

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

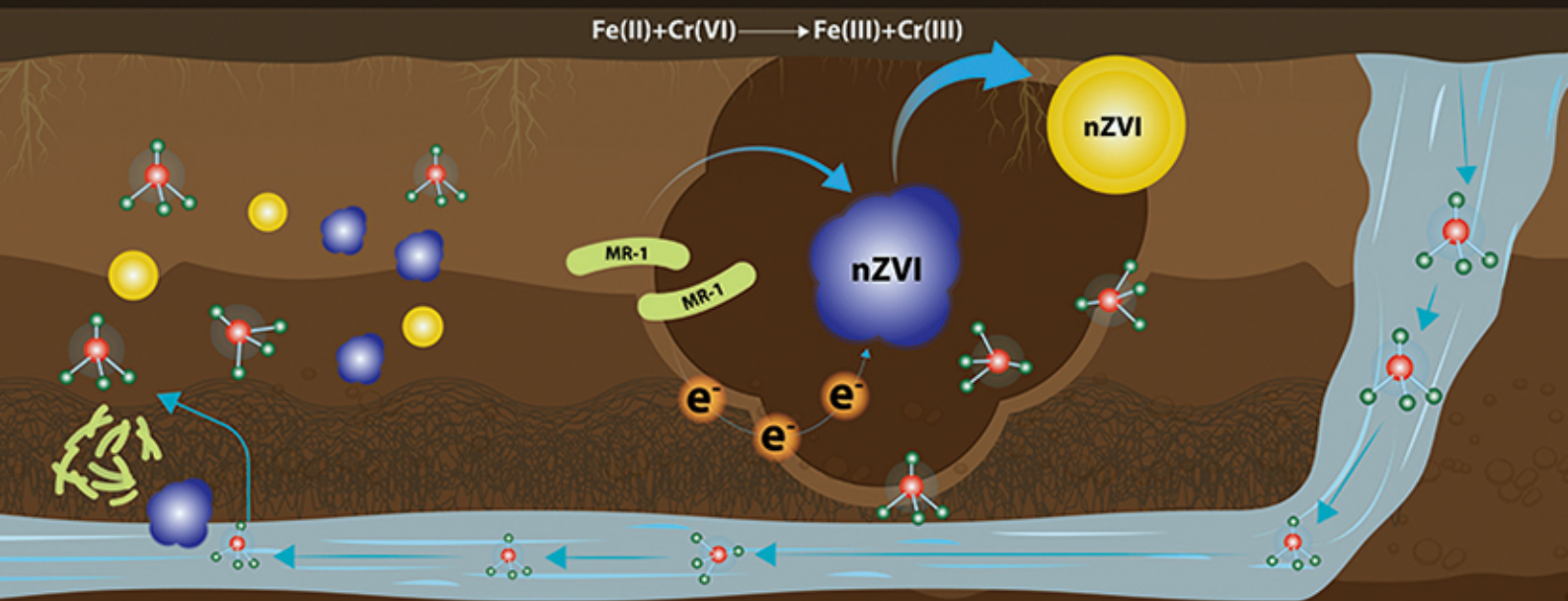
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING 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 O ₃ 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, 钟巍盛, 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, 夏峰 (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, 唐邈 (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, 邱彦峰, 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 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 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)
整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, 何晶晶 (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 N ₂ O 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 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -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 年中国全氟辛烷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)	

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¹, 王莺^{1*}, 王劲松¹, 姚玉璧^{1,2}, 周悦³, 刘晓云¹, 芦亚玲¹

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候与减灾重点实验室, 干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020; 2. 兰州资源环境职业技术学院气象学院, 兰州 730021; 3. 中国气象局武汉暴雨研究所, 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘要: 青藏高原属于环境极端脆弱区和人类活动敏感区, 近年来在该区域检测到越来越多的人为干扰. 本研究基于甘南“一江三河”和西藏“一江两河”两个流域, 分析了 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 这 7 种重金属的空间分布关系及其生态风险. 结果表明, 甘南“一江三河”流域 7 种重金属的空间分布呈东部高西部低的特点, 平均含量均超过青藏高原背景值, 以 Cd(4.50 倍)和 As(2.83 倍)较显著, Cd 和 Pb 的高值主要分布在水域、城镇及农村居民用地和工交建设用地; 西藏“一江两河”流域 7 种重金属的空间分布呈沿江一线重金属含量较低、高海拔地区重金属含量较高的特点, Ni、Zn、As 和 Cd 的平均含量超过青藏高原背景值, 以 Cd(3.13 倍)较显著, Cd 的高值主要分布在水域覆盖区. 地累积指数法和潜在生态风险指数法表明, 在甘南“一江三河”流域以 As 和 Cd 的污染程度较高, 且在水域覆盖区潜在生态风险最高; 西藏“一江两河”流域以 Cd 的污染程度较高, 水域覆盖区潜在生态风险最高. 本研究对青藏高原不同土地利用方式下土壤环境保护和可持续开发利用具有指导意义.

关键词: 青藏高原; 土地利用; 重金属; 生态风险评价; 典型流域

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4422-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012123

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau

DU Hao-lin¹, WANG Ying^{1*}, WANG Jin-song¹, YAO Yu-bi^{1,2}, ZHOU Yue³, LIU Xiao-yun¹, LU Ya-ling¹

(1. Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction, Lanzhou Institute of Arid Meteorology of China Meteorology Administration, Lanzhou 730020, China; 2. College of Meteorology, Lanzhou Resources & Environment Vocational-Technical College, Lanzhou 730021, China; 3. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau is an extremely vulnerable area that is sensitive to human activities. In recent years, more and more human disturbances have been detected in this area. This study analyzed the spatial distribution and ecological risks of 7 heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb) in two regions, namely the Bailong River and Yellow River and their two tributaries (BY region) in Gannan and the Yarlung Zangbo River and its two tributaries (YZ region) in Tibet. In terms of spatial distribution, concentrations of the seven heavy metals were higher in the east and lower in the west of the BY region. The average concentrations all exceeded the background value of the Qinghai-Tibet Plateau, especially for Cd (4.50 times) and As (2.83 times). High Pb concentrations were mainly found in water, urban and rural residential land, and industrial and construction land. In the YZ region, heavy metal concentrations were lower along the river, while high-altitude areas exhibited higher heavy metal concentrations. The average concentrations of Ni, Zn, As, and Cd exceeded the background values of the Qinghai-Tibet Plateau, especially that of Cd (3.13 times), which mostly exhibited high values in water coverage areas. The geo-accumulation index method and the potential ecological risk index method show that the degree of As and Cd pollution was relatively high in the BY region in Gannan, with the greatest potential ecological risk occurring in the water coverage area. In the YZ region in Tibet, the degree of Cd pollution was high, with the highest potential ecological risk also occurring in the water coverage area. This study provides significant guidance for the environmental protection, sustainable development, and utilization of soil under different types of land use in the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; land use; heavy metals; ecological risk assessment; typical watershed

土壤是生态环境的主要组成部分,更是人类赖以生存的物质基础. 近年来,土壤重金属污染已成为世界性的环境问题. 由于重金属在土壤中具有潜伏性强、迁移速率慢和难降解的特性,能通过“土壤-植物-动物-人体”或“土壤-水-人体”等途径间接被人体吸收,威胁人类健康^[1],现已成为社会大众关注的热点,也是亟需解决的首要问题. 由 2014 年全国

