

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0696

刘永林, 钟明洋, 孙启民, 等. 2016. 重庆市都市功能核心区秋季大气污染物时空分布特征[J]. 环境科学学报, 36(7): 2344-2354

Liu Y L, Zhong M Y, Sun Q M, et al. 2016. Temporal and spatial variations of atmospheric pollutants in Chongqing metropolitan area during autumn[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(7): 2344-2354

重庆市都市功能核心区秋季大气污染物时空分布特征

刘永林¹, 钟明洋^{2,3}, 孙启民⁴, 钟部卿^{5,*}, 雒昆利⁶

1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331
2. 重庆地质矿产研究院 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室, 重庆 400042
3. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室重庆研究中心, 重庆 400042
4. 长安大学 建筑学院, 西安 710064
5. 中国环境科学研究院, 北京 100012
6. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

收稿日期: 2015-08-09 修回日期: 2015-10-12 录用日期: 2015-10-12

摘要:为研究重庆市都市功能核心区大气污染物浓度水平及变化规律, 统计分析了 2014 年 9 月至 2014 年 11 月 5 个监测站(解放碑、高家花园、杨家坪、新山村和南坪) 24 h 连续监测 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 浓度数据. 结果表明, 观测期间, 大气颗粒物污染严重, 5 个站点 PM_{2.5} 日均浓度超标率分别为 30.8%、37.4%、38.5%、37.4% 和 31.9%, 5 个站点 PM₁₀ 日均浓度超标率分别为 23.1%、22.0%、18.7%、19.8% 和 19.8%; 重庆市都市功能核心区细颗粒物(PM_{2.5}) 污染严重, 5 个站点 PM_{2.5} 占 PM₁₀ 比例分别为 60.2%、64.6%、64.1%、75.4% 和 62.8%; PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 CO 早晚出现高峰值; SO₂ 和 O₃ 浓度日变化曲线呈现单峰型, 峰值分别出现在中午和午后; 降水量、气温和水汽压与 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 呈显著负相关; 相对湿度与 O₃ 呈显著负相关, 气温、水汽压和风速与 O₃ 呈显著正相关; CO 与相对湿度呈显著正相关; 风向也影响着大气污染物浓度的时空分布, 南偏西、南偏东和东北偏北风利于 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 CO 浓度积累, 西北风利于 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 CO 扩散; 但西北风控制下利于 O₃ 浓度积累.

关键词:大气污染物; 气象条件; 重庆市都市功能核心区; PM_{2.5}; O₃

文章编号: 0253-2468(2016)07-2344-11 中图分类号: X51 文献标识码: A

Temporal and spatial variations of atmospheric pollutants in Chongqing metropolitan area during autumn

LIU Yonglin¹, ZHONG Mingyang^{2,3}, SUN Qimin⁴, ZHONG Buqing^{5,*}, LUO Kunli⁶

1. Geography and Tourism College, Chongqing Normal University, Chongqing 401331
2. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042
3. Chongqing Research Center of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Chongqing 400042
4. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710064
5. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012
6. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101

Received 9 August 2015; received in revised form 12 October 2015; accepted 12 October 2015

Abstract: To understand the concentrations and variation features of atmospheric pollutants in Chongqing metropolitan area, the observations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ and CO, along with meteorological factors, were conducted at five stations of Jiefangbei, Gaojiahuayuan, Yangjiaping, Nanping

基金项目: 国家自然科学基金(No.41502329); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No.2014CB238906); 重庆市社会科学规划项目博士项目(No.2014BS094)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41502329), the Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (No.2014CB238906), the Ph.D. project of Chongqing Society Project Planning (No.2014BS094)

作者简介: 刘永林(1983—), 男, 副教授(博士), E-mail: liu3986130@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: zhongbq@cracs.org.cn

Biography: LIU Yonglin(1983—), male, associate professor (Ph.D.), E-mail: liu3986130@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: zhongbq@cracs.org.cn

and Xinshancun, from September 1 to November 30, 2014. The results showed that the particulate pollution was serious at the above five sites. There were 30.8%, 37.4%, 38.5%, 37.4% and 31.9% of the days with daily concentration exceeding the National Air Quality Standard of Grade II at the above five sites, respectively. The frequencies of days with excessive concentrations were 23.1%, 22.0%, 18.7%, 19.8% and 19.8% for PM_{10} . Fine particles were major pollutant, and the proportion of $PM_{2.5}$ in PM_{10} is 60.2%, 64.6%, 64.1%, 75.4% and 62.8% at the above five sites, respectively. $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 and CO had the diurnal variation of highest in the morning and night. In addition, the peaks of SO_2 and O_3 were at noon or after. $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 and NO_2 concentration was negatively correlated with precipitation, air temperature and vapor pressure. O_3 concentration was significantly negatively correlated with relative humidity, while positively correlated with air temperature, vapor pressure and wind speed. In addition, wind direction also affected spatial and temporal distribution of the concentrations of atmospheric pollutants. Southwesterly, southeasterly and northeasterly winds were associated with high $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 and CO concentrations, while northwesterly wind was associated with high concentration of O_3 .

Keywords: atmospheric pollutants; meteorological factors; urban core of Chongqing; $PM_{2.5}$; O_3

1 引言(Introduction)

$PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 等是目前城市的主要大气污染物(魏复盛等, 2001; Chan 和 Yao, 2008; 曹国良等, 2011), 严重影响着城市居民的生活和健康, 受到各国政府和公众的普遍关注(Cao *et al.*, 2012; Jerrett *et al.*, 2013; Xie *et al.*, 2015). $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 不仅影响空气能见度, 而且对人体健康, 尤其是心血管系统和呼吸系统具有很大的危害(Venners *et al.*, 2003; Pope *et al.*, 2009; Jerrett *et al.*, 2013; 张金良等, 2014). SO_2 和 NO_2 可通过一系列光化学反应形成酸雨, 进而危害生态系统、自然和人文遗迹, 并危害人体健康. 人体通过直接接触和吸入 SO_2 和 NO_2 引起呼吸系统和心血管系统等病变(Kampa and Castanas, 2008; Chen *et al.*, 2012). 近地面 O_3 浓度是光化学反应产生的二次污染物(Sillman, 1999), 高浓度的 O_3 危害人体呼吸系统和肺功能(Chen *et al.*, 2012). SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 不仅影响生态系统和人体健康, 而且还促进或参与大气颗粒物的形成(Shaddick 和 Wakefield, 2002; Cao *et al.*, 2012). 重庆市是著名的“雾都”, 空气污染严重性十分突出. 多数学者在重庆开展了空气污染方面的研究工作, 并取得一系列的成果(魏复盛等, 2001; 潘纯珍等, 2004; 李礼等, 2012; 何勇等, 2012; 任丽红等, 2014; 徐鹏等, 2014; 刘姣姣等, 2014). 但多数主要是基于单点单污染物或多点单污染物的研究, 缺乏多点多污染物的总体研究.

重庆市是我国西南地区的工业重镇, 近年来随着地区产业结构调整 and 能源结构的改善, 主要的大气污染已从以煤炭燃烧释放的 SO_2 污染转变为以颗粒物为主的污染, 同时随着汽车保有量的剧增, NO_x 污染仍没有减轻. 重庆以丘陵、山地为主, 常年无风或微风, 大气稳定度高, 辐射逆温强, 大气污染物不易扩散, 使得重庆市的大气污染较为严重. 因此, 有

必要开展关于重庆市大气中污染物的污染特征及其转换规律方面的研究. 本文利用 2014 年 9 月至 2014 年 11 月, 重庆市都市功能核心区 5 个国控监测站(解放碑、高家花园、杨家坪、新山村和南坪) 24 h 连续监测 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 浓度数据, 分析重庆市都市功能核心区 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 浓度长时间分布和空间分布特征及形成原因, 为重庆市都市功能核心区大气污染治理提供科学依据, 也为区域大气污染防治提供数据参考.

