

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

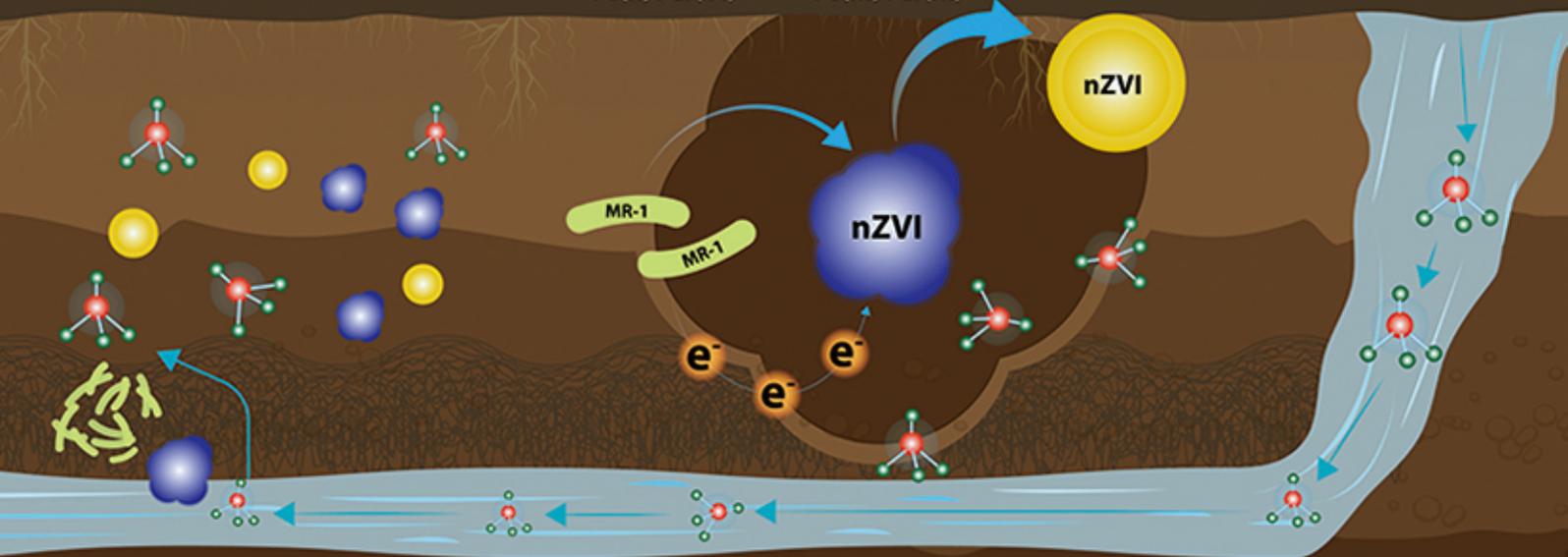
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布与健康效应评估 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM_{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N₂O 排放的影响 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH₄⁺-N 生物炭对土壤 N₂O-N 排放和 NH₃-N 挥发的影响 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析

张健琳^{1,2}, 瞿明凯^{2*}, 陈剑², 杨兰芳¹, 赵永存², 黄标²

(1. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

摘要: 金属矿开采是土壤重金属的最主要来源之一。以往针对单个或少数几个金属矿区的研究尚不足以有效支撑大尺度特别是跨省域尺度内矿区土壤重金属污染的治理。本研究针对我国金属矿产资源丰富的西南地区(云南省、四川省、贵州省、重庆市和西藏自治区), 搜集了有关金属矿开采对土壤重金属影响的文献, 采用 Meta 分析量化了不同情景模式(即不同子区域、矿种和土地利用类型)下金属矿开采对周边土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的影响, 最后利用失安全系数与漏斗图检验了研究数据的发表性偏倚。结果表明, 我国西南地区金属矿开采整体上显著增加了表层土壤中重金属含量[ES_+ (weight effect size) = 1.53], 重金属增加量由高到低顺序为: Cd (4109.80%) > Pb (741.49%) > Hg (452.90%) > Zn (420.70%) > As (278.10%) > Cu (138.69%) > Ni (16.18%), Cr 无显著影响; 四川和云南采矿对土壤 Cd ($ES_{+四川} = 4.16$; $ES_{+云南} = 3.20$) 和 Pb ($ES_{+四川} = 3.47$; $ES_{+云南} = 2.54$) 的影响较高, 贵州采矿对土壤 Hg ($ES_+ = 2.80$) 的影响最高; 金属矿开采对耕地土壤 ($ES_+ = 1.42$) 的影响较高; 铅锌矿和锡矿开采显著增加了土壤中 Cd、Pb 和 Zn 的含量, 铜矿开采显著增加了土壤 Cu、Cd 和 Pb 的含量; 以上重金属中, Pb 和 Zn 的研究结果受发表性偏倚的影响 ($P < 0.05$)。本研究结果可为西南金属矿区土壤环境保护提供更多的有效信息。

关键词: 西南地区; 金属矿区; Meta 分析; 效应值; 土壤重金属

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4414-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202012226

Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China

ZHANG Jian-lin^{1,2}, QU Ming-kai^{2*}, CHEN Jian², YANG Lan-fang¹, ZHAO Yong-cun², HUANG Biao²

