

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勖之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 虎发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联

王子屹^{1,2}, 李叙勇^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 了解城市基础要素与街尘污染物在空间上的关联特征有利于城市非点源污染源的定量解释及精准控制. 为探究城市基础要素与街尘营养元素含量空间分布之间的联系, 以武汉市汉阳区为案例研究区, 选取总氮(TN)、总磷(TP)、交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、钙结合态磷(Ca-P)、碎屑态磷(De-P)和有机态磷(Or-P)作为典型污染物指标, 利用7大类兴趣点(point of interest, POI)及路网核密度表征城市基础要素的空间分布状态, 通过相关分析, 探讨城市基础要素与街尘营养元素含量之间的关联特征. 结果表明, 汉阳区街尘中营养元素含量表现出明显的空间变异性, 其中, Al-P、Oc-P和Or-P含量的空间变异性普遍较Ex-P和Fe-P含量的空间变异性大, 而Ca-P和De-P含量的空间变异性则随街尘粒径的变化而有所差异. 各类城市基础要素核密度均与街尘营养元素含量表现出不同程度的相关性. 其中, Ex-P、Al-P、Oc-P和Or-P普遍与各类城市基础要素核密度呈现出负相关关系, 而TN、TP、Fe-P、Ca-P以及De-P则大体上与各类城市基础要素核密度表现出正相关关系. 相对而言, TN、Al-P、Fe-P、Ca-P和Or-P与各类城市基础要素核密度之间的相关性较其余几种污染物强, 但各污染物与城市基础要素核密度之间的相关性随街尘粒径变化而有所差异, 总体表现为街尘营养元素含量与各类城市基础要素核密度之间的相关性在街尘粒径 < 450 μm 时体现得更为明显, 而在粒径 < 150 μm 时表现得更为稳健.

关键词: 街尘; 城市基础要素; 营养元素; 非点源污染; 核密度估计; 兴趣点(POI); 路网

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0867-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202106057

Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation

WANG Zi-qiao^{1,2}, LI Xu-yong^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Understanding the spatial connection between urban basic elements and pollutants in road-deposited sediment (RDS) is beneficial to the quantitative explanation of source areas and the precise management of urban nonpoint source pollution. The objective of this study was to explore the spatial connection between urban basic elements and nutrient contents in RDS, using Hanyang district of Wuhan city as a case study area. Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), exchangeable phosphorus (Ex-P), aluminum-bound phosphorus (Al-P), iron-bound phosphorus (Fe-P), occluded phosphorus (Oc-P), apatite phosphorus (Ca-P), detrital apatite phosphorus (De-P), and organophosphorus (Or-P) were chosen as representative pollutants, using the kernel density of the road network and seven groups of points of interest to represent the spatial distribution of urban basic elements. Through correlation analysis, the relationship between urban basic elements and nutrient contents in RDS was examined. The results showed that nutrient contents in RDS from Hanyang varied significantly with location. Specifically, Al-P, Oc-P, and Or-P had greater spatial variability in contrast with that of Ex-P and Fe-P, and the spatial variabilities of Ca-P and De-P both varied considerably with the particle size of the RDS. All types of urban basic elements and nutrient contents in RDS were correlated to different extents. Ex-P, Al-P, Oc-P, and Or-P were negatively correlated with the kernel density of most urban basic elements, whereas TN, TP, Fe-P, Ca-P, and De-P showed a positive correlation with the kernel density of most urban basic elements. TN, Al-P, Fe-P, Ca-P, and Or-P appeared to have much stronger correlation with the kernel density of urban basic elements compared to other selected pollutants, whereas the extent of correlation between them was influenced by the particle size of the RDS. In general, the correlation between nutrient contents in RDS and the kernel density of urban basic elements was more significant when the particle size of the RDS was under 450 μm and more robust when the particle size of the RDS was under 150 μm .

Key words: road-deposited sediment; urban basic elements; nutrients; nonpoint source pollution; kernel density estimation; point of interest (POI); road network

城市地区是人类强烈活动改造自然地理环境的热点区域^[1]. 城市化进程向城市地区引入大量硬化地表^[1~4], 为各类污染物的累积提供了载体. 在各类工商业及交通等活动的影响下, 大量污染物被引入城市环境并累积在硬化地表, 当降雨发生时, 这些污染物随降雨径流进入城市水体, 进而造成潜在的水生态恶化风险^[1~3]. 与此同时, 城市化还改变了河网水系的自然状态, 降低了河流自净能力^[4], 进一步

突出了城市地区非点源污染问题的严峻性.

源头控制是当前广泛应用的非点源污染控制策略^[5,6], 因而对“源”的刻画是研究人员的关注重点之一. 在城市环境中, 街尘是各类污染物的重要

收稿日期: 2021-06-07; 修订日期: 2021-06-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2102900)

作者简介: 王子屹(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市非点源污染, E-mail: ZQ.W_soccer@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: xyli@cees.ac.cn

载体,是非点源污染的重要贡献源^[2,7],故有大量研究针对街尘负载污染物特征及其影响因素做了探讨. 现有研究表明,街尘粒径^[1,8~12]、城市功能区^[1,7,9,12,13]、城乡梯度^[14~17]、路网密度^[16]和道路等级^[17,18]等因素均会影响街尘中负载的污染物量. 然而,上述因素在大尺度空间上量化解释街尘负载污染物量的特征时通常具有一定的局限性. 一方面,城市功能区及城乡梯度在边界上一般具有一定程度的模糊性,以往研究对其的定义存在一定的主观性,可能模糊一些关键的城市地理环境特征对街尘负载污染物量的影响效应;另一方面,从城市道路特征出发解释街尘负载污染物量的空间分布特征,虽可较好地定量二者之间的关系,但忽略了其他城市基础要素对街尘负载污染物量的可能影响,可能无法充分解释街尘负载污染物量的空间差异性.

地理环境特征往往决定某种地理变量在空间上的分布特征^[19,20]. 在城市地区,各类用于工商业及交通等的建筑及构筑物是组成城市独特地理环境的基础要素,而街尘负载污染物量则可视作城市环境中的一类地理变量,故二者在空间上可能存在广泛的联系. 此外,核密度估计是一种广泛用于地理空间对象格局分析的技术手段,结合兴趣点(POI)等地理空间大数据,可以很好地量化城市基础要素的空间分布状态^[21~23]. 因此,以城市基础要素密度空间分布为切入点,可能有利于在大尺度空间上量化解释街尘负载污染物量的差异特征.

基于此,本研究旨在探究城市基础要素与街尘负载污染物量在空间上的关联特征. 考虑到营养元素是城市非点源污染中最主要的一类污染物^[12,24],是导致城市水体水质恶化的重要污染物^[24,25],本研究选取街尘中营养元素作为目标污染物,探讨其与城市基础要素密度空间分布的关联特征,以期为城市非点源污染源区的定量刻画及精细化控制提供科

学指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取武汉市汉阳区作为案例研究区. 汉阳区是武汉市中心城区之一,区域面积 111.54 km²^[26],人口密度 6 007 人·km⁻²^[26],区内工商业及交通等城市基础要素广布,并具有一定的空间变化特征. 汉阳区多年平均降水量为 1 301.2 mm,降水主要集中在 5~8 月,区内湖泊众多,主要包括龙阳湖、墨水湖和月湖等^[27]. 长期以来,汉阳区内主要湖泊水质普遍较差^[28],其中,龙阳湖及墨水湖水质常年劣于 V 类地表水标准^[27~30],水体长期处于中至重度富营养状态^[27,29,30],主要污染物为总磷、氨氮和化学需氧量等^[29].

