

粤东北丘陵区末次间冰期红土的特征与气候环境

李志文^{1,2)}, 李保生^{2, 3)}, 董玉祥¹⁾, 温小浩²⁾, 邱世藩⁴⁾, 牛东风²⁾, 欧先交²⁾, 彭培欣²⁾

1) 中山大学地理科学与规划学院, 广州, 510275; 2) 华南师范大学地理科学学院, 广州, 510631;

3) 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安, 710061;

4) 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640

内容提要: 地处华南之粤东北丘陵区的蕉岭红土属粉砂质粘土, 形成于末次间冰期。红土的细粘粒含量为 12.15%~24.64% (平均值 18.46%)、 M_z 为 $5.91\Phi\sim 7.53\Phi$ (6.72 Φ)、概率累积曲线和频率曲线分别呈现以“四段式”和“三峰式”构型; 主元素氧化物以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 为主, 含量依次为 50.10%~53.14% (51.36%)、23.07%~24.44% (24.00%)、10.18%~11.40% (10.77%), 其它如 CaO 、 Na_2O 、 MgO 、 K_2O 的含量均小于 1%。这一趋向于细粉砂分布的粒度特征和脱硅富铝化的化学元素特征说明红土形成于较强的风化—淋溶作用下, 硅铝系数 (3.49~3.86, 平均为 3.64) 指示多数层位属次强度富铝化。其气候环境, 以 $<2\mu\text{m}$ 和 $<1\mu\text{m}$ 颗粒的含量、硅铝系数、CIA 值为指标, 与我国的南亚热带—北热带一些地点的现代赤红土和砖红土作一详细对比后认为蕉岭红土发育在湿热于现今南亚热带, 相似于热带北缘的气候环境之下。这一看法与前人有关同期“大熊猫—剑齿象动物群”指示的古生态的研究结果相吻合。由此表明, 末次间冰期的粤东北甚至整个华南地区可能都处在类似现今热带北缘的气候环境之下, 其时的热带—亚热带界线向北推移了至少 3 个纬度。

关键词: 蕉岭红土; 末次间冰期; 粒度; 主量化学元素; 热带气候环境

红土是发育于我国热带—亚热带各类岩石和第四纪松散沉积物之上的富铝化风化壳 (袁宝印等, 2008), 也是我国典型的陆相层系和环境研究的最佳信息载体之一。早在上世纪 20~30 年代, 德日进 (Teilhard de Chardin et al., 1935) 和李连捷 (Li Lienzich, 1936) 在调查两广地区的新生界时, 曾将该地的网纹红土称为“原生的蠕虫状砖红壤”, 并认为中更新世是发育此类红土的最盛时期。然而, 自此之后的半个世纪, 有关红土的研究颇为沉寂, 直至 90 年代以后才又陆续取得一些新的进展, 其中以中—北亚热带的长江中下游流域的工作较多 (袁国栋等, 1990; 李长安等, 1997; 胡雪峰等, 1999, 2004, 2005)。而对其以南的华南亚热带—热带区域, 虽然也有较多工作成果 (广东省土壤普查办公室, 1993; 李文达等, 1995; 黄镇国等, 1996), 如研究较详的广西百色、南宁两盆地的中更新世网纹红

土 (黄慰文等, 1990; 高柳青等, 1996; 尹秋珍等, 2006)、珠江三角洲晚更新世晚期—全新世的花斑粘土 (黄镇国等, 1982; 余素华, 1999, 2003) 和广东雷州半岛的第四纪多旋回火山岩—红土系列 (朱照宇, 2001) 等, 但针对晚更新世早期的末次间冰期红土的特征及记录的古环境的工作不多。2000 年来, 作者等几度对华南之粤东北丘陵区晚第四纪土状堆积进行了广泛的调查, 发现在类似黄壤的棕黄色土与中生代岩层上覆的风化层或含红色粘土的混杂砾石层之间普遍分布有数米厚的岩性比较均一的赤红色土。对此, 我们在蕉岭一带选择了本文称为“蕉岭地层剖面”的此类红土进行了工作。经初步研究, 确定其时代属末次间冰期。下文首先介绍剖面所在地的现代自然环境, 再往下, 对红土的地质时代和粒度、化学元素分析结果作一阐述, 最后将据此并结合相关资料探讨其形成时的气候环境。

注: 本文为中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点开放实验室基金 (批准号 SKLLQG0809)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号 20070574005)、国家自然科学基金 (批准号 40471139) 和教育部国家大学生创新性实验计划 (批准号 081057415) 项目的成果。

收稿日期: 2009-06-17; 改回日期: 2009-08-10; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 李志文, 男, 1982 年生。博士研究生。主要从事海岸风沙地貌与环境演变的研究。通讯地址: 510275, 中山大学地理科学与规划学院; Email: lizw1982@163.com。通讯作者: 李保生, 教授。Email: libsh@senu.edu.cn。

1 区域自然环境

蕉岭地层剖面位于粤东北地区韩江上游的梅州市蕉岭县南部上坑村牌坊偏西 400m,G205 国道旁,24°25'N,116°09'E(见图 1)。剖面所在的蕉岭县四面环山,地势由北向南倾斜,以山地、丘陵地貌为主;前第四纪基岩为砂页岩、石灰岩、变质岩等;气候类型属南亚热带东北边缘季风气候,多年平均气温 19.5~21.1℃,1 月平均温 10.0~12.0℃,7 月平均温 26.9~28.8℃,一年中有 7 个月(4~10 月)月平均气温在 20℃以上,历年极端最高气温 39.2℃,极端最低气温 -2.4℃;多年平均降雨量 1500~1800mm,集中在 4~9 月,占全年 74%以上;冬春季盛行偏北风,夏秋季盛行偏南风,风力一般不大于 8 级;植被为常绿阔叶林(亚热带季雨林),主要木本植物有松科、杉科、壳斗科、竹科等,林下植被以桃金

娘、芒萁等为主,也常见蕨类、草本植物和藤本植物;地带性土壤主要为赤红壤(海拔<300 m 的低丘和山足)、山地红壤(300~500 m 的低山丘陵)、山地黄壤(500~900 m 中低山)等(蕉岭县地方志编纂委员会,1992)。

2 蕉岭红土层位及其年代确定

蕉岭剖面厚约 510cm,自上而下可划分为:

