

赵红坤, 唐世新, 付燕刚, 等. 海南琼中岩-土体系重金属迁移特征及表土环境质量评价[J]. 岩矿测试, 2024, 43(1): 137–151. DOI: 10.15898/j.ykes.202308040122.

ZHAO Hongkun, TANG Shixin, FU Yangang, et al. Migration Characteristics and Environmental Quality Assessment of Heavy Metal Elements in the Rock-Soil System in Qiongzhong, Hainan Island[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(1): 137–151. DOI: 10.15898/j.ykes.202308040122.

海南琼中岩-土体系重金属迁移特征及表土环境质量评价

赵红坤^{1,2}, 唐世新¹, 付燕刚¹, 兰瑞烜^{1,2}, 赵克强¹, 李晓东³, 马生明^{1*}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;
2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
3. 廊坊市绿源生态环境技术有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 地球关键带和土壤重金属污染是当今研究的前沿与热点, 岩-土体系是地球关键带的重要组成部分。目前海南岛针对不同成壤母质岩-土体系的详细研究较少, 并且重金属亟需基于新标准进行评价。为了查清岩-土体系中重金属元素迁移特征及污染状况, 本文以海南岛琼中3个土壤垂向剖面及7115件表层土壤样品为研究对象, 采用电感耦合等离子体质谱/发射光谱法(ICP-MS/OES)和原子荧光光谱法(AFS)等分析方法, 测定岩石和土壤中Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As和Hg共8种重金属元素含量, 利用土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准、内梅罗指数法和潜在生态危害指数法定量评价了表层土壤样品重金属污染状况及生态风险。结果表明, ①海南岛琼中二长花岗岩岩-土体系中, 不同重金属元素表现出明显的分异特征, Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd元素以亏损为主, As元素以富集为主, Hg元素则表现出不同的富集或亏损特征, As、Hg元素尤其富集在表层。②琼中绝大多数表层土壤中重金属元素含量低于土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值, 土壤污染风险低。③以琼中和海南岛背景值为评价标准时, 应关注Cr、Ni和As污染以及Hg、As和Cd的生态危害。以土壤环境质量为评价标准时, 研究区表层土壤的环境质量总体清洁, 生态风险较弱。

关键词: 岩-土体系; 重金属元素; 电感耦合等离子体质谱/发射光谱法(ICP-MS/OES); 原子荧光光谱法(AFS); 质量迁移; 环境质量; 生态风险评价; 海南岛琼中

要点:

- (1) 岩-土体系化学组成、元素定量迁移揭示了重金属元素活动性特征。
- (2) 重金属元素的表生迁移特征, 为其环境效应评价研究提供了研究基础。
- (3) 多指标、多评价标准显示琼中地区表层土壤环境总体清洁, 为当地土地资源绿色开发利用提供了研究案例支持。

中图分类号: P69; X53; X825

文献标识码: A

地球关键带是二十一世纪地球科学的研究前沿与热点, 加强对单要素的研究是地球关键带演化与功能理论框架、耦合内在机制等研究内容的前提^[1]。在地球关键带中, 最主要的是岩-土体系风化成土过

程, 在这个过程中发生了物质迁移转化与相互作用, 调控了地球表面自然生境, 决定了地形地貌, 也决定了生态系统的运行和演化。土壤是岩-土体系的重要组成部分, 同时也是保障地球生态系统结构和功能

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-12-21; 接受日期: 2024-01-16

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2022FY101800); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190305, DD20230309)

第一作者: 赵红坤, 博士研究生, 主要从事地球化学研究。E-mail: zhaohongkun@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 马生明, 博士, 研究员, 主要从事生态地质调查与研究。E-mail: msmigge@163.com。

的核心^[2]。土壤在为人类提供食物和纤维、记录地球和人类演化史、保护生物多样性等方面都发挥了重要作用。然而,随着工业、农业和城市化发展,土壤污染(尤其是土壤重金属污染)已成为目前世界上主要环境问题之一。中国大约19%的农业土壤受到重金属污染^[3]。《2022年中国生态环境状况公报》^[4]指出,影响农用地土壤环境质量的主要污染物是重金属。因此,查明单要素岩-土体系重金属元素的分布、迁移转化特征及表土环境质量具有重要意义,可为地球关键带研究提供案例和参考。

海南岛区域重金属仍是近年来的研究热点^[5-10]。2014年Gong等^[5]研究了海口、屯昌和琼海耕地土中Cr、As、Cd和Pb的粒度组分以及浸出性,只有海口市土壤Cr含量(204mg/kg)超过农业保护限值(150mg/kg),其他样品中Cr、As、Cd和Pb含量均低于允许浓度。Zang等^[6]采用单一污染指数法和综合污染指数法以及美国环境保护署推荐的健康风险评估模型方法,对海南岛水稻进行重金属污染及健康风险评价,结果表明,除Pb外,水稻中其他重金属元素平均含量均在标准范围内,污染区域主要分布在海南岛西部和东北部。周江明^[7]利用地累积指数综合评价了中国各地区耕地表层土壤重金属的积累情况和主要人为污染源,指出海南等12个省(市、区)是中国耕地污染较严重地区,对照最新《土壤环境质量—农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018),整体上中国耕地土壤重金属污染低于风险值。以往的海南岛土壤重金属评价大多依据旧标准《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008),该标准已于2018年废止,因此,重金属污染环境状况亟需基于新标准进行评价。

海南岛是中国第二大岛屿,自然生态环境优越,为建设国家级生态文明试验区,为打造热带农业科学中心和现代农业基地奠定得天独厚的基础。海南岛四周低平,中间高耸,地貌梯级结构明显^[11]。琼中位于海南岛中部,是南渡江、昌化江和万泉河的发源地,其环境质量的优劣不仅事关本地区,还将向三江流域下游辐射,甚至影响到全岛。因此,琼中地区的生态环境质量研究尤为重要。本文研究的重金属元素指在标准状况下单质密度大于5.0g/cm³,且具有明显生物毒性的元素,包括Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As和Hg。土壤中重金属含量及其分布既受控于成土母质,又受控于人类活动影响,还可以在土壤-农作物系统中迁移,当含量超过安全阈值时,就可通过食物链对人体健康造成伤害^[12]。目前对海南岛重金

属研究对象多为表层土壤、砖红壤、农用地土壤、城市土壤、蔬菜、水果以及形态、背景值等^[13-16],而对不同成壤母质岩-土体系的详细研究较少。为了弄清岩-土体系中重金属的迁移和富集特征,本文以岩-土体系物质组成演化为主线,以海南岛琼中为研究区域,以典型的二长花岗岩母质土壤剖面为研究对象,利用电感耦合等离子体质谱/发射光谱法(ICP-MS/OES)和原子荧光光谱法(AFS)测定岩石和土壤中8种重金属含量,采用元素质量迁移系数研究重金属的迁移特征,根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)、内梅罗指数法和潜在生态危害指数法对表层土壤进行环境质量评价,以期为改善海南岛生态环境提供科学依据。

1 实验部分

1.1 研究区概况与岩-土体系样品采集

琼中黎族苗族自治县简称琼中,位于海南岛中部,面积2704km²。成壤母质以二叠纪、侏罗纪、白垩纪酸性侵入岩为主,少量变质岩。琼中雨量充沛^[17]。参考海南省第二次土壤类型普查结果,结合本次调查,研究区土壤以砖红壤和赤红壤为主,植被以橡胶为主,其次为槟榔,农业产品生产保持平稳增长,主要推广益智以及种桑养蚕,以农林牧渔等行业谋生。

海南琼中岩-土体系样品采样点示意图见图1,样品类型为岩石和土壤。土壤垂向剖面样品采集根据成壤母质分布及土壤发生层发育状况,在区内布设3个精细剖面,分别为QZ-I24、QZ-I46和QZ-I70,成壤母岩均为二长花岗岩,形成时代依次为中二叠世、中三叠世和早白垩世,剖面位置坡度依次为155°、15°、140°,高程依次为361m、191m、193m,土壤类型均为砖红壤,土地利用类型均为其他园地,植被依次为槟榔、橡胶、橡胶,均为自然灌溉,无潜在污染源。土壤垂向剖面深度一般为3~5m,利用机械浅钻进行采样,在每个剖面首先根据土壤发生层分出A层(腐植质层或淋溶层)、B层(淀积层)、C层(母质层)和R层(基岩层),然后在每个发生层内根据颜色、粒度等发育程度划分亚层,如B1、B2、C1、C2,总体按20cm左右采样间距,连续采集该间距内的土壤柱为剖面样品。共采集土壤剖面样品51件,相应岩石样品3件。表层样品采集依据土地利用类型为基本地质调查单元开展,在每个基本调查单元内采集3个子样品,混合均匀后获得样品1份,保证干重不低于1kg。共采集表层土壤样品7115件。

