



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403344

引用格式:陈昶,曾广骅,文玲,等.海南岛西北部玄武岩红土型风化壳中元素地球化学特征研究[J].科学技术与工程,2025,25(12):4864-4880.

Chen Yang, Zeng Guanghua, Wen Ling, et al. Geochemical characteristics of elements in laterite weathering crust of basalt in northwest Hainan Island[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(12): 4864-4880.

海南岛西北部玄武岩红土型风化壳中元素地球化学特征研究

陈昶^{1,2}, 曾广骅^{1,3}, 文玲^{1,3*}, 许国强^{1,4}, 梁定勇^{1,3}, 杜鹃^{1,5}

(1. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206; 2. 海南省海洋地质调查院, 海口 570206; 3. 海南省地质调查院, 海口 570206; 4. 三亚水文地质工程地质勘察院, 三亚 572022; 5. 海南省地质局, 海口 570206)

摘要 玄武岩红土型风化剖面非常适合研究极端风化作用下元素的地球化学行为,报道发育于海南岛西北部临高县第四纪中更新世多文组玄武岩之上的红土型风化剖面,对 84 件剖面样品开展了细致的主-微量元素、pH、Eh 和阳离子交换量(CEC)分析,通过质量平衡计算,揭示剖面中元素的迁移和再分配规律。海南岛临高红土型风化剖面具有较高的 Fe₂O₃ (17.0%~41.6%) 和 Al₂O₃ (15.3%~28.4%), 较低的 SiO₂ (10.6%~43.6%) 组成,土壤层和残积层的化学蚀变指数(CIA)极高(平均 99.3),反映了该风化剖面经历了极端风化条件下富 Fe 和 Al、脱 Si 的强烈化学风化作用。质量平衡计算结果表明:碱金属-碱土金属大多沿整个剖面发生了程度较高的丢失,过渡族金属元素中 Sc、Cu 和 Zn 在剖面中淋失程度较高,V 和 Ni 分别在残积层顶部和 IV 层富集,高场强元素(HFSE)在剖面中呈不同程度的淋失状态;氧化还原敏感性元素中 Fe 主要以 Fe(OH)₃ 的形式在残积层顶部发生沉淀和富集。Cr 在剖面中以不溶于水的 Cr₂O₃ 形式存在,并在残积层顶部富集。Mn 和 Co 以可溶的 Mn²⁺ 和 Co²⁺ 形式存在,二者的富集是由于风化过程中含有 Mn²⁺ 和 Co²⁺ 的氧化物被溶解导致的。U 在残积层底部以 UO₂ 的形式沉淀并富集,其他层位的 U 以可溶的 UO₂CO₃ 和 UO₂⁺ 形式存在,富集行为与剖面中次生铁的氢氧化物的吸附作用有关,整个剖面 U 的轻微富集现象可能是地下水中 U 的带入导致;临高剖面形成铁质红土应是 Al 的明显淋失和 Fe 在残积层顶部的富集所致,而文昌剖面的铁铝质红土是 Fe 和 Al 同时富集的产物,有助于认识海南岛东北部和西北部玄武岩红土型风化产物的差异,为今后矿产资源开发利用提供科学依据。

关键词 海南岛西北; 红土型风化剖面; 玄武岩; 元素地球化学行为

中图分类号 P512.1⁺3 P595; **文献标志码** A

Geochemical Characteristics of Elements in Laterite Weathering Crust of Basalt in Northwest Hainan Island

CHEN Yang^{1,2}, ZENG Guang-hua^{1,3}, WEN Ling^{1,3*}, XU Guo-qiang^{1,4}, LIANG Ding-yong^{1,3}, DU Juan^{1,5}

(1. The Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment of Hainan Province, Haikou 570206, China;

2. Marine Geological Survey of Hainan Province, Haikou 570206, China; 3. Hainan Geological Survey, Haikou 570206, China;

4. Sanya Hydrogeological and Engineering Geological Survey Institute, Sanya 572022, China; 5. Hainan Geological Bureau, Haikou 570206, China)

[Abstract] Basalt laterite weathering profile is very suitable for studying the geochemical behavior of elements under extreme weathering. A laterite weathering profile developed on the Middle Pleistocene Duowen Formation basalt in Lingao County, northwestern Hainan Island was reported. Detailed analysis of main-trace elements, pH, Eh and cation exchange capacity (CEC) were carried out on 84 profile samples. The migration and redistribution behavior of elements in the profile was studied by mass balance calculation. The laterite weathering profile of Lingao in Hainan Island has high Fe₂O₃ (17.0%~41.6%) and Al₂O₃ (15.3%~28.4%), low SiO₂ (10.6%~43.6%), and very high chemical index of alteration (CIA) (average 99.3). It reflects that the weathering profile has experienced strong chemical weathering with Fe and Al enrichment, and desilicization under extreme weathering conditions. The mass balance calculation results show that alkali metals and alkaline earth metals are mostly lost along the whole profile with a high degree. Among the transition metals, Sc, Cu and Zn are leached to a high degree in the section, V and Ni are enriched in the top and IV layer of the saprolite, respectively, and high field strength element (HFSE) are leached with different degrees in the profile.

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2025-01-26

基金项目: 海南省自然科学基金(421RC754)

第一作者: 陈昶(1990—),女,汉族,湖北咸宁人,硕士,工程师。研究方向:地球化学。E-mail:yichen2205@126.com。

*通信作者: 文玲(1984—),女,汉族,海南海口人,硕士,高级工程师。研究方向:地球化学。E-mail:orange-150@163.com。

Among the redox sensitive elements, Fe mainly precipitates and accumulates in the form of $\text{Fe}(\text{OH})_3$ at the top of the saprolite. Cr exists as water-insoluble Cr_2O_3 in the profile and is enriched at the top of the saprolite. Mn and Co exist in the form of soluble Mn^{2+} and Co^{2+} , and their enrichment is caused by the dissolution of oxides containing Mn^{2+} and Co^{2+} during weathering. U precipitates and accumulates in the form of UO_2 at the bottom of the saprolite, while U in other layers exists in the form of soluble UO_2CO_3 and UO_2^{2+} . The enrichment behavior is related to the adsorption of iron hydroxide in the profile. The slight enrichment of uranium throughout the profile may be due to groundwater introduction. It is found that the formation of ferrite laterite in Lingao section should be caused by the obvious leaching of Al and the enrichment of Fe at the top of the saprolite, while the ferrite laterite in Wenchang section is the product of both Fe and Al enrichment, which is helpful to understand the difference between the laterite weathering products of basalt in northeast and northwest Hainan Island, and has certain indicative significance for the development and utilization of mineral resources in the future.

[**Keywords**] northwest of Hainan Island; laterite weathering profile; basalt; geochemical behavior of elements

化学风化是地表岩石在大气、水、生物作用下发生化学反应, 而使其成分和结构发生质的变化, 形成溶解物质(如可溶性硅酸、重碳酸盐等)和不溶残余(如高岭石、伊利石、铁氧化物等)的过程^[1]。母岩的元素组成在化学风化过程中发生迁移和重分配, 是表生地球化学循环的重要环节。化学风化过程中元素的地球化学行为研究受到越来越多中外学者的重视, 总结出多个元素在风化过程中的行为特征, 如碱金属和碱土金属在早期风化过程中严重流失^[2-3], Mn、Cr、Fe、U 等变价元素的地球化学行为与氧化还原条件联系紧密^[4-6], 而高场强元素(HFSE), 如 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等, 则被认为是风化作用下的稳定元素^[7-9], 对 Mg、Fe、Li 等元素同位素分馏的研究也有助于理解元素在风化作用下的地球化学行为^[10-13]。然而, 前人研究主要集中于温带风化条件下的酸性岩浆岩, 对于热带极端风化条件下基性岩的研究较少。热带地区的研究表明, 化学风化过程中元素的地球化学行为不同于温带地区, 如稳定元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等)在极端风化条件下也可以发生一定程度的迁移^[7, 14-15]。极端风化是风化过程的最高阶段, 对极端风化作用下剖面中元素的地球化学行为的研究, 有助于理解元素的迁移和沉积规律。

海南岛北部新生代火山活动强烈, 火山岩分布极广, 出露面积大^[16]。该区属海洋性热带季风气候, 具有高温多雨、湿热同季的特点, 出露于地表的基性火山岩在极端风化条件下形成红土型风化壳^[17]。海南岛东北部玄武岩上主要发育含铝土矿的铝铁质红土, 西北部则大多发育含褐铁矿的铁质红土^[18]。玄武岩在热带气候下容易风化^[19], 形成的红土型风化剖面非常适合研究风化过程中元素地球化学行为^[7, 9, 20-21]。文献[17-18, 20-24]对海南岛北部玄武岩红土型风化剖面的类型和分带、元素迁移和富集规律、矿物成分、成矿作用和风化成壤过程进行了一系列研究。然而这些研究多围绕土壤发生展开, 对剖面元素地球化学研究也多集中在东北区域, 关于西北部红土型风化剖面的研究较为

薄弱。鉴于此, 选择海南岛西北部玄武岩红土型风化剖面进行元素地球化学研究, 给出高精度的剖面元素组成信息, 通过质量平衡计算, 揭示海南岛西北部玄武岩在风化过程中元素的迁移和再分配规律。研究成果有助于认识热带极端风化条件下元素的地球化学行为, 并为当地矿产资源开发利用提供科学依据。

1 区域地质背景

海南岛是中国第二大岛, 位于中国南海西北部, 隔琼州海峡与中国大陆相望, 属大陆型岛屿^[25]。在大体构造位置上, 海南岛处于欧亚板块、太平洋板块和印支地块交汇处, 通常被认为是华夏地块的一部分^[26-27]。研究区位于海南岛西北部临高县博厚镇, 属海洋性热带季风气候, 年平均气温在 23 ~ 25 °C, 气温最高月份平均温度为 28.3 °C, 气温最低月份平均温度为 16.9 °C, 年平均降雨量在 1 100 ~ 1 800 mm。

琼北新生代火山岩主要分布在王五-文教断裂以北, 在平面上呈“7”字形展布, 出露面积约 6 630 km², 占全岛陆域面积 19.5%, 形成时代自古近纪始新世延续至第四纪全新世^[16](图 1, 底图根据文献[28]修改)。更新世是琼北火山活动最为活跃的时期, 这一时期形成的多文组火山岩是海南岛北部分布最广泛的火山岩, 最大厚度可达 250 m, 主要由玄武岩类夹少量火山碎屑岩构成^[16, 29]。本次研究的玄武岩红土型风化壳发育于第四纪中更新世多文组玄武岩之上, 剖面坐标 109° 49' 03" E, 19° 55' 32" N, 为本次工作开挖暴露。该剖面连续且有明显的垂向分带特征, 剖面顶部有植被覆盖, 自上而下可被划分为 3 层(图 2): ①土壤层(0 ~ 60 cm), 砖红色, 质地松散, 部分土壤呈团粒状, 零星可见豆鲕状褐铁矿; ②残积层(60 ~ 415 cm), 根据颜色和质地可进一步细分为 4 层, I 层(60 ~ 110 cm)发育大量豆状褐铁矿, 多呈不规则棱角状, 粒径 3 ~ 10 mm, 个别可达 2 ~ 3 cm。II 层(110 ~ 290 cm)为褐铁矿层, 呈黄褐-砖红色, 矿石多呈砾块

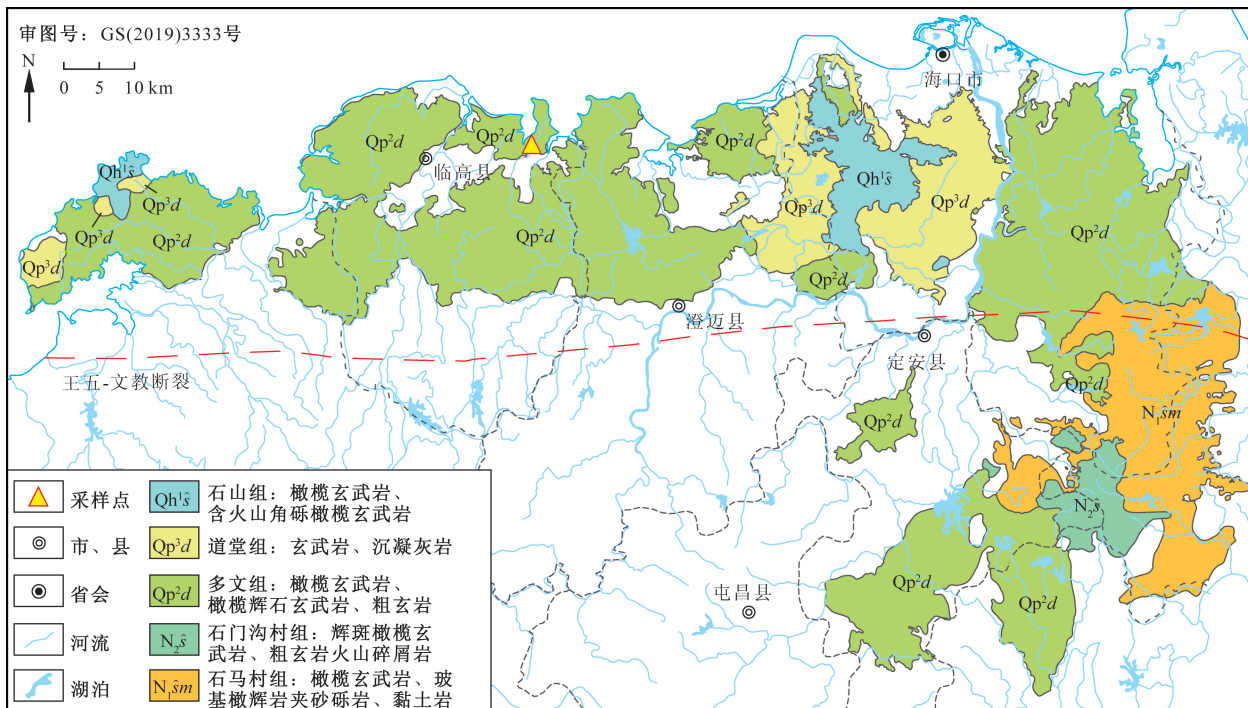


图1 琼北新生代火山岩分布和采样位置图(底图据文献[28]修改)

