

福建长乐第四纪红土微量元素揭示的气候环境变化^{*}

赵倩^{1,2}, 李志忠^{1,2}, 靳建辉^{1,2}, 祝淑雅^{1,2}, 胡凡根^{1,2}, 张辉^{1,2}

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

摘要:在野外考察采样基础上,结合 OSL 和 ESR 测年确定红土沉积年代,对福建长乐(CL)红土剖面微量元素地球化学特征及指示的古环境意义进行了初步研究。结果表明:CL 剖面中微量元素的含量和分布特征呈有规律的波动变化,反映出区域风化成壤过程中不同元素的地球化学行为存在差异。较高的 Mn、Nb、Rb、Cr 含量或较低的 Ni、As、Sr、Zn、V 含量大体指示红土沉积风化作用增强,气候暖湿;反之,则可能指示生物化学风化作用减弱,气候温干或凉干。早更新世晚期以来,研究区古气候经历了温干-暖湿,暖湿,暖湿-干冷,温干-暖湿,暖湿的变化过程。研究揭示出 CL 剖面微量元素记录的区域气候变化过程既是对全球气候变化的响应,同时也表现出亚热带季风区红土沉积风化的特殊性。

关键词:第四纪;微量元素;红土;气候变化;福建长乐

中图分类号:P532

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2012)04-0093-08

红土作为广泛分布于中国南方的第四纪古土壤,是岩石圈-大气圈-水圈-生物圈相互作用的界面。它直接记录了地球各个圈层形成演化的信息,尤其对于环境事件的记录更具特色^[1],是第四纪古气候记录的重要载体^[2]。地层中微量元素含量及其分布特征有着特定的古气候意义,因此可以运用微量元素化学指标揭示南方红土所记录的气候环境变化信息。程忠富等^[3]首次采用元素富集因子概念来探讨红土化过程中微量元素的地球化学行为。熊尚发等^[4]选取江西九江剖面,通过协变分析,对其元素迁移进行了研究,表明剖面元素组成主要受古气候变化引起的风化强度差异的限制,但也在一定程度上受母质物源变化的影响。胡雪峰等^[5]运用地球化学和粒度指标,探讨了江西九江、泰和两地第四纪红土的成因。尹秋珍^[6]基于土壤微型态学、地球化学和矿物学方法探讨了中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期的关系,认为网纹红土经历了多阶段的气候波动,因而是一种复合型的古土壤,它指示在

中更新世期间中国南方古气候可能全年都受到夏季风环流的影响。徐瑞松、苗莉等^[7-8]对华南红土主元素、微量元素表生地球化学特征进行了研究,认为华南红土的表生地球化学特征是长期和多种环境变化的真实记录,是全球变化事件在华南红土区的具体响应。朱丽东等^[9]对网纹红土稀土元素地球化学特征做了初步研究,表明网纹红土稀土元素特征一方面继承了原始物质的特征,同时体现了南方湿热气候下,化学风化导致的再分馏特征。李凤全等^[10]则以地球化学参数作为主要指标,综合研究了我国南方网纹红土类型和风化土特征。上述成果均说明古土壤地球化学元素组合及其迁移特征是研究第四纪南方红土气候记录的重要指标。

福建位于中国东南丘陵区核心地带,属于东南沿海中亚热带和南亚热带过渡区域。境内广泛分布残积坡积和部分洪积坡积成因的红土,是我国南方中亚热带非均质红土分布区的典型区域之一。本研究选取福建东部沿海的长乐(CL)红土剖面,基于剖

* 收稿日期:2011-11-10 修回日期:2012-01-04 网络出版时间:2012-07-04 11:15:00

资助项目:福建省自然科学基金(No. 2009JO1208);福建省公益类科研院所专项基金(No. 2009R10039-4);福建省大学生创新性实验计划项目(No. FJNU2011-034)

作者简介:赵倩,女,硕士研究生,研究方向为第四纪环境演变;通讯作者:李志忠,E-mail:lizzfz@163.com

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120704.1115.201204.93_017.html

面光释光(OSL)年代学和电子自旋共振(ESR)年代学测量,对样品进行微量地球化学元素含量与组合变化分析,探讨我国中亚热带和南亚热带过渡区气候与沉积环境演变过程,为揭示低纬地区第四纪时期环境演变规律提供背景参考。

1 区域概况和研究方法

1.1 研究区与区域概况

研究区位于福建闽江下游河口南岸长乐市鹤上洞湖村,属于中亚热带和南亚热带的过渡区,中生代花岗岩和凝灰熔岩剥蚀低山丘陵起伏耸立在河口冲积-海积平原上。气候类型为亚热带海洋性季风气候,全年气候温暖湿润,四季分明。多年平均气温 19.6℃,一般 7 月最高,1 月最低。雨量充沛,年平均降水 153 d,年平均降水量为 1 346 mm,多在 3~9 月,4~6 月为梅雨季节。全年风向除 7 月多南风,11 月多东北风外,大部分为东风和东南风,年平均风速为 3.4 m/s。植被类型属于亚热带季雨林,地带性土壤主要是黄壤、红壤和砖红壤性红壤等。

