

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思	(2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清	(2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹	(2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文	(2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰	(2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲	(2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾	(2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚	(2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛蒲萱, 黄韬, 高宏, 马建民	(2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹	(2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄	(2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊	(2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮	(2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水	(2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富	(2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林	(2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民	(2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹	(2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮	(2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容	(2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江	(2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯	(2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽	(2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓	(2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛	(2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜	(2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静	(2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧	(2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡	(2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋	(2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏	(2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平	(2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷	(2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然	(2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国	(2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激	(2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun	(2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳	(2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔	(2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽	(2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚	(2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳	(2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉	(2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌	(2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕	(2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞	(2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰	(2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑	(2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳	(2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇	(2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军	(2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌	(2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩	(2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳	(2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)	信息 (2646, 2656, 2857)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价

何博^{1,2}, 赵慧^{1,2}, 王铁宇^{1,2*}, 孟晶¹, 肖荣波^{3*}, 刘胜然¹, 周云桥^{1,2}, 史斌¹

(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; 3. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要: 随着我国城市化的快速发展, 土壤环境面临着较高的生态环境风险. 本文以我国南方某典型城市化区域土壤环境作为研究对象, 共采集表层(0~20 cm)土壤样品 106 份, 亚表层(20~40 cm)96 份并测定其重金属含量, 然后采用内梅罗综合污染指数法和潜在生态危害法评价其生态风险程度, 最后通过空间插值探讨其生态风险空间分布. 结果表明, 表层土壤 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 的含量范围分别为 2.87~84.64、1.40~56.00、2.75~125.05、15.05~201.39、1.46~89.92、0.001~0.92、15.29~160.07 和 0.006~0.52 mg·kg⁻¹; 亚表层土壤的含量范围为 3.56~75.14、1.65~71.58、3.28~290.04、17.99~296.94、3.07~65.67、0.02~1.00、11.10~97.59 和 0.01~0.41 mg·kg⁻¹. 依据农用地土壤污染风险管控标准, 表层土壤中 Cd、Cu、Pb、As 和 Zn 的超标率分别为 71.70%、40.57%、4.72%、3.77% 和 0.94%, 亚表层土壤中 Cd、Cu、As、Zn、Pb 和 Ni 的超标率分别为 72.92%、39.58%、6.25%、3.13%、3.13% 和 1.04%, 可见区域主要重金属污染因子为 Cd 和 Cu, 土壤重金属空间分布特征显示超标区域集中在区域北部. 基于两种评价结果可以看出, 北部地区污染程度和生态风险较高, 其中 Cd 为风险指数偏高的主要驱动因子, 风险评价空间分布特征与 Cd 的含量空间分布特征类似, 说明区域土壤 Cd 污染应该引起重点关注.

关键词: 土壤质量; 重金属; 空间分布; 风险评价; 管控对策

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2869-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810057

Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area

HE Bo^{1,2}, ZHAO Hui^{1,2}, WANG Tie-yu^{1,2*}, MENG Jing¹, XIAO Rong-bo^{3*}, LIU Sheng-ran¹, ZHOU Yun-qiao^{1,2}, SHI Bin¹

(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; 3. School of Environment Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: With the rapid urbanization in China, soil environments are facing high risks. Taking a typical urbanized area as a case study, a total of 106 surface soil samples (0-20 cm) and 96 subsurface soil samples (20-40 cm) were collected to determine the concentrations of heavy metals, and then, the Nemerow index and Hankson index methods were used to evaluate their degrees of ecological risk. The spatial distributions of ecological risks were also explored. Experimental results showed that the concentrations of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, and Hg in surface soil samples were 2.87-84.64, 1.40-56.00, 2.75-125.05, 15.05-201.39, 1.46-89.92, 0.001-0.92, 15.29-160.07, and 0.006-0.52 mg·kg⁻¹, respectively, and those in subsurface soil samples were 3.56-75.14, 1.65-71.58, 3.28-290.04, 17.99-296.94, 3.07-65.67, 0.02-1.00, 11.10-97.59, and 0.01-0.41 mg·kg⁻¹, respectively. According to the risk control standards for soil contamination of agricultural land, approximately 71.70%, 40.57%, 4.72%, 3.77%, and 0.94% of Cd, Cu, Pb, As, and Zn, respectively, in the surface soil samples exceeded the standards, while 72.92%, 39.58%, 6.25%, 3.13%, 3.13%, and 1.04% of Cd, Cu, As, Zn, Pb, and Ni, respectively, in the subsurface soil samples exceeded the standards. Obviously, the pollution by Cd and Cu was the most severe in the research area, and the main contaminated areas were distributed in the northern part of the land. The soil environmental quality pollution assessment illustrated that high risk areas were distributed in the northern part of the research area too. The risk assessment results indicated that the main pollution factor was Cd, which is accordance with the serious pollution findings for Cd. In response to these results, effective management and remediation methods should be taken to control the soil environment pollution in this typical urbanized area.

