

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

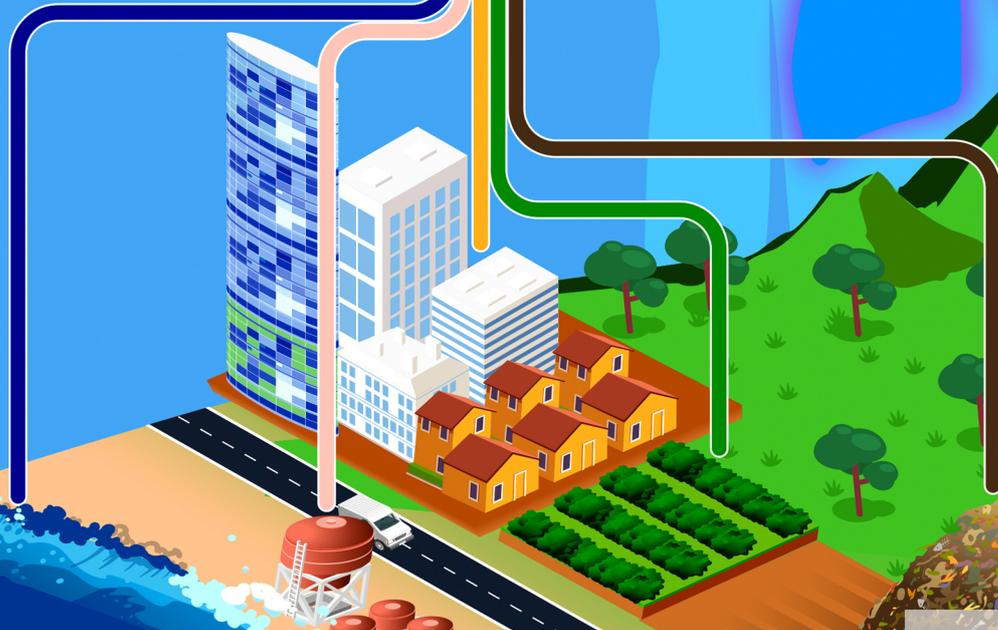
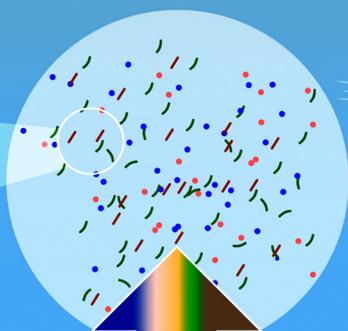
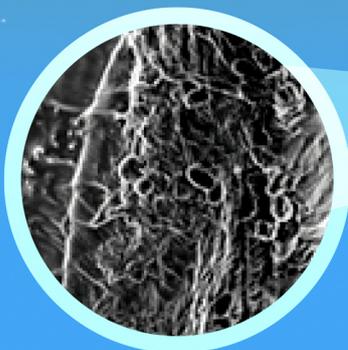
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2022年4月

第43卷 第4期

Vol.43 No.4



目次

2015~2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM_{2.5}中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM_{2.5}中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O₃生成潜势的杭州市PM_{2.5}和O₃协同控制 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 高宗源, 徐祀, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO₃⁻-N时空变化及驱动因素 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评估 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co₃O₄活化过硫酸盐降解罗丹明B 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe²⁺促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气的传质特性 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评估 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N₂O排放的影响 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

氮肥运筹对稻田CH₄和N₂O排放的影响 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价

朱迪¹, 张朝晖^{1*}, 王智慧²

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 为了解贵州省都匀市毛尖镇高寨水库附近土壤重金属污染现状和农田泥炭藓对重金属的富集能力和重金属的污染来源, 选取了该区域附近的农田泥炭藓为研究对象, 测定了泥炭藓及表层土壤中重金属含量; 采用空间分析和多元统计分析方法对重金属进行污染评价及来源分析. 结果表明, 表层土壤和农田泥炭藓中的重金属含量排序分别为: $V > Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Cd > Hg$ 和 $Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > V > As > Cd > Hg$. 研究区域内的泥炭藓优势种为卵叶泥炭藓 (*Sphagnum ovatum* Hamp. C. Muell) 和泥炭藓原亚种 (*Sphagnum palustre* L. ssp. *palustre*), 二者对土壤 Cd、Ni、Cu 和 Zn 均具有较强的富集能力, 但卵叶泥炭藓 (*S. ovatum*) 对土壤重金属的富集能力总体高于后者. 单项污染指数 (C_f) 和地累积指数 (I_{geo}) 均表明土壤 Cd 和 Hg 的含量水平最高, 综合污染指数 RI 的平均值为 87.75, 处于轻微生态风险. 土壤和泥炭藓的重金属来源包括交通运输、生活污水、农业活动和自然成土过程等.

关键词: 泥炭藓; 农田土壤; 重金属; 富集程度; 生态风险

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2115-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202108038

Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-*Sphagnum* System and Ecological Risk Assessment

ZHU Di¹, ZHANG Zhao-hui^{1*}, WANG Zhi-hui²

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to study the current status of heavy metal pollution, the accumulation capacity of farmland *Sphagnum* for heavy metals and the source of heavy metal pollution in the soil near Gaozhai Reservoir in Maojian Tea Town, Duyun City, Guizhou Province were assessed. *Sphagnum* and topsoil near this area were selected as the research object to measure the content of heavy metals. Spatial analysis and multivariate statistical analysis methods were used to conduct pollution evaluation and source analysis of heavy metals. The results showed that the heavy metal content in topsoil and farmland *Sphagnum* were $V > Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Cd > Hg$ and $Zn > Cr > Ni > Cu > Pb > V > As > Cd > Hg$, respectively. The dominant species of *Sphagnum* in the study area were *Sphagnum palustre* L. ssp. *palustre* and *Sphagnum ovatum* Hamp. C. Muell, both of which had a strong ability to accumulate soil Cd, Ni, Cu, and Zn; however, the *S. ovatum* enrichment capacity of soil heavy metals was generally higher than that of the latter. Both the single pollution index (C_f) and the geo-accumulation index (I_{geo}) indicated that the Cd and Hg content in soil were at the highest levels, and the average comprehensive pollution index RI was 87.75, which indicates a slight ecological risk. The sources of heavy metals in soil and *Sphagnum* included transportation, domestic sewage, agricultural activities, and natural soil-forming processes.

Key words: *Sphagnum*; farmland soil; heavy metals; enrichment degree; ecological risk

土壤重金属作为容易引发生态风险的污染物, 通常难以被生物降解, 易累积, 所造成的农田重金属污染与人类健康关系密切. 有研究表明, 镉 (Cd)、汞 (Hg)、镍 (Ni)、铜 (Cu) 和铅 (Pb) 是影响农用地质量的主要重金属污染物, 而贵州省农田污染较为严重的重金属是 Cd、Hg、Zn 和 As 等^[1,2]. 这些重金属通常来源于自然因素和人为因素, 在此基础上进一步分析可以减轻和利于控制土壤重金属污染^[3].

