

兰州不同时期黄土有机质碳同位素 与气候的关系*

何勇¹⁾ 秦大河²⁾ 任贾文²⁾ 孙维贞²⁾

1) (中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

2) (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯室, 兰州 730000)

摘要 基于兰州九州台黄土剖面的土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 分析, 讨论了兰州地区末次间冰期和全新世 2 个时期气候以及地表植被的变化特征。结果表明, 该地区末次间冰期 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 $-29.97\text{‰} \sim -25.52\text{‰}$, 平均值为 -27.79‰ ; 全新世 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围在 $-20.82 \sim -34.40\text{‰}$ 之间, 平均值为 -28.99‰ 。从 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值来看, 该地区在以上两个时期地表植被主要为 C_3 植物。末次间冰期九州台剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 表现出 3 峰夹 2 谷的特征与同一时期深海 SPECMAP 曲线有着良好的对应, 表明了该时期兰州地区的气候变化与全球是一致的, 全新世土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 所反映出的 3 个不同的变化阶段对应于早、中、晚全新世阶段。结合黄土高原其他剖面相应时期的土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究结果, 我们观察到陕西关中地区的黄土剖面末次间冰期和全新世土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 要大于黄土高原西部的兰州等地区, 气候差异引起的地表植被中 C_3 、 C_4 植物比例不同是造成两地区土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 差异的主要因素。研究表明, 黄土高原土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 是揭示该地区气候变化的一个良好代用指标。

关键词: 黄土-古土壤; 有机质碳同位素; 植被; 气候变化

文章编号 1006-9895 (2004) 02-0369-09 **中图分类号** P532 **文献标识码** A

1 引言

中国黄土-古土壤沉积记录了最近 2.5 Ma 东亚季风演化历史^[1], 其所记录的气候变化特征可与深海^[2]、极地^[3,4]以及青藏高原^[5]所记录的气候变化进行对比。利用黄土的磁化率^[6]、粒度^[7]以及地球化学^[8]等方法开展我国乃至全球古气候演化方面的研究工作已经取得了大量成果, 而黄土地层中有机质碳同位素方面的研究还较少。早期的工作见于林本海等^[9]对西安附近段家坡黄土剖面 0.8 Ma 以来黄土地层的研究, 他们观察到黄土-古土壤地层中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的高值对应于古土壤层, 低值对应于黄土地层, 认为其可反映东亚夏季风的变化。之后, 安芷生等^[10]、顾兆炎等^[11]、Wang 等^[12]也相继作了一些工作。最近, 何勇等^[13]、刘卫国等^[14]对甘肃临夏、陕西旬邑剖面的研究表明, 黄土中有机质碳同位素可敏感地响应古气候的变化。由于黄土有机质的成分主要来自于地表植被, 探讨土壤有机质碳同位素的变化特征, 不仅仅在气候演化方面, 在古生态研究方面也可发挥重要作用。

2004-02-16 收到, 2004-04-09 收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划 G1999043401 和中国科学院知识创新重大项目 KZCX-Y-05 项目资助

黄土-古土壤中有有机质主要来自于地表植被死亡分解后的残余物,是地表植被残余物质的混合体,有机质碳同位素的变化反映的是地表植被的平均状况。陆生植物的光合作用按其初级产物的差异可以划分为3种类型: C_3 、 C_4 及CAM植物,其 $\delta^{13}C$ 平均值分别为 -27‰ 、 -13‰ 和 -17‰ ^[15]。地表植被对气候改变有敏感的反应,不同气候条件下的植被类型也不同,并导致土壤中有有机质碳同位素不同。利用地层中有有机质碳同位素的变化可以判断出土壤有机质的来源、植被类型以及气候的演化历史^[16,17]。本文将对兰州地区末次间冰期、全新世黄土有机质碳同位素进行分析,讨论以上2个时期土壤中有有机质碳同位素的特征及其与气候变化以及植被的关系,并探讨黄土高原不同地区黄土有机质 $\delta^{13}C$ 的分布特征,和气候差异对不同地区地表植被类型的影响。

2 研究区域简介

兰州位于甘肃省中部,黄河从其中穿越而过,该区海拔1500~2000 m,大部分为黄土丘陵沟壑地形,属温带半干旱气候,年均气温 $10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量324.9 mm。由于特殊的自然地理环境,该地区黄土沉积速率较快,其周围有巨厚层的第四纪黄土堆积,是中国季风气候和全球变化的敏感区之一。

兰州九州台剖面,位于兰州市黄河北岸6级阶地之上(图1),该阶地是兰州段黄河北岸最高黄土堆积面,海拔2066 m。该剖面黄土厚318.2 m,其中风成黄土297.2 m,底部为高河漫滩黄土,厚21 m,整个黄土剖面内发育40余层古土壤。近年来的研究已经表明,九州台剖面是中国标准黄土剖面之一,对于研究黄土气候记录具有重要意义^[18~22]。在该剖面36.3~28.9 m处发育了约7.4 m的 S_1 黄土-古土壤堆积, S_1 剖面详细描述见图2,其发育了3个古土壤亚层和2个黄土亚层。其中, S_1S_3 为最底层的古土壤,土壤呈块状结构,坚硬,颜色发红,是 S_1 土壤复合体中发育最好的古土壤亚层; S_1S_2 为两个古土壤亚层中间夹一弱发育土壤层; S_1S_1 为顶部古土壤亚层,发育较好,发育程度次于 S_1S_3 。

