

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟

彭霞^{1,3}, 余倩楠^{2,3}, 龙凌波^{2,3}, 刘敏^{2,3*}, 徐茜², 魏宁^{2,3}, 周陶冶⁴

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; 3. 华东师范大学上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 4. 上海市浦东新区环境监测站, 上海 200135)

摘要: 黑碳(BC)是大气污染物的重要组成部分,对空气质量与人类生活健康产生重要的影响。本研究采用移动样带手段开展上海市近地面 BC 浓度监测,分析其基本统计特征和空间分异性。在此基础上,利用土地利用回归模型(LUR),探讨人口密度、经济产值和交通道路网密度等因素对上海市近地面 BC 浓度空间分异的影响。结果表明上海市近地面 BC 平均浓度为 $(9.86 \pm 8.68) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 空间差异明显,郊区 $[(10.47 \pm 2.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 比市中心地区 $[(7.93 \pm 2.79) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 高 32.03% $(2.54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 。气象要素(风速和相对湿度)和交通道路变量(路网长度、省道距离、高速距离等)显著影响上海市近地面 BC 浓度(r 为 0.5~0.7, $P < 0.01$)。基于气象和交通道路变量的 LUR 模型能较好模拟上海近地面 BC 浓度(调整后 R^2 为 0.62~0.75, 交叉验证 R^2 为 0.54~0.69, RMSE 为 0.15~0.20 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 其中 100 m 和 5 km 缓冲距离的 LUR 模型相对较优,在一定程度上表明上海市近地面 BC 浓度主要受气象要素和交通源的影响。本研究有利于加深对上海市 BC 浓度空间分布格局及其影响因素的客观认识,可为模拟和预测 BC 对人类活动和自然环境的响应机制提供科学依据和理论支撑。

关键词: 黑碳浓度; 土地利用回归模型; 空间分异; 移动样带监测; 上海市

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4454-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705026

Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China

PENG Xia^{1,3}, SHE Qian-nan^{2,3}, LONG Ling-bo^{2,3}, LIU Min^{2,3*}, XU Qian², WEI Ning^{2,3}, ZHOU Tao-ye⁴

(1. School of Geography Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 4. Pudong New Area Environmental Monitoring Station, Shanghai 200135, China)

Abstract: Black carbon (BC) is an important component of atmospheric pollution and has significant impacts on air quality and human health. Choosing Shanghai city for a case study, this paper explores the statistical characteristics and spatial patterns of BC concentrations using a mobile monitoring method, which differs from traditional fixed-site observations. Land use regression (LUR) modeling was conducted to examine the determinants for on-road BC concentrations, e. g. population, economic development, traffic, etc. These results showed that the average on-road BC concentrations were $(9.86 \pm 8.68) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, with a significant spatial variation. BC concentrations in suburban areas $[(10.47 \pm 2.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ were 32.03% $(2.54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ higher than those in the city center $[(7.93 \pm 2.79) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$. Besides, meteorological factors (e. g. wind speed and relative humidity) and traffic variables (e. g. the length of roads, distance to provincial roads, distance to highway) had significant effects on on-road BC concentrations (r : 0.5-0.7, $P < 0.01$). Moreover, the LUR model, including meteorological and traffic variables performed well (adjusted R^2 : 0.62-0.75, cross validation R^2 : 0.54-0.69, RMSE: 0.15-0.20 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), which demonstrates that on-road BC concentrations in Shanghai are mainly affected by these factors and traffic sources to some extent. Among them, the most accurate LUR model was developed with a 100 m buffer, followed by the LUR model with a 5 km buffer. This study is of great significance for the identification of spatial distribution patterns for on-road BC concentration and exploring their influencing factors in Shanghai, which can provide a scientific basis and theoretical support for simulating and predicting the response mechanisms of BC on human health and the natural environment.

Key words: black carbon concentration; land use regression model; spatial variation; mobile monitoring; Shanghai

近年来,气溶胶污染由于其气候和环境效应已成为国内外广泛关注的课题^[1,2],含碳物质是其主要组成成分,大约占 20%~50%^[3]。含碳颗粒物主要包含有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC),其中 EC 也被称为黑碳

收稿日期: 2017-05-03; 修订日期: 2017-06-09

基金项目: 上海市自然科学基金项目(17ZR1408700); 上海市 2017 年度“科技创新行动计划”长三角科技联合攻关领域项目(17295810603); 国家自然科学基金项目(41471076)

作者简介: 彭霞(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为空间分析与模拟, E-mail: claire_px@126.com

* 通信作者, E-mail: mliu@re.ecnu.edu.cn

(black carbon, BC). 大气中 BC 的粒径一般在 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 之间, 主要是由富含碳物质(如化石燃料和生物质原料等)的不完全燃烧产生^[4]. 在城市地区黑碳主要来源于人为排放, 常用于评估人为大气污染的追踪指标^[5]. BC 不仅对人体健康和环境质量具有重要的影响^[6,7], 还会影响气溶胶辐射强迫, 是大气中仅次于 CO_2 的增温成分^[5,8].

