

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2021.02.002

琼北南渡江两岸火山岩分布区土壤地球化学分异 及成因研究

史奇琪^{1,2}, 李响^{1,3*}, 张宗言³, 谢国刚³, 曹光跃³

SHI Qi-Qi^{1,2}, LI Xiang^{1,3*}, ZHANG Zong-Yan³, XIE Guo-Gang³, CAO Guang-Yue³

(1. 中国地质科学院研究生院, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

(1. Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China ;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China ;

3. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

摘要:海南岛北部的第四纪火山岩分布区是我国玄武岩风化成土最活跃的地区之一,对于理解热带成壤过程的元素地球化学行为具有重要意义。本文选取琼北南渡江下游两岸多期火山岩上的心土及风化剖面,系统探讨该区土壤的主量与稀土元素分异特征。研究发现,玄武岩风化土壤的主量元素组成均以 SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃ 为主,三者总含量在 73.62% 以上, MgO、CaO、Na₂O 和 K₂O 强烈淋滤流失。除全新世石山组玄武岩风化的心土样品外,其它期次火山岩风化心土样品的风化程度均为极端风化, CIA 值(化学蚀变指数)多处于 91.0 以上,且平均的 CIA_(Qp²d¹)>CIA_(Qp²d²)>CIA_(Qp³d²)>CIA_(Qbs), 表现为成土年龄越老,风化程度越高。本次研究还发现,无论是面上分布的心土样品还是剖面土壤样品,均为轻稀土富集的右倾模式, Eu 异常不显著,剖面土壤样品 ΣREE 与 CIA 之间呈现负相关。不同期次玄武岩风化土壤均呈现显著的 Ce 正异常,可能与琼北地区处于热带湿热气候区,受强烈的风化淋滤作用有关。

关键词:元素地球化学;化学蚀变指数;土壤组分;玄武岩母质;琼北

中图分类号: P512.1; P534.63

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2021)02-0136-15

Shi Q Q, Li X, Zhang Z Y, Xie G G and Cao G Y. Geochemical Differentiation and Genesis of Volcanic Rock Weathered Soil from the Downstream of the Nandu River on Northern Hainan Island. *South China Geology*, 2021, 37(2):136-150.

Abstract: The Quaternary volcanic region on northern Hainan Island is one of the most active areas of weathering in China, and is of great significance for understanding the element geochemical behavior during the basalt weathering. We analysis the major and trace element compositions of both subsoils from different periods of weathered basalts and soil samples from typical weathering profile in the downstream of the Nandu River on northern Hainan to investigate their differentiation mechanism. It is found that the major elements of volcanic weathering soils are SiO₂, Al₂O₃ and TFe₂O₃ with the total content of more than 73.62%, and their

收稿日期:2020-12-23; 修回日期:2021-3-2

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20211385、DD20201121、DD20190047)资助

第一作者:史奇琪(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为元素地球化学,联系电话:13810957250, E-mail:2603478243@qq.com

通讯作者:李响(1983—),男,副研究员,主要研究方向为成因矿物学和岩石地球化学, E-mail:lixiang_503@163.com

MgO, CaO, Na₂O, K₂O were strongly leached. Except for the weathered core soil samples of the Holocene Shishan Formation basalts, the other subsoil samples derived from different periods of volcanic rocks were extremely weathered, and their CIA (chemical alteration index) values are all higher than 91.0 with the average CIA value trend of $CIA_{(Qp^2d^1)} > CIA_{(Qp^2d^2)} > CIA_{(Qp^3d^2)} > CIA_{(Qhs)}$, which indicates that the older soils underwent more weathering. Besides, both the regional subsoil and soil samples from the profile of the weathering basalts share the similar REE characteristics, such as right-lean pattern of LREE enrichment and insignificant Eu anomaly, and negative correlation between ΣREE and CIA values on the profile. The significant positive Ce anomaly in both the subsoil and soil samples from the different basalt weathering profiles might be correlated with the strongly weathering and leaching under the tropical hot humid climate of northern Hainan Island.

Keywords: element geochemistry; basalt parent material; soil composition; chemical index of alteration; northern Hainan Island

化学风化是表生环境下最普遍的地质过程,对于元素地球化学行为研究具有重要意义^[1-4]。玄武岩是火山岩中最易发生化学风化的岩石,拥有极高的风化速率^[5],占陆地面积 5% 的玄武岩风化过程消耗的 CO₂ 占大陆硅酸盐风化消耗总量的 30% 以上^[6],因此玄武岩风化及成壤作用被视为全球碳循环的一个重要环节。此外,玄武岩的风化成壤过程还会引起主量及稀土元素发生迁移和再分配,对于了解风化过程中元素的迁移富集规律并进而探讨成土过程具有重要意义^[7-11]。

琼北南渡江下游两岸发育多期次玄武岩^[12],是风化成土最活跃的地区之一。前人对玄武岩的活动期次、岩石成因、构造背景及火山地貌进行了广泛和深入的研究^[13-16],对风化壳及土壤发生特性、风化过程同位素分馏、土壤地球化学背景值、土壤中重金属与微量元素分布及土壤中次生矿物等也开展了一定的研究^[17-24]。但总体而言,前人对琼北玄武岩风化成壤过程的研究多集中于同一期次的火山岩,且以剖面研究为主,即使是面上的研究也很难排除地形、气候等因素的影响。本文选取琼北南渡江下游两岸成土条件相近的多期次火山岩风化心土和典型剖面样品,开展主量和稀土元素特征研究,探讨热带风化成壤过程的元素地球化学分异行为及成因。

1 区域地质概况

研究区地处海南岛北部(图 1),位于印度 - 澳

大利亚板块、菲律宾板块和欧亚板块的交汇地带,在大地构造上属于雷琼拗陷的一部分。区内新生代火山活动十分频繁,一直持续到全新世,与雷州半岛南部的新生代火山岩共同组成雷琼火山群^[12,14]。研究区内火山岩以玄武岩为主,主要分布于东北部,依据地层接触关系、年代学、火山岩风化程度、火山地貌特征和岩性特征,可划分为第四纪中更新世多文组一段(Qp²d¹)、多文组二段(Qp²d²)、第四纪晚更新世道堂组二段(Qp³d²)和第四纪全新世石山组(Qhs)^[25]。这些不同期次的玄武岩多发育红色砖红壤或黄色砖红壤风化壳,是琼北地区土壤发育的重要母质。在研究区的南部出露志留纪陀烈组(S₁t)、白垩纪鹿母湾组(K₁l)、第四纪北海组(Qp²b),沿南渡江两岸为全新世冲洪积物。

2 样品采集与测试方法

本文选择琼北南渡江下游两岸的多期次玄武岩台地为研究区,同时采集不同期次玄武岩发育的风化壳心土样品和典型剖面的土壤样品,样品的采集局限于河岸两侧 200 km² 范围,尽可能排除了地形、气候和植被差异等对土壤发育的影响。为保证样品的代表性,尽量避免人为干扰,采样点均选择在林地或草地,尽量避开农田与村庄。样品的采集分为面上的心土样和剖面样品,涵盖不同期次的玄武岩母质(图 2a-d)。心土样品采集深度在 20 ~ 40 cm,采集前用铁锹剔除了表面可能受外界污染的土样。本次共采集 32 件心土样品,根据玄武