1.2 基础数据获取及处理

1.2.1 数据获取及预处理

兴趣点(point of interest, POI)是基于位置服务衍生出的一类地理空间大数据,其更新速度快,包含信息丰富,可很好地代表城市各种要素的空间分布状况及不同区域的功能特征^[21~23,31,32]. 因此,本研究在考虑不同兴趣点对城市功能特征代表性的基础上,于 2020 年 9 月从高德开放平台(<https://developer.amap.com/>)抓取 23 类兴趣点. 对初步获得的兴趣点数据,剔除重复、尚在规划中和暂停营业的点位,并将尚在建设中的住宅区兴趣点提取出来作为建筑工地兴趣点,形成初始数据集. 由于原始兴趣点数据分类较细且相互之间具有一定的相似性,可能不利于后续与街尘负载污染物量之间的关联分析,故结合各类兴趣点所反映的城市要素功能性特征对人群、车流量、车型等的可能影响特征及其对街尘污染物的潜在贡献潜力^[33~37],并参考文献[38]对兴趣点进行重分类,共分为 7 大类(表 1).

表 1 兴趣点重分类

Table 1 Reclassification of POI

新类别代码	原兴趣点类别	兴趣点数/个
I	公交车站和长途汽车站	352
II	住宅区、学校和地铁站	1 369
III	工厂、汽车养护/装饰、洗车场、汽车维修、摩托车维修、加油站和建筑工地	776
IV	餐饮服务、超级市场、综合市场、商场、特色商业街和宾馆酒店	4 074
V	运动场馆和娱乐场所	707
VI	综合医院和专科医院	139
VII	风景名胜和公园广场	77

此外,道路也是城市中一类重要的基础要素. 本研究于 2020 年 9 月从众源地图数据网站 OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>)获

取路网数据,并基于 Google 影像及高德地图对原始路网数据进行修正. 以 OSM 道路数据所包含的道路类型信息为基础,将道路划分为快速路、主干路、

次干路和支路^[39]。

1.2.2 核密度估计

核密度估计是一种非参数概率密度估计方法，其受数据分布的影响较小，可很好地表达研究对象在空间上的分布状态^[22,23,32]。核密度的计算公式如下^[23,32,40]：

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\pi h^2} K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \tag{1}$$

式中， h 为带宽， K 为核函数， n 为以点 x 为中心且带宽 h 为半径的圆域内所包含的要素个数。

带宽是影响核密度估计结果的重要因素。对于兴趣点，可采用 k 个最近邻点距离法确定带宽^[23,40]：

$$h = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k d_{ij} \right) / k \times n \tag{2}$$

式中， h 为带宽， d_{ij} 为点 i 与点 j 之间的距离， n 为总的兴趣点个数， k 为兴趣点 i 周围邻近点的个数。

一般而言，兴趣点的影响范围大体在街区尺度^[23]，故以街区间的平均距离作为兴趣点核密度估计最适带宽的参考值。利用路网划分街区^[23]，计算得到街区平均距离为 295.66 m。对每类兴趣点，不断调整 k 值使计算得到的带宽尽可能与街区平均距离相近，最终得到每类兴趣点核密度估计的最适带宽（表 2）。

表 2 各类兴趣点最适带宽
Table 2 Optimal bandwidth of POIs

新类别代码	k 值	最适带宽/m
I	1	248.89
II	8	299.00
III	6	302.75
IV	32	294.72
V	6	300.86
VI	1	238.12
VII	1	420.25

对于道路，选取主干路路段平均长度（1 302.38 m）作为路网核密度估计的最适带宽。此外，为在一定程度上代表交通量特征，参考文献^[39]中规定的各级道路设计速度及车道数，对各级道路赋予权重（表 3），计算公式如下：

$$w_m = \frac{L_m \cdot S_m}{L_i \cdot S_i} \tag{3}$$

式中， w_m 为第 m 级道路权重（ $m = \text{i, ii, iii, iv}$ ）； L_m 为第 m 级道路车道数（i 和 ii 级道路取 6，iii 级道路取 3，iv 级道路取 2）； S_m 为第 m 级道路设计速度（i 级道路取 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，ii 级道路取 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，iii 级道路取 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，iv 级道路取 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ）。

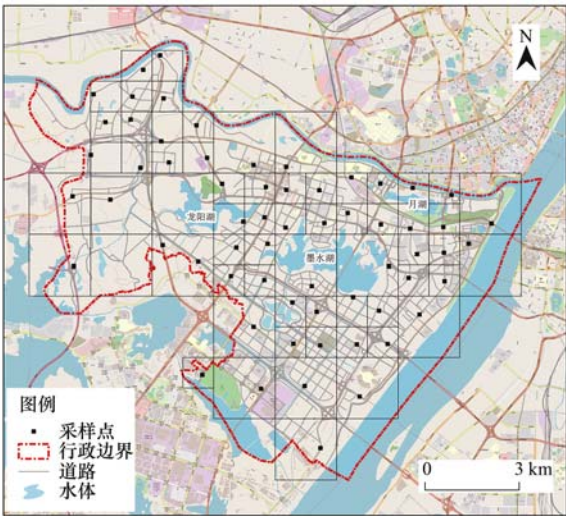
表 3 各级道路权重

Table 3 Weights of different road types

道路类别	编码	权重
快速路	i	1
主干路	ii	0.625
次干路	iii	0.25
支路	iv	0.083

1.3 采样点布置与样品采集

根据各城市基础要素核密度值的空间分布特征，基于网格布点法的思想，首先以 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的网格划分研究区，然后对格网内城市基础要素核密度值较大且空间变异性较强的网格进一步利用 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的网格细分，最终形成采样网格。根据实际道路布局，在每个格网内选择一个代表性采样点。为控制路面材料的可能影响，采样点尽可能布置在沥青路面上。此外，各采样点间距控制在 1 km 左右，以保证采样点间的相对独立性。基于上述规则，在研究区内共布设 63 个采样点（图 1）。



底图来源：OpenStreetMap；因实际道路布局限制，有两个格网内未布设采样点，只在二者交点附近布置了 1 个采样点

图 1 街尘采样点布置

Fig. 1 Distribution of RDS sampling sites

所有样品均采集于 2020 年 11 月，为保证街尘累积达到相对的动态平衡，在至少 7 d 无雨后进行街尘样品的采集^[41]。采样时，在采样点附近由路缘至道路中心约 $3 \sim 6 \text{ m}^2$ 的范围内利用笤帚、簸箕和真空吸尘器采集街尘样品，并将样品储存在塑料自封袋中。

1.4 样品实验室分析

采集的街尘样品先置于阴凉通风处干燥一周，然后进行粒径筛分。由于粒径大于 $2\,000 \mu\text{m}$ 的街尘负载的污染物量较少且不易被冲刷，对城市水体水质的影响十分有限^[9]，故样品筛分时先遗弃粒径大于 $2\,000 \mu\text{m}$ 的街尘，然后将剩余部分筛分为 4 组，即

450 ~ 2 000、150 ~ 450、63 ~ 150 和 < 63 μm .

鉴于营养元素在城市非点源污染贡献中的普遍性,并参考研究区内主要受纳水体的污染情况,选取总氮(TN)、总磷(TP)、交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、钙结合态磷(Ca-P)、碎屑态磷(De-P)和有机态磷(Or-P)作为典型污染物指标.其中,总氮利用元素分析仪(Vario EL III)测定^[16];7种形态磷参考朱广伟等^[42]和李如忠等^[7]提出的方法逐步提取,然后利用钼酸铵分光光度法测定^[43];总磷则为7种形态磷含量之和^[7].

