

青藏高原湖泊表层沉积物中陆源正构烷烃氢同位素比值的气候意义*

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

(1: 中国科学院青藏高原研究所青藏高原地表环境与过程实验室, 北京 100085)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: Max-Planck-Institut für Biogeochemistry, Postfach 100164, D-07701 Jena, Germany)

摘要: 选取青藏高原南北断面气候环境条件差异明显的大枪勇错、空姆错、纳木错、克鲁克湖和小柴达木湖的表层沉积物进行了陆源正构烷烃(C₂₅-C₃₁)的提取分析. 通过将这些生物标志物 δD 值与源区生长季节大气降水 δD 值进行比较, 发现两者有很好的相关性, 说明陆源沉积正构烷烃记录了生长季节降水同位素信号. 正构烷烃 n-C₂₅、n-C₂₇ 与大气降水间氢同位素分馏在-45‰至-70‰之间, 而 n-C₂₉、n-C₃₁ 与大气降水间氢同位素分馏在-70‰至-95‰之间, 沿青藏高原南北断面分馏恒定, 分馏平均值分别是-57‰和-82‰. 通过对比欧洲断面的-130‰分馏值, 可以看出青藏高原南北断面陆源沉积正构烷烃与大气降水间表观同位素分馏小很多.

关键词: 正构烷烃; 湖泊沉积; 氢同位素比值; 降水; 气候; 青藏高原

Climatic implication of hydrogen isotope ratios of terrigenous n-alkanes in lacustrine surface sediment of the Tibetan Plateau

XIA Zhonghuan^{1,2}, XU Baiqing¹, Mügler I.³, WU Guangjian¹, Gleixner G.³, Sachse D.³ & ZHU Liping¹

(1: *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, P.R.China*)

(2: *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(3: *Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Postfach 100164, D-07701 Jena, Germany*)

Abstract: δD values of terrigenous n-alkanes (n-C₂₅, n-C₂₇, n-C₂₉ and n-C₃₁) extracted from recent lake surface sediments of Lake Qiangyong Glacier, Lake Kongmu Co, Lake Nam Co, Lake Keluke and Lake Xiao Qaidam along the S-N transect of Tibetan Plateau are compared to those of precipitation spanning a wide range from -167‰ to -51‰ and clearly correlate with δD values of meteoric water during the growth, indicating that terrigenous n-alkanes record the precipitation signal during the growth. The isotopic fractionation between precipitation and alkanes of n-C₂₅ and n-C₂₇ cover a range from -45‰ to -70‰ whilst that between precipitation and alkanes of n-C₂₉ and n-C₃₁ vary from -70‰ to -95‰, both being fairly constant along the S-N Tibetan transect with the mean at -57‰ and -82‰, respectively. By comparison with the apparent isotope fractionation of -130‰ along the S-N European transect, it implies that the apparent hydrogen isotopic fractionation between meteoric water and terrestrial n-alkanes along the Tibetan transect is much smaller.

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

生物标志物氢同位素比值正逐渐成为新古气候和古水文代用指标^[1-7], 目前研究发现这类有机化合物在被生物合成的过程中氢同位素分馏稳定且主要受生化路径控制^[8], 因此生物标志物氢同位素比值具有记录氢源同位素组成的潜能. 正构烷烃是地质体中含量最为丰富的脂类化合物之一, 性质稳定, 容易提取分离, 所有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^[9], 而且通过正构烷烃分子特征能够区分不同生物来源^[10-13]. 通过对不同生物体的脂类化合物进行提取分析, 发现正构烷烃与

* 国家重点基础研究发展规划项目(973 计划)(2005CB422004)和国家自然科学基金创新群体项目(40121101)联合资助.
2008-01-21 收稿; 2008-07-27 收修修改稿. 夏忠欢, 男, 1978 年生, 博士; E-mail: baotazunnan@sina.com.

源水间的氢同位素分馏稳定在 -160‰ 左右, 由此假设在正构烷烃的生物合成过程中氢同位素分馏不依赖于环境因素而只受生物合成路径的控制^[8]. 如果这个假设成立, 那么正构烷烃单体 δD 值就可以用来重建源水的同位素组成, 进而反演古气候的变化. 对英格兰北部一个泥炭柱样进行分析, 发现泥炭藓来源的正构烷烃 $n\text{-C}_{23}$ 的 δD 值与气温记录具有很好的相关性, $n\text{-C}_{23}$ 的 δD 值大小反映了受蒸发作用影响的沼泽水的同位素组成^[11]. 在对来自苏格兰和澳大利亚的铜铀云母矿中的*Botryococcus braunii* 藻来源的脂肪烃的研究中, 发现其中正构烷烃的 δD 值明显反映了每个铜铀云母矿沉积的古气候, 记录了对应地质历史时期大气水的氢同位素组成^[14]. 美国东北部36个湖的表层沉积物中, 藻类来源的正构烷烃 $n\text{-C}_{17}$ 的 δD 值与湖水的 δD 值具有显著的相关性, 两者间的表观分馏稳定在 -156‰ ^[4]. 沿欧洲一个南北气候断面, 从南意大利到北芬兰采集的13个湖泊表层沉积物, 发现湖泊表层沉积水生和陆生来源的正构烷烃记录了大气降水氢同位素组成^[6], 该地区水生来源正构烷烃与降水间同位素分馏恒定为 -157‰ ; 由于树叶水分的蒸发蒸腾作用, 陆源正构烷烃与降水间氢同位素分馏要小一些, 恒定为 -130‰ . 对中国黄土高原一个沉积剖面的研究发现陆源正构烷烃的 δD 值受干旱度、气温和季风强度的共同影响, 干燥时期 δD 偏正, 湿润时期 δD 偏负^[7]. 在欧洲沿一个从南意大利到北芬兰的气候断面采集的31个陆生植物样, 发现植物中正构烷烃的 δD 值与大气降水的 δD 值具有显著的正相关关系^[15].

