

青藏高原南部空姆错湖芯中陆源正构烷烃氢同位素比值的气候意义*

夏忠欢¹, 徐柏青¹, Mügler I.², 邬光剑¹, Gleixner G.², Sachse D.³, 朱立平¹

(1: 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

(2: Max Planck Institute für Biogeochemistry, Hans-Kn 11 Straße 10, 07745 Jena, Germany)

(3: DFG-Leibniz Center for Surface Process and Climate Studies, Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Germany)

摘要: 在青藏高原南部空姆错湖钻取了一根浅湖芯, 对其中时间跨度约为 50 年的剖面按 7 年间隔对其中陆源正构烷烃 (C_{25} , C_{27} , C_{29} , C_{31}) 进行了提取分析. 通过将这些生物标志物的氢同位素比值与附近浪卡子气象站和拉萨气象站的气象参数记录进行比较, 发现这些生物标志物的 δD 值与生长季节时段的平均气温显著相关, 而与生长季节时段的降雨量和相对湿度的相关性差, 说明陆源沉积正构烷烃的氢同位素比值主要记录了气温信号, 可以被用于古温度重建.

关键词: 正构烷烃; 湖泊沉积; 氢同位素比值; 空姆错; 气候; 青藏高原

Climatic significance of hydrogen isotope ratios of terrigenous n-alkanes in Kongmo Co on the southern Tibetan Plateau

XIA Zhonghuan¹, XU Baiqing¹, Mügler I.², WU Guangjian¹, Gleixner G.², Sachse D.³ & ZHU Liping¹

(1: Key Laboratory of Tibetan Environmental Changes and Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

(2: Max Planck Institut für Biogeochemistry, Hans-Kn 11 Straße 10, 07745 Jena, Germany)

(3: DFG-Leibniz Center for Surface Process and Climate Studies, Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Germany)

Abstract: We sampled a short sediment core in Lake Kongmo Co on the southern Tibetan Plateau, and extracted terrigenous alkanes ($n-C_{25}$ to $n-C_{31}$) from the core spanning the past near-50 years at 7-year resolution, and compared the hydrogen isotope ratios of these biomarkers with meteorological records of the nearby Langkazi and Lhasa weather stations. Hydrogen isotope ratios of these n-alkanes significantly correlated with mean growing season air temperature, whereas δD values of these biomarkers showed poor correlations with both precipitation amount and relative humidity during the growth seasons, indicating that these n-alkanes recorded the air temperature signal and can be used as a proxy for paleotemperature reconstruction.

Keywords: n-alkanes; lacustrine sediment; hydrogen isotope ratio; Kongmo Co; climate; Tibetan Plateau

随着近年来利用色谱/热转化/同位素质谱仪测定单体氢同位素比值技术的发展^[1-2], 有机化合物单体氢同位素比值正逐渐成为新古气候和古水文代用指标^[3-10]. 正构烷烃是地质体中含量最为丰富的脂类化合物之一, 所含氢原子都与碳原子相连, 在低温下不会与介质中氢原子发生交换^[11]. 通过正构烷烃分子特征能够区分不同生物源, 以 $n-C_{27}$ 、 $n-C_{29}$ 或 $n-C_{31}$ 为主峰具有明显奇偶优势 (通常 CPI > 5) 的长链正构烷烃 (C_{25} – C_{32}) 主要来源于陆生高等植物^[12-13]; 以 C_{21} 、 C_{23} 或 C_{25} 为主峰具有微弱奇偶优势的中链正构烷烃 (C_{21} – C_{25}) 主要来源于沉水/漂浮水生大型植物^[14-15]; 以 C_{16} (或 C_{17} 、 C_{19}) 为主峰不具有明显奇偶优势的短链正构烷烃 (C_{14} – C_{20}) 主要来源于水生藻类和细菌^[16-17].

降水是陆生植物合成正构烷烃所需的环境源水, 降水的 δD 值受当地气温、降水量、相对湿度等气候条件

* 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (2009CB723901) 和中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-YW-Q09-03/KZCX2-YW-146) 联合资助. 2008-12-01 收稿; 2009-05-20 收修改稿. 夏忠欢, 男, 1978 年生, 博士; E-mail: baotazunnan@sina.com.

的控制^[18-21]. 在降水落到地面进入土壤-植物系统的过程中,降水的 δD 值进一步因土壤中的蒸发作用和植物叶片中的蒸发蒸腾作用而改变,而土壤中的蒸发作用和叶片中的蒸发蒸腾作用同样受气候条件的控制^[22-23]. 陆生植物中正构烷烃的氢源是树叶中的水分,因而陆源正构烷烃的 δD 值同样受气候条件的影响^[24],因此陆源正构烷烃氢同位素比值具有记录当地气候条件的可能性. 但是到目前为止,陆源正构烷烃 δD 值的气候意义仍不明确,相关的研究也很少^[5,25]. 本研究在青藏高原南部空姆错钻取了一根浅湖芯,通过将湖芯中提取的陆源正构烷烃的 δD 值与当地的气候参数记录进行比较来探讨这些生物标志物氢同位素比值的气候意义.

