

# 2015~2018年西北地区典型城市空气污染特征对比分析

房琴<sup>1,2</sup>, 黄俊<sup>3</sup>, 蔡次云<sup>4</sup>, 刘平鑫<sup>1</sup>, 宋杨<sup>1</sup>, 左艳秋<sup>1</sup>, 王洪强<sup>1,5,6\*</sup>

<sup>1</sup>桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林

<sup>2</sup>上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海

<sup>3</sup>中国科学院空天信息创新研究院, 北京

<sup>4</sup>榆林学院建筑工程学院, 陕西 榆林

<sup>5</sup>广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林

<sup>6</sup>广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林

收稿日期: 2022年9月7日; 录用日期: 2022年10月17日; 发布日期: 2023年4月24日

## 摘要

为防治西北地区空气污染, 运用统计学方法对比分析了2015~2018年西北地区西安、兰州、乌鲁木齐和银川四个典型城市空气污染特征。结果表明: (1) 随着纬度的降低, 空气质量越来越差, 西北地区的北部优于南部城市群, 其中东南部最差; 各市空气质量从优到劣排名为银川 > 兰州 > 西安 > 乌鲁木齐。(2) 4市的污染物主要是PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>, 两者年均浓度呈正相关且具有相似的季节和年变化趋势。(3) 4市的首要污染物是PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和O<sub>3</sub>, 在这4年时间序列中发现其他污染物成为首要污染物逐年上升。(4) 后向轨迹图统计分析结果表明距离地面高度500 m和1000 m的污染物轨迹线具有高度的一致性, 相同度高于75%。大气污染物传输路径的轨迹线以东北和西南方向为主, 而空气受到严重污染时污染物的来向复杂。

## 关键词

PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, 空气污染

## Comparative Analysis of Air Pollution Characteristics of Typical Cities in Northwest China from 2015 to 2018

Qin Fang<sup>1,2</sup>, Jun Huang<sup>3</sup>, Ciyun Cai<sup>4</sup>, Pingxin Liu<sup>1</sup>, Yang Song<sup>1</sup>, Yanqiu Zuo<sup>1</sup>, Hongqiang Wang<sup>1,5,6\*</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 房琴, 黄俊, 蔡次云, 刘平鑫, 宋杨, 左艳秋, 王洪强. 2015-2018年西北地区典型城市空气污染特征对比分析[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(2): 373-386. DOI: 10.12677/aep.2023.132048

<sup>1</sup>College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

<sup>2</sup>College of Resource and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai

<sup>3</sup>Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>4</sup>School of Civil Engineering, Yulin University, Yulin Shaanxi

<sup>5</sup>Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin Guangxi

<sup>6</sup>Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Areas, Guilin Guangxi

Received: Sep. 7<sup>th</sup>, 2022; accepted: Oct. 17<sup>th</sup>, 2022; published: Apr. 24<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to prevent and control the air pollution in northwest China, the air pollution characteristics of four typical cities in northwest China from 2015 to 2018 were compared and analyzed by statistical methods. The results show that: (1) With the decrease of latitude, the air quality is getting worse and worse, the northern part of northwest region is better than the southern city group and the southeast is the worst. The air quality of each city ranked Yinchuan > Lanzhou > Xi'an > Urumqi from good to bad. (2) The pollutants are mainly PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, the average annual concentrations of which are positively correlated and have similar seasonal and annual trends. (3) The primary pollutants in the four cities are PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and O<sub>3</sub>. It is found that other pollutants have become the primary pollutants in the four-year time series. (4) The statistical analysis results of the backward trajectory map show that the pollutant trajectory lines with a height of 500 m and 1000 m from the ground are highly consistent, with the same degree higher than 75%. The transport path of air pollutants is mainly in the northeast and southwest directions, and the direction of air pollutants is complicated when the air is seriously polluted.

## Keywords

PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, Air Pollutin

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

前人针对大气颗粒物已做了大量研究,发现大气颗粒物对辐射强迫[1]、能见度[2]、空气质量[3]和公众健康[4]等都会产生重大影响[5]。研究[6] [7] [8]表明,京津冀地区正在呈现高颗粒浓度与高臭氧浓度并存的区域性的大气复合污染特征。西北地区属于我国重要组成部分,人为污染源主要来自化石燃料的燃烧(如机动车、燃煤)、挥发有机物等,因此,我国应高度重视西北地区的大气环境问题,迫切需要对该地区大气颗粒物的污染进行深入研究其特征分析。

目前,国内外专家已从不同地区、角度进行了大量的空气污染研究[9] [10]。刘超等[11]通过聚分析法和后向轨迹模式对污染物输送路径进行统计,分析2014~2015年上海地区冬、夏两季大气污染特征;熊新竹等[12]探究北京典型主城区冬季大气污染特征的影响因素;刘晓咏等[13]分析了京津冀地区主要污染物的时空分布特征和污染源;李婷婷等[14]从时空两个角度研究了中三角城市群的大气污染特征及变化趋势;何涛等[15]对2013~2015年常州市冬季PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO数据进行分析,并结合

HYSPLIT 4.9 模式研究不同气团来源对常州市各污染物浓度的影响及潜在污染源区分布特征。这些研究对于认识当地大气污染的时空分布及来源具有重要意义。但目前针对我国西北地区的整体相关研究较少。

