

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

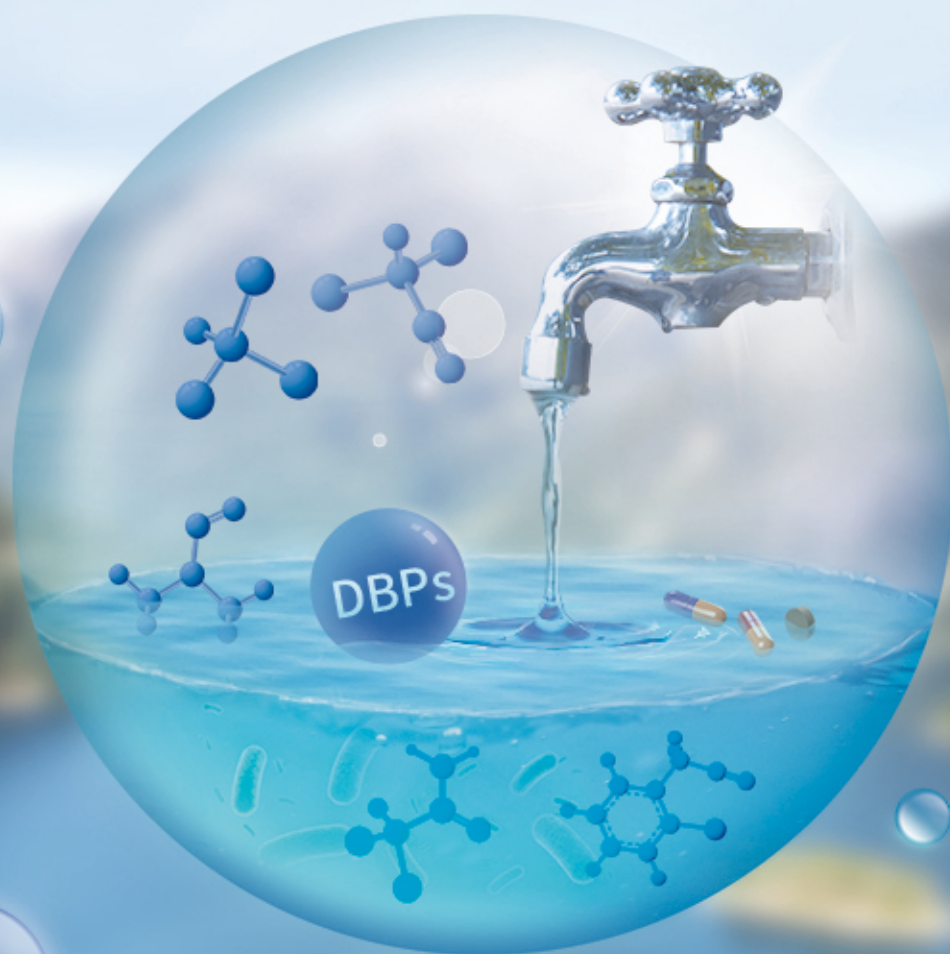
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫帆, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价

赖书雅^{1,2,3}, 董秋瑶^{2,3*}, 宋超^{2,3}, 杨振京^{2,3}

(1. 河北地质大学地球科学学院, 石家庄 050031; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 3. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 石家庄 050061)

摘要: 通过分析南阳盆地东部山区表层土壤(0~20 cm)样品的 As、Hg、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni 和 Cu 等 8 种重金属含量和 pH 值,对土壤重金属的空间分布特征、污染程度和生态风险进行研究,并对重金属的来源进行分析。结果表明,研究区内土壤 Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn 和 As 含量相比于土壤污染风险筛选值存在不同程度的超标。土壤重金属空间分布呈面状和岛状分布。含量高值区主要分布在研究区南部,且与矿区分布相吻合。除了少数样点的土壤以外,大部分样点未受到污染,Cd 的污染最为严重。As、Cr、Pb、Zn、Ni 和 Cu 在几乎全部地区的潜在生态风险系数为轻微风险等级,Cd 和 Hg 的潜在生态风险系数为中等风险等级占比最高。研究区综合土壤重金属潜在在很强和强生态风险指数占比较高,分别为 58.93% 和 37.66%。土壤 Hg、Cd 和 Pb 主要受到矿产开采等人类活动的影响,As 主要受到研究区地质背景的影响,Zn、Ni、Cr 和 Cu 同时受到人类活动和地质背景的影响。研究区矿产资源的开采是造成土壤污染及生态风险的主要原因。

关键词: 土壤重金属; 空间分布; 污染评价; 生态风险; 来源

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5500-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103019

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin

LAI Shu-ya^{1,2,3}, DONG Qiu-yao^{2,3*}, SONG Chao^{2,3}, YANG Zhen-jing^{2,3}

(1. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 3. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: The spatial distribution, pollution degree, and ecological risk of heavy metals in the soil were studied by analyzing the contents of As, Hg, Cd, Cr, Pb, Zn, Ni, and Cu and pH values in surface soil samples of the eastern mountainous area of the Nanyang basin. The results showed that the contents of Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn, and As in the soil exceeded the screening value of soil pollution risk. The spatial distribution of soil heavy metals displayed regional-and island-shaped. The highest concentration of heavy metals was found in the south of the study area, where a mining area is located. Most of the samples had no pollution levels except some samples with high contents of Cd. For As, Cr, Pb, Zn, Ni, and Cu, the potential ecological risk of most samples were low, while Cd and Hg posed medium risk in most areas. The areas with high and relatively high ecological risk index accounted for 58.93% and 37.66%, respectively. Soil Hg, Cd, and Pb contents were related to anthropogenic activities such as mineral mining. As derives from geological processes, while Zn, Ni, Cr, and Cu are both controlled by anthropogenic activities and geological processes. The mining of mineral resources is the main driving factor of soil heavy metal pollution and ecological risk in the study area.