用于研究的 CL 剖面位于长乐机场高速公路北侧,地理坐标为 25°56′55.2″N,119°34′21.4″E,海拔

19.3 m(图 1)。整个剖面厚度 8 m(未见底),主要由上段非均质红土和下段非均质网纹红土组成,其中又可划分为若干不同厚度的沉积旋回。上段部分为 0~3.5 m,棕红色土,夹多层砾石;下段部分为 3.5~8.0 m,红褐色、红棕色网纹红土层,夹杂少量棱角状砾石,胶结坚实。发育典型的蠕虫状白色、灰白色网纹。红土风化裂隙有大量黑色氧化锰薄膜,砾石直径 0.2~3 cm 不等,呈现薄层不连续分布。剖面具体的形态特征描述见表 1。

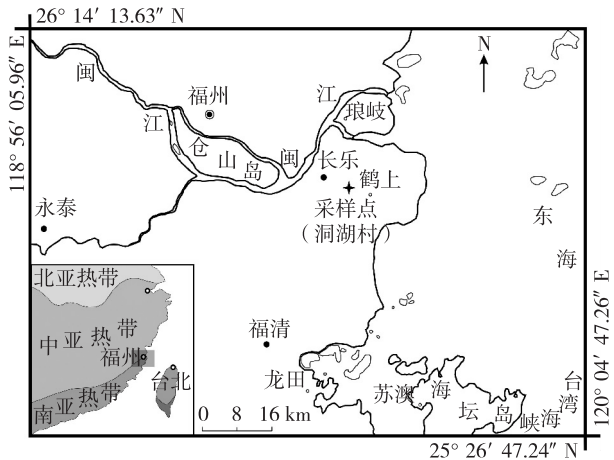


图 1 福建长乐红土地层剖面采样位置

表 1 福建 CL 剖面特征描述

深度/m	颜色	岩性特征描述
0~0.4	棕红色	现代红壤层,较多植物根系。
0.4~2.7	棕红色	胶结坚实,直径 10~20 cm,砾石表面被覆红褐色风化氧化膜。夹有 2~3 层不连续分布的薄层角砾石层,构成 2~3 个沉积旋回。
2.7~3.5	棕红色	坡积红土,以粉砂为主,胶结紧实。底部角砾石层砾石直径 0.5~5 cm,大部分呈棱角状,为侵蚀不整合面过渡到下段。
3.5~7.5	红褐色、红棕色	残积坡积网纹红土层,夹杂少量棱角状砾石,胶结坚实。发育典型的蠕虫状灰白色网纹。风化裂隙中有大量黑色氧化锰薄膜,砾石直径 0.2~3 cm 不等,呈现薄层不连续分布。
7.5~8	红褐色、红棕色	胶结坚硬伴有蠕虫状构造的网纹红土,未见底。

1.2 CL 剖面年代

在剖面不同深度采集年代样品 9 块,分别送往中国地质科学院水文地质研究所释光实验室和中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室进行了 OSL 和 ESR 测年。OSL 法相对于 TL(热释光)具有明显的优越性,它大大降低了 TL 测年中残余

信号的干扰^[11],使得测得结果更准确,但其测定年限比较短。ESR 测年方法具有测定年限长,可测试的样品多,样品用量少,制样简单,便于批量测试等特点^[12]。

OSL 年代的测试采用了粒径范围为 63~180 μm 的粗颗粒石英矿物进行。样品制备和测量均在装置

有微弱红光灯的暗室中进行,OSL信号测量使用Daybreak2200释光测量仪。该系统蓝光光源波长为470 nm,半宽5 nm,最大功率为 $60 \text{ mw} \cdot \text{cm}^{-2}$;红外光源波长为880 nm,半宽10 nm,最大功率为 $80 \text{ mw} \cdot \text{cm}^{-2}$,实验选择最大功率进行测量。预热温度 260°C ,10 s;试验剂量预热温度 220°C ,10 s。测量仪上装置有剂量率为 0.0104 Gy/s 的 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}\beta$ 标准源。获得7个有效测年数据。

ESR信号测量采用EMX1/6ESR测量信号谱仪,铀、钍含量采用Daybreak583型厚源alpha计数仪测量,钾含量采用FR640型火焰光度计分析,获得2个有效测年数据。

通过OSL和ESR测年最终获得9个有效测年数据。以9个年代数据为控制点计算剖面不同深度的沉积层年龄,并对计算的年龄结果进行内插和外延,建立了CL剖面近1.2 Ma以来的年代序列(表2)。根据OSL测年数据,上段绝对年龄为 $(48.5 \pm 2.4) \sim (112.4 \pm 6.1) \text{ ka}$,相当于南方 Q_3 红土