泥炭藓属 (*Sphagnum*) 是一类广泛分布的苔藓植物, 主要用作花卉的培养基质. 经过酸化处理的泥炭藓, 置于工业废水中能有效地吸收汞、锌、铅和铬等多种有害的金属离子^[4,5]. 中国泥炭藓种植业正在兴起, 泥炭藓种植基地主要集中在贵州省, 国外则大量集中在加拿大和德国^[6]. 目前, 国内农田重金属的研究主要基于水稻、玉米和马铃薯等与土壤

之间的重金属含量关系, 对另一种农作物泥炭藓 (*Sphagnum*) 与土壤重金属关系的研究较少^[7]. 泥炭藓对重金属有较强的吸附净化能力, 利用泥炭藓对重金属的吸附作用, 从而对环境污染起到一定的防控作用^[8]. 国内外对泥炭藓的研究主要集中在其对重金属污染的监测和空气中悬浮颗粒物 (SPM) 的吸附能力等方面, Sirohi 等^[9] 的研究发现泥炭藓可有效降低环境中悬浮颗粒物的浓度. 胡鸿兴等^[10] 的研究发现泥炭藓对重金属具有较好的吸附能力, 其泥炭层在净化过程中起着重要的作用. 文献^[11] 的研究发现泥炭藓可以有效地监测区域道路交通和车辆

收稿日期: 2021-08-05; 修订日期: 2021-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31960044); 贵州省科技厅基金项目 (黔科合平台人才 [2019] 号)

作者简介: 朱迪 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤重金属污染, E-mail: 2269305177@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhaozhang9@hotmail.com

重金属污染,尤其是对重金属 Al、Ba、Co、Cr、Cu、Fe、Ni 和 Pb 的监测效果更为显著.国内对泥炭藓的研究主要集中在种植技术方面,关于农田泥炭藓对重金属的富集能力和对环境的修复意义研究较少^[12~14].

本文以贵州省都匀市毛尖镇高寨水库附近农田泥炭藓地为研究对象,采用富集因子法、单项污染指数法、地累积指数法和生态风险指数法,对研究区农田土壤中重金属污染状况进行量化分析^[15~17];在此基础上,利用相关性分析和主成分分析对重金属污染来源进行探讨,以为当地泥炭藓农业发展和农田的合理开发与治理提供理论基础与依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于贵州省都匀市毛尖镇(图1),地理坐标为 $26^{\circ}14'49'' \sim 26^{\circ}15'20''N$, $107^{\circ}21'14'' \sim 107^{\circ}21'40''E$,区域气候为中亚热带湿润气候,年平均气温 $13.2^{\circ}C$,年平均降雨量为 1429 mm ,降雨主要集中在 $7 \sim 9$ 月.最低温为 $-9^{\circ}C$,最高温为 $32^{\circ}C$,境内多大山和峡谷,平均海拔 1460 m ,特征是温凉和湿润,多秋风,四季分明,湿度较大,日照偏少.主要生产泥炭藓(*Sphagnum*),俗称海花草和水苔等.研究区域种植的农田泥炭藓为:泥炭藓原亚种(*Sphagnum palustre* L. ssp. *palustre*)和卵叶泥炭藓(*Sphagnum ovatum* Hamp. C. Muell).

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

2020年11月对高寨水库周围泥炭藓样地观测和样品采集,选择在晴朗和近期无降水日期进行土壤和泥炭藓样品采集,采用多点混合采样方法,按照污染源(公路附近、居民住宅区附近)一共选取了5块样地S1、S2、S3、S4和S5(图1),5块样地农作物均为泥炭藓.每个样方按照 1 m^2 “梅花形”在四周和中间布设5个样点,用木铲采集($0 \sim 20\text{ cm}$)表层土壤子样以及泥炭藓样品,将5个样点采集的土壤充分混合,初步去除明显的杂物,采用四分法取 500 g 土壤作为一个样品,装入样品袋中依次进行编号.共采集表土壤样品25份,泥炭藓样品25份.

1.2.2 样品鉴定

泥炭藓样品使用 HWG01 型双筒解剖镜以及 XSZ0107TS 型光学显微镜,根据文献^[18~20]进行标本鉴定.经过鉴定,本文选取研究区域的优势种泥炭藓原亚种和卵叶泥炭藓为实验对象.

1.2.3 化学分析

土壤样品经室内自然风干,剔除杂物(植物根

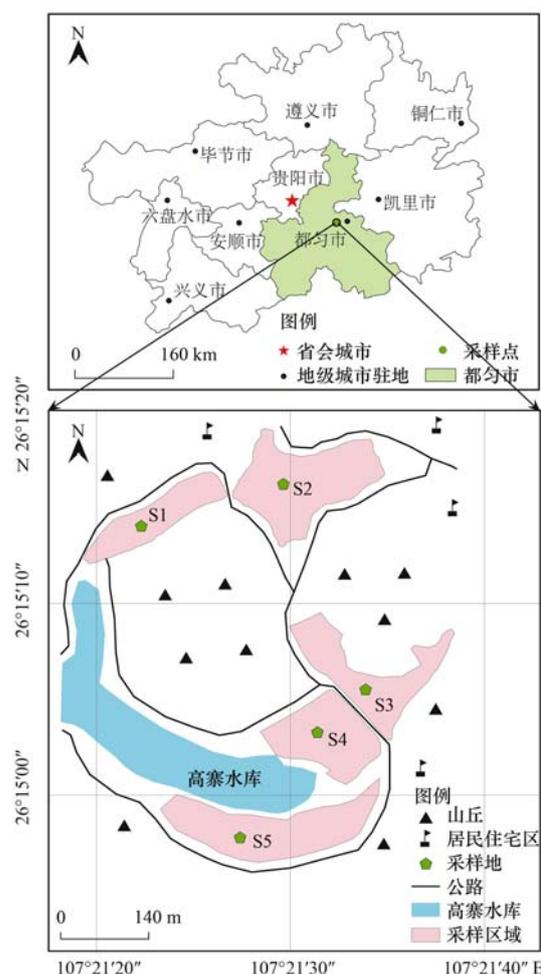


图1 研究区域地理位置和采样点分布示意

Fig. 1 Location map of the study area and sampling sites

系和石块)后,采用研钵研磨后过100目尼龙筛备用.采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 三酸消解法进行前处理并进行适当稀释.使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,型号 NexION 300X,美国)测试样品中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Cd 和 Hg 含量.测试过程中加入空白,采用平行样品,重复3次测定,相对标准偏差控制在5%以下,并采用国家一级土壤标准物质 GSS026(GBW07455)进行质量控制,检出限为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,达到《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)检出要求,各重金属的回收率均大于85%.泥炭藓样品带回实验室先用自来水冲洗去除其表面污物,然后用去离子水冲洗3次,沥去水分后在室温下自然晾干,然后在 $70^{\circ}C$ 恒温箱内烘24 h,最后将烘干的样品研磨至过100目尼龙筛.每个样品精确称取 0.5 g ,采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 消解后,用 ICP-MS(Agilent VISTA,美国)测定样品中 V、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb、Cd 和 Hg 的含量.

