

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

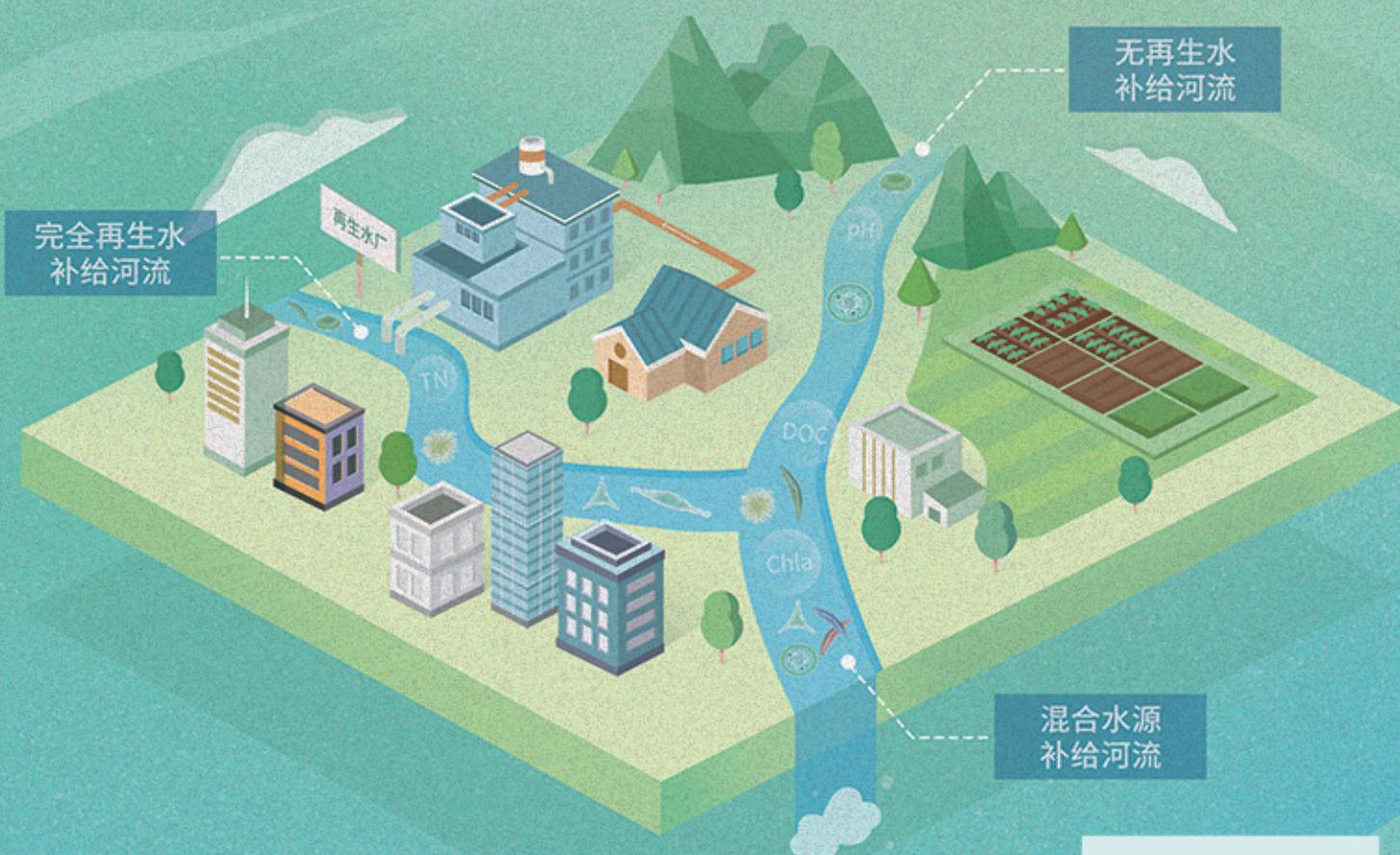
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变格局及其影响因素 ..... 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 ..... 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度时空分布特征及影响因素分析 ..... 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成及来源解析 ..... 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征与健康风险评估 ..... 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 ..... 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 ..... 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 ..... 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 ..... 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 ..... 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 ..... 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 ..... 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 ..... 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 ..... 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 ..... 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 ..... 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 ..... 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 ..... 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 ..... 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 ..... 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 ..... 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 ..... 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 ..... 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 ..... 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 ..... 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 ..... 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 ..... 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) ..... 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 的去除 ..... 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 ..... 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 ..... 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 ..... 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 ..... 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 ..... 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 ..... 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 ..... 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 ..... 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 ..... 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 ..... 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 ..... 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 ..... 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 ..... 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 ..... 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 ..... 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 ..... 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 ..... 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 ..... 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 ..... 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 ..... (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)

# 典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析

宫健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹\*, 刘晓雪, 高存富

(中国环境科学研究院环境检测与实验中心, 北京 100012)

**摘要:** 为研究荆门市某石油场地周边表层土壤重金属形态特征和来源, 对研究区土壤中 Cr、As、Cd、Sb、Hg、Pb、Ni、Cu 和 Pb 这 9 种重金属总量和赋存形态进行了调查分析, 对土壤中重金属的生态风险和生物有效性进行评价, 并且用多元分析方法对重金属的来源进行辨析. 结果表明, Cd 在土壤中主要是以酸溶态和可还原态为主, 含量平均值为  $0.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占到 4 种形态总和的 79.86%; Cr、Cu、Zn、As、Sb 和 Pb 主要以残渣态为主, Hg 主要以残渣态和可氧化态为主, 在土壤中稳定性较好. Cr 处于无风险状态, Sb、Pb、Ni 和 Cu 的风险评价结果为低风险. Cd、Hg、Zn 和 As 的风险指数均达到中等风险水平, 尤其 Cd 接近高风险标准, 需要引起相关重视. 土壤重金属总量和赋存形态的相关性和主成分分析结果表明, As、Cr、Ni、Sb、Hg 和 Pb 等重金属主要来源受自然输入影响较大, 重金属 Cd 受工业生产人为活动的外源性因素影响较为明显.