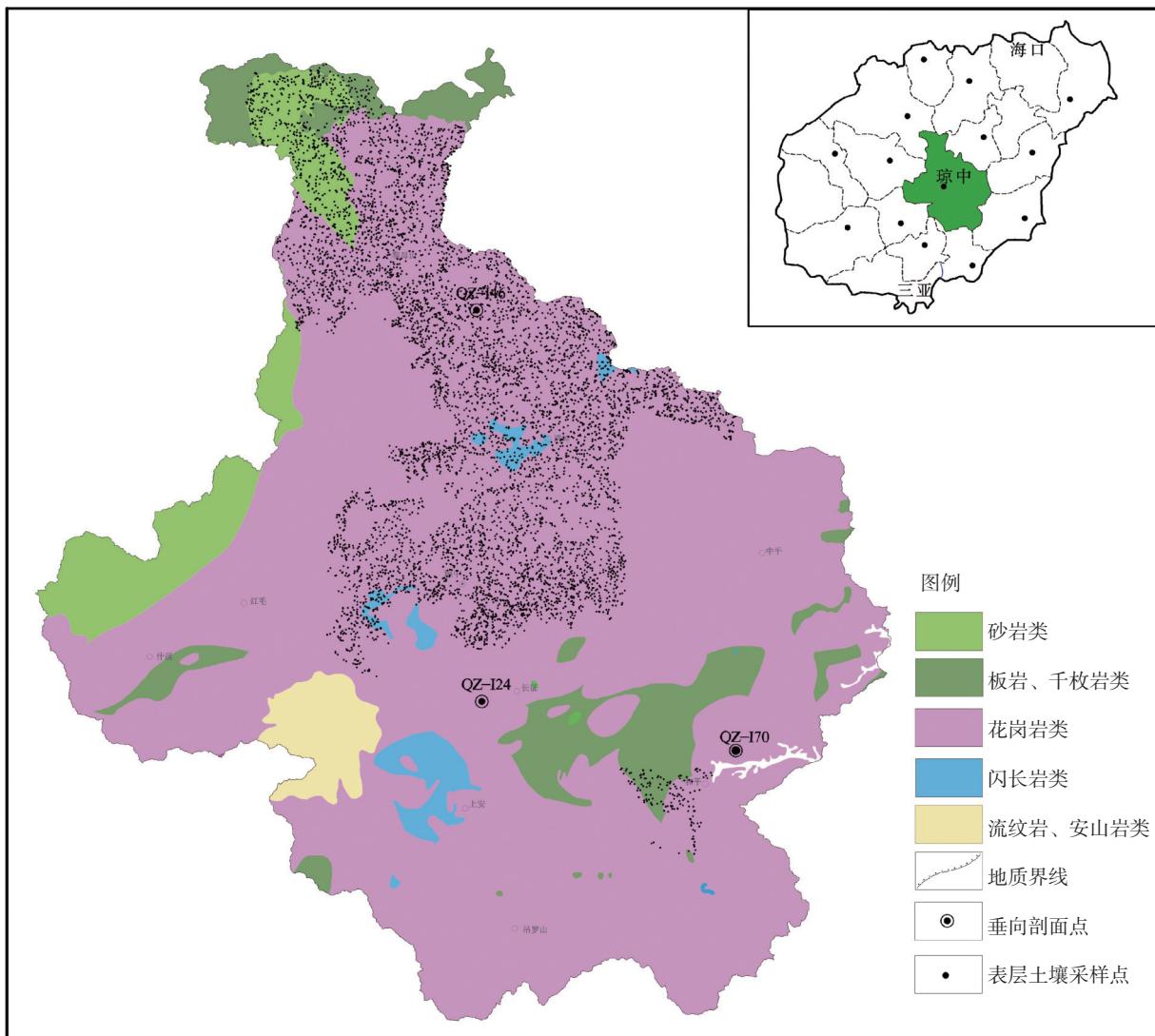


图1 琼中研究区地质、土壤垂向剖面及表层土壤采样点示意图

Fig. 1 Geographic map and soil vertical profile and topsoil sampling sites of the Qiongzhong, Hainan Island.

1.2 样品测试与数据质量监控

采集的样品前处理和测试参照《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T 0279—2016), 在华北有色地质勘查局燕郊中心实验室完成。不同重金属元素测试方法不同。岩石和土壤中 Cu、Pb、Ni 和 Cd 采用 ICP-MS 测定, Zn 和 Cr 采用 ICP-OES 法测定, As 和 Hg 采用 AFS 法测定, 样品分析方法检出限、准确度及相对标准偏差 (RSD) 见表 1。

分析过程质量控制参照《多目标区域地球化学调查规范 (1 : 250000)》(DZ/T 0258—2014)、《生态地球化学评价样品分析方法和技术要求》(DD 2005—03) 和《土地质量地球化学评估样品分析测试技术要求 (试行)》(DD 2008—06), 采用外部质量控制和内部质量监控相结合的方法控制分析质量, 将样

品总数 5% 的样品进行重复样分析, 每 500 件样品中密码插入 12 个 GBW 标准物质进行质量控制, 结果表明样品分析测试 100% 合格。

1.3 数据处理

本研究利用 Excel 2021 和 SPSS 24 进行数据统计分析, 采用偏度、峰度和 Shapiro-Wilk(检验 51 件垂向剖面土壤)、Kolmogorov-Smirnov(检验 7115 件表层土壤) 对重金属含量进行正态分布检验。采用 Origin Pro2022b、Mapgis6.7、Coreldraw2018 以及 Arcgis10.2 绘制相关图件。

2 结果与讨论

2.1 岩-土体系重金属含量与分布特征

岩-土体系重金属垂向分布如图 2 所示, QZ-I24

表1 样品分析方法及准确度、精密度、检出限

Table 1 Analysis method, accuracy, precision and detection limits of the samples.

样品类型	重金属元素	分析方法	准确度 ($\Delta \lg C$)	RSD (%)	检出限 (mg/kg)
	Cu	ICP-MS	0 ~ 0.013	4.64 ~ 6.55	1
	Pb	ICP-MS	0 ~ 0.021	2.76 ~ 7.09	1.5
	Zn	ICP-OES	0.001 ~ 0.014	4.17 ~ 6.22	2
	Cr	ICP-OES	0.001 ~ 0.011	3.59 ~ 5.05	3
土壤	Ni	ICP-MS	0.001 ~ 0.012	3.56 ~ 6.85	1
	Cd	ICP-MS	0 ~ 0.018	4.29 ~ 7.92	0.02
	As	AFS	0.001 ~ 0.017	4.41 ~ 6.59	0.5
	Hg	AFS	0 ~ 0.016	4.73 ~ 7.33	0.0005
	Ti	ICP-OES	0 ~ 0.012	3.02 ~ 5.00	10
岩石	Cu	ICP-MS	0 ~ 0.011	2.49 ~ 5.26	1
	Pb	ICP-MS	0.001 ~ 0.016	4.21 ~ 6.60	1.5
	Zn	ICP-OES	0 ~ 0.017	3.60 ~ 6.88	2
	Cr	ICP-OES	0.002 ~ 0.017	2.99 ~ 6.03	3
	Ni	ICP-MS	0.001 ~ 0.009	3.51 ~ 5.73	1
	Cd	ICP-MS	0.001 ~ 0.011	3.08 ~ 7.83	0.02
	As	AFS	0 ~ 0.013	3.51 ~ 6.40	0.5
	Hg	AFS	0.001 ~ 0.011	4.14 ~ 7.56	0.0005
	Ti	ICP-OES	0.001 ~ 0.015	4.28 ~ 5.77	1

