

doi:10.3799/dqkx.2011.006

咸水湖泊沉积物中正构烷烃及其氢同位素组成与成因

段毅, 何金先, 吴保祥, 徐丽, 张晓丽, 孙涛

中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究重点实验室, 甘肃兰州 730000

摘要: 青海湖是我国最大的内陆咸水湖泊。对这种湖泊沉积物中正构烷烃及其氢同位素进行了分析,研究了沉积物中正构烷烃及其同位素组成,并且与青海湖水生植物及其周围陆生植物的研究结果进行了对比,研究了它们的成因。结果显示了青海湖表层和柱状沉积物中正构烷烃分布都是类似的,其特征反映了它们起源于湖泊周围陆生草本植物。青海湖表层沉积物中正构烷烃氢同位素组成特征也与柱状沉积物中的类似,沉积物样品中正构烷烃氢同位素的组成和分布特征反映了它们主要来自陆生草本植物。从而进一步证实了水体中沉积物的正构烷烃氢同位素组成,反映了生物源的氢同位素组成,后者与古气候相关,因此沉积物的正构烷烃氢同位素组成可以指示古气候。

关键词: 地球化学; 咸水湖泊; 沉积物; 正构烷烃分布; 氢同位素组成; 成因。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2011)01-0053-09

收稿日期: 2010-10-10

Composition and Genesis of *n*-Alkanes and Their Hydrogen Isotope in Sediments from Saline Lake, China

DUAN Yi, HE Jin-xian, WU Bao-xiang, XU Li, ZHANG Xiao-li, SUN Tao

Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The Qinghai Lake is the largest saline lake in China. We study the compositions of *n*-alkanes and their hydrogen isotope in sediments from the lake, and discuss the genesis of their compositions by the comparison with previous study results of plants from the lake and its surrounding areas. Our results show that the *n*-alkanes in the surface and core sediments have a similar distribution which reflects the source from terrestrial herbaceous plants in the surrounding regions of the lake. The hydrogen isotopic compositions of *n*-alkanes in the surface and core sediments are also similar, which indicates that *n*-alkanes in the sediments were derived from terrestrial herbaceous plants in surrounding regions of the lake. This study further demonstrates that the hydrogen isotopic compositions of *n*-alkanes in lake sediment reflect the biological source hydrogen isotopic signals that are related to paleoclimate. Therefore, δD values of *n*-alkanes in lake sediment can be used to indicate paleoclimate.

Key words: geochemistry; saline lake; sediment; distribution of *n*-alkane; hydrogen isotopic composition; genesis.

单体脂类氢同位素组成可以提供沉积正构烷烃的成因信息,因此它在地球化学研究领域中具有广泛的应用前景(Xie *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2001; Sauer *et al.*, 2001; Yang and Huang, 2003; Dawson *et al.*, 2004; Sachse *et al.*, 2004; 熊永强等, 2004)。例如,认识地质样品中有机质来源(Li *et al.*, 2001; 熊永强等, 2004; Chikaraishi and Naraoka, 2006)及研究地区古环境(Xie *et al.*, 2000; Huang *et al.*, 2002; Sachse *et al.*, 2004; Duan and Wu, 2009)。为

了这种应用研究,已经对不同类型植物中正构烷烃的氢同位素组成和植物正构烷烃与环境水之间的氢同位素分馏效应进行了许多研究(Chikaraishi *et al.*, 2004; Bi *et al.*, 2005; Sachse *et al.*, 2006; Sessions, 2006; Chikaraishi and Naraoka, 2007; Duan and Wu, 2009)。现代沉积有机质未受热力作用影响,生物源容易认识,对其中单体正构烷烃氢同位素组成的研究,可以为单体正构烷烃氢同位素应用研究提供重要的科学信息。一些现代沉积物中单体

正构烷烃氢同位素的研究已被报道 (Xie *et al.*, 2000; Chikaraishi and Naraoka, 2003; Yang and Huang, 2003; Huang *et al.*, 2004; Sachse *et al.*, 2004; Chikaraishi and Naraoka, 2005, 2006; Mügler *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009; Seki *et al.*, 2009; Duan, 2009), 但是, 这种研究涉及的沉积环境和地理环境都是有限的, 以致影响了沉积单体脂类氢同位素应用研究的准确性。