1.5 相关分析实现方法

结合缓冲区分析与相关分析以定量研究城市基础要素与街尘营养元素含量在空间上的联系特征.认为每个采样点可大体反映其附近一到两个街区范围内(约300 ~ 600 m)城市基础要素分布情况对街尘营养元素含量的影响,由此设定缓冲区半径为500 m.以采样点为中心做缓冲区并去除与水域重合部分,计算缓冲区内各类城市基础要素核密度均值,然后与采样点对应的营养元素含量进行相关分析.由于数据分布的非正态性以及数据间可能存在的非线性关系,故选用Spearman秩相关分析探讨城市基础要素与街尘营养元素含量之间的相关性.

缓冲区分析利用ArcMap 10.6(©2017 Esri)实现,相关分析则通过R语言完成.

2 结果与分析

2.1 研究区城市基础要素空间分布特征

由核密度估计的结果可以看出,汉阳区内各类城市基础要素表现出比较明显的东西分异特征(图2).以龙阳湖和墨水湖之间的二环线-龙阳大道一线为大致分界,向东道路、车站类(POI-I)、住宅学校类(POI-II)、餐饮商场类(POI-IV)、娱乐休闲类(POI-V)、医院类(POI-VI)和景点类(POI-VII)要素具有明显的聚集特征,而工厂汽修类(POI-III)要素则主要集中在该线以西的区域.实地调查结果表明,汉阳区西北部四台地区集中了多个工业园区;中部和东北部是区内著名的王家湾和钟家村商圈所在地,聚集了众多商场、餐馆和酒店等服务性设施;区内居民小区主要集中在二环线沿线及环墨水湖一带,故而学校和医院等社会基础设施也聚集于此;古琴台、归元禅寺和武汉动物园等著名景点主要分布于该区东北部;二环线、三环线、琴台大道、龙阳大道、汉阳大道、鹦鹉大道和汉新大道等构成区内路网的主要骨架,公交线网则以此为基础构建,主要分布于该区东部.与实际情况相对比,可见核密度值很好地反映了各类城市基础要素在空间上的分布特征,较为准确地代表了汉阳区不同区域内各类城市基础要素的聚集及散布状态.

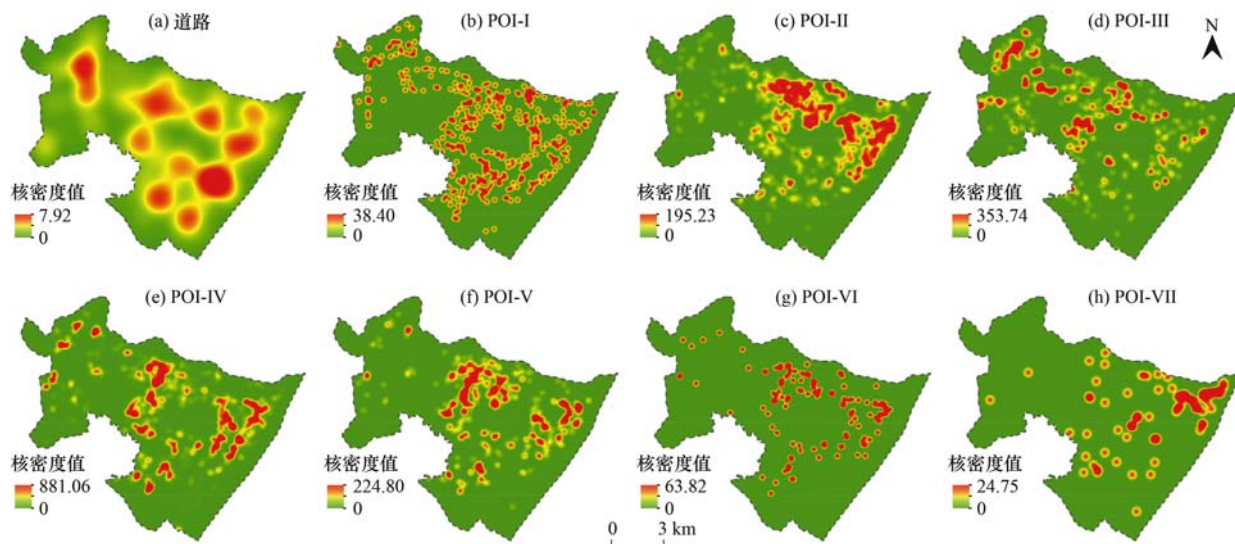


图2 8类城市基础要素核密度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of kernel density of eight groups of urban basic elements

2.2 研究区街尘营养元素含量特征

对汉阳区不同粒径街尘中营养元素含量进行统计(表4).可以看出,各粒径街尘中氮素含量显著高于磷素含量.在粒径<63、63~150、150~450和450~2 000 μm 的街尘中, $\omega(\text{TN})$ 均值分别为

1 651.24、1 362.63、1 052.49和1 569.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而 $\omega(\text{TP})$ 均值则分别为395.52、385.84、258.26和267.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.不同形态磷素在街尘中的含量也有明显差异,总体而言,De-P、Ca-P、Ex-P和Fe-P为街尘中主要的磷素形态,且De-P在街尘中的平均

含量相对最高；而 Or-P、Al-P 和 Oc-P 这 3 种形态磷素在街尘中的含量极少,其在各组粒径街尘中的含量均不超过 4 mg·kg⁻¹.

随粒径变化,街尘中营养元素的含量也呈现出一定的变化特征(表 4).当街尘粒径 <450 μm 时,街尘中 TN 的平均含量随粒径的增大而明显减小,但当街尘粒径为 450~2 000 μm 时,街尘中 TN 的平均含量又有所升高,仅次于 <63 μm 街尘中 TN 的平均含量.尽管街尘中 TP 的平均含量明显随街尘粒径的增大而减小,但不同形态磷素在街尘中的含量随街尘粒径的变化特征却并不完全与 TP 一致.具体来说,Fe-P 和 De-P 在街尘中的平均含量大体随街尘粒径的增大而降低;Ca-P 和 Or-P 在街尘中的平均含量则随街尘粒径的增大而有所上升;Al-P 和 Oc-P 在各粒径段街尘中的平均含量大体相当;而 Ex-P 则较为特殊,其在粒径 <63 μm 和介于 450~2 000 μm 之间的街尘中平均含量相对较高,而在粒径为 63~450 μm 的街尘中的平均含量相对较低.

此外,由变异系数的计算结果可知,街尘中氮磷

元素的含量表现出不同程度的空间变异性.总体而言,若以总量计,街尘中氮素的空间变异性较磷素要强,各粒径段街尘中 TN 含量的变异系数均大于 TP 含量的变异系数,这与以往的研究结果较为吻合^[7].然而,街尘中不同形态磷素含量的空间变异性又有显著差异.整体而言,Al-P、Oc-P 和 Or-P 在各粒径段街尘中含量的变异系数普遍较大,特别是 Al-P 和 Oc-P,其在各粒径段街尘中含量的变异系数普遍超过 200%.相对而言,街尘中 Ex-P 和 Fe-P 含量的变异系数较低,普遍 <50%.街尘中 Ca-P 和 De-P 含量的变异系数均随街尘粒径的变化而有较大波动,但二者在街尘中含量的变异系数随街尘粒径的变化特征又有所差异.街尘中 Ca-P 含量的变异系数在街尘粒径为 450~2 000 μm 时较大,可达 100.28%;而当街尘粒径 <450 μm 时,街尘中 Ca-P 含量的变异系数则在 40% 左右.对于 De-P,其在街尘中含量的变异系数则在街尘粒径 <150 μm 时相对较大,约 90%;而当街尘粒径 >150 μm 时,De-P 含量的变异系数则 <50%.