国内外有关于 BC 的研究涉及到不同空间尺度以及侧重于不同的研究主体, 其中空间尺度主要包括全球尺度^[9]、区域尺度^[10]、城市尺度^[11]等, 而研究主体则从最初基于观测数据的浓度变化特征分析和源解析^[12], 逐渐深入到 BC 光学特性、辐射强迫分析等^[13]. 另外也有学者改变传统固定点采样方式转为移动采样, 并分析城市 BC 主要排放源, 即交通源与 BC 之间的关系^[14], 同时基于多种模型评估 BC 暴露水平以及模拟 BC 的空间分布^[15]. 总体而言, 目前国内外研究主要基于少量固定样点观测 BC 浓度, 且主要侧重于 BC 样点的浓度时间变化, 受采样点数量的限制, 其空间代表性受限, 区域上的空间分析和空间模拟相对较少.

鉴于此, 本研究以高强度人类干扰和快速城市化的上海市作为研究区域, 采用 AE-51 便携式黑碳仪和 GPS 组成的车载移动平台, 对上海市 BC 进行样带监测, 分析上海市 BC 浓度空间变化特征. 在此基础上利用气象、土地利用、人口、社会经济以及交通道路数据等探讨上海 BC 浓度空间分异的影响因素, 同时建立土地利用回归模型(land use regression model, LUR)模拟上海市 BC 的空间分布. 本研究对于明确上海市 BC 空间分布格局并探讨其影响因素具有重要意义, 有利于加深对 BC 影响机制的客观认识, 以期模拟和预测 BC 对人类活动和自然环境的响应机制提供科学依据和理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

上海市($30^{\circ}40' \sim 31^{\circ}53' \text{N}$, $120^{\circ}52' \sim 122^{\circ}12' \text{E}$)位于长江三角洲的长江入海口, 东濒东海, 南临杭州湾, 毗邻江苏和浙江两省(图 1), 地势低平, 平均海拔约 4 m , 总面积 6340.5 km^2 . 该地区属于亚热带季风气候, 四季分明, 夏季盛行东南风, 冬季盛行西北风, 全年平均温度为 17.1°C , 年平均降水量为 1649.1 mm , 气候温和湿润^[16]. 全市共辖 16 个区, 交通发达, 城市用地高度密集, 2015 年常住人口为 2415.27 万人, 生产总值(GDP)达到 25123.45 亿

元^[16]. 作为长三角地区最大的城市和商业中心, 上海市能源消耗和机动车辆的持续增长使得城市大气污染环境问题日益严重. 2002~2015 年期间, 上海市的民用车辆拥有量从 139.03 万辆上升到 332.35 万辆^[16]. 有研究表明, 上海市的空气污染已由煤烟型逐渐转变为煤烟型和石油型并存的复合型污染^[3].



图 1 上海市 BC 浓度样带监测(T1、T2 和 T3)空间分布

Fig. 1 Distributions of the three transects (T1, T2&T3) with BC concentration monitoring in Shanghai

1.2 BC 数据获取与处理

1.2.1 样带布设和采样仪器设置

结合上海市城市化水平以及各路段交通量, 本研究以上海市中心(人民广场)为起点分别选取沿西北(T1, 约 36 km)、西南(T2, 约 43 km)和东南(T3, 约 40 km)走向的 3 条样带, 租用出租车进行 BC 浓度监测(图 1), 平均车速为 $35 \sim 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 为避免仪器进水损坏仪器以及确保采样数据的相对真实性, 本研究样带监测时间为 2016 年 10~12 月无雨工作日的上午 09:00~11:00. 每条样带监测采取往返采样的方法, 并在不同工作日重复监测 3 次, 尽量减少外在环境和观测时间不一致对黑碳浓度观测的影响^[17].

本研究使用的采样仪器为目前广泛使用的美国 Magee 公司生产的便携式 AE-51 型黑碳测量仪^[18,19], 仪器是通过在 880 nm 波长下计算光透过采样滤膜后的衰减率来测定空气中黑碳气溶胶浓

度^[20],采样滤膜材质为石英纤维. AE-51 采样间隔设置为 10 s,流量为 150 mL·min⁻¹,采样进气管用伸缩鱼竿从出租车窗口伸出,固定在离路面约 2 m 高处.在采集 BC 同时,利用 GPS 设备(Trimble Juno SB)记录相应的地理位置信息(经纬度),GPS 记录时间间隔为 1 s. 采样时 AE-51 和 GPS 同时开始记录,以便后期基于时间对 BC 数据进行地理位置匹配. 为确保数据的质量,每次采样前均对仪器进行校准.

1.2.2 BC 数据质量控制

由于 AE-51 黑碳仪器属于手持式微型黑碳仪,开展高时间分辨率(即采样间隔小)的采样时易受到噪声信号影响^[18]. 同时,由于黑碳仪器是基于滤膜的光学吸收方法采集 BC 浓度数据,随着颗粒物在滤膜上的累积,仪器在观测后期可能会产生 BC 的低估值(loading effect)^[20]. 为消除噪声信号和低

估值对 BC 浓度观测结果的影响,本研究在开展数据分析之前分别采用 Optimized Noise-reduction Averaging(ONA) 算法^[18,21]和经验校正方程(K-N 校正)^[20]对采集的原始 BC 数据依次进行校正^[22].