- JL1 灰黑色壤土,粘土质粉砂,含较多虫孔和植物根系,松散,偶见小砾石和粗砂,地表生长着大量的乔木与灌木植物。

厚 30cm。
- JL2 棕黄—浅红橙色粘土质粉砂,可见虫孔和植物根系,半胶结,团粒状,紧实,无层理,垂直解理发育。

厚 180cm。
- KJL3 赤红色粉砂质粘土,棱柱状结构,半胶结、紧实、具较多黄色斑纹,无层理。

厚 340cm。
- JL4 含红色粘土的混杂砾石层。

厚 300 cm。

~~~~~不整合面~~~~~

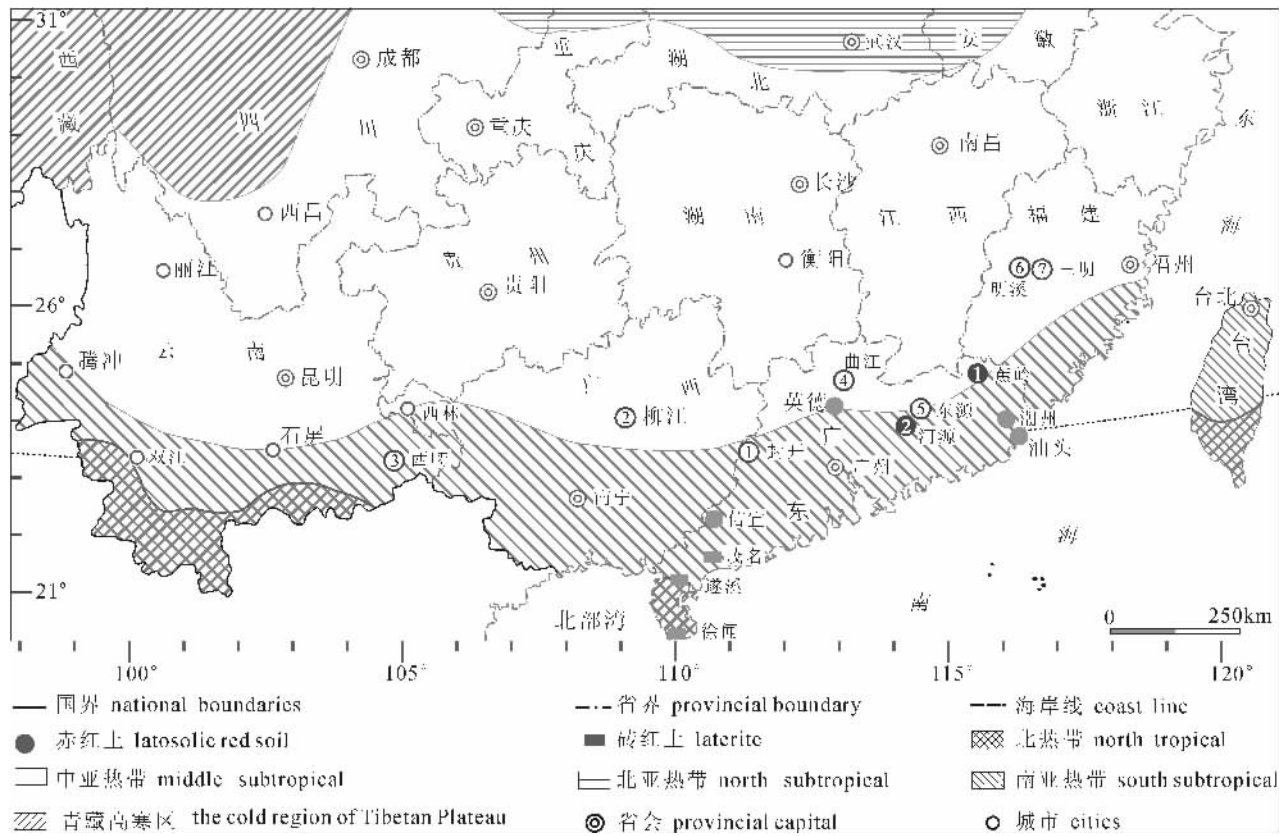


图 1 蕉岭剖面位置与本文涉及的红土和动物群化石地点

Fig. 1 The positions of the Jiaoling stratigraphic section, the red earth and the Ailuropoda—Stegodon

fauna referred in this paper

①~⑦大熊猫—剑齿象哺乳动物化石地点:①封开—黄岩洞/罗沙岩;②柳江—咁前洞;③西畴—仙人洞;④曲江—马坝洞/狮子山;  
⑤东源—碧寿洞;⑥三明—万寿岩;⑦明溪—剪刀坑山。①~② 研究地点:① 蕉岭地层剖面;② 临江地层剖面  
①~⑦ The positions of Ailuropoda—Stegodon fauna fossils:① Huangyan cave and Luoshayan cave in Fengkai;② Ganqian cave in Liujiang;③ Xianren cave in Xichou;④ Maba cave and Shizishan cave in Qujiang;⑤ Bishou cave in Dongyuan;⑥ Wanshouyan Hill in Sanming;⑦ Jiandaoqian Hill in Mingxi。①~② Study sites:① Jiaoling stratigraphic section;② Linjiang stratigraphic section

JL5 上白垩统南雄组( $K_2n$ )杂色砂页岩,岩层呈轻度倾斜且风化强烈,具不清晰层理,多处可见由风化形成的呈斑状分布的高岭土。出露厚度逾 6m。

上述地层中,棕黄色土(JL2)属通常认为的黄壤,其下伏的 JL3 即是本文所要讨论的红土发生层位,覆于与下伏地层——上白垩统南雄组( $K_2n$ )杂色砂页岩(JL5)呈不整合的含红色粘土的混杂砾石层(JL4)之上。JL4 及其以上的地层的新老关系呈现出连续堆积,其间未见明显的剥蚀作用。

关于蕉岭红土的形成时代,由于目前仅对其底部(即红土发育的起始年代)进行了年代测试,因而还无法确切说明红土的顶部年代,也即其终止的时间。鉴此,本文试图采用地层及其对比作一讨论。

图 2 显示蕉岭及邻近区域的临江地层剖面 and 碧

寿洞地层剖面的地层划分方案。其中的年代除一个为 OSL(光释光)测试结果外,其余都为 TL(热释光)结果。分别由中国科学院地球环境研究所光释光实验室王旭龙先生、中国科学院广州地球化学研究所热释光实验室黄宝林先生和卢良才女士完成。测试仪器分别为美国 Day Break 2200 光释光测定仪和英国牛津 Littlemore 科学仪器公司生产的 711 型热释光断代仪。测试材料均是从样品中提取的 $<10\mu\text{m}$  的石英细粒。测试年龄及其参数见表 1。

从图 2a 可以看出,蕉岭红土底部的年代为  $132.8\pm13.5\text{ ka BP}$ ,也就是说其下限差不多在晚更新世之初、JL1~JL4 是晚更新世以来的堆积。其上限—JL2/JL3 界面、也即其发育结束的时代,目前

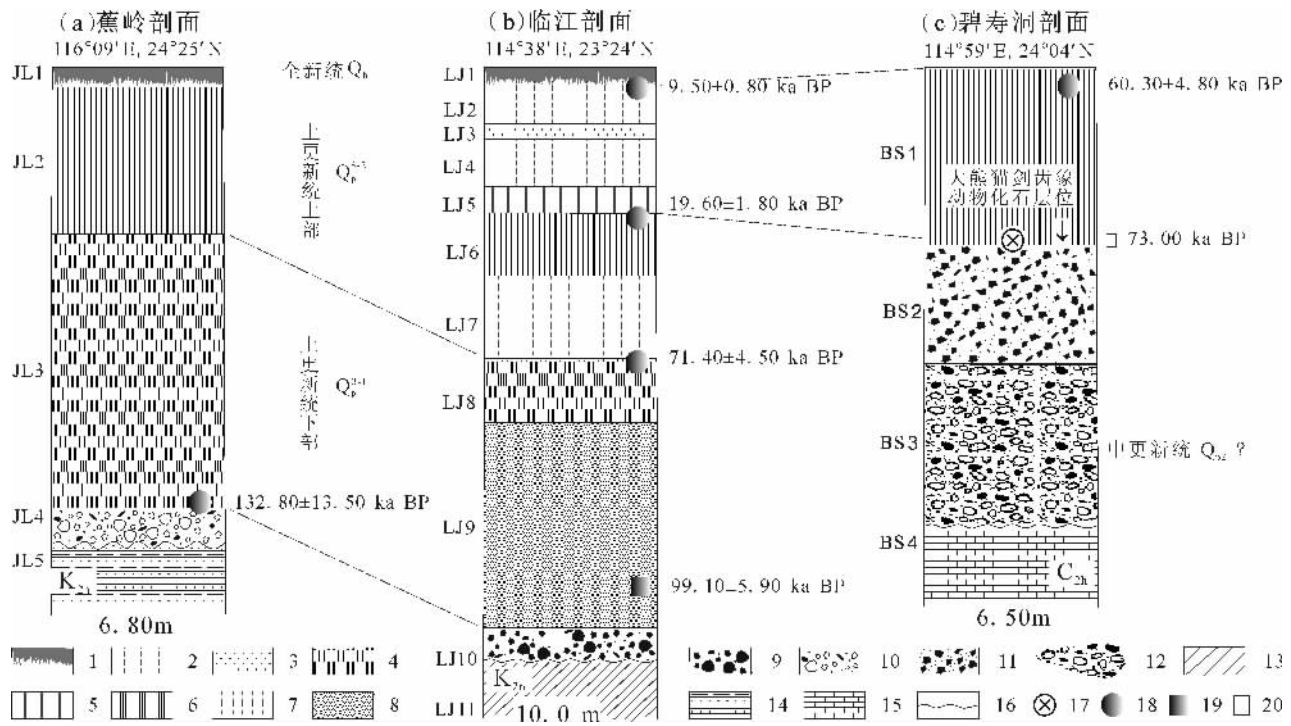


图 2 蕉岭(a)、临江(b)和碧寿洞(c)地层剖面及其对比

Fig. 2 Comparison between Jiaoling(a), Linjiang(b) and Bishoudong cave(c) stratigraphic sections

1—耕作层(灰黑色壤土);2—亮—浅红橙色砂质粉砂;3—浅红橙色粉砂质极细砂;4—弱网纹红土(棕红色粘质红土);5—浅红橙色粉砂;6—棕黄色粉砂;7—棕黄色粘土质粉砂;8—强网纹红土(具条、斑状的棕红色粘质红土);9—风化强烈的绛红色土状砾石层;10—中等风化的杂色砂质砾石层;11—桔红色粘土和钙质轻微胶结的角砾石层;12—钙质半胶结的冲积砾石层;13—上白垩统南雄组( $K_2n$ )紫红色砂岩;14—上白垩统南雄组( $K_2n$ )紫红色砂岩与页岩;15—中—上石炭统壶天群结晶( $C_2h$ )灰岩;16—不整合面;17—含大熊猫—剑齿象化石层位;18—热释光年代;19—光释光年代;20—推测年代

1—Cultivated horizon (grey black soil); 2—bright—light red orange sandy silt; 3—light red-orange silty very fine sand; 4—weak-weathered reticulated red clay (brown-red clayey earth); 5—light red-orange silt; 6—brown-yellow silt; 7—brown-yellow clayey silt; 8—strong-weathered reticulated red clay (brown-red clayey earth with veins of strips and spots); 9—strong-weathered, deep