

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

北京地区冬春 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系

赵晨曦, 王云琦*, 王玉杰, 张会兰, 赵冰清

(北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 北京 2012 ~ 2013 年的冬春多次出现雾霾天气, 可吸入颗粒物 (PM_{10}) 污染严重. 而 $\text{PM}_{2.5}$ 作为 PM_{10} 中粒径较小的部分, 在 PM_{10} 中所占比重越高, 污染越严重. 因此, 本研究选取了能够覆盖北京所有区县的 30 个 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度监测点, 对该地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染特征进行分析, 确定其空间差异特征和时间性变化特征. 普通克里格插值 (Original Kriging) 法得到的北京地区冬、春季颗粒物浓度分布图显示, 颗粒物浓度从北部山区到南部地区逐渐递增, 在中心城区处, 西部高于东部, 且局部地区存在一定的城乡差异. 颗粒物浓度月变化曲线呈单峰单谷型, 1 月最高, 4 月最低; 逐日变化反映了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度具有较好的相关性, 且受气象条件影响显著; 日变化呈双峰趋势. 本文选取日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)、相对湿度 (%)、风速 (风级)、降水量 (mm) 等气象因子, 利用 Spearman 秩相关分析研究各个气象因子对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响. 北京冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度分别与气温、相对湿度正相关, 与风速负相关, 风速和相对湿度是影响污染物质量浓度分布的主要因素.

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; PM_{10} ; 污染水平; 时空分布; 气象条件

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0418-10

Temporal and Spatial Distribution of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing

ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, ZHANG Hui-lan, ZHAO Bing-qing

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing 100083, China)

Abstract: Fogs and hazes broke out many times in winter and spring of 2012-2013 in Beijing, inducing severe pollution of respirable particulate matters (PM_{10}). As a fine particle component in PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ would cause more severe air pollution if the proportion of $\text{PM}_{2.5}$ to PM_{10} is high. Based on this, 30 monitoring stations recording the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} all over Beijing were selected, and the contamination characteristics of particulate matters were analyzed, which further served to determine the characteristics of temporal and spatial pollution variations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} . The distribution of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration in winter and spring in Beijing were derived by the Original Kriging interpolation method, and it was depicted from the figure that the concentration of particulate matters gradually increased from the northern mountain area to the southern part of Beijing; in the central urban area, the particulate concentration of the western region was generally higher than that of the eastern region, with certain differences between urban and rural area within some local areas. Monthly variation curve of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration showed single peak-valley pattern; the maximum was in January and the minimum was in April; daily variation indicated a good correlation between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} , both of which were significantly influenced by meteorological conditions; diurnal variation curve showed a double peak-valley type. Meteorological factors such as daily average temperature ($^{\circ}\text{C}$), relative humidity (%), wind speed (wind scale), precipitation (mm) were chosen and their individual relationships with concentrations of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ were investigated using Spearman rank correlation analyses. It was demonstrated that the concentrations of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ were positively correlated with temperature and relative humidity, respectively, and strongly negatively correlated with wind speed; wind speed and relative humidity were two key factors affecting the distributions of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentration.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; PM_{10} ; pollution levels; temporal and spatial distribution; meteorological condition

工矿业发展、机动车尾气排放以及大量化石燃料的燃烧使得空气质量愈发恶化, 城市大气环境量的评价及污染防治已成为大气污染研究和城市气候研究领域的主要课题之一^[1]. 在各项空气污染指标中, 北京地区以颗粒物污染问题较为显著. 根据

中华人民共和国环境保护部公布数据显示: 2008 ~

收稿日期: 2013-05-24; 修订日期: 2013-10-17

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (20130430103)

作者简介: 赵晨曦 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持, E-mail: kakaanew@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

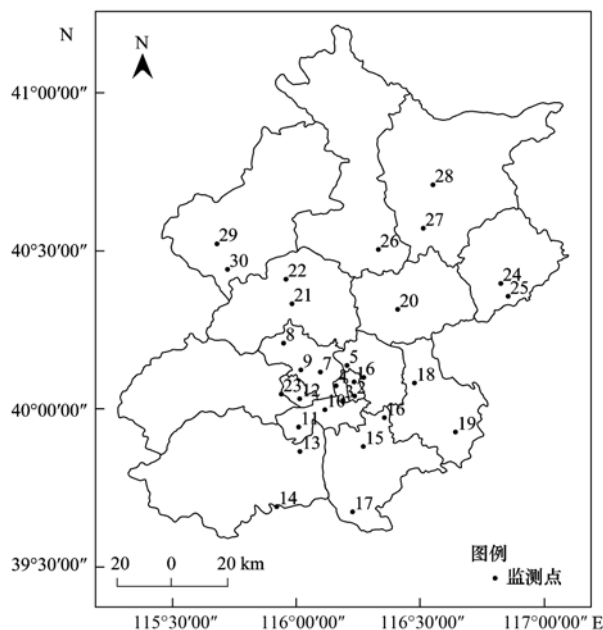
2012 年北京市首要污染物为可吸入颗粒物 (PM_{10}) 的天数占本年度非 I 级天数的比例均在 95% 以上, PM_{10} 已成为北京市最主要的空气污染物^[2]. $PM_{2.5}$ 作为 PM_{10} 中粒径较小的部分, 对人体健康和大气环境的危害更为突出^[3,4], 逐渐成为人们重点关注和研究的热点问题. 研究发现, $PM_{2.5}$ 能显著降低大气能见度^[5,6], 且 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重越高, 污染越严重. 根据对北京定陵清洁区大气降尘、总悬浮颗粒物 (TSP) 及可吸入颗粒物 (PM_{10}) 等历史监测数据的研究显示, 大气颗粒物总体呈下降趋势, 年际短期变化受沙尘天气影响较大^[7]. 然而, 以往研究主要局限于北京个别监测点, 很难对北京地区的颗粒物污染水平及空间分布特征进行整体评价. 贺克斌等^[8] 仅以清华大学环境系二楼平台作为连续观测点, 代表城区颗粒物污染情况. 蒲维维等^[9] 则分别以北京宝联站和北京上甸子区域大气本底站代表城区和郊区颗粒物浓度水平. 赵文慧等^[10] 虽然选取了多个采样点对北京 $PM_{0.3}$ 、 $PM_{3.0}$ 和 $PM_{5.0}$ 的分布进行了插值分析, 但主要集中于中心城区处, 实际上并未覆盖整个北京地区, 且研究对象较集中于细颗粒物. 而本研究选取了北京市 30 个 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度监测点, 覆盖了北京地区所有区县, 利用普通克里格插值 (Original Kriging) 法分析该区域内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染特征的空间特性, 将北京地区冬春季的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分布进行对比. 此外, 研究表明某些不利气象条件会显著加重颗粒物污染过程. Tai 等^[11] 发现温度、相对湿度、降水和大气循环等条件能够较好地解释北美地区 $PM_{2.5}$ 浓度的变化情况, 而较粗粒子 ($PM_{2.5-10}$, PM_{10}) 的相关性比 $PM_{2.5}$ 更加明显^[12]. 因此, 本研究选择污染较为严重的 2012 年冬季, 筛选北京市各个监测点的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度信息, 并结合不同气象因子 [气温 ($^{\circ}C$)、相对湿度 (%)、风速 (风级)、降水量 (mm) 等] 对颗粒物浓度的影响, 揭示颗粒物污染与气象条件之间的关系.

