ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第2期
2014年2月15日

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 $PM_{5.0}$ 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,张泽锋,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,姜琳娴(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,刘凤娴,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 …… 青宪,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,王知溥,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,邰俊,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,叶杞宏,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)
翻堆频率对猪粪条垛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,郑嘉熹,韩圣慧,万合锋(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)
浙闽沿岸海域总溶解态无机锑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)
太滆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,刘国锋(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,王志伟,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,藏婷婷,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, 潘佳钏 (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,钟太洋,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,李奇锋,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)
Pseudomonas 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)
$n(NO_3^-\text{-N})/n(NO_2^-\text{-N})$ 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羰基硫排放动态研究 …… 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青(786)
农田土壤 N_2O 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)

北京市 $PM_{5.0}$ 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析

王艳慧[1,2,3], 肖瑶[1,2,3]

(1. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048; 2. 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048; 3. 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048)

摘要: 分析城市可吸入颗粒物的空间特征及影响因素对于制定更为有效的可吸入颗粒物污染控制政策具有重要的现实意义. 本研究在实际采样和遥感数据处理基础上, 构造差值植被指数(DVI), 通过建立 TM 影像与对应 $PM_{5.0}$ 颗粒物实测值之间的相关关系模型, 对北京市 2008~2010 年 3 a 的 $PM_{5.0}$ 的分布进行了反演计算和精度分析; 研究了 NDBI 和 NDMI 对 $PM_{5.0}$ 浓度的影响, 进一步揭示了北京五环区域范围内可吸入颗粒物的时空分布特征. 结果表明, 采用 DVI 反演 $PM_{5.0}$ 分布的方法可行, 反演精度在可接受范围内; 整体上研究区 2008 年 $PM_{5.0}$ 颗粒物污染最轻, 西南三环和四环以及东南三四环之间为颗粒物污染的高值区, 西北五环附近颗粒物污染较轻; NDBI(归一化建筑指数)、NDMI(归一化水汽指数)与 $PM_{5.0}$ 可吸入颗粒物的分布分别呈现显著的负相关和正相关关系, 且二者对 $PM_{5.0}$ 的影响相近.

关键词: $PM_{5.0}$; 可吸入颗粒物; 遥感反演; 差值植被指数; 时空分布; 关联分析

中图分类号: X87 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)02-0428-08

Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on $PM_{5.0}$ Inhalable Particulate in Beijing

WANG Yan-hui[1,2,3], XIAO Yao[1,2,3]

(1. Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Key Laboratory of Resource Environment and Geographic Information System, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Study on urban spatial characteristics of inhalable particulate and its influencing factors has an important practical significance for the development of more effective inhalable particulate pollution control policy. On the basis of the actual sampling and remote sensing data processing, a correlation model was established between the difference vegetation index (DVI) values of TM images and the measured values of the corresponding $PM_{5.0}$ particulate matter, and $PM_{5.0}$ distributions from 2008 to 2010 in Beijing were acquired by the use of inversion experiments and their accuracies were tested. Furthermore, the impact of NDBI and NDMI on $PM_{5.0}$ was explored, as well as the spatial and temporal characteristics of inhalable particulate within the five rings of Beijing. The results showed that: ① the $PM_{5.0}$ inversion method using DVI was feasible, and the inversion accuracy was acceptable; ②Overall, in 2008, $PM_{5.0}$ particulate matter pollution was the lightest in the study area. The higher values of particle pollution were distributed between the southwest third ring road and southwest fourth ring road, as well as between the southeast third ring road and southeast fourth ring road, and the lower values of particle pollution were distributed around the northwest fifth ring road; ③NDBI and NDMI had equal significant impact on inhalable particulate, which respectively showed significant negative correlation and positive correlation.

Key words: $PM_{5.0}$; inhalable particulate; remote sensing inversion; difference vegetation index (DVI); spatial-temporal distribution; correlation analysis

随着城市经济的迅速发展, 环境问题也日益突出, 甚至威胁到人类的健康[1~3]. 可吸入颗粒物已经成为我国大中城市包括北京市大气环境的首要污染物之一[2~11]. 分析其空间分布特征及影响因素, 对于制定更为有效的可吸入颗粒物污染控制政策具有重要的现实意义[11~13]. 仅采用有限的地面观测站点资料尚不能全面反映可吸入颗粒物的空间分布, 因此近年来很多专家学者采用 3S 空间信息技术进行可吸入颗粒物监测的研究以弥补地面观测的这一局限性[10~21]. 如针对首都北京这一研究区, 侯芳等[8]、赵文慧等[22]利用 GIS 地统计插值技术研究了北京地区可吸入颗粒物的时空分布, 另有很多学者开展了利用遥感影像提取污染物并分析其时空分布格局及机制的研究[11~29]. 而相关研究成果表

收稿日期: 2013-06-20; **修订日期**: 2013-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371375); 北京市自然科学基金项目(8132018); "十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAH33B03, 2012BAH33B05)

作者简介: 王艳慧(1977~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为地理信息系统和遥感应用, E-mail: huiwangyan@sohu.com