期^[13-14],沉积持续7~8 Ma以上。根据ESR测年数据,下段沉积绝对年龄为 $(241 \pm 14) \sim (1\,235 \pm 128) \text{ ka}$,为早更新世晚期红土期(Q_1^2)至中更世沉积风化的产物,下段沉积持续约90~100 Ma。

1.3 微量元素含量测试

在野外自下而上,按照5 cm间隔对CL剖面等间距采样161块。微量元素含量在南京师范大学地理科学学院实验室完成。使用荷兰PANalytical公司生产的Minipal 4型X射线荧光光谱仪测定。首先将待测样品晾干、碾磨,使其粒径小于 $75 \mu\text{m}$,然后称取粒度小于 $75 \mu\text{m}$ 的粉末试样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的圆片。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,元素测量实验误差小于5%。

表2 CL剖面测年结果及校正年代

深度/cm	等效剂量/Gy	年剂量/ $(\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1})$	年代/ka	深度/cm	等效剂量/Gy	年剂量/ $(\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1})$	年代/ka
50	223.90 ± 6.92	4.62	$48.5 \pm 2.4^{\blacktriangle}$	450	—	—	426
100	298.91 ± 6.87	4.40	$67.9 \pm 3.7^{\blacktriangle}$	480	—	—	555.6
150	373.37 ± 24.30	4.68	$79.7 \pm 6.1^{\blacktriangle}$	550	—	—	740
200	431.12 ± 3.55	4.89	$88.2 \pm 4.0^{\blacktriangle}$	600	—	—	897
250	478.21 ± 16.14	5.19	$92.2 \pm 4.8^{\blacktriangle}$	675	—	—	1 132
300	431.37 ± 2.25	4.64	$93.0 \pm 3.7^{\blacktriangle}$	700	$5\,632 \pm 563$	4.65	$1\,211 \pm 121^{\bullet}$
350	574.92 ± 21.29	5.12	$112.4 \pm 6.1^{\blacktriangle}$	750	—	—	1223
355	—	—	128.1	800	$5\,114 \pm 511$	4.14	$1\,235 \pm 123^{\bullet}$

注:▲为OSL年龄;●为ESR年龄

2 结果分析与讨论

2.1 微量元素含量变化及分布

选取CL剖面Mn、Nb、Rb、Sr、Cr、Ni、As、V、Zn、Ba等10个代表性元素进行分析(图2,表3)。从表3可以看出,CL剖面中不同层位相同元素和各个层位不同元素之间含量不等,甚至差别很大。剖面中元素Mn含量变化范围在 $298.2 \sim 3\,931.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $918.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在560 cm处。Nb元素含量在 $15.6 \sim 24.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

之间变动,平均值为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在630 cm处。Rb元素含量变化范围在 $89.7 \sim 154.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $114.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在560 cm处。Sr元素含量变化范围在 $30.7 \sim 73.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $44.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在剖面表层。Cr元素含量在 $32 \sim 81.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间变动,平均值为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值在110 cm处。Ni元素含量变化范围在 $17.4 \sim 43.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $26.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在520 cm处。As元素含量在 $4 \sim 27.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