2 材料和方法(Materials and methods)

2.1 重庆市都市功能核心区概况

重庆市主城区属川东平行岭谷地貌, 背斜发育成较狭窄的长条形山脉, 向斜发育成宽阔谷地(图 1a), 重庆市主城区居民、工业等主要分布于向斜谷地. 重庆市都市功能核心区(重庆市核心区)位于长江、嘉陵江河谷地带(图 1b), 包括渝中区全域和大渡口、江北、沙坪坝、九龙坡、南岸 5 区处于内环以内的区域(图 1), 面积 294 km^2 , 常住人口 367.76 万人. 重庆市核心区东西有数条平行岭谷阻挡, 地势低陷, 风速较小, 风力微弱, 散热能力差, 空气相对湿度较大.

重庆市城市功能核心区是工商业的主要聚集区, 其中位于大渡口区的重庆钢铁集团、九龙坡区杨家坪的重庆火力发电厂和江津区的洛璜火力发电厂是城市核心区 3 个最大的污染排放源. 加之独特的地形和气象条件, 使得城市功能核心区成为重庆市污染最为严重的区域.

2.2 数据来源

$PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 小时浓度数据为重庆市环境保护局 5 个国控环境空气自动监测站(渝中区解放碑、沙坪坝区高家花园、九龙坡区杨家坪、大渡口区新山村和南岸区南坪) 24 h 连续监测结果(<http://222.177.117.35:8021/>). $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、

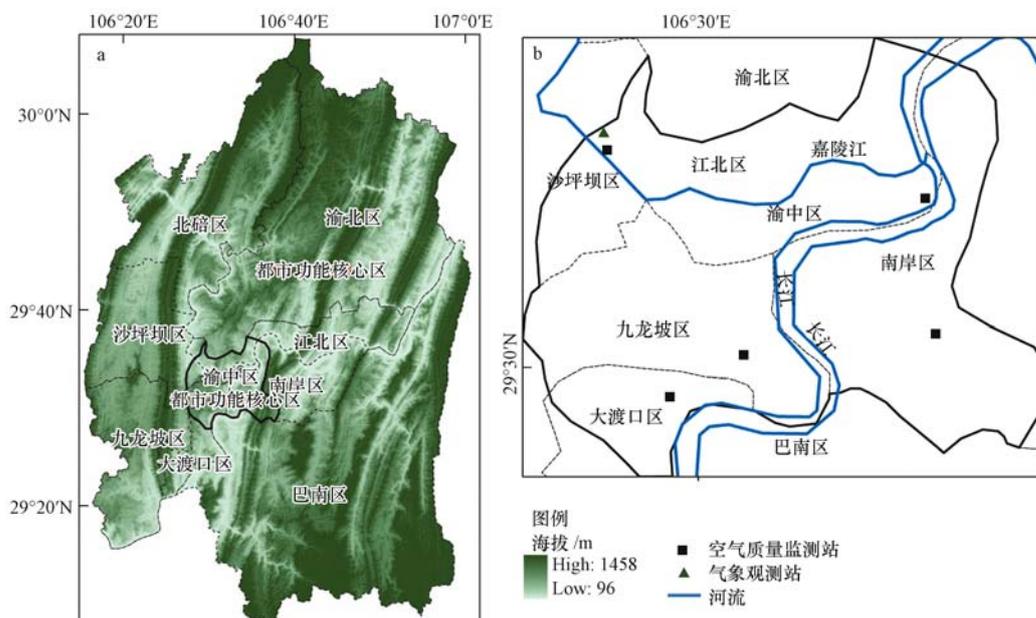


图1 重庆市都市功能核心区空气质量监测站位置图

Fig.1 Spatial distribution of automatic air monitoring stations in Chongqing metropolitan area

SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 小时浓度数据时间为 2014 年 9 月 1 日至 2014 年 11 月 30 日,为完整一个秋季,共 91 d.监测数据的缺失率仅为 4.7%,可视为随机缺失,因此对缺失值以每月的日均值填充.重庆市都市功能核心区 5 个空气质量监测站位置见图 1b,其中,解放碑代表商业区,解放碑采样点位于经济商业中心,附近多大型商场,人群密集;高家花园代表文教区,该采样点紧邻交通主干道,车流量较大;南坪采样点同样位于文教区;杨家坪和新山村代表工业区,新山村采样点紧邻典型工业园区,并且附近有较多餐饮源.都市功能核心区的气象站为沙坪坝气象站(图 1b),其地面气象资料(气温(T)、水汽压(W atP)、相对湿度(U)、风速(W in)、风向(W indir)、降水量(R)、水平能见度(VV))日均值来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>).

本文 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 统计基础数据均为小时数据,根据每天 24 h(0:00—23:00)数据求得算数均值即为 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 的日均值,根据每天 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 的日均值求得月均值,根据月均值求得季均值.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 大气污染物逐日变化特征

图 2 为 2014 年秋季气象要素的逐日变化特征.

重庆市核心区秋季累积降水量 409.8 mm,降水主要集中于 9 月中旬至 10 月中旬(图 2a);重庆市核心区秋季相对湿度为 61%~97%,平均 83%(标准差 8.2),表明重庆市核心区秋季相对湿度逐日波动较大(图 2a);重庆市核心区秋季气温呈逐渐下降趋势,水汽压变化趋势与气温相似(图 2b);重庆市核心区秋季主导风向南偏西风(风向变化范围 202.5°~247.5°),风速为 0.5~2.2 m·s⁻¹,主要在 1.0~1.6 m·s⁻¹,平均 1.2 m·s⁻¹(图 2c);重庆市核心区秋季能见度平均值为 6.2 km,日均值变化范围为 1.5~16.0 km(图 2d).

图 3 为重庆市核心区不同空气监测站秋季大气污染物逐日变化特征.不同监测站点,PM_{2.5} 浓度逐日变化曲线特征相似(图 3a),其中 9 月份 PM_{2.5} 日均浓度动态变化较稳定(标准差均小于 20)(附表 1),相邻的波峰和波谷差值较小(图 3);10 月份和 11 月份 PM_{2.5} 日均浓度变化不稳定(标准差均大于 37)(附表 1),相邻的波峰和波谷差值较大(图 3a).解放碑、高家花园、杨家坪、南坪和新山村秋季 PM_{2.5} 日均浓度超过国家二级环境空气质量标准(75 μg·m⁻³)(环境保护部,2012)的天数分别为 28 d、34 d、35 d、34 d 和 29 d,超过美国 EPA 环境空气质量标准(35 μg·m⁻³)的天数分别为 77 d、76 d、78 d、74 d 和 74 d.功能核心区 5 个采样点的 PM_{2.5} 日均浓度分布在统计学上无显著性差异.

