

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 ..... 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM<sub>2.5</sub>浓度调控模拟 ..... 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM<sub>2.5</sub>碳质组分特征 ..... 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM<sub>1</sub>中金属元素污染特征及健康风险评估 ..... 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 ..... 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 ..... 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 ..... 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 ..... 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 ..... 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 ..... 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 ..... 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 ..... 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 ..... 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 ..... 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 ..... 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 ..... 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 ..... 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 ..... 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 ..... 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 ..... 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 ..... 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 ..... 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 ..... 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 ..... 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 ..... 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 ..... 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 ..... 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 ..... 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 ..... 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 ..... 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 ..... 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 ..... 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 ..... 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 ..... 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 ..... 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 ..... 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 ..... 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 ..... 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 ..... 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O浓度的时空变化特征及影响因素 ..... 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 ..... 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 ..... 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 ..... 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 ..... 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

# 有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析

汪峰<sup>1</sup>, 黄言欢<sup>2</sup>, 李如忠<sup>1\*</sup>, 吴鸿飞<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽文川环保有限公司, 铜陵 244002)

**摘要:** 为了解铜陵市村镇土壤重金属污染程度和潜在生态风险水平, 在顺安镇、钟鸣镇和义安经济开发区大致均匀布设 67 个采样点位, 采集表层土壤样(包括地表灰尘和河道沉积物), 通过测试 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 和 Ni 等重金属含量及土壤 pH 值, 剖析土壤重金属含量的空间分布特征, 评估土壤重金属污染程度和潜在生态风险水平, 并解析土壤重金属来源。结果表明, 研究区土壤 pH 呈弱酸性, 土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 和 Ni 含量均值分别为铜陵市土壤背景值的 4.94、2.89、2.07、0.94、7.97、4.03 和 2.02 倍, 总体上呈现西高东低的变化特征。内梅罗污染指数表明, Cu、Cd、As 和 Pb 属于重度污染, Zn 和 Ni 分别属中度和轻度污染, Cr 为无污染; 不同用地类型内梅罗综合污染指数大小排序为: 河道 > 城镇 > 工业用地 > 菜地 > 农业用地 > 山林 > 村庄, 研究区总体属于重度污染水平。土壤重金属潜在生态风险系数大小排序为: Cd > As > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr, 其中 Cd 处于极高风险, Cu 和 As 处于中等风险, 其余各元素均处于低风险水平; 不同用地类型潜在生态风险水平排序为: 河道 > 城镇 > 工业用地 > 菜地 > 农业用地 > 村庄 > 山林, 其中工业用地、菜地和城镇总体达很高风险水平, 农业用地达高风险水平, 村庄和山林属于中等风险。主成分分析表明, 研究区 Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 的主要来源是当地金属矿业污染; Cr 主要来自地质背景和金属矿业污染; Ni 主要来源为化石燃料燃烧。

**关键词:** 有色金属; 土壤重金属污染; 潜在生态风险评价; 来源解析; 铜陵市

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4800-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112016

## Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City

WANG Feng<sup>1</sup>, HUANG Yan-huan<sup>2</sup>, LI Ru-zhong<sup>1\*</sup>, WU Hong-fei<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Wenchuan Environmental Protection Co., Ltd., Tongling 244002, China)

**Abstract:** To investigate the soil contamination degree and potential ecological risk level of heavy metals in villages and towns in Tongling City, we collected 67 surface soil samples (including surface dusts and river sediments) from the typical districts, namely Shun'an Town, Zhongming Town, and Yi'an Economic Development Zone, and measured the contents of heavy metals including Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, As, and Ni. Then, spatial distribution characteristics of heavy metals were analyzed, and their contamination degree and potential ecological risk were assessed. Finally, source apportionment of soil heavy metals was conducted using factor analysis. The results showed that the soil pH was weakly acidic in the study area, and the average contents of Cu, Zn, Cr, Cd, As, and Ni were 4.94, 2.89, 2.07, 0.94, 7.97, 4.03, and 2.02 times their soil background values in Tongling City, respectively. In general, the contents of soil heavy metals in the western part were higher than those in the eastern part across the studied area. According to the Nemerow pollution index, Cu, Cd, As, and Pb reached pollution levels; Zn, and Ni approached moderate pollution levels; and Cr belonged to the no pollution degree category. The Nemerow comprehensive pollution index of different land types was arranged in the order of river bed > town district > industrial land > vegetable land > agricultural land > mountain forest > village. On the whole, the contamination degree of soil heavy metals in the study area reached severe pollution levels. The order of potential ecological risk coefficients of soil heavy metals was Cd > As > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr, in which Cd belonged to the extremely high risk level, Cu and As belonged to the medium risk level, and the others were all low risk levels. The potential ecological risk levels corresponding to different land types were as follows: river bed > town distribution > industrial land > vegetable land > agricultural land > village > mountain forest. The industrial land, vegetable land, and town district generally reached a very high risk level, and the agricultural land reached a high risk, whereas both village and mountain forest land showed a medium risk. Principal component analysis showed that Cu, Zn, Pb, Cd, and As in the study area were derived from local metal mining pollution; Cr was from both the geological background and metal mining pollution; and Ni mainly came from fossil fuel combustion.

**Key words:** nonferrous metals; soil heavy metal contamination; potential ecological risk assessment; source apportionment; Tongling City

随着国家城市化与工业化的快速发展, 土壤环境污染问题开始引起人们的广泛关注, 推动了我国“土十条”政策的制定和环保系统内部管理的改革。作为最普遍的土壤环境污染物之一, 重金属具有持久性、富集性和难降解性等特点<sup>[1]</sup>, 致使土壤重金属污染治理困难重重。有研究表明, 重金属污染物容易发生迁移并被生物体富集<sup>[2,3]</sup>, 进而通过食物链的逐级放大而危害人体健康, 引发各种疾病<sup>[4]</sup>。实

际上, 空气颗粒物表面吸附的重金属、地表灰尘和农田土壤富集的重金属, 也都可以通过皮肤接触、呼吸接触等暴露途径危害生态和人体健康<sup>[5]</sup>。土壤重金属污染来源广泛, 其中有色金属的开采及加工

收稿日期: 2021-12-01; 修订日期: 2022-01-19

基金项目: 企业委托项目(W2019JSKF0473)

作者简介: 汪峰(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染风险评估, E-mail: 1603669501@qq.com

\* 通信作者, E-mail: lrz1970@163.com

活动往往被认为是最突出的污染源<sup>[6]</sup>. 客观地说, 国外对金属矿区重金属污染问题的研究起步较早<sup>[7,8]</sup>. 近年来, 随着我国对矿区环境污染和生态修复问题的日益重视, 针对矿区土壤重金属污染风险评价<sup>[9,10]</sup>、污染源解析<sup>[11,12]</sup>、赋存形态分析<sup>[13,14]</sup>和健康风险评估<sup>[15,16]</sup>等方面的研究日趋活跃起来, 为矿区土壤重金属污染防治提供了依据. 毫无疑问, 对于有色金属矿山开采、冶炼和加工等活动较为活跃的城乡地区, 无论是从环境管理还是从重金属污染防治角度, 弄清土壤重金属空间分布特征, 掌握土壤重金属污染状况和潜在生态风险水平都是十分必要的.