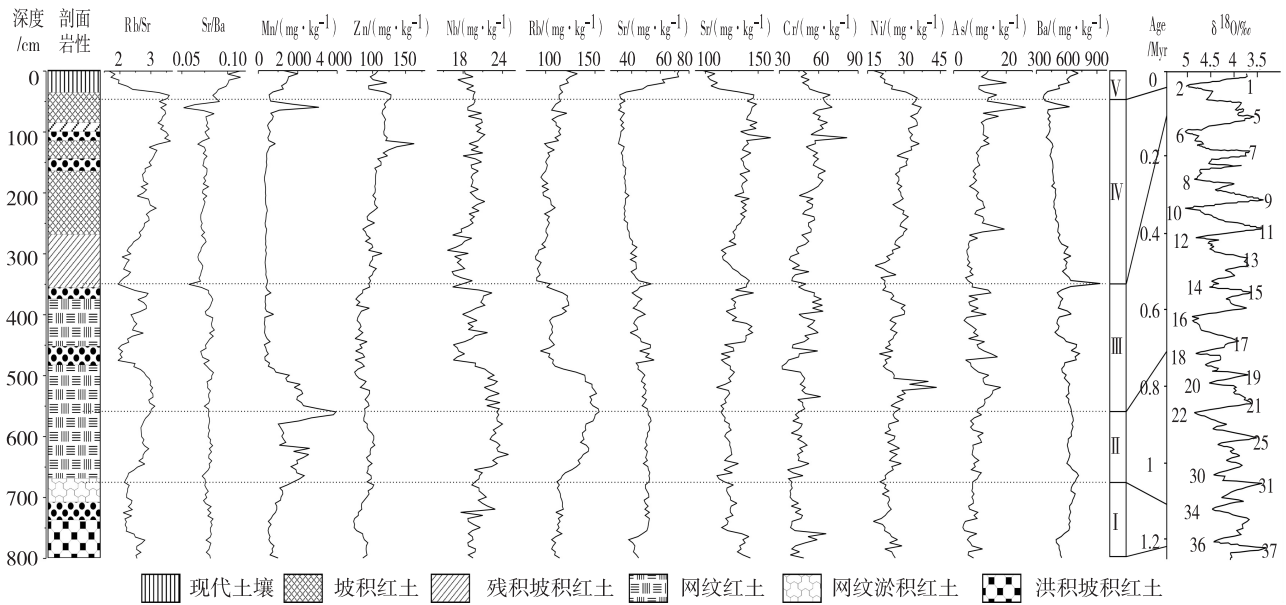


图 2 长乐红土剖面微量元素含量及其比值记录

表 3 福建 CL 剖面微量元素含量分布与变化

mg · kg⁻¹

元素	I 阶段	II 阶段	III 阶段	IV 阶段	V 阶段	全剖面	福建红壤微量元素背景值 ^[15]
Mn	905.9 ^a 490.5~2 096 ^b	2 021.3 ^a 1 018.5~3 931 ^b	840.7 ^a 2 98.2~2293 ^b	510.8 ^a 314.7~3 080 ^b	1 150 ^a 543.6~1 995 ^b	918.1 ^a 298.2~3 931 ^b	255
Nb	19.9 ^a 17.6~22.9 ^b	22.6 ^a 19.7~24.9 ^b	20.1 ^a 16.4~23.6 ^b	19.1 ^a 15.6~21.3 ^b	18.9 ^a 17.2~19.8 ^b	20 ^a 15.6~24.9 ^b	—
Rb	112.9 ^a 106.2~118 ^b	138.2 ^a 115.4~154.1 ^b	120 ^a 94.8~151.6 ^b	102.2 ^a 89.7~121.5 ^b	119.1 ^a 113.6~132.1 ^b	114.8 ^a 89.7~154.1 ^b	119
Sr	48.1 ^a 37.9~52.5 ^b	51.1 ^a 47.3~53.5 ^b	46.6 ^a 38.8~55.7 ^b	36.6 ^a 30.7~53.7 ^b	52.3 ^a 31.7~73.1 ^b	44.1 ^a 30.7~73.1 ^b	22.4
Cr	43.6 ^a 37~65.7 ^b	45 ^a 36.3~52.5 ^b	49.5 ^a 32~63.5 ^b	54.3 ^a 37.5~81.7 ^b	55.2 ^a 46.5~68.7 ^b	50 ^a 32~81.7 ^b	43.6
Ni	23.3 ^a 17.4~29.2 ^b	25.2 ^a 22.1~28.9 ^b	26.4 ^a 19.8~43.5 ^b	29.1 ^a 18.1~37.1 ^b	26.2 ^a 17.5~35.5 ^b	26.7 ^a 17.4~43.5 ^b	13.3
As	6.8 ^a 3.5~11 ^b	8.6 ^a 6.5~11.4 ^b	9.8 ^a 4~17.6 ^b	9.9 ^a 4.6~27.4 ^b	13 ^a 9.6~20.1 ^b	9.4 ^a 4~27.4 ^b	5.98
V	126.5 ^a 112.7~142.6 ^b	120.4 ^a 110.8~131.4 ^b	127.1 ^a 110.5~145.8 ^b	135 ^a 115.2~162.1 ^b	118.8 ^a 97.7~146 ^b	128.4 ^a 97.7~162.1 ^b	82.8
Zn	86.1 ^a 71.2~101.7 ^b	94.4 ^a 86.6~103.3 ^b	83.6 ^a 72.4~95.7 ^b	107 ^a 85.2~163.2 ^b	110.5 ^a 93.8~127.9 ^b	95.9 ^a 71.2~163.2 ^b	84.5
Ba	612.9 ^a 495.7~717.7 ^b	638 ^a 601.4~698.7 ^b	595.9 ^a 484~932.4 ^b	488.4 ^a 367.6~641.3 ^b	610 ^a 518.9~714.7 ^b	564.34 ^a 367.6~932.4 ^b	—
Sr/Ba	0.1 ^a 0.074~0.084 ^b	0.079 3 ^a 0.072~0.084 ^b	0.078 8 ^a 0.058~0.086 ^b	0.073 4 ^a 0.052~0.091 ^b	0.097 ^a 0.084~0.114 ^b	0.078 ^a 0.052~0.114 ^b	—
Rb/Sr	2.36 ^a 2.11~2.8 ^b	2.71 ^a 2.2~3.12 ^b	2.58 ^a 1.94~3.12 ^b	2.84 ^a 1.95~3.63 ^b	2.49 ^a 1.65~3.59 ^b	2.65 ^a 1.65~3.63 ^b	—