Fig. 1 Distribution map of Cenozoic volcanic rocks in northern Hainan and sampling location (modified according to ref. [28])

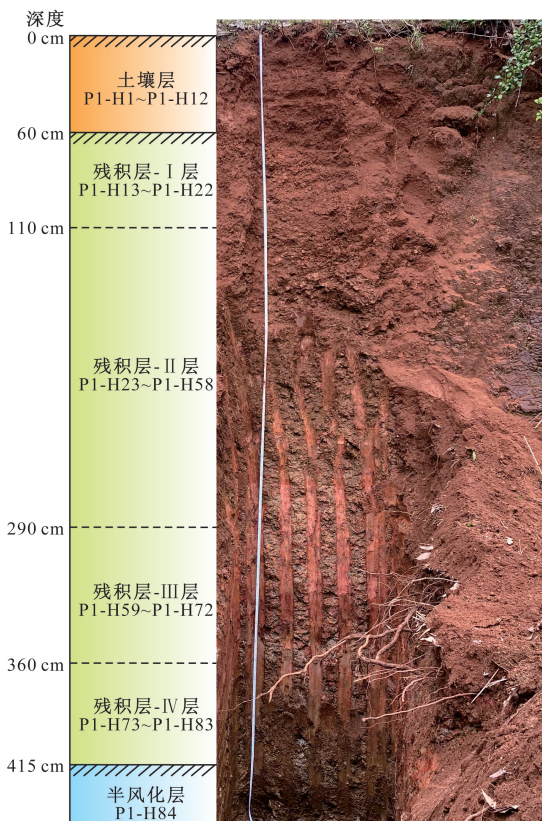


图2 临高红土型风化剖面分层和采样示意图

Fig. 2 Layering and sampling diagram of laterite weathering profile in Lingao

状或豆觔状。Ⅲ层(290~360 cm)呈灰白-砖红色,黏土含量较上一层明显增加。Ⅳ层(360~415

质地较上一层变硬,呈灰白夹杂黄色;③半风化层,>415 cm,可见灰黑色半风化玄武岩。

2 样品和分析方法

本次研究采集 84 件剖面样品,样品均匀且连续分布于剖面,间隔 5 cm,包括土壤层样品 12 件,残积层样品 71 件,半风化玄武岩样品 1 件,样品层位如图 2 所示。对 84 件样品进行了系统配套的主量元素、微量元素、pH、氧化还原电位和阳离子交换量分析,所采样品均经过标准流程进行风干、去渣、研磨、过筛等处理至粒径为 200 目的粉末,所有测试分析均在中国地质大学(武汉)“生物地质与环境地质”国家重点实验室完成。主量元素所使用的分析仪器为日本岛津公司生产的扫描型 X 射线荧光光谱仪(XRF-1800),采用碱熔玻璃片方法制样,同时对样品的烧失量进行测试。微量元素分析所用仪器为德国安捷伦公司生产的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7900),将 50 mg 的粉末样品置于 Teflon 溶样器中,采用 HF + HNO₃ 溶样法在 195 °C 条件下消解 48 h,然后用 2% HNO₃ 稀释至 100 g,定容于干净的聚乙烯塑料瓶以待 ICP-MS 测试,详细的样品处理和分析过程参见文献[30]。分析经国家标准样品和重复样监测,绝大多数主量元素的分析精度优于 1%~5%,绝大多数微量元素的分析精度优于 5%~10%。土壤 pH(酸碱度)和 Eh(氧化还原电位)采用电位法测量,所使用的仪器分别

为 pH 计(C16A0157)和笔式氧化还原电位计(LH-M300)。阳离子交换量(CEC)使用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定,所使用的仪器为紫外可见分光光度计(SP-1920UV)。

3 分析结果

3.1 主量元素

84 件样品的主量元素分析结果如表 1 所示,沿剖面的变化特征如图 3 所示。在主量元素特征上,剖面中 SiO_2 (10.6% ~ 43.6%, 平均 $26.7\% \pm 7.76\%$, 误差为标准误差,下同)在土壤层中含量从上至下先显著上升再逐渐下降,随后在残积层中随深度增加缓慢上升,至半风化玄武岩层达到最高值,但仍小于临高多文组玄武岩(52.0%, 数据自文献[16, 29, 31-32], 下同)。 Fe_2O_3 (17.0% ~ 41.6%, 平均 $28.8\% \pm 6.68\%$)、 Al_2O_3 (15.3% ~ 28.4%, 平均 $20.3\% \pm 3.31\%$)、 TiO_2 (2.60% ~ 4.97%, 平均 $3.74\% \pm 0.62\%$) 和 MnO (0.05% ~ 0.59%, 平均 $0.33\% \pm 0.15\%$) 在剖面中含量较高,是临高多文组玄武岩的 1 ~ 3 倍(分别为 11.8%、14.2%、2.04% 和 0.14%)。 Fe_2O_3 在残积层上部(70 ~ 150 cm)含量最高,往下含量逐渐降低,与 SiO_2 在剖面中的变化趋势大致呈互为消长的镜像关系。相较临高多文组玄武岩(P_2O_5 为 0.31%), P_2O_5 (0.08% ~ 0.53%, 平均 $0.26\% \pm 0.11\%$) 含量波动较大,主要富集在残积层顶部。 MnO 在剖面中波动较大,在残积层 III 层和 IV 层有明显降低。土壤层和残积层中 K_2O (0.03% ~ 0.17%)、 Na_2O (0.01% ~ 0.07%)、 CaO (0.00% ~ 0.14%) 和 MgO (0.02% ~ 0.17%) 的含量极低,显著低于临高多文组玄武岩(分别为 0.97%、3.19%、8.30% 和 6.63%)。烧失量 LOI (11.0% ~ 16.3%, 平均 $14.5\% \pm 1.01\%$) 含量变化较为稳定,且在残积层中的含量大于土壤层。

3.2 微量元素

84 件样品的微量元素分析结果如表 2 所示,沿剖面的变化特征如图 4 所示。多个微量元素在近乎整个剖面上的含量均大于临高多文组玄武岩,包括 V、Co、Ni、Cu、Pb、Ga、As、Zr、Cs、Hf、Th 和 U, 而 Rb、Sr 和 Y 在近乎整个剖面上的含量小于临高多文组玄武岩。根据元素性质和在风化剖面上的含量变化,大致将微量元素分为四类来描述。

(1) 碱金属和碱土金属(Li、Be、Rb、Sr、Cs、Ba)。Li [2.91 ~ 13.8 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(5.94 \pm 2.76) \mu\text{g/g}$]、Rb [2.27 ~ 11.8 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(5.55 \pm 2.09) \mu\text{g/g}$] 和 Cs [0.42 ~ 3.57 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(1.39 \pm 0.67) \mu\text{g/g}$] 在剖面中的变化趋势较为一致,在土壤中含量相对较

高,进入残积层后含量明显下降,并大致保持稳定,但 Li 元素在残积层的 IV 层再次富集。Be 元素 [0.78 ~ 3.18 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(1.46 \pm 0.65) \mu\text{g/g}$] 在剖面上部和中部的含量大致稳定,与 Li 元素类似,在 IV 层明显富集。Sr 含量 [3.39 ~ 185 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(12.0 \pm 19.6) \mu\text{g/g}$] 含量在剖面上部整体较为稳定,在残积层 IV 层含量逐渐增加,至半风化玄武岩层达到最高值。Ba 含量 [104 ~ 728 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(247 \pm 101) \mu\text{g/g}$] 整体上较为稳定,在半风化玄武岩层最高。

(2) 第一过渡族元素(Sc、V、Cr、Co、Ni、Zn、Cu)。Zn [81.4 ~ 221 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(110 \pm 16.9) \mu\text{g/g}$] 和 Ni [116 ~ 494 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(199 \pm 96.0) \mu\text{g/g}$] 的含量在剖面上部较为稳定,进入 IV 层后开始增加。V [178 ~ 536 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(364 \pm 79.0) \mu\text{g/g}$]、Cr [241 ~ 900 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(490 \pm 180) \mu\text{g/g}$] 与 Fe_2O_3 的含量变化趋势高度相似,主要富集在残积层顶部。Co [20.5 ~ 309 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(139 \pm 63.0) \mu\text{g/g}$] 的含量变化趋势与 MnO 十分类似,在进入 III 层后含量急剧下降并保持稳定。Sc [0.42 ~ 3.57 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(17.9 \pm 4.01) \mu\text{g/g}$] 在剖面的含量总体保持稳定,仅在局部来回波动。

(3) 高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)。Zr [180 ~ 345 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(258 \pm 33.0) \mu\text{g/g}$] 和 Hf (5.72 ~ 10.2 $\mu\text{g/g}$, 平均 $7.96 \pm 1.06 \mu\text{g/g}$) 在剖面上的变化趋势高度相似,整体上与 TiO_2 类似。Nb [5.17 ~ 67.6 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(37.8 \pm 16.1) \mu\text{g/g}$] 的含量在土壤层中变化较大,呈先降低再升高趋势,在残积层上部较为稳定,从中部往下缓慢下降且来回波动。Ta [0.36 ~ 16.8 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(2.54 \pm 2.22) \mu\text{g/g}$] 在剖面中含量低且稳定,仅在土壤层顶部、200 cm 和 360 cm 处有显著高值。

(4) 放射性元素(Th 和 U)。Th [4.02 ~ 10.2 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(7.85 \pm 0.98) \mu\text{g/g}$] 的含量整体较为稳定,沿剖面呈轻微下降趋势,U [1.01 ~ 4.07 $\mu\text{g/g}$, 平均 $(2.79 \pm 0.51) \mu\text{g/g}$] 除在残积层顶部(70 ~ 150 cm)轻微富集外,在其他层位的含量均较为稳定。

3.3 化学性质指标

所有样品的化学性质指标分析结果如表 3 所示,沿剖面的变化特征如图 5 所示。剖面的 pH 介于 4.00 ~ 7.43, 平均值 5.68 ± 0.57 , 总体呈弱酸性,从上至下 pH 大体上逐渐增高,侧面反映了剖面从上至下淋溶程度逐渐减弱:土壤层平均 5.76 ± 0.15 , 残积层中 I 层平均 5.31 ± 0.10 , II 层平均 5.35 ± 0.44 , III 层平均 5.87 ± 0.26 , IV 层平均 6.68 ± 0.25 , 半风化层 6.89。

表 1 临高红土型风化剖面主量元素、微量元素组成和化学性质指标
Table 1 Major elements and trace elements concentrations and chemical properties of samples in Lingao laterite weathering profile