1 样品采集和分析

1.1 采集点

空姆错(KC)位于青藏高原南部,浪卡子气象站(28°34.8'N,90°14.4'E;4433m a. s. l.)和拉萨气象站(29°42'N,91°7.8'E;3658m a. s. l.)在空姆错附近(图1). 这一区域的气候主要受印度季风控制,植被带属于高寒灌木草原带,区域的基本信息见表1. 空姆错是一个封闭湖,在湖周围分布了草本植物和少量木本植物,草本植物以小蒿草草甸和针茅草原为主要代表^[26].

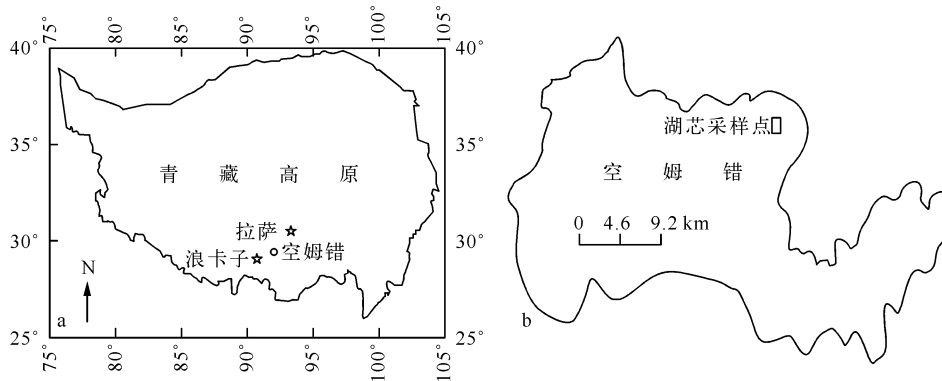


图1 青藏高原(a)和空姆错(b)采样点位置(圆圈、五角星和矩形分别代表采样湖、气象站和湖芯采样点)

Fig. 1 Location of sampling sites in the Tibetan Plateau(a) and Kongmo Co(b)

表1 沉积物采样点基本信息*

Tab. 1 Basic information for sediment sampling site

湖泊	空姆错
代号	KC
地理位置	29°01.562'N, 90°28.135'E
海拔(m a. s. l.)	4445
水深(m)	15
湖面积(km ²)	29 ^A
年平均温度(°C)	3.8 ^B
年平均降水量(mm)	379.0 ^B
年平均蒸发量(mm)	1994.4 ^B
年平均相对湿度	40% ^C
年平均太阳总辐射(MJ/m ²)	7623 ^D
夏半年平均温度(°C)	8.0 ^B
夏半年平均降水量(mm)	374.6 ^B
夏半年平均蒸发量(mm)	999.4 ^B
夏半年平均湿度	53% ^C
主要植被	小蒿草草甸和针茅草原 ^E

* 经度、纬度、海拔是在采样点用便携式GPS测定;采样点水深利用回声测深仪测定;A数据:利用Google Earth ruler估计;B数据:浪卡子站,1999;C数据:浪卡子站,1970-1980;D数据:参考文献[31];E数据:参考文献[26];夏半年:5-10月.

1.2 定年

2005年8月至9月在KC利用重力取芯器钻取了一根浅湖芯(33cm). 湖芯在野外按1cm间距分割,每个分样都去除了表面部分以避免污染,最上面的10cm分样通过²¹⁰Pb平均沉积速率和¹³⁷Cs绝对时标对比定年^[27-28]. ²¹⁰Pb和¹³⁷Cs是在中国科学院青藏高原研究所利用美国Ortec公司生产的高纯锗井型探测器(GWL-120-15)和由Ortec Dspec jr 2.0型谱仪和HP微机构成的16k道多道分析器所组成的 γ 谱分析系统测定.¹³⁷Cs、²²⁶Ra和²¹⁰Pb标准样品由中国原子能研究院提供.

采用²¹⁰Pb计年的CIC(稳定初始放射性通量)模式^[29]对数据点进行线性拟合,得到平均沉积速率为(0.15 ± 0.03) cm/a,相关系数R²为0.76,每1cm样品代表的平均年代间距为6.67 ± 1.39年. 根据此平均沉积速率,推算出湖芯在3.0和6.0cm深度分别对应1985年和1965年,这

与 ^{137}Cs 的绝对时标相符,而且 0.15cm/a 的平均沉积速率值也与文献[30]的定年结果相符.通过这一年龄模式得出KC湖芯最上面的 10cm 分样对应的时间段是1945–2005年(图2).

根据定年结果,每 1cm 分样的时间跨度约为7年.由于浪卡子和拉萨气象站气象数据开始于50年代,因此本文只讨论湖芯最上面 8cm 部分,对应的时间是1952–2005年.

