

文章编号: 1008-2786-(2016)6-690-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000175

# 44ka 以来福州盆地红土的沉积地球化学特征

靳建辉<sup>1 2 3</sup> 李志忠<sup>1 2 3</sup>

(1. 福建师范大学 地理研究所 福州 350007; 2. 福建师范大学 地理科学学院 福州 350007;

3. 湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室 福州 350007)

**摘 要:** 基于福州盆地 MB 红土剖面所揭示的地层岩性和光释光样品的年龄结果,以及对剖面地化元素的系统分析结果,对剖面所揭示的地层化学风化特征及其区域气候变化特征进行探讨。结果显示:1. 福州盆地的坡积红土沉积始于晚更新世中期,止于全新世晚期;2. 马保剖面整体的化学风化特征变异主要受自然因素所控制,红土表层受化学风化和流水搬运共同作用的影响。末次寒冷期以来福州盆地古地理环境经历了明显的阶段性变化,且与深海氧同位素阶段有较好对应关系;3. 氧同位素 1(MIS1)阶段在福州盆地红土中的记录难以进行高分辨率提取,期间可能存在沉积间断,间断时间约为 2.3ka。

**关键词:** 福州盆地; 红土; 地球化学; 古气候; 第四纪

**中图分类号:** P92

**文献标志码:** A

中国南方第四纪红土沉积是揭示区域古环境变迁的良好信息载体<sup>[1-4]</sup>,主要分布在江西、湖南、湖北南部、安徽南部以及浙江、福建、广东和广西等地的丘陵山间盆地。1990 年代以来,我国南方红土的全球变化研究积累了丰富成果。多数学者认为,我国南方红土是对当时气候环境某种程度和规模的响应,记录了晚第四纪以来的气候环境变迁信息<sup>[4-7]</sup>。譬如,黄镇国等<sup>[4]</sup>对南方红土风化壳的地层划分,朱照宇等<sup>[5]</sup>对雷琼地区热带红土的期次划分,均反映了气候的冷暖或干湿交替,为研究古气候变迁提供了依据。同时,研究人员针对南方红土风化壳的形成机理<sup>[6]</sup>、风化过程<sup>[7]</sup>也做了深入研究。近年来,南方红土研究有了进一步发展<sup>[8-13]</sup>。研究人员通过多学科方法手段对南方红土的磁学特性<sup>[8-10]</sup>、年代地层学<sup>[11]</sup>和地球化学特征<sup>[12,13]</sup>等问题进行了深入探讨,促进了红土研究的发展。尽管如此,红土研究中仍存在许多科学问题亟待解决。譬如,红土

年代学的分辨率和适用尺度问题,以及如何从红土中提取高分辨率气候环境演变信息?这些科学问题的解决均需采用沉积学、年代学和元素地球化学等多学科理论进行系统研究,才有可能在上述研究中取得突破,进而推动第四纪红土研究进展。近 20 年来,除了雷琼地区和岭南地区有少量研究成果外,多数成果主要出于长江流域的网纹红土研究。福州盆地作为湿润亚热带典型东亚季风区,红土沉积具有广泛代表性,本文就福州山间盆地坡积红土的沉积地球化学和矿物学特征作初步探讨,拟揭示沉积地球化学变化与环境演变之间的关系,为我国南方亚热带红土研究补充新的证据。

## 1 研究区概况

福州盆地位于中国东南沿海,闽江下游入海口附近,在大地构造上处于华南褶皱系东部,闽东火山

收稿日期(Received date): 2015-10-29; 修回日期(Accepted): 2016-01-06。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41301012, 41271031); 福建省自然科学基金(2013J01153) [Natural Science Foundation of China (41301012, 41271031); Natural Science Foundation of Fujian Province, China(2013J01153)]

作者简介(Biography): 靳建辉(1981-),男,山西陵川人,讲师,博士,主要从事地貌与第四纪环境演变研究 [Jin Jianhui (1981-), male, born in Lingchuan, Shanxi, Lecturer, Ph. D, mainly engaged in research of geomorphology and quaternary environmental evolution] E-mail: geojjh@fjnu.edu.cn

断拗带的福鼎-云霄断拗带内,是发育于第四纪中晚期的断陷盆地<sup>[1]</sup>。盆地基底和山区主要由燕山晚期花岗岩和侏罗系火山岩组成,盆地内部沉积了晚更新世-全新世海相、海陆过渡相和陆相沉积地层。该地属于中亚热带季风气候,年平均降水量为1 342.5 mm,年均气温16~20℃。最热月7—8月,平均气温为24~29℃,年平均降水量1 342.5 mm;冬季主导风向为东北风,夏季偏南风为主;植被以亚热带常绿阔叶林为主,地带性土壤以红壤为主。

## 2 材料与方法

晚第四纪以来,伴随着区域性地壳运动和海平面变化,福州盆地与闽东南诸多山间盆地一起发育了第四纪海相、海陆交互相和陆相沉积。其中福州盆地中东部受区域海平面和构造运动影响,沉积相复杂多变,且受盆地内过境河流侵蚀,沉积记录不完整,不能很好反映晚更新世以来福州盆地的古环境变迁。盆地西部地势相对平坦,晚更新世以来不断接受周边山地坡积洪积物质,并在地势较低的平坦地面沉积下来。整体来看,晚更新世以来该区域在千年尺度上没有明显沉积间断,因此选择福州盆地西部的马保剖面作为研究载体。

