https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.610

巫山黄土微生物四醚膜脂分布特征及其古气候意义

马舒慧[1],彭红霞[1,2]*

1.中国地质大学公共管理学院,湖北武汉 430074

2.中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074

摘要:“巫山黄土”是指分布于长江三峡地区的黄土状堆积物,是中国黄土的重要组成部分,具有重要的古气候环境意义.微生物四醚膜脂是反演古气候环境的灵敏指标,为了进一步理解巫山黄土中蕴含的古气候意义,通过测定巫山黄土中微生物醚类化合物(glycerol dialkyl glycerol tetraethers, GDGTs)并分析其分布特征,基于支链GDGTs(bGDGTs)的甲基化指数(methylation index of branched tetraethers, MBT)和环化指数(cyclization ration of branched tetraethers, CBT)重建该地44.4~22.8 ka.BP的古温度年平均气温(mean annual air temperature, MAAT),MAAT与频率磁化率曲线和北大西洋沉积物有孔虫曲线对比,其变化趋势具有一致性,反映了其指标的可靠性.巫山黄土的陆源输入指数(BIT值,bGDGTs vs. crenarchaeol)在0.5~1.0之间,大部分值接近于1.0,但有几个极低值,分析为干旱事件.根据MAAT和BIT指标,巫山地区在冰期气候有剧烈的波动,在36.2±3.6 ka.BP、26.0±2.7 ka.BP、23.7±2.3 ka.BP时相对比较干旱,推测可能分别对应着H4、H3和H2事件,表明该区气候变化响应全球气候变化.

关键词:黄土;古气候;微生物醚类化合物;年平均气温;气候变化.

中图分类号:P66 **文章编号:**1000-2383(2018)11-4018-09 **收稿日期:**2017-12-19

Distribution and Paleoclimate Implication of Microbial Tetraether Lipids in Wushan Loess

Ma Shuhui[1], Peng Hongxia[1,2]*

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

2.*State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

Abstract: "Wushan loess", regarded as the southern boundary of Chinese Loess, is distributed in the Three Gorges area in the Yangtze River, which contains rich paleoclimatic information attracting attentions of many scholars in paleoclimate. In order to further reveal its causes and better understand the paleoclimatic significance contained in Wushan loess, the glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) extracted from Wushan loess section were investigated. Comparing the mean annual air temperature (MAAT) reconstructed based on branched GDGTs (bGDGTs) with frequency-dependent magnetic susceptibility and North Atlantic sediments, it is found that the three curves are analogous in climate evolution patterns. These similarities show that climatic changes in Wushan region respond to global climatic changes. The BIT values range from 0.5-1.0 and most BIT (bGDGTs vs. crenarchaeol) values are close to 1. The low BIT values suggest that it was very dry at 36.2 ka.BP, 30.2 ka.BP and 23.5 ka.BP. Based on MAAT and BIT values, it is found that it was relatively cold when it was very dry. It is proposed that the three periods correspond to H4, H3, H2 climate events, respectively.

Key words: loess; paleoclimate; glycerol dialkyl glycerol tetraether; mean annual air temperature; climate change.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41877297);国家重点基础研究发展计划“973”项目(No.2011CB710601).

作者简介:马舒慧(1991-),女,硕士研究生,自然地理学研究方向.ORCID:0000-0003-2575-0783. E-mail:mashuhui1002@163.com

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

引用格式:马舒慧,彭红霞,2018.巫山黄土微生物四醚膜脂分布特征及其古气候意义.地球科学,43(11):4018-4026.

来自微生物细胞膜脂的甘油二烷基甘油四醚化合物（glycerol dialkyl glycerol tetraethers，GDGTs），包括类异戊二烯 GDGTs（iGDGTs）和支链 GDGTs（bGDGTs）两大类（Yang *et al.*，2013），广泛存在于海洋（Lü *et al.*，2014）、湖泊（Günther *et al.*，2014）、泥炭（Coffinet *et al.*，2015）和土壤（Wang *et al.*，2014）等沉积物中，其分布能灵敏地响应气候环境变化，成为近年来古环境重建方面研究的热点.

古菌能够合成含有五元环或六元环的 iGDGTs 化合物（图 1）.研究者发现其大量存在于海洋（Schouten *et al.*，2002）、湖泊（Buckles *et al.*，2014）等沉积物中，后来发现在土壤（Weijers *et al.*，2006b）中也有 iGDGTs 分布，其含量主要受土壤 pH（Yang *et al.*，2012；Dang *et al.*，2016）和湿度（Wang *et al.*，2013）的控制.细菌 bGDGTs 一般由 2～6 个甲基支链和 0～2 个五元环组成（图 1），由厌氧异养细菌生成，主要存在于土壤（Weijers *et al.*，2007）和泥炭（Weijers *et al.*，2006a）沉积物中，并被河流带入海洋和湖泊（Herfort *et al.*，2006；Kim *et al.*，2007），另外，在湖泊和边缘海中也有自生的 bGDGTs（Tierney and Russell，2009；Sinninghe Damsté，2016）.甲基化指数 MBT（methylation index of branched tetraethers）与环化指数 CBT（cyclization ration of branched tetraethers）与大气温度、土壤 pH 关系密切，已经成为古环境重建的重要指标（Zhou *et al.*，2011；Peterse *et al.*，2012；Tang *et al.*，2017）.BIT（bGDGTs vs. crenarchaeol）指标一开始用来反映海洋、湖泊中陆源有机质的输入（Hopmans *et al.*，2004），近年来发现土壤 GDGTs 得到的 BIT 值能间接反映流域水文情况，且与土壤含水率呈正相关关系（Dirghangi *et al.*，2013）.

