

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期

Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM_{2.5}污染防治的健康效益评估 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文煊, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢惠君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO₂对水稻富集镉的影响机制 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价

陈佳林¹, 李仁英^{1*}, 谢晓金¹, 王红², 徐静², 邵京², 简静¹, 阿克居里·乌尔曼¹, 沈嘉¹, 央宗¹
(1. 南京信息工程大学应用气象学院农业资源与环境系, 南京 210044; 2. 南京市园林和林业科学研究院, 南京 210037)

摘要: 为了解南京市主城区绿地土壤中重金属污染现状, 分析了南京市主城区绿地表层土壤 5 种重金属元素 (Cr、Cu、Zn、Pb 和 Cd) 的含量状况及其空间分布特征, 并利用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法及潜在生态风险指数法对重金属的污染程度及其潜在生态风险进行了评价。结果表明, 南京市主城区绿地土壤中 5 种重金属元素的平均含量均高于南京市土壤背景值, 单因子污染等级依次为 Cd > Pb > Cr > Cu > Zn, 平均内梅罗综合指数为 2.72, 土壤呈中度污染水平。土壤重金属元素 (Cr、Cu、Zn 和 Pb) 的单项生态风险指数都小于 10, 具有轻微风险, 而 Cd 的生态风险指数达到了 97.32, 具有强风险; 综合潜在生态风险指数 < 150, 总体属于低生态风险。5 种重金属元素在空间上呈斑块状分布, Cr、Cu、Zn 和 Pb 含量高值区域集中在城区东北部的绿地, Cd 含量高值区集中在西南部及西北部绿地。通过本研究可知, 南京市主城区绿地土壤中 Cd 的污染较为严重, 在城市生活中需引起重视。

关键词: 城市绿地; 分布特征; 重金属污染; 内梅罗污染指数 (NIPI); 潜在生态风险指数 (PERC)

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0909-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005203

Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City

CHEN Jia-lin¹, LI Ren-ying^{1*}, XIE Xiao-jin¹, WANG Hong², XU Jing², SHAO Jing², JIAN Jing¹, Akejuli·Wuerman¹, SHEN Jia¹, YANG Zong¹

(1. Department of Agricultural Resources and Environment, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Academy of Landscape and Forestry, Nanjing 210037, China)

Abstract: Concentrations and the spatial distribution of heavy metals (Cr, Cu, Zn, Pb, and Cd) in greenbelt soils in the main areas of Nanjing City, Jiangsu Province, were investigated and pollution levels were assessed using the single factor pollution index (SFPI), Nemerow integrated pollution index (NIPI), and potential ecological risk coefficient (PERC). The results showed that the average concentrations of heavy metals in greenbelt soils exceeded their background values, with the SFPI results ranked Cd > Pb > Cr > Cu > Zn, and the mean NIPI was 2.72 indicating that the greenbelt soils are moderately polluted. The PERC of each heavy metal (Cr, Cu, Zn, and Pb) was less than 10, indicating that the greenbelt soils present a slight ecological risk, while the PERC of Cd reached 97.32, indicating a strong ecological risk. The composite PERC of all heavy metals was less than 150, indicating a slight ecological risk overall. The five heavy metals showed a patchy spatial distribution, with high concentrations of Cr, Cu, Zn, and Pb in the greenbelt soils of northeast areas, and high concentrations of Cd in the southwest and northwest. Based on the results of study, Cd pollution in greenbelt soils in main areas of Nanjing City is relatively serious, which requires further attention.

Key words: urban greenbelt; distribution characteristics; heavy metal pollution; Nemerow integrated pollution index (NIPI); potential ecological risk coefficient (PERC)

城市绿地土壤(城市中各种草地、耕地、公园绿地以及林地等)是陆地生态系统的重要组成部分,是城市绿地建设的重要载体^[1]。这些绿地兼具市场功能、生态功能和环境功能,能增加空气湿度,固碳释氧,改善环境,是人类休闲活动的重要场所,也是生态城市及园林城市的建设基石。城市绿地土壤是城市绿地生态系统中独立而不孤立存在的一个环节,是绿地植物生长的介质,能为绿地植物提供生长所需的养分和水分,并对排入城市生态系统的污染物起到一定的净化作用^[2],因此城市绿地土壤对城市生态环境改善及可持续发展具有重要意义。

然而,随着城市化进程的加剧及人类活动的影响,城市绿地土壤中的重金属污染日益严重。重金属元素如镉(Cd)、铅(Pb)和铬(Cr)等通过机动车

尾气、工业废弃物的排放、垃圾焚烧以及自然大气降尘等途径进入土壤^[3~5],能够在土壤中存留较长时间,最终超出土壤的承载能力^[6],因此对土壤造成较大的潜在危害。

绿地土壤是城市人群最易接触重金属的途径之一^[7]。城市污染土壤可以通过扬尘,呼吸道摄取及儿童吮舔等多种途径进入人体,直接危害人体健康^[8~11]。此外,城市生态系统较为封闭,对污染物的降解能力较低。土壤重金属污染势必会对城市绿地

