

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 寒林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素：以云南哀牢山为例

刘旭¹, 王训¹, 王定勇^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为探究微量重金属元素的分布格局与局地气候、人类活动、植被分布和土壤发育差异等影响因素的关联作用, 本文以云南哀牢山迎风坡(西坡)与背风坡(东坡)850~2650 m之间的9个海拔高度的森林样地为研究对象, 重点探讨了迎风坡与背风坡森林表层土壤中典型重金属海拔分布格局差异及其主控因素。结果表明, 土壤中Cd、Sb、As、Cr和Pb的含量及富集因子较高; 东西坡土壤层中Cd、Sb和东坡Pb的含量具有较明显的海拔分布模式, 其含量随海拔升高而增加; 同一海拔西坡土壤层中Cd、Sb、As和Cr的含量显著高于东坡的相关含量。相关分析和主成分分析结果显示, Cd和Sb分布格局变化主要受控于大气输入沉降与土壤有机质的强结合作用, 高海拔区域存在明显的“冷捕集”效应(cold-trapping), As和Cr的分布变化主要来源于土壤母质风化差异, 而Pb的分布差异受基岩矿物风化控制。研究结果强调了大气沉降输入、降水与植被的综合效应(如“冷捕集”效应、促进冠层过滤、凋落物沉降与岩石风化等)对偏远高山土壤中微量重金属分布格局的影响作用。

关键词: 哀牢山; 微量重金属; 海拔分布; 影响因素; 来源分析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3507-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012029

Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province

LIU Xu¹, WANG Xun¹, WANG Ding-yong^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China)

Abstract: In this study, we hypothesized that the distribution patterns of trace metal elements in montane regions would be controlled by the local climate, human activities, vegetation distribution and soil development. Hence, we selected nine forest sites among the elevation of 850 m to 2 650 m on the windward (western slope) and leeward (eastern slope) slopes of Ailao Mountain in Yunnan Province of China to determine the typical heavy metal concentrations in forest surface soils, and their differences for distribution trends along with the increasing elevations, and the corresponding environmental factors. The results showed that surface soil Cd, Sb, As, Cr, and Pb had relatively higher concentrations and distinct enrichment factors both on eastern and western slopes. Specifically, the concentrations of Cd and Sb in surface soils of the eastern and western slopes and Pb on the western slope all had obvious altitude distribution trends, which showed their concentrations increased with the increasing elevation. In addition, we found the concentrations of Cd, Sb, As, and Cr in surface soils of the western slope were significantly higher than those of the eastern slope at the same altitude. The correlation analysis and principal component analysis further depicted that the elevation trends of Cd and Sb were mainly controlled by the strong combining effects from long-range atmospheric input and soil organic matter strong absorption, and there was an obvious “cold trapping” effect in high altitude areas. The distribution variations of As and Cr were mainly derived from the weathering difference of soil parent material, while the variations for Pb were controlled by the weathering of bedrock minerals. This study highlights the important role of combining effects from long-range atmospheric input, and from precipitation and vegetation (such as “cold trapping” effect, promoting canopy filtration, litterfall deposition and bedrock weathering) on the distribution trends of trace metals in remote alpine soils.

Key words: Ailao Mountain; trace heavy metals; altitude distribution; influencing factors; source analysis

近几十年来,随着工业的快速发展,人类活动向环境中排放的大量有毒重金属导致了一系列的环境问题。尤其是高山地区,其脆弱的生态系统,特殊的气候环境,对全球变化与重金属污染的响应十分敏感^[1]。众多证据表明,高山地区虽远离人为源,但其强烈的“冷捕集”效应(cold-trapping)能显著促进大气长距离传输来的重金属污染物沉积在山地土壤中^[2-5],对高山生态系统的生态安全带来潜在的

风险。例如,随着全球变暖和土壤酸化作用的增强,土壤中的微量重金属随河流进入下游水生系统,造成重金属在水生食物链的富集,对野生动物和人类健

收稿日期: 2020-12-04; 修订日期: 2020-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(4197272); 中央高校基本科研业务费专项(SWU019037)

作者简介: 刘旭(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 1576441949@qq.com

* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

康造成直接威胁^[6,7]. 因此,研究高山生态系统中微量重金属元素的分布、来源及关键控制因素,对生态环境风险的管控具有重要意义. 近年来,国内外研究者针对不同区域高山地区土壤微量重金属污染进行了大量研究,对不同海拔下土壤微量重金属的含量分布及人为活动的影响作用取得了长足进展^[8~11],但对气候-植被格局-人类活动协同与反馈效应对山地土壤微量重金属分布格局的关联作用仍缺乏深入的认识.

哀牢山位于中国西南部云南省的云贵高原、横断山脉和西藏高原之间,是云南重要的气候与生态类型的分界线^[12]. 由于冬季弱冷空气西进和西南暖湿气流东进时皆被山体所阻,哀牢山形成了西坡降水多于东坡,气候垂直分布明显,植被分布亦具有明显垂直差异的特色高山森林生态系统^[13]. 哀牢山为探究气候-植被格局-人类活动对高山地区土壤微量重金属元素分布格局的影响作用,提供了较好的研究平台. 近年来,相关研究表明哀牢山高山土壤中的汞(Hg)受到大气沉降的影响,降水和凋落物是大气中 Hg 向哀牢山土壤中输送的两大主要途径,哀牢山东西坡向的气候差异能显著影响 Hg 在不同坡向土壤中的分布格局^[14,15]. 然而,当前哀牢山其他重要的微量重金属元素(Cd、Pb 和 Sb 等)的分布格局与局地气候、人类活动、植被分布及土壤发育差异等影响因素的关联作用研究不足,认识不明.

因而,本研究基于哀牢山迎风坡(西坡)与背风坡(东坡)这条大海拔横断面,分别从东西坡选择了 850~2 650 m 之间的不同类型森林样地,通过比较不同海拔与同一海拔不同气候环境下土壤中微量重金属的累积和分布格局的差异,旨在阐明其相关核心影响因素,并探讨典型森林土壤中微量重金属潜在来源,以期为山地森林重金属生物地球化学循环提供数据支撑与理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究选取了位于云南普洱景东境内的哀牢山(24°32'N, 101°01'E)中 850~2 650 m 的东西坡为研究对象. 该区域气候常年受西南季风影响,有明显的旱季(11月至次年5月)和雨季(6~9月). 表1总结了哀牢山东西坡不同海拔的温度、降雨、叶面积指数(Leaf area index, LAI)、林冠覆盖率、森林类型和优势树种等信息. 干热河谷植被主要分布在海拔 850~1 000 m 的东坡; 1 000~2 400 m 的东西坡均以针叶(松树属)与常绿阔叶树种(<40%)的混交林为主; 2 500~2 650 m 的东西坡山地区域以常绿

阔叶林为主. 值得注意的是,东西坡的降水量均随海拔的增加而增加,但西坡处于山体的迎风面,在海拔 1 250 m 处,其年降水强度比同海拔东坡高 200 mm 左右($P < 0.05$, 独立样本 T 检验). 这种降水差异随着海拔高度的增加而变小,到海拔 2 500 m 处,东西坡的年降水强度相当. 相比于降水,两个坡度同一海拔高度的气温相当(相关气象资料来源于云南哀牢山森林生态系统国家野外科学观测研究站 <http://alf.cern.ac.cn/meta/metaData>).

