

doi:10.3799/dqkx.2015.070

安徽宣城红土微生物 GDGTs 分布特征及其古环境意义

马瑞元¹, 彭红霞^{1*}, 张林¹, 顾延生², 胡圣虹³

1. 中国地质大学公共管理学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 中国南方更新世红土是古气候环境变化研究非常重要的载体之一, 红土微生物类脂分子是其古气候环境研究的有效指标, 但其在红土中的古气候意义需要更进一步的挖掘和明确. 选取处于气候变化敏感地带并且已有很好年代学基础的安徽宣城红土剖面进行详细的野外调查和系统的样品采集, 利用改善后的碱式水解法提取红土微生物类脂分子, 通过对比分析、比较印证等方法对其中的甘油二烷基甘油四醚(glycerol dialkyl glycerol tetraethers, 简称 GDGTs) 进行系统研究. 宣城剖面 GDGTs 分布特征显示: 剖面下部各指标呈旋回性变化、而上部相对稳定, 表明形成初期环境比较动荡, 而后期成土环境相对稳定; 土壤 pH 为 7.0~8.0, 推测其物源主要来源于北方干旱区或长江中下游干涸河滩沉积; BIT 指标反映宣城地区在 130 ka BP 左右气候极为干旱. 结果表明, 红土中微生物类脂物 GDGTs 能够定量、高分辨率地重建安徽宣城的古气候环境, 具有重要的研究意义.

关键词: 红土; GDGTs; 古环境; 气候学; 环境微生物学.

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2015)05-0863-07

收稿日期: 2014-11-14

Distributions and Paleo-Environment Implications of Microbial GDGTs from Red Earth Profile in Xuancheng, Anhui Province

Ma Ruiyuan¹, Peng Hongxia^{1*}, Zhang Lin¹, Gu Yansheng², Hu Shenghong³

1. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Abundant information about paleo-environment, paleo-climate and paleolithic culture can be obtained from the red earth in southern China. However, the vermicular paleosol is proposed to be incapable of interpreting the original information about the past climate and environment changes owing to the intensive pedogenesis in the tropical-subtropical area. Therefore, previous studies on bio-climatic approaches including pollen, spore fossils and phytoliths are also believed to be not suitable for such kind of stratigraphy. Despite that some studies show the microbial molecular fossils are useful in the paleo-environment reconstruction, but their implications in red earth need to be further explored and confirmed. It is necessary to introduce some new methods to extract the detailed biological information in the red earth. In this study, we collected red earth samples from the Xuancheng section, Anhui Province in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, which is well-dated and sensitive to climate change. Microbial lipids in the red earth are extracted by employing alkaline hydrolysis combined with the field survey and the laboratory investigation. The characteristics of the microbial lipids, especially glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) are investigated. The distributions of GDGTs from the Xuancheng profile show that all GDGT-derived proxies in the lower part of profile fluctuates frequently, whereas they are relatively stable in the upper part, which indicates that the paleo-

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41202124); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No.2011CB710601).

作者简介: 马瑞元(1991-), 女, 硕士生, 自然地理学研究方向. E-mail: ryma_cug@sina.com

* **通讯作者:** 彭红霞, E-mail: penghongxia@sina.com

引用格式: 马瑞元, 彭红霞, 张林, 等, 2015. 安徽宣城红土微生物 GDGTs 分布特征及其古环境意义. 地球科学——中国地质大学学报, 40(5): 863-869.

environment changed frequently during the early period of this profile but the later soil environment was relatively stable. The CBT-inferred soil pH ranges from 7.0 to 8.0, indicating that the soil parent material likely comes from the arid areas in north-western China or alternatively from the dry river sediments in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. The low BIT values suggest that it was very dry at 130 ka BP in the Xuancheng region.

Key words: red earth; GDGTs; paleo-environment; climatology; environmental microbiology.

随着检测技术的不断进步,作为细胞膜主要组成部分的微生物类脂物逐渐被应用于多领域的古气候环境重建中 (Schouten *et al.*, 2003; Bechtel *et al.*, 2010; Weijers *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014). 微生物繁殖非常迅速,类脂物结构和组成也会随着温度等环境因子的变化在分子级别上予以很灵敏地响应;且微生物来源的类脂物一般沉积于土壤的相对内部,比较易保存.因而,在微生物类脂物结构变化的基础上所建立的环境指标可以迅速、高分辨率地记录气候环境变化信息,具有很好的应用前景.