一般认为, 湖泊沉积物保存了地质历史中雨水和湖水的氢同位素组成, 因此, 湖泊沉积物中单体正构烷烃氢同位素研究可以提供古气候信息 (Sauer *et al.*, 2001; Mügler *et al.*, 2008). 由于湖泊所处的地理位置和气候环境不同, 使湖水蒸发程度不同, 影响了水生生物中正构烷烃的氢同位素组成, 从而导致了水生与陆生生物中正构烷烃的氢同位素组成差别 (Mügler *et al.*, 2008; Duan, 2009). 沉积物中正构烷烃可以起源于不同的生物, 例如, 水生菌藻类、水生大型植物和陆源高等植物. 因此, 区分沉积物中不同成因的正构烷烃是其氢同位素研究的关键. 湖泊浅水湖岸地区容易接受陆源有机质, 沉积陆源正构烷烃丰富, 是研究沉积陆源正构烷烃氢同位素的有利地区. 一般来说, 不同季节生物的正构烷烃氢同位素组成存在差异, 并且秋季沉积物中正构烷烃氢同位素组成代表了植物叶类全年的氢同位素组成 (Sachse *et al.*, 2006). 青海湖位于青藏高原的东北部, 是一个封闭的高原内陆咸水湖泊, 湖区气候属于半干旱气候, 每年湖水的蒸发量大于补给量, 湖中含氧量极低, 浮游生物十分稀少, 具有特殊的生态环境. 本文对青海湖浅水湖岸地区表层沉积物和柱状沉积物进行了采集, 应用 GC-MS 和 GC-TC-IRMS 同位素分析技术, 对沉积物中单体正构烷烃及其氢同位素进行了分析, 研究了正构烷烃及其氢同位素的组成, 并且将沉积物的研究成果与以前对青海湖及其周围生物的研究成果进行了对比研究, 利用沉积正构烷烃氢同位素组成, 结合正构烷烃分布, 阐明了沉积正构烷烃和生物源之间的关系, 为沉积单体正构烷烃氢同位素的应用研究提供了科学依据.

1 样品与分析

表层样品采自于青海湖浅水湖岸地区, 在青海湖四周均有分布; 柱样品采自于青海湖西北地区 (图 1 和表 1). 这些样品于 2007 年和 2008 年 8 月, 用直径为 5 cm 的 PVC 管采集; 底层泥样深度大约 0~

3 cm; 柱样总长 50 cm, 每 10 cm 切成一个样品; 采样水深 70~100 cm. 青海湖位于青藏高原的东北部, 是构造断陷湖, 湖盆边缘多以断裂与周围山相接, 北面是大通山, 东面是日月山, 南面是青海南山, 西面是橡皮山, 海拔为 3 193 m. 青海湖是一个封闭的高原内陆湖泊, 周长 360 km, 面积达 4 260 km², 最大水深 26 m, 平均深度 16 m, 是我国最大的咸水湖. 湖水盐度平均为 14.2‰, pH 值 9.2, 湖中含氧量极低, 浮游生物十分稀少. 湖区年平均气温在 -1.3~0.5 °C, 西部和北部气温稍低. 气候属于高原半干旱气候, 全年降水量偏少, 年平均降水量为 323~384 mm, 东部和南部稍高于北部和西部; 全年蒸发量达 1 378~1 767 mm, 蒸发量远远超过降水量 (孙永亮等, 2007). 湖区有大小河流近 30 条流入湖内, 但是由于每年湖水的蒸发量大于补给量, 在近 30 多年间, 湖水平均每年下降 10 cm.

样品采取后低温保存. 分析时, 样品在室温下自然凉干并粉碎至 80 目. 粉碎的样品用二氯甲烷-甲醇 (2:1) 溶剂进行索氏抽提. 抽提物过滤后蒸发至干, 用氧化铝/硅胶柱色谱进行了分离, 饱和烃馏分用正己烷冲洗, 芳烃用二氯甲烷冲洗, 酮馏分用正己烷+10% 乙酸乙酯冲洗, 醇馏分用正己烷+20% 乙酸乙酯冲洗, 最后用甲醇冲洗.

饱和烃馏分用美国安捷伦科技公司 (Agilent) 制造的色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 进行分析鉴定. MS 为 5 973 N, 离子源温度为 250 °C, 电离电压为 70 eV. GC 为 6 890 N, 色谱柱为 HP-5 (30 × 0.32 mm), 固定相涂膜厚度 0.25 μm, 载气为 He, 起始温度 80 °C, 以 4 °C/min 升温至少 300 °C, 然后恒温 30 min.