1.3 土地利用回归模型

土地利用回归模型(LUR)是一种将回归模型与空间上的土地利用数据、监测数据以及其他相关的地理数据结合分析的方法^[23]. 本研究以 1 km 为间距对 3 条样带进行分段统计,共计 116 段(去除了 T2 和 T3 有的重叠部分). 以研究区域的交通道路、土地利用、气象、人口和经济产值、地理高程数据以及污染企业距离等 20 种可能影响 BC 浓度的空间变量数据作为 LUR 模型的预选影响因素变量(表 1). 本研究中考虑到上海市 BC 主要污染源可能是交通源,因此对交通道路变量进行了较为详细的划

表 1 本研究预选影响因素变量描述与来源

Table 1 Descriptions and sources of potentially predictive variables

变量	简称	描述	数据来源
交通道路			
路网长度	Road_Len	全部类型道路的长度栅格数据	结合利用长三角地区高速公路地图集以及 TM 遥感影像解译并矢量化获得 ^[26]
城市快速路距离	DIST_Exp	距离城市快速路(高架)的直线距离,为欧氏距离栅格	
高速距离	DIST_High	距离高速路的直线距离,为欧氏距离栅格	调用百度地图 API 获取公交站、收费站和高架进出口经纬度,并经过仔细筛选
国道距离	DIST_Nat	距离国道的直线距离,为欧氏距离栅格	
省道距离	DIST_Prov	距离省道的直线距离,为欧氏距离栅格	
县道距离	DIST_Coun	距离县道的直线距离,为欧氏距离栅格	
乡镇村道距离	DIST_Town	距离乡镇村道的直线距离,为欧氏距离栅格	
路网密度	Road_Den	全部类型道路的核密度栅格矩阵	
公交站密度	Bus_Den	公交站点的核密度栅格矩阵	
高速收费站距离	DIST_Toll	距离高速收费站的直线距离,为欧氏距离栅格	
高架进出口距离	DIST_Exit	距离高架进出口的直线距离,为欧氏距离栅格	
土地利用			
不透水面覆盖度	ISA_Cov	单位栅格中不透水面所占的百分比	基于 Landsat 8 遥感影像数据经过混合像元分解反演得到 ^[27]
植被覆盖度	Veg_Cov	单位栅格中植被所占的百分比	
气象			
相对湿度	RH	采样时段上海市气象站点的相对湿度 IDW 插值栅格	中国气象数据共享网(http://data.cma.cn/data/)
风速	Wind_S	采样时段上海市气象站点的最大风速 IDW 插值栅格	
大气稀释率	Dilu_Rate	大气稀释对污染物浓度的影响,是风速与混合层高度的乘积	欧洲中期天气预报中心 ^[28] (http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/)
人口经济			
人口	POP	单位栅格中人口总量	http://www.worldpop.org.uk/data/get_data/
生产总值	GDP	单位栅格中 GDP(原始数据分辨率为 1 km,重采样为 100 m)	http://geodoi.ac.cn/WebCn/CategoryList.aspx?categoryID=9
地理			
高程	DEM	单位栅格中海拔高度	地理空间数据云 http://www.gscloud.cn/
工业污染源			
污染企业距离	DIST_Pollu	距离高架进出口的直线距离,为欧氏距离栅格	调用百度地图 API 获取蔚蓝地图污染排放企业经纬度(主要是烟尘排放型企业)

分,其中不同道路类型分为城市快速路、高速路、国道、省道、县道以及乡镇村道。

由于大气污染物通常表现为典型的自然对数分布^[24], Hankey 等^[15]发现中位数比均值更能代表移动样带监测的 BC 浓度值,因此本研究将每段 BC 监测数据的中位数取自然对数作为 LUR 模型的因变量。同时,为了探讨 BC 的受影响范围,本研究分别在样带周围建立不同缓冲区(缓冲距离设置为 50 m、100 m、250 m、500 m、1 km、2 km、5 km、7 km),用以统计在缓冲区内对应分段样带的 20 种空间数据的均值。在此基础上,建立不同缓冲区的 LUR 模型,研究 20 个预选影响因素与 BC 浓度之间的相关性。20 个预选影响因素的空间分辨率均为 100 m × 100 m,为消除量纲不同、数量级不同带来的影响,本研究使用最大-最小标准化统一对栅格数据进行标准化处理^[25]。

本研究 LUR 模型建立基本思路如下:①双变量分析,首先对 20 个预选变量与 BC 浓度之间进行相关性分析,筛选出与 BC 浓度相关性通过显著性检验的变量($P < 0.05$);②找到每个子类别中相关系数最大的变量;③剔除每个子类别中与最大相关系数的变量之间相关性较高的其他变量($r > 0.6$),实际上是去掉子类别中共线性较强的变量;④将剩余的变量进行逐步线性回归分析,进一步去除不同类别变量之间的共线性,并将不满足 t 检验($P > 0.05$)的变量剔除,得到最优回归模型。

1.4 模型验证

本研究基于交叉检验(hold-out validation, HOV)^[29]将 116 个 BC 数据进行分组,随机取 80% (93 个样本数据)的 BC 浓度数据作为训练数据集用于 LUR 模型的构建,剩下 20% (23 个样本数据)数据作为测试数据集用于验证 LUR 模型精度。采用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)评估 LUR 模型的拟合优度以及观测值与模拟值之间的偏差。此外,本研究对 LUR 模型进行共线性诊断,计算了最终选入 LUR 模型变量的方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)。当 $VIF \geq 10$ 时,变量之间存在严重的多重共线性,这会对自变量解释因变量的影响程度造成一定的影响^[30]。