目前,利用微生物类脂物化合物来反演古气候环境演变的研究工作已取得了长足进展 (Yang *et al.*, 2011; Jia *et al.*, 2012). 如图 1 所示,甘油二烷基甘油四醚 (glycerol dialkyl glycerol tetraethers, 简称 GDGTs) 从结构上分为古菌类异戊二烯 GDGTs (isoprenoid GDGTs, 简称 iGDGTs) 和细菌支链 GDGTs (branched GDGTs, 简称 bGDGTs). iGDGTs 中含有数量不等的五元环结构 (Damsté *et al.*, 2002), 其中 crenarchaeol 及 crenarchaeol regio-isomer 还包含 1 个六元环 (Schouten *et al.*, 2008). bGDGTs 则一般含有 2~6 个甲基支链和 0~2 个五元环结构,它主要来自土壤中的厌氧细菌 (Weijers *et al.*, 2006). Weijers *et al.* (2007) 等通过对全球不同地区土壤中 bGDGTs 的调查,发现细菌支链中的甲基相对含量与年平均大气温度和土壤 pH 有关,五元环的数量随着 pH 的增大逐渐增多,与 pH 有很好的线性关系.它们分别通过 bGDGTs 的甲基化指数 MBT (methylation index of branched tetraethers) 和环化指数 CBT (cyclization of branched tetraethers) 表现出来,目前已成为陆地环境中古环境重建的重要指标 (Weijers *et al.*, 2007). 另外,由细菌 bGDGTs 和古菌 iGDGTs 构建的陆源输入指数 BIT (branched and isoprenoid tetraether) (Hopmans *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2007) 以及由其衍生来的 R_{ib} (表示古菌 iGDGTs 与细菌 bGDGTs 之间的相对含量变化) 也能反映流域内的水文状况及由气候干旱而引起的盐碱化等环境特征 (Xie *et al.*, 2012). 但是,目前大部分基于微生物

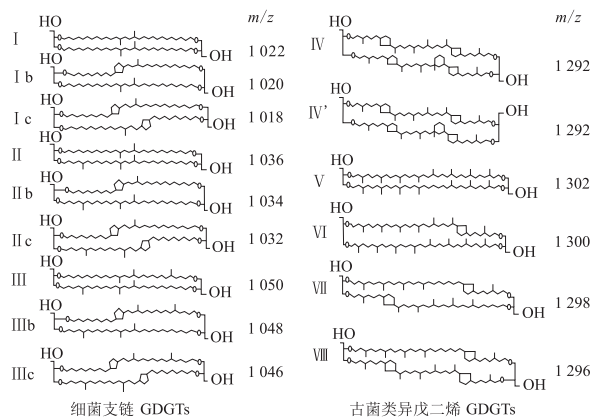


图 1 GDGTs 分子结构

Fig.1 Structures of bacterial and archaeal GDGTs

物类脂物的古气候环境指标主要被广泛应用于海洋 (Schouten *et al.*, 2003; Tierney *et al.*, 2010)、湖泊 (吴霞, 2014; Bechtel *et al.*, 2010; Tierney *et al.*, 2010)、泥炭 (Weijers *et al.*, 2011)、黄土 (Yang *et al.*, 2014) 等领域的古气候环境重建中,在热带的砖红壤和砖黄壤 (Yang *et al.*, 2014) 亦有初步研究,基于红土微生物类脂物 GDGTs 的各环境指标能否同样应用于南方红土古气候环境的重建,目前还需要更多的数据支持.

长江中下游地区安徽宣城红土位于气候敏感地带,又具有加积型特点,是研究古气候环境演变的理想剖面 (胡雪峰等, 2004; 谢树成等, 2003, 2008; Hong *et al.*, 2010). 本文以安徽宣城红土剖面 GDGTs 为研究对象,分析其分布特征,通过细菌 bGDGTs 指标探讨该区古气候环境演变特征,以期为全球气候环境变化提供区域资料.

1 研究区概况和样品分析方法

1.1 研究区概况

宣城位于安徽省东南部,属北亚热带湿润季风气候,年平均温度为 15.6 °C,年降水量为 1 200~1 500 mm,雨热同期,无霜期长达 8 个月;在地质分区上位于扬子准地台地区,受地质构造控制,地势南高北低,地貌复杂多样.样品来自宣城市向阳村陈山

红土剖面(30°52′24″N, 118°51′56″E), 其位于长江下游支流水阳江的南岸, 属河成二级阶地, 地处剖面红壤北区边缘, 在河谷冲积平原上(图 2)。

1.2 样品的采集与 GDGTs 的萃取

该剖面总厚度为 7.4 m, 6.0 m 至底部发育有粗大网纹的亚黏土层; 6.0~3.7 m 为含稀疏网纹的亚黏土层; 3.7~2.5 m 为粉砂质粘土见有稀疏网纹发育; 2.5~0.5 m 为粉砂质粘土层; 0.5~0 m 为现代土壤。为了能很好的进行纵向对比分析, 笔者对整条剖面进行采样, 每个样品对应厚度为 10 cm, 在测试中每隔一个样品进行分析测试。