1.3 统计方法与评价方法

为了全面了解研究区土壤重金属污染状况,采

用生物富集系数(BCF)、重金属污染指数 C_r 、潜在污染指数 C_p 和地累积指数 I_{geo} 进行综合量化分析^[21~24]。

富集系数(BCF)表征泥炭藓对重金属的富集能力,其计算公式为:

$$BCF = C_i / C_n \quad (1)$$

式中, C_i 为泥炭藓植物体内重金属含量; C_n 为土壤重金属含量。

地累积指数法(geoaccumulation index, I_{geo})是德国研究者 Muller^[25] 于 1979 年首次提出,用于研究河流沉积物的重金属污染程度。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log(C_n / 1.5B_n) \quad (2)$$

式中, C_n 为重金属元素 n 在土壤或沉积物中实测含量; B_n 为该元素农田土壤筛选值;考虑到成岩作用等可能引起背景值波动的因素,筛选值乘以修正系数 1.5 得到最小污染级别的界限值。其评价标准为: $I_{geo} \leq 0$: 无污染; $0 < I_{geo} \leq 1$: 轻微污染; $1 < I_{geo} \leq 2$: 轻度污染; $2 < I_{geo} \leq 3$: 中度污染; $3 < I_{geo} \leq 4$: 偏重污染; $4 < I_{geo} \leq 5$: 重度污染; $I_{geo} > 5$: 严重污染。

采用单项污染指数(C_r)和生态风险指数(RI)评价某流域土壤-水稻重金属污染水平。以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)为参比值,采用潜在生态风险指数(RI)对某流域土壤-水稻重金属污染的潜在生态风险进行评估。其计算公式为:

$$C_r = C_i / B_n \quad (3)$$

式中, C_i 为元素 i 的实测浓度, B_n 为元素 i 的参考值,本研究以农田土壤筛选值为参考值。其评价标准为: $C_r < 1$: 轻微污染; $1 \leq C_r < 3$: 中等污染; $3 \leq C_r < 6$: 强污染; $C_r \geq 6$: 极强污染。

潜在污染指数 C_p ^[26] 主要研究某一重金属的最大质量分数,可以反映出研究区土壤环境中最具污染潜力的重金属,其计算公式如下:

$$C_p = \frac{C_{mm}}{B_n} \quad (4)$$

式中, C_{mm} 为重金属元素 n 的最大实测质量分数, m 为最大值简写; B_n 为重金属元素 n 的参考值,本研究以农田土壤筛选值为参考值。其评价标准为: $C_p < 1$: 轻微污染; $1 \leq C_p \leq 3$: 轻度-中度污染; $C_p > 3$: 重度污染。

生态风险指数(RI):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_r^i), \quad C_r^i = C_i / C_o^i \quad (5)$$

式中, RI 为土壤中重金属所有风险值总和; E_r^i 为单项生态风险值; T_r^i 为重金属的毒性响应系数, V、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的毒性系数分别

为 2、2、5、5、1、10、30、40 和 5; C_o^i 为单一重金属的污染系数^[27,28]; C_o^i 为该元素的参比值, $mg \cdot kg^{-1}$; n 为样品数,其重金属评价标准见表 1。

表 1 重金属潜在生态风险指标和评价等级^[29]

单项生态风险指数	单个污染物生态风险程度	潜在生态风险指数 RI	总潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$600 \leq RI < 1200$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强	$RI \geq 1200$	极强

1.4 数据处理

采用 Excel 进行数据统计, SPSS 26.0 软件进行方差分析、 t 检验、多元统计分析、回归分析和相关性分析等,利用 ArcGIS 软件完成研究区域统计分析,利用 Origin 2021 和 R 语言绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量情况

对都匀市毛尖镇坪阳村五块样地农田表层土壤中 9 种重金属含量进行统计分析(表 2), 9 种重金属含量大小为: V ($86.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Zn ($82.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cr ($69.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Pb ($37.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cu ($17.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Ni ($16.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > As ($11.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cd ($0.446 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Hg ($0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。研究区域 9 种重金属与《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》中的风险筛选值相比^[30,31], 土壤中的重金属 Cd 和 Hg 在 5 块样地均高于风险筛选值,其余重金属均未超标。与贵州省土壤背景值相比, Hg 在 5 块样地均超标。变异系数表明(CV): 研究区农田重金属变异系数由大到小为: Hg > As > Pb > Cu > Cr > V > Ni > Cd > Zn。其中, Hg 和 As 为高等变异 ($CV > 36\%$), 而 Pb、Cu、Cr、V、Ni、Cd、Zn、Hg 和 As 为中等变异 ($15\% < CV < 36\%$)。综上所述,引起该研究区域的土壤重金属污染的元素主要为 Cd 和 Hg^[32]。

2.2 泥炭藓植物中重金属含量与富集特征

对两种经济作物泥炭藓原亚种、卵叶泥炭藓进行重金属含量分析(表 3), 结果表明: 两种农田泥炭藓中的重金属含量存在差异, 泥炭藓原亚种重金属含量大小为: Zn ($72.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cr ($34.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Ni ($13.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cu ($10.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Pb ($9.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > V ($2.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > As ($1.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > Cd ($0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) >

表 2 农田土壤重金属元素含量统计结果

Table 2 Statistical results of heavy metal content in farmland soil

项目	土壤重金属 $\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$								
	V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
最小值 (min)	62.73	55.43	11.06	12.40	65.75	7.28	0.32	0.12	25.56
最大值 (max)	108.83	92.68	20.79	23.31	95.97	19.70	0.55	0.64	50.29
中位数 (median)	90.47	58.23	17.84	18.79	91.09	10.55	0.45	0.48	39.60
平均值 (mean)	86.13	69.30	16.72	17.44	82.73	11.68	0.45	0.41	37.16
标准偏差 (SD)	19.89	17.29	3.74	4.74	13.94	4.71	0.08	0.17	9.98
变异系数(CV)/%	23.10	24.94	22.36	27.18	16.85	40.31	18.99	42.03	26.85
土壤筛选值	138.8	250	60	150	200	30	0.3	0.5	80
贵州省 A 层土壤背景值	138.8	95.9	39.1	32	99.5	20	0.659	0.11	35.2

Hg($0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 卵叶泥炭藓重金属含量大小为: Zn ($80.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cr ($36.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Ni ($27.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Pb ($19.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cu ($18.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > V ($5.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > As ($2.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Cd ($0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Hg ($0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

两种农田泥炭藓对重金属的富集能力存在差

异,从图 2 可以看出,泥炭藓原亚种和卵叶泥炭藓对重金属均有富集能力,其中卵叶泥炭藓对重金属的富集能力均超过泥炭藓原亚种. 泥炭藓原亚种对 9 种重金属的富集能力为: Cd > Ni > Zn > Cu > Cr > Pb > As > V > Hg, 卵叶泥炭藓对 9 种重金属的富集能力为: Ni > Cd > Cu > Zn > Pb > Cr > As > Hg > V.

