

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

重庆市主城区 PM_{2.5} 时空分布特征

刘永林¹, 孙启民², 钟明洋^{3,4}, 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. 长安大学建筑学院, 西安 710064; 3. 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; 4. 重庆地质矿产研究院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; 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)

摘要: 利用 2014 年 6 月 1 日至 2015 年 5 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 PM_{2.5} 浓度数据, 探讨了重庆市主城区 PM_{2.5} 时空分布特征。结果表明: ①重庆市主城区 PM_{2.5} 季节浓度由高到低依次为冬季 (100.2 μg·m⁻³)、秋季 (66.1 μg·m⁻³)、春季 (45.9 μg·m⁻³) 和夏季 (33.4 μg·m⁻³) ($P < 0.05$)。②重庆市主城区 PM_{2.5} 月均浓度变化呈单峰单谷型, 1 月 PM_{2.5} 月均浓度最高 ($P < 0.05$), 达到 120.8 μg·m⁻³。③逐日变化, 国控 17 个空气质量监测站 PM_{2.5} 日均浓度曲线都呈现出尖峰和深谷交替变化的锯齿状。④重庆市主城区 16 个国控监测点 (除缙云山对照点) PM_{2.5} 浓度日变化在全年、春季、秋季和冬季都呈现明显的双峰双谷型。⑤PM_{2.5} 与 SO₂、NO₂ 和 CO 都呈显著正相关 ($P < 0.01$), 表明 SO₂、NO₂ 和 CO 的二次转化对 PM_{2.5} 浓度具有显著影响。

关键词: 重庆市主城区; PM_{2.5}; 时间分布; 空间分布; 气象条件

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1219-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.005

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM_{2.5} in Chongqing Urban Areas

LIU Yong-lin¹, SUN Qi-min², ZHONG Ming-yang^{3,4}, ZHONG Bu-qing^{5*}, LUO Kun-li⁶

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

Abstract: To explore the diurnal and seasonal characteristics of PM_{2.5}, hourly PM_{2.5} concentration data of 17 fixed monitoring sites in Chongqing urban area were collected continuously from June 2014 to May 2015. The result showed that: ①the seasonal concentration of PM_{2.5} in different seasons decreased in the order of winter, autumn, spring and summer ($P < 0.05$), which were 100.2 μg·m⁻³, 66.1 μg·m⁻³, 45.9 μg·m⁻³ and 33.4 μg·m⁻³, respectively. ②Monthly average concentrations of PM_{2.5} showed a single-peak curve, and the peaks of which occurred in January ($P < 0.05$, 120.8 μg·m⁻³). ③For the whole year, daily variation of PM_{2.5} showed a jagged curve. ④Diurnal average concentrations of PM_{2.5} showed an obviously bimodal curve in winter, autumn and spring, but it was less obvious in summer. ⑤Daily PM_{2.5} concentration was significantly positively correlated with SO₂, NO₂ and CO ($P < 0.01$), indicating that the concentrations of SO₂, NO₂ and CO had a significant impact on the concentration of PM_{2.5}.

Key words: Chongqing urban area; PM_{2.5}; temporal distribution; spatial distribution; meteorological condition

随着我国经济飞速发展, 一系列环境问题开始呈现, 其中大气环境尤为显著^[1~3]。PM_{2.5} 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^[4~7]。因此, PM_{2.5} 引起各国政府和公众的广泛关注。我国有关颗粒物研究集中在京津冀地区、长江三角洲和珠江三角洲, 而经济相对落后的成渝地区研究较少^[1~3, 5]。魏复盛等^[1]报道了 1995~1996 年每季度连续采 15 d 的重庆市 PM_{2.5} 浓度变化特征、化学元素含量; 潘纯珍等^[8]监测了 2003 年 10 月 16~28 日重庆市 5 条典

型城区道路 PM_{2.5} 浓度, 结果表明交通干道 PM_{2.5} 平均浓度为 206.9 μg·m⁻³; 王同桂^[9]采集了 2004 年 8 月 21 日至 2005 年 5 月 6 日重庆市北碚区、江北区和大渡口区 3 个站点的 PM_{2.5}, 结果表明 PM_{2.5} 浓度冬季最高, 夏季最低; 李礼等^[10]采集 2010 年 3~

收稿日期: 2015-08-18; 修订日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41502329); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2014CB238906); 重庆市社会科学规划项目博士项目 (2014BS094)

作者简介: 刘永林 (1983~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为地质环境与健康, E-mail: liu3986130@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhongbq@craes.org.cn

data.cma.gov.cn/).

PM_{2.5} 统计基础数据均为小时数据,根据每天 24 h(00:00~23:00) 数据求得算数均值即为 PM_{2.5} 的日均值,根据每天 PM_{2.5} 的日均值求得月均值,根据月均值求得季均值和年均值. 其中 6、7、8 月为夏季,9、10、11 月为秋季,12、1、2 月为冬季,3、4、5 月为春季. 监测数据的缺失率仅为 4.7%. 用 Excel 2010、SPSS 17.0 软件统计分析数据.

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5} 浓度季节变化

图 2 为不同空气监测站不同季节 PM_{2.5} 浓度箱型图. 分季节看,冬季 PM_{2.5} 平均浓度最高,达到 100.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 其次为秋季、春季和夏季($P < 0.05$), 分别为 66.1、45.9 和 33.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 分站点来看,冬季为两路、礼嘉和高家花园最高($P < 0.05$), 分别为 111.4、109.4 和 109.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 秋季为白市驿、南泉和高家花园最高($P < 0.05$), 分别为 76.0、75.7 和 73.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 春季为南坪、杨家坪和白市驿($P <$

0.05), 分别为 52.8、50.9 和 49.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 夏季为高家花园、白市驿和唐家沱($P < 0.05$), 分别为 45.3、40.1 和 39.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 年度上看,高家花园、白市驿和杨家坪最高($P < 0.05$), 分别为 68.7、67.1 和 66.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别是中国环境空气质量标准(年均浓度 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [12]) 的 1.96、1.92 和 1.90 倍. 分季节,不同站点 PM_{2.5} 浓度的标准差较大,最高为冬季、其次为秋季、春季、夏季(图 2), 表明在时间序列上 PM_{2.5} 浓度具有明显的非均匀分布,在短期时间内冬季 PM_{2.5} 浓度会出现较大波动,而夏季 PM_{2.5} 浓度比较稳定. 受盆地地形影响 [13], 重庆市主城区夏季炎热,冬季湿冷多雾,这种特殊的地理环境和气象条件造成不同季节 PM_{2.5} 浓度的差异.