土壤污染状况调查结果显示,我国土壤污染超标率达 16.1%,其中以无机污染为主,超标点数占全国的

收稿日期: 2020-12-15; 修订日期: 2021-02-23

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0605)

作者简介: 杜昊霖(1993~),男,硕士,研究实习员,主要研究方向为土壤重金属修复和区域环境风险评估, E-mail: kydu2333@163.com

* 通信作者, E-mail: wangyn924@163.com

82.8%^[2], 因此, 我国土壤重金属污染及其潜在危害不容忽视。近几年国内关于土壤重金属的研究主要集中在珠江三角洲、东北老工业基地、长江三角洲、中南和西南等地区^[3], 对西部地区尤其是作为世界独特地理单元的青藏高原, 其关于土壤重金属的研究还较少。

青藏高原地处低纬, 面积辽阔, 地势高亢, 平均海拔4 000 m以上, 是全球海拔最高的独特地域单元。随着青藏高原城市化和工业化的发展, 自然资源的开发利用和第二、三产业的发展逐步加快, 导致青藏高原土壤系统已遭受到一定程度的重金属污染^[4]。近几十年来, 研究人员利用多种方法对青藏高原重金属进行了分析。首先, 源解析的结果表明, 不同研究区域中重金属元素的来源存在较大的差异, 主要来源包括汽车等交通工具^[5]、化肥和农药的施用^[6]以及大量外源污染物等, 例如高原外部的灰尘和气溶胶等大气颗粒物的沉降^[7~10]。另一个重要的污染源是宗教活动和大型祭祀活动, 这是非工业地区和偏远地区出现轻微污染的原因。其次, 青藏高原重金属生态风险评价的结果表明^[11], 青藏高原超过50%的地区土壤污染程度为中度或高度, 其中青海地区土壤污染较严重, 西藏地区土壤污染相对较轻。青藏高原多条河流和高原东南部水体的水危害指数较高, 其中雅鲁藏布江和拉萨河中Pb含量较高是造成污染的主要原因。另外, 由中亚气团和印度洋海上气流输送至青藏高原冰川积雪中的重金属量相当可观, 在气候变暖影响下, 这些重金属随着冰雪融水被释放到河流土壤中^[12,13]。以上研究成果对了解青藏高原重金属特征具有重要意义。但仍存在局限, 首先多是针对青藏高原某一具体的点进行研究, 缺乏大尺度流域的整体研究; 其次, 存在局限性采样, 采样数据较早或采样点偏远。当前青藏高原在人类活动的不断影响下, 土地利用方式发生了巨大的改变, 其破碎化程度、聚集化程度和景观形状复杂度的变化会进一步破坏植被、供水和土壤, 造成土壤重金属的直接或间接污染, 增加了土壤中重金属元素的分布和迁移的可能性^[14]。因此, 研究不同土地利用类型下土壤中重金属的分布特征和对生态的风险具有重要意义。目前, 关于青藏高原流域土壤重金属的分布、风险评估的信息较少, 以青藏高原其中的小流域为视角, 对流域内不同土地利用类型下重金属的污染特征与风险评价还较缺乏。

甘南“一江三河”流域地处青藏高原东北边缘, 是中国地势第一级阶梯向第二级阶梯的过渡地带, 表现出显著的边缘性与过渡性^[15,16]。这一区域是黄河上游乃至整个黄河流域重要的水源补给区。甘南

水资源不仅影响甘南本身的生态安全和人民生活, 还必将波及黄河中下游地区。甘南的牧场还被誉为亚洲最好的牧场之一, 海拔较低且降水丰富导致产草量比青藏高原的三江源地区、可可西里和藏北高原等地高^[17], 是青藏高原畜牧业的重要组成部分。这些无疑都表明甘南“一江三河”流域是我国生态屏障的重要组成部分。西藏“一江两河”流域地处青藏高原腹地, 是西藏自治区的政治、经济和文化中心。流域内河谷平原宽广, 形成辫状水系, 存在许多宽窄不一的河谷平地 and 湖盆谷地, 优越的地理位置使得基础设施的建设和经济的高速发展加速了对资源的开发利用^[18]。这一区域内人口比较集中, 占西藏自治区总人口的30%以上, 年楚河谷、拉萨河谷和雅鲁藏布江山南谷地并称为西藏的“三大粮仓”, 是青藏高原种植业和农业的重要组成部分^[19]。两个流域在当前及可预见的未来都将长期处于高强度活动状态, 高原独特的自然条件及生态环境的脆弱特征对两个流域会产生或多或少的负面影响。由此可见, 甘南“一江三河”流域和西藏“一江两河”流域在自然、生态、社会、经济和制度等因素的交互作用下加剧了土地景观演变的复杂性, 人地关系呈现出高度异质性与复杂性, 使其成为极其脆弱、敏感的地区^[20]。这些变化对两个流域的自然地球化学以及化学元素的迁移转化产生了巨大的影响。

因此, 本文选择土地利用和人类扰动有明显差异的甘南“一江三河”流域和西藏“一江两河”流域进行研究, 分析Cr、Cd、Cu、Pb、Zn、Ni和As这7种重金属在不同土地利用类型下的分布特点, 并评估它们之间的因果关系, 利用潜在生态风险指数法和地累积指数法揭示研究区重金属风险评估特征, 通过了解青藏高原腹地和边缘地区土壤环境中的重金属环境行为, 以期因地制宜保护当地生态环境提供科学依据和借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域

甘南“一江三河”流域是指黄河支流洮河和大夏河与嘉陵江的支流白龙江^[21], 西藏“一江两河”流域是指雅鲁藏布江及其支流拉萨河和年楚河, 其基本概况如表1所示。

1.2 样品采集和分析

2020年5月在甘南“一江三河”流域采集了34个土壤样品, 2020年8月在西藏“一江两河”流域采集了20个土壤样品(图1)。采集的土壤样品自然风干后去除植物残体和砾石等杂物, 按四分法取土研磨过200目筛^[25]。采用王水提取-电感耦合

表 1 研究区域概况

Table 1 Overview of the study area

项目	甘南“一江三河”流域	西藏“一江两河”流域
位置	北纬 33°06′~36°10′,东经 100°46′~104°44′	北纬 28°09′~31°06′,东经 88°45′~92°03′
行政区域	合作市、临潭、卓尼、迭部、夏河、玛曲和碌曲	拉萨市、当雄、曲水、尼木、山南、琼结、扎囊、乃东、贡嘎、日喀则、康马、江孜县、白朗和南木林
气候	年平均气温约 1~13℃,境内年均降水量为 433~599 mm,全州降水量的地理分布极不均匀,分布趋势大致以西南部的郎木寺向四周递减,季降水量分布亦很不均匀,暖季多,冷季少,雨热同季的特征显著,是典型的湿润偏干气候 ^[21]	年均气温约 4.7~8.9℃,平均最高和最低气温分别为 13.5~16.2℃和 -3.0~1.2℃. 多年平均降水量为 251.7~580.0 mm,拉萨市、日喀则和山南等地区的降雨量占该流域全年降雨量的比重超过 80%,该区域是典型的半干旱气候 ^[22]
面积	$4.02 \times 10^4 \text{ km}^2$	$6.57 \times 10^4 \text{ km}^2$
人口	56.7 万人(2018 年)	102.8 万人(2018 年)
土壤类型	夏河县、碌曲县和合作市主要以高山土为主;迭部县和卓尼县主要以淋溶土为主,临潭县土质复杂,除高山土和淋溶土以外还存在钙层土;玛曲县主要以水成土和高山土为主 ^[23]	研究区内绝大多数土壤以高山土为主,在沿江一线土壤类型主要为初育土;拉萨市、当雄县、白朗县和浪卡子县分布着少量水成土 ^[23]
岩石类型	酸性花岗岩、酸性石英斑岩、砂砾岩和石英闪长岩为主 ^[17]	中酸性-中基性火山岩、火山碎屑岩和陆缘碎屑沉积为主 ^[24]