**关键词:** 石油场地; 重金属; 赋存形态; 分布特征; 源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5710-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201079

## Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites

GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, WANG Yao-feng, CAO Ying\*, LIU Xiao-xue, GAO Cun-fu

(Environmental Testing and Experiment Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In order to understand the speciation characteristics and sources of heavy metals in the surface soil around a petroleum site in Jingmen City, the total amount and occurrence form of nine heavy metals including Cr, As, Cd, Sb, Hg, Pb, Ni, Cu, and Pb in the soil of the study area were determined, and the ecological risk and bioavailability of heavy metals in the soil were evaluated. The sources of heavy metals were analyzed using multivariate analysis. The results showed that Cd was mainly in acid-soluble and reducible forms in the soil, with an average content of  $0.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , accounting for 79.86% of the total of the four forms; Cr, Cu, Zn, As, Sb, and Pb were mainly in the residual form. Hg was mainly in the residue state and oxidizable state and had good stability in the soil. Cr was in a risk-free state, and the risk assessment results of Sb, Pb, Ni, and Cu indicated low risk. The risk indexes of Cd, Hg, Zn, and As all reached the medium risk level, especially Cd, which was close to the high risk standard, thus requiring particular attention. The correlation and principal component analysis of the total amount of heavy metals in the soil and their existing forms showed that the main sources of heavy metals such as As, Cr, Ni, Sb, Hg, and Pb were greatly affected by natural input, and the heavy metal Cd was more obviously affected by exogenous factors caused by human activities in industrial production.

**Key words:** petroleum site; heavy metal; chemical form; distribution characteristics; source identification

石油化工产业在国民经济发展中发挥着重要作用, 是我国重要的支柱产业之一. 石化产业发展过程中也不可避免地带来了一些环境问题, 如土壤重金属污染受到日益关注<sup>[1-4]</sup>. 土壤重金属具有难降解和生物毒性大的特点, 可由皮肤接触和食物摄取等多种途径进入生物体, 并通过食物链和食物网在生物体内富集累积, 最终危害人体健康<sup>[5]</sup>. 石油化工园区中, 在原油产品的加工合成、贮存和运输等环节中产生的石油污染问题, 对土壤环境的生态安全带来了严峻的威胁, 国内外学者在环境容量、时空分布特征和风险评价等方面进行了大量研究<sup>[1, 5-8]</sup>. 因此, 开展对园区周边土壤环境质量和污染评价的研究具有十分重要的意义.

重金属污染物总量是评价土壤重金属污染的一个重要指标<sup>[9]</sup>, 通过对重金属总量的研究可以获知土壤受污染的状况. 土壤中重金属通过络合吸附和凝聚等作用, 形成不同的化学形态, 并表现出不同的活性<sup>[10, 11]</sup>. 重金属的生物毒性及其在生

态环境中的迁移转化等主要取决于其赋存形态<sup>[12]</sup>, 因而对元素进行形态分析有助于表征其生物有效性以及进行准确的生态风险评价. 目前, 相关研究主要针对石油场地污染土壤中重金属分布特征和影响因素的调查和分析<sup>[1, 6, 13]</sup>, 对石油场地周边土壤中重金属赋存形态分布、生物有效性和源解析方面的研究较少.

本文以荆门某石化园区周边表层土壤为研究对象, 对 Cr、As、Cd、Sb、Hg、Pb、Ni、Cu 和 Zn 这 9 种重金属总量和赋存形态的分布特征、生物有效性和来源进行分析, 以期为该地区土壤环境做出准确合理评估, 并为相关管理部门进行重金属污染控制和修复提供理论基础和决策依据.

收稿日期: 2022-01-10; 修订日期: 2022-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1803401, 2020YFC1807700)

作者简介: 宫健(1991~), 男, 硕士, 主要研究方向为场地重金属调查, E-mail: gongj1991@126.com

\* 通信作者, E-mail: caoying@ceaes.org.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区位于荆门某石化园区,荆门市位于湖北省中部,汉江中下游,地理位置优越,交通十分便利。东西最大横距 155 km,南北最大纵距 131 km,区域总面积 12 339.43 km<sup>2</sup>,介于东经 111°51'~113°29',北纬 30°32'~31°36'之间。荆门市地处中纬度北亚热带季风气候带,四季分明,雨热同期,无霜期长。年平均气温为 15.6~16.3℃,年平均降水量为 804~1 067 mm。

石化园区大部分为未开发的山地,地势起伏较大,受地形限制,园区呈不规则形状。园区北侧为润滑油系列装置,南侧主要集中了下游的聚丙烯装置、球罐区以及配套设施等。自备电站及水处理站等位于园区的最西端,硫磺、污水处理厂和汽车装车设施等布置在园区的东侧;原油、汽油和柴油等罐区集中布置在园区东南侧。

### 1.2 样品采集与测试

土壤采样点位围绕石化园区周边布设,以采集表层(0~20 cm)土壤为主,具体采样点位分布情况见图 1。每个采样点经纬度由手持式 GPS 定位,在每个采样点以 5 m 对角线采用四分法取 3~5 个点混匀为一个土样,混合均匀,保留 1~2 kg。每个采样点取 3 组重复。带回实验室后,除去样品中的枝棒、叶片和石子等异物,自然风干研磨过 100 目筛备用。

As、Cd、Sb 和 Pb 等重金属总量测试参照标准 HJ 803-2016,土壤样品用盐酸/硝酸(王水)混合溶

液经微波消解仪(CEM Mars 6)消解后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS Agilent 7900)进行检测。重金属 Cr 总量的测试参考方法 HJ491-2019,土壤样品加入盐酸、硝酸和氢氟酸,经微波消解仪消解(CEM Mars 6),定容保存,用火焰原子吸收分光光度计(日立 ZA3000)测定。重金属 Hg 的测试参考 HJ923-2017,用冷原子吸收直接进样测汞仪(海光 HGA-100)进行测定。重金属赋存形态的测试参照改进的 BCR 连续提取法进行不同形态提取<sup>[14]</sup>。