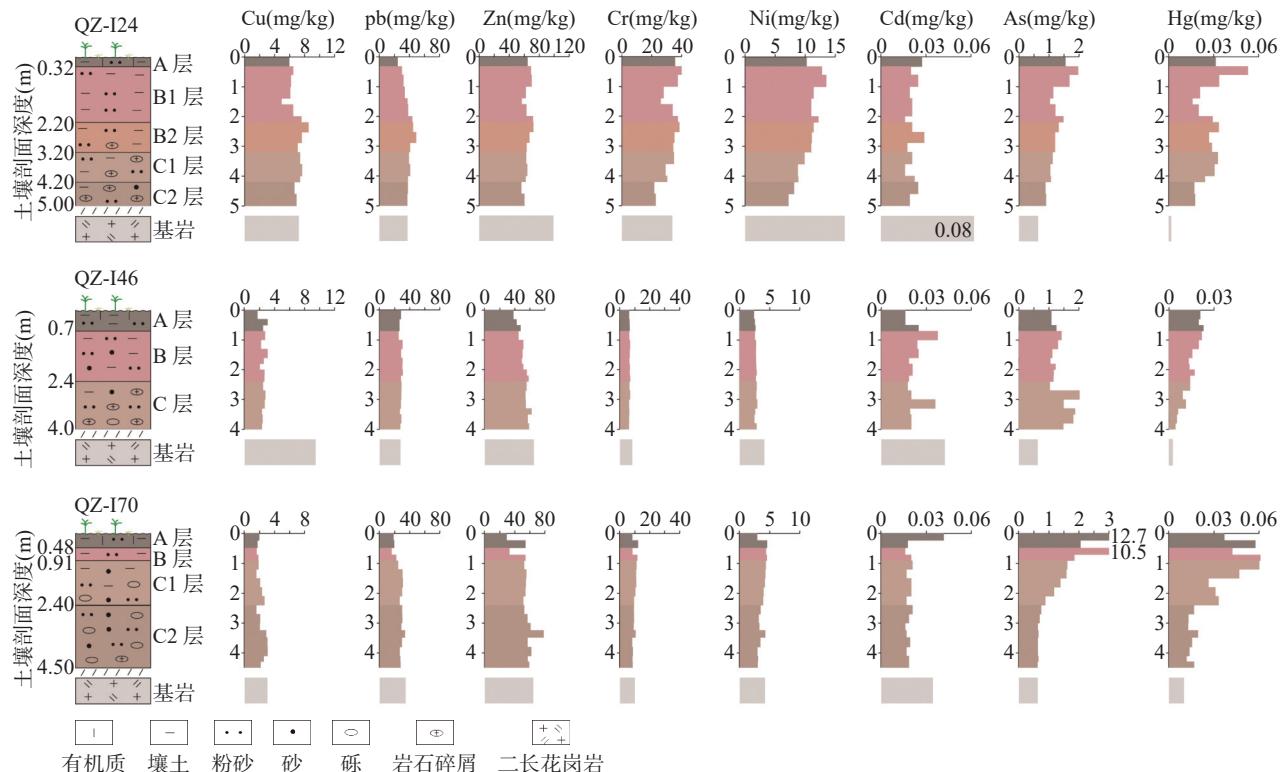


图2 琼中岩-土体系重金属元素含量变化

Fig. 2 Changes of heavy metal element contents in the rock-soil system of Qiongzong, Hainan Island. The contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As and Hg ranged from 1.6 to 9.5, 16 to 49, 29 to 98, 5.8 to 40, 2.4 to 17, 0.02 to 0.08, 0.6 to 12.7 and 0.002 to 0.061mg/kg, respectively. Cu, Pb, Zn, Cr, Ni and Cd were mainly inherited from the parent rocks.

剖面中, Cu 与 Pb, Zn 与 Cr、Ni、As、Hg 变化趋势较为一致, Cd 表现出单独的变化趋势。QZ-I46 剖面中, Zn 与 Ni 变化趋势较为一致, 其他元素表现出各自的变化趋势。QZ-I70 剖面中, Cu 与 Pb、Zn 变化趋势较为一致, Cr 与 Ni、As、Hg 变化趋势较为一致, Cd 表现出单独的变化趋势。整体上, 岩-土体系中 Cr 和 Ni、As 和 Hg 含量变化趋势高度一致, Cu、Pb、Zn 和 Cd 含量表现出各自的变化趋势。

岩-土体系中不同重金属含量随土壤深度变化不一。Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 含量范围分别为 1.6 ~ 9.5、16 ~ 49、29 ~ 98、5.8 ~ 40、2.4 ~ 17、0.02 ~ 0.08、0.6 ~ 12.7 和 0.002 ~ 0.061mg/kg。岩-土体系中 8 种重金属含量都有部分超过基岩中的含量, 其中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 Cd 含量在基岩中最高, 暗示它们在垂向剖面主要继承于母岩。土壤由岩石风化而来, 其五大形成因素分别为气候、母质、植被(生物)、地形和时间。这 3 个剖面均采自琼中, 气候相似, 同时成壤母质一致, 不同剖面上元素的变化趋势不同可能与母质的形成时代、植被类型、风化过程中的元素行为、剖面所处不同位置的淋溶强度有关,

还可能存在外源的加入等。Wang 等^[8]利用地理统计和多元分析对海南岛表土和底土中潜在有毒元素进行研究, 认为 Co、Cr、Cu 和 Sc 主要来自土壤母质, Cd、Hg 和 Pb 主要受外源输入的叠加, As 和 Zn 可能受成土作用和风化作用影响较大。已有研究结果表明, 风化过程中主量元素的地球化学行为控制重金属元素的地球化学行为^[18], 土壤 pH 值、有机质和营养元素、氧化还原电位和土壤阳离子交换量等土壤理化性质、土壤微生物与土壤酶活性、重金属之间的交互作用以及作物根际环境等都会对重金属的分布产生影响^[19], 如 Gong 等^[5]认为海南的海口、屯昌和琼海耕地土中的重金属分布随粒径减小而增大, 不同粒级 Cr、Pb 和 Cd 分布受有机碳和铁含量影响明显。海南岛属于中度到强度风化, 岩-土体系的风化主要体现在长石矿物的分解, 随着高岭石、伊利石和蒙脱石等黏土矿物的生成, QZ-I24 剖面的 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg, QZ-I46 和 QZ-I70 剖面的 Zn、Cd、As、Hg 相对富集。土壤母质是影响土壤铁含量、黏土含量和土壤 pH 值的主要因素^[20]。土壤理化性质主要对土壤重金属存在的形态产生影响。琼中充沛的降雨使得土壤中可交换态和离子态重金属淋洗释放出来, 弱酸性的雨水源源不断地往土壤中输入 H⁺增加对重金属的吸附力, 土壤上的可交换态重金属易于解吸, 同时碳酸盐态、有机结合态等重金属缓慢释放出来, 雨水中 SO₄²⁻、NH₄⁺、NO₃⁻、Ca²⁺也会对土壤中重金属的释放产生影响^[21]。As 和 Hg 含量在 3 个土壤剖面中都明显高于基岩, 说明 As、Hg 元素受到人为等外来因素的影响, 可能与过去使用含 As、Hg 的农药或过量施用肥料有关^[22], 还有研究者提出土壤 Hg 异常是与土壤中的辰砂矿物有关^[23]。综上所述, 不同剖面上元素的变化趋势不同, 反映岩-土体系中的重金属含量受到成土母质重金属含量、重金属分布环境、外源输入以及成壤过程中重金属淋溶的迁移与沉淀等多种因素影响^[18, 24], 并且各种重金属对不同影响因素的响应不同。

2.2 岩-土体系重金属迁移富集特征

迁移系数可以用来表征重金属的迁移能力, 其相对于母岩富集或损失的质量分数可通过质量平衡计算得到^[25-28]。其原理是利用地球化学开放系统中惰性组分质量守恒, 将系统的质量变化转换成惰性组分的浓度变化, 进而估算其他元素的迁移情况。该计算需选择惰性元素作为参比元素, 其中惰性元素包含 Zr、Hf、Nb、Ta、Th、Sc 和 Ti 等。Nesbitt^[29]认为 Ti 是花岗岩风化剖面中最稳定的元素, 并且 Ti

