

# 重庆市主城区大气中二氧化硫浓度 时空分布特征研究

高月<sup>1</sup> 孙荣国<sup>1,2</sup> 陈卓<sup>1\*</sup> 臧庆大<sup>1</sup>

(1. 贵州师范大学 化学与材料科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所  
环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 采用2016年3月~2017年2月重庆市17个空气质量监测站24 h自动连续采样的SO<sub>2</sub>逐小时数据, 探讨重庆市主城区大气中SO<sub>2</sub>的时空分布特征。结果表明, 研究期间日均浓度总体呈先下降后上升的变化趋势; 春夏两季, SO<sub>2</sub>高值主要集中在主城区的中部, 秋冬两季, 大渡口区和巴南区的浓度相对较高; SO<sub>2</sub>月均浓度表现为冬季月份浓度高, 夏季月份低, 南岸区月均浓度最高(14.99 μg/m<sup>3</sup>), 北碚区浓度最低(11.51 μg/m<sup>3</sup>); 周末两天的SO<sub>2</sub>周浓度均值高于日常工作日, 南岸区的周浓度均值最高, 渝北区最低; SO<sub>2</sub>小时浓度具有明显的双峰双谷的24 h日变化特征; SO<sub>2</sub>日平均浓度与降水量、相对湿度、风速和日照呈显著负相关, 与气温或气压的相关性不强, 与相对湿度呈最显著负相关; 重庆市大气中SO<sub>2</sub>四季的气团输送轨迹主要来自重庆本地、西部、西北部和西南部气团。研究结果可为重庆市进行大气环境管理提供研究基础。

**关键词:** 重庆; SO<sub>2</sub>; 时间分布; 空间分布  
中图分类号: X511 文献标识码: A

## Study on temporal and spatial distribution characteristics of SO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere of main urban areas of Chongqing

GAO Yue<sup>1</sup>, SUN Rongguo<sup>1,2</sup>, CHEN Zhuo<sup>1\*</sup>, ZANG Qingda<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Materials Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences Environmental Geochemistry National Key Laboratory, Guiyang, Guizhou 550081, China)

**Abstract:** To explore the temporal and spatial distribution of SO<sub>2</sub> in the main urban area of Chongqing, hourly SO<sub>2</sub> concentration data of 17 fixed monitoring sites in Chongqing were collected continuously from March 2016 to February 2017. The results showed that the daily average concentration of the whole year showed an overall trend of first decreasing and then increasing. In the spring and summer, the high value of SO<sub>2</sub> was mainly concentrated in the middle of the main urban area. In autumn and winter, the concentrations in Dadukou area and Banan area were relatively high. The average monthly concentration of SO<sub>2</sub> showed that winter months was high, summer months was low. The average monthly concentration of SO<sub>2</sub> in the Nanan area was the highest (14.99 μg/m<sup>3</sup>) and the lowest in Beibei area (11.51 μg/m<sup>3</sup>). The weekend's concentration of SO<sub>2</sub> was higher than daily working days. The

收稿日期: 2018-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(No. 21767007); 贵州师范大学2014年博士科研启动基金; 贵州师范大学“省级大学生创新创业训练计划”项目(No. 201710663071)

\* 通讯作者: 陈卓(1971-), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 大气环境化学, E-mail: chen-zhuo19@163.com.

average weekly concentration of  $\text{SO}_2$  in the Nanan area was the highest and the lowest in Yubei area. The 24 h average hourly concentrations of  $\text{SO}_2$  showed an obviously bimodal curve. The average  $\text{SO}_2$  concentration was significantly negatively correlated with precipitation, relative humidity, wind speed and sunshine, and was not strongly correlated with temperature or air pressure, and was most significantly negatively correlated with relative humidity. Atmospheric  $\text{SO}_2$  seasons air mass transport trajectories mainly from Chongqing local, western, northwestern and southwestern air masses. The results of this study can provide the research basis for Chongqing's atmospheric environment management.