red and soil-like gravels; 10—moderate-weathered and mottled sandy gravels; 11—breccia layer slightly cemented with red orange clay and calcium; 12—dark-grey alluvial gravels half cemented with calcium; 13—amaranth sandstone of Upper Cretaceous Nanxiong Formation ( $K_2n$ ); 14—amaranth sandstone and shale of Upper Cretaceous Nanxiong Formation ( $K_2n$ ); 15—crystalloid limestone of Middle—Upper Hutian Group ( $C_2h$ ); 16—unconformable plane; 17—fossiliferous horizon of the Ailuropoda—Stegodon Fauna; 18—TL age; 19—OSL age; 20—estimated age

表 1 蕉岭剖面与近邻地区相关地层的释光测年结果及相关参数

Table 1 TL and OSL ages of the Jiaoling stratigraphic section and its adjacent area and related parameters

| 层位/实验<br>室编号 | U (×10 <sup>-6</sup> ) | Th (×10 <sup>-6</sup> ) | K(%)       | 等效剂量<br>E. D (Gy) | 年剂量<br>(mGy) | 年龄<br>(ka BP) | 测年方法 |
|--------------|------------------------|-------------------------|------------|-------------------|--------------|---------------|------|
| JL3B/ TGD847 | 3.89±0.19              | 30.11±0.60              | 0.62±0.005 | 224.40±16.83      | 1.69±0.05    | 132.80±13.50  | 热释光  |
| LJ1B/ TGD631 | 5.99±0.30              | 35.80±0.72              | 3.00±0.024 | 71.40±4.50        | 7.58±0.22    | 9.50±0.80     | 热释光  |
| LJ6T/ TGD800 | 6.18±0.31              | 41.56±0.83              | 2.95±0.024 | 136.80±9.58       | 6.97±0.21    | 19.60±1.80    | 热释光  |
| LJ8T/ TGD848 | 4.62±0.23              | 42.10±0.84              | 2.01±0.016 | 442.00±27.85      | 6.19±0.19    | 71.40±6.60    | 热释光  |
| BS1T/ TGD663 | 3.85±0.19              | 18.49±0.37              | 2.01±0.016 | 252.00±17.64      | 4.18±0.13    | 60.03±4.80    | 热释光  |
| Hy5(08G145)  | 3.16                   | 15.5                    | 1.58       | 396.07±18.73      | 4.00±0.17    | 99.10±5.90    | 光释光  |

注：本表中层位号之后的“T”和“B”分别代表所测层位的顶部和底部。

虽缺乏年代测试结果,但不妨从与之近邻的临江地层剖面的已知年代及其对比作一推断。在此,首先对该剖面的地层层序做一描述。临江剖面(23°34' N, 114°38'E)位于蕉岭剖面西南,发育于东江一级基座阶地。剖面(图 2b)自上而下出露的地层为 LJ1 ~ LJ8 和 LJ9 之一部,LJ9 下伏地层通过人工开挖获得。描述如下:

- LJ1 地表耕作土,暗灰黑色粉砂质砂,团粒状。地表生长高约 2~3m 的乔木和藤本类植物,含较多腐殖质和未腐烂枯枝落叶层。厚 30cm。
- LJ2 亮红橙色砂质粉砂,团粒状,松软。55cm。
- LJ3 浅红橙色风成粉砂质极细砂,无层理,整体分选较均匀,松散。15 cm。
- LJ4 浅红橙色砂质粉砂,团粒状,松软。92cm。
- LJ5 浅红橙色粉砂,致密,较紧实。54cm。
- LJ6 棕黄色粉砂,团块状,致密、紧实,无层理,粘性较强。106 cm。
- LJ7 棕黄色粘土质粉砂,性状同 LJ6。112 cm。
- LJ8 棕红色发育较弱的粘质网纹红土,团块状,紧实,无层理。116 cm。
- LJ9 网纹红土,粉砂质粘土,含红、黄、白相间的蠕虫状、

树枝状等条块,底部网纹呈垂直条带状,网纹构造向下发育愈加密集,该网纹红土被新近堆积的高河漫滩沉积物覆盖。出露厚度 65cm,总厚 435 cm。

LJ10 风化强烈的绛红色土状砾石层,与下伏上白垩统南雄组红色砂岩呈角度不整合。30 cm。

