



高黎贡山南段不同气候条件下稀土元素地球化学特征对比研究

夏顶洪, 赵忠强, 张佳琳, 李振阳, 曾丽源, 何洪鸣, 宋垠先, 陈 忠

Comparative study on the geochemical characteristics of rare earth elements under different climatic conditions in the southern segment of Gaoligong Mountain

XIA Dinghong, ZHAO Zhongqiang, ZHANG Jialin, LI Zhenyang, ZENG Liyuan, HE Hongming, SONG Yinxian, and CHEN Zhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024013102>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西太平洋深海沉积物孔隙水稀土元素地球化学特征及意义

Rare earth element geochemistry characteristics and implications of pore-water from deep sea sediment in Western Pacific Ocean
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 75-86

西太平洋Kocebu海山铁锰结壳稀土元素地球化学特征

Geochemistry of rare earth elements and yttrium in ferromanganese crusts from Kocebu Guyot in the Western Pacific
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 210-222

西太平洋采薇海山和徐福海山富钴结壳稀土元素地球化学特征及来源

Geochemistry and sources of rare earth elements in cobalt-rich crusts from the Caiwei and Xufu seamounts, West Pacific Ocean
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 87-99

长江下游与浙江主要河流枯水期悬浮物稀土元素组成研究

On the composition of rare earth elements of suspended substance in lower reach of the Yangtze River and main rivers in Zhejiang Province in dry season
海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(4): 88-98

九州-帕劳海脊南段共生多金属结核与富钴结壳地球化学特征及其资源意义

Geochemical characteristics and resource significance of polymetallic nodules and cobalt-rich crusts in the southern Kyushu-Palau ridge
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 149-157

海洋细菌对稀土元素铈的富集矿化过程研究

Study on the enrichment and mineralization of rare earth element cerium by marine bacteria
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(5): 190-197



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

夏顶洪, 赵忠强, 张佳琳, 等. 高黎贡山南段不同气候条件下稀土元素地球化学特征对比研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 83-95.

XIA Dinghong, ZHAO Zhongqiang, ZHANG Jialin, et al. Comparative study on the geochemical characteristics of rare earth elements under different climatic conditions in the southern segment of Gaoligong Mountain[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 83-95.

高黎贡山南段不同气候条件下稀土元素地球化学特征对比研究

夏顶洪^{1,2,3}, 赵忠强^{1,2,3}, 张佳琳^{1,2,3}, 李振阳^{1,2,3}, 曾丽源^{1,2,3}, 何洪鸣^{4,5}, 宋垠先^{1,2,3}, 陈忠^{1,2,3}

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093

2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 昆明 650093

3. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 昆明 650093

4. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241

5. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 高黎贡山气候垂直分带明显, 山体两侧分属亚热带季风气候与干热河谷气候, 水热条件差异大。通过对高黎贡山南段东西两侧 5 个风化剖面的研究, 利用矿物组成与稀土元素分析方法, 对比得到不同气候条件下风化壳稀土元素地球化学特征。结果表明, 两侧矿物包括石英、长石、方解石、白云石、伊利石与高岭石等, 西侧还出现了白云母、蒙脱石与蒙脱石-绿泥石混层矿物等, 表明西侧风化更强。总体上, 西侧风化剖面稀土元素 (REE) 含量高于东侧, 分异程度也更大, 随着海拔的降低, 稀土元素逐渐富集; 东侧 REE 含量相对较低, 存在一定波动, 可能与遭受一定程度的淋滤作用和较强的蒸发作用有关。东西两侧都呈现明显的 Eu 负异常, 西侧负异常更大, 西侧 Ce 均为正异常而东侧为弱负异常。随着 pH 的升高, 两侧均出现轻重稀土富集的现象, 而西侧富集更加显著。稀土元素与矿物的相关性分析表明, 轻稀土 (LREE) 与碳酸盐和黏土矿物相关性强, 重稀土 (HREE) 与碳酸盐和长石矿物联系密切。风化壳中 Eu/Sm 和 Ce/Eu 比值对母岩具有较好的指示, 西侧母岩来自于花岗岩, 东侧为沉积岩。

关键词: 稀土元素; 地球化学; 矿物组成; 怒江干热河谷; 高黎贡山南段

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024013102

Comparative study on the geochemical characteristics of rare earth elements under different climatic conditions in the southern segment of Gaoligong Mountain

XIA Dinghong^{1,2,3}, ZHAO Zhongqiang^{1,2,3}, ZHANG Jialin^{1,2,3}, LI Zhenyang^{1,2,3}, ZENG Liyuan^{1,2,3}, HE Hongming^{4,5}, SONG Yinxian^{1,2,3}, CHEN Zhong^{1,2,3}

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming 650093, China

3. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming 650093, China

4. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

5. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: The vertical zonation of climate in the north-south Gaoligong Mountain is obvious. The two sides of the mountain are subtropical monsoon climate and dry-hot valley climate, with great differences in hydrothermal conditions. Five weathering cross-sections on the east and west sides of the southern segment of the Gaoligong Mountain were studied, and the mineral composition and geochemical characteristics of REE in weathering crust under different climate conditions were analyzed. Results show that the minerals on the both sides include quartz, feldspar, calcite, dolomite, illite and kaolinite, and so on, and there are also minerals such as muscovite, montmorillonite, and montmorillonite-chlorite mixed-layer minerals on the west side, indicating that the weathering on the west side is more intensive. In general, the REE content and the degree of differentiation are greater on the west side than those on the east side. With the decrease of altitude, REE is gradually enriched.

资助项目: 国家重点研发计划项目“高黎贡山生态风险预警技术体系构建”(2022YFF1302401)

作者简介: 夏顶洪 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事环境地质学研究, E-mail: 2694113822@qq.com

通讯作者: 陈忠 (1970—), 男, 博士, 副教授, 从事环境地球化学研究, E-mail: qwchenzhong@163.com

收稿日期: 2024-01-31; 改回日期: 2024-03-14. 张现荣编辑

The REE content of the east side is relatively low and varied slightly, which may be related to a certain degree of leaching and strong evaporation. There are obvious negative Eu anomalies on both sides, and the negative anomalies are greater on the west side. The Ce anomalies are positive on the west side, but weak negative anomalies on the east side. With the increase of pH, both LREE and HREE are enriched, and the enrichment on the west side is more significant. The correlation analysis of REE and minerals shows that LREE is strongly correlated with carbonate and clay minerals, and HREE is closely related to carbonate and feldspar minerals. The Eu/Sm and Ce/Eu ratios in the weathering crust are good indicators to the parent rocks, which are granitic rocks on the west side and sedimentary rocks on the east side.

Key words: rare earth elements; geochemistry; mineral composition; the dry-hot valley of the Nujiang River; the southern segment of Gaoligong Mountain

稀土元素由于其性质稳定、不易受变质作用干扰,被认为是地球化学循环中物质演化特征的重要示踪剂^[1-3]。稀土元素包括其同位素的丰度和分配等用以研究岩石与矿物的成因和分类、成岩成矿作用的物理化学条件,成矿物质的来源,沉积与变质作用,乃至太阳系的起源和演化等。稀土元素在地壳中富集,特别是在风化壳中,而风化壳中稀土元素成矿已成为一种重要的矿床类型——离子吸附型稀土矿。中国是离子吸附型稀土矿床分布最主要的国家,最近十多年来对该类矿床的研究^[4-12]非常深入,对风化成矿的机理也有深刻的认识。在对中国南方离子吸附型稀土矿的研究中,认识到随着风化壳的发育,稀土元素在风化壳中不断淋滤向下迁移,在全风化层下部聚集成矿,这种情况在花岗岩带中最为典型。虽然稀土矿的形成与岩浆作用、热液活动和流体的交代作用有关,但在地表的风化作用对稀土最终富集起到了关键作用。花岗岩在地表的风化作用与气候有紧密的关系,有研究总结了华南离子吸附型稀土矿的区域气候的特征^[8],表现为温暖湿润、年均气温为18~22℃,年降水量为1400~1800mm。气温高、雨量足、植被发育,岩石化学风化才强烈,有利的地貌也会促使稀土元素富集。在风化壳发育过程中,pH值在不同深度上会有明显变化,黏土矿物随着风化的发育也会产生变化。风化剖面中,不同深度的黏土矿物组合有变化,不同的pH值、不同的黏土矿物组合都会对稀土元素淋滤、吸附产生影响,进而产生轻重稀土的分异,在风化剖面中,轻稀土富集层位一般偏上,而重稀土相对偏下。简而言之,稀土元素在风化壳的分布特征与风化作用有紧密的联系,而风化作用受气候的控制。

云南分布有典型的离子吸附型稀土矿床,在临沧、腾冲、建水等地均发现了离子吸附型稀土矿床,腾冲—陇川成矿区更有海西至喜山期各花岗岩岩体经风化发育的矿床^[10],对这些矿床的研究加深了该区域风化作用对稀土元素迁移富集的认识。