明[10~20]：根据遥感影像上提取出来的差值植被指数等一些参数，与不同粒径可吸入颗粒物的分布之间具有一定的相关性，从而构建拟合方程来剖析大尺度范围可吸入颗粒物的分布情况. 且学者们针对北京地区研究区的研究已经证实：细粒径（$PM_{0.3}$、$PM_{0.5}$和 $PM_{1.0}$）与粗粒径（$PM_{3.0}$、$PM_{5.0}$、PM_{10}）的颗粒物浓度数量级上相差较大，空间分布特点和分布趋势也各有差异，且下垫面介质、人口密度、气象因子（温度、风速、相对湿度等）等对不同粒径颗粒物浓度的影响也不尽相同[2,8,10,25~28]，因此有必要针对不同粒径区别研究. 但目前针对不同粒径序列可吸入颗粒物分布演变的研究大都围绕 PM_{10}和 $PM_{2.5}$展开，很少有针对 $PM_{5.0}$等中等粗颗粒物分布的专门详细论述；且有研究表明粒径为 0.5、1.0 和 3.0 μm 的可吸入颗粒物均与 5.0 μm 粒径的可吸入颗粒物有较强的相关性；建筑用地中 $PM_{5.0}$的浓度要显著高于其他下垫面，而汽车尾气排放所带来的颗粒物污染主要集中在细粒径颗粒物上[25~28]. 但这些研究对 $PM_{5.0}$分布机制仅停留在偏宏观分析层面，并没有进一步围绕此展开更详细论述. 而在各地城市化进程不断推进的过程中，建筑用地逐渐增多，其颗粒物浓度势必会对整个区域产生越来越大的影响.

因此，本研究以比较典型的 $PM_{5.0}$粗颗粒物作为对象，对其分布特征展开详细论证，在实际采样和遥感数据处理基础上，选取 DVI 差值植被指数这一参数构建 TM 遥感影像与可吸入颗粒物的相关分析模型进行 2008 ~2010 年的 $PM_{5.0}$可吸入颗粒物的反演与计算，剖析 NDBI、NDMI 对可吸入颗粒物分布的影响，并进一步地分析了北京五环区域范围内可吸入颗粒物的时空分布格局.

1　材料与方法

采样点的布设范围在五环内，以天安门为中心，然后沿着环线分散布点，并考虑涵盖不同的下垫面类型，从而使得所得数据更具有科学研究性. 采样点布置在北京市主城区内不同的下垫面上，空间分布遵循广泛性、均匀性、规律性的原则. 广泛性指监测点的分布涵盖北京五环周边及其以内范围的各种下垫面类型，主要包括建筑工地、生活小区、公园、商业区和道路等在内的主要土地覆盖类型. 均匀性指监测点的布置以北京市的环路为参考，分别围绕二环、三环、四环及五环分布采样点，规律性则是指监测点的分布由东向西，由南向北成空间规律性分别[30]. 2008 ~2010 年每年的采样点地理位置都比较固定，总共可达 60 ~70 个，根据每年采样时所遇到的具体实际情况进行 3 ~5 个左右的取舍，采样点分布情况如图 1 所示.

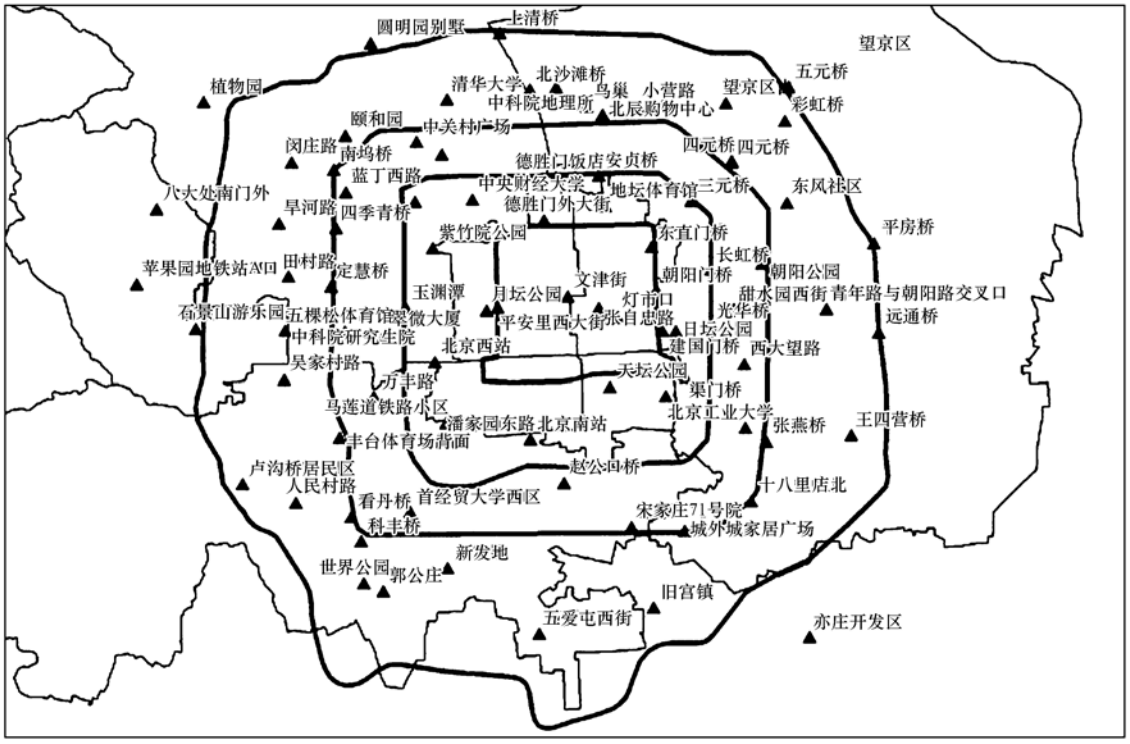

图 1　采样点分布示意

Fig. 1　Illustration of sampling points distribution

采样时间主要为2008 ~2010 年的夏季,采样时段为08:00 ~ 18:00,为保证数据的可比性,每年采样点顺序及采样时间均保证一致(偶然堵车除外). 具体如表1.