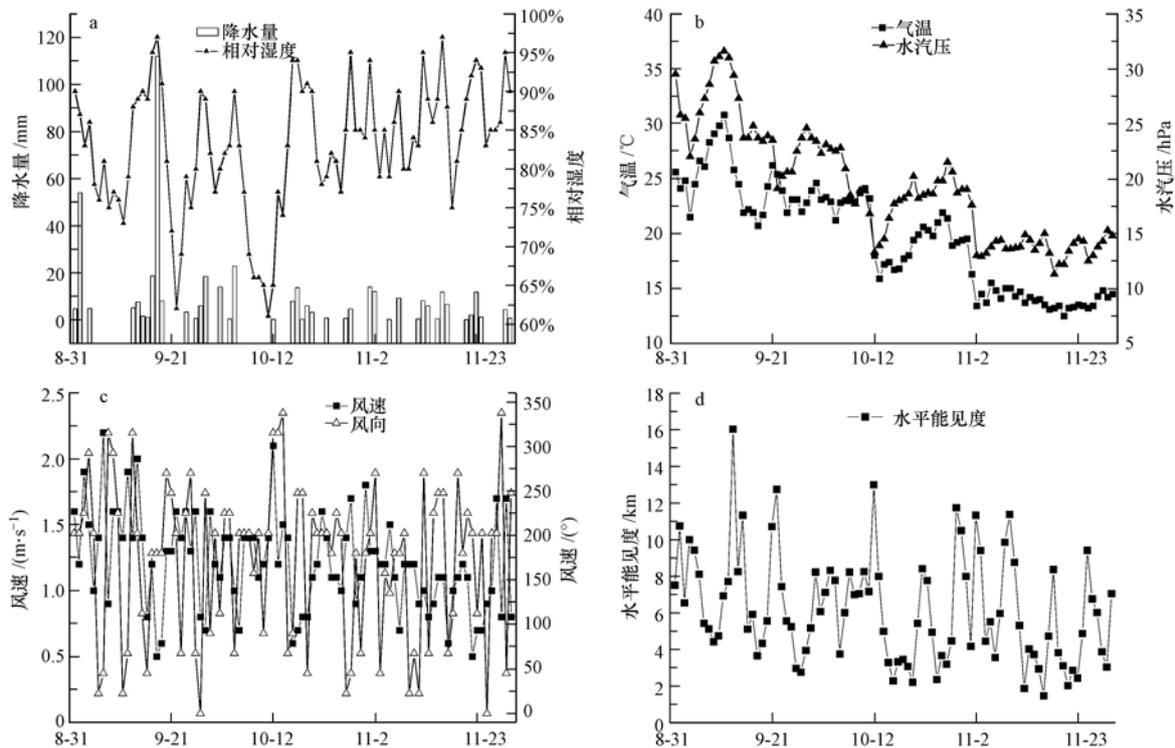


图 2 秋季气象要素逐日变化

Fig.2 Daily variation of meteorological parameters in autumn

秋季,不同监测站 PM_{10} 浓度逐日变化曲线特征相似(图 3b), PM_{10} 日均浓度动态变化稳定性类似 $PM_{2.5}$, 即 9 月份 PM_{10} 日均浓度变化较稳定, 而 10 月和 11 月 PM_{10} 日均浓度变化不稳定(附表 1, 图 3b). 解放碑、高家花园、杨家坪、南坪和新山村秋季 PM_{10} 日均浓度超过国家二级环境空气质量标准 ($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) (环境保护部, 2012) 的天数分别为 21 d、20 d、17 d、18 d 和 18 d; 不同站点 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 比例分别为 60.2%、64.6%、64.1%、75.4% 和 62.8%, 可见重庆市核心区细颗粒物污染严重. 空间呈现解放碑 ($117.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 高家花园 ($111.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 杨家坪 ($108.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 新山村 ($106.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 南坪 ($95.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的差异性 ($p=0.02$; $n=91$). PM_{10} 日均浓度空间分布特征与区域道路扬尘、建筑尘、煤烟尘和机动车尾气尘排放有关(赵琦等, 2008). 解放碑采样点处于繁华商业区且车辆拥堵, 高家花园采样点周围商业区和餐馆较多, 交通密集, 道路扬尘和机动车尾气尘排放可能是解放碑和高家花园的 PM_{10} 浓度高于其他采样点的原因, 杨家坪和新山村采样点 PM_{10} 浓度可能分别来源于重庆市发电厂、钢铁集团的烟尘排放.

秋季, 解放碑、高家花园、杨家坪、南坪和新山

村 SO_2 日均浓度分别为 $3.6\sim 43.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2.8\sim 32.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5.8\sim 43.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $9.0\sim 40.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $9.8\sim 57.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 均低于国家二级环境空气质量标准 ($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 且空间上呈现出南坪 ($20.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 新山村 ($20.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 杨家坪 ($20.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 解放碑 ($17.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 高家花园 ($14.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的差异性 ($p<0.001$; $n=91$). 重庆市功能核心区 SO_2 浓度的空间分布, 与燃煤污染物排放有密切关系, 杨家坪采样点附近的重庆发电厂和新山村附近的重庆钢铁集团是直接的大污染源, 而东部的南岸区本没有高污染源, 而 SO_2 浓度相对高, 其主要原因可能是南岸区处于重庆发电厂和重庆钢铁集团污染源的下风向和真武山的迎风坡, 因此造成污染物难以扩散.

观测期间, 解放碑、高家花园、杨家坪、南坪和新山村 NO_2 日均浓度分别为 $31.4\sim 93.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $18.8\sim 73.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $12.6\sim 94.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $18.7\sim 101.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $23.7\sim 99.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过国家二级环境空气质量标准 ($80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的天数分别为 3 d、0 d、2 d、3 d 和 6 d, 空间上呈现出解放碑 ($54.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 新山村 ($52.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 南坪 ($45.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 高家花园 ($44.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 杨家坪 ($42.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的差异