表 4 汉阳区不同粒径街尘中营养元素含量统计值

Table 4 Statistics of nutrient content in grain size fractions of RDS from Hanyang

粒径/μm	项目	TN	Ex-P	Al-P	Fe-P	Oc-P	Ca-P	De-P	Or-P	TP
<63	最大值/mg·kg ⁻¹	7 816.67	243.37	10.79	89.40	5.65	120.13	1932.01	8.19	2027.55
	最小值/mg·kg ⁻¹	28.05	24.22	0	14.12	0	12.81	103.76	0	224.09
	平均值/mg·kg ⁻¹	1 651.24	62.56	0.76	36.99	0.39	48.69	244.78	1.35	395.52
	变异系数/%	72.85	50.71	236.22	36.87	253.15	42.66	90.82	148.50	55.18
63~150	最大值/mg·kg ⁻¹	7 963.01	101.01	7.06	63.40	5.65	106.93	2031.02	20.99	2101.22
	最小值/mg·kg ⁻¹	44.34	17.06	0	8.61	0	11.49	115.64	0	244.44
	平均值/mg·kg ⁻¹	1 362.63	50.64	0.92	30.20	0.38	42.49	259.83	1.39	385.84
	变异系数/%	93.81	36.97	194.80	42.36	265.16	39.75	89.03	211.87	58.11
150~450	最大值/mg·kg ⁻¹	5 825.55	100.79	17.72	48.12	2.77	113.14	359.80	13.81	449.87
	最小值/mg·kg ⁻¹	40.66	16.37	0	5.64	0	14.13	52.28	0	151.35
	平均值/mg·kg ⁻¹	1 052.49	50.13	1.07	26.90	0.28	51.80	124.62	3.46	258.26
	变异系数/%	87.02	40.54	261.84	34.38	218.80	36.33	38.83	115.65	18.92
450~2 000	最大值/mg·kg ⁻¹	7 218.23	230.30	6.70	104.65	4.75	330.96	365.05	16.78	705.51
	最小值/mg·kg ⁻¹	134.12	19.31	0	0	0	2.24	24.55	0	114.69
	平均值/mg·kg ⁻¹	1 569.80	55.11	0.51	26.41	0.49	54.20	127.98	2.75	267.45
	变异系数/%	91.56	61.34	227.95	72.27	229.05	100.28	48.78	137.05	43.95

2.3 街尘营养元素含量与城市基础要素关联分析

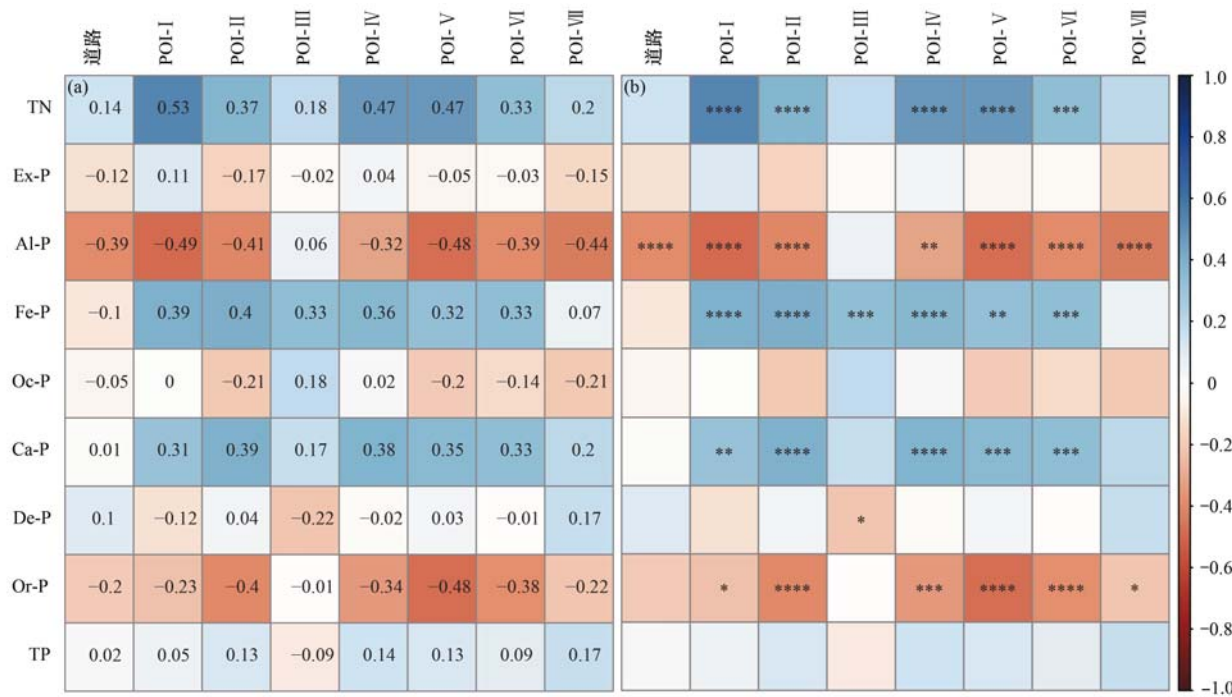
如前所述,研究区内各类城市基础要素和街尘中营养元素含量均表现出明显的空间变异性.为探究二者空间变异性之间是否具有特定的联系,借助 Spearman 秩相关分析进行探讨.结果表明,在各粒径段,城市基础要素核密度值均与街尘中营养元素含量表现出不同程度的相关性,不过氮素和各形态磷素与城市基础要素之间表现出不同趋势和强度的关联特征(图 3~6).从污染物的角度来说,TN、Fe-P、Ca-P、De-P 和 TP 普遍与各类城市基础要素呈正相关关系;而 Ex-P、Al-P、Oc-P 和

Or-P 则大体与各类城市基础要素表现出负相关关系.不过,Ex-P 和 De-P 与各类城市基础要素之间的相关性较弱,普遍在 $\alpha=0.05$ 的水平上不显著,而 TN、Al-P、Fe-P 与多数城市基础要素之间的相关性较强,普遍在 $\alpha=0.05$ 的水平上显著.从城市基础要素的角度而言,道路和工厂汽修类(POI-Ⅲ)要素与街尘中营养元素含量之间的相关性整体较弱,但特定形态的磷素(如 Al-P、Fe-P 和 Or-P)仍可能与这两类要素之间存在特定的联系;而车站类(POI-I)、住宅学校类(POI-II)、餐饮商场类(POI-IV)、娱乐休闲类(POI-V)以及医院类

(POI-VI)要素则与街尘中营养元素含量普遍存在较为显著的相关关系。

街尘中营养元素含量与城市基础要素之间的相关性在不同粒径街尘中也表现出一定的差异,整体而言,街尘营养元素含量与城市基础要素核密度之间的相关性在街尘粒径 <450 μm 时表现得更为显著(图3~6)。然而,街尘中氮素和不同形态磷素与城市基础要素核密度之间的相关程度随街尘粒径的变化特征有比较明显的差异。TP在粒径为63~150 μm和450~2 000 μm的街尘中的含量与住宅学校类(POI-II)、餐饮商场类(POI-IV)、娱乐休闲类

(POI-V)和医院类(POI-VI)要素的相关性普遍在 α=0.05 的水平上显著(图4和图6),而在其余两组粒径段中这种关系并不显著(图3和图5);Oc-P含量在街尘粒径大于150 μm时才与车站类(POI-I)、住宅学校类(POI-II)、娱乐休闲类(POI-V)和景点类(POI-VII)要素表现出较为显著的相关性(图5和图6);TN、Al-P和Or-P在街尘中的含量普遍在街尘粒径 <450 μm 时与各类城市基础要素之间的相关性更强(图3~6);而街尘中Fe-P和Ca-P含量与各类城市基础要素之间的相关性则受街尘粒径的影响相对较小(图3~6)。