表1 具体采样时间段

Table 1 Specific sampling time

可吸入颗粒物采样时段	遥感数据获取时间
2008-06-01 ~2008-06-07	2008-06-10
2009-05-17 ~2009-05-22	2009-05-17
2010-06-01 ~2010-06-08	2010-06-05

由于研究区较大,采样点较多,在卫星过境当天同步采集所有的可吸入颗粒物数据很难,因此,选取靠近遥感数据获取日期的,且天气条件较为近似的时间所采集的数据进行实验分析. 2008 年6 月10 日、2009 年5 月17 日和2010 年6 日5 号天气状况均晴好,无异常气象状况出现,因此准同步采样数据与卫星过境时的采样数据不会有太大的偏差.

本研究采用美国加野麦克斯 KANOMAX 手持激光粒子计数器(3886GEOX)和 Trimble GPS 手持机仪器对空气中的颗粒物进行了颗粒物采样观测,可分别获取不同粒径(0.3、0.5、1.0、3.0、5.0 μm)粒子数、采样点气象因子(温度、湿度和风速)及采样点的点位坐标. 前者内置流量传感器保证粒子计数的高精度,一致性损失为:当每立方英尺2 000 000个粒子时小于5%,使用前通过了报错测试.

对于野外所采集获取的颗粒物污染浓度数据,通过仪器所带数据线及其自带软件,可以将其输出成为 Excel 格式的数据,然后将通过 GPS 手持机所获取的经纬度数据在 ArcGIS 环境下,利用 Add data 将其落点成图后,利用 ArcGIS 中提供的 Joins and Relates 功能,将所测取的可吸入颗粒物的污染数据和点图层进行关联,即可得到北京市五环范围内的可吸入颗粒物污染分布图. 但由于这些数据的采样点是有限的,只能反映特定监测点的特定地理位置的部分区域的污染情况,无法顾及研究范围的每个空间和角落,因此对于空间连续的面积较大的地区无法直观和真实的反映其可吸入颗粒物的分布特征.

因此本研究在以上准同步实测采样数据的支持下,利用 LandsatTM 影像的第3、4 波段构造 DVI 指数,构建相关分析模型,对2008 ~2010 年的 $PM_{5.0}$ 的分布进行反演实验,揭示其时空分布格局;在此基础上,定量研究 NDBI 和 NDMI 对粒径为5.0 的可吸入颗粒物的浓度的影响.

2 可吸入颗粒物 $PM_{5.0}$ 的遥感反演

研究表明城市大气中的可吸入颗粒物由于其粒子半径、密度相对较小,在可见光和近红外波段,它对太阳辐射的吸收和散射可以忽略不计,但对大气透过率有一定的影响[19]. 当大气中的可吸入颗粒物增加时,卫星可见光和近红外通道的大气透过率会下降,而近红外通道比可见光通道下降得更快. 因此,本研究根据颗粒污染物对可见光和近红外通道大气透过率下降的影响差异,利用 TM 影像可见光与近红外波段的双通道组合技术,构造差值植被指数(DVI),并通过建立其与污染实测值之间的相关关系来达到卫星污染测值的反演和计算. 由于这两个波段在植被的光谱响应上有很明显的差别,绿色植物对可见光的红波段吸收较强,但对近红外波段反射较强,因此该差值植被指数不仅可以用来反映地表的植被覆盖情况,突出颗粒物污染的光谱信息,还可部分消除太阳高度角、卫星扫描角以及大气层辐射的影响. 已有研究验证了 DVI 与地面 PM_{10} 污染指数存在明显的线性相关关系[10,19],因此,本研究借鉴现有利用颗粒物反演方法,设计并实现基于 DVI 的 $PM_{5.0}$ 定量反演,并检验其可行性.

2.1 差值植被指数

差值植被指数(DVI)是由近红外波段和可见光波段的差构造出来的一个植被指数[20],可通过两个波段的灰度值(DN 值)之差获得,也可以是两个波段的反射率(ρ)之差. 即:

$$DVI = DN_{NIR} - DN_R \text{ 或 } DVI = \rho_{NIR} - \rho_R$$

在 Landsat TM 影像中,近红外波段为第四波段,可见光红波段为第三波段. 此计算可通过很多遥感软件实现,本研究通过 ENVI 中的波段计算(Band Math)获取. 结果如图2 ~4.

根据采样点的地理坐标位置,在 DVI 计算结果图上提取采样点位置的 DVI 值,其中为了减少采样时的定位误差对结果带来的影响,文中计算采样点周围3 ×3 像元 DVI 的平均值作为采样点的 DVI.