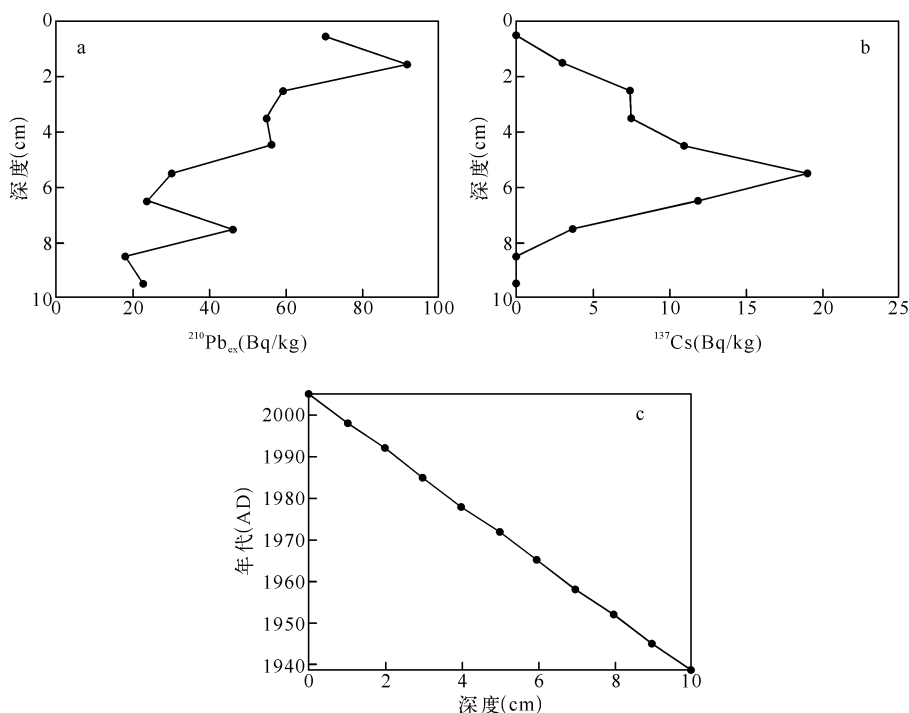


图2 空姆错湖芯的年龄模式和年龄序列： $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度(a)； ^{137}Cs 活度(b)；依据平均沉积速率的年龄模式(c)

Fig. 2 Chronology of the core at Kongmo Co: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activity (a); ^{137}Cs activity (b); Age-depth model based on average sedimentation rate (c)

1.3 正构烷烃的抽提和仪器分析

正构烷烃浓度的测定和氢同位素分析是在德国马普生物地球化学研究所(Max-Planck-Institut für Biogeochemistry)进行.所有样品先冷冻干燥,然后在加速溶剂抽提器(ASE-200, DIONEX Corp., Sunnydale, USA)进行可溶有机物质的提取.脂肪族化合物在硅胶柱上分离,由正己烷洗脱下来.洗脱下来的正构烷烃在气相色谱-原子发射检测器(GC-AED)(Agilent6890, Agilent, Palo Alto, USA)上通过标准混合物外标法进行定性和定量检测.单分子 δD 值通过高温转化炉^[1-2]和同位素比值质谱仪(IRMS)(Delta^{plus}XL, Finnigan MAT, Bremen, Germany)测定,每个样品平行测定3次.沉积样品的 δD 值通过 δD 值已知的正构烷烃标准混合物(C_{10} – C_{32})归一化为VSMOW标准.详细实验步骤参考文献[6].湖芯样品中所有化合物测定的平均标准偏差为7‰,标准混合物中所有化合物测定的平均标准偏差为4‰.

2 结果与讨论

2.1 正构烷烃分子特征

正构烷烃 C_{25} – C_{32} 表现出明显的奇偶优势,样品的碳优势指数(CPI_{25-32})大于5或接近5,指示陆生高等植物来源.木本植物来源的正构烷烃以 $n\text{-C}_{27}$ 为主峰,草本植物来源的正构烷烃以 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰^[16,32-33],因此

C_{31}/C_{27} 比值能够反映草本植物和木本植物之间的相对丰度^[32-34]. 整个 8cm 湖芯中 C_{31}/C_{27} 比值都大于 1 (表 2), 说明这一地区在过去 50 年中都是以草本植物为主.

表 2 湖芯最上面 8cm 部分中正构烷烃的 CPI_{25-32} 值 ($C_{25}-C_{32}$ 的碳优势指数) 和 C_{31}/C_{27} 比值随深度的分布状况 ($CPI_{25-32} = \sum C_{25-32}(\text{奇碳}) / \sum C_{25-32}(\text{偶碳})$)

Tab. 2 Vertical distribution of CPI_{25-32} values (carbon preference index for C_{25-32}) and C_{31}/C_{27} ratios of n-alkanes from the top 8cm sections ($CPI_{25-32} = \sum C_{25-32}(\text{odd}) / \sum C_{25-32}(\text{even})$)

深度 (cm)	CPI_{25-32}	C_{31}/C_{27}	深度 (cm)	CPI_{25-32}	C_{31}/C_{27}
0-1	5.7	1.6	4-5	6.2	2.5
1-2	4.9	2.7	5-6	5.6	2.6
2-3	6.0	2.4	6-7	5.2	2.1
3-4	4.0	2.7	7-8	6.7	1.9

2.2 陆源正构烷烃 ($n-C_{25}-n-C_{31}$) δD 值

对同一样品, $n-C_{25}$ 、 $n-C_{27}$ 、 $n-C_{29}$ 、 $n-C_{31}$ 四种生物标志物具有相似的 δD 值 (表 3), 只是 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$ 的 δD 值略比 $n-C_{25}$ 和 $n-C_{27}$ 的 δD 值小一点, 其原因可能是正构烷烃 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$ 来源于草本植物的比例要比 $n-C_{25}$ 和 $n-C_{27}$ 的大^[16, 32-33], 又由于同一地区草要比树和灌木的 δD 值小^[35], 所以 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$ 的 δD 值更小一些. 这四种生物标志物的 δD 值随深度变化的趋势相似, 从湖芯表面至 5cm 深度处逐渐减小, 从 5cm 深度处至 7cm 深度处又逐渐增大.