(1. Faculty of Resources and Environment Science, Hubei University, Wuhan 430062, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Metal mining is one of the main contributors of soil heavy metals. Previous studies examining the impact of metal mining on surrounding soil have mainly focused on one or a few metal mining areas. However, such studies cannot effectively inform the management of heavy metal pollution in soil at an inter-provincial scale. As part of this study, literature was collected on soil heavy metals (i. e., As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn) affected by metal mining in regions of Southwest China (i. e., Yunnan Province, Sichuan Province, Guizhou Province, Chongqing Municipality, and Tibet Autonomous Region); Next, the impact of metal mining on the soil concentrations of these metals was quantified through meta-analysis, and the relationships between the selected factors (i. e., different sub-regions, metal minerals, and land-use types) and soil heavy metal concentrations were explored. Finally, the literature data was tested for publication bias. The results showed that metal mining in Southwest China has significantly increased the concentrations of heavy metals in topsoil. The different metals were ranked according to their weight effect sizes (ES_+) in the following order Cd > Pb > Hg > Zn > As > Cu > Ni > Cr. Metal mining in both Sichuan and Yunnan led to higher effect sizes of soil Cd ($ES_{+Sichuan} = 4.16$, $ES_{+Yunnan} = 3.20$) and Pb ($ES_{+Sichuan} = 3.47$, $ES_{+Yunnan} = 2.54$) than those of the other heavy metals, while metal mining in Guizhou led to a higher effect size of soil Hg ($ES_+ = 2.80$). The effect size of metal mining on soil heavy metals was higher in cultivated soil ($ES_+ = 1.42$) than in forested soil ($ES_+ = 0.50$). The mining of lead-zinc and tin significantly increased the concentrations of soil Cd, Pb, and Zn, and the mining of copper significantly increased the concentrations of soil Cu, Cd, and Pb. Of the investigated soil heavy metals in Southwest China, Pb and Zn showed slight potential publication biases ($P < 0.05$). The above results can provide more effective information for the environmental protection of soil in metal mining areas of Southwest China.

Key words: Southwest China; metal mining; Meta-analysis; effect size; soil heavy metals

近年来中国金属矿产资源开采造成的土壤重金属污染问题逐渐凸显^[1-3]。金属矿开采产生的大量废液、残渣等有毒物质被雨水冲刷、淋滤后, 极易渗透进入土壤, 对当地及周边环境造成了较大影响^[4-6]。西南地区, 即云南省、四川省、贵州省、重庆市和西藏自治区, 位于欧亚板块和印度洋板块的交界处, 地质条件复杂, 目前已发现多达 155 种矿产资

源, 矿产储量足, 种类多, 矿山企业超过 20 000 个, 其中金属矿山企业 3 000 余个, 是我国矿产资源最丰富的区

收稿日期: 2020-12-23; 修订日期: 2021-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800104); 国家自然科学基金项目(41771249); 中国科学院青年创新促进会项目(2018348)

作者简介: 张健琳(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向区域土壤环境风险评估, E-mail: zhangjianlin1008@163.com

* 通信作者, E-mail: quming kai@issas.ac.cn

域之一^[7,8]. 西南地区丰富的金属矿产资源使其具备开采基础, 而长期不合理、粗放式和过度开采使岩层中的矿物暴露于地表环境, 最终不断富集在土壤中, 导致矿区及周围土壤环境质量下降^[9]. 同时该地区多山地丘陵, 地势陡峭, 雨量充沛, 这种地势和降雨量利于重金属在土壤中的迁移, 从而扩大了重金属的积累范围^[10,11]. 因此, 有必要对西南金属矿区及周围土壤环境质量展开调查研究, 以期对西南金属矿区的土壤环境保护提供有效决策支持.

以往有关金属矿开采对土壤重金属影响的研究主要集中在单个或少数几个金属矿区^[12,13]. 然而这类研究结果无法为大尺度, 尤其是跨省域尺度视角下金属矿区的土壤污染治理提供有效的决策支持. 如果将以往的多个研究加以搜集, 则可以获取大尺度, 甚至是跨省域尺度金属矿区土壤重金属的信息. 然而传统的土壤重金属文献调查法往往存在如下问题: ①未考虑文献数据的权重问题, 往往将可信度不同的多个研究结果直接加以利用^[14,15]; ②研究结果受文献的发表性偏倚影响, 较少进行发表性偏倚的检验^[16,17]. 而近年来生态环境领域出现的定量 Meta 分析方法为该类问题提供了一种较好的解决途径. 该方法可定量整合同一研究主题下的多个试验结果, 根据单项研究中的样本数量赋予其权重. 每项研究中样本数量越多, 方差越小, 则该模型给予的权重越大, 反之权重越小. 此外, 该方法还可对搜集的文献数据进行发表性偏倚的检验, 以探索研究结果的可信度. 因此, Meta 分析为定量解析跨省域尺度金属矿开采对土壤重金属的影响提供了较好的分析手段.

本研究首先搜集我国西南地区有关金属矿开采对土壤重金属 (As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn) 影响的文献, 然后运用 Meta 分析: ①量化西南地区金属矿开采对土壤重金属的影响; ②探索不同情景模式 (即不同子区域、矿种和土地利用类型) 下金属矿开采对土壤重金属的影响; ③利用失安全系数与漏斗图检验搜集的文献数据的发表性偏倚. 本研究基于跨省域尺度视角, 旨在为我国西南金属矿区土壤环境治理提供有效的决策支持.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于中国知网、维普期刊和 Web of Science 数据库; 以 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 为调查对象; 以 (砷 &As& 镉 &Cd& 铬 &Cr& 铜 &Cu& 汞 &Hg& 镍 &Ni& 铅 &Pb& 锌 &Zn& 土壤重金属 &soil heavy metal& 金属矿区 &metal mine area& 采矿 &mining& 土壤污染 &soil pollution) +

(西南地区 &Southwest China& 云南 &Yunnan& 贵州 &Guizhou& 重庆 &Chongqing& 西藏 &Tibet& 四川 &Sichuan) 为关键词, 收集了 2020 年前我国西南地区有关金属矿开采对土壤重金属影响的文献.

为确保研究的准确性, 文献筛选标准为: ①土壤样品采自我国西南地区受金属矿开采影响的区域; ②重金属采用标准实验室分析方法测定 (如石墨炉原子吸收分光光度法; 火焰原子吸收分光光度法; 冷原子吸收光谱法; 石墨消解-原子荧光法); ③调查对象为 8 种重金属 (As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn) 中的一种或多种; ④包括土壤样本量、重金属含量的平均值和标准差 (SD), 或通过再次计算得到的标准差. 若文献中仅有标准误 (SE), 则标准差 (SD) 可用下列公式进行换算^[18]:

$$SD = SE \sqrt{N} \quad (1)$$

式中, N 为文献报告中的土壤样本量. 若文献报告中未给出 SD 或 SE, 为尽可能得到较多的可利用数据, 采用土壤重金属含量平均值十分之一的方法作为该文献报告的标准差^[19,20]. 本研究最终获取 103 篇有效文献, 从这些文献的描述性统计表或图中提取了 144 个调查位置、658 组数据和 53 个金属矿 (图 1). 最终数据库包括文献背景信息 (如作者、发表年份)、地理位置 (如经纬度、省份、城市)、金属矿种类、重金属类型、重金属含量的平均值、标准差、土壤采样数量和采样区域的土地利用类型.