2.2 $PM_{5.0}$ 反演

以2008 ~2010 年夏季期间,覆盖北京五环的采样点为研究数据,利用 SPSS 软件,借鉴相关研究中采用的 GIS 地统计和数理统计分析方法[3,4,10,19 ~23],对准同步 $PM_{5.0}$ 的实际监测数据与 DVI 数据进行相关关系分析,建立线性相关模型,最后反演出北京市五环的 $PM_{5.0}$ 浓度分布图. 在建立相关模型时,剔除部分相关性较差的数据,减小方差,最后保留35 个

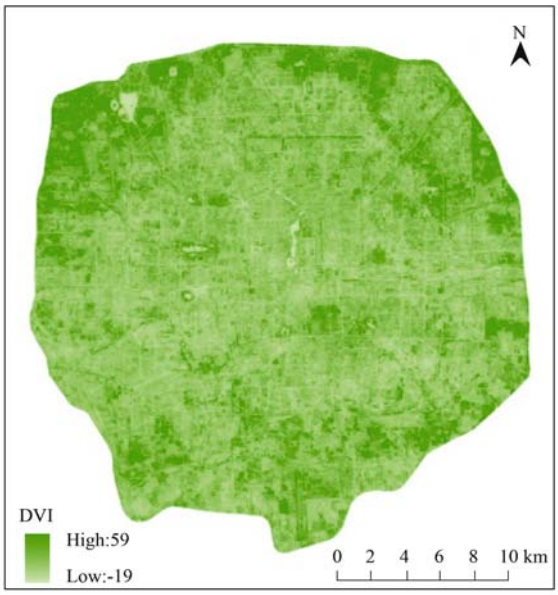

图 2　2008 年 DVI 提取结果

Fig. 2　DVI extraction result in 2008

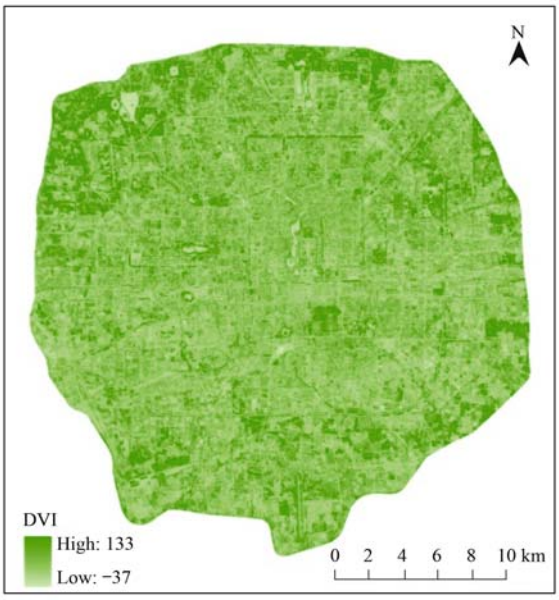

图 3　2009 年 DVI 提取结果

Fig. 3　DVI extraction result in 2009

采样点的实测数据用于建立相关关系模型，然后另外随机选取 5 个采样点实测数据进行结果的精度验证. 建立 2008 ~ 2010 年的 DVI 和 $PM_{5.0}$ 相关方程依次为：

$$y = -0.616x + 72.962,\ R^2 = 0.583 \quad (1)$$

$$y = -1.857x + 253.799,\ R^2 = 0.665 \quad (2)$$

$$y = -0.874x + 117.515,\ R^2 = 0.673 \quad (3)$$

式中，y 为 $PM_{5.0}$ 浓度，单位为 10^3 粒·m^{-3}，x 为 DVI.

其中，为了去除水体的影响，研究中采用

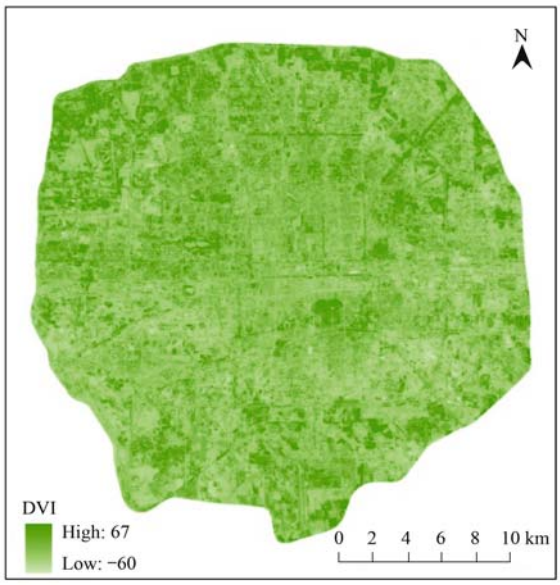

图 4　2010 年 DVI 提取结果

Fig. 4　DVI extraction result in 2010

MNDWI 指数(修正归一化水体指数)[24,25]，并进行相应的阈值设定提取五环内的水体部分，而后进行掩膜处理.

依据建立的相关方程，在 ERDAS 软件中的 Spatial Modeler 空间建模工具模块下，建立相应的反演模型，最终即可获得北京五环的 $PM_{5.0}$ 空间分布图. 其反演结果如图 5 ~ 7 所示.