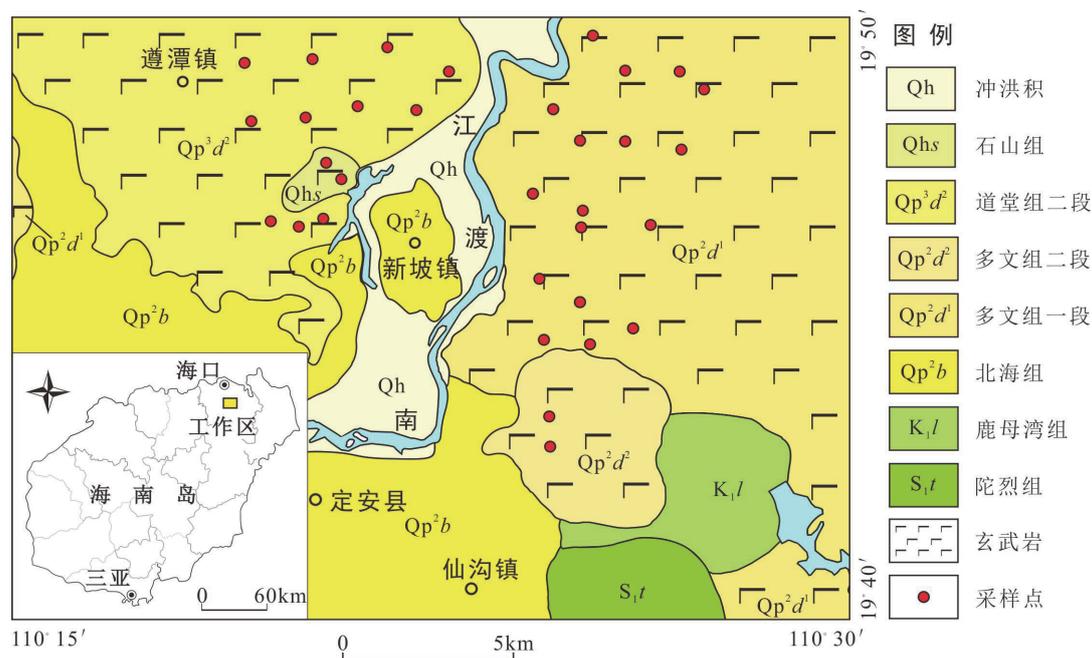


图1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the study area

岩母质的期次,包括多文组一段 17 件,多文组二段 2 件,道堂组二段 11 件,石山组 2 件。剖面选择以受侵蚀影响小、层位发育清晰的残积剖面为主,采样分辨率为 20 ~ 40 cm,采集厚度视风化壳的发育程度不尽相同。共采集 4 个剖面上的样品(图 2e-h),其中剖面 YX02(110°12'16.07", 19°46'10.56")、YX04(110°12'48.61", 19°46'19.63")、CMP05(110°0'30.09", 19°45'53.86")的母质为多文组一段玄武岩,剖面 CMP03(110°6'49.27", 19°49'24.55")的母质为道堂组二段玄武岩。

样品采集完毕后,在实验室对样品进行风干,过筛取小于 0.25 mm 样品 30 g 研磨至 200 目,用以进行主量及稀土元素分析测试。样品分析测试在澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素分析使用美国 Agilent 5110 型电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES)和荷兰 PANalytical PW2424 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)检测完成,ICP-AES 相对偏差、相对误差均 <10%,XRF 相对偏差、相对误差均 <5%。

稀土元素测试使用美国 Agilent 5110 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)和 Agilent 7700X、7900 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)

完成,ICP-AES/MS 相对偏差、相对误差均 <10%。

3 土壤样品中元素地球化学特征

3.1 主量元素地球化学特征

心土样品主量元素分析结果见表 1,主量元素组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 为主,三者总量为 73.62% ~ 81.70%。其中: SiO_2 质量分数最高,范围为 25.90% ~ 49.72%,平均为 35.42%; TFe_2O_3 、 Al_2O_3 次之,含量分别为 13.84% ~ 26.19% 和 12.84% ~ 28.02%,平均值分别为 21.57%、21.28%。 TiO_2 含量介于 2.05% ~ 9.21% 之间,平均值为 5.44%。本文采用 Wang et al.^[14] 和 Liu et al.^[15] 发表的琼北地区 187 个玄武岩样品的主量元素平均含量作为新鲜玄武岩母岩的背景值(表 1)。与母岩的背景值相比,样品的 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 TiO_2 明显富集;此外,除石山组玄武岩风化土外,其它样品的 MgO (0.23% ~ 3.25%)、 CaO (0.01% ~ 0.91%)、 Na_2O (0.03% ~ 0.28%) 和 K_2O (0.10% ~ 0.48%) 等水溶性元素的含量远低于母岩背景值。元素相关性分析表明, SiO_2 与 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 TiO_2 负相关, MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 正相关,表明玄武岩的风化成壤

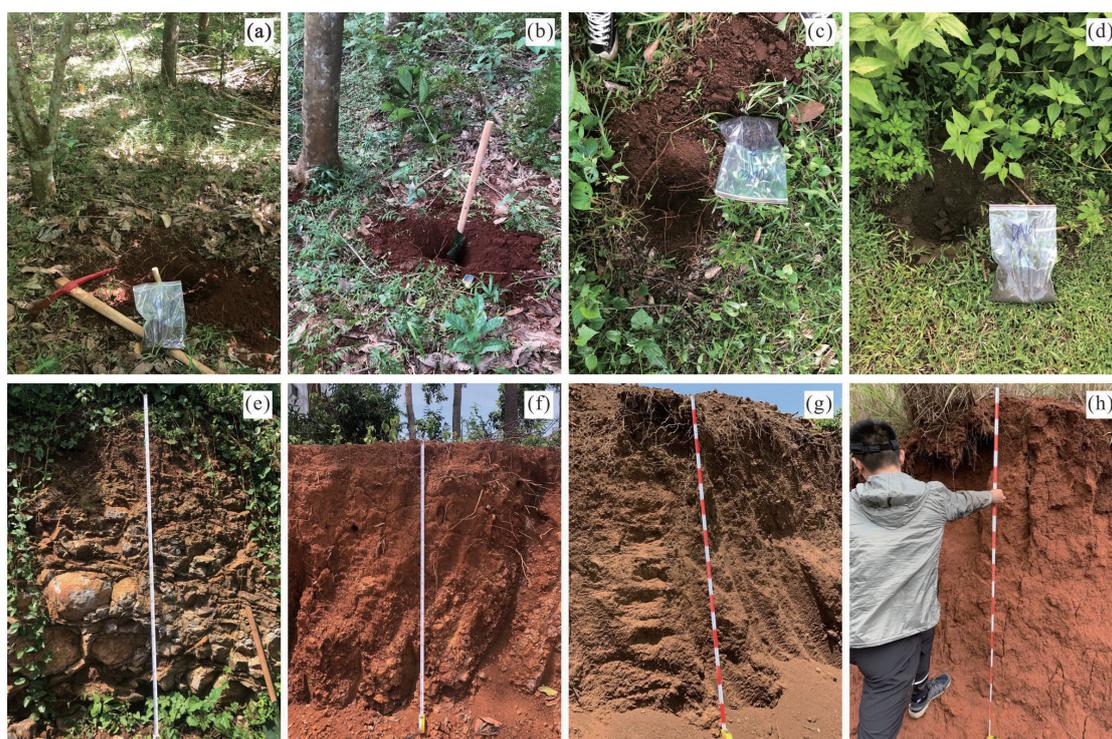


图 2 代表性心土采样现场和研究的土壤剖面照片

Fig. 2 Representatives subsoil sampling sites and basalt-weathering profile

a-d 为心土样品:a 为 DA-39(Qp^2d^1),b 为 DA-30(Qp^2d^2),c 为 DA-100(Qp^3d^2),d 为 DA-101(Qhs);e-h 为研究剖面:e 为剖面 YX02(Qp^2d^1),f 为剖面 YX04(Qp^2d^1),g 为剖面 CMP05(Qp^2d^1),h 为剖面 CMP03(Qp^3d^2)。

过程是贫 Si, 富 Fe、Al、Mg、Ca、Na 和 K 强烈淋滤流失的过程。不同时代玄武岩之上发育的心土样品的主量元素组成与母岩的形成时代之间无明显的规律性, 仅全新世石山组之上发育的心土样品显示与母岩背景值较相似的元素组成, 这与其形成时代较晚、风化程度相对较弱有关。

3 个多文组一段的风化壳剖面 and 1 个道堂组二段的风化壳剖面土壤的主量元素分析结果见表 1。各剖面土壤样品主量元素组成从下到上含量变化不大, 没有明显的变化规律, 也以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 为主, 三者总量为 77.10% ~ 83.27%。 SiO_2 含量为 31.99% ~ 44.24%; 与母岩的背景值相比, Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 TiO_2 明显富集, 含量范围分别为 19.72% ~ 28.96%, 15.29% ~ 20.90%, 2.64% ~ 5.32%。大多数次表层土壤(采样深度约为 20 cm)的 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 TiO_2 含量高于表层土壤, 可能与表层土壤中的 Al、Fe、Ti 在强淋滤作用下向下移动造成的富集有关^[17]。 MgO (0.12% ~ 5.29%)、 CaO (0.01% ~ 3.33%)、 Na_2O (0.01% ~ 1.22%) 和

K_2O (0.12% ~ 0.50%) 相对母岩背景值存在强烈淋滤流失。各元素相关分析表明, Mg、Ca、Na 和 K 之间的相关性优于面上分布的心土样品, 相关系数 r 介于 0.96 ~ 1.00 之间, 表明它们在玄武岩的风化成壤过程中具有非常相似的地球化学行为。

