科学通报 2008 年 第 53 卷 第 22 期: 2793 ~ 2800
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

岭南粤东北地区晚第四纪红土与棕黄色沉积物的古气候转变记录

李保生[①②], 温小浩[①*], David Dian Zhang[③], 邱世藩[①], 董玉祥[④], 李志文[①], 杜恕环[①], 欧先交[①], 李后信[⑤], 牛东风[①], 杨艺[①]

① 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631;
② 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;
③ 香港大学地理系, 香港;
④ 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275;
⑤ 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640
* 联系人, E-mail: wenxiaohao@hotmail.com

2008-04-07 收稿, 2008-08-20 接受
国家自然科学基金(批准号: 40471139)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2004CB720206)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20070574005)和香港政府研究基金(批准号: HKU 7243/04H)资助项目

摘要 通过对南岭以南的粤东北地区河流沿岸晚第四纪地质调查, 并主要以对临江地层剖面为代表的红土与棕黄色粉砂的时代、主氧化物——SiO_2, Al_2O_3, TOFE(Fe_2O_3+FeO)和 CIA 值反映的古环境的研究结果认为, 该地主要分布于一级阶地的红土属末次间冰期(距今 132~73 ka)湿热的类似于现代热带北缘季风气候环境背景下形成的网纹红土; 上覆棕黄色粉砂层主要是末次冰期(距今 73~11 ka)暖温带季风气候环境的堆积, 其中的风成砂——LJ3 层位代表了其时气候恶化的极端时期. 这一看法与前人对岭南及其以东的大量的古生物指示的古生态的研究结果颇为吻合. 由此表明, 粤东北甚至整个岭南地区从末次间冰期到末次冰期、从红土为嗣后的棕黄色粉砂沉积替代(甚至从大熊猫-剑齿象动物群演替为澎湖动物群), 生物气候带确实经历了一场大规模的急剧的古地理环境变迁, 这一研究可为全球变化影响下的中国低纬区域万年尺度的环境响应提供一个重要的地质学实证.

关键词
粤东北地区
晚第四纪
网纹红土
棕黄色粉砂沉积
环境变迁

“岭南” (南岭以南)的中国南亚热带-热带, 黄壤或与之类似颜色的棕黄色土特别是红土广泛分布. 早在 20 世纪 20~30 年代 Teilhard 和 Young 等[1,2]在调查广东、广西的新生代地层时, 曾对该地的网纹红土进行过初步探讨, 称之为“原生的蠕虫状砖红壤”并推测其时代属中更新世. 然而, 自此之后的半个多世纪, 中国红土研究相当沉寂, 直至 20 世纪 90 年代以来对此的探索才陆续取得一些新的进展, 但多涉及中亚热带-北亚热带的长江中下游流域[3~9]. 对于岭南之南亚热带区域, 目前以对广西百色和南宁两盆地中更新世网纹红土的工作[10]较为深入. 岭南第四纪以来的红土, 则现阶段以对地处热带区域的雷州半岛多旋回红土-火山岩系列的层序及其年代学的研究较详[11], 可以分为 7 个时期的旋回系列. 但涉及到南亚热带的晚第四纪网纹红土(或“花斑黏土”)[12,13]的研究不多, 而对于黄壤或棕黄色土的论述就更少. 近年来, 作者对岭南粤东北地区的土状堆积进行了广泛调查. 初步研究结果表明, 这一区域广泛出露于河流沿岸一级阶地、类似黄壤的棕黄色土和红土的时代主要属于晚更新世, 按气候地层学划分, 两者分属于末次冰期和末次间冰期; 从红土发育并被嗣后的棕黄色粉砂沉积物所替代, 似乎说明岭南存在重大的古地理环境变迁. 这一研究, 可为全球变化影响下的中国低纬区域万年尺度的环境响应提供一个地质学实证. 对

此, 本文将主要以粤东北东江流域的“临江地层剖面”网纹红土和棕黄色粉砂层为例, 并结合相关资料作一初步讨论.

1 临江地层剖面红土和棕黄色粉砂的地质年代

临江地层剖面位于广东省河源市紫金县临江镇东江左岸的第一级基座阶地, 地理坐标 23º35′N, 114º39′ E(图 1). 记录的该剖面地层总厚约 10 m, 其中出露厚度逾 6 m, 其下开挖约 4 m. 现将临江剖面地层(图 2(a))自上而下概述如下:

LJ1 地表耕作土, 暗灰黑色粉砂质砂, 团粒状. 地表生长高约 2~3 m 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 30 cm

LJ2 亮红橙色砂质粉砂, 团粒状, 松软. 55 cm

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. 92 cm

LJ5 浅红橙色粉砂, 致密, 较紧实. 54 cm

LJ6 棕黄色粉砂, 团块状, 致密、紧实, 无层理, 黏性较强. 106 cm

LJ7 棕黄色黏土质粉砂, 性状同 LJ6. 112 cm

LJ8 棕红色黏质红土, 团块状, 紧实, 无层理. 116 cm

LJ9 网纹红土, 粉砂质黏土, 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, 网纹构造向下发育越加密集, 该网纹红土被新近堆积的高河漫滩沉积物覆盖, 两者呈角度不整合接触, 出露厚度 65 cm, 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(K_{2n})紫红色砂岩. 可见厚度 80 cm