在土壤中稳定性高且人为污染比较小, 因此本文选择 Ti 为参比元素。迁移系数(τ)计算公式为:

$$\tau_{i,j} = \frac{C_{j,w}}{C_{j,p}} \times \frac{C_{i,p}}{C_{i,w}} - 1 \quad (1)$$

式中: $C_{j,w}$ 和 $C_{j,p}$ 分别是风化土壤和新鲜母岩中元素 j 的浓度, $C_{i,w}$ 和 $C_{i,p}$ 分别是风化土壤和新鲜母岩中相对最稳定元素 i 的浓度。迁移系数 $\tau_{i,j} < 0$ 反映元素 j 相对于母岩的净损失; $\tau_{i,j} > 0$ 反映元素 j 相对于母岩的净积累或者富集; $\tau_{i,j} = 0$ 反映元素 j 是稳定的和不迁移的。

重金属元素在岩-土体系中的迁移系数分布特征见图 3。从基岩到土壤, 在 3 个剖面中不同重金属表现出明显的分异特征, 其中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 与 Cd 元素以亏损为主(迁移系数小于 0), 表明这些元素发生流失。As 元素以富集为主。As 和 Hg 元表现出不同的富集或亏损特征, 部分剖面 As、Hg 元素强烈富集, 并且尤其富集在表层。其中 QZ-I70 剖面中 Ni、Cd 和 As 在地表 1m 范围内富集, QZ-I24 和 QZ-I46 两个剖面中 Hg 强烈富集(迁移系数高达 10~20)。岩-土体系中重金属含量可以直观地判断出其是否有污染, 那么表层富集的重金属元素是否有污染, 是否有生态风险? 亏损的重金属元素就一定无污染、无生态风险? 下文对琼中 7115 件表层土壤样品环境质量进行了评价。

2.3 表层土壤重金属含量特征

相关研究表明酸性条件下, 土壤中重金属容易发生迁移^[30]。重金属元素含量变异系数越小, 表明该重金属元素以自然背景含量为主, 变异系数越大说明受人为影响越大。研究区 7115 件表层土壤样品中 8 种重金属元素及 pH 指标统计结果见表 2, 表层土壤中 8 种重金属含量变化幅度都很大, pH 值在 3.98~7.52, 平均值为 5.4, 中位值为 5.44, 总体呈酸性。表层土壤中 8 种重金属含量变异系数大小排序为: As>Cd>Cr>Ni>Cu>Pb>Zn=Hg, 均为高度变异, 表明可能存在由于人为影响而导致表层土壤中重金属分布不均匀。Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 平均含量分别为 8.8、31.7、53、36、10.2、0.056、3.7 和 0.035mg/kg, 分别是琼中土壤背景值^[31]的 1.24、1.04、1.02、1.49、1.62、0.93、3.59 和 1.17 倍, 是海南土壤背景值^[31]的 1.78、1.42、1.51、2.36、2.48、1.12、3.25 和 1.17 倍, 除 Pb 外其余 7 种重金属平均含量均低于中国土壤背景值^[32]。

对照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018), 对 7115 件表层土壤样品

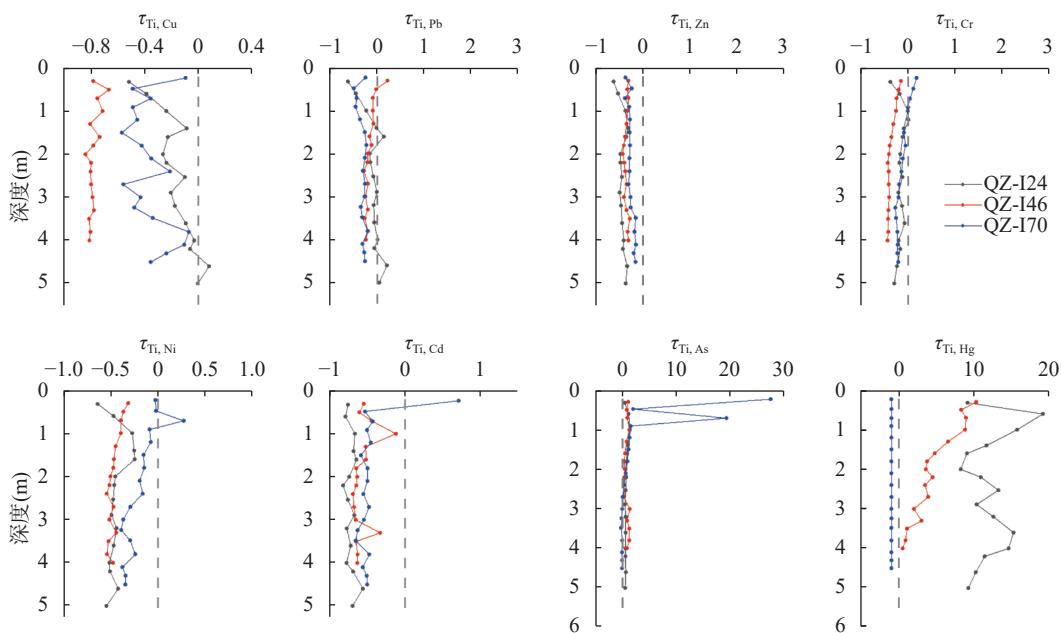


图3 琼中岩-土体系重金属元素迁移系数

Fig. 3 Migration coefficients of heavy metal elements in the rock-soil system of Qiongzhong, Hainan Island. Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, and Cd were predominantly deficient, and most of their mass migration coefficients were less than 0. In contrast, As was enriched, and most of its mass migration coefficient was greater than 0. Hg exhibited different enrichment or deficiency characteristics. As and Hg were particularly enriched in the surface layer.

表2 琼中表层土壤重金属含量统计 ($n=7115$)Table 2 Summary statistical of heavy metal elements contents in the topsoil samples of Qiongzhong, Hainan Island ($n=7115$).

项目	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg	pH
最小值	1.0	2.0	4.0	3.9	1.0	0.02	0.5	0.002	3.98
中位值	6.4	29.7	50	23.7	6.94	0.04	1.7	0.032	5.4
平均值	8.8	31.7	53	36	10.2	0.056	3.7	0.035	5.44
最大值	104	463	500	2110	488	15.2	654	0.395	7.52
标准差	7.4	16.8	25	59	13.0	0.19	13.1	0.02	0.45
变异系数	84	53	48	163	127	329	350	48	8
琼中背景值 ^[31]	7.09	30.49	52.19	24.12	6.28	0.06	1.03	0.03	—
海南岛背景值 ^[31]	4.95	22.34	35.11	15.24	4.12	0.05	1.14	0.03	—
中国土壤背景值 ^[32]	22.6	26.0	74.2	61.0	26.9	0.097	11.2	0.065	—

注：重金属含量单位为 mg/kg, pH 无量纲，变异系数单位为 %，“—”表示未提供此项数据。

中 8 种重金属含量按该土壤 pH 范围以及水田和其他 2 种农用地类型进行统计。表 3 结果显示, 7115 件表层土壤样品中 4254 件 pH 小于 5.5, 2694 件 pH 在 5.5~6.5, 165 件 pH 在 6.5~7.5, 2 件 pH 大于 7.5。除 Hg 外, 其他 7 种重金属均存在少量样品含量大于筛选值, 分别是 Cu(19 件, 0.27%)、Pb(82 件, 1.15%)、Zn(3 件, 0.04%)、Cr(140 件, 1.97%)、Ni(37 件, 0.52%)、Cd(23 件, 0.32%)、As(58 件, 0.82%) 含量超过风险筛选值。所有表层土壤中 Pb 和 Hg 含量均低

于农用地土壤污染风险管控值, 但 Cr(5 件, 0.07%)、Cd(1 件, 0.01%) 和 As(3 件, 0.04%) 超过风险管控值, 表层土壤中虽然多种重金属含量较高, 但整体污染风险低, 应对 Cr 稍加监控。

2.4 表层土壤环境质量评价

2.4.1 表层土壤重金属污染评价

内梅罗综合污染指数 (Nemerow pollution index, P) 可综合反映出不同污染物在土壤中的污染程度, 它由单因子污染指数 P_i 发展而来, 是当前国内外计

表3 琼中表层土壤重金属含量土壤污染风险统计结果($n=7115$)

Table 3 Statistical results of heavy metal element contents and soil pollution risks in the topsoil samples of Qiongzhong, Hainan Island ($n=7115$).