3.2 稀土元素地球化学特征

将 Wang et al.^[14] 和 Liu et al.^[15] 发表的琼北地区 136 个新鲜玄武岩的稀土元素平均值作为母岩背景值(表 1), 计算得到 $\sum REE$ 、L/HREE、 $(La/Yb)_N$ 背景值分别为 113.56×10^6 、6.62、11.20, δCe 和 δEu 分别为 0.99 和 1.06, 无 Ce 和 Eu 的明显异常。与母岩背景值相比, 面上分布的心土样品的稀土总量稍有增加, $\sum REE$ 为 $(95.95 \sim 239.26) \times 10^6$, 平均值为 144.31×10^6 ; 轻重稀土比值 LREE/HREE 介于 5.63 ~ 11.82 之间, 平均值为 8.94; $(La/Yb)_N$ 值为 6.22 ~ 18.35, 平均值为 8.69。它们的 δCe 为 0.97 ~ 2.48, 平均值为 1.73, 出现显著的正异常; δEu 值为 0.83 ~ 1.03, 平均值为 0.92, Eu 异常不显著。心土样品的球粒陨石标准化稀土配分曲线均

表 1 心土和风化剖面土壤样品的主量 (%) 和稀土元素 (10^{-6}) 组成
Table 1 The major (%) and REE (10^{-6}) compositions of subsoil and soil samples from weathering basalts in different periods

样号	心土(Qp ² d ¹)									
	DA-31	DA-32	DA-34	DA-35	DA-36	DA-37	DA-38	DA-39	DA-40	DA-41
SiO ₂	33.34	40.16	33.91	35.63	34.78	29.79	25.90	27.01	27.04	29.60
TiO ₂	4.72	3.97	5.71	5.32	6.49	6.18	5.95	6.14	5.97	5.17
Al ₂ O ₃	25.77	21.47	24.23	25.25	23.89	24.90	27.61	22.74	26.93	26.50
TFe ₂ O ₃	20.27	18.08	20.14	19.61	20.37	22.84	23.19	26.19	23.10	22.46
MgO	0.26	0.25	0.27	0.25	0.31	0.30	0.26	0.30	0.25	0.27
MnO	0.20	0.15	0.18	0.18	0.21	0.15	0.28	0.21	0.18	0.18
CaO	0.03	0.06	0.04	0.04	0.02	0.05	0.02	0.16	0.03	0.04
Na ₂ O	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
K ₂ O	0.17	0.10	0.12	0.11	0.10	0.10	0.12	0.12	0.12	0.16
P ₂ O ₅	0.24	0.17	0.21	0.13	0.17	0.21	0.21	0.39	0.24	0.55
LOI	14.07	14.76	14.50	12.48	12.77	14.36	15.61	15.56	15.40	14.44
SUM	99.11	99.21	99.34	99.03	99.14	98.91	99.18	98.86	99.29	99.41
CIA	99.08	99.08	99.22	99.29	99.38	99.28	99.39	98.61	99.34	99.10
La	19.40	18.60	19.30	30.60	20.20	22.30	18.00	21.60	16.80	17.90
Ce	70.60	62.40	86.10	114.00	74.20	78.80	89.70	78.50	86.30	75.20
Pr	4.63	4.83	4.71	7.54	5.02	4.99	4.53	5.00	4.08	4.19
Nd	19.00	20.40	19.90	32.00	21.50	20.30	19.40	20.40	17.60	17.20
Sm	4.74	5.41	4.69	7.53	5.36	4.80	5.16	4.97	4.59	4.10
Eu	1.44	1.56	1.32	2.14	1.45	1.29	1.42	1.36	1.25	1.18
Gd	3.91	4.68	4.09	6.57	4.82	4.11	4.17	4.25	3.81	3.47
Tb	0.64	0.71	0.67	1.03	0.72	0.63	0.69	0.65	0.54	0.58
Dy	3.68	3.98	3.88	5.87	4.14	3.61	3.74	3.71	3.15	3.25
Ho	0.71	0.71	0.76	1.09	0.77	0.69	0.75	0.71	0.64	0.63
Er	1.89	1.84	1.96	2.86	1.97	1.80	1.97	1.88	1.73	1.59
Tm	0.27	0.26	0.28	0.38	0.28	0.25	0.28	0.27	0.25	0.23
Yb	1.65	1.62	1.84	2.36	1.75	1.56	1.73	1.68	1.54	1.46
Lu	0.26	0.25	0.28	0.37	0.28	0.25	0.25	0.25	0.23	0.23
Y	15.70	15.90	16.30	25.10	16.50	15.20	15.00	14.80	14.10	13.20
ΣREE	132.82	127.25	149.78	214.34	142.46	145.38	151.79	145.23	142.51	131.21
LREE	119.81	113.20	136.02	193.81	127.73	132.48	138.21	131.83	130.62	119.77
HREE	13.01	14.05	13.76	20.53	14.73	12.90	13.58	13.40	11.89	11.44
L/HREE	9.21	8.06	9.89	9.44	8.67	10.27	10.18	9.84	10.99	10.47
δEu	0.99	0.93	0.90	0.91	0.85	0.87	0.91	0.88	0.89	0.93
δCe	1.77	1.58	2.15	1.79	1.76	1.76	2.37	1.78	2.48	2.05
(La/Yb) _N	8.43	8.24	7.52	9.30	8.28	10.25	7.46	9.22	7.83	8.79

续表 1

样号	心土(Qp ² d ¹)							心土(Qp ² d ²)		心土(Qp ³ d ²)
	DA-42	DA-43	DA-44	DA-45	DA-46	DA-47	DA-48	DA-28	DA-30	DA-85
SiO ₂	29.88	29.37	27.65	32.92	27.53	32.14	27.52	38.74	31.36	36.26
TiO ₂	6.87	9.21	6.30	7.00	5.35	8.32	8.46	5.68	4.81	4.09
Al ₂ O ₃	20.59	24.28	26.65	24.24	28.02	23.53	20.67	13.30	25.57	18.84
TFe ₂ O ₃	24.61	22.59	23.35	20.95	22.79	19.74	25.43	25.65	22.43	22.29
MgO	0.38	0.35	0.26	0.29	0.23	0.32	0.37	3.25	0.27	2.46
MnO	0.31	0.17	0.24	0.18	0.21	0.15	0.23	0.40	0.18	0.35
CaO	0.40	0.04	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.74	0.04	0.91
Na ₂ O	0.05	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.15	0.04	0.26
K ₂ O	0.16	0.10	0.10	0.20	0.14	0.18	0.10	0.43	0.11	0.24
P ₂ O ₅	0.35	0.21	0.21	0.33	0.21	0.27	0.28	0.81	0.24	0.43
LOI	15.46	13.51	14.65	13.15	14.86	14.23	15.89	10.31	14.15	13.70
SUM	99.06	99.87	99.45	99.32	99.38	98.95	99.02	99.46	99.20	99.83
CIA	97.12	99.26	99.48	98.94	99.36	98.95	99.18	90.97	99.26	93.04
La	18.60	21.00	24.10	21.50	25.70	19.90	19.30	44.00	26.40	12.70
Ce	85.90	87.10	100.50	84.90	93.70	61.20	86.50	114.30	79.90	49.60
Pr	4.14	4.92	5.88	4.91	6.59	4.46	4.50	10.03	6.25	3.53
Nd	17.00	20.60	24.80	20.40	28.00	18.00	18.50	40.50	25.60	15.00
Sm	3.88	5.04	6.20	4.82	7.10	4.11	4.43	9.08	6.52	3.94
Eu	1.08	1.40	1.97	1.32	2.07	1.10	1.21	2.69	1.96	1.13
Gd	3.66	4.16	5.65	4.20	6.44	3.92	4.07	6.69	5.15	3.75
Tb	0.56	0.64	0.86	0.65	0.97	0.62	0.65	0.99	0.75	0.59
Dy	3.19	3.77	4.86	3.85	5.40	3.68	3.67	5.43	4.16	3.41
Ho	0.62	0.73	0.88	0.75	1.00	0.75	0.69	0.96	0.83	0.63
Er	1.65	1.98	2.24	1.89	2.43	1.95	1.88	2.29	2.23	1.57
Tm	0.23	0.29	0.30	0.27	0.34	0.28	0.28	0.30	0.31	0.21
Yb	1.42	1.92	1.92	1.76	2.16	1.79	1.76	1.72	1.98	1.34
Lu	0.22	0.29	0.29	0.27	0.32	0.27	0.28	0.28	0.32	0.20
Y	13.50	15.80	19.20	15.50	21.50	16.80	15.60	22.50	18.50	14.20
ΣREE	142.15	153.84	180.45	151.49	182.22	122.03	147.72	239.26	162.36	97.60
LREE	130.60	140.06	163.45	137.85	163.16	108.77	134.44	220.60	146.63	85.90
HREE	11.55	13.78	17.00	13.64	19.06	13.26	13.28	18.66	15.73	11.70
L/HREE	11.31	10.16	9.61	10.11	8.56	8.20	10.12	11.82	9.32	7.34
δEu	0.86	0.91	1.00	0.88	0.92	0.83	0.86	1.01	1.00	0.89
δCe	2.30	2.03	2.01	1.95	1.72	1.53	2.19	1.28	1.47	1.79
(La/Yb) _N	9.40	7.85	9.00	8.76	8.53	7.97	7.87	18.35	9.56	6.80