Key words: soil heavy metals; spatial distribution; pollution assessment; ecological risk; source

土壤作为四大圈层互相紧密接触的过渡地带,其生态环境意义重大。同时土壤作为人类赖以生存的重要资源,也是生态和环境保护的重要对象^[1]。随着我国社会经济的快速发展,人类在社会生产中排出的各种污染物与日俱增。土壤重金属污染则成为日益严重的环境问题^[2]。导致土壤环境产生污染的重金属主要有 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 等 8 种^[3]。过量的重金属进入土壤,会导致土壤生产力下降,从而引起土壤质量下降^[4,5]。矿产资源开发、金属加工和冶炼、化学生产、工厂排放和污水灌溉等人为活动已被证明是重金属污染的主要来源^[6~8]。土壤重金属污染具有隐蔽性、潜伏性、不可逆性、长期性和后果严重性,从而产生一系列危害^[9]。包括引起并加速环境污染、直接危害农作物的产量和质量^[10]、影响人类的身体健康、降低生物

多样性和威胁人类生存安全^[11~13]。因此,调查土壤重金属地球化学特征,进行生态环境风险评价,对于开展土壤重金属污染防控和环境修复治理都至关重要。

南阳盆地东部山区作为南阳盆地、桐柏山北部山支余脉和华北平原的交界处,工业和农业生产状况复杂多样,矿产资源丰富。由这些活动产生的重金属元素在土壤中会进行迁移和扩散,造成土壤污染,给当地生活生产带来一系列影响。特别是该地区矿产资源的开发对土壤造成的影响不能忽视。林苾等^[14]的研究认为矿产资源的开发在带来高利润收

收稿日期: 2021-03-03; 修订日期: 2021-05-07

基金项目: 中国地质调查项目(DD20190532)

作者简介: 赖书雅(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为全球环境变化,E-mail:2458757069@qq.com

* 通信作者,E-mail:64965341@qq.com

益的同时,也带来了一系列环境污染问题.尤其是矿山开发的所有过程中,都会产生大量的重金属元素,严重破坏生态并影响人体健康^[15].我国不同地方方金矿^[15]、铁锰矿^[16]、铝铜矿^[17,18]、铅锌矿^[19]和煤矿^[20~22]等开采都造成了不同程度的土壤重金属污染.然而对于南阳盆地东部山区土壤重金属的研究相对较少,通过对南阳盆地东部山区土壤重金属元素的空间分布特征及其生态风险进行分析,并结合研究区人类活动、生态环境和地质背景,以加深对土壤环境质量状况的了解,以期为该地区土壤重金属污染的修复和防控提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南阳盆地东部山区位于秦岭大别造山带中部,西部是南阳盆地,东部为华北平原,南部为桐柏-大别山(图1).在行政区划上主要位于河南省南阳市与驻马店市结合处,包括桐柏县、泌阳县、确山县、遂平县、驻马店市、方城县、舞钢市和西平县.东邻信阳市,南接湖北随州和枣阳市.研究区平均海拔高度约150 m,属亚热带与暖温带的过渡地带,年平均气温约15℃,1月最冷平均气温约1.5℃,7月最热平均气温约27.5℃,年降水量900~1200 mm.南阳盆地东部山区为长江、淮河两大水系支流上游发源地之一.区域内主要地貌为中低山、丘陵、台地、岗地、洪积平原和河谷平原.土地利用现状主要有水田、旱地、有林地和灌木林地.研究区土壤类型主要为黄褐土、黄褐土性土、粗骨土、灰潮土和淹育型水稻土.农作物主要有花生、小麦、玉米和水稻等.矿产资源主要有碱矿、萤石矿、磷矿、金矿、银矿、铁矿、铜矿和铅锌矿等.

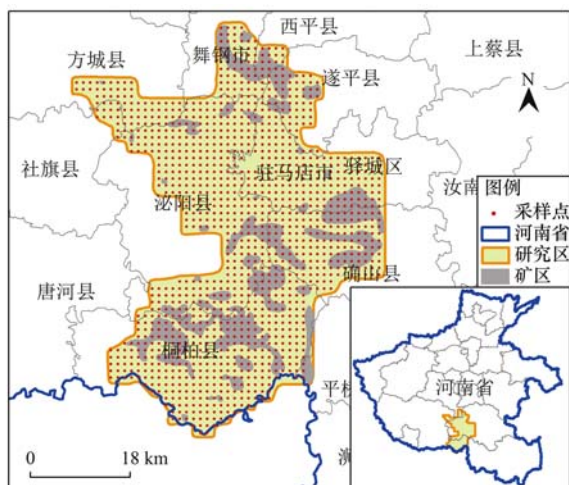


图1 研究区位置和组合样点位置

Fig. 1 Location of the study area and combined sample point position

1.2 样品采集与测试

使用网格化采集农用地表层0~20 cm土壤,以1 km²内采集一个样品,在采样中心点周围100 m范围内3处~5处多点采集组合,共采集5521个样品.采样过程中每个子样点采集表层0~20 cm土壤样品1 kg左右,采样时去除表层杂物,将样品装入布袋中,标记样品号,同时记录该子样点地理位置、海拔、地貌、农作物、土地利用现状和周围环境信息.装在布袋中的样品,在通风干燥或50℃以下烘干.样品在干燥过程中要及时翻晒和敲打,避免结块和霉变,干燥后的样品在加工(过筛)前用木锤敲打,使其恢复至自然粒级状态.样品干燥后过20目尼龙筛,筛下部分总重量应大于500 g.将表层土壤样品按照4 km²的大格重量组合成1个分析样,保证组合后的样品重量≥200 g,组合分析样1378件,最后样品装袋送实验室进行测试.