~~~~~不整合面~~~~~

LJ11 红色砂岩,属上白垩统南雄组(K₂n)紫红色砂岩。可见厚度 80cm。

不难看出,上述的临江剖面堆积总体上显示出与蕉岭剖面类似的情形,即也是一套伏于壤土(LJ1)之下的黄壤(LJ2~LJ7)或以棕黄—浅红橙色土为主的沉积在上、网纹红土(LJ8~LJ9)在下的序列,后者之下伏地层同样是与上白垩统南雄组红色层系(K₂n)呈不整合接触的厚数十厘米的风化砾石层(LJ10)。由于这两个剖面地点自砾石层堆积—风化以来的层序未见明显的沉积间断,故可以假定两地红土始终是等时的。在临江剖面,网纹红土顶部即 LJ8T 的年代为 71.40±6.60 ka B P,相当于棕黄—浅红橙色土/网纹红土也即 LJ7 / LJ8 界面的时间界线。按地层对比,这一界面亦相当于蕉岭剖

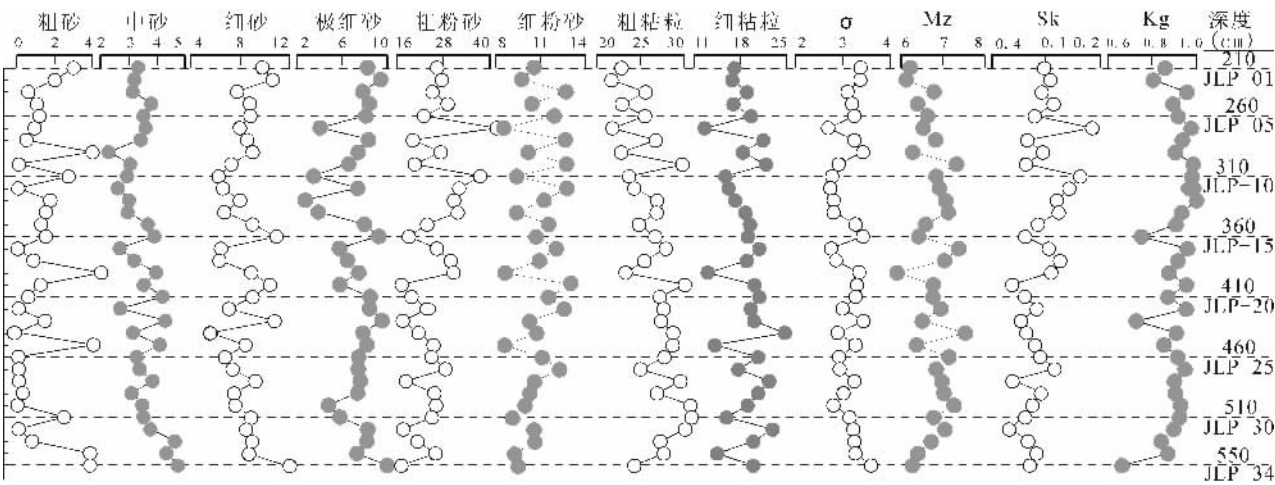


图 3 蕉岭红土的粒度组成与其参数特征

Fig. 3 The grain-size composition of Jiaoling red earth and its parameters

面 JL2/JL3 之界面,故前者的时限也应该等同于后者。这样一来,蕉岭剖面红土堆积的年代应该是 132.8~71.4 ka B P,差不多相当于 MIS5 或极地冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 5 的年代(Shackleton *et al.*, 1973; GRIP Members, 1993),也即通常所认为的末次间冰期。另外,地处上述二剖面之间的碧寿洞地层剖面(24°04'N, 114°59'E,位置见图 1)的年代似乎暗示粤东北地区分布于厚层棕黄—浅红橙色土之下的红土的终结时代也是末次间冰期的闭幕(图 2c)。该地棕黄色土之近底部的年代为 60.30±4.80 ka B P,近年的研究推测其底部年代大致在 73 ka B P (李保生等,2008),这似乎说明大约在距今 7 万年以后的一个颇长的地质时代内已不具备发育红土的气候环境。值得提出的是,JL3 与 LJ8 和 LJ9 的对比问题。几者虽然都为红土,但前者不具备网纹,而后两者为网纹化的红土,这显然与是否受到的地下水的淋滤作用有关。但这只能说明红土在形成条件方面的局部差异,并不因此而失去进行地层对比和讨论的意义。加之,LJ9 即网纹红土距底部 50cm 处(图 2b)的新近光释光测年结果——99.10±5.90 ka B P 也说明蕉岭与临江剖面的上述地层对比是合宜的。

3 蕉岭红土的粒度和主要化学元素的分布

3.1 粒度分析及结果

对蕉岭红土按 10cm 等间距采集 34 个样品在华南师范大学地理科学学院沉积物实验室进行粒度分析。分析仪器为英国马尔文公司生产的 Mastersizer 2000 M 型激光粒度分析仪,分析范围 0.02~2000 μm ,重复性达 0.5%。其实验流程:首先将所有样品经室内自然风干后,取部分样品加入 HCl,无气泡产生,表明样品中几乎不含碳酸盐类,故省略样品的前处理步骤;均匀称取 0.5~1.0g 样品置于烧杯中,加入过量的 H_2O_2 以去除有机质,然后加入 10mL 浓度为 0.05mol/L 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 分散剂煮沸,静置 24h 后滤去清液并稀释到适当浓度,再用超声波清洗机振荡 10 min 后进行分析,每个样品测试 3 次以检验其是否在有效误差范围内,最后取其平均值。粒度共分为 101 个粒级:2000~100 μm 参照十进制,<100 μm 按中国黄土的一般分级原则(刘东生, 1985),其余为仪器设定标准,数据输出以 EXCEL 格式存储并在 Matlab 软件中编程进行数据处理。现将红土的粒度分析结果绘于图 3 中。为了更清楚地说明蕉岭红土的粒度分布状态,本图还

列出了相关的参数值,其计算的颗粒粒径以之对数 Φ 值表示,转换公式为 Krumbien (Krumbien W. C., 1938) 制定的 $\Phi = -\log_2 d$ (d 为直径,单位为 mm)。这些参数值是 Mz (平均粒径)、 σ (标准离差)、 Sk (偏度)、 Kg (峰态),计算公式采用 Folk and Ward 的公式(Folk and Ward, 1957):

$$Mz = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) / 3$$
$$\sigma = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} - \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6}$$
$$Sk = \frac{\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_{95} + \Phi_5 - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)}$$
$$Kg = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$$

分析结果表明,蕉岭红土属粉砂质粘土。以粘粒(<5 μm)含量最高,次为粉砂(5~50 μm)、砂(50~2000 μm),分布范围依次为 34.00%~53.39%、24.77%~54.85%、13.61%~30.22%;平均为 44.94%、35.44%、19.62%。其中,以粗粘粒(1~5 μm)含量最高,次为粗粉砂(10~50 μm),分布范围分别为 21.72%~30.85%和 16.24%~41.84%,平均含量为 26.47%和 24.68%;细粘粒(<1 μm)、细粉砂(5~10 μm)、细砂(100~250 μm)、极细砂(50~100 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1000 μm)含量的分布范围依次为 12.15%~24.64%、8.53%~13.01%、4.01%~11.61%、2.76%~9.97%、2.30%~4.75%、0~4.48%,平均含量为 18.46%、10.76%、7.47%、7.27%、3.49%、1.39%;极粗砂(1000~2000 μm)含量最低,0~0.97%,平均 0.04%,且仅存于 4 个样品中。

除了上述分布的一般特征外,在不同深度红土的各个粒级(粗砂—细粘粒)的含量分布上,虽然显示波动,但波幅并不大,似乎从总体上显示出相对均一的岩性特征(见图 3)。

粒度参数 Mz 、 σ 、 Sk 、 Kg 值的变化范围分别为 5.91~7.53 Φ (粗粉砂—细粉砂粒级,其中 22 个样品属细粉砂粒级)、2.69~3.59(分选很差)、-0.3~0.16(负偏—近对称,31 个样品为负偏)、0.66~1.00(宽峰—中等峰态,14 个样品为宽峰峰态),平均值分别为 6.72 Φ 、3.12、-0.12、0.91。