收稿日期: 2020-05-20; 修订日期: 2020-08-11

基金项目: 江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2019]08); 南京市园林绿化行业科技计划项目(YLKJ201818ZB); 江苏省大学生实践创新训练项目(201810300040Z)

作者简介: 陈佳林(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染及防治, E-mail: chenjialin614@163.com

* 通信作者, E-mail: rylt2005@nuist.edu.cn

生态系统功能及人类健康带来直接和潜在的危害。

南京作为一个典型的工业城市,土壤重金属污染现象较为严重. 目前的研究主要集中在南京部分地区如矿场或郊区,土地利用方式主要为菜地土壤、农田土壤或不同功能区土壤^[12-14],对南京市主城区绿地土壤重金属污染来源及其潜在生态风险的研究较少. 因此,本文以南京市主城区绿地土壤为研究对象,分析 Cr、Cu(铜)、Zn(锌)、Pb 和 Cd 这 5 种元素的含量和空间分布特征,探讨重金属污染来源,并使用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法及潜在生态风险指数法对南京市主城区绿地土壤的重金属进行综合评价,通过全面了解南京市绿地土壤环境质量,以期城市绿地土壤重金属的控制提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 采样点的确定

本研究采用地理信息系统技术和网格化方法并结合南京市绿地实际情况,确定了 228 个采样点. 采样点基本覆盖南京市主城区的绿地土壤. 采样点主要选择在网格内的绿化区域,在同一网格内,选取环境接近,绿地类型相近的点位取土. 采样点的分布见图 1.

1.2 土壤样品的采集

随机选取样点后,记录每个样点的绿地类型,植被类型,并利用 GPS 记录每个采样点的地理坐标. 于 2019 年 3~5 月,采集绿地表层(0~30 cm)土壤,每个网格内按具体情况采用 S 形布设 8~10 个点进行采样,均匀混合后装袋. 样品带回实验室,将土壤样品自然风干,再用木棒压碎,去除石砾、杂物及草根等,过 0.149 mm 尼龙筛,以用于土壤重金属的测定.

1.3 土壤样品的测定

土壤重金属采用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮-ICP 测

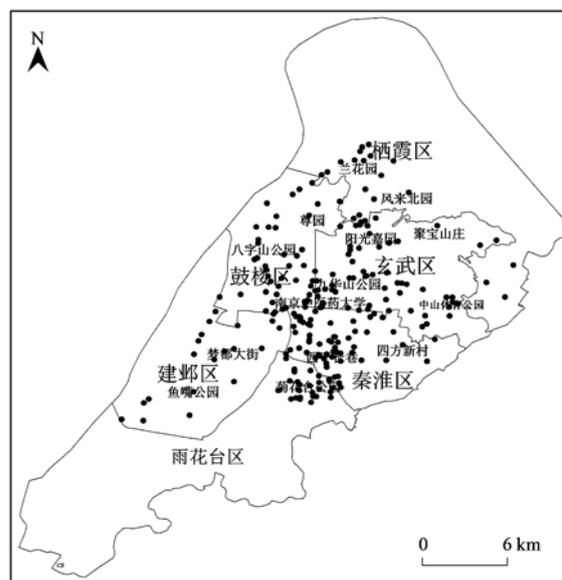


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the study areas

定:用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮土壤样品,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)测定土壤消煮液中 Cr、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量^[15]. 土壤样品消煮过程和分析过程中插入土壤标准物质(GBW07388)和平行样品进行准确度的质量控制.

1.4 重金属污染评价

土壤重金属采用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法及潜在生态风险指数法进行评价,以明确南京市绿地土壤的重金属污染程度.

1.4.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法是对土壤中某一污染物的污染程度进行的评价. 其计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, C_i 为污染物 i 的实测含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的评价标准,本研究选用南京市土壤重金属元素的背景值作为污染物的评价标准^[16]. 单因子污染指数分级标准如表 1 所示.

表 1 单因子污染指数分级标准

Table 1 Classification standards of the single-factor pollution index

污染指数	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$P_i > 3$
质量等级	未污染	潜在污染	轻度污染	重度污染

1.4.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法^[17]是国内外学者常用的土壤重金属综合污染评价方法. 内梅罗综合污染指数法重点体现了环境要素中含量最大的污染物对环境的影响. 在单因子污染指数的基础上,求出各指数的平均值,利用最大值和平均值计算. 本研究运用内梅罗综合污染指数对南京市主城区绿地

土壤的重金属污染程度进行评价,其公式如下:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_N 为内梅罗综合污染指数; $P_{i\max}$ 为单因子污染指数的最大值; $P_{i\text{ave}}$ 为各个污染元素指数的算术平均值,内梅罗指数既反映了各重金属元素对土壤的作用,同时突出了高浓度污染物对土壤环境质量

的影响程度.依据单因子污染指数法和内梅罗污染指数法将污染分为5个等级.如表2所示.