1.2 样品收集和预处理

对地形和植被进行详细调查后,本研究于 2017 年 4 月在东坡选取了 850(干热河谷谷底)、1 000、1 250、1 500、1 850、2 100、2 400、2 500 和 2 650 m 这 9 个不同海拔的研究样点;在西坡选取了 1 250(西坡最低点,靠近景东县城)、1 500、1 850、2 100、2 400、2 500 和 2 650 m, 7 个不同海拔的森林样点(详见表 1). 在每个研究样点,分别设置 3~4 个 5 m × 5 m 重复土壤样方. 每个重复样方按照“蛇形”布点的方式,分别采集样方内 5~6 个具体采样点的凋落物及 0~20 cm 的土壤样品,并混合组成 500 g 左右的相关样品. 由于西坡 2 400 m 与东坡 1 500 m 采样点凋落物层和土壤层发育程度不同,该两处样地凋落物样品缺失. 本研究总共收集东坡凋落物 26 个、东坡土壤 29 个、西坡凋落物 23 个和西坡土壤 21 个,并分别装入聚乙烯袋,带回实验室进行预处理. 值得注意的是,由于森林部分样点存在土壤异质性,尽管在异质性较大的样点设置了 4 个左右的重复样方,其采样仍可能存在误差.

为了保证样品的均一性,用双蒸馏水去除凋落物表面的尘土. 凋落物样品洗净尘土后,置于烘箱中,50℃烘干至恒重(连续两次 8 h 加热,其质量变化 < 0.03%),然后样品经电粉碎机研磨,过 100 目筛,装入聚乙烯袋备用. 土壤样品置于无尘房间,室温下风干数周,去处杂质,用玛瑙研钵研磨过 200 目筛,装入聚乙烯袋备用. 为防止人为引入污染,整个样品预处理期间全程佩戴一次性手套,且每处理完一个样品,更换手套,并用酒精擦洗研磨与过筛工具.

1.3 化学分析

样品的总碳(TC)与总氮(TN)采用德国元素分析仪(Elementar vario macro cube)测试. 样品测试过程中,每个样品的 TC 与 TN 均测试 2 次以上,直至平行数据的差异性 < 5%. 每 10 次样品测试后,加标进行质量控制. 其中凋落物样品测试中采用 AR-2026 为标准物质;土壤样品测试时,采用 IVA99994 为标准物质. TC 与 TN 整体实验中,加标样品的

表 1 哀牢山不同海拔采样点信息
Table 1 Description of sampling sites along the elevations at Ailao Mountain

项目		海拔/m				
		850	1 000	1 250	1 500	1 850
降雨/mm	东坡	937.0	995.0	1 099.6	1 215.2	1 397.9
	西坡			1 259.9	1 383.6	1 541.0
温度/℃	东坡	23.3	22.7	21.6	20.3	18.0
	西坡			21.3	20.0	17.7
叶面积指数	东坡	2.6	1.3	0.9	2.2	1.4
	西坡			2.4	3.3	3.3
植被覆盖度/%	东坡	60	50	40	60	60
	西坡			60	70	70
植被类型	东坡	干热河谷植被	干热河谷植被	针阔混交林(阔叶林占 20%)	针阔混交林(阔叶林占 15%)	针阔混交林(阔叶林占 25%)
	西坡			针阔混交林(阔叶林占 25%)	针阔混交林(阔叶林占 15%)	针阔混交林(阔叶林占 25%)
优势种	东坡	余甘子、红椿和川楝等	余甘子、水锦树和构树等	余甘子、云南松和栓皮栎等	云南松、西南木荷和茶梨等	云南松、西南木荷和杨梅等
	西坡			余甘子、云南松和水锦树等	云南松、西南木荷和茶梨等	云南松、西南木荷和岗桧等

项目		海拔/m			
		2 100	2 400	2 500	2 650
降雨/mm	东坡	1 544.9	1 741.8	1 812.9	1 858.0
	西坡	1 644.6	1 761.4	1 798.7	1 858.0
温度/℃	东坡	16.0	13.3	12.4	10.8
	西坡	16.8	13.1	12.2	10.7
叶面积指数	东坡	0.8	1.9	4.2	2.3
	西坡	3.2	3.6	4.2	2.3
植被覆盖度/%	东坡	70	70	95	90
	西坡	70	70	90	95
植被类型	东坡	针阔混交林(阔叶林占 20%)	针阔混交林(阔叶林占 35%)	阔叶林	阔叶林
	西坡	针阔混交林(阔叶林占 20%)	针阔混交林(阔叶林占 35%)	阔叶林	阔叶林
优势种	东坡	云南松、厚皮香和水红木等	云南松、滇南山杨和截果柯等	木果柯、硬斗柯和变色锥等	硬叶柯和露珠杜鹃
	西坡	云南松、西南木荷和元江栲等	云南松、刀把木和壶壳柯等	木果柯、硬斗柯和变色锥等	叶柯和露珠杜鹃

回收率控制在 98%~104% 范围内。

微量重金属的测试中,对于凋落物样品采用 HNO₃ + H₂O₂ 混合酸高压密闭罐消解,而土壤样品采用 HNO₃ + HF 混合酸高压密闭罐消解。样品消解完毕后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent-7900 型,美国)测定样品中的 Li、Be、V、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Rb、Sr、Mo、Cd、Sb、Cs、Ba、Tl、Pb 和 U 微量重金属含量。测定凋落物和土壤中的微量重金属元素时,分别采用 GBW10020(GSB-11)柑橘叶标准物质和 GBW07407(GSS-7)土壤标准物质进行质量控制。测样时,每个样品均测定 2 次及以上,取其平均值,平行测定的标准偏差 < 5%,且每测 10 个样品后,用标准物质进行一次回收率测定检验。整个实验测试中各目标元素的回收率严格控制在 90%~108% 的变化范围内。

1.4 统计分析

土壤中微量重金属元素的富集因子(EF)计算如下:

EF = (Me/Li)_{样品} / (Me/Li)_{背景}

式中,选择锂(Li)作为参考元素,其中(Me/Li)_{样品}是样品中目标微量重金属与 Li 的含量比,(Me/Li)_{背景}是中国大陆上地壳中目标元素含量与 Li 相应的背

景比值。为了评估微量重金属元素的富集程度,根据前人的研究成果^[16],提出了以下分类等级:EF < 1,无/低富集;1 ≤ EF < 3,中度富集;3 ≤ EF < 6,高度富集;EF ≥ 6,极度富集。

本研究采用 SPSS 25.0 软件完成相关的统计分析,采用 EXCEL 完成图表制作。本研究主要的统计方法如下:采用独立样本 T 检验与单因素方差分析对不同层位和不同海拔的土壤变量均值进行显著性差异分析;采用回归分析、皮尔逊相关分析与主成分分析,探讨土壤中微量重金属分布格局及其影响因素。

2 结果与讨论

2.1 微量重金属的含量与富集因子(EF)

哀牢山凋落物层和土壤层中微量元素的含量分布见表 2。与中国大陆上地壳层和沉积层中的微量重金属含量^[17]相比,东西坡 0~20 cm 土壤层中 Li、Be、Mn、Co、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Mo、Ba、Tl 和 U 的含量低 1~5 倍(P < 0.05,独立样本 T 检验,下同),而东坡 Ni 和西坡 V 的含量相对稍高但差异不显著(P > 0.05)。本研究土壤中的 As、Cd 和 Sb 的含量均高出中国大陆上地壳层和沉积层相关含量 1

~4 倍($P < 0.05$),而 Pb 和 Cr 的含量差异不显著($P > 0.05$).东西坡凋落物层中包括 Sb、As、Cr 和 Pb 等在内的绝大多数微量重金属的含量较低,相比于中国大陆上地壳层和沉积层相关含量,可低几十至几百倍($P < 0.05$),只有 Mn 和 Cd 的含量显著高于中国沉积层相关含量 2~3 倍($P < 0.05$).