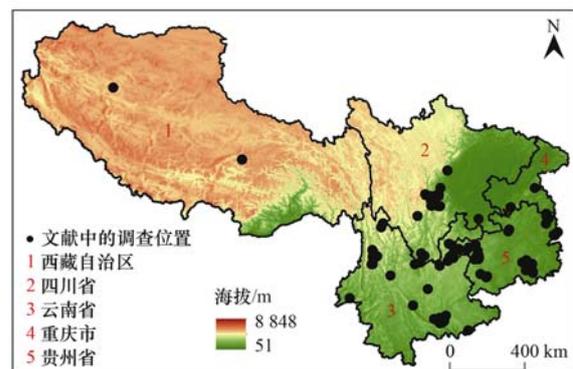


图 1 文献中提取的我国西南金属矿区土壤重金属的调查位置 ($n=144$)

Fig. 1 Investigation locations of soil heavy metals in metal mining areas of Southwest China extracted from the literatures ($n=144$)

1.2 Meta 分析

Meta 分析将研究数据按照处理组与对照组进行两两配对, 利用随机效应模型或固定效应模型将二者关系用效应值 (effect size, ES) 表现出来. 本研究选取中国环境监测总站 (1990 年) 记录的我国西南地区各省土壤重金属的背景值、采样数量和标准

差为对照组^[21];本次文献调查所提取的土壤重金属含量平均值、采样数量和标准差为处理组,采用对数反应比($\ln R$)来度量效应值^[20],其计算公式如下:

$$\begin{aligned} ES &= \ln R = \ln(X_t/X_c) \\ &= \ln(X_t) - \ln(X_c) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, X_t 为文献中提取到的土壤重金属平均值; X_c 为西南地区各省土壤重金属背景值.若效应值高于0,则表明金属矿开采增加了土壤中重金属的含量.每一个效应值对应的研究内方差(v_i)可用下列公式进行计算^[18]:

$$v_i = (S_t^2/N_t X_t^2) + (S_c^2/N_c X_c^2) \quad (3)$$

式中, S_t 和 S_c 为土壤重金属平均值和土壤背景值的标准差(SD); N_t 和 N_c 分别为对照组与处理组的土壤样本数.本研究采用随机效应模型计算效应值,该模型不仅考虑到研究内方差,也考虑到了研究间方差(τ^2). τ^2 采用最大似然函数(REML)进行估计^[22].每项研究的权重 w_i 的计算公式为^[18]:

$$w_i = 1/(v_i + \tau^2) \quad (4)$$

通过每项研究的权重 w_i 可计算加权平均后的综合效应值(weight effect size, ES_+),计算公式如下:

$$ES_+ = \frac{\sum_{i=1}^k (w_i \times ES_i)}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (5)$$

式中, w_i 与 ES_i 分别为第 i 对数据的权重与未加权的效应值; k 为对照组与处理组的配对数.同时计算综合效应值的95%置信区间(confidence interval, CI),若95%置信区间不包含0,则认为金属矿开采的影响是显著的($P < 0.05$),为更方便解释金属矿开采对重金属含量的影响,通过式(6)计算变化百分数^[23]:

$$PI = (e^{ES_+} - 1) \times 100\% \quad (6)$$

1.3 发表性偏倚

发表性偏倚是指在同类研究中,结果具有统计学意义的研究比结果无统计学意义的研究更容易被接受和发表的现象^[24].本研究采用漏斗图与失安全系数两种方法检验发表性偏倚.漏斗图是根据多个单项研究是否按照漏斗图的中心线对称分布进行检验,对称性越差,则发表性偏倚越大,结论可靠度越低,反之亦然.为定量判断漏斗图是否对称,采用 Egger's 回归分析来加以量化,其中 $P > 0.05$ 表示漏斗图对称性好^[25,26].Rosenberg^[27]提出的失安全系数(fail-safe number, Nfs)认为当研究具有统计学意义时,为排除可能的发表性偏倚,可计算最少需要加入多少个未发表的研究(即结果无统计学意义的研究)才能使 Meta 分析的显著性结果发生逆转.若失安全系数高于临界值($5n + 10$, n 为文献中调查到

的各重金属的组数),说明结论可靠,受偏倚性影响较小^[22,25,27].

本研究采用 R 语言 4.0 (<http://cran.r-project.org/>)“metafor”程序包^[28]进行统计分析,采用 ArcGIS 10.3 进行空间绘图.

2 结果与分析

2.1 金属矿开采导致的土壤重金属增加量

我国西南地区金属矿开采对金属矿区 8 种土壤重金属含量的效应值(ES_+)如图 2 所示.金属矿开采对土壤重金属含量的总体效应值为 1.53,置信区间为 1.52 ~ 1.54.置信区间不包含 0,且效应值为正($P < 0.05$).说明金属矿开采显著增加了我国西南金属矿区表层土壤重金属的含量.与西南地区土壤背景值相比,其含量整体增加了 361.82% (95% CI: 357.22% ~ 366.46%).

本研究对文献中所调查到的土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的组数分别为 78、115、68、93、32、34、127 和 111 (图 2).西南金属矿区重金属平均效应值由高到低依次为: Cd (3.74) > Pb (2.13) > Hg (1.71) > Zn (1.65) > As (1.33) > Cu (0.87) > Ni (0.15) > Cr (-0.01) (图 2).土壤 As、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的效应值为正,且 95% 置信区间不包含 0.表明西南金属矿开采显著增加了这 7 种土壤重金属的含量($P < 0.05$).与西南地区土壤背景值相比,这 7 种重金属的含量分别增加了 278.10%、4109.80%、138.69%、452.90%、16.18%、741.49% 和 420.70%.Cr 的效应值低于 0,置信区间包含 0.这说明西南金属矿开采可能对土壤 Cr 含量的增加无显著影响.