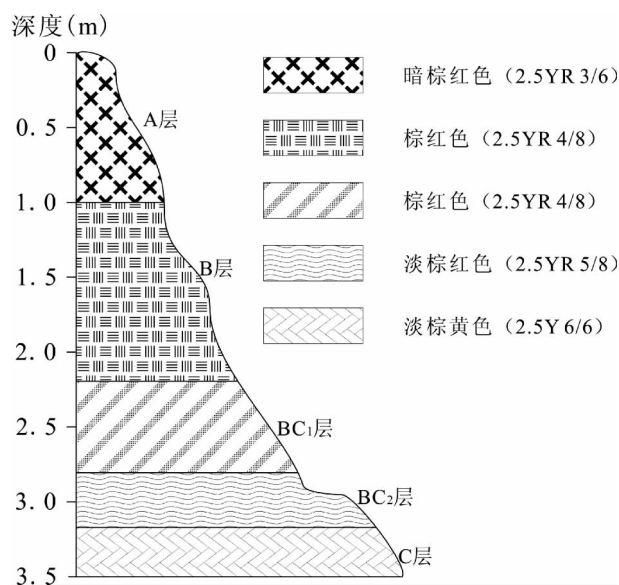
### 2.1 剖面岩性特征

马保剖面位于福州盆地西部,地理位置为26°00′42.6″N,119°12′25.6″E。基底为燕山期钾长花岗岩风化壳。剖面厚度3.5 m,未见底。剖面顶部生长麻竹(*Dendrocalamus latiflorus* Munro),箭竹(*Fargesia spathacea*),白玉兰(*Magnolia denudata*)等植被。剖面从上到下分为5层(图1)。

### 2.2 地球化学元素分析

在野外自下而上,按照10 cm间隔等间距采样36块。实验仪器采用日本理学株式会社生产的3070E-X荧光光谱仪。首先将野外采集的36个样品凉干、使用行星式球磨机碾磨,使其粒径<75 μm,然后称取<75 μm的粉末样4.0 g,用低压聚乙烯镶边垫底,在30 t压力下压制成试样直径为30 mm圆片。在X射线管电压为50 kV、电流为50 mA、粗狭缝、真空光路的工作条件下,用已建立好的各元素测量条件对样品进行测试,通过计算机处理后得到被测样品的分析结果,实验误差<5%,分析结果见图2。

### 2.3 光释光(Optical Stimulated Luminescence)年代测



A层:0~1 m 较紧实,暗棕红色(2.5YR 3/6)

B均质层:1~2.2 m 紧实,棕红色(2.5YR 4/8)

BC<sub>1</sub>层:2.2~2.8 m 棕红色(2.5YR 4/8)。夹杂少量黄棕色杂色不均匀,斑块块状结构,少量孔隙较紧实。

BC<sub>2</sub>层:2.8~3.2 m,淡棕红色(2.5YR 5/8)。夹杂棕黄色,疏松,夹杂少量棱块状,直径2~10 mm的硅铝结核以及红褐色铁锰结核,含植物残根及少量腐烂灰黑色植物根系,多孔隙

C层:3.2~3.5 m,淡棕黄色(2.5Y 6/6)。疏松多孔,夹黄色、淡黄,混杂多量腐烂的灰黑色植物根系。

图1 福州盆地马保剖面柱状岩性图

Fig. 1 Lithology of Maobao (MB) profile in Fuzhou basin

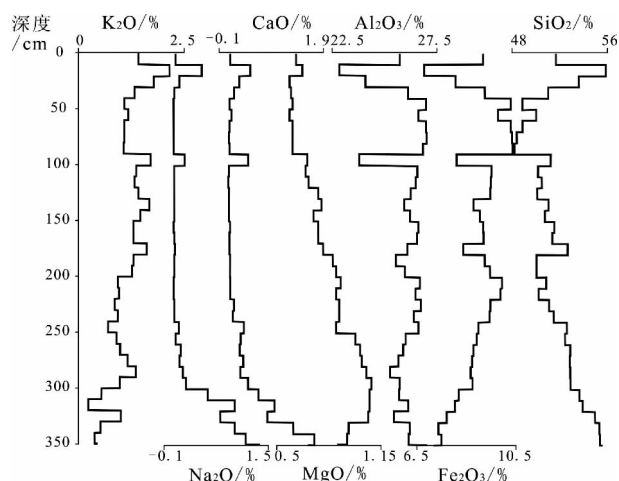


图2 MB剖面氧化物地球化学特征

Fig. 2 Geochemistry characteristics of MB profile

采集MB剖面光释光(OSL)测年样品3个,采样深度自表层向下分别为1.5 m、2.4 m、3.5 m。光释光测年在中国地质科学院水文地质研究所释光实验室完成。测试样品在实验室红光条件下打开,先