上述的土状堆积大体分为两类: 一是网纹红土——LJ8 和 LJ9, 分别属弱网纹红土和强网纹红土, 覆于与上白垩统南雄组红色砂岩(K_{2n})呈角度不整合的厚 30 cm 左右的风化强烈的绛红色砾石层——LJ10 之上、处于剖面 4.64~5.80 和 5.80~9.00 m 的深度; 二是主要为一套上述的棕黄色土 LJ2~LJ7, 实系一套大多称之为“黄壤”的浅红橙-棕黄色粉砂层, 以下称“棕黄色粉砂”, 覆于网纹红土之上、分布于 0.32~4.64 m 深度. 为了查明棕黄色粉砂层与网纹红土的形成时代, 我们对临江及其近邻区域的相关地层进行了 TL(热释光)年代测试. 测试材料均采用从样品中提取的<10 μm 石英细粒. 测试工作由中国科学院广州地球化学研究所热释光实验室黄宝林和卢良才完成, 测试仪器为英国牛津 Littlemore 科学仪器公司生产的 711 型热释光断代仪. 现将样品测试年龄及其各个参数列于表 1.

根据上述年代测试结果, 首先可以确定棕黄色粉砂与网纹红土界面和前者的形成年代: 弱网纹红土——LJ8 顶部年代为(71400±6600) a(实验室编号 TGD848, TL 测年), 这一年代相当于棕黄色粉砂/网纹红土也即 LJ7/LJ8 界面的时间界限; LJ1 系灰黑色壤土, 其底部年代为(9500±800) a (TGD631, TL 测年), 相当于灰黑色壤土/棕黄色粉砂即 LJ1/LJ2 界面的时