表 3 湖芯最上面 8cm 部分中陆源正构烷烃 δD 值随深度的分布状况

Tab. 3 Vertical distribution of δD values (‰ vs. VSMOW) of terrigenous n-alkanes from the top 8cm sections

深度 (cm)	$n-C_{25}$	SD	$n-C_{27}$	SD	$n-C_{29}$	SD	$n-C_{31}$	SD
0-1	-180	5	-173	15	-187	6	-189	5
1-2	-180	4	-173	6	-186	7	-191	6
2-3	-202	5	-192	4	-218	8	-235	8
3-4	-218	4	-207	5	-252	8	-258	6
4-5	-223	6	-211	4	-254	7	-262	9
5-6	-229	8	-216	7	-241	5	-248	7
6-7	-217	5	-203	6	-230	9	-236	11
7-8	-212	7	-197	4	-226	6	-222	8

2.3 陆源正构烷烃 ($n-C_{25}-n-C_{31}$) δD 值与气候参数之间的相关性

降水的氢同位素比值受气候条件控制, 与气温正相关, 与降雨量和相对湿度反相关^[18-21]. 土壤水分和植物叶片水分的氢同位素比值受蒸发蒸腾作用影响, 而影响蒸发蒸腾作用的主要气候参数包括温度和相对湿度. 随着温度的升高和相对湿度的减小, 土壤水分的蒸发作用和叶片水分的蒸发蒸腾作用加强, 使得叶片水分的 δD 值增加^[22-23, 36-37]. 因为植物是利用叶片水分作为直接源水来合成正构烷烃, 所以理论上陆源正构烷烃的 δD 值与温度应该呈正相关关系, 与相对湿度呈反相关关系. 在青藏高原南部, 因受季风影响, 降水的 δD 值与降雨量在季节和年际尺度上呈现反相关关系, 与气温之间的正相关关系较弱^[38-40]. 空姆错周围的植被主要是草本植物, 草本植物的生长期主要在生长季节 (5-9 月), 因此植物在合成正构烷烃时所利用的氢源主要来自生长季节的叶片水分. 根据定年结果, KC 湖芯每 1cm 分样对应的时间间隔是 7 年, 因此本研究通过将湖芯前 8cm 分样所提取的陆源正构烷烃的 δD 值与当地对应时间间隔的生长季节时段气候参数记录的 7 年滑动平均值进行比较, 探讨陆源正构烷烃 δD 值与气候参数之间的关系, 揭示湖芯中这类生物标志物 δD 值的气候意义.

陆源正构烷烃 ($n-C_{25}$ 、 $n-C_{27}$ 、 $n-C_{29}$ 、 $n-C_{31}$) 的 δD 值与浪卡子气象站生长季节平均气温的 7 年滑动平均值呈显著线性关系 (图 3), 相关系数 R^2 平均为 0.62, $P < 0.05$, 说明这 4 种正构烷烃的 δD 值很好地记录了生长季节的平均气温信号. 我们注意到, 陆源正构烷烃 δD 值与生长季节平均气温之间线性相关曲线的平均

斜率是 $71\text{‰}/\text{°C}$ ，而大气降水的 δD 值与气温之间线性相关曲线的斜率通常是 $5\text{‰}-10\text{‰}/\text{°C}$ 。泥炭沉积中正构烷烃 $n\text{-C}_{23}$ 的 δD 值与年平均气温 30 年滑动平均值之间也有 1 个高斜率值 $59\text{‰}/\text{°C}$ [25]。本研究中正构烷烃 δD 值与气温之间的斜率大于降水 δD 值与气温之间斜率的可能原因是，温度的升高除了增加大气降水的 δD 值，还在很大程度上增强了树叶水分的蒸腾作用和/或土壤水分的蒸发作用，导致正构烷烃对温度的敏感度比降水要大许多。但是本研究还不能完全确认这一原因，需要进一步研究青藏高原南部生长季节时段内气温对降水 δD 值、土壤水 δD 值和叶片水 δD 值的影响程度。