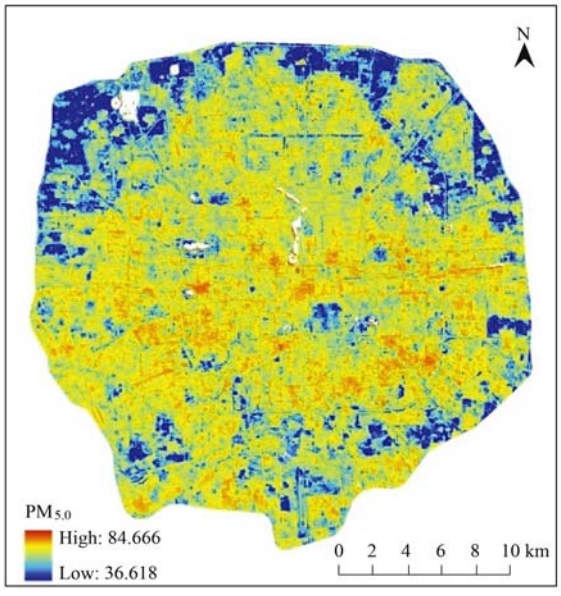

图 5　2008 年 $PM_{5.0}$ 反演结果

Fig. 5　$PM_{5.0}$ inversion result in 2008

2.3　反演结果精度验证

为了检验反演结果的精度，以实测的 $PM_{5.0}$ 数据为标准，与反演的结果进行比对，计算反演结果的误

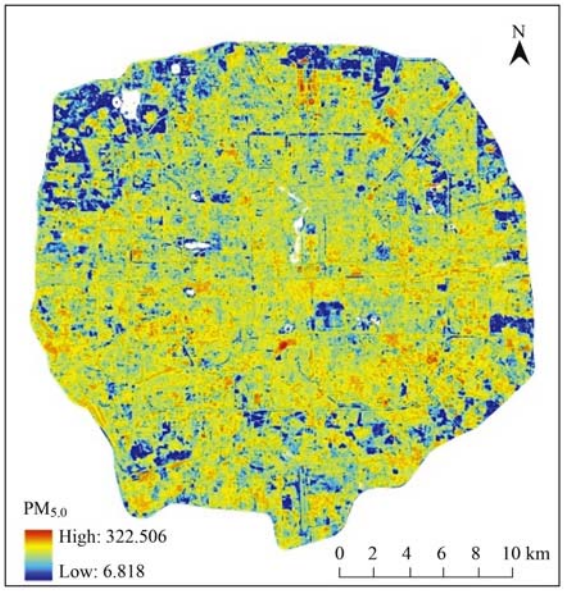

图 6 2009 年 $PM_{5.0}$ 反演结果

Fig. 6 $PM_{5.0}$ inversion result in 2009

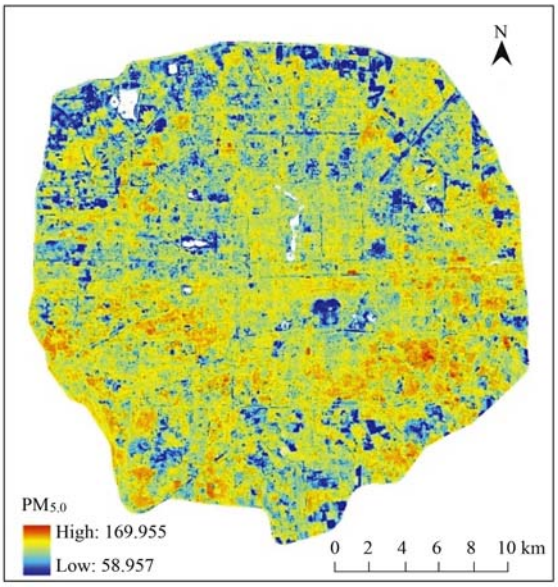

图 7 2010 年 $PM_{5.0}$ 反演结果

Fig. 7 $PM_{5.0}$ inversion result in 2010

差. 即用式(4)进行验证比较:

$$i = | PM_{5.0} - PM_{实测} | / PM_{实测} \times 100\% \quad (4)$$

式中,$PM_{5.0}$为反演结果,$PM_{实测}$为实际所测得的浓度数据,i 为精度验证的结果,无量纲. 检验结果如表 2.

表 2 $PM_{5.0}$ 反演结果精度验证/%

Table 2 Accuracy verification of the $PM_{5.0}$ inversion results/%

年份	最大误差	最小误差	平均误差
2008	71.562	0.794	15.028
2009	56.321	1.327	11.753
2010	59.968	0.523	7.336

检验发现,粒径为 5.0 的可吸入颗粒物的反演误差总体不大,但存在个别误差较大的点,这可能是由于采集时间和影像获取时间的不同步以及当天的气象条件或者部分人为因素可能造成的污染物浓度异常,但不影响总体的反演精度,且误差值是在可接受的范围内的.

3 $PM_{5.0}$ 时空分布特征分析

由以上的反演结果,可看出 2008 ~ 2010 年的可吸入颗粒物污染分布状况基本一致,其中 2008 年的质量状况最好,这是由于政府在迎接北京奥运之前采取了众多的改善空气质量的措施,且执行力比较强,因此效果明显. 但在 2008 年过后,污染又变得较为严重,这也侧面验证和补充了孙志强等[26]的研究结论.

在北京的西南三环和四环以及东南三四环之间为颗粒物污染较为严重的区域,这些地区高楼密集,也是人口集中地和重要的商业区. 如在距离西三环很近的北京西站,在 2008 年 8 月 1 日北京南站投入使用之前是原亚洲规模最大的现代化铁路客运站,且截至 2009 年,仍是全国日客流量最大的火车站. 随着铁路运输的不断发展,北京西站成为了北京向全国甚至全世界传递信息的重要窗口,是中国规模最大的人口集散地和交通枢纽,据资料显示,北京西站最高客运能力可达每日 90 对列车、60 万人次,可见其承载和运输能力之强大. 而这也直接影响了北京西站附近的生态环境,人口集中、高楼和厂房密集,车流量大以及商业区的遍布,导致了此区域成为了颗粒物污染的高值区.