样品 编号	深度/ cm	主量元素质量分数/%														微量元素/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)														化学性质指标						
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Li	Be	Se	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U	pH	Eh/ mV (mmol·kg ⁻¹)	CEC/ mmol·kg ⁻¹)
PI-H1	5	23.0	3.63	16.1	33.5	0.48	0.05	<0.01	0.02	0.07	0.33	14.2	9.33	1.75	26.4	489	755	162	139	98	122	32.1	16.3	6.48	6.29	12.5	25.4	63.8	193	7.69	13.20	7.99	2.94	5.76	330	153
PI-H2	10	35.4	4.55	15.3	25.1	0.38	0.12	0.02	0.02	0.11	0.23	12.7	12.00	1.19	19.4	379	557	99	128	70	118	27.2	10.2	9.70	9.28	16.4	303	67.2	132	8.54	4.97	8.71	2.70	5.82	304	173
PI-H3	15	36.8	4.69	15.3	24.4	0.40	0.11	0.01	0.02	0.11	0.20	12.0	13.80	1.18	21.0	337	470	95	116	54	99	26.3	11.7	9.48	8.61	14.8	306	18.9	131	8.57	0.85	8.11	2.44	5.68	325	161
PI-H4	20	36.4	4.70	16.0	24.3	0.39	0.11	<0.01	0.02	0.10	0.20	12.0	12.10	1.06	20.6	330	508	95	130	63	108	27.4	10.6	9.47	8.67	14.6	309	24.9	133	8.80	2.36	8.76	2.59	5.67	355	163
PI-H5	25	35.1	4.69	16.9	24.2	0.40	0.11	<0.01	0.03	0.10	0.20	12.4	12.50	1.16	20.5	377	541	103	142	68	120	30.5	13.7	10.40	9.33	16.1	345	62.3	141	9.90	3.92	9.79	2.90	5.78	325	84
PI-H6	30	33.2	4.54	16.8	24.7	0.42	0.09	<0.01	0.02	0.09	0.20	12.7	10.70	1.07	17.2	356	522	102	131	64	112	28.1	11.7	9.24	8.66	15.0	301	67.6	143	8.70	3.94	8.65	2.67	5.88	384	169
PI-H7	35	32.7	4.56	17.8	24.4	0.40	0.09	<0.01	0.03	0.09	0.19	12.6	11.20	1.04	20.3	364	525	105	141	69	116	30.3	14.1	9.83	9.23	18.0	305	58.8	131	8.92	3.55	9.59	2.96	5.98	354	169
PI-H8	40	27.1	3.93	17.4	29.4	0.44	0.07	<0.01	0.02	0.08	0.26	13.4	9.21	1.22	22.5	400	645	124	137	80	114	31.0	16.1	8.16	8.10	13.9	273	61.8	171	8.07	3.64	8.57	2.86	5.92	357	178
PI-H9	45	27.5	4.07	17.6	28.8	0.43	0.07	<0.01	0.03	0.08	0.26	13.5	8.98	1.18	18.6	389	621	118	135	79	115	30.7	16.5	8.19	7.79	14.5	278	55.0	164	8.17	3.25	8.80	2.96	5.80	340	174
PI-H10	50	24.9	3.81	17.3	30.8	0.45	0.06	<0.01	0.02	0.07	0.29	13.6	12.10	1.73	25.5	435	689	125	131	79	108	32.0	15.8	7.96	6.92	13.5	272	39.7	168	7.88	2.26	7.96	2.99	5.83	349	146
PI-H11	55	32.6	4.72	18.3	30.5	0.37	0.10	<0.01	0.03	0.09	0.20	13.1	8.70	1.02	15.7	351	481	102	144	70	115	29.9	15.2	10.10	8.84	15.2	316	37.5	151	9.35	2.35	9.58	3.05	5.56	364	173
PI-H12	60	23.3	3.75	17.3	31.8	0.48	0.06	0.02	0.01	0.07	0.31	14.1	7.46	1.33	19.8	417	690	140	135	88	123	31.8	21.6	7.28	7.80	13.6	272	60.4	193	8.09	3.54	9.11	3.44	5.44	310	138
PI-H13	65	22.1	3.50	17.4	33.2	0.51	0.08	0.03	0.04	0.09	0.31	14.4	7.99	1.38	24.2	440	720	154	136	93	120	33.0	22.7	8.62	9.17	15.1	272	60.4	277	8.25	3.43	9.34	3.64	5.08	322	144
PI-H14	70	15.1	3.04	16.5	38.8	0.44	0.05	<0.01	0.02	0.05	0.41	15.2	4.89	1.59	24.8	493	866	143	124	102	115	33.8	26.6	5.32	5.26	12.5	217	48.9	236	6.50	2.95	7.63	3.92	5.36	343	132
PI-H15	75	11.7	2.76	16.0	41.6	0.40	0.04	<0.01	0.01	0.04	0.48	15.8	3.93	1.72	28.6	536	900	145	127	116	119	36.9	29.7	3.55	4.08	11.8	219	46.2	246	6.53	2.89	7.52	4.07	5.29	343	134
PI-H16	80	13.4	2.83	16.7	39.2	0.59	0.05	<0.01	0.02	0.04	0.44	15.3	4.88	1.60	19.6	501	779	201	130	117	121	36.0	30.6	4.18	5.00	12.1	256	52.6	379	7.66	3.09	7.74	3.88	5.28	314	131
PI-H17	85	10.7	2.60	16.7	40.2	0.49	0.05	0.01	0.02	0.06	0.49	16.2	3.95	1.54	20.1	492	748	193	119	120	117	35.8	30.7	4.77	7.06	10.9	205	44.7	288	6.17	2.76	7.14	3.64	5.23	329	129
PI-H18	90	10.7	2.64	16.2	40.9	0.45	0.05	<0.01	0.04	0.04	0.50	16.1	3.46	1.62	19.1	528	858	180	125	120	117	36.8	34.1	3.53	5.02	10.6	209	44.6	273	6.27	2.81	6.96	3.71	5.28	341	126
PI-H19	95	10.7	2.66	16.2	40.9	0.43	0.02	<0.01	0.03	0.03	0.48	15.9	2.98	1.57	12.9	514	838	177	121	119	116	35.6	31.8	2.63	3.94	9.7	211	43.9	217	6.27	2.73	6.48	3.64	5.35	346	125
PI-H20	100	10.6	2.71	16.2	41.6	0.41	0.02	<0.01	0.01	0.03	0.53	15.8	2.91	1.55	29.1	519	784	171	120	121	116	35.7	29.0	2.42	3.93	10.3	201	44.2	200	6.07	2.57	7.12	3.73	5.32	345	122
PI-H21	105	11.5	2.73	15.9	41.1	0.41	0.02	<0.01	0.01	0.03	0.49	16.3	3.18	1.51	15.6	498	787	168	123	118	114	34.6	24.7	2.62	4.09	10.0	208	43.8	205	6.18	2.56	6.37	3.56	5.45	334	125
PI-H22	110	25.0	4.08	19.3	31.2	0.22	0.06	<0.01	0.02	0.06	0.21	16.2	3.02	1.52	23.4	497	746	209	122	123	114	34.1	25.9	2.27	4.35	9.7	192	41.5	261	5.82	2.43	6.65	3.55	5.42	349	127
PI-H23	115	12.3	2.87	16.3	40.8	0.38	0.02	<0.01	0.01	0.03	0.50	15.7	3.07	1.46	25.5	493	847	165	127	120	116	35.7	19.6	2.73	4.63	11.0	208	45.7	171	6.30	2.71	7.37	3.60	4.00	325	121
PI-H24	120	13.4	2.93	16.2	41.1	0.37	0.03	<0.01	0.01	0.04	0.48	15.5	3.13	1.39	22.1	489	800	146	124	119	113	34.2	24.9	3.12	5.00	10.5	208	45.3	169	6.14	2.60	7.32	3.68	5.35	319	113
PI-H25	125	15.8	3.13	16.9	38.9	0.36	0.04	<0.01	0.03	0.04	0.44	15.2	3.44	1.17	21.6	426	745	129	118	102	100	31.1	20.0	3.37	5.14	10.1	202	43.4	133	5.87	2.46	6.86	3.05	5.27	331	128
PI-H26	130	15.9	3.04	17.1	38.7	0.35	0.02	<0.01	0.01	0.04	0.42	15.3	3.43	1.24	25.3	461	696	134	135	122	107	33.1	19.9	3.13	5.70	9.6	217	46.9	156	6.48	2.61	7.17	3.23	5.31	157	136
PI-H27	135	16.2	3.22	17.5	38.2	0.37	0.03	<0.01	0.02	0.04	0.43	15.2	3.78	1.27	24.0	457	755	140	135	111	112	34.4	22.4	3.79	5.91	10.6	229	49.9	162	6.86	2.79	7.85	3.27	5.30	300	122
PI-H28	140	16.4	2.95	17.8	37.6	0.47	0.03	<0.01	0.02	0.03	0.39	15.0	3.46	1.25	19.2	417	587	184	150	122	106	33.1	19.5	2.62	5.52	8.8	221	48.1	249	6.58	2.68	6.81	2.86	5.30	338	128
PI-H29	145	19.5	3.14	18.3	35.3	0.59	0.07	0.03	0.01	0.05	0.34	14.8	4.57	1.10	17.1	396	544	227	142	109	110	32.9	18.3	4.45	7.06	10.8	245	55.0	288	7.25	2.98	7.77	2.82	5.49	290	144

投稿网址: www.stae.com.cn

续表

样品 编号	深度/ cm	微量元素质量分数/%																				微量元素/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)										化学性质指标				
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U	pH	Eh/ mV	CEC/ mmol·kg ⁻¹
P1-H30	150	19.1	3.12	18.6	36.7	0.47	0.06	0.01	0.04	0.04	0.34	15.0	4.06	1.15	19.1	422	586	203	149	113	106	33.1	13.7	3.24	5.75	11.0	223	50.4	255	6.73	2.75	7.39	2.93	5.49	310	140
P1-H31	155	21.7	3.42	19.6	33.2	0.35	0.08	<0.01	0.02	0.04	0.33	15.3	4.12	1.13	13.0	400	534	143	191	112	112	35.8	10.3	3.70	5.84	9.6	253	56.3	211	7.76	3.08	7.76	2.88	5.40	312	142
P1-H32	160	22.4	3.32	19.5	32.4	0.42	0.10	0.04	0.03	0.07	0.27	12.9	4.85	1.00	16.6	367	457	179	169	106	104	32.4	8.3	5.21	6.65	10.4	228	52.6	260	7.04	2.84	7.56	2.62	5.34	342	152
P1-H33	165	23.8	3.67	20.1	30.3	0.38	0.09	0.03	0.02	0.08	0.25	15.4	5.41	1.05	18.7	347	480	141	185	102	109	33.1	6.4	6.24	7.40	11.5	252	56.6	208	7.73	3.05	8.28	2.64	5.26	333	159
P1-H34	170	26.6	4.06	20.4	28.4	0.37	0.08	<0.01	0.03	0.08	0.24	14.8	5.78	0.98	16.8	366	495	145	181	102	115	35.6	8.3	6.80	7.07	12.9	289	57.8	176	8.87	3.02	9.55	2.86	5.13	342	150
P1-H35	175	21.7	3.28	18.9	32.1	0.49	0.07	0.03	0.02	0.05	0.26	14.9	4.32	1.13	14.8	378	516	207	169	111	108	33.4	6.5	4.47	5.44	11.3	241	53.3	243	7.26	2.80	7.74	2.72	4.95	347	72
P1-H36	180	21.2	3.02	27.3	32.6	0.53	0.11	0.04	0.07	0.07	0.26	15.1	4.26	1.06	17.4	344	483	191	171	100	100	30.8	4.2	4.02	5.08	10.4	215	48.8	287	6.57	2.59	7.06	2.56	5.02	355	148
P1-H37	185	25.7	3.75	20.2	29.0	0.43	0.08	<0.01	0.03	0.08	0.24	14.9	5.24	1.06	10.4	336	463	163	177	97	103	32.6	10.4	6.30	7.41	10.7	265	18.3	238	8.18	1.02	7.96	2.77	5.23	322	159
P1-H38	190	21.6	3.20	18.6	34.0	0.36	0.06	0.02	0.03	0.05	0.26	14.5	3.77	1.15	16.2	408	561	131	169	114	107	32.8	12.9	3.83	7.02	10.7	221	48.5	325	6.86	2.57	7.16	2.90	5.32	347	133
P1-H39	195	26.1	4.10	19.2	31.6	0.22	0.08	<0.01	0.02	0.06	0.21	14.2	5.35	1.03	10.5	404	523	97	148	106	111	32.7	12.7	5.97	7.63	11.5	272	54.5	161	8.48	16.80	8.17	3.07	5.30	356	135
P1-H40	200	27.5	4.06	21.0	28.0	0.38	0.10	0.01	0.02	0.07	0.23	14.4	5.14	0.92	13.6	315	395	142	171	90	99	31.6	8.2	5.60	7.18	10.7	264	26.7	205	8.03	1.35	7.92	2.54	5.32	30	140
P1-H41	205	24.5	3.81	19.0	32.2	0.32	0.08	0.01	0.02	0.06	0.24	14.1	4.29	1.02	14.4	383	505	138	164	105	103	32.4	13.4	4.63	10.10	11.1	250	54.3	198	7.63	2.82	7.74	2.72	5.33	368	139
P1-H42	210	26.7	3.72	21.1	27.7	0.48	0.09	<0.01	0.02	0.07	0.23	14.4	4.60	1.04	15.0	331	397	195	193	98	111	34.4	12.8	5.56	8.16	11.2	276	42.2	240	8.44	2.13	8.03	2.67	5.35	288	82
P1-H43	215	26.6	4.10	20.1	28.6	0.36	0.08	0.02	0.02	0.06	0.22	13.8	4.54	0.95	13.6	332	363	139	177	97	104	32.4	13.0	5.39	8.78	12.3	274	32.1	199	8.28	1.61	8.14	2.64	5.19	362	71
P1-H44	220	24.0	3.23	20.3	30.5	0.57	0.06	<0.01	0.02	0.05	0.23	14.1	4.16	1.08	12.4	368	475	191	163	111	100	30.6	15.3	4.57	10.70	10.3	230	49.8	204	7.10	2.64	7.17	2.69	4.95	343	73
P1-H45	225	26.3	3.80	20.3	26.7	0.49	0.06	0.13	0.01	0.07	0.18	13.7	4.07	1.02	15.0	331	368	266	162	101	97	31.4	14.4	4.25	8.26	10.8	234	44.6	292	7.17	2.31	7.08	2.56	5.29	298	119
P1-H46	230	26.5	3.77	20.2	29.1	0.39	0.07	<0.01	0.02	0.06	0.19	13.9	4.74	0.95	14.6	341	398	199	163	101	102	31.0	15.0	5.34	8.07	11.2	256	51.7	198	8.03	2.72	7.94	2.66	5.29	359	83
P1-H47	235	25.4	3.42	19.9	29.2	0.43	0.13	0.11	0.06	0.11	0.22	14.2	5.36	1.18	16.7	364	434	214	186	110	102	31.6	16.5	8.40	12.80	11.5	240	51.8	268	7.39	2.75	7.76	2.68	5.17	339	91
P1-H48	240	27.1	3.82	20.9	26.9	0.50	0.07	0.14	0.02	0.07	0.19	14.2	5.19	0.99	16.8	340	385	220	183	100	102	32.7	14.4	6.03	10.40	12.5	279	33.4	302	8.74	1.62	9.06	2.71	5.33	310	88
P1-H49	245	25.9	3.66	20.3	29.3	0.44	0.07	0.03	0.02	0.06	0.21	14.2	4.57	1.03	16.6	359	416	230	185	106	99	31.8	14.5	4.88	7.39	11.2	257	37.0	288	8.16	1.87	8.59	2.77	5.45	341	91
P1-H50	250	25.6	3.51	20.1	30.1	0.42	0.06	0.01	0.03	0.06	0.23	14.2	4.34	1.10	16.5	358	441	226	197	116	101	32.4	14.6	5.10	8.16	10.8	253	39.4	282	7.86	2.03	7.83	2.79	7.43	293	88
P1-H51	255	26.4	3.48	21.3	27.8	0.47	0.07	<0.01	0.02	0.04	0.21	14.5	4.26	1.12	14.0	361	425	265	226	114	107	35.0	15.4	4.14	7.47	9.7	261	30.0	347	8.21	1.56	7.68	2.73	5.64	254	86
P1-H52	260	27.8	3.69	21.1	26.8	0.50	0.10	0.05	0.02	0.06	0.18	14.2	5.03	1.03	12.0	336	384	273	180	106	103	32.9	13.5	5.74	8.86	10.8	275	31.9	304	8.71	1.72	8.29	2.82	5.40	271	78
P1-H53	265	26.6	3.69	19.9	30.0	0.27	0.08	0.01	0.01	0.05	0.22	14.3	4.03	1.15	12.6	386	488	151	181	114	102	32.5	14.3	4.47	8.68	9.7	242	43.1	225	7.76	2.38	7.68	3.02	5.39	275	73
P1-H54	270	28.4	3.69	22.2	26.5	0.30	0.08	0.02	0.03	0.05	0.23	14.5	3.09	1.16	11.0	320	411	164	248	105	105	34.0	11.3	3.83	8.41	8.9	266	18.9	350	8.61	1.03	7.42	2.81	5.43	298	75
P1-H55	275	26.0	3.49	19.8	30.1	0.34	0.09	0.04	0.03	0.05	0.23	14.2	4.43	1.22	14.9	379	473	190	181	113	99	32.5	12.4	4.28	8.43	9.7	236	26.5	308	7.56	1.44	7.92	2.94	5.51	308	74
P1-H56	280	26.7	3.37	20.6	27.3	0.54	0.10	0.03	0.02	0.06	0.21	14.5	5.51	1.30	16.4	349	444	309	207	113	104	33.3	9.9	5.16	8.13	10.9	254	19.7	510	8.23	0.99	8.46	2.95	5.46	312	85
P1-H57	285	26.6	3.54	19.9	23.6	0.38	0.09	0.02	0.03	0.06	0.17	14.3	4.03	1.17	16.7	310	413	164	221	97	99	33.0	7.1	4.58	10.30	9.5	254	28.7	287	8.24	1.44	7.99	2.62	5.59	294	88
P1-H58	290	30.8	3.75	21.8	28.5	0.30	0.11	0.02	0.03	0.06	0.20	14.6	4.92	1.22	17.0	331	427	233	222	110	103	34.3	7.3	5.79	8.96	10.3	282	15.1	413	9.16	0.70	9.02	2.95	5.51	289	96
P1-H59	295	26.3	3.51	20.3	29.1	0.29	0.07	0.01	0.03	0.04	0.24	14.3	3.94	1.42	17.2	352	471	175	202	115	102	33.4	4.8	3.69	7.71	9.7	243	39.8	307	7.91	2.15	7.91	2.87	5.50	277	77