2.2 不同省份中金属矿开采导致的土壤重金属增加量

文献中所调查到的云南、四川、贵州、重庆和西藏的重金属组数分别为 349、149、111、31 和 18.这些调查的重金属点位主要分布在西南地区的东南部(图 1).西南地区不同省份金属矿开采对土壤重金属含量的效应值如图 3 所示.云南金属矿开采显著增加了土壤 Cd、Pb、As 和 Hg 的含量($P < 0.05$),其平均效应值依次为 3.20、2.54、1.55 和 1.21 (图 3),与背景值相比,其含量分别增加了 2 353.25%、1 167.97%、371.15% 和 235.35%.贵州金属矿开采中,土壤 Hg (2.80) 效应值最高,土壤 Cu (0.45) 最低(图 3),与背景值相比,土壤 Hg 含量增加了 1 544.47%.四川金属矿开采对土壤 Cd (4.16)、Pb (3.47)、Zn (2.61) 和 Hg (1.47) 显著增加作用程度高于其它 4 种重金属($P < 0.05$) (图 3),与土壤

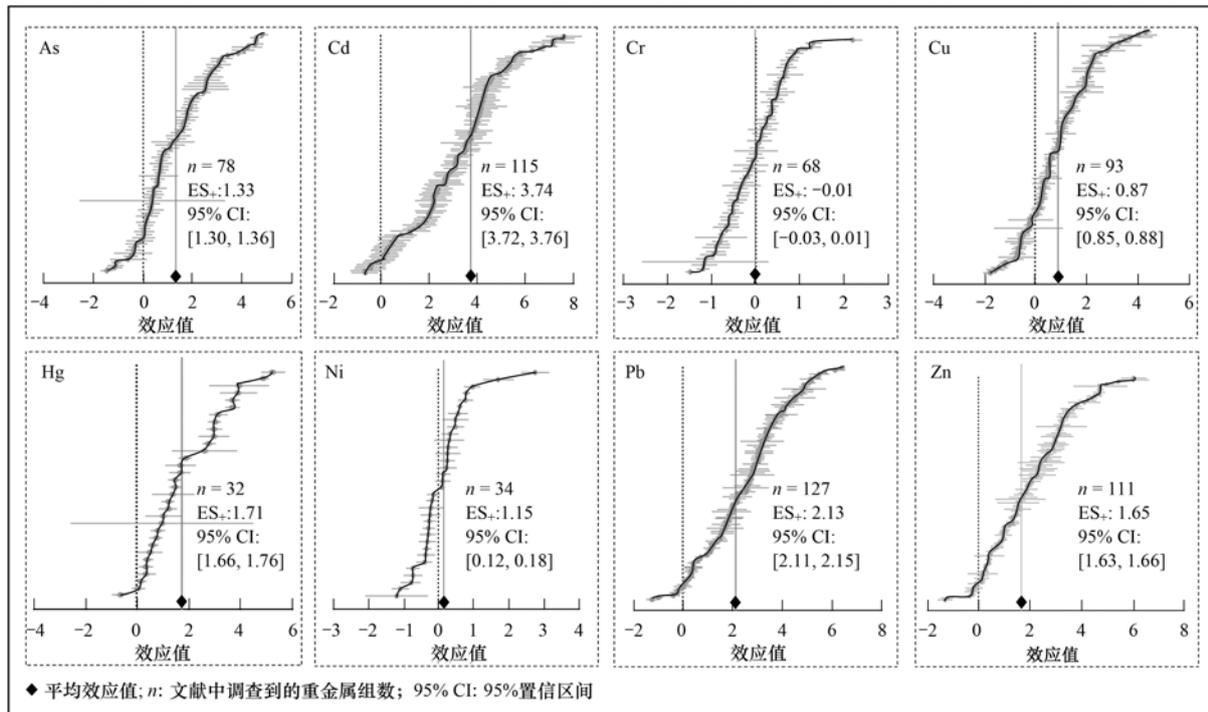


图 2 西南地区金属矿开采对各土壤重金属的效应值

Fig. 2 Effect sizes of metal mining on each type of heavy metal in soil of Southwest China

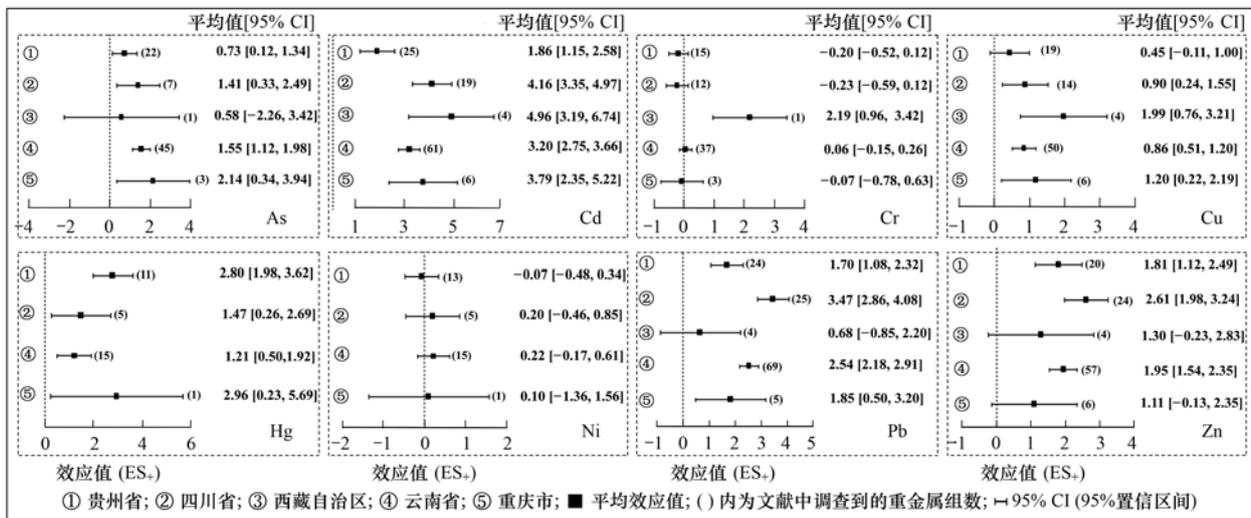


图 3 西南地区不同省份金属矿开采对各土壤重金属的效应值

Fig. 3 Effect sizes of metal mining on each type of heavy metal in soil of different provinces in Southwest China