概率累积曲线(图 4a)呈“四段式”分布,分别以 A、B、C、D 表示:粗截点主要位于 1~2 Φ ,细截点于 10~11 Φ ,此外,在 4~5 Φ 处亦存在截点。A 段为颗粒最粗组分,分布于 5%~15%之间;B、C 段是红土的主要组分,65%~80%;D 段属细粘粒组分,8%~20%之间。频率曲线(图 4b)呈示明显的“三峰”结

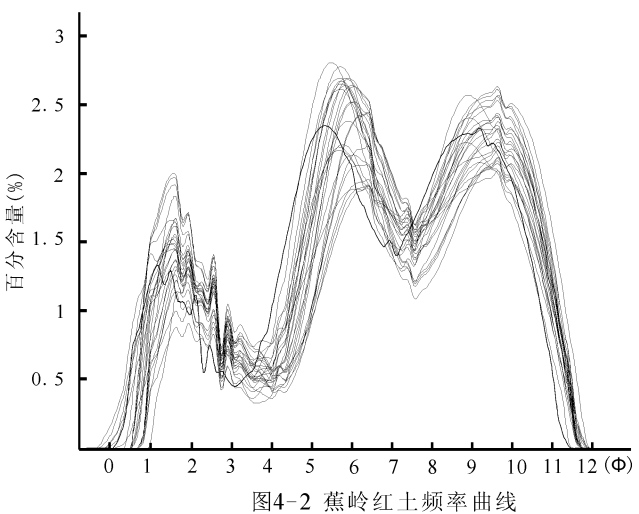
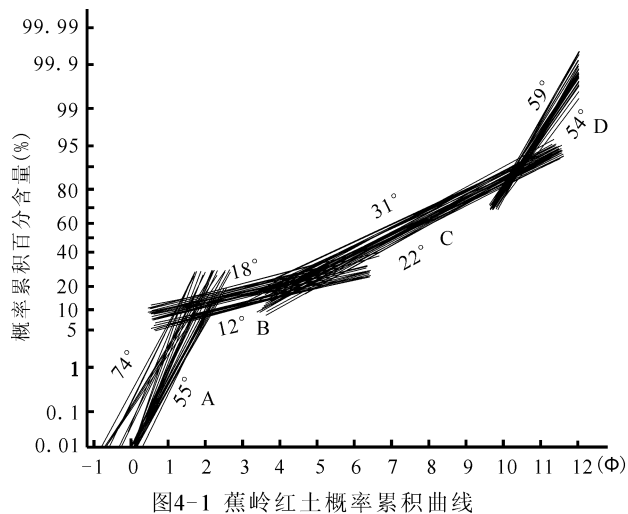


图 4 蕉岭红土的概率累积曲线(a)和频率曲线(b)
Fig. 4 The accumulative(a) and the frequency(b) curves of the Jiaoling red earth

构,主众数为 8~11Φ,次众数为 4~7Φ,第三众数为 1~2Φ,差不多与概率累积曲线显示的特征一致。另外,二者还反映出蕉岭红土在岩性上具有相对均一的特征,如诸样品的概率累积曲线都具有“四段式”构形且各个段落组分的分布趋向于平行延展,频率曲线都具有较为相似的“三峰式”特征。

3.2 主元素分析及结果

对蕉岭红土按 30cm 等间距采集 11 个样品进行了全量化学元素分析。分析仪器为日本株式会社理学 3070E 型 X-荧光光谱仪。方法是将风干样品研磨至 < 200 目筛,在高压下压制成片(直径 30mm),选择适当的条件进行分光计测量,并经计算机处理后得出结果。在分析的主元素氧化物中, SiO₂ 含量最高, 50.10% ~ 53.14% (平均值 51.36%), Al₂ O₃ 次之, 23.07% ~ 24.44% (24.00%),再次是 TF_{e2} O₃ (Fe₂ O₃ + FeO), 10.18% ~ 11.40% (10.77%)。其余常见氧化物的含量均不足 1%; K₂ O 为 0.66% ~ 0.87% (0.71%), MgO 为 0.27% ~ 0.32% (0.30%)、Na₂ O 为 0.08% ~

0.10% (0.09%)、CaO 在各层中都约 0.07%。在此基础上,本文还计算出硅铝系数 $[=n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)]$ 和化学蚀变指数 CIA, $\text{CIA} = n(\text{Al}_2\text{O}_3) \times 100 / [(n(\text{Al}_2\text{O}_3) + n(\text{CaO} \ast) + n(\text{Na}_2\text{O}) + n(\text{K}_2\text{O}))]$, 式中的 CaO * 指硅酸盐中的 CaO,参照 Honda and Shimizu 提出的公式进行校正 $[n(\text{CaO} \ast) = 0.35 \times 2 n(\text{Na}_2\text{O}) / 62]$ (Honda *et al.*, 1998)。现将这些结果统列于表 2。为了便于在下文中讨论蕉岭红土发育时的气候环境,我们亦将广东广州和徐闻的一些相关数据列于本表。

4 蕉岭红土堆积时的气候环境

4.1 粒度指示的气候环境

前述的粒度分析结果,虽然总体上显示蕉岭红土所具有的粉砂质粘土的岩性特征,但砂物质亦占相当的比例,兼之其各个粒级的砂粒(极细砂—粗砂)皆有之以及 > 10Φ 的细粘粒的分布,就显此类红土的物质不均且机械成分复杂,从而导致前已述及的 σ 显示的分选很差、Kg 的宽峰—中等峰态和概率累积曲线、频率曲线分别呈现的“四段式”、“三

表 2 蕉岭红土与广州赤红土和徐闻砖红土中的主氧化物含量(%),硅铝系数和 CIA 值
Table 2 The oxides of major elements, SiO₂/Al₂O₃ ratio and CIA value of Jiaoling red earth, latosolic red soil in Guangzhou and laterite in Xuwen

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TF _{e2} O ₃ | CaO | K ₂ O | Na ₂ O | MgO | 硅铝系数 | CIA |
|------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------|------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|
| 广州 | 53.30~59.00 | 22.50~25.69 | 6.16~7.70 | 0.03~0.07 | 1.43~1.79 | 0.27~0.28 | — | 3.53~4.46 | 89.20~91.76 |
| 徐闻* | 35.13 | 27.49 | 18.32 | 0.27 | 0.18 | 0.09 | 0.27 | 2.17 | 98.4 |
| 蕉岭** | 50.10~53.14 | 23.07~24.44 | 10.18~11.40 | 0.07~0.07 | 0.66~0.87 | 0.08~0.10 | 0.27~0.32 | 3.49~3.86 | 95.07~96.24 |

注:“*”表示徐闻为一个样品的分析结果;“**”表示所测为全铁含量;“—”表示未检测出;都为全岩样品。

峰式”的构型特点;同时趋向于细粉砂的 M_z 分布数值和频率曲线中主次众数($8\sim 11\Phi$, $4\sim 7\Phi$)的分配,说明粘粒、细粉砂在红土成分中占有相当大的比例;而不同深度红土样品在各个粒级含量上的近似,特别是诸样品概率累积曲线和频率曲线几乎一致的“四段式”、“三峰式”构型揭示出红土在堆积—风化过程中总体上处在一种相对稳定的、波动较小的气候环境中。