西北地区大体位于大兴安岭以西, 昆仑山-阿尔金山、祁连山以北。是由大致包括内蒙古中西部, 新疆大部, 宁夏北部, 甘肃中西部以及和这些地方接壤的少量山西、陕西、河北、辽宁、吉林等地的边缘地带。西北地区荒漠广布, 人口密度小[1], 沙尘天气易导致该地区颗粒物浓度上升, 本研究对 2015~2018 年空气气象局数据统计分析发现, 西北地区城市群长期以  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  为首要污染物。近年来, 已有学者对西北地区部分城市空气质量状况进行研究。杨小银等[1]对 2010 年西北三省区大气环境污染气象条件、空气质量现状及演变和大气污染排放现状及演变进行了系统的分析, 发现相对于全国其它地区, 西北三省区人为源排放造成的  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  浓度并不高, 甘肃东部及南部地区  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  浓度相对较高;  $O_3$  浓度与海拔高度呈正相关, 与氮氧化物排放量呈负相关, 乌昌地区及兰白地区的  $O_3$  值并不高。呼东峰等[16]分析了 2013~2017 年西安市模糊综合评判法并对大气环境质量进行评价, 结果表明:  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、呈现逐年下降趋势,  $O_3$  呈先下降后上升的趋势, 各指标月均值呈明显的季节性变化特征, 除  $O_3$  外其他指标夏季最低, 冬季最高, 指标间具有高度的相关性。樊韬等[17]根据银川市 2009 年的  $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $PM_{10}$  浓度资料, 对银川市空间统计特征, 季、月、日际变化特征和典型变化特征进行了统计分析, 结果表明, 空气质量状况良好, 春冬两季污染严重, 冬季最重, 夏季最轻, 三种污染物中  $PM_{10}$  污染最严重, 其次是  $SO_2$ ,  $NO_2$  污染最轻。李德枕[18]通过采集 2006~2012 年乌鲁木齐市人民会堂等 3 个环境空气质量国控监测点的  $PM_{10}$ 、 $SO_2$  和  $NO_2$  等 3 种污染物各个质量类别天数及其变化曲线, 结果表明, 2006~2012 年乌鲁木齐市空气质量总体向好, 污染呈波动下降趋势, 尤以 2012 年变化更为明显。

以上结果为研究西北地区的大气污染提供了重要的数据支撑; 但是, 以上研究主要是为单个城市短时间尺度(1 年以内)、单个城市长时间序列(5 年、7 年)以及区域性短时间尺度(1 年), 对于区域性、长时间序列的研究较为缺乏, 难以全面了解西北地区的空气质量分布及演变特征。本研究拟利用西安、兰州、乌鲁木齐、银川 4 个典型城市 2015~2018 年  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  质量浓度数据, 分析西北地区典型城市空气质量事件演变以及空间分布特征, 分析评价西北地区整体空气质量状况, 为该地区的大气污染防治以及产业规划布局提供数据支持。

## 2. 数据处理

### 2.1. 数据处理

数据基于中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/>), 该平台每小时公布一次空气污染状况数据, 包括  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、CO、 $NO_2$ 、 $O_3$  和  $SO_2$  的小时平均值, 公布的数据包括兰州、银川、西宁、西安和乌鲁木齐等我国西北地区 48 个城市, 由于各个点布设的时间不一致, 本研究仅统计包含连续观测 4 年的兰州、银川、西宁、西安和乌鲁木齐 4 个典型城市(2015-03-01~2019-02-28), 并基于日平均值进行统计, 需要说明的是, 数据首先剔除了异常值 0。

### 2.2. 监测点分布

研究数据来源于西北地区 4 个省级 48 个地级市国控空气质量监测站提供的自 2015 年 1 月 1 日~2018 年 12 月 12 日 4 年内空气质量指数(AQI)和 6 个污染物指标( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、CO、 $NO_2$ 、 $O_3$ 、和  $SO_2$ )逐时均值数据。各省监测站点数分别为甘肃 14 个、宁夏 5 个、陕西 10 个、新疆维吾尔族 11 个。监测点数分布如图 1 所示。

### 2.3. 方法处理

空气污染状况由空气质量指数(air quality index, AQI)评价。AQI 依据环境空气质量标准和各类污染

物浓度简化为单一的概念性指数形式，并将空气污染程度和空气状况分级表示，适合表示城市空气质量状况和变化趋势。计算方法如下。

$$AQI = \max \{IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \dots, IAQI_n\} \quad (1)$$

$$IAQI_P = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_P - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \quad (2)$$

式中， $n$  为污染物的项目数； $IAQI$  为空气质量分指数， $C_P$  为污染物项目  $P$  的质量浓度值； $BP_{Hi}$  为收集的原始数据中与  $C_P$  相近的污染物浓度值的高位值； $BP_{Lo}$  为收集的原始数据中与  $C_P$  相近的污染物浓度限值的低位值； $IAQI_{Hi}$  为收集的原始数据中与  $BP_{Hi}$  对应的空气质量分指数的高位值； $IAQI_{Lo}$  为收集的原始数据中与  $BP_{Lo}$  对应的空气质量分指数的低位值[19]。

根据我国 2012 年我国制定的《环境空气质量标准》(GB3095-2012) [20] 中空气质量指数规定，将 AQI 值分为 6 级：0~50、51~100、101~150、151~200、201~300、>300，分别对应空气质量等级优、良好、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染；指数越大，级别越高，说明污染越严重，对人体健康的危险越明显[21]。



Figure 1. Distribution of Monitoring points  
图 1. 监测点数分布图

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 污染状况

城市空气质量优劣可通过空气质量优良比例评价，对乌鲁木齐、兰州、西安、银川 2015~2018 年的 AQI 日均值统计分析 4 市每年各级空气质量级别所占天数和优良率见表 1、见表 2、见表 3、见表 4，结果表明，银川空气质量最好，每年处于 I 级的天数都在 220 d 以上，年均处于 I 级的天数为 245 d，每年的优良率皆超过 60%，年均优良率为 68.9%，除了乌鲁木齐的空气质量每年以小幅度不断改善外，其他 3 市整体呈下降趋势。乌鲁木齐、西安、兰州的优良变化率变化范围分别为 61.7%~54.1%、67.4%~43.8%、71.0%~62.2%，3 市优良率均大致为逐年下降，乌鲁木齐每年的平均优良率为 57%，平均每年 II 级以上天数为 30 d；西安各年际空气质量优良率变化波动最大的是 2015 年至 2016 年时段，下降百分率为 18.8%，2016~2018 年基本趋于稳定递增；兰州各年际空气质量优良率变化最小，基本稳定；4 市西安的空气恶