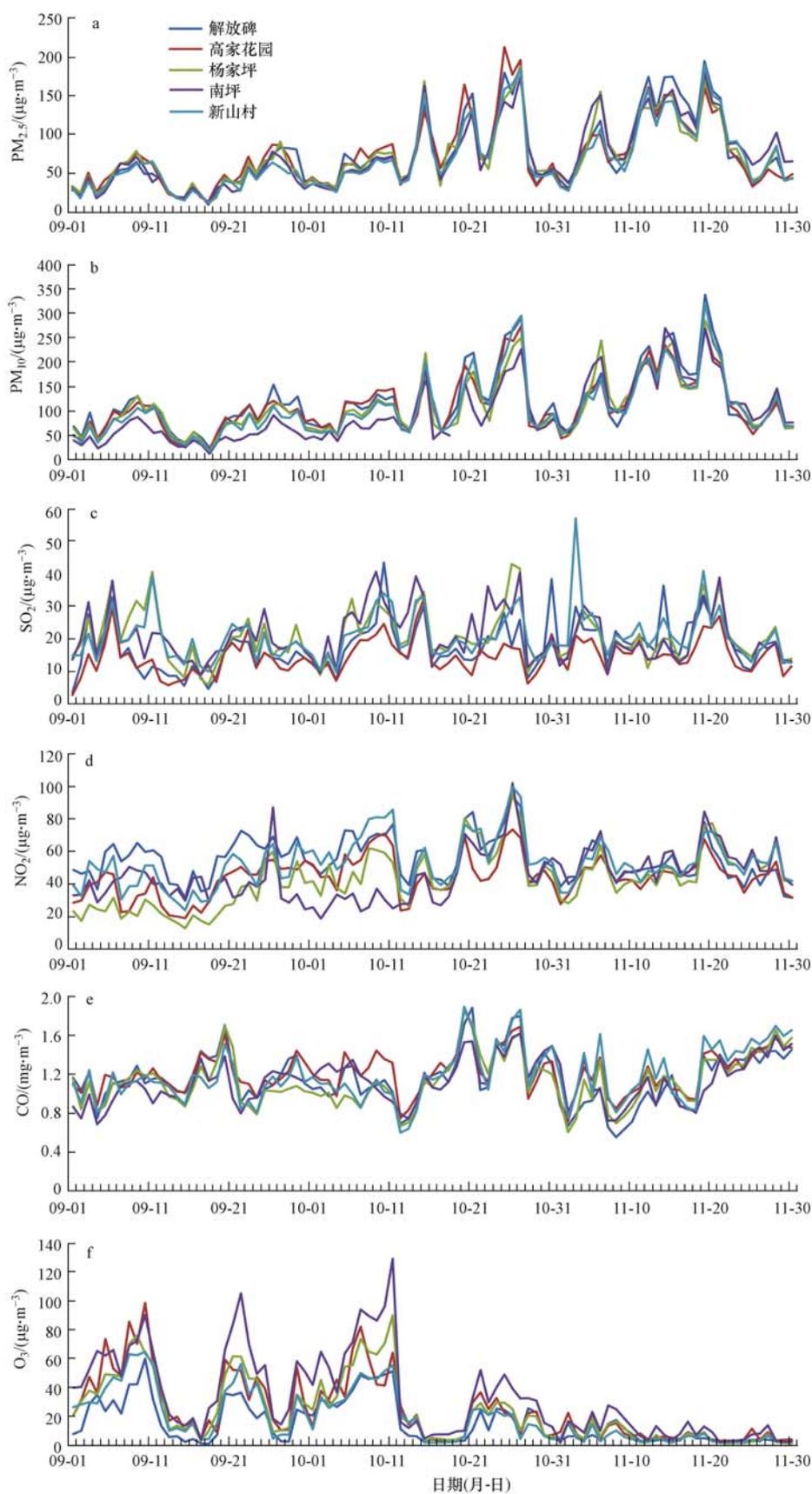


图3 大气污染物浓度逐日变化

Fig.3 Daily variation of air pollutant concentrations

性($p < 0.001$; $n = 91$).不同监测站9月和11月 NO_2 日均浓度动态变化较稳定,10月 NO_2 日均浓度动态变化不稳定(附表1,图3d). NO_2 的日均浓度分布特征可能与重庆城市交通状况有关,解放碑是重庆市最繁华的商业区,人口密集、车辆拥堵, NO_2 排放浓度高,新山村因为有重庆钢铁集团这一空气污染排放源, NO_2 浓度也相对较高,南坪采样点处于重庆主城向南的交通要道,因而汽车尾气排放 NO_2 也相对较高.

观测期间,不同监测站9月CO日均浓度动态变化较稳定,10月和11月CO日均浓度动态变化不稳定(附表1,图3e),但相较于其他污染物,CO日均浓度变化较稳定(附表1).解放碑、高家花园、杨家坪、南坪和新山村CO日均浓度分别为 $0.55 \sim 1.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.72 \sim 1.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.60 \sim 1.84 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.69 \sim 1.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.60 \sim 1.89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,均低于国家二级环境空气质量标准($4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$).空间呈现高家花园($1.21 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)>新山村($1.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)>解放碑($1.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)>杨家坪($1.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)>南坪($1.12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)的差异性($p = 0.05$; $n = 91$).高家花园采样点虽位于文教区,但其周围商业区和餐馆较多,并且附近的主干道交通密集,因此CO日均浓度较高.

秋季,不同监测站9月和10月 O_3 日均浓度动态变化较不稳定,11月 O_3 日均浓度动态变化较稳定(附表1,图3f),与其它大气污染物相反.不同监测站 O_3 日均浓度都由9月向11月降低,且在10月中旬之后 O_3 日均浓度出现突降.解放碑、高家花园、杨家坪、南坪和新山村 O_3 日均浓度分别为 $1.0 \sim 59.9 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $3.0 \sim 98.5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.3 \sim 89.8 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.6 \sim 129.0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.9 \sim 64.7 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中超过国家二级环境空气质量标准1h均值浓度($200 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的天数分别为0d、3d、1d、3d和1d,且空间呈现南坪($33.1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)>高家花园($24.3 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)>杨家坪($23.4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)>新山村($18.9 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)>解放碑($15.5 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的差异性($p < 0.001$; $n = 91$).重庆市 O_3 的日均浓度分布特征可能与城市交通状况和气象条件有关.处于交通繁华地段的解放碑采样点和邻近污染排放源的新山村、杨家坪采样点,汽车尾气排放或工业废气排放中的 NO_x 快速消耗了空气中的 O_3 ,导致解放碑、新山村和杨家坪采样点中 O_3 浓度低于其他采样点.南坪采样点 O_3 浓度相对较高,可能与气象条件有关.

3.2 大气污染物日变化特征

观测期间,不同监测站9月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化曲线呈现出较明显的双峰双谷(图4),双峰出现时间为9:00—14:00和21:00—1:00;双谷出现时间为4:00—6:00和15:00—18:00.10月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化曲线动态变化不稳定,但整体依然为双峰双谷特征,双峰和双谷出现时间与9月相同.11月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化曲线变化极不稳定,出现多峰多谷,但整体上早晨4:00—8:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低,晚上20:00—24:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高.整个秋季,不同站点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化曲线呈现出较明显的双峰双谷(图4),双峰出现时间为9:00—13:00和20:00—24:00;双谷出现时间为4:00—8:00和15:00—18:00.观测期间,不同监测站不同月份 PM_{10} 浓度日变化曲线与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化曲线相似(图4).再次证明, PM_{10} 的主要组成是 $\text{PM}_{2.5}$,说明重庆市核心区细颗粒物污染偏重.任丽红等(2014)研究表明重庆市主城区 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 来源主要为二次粒子、移动源和扬尘.机动车早高峰向大气环境中不断输入气态二氧化硫、氮氧化物、细颗粒物以及道路扬尘(Louie *et al.*, 2005),伴随气温升高二次粒子开始形成,最终使得颗粒物浓度峰值出现在10:00左右.之后伴随湍流垂直交换能力强,颗粒物浓度有所下降;而夜间混合层降低,晚高峰交通流量增加,其 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度再次聚集(张睿等, 2004; 王占山等, 2015; 谢雨竹等, 2015).

观测期间,不同监测站9月份和10月份 SO_2 浓度日变化曲线呈现单峰型特征(图4),11月高家花园、杨家坪和南坪 SO_2 浓度日动态变化比较平缓,解放碑和新山村 SO_2 浓度日动态变化比较大(图4). SO_2 浓度高值出现在中午10:00—14:00,而 SO_2 浓度低值出现在早晨3:00—7:00和傍晚16:00—20:00.整体上,白天 SO_2 浓度高于晚上(图4).机动车早高峰时段及早晨空气相对稳定,有利于 SO_2 浓度的聚集(孟庆珍和万敏, 1994; 徐鹏等, 2014; 王占山等, 2015; 谢雨竹等, 2015),早高峰之后,伴随机动车流量减少和空气对流加强, SO_2 浓度开始降低,至晚高峰后 SO_2 浓度略有上升,但幅度不大.