关于蕉岭红土粒度指示的气候环境,如果以其 $<2\mu\text{m}$ 颗粒的含量与表 3 列出的我国南亚热带—北热带一些地点如英德、潮州、汕头、信宜的现代赤红土(广东省土壤普查办公室, 1993)与茂名、徐闻(广东省土壤普查办公室, 1993)、遂溪(李庆逵等, 1983)的现代砖红土的相同粒级含量作一比较则可能间接说明其发育时的湿热化程度。由表 3 可见,前述的蕉岭红土 $<2\mu\text{m}$ 颗粒的含量($23.19\%\sim 39.03\%$, 平均值 31.47%)按平均值都略高于我国南亚热带—北热带除母岩为玄武岩(汕头、徐闻)以外的其它岩石(或土壤)上发育的赤红土和砖红土中相同粒级的含量(表 3),其中茂名的砖红土为典型的南亚热带南部边缘气候环境的产物。就蕉岭红土 $<1\mu\text{m}$ 的细粘粒含量($12.15\%\sim 24.64\%$)与北热带的遂溪砖红土中相同粒级含量(表 3)的对比来看,虽然前者波动范围较大,但其平均值(18.46%)却与后者(18.60%)几乎是一致的。据前人研究,风化类型的红土(黄镇国等, 1996)或土壤(刘东生, 1985)的粘粒($<5\mu\text{m}$)主要来自于原生矿物经历的风化成壤作用,其含量随生物化学风化作用的深入增加,而这种风化作用的强度取决于气候的湿热程度。当然,母质不同也势必影响红土成土过程中的粘粒含量,如表 3 所列的以玄武岩为母质的红土中异常高含量的粘粒即可说明这种情况。不过,除此之外的英德、信宜、茂名发育的红土, $<2\mu\text{m}$ 颗粒含量值的波动范围—— $26.24\%\sim 30.05\%$ 并不大。而

潮州者, $19.29\%\sim 29.35\%$,虽然显示其含量的下限相对偏低,但其含量上限却与前三者含量的上限几乎没有什么明显的不同。这一结果,使我们倾向地认为红土中 $26\%\sim 30\%$ 的 $<2\mu\text{m}$ 颗粒的含量也许更加接近于南亚热带—北热带这一气候带的风化情形。如果这种看法合理, $<2\mu\text{m}$ 颗粒含量略高于上述几个地点的蕉岭红土,则可能暗示了其时的气候带亦属于南亚热带—北热带。但由于其 $<2\mu\text{m}$ 颗粒含量的平均值高于地处热带—亚热带交界的茂名的砖红土、 $<1\mu\text{m}$ 颗粒含量的平均值又相近于热带之遂溪的砖红土,使我们更倾向于认为蕉岭红土是类似现今热带北缘气候环境的产物。加之赤红土、砖红土分别形成于年均温 $20\sim 22^\circ\text{C}$ 和 $22\sim 28^\circ\text{C}$ 、年降水量 $1200\sim 2500$ 和 $1500\sim 2500\text{mm}$ 的气候环境下,分属南亚热带、热带之地带性土壤(广东省地方史志编纂委员会, 1999)。据此,我们更进一步认为,蕉岭红土形成时的气候环境湿热于南亚热带,接近于北热带的雷州半岛北部的遂溪。这表明,其形成时有如雷州半岛的现代气候条件:年均温 $22\sim 24^\circ\text{C}$ 和年降水量 $1300\sim 2300\text{mm}$ (广东省地方史志编纂委员会, 1999),这一水热条件应该是蕉岭红土形成时的相似的气候环境。

4.2 主元素氧化物指示的气候环境

红土中化学元素及其氧化物的含量既受自身理化性质的影响,也与之所处的气候环境密切相关。 CaO 、 Na_2O 、 MgO 、 K_2O 等易迁移氧化物在风化过程中最先淋溶,其含量低值可指示较为湿热的气候环境; SiO_2 属可迁移氧化物,仅在湿热地区强烈生物化学风化作用的后期才开始淋失,此时的低含量值代表更为湿热的气候环境; Al_2O_3 、 TFe_2O_3 属惰性氧化物,较难淋失,其含量高值可指示十分湿热的气候环境(刘东生, 1985; 李文达等, 1995; 黄镇国等, 1996)。此外,亦可采用基于两种或多种化学元素氧化物比值的风化指数来判断红土的风化程度,如硅

表 3 岭南热带—南亚热带一些地点的赤红土和砖红土中 $<2\mu\text{m}$ 或 $<1\mu\text{m}$ 粒级的颗粒含量
Table 3 The content of grains smaller than $2\mu\text{m}$ or $1\mu\text{m}$ for latosolic red soil and laterite from south subtropical to north tropical, south to the Nanling Mountains, China

| | 赤红土 | | | | 砖红土 | | |
|---------|-------------|-------------|-----------|-------------|----------|-----------|-----------|
| 地点 | 英德 | 潮州 | 汕头 | 信宜 | 茂名* | 遂溪** | 徐闻 |
| 母质 | 石灰岩 | 砂页岩 | 玄武岩 | 花岗岩 | 砂页岩 | 浅海沉积物 | 玄武岩 |
| 粘粒含量(%) | 26.24~28.34 | 19.29~29.35 | 47.9~51.6 | 27.81~30.05 | 29.57 | 18.3~18.9 | 45.7~55.7 |
| 纬度 | 24°11'N | 23°39'N | 23°21'N | 22°25'N | 21°40'N | 21°15'N | 20°27'N |
| 经度 | 113°25'E | 116°37'E | 116°40'E | 111°02'E | 110°51'E | 110°03'E | 110°07'E |

注:“*”表示茂名为一个样品的分析结果;“**”表示遂溪为 $<1\mu\text{m}$ 颗粒的含量,其它为 $<2\mu\text{m}$ 颗粒的含量。

铝系数和 CIA 值。研究表明,硅铝系数越低(黄镇国等, 1996)、CIA 值越高(Neshitt H W *et al*, 1996;冯连君等, 2003),红土的风化程度越强,据前者还可将其风化程度划分为强度(<2.4)、次强度(2.4~3.8)、中度(3.8~7.3)、轻度富铝化(>7.3)四个等级。

如前所述,蕉岭红土 SiO₂、Al₂O₃ 的含量分别为 50.10%~53.14%(平均值 51.35%), 23.07%~24.44%(24.00%),硅铝系数 3.49~3.86(3.64), 将其与我国现今南亚热带—北热带之地带性土壤即赤红土(以广州为例)和砖红土(以徐闻为例)(见表 2)进行对比得出,蕉岭红土的 SiO₂ 含量稍低于广州之赤红土,明显高于徐闻之砖红土;而 Al₂O₃ 含量的变化则与之相反,这一此消彼长的特征导致了基于二者比值的硅铝系数高于徐闻砖红土而低于广州赤红土。按上述的硅铝系数指示的风化程度,蕉岭红土属中等一次强度富铝化且更多属于次强度富铝化的产物,介于徐闻砖红土的强度富铝化与广州的中等富铝化(按硅铝系数平均值计)之间。

另外,表 2 亦显示出三地红土中易迁移氧化物含量都很低的情形:CaO、Na₂O、MgO 均不足 0.3%,而 K₂O 除广州分布于 1.43~1.79%之外,其它均小于 1%,这一现象暗示了这些红土发育时的气候条件都已达到使易迁移氧化物差不多淋失殆尽的程度。Al₂O₃ 含量主要因 SiO₂ 淋失的差异程度而显见不同,从而导致几地红土的 CIA 值也存在较大差异,其在蕉岭红土中为 95.07~96.24(平均为 95.92),明显高于广州的赤红土,而与徐闻的砖红土相差甚少(仅 2%~3%)。这一差别反映出蕉岭红土南亚热带之赤红土强而稍弱于北热带雷州半岛南部之砖红土。据此认为蕉岭红土是类似于现今热带北缘气候环境下的产物。