注:a 代表平均值,b 代表含量范围;Sr/Ba、Rb/Sr 为元素含量比值。

之间变动,平均值为 $9.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在表层 60 cm 处。V 元素含量在 $97.7 \sim 162.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间变动,平均值为 $128.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在 110 cm 处。Zn 元素含量变化范围在 $71.2 \sim 163.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $95.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在 120 cm 处。Ba 的含量在 $367.6 \sim 932.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $564.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值出现在 350 cm 处。

其中,元素 Mn、Nb 和 Rb 在 II 阶段的平均含量最大,分别为 $2\ 021.3$ 、 22.6 、 $138.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;元素 Sr、Cr、As、Zn 在 V 阶段的平均含量最大,分别为 52.3 、 55.2 、 13 和 $110.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;元素 V、Ni 在 IV 阶段的平均含量最大,分别为 29.1 、 $135 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;元素 Ba 在 III 阶段的平均值最大,为 $932.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Sr/Ba 比值一般在 0.07 上下波动,在 I 阶段最大,其值为 0.1;Rb/Sr 比值一般在 2.0 上下波动,在 V 阶段最大,其值为 2.84。

如果将 CL 剖面代表微量元素含量均值与福建省现代红壤元素背景值^[15]进行比较,除元素 Rb 外,Mn、Sr、Cr、Ni、As、V、Zn 的平均含量均大于福建红壤背景值,表现为较显著的富集特征,反映出研究区风化成壤和生物地球化学作用都十分强烈。其中元素 Mn 的平均含量要比福建红壤背景值中的 Mn 含量高出很多,可能是研究区母岩化学组成、生物富集作用以及人为活动等多种因素共同影响的结果。

2.2 微量元素变化的因素及其气候指示意义

地层中微量元素含量及其变化特征是区域母岩类型、水热条件、风化作用与化学元素本身理化特性的综合。因此,微量元素含量变化在恢复区域古气候方面是很好的代用指标^[16]。

风化壳中微量元素的主要来源是母岩^[17]。母岩化学组成决定了区域风化壳中微量元素的最初含量,风化过程使元素有的淋失,有的累积,改变了这些元素的最初含量和它们的结构特性及在剖面的分布特征。例如,研究区广泛分布的中生代花岗岩低山丘陵,为化学风化作用提供了丰富的 Mn 元素来源,CL 剖面所在山坡母岩主要为花岗岩和凝灰熔岩,因此剖面中 Mn 的含量比较多。同时,Mn 以活性的铁锰氧化物胶膜而存在,有固定和富集微量元素的作用,又使得亲铁或亲铜的微量元素如 Ni、Cr、

As 等含量增多。

区域亚热带气候,尤其是良好的水热条件是影响土壤内部元素迁移和转化的主要外因。丰富的降水和充足的热量不仅使得土壤颗粒细化,粉砂粘土含量增加,同时地表植被得以旺盛生长。良好的水热条件和植被状况有利于生物化学风化作用进行,极大地提高了微量元素的富集程度^[18]。例如 Mn、Zn 和 Pb 是植物生长必须的微量元素,植物生长吸收一定量的 Mn、Zn,并随枯枝落叶在地表相对富集,另外游离的 Mn、Zn 很容易被有机质和粘土矿物所吸附。因此当气候干冷时,地表风化作用微弱,Mn、Zn 不易析出,其活性降低;当气候暖湿时,生物化学风化作用加强,Mn、Zn 易被风化析出,随溶液迁移能力增强,在地形低洼处富集^[16]。

从不同元素地球化学行为分析,Mn、Rb、Nb、Cr 等化学性质相对稳定的元素,常常与 Fe、Al 等常量元素一起在强烈的生物化学作用下富集,其富集程度受气候干冷与暖湿状况的制约。气候越干冷,Mn、Rb、Nb、Cr 等元素的富集越低;反之,气候越暖湿,这些元素富集越高。而化学性质相对活泼的元素如 As、Sr、Zn、V、Ni 等与 Ca、Mg 等常量元素有着相似的化学行为。通常是在暖湿气候作用下相对淋失,而在干冷气候环境中相对富集。因此 CL 剖面微量元素 Rb、Mn、Nb、Cr、As、Sr、Zn、V、Ni 等的波动变化以及由此显示出的元素含量旋回变化特征在一定程度上反映了区域气候的干冷暖湿波动变化。

此外,V、Cr 和 Ni 是化学性质较稳定的过渡元素,属湿润气候型元素^[19]。在干冷气候条件下,由于化学风化和生物作用的减弱、介质碱性的增强和胶体的凝聚,这些元素活性降低,淋失减少;而在暖湿气候条件下,这些元素易于随溶液迁移,当溶液进入低洼地区以后,被粘土或有机酸吸附,在低洼地区富集。CL 剖面中 V、Cr、Ni 等湿润型气候元素在整个剖面中出现多次富集、淋溶,表明研究区经历过多次气候相对干旱-湿润的变化时期。