饱和烃馏分在气相色谱-高温热转变-同位素比值质谱议 (GC-TC-IRMS) 上进行了单体正构烷烃

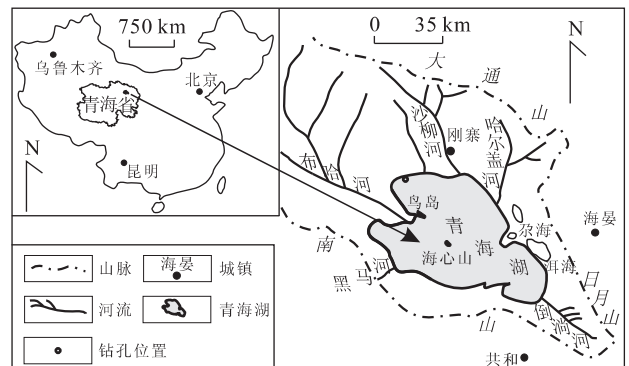


图 1 采样位置示意

Fig. 1 Collection sites for the studied samples

表 1 青海湖沉积物中正构烷烃参数

Table 1 Parameters of *n*-alkanes in the studied samples

样号	沉积物	深度(cm)	相对湖泊位置	坐标	碳数范围	C _{max}	ACL	CPI
表层沉积物								
QM-1	黑色泥	表层	北部	37°11' 15"N;100°04'38"E	C ₁₆ -C ₃₃	C ₂₇	27.9	4.5
QM-2	黑色泥	表层	西部	37°11' 48"N;99°49'34"E	C ₂₁ -C ₃₁	C ₂₉	27.9	8.0
QM-6	灰色泥	表层	北部	37°08' 18"N; 100°20'44"E	C ₁₆ -C ₃₁	C ₂₇	27.4	4.7
QM-9	灰色泥	表层	北部	37°11'15"N; 100°04'38"E	C ₁₇ -C ₃₃	C ₂₅	27.7	4.1
QM-13	灰色泥	表层	西部	36°54'06"N; 99°38 '01"E	C ₁₇ -C ₃₃	C ₂₇	27.8	5.7
QM-15	黑色泥	表层	东部	36°32'52"N; 100°41'27"E	C ₂₁ -C ₃₁	C ₂₉	28.0	5.2
QM-17	灰色泥	表层	南部	36°39'14"N; 100°16'16"E	C ₁₆ -C ₃₁	C ₂₇	27.5	4.0
QM-20	黑色泥	表层	南部	36°37' 59"N; 100°06'59"E	C ₁₆ -C ₃₁	C ₂₇	27.7	3.5
QH-2-3	黑色泥	表层	西部	36°54'06"N; 99°38 '01"E	C ₁₇ -C ₃₁	C ₂₇	27.1	4.9
柱状沉积物								
QZH-2-10	黑色泥	0~10	西部	37°11'48"N; 99°49'34"E	C ₁₇ -C ₃₃	C ₂₇	28.0	3.7
QZH-2-20	黑色泥	10~20	西部	37°11'48"N; 99°49'34"E	C ₁₇ -C ₃₁	C ₂₅	27.5	3.9
QZH-2-30	黑色泥	20~30	西部	37°11'48"N; 99°49'34"E	C ₁₉ -C ₃₁	C ₂₅	27.0	3.4
QZH-2-40	黑色泥	30~40	西部	37°11'48"N; 99°49'34"E	C ₁₉ -C ₃₃	C ₂₉	27.9	3.8
QZH-2-50	黑色泥	40~50	西部	37°11'48"N; 99°49'34"E	C ₁₉ -C ₃₃	C ₂₉	28.0	4.8

注: CPI = $[(C_{25} + C_{27} + \dots + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + \dots + C_{32}) + (C_{25} + C_{27} + \dots + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + \dots + C_{34})] / 2$; ACL = $[25(nC_{25}) + 27(nC_{27}) + 29(nC_{29}) + 31(nC_{31}) + 33(nC_{33})] / (nC_{25} + nC_{27} + nC_{29} + nC_{31} + nC_{33})$.

碳和氢同位素测定. 气相色谱仪为 Finnigan Combustion III 型, 同位素比值质谱仪为 Delta plus XP 型, 它们之间的高温热转变装置由 GC-CIII 接口连接. 单个化合物氢同位素测定是单个化合物经气相色谱分离后依次进入热解炉装置, 并在 1 440 °C 下定量分解转换为 H₂, 然后 H₂ 进入同位素比值质谱仪进行氢同位素组成的测定. 色谱柱为 SE-54(60 × 0.32 mm i. d. × 0.25 μm) 型熔融石英毛细柱, 载气为 He, 起始温度为 80 °C, 以 3 °C/min 升到 300 °C, 然后恒温 30 min. 质谱仪通过调谐使 H₃ 因子稳定在 5~10 左右; 大约每 6 个样品测定一次 H₃ 因子, 以观察仪器的稳定性和保证数据的可靠性. 实验中大约 4 次样品分析测定 1 次已知同位素组成的氢同位素标准(使用经典离线燃烧法测定 C₁₄、C₁₆、C₁₈、C₂₃、C₂₈ 和 C₃₂ 共 6 个烷烃化合物), 以保证氢同位素数据的重现性和准确性. 在每次样品分析中, 通过引入已知同位素组成的参考氢气来计算未知样品中单个化合物的氢同位素组成. 每个样品测定 1~3 次, 所有的 δD 值相对于 VSMOW 标准, 在测定化合物具有良好的色谱分离和适合的强度下, 大多数实测正构烷烃氢同位素分析标准偏差 < 5%.

2 结果与讨论

2.1 正构烷烃分布

对青海湖表层和柱状沉积物中正构烷烃进行了

分析, 结果列于表 1 和图 2、图 3. 青海湖表层和柱状沉积物中正构烷烃分布都是类似的, 碳数分布范围在 C₁₆~C₃₃ 之间, 呈单峰型分布, 主峰碳数除了 3 个样品为 C₂₅ 外, 其余样品均为 C₂₇ 和 C₂₉, 这与青海湖及其周围的生物中正构烷烃主峰碳数分布相类似(Duan and Wu, 2009). 所研究的沉积物样品中正构烷烃呈明显地奇偶优势分布, 碳优势指数 CPI 值在 QM-2 样品中为 8.0, 其他样品分布在 3.4~5.7 之间, 主要与青海湖周围陆生草本植物早熟禾中正构烷烃的 CPI 值(分布在 4.0~4.5 之间, 平均为 4.3) 相似(表 2). 同时, 沉积物中正构烷烃明显的奇偶优势说明其直接来自植物蜡质, 如果它们来自咸水沉积物中脂肪酸还原形成, 则一般呈现偶碳优势. 沉积物中正构烷烃的平均碳链长度 ACL 值为 27.0~28.0, 主要与青海湖周围陆生嵩草、早熟禾、豆黄花棘正构烷烃的平均 ACL 值(27.9~28.3) 更接近.