黄土是晚新生代古气候研究的重要载体.前人继利用磁化率（Hao *et al.*，2008；Li *et al.*，2015）、粒度（Sun *et al.*，2008）、同位素地球化学（Wang *et al.*，2007；Wei *et al.*，2015）等方法对其进行广泛研究之后，又把基于微生物类脂物的相关指标用于黄土古气候环境重建（Huguet *et al.*，2012；Yang *et al.*，2014；Schreuder *et al.*，2016）."巫山黄土"是指分布于长江三峡的黄土状堆积，是中国黄土的重要组成部分，含有丰富的气候与环境变化信息，早已引起学者关注.前人对巫山黄土的研究，主要集中于其成因的探讨（黄臻等，2010；李长安等，2010；张玉芬等，2010），缺乏古环境重建方面的研究.本文以巫山黄土剖面 GDGTs 为研究对象，分析其分布特征，重建古温度，探讨该区域古气候环境演变特

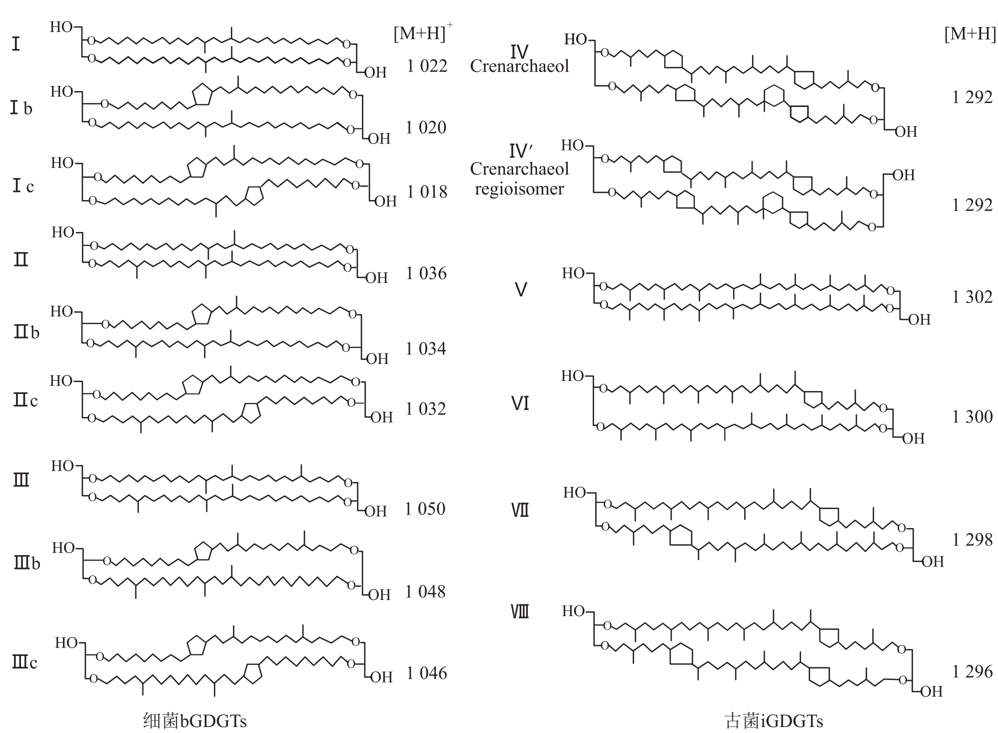

图 1　GDGTs 分子结构图及其质子化后的质核比（m/z）

Fig.1　The structures of GDGTs and their protonated mass to charge ratios（m/z）

征,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　样品采集及定年

巫山县位于重庆市最东端,地处三峡库区腹心,地势南北高中间低,为典型的亚热带季风湿润气候,年均气温 18.4 ℃,年均降水量 1 041 mm,雨热同期.样品采自巫山县客运港附近长江中游河谷的北岸,为一个建筑工地开挖的新鲜露头,剖面高达 10 m 多,出露完整,整体以黄色或褐黄色的粉砂和砂质粘土组成,岩性均一、无层理、未见古土壤,是理想的研究巫山黄土的剖面(图 2).