表 2 哀牢山东西坡凋落物层与 0~20 cm 土壤层中微量重金属元素的总体含量均值(平均值±标准差)/mg·kg⁻¹

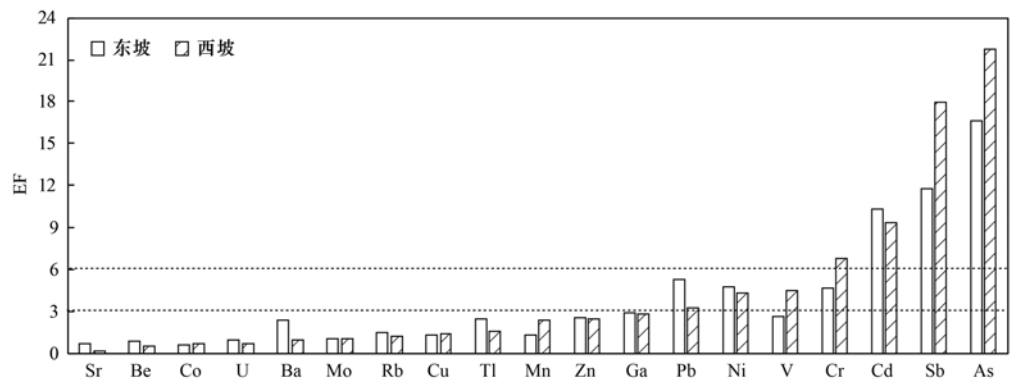
Table 2 Average concentrations of trace heavy metals in the litters and 0-20 cm soils on the eastern and western slopes at Ailao Mountain (Mean ± SD)/mg·kg ⁻¹						
微量元素	中国大陆上地壳层 ¹⁾	中国沉积层 ¹⁾	东坡		西坡	
			凋落物层 (n=26)	土壤层 (n=29)	凋落物层 (n=23)	土壤层 (n=21)
Li	62	26	1.03 ± 1.11	15.7 ± 9.04	0.36 ± 0.15	14.1 ± 5.78
Be	5.5	1.8	0.19 ± 0.26	1.21 ± 0.64	0.04 ± 0.02	0.71 ± 0.23
V	63	54	2.05 ± 1.53	42.6 ± 22.7	1.31 ± 0.84	65.3 ± 32.9
Cr	25	52	26.5 ± 15.1	29.9 ± 15.1	6.79 ± 2.22	38.8 ± 4.78
Mn	500	260	628 ± 397	172 ± 144	967 ± 309	274 ± 206
Co	24	33	0.56 ± 0.44	3.79 ± 2.95	0.46 ± 0.11	4.06 ± 2.21
Ni	13	25	3.98 ± 2.12	15.8 ± 11.2	5.07 ± 2.76	13.0 ± 3.83
Cu	32	28	5.46 ± 1.8	10.5 ± 5.37	4.38 ± 1.93	10.6 ± 3.83
Zn	51	45	25.0 ± 7.96	33.7 ± 11.1	26.7 ± 8.68	29.0 ± 15.2
Ga	18	13	0.64 ± 0.52	13.2 ± 2.37	0.22 ± 0.08	11.6 ± 2.01
As	2.5	5.0	0.60 ± 0.23	10.5 ± 4.62	0.48 ± 0.19	12.4 ± 3.22
Rb	210	95	7.43 ± 2.97	80.8 ± 31.97	4.50 ± 2.36	62.0 ± 18.1
Sr	470	330	113 ± 134	85.8 ± 96.8	35.1 ± 21.9	18.7 ± 11.4
Mo	1.6	0.56	0.18 ± 0.08	0.44 ± 0.2	0.07 ± 0.03	0.38 ± 0.15
Cd	0.049	0.053	0.21 ± 0.15	0.13 ± 0.09	0.22 ± 0.08	0.10 ± 0.04
Sb	0.19	0.39	0.07 ± 0.04	0.56 ± 0.42	0.08 ± 0.02	0.78 ± 0.37
Cs	—	—	0.32 ± 0.24	6.12 ± 2.56	0.12 ± 0.04	3.59 ± 0.68
Ba	660	260	118 ± 107	409 ± 357	106 ± 148	145 ± 37.7
Tl	0.88	0.50	0.05 ± 0.02	0.56 ± 0.21	0.03 ± 0.02	0.32 ± 0.08
Pb	19	11	4.24 ± 2.69	25.6 ± 4.60	2.80 ± 0.89	14.3 ± 4.13
U	8.1	2.0	0.12 ± 0.14	1.96 ± 0.80	0.04 ± 0.03	1.40 ± 0.38

1) 引用自文献[17],“—”表示文章中没有相关数据

为了更好地评估土壤中微量重金属的累积程度,本研究计算了它们的富集因子(EF).如图 1 所示,东西坡土壤层中 Sr、Be、Co、U、Ba、Mo、Rb、Cu、Tl、Mn、Zn 和 Ga 的 EF 总体均值均小于 3; Pb、Ni、东坡 Cr 和西坡 V 的 EF 总体均值在 3~6 之间(高度富集); Cd、Sb、As 和西坡 Cr 的 EF 总体均值均大于 6(极度富集),尤其是 As 和 Sb,其 EF 总体均值大于 10. EF 值小于 3 的元素表示富集作用

不明显,主要受自然影响作用控制,而 EF 值较高则可能暗示潜在的人为来源影响^[18].考虑到相关元素含量,EF 指示的富集程度(>3)及相应的环境毒性,本研究重点关注表层 0~20 cm 土壤中 Cd、Sb、As、Cr 和 Pb 在不同海拔和同一海拔不同坡向的分布格局、潜在来源及其主控因素.

2.2 哀牢山山地系统中微量重金属的海拔分布格局
高山地区微量重金属的积累与分布格局受海拔



两条虚线分别表示 EF = 3 和 EF = 6,代表土壤微量重金属的富集等级:EF < 3,中低度富集; 3 ≤ EF < 6,高度富集; EF ≥ 6,极度富集
图 1 哀牢山东西坡土壤微量重金属元素富集因子的总体均值

Fig. 1 Average enrichment factors (EF) of trace heavy metals in surface soils of the eastern and western slopes at Ailao Mountain

高度、局地气候、人类活动、植被类型和土壤发育差异的综合影响作用. 低海拔地区, 由于频繁的人类活动, 大气颗粒物中重金属含量较高, 大气重金属直接干沉降作用明显; 而高海拔地区由于其温度低、降雨多, “冷捕集”效应产生的大气湿沉降能显著促进微量重金属的积累^[19]. 此外, 不同的植被类型与土壤发育差异, 能显著影响微量重金属的大气沉降和地质来源贡献等, 并通过相应生物地球化学过程影响这些重金属在植被-土壤体系中的重新分配^[20~23].

从图 2 可知, 在东坡低海拔区域的干热河谷地

带(850 m), 表层 0~20 cm 土壤中 Cd、Sb、As 和 Cr 的含量处于较高水平. 尤其是 Cr 和 As 达到极度富集程度, 此处 Cr 的 EF 值为 7, As 的 EF 值为 18(图 3). 考虑到干热河谷地带, 气候恶劣, 植被发育较差, 且人为活动痕迹不明显, 故推测此处元素的显著富集可能受到了河流冲积扇的影响, 即河流泥沙携带的微量重金属元素随泥沙铺散沉积下来, 造成冲积扇土壤中微量重金属的累积. 西坡的最低点(1 250 m 样点) 由于紧靠景东县城, 受到局部污染源的影响作用明显, 其表层土壤中 Cr、Sb 和 As 含量值也相对较高(图 2).