重金属元素	污染风险指标	表层土壤重金属含量超标样品件数				合计	重金属含量超标样品占 样品总数的比例 (%)
		pH≤5.5 (n=4254)	5.5<pH≤6.5 (n=2694)	6.5<pH≤7.5 (n=165)	pH>7.5 (n=2)		
Cu	大于风险筛选值	9	10	0	0	19	0.27
	大于风险管控值	—	—	—	—	—	—
Pb	大于风险筛选值	73	9	0	0	82	1.15
	大于风险管控值	0	0	0	0	0	0
Zn	大于风险筛选值	1	2	0	0	3	0.04
	大于风险管控值	—	—	—	—	—	—
Cr	大于风险筛选值	58	82	0	0	140	1.97
	大于风险管控值	0	5	0	0	5	0.07
Ni	大于风险筛选值	16	21	0	0	37	0.52
	大于风险管控值	—	—	—	—	—	—
Cd	大于风险筛选值	8	14	1	0	23	0.32
	大于风险管控值	0	1	0	—	1	0.01
As	大于风险筛选值	45	13	0	0	58	0.82
	大于风险管控值	3	0	0	0	3	0.04
Hg	大于风险筛选值	0	0	0	0	0	0
	大于风险管控值	0	0	0	0	0	0

注: “—”表示无此数据。

算综合污染指数常用的方法之一^[33], 本研究分别以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)、琼中土壤重金属元素背景值以及海南岛土壤重金属元素背景值^[31]为评价标准。公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

$$P = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + (P_{imax})^2}{2}} \quad (3)$$

式中: P_i 为重金属的单因子污染指数; C_i 为重金属含量实测值; S_i 可以为农用地土壤污染风险筛选值, 也可以为土壤环境背景值; P 为采样点综合污染指数; \bar{P}_i 为采样点重金属污染物单项污染指数平均值; P_{imax} 为采样点重金属污染物单项污染指数的最大值。《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004) 中规定内梅罗综合污染指数分级标准为: $P \leq 0.7$, 清洁; $0.7 < P \leq 1.0$, 警戒线; $1.0 < P \leq 2.0$, 轻度污染; $2.0 < P \leq 3.0$, 中度污染; $P > 3.0$, 重度污染。

琼中表层 7115 件土壤样品重金属元素单因子污染指数以及内梅罗综合污染指数统计结果见表4、表5。以琼中背景值为评价标准时, 除 As 外, 其他 7 种重金属的单因子污染指数的平均值和中位值均

小于 2, 为轻度污染。以海南背景值为评价标准时, Cu、Pb、Zn、Cd、和 Hg 等 5 种重金属单因子污染指数的平均值和中位值也小于 2, 为轻度污染水平, Cr、Ni 为中度污染, As 为重度污染。综合污染指数均为高度变异, 7115 件表层土壤样点中出现轻度、中度以及重度污染的情况比较多。但前文已统计 7115 个表层土壤样点中, 实际只有 19 件 Cu、82 件 Pb、3 件 Zn、140 件 Cr、37 件 Ni、23 件 Cd、58 件 As 含量超过农用地土壤风险筛选值, 只有 5 件 Cr、1 件 Cd 和 3 件 As 超过污染风险管控值。因此, 选择农用地土壤污染风险筛选值作为内梅罗综合污染指数标准时, 8 种重金属绝大多数未产生污染。内梅罗综合污染指数介于 0.05 ~ 36.19, 平均值为 0.39, 其中 94.9% 土壤采样点均为清洁, 3.4% 土壤采样点在警戒线范围内, 土壤整体为清洁。

2.4.2 表层土壤重金属生态风险评价

潜在生态风险指数 (Potential ecological risk index, RI) 由 Hakanson^[34] 提出, 该方法被广泛应用于评估重金属的污染程度和生态风险, 公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times C_f^i \right) = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \right) \quad (4)$$

表4 琼中表层土壤重金属元素单因子污染指数统计结果($n=7115$)

Table 4 Statistical results of single factor pollution indices of heavy metal elements in the topsoil samples of Qiongzhong, Hainan Island ($n=7115$).

评价标准	重金属元素	单因子污染指数 P_i					污染程度 P_i 占比 (%)				
		最小值	中位值	均值	最大值	标准差	变异系数	≤1 (未污染)	1~2 (轻度污染)	2~3 (中度污染)	>3 (重度污染)
琼中背景值	Cu	0.14	0.91	1.24	14.67	1.04	84	54.74	28.33	10.98	5.95
	Pb	0.07	0.97	1.04	15.19	0.55	53	53.61	43.5	2.40	0.49
	Zn	0.08	0.95	1.02	9.58	0.49	48	54.14	42.26	3.33	0.27
	Cr	0.16	0.98	1.49	87.48	2.43	163	50.81	27.24	11.58	10.37
	Ni	0.16	1.11	1.62	77.71	2.07	127	46.0	28.87	12.8	12.33
	Cd	0.33	0.70	0.94	253.33	3.09	329	70.57	24.67	3.15	1.61
	As	0.49	1.66	3.63	634.95	12.72	350	15.92	45.14	15.02	23.92
	Hg	0.070	1.070	1.162	13.167	0.555	48	43.2	52.14	3.74	0.92
海南背景值	Cu	0.20	1.30	1.78	21.01	1.49	84	37.05	31.3	16.37	15.28
	Pb	0.09	1.33	1.42	20.73	0.75	53	20.63	68.11	9.36	1.9
	Zn	0.11	1.41	1.52	14.24	0.72	48	24.33	54.11	18.1	3.46
	Cr	0.26	1.56	2.37	138.45	3.85	163	35.11	25.03	16.16	23.7
	Ni	0.24	1.68	2.48	118.45	3.15	127	29.4	27.56	17.41	25.63
	Cd	0.39	0.84	1.12	304.00	3.70	329	60.72	31.29	5.51	2.48
	As	0.44	1.50	3.28	573.68	11.49	350	22.3	43.57	12.69	21.44
	Hg	0.070	1.070	1.162	13.167	0.555	48	43.2	52.15	3.74	0.91
筛选值	Cu	0.01	0.13	0.17	2.08	0.15	85	99.73	0.26	0.01	0
	Pb	0.02	0.38	0.41	5.14	0.22	55	98.85	0.94	0.07	0.14
	Zn	0.02	0.25	0.27	2.50	0.13	48	99.96	0.03	0.01	0
	Cr	0.02	0.16	0.24	14.07	0.39	163	98.03	1.53	0.3	0.14
	Ni	0.01	0.11	0.16	6.97	0.19	123	99.48	0.45	0.01	0.06
	Cd	0.07	0.14	0.19	50.67	0.62	329	99.69	0.24	0.04	0.03
	As	0.01	0.04	0.09	16.35	0.33	348	99.2	0.65	0.07	0.08
	Hg	0.001	0.022	0.024	0.219	0.012	51	100	0	0	0

表5 琼中表层土壤重金属元素内梅罗综合污染指数统计结果($n=7115$)

Table 5 Statistical results of Nemerow pollution indices of heavy metal elements in the topsoil samples of Qiongzhong, Hainan Island ($n=7115$).