2 结果与讨论

2.1 上海市 BC 浓度的总体观测特征

上海市 3 条样带 BC 的平均浓度为 $(9.86 \pm 8.68) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这与其他同地区移动采样研究结果

较为接近。Lei 等^[31]通过移动采样监测上海市 3 个环带(内环、中环和外环)的 BC 平均浓度为 $(11.8 \pm 9.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; Li 等^[22]研究不同交通出行方式检测 BC 个体暴露水平时,搭乘出租车检测的 BC 平均浓度为 $(8.62 \pm 4.13) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。与其他国内外 BC 监测结果相比,就传统固定样点采样的研究而言,上海市 BC 浓度相较国内外其他中大型城市浓度偏高,例如南京北郊地区 BC 浓度均值^[4]为 $(2.52 \pm 1.75) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这可能是由于固定样点采样受 BC 主要污染源(交通排放)影响较小,采样高度较高且一般为长时间连续观测,因此其采样浓度一般要低于移动样带监测。而基于移动样带监测方式的巴西隆德里纳^[14]的 BC 平均浓度 $[(6.35 \pm 20.00) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 同样低于本研究中上海市 BC 的平均浓度,这可能是由于上海市城市化水平相较巴西隆德里纳要高,人口密集,交通流量大并且工业污染排放较为严重。

上海市 BC 浓度空间分异明显,3 条样带 BC 中值浓度的空间分布(图 2)总体上表现为郊区 $[(10.47 \pm 2.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 比市中心 $[(7.93 \pm 2.79) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 高 32.03% ($2.54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。T1 $[(10.65 \pm 2.06) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 T3 $[(9.49 \pm 3.14) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 明显高于 T2 $[(7.74 \pm 2.08) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 。3 条样带在高速路段均出现浓度高值。此外,除高速路段存在高值外,T1 和 T3 样带在外环处附近均有高值出现,尤其是 T3 样带在外环附近 BC 浓度最高值为 $18.58 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这一现象可能与上海市交通限

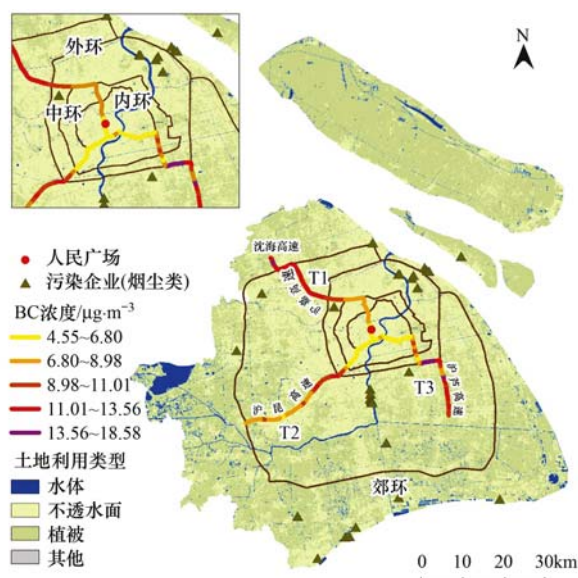


图 2 上海市 3 条样带 BC 浓度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of BC concentrations at three transects in Shanghai

行政策有关,自2016年10月1日起,国Ⅰ汽油车限行至郊环,部分国Ⅱ汽油车限行至外环,部分国Ⅲ汽油车限行至中环.而且已有研究表明交通排放占城市中BC的70%^[31],Targino等^[14]发现BC浓度与交通流量呈现正相关,尤其与重型柴油发动机汽车表现为强相关,同时交通信号灯处车辆的起步也对BC浓度的上升造成一定的影响.其次,上海市郊外BC浓度比市中心高也可能与大部分的烟尘排放企业分布在郊外以及郊外耕地中的生物质燃烧有一定关系.

2.2 BC浓度与预选影响因素之间相关性分析

3条监测样带分段相应8种缓冲距离内BC浓度中位数的自然对数与各预选影响因素变量之间的相关系数如表2所示.交通道路变量中,除了城市快速路距离DIST_Exp,县道距离DIST_Coun以及高架进出口距离DIST_Exit这3个变量与BC浓度之间在全部缓冲区内均不相关外,其他交通道路变量与BC浓度之间具有显著的相关性(尤其是在<1 km的缓冲距离内绝对相关系数达到0.45以上).两种土地利用类型变量在8种缓冲距离内整体上与BC浓度之间表现出较为显著的相关性,相关系数(绝对值)在0.31~0.65之间,其中不透水面覆盖度ISA_Cov与BC浓度之间表现为负相关,而植被

覆盖度Veg_Cov与BC浓度则为正相关.预选的3种气象变量中,除大气稀释率Dilu_Rate外,相对湿度RH和风速Wind_S与BC浓度在8种缓冲距离内均表现出显著的正相关,尤其是Wind_S与BC浓度的相关系数在<5 km的缓冲距离内相关系数均超过0.60.人口经济、地理和工业污染源类型变量均与BC浓度表现出一定的相关性,其中GDP与BC浓度之间表现为正相关,POP、DEM和DIST_Pollu与BC浓度表现为负相关,POP相较于DEM和DIST_Pollu而言,与BC浓度之间相关性较强,在<2 km的缓冲距离均达到0.50以上.