背景值相比,其含量分别增加了 6 307.15%、3 113.67%、1 259.91% 和 334.92%。

2.3 不同土地利用类型下金属矿开采导致的土壤重金属增加量

图 4 展示了西南地区金属矿开采对不同土地利用类型下土壤重金属的效应值。本研究调查到的土地利用类型主要有废弃地土壤、采矿区土壤、耕地土壤和林地土壤。总体上,西南金属矿开采对不同土地利用类型下重金属的效应值由高到低顺序为:废弃地土壤 > 采矿区土壤 > 耕地土壤 > 林地土壤(图 4)。矿区废弃地土壤重金属的平均效应值为 3.49,

与土壤背景值相比,其含量增加了 3 178.60%。金属矿开采对耕地和林地的平均效应值分别为 1.42 (95% CI: 1.24 ~ 1.60) 和 0.50 (95% CI: -0.19 ~ 1.19)。这表明耕地较林地受金属矿开采影响大。金属矿开采显著增加了耕地土壤中重金属的含量 ($P < 0.05$),其中 Cd (2.56)、Hg (2.06) 和 Pb (1.98) 的效应值较高,与背景值相比,含量分别增加了 1 193.58%、684.6% 和 624.27%。

2.4 不同种类金属矿开采导致的土壤重金属增加量

本研究共收集了西南地区 53 个金属矿山的数

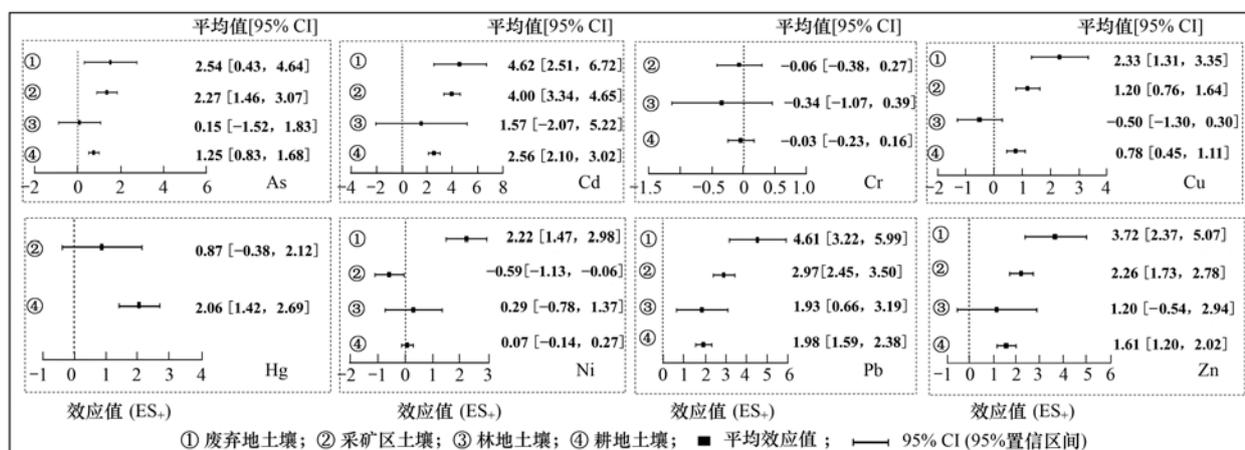


图4 西南地区金属矿开采对不同土地利用类型下各重金属的效应值

Fig. 4 Effect sizes of metal mining in Southwest China on each type of heavy metal in soil with different land-use types

据,其中汞矿4个,金矿4个,锰矿2个,镍钨多金属矿1个,铅锌矿21个,铊矿1个,铋矿3个,铁矿2个,铜矿9个,锡矿6个.图5为我国西南地区不同类型金属矿开采对土壤重金属的效应值.

铅锌矿开采显著增加了金属矿区土壤As、Cd、Hg、Pb和Zn的含量($P < 0.05$),其中Cd(4.08)、Pb(3.08)和Zn(2.73)的效应值较高,与西南地区土壤背景值相比,其重金属含量分别增加了5814.55%、2075.84%和1433.29%.锡矿开采显著增加了土壤Cd($ES_+ = 3.09$)、Pb($ES_+ = 2.74$)、As($ES_+ = 2.31$)、Cu($ES_+ = 2.02$)和Zn($ES_+ = 1.98$)的含量($P < 0.05$,图5),与背景值相比,其含量分别增加了2097.71%、1448.70%、907.44%、653.83%和624.27%.铜矿开采显著增加了土壤Cu($ES_+ = 1.30$)的含量($P < 0.05$,图5),与西南地区土壤背景值相比,其含量增加了

266.93%.汞矿开采显著增加了土壤Hg的含量,效应值为4.33,与土壤背景值相比,其含量增加了7494.43%.

2.5 发表性偏倚的检验

西南金属矿区土壤重金属的发表性偏倚检验结果如表1所示.Meta分析检验针对具有显著性影响的研究结果进行检验,因此本研究未检验土壤Cr.各土壤重金属的失安全系数远高于临界值(表1),表明研究结果受发表性偏倚的影响较小,研究结果较可信.漏斗图的Egger's回归分析结果显示土壤As、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn的显著性水平分别为:0.7588、0.3720、0.0847、0.9375、0.6196、0.0451和0.0147(表1).Pb和Zn的研究结果受轻微发表性偏倚的影响($P < 0.05$);其余重金属显著性水平均高于0.05,未受发表性偏倚影响.