安徽宣城剖面总有机质含量为 0.05%~1.05%, 平均为 0.38% (赵其国和杨浩, 1995), 且大多以结合态的有机分子存在, 致使传统索氏抽提方法在红土中的应用受到限制。本文利用改善后的碱式水解法(李雪艳等, 2009), 将风干后的样品碾磨过筛后称取 25 g, 加入配好的 1 mol/L KOH 的甲醇溶液 30 mL, 放入 2~3 粒沸石后, 在电热套上加热 2 h, 温度设为 80 °C 进行碱式水解。待冷却后用二氯甲烷萃取(每次 15 mL, 萃取 4 次), 并将萃取物过无水硫酸钠柱干燥, 然后用旋转蒸发器将其进行减压蒸发浓缩至 3 mL 左右, 并转移至大细胞瓶中, 将样品放置于加热板上(温度一般为 42 °C 左右), 至烘干后再过柱层析将极性组分和非极性组分进行分离, 将含有 GDGTs 的极性组分在氮吹仪下吹干经过滤膜后, 重新溶解在正己烷/异丙醇(体积比为 99:1)中, 然后进行上机测试。

红土中有机质含量很少, 在样品采集及萃取中

为防止人为污染, 所用器皿均经过认真洗涤, 在 500 °C 高温的马弗炉里灼烧 6 h; 同时为了对其实施监控, 每隔 10 个样品设 1 个空白样, 空白样中未检测出本实验所测类脂物。

1.3 GDGTs 测试

将处理好的样品利用液相色谱-质谱联用仪进行测试分析, 仪器型号为 Agilent 1200 HPLC, 6460A 三重四级杆质谱仪, 配备有大气压化学电离源(APCI)与电喷雾(ESI)两种离子源。色谱柱为 Alltech Prevail 氰基柱(150 mm×2.1 mm, 3 μm)。GDGTs 化合物检测条件为: 正己烷和异丙醇作为流动相, A 流动相为正己烷, B 流动相为正己烷/异丙醇(体积比为 9:1)。洗脱梯度为 0~5 min 时, 流动相体积含量比为 90%A:10%B; 在 5~45 min 时, A 流动相比例从 90% 线性减至 82%, 之后冲洗色谱柱至 B 流动相含量回到 10%, 流速保持 0.2 mL/min, 柱温箱恒温 40 °C; 化合物离子化在 APCI 源中进行, APCI/MS 条件为雾化器压力为 0.41 MPa, 雾化温度为 400 °C, 干燥气(N₂)流速为 6 L/min, 温度为 200 °C, 毛细管电压为 3 500 V, 电晕电流为 5 μA (约 3 200 V)。为提高检测信噪比和重现性, 采用单离子扫描模式(SIM)对离子进行扫描, 扫描质核比(*m/z*)为 1 302、1 300、1 298、1 296、1 292、1 050、1 048、1 046、1 036、1 034、1 032、1 022、1 020、1 018 和 744。