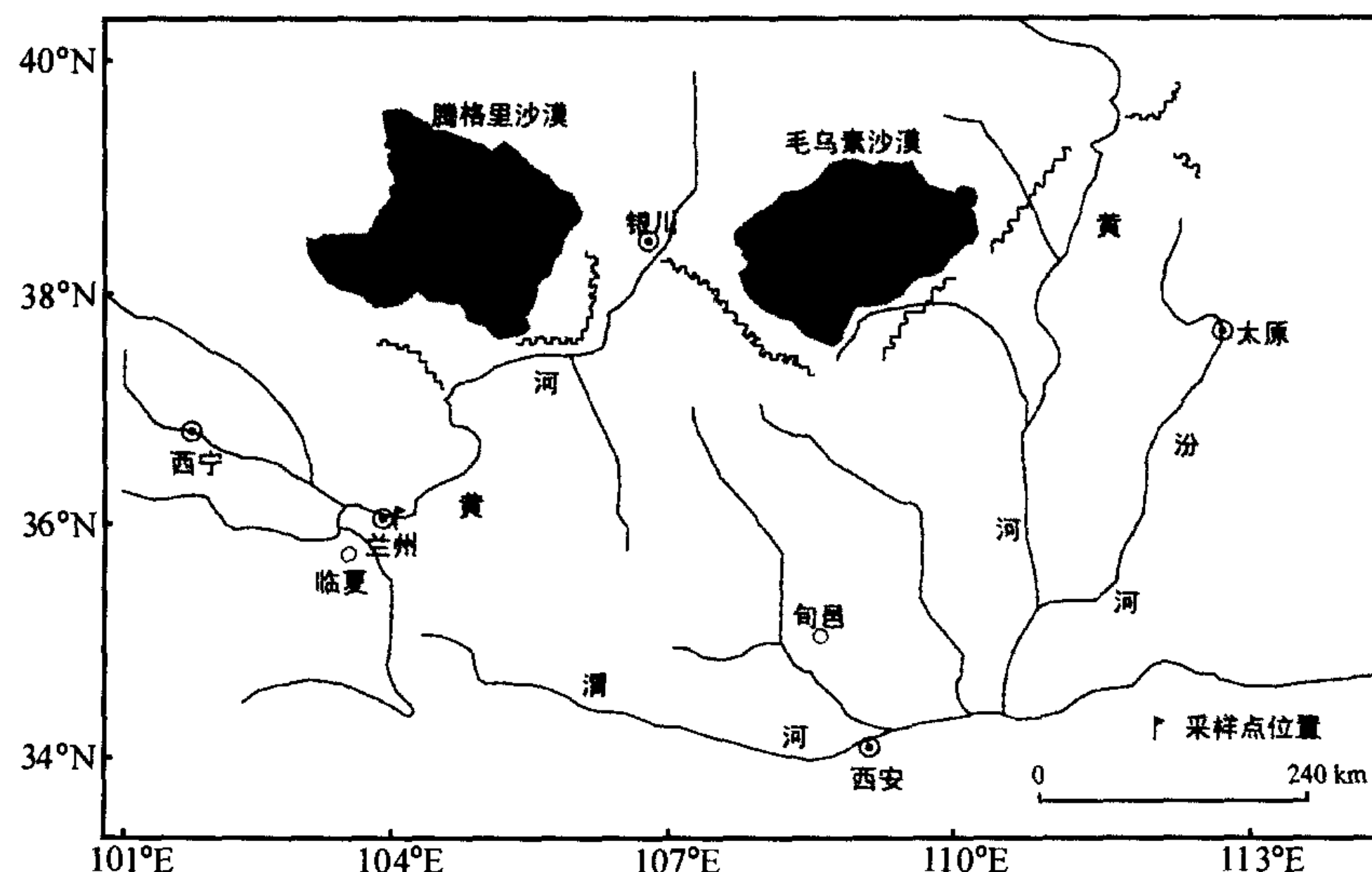


图1 采样点地理位置

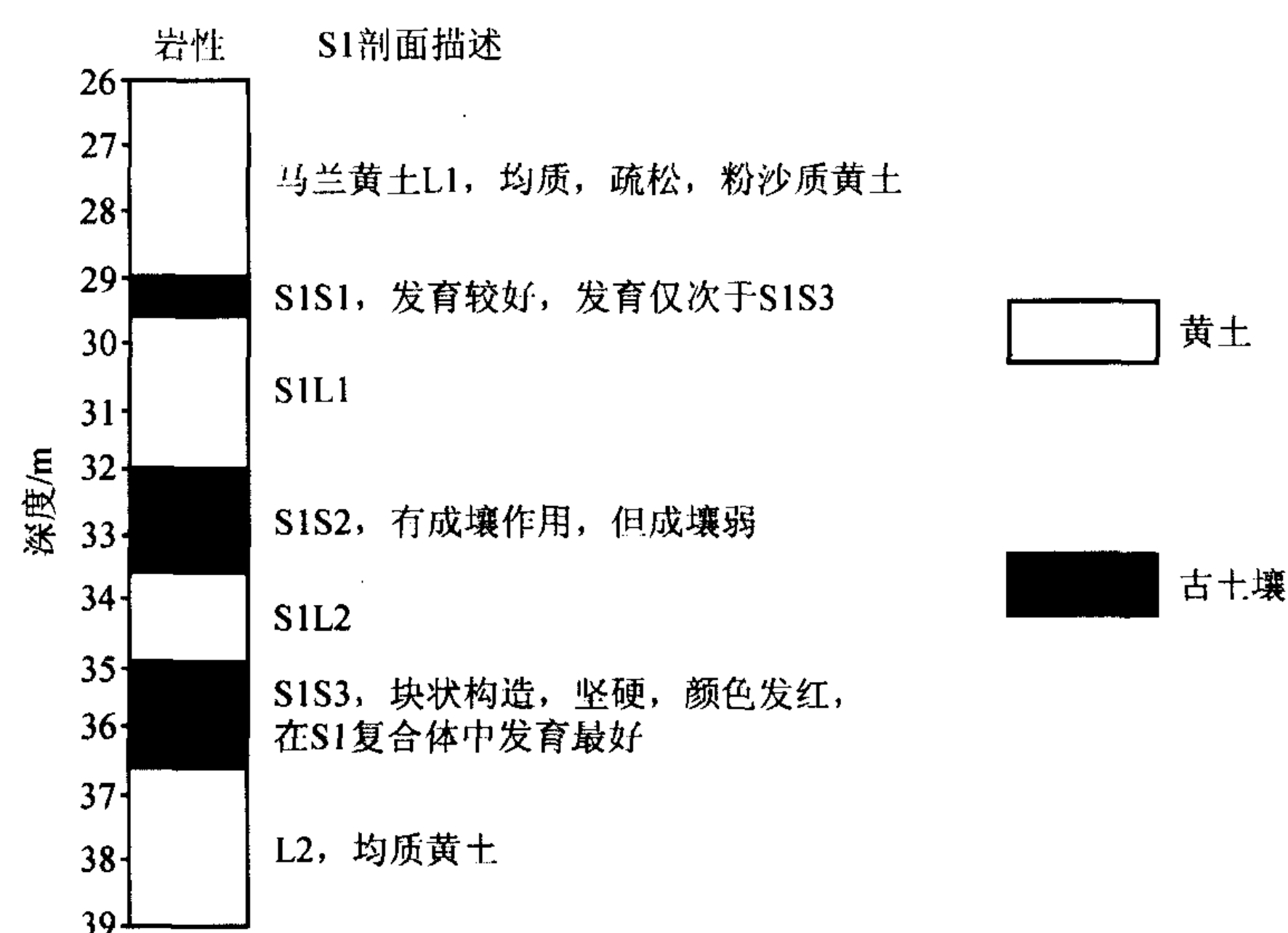


图2 兰州九州台末次间冰期剖面简图及描述

3 样品采集以及实验方法

我们在该剖面从离石黄土的上部至马兰黄土的底部, 对 S_1 段自下而上采样, 间距为 2 cm。回到室内将样品自然风干, 用碾钵粉碎。样品的前处理采用通用的加酸除去无机碳酸盐的方法, 取 20 g 左右的粉末样用 1 mol L^{-1} 的盐酸浸泡 24 h, 期间搅拌多次, 充分除去其中的无机碳酸盐。再用蒸馏水冲洗残余的样品多次, 直至上层溶液的 pH 值达到中性; 将样品烘干, 粉碎, 取 1 g 左右的粉末样放入石英管内, 通纯氧加热燃烧样品中的有机物, 将收集所得的二氧化碳在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯室的 Delt-plus (Finnigan 公司) 上测试得到 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 采用 PDB 标准, 样品的实验误差小于 0.05‰。该剖面对应的磁化率数据由兰州大学汪海滨提供; 同时, 兰州九州台全新世土壤有机质碳同位素及相应年代数据由兰州大学张成君提供, 他的采样以及试验方法都与本文相一致。

4 前处理系统稳定性和可靠性的检验

本次研究对不同地点的样品进行随机抽样 (计 8 个样品), 每个样品重复分析一次, 以检查前处理实验系统的稳定性。分析结果表明, 8 个样品两次重复测试差值最小值为 0.01‰, 最大值为 0.09‰, 说明本文所采用的通纯氧燃烧有机质的前处理系统具有较好的稳定性。为检验本文所采用前处理系统的可靠性, 对标准样乙炔黑 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{std}}$ 为 -23.7‰) 进行了 6 次测试, 每次都取相等量的样品。分析结果也表明, 除了 1 个样品的分析结果与标准样品的值 (-23.7‰) 相差较大外 (0.16‰), 其余 5 个样品的分析结果都较好, $\delta^{13}\text{C}_{\text{mea}}$ (实测值) 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{std}}$ (标准值) 的差值在 0.02‰ 附近, 显示了该前处理系统具有良好的可靠性。