续表 1

样号	心土(Qp ³ a ²)									
	DA-86	DA-87	DA-89	DA-90	DA-96	DA-98	DA-99	DA-100	DA-72	DA-102
SiO ₂	38.39	35.68	44.17	46.30	45.11	38.79	38.09	40.72	43.19	38.98
TiO ₂	4.46	4.30	4.24	3.46	4.54	5.39	4.20	5.33	4.58	4.71
Al ₂ O ₃	19.01	21.00	17.09	18.19	15.90	15.88	17.22	16.26	15.88	22.32
TFe ₂ O ₃	22.23	22.30	19.20	16.10	20.69	22.61	21.36	21.91	22.09	17.72
MgO	1.96	0.76	0.82	0.75	1.15	2.41	2.14	1.48	1.93	0.41
MnO	0.36	0.29	0.31	0.22	0.38	0.46	0.43	0.39	0.38	0.11
CaO	0.75	0.33	0.41	0.54	0.42	0.62	0.52	0.86	0.62	0.39
Na ₂ O	0.24	0.11	0.22	0.23	0.18	0.28	0.26	0.28	0.24	0.12
K ₂ O	0.20	0.18	0.41	0.48	0.24	0.40	0.30	0.29	0.23	0.33
P ₂ O ₅	0.34	0.30	0.24	0.23	0.33	0.39	0.33	0.48	0.32	0.60
LOI	11.60	14.09	12.54	12.74	10.47	12.20	14.08	11.39	9.84	13.69
SUM	99.54	99.34	99.65	99.24	99.41	99.43	98.93	99.39	99.30	99.38
CIA	94.11	97.13	94.26	93.57	94.98	92.43	94.10	91.92	93.58	96.37
La	12.90	18.40	28.20	24.60	15.10	21.30	18.90	16.80	15.00	38.30
Ce	47.40	61.60	73.40	64.40	58.60	77.50	63.70	59.60	51.50	72.30
Pr	3.48	4.93	7.00	6.12	3.92	5.01	4.67	4.54	3.91	7.88
Nd	14.70	20.20	28.20	24.50	15.70	19.70	19.30	18.80	15.90	34.40
Sm	3.90	5.24	6.11	5.65	3.85	4.44	4.41	4.52	4.00	7.45
Eu	1.25	1.68	1.73	1.66	1.14	1.41	1.27	1.52	1.27	1.90
Gd	3.94	5.17	5.85	5.45	3.86	4.42	4.56	4.36	4.02	5.84
Tb	0.61	0.82	0.90	0.84	0.61	0.70	0.74	0.70	0.64	0.88
Dy	3.52	4.67	5.27	4.77	3.59	3.65	4.01	3.94	3.52	4.77
Ho	0.65	0.86	1.05	0.90	0.69	0.71	0.78	0.76	0.70	0.89
Er	1.70	2.20	2.69	2.29	1.74	1.82	2.01	2.03	1.83	2.27
Tm	0.23	0.32	0.37	0.32	0.25	0.26	0.29	0.30	0.27	0.32
Yb	1.45	2.01	2.23	2.07	1.61	1.62	1.85	1.86	1.73	1.81
Lu	0.22	0.30	0.35	0.31	0.24	0.24	0.28	0.29	0.26	0.25
Y	15.00	21.20	25.00	23.00	16.50	17.60	18.30	19.10	16.10	21.00
ΣREE	95.95	128.40	163.35	143.88	110.90	142.78	126.77	120.02	104.55	179.26
LREE	83.63	112.05	144.64	126.93	98.31	129.36	112.25	105.78	91.58	162.23
HREE	12.32	16.35	18.71	16.95	12.59	13.42	14.52	14.24	12.97	17.03
L/HREE	6.79	6.85	7.73	7.49	7.81	9.64	7.73	7.43	7.06	9.53
δEu	0.97	0.98	0.87	0.90	0.89	0.96	0.86	1.03	0.96	0.85
δCe	1.70	1.55	1.24	1.25	1.82	1.78	1.61	1.64	1.61	0.97
(La/Yb) _N	6.38	6.57	9.07	8.52	6.73	9.43	7.33	6.48	6.22	15.18

续表 1

样号	心土(Qhs)		剖面 YX02(Qp ^{2d})				剖面 YX04(Qp ^{2d})			
	DA-76	DA-101	YX02-0	YX02-20	YX02-40	YX02-80	YX04-0	YX04-20	YX04-80	YX04-140
SiO ₂	43.84	49.72	35.54	35.52	35.22	44.24	34.65	35.32	33.88	31.99
TiO ₂	5.13	2.05	3.68	5.00	4.71	2.64	5.09	5.32	4.80	4.53
Al ₂ O ₃	12.84	14.27	22.98	23.13	23.74	19.72	25.30	24.52	26.56	27.70
TFe ₂ O ₃	24.09	13.84	18.58	20.90	20.67	15.29	20.14	20.11	19.86	20.78
MgO	2.77	7.55	0.93	0.78	0.77	5.29	0.23	0.23	0.21	0.26
MnO	0.44	0.19	0.36	0.37	0.36	0.22	0.20	0.25	0.15	0.19
CaO	0.59	7.03	0.65	0.22	0.23	3.33	0.05	0.09	0.05	0.07
Na ₂ O	0.38	2.32	0.16	0.10	0.11	1.22	0.03	0.03	0.01	0.03
K ₂ O	0.51	0.85	0.21	0.15	0.14	0.50	0.17	0.16	0.17	0.15
P ₂ O ₅	0.54	0.27	0.39	0.32	0.31	0.39	0.28	0.33	0.22	0.26
LOI	8.22	2.07	15.90	13.01	13.12	7.20	13.84	13.58	13.30	13.65
SUM	99.35	100.16	99.38	99.50	99.38	100.04	99.98	99.94	99.21	99.61
CIA	89.66	58.32	95.8	98.0	98.0	79.6	99.0	98.9	99.1	99.1
La	24.10	16.60	39.6	37.3	38.5	89.2	23.5	25.2	22.6	25.3
Ce	70.70	36.90	84.5	84.7	87.6	85.2	66.4	71.1	68.3	88.6
Pr	5.54	4.31	9.10	9.01	8.99	21.9	5.55	5.69	6.08	6.93
Nd	21.60	18.30	38.8	38.0	36.9	91.8	22.7	23.5	24.4	29.0
Sm	5.28	4.57	9.82	9.35	8.90	22.0	5.59	5.90	6.01	7.21
Eu	1.44	1.56	3.22	3.01	2.91	7.19	1.72	1.81	1.84	2.16
Gd	4.40	4.90	9.30	8.76	8.50	21.4	5.46	5.46	5.54	6.51
Tb	0.73	0.75	1.43	1.34	1.30	3.03	0.84	0.84	0.91	1.04
Dy	4.16	4.23	7.71	7.21	6.99	15.80	4.57	4.73	4.83	5.53
Ho	0.83	0.76	1.38	1.27	1.24	2.72	0.85	0.91	0.90	1.00
Er	2.10	1.96	3.53	3.29	3.20	6.53	2.22	2.30	2.27	2.42
Tm	0.30	0.26	0.47	0.43	0.43	0.79	0.31	0.32	0.31	0.33
Yb	1.93	1.53	2.73	2.63	2.62	4.52	1.95	1.99	2.01	2.11
Lu	0.29	0.22	0.38	0.37	0.37	0.62	0.29	0.31	0.30	0.32
Y	19.60	20.40	36.6	32.0	32.6	72.7	22.1	22.1	22.1	23.7
ΣREE	143.40	96.85	211.97	206.67	208.45	372.70	141.95	150.06	146.30	178.46
LREE	128.66	82.24	185.04	181.37	183.80	317.29	125.46	133.20	129.23	159.20
HREE	14.74	14.61	26.93	25.30	24.65	55.41	16.49	16.86	17.07	19.26
L/HREE	8.73	5.63	6.87	7.17	7.46	5.73	7.61	7.90	7.57	8.27
δEu	0.89	1.00	1.09	1.13	1.15	0.47	1.43	1.46	1.43	1.64
δCe	1.44	1.04	1.03	1.02	1.02	1.01	0.95	0.97	0.97	0.96
(La/Yb) _N	8.96	7.78	10.40	10.17	10.54	14.16	8.64	9.08	8.07	8.60