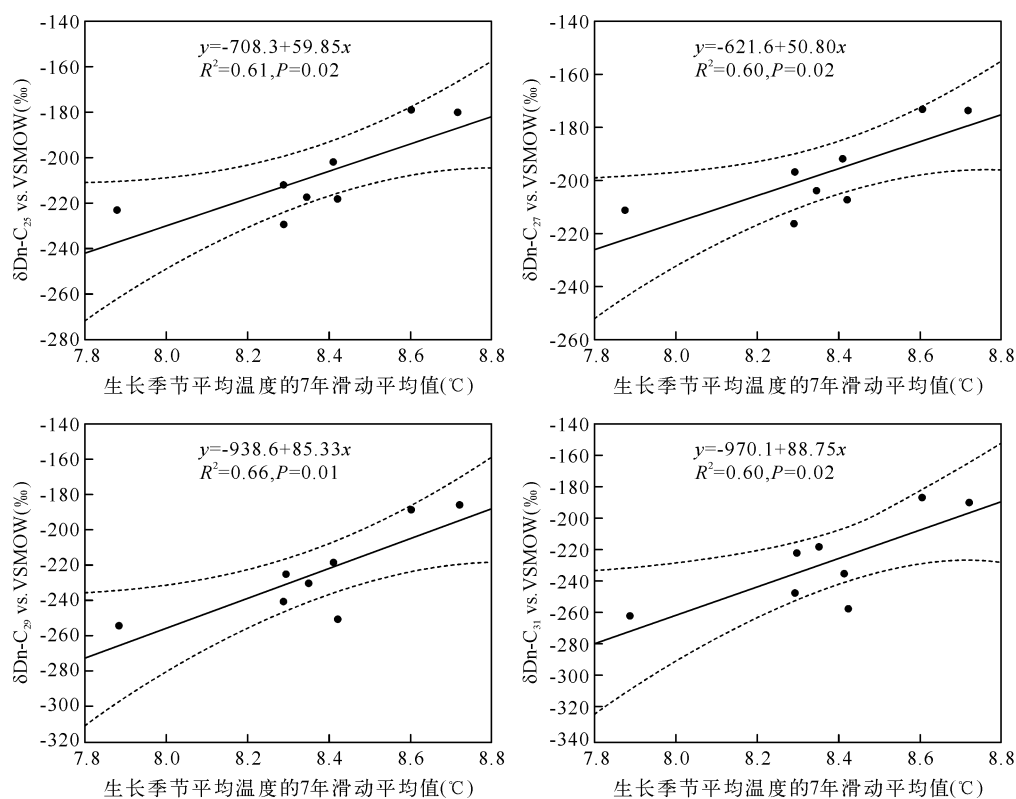


图3 正构烷烃 $n\text{-C}_{25}$ 、 $n\text{-C}_{27}$ 、 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 的 δD 值与浪卡子站生长季节平均气温的 7 年滑动平均值之间的相关性(点线所围区域表示 95% 置信区间, 生长季节: 5-9 月)

Fig. 3 δD values of $n\text{-C}_{25}$, $n\text{-C}_{27}$, $n\text{-C}_{29}$ and $n\text{-C}_{31}$ alkanes vs. 7-year running average of the mean growing season temperature of Langkazi station

陆源正构烷烃 ($n\text{-C}_{25}$ - $n\text{-C}_{31}$) 的 δD 值与浪卡子气象站生长季节降雨量的 7 年滑动平均值之间的相关性差(图 4), 说明这 4 种生物标志物的 δD 值没有记录降雨量信号。季风季节与非季风季节间的降雨量差别在 400 - 500mm 时, 降水的 δD 值与降雨量间表现出反相关关系, 所引起的两季节间降水 δD 值的变化大约为 2‰ [39, 41-45]。本研究中湖芯各个分样所对应时段的降雨量差别基本都小于 100mm, 因此陆源正构烷烃 δD 值与生长季节降雨量相关性差的一个可能原因是, 不同时段内降雨量差别太小, 使得其对降水 δD 值的改变很小。另一个可能的原因是, 降雨量对土壤水 δD 值和叶片水 δD 值的影响很小, 导致对所合成的正构烷烃的 δD 值的影响很小。本研究还不能完全确认以上这两个原因, 需要进一步的研究来探讨较小的降雨量变化对降水 δD 值、土壤水 δD 值以及叶片水 δD 值的影响程度。

陆源正构烷烃 ($n\text{-C}_{25}$ - $n\text{-C}_{31}$) 的 δD 值与拉萨气象站生长季节相对湿度 7 年滑动平均值之间的相关性差(图 5), 说明这 4 种生物标志物的 δD 值同样也没有记录生长季节的相对湿度信号。湖芯各个分样所对应