评价标准	综合污染指数 P						污染等级占比 (%)				
	最小值	中位值	平均值	最大值	标准差	变异系数	清洁 ($P \leq 0.7$)	警戒线 ($0.7 < P \leq 1.0$)	轻度污染 ($1.0 < P \leq 2.0$)	中度污染 ($2.0 < P \leq 3.0$)	重度污染 ($P > 3.0$)
风险筛选值	0.05	0.33	0.39	36.19	0.554	142	94.9	3.4	1.3	0.2	0.2
琼中背景值	0.38	1.92	3.37	453	9.369	278	0.5	6.0	46.5	20.3	26.8
海南岛背景值	0.36	2.36	3.78	409	8.858	234	0.2	2.9	36.5	24.2	36.3

式中: C_s^i 为重金属 i 元素含量实测值 (mg/kg), C_n^i 为该元素的评价标准。 T_r^i 为重金属 i 元素的毒性响应系数, 由污染物 i 的毒性系数与水体敏感性参数的乘积得到^[35], 轻微生态风险水体 BPI 参考标准为 5.0, 毒性系数分别为 Hg=40、Cd=30、As=10、Pb=Cu=Ni=5、Zn=1 和 Cr=2, n 为重金属类别数量。 E_r^i 为重金属 i 元素的潜在生态风险系数, RI 为某一点土壤多种重金属综合潜在生态风险指数。本研究分别以琼

中土壤背景值、海南岛土壤背景值以及《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管理标准》(GB 15618—2018) 土壤污染风险筛选值和管控值为评价标准。

由 Hakanson 公式可知, 某样点多种污染物的 RI 值大小与参评污染物的种类和数量有关, 轻微生态风险的 RI 第一级界限值是假定各个污染物都未发生污染 ($C_f^i=1$)、轻微生态风险水体的 BPI 为 5.0 时的结果。马建华等 2011 年首次提出 RI 值分级调

整方案, 即单位毒性系数 RI 值乘以某一具体研究所参评污染物毒性系数总值, 并取十位整数得到第一级界限值; 然后将 RI 第一级界限值乘 2 得到第二级界限值, 余者类推^[35]。单位毒性系数 RI 值为 Hakanson 的 RI 第一级界限值 (150) 除以 8 种污染物 (PCB、Hg、As、Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn) 毒性系数总值 133, $150/133=1.13$ 。本研究中 RI 第一级界限值为单位毒性系数 RI 分级值 1.13 乘 8 种重金属的毒

性系数总值 98 或 5 种重金属的毒性系数总值 87, 并取十位整数获得, 然后余下各级界限值为上一级界限值的 2 倍, 潜在生态风险水平分级划分标准见表 6。

表层土壤中重金属潜在生态风险评价结果见表 7、图 4。以琼中背景值和海南岛背景值为评价标准时, Hg、Cd 和 As 为主要危害元素, 以较轻-中度危害为主, 其余元素危害程度均较轻, 研究区超过 90% 的采样点呈轻度-中度生态危害。以土壤污染风险筛

表 6 潜在生态风险水平分级划分标准

Table 6 Classification division standards of potential ecological risks.

参评重金属元素	潜在生态 风险指标	潜在生态风险水平				
		较轻	中度	强	很强	极强
8 种元素 (Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg)	E_r^i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
	RI	<110	110~220	220~440	>440	-
5 种元素 (Pb、Cr、Cd、As、Hg)	E_r^i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
	RI	<100	100~200	200~400	>400	-

注: “-”表示无此数据。

表 7 琼中表层土壤重金属潜在生态危害指数统计 ($n=7115$)Table 7 Statistics of potential ecological harm indices of heavy metal elements in topsoil samples of Qiongzong, Hainan Island ($n=7115$).

评价标准	重金属元素	评价指标样品数(个)							
		E_r^i					RI		
		较轻	中度	强	很强	极强	轻度	中度	强
琼中背景值	Cu	7098	17	0	0	0	3348	3254	424
	Pb	7108	7	0	0	0			
	Zn	7115	0	0	0	0			
	Cr	7107	3	4	1	0			
	Ni	7040	64	7	3	1			
	Cd	5918	1025	153	14	5			
	As	5868	680	336	151	80			
	Hg	3035	3742	315	19	4			
海南岛背景值	Cu	7069	42	4	0	0	2458	3984	582
	Pb	7102	11	2	0	0			
	Zn	7115	0	0	0	0			
	Cr	7084	24	2	5	0			
	Ni	6878	202	30	2	3			
	Cd	5356	1510	208	35	6			
	As	5997	611	314	126	67			
	Hg	3035	3742	315	19	4			
筛选值	Cu	7115	0	0	0	0	7113	1	1
	Pb	7115	0	0	0	0			
	Zn	7115	0	0	0	0			
	Cr	7110	5	0	0	0			
	Ni	7115	0	0	0	0			
	Cd	7114	0	0	1	0			
	As	7113	0	2	0	0			
	Hg	7115	0	0	0	0			
管控值	Pb	7115	0	0	0	0	7114	0	1
	Cr	7115	0	0	0	0			
	Cd	7114	0	0	1	0			
	As	7115	0	0	0	0			
	Hg	7115	0	0	0	0			

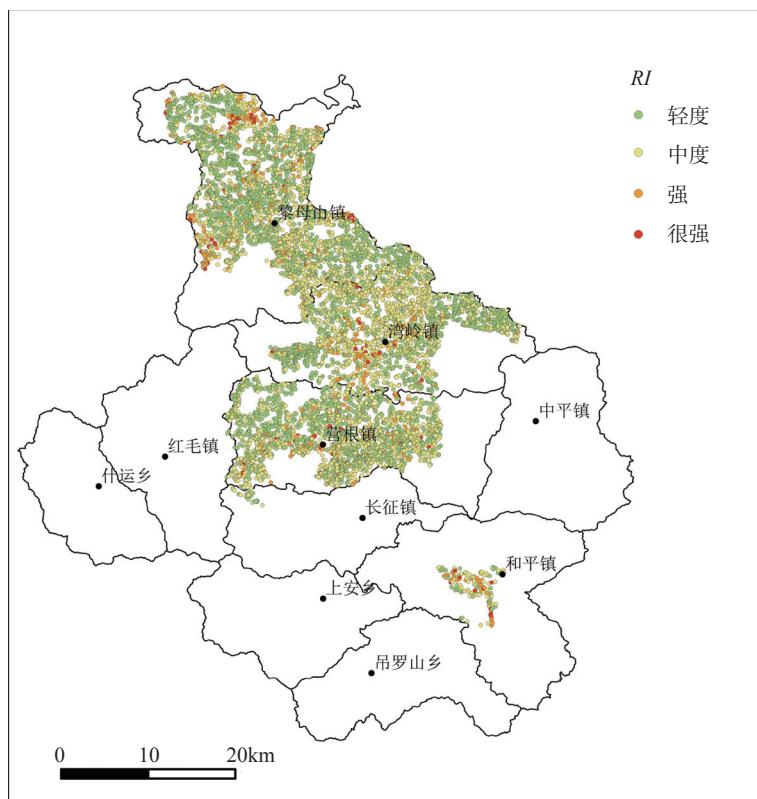


图4 琼中表层土壤生态风险指数空间分布(评价标准为琼中土壤背景值)

Fig. 4 Spatial distribution of potential ecological risks in the topsoil samples of Qiongzhong, Hainan Island (The evaluation standard is the Qiongzhong soil background values, the green circles represent low ecological risks, the yellow circles represent moderate ecological risks, the orange circles represent considerable ecological risks, and the red circle represents very high ecological risks).

选值和管控值为评价标准时,7114件土壤样品的生态风险均较低,研究区呈轻度生态危害,1件样品的Cd为很强危害,应核查是否为点源污染。已有研究者认识到不同评价方法会对结果产生一定影响^[36]。虽然中国的Hg高值区主要分布在浙江东部、广东中部、福建、湖南和贵州^[37],但花岗岩地区Hg生态风险同样值得关注^[36]。研究表明^[37],海南岛农用地Cd和As大量富集是由于施用的化肥农药中约有70%随雨水渗透到土壤并迁移。有研究者提出^[38-39],生态风险既与含量状况有关,更与其存在形式和存在形式转变、作物根系吸收重金属的机制等有关。

3 结论

岩-土体系重金属的分布特征反映重金属的迁移能力和土壤受污染的程度。在海南岛琼中地区布设3个土壤垂向剖面和7115个表层土壤采样点,利用ICP-MS/OES和AFS分析了Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、