续表

样品 编号	深度/ cm	微量元素质量分数/%																			微量元素/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)						化学性质指标									
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U	pH	Eh/ mV	CEC/ (mmol· kg ⁻¹)
P1-H60	300	27.1	3.65	20.0	28.4	0.20	0.08	<0.01	0.02	0.04	0.2	14.2	4.32	1.36	16.1	347	440	102	175	109	96	31.7	2.3	3.91	7.62	9.4	237	47.3	242	7.81	2.56	7.99	2.76	5.46	272	84
P1-H61	305	33.7	4.55	21.2	26.7	0.13	0.09	<0.01	0.02	0.07	0.11	13.7	5.88	0.99	20.3	303	350	71	158	89	96	32.0	7.3	6.35	10.10	10.9	277	34.3	136	8.91	1.47	9.83	2.59	5.86	326	95
P1-H62	310	33.5	4.79	22.3	25.3	0.11	0.10	0.01	0.02	0.07	0.09	13.6	3.39	0.87	11.8	254	291	54	160	78	85	29.8	6.8	6.11	10.50	8.4	288	12.6	134	9.35	0.57	8.41	2.44	5.81	370	97
P1-H63	315	32.4	4.25	23.6	25.1	0.20	0.09	0.03	0.02	0.05	0.10	14.4	3.14	0.90	14.4	237	264	102	181	77	91	32.1	6.7	4.88	11.00	8.1	284	15.8	189	9.24	0.69	7.99	2.25	5.83	333	100
P1-H64	320	34.1	4.65	23.4	23.2	0.16	0.11	0.02	0.03	0.07	0.09	14.1	3.00	0.79	12.7	238	272	62	160	74	88	30.9	6.7	6.29	10.70	8.2	296	17.3	167	9.50	0.75	8.33	2.28	5.78	357	105
P1-H65	325	33.7	4.53	23.4	23.9	0.09	0.10	<0.01	0.02	0.06	0.09	14.5	3.85	0.83	15.5	248	280	35	156	75	86	31.4	7.0	6.03	11.10	8.7	281	13.5	129	8.99	0.56	8.52	2.28	5.77	351	124
P1-H66	330	32.6	4.35	22.8	25.7	0.08	0.10	<0.01	0.03	0.06	0.11	14.4	4.22	0.91	16.3	256	315	33	156	81	86	32.8	7.1	5.52	10.60	9.0	275	15.9	132	8.81	0.88	8.62	2.40	5.70	335	106
P1-H67	335	36.3	4.73	23.9	20.1	0.05	0.14	<0.01	0.02	0.07	0.08	14.1	3.58	0.78	13.5	233	258	21	148	72	81	30.5	6.6	6.33	11.30	8.4	285	7.9	104	9.17	0.36	8.62	2.28	5.73	349	110
P1-H68	340	35.9	4.61	23.1	21.6	0.12	0.12	0.01	0.02	0.07	0.09	14.5	5.88	0.85	15.5	247	288	26	149	75	87	30.4	7.4	11.80	18.30	10.0	311	10.0	128	10.20	0.57	10.20	2.62	5.89	325	121
P1-H69	345	36.0	4.97	22.6	21.3	0.07	0.17	0.01	0.06	0.17	0.09	14.2	4.40	0.85	15.1	253	278	45	153	77	86	31.5	8.3	6.78	12.20	8.6	300	11.8	175	9.66	0.49	9.05	2.38	6.02	22	57
P1-H70	350	31.7	3.78	22.2	27.1	0.14	0.06	<0.01	0.02	0.04	0.19	14.9	8.60	2.80	16.6	386	469	92	255	122	112	34.7	9.7	3.94	13.30	8.6	255	30.2	234	7.85	6.37	6.74	2.22	6.09	24	102
P1-H71	355	33.4	4.38	24.8	21.7	0.12	0.12	<0.01	0.04	0.06	0.19	14.7	9.41	2.38	18.1	335	306	60	356	103	127	36.1	7.3	5.66	20.10	8.6	291	31.0	287	9.05	3.28	7.77	2.25	6.37	23	114
P1-H72	360	34.6	4.43	23.9	21.6	0.09	0.11	<0.01	0.03	0.07	0.18	14.5	9.60	2.35	18.8	351	386	44	317	102	114	33.8	8.1	6.28	17.30	8.8	280	14.3	251	8.85	1.24	7.79	2.34	6.38	26	111
P1-H73	365	34.9	4.41	24.8	20.3	0.09	0.13	<0.01	0.03	0.06	0.17	14.6	8.91	2.38	18.5	338	362	47	345	105	109	34.5	8.7	6.79	26.30	9.1	289	8.8	267	8.91	0.79	7.83	2.37	6.08	24	102
P1-H74	370	35.8	4.46	25.2	19.2	0.11	0.12	0.02	0.03	0.07	0.14	14.8	8.71	2.08	16.7	274	254	53	352	87	105	32.6	5.4	7.06	19.00	7.9	291	5.2	271	9.10	0.59	7.63	2.14	6.53	23	116
P1-H75	375	31.8	3.99	24.1	24.0	0.18	0.09	0.02	0.05	0.04	0.27	15.6	8.13	3.18	18.3	331	276	118	447	111	142	36.3	6.7	3.76	20.60	8.3	283	18.8	399	8.96	1.55	6.88	2.27	6.55	23	120
P1-H76	380	34.4	4.43	24.1	21.4	0.13	0.11	0.02	0.03	0.06	0.19	14.7	8.67	2.63	17.9	308	298	75	379	98	120	33.3	6.3	5.48	17.20	8.7	287	15.3	299	9.09	1.22	7.82	2.32	6.57	24	100
P1-H77	385	34.0	3.87	25.9	19.8	0.12	0.09	0.01	0.04	0.04	0.25	15.7	5.57	2.86	16.9	276	258	73	408	85	129	33.7	4.5	3.79	16.50	7.2	266	28.6	364	8.52	1.91	6.29	2.11	6.83	23	106
P1-H78	390	33.3	3.69	27.3	19.6	0.13	0.09	0.01	0.04	0.04	0.27	15.7	6.18	2.97	20.4	280	270	71	458	85	134	35.1	4.9	3.32	18.50	7.5	252	32.6	432	8.02	2.36	6.05	2.10	6.81	278	110
P1-H79	395	33.8	3.72	26.8	18.9	0.15	0.11	0.02	0.06	0.04	0.27	15.7	6.97	3.11	19.2	300	278	86	472	84	125	35.4	5.0	3.46	19.80	8.4	261	29.9	430	8.37	2.11	6.37	2.18	7.09	24	111
P1-H80	400	34.8	3.60	26.1	18.7	0.22	0.14	0.05	0.04	0.05	0.25	15.6	8.27	3.00	21.7	292	264	121	427	83	125	35.3	5.7	4.38	19.40	9.0	260	29.5	390	8.27	2.25	6.71	2.21	6.91	23	121
P1-H81	405	36.5	4.26	25.2	19.1	0.08	0.13	0.01	0.04	0.07	0.20	14.3	11.00	2.81	19.3	314	335	55	352	88	119	34.3	7.1	7.15	18.90	9.6	285	28.4	264	9.06	2.42	8.23	2.46	6.82	23	124
P1-H82	410	35.7	3.58	27.8	17.0	0.11	0.14	0.02	0.03	0.06	0.20	15.3	11.00	2.77	17.7	267	269	69	377	84	120	35.4	5.4	7.30	21.10	8.9	266	26.0	280	8.57	2.05	7.36	2.25	6.70	23	146
P1-H83	415	34.6	3.11	28.4	17.6	0.26	0.15	0.09	0.04	0.05	0.28	15.5	9.08	3.04	19.1	251	241	153	494	83	133	33.6	5.1	5.14	25.00	9.6	240	27.4	469	7.85	2.09	6.18	2.01	6.58	25	137
P1-H84	420	43.6	2.45	22.2	15.2	0.13	1.51	2.02	1.41	0.54	0.34	11.0	5.45	2.64	22.0	178	268	57	406	78	221	29.0	5.7	7.81	185.00	138.0	180	23.0	728	5.72	1.49	4.02	1.01	6.89	282	194