Key words: soil quality; heavy metals; spatial distribution; risk assessment; management measures

随着经济的发展工业化进程的加快, 城市在快速发展的过程中面临着各种环境污染的问题, 其中

城市土壤重金属污染是国内外环境科学研究的热点问题^[1-5]. 土壤中重金属持久性、难降解性和易富

收稿日期: 2018-10-11; 修订日期: 2019-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800301, 2017YFC0505702); 国家自然科学基金项目(41877509, 41571478); 广东省应用型科技研发专项(2016B020240008)

作者简介: 何博(1992~), 男, 硕士研究生, 主要方向为区域污染评价与生态修复, E-mail: hdbly2011@163.com

* 通信作者, E-mail: wangty@cees.ac.cn; ecxiaorb@163.com

集等特点,不仅会导致土壤环境质量的恶化,还会经各种介质的传递进入人体,最终影响人类健康.我国历史上粗放式的经济发展方式和工业生产模式,使得大多城市土壤环境不同程度地受到重金属污染,形成了一系列生态环境损坏的遗留问题^[6-9].土壤环境公报^[10]显示,我国南方地区土壤污染重于北方,且长江三角洲和珠三角地区的污染问题尤为突出.本研究区域发达的工业、制造业等为经济带来了长足发展,同时也给城市生态环境带来了巨大的压力.因此,研究区域土壤重金属污染空间分布并进行风险评价对城市生态环境保护、可持续发展以及居民健康等具有重要现实意义.

近年来学者针对不同城市:北京^[9]、上海^[11]、重庆^[12]和广州^[13, 14]等,开展过很多土壤重金属污染研究工作.李泗清等^[15]和叶中进^[16]曾针对区域不同企业类型周边土壤重金属进行过污染评价,余姝洁等^[17]主要针对区域工业园附近土壤开展过风险评估.但以上都是基于城市特定区域的污染研究,鲜见关于整体区域土壤重金属污染报道,也缺乏对区域表层、亚表层土壤重金属同时进行污染和风险评估.本研究选择我国南方某典型城市化区域为案例,通过对整体研究区域土壤进行采样监测,利用内梅罗综合污染指数和潜在生态风险指数法对区域土壤环境进行污染评价和风险评估,并结合GIS空间分析对土壤重金属空间分布进行可视化表达,通过分析比较,阐释区域土壤重金属的污染状况和主要影响因素,以期为该区域土壤环境保护和治理提供科学支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于我国工业化和城市化水平较高的南方地区,其工业产值占区域GDP的50%以上,研究区分布有大量的化工、印染、电镀和造纸等工业企业.该区域属亚热带季风气候,年均降水量为1791.3mm.地形以平原为主,中高周低,土壤主要类型为赤红壤,主要农用植被类型有菜地、果园和苗圃等,自然植被代表类型为热带季雨林型的常绿季雨林,森林覆盖率占10%以上.

1.2 样品采集与分析

利用棋盘式布点法并根据所预测重点污染区域加密布点进行采样(图1),于2018年1月完成研究区域采样工作,采集表层(0~20 cm)土壤样品106份,亚表层(20~40 cm)96份,每个样点均保证以梅花形采集5个土壤子样,充分混合后取约500 g装入样品袋.将样品自然风干,过2 mm尼龙筛去

除杂质,后将样品细磨全部过孔径0.149 mm(100目)筛,装于无色聚乙烯自封袋备用.表层和亚表层土壤pH测定范围分别为4.16~6.88和3.85~6.72,平均值为5.81和5.71,土壤呈酸性.土壤样品中砷、铅、镉、铜、锌、铬和镍参照国家标准^[18]对土壤进行前处理,经电感耦合等离子体质谱仪(NexION 2000 ICP-MS)测定,汞含量采用冷原子吸收测汞仪(DMA-80)测定.所用试剂均为优级纯,配置用水为超纯水,所有器皿均保证在20%硝酸溶解中浸泡24 h后使用.质控和样品回收率均在70%~125%之间,实验结果符合质量控制标准.

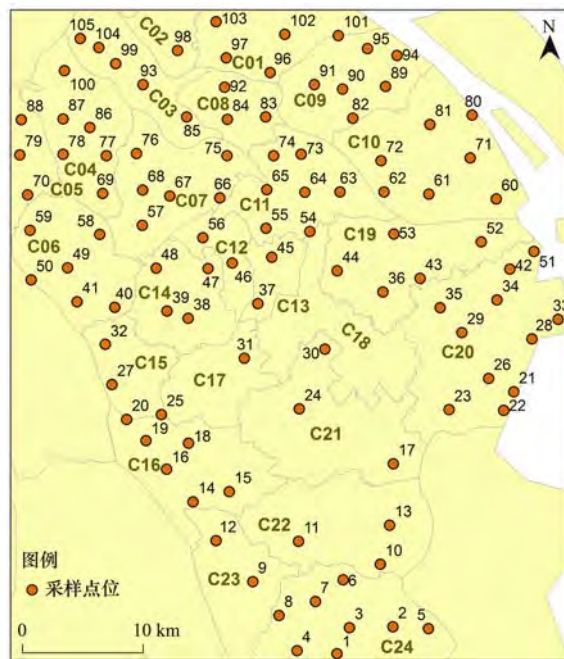


图1 研究区采样布点示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

1.3 评价方法

1.3.1 内梅罗综合污染指数法

土壤污染采用内梅罗综合污染指数法^[19]进行评价,不仅可以全面反映各个污染物的平均污染水平,还能突出污染最严重的污染物对环境的危害.其计算公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum \frac{c_n}{c_i}\right)^2 + \left(\frac{c_n}{c_i}\right)_{\text{MAX}}^2}{2}} \quad (1)$$

式中, P 为内梅罗指数; c_n 为污染物 n 的实测值, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; c_i 为污染物 i 参比值,采用农用地土壤质量筛选值; $\left(\frac{c_n}{c_i}\right)_{\text{MAX}}^2$ 为重金属污染指数最大值; $\left(\frac{1}{n} \sum \frac{c_n}{c_i}\right)^2$ 为重金属污染指数平均值.综合污染指数 P 的分级标准: $P \leq 0.7$ 为安全水平; $0.7 < P \leq 1$ 为警戒水平; $1 < P \leq 2$ 为轻度污染水平; $2 < P$