### 1.3 质量与控制

分析过程中实验用水为超纯水,试剂为优级纯以上,并采用实验室空白、平行样品检测和样品加标回收等措施进行严格的质量控制。在本次环境样品分析测试中,实验室空白均低于测定下限、平行样品相对偏差均小于 20%、标准曲线的相关系数均大于 0.999,国家标准的土壤 GSS-27 的回收率在 80%~110% 之间,均满足相关检测标准的质控要求。

### 1.4 评价方法

采用风险评价代码法(risk assessment code)对重金属进行风险评价,这是一种基于重金属不同赋存形态的评价方法<sup>[7]</sup>。风险评价代码法根据酸溶态占重金属总量的比例将风险水平划分为 5 个等级,比例 <1 时,风险评价结果为无风险;比例在 1~10 时,风险评价结果为低风险;比例在 11~30 时,风险评价结果为中等风险;比例在 31~50 时,风险评价结果为高风险;比例 >50 时,风险评价结果为极高风险。

### 1.5 数据分析与制图

运用 Pearson 相关性来分析重金属元素总量之间和重金属总量及赋存形态之间的相关关系,主成分分析揭示了各重金属元素之间来源的相似性。用 Origin 2021 对数据进行绘图,未检出或检出率过低的重金属元素不再作图分析,SPSS 20.0 对数据进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属总量水平分布特征

土壤重金属污染具有非均匀性,故采用最大值、最小值、平均值、标准差和变异系数等指标对研究区土壤中 9 种重金属元素 Cr、As、Cd、Sb、Hg、Pb、Ni、Cu 和 Zn 等进行描述性统计分析,结果见表 1。从中可见,研究区内土壤中重金属的整体分布情况有所差异。土壤中  $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Sb})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$  和  $\omega(\text{Zn})$  的平均值分别为 5.10、1.81、0.21、1.03、0.03、

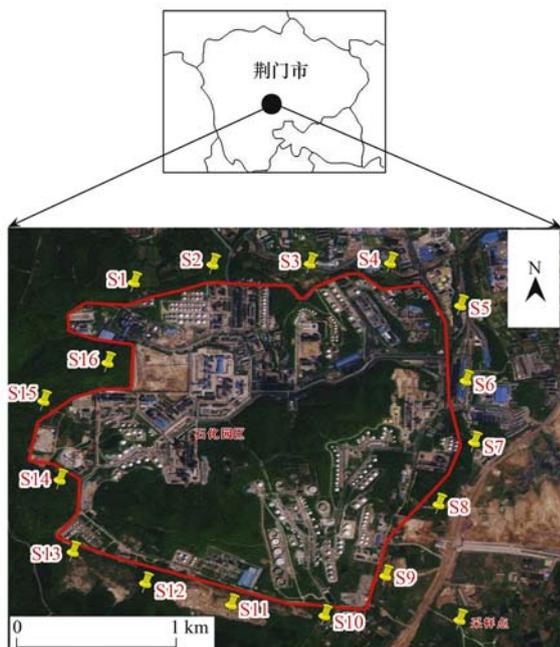


图 1 研究区采样点示意

Fig. 1 Sampling point map of study area

8.09、5.08、2.39 和  $22.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其中, Cr、As、Hg、Pb、Ni、Cu 和 Zn 含量的最大值均小于湖北省土壤背景值<sup>[15]</sup>, 说明石化园区的生产活动对这些重金属在周边土壤中的分布影响较小. 土壤中重金属 Cd 的平均值是湖北省土壤背景值的 1.22 倍, 表明园区对研究区土壤中的 Cd 存在一定程度上的影响. Sb 的平均值要低于湖北省土壤背景值, 但最大值为湖北省土壤背景值的 1.35 倍, 最小值和最大值

之间相差达 6 倍, 不同采样点间的差异性可能是由于交通运输等点源人类活动影响导致的, 说明研究区土壤中重金属 Sb 在一定程度上会受到石化园区生产活动的影响. 重金属变异系数作为一种标准差的无量纲化表达, 能较好地反映出各采样点数据的波动情况<sup>[16]</sup>, Cd 和 Sb 等重金属之间的变异系数差异均较小, 表明研究区内土壤中重金属受外源因素影响可能具有一定的同源性.

表 1 研究区土壤重金属总量统计结果

Table 1 Statistical results of soil heavy metals in the study area

重金属	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				湖北省土壤背景值 <sup>[15]</sup>	变异系数
	范围	平均值	标准差			
Cr	0.08 ~ 9.76	5.10	3.62		86.0	0.710
As	0.12 ~ 5.83	1.81	1.78		12.3	0.984
Cd	0.08 ~ 0.52	0.21	0.13		0.17	0.606
Sb	0.37 ~ 2.22	1.03	0.50		1.65	0.482
Hg	0.01 ~ 0.05	0.03	0.01		0.08	0.497
Pb	0.26 ~ 20.4	8.09	5.07		26.7	0.626
Ni	1.03 ~ 9.58	5.08	2.67		37.3	0.526
Cu	0.12 ~ 6.41	2.39	1.96		30.7	0.820
Zn	2.04 ~ 70.6	22.5	16.6		83.6	0.738