表 3 泥炭藓重金属元素含量统计结果

Table 3 Statistical results of heavy metal content in *Sphagnum*

项目	泥炭藓种类 ¹⁾	泥炭藓重金属/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					变异系数(CV)/%
		最小值 (min)	最大值 (max)	中位数 (median)	平均值 (mean)	标准偏差 (SD)	
V	S. P	0.60	6.83	2.58	2.95	2.32	0.79
	S. O	2.14	7.18	5.34	5.18	1.90	0.37
Cr	S. P	24.95	49.64	27.52	34.69	11.91	0.34
	S. O	13.07	77.55	21.15	36.24	27.36	0.76
Ni	S. P	6.65	19.27	16.09	13.80	5.91	0.43
	S. O	6.45	99.72	7.43	27.86	29.25	1.05
Cu	S. P	5.79	21.21	7.15	10.18	6.36	0.62
	S. O	8.61	52.69	11.45	18.87	18.95	1.00
Zn	S. P	51.41	100.05	72.59	72.64	19.04	0.26
	S. O	50.41	146.29	66.44	80.79	39.82	0.49
As	S. P	1.49	2.84	1.71	1.92	0.54	0.28
	S. O	1.58	4.60	2.34	2.62	1.17	0.45
Cd	S. P	0.46	0.67	0.57	0.56	0.08	0.15
	S. O	0.29	1.87	0.29	0.64	0.69	1.08
Hg	S. P	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	1.91
	S. O	0.00	0.12	0.00	0.04	0.05	1.39
Pb	S. P	8.05	15.27	8.66	9.91	3.01	0.30
	S. O	7.50	36.66	11.83	19.87	13.87	0.70

1) S. P 表示泥炭藓原亚种; S. O 表示卵叶泥炭藓

2.3 泥炭藓-土壤系统中重金属来源分析

2.3.1 泥炭藓-土壤体系中重金属相关性分析结果

为了探究研究区域重金属的来源情况,对土壤和泥炭藓进行了 Pearson 相关性分析,结果表明土壤重金属 Ni、Zn、As、Cu 和 Pb 之间均呈现显著的正相关[图 3(a)],说明这 5 个重金属元素具有相似的来源. Hg-Pb 和 Hg-Zn 呈现负相关, V 与其他重金属均呈现负相关. 土壤重金属 Cd 和 As 元素呈负相关, Cr 与除 V 外的其他金属都不相关. 泥炭藓重金属 As 与 Zn 和 Cd 之间呈现出显著的正

相关性[图 3(b)],这与土壤重金属相关性基本一致,同时 Cu 与 Ni 和 Cr 也呈现显著的正相关性,而土壤中重金属 Cr 与 Ni 和 Cu 均呈现负相关. Hg 与其他重金属均不呈正相关,结合前文对重金属变异系数的计算, Hg 变异系数最高,因此 Hg 的污染源较为复杂.

2.3.2 泥炭藓-土壤体系中重金属主成分分析结果

为进一步探究重金属 Cd 和 Hg 的污染源,对土壤和泥炭藓中的重金属分别进行了主成分分析(图 4),图 4(a)中,两个主成分特征值均大于 1,累积方

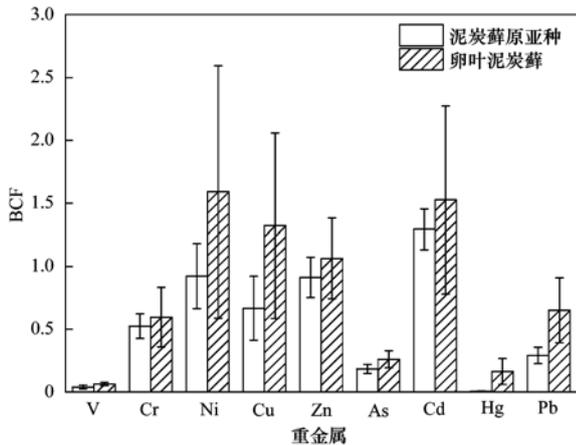


图 2 农田泥炭藓生物富集系数 (BCF)

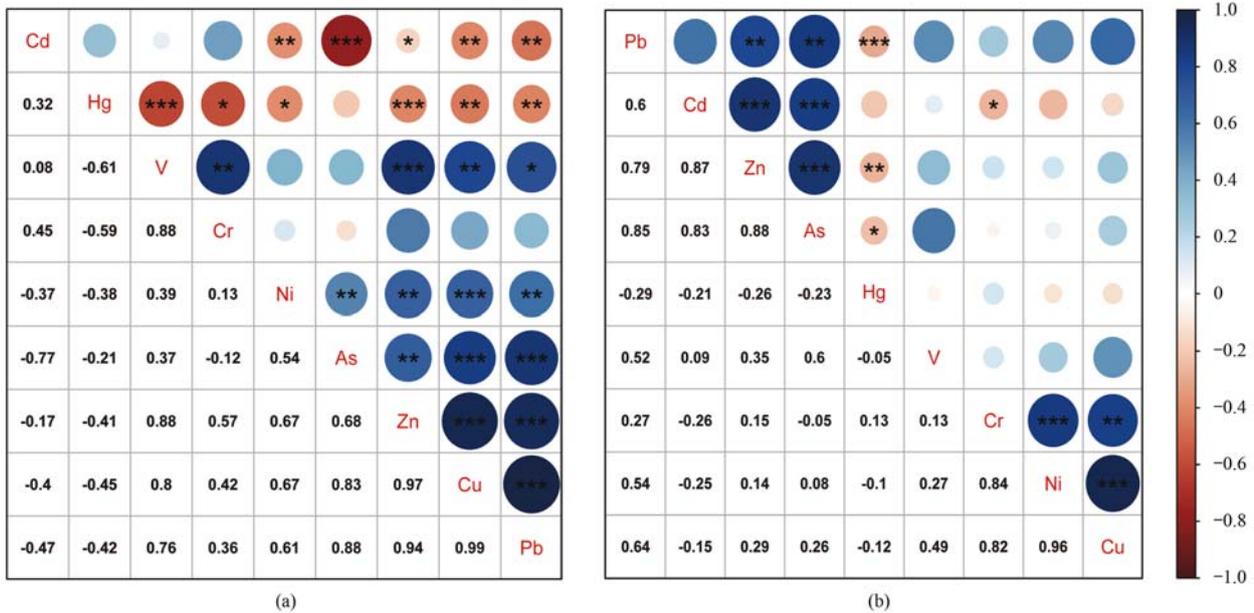
Fig. 2 Bioenrichment coefficient (BCF) of *Sphagnum* in farmland

差贡献率为 84.1%, 所有重金属被分为 2 个主成分. 第一主成分为: V、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb, 方差贡献率为 59.8%, 特征值为 5.38. 第二主成分为: Cr、Cd 和 Hg, 方差贡献率为 24.3%, 特征值为 2.2.