观测期间,不同监测站9月份和10月份 NO_2 浓度日变化曲线呈现较明显的双峰型(图4),11月份为单峰型. NO_2 小时浓度峰值出现在上午9:00—12:00和晚上19:00—24:00,且晚上 NO_2 小时浓度峰值明显高于上午峰值.上午峰值可能是由于城市交

通早高峰的影响,随后由于太阳辐射的作用,NO₂开始光化学反应,至下午 16:00 左右浓度降至最低,之后伴随交通晚高峰、太阳辐射的减弱及 NO 和 O₃ 反应生成 NO₂,使 NO₂在晚上开始发生积聚,并明显高于上午峰值(朱燕舞等,2008, 2009; 徐鹏等, 2014; 谢雨竹等, 2015).11 月份 NO₂浓度日变化只有明显

的晚上峰值和早晨峰谷,可能是由于 11 月份重庆市主城区日照时数,即太阳辐射较少,使 NO₂光化反应速度减慢的缘故(陈志军等, 2008; 唐晓萍等, 2013).

观测期间,不同监测站 CO 浓度日变化曲线呈现明显的双峰双谷特征(图4),9月和10月峰值出

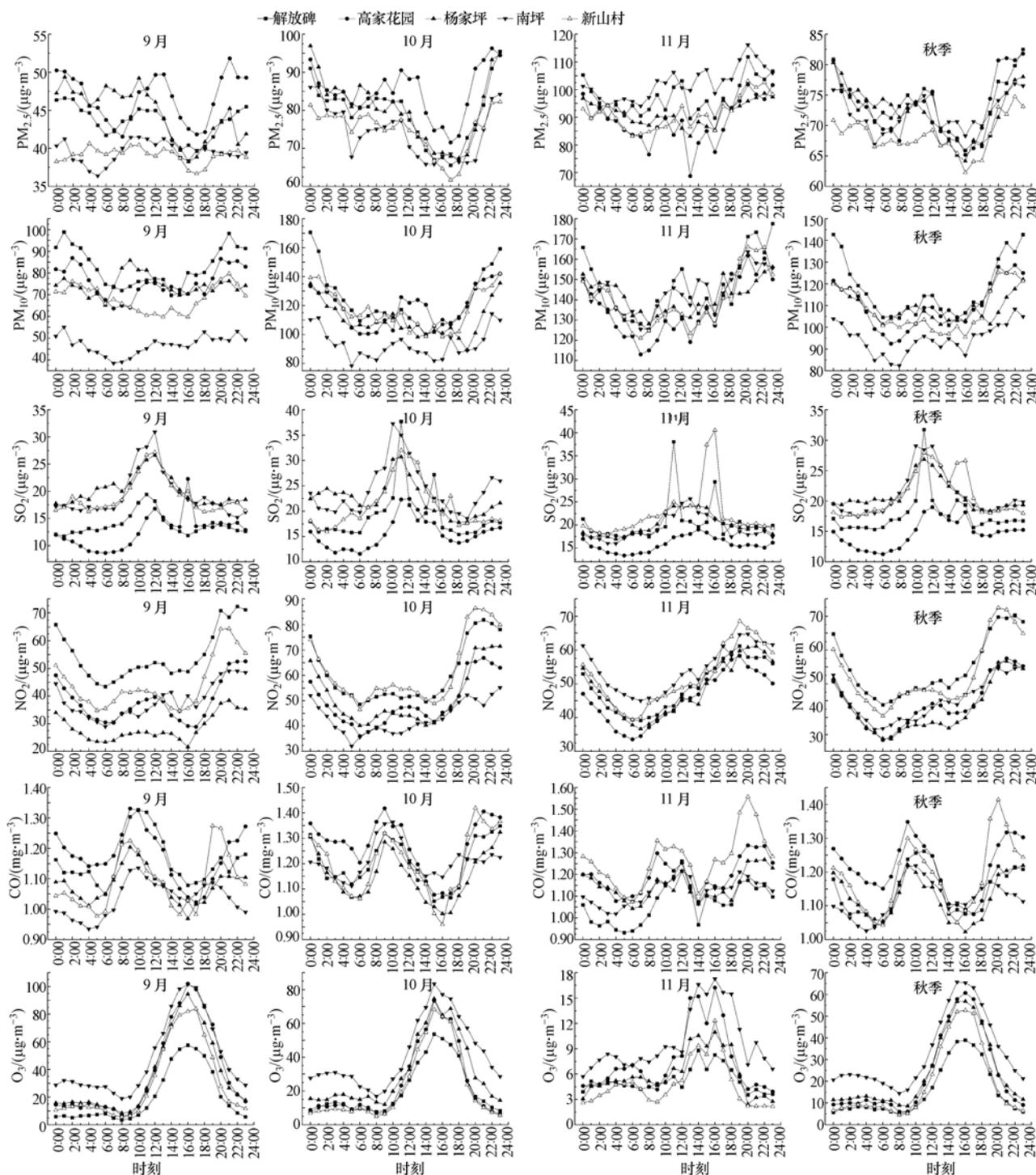


图4 大气污染物浓度日变化

Fig.4 Diurnal variation of air pollutant concentrations

现在上午 8:00—11:00 和晚上 19:00—24:00, 11 月峰值出现在上午 9:00—12:00 和晚上 18:00—22:00, 并且 9 月和 10 月 CO 变化幅度小于 11 月. 这可能由于 11 月气温较低, 白天时间段, 人们出门时间较晚, 造成 11 月交通早晚高峰不同于 9 月和 10 月, 并且 11 月份重庆市大气稳定性较好 (孟庆珍和万敏, 1994; 徐鹏等, 2014).

观测期间, 不同监测站 O₃ 浓度日变化曲线呈现单峰型特征 (图 4), 9 月和 10 月 O₃ 浓度日动态变化稳定, 而 11 月 O₃ 浓度日动态变化不稳定 (图 4). 日出后, 随着温度和太阳辐射强度的上升, NO₂ 通过光化学反应不断生成 O₃, 在午后出现峰值 (14:00—18:00), 傍晚到日出前 (19:00—7:00) O₃ 浓度逐渐降低, 这主要是 NO 等还原物与其发生氧化反应所造成 (朱燕舞等, 2008, 2009; Rypdal *et al.*, 2009; 谢雨竹等, 2015; 雷瑜等, 2015).

3.3 大气污染物空间分布

图 5 为运用空间插值得出的重庆市都市功能核

心区秋季大气污染物浓度空间分布. 空间插值研究大气污染物浓度空间分布已被多数学者运用 (赵阳等, 2011; 刘姣姣等, 2014; 王占山等, 2015). PM_{2.5} 浓度空间分布特征为由西南向东北降低, PM₁₀ 浓度空间分布与 PM_{2.5} 相反; 但由于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 最小值和最大值差别较小 (分别相差 3.4 μg·m⁻³ 和 3.2 μg·m⁻³, 图 6), 因此重庆市都市功能核心区秋季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度空间分布比较均匀. SO₂ 和 CO 浓度空间分布相似, 都是南部高北部低; NO₂ 和 O₃ 浓度空间分布相反, NO₂ 浓度高的区域 O₃ 浓度较低, 可能是由于 NO₂ 和 O₃ 之间光化学反应平衡的缘故 (朱燕舞等, 2009; Rypdal *et al.*, 2009; 谢雨竹等, 2015; 雷瑜等, 2015). 大气污染物浓度空间分布的差异, 尤其是 SO₂、NO₂ 和 O₃ 的空间分布, 可能受重庆市工业布局、交通状况及地理环境等影响 (刘姣姣等, 2014; 任丽红等, 2014; 徐鹏等, 2014).