1 材料与方法

1.1 监测点的选择与数据的收集

根据北京市环境保护监测中心网站 (<http://www.bjmemc.com.cn>) 提供的监测点信息, 选取能够覆盖北京市所有区县的 30 个空气污染监测站点, 各个监测点信息及位置分布情况见图 1.

分别收集以上监测点 2012 年 12 月 ~ 2013 年 5 月的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的 24 h 日均值以及



1. 东城东四; 2. 东城天坛; 3. 西城万寿西宫; 4. 西城官园;
5. 朝阳奥体中心; 6. 朝阳农展馆; 7. 海淀万柳; 8. 海淀北部新区;
9. 海淀植物园; 10. 丰台花园; 11. 丰台云岗; 12. 石景山古城;
13. 房山良乡; 14. 房山琉璃河; 15. 大兴黄村; 16. 大兴亦庄;
17. 大兴榆堡; 18. 通州新城; 19. 通州永乐店; 20. 顺义新城;
21. 昌平镇; 22. 昌平定陵; 23. 门头沟龙泉镇; 24. 平谷镇;
25. 平谷东高村; 26. 怀柔镇; 27. 密云镇; 28. 密云水库;
29. 延庆镇; 30. 延庆八达岭

图 1 北京市各区县 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度监测点

Fig. 1 Monitoring sites of $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration in each district of Beijing

2012 年 12 月 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的实时浓度值 (即小时平均值).

收集各区县实时气象因子数据, 选取气温 ($^{\circ}C$)、相对湿度 (%)、风速 (风级)、降水量 (mm) 等气象因子, 收集并记录 2012 年 12 月各个气象因子的小时平均值和日平均值. 气象数据主要摘自中国天气网 (<http://www.weather.com.cn>).

1.2 数据处理方法

通过数据的整理计算, 得到 2012 年 12 月 ~ 2013 年 5 月各监测点 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的月均值, 并以此为依据利用 Arc GIS 9.3 软件进行插值分析, 通过已知点的颗粒物浓度得到整个北京地区颗粒物浓度的空间分布特征. 颗粒物的时间分布特征主要通过 SPSS 18.0 软件整理分析. 结合各区县分布, 将北京地区划分为 5 个区域, 以对比颗粒物浓度的区域差异. 此外, 整理各区县 2012 年 12 月 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 各个气象因子的小时平均值, 用于颗粒物质量浓度和气象因子的相关关系的研究.

1.2.1 插值方法的选择

在对污染物浓度分布及变化情况进行研究时,常利用插值法,通过已知点的浓度数据计算同一区域内其他未知点的数据,从而推导出整个区域的分布情况.随着GIS技术的不断发展,空间数据插值的应用越来越广,人们在研究工作中对空间数据插值的质量要求也逐渐提高.在众多的插值方法中,晏星等^[13]基于不同插值方法研究了北京内部城区 PM_{10} 的浓度分布情况,将反距离加权插值法(IDW),普通克里格插值法(Original Kriging)和样条函数插值(SPLINE)这3种空间插值方法进行了对比.结果表明,克里格插值较为灵活,能够充分利用数据探索性分析工具,有效地提高空间插值分析的效率,利用已知样点的统计特征,量化各测量点之间的空间自相关性,并且对正态数据的预测精度最高^[13].克里格插值较好地表明了预测区域范围内的污染物的空间分布情况,突出了总体的分布趋势,最接近观测值.因此,本研究利用Arc GIS 9.3软件,选择普通克里格法进行插值,得到北京地区冬春季节 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度分布.

1.2.2 相关性分析方法的选择

关于不同大气污染物浓度(气体、颗粒物)与气象因子之间的关系研究已有大量工作^[14],短时效的污染预报也取得了一定的成绩^[15].然而由于气象因子的多变性与不可控性,造成了颗粒物浓度变化的复杂性,因此对于二者之间相关性的研究十分必要.在过去的研究中,一般把污染物浓度与气象要素之间的相关关系看作线性关系,用线性关系来反映二者依赖关系.然而此种方法具有一定的局限性,对污染物浓度数据的收集情况有较高的要求,不具有普遍适用性,且其研究结果是否准确也是一个值得分析的问题^[16].周江兴^[16]用非线性回归方程来描述污染物浓度与气象要素之间的依赖关系,使污染物浓度与气象要素之间的相关性有了明显的提高.然而,非参数分析方法(如Spearman秩相关系数)能提供2个随机变量在线性相关或非线性相关下的共变趋势程度,因此能够更加客观地反映出气象因素与颗粒物质量浓度之间的真实相关关系^[17].目前,利用非参数分析方法研究气象因素对不同粒径颗粒物影响的分析较为少见.本研究利用SPSS 18.0软件进行数据处理,将2012年12月各个区县 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的实时浓度值标准化,并进行正态性检验.检验结果不符合正态分布,因此采用非参数分析即Spearman秩相关系数统计分析方法进行

$PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度与对应气象因子的相关分析更为合理.Spearman秩相关分析能有效克服Pearson积矩相关系数只适合描述线性相关关系的缺点,提供2个随机变量在线性相关或非线性相关下的共变趋势程度,适用性比相应的参数方法更好.同时,在对总体分布不明确和总体信息缺乏的情况下,非参数分析方法能可靠地获得结论^[18].