1.4 土壤 pH 测定

宣城土壤 pH 采用水浸法测定。将研磨过筛的土壤样品按照 1:2.5(g/mL)的比例浸泡于超纯水

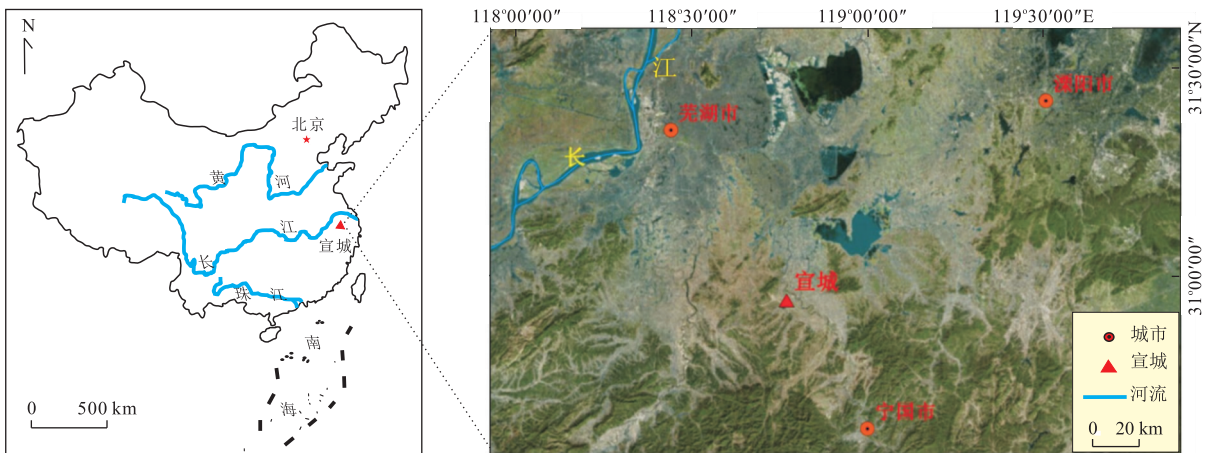


图 2 宣城地理位置示意

Fig.2 The geographic location of profile in Xuancheng

中,震荡摇匀使其完全溶解后静置,然后用 pH 计(Denver pH 计,精度为 0.01)测定上层清液,每个样品测定 3 次,最后取它们的平均值.测定前先校准 pH 计,在每测试完 1 次之后用超纯水冲洗电极,然后用软纸将水吸干.本测试工作在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室微生物实验室完成.

2 结果与讨论

2.1 GDGTs 分布特征

宣城土壤样品中检测出了丰富的 GDGTs 化合物,包括 GDGTs I-VIII(图 3).GDGTs 总含量差别较大,其中细菌 bGDGTs 的含量明显高于古菌 iGDGTs 的含量.在细菌 bGDGTs 中 GDGTs I 的丰度最高,且较其他细菌 bGDGTs 化合物含量差别显著;GDGTs II 的含量高于 GDGTs III 的含量;部分样品中含五元环的 GDGTs 含量差别较大,GDGTs Ib 和 GDGTs Ic 较 GDGTs II 和 GDGTs III 的含量略多.古菌 iGDGTs 含量相对较少,受土壤 pH 等环境因素的影响,其含量曲线有相应的波动变化,在 iGDGTs 中以 GDGTs IV 和 GDGTs V 为主;而部分样品的 iGDGTs 的含量极低,甚至低于检出限.

纵向来说,剖面底部至 0.5 m 处古土壤的 GDGTs 化合物含量明显低于 0~0.5 m 的现代土壤,但由于受具体土壤成土环境影响古土壤的 iGDGTs 和 bGDGTs 相对含量亦有一定波动变化.从图 4 可以发现,除了现代土壤层以外,iGDGTs 在剖面 2.5~6 m 的粉砂质粘土及网纹红土层中含量变化也较为明显;由于 bGDGTs 的含量在现代土壤

与古土壤中差别极为显著,则整体来看在 0.5 m 以下其含量变化波动不太明显(图 4).

2.2 GDGTs 古环境意义

基于古菌 iGDGTs 和细菌 bGDGTs 所建立的古气候环境指标已在海洋、湖泊、泥炭、黄土及热带的砖红壤和砖黄壤中证实了其应用潜力.宣城红土样品中检测出了较为丰富的 GDGTs 化合物,这为利用红土 GDGTs 重建古气候环境提供了可能性.由于目前关于红土 GDGTs 化合物的研究尚少,还没有专用于南方红土 GDGTs 温度校正方程,笔者将通过探讨 Weijers *et al.*(2007)在全球土壤细菌支链 GDGTs 的调查建立的指标 *MBT* 和 *CBT* 以及 Hopmans *et al.*(2004)建立的陆源输入指数 *BIT* 来了解安徽宣城红土中蕴含的古环境信息.具体计算公式如下(公式中罗马数字代表图 1 中对应的 GDGTs 分子结构):

$$MBT = \frac{(I + Ib + Ic)}{(I + Ib + Ic) + (II + IIb + IIc) + (III + IIIb + IIIc)}, \quad (1)$$