总体而言,相比于土地利用和人口经济等变量,BC浓度与交通道路变量、气象变量更相关.本研究中各类型变量与BC浓度之间相关性在8种缓冲距离内的变化表现出较大差异性.交通道路变量与BC浓度基本上存在负相关,且相关性随着缓冲距离的增大而减小,这在一定程度上可以说明交通源排放的扩散范围以及对BC浓度的影响强弱,体现了一定的影响随距离衰减特征.而土地利用类型变量中,ISA_Cov与BC浓度之间表现为负相关,Veg_Cov与BC浓度则为正相关,这与其他有关研究稍有不同^[29].气象类型变量中相对湿度RH和风速Wind_S均与BC浓度具有较强的相关性,但大气稀释率

表2 不同缓冲区内BC浓度与预选影响因素变量之间相关系数(r)¹⁾

Table 2 Correlations (r) between BC concentrations and potentially predictive variables with different buffer distances

预选影响因素变量	缓冲距离							
	50 m	100 m	250 m	500 m	1 km	2 km	5 km	7 km
交通道路	路网长度(Road_Len)	-0.54 **	-0.46 **	-0.51 **	-0.50 **	-0.45 **	-0.45 **	-0.32 **
	城市快速路距离(DIST_Exp)	0.00	0.00	-0.00	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04
	高速距离(DIST_High)	-0.54 **	-0.54 **	-0.53 **	-0.52 **	-0.50 **	-0.47 **	-0.35 **
	国道距离(DIST_Nat)	0.20 *	0.20 *	0.20 *	0.20 *	0.21 *	0.22 *	0.18
	省道距离(DIST_Prov)	0.62 **	0.61 **	0.60 **	0.58 **	0.54 **	0.45 **	0.03
	县道距离(DIST_Coun)	-0.08	-0.08	-0.09	-0.09	-0.10	0.00	0.17
	乡镇村道距离(DIST_Town)	0.28 **	0.28 **	0.28 **	0.29 **	0.24 **	0.29 **	0.17
	路网密度(Road_Den)	-0.52 **	-0.52 **	-0.53 **	-0.52 **	-0.53 **	-0.54 **	-0.49 **
	公交站密度(Bus_Den)	-0.67 **	-0.67 **	-0.67 **	-0.68 **	-0.69 **	-0.70 **	-0.59 **
	高速收费站距离(DIST_Toll)	-0.24 *	-0.23 *	-0.23 *	-0.23 *	-0.22 *	-0.23 *	-0.33 **
土地利用	高架进出口距离(DIST_Exit)	0.05	0.05	0.04	0.03	0.01	-0.02	-0.05
	不透水面覆盖度(ISA_Cov)	-0.62 **	-0.60 **	-0.52 **	-0.46 **	-0.12	-0.31 **	0.04
	植被覆盖度(Veg_Cov)	0.00	0.65 **	0.59 **	0.53 **	0.50 **	0.51 **	0.43 **
气象	相对湿度(RH)	0.50 **	0.50 **	0.51 **	0.50 **	0.51 **	0.49 **	0.36 **
	风速(Wind_S)	0.77 **	0.77 **	0.77 **	0.77 **	0.76 **	0.73 **	0.61 **
	大气稀释率(Dilu_Rate)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.12
人口经济	人口(POP)	-0.57 **	-0.57 **	-0.56 **	-0.57 **	-0.55 **	-0.54 **	-0.34 **
	生产总值(GDP)	0.25 **	0.25 **	0.25 **	0.24 **	0.22 *	0.24 **	0.49 **
地理	高程(DEM)	-0.30 **	-0.36 **	-0.40 **	-0.41 **	-0.46 **	-0.48 **	-0.35 **
工业污染源	污染企业距离(DIST_Pollu)	-0.24 *	-0.24 *	-0.24 **	-0.24 **	-0.25 **	-0.26 **	-0.19 *

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

Dilu_Rate 却在所有缓冲距离中均与 BC 浓度不相关,可能是大气稀释率 Dilu_Rate 体现的是整个大气层对污染物的稀释扩散能力,因此对近地面采样高度(离路面约为 2 m)的 BC 浓度影响较小.

2.3 上海市 BC 浓度 LUR 模型的构建与验证

本研究基于不同缓冲距离下 BC 浓度与预选影

响因素变量之间的相关系数,将与 BC 浓度不相关以及子类别中与最大相关系数变量之间相关性较强的子类别变量剔除,剩余的变量进行逐步回归分析,得到 8 种缓冲距离下的 LUR 模型(表 3). 其中,回归系数为 LUR 回归模型自变量的系数,标准化回归系数可以体现该自变量对因变量(BC 浓度)的解释