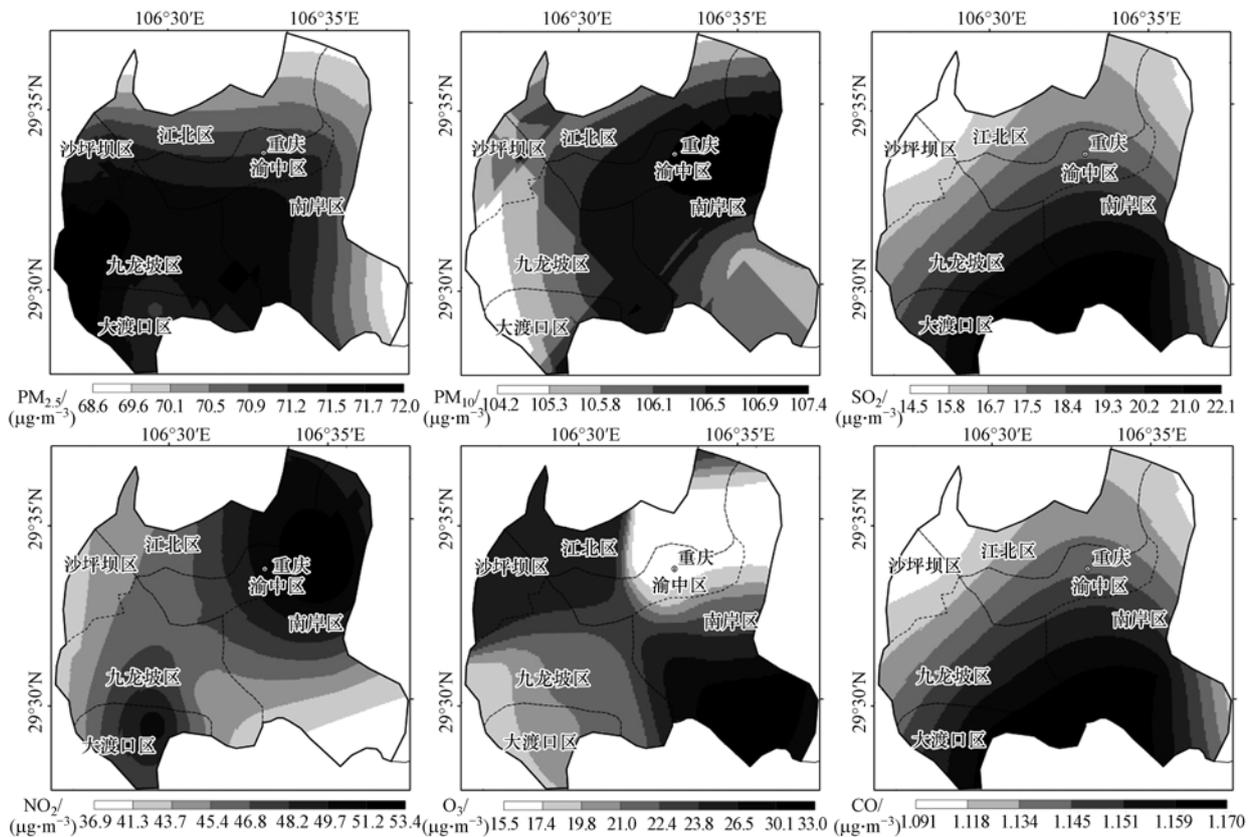


图 5 重庆市都市功能核心区秋季大气污染物空间插值分布

Fig.5 Distribution of spatial interpolation of atmospheric pollutants in Chongqing metropolitan area in autumn

3.4 气象因素与大气污染物的相关性

气象条件对大气污染物浓度变化具有明显的影响(王莉莉等, 2010; Xie *et al.*, 2015; 李润奎等, 2015; Masiol *et al.*, 2015). 表 1 为大气污染物与气象因素的相关性. 可知, 降水量与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 呈显著负相关, 也与 CO 和 O_3 呈不显著负相关, 说明降水可以有效的降低空气中大气污染物的含量, 尤其是颗粒物和形成酸雨前体物 SO_2 和 NO_2 (韩燕等, 2013; 李芳和张承中, 2013). 相对湿度与 SO_2 、 NO_2 和 O_3 呈极显著负相关, 但与 CO 呈显著正相关, 相对湿度的增大有利于 SO_2 、 NO_2 浓度的下降, 重庆市秋季空气相对湿度为 61%~97%, 均值 83%, 石志平和王文生(2004) 研究表明, 当湿度达到 80% 以上时, O_3 分解速率加大, 这将导致 O_3 浓度降低. 相对湿度的增大有利于大气污染物 CO 的生成量增加(路屹雄和王元, 2008). 气温与 SO_2 、 NO_2 和 CO 的浓度不存在显著的相关性. 气温与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 呈极显

著负相关, 这可能是随着气温的升高, 加速了污染物在垂直方向上的快速扩散的原因. 气温与 O_3 呈极显著正相关, 可能是随着近地面气温的升高光化学反应速率增加更有利于 O_3 的生成和积聚 (Rypdal 等, 2009; 谢雨竹等, 2015). 水汽压与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 呈显著负相关, 而与 O_3 呈极显著正相关. 水汽压高说明空气中水汽含量高, 气温高, 此时有利于大气污染物在垂向上的扩散, 加剧光化学反应速率, 进而增加 O_3 浓度. 风速影响大气污染物的扩散速度, 风向影响大气污染物的污染区域. 相关分析显示, 风速与 O_3 呈显著正相关, 而与其他大气污染物没有显著性相关性. 刘姣姣等(2014) 研究表明, 风速低于 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时有利于 O_3 的积累, 而重庆市秋季有 89 d 风速为 $0.5\sim 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 仅 2 d 的风速高于 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 因此, 重庆秋季风速有利于 O_3 浓度聚集. 风向与大气污染都不具有显著相关性.

表 1 大气污染物与气象因素之间相关性

Table 1 Correlation coefficients of atmospheric pollutants and meteorological factors

参数	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO	O_3
降水量	-0.301*	-0.318*	-0.349*	-0.315*	-0.031	-0.010
相对湿度	0.061	-0.026	-0.547**	-0.283**	0.232*	-0.723**
气温	-0.434**	-0.387**	-0.012	-0.139	-0.035	0.767**
水汽压	-0.455*	-0.431**	-0.288*	-0.303**	0.022	0.535**
风速	-0.205	-0.148	0.122	-0.074	-0.192	0.366**
水平能见度	-0.582**	-0.510**	-0.128	-0.366**	-0.462**	0.282**

注: ** : $p < 0.01$; * : $p < 0.05$.

3.5 与典型城市大气污染物浓度对比分析

将该研究中重庆市大气污染物浓度的平均值与国内典型城市对比分析, 从表 2 可以看出, 重庆市 SO_2 与 NO_2 浓度低于北方和南方城市. 北方城市中沈阳和石家庄的 SO_2 浓度秋季最高, 主要的污染来源可能是工业燃煤排放. 广州、石家庄、北京 NO_2 浓度分布偏高, 其中广州、北京这两座城市经济及社会

较发达, 机动车保有量在全国名列前茅, 而石家庄 NO_2 来源除了与机动车尾气有关外, 还有燃煤排放的贡献. 北方城市 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度普遍高于南方与西南部城市, 大气颗粒物的主要来源是城市扬尘、建筑尘、煤烟尘. 重庆市大气颗粒物浓度高于南方城市可能与其独特的地形和气象条件, 使得大气颗粒物不易扩散.

