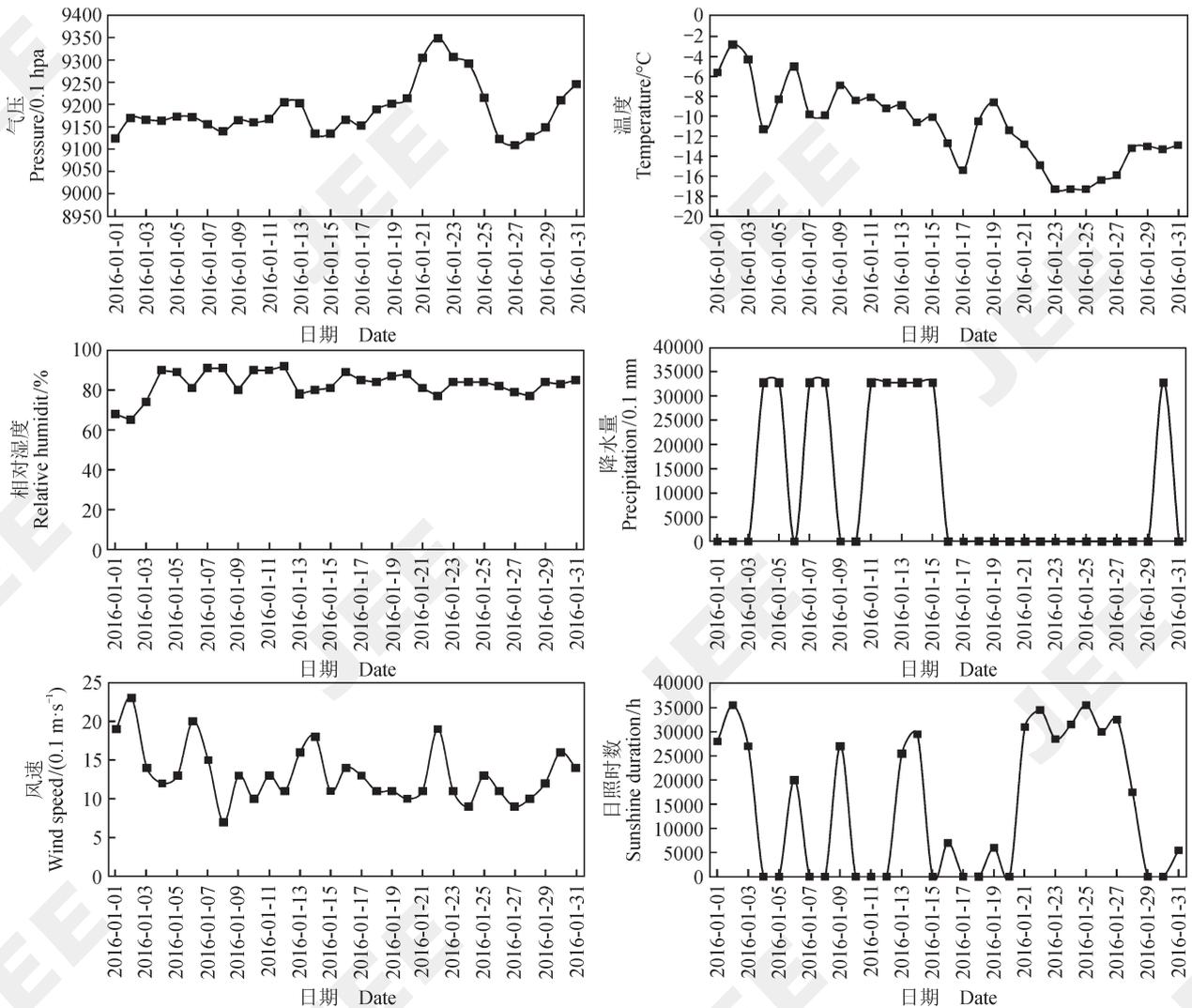


图5 乌鲁木齐市气象因素日变化
Fig.5 Daily variation of meteorological factors in Urumqi

表3 空气污染物因子与气象因素相关分析
Tab.3 Correlation analysis of air pollution factors and meteorological factors