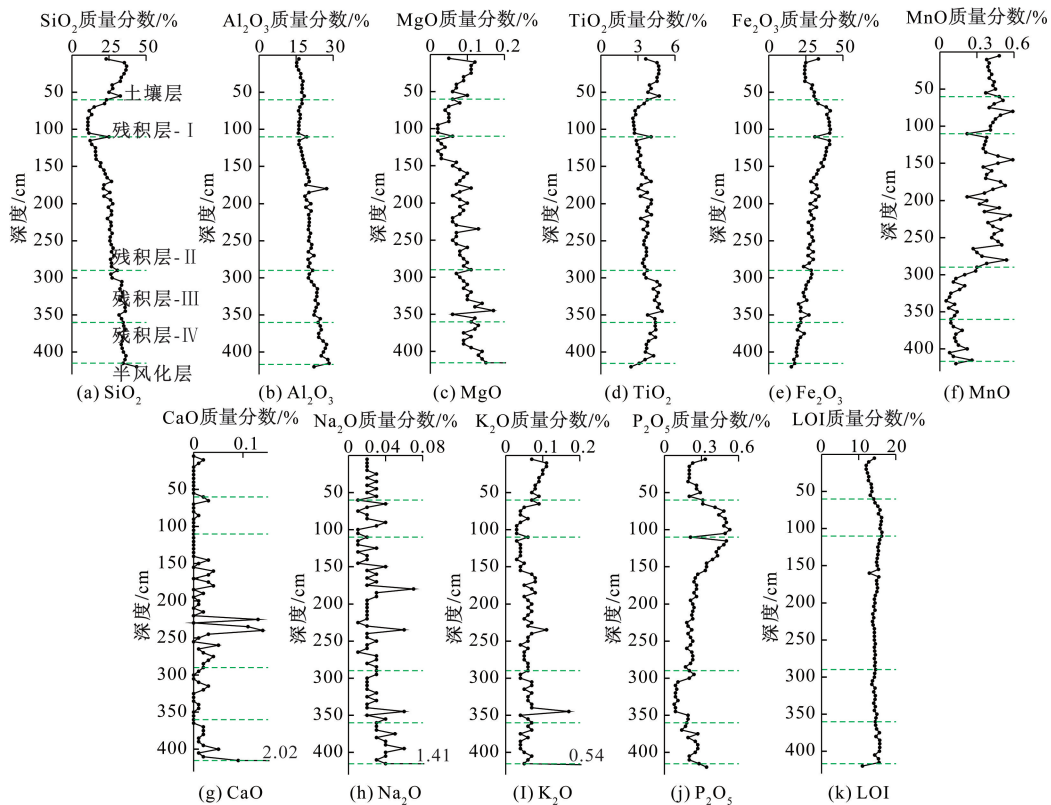


图3 临高红土型风化剖面主要元素含量变异图

Fig. 3 Variation diagram of major elements concentrations across the Lingao laterite weathering profile

土壤氧化还原能力的大小可用 Eh 来衡量,剖面中样品的 Eh 范围为 22 ~ 384 mV, 平均 (270 ± 119) mV。从总体上来看,土壤层和残积层的上部和中部的 Eh 总体比较稳定,但从 340 cm 向下,Eh 急剧降低,并一直保持低位,各层位 Eh 平均值分别为:土壤层 (341 ± 22) mV,残积层中 I 层 (337 ± 11) mV, II 层 (307 ± 61) mV, III 层 (242 ± 141) mV, IV 层 (47 ± 73) mV,半风化层 282 mV。

剖面的 CEC 介于 56.5 ~ 194 mmol/kg, 平均 (120 ± 30.2) mmol/kg, 波动较大,总体上从上至下呈先下降后上升的趋势:土壤层平均 (157 ± 24.8) mmol/kg, 残积层中 I 层平均 (130 ± 5.95) mmol/kg, II 层平均 (111 ± 29.6) mmol/kg, III 层平均 (100 ± 17.4) mmol/kg, IV 层平均 (118 ± 13.6) mmol/kg,半风化层 194 mmol/kg。

4 讨论

4.1 剖面风化程度

与临高多文组玄武岩 (Al_2O_3 为 14.2%、 Fe_2O_3 为 11.8% 和 SiO_2 为 52.0%^[16,29,31-32]) 和 PAAS (后太古宙平均页岩, Al_2O_3 为 18.90%、 Fe_2O_3 为 7.20% 和 SiO_2 为 62.80%^[33]) 相比,剖面的主要元素组成表现出明显的高 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 , 和低 SiO_2 的特征,符合极端风化条件下的脱 Si、富 Fe 和 Al 的风化作用的结

果。将剖面的微量元素组成与临高多文组玄武岩和 PAAS 进行对比(图 6),相对于 PAAS,剖面的 HFSE (Nb、Zr、Hf、Ti) 含量明显偏高,可能与其受剖面中 Ti-Fe 氧化物控制有关;相对于临高多文组玄武岩,剖面显示出明显的碱金属-碱土金属 (Rb、K、Sr) 的亏损,与玄武岩遭受风化作用后这类元素极易流失的事实相吻合,其余微量元素的配分则大体相似,显示了对母岩的继承性。

化学蚀变指数 (CIA) 常用于评价化学风化的强度^[19],剖面中土壤层和残积层的 CIA 值范围为 97.9 ~ 99.6, 平均 99.3 ± 0.3 ,半风化玄武岩样品的 CIA 为 77.1。土壤层和残积层的 CIA 值明显大于半风化玄武岩样品、临高多文组玄武岩 (40.7 ^[16,29,31-32]) 和 PAAS (70.4 ^[33]),如图 7(a) 所示,剖面中普遍极高的 CIA 值反映了炎热、潮湿的热带、亚热带条件下的极端化学风化作用^[19,34-35]。IOL (红土化指数) 和 SAF (SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3) 三角图可对沉积物的风化程度进行评价^[9],更高的 IOL 对应于更强烈的化学风化,土壤层和残积层的 IOL 范围为 51.9 ~ 84.5, 平均 65.5 ± 8.8 ,半风化玄武岩的 IOL 为 46.2,临高多文组玄武岩的 IOL 值为 33.3。如图 7(b) 所示,半风化玄武岩和少数的土壤层与残积层样品处于高岭石化末期,绝大部分剖面样品落在弱红土化和中度红土化区间,并明显的趋向 Fe_2O_3 。

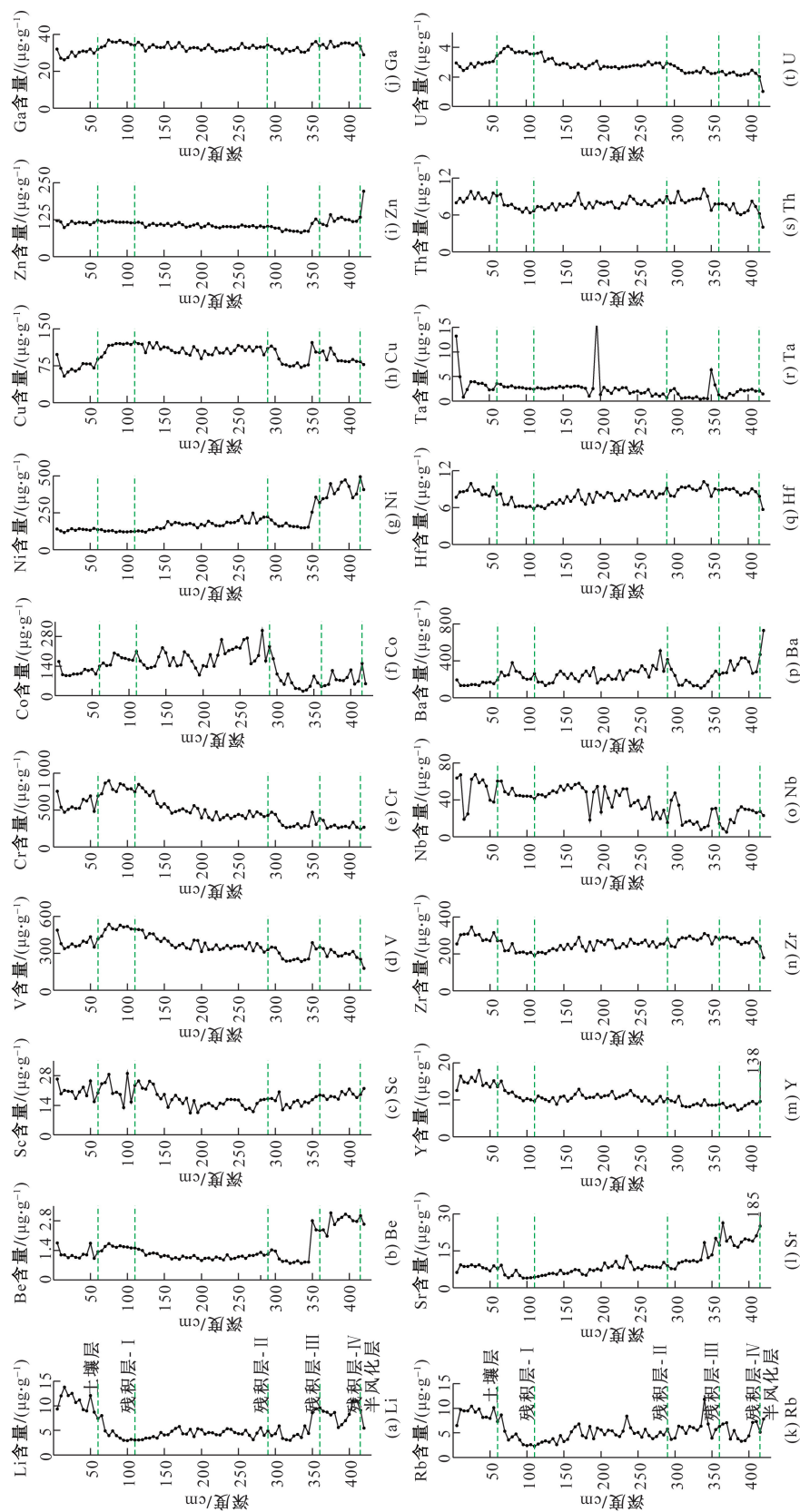


图4 临高红土型风化剖面微量元素含量变异图
Fig.4 Variation diagram of trace elements concentrations across the Lingao laterite weathering profile

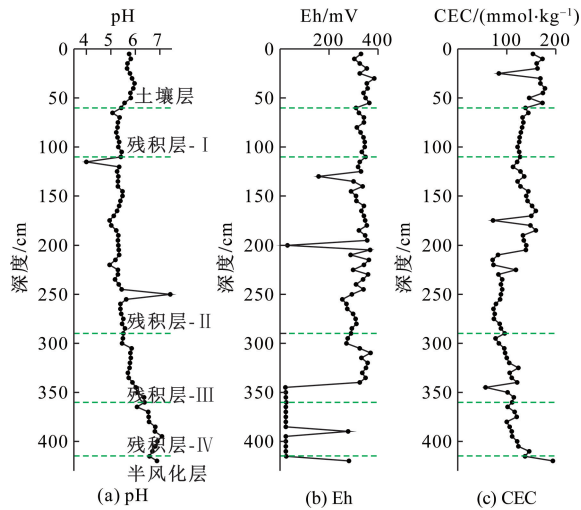


图5 临高红土型风化剖面化学性质指标变异图
Fig. 5 Chemical properties values across the Lingao laterite weathering profile

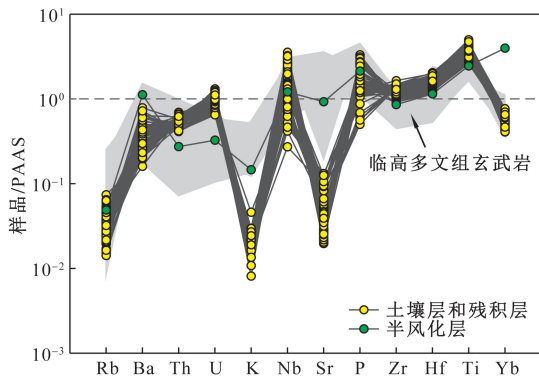
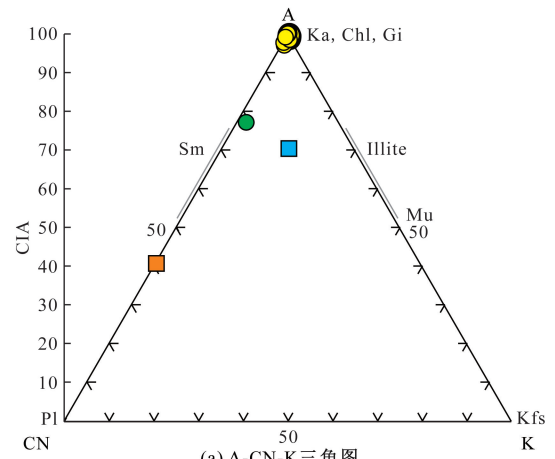


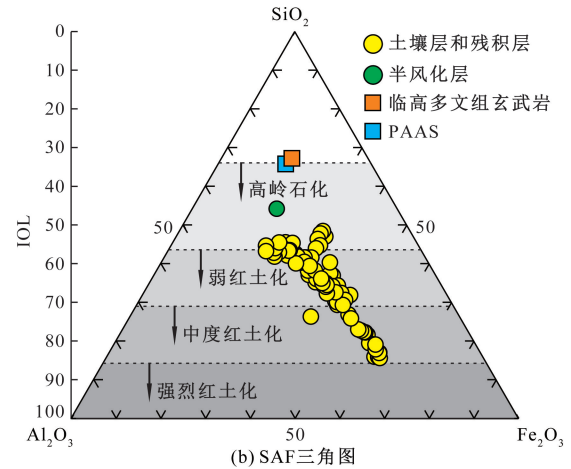
图6 临高红土型风化剖面微量元素蛛网图(标准化数据 PAAS 自文献[33], 临高多文组玄武岩数据自文献[16,29,31-32])
Fig. 6 Spider diagrams of trace elements in Lingao laterite weathering profile (standardized data PAAS according to ref. [33], Lingao Duowen basalt data according to ref. [16,29,31-32])