5 兰州末次间冰期、全新世土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的特征及与气候的关系

图 3 显示了兰州九州台末次间冰期黄土-古土壤有机物碳同位素、磁化率随采样深度变化的特征。实验结果表明,兰州九州台末次间冰期剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 -29.97‰ $\sim$ -25.52‰ , 平均值为 -27.79‰ ; 磁化率的变化范围为 $(2.32 \sim 5.46) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 平均值为 $3.06 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。图 3a、3b 和 3c 分别为九州台剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 、磁化率随深度的变化曲线以及深海氧同位素 SPECMAP 曲线^[23]在 MIS5 阶段的变化特征。图 3 中 $\delta^{13}\text{C}$ 和磁化率曲线在 MIS5 阶段表现为较显著的 3 峰夹 2 谷的形式, 其中 $\delta^{13}\text{C}$ 的 3 个峰值分别为 -25.60‰ 、 -25.52‰ 和 -26.71‰ , 对应的采样深度为 35.88、33.58 和 30.18 m, 前 2 个峰值要显著地大于第 3 个峰值; 2 个谷值分别为 -29.97‰ 和 -28.78‰ , 对应的采样深度为 34.26 和 30.72 m。磁化率的 3 个峰值分别为 5.45×10^{-8} 、 5.46×10^{-8} 和 $4.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 对应的地层位置分别为 35.30、32.66 和 29.02 m, 其中前 2 个峰的最大值也要显著大于第 3 个峰的最大值, 该特征与 $\delta^{13}\text{C}$ 类似。兰州九州台末次间冰期黄土剖面土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的 3 峰加 2 谷的特征与 SPECMAP 曲线上末次间冰期由 3 个暖期 (5e、5c、5a) 加 2 个冷期的现象非常类似。经过与野外地层对比, 我们观察到 $\delta^{13}\text{C}$ 的高值阶段对应于古土壤亚层, 低值阶段对应于黄土亚层。已有的研究表明黄土-古气候变化主要为地球轨道参数变化周期的控制, 末次间冰期剖面 3 层古土壤是岁差周期的反映^[24]。兰州九州台末次间冰期 $\delta^{13}\text{C}$ 和磁化率曲线上的 3 峰夹 2 谷的形式分别对应了 SPECMAP 曲线的 5a~5e 5 个亚阶段, 表明了该地区末次间冰期的气候变化具有全球一致性。

对比兰州九州台剖面土壤磁化率和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线, 二者在末次间冰期的变化特

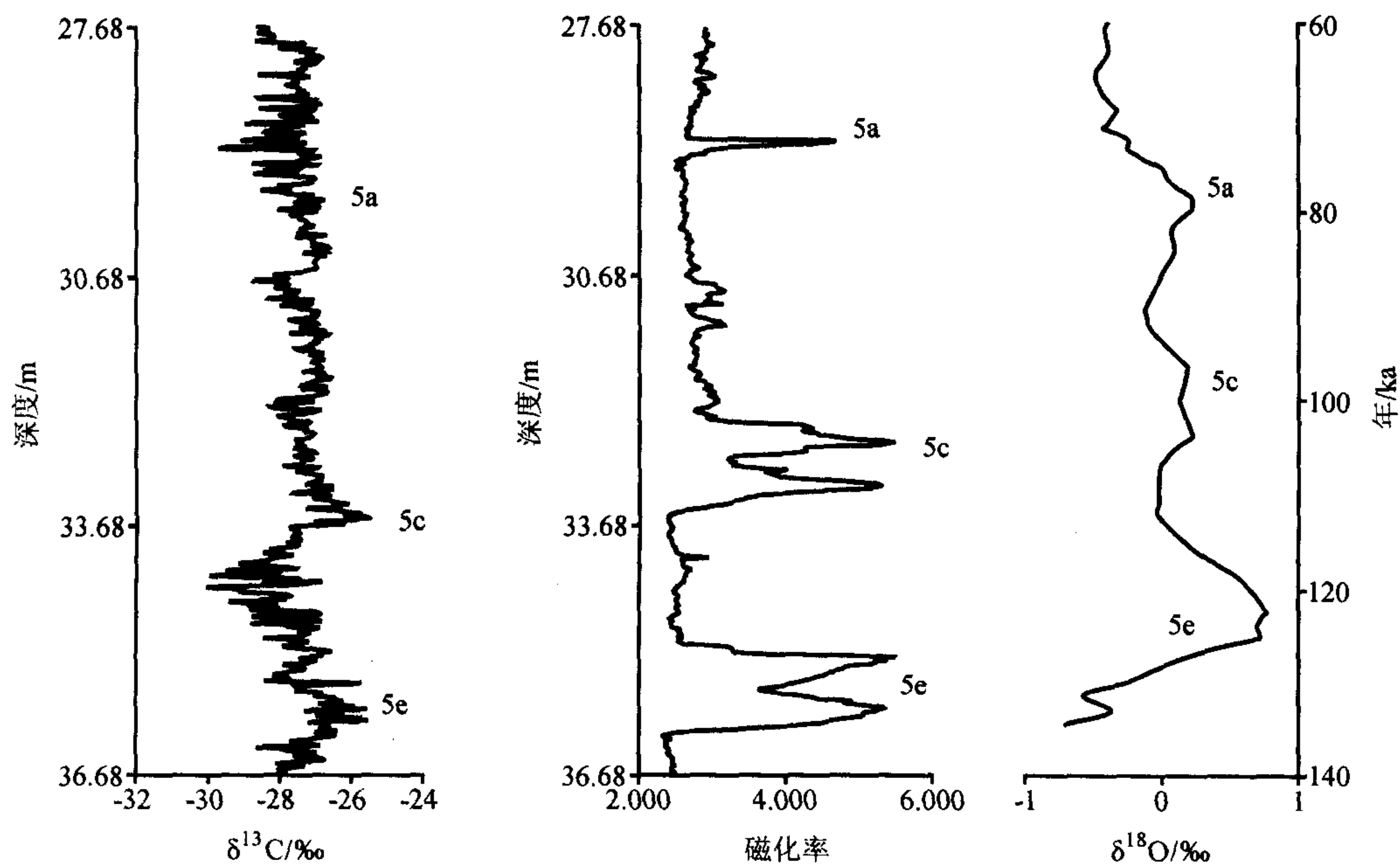


图 3 兰州九州台剖面末次间冰期黄土有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 、磁化率记录及其与 SPECMAP 曲线^[23]的关系