**Key words:** Chongqing;  $\text{SO}_2$ ; temporal distribution; spatial distribution

## 0 引言

二氧化硫( $\text{SO}_2$ )在大气中分布广,含量高,是大气中的主要污染物之一<sup>[1]</sup>。高浓度的 $\text{SO}_2$ 会促进酸雨的产生,危害人体健康,破坏生态系统,给国民经济发展带来损失,已引起有关部门和科学界的高度关注<sup>[2-3]</sup>。降雨、风速、温度等气象条件、气团运动轨迹、下垫面特征、人口分布、能源结构、工业发展状况等因素均可影响大气 $\text{SO}_2$ 的浓度与空气质量<sup>[4-6]</sup>。王锦<sup>[7]</sup>等通过对北京市雾霾天气的研究,发现北京市火力发电厂升级改造,以及排放标准的提高,对大气环境质量产生重要影响;陈翔翔<sup>[8]</sup>等通过对南昌市气象要素与主要大气污染物变化特征的研究,发现不利的气象条件有利于霾天气的发展;王郭臣<sup>[9]</sup>等通过对天津市 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{NO}_2$ 输送路径及潜在源区的研究,指出周边污染潜在源区的气团传输对本地污染物浓度有一定影响。重庆市工业发达,是我国非常重要的老工业基地,大气污染严重,是我国酸雨和 $\text{SO}_2$ 重要监控区,同时,主城区位于四川盆地东部的平行岭谷区槽谷地带,地形多以谷地丘陵为主,冬季城市静风和逆温频率较高,不利于污染物扩散<sup>[10]</sup>。

本研究以重庆市9个主城区2016-2017年大气资料为依据,分析了主城区大气中 $\text{SO}_2$ 浓度的时空分布特征,认识重庆市主城区大气中 $\text{SO}_2$ 浓度时空分布特征及气象因素和气团运动的影响对区域进行大气污染防控具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

重庆市主城区包括都市核心区的渝中、江北、大渡口、沙坪坝、南岸和九龙坡6区和外围都市圈的巴南、渝北和北碚3区;主城区人口密度大,是长江

上游最大的经济中心,也是西南水陆交通枢纽和商业重镇;气候类型为亚热带季风气候,降水丰沛,四季分明,多云雾,少日照<sup>[11]</sup>。以全国城市空气质量实时发布平台([http://106.37.208.233:20035./](http://106.37.208.233:20035/))对社会发布的17个站点作为研究区域(图1)。

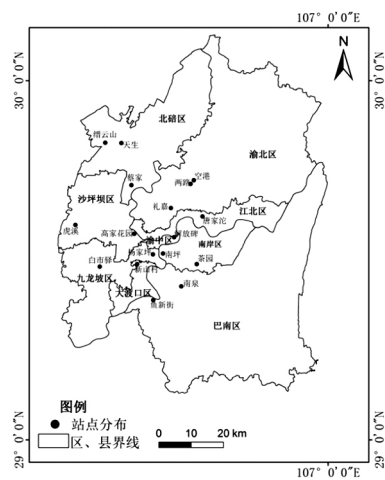


图1 重庆市主城区17个空气质量监测站点位置

Fig.1 Location of 17 automatic air monitoring stations in Chongqing

### 1.2 数据来源及分析方法

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./](http://106.37.208.233:20035/))发布的重庆市17个空气质量监测站2016年3月1日~2017年2月28日 $\text{SO}_2$ 逐小时观测数据。以每个城区所有站点大气中 $\text{SO}_2$ 小时浓度数据,求出相应城区的日浓度均值,据此求得相应城区的周、月、季节均值。3-5月为春季,6-8月为夏季,9-11月为秋季,12月至次年2月为冬季。气象数据来源于中国气象局气象数据中心。

## 2 结果与分析

### 2.1 全年变化趋势

研究期间,各城区大气中 $\text{SO}_2$ 年均浓度总体呈

先下降后上升的变化趋势(图 2),最小值为 2.00 ~ 3.67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最大值为 34.00 ~ 140.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均值为 4.72 ~ 33.07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其中南岸区年均浓度最高(12.42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),渝北区最低(10.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。根据中国环境空气质量标准,各城区  $\text{SO}_2$  年均浓度均达到一级标准<sup>[12]</sup>;分城区看,全年日均值  $\text{SO}_2$  浓度呈现出南岸区(14.99  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 巴南区(13.68  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 大渡口区(13.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 沙坪坝区(12.42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 渝中区(12.35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 九龙坡区(11.97  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 江北区(11.62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 北碚区(11.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 渝北区(10.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。这种空间差异可能与主城区周边环境及四季气候特征有关。

### 2.2 季节变化特征

研究期间,运用克里金空间(Kriging)插值法得到主城区四季大气中  $\text{SO}_2$  浓度的空间分布(图 3)。从区域上来看,四季大气中的  $\text{SO}_2$  具有明显的空间分布特征,大气中  $\text{SO}_2$  浓度均以南岸区最高,南岸区位于川东平行岭谷区,有发展较快的茶