续表 1

剖面号 样号	剖面 CMP05(Qp ³ d ¹)				剖面 CMP03(Qp ³ d ²)				背景值
	CMP05-0	CMP05-20	CMP05-60	CMP05-140	CMP03-0	CMP03-20	CMP03-60	CMP03-100	
SiO ₂	39.82	38.83	38.18	34.62	38.48	38.35	38.36	37.61	51.31
TiO ₂	2.70	2.77	2.79	2.94	5.20	5.13	4.97	5.22	2.03
Al ₂ O ₃	25.23	26.26	27.24	28.96	23.31	24.07	22.98	22.95	13.93
TFe ₂ O ₃	16.70	17.31	17.85	18.86	19.17	18.90	19.57	19.59	11.87
MgO	0.15	0.13	0.13	0.12	0.22	0.20	0.22	0.23	7.31
MnO	0.09	0.08	0.09	0.12	0.33	0.26	0.43	0.39	0.13
CaO	0.03	0.02	0.02	0.01	0.09	0.06	0.06	0.07	8.52
Na ₂ O	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	3.10
K ₂ O	0.17	0.15	0.16	0.17	0.16	0.17	0.12	0.12	1.23
P ₂ O ₅	0.13	0.10	0.10	0.09	0.25	0.26	0.28	0.26	0.38
LOI	15.24	14.26	13.46	13.83	12.70	12.41	12.51	12.85	0.36
SUM	100.29	99.94	100.05	99.76	99.95	99.84	99.54	99.33	100.17
CIA	99.1	99.2	99.2	99.2	98.8	98.9	99.1	99.0	52.0
La	11.2	11.3	10.3	17.8	24.4	19.3	25.9	30.4	21.3
Ce	49.4	52.2	50.4	72.5	92.8	86.1	91.4	87.8	42.9
Pr	3.03	3.02	2.98	5.55	5.65	4.49	6.15	7.14	5.27
Nd	11.9	11.7	10.7	19.9	22.4	17.1	23.6	27.9	21.9
Sm	2.97	2.78	2.54	4.82	5.05	3.91	5.55	6.42	5.36
Eu	0.69	0.67	0.63	1.20	1.53	1.21	1.74	2.05	1.87
Gd	2.98	2.21	2.05	3.76	4.66	3.60	5.21	6.01	5.45
Tb	0.53	0.38	0.36	0.58	0.73	0.59	0.84	0.94	0.81
Dy	3.49	2.33	2.21	3.33	4.15	3.36	4.51	5.10	4.27
Ho	0.75	0.50	0.47	0.71	0.76	0.66	0.86	0.94	0.76
Er	2.11	1.42	1.34	2.10	2.01	1.76	2.30	2.42	1.83
Tm	0.31	0.21	0.20	0.32	0.32	0.26	0.34	0.35	0.24
Yb	1.97	1.42	1.34	2.09	1.89	1.66	2.01	2.15	1.36
Lu	0.30	0.23	0.22	0.33	0.27	0.25	0.28	0.29	0.19
Y	20.7	12.3	11.6	15.6	19.9	16.3	21.2	23.7	19.6
ΣREE	91.63	90.37	85.74	134.99	166.62	144.25	170.69	179.91	113.56
LREE	79.19	81.67	77.55	121.77	151.83	132.11	154.34	161.71	98.65
HREE	12.44	8.70	8.19	13.22	14.79	12.14	16.35	18.20	14.91
L/HREE	6.37	9.39	9.47	9.21	10.27	10.88	9.44	8.89	6.62
δEu	0.71	0.83	0.84	0.86	0.96	0.99	0.99	1.01	1.06
δCe	2.08	2.19	2.23	1.79	1.94	2.27	1.78	1.46	0.99
(La/Yb) _N	4.08	5.71	5.51	6.11	9.26	8.34	9.24	10.14	11.20

为轻稀土富集的右倾模式(图 3)。

各剖面内稀土含量自下至上没有规律性变化,但各剖面之间存在一定的差异,反映了母岩对土壤样品的影响。剖面 YX02 土壤样品的 ΣREE 、 L/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值分别为 249.95×10^6 、6.81、11.32, δCe 和 δEu 平均值分别为 0.96 和 1.02。剖面 YX04 土壤样品的 ΣREE 、 L/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值分别为 154.19×10^6 、7.84、8.60, δCe 和 δEu 平均值分别为 1.49 和 0.97;剖面 CMP05 土壤样品的 ΣREE 、 L/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值分别为 100.68×10^6 、8.61、5.35, δCe 和 δEu 平均值分别为 2.07 和 0.81;剖面 CMP03 土壤样品的 ΣREE 、 L/HREE 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值分别为 165.37×10^6 、9.87、9.25, δCe 和 δEu 平均值分别为 1.86 和 0.99。各剖面的土壤样品均呈现了显著的 Ce 正异常, δCe 最大达 2.27,平均值为 1.60。剖面 YX02 土壤样品的稀土总量最高,轻重稀土分馏最为明显。各剖面土壤样品与母岩背景值均为轻稀土富集型,配

分曲线右倾,显示了稀土元素组成对母岩具有继承性(图 4)。

4 讨论

4.1 琼北表土风化程度及元素迁移率

化学蚀变指数(CIA)作为判断表生化学风化强度的地化指标被广泛应用,研究区化学蚀变指数计算结果见表 1 和图 5。

按照 Nesbitt^[27] 提出的理论及计算方法,面上分布的心土土壤样品 CIA 值为 58.3 ~ 99.5,除去全新世石山组玄武岩风化土壤的 CIA 值较低(为 58.3 和 89.7)外,其余玄武岩风化土壤的 CIA 值均在 91.0 以上,平均值为 97.0,表明为极端风化。邹海波等^[28] 获得琼北马鞍岭和雷虎岭石山组玄武岩的镭-钍同位素年龄分别为 4.3 ka 和 4.7 ka,时代属于全新世,这也与其风化较弱、具有较低的 CIA 值相一致。通过比较不同时代母岩发育的土壤 CIA

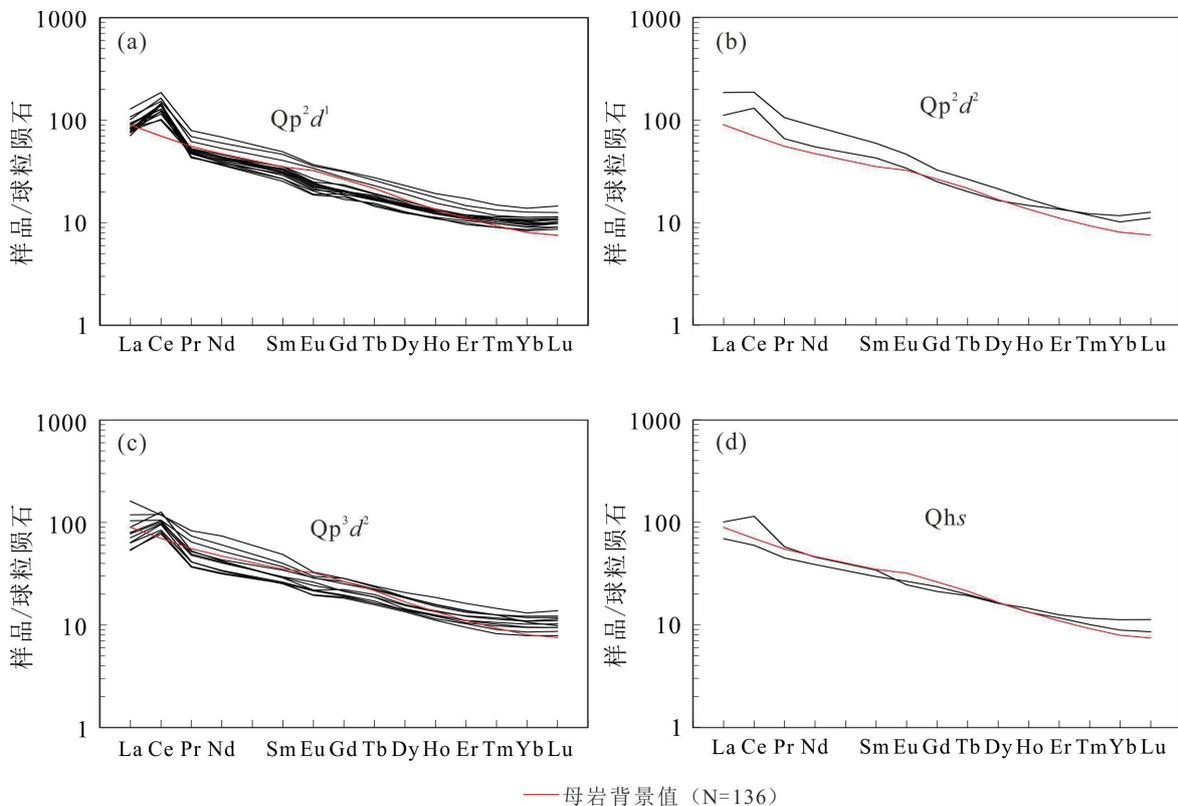


图 3 心土样品球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the subsoil samples

球粒陨石标准值引自文献 [26].