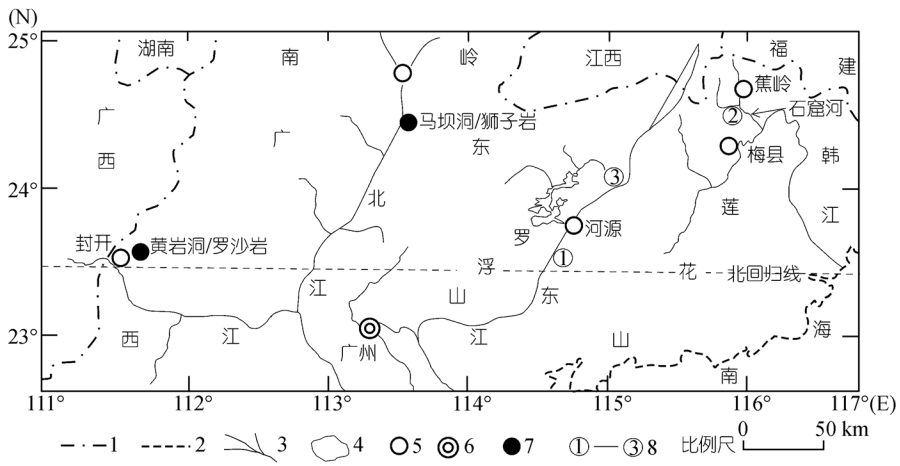

图 1 临江、蕉岭和碧寿洞地层剖面分布位置

1, 省界; 2, 海岸线; 3, 河流; 4, 水库; 5, 城镇; 6, 省会; 7, 动物化石分布地点; 8, 地层剖面分布位置: ① 临江剖面, ② 蕉岭剖面, ③ 碧寿洞剖面
~~~~~~~~~~~~~~

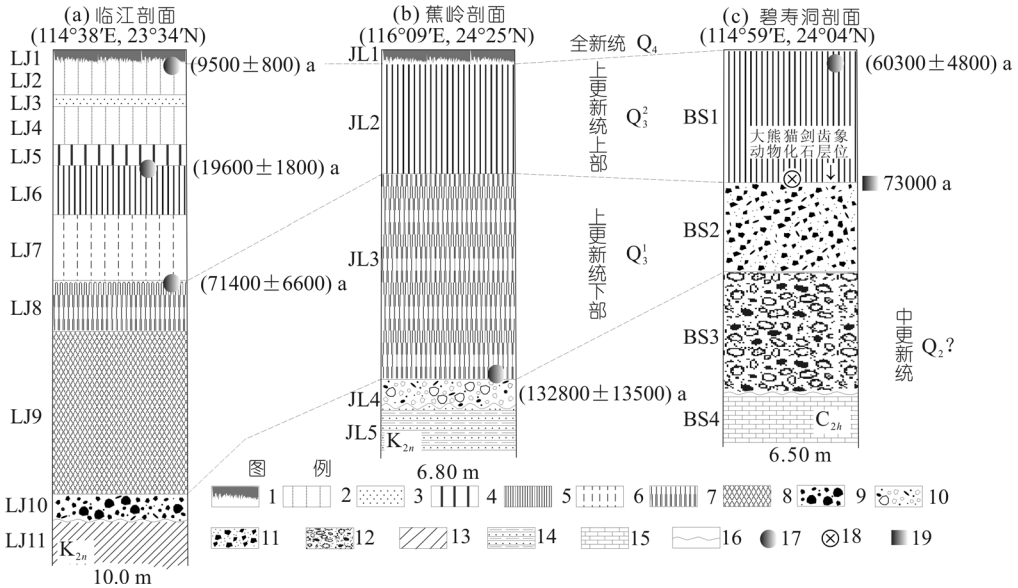

图 2　临江、蕉岭和碧寿洞地层剖面及其对比

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, 浅红橙色粉砂; 5, 棕黄色粉砂; 6, 棕黄色黏土质粉砂; 7, 弱网纹红土(棕红色黏土质红土); 8, 强网纹红土(具条、斑状的棕红色黏土质红土); 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, 桔红色黏土和钙质轻微胶结的角砾石层; 12, 深灰色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})杂色砂岩与页岩; 15, 中上石炭统壶天群(C_{2h})结晶灰岩; 16, 不整合面; 17, 释光年代; 18, 化石层位; 19, 推测年代

表 1　临江剖面和相邻地区一些层位的热释光测年结果及相关参数

地点与层位	实验室编号	U/μg·g^{-1}	Th/μg·g^{-1}	K(%)	等效剂量 E.D/Ga	年剂量/m·Ga^{-1}	年龄/ka
临江 LJ1 底部	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
临江 LJ6 顶部	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
临江 LJ8 顶部	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
碧寿洞 BS1 顶部	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
蕉岭 JL3 底部	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

间界限. 显然, 网纹红土的终结年代是LJ7/LJ8之界面的年代; 棕黄色粉砂持续的时间应该是距今 71400~9500 a. 至于网纹红土的堆积下限——LJ9/LJ10 之界面的时间, 由于没有年代测试结果, 我们试从近邻的蕉岭剖面网纹红土底部的年代测试结果做一推断. 蕉岭剖面(24º25′N, 116º09′E)位于在蕉岭县和梅县境内发育的石窟河上游支流石扇河右岸的一级基座阶地, 其以东数百米为 205 国道. 该剖面及其附近, 上白垩统南雄组(红色砂岩与灰绿-绣黄色黏土岩和粉砂岩水平互层)广泛出露, 岩层风化强烈. 在该套岩层之上的蕉岭剖面(图 2(b))记录了大体类似临江剖面的堆积序列, 即也是伏于灰黑色壤土之下的棕黄色粉砂层(JL2)在上、网纹红土(JL3)在下, 后者之下伏地层同样是与上白垩统南雄组层系(K_{2n})呈不整合接触的厚数十厘米的风化砾石层(JL4). 由于这两个剖面地点自砾石层堆积-风化以来的层序没有发现明显的沉积间断, 故可以假定两地网纹红土的沉积是等时的. 蕉岭网纹红土底部为(132800±13500) a(TGD847, TL 测年), 于是我们亦可以将这一年代同样视为临江距今网纹红土沉积之初的时间. 按照这一假设, 同样的亦可以将临江距今 71400 和 9500 a 的年代分别作为蕉岭的棕黄色粉砂/网纹红土和灰黑色壤土/棕黄色粉砂的地质时限来处理.

基于上述认识, 我们将以临江剖面为代表的广泛出露于粤东北地区河流沿岸阶地的网纹红土和棕黄色粉砂层的时代分别归属于晚更新世早期(Q_3^1)和晚期(Q_3^2), 将棕黄色粉砂层上覆的灰黑色壤土和网纹红土下伏的风化砾石层的时代分别归属于全新世(Q_4)和中更新世(Q_2).

2　红土和棕黄色粉砂沉积的气候环境

按气候地层学划分, 本文的网纹红土(Q_3^1)和棕黄

色粉砂层(Q_3^2)及其之上的灰黑色壤土应该依次归属于末次间冰期、末次冰期和冰后期, 其形成时代依次为距今 132800~71400 a, 71400~9500 a 和 9500 a~现代. 这 3 套地层的地质时代依次与深海和极地冰芯的氧同位素 5 阶段(MIS5)的距今 132000(或 128000) ~ 73000 a, 2~4 阶段(MIS2~MIS4)的距今 73000~11000 a 和 1 阶段(MIS1)的距今 11000 a~现代的时限吻合程度颇高, 据此并考虑到 TL 测试结果的年龄误差, 我们将其分别按照氧同位素 5~1 阶段的时间来进行讨论.