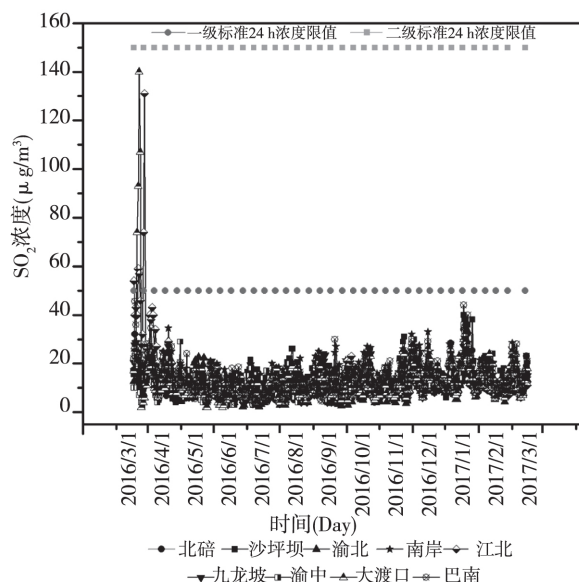


图 2 各城区  $\text{SO}_2$  浓度全年变化趋势

(2016 年 3 月 ~ 2017 年 2 月)

Fig. 2 The tendency of concentrations of  $\text{SO}_2$  for different urban areas from March 2016 to February 2017

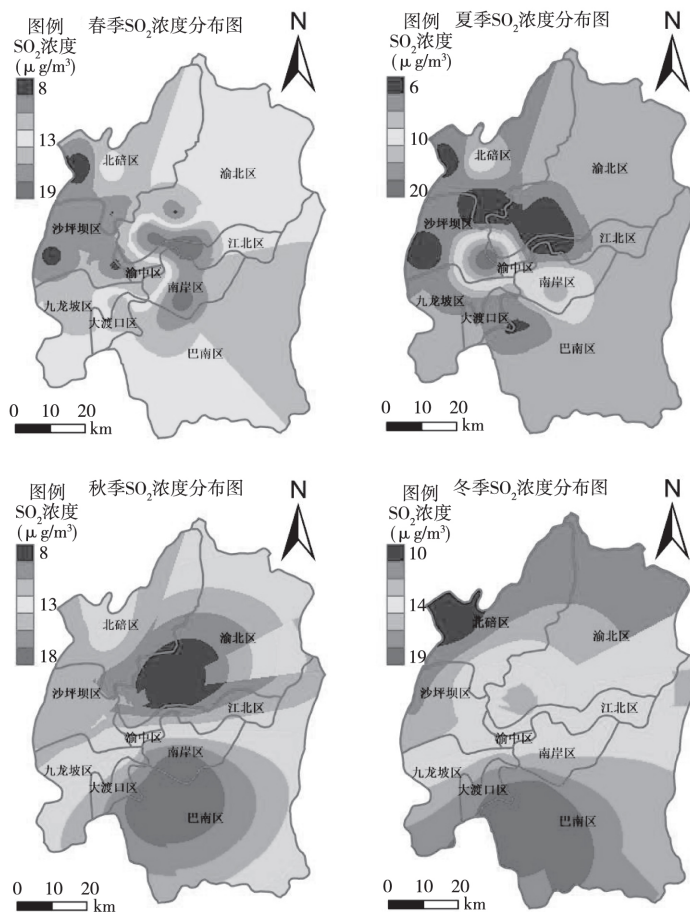


图 3 主城区  $\text{SO}_2$  浓度季节空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of  $\text{SO}_2$  concentration in main urban areas

园工业区增加了大气中污染物的排放量。从季节上来看, 春夏两季, 大气中较高浓度的 SO<sub>2</sub> 主要集中在主城区的中间地带——南岸区、渝中区、沙坪坝区和江北区, 污染物的浓度除与本地区繁华程度有关外, 还受气流输送的影响。秋冬两季, 由于西北风的盛行, 容易携带四川西北部程-锦产业带和拉萨市郊县产业园区的大气外源硫化物气溶胶, 同时受西伯利亚冷空气的影响, 冷空气流东移至南下, 易将本市核心经济区渝中区、江北区以及沙坪坝区的大气污染物输送至位于东南部的大渡口区区和巴南区, 巴南区的污染程度高于其它城区。由于重庆市东南部地势高于西北部, 高地势一定程度上阻碍了污染物向远处的传播, 且巴南区地势复杂, 四面环山, 污染物容易在近地面积累。四季大气污染物浓度均未超过国家空气质量一级标准浓度限值。四季中南岸区大气中 SO<sub>2</sub> 浓度均较高, 北碚区浓度最低。

2.3 月变化特征

主城区大气中 SO<sub>2</sub> 月均浓度表现为冬季月份浓度高、夏季月份浓度低(图 4)。3 月份各主城区的浓度最高, 达 19.21 μg/m<sup>3</sup>; 6 月浓度最低, 为 8.67 μg/m<sup>3</sup>。南岸区月均浓度最高(14.99 μg/m<sup>3</sup>) 北碚区浓度最低(11.51 μg/m<sup>3</sup>)。方差分析(One-way ANOVA)发现, 在任一月份, 有的城区之间 SO<sub>2</sub> 月均浓度不存在差异, 有的存在显著差异, 如 3 月, 江北区与其它城区之间存在显著性差异(Sig < 0.05); 1 月, 除江北区, 其它城区之间不存在显著性差异(Sig > 0.05); 同一主城区不同月份之间均存在显著性差异(Sig < 0.05)。