表2 表层土壤内梅罗指数分级指标

Table 2 Classification standards of the Nemerow integrated pollution index

土壤污染等级	土壤综合污染指数	污染程度	污染水平
I	$P_N \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻污染	土壤轻度污染
IV	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中污染	土壤中度污染
V	$P_N > 3.0$	重污染	土壤重度污染

1.4.3 潜在生态风险指数法

瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出了潜在生态风险指数法,用于评价重金属的污染程度,潜在生态风险指数法能够在考虑重金属平均含量的同时,将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起^[18],其公式如下:

$$C_r^i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (4)$$

$$RI = \sum E_r^i \quad (5)$$

式中, C_r^i 为单一重金属污染指数, $C_{\text{表层}}^i$ 为实测值, C_n^i 为土壤重金属元素背景值, E_r^i 为单一重金属潜在生态风险指数, T_r^i 为各重金属的毒性响应系数,RI为土壤多种重金属潜在生态风险指数.重金属元素的背景值及毒性系数如表3所示.潜在生态风险指数与污染程度的关系如表4所示.

表3 重金属元素背景参考值及其毒性系数^[19]

重金属	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd
南京市背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	59	32.2	76.8	24.8	0.19
毒性系数	2	5	1	5	30

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 和 SPSS 22.0 进行土壤重金属含量、污染指数、生态风险指数、相关性以及主成分的统计和分析;采用 ArcGIS 10.2 对土壤采样点分布、重金属空间分布进行分析和制图.

表5 南京市绿地重金属含量特征描述($n=228$)

Table 5 Concentrations of heavy metals in greenbelt soils in Nanjing City ($n=228$)

元素	含量范围 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值 \pm 标准差 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	样本超标率 /%	土壤背景值 $/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Cr	22.69 ~ 191.38	87.29 \pm 18.29	20.96	98.20	59.00
Cu	7.59 ~ 354.71	36.89 \pm 33.11	89.74	43.40	32.20
Zn	17.81 ~ 422.98	80.37 \pm 37.47	46.63	43.90	76.80
Pb	8.75 ~ 361.00	46.30 \pm 29.18	63.02	86.40	24.80
Cd	0.27 ~ 2.70	0.62 \pm 0.24	38.43	100.00	0.19

2.2 南京市绿地土壤重金属空间分布特征

将南京市主城区绿地各采样点的重金属含量按

表4 潜在生态风险评价指标^[20]

Table 4 Index of potential ecological risk assessment of heavy metals

单项生态风险指数		综合生态风险指数(RI)	
等级	得分	等级	得分
轻微	<40	低生态风险	<150
中等	40 ~ 80	中等生态风险	150 ~ 300
强	80 ~ 160	高生态风险	300 ~ 600
很强	160 ~ 320	极高生态风险	>600
极强	>320		

2 结果与分析

2.1 南京市绿地土壤重金属含量状况

南京市主城区绿地土壤重金属含量状况如表5所示.从中可知,南京市绿地土壤重金属平均含量均高于土壤背景值.Cr、Cu、Zn、Pb和Cd的平均含量分别为87.29、36.89、80.37、46.30和0.62 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为南京市土壤背景值的1.48、1.14、1.05、1.86和3.26倍.与南京市土壤背景值相比,重金属样本超标率均在40.00%以上,其中Cd的样本超标率达到了100.00%,其次为Cr和Pb,样本超标率分别为98.20%和86.40%.这些结果表明,南京市主城区绿地土壤中的重金属具有一定程度的富集.

5种重金属元素的变异系数大小为 $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{Cr}$,均呈中等强度变异^[21],表明Cr、Cu、Zn、Pb和Cd的污染不仅受到结构性因素影响,同时也受到随机性因素的作用^[22].变异系数可以反映重金属在土壤中的变异性和均匀性,与人类活动有很大的关系^[23].Cr、Cu、Zn、Pb和Cd的变异系数相差较大,说明这5种重金属的离散程度较高,在不同点位的5种重金属含量差异较大^[24].Cr变异系数最小,说明Cr在南京市主城区绿地土壤的分布比较均匀并且受到外界环境影响最小.Cu和Pb的变异系数均超过了50.00%,Cu的变异系数最高,达到了89.74%,说明Cu的分布不均且受人类活动影响最大^[25].Cr、Cu、Zn和Pb的最大值、最小值区间变化较大说明南京市部分地区局部存在单个重金属污染严重的情况.