使用PHS-3C离子选择电极测定土壤pH,选择使用BAF-2000原子荧光光度计测定土壤As和Hg含量,使用ZSXPrimus II射线荧光光谱仪测定土壤Cr含量.其中As、Cr和pH分析检测过程按区域地球化学样品分析方法(DZ/T 0279-2016)的检验规程进行测试^[23].Hg检测方法依据土壤检测(NY/T 1121-2006)的要求^[24].使用XSERIES2电感耦合等离子体质谱仪测定土壤Cd、Pb、Zn、Ni和Cu含量,检测方法依据硅酸盐岩石化学分析方法(GB/T 14506-2010)的要求^[25].各分析方法的最低检出限均等于或优于土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295-2016)的要求^[26].

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数(P_i)是指土壤中某一重金属含量与土壤环境质量评价标准之比,计算公式为:

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

式中, P_i 为土壤中重金属*i*的单因子污染指数, C_i 为重金属*i*的实测值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), S_i 为重金属*i*在土壤中的环境质量评价标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).评价标准参考土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)^[27],对于水旱轮作地,采用其中较严格的风险筛选值. $P_i \leq 1$ 说明土壤未受到污染, $1 < P_i \leq 2$ 说明土壤存有潜在重金属污染, $2 < P_i \leq 3$ 说明土壤重金属存在轻度污染, $P_i > 3$ 说明土壤重金属存在重度污染,如表1所示.

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法(P_N)^[28]是对土壤中多种重金属的污染情况进行综合评价的方法,计算公式为:

$$P_N = \sqrt{(P_{iave}^2 + P_{imax}^2)/2}$$
 (2)

式中, P_N 为土壤重金属综合污染指数值, P_{iave} 为重金属 i 的单因子污染指数平均值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), P_{imax} 为重金属 i 的单因子污染指数最大值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 根据内梅罗综合污染指数 (P_N) 的大小可将土壤按污染程度划分为 5 级, 如表 1 所示.

1.3.3 潜在生态风险指数法

瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出潜在生态风险指数法 (RI)^[29], 其后广泛应用于沉积物与土壤中重金属生态风险评价, 该方法不仅考虑到重金属的含量, 同时将重金属的生态效应、环境效应和毒理

学联系在一起. 计算公式为:

$$E_i = \sum_{i=1}^n (T_i \times C_f^i) = \sum_{i=1}^n \left(T_i \times \frac{C_i}{C_n^i} \right)$$
 (3)

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i$$
 (4)

式中, RI 为土壤中重金属的潜在生态风险指数, E_i 为重金属 i 的潜在生态风险系数, T_i 为重金属 i 的毒性系数^[29] (见表 2), C_i 为重金属 i 实测值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), C_n^i 为重金属 i 的背景值, 这里选择河南省表层土壤的背景值^[30]. 潜在生态风险评价等级如表 1 所示.

表 1 土壤重金属污染等级划分标准

Table 1 Classification standard of soil heavy metal pollution

单因子污染指数		内梅罗污染指数		潜在生态风险评价			
P_i	污染等级	P_N	污染等级	E_i	风险等级	RI	风险等级
$P_i \leq 1$	未污染	$P_N \leq 0.7$	安全	$E_i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微风险
$1 < P_i \leq 2$	潜在污染	$0.7 < P_N \leq 1$	警戒值	$40 \leq E_i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等风险
$2 < P_i \leq 3$	轻度污染	$1 < P_N \leq 2$	轻度污染	$80 \leq E_i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强风险
$P_i > 3$	重度污染	$2 < P_N \leq 3$	中度污染	$160 \leq E_i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强风险
		$P_N > 3$	重度污染	$E_i \geq 320$	极强		

表 2 重金属毒性系数

Table 2 Toxicity coefficient of heavy metals

项目	As	Hg	Cd	Cr	Pb	Zn	Ni	Cu
毒性系数 T_i	10	40	30	2	5	1	5	5

2 结果与分析

2.1 研究区表层土壤重金属空间分布特征

研究区土壤重金属含量特征见表 3. 土壤 pH 值变化范围为 4.5 ~ 7.97, 其中 pH 值小于 7 的地区占比 94.56%, 以酸性土壤为主. 研究区土壤重金属 As、Hg、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni 和 Cu 含量平均值分别为 8.30、0.04、0.16、65.34、29.49、67.94、25.74 和 22.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 土壤 As、Hg、Cd、Cr、Pb、Zn、

Ni 和 Cu 平均值与全国表层土壤环境背景值^[31] 的比值分别为 0.74、0.58、1.68、1.07、1.13、0.92、0.96 和 1.02, 与河南省表层土壤元素背景值的比值分别为 0.85、1.52、2.51、1.03、1.32、1.09、0.94 和 1.15.