取 20 g 左右用于测定含水量及作 U、Th、K 含量分析。再取中心样品过 180 目筛。将筛下部分加入烧杯中,用浓度为 40% 的  $H_2O_2$  和 30% 的盐酸去除有机质和碳酸盐类,然后加 30% 的氟硅酸腐蚀 3 d。用蒸馏水清洗至中性。将中性悬浊液倒入烧杯,根据静水沉降原理分离出 4 ~ 11  $\mu m$  的颗粒。将分离好的细颗粒组分充分摇匀后,注入事先准备好的放了不锈钢片的漏斗中,等颗粒完全沉淀在不锈钢片上后,再将水慢慢滴尽,放入烘箱中低温烘干(40℃),取出不锈钢片即是细颗粒测片,每个测片上的样品重约 1 mg。样品在 Daybreak 2 200 光释光仪上测定,该系统蓝光光源波长为 470 nm,半宽 5 nm,最大功率为 60 mW/cm<sup>2</sup>;红外光源波长为 880 nm,半宽 10 nm,最大功率为 80 mW/cm<sup>2</sup>,我们选择最大功率进行测量,预热温度为 260℃,10 s,试验剂量预热温度 220℃,10 s。需要辐照的测片都是在 801E 辐照仪中进行的,其  $^{90}Sr - Y\beta$  放射源的照射剂量率约为 0.103871 Gy/Sec。细颗粒采用简单多片再生法测量样品的等效剂量,粗颗粒样品采用单片再生法测量等效剂量。样品的铀、钍和钾含量是用中子活化法测得的。

3 结果分析

3.1 光释光年龄

从获取的测试数据(表 1)来看,U、Th 含量在深度上的变化与剖面风化程度有较大关系。剖面整体来讲,U、Th 含量从上至下逐渐减少。具体表现为组成剖面物质的粒度特征、色度以及矿物组成等特征。一般来讲,风化程度越高,剖面中黏土含量越高、氧化作用越强,颜色越红, $SiO_2$  含量越低, $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  和 FeO 含量越高。通常情况下,老红砂自地表向下的风化程度逐渐变弱,U、Th 含量随地表向下逐渐变少。这可以用 U、Th 在沉积物风化过程中的地球化学迁移行为来解释。但变化幅度较小,这可能指示样品中的含 U 矿物主要来自于花岗岩风化

残积物中的抗风化矿物。另外物源的差异也是造成 U、Th 含量变化的重要原因。

等效剂量测定采用粗颗粒(90 ~ 180  $\mu m$ ) 单片再生法(SAR)。计算等效剂量时,选取前 0.8 s(前 5 个通道积分值)减去背景值(最后 25 个通道积分值)的释光信号值,进行线性或指数拟合建立光释光信号的剂量响应曲线即光释光生长曲线,确定样品的等效剂量(DE)值。样品的光释光信号较强,且光释光信号在前 2 秒基本衰减到背景值,呈快速衰减特征,为典型的石英信号特征,说明长石在前处理过程中已经刻蚀干净,测试矿物为纯石英。

因此,所测年龄基本接近红土实际年龄。

3.2 主元素含量特征

主元素氧化物中, $CaO$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$ 、 $MgO$  等易迁移氧化物在风化过程中最先淋溶,含量的低值可以反映较为湿热的气候环境背景; $SiO_2$  属于可迁移氧化物,仅在强烈风化作用后期开始淋溶,低含量的  $SiO_2$  可以指示湿热的气候环境; $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  属于惰性氧化物,基本不发生淋溶现象,含量值越高则指示的气候环境越湿热。

由图 2 及表 2 可知, $TiO_2$  含量普遍 < 6 g/kg,剖面  $TiO_2$  含量波动幅度显示沉积红土的物源稳定,主要为邻近区域坡积物。氧化物化学成分在 MB 剖面中的峰谷变化明显,表现出一定的变化规律。该阶段沉积物对应深海氧同位素 4 - 2 阶段。化学组成均以  $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$  和  $Al_2O_3$  为主,三者合计为 83.31% ~ 89.62%。 $SiO_2$  含量变化介于 48.24% ~ 55.87%,均值为 51.83%; $Al_2O_3$  含量变化范围为 23.09% ~ 26.85%,均值为 25.94%; $Fe_2O_3$  含量介于 6.81% ~ 10.35%,均值为 8.94%;远高于上陆壳平均值(5%)<sup>[2]</sup>,同时高于中亚热带江西、浙江、湖南等地红土含量均值<sup>[4]</sup>,是福州盆地强红土化作用的重要标志。另外,剖面中  $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $CaO$  和  $MgO$  等组分含量整体较低,但相比北亚热带地区的红土,含量有所不同。 $K_2O$  平均含量超过了 1.14%,部分阶段超过 2%; $Na_2O$ 、 $CaO$  和  $MgO$  含量均 < 1%,均

表 1 福州盆地马保剖面光释光年代  
Tab. 1 OSL ages of MB profile in Fuzhou basin

编号	埋深/m	U/( $\mu g/g$ )	Th/( $\mu g/g$ )	K/(%)	等效剂量 DE/(Gy)	年剂量/(Gy/Ka)	含水量/(%)	年龄/(ka)
MB-1	1.5	10.5	49.4	1.21	192.71 $\pm$ 7.07	9.02	18.67	21.4 $\pm$ 1.2
MB-2	2.4	8.72	42.1	1.80	200.59 $\pm$ 8.87	8.71	10.67	23.0 $\pm$ 1.4
MB-3	3.5	7.35	35.6	1.59	335.80 $\pm$ 14.43	7.61	6.00	44.1 $\pm$ 2.6