前人对腾冲地区高田村的风化剖面进行研究^[13],结果表明,在水热条件好的情况下重稀土的分异程度更高,Eu的负异常较强。对高黎贡山南段花岗岩风化壳的研究^[10],表明稀土分布模式为“海鸥式”。整体上,对高黎贡山地区风化壳的研究并不多。由于高黎贡山南段东西两侧分属于热河谷和亚热带山地季风气候,山体高差较大存在明显的海拔效应,小气候条件差异较为显著。在高黎贡山南段对不同气候条件下风化剖面开展稀土元素研究,不仅可以加深该区域稀土元素地球化学特征的了解,而且对于不同气候条件下稀土元素的地球化学行为有进一步的认识。

1 样品与方法

1.1 研究区概况

高黎贡山地处印度板块与欧亚板块碰撞及板块俯冲的缝合带上,目前地壳活动仍然较为剧烈,地貌过程复杂。山体整体沿怒江西侧南北向展布,自北向南海拔降低,最高海拔>4000m^[14]。山体可划分为北、中、南3段,本研究区属于南段的东支,位置为24°56′~25°18′N、98°49′~98°51′E,海拔多在800m以上,山体效应明显。山体西侧属亚热带山地季风气候,位于迎风坡面,暖湿气流在此上升产生凝结降水,年均降水量达1625mm,年均气温为16℃。主要植被类型为常绿阔叶林与暖性针叶林等,物种较为丰富。区域地层主要为下古生界、新近系和第四系,岩性以花岗岩、片麻岩和砂岩为主。山体东侧位于怒江干热河谷南段地区,由于处在背风坡面,热量较高,年均气温达23℃,最高气温40.2℃,年降雨量700~1000mm,垂直气候分布明显,水热条件不平衡,雨热不同期,植被覆盖率低。主要植被类型以灌木草丛为主,河谷内多种植果树,如芭蕉、芒果等,河谷两岸多生长耐旱植物龙舌兰。地层由老到新包括寒武系、奥陶系、志留

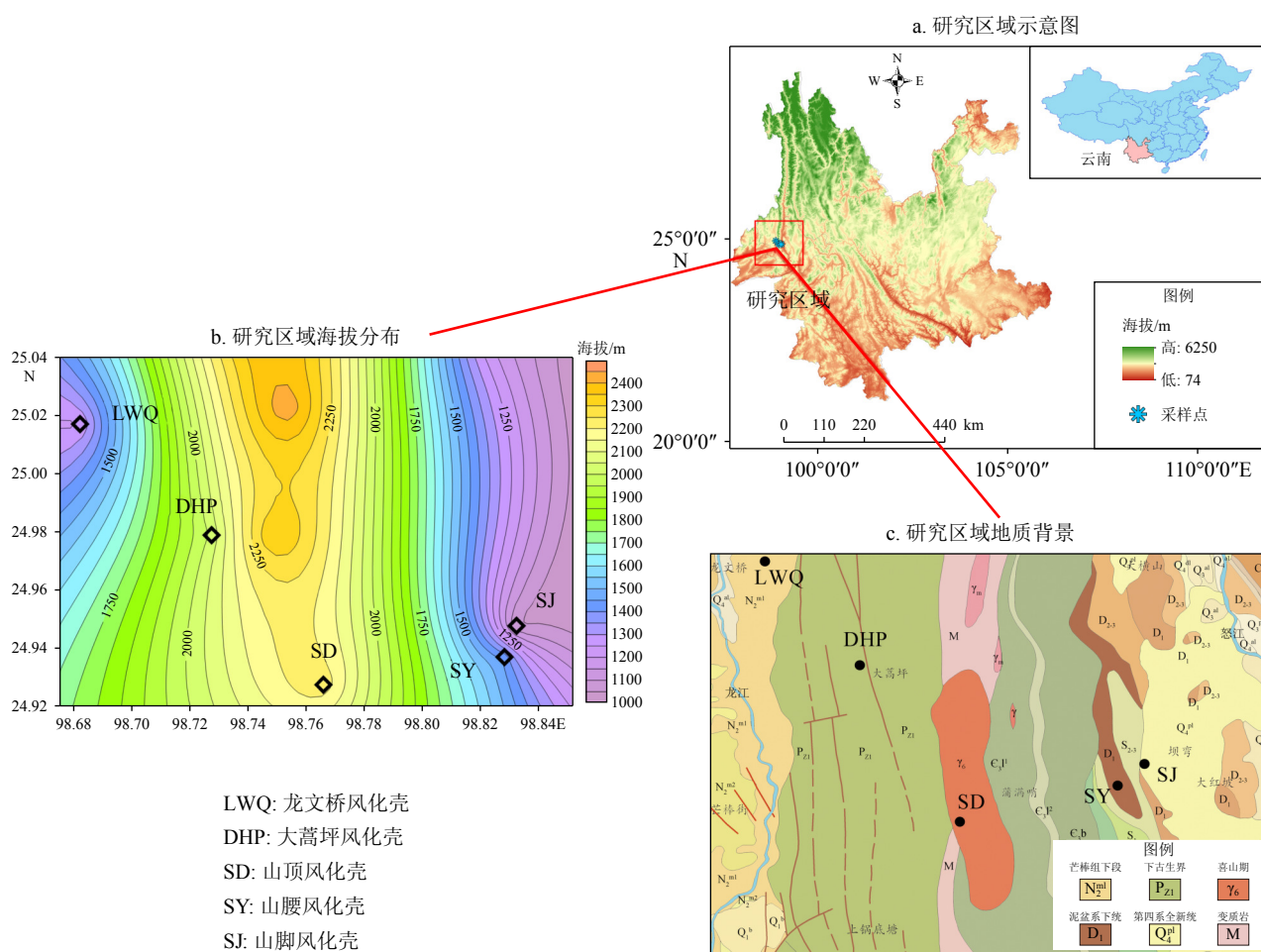


图 1 研究区概况及采样点

Fig.1 Overview of the study area and distribution of sampling sites

系、泥盆系、石炭系、新近系和第四系为主,岩性以泥质灰岩、砾岩和砂岩为主(图 1)。

1.2 样品及分析方法

按照风化壳风化发育程度,结合每个剖面实际情况,分别在土壤层、全风化层、半风化层和弱风化层至基岩采样,由于各个剖面发育程度不一,出露的情况不同,实际采样并非各层都采到,在采取的层位每层采约 1 kg 样品,具体信息如表 1。

样品经过处理,然后采用不同方法和仪器进行测试。样品处理步骤为:将土壤样品放置阴凉处,自然风干并剔除有机物残体等杂质,在陶瓷研磨体中粗磨过 20 目筛,然后用玛瑙研磨机进行细磨,过 200 目筛,储存备用。

基础理化性质分析:采用水土比 2.5 : 1.0 电位法,用酸度计测定土壤 pH 值。

矿物组成分析:在中科院南京地理与湖泊研究所采用粉晶 X 射线衍射仪进行测试,仪器为帕纳科公司的 X.pert³ Powder 型。实验条件:电压为 40 kV,

电流为 30 mA,铜靶 Ka 辐射($\lambda=1.5406$),扫描角度(2 θ)为 5°~80°,扫描速度为 5°/min。

微量元素分析:在贵州同微测试科技有限公司完成,仪器为电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS X2),所配自动进样器型号为 Cetac ASX-520,用称重法配制上机溶液,精确计算出内标元素浓度与稀释倍数。测试的相对标准偏差均<3%。

2 结果与讨论

2.1 矿物组成特征

土壤矿物按来源可分为原生矿物与次生矿物,原生矿物直接来自母岩,主要有石英、长石、云母、角闪石和辉石等;次生矿物是由原生矿物分解转化而成,如结晶层状硅酸盐黏土矿物和碳酸盐矿物等。矿物组成结果如图 2。山体西侧风化剖面主要矿物为石英、白云母、正长石、钠长石、白云石和黏土矿物,黏土矿物组合为蒙脱石、蒙脱石-绿泥石混

表 1 剖面采样信息
Table 1 Specification of sampling sites along the cross-sections

采样剖面	经纬度	海拔/m	样品个数/个	剖面高度/m	气温/℃	降水/mm	母岩/母质
LWQ	25°01'1.81"N、 98°40'57.04"E	1 246	3	2.5	18.62	1450	砂砾岩
DHP	24°58'44.45"N、 98°43'39.58"E	2 012	3	4	15.38	1202	花岗岩
SD	24°55'39.54"N、 98°45'58.36"E	2 232	7	3.5	14.40	1187	白云母花岗岩
SY	24°56'13.34"N、 98°49'42.46"E	1 433	5	4	20.06	1020	泥沙质灰岩
SJ	24°56'52.21"N、 98°49'56.99"E	1 046	6	4	21.30	850	泥质灰岩