2 结果与分析

2.1 冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 空间分布特征

2.1.1 整体分布特征

利用北京冬季和春季各区县监测点(共30个) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的污染物平均值,进行普通克里格插值分析,得到了4张北京市颗粒物浓度预测分布图,结果如图2所示.

从整体来看,冬春季的颗粒物浓度具有以下特征:第一,冬春季颗粒物浓度在标尺区间段存在一定差异. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的最小值在两个季节下相差不大,但冬季最大值可达到春季最大值的1.5倍左右,因此冬季的标尺区间段数比春季要多,可以更好地体现区域内颗粒物分布的差异特征.第二,冬季的颗粒物浓度整体水平显著高于春季,高浓度颗粒物覆盖区域所占面积更大,颗粒物更易富集.2012年冬季和2013年春季 $PM_{2.5}$ 的平均浓度分别达到 $(122.86 \pm 2.22) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(86.88 \pm 1.17) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10} 的平均浓度分别达到 $(148.60 \pm 2.67) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(127.99 \pm 1.49) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,均远远高于了我国将于2016年正式实施的国家标准.第三,颗粒物分布的浓度梯度特征明显.在全北京范围内, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度从北部山区到南部地区逐渐递增,以密云水库处最低,房山琉璃河处最高.中心城区处,西部城区略高于东部城区.第四,颗粒物浓度在局部地区反映了一定的城乡差异,人口较为密集、污染源较多的城镇略高于植被覆盖条件较好、具有一定自净能力的乡村地区.由于冬季颗粒物浓度的区间段划分更细,因此差异体现得更为清晰,例如图2(a)和2(b)中的海淀北部新区和海淀植物园,以及平谷镇和平谷东高村.

2.1.2 区域特征

结合各个区县的分布,可依次将整个北京地区划分为城六区、西南部、东南部、东北部和西北部这5个区域.具体包含区县及各区域颗粒物浓度特征见表1.可以看出,冬春季节各个区域 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度由高到低的顺序均为:西南部>东南

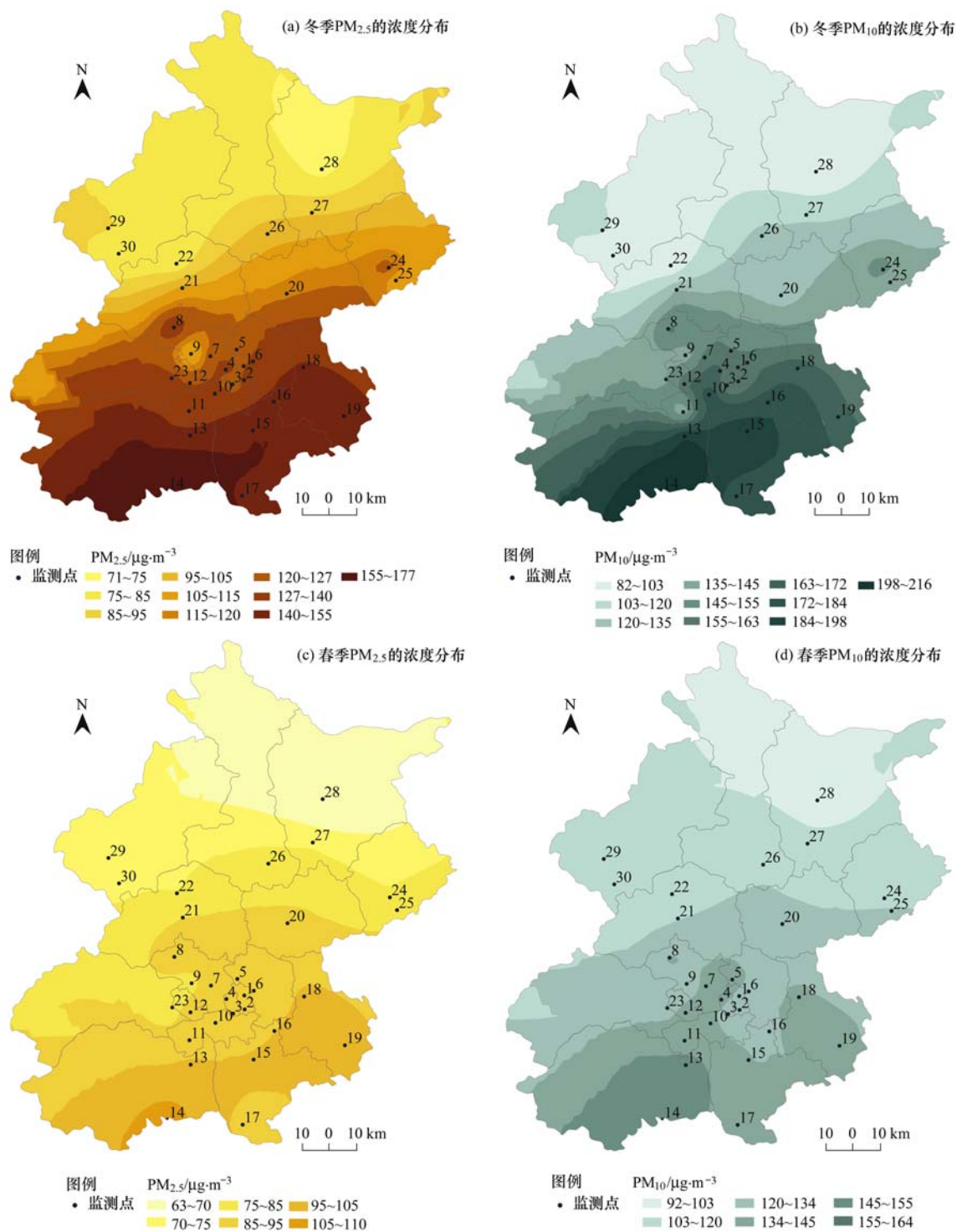


图2 北京PM_{2.5}、PM₁₀的质量浓度差异

Fig. 2 PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentration distribution in Beijing