表 2 福州盆地马保剖面主元素百分含量

Tab. 2 Major element percentage content of MB profile in Fuzhou basion

深度 /cm	Na <sub>2</sub> O /%	MgO /%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	SiO <sub>2</sub> /%	K <sub>2</sub> O /%	CaO /%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	TiO <sub>2</sub> /g/kg
0	0.08	0.62	25.66	51.7	1.42	0.11	9.17	4.852
10	0.48	0.66	23.09	55.87	2.15	0.5	6.81	4.774
20	0.14	0.58	24.19	53.62	1.78	0.29	8.07	5.140
30	0.06	0.59	26.01	51.06	1.33	0.19	9.24	5.080
40	0.05	0.6	26.78	48.91	1.09	0.1	10.29	4.556
50	0.05	0.58	26.45	50.06	1.18	0.14	9.78	4.803
60	0.05	0.6	26.78	48.91	1.09	0.1	10.29	4.556
70	0.05	0.6	26.8	48.43	1.09	0.09	10.34	4.505
80	0.05	0.6	26.65	48.24	1.07	0.1	10.35	4.497
90	0.22	0.69	23.93	51.27	1.71	0.46	8.11	4.482
100	0.06	0.68	26.41	50.21	1.37	0.09	9.51	4.409
110	0.06	0.7	26.34	50.53	1.33	0.08	9.48	4.688
120	0.06	0.76	26.13	50.15	1.42	0.09	9.47	4.582
130	0.06	0.78	25.86	51.07	1.68	0.09	8.79	4.527
140	0.06	0.73	26.1	50.78	1.47	0.09	9.04	4.482
150	0.05	0.76	26.46	51.55	1.31	0.11	9.18	4.837
160	0.06	0.76	26.4	51.4	1.31	0.1	9.19	4.851
170	0.07	0.79	25.99	52.68	1.62	0.1	8.37	4.715
180	0.06	0.85	25.5	50.09	1.31	0.11	9.24	4.697
190	0.06	0.87	25.89	50.1	1.28	0.11	9.45	4.817
200	0.05	0.9	26.53	50.89	0.94	0.12	9.93	5.159
210	0.05	0.87	26.34	50.26	0.97	0.12	9.87	5.064
220	0.06	0.89	26.57	51.13	0.87	0.19	9.47	5.270
230	0.06	0.89	26.27	51.51	0.94	0.17	9.44	5.359
240	0.13	0.87	26.47	52.61	0.71	0.38	8.98	5.634
250	0.08	0.99	25.93	52.45	0.91	0.32	8.92	5.409
260	0.16	1.02	25.82	52.89	1	0.3	8.78	5.723
270	0.14	1.03	25.61	52.86	1.18	0.37	8.73	5.343
280	0.19	1.06	25.26	52.88	1.37	0.31	8.67	5.431
290	0.24	1.09	25.67	52.92	0.99	0.46	8.75	5.474
300	0.57	1.08	25.65	53.65	0.56	0.66	8.19	5.764
310	0.98	1.08	26.04	53.93	0.25	0.97	8.04	5.893
320	0.76	1.07	25.43	54.97	1.02	0.83	7.71	5.551
330	0.98	0.95	26.1	55.32	0.54	1.33	7.38	5.504
340	1.15	0.94	26.05	55.38	0.4	1.73	7.5	5.216
350	1.36	0.88	26.85	55.58	0.47	1.61	7.19	5.763

值分别为 0.24%、0.36% 和 0.82% ,明显低于上陆壳( UCC) 3.9%、4.2% 和 2.2% 的标准含量。植物生长茂盛使得较多的 K 元素被粘土吸附 ,保存在风化成土过程中。同时湿热气候环境有利于 Si、Al、Fe 等稳定元素大量富集。这种富铝铁化现象和强淋融作用显示福州盆地 44ka 以来温暖湿润的化学风化

环境。

3.3 元素比值和矿物特征

氧化物分子比值常用来反映风化强度。全岩的化学蚀变指数( CIA) 主要代表自然作用下化学风化的强度 ,CIA 值越大表示风化作用越强; 硅铝率( 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 比值) 和( 高岭石 + 伊利石) /石英比值