注：气候数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn)^[15]。

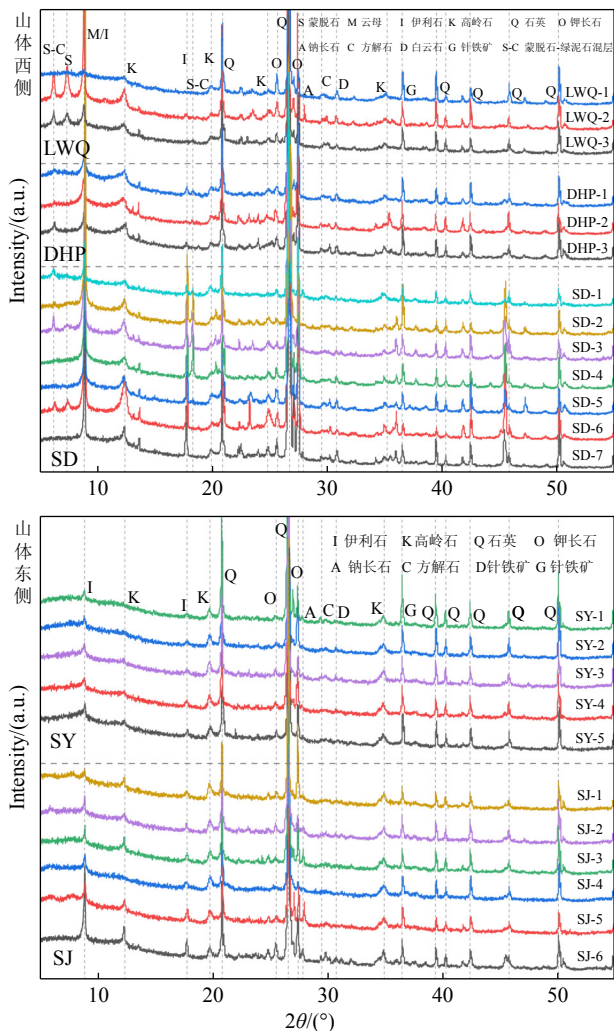


图 2 高黎贡山南段东西两侧样品 XRD 分析结果
Fig.2 XRD analysis results of samples from the eastern and western sides of the southern segment of the Gaoligong Mountain
层、伊利石和高岭石。从次生矿物看，特别是黏土矿物的组成，显示较强的风化程度。东侧主要矿物为石英、正长石、钠长石、方解石、白云石和黏土矿物等，黏土矿物为伊利石和高岭石，组成相对简单，

显示东侧风化程度相对较低，与东侧干热河谷的环境特征相对应。前人对金沙江干热河谷黄土状物质的研究表明，其主要矿物组成除石英、长石和方解石外，黏土矿物为少量蒙脱石、伊利石、高岭石和云母^[16-17]，虽然与怒江干热河谷的有一定差异，但风化程度都较低。综上所述，山体东西两侧的矿物组成显示风化强度存在差别，西侧风化更强。

对已确定的矿物采用 Johnson^[18] 分析方法进行半定量计算。由表 2 可知，高黎贡山南段东西两侧风化剖面中石英、长石和云母平均占总量的 88.24%，碳酸盐矿物约占 2.11%，黏土矿物约占 9.66%。西侧与东侧的石英含量范围分别为 15.55%~68.79% 和 46.50%~89.91%，长石含量相近，分别为 25.40% 和 23.31%。西侧碳酸盐矿物(方解石和白云石)的平均含量分别为 2.29%，略高于东侧 1.89%，其中，西侧方解石与白云石平均含量为 0.69% 和 1.60%，东侧为 1.01% 和 0.88%，东侧方解石含量略高于西侧，而白云石则是西侧高于东侧，由于白云石一般为原生，因此可能与西侧分布有更多含白云石的地层有关。此外西侧黏土矿物总量为 11.82%，高于东侧 7.11%，这与西侧风化程度更强，生成了更多的黏土矿物相关。

2.2 稀土元素特征

2.2.1 稀土元素的含量与分布

稀土元素分析结果显示，高黎贡山南段西侧风化壳剖面中稀土总量为 107.3 ~ 498.8 μg/g，平均 239.2 μg/g，东侧风化壳剖面中稀土总量为 143.2 ~ 251.4 μg/g，平均 185.6 μg/g(表 3)，均高于中国土壤平均值(164 μg/g)^[19]。西侧样品 ΣREE 高于东侧，且丰度变化范围较大，变异系数高达 56.4%，大于东侧的 17.1%(图 3)。由山顶至山脚 ΣREE 逐渐增加，山

表 2 高黎贡山南段东西两侧样品矿物组成										%
Table 2 Mineral composition of samples from the two sides of the southern segment of the Gaoligong Mountain										
n=24	石英	云母	钾长石	钠长石	方解石	白云石	S	I	K	S-C
LWQ-1	68.79	3.58	17.80	0.00	1.34	5.92	0.00	0.42	2.17	0.00
LWQ-2	24.47	35.50	12.10	0.00	0.99	1.48	7.54	3.98	2.59	11.35
LWQ-3	37.39	13.39	28.89	0.00	1.13	1.66	4.98	1.59	1.04	9.92
DHP-1	46.11	16.08	28.86	0.00	0.70	2.54	0.00	2.03	2.72	0.96
DHP-2	36.28	7.40	50.59	0.00	1.38	1.64	0.00	1.21	1.50	0.00
DHP-3	49.87	11.37	25.32	0.00	1.13	1.88	0.00	1.49	3.08	5.86
SD-1	31.98	28.08	26.87	1.95	0.28	1.67	0.00	3.85	0.52	4.80
SD-2	17.98	50.20	15.36	0.00	0.13	0.42	0.00	13.30	1.32	1.29
SD-3	24.33	37.85	20.12	0.00	0.40	0.54	0.00	9.38	1.39	5.99
SD-4	15.55	45.97	26.06	0.00	0.41	0.26	0.00	9.96	0.97	0.81
SD-5	26.57	40.19	20.62	0.00	0.29	0.65	0.00	9.10	1.88	0.71
SD-6	17.57	39.53	25.22	0.00	0.23	0.55	1.40	8.95	4.12	2.42
SD-7	16.16	44.23	30.48	0.00	0.56	1.56	0.00	4.76	2.25	0.00
XC	31.77	28.72	25.25	0.15	0.69	1.60	1.07	5.39	1.97	3.39
SY-1	74.50	0.00	16.90	1.54	3.20	0.66	0.00	1.58	1.62	0.00
SY-2	69.33	0.00	26.50	0.65	0.97	0.87	0.00	1.31	0.38	0.00
SY-3	77.48	0.00	12.50	1.97	1.28	2.48	0.00	1.95	2.34	0.00
SY-4	67.60	0.00	25.58	1.49	0.70	1.33	0.00	1.82	1.47	0.00
SY-5	70.66	0.00	22.32	1.21	0.64	0.60	0.00	2.30	2.27	0.00
SJ-1	46.50	0.00	43.13	0.94	0.28	0.48	0.00	2.14	6.53	0.00
SJ-2	78.31	0.00	10.09	3.55	0.18	0.60	0.00	4.37	2.91	0.00
SJ-3	60.53	0.00	21.85	6.53	0.38	1.42	0.00	2.15	7.15	0.00
SJ-4	89.91	0.00	5.07	0.00	0.40	0.40	0.00	3.76	0.47	0.00
SJ-5	58.49	0.00	20.95	8.02	0.90	0.44	0.00	4.58	6.63	0.00
SJ-6	51.34	0.00	21.53	4.07	2.16	0.44	0.00	12.53	7.94	0.00
DC	67.69	0.00	20.58	2.72	1.01	0.88	0.00	3.50	3.61	0.00
平均	48.24	15.56	23.11	1.33	0.84	1.27	0.58	4.52	2.72	1.84

注: S: 蒙脱石, I: 伊利石, K: 高岭石, S-C: 蒙脱石-绿泥石混层。

脚达到最高值。研究区海拔落差较大,气候具有明显垂直分带,且山体两侧气候差异显著,东侧为怒江干热河谷,气候明显的差异可能是导致风化剖面稀土含量特征不同的主要原因。西侧位于迎风面上,强烈的降水导致坡面淋滤作用较强,稀土元素在淋滤作用过程中也随之发生迁移,出现从山顶(SD)至山脚(LWQ)ΣREE明显的增加。西侧三个剖面中ΣREE随深度变化的特征也非常有意思(图3),山顶剖面整体ΣREE较低,在表层和底层略有升高,

可能是山顶淋滤作用较强,导致大部分稀土元素向下迁移,到一定深度稀土开始富集。山腰剖面(DHP)表现出ΣREE自表层向下逐渐富集,符合一般风化壳稀土元素分布特征,即从表层向全风化层,ΣREE逐渐升高。山脚LWQ剖面呈现出表层ΣREE最高,向下明显降低,可能是受到从山顶淋滤而来稀土的影响,导致在表层出现最高值,在剖面的中下部,虽然也接受了淋滤富集,但不及表层接收的多,因而出现剖面中下部逐渐降低的特征。需

表 3 高黎贡山南段东西两侧样品稀土元素含量

Table 3 Rare earth content of samples from the two sides of the southern segment of the Gaoligong Mountain (μg/g)