应该指出的是,在讨论红土的主元素氧化物指示的气候环境时一个不可回避的问题仍然是这些化学物质的含量与成土母质的关系。虽然各地的母质存在差异,不过,笔者等相信,尽管红土中化学元素的含量与母质存在着物质上的某种继承关系,但成土过程中的风化—淋溶作用是导致化学元素迁聚和再分配的至关重要的因

素,即较大程度上受控于气候环境的湿热程度,期间的复杂关系还有待于今后进行详细研究。

有意义的是,本文关于蕉岭红土形成于热带北缘气候环境的看法也为我国末次间冰期“大熊猫—剑齿象动物群”日益增多的研究结果所证实。迄今在两广和闽、滇发现的大熊猫—剑齿象动物群化石及其层位的年代测试结果显示(表 4),这一动物群在时间上似乎贯穿末次间冰期(或稍早)始终(136~73 ka BP),在动物种群上存在较多的反映热带环境的东洋界属种,如剑齿象、犀、巨膜、猩猩等,即使是生活于末次间冰期—末次冰期之交的碧寿洞动物群(化石层位见图 2c)中亦存在剑齿象、亚洲象等,反映了其时湿热的热带气候环境(李保生等, 2007);在空间上,这些化石的分布地点又与蕉岭所在的纬度相似,即都处于 24°N 上下,尤其是广东境内北江流域之马坝洞、狮子山,西江流域之罗沙岩、黄岩洞和东江流域之碧寿洞等,不仅在纬度上更为接近,经度上也相去不远。据此认为蕉岭红土应该与这些“大熊猫—剑齿象动物群”为相同时代的地质—生物现象,共同存在于热带北缘季风气候的环境背景之下。此种气候状况的北界至少可以向东达(26°22'N, 117°12'E)福建的三明、向西抵(23°25'N, 104°41'E)云南的西畴(见表 4)。不言而喻,这也为本文粒度与主元素氧化物论证的蕉岭末次间冰期红土形成于热带北缘的气候环境的认识提供了重要的古生物方面的证据。

如果上述看法正确,则表明在末次间冰期时我国华南地区可能为类似于现今热带北缘的气候环境,其时的热带—亚热带界线较今向北推移了至少 3 个纬度。显然,这标志着晚第四纪的我国南方气候带曾经发生过重大的古环境变迁。

5 结论

粤东北丘陵区之蕉岭红土属粉砂质粘土,形成

表 4 大熊猫—剑齿象动物群化石的发掘地点及其年代
Table4 Ailuropoda—Stegodon fauna sites and their ages

| 洞穴 | 分布地点 | 年代(ka BP) | 纬度(N) | 经度(E) | 资料来源 |
|------|------|-----------|--------|---------|-----------------------|
| 黄岩洞 | 广东封开 | 136 | 23°31′ | 111°47′ | 宋方义等, 1992 |
| 咁前洞 | 广西柳江 | 139~85 | 24°13′ | 109°05′ | 李有恒等, 1984;沈冠军等, 2001 |
| 仙人洞 | 云南西畴 | 130~100 | 23°25′ | 104°41′ | 陈德珍等, 1978 |
| 马坝洞 | 广东曲江 | 129 | 24°21′ | 113°35′ | 张镇洪, 1996 |
| 狮子山 | 广东曲江 | 120 | 24°21′ | 113°35′ | 梁钊韬等, 1959;黄万波, 2000 |
| 罗沙岩 | 广东封开 | 79 | 23°31′ | 111°48′ | 张镇洪等, 1994 |
| 碧寿洞 | 广东东源 | 73 | 24°04′ | 114°59′ | 李保生等, 2007 |
| 万寿岩 | 福建三明 | 118 | 26°16′ | 117°28′ | 范雪春等, 2006 |
| 剪刀坑山 | 福建三明 | 118 | 26°22′ | 117°12′ | 范雪春等, 2006 |

于末次间冰期。其粒度组成中粘粒、粉砂、砂的含量依次为 34.00% ~ 53.39% (平均值 44.94%)、24.77% ~ 54.85% (35.44%)、13.61% ~ 30.22% (19.62%);粒度参数 Mz 、 σ 、 Sk 、 Kg 值分别为 5.91 ~ 7.53 Φ (6.72 Φ)、2.69 ~ 3.59 (3.12)、- 0.30 ~ 0.16 (-0.12)、0.66 ~ 1.00 (0.91),依次显示为粗粉砂—细粉砂粒级、差的分选、负偏—近对称分布、宽峰—中等峰态;诸样品的概率累积曲线和频率曲线分别呈现以“四段式”和“三峰式”构型。

主元素氧化物以 SiO₂ 含量最高,为 50.10% ~ 53.14% (平均值 51.36%),Al₂O₃ 和 TF_{e2}O₃ 次之,分别为 23.07% ~ 24.44% (24.00%) 和 10.18% ~ 11.40% (10.77%)。其余常见氧化物 K₂O、MgO、Na₂O、CaO 的含量均不足 1%。硅铝系数和 CIA 值分别为 3.49 ~ 3.86 (3.64) 和 95.07 ~ 96.24 (95.92)。

以蕉岭红土中 <2 μ m 或 <1 μ m 颗粒的含量、硅铝系数、CIA 值为指标,与我国亚热带—北热带一些地点的现代赤红土和砖红土进行对比并结合二者发育环境的分析,作者认为蕉岭红土是类似于现今我国热带北缘气候环境的产物。这一推论与末次间冰期“大熊猫—剑齿象动物群”指示的古生态相吻合。由此表明,末次间冰期的粤东北甚至整个华南地区可能都处在类似现今热带北缘的气候环境之下,其时的热带/亚热带界线向北推移了至少 3 个纬度。

致谢:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所孙忠先生完成化学元素分析;中国科学院广州地球化学研究所热释光实验室黄宝林、卢良才完成 TL 年龄测定;中国科学院地球环境研究所光释光实验室王旭龙先生完成 OSL 年龄测定;曾兰华、司月君、王江龙、甘春英等参与了野外考察或实验分析工作,谨此致谢。

参 考 文 献 / References

陈德珍,祁国琴. 1978. 云南西畴人类化石及其共生的哺乳动物群. 古脊椎动物与古人类, 16(1): 34~46.

范雪春, 郑国珍. 2006. 福建第四纪哺乳动物化石考古发现与研究. 北京: 科学出版社, 21~174.

冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用. 地学前缘, 10(4): 539~544.

高柳青, 袁宝印. 1996. 南宁、百色盆地红土风化壳的地球化学特征及其环境意义. 地理研究, 15(1): 82~90.

广东省地方志编纂委员会. 1999. 广东省志——地理志. 广州: 广东人民出版社, 172~222.

广东省土壤普查办公室. 1993. 广东土壤. 北京: 科学出版社. 1~537.

胡雪峰, 龚子同, 夏应菲, 眭云霞, 杜剑华. 1999. 安徽宣州黄棕色土和第四纪红土的比较研究及其古气候意义. 土壤学报, 8(3): 301~307.

胡雪峰, 沈铭能, 方圣琼. 2004. 皖南网纹红土的粒度分布特征及古环境意义. 第四纪研究, 24(2): 160~166.