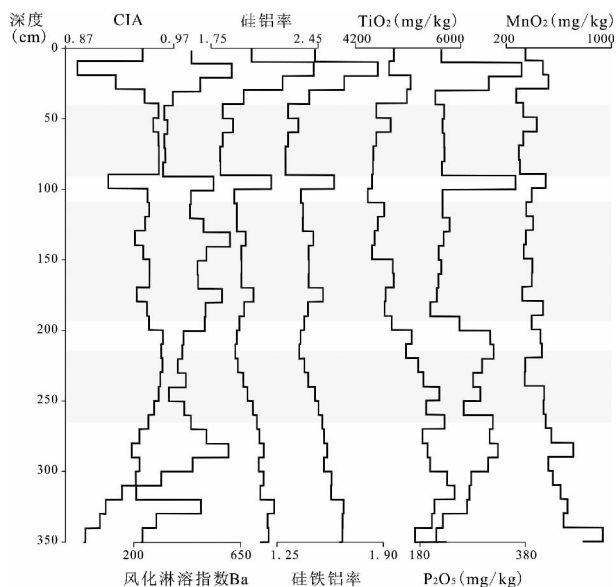


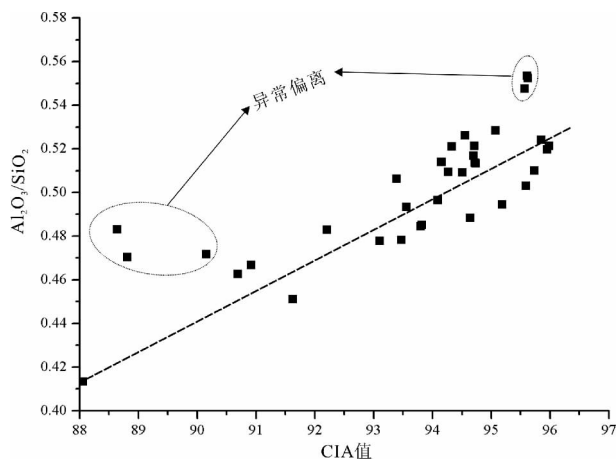
图3 MB剖面氧化物含量及其元素特征值

Fig. 3 Oxide content and elements characteristics of MB profile

在全岩研究中代表化学风化和侵蚀作用的共同强度。硅铝率( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值) 越小( 越大) 表示风化程度越高; 其中  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值与 CIA 值的相关关系可以作为区分化学风化作用自然因素变化与侵蚀作用加剧的一种新的分析方法<sup>[5]</sup>。

化学蚀变指数 CIA 值是剖面全岩各类矿物和胶结物总的化学元素迁移与富集的反映, 该指标代表了剖面在自然作用下化学风化的总体特征。从图 3 可以看出, 该指标在剖面上波动变化明显, 存在若干波动起伏, 变化范围为 0.88 ~ 0.96, 总体趋势从下到上逐渐变大。风化淋溶指数 ba 值低于 650 mg/kg,  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  等宜溶组分淋失充分, 足以显示 MB 剖面红土经历了多水的风化成壤环境。硅铝率( 或  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值) 常用来作为成土作用强度的指标。剖面硅铝率、硅铝铁率总体上是从剖面下部向上部逐渐增大, 变化范围分别为 1.75 ~ 2.45、1.25 ~ 1.90, 与 CIA 值较为协调, 表明福州盆地地表残积、坡积红土总体上呈正常风化作用的趋势。另外,  $<2\ \mu\text{m}$  粒级部分的硅铝率和硅铝铁率明显低于全岩样品值, 即硅铝率和硅铝铁率主要适用于红土风化壳的黏粒部分, 在全岩的研究中比较复杂, 说明单独用全岩样品的硅铝率和硅铝铁率指示红土风化强度不够有效。对 MB 剖面样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值与 CIA 值作相关性分析( 图 4), 风化剖面正常发育的状态下, 二者应该呈现较密切的正相关性, 如果有部分样品的指标偏离趋势线, 认为

有异常作用发生<sup>[5]</sup>。一般来讲, CIA 值异常偏离, 可能反应自然因素的变化,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值的异常偏离, 则反映了侵蚀作用的加剧。图 4 显示, MB 剖面  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值与 CIA 值的相关曲线表现出较正常的正相关关系, 表明剖面整体的化学风化特征变异主要受自然因素所控制。在剖面的顶部和底部有若干波动, 说明地下水的局部还原作用和地表水的氧化作用是相关性发生偏离的主要原因。

图4 MB剖面  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值与 CIA 值相关图Fig. 4 Comparison between CIA value and ratio of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  of MB profile

石英在化学风化作用和地表水流机械搬运作用中均难以迁移, 高岭石和伊利石既是化学风化作用的产物, 也是易被流水搬运的矿物。因此( 高岭石 + 伊利石) / 石英的比值代表了化学风化与侵蚀作用的共同强度。对样品  $<4\ \mu\text{m}$  黏粒干粉末样的 X 射线衍射分析, 图谱显示石英衍射峰最强, 高岭石、伊利石、水云母、赤铁矿、针铁矿等次生矿物相对于石英的含量较少, 剖面( 高岭石 + 伊利石) / 石英比值也表现出一定变化, 可与硅铝率和硅铝铁率可以共同指示剖面化学风化与流水侵蚀的强度。在 MB 剖面顶部, 我们观察到土壤的石英砂砾明显增多,  $\text{SiO}_2$  含量与正常风化作用演化趋势<sup>[15-16]</sup> 相反, 同时  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  比值与 CIA 值也有异常偏离, 表明 MB 剖面顶部侵蚀作用的突然加剧和土壤的退化加强。