(a) 相关系数矩阵, (b) 相关关系检验 P 值矩阵; * 表示 $P < 0.1$, ** 表示 $P < 0.05$, *** 表示 $P < 0.01$, **** 表示 $P < 0.005$,下同

图3 粒径 <63 μm 街尘中营养元素含量与城市基础要素核密度值相关系数和 P 值矩阵

Fig. 3 Correlation coefficient and significance matrix of the relationship between kernel density of urban basic elements and nutrient content in <63 μm grain size fractions

3 讨论

3.1 城市基础要素与街尘营养元素含量关联特征的稳健性

由于本研 究所得到的街尘营养元素含量与城市基础要素核密度之间的相关关系基于缓冲区分析,因而有必要就缓冲区大小对分析结果的影响进行讨论,以探讨上述相关关系的稳健性。参考汉阳区街区间的平均距离(295.66 m),设置较小半径的缓冲区(半径为300 m)再次进行上述相关分析,借鉴模型评估中百分偏差(PBIAS)的概念^[44],评估缓冲区半径的变化对上述相关关系的影响。

首先,此处对百分偏差的定义为:缓冲区半径为300 m时计算得到的各因素间相关系数相对于缓冲

区半径为500 m时(初始值)计算得到的各因素间相关系数变化的百分比。修改后百分偏差计算公式如下:

$$PBIAS = \frac{(\rho_{i,j,300} - \rho_{i,j,500})}{\rho_{i,j,500}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $\rho_{i,j,300}$ 表示缓冲区半径为300 m时第 i 类污染物指标与第 j 类城市基础要素之间的 Spearman 秩相关系数, $\rho_{i,j,500}$ 表示缓冲区半径为500 m时第 i 类污染物指标与第 j 类城市基础要素之间的 Spearman 秩相关系数。其中, i 可取9个代表性污染物指标中的一个; j 可取8类城市基础要素中的一类。计算得到的结果在表5中列出。

整体而言,对于粒径 <150 μm 的街尘中营养元素含量与城市基础要素核密度间的相关关系,改变

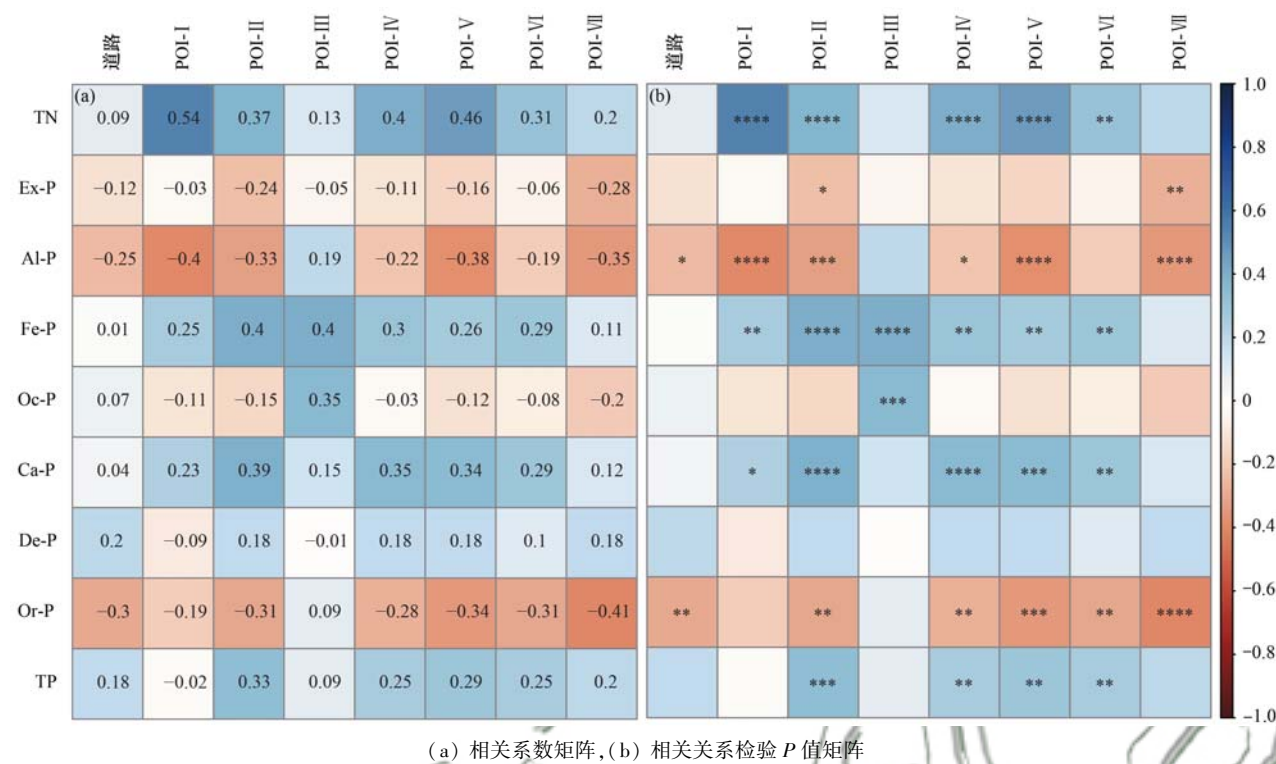


图 4 粒径为 63 ~ 150 μm 街尘中营养元素含量与城市基础要素核密度值相关系数和 P 值矩阵

Fig. 4 Correlation coefficient and significance matrix of the relationship between kernel density of urban basic elements and nutrient content in 63-150 μm grain size fractions