北京的西北五环附近则为颗粒物污染的低值区,这些地区为植被覆盖集中的区域,西五环附近的香山、植物园,以及西五环内的圆明园和颐和园等均为以绿地和水体等景观为主的自然观赏区,主要供公众的休息游玩的公共区域,具有改善城市生态、防火、避难等作用,且环境幽深还有清凉避暑的作用. 在北五环内有奥林匹克森林公园,北五环外还有一些休闲度假中心,如有大面积的高尔夫球场,植物的枝条和叶片表面积较大,且叶片表面有角质和茸毛等结构,分泌油脂和黏性物质,因此对尘埃、污染物等有较强的吸附作用,此外还能降低风速,使大粒灰尘等降落地面,这在一定程度上使得空气得到了净化.

4 $PM_{5.0}$ 关联因素分析

NDMI(归一化水汽指数)的值与植被结构、覆

盖情况、植被冠层水分含量高度相关，土地覆盖类型直接影响颗粒物的浓度[27~30]；另外，唐明[31]和肖瑶[32]研究发现建筑用地对可吸入颗粒物的影响比绿地明显. 因此，本研究将 NDMI、NDBI（归一化建筑指数）作为影响 $PM_{5.0}$ 浓度的相关影响因素，考虑以 NDMI、NDBI 为自变量，进行线性回归分析，研究其与粒径为 5.0 μm 的颗粒物之间的关系.

4.1　$PM_{5.0}$ 和 NDMI 关系分析

为了进一步详细直观地揭示 $PM_{5.0}$ 和 NDMI 之间的关系，在 ArcGIS 环境下，进行叠置分析，创建 20×20 的 Fishnet 渔网（实际有效点为 312 个），然后利用空间分析工具 Spatial Analyst Tools 中的 Extract Values to Points 提取对应点位的地表温度值和 NDMI 值，进而对整个研究区的地表温度和 NDMI 进行线性回归分析，研究二者的相关性. $PM_{5.0}$ 和 NDMI 散点分布图如图 8 ~ 10 所示.

由表 3 中的 Pearson 相关系数可知，NDMI 和

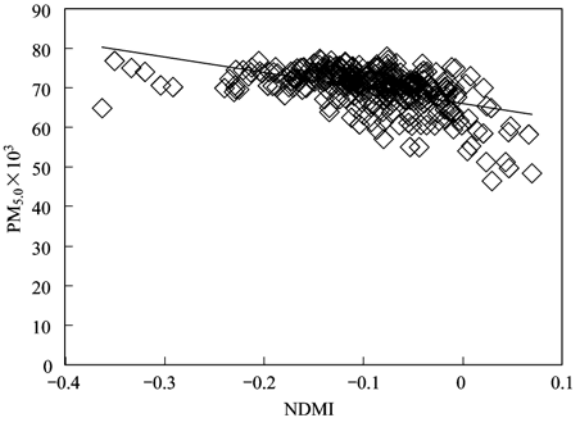

图 8　2008 年 $PM_{5.0}$ 和 NDMI 散点图

Fig. 8　Illustration of $PM_{5.0}$ and NDMI scatter in 2008

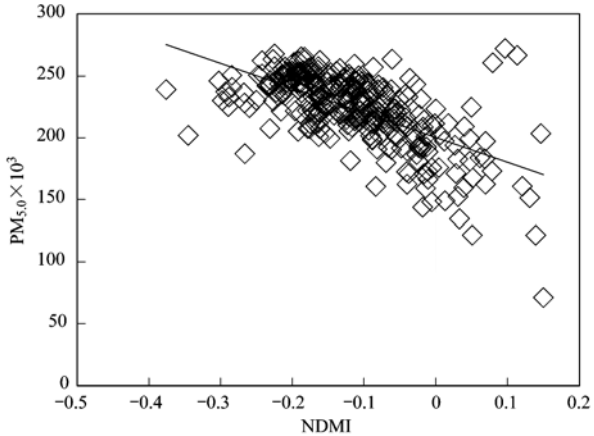

图 9　2009 年 $PM_{5.0}$ 和 NDMI 散点图

Fig. 9　Illustration of $PM_{5.0}$ and NDMI scatter in 2009

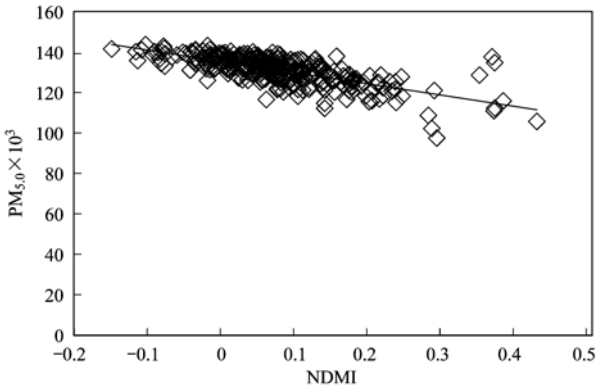

图 10　2010 年 $PM_{5.0}$ 和 NDMI 散点图

Fig. 10　Illustration of $PM_{5.0}$ and NDMI scatter in 2010

$PM_{5.0}$ 之间呈负相关的关系，相关性也比较显著. 与 NDBI 相较，二者对 $PM_{5.0}$ 浓度的影响都差不多，仅在 2010 年时，NDBI 和 $PM_{5.0}$ 的相关系数要小于 NDMI 的，也就是说 2010 年时 NDMI 对颗粒物的浓度的影响比 NDBI 对其的影响显著.