铜陵是安徽省南部长江沿岸的典型矿业城市, 为著名的有色多金属矿区, 是我国当前最重要的有色金属基地之一<sup>[17]</sup>, 有着延绵2 000多年的铜采冶历史. 目前, 针对铜陵市区和铜陵矿区土壤重金属污染评价、污染特征的研究已有许多<sup>[18-20]</sup>. 但对于邻近矿区的城市边缘乡镇和村落的重金属污染研究则相对较少. 作为矿山开采和矿业加工重金属污染物的重要承载单元, 上述地区土壤重金属污染同样值

得关注. 为此, 本研究以铜陵市东部重要城镇顺安镇、钟鸣镇和义安经济开发区为对象, 开展村镇土壤重金属空间分布特征分析, 评估土壤重金属污染程度和潜在生态风险水平, 并识别土壤重金属污染源, 以期为该地区土壤重金属污染防治提供依据.

## 1 研究区概况

铜陵市位于安徽省南部、长江下游南岸, 地处东经 117°42'00" ~ 118°10'06" 与北纬 30°45'12" ~ 31°07'56" 之间, 属亚热带气候, 年均温度 16.2℃、年均降水量 1 340 mm. 顺安镇和钟鸣镇位于铜陵市东部, 其中顺安镇距铜陵市区约 15 km, 钟鸣镇距市区约 30 km. 在两镇中间位置为铜陵市义安经济开发区, 国道 G236 自西南向东北方向贯穿两镇一区(图 1). 该区域北部紧靠长江, 东、南部为铜矿资源丰富的山区. 顺安河水系的新桥河段由南向北贯穿该区域, 最终汇入长江, 该河发源于南部山区, 两条主要源头河流相思河、盛冲河分别流经凤凰山铜矿区、新桥硫铁矿区, 承接来自相思谷尾矿库、林冲尾矿库等尾矿库的尾水汇入.

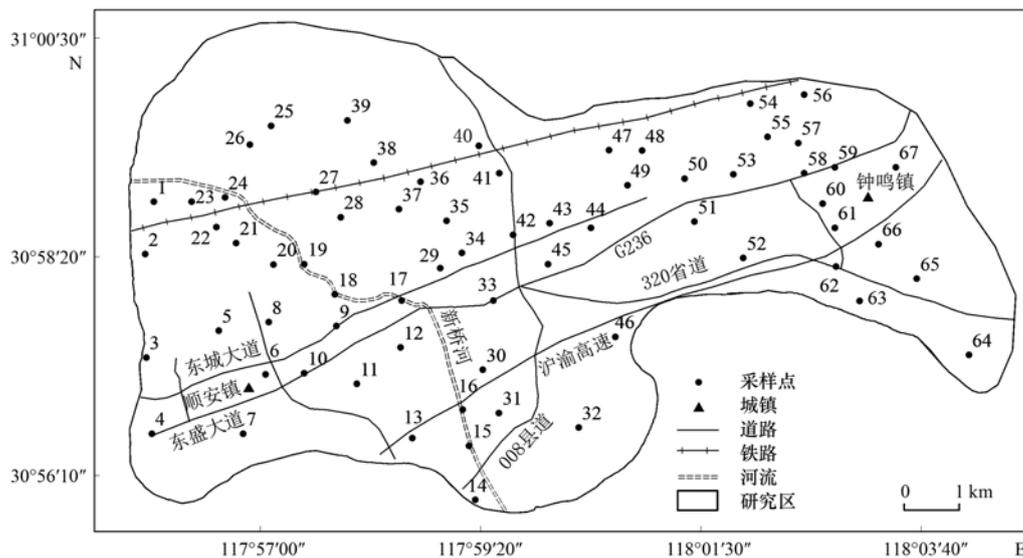


图 1 研究区基本情况

Fig. 1 Basic situation of the study area

钟鸣镇行政区域总面积 154.50 km<sup>2</sup>, 户籍人口 4.77 万; 该镇矿产资源丰富, 已探明的矿种主要有铜、硫、铁、金、银、煤和石灰石等. 顺安镇是铜陵三大古镇之一, 面积约 135 km<sup>2</sup>, 总人口 5.73 万; 境内地下蕴藏有金、铜、铁、硫、煤、锰和石灰石等多种矿产资源, 拥有多座大型金属矿山采矿场, 如新桥硫铁矿和凤凰山铜矿等, 并有金牛洞古采矿场遗址. 义安经济开发区为省级开发区, 主导产业为新材料、装备制造和电子信息产

业. 研究区属沿江丘陵平原, 境内平原、丘陵和低山呈交错状分布, 整体地势由南向北逐渐倾斜, 水文动态基本与长江一致. 成土母岩多为砂岩或石灰岩, 有少量石英岩、砂质页岩和粉砂岩等, 土壤主要为黄红壤(黄棕壤)、石灰(岩)土和红壤性麻砂土. 森林植被为北亚热带落叶、常绿阔叶混交林向中亚热带常绿阔叶林过渡, 植物种类繁多, 资源丰富. 植被类型由人工林、阔叶天然次生林、竹林和灌木林等组成<sup>[21]</sup>.

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与测试

2020年10~12月,在顺安镇、钟鸣镇和义安经济开发区境内人为活动相对较为强烈的区域,大致均匀地布设67个采样点位(图1),采用非金属材质工具采集表层(0~20 cm)土样,其中农业用地、工业用地、村庄、菜地、城镇、河道和山林的采样点数目分别为10、10、14、8、13、7和5个。对于陆域样点,在每个采样点位1 m<sup>2</sup>范围区采集3处土样,将其混合均匀装入贴有标签的塑料自封袋中,代表该点位样品;对于河道样点,采集表层(0~10 cm)沉积物样,装入贴有标签的塑料自封袋中,同时利用GPS记录采样点的地理坐标。将样品在室内通风处自然风干,研磨后过140目尼龙筛密封备用。研磨后的样品按1:5的比例与去离子水混合,充分搅拌后利用pH计测试。

重金属测试采用完全消解法。先利用HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>对土样进行加热消解,后通过原子吸收分光光度法(TAS-990AFG分光光度计)测试Cu、Pb、Zn、Cd、Cr和Ni含量,利用原子荧光光度计(PF52原子荧光光度计)测试As含量。为使样本更为准确地反映土壤质量状况,选择在连续7 d不下雨的晴朗天气采样。所有样品均做空白实验,并以标准溶液进行质量控制以保证测试结果的可信度。重金属回收率在95%~104%之间,平行实验的相对偏差均小于10%。相关测试工作均在安徽环能环境监测有限责任公司完成。