2.2 正构烷烃的氢同位素组成

青海湖是我国最大的内陆咸水湖泊, 湖泊沉积物中正构烷烃及其氢同位素组成特征的认识, 可以为有机地球化学应用研究提供科学依据. 青海湖表层沉积物中正构烷烃氢同位素组成分布在 -210.5‰~-112.7‰ 之间, 平均值为 -185.1‰~-132.7‰(表 3). 根据表层沉积物中正构烷烃平均 δD 值分布特征, 可以将表层沉积物划分为两类. QM-1、QM-2、QM-6、QM-17、QM-20 样品平均 δD 值较低, 小于 -156‰; QM-9、QM-13、QM-15、QH-2-3

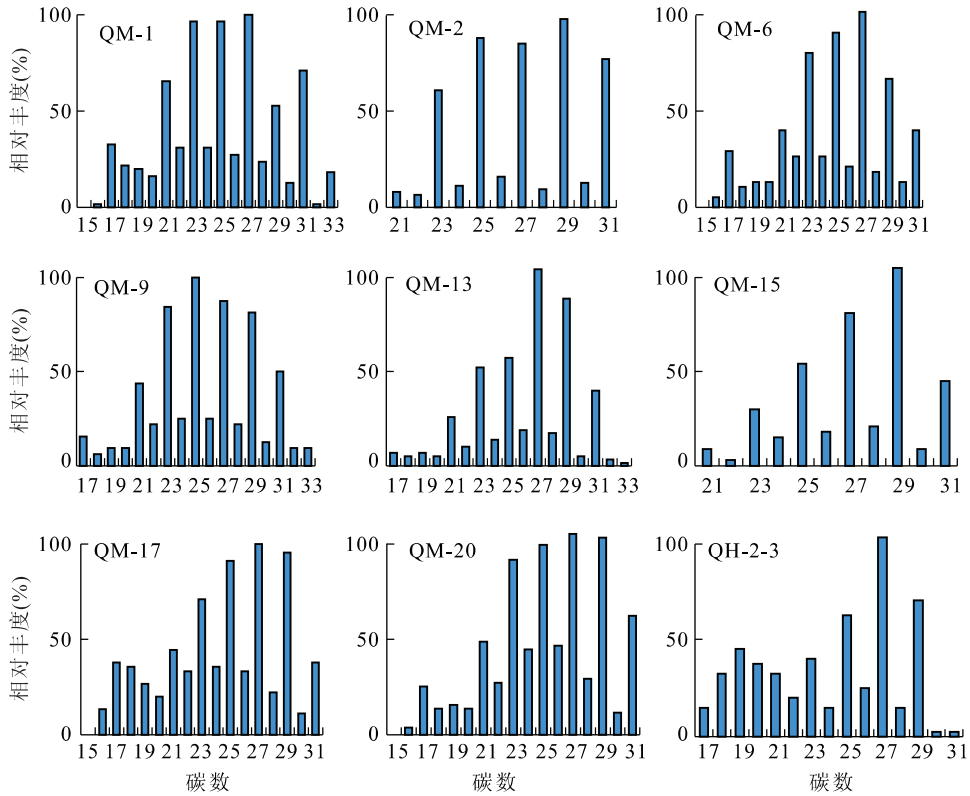


图 2 青海湖表层沉积物中正构烷烃分布

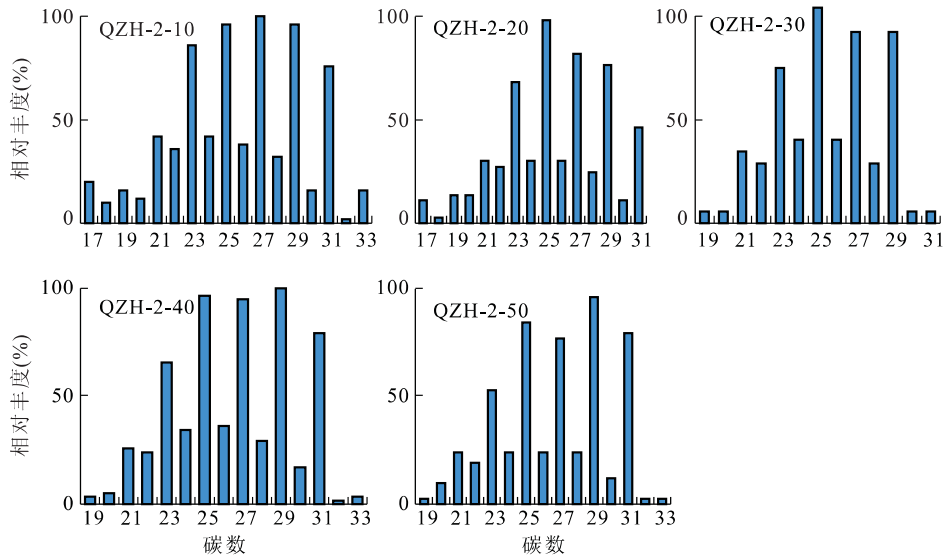
Fig. 2 Histograms of the molecular distributions of *n*-alkanes in the surface sediments from Qinghai Lake