征基本类似。在 MIS5e 和 MIS5c 2 个亚阶段，磁化率都表现为马鞍形状，即 2 峰夹 1 谷，该特征在 $\delta^{13}\text{C}$ 也有表现，只是 2 个峰之间的距离要大于磁化率；但是该形式在 SPECMAP 曲线上则无表现，这可能指示了在以上 2 个温暖湿润时期，该地区还有短暂寒冷干旱的气候发生，方小敏^[19]曾经指出了在兰州九州台剖面 MIS5e 阶段气候变化的波动性。同时磁化率和 $\delta^{13}\text{C}$ 在末次间冰期的表现也有较大的区别，在 MIS5b 和 MIS5d 亚阶段，磁化率波动不大，而 $\delta^{13}\text{C}$ 在这 2 个时期都是表现为 1 个 V 型的谷；在磁化率曲线上，峰与谷的转换非常迅速，而 $\delta^{13}\text{C}$ 则在这种转换中表现得比较平缓；图 3 中 $\delta^{13}\text{C}$ 在末次间冰期 3 个暖期达到最大值的时间要比磁化率稍微提前。黄土磁化率反映了夏季风降水的变化，而 $\delta^{13}\text{C}$ 反映的是地表植被类型的组成，其与温度和降水都有关系，因此我们认为，可能地表植被对于气候变化的响应要早于磁化率，在甘肃临夏塬堡末次间冰期剖面中也有类似的特征出现^[13]。

通过以上分析，我们观察到兰州九州台末次间冰期剖面土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 可以较好地反映末次间冰期该地区的气候演化特征，由于对九州台黄土剖面末次间冰期以来在磁化率和粒度与气候演化关系方面已经开展了大量的研究，本文将不再加以详细的叙述。

兰州九州台全新世剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围在 $-20.82\text{‰} \sim -34.40\text{‰}$ 之间，平均值为 -28.99‰ ，剖面中、下部两个有机质¹⁴C 年龄分别为 4.99 ka BP (before present) 和 7.39 ka BP (如图 4)。从图 4 中我们观察到全新世期间，土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 表现出显著的 3 个不同变化阶段，对应于全新世气候变化的不同时期：早全新世阶段 (3.68~4.58 m)， $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围在 $-28.23\text{‰} \sim -25.85\text{‰}$ 之间，呈小幅波动，在此阶段晚期， $\delta^{13}\text{C}$ 急剧减小，表明了当时 1 次寒冷事件的发生，这在我国许多地方同一时期都有表现^[25,26]；中全新世阶段 (2.66~3.68 m)， $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 $-33.89\text{‰} \sim -20.82\text{‰}$ ，该阶段亦称为全新世大暖期，气候状况为全新世最好，此时 $\delta^{13}\text{C}$ 的值都达到了全新世期间的最大值 (-20.82‰ , 2.96 m)；晚全新世阶段 (2.66~1 m)， $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 $-34.40\text{‰} \sim -23.32\text{‰}$ 。晚全新世阶段兰州九州台剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 表现为持续减小的趋势，其波动程度要大于早、中全新 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化情况，表明该地区在全新世晚期的气候变化比较剧烈。