### 2.2 土壤重金属污染评价

#### 2.2.1 内梅罗指数法

内梅罗指数法是土壤重金属污染程度评价中使用广泛的评价方法<sup>[22,23]</sup>,它是由单项污染指数和综合污染指数两个部分组成。其中,单项污染指数计算公式为:

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

式中, $P_i$ 为重金属*i*的污染指数; $C_i$ 为样品中重金属*i*的实测值; $S_i$ 为重金属*i*的标准值<sup>[22]</sup>(通常取土壤重金属*i*背景值,这里取铜陵市土壤背景值)。

一般地,若 $P_i \leq 1$ ,为无污染; $1 < P_i \leq 2$ ,为轻度污染; $2 < P_i \leq 3$ ,为中度污染; $P_i > 3$ ,为重度污染。

根据单项污染指数的结果,可计算得到内梅罗综合污染指数,即:

$$P_N = \sqrt{(P_{\max}^2 + P_{\text{avg}}^2)/2} \quad (2)$$

式中, $P_{\max}$ 为单项污染指数最大值; $P_{\text{avg}}$ 为单项污染指数平均值; $P_N$ 为内梅罗综合污染指数。

一般地,若 $P_N \leq 0.7$ ,为安全等级; $0.7 < P_N \leq 1$ ,为警戒线; $1 < P_N \leq 2$ ,为轻度污染; $2 < P_N \leq 3$ ,为中度污染; $P_N > 3$ ,为重度污染。

#### 2.2.2 潜在生态危害指数法

1980年,Hakanson<sup>[24]</sup>从沉积学角度,提出了综合测算土壤和沉积物重金属生态风险的潜在生态危害指数法,相关计算公式为:

$$C_f^i = C_i/C_n^i \quad (3)$$

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i \quad (4)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (5)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (6)$$

式中, $C_i$ 为重金属*i*实测值,mg·kg<sup>-1</sup>; $C_d$ 为综合污染系数; $C_n^i$ 为重金属*i*的背景值(这里取铜陵市土壤背景值),mg·kg<sup>-1</sup>; $E_r^i$ 为重金属*i*的潜在生态风险系数,无量纲;RI为土壤中重金属的潜在生态风险指数,无量纲; $T_r^i$ 为重金属*i*的毒性系数,Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As和Ni分别取5、1、5、2、30、10和5<sup>[24]</sup>。

本研究涉及的重金属元素种类和数量与经典Hakanson潜在生态危害指数法有所不同,故考虑对Hakanson评价标准进行适当的调整。将 $C_d$ 最低级上限值设定为参评重金属种类数,其余级别上限值依次加倍,具体划分方法参见文献<sup>[25,26]</sup>。 $E_r^i$ 最低级别上限值由 $C_f^i$ 最低级别上限值(取1)与 $T_r^i$ 最大毒性系数值(取30)相乘后得到(30),其余级别上限值依次加倍。至于RI分级标准的最低级上限值,考虑由各重金属 $T_r^i$ 之和与 $C_f^i$ 最低级别上限值相乘后取10位整数得(5+1+5+2+30+10+5=58,取60),其余级别依次加倍。据此,得出本研究中拟采用的评价指标等级评分标准<sup>[25,26]</sup>,单项指标生态风险分级标准分别为:若 $E_r^i < 30$ ,为轻微风险; $30 \leq E_r^i < 60$ ,为中等风险; $60 \leq E_r^i < 120$ ,为高风险; $120 \leq E_r^i < 240$ ,为很高风险; $E_r^i \geq 240$ ,为极高风险。

潜在生态风险分级标准为:若 $RI < 60$ ,为轻微风险; $60 \leq RI < 120$ ,为中等风险; $120 \leq RI < 240$ ,为高风险; $RI \geq 240$ ,为很高风险。

### 2.3 数据处理

采用SPSS 26统计软件完成土壤重金属的相关性、主成分分析;采用Arcmap 10.6IDW插值法绘制土壤重金属含量的空间分布;基本数据处理和统计图件绘制,由Excel和Origin2019实现。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤重金属含量

研究区土壤重金属含量的统计特征值见表1。

可以看出,除 Cr 元素外,其他 6 种重金属含量均值都不同程度高于铜陵市土壤背景值. 具体地说,Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 和 Ni 含量均值分别为铜陵市土壤背景值的 4.94、2.89、2.07、0.94、7.97、4.03 和 2.02 倍. 研究区土壤重金属元素含量均值都高于安徽省土壤背景值,其中 Cd 平均含量甚至高出安徽省土壤背景值 57.2 倍,即便是整个区域最小值也高于安徽省土壤背景值,此外,Cu 和 As 也都比安徽

省土壤背景值高 10 倍以上. 该区域土样 pH 值的变化范围为 5.67~7.85,平均值为 6.87,且 pH 值小于 7.0 的样品数占总样本数目的 65.67%,表明土壤总体偏弱酸性,也意味着土壤重金属活性较强. 这里,Cr 和 Ni 变异系数远低于其他元素,表明两者空间分布较为均匀;其他重金属含量变异系数均高于 100%,表明以上重金属元素空间分布不均匀程度较高.

表 1 土壤重金属元素含量参数统计值

Table 1 Statistical values for soil heavy metal contents

统计值	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Ni
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	2 608.23	2 812.47	685.99	172.62	26.22	537.32	192.46
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	36.78	49.27	30.22	46.08	0.15	12.28	21.36
平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	390.71	401.98	138.97	73.46	5.65	91.50	66.67
变异系数/%	140	145	107	28	110	127	31
铜陵市土壤背景值 <sup>[27]</sup> / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	79	139	67	78	0.709	22.70	33
安徽省土壤背景值 <sup>[28]</sup> / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	20.4	62.0	26.6	66.5	0.097	9.0	29.8
沉积物背景值 <sup>[29,30]</sup> / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	57.04	144	26.9	84.71	0.45	15	68