对于在地球环境系统中占有重要地位、对全球的气候和环境具有重大影响并且自身对气候变化非常敏感的青藏高原地区, 到目前为止, 其湖泊沉积正构烷烃氢同位素比值的气候环境意义不明确, 缺乏相关研究. 本文沿青藏高原南北断面从气候环境差异明显的大枪勇错、空姆错、纳木错、克鲁克湖和小柴达木湖采集表层沉积物, 探讨其中陆生来源的正构烷烃氢同位素比值的气候意义.

1 样品采集和分析

1.1 采样点

表层沉积物采样点是青藏高原南北断面的大枪勇错(QY)、空姆错(KC)、纳木错(NC)、克鲁克湖(KLK)和小柴达木湖(XQ), 大气降水采样点是拉萨、纳木错和德令哈(图 1). QY 和 KC 位于青藏高原南部, 气候主要受印度季风控制; NC 位于青藏高原中部, 主要属高原亚寒带季风半干旱气候; KLK、XQ 位于青藏高

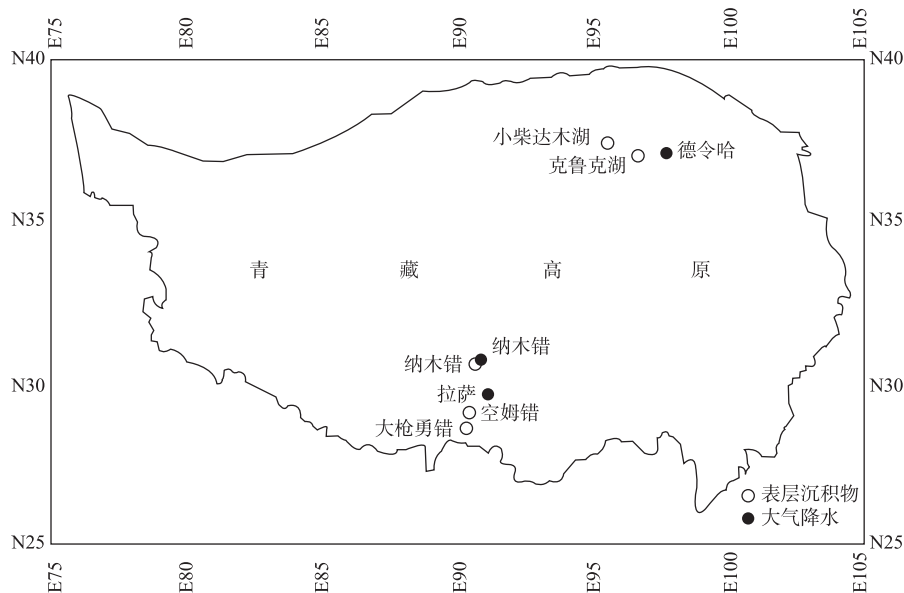


图1 青藏高原采样点位置

Fig.1 Location of sampling sites on the Tibetan Plateau

原东北部, 气候主要受高空西风气流和蒙古高压控制, 夏季还受青藏暖高压影响, 具有干旱荒漠气候特点. 在 5 个采样湖中, QY 和 KLK 是淡水湖, KC 是微咸水湖, NC 是咸水湖, XQ 是盐湖. 降水采样点拉萨靠近 QY 和 KC, 纳木错靠近 NC, 德令哈靠近 KLK 和 XQ. 表层沉积物采样点基本信息见表 1, 降水采样点的基本信息和降水年加权平均 δD 值见表 2.