Zr、Nb 和 As 化学元素性质比较稳定,属于弱迁移元素,在地势低洼的负地形中,这类元素在长期性或周期性接近地下水作用下,从地下水中可以连续不断的沉淀富集^[20]。

Rb/Sr 比是一种常用的反映化学风化程度的替

代指标,具有明显的气候指示意义^[21-22]。在化学风化过程中 Rb 和 Sr 的地球化学行为存在明显的差别,其中 Rb 相对稳定,Sr 属于易迁移组分,强烈的化学风化作用导致 Sr 更多的迁移出风化带和成土剖面,从而使 Rb/Sr 比值增大,因此 Rb/Sr 比值与气候的炎热湿润程度呈正相关关系。在湿润气候条件下,沉积物中的 Rb/Sr 值相对较高,当气候干旱时,沉积物中 Rb/Sr 值相对较低。CL 剖面中的 Rb/Sr 比值出现了 5~6 个明显的峰谷旋回变化,表明研究区可能经历过 5~6 个气候相对湿润-干旱的变化时期。

Sr/Ba 比值与盐度呈正相关关系,其高值指示介质盐度较高,反映湿地水体相对萎缩或土壤湿度减小,标志气候干旱期;低值指示介质盐度较低,反映湿地水体相对扩张或土壤湿度增加,标志气候相对湿润期^[23]。CL 剖面 Sr/Ba 比值呈现 5~6 个较为明显的谷值,表明研究区可能存在 5~6 个气候相对明显的湿润阶段。

2.3 CL 剖面所记录的气候环境变化

由图 2 和表 3 可见,CL 剖面中 Mn、Nb、Rb、Cr、Ni、As、Sr、Zn、V、Ba 等 10 个微量元素的含量和分布特征呈有规律的波动变化,Rb/Sr 和 Sr/Ba 比值大小也有明显的峰谷变化。根据上述各个微量元素含量、特征元素比值变化所指示的风化程度、迁移累积特征和气候环境意义分析,表明 1.2 Ma 以来 CL 剖面残积坡积红土发育过程中,区域气候可能经历了多次旋回演变。基于测年初步确定的年代标尺,根据微量元素含量及其比值的旋回变化特点,可将 CL 剖面 1.2 Ma 以来的气候环境变化划分为 5 个阶段。

阶段 I:8.0~6.7 m,早更新世(Q₁)中期网纹红土层,距今年代约为 1 132~1 235 ka。微量元素组合及其比值反映气候由较温干向较暖湿过渡变化的特点,有多个峰谷变化,说明期间有气候波动变化,即暖湿与温干的变化,但是以温干气候为主,对应于深海氧同位素 MIS36-MIS30 阶段。其中,Cr、Ni 等湿润气候型元素的含量总体呈有规律减少趋势;Mn、Nb、Rb 等化学性质相对较稳定的元素含量,在这一时期总体呈现增加趋势;Ni、As 等性质较为活泼的元素含量呈现减少趋势;Rb/Sr 比值自下

而上呈增长趋势,Sr/Ba 比值变化趋势不明显,总体呈减小趋势,但在该阶段比值达到最大,为 0.1。说明这一时期红土沉积自下而上风化作用增强,红土的发育程度加强。

阶段 II:6.7~5.5 m,早更新世(Q₁)晚期网纹红土层,距今年代约为 740~1 132 ka。微量元素组合及其比值反映气候总体表现出暖湿的气候特征,有多个次级冷暖波动,对应于深海氧同位素 MIS30-MIS22 阶段。其中,780~900 ka 对应 MIS19-MIS21,属于暖期,气候以暖湿或温干为主^[24]。化学性质较稳定的 Mn、Nb、Rb 等元素含量在这一时期总体呈增加趋势;V、Sr、Zn 等活泼元素的含量呈减少趋势;且元素 Mn、Nb 和 Rb 在这一时期达到最高值,分别为 2 021.3、22.6 和 138.2 mg·kg⁻¹;Rb/Sr 比值自下而上呈增长趋势,Sr/Ba 比值呈减小趋势,表明该阶段红土的化学风化作用进一步加强,发育程度较上一阶段增强,充分表明该时期气候湿润的特点。

阶段 III:5.5~3.5 m,中更新世(Q₂)网纹红土层,距今年代约为 112.4~740 ka。微量元素组合及其比值反映气候总体呈现由较暖湿向较干冷过渡变化的特点,其间包含多个冷暖波动,大致对应于深海氧同位素 MIS21-MIS6 阶段。由于年代跨度较大,可能有多个侵蚀间断,并包括多个小的冰期间冰期,气候冷暖波动频繁。其中,196~148 ka 对应 MIS6,气候以干凉为主;0.69~0.72 Ma 对应 MIS17,气候以暖湿为主,期间存在冷暖波动。CL 剖面 V、Cr 等湿润型元素含量总体呈现增长趋势;Mn、Nb、Rb 等化学性质较稳定的元素含量在这一时期总体呈减少趋势;V、Sr、As 等活泼元素的含量呈增加趋势;Rb/Sr 比值在该阶段呈现两峰一谷,Sr/Ba 比值呈三峰两谷,说明气候存在明显的干冷暖湿波动变化。