部>城六区>东北部>西北部。

2.1.3 成因分析

北京地区的颗粒物浓度差异特征主要受北京市的地形特征、气候条件和水域环境等原因所限。从地形上看,北京市位于华北平原西北边缘,西部与北部为山地丘陵,中部与东部为平原,地势自西北向东

南倾斜。山地丘陵自西、北和东北三面环抱北京城所在的小平原。“北京湾”的特殊地形使得北京地区山谷风明显,特别是山丘区地势起伏明显,沿山间河谷等地区容易形成较周围地区风速明显偏大的风口,使得颗粒物能够快速疏散,有助于降低PM_{2.5}及PM₁₀的平均浓度。因此,该种地形条件是造成北京

颗粒物污染南北差异的原因之一。从气候来看,冬季北京地区气候寒冷,干燥少雨,每年从11月下旬到翌年2月几乎完全受来自西伯利亚的干冷气团控制,以北风、西北风为主。大量颗粒物随气流被夹带到了南部区县,加之平原地区风力有所减弱,因此在该地区得到了积累,造成了 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的平均浓度的居高不下。而春季多为东南风为主,对于南北浓度梯度有一定的减弱作用。这是造成北京颗粒

物浓度分布冬春季差异的主要原因之一。冬春季的主要风向可见图3。此外,北京西北部广泛分布着官厅水库(延庆与河北交界处)、白河堡水库(延庆境内)、密云水库(密云境内)、十三陵水库(昌平境内)和怀柔水库(怀柔境内)等水域环境,更有利于调节大气颗粒物等污染状况。由于水域环境的存在,该区域范围内有更温和的气候条件和更好植被覆盖程度,更有助于移除大气中的颗粒物。

表1 各区域颗粒物质量浓度的特征值

Table 1 Eigenvalues of the mass concentration of the particulate matters in each district

区域	包含区县	冬季		春季	
		$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	$PM_{10}/\mu g \cdot m^{-3}$	$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	$PM_{10}/\mu g \cdot m^{-3}$
城六区	东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山	126.30 ± 3.56	156.80 ± 4.13	89.49 ± 1.81	134.42 ± 2.43
西南部	房山、门头沟	160.27 ± 8.11	193.66 ± 10.34	95.71 ± 3.96	146.60 ± 5.04
东南部	大兴、通州	148.74 ± 5.88	176.32 ± 7.19	95.35 ± 3.07	134.56 ± 3.59
西北部	昌平、延庆	87.34 ± 4.36	104.10 ± 5.40	76.47 ± 2.95	106.36 ± 3.44
东北部	顺义、平谷、怀柔、密云	106.20 ± 4.08	131.34 ± 4.73	76.74 ± 2.45	113.17 ± 2.81

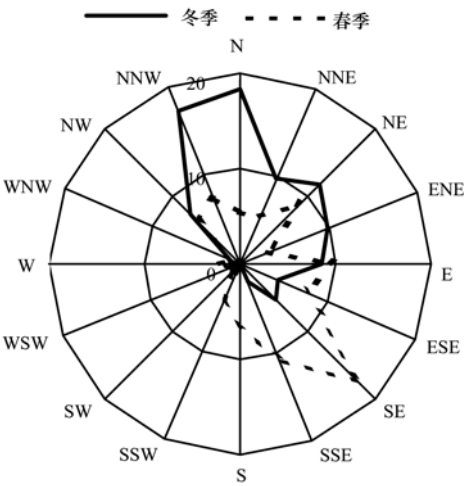


图3 北京市冬春季风向玫瑰图

Fig. 3 Wind direction rose map of Beijing in winter and spring

2.2 冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时间分布特征

2.2.1 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的月变化特征

根据2012年12月~2013年5月北京地区各个区县监测点的 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的月平均浓度数据可得到图4。可以看出,不论是全北京还是局部区域,颗粒物浓度月变化曲线均呈单峰单谷型,且总体趋势基本相同,均在1月最高,4月最低,其中以 $PM_{2.5}$ 浓度变化更为明显。就各个区域来说,西南部和东南部趋势较为接近、西北部和东北部较为接近,而城六区位于市中心接近南、北均值,基本可以代表整个北京的颗粒物月变化水平。

该种月变化形式的产生原因主要有以下3点。

①随着冬季供暖期的开始,燃煤等能源消耗显

著增加,由此产生的人为颗粒物源也随之增加,造成颗粒物排放显著增加,在1月隆冬时节达到最高。此后,随着冬季结束天气转暖,颗粒物浓度逐渐降低,在4月时降到最低。

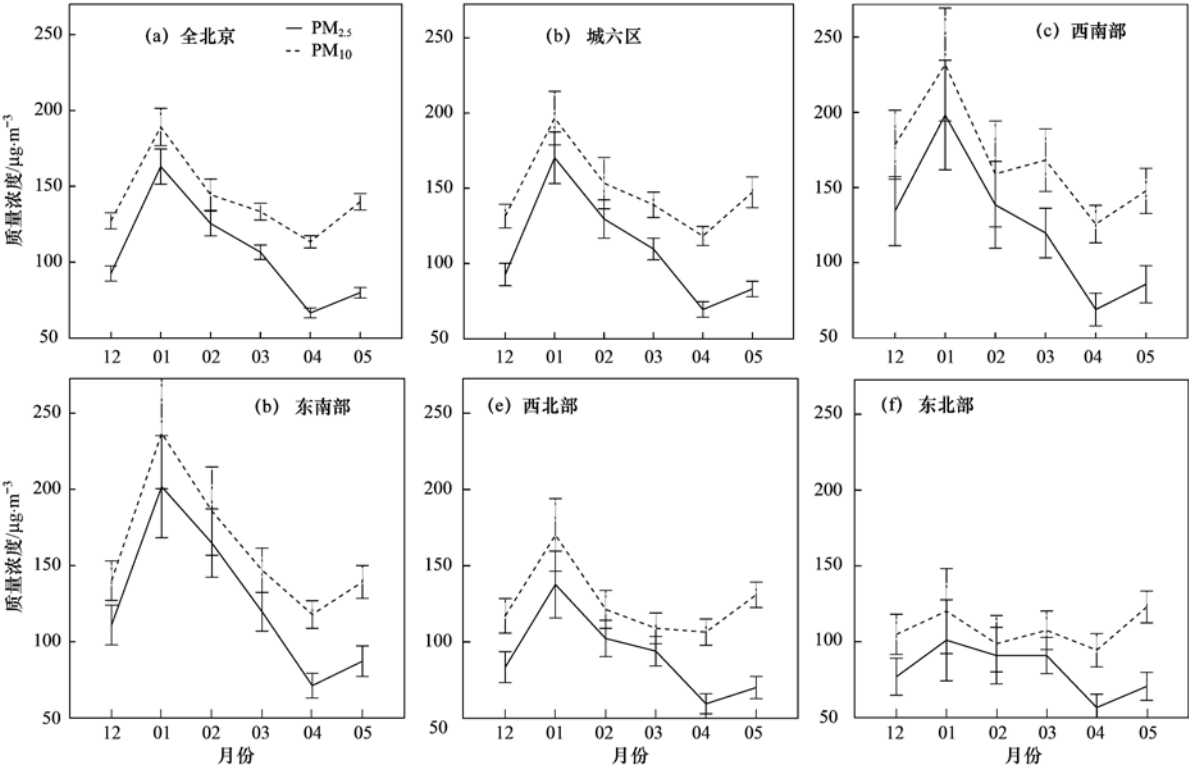
②雾霾天气在北京冬季更易形成,而随入春以来气候条件的改善,雾霾天气次数明显减少,降低了颗粒物滞留的可能性,从而使颗粒物浓度水平降低。