胡雪峰, 朱煜, 沈铭能. 2005. 南方网纹红土多元成因的粒度证据. 科学通报, 5(9): 918~925

黄万波. 2000. 中国的洞穴与裂隙堆积. 第四纪研究, 3(2): 155~164.

黄慰文, 冷健, 员晓枫, 谢光茂. 1990. 对百色石器层位和时代的新认识. 人类学学报, 9(2): 105~112

黄镇国, 李平日, 张仲英, 李孔宏, 乔彭年. 1982. 珠江三角洲形成发育演变. 广州: 科学普及出版社广州分社, 58~196.

黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿, 刘瑞华, 何正翀. 1996. 中国南方红色风化壳. 北京: 海洋出版社, 269~294.

蕉岭县地方志编纂委员会. 1992. 蕉岭县志. 广州: 广东人民出版社. 1~105.

李保生, 边戈果, 张伟, 温小浩, 牛东风, 杜恕环, 李后信, 欧先交. 2007. 岭南东江流域晚更新世哺乳动物化石的新发现. 地质学报, 9(9): 1195~1199.

李长安, 顾延生. 1997. 江西修水第四系网纹红土的地层学研究. 地层学杂志, 21(3): 226~232

李庆逵. 1983. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社. 56~60

李文达, 王文斌, 程忠富, 周汉民. 1995. 华南红土化作用地球化学及红土型金矿形成的可能性. 北京: 地质出版社, 1~88.

李有恒, 吴茂霖, 彭书琳, 周石保. 1984. 广西柳江土博出土的人牙化石及共生的哺乳动物群. 人类学学报, 3(4): 322~329.

梁钊韬, 李炎贤. 1959. 马坝人发现地点的调查及人类头骨化石的初步观察. 中山大学学报(自然科学版), 1~2: 136~146.

刘东生. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 191~400.

沈冠军, 王颖, 王谦, 潘亚娟. 2001. 广西柳江土博咭前洞的铀系年代. 人类学学报, 20(3): 238~244

宋方义, 张镇洪, 邓增魁, 曾小豪, 陈青松. 1992. 广东封开黄岩洞 1989 年和 1990 年发掘简报. 东南文化, (1): 148~156.

尹秋珍, 郭正堂. 2006. 中国南方的网纹红土与东亚季风的异常强盛期. 科学通报, 51(2): 186~193

余素华, 杨晓强, 周厚云, 李海涛. 1999. 深圳湾北岸新民孔 Q₃—Q₁ 的气候记录. 海洋地质与第四纪地质, 19(4): 109~113.

余素华, 张玉兰, 杨晓强, 周厚云. 2003. 深圳湾北岸新民孔岩心晚更新世以来的环境记录. 海洋地质与第四纪地质, 23(2): 9~18.

袁宝印, 夏正楷, 李保生, 乔彦松, 顾兆炎, 张家富, 许冰, 黄慰文, 曾荣树. 2008. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题. 第四纪研究, 28(1): 1~13.

袁国栋, 龚子同. 1990. 第四纪红土的土壤发生及其古地理意义. 土壤学报, 27(1): 54~62.

张经纬, 姚清尹, 李焕珊. 1994. 华南坡地研究. 北京: 科学出版社, 127.

张镇洪, 张锋, 陈青松. 1994. 广东封开县罗沙岩洞穴遗址第一期发掘简报. 人类学学报, 11(4): 300~308.

张镇洪. 1996. 新生代哺乳动物学概论. 广州: 广东人民出版社, 246~275.

周瑞荣, 王明珠, 何园球. 1987. 梅岭、罗浮山、尖峰岭成土过程中的地球化学特点. 土壤专报第 41 号, 北京: 科学出版社, 159~167.

朱照宇, 徐义芳, 文启忠, 蒲志平, 周厚云, 文高国, 戴樟谟, 梁俊平, 梁池生, 罗树文. 2001. 华南雷州半岛第四纪多旋回火山岩—红土系列的层序与年代. 第四纪研究, 21(3): 270~276.

- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 29(1): 87~97.
- GRIP Members. 1993. Climate Instability during the Last Interglacial Period in the GRIP Ice Core. *Nature*, 364(34): 234~237.
- Honda M, Shimizu H. 1998. Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands. *Sedimentology*, 45, 1125~1143.
- Krumbein, W. C., Pettijohn, F. J. 1938. *Manual of sedimentary petrology*. Appleton—century—crofts. 549.
- Li Lienzhich. 1936. Physiographical Singnificance of the Occurrence of Red Earths in Naning Basin, Kwangsi. *Bull. Geol. Soc. China*, 15(4): 528~554.
- Neshitt H W, Young G M, McLennan S M, Keays R R. 1996. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies. *J. Geol.*, 104(5): 525~542.
- Shackleton N J, Opdyke N D. 1973. Qxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial pacific core V28-238; oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 and 10^4 year scale. *Quaternary research*, 3: 39~55.
- Teilhard de Chardin, Young C C, Pei W C, Chang H C. 1935. On the Cenozoic Formation of Kwangsi and Kwangtung. *Bull. Geol. Soc. China*, 14(2): 179~205.

Characters of the Last Interglacial Red Earth in the Hilly Area, Northeastern Guangdong, South China, and Their Climatic Environment Significances

LI Zhiwen^{1,2)}, LI Baosheng^{2,3)}, DONG Yuxiang¹⁾, WEN Xiaohao²⁾, QIU Shifan⁴⁾,
NIU Dongfeng²⁾, OU Xianjiao²⁾, PENG Peixin²⁾

1) *Geography and Planning School, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275;*

2) *School of Geography, South China Normal University, Guangzhou, 510631;*

3) *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710061;*

4) *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640*

Abstract: It is revealed by our studies that the Jiaoling red earth in the hilly area, northeastern Guangdong, South China, developed in the last interglacial period and belongs to silty clay in terms of lithology. Meanwhile, the red earth's fine-grained clay content 12.15%~24.64% (average 18.46%), M_z 5.91 Φ ~7.53 Φ (6.72 Φ) and the four-segment distribution of cumulative probability curve is roughly consistent with the three-peak distribution of frequency curve for each sample. The primary oxides of major elements are mainly SiO₂, Al₂O₃ and TFe₂O₃ (Fe₂O₃+FeO), of which the contents are 50.10%~53.14% (51.36%), 23.07%~24.44% (24.00%), 10.18%~11.40% (10.77%), respectively, whereas the CaO, Na₂O, MgO and K₂O contents are all below 1%. Moreover, The approximative fine silt distribution of grain size and the desilicification—allitization phenomenon indicating a strong chemical weathering and eluviation. In addition, the Si/Al ratios of most red earth horizons indicate a less intensive allitization. A thorough comparison of the content of grains smaller than 2 μ m or 1 μ m, Si/Al ratio, and CIA between Jiaoling red earth and mordern latosolic red soil, and laterite in some of China's north tropical and south subtropical zones reveals that the red earth developed in a climatic environment that is more warm—humid than that of the present south subtropical zone, and similar to that of the north margin of the present tropical zone. Such a viewpoint is roughly consistent with predecessors' conclusion on the paleoecology indicated by the Ailuropoda—Stegodon fauna during that period. Therefore, we conclude that the last interglacial northeastern Guangdong and even the full extent of South China were in a climatic environment similar to that of the north margin of present tropical zone, and the boundary between the tropical and subtropical zones experienced a northward migration of at least 3 degrees of latitude.

Key words: Jiaoling red earth; last interglacial period; grain-size; major element; tropical climatic environment; Guangdong