劣趋势最剧烈, 2015~2016年优良率从67.4%降到48.6%, 下降了18.8%, 之后3年基本稳定在40%~50%左右。综上, 西北地区空气污染总体呈现出随着纬度减小优良率递增的特征: 西北地区东北部优于西北部城市群, 东南部最差, 4市空气质量排名为: 银川 > 兰州 > 西安 > 乌鲁木齐, 地理加权回归模型表明, 自然和社会经济因素对AQI分布均有显著影响, 但不同地区的影响因素存在差别, 其中, 风速、气温、相对湿度、绿化覆盖率、第二产业比重和总人口等自然和社会经济因素对西北城市的AQI指数影响最显著[22]。西北地区东南部与发达城市相接触, 发达地区发展速度快, 工业聚集, 空气污染较为严重, 受风速风向影响污染物也将会影响到西北附近地区。

**Table 1.** Distribution of days and excellence rate of air quality at all levels in the four cities in 2015

**表 1.** 2015年4个城市各级空气质量级别所占天数和优良率分布

项目	2015年			
	银川	乌鲁木齐	西安	兰州
I级	261	210	246	259
II级	18	30	14	10
III级	63	67	67	82
IV级	14	25	18	12
V级	8	25	19	1
VI级	1	8	1	1
优良率/%	71.5	57.5	67.4	71.0

**Table 2.** Distribution of days and excellence rate of air quality at all levels in the four cities in 2016

**表 2.** 2016年4个城市各级空气质量级别所占天数和优良率分布

项目	2016年			
	银川	乌鲁木齐	西安	兰州
I级	249	198	178	230
II级	10	49	15	10
III级	73	39	98	91
IV级	25	22	39	27
V级	8	44	29	2
VI级	1	14	7	6
优良率/%	68.0	54.1	48.6%	62.8

**Table 3.** Distribution of days and excellence rate of air quality at all levels in the four cities in 2017

**表 3.** 2017年4个城市各级空气质量级别所占天数和优良率分布

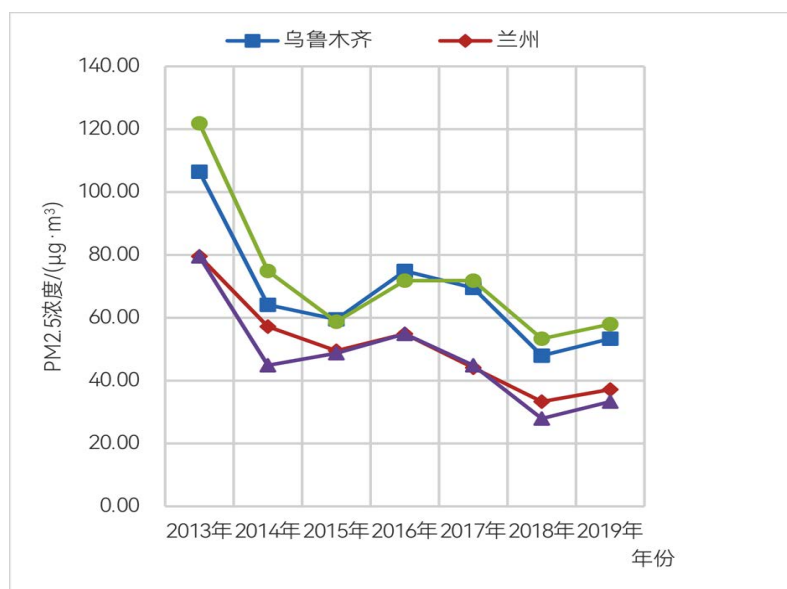
项目	2017年			
	银川	乌鲁木齐	西安	兰州
I级	223	200	160	227
II级	9	41	18	10
III级	104	54	103	105
IV级	21	21	42	12
V级	5	34	26	2
VI级	3	15	16	9
优良率/%	61.1	54.8	43.8	62.2

**Table 4.** Distribution of days and excellence rate of air quality at all levels in the four cities in 2018  
**表 4.** 2018 年 4 个城市各级空气质量级别所占天数和优良率分布

项目	2018 年			
	银川	乌鲁木齐	西安	兰州
I 级	249	216	185	216
II 级	29	52	30	33
III 级	30	35	87	68
IV 级	1	22	25	0
V 级	0	25	17	0
VI 级	0	0	2	0
优良率/%	90.1	61.7	53.5	68.1

### 3.2. 各污染物年际变化特征

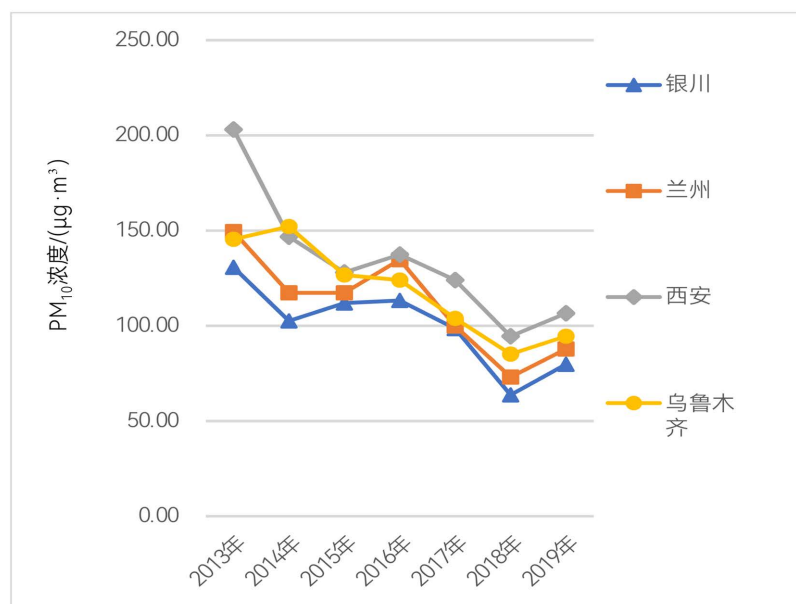
根据图 2(a)为 4 个城市的年际变化趋势图, 根据我国 2012 年 1 月 1 日实施的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)规定,  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $O_3$  的一级和二级日均值(24 h 均值,  $O_3$  日最大 8 h 均值)浓度限值分别为 35/75、50/150、100/160 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。由图 2(a)可看出, 6 年来  $PM_{2.5}$  的年均浓度普遍高于国家二级标准, 只有银川在 2018~2019 年的  $PM_{2.5}$  浓度是低于 35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由图 2(b)可见 4 个城市未超过二级标准 8 h 浓度限值, 从图表可知  $O_3$  浓度未超标, 其中乌鲁木齐的  $O_3$  在 2014~2018 年都是一级标准, 可见  $O_3$  污染在西北地区总体较轻。图 2(c)表明  $PM_{10}$  年均值浓度各城市间差距较小, 4 个城市  $PM_{10}$  浓度都是维持在二级标准达标率内。空气污染值得重视。2014~2018 年的  $PM_{2.5}$  的浓度波动不是很大, 大多处于下降状态, 其中 2015 年和 2018 年与其他城市相比  $PM_{2.5}$  浓度有上升的趋势。对于四个城市污染物相比, 污染物  $PM_{2.5}$  浓度与  $O_3$  浓度相差值不大, 其中乌鲁木齐的  $O_3$  浓度在这六年中相比其他三个城市都比较偏低。由此可见, 西北地区典型城市的空气污染物主要是大气颗粒物( $PM_{2.5}$ )。