对剖面进行系统采样,采样间隔为 5 cm,共得样品 177 个,测试时每隔 3 个样品,即每隔 20 cm 取样进行 GDGTs 测试;同时,测试 1 个表土 GDGTs 样品,进行温度重建对比研究,共测试 46 个黄土 GDGTs 样品.频率磁化率可以反映气候温暖湿润的强弱和时间,为了进行对比,笔者对所有样品(177 个)进行磁化率测试,巫山黄土频率磁化率的测试工作在中国地质大学(武汉)岩石磁学实验室完成,采用 HKB23 型磁化率仪,其灵敏度可达 2×10^{-7} SI.另外,在剖面 2.00 m、4.00 m、6.00 m、8.00 m、10.00 m处避光密封采集 5 块样品,送到中国科学院青海盐湖研究所资源与化学重点实验室进行光释光(OSL)测年,测年方法详见赖忠平等(Lai *et al*., 2007; Kang *et al*., 2011).由于在 8.00 m 处采得的样品的测年数据明显不符合实际,故将其舍去,最终的年代数据(表 1)与深度呈较强的线性关系(R = 0.975)(吴可等,2014),表明研究区的巫山黄土剖面沉积连续,其年代范围为 44.4～22.8 ka.BP,为晚更新世中后期沉积黄土.笔者去除风化表面后,在剖面 1 m 处开始采样.

表 1　巫山黄土剖面 OSL 测年结果

Table 1　OSL dating results of the samples from Wushan loess section

采样深度(m)	估计光释光年龄(ka.BP)
2	26.4±2.3
4	28.2±2.5
6	31.9±2.9
10	44.4±4.2

1.2　GDGTs 的萃取和分析

黄土样品经过 48 h 冷冻干燥并用玛瑙研钵研磨过 60 目筛后,称取 80 g 左右样品和一定量的石英砂混合均匀后装入加速溶剂萃取仪(ASE100; Dionex, USA)的萃取池中,安装好萃取池后,调好模式的仪器自动在萃取池温度升到 100 ℃,氮气加压至 1.0×10^6 Pa 后,用 DCM∶MeOH(9∶1, v/v)混合溶剂萃取样品 30 min.完成萃取后将提取的脂类转移到旋转蒸发仪浓缩至 1～2 mL,后用氮气吹干.然后,过硅胶层析柱分离非极性组分和极性组分,洗脱剂分别为正己烷和甲醇.极性组分用氮气吹干后,用 DCM 重新溶解过 0.45 μm PTFE 滤膜,再用氮吹仪吹干准备分析其中的 GDGTs.为防止人为污染,每隔 10 个样品设 1 个空白样,实施监测.

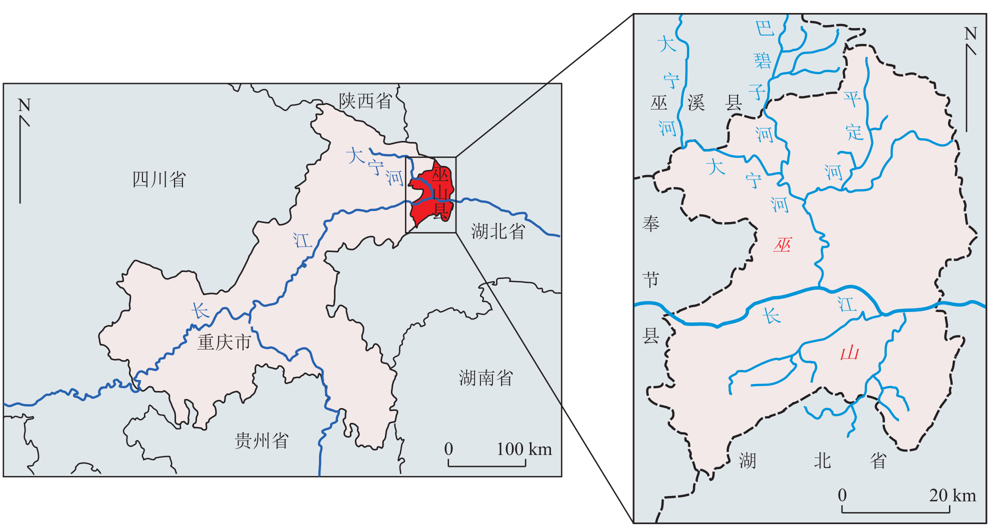

图 2　研究区地理位置图

Fig.2　Location of research region

地理位置图据百度地图(map.baidu.com)改绘

把待测样品重新溶解在 300 μL 正己烷/异丙醇(99∶1,v/v)混合溶剂中，并加入 10 μL C_{46} GDGT 作为内标(浓度为 0.001 157 μg/μL).类脂物 GDGTs 化合物的检测采用高效液相色谱质谱－质谱联用仪(LC-MS)，仪器型号为 Agilent 1200 HPLC，是配有大气压化学电离源(APCI)与电喷雾(ESI)两种离子源的 6460A 三重四级杆质谱仪，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：流动相 A 相为正己烷，B 相为正己烷/异丙醇(体积比为 9∶1).洗脱梯度为 0～5 min，90%A∶10%B；5～45 min，A 相比例由 90% 线性降至 82%，而后冲洗色谱柱至 B 相含量回到 10%，过程中流速为 0.2 mL/min，柱温箱恒温40 ℃.在 APCI 源中进行化合物离子化，APCI/MS 条件如下：雾化器压力 0.41 MPa，雾化温度 400 ℃，干燥气(N_2)流速 6 L/min，温度 200 ℃，毛细管电压 3 500 V，电晕电流 5 μA(约 3 200 V).采用选择离子扫描模式(SIM)检测 GDGTs 质子化后有特定质荷比的离子，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.本研究主要是对 GDGTs 化合物的定性分析，通过各离子峰面积与加入内标面积的比值对目标化合物进行定量分析.