关于临江剖面红土、棕黄色粉砂层的成因类型我们有如下分析. 从网纹红土下伏的砾石层来看, 很可能是河流阶地二元结构下部河床相沉积, 而上面的网纹红土是二元结构上部河漫滩相沉积. 也就是说, 该地网纹红土是以河流相沉积为母质的基础上发育而成的. 继网纹红土之后堆积的棕黄色粉砂, 可能同属河漫滩相沉积. 不过, 从棕黄色粉砂及其粒度分析结果(其平均粒径 M_x 和中位数 M_d 属黏土质粉砂-粉砂)显示其总体颗粒较细且岩性相对均一的特征来看, 可能将其归属于超河漫滩看待更为合适. 也就是说, 该地自网纹红土形成之后即已具有类似现在一级阶地的雏形, 嗣后才开始接受可能来自高水位时期悬浮的"细粒"沉积. 当然, 其间的各个层位的差别也显示古水文条件的一些变化. 如果这一看法是正确的, 便产生两个值得注意的问题. 一是网纹红土与棕黄色粉砂层之间是否存在沉积间断? 二是剖面的 LJ3 风成砂沉积的证据? 首先从网纹红土与棕黄色粉砂之间的接触关系来看, 并未见两者之间存在明显的剥蚀面. 不过, 风化壳成因类型的网纹红土因其上层面脱离水面而受到风化剥蚀作用, 难免导致沉积间断的发生. 但如果将网纹红土视为不是一次、而是多次堆积与风化作用交替、且风化作用大于堆积作用的产物的话, 其上层面或许与之上覆棕黄色粉砂层之间的"间断"期不长, 在讨论 10 ka 尺度的变化时可以假定两者之间是相对连续的. 当然, 这一问题还有赖于今后对其上覆棕黄色粉砂下限年代的测试结果进一步证实. 而对于 LJ3 的成因问题来说, 我们发现其岩性特征相当均一, 无层理, 很像华南海岸风成的"老红砂"沉积类型. 根据对该层直径>150 μm 的石英颗粒的扫描电镜图像来看(图 3), 其磨圆度较差, 多为次棱角状, 反映出这是来自近源区的物质; 多数颗粒显示的类似贝壳状断口的表面新鲜, 说明风沙流运动过程中沙粒间的相互撞击作用. 当然, 仍然可以看到某些石英颗粒表面的溶蚀或者部分溶蚀现象, 这也许与之堆积后又受到轻度化学风化的影响有关. 但从石英表面的总的特征上来看, 当时应该是以物理风化作用为主导的环境. 另外, 近年来我们还对 LJ3 进行了 16 个样品的粒度分析, 经研究, 认为该层属风成的砂质沉积[14].

以下试从两个方面讨论网纹红土和棕黄色粉砂的形成环境. 一是通过两者与已知土类的主氧化物——SiO_2, Al_2O_3, TOFE 和 CIA 值的对比基础上进行推断; 二是通过岭南与临江剖面纬度相近的北回归线上下及其以东一些地点的古生物指示的古生态加以佐证.

2.1 红土和棕黄色粉砂层主氧化物——SiO_2, Al_2O_3, TOFE 和 CIA 值及其对比

临江剖面按棕黄色粉砂层(含风成砂)平均间隔约 3 cm/个样品、网纹红土 12 cm/个样品取样, 共采集 171 个样品进行了主量化学元素分析. 分析数据采用日本株式会社理学 3070E 型 X-荧光光谱仪测得. 分析方法是将风干样品研磨<200 目筛, 在 30T 高压下压制成片(直径 30 mm), 选择适当的条件进行分光

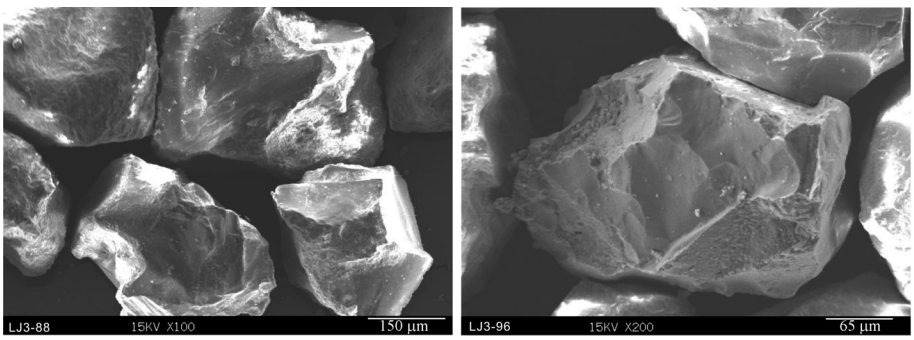

图 3 临江剖面 LJ3 层位>150 μm 的石英颗粒扫描电镜下的形态特征

计测量, 并经计算机处理后得出结果. 在分析的常量元素含量中, 以 SiO_2 含量最高, 变化于 60.32%~80.09%, Al_2O_3 次之, 10.06%~21.32%, 再次是 TOFE (Fe_2O_3 + FeO), 2.34%~5.96%. 其余常见氧化物, 除 K_2O 含量为 1.79%~3.27%外, MgO, CaO, Na_2O 和 TiO_2 皆在 0.60%之下, 其中 CaO 含量最低, 其全部样品 <0.24%. 由于 SiO_2, Al_2O_3 及 TOFE 含量较高且对于说明气候的指示意义, 故本文将其作为主氧化物对环境及其变化进行讨论并将网纹红土和棕黄色粉砂 171 个样品的主氧化物的分布绘制成 SiO_2-(Al_2O_3+TOFE) 散点图(图 4). 同时, 为了在下文中进行对比, 我们还计算了网纹红土和棕黄色粉砂的 CIA(化学蚀变指数)值. 其计算公式为 CIA=Al_2O_3×100/(Al_2O_3+ CaO* + Na_2O + K_2O), 式中氧化物均为摩尔比, CaO*指硅酸盐中 CaO, 参照 Honda 和 Shimizu[15]提出的公式进行校正[CaO*=0.35×2 (Na_2O%)/62].