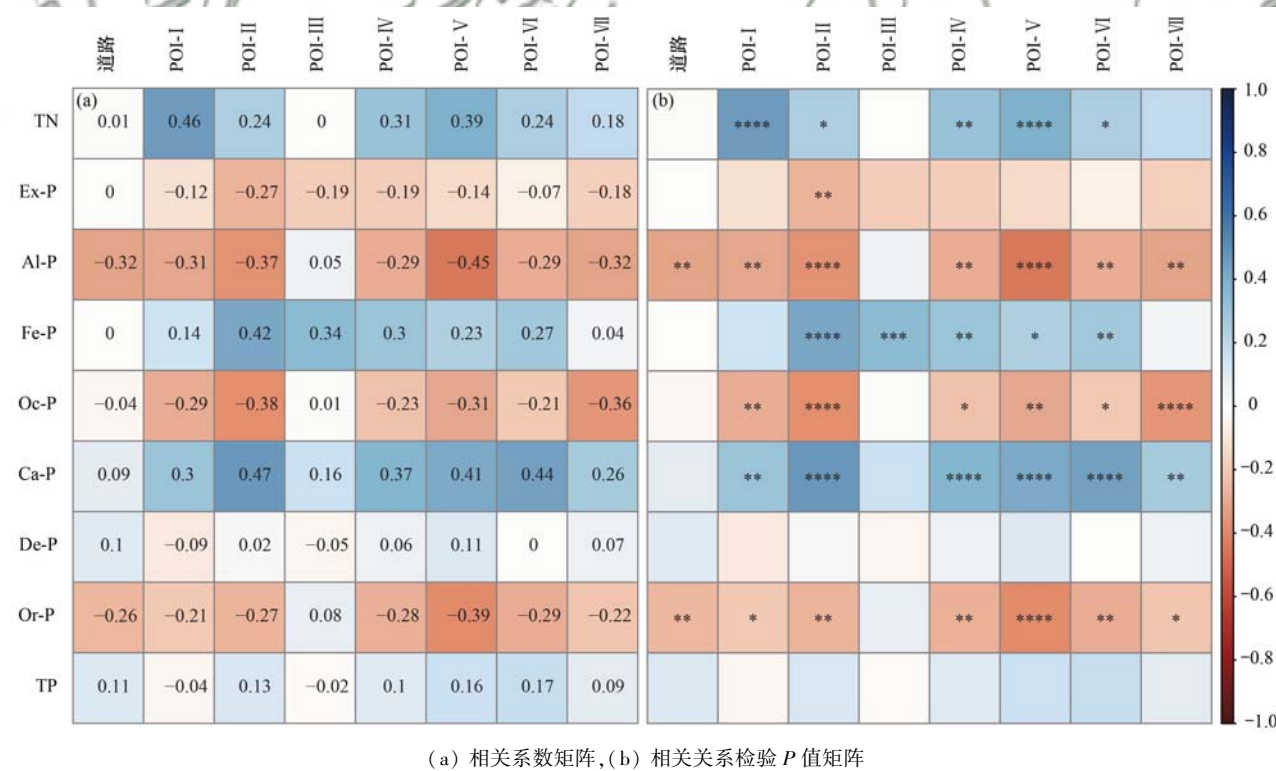
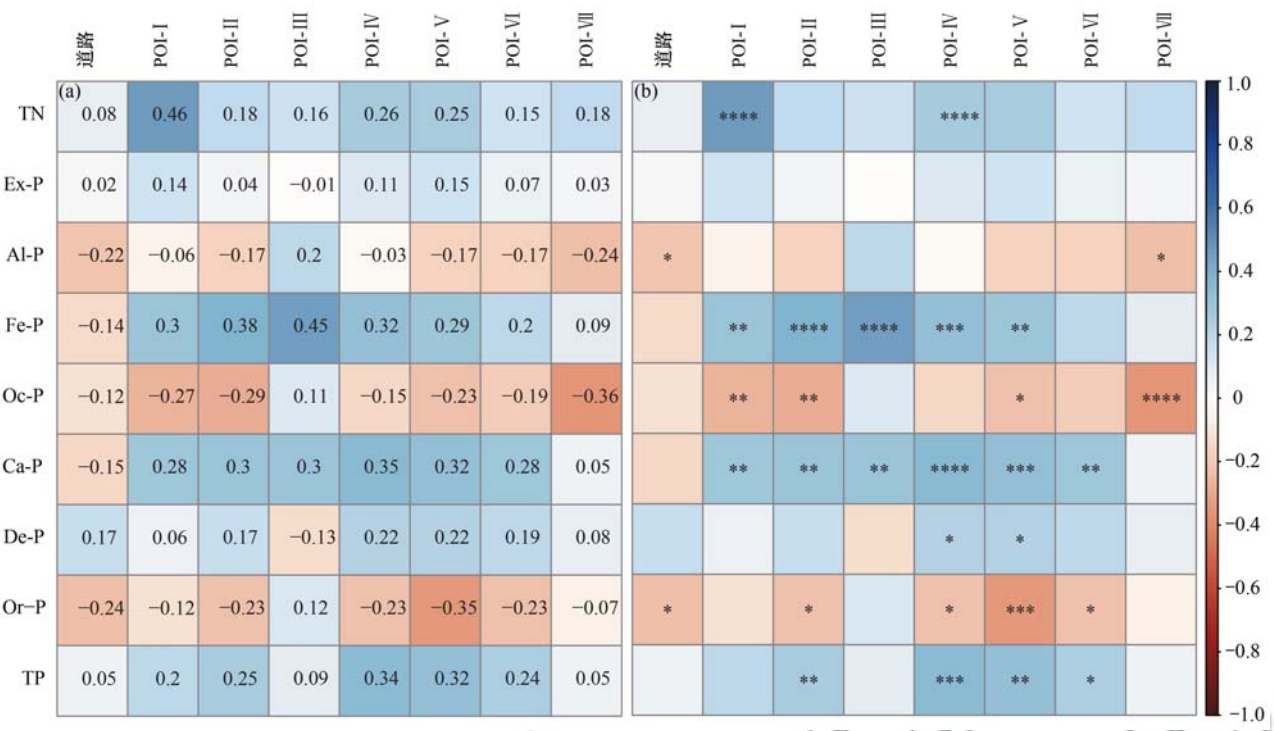


图 5 粒径为 150 ~ 450 μm 街尘中营养元素含量与城市基础要素核密度值相关系数和 P 值矩阵

Fig. 5 Correlation coefficient and significance matrix of the relationship between kernel density of urban basic elements and nutrient content in 150-450 μm grain size fractions

缓冲区大小所造成的扰动相对较小. 具体表现为因素间相关系数的变化幅度相对较小, 百分偏差普遍 < 15%. 同时, 因素间相关关系显著性的改变也相对不明显. 改变缓冲区半径后, 66 对原本在 $\alpha = 0.1$ 的水平上显著的因素间相关关系仅有 5 对的显著性发生改变, 即使将显著性水平阈值提高到 0.05, 因



(a) 相关系数矩阵, (b) 相关关系检验 P 值矩阵
图 6 粒径为 450 ~ 2 000 μm 街尘中营养元素含量与城市基础要素核密度值相关系数和 P 值矩阵
Fig. 6 Correlation coefficient and significance matrix of the relationship between kernel density of urban basic elements and nutrient content in 450-2 000 μm grain size fractions

素间显著性改变的比例也仅有 4/59. 这说明, 街尘粒径 $< 150 \mu\text{m}$ 时, 城市基础要素核密度与街尘中营养元素含量之间的相关性具有较好的稳健性. 然而, 当街尘粒径大于 $150 \mu\text{m}$ 时, 缓冲区大小的改变对城市基础要素核密度与街尘营养元素含量之间的相关关系有相对较大的影响. 改变缓冲区半径后, 在 $\alpha = 0.1$ 和 $\alpha = 0.05$ 的水平上因素间显著性改变的比例分别上升至 11/72 和 10/56.

就污染物而言, 街尘中 TN、Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量与 8 类城市基础要素核密度间的相关关系具有相对较好的稳健性. 其中, Ca-P 含量与各类城市基础要素核密度间的相关性最为稳健, 改变缓冲区半径所造成的相关系数百分偏差仅有一项超过 20%, 其余均 $< 15\%$, 同时, 这种相关关系的显著性也均未变差. 相对而言, 街尘中 Oc-P、De-P 和 Or-P 含量与各类城市基础要素核密度间的相关性则对缓冲区大小的变化较为敏感, 改变缓冲区半径导致因素间在 $\alpha = 0.1$ 的水平上显著性变化的比例分别为 3/12、3/4 和 7/24.

从城市基础要素的角度来说, 道路、住宅学校类 (POI-II) 和娱乐休闲类 (POI-V) 要素与街尘营养元素含量之间的相关性较为稳健, 特别是道路, 改变缓冲区半径所带来的相关系数的百分偏差均 $< 2\%$, 在 $\alpha = 0.1$ 的水平上, 也仅有其与粒径为 150

$\sim 450 \mu\text{m}$ 的街尘中 Or-P 含量相关关系的显著性发生改变. 车站类 (POI-I) 和景点类 (POI-VII) 要素与街尘中营养元素含量之间的相关性则受缓冲区大小的影响相对较为明显, 改变缓冲区半径导致因素间相关系数变化的百分偏差超过 20% 的比例分别为 6/18 和 4/12.