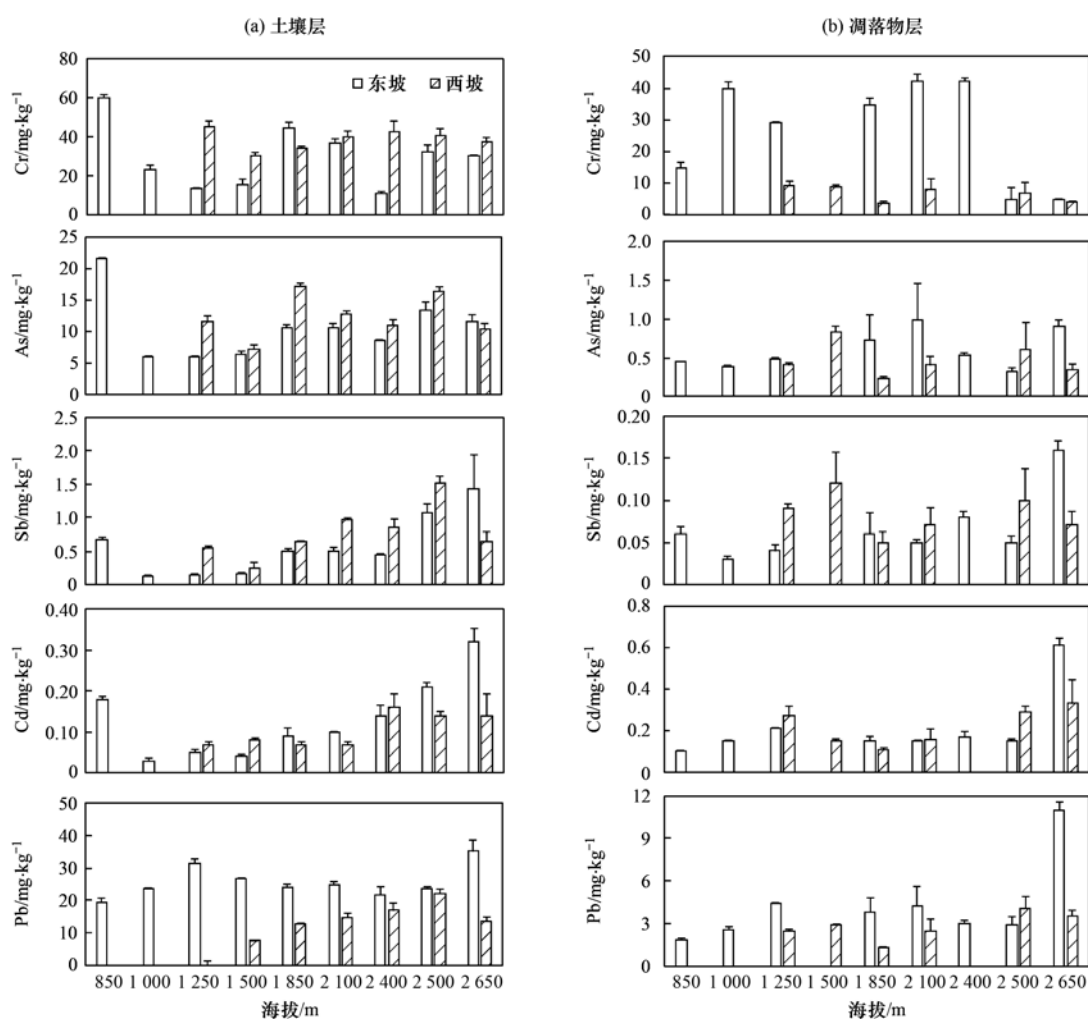


图 2 哀牢山东西坡凋落物和土壤中微量重金属含量的海拔分布差异

Fig. 2 Trends of trace metals in litterfall and surface soil with elevation on eastern and western slopes at Ailao Mountain

海拔 1 250~2 400 m 之间, 东西坡土壤层中 Cd、Sb 和西坡 Pb 的含量以及相应的 EF 具有较明显的海拔分布模式(图 2 和图 3), 总体上相应的数据值随海拔升高而增加, 而 Cr、As 和东坡 Pb 的海拔分布模式相对不明显. 相比于表层 0~20 cm 土壤, 凋落物层中的重金属没有明显的海拔分布格局. 土壤中重金属含量随海拔升高而增加, 这可能与山地区域“冷捕集”效应导致的大气湿沉降显著增加,

以及高山区域有机质累积后对相应重金属的强吸附作用相关^[24~26]. 另外随着海拔的升高, 凋落物的生物量显著增加, 因而与凋落物相关的重金属的沉降通量也可能显著增加, 进而促进土壤中重金属的累积^[27]. 例如, Wu 等^[28]的研究表明, 植物体内从大气中吸附或从土壤中吸收的微量重金属可以随凋落物返回土壤, 并在表层土壤中显著富集. 值得注意的是, 与东坡低海拔的干热河谷相比, 西坡紧靠景东县

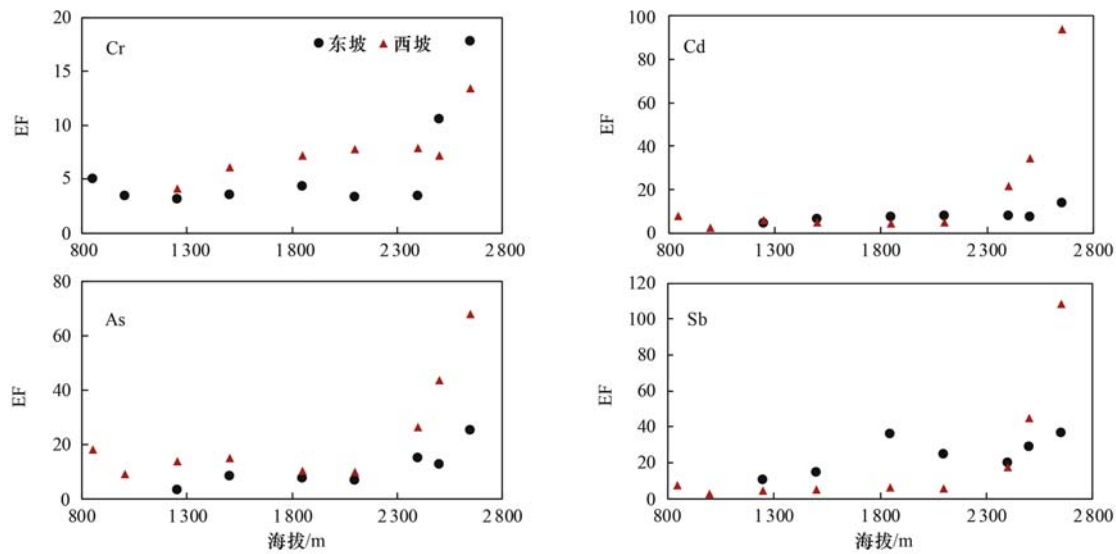


图3 土壤 Cr、Cd、As 和 Sb 的富集因子随海拔变化的分布

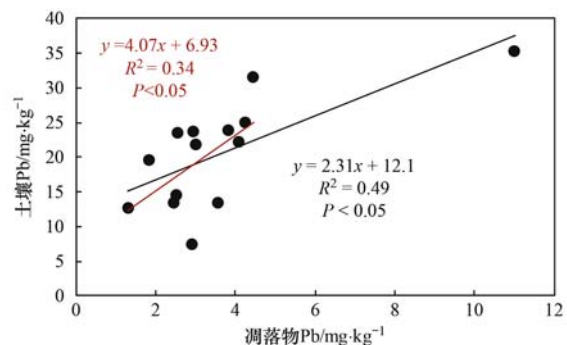
Fig. 3 Variations of enrichment factors (EF) of Cr, Cd, As, and Sb in the surface soils along elevation gradients.