图 3 青海湖柱状沉积物中正构烷烃分布

Fig. 3 Histograms of the molecular distributions of *n*-alkanes in the core sediments from Qinghai Lake

样品平均 δD 值较高, 大于 -152‰ 。表层沉积物中正构烷烃平均 δD 值分布表现为偶碳数正构烷烃重于奇碳数正构烷烃(图 4)。柱状沉积物样品中正构烷烃氢同位素组成特征与表层沉积物中的类似, 其 δD 值分布在 $-187.1\text{‰} \sim -120.7\text{‰}$ 之间, 平均值为

$-162.7\text{‰} \sim -142.4\text{‰}$ 。正构烷烃氢同位素组成随深度变化的特征是在 30 cm 处最重(表 3), 并且偶碳数正构烷烃平均氢同位素组成重于奇碳数正构烷烃(图 4)。如图 5 所示, 沉积物中正构烷烃氢同位素随着其平均碳链长度(ACL 值)增加, 具有变轻的趋

表 2 青海湖及其周围植物中正构烷烃参数和氢同位素组成平均值

Table 2 Mean parameters of *n*-alkanes and their hydrogen isotopic values in plants from Qinghai Lake and its surrounding areas

植物类型	样品数	平均 ACL	平均 CPI	平均 δD 值(‰)
水生眼子菜、绿藻	7 个	26.3	7.6	-130.2
水生海韭菜	3 个	28.4	18.4	-162.9
陆生蒿草	3 个	28.1	13.3	-138.1
陆生早熟禾	3 个	27.9	4.3	-165.0
陆生豆黄花棘	1 个	28.3	25.7	-164.5
陆生赖草	2 个	28.6	18.7	-149.9
陆生树叶	4 个	26.8	12.5	-121.7

势。ACL 值反映了植物叶蜡质层的特征,平均碳链长度增长、叶腊抵抗水蒸气扩散的能力增强、水分损失减少(Dodd and Poveda, 2003)、植物叶的正构烷烃氢同位素变轻。

2.3 正构烷烃的成因

青海湖(海拔为 3 193 m)地区生长的植物主要为草本植物,并且蒿草和早熟禾为优势种之一,树木植物极少。因此,青海湖沉积物中正构烷烃来源应该是陆生草本植物和水生生物。沉积物中正构烷烃的平均碳链长度 ACL 值为 27.0~28.0,平均为 27.6。青海湖水生眼子菜和绿藻的 ACL 值为 26.0~26.8,平均为 26.3,沉积物中正构烷烃的平均碳链长度 ACL 值与这类植物相差较大;青海湖周围陆生蒿草、早熟禾、豆黄花棘、赖草中正构烷烃的平均 ACL 值为 28.2,沉积物中正构烷烃的平均碳链长度 ACL 值与陆生草本植物的更接近。

已有研究表明,水体中沉积物的正构烷烃氢同位素组成反映了生物源的氢同位素组成,后者与古气候相关,因此沉积物的正构烷烃氢同位素组成可以指示古气候(Sachse *et al.*, 2004; Chikaraishi and Naraoka, 2006; Huang *et al.*, 2006)。研究发现,在潮湿气候环境下,水体氢同位素轻于入湖的河水时,水生生物成因的正构烷烃氢同位素组成轻于相同地区陆生生物成因的正构烷;可是,在半干燥至干燥气候环境下,水体氢同位素重于入湖的河水时,水生生物成因的正构烷烃氢同位素组成重于相同地区陆生生物成因的正构烷(Mügler *et al.*, 2008)。笔者的研究结果进一步证实了这一认识。青海湖地区属于干燥气候环境,湖水的氢同位素组成(平均 4.7‰)远重于入湖的河水(平均 -45.3‰),使水生眼子菜和绿藻中正构烷烃氢同位素组成重于陆生草(Duan