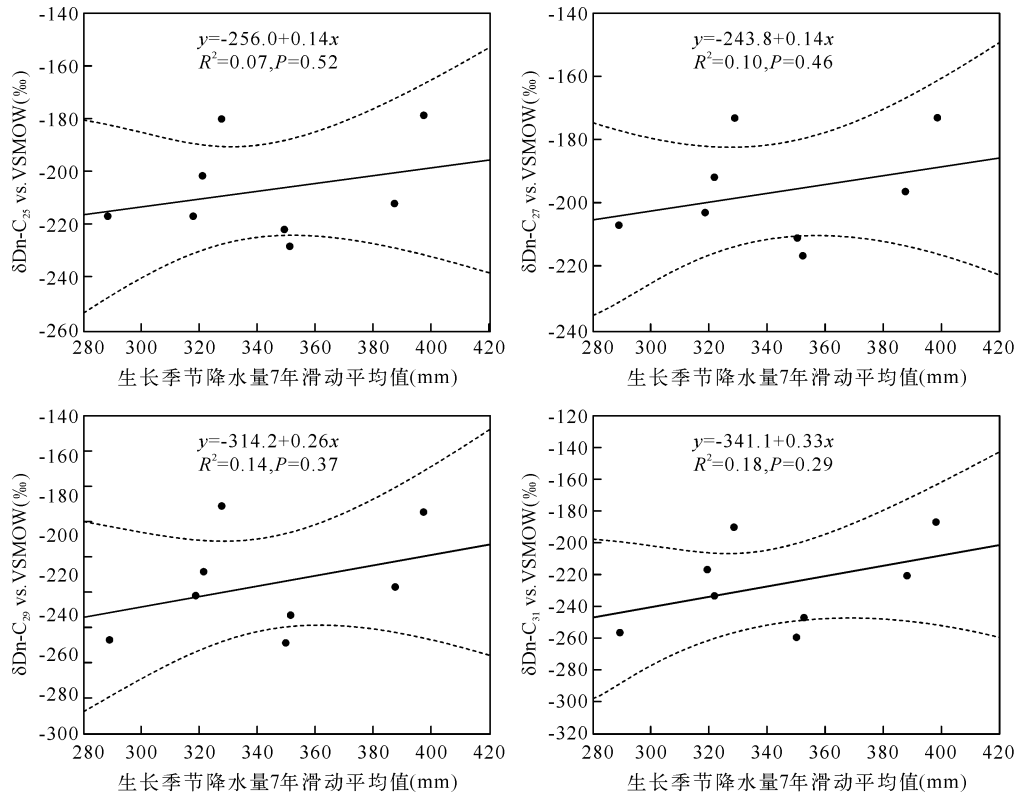


图4 正构烷烃 n-C₂₅、n-C₂₇、n-C₂₉和 n-C₃₁的 δD 值与浪卡子站生长季节降水量的7年滑动平均值之间的相关性(点线所围区域表示95%置信区间,生长季节:5-9月)

Fig. 4 δD values of n-C₂₅, n-C₂₇, n-C₂₉ and n-C₃₁ alkanes vs. 7-year running average of the growing season precipitation of Langkazi station

时段的相对湿度的差别非常小,最大差别不超过5%,这可能是相对湿度对正构烷烃 δD 值影响很小的原因。

植被的变化(本质上是由气候变化所引起)也能影响陆源正构烷烃的 δD 值大小^[5,24,46-47]。KC湖芯周围的植被几乎都是C3植物^[48-50],草本植物占优势。在过去50年中,该区域没有大的气候变化,因此我们推断植被也没有大的变化。因此在气温信号被传递给植物所利用的源水,进而传递给植物所合成的正构烷烃时,这种直接的气候信号没有被植被信号改变很多或掩盖,由此我们认为湖芯不同深度处陆源正构烷烃单体 δD 值的变化主要反映的是气温的变化。尽管需要更多的研究工作来进一步明确陆源沉积正构烷烃 δD 值与当地生长季节平均气温之间良好相关性的原因,通过本研究可以看到,陆源沉积正构烷烃 δD 值记录了气温信号,可以作为代用指标来进行古温度重建。

3 结论

通过和浪卡子气象站和拉萨气象站过去约50年的7年精度的气象数据相比较,可以看出青藏高原南部空姆错湖芯中陆源正构烷烃(C₂₅-C₃₁)的 δD 值与当地生长季节时段的平均气温显著相关,而与降雨量和相对湿度相关性差,说明这些陆源生物标志物的 δD 值记录了气温信号,可以被用于古温度重建。