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
LWQ-1	130.0	198.0	26.8	91.4	15.8	1.2	12.2	1.9	9.5	1.8	4.7	0.7	4.3	0.6	498.8
LWQ-2	73.6	208.0	16.2	56.3	10.1	0.9	7.5	1.1	5.5	1.0	2.7	0.4	2.6	0.4	386.4
LWQ-3	57.5	197.0	13.2	46.9	9.2	0.8	7.6	1.3	6.7	1.3	3.5	0.6	3.6	0.5	349.6
DHP-1	53.8	141.0	11.6	39.9	7.8	0.6	6.7	1.2	6.9	1.5	4.6	0.8	5.2	0.8	282.3
DHP-2	52.6	121.0	11.9	41.4	9.5	0.4	11.3	2.4	16.6	4.0	13.4	2.5	17.2	2.8	306.9
DHP-3	88.1	172.0	18.7	63.1	12.2	0.5	10.0	1.6	8.5	1.6	4.5	0.7	4.3	0.6	386.4
SD-1	33.7	72.9	7.1	25.0	4.7	0.7	3.8	0.6	3.2	0.6	1.6	0.2	1.6	0.2	156.0
SD-2	25.8	73.1	4.5	14.9	2.6	0.3	1.7	0.3	1.2	0.2	0.5	0.1	0.4	0.1	125.6
SD-3	21.6	67.3	4.1	14.2	2.6	0.3	1.8	0.3	1.4	0.2	0.6	0.1	0.6	0.1	115.2
SD-4	25.7	53.7	4.9	15.9	2.8	0.3	1.8	0.2	1.1	0.2	0.4	0.1	0.3	0.0	107.3
SD-5	26.7	65.2	4.7	15.0	2.5	0.4	1.7	0.2	1.0	0.2	0.4	0.1	0.3	0.0	118.3
SD-6	29.3	47.4	6.2	20.9	3.6	0.4	2.2	0.3	1.3	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	112.8
SD-7	47.2	67.2	8.6	28.4	4.8	0.5	3.0	0.4	1.7	0.3	0.6	0.1	0.5	0.1	163.3
XC	51.2	114.1	10.7	36.4	6.8	0.6	5.5	0.9	5.0	1.0	2.9	0.5	3.2	0.5	239.2
SY-1	41.8	77.3	9.2	33.7	5.9	1.0	4.4	0.7	3.8	0.8	2.2	0.4	2.3	0.4	183.8
SY-2	46.8	92.3	10.2	36.6	6.2	1.0	4.6	0.7	3.7	0.8	2.2	0.3	2.2	0.3	208.1
SY-3	35.9	66.2	8.5	31.4	5.5	1.0	4.3	0.6	3.5	0.7	2.0	0.3	2.0	0.3	162.2
SY-4	50.7	90.7	11.0	40.0	6.9	1.2	5.2	0.8	4.2	0.8	2.3	0.4	2.3	0.3	216.9
SY-5	33.3	54.0	7.9	29.1	5.1	0.9	3.9	0.6	3.3	0.7	1.9	0.3	1.9	0.3	143.2
SJ-1	34.9	58.5	8.3	31.4	6.1	1.3	5.2	0.8	4.3	0.9	2.6	0.4	2.7	0.4	157.7
SJ-2	44.5	86.3	9.9	36.7	6.7	1.3	5.6	0.9	4.8	1.0	2.8	0.4	2.9	0.4	204.3
SJ-3	38.0	66.5	8.7	32.7	5.9	1.2	4.8	0.7	4.0	0.8	2.4	0.4	2.4	0.4	168.8
SJ-4	53.1	110.0	12.0	43.8	7.8	1.4	6.4	1.1	6.2	1.3	3.6	0.6	3.6	0.5	251.4
SJ-5	35.5	56.7	8.9	34.4	7.0	1.5	6.2	1.0	5.4	1.1	3.2	0.5	3.2	0.5	165.1
SJ-6	40.2	70.7	9.5	35.1	6.4	1.1	4.9	0.7	4.2	0.9	2.6	0.4	2.6	0.4	179.6
DC	41.3	75.4	9.5	35.0	6.3	1.2	5.0	0.8	4.3	0.9	2.5	0.4	2.6	0.4	185.6

说明一点,山脚稀土总量明显高于其他剖面,应该与基岩的稀土含量高有关,单独依靠淋溶作用不能解释如此高的稀土总量。在山体东侧,其降水明显减少,植被发育具有干旱化的特征,特别是在河谷地带。在东侧山腰(SY)和山脚(SJ),ΣREE变化存在锯齿状波动,可能跟本区域干热河谷有关,因为从气候数据看,河谷平均气温在 20℃ 以上,降水量达到 850 mm,即有一定降水量,蒸发作用较强,剖面上稀土既遭受淋滤作用,也受到蒸发作用的影响(出现沉淀),导致出现锯齿状分布。这一特征是否为干热河谷剖面具有的一般特征,还有待更多的研

究证实。

2.2.2 稀土元素分异特征

对稀土元素进行球粒陨石标准化表明^[20](图 4),5 个剖面稀土配分模式一致,整体向右倾斜,表现为轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损以及明显的 Eu 负异常特征,与 UCC 非常相似。剖面中 (La/Yb)_N、(La/Sm)_N、(Gd/Lu)_N 变化范围分别为 7.03~66.71、3.19~6.61、0.51~5.91,山体东西两侧 (La/Yb)_N 均值分别为 11.16、28.05, (La/Sm)_N 均值分别为 4.12、5.06, (Gd/Lu)_N 均值分别为 1.61、2.88。

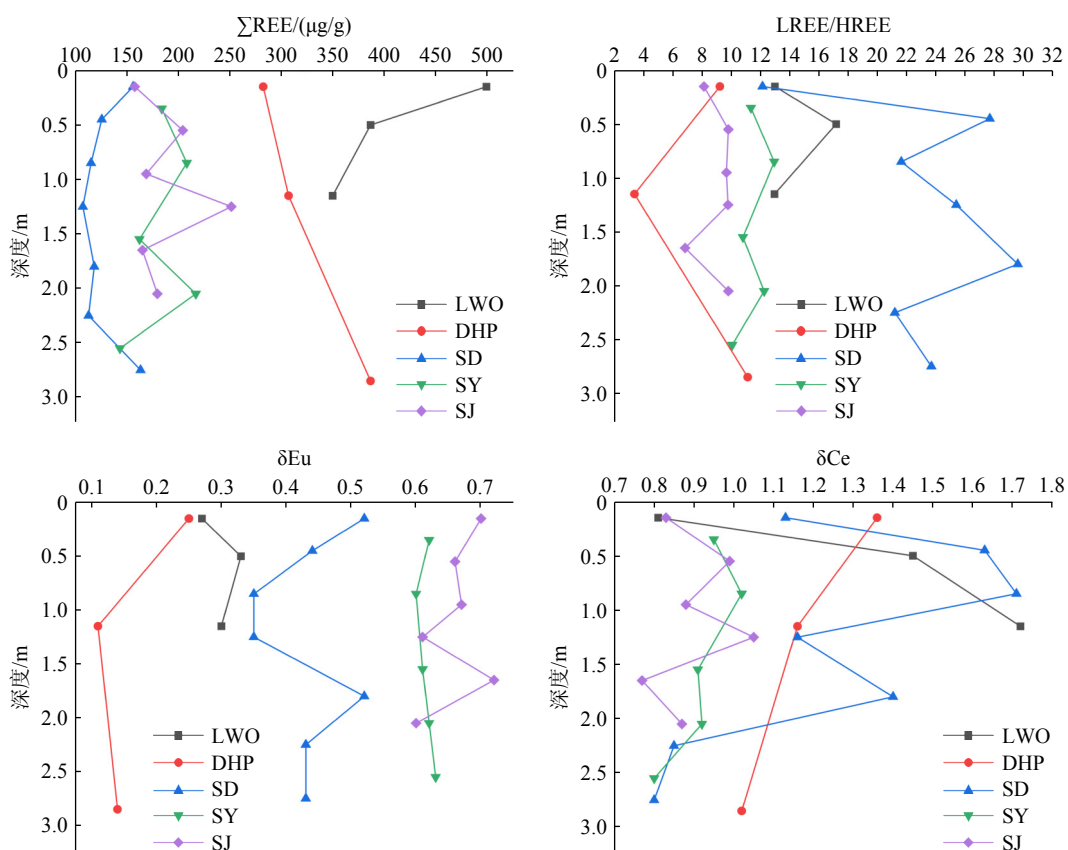


图 3 高黎贡山南段样品 REE 参数垂向变化特征

Fig.3 Vertical variation characteristics of the samples REE parameters in the southern segment of the Gaoligong Mountain