结合图 4, 首先讨论网纹红土. 网纹红土(43 个样品)SiO_2, Al_2O_3 和 TOFE 的分布范围依次是 60.32%~69.58%, 17.52%~21.32%和 4.17%~5.96%, 平均值依次 65.60%, 19.44%和 5.16%. 网纹红土的 CIA 值变化于 82.13~88.61, 平均值 87.37. 如以本文网纹红土中含量最高的 SiO_2, Al_2O_3 与广东几个地点[16~18]以及广西百色盆地[10]古网纹红土的相应氧化物(表 2)作一对比, 可以看出, 除广东电白网纹红土 SiO_2 和 Al_2O_3 分别较低和较高外, 其他几地与临江剖面网纹红土并没有什么明显不同. 这说明, 我们所认为的网纹红土同其他学者所见, 由表及里是大同的. 按现代土壤概念的理解, 网纹红土发育的气候条件要求年均气温 20~25℃, 年均降水量 1000~3000 mm 甚至更多[17]. 其明显高于亚热带南部 16~22℃的年均气温, 只是与该地 1200~2500 mm 的年均降水接近; 相比较而言, 与中国热带北缘水热条件更加接近, 该地年均气温和降水分别为 22~24℃和 1300~2300 mm[19]. 据此, 我们倾向于末次间冰期网纹红土是在湿热的类似于现代热带北缘的季风气候环境背景下形成的堆积.

临江剖面棕黄色粉砂(113 个样品)的 SiO_2, Al_2O_3 和 TOFE 的分布范围依次是 65.49%~80.09%, 10.06%~19.35%和 2.34%~5.23%, 平均值依次为 73.25%, 14.93%和 3.86%. 棕黄色粉砂的 CIA 值变化于 71.62~84.26, 平均值 78.92. 若以棕黄色粉砂的 CIA 值与地处中亚热带的江西九江的现代褐黄色土[20]作一比较, 则显见两者在平均值上非常接近. 后者在 0~640 cm 深度的 CIA 值(14 个样品)平均为 77.40. 但九江褐黄色土 CIA 值主要分布于 76.00~81.00, 而棕黄色粉砂一半以上样品的 CIA 值<76.00, 与地处中国暖温带的陕西武功耕作层之下深度为 60~140 cm 的棕褐色土(称之为老黏化层和老心土)的 CIA 值 71.36~75.12[21]相近. 这说明, 临江剖面的棕黄色粉砂形成时总体上

表 2　本文与广东、广西网纹红土主氧化物 SiO_2 和 Al_2O_3 含量(%)的对比

氧化物	本文	广东电白小良[16]	广东深圳科技馆[17]	广东德庆深涌[18]	广西百色盆地[10]
SiO_2	60.32~69.58	53.53~57.69	68.92~69.80	64.37~64.46	52.17~62.49
Al_2O_3	17.52~21.32	23.87~29.04	19.69~19.79	20.91~21.77	18.10~20.92

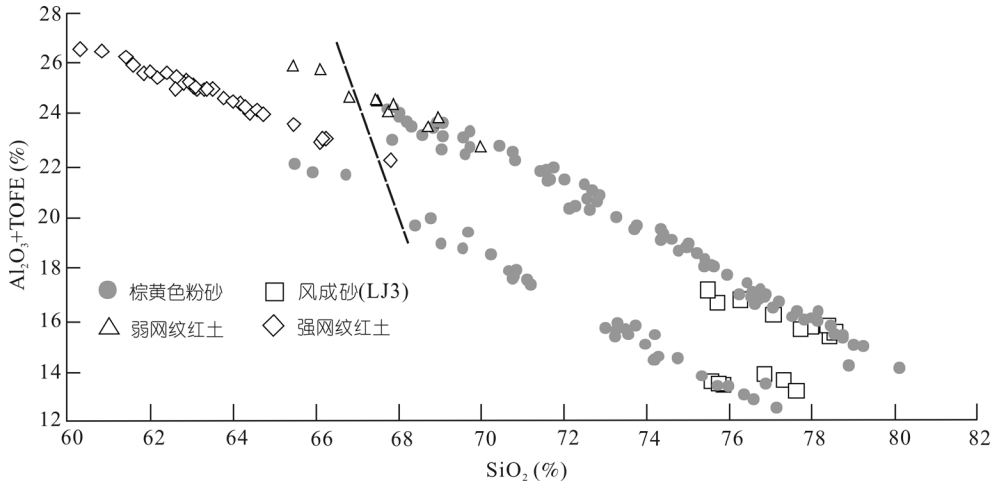

图 4　临江剖面网纹红土、棕黄色粉砂 SiO_2-(Al_2O_3+TOFE)散点图

或许有如现代暖温带半干燥的气候环境. 当然, 其中的一些较高的类似九江现代褐黄色土的 CIA 值(>76)可能还反映出其间存在具有中亚热带-北亚热带的气候环境波动.

值得注意的是临江剖面风成砂——LJ3 的主氧化物和 CIA 值的变化. 按年代测试结果(图 2), 风成砂应该是在距今 20~10 ka 或者差不多是 MIS2 期间发生的堆积事件. LJ3(15 个样品)SiO_2, Al_2O_3 和 TOFE 的分布范围依次是 75.46%~78.53%, 10.58%~14.35%和 2.97%~3.13%, 平均值依次为 76.95%, 12.34%和 2.97%; CIA 值变化于 70.79~75.81, 平均值 73.82. 这说明, 其时的铁铝化富集作用急剧降低, 而高含量的 SiO_2 与其中高含量的石英(近 80%)和长石的分析结果吻合[14]. 再从 CIA 值上来看, 其分布不仅与上述的棕褐色土非常接近, 且其中的 6 个样品的 CIA 值均<72.00, 接近于与棕黄色粉砂相同时代的长江流域的镇江下蜀土(L1)的 CIA 值(70.19~70.55)[22]. 据此认为, LJ3 揭示出当时本区域存在明显的沙质荒漠化环境, 代表了末次冰期岭南之粤东北暖温带气候环境继续恶化的极端情形.