表 1 表层沉积物采样点的基本信息*
Tab.1 Basic information for surface sediment sampling sites

	QY	KC	NC	KLK	XQ
湖泊名称	大枪勇错	空姆错	纳木错	克鲁克湖	小柴达木湖
地理位置	28°53.390'N 90°13.496'E	29°01.562'N 90°28.135'E	30°38.423'N 90°36.134'E	37°16.669'N 96°52.684'E	37°28.110'N 95°29.440'E
海拔(m a.s.l.)	4855	4445	4718	2812	3163
采样点水深(m)	17	15	20	7	2.5
湖面积(km ²)	0.1 ¹⁾	29 ¹⁾	1920 ^[23]	57.96 ^[24]	40.6 ¹⁾
年平均气温(°C)	3.8 ²⁾	3.8 ²⁾	0 ^[25]	5.1 ³⁾	3.1 ⁴⁾
年降水量(mm)	379.0 ²⁾	379.0 ²⁾	281.8 ^[25]	196.1 ³⁾	95.2 ⁴⁾
年蒸发量(mm)	1994.4 ²⁾	1994.4 ²⁾	2000 ^[23]	2439.4 ^[26]	1741.9 ⁴⁾
年平均相对湿度	40% ⁵⁾	40% ⁵⁾	53% ^[25]	39% ⁶⁾	32% ⁴⁾
年平均太阳总辐射 (MJ/m ²)	7623 ^[27]	7623 ^[27]	7528 ^[28]	6965 ^[29]	6965 ^[29]
夏半年平均温度(°C)	8.0 ²⁾	8.0 ²⁾	6.2 ⁷⁾	12.6 ³⁾	11.6 ⁸⁾
夏半年降水量(mm)	374.6 ²⁾	374.6 ²⁾	281.5 ^[25]	182.1 ³⁾	90.5 ⁴⁾
生长季节降水量(mm)	370.3 ²⁾	370.3 ²⁾	274.7 ^[25]	181.0 ³⁾	88.6 ⁴⁾
夏半年蒸发量(mm)	999.4 ²⁾	999.4 ²⁾	945.3 ⁹⁾	-	1207 ⁸⁾
夏半年平均相对湿度	53% ⁵⁾	53% ⁵⁾	64% ⁷⁾	42% ⁶⁾	34% ⁴⁾
湖区主要植被 ^[30]	小蒿草 草甸; 针茅草原	小蒿草 草甸; 针茅草原	小蒿草草甸; 紫花针茅草原	蒿叶猪毛菜砾 漠(荒漠草原); 琐琐沙漠 (荒漠灌木)	驼绒藜荒漠 (荒漠草原); 蒿叶猪毛菜砾漠 (荒漠草原)

* 生长季节 5-9 月; 夏半年: 5-10 月. 经度、纬度、海拔是在采样点用便携式 GPS 测定; 采样湖水深利用回声测深仪测定; 1) 数据: 利用 Google Earth ruler 估计; 2) 数据: 浪卡子站, 1999 年(内部资料, 中国科学院青藏高原研究所); 3) 数据: 德令哈站, 2003 年(内部资料, 中国科学院青藏高原研究所); 4) 数据: 大柴旦站, 2005 年(内部资料, 中国科学院青藏高原研究所); 5) 数据: 浪卡子站, 1970-1980 年(内部资料, 中国科学院青藏高原研究所); 6) 数据: 德令哈站, 2000-2003 年(内部资料, 中国科学院青藏高原研究所); 7) 数据: 纳木错站, 2005-07-10 和 2006-05-06(内部资料, 中国科学院青藏高原研究所); 8) 数据: 大柴旦站, 2005 年(内部资料, 中国科学院青藏高原研究所); 9) 数据: 纳木错站, 2005-07-10 和 2006-05-06(内部资料, 中国科学院青藏高原研究所);

1.2 采样和实验

湖泊表层沉积样(最上 1cm)于 2005 年 8-9 月利用重力取芯器采集. 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1425°C的高温转化炉^[16-17]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. 所有 δD 值通过正构烷烃标准混合物(C₁₀-C₃₂)归一化为SMOW标准. 详细实验步骤见参考文献[6]. 沉积物样品中所有化合物测定的平均标准偏差为10%,标准混合物中所有化合物测定的平均标准偏差为4%.

表2 大气降水采样点的地理位置和降水年加权平均 δD 值

Tab.2 Location and the mean weighted annual precipitation δD value of the precipitation sampling site

采样点	地理位置	海拔 (m a.s.l.)	δD (‰, SMOW)
拉萨	29°42'N, 91°7.8'E	3658	-124 ¹⁾
纳木错	30°46.44'N, 90°59.31'E	4730 ^[25]	-167 ²⁾
德令哈	37°22.2'N, 97°58.2'E	2981	-53 ³⁾

1)数据: 1998年9月至2000年9月(内部资料,中国科学院青藏高原研究所); 2)数据: 2005年8月至2006年10月(内部资料,中国科学院青藏高原研究所); 3)数据: 1993-1996年(内部资料,中国科学院青藏高原研究所). 降水年加权平均 δD 值计算公式: $\delta D = \sum(\delta D_i A_i) / \sum A_i$, 式中 i 是降水事件序号, δD_i 是降水事件 i 的降水 δD 值, A_i 是降水事件 i 的降水量.

1.3 氢同位素分馏计算

大气降水与正构烷烃间氢同位素分馏 ϵ 利用公式(1)计算

$$\epsilon = 1000 \left(\frac{\delta D_n + 1000}{\delta D_w + 1000} - 1 \right) \quad (1)$$

式中, n 为正构烷烃; w 为大气降水.