≤3 为中度污染水平；P>3 为重度污染水平。

1.3.2 潜在生态风险评价法

潜在生态风险评价法^[20]是瑞典科学家 Hakanson 提出的定量评价污染物潜在生态危害程度的方法，不仅可反映某特定环境中单一重金属元素的影响，还能反映多种重金属的复合影响，并且用定量方法划分出潜在生态危害程度，被广泛应用于沉积物及土壤重金属污染评价中。其计算公式如下：

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times \left(\frac{c_i}{c_n^i} \right) \quad (2)$$

式中，RI 为潜在生态危害指数； E_r^i 为污染物 i 的污染程度； T_r^i 为重金属的毒性响应系数，参考相关研究 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Ni、Cr 和 Zn 的毒性响应系数分别为 40、30、10、5、5、5、2 和 1； c_i 为重金属的实测含量，单位 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； c_n^i 为参比值，采用研究区域土壤环境背景值^[21]。其中 E_r^i 和 RI 的分级标准见表 1。

表 1 潜在生态风险指数分级标准

Table 1 Standards for potential ecological risks

E_r^i 与污染程度		RI 与污染程度	
$E_r^i < 40$	轻微生态危害	$RI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	中等生态危害	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	强生态危害	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	很强生态危害	$RI \geq 600$	很强生态危害
$E_r^i \geq 320$	极强生态危害		

1.4 数据处理

数据采用 SPSS 19.0 和 Excel 2013 以及 Origin 2018 进行统计分析，运用 ArcGIS 10.5 进行空间分析。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量分析

8 种重金属元素含量分析结果见表 2，可以看

表 2 研究区域土壤重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Concentrations of heavy metals in soil within the research area/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

类型	统计量	元素							
		Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
表层	平均值	37.22	30.07	41.98	110.59	18.43	0.39	43.81	0.13
	最大值	84.62	56.00	125.05	201.39	89.92	0.92	160.07	0.52
	最小值	2.87	1.40	2.75	15.05	1.46	0.001	15.29	0.006
	变异系数/%	49.65	48.99	48.12	36.23	64.62	51.28	42.62	69.23
亚表层	平均值	36.80	31.94	45.66	113.65	17.93	0.41	40.17	0.13
	最大值	75.14	71.58	290.04	296.94	65.67	1.00	97.59	0.41
	最小值	3.56	1.65	3.28	17.99	3.07	0.02	11.10	0.01
	变异系数/%	44.89	44.52	70.43	38.29	65.70	46.34	31.39	53.85
农用地土壤筛选值		150	60	50	200	40	0.3	70	1.3
研究区土壤背景值		50.5	14.4	17	47.3	8.9	0.056	36	0.078

2.2 土壤重金属的空间分布特征

2.2.1 区域表层土壤重金属空间分布特征

利用 SPSS 软件对重金属含量做正态分布检验，

出区域土壤重金属含量均值除 Cr 外均高于研究区域土壤背景值，表层 Cd、Cu、Zn、Ni 和 As 的平均含量分别为背景值的 6.69、2.47、2.34、2.09 和 2.07 倍；亚表层 Cd、Cu、Zn、Ni 和 As 的平均含量分别为背景值的 7.32、2.69、2.40、2.22 和 2.01 倍，这一结果与李泗清等^[15]关于区域涉重金属企业周边土壤污染研究一致，均表现为 Cd 和 Cu 的富集程度较高。由于本研究主要聚焦在农用地，所以采用农用地土壤污染风险筛选值^[22]对土壤进行质量评价，表层土壤重金属 Cd、Cu、Pb、As 和 Zn 的超标率分别为 71.70%、40.57%、4.72%、3.77% 和 0.94%，从大到小依次为 Cd>Cu>Pb>As>Zn；亚表层土壤中 Cd、Cu、As、Zn、Pb 和 Ni 的超标率分别为 72.92%、39.58%、6.25%、3.13%、3.13% 和 1.04%，从大到小依次为 Cd>Cu>As>Zn=Pb>Ni。表层和亚表层土壤重金属水平的相似性证明研究区域土壤重金属具有一定的纵向迁移，整体上存在累积和污染问题，并且以 Cd 和 Cu 的污染为主，需要引起关注。

进一步分析变异系数结果显示，研究区域表层土壤中 Zn、Pb、Cu、Ni、Cr、Cd、As 和 Hg 的变异系数分别为 36.23%、42.62%、48.12%、48.99%、49.65%、51.28%、64.62% 和 69.23%，均超过 30%；亚表层土壤中 Pb、Zn、Ni、Cr、Cd、Hg、As 和 Cu 的变异系数分别为 31.39%、38.29%、44.52%、44.89%、46.34%、53.85%、65.70% 和 70.43%，离散程度较大，空间差异性结果可能受区域主要潜在污染源的影响，即工业生产污染物的排放^[23~25]、农业生产活动导致的污染物的残留^[24, 26]和城区及其周边的交通尾气排放以及部件磨损导致的重金属释放^[24, 27]等。

结果显示，Cr、Cu 和 Cd 数据符合正态分布，采用普通克里金插值，对不符合正态分布的采取反距离加权插值进行空间可视化表达。表层土壤重金属含

量的空间分布特征如图2所示,整体上重金属Cr、Ni、Cu、Zn、As和Cd含量呈现由西北向东南地区递减的趋势,C21周边区域含量较低,这可能与研究区域北部是主要工农业生产区,土壤环境受到人为干扰较大等因素相关.而Pb和Hg含量较高的地区集中在主城区附近,其人口密度较大,交通活动比较繁忙.胡克林等^[28]认为交通及生活污水的排放,可能是导致区域Pb和Hg含量较高的原因.