## 2.2 土壤重金属赋存形态分布特征及生物有效性分析

通过 BCR 法对研究区土壤中重金属形态进行分析, 结果如图 2 和图 3 所示. 从中可知, Cd 在土壤中主要是以酸溶态和可还原态为主, 平均值为  $0.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占到 4 种形态总和的 79.86%. 重金属酸溶态在一定程度上能够反映人类活动对环境的影响, 且在重金属 4 种赋存形态中, 酸溶态的生物有效性最高, 易于迁移和转化, 可被植物体直接吸收, 其对生态环境的危害较大<sup>[12,17]</sup>. Sb 中的酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态的平均值分别为 0.03、0.41、0.13 和  $0.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 残渣态占比最高 (55.15%), 其次为可还原态 (32.49%). 但在个别点位中, 如 S6、S8、S9 和 S13, 重金属 Sb 的形态以可还原态为主. 氧化还原条件和 pH 值等环境因素对可还原态有较大影响, 当 pH 值降低或还原性增强时, 可还原态容易被还原成酸溶态而增加土壤重金属二次污染的风险<sup>[18,19]</sup>. 钟晓兰等<sup>[20]</sup>对表层重金属形态分布研究表明, 土壤中 Cr 赋存形态主要以残渣态为主, 其余各形态占总量比例大小依次为可氧化态、可还原态和酸溶态. 这与本研究的结果较为一致, 重金属 Cr 的酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态的平均值分别为 0.03、0.09、2.97 和  $3.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占 4 种形态总和的比例分别为 0.50%、1.24%、42.51% 和 55.76%. 重金属残渣态化学活性较为稳定, 一般为自然地质风化作用的结果, 与人类活动情况和环境变化无相关性<sup>[17,21,22]</sup>. 土

壤中残渣态 Cr 占 4 种形态总和的比例超过一半, 说明研究区内土壤中 Cr 的化学活性较为稳定, 对周边环境产生威胁的可能性较小. As 在土壤中的酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态的平均值分别为 0.37、0.34、0.10 和  $1.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占 4 种形态总和的比例分别为 16.51%、15.36%、4.31% 和 63.82%. Hg 的酸溶态、可还原态、可氧化态和残渣态的平均值分别为 0.008、0.006、0.015 和  $0.003 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占 4 种形态总和的比例分别为 24.87%、18%、48.23% 和 8.90%. As 和 Hg 在少数点位中, 酸溶态和可还原态所占总量比例较大. 麻冰涓等<sup>[23]</sup>的研究显示, Pb 在土壤中主要以可还原态存在, 占总量的 61.1%, 许超等<sup>[24]</sup>的研究也发现, 土壤中 Pb 赋存形态以可还原态为主. 土壤中可还原态 (铁锰氢氧化物) 对铅离子有较强的吸附能力<sup>[25,26]</sup>, 可能是可还原态在总量中占比高的原因. 这与本研究结果略有差异, 在本研究中, Pb 在土壤中以残渣态为主, 其占比可达 61.43%, 其次为可还原态 (28.31%), 这可能是由于不同地区间土壤理化性质的差异性造成的.

将重金属不同赋存形态的生物有效性划分为可利用态 (酸溶态 + 可还原态与 4 种形态总和的比值)、中等利用态 (可氧化态与 4 种形态总和的比值) 和难利用态 (难利用态与 4 种形态总和的比值)<sup>[27,28]</sup>, 结果见表 2. 从中可知, 可利用态占比最高的是重金属 Cd, 其可利用态占比达 80%, 远高于中等利用态和难利用态, 这说明 Cd 容易进入环境对