上机测试结果显示：样品 ws-169 的数据出现错误，将其舍去，最终得到 45 个样品数据；所有空白样均未监测出本实验所测类脂物.

2　结果与讨论

2.1　GDGTs 分布特征

巫山黄土样品中检测出 5 种类异戊二烯类和 9 种支链类 GDGTs，古菌 iGDGTs 和细菌 bGDGTs 总含量差别较大(图 3)，分别为 31.20～3 999.40 μg·g^{-1} 和 164.60～36 451.30 μg·g^{-1}.bGDGTs 占总 GDGTs 含量的 78.33%～94.29%.古菌 iGDGTs 的主要组分为 GDGT-Ⅴ和 GDGT-Ⅳ(crenarchaeol)，占古菌 iGDGTs 总量的 9.37%～71.19%.细菌 bGDGTs 中丰度较高的组分依次为 GDGT-Ⅰ、GDGT-Ⅰb、GDGT-Ⅱ、GDGT-Ⅱb，占细菌 bGDGTs 总量的 8.52%～45.48%.黄土为中到弱碱性土壤，黄土中古菌 iGDGTs 的含量(相对内标 C46GDGT)比酸性土壤的含量高(杨欢，2014)，黄土中细菌 bGDGTs 的主要组分相较于酸性土壤以 GDGT-Ⅰ、GDGT-Ⅱ、GDGT-Ⅲ为主有较大区别.

2.2　巫山黄土 GDGTs 古环境意义

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、热带的砖红壤和砖黄壤中证实了其应用潜力.巫山黄土样品中检测出了较为丰富的 GDGTs 化合物，这为利用巫山黄土 GDGTs 重建古气候环境提供了可能性.GDGTs 化合物的 MBT 和 CBT 指标被广泛应用到古温度的重建，目前土壤沉积物已经建立了多种全球土壤温度校正公式(Weijers *et al*.，2007；Peterse *et al*.，2012)、中国区域校正公式(Yang *et al*.，2014).由于本文采集的样品与杨欢建立的中国区域校正公式的样品具有相同的属性，所以引用杨欢的中国区域校正公式.笔者将探讨通过中国区域校正公式计算的平均温度 MAAT 以及 Hopmans 等建立的陆源输入指数 BIT(branched and isoprenoid tetraether index)(Hopmans *et al*.，2004)来了解巫山黄土中蕴含的古环境信息.具体计算方法如公式(1)、(2)、(3)、(4)(公式中罗马数字代表图 1 中对应的 GDGTs 分子结构)：

$$\mathrm{MBT}=\frac{\mathrm{I}+\mathrm{Ib}+\mathrm{Ic}}{\mathrm{I}+\mathrm{Ib}+\mathrm{Ic}+\mathrm{II}+\mathrm{IIb}+\mathrm{IIc}+\mathrm{III}+\mathrm{IIIb}+\mathrm{IIIc}},\tag{1}$$