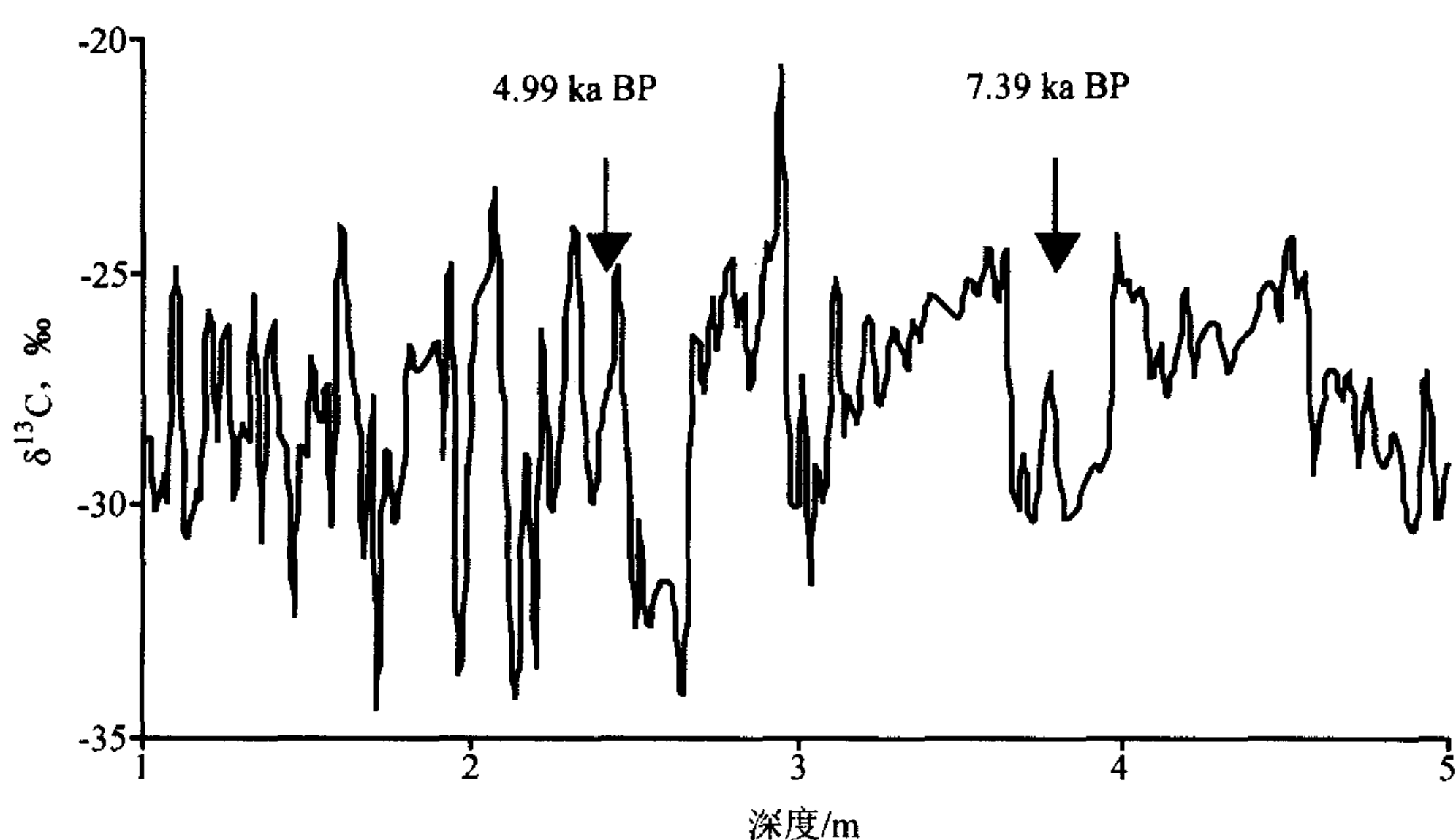


图 4 兰州九州台全新世土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

6 讨论

对兰州九州台末次间冰期和全新世黄土剖面土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 分析我们观察到, 当气候为温暖湿润时期 (MIS5e、MIS5c、MIS5a 以及全新世中期) 剖面土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 增大, 当气候转为寒冷干旱时 (MIS5d、MIS5b 以及全新世早期和晚期) $\delta^{13}\text{C}$ 减小。基于植物生理学的研究, 温度和降水是影响植物稳定碳同位素的主要因素, 温度升高和降水增加都会引起植物碳同位素减小。Hong 等^[27] 观察到在金川地区约 6 ka BP 以来的泥炭沉积中, 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 的增大对应于寒冷干旱的环境, 而减小则为温暖湿润的气候, 其结论与本文的研究结果截然相反; 刘卫国等^[14] 对陕西旬邑剖面末次间冰期以来的黄土-古土壤以及现代土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究中观察到, 黄土高原地区属于 C_4 植物的草类主要是一些喜欢在暖湿气候下生长的白羊草、狗尾草等禾本植物, 而耐寒、旱的藜科、莎草科及灌木植物很少。由于黄土高原地区的 C_4 植物在生长季节需要暖湿的气候条件, 故在该地区相对暖湿的古土壤阶段 (间冰期) C_4 草本植物的比例增大, 对应于有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的增加; 在相对干旱的黄土阶段 (冰期) C_3 灌木和草本植物比例增加, 引起土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 减小。孢粉^[20]、植物硅酸体^[28] 以及分子化石的证据^[29] 表明了末次间冰期和全新世期间兰州地区主要生长的是草本植物。但是在一些特定的地层当中, 例如在 S_1S_2 地层中找到了北亚热带植物的冬青花粉, 在全新世黑垆土中有比较多的蕨类植物的孢子^[20], 这就表明了以上时段, 该地区的气候曾经非常的温暖湿润。兰州九州台末次间冰期和全新世剖面土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分别为 -27.79‰ 和 -28.99‰ , 均小于 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值, 因此可以认为在末次间冰期和全新世 2 个时期, 该地区地表植被主要为 C_3 植物。然而从以上 2 个时期地层土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的最大值来看, 兰州九州台剖面在末次间冰期和全新世期间的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{最大}}$ 分别为 -25.52‰ 和 -20.82‰ , 即在以上 2 个时期的温暖湿润气候阶段, 会有部分 C_4 植物出现在该地区的地表植被中。结合刘卫国与本文的研究, 我们认为在九州台末次间冰期和全新世剖面中, 由于气候的改变导致地表草本植被类型 (C_4 、 C_3 植物, 尤其是 C_4 植物) 发生变化, 在暖湿气候时期, 地表草本植被中喜暖湿气候的禾本科 C_4 植物比例增加, 导致土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的增大; 在寒冷干旱时期, 地表植被主要是一些 C_3 植物的灌丛和草本植物, 土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 相应减小。