$$CBT = -\log\left(\frac{Ib + IIb}{I + II}\right), \quad (2)$$

$$CBT = 3.33 - 0.38 \times pH, \quad (3)$$

$$BIT = \frac{I + II + III}{I + II + III + IV}. \quad (4)$$

利用公式(1)得到宣城剖面中细菌的甲基化指数 *MBT* 的变化范围为:0.40~0.84;环化指数 *CBT* 的变化范围为:0.06~2.09(图 4).从图 4 中可以看出,*MBT* 在剖面底部至 3.7 m 之间网纹发育的亚粘土层波动较大,指示当时成土过程中气候环境比较动荡;3.7 m 以上波动较小,表明成土环境相对较稳定.*CBT* 在剖面下部波动较为频繁,由于 *CBT* 与土壤 pH 关系较为密切,这种波动可能是由于不同变化趋势的 pH 造成的;*CBT* 在现代表土层处,其值变化较大,在 0.5~3.7 m 处波动较小,说明在这段时间内,bGDGTs 中五元环的相对含量变幅不大,其成土时的土壤 pH 较稳定.对比来看:*MBT* 和 *CBT* 变化曲线均为下部呈旋回状波动,表明在网纹红土形成过程中环境亦有旋回性变化,而上部粉砂质粘土的形成环境较为稳定.3.7 m 处为粉砂质粘土与亚粘质网纹红土的分界线,该处也是全球气候变化的关键界限.该波动趋势恰好与黄棕色土层形成于沉积动力强度弱而稳定的沉积环境,而网纹红土则形成于沉积动力强度大、稳定性相对较差的沉积环境(朱宗敏等,2006)的观点相一致.因此,该指标在红土中亦可以得到有效的应用.具体各指标随深度分布状况见表 1.

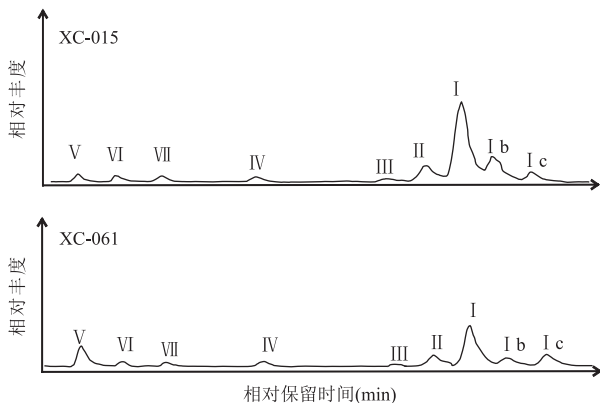


图 3 样品的部分基峰色谱

Fig.3 Partial base peak chromatograms showing distribution of GDGTs for the samples in red soils

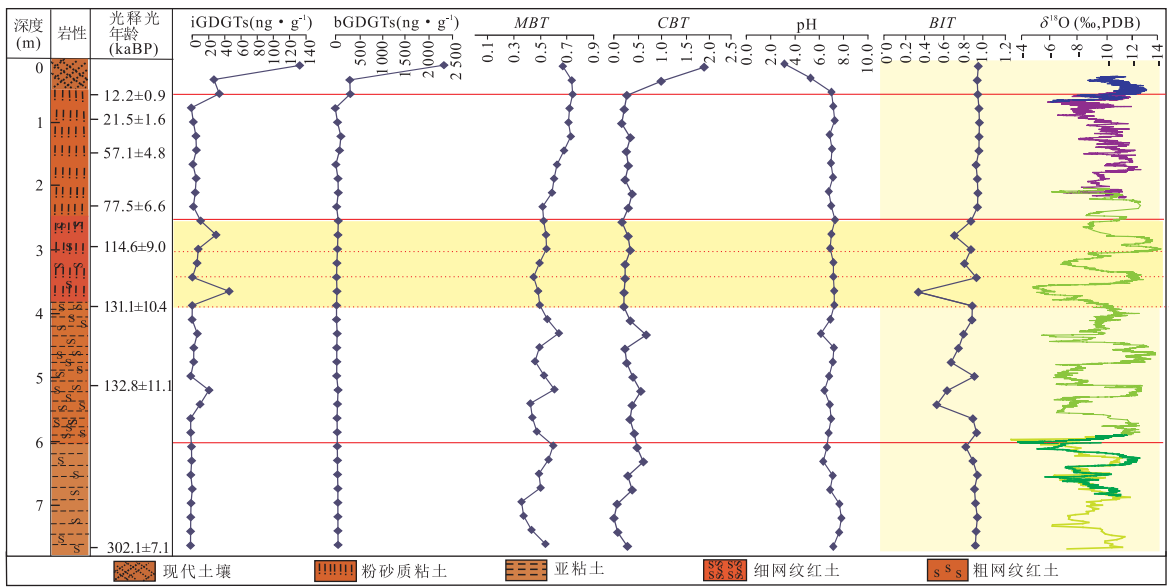


图 4 GDGTs 化合物含量与各环境指标随深度的变化情况及 BIT 指标与石笋氧同位素曲线对比

Fig.4 The variation of GDGT concentration and GDGT-derived proxies vs. soil depth; the stalagmite oxygen isotopes in caves are also provided to make comparison with the BIT index

图中年代来源于马俊洁(2012);石笋氧同位素曲线来源于 Cheng *et al.*(2009)

由公式(3)计算所得土壤 pH 变化为 3.3~8.6 (表 1),随深度的变化曲线见图 4.在 0.5 m 以下土壤 pH 波动较小,大部分为 7.0~8.0;而土壤 pH 测定数据显示,宣城红土 pH 变化范围为 4.6~6.8,呈酸性.由于 GDGTs 反映指标均为成土时的古环境信息,因此笔者推测安徽宣城红土主要为风成沉积,其主要来源于北方干旱区的风尘物质或长江中下游干涸河滩沉积,而实测土壤 pH 反映的是红土网纹化后的 pH,所以呈酸性.横向来看,宣城红土现代土壤层样品的实测 pH 与由公式而得出的 pH 值均呈酸性,说明该公式在宣城红土中的应用较为准确.所以,运用 GDGTs 指标来还原土壤最初的 pH 有较好的前景.

