

重庆市主城区大气中 NO₂ 浓度时空分布特征

孙荣国^{1,2}, 高月¹, 陈卓^{1,*}, 臧庆大¹

(1. 贵州师范大学 化学与材料科学学院, 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, 贵阳 550081)

摘要: 利用 2017 年 1 月 1 日~2017 年 12 月 31 日重庆市主城区 17 个国控空气质量监测站 24 h 自动连续采样的二氧化氮 (NO₂) 浓度小时数据, 探讨九个主城区大气中 NO₂ 浓度的时空分布特征、与气象参数之间的关系和气团运动的影响。结果表明, 主城区大气 NO₂ 浓度全年北碚区达标率较高 (76.16%), 渝中区达标率低 (3.84%), 日均浓度呈夏季前下降、夏季后上升的趋势; 月均浓度表现为冬季月份浓度高, 其次为春季、秋季和夏季月份; 周六、周日、周一和周二的浓度均值较高, 周三、周四和周五的较低; 小时浓度基本呈 5:00~11:00 和 16:00~20:00 上升、其余时间段下降的变化趋势; 大气 NO₂ 浓度空间分布差异显著, 西北地区(北碚)大气 NO₂ 浓度偏低、渝中区及其附近区域浓度偏高。影响大气中的 NO₂ 浓度的主要气象因素有: 气温、降水量、气压、日照和相对湿度; 四季气流输送中, 春冬季气流轨迹相似, 主要源自西部、西北部气流, 春季气流轨迹的 ρ(NO₂) 最高, 夏季最低。研究结果可为今后重庆市大气的治理提供研究基础。

关键词: 重庆; NO₂; 时空分布; 气象参数; 后向轨迹

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2019)01-0026-08 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.001

随着中国经济的飞速发展、城市人口的激增、汽车保有量的增加, 导致 NO₂ 排放量日益剧增^[1]。NO₂ 是大气污染、形成酸雨、以及光化学烟雾的重要前体物^[2], 可降低区域能见度^[3], 浓度高时可对人体健康造成严重危害。研究发现, 人类活动、下垫面类型、气象条件和区域传输对大气中污染物浓度有一定影响, 如华北地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区, 是人类活动剧烈的地区, 大气中 NO₂ 浓度较高, 且季节性变化规律明显^[4]; 风速、降水、气温等气象条件会影响南京市大气中 NO₂ 的浓度^[5]; 海峡谷地形不利于霞浦县城区大气中 NO₂ 的扩散^[6]; 海南岛夏季大气中 NO₂ 以本地排放为主, 冬季以珠江三角洲地区的外源输送起主要贡献作用^[7]。重庆市地处四川盆地东部, 东及东北临大巴山, 南及东南靠贵州高原, 呈三面闭合态势, 城市建筑物多依山而建、交通要道狭窄, 且城市静风和逆温频率较高^[8], 不利于污染物的扩散和自行净化, 同时, 重庆市作为我国重要的工业城市, 人口密集,

能源消耗巨大, 因此是我国空气污染严重的四大区域之一^[9]。目前有关重庆市主城区大气污染物的研究大多数基于短期、单点监测、只选择典型地区开展研究, 且大气 NO₂ 的时空分布、气象条件与气团运动的影响也少有报道^[10-12]。

为此, 本文对重庆市 17 个空气质量监测站的 NO₂ 小时浓度数据进行统计, 探讨了九个主城区大气中 NO₂ 浓度的小时、日、周、月和季度均值的时空变化规律, 日均浓度与气象因子之间的关系, 以及气团运动轨迹对 NO₂ 浓度的影响, 旨在更深入的了解重庆市大气污染物的时空分布特征, 对重庆市大气环境研究和空气质量监控具有重要的现实意义。

1 资料来源与方法

1.1 研究区概况

重庆市位于四川盆地的东部平行岭谷区, 地处东经 105°1′~110°11′, 北纬 28°10′~32°13′之间, 地域差异大, 峰谷高差悬殊, 盆地丘陵交错, 可谓“盆

收稿日期: 2018-04-18; 改回日期: 2018-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(21767007); 贵州师范大学博士科研启动基金项目(2014); 贵州师范大学“省级大学生创新创业训练计划”项目(201710663071)。

第一作者简介: 孙荣国(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境污染化学方面研究。E-mail: sunrongguo88@163.com.

* 通讯作者: 陈卓(1971-), 女, 教授, 研究方向为大气环境污染与控制。E-mail: chenzhuo19@163.com.