2 结果与讨论

2.1 陆源沉积正构烷烃分子特征

采样湖表层沉积物中陆生来源的正构烷烃分子相对丰度见图2. 正构烷烃C₂₅-C₃₂表现出明显的奇偶优势, 碳优势指数(CPI₂₅₋₃₂)大于5, 指示陆生高等植物来源^[10,18]. 木本植物来源的正构烷烃以n-C₂₇为主峰, 草本植物来源的正构烷烃以n-C₃₁为主峰^[18-20], 因此C₂₇/C₃₁比值能够反映木本植物和草本植物之间的相对丰度^[19-21]. QY、KC、NC、KLX、XQ沉积物中C₂₇/C₃₁比值分别为0.46、0.62、0.49、1.34、0.4. 对于QY、KC、NC和XQ, C₂₇/C₃₁比值都小于1, 说明这些地区草本植物要多于木本植物; 而对于KLK, C₂₇/C₃₁比值大于1, 说明草本植物要少于木本植物. 采样地区木本植物与草本植物之间相对丰度的估计值与湖周围主要植被的分布信息相一致(表1), 对于QY、KC、NC和XQ, 湖区优势植被是草原或荒漠草原, 而对于KLK, 湖区优势植被是荒漠灌木和荒漠草原(表1).

2.2 陆源沉积正构烷烃氢同位素比值

各气象站生长季节降水量近似等于年降水量(表1), 因此各气象站的降水生长季节加权平均 δD 值近似等于降水年加权平均 δD 值. 采样湖表层沉积物中陆源正构烷烃(n-C₂₅、n-C₂₇、n-C₂₉、n-C₃₁)的 δD 值和通过大气降水采样点的降水年加权平均 δD 值计算得到的湖芯采样点降水年加权平均 δD 值见表3, 同样, 湖芯采样点的降水生长季节加权平均 δD 值近似等于降水年加权平均 δD 值. 陆源正构烷烃的 δD 值与湖芯采样点降水的 δD 值具有很好的线性相关关系, 说明陆源正构烷烃记录了降水的同位素信号, 而且记录的主要是生长季节时段降水的同位素信号(图3). 对同一样品, 这4种生物标志物具有相似的 δD 值(表3), 只是n-C₂₉和n-C₃₁的 δD 值比n-C₂₅和n-C₂₇的 δD 值稍微更负一点, 其原因可能是在生物合成n-C₂₉和n-C₃₁时, 相对于n-C₂₅和n-C₂₇存在同位素偏负一些的机制, 但是据我们所知, 到目前为止这种机制还没有被报道过.

对中国西北部生长的34种陆生植物(包括21种C₃植物和13种C₄植物)的氢同位素比值研究发现, 由于不同植物水分利用效率不同, 草比同一地区的树和灌木具有更负的 δD 值^[22]. 而对于本研究地区, 不管优势植被是草本植物还是木本植物, n-C₂₉和n-C₃₁来源于草本植物的比例要比n-C₂₅和n-C₂₇来自于草本植物的比例大, 而n-C₂₅和n-C₂₇来源于木本植物的比例要比n-C₂₉和n-C₃₁来自于木本植物的比例大, 又由于同一地区草要比树和灌木的 δD 值负, 因此这有可能导致n-C₂₉和n-C₃₁的 δD 值比n-C₂₅和n-C₂₇的 δD 值负.