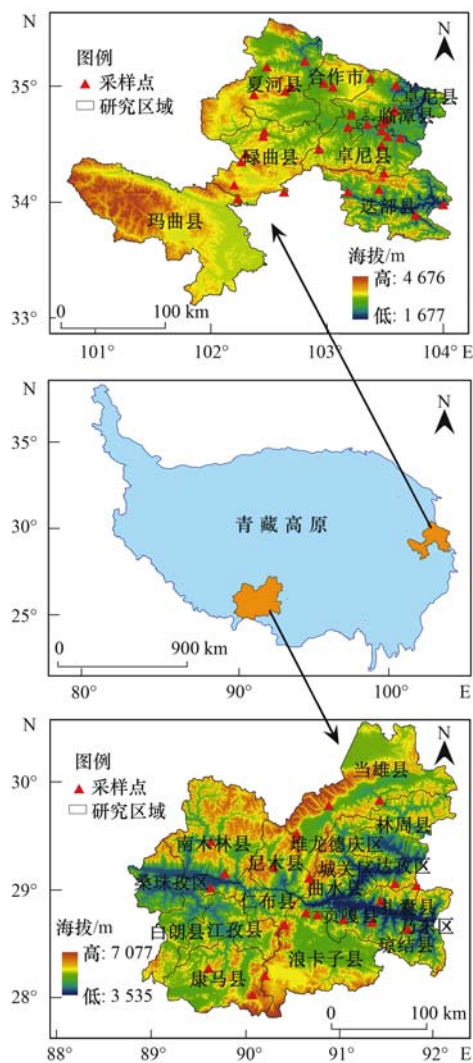


图 1 研究区域及采样点信息

Fig. 1 Research area and sampling point information

等离子体质谱法,每个样品称取 (0.25 ± 0.0001) g用盐酸/硝酸(王水)混合溶液经微波

消解仪(Multiwave PRO)消解后定容至 25 mL^[26],使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(Agilent 7800)测量土壤样品中重金属 Cr、Cd、Cu、Pb、Zn、Ni 和 As 的含量.样品按 10% 的比例进行平行双样测,相对偏差应小于 30%;样品分析 10% 的加标回收样,加标回收率应控制在 70%~125% 之间.

1.3 土地利用类型

土地利用类型数据来自中国科学院地理科学与资源研究所([http://www. globallandcover. com/](http://www.globallandcover.com/))^[23],空间分辨率为 30 m.主要包括耕地、森林、草原、灌木丛、湿地、水域、苔原、城乡及工矿用地、未利用土地和冰川积雪这 10 种类型.

1.4 重金属生态风险评价

1.4.1 地累计指数法

地累计指数法考虑了自然成岩作用对背景值的影响,同时也考虑了人为活动对环境的影响^[27].其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (K \times C_n^i)] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为重金属的地累计指数, C_i 为重金属*i*的实测含量值, C_n^i 为重金属*i*的参考背景值,本文采用青藏高原土壤环境背景值作为参考值, K 为消除各地岩石差异可能引起背景值的差异(一般取 1.5).污染等级分为 7 级,如表 2 所示.

1.4.2 潜在生态危害指数风险评价

潜在生态危害指数法综合考虑了多元素的协同作用、毒性水平、污染含量以及环境对重金属污染敏感性等因素,可以综合反映重金属对生态环境影响潜力^[28].计算公式为:

RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times P_i)

= \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i/C_n^i) (2)

式中, RI 为综合生态风险指数, E_r^i 为单个污染物的

潜在生态风险系数, T_r^i 为单个污染物的毒性响应系数, P_i 为某一重金属的污染指数, 重金属的毒性响应系数分别为 Zn = 1, Cr = Ni = Pb = Cu = 5, As = 10, Cd = 30^[29]. 将土壤重金属潜在生态风险分为如表 3 所述的级别.

表 2 重金属污染等级划分

Table 2 Classification of heavy metal pollution levels

项目	污染程度					
	无污染	轻度污染	中度污染	中度-重度污染	重度污染	重度-极度污染
参数	≤0	0 < I _{geo} ≤1	1 < I _{geo} ≤2	2 < I _{geo} ≤3	3 < I _{geo} ≤4	4 < I _{geo} ≤5
						>5

表 3 生态危害程度划分

Table 3 Classification of the hazards associated with heavy metals

项目	危害程度				
	1 级(轻度)	2 级(中度)	3 级(重度)	4 级(强烈)	5 级(极强)
E_r^i	<40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	> 320
RI	<150	150 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 1 200	≥1 200

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属的空间分布特征

青藏高原两个流域内 7 种重金属元素含量统计结果如表 4 所示. 甘南“一江三河”流域内 7 种重金属的平均值均没有超过国家土壤环境质量标准; Zn、As、Cd 和 Pb 的含量均超过青藏高原土壤环境背景值, 以 Cd (4.50 倍) 和 As (2.83 倍) 较显著; 和中国土壤背景值相比, Zn、As、Cd 和 Pb 的含量偏高, 以 As (4.73 倍) 和 Cd (3.71 倍) 较显著; 和世界土壤背景值相比, Zn、As 和 Pb 的含量较高, 以 As (8.82 倍) 较显著. 甘南“一江三河”流域内表土重金属变异系数大小依次为 Cd > Zn > As > Pb > Ni > Cr > Cu, 其中 Cd 属于极度变异 (>100%), Cr、Ni、Zn、As 和 Pb 属于高度变异 (>50%). 西藏“一江两河”流域内 7 种重金属元素平均值均没有超过国家土壤环境质量标准; Ni、

Zn、As 和 Cd 的含量超过青藏高原土壤环境背景值, 其中以 Cd (3.13 倍) 较显著; 7 种重金属的含量和中国土壤背景值相比, Ni、Zn、As 和 Cd 的含量较高, 其中以 Zn (2.16 倍) 和 Cd (2.57 倍) 较显著; 和世界土壤背景值相比, Zn 和 As 的含量较高, 以 As (3.70 倍) 较显著. 西藏“一江两河”流域内表土重金属变异系数大小依次为: Cd > Ni > Zn > Cr > As > Cu > Pb, 重金属 Cu、As 和 Pb 3 种重金属属于中度变异 (15% ~ 50%), 而 Cr、Ni、Zn 和 Cd 这 4 种重金属均属于高度变异 (>50%), 离散程度较大. 两个流域内都存在 Zn、Ni 和 Cd 高度变异的情况, 空间异质性强, 说明可能存在 Zn、Ni 和 Cd 的点源污染.