中之盆”^[13]。属于典型中亚热带季风湿润气候,降水丰沛,四季分明,多云雾,少日照。主城区包括都市核心区的渝中、江北、大渡口、沙坪坝、南岸、九龙坡 6 区和外围都市圈的巴南、渝北、北碚 3 区^[14](图 1)。

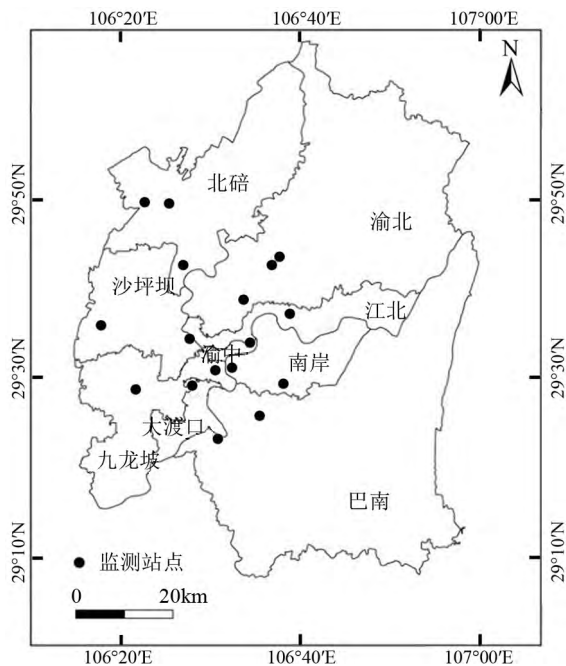


图 1 空气质量监测站点位置

Fig.1 Location of automatic air monitoring stations

1.2 数据来源及分析方法

重庆市 17 个空气质量监测站 NO_2 逐小时数据源于全国城市空气质量实时发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>)。以每个城区所有站点大气中 NO_2 小时浓度数据求得相应城区的日均值,再根据日均值求得周、月、季节均值。气象数据源于中国气象局气象数据中心。利用 TrajStat 软件对气团轨迹进行聚类^[15],计算出各类轨迹数占总轨迹数的比例,以及聚类后每条轨迹的质量浓度。大气

气流资料由美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供^[16]。

2 结果与分析

2.1 全年变化趋势

2017 年主城区大气中 NO_2 年均浓度整体呈现先下降后上升的变化趋势,最小值为 $8.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$,最大值为 $118.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$,平均值为 $42.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (图 2)。根据国家空气质量标准 (GB 3905-2012)^[17],北碚、沙坪坝、渝北、南岸、江北、九龙坡、渝中、大渡口和巴南等区 2017 年大气 NO_2 年均浓度达标 ($\leq 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的天数分别为 278、138、117、167、215、228、14、57 和 125 天,年达标率分别为 76.16%、37.81%、32.05%、45.75%、58.90%、62.47%、3.84%、15.62% 和 34.25%,北碚区的年均浓度为 $32.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$,渝中区年均浓度为 $67.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。方差分析 (One-way ANOVA) 显示,巴南区与沙坪坝区之间的大气 NO_2 年均浓度不存在差异 ($\text{Sig}>0.05$)(表 1),其它城区之间的存在显著性差异 ($\text{Sig}<0.05$)。

2.2 月、季变化特征

总体上,1~7 月主城区大气 NO_2 月均浓度呈下降、7、8~12 月呈上升趋势,其中 12 月各主城区的浓度最高,达 $55.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$;8 月浓度最低,为 $30.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。渝中区月均浓度最高 ($68.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$),北碚区的最低 ($32.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$)(图 3)。将 3~5 月划为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,1、2 和 12 月为冬季,各城区冬季 NO_2 浓度均值 ($56.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 较高,其次为春季 ($50.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、秋季 ($44.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和夏季 ($38.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$),其中渝中区大气 NO_2 各季节浓度均值最高 ($64.00 \sim 78.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$),北碚区最低 ($25.74 \sim 39.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

表 1 不同城区间方差分析 Sig 值

Table 1 The Sig value of covariance analysis for different urban areas

	北碚	沙坪坝	渝北	江北	九龙坡	渝中	大渡口	巴南
沙坪坝	0.00*							
渝北	0.00*	0.001*						
江北	0.00*	0.00*	0.00*					
九龙坡	0.00*	0.00*	0.00*	0.014*				
渝中	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*			
大渡口	0.00*	0.001*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*		
巴南	0.00*	0.167	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	
南岸	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.186	0.00*	0.00*	0.023*