4.2 质量平衡计算

岩石在风化的过程中发生元素的迁入和迁出现象,总是伴随着旧矿物的分解和新矿物的形成,进而导致母岩的质量和体积发生不同程度的改变。直接对比不同层位样品的元素含量并不能真实地反映出风化过程中各元素相对于母岩发生富集和贫化的程度,为准确地了解成矿过程中元素的富集或流失行为,需对风化作用前后元素的组成变化进行质量平衡计算。在地表风化和蚀变过程中, HFSE (Ti、Nb、Ta、Zr 和 Hf) 的地球化学性质通常相对稳定,可作为质量平衡计算的标准元素^[3,36]。除 Ti 常作为玄武岩风化剖面研究的稳定元素外^[37], Ma 等^[21]认为 Th 是海南文昌玄武岩红土型风化剖面中最稳定的元素,而 Jiang 等^[20]认为 Nb 是同一地区另一玄武岩红土型风化剖面中最稳定的元素。本次



(a) A-CN-K三角图



(b) SAF三角图

Ka 为高岭石;Chl 为绿泥石;Gi 为三水铝石;Sm 为蒙脱石; Illite 为伊利石;Mu 为白云母;Pl 为斜长石;Kfs 为钾长石
图7 临高红土型风化剖面 A-CN-K 三角图和 SAF 三角图 (底图据文献[9,35], PAAS 数据自文献[33], 临高多文组玄武岩数据自文献[16,29,31-32])
Fig. 7 A-CN-K diagram and SAF diagram of Lingao laterite weathering profile (modified according to ref. [9,35], PAAS data according to ref. [33], Lingao Duowen basalt data according to ref. [16,29,31-32])

研究采用 Th 元素作为质量平衡计算的标准元素,主要依据有:一是与 Ma 等^[21]相似,当假定 Th 为剖面中最稳定元素时,Ti、Fe、Zr、Hf、Nb 和 Ta 表现出不同程度的丢失(图 8),而假定其他元素为标准元素时,部分元素表现出富集现象,说明 Th 在研究剖面中最为稳定;二是研究表明,海南岛东北部土壤中的 Th 并未受风尘带入物质的影响^[20],该剖面据本次剖面仅约 100 km,而风尘影响具有区域性,因此有理由认为本次剖面中 Th 的含量也未受风尘带入物质的影响。综上所述,本次研究采用 Th 元素作为质量平衡计算的标准元素,假设其在风化作用前后的绝对含量基本保持不变,关于不同样品中各元素相对母岩的富集或流失程度 T 的计算公式为

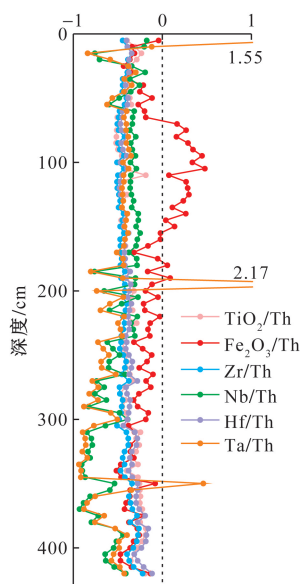


图8 临高红土型风化剖面中 Fe_2O_3 、 TiO_2 、Zr、Hf、Nb 和 Ta 与 Th 比值相对临高多文组玄武岩的变化
Fig. 8 In-depth variations of the ratio of Fe_2O_3 , TiO_2 , Zr, Hf, Nb and Ta to Th in the Lingao laterite weathering profile relative to the Lingao Duowen Formation basalt

$$T = \frac{w(i, \text{风化剖面})}{w(i, \text{母岩})} \frac{w(\text{Th}, \text{母岩})}{w(\text{Th}, \text{风化剖面})} - 1 \quad (1)$$

式(1)中: w 为元素含量; i 为某一元素。

研究剖面发育于中更新世多文组玄武岩之上,多文组玄武岩是海南岛北部分布最广泛的玄武岩,本次研究仅采用分布在研究区周边(临高县内)的多文组玄武岩元素组成的加权平均值代表临高多文组玄武岩化学成分(数据来自文献[16, 29, 31-32])。根据上述计算原理,以临高多文组玄武岩作为母岩进行质量计算,对剖面元素质量变异图(图9)观察发现,元素在剖面中的富集和淋失规律与水溶液条件下元素的迁移行为相符,说明以临高多文组玄武岩代表母岩合理。Nesbitt^[38]将微量元素的迁移强度划分为: T 为 $-0.7 \sim -1$ 的强迁移、 $-0.4 \sim -0.7$ 的中等迁移和 $0 \sim -0.4$ 的弱迁移。根据质量平衡计算结果,相对临高多文组玄武岩,剖面中的强迁移元素有 SiO_2 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、Li、Be、Rb、Sr和Y,中等迁移元素有 Al_2O_3 、Sc、Cu、Zn、Ga、Zr、Nb、Ba、Lu和Ta,弱迁移元素有 TiO_2 、 Fe_2O_3 、MnO、V、Cr、Co、Ni和Hf。此外,U在整个剖面相对临高多文组玄武岩保持富集状态。

4.3 碱金属和碱土金属元素质量变异特征

碱金属Na、K和碱土金属Mg、Ca、Sr不仅含量明显低于新鲜玄武岩,而且沿整个剖面发生程度极高的丢失,平均 T 值分别为 -0.99 、 -0.97 、 -0.99 、

-1.00 和 -0.98 。这一现象与碱性金属元素在表条件下的强活动性有关,表明玄武岩中的这些碱性金属元素在热带极端风化条件下近乎完全被淋滤出剖面。同时,上述5个碱性元素 T 值相互间的相关性均大于 0.98 ,说明它们在风化过程中具有十分相似的地球化学行为。

虽然碱金属Li、Rb和碱土金属Be、Ba在整个剖面仍表现为淋失,但淋失程度略小于前述同类元素(平均分别为 -0.80 、 -0.88 、 -0.74 和 -0.68),并都在残积层底部(IV层)淋失程度减弱,这一现象可能与黏土矿物的吸附作用有关,与野外观察中IV层黏土含量最高的事实相符,也可能与进入IV层后pH由弱酸性转变为弱碱性有关。这4个元素在淋失程度上具有 $\text{Rb} > \text{Li} > \text{Be} > \text{Ba}$ 的顺序(平均 T 值分别为 -0.88 、 -0.80 、 -0.74 和 -0.68)。

4.4 氧化还原敏感性元素质量变异特征

Fe、Mn、U、Co、Cr等元素被统称为氧化还原敏感性元素,它们通常以不同价态存在于自然界中。Fe在残积层顶部发生富集(70~150 cm,该层平均 T_{Fe} 为 0.25),与残积层顶部豆状、块状褐铁矿普遍发育的现象相符。Fe在其他层位发生轻微淋失、在残积层顶部发生富集的行为指示其迁移方向并非整体向下,可能存在侧向或向上迁移,与前人的认识一致^[23]。从pH-Eh条件可知,Fe在残积层顶部主要以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的形式沉淀[图10(a),底图根据文献[39]修改]。Cr在还原环境下不易溶解,在氧化环境则形成可溶的含氧阴离子^[4]。Cr在剖面中以不溶于水的 Cr_2O_3 形式存在[图10(b),底图根据文献[39]修改],残积层顶部Cr的富集是 Cr_2O_3 的沉淀导致。

Co与Mn沿剖面的质量变异特征高度相似,二者 T 值的相关系数高达 0.83 ,在剖面中的富集多发生在残积层I层和II层范围内,但波动较大(该层 T_{Co} 和 T_{Mn} 范围在 $-0.47 \sim 0.66$),在土壤层和残积层III层和IV层则表现为一定程度的淋失。Co元素通常以 Co^{2+} 的形式存在于溶液中,而 Co^{3+} 的溶解度非常低^[4]。在玄武岩的化学风化过程中,Mn容易从原生矿物中浸出^[3],一般来说, Mn^{2+} 是可溶的,当它被氧化成 Mn^{3+} 或 Mn^{4+} 时,则以不溶性氧化物或氢氧化物的形式析出^[40-41]。根据pH-Eh图[图10(a)和图10(c),底图根据文献[39]修改]可知,剖面中Mn和Co均以可溶的 Mn^{2+} 和 Co^{2+} 形式存在,推测Mn和Co的富集可能是由于风化过程中含有 Mn^{2+} 或 Co^{2+} 的氧化物或氢氧化物水解导致,而Mn和Co高度的相关性指示二者行为相似或发生类质同象。