夏季夜短, 逆温层形成得较薄, 污染物随着大气运动容易扩散稀释, 且夏季雨水充沛, 污染物发生湿沉降的几率较大; 冬季夜长, 逆温层形成得较厚, 大气层结构相对稳定, 污染物难以向高空扩散, 进入燃煤期, 增加了大气中 SO<sub>2</sub> 的排放量。因此, 主城区大气中 SO<sub>2</sub> 的浓度表现为冬季月份高, 夏季月份低。

2.4 周变化特征

图 5 为各地区 SO<sub>2</sub> 浓度周变化特征。整体上来分析, 主城区大气中 SO<sub>2</sub> 浓度在周一、周六、周日和周二较高, 分别为 12.82 μg/m<sup>3</sup>、12.80 μg/m<sup>3</sup>、12.63 μg/m<sup>3</sup> 和 12.72 μg/m<sup>3</sup>; 周五、周三和周四相对较低, 分别为 12.07 μg/m<sup>3</sup>、12.40 μg/m<sup>3</sup> 和 11.78 μg/m<sup>3</sup>; 分城区看, 南岸区的 SO<sub>2</sub> 周浓度均值最高, 其它城区次之, 渝北区最低。

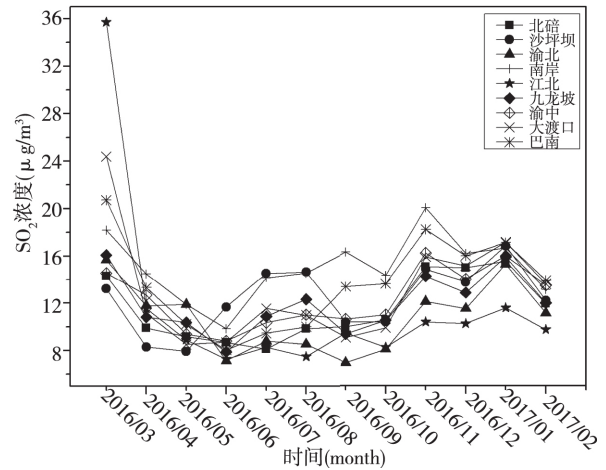


图 4 各地区 SO<sub>2</sub> 浓度月变化特征

Fig. 4 The monthly variation characteristics of SO<sub>2</sub> in different urban areas

方差分析(One-way ANOVA)发现, 同一城区周一至周日间 SO<sub>2</sub> 浓度不存在差异(Sig > 0.05)。周一至周日任一天, 有的城区之间 SO<sub>2</sub> 浓度不存在差异, 有的存在显著差异, 如周五, 北碚区与南岸区、巴南区以及大渡口区之间存在显著性差异(Sig < 0.05), 北碚区与渝北区之间不存在显著性差异(Sig > 0.05)。

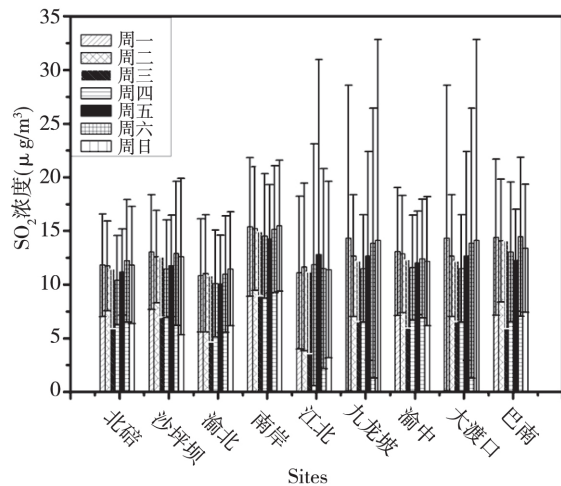


图 5 各地区 SO<sub>2</sub> 浓度周变化特征

Fig. 5 The Weekly variation characteristics of SO<sub>2</sub> in different urban areas

2.5 日 24 h 变化特征

大气中 SO<sub>2</sub> 小时浓度具有明显的 24 h 日变化特征(图 6)。各城区大气中 SO<sub>2</sub> 小时浓度春、冬季基本表现出 0:00—7:00 下降、7:00—12:00 上升、12:00—17:00 下降, 然后又上升的趋势; 夏、秋季则表现出 0:00—9:00 趋于稳定, 9:00—12:00 上