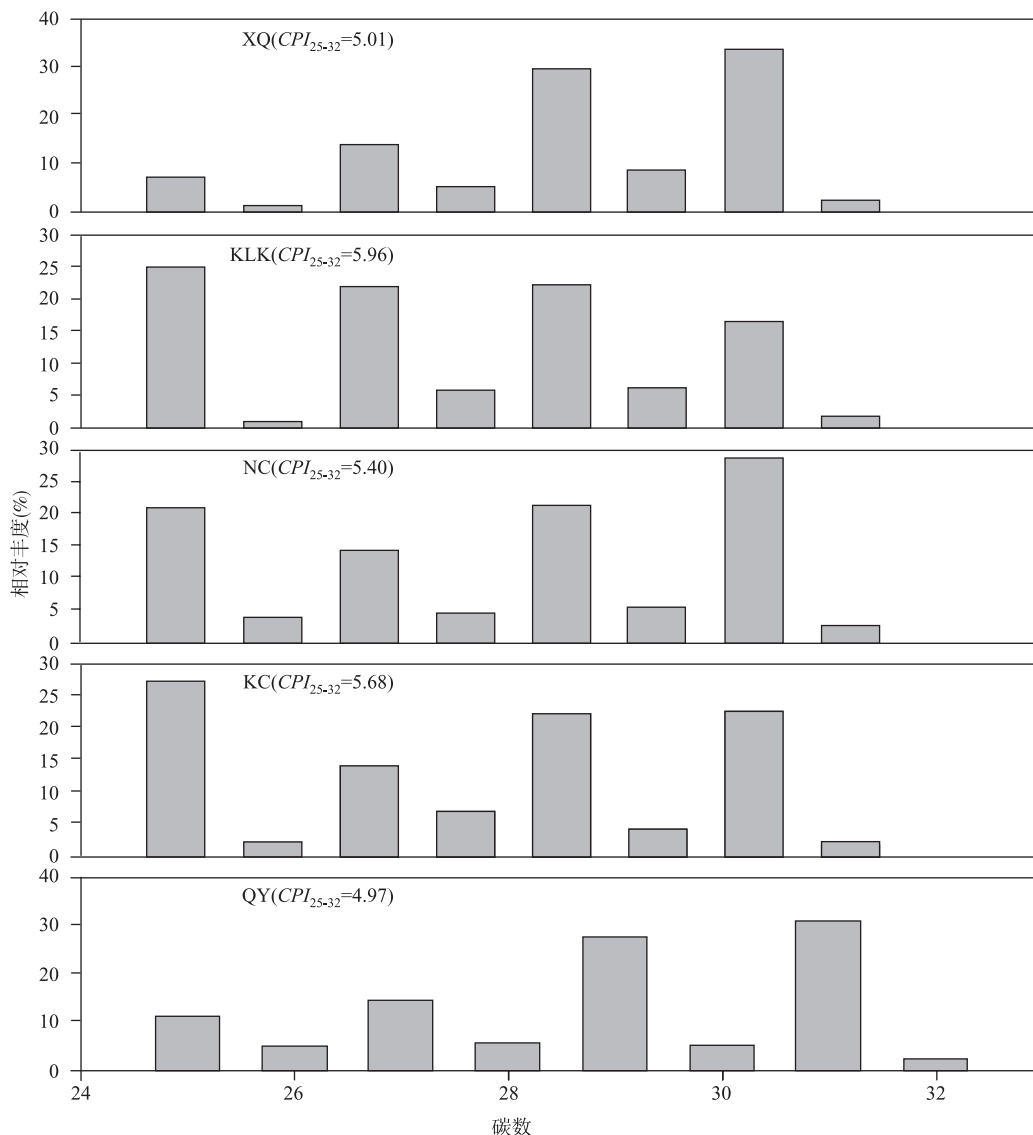


图2 QY(大枪勇错)、KC(空姆错)、NC(纳木错)、KLK(克鲁克湖)、XQ(小柴达木湖)的陆源沉积正构烷烃分子相对丰度($C_n\% = 100C_n / \sum C_{25-32}$, $n=25-32$)与碳数分布关系, C_n 是碳数为 n 的正构烷烃浓度, $C_{25}-C_{32}$ 的CPI值(碳优势指数): $CPI_{25-32} = \sum C_{25-32}(\text{奇碳}) / \sum C_{25-32}(\text{偶碳})$

Fig.2 Relative abundance ($C_n\% = 100C_n / \sum C_{25-32}$, $n=25-32$) versus carbon number of n-alkanes in QY (Lake Qiangyong Glacier), KC (Lake Kongmu Co), NC (Lake Nam Co), KLK (Lake Keluke) and XQ (Lake Xiao Qaidam), C_n is concentration of the n-alkane containing n carbon atoms, CPI (carbon preference index) value for $C_{25}-C_{32}$: $CPI_{25-32} = \sum C_{25-32}(\text{odd}) / \sum C_{25-32}(\text{even})$

表 3 表面沉积物采样点正构烷烃、大气降水的 δD 值*Tab.3 δD values of n-alkanes and meteoric water for surface sediment sampling site

湖泊代号	n-C ₂₅	SD	n-C ₂₇	SD	n-C ₂₉	SD	n-C ₃₁	SD	δD (大气降水) (‰,SMOW)
QY	-183	9	-186	7	-199	9	-214	10	-135 ¹⁾
KC	-180	5	-173	15	-187	6	-189	5	-132 ¹⁾
NC	-209	4	-201	26	-246	9	-243	15	-167 ²⁾
KLK	-104	7	-116	22	-126	8	-131	5	-51 ³⁾
XQ	-118	11	-124	13	-139	7	-138	8	-55 ³⁾

* SD代表标准偏差数据: 利用拉萨降水年加权平均 δD 值(1998年9月至2000年9月)和同位素比值海拔梯度(-0.12‰/100m)^[31] 计算得到; 2) 数据: 纳木错降水年加权平均 δD 值(2005年8月至2006年10月); 3) 数据: 利用德令哈降水年加权平均 δD 值(1993-1996年)和同位素比值海拔梯度(-0.12‰/100m)^[31] 计算得到.

2.3 陆源沉积正构烷烃与大气降水间氢同位素分馏

采样湖的陆源沉积正构烷烃 n-C₂₅、n-C₂₇ 与大气降水间氢同位素分馏($\epsilon_{C_{25}/P}$ 、 $\epsilon_{C_{27}/P}$)在-45‰至-70‰之间, 平均值为-57‰; 正构烷烃 n-C₂₉、n-C₃₁ 与大气降水间氢同位素分馏($\epsilon_{C_{29}/P}$ 、 $\epsilon_{C_{31}/P}$)在-70‰至-95‰之间, 平均值为-82‰. 沿青藏高原南北断面, 这 4 种陆源生物标志物与大气降水间氢同位素分馏都十分稳定(表 4).