U在整个剖面质量变异较为稳定,并表现为轻

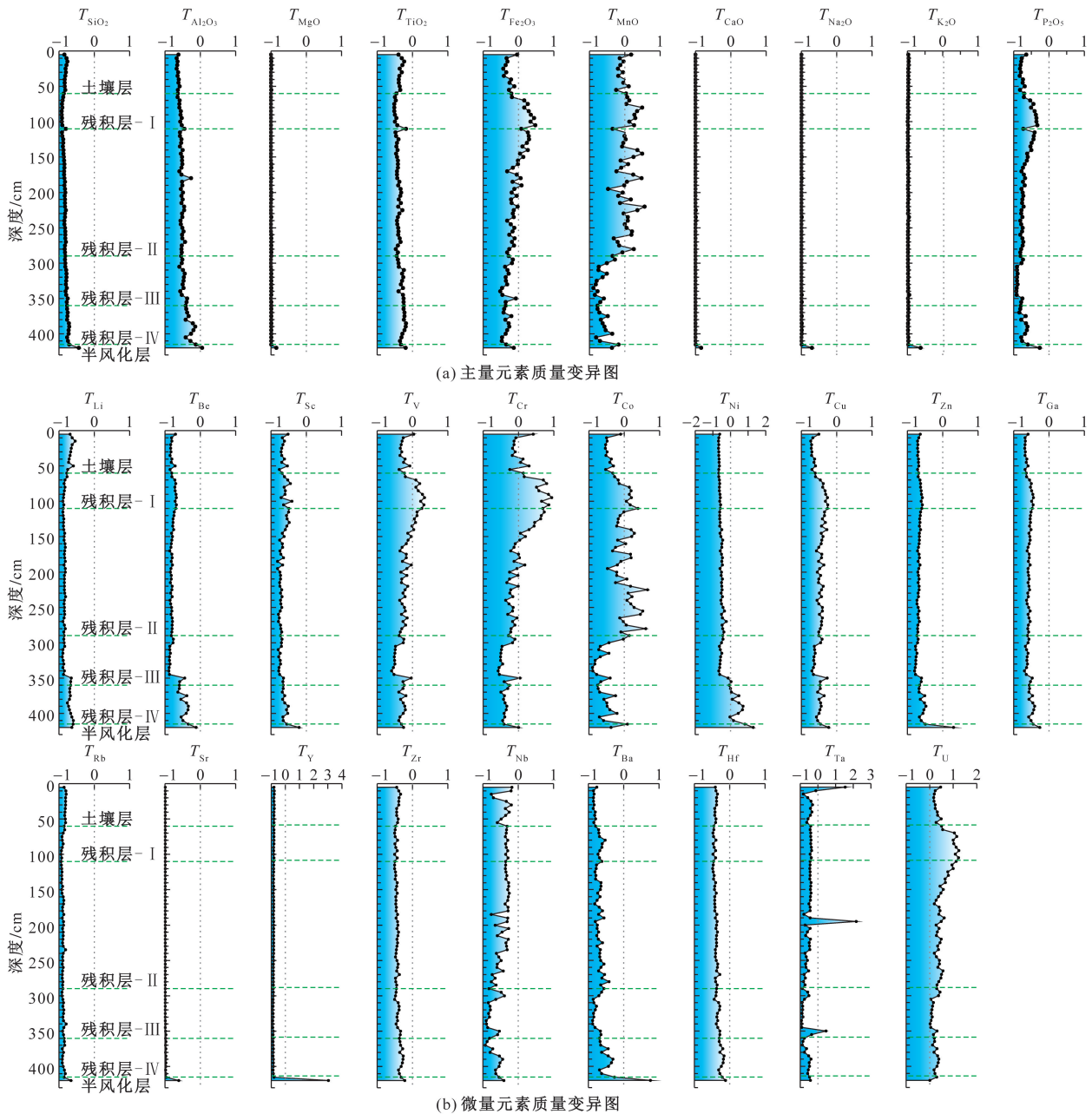


图9 临高红土型风化剖面元素质量变异图

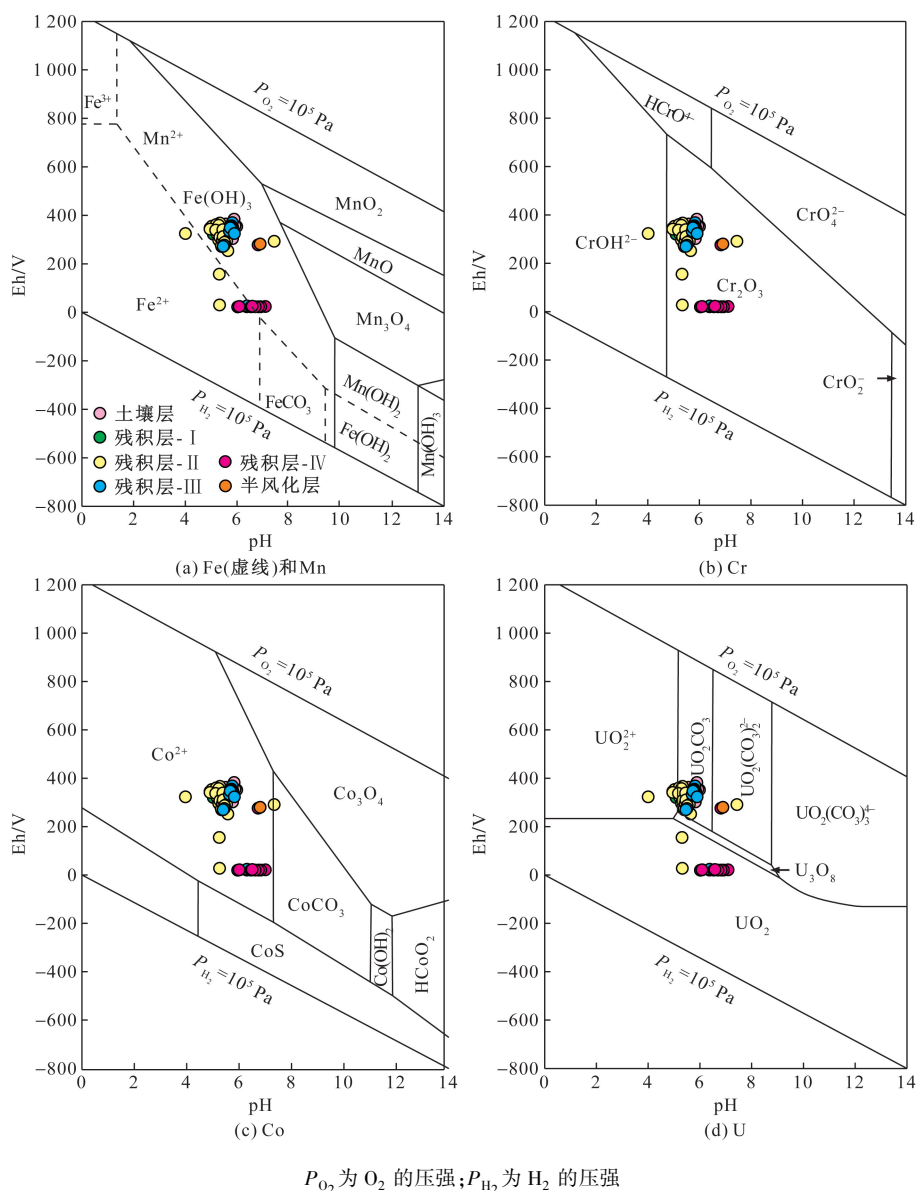
Fig. 9 Variation of elemental mass across the Lingao laterite weathering profile

微的富集,平均 T_U 为 0.43,在残积层上部富集程度更为明显一些(70 ~ 150 cm,该层 T_U 平均为 0.93)。U 在自然界中主要以 +6 价和 +4 价两种价态存在,其中, U^{6+} 的溶解度较高,容易随水迁移, U^{4+} 的溶解度较低,不容易迁移^[42-43]。剖面中的 U 多以 6 价 (UO_2CO_3 和 UO_2^{2+}) 的形式存在,仅在残积层 IV 层呈 4 价 (UO_2) 沉淀[图 10(d),底图根据文献[39]修改]。次生铁的氧化物/氢氧化物或黏土矿物表面对 UO_2^{2+} 具有强烈的吸附作用^[40,44],剖面中 U 与 Fe 的 T 值相关性高达 0.92,与 Al 呈负相关,可排除黏土矿物的吸附作用。因此,残积层 IV 层 U 的富集由

UO_2 沉淀导致,其他层位 U 的富集与次生铁的氢氧化物的吸附有关。至于 U 在整个剖面的轻微富集现象,推测与地下水中的 U 的带入有关。花岗岩会造成地下水 U 含量偏高^[45],海南岛中部发育大量花岗岩,中间高四周低的地形使得沿海地区接受中部地下水的补给^[46]。同时,农业活动中磷肥施用量的增加也可能会造成地下水的 U 含量升高^[47]。

4.5 稳定元素质量变异特征

在通常的地表风化条件下,Ti、Nb、Ta、Zr 和 Hf 大多以副矿物和新生矿物的形式保留下来,如锆石、金红石、榍石等,地球化学行为相对稳定^[9]。但



P_{O_2} 为 O_2 的压强; P_{H_2} 为 H_2 的压强

图 10 临高红土型风化剖面氧化还原敏感性元素 pH-Eh 相图(底图据文献[39])

Fig. 10 pH-Eh diagrams of redox elements in Lingao laterite weathering profile (modified according to ref. [39])

在本次研究剖面中观察到的现象并非如此,上述元素在剖面中均呈轻微淋失状态,说明在极端风化条件下这些一般被认为稳定的元素也会发生明显移动。Zr 和 Hf 在剖面上的质量变化趋势高度一致,且淋失程度较为稳定, T_{Zr} 和 T_{Hf} 范围分别为 $-0.51 \sim -0.22$ 和 $-0.48 \sim -0.12$, 平均值分别为 -0.42 和 -0.37 。Nb 和 Ta 的变化趋势类似, 平均淋失程度分别为 -0.50 和 -0.49 , 但波动较大, T_{Nb} 和 T_{Ta} 范围分别为 $-0.93 \sim -0.17$ 和 $-0.94 \sim 2.17$, 且在残积层下部淋失程度明显大于其他层位。Ti 在整个剖面上亦表现为淋失, 淋失程度为 $-0.52 \sim -0.19$, 平均 -0.37 。上述稳定元素在剖面上的淋失可能是由分布不均的副矿物(寄主矿物)风化释放导致。

由于地球化学行为稳定且相似, 在风化过程中

HFSE 之间的比值一般不会发生明显变化^[48-49]。在本次剖面中, Zr/Hf 、 Nb/Ta 、 Th/Ti 和 $10^2TiO_2/Zr$ 的比值保持相对稳定, 平均值分别为 32.5 ± 1.26 、 17.0 ± 3.98 、 2.13 ± 0.29 和 1.45 ± 0.13 , 与临高多文组玄武岩接近(平均值分别为 35.6 、 14.9 、 1.32 和 1.32)。中国北方黄土高原的黄土物质具有较高的 Zr/Hf (38.66) 和 Th/Ti (14.48) 较低的 Nb/Ta (12.40) 和 $10^2TiO_2/Zr$ (0.46)^[50], 然而剖面中绝大部分样品的 Zr/Hf 、 Nb/Ta 和 $10^2TiO_2/Zr$ 比值呈较为稳定的线性关系(图 11), 所以判断风尘物质输入对剖面中 HFSE 的影响是微不足道的。

4.6 过渡金属元素质量变异特征

过渡金属中 Sc、Cu 和 Zn 在剖面中淋失程度较高, 淋失程度 $Sc \approx Zn > Cu$, 平均 T 值分别为

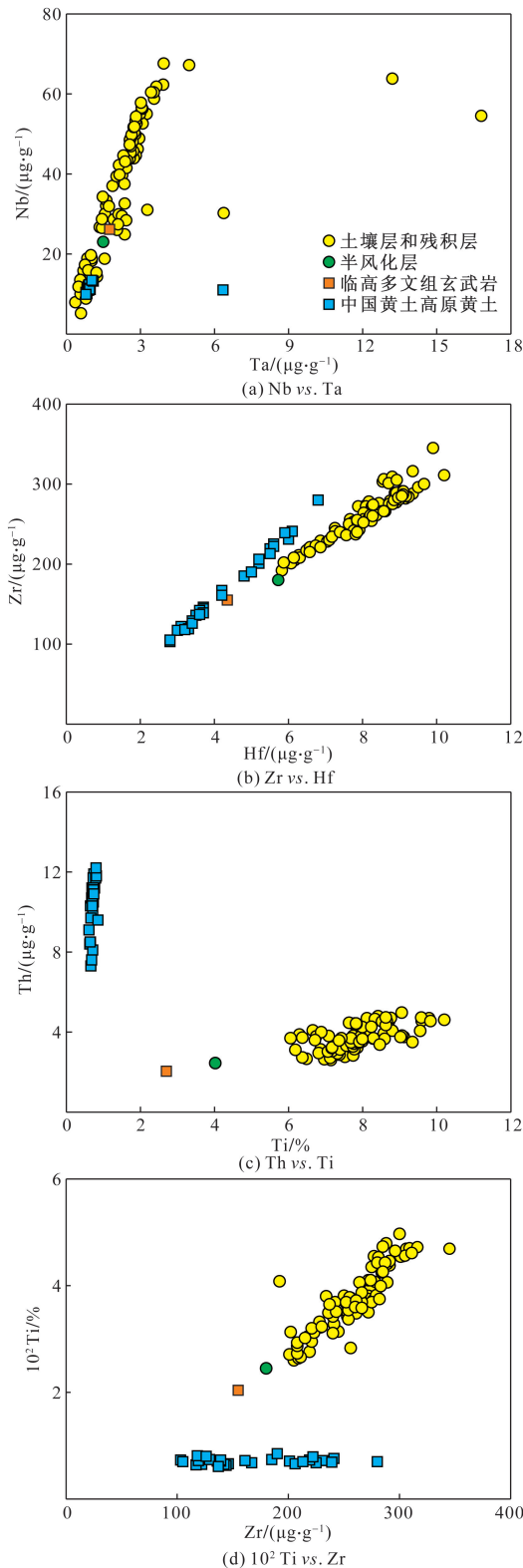


图 11 HFSE 散点图(中国黄土高原黄土数据自文献[50], 临高多文组玄武岩数据自文献[16,29,31-32])

Fig. 11 Scatter diagram of HFSE (China's Loess Plateau loess data according to ref. [50], Lingao Duowen basalt data according to ref. [16,29,31-32])

-0.66、-0.66 和 -0.49。V 在残积层顶部富集(70~140 cm, 该层 T_V 平均值为 0.16), 在其他层位

轻度淋失, 其行为与 Fe 高度相似 (T 值相关性 0.93), 应与 V 和 Fe 的类质同象有关。Ni 在剖面上部和中部表现为轻微且稳定的淋失, 但在残积层 IV 层表现出微弱富集, 平均富集程度 0.32。基性岩中橄榄石和辉石具有相对较高的 Ni 含量, 由于在基性岩风化过程中橄榄石和辉石最先风化, 导致 Ni 在风化过程的初始阶段便开始释放, 随后向下迁移, 以次生镍矿物和次生含镍矿物沉淀下来, 富集在剖面底部^[51-52]。值得注意的是, 以上过渡族元素在进入 IV 层后均有淋失程度明显减弱甚至富集的现象, 可能与进入 IV 层后 pH 由弱酸性转变为弱碱性有关。

4.7 Al 和 Si 质量变异特征

剖面中的 Al 元素总体保持淋失状态, T_{Al} 为 -0.67~0.05, 平均 -0.50, 从上至下淋失程度逐渐减弱, 表明 Al 在风化作用初期的迁移较弱, 更强烈的流失发生在风化作用后期。一般风化条件下, Al 是高惰性元素, 铝硅酸盐很难分解, 但在热带环境下, 有机络合离子可明显提高 Al 的活性, 从而加速矿物分解和 Al 的淋失^[1,3,21]。在红土型风化壳的极端化学风化作用下, Si 大量流失, 淋失程度大于 Al, 在 -0.92~-0.44, 平均 -0.82。

海南岛东部和西北部玄武岩红土型风化剖面的矿物成分、结构构造和化学组成类同, 但岛东北发育铁铝制红土, 岛西北发育铁质红土^[18]。前人多从矿物组成、成矿环境等方面对两地风化产物进行对比, 缺少对两地风化产物差异的系统研究。本次研究以质量平衡计算为基础, 将岛西北临高县玄武岩红土型风化剖面与 Jiang 等^[20]在岛东文昌市玄武岩红土型风化剖面的研究成果对比发现, Si 在两侧剖面的地球化学行为较为一致, 在整个剖面均呈现较高的淋失状态(文昌 T_{Si} 约 -0.6, 临高 T_{Si} = -0.82); Al 在文昌剖面整体上表现为富集, 最大富集程度接近 0.4, 而在临高剖面整体表现为较高度度的淋失; 在文昌剖面中 T_{Fe} 在 -0.2~0.2 来回波动, 而在临高剖面残积层顶部集中富集(平均 T_{Fe} 为 0.25), 其余层位轻微淋失。研究表明, Fe 在两侧剖面的淋失-富集程度相似, 但 Al 的行为差异显著, 临高剖面形成铁质红土应是 Al 的明显淋失和 Fe 在残积层顶部的富集所致, 而文昌剖面的铁铝质红土是 Fe 和 Al 同时富集的产物, 至于临高剖面中 Al 明显淋失的原因有待进一步研究。岛东北的铁铝质红土矿产资源以中国著名的三水型铝土矿-文昌市蓬莱铝土矿为代表, 为风化残积型大型铝土矿, 岛西北的铁质红土矿产资源以研究区所属的“临高-澄迈褐铁矿”为代表, 属风化淋滤型大型褐铁矿, 二者矿体均赋存于新生代玄武岩风化壳中^[28], 是海南省重