(a)



(b)



(c)

**Figure 2.** (a) Interannual variations of PM<sub>2.5</sub>; (b) Interannual variations of O<sub>3</sub>; (c) Interannual variations of PM<sub>10</sub>

**图 2.** (a) PM<sub>2.5</sub> 年际变化图; (b) O<sub>3</sub> 年际变化图; (c) PM<sub>10</sub> 年际变化图

### 3.3. 首要污染物

计算得到 6 项污染物的空气质量分指数后, AQI 为各项空气质量分指数中的最大值, 当 AQI 大于 50 时, IAQI 最大的污染物为首要污染物[19]。见表 5 和见表 6 列出来 2015~2018 年 4 市各首要污染物所占天数和比例, 可知 4 市中 PM<sub>10</sub> 成为首要污染物天数最多, 其中 2015 年兰州和银川的年平均天数高达高达 177 和 174 d, 所占年平均首要污染物天数比例超过 47%; 其次是 PM<sub>2.5</sub> 或 O<sub>3</sub>, 兰州和银川市 O<sub>3</sub> 排名第二、PM<sub>2.5</sub> 排名第三位, 其余两个市则是 PM<sub>2.5</sub> 第二位、O<sub>3</sub> 第三位。总体来看 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 成为首要

污染物的年平均天数逐年递减、 $O_3$ 逐年递增的趋势，但  $PM_{2.5}$ 除兰州逐年递减的趋势，其他 3 市趋势波动不定，基本趋于下降趋势。在  $PM_{10}$ 下降趋势中，西安  $PM_{10}$ 下降天数幅度变化最大，2018 年同比 2015 年下降了 30.4%，银川、乌鲁木齐、兰州 3 市 2018 年同比 2015 年下降率依次为 19.7%、15.9%、29.3%；在  $PM_{2.5}$ 的下降趋势下，兰州 2018 年同比 2015 年下降率为 12.4%，银川、乌鲁木齐、西安 3 市则以倒“V”型变化，先升后降。而在  $O_3$ 的上升趋势中，银川以年均 7.1%的增长率上升，2016 年同比 2015 年，乌鲁木齐以 2.4%的速率增长，2018~2016 以超过 6%的速率增长，2016 年同比 2015 年，西安以 10.6%的速率增长，兰州以 9.3%的速率增长，而 2017 年同比 2016 年，西安速率增长变慢增长速率为 0.3%，兰州增长速率为 13.2%，而 2018 年同比 2017 年，西安和兰州则分别以 1.6%和 1.1%的速率下降。在 4 年时间序列中发现其他污染物也有存在为首要污染物，西安与兰州的增长速率持续上升，银川则以“V”型变化，先降后升，乌鲁木齐以倒“V”型变化，先升后降，但是比例都是比较小的，所以 4 市的首要污染物主要是  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 和  $O_3$ 。

**Table 5.** Days and proportions of major pollutants in each year of the four cities from 2015 to 2018

**表 5.** 2015~2018 年 4 市各年份首要污染物所占天数和比例

	城市	$PM_{2.5}$		$PM_{10}$		$O_3$		其他	
		天数	比例/%	天数	比例/%	天数	比例/%	天数	比例/%
2015 年	银川	53	14.5	225	61.6	33	9.0	54	14.8
	乌鲁木齐	116	31.8	209	57.3	21	5.8	19	5.2
	西安	77	21.1	215	58.9	63	17.3	10	2.7
	兰州	71	19.5	231	63.3	33	9.0	30	8.2
2016 年	银川	90	24.6	163	44.5	91	24.9	22	6.0
	乌鲁木齐	136	37.2	169	46.2	30	8.2	31	8.5
	西安	114	31.1	138	37.7	102	27.9	12	3.3
	兰州	47	12.8	204	55.7	67	18.3	48	13.1
2017 年	银川	58	15.9	156	42.7	124	34.0	27	7.4
	乌鲁木齐	139	38.1	139	38.1	65	17.8	22	6.0
	西安	131	35.9	72	19.7	103	28.2	59	16.2
	兰州	43	11.8	147	40.3	115	31.5	60	16.4
2018 年	银川	26	7.1	153	41.9	150	41.1	36	9.9
	乌鲁木齐	109	29.9	151	41.4	87	23.8	18	4.9
	西安	100	27.4	104	28.5	97	26.6	64	17.5
	兰州	26	7.1	124	34.0	111	30.4	104	28.5