升,12:00—17:00 下降,然后又上升的趋势。春、夏、秋和冬四季日变化幅度最高的是巴南区、大渡口区、巴南区和巴南区,平均日较差分别为:  $22.84 \pm 10.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $18.89 \pm 12.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $21.48 \pm 11.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $21.25 \pm 11.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;最低的均是北碚区,平均日较差分别为,  $12.80 \pm 9.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $15.46 \pm 12.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $12.49 \pm 10.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $15.46 \pm 12.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

随太阳升起,人类活动加强,SO<sub>2</sub> 的排放源逐渐增多。同时,大气混合层厚度变高,容纳污染物空间变大,大气中的 SO<sub>2</sub> 逐渐积累,至 12:00 左右

进入第一次峰;随着光照强度继续加强,地表温度较高,SO<sub>2</sub> 分子运动加剧,对流层运动继续加强,有利于大气中的污染物扩散,至 17:00 左右 SO<sub>2</sub> 浓度达到最低;17:00 以后地表温度下降,大气扩散能力逐渐减弱,同时进入下班高峰期,SO<sub>2</sub> 在地表得到积累,到 22:00 又一次进入第二次峰,由于春、冬季夜晚地表温度较低,容易形成逆温,不利于污染物向高空扩散,至次日 9:00 左右大气中的 SO<sub>2</sub> 浓度趋于稳定,而夏秋季逆温频率相对较低,有利于污染物的扩散,至次日 7:00 左右浓度达到最低。

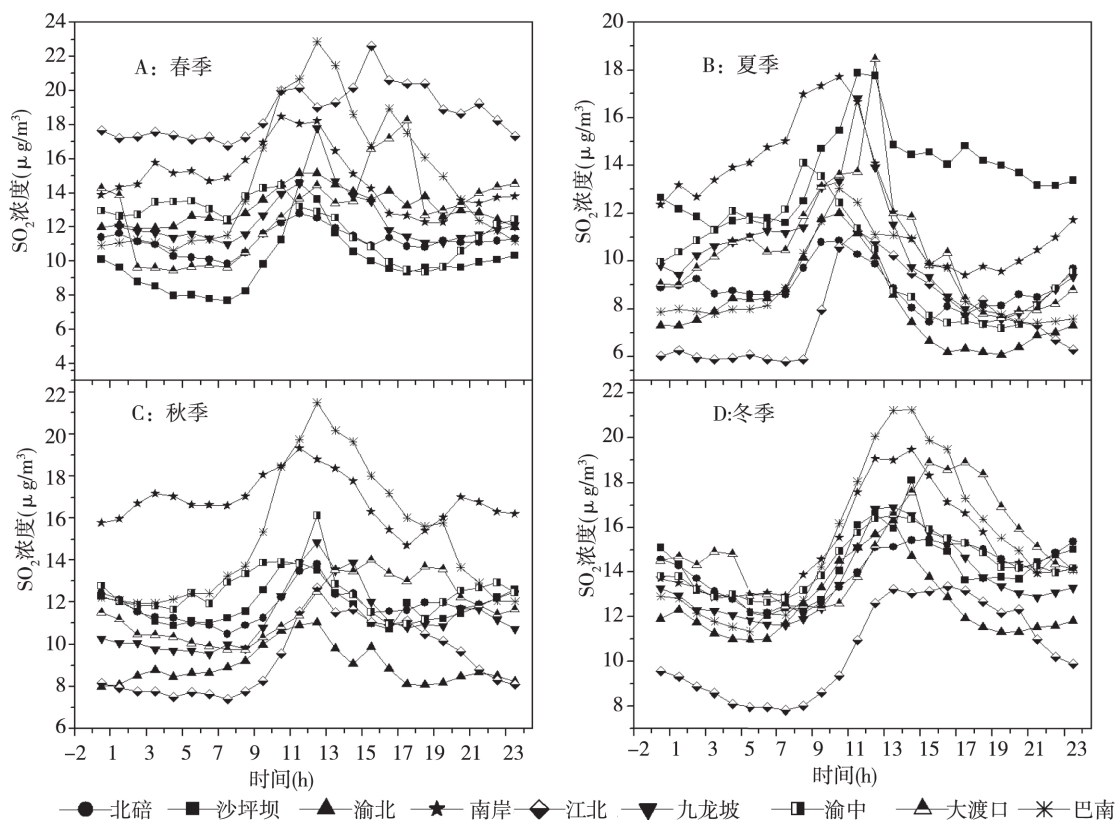


图6 各地区 SO<sub>2</sub> 浓度日变化特征

Fig. 6 The daily variation characteristics of SO<sub>2</sub> in different urban areas