植物体生物合成正构烷烃过程中氢同位素分馏在-160‰左右^[6,8]. 除了降水 δD 值, 还有其它一些因素, 例如相对湿度、植被类型(木本或草本)、植物物种、光合作用途径(C₃ 或 C₄)等都能改变植物中正构烷烃 δD 值^[7,32-34]. 这些因素通过影响土壤水分的蒸发作用和叶片表层水分的蒸发蒸腾作用来改变用于合成正构烷烃的氢源 δD 值, 进而改变所合成的正构烷烃 δD 值^[35]. 因此当由于土壤水分的蒸发作用和叶片表层水分的蒸发蒸腾作用, 用于生物合成正构烷烃的氢源氘同位素被富集, 这将使得这些陆源生物标志物与大气降水的表观氢同位素分馏小于-160‰.

湖泊 QY、KC、NC、KLK 和 XQ 分布在气候条件差异明显的青藏高原南北断面上, 从南至北干旱度急剧增加. 由于气候干旱, KLK 和 XQ 地区的相对湿度要比 QY、KC 的低, 尤其是在夏半年(表 1), 因此 KLK 和 XQ 地区土壤水分的蒸发作用和叶片表层水分的蒸发蒸腾作用应该比 QY、KC 地区更强烈, 使得合成正构烷烃的氢源更富集氘同位素. 按照这一理论, KLK 和 XQ 地区正构烷烃与降水间表观氢同位素分馏应该比 QY、KC 地区小, 然而青藏高原南北断面这些湖泊的陆源沉积正构烷烃与降水间氢同位素分馏却十分稳定(表 4). 可能的一个原因是研究区域的植被大都是在秋季凋谢进入湖泊并沉积下来, 而这个时段青藏高原南北不同地区的相对湿度差别不大, 因此土壤水分的蒸发作用和叶片表层水分的蒸发蒸腾作用对氢源 δD 值的改变在不同地区差异很小. 另一个可能的原因是不同地区植物种类的不同导致南北地区表观氢同位素分馏稳定. 采样湖区的植物基本都是 C₃ 植物^[36-39], 只有 XQ 湖区有少量的 C₄ 植物. QY、KC 和 NC 周围的主要植被是草原, 而 KLK 和 XQ 周围的主要植被分别是荒漠灌木、荒漠草原和荒漠草原(表 1). KLK 和 XQ 湖区的植被可能已经适应了这种干旱的气候, 对于水分的利用效率更高, 使得水分在叶片表层的蒸发蒸腾作用要比 QY、KC 和 NC 湖区的小. 但是本研究无法确定这一原因是否存在, 需进一步的工作来研究青藏高原南北断面现代植被与大气降水间氢同位素分馏状况. 另外, 由于冰川融水或河水的补给, 在 KLK 湖边分布了非常少量的芦苇沼泽和芦苇草甸, 在 XQ 湖边也分布了非常少量的芦苇草甸和赖草草甸^[30]. 这些植被生长在相对潮湿的地方, 相对湿度较大, 因此土壤水分的蒸发作用和叶片表层水分的蒸发蒸腾作用应该比草原植被的小, 使得用于生物合成正构烷烃的氢源的 δD 值相对要更负一些. 但是考虑到芦苇沼泽、芦苇草甸和赖草草甸的数量非常少, 远远小于这些地区主要植被的数量, 因此非常少量的芦苇沼泽、芦苇草甸和赖草草甸的分布可能不是促成青藏高原南北地区氢同位素分