图 4(b) 中, 两个主成分特征值均大于 1 且累计贡献率为 75.9%, 故将泥炭藓土壤重金属分为两个主成分, 第一主成分为: V、Cd、Cu、Zn、As 和 Pb, 方差贡献率为 46.03%, 特征值为 45.96%, 与土壤重金属含量一致, 第二主成分为: Cr、Ni 和 Hg, 方差贡献率为 30.87%, 特征值为 2.7.

2.4 泥炭藓-土壤体系重金属潜在生态风险评价

土壤重金属的平均地累积指数 (I_{geo}) 变化规律为: Cd > Hg > V > Pb > Zn > Cr > As > Ni > Cu (图



(a) 土壤重金属相关性, (b) 泥炭藓重金属相关性; ***, ** 和 * 表示相关性显著, 分别为 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$; 不同大小的圆形代表重金属之间的相关系数大小

图 3 土壤和泥炭藓重金属相关性

Fig. 3 Correlation of heavy metals in soil and *Sphagnum*

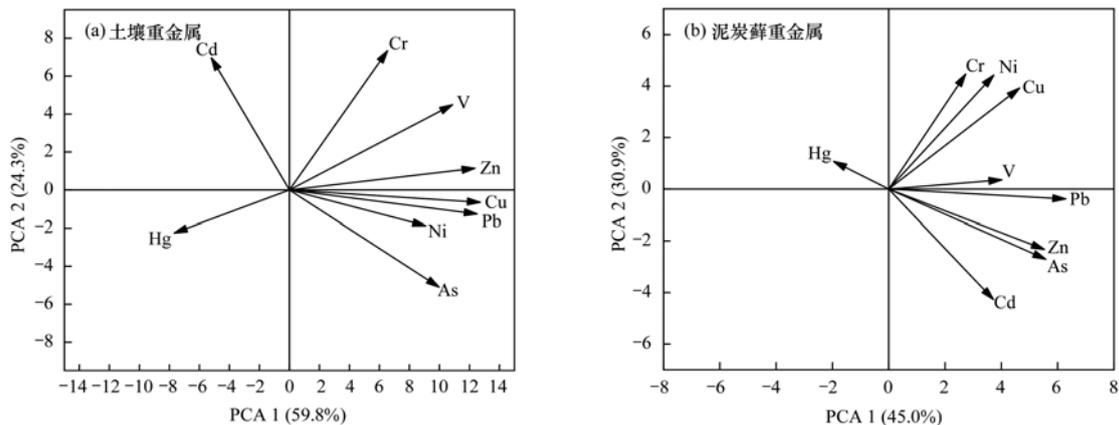


图 4 土壤和泥炭藓重金属主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of soil and *Sphagnum*

5), 研究区域污染最严重的是 Cd, 5 个位点累计污染指数在 1~2 之间, 为轻度污染, Cd 在 0~1 之间,

为轻微污染. 9种重金属潜在污染指数(C_p)变化规律为: $Cd > Hg > V > As > Pb > Zn > Cr > Ni > Cu$ (图6), 重金属 Cd、Hg 的污染贡献率分别为: 50.8%、37.3%, 累计贡献率 88.1%, 是研究区域内重点关注的潜在污染源.

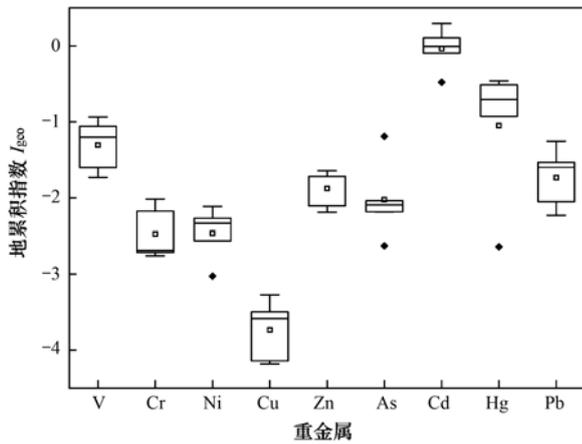


图5 地累积指数 I_{geo}

Fig. 5 Cumulative index I_{geo}

单个重金属污染指数 C_r 的大小为: $Cd > Hg > V > Pb > Zn > Cr > As > Ni > Cu$ (图7), Cd 在 1.07 ~ 1.61 之间为中等污染, Hg 在 0.78 ~ 1.05 之间. 5个采样站位土壤重金属生态风险指数(RI)变化范围在 65.72 ~ 109.34 之间, 风险指数跨度较小, 其中采样站位 S3 生态风险指数最高为 109.34, 采样站位 S4 的综合生态风险指数最低为 65.72. 研究区 RI 的平均值为 87.75 (表4), 处于轻微生态风险, 土壤重金属对 RI 贡献指数为: $Cd(44.60) > Hg(32.74) > As(3.89) > Pb(2.32) > Ni(1.39) > V(1.24) >$

表4 研究区潜在生态风险评价结果

Table 4 Potential ecological risk assessment results in the study area

风险指数	重金属	最小值(min)	最大值(max)	平均值 + 标准差	风险等级
E_r^i	V	0.90	1.57	1.24 ± 0.29	轻微生态危害
	Cr	0.44	0.74	0.55 ± 0.14	轻微生态危害
	Ni	0.92	1.73	1.39 ± 0.31	轻微生态危害
	Cu	0.41	0.78	0.58 ± 0.16	轻微生态危害
	Zn	0.33	0.48	0.41 ± 0.07	轻微生态危害
	As	2.43	6.57	3.89 ± 1.57	轻微生态危害
	Cd	32.30	55.30	44.60 ± 8.47	中等生态危害
	Hg	9.64	43.59	32.74 ± 13.76	中等生态危害
	Pb	1.60	3.14	2.32 ± 0.62	轻微生态危害
RI				87.75	轻微生态危害