### 3.2 土壤重金属空间分布特征

根据采样点地理坐标信息,运用 Arcmap 10.6 软件进行重金属分布的空间插值模拟,采用反距离

插值法(IDW)得到结果,见图 2. 可以看出,土壤重金属含量主要呈现片状和岛状分布形式. 其中,Ni 含量有 3 处低值区,分别为东、北部和西南部,两处

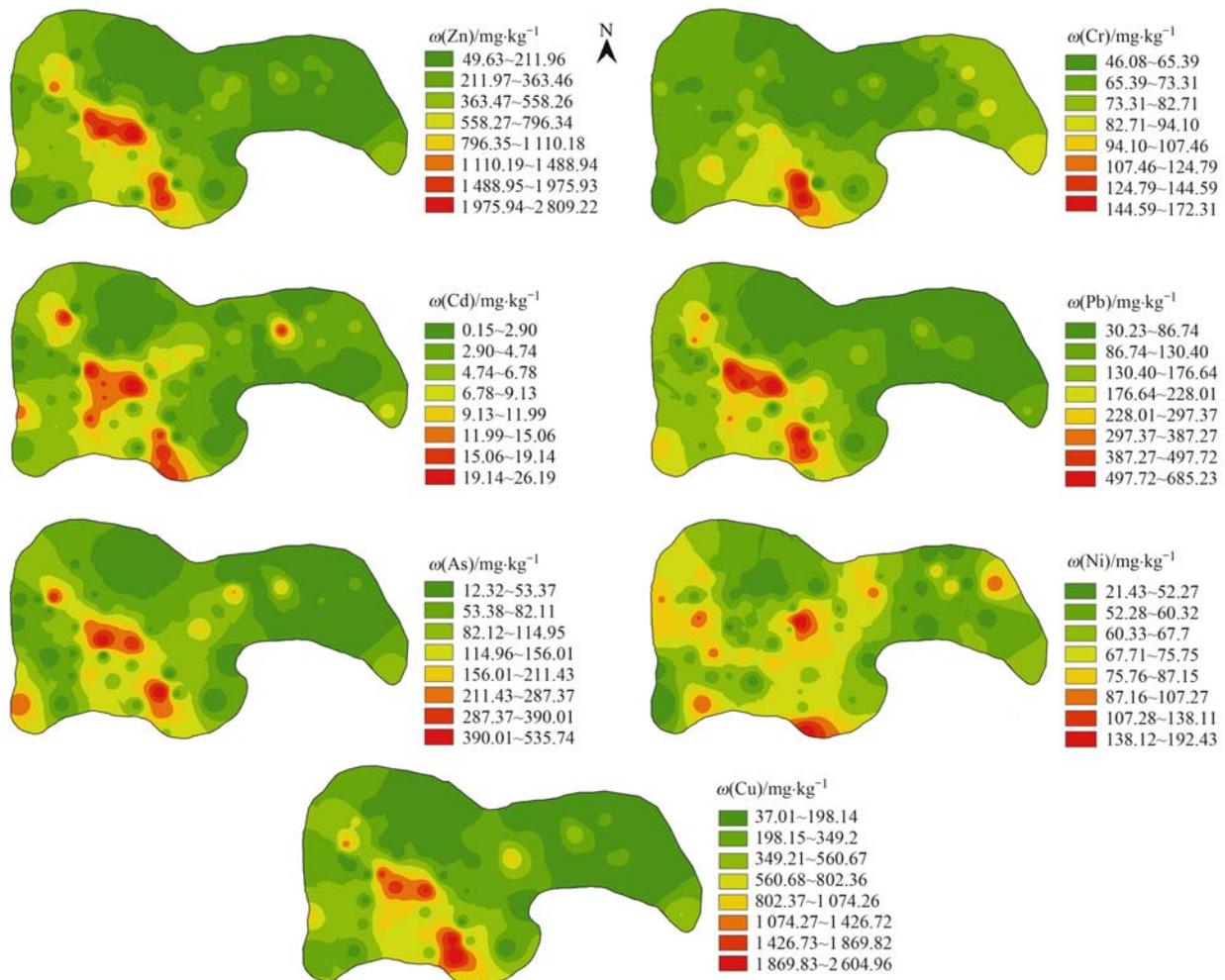


图 2 研究区土壤重金属分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil heavy metal contents in the study area

高值点分别位于第 34 号采样点(铜陵博锋实业有限公司)和第 14 号采样点(沙埂),其它区域较为均匀. Cr 含量最高值出现在南部的第 15 号采样点(河沿村)和第 16 号采样点(石桥村),其他区域则较低,特别是中部区域. 其它 5 种重金属元素的空间分布特征则大体相似,即基本都表现为西部河道及周边区域含量较高,高值区主要出现在第 16 号采样点(石桥村)、第 17 号采样点(埂下村)和第 18 号采样点(三坝村),而东、北部农业区域相对较低,并表现出由中部工业区向东部农业区递减的趋势. 而且, Cu、As 和 Pb 高值点均出现在中部工业区,如第 44 号采样点(铜陵市卓翔铜材有限公司)和第 45 号采样点(新城汽车修理厂).

整体上,研究区土壤重金属含量呈现出西高东低的变化特征,这可能与长期以来铜陵市铜矿冶炼

和有色金属加工企业等主要分布在研究区西部的铜陵市区有很大关系.

### 3.3 土壤重金属污染评价

根据内梅罗指数法得到的研究区土壤重金属污染评价结果见表 2. 单项污染指数均值大小排序为:  $Cd > Cu > As > Pb > Zn > Ni > Cr$ , 其中 Cd、Cu、As 和 Pb 达到了重度污染水平, Zn 和 Ni 分别属于中度和轻度污染水平, 仅 Cr 处于无污染水平. 研究区中每种重金属污染程度的差异性都相当显著, 导致不同空间点位同一种重金属污染程度评价结果的不一致性. 在整个采样点位中, Cd 处于重度、中度、轻度和无污染水平的采样点占比分别为: 63%、6%、24% 和 7%; Cu 为: 40%、11%、24% 和 25%; Pb 为: 16%、9%、36% 和 39%; As 为: 33%、22%、27% 和 18%. 即便是 Cr, 中度污染点位也占 2%、轻度占 22%.

表 2 土壤重金属污染评价结果

Table 2 Results of soil heavy metal contamination assessment

统计值	单项污染指数( $P_i$ )							综合污染指数( $P_N$ )
	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Ni	
最大值	45.73	19.53	25.50	2.04	58.27	35.82	5.83	44.44
最小值	0.47	0.35	0.45	0.59	0.21	0.54	0.65	1
平均值	5.82	2.84	3.29	0.93	9.55	4.86	1.92	7.86
污染等级	重度污染	中度污染	重度污染	无污染	重度污染	重度污染	轻度污染	重度污染

整个研究区 7 种重金属的内梅罗综合污染指数平均值为 7.86, 整体处于重度污染水平. 而且, 不同用地类型土壤重金属内梅罗综合污染指数差异较大, 污染程度高低排序为: 河道(32.63) > 城镇(7.82) > 工业用地(7.31) > 菜地(6.79) > 农业用地(3.05) > 山林(1.89) > 村庄(1.88), 其中仅山林和村庄属于轻度污染, 其他皆为重度污染等级.