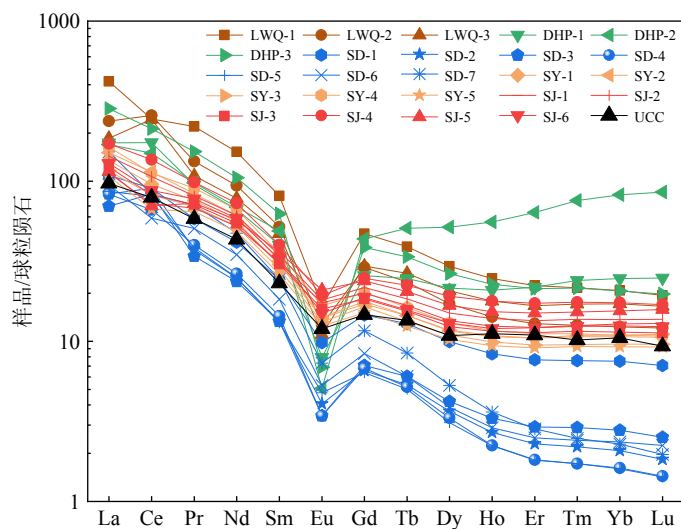


图 4 高黎贡山南段样品稀土配分模式

Fig.4 Rare earth element distribution patterns of the samples in the southern segment of the Gaoligong Mountain

西侧较东侧风化剖面 LREE/HREE 更大, 表明西侧分异程度更大, 前人关于 LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 的研究结果表明, LREE/HREE 越大越具有温暖湿润的气候条件^[21-23], $(La/Yb)_N$ 高值指示温湿的气候条件, 而低值表明较为干燥的气候条件^[21-22], 这与本研究中西侧和东侧 $(La/Yb)_N$ 结果及所处的

环境一致。SD 剖面 LREE 分布明显与其他样品分布不一致, 其 LREE/HREE 值明显高出其他样品 1 倍左右 (表层 SD-1 除外), 前述已讨论过山顶剖面淋滤作用较强, 稀土流失较为明显, 相比较而言, 重稀土流失更多。前人的实验表明^[24], 在酸性-弱酸性条件下重稀土和 Y 比轻稀土较少水解, 较易被吸

附,在风化作用过程中重稀土和 Y 更易被水从黏土矿物上淋滤向下迁移。Duddy^[25]曾指出,风化作用中酸性条件更容易带走重稀土。SD 剖面酸性很强(表 4),使得重稀土被带走,导致轻重稀土分异较大。此外,图 4 中 DHP 剖面 2 号样品重稀土超过所有其他样品,显得较为异常,目前暂无证据对其进行合理解释。

2.2.3 Eu、Ce 异常

通过球粒陨石标准化配分曲线及表 4 结果可以看出,所有剖面样品中 $\delta\text{Eu} = \text{Eu}/\text{Eu}^* < 1$, 表现为 Eu 负异常,但东西两侧异常强度不同,西侧负异常

更强,基本在 0.5 以下,东侧大都稳定在 0.6 以上,相对稳定,与上地壳一致。已有研究表明,斜长石是 Eu 的主要宿主矿物^[26],在成岩过程中, Eu^{2+} 类质同象置换斜长石中的 Ca^{2+} ,以 Eu^{2+} 形式存在于长石中,在碱性与氧化条件下, Eu^{2+} 氧化为 Eu^{3+} ,长石的优先风化将 Eu^{3+} 释放进入地下水中,从而在主岩中表现为 Eu 负异常^[27-28]。东西两侧 Eu 的负异常可能更多反映了来自母岩的特征,负异常程度差异可能与遭受的风化淋滤强度有关。西侧风化淋滤作用更强,含 Eu 高的斜长石类矿物风化殆尽,使得 Eu 被淋滤带走更多,因此表现出强负异常,另外,西侧矿物组成

表 4 高黎贡山南段样品 REE 特征参数
Table 4 REE characteristic parameters of the samples in the southern segment of the Gaoligong Mountain

样品	(La/Lu) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Lu) _N	δEu	δCe	ΣLREE/(μg/g)	ΣHREE/(μg/g)	ΣL/ΣH	pH
LWQ-1	21.64	5.18	2.43	0.27	0.81	463.22	35.62	13.00	3.81
LWQ-2	19.60	4.58	2.39	0.33	1.45	365.13	21.24	17.19	4.71
LWQ-3	11.18	3.94	1.78	0.30	1.72	324.59	25.03	12.97	3.73
DHP-1	6.97	4.35	1.04	0.25	1.36	254.66	27.60	9.23	3.73
DHP-2	1.99	3.47	0.51	0.11	1.16	236.80	70.10	3.38	4.04
DHP-3	14.41	4.54	1.95	0.14	1.02	354.61	31.83	11.14	4.08
SD-1	15.42	4.48	2.08	0.52	1.13	144.15	11.86	12.15	3.74
SD-2	45.42	6.27	3.58	0.44	1.63	121.22	4.37	27.72	3.86
SD-3	27.70	5.21	2.81	0.35	1.71	110.10	5.08	21.65	3.93
SD-4	57.66	5.77	4.73	0.35	1.16	103.22	4.06	25.42	3.96
SD-5	60.55	6.61	4.48	0.52	1.40	114.48	3.86	29.63	4.26
SD-6	42.27	5.16	3.75	0.43	0.85	107.73	5.08	21.21	5.26
SD-7	77.21	6.24	5.91	0.43	0.80	156.74	6.61	23.72	7.35
XC	30.92	5.06	2.88	0.34	1.25	219.74	19.41	17.57	4.34
SY-1	12.20	4.46	1.55	0.62	0.95	168.96	14.87	11.36	3.79
SY-2	14.21	4.75	1.67	0.60	1.02	193.14	14.91	12.95	4.78
SY-3	12.11	4.11	1.72	0.61	0.91	148.44	13.73	10.81	5.17
SY-4	15.13	4.61	1.87	0.62	0.92	200.54	16.36	12.26	7.16
SY-5	11.65	4.09	1.64	0.63	0.80	130.31	12.92	10.08	7.43
SJ-1	8.69	3.62	1.54	0.70	0.83	140.42	17.25	8.14	6.68
SJ-2	10.46	4.16	1.58	0.66	0.99	185.44	18.90	9.81	7.30
SJ-3	10.84	4.03	1.63	0.67	0.88	153.03	15.81	9.68	5.93
SJ-4	10.10	4.28	1.46	0.61	1.05	228.13	23.30	9.79	7.01
SJ-5	7.26	3.19	1.51	0.72	0.77	144.03	21.02	6.85	8.36
SJ-6	10.52	3.97	1.52	0.60	0.87	162.94	16.62	9.81	—
DC	11.20	4.12	1.61	0.64	0.91	168.67	16.88	10.14	6.36

注：陨石数据根据 Boynton(1984); $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_\text{N}/(\text{Sm}_\text{N} \times \text{Gd}_\text{N})^{1/2}$; $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_\text{N}/(\text{La}_\text{N} \times \text{Pr}_\text{N})^{1/2}$ 。

中白云母和钠长石的含量都相对较低,指示风化作用较强,可能也是 Eu 负异常的原因。东侧由于处于干热河谷区域,淋滤作用弱,δEu 更多继承了母岩特征。

Ce 在风化淋滤过程中的行为与其他稀土元素显著不同^[29],在风化剖面中变化显著,成为指示风化发育的特征元素。一般而言,在风化壳上部特别是植被发育的表层,有机质含量丰富、pH 值较低,含稀土的矿物易遭受分解而被淋滤出来,其中 Ce^{3+} 氧化成 Ce^{4+} ,易水解形成 CeO_2 沉淀,且 Ce^{4+} 也易被铁锰(氢)氧化物、黏土矿物吸附而富集,因而产生 Ce 正异常。随剖面向下随着碱基离子的迁移 pH 也逐渐升高,在含 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等配离子的溶液中, Ce^{4+} 易与之发生络合,生成稳定的可溶配合物,导致 Ce 又出现负异常。山体西侧 LWQ 呈现 δCe 向下逐渐升高且正异常较高,指示 Ce 向下富集,可能与降水量大风化作用强有关,在较强的淋滤作用下 Ce 在剖面下部被铁氧化物及黏土矿物吸附;DHP 则表现出有所下降的特点;在 SD 表现出升高后降低的趋势,这与 Ce 在风化剖面的变化特征吻合。DHP 剖面有一定的特殊性,其上有农业耕作,上部风化层可能遭受了破坏,因此只显示向下降低的特征。SD 剖面相对较为完整,显示先升高后又降低的特征。山体东侧干热河谷环境使得 Ce 的迁移活动弱,δCe 整体表现出弱负异常,值得注意的是 δCe 仍表现出波动性,是否与前述提及的有一定的降水量而蒸发作用又较强的干热河谷环境有关。

2.2.4 稀土元素分布与矿物组成的关系

母岩中原生矿物的稳定性及土壤的发育程度是控制剖面稀土元素富集程度及分布规律的主要因素^[27, 30-31]。母岩中含 REE 独立矿物的分布,对 REE 的活动与分异有重大影响^[32-33]。例如锆石、独居石及磷钇矿等以稀土单矿物相稳定存在,可能形成风化壳砂矿床,而易风化矿物如氟碳铈矿、硅铈钇矿等在风化过程中释放出稀土离子,进入溶液中参与地球化学循环^[34]。由于不同母岩类型中矿物组合不同,不同矿物抗风化能力也存在差异,导致矿物的差异性溶解,从而使得剖面中以离子吸附态存在的稀土元素含量变化^[35-37]。