注: * 在 0.05 水平上显著差异。

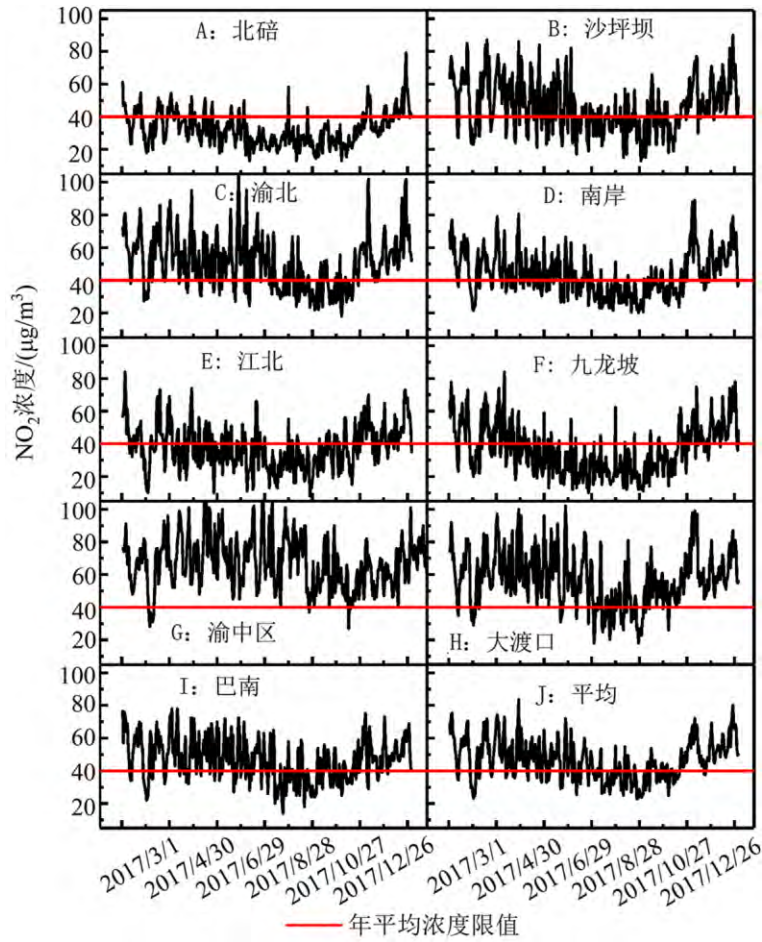


图2 各城区 NO₂ 浓度全年变化趋势

Fig.2 The tendencies of NO₂ in different urban areas in 2017

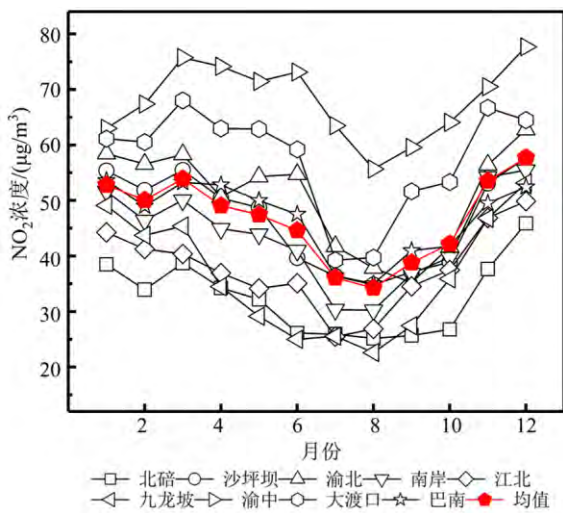


图3 NO₂ 浓度月变化特征

Fig.3 The characteristics of monthly variation of NO₂ in different urban areas

采用克里金 (Kriging) 空间插值法对 NO₂ 的空间分布进行展示,发现主城区各季节大气 NO₂ 浓度

均呈现出西北地区偏低、渝中区及其附近区域偏高的现象(图4),体现了城市发展布局和污染物气流传输对大气 NO₂ 浓度的影响。分季节来看,各区域 NO₂ 浓度最高的为冬季,其次为春季、秋季和夏季。冬季高浓度污染面积最大,主要集中在渝中、江北西部、渝北西南部、南岸西部、大渡口和沙坪坝大部分地区。冬季受高压控制,盆周冷空气下沉,盛行西北风,输送来自北方污染物,采暖季的到来以及春节期间烟花爆竹的燃放,导致 NO₂ 大量堆积。春季盛行西北风,带来北方大量的气溶胶,污染物主要集中在渝中、南岸西部、江北西部和大渡口北部等区,但随春季降水量逐渐增加在一定程度上净化空气,使得春季 NO₂ 浓度总体低于冬季。秋季由于较强的太阳辐射,促进了大气污染物的氧化,伴随着逐渐增多的逆温现象,导致 NO₂ 不易扩散,污染区域和春季相似。夏季降水量大,雨水对污染物有一定的淋洗和吸附作用,伴随气流下沉,带来大量水汽,进一步加大污染物的湿沉降,同时夏季大气

对流层旺盛,有利于污染物的扩散。因此夏季大部分地区 NO₂ 浓度均低于其它季节。

2.3 周内变化特征

主城区大气中 NO₂ 浓度在周六(46.52 μg/m³)、周日(46.34 μg/m³)、周一(47.91 μg/m³)和周二

(47.51 μg/m³)的均值较高,周五(46.06 μg/m³)、周三(46.20 μg/m³)和周四(46.24 μg/m³)的较低;分城区看,渝中区周内浓度均值最高,为66.22 μg/m³,北碚区最低,为32.29 μg/m³(图5)。One-way ANOVA 发现,同一城区周一至周日间 NO₂ 浓度不