③落叶植被的抽枝发芽,使得叶面积显著增加,湿润且具有一定粗糙度的叶片最利于颗粒物的吸收和滞留,因此也能有助于降低大气中的颗粒物。

2.2.2 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的逐日变化特征

根据2012年12月~2013年5月北京地区各个区县监测点的 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的每日24h平均浓度的监测数据可得到图5。从中可以看出, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度每日变化差异情况,二者有较好的相关性(Spearman秩相关系数为0.867, $P < 0.01$),且日波动范围较大。最小值在 $20 \mu g \cdot m^{-3}$ 以下,最大值则可达到 $400 \mu g \cdot m^{-3}$ 以上,最大值可达最小值的20倍。如此波动巨大的日变化情况主要受该地区大气环境的气象因素影响。较小值一般出现在降水和强风天气过后,而较大值则出现在连续的低压、无风、较高相对湿度的雾霾天气下。这主要是由于颗粒物可以随降水过程通过湿沉降沉降下来,或是在强风作用下迅速扩散。而在无风、高湿的雾霾天气下,颗粒物多附着、溶解或混合于雾气之中,不但得不到有效的扩散和去除,还易与其他污染物发生化学反应,增加二次气溶胶产生的可能性。

2.2.3 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日变化特征



误差线:95% CI,下同

图 4 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的质量浓度月变化情况

Fig. 4 Monthly variation of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration in Beijing

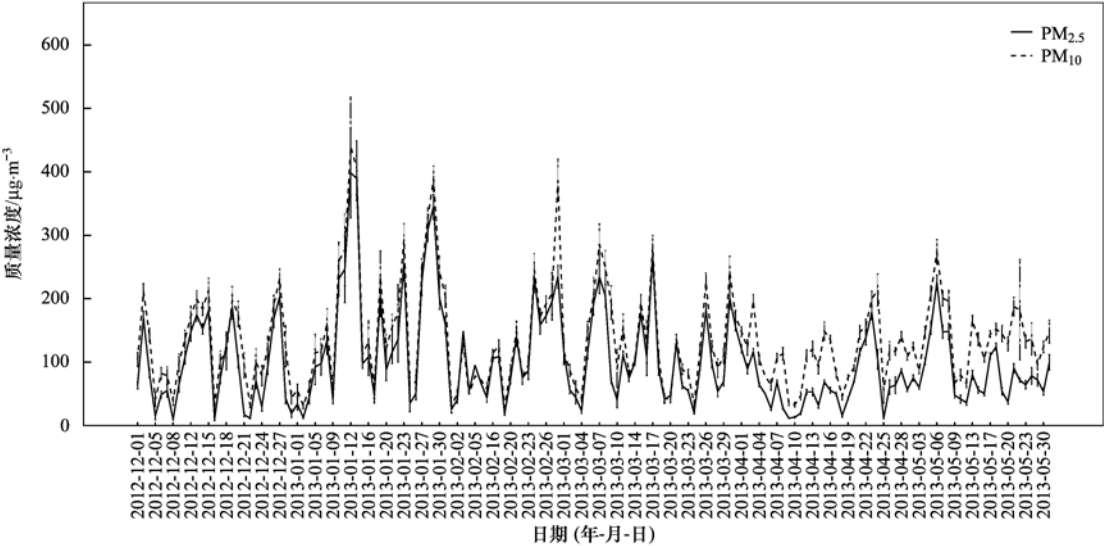


图 5 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度逐日变化情况

Fig. 5 Daily variation of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration in Beijing

根据 2012 年 12 月北京地区各个区县监测点 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 的每天实时浓度的监测数据可得到全北京及各个区域的日变化图. 由于各个区域日变化规律差异不大, 仅以全北京为代表进行分析, 见图 6. 从中可以看出, 从 00:00 ~ 23:00 的每小时 $\text{PM}_{2.5}$

及 PM_{10} 质量浓度随时间的浮动变化. 总体来说, 二者的变化区间段分别在 $70 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 及 $100 \sim 130 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右浮动. 从日变化规律来看, 大体呈双峰趋势. PM_{10} 的质量浓度在清晨 05:00 ~ 07:00 左右最低, 随着太阳逐渐升起, 辐射量增加、空气温

度升高,人们开始外出活动,污染排放开始累积,因此颗粒物浓度也随之升高,并在上午上班高峰后,太阳辐射最强的 10:00~12:00 左右达到一个小高峰. 午后,太阳辐射有所减弱,大气及地面的累积温度继续升高,局部温度差异增大,空气流动性增强,使得颗粒物浓度随之稍稍有所缓解. 然而由于下午人类活动的增加、下班晚高峰的到来以及城市夜生活的各种能源消耗,颗粒物污染再次呈攀升趋势,直至晚 19:00~21:00 达到一天中的峰值. 此后,随着夜晚的到来,PM₁₀ 浓度逐渐降低. PM_{2.5} 质量浓度的日变化与 PM₁₀ 基本相似,但从 00:00 开始变化趋势较为滞后,午间波动较为和缓,且颗粒物高峰时段过后,随时间的降低较 PM₁₀ 更为缓慢,这与其自身不易沉降的特性也有一定关系.