我们将黄土高原地区有关土壤有机质碳同位素在末次间冰期和全新世时期的研究结果列于表 1。

表 1 黄土高原地区末次间冰期和全新世土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值

剖面名称	末次间冰期	全新世	资料来源
甘肃兰州九州台	-27.79	-28.99	本文
甘肃临夏塬堡	-27.86	-26.88	文献 [13]
陕西西安刘家坡	-23.57	-21.9	文献 [12]
陕西旬邑	-22.3	-21.2	文献 [14]

从表 1 我们观察到, 陕西西安刘家坡剖面 and 旬邑剖面末次间冰期和全新世土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值要比甘肃兰州九州台剖面 and 临夏塬堡剖面高, 其中末次间冰期陕西 2

个剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 比甘肃 2 个剖面高 3‰ 以上，全新世陕西 2 个剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值比甘肃 2 个剖面高出 4‰ 以上。造成两地 $\delta^{13}\text{C}$ 在以上 2 个时期的差异主要原因还是由于两地气候的不同。古气候的研究^[30~32]已经表明了无论在末次间冰期还是全新世，陕西关中盆地的气候（温度，降水等）都要优于甘肃兰州及其附近地区。较多的降水和较高的温度导致陕西关中盆地地表植被中 C_4 植物的比例要远远高于甘肃兰州附近地区，利用 C_3 、 C_4 植物的平均值（-27‰和-13‰），并考虑到土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 比植被 $\delta^{13}\text{C}$ 要偏正 1‰ 左右，我们可以估算末次间冰期陕西 2 个剖面附近 C_4 植物的比例可以达到 20% 左右，而甘肃 2 个剖面则几乎为 0；全新世期间陕西 2 个剖面的 C_4 植物的比例可以达到 30% 左右，甘肃 2 剖面仍然为 0。这就很好地解释了为何陕西和甘肃 2 个地区在末次间冰期和全新世期间土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 相差较大的原因。尽管从植物生理学的角度上来说对于相同植物在兰州地区生长时其植物体的 $\delta^{13}\text{C}$ 要高于在陕西关中地区，但是对于整个地表植被来说，由于气候的差异，导致了两地地表植被 C_3 、 C_4 植物比例的不同，造成土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 相差较大。

7 小结

通过对兰州地区末次间冰期、全新世黄土有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析，我们观察到其可以较准确地反映该地区在以上 2 个时期气候变化的特征。末次间冰期和全新世期间兰州地区地表植被主要为 C_3 草本植物，只有在相对温暖时期，才有部分的 C_4 植物出现。对比陕西和甘肃 2 地区 4 个黄土剖面有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值，末次间冰期陕西关中地区的要比甘肃兰州附近地区高 3‰ 以上，全新世陕西 2 个剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值比甘肃 2 个剖面高出 4‰ 以上，这主要是由于两地在以上时期气候状况不同而引起的。末次间冰期和全新世较高的温度和降水量，使得在陕西关中地区地表植被中 C_4 植物的比例要远高于甘肃兰州附近地区，从而导致了其黄土有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 的值也较大。因此黄土地层中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 不仅能反映气候的变化，对于地表植被类型的变化也有较好的表现。

致 谢 感谢张成君博士和汪海斌博士提供相关资料。

参 考 文 献

- 1 刘东生，黄土与环境，北京：科学出版社，1985，44.
- 2 Porter, S. C., and Z. S. An, Correlation between climates events in the North Atlantic and China during the Last Glaciation, *Nature*, 1995, **375**, 305~308.
- 3 GRIP members, Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core, *Nature*, 1993, **364**, 203~207.
- 4 Lorius, C., J. Jouzel, C. Ritz et al., A 150 000 a climatic record from Antarctic, *Nature*, 1985, **316**, 591~596.
- 5 姚檀栋、Tompson, L. G.、施雅风等，古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究，中国科学（D 辑），1997，**27**（5），1~6.
- 6 An, Z. S., G. Kukla, S. C. Porter et al., Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 years, *Quaternary Research*, 1991, **36**（1），29~36.