and Wu, 2009);并且水生绿藻和水生草中正构烷烃氢同位素分布形式与陆生植物的明显不同,前者 C_{23} 和 C_{25} 奇碳数相对相邻偶碳数明显地富集重同位素,后者则明显地富集轻同位素(图 6)。青海湖表层和柱状沉积物中正构烷烃氢同位素组成分布形式与陆生植物的相似,并且它们的 δD 值接近陆生草本植物(表 2 和表 3)。因此,从总体来看,青海湖表层和柱状沉积物中正构烷烃氢同位素特征反映了它们主要来自陆生草本植物。这与样品采集位置是一致的,因为样品来自于浅水湖岸地区,这里陆源沉积有机质丰富。生物化学研究认为,沉积物中不同碳数正构烷烃来自不同的生物源, C_{15} - C_{19} 正构烷烃主要来自菌藻类(Cranwell *et al.*, 1987; Meyers, 2003), C_{21} - C_{25} 正构烷烃主要来自水生沉浮生物(Baas *et al.*, 2000; Ficken *et al.*, 2000), C_{27} - C_{29} 正构烷烃主要来自陆生生物(Eglinton and Hamilton, 1967; Meyers, 2003)。所研究的表层沉积物中 C_{19} 正构烷烃 δD 值重于其他奇碳数正构烷烃(图 4),可能说明该化合物更多的来自湖泊中的绿藻,沉积物中其他正构烷烃 δD 值反映了它们主要来自陆生草本植物(图 4 和图 6)。从不同样品 δD 值分布来看,表层沉积物 QM-1、QM-2、QM-6、QM-17、QM-20 样品平均 δD 值较低,反映了这些样品中正构烷烃更多地来自陆生早熟禾和豆黄花棘;QM-9、QM-13、QM-15、QH-2-3 样品平均 δD 值较高,显示了这些样品中正构烷烃更多地来自陆生蒿草和赖草(表 2 和表 3)。由于所研究沉积物中正构烷烃氢同位素主要代表了陆生草本植物的氢同位素特征,因此它们的氢同位素主要受大气水的影响,以致它们的氢同位素可以反映古气候。这是因为植物的氢同位素组成与它们生长地区的降水中氢同位素有关,而降水中氢同位素组成主要受雨滴凝结时的温度和降水的水汽来源控制,明显表现为降水同位素组成因地理和气候因素差别而异。柱状沉积物样品中正构烷烃 δD 值随埋深的变化特征是先增加,后减少,在 30 cm 处最重(图 7)。这种变化的原因可能是:(1)气候变化所引起;(2)生物源不同所致。从柱状沉积物样品中正构烷烃 δD 值与 ACL 值随埋深呈相反方向变化的特征(图 7),可能说明柱状沉积物样品中正构烷烃 δD 值随埋深的变化是由生物源不同所致。这说明湖泊沉积物中正构烷烃氢同位素继承了其生物源的氢同位素特征,因此沉积物的正构烷烃 δD 值可以作为指示古气候的地球化学指标。

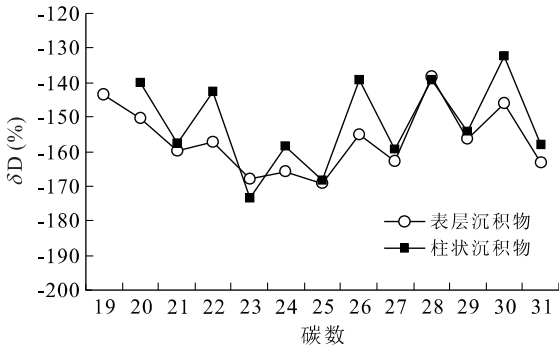


图 4 青海湖沉积物中正构烷烃平均 δD 值分布

Fig. 4 Histograms of the δD mean value distributions of n-alkanes in the sediments from Qinghai Lake

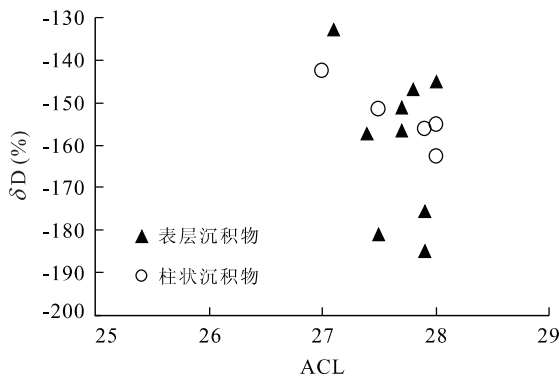


图 5 青海湖沉积物中正构烷烃平均 δD 值与 ACL 值相关图
Fig. 5 Cross plot of mean δD values vs. ACL values of n-alkanes in the studied samples

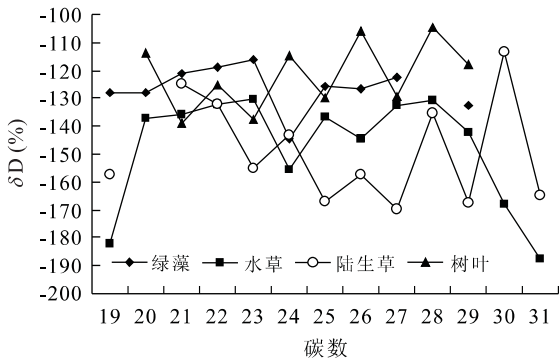


图 6 青海湖及其周围植物中正构烷烃平均 δD 值分布

Fig. 6 Histograms of the δD mean value distributions of n-alkanes in plants from Qinghai Lake and its surrounding areas

3 结论

为了认识咸水湖泊沉积物中生物标志化合物氢同位素组成及其与生物源关系,应用 GC-MS 和 GC-

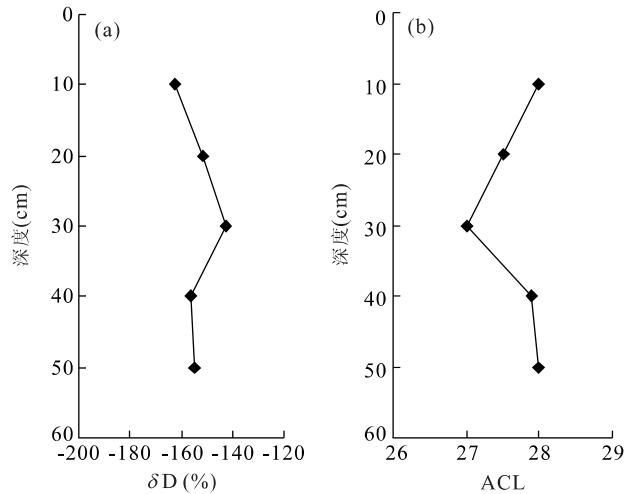


图 7 青海湖柱状沉积物中正构烷烃 δD 值(a)和 ACL(b)值随深度变化

Fig. 7 Cross plot of mean δD (a) and ACL (b) values of n-alkanes in the studied samples vs. depth