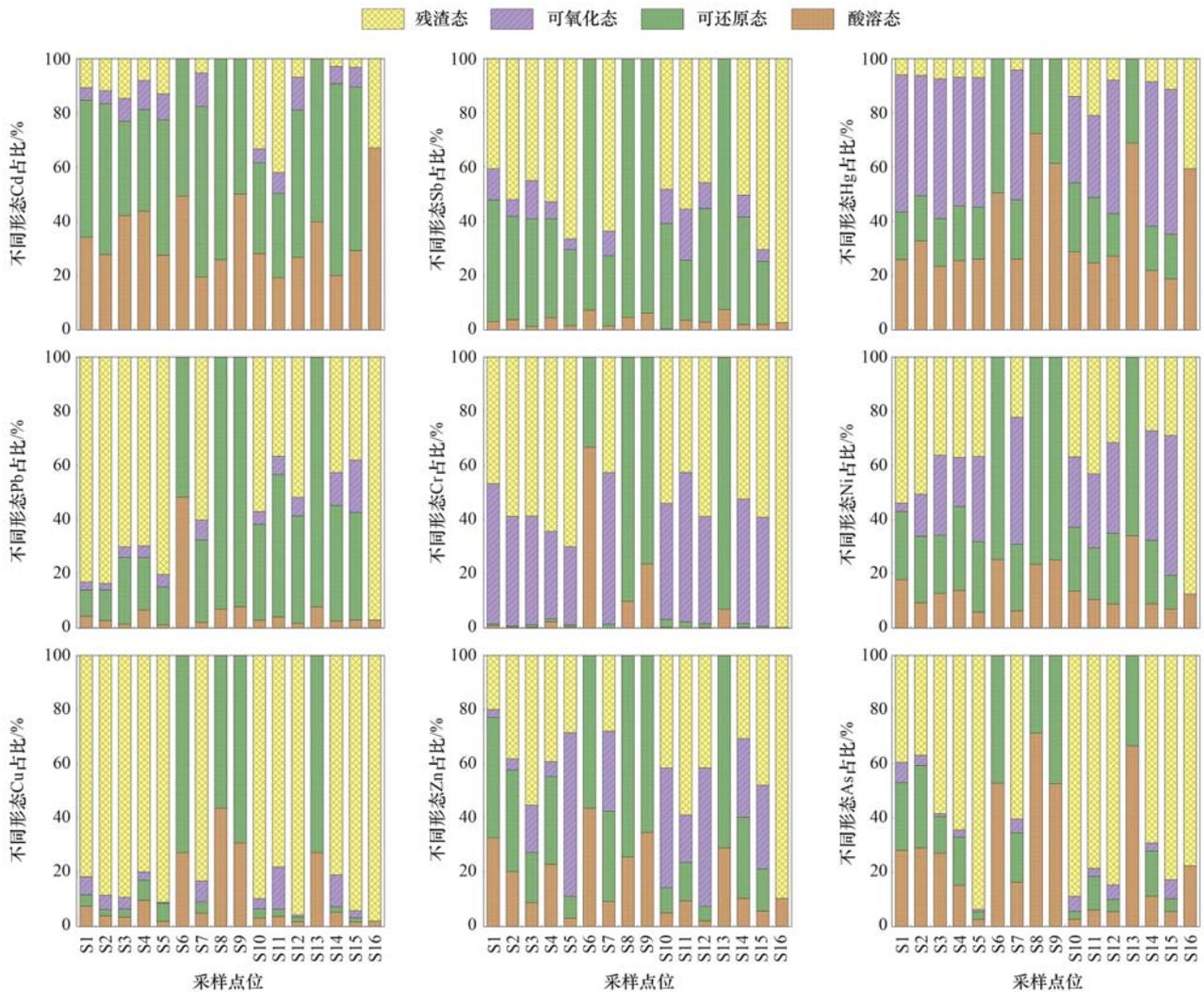


图 2 不同点位土壤重金属赋存形态分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of occurrence forms of heavy metals in different soil sites

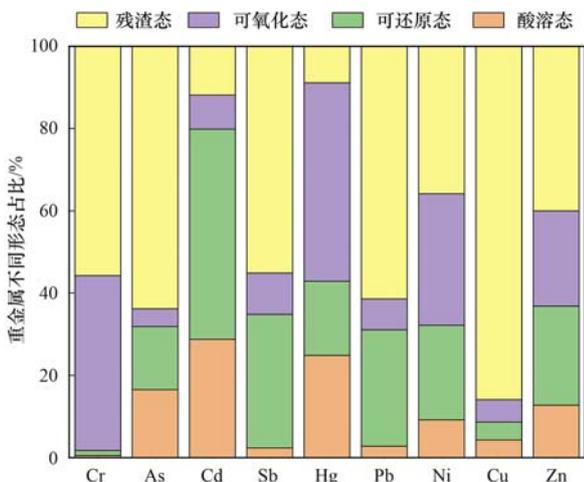


图 3 不同元素赋存形态分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of occurrence forms of different elements in soil

生物体产生影响. 酸溶态易在土壤中迁移转化, 能够被生物吸收利用进入食物链, 对生态环境和人体健康具有潜在风险<sup>[23,29]</sup>. 在研究区, 不存在农作物或

经济作物种植情况, 因此, 重金属 Cd 进入食物链传递的可能性较低. 土壤中重金属形态的酸溶态和可还原态的质量分数和其污染程度有关, 酸溶态和可还原态在重金属赋存形态中的占比会随着污染程度的加重而升高<sup>[30]</sup>. As、Sb、Pb、Cu 和 Zn 的生物有效性变化规律较为相似, 均为: 难利用态 > 可利用态 > 中等利用态, 难利用态 (残渣态) 性质较稳定, 不易被生物吸收利用, 对生态环境产生的危害较低. 同时发现 As、Sb、Pb 和 Zn 的生物有效性中的可利用态占比也较高 (31% ~ 45%), 说明在一定情况下受外界环境影响较大, 潜在生态风险较高, 如在某些点位中存在 Sb 含量超过湖北省土壤环境背景值的情况. Cr 生物有效性中可利用态占比仅为 2%, 难利用态占比为 56%, 表明重金属 Cr 不易被生物利用, 对环境的影响较为有限. Hg 的生物有效性: 中等利用态 > 可利用态 > 难利用态, 中等利用态在碱性条件下可转化被生物利用<sup>[17,31]</sup>, 中等利用态和可利用态占比超过 90%, 说明在受污染的土壤中, Hg 的不断

表 2 研究区土壤重金属的生物有效性和占比<sup>1)</sup>

Table 2 Bioavailability and proportion of soil heavy metals in the study area

重金属	可利用态	中等利用态	难利用态
Cr	0.02(1.7)	0.43(43)	0.56(56)
As	0.32(32)	0.04(4.3)	0.64(64)
Cd	0.80(80)	0.08(8.2)	0.12(12)
Sb	0.35(35)	0.10(10)	0.55(55)
Hg	0.43(43)	0.48(48)	0.09(8.9)
Pb	0.31(31)	0.07(7.5)	0.61(61)
Ni	0.32(32)	0.32(32)	0.36(36)
Cu	0.09(8.6)	0.05(5.5)	0.86(86)
Zn	0.37(45)	0.05(6.6)	0.40(49)

1) 括号外数值表示生物有效性, 括号内数值表示对应形态的占比 (%)

累积会较易发生迁移. 在研究区, 土壤中 Hg 的含量低于土壤环境背景值, 对环境存在潜在风险的可能性较低.

### 2.3 土壤重金属生态风险评价

风险评价代码法是通过酸溶态与重金属总量之比来评价其风险水平的方法. 已有研究表明<sup>[32]</sup>, 在相同条件下, 有效态含量占重金属总量比例越大, 生态风险就越高. 运用风险评价代码法对重金属进行风险评价, 结果见图 4. Cr 的风险指数小于 1%, 根据风险评价结果可认为其处于无风险状态. Sb、Pb、Ni 和 Cu 的平均风险指数分别为 2.34%、2.77%、9.15% 和 4.27%, 风险评价结果为低风险. Hg、Zn 和 As 的风险指数为 13.0%~24.9%, 均达到中等风险水平. 这说明若研究区土壤中 Hg、Zn 和 As 不断累积并产生污染, 其将会达到中等风险水平. 而在研究区内, 土壤中 Hg、Zn 和 As 的含量值均低于环境背景值, 对周边环境产生影响的可能性较小. 尤其 Cd 的风险指数(28.7%)已接近高风险标准(31%~50%), 需要引起相关的重视. 综上分析可知, 研究

区土壤中风险水平最高的是重金属 Cd.