表 2 为本次研究与前人监测结果的对比,可以看出,1995~2014 年重庆市主城区 PM_{2.5} 年均浓度有一定下降. 从季节来看,2004~2015 年春季、夏季、秋季 PM_{2.5} 浓度分别下降 56%、45% 和 28%, 冬季 PM_{2.5} 浓度下降不明显. 年均和季节 PM_{2.5} 浓度具有明显的波动性.

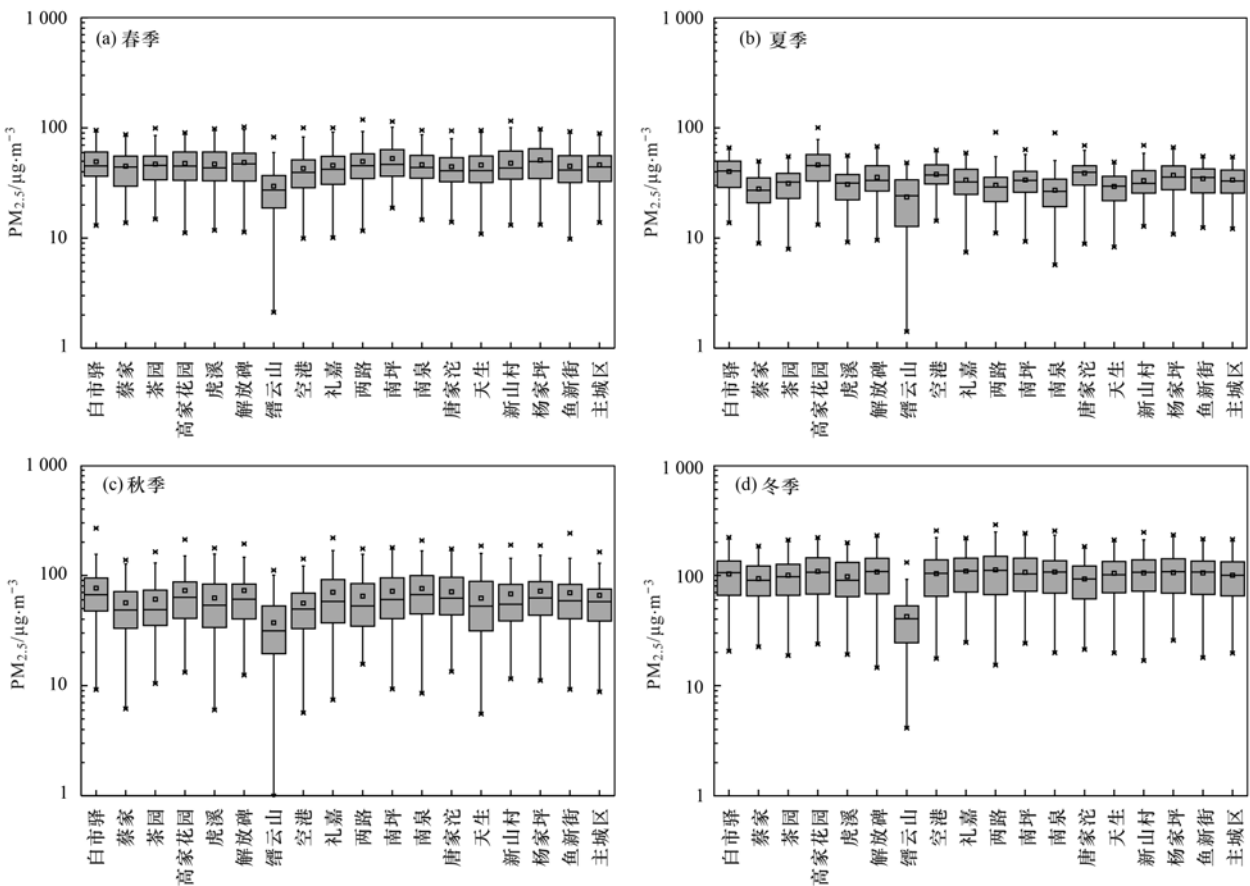


图 2 不同季节 PM_{2.5} 浓度箱型图

Fig. 2 Box figure of PM_{2.5} concentration in different seasons

表 2 重庆主城区历年来 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 2 Comparison of average $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Main Districts of Chongqing in different Years/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

时间	年份	平均浓度	文献
年均	2014-06 ~ 2015-05	61.4	本研究
	2012	84.2	[14]
	2010-03 ~ 2011-07	104.0	[15]
	2004-08 ~ 2005-05	84.6	[9]
	1996	72.0	[1]
春季	1995	105.0	[1]
	2015	45.9	本研究
	2012	88.1	[14]
	2010	108.8	[15]
夏季	2005	104.8	[9]
	2014	33.4	本研究
	2012	62.5	[14]
	2010	85.3	[15]
秋季	2004	61.2	[9]
	2014	66.1	本研究
	2012	75.8	[14]
	2010	108.6	[15]
冬季	2004	92.1	[9]
	2014-12 ~ 2015-02	100.2	本研究
	2012	110.4	[14]
	2010-12 ~ 2011-02	141.8	[15]
	2004-12 ~ 2005-02	99.3	[9]

表 3 国内部分城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 3 Comparison of $\text{PM}_{2.5}$ among some domestic cities/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

地区	城市	监测时间	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度	来源
西南	重庆	2014-06 ~ 2015-05	全年: 60.5 ± 40.0 , 冬: 100.5 ± 49.3 , 春: 46.2 ± 19.7	本研究
	成都	2012-05 ~ 2013-05	全年: 91.6 ± 54.3 , 冬: 108.1 , 春: 89.4	[16]
	贵阳	2009-03 ~ 2010-01	138.0	[17]
华北	北京	2012 冬、2013 春	冬: 122.8 ± 2.2 , 春: 86.9 ± 1.2	[18]
	石家庄	2013-01 ~ 2013-12	156.4 ± 118.6	[19]
	天津	2010-09 ~ 2010-11	107.0	[20]
	太原	2009 冬、2010 春	冬: 289.2 ± 104.8 , 春: 248.6 ± 68.6	[21]

最高月为 12 月 ($58.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 从各个监测站月均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化曲线来看, 国控 16 个监测站(除缙云山对照点) $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度变化都呈单峰单谷型(图 3); 缙云山监测站(对照点) $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度变化呈现波浪形, 即有多个波峰和波谷(图 3).