表 2 国内典型城市大气污染物浓度的平均值对比

Table 2 Comparison of main atmospheric pollutants level in typical cities of China

城市	监测时间	污染物日均浓度 / ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)				来源
		SO_2	NO_2	PM_{10}	$PM_{2.5}$	
重庆	2014-09—11	18.9±7.7	48.0±15.5	107.7±60.2	71.6±42.1	本研究
成都	2013-06—08	18.9	50.2	93.1	66.5	谢雨竹等, 2015
沈阳	2013-09—11	64.6	49.7	107.3	64.1	朱红霞等, 2015
北京	2008, 2009 秋	24.9±21.8	58.2±26.6	110.1±75.9	—	Xu <i>et al.</i> , 2014
石家庄	2008-09—10	92.0±44.4	60.5±16.9	147.4±67.0	95.8±50.0	杜吴鹏等, 2010
天津	2013-10—11	39.0	43.0	135.0	90.0	商海荣等, 2014
上海	2010—2012	27.0±17.0	48.8±20.7	76.4±57.1	—	张江华等, 2014
广州	2006—2008	50.3±31.0	62.7±29.9	74.7±41.1	64.9±32.9	殷文军等, 2009

4 结论(Conclusions)

1)重庆市都市功能核心区秋季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染较重,且 $PM_{2.5}$ 为首要污染物。 NO_2 和 O_3 污染较轻, SO_2 和 CO 均达标。 SO_2 、 NO_2 和 O_3 浓度在空间分布上具有差异性。

2)不同大气污染物在日变化上表现特征不一。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度日变化曲线为双峰型,双峰出现时间为 9:00—13:00 和 20:00—24:00; NO_2 和 CO 也呈现早晚两个峰值; SO_2 和 O_3 浓度日变化曲线呈现单峰型,峰值分别出现在中午和午后。

3)降水量、气温和水汽压与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 呈显著负相关;降水量、相对湿度和水汽压与 SO_2 和 NO_2 呈显著负相关;说明降水和空气中水汽的增加有利于 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 浓度的稀释。相对湿度与 O_3 呈显著负相关,气温、水汽压和风速与 O_3 呈显著正相关,说明高温高湿及较低风速控制下,易出现 O_3 高值。 CO 与相对湿度呈显著正相关。

4)总体上,重庆市都市功能核心区秋季受南偏西、南偏东和东北偏北风控制下利于 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 大气污染物积累,而西北风控制下利于 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 大气污染物扩散。但西北风控制下利于 O_3 大气污染物积累。

参考文献(References):

曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 2011. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单[J]. 科学通报, 56(3): 261-268

Cao J J, Xu H M, Xu Q, et al. 2012. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city[J]. Environ Health Perspect, 120:373-378

Chan C K, Yao X. 2008. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmos Environ, 42(1): 1-42

Chen C, Zhao B, Weschler C J. 2012. Assessing the influence of indoor exposure to outdoor ozone on the relationship between ozone and short-term mortality in U.S. communities[J]. Environmental Health Perspectives, 120:235-240

陈志军, 查书平, 高阳华, 等. 2008. 重庆市日照时间变化规律和特征分析[J]. 南通大学学报(自然科学版), 7(2): 55-59

杜吴鹏, 王跃思, 宋涛, 等. 2010. 夏秋季石家庄大气污染变化特征观测研究[J]. 环境科学, 7(7): 1409-1416

何勇, 吴亚坤, 陈昌鸣, 等. 2012. 2001-2010 年重庆主城区空气质量变化趋势[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 31(5): 1058-1061

韩燕, 徐虹, 毕晓辉, 等. 2013. 降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响[J]. 中国环境科学, 33(2): 193-200

环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 2012. 环境空气质量标准. GB 3095-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社

Jerrett M, Burnett R T, Beckerman B S, et al. 2013. Spatial analysis of air pollution and mortality in California[J]. Am J Respir Crit Care Med, 88:593-599

Kampa M, Castanas E. 2008. Human health effects of air pollution[J]. Environmental Pollution, 151:362-367

雷瑜, 张小玲, 唐宜西, 等. 2015. 北京城区 $PM_{2.5}$ 及主要污染气体“周末效应”和“假日效应”研究[J]. 环境科学学报, 35(5): 1520-1528

李芳, 张承中. 2013. 西安市大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 与降水关系的探讨[J]. 中国环境监测, 29(6): 22-28

李礼, 余家燕, 鲍雷, 等. 2012. 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, 6(6): 2012-2016

李润奎, 李志鹏, 高文举, 等. 2015. 北京市大气 $PM_{2.5}$ 的季节特征和空间趋势[J]. 科学通报, 60(3): 387-395.

刘姣姣, 蒋昌潭, 宋丹, 等. 2014. 重庆夏季近地面臭氧变化规律及影响因素分析[J]. 重庆大学学报, 37(8): 91-98.

Louie P K K, Watson J G, Chow J C, et al. 2005. Seasonal characteristics and regional transport of $PM_{2.5}$ in Hong Kong[J]. Atmos Environ, 39(9): 1695-1710

路屹雄, 王元. 2008. 一次高影响天气事件——延边 2.13 一氧化碳中毒事件分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 44(3): 258-272

Masiol M, Benetello F, Harrison R M, et al. 2015. Spatial, seasonal trends and transboundary transport of $PM_{2.5}$ inorganic ions in the Veneto region (Northeastern Italy) [J]. Atmos Environ, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.06.044

孟庆珍, 万敏. 1994. 重庆近 12 年大气稳定度综合研究[J]. 成都气象学院学报, 1: 75-83

潘纯珍, 陈刚才, 杨清玲, 等. 2004. 重庆市地区道路 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 浓度分布特征研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 26(5): 576-579

Pope C A III, Ezzati M, Dockery D W. 2009. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States [J]. The New England Journal of Medicine, 360:376-386

任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 2014. 重庆主城区大气 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. 环境科学研究, 27(12): 1387-1394

Rypdal K, Rive N, Berntsen T, et al. 2009. Climate and air quality-driven scenarios of ozone and aerosol precursor abatement [J]. Environ Sci Policy, 12: 855-869

Shaddick G, Wakefield J. 2002. Modelling daily multivariate pollutant data at multiple sites [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 51(2): 351-362

商海荣, 徐洁. 2014. 天津滨海新区塘沽 2013 年供暖期前后大气污染物特征分析[J]. 天津科技, 12: 36-39

石志平, 王文生. 2004. 相对湿度变化对臭氧分解速率的影响[J]. 保鲜与加工, 6: 24-25

Sillman S. 1999. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. Atmospheric Environment, 33(12): 1821-1845