表 3　$PM_{5.0}$ 和 NDMI 相关性

Table 3　Correlation of $PM_{5.0}$ and NDMI

年份	Pearson 相关系数
2008	-0.501
2009	-0.620
2010	-0.718

4.2　$PM_{5.0}$ 和 NDBI 关系分析

采用与上文 NDMI 提取类似的方法，提取对应点位的地表温度值和 NDBI 值，进而对整个研究区的地表温度和 NDBI 进行线性回归分析，研究二者的相关性. $PM_{5.0}$ 和 NDBI 散点分布图如图 11 ~ 13 所示.

由表 4 中的 Pearson 相关系数可知，NDBI 和

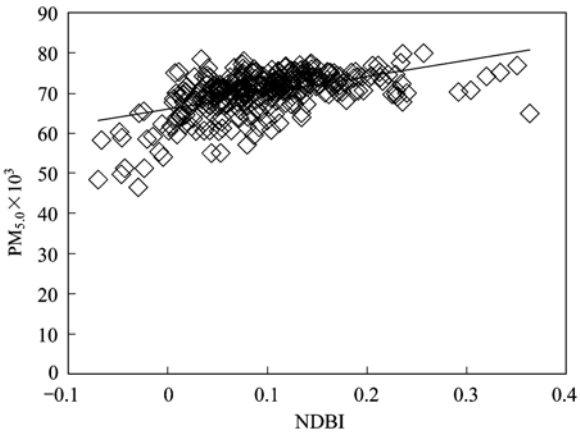

图 11　2008 年 $PM_{5.0}$ 和 NDBI 散点图

Fig. 11　Illustration of $PM_{5.0}$ and NDBI scatter in 2008

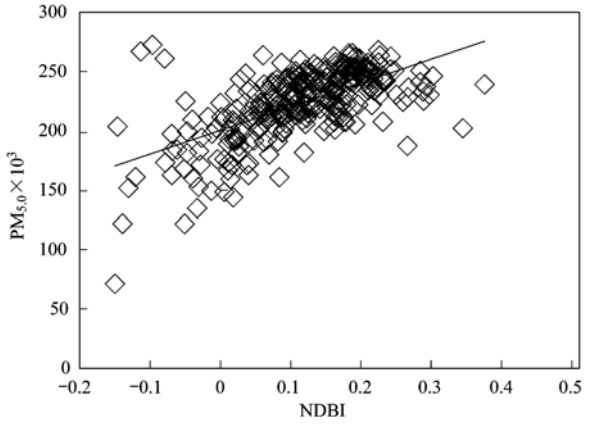

图 12 2009 年 $PM_{5.0}$和 NDBI 散点图

Fig. 12 Illustration of $PM_{5.0}$ and NDBI scatter in 2009

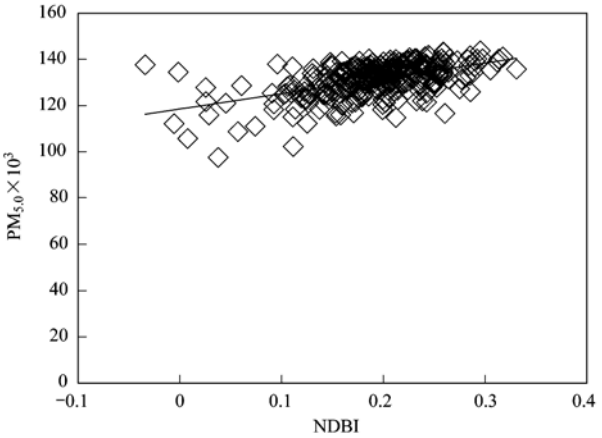

图 13 2010 年 $PM_{5.0}$和 NDBI 散点图

Fig. 13 Illustration of $PM_{5.0}$ and NDBI scatter in 2010

表 4 $PM_{5.0}$和 NDBI 相关性

Table 4 Correlation of $PM_{5.0}$ and NDBI

年份	Pearson 相关系数
2008	0.537
2009	0.621
2010	0.524

$PM_{5.0}$呈正相关关系,2009 年相关性最强,2008 年次之,2010 年最弱,但整体来看,相关性均比较明显,这说明 NDBI 的大小对颗粒物的浓度影响较为显著.

5 结论

(1)采用 DVI 反演 $PM_{5.0}$分布的方法可行,反演精度在可接受范围内.

(2)整体上,研究区 2008 年 $PM_{5.0}$颗粒物污染最轻;局部上,西南三环和四环以及东南三四环之间为颗粒物污染的高值区;西北五环附近颗粒物污染较轻.

(3)NDBI、NDMI 与 $PM_{5.0}$可吸入颗粒物的分布分别呈现显著的负相关和正相关关系,且二者对 $PM_{5.0}$的影响相近.

参考文献:

[1] Watson J G. Visibility: science and regulation[J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2005, **52**(6): 628-713.

[2] Tang T, Zhao W, Gong H, *et al*. GIS spatial analysis of population exposure to fine particulate air pollution in Beijing, China[J]. Environmental Geosciences, 2010, **17**(1): 1-16.

[3] 杨维, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 237-243.

[4] 钟晓兰, 周生路, 赵其国, 等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2758-2765.