TC-IRMS 同位素分析技术,首次对青海湖表层和柱状沉积物中正构烷烃氢同位素进行了分析和研究。

研究表明,青海湖表层和柱状沉积物中正构烷烃分布都是类似的,碳数分布范围在 C₁₆~C₃₃ 之间,呈单峰型分布;主峰碳数为 C₂₅、C₂₇ 和 C₂₉;CPI 值主要分布在 3.4~5.7 之间;ACL 值为 27.0~28.0,主要与青海湖周围陆生草本植物的更接近。

青海湖表层沉积物中正构烷烃 δD 值分布在 -210.5‰~-112.7‰之间,平均值为 -185.1‰~-132.7‰;柱状沉积物样品中正构烷烃 δD 值分布在 -187.1‰~-120.7‰ 之间,平均值为 -162.7‰~-142.4‰。沉积物中正构烷烃平均 δD 值分布具有偶碳数正构烷烃重于奇碳数正构烷烃的特征,并且正构烷烃氢同位素随着其平均碳链长度 (ACL 值)的增加,具有变轻的趋势。

青海湖沉积物样品与其水生植物及周围陆生植物样品对比研究,表明沉积物样品中正构烷烃氢同位素的组成和分布特征主要与陆生草本植物的相似,反映了它们主要来自陆生草本植物,但是不同陆生草本植物种输入的差别在沉积物样品中也是存在的。柱状沉积物样品中正构烷烃 δD 值与 ACL 值随埋深呈相反方向的变化,可能反映了随埋深的变化生物源有所不同。

这些研究成果进一步证实了水体中沉积物的正构烷烃氢同位素组成反映了生物源的氢同位素组成,后者与古气候相关,因此沉积物的正构烷烃氢同位素组成可以指示古气候。

References

- Baas, M. , Pancost, R. , Van Geel, B. , et al. , 2000. A comparative study of lipids in Sphagnum species. *Organic Geochemistry*, 31(6): 535—541. doi: 10. 1016/S0146—6380(00)00037—1
- Bi, X. H. , Sheng, G. Y. , Liu, X. H. , et al. , 2005. Molecular and carbon and hydrogen isotopic composition of *n*-alkanes in plant leaf waxes. *Organic Geochemistry*, 36(10): 1405—1417. doi: 10. 1016/j. orggeochem. 2005. 06. 001
- Chikaraishi, Y. , Naraoka, H. , 2003. Compound-specific δD - $\delta^{13}C$ analyses of *n*-alkanes extracted from terrestrial and aquatic plants. *Phytochemistry*, 63(3): 361—371. doi: 10. 1016/S0031—9422(02)00749—5
- Chikaraishi, Y. , Naraoka, H. , 2005. $\delta^{13}C$ and δD identification of sources of lipid biomarkers in sediments of Lake Haruna (Japan). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(13): 3285—3297. doi: 10. 1016/j. gca. 2005. 02. 023
- Chikaraishi, Y. , Naraoka, H. , 2006. Carbon and hydrogen isotope variation of plant biomarkers in a plant-soil system. *Chemical Geology*, 231(3): 190—202. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2006. 01. 026
- Chikaraishi, Y. , Naraoka, H. , 2007. $\delta^{13}C$ and δD relationships among three *n*-alkyl compound classes (*n*-alkanoic acid, *n*-alkane and *n*-alkanol) of terrestrial higher plants. *Organic Geochemistry*, 38(2): 198—215. doi: 10. 1016/j. orggeochem. 2006. 10. 003
- Chikaraishi, Y. , Naraoka, H. , Poulson, S. R. , 2004. Hydrogen and carbon isotopic fractionations of lipid biosynthesis among terrestrial (C_3 , C_4 and CAM) and aquatic plants. *Phytochemistry*, 65(10): 1369—1381. doi: 10. 1016/j. phytochem. 2004. 03. 036
- Cranwell, P. A. , Eglinton, G. , Robinson, N. , 1987. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments II. *Organic Geochemistry*, 11(6): 513—527. doi: 10. 1016/0146—6380(87)90007—6
- Dawson, D. , Grice, K. , Wang, S. X. , et al. , 2004. Stable hydrogen isotopic composition of hydrocarbons in torbanites (Late Carboniferous to Late Permian) deposited under various climatic conditions. *Organic Geochemistry*, 35(2): 189—197. doi: 10. 1006/j. orggeochem. 2003. 09. 004
- Dodd, R. S. , Poveda, M. M. , 2003. Environmental gradients and population divergence contribute to variation in cuticular wax composition in *Juniperus communis*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 31(11): 1257—1270. doi: 10. 1016/S0305—1978(03)00031—0
- Duan, Y. , 2009. Compositions of *n*-alkanes and their hydrogen isotopes in plants from Qinghai Lake and its surrounding areas in China. *Organic Geochemistry* (in press).
- Duan, Y. , Wu, B. X. , 2009. Hydrogen isotopic compositions and their environmental significance for individual *n*-alkanes in typical plants from land in China. *Chinese Science Bulletin*, 54(3): 461—467. doi: 10. 1007/s11434—008—0443—x
- Eglinton, G. , Hamilton, R. J. , 1967. Leaf epicuticular waxes. *Science*, 156(3780): 1322—1335. doi: 10. 1126/science. 156. 3780. 1322
- Ficken, K. J. , Li, B. , Swain, D. L. , et al. , 2000. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 31(8): 745—749. doi: 10. 1016/S0146—6380(00)00081—4
- Huang, Y. S. , Shuman, B. , Wang, Y. , et al. , 2002. Hydrogen isotope ratios of palmitic acid in lacustrine sediments record Late Quaternary climate variations. *Geology*, 30(12): 1103—1106. doi: 10. 1130/0091—7613(2002)030<1103:HIROPA>2. 0. CO;2
- Huang, Y. S. , Shuman, B. , Wang, Y. , et al. , 2004. Hydrogen isotope ratios of individual lipids in lake sediments as novel tracers of climatic and environmental change; a surface sediment test. *Journal of Paleolimnology*, 31(3): 363—375. doi: 10. 1023/B: JOPL. 0000021855. 80535. 13
- Huang, Y. S. , Shuman, B. , Wang, Y. , et al. , 2006. Climatic and environmental controls on the variation of C_3 and C_4 plant abundances in Central Florida for the past 62 000 years. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 237(2—4): 428—435. doi: 10. 1016/j. palaeo. 2005. 12. 014
- Li, C. , Sessions, A. L. , Kinnaman, F. S. , et al. , 2009. Hydrogen-isotopic variability in lipids from Santa Barbara basin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16): 4803—4823. doi: 10. 1016/j. gca. 2009. 05. 056
- Li, M. W. , Huang, Y. S. , Obermajer, M. , et al. , 2001. Hydrogen isotopic compositions of individual alkanes as a new approach to petroleum correlation; case studies from the western Canada sedimentary basin. *Organic Geochemistry*, 32(2): 1387—1399. doi: 10. 1016/S0146—6380(01)00116—4
- Meyers, P. A. , 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, 34(2): 261—289. doi: 10. 1016/S0146—6380(02)00168—7