图 2 是甘南“一江三河”流域 7 种重金属的空间分布. 重金属分布整体呈现出东部高西部低的趋势. 甘南西部以辽阔的草甸草原为主, 而东部丘陵山地农牧兼营, 人口密度较大, 人类活动可能是造成东

表 4 青藏高原不同流域土壤重金属描述性统计特征

Table 4 Descriptive statistical characteristics of soil heavy metals in different watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau

研究区域	元素	范围	平均值	中值	标准差	变异系数 /%	土壤环境 质量 ^[30]	土壤背景值/mg·kg ⁻¹		
		/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·kg ⁻¹				青藏高原 ^[31]	中国 ^[32]	世界 ^[32]
甘南 “一江 三河” 流域	Cr	9.78 ~ 114.23	46.97	44.30	23.90	50.82	250	77.40	61	70
	Ni	4.08 ~ 62.63	19.04	16.63	11.03	57.95	190	32.10	26.90	50
	Cu	5.97 ~ 36.53	14.80	14.42	5.53	37.39	100	21.90	22.60	30
	Zn	34.00 ~ 574.38	129.94	90.81	127.22	97.91	300	73.70	74.20	90
	As	2.24 ~ 172.69	52.94	19.40	48.62	91.84	25	18.70	11.2	6
	Cd	0.11 ~ 2.04	0.36	0.19	0.45	124.76	0.6	0.08	0.097	0.35
	Pb	9.76 ~ 126.72	29.93	21.42	26.68	89.13	170	28.90	26	35
西藏 “一江 两河” 流域	Cr	17.89 ~ 145.86	53.64	34.83	31.68	59.06	250	77.40	61	70
	Ni	13.49 ~ 36.22	32.65	21.05	22.40	68.59	190	32.10	26.90	50
	Cu	13.49 ~ 36.22	20.67	17.47	6.48	31.35	100	21.90	22.60	30
	Zn	64.32 ~ 405.52	160.91	110.35	96.32	59.82	300	73.70	74.20	90
	As	10.19 ~ 41.60	22.21	18.02	9.54	42.96	25	18.70	11.2	6
	Cd	0.09 ~ 0.92	0.25	0.21	0.17	69.20	0.6	0.08	0.097	0.35
	Pb	4.20 ~ 34.36	24.85	24.17	7.01	28.22	170	28.90	26	35

部地区重金属富集的主要原因^[16]. 临潭县和卓尼县县城的 Zn 和 As 含量较高; 在卓尼县附近存在铅锌尾矿, 局部矿业活动可导致 Cd 和 Pb 出现极大值; Cr 的高含量区主要分布在迭部县郎木寺和卓尼县腊子口镇等旅游区域, 旅游资源的不断开发加速了对原有生境的侵占和破坏. 图 3 是西藏“一江两河”流域表层土壤中重金属的空间分布情况, 7 种重金属整体呈现出在沿江一线土壤重金属含量较低, 而在人口稀疏的地区土壤重金属含量较高; 研究区西北部有申扎-旁多成矿带, 丰富的矿产资源导致该区域内 Cr、Ni、Cu、As 和 Pb 的含量较高; 在康马县

和浪卡子县交界处、康马县中部, 这一区域海拔较高, 土地覆盖类型主要以未利用土地和草地为主, 复杂的地质构造、高背景含量岩石自然风化成为重金属 Zn、As、Cu、Cd 和 Pb 异常分布的主要原因^[33]; 在曲水县和拉萨市达孜区, 当地农业、交通和能源等基础设施的大力发展, 加速了当地 Cu、Zn、Ni 和 Pb 在土壤中的富集^[34].

2.2 基于不同土地覆盖的土壤重金属含量统计

图 4 显示了不同土地利用类型下 7 种重金属的基本统计数据, 采用分边小提琴图进行表示. 根据野外调查采样点和 Google Earth 图像对土地利用类型

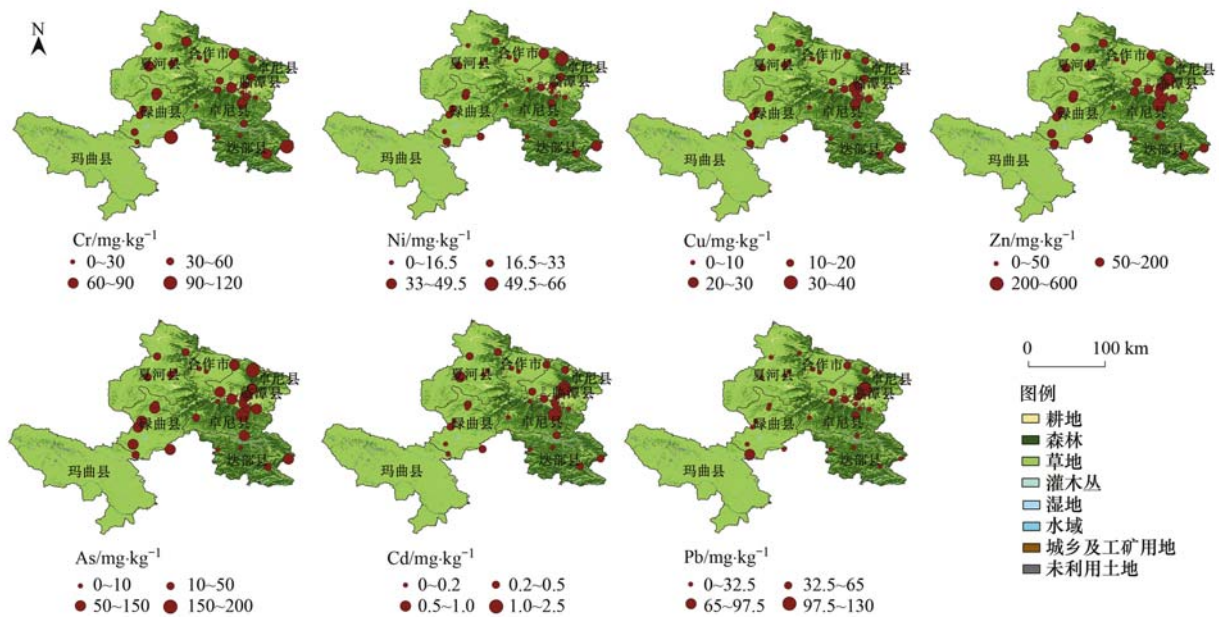


图 2 甘南“一江三河”流域重金属的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in the “Bailong River and Yellow River and their two tributaries” region in Gannan