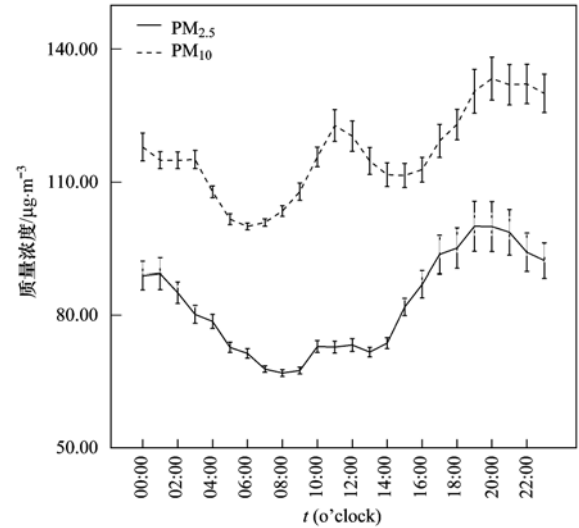


图 6 北京市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的质量浓度日变化情况

Fig. 6 Diurnal variation of PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentration in Beijing

2.3 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度与气象因子的相关性

气象条件对污染物的扩散、稀释和积累作用已得到普遍公认^[19,20],因此,在污染物一定的条件下,气象因子的选择对研究其与污染物质量浓度的关系至关重要. 气温、相对湿度、风速等气象条件对于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的污染程度有着很重要的影响. 而考虑到北京市大气降水主要集中在夏季,冬季降水并不多且不连续,在进行 Spearman 秩相关分析求秩时可能会出现很高的同分率,从而对检验结果产生不利影响. 故在对颗粒物质量浓度与气象因素的 Spearman 秩相关分析时,不考虑降水因素,仅以相对湿度代替.

由表 2 可以看出,PM_{2.5}、PM₁₀ 的实时浓度与对

应的气温、相对湿度显著正相关,而与风速显著负相关. 此外,北京市冬季相对湿度与风速呈显著负相关(Spearman 秩相关系数为 -0.583 , $P < 0.01$). 表明当风速较小时,相对湿度较大,该条件有利于大气近地面层保持稳定状态,逆温强度增大,从而不利于 PM_{2.5}、PM₁₀ 等污染物在垂直和水平方向的扩散,加重了颗粒物的积聚污染,使其质量浓度居高不下. 而且当冬季气温和相对湿度均处于较高水平时,经常会伴有雾产生^[21],北京市冬季大雾出现的频率占全年大雾日的 27.1%^[22]. 在该种气象条件下,悬浮的雾滴不仅极易吸附气态污染物,也易捕获空气中的颗粒物污染物,并有利于二次粒子的转化形成. 由表 2 还可看出,PM₁₀ 与气象因子的相关系数比 PM_{2.5} 与气象因子的较大,说明冬季气象因子对较大颗粒污染物质量浓度的影响比对细颗粒显著. 原因是在冬季相对湿度增大,风速减小和逆温层加厚等不利气象条件时,粗、细粒子都会发生持续累积,质量浓度均升高. 然而,当气象条件转好,利于颗粒物沉降或扩散时,粗粒子比细粒子更易去除,其输送、迁移和沉降的效果均好于细粒子,因此质量浓度降低趋势比细粒子的显著. 因此,PM₁₀ 的质量浓度对相应温、湿度的响应较好.

表 2 冬季颗粒物质量浓度与气象因素的 Spearman 秩相关系数¹⁾

Table 2 Spearman correlation matrix between PM mass concentration and meteorological parameters in winter

项目	气温	相对湿度	风速
PM ₁₀ 实时浓度	0.290 **	0.672 **	-0.423 **
PM _{2.5} 实时浓度	0.269 **	0.656 **	-0.410 **
PM _{2.5} /PM ₁₀	0.174	0.583 **	-0.391 **

1) ** 表示在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的

3 讨论

3.1 插值误差

插值结果受采样点范围、采样点密度、采样点属性取值变化以及各自的参数影响. 采样点的空间位置对空间差值的结果影响很大,理想的情况是在研究区内均匀分布^[23]. 研究显示,当使用不同空间内插方法进行插值时,所得结果在采样点分布密集的区域差异较小,而在采样点分布稀疏的区域则差异较大^[10]. 但不管用哪一种插值方法,均有误差产生. 空间插值不能完全代替观测数据,在有一定数量的观测数据的基础上,插值结果才会更逼近真实值.

本研究所选的 30 个采样监测点在中心城区较为集中,而在近郊区县分布较少. 因此,在对北京外

围区县的颗粒物浓度预测时不可避免地造成了一定的误差. 图 7 是根据北京地区春季 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度进行普通克里格插值过程所产生的标准误差预测图, 可以反映在整个研究区内插值结果的可靠性. 可以看出, 中心城区由于监测点较多, 预测标准误差较小, 而监测点较少的北京周边地区, 预测标准误差较大. 在房山区西南边缘处达到最大值 $11.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 导致该区域标准误差较大的原因主要有: 首先, 区县内监测点数量仅有两个, 且均位于房山区东部, 而房山区所占面积较大, 因此对该区县西部的预测存在较大的误差; 其次, 该地区位于北京西南处, 整体污染水平较高, 不同气象条件下颗粒物浓度差异较大, 数据变化性和离散程度较高, 造成样本统计量不能很好地体现总体统计量; 最后, 该区域监测点的数据具有一定的缺失值, 可能对本区域的标准误差具有一定影响.