相比于农用地土壤污染风险筛选值, 土壤 Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn 和 As 的超标率所占比例分别为 4.72%、2.90%、1.74%、1.02%、0.58%、0.36% 和 0.07%, 说明部分地区的土壤对农产品质量安全、农

表 3 研究区表层土壤重金属含量统计 ($n=1\,378$)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Statistics of heavy metal content in surface soil of the study area ($n=1\,378$)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

特征参数 ¹⁾	As	Hg	Cd	Cr	Pb	Zn	Ni	Cu	pH
最小值	2.39	0.01	0.05	24.40	13.00	36.53	7.45	8.01	4.50
最大值	71.73	1.42	5.22	354.00	1 029.80	636.90	155.70	117.40	7.97
中位值	8.22	0.03	0.13	61.65	26.80	62.77	23.80	20.09	5.55
平均值	8.30	0.04	0.16	65.34	29.49	67.94	25.74	22.98	5.68
标准差	3.00	0.06	0.18	27.27	30.04	28.06	10.70	10.19	0.68
变异系数/%	36.16	165.63	110.47	41.74	101.86	41.30	41.57	44.33	11.96
超标率/%	0.07	0.00	4.72	1.74	0.58	0.36	1.02	2.90	—
河南省土壤背景值	9.80	0.03	0.07	63.20	22.30	62.50	27.40	20.00	7.70
全国土壤背景值	11.20	0.07	0.10	61.00	26.00	74.20	26.90	22.60	6.80
K_1	0.85	1.52	2.51	1.03	1.32	1.09	0.94	1.15	0.74
K_2	0.74	0.58	1.68	1.07	1.13	0.92	0.96	1.02	0.83

1) K_1 和 K_2 分别表示土壤重金属元素平均含量与河南省和全国土壤背景值之比

作物生长和土壤生态环境可能存在风险. 与农用地土壤污染风险管制值对比得出, 土壤 Cd 和 Pb 分别有 2 和 1 个组合样超过管制值.

研究区土壤重金属空间变异系数从大到小排序: $Hg > Cd > Pb > Cu > Cr > Ni > Zn > As$. 有研究表明, 变异系数大于 50%, 说明重金属含量空间分布不均匀, 存在点源污染可能, 有外源物质进入所致^[32,33], 即变异系数越大, 受人为影响越严重. 其中 Hg、Cd 和 Pb 元素的变异系数均大于 50%, 且超过 100%, 表现出明显的空间变异性, 表明这 3 种元素在局部地区可能受到人类活动影响.

图 2 是运用 ArcGIS 10.6 中的反距离权重法插值得到的南阳盆地东部山区土壤重金属空间分布状况. 整体情况来看, 研究区表层土壤 8 种重金属元素空间分布基本呈现片状和岛状分布. As 和 Hg 元素高含量区分布较为分散, 其余重金属含量高值区主

要分布在研究区南部的桐柏县和泌阳县, 而桐柏-泌阳地区矿产资源丰富, 采矿业较为发达, 矿山开采活动可能对该区域表层土壤重金属含量具有一定的影响作用.

2.2 研究区表层土壤重金属污染评价

通过计算土壤中重金属单因子污染指数, 利用公式(1)得出每个组合样的污染指数及其所占百分比, 并划分等级, 结果见表 4. 各元素平均单项污染指数从大到小依次为: $Cd > Cu > Cr > Ni > Zn > Pb > As > Hg$, 其中 As、Cd、Cr、Pb、Zn、Ni 和 Cu 元素分别有 0.07%、3.77%、1.67%、0.44%、0.22%、0.94% 和 2.76% 的地区处于潜在污染等级, Cd、Cr、Zn、Ni 和 Cu 元素中分别有 0.44%、0.07%、0.07%、0.07% 和 0.15% 的地区处于轻度污染等级, Cd、Pb 和 Zn 元素中分别有 0.51%、0.15% 和 0.07% 的地区处于重度污染等级.