由图 4 可见, 无论网纹红土还是棕黄色粉砂, SiO_2 与 Al_2O_3+TOFE 这两组氧化物含量都存在着显著的互为消长的关系; 从网纹红土至棕黄色粉砂, SiO_2 含量明显增加、Al_2O_3+TOFE 则显著降低, 且两者之间的散点界线(图中的虚线)分野非常清晰而极少有过渡性的样点. 主氧化物的这种分布反映出从间冰期向冰期气候演化的状态, 即从前者向后者具有突变性的环境变化. 后者中 LJ3 样点的分布代表了末次冰期环境演化的极端.

如果这种看法正确, 则我们研究的粤东北区域从末次间冰期到末次冰期很可能经历了一种大规模的从热带向暖温带自然环境急剧变化的跨越式的气候带变迁.

2.2 古生物指示的古生态

众所周知, 大熊猫-剑齿象动物群是中国南方典型的第四纪哺乳动物群. 其主要成员——大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)、东方剑齿象(*Stegodon orientalis Owen*)、猩猩(*Pango* sp.)、豪猪(*Hystrix subcristate Swinboc*)、巨貘(*Megatapirus* sp.)、猕猴(*Maccaca* sp.)等属种[23], 综合反映出其生活时期所具有的热带雨林背景下的森林草原景观. 在岭南, 已有数十处地点发现大熊猫-剑齿象动物群化石. 据前人研究结果, 其中又有数个地点发现并有年代学确定的属于末次间冰期的大熊猫-剑齿象动物群化石-封开黄岩洞 1(23°31′N, 111°47′E)[24]、曲江马坝洞(24°21′N, 113°35′E)[25]、曲江狮子岩(24°21′N, 113°35′E)[26]、封开黄岩洞 2(23°31′N, 111°47′E)[27], 其测年结果依次为距今 136, 129~107, 120 和(79±15) ka. 最近, 我们对河源碧寿洞(24°04′N, 114°59′E, 图 1)[28]大致与临江剖面 LJ7/LJ8 界面处在相同位置的地层中发现的这类动物群化石(化石层位见图 2 的剖面 3)进行了研究, 并依据 TL 年代与地层对比, 将在该地出土的动物化石的年代确定为距今 73 ka. 有趣的是, 封开黄岩洞、曲江马坝洞与狮子岩和河源碧寿洞虽分属西江、北江和东江流域, 这几个地点几乎都处在大致相同的纬度(24°N 上下); 在时间上, 末次间冰期的大熊猫-剑齿象动物群的地层记录跨越了整个 MIS5 间冰期(距今 120, 129~107 和(79±15) ka). 因而可以认为, 粤东北分布于一级阶地的末次间冰期网纹红土发育时总体上应该处于类似中国现在的热带季风气候的环境背景之下.

又据前人研究结果, 岭南确切属于末次冰期的具有年代学证据的大熊猫-剑齿象动物群有 3 处——广西扶绥南山洞(22°23′N, 107°41′E)[29]、广西桂林宝积岩(25°17′N, 110°17′E)[30]和广东封开黄岩洞[27,31], 测年结果依次为距今 30~40, 24~35 和 14.10~12.20 ka. 从这几个地点的大熊猫-剑齿象动物群的成员来看, 岭南在距今 24~40 ka 期间的气候相当温暖, 这应该与末次间冰阶也即 MIS3(距今 59000~23000 a)时期全球性气候的影响有关. 然而, 我们注意到, 此时的大熊猫-剑齿象动物群似乎已残缺不全, 桂林宝积岩地点只见大熊猫而不见剑齿象、扶绥南山洞则这两种动物化石均失; 而野猪(*S. scrofa* L.)、麂(*Munticacus* sp.)、鹿(*Cervus* sp.)、牛(*Bovidae*)、羊(*Ovis*)等适从草原-灌丛草原的食草类动物明显增加甚至还出现广布于欧亚大陆的适从干旱气候环境的蒙古野驴(*Equus hemionus*). 这说明, 这毕竟是在一个被认为是相当寒冷的 Würm 或 Wisconsin 冰期的一次气候波动. 因此, 一般说来, 冰期气候的回返尚不能够达到末次间冰期时的温暖程度.

如果将认识问题的视线转向与临江剖面差不多处在相同纬度的该地以东数百公里的台湾海峡澎湖海沟(大致在 22°40′~23°50′N, 119°40′~120°50′E), 我们还会发现, 那里大致在 MIS2 期间还有达氏四不像