### 3 对数据的相关性分析和气团轨迹的分析

#### 3.1 相关研究成果间的比较

重庆市大气中 SO<sub>2</sub> 浓度与国内部分城市进行对比,发现北方地区北京市、西北地区兰州市以及沿海地区的厦门市大气中 SO<sub>2</sub> 的浓度高于西南地区的遂宁市和重庆市(表 2)。北京市在冬季大气中的 SO<sub>2</sub> 浓度高达  $168 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,高于国家二级标准

24 h 浓度限值( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),大气污染已经十分严重,而西南地区的遂宁市和重庆市年均浓度相对较低。一方面可能由于西南地区降水频繁,有利于颗粒物的去除;另一方面可能受城市能源结构、人口密集程度、工业活动的综合影响<sup>[13-14]</sup>。重庆市的 SO<sub>2</sub> 年均浓度为  $10.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,远高于西部城市的遂宁市,由于重庆市是中国西南地区的工业重镇,同时又是中国酸雨高频地之一,大气中 SO<sub>2</sub> 浓度较高。



表1 历年来不同城市 SO<sub>2</sub> 平均浓度对比Tab.1 The average concentration of SO<sub>2</sub> in different cities in several years

时间	地点	浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	文献
1999年12月~2000年2月冬季	北京市	168*	[15]
2006年1月~2006年12月	厦门市	28	[16]
2006-2007年	烟台市	43	[17]
2000年	北京市	71	[18]
2010年	兰州市	57	[19]
2011年3月~2012年2月	遂宁市	2.25	[20]
2016年3月~2017年2月	重庆市	10.15	本文

\* 冬季月份均值, 其余为年均值

### 3.2 SO<sub>2</sub> 浓度特征与气象因素相关性分析

向大气中排放的有害物质主要是依靠大气的对流输送并与周围的空气混合稀释,使其浓度逐步降低。在污染物排放强度不变的条件下,大气被污染的状况主要取决于气象条件。本文运用 SPSS 软件对监测期间 SO<sub>2</sub> 日平均浓度与气温、风速、气压、降水量、相对湿度和日照强度等气象因素日平均值进行 Pearson 相关性分析,其相关系数分别为 0.38、-0.116、-0.011、-0.351、-0.468 和 -0.152。可知,重庆市空气中 SO<sub>2</sub> 日平均浓度与降水量、相对湿度、风速和日照呈显著负相关,说明降水量增加、空气湿度变大,风速增加以及日照强度增强,有利于 SO<sub>2</sub> 的扩散和清除。空气中 SO<sub>2</sub> 日均浓度与气温或气压的相关性不强,说明重庆市气温和气压的变化对 SO<sub>2</sub> 浓度影响不大。空气中 SO<sub>2</sub> 日平均浓度与相对湿度的相关性最强,2016年3月~2017年2月重庆市相对湿度日平均值为 75.79% 左右。SO<sub>2</sub> 日平均浓度与各段相对湿度的相关系数及检验结果见表 2。随着相对湿度的增加,SO<sub>2</sub> 日平均浓度均值从 14.59  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  逐渐下降至 7.57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。当相对湿度小于 70% 时,SO<sub>2</sub> 日平

表2 SO<sub>2</sub> 浓度与各段相对湿度的相关性Tab.2 Correlation between SO<sub>2</sub> concentration and relative humidity of each segment

相对湿度	SO <sub>2</sub> 日 平均浓 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	下降幅度 (%)	相关系数	P
<70%	14.59	-	-0.369	-0.352
70%~80%	13.37	8.36	-0.099	-0.021
80%~90%	11.55	13.61	-0.0136	-0.085
>90%	7.57	34.46	0.032	-0.042

注:  $P < 0.01$  时表示在  $\alpha = 0.01$  下相关不显著(双侧检验),  $P > 0.05$  时表示相关性显著。

均浓度与相对湿度的系数为 -0.369,呈最显著负相关。由于空气中的水汽和凝结核增加,有利于硫化物气溶胶发生湿沉降。当相对湿度逐渐增大时,相关性逐渐变的不显著。当空气中相对湿度大于 90% 时,则表现为正相关,空气湿度较大时,容易促进 SO<sub>2</sub> 的二次生成,不利于 SO<sub>2</sub> 的稀释和清除。

### 3.3 气团运动轨迹分析

通过后向轨迹模型(HYSPLIT)<sup>[21-22]</sup>,分析(图7)重庆市主城区春、夏、秋和冬不同高度四季气团运动轨迹(表4)。结果表明,夏季气团轨迹输送距离较春季、秋季和冬季短,且夏季四条气团轨迹呈发散状;秋季和夏季中,短距离、重庆本地气团占气团轨迹总数的最高,说明本地气团轨迹对污染物传输频率最高;春季和冬季中源自于四川东北部和西南部气团轨迹占比最高,污染物随风速扩散最慢,气团轨迹最短;春季和冬季的西北气流轨迹占比较春季和夏季低。结果表明,重庆市大气中 SO<sub>2</sub> 气团输送轨迹主要来自重庆本地、西部、西北部和西南部气团,本地气团占气团总轨迹数最高;从整体四季上来分析,均未出现远距离的东北、南、东、和东南部气团轨迹,一定程度上表明,对重庆市大气中 SO<sub>2</sub> 的浓度的影响,除来自重庆市本地外,主要受西部、西北部气团的影响。