以研究单元为界,表层土壤中Cr和Zn整体含量水平较低,区域内仅一个Zn超标点位,且未发现Cr、Ni和Hg超标的情况.Cu和As高值区域分布在C09、C10、C01、C15以及C06和C14的部分地区,Cu的超标情况较为明显.Cd超标率较高,超标区域主要分布在C05、C04、C03、C02以及C06和C10的部分区域,Pb超标情况较轻,仅4处点位存在超标,相对较高的地区为中部城区以及C19部分区域.

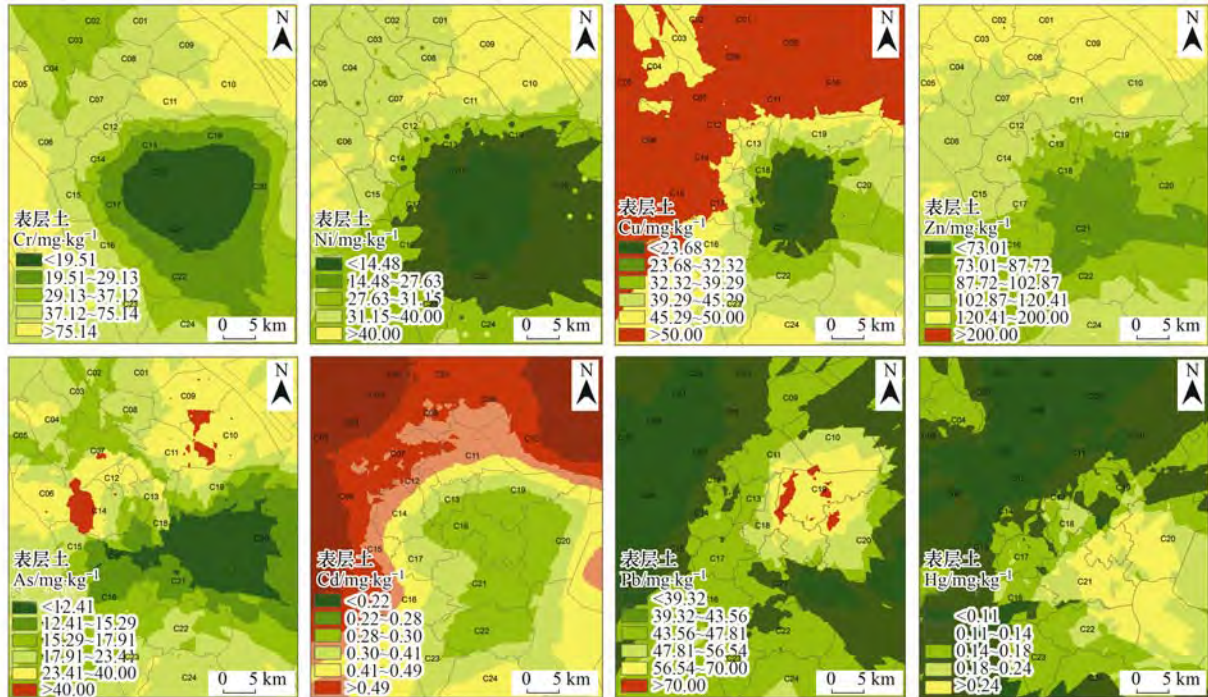


图2 表层土壤重金属含量空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal concentrations in surface soil

2.2.2 区域亚表层土壤重金属空间分布特征

亚表层土壤空间分布表现为重金属Cr、Ni、Cu、Zn和Cd的高值区集中在研究区域西北部主要的工业、农业生产区,As含量较高的地区分布在西南部区域,Pb和Hg含量相对较高的区域集中在中部城区以及C19周边.亚表层土壤重金属与表层土壤重金属的空间分布格局基本一致(图3).

亚表层土壤中,Cr呈由四周向中心递减的趋势分布,整体无超标现象.Ni含量的高值区主要集中在东北部,整个区域Ni的含量相对较低,仅一个超标点位.Cu含量较高的区域集中出现在C09、C10、C06、C15以及C16.Zn含量的空间分布显示北部地区相对较高,区域内仅3个样点超标.As高值区主要出现在西南部分地区.Cd的高值区集中出现在北部地区,其中C05北部、C04北部、C03北部、C10北部以及C07中部地区,为区域主要工业、农业生产区域,低值区主要位于中部区域.Pb含量整体水平较低,仅3个采样点超过农用地土壤筛选值

标准.Hg无超标情况.与表层土壤情况基本一致,当地土壤的经常翻耕和淋溶现象,可能是导致表层和亚表层土壤重金属含量相似的原因.