2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐日变化

重庆市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 逐日总体变化曲线呈现锯齿状, 具有明显尖峰和深谷(图 4). 2014 年 10 月至 2015 年 3 月, 尖峰处的 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度远高于相邻深谷, 其余月份尖峰处 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度略高于相邻深谷(图 4). 2014 年 11 月至 2015 年 2 月重庆市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度(日均值 $97.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 高于环境空气二级标准 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [12]); 2014 年 6 月至 2014 年 9 月重庆市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度(日均值

本研究 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与国内部分城市对比分析(表 3), 北方城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度普遍高于西南城市, 一方面可能是西南地区降水频繁, 有利于颗粒物的去除; 另一方面可能受城市能源结构、工业活动和城市机动车尾气排放强度的影响. 北方城市中石家庄、太原的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于经济及社会较发达的北京、天津, 可能与前两个城市的能源结构和工业活动有关. 重庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平低于同处于西南地区的成都和贵阳, 这与重庆市逐步调整产业结构以及改善能源结构有关 [9~11].

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐月变化

重庆市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度最高值为 1 月 ($P < 0.05$), 达到 $120.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 3), 最低月为 7 月和 8 月 ($P < 0.05$), 分别为 $31.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $32.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 重庆市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度变化呈单峰单谷型(图 3). 分站点来看, 国控 15 个监测站(除缙云山对照点) $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度最高值出现在 1 月, 且月均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大于 $105.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 礼嘉监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度最高值出现在 12 月 ($120.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 缙云山监测站(对照点) 月均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

$34.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 低于环境空气二级标准. 分站点看, 国控 17 个空气监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度曲线呈现出尖峰和深谷交替变化的锯齿状. 2014 年 10 月至 2015 年 3 月, 日均值 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现出南坪 ($92.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 南泉 ($92.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 礼嘉 ($91.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 高家花园 ($91.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) $\geq$ 解放碑 ($91.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 两路 ($90.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 白市驿 ($90.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 杨家坪 ($90.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 新山村 ($88.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 鱼新街 ($88.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 天生 ($86.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 茶园 ($83.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 虎溪 ($82.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 唐家沱 ($82.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 空港 ($81.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 蔡家 ($78.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的趋势 ($P < 0.01$, $n = 182$). 这种空间差异可能与监测点周边环境及秋冬季气候特征有关.

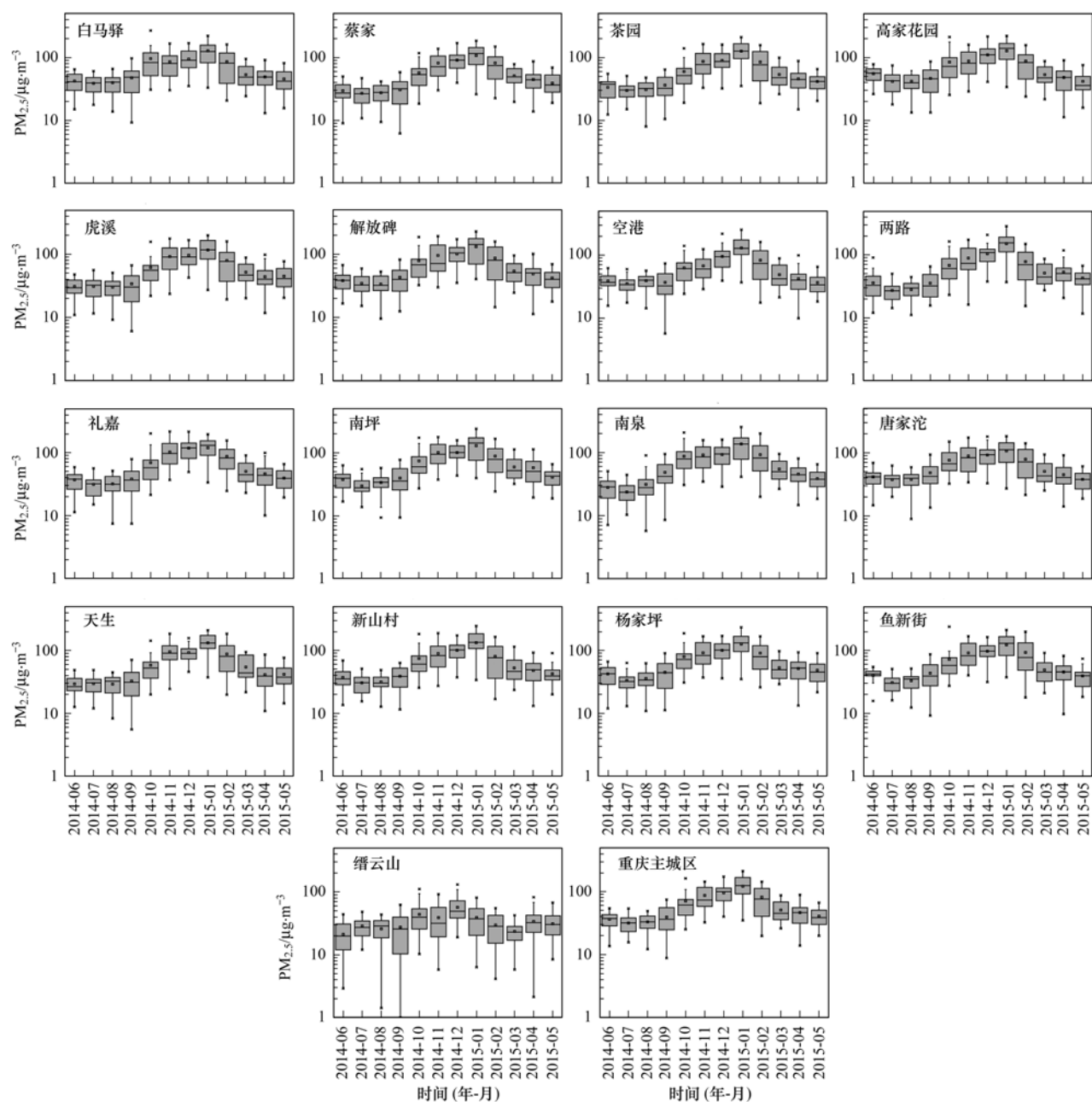


图3 重庆主城区 17 个监测站 PM_{2.5}月均浓度箱型图

Fig. 3 Box figure of monthly average concentration of PM_{2.5} from 17 monitoring stations in the Main Districts of Chongqing