### 3.4 潜在生态风险评价

研究区土壤重金属潜在生态风险系数见表

3. 可以看出, 除 Cd 处于极高风险、Cu 和 As 处于中等风险水平外, 其余各元素均处于轻微风险水平, 各重金属潜在生态风险系数大小排序为:  $Cd > As > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr$ , 其中 Cd 的最高潜在生态风险系数出现在第 17 号采样点位, 即新桥河沉积物样品中; 整个研究区潜在生态风险指数 RI 平均值为 397.47, 总体处于很高风险等级, 最高值也是出现在第 17 号采样点, 其值为 2 328.49.

表 3 潜在生态风险系数

Table 3 Potential ecological risk coefficients for each heavy metal

项目	潜在生态风险系数( $E_i^p$ )							风险指数(RI)
	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Ni	
最大值	228.63	19.53	127.51	4.08	1748.00	358.21	29.16	2 328.49
最小值	2.74	0.35	2.26	1.18	6.35	5.41	3.24	28.65
平均值	31.50	2.84	16.44	1.86	286.58	48.64	9.61	397.47
风险等级	中等风险	轻微风险	轻微风险	轻微风险	极高风险	中等风险	轻微风险	很高风险

在潜在生态风险指数 RI 中, Cd 的生态风险贡献高达 72.10%, 其次是 As 和 Cu, 分别为 12.24% 和 7.92%, Cr 贡献仅 0.46%. 由于 Cd 和 As 含量高且毒性大, 因此顺安镇、钟鸣镇和义安经济开发区土壤重金属污染防治, 应当将 Cd 和 As 的污染治理作为工作重点. 实际上, 其他一些针对铜陵城区土壤或地表灰尘、有色金属矿区和河流水系沉积物重金属

污染问题的研究成果<sup>[31,32]</sup>, 也都反映土壤 Cd 和 As 污染相对更为突出.

图 3 展示了整个研究区每种重金属处于不同生态风险等级的采样点位占比情况. 显然, 除 Cd 以外, 其他重金属都是以轻微风险水平的采样点数目占绝对优势, 特别是 Zn、Cr 和 Ni, 所有采样点位的潜在生态风险系数都处于轻微风险水平. Cu、Pb、

As 和 Cd 处于高风险水平的采样点占比分别为 7.46%、10.45%、8.96% 和 14.93%, Cu、As 和 Cd 处于很高风险占比分别为 7.46%、2.98% 和 22.39%, As 和 Cd 处于极高风险水平分别占 5.97% 和 31.34%。整个研究区约 68.66% 采样点 Cd 含量达到高风险及以上风险等级, 17.91% 采样点 As 含

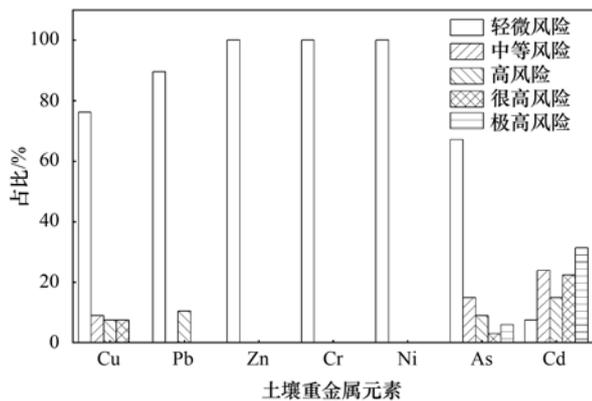


图3 每种重金属在各评价等级的潜在生态风险系数占比

Fig. 3 Proportion of potential ecological risk coefficients in different risk levels for each heavy metal

表4 不同用地类型土壤重金属潜在生态风险系数

Table 4 Potential ecological risk coefficients of soil heavy metals in different land-use types

用地类型	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Ni	RI
农业用地	16.05	1.41	5.73	1.70	97.15	20.79	9.49	152.32
工业用地	20.55	1.68	8.60	1.63	254.17	42.28	12.15	341.05
村庄	6.85	0.89	4.89	1.80	56.88	16.38	9.15	96.84
菜地	26.07	2.40	7.46	1.94	264.03	22.73	12.85	337.47
城镇	26.28	2.21	10.12	1.85	298.70	37.46	9.16	385.77
河道	150.71	13.51	97.00	2.41	1238.95	235.01	4.47	1742.07
山林	8.67	0.90	3.88	1.98	44.68	16.99	9.17	86.26

### 3.5 土壤重金属来源解析

采用 Spearman 相关系数法开展土壤重金属的相关性分析, 结果见表 5。可以看出, Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 存在极显著正相关性; 而 Cr 仅和 Zn 表现出显著相关性, 与其他重金属元素都没有表现出显著的相关关系, Ni 则与所有重金属都不存在显著或极显著相关性。实际上, 在有关铜陵市土壤和地表灰尘重金属污染问题的研究中<sup>[33]</sup>, 也发现 Ni 和 Cr 与其它重金属元素不存在明显的相关性。

对分析测试数据进行 KMO 和 Bartlett 检验, 得到 KMO 值为 0.868, 显著性水平  $P < 0.05$ , 表明原始数据适合进行因子分析<sup>[34]</sup>。采用主成分分析法解析研究区土壤重金属来源, 得到 3 个主成分的重金属载荷及主成分贡献率, 见表 6。第一主成分中, 重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 载荷较高, 分别为 0.965、0.967、0.958、0.853 和 0.902; 第二主成分中, Ni 载荷显著最高, 为 0.992; 第三主成分中, Cr 载荷显著最高, 达到 0.763。但也应看到, Cr 在第一主成分

量达到了高风险及以上风险水平。在整个研究区中, 约有 8.96% 采样点的潜在生态风险指数处于轻微风险水平, 20.90% 处于中等风险, 28.36% 处于高风险, 41.78% 处于很高风险水平。

表 4 给出了不同用地类型土壤重金属潜在生态风险系数和风险指数情况。河道沉积物中 Cd 处于很高风险水平, As 和 Cu 也处于高风险水平。总的来看, 各用地类型潜在生态风险指数基本都达到了中等以上风险水平, 相应的数值大小排序为: 河道 > 城镇 > 工业用地 > 菜地 > 农业用地 > 村庄 > 山林。其中, 河道、城镇、工业用地、菜地属于很高风险等级, 农业用地为高风险等级, 村庄和山林也达到了中等风险水平。这里, 河道最高风险点出现在第 17 号采样点(埂下村附近), 城镇最高风险点出现在第 10 号采样点(东盛大道东段), 工业用地出现在第 34 号采样点(铜陵博锋实业有限公司附近), 菜地为第 14 号采样点(沙埂附近), 农业用地为第 64 号采样点(牧陵附近), 山林则为第 12 号采样点(埂上村附近)。

表4 不同用地类型土壤重金属潜在生态风险系数

Table 4 Potential ecological risk coefficients of soil heavy metals in different land-use types