馏稳定的主要原因。

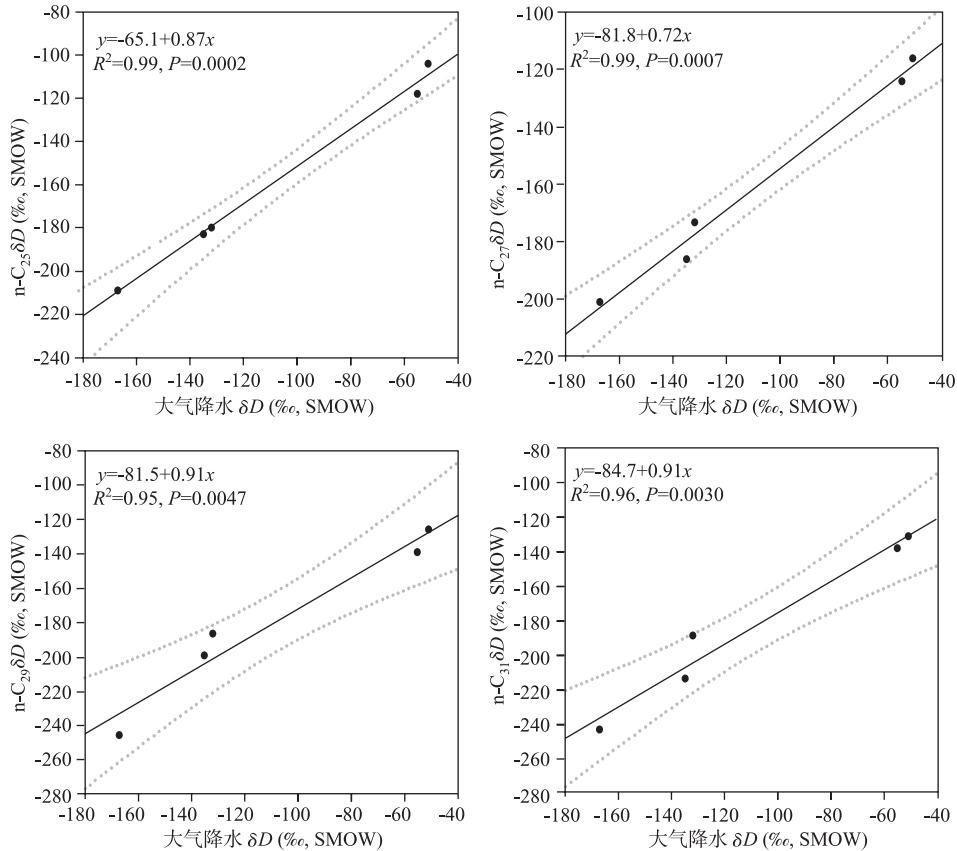


图3 正构烷烃 n-C₂₅、n-C₂₇、n-C₂₉ 和 n-C₃₁ 的 δD 值与大气降水 δD 值之间相关性
(点线所围区域表示回归曲线 95%置信区间)

Fig.3 δD values of n-C₂₅, n-C₂₇, n-C₂₉ and n-C₃₁ alkanes vs.the meteoric water δD value
(Dotted lines show the 95% confidence interval of the regression line)

通过对比欧洲南北断面,可以看出青藏高原南北断面湖泊表层沉积物中陆源正构烷烃与大气降水间的表观氢同位素分馏要小很多。青藏高原是干旱-半干旱气候而欧洲是湿润气候,因此导致这两个地区表观氢同位素分馏不同的原因可能是两个地区之间气候的差异。青藏高原地区年平均相对湿度和年平均太阳总辐射分别约是 40%和 7300MJ/m²(表 1),而欧洲的年平均相对湿度和年平均太阳总辐射分别约是 70%和 3700MJ/m²(表 5)。由于气候条件的差异,例如相对湿度和太阳总辐射的差异,青藏高原地区土壤水分的蒸发作用和叶片表层水分的蒸发蒸腾作用比欧洲更强烈,使得正构烷烃的氢源更富集氘同位素,导致表观分馏较小。但是本研究还不能完全确认这一原因,需要进一步的工作来研究青藏高原地区树叶水分与植物体所含的正构烷烃之间以及土壤水分与植物体所含的正构烷烃之间的氢同位素分馏状况。欧洲南北断面的主要植被是落叶树^[15],而青藏高原南北断面的主要植被是草原,又因为树的正构烷烃的 δD 值要比同地区草的正构烷烃的 δD 值更正一些^[22,33],因此两地区植被生活型的差异可能不是导致青藏高原陆源沉积正构烷烃与大气降水间的表观氢同位素分馏小于欧洲的原因。

表4 陆源沉积正构烷烃与大气降水间氢同位素分馏 ϵ (SD : 2σ 标准偏差, P: 大气降水)
Tab.4 Fractionation ϵ values for each site and mean values as well as 2σ standard deviation (SD)
along the transect (P represents precipitation)

湖泊代号	$\epsilon_{C_{25}/P}$	$\epsilon_{C_{27}/P}$	$\epsilon_{C_{29}/P}$	$\epsilon_{C_{31}/P}$
QY	-55	-59	-74	-91
KC	-55	-47	-63	-66
NC	-50	-41	-95	-91
KLK	-56	-68	-79	-84
XQ	-67	-73	-89	-88
平均值	-57	-58	-80	-84
SD	6	14	13	10

表5 欧洲南北断面表层沉积物采样点的年平均相对湿度(RH)和年平均太阳总辐射(SR)^{[6]*}
Tab.5 Mean annual relative humidity (RH) and mean annual global solar radiation(SR) of the lake sites

	NAI	KEI	SOD003	SOD007	HYY	SYR	LAM	SOR	HZM	MAS	MEZ	LGM	LPM
RH(%)	>70	>70	>70	>70	>70	>70	>70	78	77	72	75	69	69
SR(MJ/m ²)	2705	2693	2751	2771	3205	3241	3272	3526	3654	4921	5263	5510	5434

* RH of KEI, NAI, SOD003, SOD007, HYY, SYR, LAM: http://www.fmi.fi/weather/climate_3.html; RH of SOR: <http://www.worldtravelguide.net/country/74/climate/Europe/Denmark.html> for Copenhagen; RH of HZM: <http://www.worldtravelguide.net/country/99/climate/Europe/Germany.html> for Frankfurt am Main; RH of MAS: <http://eurometeo.com/english/climate> for Pisa; RH of MEZ: <http://eurometeo.com/english/climate> for Rome-fiumicino; RH of LGM, LPM: <http://eurometeo.com/english/climate> for Crotona; SR of lake sites: <http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/apps/radmonth.php?en=&europe=>