为了研究稀土元素与矿物组成的关系,将样品稀土元素及其他特征参数与碳酸盐矿物(方解石和白云石)、长石、云母、黏土矿物等主要矿物进行了相关性分析(图 5)。结果显示,研究区 ΣREE 和 LREE 与白云石、方解石、蒙脱石、绿泥石-蒙脱石混层表现为正相关,与长石、云母、伊利石和高岭

石呈负相关,HREE 与方解石、白云石和钾长石表现为正相关,与其他矿物表现为负相关。δEu 与高岭石和钠长石呈正相关,与其他矿物呈负相关,δCe 与云母、蒙脱石、伊利石和绿泥石-蒙脱石混层表现为正相关。从上述矿物与稀土特征的相关系可以看出,LREE 主要与碳酸盐矿物和黏土矿物相关性强,而 HREE 则与碳酸盐矿物、长石联系密切。δEu、δCe 的变化主要与黏土矿物的含量相关。

2.2.5 pH 对稀土元素的影响

pH 值对于稀土元素的影响比较大,所有稀土元素都呈弱碱性,只有还原性的 Eu,即 Eu^{2+} 由于离子半径最大,离子电位低而具有强碱性。pH 值明显影响稀土元素的活动性,也影响着轻重稀土元素的分异。一般而言,低 pH 值条件有利于稀土元素迁移,高 pH 值稀土元素容易发生再沉淀^[38-39],酸性环境中稀土元素以可溶性水合物阳离子形式迁移^[40]。在风化壳剖面中,介质的 pH 值自上而下呈现逐渐升高的趋势,剖面上部酸性较强稀土元素优先发生淋滤,并积累在 pH 值较高的下层^[41-42]。稀土元素在风化壳中主要富集在全风化层下部和半风化层上部^[43-44]。前人对花岗岩风化剖面研究发现,风化作用越强烈,水淋溶强度越大,风化壳上下层之间的 pH 值差异就越大,pH 值较高的底部稀土元素发生沉淀,在向下迁移过程中不同稀土富集区相差越远,导致稀土的分异程度也越强^[36]。其实风化初期剖面上部轻稀土富集,随着风化作用进行,淋溶作用加强使得轻稀土元素缓慢下移,逐渐富集在全风化层下部,风化较为彻底时,部分重稀土元素还会随地下水发生流失。在研究区的风化壳剖面中(图 6),无论西侧还是东侧,整体上表现出随着 pH 值的升高 ΣLREE 、 ΣHREE 上升的特征,只是西侧变化的幅度更大,表明 pH 的升高对稀土元素含量增加有促进作用,与 pH 升高导致稀土沉淀的规律一致。但有意思的是,本研究中特别是西侧的 pH 值均较低(3.7~5.5),较低 pH 值对稀土元素无论是轻稀土还是重稀土产生沉淀都是不利的,但它们的含量都相对较高,特别是轻稀土,这可能与西侧基岩稀土的背景含量本身偏高有关;另外,西侧 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{REE}$ 的分异较大(表 4),达到了 17.6,东侧为 10.1,这跟 pH 的影响也是有关系的。东侧 pH 值变化较大,但整体稀土元素含量较低,一方面跟稀土的背景值有关,也与东侧较为干旱,淋溶作用弱稀土迁移少有关,表现为随着 pH 逐渐升高至中性和碱性,稀土含量升高不多。同时,东侧 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 分异也较东部低。

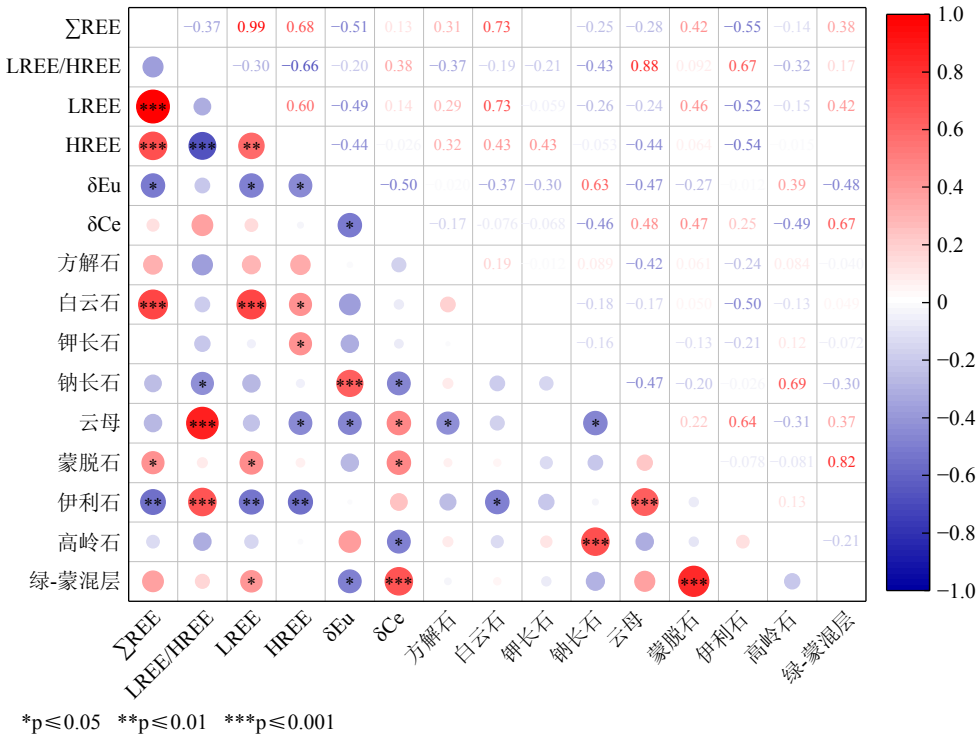


图 5 Σ REE 及其特征参数与矿物组成的相关性分析

Fig.5 The heatmap of Σ REE and its characteristic parameters, and correlation analysis on the mineral

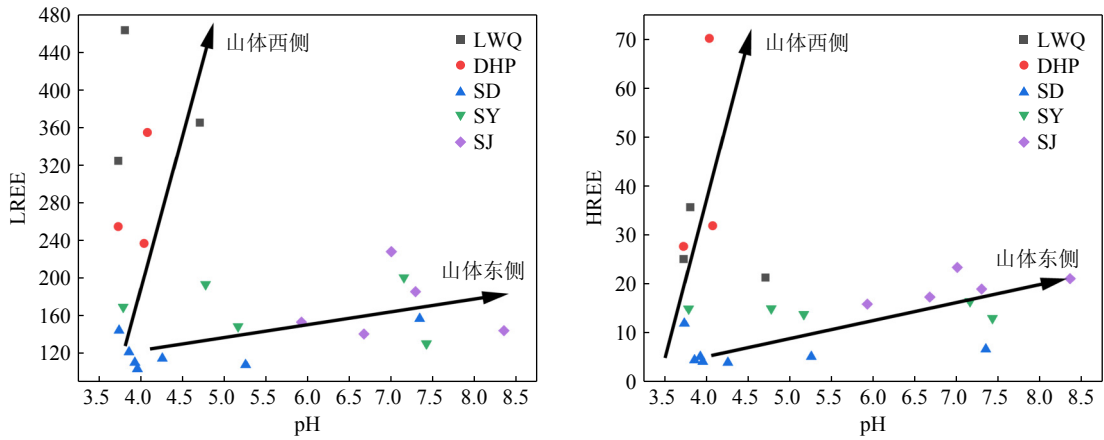


图 6 高黎贡山南段样品 pH 与 LREE、HREE 散点图

Fig.6 Scatter plots of samples pH with LREE and HREE in the southern segment of Gaoligong Mountain

2.3 稀土元素对成土母岩的指示

稀土元素由于其在风化、沉积、搬运过程中性质较稳定,常被用来指示土壤与沉积物来源的示踪剂^[45-46]。早期研究中常使用 La/Yb- Σ REE、 δ Eu- Σ REE 和 δ Eu-LREE/HREE 等图解来指示岩石与沉积物的来源^[46-47]。由于风化过程中常发生稀土元素的富集与亏损,土壤 REE、LREE/HREE 不能够完全反映土壤母岩特征。进一步研究发现,土壤 Ce/Eu—Eu/Sm 指数可能是指示土壤母质来源的有效方法^[48-51]。本研究中风化壳处于亚热带,具有不同母岩类型,

因此绘制了 Ce/Eu—Eu/Sm 图解(图 7)。从图中可以看出,高黎贡山南段西侧与东侧风化壳物质主要分布于两个互不重叠的区域,只是西侧数据较为分散, Ce/Eu 为 120~340, Eu/Sm 分布在 0.04~0.14; 山体东侧则较为集中, Ce/Eu 分布在 45~80, Eu/Sm 在 0.17~0.22。整体上,西侧样品落入基岩为花岗岩的区域,而东侧样品主要分布于沉积岩所在区域。这与东西两侧基岩性质基本一致,东侧两个剖面为泥砂质灰岩和泥质灰岩,西侧基岩基本为花岗岩, LWQ 剖面为砂砾岩,不过在野外可辩其源岩为花岗质, DHP 剖面发生了变质,但其底部均为混合花