照反距离插值法绘制成空间分布,其结果如图2所示.从中可知,主城区绿地土壤重金属呈现斑块状

分布,分布规律明显. 南京主城区绿地土壤 Cr 含量高值区域主要集中在玄武区及建邺区部分绿地,在鱼嘴公园,聚宝山庄,四方新村等含量较高,在鼓楼区 and 秦淮区个别区域含量较低. Cu 含量高值区域主要集中在玄武区,但总体含量水平较低,含量最高区域在阳光嘉园绿地附近,这与 Zn 含量的分布区域类似. Pb 含量的高值区主要出现在玄武区,其余区域 Pb 含量较低. Cd 呈现出主城区西南部及西北部区域含量较高,东部地区含量较低的分布规律. Cr、Cu、Zn 和 Pb 这 4 种元素在城区东北部含量较高,且呈现出富集趋势,说明人类活动对重金属的富集产生较大的影响^[26].

2.3 土壤重金属污染特征

通过单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法

以及潜在生态风险指数法计算了研究区内 228 个样点的污染指数及其所占的百分比. 由表 6 和表 7 可知, Cd 单项污染指数在 3(重污染)以上的样点占比为 66.23%,平均污染指数为 3.24,污染等级为重污染. Cr、Cu、Zn 和 Pb 的单因子污染指数均值分别为 1.48、1.15、1.05 和 1.87,均属于潜在污染等级. Pb 有 24.56%的样点单项污染指数处于轻度污染. 5 种重金属的内梅罗综合污染指数平均值为 2.72,属于中度污染,其中轻度污染样点占 22.37%,中度污染样点占 68.42%,但是部分受污染样点的污染指数较高,导致内梅罗指数在总体上相对偏高. 除去 Cd 外,重金属的单项生态风险指数均低于 10,属于轻微生态风险水平(表 8). 南京市主城区的综合生态风险指数为 116.39(<150),属于低生态风险.

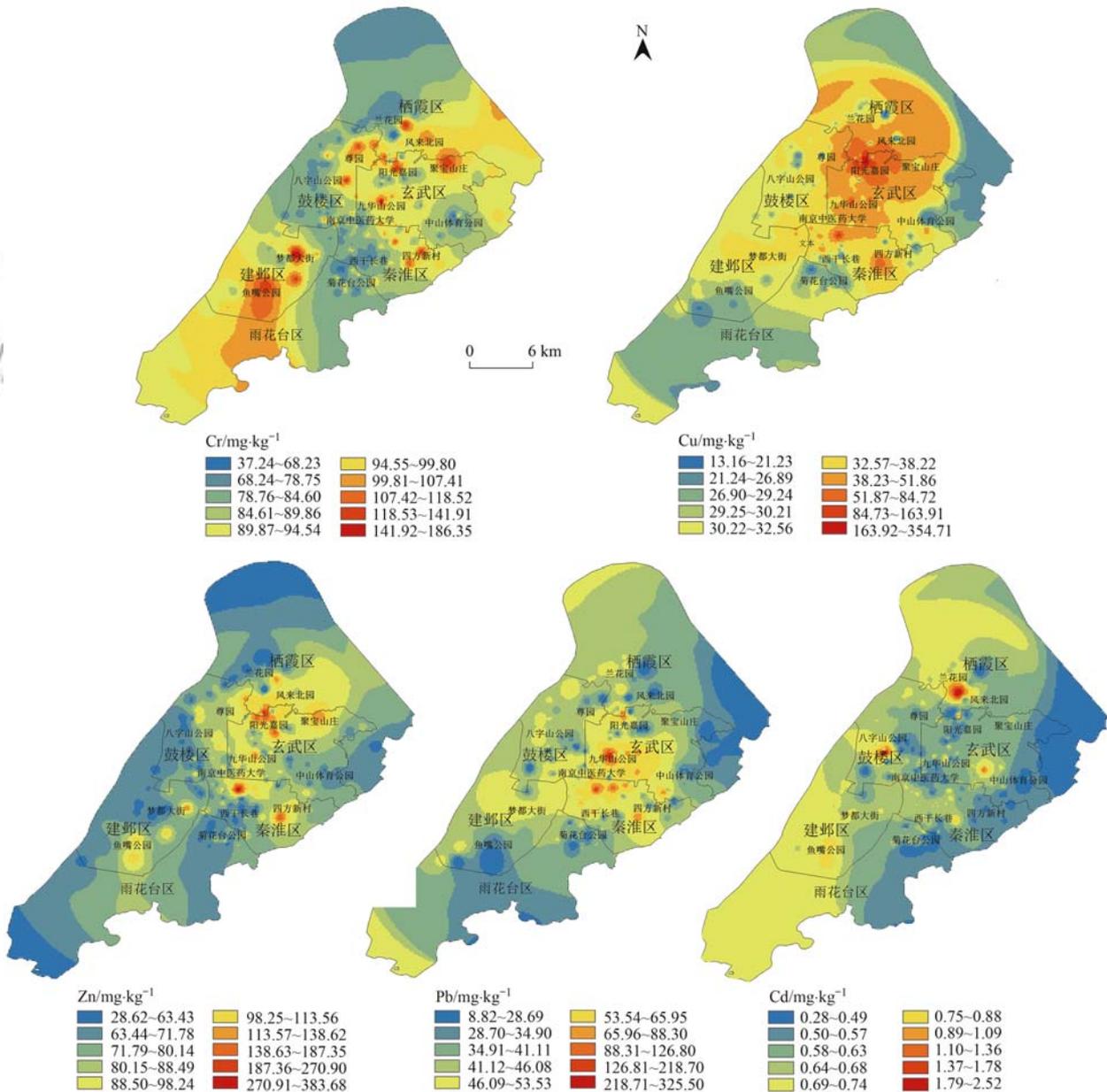


图 2 研究区绿地土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in greenbelt soils in the study areas