3 结论

通过和源区大气降水 δD 值(-167‰至-51‰)相比较,可以看出青藏高原南北断面湖泊表层陆源沉积正构烷烃(C_{25} - C_{31})记录了降水同位素比值信号.正构烷烃 $n-C_{25}$ 、 $n-C_{27}$ 与降水间氢同位素分馏值在-45‰至-70‰之间而 $n-C_{29}$ 、 $n-C_{31}$ 与降水间氢同位素分馏值在-70‰至-95‰之间,沿南北断面分馏都十分稳定,分馏平均值分别是-57‰和-82‰.通过对比欧洲气候断面,可以看出青藏高原气候断面陆源沉积正构烷烃与大气降水间表观氢同位素分馏小很多.

致谢:田立德教授为本文提供了所需气象数据和水样氢同位素数据,周石砦副教授、游庆龙博士为本文提供了所需气象数据,徐彦伟博士为本文提供了所需水样氢同位素数据,在此向他们深表感谢.还要感谢审稿人,他们为本文的完善提出了宝贵的意见.

4 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [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] Liu WG, Huang YS. Compound specific D/H ratios and molecular distributions of higher plant leaf waxes as novel paleoenvironmental indicators in the Chinese Loess Plateau. *Organic Geochemistry*, 2005, **36**: 851-860.
- [8] Sessions AL, Burgoyne TW, Schimmelmann A *et al.* Fractionation of hydrogen isotopes in lipid biosynthesis. *Organic Geochemistry*, 1999, **30**: 1193-1200.
- [9] 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.
- [10] Glinton GE, Hamilton RJ. Leaf epicuticular waxes. *Science*, 1967, **156**(3780): 1322-1335.
- [11] 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.
- [12] Cranwell PA, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments--II. *Organic Geochemistry*, 1987, **11**(6): 513-527.
- [13] Han J, Calvin M. Hydrocarbon Distribution of Algae and Bacteria and Microbiological Activity in Sediments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1969, **64**(2): 436-443.
- [14] Dawson D, Grice K. Stable hydrogen isotopic composition of hydrocarbons in torbanite (Late Carboniferous to Late Permian) deposited under various climatic conditions. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**: 189-197.
- [15] Sachse D, Radke J, Gleixner G. Delta D values of individual n-alkanes from terrestrial plants along a climatic gradient—Implications for the sedimentary biomarker record. *Organic Geochemistry*, 2006, **37**(4): 469-483.
- [16] Burgoyne TW, Hayes JM. Quantitative production of H₂ by pyrolysis of gas chromatographic effluents. *Analytical Chemistry*, 1998, **70**: 5136-5141.
- [17] Hilker 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.
- [18] 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.
- [19] Cranwell PA. Chain-length distribution of n-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change. *Freshwater Biol*, 1973, (3): 259-265.
- [20] 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.
- [21] Fisher E, Oldfield F, Wake R *et al.* Molecular marker records of land use change. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(1): 105-119.
- [22] 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.
- [23] 宗 浩, 王成善, 黄川友等. 纳木错流域自然生态特征与生物资源保护研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, **31**(5): 551-557.
- [24] 段水强. 德令哈盆地湖泊湿地变化与生态需水初步研究. 中国农村水利水电, 2005, (9): 22-23.
- [25] 游庆龙, 康世昌, 李潮流等. 青藏高原纳木错气象要素变化特征. 气象, 2007, **33**(3): 54-60.
- [26] 胡玉民, 崔向红. 德令哈市地下水资源开发利用浅析. 青海环境, 2002, **12**(4): 161-162.
- [27] 谭淑琼, 安 妮, 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.
- [28] 闫 巍, 张宪洲, 石培礼等. 青藏高原高寒草甸生态系统 CO₂ 通量及其水分利用效率特征. 自然资源学报, 2006, **21**(5): 756-767.
- [29] 汪青春, 张国胜. 柴达木地区春小麦生长季光能和光合特征分析. 甘肃农林科技, 1997, (4): 4-6.
- [30] 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.

- [31] Hou SG, Masson-Delmotte V, Qin DH *et al.* Modern precipitation stable isotope vs. elevation gradients in the High Himalaya. Comment on "A new approach to stable isotope-based paleoaltimetry: implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the High Himalaya since the Late Miocene" by David B. Rowley *et al.* [Earth Planet. Sci. Lett., 2001, 188: 253-268]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, **209**: 395-399.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Flanagan LB, Comstock JP, Ehleringer JR *et al.* Comparison of modeled and observed environmental influences on the stable oxygen and hydrogen isotope composition of leaf water in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Physiology*, 1991, **96**: 588-596.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 李相博, 陈践发, 张平等. 青藏高原(东北部)现代植物碳同位素组成特征及其气候信息. *沉积学报*, 1999, **17**(2): 325-329.
- [39] 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.