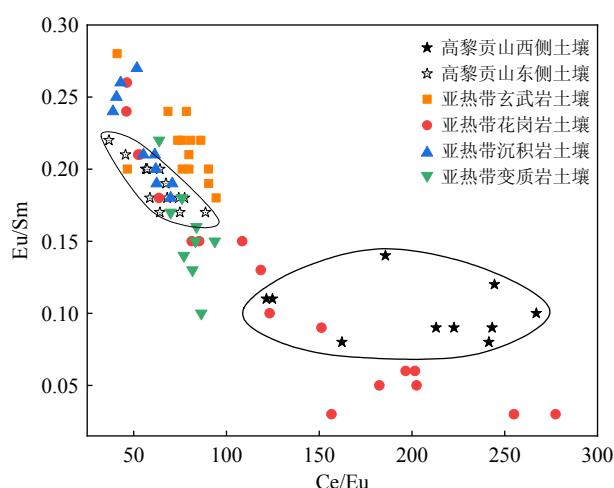


图 7 风化剖面样品与亚热带不同母岩发育土壤 Ce/Eu-Eu/Sm 关系图

亚热带玄武岩土壤来自课题组数据(未公开), 花岗岩土壤数据来自钱建民等^[52], 沉积岩土壤数据来自魏震洋等^[53], 变质岩土壤数据来自罗改等^[54]。

Fig.7 The relationship between Ce/Eu and Eu/Sm of the weathering profile samples and soil from different parent rocks in the subtropics

The data for subtropical basalt-derived soils were obtained from the research group's dataset (unpublished), while the granite-derived soil data were sourced from Qian et al^[52], sedimentary rock-derived soil data from Wei et al^[53], and metamorphic rock-derived soil data from Luo et al^[54].

岗岩。细致对比两侧样品的 Ce/Eu 和 Eu/Sm, Eu 对其比值的影响明显, 由于花岗岩中 δEu 普遍偏低, 导致 Eu/Sm 比较低, Ce/Eu 比较高, 而沉积岩中 δEu 相对较高, 因此 Eu/Sm 较高, Ce/Eu 较低, 导致花岗质基岩与沉积岩分布在两个完全不同的区域。需要指出, 花岗质岩石和沉积类岩石分布的范围其实比较广, 运用 Eu/Sm 和 Ce/Eu 比指示基岩性质还有赖于更多的数据证实。

3 结论

(1) 高黎贡山西侧风化剖面中的主要矿物为石英、云母、长石、方解石、白云石和黏土矿物, 黏土矿物组合为蒙脱石+绿泥石-蒙脱石混层+伊利石+高岭石。东侧的主要矿物有石英、长石、方解石、白云石和黏土矿物, 黏土矿物组合为伊利石+高岭石。

(2) 东西两侧风化剖面中 REE 含量西侧高于东侧, 西侧分异程度也更大, REE 随海拔降低而增加; 东侧 REE 相对较低, 总体稳定。东西两侧 REE 具有一致的配分模式, 整体向右倾斜, Eu 呈“V”型分

布, 西侧负异常更为显著, 且 Ce 在西侧为正异常, 而在东侧表现为弱负异常, 与淋溶强度有关。

(3) 矿物组成与稀土元素相关性分析表明, LREE 主要与碳酸盐矿物和黏土矿物相关性强, 而 HREE 则与碳酸盐矿物、长石联系密切, δEu 、 δCe 的变化与黏土矿物的含量有关。

(4) 风化壳中 Ce/Eu 和 Eu/Sm 比母岩有较好的指示作用, 西侧母岩与花岗质岩石有关, 东侧与沉积岩相关。

参考文献 (References)

- [1] 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 等. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪 [J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 792-798. [DING Zhenju, YAO Shuzhen, LIU Congqiang, et al. The characteristics of exhalation-sedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: evidence from ore's REE composition[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 792-798.]
- [2] Borrego J, Carro B, López-González N, et al. Effect of acid mine drainage on dissolved rare earth elements geochemistry along a fluvial estuarine system: the Tinto-Odiel Estuary (S. W. Spain)[J]. *Hydrology Research*, 2012, 43(3): 262-274.
- [3] Tachikawa K, Piotrowski A M, Bayon G. Neodymium associated with foraminiferal carbonate as a recorder of seawater isotopic signatures[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 88: 1-13.
- [4] 池汝安, 田君, 罗仙平, 等. 风化壳淋积型稀土矿的基础研究 [J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(4): 1-13. [CHI Ru'an, TIAN Jun, LUO Xianping, et al. The basic research on the weathered crust elution-deposited rare earth ores[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2012, 3(4): 1-13.]
- [5] 王登红, 赵芝, 于扬, 等. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向 [J]. 岩矿测试, 2013, 32(5): 796-802. [WANG Denghong, ZHAO Zhi, YU Yang, et al. Progress, problems and research orientation of Ion-adsorption type rare earth resources[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2013, 32(5): 796-802.]
- [6] 许成, 宋文磊, 何晨, 等. 外生稀土矿床的分布、类型和成因概述 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(2): 234-241. [XU Cheng, SONG Wenlei, HE Chen, et al. The overview of the distribution, type and genesis of the exogenetic rare earth elements(REE)deposits[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(2): 234-241.]
- [7] 赵芝, 王登红, 陈郑辉, 等. 南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展 [J]. 地质学报, 2017, 91(12): 2814-2827. [ZHAO Zhi, WANG Denghong, CHEN Zhenghui, et al. Progress of research on metallogenic regularity of Ion-adsorption type REE deposit in the Nanling range[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(12): 2814-2827.]
- [8] 池汝安, 刘雪梅. 风化壳淋积型稀土矿开发的现状及展望 [J]. 中国稀土学报, 2019, 37(2): 129-140. [CHI Ru'an, LIU Xuemei. Prospect and development of weathered crust elution-deposited rare earth ore[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2019, 37(2): 129-140.]

- [9] 陆蕾, 王登红, 王成辉, 等. 云南临沧花岗岩中离子吸附型稀土矿床的成矿规律 [J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1466-1478. [LU Lei, WANG Denghong, WANG Chenghui, et al. Mineralization regularity of ion-adsorption type REE deposits on Lincang granite in Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1466-1478.]
- [10] 陆蕾, 王登红, 王成辉, 等. 云南离子吸附型稀土矿成矿规律 [J]. *地质学报*, 2020, 94(1): 179-191. [LU Lei, WANG Denghong, WANG Chenghui, et al. The metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(1): 179-191.]
- [11] 黄健. 广东仁居风化壳离子吸附型稀土矿床中稀土元素的富集分异机制研究 [D]. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文, 2021. [HUANG Jian. REE enrichment and fractionation mechanism of the Renju ion adsorption type REE deposit in Guangdong Province[D]. Doctor Dissertation of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2021.]
- [12] 梁晓亮, 谭伟, 马灵涯, 等. 离子吸附型稀土矿床形成的矿物表/界面反应机制 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(1): 29-41. [LIANG Xiaoliang, TAN Wei, MA Lingya, et al. Mineral surface reaction constraints on the formation of ion-adsorption rare earth element deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(1): 29-41.]
- [13] 崔丽峰, 刘从强, 赵志琦, 等. 青藏高原东南缘花岗岩风化壳稀土元素地球化学特征 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(S1): 515. [CUI Lifeng, LIU Congqiang, ZHAO Zhiqi, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in granite weathering crusts from the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2017, 36(S1): 515.]
- [14] 王佳龙. 青藏高原东南缘高黎贡山新生代剥露演化 [D]. 中国地震局地质研究所博士学位论文, 2022. [WANG Jialong. Exhumation processes and evolution of the Gaoligong Mountains at the Southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau since the cenozoic[D]. Doctor Dissertation of Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2022.]
- [15] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901-2100[J]. *Sustainability*, 2020, 12(2): 477.
- [16] 王泽丽. 金沙江河谷黄土状物质的成因及其环境指示意义研究 [D]. 云南师范大学硕士学位论文, 2016. [WANG Zeli. Study on the genesis of loess-like materials in the Jinsha River valley and their environmental indicative significance[D]. Master Dissertation of Yunnan Normal University, 2016.]
- [17] 叶玉林, 苏怀, 董铭, 等. 元素和矿物组成揭示的金沙江干热河谷黄土状物质的物源 [J]. *地球环境学报*, 2018, 9(3): 238-244. [YE Yulin, SU Huai, DONG Ming, et al. Elements and mineral composition indicating the provenance of loess-like sediments in Dry-Hot Valleys of Jinsha River[J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(3): 238-244.]
- [18] Cook H E, Johnson P D, Matti J C, et al. Methods of sample preparation and X-ray diffraction data analysis, X-Ray mineralogy laboratory, deep sea drilling project, university of California, riverside[J]. 1975.
- [19] Yuan Y Y, Liu S L, Wu M, et al. Effects of topography and soil properties on the distribution and fractionation of REEs in topsoil: A case study in Sichuan Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148404.
- [20] Boynton W V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63-114.
- [21] 陈骏, 王洪涛, 鹿化煜. 陕西洛川黄土沉积物中稀土元素及其它微量元素化学淋滤研究 [J]. *地质学报*, 1996, 70(1): 61-72. [CHEN Jun, WANG Hongtao, LU Huayu. Behaviours of ree and other trace elements during pedological weathering-evidence from chemical leaching of loess and paleosol from the Luochuan section in central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(1): 61-72.]
- [22] 陈亮, 刘春莲, 庄畅, 等. 三水盆地古近系下部湖相沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义 [J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1155-1162. [CHEN Liang, LIU Chunlian, ZHUANG Chang, et al. Rare earth element records of the lower paleogene sediments in the Sanshui basin and their paleocliate implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(6): 1155-1162.]
- [23] 张虎才, 张文翔, 常凤琴, 等. 稀土元素在湖相沉积中的地球化学分异: 以柴达木盆地贝壳堤剖面为例 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(8): 1160-1168. [ZHANG Hucai, ZHANG Wenxiang, CHANG Fengqin, et al. Geochemical fractionation of rare earth elements in lacustrine deposits from Qaidam basin[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(11): 1703-1713.]
- [24] 王中刚, 于学元. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989. [WANG Zhonggang, YU Xueyuan. Rare Earth Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989.]
- [25] Duddy L R. Redistribution and fractionation of rare-earth and other elements in a weathering profile[J]. *Chemical Geology*, 1980, 30(4): 363-381.
- [26] 杨骏雄, 刘从强, 赵志琦, 等. 不同气候带花岗岩风化过程中稀土元素的地球化学行为 [J]. *矿物学报*, 2016, 36(1): 125-137. [YANG Junxiong, LIU Congqiang, ZHAO Zhiqi, et al. Geochemical behavior of rare-earth element during the weathering of granite under different climatic conditions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2016, 36(1): 125-137.]
- [27] Condie K C, Dengate J, Cullers R L. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(2): 279-294.
- [28] Dawood Y H, El-Naby H H A, Sharafeldin A A. Influence of the alteration processes on the origin of uranium and europium anomalies in trachyte, central Eastern Desert, Egypt[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 81(1-3): 15-27.
- [29] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论 [M]. 北京: 地质出版社, 1987. [LIU Yingjun, CAO Liming. Introduction to Elemental Geochemistry[M]. Beijing: Geological Press, 1987.]
- [30] Nesbitt H W, Wilson R E. Recent chemical weathering of basalts[J]. *American Journal of Science*, 1992, 292(10): 740-777.
- [31] Censi P, Sprovieri M, Saiano F, et al. The behaviour of REEs in Thailand's Mae Klong estuary: Suggestions from the Y/Ho ratios and lanthanide tetrad effects[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(3-4): 569-579.
- [32] Topp S E, Salbu B, Roaldset E, et al. Vertical distribution of trace elements in laterite soil (Suriname)[J]. *Chemical Geology*, 1984, 47(1-