表 6 土壤重金属元素污染指数

Table 6 Pollution index of heavy metals

重金属	P_i					P_N	风险等级
	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd		
平均值	1.48	1.15	1.05	1.87	3.24	2.72	中度污染
最大值	3.24	11.02	5.51	14.56	14.21		
最小值	0.38	0.24	0.23	0.35	1.42		
均值质量等级	潜在污染	潜在污染	潜在污染	潜在污染	重污染		

表 7 不同污染级别样点数占总数百分比¹⁾

Table 7 Percentages of sites at different pollution levels

污染等级	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	P_N
$0 < P_i \leq 1$	4(1.75)	129(56.58)	128(56.14)	31(13.60)	0(0.00)	0(0.00)
$1 < P_i \leq 2$	211(92.54)	91(39.91)	93(40.79)	128(56.14)	16(7.02)	51(22.37)
$2 < P_i \leq 3$	12(5.26)	2(0.88)	5(2.19)	56(24.56)	61(26.75)	156(68.42)
$3 < P_i$	1(0.44)	6(2.63)	2(0.88)	13(5.70)	151(66.23)	21(9.21)

1) 括号外为样点数,括号内为样点所占的百分数(%)

表 8 土壤重金属元素潜在生态风险指数

Table 8 Potential ecological risk index of soil heavy metal elements

重金属	单项生态风险指数(E_i^r)					综合生态风险指数(RI)	风险等级
	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd		
平均值	2.96	5.73	1.05	9.33	97.32	116.39	低生态风险
风险程度	轻微	轻微	轻微	轻微	强		

2.4 绿地土壤重金属相关性分析

一般来说,土壤重金属主要来源于成土母质和各种人类活动,重金属之间的相关性有助于辨识其来源,若重金属之间存在显著正相关,则说明其可能有同一来源。否则,其可能有多个来源^[27]。对南京市主城区绿地土壤重金属进行 Pearson 相关性分析,分析结果见表 9。从中可知,重金属元素 Cu-Zn、Pb-Cu 和 Pb-Zn 之间的相关系数分别为 0.65、0.47 和 0.35,达到显著正相关关系($P < 0.01$)。Cd 除了与 Pb 呈显著正相关外,与其他元素关系不大。

表 9 南京市绿地土壤重金属相关系数¹⁾

Table 9 Correlation coefficient of heavy metals

in greenbelt soils in Nanjing City

	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd
Cr	1				
Cu	0.17*	1			
Zn	0.37**	0.65**	1		
Pb	0.16*	0.47**	0.35**	1	
Cd	-0.09	0.09	-0.07	0.19**	1

1) **表示在 0.01 水平上显著相关,*表示在 0.05 水平上显著相关

2.5 绿地土壤重金属主成分分析

据研究,同一主成分的重金属,可以辨别其有相似的来源^[28,29]。从主成分分析结果可知,两个特征值大于 1 的主成分因子的累计贡献率为 66.02% (>60%),可以解释重金属的绝大部分信息(表 10)。第一主成分的贡献率为 42.82%,Cr、Cu、Zn、

Pb 和 Cd 的因子载荷分别为 0.17、0.41、0.36、0.36 和 0.14(表 10)。第二主成分的贡献率为 23.20%,Cd 的因子载荷为 0.72。Cu 和 Pb 在第二主成分也具有较高的载荷,分别为 0.41 和 0.27。

表 10 绿地土壤重金属的主成分分析

Table 10 Principal component analysis (PCA) of heavy metals in greenbelt soils in Nanjing City

项目	第一主成分	第二主成分
Cr	0.17	-0.45
Cu	0.41	0.41
Zn	0.36	-0.25
Pb	0.36	0.27
Cd	0.14	0.72
特征值	2.14	1.16
贡献率/%	42.82	23.20
累积贡献率/%	42.82	66.02

3 讨论

从重金属含量水平来看,南京市主城区绿地土壤中 Cr、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的平均含量都高于南京市土壤背景值(表 5)。南京市作为特大中心城市,机动车数量较多,汽车尾气,轮胎摩擦,润滑油和金属部分的摩擦和燃料燃烧等都能释放出 Cd、Cu、Zn 和 Pb 等元素,这可能是造成南京市绿地土壤中 Cd、Cu、Zn 和 Pb 含量较高的原因^[30]。一般来说,Cr 是我国城市土壤污染程度最低的重金属^[31,32],但是 Cr 在南京市主城区绿地土壤部分样点中含量较高,一方面这可能是因为南京市主城区印刷厂较