**Table 6.** Days and proportions of each major pollutant per year in the four cities from 2015 to 2018

**表 6.** 2015~2018 年 4 市各首要污染物平均每年所占天数和比例

城市	$PM_{2.5}$		$PM_{10}$		$O_3$		其他	
	天数	比例/%	天数	比例/%	天数	比例/%	天数	比例/%
银川	57	15.5	174	47.7	100	27.2	35	9.5
乌鲁木齐	125	34.2	167	45.7	51	13.9	23	6.2
西安	106	28.9	132	36.2	91	25.0	36	9.9
兰州	47	12.8	177	48.3	82	22.3	61	16.6



## 4. PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和 O<sub>3</sub> 变化特征

### 4.1. 季节变化特征

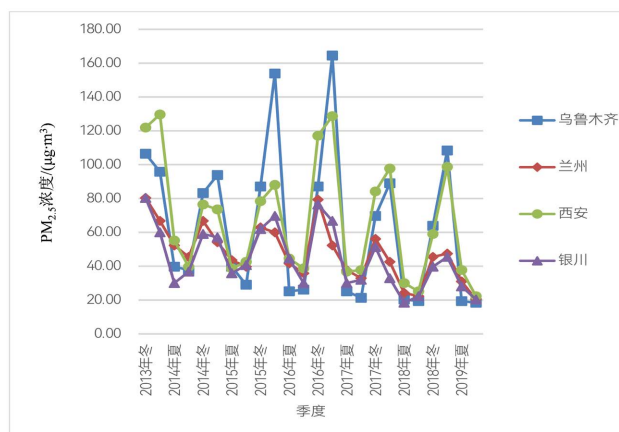


Figure 3. Seasonal average of PM<sub>2.5</sub> in the typical cities of northwest region from 2015 to 2017

图 3. 2015~2018 年西北地区典型城市 PM<sub>2.5</sub> 年季节均值

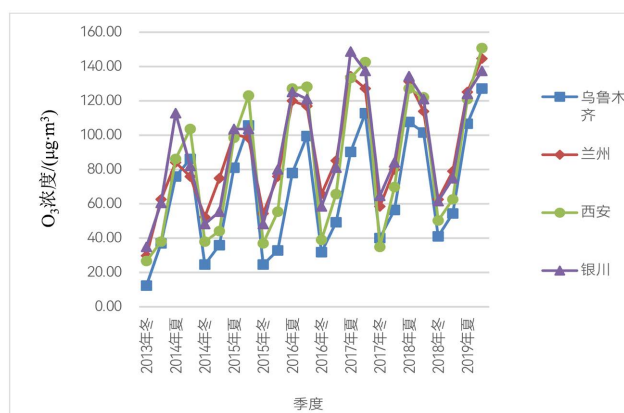


Figure 4. Seasonal average of O<sub>3</sub> in the typical cities of northwest region from 2015 to 2017

图 4. 2015~2018 年西北地区典型城市 O<sub>3</sub> 年季节均值

根据西北地区气候特征，将四季划分如下：春季 PM<sub>2.5</sub> 浓度与 O<sub>3</sub> 浓度均值为 3、4、5 月的平均，以此类推，计算出夏、秋季均值，冬季 PM<sub>2.5</sub> 浓度、O<sub>3</sub> 浓度均值为 12 月和次月 1、2 月的平均。其中 2013 年冬为 2013 年 12 月数值，2019 年秋为 2019 年 8 月数值。从图 3~图 5 可以看出，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 具有高度的一致性，且 4 市的 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 季节均值变化同步，图中展示出了研究区域内各城市 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的季节变化特征，各城市表现出了高度的差异。具体表现为春季是峰值，夏季下落，秋季降到波谷，冬季回升，呈现春季浓度最高，冬季次之，夏秋最低的季节动态规律，由于夏季的降雨天数和降雨量明显高于春季，平均风速亦高于春季，较高的风速以及雨水的冲刷有利于污染物的扩散[23]，而春季易发生沙尘暴、扬沙及浮尘天气[24]，而且较大的风速携带大量颗粒物[25]。2015~2017 年 PM<sub>2.5</sub> 年季节均值整体呈逐年递增趋势，其中乌鲁木齐波动最大，说明空气污染受颗粒物影响不断恶化。图 4 展示出了研究区域内各城市 O<sub>3</sub> 的季节变化特征，各城市表现了高度的一致性。O<sub>3</sub> 表现为夏季浓度最高，秋季次之，春冬最低的格局。由于夏季全国气温较高，受太阳辐射的影响，氮氧化物和挥发性有机物的光化学反应加剧[26]，导致夏季 O<sub>3</sub> 浓度较高。春季热点城市主要分布在东北地区南部、华北地区、西北地区东部、

华中地区北部及华东地区北部；夏季热点城市分布范围进一步扩大，且由东部沿海向内陆地区扩展，表明夏季由于太阳辐射引起的  $O_3$  前体物光化学反应增强[26]。

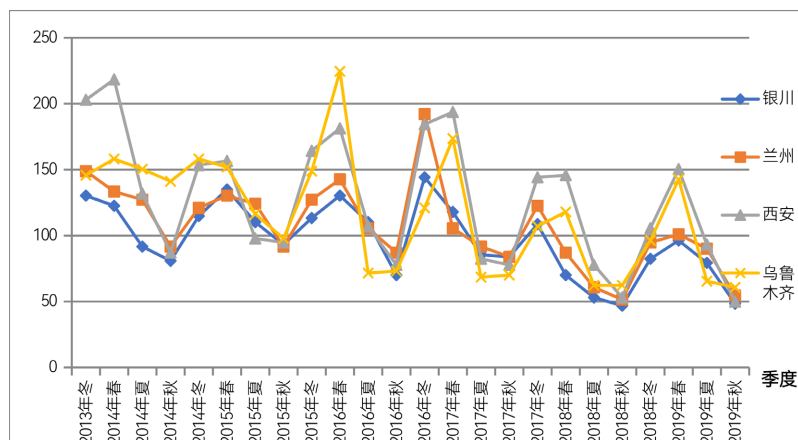


Figure 5. Seasonal average of  $PM_{10}$  in the typical cities of northwest region from 2015 to 2018  
图 5. 2015~2018 年西北地区典型城市  $PM_{10}$  年季节均值