表 3 不同缓冲距离下 BC 浓度的 LUR 模型结果

Table 3 LUR model results for BC concentrations with different buffer distances

缓冲距离	选入变量	回归系数	标准化回归系数	VIF	模型评估参数	HOV 验证参数
50 m	常数项	2.86				
	风速(Wind_S)	0.74	0.52	1.91	$R^2 = 0.71$	$R^2 = 0.69$
	省道距离(DIST_Prov)	0.52	0.17	1.63	调整后的 $R^2 = 0.70$	RMSE = 0.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
	污染企业距离(DIST_Pollu)	-0.87	-0.25	1.04	RMSE = 0.16 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	不透水面覆盖度(ISA_Cov)	-1.26	-0.24	2.05		
100 m	常数项	1.80				
	风速(Wind_S)	0.43	0.30	3.15	$R^2 = 0.76$	$R^2 = 0.63$
	污染企业距离(DIST_Pollu)	-1.40	-0.40	1.74	调整后的 $R^2 = 0.75$	RMSE = 0.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
	植被覆盖度(Veg_Cov)	1.55	0.41	2.16	RMSE = 0.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	高速收费站距离(DIST_Toll)	-0.98	-0.19	2.03		
	路网长度(Road_Len)	-0.95	-0.18	1.52		
	生产总值(GDP)	0.19	0.16	1.38		
250 m	常数项	2.01				
	风速(Wind_S)	0.80	0.56	1.58	$R^2 = 0.71$	$R^2 = 0.66$
	省道距离(DIST_Prov)	0.53	0.18	1.52	调整后的 $R^2 = 0.70$	RMSE = 0.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
	污染企业距离(DIST_Pollu)	-0.97	-0.28	1.08	RMSE = 0.16 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	路网长度(Road_Len)	-1.75	-0.23	1.44		
500 m	常数项	2.37				
	风速(Wind_S)	0.61	0.42	2.39	$R^2 = 0.72$	$R^2 = 0.59$
	污染企业距离(DIST_Pollu)	-1.33	-0.38	1.69	调整后的 $R^2 = 0.70$	RMSE = 0.19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
	路网长度(Road_Len)	-1.88	-0.18	1.59	RMSE = 0.16 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	省道距离(DIST_Prov)	0.57	0.19	1.54		
	高程(DEM)	-2.23	-0.15	1.44		
	高速收费站距离(DIST_Toll)	-0.86	-0.17	1.96		
1 km	常数项	2.48				
	风速(Wind_S)	0.58	0.40	2.70	$R^2 = 0.70$	$R^2 = 0.61$
	污染企业距离(DIST_Pollu)	-1.31	-0.37	1.62	调整后的 $R^2 = 0.69$	RMSE = 0.19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
	公交站密度(Bus_Den)	-0.29	-0.26	2.80	RMSE = 0.16 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	高速收费站距离(DIST_Toll)	-0.93	-0.18	1.92		
	高程(DEM)	-2.56	-0.16	1.95		
2 km	常数项	2.45				
	风速(Wind_S)	0.51	0.34	2.54	$R^2 = 0.69$	$R^2 = 0.67$
	污染企业距离(DIST_Pollu)	-1.44	-0.42	1.55	调整后的 $R^2 = 0.68$	RMSE = 0.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
	公交站密度(Bus_Den)	-0.49	-0.43	2.12	RMSE = 0.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	高速收费站距离(DIST_Toll)	-1.09	-0.21	1.84		
5 km	常数项	1.51				
	风速(Wind_S)	-0.40	-0.22	3.94	$R^2 = 0.75$	$R^2 = 0.54$
	污染企业距离(DIST_Pollu)	-1.67	-0.49	1.66	调整后的 $R^2 = 0.74$	RMSE = 0.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
	生产总值(GDP)	1.05	0.48	1.56	RMSE = 0.15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	
	相对湿度(RH)	1.45	0.56	2.09		
	高速收费站距离(DIST_Toll)	-2.37	-0.42	2.63		
	植被覆盖度(Veg_Cov)	1.80	0.46	1.69		
7 km	常数项	1.20				
	生产总值(GDP)	1.53	0.60	1.07	$R^2 = 0.63$	$R^2 = 0.58$
	相对湿度(RH)	2.19	0.74	1.36	调整后的 $R^2 = 0.62$	RMSE = 0.19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
	高速距离(DIST_High)	-2.01	-0.45	1.29	RMSE = 0.18 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	

程度,模型调整后的 R^2 均大于 0.6,拟合程度较好,最优模型为 100 m 缓冲距离的 LUR 模型(调整后 $R^2=0.75$),其次是 5 km 缓冲距离的 LUR 模型(调整后 $R^2=0.74$)。在 7 km 之前,被选入模型的变量大多是风速 Wind_S 与交通变量,污染企业距离 DIST_Pollu 也几乎都被选入模型。这在一定程度上可以说明,上海市 BC 浓度主要受交通源与污染源以及气象条件风速的影响。相较于其他研究结果而言^[29],土地利用类型变量(植被覆盖度 Veg_Cov 和不透水面覆盖度 ISA_Cov)在本研究中被选入的次数较少,这可能是由于本研究未能将土地利用类型细分为相关特定功能区土地利用类型,使得土地利用类型对 BC 浓度分布的影响不明显。此外,如果不考虑气象要素,在 5 km 之前,LUR 模型变化差别不大,但在 5 km 之后,模型调整后的 R^2 变化较大,5 km 的 LUR 模型(去掉气象要素)调整后的 $R^2=0.55$,7 km 的 LUR 模型(去掉气象要素)调整后的 $R^2=0.36$ 。这表明气象要素随着缓冲距离的扩大对 LUR 模型的构建以及对 BC 浓度的影响趋于重要。在缓冲距离较小时,BC 浓度的 LUR 模型受交通变量影响较大,而污染企业距离 DIST_Pollu 则是随着缓冲距离扩大对 BC 浓度 LUR 模型影响增大。这种结果在其他研究中的 LUR 模型中也有体现,Hankey 等^[15]建立 BC 的 LUR 模型中被选入的交通变量大多是缓冲距离在 300 m 以内。