用地类型	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Ni	RI
农业用地	16.05	1.41	5.73	1.70	97.15	20.79	9.49	152.32
工业用地	20.55	1.68	8.60	1.63	254.17	42.28	12.15	341.05
村庄	6.85	0.89	4.89	1.80	56.88	16.38	9.15	96.84
菜地	26.07	2.40	7.46	1.94	264.03	22.73	12.85	337.47
城镇	26.28	2.21	10.12	1.85	298.70	37.46	9.16	385.77
河道	150.71	13.51	97.00	2.41	1238.95	235.01	4.47	1742.07
山林	8.67	0.90	3.88	1.98	44.68	16.99	9.17	86.26

的载荷也相当高, 达到 0.636, 稍低于第三主成分。可以看出, 主成分分析结果与相关性分析相一致, 即 Cr 和 Ni 都表现出相对的独立性, 意味着 7 种重金属可能存在 3 种不同来源。

铜陵市有色金属矿区多为伴生型矿床, 往往同时富集有多种金属组分, 结合其他学者针对该地区的相关研究成果<sup>[35,36]</sup>以及研究区空间分布特征, 可以推断第一主成分的 Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 来源于金属矿山的开采、选洗、冶炼和加工等矿业生产活动, 并通过大气降尘、地表和河道径流等多种传输途径输入到研究区。铜陵有色金属矿区矿石组分中 Ni 含量并不显著, 因此作为第二主成分的 Ni 可能有不同来源。众所周知, 石油中含有 Ni<sup>[37]</sup>, 大部分煤也含有微量 Ni<sup>[38]</sup>, 其可以在燃烧过程释放出来, 并成为大气中 Ni 的主要来源。铜陵市是一座以矿山开采业、有色金属冶炼、压延加工业和金属制品业等为主的重工业城市, 煤炭能源消耗量相当大, 为安徽省煤炭能源消耗大户。目前, 仅义安经济开发区就有

表 5 土壤重金属相关系数<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation coefficients between different soil heavy metals

	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Ni
Cu	1						
Zn	0.823 **	1					
Pb	0.828 **	0.739 **	1				
Cr	0.154	0.259 *	0.21	1			
Cd	0.797 **	0.771 **	0.754 **	0.169	1		
As	0.645 **	0.636 **	0.719 **	0.162	0.707 **	1	
Ni	0.148	0.236	0.159	0.067	0.182	0.12	1

1) \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

表 6 污染因子主成分构成

Table 6 Principal component composition of pollution factors

污染因子	第一主成分	第二主成分	第三主成分
Cu	0.965	-0.027	0.026
Zn	0.967	-0.057	-0.075
Pb	0.958	-0.076	-0.138
Cr	0.636	0.055	0.763
Cd	0.853	0.236	-0.276
As	0.902	-0.097	-0.079
Ni	0.006	0.992	0.001
特征值	4.72	1.06	0.69
贡献率/%	67.55	15.15	9.85
累计贡献率/%	67.55	82.70	92.56

规模以上工业企业 44 家, 2019 年规模以上企业能源消耗总量已达到 52 850.71 t 标准煤(等价值), 所耗能源主要包括电力、煤炭、天然气、柴油、汽油和生物质燃料等。此外, 顺安镇和钟鸣镇居民生产和生活也都消耗化石能源, 因此可以推断, 研究区土壤重金属 Ni 可能主要来自于化石能源燃烧贡献。铜陵金属矿区矿石组分中 Cr 含量相对并不突出, 研究区 Cr 的潜在生态风险系数评价结果为无污染水平, 且 Cr 含量空间分布较为均匀, 变异系数仅为 28%, 说明人为因素对 Cr 的影响相对较小, 地质背景的影响可能更为重要。但由第一主成分中 Cr 载荷情况来看, 金属矿山开采和冶炼、加工行为同样也为研究区 Cr 提供了重要来源。此外, 义安经济开发区的重点工业企业很多都涉及金属行业, 特别是金属制品业、金属表面处理和热处理加工等, 这可能是 Ni 和 Cr 也出现了局部富集的原因所在。

#### 4 讨论

本研究中, 河道沉积物的重金属污染程度最高, 无论是综合污染指数还是潜在生态风险指数都远高于城镇、村庄、菜地和林地, 甚至显著高于经济开发区的工业用地类型。由于研究区河段两侧汇流区土壤重金属含量显著低于河道沉积物, 汇流区非点源污染不可能造成如此严重的后果, 加之涉及重金属的点源污染治理和监管力度相当大, 达标排放污

水也不大可能导致河道沉积物重金属如此强烈地富集。究其原因, 笔者以为, 这与顺安河上游地区数十年来大规模采矿类活动有着密切关系, 特别是凤凰山铜矿和新桥硫铁矿的开采活动带来的点源、非点源污染排放, 以及源头溪流多处尾矿库尾水渗漏入河而向下游的传输影响。叶宏萌等<sup>[39]</sup>针对铜陵矿区河流沉积物的研究也可以印证上述结论。城镇内土壤重金属高于其他多种用地类型, 一方面可能由于顺安镇和钟鸣镇地处交通要道, 交通和制造业相对较为发达, 受人为活动污染影响相对较大; 另一方面可能由于城镇区部分采样点采集的是不透水地面地表灰尘, 其重金属污染含量及污染程度普遍高于土壤采样点, 这在很多研究中都有类似特点<sup>[40,41]</sup>。

在来源解析方面, 对比已有研究, 付欢欢等<sup>[35]</sup>认为铜陵矿区农田土壤 Cd 主要受到农业污染和尾矿废渣等的影响。王银泉<sup>[42]</sup>和 Jiang 等<sup>[43]</sup>认为矿业污染是新桥矿区周边土壤重金属中 Cu、Pb、Zn、Cd 和 As 的主要来源。陈婧<sup>[33]</sup>认为铜陵市土壤和灰尘重金属中 Ni 和 Cr 虽与其它重金属元素无明显相关性, 但仍然受到人为因素的影响。这与本研究的结果基本符合。基于数理统计建立的 PCA 和 PFM 方法常用于判定研究区的污染源类别<sup>[44]</sup>, 但由于解析方法的原理或假设不同, 不同源解析结果存在一定的差异, 表现出各自在应用上的优势和局限性<sup>[45]</sup>。实际上, 笔者也采用正定矩阵因子分析模型(PMF)解析了研究区土壤重金属来源, 得到 Cu、Zn 和 Pb 来源一致, Cr 和 Ni 来源相同, Cd 和 As 来源各不相同的结论。显然, 该结论与相关性分析结果不吻合, 也与铜陵有色金属矿山 Cu 多与 Cd 和 As 伴生的特点不相符。可以推断, 本研究根据主成分分析方法得到的源解析结果可以更好地反映实际状况。

如果将各采样点重金属元素单项污染指数取平均值, 再利用综合污染指数方法进行计算<sup>[46]</sup>, 可以得到整个研究区 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 和 Ni 的综合污染指数分别为 32.59、13.96、18.18、1.58、41.75、25.56 和 4.34, 由此得到 7 种重金属的污染

程度排序为:  $Cd > Cu > As > Pb > Zn > Ni > Cr$ , 与内梅罗综合污染指数法重金属污染排序一致. 由于内梅罗指数法格外强调最不利因素, 导致评价结论很大程度上受最大指数值的影响或控制, 使得有时难以很好地契合实际污染状况. 本研究中, 排序相近的重金属元素之间单项污染指数相差不是很显著, 这或许是没有出现与一般综合指数法排序结果相悖的主要原因. 笔者以为, 尽管内梅罗指数法尚存在一些瑕疵, 但对于毒性强、危害大的重金属类污染物, 为更好地引起人们的警觉和重视, 适当强调或放大最不利因素影响还是很有必要的.