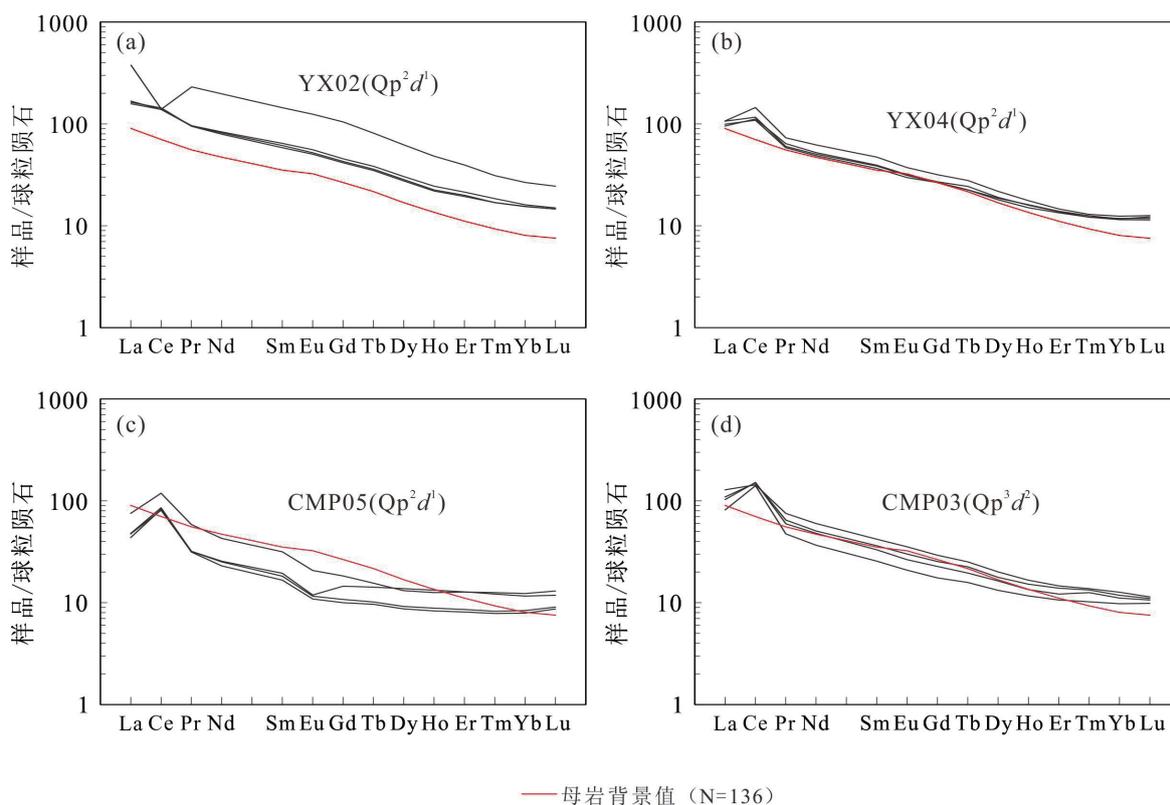


图4 玄武岩风化剖面土壤样品稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the soil samples in the weathering profile of basalt
球粒陨石标准值引自文献 [26].

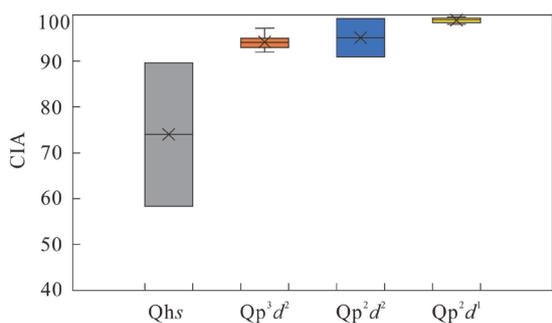


图5 研究区不同期次玄武岩风化心土样品风化蚀变指数 CIA 对比图

Fig. 5 The average CIA values of subsoil samples from different periods of basalts

平均值,我们发现随母岩时代由老到新,CIA 平均值逐渐变小,即 $CIA_{(Qp^2d^1)} > CIA_{(Qp^2d^2)} > CIA_{(Qp^3d^2)} > CIA_{(Qhs)}$,表明母质年龄越老,风化程度越高,成土年龄越老。例如:剖面 YX02、YX04、CMP05 的母岩为中更新世多文组一段 (Qp^2d^1) 玄武岩,剖面 CMP03

的母岩为晚更新世道堂组二段 (Qp^3d^2) 玄武岩;相应的土壤样品的 CIA 值除 YX02 剖面 80 cm 深度处的较低外 (CIA 值为 79.6),其余均在 95.8 以上,平均值为 98.7,均表现为强烈风化,且各剖面内部 CIA 值差别不大,且自下而上没有规律性的变化,整体都处于强风化阶段。此外,各剖面土壤样品 CIA 值与 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 之间显示极强的负相关 (图 6),表明在风化剖面中影响母岩风化的条件相似,风化强度反映的是 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 的淋滤流失程度。

元素相对迁移速率在研究岩石的风化强度时广泛使用,其计算方法如下:

$$X = \left(\frac{M}{N} - 1 \right) \times 100\%$$

其中, X 为某种元素的相对迁移率,负值为相对母岩亏损,正值为相对母岩富集, M 为该元素在某一层土壤中的含量, N 为该元素在母岩中的含量 [29], 本文采用琼北玄武岩的背景值来代替。

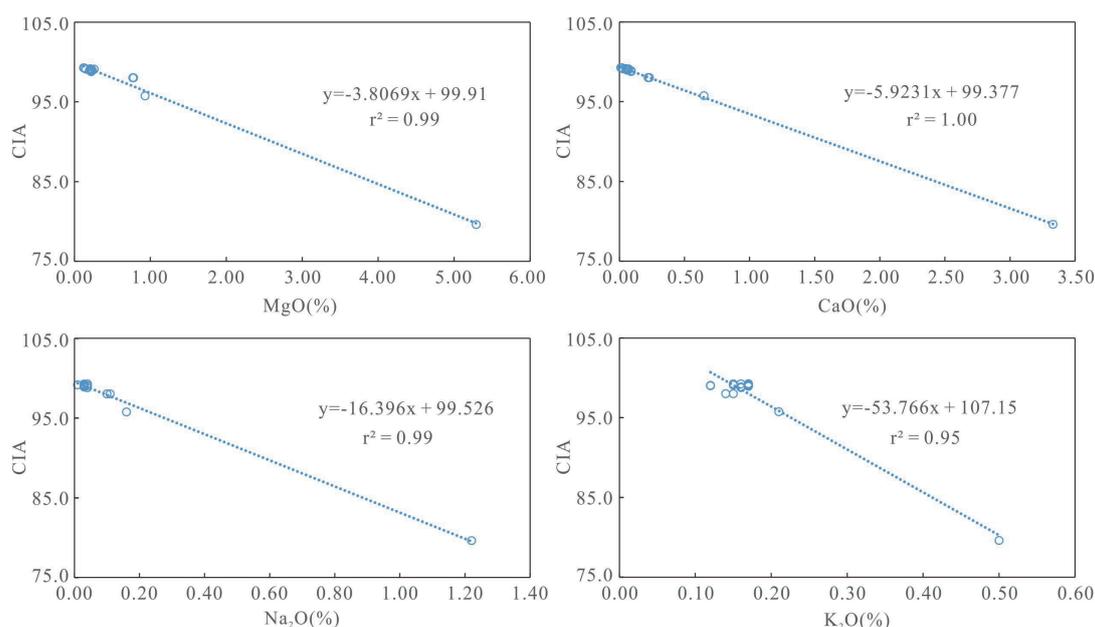


图 6 研究区 4 个玄武岩风化剖面中 CIA 与 MgO、CaO、Na₂O 和 K₂O 相关图解

Fig. 6 Correlation plots of CIA value vs MgO, CaO, Na₂O and K₂O contents of soil samples from 4 basalt weathering profiles