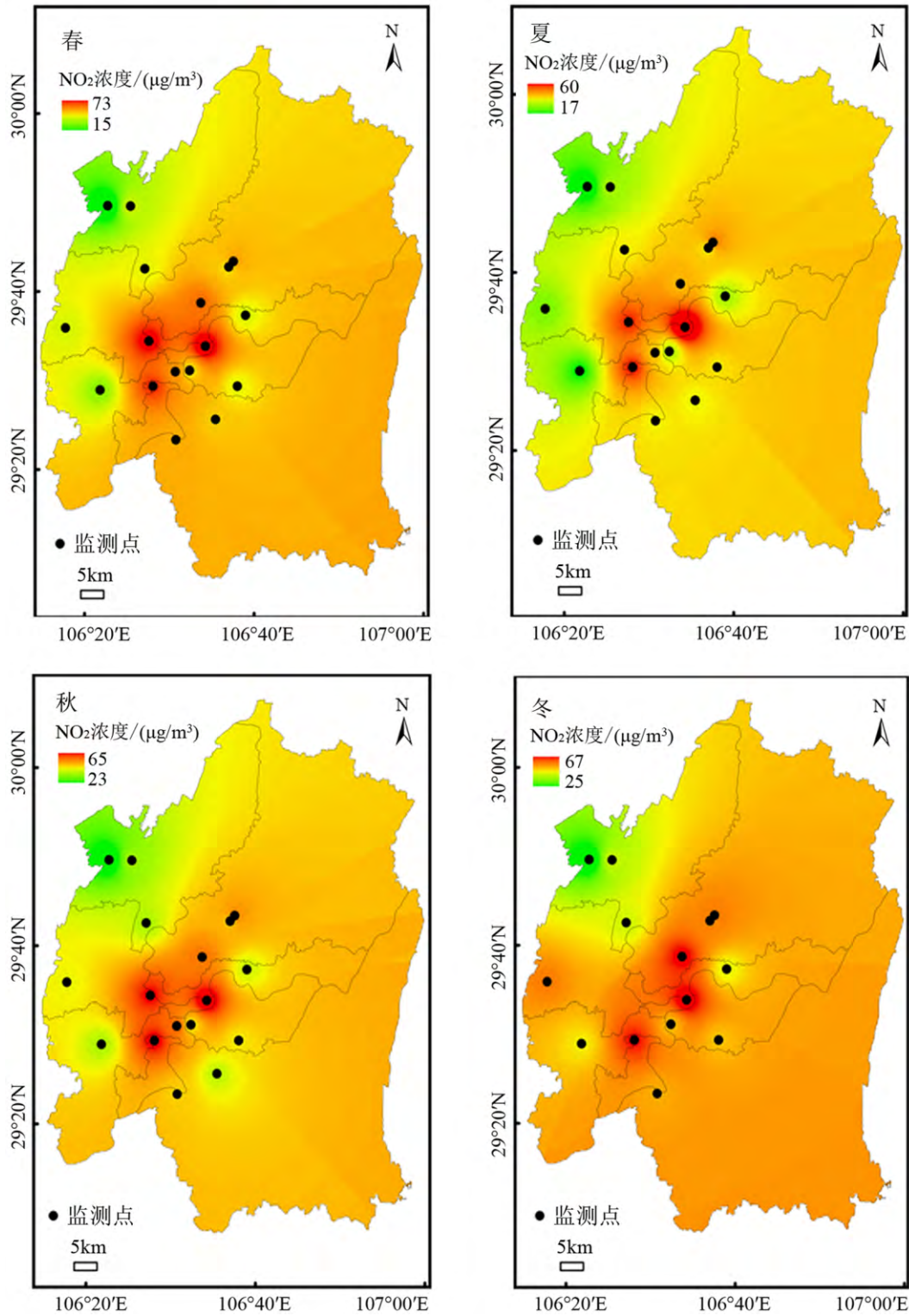


图 4 NO₂ 季节空间分布
Fig.4 The distribution map of seasonal NO₂ in urban areas of Chongqing

存在差异 ($Sig>0.05$), 周一至周日任一天, 有的城区之间 NO_2 浓度不存在差异, 有的存在显著差异, 如周三, 江北区与九龙坡区之间不存在差异 ($Sig>0.05$), 渝中区与其它城区之间存在显著性差异 ($Sig<0.05$)。通常, 百姓周末有出游的习惯, 此时间段内交通量必然会显著增加, 过量的汽车尾气排放可能是导致周六、周日大气中 NO_2 浓度升高的关键因素; 周一、周二是一个星期内办事情比较集中的时间点, 交通量也较大, 同时受周六和周日的影 响, 以致大气中 NO_2 浓度相对升高。在周三、四和五交通出行压力会变小, 大气中 NO_2 浓度也相应下降^[6]。