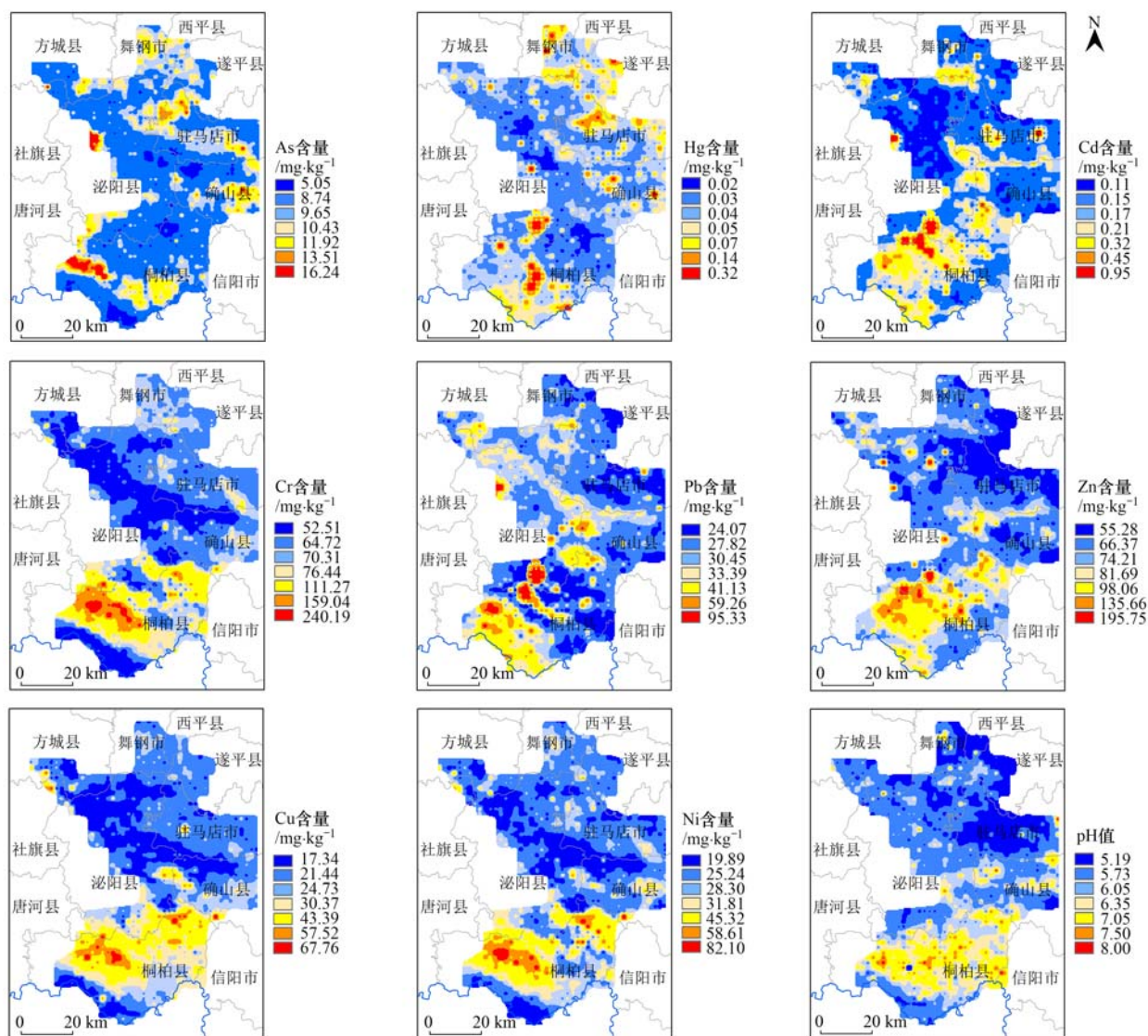


图 2 研究区土壤重金属含量空间分布

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

表 4 土壤重金属单因子污染指数占比/%

Table 4 Single factor pollution index of soil heavy metals/%

项目	As	Hg	Cd	Cr	Pb	Zn	Ni	Cu	等级
$P_i \leq 1$	99.93	100.00	95.28	98.26	99.42	99.64	98.98	97.10	未污染
$1 < P_i \leq 2$	0.07	0.00	3.77	1.67	0.44	0.22	0.94	2.76	潜在污染
$2 < P_i \leq 3$	0.00	0.00	0.44	0.07	0.00	0.07	0.07	0.15	轻度污染
$P_i > 3$	0.00	0.00	0.51	0.00	0.15	0.07	0.00	0.00	重度污染

通过对研究区表层土壤中重金属元素综合污染状况进行评价,利用公式(2)计算,得出该地区内梅罗综合污染指数(P_N)的变化范围是 0.26 ~ 12.67,平均值为 0.50. 绘制研究区内梅罗综合污染指数(P_N)的空间分布,并统计不同污染等级所占比例,结果见图 3. 研究区有 88.82% 的地区是安全的,有

7.62% 的地区处在警戒值上, 3.05% 的地区风险等级为轻度污染, 分别有 0.15% 和 0.36% 的地区存在中度和重度污染. 而这些存在污染的地区主要分布在桐柏县中北部和泌阳县的南部边缘处, 并且污染严重的地区则与研究区南部矿区的分布相吻合, 而这些矿区大多属于多金属矿区.

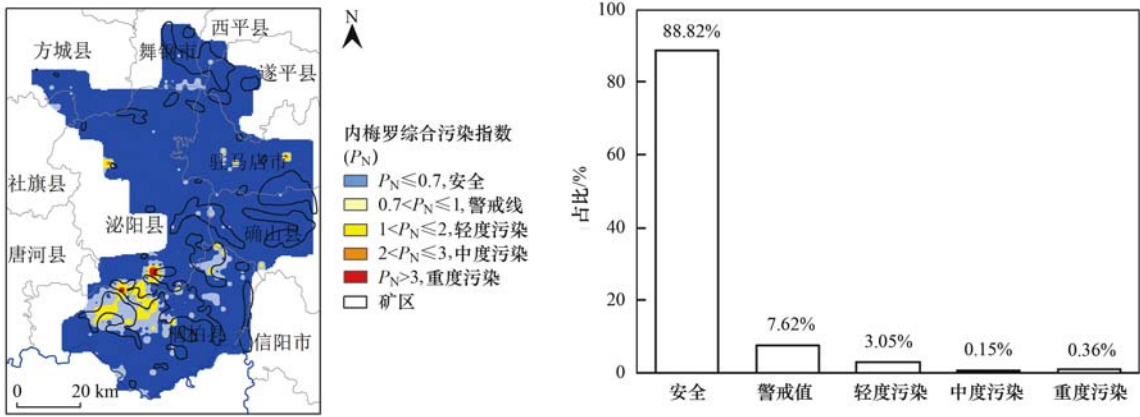


图 3 土壤重金属内梅罗综合污染指数分布及其占比

Fig. 3 Distribution and proportion of Nemerow comprehensive pollution index of soil heavy metals

通过对研究区表层土壤中重金属元素潜在生态风险进行评价,利用公式(3)计算得出表 5,该地区各个元素潜在生态风险系数(E_i)平均值从大到小依次为: $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$. 其中 Cr、Zn、Ni 和 Cu 在全区的潜在生态风险系数为轻微风险等级, As 元素有 99.85% 的地区潜在生态风险系数为轻微风险等级, 0.15% 的地区为中等风险等级, Pb 元素有 99.85% 的地区为

轻微风险等级, 0.07% 的地区为中等风险等级, 0.07% 的地区为很强风险等级, Hg 和 Cd 元素分别有 33.74% 和 2.83% 的地区为轻微风险等级, 54.50% 和 73.51% 的地区为中等风险等级, 19.59% 和 10.23% 的地区为强风险等级, 2.54% 和 1.16% 的地区为很强风险等级, 1.09% 和 0.51% 的地区潜在生态风险系数为极强风险等级.