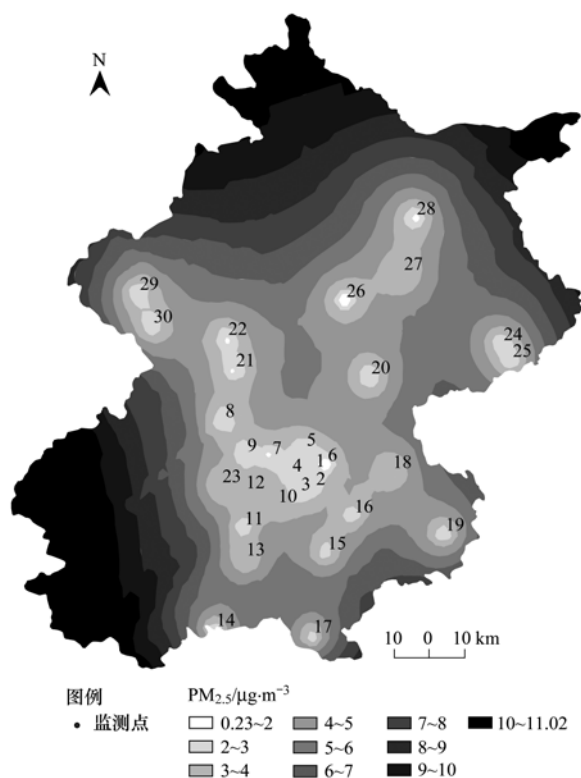


图 7 北京市春季 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度进行克里格插值产生的标准误差预测图

Fig. 7 Prediction standard error map of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in spring in Beijing

3.2 相关研究对比

相较于我国其他发达地区, 北京市的颗粒物污染程度也较为严重. 北京 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的冬春平均质量浓度分别为 $102.95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $136.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 且二者存在较好的相关性, Spearman 秩相关系数为

0.867 , $P < 0.01$. 二者的比值范围为 $0.31 \sim 0.96$, 均值为 0.72 . $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 组成中的绝大部分, 起到主导作用, 这与其他城市、地区相关研究报道相似. 上海区县和临安本底站 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度分别为 $(131.6 \pm 65.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(83.5 \pm 22.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [24]. 广州冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值浓度为 $69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 霾日期间 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值浓度为 $72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [25]. 台湾高雄的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日均质量浓度分别为 $(68 \pm 24) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(111 \pm 38) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 二者之比为 0.62 ± 0.1 [26]. 香港的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日均质量浓度分别为 $(31.12 \pm 7.31) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(49.71 \pm 12.28) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 二者之比为 0.63 [27]. $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比重越高, 危害越严重. 因此, 可以通过调控 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度来降低 PM_{10} 的质量浓度. 虽然北京区县 $\text{PM}_{2.5}$ 已经成为 PM_{10} 的主要组成部分, 但是粗粒子 ($\text{PM}_{2.5 \sim 10}$) 在 PM_{10} 中仍占相当的份额. Zhang 等 [28] 通过北京大气中的钙离子分析, 发现粗粒子中钙离子的主要来源是建筑尘. 北京近期的大规模地铁、工程建设可能是产生粗粒子的重要原因, 同时也可以说明目前仍然可以通过控制粗粒子的浓度来降低 PM_{10} 的浓度. 因此, 对于减轻北京市颗粒物污染的问题需要做到粗、细粒子双管齐下, 预防和治理结合, 制定行之有效的调控措施.

以往研究亦可表明, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度会呈现季节性变化, 且供暖期与非供暖期之间也存在着显著的差异 [29]. 一般来说, 北京冬季供暖期 SO_2 污染较为严重, $\text{PM}_{2.5}$ 的平均质量浓度冬季最高, 晚春、夏天和早秋则最低 [30]. Shi 等 [31] 研究发现, 北京区县夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均质量浓度为 $(46 \pm 28) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 的平均质量浓度为 $(68 \pm 33) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 二者的比为 0.68 . 其浓度均值几乎是冬季的一半, 主要由于夏季大气环境不稳定, 雨水丰沛, 植被覆盖程度高, 利于颗粒物扩散或沉降. 而受冬季供暖, 春季风沙等污染源因素的影响, 冬春季节下颗粒物浓度普遍偏高.

3.3 气象因子的影响

有研究表明, 冬季近地层大气环境较稳定, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度与气象因子的相关性在四季中最高 [15]. 较高的相对湿度利于大气颗粒物在水汽上附着, 使得颗粒物质量浓度增加. 湿度大的天气多存在逆温现象, 使空气中的颗粒物不易扩散, 容易形成雾罩, 而雾罩会更加抑制颗粒物扩散. 风

是利于颗粒物疏散的良好条件,通过对数据的描述性统计分析,也能明显地发现当风速持续低于2级时,颗粒物得不到良好的扩散与稀释,便会持续积累攀升,直到出现大风或降水天气时才有所扭转。而风速达到3~4级以上,并持续几小时时,该天的颗粒物浓度便会显著降低。降水也能有效地降低空气中的颗粒物浓度,但过程较为缓慢。冬季降雪并不能迅速地降低空气中颗粒物的含量,相反由于大气湿度的增加,降雪中颗粒物浓度并无降低趋势。然而当降雪过程结束,天气回复晴朗后,颗粒物浓度才比降雪之前有显著的降低。因此,通常是降雪的次日,空气质量才有所提高,可见冬季降雪对于降低大气中颗粒物质量浓度具有一定的滞后性。

此外,气压、总辐射量、总云量、日照时数和能见度与 $PM_{2.5}$ 质量浓度之间也存在着一定的相关性。气压的高低与大气环流形势密切相关。当地面受低压控制时,四周高压气流流向中心,使中心形成上升气流,形成加大风力,利于污染物向上疏散,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^[32]。郭利等^[33]研究发现,颗粒物质量浓度和气压呈显著负相关,北京2007年11月的 PM_{10} 质量浓度与气压的Spearman相关系数为 -0.416 , $P < 0.01$ 。邓利群等^[34]也有类似研究结果, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度与气压的相关系数分别为 -0.25 和 -0.31 。李凯等^[29]发现, $PM_{2.5}$ 的质量浓度与总辐射量呈显著的负相关,与总云量呈较好的正相关,原因与温度、相对湿度类似。宋宇等^[5]发现,能见度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈现较好的负相关,而与 PM_{10} 质量浓度的相关性较差一些,原因主要在于不同粒径的颗粒物化学组分不同,因此对于大气消光作用也存在很大差别。因此细粒子质量浓度的高低是决定能见度好坏的主要因子。

4 结论

(1)空间特征。北京颗粒物浓度的空间分布具有一定的梯度特征,且冬季比春季更为明显。在全北京范围内, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度从北部山区到南部地区逐渐递增。局部地区颗粒物浓度存在一定的城乡差异,人口较为密集、污染源较多的城镇略高于植被覆盖条件较好、具有一定自净能力的乡村地区。区域 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分布差异体现为:西南部>东南部>城六区>东北部>西北部。