要矿产资源,以上认识有助于理解二者成矿机制的差异,为今后矿产资源开发利用提供科学依据。

5 结论

玄武岩红土型风化剖面非常适合研究极端风化作用下元素的地球化学行为,通过对海南岛西北部玄武岩红土型风化剖面的高精度地球化学研究,揭示了剖面中元素的迁移和再分配规律。得出如下结论。

(1)剖面具有较高的 Fe_2O_3 (17.0% ~ 41.6%, 平均 $28.8\% \pm 6.68\%$) 和 Al_2O_3 (15.3% ~ 28.4%, 平均 $20.3\% \pm 3.31\%$), 较低的 SiO_2 (10.6% ~ 43.6%, 平均 $26.7\% \pm 7.76\%$) 组成,土壤层和残积层的 CIA 值极高(平均 99.3),反映了该玄武岩风化剖面经历了热带条件下脱 Si、富 Fe 和 Al 的极端化学风化作用。

(2)剖面中元素含量明显的升高或降低与剖面分界线的划分相吻合。主量元素中 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 和 MnO 的含量高于临高多文组玄武岩, SiO_2 和碱金属-碱土金属的含量显著低于临高多文组玄武岩, P_2O_5 在剖面中的含量则波动较大。除碱金属-碱土金属外,绝大多数微量元素(V、Co、Ni、Cu、Pb、Ga、As、Zr、Cs、Hf、Th 和 U)在近乎整个剖面上的含量均大于临高多文组玄武岩。

(3)以 Th 作为标准元素进行质量平衡计算发现,剖面中的强迁移元素有 SiO_2 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、Li、Be、Rb、Sr 和 Y,中等迁移元素有 Al_2O_3 、Sc、Cu、Zn、Ga、Zr、Nb、Ba、Lu 和 Ta,弱迁移元素有 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 MnO 、V、Cr、Co、Ni 和 Hf,U 在整个剖面相对母岩保持富集状态。

(4)碱金属-碱土金属大多沿整个剖面发生了程度较高的丢失,过渡族金属元素中 Sc、Cu 和 Zn 在剖面中淋失程度较高,V 和 Ni 分别在残积层 IV 层富集,HFSE 在剖面中呈不同程度的淋失状态。

(5)氧化还原敏感性元素的地球化学行为较为复杂:Fe 主要以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的形式在残积层顶部发生沉淀和富集;Cr 在剖面中以不溶于水的 Cr_2O_3 形式存在,并在残积层顶部富集;Mn 和 Co 均以可溶的 Mn^{2+} 和 Co^{2+} 形式存在,二者的富集是由于风化过程中含有 Mn^{2+} 和 Co^{2+} 的氧化物被溶解导致的;U 在残积层 IV 层以 UO_2 的形式沉淀并富集,其他层位的 U 以可溶的 UO_2CO_3 和 UO_2^{2+} 形式存在,富集行为与剖面中次生铁的氢氧化物的吸附作用有关,整个剖面 U 的轻微富集现象可能是地下水中 U 的带入导致。

(6)研究区所属的“临澄褐铁矿区”和琼东北的

“蓬莱三水型铝土矿区”是海南省重要矿产资源,在质量平衡计算的基础上对比前人研究成果,临高剖面形成铁质红土应是 Al 的明显淋失和 Fe 在残积层顶部的富集所致,而文昌剖面的铁铝质红土是 Fe 和 Al 同时富集的产物。这一认识有助于理解海南岛东北部和西北部玄武岩红土型风化产物成矿机制差异,为今后矿产资源开发利用提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 桑隆康, 马昌前. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2012. Sang Longkang, Ma Changqian. Petrology[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2012.
- [2] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44: 1659-1666.
- [3] Nesbitt H W, Wilson R E. Recent chemical weathering of basalts[J]. *American Journal of Science*, 1992, 292(10): 740-777.
- [4] Middelburg J J, Van Der W C H, Woitix J R W. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks[J]. *Chemical Geology*, 1988, 68: 253-273.
- [5] Collins R N, Kinsela A S. The aqueous phase speciation and chemistry of cobalt in terrestrial environments[J]. *Chemosphere*, 2010, 79: 763-771.
- [6] Kraemer D, Kopf S, Bau M. Oxidative mobilization of cerium and uranium and enhanced release of “immobile” high field strength elements from igneous rocks in the presence of the biogenic siderophore desferrioxamine B[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 165: 263-279.
- [7] Hill I G, Worden R H, Meighan I G. Yttrium: the immobility-mobility transition during basaltic weathering[J]. *Geology*, 2000, 28: 923-926.
- [8] Hodson M E. Experimental evidence for mobility of Zr and other trace elements in soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 819-828.
- [9] Babechuk M G, Widdowson M, Kamber B S. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India[J]. *Chemical Geology*, 2014, 363: 56-75.
- [10] Lemarchand E, Chabaux F, Vigier N, et al. Lithium isotope systematics in a forested granitic catchment (Strengbach, Vosges Mountains, France) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(16): 4612-4628.
- [11] Tipper E T, Gaillardet J, Louvat P, et al. Mg isotope constraints on soil pore-fluid chemistry: evidence from Santa Cruz, California [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(14): 3883-3896.
- [12] Liu S A, Teng F Z, Li S, et al. Copper and iron isotope fractionation during weathering and pedogenesis: insights from saprolite profiles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 146: 59-75.
- [13] Li M, He Y S, Kang J T, et al. Why was iron lost without significant isotope fractionation during the lateritic process in tropical environments? [J]. *Geoderma*, 2017, 290: 1-9.

- [14] Nahon D, Merino E. Pseudomorphic replacement versus dilation in laterites: petrographic evidence, mechanisms, and consequences for modelling[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, 57(1-3): 217-225.
- [15] Braun J J, Pagel M, Herbillon A, et al. Mobilization and redistribution of Rees and Thorium in a syenitic lateritic profile: a mass-balance study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(18): 4419-4434.
- [16] 李孙雄, 云平, 林义华, 等. 海南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
Li Sunxiong, Yun Ping, Lin Yihua. *Regional geology of Hainan Province*[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2017.
- [17] 冯锦江, 胡碧茹. 海南岛第四纪玄武岩风化壳中次生矿物转变与时间的关系[J]. *岩石学报*, 1991(3): 56-64.
Feng Jinjiang, Hu Biru. The correlation between secondary minerals and ages of weathering crust on the quaternary basalt on Hainan Island[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1991(3): 56-64.
- [18] 汪寿松, 李康, 韩秀玲, 等. 海南岛红土风化壳的矿物成分及其形成机理[J]. *中国科学(B辑)*, 1983(3): 270-278.
Wang Shousong, Li Kang, Han Xiuling, et al. Mineral composition and formation mechanism of laterite weathering crust in Hainan Island[J]. *Science China(Series B)*, 1983(3): 270-278.
- [19] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
- [20] 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.
- [21] Ma J L, Wei G J, Xu Y G, et al. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(13): 3223-3237.
- [22] 张家友, 周芳芳, 傅杨荣, 等. 海南岛北部红土型褐铁矿开发问题探讨[J]. *金属矿山*, 2012(2): 162-165.
Zhang Jiayou, Zhou Fangfang, Fu Yangrong, et al. Development issues study on lateritic limonite in north Hainan Island[J]. *Metal Mine*, 2012(2): 162-165.
- [23] 汪寿松, 李康, 韩秀玲, 等. 海南岛第四纪玄武岩的红土化作用[J]. *地质科学*, 1983(1): 56-70, 111.
Wang Shousong, Li Kang, Han Xiuling, et al. Lateritization of quaternary basalts in Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1983(1): 56-70, 111.
- [24] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生的化学特性研究[J]. *热带地理*, 2001, 21(3): 207-212.
Huang Chengmin, Gong Zitong. A study on the chemical properties of the soils derived from basalt in northern Hainan Island[J]. *Tropical Geography*, 2001, 21(3): 207-212.
- [25] 曾广骅, 陈咏, 许国强, 等. 海南岛西部近岸海域碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学物源示踪及其地质意义[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(16): 6626-6641.
Zeng Guanghua, Chen Yang, Xu Guoqiang, et al. Detrital zircon U-Pb geochronology from coastal sea of western Hainan Island: provenance tracing and geological implications[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(16): 6626-6641.
- [26] Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in South China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163-166.
- [27] Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China block: key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1273-1305.
- [28] 张家友. 海南岛北部新生代火山岩风化成矿作用地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2012.
Zhang Jiayou. *Geochemical studies of the mineralization by weathering of Cenozoic volcanic rocks in North Hainan Island*[D]. Wuhan: China University of Geoscience (Wuhan), 2012.
- [29] 曹楚奇, 熊发挥, 杨胜标, 等. 南海北部陆缘新生代玄武岩地球化学特征及成因[J]. *地质学报*, 2022, 96(8): 2683-2704.
Cao Chuqi, Xiong Fahui, Yang Shengbiao, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Cenozoic basalt from the northern continental margin of the South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(8): 2683-2704.
- [30] Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, et al. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 133-153.
- [31] Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. Temperature, pressure, and composition of the mantle source region of Late Cenozoic basalts in Hainan Island, SE Asia: a consequence of a young thermal mantle plume close to subduction zones[J]? *Journal of Petrology*, 2012, 53(1): 177-233.
- [32] 刘建强, 任钟元. 玄武岩源区母岩的多样性和识别特征: 以海南岛玄武岩为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(3): 471-488.
Liu Jianqiang, Ren Zhongyuan. Diversity of source lithology and its identification for basalts: a case study of the Hainan basalts[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(3): 471-488.
- [33] Taylor S R, McLennan S M. *The continental crust: its composition and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [34] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97: 129-147.
- [35] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23: 921-924.
- [36] 马晓慧, 郝春明, 王梦露, 等. 峰峰煤矿塌陷区典型农田土壤剖面重金属元素化学风化规律[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(3): 1202-1210.
Ma Xiaohui, Hao Chunming, Wang Menglu, et al. Chemical weathering law of heavy metal element in typical farmland soil profile in subsidence area of Fengfeng Coal Mine[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(3): 1202-1210.
- [37] Hill I G, Worden R H, Meighan I G. Yttrium: the immobility-mobility transition during basaltic weathering[J]. *Geology*, 2000, 28: 923-926.
- [38] Nesbitt H W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite[J]. *Nature*, 1979, 279: 206-210.

- [39] Brookins D G. Eh-pH diagrams for geochemistry [M]. Belin: Springer Verlag, 1988.
- [40] Koppi A J, Edis R, Field D J, et al. Rare earth element trends and cerium-uranium-manganese associations in weathered rock from Koongarra, northern territory, Australia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(10): 1695-1707.
- [41] Weijden C H, Weijden R D. Mobility of major, minor and some redox sensitive trace elements and rare-earth elements during weathering of four granitoids in central Portugal [J]. *Chemical Geology*, 1995, 125: 149-167.
- [42] Duff M C, Coughlin J U, Hunter D B. Uranium co-precipitation with iron oxide minerals [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66: 3533-3547.
- [43] Klinkhammer G P, Palmer M R. Uranium in the oceans: where it goes and why [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55: 1799-1806.
- [44] Boekhout F, Gerard M, Kanzari A, et al. Uranium migration and retention during weathering of a granitic waste rock pile [J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 58: 123-135.
- [45] Bowman, Robert S. Aqueous environmental geochemistry [J]. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 1997, 78(50): 586.
- [46] 卢丽, 樊连杰, 裴丽欣, 等. 海南岛地下水资源状况及其环境地质问题 [J]. *中国地质*, 2024, 51(2): 499-510.
Lu Li, Fan Lianjie, Pei Lixin, et al. Groundwater resources and environmental geologic problems on Hainan Island [J]. *Geology in China*, 2024, 51(2): 499-510.
- [47] Schnug E, Lottermoser B G. Fertilizer-derived uranium and its threat to human health [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(6): 2433-2434.
- [48] Kurtz A C, Derry L A, Chadwick O A, et al. Refractory element mobility in volcanic soils [J]. *Geology*, 2000, 28(8): 683-686.
- [49] Babechuk M G, Widdowson M, Murphy M, et al. A combined Y/Ho, high field strength element (HFSE) and Nd isotope perspective on basalt weathering, Deccan Traps, India [J]. *Chemical Geology*, 2015, 396: 25-41.
- [50] Jahn B M, Gallet S, Han J. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka [J]. *Chemical Geology*, 2001, 178(1): 71-94.
- [51] 高雅, 杨晓勇. 红土型风化壳中元素迁移富集规律研究——以菲律宾南部苏里高地区红土型镍矿为例 [J]. *矿床地质*, 2012, 31(S1): 1125-1126.
Gao Ya, Yang Xiaoyong. Migration and enrichment of elements in laterite-type weathering crust: a study of laterite-type nickel ore in Surigao area, southern Philippines [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(S1): 1125-1126.
- [52] 李森. 菲律宾南部苏里高地区红土型风化剖面 Fe 同位素研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
Li Miao. An iron isotope study on laterite weathering profile of Surigao, southern Philippines [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.