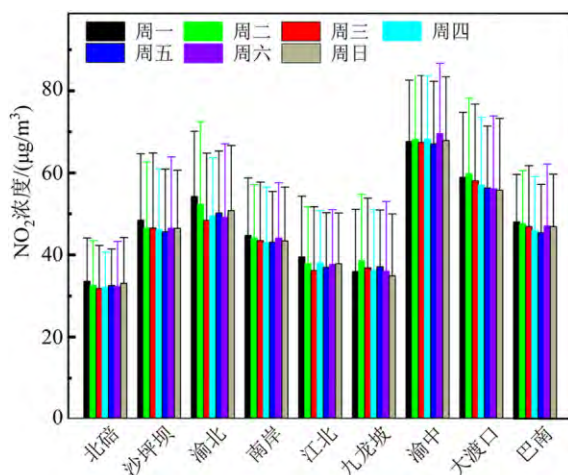


图5 各地区 NO_2 浓度周内变化特征

Fig.5 Variation of NO_2 concentrations in different urban areas within a week

2.4 日时刻变化特征

主城区大气中 NO_2 小时浓度在四季基本呈 0:00~5:00 下降, 5:00~11:00 上升, 11:00~16:00 下降, 最后再上升的变化趋势(图6)。随着人类活动的逐渐加强, 此阶段城市机动车辆等交通工具排放的污染物较多, 同时受到边界层生消演变规律的影响, 混合层高度逐渐抬高, 造成 NO_2 小时浓度有所增加, 但幅度并不是很大, 至 11:00 达到第一次峰值, 随着太阳辐射的继续加强, 混合层厚度继续抬升到最大值, 加大 NO_2 垂直扩散空间, NO_2 光解参与 O_3 生成的光化学反应, 至午后 16:00 左右达到最低值, 随着混合层厚度的降低, 下班高峰期的到来, NO_2 的浓度又逐渐上升, 在晚上 21:00 达到最高值, 之后由于夜间盆周冷空气下沉, 并伴有逆温现象, 大气层处于相对稳定状态, 各种污染源不容易扩散, 致使 NO_2 得到积累。春、夏、秋、冬四季 NO_2 小

时浓度最高的区域均为渝中区, 浓度最低均为北碚区。渝中区地处重庆核心经济区, 是大气污染的高频地, 而北碚区位于重庆市西北部, 有重庆市“后花园”的美誉, 大气污染相对较轻^[18]。

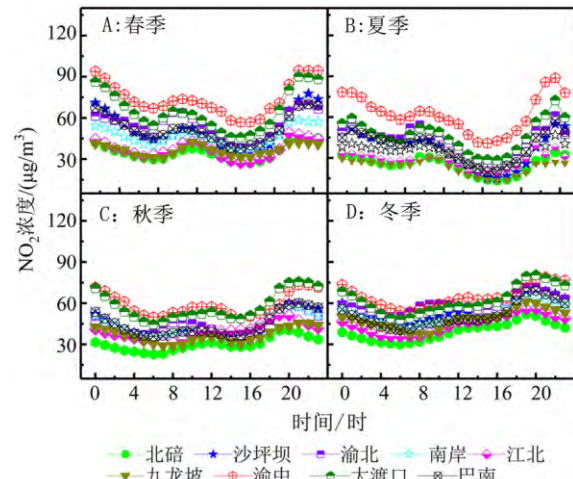


图6 各地区 NO_2 浓度日时刻变化特征

Fig.6 The hourly variation of NO_2 concentrations in different urban areas

3 讨论

3.1 NO_2 浓度与气象参数之间的相关性

通常, 大气中 NO_2 的浓度会受到多种气象因素综合作用^[19-20]。逐步回归分析结果显示, 影响大气中的 NO_2 浓度的主要气象因素有: 地温、降水量、气压、日照强度和相对湿度(表2)。为进一步明确上述因素对主城区大气中 NO_2 浓度的作用方式, 途径分析(表3)发现, 地温与降水量具有直接负效应, 分别为-0.66和-0.22。当地表温度升高时, 大气层结构稳定度降低, 近地层对流运动加剧, 有利于污染物向高空扩散^[21], 降水对污染物有较好的稀释作用, 不断地对大气污染物进行吸附和捕集, 使大气污染物浓度降低^[22]。气压、日照强度和相对湿度具有直接正向作用, 分别为0.44、0.14和0.21, 它们的间接作用要小于直接作用。这主要是因为, 在低压控制下, 垂直气流运动变大, 有利于带走近地面的 NO_2 , 而在高压系统控制下, 大气层相对稳定, 不利于 NO_2 的输送和扩散^[23]; 当太阳辐射强度变强时, 大气混合层厚度逐渐增加, 容纳污染物的交换空间越大, 导致 NO_2 浓度的积累^[24]; 空气湿度较大时, 有利于大气中气溶胶的二次生成和长大, 造成二次污染。

3.2 气团运动轨迹分析

春季盛行西北风, 轨迹较长, $\rho(NO_2)$ 为 73.78

表 2 逐步回归分析结果

Table 2 Results of stepwise regression analysis

步骤	进入方程的变量	标准差	回归系数	标准误差	t	Sig.
1	地温	196.81	-0.041	0.16	-2.50	0.013
2	降水量	1 078.55	0.63	0.000 64	2.46	0.015
3	气压	138.85	0.04	0.16	2.48	0.014
4	日照	4.31	0.012	0.26	2.46	0.015
5	相对湿度	19.75	0.133 8	2.61	0.51	0.61