表 5 土壤重金属潜在生态风险系数占比/%

Table 5 Potential ecological risk coefficient of heavy metals in soil/%

项目	As	Hg	Cd	Cr	Pb	Zn	Ni	Cu	等级
$E_i < 40$	99.85	33.74	2.83	100.00	99.85	100.00	100.00	100.00	轻微
$40 \leq E_i < 80$	0.15	54.50	73.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	中等
$80 \leq E_i < 160$	0.00	19.59	10.23	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	强
$160 \leq E_i < 320$	0.00	2.54	1.16	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	很强
$E_i \geq 320$	0.00	1.09	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	极强

通过对研究区表层土壤中重金属元素潜在生态风险指数进行评价,利用公式(4)计算,得出该地区潜在生态风险指数(RI)的变化范围是 78.00 ~ 4 944.91,平均值为 164.8. 绘制研究区潜在生态风

险指数(RI)的空间分布,并统计不同潜在生态风险等级所占比例,结果见图 4. 研究区土壤重金属潜在很强、强、中等和轻微生态风险所占比例分别为 0.73%、2.69%、37.66% 和 58.93%. 与矿区分布图

息. 其中旋转后的 F1 中 Hg、Cd、Pb 和 Zn 元素占有较大载荷, 方差贡献率 34.331%, F2 中 Cr、Ni 和 Cu 元素占有较大载荷, 方差贡献率 33.555%, F3 中 As 元素占有较大载荷, 方差贡献率 12.743%.

3 讨论

本研究结果表明, 南阳盆地东部山区表层土壤重金属空间分布整体呈现南部高北部低的特点, 以面状和岛状分布为特征, 且 8 种金属含量高值区主要分布在桐柏县地区. 该地区重金属含量高的原因, 一方面是受地质背景的影响, 另一方面是受人类活动的影响. 通过统计结果显示, Hg、Cd、Cr、Pb、Zn 和 Cu 的含量平均值高于河南省表层土壤背景值. Cd、Cr、Ni 和 Cu 的含量平均值高于全国表层土壤背景值. Hg、Cd 和 Pb 元素的空间变异性最强, 也证明了研究区的局部地区人为输入重金属较多. 土壤 Cd、Cu、Cr 和 Ni 的超标率占比较高, 占比高的原因推测与该地区采矿活动有关.

根据单因子污染指数显示, 研究区各金属元素在大部分地区未受到污染, 少数地区为潜在污染、中度和重度污染. 少数污染地区主要分布在采矿区附近(图 5), 还有一些分布在地势较高的区域, 说明污染地区除了受开矿活动的影响, 还受地质背景的控制. 污染的地区中存在潜在污染的重金属主要是 Cd、Cr 和 Cu, 并且还存在复合潜在污染的地区. 存在轻度与重度污染的重金属主要是 Cd, 主要分布在桐柏县北部泌阳县南部矿区. 根据全国矿产地数据库显示, 桐柏县目前有矿产资源 50 余种, 现共有采

矿区 174 个, 主要为石墨矿区、磷矿区、金矿区、银矿区、萤石矿区、铁矿区、铜铅多金属矿区、铅矿区、铅锌矿区和铜矿区等, 主要产矿有镉矿、金矿、硫铁矿、铅矿、锌矿、银矿、铁矿、磷矿、石墨矿和萤石等. 泌阳县内现有采矿区 56 个, 主要为花岗岩区、萤石矿区、多金属矿区、铜矿区和铅锌矿区等, 主要产矿有金矿、银矿、铁矿、铅矿、锌矿和铜矿等, 且泌阳县矿区主要分布在东、南、东北部和西北部边缘. 而这些存在污染的重金属的分布与桐柏县和泌阳县采矿区分布基本吻合. 并且综合污染指数显示, 存在轻、中和重度污染的地区也分布在桐柏县北部和泌阳县南部采矿区, 表明采矿活动是该地区表层土壤产生重金属污染最主要的原因.

根据潜在生态风险指数法显示, 整个研究区土壤重金属元素中 Cr、Zn、Ni 和 Cu 的潜在生态风险系数为轻微风险等级, As 和 Pb 大部分地区为轻微风险等级, 有个别地区为中等、强和很强风险等级. Cd 和 Hg 元素的中等风险等级占比最高, 分布在研究区的大部分区域(图 6). Cd 元素强、很强和极强潜在生态风险等级的区域主要分布在桐柏-泌阳县矿区, 还有少数分布在地势较高的区域, 由此可知 Cd 的污染和生态风险更为严重, 这与 Yang 等^[35]的研究结果是一致的. Hg 元素虽然未发现污染, 但是潜在生态风险系数等级较高, 风险较为严重, 其中强、很强和极强潜在生态风险系数, 主要分布在研究区西南部和东北部. 潜在生态风险指数(RI)显示, 研究区南部存在很强生态风险, 需要加强对土壤重金属污染的预防.