3.2 关联城市基础要素与街尘污染特征对非点源污染控制的指导意义

由上述分析结果可以看出, 各类城市基础要素与街尘中营养元素含量在空间分布上存在着一定程度的关联特征, 而地理环境特征往往决定着特定地理现象在空间上的发生情况^[19,20], 这意味着利用城市基础要素的空间分布解释街尘污染特征的空间变化具有相当的潜力, 同时, 利用这种关系指导实际城市非点源污染的控制也具有较多优点. 首先, 城市基础要素的空间分布格局可利用兴趣点核密度进行定量表达, 而兴趣点数据更新速度快、精度较高且开放性较好^[21], 可以较为实时、准确地对城市基础要素的空间分布状况进行量化描述, 这种特性是传统土地利用等数据所不具备的. 其次, 城市基础要素的变化特征往往在空间上体现得更为明显, 而在时间维度上具有一定的稳定性 (其随时间的变化往往是以月或年为基本单位的), 这使得其相对于一些时空变异性均较强的因素 (如交通量等), 更易于和动

表 5 改变缓冲区半径后相关系数百分偏差¹⁾/ %
Table 5 Percent bias of correlation coefficient caused by changing buffer radius/ %

粒径/μm	项目	道路	POI- I	POI- II	POI- III	POI- IV	POI- V	POI- VI	POI- VII
<63	TN		- 6. 49	3. 69	16. 78 *	13. 29	11. 79	18. 36	
	Ex-P								
	Al-P	- 1. 89	- 19. 43	- 3. 81		7. 59	- 8. 32	0. 66	- 12. 93
	Fe-P		6. 87	5. 04	- 13. 33	14. 03	10. 39	18. 88	
	Oc-P								
	Ca-P		9. 97	7. 42		7. 51	12. 35	21. 20	
	De-P				- 9. 73 *				
	Or-P		- 46. 28 *	- 1. 90		- 5. 74	- 5. 03	- 4. 82	- 27. 86 *
	TP								
63 ~ 150	TN		- 3. 16	8. 13		20. 43 **	11. 28	17. 95 **	
	Ex-P			- 19. 15 *					13. 65
	Al-P	- 1. 19	- 29. 45	- 2. 35		15. 42 **	- 1. 33		- 11. 53
	Fe-P		41. 37	- 1. 43	- 9. 00	10. 29	- 0. 59	10. 27	
	Oc-P				- 9. 71				
	Ca-P		11. 04 **	1. 19		4. 33	11. 97	13. 12	
	De-P								
	Or-P	- 0. 43		- 7. 09		- 9. 37	- 3. 81	- 7. 60	- 13. 14
	TP			- 2. 16		- 15. 55	- 9. 41	- 3. 50	
150 ~ 450	TN		- 10. 37	0. 34		20. 88	12. 86	17. 40 **	
	Ex-P			- 10. 77 **					35. 07 *
	Al-P	1. 27	- 28. 04 **	0. 09		9. 15	- 11. 80	- 12. 32	- 18. 03
	Fe-P			- 3. 84	- 18. 27	2. 00	1. 38	21. 16	
	Oc-P		- 17. 50 **	- 7. 32		- 13. 69 *	- 10. 95	17. 68 **	- 2. 14
	Ca-P		- 1. 38	1. 53		12. 35	1. 16	8. 91	1. 98
	De-P								
	Or-P	- 1. 65 *	- 25. 60 **	- 14. 53		- 9. 65	- 7. 98	- 10. 16	- 26. 60 *
	TP								
450 ~ 2 000	TN		- 18. 55			8. 34	17. 68		
	Ex-P						47. 12		
	Al-P	- 0. 13							- 28. 96 *
	Fe-P		- 30. 53 **	- 3. 62	- 18. 05	- 6. 53	6. 92		
	Oc-P		- 7. 69	- 8. 48			- 16. 01 *	17. 72 *	- 9. 44
	Ca-P		- 12. 06	9. 25	- 9. 94	8. 39	14. 63	- 6. 90	
	De-P					- 16. 87 *	- 2. 65	30. 90 *	
	Or-P	- 3. 32		- 10. 38 *		- 17. 35 *	- 10. 25	- 20. 73 *	
	TP			5. 78		- 0. 10	14. 39	26. 06 **	

1) 只列出缓冲区半径为 300 m 或 500 m 时两因素间相关关系至少在 $\alpha=0.1$ 的水平上显著时对应各项的百分偏差值; * 表示以 $\alpha=0.1$ 为显著性阈值时,改变缓冲区半径导致显著性改变; ** 表示以 $\alpha=0.05$ 为显著性阈值时,改变缓冲区半径导致显著性改变

态平衡状态下街尘负载污染物量之间建立相对稳定的定量关系,从而在不同情境下具有相对更高的适应性.此外,由于城市基础要素空间分布状态的描述无需像土地利用那样依托特定的斑块,因此利用城市基础要素与街尘污染特征在空间分布上的联系可让非点源污染关键源区的识别在更为精细的尺度上实现,从而帮助提升非点源污染源头控制措施选址决策的准确度.不仅如此,城市基础要素的空间布局本身具有一定的可调节性,故而基于城市基础要素与街尘污染特征在空间上的关联情况,可在城市规划阶段先行考虑非点源污染控制问题,既优化城市布局,又在一定程度上控制非点源污染问题,如此可

在一定程度上帮助协调非点源污染控制与城市建设之间的矛盾.

4 结论

(1) 各类城市基础要素与街尘营养元素含量在空间上存在一定的关联特征,体现了不同区域城市基础要素分布所决定的人类活动特征对街尘营养元素含量的影响效应.但是,道路和工厂汽修类(POI-III)要素核密度与街尘营养元素含量之间的相关性相对较弱,表明上述要素的空间分布对街尘营养元素含量空间分布特征的影响效应较弱.

(2) 街尘中不同氮磷元素含量与城市基础要素

核密度之间的相关关系存在明显差异. 其中, TN、TP、Fe-P、Ca-P 和 De-P 含量普遍与城市基础要素核密度之间表现为正相关, Ex-P、Al-P、Oc-P 和 Or-P 含量则普遍与城市基础要素核密度之间表现为负相关, 但 Ex-P 和 De-P 含量与城市基础要素核密度之间的相关关系整体较弱. 整体而言, 城市基础要素核密度与街尘营养元素含量之间的相关性普遍在街尘粒径 $< 450 \mu\text{m}$ 时更为显著.

(3) 各粒径段街尘中营养元素含量与城市基础要素核密度之间的相关关系在不同程度上受到尺度效应的影响. 整体而言, 城市基础要素与街尘营养元素含量在空间上的关联特征在街尘粒径 $< 150 \mu\text{m}$ 时具有相对较好的稳健性, 说明城市基础要素的空间分布对粒径 $< 150 \mu\text{m}$ 的街尘中营养元素含量空间异质性的解释能力受尺度效应的影响相对较小.

(4) 利用城市基础要素的空间分布可在一定程度上定量解释动态平衡状态下街尘中营养元素含量的空间变异性. 在城市非点源污染管理决策时, 可加入对城市基础要素空间分布特征的考量, 有利于大尺度空间上非点源污染物空间分布情况的定量理解, 提高城市地区非点源污染源头控制方案的决策效率.