多,部分采样点分布在印刷厂周围所致,另一方面,可能与 Cr 及其化合物被广泛应用于冶金、电镀、制革等行业,大量的铬渣被排入环境,污染南京市地下水及主城区绿地土壤有关。虽然南京市主城区绿地土壤中 Cr、Cu、Zn 和 Pb 的平均含量均高于南京市土壤背景值,但通过结合重金属的生态效应、环境效应与毒理学而计算的潜在生态风险指数的结果可知,这几种重金属污染等级均为轻微等级,即具有较低的生态风险。而相比于 Cr、Cu、Zn 和 Pb,南京市主城区绿地土壤中 Cd 污染最为严重,处于强等级,具有较大的生态风险。与北京市绿地土壤重金属含量相比^[33],除了 Zn 外,本文所研究的重金属在南京市绿地土壤中都较高,这除了与成土母质有关外,很大程度上取决于人为活动,因此,应引起政府及园林部门的重视。

从重金属空间分布来看,Cr 在玄武区、建邺区以及秦淮区部分绿地土壤含量较高的原因可能与这些地区印刷厂分布较为广泛有关,也可能是因为被 Cr 污染过的地下水通过各种途径进入绿地土壤所致^[34]。市中心 Pb 含量较高的原因可能是因为在公园的修建过程中,含 Pb 的化合物通常被作为着色剂使用,公园类休憩场所的建筑表层在长期的风化作用下,不可避免地被侵蚀,从而使含 Pb 物质进入土壤,导致绿地土壤中的 Pb 含量较高^[35],同时机动车含 Pb 燃料的燃烧也是导致绿地土壤中 Pb 含量较高的可能原因之一。Cd 污染集中在城区西北部和西南部,这可能是因为西部地区的印染厂分布较为广泛,在印染厂附近的土壤更易受到 Cd 的污染^[36]。除此以外,农业用品中的热稳定剂及含 Cd 肥料的长期大量使用^[37]、汽车尾气排放量的日益增加,污水的不当排放^[35]都会造成土壤中 Pb 和 Cd 的污染问题。Cu 和 Zn 在主城区东北区域污染较为严重,且空间分布类似,这可能是南京主城区东北部大卡车车流量较多,另外工业飘尘、汽车尾气、污水灌溉、工业废渣、城市垃圾及农药化肥等因素都是导致该区域绿地土壤重金属含量较高的原因^[38]。

从重金属元素之间相关性分析及主成分分析结果来看,本研究第一主成分的贡献率为 42.82%,Cr、Cu、Zn 和 Pb 具有较高的因子载荷,分别为 0.17、0.41、0.36 和 0.36(表 10)。Cu、Zn 会在机动车燃料燃烧时释放出来;主城区机动车尾气排放及轮胎摩擦是 Pb 的主要来源^[30];Cu、Pb 和 Zn 受人类活动影响较大且 Cu、Zn 和 Pb 两两之间均具有正相关关系(表 9)^[39,40],说明这些元素具有相似的来源。这些结果说明第一主成分主要反映了人为因子对土壤的污染,推测其为人为源。第二主成分 Cd 的因子

载荷较高,为 0.72(表 10),长江冲积物导致了土壤中 Cd 的原始积累较高^[41],推测为自然源;当同一元素在不同的主成分上均有相当的载荷时,可以认为其具备两种主成分的来源^[33]。Cu 和 Pb 在第二主成分上也具有相当的载荷(表 10),且 Cu 和 Pb 之间具有显著相关性,说明 Cu 和 Pb 也来自第二主成分,即自然因子^[42]。这说明 Cu 和 Pb 存在两种不同的来源,推测其为人为源和自然源。综合以上分析,推断南京市主城区绿地土壤中 5 种重金属的来源分别为:①Cr 和 Zn 为人为源;②Cd 为自然源;③Cu 和 Pb 为混合源。

4 结 论

(1)南京市主城区 5 种重金属 Cr、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的平均含量均超过背景值,分别是背景值的 1.48、1.14、1.05、1.86 和 3.26 倍,存在富集现象。总体上,研究区域内 5 种重金属的平均内梅罗综合污染指数为 2.72,污染程度为中度污染,5 种重金属的综合生态风险指数为 116.39,属于低生态风险。其中 Cd 的单项生态风险指数为 97.32,处于强等级程度,Cd 的单因子污染指数为 3.24,属于重度污染,其余 4 种重金属为潜在污染。

(2)在空间分布上,研究区内绿地土壤重金属空间分布呈斑块状分布,Cr、Cu、Zn 和 Pb 高值区域集中于主城区东北区域,Cd 高值区域集中于西南及西北地区。

(3)因子分析结果表明,南京市主城区内重金属有 3 种主要来源,一是由于人类活动影响所导致的人为源;二是成土母质所导致的自然来源,三是人类活动与自然的混合源。其中 Cr 和 Zn 为人为源,Cd 为自然源,Cu 和 Pb 为混合源。