3 讨论

3.1 土壤重金属来源解析

根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中农田土壤风险筛选值发现, Cd 和 Hg 元素的土壤浓度值超过了农田土壤筛选值, 土壤中 Hg 的含量是贵州省 A 层土壤环境背

$Cu(0.58) > Cr(0.55) > Zn(0.41)$, 贡献率分别为: Cd(50.83%)、Hg (37.32%)、As(4.44%)、Pb (2.65%)、Ni (1.59%)、V(1.41%)、Cu (0.66%)、Cr(0.63%)和Zn(0.47%)。

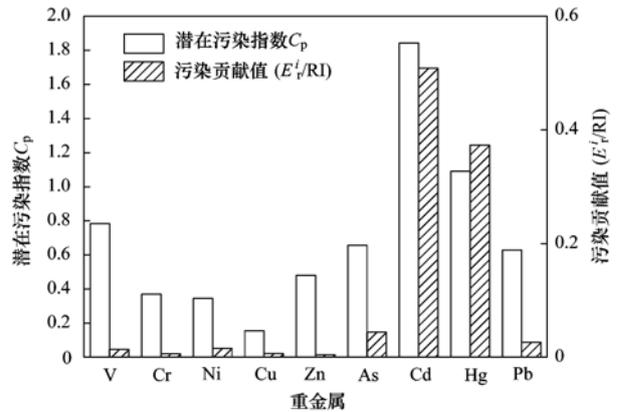


图6 污染贡献值与潜在污染指数 C_p

Fig. 6 Pollution contribution value and potential pollution index

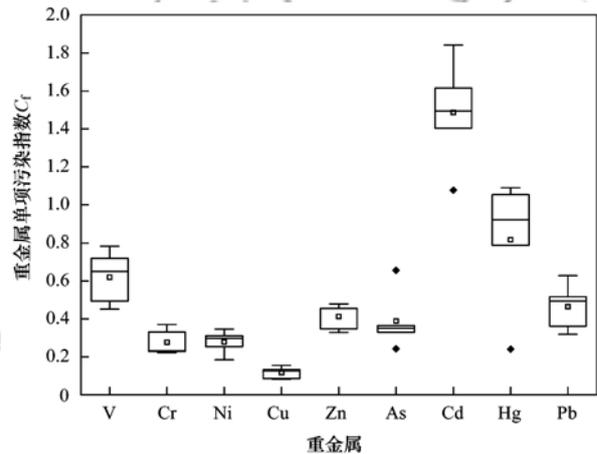


图7 重金属单项污染指数 C_r

Fig. 7 Heavy metal pollution index C_r

景值的4倍, 研究区的主要重金属污染物为 Cd 和 Hg 两种元素^[33~35]. 从相关性分析可以看出, Cd 与其他重金属均不呈正相关, 而泥炭藓重金属 Cd 与 As 和 Zn 呈显著相关, 说明二者来源不完全相同, 而研究区内无工厂或矿业活动, 则推断土壤中 Cd、Zn、As 和 Pb 主要来源为公路交通与化肥农药^[36]. 土壤 Cd 含量可能与土壤成岩以及人为活动相关,

这与秦先燕等^[37]和姬超等^[38]的研究结果一致, 重金属 Cd 与 As 和 Zn 主要与人为活动关系较为密切, 人为活动如生活污水的排放以及对农作物进行农药和除草剂的施用等. 泥炭藓重金属 Hg 含量基本低于土壤重金属 Hg 含量, Hg 在土壤和泥炭藓中的变异系数分别为 42.03% 和 195.72%, 大于 35% 推断为人为污染, 全球 Hg 排放量的 60%~80% 基本来源于人为污染^[39]. 研究区域农田主要围绕在公路两旁以及居民生活住宅区, 一方面是公路交通产生的污染, 另一方面则由居民产生的生活垃圾以及生活污水造成污染^[40~42].

重金属主成分分析结果表明, 土壤第一主成分为 V、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb, 泥炭藓第一主成分为 V、Cd、Cu、Zn、As 和 Pb, 土壤第二主成分为 Cr、Cd 和 Hg, 泥炭藓第二主成分为 Cr、Ni 和 Hg. 土壤和泥炭藓中重金属 Cd 和 Hg 的来源不同, Cd 与 Cu、Zn、As 和 Pb 有相似来源, Hg 与 Cr 有相似来源, Cd 主要由于公路交通污染, 其次是生活污水的污染. Hg 污染主要由于农药化肥施用、生活污水导致. 相关研究表明公路附近 200 m 以内土壤重金属 Hg 的含量高于外围区域, 公路交通会造成重金属 Hg 的污染, Hg 的来源也有极小一部分来自于公路交通污染^[43~45].

3.2 泥炭藓对重金属的富集能力

该区域主要有泥炭藓原亚种以及卵叶泥炭藓. 卵叶泥炭藓富集重金属能力大于泥炭藓原亚种, 说明卵叶泥炭藓对重金属有更强的富集能力, 这与蒙文萍等^[46]的研究结果一致. 两种泥炭藓富集较强的重金属是 Cd、Ni、Zn 和 Cu, 对 Hg 的富集能力较弱. 通过询问当地农户以及对周围环境的调查, 研究区农作物样品采集均为种植相同年限的泥炭藓样品, 泥炭藓 Cd 含量超过土壤 Cd 含量, 泥炭藓对 Cd 的富集能力最强, 泥炭藓可能有助于修复被污染的土壤^[47~49]. 泥炭藓目前的研究热点是用于全球气候变暖以及碳汇, 但是目前我国对此研究较少, 值得进一步探索^[50].

3.3 研究区域生态污染评价

本研究发现 Cd 为该区域农田土壤中单项污染指数和生态风险等级最高的重金属, 初步推测受农药化肥影响较大^[51~53], Cd 元素对该区域农田土壤重金属生态风险指数(RI)的贡献值最大为 0.51, 其次是 Hg 为 0.37, 与地累积指数结果一致. 在采样过程中, 发现所采样地大部分农田土壤均有灌溉系统, 一部分农田喷洒了农药, 而灌溉系统水资源来源不一, 因此对灌溉水源和农药中重金属的来源未来需要进一步调查分析^[54~56]. 为加强研究区域土壤重金属污染防治及生态风险控制, 提出以下措施建议: 对研究区域进行长期观察, 准确解析土壤-泥炭藓重金

属污染源; 采取有效治理方法, 降低重金属的生态风险; 对农田泥炭藓对重金属的吸附特征以及净化空气的能力进一步加强研究^[57,58].

4 结论

(1) 从研究区域重金属分布情况来看, 污染最为严重的两种重金属为 Cd 和 Hg, 土壤和泥炭藓重金属含量变异系数(CV)最高的均为 Hg.

(2) 两种农田泥炭藓对重金属富集能力为: 卵叶泥炭藓 > 泥炭藓原亚种, 两种泥炭藓均对重金属 Cd、Ni、Cu 和 Zn 的富集能力较强.