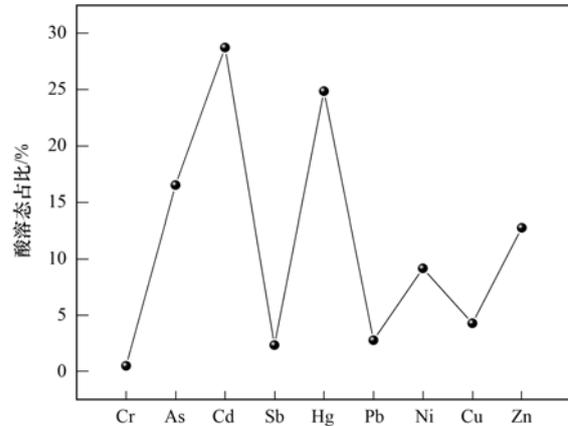


图 4 重金属生态风险指数

Fig. 4 Heavy metal ecological risk index

### 2.4 重金属来源解析

重金属的来源较为复杂, 一般可分为两个主要来源: 自然源和人为源. 本文运用主成分分析和相关性分析等多元统计分析方法对研究区土壤中重金属来源进行辨析.

#### 2.4.1 相关性分析

相关性分析结果如图 5 所示. 重金属总量 Cr 与 As、Cd、Sb、Hg、Pb、Ni、Cu 和 Zn 之间存在显著正相关( $P < 0.05$ ), 其中, Cr 和 Ni 之间的相关性系数达 0.83, 表明这 2 种元素之间可能具有相似的来源. As 和 Cu 之间相关性较强, 相关性系数达 0.88, 说明重金属总量 As 和 Cu 之间可能具有相似的来源. Ni 与 Cu、Zn 的重金属总量之间的相关性较弱, 重金属总量 Cd 与 As、Sb、Pb 之间的相关性较弱. Pb、Sb、Zn 和 Hg 重金属总量相互之间的相关性较为显著, 其中 Pb 和 Sb 之间的相关性系数较高, 说明 2 种重金属总量之间具有相似源的可能性较大. 重金属总量 Cd 与 Hg、Ni、Cu 和 Zn 之间存在显著相

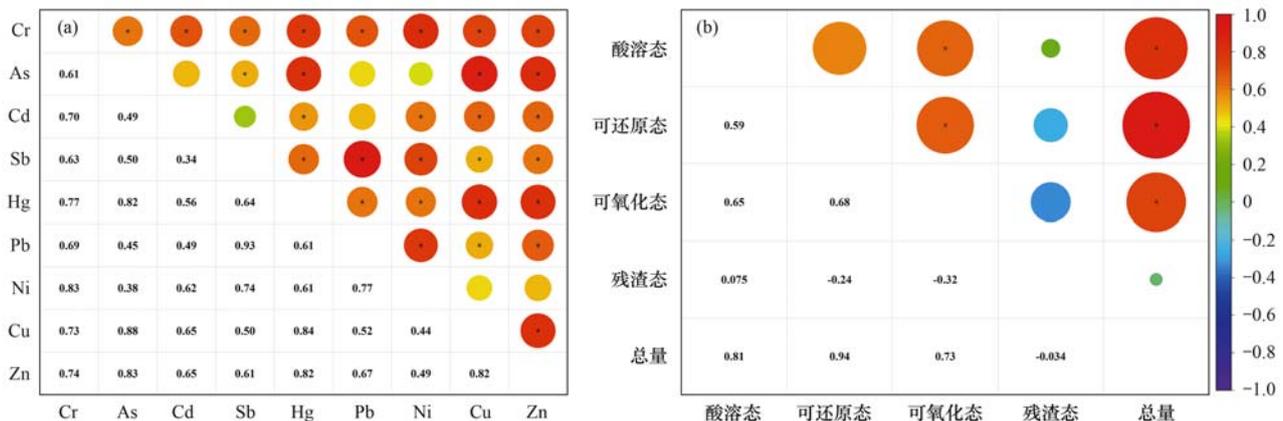


图 5 重金属相关性分析

Fig. 5 Analyzing the correlation of the heavy metals

关性,但相关性系数相对较低,结合前文内容,研究区土壤中 Cd 平均含量超过环境背景值, Ni 等含量均低于环境背景值,说明土壤中 Cd、Ni 等重金属来源可能受到多个因素的影响. 重金属 Cd 总量与酸溶态、可还原态及可氧化态之间均存在显著正相关性( $P < 0.05$ ),相关性系数均大于 0.7( $P < 0.05$ ); Cd 总量与残渣态之间相关性较弱,酸溶态与可还原态之间具有显著相关性( $P < 0.05$ ).

#### 2.4.2 主成分分析

通过主成分分析法对重金属进行了分析. 本文分析发现, KMO 值为 0.716, Bartlett 球形检验为 0.000,符合统计学上要求的 KMO 检验值大于 0.5, Bartlett 球形检验概率小于显著性水平 0.01. 由此判断原始变量存在相关关系,适合进行主成分分析. 表 3 表述特征值及主成分贡献率,本研究中使用累积方差贡献率的方法来确定主成分的数量. 从中可以看出,提取的 3 个主成分(1、2 和 3),它们的累积方差贡献率为 90.9%,说明提取的主成分涵盖了原始变量足够的信息,因此选用上述因子有效.