- 7 An, Z. S., G. Kukla, S. C. Porter et al., Late Quaternary dust flow on the Chinese Plateau, *Catena*, 1991, **18**, 125~132.
- 8 陈骏、仇纲、季峻峰等, 最近 130 ka 黄土高原夏季风变迁的 Rb 和 Sr 地球化学证据, 科学通报, 1996, **41**, 21~25.
- 9 林本海, 刘荣漠, 最近 800 ka 黄土高原季风变迁的稳定同位素证据, 科学通报, 1992, **37** (2), 178~180.
- 10 An, Z. S., S. C. Porter, W. J. Zhou, et al., Episode of strengthened summer monsoon climate of younger dryas age on the Loess Plateau of Central China, *Quaternary Research*, 1993, **39** (1), 45~54.
- 11 顾兆炎、韩家懋、刘东生, 中国第四纪黄土地球化学研究进展, 第四纪研究, 2000, **20** (1), 41~55.
- 12 Wang, H., S. H. Ambrose, C. J. Liu et al., Paleosol stable isotope evidence for early Hominid occupation of East Asian temperate environments, *Quaternary Research*, 1997, **48**, 228~238.
- 13 何勇、秦大河、任贾文等, 塬堡黄土剖面末次间冰期古土壤有机质碳同位素记录的夏季风演化历史, 科学通报, 2002, **47** (12), 943~945.
- 14 刘卫国、宁有丰、安芷生等, 黄土高原现代土壤和古土壤有机碳同位素对植被的响应, 中国科学 (D 辑), 2002, **32** (10), 830~836.
- 15 Deines, P., The isotopic composition of reduced organic carbon, Handbook of Environmental Isotope Geochemistry I, Fritz, P. and Fontes, J. Ch., Eds, The terrestrial environment, Elsevier, Amsterdam, 1980, 329~406.
- 16 Boutton, T. W., S. R. Archer, A. J. Midwood et al., $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem, *Geoderma*, 1998, **82**, 5~41.
- 17 Nordt, L. C., T. W. Boutton, C. T. Hallmark et al., Late Quaternary vegetation and climatic change in central Texas based on the isotopic composition of organic carbon, *Quaternary Research*, 1994, **41**, 109~120.
- 18 Burbank, D. W., and J. J. Li, Age and paleoclimatic significance of the loess of Lanzhou, China, *Nature*, 1985, **316**, 141~143.
- 19 方小敏、李吉均、Banerjee, S. 等, 末次间冰期 5e 亚阶段夏季风快速变化的环境岩石磁学研究, 科学通报, 1998, **43** (21), 2330~2332.
- 20 陈发虎、张维信等, 甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题, 北京: 科学出版社, 1983, 74.
- 21 戴雪荣、李吉均、俞立中等, 末次间冰期甘肃沙尘暴演化历史的黄土记录分析, 地理学报, 1999, **54** (5), 445~453.
- 22 汪海斌、陈发虎、张家武, 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义, 中国沙漠, 2002, **22** (1), 21~26.
- 23 Martinson, D. G., W. G. Pisias, J. D. Hays et al., Age dating and the orbital theory of the ice age: development of a high resolution 0 to 30000 year chronostratigraphy, *Quaternary Research*, 1987, **27**, 1~29.
- 24 丁仲礼、余志伟、刘东生, 中国黄土研究新进展 (三) 事件标尺, 第四纪研究, 1991, **4**, 336~348.
- 25 姚檀栋、施雅风、Tompson, L. G. 等, 祁连山敦德冰芯记录的全新世环境变化, 中国全新世暖期气候与环境, 北京: 海洋出版社, 1992, 206~211.
- 26 李世杰、焦克勤, 3 万年来西昆仑山南坡的冰川变化, 冰川冻土, 1990, **12** (4), 311~318.
- 27 Hong, Y. T., Z. G. Wang, H. B. Jiang et al., A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a $\delta^{13}\text{C}$ time-series from peat cellulose, *Earth and Planetary Science Letter*, 2001, **185**, 111~119.
- 28 吕厚远、刘东生、吴乃琴等, 末次间冰期以来黄土高原南部植被演替的植物硅酸体记录, 第四纪研究, 1999, **4**, 340~347.
- 29 谢树成、王志远、王红梅等, 末次间冰期以来黄土高原的草原景观植被: 来自分子化石的证据, 中国科学 (D 辑), 2002, **32** (1), 28~35.
- 30 孙东怀、周杰、吴锡浩等, 全新世气候适宜期黄土高原及黄土/沙漠过渡区年降水量的初步恢复, 中国沙漠, 1995, **15** (4), 339~344.
- 31 安芷生、吴锡浩、汪品先等, 最近 130 ka 中国的古季风—I. 古季风记录, 中国科学, 1991 (10), 1076~1081.
- 32 安芷生、吴锡浩、汪品先等, 最近 130 ka 中国的古季风—II. 古季风变迁, 中国科学, 1991 (11), 1209~1215.

Relationship between the $\delta^{13}\text{C}$ of Organic Matter in the Paleosoil at Different Stage with the Climatic Change in Lanzhou

He Yong¹⁾, Qin Dahe²⁾, Ren Jiawen²⁾, and Sun Weizhen²⁾

- 1) (*Key Laboratory of Regional Climate—Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029*)
- 2) (*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000*)

Abstract On the basis of the carbon isotopic analysis of the organic matter in the paleosoils from the Jiuzhoutai S_1 and S_0 profiles it shows that the values of $\delta^{13}\text{C}$ from the S_1 profile are from -29.97‰ to -25.52‰ , with the average of -27.79‰ , and that from S_0 are from -34.40‰ to -20.82‰ , average is -28.99‰ . The main vegetation during the two stages is C_3 , and during the warm and humid periods less C_4 vegetation appeared. Combining the result of the SPECMAP we observed that three peaks and two valleys appear at the curve of $\delta^{13}\text{C}$ during the last Interglacial period, suggest that the climatic change characteristic at Lanzhou area is the same with the global. Three different climatic stages are also reflected on the $\delta^{13}\text{C}$ variation during the Holocene. Comparing the $\delta^{13}\text{C}$ results of other profiles in the Loess Plateau, the carbon isotopic values increase from profiles in Shaanxi Province to Lanzhou area, Gansu Province. Different climatic conditions at the two areas are the main factor that resulted such $\delta^{13}\text{C}$ variation.

Key words: loess and paleosoils; carbon isotope of organic matter; vegetation; climatic change