	气压 Pressure	温度 Temperature	相对湿度 Relative humidity	降水量 Precipitation	风速 Wind Speed	日照时数 Sunshine duration
AQI	-0.215	-0.294	-0.148	-0.359*	-0.224	-0.047
PM _{2.5}	-0.225	-0.295	-0.169	-0.358*	-0.226	-0.008
PM ₁₀	-0.18	-0.312	-0.152	-0.370*	-0.199	-0.026
NO ₂	-0.078	-0.482**	-0.376*	-0.499**	-0.167	0.421*
SO ₂	0.416*	-0.460**	0.247	-0.195	-0.161	-0.232
CO	-0.213	-0.284	-0.369*	-0.413*	-0.101	0.286
O ₃	0.146	0.161	0.202	0.258	0.078	-0.26

**：在 0.01 水平（双侧）上显著相关；*：在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

**：significant correlation at 0.01 level (bilateral); *：significant correlation at 0.05 level (bilateral).

2.3 层次分析法对空气污染分布特征的影响因素评价

结合乌鲁木齐市各城区实际发展情况，构建乌鲁木齐市空气污染评价模型。目标层为空气污染；准则层包括土地利用、重要污染物企业和气象因素；指标层包括工业用地、公共设施用地、

商业服务设施用地、道路与交通设施用地、林地、耕地、水体，工业园区、发电站、制造厂、垃圾场，气压、温度、相对湿度、降水量、风速、日照时数。通过专家打分法得到以下 4 个判断矩阵。得出这 4 个矩阵都通过了一致性检验，可以用来对目标层“空气污染”做评价分析。

1. 空气污染 判断矩阵一致性比例：0.0015；对总目标的权重：1； λ_{\max} :3.0015

空气污染 Air pollution	土地利用 Land use	重要污染企业 Important pollutant enterprise	气象因素 Meteorological factors	W_i
土地利用 Land use	1	0.1111	0.5	0.0852
重要污染企业 Important pollutant enterprise	9	1	4	0.7375
气象因素 Meteorological factors	2	0.25	1	0.1773

2. 土地利用 判断矩阵一致性比例：0.0348；对总目标的权重：0.0852； λ_{\max} :7.2838

土地利用 Land use	工业用地 Industrial land	公共设施 用地 Public land	商业服务 设施用地 Trade estate	道路与交通 设施用地 Land for transport	林地 Forest land	耕地 Plough	水体 Water	W_i
工业用地 Industrial land	1	9	2	3	9	9	9	0.4249
公共设施用地 Public land	0.1111	1	0.5	1	2	6	4	0.1078
商业服务设施用地 Trade estate	0.5	2	1	2	3	9	6	0.2140
道路与交通设施用地 Land for transport	0.3333	1	0.5	1	2	9	4	0.1337
林地 Forest land	0.1111	0.1667	0.1111	0.1111	0.3333	1	0.5	0.0219
耕地 Plough	0.1111	0.25	0.1667	0.25	0.5	2	1	0.0357
水体 Water	0.1111	0.5	0.3333	0.5	1	3	2	0.0620

3. 重要污染物企业判断矩阵一致性比例: 0.0030; 对总目标的权重: 0.7375; λ_{\max} : 4.0080

重要污染物企业 Important pollutant enterprise	工业园区 Industrial park	发电站 Power station	制造厂 Manufactory	垃圾场 Crematory	W_i
工业园区 Industrial park	1	9	9	2	0.5671
发电站 Power station	0.1111	1	1	0.1667	0.0586
制造厂 Manufactory	0.1111	1	1	0.2	0.0614
垃圾场 Crematory	0.5	6	5	1	0.3128