Cd、As和Hg共8种重金属元素含量,查明了琼中二长花岗岩岩-土体系重金属的迁移富集特征,多指标定量评价了表层土壤重金属污染情况及生态效应。结果表明,琼中二长花岗岩岩-土体系中不同重金属元素地球化学行为不同,表现出明显的分异特征。7115件表层土壤样品中有极少样品中个别重金属含量超过农用地土壤污染风险筛选值和管控值。以琼中背景值以及海南背景值为评价标准时,单因子污染指数和内梅罗综合污染指数较高,潜在生态危害指数以较轻-中度生态危害为主,8种重金属均呈现不同程度的污染以及生态风险;以农用地土壤污染风险筛选值和管控值为评价标准时,单因子污染指数、内梅罗综合污染指数和潜在生态危害指数均较低,8种重金属绝大多数未污染,呈轻度生态危害,琼中整体为洁净土壤。不同的评价标准以及评价方法会导致不同的评价结果。以背景值为标准进行评价时可能产生污染较重,无需过度紧张,建议稍加监控;以土壤环境质量土壤污染风险筛选值和管控值为标

准评价时,若出现污染应引起重视,加强土壤和农产品协同监测,严重时应采取严格管控措施并及时修复治理。重金属污染评估建议采取多种评价方法以及标准进行综合评估,以得到比较真实、客观、准确的评价结果。

本研究查明了海南岛琼中二长花岗岩岩-土体系重金属的分布特征、迁移特征以及表层土壤环境质量,对正确认识琼中区域地球化学特征具有重要

意义,为该地区的农业规划提供建议,进一步为改善海南岛琼中的生态环境提供科学依据、同时为地球关键带中的重金属演化特征研究提供一定参考。本文仅以二长花岗岩母质为例进行探讨,正长花岗岩、玄武岩等其他建造类型岩-土体系重金属的分布特征和迁移特征还有待归纳总结。此外,岩-土体系中重金属的迁移演化机制十分复杂,有待开展深入研究。

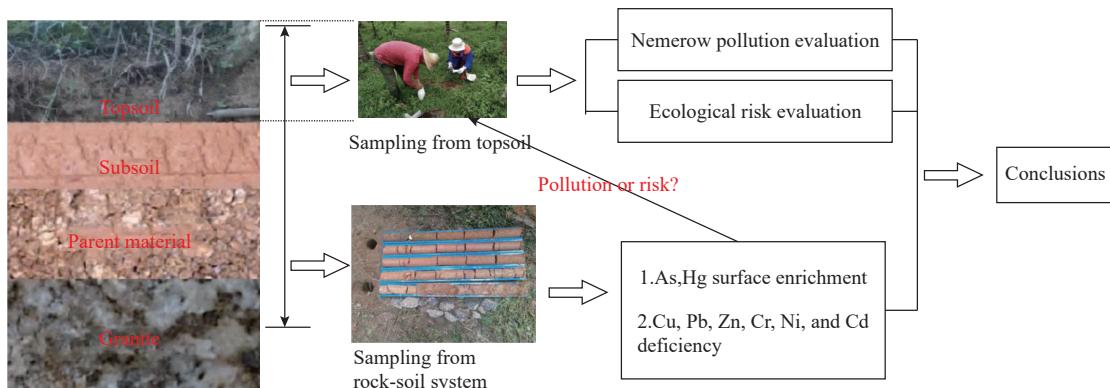
Migration Characteristics and Environmental Quality Assessment of Heavy Metal Elements in the Rock-Soil System in Qiongzhong, Hainan Island

ZHAO Hongkun^{1,2}, TANG Shixin¹, FU Yangang¹, LAN Ruixuan^{1,2}, ZHAO Keqiang¹, LI Xiaodong³, MA Shengming^{1*}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China;
 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
 3. Langfang Luyuan Ecological Environment Technology Co., Ltd., Langfang 065000, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The chemical composition and quantitative migration of elements in the rock-soil system reveal the activity characteristics of heavy metal elements.
- (2) The surface migration characteristics of heavy metal elements provide a research basis for environmental and ecological effect evaluation studies.
- (3) Multiple indicators and evaluation criteria show that the topsoil environment in Qiongzhong, Hainan Island is generally clean, providing a research case support for the green development and utilization of local land resources.



ABSTRACT: The rock-soil system is an important component of the Earth's critical zone, but there are few detailed studies on different soil systems in Hainan Island. To clarify migration characteristics and environmental quality, three typical adamellite soil profiles and 7115 topsoil samples were collected from Qiongzhong, Hainan

Island. The heavy metals Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As and Hg in rocks and soils were determined by ICP-MS/OES or AFS. Comprehensive evaluation shows that although heavy metal elements in the rock-soil system of the Qiongzhong research area exhibit diverse migration patterns and enrichment or deficiency characteristics, the overall environmental quality of the topsoil is relatively clean, with weak ecological risks. Different evaluation criteria and methods will lead to different evaluation results. It is suggested that a variety of evaluation methods and standards are adopted to carry out comprehensive evaluation in order to obtain more real, objective, and accurate evaluation results. The BRIEF REPORT is available for this paper at <http://www.ykcs.ac.cn/en/article/doi/10.15898/j.ykcs.202308040122>.

KEY WORDS: rock-soil system; heavy metal elements; ICP-MS/OES; AFS; mass transfer; environmental quality; ecological risk assessment; Qiongzhong (Hainan Island)

BRIEF REPORT

Significance: A large area of intrusive rocks are exposed in Hainan Island, more than 90% of which are monzonitic granite, syenogranite and granodiorite. The study area of Qiongzhong is located in the middle of Hainan Island. Taking the monzonitic granite geological formation as an example, the distribution and migration characteristics of heavy metal elements in the rock-soil system and the environmental quality of the surface soil are identified, which is of great significance for the correct understanding of the geochemical characteristics of Qiongzhong region. It is suggested that a variety of evaluation methods and standards should be used to evaluate the heavy metal element pollution status. In addition, the distribution and migration characteristics of heavy metal elements in the rock-soil system of other geological formation types such as syenite-granite still need to be summarized. The migration and evolution mechanism of heavy metal elements in rock-soil system is very complex and needs to be further studied.

Methods: Three typical adamellite soil profiles and 7115 topsoil samples were collected from Qiongzhong, Hainan Island ([Fig.1](#)). The heavy metals Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As and Hg in rocks and soils were determined by ICP-MS/OES or AFS. An elemental mass migration coefficient was used to study the migration characteristics of heavy metals, and the environmental quality of topsoil were evaluated according to the “Soil Environmental Quality-Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land” (GB 15618—2018), Nemerow index and potential ecological hazard index.

Data and Results: The heavy metal elements in the adamellite rock-soil system exhibited distinct differentiation characteristics, as shown in [Fig.2](#) and [Fig.3](#). The contents of eight heavy metals in the rock-soil system of Qiongzhong, Hainan Island varied with soil depth. The ranges of Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As, and Hg were 1.6 to 9.5, 16 to 49, 29 to 98, 5.8 to 40, 2.4 to 17, 0.02 to 0.08, 0.6 to 12.7, and 0.002 to 0.061mg/kg, respectively. Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, and Cd were predominantly deficient, and most of their mass migration coefficients were less than 0. In contrast, As was enriched, and most of its mass migration coefficient was greater than 0. Hg exhibited different enrichment or deficiency characteristics, and As and Hg were particularly enriched in the surface layer.

The majority of heavy metal element concentrations of topsoil samples in Qiongzhong were lower than the screening values of soil environmental quality standard (GB 15618—2018). The Nemerow index method and potential ecological hazard index method highlighted the need to pay attention to Cr, Ni, and As pollution, as well as the ecological hazards posed by Hg, As, and Cd when the background values of Qiongzhong and Hainan Island were used as evaluation criteria. When soil environmental quality was taken as the evaluation standard, the overall environmental quality of the topsoil was relatively clean, with weak ecological risk. Different evaluation criteria and methods can lead to different evaluation results. It is suggested that a variety of evaluation methods and standards are adopted to carry out comprehensive evaluation in order to obtain more real, objective and accurate evaluation results. Refer to [Tables 4](#), [Tables 5](#), and [Tables 7](#) for detailed data.