城人类活动区域,在山地气候影响下,人为活动排放的 Pb 可能存在明显的“冷捕集”效应,从而使西坡的 Pb 具有明显的海拔分布模式。

值得注意的是,东坡2 400 m处曾在过去30 年左右发生过森林火灾(哀牢山生态观测站的记录),森林大火影响下植被发育变差,土壤 C 含量显著降低,同时也导致此处土壤中微量元素不同程度地流失,因而其土壤中 Cr、As、Sb 和 Pb 的含量较低。海拔2 500~2 650 m 处,除 Cd 和 Sb 外,其余3 种微量重金属的含量出现显著降低。这可能与植被影响作用相关,海拔2 500 m 处以高大的乔木为主,而2 650 m 处的苔藓矮林植株矮小。相关的研究表明,植物的根系分泌物可以通过物理、生化过程增强土壤矿物风化^[29],从而影响土壤微量重金属含量分布。笔者猜测海拔2 650 m 处,植被根系分泌物少,土壤矿物风化能力弱,从而导致土壤中的微量重金属含量相对较低。另外一个重要的影响因素是凋落物重金属沉降通量的差异。2 650 m 植被的凋落物生物量与凋落物中相关金属元素含量均显著小于2 500 m 相关样品,因而凋落物重金属的输入通量较小^[13]。

从同一海拔来看,西坡土壤层中 Cd、Sb、As 和 Cr 的含量值显著高于东坡相关含量值($P < 0.05$,图2)。一方面,这可能是由于西坡作为哀牢山的迎风坡,具有更多的降水,其相关微量重金属湿沉降较东坡高(表1),进而增加了土壤中的相关微量重金属的沉降积累。另一方面,植被生物量的差异可能导致微量重金属大气沉降截留、岩石风化、以及凋落物返还等过程的差异,进而导致土壤中微量重金属含量分布的差异^[30,31]。在本研究中,东坡土壤层和凋落

物层中的 Pb 都高于西坡,而凋落物中的 Pb 和土壤层中的 Pb 有明显的线性关系($P < 0.05$, $R^2 = 0.34$,图4),这说明凋落物的归还作用对土壤中 Pb 的分布有显著影响。植被的冠层过滤及植被根系风化效应也是影响土壤中微量重金属分布的重要机制之一^[21,32]。例如,冠层过滤(指冠层表面的粗糙度的影响使得大气中颗粒物在林间的沉降速率高于空旷区域)主要受叶面积指数差异的调节^[25,33],叶面积指数越高,植物对微量重金属的截留作用就越大。迎风坡 LAI 显著高于背风坡(表1),因而西坡植被相关的过滤及植被根系风化等效应可能强于东坡。



图中红线表示去除最高值后的线性拟合,黑线表示所有数据的线性拟合

图4 哀牢山凋落物和土壤中 Pb 的相关关系

Fig. 4 Pb concentrations in litter and in surface soil at Ailao Mountain

2.3 哀牢山土壤中微量重金属的潜在来源分析

与四川贡嘎山^[25]、四川螺髻山^[24]和广东鼎湖山^[34]相关山地区域研究相比(表3),哀牢山 Cd、As 和 Sb 的含量显著低于这些山地森林土壤含量($P < 0.001$); Cr 的含量高于鼎湖山,但显著低于贡嘎山($P < 0.001$); Pb 的含量与上述山地森林土壤差异

不显著. 哀牢山的土壤微量重金属元素含量与欧洲^[35]、法国^[36]和瑞士^[37]森林土壤的数据也进行了比较(表 3),除瑞士相关森林土壤 Cr 的含量比研究地点高 2~3 倍外,哀牢山其他元素的含量与各地区报告的含量范围重叠. 广东鼎湖山由于地处珠江三角洲,周边区域工业发达,人为源影响显著,因而其森林土壤重金属含量较高^[34]. Bing 等^[25]和 Li 等^[24]的研究表明,四川贡嘎山与螺髻山土壤层 Cd 和 Sb 受到的人为影响显著,且与大气颗粒物长距

离输送导致的大气沉降贡献有关. 欧洲山地区域相关研究也表明,森林土壤中 Cd 的 EF 值显著高于自然背景值,相比于母质土壤风化等自然作用, Cd 人为源的大气沉降输入影响作用显著^[35]. 哀牢山与贡嘎山地理位置相近,且都受西南季风控制,故推测哀牢山土壤中微量重金属的来源与贡嘎山等西南地区背景地区有着共同之处,即受到人为源沉降输入以及与土壤、植被调控相关的生物地球化学过程的影响.

表 3 哀牢山 0~20 cm 森林土壤中微量重金属元素含量与其它已发表的不同森林土壤的比较/mg·kg⁻¹

Table 3 Comparison of trace metals concentrations in montane forest 0-20 cm soils at Ailao Mountain to the values documented in earlier forest soil studies/mg·kg⁻¹

位置	项目	类型	Cr	As	Cd	Sb	Pb
中国	哀牢山(24°32'N, 101°01'E, 山地森林土壤, 850~2 650 m)	范围	10.6~62.4	5.86~21.8	0.02~0.36	0.11~1.78	18.6~37.7
		平均值	29.9	10.5	0.13	0.56	25.6
		标准差	15.1	4.62	0.13	0.42	4.6
		范围	28.9~50.6	6.32~17.7	0.06~0.22	0.16~1.69	7.27~23.5
		平均值	38.3	12.4	0.1	0.78	14.3
		标准差	4.78	3.22	0.04	0.37	4.13
	贡嘎山(29°36'N, 101°53'E, 亚高山森林土壤, 2 000~3 700 m) ^[25]	范围	— ¹⁾	—	—	—	—
		中位数	174	—	0.63	0.53	25.3
		—	—	—	0.68~1.99	—	23.6~51.7
	螺髻山(27°58'N, 102°42'E, 山地森林土壤, 2 200~3 830 m) ^[24]	范围	—	—	1.11	—	39.1
		平均值	—	—	0.41	—	10
		标准差	—	—	—	—	—
	鼎湖山(23°10'N, 112°31'E, 山地森林土壤, 500~800 m) ^[34]	范围	—	—	—	—	—
		平均值	10.9	25.7	0.7	—	60.6
		标准差	—	—	—	—	—
欧洲	比利牛斯山脉(42°38'N, 0°36'E, 山地森林土壤, 1 516~2 872 m) ^[35]	范围	—	7~61	0.09~0.64	—	20~111
		平均值	—	15	0.22	—	45
		标准差	—	12.1	0.11	—	18.7
法国	法国森林土壤 ^[36]	范围	3.01~102.8	—	0.09~0.63	—	3.20~134.4
		平均值	33.53	—	0.23	—	30.3
		标准差	27.6	—	0.14	—	30.1
瑞士	瑞士森林土壤 ^[37]	范围	53.8~128.3	1.6~31.2	—	—	16.9~65.3
		平均值	86.8	8.87	—	—	40.4
		标准差	17.2	7.03	—	—	25.8