4. 气象因素判断矩阵一致性比例: 0.0651; 对总目标的权重: 0.1773; λ_{\max} : 6.4102

气象因素 Meteorologic elements	气压 Pressure	温度 Temperature	相对湿度 Relative humidity	降水量 Precipitation	风速 Wind speed	日照时数 Sunshine duration	W_i
气压 Pressure	1	1	0.3333	1	0.25	0.3333	0.0879
温度 Temperature	1	1	1	1	0.5	1	0.1423
相对湿度 Relative humidity	3	1	1	1	2	1	0.2153
降水量 Precipitation	1	1	1	1	1	1	0.1598
风速 Wind speed	4	2	0.5	1	1	0.5	0.1793
日照时数 Sunshine duration	3	1	1	1	2	1	0.2153

综合上面4个判断矩阵,可以得到目标层、准则层内容和指标层各指标权重。可以看出,在准则层,权重大小排名为重要污染物企业(0.7375)、气象因素(0.1773)、土地利用(0.0852);重要污染物企业对空气污染起到绝对的影响作用。在指标层,排在前六位的是:工业园区(0.5671)、工业用地(0.4249)、垃圾场(0.3128)、相对湿度(0.2153)、日照时数(0.2153)、商业服务设施用地(0.2140),排在中间五位的是风速(0.1793)、降水量(0.1598)、温度(0.1423)、道路与交通设施用地(0.1337)、公共设施用地(0.1078),排在后六位的是气压(0.0879)、水体(0.0620)、制造厂(0.0614)、发电站(0.0586)、耕地(0.0357)、林地(0.0219)。可知对空气污染起到影响作用较大的是工业园区、工业用地、垃圾场、相对湿度、日照时数和商业服务设施用地,对空气污染影响作用较小的是气压、水体、制造厂、发电站、耕地和林地。

3 结论

(1) 从时间分布看,乌鲁木齐市2016年1月城市空气污染程度整体呈上升趋势,其中1月上旬呈小波动上升状态、1月中旬呈稳定发展状态、1月下旬呈迅速上升状态且污染物因子AQI、PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂的最高值都出现在1月下旬。从空间分布看,乌鲁木齐市2016年1月城市空气

污染分布基本与乌鲁木齐市的土地利用与重要污染物企业分布相一致;其中PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃的高值中心都出现在米东区的古牧地镇、卡子湾镇和铁厂沟镇,低值中心都出现在新市区的六十户乡、青格达湖乡和安宁渠镇;污染物因子的综合空间分布以新市区的监测站和米东区的环保局为中心的两个高值区,以新市区的新疆农科院牧场和水磨沟的三十一中学为中心的两个低值区。

(2) 对乌鲁木齐市的城区空气污染物因子和同期气象因素做相关分析得出:PM_{2.5}、PM₁₀与降水量在0.05水平上呈显著负相关;NO₂与温度和降水量在0.01水平上呈显著负相关,与相对湿度在0.05水平上呈显著负相关,与日照时数在0.05水平上呈显著正相关;SO₂与气压在0.05水平上呈显著正相关,与温度在0.01水平上呈显著负相关;CO与相对湿度和降水量在0.05水平上呈显著负相关。

(3) 对乌鲁木齐市的空气污染分布特征的影响因素用AHP法做评价分析发现:重要污染物企业的空间分布对乌鲁木齐市空气污染空间分布起到绝对的影响作用,对乌鲁木齐市环境空气污染分布起较大作用的影响因素有工业园区、工业用地、垃圾场、相对湿度、日照时数、商业服务设施用地;影响作用较小的因素有水体、耕地和林地等。

(4) 本研究结合遥感影像解译和聚类分析、通过 GIS 做 IDW 空间插值分析、相关分析和 AHP 法对乌鲁木齐市 2016 年 1 月环境空气污染的时空分布特征及其影响因素做评价研究, 在数理分析过程中忽略了“微风”、“静风”等特殊情况下对空气污染物的影响, 直接用气象因素的 24 小时日均值来分析, 有所欠缺, 今后有待深入研究特殊情况对空气污染的影响。

参考文献

陈淳祺, 陈瑜琪, 汤圣君, 等. 2013. 2001—2010 年武汉市气象环境对空气质量影响分析 [J]. *环境科学与技术*, 36(5): 130–133. [Chen C Q, Chen Y Q, Tang S J, et al. 2013. Analysis of effect of meteorological factor on air quality of Wuhan in 2001—2010 [J]. *Environmental Science & Technology*, 36(5): 130–133.]