#### 4.2. $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 和 $O_3$ 年变化

图 6~8 是四个城市在 2014 年至 2018 年每月污染物  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  与  $O_3$  的浓度平均值，从图 6、8 可以看出从  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  呈正相关，大致为“U”型变化，1~7 月逐渐下降，7~12 月逐渐上升，其中 1 月是峰值，7 月最底，整体来看 4 个城市的变化比较稳定，没有太大的波动，线段比较光滑；图中可知四个城市的总体变化趋势基本相同，兰州和银川的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  分别都维持在 80 和 150  $\mu g/m^3$  以下变化，其余两个市空气颗粒物年月均值浓度偏差相对稳定。由图 7 可知， $O_3$  浓度与  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  浓度相反，最大值处于 7 月，1 月与 12 月则最底，呈现一个倒“V”趋势变化，西北地区属于温带大陆性气候，降雨季节主要集中在 6~9 月，多雨季节出现空气湿度大幅增加，与王磊等[27]、王成辉[28]、李凌霄等[29] 3 的研究结果一致， $O_3$  浓度与相对湿度呈现出相反的趋势，两者呈现明显的负相关性，而当夏季结束后进入高温少雨、强光天气， $O_3$  的月均值浓度缓慢下降；最低值出现在 12 月，这时的气温低、太阳辐射较弱，空气较干燥。

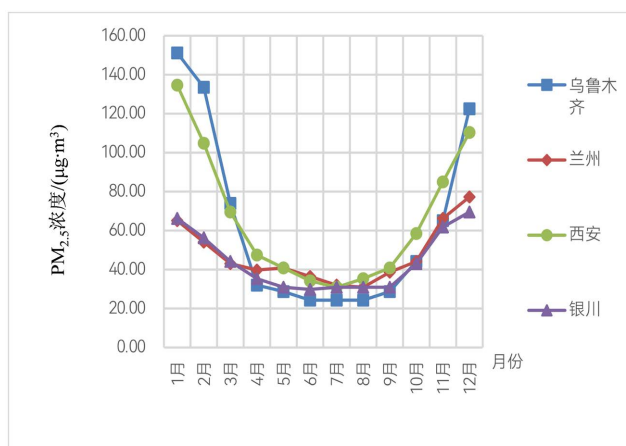
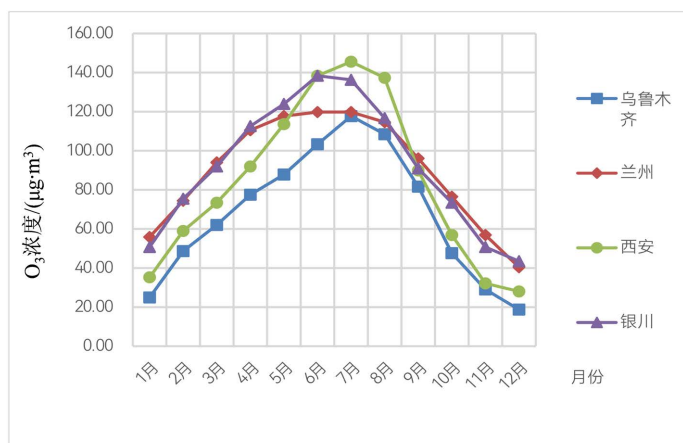
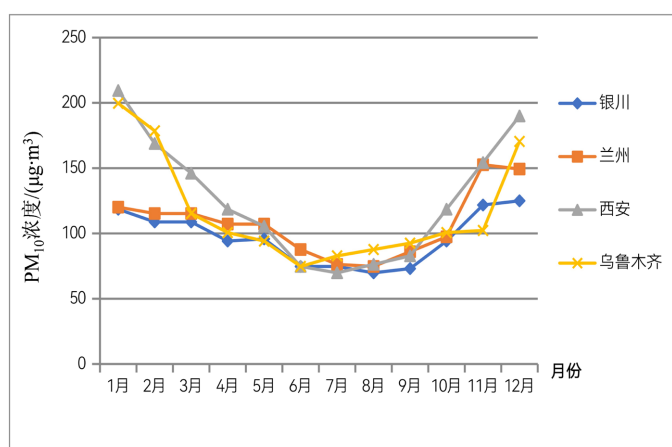


Figure 6. Monthly average of  $PM_{2.5}$  in the typical cities of northwest region from 2015 to 2018  
图 6. 2015~2018 年西北地区典型城市  $PM_{2.5}$  年月均值



**Figure 7.** Monthly average of O<sub>3</sub> in the typical cities of northwest region from 2015 to 2018  
**图 7.** 2015~2018 年西北地区典型城市 O<sub>3</sub> 年月均值



**Figure 8.** Monthly average of PM<sub>10</sub> in the typical cities of northwest region from 2015 to 2018  
**图 8.** 2015~2018 年西北地区典型城市 PM<sub>10</sub> 年月均值

## 5. 后向轨迹分析

根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012)制定的空气质量指数规定,将 AQI 值分为 6 级: 0~50、51~100、101~150、151~200、201~300、>300,分别对应空气质量等级优、良好、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染。对中度污染、重度污染和严重污染进行后向轨迹绘图分析(如果这些天数太多,可以选取典型时间分析,例如按春夏秋冬季节选取时间)。

为了研究西北地区四个典型的城市西安、兰州、乌鲁木齐、银川 2015~2018 年首要污染物 PM<sub>2.5</sub> 的潜在污染源的分布特征,使用美国海洋与大气研究中心(NOAA)的 HYSPLIT4 模型计算每日 72 h 后向轨迹,并下载空气轨迹图和相应的轨迹数据,采用世界时间每天早上 8:00 的后向轨迹资料,每条气流轨迹由 12 个点组成[30] REF\_Ref30688 \r \h [31]。以西安(33.42 N 107.40 E)、兰州(36.00 N 103.40 E)、乌鲁木齐(43.00 N 87.00 E)、银川(38.50 N 106.30 E)为受体点,确定受体点 500 m、1000 m、1500 m 三个高度处气流作为研究高度。这主要是城市近地面风速一般比郊区小,在 100 m 以下,主要受低层城区尺度的近距离污染源影响[1],而 500 m 的风场既可以反映近地层的气团输送特征,又可以减少地表摩擦对气团的影响[32]。因此分别对这四个地区从 2015~2018 年典型时间进行后向轨迹模拟计算,每条轨迹模拟时长 72 小时,时间分辨率为 1 小时。每个城市分三个不同等级的污染分别为中度污染、重度污染、