鹿(*Elaphurus davidianus*)和普氏野马中国亚种(*Equus prezewalskyisi nensis*)[32]这种多见于华北和西北的动物. 因而, 台湾山地海拔 3200 m 高程发育了约距今 18 ka 的冰川遗迹就不足为奇了[33]. 另外, 从分布于 23°~24°N 间的台湾玉山(23°28′~23°29′N, 120°54′~120°55′E)之西坡吉谭湖相沉积剖面(海拔高度 745 m, 钻孔深度 12.90 m)的孢粉分析结果[17]还显示, 末次冰期早期(早 Würm 冰期)该地铁杉(*Tsuga*)、云杉(*Picea*)、冷杉(*Abies*)占有 10%~20%的比例, 还有山矾属(*Symplocos*), 较今降温 5~9℃; 距今 50~10 ka 大量生长暖温带树种, 如栎(*Quercus*)、榆(*Ulmus*)、桦(*Zelkovo*)、胡桃(*Juglans*)、女贞(*Ligustrum lucidum Ait*)、柳(*Salix*)等.

末次冰期的以上古生物指示的生态学证据, 清楚地昭示出其时包括粤东北在内的岭南及至以东的台湾及其海峡, 大部分陆地区域处在一种类似中国现在的暖温带季风气候的环境背景之下. 当然, 其间也有波动. 不仅存在距今 24~40 ka 期间相当于亚热带气候的万年尺度的波动, 封开黄岩洞大熊猫-剑齿象动物群还显示出盛冰期之后距今 14~12 ka 之间具有亚热带性质的千年尺度的气候波动. 因而, 从古生物指示的古生态学的意义上来说, 本文所探讨的岭南的粤东北地区的棕黄色粉砂层, 无论从表象上还是从主氧化物含量上已与末次间冰期时的成土环境存在很大差异, 特别是其在 CIA 值分布上能够与中国北方"现代暖温带半干燥的气候环境"下形成的土壤的基本一致绝非是偶然的.

3 结论

通过对南岭以南的粤东北地区河流沿岸晚第四纪地质调查, 并主要以临江地层剖面为代表的红土与棕黄色粉砂堆积的时代、主氧化物——SiO_2, Al_2O_3, TOFE(Fe_2O_3+FeO)和 CIA 值反映的古环境的研究结果认为, 该地主要分布于一级阶地的红土属末次间冰期(距今 132~73 ka)湿热的类似于现代热带北缘季风气候环境背景下形成的网纹红土; 其上覆棕黄色粉砂层主要是末次冰期(距今 73~11 ka)暖温带季风气候环境的产物, 其中的风成砂——LJ3 层位代表了其时气候恶化的极端时期. 前人对岭南及至以东的大量的古生物指示的古生态的研究结果似乎也支持本文的看法, 即本区红土发育时也是粤东北处于相同纬度范围的中国南方典型的第四纪哺乳动物群即大熊猫-剑齿象动物群大量繁衍之时; 棕黄色粉砂沉积发育时, 岭南区域大熊猫-剑齿象动物群属种急剧减少, 鹿(*Cervus*)、牛(*Bovidae*)、羊(*Ovis*)等适从草原-灌丛草原的食草类动物明显增加, 岭南及其以东的澎湖海沟的"澎湖动物群"甚至还伴有广布于欧亚大陆的适从干旱气候环境的蒙古野驴(*Equus hemionus*)、达氏四不像鹿(*Elaphurus davidianus*)、普氏野马中国亚种(*Equus prezewalskyisinensis*)的出现. 不仅于此, 在相同纬度范围的台湾玉山末次冰期大量的暖温带孢粉似也说明棕黄色粉砂形成时的环境恶化现象.

上述结果也表明, 粤东北甚至整个岭南地区从末次间冰期到末次冰期、从红土为嗣后的棕黄色粉砂沉积替代甚至从大熊猫-剑齿象动物群演替为澎湖动物群, 生物气候带确实经历了一场大规模的急剧的古地理环境变迁, 这一研究可为全球变化影响下的中国低纬区域万年尺度的环境响应提供一个重要的地质学实证.

致谢 本文中化学元素由高级工程师孙忠测试; TL 年龄测定由黄宝林、卢良才完成, 在此一并致谢.

参考文献

1 Teilhard D C, Young C C, Pei W C, et al. On the Cenozoic formations of Kwangsi and Kwangtung. Bull Geol Soc, China, 1935, 14(2): 179—205
2 Young C C, Bein M N, Lee Y Y. "Red beds" of human. Bull Geol Soc, China, 1938, 18(3-4): 259—300
3 杨达源, 韩辉友, 周旅复, 等. 安徽宣城地区中晚更新世风成堆积与环境变迁. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(2): 97—104
4 朱显谟. 中国南方的红土与红色风化壳. 第四纪研究, 1993, (1): 75—84
5 赵其国, 杨浩. 中国南方红土与第四纪环境变迁的初步研究. 第四纪研究, 1995, (2): 107—116
6 杨浩, 赵其国, 李小平, 等. 安徽宣城风成沉积——红土系列剖面 ESR 年代学研究. 土壤学报, 1996, 33(3): 293—300