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

$$\mathrm{MAAT}=7.5+16.1\times\mathrm{MBT}-1.2\times\mathrm{CBT},\tag{3}$$

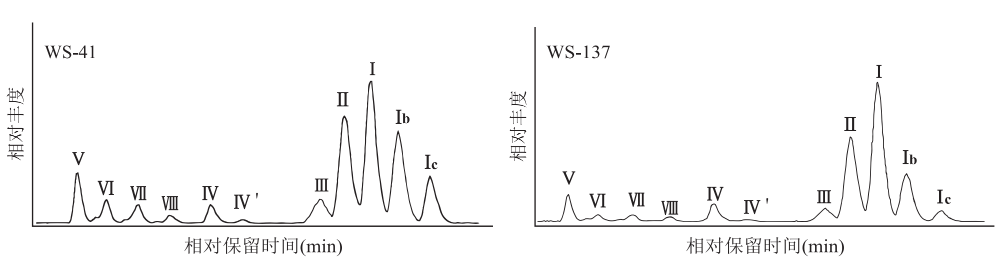

图 3　样品的部分基峰色谱

Fig.3　HPLC-APCI/MS base peak chromatograms of two samples in loess

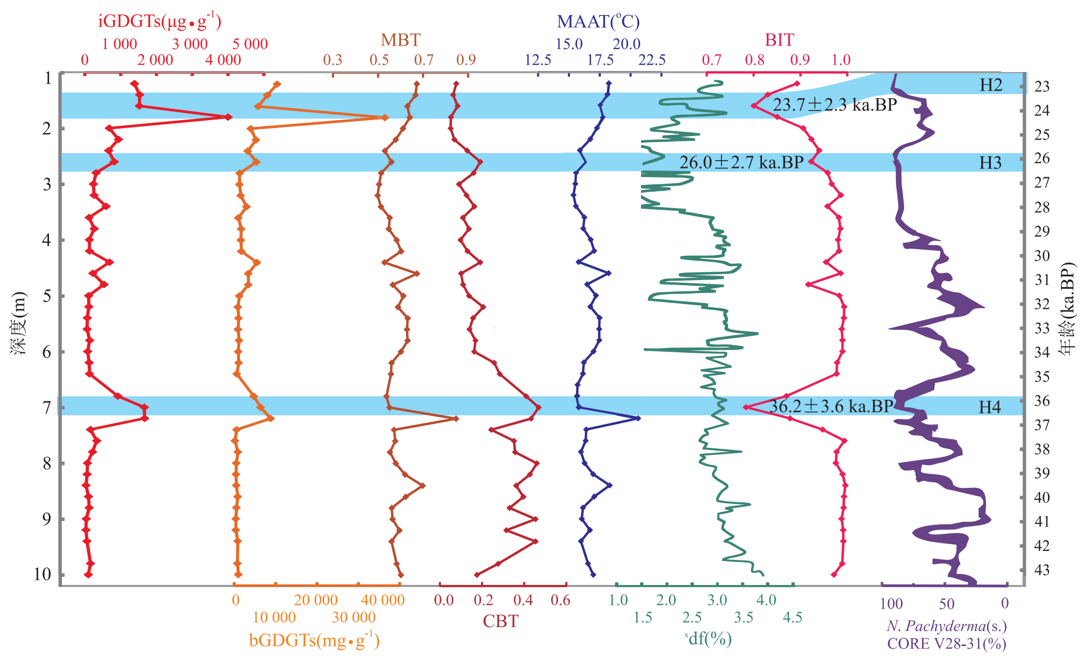

图 4 巫山黄土剖面 GDGTs 各参数的变化及 bGDGTs 重建的温度与频率磁化率、北大西洋 V23-81 钻孔沉积物有孔虫曲线对比

Fig.4 Variations of GDGT proxies in Wushan loess section and comparison of bGDGT-derived MAAT with frequency-dependent magnetic susceptibility and North Atlantic Core V23-81 *N. Pachyderma*

据 Bond *et al*.(1992)

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

所有测式及计算获得的数据如图 4.

利用公式(1)和(2)得到巫山黄土剖面中细菌的甲基化指数 MBT 和环化指数 CBT 的变化范围分别为:0.50～0.85,0.05～0.47.利用公式(3)计算出表土层的温度为 18.6 ℃,比现在当地记录的平均温度 18.4 ℃高,但差别不大.44.4～22.8 ka.BP,MAAT 变化范围为 15.5～18.3 ℃,平均温度约为 16.7 ℃,比现在该区记录的温度低 1.7 ℃,这与该时段处于冰期相比现代温度要低的事实相符.不同的纬度末次冰期温度与现代温度的差异较大.一般来说,高纬度地区可以相差 8～10 ℃(卢冰等,2001),低纬度地区可能相差 2～3 ℃(姚龙奎等,2007),本研究区所处的中纬度地区相差 4～5 ℃(李铁刚等,2006). Weijers *et al*.(2011)通过研究全球 8 个采样点的土壤,发现 MBT-CBT 计算得出的温度比实际测量的大气年均温度高 2.1 ℃.频率磁化率可反映样品中超顺磁磁颗粒含量的多少,这些含量又反映了气候温暖湿润的强弱和时间,温湿程度越高则频率磁化率的值越大(刘秀铭等,1990).重建的 MAAT 曲线与频率磁化率相比较(图 3),两条曲线总体上的变化趋势基本一致,虽然重建巫山地区的古温度 MAAT 曲线绝对温度上偏高,但其相对变化趋势是可信的.图 4 为巫山黄土重建的古温度和北大西洋钻 V23-81 有孔虫含量对比曲线(Bond *et al*.,1992),有相似的气候变化,在该时期,温度有较大的波动,尤其在 6.6 m、4.8 m 和 1.6 m 处气温有大幅度降低.

本文由公式(4)得到的 BIT 值大部分接近 1(图 4),一般在 0.95～1.00 范围内波动,但受当时具体环境影响,部分样品的 BIT 值有所波动,分别在 6.6 m、4.8 m 和 1.6 m 处出现极低值,对应地 BIT 值分别降到 0.50、0.92、0.80,反映了这些时期出现了干旱事件. 一般 BIT 指数的范围为 0～1,在土壤中,支链 GDGTs 含量很高,BIT 指数接近于 1;而在远洋沉积物中几乎没有支链 GDGTs,BIT 指数则接近于 0.尽管土壤中 BIT 接近于 1 的那些值不能反映湿润气候,但 BIT 的那些相对极低值可以反映干旱事件.前人研究表明:中到弱碱性条件下,越干旱厌氧细菌所产生的 bGDGTs 越少,好氧所产生的古菌越多,从而导致 BIT 值变小(Xie *et al*., 2013; 杨欢,2014).