2.3 土壤重金属污染评价

内梅罗综合污染评价结果显示,106份表层土壤中安全点位19个,警戒点位21个,轻度污染点位65个,中度污染点位1个,分别占总体的17.92%、19.81%、61.32%和0.94%.其中安全点位中最大单因子Pb、Cd和As占比分别为63.16%、26.32%和10.53%;警戒点位中最大单因子Cd、Pb、Cu和As占比分别为61.90%、28.57%、4.76%和4.76%;轻度污染点位中最大单因子Cd、Pb、As和Cu占比分别为93.85%、3.08%、1.54%和1.54%.96份亚表层土壤中安全点位18个,警戒点位18个,轻度污染点位56个,中度污染点位3个,重度污染点位1个,占总体比例为18.75%、18.75%、58.33%、3.13%和1.04%.轻度污染点位中最大单因子Cd、As、Cu

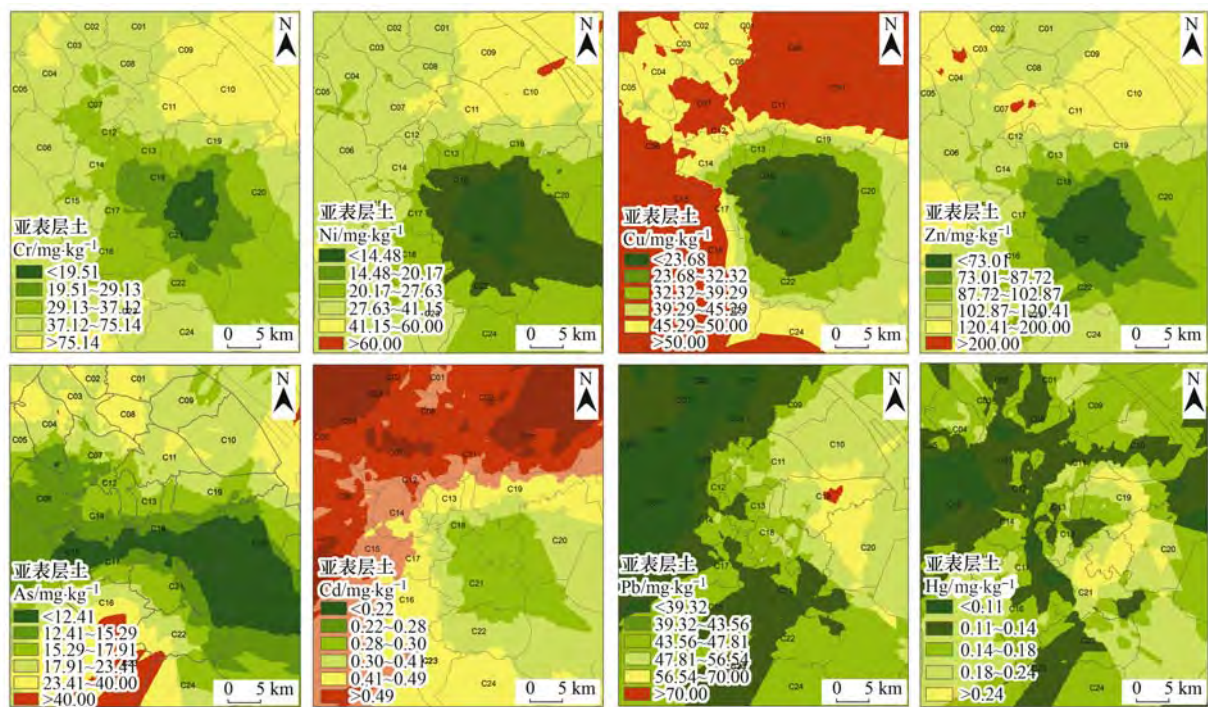


图3 亚表层土壤重金属含量空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of subsurface heavy metal concentrations

和 Pb 占比分别为 92.86%、3.57%、1.79% 和 1.79%；3 个中度污染点位的最大单因子元素均为 Cd。如图 4 示，警戒及以上污染水平点位中，Cd 的最大单因子占比最高，说明区域土壤污染受 Cd 的主导，总体土壤环境处于警戒-轻度污染水平。

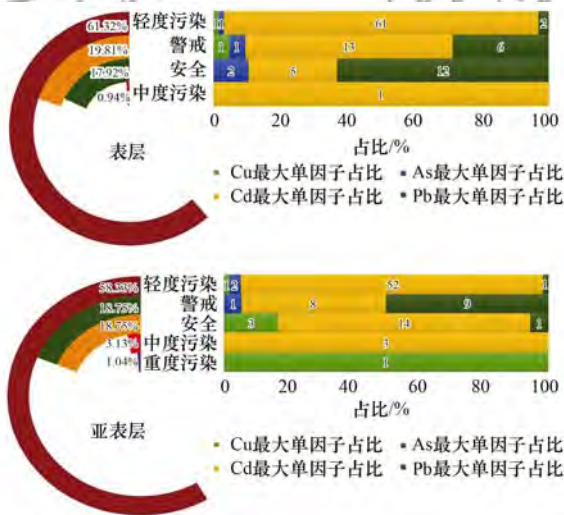


图4 土壤综合污染评价

Fig. 4 Complex pollution assessment of soil

土壤重金属污染评价的空间分布特征显示(图 5)，表层和亚表层土壤整体上均呈现出由西北向东南降低的污染趋势。根据调查结果显示，研究区域北部地区分布着大量电镀、印染、皮革生产以及电池制造等企业。郭鹏然等^[13]的研究发现，广州市电镀厂周边环境土壤中重金属 Cd、Cu 和 Zn 等富集明显，且主要经废气和废水进入环境，因此常年的工