参考文献

- [1] 杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 等. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J/OL]. 土壤学报, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1337.012.html>. Yang S H, Song X D, Wu H Y, et al. A review and discussion on the Earth's critical zone research: Status quo and prospect[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023.<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1337.012.html>.
- [2] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报, 2015, 70(12): 1859–1869. Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1859–1869.
- [3] Guan D, Sun F, Yu G, et al. Total and available metal concentrations in soils from six long-term fertilization sites across China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(31): 31666–31678.
- [4] 2022年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2023, 51(Z2): 64–81. Communique on the State of China's Ecological Environment in 2022 (Excerpt) [J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(Z2): 64–81.
- [5] Gong C, Ma L, Cheng H, et al. Characterization of the particle size fraction associated heavy metals in tropical arable soils from Hainan Island, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139: 109–114.
- [6] Zang Z, Li Y, Liu S, et al. Assessment of the heavy metal pollution and health risks of rice cultivated in Hainan Island, China[J]. *Environmental Forensics*, 2021, 22(1-2): 63–74.
- [7] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 83–92. Zhou J M. The present status of heavy metal (loid)s pollution in farmland soils and analysis of polluting sources in China[J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2020(2): 83–92.
- [8] Wang A, Wang Q, Li J, et al. Geo-statistical and multivariate analyses of potentially toxic elements' distribution in the soil of Hainan Island (China): A comparison between the topsoil and subsoil at a regional scale[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 197: 48–59.
- [9] Zhao Z, Zhao Z, Fu B, et al. Distribution and fractionation of potentially toxic metals under different land-use patterns in suburban areas[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, 31(1): 475–483.
- [10] 高健翁, 龚晶晶, 杨剑洲, 等. 海南岛琼中黎母山—湾岭地区土壤重金属元素分布特征及生态风险评价[J]. 地质通报, 2021, 40(5): 807–816. Gao J W, Gong J J, Yang J Z, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metal pollution in the soil of Limu Mountain—Wanling Town, Qiongzhong, Hainan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 807–816.
- [11] 段璇瑜, 龚文峰, 孙雨欣, 等. 海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 301–311. Duan X Y, Gong W F, Sun Y X, et al. Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in coastal zone of Hainan Island[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 301–311.
- [12] Mao C, Song Y, Chen L, et al. Human health risks of heavy metals in paddy rice based on transfer characteristics of heavy metals from soil to rice[J]. *Catena*, 2019, 175: 339–348.
- [13] 王军广, 赵志忠, 王鹏, 等. 不同土地利用方式土壤重金属赋存与有机碳关联性分析[J]. 南方农业学报, 2021, 52(9): 2417–2425. Wang J G, Zhao Z Z, Wang P, et al. Correlation analysis between concentrations of soil heavy metal species and organic carbon in different land use types[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(9): 2417–2425.
- [14] Gao J W, Gong J J, Yang J Z, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in a typical volcanic area: Influence of parent materials[J]. *Heliyon*, 2023, 9(1): e12993.
- [15] Yang J Z, Sun Y L, Wang Z L, et al. Heavy metal pollution in agricultural soils of a typical volcanic area: Risk assessment and source appointment[J]. *Chemosphere*, 2022, 304: 135340.
- [16] 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 等. 海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4916–4924. Yang J Z, Wang Z L, Gao J W, et al. Accumulation and health risk of heavy metals in cereals, vegetables, and fruits of intensive plantations in Hainan Province[J]. *China Environmental Science*, 2021, 42(10): 4916–4924.
- [17] 张黎明, 魏志远, 漆智平. 近30年海南不同地区降雨量和蒸发量分布特征研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 403–407. Zhang L M, Wei Z Y, Qi Z P. Characteristics of rainfall and evaporation of different region in recent 30 years in Hainan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4): 403–407.
- [18] 王海荣, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 广东省典型花岗岩成剖面元素垂向分布特征[J]. 中国地质, 2013, 40(2): — 149 —

- 619–628.
- Wang H R, Hou Q Y, Yang Z F, et al. Vertical distribution of some elements in typical weathering-soil profiles of granite in Guangdong Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 619–628.
- [19] 曹勤英, 黄志宏. 污染土壤重金属形态分析及其影响因素研究进展[J]. *生态科学*, 2017, 36(6): 222–232.
- Cao Q Y, Huang Z H. Review on speciation analysis of heavy metals in polluted soils and its influencing factors[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(6): 222–232.
- [20] Alnaimy M A, Elrys A S, Zelenakova M, et al. The vital roles of parent material in driving soil substrates and heavy metals availability in arid alkaline regions: A case study from Egypt[J]. *Water*, 2023, 15: 2481.
- [21] 郑顺安. 我国典型农田土壤中重金属的转化与迁移特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- Zheng S A. Studies on the transformation and transport of heavy metals in typical Chinese agricultural soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [22] 赵泽阳. 海南岛东部不同土地利用方式土壤重金属元素富集特征及其影响因素[D]. 海口: 海南师范大学, 2020.
- Zhao Z Y. Enrichment characteristics and influencing factors of heavy metals in different agricultural land use types in Eastern Hainan Island[D]. Haikou: Hainan Normal University, 2020.
- [23] 马生明, 朱立新, 汤丽玲, 等. 城镇周边土壤Hg异常成因机理研究[J]. *地质学报*, 2007, 81(4): 570–576.
- Ma S M, Zhu L X, Tang L L, et al. Mechanism of Hg anomalies in soil of city and town areas and their surroundings[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 570–576.
- [24] 徐磊, 赵萌生, 徐杰, 等. 滇中富碱斑岩风化剖面中重金属元素地球化学特征和环境风险评价[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(3): 616–631.
- Xu L, Zhao M S, Xu J, et al. Geochemical characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in weathering profiles of Alkali-enriched porphyry in Central Yunnan[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(3): 616–631.
- [25] Chadwick O A, Brimhall G H, Hendricks D M. From a black to a gray box—A mass balance interpretation of pedogenesis[J]. *Geomorphology*, 1990, 3(3): 369–390.
- [26] Jiang K, Qi H W, Hu R Z. Element mobilization and redistribution under extreme tropical weathering of basalts from the Hainan Island, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 158: 80–102.
- [27] Kurtz C, Derry L, Chadwick O, et al. Refractory element mobility in volcanic soils[J]. *Geology*, 2000, 28: 683–686.
- [28] Campodonico V A, Pasquini A I, Lecomte K L, et al. Chemical weathering in subtropical basalt-derived laterites: A mass balance interpretation (Misiones, NE Argentina)[J]. *Catena*, 2019, 173: 352–366.
- [29] Nesbitt H W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite[J]. *Nature*, 1979, 279(5710): 206–210.
- [30] 宋波, 刘畅, 陈同斌. 广西土壤和沉积物砷含量及污染分布特征[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 654–668.
- Song B, Liu C, Chen T B. Contents and pollution distribution characteristics of arsenic in soils and sediments in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 654–668.
- [31] 傅杨荣. 海南岛土壤地球化学与优质农业研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Fu Y R. Studies on soil geochemistry and high-quality agriculture in Hainan Island[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [32] 国家环境保护局, 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.
- National Environmental Protection Administration, China Environmental Monitoring Station. Background values of soil environment in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [33] Al-Kahtany K, Nour H E, Giacobbe S, et al. Heavy metal pollution in surface sediments and human health assessment in Southern Al-Khobar coast, Saudi Arabia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 187: 114508.
- [34] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [35] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. *地理研究*, 2020, 39(6): 1233–1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1233–1241.
- [36] 余斐, 叶彩红, 许宛孜, 等. 韶关市花岗岩地区森林土壤重金属污染评价[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(2): 354–362.
- Yu F, Ye C H, Xu T Z, et al. Evaluation of heavy metal pollution in woodland soil of granite area in Shaoguan City[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(2): 354–362.
- [37] 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, 4(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, 4(6): 2822–2833.
- [38] 马生明, 朱立新, 汤丽玲, 等. 城镇周边和江河沿岸土壤中 Hg 和 Cd 存在形式解析与生态风险评估[J]. 岩矿测试, 2020, 39(2): 225–234.
Ma S M, Zhu L X, Tang L L, et al. The occurrences of Hg and Cd in soils around cities and rivers and their ecological risk assessment[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(2): 225–234.
- [39] 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 等. 典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3913–3923.
Tang S Q, Liu X J, Yang K, et al. Migration, transformation characteristics, and ecological risk evaluation of heavy metal fractions in cultivated soil profiles in a typical carbonate-covered area[J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3913–3923.