根据图 4,在 6.6 m、4.8 m 和 1.6 m 处 BIT 为极低值,同时 MAAT 也是低值,反映了干旱事件,极干对应着寒冷.根据测年插值计算,误差取测试中间值的平均,这 3 个低值对应的时间段分别为 36.2±3.6 ka.BP、26.0±2.7 ka.BP 和 23.7±2.3 ka.BP,这些年龄范围在国际公认的 H4、H3、H2 年龄范围

内，笔者推测此 3 次事件对应于北大西洋沉积物所指示的 H4、H3 和 H2 事件（Bond *et al.*，1992）. 从数据上分析认为 H4 最干旱，H2 次之，H3 最末，可能 H4 事件正好对应着 D/O 旋回的寒冷期，而 H3、H2 事件对应着 D/O 旋回的间冰阶期（王绍武，2011）. 结合获得的 MAAT 和 BIT 分析，在巫山地区，极端干旱时期对应着温度的降低，可能是中北大西洋冰漂碎屑事件（H 事件）（Heinrich，1988；Bond *et al.*，1992），通过海一气系统的快速重组，西风带和蒙古冷高压影响东亚季风气候系统（An，2000），导致全球气候突发性降温干旱. 图 3 中巫山黄土曲线所反映的千年尺度气候突变与北大西洋 V23-81 钻孔沉积物记录的 Heinrich 事件对应较好，说明研究时期内巫山短暂的气候回返事件具有全球性. 但巫山黄土指示的气候没有较明显的周期性，与格陵兰冰芯记录有一定的差异性，可能是受巫山复杂地理环境的影响以致呈现一定的区域性.

3　结论

（1）巫山黄土检测出了丰富的微生物类脂物，其中细菌 bGDGTs 含量明显高于古菌 iGDGTs 含量，表现出黄土中到弱碱性土壤的 GDGTs 分布特征.

（2）利用 MBT 和 CBT 重建的巫山黄土末次冰期间的 MAAT 值虽然比实际偏高，但变化趋势与其他指标一致，可反演气温的相对变化，MAAT 值波动较大，反映了冰期气候的不稳定性. 巫山黄土的 BIT 指数大部分接近于 1，但局部由于极端气候事件的影响有降低，指示干旱事件. 根据 MAAT 和 BIT 指标，巫山地区在约 36.2±3.6 ka.BP、26.0±2.7 ka.BP和 23.7±2.3 ka.BP 时对应着干冷，推测可能分别对应着 H4、H3 和 H2 事件.

（3）巫山短暂的气候回返事件具有全球性，但又与北大西洋记录有一定的差异性，可能是受巫山复杂地理环境的影响致使呈现一定的区域性.

致谢：感谢中国地质大学（武汉）地球科学学院地理系杨欢副教授对分子化石测试分析工作的指导；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；感谢实验室其他老师和同学的帮助. 感谢两位审稿人耐心细致的审稿，感谢责任主编不厌其烦的宝贵修改意见！

References

An, Z.S., 2000. The History and Variability of the East Asian Paleomonsoon Climate. *Quaternary Science Reviews*, 19(1－5): 171－187. https://doi.org/10.1016/s0277-3791(99)00060-8

Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., et al., 1992. Evidence for Massive Discharges of Icebergs into the North Atlantic Ocean during the Last Glacial Period. *Nature*, 360(6401): 245－249. https://doi.org/10.1038/360245a0

Buckles, L.K., Weijers, J.W.H., Tran, X.M., et al., 2014. Provenance of Tetraether Membrane Lipids in a Large Temperate Lake (Loch Lomond, UK): Implications for Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraether (GDGT)-Based Palaeothermometry. *Biogeosciences*, 11(19): 5539－5563.

Coffinet, S., Huguet, A., Williamson, D., et al., 2015. Occurrence and Distribution of Glycerol Dialkanol Diethers and Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers in a Peat Core from SW Tanzania. *Organic Geochemistry*, 83－84: 170－177. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2015.03.013

Dang, X.Y., Yang, H., Naafs, B.D.A., et al., 2016. Evidence of Moisture Control on the Methylation of Branched Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers in Semi-Arid and Arid Soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 189: 24－36.

Dirghangi, S.S., Pagani, M., Hren, M.T., et al., 2013. Distribution of Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers in Soils from Two Environmental Transects in the USA. *Organic Geochemistry*, 59: 49－60. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.03.009

Günther, F., Thiele, A., Gleixner, G., et al., 2014. Distribution of Bacterial and Archaeal Ether Lipids in Soils and Surface Sediments of Tibetan Lakes: Implications for GDGT-Based Proxies in Saline High Mountain Lakes. *Organic Geochemistry*, 67: 19－30. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.11.014

Hao, Q.Z., Oldfield, F., Bloemendal, J., et al., 2008. The Magnetic Properties of Loess and Paleosol Samples from the Chinese Loess Plateau Spanning the Last 22 Million Years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 260(3－4): 389－404. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.11.010

Heinrich, H., 1988. Origin and Consequences of Cyclic Ice Rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the Past 130,000 Years. *Quaternary Research*, 29(2): 142－152. https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90057-9

Herfort, L., Schouten, S., Boon, J.P., et al., 2006. Characterization of Transport and Deposition of Terrestrial Organic Matter in the Southern North Sea Using the BIT Index. *Limnology and Oceanography*, 51(5): 2196－2205. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2196

Hopmans, E.C., Weijers, J.W.H., Schefuβ, 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. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.012

Huang, Z., Wang, J. L., Wang, Y., 2010. Grain-Size Features of Quaternary Sediments in Changjiang Three Gorge Reservoir of the Wushan Area. *Tropical Geography*, 30(1): 30-33, 39 (in Chinese with English abstract).