业生产可能是造成区域土壤重金属污染的原因之一。同时农业活动中农药、化肥的施用也是重金属累积的主要原因，周玲莉等^[29]的研究结果也证实，污水灌溉是土壤重金属富集的重要来源，李莲芳等^[26]发现，化肥和有机肥的施用是导致土壤重金属含量升高的重要因素。污染评价的空间分布特征与 Cd 和 Cu 的空间分布相似，污染水平较高的区域与 Cd 和 Cu 的高值区域基本重合，这与内梅罗污染指数评价突出污染较重因子对环境的危害相吻合。

2.4 潜在生态风险评价

以研究区域土壤背景值作为重金属的评价参比值对区域土壤进行潜在生态风险评价，结果如表 3 所示，表层和亚表层土壤中重金属 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 均处于轻微生态危害水平，重金属 As 分别有 93.40% 和 92.71% 的表层和亚表层土壤处于中等以下生态危害水平，重金属 Hg 基本处于强生态危害以下水平，其中约 50% 以上的点位处于中等生态危害水平，重金属 Cd 的生态危害水平较高，其中 60.38% 和 61.46% 的表层及亚表层样点处于很强生态危害水平，并且有约 11% 的样点处于极强危害水平，表层和亚表层土壤各个重金属生态危害水平基本一致，与相同样点重金属含量水平相近有关。各重金属平均 *E* (单一污染物的污染程度) 显示，除 Hg 和 Cd 外其余重金属 *E* 值均低于 40，危害水平较低，表层和亚表层土壤 Hg 处于中等危害，Cd 则处于很强生态危害的水平。表层土壤 RI 的范围在

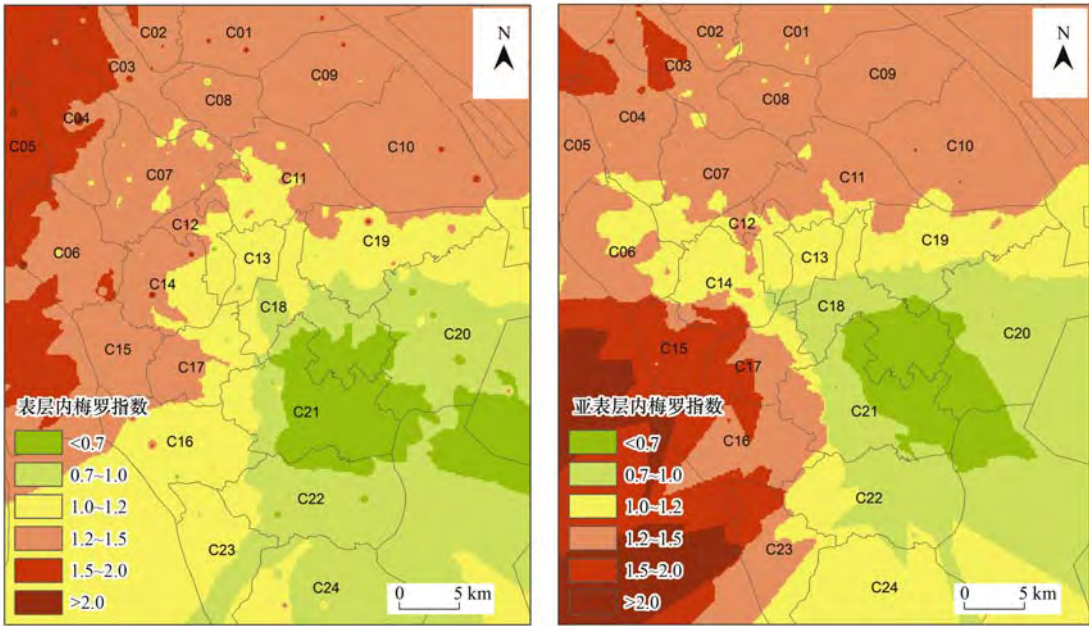


图 5 综合污染空间特征
Fig. 5 Spatial distribution of complex pollution

表 3 土壤潜在生态风险评价
Table 3 Potential ecological risk assessment of soils

项目		生态危害水平占比/%					E
		轻微	中等	强	很强	极强	
Cr	表层	100	—	—	—	—	1.47
	亚表层	100	—	—	—	—	1.46
Ni	表层	100	—	—	—	—	10.44
	亚表层	100	—	—	—	—	11.09
Cu	表层	100	—	—	—	—	12.35
	亚表层	98.96	—	1.04	—	—	13.43
Zn	表层	100	—	—	—	—	2.34
	亚表层	100	—	—	—	—	2.40
As	表层	93.40	5.66	0.94	—	—	20.71
	亚表层	92.71	7.29	—	—	—	20.15
Cd	表层	10.38	5.66	12.26	60.38	11.32	208.10
	亚表层	5.21	6.25	15.63	61.46	11.46	220.96
Pb	表层	100	—	—	—	—	6.08
	亚表层	100	—	—	—	—	5.58
Hg	表层	24.53	56.60	12.26	6.60	—	66.65
	亚表层	18.75	60.42	18.75	2.08	—	65.44
RI	表层	328.14			强生态危害		
	亚表层	340.50			强生态危害		

30.21 ~ 661.36 之间, 其中 13.21% 的样点处于轻微生态危害水平, 17.92% 的样点处于中等生态危害水平, 67.92% 的样点处于强生态危害水平, 0.94% 的样点处于很强的生态危害水平. 亚表层 RI 值的范围在 33.13 ~ 640.48 之间, 轻微生态危害样点数占 10.42%, 中等生态危害样点数占 21.88%, 强生态危害样点数占 66.67%, 很强生态危害样点数为 1.04%. 表层和亚表层土壤 8 种重金属的潜在生态危害指数 RI 平均值分别达到 328.14 和 340.50, 表明研究区域土壤总体处于强生态危害程度, 其中 Cd 的贡献率均超过 60%, 显然 Cd 是构成

生态危害的主要风险因子.