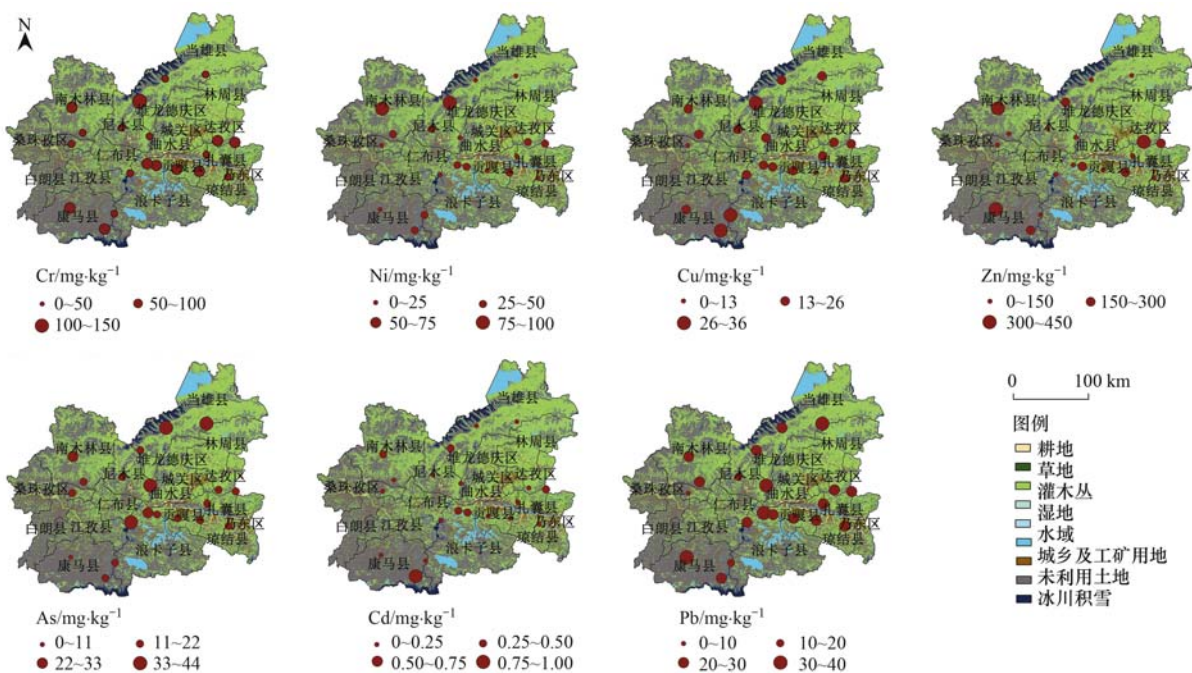


图 3 西藏“一江两河”流域重金属的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals in the “Yarlung Zangbo River and its two tributaries” region in Tibet

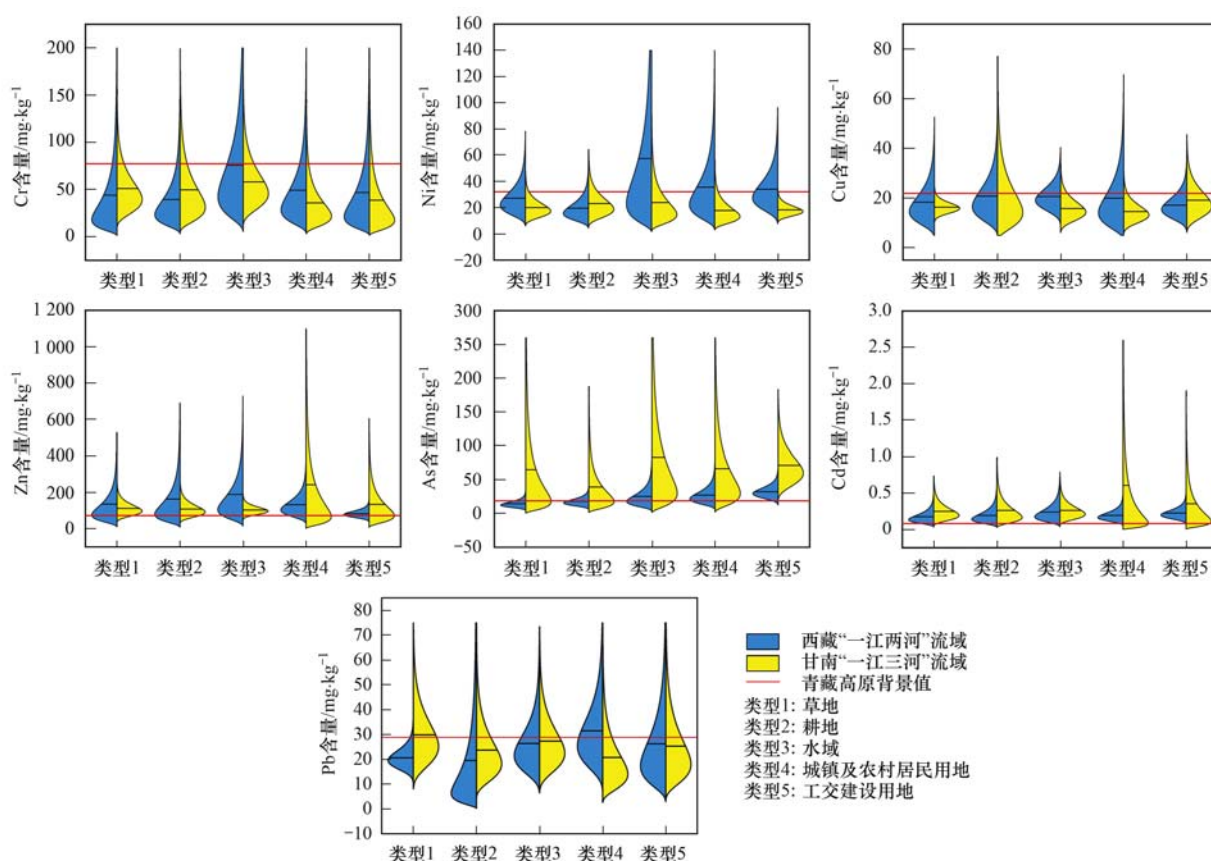


图4 不同土地利用类型下重金属的分裂小提琴图

Fig. 4 Split violin diagram of heavy metals under different types of land use

数据库进行了修正,将土地利用类型重新分配为5个类别,分别是草地、耕地、水域、城镇及农村居民用地和工交建设用地。在不同土地利用类型,两个流域内绝大多数采样点中Cr、Ni、Cu和Pb的含量都低于青藏高原土壤环境背景值,表明土壤环境处于安全范围之内。在水域、城镇及农村居民用地和工交建设用地,甘南“一江三河”流域内Cr、Ni、Cu和Pb的含量均低于西藏“一江两河”流域的含量,而土地利用类型为耕地时,甘南“一江三河”内Cr、Ni、Cu和Pb的含量高于西藏“一江两河”流域的含量。

两个流域内绝大多数采样点中Zn、As和Cd的含量高于青藏高原土壤环境背景值,As的高含量主要是由于青藏高原广泛分布着富含As的页岩,导致As的含量远大于中国土壤背景值和世界土壤背景值^[35];而Zn和Cd的高值有可能是受到工农业的影响,例如化石燃料和冶金工业会释放挥发性的Zn和Cd^[36],也有研究表明青藏高原表层土壤中Zn和Cd含量较高主要受交通因素的影响^[37]。在甘南“一江三河”流域,Zn和Cd的最大值均出现在城镇及农村居民用地,其值分别为 $169.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;As的最大值出现在水域,其值为 $81.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在西藏“一江两河”流域,Zn和Cd最大值均出现在水域,分别为 $174.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和