Huguet, A., Wiesenberg, G. L. B., Gocke, M., et al., 2012. Branched Tetraether Membrane Lipids Associated with Rhizoliths in Loess: Rhizomicrobial Overprinting of Initial Biomarker Record. *Organic Geochemistry*, 43: 12-19. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.11.006

Kang, S.G., Lu, Y.C., Wang, X.L., 2011. Closely-Spaced Recuperated OSL Dating of the Last Interglacial Paleosol in the Southeastern Margin of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Geochronology*, 6(5): 480-490. https://doi.org/10.1016/j.quageo.2011.04.004

Kim, J. H., 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. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2007.06.010

Lai, Z. P., Wintle, A. G., Thomas, D. S. G., 2007. Rates of Dust Deposition between 50 ka and 20 ka Revealed by OSL Dating at Yuanbao on the Chinese Loess Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 248(3-4): 431-439. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.12.013

Li, C. A., Zhang, Y. F., Yuan, S. Y., et al., 2010. Grain Size Characteristics and Origin of the "Wushan Loess" at Wushan Area. *Earth Science*, 35(5): 879-884 (in Chinese with English abstract).

Li, G.H., Xia, D.S., Jin, M., et al., 2015. Magnetic Characteristics of Loess-Paleosol Sequences in Tacheng, Northwestern China, and Their Paleoenvironmental Implications. *Quaternary International*, 372: 87-96. https://doi.org/10.13039/501100001809

Li, T. G., Chen, J. X., Zhang, D. Y., et al., 2006. Sedimentary Record of Millennial-Scale Paleoceanography Evolution since the Last Glaciation in the Okinawa Trough. *Studia Marina Sinica*, 47(4): 16-28 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. M., Liu, D. S., Heller, F., et al., 1990. Frequency-Dependent Susceptibility of Loess and Quaternary Paleoclimate. *Quaternary Sciences*, 10(1): 42-50 (in Chinese with English abstract).

Lu, B., Chen, R. H., Wang, Z. P., et al., 2001. Long-Chain Alkenones and Their Application Study on the Paleo-Temperature of U_{37}^{k} Values in the Arctic Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(5): 49-57 (in Chinese with English abstract).

Lü, X.X., Yang, H., Song, J.M., et al., 2014. Sources and Distribution of Isoprenoid Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers (GDGTs) in Sediments from the East Coastal Sea of China: Application of GDGT-Based Paleothermometry to a Shallow Marginal Sea. *Organic Geochemistry*, 75: 24-35. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.06.007

Peterse, F., van der Meer, J., Schouten, S., et al., 2012. Revised Calibration of the MBT-CBT Paleotemperature Proxy Based on Branched Tetraether Membrane Lipids in Surface Soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 96: 215-229. https://doi.org/10.13039/501100000781

Schouten, S., Hopmans, E.C., Schefuβ, E., et al., 2002. Distributional Variations in Marine Crenarchaeotal Membrane Lipids: A New Tool for Reconstructing Ancient Sea Water Temperatures? *Earth and Planetary Science Letters*, 204(1-2): 265-274. https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00979-2

Schreuder, L. T., Beets, C. J., Prins, M. A., et al., 2016. Late Pleistocene Climate Evolution in Southeastern Europe Recorded by Soil Bacterial Membrane Lipids in Serbian Loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 449: 141-148. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.02.013

Sinninghe Damsté, J. S., 2016. Spatial Heterogeneity of Sources of Branched Tetraethers in Shelf Systems: The Geochemistry of Tetraethers in the Berau River Delta (Kalimantan, Indonesia). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 186: 13-31.

Sun, D. H., Su, R. X., Bloemendal, J., et al., 2008. Grain-Size and Accumulation Rate Records from Late Cenozoic Aeolian Sequences in Northern China: Implications for Variations in the East Asian Winter Monsoon and Westerly Atmospheric Circulation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 264(1-2): 39-53. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.03.011

Tang, C.Y., Yang, H., Dang, X.Y., et al., 2017. Comparison of Paleotemperature Reconstructions Using Microbial Tetraether Thermometers of the Chinese Loess-Paleosol Sequence for the Past 350 000 Years. *Science China Earth Sciences*, 60(6): 1159-1170. https://doi.org/10.1007/s11430-016-9035-y

Tierney, J. E., Russell, J. M., 2009. Distributions of Branched GDGTs in a Tropical Lake System: Implications for Lacustrine Application of the MBT/CBT Paleoproxy. *Organic Geochemistry*, 40(9): 1032－1036. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.04.014

Wang, H., Liu, W., Zhang, C.L., 2014. Dependence of the Cyclization of Branched Tetraethers on Soil Moisture in Alkaline Soils from Arid-Subhumid China: Implications for Palaeorainfall Reconstructions on the Chinese Loess Plateau. *Biogeosciences*, 11(23): 6755－6768. https://doi.org/10.5194/bg-11-6755-2014

Wang, H.Y., Liu, W.G., Zhang, C.L., et al., 2013. Branched and Isoprenoid Tetraether (BIT) Index Traces Water Content along Two Marsh-Soil Transects Surrounding Lake Qinghai: Implications for Paleo-Humidity Variation. *Organic Geochemistry*, 59: 75－81. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.03.011

Wang, S.W., 2011. D/O Cycles and H Events. *Advances in Climate Change Research*, 7(6): 458－460 (in Chinese).