2.4 PM_{2.5}浓度日变化

为认识重庆市主城区 PM_{2.5}浓度的日变化规律,以季节为基本单元,统计了不同监测站每日不同时刻 PM_{2.5}浓度的平均值(图 5).重庆市主城区 PM_{2.5}浓度日变化在全年、春季、秋季和冬季呈现明显的双峰双谷型(图 5),夏季呈现不明显的双峰双谷型(图 5).双峰分别出现在白天的 10:00 ~ 12:00 和夜晚的 21:00 ~ 23:00,且晚上 PM_{2.5}小时峰值高于白天,表明夜间重庆市主城区的 PM_{2.5}更容易积累或二次生成;双谷分别出现在早晨的 05:00 ~ 07:00

和傍晚的 16:00 ~ 17:00,且早晨 PM_{2.5}小时谷值高于傍晚.分站点看,重庆市主城区 16 个国控监测点(除缙云山对照点)PM_{2.5}浓度日变化在全年、春季、秋季和冬季呈现明显的双峰双谷型(图 5),其中冬季 PM_{2.5}浓度日变化最为明显,其次为秋季和春季(图 5).双峰和双谷出现的时间段与重庆市主城区相同.

任丽红等^[11]研究表明重庆市主城区 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

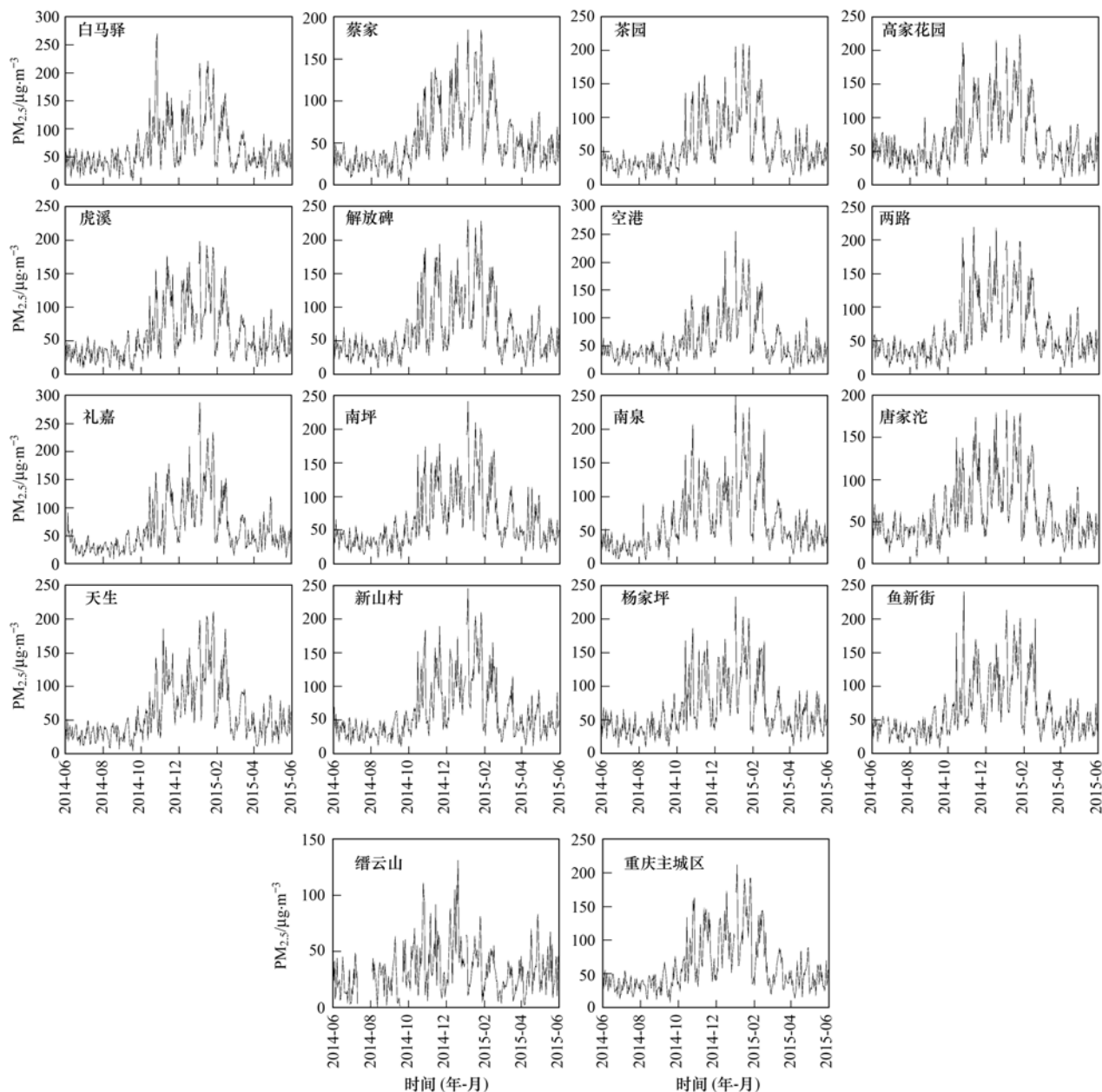


图4 重庆主城区不同监测点 $PM_{2.5}$ 逐日变化曲线

Fig. 4 Daily variations of concentrations of $PM_{2.5}$ in different monitoring stations in the Main Districts of Chongqing

颗粒物以及道路扬尘^[22],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 11:00 左右.之后伴随湍流垂直交换能力强,颗粒物浓度有所下降;夜间混合层降低,晚高峰交通流量增加,其 $PM_{2.5}$ 浓度再次聚集^[23~25].缙云山监测站为对照点, $PM_{2.5}$ 小时浓度日变化特征在夏季、秋季和冬季表现为多峰多谷型,春季和全年表现为双峰双谷型(图5).这可能与缙云山监测站处于山区,与周围气象环境变化较快有关.