$0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,As的最大值出现在工交建设用地,其值为 $28.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同土地覆盖类型下,西藏“一江两河”流域内Zn的含量高于甘南“一江三河”流域,这主要是由于西藏冈底斯地区是重要的Pb-Zn多金属矿产资源基地,加之“一江两河”流域位于冈底斯构造岩浆带,间歇性的火山作用和地壳相撞、挤压等运动导致土壤表层中重金属含量升高^[38],而且Zn元素极易溶于水,频繁的地热活动导致含Zn矿物溶解并随地热活动释放的气液排出。而在甘南“一江三河”流域内As和Cd的含量均高于西藏“一江两河”流域,这可能是由于甘南“一江三河”流域属于湿润偏干区,形成了高寒低温、湿润多雨的气候,在雨水冲刷淋溶等作用下富集在不同土地类型的土壤中;其次,甘南“一江三河”流域生态环境日趋退化,与20世纪80年代初相比,水土流失面积增加47.75%,已达到 1.18 万 km^2 ^[16],加重了重金属的异常迁移。

两个研究区内不同土地覆盖区7种重金属的相关性见表5,可以在一定程度上反映不同重金属之间的相互依存关系,较强的相关性可能来自同一种污染源,较弱的相关性可能来自不同的污染源。土地利用类型为草地时,甘南“一江三河”流域表层土壤中Cr和Pb分别与其他重金属之间均呈显著正相关

表 5 不同土地利用类型下重金属含量之间的相关性¹⁾

Table 5 Correlation between heavy metal concentrations under different types of land use

土地覆盖区	元素	甘南“一江三河”流域						
		Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
草地	Cr	1	0.502	0.542 *	0.535 *	0.736 **	0.745 **	0.684 **
	Ni		1	0.322	0.426	0.392	0.381	0.892 **
	Cu			1	0.410	0.277	0.382	0.397
	Zn				1	0.737 **	0.689 **	0.672 **
	As					1	0.756 **	0.705 **
	Cd						1	0.683 **
	Pb							1
耕地	Cr	1	0.455	-0.261	-0.214	0.779 **	0.318	-0.013
	Ni		1	0.606 *	0.169	0.491	-0.059	0.307
	Cu			1	0.188	-0.214	-0.124	0.385
	Zn				1	-0.124	-0.267	0.386
	As					1	-0.239	0.215
	Cd						1	-0.491
	Pb							1
水域	Cr	1	0.140	0.428	0.306	-0.104	0.562 *	-0.179
	Ni		1	0.521 *	0.477	0.595 *	0.008	-0.125
	Cu			1	0.547 *	0.498 *	0.256	0.120
	Zn				1	0.422	0.149	0.368
	As					1	-0.217	0.097
	Cd						1	0.239
	Pb							1
城镇及农村居民用地	Cr	1	0.525 **	0.677 **	-0.062	0.524 *	0.208	0.600 **
	Ni		1	0.629 **	0.368	0.388	0.442 *	0.409 *
	Cu			1	0.280	0.770 **	0.445 *	0.531 *
	Zn				1	0.251	0.663 **	0.066
	As					1	0.285	0.480 *
	Cd						1	0.172
	Pb							1
工交建设用地	Cr	1	0.145	-0.094	-0.395	0.471	-0.272	0.582 *
	Ni		1	0.580 *	0.016	0.503 *	0.243	0.034
	Cu			1	0.461	-0.002	0.076	-0.104
	Zn				1	-0.326	0.069	-0.366
	As					1	0.057	0.314
	Cd						1	0.392
	Pb							1
土地覆盖区	元素	西藏“一江两河”流域						
		Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
草地	Cr	1	0.750 **	0.032	0.527 *	0.517 *	0.923 **	0.495
	Ni		1	0.622 *	0.701 **	0.620 *	0.665 **	0.122
	Cu			1	-0.084	0.329	0.047	-0.281
	Zn				1	0.143	0.533	0.268
	As					1	0.385	0.278
	Cd						1	0.611 *
	Pb							1
耕地	Cr	1	0.831 **	0.153	0.463 *	-0.151	0.255	0.377
	Ni		1	-0.114	0.355	-0.128	0.627 *	0.217
	Cu			1	0.028	0.625 **	0.541 **	-0.036
	Zn				1	-0.350	0.312	0.235
	As					1	0.552 *	-0.127
	Cd						1	0.469 *
	Pb							1
水域	Cr	1	0.820 **	0.274	0.292	-0.276	0.399	0.472
	Ni		1	0.503	0.557	-0.031	0.593 *	0.304
	Cu			1	0.176	-0.169	0.342	0.665 *
	Zn				1	0.451	0.375	0.197
	As					1	0.289 *	0.281
	Cd						1	0.424
	Pb							1
城镇及农村居民用地	Cr	1	0.586 *	0.918 **	0.786 **	-0.294	0.755 **	-0.647 *
	Ni		1	0.363	0.354	-0.632 *	0.303	-0.197
	Cu			1	0.753 **	-0.250	0.631 *	-0.641 *
	Zn				1	-0.132	0.414	-0.486
	As					1	0.088	0.004
	Cd						1	-0.596 *
	Pb							1
工交建设用地	Cr	1	0.343	0.568	0.606 *	-0.080	0.236	0.099
	Ni		1	0.275	0.676 *	-0.116	0.115	-0.473
	Cu			1	0.554	-0.126	0.511	-0.199
	Zn				1	-0.220	0.062	-0.348
	As					1	-0.432	-0.483
	Cd						1	-0.006
	Pb							1

1) * 表示重金属之间有显著性差异($P < 0.05$), ** 表示重金属之间有极显著性差异($P < 0.01$)

关系; 西藏“一江两河”流域表层土壤中 Cr 和 Ni 与其他重金属之间达到显著相关水平, 7 种重金属之间均呈正相关关系. 土地利用类型为耕地和水域时, 7 种重金属之间的相关关系较为复杂, 甘南“一江三河”流域 Cd 和西藏“一江两河”流域 As 分别与其他重金属之间呈负相关关系. 土地利用类型为城镇及农村居民用地时, 在甘南“一江三河”流域 7 种重金属之间直接均呈现出正相关关系, 绝大多数重金属之间的相关性达到显著水平, 受人类活动影响较大; 而西藏“一江两河”流域内, Cu 和 Zn 与其他重金属之间呈显著正相关水平, Cd 与其他重金属之间呈正相关, Pb 与其他重金属之间呈负相关. 土地利用类型为工交建设用地时, 两个流域内绝大多数重金属之间的相关性均未通过显著性检验.