阶段 IV:3.5~0.4 m,晚更新世(Q₃)早期非均质红土层,距今年代约为 48.5~112.4 ka。微量元素组合及其比值反映气候总体呈现温干向暖湿过渡,后期又过渡为温干的特点,但变化不太明显。此阶段大部分属于末次间冰期^[26],对应 MIS5 阶段,后期相当于 MIS4 阶段以来的残积坡积风化产物。CL 剖面微量元素记录的 Rb/Sr 比值自上而下增

大, Sr/Ba 比值自下而上减小; 元素 Mn、Nb、Rb 等的含量在本阶段总体呈增加趋势, 而 Sr、As 等元素的含量呈减少趋势; 在 0.6 m 处元素 Mn 的含量出现一高值, 为 $3\ 080.6\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可能因为接近剖面表层, 受人为和生物富集因素的影响, 使得本阶段 Mn 的含量较高。

阶段 V: 0.4~0 m, 现代红壤层。主要是冰后期以来残坡积物质生物化学风化以及长期人为耕作影响下成壤的产物, 对应 MIS1 阶段, 微量元素记录总体反映气候暖湿。剖面 Rb/Sr 比值达到最大, 其值为 2.84, 且自上而下呈减小趋势; Sr/Ba 比值明显增大, 且波动较大, 在 0.1 m 处最大, 而 0.3 m 处最小; 活泼元素 Sr 含量呈增加趋势; 元素 Ni、As、V、Zn 等的含量呈减少趋势; 且元素 Sr、Cr、As 和 Zn 的平均含量在本段达到最大, 分别为 52.3、55.2、13 和 $110.5\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于 CL 剖面表层可能受人为活动影响, 同时 Mn、Nb 等又是植物生长必须的微量元素, 现代植物生长吸收一定量的 Mn, 并随枯枝落叶落在地表矿质化而相对富集。所以 Mn、Nb 等性质较稳定的元素在剖面表层的含量较高。

3 结论

根据以上对 CL 剖面微量元素含量变化及特征元素比值所反映的气候变化特征的分析, 初步得出以下几点结论:

1) CL 剖面中, Mn、Nb、Sr、Zn、V 等微量元素含量的变化出现多个峰谷旋回。其中, Mn、Rb、Cr 等化学性质较稳定的元素其峰值段大体上对应区域生物风化作用增强, 红土发育程度加强, 气候暖湿; 其谷值段对应区域生物化学风化作用减弱, 红土发育程度减弱, 气候干凉。

2) 根据微量元素含量、元素比值的变化旋回特征, 可将 CL 剖面 1.2 Ma 以来的气候变化分为 5 个阶段, 即 1 132~1 235 ka, 气候由较温干向较暖湿过渡, 以温干为主; 740~1 132 ka, 总体表现出暖湿的气候特征; 112.4~740 ka, 气候由较暖湿向较干冷过渡变化; 48.5~112.4 ka, 气候总体呈现由干冷向暖湿过渡变化的特点; 48.5 ka 以来, 气候总体上由暖湿趋于冷干, 但冰后期现代红壤是在亚热带暖湿气候发育的。通过区域对比发现, 上述气候变化在

中国南方其他地区的第四纪红土记录中具有一定的普遍性。

3) 现在, 人们以位于太平洋的深海岩芯 V₂₈₋₂₃₈ 氧同位素分期作为第四纪气候变化的标准分期。通过 CL 剖面微量元素记录的气候变化旋回和太平洋深海氧同位素气候旋回的遥相关分析, 大体上反映出在十万年至万年尺度上, 研究区古气候变化与全球轨道尺度上的气候变化具有某种一致性, 同时也表现出亚热带东亚季风区第四纪气候变化和区域化学剥蚀沉积过程的特殊性, 化学元素的淋失或富集过程受到区域气候条件和地质地貌等区域性因素的影响。