表 3 影响大气中 NO₂ 浓度的作用因子途径分析结果

Table 3 The path analysis results of influent factors of atmospheric NO₂ concentrations

变量	路径效应(P _{ij})					直接效应	间接效应	总效应
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅			
X ₁	-0.66	0.037	0.074	0.024	0.21	-0.66	-0.057	-0.717
X ₂	0.11	-0.22	-0.66	-0.007 6	-0.034	-0.22	-0.027	0.247
X ₃	-0.66	-0.016	0.44	0.021	0.21	0.44	0.056	0.496
X ₄	0.009 7	0.033	-0.033	0.14	-0.012	0.14	0.000 95	0.140 95
X ₅	-0.66	-0.012	0.44	0.022	0.21	0.21	0.022	0.232

注: X₁ 即地温、X₂ 即降水量、X₃ 即气压、X₄ 即日照强度、X₅ 即相对湿度。

μg/m³(图 7)。聚类轨迹的 ρ(NO₂) 从高到低依次为 3>5>1>4>2>6(表 4), 其中, 西部和西北部轨迹 3、1 对应的 ρ(NO₂) 较高, 来自西南部的轨迹 6 对应的 ρ(NO₂) 较低, 轨迹 2、3 和 4 对应的 ρ(NO₂) 分别占本季节轨迹的 35.86%、4.35% 和 15.22%, 总占比 55.43%, 显然, 春季西部气流轨迹方向是主城区 NO₂ 的主要输送方向。

夏季的 ρ(NO₂) 最低, 为 63.73 μg/m³, 主要存在以下原因: 夏季植株茂盛, 植物叶片能有效吸附和移除空气中的污染物^[25]; 同时夏季降水充沛, 对大气中的污染物有较强的稀释和清除作用。各类轨迹对应的 ρ(NO₂) 从高到低依次为 4>2>1>6>5>3, 西北轨迹 1 和 4 对应的 ρ(NO₂) 最高。西北部轨迹 1 路径较短, 表明风速小, 区域气象条件稳定, 污

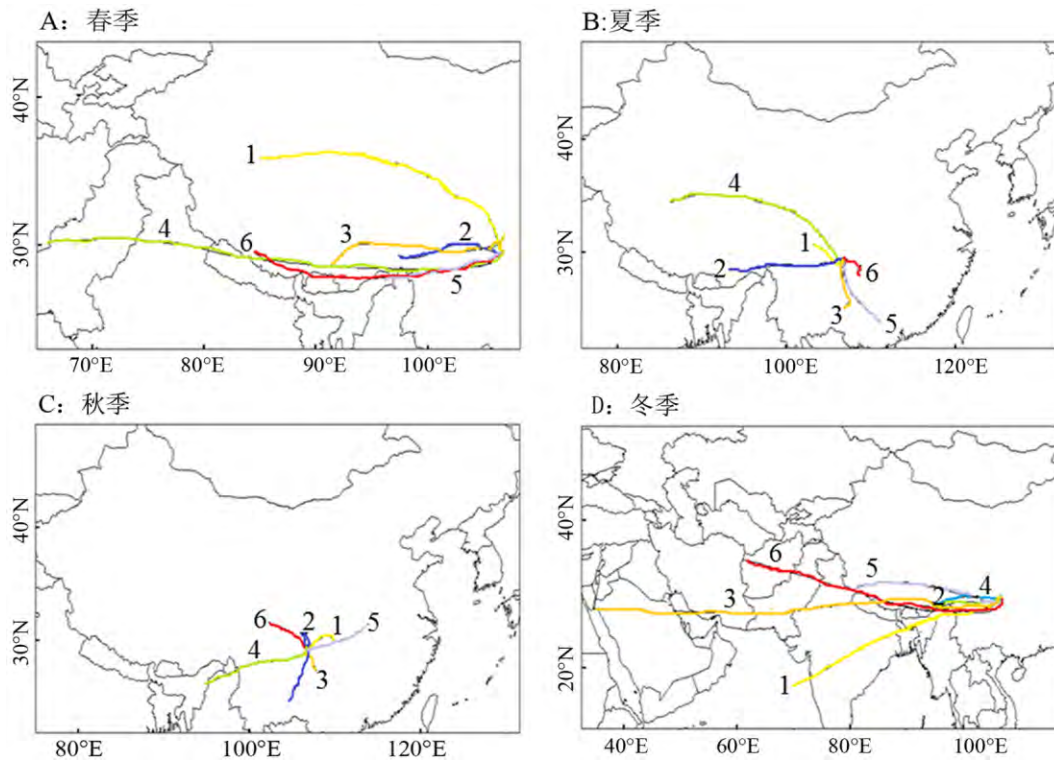


图 7 2017 年重庆四季的气流后向轨迹聚类

Fig.7 The seasonal distribution of airflow back-trajectories clusters for Chongqing in 2017