2.3 重金属生态风险评价

2.3.1 地累积指数法

表 6 是对不同土地利用类型下重金属的污染程度进行评价. 在甘南“一江三河”流域, Cr、Ni 和 Cu 在 5 类土地利用类型下地累积指数小于 0, 表明在甘南“一江三河”流域没有受到这 3 种重金属的污染. Zn 在草地、耕地和城镇及农村居民用地为轻度

污染等级, 在工交建设用地达到中度污染等级. As 在草地、耕地和工交建设用地达到中度污染等级, 而在水域附近土壤达到中度-重度污染等级, 地累积指数为 2.35. Cd 在工建设用地的地累积指数为 2.34, 达到了中度-重度污染等级, 其他 4 类土地利用类型下 Cd 为轻度污染等级. Pb 在城镇及农村居民用地的地累积指数最大, 为 1.29, 达到了中度污染的等级, 今后应重点关注在此类土地 Pb 的排放. 在西藏“一江两河”流域, Zn 在草地、耕地、水域和工交建设地下均为轻度污染, 土地利用类型为水域时地累积指数最大, 达到了 0.78. Cd 在草地、耕地和城镇及农村居民用地为轻度污染, 而在水域和工交建设用地 Cd 达到了中度污染, 其中工交建设用地 Cd 的地累积指数最大, 为 1.57. Cr、Ni、Cu 和 As 的地累积指数较低, 只有在水域附近土壤 Ni 达到了轻度污染等级, 其他土地利用类型下地累积指数小于 0, 污染等级为无污染. 总体来看, 两个区域内表层土壤均受到了重金属的污染, Cd 污染在两个流域内均存在, 今后应该重点关注 Cd 的排放及对受污染地区重金属的来源分析和调查.

表 6 青藏高原不同流域土壤重金属地累积指数
Table 6 Soil heavy metal accumulation indeces in different watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau

元素	甘南“一江三河”流域					西藏“一江两河”流域				
	草地	耕地	水域	城镇及农村居民用地	工交建设用地	草地	耕地	水域	城镇及农村居民用地	工交建设用地
Cr	-0.36	-0.40	-0.16	-1.23	-1.67	-1.39	-1.55	-0.61	-1.31	-1.58
Ni	-1.29	-1.08	-1.03	-1.43	-1.43	-0.81	-1.29	0.26	-0.49	-1.39
Cu	-1.10	-0.67	-1.14	-0.72	-1.17	-0.83	-0.66	-0.67	-0.94	-0.77
Zn	0.14	0.09	-0.01	0.26	1.14	0.32	0.57	0.78	-0.38	0.29
As	2.00	1.28	2.35	-0.03	1.24	-0.92	-0.63	-0.13	0.22	1.47
Cd	0.74	0.83	0.72	0.72	2.34	0.56	0.71	1.01	0.91	1.57
Pb	-0.10	0.39	0.58	1.29	0.88	-0.95	-0.98	0.70	-0.58	-0.82

2.3.2 潜在生态风险指数法

表 7 是对不同土地利用类型下重金属的潜在生态危害程度进行评价. 在甘南“一江三河”流域, 表层土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn 在 5 种土地利用类型下均处于轻度风险水平. As 在草地中为轻度风险, 其他土地利用类型下都达到了中度风险水平, 其中工交建设用地潜在生态风险指数最大, 达到 91.48. Cd 在草地、耕地和工交建设用地达到中度风险水平, 而在水域、城镇及农村居民用地达到了重度风险水平. Pb 在水域附近土壤中达到了重度风险水平, 其他土地利用类型下均为轻度风险水平. 从综合生态风险指数分析来看, 7 种重金属在草地处于轻度风险水平, 耕地、水域、城镇及农村居民用地和工交建设用地区处于中度风险, 其综合风险指数分别为 156.30、

257.81、180.27 和 183.74. 西藏“一江两河”流域内, Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 在 5 种土地利用类型下均处于轻度风险水平. Cd 在草地、耕地和城镇及农村居民用地中达到了中度风险水平, 在水域和工交建设用地达到重度风险水平, 其中在水域 Cd 的潜在生态风险指数最大, 达到 110.86. 从综合生态风险指数分析来看, 7 种重金属在草地、耕地、城镇及农村居民用地和工交建设用地的综合风险程度为轻度风险水平, 而在水域其综合风险程度达到中度风险水平, 综合风险指数为 160.34.

由于两种评价方法均选择青藏高原背景值作为参考值进行计算, 并未选择国家土壤环境质量标准中的风险筛选值. 因此, 本次研究区和东部地区土壤环境相比两个小流域内土壤环境仍然是一个相对洁

表 7 青藏高原不同流域土壤重金属潜在生态风险评价

Table 7 Assessment of potential ecological risk for soil heavy metals in different watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau

研究区域	土地利用类型	潜在生态风险指数(E_r^i)							综合生态 风险指数 (RI)
		Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	
甘南 “一江三河” 流域	草地	5.69	3.55	4.70	1.60	36.36	79.95	5.71	137.56
	耕地	5.86	3.07	3.49	1.65	59.98	75.26	6.99	156.30
	水域	3.68	2.20	2.68	2.71	44.10	94.31	107.91	257.81
	城镇及农村居民用地	2.33	2.79	3.32	1.06	68.15	92.44	10.18	180.27
	工交建设用地	1.24	2.86	4.39	1.83	91.48	70.51	11.43	183.74
西藏 “一江两河” 流域	草地	2.85	4.26	4.21	1.87	7.88	66.55	3.88	91.49
	耕地	2.56	3.05	4.73	2.22	9.69	73.70	3.81	99.78
	水域	4.90	18.98	4.72	2.58	13.71	110.86	4.59	160.34
	城镇及农村居民用地	3.19	5.55	4.57	1.79	14.69	74.14	4.84	108.77
	工交建设用地	3.02	5.33	2.95	1.14	17.54	84.80	4.05	118.83

净的水平,但本次生态风险评价结果也表明在人为活动剧烈的地方存在向土壤环境输入重金属的情况,制定防治措施来减少青藏高原的重金属污染势在必行。

3 结论

(1)本文通过研究青藏高原上两个小流域的 7 种重金属(Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As),利用地统计学方法,对不同类型土地覆盖区的重金属含量进行分析。甘南“一江三河”流域重金属呈东部高西部低的分布特征,其中 Cd 和 As 含量较高,是青藏高原土壤环境背景值的 4.50 倍和 2.83 倍。西藏“一江两河”流域重金属呈沿江一线低,高海拔地区高的分布特点,其中 Cd 的含量较高,是青藏高原土壤环境背景值的 3.1 倍。

(2)不同土地利用类型下,甘南“一江三河”流域和西藏“一江两河”流域 Cr、Ni、Cu 和 Pb 的含量均低于青藏高原背景值,Zn、As 和 Cd 的含量均超过青藏高原背景值。在甘南“一江三河”流域,Zn 和 Cd 的最大值均出现在城镇及农村居民用地,As 的最大值出现在水域。在西藏“一江两河”流域,Zn 和 Cd 最大值均出现在水域,As 的最大值出现在工交建设用地。

(3)地累积指数法表明两个流域内没有受到 Cr、Ni 和 Cu 的污染,在甘南“一江三河”流域,Zn 和 Cd 在工交建设用地的地累积指数最大,分别为 1.14 和 2.34;As 在水域的地累积指数最大,为 2.35;Pb 在城镇及农村居民用地的地累积指数最大,为 1.29。在西藏“一江两河”流域,Zn 和 Pb 在水域的地累积指数最大,分别为 0.78 和 0.70;As 和 Cd 在工交建设用地的地累积指数最大,为 1.47 和 1.57。潜在生态风险指数法表明在甘南“一江三河”流域,Cr、Ni、Cu 和 Zn 在不同土地利用类型下均为轻度危害,而 As、Cd 和 Pb 危害程度较高;在西藏“一江两河”流域,Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 在不

同土地利用类型下均为轻度危害程度,Cd 的危害程度较高。综合生态风险表明两个流域在水域重金属危害程度最大,均达到中度危害。

参考文献:

[1] 李春芳,曹见飞,吕建树,等.不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J].环境科学,2018,39(12):5628-5638.
Li C F, Cao J F, Lv J S, et al. Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5628-5638.