2.5 $PM_{2.5}$ 浓度空间变化

为研究 $PM_{2.5}$ 的空间变化特征,以重庆市政府做

为重庆市中心,绘制不同季节 $PM_{2.5}$ 浓度与监测站距市政府距离的关系图(图6).可知,总体上,每个季节的 $PM_{2.5}$ 浓度离市中心(重庆市政府)越近其浓度越高(图6).因此, $PM_{2.5}$ 浓度在空间变化上,表现为由市中心向周围减小的趋势.重庆市主城区人口和工业主要分布于中梁山和铜锣山之间谷地南段(图1),因此,此地区为颗粒物的主要污染源.其中,南坪、高家花园、解放碑、杨家坪、礼嘉、新山村位于重庆市主城区中心区域,人口密度高,交通流量大, $PM_{2.5}$ 浓度较高.分季节看,夏季和秋季 $PM_{2.5}$ 浓度向市中心增大的趋势明显.冬季 $PM_{2.5}$ 浓度向市中心

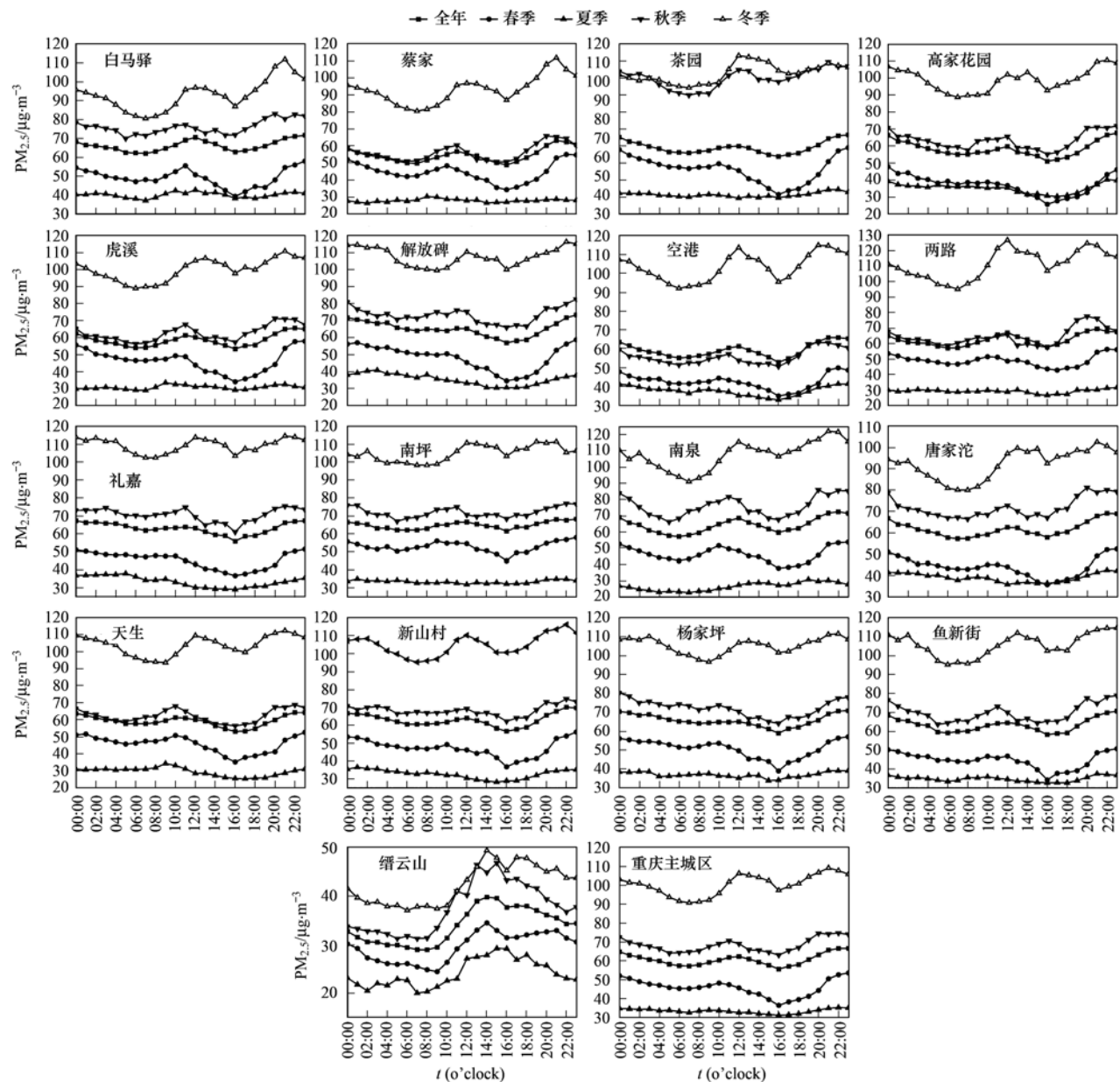


图5 庆主城区不同监测点 PM_{2.5}日变化曲线

Fig. 5 Diurnal variations of PM_{2.5} in different monitoring stations in the Main Districts of Chongqing

增大的趋势最不明显,说明重庆市主城区在冬季时 PM_{2.5}浓度空间差异不显著. 这可能由于重庆冬季气温低气流稳定有利于 PM_{2.5}的聚集^[26].

3 讨论

3.1 PM_{2.5}浓度与气象条件

PM_{2.5}浓度与气象要素具有密切关系^[23,26~29]. 随着风速的增大,将加速 PM_{2.5}浓度扩散,导致浓度降低,但也将 PM_{2.5}传送到其它地方^[24,30]. 全年看,重庆市主城区 PM_{2.5}浓度与气温呈显著负相关;分季节看,春季、夏季和冬季 PM_{2.5}浓度与气温相关性

不明显;秋季呈显著负相关(表4). 气温越高,大气对流层内的对流运动越强烈,则大气中的污染物便可输送到远方,从而降低 PM_{2.5}浓度,气温较低时,对流运动就会较弱,甚至会因近地面空气向外强烈辐射迅速冷却降温而形成逆温层^[13,26,30],污染物难以转移扩散,PM_{2.5}浓度增加. 重庆市秋季气温呈稳定下降趋势,且风速最小^[13],这也就造成不同季节 PM_{2.5}浓度与气温所呈现不同的相关性. 全年来看,气压与 PM_{2.5}浓度呈显著正相关;春季和冬季 PM_{2.5}浓度与气压相关性不显著,夏季呈显著负相关,而秋季呈显著正相关. 当地面受低压控制时,四周高压