(3) 土壤重金属 Cd 的地累积指数(I_{geo})大于零, 其余重金属地累积指数均小于零, 单项污染指数(C_i)最高的重金属是 Cd 和 Hg, 研究区域主要受重金属 Cd 和 Hg 污染, Zn 和 Pb 次之, 潜在污染指数(C_p)大小为: Cd > Hg > V > As > Pb > Zn > Cr > Ni > Cu, 综合污染指数 RI 的变化所属区间为: 65.72 ~ 109.34, 平均值为 87.75, 处于轻微生态风险.

(4) 研究区域总体污染水平较低, 但 Hg 和 Cd 污染仍需引起重视, 在一定程度上, 可利用泥炭藓对重金属的吸附特性对其他区域进行环境监测及治理.

致谢: 徐盛、韩锦华、路丹和丁海峰等在采样和实验方面提供帮助, 特此致谢!

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4197-4209.
Zhang F G, Peng M, Wang H Y, et al. Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, southwestern, China [J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4197-4209.
- [3] 刘文辉, 马腾, 李俊琦, 等. 资江河口区农田土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 地质科技通报, 2021, 40(2): 138-146.
Liu W H, Ma T, Li J Q, et al. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in agricultural soil around Zijiang River estuary [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(2): 138-146.
- [4] 刘保东. 泥炭藓的应用价值[J]. 植物杂志, 1991, 4(1): 12.
- [5] Vuković G, Urošević M A, Tomašević M, et al. Biomagnetic monitoring of urban air pollution using moss bags (*Sphagnum girgensohnii*) [J]. Ecological Indicators, 2015, 52: 40-47.
- [6] 晋建勇, 孟宪民. 国外泥炭藓种植业的研究进展[J]. 腐植酸, 2006, (5): 6-8, 17.
Jin J Y, Meng X M. Progress in *Sphagnum* farming research in western countries [J]. Humic Acid, 2006, (5): 6-8, 17.
- [7] 麻俊虎, 彭涛, 李大华. 中国泥炭藓属植物研究进展[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(1): 114-120.
Ma J H, Peng T, Li D H. Recent advances of *Sphagnum* plant

- research in China [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2017, **35**(1): 114-120.
- [8] Boquete M T, Ares A, Fernández J A, *et al.* Matching times: trying to improve the correlation between heavy metal levels in mosses and bulk deposition [J]. Science of the Total Environment, 2020, **715**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136955.
- [9] Sirohi S, Kumar S, Yadav C, *et al.* *Sphagnum*: a promising indoor air purifier[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2020, **15**(4): 208-215.
- [10] 胡鸿兴, 何伟, 刘巧玲, 等. 大九湖泥炭藓湿地对磷、铜污染物净化作用的模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(6): 920-926.
- Hu H X, He W, Liu Q L, *et al.* On simulating the purification effects of the *Sphagnum* wetland using the wastewater that contain phosphorus and cuprum in DaJiuHu [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, **17**(6): 920-926.
- [11] Gonzalez A G, Pokrovsky O S, Beike A K, *et al.* Metal and proton adsorption capacities of natural and cloned *Sphagnum* mosses[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, **461**: 326-334.
- [12] 何春梅, 张朝晖, 王智慧, 等. 贵州麻若平台泥炭藓沼泽中泥炭藓持水特性及其与土壤营养元素关系研究[J]. 植物科学学报, 2020, **38**(5): 618-626.
- He C M, Zhang Z H, Wang Z H, *et al.* Water retention characteristics of *Sphagnum* and their relationship with soil nutrient content in the peatland of Maruo, Upland Guizhou[J]. Plant Science Journal, 2020, **38**(5): 618-626.
- [13] Sorrentino M C, Capozzi F, Giordano S, *et al.* Genotoxic effect of Pb and Cd on *in vitro* cultures of *Sphagnum* palustre: an evaluation by ISSR markers[J]. Chemosphere, 2017, **181**: 208-215.
- [14] Kempter H, Krachler M, Shotyky W, *et al.* Major and trace elements in *Sphagnum* moss from four southern German bogs, and comparison with available moss monitoring data[J]. Ecological Indicators, 2017, **78**: 19-25.
- [15] 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 等. 工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- Li Y L, Lu Y F, Chen W P, *et al.* Spatial-temporal variation and source change of heavy metals in the cropland soil in the industrial city[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- [16] 赵靛, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某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.
- [17] 魏星宇, 杨永琼, 王敬富, 等. 贵州草海流域下不同土地类型重金属污染空间分布特征及评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2021, **39**(4): 39-45.
- Wei X Y, Yang Y Q, Wang J F, *et al.* Spatial distribution characteristics and evaluation of heavy metals pollution in different land types under Caohai watershed in Guizhou province [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2021, **39**(4): 39-45.
- [18] 中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志-第十八卷-苔藓植物: 藓纲[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 75-463.
- [19] 中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志-第十九卷-苔藓植物: 藓纲[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 1-346.
- [20] 高谦. 中国苔藓志-第一卷-泥炭藓目 黑藓目 无轴藓目 曲尾藓目[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 1-54.
- [21] 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.
- [22] Tian K, Huang B, Xing Z, *et al.* Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China[J]. Ecological Indicators, 2017, **72**: 510-520.
- [23] Lin L, Dong L, Meng X Y, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in water and surface sediment from the three gorges reservoir[J]. Journal of Environmental Science, 2018, **69**: 271-280.
- [24] Ahmed F, Fakhruddin A N M, Imam M D T, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metal pollution in roadside surface soil: a study of Dhaka Aricha highway, Bangladesh[J]. Ecological Processes, 2016, **5**(1), doi: 10.1186/s13717-016-0045-5.
- [25] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, **2**(1): 108-118.
- [26] Kumar V, Sharma A, Kaur P, *et al.* Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: a state-of-the-art[J]. Chemosphere, 2019, **216**: 449-462.
- [27] Peng Y S, Yang R D, Tao J, *et al.* Risk assessment for potentially toxic metal (loid)s in potatoes in the indigenous zinc smelting area of northwestern Guizhou Province, China[J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, **120**: 328-339.
- [28] 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.
- [29] Ke X, Gui S F, Huang H, *et al.* Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China[J]. Chemosphere, 2017, **175**: 473-481.
- [30] 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].
- [31] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [32] Müller G, Förstner U. Schwermetalle in den sedimenten der elbe bei stade: Veränderungen seit 1973 [J]. Naturwissenschaften, 1976, **63**(5): 242-243.
- [33] 董燕, 孙璐, 李海涛, 等. 雄安新区土壤重金属和砷元素空间分布特征及源解析[J]. 水文地质工程地质, 2021, **48**(3): 172-181.
- Dong Y, Sun L, Li H T, *et al.* Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiongan New Area, China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, **48**(3): 172-181.
- [34] 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.
- [35] 章海波, 骆永明, 李远, 等. 中国土壤环境质量标准中重金属指标的筛选研究[J]. 土壤学报, 2014, **51**(3): 429-438.
- Zhang H B, Luo Y M, Li Y, *et al.* Screening of criteria for heavy metals for revision of the national standard for soil environmental quality of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(3): 429-438.
- [36] Ji Y Y, Gao F H, Wu Z H, *et al.* A review of atmospheric benzene homologues in China: characterization, health risk