1) “—”表示文章中没有相关数据

为了分析哀牢山东、西坡表层土壤重金属的潜在来源,本研究首先应用皮尔逊相关分析,探索土壤微量重金属之间以及与植被、气候指标间的相关关系(如表 4). 本研究选取了海拔、土壤碳(C)、氮(N)、降雨和温度等指标,以表征植被与气候的影响作用. 相关分析结果表明, Cd 和 Sb 与温度呈显著负相关,与海拔、土壤碳(C)、氮(N)和降雨显著正相关(图 5). 前人在哀牢山的研究表明,随着海拔升高、温度降低与降水增加,可促进土壤 C、N 的累积^[13]. 上述的相关性表明 Cd 和 Sb 在土壤的累积与土壤有机质强结合及高海拔较明显的“冷捕集”效应(降雨较高、温度较低导致更为明显的湿沉降)相关. 有研究表明,土壤酸化会加速土壤中微量元素的淋溶和流失,影响土壤中微量元素的累积^[25],但哀

牢山东西坡不同海拔的 pH 值差异不大,变化范围在 4.1~4.8 之间^[38],故推断 pH 对哀牢山表层土壤中微量重金属分布的影响较小. 表层土壤中 As 与 V、Cr、Ni 和 Cu 呈显著正相关($P<0.01$),这可能与土壤中的 Al/Fe 相关的矿物风化相关. Baize 等^[39]的研究也发现包括 Cu、Cr 和 Ni 在内的微量重金属含量随着土壤中 Al/Fe 的含量增加而增加; Wang 等^[40]对贡嘎山微量重金属的研究也支持这一观点,即土壤中 Al/Fe 矿物的风化程度能显著影响土壤中相关微量重金属的含量. 表层土壤中 Cd 和 Cu 的显著正相关关系($P<0.01, R^2=0.65$)可用地球化学亲和性予以解释. Cd 和 Cu 均属于亲硫元素,具有类似的原子结构和化学性质,均与土壤含硫矿物的风化相关,故而在土壤中具有较强的共线性^[41].

表 4 哀牢山表层土壤微量重金属元素与影响因素的相关性矩阵¹⁾
Table 4 Correlation matrix for influencing factors and trace metals in soils at Ailao Mountain

微量元素	影响因素				
	海拔	C	N	降雨	温度
Li	-0.56 *	-0.50 *	-0.51 *	-0.56 *	0.56 *
Be	-0.66 **	-0.46	-0.43	-0.73 **	0.62 *
V	0.18	0.30	0.22	0.20	-0.23
Cr	-0.05	0.04	0.00	0.00	0.02
Co	-0.63 **	-0.44	-0.40	-0.59 *	0.57 *
Ni	-0.36	-0.17	-0.15	-0.36	0.31
Cu	0.10	0.27	0.31	0.15	-0.15
Zn	-0.37	-0.23	-0.23	-0.38	0.34
As	0.08	0.20	0.20	0.13	-0.12
Rb	-0.61 *	-0.51 *	-0.50 *	-0.68 **	0.59 *
Sr	-0.56 *	-0.49	-0.45	-0.64 **	0.57 *
Cd	0.58 *	0.79 **	0.80 **	0.57 *	-0.65 **
Sb	0.70 **	0.74 **	0.69 **	0.70 **	-0.70 **
Ba	-0.51 *	-0.45	-0.42	-0.60 *	0.51 *
Tl	-0.56 *	-0.52 *	-0.50 *	-0.67 **	0.58 *
Pb	0.09	0.26	0.25	-0.05	-0.11

微量元素																
	Li	Be	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Cd	Sb	Ba	Tl	Pb
Li	1.00															
Be	0.22	1.00														
V	0.28	-0.19	1.00													
Cr	0.62 *	-0.14	0.68 **	1.00												
Co	0.71 **	0.28	0.57 *	0.59 *	1.00											
Ni	0.77 **	0.18	0.57 *	0.80 **	0.81 **	1.00										
Cu	0.24	-0.10	0.27	0.60 *	0.31	0.55 *	1.00									
Zn	0.67 **	0.15	0.53 *	0.32	0.79 **	0.63 **	0.09	1.00								
As	0.31	-0.21	0.76 **	0.75 **	0.60 *	0.73 **	0.63 **	0.41	1.00							
Rb	0.28	0.82 **	-0.16	-0.03	0.27	0.24	-0.09	0.09	-0.11	1.00						
Sr	-0.08	0.76 **	-0.42	-0.57 *	-0.03	-0.26	-0.46	-0.02	-0.53 *	0.71 **	1.00					
Cd	-0.29	-0.29	0.30	0.24	-0.09	0.23	0.65 **	-0.08	0.40	-0.34	-0.49	1.00				
Sb	-0.23	-0.49	0.68 **	0.42	0.01	0.20	0.51 *	0.03	0.599 *	-0.50 *	-0.60 *	0.74 **	1.00			
Ba	-0.11	0.69 **	-0.46	-0.58 *	-0.12	-0.30	-0.50 *	-0.12	-0.57 *	0.72 **	0.97 **	-0.49	-0.60 *	1.00		
Tl	0.21	0.79 **	-0.39	-0.32	0.06	0.07	-0.26	0.09	-0.34	0.89 **	0.85 **	-0.41	-0.61 *	0.84 **	1.00	
Pb	-0.15	0.39	-0.15	-0.38	-0.20	-0.03	0.06	0.09	-0.21	0.23	0.46	0.33	0.13	0.46	0.49	1.00

1) * 表示相关性在 $P < 0.05$ 水平上显著, ** 表示相关性在 $P < 0.01$ 水平上显著

本研究对哀牢山土壤中的微量重金属和影响因素进行了主成分分析,进一步揭示 Cd、Sb、As、Cr 和 Pb 等微量元素分布格局的主控因素. 主成分分析结果如表 5 所示,本研究通过最大方差法旋转,共提取出 3 个特征值大于 1.0 的主成分(占总方差的 82%). 其中,第一个成分占总方差的 31%,其主要的载荷因子包括海拔、C、N、降雨、温度、Cd 和 Sb. 这与相关分析的结果吻合,进一步说明土壤中 Cd 和 Sb 的含量分布格局变化受土壤 C 累积后的强吸附作用、人为来源的大气输送与高海拔“冷捕集”效应的综合影响. 第二个成分占总方差的 27%,主要是 Ni、Co、Cr、As、V、Li、Zn 和 Cu 等载荷因子. 考虑到 V 和 Li 等元素属于典型的“亲石”元素(主要来源与母质层风化作用相关)^[41],这表明 Cr 和 As 的空间分布变化极有可能受到不同海拔样点土壤母质

差异的控制. 第三个成分占总方差的 24%,主要载荷因子由 Tl、Be、Sr、Ba、Rb 和 Pb 组成. Be、Sr、Ba 和 Rb 属于典型的岩性元素^[41],揭示了基岩风化的影响,因此笔者推断表层土壤 Pb 的变化主要受成岩特征的控制.