- 2): 159-174.
- [33] Banfield J F, Eggleton R A. Apatite replacement and rare earth mobilization, fractionation, and fixation during weathering[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1989, 37(2): 113-127.
- [34] 包志伟. 华南花岗岩风化壳稀土元素地球化学研究 [J]. *地球化学*, 1992, 21(2): 166-174. [BAO Zhiwei. A geochemical study of the granitoid weathering crust in Southeast China[J]. *Geochimica*, 1992, 21(2): 166-174.]
- [35] 雒恺, 马金龙. 花岗岩风化过程中稀土元素迁移富集机制研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2022, 37(7): 692-708. [LUO Kai, MA Jinlong. Recent advances in migration and enrichment of rare earth elements during chemical weathering of granite[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(7): 692-708.]
- [36] 马英军, 霍润科, 徐志方, 等. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 87-94. [MA Yingjun, HUO Runke, XU Zhifang, et al. REE behavior and influence factors during chemical weathering[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(1): 87-94.]
- [37] Mihajlovic J, Stärk H J, Rinklebe J. Geochemical fractions of rare earth elements in two floodplain soil profiles at the Wupper River, Germany[J]. *Geoderma*, 2014, 228-229: 160-172.
- [38] Bray A W, Oelkers E H, Bonneville S, et al. The effect of pH, grain size, and organic ligands on biotite weathering rates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 164: 127-145.
- [39] 何耀, 程柳, 李毅, 等. 离子吸附型稀土矿的成矿机理及找矿标志 [J]. *稀土*, 2015, 36(4): 98-103. [HE Yao, CHENG Liu, LI Yi, et al. The mineralization mechanism of the ion adsorption type rare earths ore and prospecting marks[J]. *Chinese Rare Earths*, 2015, 36(4): 98-103.]
- [40] 池汝安, 田君. 风化壳淋积型稀土矿评述 [J]. *中国稀土学报*, 2007, 25(6): 641-650. [CHI Ru'an, TIAN Jun. Review of weathered crust rare earth ore[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2007, 25(6): 641-650.]
- [41] Sanematsu K, Watanabe Y. Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits[M]//Verplanck P L, Hitzman M W. Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. Society of Economic Geologists, 2016.
- [42] 赵芝, 王登红, 刘新星, 等. 广西花山岩体不同风化阶段稀土元素特征及其影响因素 [J]. *稀土*, 2015, 36(3): 14-20. [ZHAO Zhi, WANG Denghong, LIU Xinxing, et al. Geochemical features of rare earth elements in different weathering stage of the Guangxi Huashan granite and its influence factors[J]. *Chinese Rare Earths*, 2015, 36(3): 14-20.]
- [43] Li M Y H, Zhou M F, Williams-Jones A E. The genesis of regolith-hosted heavy rare earth element deposits: insights from the world-class Zudong deposit in Jiangxi province, South China[J]. *Economic Geology*, 2019, 114(3): 541-568.
- [44] Fu W, Li X T, Feng Y Y, et al. Chemical weathering of S-type granite and formation of Rare Earth Element (REE)-rich regolith in South China: Critical control of lithology[J]. *Chemical Geology*, 2019, 520: 33-51.
- [45] Wen X Y, Huang C M, Tang Y, et al. Rare earth elements: a potential proxy for identifying the lacustrine sediment source and soil erosion intensity in karst areas[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(10): 1693-1702.
- [46] Xie Y Y, Meng J, Guo L E. REE geochemistry of modern Eolian dust deposits in Harbin city, Heilongjiang province, China: implications for provenance[J]. *Catena*, 2014, 123: 70-78.
- [47] 周国兴, 赵恩好, 岳明新, 等. 稀土元素地球化学分析在地质学中的意义 [J]. *地质与资源*, 2014, 23(5): 495-499. [ZHOU Guoxing, ZHAO Enhao, YUE Mingxin, et al. Geological significance of rare earth elements in geochemical analysis[J]. *Geology and Resources*, 2014, 23(5): 495-499.]
- [48] Egashira K, Iwashita S, Yamasaki S I. Clay mineral status of paddy soils from the Tai Lake Region of China in relation to high paddy-rice productivity[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 43(3): 521-530.
- [49] Egashira K, Fujii K, Yamasaki S, et al. Rare earth element and clay minerals of paddy soils from the central region of the Mekong River, Laos[J]. *Geoderma*, 1997, 78(3-4): 237-249.
- [50] 杨恬, 朱照宇, 吴翼, 等. 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. [YANG Tian, ZHU Zhaoyu, WU Yi, et al. Rare earth elements geochemistry in topsoils from the eastern part of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(3): 233-241.]
- [51] 陶安, 宋照亮, 李建武. 玄武岩发育土壤稀土元素地球化学特征及其指示意义 [J]. *地球与环境*, 2023, 51(4): 388-400. [TAO An, SONG Zhaoliang, LI Jianwu. Geochemical characteristics and indicative significance of soil rare earth elements developed from basalt[J]. *Earth and Environment*, 2023, 51(4): 388-400.]
- [52] 钱建民, 华杰雄. 浙江省燕山期花岗岩化学元素丰度及特征 [J]. *矿产勘查*, 2022, 13(11): 1581-1602. [QIAN Jianmin, HUA Jiexiong. Abundances of elements of Yanshanian granitoids in Zhejiang province and their characteristics[J]. *Mineral Exploration*, 2022, 13(11): 1581-1602.]
- [53] 魏震洋, 于津海, 王丽娟, 等. 南岭地区新元古代变质沉积岩的地球化学特征及构造意义 [J]. *地球化学*, 2009, 38(1): 1-19. [WEI Zhenyang, YU Jinhai, WANG Lijuan, et al. Geochemical features and tectonic significances of Neoproterozoic metasedimentary rocks from Nanling range[J]. *Geochimica*, 2009, 38(1): 1-19.]
- [54] 罗改, 张彤, 贾小川, 等. 滇西北石鼓杂岩中花岗质片麻岩年代学、地球化学特征及地质意义 [J]. *地质学报*, 2021, 95(11): 3335-3351. [LUO Gai, ZHANG Tong, JIA Xiaochuan, et al. Geochronology, geochemical features and geological significance of the granitic gneiss in the Shigu complex, northwest Yunnan, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(11): 3335-3351.]