Wang, Y.X., Yang, J.D., Chen, J., et al., 2007. The Sr and Nd Isotopic Variations of the Chinese Loess Plateau during the Past 7 Ma: Implications for the East Asian Winter Monsoon and Source Areas of Loess. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249(3－4): 351－361. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.010

Wei, H.Z., Lei, F., Jiang, S.Y., et al., 2015. Implication of Boron Isotope Geochemistry for the Pedogenic Environments in Loess and Paleosol Sequences of Central China. *Quaternary Research*, 83(1): 243－255.

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

Weijers, J.W.H., Schouten, S., Spaargaren, O.C., et al., 2006b. Occurrence and Distribution of Tetraether Membrane Lipids in Soils: Implications for the Use of the TEX_{86} Proxy and the BIT Index. *Organic Geochemistry*, 37(12): 1680－1693. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.07.018

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. https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.10.003

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. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.03.013

Wu, K., Peng, H.X., Shi, R., et al., 2014. Analysis on the Characteristics and Their Origin of the Grain-Size of Wushan Loess in the Three Gorges Area, China. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences)*, 48(2): 284－289 (in Chinese with English abstract).

Xie, S.C., Evershed, R.P., Huang, X.Y., 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. https://doi.org/10.1130/g34318.1

Yang, G.F., Zhang, C.L., Xie, S.C., et al., 2013. Microbial Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers from River Water and Soil near the Three Gorges Dam on the Yangtze River. *Organic Geochemistry*, 56: 40－50. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.11.014

Yang, H., Ding, W.H., Wang, J.X., et al., 2012. Soil pH Impact on Microbial Tetraether Lipids and Terrestrial Input Index (BIT) in China. *Science China Earth Sciences*, 55(2): 236－245.

Yang, H., 2014. The Paleoclimate Reconstruction Based on Microbial Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers in Terrestrial Environments: Modern Process and Its Application in Chinese Loess-Paleosol and Stalagmite (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 55－57 (in Chinese with English abstract).

Yang, H., Pancost, R.D., Tang, C.Y., et al., 2014. Distributions of Isoprenoid and Branched Glycerol Dialkanol Diethers in Chinese Surface Soils and a Loess-Paleosol Sequence: Implications for the Degradation of Tetraether Lipids. *Organic Geochemistry*, 66: 70－79. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.11.003

Yao, L.K., Xue, B., Yao, M., et al., 2007. By Using U_{37}^{K} Index to Study Sea Surface Paleotemperatures in South China Sea since the Last Glacial Maximum. *Journal of Marine Sciences*, 25(4): 24－31 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y.F., Li, C.A., Shao, L., et al., 2010. Magnetic Fabric Characteristics and Implications for Its Origin of "Wushan Loess". *Earth Science*, 35(5): 885－890 (in Chinese with English abstract).

Zhou, H., Hu, J., Ming, L., et al., 2011. Branched Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers and Paleoenvironmental Reconstruction in Zoig Peat Sediments during the Last 150 Years. *Chinese Science Bulletin*, 56(23): 2456－2463.

附中文参考文献

黄臻，王建力，王勇，2010. 长江三峡巫山第四纪沉积物粒度分布特征. 热带地理，30(1)：30－33，39.

李长安，张玉芬，袁胜元，等，2010."巫山黄土"粒度特征及其对成因的指示.地球科学，35(5)：879－884.

李铁刚，陈金霞，张德玉，等，2006.冲绳海槽末次冰期以来千年尺度古海洋演化的沉积记录.海洋科学集刊，47(4)：16－28.

刘秀铭，刘东生，Heller，F.，等，1990.黄土频率磁化率与古气候冷暖变换.第四纪研究，10(1)：42－50.

卢冰，陈荣华，王自磐，等，2001.长链烯酮及 U_{37}^{k} 值在北极海洋古温度的应用研究.海洋学报，23(5)：49－57.

王绍武，2011.D/O 循环与 H 事件.气候变化研究进展，7(6)：458－460.

吴可，彭红霞，时冉，等，2014.长江三峡地区黄土粒度特征及其成因分析.华中师范大学学报(自然科学版)，48(2)：284－289.

杨欢，2014.陆相微生物脂类 GDGTs 的古气候重建：现代过程及其在黄土－古土壤和石笋中的应用(博士学位论文).武汉：中国地质大学，55－57.

姚龙奎，薛斌，姚梅，等，2007.U_{37}^{K} 指标在南海末次盛冰期表层海水古温度研究中的应用.海洋学研究，25(4)：24－31.

张玉芬，李长安，邵磊，等，2010."巫山黄土"的磁组构特征及成因.地球科学，35(5)：885－890.