(2)时间特征。不论是全北京还是局部区域,颗

颗粒物浓度的月变化曲线均呈单峰单谷型,且总体趋势基本相同,均在1月最高,4月最低。就各个区域来说,西南部和东南部趋势接近、西北部和东北部较为接近,而城六区基本可以代表整个北京的颗粒物月变化水平。逐日变化反映了 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度具有较好的相关性,且波动随天气变化波动明显。从日变化规律来看, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度波动均呈双峰趋势。 PM_{10} 的质量浓度在05:00~07:00左右最低,10:00~12:00左右达到一个小高峰,午后稍有降低,并在19:00~21:00达到一天中的峰值。 $PM_{2.5}$ 质量浓度的日变化与 PM_{10} 基本相似,但多数时段下变化趋势稍有滞后。

(3)与气象因子的关系。北京冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度分别与气温、相对湿度正相关、与风速负相关。其中,与相对湿度和风速的相关程度较高,而与温度的相关程度较低,即颗粒物受相对湿度和风速影响更大,而对温度的响应较低。且 PM_{10} 与气象因子的相关系数比 $PM_{2.5}$ 的大,因此冬季气象因子对较大颗粒污染物质量浓度的影响比对细颗粒显著。

参考文献:

- [1] 袁杨森,刘大猛,车瑞俊,等.北京市秋季大气颗粒物的污染特征研究[J].生态环境,2007,16(1):18-25.
- [2] 于淑秋,徐祥德,林学椿.北京市区大气污染的时空特征[J].应用气象学报,2002,13(s1):92-99.
- [3] Pope C A, Burnett R T, Thun M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. Journal of the American Medical Association, 2002, 287(9): 1132-1141.
- [4] Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems Brisbane (Australia) using multiple linear regression techniques[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(19): 3237-3250.
- [5] 宋宇,唐孝炎,方晨,等.北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J].环境科学学报,2003,23(4):468-471.
- [6] 尚倩,李子华,杨军,等.南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J].环境科学,2011,32(9):2750-2760.
- [7] 李令军,王英,李金香.北京清洁区大气颗粒物污染特征及长期变化趋势[J].环境科学,2011,32(2):319-323.
- [8] 贺克斌,贾英韬,马永亮,等.北京大气颗粒物污染的区域性本质[J].环境科学学报,2009,29(3):482-487.
- [9] 蒲维维,赵秀娟,张小玲.北京地区夏末秋初气象要素对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J].应用气象学报,2011,22(6):716-723.
- [10] 赵文慧,宫辉力,赵文吉,等.基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J].环境科学学报,2010,30(11):2154-2163.

- [11] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(32): 3976-3984.
- [12] Pateraki S, Asimakopoulos D N, Flocas H A, *et al.* The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$) [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **419**(1): 124-135.
- [13] 晏星, 马小龙, 赵文慧. 基于不同插值方法的 PM_{10} 污染物浓度研究[J]. *测绘*, 2010, **33**(4): 172-175.
- [14] 洪钟祥, 胡非. 大气污染预测的理论和方法研究进展[J]. *气候与环境*, 1999, **4**(3): 226-230.
- [15] 王淑英, 张小玲. 北京地区 PM_{10} 污染的气象特征[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(S1): 177-184.
- [16] 周江兴. 北京市几种主要污染物浓度与气象要素的相关分析[J]. *应用气象学报*, 2005, **16**(S1): 123-127.
- [17] 李军, 孙春宝, 刘咸德, 等. 气象因素对北京市大气颗粒物浓度影响的非参数分析[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(6): 663-669.
- [18] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. (第二版). 北京: 电子工业出版社, 2009. 172.
- [19] 刘大锰, 黄杰, 高少鹏, 等. 北京市区春季交通源大气颗粒物污染水平及其影响因素[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(2): 228-233.
- [20] 刘大锰, 马永胜, 高少鹏, 等. 北京市区春季燃烧源大气颗粒物的污染水平和影响因素[J]. *现代地质*, 2005, **19**(4): 627-633.
- [21] 李金香, 邱启鸿, 辛连忠, 等. 北京秋冬季空气严重污染的特征及成因分析[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(2): 89-93.
- [22] 孟燕军, 王淑英, 赵习方. 北京地区大雾日大气污染状况及气象条件分析[J]. *气象*, 2000, **26**(3): 40-43.
- [23] 邬伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 197.
- [24] 姚振坤, 冯满, 吕森林, 等. 上海区县和临安本底站 $PM_{2.5}$ 的物化特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(3): 289-295.
- [25] 梁明易, 董林, 陶俊. 广州冬季霾天气大气 $PM_{2.5}$ 污染特征分析[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(5): 52-54, 70.
- [26] Lin J J. Characterization of water-soluble ion species in urban ambient particles[J]. *Environment International*, 2002, **28**(1-2): 55-61.
- [27] Zhuang H, Chan C K, Fang M, *et al.* Size distributions of particulate sulfate, nitrate and ammonium at a coastal site in Hong Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(6): 834-853.
- [28] Zhang D Z, Iwasaka Y. Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particles in Beijing, China in Spring of 1995 and 1996 [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(19): 3213-3223.
- [29] 李凯, 张承中, 周变红. 西安市采暖期 $PM_{2.5}$ 污染状况及其与气象因子的相关分析[J]. *安徽农业科学*, 2009, **37**(20): 9603-9605.
- [30] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [31] Shi Z B, Shao L Y, Jones T P, *et al.* Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air site in Beijing, 2001 [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(29): 4097-4108.
- [32] 慕彩芸, 屠月青, 冯瑶. 气象因子对哈密市大气可吸入颗粒物浓度的影响分析[J]. *气象与环境科学*, 2011, **34**(S1): 75-79.
- [33] 郭利, 张艳昆, 刘树华, 等. 北京地区 PM_{10} 质量浓度与边界层气象要素相关性分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, **47**(4): 607-612.
- [34] 邓利群, 钱骏, 廖瑞雪, 等. 2009 年 8~9 月成都市颗粒物污染及其与气象条件的关系[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(8): 1433-1438.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行