致谢: 陈秀玲、姜修洋老师和马鹏、吴美榕、齐升吉等同学参与了野外样品的采集、实验测试等工作, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 朱照宇, 吴翼, 邱世藩, 等. 华南沿海第四纪类网纹红土的赋存层位及其年代问题[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4): 391-399.
- [2] Retallack G J. Soils of the past[M]. London: Unwin-Hyman, 1990: 1-520.
- [3] 程忠富, 李文达. 华南玄武岩红土化过程中微量元素地球化学[J]. 火山地质和矿产, 1994, 15(2): 35.
- [4] 熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 南方红土元素迁移特征及其古环境意义[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 25-31.
- [5] 胡雪峰, 龚子同. 江西九江泰和第四纪红土成因的比较研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 1-9.
- [6] 尹秋珍, 郭正堂. 中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期[J]. 2006, 51(2): 186-192.
- [7] 徐瑞松, 徐金鸿, 朱照宇, 等. 华南红土主元素表生地球化学特征地球化学[J]. 地球化学, 2006, 35(5): 547-552.
- [8] 苗莉, 徐瑞松, 朱照宇, 等. 华南红土微量元素表生地球化学特征及环境效应[J]. 农机化研究, 2008, 6: 126-130.
- [9] 朱丽东, 周尚哲, 叶玮, 等. 网纹红土稀土元素地球化学特征的初步研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 194-200.
- [10] 李凤全, 叶玮, 朱丽东, 等. 第四纪网纹红土的类型与网纹化作用[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 346-355.
- [11] 张生. 第四纪沉积物常用测年方法及其适用性研究[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2001, 24(4): 383-388.
- [12] 业渝光. 电子自旋共振(ESR)测年方法简介[J]. 中国地

- 质,1992,3:28-29.
- [13] 黄镇国,张伟强,陈俊鸿,等. 中国的红土期[J]. 热带地理,1998,18(3):35-41.
- [14] 黄镇国,张伟强. 中国红土期气候期构造期的耦合[J]. 地理学报,2000,55(2):200-208.
- [15] 刘永清. 福建省红壤元素背景值研究[J]. 福建农业科技,2007,6:59-61.
- [16] 李明启,靳鹤龄,董国荣,等. 萨拉乌苏河流域微量元素揭示的气候变化[J]. 中国沙漠,2006,26(2):172-179.
- [17] 黄镇国,张伟强,陈俊鸿,等. 中国南方红色风化壳[M]. 北京:海洋出版社,1996:122-300.
- [18] 杨艺,李保生,李云卓,等. 巴丹吉林沙漠查格勒布剖面微量元素反映的 150 ka BP 以来的气候变化[J]. 中国沙漠,2007,27(1):2-8.
- [19] 黄汝昌. 陆相沉积中古气候演变及元素的迁移、聚集和演化[C]//中国科学院兰州地质研究所. 中国科学院兰州地质研究所集刊(第一号). 北京:科学出版社,1982:137-160.
- [20] 多布罗沃利斯基 B B. 微量元素地理学[M]. 北京:科学出版社,1987:31-32.
- [21] Chen J, Ji J F, Qiu G, et al. Geochemical studies on the intensity of chemical weathering in Luochuan loess-paleosol sequence, China [J]. Science in China(Series D), 1998,41(3):235-241.
- [22] 叶荷,张克信,陈奋宁,等. 新疆叶城柯克亚 8~3.85 Ma 沉积地层中常量和微量元素分布对气候演化的响应[J]. 地质科技情报,2010,29(4):43-50.
- [23] Fritz S C. Paleolimnological records of climatic change in North America [J]. Limnology and Oceanography, 1996,41(5):882-889.
- [24] Lowe J J, Walker M J C. 第四纪环境演变(第二版)[M]. 北京:科学出版社,2010:2-12.
- [25] 李文漪,阎顺. 柴窝堡盆地第四纪孢粉学研究[C]//施雅风,文启忠. 新疆柴窝堡盆地第四纪气候环境变迁和水文地质条件. 北京:海洋出版社,1990:46-74.
- [26] 刘嘉麒,倪云燕,储国强,等. 第四纪的主要气候事件[J]. 第四纪研究,2001,21(3):239-247.

Climate Change Indicated by Quaternary Red Earth Trace Elements at Changle in Fujian Province

ZHAO Qian^{1,2}, LI Zhi-zhong^{1,2}, JIN Jian-hui^{1,2}, ZHU Shu-ya^{1,2}, HU Fan-gen, ZHANG Hui

(1. School of Geography Science; 2. Institute of Geography Research, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Based on the field investigation and combined with the OSL and ESR dating, this paper focuses on the research of red earth profile of Changle (CL) in Fujian province. The results show that: the content of trace element at CL profile has a regular fluctuation change in their concentration and distribution. It is suggested that there are different geochemical behaviors between these element during weathering and pedogenesis. Higher content of Mn, Nb, Rb, Cr, Pb or lower Ni, As, Sr, Zn, V in CL profile means a warm and wet climate, and luxuriant vegetation. Lower content of Mn, Nb, Rb, Cr, Pb or Higher content of Ni, As, Sr, Zn, V in CL profile means a cold and dry climate. Since the early Pleistocene the climate of Changle has experienced 4~5 times climates changes in dry-wet and cold-warm fluctuations. It shows that since the late early-Pleistocene, the climate changes recorded by the content and their ratio of trace element at CL profile is the specific response to the global climatic changes, and meanwhile it displays special zonality at the subtropical monsoon region.

Key words: quaternary; the trace element; red earth; climate change; Changle in Fujian province

(责任编辑 方 兴)