总体而言,上海市 BC 浓度的 LUR 模型相较于其他地区 BC 的 LUR 模型拟合程度要高。Hankey 等^[15]对美国的明尼阿波利斯以及 Montagne 等^[32]对荷兰的阿姆斯特丹和鹿特丹建立 BC 浓度的 LUR 模型调整后 R^2 分别为 0.28~0.47、0.33~0.42。这可能是由于本研究将气象要素考虑其中,类似结果同样出现在陈莉等^[33]研究天津市 PM_{10} 的 LUR 模型中,在添加气象要素之后 R^2 上升到了 0.85~0.98。而与 Saraswat 等^[24]的结果相差不大,其 BC 的 LUR 模型调整后 R^2 为 0.69~0.86。在国内利用 LUR 模型对大气污染物进行模拟研究中,以 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 居多。例如,吴健生等^[29]和许刚等^[34]分别对重庆市和京津冀地区建立 $PM_{2.5}$ 的 LUR 模型,模型 R^2 分别为 0.84 和 0.81。施媛媛等^[23]和陈莉等^[33]分别对武汉市和天津市的 NO_2 建立 LUR 模型,其 R^2 分别为 0.57 和 0.69~0.85。

3 结论

(1)本研究通过移动采样开展上海市近地面

BC 浓度样带监测,在分析上海市近地面 BC 浓度空间分布基本特征的基础上,结合土地利用回归模型(LUR 模型)对上海市近地面 BC 数据进行模拟分析。结果表明,上海市近地面 BC 浓度为 $(9.86 \pm 8.68) \mu g \cdot m^{-3}$,空间分布上变异特征明显,总体上表现为市中心低,郊区高(尤其是郊区的高速路段)的特征,在一定程度上与上海市交通限行政策有关。此外,BC 浓度与 20 个预选影响因素变量在 8 种不同缓冲距离(50 m、100 m、250 m、500 m、1 km、2 km、5 km、7 km)内的相关性分析中,上海 BC 浓度与交通变量和气象要素之间的相关性相较于其他类型变量更强。基于 LUR 模型得到的上海市近地面 BC 浓度的模拟模型表现良好(调整后 R^2 为 0.62~0.75),模型验证精度较高,交叉验证 R^2 达到 0.54~0.69,RMSE 为 0.15~0.20 $\mu g \cdot m^{-3}$ 。

(2)由于我国还尚未将 BC 列入中国环境监测站观测项目中,因此长时间以及大范围的 BC 观测研究相对匮乏。而在个体或团队研究中,大范围布设样点观测受到人力和财力资源所限,移动采样方式在一定程度上可以弥补这方面的不足。此外,本研究中利用 LUR 模型能较好地模拟上海市近地面 BC 浓度,但与土地利用类型有关的变量仅用了植被覆盖度和不透水面覆盖度来衡量,稍显单一。在后续的研究中将进一步改进完善,以便更科学客观地对上海市 BC 空间分异特征进行研究分析。

参考文献:

- [1] Beegum S N, Moorthy K K, Babu S S, *et al.* Spatial distribution of aerosol black carbon over India during pre-monsoon season [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(5): 1071-1078.
- [2] Geng F H, Hua J, Mu Z, *et al.* Differentiating the associations of black carbon and fine particle with daily mortality in a Chinese city [J]. *Environmental Research*, 2013, **120**: 27-32.
- [3] 王杨君,董亚萍,冯加良,等.上海市 $PM_{2.5}$ 中含碳物质的特征和影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1755-1761.
Wang Y J, Dong Y P, Feng J L, *et al.* Characteristics and influencing factors of carbonaceous aerosols in $PM_{2.5}$ in Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1755-1761.
- [4] 肖思晗,于兴娜,朱彬,等.南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3280-3289.
Xiao S H, Yu X N, Zhu B, *et al.* Characteristics of black carbon aerosol and influencing factors in northern suburbs of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3280-3289.
- [5] Zhang X L, Rao R Z, Huang Y B, *et al.* Black carbon aerosols in urban central China [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, **150**: 3-11.
- [6] 邹长伟,黄虹,曹军骥.大气气溶胶含碳物质基本特征综述 [J]. *环境污染与防治*, 2006, **28**(4): 270-274.