由公式(4)可得相应数据见表 1,BIT 值大部分接近于 1,但受当时具体环境影响,部分样品的 BIT 值有所波动,基本上为 0.9~1.0,少数值为 0.7~0.8,但也有 XC-033 的 BIT 值为 0.3,偏离 1 较远.此样品位于 3.3 m 处,根据图 4 中马俊洁(2012)光释光测年数据,(Cheng *et al.*,2009)推测该样品年代约为 130 ka BP,当时正值北方极为干旱,黄土也处于最干旱的时候.另外,笔者通过对比发现,BIT 在 150 ka BP 的波动趋势与同阶段石笋氧同位素曲线的变化趋势一致(Cheng *et al.*,2009;图 4):在 2.5~3.7 m 处 BIT 变化较为明显,指示当时温度和降水变化较大,笔者推测其主要受季风的交替变化影响;

表 1 各环境指标的分布状况

Table 1 The distributions of environmental proxies

样品编号	MBT	CBT	pH	实测 pH	BIT
XC-001	0.76	2.09	3.26	4.59	0.99
XC-003	0.83	1.13	5.80	4.55	0.98
XC-005	0.84	0.35	7.83	4.68	0.98
XC-007	0.81	0.29	7.99	4.78	0.99
XC-009	0.81	0.24	8.14	4.71	1.00
XC-011	0.83	0.43	7.63	5.03	0.99
XC-013	0.77	0.34	7.86	6.53	0.99
XC-015	0.71	0.39	7.75	4.71	0.96
XC-017	0.68	0.31	7.94	5.68	0.97
XC-019	0.66	0.47	7.52	4.82	0.98
XC-021	0.58	0.38	7.75	6.30	0.97
XC-023	0.59	0.25	8.12	5.67	0.90
XC-025	0.61	0.38	7.76	6.28	0.73
XC-027	0.62	0.43	7.64	5.02	0.90
XC-029	0.56	0.31	7.94	6.08	0.83
XC-031	0.50	0.31	7.94	6.62	0.96
XC-033	0.54	0.29	8.00	6.47	0.34
XC-035	0.56	0.29	8.01	4.85	0.91
XC-037	0.62	0.43	7.63	5.64	0.91
XC-039	0.72	0.79	6.69	5.12	0.82
XC-041	0.56	0.31	7.95	5.27	0.76
XC-043	0.52	0.35	7.84	5.50	0.69
XC-045	0.59	0.49	7.47	5.29	0.93
XC-047	0.68	0.67	7.01	5.16	0.64
XC-049	0.48	0.47	7.52	5.54	0.53
XC-051	0.49	0.42	7.65	5.56	0.91
XC-053	0.53	0.52	7.40	5.64	0.95
XC-055	0.67	0.58	7.23	5.46	0.84
XC-057	0.63	0.72	6.86	5.45	0.91
XC-059	0.55	0.37	7.78	6.76	0.96
XC-061	0.57	0.47	7.52	5.67	0.93
XC-065	0.40	0.13	8.41	5.71	0.94
XC-067	0.42	0.06	8.60	5.81	0.96
XC-069	0.49	0.15	8.37	5.61	0.94
XC-073	0.61	0.37	7.80	5.69	0.93

同时,在 3.3 m 处石笋氧同位素也反映此时降水少、气候干旱;而在 0.5~2.5 m 则没有太大波动。前人研究表明在环境越干旱的时候厌氧细菌所产生的 bGDGTs 越少,而好氧细菌所产生的 iGDGTs 越多,从而导致 BIT 值变小(Xie *et al.*, 2013),这恰好与当时气候环境相吻合。从其他测试指标来看:iGDGTs 含量明显高于 bGDGTs,温度相对较低,土壤 pH 呈碱性,也同样与 GDGTs 各指标分布特征相一致。据此笔者推测在 130 ka BP 左右宣城地区气候也极为干旱。

3 结论

根据安徽宣城红土剖面的 GDGTs 化合物的实验测试结果,笔者利用全球不同地区土壤中 bGDGTs 的调查及中国区域陆地古环境重建的相应指标,对安徽宣城红土所记录的气候信息进行了探讨,评价了不同气候指标在南方红土中的适用性,其结论如下:

(1)从测试的各项指标来看,宣城红土剖面下部各环境指标波动较大,而上部相对稳定,表明宣城红土初期成土沉积动力强度大,环境比较动荡,后期成土沉积动力弱,沉积环境相对稳定。

(2)由公式(3)计算所得土壤 pH 与实测 pH 对比可知,宣城红土在最初成土时呈弱碱性,由该处为风成沉积推测其主要来源于北方干旱区或长江中下游干涸河滩沉积,而后期随着气候环境的变化,土壤 pH 值发生了相应的变化。

(3)宣城红土的 BIT 指数大部分接近于 1,但局部由于受气候干湿变化的影响有降低趋势,根据 BIT 指标,笔者推测宣城地区在 130 ka BP 左右气候极为干旱。

致谢:感谢杨欢副教授对分子化石的测试分析指导;感谢生物地质与环境地质国家重点实验室提供 GDGTs 良好的测试条件;感谢生物地质与环境地质国家重点实验室微生物实验室提供 pH 测试条件;感谢实验室其他老师和同学的帮助。

References

Bechtel, A., Smittenberg, R. H., Bernasconi, S. M., et al., 2010. Distribution of Branched and Isoprenoid Tetraether Lipids in an Oligotrophic and a Eutrophic Swiss Lake: Insights into Sources and GDGT-Based Proxies. *Organic Geochemistry*, 41(8): 822—832. doi: 10.1016/j.

orggeochem.2010.04.022
Cheng, H., Edwards, R., L., Broecker, W. S., et al., 2009. Ice Age Terminations. *Science*, 326 (5950): 248—252. doi: 10.1126/science.1177840
Damsté, J. S. S., Rijpstra, W. I. C., Hopmans, E. C., et al., 2002. Distribution of Membrane Lipids of Planktonic Crenarchaeota in the Arabian Sea. *Applied and Environmental Microbiology*, 68 (6): 2997—3002. doi: 10.1128/AEM.68.6.2997—3002.2002
Hong, H. L., Gu, Y. S., Yin, K., et al., 2010. Red Soils with White Net-Like Veins and Their Climate Significance in South China. *Geoderma*, 160(2): 197—207. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.09.019
Hopmans, E. C., Weijers, J. W. H., Schefuss, E., et al., 2004. A Novel Proxy for Terrestrial Organic Matter in Sediments Based on Branched and Isoprenoid Tetraether Lipids. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(1—2): 107—116. doi: 10.1016/j.epsl.2004.05.012
Hu, X. F., Shen, M. N., Fang, S. Q., 2004. Grain-Size Distribution of the Reticulate Red Clay in Southern Anhui Province and Its Paleo-Environmental Significance. *Quaternary Sciences*, 24(2): 160—166 (in Chinese with English abstract).
Jia, C., Huang, J., Kershaw, S., et al., 2012. Microbial Response to Limited Nutrients in Shallow Water Immediately after the End-Permian Mass Extinction. *Geobiology*, 10(1): 60—71. doi: 10.1111/j.1472—4669.2011.00310.x
Kim, J., Ludwig, W., Schouten, S., et al., 2007. Impact of Flood Events on the Transport of Terrestrial Organic Matter to the Ocean: A Study of the Têt River (SW France) Using the BIT Index. *Organic Geochemistry*, 38(10): 1593—1606. doi: 10.1016/j.orggeochem.2007.06.010
Li, X. Y., Gu, Y. S., Huang, X. Y., et al., 2009. An Optimized Alkaline Hydrolysis Method to Extract Lipid Biomarkers from Pleistocene Vermicular Red Paleosols: An Example from Xuancheng, Anhui Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(4): 623—628 (in Chinese with English abstract).
Ma, J. J., 2012. OSL Dating about Red Earth in Xuancheng, Anhui Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 30—31 (in Chinese with English abstract).
Schouten, S., Hopmans, E. C., Forster, A., et al., 2003. Extremely High Sea-Surface Temperatures at Low Latitudes during the Middle Cretaceous as Revealed by Archaeal Membrane Lipids. *Geology*, 31(12): 1069—1072.

doi:10.1130/G19876.1

Schouten, S., Hopmans, E. C., Baas, M., et al., 2008. Intact Membrane Lipids of "Candidatus Nitrosopumilus Maritimus," a Cultivated Representative of the Cosmopolitan Mesophilic Group I Crenarchaeota. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(8): 2433–2440. doi: 10.1128/AEM.01709–07