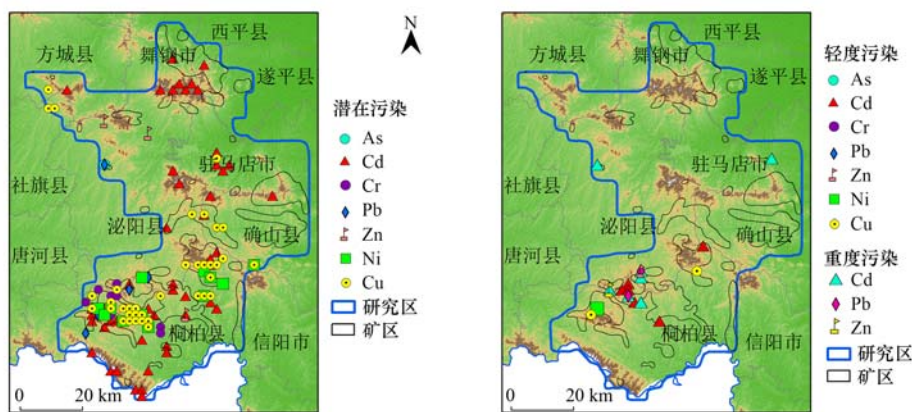


图 5 单因子污染指数污染组合样点分布

Fig. 5 Distribution of pollution combination samples of single factor pollution index

根据相关性和主成分分析显示, 旋转后的载荷因子中第一主成分中 Hg、Cd、Pb 和 Zn 占有较大载荷, 且 Pb-Hg 和 Pb-Cd-Zn 这两组中的元素存在较强的相关性, 说明它们具有相似来源. 研究表明, 土壤 Hg、Pb 和 Zn 存在明显的伴生关系, 可能受到矿产

开采等人为活动的影响^[36,37]. 研究区 Hg、Cd、Pb 和 Zn 高含量区与矿区分布相关, 其中 Hg、Cd 和 Pb 高度变异性也表明了这 3 个金属元素高值区来源可能为采矿等人类活动, 但 Cd 还存在部分样点受地质背景值控制. 第二主成分中 Ni、Cr 和 Cu 占有较

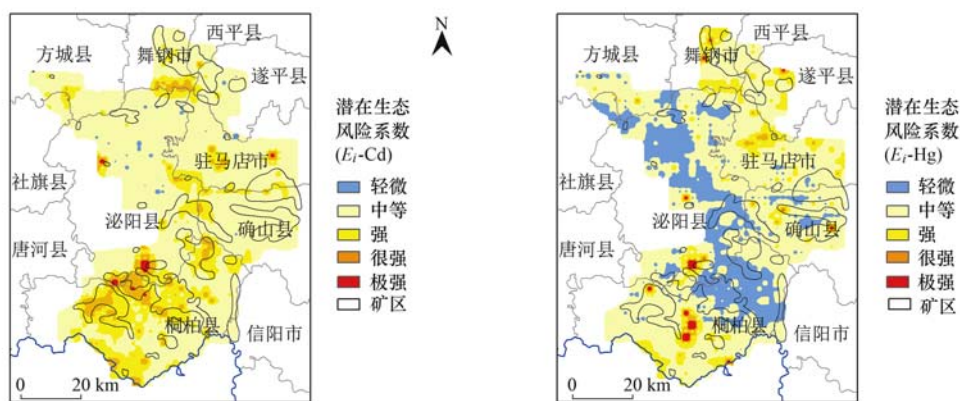


图6 Cd和Hg元素潜在生态风险系数等级分布

Fig. 6 Levels of potential ecological risk coefficients of Cd and Hg elements

大载荷,且 Ni-Cr-Cu 这组中的元素存在较强的相关性,变异系数也较小. 相关研究表明 Ni 和 Cr 更多地来源于成土母质^[38]. 但是 Ni、Cr 和 Cu 中有少量污染,且污染地区与元素的高含量区主要分布在矿区,说明这 3 种金属可能是自然和人类混合来源. 第三主成分中 As 占有较大载荷,As 与其他重金属相关性较低,虽然受到人为矿山开采活动影响,但程度很低,则推测 As 是自然来源.

4 结论

(1)研究区表层土壤重金属含量统计显示,各重金属含量存在一定的累积,但是平均值均未超出土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值. 土壤中重金属超标率从大到小排序: Cd > Cu > Cr > Ni > Pb > Zn > As. Hg、Cd、Cr、Pb、Zn 和 Cu 的含量平均值分别是河南省表层土壤背景值的 1.52、2.51、1.03、1.32、1.09 和 1.15 倍, Cd、Cr、Pb 和 Cu 的含量平均值是全国表层土壤背景值的 1.68、1.07、1.13 和 1.02 倍. Hg、Cd 和 Pb 元素变异系数超过 100%,表现为强烈的空间变异性,人为影响相对较大. 各重金属含量高值区与矿区分布基本吻合,主要分布在研究区南部桐柏县区域内.

(2)单因子污染指数法评价结果显示,各金属元素大部分地区土壤未受到污染,只存在少数地区为潜在污染、中度和重度污染. 内梅罗综合污染指数法显示,研究区有 88.82% 的土壤是安全的,有少数地区的土壤存在污染. 研究区污染区与潜在生态风险系数值较高区主要分布在矿区. 潜在生态风险评价结果显示,研究区土壤重金属潜在在很强和强生态风险占比较高,范围较大,分别为 58.93% 和 37.66%,说明了人类活动对土壤的影响很大.

(3)相关性分析和主成分分析结果显示,各重金属元素之间相关性较强. 土壤 Hg、Cd 和 Pb 除了

主要受到矿产开采等人类活动的影响,还受到地质背景值影响. As 主要受到研究区地质背景值的影响, Zn、Ni、Cr 和 Cu 同时受到人类活动和地质背景值的影响. Cd 元素污染区在研究区占比最高,同时 Cd 和 Hg 潜在生态风险系数等级较高,分布范围广,应充分加以重视.