8 种重金属协同作下的潜在生态危害水平空间特征如图 6 所示, 表层和亚表层土壤潜在生态危害空间分布特征类似, 均呈现出西北向东南逐渐降低的态势. 总体而言, 研究区域中度及以上污染区域基本分布在北部区域, 其中污染最重的区域主要集中在 C03、C04、C05、C06 以及 C09. 余姝洁等^[17]的研究也显示, 电镀基地、化工区、化工产业区等工业聚集区周边土壤环境均存在重金属污染问题, 工业区的生产和农业活动等都有可能是重金属在该区域富集并造成生态危害的原因. 同时, 生态危害水平的空

间分布特征与 Cd 空间分布规律大体一致，进一步证明了研究区域土壤污染的主要驱动因子是 Cd.

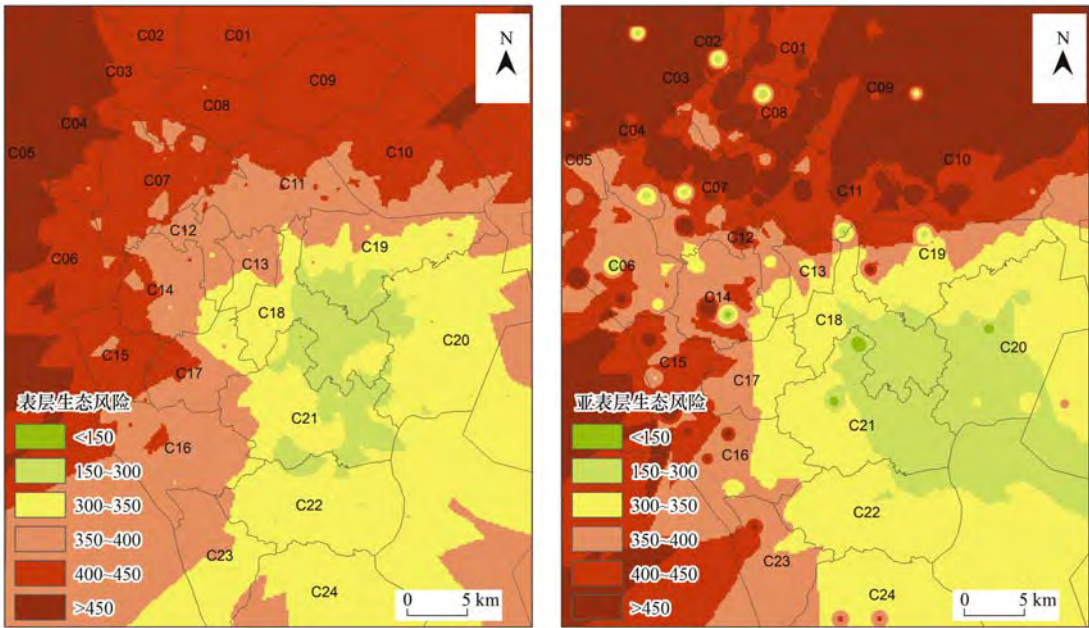


图 6 潜在生态风险空间特征
Fig. 6 Spatial distribution of potential ecological risks

整体上内梅罗综合污染评价结果与潜在生态风险评价的结果基本一致，但也存在部分差异，其中污染评价显示主要的污染因子是 Cd 和 Cu，而主导生态危害水平的因子为 Cd 和 Hg，主要因为土壤 Hg 的含量远高于土壤背景值，且 Hg 毒性系数较高，所以 Hg 的生态风险较高，但 Hg 的农用地土壤筛选值较高，因此 Hg 对综合污染评价贡献较低. 空间特征显示区域 C15 处于中等及以上污染水平，但生态风险相对较低，产生这一差异性结果是因为该区域亚表层土壤样点中 Cu 的含量值较大导致综合污染水平较高，而在潜在生态风险评价中 Cu 的毒性系数较低，因此生态危害水平较低. 污染评价与风险评价的结合使用可以互补分析区域土壤重金属污染规律和风险规律^[30].

内梅罗综合污染评价和潜在生态风险评价均显示本研究区域存在土壤环境污染问题，并且北部区域的污染水平和生态风险水平高于南部地区. 北部区域重金属污染问题值得重视. 重金属 Cd 的空间分布和贡献率也说明 Cd 是区域土壤污染的主要驱动因子，因此认为区域土壤 Cd 污染需要重点关注.

3 结论

(1)本研究所采集的 106 份表层和 96 份亚表层土壤样品分析显示，除 Cr 外其余重金属均值均高于研究区域土壤背景值，相同样点的表层和亚表层土壤重金属含量相近，说明土壤重金属存在一定的富集现象，以农用地土壤污染风险筛选值作为参

比的情况下，Cd 和 Cu 的超标现象较为明显，表层和亚表层 Cd 和 Cu 的超标率分别为 71.70%、72.92% 和 40.57%、39.58%.

(2)分析研究区域土壤重金属的空间分布特征，北部为主要的重金属富集地区，表层以及亚表层土壤中重金属含量分布特征基本一致，镉、铜为北部区域主要的超标重金属，北部分布的大量电镀、皮革、电池等企业和农业生产聚集区，生产活动的输入可能是区域重金属富集的主要原因.