表 3 特征值及主成分贡献率

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	6.224 3	69.159 3	69.159 3
2	1.215 6	13.506 4	82.665 7
3	0.738 7	8.208 1	90.873 8
4	0.336 3	3.736 5	94.610 2
5	0.170 9	1.899 2	96.509 4
6	0.138 0	1.533 7	98.043 1
7	0.125 6	1.395 6	99.438 7
8	0.034 3	0.380 9	99.819 6
9	0.016 2	0.180 4	100.000 0

根据分析结果(图 6),主成分 1 上载荷较高的重金属元素有 As,说明主成分 1 主要反映了重金属 As 的信息. Bosco 等<sup>[33]</sup>在对 Gela 地区石化工业区重金属污染的研究中,将当地 As 的污染归因为石油化工厂的生产活动.但在研究区中,As 的含量均低于环境背景值,且 As 的赋存形态中残渣态占比较大,故将主成分 1 看作自然来源. 重金属 Pb 和 Sb 在主成分 2 上有较大载荷. 土壤中 Pb 一般可作为交通来源有关的标识因素<sup>[34,35]</sup>,Bosco 等<sup>[33]</sup>也对石化园区土壤中 Pb 的来源归因于交通排放. 由于研究区中土壤 Pb 的含量低于环境背景值,本研究认为 Pb 主要产生于自然来源. 该区内 Sb 平均含量值低于环境背景值,但存在个别点位(S11)要高于环境背景值,这可能是由于受园区生产活动的点源污染影响. 园区南侧设有聚丙烯装置,在生产活动中含 Sb 和 Pb 等添加剂的使用,可能会造成重金属 Sb 等超标. 因此

主成分 2 主要来源于自然输入和生产活动的点源污染. 因子 Cd、Cr 和 Ni 在主成分 3 上具有较大载荷. 研究区重金属 Cd 含量高于环境背景值,说明受外源因素影响较为明显. 重金属 Cd 污染可能与工业“三废”的排放有关<sup>[36,37]</sup>. 在研究区,一方面可能是由于园区内原油产品的加工、合成等过程中涉及含 Cd 等重金属催化剂的使用;另一方面可能是由于该园区排放的有害气体形成酸雨沉降后与地面重金属发生作用,以及排放废水中有害金属的富集,因此 Cd 可能来源于园区工业生产活动. Ni 和 Cr 是我国土壤中受污染较少的重金属,更多的来源于成土母质<sup>[37~40]</sup>. 在本研究, Ni 和 Cr 含量均低于环境背景值,赋存形态中残渣态占比较高,故推断 Ni 和 Cr 来源符合自然输入. 因此可将主成分 3 推测为与工业生产和自然输入有关的混合源.

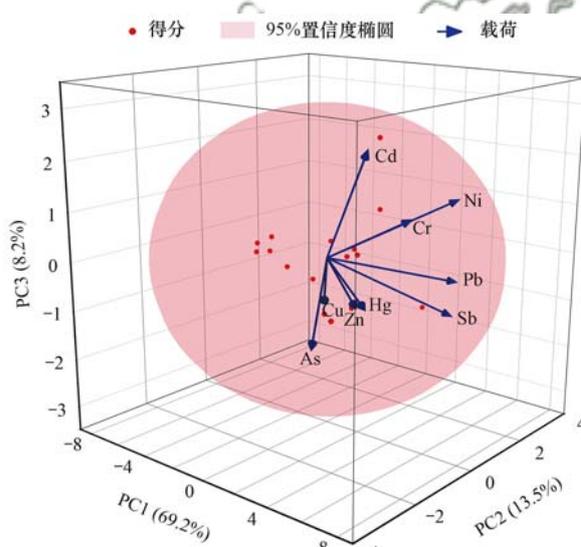


图 6 主成分载荷

Fig. 6 Load of principal components

### 3 结论

(1) Cd 在土壤中主要是以酸溶态和可还原态为主,平均值为  $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,占到 4 种形态总和的 79.86%; Cr、Ni、Cu、Zn、As、Sb 和 Pb 主要以残渣态为主, Hg 主要以残渣态和可氧化态为主,在土壤中稳定性较好.

(2) Cr 的风险指数小于 1%,其处于无风险状态; Sb、Pb、Ni 和 Cu 的平均风险指数分别为 2.34%、2.77%、9.15% 和 4.27%,风险评价结果为低风险; Hg、Zn 和 As 的风险指数为 13.0% ~ 24.9%,均达到中等风险水平,但在研究区,土壤中 Hg 和 As 的含量值低于土壤环境背景值,对环境造成风险的可能性较低. 尤其 Cd 的风险指数(28.7%)接近高风险标准(31% ~ 50%),需要引起相关的重视.

(3)土壤重金属总量和赋存形态的相关性和主成分分析结果表明,As、Cr、Ni、Sb和Pb等重金属的主要来源受自然输入的影响较大,重金属Cd受工业生产的人为活动的外源性因素影响较为明显。