唐晓萍, 陈志军, 何泽能. 2013. 1961—2010 年重庆地区气温和总辐射变化分析[J]. 高原山地气象研究, 33(3): 43-47

Venners S A, Wang B Y, Peng Z G, et al. 2003. Particulate Matter,

- Sulfur Dioxide, and Daily Mortality in Chongqing, China [J]. Environ Health Perspect, 111(4):562-567
- 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2015. 2013 年北京市 PM_{2.5} 的时空分布 [J]. 地理学报, 70(1): 110-120
- 王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 2010. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 30(7): 924-930
- 魏复盛, 滕恩江, 吴国平, 等. 2001. 我国 4 个大城市空气 PM_{2.5}、PM₁₀ 污染及其化学组成 [J]. 中国环境监测, 17(7): 1-6
- Xie Y Y, Zhao B, Zhang L, et al. 2015. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃ [J]. Particuology, 20: 141-149
- 谢雨竹, 潘月鹏, 倪长健, 等. 2015. 成都市区夏季大气污染物浓度时空变化特征分析 [J]. 环境科学学报, 35(4): 975-983
- Xu M, Guo Y, Zhang Y, et al. 2014. Spatiotemporal analysis of particulate air pollution and ischemic heart disease mortality in Beijing, China [J]. Environmental Health, 13(1):109.1-109.26
- 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 等. 2014. 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 [J]. 环境科学, 35(3): 820-829
- 殷文军, 彭晓武, 宋世震, 等. 2009. 广州市灰霾天气对城区居民心血管病影响的时间序列分析 [J]. 环境与健康杂志, 12:1081-1085, 1145
- 张江华, 郭常义, 许慧慧, 等. 2014. 上海市大气污染与某医院呼吸系统疾病门诊量关系的时间序列研究 [J]. 环境与职业医学, 11:846-851
- 张金良, 高健, 刘喆, 等. 2014. 2013 年灰霾事件及其对北京市医院成人门诊量影响的描述性研究 [J]. 环境与健康杂志, 31(10): 853-859
- 张睿, 蔡旭辉, 宋宇. 2004. 北京地区大气污染物时空分布及累积效应分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 40(6): 930-938
- 赵琦, 张丹, 叶堤, 等. 2008. 重庆主城大气 PM₁₀ 的源解析研究 [J]. 重庆环境科学, 1(3): 14-17
- 赵阳, 邵敏, 王琛, 等. 2011. 被动采样监测珠江三角洲 NO_x、SO₂ 和 O₃ 的空间分布特征 [J]. 环境科学, 32(2): 324-329
- 朱红霞, 赵淑莉, 阚海东. 2015. 2013 年我国典型城市大气污染物浓度分布特征 [J]. 环境科学与技术, 6:227-233
- 朱燕舞, 刘文清, 谢品华, 等. 2008. 夏季城市大气中 O₃ 和 NO₂ 的观测研究 [J]. 大气与环境光学学报, 3(5): 369-376
- 朱燕舞, 刘文清, 谢品华, 等. 2009. 北京夏季大气 HONO 的监测研究 [J]. 环境科学, 30(6): 1567-1573

附表 1 重庆市核心区秋季大气污染浓度统计特征

Attached Table 1 Summary statistics of concentrations of atmospheric pollutants in the Urban Core of Chongqing in autumn

监测站	大气污染物	9月	10月	11月	秋季
解放碑	PM _{2.5}	43.4±19.9(82.6)	79.2±44.0(188.1)	96.0±50.2(193.9)	72.9±45.5(193.9)
	PM ₁₀	83.6±32.5(153.2)	125.3±63.5(290.0)	143.3±75.3(336.9)	117.5±64.3(336.9)
	SO ₂	13.8±6.5(32.8)	18.8±8.2(43.4)	20.0±7.1(38.4)	17.6±7.7(43.4)
	NO ₂	54.6±11.3(72.6)	60.6±15.4(93.6)	48.7±9.9(77.9)	54.7±13.2(93.6)
	CO	1.16±0.18(1.70)	1.21±0.29(1.88)	1.06±0.29(1.45)	1.14±0.26(1.88)
	O ₃	20.3±15.3(59.9)	20.8±16.0(51.2)	5.2±3.6(17.4)	15.5±14.7(59.9)
高家花园	PM _{2.5}	46.6±21.2(86.4)	84.6±48.4(211.9)	87.5±40.4(160.1)	73.0±42.5(211.9)
	PM ₁₀	76.4±31.0(120.1)	122.4±58.4(273.3)	133.7±60.0(268.3)	111.0±56.8(273.3)
	SO ₂	12.6±5.4(29.4)	15.5±5.7(32.2)	15.7±4.6(27.0)	14.6±5.4(32.2)
	NO ₂	38.0±11.8(54.7)	49.6±13.5(73.3)	45.0±8.3(67.2)	44.3±12.3(73.3)
	CO	1.18±0.15(1.61)	1.27±0.25(1.86)	1.19±0.23(1.57)	1.21±0.22(1.86)
	O ₃	38.4±24.2(98.5)	27.0±20.9(82.0)	7.4±5.1(22.4)	24.3±22.5(98.5)
杨家坪	PM _{2.5}	44.8±20.1(90.3)	79.7±39.2(174.3)	91.5±40.0(168.3)	72.1±40.2(187.1)
	PM ₁₀	74.9±28.7(130.2)	109.6±54.3(249.6)	141.4±64.4(284.1)	108.5±57.6(284.1)
	SO ₂	19.9±5.9(40.5)	22.0±8.6(43.0)	19.8±6.4(36.8)	20.6±7.8(43.0)
	NO ₂	28.5±12.1(59.6)	51.6±16.6(94.9)	48.1±12.3(77.2)	42.8±17.1(94.9)
	CO	1.08±0.20(1.69)	1.16±0.28(1.84)	1.14±0.28(1.65)	1.13±0.26(1.84)
	O ₃	34.9±20.8(75.9)	29.1±23.9(89.8)	5.9±5.0(18.4)	23.4±22.2(89.8)
南坪	PM _{2.5}	39.8±18.3(77.7)	74.5±39.2(174.3)	101.6±37.1(178.8)	72.0±41.3(178.8)
	PM ₁₀	48.7±19.5(90.7)	92.0±49.9(226.0)	144.4±59.5(268.8)	95.0±60.3(268.8)
	SO ₂	19.4±5.9(37.8)	24.1±9.1(40.6)	19.2±7.0(38.8)	20.9±7.7(40.6)
	NO ₂	39.1±11.2(86.9)	43.5±19.5(101.6)	54.0±11.0(72.3)	45.5±15.7(101.6)
	CO	1.03±0.17(1.38)	1.22±0.23(1.61)	1.12±0.25(1.60)	1.12±0.23(1.61)
	O ₃	47.8±25.4(105.0)	41.4±32.1(129.0)	9.7±7.1(27.5)	33.1±29.1(129.0)
新山村	PM _{2.5}	39.0±16.2(63.6)	74.8±42.9(183.7)	90.0±42.0(189.3)	68.0±41.5(189.3)
	PM ₁₀	67.4±26.2(109.2)	115.1±64.0(294.6)	136.1±63.9(320.8)	106.3±61.1(320.8)
	SO ₂	19.1±6.2(39.3)	21.0±6.9(33.9)	22.1±8.8(57.0)	20.7±7.4(57.0)
	NO ₂	44.3±11.6(64.9)	62.1±16.9(99.7)	51.9±9.6(72.3)	52.9±14.9(99.7)
	CO	1.09±0.16(1.51)	1.21±0.31(1.89)	1.26±0.30(1.69)	1.19±0.27(1.89)
	O ₃	30.2±18.9(64.7)	21.7±16.3(55.2)	4.7±3.4(15.1)	18.9±17.9(64.7)

注: CO 浓度单位 mg·m⁻³; 其余大气污染物浓度单位 μg·m⁻³; 数据表示格式为: 算数均值±标准差(最大值)。