严重污染。

结果表明, 中度污染、重度污染和严重污染分别主要集中在冬季的 2 月、12 月以及春季和夏季的 4、5 月。乌鲁木齐地区在高度为 500、1000、1500 m<sup>3</sup> 个不同高度的轨迹线均显示大气污染物来自西南部方向; 西安市在三年里序列间重度污染出现 5 次, 500、100、1500 m<sup>3</sup> 个不同高度的轨迹线均来自东北方向; 兰州、银川的轨迹线则以东北和西北方向为主, 两市东北和西北走向的轨迹线占该市总轨迹线比例为 78%、85%, 其中两市的大气污染物以东北方向的传输路径较多, 为 52 条。并且西安、兰州、乌鲁木齐、银川四市均出现 AQI > 300, 西安 2 d (图 9(a)、(b)), 兰州 2 d (图 9(e)、(f)), 乌鲁木齐 1 d (图 9(c)) 和银川 2 d (图 9(d)、(g))。由此可见, 空气受到不同程度的污染源轨迹可能来自各个方向, 且日期分布在不同月份, 说明空气质量出现严重污染时污染物的来向复杂[33]。

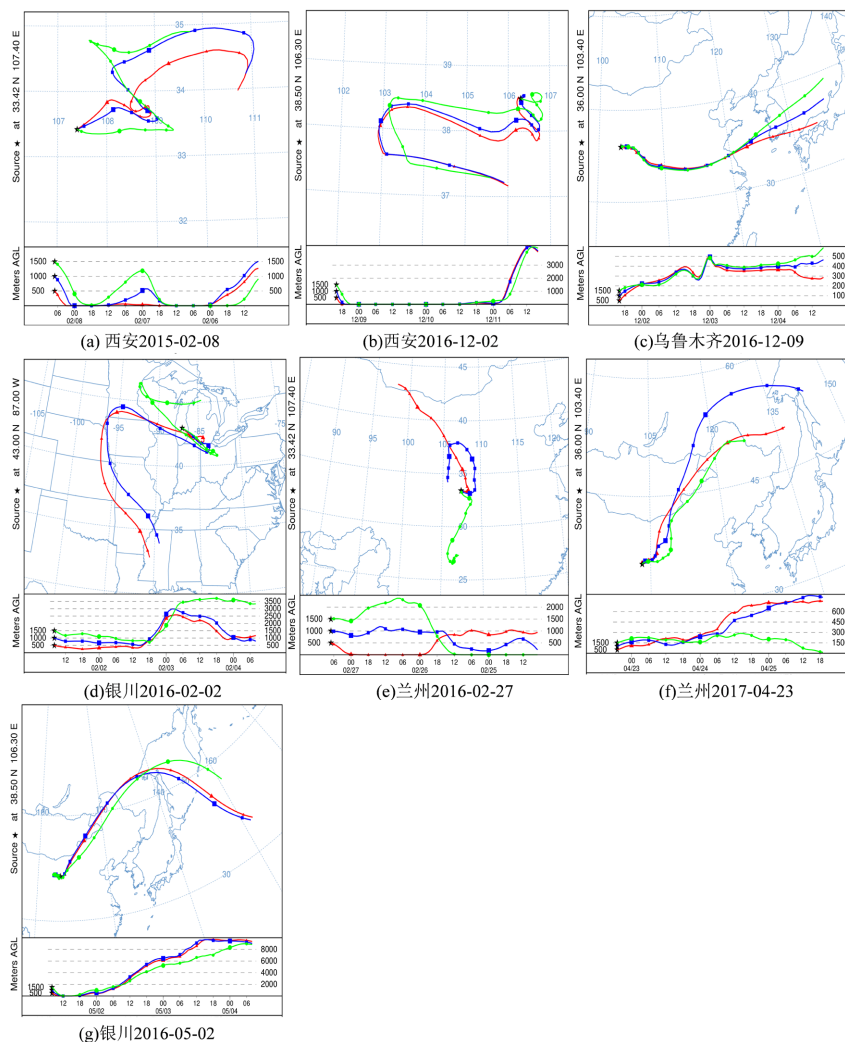


Figure 9. Backward trajectory of AQI > 300  
图 9. AQI > 300 后向轨迹图

## 6. 结论

(1) 2015~2018 年西安、兰州、乌鲁木齐和银川 4 市的空气质量以优良为主, 优良率均超过 50%; 随着纬度的降低, 空气质量变差, 西北地区的北部优于南部城市群、东南部最差; 各市空气质量从优到劣

排名为银川 > 兰州 > 西安 > 乌鲁木齐。

(2) 西北地区典型城市的空气污染物主要是大气颗粒物( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ )， $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 的年际变化呈正相关；主要污染物都维持在二级标准内。

(3) 2015~2018年，总体来看，西北地区的典型城市出现的首要污染物是 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 和 $O_3$ ，4年间 $PM_{2.5}$ 成为首要污染物的天数逐年下降， $O_3$ 和其他污染物成为首要污染物的天数逐年上升。 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 具有明显季节特征，冬季是高峰期，夏季则是低谷期，呈现冬季 > 秋季/春季 > 夏季的季节动态规律，与国内其他南方城市表现较一致， $O_3$ 则相反，最高值集中在夏季，最小值集中在冬季。