参考文献:

- [1] Miguntanna N P. Nutrients build-up and wash-off processes in urban land uses [D]. Brisbane: Queensland University of Technology, 2009.
- [2] 赵洪涛, 李叙勇, 尹澄清. 街尘与城市降雨径流污染的关系综述[J]. 生态学报, 2012, **32**(24): 8001-8007.
Zhao H T, Li X Y, Yin C Q. Research progress on the relationship of pollutants between road-deposited sediments and its washoff[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(24): 8001-8007.
- [3] Wang Z H, Zhang S, Peng Y R, *et al.* Impact of rapid urbanization on the threshold effect in the relationship between impervious surfaces and water quality in Shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115569.
- [4] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, **25**(4): 594-605.
Zhang J Y, Song X M, Wang G Q, *et al.* Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, **25**(4): 594-605.
- [5] Barbosa A E, Fernandes J N, David L M. Key issues for sustainable urban stormwater management[J]. Water Research, 2012, **46**(20): 6787-6798.
- [6] Freni G, Mannina G, Viviani G. Urban storm-water quality management: centralized versus source control[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, **136**(2): 268-278.
- [7] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1159-1166.
Li R Z, Zhou A J, Tong F, *et al.* Distribution and bioavailability of nitrogen and phosphorus species in the urban dusts from Hefei city[J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1159-1166.
- [8] Deletic A, Orr D W. Pollution buildup on road surfaces[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, **131**(1): 49-59.
- [9] Bian B, Zhu W. Particle size distribution and pollutants in road-deposited sediments in different areas of Zhenjiang, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, **31**(4): 511-520.
- [10] Niu S P, Chen Y H, Yu J H, *et al.* Characteristics of particle size distribution and related contaminants of highway-deposited sediment, Maanshan City, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, **41**(6): 2697-2708.
- [11] Sutherland R A. Lead in grain size fractions of road-deposited sediment[J]. Environmental Pollution, 2003, **121**(2): 229-237.
- [12] Miguntanna N P, Goonetilleke A, Egodawatta P, *et al.* Understanding nutrient build-up on urban road surfaces [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(6): 806-812.
- [13] 崔立强, 严金龙, 丁成, 等. 盐城市不同功能区地表灰尘重金属污染特征及评价[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(9): 7-12, 17.
Cui L Q, Yan J L, Ding C, *et al.* Characteristic and assessment of heavy metals pollution in urban surface dust of different functional areas of Yancheng[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, **36**(9): 7-12, 17.
- [14] Zhao H T, Li X Y, Wang X M. Heavy metal contents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Beijing and its potential contribution to runoff pollution [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(17): 7120-7127.
- [15] Zhao H T, Li X Y. Risk assessment of metals in road-deposited sediment along an urban-rural gradient [J]. Environmental Pollution, 2013, **174**: 297-304.
- [16] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 364-372.
Tang R L, Ma K M, Zhang Y X, *et al.* Content trends of pollutants in street dust of Beijing along the urban-rural gradient and road density gradient[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 364-372.
- [17] Day J P, Hart M, Robinson M S. Lead in urban street dust[J]. Nature, 1975, **253**(5490): 343-345.
- [18] 余麟, 韩龙, 周连宁, 等. 深圳市城市道路地表污染物分析研究[J]. 环境科学与管理, 2016, **41**(2): 101-104, 120.
Yu L, Han L, Zhou L N, *et al.* Analysis of urban road surface dust in Shenzhen city [J]. Environmental Science and Management, 2016, **41**(2): 101-104, 120.
- [19] Zhu A X, Lu G N, Liu J, *et al.* Spatial prediction based on Third Law of Geography [J]. Annals of GIS, 2018, **24**(4): 225-240.
- [20] 朱阿兴, 闫国年, 周成虎, 等. 地理相似性: 地理学的第三定律? [J]. 地球信息科学学报, 2020, **22**(4): 673-679.
Zhu A X, Lv G N, Zhou C H, *et al.* Geographic similarity: third law of geography? [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, **22**(4): 673-679.
- [21] 薛冰, 李京忠, 肖骁, 等. 基于兴趣点 (POI) 大数据的人地关系研究综述: 理论、方法与应用[J]. 地理与地理信息科学, 2019, **35**(6): 51-60.
Xue B, Li J Z, Xiao X, *et al.* Overview of man-land relationship research based on POI data: theory, method and application[J].

- Geography and Geo-Information Science, 2019, **35**(6): 51-60.
- [22] 许泽宁, 高晓路. 基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法[J]. 地理学报, 2016, **71**(6): 928-939.
Xu Z N, Gao X L. A novel method for identifying the boundary of urban built-up areas with POI data [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(6): 928-939.
- [23] 丁彦文, 许捍卫, 汪成昊. 融合 OSM 路网与 POI 数据的城市功能区识别研究[J]. 地理与地理信息科学, 2020, **36**(4): 57-63.
Ding Y W, Xu H W, Wang C H. Research on urban functional area recognition integrating OSM road network and POI data [J]. Geography and Geo-Information Science, 2020, **36**(4): 57-63.
- [24] Hobbie S E, Finlay J C, Janke B D, *et al.* Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, **114**(16): 4177-4182.
- [25] Wei Y Q, Zhang H, Yuan Y, *et al.* Indirect effect of nutrient accumulation intensified toxicity risk of metals in sediments from urban river network [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(6): 6193-6204.
- [26] 武汉市统计局, 国家统计局武汉调查队. 武汉统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Wuhan Municipal Statistics Bureau, State Statistical Bureau Wuhan Investigation Team. Wuhan statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [27] 武汉市水务局, 湖北省武汉市水文水资源勘测局. 2020 年武汉市水资源公报[R]. 武汉: 武汉市水务局, 2021.
- [28] 郭青海, 马克明, 杨柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2170-2175.
Guo Q H, Ma K M, Yang L. Main sources of urban non-point source pollution and control measures for classified catchments [J]. Environmental Science, 2006, **27**(11): 2170-2175.
- [29] 武汉市水务局, 湖北省武汉市水文水资源勘测局. 2019 年武汉市水资源公报[R]. 武汉: 武汉市水务局, 2020.
- [30] 武汉市水务局, 湖北省武汉市水文水资源勘测局. 2018 年武汉市水资源公报[R]. 武汉: 武汉市水务局, 2019.
- [31] Hong Y, Yao Y. Hierarchical community detection and functional area identification with OSM roads and complex graph theory [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019, **33**(8): 1569-1587.
- [32] Xu H L, Zhu J H, Wang Z Q. Exploring the spatial pattern of urban block development based on POI analysis: a case study in Wuhan, China [J]. Sustainability, 2019, **11**(24), doi: 10.3390/su11246961.
- [33] Jegatheesan V, Goonetilleke A, Van Leeuwen J, *et al.* Urban stormwater and flood management [M]. Cham: Springer, 2019.
- [34] Yang X P, Fang Z X, Xu Y, *et al.* Understanding spatiotemporal patterns of human convergence and divergence using mobile phone location data [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, **5**(10), doi: 10.3390/ijgi5100177.
- [35] Liu Y, Wang F H, Xiao Y, *et al.* Urban land uses and traffic 'source-sink areas': evidence from GPS-enabled taxi data in Shanghai [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, **106**(1): 73-87.
- [36] Chen E H, Ye Z R. Identifying the nonlinear relationship between free-floating bike sharing usage and built environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124281.
- [37] 高枫, 李少英, 吴志峰, 等. 广州市主城区共享单车骑行目的地时空特征与影响因素[J]. 地理研究, 2019, **38**(12): 2859-2872.
Gao F, Li S Y, Wu Z F, *et al.* Spatial-temporal characteristics and the influencing factors of the ride destination of bike sharing in Guangzhou city [J]. Geographical Research, 2019, **38**(12): 2859-2872.
- [38] GB/T 4754-2017, 国民经济行业分类[S].
GB/T 4754-2017, Industrial classification for national economic activities[S].
- [39] GB/T 51328-2018, 城市综合交通体系规划标准[S].
GB/T 51328-2018, Standard for urban comprehensive transport system planning[S].
- [40] Silverman B W. Density estimation for statistics and data analysis [M]. New York: Chapman and Hall, 1986.
- [41] Wijesiri B, Egodawatta P, McGree J, *et al.* Process variability of pollutant build-up on urban road surfaces [J]. Science of the Total Environment, 2015, **518-519**: 434-440.
- [42] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(3): 349-352.
Zhu G W, Qin B Q. Chemical sequential extraction of phosphorus in lake sediments [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, **22**(3): 349-352.
- [43] GB 11893-1989, 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法[S].
- [44] Moriasi D N, Gitau M W, Pai N, *et al.* Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria [J]. Transactions of the ASABE, 2015, **58**(6): 1763-1785.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)