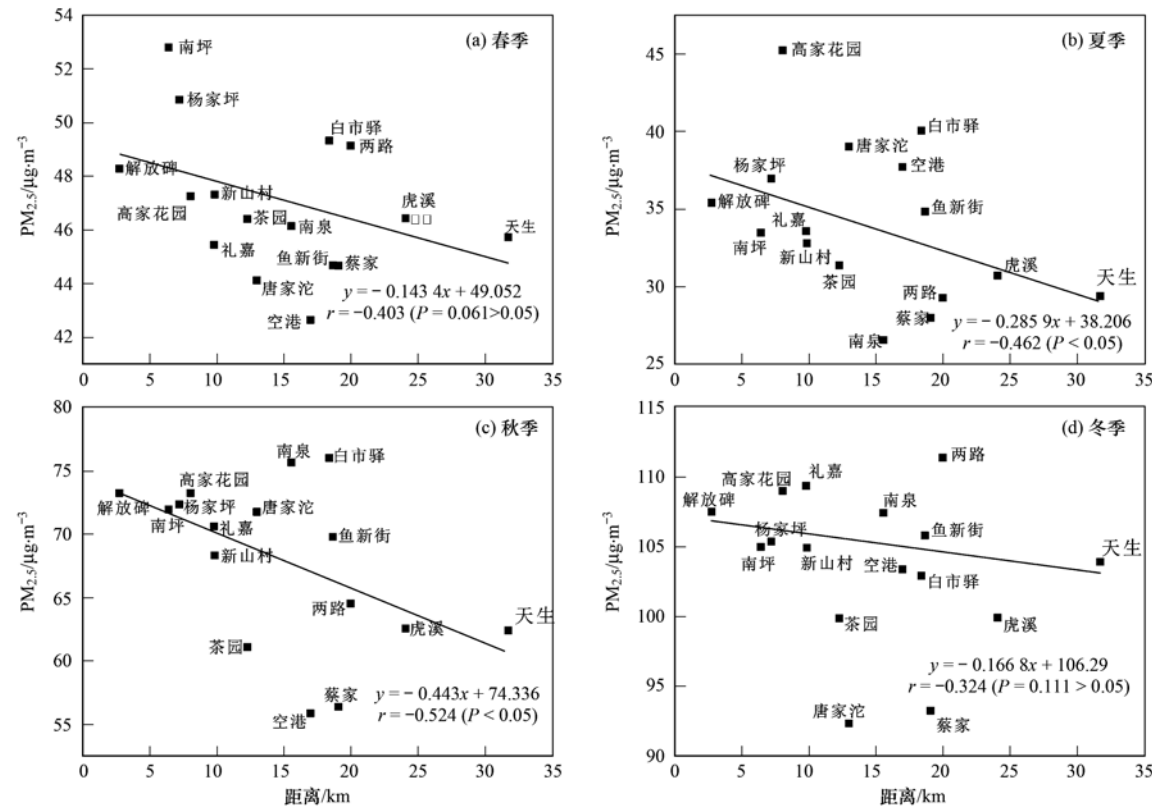


图 6 不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与监测站距重庆市中心 (重庆市政府) 距离关系

Fig. 6 Plot of $\text{PM}_{2.5}$ concentration to the distance of site to center of Chongqing core area, Chongqing Municipal People's Government

气团流向中心,使中心形成上升气流,形成大风,利于污染物向上扩散,颗粒物浓度较低.相反,若地面受高压控制,中心部位出现下沉气流,抑制污染物向上扩散,在稳定高压的控制下,污染物积累,颗粒物浓度加剧,因此,冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低^[13,26,30]. 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与相对湿度呈显著负相关,其它季节相关性不显著.一年四季, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速都具有负相关性,但夏季不显著.四季降水量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈负相关,但春夏两季相关性不显著.一般情况,相对湿度大易使颗粒物聚集.但有关研究表明^[31,32],当相对湿度较高,并伴有降水时,由于吸湿增长的影响,当 $\text{PM}_{2.5}$ 达到一定浓度时,会由于自身的重量而自沉降,从而降低空气中颗粒物浓度.水平能见度能很好地反映空气质量的优

劣^[33],大气中的颗粒物浓度越高水平能见度越低^[33,34].表4显示一年四季,水平能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度都呈显著负相关,其中冬季和春季相关性较高,其次为秋季.这与重庆市主城区冬季气温低,风速较小而大气结构稳定,不利于空气颗粒物扩散;而夏季气温高,风速较大而大气结构不稳定有利于空气颗粒物扩散有关^[35];同时,由于冬季降雨较少,有利于污染物累积和二次气溶胶形成细颗粒污染物而导致能见度降低^[11].

风向影响着空气污染物的来源、聚集和扩散^[28].如图7所示,春季NW风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,夏季NE、SEE、SW、NWW、NNW风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,秋季NNE、SE、SW风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,冬季NEE、E、SE、SSE风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,

表 4 不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 与气象因素之间相关性¹⁾

Table 4 Correlation coefficients of $\text{PM}_{2.5}$ and meteorological factors in different seasons

时间	气温	气压	相对湿度	风速	降水量	水平能见度
全年	-0.554 **	0.516 **	0.095	-0.302 **	-0.289 **	-0.566 **
春季	0.150	-0.094	-0.185	-0.408 **	-0.268	-0.619 **
夏季	0.180	-0.206 *	-0.209 *	-0.050	-0.228	-0.315 **
秋季	-0.435 **	0.472 **	0.027	-0.277 **	-0.309 *	-0.562 **
冬季	0.041	-0.20	-0.052	-0.348 **	-0.429 **	-0.637 **