(4) 根据后向轨迹图统计分析结果表明：空气质量为重度污染和严重污染时，距离地面高度500 m和1000 m的污染物轨迹线具有高度的一致性，相同度高于75%。西安市的大气污染物传输路径是以东北和西南方向为主。兰州市的大气污染物传输路径是以东北为主。乌鲁木齐市的大气污染物传输路径是以西南方向为主。银川地区的中度污染与重度污染不是很严重，从图可知基本为零，少部分污染从银川的西北地区与西南地区传来，其中，空气受到严重污染时污染物的来向复杂。

## 基金项目

国家重点研发计划项目(2018YFC1506304)资助。

## 参考文献

- [1] 杨小银. 西北地区(甘青新)大气环境现状分析研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [2] Boucher, R.D., Artaxo, P., *et al.* (2013) *Clouds and Aerosols*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] Zhang, Q.H., Zhang, J.P. and Xue, H.W. (2010) The Challenge of Improving Visibility in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **10**, 7821-7827. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7821-2010>
- [4] Chan, C.K. and Yao, X. (2008) Air Pollution in Mega Cities in China. *Atmospheric Environment*, **42**, 1-42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.003>
- [5] Chen, Y., Ebenstein, A., Greenstone, M. and Li, H.B. (2013) Evidence on the Impact of Sustained Exposure to Air Pollution on Life Expectancy from China's Huai River Policy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 12936-12941. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300018110>
- [6] 徐祥德, 施晓晖, 谢立安, 丁国安, 苗秋菊, 马建中, 郑向东. 城市冬、夏季大气污染气、粒态复合型相关空间特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005, 35(Z1): 53-65.
- [7] 辛金元, 王跃思, 唐贵谦, 王莉莉, 孙扬, 王迎红, 胡波, 宋涛, 吉东生, 汪伟峰, 李亮, 刘广仁. 2008年奥运期间北京及周边地区大气污染物消减变化[J]. 科学通报, 2010, 55(15): 1510-1519.
- [8] 唐孝炎, 张远航, 绍敏. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] Elminir, H.K. (2005) Dependence of Urban Air Pollutants on Meteorology. *Science of the Total Environment*, **350**, 225-237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.043>
- [10] Rama Krishna, T.V.B.P.S., Reddy, M.K., Reddy, R.C. and Singh, R.N. (2005) Impact of an Industrial Complex on the Ambient Air Quality: Case Study Using a Dispersion Model. *Atmospheric Environment*, **39**, 5395-5407. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.003>
- [11] 刘超, 花丛, 康志明. 2014-2015年上海地区冬夏季大气污染特征及其污染源分析[J]. 气象, 2017, 43(7): 823-830.
- [12] 熊新竹, 陶双成, 高硕晗, 姚嘉林, 孔亚平. 北京典型主城区冬季大气污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(7): 1167-1173. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.07.011>
- [13] 刘晓咏, 王自发, 王大玮, 向伟玲, 潘小乐, 刘航, 田雨, 张瑜, 王刘铭, 李杰, 苏方成, 贺泓. 京津冀典型工业城市沙河市大气污染特征及来源分析[J]. 大气科学, 2019, 43(4): 861-874.
- [14] 李婷婷, 尉鹏, 程水源, 王文杰, 谢品华, 陈臻懿, 苏福庆, 任阵海. 2005-2014年中三角城市群大气污染特征及变化趋势[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2977-2984.
- [15] 何涛, 彭燕, 乔利平, 滕加泉, 薛银刚. 常州市冬季大气污染特征及潜在源区分析[J]. 环境科学研究, 2018, 31(3): 487-495. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2017.03.74>

- [16] 呼东峰. 西安市空气质量评价及可吸入颗粒物中重金属元素特征分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [17] 樊韬, 陶涛, 舒志亮, 翟涛, 孙艳桥, 车晶晶. 银川市环境空气质量统计特征分析[J]. 科技信息, 2011(9): 421-423.
- [18] 李德忱. 乌鲁木齐大气中二氧化硫、总悬浮微粒污染特征及趋势分析[J]. 干旱环境监测, 1991(2): 70-75+135.
- [19] 李淑芹, 孟宪林. 环境影响评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [20] 王艳琴. GB 3095-2012《环境空气质量标准》将分期实施[J]. 中国标准导报, 2012(4): 4-5.
- [21] 环保部. HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [22] 魏旖梦, 孜比布拉·司马义, 杨胜天, 等. 西北五省(区)空气污染时空变化特征及其影响因素[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 513-523.
- [23] 钱婧, 韩婧, 阮幸. 西安市冬季重污染天PM<sub>2.5</sub>高分辨率及其中碳气溶胶污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 464-471. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.03.006>
- [24] 张婷, 曹军骥, 刘随心. 宝鸡市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子组分污染特征及来源分析[J]. 地球环境学报, 2017, 8(1): 46-54.
- [25] 马雁军, 刘宁微, 王扬锋, 洪也, 张云海, 刘庆鹭. 沈阳及周边城市大气细粒子的分布特征及其对空气质量的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1168-1174. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2011.06.012>
- [26] 李霄阳, 李思杰, 刘鹏飞, 孔云峰, 宋宏权. 2016年中国城市臭氧浓度的时空变化规律[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1263-1274. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2017.0399>
- [27] 王磊, 刘端阳, 韩桂荣, 王易, 庆涛, 姜麟. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1285-1296. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2017.0401>
- [28] 王成辉. 云南省典型城市近地面臭氧成因研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [29] 李凌霜, 赵景波. 西安市雁塔区10月03时空变化规律[J]. 地球环境学报, 2015, 6(5): 299-306.
- [30] Rolph, G., Stein, A. and Stunder, B. (2017) Real-Time Environmental Applications and Display System: Ready. *Environmental Modeling & Software*, **95**, 210-228. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
- [31] 魏桢, 李健军, 王帅, 等. 用后向空气轨迹方法对胶州湾主要大气污染物分布的分析[J]. 中国环境监测, 2013, 29(1): 58-63.
- [32] 符传博, 陈红, 丹利, 等. 2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5000-5008. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202201225>
- [33] 王洪强, 潘惠妹, 廖雷, 王敦球. 2015-2017年安徽典型城市空气污染特征对比分析[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(1): 168-176.