- Mügler, I., Sachse, D., Werner, M., et al., 2008. Effect of lake evaporation on δD values of lacustrine *n*-alkanes; a comparison of Nam Co (Tibetan Plateau) and Holzmaar (Germany). *Organic Geochemistry*, 39(6): 711–729. doi: 10.1016/j.orggeochem.2008.02.008
- Sachse, D., Radke, J., Gleixner, G., 2004. Hydrogen isotope ratios of recent lacustrine sedimentary *n*-alkanes record modern climate variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(23): 4877–4889. doi: 10.1016/j.gca.2004.06.004
- Sachse, D., Radke, J., Gleixner, G., 2006. δD values of individual *n*-alkanes from terrestrial plants along a climatic gradient-implications for the sedimentary biomarker record. *Organic Geochemistry*, 37(4): 469–483. doi: 10.1016/j.orggeochem.2005.12.003
- Sauer, P. E., Eglinton, T. I., Hayes, J. M., et al., 2001. Compound-specific D/H ratios of lipid biomarkers from sediments as a proxy for environmental and climatic conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(2): 213–222. doi: 10.1016/S0016-7037(00)00520-2
- Seki, O., Meyers, P. A., Kawamura, K., et al., 2009. Hydrogen isotopic ratios of plant wax *n*-alkanes in a peat bog deposited in Northeast China during the last 16 kyr. *Organic Geochemistry*, 40(6): 671–677. doi: 10.1016/j.orggeochem.2009.03.007
- Sessions, A. L., 2006. Seasonal changes in D/H fractionation accompanying lipid biosynthesis in *Spartina alterniflora*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(9): 2153–2162. doi: 10.1016/j.gca.2006.02.003
- Sun, Y. L., Li, X. Y., Xu, H. Y., 2007. Daily precipitation and temperature variations in Qinghai Lake watershed in recent 40 years. *Arid Meteorology*, 25(1): 7–13 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S., Nott, C. J., Avsejs, L. A., et al., 2000. Palaeoclimate records in compound-specific δD values of a lipid biomarker in ombrotrophic peat. *Organic Geochemistry*, 31(10): 1053–1057. doi: 10.1016/S0146-6380(00)00116-9
- Xiong, Y. Q., Geng, A. S., Pan, C. C., et al., 2004. Hydrogen isotopic compositions of individual (*n*-alkanes) in terrestrial source rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 31(1): 60–63 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Huang, Y. S., 2003. Preservation of lipid hydrogen isotope ratios in Miocene lacustrine sediments and plant fossils at Clarkia, northern Idaho, USA. *Organic Geochemistry*, 34(3): 413–423. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00212-7

附中文参考文献

- 孙永亮, 李小雁, 许何也, 2007. 近 40a 青海湖流域逐日降水和气温变化特征. *干旱气象*, 25(1): 7–13.
- 熊永强, 耿安松, 潘长春, 等, 2004. 陆相有机质中单体烃的氢同位素组成特征. *石油勘探与开发*, 31(1): 60–63.