## 5 结论

(1) 研究区土壤 pH 偏弱酸性, 土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd、As 和 Ni 含量都高于铜陵市土壤背景值数倍, 更显著高于安徽省土壤背景值; 总体表现出靠近铜陵市区的西部地区土壤重金属含量高、毗邻农村的东部地区低的特点.

(2) 研究区土壤 Cd、Cu、As 和 Pb 处于重度污染水平, Zn、Ni 和 Cr 分别处于中度、轻度和无污染污染水平; 各用地类型的内梅罗综合污染指数大小排序为河道 > 城镇 > 工业用地 > 菜地 > 农业用地 > 山林 > 村庄, 除村庄和山林属于轻度污染等级外, 其他均属于重度污染等级.

(3) 土壤重金属潜在生态风险系数大小排序为:  $Cd > As > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr$ , 其中 Cd 为极高风险、Cu 和 As 为中等风险, 其余皆为低风险水平; 不同用地类型潜在生态风险指数大小排序为: 河道 > 城镇 > 工业用地 > 菜地 > 农业用地 > 村庄 > 山林, 其中工业用地、菜地和城镇总体达很高风险水平, 农业用地达高风险水平, 村庄和山林属于中等风险.

(4) 主成分分析结果表明, 研究区土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 和 As 主要来源为当地金属矿业污染, Cr 主要来源为地质背景和金属矿业污染, Ni 主要来源为化石燃料燃烧.

### 参考文献:

[ 1 ] Zheng S N, Wang Q, Yuan Y Z, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China[J]. Food Chemistry, 2020, **316**, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126213.

[ 2 ] Vaněk A, Ettler V, Grygar T, *et al.* Combined chemical and mineralogical evidence for heavy metal binding in mining- and smelting-affected alluvial soils[J]. Pedosphere, 2008, **18**(4): 464-478.

[ 3 ] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2031-2039.

Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops [J]. Environmental

Science, 2021, **42**(4): 2031-2039.

[ 4 ] Bocca B, Alimonti A, Petrucci F, *et al.* Quantification of trace elements by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry in urine, serum, blood and cerebrospinal fluid of patients with Parkinson's disease [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, **59**(4): 559-566.

[ 5 ] Hooker P J, Nathanail C P. Risk-based characterisation of lead in urban soils[J]. Chemical Geology, 2006, **226**(3-4): 340-351.

[ 6 ] Zhu D W, Wei Y, Zhao Y H, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the agriculture soil in Xunyang mining area, Shaanxi Province, Northwestern China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, **101**(2): 178-184.

[ 7 ] Moore J W, Sutherland D J. Distribution of heavy metals and radionuclides in sediments, water, and fish in an area of Great Bear Lake contaminated with mine wastes [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1981, **10**(3): 329-338.

[ 8 ] Fuge R, Laidlaw I M S, Perkins W T, *et al.* The influence of acidic mine and spoil drainage on water quality in the mid-Wales area [J]. Environmental Geochemistry and Health, 1991, **13**(2): 70-75.

[ 9 ] Muñoz M A, Faz A, Acosta J A, *et al.* Metal content and environmental risk assessment around high-altitude mine sites [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **69**(1): 141-149.

[ 10 ] 陈三雄, 谢莉, 陈家栋, 等. 露天开采矿区土壤重金属污染状况评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, **36**(3): 59-63.

Chen S X, Xie L, Chen J D, *et al.* Evaluation on soil heavy metal pollution at Dabaoshan mine in Guangdong Province [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2012, **36**(3): 59-63.

[ 11 ] 王蕊, 陈楠, 张二喜, 等. 龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1114-1122.

Wang R, Chen N, Zhang E X, *et al.* Geochemical patterns and source analysis of soil heavy metals in an iron and manganese ore area of Longyan City [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1114-1122.

[ 12 ] Dragović S, Mihailović N, Gajić B. Heavy metals in soils: Distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources [J]. Chemosphere, 2008, **72**(3): 491-495.

[ 13 ] 陈佳木, 吴志华, 刘文浩, 等. 湖南水口山多金属矿区废石堆重金属污染评价及赋存形态分析[J]. 地球科学, 2021, **46**(11): 4127-4139.

Chen J M, Wu Z H, Liu W H, *et al.* Heavy metal pollution evaluation and species analysis of waste rock piles in Shuikoushan, Hunan Province [J]. Earth Science, 2021, **46**(11): 4127-4139.

[ 14 ] 周颖, 王雪梅, 蒋玉琢, 等. 北京市平谷区金矿区周边土壤砷、汞赋存形态特征及生态风险评估[J]. 环境工程, 2021, **39**(8): 203-210, 164.

Zhou Y, Wang X M, Jiang Y Z, *et al.* Speciation and ecological risk assessment of arsenic and mercury in soil around a gold mining area in Pinggu District, Beijing [J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(8): 203-210, 164.