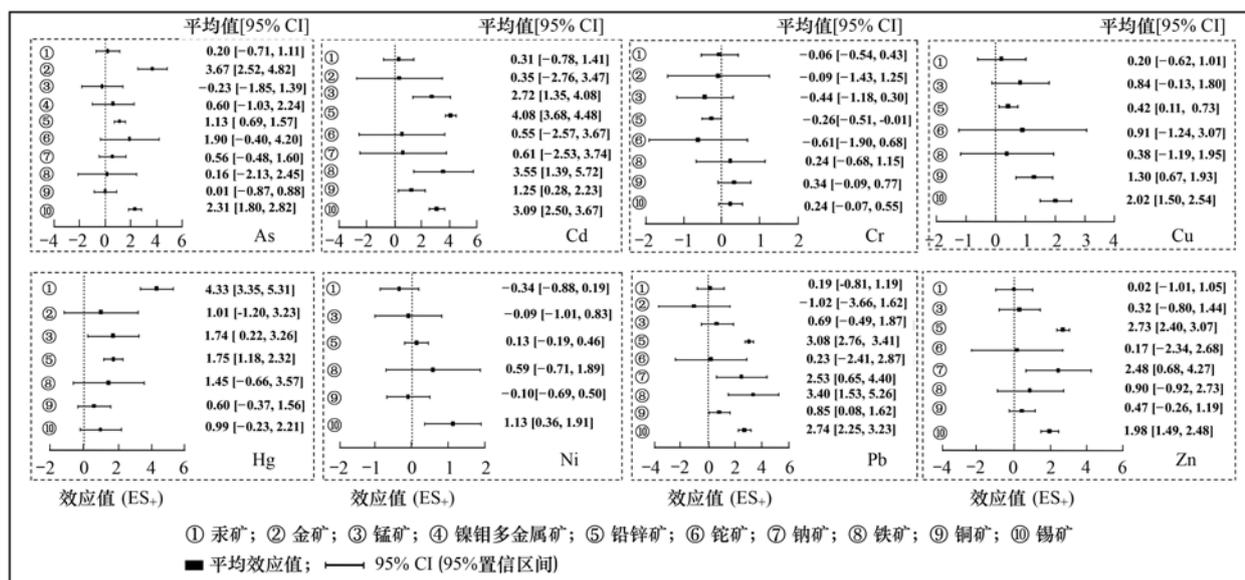


图5 西南地区不同类型金属矿开采对各土壤重金属的效应值

Fig. 5 Effect sizes of mining at different metal mines on each type of heavy metal in soil of Southwest China

表 1 西南金属矿区土壤重金属的发表性偏倚检验¹⁾

Table 1 Publication bias test for soil heavy metals at the representative metal mines in Southwest China

重金属	观测组数 (n)	临界值	失安全系数	Egger's 回归 分析(P)
As	78	400	163 798	0.758 8
Cd	116	590	1 935 822	0.372 0
Cr	68	350	—	—
Cu	93	475	169 381	0.084 7
Hg	32	170	47 810	0.937 5
Ni	34	180	366	0.619 6
Pb	127	645	2 893 233	0.045 1
Zn	112	580	1 566 454	0.014 7

1) 观测组数为文献中调查到的各重金属的组数

3 讨论

西南地区金属矿的开采整体上显著增加了土壤中重金属的含量($ES_{+} = 1.53$),其中 Cd、Pb 和 Hg 受其影响高于其它重金属,这在一定程度上与文献[29]中的调查结果一致.但对于不同子区域,重金属含量的增加程度存在明显差异.四川和云南金属矿的开采使得土壤中 Cd($PI_{四川} = 6\,307.15\%$ 、 $PI_{云南} = 2\,353.25\%$)和 Pb($PI_{四川} = 3\,113.67\%$ 、 $PI_{云南} = 1\,167.97\%$)的增加量较高;贵州和重庆金属矿的开采使得土壤中 Hg($PI_{贵州} = 1\,544.47\%$ 、 $PI_{重庆} = 1\,829.80\%$)增加量较高.主要原因为:①四川和云南的金属矿在开采过程中存在小规模开采、开发技术水平低的现象^[8,30],且本研究调查到铅锌矿的数据多数位于四川省和云南省,铅锌矿的开采显著增加了土壤中 Cd 和 Pb 的含量(图 5);②贵州和重庆的汞矿资源丰富,贵州汞矿储量占全国总储量 70% 以上,重庆汞矿储量 1.04 万 t,均属于全国特大型汞矿,其矿山开采历史悠久,具有多种开采方式,使 Hg 在土壤中不断累积^[31-33].值得注意的是尽管在省域尺度上所调查到的金属矿开采对土壤 Cr 整体上无显著增加,但局部区域(西藏)中却表现为 Cr 含量的显著增加. Zhong 等^[3]调查了华东地区 58 个金属矿的 420 个土壤样品,发现矿区周围荒地土壤中 Cr 的平均浓度为 $42.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于其标准值.这说明采矿活动对局部区域的 Cr 确有影响.另一方面,西藏生态环境脆弱,较容易受到金属矿开采影响,且西藏大面积发育着超基性岩,往往富含 Cr^[34-36].因此西藏区域土壤 Cr 效应值高.

调查的土地利用类型中,金属矿开采对土壤重金属的效应值由高到低顺序为:废弃地土壤 > 采矿区土壤 > 耕地土壤 > 林地土壤.废弃地受其影响最大,主要原因为长期残留在该区域的矿渣等废弃物仍会释放一定的重金属,从而使该区域表层土壤中重金属的含量不断增加.以往的研究中也有类似的

结论,如 Diami 等^[37]通过对某铁矿附近废弃地的土壤重金属进行风险评价发现,受矿区周围废弃物的影响,废弃地土壤中 Cu、Pb 和 Co 的含量均超过了当地背景值,并产生了较高的生态风险;唐文杰等^[38]调查了广西全州、板苏和下雷这 3 个锰矿矿区废弃地的土壤环境,发现 3 个矿区土壤中的 Cd、Mn 的含量非常高,其含量分别是广西土壤背景值的 22 ~ 246 倍和 39 ~ 1 009 倍,存在不同程度的重金属积累.据统计,我国矿区废弃地面积达到 40 000 hm^2 ,并以每年 300 hm^2 的速度增长,尤以金属矿区废弃地最为严重^[38].耕地土壤受金属矿开采影响较林地土壤高.主要原因为:①我国西南地区多山,采矿活动不可避免会产生一些污染物,而耕地往往位于河谷周边,更容易受到河流携带矿区泥沙的灌溉影响^[39-41];②林地往往位于地势较高的区域,较少受到矿区河流灌溉的影响.