Tierney, J. E., Mayes, M. T., Meyer, N., et al., 2010. Late-Twentieth-Century Warming in Lake Tanganyika Unprecedented since AD 500. *Nature Geoscience*, 3(6): 422–425. doi:10.1038/NGEO865

Weijers, J. W. H., Schouten, S., Hopmans, E. C., et al., 2006. Membrane Lipids of Mesophilic Anaerobic Bacteria Thriving in Peats have Typical Archaeal Traits. *Environmental Microbiology*, 8(4): 648–657. doi:10.1111/j.1462–2920.2005.00941.x

Weijers, J. W. H., Steinmann, P., Hopmans, E. C., et al., 2011. Bacterial Tetraether Membrane Lipids in Peat and Coal: Testing the MBT-CBT Temperature Proxy for Climate Reconstruction. *Organic Geochemistry*, 42(5): 477–486. doi:10.1016/j.orggeochem.2011.03.013

Weijers, J. W. H., Schouten, S., van den Donker, J. C., et al., 2007. Environmental Controls on Bacterial Tetraether Membrane Lipid Distribution in Soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(3): 703–713. doi: 10.1016/j.gca.2006.10.003

Wu, X., 2014. The Application of Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers in Reconstruction of Kusai Lake Paleoenvironment on the Qinghai-Tibetan Plateau (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Xie, S. C., Pancost, R. D., Chen, L., et al., 2012. Microbial Lipid Records of Highly Alkaline Deposits and Enhanced Aridity Associated with Significant Uplift of the Tibetan Plateau in the Late Miocene. *Geology*, 40(4): 291–294. doi:10.1130/G32570.1

Xie, S. C., Evershed, R. P., Huang, X., et al., 2013. Concordant Monsoon-Driven Postglacial Hydrological Changes in Peat and Stalagmite Records and Their Impacts on Prehistoric Cultures in Central China. *Geology*, 41(8): 827–830. doi:10.1130/G34318.1

Xie, S. C., Yi, Y., Liu, Y. Y., et al., 2003. Response of Red Clay in Southern Pleistocene Reticulate Chinese on Global Climate Change: Molecular Fossil Record. *Science in China (Series D)*, 33(5): 411–417 (in Chinese).

Xie, S. C., Liang, B., Gu, Y., S., et al., 2008. Distributions of

N-Alkan-2-Ones in Quaternary Paleosols Indicative of Paleoclimate Changes. *Acta Palaeontologica Sinica*, 47(3): 273–278 (in Chinese with English abstract).

Yang, H., Ding, W. H., Zhang, C. L., et al., 2011. Occurrence of Tetraether Lipids in Stalagmites: Implications for Sources and GDGT-Based Proxies. *Organic Geochemistry*, 42(1): 108–115. doi:10.1016/j.orggeochem.2010.11.006

Yang, H., Pancost, R. D., Dang, X. Y., et al., 2014. Correlations between Microbial Tetraether Lipids and Environmental Variables in Chinese Soils: Optimizing the Paleo-Reconstructions in Semi-Arid and Arid Regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 126: 49–69. doi:10.1016/j.gca.2013.10.041

Zhao, Q. G., Yang, H., 1995. A Preliminary Study on Red Earth and Changes of Quaternary Environment in South China. *Quaternary Sciences*, (2): 107–116 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Z. M., Yang, W. Q., Lin, W. J., et al., 2006. Magnetic Fabric Characteristics and Significance of Reticulate Red Earth in Xuancheng Profile, Anhui Province. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(4): 105–110 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

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.

李雪艳, 顾延生, 黄咸雨, 等, 2009. 碱式水解法提取红土分子化石: 以安徽宣城更新世网纹红土为例. 地球科学——中国地质大学学报, 34(4): 623–628.

马俊洁, 2012. 安徽宣城红土光释光测年(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学, 30–31.

吴霞, 2014. 甘油二烷基甘油四醚膜类脂在青藏高原库赛湖古环境重建中的应用研究. 北京: 中国地质大学(北京), 126.

谢树成, 易轶, 刘育燕, 等, 2003. 中国南方更新世网纹红土对全球气候变化的响应: 分子化石记录. 中国科学(D辑), 33(5): 411–417.

谢树成, 梁斌, 顾延生, 等, 2008. 脂肪酮分子在第四纪古土壤中的分布及其古气候意义. 古生物学报, 47(3): 273–278.

赵其国, 杨浩, 1995. 中国南方红土与第四纪环境变迁的初步研究. 第四纪研究, (2): 107–116.

朱宗敏, 杨文强, 林文姣, 等, 2006. 安徽宣城第四纪网纹红土的磁组构特征及其意义. 海洋地质与第四纪地质, 26(4): 105–110.