[5] 穆珍珍, 赵景波, 徐娜, 等. 西安市雁塔区冬季可吸入颗粒物时空变化研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(7): 1509-1516.

[6] 赵晴, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京及周边地区夏季大气颗粒物区域污染特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 1873-1880.

[7] 赵素平, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 687-693.

[8] 侯芳, 赵文慧, 李志忠, 等. 北京市城区不同等级道路网对可吸入颗粒物的浓度影响研究[J]. 测绘科学,2012, **37**(5): 135-137.

[9] 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 1-8.

[10] 唐明, 赵文吉, 赵文慧. 基于 SPOT 影像的可吸入颗粒物遥感反演[J]. 国土资源遥感, 2011, **23**(1): 62-65.

[11] 薛岩松. 可吸入颗粒物浓度的遥感监测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[12] 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM_{10}监测方面的应用研究[J]. 北京大学学报(自然科学版). 2010, **46**(2): 178-184.

[13] 李成林. 城市大气污染的定量遥感监测方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.

[14] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al*. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application [J]. Environmental Health Perspectives, 2010, **118**(6): 847-855.

[15] Chu D A, Kaufman, Y J, Zibordi G, *et al*. Global monitoring of air pollution over land from the earth observing system-terra moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D21): 4661-4678.

[16] 王静, 杨复沫, 王鼎益, 等. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$质量浓度的特征及其相关性[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, **27**(1): 10-16.

[17] Liu Y, Meredith F, Ralph K. Using aerosol optical thickness to predict ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, **107**(1-2): 33-44.

[18] Han Y J, Kim T S, Kim H. Ionic constituents and source analysis of $PM_{2.5}$ in three Korean cities [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(19): 4735-4746.

[19] 余梓木, 周红妹, 郑有飞. 基于遥感和 GIS 的城市颗粒物污染分布研究[J]. 自然灾害学报, 2004, **13**(3): 58-64.

[20] Templemeryer K, Ey O. Use of remote sensing to study the dispersion of stack plumes [J]. Remote Sensing of Earth Resources, 1974, (3): 255-273.

[21] Wang F H. Quantitative methods and applications in GIS[M]. America: Taylor and Francis Group, 2006. 58-59.

[22] 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.

[23] Hisao F, Kiyoyukii H. Assessment of air pollution by using satellite data in the neighborhood of cities and industrial complex [J]. Remote Sensing Society of Japan, 1991, **11**(4): 655-663.

[24] Marghany M M. TOPSAR wave spectra model and coastal erosion detection [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2001, **3**(4): 357-365.

[25] 王琳, 徐涵秋, 李胜. 厦门岛及其邻域海岸线变化的遥感动态监测[J]. 遥感技术与应用, 2005, **20**(4): 404-410.

[26] 孙志强, 吉东生, 宋涛, 等. 奥运时段北京及近周边区域空气污染观测与比对分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2852-2859.

[27] 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 北京市可吸入颗粒物的空间分布特征及与气象因子的 CCA 分析[J]. 地理与地理信息科学, 2009, **25**(1): 71-74.

[28] 袁杨森, 刘大锰, 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.

[29] 郭建斌, 陈珏. 北京市空气污染季节变化规律研究及污染控制建议[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 952-956.

[30] 赵文慧, 赵文吉, 宫辉力, 等. 北京市采暖期可吸入颗粒物时空分布特征及源追踪[J]. 地理研究, 2012, **31**(3): 417-428.

[31] 唐明. 北京城区可吸入颗粒物分布与土地覆盖类型的关系研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.

[32] 肖瑶. 北京地表温度与可吸入颗粒物时空分布及其关联分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 2

Feb. 15, 2014

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China ····· WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, *et al.* (401)

Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in $PM_{2.5}$ and Source Analysis in Beijing ····· TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (442)

Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles ····· WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, *et al.* (451)

Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM_{10} in Xinzhou City ····· SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, *et al.* (458)

Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou ····· QING Xian, SU Yuan, SU Qing, *et al.* (464)

Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis ····· SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, *et al.* (470)

Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea ····· XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, *et al.* (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, *et al.* (481)

Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area ····· HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, *et al.* (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, *et al.* (504)

Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area ····· QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, *et al.* (513)

Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter ····· HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, *et al.* (520)

Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends ····· LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, *et al.* (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, *et al.* (533)

Oxidation of Mercury by $CuBr_2$ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition ····· HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (562)

Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary ····· ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, *et al.* (569)

Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary ····· MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, *et al.* (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, *et al.* (585)

Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands ····· BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, *et al.* (592)

Impacts of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of *Microcystis aeruginosa* ····· ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, *et al.* (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, *et al.* (605)

Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite ····· LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (643)

Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter ····· LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, *et al.* (651)

Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process ····· CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, Det *al.* (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 Pleurotus Oyster ····· HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, *et al.* (669)

Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition ····· WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, *et al.* (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, *et al.* (684)

Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China ····· ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, *et al.* (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, *et al.* (704)

Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China ····· ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, *et al.* (711)

Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River ····· TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, *et al.* (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, *et al.* (727)

Impact of Compounded 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 *Pseudomonas* sp. QJX-1 ····· ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, *et al.* (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, *et al.* (746)

Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou ····· GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, *et al.* (753)

Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles ····· ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, *et al.* (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, *et al.* (764)

Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on *Eisenia foetida* ····· 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, *et al.* (780)

Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from *Suaeda salsa* Marsh in the Yellow River Estuary ····· LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, *et al.* (786)

Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies ····· ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, *et al.* (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