7 胡雪峰, 程天凡, 巫和昕. 南方网纹红土内是否可能存在多个"沉积-成土"过程的旋回? 科学通报, 2003, 48(9): 969—975

8 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. 科学通报, 2006, 51(2): 186—193
9 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
10 高柳青, 袁宝印. 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, 1996, 15(1): 82—90
11 朱照宇, 徐义芳, 文启忠, 等. 华南雷州半岛第四纪多旋回火山-红土系列的层序与年代. 第四纪研究, 2001, 21(3): 270—276
12 刘尚仁. 晚更新世以来北江和西江的阶地地壳运动及其生产利用. 中山大学学报(自然科学版), 1984, (4): 135—142
13 杨小强, 李华梅, 余素华. 从 SX97 孔分析深圳沿海近 3 万年来海平面及气候变迁. 地球化学, 2003, 32(2): 146—154
14 杜恕环, 李保生, 温小浩, 等. 岭南东江流域 MIS2 阶段红色沙质沉积物粒度分布特征分析. 中国沙漠, 2007, 27(5): 771—774
15 Honda M, Shimizu H. Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands. Sedimentology, 1998, 45: 1125—1143 [DOI]
16 姚清尹, 郑良文, 黄少辉. 小良花岗岩台地风化壳发育机理及其破坏特征. 热带地理, 1984, 4(2): 65—73
17 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿, 等. 中国南方红色风化壳. 北京: 海洋出版社, 1996. 269—294
18 张经炜, 姚清尹, 李焕珊, 等. 华南坡地研究. 北京: 科学出版社, 1994. 65
19 广东省地方史志编纂委员会. 广东省志——地理志. 广州: 广东人民出版社, 1999. 172
20 熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 南方红土迁移特征及其环境意义. 土壤学报, 2001, 38(1): 25—31
21 熊毅, 李庆逵. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1987. 77—89
22 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征. 地理学报, 2007, 62(11): 1174—1184
23 金建华, 王英永, 张镇洪. 广东乐昌第四纪大熊猫-剑齿象动物群. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 7(4): 95—101
24 宋方义, 张镇洪, 邓增魁, 等. 广东封开黄岩洞 1989 年和 1990 年发掘简报. 东南文化, 1992, (1): 148—156
25 原思训, 陈铁梅, 高世君. 华南若干旧石器时代地点的铀系年代. 人类学学报, 1986, 5(2): 179—190
26 黄万波. 中国的洞穴与裂隙堆积. 第四纪研究, 2000, 3(2): 155—164
27 黄万波. 广东高要、罗定、封开等地洞穴及其堆积物概述. 古脊椎动物与古人类, 1963, 3(1): 79—83
28 李保生, 边戈果, 张韦, 等. 岭南东江流域晚更新世哺乳动物化石的新发现. 地质学报, 2007, 9(9): 1195—1199
29 王頠, 莫进尤. 广西扶绥南山洞新发现的人类化石和蒙古野驴化石——末次冰期华南气候变化的哺乳动物化石新证据. 人类学学报, 2004, 5(2): 130—137
30 蒋远金. 广西岩溶洞穴中晚更新世哺乳动物群的研究. 中国岩溶, 1992, 3(1): 38—42
31 陈水挟, 王将克, 钟月明, 等. 粤西第四纪洞穴化石的氨基酸年龄及混杂堆积现象. 中山大学学报(自然科学版), 1995, 7(3): 89—94
32 祁国琴, 何传坤. 台湾第四纪澎湖海沟动物群及古地理环境. 第四纪研究, 1999, (2): 185
33 宋长青, 赵楚年. 台湾省第四纪冰川遗迹的发现及其意义. 地理科学进展, 1999, 18(1): 95—96