表3 各类轨迹区域特征

Tab.3 Regional characteristics of cluster

时间	轨迹 类型	出现概率 (%)	途径区域
春季	1	35	西藏东南部、四川中部
	2	20	新疆东南部、甘肃中部、四川东北部
	3	39	四川东北部
	4	6	境外、四川南部、贵州西北部
夏季	1	23	甘肃南部
	2	24	云南中部、贵州中部
	3	46	重庆东南部
	4	6	青海西北部、四川东北部
秋季	1	49	重庆西南部
	2	22	西藏南部、四川南部
	3	25	境外、云南北部、贵州中部
	4	4	境外、西藏西北部、四川中部
冬季	1	19	新疆西南部、青海西南部、四川东北部
	2	55	四川南部
	3	14	境外、西藏中部、四川中部
	4	11	境外、云南北部、贵州中部

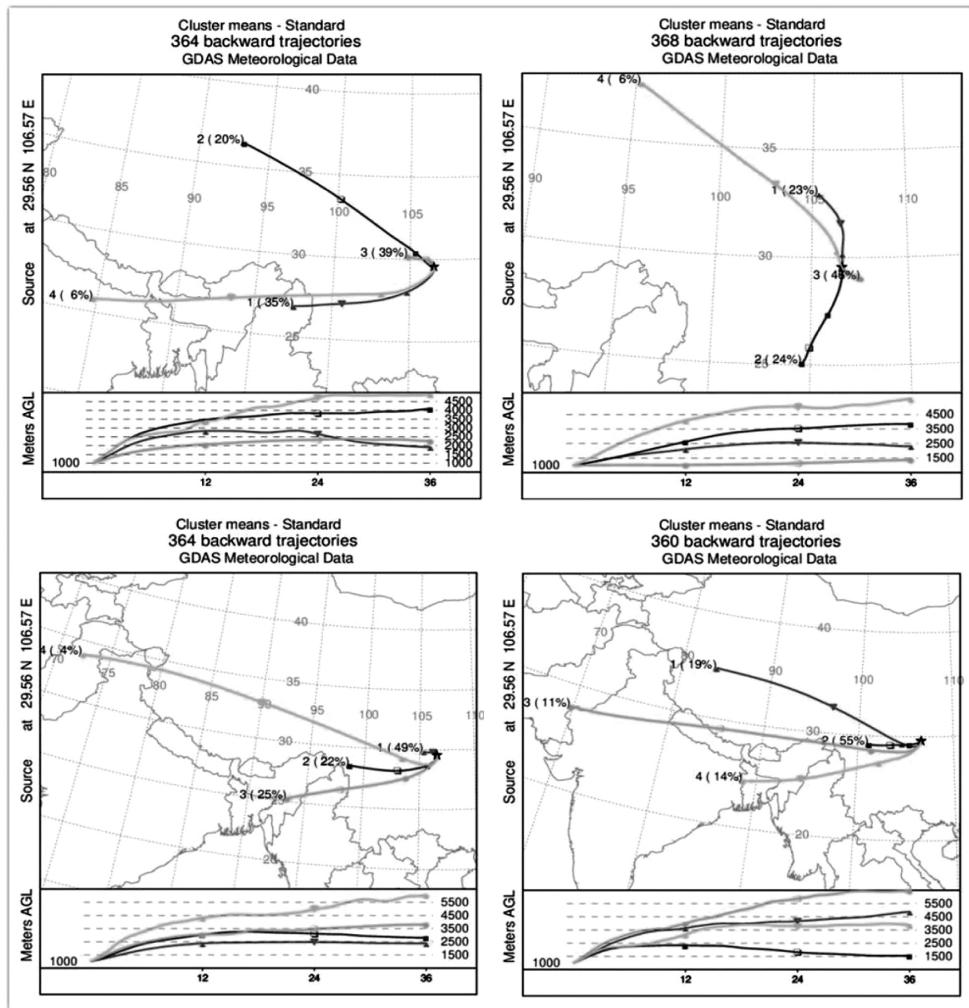


图 7 2016 - 2017 年重庆年四季向轨迹聚类分布

Fig. 7 Distributions of cluster-mean back-trajectories in four seasons in Chongqing during 2016 - 2017