#### 4 区域气候变化

红土作为地球化学环境变化研究的有效载体,

其元素含量及元素比值可作为地层对比、古气候恢复和环境变化研究的有效指标<sup>[17]</sup>。福州 MB 剖面沉积相表现为坡积红土,剖面红土地化元素 Si、Al、Fe、K、Na、Ca、Mg、P、Mn、Ti 等氧化物百分含量及特征比值也表现出一定的波动变化特点,表明末次寒冷期以来福州盆地古地理环境有明显的阶段性变化。因此,MB 剖面红土地球化学可用于提取研究区沉积环境变化信息,可以大致重建轨道尺度气候变化过程。

I 阶段 3.5 ~ 2.4 m,地层年代为 44.1—23.0 ka,对应深海氧同位素 3 阶段。海洋同位素记录表明全球冰量在 3 阶段有所减少,海平面从 4 阶段的 -75 m 上升到 3 阶段的 -50 m。在 MB 红土剖面中,本阶段湿润型元素 SiO<sub>2</sub> 含量表现为波动递减趋势;相反,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量表现出波动递增趋势,且 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量递增速率快于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量;硅铝系数和铝铁铝系数也表现出震荡递减趋势,化学蚀变指数 CIA 值也呈现逐渐递增趋势,风化淋溶指数波动较大,P、Mn 等含量较高的元素氧化物也出现明显波动。以上元素变化趋势与深海氧同位素曲线中的一次偏轻时期相对应。北欧和西欧的记录也显示 39—36 ka 和 32—28 ka 存在两个较温暖的时期<sup>[9]</sup>。福州盆地 14 个钻孔资料显示 44—20 ka 发育的淤泥层是“福州海侵”的产物<sup>[17]</sup>,也证实了该区域整体偏暖的气候背景。25 ka 之后,福建双连洞动物群中的大型动物和喜暖种类明显减少或消失,显示该时段的气候转为偏凉,植被以灌丛—草地环境为主<sup>[18]</sup>,表明研究区在本阶段后期逐渐进入末次冰期的前期。

II 阶段 2.4 ~ 1.0 m,地层年代为 23.0—14.3 ka,对应深海氧同位素 2 阶段。在氧同位素 2 阶段期间,海平面整个降低至 -120 m,巴巴多斯岛铀系测年的结果证实海平面在约 30 ka 至少下降至 -85 m。MB 剖面的 SiO<sub>2</sub> 含量在该阶段表现为一个高值波动,出现波峰。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量表现为低值区,出现波谷,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量变化相对于 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量变化明显。MgO 含量保持递减趋势。Ca、Na 等易淋失元素含量在该阶段接近 0.1, K<sub>2</sub>O 含量出现峰值。风化淋溶指数出现 3 个明显的小波峰。福州盆地强烈的风化、红土化进一步造成 MgO、Na<sub>2</sub>O、CaO 等氧化物含量的低值。化学蚀变指数 CIA 值出现一个相对低值区;风化淋溶指数呈现一个相对高值区;硅铝率和硅铁铝率也同时出现一个相对高值区。以上

元素及元素比值的变化反映了该时期福州盆地以温凉的气候条件占主导。福建平潭、长乐等地的老红砂研究也显示该时期闽北地区以温凉气候环境为主<sup>[19]</sup>。该时期出土动物化石也显示该阶段气候偏凉,植被以灌丛草地为主。尤其 18—15 ka 时期的气候变化最为明显,该时期气温骤然下降,导致部分热带动物南迁,并最终退出福建地区<sup>[20]</sup>。最新考古发现表明,从台湾海峡获得的 26—11ka 的哺乳动物化石具有很大相似性,此类化石有别于同纬度地带的闽粤而与淮河流域一致,表明这和冰期气温降低、海平面下降、哺乳动物随东海大陆架南迁有关<sup>[21]</sup>。

III 阶段 1.0 ~ 0 m,地层年代为 14.3 ka 直至今,对应深海氧同位素 1 阶段,处于较温暖湿润气候环境。MB 剖面的 SiO<sub>2</sub> 含量在该阶段表现为一个低值区域,出现剖面最低值。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量表现为高值区,出现最大值。MgO 含量保持递减趋势。Ca、Na 等易淋失元素含量很小。K<sub>2</sub>O 含量出现一个波谷。化学蚀变指数 CIA 值出现一个相对高值区;风化淋溶指数呈现一个相对低值区;硅铝率和硅铁铝率也同时出现低值区;在剖面顶部 0 ~ 20 cm 各项指标变化幅度较大,与区域化学风化特征有关。资料表明,原本栖息在福建境内的哺乳动物在进入全新世之前,相当数量的种类已向南退缩 1 ~ 2 个自然带。一些热带物种随着冰期的结束而灭绝<sup>[17]</sup>。钻孔资料显示,福州盆地在全新世中晚期的 7.86—1.47 ka 期间发育两层淤泥层,主要为“长乐海侵”的产物<sup>[17]</sup>,也反映了该时期的温暖气候背景。

## 5 结论

根据上述对福州 MB 剖面的坡积红土的沉积特征、沉积年龄、地球化学元素分析结果的讨论,可以看出:

1. 剖面释光测年数据并结合已有钻孔数据显示,福州盆地的坡积红土沉积始于晚更新世中期,止于全新世晚期。
2. 相关分析显示,剖面整体的化学风化特征变异主要受自然因素所控制,红土表层受化学风化和流水搬运共同作用的影响。在剖面的顶部和底部有若干波动,说明地下水的局部还原作用和地表水的氧化作用是相关性发生偏离的主要原因。
3. 结合年代学数据,探讨了红土地化元素的区域气候意义。分析显示末次寒冷期以来福州盆地古

地理环境经历了明显的阶段性变化,且与深海氧同位素阶段有较好对应关系。

4. 氧同位素 1 阶段是第四纪研究中最多的时期,该时期的各种记录的时间分辨率比第四纪其他时期的分辨率要高得多,然而南方红土风化淋溶作用强烈,氧同位素 1 阶段在红土中的记录难以进行高分辨率提取。福州盆地也不例外,期间可能存在沉积间断。福州盆地已有钻孔资料显示,在全新世早期存在沉积间断<sup>[15]</sup>,间断时间约为 2.3 ka。

## 参考文献 (References)

- [1] 韩书华,张静. 福州市马尾地区第四纪地层的划分及海相层分析[J]. 海洋地质与第四纪地质,1992,12(1): 85-95 [Han Suhua, Zhang Jing. Quaternary stratigraphic division and marine bed analysis of Mawei area, Fuzhou[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1992, 12(1): 85-95]
- [2] Taylor SR, McLennan SM. The continental crust: Its composition and evolution[M]. London: Blackwell, 1985: 57-72
- [3] 黄镇国,张伟强,陈俊鸿,等. 中国红土与自然地带变迁[J]. 地理学报,1999,54(3): 193-203 [Huang Zhengguo, Zhang Weiqiang, Chen Junhong, et al. The change of natural zones and the evolution of red earth in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(3): 193-203]
- [4] 黄镇国,张伟强. 中国红土期气候构造期的耦合[J]. 地理学报,2000,55(2): 200-208 [Huang Zhengguo, Zhang Weiqiang. Coupling relationship between the red earth evolution, climate change and tectonic movement in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2): 200-208]
- [5] 朱照宇,谢久兵,王彦华,等. 华南沿海地表红土地球化学特性变异的自然因素与人类活动干预. 第四纪研究,2004,24(4): 402-408 [Zhu Zhaoyu, Xie Jiubing, Wang Yanhua, et al. The nature factors and artificial disturbance of variation in geochemistry characteristics of red soil on land surface along the coast of South China[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(4): 402-408]
- [6] 冯志刚,王世杰. 中国南方红土古环境重建中存在的几个问题[J]. 山地学报,2004,21(6): 641-646 [Feng Zhigang, Wang Shijie. Problems in the paleoenvironmental reconstruction of laterite in South China[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 21(6): 641-646]
- [7] 熊尚发,刘东生,丁仲礼. 南方红土的剖面风化特性[J]. 山地学报,2000,18(1): 7-12 [Xiong Shangfa, Liu Dongsheng, Ding Zhongli. The weathering sequence of the red earth over Southern China[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(1): 7-12]
- [8] 邓黄月,高悦,郑祥民,等. 我国南方红土岩石磁学特征及其磁化率增强机制[J]. 海洋地质与第四纪地质,2015,35(4): 163-175 [Deng Huangyue, Gao Yue, Zheng Xiangmin, et al. Rock-magnetic characteristics of the red soils in Southern China and the magnetism for enhancing magnetic susceptibility[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(4): 163-175]
- [9] 叶玮,郑万乡,李凤全,等. 中亚热带红土与水稻土铁锰结核理化特性与形成环境对比[J]. 山地学报,2008,26(3): 293-299 [Ye Wei, Zheng Wanxiang, Li Fengquan, et al. The composition and disposing condition of ferromanganese nodules developed in Quaternary red earth and paddy soil in mid-subtropical zone, China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(3): 293-299]
- [10] 靳建辉,李志忠,陈秀玲,等. 1.2 Ma 以来闽中沿海长乐红色风化壳剖面的地球化学记录及古气候意义[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版,2013,46(6): 780-788 [Jin Jianhui, Li Zhizhong, Chen Xiuling, et al. The geochemical records and their paleoclimate significance of the red weathering crust at Changle coast in central Fujian since 1.2 Ma[J]. Journal of Huazhong Normal University (Nature Science), 2013, 46(6): 780-788]
- [11] 袁宝印,夏正楷,李保生,等. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J]. 第四纪研究,2008,28(1): 1-13 [Yuan Baoyin, Xia Zhengkai, Li Baosheng, et al. Chronostratigraphy and stratigraphic division of red soil in Southern China[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(1): 1-13]
- [12] 朱丽东,姜永见,张明强,等. 庐山 JL 剖面红土磁化率特征及古环境记录[J]. 山地学报,2011,29(4): 385-394 [Zhu Lidong, Jiang Yongjian, Zhang Mingqiang, et al. Characteristics of magnetic susceptibility and paleoenvironmental records from JL red earth section, Lushan area[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(4): 385-394]
- [13] 朱丽东,周尚哲,李凤全,等. 南方更新世红土氧化物地球化学特征. 地球化学,2007,36(3): 295-302 [Zhu Lidong, Zhou Shangzhe, Li Fengquan, et al. Geochemical behavior of major elements of Pleistocene red earth in South China[J]. Geochimica, 2007, 36(3): 295-302]
- [14] 杨元根,刘丛强,袁可能,等. 南方红土形成过程及其稀土元素地球化学. 第四纪研究,2000,20(5): 469-479 [Yang Yuangen, Liu Congqiang, Yuan Keneng, et al. Laterite formation process in Southern China and its rare earth element (REE) geochemistry[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(5): 469-479]
- [15] 郑荣章,徐锡伟,朱金芳,等. 福州盆地晚第四纪地层划分及古环境分析. 地震地质,2002,24(4): 503-513 [Zheng Rongzhang, Xu Xiwei, Zhu Jinfang, et al. Division of Late Quaternary strata and analysis of paleoenvironment in Fuzhou Basin[J]. Seismology and Geology, 2002, 24(4): 503-513]
- [16] Behre K E. Towards an absolute chronology for the last glacial period in Europe: radiocarbon dates from Obereisener Geomany[J]. Vegetation History and Archaeobotany, 1992, 1: 111-117
- [17] 郑荣章,陈桂华,徐锡伟,等. 福州盆地埋藏晚第四纪沉积地层划分. 地震地质,2005,27(4): 556-565 [Zheng Rongzhang, Chen Guihua, Xu Xiwei, et al. Strata division of buried Late Quaternary of Fuzhou basin[J]. Seismology and Geology, 2005, 27(4): 556-565]
- [18] 范雪春,郑国珍. 福建第四纪哺乳动物化石考古发现与研究[M]. 北京: 科学出版社,2006: 170-174 [Fan Xuechun, Zheng Guozhen. Discovery and research of Quaternary mammal fossil in Fujian[M]. Beijing: Science Press, 2006: 170-174]
- [19] 曾从盛,陈居成,吴幼恭. 闽东南沿海老红砂与晚第四纪环境演变. 中国沙漠,1999,19(2): 110-114 [Zeng Congsheng,