- Zou C W, Huang H, Cao J J. Review on basic characteristic of aerosol carbonaceous [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2006, **28**(4): 270-274.
- [7] Janssen N A H, Hoek G, Simic-Lawson M, *et al.* Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM₁₀ and PM_{2.5} [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, **119**(12): 1691-1699.
- [8] IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151.
- [9] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221-227.
- [10] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, **297**(5590): 2250-2253.
- [11] Begam G R, Vachaspati C V, Ahammed Y N, *et al.* Measurement and analysis of black carbon aerosols over a tropical semi-arid station in Kadapa, India [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **171**: 77-91.
- [12] Dutkiewicz V A, Alvi S, Ghauri B M, *et al.* Black carbon aerosols in urban air in South Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(10): 1737-1744.
- [13] Willis M D, Healy R M, Riemer N, *et al.* Quantification of black carbon mixing state from traffic: implications for aerosol optical properties [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(7): 4693-4706.
- [14] Targino A C, Gibson M D, Krecl P, *et al.* Hotspots of black carbon and PM_{2.5} in an urban area and relationships to traffic characteristics [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 475-486.
- [15] Hankey S, Marshall J D. Land use regression models of on-road particulate air pollution (particle number, black carbon, PM_{2.5}, particle size) using mobile monitoring [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, **49**(15): 9194-9202.
- [16] 上海统计局. 上海统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [17] 潘晨, 朱希扬, 贾文晓, 等. 上海市近地面 CO₂ 浓度及其与下垫面特征的定量关系 [J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(7): 2123-2130.
- Pan C, Zhu X Y, Jia W X, *et al.* Near surface CO₂ concentration and its quantitative relationship with character of underlying surface in Shanghai City, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(7): 2123-2130.
- [18] 白杨, 秦凯, 吴立新, 等. 徐州市区主干道黑炭气溶胶浓度移动观测实验 [J]. *地理与地理信息科学*, 2014, **30**(1): 45-49.
- Bai Y, Qin K, Wu L X, *et al.* A mobile measurement on black carbon concentrations along the main roads of Xuzhou downtown [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, **30**(1): 45-49.
- [19] 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 等. 2008~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1215-1222.
- Wang H Q, He Q S, Chen Y H, *et al.* Analysis of characteristics of black carbon concentration in Shanghai from 2008 to 2012 [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1215-1222.
- [20] Kirchstetter T W, Novakov T. Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating black carbon measurement methods [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(9): 1874-1888.
- [21] Hagler G S W, Yelverton T L B, Vedantham R, *et al.* Post-processing method to reduce noise while preserving high time resolution in aethalometer real-time black carbon data [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, **11**(5): 539-546.
- [22] Li B, Lei X N, Xiu G L, *et al.* Personal exposure to black carbon during commuting in peak and off-peak hours in Shanghai [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **524-525**: 237-245.
- [23] 施媛媛, 李仁东, 邱娟, 等. 基于 LUR 的二氧化氮浓度空间分布模拟及其下垫面影响因素分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2017, **19**(1): 10-19.
- Shi Y Y, Li R D, Qiu J, *et al.* Spatial distribution simulation and underlying surface factors analysis of NO₂ concentration based on Land Use Regression [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, **19**(1): 10-19.
- [24] Saraswat A, Apte J S, Kandlikar M, *et al.* Spatiotemporal land use regression models of fine, ultrafine, and black carbon particulate matter in new delhi, India [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(22): 12903-12911.
- [25] 蒋月华, 毛德华. 土地整理项目综合效益评价与可行性分析 [J]. *上海国土资源*, 2015, **36**(3): 57-60, 63.
- Jiang Y H, Mao D H. Comprehensive evaluation of benefits and a feasibility analysis of a land arrangement project [J]. *Shanghai Land and Resources*, 2015, **36**(3): 57-60, 63.
- [26] 余倩楠, 贾文晓, 潘晨, 等. 长三角地区城市形态对区域碳排放影响的时空分异研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, **25**(11): 44-51.
- She Q N, Jia W X, Pan C, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of urban forms' impact on regional carbon emissions in the Yangtze River Delta [J]. *China Population Resources and Environment*, 2015, **25**(11): 44-51.
- [27] 周纪, 陈云浩, 张锦水, 等. 北京城市不透水层覆盖度遥感估算 [J]. *国土资源遥感*, 2007, **19**(3): 13-17, 27.
- Zhou J, Chen Y H, Zhang J S, *et al.* Urban impervious surface abundance estimation in Beijing based on remote sensing [J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2007, **19**(3): 13-17, 27.
- [28] Bechle M J, Millet D B, Marshall J D. Effects of income and urban form on urban NO₂: global evidence from satellites [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(11): 4914-4919.
- [29] 吴健生, 廖星, 彭建, 等. 重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子 [J]. *环境科学*, 2015(3): 759-767.
- Wu J S, Liao X, Peng J, *et al.* Simulation and influencing factors of spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2015(3): 759-767.
- [30] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析 [M]. (第四版). 北京: 中国人民大学出版社, 2015.
- [31] Lei X N, Bian J W, Xiu G L, *et al.* The mobile monitoring of black carbon and its association with roadside data in the Chinese megacity of Shanghai [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(8): 7482-7489.
- [32] Montagne D R, Hoek G, Klompmaker J O, *et al.* Land use

- regression models for ultrafine particles and black carbon based on short-term monitoring predict past spatial variation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (14): 8712-8720.
- [33] 陈莉, 白志鹏, 苏笛, 等. 利用 LUR 模型模拟天津市大气污染物浓度的空间分布[J]. *中国环境科学*, 2009, **29** (7): 685-691.
- Chen L, Bai Z P, Su D, *et al.* Application of land use regression to simulate ambient air PM₁₀ and NO₂ concentration in Tianjin city[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29** (7): 685-691.
- [34] 许刚, 焦利民, 肖丰涛, 等. 土地利用回归模型模拟京津冀 PM_{2.5} 浓度空间分布[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, **30** (10): 116-120.
- Xu G, Jiao L M, Xiao F T, *et al.* Applying land use regression model to estimate spatial distribution of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, **30** (10): 116-120.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.
图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.
会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.
学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.
报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.
专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjks@rcees.ac.cn; 网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)