不同种类金属矿开采对矿区土壤重金属的影响具有明显差异.铅锌矿往往伴生元素 Cd,其矿山在开采过程中除释放大量的 Pb 和 Zn 外,可能还会向环境中释放大量的 Cd^[42],因而本研究调查到的铅锌矿开采中土壤 Cd、Pb 和 Zn 的增加量较高(图 5);锡矿的开采往往还会释放较多的 Cd、As、Zn 和 Pb^[43,44],因而本研究调查到的锡矿开采显著增加了土壤中 As、Cd、Pb 和 Zn 的含量(图 5);铜矿开采往往还会释放较多的 Cd 和 Pb^[45],因而本研究调查到的铜矿开采中 Cu、Cd 和 Pb 的增加量较高(图 5).这些均与前人的研究结果相一致.此外多种类型的金属矿(如铅锌矿、铁矿、锡矿和铜矿)开采均显著增加了土壤中的 Cd 含量(图 5).其主要原因为 Cd 具有高度分散性,不易形成独立的 Cd 矿床,绝大多数共生或伴生于铅矿、锌矿、锡矿、银矿、钼矿和铜矿等金属矿中,单独存在较少^[46].

4 结论

(1) 西南地区金属矿开采显著增加了土壤重金属的含量($ES_{+} = 1.53$),对单个土壤重金属的平均效应值由高到低顺序为: Cd(3.74) > Pb(2.13) > Hg(1.71) > Zn(1.65) > As(1.33) > Cu(0.87) > Ni(0.15),与背景值相比,其含量分别增加了 4 109.80%、741.49%、452.90%、420.70%、278.10%、138.69% 和 16.18%.

(2) 云南和四川金属矿山开采对土壤 Cd($ES_{+四川} = 4.16$; $ES_{+云南} = 3.20$)和 Pb($ES_{+四川} = 3.47$; $ES_{+云南} = 2.54$)的影响较高;贵州金属矿山开采对土壤 Hg($ES_{+} = 2.80$)影响最高.

(3) 金属矿开采显著增加了耕地土壤中重金属

的含量,增加量为 313.71%。

(4) 铅锌矿和锡矿开采显著增加了土壤 Cd ($ES_{+铅锌矿} = 4.08$; $ES_{+锡矿} = 3.09$)、Pb ($ES_{+铅锌矿} = 3.08$; $ES_{+锡矿} = 2.74$) 和 Zn ($ES_{+铅锌矿} = 2.73$; $ES_{+锡矿} = 1.98$) 的含量; 铜矿开采显著增加了土壤 Cu ($ES_{+} = 1.30$)、Cd ($ES_{+} = 1.25$) 和 Pb ($ES_{+} = 0.85$) 的含量。

(5) 土壤 Pb 和 Zn 受轻微发表性偏倚的影响 ($P < 0.05$)。

(6) 相对于以往单个和少数几个矿区土壤重金属的研究,本研究可为西南金属矿区土壤污染防治及环境质量保护提供更多有效的决策支持。

参考文献:

- [1] Zhang X W, Yang L S, Li Y H, *et al.* Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(4): 2261-2273.
- [2] Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Risk assessment and source identification of toxic metals in the agricultural soil around a Pb/Zn mining and smelting area in Southwest China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(9), doi: 10.3390/ijerph15091838.
- [3] Zhong X, Chen Z W, Li Y Y, *et al.* Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123289.
- [4] Hong C O, Lee D K, Chung D Y. *et al.* Liming effects on cadmium stabilization in upland soil affected by gold mining activity [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **52**(4): 496-502.
- [5] Sun L, Liao X Y, Yan X L. *et al.* Evaluation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons accumulation in plants from typical industrial sites: potential candidate in phytoremediation for co-contamination [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(21): 12494-12504.
- [6] Shamsaddin H, Jafari A, Jalali V. *et al.* Spatial distribution of copper and other elements in the soils around the Sarcheshmeh copper smelter in southeastern Iran [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11**(10): 1681-1691.
- [7] 耿融, 吕品翰. 云南省矿产资源勘查开发与保护布局研究 [J]. *价值工程*, 2019, **38**(18): 280-281.
Geng R, Lv P H. Research on exploration, development and protection layout of mineral resources in Yunnan Province [J]. *Value Engineering*, 2019, **38**(18): 280-281.
- [8] 王艳. 浅谈西南地区矿产资源开发的环境地质问题 [J]. *世界有色金属*, 2020, (10): 105-106.
Wang Y. On the environmental geological problems of mineral resources development in Southwest China [J]. *World Nonferrous Metals*, 2020, (10): 105-106.
- [9] 杨善谋. 铜陵金属矿集区土壤中 Cu、Cd 元素污染评价及其缓变型地球化学灾害研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
Yang S M. Pollution assessment and delayed geochemical hazard research of heavy metal Cu and Cd in Tongling mining soil [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [10] Lu S J, Teng Y G, Wang Y Y, *et al.* Research on the ecological risk of heavy metals in the soil around a Pb-Zn mine in the Huize County, China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2015, **34**(4): 540-549.
- [11] Shao M M, Zhu Y, Hao R, *et al.* The health hazards of potentially toxic metals in the daily diets of adults and children from a mining and smelting region (Hezhang County) in Southwestern China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**(7): 432.
- [12] 周妍姿, 王钧, 曾辉, 等. 内蒙古土壤重金属的空间异质性及其污染特征 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(8): 1381-1387.
Zhou Y Z, Wang J, Zeng H, *et al.* Spatial characteristics of soil heavy metal pollution in Inner Mongolia, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(8): 1381-1387.
- [13] 李春华, 王玥琳, 陈文德. 云南中甸县 Cu 矿区土壤重金属污染评价 [J]. *环境保护科学*, 2016, **42**(2): 97-102.
Li C H, Wang Y L, Chen W D. Characterization evaluation of heavy metal pollution in the soils of Cu mining areas of Zhongdian County in Yunnan Province [J]. *Environmental Protection Science*, 2016, **42**(2): 97-102.
- [14] Zeng S Y, Ma J, Yang Y J, *et al.* Spatial assessment of farmland soil pollution and its potential human health risks in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **687**: 642-653.
- [15] Li X Y, Zhang J R, Gong Y W, *et al.* Status of mercury accumulation in agricultural soils across China (1976-2016) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **197**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110564.
- [16] 时鹏, 汪亚峰, 陈利顶. 廊道式工程建设对土壤生态环境影响的 meta 分析 [J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(8): 2029-2037.
Shi P, Wang Y F, Chen L D. Impacts of linear project construction on soil eco-environment: a meta analysis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8): 2029-2037.
- [17] 仕相林, 孙亚男, 王家麟, 等. 大豆叶片性状 QTL 的定位及 meta 分析 [J]. *作物学报*, 2012, **38**(2): 256-263.
Shi X L, Sun Y N, Wang J L, *et al.* Mapping and meta-analysis of QTLs for leaf traits in soybean [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, **38**(2): 256-263.
- [18] Du Y D, Cui B J, Zhang Q, *et al.* Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis [J]. *CATENA*, 2020, **193**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104617.
- [19] Gattinger A, Muller A, Haeni M, *et al.* Enhanced top soil carbon stocks under organic farming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(44): 18226-18231.
- [20] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, *et al.* Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: a meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **204**: 40-50.
- [21] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, **80**(4): 1150-1156.
- [23] Liu C, Lu M, Cui J, *et al.* Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(5): 1366-1381.
- [24] Sterne J A C, Gavaghan D, Egger M. Publication and related bias in meta-analysis: power of statistical tests and prevalence in the literature [J]. *Journal of Clinical Epidemiology*, 2000, **53**(11): 1119-1129.
- [25] Egger M, Smith G D, Schneider M, *et al.* Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test [J]. *BMJ*, 1997, **315**(7109): 629-634.