参 考 文 献:

- [1] 王庆日. 城市绿地的价值及其评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. 6-7.
- [2] Harawa N T, Greenland S, Bingham T A, et al. Associations of race/ethnicity with HIV prevalence and HIV-related behaviors among young men who have sex with men in 7 urban centers in the United States[J]. *Journal of Acquired Immune Deficiency Syndromes*, 2004, **35**(5): 526-536.
- [3] 胡文军. 深圳城市公园道路绿地土壤理化性状与土壤酶活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008. 1-2.
Hu W J. Studies on soil physical-chemical properties and enzymes activities for urban parks and roads green-land in Shenzhen[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2008. 1-2.
- [4] 陈立新, 赵淑苹, 段文标. 哈尔滨市不同绿地功能区土壤重金属污染及评价[J]. *林业科学*, 2007, **43**(S1): 65-71.
Chen L X, Zhao S P, Duan W B. Heavy metal contamination of soils and its evaluation in different greenbelt region of Harbin [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, **43**(S1): 65-71.

- [5] Adama M, Esena R, Fosu-Mensah B, *et al.* Heavy metal contamination of soils around a hospital waste incinerator bottom ash dumps site[J]. *Journal of Environmental and Public Health*, 2016, **2016**, doi: 10.1155/2016/8926453.
- [6] Yang J L, Zhang G L. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils—a review [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, **61**(sup1): 30-46.
- [7] Calabrese E J, Stanek E J, Barnes R, *et al.* Methodology to estimate the amount and particle size of soil ingested by children: Implications for exposure assessment at waste sites [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1996, **24**(3): 264-268.
- [8] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. *环境科学*, 2001, **22**(3): 44-48.
Yang Y G, Paterson E, Campbell C. Accumulation of heavy metals in urban soils and impacts on microorganisms [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(3): 44-48.
- [9] 李敏, 林玉锁. 城市环境铅污染及其对人体健康的影响[J]. *环境监测管理与技术*, 2006, **18**(5): 6-10.
Li M, Lin Y S. Lead pollution and its impact on human health in urban area [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2006, **18**(5): 6-10.
- [10] 周洪英, 单爱琴, 徐林建, 等. 城市土壤重金属污染多元统计及空间评估[J]. *工业安全与环保*, 2016, **42**(5): 1-4, 11.
Zhou H Y, Shan A Q, Xu L J, *et al.* Multi-statistical and spatial assessment of urban soil heavy metal contamination [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, **42**(5): 1-4, 11.
- [11] 吴新民, 李恋卿, 潘根新, 等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 105-111.
Wu X M, Li L Q, Pan G X, *et al.* Soil pollution of Cu, Zn, Pb and Cd in different city zones of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(3): 105-111.
- [12] Adrees M, Ali S, Rizwan M, *et al.* Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants; a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **119**: 186-197.
- [13] 高占啟, 刘廷凤, 刘献锋, 等. 南京江宁区土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *广州化工*, 2015, **43**(22): 140-142.
Gao Z Q, Liu T F, Liu X F, *et al.* Risk assessment on heavy metals pollution in soil at Jiangning District of Nanjing [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, **43**(22): 140-142.
- [14] 毛香菊, 邹安华, 马亚梦, 等. 南京某铁矿土壤重金属污染潜在生态危害评价[J]. *矿产保护与利用*, 2015, (3): 54-59.
Mao X J, Zou A H, Ma Y M, *et al.* Evaluation of the potential ecological risk of heavy metals in soil of an iron mine region [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2015, (3): 54-59.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 中国科学院土壤背景值协作组. 北京、南京地区土壤中若干元素的自然背景值[J]. *土壤学报*, 1979, **16**(4): 319-328.
The Group of Natural Background Values of Soil, *Academia Sinica*. The natural background values of some trace elements in the important soil types of Beijing and Nanjing areas [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1979, **16**(4): 319-328.
- [17] 陈优良, 史琳, 王兆茹. 基于 GIS 的矿区土壤重金属污染评价及空间分布[J]. *测绘科学*, 2018, **43**(4): 80-86.
Chen Y L, Shi L, Wang Z R. Pollution assessment and spatial distribution of soil heavy metals in mining area based on GIS [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, **43**(4): 80-86.
- [18] Peter E, Adeniyi G. Spatial relationships of urban land use, soils and heavy metal concentrations in Lagos Mainland area [J]. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2011, **15**(2): 391-399.
- [19] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [20] Lv J S, Zhang Z L, Li S, *et al.* Assessing spatial distribution, sources, and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of the Nansi Lake, Eastern China [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, **299**(3): 1671-1681.
- [21] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(1): 33-40.
Zhong X L, Zhou S L, Li J T, *et al.* Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta—a case study of Taicang City in Jiangsu Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(1): 33-40.
- [22] 阿卜杜萨拉木·阿布都加帕尔, 王宏卫, 杨胜天, 等. 淮东地区土壤重金属污染特征及来源分析[J]. *中国矿业*, 2019, **28**(11): 168-174.
Abdusalam A, Wang H W, Yang S T, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of soil heavy metals in east Junggar Region [J]. *China Mining Magazine*, 2019, **28**(11): 168-174.
- [23] 陈小敏, 朱保虎, 杨文, 等. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布、来源及污染评价[J]. *环境化学*, 2015, **34**(12): 2248-2256.
Chen X M, Zhu B H, Yang W, *et al.* Sources, spatial distribution and contamination assessments of heavy metals in gold mine area soils of Miyun Reservoir upstream, Beijing, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(12): 2248-2256.
- [24] 张永江, 邓茂, 邵曾, 等. 典型生态旅游地土壤重金属空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境影响评价*, 2015, **37**(5): 75-79.
Zhang Y J, Deng M, Shao Z, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metal in typical ecotourism area soil [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2015, **37**(5): 75-79.
- [25] 郑袁明, 余轲, 吴泓涛, 等. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价[J]. *地理研究*, 2002, **21**(4): 418-424.
Zheng Y M, Yu K, Wu H T, *et al.* Lead concentrations of soils in Beijing urban parks and their pollution assessment [J]. *Geographical Research*, 2002, **21**(4): 418-424.
- [26] 杨少斌, 于鑫, 孙向阳, 等. 北京城区绿地土壤重金属污染评价与空间分析[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(5): 933-941.
- [27] 杨蕊, 李小平, 王继文, 等. 西宁市城市土壤重金属分布特