- assessment, source identification and countermeasures [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **95**: 225-239.
- [37] 秦先燕, 李运怀, 孙跃, 等. 环巢湖典型农业区土壤重金属来源解析[J]. 地球与环境, 2017, **45**(4): 455-463.
Qin X Y, Li Y H, Sun Y, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in typically agricultural region around Chaohu lake, China[J]. Earth and Environment, 2017, **45**(4): 455-463.
- [38] 姬超, 侯大伟, 李发志, 等. 耕地土壤重金属健康风险空间分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1440-1448.
Ji C, Hou D W, Li F Z, *et al.* Assessment and spatial characteristics analysis of human health risk of heavy metals in cultivated soil[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1440-1448.
- [39] 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.
- [40] Liu R H, Wang Q C, Lu X G, *et al.* Distribution and speciation of mercury in the peat bog of Xiaoxing'an Mountain, northeastern China[J]. Environmental Pollution, 2003, **124**(1): 39-46.
- [41] 银燕春, 王莉淋, 肖鸿, 等. 成都市区、城郊和农村生活垃圾重金属污染特性及来源[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 392-400.
Yin Y C, Wang L L, Xiao H, *et al.* Characteristics and sources of heavy metal pollution in urban, suburban and rural domestic waste of Chengdu, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(1): 392-400.
- [42] Mamat A, Zhang Z Y, Mamat Z, *et al.* Pollution assessment and health risk evaluation of eight (metalloid) heavy metals in farmland soil of 146 cities in China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, **42**(11): 3949-3963.
- [43] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 农田土壤重金属垂直分布迁移特征及生态风险评价[J]. 环境工程, 2021, **39**(2): 166-172.
Dou W Q, An Y, Qin L, *et al.* Characteristics of vertical distribution and migration of heavy metals in farmland soils and ecological risk assessment [J]. Environmental Engineering, 2021, **39**(2): 166-172.
- [44] 姚波, 杨爱萍, 陈华毅, 等. 珠江流域上游云贵地区农田土壤重金属污染状况及其风险性分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(10): 2259-2266.
Yao B, Yang A P, Chen H Y, *et al.* Soil heavy metal pollution and risk assessment of agricultural soils in the Yunnan-Guizhou area, Upper Pearl River Basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(10): 2259-2266.
- [45] Lubbad S H, Al-Batta S N. Ultrafast remediation of lead-contaminated water applying *Sphagnum* peat moss by dispersive solid-phase extraction[J]. International Journal of Environmental Studies, 2020, **77**(3): 382-397.
- [46] 蒙文萍, 莫秀模, 尹运, 等. 泥炭藓对环境污染物质的耐受性研究[J]. 环保科技, 2019, **25**(1): 1-4.
Meng W P, Mo X M, Yin Y, *et al.* Study on the tolerance of *Sphagnum* to environmental pollutants [J]. Environmental Protection and Technology, 2019, **25**(1): 1-4.
- [47] 霍明珠, 高秉博, 乔冬云, 等. 基于 APCS-MLR 受体模型的农田土壤重金属源解析[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(5): 978-986.
Huo M Z, Gao B B, Qiao D Y, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil based on the APCS-MLR model [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(5): 978-986.
- [48] Hu R, Yan Y, Zhou X L, *et al.* Monitoring heavy metal contents with *Sphagnum junghuhnianum* moss bags in relation to traffic volume in Wuxi, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(2), doi: 10.3390/ijerph15020374.
- [49] 石匡正, 张朝晖, 何春梅, 等. 毕节吞天井边缘地带不同郁闭度环境对泥炭藓叶绿素荧光特性及蓄水量的影响[J]. 植物研究, 2021, **41**(2): 262-269.
Shi K Z, Zhang Z H, He C M, *et al.* Effects of different canopy density on the chlorophyll fluorescence and water storage capacity of *Sphagnum palustre* in the edge of the Tuntianjing sinkhole in Bijie city[J]. Bulletin of Botanical Research, 2021, **41**(2): 262-269.
- [50] Shoty K W, Bicalho B, Cuss C W, *et al.* Dust is the dominant source of "heavy metals" to peat moss (*Sphagnum fuscum*) in the bogs of the Athabasca bituminous sands region of Northern Alberta[J]. Environment International, 2016, **92-93**: 494-506.
- [51] 冯乾伟, 王兵, 马先杰, 等. 黔西北典型铅锌矿区土壤重金属污染特征及其来源分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, **39**(4): 863-870.
Feng Q W, Wang B, Ma X J, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in soils of typical lead-zinc mining areas in Northwest Guizhou, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, **39**(4): 863-870.
- [52] 邓海, 王锐, 严明书, 等. 矿区周边农田土壤重金属污染风险评价[J]. 环境化学, 2021, **4**(4): 1127-1137.
Deng H, Wang R, Yan M S, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil around mining area [J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(4): 1127-1137.
- [53] 刘杏梅, 赵健, 徐建明. 污染农田土壤的重金属钝化技术研究——基于 Web of Science 数据库的计量分析[J]. 土壤学报, 2021, **58**(2): 445-455.
Liu X M, Zhao J, Xu J M. Research on immobilization of heavy metals in contaminated agricultural soils-bibliometric analysis based on web of science database[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(2): 445-455.
- [54] 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 等. 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5540-5549.
Wu Q M, Liu G, Wang H F, *et al.* Hydrocalumite passivation effect and mechanism on heavy metals in different Cd-contaminated farmland soils[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5540-5549.
- [55] Wardwell L H, Jude B A, Moody J P, *et al.* Co-Selection of mercury and antibiotic resistance in *Sphagnum* core samples dating back 2000 years[J]. Geomicrobiology Journal, 2009, **26**(5): 351-360.
- [56] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 886-894.
Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet plateau [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 886-894.
- [57] Zhang M, Wang X P, Liu C, *et al.* Identification of the heavy metal pollution sources in the rhizosphere soil of farmland irrigated by the Yellow River using PMF analysis combined with multiple analysis methods-using Zhongwei City, Ningxia, as an example[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(14): 16203-16214.
- [58] Dauvalter V, Rognerud S. Heavy metal pollution in sediments of the Pasvik River drainage[J]. Chemosphere, 2001, **42**(1): 9-18.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)