[2] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, et al. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.

[3] 梁耀杰.我国土壤重金属污染现状及其防治措施探讨[J].资源节约与环保,2020,(1):98.

[4] Wu J, Lu J, Li L, et al. Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chemosphere, 2018, 201: 234-242.

[5] Zhang F, Yan X D, Zeng C, et al. Influence of traffic activity on heavy metal concentrations of roadside farmland soil in mountainous areas [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(5): 1715-1731.

[6] 孙曦,刘合满,周通,等.林芝河谷地区典型农田土壤主要性质及重金属状况初探[J].土壤,2016,48(1):131-138.
Sun X, Liu H M, Zhou T, et al. Preliminary study on soil fertility and heavy metal concentrations of croplands in Nyingchi valley of Tibet [J]. Soils, 2016, 48(1): 131-138.

[7] 康世昌,丛志远,王小萍,等.大气污染物跨境传输及其对青藏高原环境影响[J].科学通报,2019,64(27):2876-2884.
Kang S C, Cong Z Y, Wang X P, et al. The transboundary transport of air pollutants and their environmental impacts on Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2876-2884.

[8] Huang J, Kang S C, Ma M, et al. Accumulation of atmospheric mercury in glacier cryoconite over western China [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(12): 6632-6639.

[9] Yin X F, de Foy B, Wu K P, et al. Gaseous and particulate pollutants in Lhasa, Tibet during 2013-2017: spatial variability, temporal variations and implications [J]. Environmental Pollution, 2019, 253: 68-77.

[10] Zhang Y L, Kang S C, Sprenger M, et al. Black carbon and

- mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau [J]. *Cryosphere*, 2018, **12**: 413-431.
- [11] Wu J, Duan D P, Lu J, *et al.* Inorganic pollution around the Qinghai-Tibet Plateau: an overview of the current observations [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 628-636.
- [12] Łokas E, Zaborska A, Kolicka M, *et al.* Accumulation of atmospheric radionuclides and heavy metals in cryoconite holes on an Arctic glacier [J]. *Chemosphere*, 2016, **160**: 162-172.
- [13] Zhang H, Zhang Y L, Wang Z F, *et al.* Heavy metal enrichment in the soil along the Delhi-Ulan section of the Qinghai-Tibet railway in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(7): 5435-5447.
- [14] Liu S L, Pan G H, Zhang Y Q, *et al.* Risk assessment of soil heavy metals associated with land use variations in the riparian zones of a typical urban river gradient [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **181**: 435-444.
- [15] 赵梅. 甘南州主要河流地表径流演变趋势研究 [J]. *地下水*, 2018, **40**(4): 208-212.
- [16] 赵雪雁, 李巍. 中国地理学中的甘南研究 [J]. *地理研究*, 2019, **38**(4): 743-759.
- Zhao X Y, Li W. Review of Gannan research in Chinese geography [J]. *Geographical Research*, 2019, **38**(4): 743-759.
- [17] 伍光和. 甘南高原的自然条件与生态保护 [M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 2010.
- [18] 刘玉洁, 代粮, 张婕, 等. 资源承载力监测——以西藏“一江两河”地区为例 [J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(7): 1699-1713.
- Liu Y J, Dai L, Zhang J, *et al.* Research on monitoring resource carrying capacity: taking Three-Rivers Region in Tibet as an example [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(7): 1699-1713.
- [19] 李丹, 田沛佩, 罗红英, 等. 西藏“一江两河”耕地生态安全时空格局与障碍诊断 [J]. *农业机械学报*, 2020, **51**(10): 213-222.
- Li D, Tian P P, Luo H Y, *et al.* Spatio-temporal characteristics and obstacle diagnosis of cultivated land ecological security in “one river and two tributaries” region in Tibet [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, **51**(10): 213-222.
- [20] Dai L J, Wang L Q, Liang T, *et al.* Geostatistical analyses and co-occurrence correlations of heavy metals distribution with various types of land use within a watershed in eastern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **653**: 849-859.
- [21] 姚玉璧, 王润元, 邓振镛, 等. 黄河上游主要产流区气候变化及其对水资源的影响——以甘南高原为例 [J]. *中国沙漠*, 2007, **27**(5): 903-909.
- Yao Y B, Wang R Y, Deng Z Y, *et al.* Climate evolution and its impact on water resource change in main runoff generating area of upper yellow river: a case study on Gannan plateau [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, **27**(5): 903-909.
- [22] 杜军, 胡军, 尼玛吉, 等. 1981-2017 年西藏“一江两河”流域 5cm 地温及其界限温度时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2019, **74**(9): 1821-1834.
- Du J, Hu J, Nimaji, *et al.* Spatial-temporal change of mean soil temperature and its critical temperature at 5 cm depth in the region of the Yarlung Zangbo River and its two tributaries of Tibet during 1981-2017 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(9): 1821-1834.
- [23] 中国科学院地理科学与资源研究所. 资源环境科学与数据中心 [EB/OL]. <http://www.resdc.cn/Default.aspx>, 2020-09-21.
- [24] 夏代祥, 刘世坤. 西藏自治区岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [25] GB/T 36199-2018, 土壤质量 土壤采样程序设计指南 [S].
- [26] HJ 803-2016, 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法 [S].
- [27] 徐静, 李杏茹, 张兰, 等. 北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- Xu J, Li X R, Zhang L, *et al.* Concentration and ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} collected in urban and suburban areas of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2501-2509.
- [28] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- He B, Zhao H, Wang T Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- [29] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [30] GB15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
- [31] 成延鳌, 田均良. 西藏土壤元素背景值及其分布特征 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [32] 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.
- [33] 吴旌, 徐亚东, 安显银, 等. 冈底斯新元古代-中生代沉积盆地演化 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2014, **39**(8): 1052-1064.
- Wu J, Xu Y D, An X Y, *et al.* Evolution of neoproterozoic-mesozoic sedimentary basins in Gangdese area, Tibetan plateau [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, **39**(8): 1052-1064.
- [34] Niu F Q, Yang X Y, Zhang X P. Application of an evaluation method of resource and environment carrying capacity in the adjustment of industrial structure in Tibet [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, **30**(2): 319-332.
- [35] Li C L, Kang S C, Chen P F, *et al.* Geothermal spring causes arsenic contamination in river waters of the southern Tibetan Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(9): 4143-4148.
- [36] 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.
- [37] Zhang H, Wang Z F, Zhang Y L, *et al.* Identification of traffic-related metals and the effects of different environments on their enrichment in roadside soils along the Qinghai-Tibet highway [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **521-522**: 160-172.
- [38] 王金贵, 张鑫全, 魏文通, 等. 西藏雅鲁藏布缝合带三叠系朗杰学群沉积岩古生物、地球化学特征及其物源区和构造背景分析 [J]. *地质学报*, 2020, **94**(4): 1208-1226.
- Wang J G, Zhang X Q, Wei W T, *et al.* Paleontology, geochemistry and provenance of sedimentary rocks from the Triassic Langjixue group in the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet and their tectonic setting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, **94**(4): 1208-1226.

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 (<i>Nereididae</i>) 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)