对比哀牢山和贡嘎山的研究结果发现,虽然同处我国西南背景山地地区,其相关重金属的来源既有相似之处,也有显著不同. Bing 等^[25]的研究结果表明贡嘎山土壤中 Pb、Sb 和 Cd 的含量随降水量呈指数增加,表明大气湿沉降的潜在贡献,并进一步指出海螺沟的交通运输和当地燃料的燃烧、中国西南部的采矿、金属冶炼和工业燃煤以及南亚的人为排放是微量重金属潜在的重要来源. 对于哀牢山,先前相关研究运用后向轨迹模型已表明哀牢山云团轨迹区域主要包括以下区域:云南和广西等工业较为发

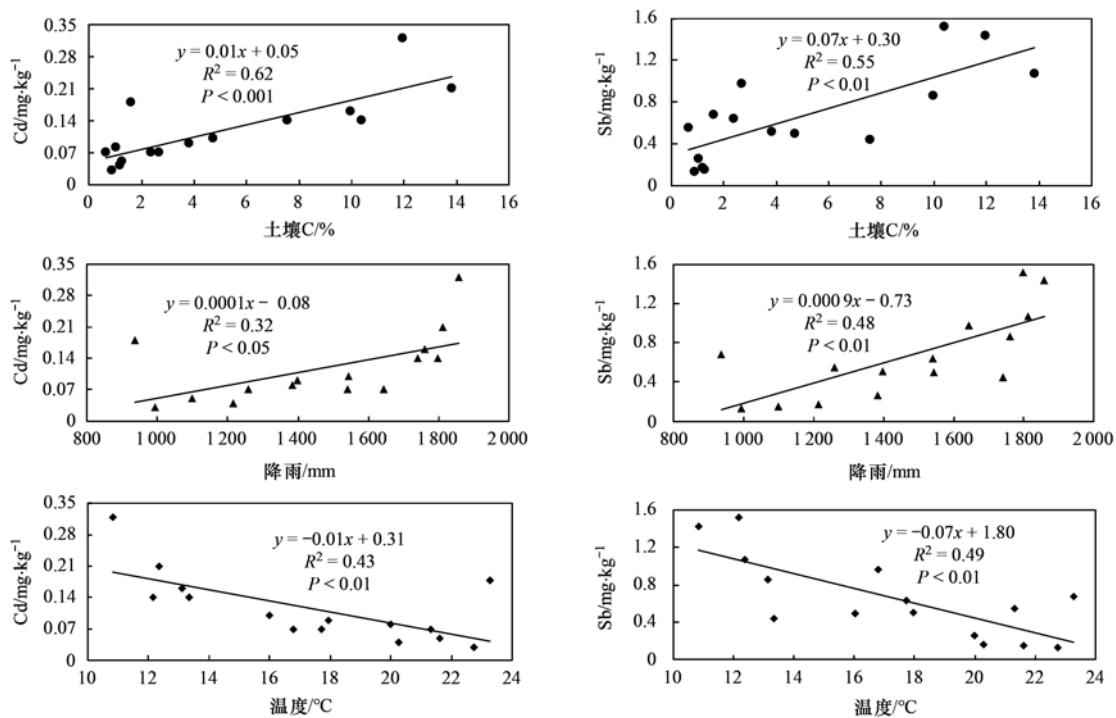


图5 哀牢山东西坡 Cd、Pb 与土壤 C、降雨、温度的相关关系

Fig. 5 Correlation between Cd, Pb, and soil C with precipitation and temperature on eastern and western slopes of Ailao Mountain

表5 土壤微量重金属元素与影响因素的主成分分析结果

Table 5 Results of principal component analysis of trace elements and influencing factors

项目	成分		
	1 (31%)	2 (27%)	3 (24%)
C	0.939	-0.056	-0.223
N	0.913	-0.055	-0.188
Cd	0.870	0.285	-0.050
温度	-0.851	0.207	0.408
海拔	0.807	-0.262	-0.439
Sb	0.783	0.376	-0.311
降雨	0.759	-0.238	-0.558
Ni	-0.093	0.951	0.107
Co	-0.397	0.854	0.098
Cr	0.007	0.842	-0.314
As	0.237	0.828	-0.234
V	0.263	0.729	-0.231
Li	-0.517	0.698	0.053
Zn	-0.229	0.682	0.119
Cu	0.398	0.631	-0.051
Tl	-0.342	-0.105	0.875
Be	-0.313	0.086	0.840
Sr	-0.349	-0.343	0.824
Ba	-0.325	-0.411	0.798
Rb	-0.361	0.118	0.786
Pb	0.473	-0.086	0.747

1) 黑体字表示所占载荷较高的元素，即某成分的主要组成元素

达区域以及缅甸、老挝、孟加拉与印度等国家森林大火频发区域^[42,43]。因而，哀牢山土壤中 Cd 和 Sb 的海拔分布及潜在的来源与同处西南的贡嘎山区域有着相似之处。但对于 Pb 元素而论，本研究表

明，哀牢山土壤 Pb 受到的人为活动影响显著弱于贡嘎山。这可能与贡嘎山作为全国知名的旅游胜地及周边具有发达的工农业产业相关^[25]，其较明显的人类活动排放影响，能显著促进贡嘎山土壤中 Pb 累积。

3 结论

(1) 哀牢山森林土壤中的 Cd 和 Sb 的含量显著高出中国大陆上地壳层和沉积层相关含量 1~4 倍，存在较为明显人为源污染的影响作用。

(2) 在海拔 1 250~2 400 m 间，东西坡土壤层中 Cd、Sb 和西坡 Pb 的含量随海拔升高而增加。从同一海拔来看，在西坡土壤层中 Cd、Sb、As 和 Cr 的含量显著高于东坡含量。山地区域的“冷捕集”效应和植被的综合作用（根系风化效应、凋落物返还、冠层过滤）是形成这种海拔分布格局的关键因素。

(3) 人类活动的排放与河流输送作用是哀牢山低海拔森林土壤重金属异常的主因；此外，森林火灾可显著影响高海拔地区土壤重金属的分布与累积。

(4) 综合相关分析和主成分分析表明，哀牢山表层土壤中 Cd 和 Sb 海拔分布差异主要受控于降水与植被的综合效应，特别是大气输入沉降相关的“冷捕集”效应与土壤有机质的强结合作用；As 和 Cr 分布差异主要来源于土壤母质风化；而 Pb 分布差异主要来源于基岩矿物风化。

参考文献:

- [1] 吴艳宏, 邴海健, 周俊. 山地表生地球化学研究现状与展望[J]. 地球科学与环境学报, 2015, **37**(2): 75-82.
- Wu Y H, Bing H J, Zhou J. Review on mountain supergene geochemistry[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, **37**(2): 75-82.
- [2] Bacardit M, Camarero L. Atmospherically deposited major and trace elements in the winter snowpack along a gradient of altitude in the Central Pyrenees: the seasonal record of long-range fluxes over SW Europe[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(4): 582-595.
- [3] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, *et al.* Atmospheric deposition of lead in remote high mountain of eastern Tibetan Plateau, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 425-435.
- [4] Blackwell B D, Driscoll C T. Deposition of mercury in forests along a montane elevation gradient[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(9): 5363-5370.
- [5] Wang X, Luo J, Yin R S, *et al.* Using mercury isotopes to understand mercury accumulation in the montane forest floor of the eastern Tibetan Plateau[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(2): 801-809.
- [6] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5410-5418.
- Jiang T, Lin W W, Cao Y J, *et al.* Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan reservoir in the Meijiang Basin[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5410-5418.
- [7] 刘孝利, 曾昭霞, 铁柏清, 等. 酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3882-3887.
- Liu X L, Zeng Z X, Tie B Q, *et al.* Major factors influencing the Cd content and seasonal dynamics in different land cover soils in a typical acid rain region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3882-3887.
- [8] 丁园, 余小芬, 赵朝平, 等. 庐山不同海拔森林土壤中重金属含量分析[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(6): 191-194.
- Ding Y, Yu X F, Zhao G P, *et al.* Analysis of heavy metals in soil of forests of Mt. Lushan at different altitudes[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **36**(6): 191-194.
- [9] Magnani A, Ajmone-Marsan F, D'Amico M, *et al.* Soil properties and trace elements distribution along an altitudinal gradient on the southern slope of Mt. Everest, Nepal[J]. CATENA, 2018, **162**: 61-71.
- [10] 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.
- [11] Liu Z R, Hu B, Yang Y J, *et al.* Evaluating the size distribution characteristics and sources of atmospheric trace elements at two mountain sites: comparison of the clean and polluted regions in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(34): 42713-42726.
- [12] Lu Z Y, Wang X, Zhang Y P, *et al.* High mercury accumulation in two subtropical evergreen forests in South China and potential determinants[J]. Journal of Environmental Management, 2016, **183**: 488-496.
- [13] Wang X, Yuan W, Lu Z Y, *et al.* Effects of precipitation on mercury accumulation on subtropical montane forest floor: implications on climate forcing[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2019, **124**(4): 959-972.
- [14] Wang X, Lin C J, Lu Z Y, *et al.* Enhanced accumulation and storage of mercury on subtropical evergreen forest floor: implications on mercury budget in global forest ecosystems[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, **121**(8): 2096-2109.
- [15] Zhou J, Feng X B, Liu H Y, *et al.* Examination of total mercury inputs by precipitation and litterfall in a remote upland forest of Southwestern China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **81**: 364-372.
- [16] Abraham G M S, Parker R J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **136**(1-3): 227-238.
- [17] Li T. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1995, **14**(1): 26-32.
- [18] Huang J, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Atmospheric deposition of trace elements recorded in snow from the Mt. Nyainqêntanglha region, southern Tibetan Plateau[J]. Chemosphere, 2013, **92**(8): 871-881.
- [19] Zhang H, Yin R S, Feng X B, *et al.* Atmospheric mercury inputs in montane soils increase with elevation: evidence from mercury isotope signatures[J]. Scientific Reports, 2013, **3**, doi: 10.1038/srep03322.
- [20] Reimann C, Englmaier P, Fabian K, *et al.* Biogeochemical plant-soil interaction: variable element composition in leaves of four plant species collected along a south-north transect at the southern tip of Norway[J]. Science of the Total Environment, 2015, **506-507**: 480-495.
- [21] Bing H J, Zhou J, Wu Y H, *et al.* Barrier effects of remote high mountain on atmospheric metal transport in the eastern Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2018, **628-629**: 687-696.
- [22] 李向阳, 吴疆, 刘洪强. 鄂东南 5 种森林土壤重金属含量及污染评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, **39**(10): 102-108.
- Li X Y, Wu J, Liu H Q. Concentration and ecology risk assessment of heavy metal in five forest soils in southeastern Hubei province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, **39**(10): 102-108.
- [23] Nguyen C T T, Wasson R J, Estrada E S, *et al.* Soil elemental analysis in a high conservation tropical forest in Singapore[J]. Journal of Environmental Management, 2019, **232**: 999-1011.
- [24] Li R, Bing H J, Wu Y H, *et al.* Altitudinal patterns and controls of trace metal distribution in soils of a remote high mountain, Southwest China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, **40**(1): 505-519.
- [25] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, *et al.* Vegetation and cold trapping modulating elevation-dependent distribution of trace metals in soils of a high mountain in eastern Tibetan Plateau[J]. Scientific Reports, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep24081.
- [26] 祝贺, 吴艳宏, 邴海健, 等. 贡嘎山营养元素和重金属的生物地球化学研究现状与展望[J]. 山地学报, 2017, **35**(5): 686-697.
- Zhu H, Wu Y H, Bing H J, *et al.* Progress and perspective of research on biogeochemistry of nutrient elements and heavy metals in Mt. Gongga[J]. Mountain Research, 2017, **35**(5): 686-697.

- [27] 王训, 袁巍, 冯新斌. 森林生态系统汞的生物地球化学过程[J]. 化学进展, 2017, **29**(9): 970-980.
Wang X, Yuan W, Feng X B. Global review of mercury biogeochemical processes in forest ecosystems[J]. Progress in Chemistry, 2017, **29**(9): 970-980.
- [28] Wu Y H, Liang J H, Bing H J, *et al.* Seasonal and spatial distribution of trace metals in alpine soils of Eastern Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14**(8): 1591-1603.
- [29] Balogh-Brunstad Z, Keller C K, Gill R A, *et al.* The effect of bacteria and fungi on chemical weathering and chemical denudation fluxes in pine growth experiments [J]. Biogeochemistry, 2008, **88**(2): 153-167.
- [30] Reimann C, Fabian K, Schilling J, *et al.* A strong enrichment of potentially toxic elements (PTEs) in Nord-Trøndelag (central Norway) forest soil[J]. Science of the Total Environment, 2015, **536**: 130-141.
- [31] Obrist D, Pearson C, Webster J, *et al.* A synthesis of terrestrial mercury in the western United States: spatial distribution defined by land cover and plant productivity[J]. Science of the Total Environment, 2016, **568**: 522-535.
- [32] 何清清, 邴海健, 吴艳宏, 等. 海螺沟冰川退缩区土壤元素分布特征及影响因素[J]. 山地学报, 2017, **35**(5): 698-708.
He Q Q, Bing H J, Wu Y H, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of soil elements in the retreated area of Hailuoguo Glacier, SW China[J]. Mountain Research, 2017, **35**(5): 698-708.
- [33] 张捷. 马尾松人工林林冠对氮磷硫的截留作用[D]. 成都: 四川农业大学, 2014. 1-5.
Zhang J. Research on the effect of canopy interception of nitrogen and phosphorus sulfur in *Pinus massoniana* plantations [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2014. 1-5.
- [34] Hansen H, Larssen T, Seip H M, *et al.* Trace metals in forest soils at four sites in Southern China[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, **130**(1-4): 1721-1726.
- [35] Bacardit M, Camarero L. Major and trace elements in soils in the Central Pyrenees: high altitude soils as a cumulative record of background atmospheric contamination over SW Europe [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010, **17**(9): 1606-1621.
- [36] Hernandez L, Probst A, Probst J L, *et al.* Heavy metal distribution in some french forest soils: evidence for atmospheric contamination[J]. Science of the Total Environment, 2003, **312**(1-3): 195-219.
- [37] Blaser P, Zimmermann S, Luster J, *et al.* Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils[J]. Science of the Total Environment, 2000, **249**(1-3): 257-280.
- [38] 高大威. 哀牢山国家级自然保护区东西坡土壤理化性质及土壤质量沿海拔梯度变化特征分析[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020. 42-56.
Gao D W. Analysis on the characteristics of soil physical and chemical properties and soil quality along the altitude gradient in the East and West slopes of Ailao Mountains National Nature Reserve[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2020. 42-56.
- [39] Baize D, Sterckeman T. Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements[J]. Science of the Total Environment, 2001, **264**(1-2): 127-139.
- [40] Wang X D, Cheng G W, Zhong X H, *et al.* Trace elements in sub-alpine forest soils on the eastern edge of the Tibetan Plateau, China[J]. Environmental Geology, 2009, **58**(3): 635-643.
- [41] 张宏飞, 高山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012. 83-103.
- [42] Wang X, Zhang H, Lin C J, *et al.* Transboundary transport and deposition of Hg emission from springtime biomass burning in the Indo-China Peninsula [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**(18): 9758-9771.
- [43] Zhang H, Fu X W, Lin C J, *et al.* Monsoon-facilitated characteristics and transport of atmospheric mercury at a high-altitude background site in southwestern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(20): 13131-13148.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)