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

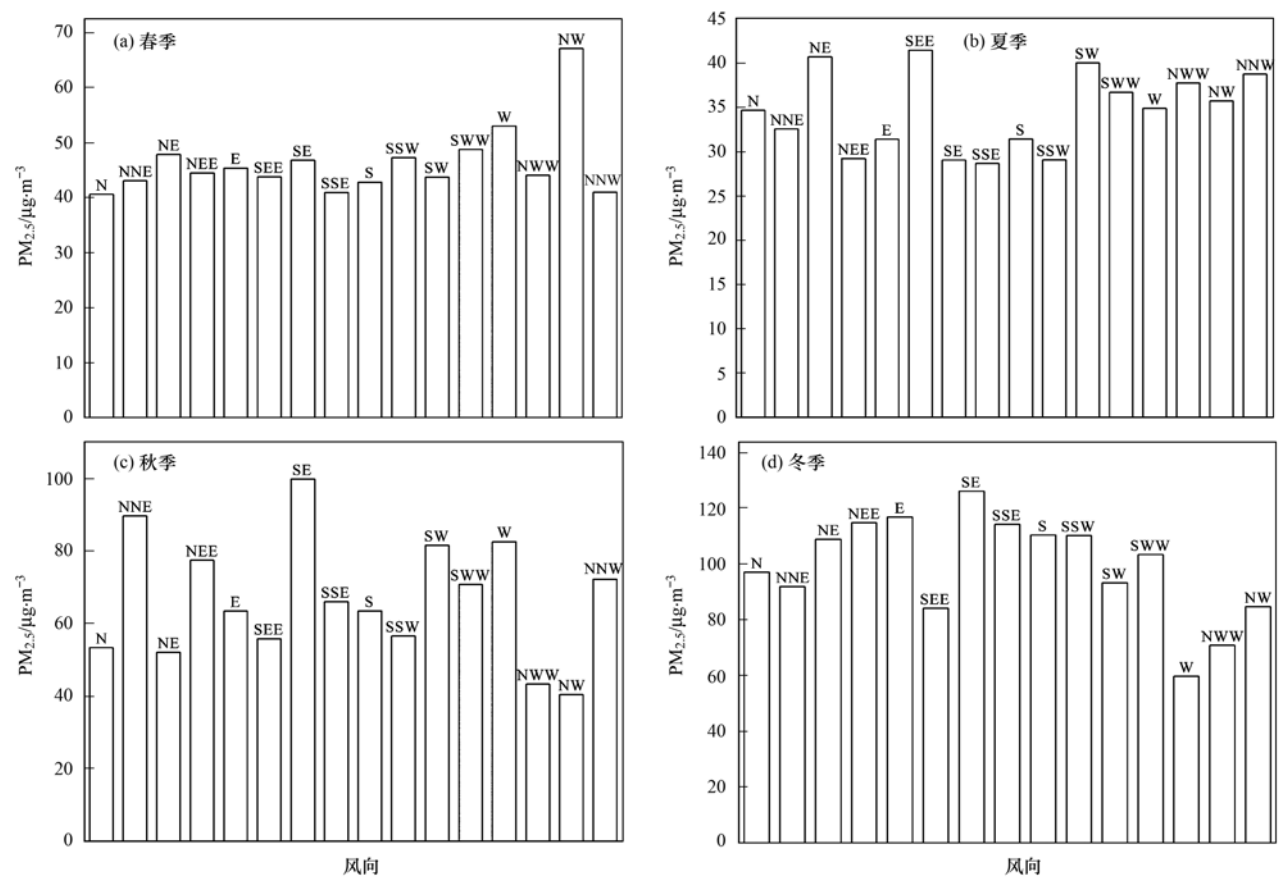


图 7 PM_{2.5}与风向关系

Fig. 7 Relationship between PM_{2.5} and wind direction

表 5 不同监测站 PM_{2.5}与 SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 的相关性¹⁾

监测站	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
白市驿	0.607 **	0.647 **	0.279 **	-0.283 **
蔡家	0.551 **	0.668 **	0.505 **	-0.429 **
茶园	0.429 **	0.561 **	0.565 **	-0.492 **
高家花园	0.639 **	0.368 **	0.631 **	-0.422 **
虎溪	0.730 **	0.619 **	0.458 **	-0.458 **
解放碑	0.618 **	0.313 **	0.571 **	-0.359 **
缙云山	0.624 **	0.434 **	0.190 **	0.065
空港	0.769 **	0.552 **	0.606 **	-0.453 **
礼嘉	0.601 **	0.308 **	0.667 **	-0.458 **
两路	0.665 **	0.451 **	0.630 **	-0.487 **
南坪	0.627 **	0.664 **	0.528 **	-0.461 **
南泉	0.433 **	0.603 **	0.531 **	-0.505 **
唐家沱	0.549 **	0.523 **	0.436 **	-0.390 **
天生	0.685 **	0.604 **	0.597 **	-0.406 **
新山村	0.547 **	0.393 **	0.696 **	-0.433 **
杨家坪	0.577 **	0.578 **	0.609 **	-0.388 **
鱼新街	0.486 **	0.512 **	0.626 **	-0.373 **
重庆主城区	0.721 **	0.602 **	0.667 **	-0.449 **

1) ** 为 $P < 0.01$

而一年四季中近 NS 方向下 $PM_{2.5}$ 浓度较低. 重庆市主城区位于近南北走向的平行岭谷地貌单元(图 1), 近南北向的宽阔谷地有利于近南北向的风流通, 而不利于东西向的风流通. 因此, 在东西向风的作用下, 重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 稀释和扩散较慢^[30].

3.2 $PM_{2.5}$ 浓度与其它空气污染物相关性

SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 可伴随 $PM_{2.5}$ 同时从污染源排出, 也会通过二次化学反应而重新生成 $PM_{2.5}$. $PM_{2.5}$ 中重要的化学组分 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 基本都是通过 SO_2 和 NO_2 在大气中发生光化学作用而生成^[27,36-38]. 因此, 大气中 SO_2 和 NO_2 浓度与 $PM_{2.5}$ 浓度具有密切关系. 表 5 为不同监测站 $PM_{2.5}$ 与气体污染物的相关性, 可知, 每一个监测站 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 和 CO 都呈极显著正相关, 即随着 SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度的增高 $PM_{2.5}$ 浓度也随之增高, 说明 SO_2 、 NO_2 和 CO 的二次转化对 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著作用^[38]. 不同站点, SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度对 $PM_{2.5}$ 浓度影响程度不一样, 总体上, SO_2 对 $PM_{2.5}$ 浓度影响更加显著. 重庆市主城区 16 个国控监测站 $PM_{2.5}$ 浓度都与 O_3 呈显著负相关. 颗粒物具有消光作用, 可以吸收和散射太阳辐射, 从而减少 O_3 的生成^[37,39].

4 结论

(1) 分季节看, 重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 浓度由高到低依次为冬季、秋季、春季和夏季, 其 $PM_{2.5}$ 季均浓度依次为 100.2、66.1、45.9 和 33.4 $\mu g \cdot m^{-3}$. 重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 浓度在时间序列上具有明显的非均匀分布, 即短时间内冬季 $PM_{2.5}$ 浓度会出现较大波动, 而夏季 $PM_{2.5}$ 浓度比较稳定.