计算得到不同期次母岩风化心土样品的元素相对迁移速率平均值见表 2 和图 7, SiO₂、MgO、CaO、Na₂O、K₂O 和 P₂O₅ 相对母岩亏损, TiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃ 和 MnO 相对母岩富集。随母岩的年龄由老到新, 各元素迁移率大致呈现出由强至弱的趋势, 尤其是 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、CaO、Na₂O、K₂O 最为明显, MgO、CaO、Na₂O 在石山组风化土壤中快速流失, 淋滤流失率在 29.5% ~ 56.5% 之间; 而在道堂组二段、多文组一段和二段中几乎不再变化,

且几乎淋滤殆尽, 表明 MgO、CaO、Na₂O 的快速淋滤流失发生在早期阶段。随时代从新到老, 从石山组到多文组一段, 它们的 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃ 则表现为逐渐变化的过程, 其中 SiO₂ 逐渐流失, 而 TiO₂、Al₂O₃ 则表现为逐渐富集。TFe₂O₃ 从石山组到多文组二段逐渐富集, 而从多文组二段到多文组一段则表现为相对亏损, 表明多文组一段风化土壤后期受外生地质作用影响元素铁发生了一定程度的淋滤流失。

表 2 不同期次玄武岩风化心土样品元素平均相对迁移速率对比表

Table 2 The average relative migration rate of elements in the subsoil samples from different periods of basalts

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
Qp ² d ¹ (n=17)	-39.91	209.82	76.22	86.16	-96.04	57.09	-99.30	-98.84	-78.98	-66.07
Qp ² d ² (n=2)	-31.69	157.86	39.53	102.49	-75.94	127.12	-95.42	-96.94	-57.17	-29.21
Qp ³ d ¹ (n=11)	-21.04	120.34	28.96	74.97	-79.78	162.00	-93.20	-92.91	-70.41	-21.34
Qhs(n=2)	-8.83	76.50	-2.68	59.75	-29.45	146.69	-55.26	-56.48	-66.96	78.29

各剖面土壤样品的元素迁移速率自下而上没有呈现出明显的变化规律, 不同时代的玄武岩风化剖面之间也没有规律性的变化。剖面 YX02 80cm 深处土壤的 CIA 值为 79.6, 为弱风化外, 各剖面其余土壤样品均处于强风化阶段, 这导致各剖面内部

不同元素之间的相对迁移速率没有太大变化, 尤其是 MgO、CaO、Na₂O、K₂O 最为明显, 这也与其均发生了强烈的淋滤流失有关。大多数心土层土壤(采样深度约为 20cm) Al₂O₃、TFe₂O₃、TiO₂ 的元素相对迁移速率高于表层土壤, 可能与表层土壤中的 Al、

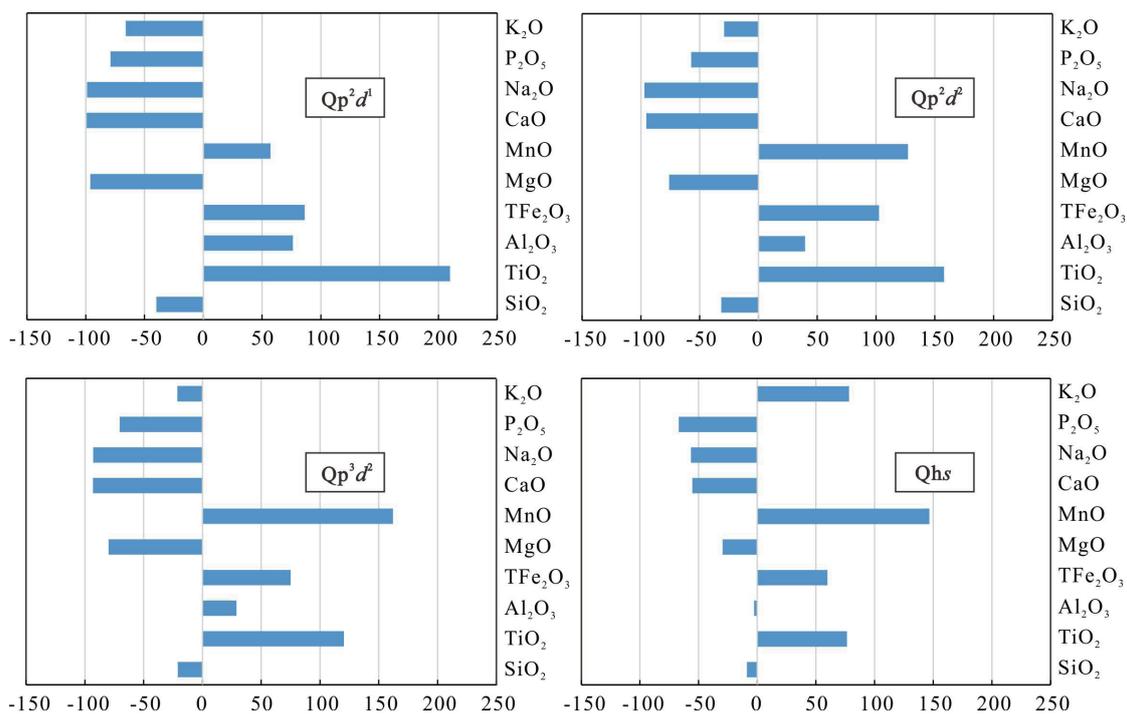


图7 不同期次玄武岩风化心土样品元素平均相对迁移速率图

Fig. 7 The diagram for average relative migration rate of elements in the subsoil samples from different periods of basalts

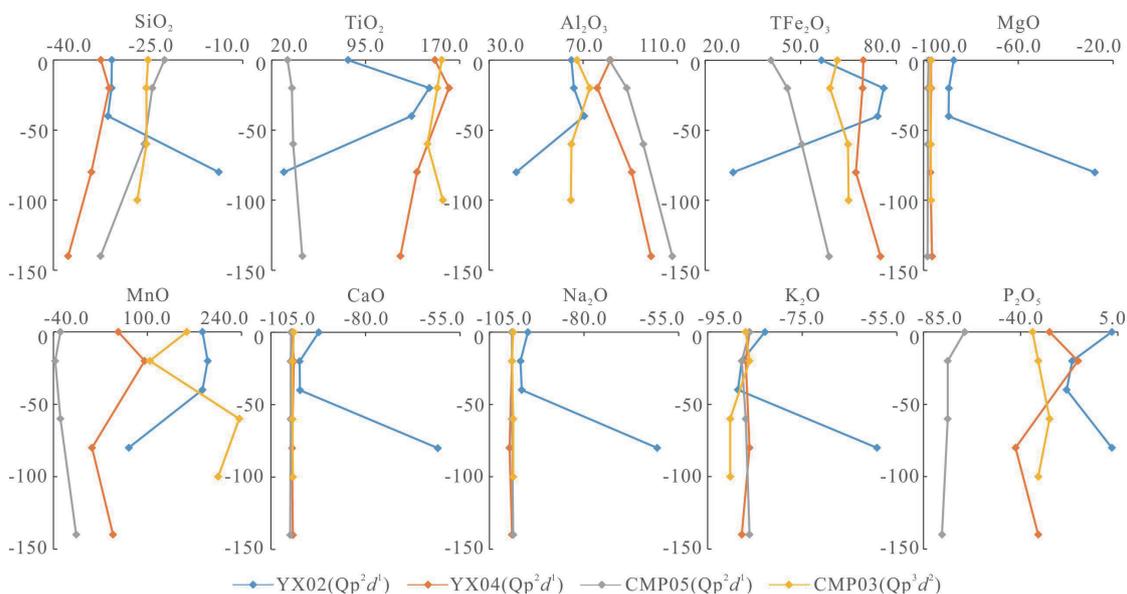


图8 不同期次玄武岩风化剖面土壤元素相对迁移速率

Fig. 8 The diagram for relative migration rate of elements in the soil samples from basalt weathering profile of different periods

Fe、Ti 在强淋滤作用下向下移动造成在心土层的相对富集有关^[17]。

4.2 风化土壤稀土元素组成的影响因素

黄成敏和龚子同^[9]对海南岛北部不同时期玄武岩风化壳稀土元素的研究表明,REE 总量与

成土年龄显著正相关,且随土壤发育程度的加深,REE 出现分异,Ce 呈现正异常,Eu 呈现负异常。本次研究发现,无论是面上分布的心土样品还是剖面土壤样品,均为轻稀土富集的右倾模式,ΣREE、L/HREE、(La/Yb)_N 随母岩的时代由老到新或从剖