崔玉航, 汤莉莉, 潘良宝, 等. 2017. 南京 1 月不同气象条件对大气环境影响对比研究 [J]. *环境科学与技术*, 40(2): 44–52. [Cui Y H, Tang L L, Pan L B, et al. 2017. Comparative study on how different meteorological conditions affect atmospheric environment in January in Nanjing [J]. *Environmental & Science*, 40(2): 44–52.]

董群, 赵普生, 王迎春, 等. 2017. 北京山谷风环流特征分析及其对 PM_{2.5} 浓度的影响 [J]. *环境科学*, 38(6): 1–17. [Dong Q, Zhao P S, Wang Y C, et al. 2017. Impact of mountain-valley wind circulation on typical cases of air pollution in Beijing [J]. *Environmental Science*, 38(6): 1–17.]

段平, 盛业华, 李 佳, 等. 2014. 自适应的 IDW 插值方法及其在气温场中的应用 [J]. *地理研究*, 33(8): 1417–1426. [Duan P, Sheng Y H, Li J, et al. 2014. Adaptive IDW interpolation method and its application in the temperature field [J]. *Geographical Research*, 33(8): 1417–1426.]

高庆先, 刘俊蓉, 李文涛, 等. 2015. 中美空气质量指数 (AQI) 对比研究及启示 [J]. *环境科学*, 36(4): 1141–1147. [Gao Q X, Liu J R, Li W T, et al. 2015. Comparative analysis and inspiration of air quality index between China and America [J]. *Environmental Science*, 36(4): 1141–1147.]

何建军, 吴 琳, 毛洪钧, 等. 2016a. 气象条件对河北廊坊城市空气质量的影响 [J]. *环境科学研究*, 29(6): 791–799. [He J J, Wu L, Mao H J, et al. 2016a. Impacts of meteorological conditions on air quality in urban Langfang, Hebei Province [J]. *Research of Environmental*

Sciences, 29(6): 791–799.]

何建军, 余 晔, 刘 娜, 等. 2016b. 气象条件和污染物排放对兰州市冬季空气质量的影响 [J]. *高原气象*, 35(6): 1577–1583. [He J J, Yu Y, Liu N, et al. 2016b. Impact of meteorological conditions and pollutant emission on winter air quality in Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology*, 35(6): 1577–1583.]

贺 祥, 林振山, 刘会玉, 等. 2016. 基于灰色关联模型对江苏省 PM_{2.5} 浓度影响因素的分析 [J]. *地理学报*, 71(7): 1119–1129. [He X, Lin Z S, Liu H Y, et al. 2016. Analysis of the driving factors of PM_{2.5} in Jiangsu province based on grey correlation model [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 71(7): 1119–1129.]

黄 成, 陈长虹, 李 莉, 等. 2011. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究 [J]. *环境科学学报*, 31(9): 1858–1871. [Huang C, Chen C H, Li L, et al. 2011. Anthropogenic air pollutant emission characteristics in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(9): 1858–1871.]

冷苏娅, 蒋世杰, 潘 杰, 等. 2017. 京津冀协同发展背景下的区域综合环境风险评估研究 [J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 53(1): 60–69. [Leng S Y, Jiang S J, Pan J, et al. 2017. Regional integrated environmental risk assessment in collaborative development of Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 53(1): 60–69.]

李 琛, 刘 瑾, 王彦民. 2017. 气象因素对西安市城区空气质量的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 31(3): 83–88. [Li C, Liu J, Wang Y M. 2017. Influences of meteorological factors on air quality of Xi'an city [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 31(3): 83–88.]