- 征及其环境风险[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(6): 1531-1538.
Yang R, Li X P, Wang J W, *et al.* Geochemical distribution and environment risk of heavy metals in urban soil of Xining City[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, **35**(6): 1531-1538.
- [28] 卢琰, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 123-126.
Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, *et al.* Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(1): 123-126.
- [29] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution, 2001, **114**(3): 313-324.
- [30] 张磊, 宋凤斌, 王晓波. 中国城市土壤重金属污染研究现状及对策[J]. 生态环境, 2004, **13**(2): 258-260.
Zhang L, Song F B, Wang X B. Heavy metal contamination of urban soils in China: status and countermeasures[J]. Ecology and Environment, 2004, **13**(2): 258-260.
- [31] Sun C Y, Liu J S, Wang Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, Northeast China[J]. Chemosphere, 2013, **92**(5): 517-523.
- [32] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **107**: 140-147.
- [33] 赵靛, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5552-5561.
Zhao L, Liang Y P, Chen Q, *et al.* Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in urban green space soil of a city in north China[J]. Environment Science, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [34] 王威. 铬污染地区环境对植物吸收重金属的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2005, **25**(1): 66-68.
Wang W. Effects of the environment polluted by heavy metal Cr on plant growth[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2005, **25**(1): 66-68.
- [35] 张娟, 王艳春, 田宇. 北京市属公园土壤重金属分布及风险评估[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(6): 78-81.
Zhang J, Wang Y C, Tian Y. Soil contamination in Beijing's parks and heavy metals risk assessment[J]. Environment Science & Technology, 2012, **35**(6): 78-81.
- [36] 孟君, 苏彩娜. 郑州市环境中重金属 Pb, Cd 的污染分析[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2013, **28**(4): 52-54.
Meng J, Su C N. Analysis of heavy metal Pb, Cd pollution in the environment of Zhengzhou City[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science), 2013, **28**(4): 52-54.
- [37] 颜蒙蒙, 王济, 胡丰青, 等. 贵阳郊区菜地土壤重金属 Zn、Cd、Pb、Cu 污染及潜在生态危害评价[J]. 四川农业大学学报, 2016, **34**(3): 336-341, 380.
Yan M M, Wang J, Hu F Q, *et al.* Pollution and potential ecological hazard of heavy metals Zn, Cd, Pb, Cu in the vegetable soils of Guiyang Suburb[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2016, **34**(3): 336-341, 380.
- [38] Bilos C, Colombo J C, Skorupka C N, *et al.* Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina[J]. Environmental Pollution, 2001, **111**(1): 149-158.
- [39] Möller A, Müller H W, Abdullah A, *et al.* Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta[J]. Geoderma, 2005, **124**(1-2): 63-71.
- [40] Karimi R, Ayoubi S, Jalalian A, *et al.* Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, **74**(1): 1-7.
- [41] 秦文, 郭坤一, 刘红樱, 等. 长江三角洲土壤 Cd 分布特征及生态效应初步评价[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(5): 1986-1988, 1998.
Qin W, Guo K Y, Liu H Y, *et al.* Preliminary evaluation on soil Cd distribution characters and ecological effect of Yangtze River Delta[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, **36**(5): 1986-1988, 1998.
- [42] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2322-2328.
Liu Y N, Zhu S F, Wei X F, *et al.* Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2322-2328.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshui Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshui	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qililai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)