致谢:田立德教授不仅为本文提供了所需气象数据,而且为本文的完善提出了宝贵的建议,在此向他深表感谢,还要感谢两位匿名审稿人,他们为本文的完善提出了宝贵的意见。

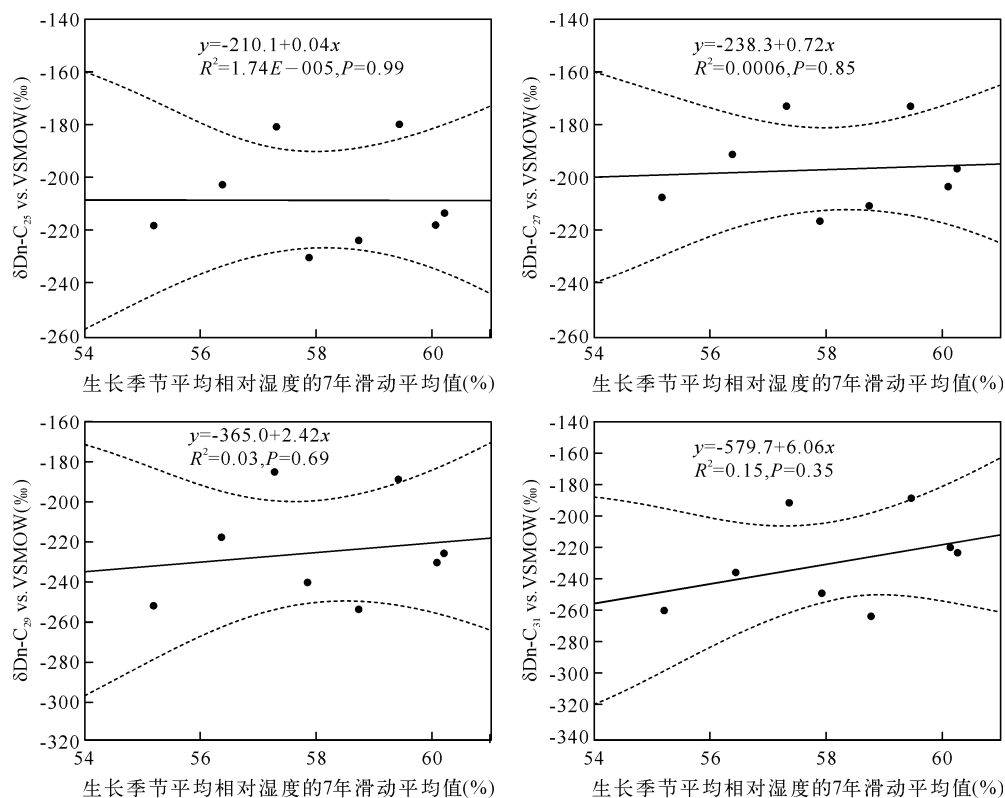


图5 正构烷烃 $n\text{-C}_{25}$ 、 $n\text{-C}_{27}$ 、 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 的 δD 值与拉萨站生长季节平均相对湿度的7年滑动平均值之间的相关性(点线所围区域表示95%置信区间, 生长季节: 5-9月)

Fig. 5 δD values of $n\text{-C}_{25}$, $n\text{-C}_{27}$, $n\text{-C}_{29}$ and $n\text{-C}_{31}$ alkanes vs. 7-year running average of the mean growing season relative humidity of Lhasa station

4 参考文献

- [1] Burgoyne TW, Hayes JM. Quantitative production of H_2 by pyrolysis of gas chromatographic effluents. *Analytical Chemistry*, 1998, **70**: 5136-5141.
- [2] Hilkert AW, Douthitt CB, Schluter HJ *et al.* Isotope ratio monitoring gas chromatography/mass spectrometry of D/H by high temperature conversion isotope ratio mass spectrometry. *Rapid Communication in Mass Spectrometry*, 1999, **13**: 1226-1230.
- [3] Andersen N, Paul HA, Bernasconi SM *et al.* Large and rapid climate variability during the Messinian salinity crisis: evidence from deuterium concentrations of individual biomarkers. *Geology*, 2001, **29**: 799-802.
- [4] Huang Y, Shuman B, Wang Y *et al.* Hydrogen isotope ratios of individual lipids in lake sediments as novel tracers of climatic and environmental change: a surface sediment test. *Journal of Paleolimnology*, 2004, **31**: 363-375.
- [5] Liu WG, Huang YS. Compound specific D/H ratios and molecular distributions of higher plant leaf waxes as novel paleo-environmental indicators in the Chinese Loess Plateau. *Organic Geochemistry*, 2005, **36**: 851-860.
- [6] Sachse D, Radke J, Gleixner G. Hydrogen isotope ratios of recent lacustrine sedimentary n-alkanes record modern climate variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, **68**(23): 4877-4889.
- [7] Sauer P, Eglinton TI, Hayes JM *et al.* Compound-specific D/H ratios of lipid biomarkers from sediments as a proxy for environmental and climatic conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, **65**: 213-222.