表4 不同季节各类轨迹 NO₂ 质量浓度统计结果
Table 4 Statistical result of NO₂ mass concentrations in different seasons

季节	类型	途径区域	所有轨迹	
			出现概率 / %	$\rho(\text{NO}_2) / (\mu\text{g}/\text{m}^3)$
春	1	西藏、青海、兰州、陕西	11.95	79.36
	2	西藏、四川	35.86	69.3
	3	西藏、青海、四川	4.35	85.5
	4	境外、云南、贵州	15.22	76.14
	5	境外、云南、贵州	14.48	79.94
	6	境外、云南、四川、贵州	14.13	66.23
	总			73.78
夏	1	四川	32.61	72.27
	2	西藏、四川	9.78	78.87
	3	贵州	11.96	48.82
	4	西藏、青海、甘肃、四川	2.17	98
	5	广西、贵州	17.39	51.89
	6	湖南、湖北	26.09	59.29
	总			63.73
秋	1	湖北	21.98	63.65
	2	云南	1.10	47
	3	湖南	30.77	65.06
	4	境外、云南、四川	9.89	62.22
	5	湖北、湖南	10.99	68.3
	6	四川	25.27	65.39
	总			64.71
冬	1	境外、西藏、四川	7.95	66.57
	2	西藏、四川	28.41	74
	3	境外、西藏、四川	13.64	64.58
	4	西藏、四川	26.40	68
	5	西藏、青海、甘肃	22.73	68.05
	6	境外、西藏、云南、四川	1.14	82
	总			69.3

染物扩散能力较弱,易将四川等地的污染物输送至重庆,造成污染物的积聚;但南部轨迹5路径较长,风速较大,有利于污染物的扩散和稀释。

秋季 $\rho(\text{NO}_2)$ 为 $64.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 气流轨迹来自东北、西南、西北、南部、西南五个方向。各类轨迹的 $\rho(\text{NO}_2)$ 从高到低依次为 $5 > 6 > 3 > 1 > 4 > 2$, 来自云南的气流轨迹对应 $\rho(\text{NO}_2)$ 最低, 所经路径相对洁净, 人为排放源较少, 故 $\rho(\text{NO}_2)$ 最低。来自湖北、湖南等地的轨迹 1、3 和 5 对应较高的 $\rho(\text{NO}_2)$,

由于该区域人为排放源较多, 故经过此区域的气流能携带较高浓度的 NO_2 ; 同时, 这三条轨迹出现的概率之和为 63.74%, 相对较高, 所以秋季湖南和湖北可能是重庆大气 NO_2 的重要潜在污染源。

冬季 $\rho(\text{NO}_2)$ 为 $69.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 各类轨迹对应的 $\rho(\text{NO}_2)$ 由高到低依次为 $6 > 2 > 5 > 4 > 1 > 3$, 轨迹 6 对应的值高达 $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 超过国家二级标准 24 h 浓度限值 ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。来自西部和西南部的轨迹 3 和 1 对应的 $\rho(\text{NO}_2)$ 最低, 这与风速大, 轨迹的输送浓度低相对应, 西部、西北部气流占比分别为 28.41%、13.64%、26.1% 和 22.73%, 总占比 90.92%, 这与春季气流输送特征相似。四季均未出现远距离的东部、东北部、东南部和南部气流轨迹, 这与重庆市的峡谷地形有很大关系, 一定程度上阻碍了远距离污染物的传输。

4 结论

1) 主城区大气中 NO_2 浓度具有明显的时空分布特征。2017 年重庆市主城区大气 NO_2 日均浓度总体呈先下降后上升的变化趋势; 冬季月均浓度高, 其次为春季、秋季和夏季月份; 周六、周日、周一和周二的浓度均值较高, 周三、周四和周五的较低; 小时浓度整体呈 0:00~5:00 和 11:00~16:00 下降, 其余时间段上升的变化趋势; 主城区大气中 NO_2 的空间分布特征差异显著, 北碚区大气 NO_2 浓度偏低, 达标率较高, 渝中区及其附近区域浓度偏高, 达标率低。

2) 影响大气中的 NO_2 浓度的主要气象因素有气温、降水量、气压、日照和相对湿度。地温与降水量具有直接负效应, 气压、日照强度和相对湿度具有直接正向作用。四季气流输送中, 春冬季气流轨迹相似, 春季气流轨迹的 $\rho(\text{NO}_2)$ 最高, 夏季最低, 四季均未出现远距离的东部、东北部、东南部和南部气流轨迹。