面的底部到顶部(风化强度由弱到强)均没有呈现规律性的变化, Eu 异常不显著。各剖面内部 ΣREE 差别不大, 剖面之间 ΣREE 的差别可能是继承自母岩, 反映的是母岩稀土组成上的差异。剖面 ΣREE 与 CIA 之间呈现负相关(图 9), 表明在剖面相似的风化条件下, 土壤 ΣREE 与风化程度呈负相关, 即风化强度越强, ΣREE 含量越低。

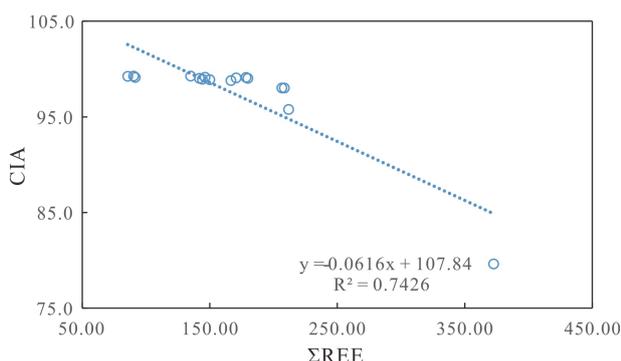


图 9 研究区风化剖面土壤样品 ΣREE 与 CIA 相关图解

Fig. 9 The CIA value vs ΣREE plots for soil samples from basalt weathering profiles

琼北玄武岩背景值无明显的 Ce 异常, 而风化的心土样品和剖面土壤样品都呈现明显的 Ce 正异常。杨元根等^[30]、冉勇等^[31]也发现我国南方红壤中有不同程度的 Ce 正异常, 这可能是因为与其它稀土元素通常呈现稳定 +3 价离子不同, Ce 是变价元素, 在氧化条件下 Ce 可被氧化成 CeO_2 , CeO_2 易被粘土吸附^[32], 且不溶于水, 相对其他元素更难迁移, 从而造成在风化土壤中富集。研究区不同期次玄武岩风化土壤 Ce 的异常值较大, 心土样品的 δCe 平均值为 1.73, 剖面土壤样品的 δCe 平均值为 1.60, 可能与琼北地区处于热带湿热气候区, 受强烈的风化淋滤作用有关。前人的研究也表明, 只有在气候达到北热带地区的湿热程度和风化强度时, 表土才会产生显著的 Ce 正异常^[33]。

5 结论

(1) 琼北南渡江两岸火成岩母质发育土壤主量元素组成以 SiO_2 , Al_2O_3 , TFe_2O_3 为主, 心土样品和剖面样品中三者总量分别为 73.62% ~ 81.70% 和 77.10% ~ 83.27%, MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 强烈

淋滤流失。与母岩相比, 均发生了强烈的风化淋溶和脱硅富铁富铝作用。

(2) 除石山组风化心土样品外, 其它期次玄武岩风化心土样品的风化程度均为极端风化, CIA 值多处于 91.0 以上, 且平均的 $\text{CIA}_{(\text{Qp}^2_1)} > \text{CIA}_{(\text{Qp}^2_2)} > \text{CIA}_{(\text{Qp}^3_2)} > \text{CIA}_{(\text{Qhs})}$, 表现为成土年龄越老, 风化程度越高。 MgO 、 CaO 、 Na_2O 的快速淋滤流失发生在风化的早期阶段, SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 则表现为逐渐变化的过程。

(3) 研究区不同期次玄武岩风化土壤均呈现显著的 Ce 正异常, 可能与琼北地区处于热带湿热气候区, 受强烈的风化淋滤作用有关。

参考文献:

- [1] White A F, Blum A E. Effects of climate on chemical weathering rates in watersheds[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9): 1727-1736.
- [2] Lasaga A C, Soler J M, Ganor J. Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(10): 2361-2386.
- [3] Bluth G J S, Kump L R. Lithologic and climatologic controls of river chemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(10): 2341-2359.
- [4] Berner R A. Chemical weathering and its effect on atmospheric CO_2 and climate [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1995, 31(1):565-583.
- [5] Louvat P, Allègre C J. Present denudation rates on the island of Reunion determined by river geochemistry: basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61 (17): 3645-3669.
- [6] Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, Francois L M, Allègre C J. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle[J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3): 257-273.
- [7] Ma J L, Wei G J, Xu Y G Long W G, Sun W D. Mobilization and redistribution 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.
- [8] Jiang K, Qi H W, Hu R Z. Element mobilization and re-

- distribution under extreme tropical weathering of basalts from the Hainan Island, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 158(1): 80-102.
- [9] 黄成敏, 龚子同. 土壤发育过程中稀土元素的地球化学指示意义[J]. *中国稀土学报*, 2000, 18(2): 150-155.
- [10] 徐义芳, 朱照宇, 文高国, 梁俊平, 罗树文. 雷州半岛南部若干红土剖面的地球化学与成土环境研究[J]. *地球化学*, 2000, 29(4): 402-409.
- [11] 张立娟, 李徐生, 李德成, 韩志勇, 张甘霖. 雷州半岛玄武岩母质土壤剖面稀土元素分布及其与常量元素、粒度的关系[J]. *土壤学报*, 2011, 48(1): 1-9.
- [12] 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元. 雷琼第四纪玄武岩[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 170-188.
- [13] 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 隋建立. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 533-544.
- [14] Wang X C, Li Z X, Li X H, Li J, Liu Y, Long W G, Zhou J B, Wang F. 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.
- [15] Liu J Q, Ren Z Y, Nichols A R L, Song M S, Qian S P, Zhang Y, Zhao P P. Petrogenesis of Late Cenozoic basalts from North Hainan Island: constraints from melt inclusions and their host olivines[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 152: 89-121.
- [16] 段政, 张翔, 周翠, 余明刚, 褚平利, 洪文涛. 琼北地区第四纪火山地质遗迹类型与地学意义[J]. *地球学报*, 2021, 42(1): 111-123.
- [17] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究Ⅲ. 元素地球化学特征[J]. *土壤学报*, 2002, 39(5): 643-652.
- [18] Huang K J, Teng F Z, Wei G J, Ma J L, Bao Z Y. Adsorption- and desorption controlled magnesium isotope fractionation during extreme weathering of basalt in Hainan Island, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 359-360: 73-83.
- [19] Ma J L, Wei G J, Xu Y G, Long W G. Variations of Sr-Nd-Hf isotopic systematics in basalt during intensive weathering[J]. *Chemical Geology*, 2010, 269(3): 376-385.
- [20] 朱鑫, 汪实, 李婷婷. 雷州半岛土壤地球化学背景值研究[J]. *华南地质*, 2021, 37(1): 103-112.
- [21] 都凯. 中国东部新生代玄武岩风化作用地球化学研究[D]. 南京大学硕士学位论文, 2012.
- [22] 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.
- [23] 朱维晃, 杨元根, 毕华, 刘强. 海南土壤中稀土元素含量及分布特征[J]. *地球与环境*, 2004, 32(2): 20-25.
- [24] Long X Y, Ji J F, Balsam W. Rainfall dependent transformations of iron oxides in a tropical saprolite transect Hainan Island, South China: spectral and magnetic measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F3).
- [25] 龙文国. 琼海县幅 E49C001002 1/25 万区域地质调查报告[R]. 海南省地质调查院, 2004.
- [26] Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes, in *Magmatism in the Ocean Basins*[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [27] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [28] 邹海波, 郭紫佩, 樊祺诚, 赵勇伟. 中国东部全新世火山的镭-钍同位素年代学[J]. *岩石学报*, 2020, 36(7): 1945-1952.
- [29] 刘奇志. 吉林省东部玄武岩风化成壤过程中的元素地球化学特征[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2018.
- [30] 杨元根, 刘丛强, 袁可能, 何振立. 南方红土形成过程及其稀土元素地球化学[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(5): 469-480.
- [31] 冉勇, 刘铮. 我国主要土壤中稀土元素的含量和分布[J]. *中国稀土学报*, 1994, 12(3): 248-252.
- [32] Braun J J, Pagel M, Muller J P, Bilong P, Michard A, Guillet B. Cerium anomalies in lateritic profiles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(3): 781-795.
- [33] 杨恬, 朱照宇, 吴翼, 邱世藩, 饶志国, 韩江伟. 中国东部地带表土稀土元素的地球化学特征[J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 233-241.