- [8] Xie SC, Yao TD, Kang SC *et al.* Geochemical analyses of a Himalayan snowpit profile: implications for atmospheric pollution and climate. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**(1): 15-23.
- [9] Yang H, Huang Y. Preservation of lipid hydrogen isotope ratios in Miocene lacustrine sediments and plant fossils at Clarkia, northern Idaho, USA. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**: 413-423.
- [10] Xia ZH, Xu BQ, Mügler I *et al.* Hydrogen isotope ratios of terrigenous n-alkanes in lacustrine surface sediment of the Tibetan Plateau record the precipitation signal. *Geochemical Journal*, 2008, **42**(4): 331-338.
- [11] Schimmelmann A, Lewan MD, Wintsch RP. D/H isotope ratios of kerogen, bitumen, oil, and water in hydrous pyrolysis of source rocks containing kerogen types I, II, and III. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**: 3751-3766.
- [12] Glinton GE, Hamilton RJ. Leaf epicuticular waxes. *Science*, 1967, **156**(3780): 1322-1335.
- [13] Rieley G, Collier RJ, Jones DM *et al.* The biogeochemistry of Ellesmere lake, UK. 1. Source correlation of leaf wax inputs to the sedimentary lipid record. *Organic Geochemistry*, 1991, **17**(6): 901-912.
- [14] Ficken KJ, Li B, Swain DL *et al.* An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**(7-8): 745-749.
- [15] Viso AC, Pesando D, Bernard P *et al.* Lipid Components of The Mediterranean Seagrass Posidonia-oceanical. *Phytochemistry*, 1993, **34**(2): 381-387.
- [16] Cranwell PA, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments- II. *Organic Geochemistry*, 1987, **11**(6): 513-527.
- [17] Han J, Calvin M. Hydrocarbon Distribution of Algae and Bacteria and Microbiological Activity in Sediments. *Proc Nat Acad Sci USA*, 1969, **64**(2): 436-443.
- [18] Dansgaard W. The abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapor. *Tellus*, 1953, **5**: 461-469.
- [19] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, **16**: 436-468.
- [20] Ehhalt D, Knot K, Nagel JF *et al.* Deuterium and oxygen-18 in rain water. *Journal of Geophysical Research*, 1963, **68**: 3775-3780.
- [21] Gat JR. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1996, **24**: 225-262.
- [22] Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH *et al.* Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, **33**: 507-559.
- [23] Larcher W. *Physiological plant ecology*. Springer, 1995: 506.
- [24] Smith FA, Freeman KH. Influence of physiology and climate on δD of leaf wax n-alkanes from C3 and C4 grasses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**: 1172-1187.
- [25] Xie S, Nott CJ, Avsejs LA *et al.* Paleoclimate records in compound-specific δD values of a lipid biomarker in ombrotrophic peat. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**: 1053-1057.
- [26] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 1: 1000000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001: 1-260.
- [27] 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年. 第四纪研究, 1997, **17**(3): 230-239.
- [28] 万国江. 现代沉积年分辨的 ^{137}Cs 计年——以云南洱海和贵州红枫湖为例. 第四纪研究, 1999, **19**(1): 73-80.
- [29] Pennington W, Cambay RS, Eakins JD *et al.* Radionuclide dating of the recent sediments of Blelham Tarn. *Freshwater Biology*, 1976, **6**: 317-331.
- [30] Zhu LP, Zhang PZ, Xia WL *et al.* 1400-year cold/warm fluctuations reflected by environmental magnetism of a lake sediment core from the Chen Co, southern Tibet, China. *Journal of Paleolimnology*, 2003, **29**: 391-401.
- [31] 谭淑琼, 安 姬, 刘 瑛. 拉萨地区农业气候资源分析. 西藏农业科技, 2007, **29**(3): 31-33.
- [32] Cranwell PA. Chain-length distribution of n-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change. *Freshwater Biol*, 1973, (3): 259-265.
- [33] Meyers PA, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, 1993, **20**(7): 867-900.
- [34] Fisher E, Oldfield F, Wake R *et al.* Molecular marker records of land use change. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(1): 105-119.
- [35] Liu WG, Yang H, Li LW. Hydrogen isotopic compositions of n-alkanes from terrestrial plants correlate with their ecological life forms. *Oecologia*, 2006, **150**(2): 330-338.

- [36] Wershaw RL, Friedman I, Heller SJ. Hydrogen isotope fractionation of water passing through trees. *Organic Geochemistry*, 1970, **3**: 55-67.
- [37] Yakir D, DeNiro MJ, Rundel PW. Isotopic inhomogeneity of leaf water: Evidence and implications for the use of isotopic signals transduced by plants. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, **53**: 2769-2773.
- [38] Kang SC, Wake CP, Qin DH *et al.* Monsoon and dust signals recorded in Dasuopu Glacier, Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, **46**(153): 222-226.
- [39] Tian LD, Yao TD, Numaguti A *et al.* Stable isotope variations in monsoon precipitation on the Tibetan Plateau. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 2001, **79**(5): 959-966.
- [40] Tian LD, Yao TD, Stievenard M *et al.* Deuterium in precipitation and relevant climate in west China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, **21**(4): 357-361.
- [41] Tian L, Yao T, Schuster PF *et al.* Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D9): ACH16-01-16-10.
- [42] Tian LD, Masson-Delmotte V, Stievenard M *et al.* Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D22): 28081-28088.
- [43] Tian LD, Yao TD, Sun WZ *et al.* Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in precipitation on north and south of the Tibetan Plateau and moisture recycling. *Science in China, Ser. D*, 2001, **44**(9): 789-796.
- [44] 田立德, 姚檀栋, 蒲健辰等. 拉萨夏季降水中氧稳定同位素变化特征. 冰川冻土, 1997, **19**(4): 295-301.
- [45] 田立德, 姚檀栋, 余武生等. 青藏高原水汽输送与冰芯中稳定同位素记录. 第四纪研究, 2006, **26**(2): 145-152.
- [46] Chikaraishi Y, Naraoka H. Compound-specific δD - $\delta^{13}C$ analyses of n-alkanes extracted from terrestrial and aquatic plants. *Phytochemistry*, 2003, **63**: 361-371.
- [47] Hou JZ, D'Andrea WJ, MacDonald D *et al.* Hydrogen isotopic variability in leaf waxes among terrestrial and aquatic plants around Blood Pond, Massachusetts (USA). *Organic Geochemistry*, 2007, **38**: 977-984.
- [48] 王 谋, 李 勇, 黄润秋等. 青藏高原腹地植物碳同位素组成对环境条件的响应. 山地学报, 2005, **23**(3): 274-279.
- [49] 李明财, 易现峰, 李来兴等. 基于稳定碳同位素技术研究青藏高原东部高寒区植被的光合型. 西北植物学报, 2004, **24**(6): 1052-1056.
- [50] 陈 拓, 杨梅学, 冯虎元等. 青藏高原北部植物叶片碳同位素组成的空间特征. 冰川冻土, 2003, **25**(1): 83-87.