参考文献:

- [1] 陈世宝,王萌,李杉杉,等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.
Chen S B, Wang M, Li B B, et al. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution pre-vention in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 35-41.
- [2] 陈文轩,李茜,王珍,等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2822-2833.
- [3] 周建军,周桔,冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320, 350.
Zhou J J, Zhou J, Feng R G. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(3): 315-320, 350.
- [4] 张博. 北京市房山区土壤重金属分布特征及评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
Zhang B. Distribution characteristics and evaluation of heavy metals in soils of Fangshan District, Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [5] Wei L L, Wang K, Noguera D R, et al. Transformation and speciation of typical heavy metals in soil aquifer treatment system during long time recharging with secondary effluent: depth distribution and combination [J]. Chemosphere, 2016, 165: 100-109.
- [6] Liu W H, Zhao J Z, Ouyang Z Y, et al. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China [J]. Environment International, 2005, 31(6): 805-812.
- [7] Chen K, Huang L, Yan B Z, et al. Effect of lead pollution control on environmental and childhood blood lead level in Nantong, China: an interventional study [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21): 12930-12936.

- [8] Zhang X Y, Zhong T Y, Liu L, *et al.* Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China[J]. *PLoS One*, 2015, **10**(8), doi: 10.1371/journal.pone.0135182.
- [9] Ljung K, Otabbong E, Selinus O. Natural and anthropogenic metal inputs to soils in urban Uppsala, Sweden [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, **28**(4): 353-364.
- [10] Khan S, Cao Q, Zheng Y M, *et al.* Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(3): 686-692.
- [11] Krishna K K, Mohan K R. Distribution, correlation, ecological and health risk assessment of heavy metal contamination in surface soils around an industrial area, Hyderabad, India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(5), doi: 10.1007/s12665-015-5151-7.
- [12] Luo X S, Ding J, Xu B, *et al.* Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **424**: 88-96.
- [13] Zhao H R, Xia B C, Fan C, *et al.* Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **417-418**: 45-54.
- [14] 林苒, 梁文静, 焦畅, 等. 陕西潼关县金矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 2021, **48**(3): 749-763.
- Lin J, Liang W J, Jiao Y, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan, Shaanxi[J]. *Geology in China*, 2021, **48**(3): 749-763.
- [15] 卢楠, 李刚, 罗玉虎. 金矿区土壤重金属污染及植物富集特征研究[J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2020, **5**(4): 24-29.
- Lu N, Li G, Luo Y H. Research on soil heavy metal pollution and plant enrichment in gold mining area[J]. *Development of the West China (Land Development Engineering Research)*, 2020, **5**(4): 24-29.
- [16] 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.
- [17] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- Zhang L K, Li H P, Huang X M, *et al.* Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1139-1146.
- [18] 李玉梅, 李海鹏, 张连科, 等. 包头某铜厂周边土壤重金属分布特征及来源分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(7): 1321-1328.
- Li Y M, Li H P, Zhang L K, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in soil around a copper plant in Baotou, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(7): 1321-1328.
- [19] 张龙, 张云霞, 宋波, 等. 云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4210-4217.
- Zhang L, Zhang Y X, Song B, *et al.* Potential of accumulation and application of dominant plants in Lanping lead-zinc Mine, Yunnan Province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4210-4217.
- [20] 刘芳, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4815-4829.
- Liu F, Tiyp T, Nurmamat I, *et al.* Spatial distribution characteristics of heavy metal pollution and health risk in soil around the coal industrial area of east Junggar Basin [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4815-4829.
- [21] 张成丽, 张伟平, 程红丹, 等. 禹州市煤矿区周边土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2019, **38**(4): 805-812.
- Zhang C L, Zhang W P, Cheng H D, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment of farmland soil around coal mines in Yuzhou City[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(4): 805-812.
- [22] 陈城, 鲁潇, 于坤, 等. 安徽迪沟采煤沉陷区土壤和沉积物重金属特征及潜在生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(3): 570-579.
- Chen C, Lu X, Yu K, *et al.* Heavy metal characteristics and potential ecological risk assessment of the soil and sediment in the Digou coal mining subsidence area, Anhui, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(3): 570-579.
- [23] DZ/T 0279-2016, 区域地球化学样品分析方法[S].
- [24] NY/T 1121-2006, 土壤检测[S].
- [25] GB/T 14506-2010, 硅酸盐岩石化学分析方法[S].
- [26] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [27] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [28] Nemerow N L. *Scientific stream pollution analysis* [M]. Washington: McGraw-Hill Book Company, 1974. 1-355.
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [30] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. *河南农业*, 1998, (10): 29.
- [31] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 1991, **12**(4): 12-19.
- Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the background contents on elements of soils in China [J]. *Environmental Science*, 1991, **12**(4): 12-19.
- [32] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 等. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 909-916.
- Chen J L, Li R Y, Xie X J, *et al.* Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in greenbelt soils of Nanjing City[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 909-916.
- [33] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地理学报*, 2017, **72**(9): 142-156.
- Eziz M, Mamut A, Mohammad A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(9): 142-156.
- [34] 孙慧, 毕如田, 郭颖, 等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 704-714.
- Sun H, Bi R T, Guo Y, *et al.* Source apportionment analysis of trace metal contamination in soils of Guangdong Province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 704-714.
- [35] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal

- pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700.
- [36] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *土壤通报*, 2017, **48**(2): 474-480.
- Zhan T L, Huang Y, Teng Y, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in farmland soil in Wanshan mining areas, Guizhou Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(2): 474-480.
- [37] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [38] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4749-4756.
- Wang R, Deng H, Yan M S, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in southern Youyang County, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4749-4756.

环境科学

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i> (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i> (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)