- [26] Erisman B E, Bolser D G, Ilich A, *et al.* A meta-analytical review of the effects of environmental and ecological drivers on the abundance of red snapper (*Lutjanus campechanus*) in the U. S. Gulf of Mexico [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2020, **30**(3): 437-462.
- [27] Rosenberg M S. The file-drawer problem revisited: a general weighted method for calculating fail-safe numbers in meta-analysis [J]. *Evolution*, 2005, **59**(2): 464-468.
- [28] Viechtbauer W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package [J]. *Journal of Statistical Software*, 2010, **36**(3): 1-48.
- [29] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部, 2014.
- [30] 胡朝华. 探索云南地质发挥云南矿产资源优势[J]. *中国金属通报*, 2019, (1): 68-69.
- [31] 仇广乐, 冯新斌, 王少锋, 等. 贵州汞矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 550-555.
- Qiu G L, Feng X B, Wang S F, *et al.* Total mercury and methylmercury in soils collected from Guizhou Hg-mined areas [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(3): 550-555.
- [32] 朱永红, 徐石辉, 王祁仑, 等. 贵州务川汞矿带木油厂矿田地质特征及成矿模式[J]. *地质与勘探*, 2012, **48**(1): 38-48.
- Zhu Y H, Xu S H, Wang Q L, *et al.* Geological characteristics and metallogenic model of the muyouchang orefield in the Wuchuan mercury mineralization belt, Guizhou Province [J]. *Geology and Exploration*, 2012, **48**(1): 38-48.
- [33] 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.
- [34] Sheng J J, Wang X P, Gong P, *et al.* Heavy metals of the Tibetan top soils: level, source, spatial distribution, temporal variation and risk assessment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(8): 3362-3370.
- [35] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, **28**: 211-280.
- [36] 王伟鹏, 卢宏玮, 冯三三. 西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, **37**(6): 970-980.
- Wang W P, Lu H W, Feng S S. Ecological risk assessment of soil heavy metals in the middle of the "one river and two tributaries" basin in Tibet [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(6): 970-980.
- [37] Diami S M, Kusin F M, Madzin Z. Potential ecological and human health risks of heavy metals in surface soils associated with iron ore mining in Pahang, Malaysia [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(20): 21086-21097.
- [38] 唐文杰, 李明顺. 广西锰矿区废弃地优势植物重金属含量及富集特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(5): 1757-1763.
- Tang W J, Li M S. Heavy metal concentrations of dominant plants and bioaccumulation in three manganese mine wastelands, Guangxi [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(5): 1757-1763.
- [39] 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.
- [40] 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in Southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [41] Larson C. China gets serious about its pollutant-laden soil [J]. *Science*, 2014, **343**(6178): 1415-1416.
- [42] 周启星, 任丽萍, 孙铁瑁, 等. 某铅锌矿开采区土壤镉的污染及有关界面过程[J]. *土壤通报*, 2002, **33**(4): 300-302.
- Zhou Q X, Ren L P, Sun T H, *et al.* Contaminative and interfacial processes of soil cadmium in a lead-zinc mining area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, **33**(4): 300-302.
- [43] 谢华, 刘晓海, 陈同斌, 等. 大型古老锡矿影响区土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3503-3507.
- Xie H, Liu X H, Chen T B, *et al.* Concentration and health risk of heavy metals in vegetables and soils in region affected by an ancient tin ore [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3503-3507.
- [44] 张德刚, 袁寒, 刘艳红. 云南锡矿尾矿库土壤肥力特征与重金属污染分析[J]. *西南农业学报*, 2017, **30**(5): 1158-1161.
- Zhang D J, Yuan H, Liu Y H. Analysis of soil heavy metal pollution and fertility properties in tin tailings storehouse of Yunnan Province [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **30**(5): 1158-1161.
- [45] 周东美, 王玉军, 郝秀珍, 等. 铜矿区重金属污染分异规律初步研究[J]. *农业环境保护*, 2002, **21**(3): 225-227.
- Zhou D M, Wang Y J, Hao X Z, *et al.* Primary study of distribution of heavy metals in copper mines [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, **21**(3): 225-227.
- [46] 袁珊珊, 肖细元, 郭朝晖. 中国铜矿的区域分布及土壤镉污染风险分析[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(6): 51-56, 100.
- Yuan S S, Xiao X Y, Guo C H. Regional distribution of cadmium minerals and risk assessment for potential cadmium pollution of soil in China [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, **34**(6): 51-56, 100.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)