李 凯, 赵华甫, 吴克宁, 等. 2016. 土壤重金属 Cd 污染指数的适宜插值方法和合理采样数量研究 [J]. *土壤通报*, 47(5): 1056–1064. [Li K, Zhao H F, Wu K N, et al. 2016. Suitable interpolation method and reasonable sampling quantity of Cd pollution index in soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 47(5): 1056–1064.]

廖志恒, 范绍佳, 黄 娟, 等. 2014. 2013 年 10 月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 [J]. *环境科学*, 35(11): 4061–4069. [Liao Z H, Fan S J, Huang J, et al. 2014. Characteristic analysis of a multi-day pollution event in Chang-Zhu-Tan metropolitan area during October 2013 [J]. *Environmental Science*, 35(11): 4061–4069.]

潘本锋, 李莉娜. 2016. 环境空气质量指数计算方法与分级方

- 案比较 [J]. *中国环境监测*, 32(1): 13–17. [Pan B F, Li L N. 2016. Comparison of the calculating method and classifying program of air quality index among some countries [J]. *Environmental Monitoring in China*, 32(1): 13–17.]
- 许 珊, 邹 滨, 蒲 强, 等. 2015. 土地利用 / 覆盖的空气污染效应分析 [J]. *地球信息科学学报*, 17(3): 290–299. [Xu S, Zou B, Pu Q, et al. 2015. Impact analysis of land use/cover on air pollution [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 17(3): 290–299.]
- 张建国, 庞 赞. 2017. 城市河流旅游开发适宜性评价模型建构及实证分析 [J]. *经济地理*, 37(2): 209–215. [Zhang J G, Pang Z. 2017. Model construction and empirical analysis of the suitability evaluation of urban river tourism development [J]. *Economic Geography*, 37(2): 209–215.]
- 张媛媛, 吴立新, 任传斌, 等. 2016. APEC 会议前后京津冀空气污染物时空变化特征 [J]. *科技导报*, 34(24): 115–121. [Zhang Y Y, Wu L X, Ren C B, et al. 2016. On the spatio-temporal features of air pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei for the period of APEC summit [J]. *Science & Technology Review*, 34(24): 115–121.]
- 周兆媛, 张时煌, 高庆先, 等. 2014. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析 [J]. *资源科学*, 36(1): 191–199. [Zhou Z Y, Zhang S H, Gao Q X, et al. 2014. The impact of meteorological factors on air quality in the Beijing-Tianjin-Hebei region and trend analysis [J]. *Resources Science*, 36(1): 191–199.]
- 朱 焱, 刘红年, 沈 建, 等. 2016. 苏州城市热岛对污染扩散的影响 [J]. *高原气象*, 35(6): 1584–1594. [Zhu Y, Liu H N, Shen J, et al. 2016. Influence of urban heat island on pollution diffusion in Suzhou [J]. *Plateau Meteorology*, 35(6): 1584–1594.]
- Kumar A, Patil R S, Dikshit A K, et al. 2016. Comparison of predicted vehicular pollution concentration with air quality standards for different time periods [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(7): 2293–2303.
- Mishra S R, Pradhan R P, Prusty B A K, et al. 2016. Meteorology drives ambient air quality in a valley: A case of Sukinda chromite mine, one among the ten most polluted areas in the world [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188: 402. DOI: 10.1007/s10661-016-5393-1.
- Oktavia E, Widyawan W, Mustika I W. 2016. Inverse distance weighting and kriging spatial interpolation for data center thermal monitoring [C]. 2016 1st International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE). 2016: 69–74.
- Shrestha R K, Gallagher M W, Connolly P J. 2016. Diurnal and seasonal variations of meteorology and aerosol concentrations in the foothills of the nepal himalayas (Nagarkot: 1,900 m asl) [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 52(1): 63–75.
- Singh B P, Tiwari S, Hopke P K, et al. 2015. Seasonal inhomogeneity of soot particles over the central Indo-Gangetic Plains, India: Influence of meteorology [J]. *Journal of Meteorological Research*, 29(6): 935–949.