## 4 结论

1) 全年日均浓度总体呈先下降后上升的变化趋势,各城区年均浓度均达到一级标准;春夏两季,SO<sub>2</sub> 高值主要集中在南岸区、渝中区、沙坪坝区和江北区,秋冬两季,大渡口区 and 巴南区的浓度相对较高,四季中南岸区大气中 SO<sub>2</sub> 浓度均较高,北碚区浓度均最低;月均浓度表现为冬季月份高,夏季月份低,南岸区月均浓度最高,北碚区浓度最低;周末两天的周浓度均值高于日常工作日,南岸区的周浓度均值最高,渝北区最低;小时浓度具有明显的“双峰双谷”的 24 h 日变化特征,白天峰值高于夜晚峰值。

2) 将 SO<sub>2</sub> 日平均浓度与气象因素进行 Pearson 相关性分析发现,SO<sub>2</sub> 日平均浓度与降水量、相对

湿度、风速和日照呈显著负相关,与气温或气压的相关性不强,与相对湿度呈最显著负相关;气团运动轨迹分析,四季总体上均未出现东北、南、东南和东部气团输送轨迹,主要受西部、西北部气团的影响。

## 参考文献:

- [1] 樊洁平. 基于数据的甘肃中部地区大气边界层时空分布特征研究[D]. 北碚: 西南师范大学 2013: 1-47.
- [2] 侯党社. 空气污染现状及咸阳市大气中 SO<sub>2</sub> 浓度变化研究[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版) 2018, 38(2): 35-43.
- [3] 曾强, 李国星, 张磊, 等. 大气污染对健康影响的疾病负担研究进展[J]. 环境与健康杂志 2015, 32(1): 86-90.
- [4] 李兵, 巨天珍, 张斌才, 等. 天水市大气 SO<sub>2</sub> 浓度时空变化特征的卫星遥感监测与影响分析[J]. 中国环境监测 2016, 32(2): 135-140.

- [5] 孙雪,罗小三,陈燕,等. 环境管理强化后南京市2013—2016年大气污染物的时空特征和气象影响[J]. 地球环境学报, 2017, 8(6): 506-514.
- [6] 么相姝,王磊. 天津团泊洼地区SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>传输轨迹及来源识别[J]. 生态与农村环学报, 2016, 32(3): 451-457.
- [7] 王锦,吉奕康. 北京市主要大气污染源清单及火电厂排放污染物对雾霾天气的影响[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(1): 78-82.
- [8] 陈翔翔,胡磊彭,王敏子,等. 1960—2014年南昌市霾天气气象要素及主要大气污染物变化特征[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(5): 114-121.
- [9] 王郭臣,王珏,信玉洁,等. 天津PM<sub>10</sub>和NO<sub>2</sub>输送路径及潜在源区研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3009-3016.
- [10] 潘纯珍,陈刚才,杨清玲,等. 重庆市地区道路PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>浓度分布特征研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2004, 26(5): 576-580.
- [11] 江文华,陈道劲. 2015年重庆主城区空气质量状况及气象条件分析[J]. 四川环境, 2016, 35(3): 90-93.
- [12] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. GB 3095-2012环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 1-12.
- [13] 李礼,余家燕,鲍雷,等. 重庆主城区春季典型天气的大气颗粒物浓度变化分析[J]. 环境工程学报, 2012, 6(6): 2012-2016.
- [14] 任丽红,周志恩,赵雪艳,等. 重庆主城区大气PM<sub>10</sub>及PM<sub>2.5</sub>来源解[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1387-1394.
- [15] 韦意双,蔡旭晖,范绍佳,等. 北京地区冬季SO<sub>2</sub>浓度的时空分布和年际变化特征研究[J]. 环境保护科学, 2007, 33(6): 1-20.
- [16] 林长城,王宏,陈彬彬,等. 厦门市空气质量时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2010, 39(1): 79-83.
- [17] 常鸣,刘伟,纪永芝,等. 烟台市区大气中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>及PM<sub>10</sub>的时空分布规律研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工 程版), 2011, 24(4): 324-328.
- [18] 程念亮,张大伟,李云婷,等. 2000(2014年北京市SO<sub>2</sub>时空分布及一次污染过程分析[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 3961-3971.
- [19] 刘昱霞,朱柯嘉,王新敏,等. 兰州市环境污染状况及对策研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(1): 109-114.
- [20] 龙帅,张凯,唐红军,等. 遂宁市环境空气中SO<sub>2</sub>时空分布特征研究[J]. 四川环境, 2013, 32(4): 28-61.
- [21] DRAXLER R R, ROLPH G D. HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access via NOAA ARLREADY website [EB/OL]. Silver Spring, MD: NOAA Air Resources Laboratory, [2013-10-09]. <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>.
- [22] SHAN W P, YIN Y Q, LU H X, et al. A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data [J]. Atmospheric Research, 2009, 93(4): 767-776.