#### 参考文献:

- [1] 傅晓文. 盐渍化石油污染土壤中重金属的污染特征、分布和来源解析[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
Fu X W. Characteristics, distribution and source analysis of heavy metals in the oil-polluted alkaline soil [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.
- [2] Zhang H L, Zhao Y R, Wang Z W, *et al.* Distribution characteristics, bioaccumulation and trophic transfer of heavy metals in the food web of grassland ecosystems [J]. *Chemosphere*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130407.
- [3] Liu N T, Liu H Y, Wu P, *et al.* Distribution characteristics and potential pollution assessment of heavy metals (Cd, Pb, Zn) in reservoir sediments from a historical artisanal zinc smelting area in Southwest China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(10): 14288-14298.
- [4] Wu Z Y, Zhang L N, Xia T X, *et al.* Heavy metal pollution and human health risk assessment at mercury smelting sites in Wanshan district of Guizhou Province, China [J]. *RSC Advances*, 2020, **10**(39): 23066-23079.
- [5] Zhang H Y, Yuan X Z, Xiong T, *et al.* Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: influence factors, mechanisms and evaluation methods [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **398**, doi: 10.1016/j.cej.2020.125657.
- [6] 李沅蔚, 邹艳梅, 王传远. 黄河三角洲油田区土壤重金属的垂直分布规律及其影响因素[J]. *环境化学*, 2019, **38**(11): 2583-2593.  
Li Y W, Zou Y M, Wang C Y. Vertical distribution and influencing factors of heavy metals in oilfield soil in the Yellow River Delta [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(11): 2583-2593.
- [7] Sundaray S K, Nayak B B, Lin S, *et al.* Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments-A case study: Mahanadi basin, India [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(2-3): 1837-1846.
- [8] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 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[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 900-908.  
Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 900-908.
- [9] Liu G N, Tao L, Liu X H, *et al.* Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, **132**: 156-163.
- [10] 姜时欣, 翟付杰, 张超, 等. 伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2653-2663.  
Jiang S X, Zhai F J, Zhang C, *et al.* Speciation distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from the Yitong River city area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2653-2663.
- [11] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 449-459.  
Ma H H, Peng M, Liu F, *et al.* Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 449-459.
- [12] 郭彦海, 高国龙, 王庆, 等. 典型平原地区生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属赋存形态分布特征及生物有效性评价[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(9): 1613-1620.  
Guo Y H, Gao G L, Wang Q, *et al.* Heavy metal speciation distribution and bioavailability assessment in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in the typical plain area in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9): 1613-1620.
- [13] 张越. 黄土高原石油炼油厂周边环境重金属污染评价[D]. 西安: 西北大学, 2012.
- [14] 张朝阳, 彭平安, 宋建中, 等. 改进BCR法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(11): 1881-1884.  
Zhang C Y, Peng P A, Song J Z, *et al.* Utilization of modified BCR procedure for the chemical speciation of heavy metals in Chinese soil reference material [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(11): 1881-1884.
- [15] 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.
- [16] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018-1027.  
Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [17] 高彦鑫, 冯国金, 唐磊, 等. 密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1707-1717.  
Gao Y X, Feng J G, Tang L, *et al.* Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in iron and gold mine soil of Miyun Reservoir upstream [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1707-1717.
- [18] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4291-4299.  
Qin Y W, Zhang L, Zheng B H, *et al.* Speciation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4291-4299.
- [19] Wang S Y, Kalkhajah Y K, Qin Z R, *et al.* Spatial distribution and assessment of the human health risks of heavy metals in a retired petrochemical industrial area, South China [J]. *Environmental Research*, 2020, **188**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109661.
- [20] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属生物有效性的研究——以江苏昆山市为例[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(2): 240-248.  
Zhong X L, Zhou S L, Li J T, *et al.* Bioavailability of soil heavy metals in the yangtze river delta—a case study of Kunshan City in Jiangsu province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(2): 240-248.
- [21] 赵靓, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某城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.
- [22] Alshahri F, El-taher A. Assessment of heavy and trace metals in surface soil nearby an oil refinery, Saudi Arabia, using geoaccumulation and pollution indices [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, **75**(3): 390-401.
- [23] 麻冰涓, 王海邻, 李小超, 等. 河南省武陟县大田土壤重金属形态分布及潜在生态风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2015, **15**(4): 363-367.
- Ma B J, Wang H L, Li X C, *et al.* Fractional distribution and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soil, Wuzhi, Henan [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(4): 363-367.
- [24] 许超, 夏北成, 吴海宁, 等. 酸性矿山废水污灌区水稻土重金属的形态分布及生物有效性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 900-906.
- Xu C, Xia B C, Wu H N, *et al.* Speciation and bioavailability of heavy metals in paddy soil irrigated by acid mine drainage [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 900-906.
- [25] 陈岩, 季宏兵, 朱先芳等. 北京市得田沟金矿和崎峰茶金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(11): 2142-2151.
- Chen Y, Ji H B, Zhu X F, *et al.* Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in soils around the gold mine of Detiangou-Qifengcha, Beijing City, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(11): 2142-2151.
- [26] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [27] Teng Y G, Wu J, Lu S J, *et al.* Soil and soil environmental quality monitoring in China: a review [J]. *Environment International*, 2014, **69**: 177-199.
- [28] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- Wang R, Hu X L, Zhang Y W, *et al.* Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- [29] 林淑芬, 李辉信, 胡锋. 蚓粪对黑麦草吸收污染土壤重金属铜的影响[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(6): 911-918.
- Lin S F, Li H X, Hu F. Effect of earthworm casts on copper uptake by ryegrass in copper polluted soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, **43**(6): 911-918.
- [30] 陈俊, 范文宏, 孙如梦, 等. 新河污灌区土壤中重金属的形态分布和生物有效性研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(5): 831-837.
- Chen J, Fan W H, Sun R M, *et al.* Bioavailability and species distribution of heavy metals in sewage-irrigated soil from Xinhe [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(5): 831-837.
- [31] 张晶, 于玲玲, 辛术贞, 等. 根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 685-691.
- Zhang J, Yu L L, Xin S Z, *et al.* Phytoavailability and chemical speciation of cadmium in different Cd-contaminated soils with crop root return [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 685-691.
- [32] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- Lin C Q, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Jiulong River [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- [33] Bosco M L, Varrica D, Dongarrà G. Case study: Inorganic pollutants associated with particulate matter from an area near a petrochemical plant [J]. *Environmental Research*, 2005, **99**(1): 18-30.
- [34] Hanesch M, Scholger R, Dekkers M J. The application of fuzzy C-means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, **26**(11-12): 885-891.
- [35] 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3774-3784.
- Zhang J, Dong J, Liang Q F, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and influencing factors in Baoji Arban soils [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3774-3784.
- [36] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属污染植物修复技术的研究与应用现状[J]. *地球科学进展*, 2002, **17**(6): 833-839.
- Wei C Y, Chen T B. An overview on the status of research and application of heavy metal phytoremediation [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, **17**(6): 833-839.
- [37] 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 等. 南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- Lai S Y, Dong Q Y, Song C, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in the eastern mountainous area of the Nanyang Basin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- [38] 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.
- [39] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 163-178.
- [40] 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 X, 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.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM <sub>2.5</sub> Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO <sub>2</sub> Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)