参 考 文 献

- [1] 谢焱鑫, 何立志, 马超云. 湘潭市大气中 NO_2 时空分布特征研究[J]. 低碳世界, 2017, 142(4): 1-3.
- [2] Wei P, Ren Z, Su F, et al. Environmental process and convergence belt of atmospheric NO_2 pollution in north China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 25(6): 797-811.
- [3] 郭伟, 程燕, 樊巍, 等. 西安市大气污染物浓度特征及影响因素分析[J]. 地球环境学报, 2014, 5(4): 235-242.
- [4] 梅世玉, 麻金继, 张鑫. APEC 期间京津冀地区 NO_2 浓度的时空变化特征研究[J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(4): 281-287.
- [5] 魏玉香, 童尧青, 银燕, 等. 南京 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 变化特征及其与气象条件的关系[J]. 大气科学学报, 2009, 32(9): 451-457.
- [6] Huang W, Long E, Wang J, et al. Characterizing spatial distribution and temporal variation of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations in an urban

- area of Southwest China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, 6: 842–848.
- [7] 符传博,陈有龙,丹利,等. 近10年海南岛大气NO₂的时空变化及污染物来源解析[J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 18–23.
- [8] 周国兵,王式功. 重庆市主城区空气污染天气特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(11): 1345–1349.
- [9] 徐龙君,兰劲涛. 重庆市酸雨规律分析及防治对策[J]. *矿业安全与环保*, 2005, 32(5): 16–19.
- [10] 王同桂. 重庆市大气PM_{2.5}污染特征及来源解析[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [11] 潘纯珍,陈刚才,杨清玲,等. 重庆市地区道路PM₁₀/PM_{2.5}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.
- [12] 李杰,范毅,曾雪梅. 重庆市南岸区环境空气质量现状及变化趋势研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 25(4): 184–189.
- [13] 叶堤,陈刚才,陶俊,等. 重庆市春季大气NO₂浓度空间分布特征研究[J]. *四川环境*, 2005, 24(1): 34–37.
- [14] 孟小峰,徐刚. 重庆主城区空气质量时空分布及原因分析[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2010, 5(4): 37–42.
- [15] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2009, 24(8): 938–939.
- [16] Shan W, Yin Y, Lu H, et al. A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 93(4): 767–776.
- [17] 中华人民共和国环境保护部和国家质量监督检验检疫局. GB 3095–2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [18] 徐鹏,郝庆菊,吉东生,等. 重庆市北碚大气中PM_{2.5}、NO_x、SO₂和O₃浓度变化特征研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(5): 1539–1547.
- [19] 杨显双. 重庆市北碚区SO₂、NO₂变化趋势及影响因素分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(2): 50–53.
- [20] 刘永林,孙启民,钟明洋,等. 重庆市主城区PM_{2.5}时空分布特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(4): 1199–1129.
- [21] Duo B, Cui L, Wang Z, et al. Observations of atmospheric pollutants at Lhasa during 2014–2015: Pollution status and the influence of meteorological factors [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 63(1): 28–42.
- [22] 李琛,刘瑾,张继林. 气象因素对汉中市城区空气污染的影响[J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(3): 234–238.
- [23] 周彬,刘端阳,魏建芬,等. 降水对气溶胶颗粒物清除作用的初步分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(Z1): 160–170.
- [24] Cugeron A, Michele C D, Ghezzi A, et al. Aerosol removal due to precipitation and wind forcings in Milan urban area [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 556(1): 1256–1262.
- [25] McDonald A G, Bealey W J, Fowler D, et al. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM₁₀ in two UK conurbations [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(38): 8455–8467.

Characteristics of Temporal and Spatial Distribution of Atmospheric NO₂ in Main Urban Areas of Chongqing

SUN Rongguo^{1,2}, GAO Yue¹, CHEN Zhuo¹, ZANG Qingda¹

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

Abstract: Characteristics of temporal and spatial distribution of atmospheric NO₂ in nine main urban areas of Chongqing during 2017 were analyzed based on data from automatic continuous sampling results of 17 state stations of air quality monitoring, and relationships between concentrations of ambient NO₂ and meteorological parameters and movements of air mass were discussed. The results showed that the compliance rate of measured NO₂ concentration according to the grade II Ambient Air Quality Standard of China was highest (76.16%) in the Beibei district and was lowest (3.84%) in the Yuzhang district. The 24-hour mean concentrations of atmospheric NO₂ were lowest in summer. The monthly average concentration of NO₂ was highest in winter, and decreased in the trend of spring, autumn, and summer. The daily average concentration of NO₂ was relatively high on days of Saturday, Sunday, Monday and Tuesday, and was relatively low on days of Friday, Wednesday and Thursday. The hourly average concentrations of NO₂ showed increasing trends during periods of 5:00–11:00 and 16:00–20:00, and showed decreasing trends during other times. The Spatial distribution of NO₂ concentration varied significantly, NO₂ concentrations were low in the northwest region (Beibei district) and were high in the Yuzhong district and its vicinities. Air temperature, precipitation, air pressure, sunshine and relative humidity affected NO₂ concentration significantly. Airflow trajectories were similar in spring and winter, mainly western or northwestern airflows. The average concentration of NO₂ in airflow was highest in spring and lowest in summer. The research results provided important data for future air pollution controlling in the Chongqing city.

Key words: Chongqing; NO₂; spatial and temporal distribution; meteorological parameters; backward trajectory