(3)综合污染评价显示研究区域 61.32% 表层土壤和 58.33% 亚表层土壤处于轻度污染水平，较少区域处于中度及以上污染水平；潜在生态危害风险评价表明区域 67.92% 的表层土壤和 66.67% 的亚表层土壤处于强生态风险水平. 污染区域与风险较高区域基本重合，北部区域的土壤污染水平较高且具有较强的生态风险，需要引起重视. 两种评价均显示 Cd 为最主要污染因子，研究区域土壤重金属污染环境管理应重点关注重金属 Cd.

参考文献：

[1] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 690-700.
[2] Gałsiorek M, Kowalska J, Mazurek R, *et al.* Comprehensive assessment of heavy metal pollution in topsoil of historical urban park on an example of the Planty Park in Krakow (Poland) [J]. Chemosphere, 2017, **179**: 148-158.
[3] Tepanosyan G, Sahakyan L, Belyaeva O, *et al.* Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health [J]. Science of the Total Environment, 2018, **639**: 900-

- 909.
- [4] Koshleva N E, Vlasov D V, Korlyakov I D, *et al.* Contamination of urban soils with heavy metals in Moscow as affected by building development [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 854-863.
- [5] 纪小凤, 郑娜, 王洋, 等. 中国城市土壤重金属污染研究现状及展望[J]. *土壤与作物*, 2016, **5**(1): 42-47.
- Ji X F, Zheng N, Wang Y, *et al.* Heavy metal contamination of urban soils in China: Recent advances and prospects[J]. *Soils and Crops*, 2016, **5**(1): 42-47.
- [6] Islam S, Ahmed K, Habibullah-Al-Mamun, *et al.* Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 94-102.
- [7] 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 等. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3151-3159.
- Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in an e-waste dismantling area and their distribution characteristics [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3151-3159.
- [8] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5262-5271.
- Guo Y H, Sun X C, Zhang S B, *et al.* Pollution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5262-5271.
- [9] Wang M E, Liu R, Chen W P, *et al.* Effects of urbanization on heavy metal accumulation in surface soils, Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **64**: 328-334.
- [10] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. *中国环保产业*, 2014, (5): 1689-1692.
- [11] Bi C J, Zhou Y, Chen Z L, *et al.* Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 1349-1357.
- [12] 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征[J]. *生态学报*, 2014, **34**(15): 4201-4211.
- Huang X J, Jiang C S, Hao Q J. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals by plants in Rongxi Manganese mineland of Chongqing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(15): 4201-4211.
- [13] 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 等. 电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3447-3456.
- Guo P R, Lei Y Q, Zhou Q L, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in environmental samples around electroplating factories and the health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3447-3456.
- [14] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(S1): 49-53.
- Lei G J, Chen Z L, Liu Q J, *et al.* The assessments of polluted degree and potential ecological hazards of heavy metals in suburban soil of Guangzhou city [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(S1): 49-53.
- [15] 李泗清, 杨满芽. 中山市不同类型企业周边土壤重金属污染特性及潜在生态风险评价[J]. *地球与环境*, 2014, **42**(4): 525-531.
- Li S Q, Yang M Y. The features and potential ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of different types of enterprises in Zhongshan Municipality [J]. *Earth and Environment*, 2014, **42**(4): 525-531.
- [16] 叶中进. 中山市不同类型企业区域土壤重金属污染分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [17] 余妹洁, 李名, 张保见, 等. 中山市工业园周边土壤重金属污染及风险评估[J]. *武汉理工大学学报*, 2016, **38**(4): 70-75.
- Yu S J, Li M, Zhang B J, *et al.* Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the surrounding soil of industrial park in Zhongshan city [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, **38**(4): 70-75.
- [18] HJ 803-2016, 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法[S].
- [19] Nemerow N L. *Scientific stream pollution analysis* [M]. Washington: McGraw Hill, 1974.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [21] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [23] 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 等. 典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2875-2883.
- Zheng J Z, Wang C D, Wang S H, *et al.* Spatial variation of soil heavy metals in Lin'an city and its potential risk evaluation [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2875-2883.
- [24] 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 等. 天津农田重金属污染特征分析及降雨淋溶影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1095-1101.
- Xu M M, Liu A F, Shi R G, *et al.* Characteristics of heavy metals pollution of farmland and the leaching effect of rainfall in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1095-1101.
- [25] Dietrich M, Huling J, Krekeler M P S. Metal pollution investigation of Goldman Park, Middletown Ohio; Evidence for steel and coal pollution in a high child use setting [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 1350-1362.
- [26] 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 等. 吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2936-2943.
- Li L F, Zhu C X, Zeng X B, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in greenhouse soil and vegetables in Siping city, Jilin Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2936-2943.
- [27] Mazurek R, Kowalska J, G? siorek M, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution [J]. *Chemosphere*, 2016, **168**: 839-850.
- [28] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 463-468.
- Hu K L, Zhang F R, Lü Y Z, *et al.* Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing county, Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(3): 463-468.
- [29] 周玲莉, 薛南冬, 杨兵, 等. 黄淮平原农田土壤中重金属的分布和来源[J]. *环境化学*, 2013, **32**(9): 1706-1713.
- Zhou L L, Xue N D, Yang B, *et al.* Distribution and source of heavy metals in agricultural soils from Huang-huai Plain [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(9): 1706-1713.
- [30] 姜菲菲, 孙丹峰, 李红, 等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(8): 330-337.
- Jiang F F, Sun D F, Li H, *et al.* Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, **27**(8): 330-337.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)