- Chen Jucheng, Wu Yougong. The old red sand along the coast of Southeast Fujian and environmental evolution during Late Quaternary[J]. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(2): 110–114]
- [20] 尤玉柱. 中国气候变化及其影响[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 178–190 [You Yuzhu. The climate variation and impact of China[M]. Beijing: Ocean Press, 1992: 178–190]
- [21] 蔡保全. 台湾海峡晚更新世哺乳动物化石与古地理环境[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 1999(4): 29–32 [The later Pleistocene fossil mammals and the palaeogeographical environment of the Taiwan Strait[J]. *Journal of Xiamen University (Arts & Social Sciences)*, 1999(4): 29–32]

## Geochemistry Characteristics of Red Earth Sedimentation since 44ka in Fuzhou Intermountane Basin

JIN Jianhui<sup>1 2 3</sup>, LI Zhizhong<sup>1 2 3</sup>

(1. *Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;*

2. *School of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;*

3. *Key Laboratory of Humid Subtropical Ecosystem and Geography, Ministry of Education, Fuzhou 350007, China;*)

**Abstract:** Based on the age of optically stimulated luminescence (OSL) and the stratigraphic lithology of Mabao (MB) clay profile in Fuzhou intermountane basin, this paper mainly analyzed the results of geochemical elements. Meanwhile we discussed the chemical weathering features and regional climate change characteristics.

The result showed that 1) the age of Diluvial clay in Fuzhou intermountane basin was from middle stage of Late Pleistocene to Late Holocene. This period was roughly corresponding to the first to the third stage of Marine Oxygen Isotope (MIS1–3). 2) The variation of chemical weathering characteristics of Mabao (MB) profile was controlled by nature factors, and the topsoil of MB profile was undergone a combined impact of chemical weathering and transporting action of flowing water. Al, Fe accumulation and the local intense eluviation represented a warm humid chemical weathering environment of Fuzhou intermountane basin since 44 ka. The information of environmental changes recorded in the MB clay profile can roughly reestablish the climate change process on the orbital timescale. The paleoenvironment of Fuzhou basin had undergone different phases, which corresponded to marine oxygen isotope stages (MIS) since the last glacial period. In the first period (44.1 ka – 23.0 ka), the regional climate was warm and humid as a whole, and after 25 ka before present, the climate environment turned to generally colder with vegetation of bushwood and meadowland. In the second period (23.0 ka – 14.3 ka), the climate condition mainly dominated by warm and cool reflected by the changes of geochemical elements and elements ratios in Fuzhou intermountane basin. The period of 18–15 ka before present was a typical period with most prominent change. There was a sharp decline in Fuzhou intermountane basin temperatures, which led to tropical animals migrated southward and finally disappeared in Fujian area. And in the last period (14.3 ka – now), the climatic characteristics mainly manifested as warm and moist. There were two mud layers in Fuzhou intermountane basin during the mid–late Holocene (7.86 ka – 1.47 ka) based on several cores from this area. In addition, 3) there had little clay sediment during marine oxygen isotope stage 1 (MIS1) in which a hiatus, about 2.3 ka, occurred in Fuzhou intermountane basin.

**Key word:** Fuzhou basin; red earth; geochemistry; paleoclimate; Quaternary