(2) 从逐月变化来看, 重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 月均浓度变化呈单峰单谷型, 1 月 $PM_{2.5}$ 月均浓度最高, 达到 120.8 $\mu g \cdot m^{-3}$. 分站点来看, 国控 16 个监测站(除缙云山对照点) $PM_{2.5}$ 月均浓度变化都呈单峰单谷型, 其中 15 个监测点 1 月 $PM_{2.5}$ 月均浓度最高且都高于 105.0 $\mu g \cdot m^{-3}$.

(3) 逐日变化上, 重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 逐日总体变化曲线呈现锯齿状, 具有明显尖峰和深谷, 尖峰处的 $PM_{2.5}$ 日均浓度高于相邻深谷. 其中 2014 年 10 月至 2015 年 3 月, 各空气监测站 $PM_{2.5}$ 日均浓度变化剧烈, 尖峰处 $PM_{2.5}$ 浓度远高于相邻深谷, 其余月份日均值浓度变化较稳定.

(4) 重庆市主城区 16 个国控监测点(除缙云山

对照点) $PM_{2.5}$ 浓度日变化在全年、春季、秋季和冬季都呈现明显的双峰双谷型, 夏季 $PM_{2.5}$ 浓度日变化呈现不明显的双峰双谷型; 冬季 $PM_{2.5}$ 小时浓度波动最大, 其次为秋季和春季.

(5) $PM_{2.5}$ 浓度在空间变化上, 总体表现为由市中心(重庆市政府)向周围减小的趋势. 冬季 $PM_{2.5}$ 浓度由周边向市中心增大的趋势最不明显.

(6) $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 和 CO 都呈极显著正相关, 说明 SO_2 、 NO_2 和 CO 的二次转化对 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著影响. 但从相关性上, SO_2 对重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 浓度影响更加显著.

参考文献:

- [1] 魏复盛, 滕恩江, 吴国平, 等. 我国 4 个大城市空气 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染及其化学组成[J]. 中国环境监测, 2001, 17(特刊): 1-6.
- [2] Chan C K, Yao X Y. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.
- [3] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 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, 2011, 56(3): 261-268.
- [4] Pope C A III, Ezzati M, Dockery D W. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States[J]. The New England Journal of Medicine, 2009, 360(4): 376-386.
- [5] Cao J J, Xu H M, Xu Q, et al. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city[J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(3): 373-378.
- [6] Jerrett M, Burnett R T, Beckerman B S, et al. Spatial analysis of air pollution and mortality in California[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2013, 188(5): 593-599.
- [7] 张金良, 高健, 刘喆, 等. 2013 年灰霾事件及其对北京市医院成人门急诊量影响的描述性研究[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(10): 853-859.
- [8] 潘纯珍, 陈刚才, 杨清玲, 等. 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), 2004, 26(5): 576-579.
- [9] 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. 21-23.
- [10] 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.
- [11] 任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 重庆主城区大气 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1387-1394.
- [12] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [13] 孟庆珍, 万敏. 重庆近 12 年大气稳定度综合研究[J]. 成都气象学院学报, 1994, 9(1): 75-83.
- [14] 陈敏. 重庆市主城区大气 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 中 PAHs 分布规律解析[D]. 重庆: 西南大学, 2013. 37-38.
- [15] 张丹, 翟崇治, 周志恩, 等. 重庆市主城区不同粒径颗粒物

- 水溶性无机组分特征[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(10): 1099-1106.
- [16] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012-2013年)[J]. 环境科学学报, 2015, doi: 10.13671/j. hjkxxb. 2015. 0501.
- [17] 王京, 王初, 陈振楼. 贵阳市城区近地面 PM₁₀/PM_{2.5} 及重金属污染水平研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(4): 74-76.
- [18] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 418-427.
- [19] 韩雪. 石家庄市大气颗粒物(PM₁₀/PM_{2.5})对肺炎住院影响的病例交叉研究[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2014. 18-19.
- [20] 黄鹤, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津市 PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 连续在线观测分析[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(8): 897-903.
- [21] 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 等. 太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 780-786.
- [22] Louie P K K, Watson J G, Chow J C, *et al.* Seasonal characteristics and regional transport of PM_{2.5} in Hong Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(9): 1695-1710.
- [23] 张睿, 蔡旭辉, 宋宇. 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), 2004, **40**(6): 930-938.
- [24] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013 年北京市 PM_{2.5} 的时空分布[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 110-120.
- [25] 谢雨竹, 潘月鹏, 倪长健, 等. 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, 2015, **35**(4): 975-983.
- [26] 刘敏, 许丽萍, 余家燕, 等. 重庆主城区秋冬季逆温对空气质量影响的观测分析[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(8): 3367-3372.
- [27] Xie Y Y, Zhao B, Zhang L, *et al.* Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃ [J]. *Particulology*, 2015, **20**: 141-149.
- [28] Li R K, Li Z P, Gao W J, *et al.* Diurnal, seasonal, and spatial variation of PM_{2.5} in Beijing[J]. *Science Bulletin*, 2015, **60**(3): 387-395.
- [29] Masiol M, Benetello F, Harrison R M, *et al.* Spatial, seasonal trends and transboundary transport of PM_{2.5} inorganic ions in the Veneto region (Northeastern Italy) [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **117**: 19-31.
- [30] 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 等. 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, 2014, **35**(3): 820-829.
- [31] Wang J H, Ogawa S. Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(8): 9089-9101.
- [32] Liu P F, Zhao C S, Göbel T, *et al.* Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the north china plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(7): 3479-3494.
- [33] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, **29**(2): 34-41.
- [34] 陈义珍, 赵丹, 柴发合, 等. 广州市与北京市大气能见度与颗粒物质量浓度的关系[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(7): 967-971.
- [35] 叶堤, 蒋昌潭, 王飞. 重庆市区大气能见度变化特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境学报, 2006, **22**(6): 6-10.
- [36] Stephens S, Madronich S, Wu F, *et al.* Weekly patterns of México City's surface concentrations of CO, NO_x, PM₁₀ and O₃ during 1986-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(17): 5313-5325.
- [37] Rypdal K, Rive N, Berntsen T, *et al.* Climate and air quality-driven scenarios of ozone and aerosol precursor abatement [J]. *Environmental Science & Policy*, 2009, **12**(7): 855-869.
- [38] Leibensperger E M, Mickley L J, Jacob D J, *et al.* Intercontinental influence of NO_x and CO emissions on particulate matter air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(19): 3318-3324.
- [39] 雷瑜, 张小玲, 唐宜西, 等. 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, 2015, **35**(5): 1520-1528.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppe	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行