[ 15 ] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health

- risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [16] Santos I, Da Silva E F, Patinha C, *et al.* Definition of areas of probable risk to human health posed by As and Pb in soils and ground-level dusts of the surrounding area of an abandoned As-sulfide mine in the north of Portugal: Part 1 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(5): 1649-1660.
- [17] 王春光, 刘军省, 耿浩, 等. 铜陵矿区主要河流水质分析与污染评价[J]. *地学前缘*, 2021, **28**(4): 175-183.  
Wang C G, Liu J X, Geng H, *et al.* Water quality analysis and pollution evaluation of the main rivers in the Tongling mining area [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(4): 175-183.
- [18] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2261-2270.  
Li R Z, Pan C R, Chen J, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling City [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2261-2270.
- [19] 王春光, 刘军省, 殷显阳, 等. 基于 IDW 的铜陵地区土壤重金属空间分析及污染评价[J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(5): 1989-1996.  
Wang C G, Liu J X, Yin X Y, *et al.* Spatial analysis and pollution assessment of heavy metals in the soils of Tongling urban area based on IDW [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(5): 1989-1996.
- [20] Zhao X Q, Huang J, Zhu X Y, *et al.* Ecological effects of heavy metal pollution on soil microbial community structure and diversity on both sides of a river around a mining area [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(16), doi: 10.3390/ijerph17165680.
- [21] 刘先虎. 铜陵市矿山废弃地植被恢复技术[J]. *安徽林业科技*, 2013, **39**(3): 63-65.
- [22] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太滹运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5073-5081.  
Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige Canal Valley [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [23] 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 the urban green space soils of a city in north China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] 侯千, 马建华, 王晓云, 等. 开封市幼儿园土壤重金属生物活性及潜在生态风险[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1764-1771.  
Hou Q, Ma J H, Wang X Y, *et al.* Bioavailability and potential ecological risk of soil heavy metals in kindergartens, Kaifeng City [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(6): 1764-1771.
- [26] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(1): 88-96.  
Li R Z, Xu J J, Jiang Y M, *et al.* Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the riparian zone of Huixi Stream in Tongling City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(1): 88-96.
- [27] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 等. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. *中国地质*, 2012, **39**(2): 302-310.  
Chen X R, Chen F R, Jia S J, *et al.* Soil geochemical baseline and background in Yangtze River-Huaihe River basin of Anhui Province [J]. *Geology in China*, 2012, **39**(2): 302-310.
- [28] 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.
- [29] 单丽丽, 袁旭音, 茅昌平, 等. 长江下游不同源沉积物中重金属特征及生态风险[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2399-2404.  
Shan L L, Yuan X Y, Mao C P, *et al.* Characteristics of heavy metals in sediments from different sources and their ecological risks in the lower reaches of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2399-2404.
- [30] 易雨君, 王文君, 宋劫. 长江中下游底泥重金属污染特征、潜在生态风险评估及来源分析[J]. *水利水电技术*, 2019, **50**(2): 1-7.  
Yi Y J, Wang W J, Song J. Pollution characteristics, potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals of sediment in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, **50**(2): 1-7.
- [31] 鲁潇, 于坤, 孙庆业, 等. 铜陵矿区周边莲藕重金属元素含量及健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(9): 2049-2056.  
Lu X, Yu K, Sun Q Y, *et al.* Heavy metal content and health risk assessment of lotus roots around the Tongling mining area, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(9): 2049-2056.
- [32] 陆金, 赵兴青. 铜陵狮子山矿区土壤重金属污染特征及生态风险评估[J]. *环境化学*, 2017, **36**(9): 1958-1967.  
Lu J, Zhao X Q. Characteristics and ecological risk assessment of polluted soil by heavy metals in Shizishan, Tongling [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(9): 1958-1967.
- [33] 陈婧. 典型金属矿山城市土壤重金属污染及健康风险评估 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.  
Chen J. Pollution and health risk assessment of heavy metals in urban soil and dust near the mine [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [34] Zhang S, Yang D, Li F L, *et al.* Determination of regional soil geochemical baselines for trace metals with principal component regression: a case study in the Jiangnan plain, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2014, **48**: 193-206.
- [35] 付欢欢, 马友华, 吴文革, 等. 铜陵矿区与农田土壤重金属污染现状研究[J]. *农学学报*, 2014, **4**(6): 36-40.  
Fu H H, Ma Y H, Wu W G, *et al.* The research of status quo on soil heavy metal pollution in Tongling mining area and farmland [J]. *Journal of Agriculture*, 2014, **4**(6): 36-40.
- [36] Li Y B, Fang F M, Lin Y S, *et al.* Heavy metal contamination and health risks of indoor dust around Xinqiao mining area, Tongling, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2020, **26**(1): 46-56.
- [37] Sanz-Robinson J, Williams-Jones A E. The solubility of Nickel (Ni) in crude oil at 150, 200 and 250°C and its application to ore genesis [J]. *Chemical Geology*, 2020, **533**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2019.119443.
- [38] Oboirien B O, Thulari V, North B C. Enrichment of trace elements in bottom ash from coal oxy-combustion: effect of coal

- types[J]. *Applied Energy*, 2016, **177**: 81-86.
- [39] 叶宏萌, 袁旭音, 赵静. 铜陵矿区河流沉积物重金属的迁移及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(10): 1853-1859.  
Ye H M, Yuan X Y, Zhao J. Spatial migration and environmental effects of heavy metals in river sediments from in the Tongling mining area, Anhui Province [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(10): 1853-1859.
- [40] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. *Microchemical Journal*, 2010, **94**(2): 99-107.
- [41] 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 等. 多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1105-1113.  
Zeng W B, Gu G Q, Wan X M, *et al.* Heavy metal contents of soil and surface dust and its ecological risk analysis in a multifunctional industrial park [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1105-1113.
- [42] 王银泉. 铜陵市新桥矿区土壤重金属污染评价及源解析研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.  
Wang Y Q. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in soils around Xinqiao mining area in Tongling, Anhui Province [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [43] Jiang H, Nie J R, Fan S S, *et al.* Integrating GIS to determine the spatial distribution of principal components and the sources of heavy metals in farmland soils near mining area in Tongling, China [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2018, **27**(5): 2662-2670.
- [44] 王成, 赵艳萍, 谢鸣捷. 苏南典型工农业交错区土壤铅富集特征及源解析——基于 PCA-PMF 方法[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 279-287.  
Wang C, Zhao Y P, Xie M J. Characteristics of lead enrichment in the soil from a typical peri-urban agricultural area of the southern Jiangsu and source appointment based on the PCA-PMF method [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 279-287.
- [45] 张延君, 郑玫, 蔡靖, 等. PM<sub>2.5</sub> 源解析方法的比较与评述 [J]. *科学通报*, 2015, **60**(2): 109-121.  
Zhang Y J, Zheng M, Cai J, *et al.* Comparison and overview of PM<sub>2.5</sub> source apportionment methods [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(2): 109-121.
- [46] 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1076-1085.  
Li R Z, Pan C R, Xu J J, *et al.* Contamination and health risk for heavy metals via consumption of vegetables grown in fragmentary vegetable plots from a typical nonferrous metals mine city [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1076-1085.



## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018 .....	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM <sub>2.5</sub> Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form .....	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Under the Background of Emission Reduction .....	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM <sub>1</sub> During Autumn and Winter in Qingdao .....	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area .....	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin .....	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing .....	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer .....	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer .....	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill .....	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years .....	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin .....	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake .....	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors .....	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City .....	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments .....	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region .....	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate .....	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation .....	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area .....	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation .....	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil .....	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine .....	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities .....	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River .....	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain .....	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments .....	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials .....	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process .....	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project .....	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China .....	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau .....	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas .....	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou .....	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil .....	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City .....	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schum) .....	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis .....	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings .....	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield .....	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China .....	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve .....	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond .....	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> Adsorption by Soil Around a Dressing Plant .....	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar .....	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau .....	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation .....	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)