

湖泊沉积物纤维素氧同位素研究进展

朱正杰^{1,2,3}, 任世聪^{2,3}, 李航^{2,3}, 李妍均^{2,3}, 陈敬安¹

1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 重庆地质矿产研究院, 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室, 重庆 400042;

3. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室重庆研究中心, 重庆 400042

摘要:纤维素作为湖泊沉积物有机质的重要组成部分, 其氧同位素组成已逐渐应用在中古气候、古环境重建中。本文综述了湖泊沉积物纤维素氧同位素在中古气候研究中的进展, 包括纤维素的实验提取方法、纤维素及其寄宿水体之间的氧同位素分馏系数, 以及纤维素氧同位素在定量中古气候参数方面的应用, 并展望了未来的研究趋势。研究表明, 纤维素结合碳酸盐氧同位素组成可能是一种潜在的定量古温度指示剂, 可能在未来的湖泊沉积中发挥极大作用。因此, 今后的有关研究可能集中在定量中古气候参数上的应用。

关键词:纤维素; 氧同位素; 定量; 中古气候

中图分类号: P593 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2011)02-0198-06

Research Progress on the Oxygen Isotope Composition of Cellulose from Lacustrine Sediments

ZHU Zheng-jie^{1,2,3}, REN Shi-cong^{2,3}, LI Hang^{2,3}, LI Yan-jun^{2,3}, CHEN Jing-an¹

1. *The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;* 2. *Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;*

3. *Chongqing Research Center of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Chongqing 400042, China*

Abstract: Cellulose is an important component of organic matter in the lake sediments, its oxygen isotope composition has been extensively used in paleoclimate and paleoenvironment reconstructions. This paper reviewed research advances of the oxygen isotope composition of cellulose, including the method of extracting cellulose from lake sediments, the isotope fractionating between cellulose and surrounding waters, and its applications of quantitative reconstructing paleoclimate parameters. Some studies had revealed that the correlation of $\delta^{18}\text{O}$ values in cellulose and in carbonate may be a potential temperature indicator, and may play an important role in future paleoclimatic research. Therefore, studies on oxygen isotope of cellulose in the future should be centred on quantification.

Key words: cellulose; oxygen isotope; quantify; paleoclimatic

自上世纪 50 年代学术界提出氧同位素古温度计理论以来^[1~4], 湖泊沉积物氧同位素已经大量地应用在中古气候和古环境的研究中(如古温度和干湿变化的恢复); 实验的样品主要是碳酸盐和硅藻。1989 年, Edwards 和 McAndrews^[5] 用湖泊沉积物有机质纤维素氧同位素组成来恢复 Shield 湖地区全新世中古气候和古水文变化以来, 纤维素稳定同位

素逐渐被推广应用于中古气候、古环境的重建, 特别是对沉积物中缺少碳酸盐和硅藻的湖泊颇为有效。目前, 这一方法在中古气候、古环境定性和定量研究中显示了很大的潜力和优势, 但相关的研究还存在一些难点。本文综述了湖泊沉积物纤维素氧同位素的研究进展, 指出可能的研究方向, 为深入开展湖泊沉积物纤维素氧同位素研究提供参考。

收稿日期: 2010-08-30 收到, 10-20 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40673068); 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403201)

第一作者简介: 朱正杰(1984—), 男, 博士, 从事湖泊沉积与全球气候变化研究. E-mail: zhuzhjie@163.com.

通讯作者: 陈敬安(1973—), 男, 研究员, 博导, 主要从事湖泊沉积环境记录研究. E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn.

1 纤维素提取和氧同位素分析方法

纤维素是植物体中含量丰富的有机组分之一,存在于细胞壁中,含量约占有机质的1%~10%。目前国内对湖泊沉积物纤维素稳定同位素在古气候、古环境定性和定量的研究并不很多,特别是国内仅见有泸沽湖沉积物纤维素碳同位素的研究工作^[6]。究其原因,主要是湖泊沉积物有机质纤维素的含量低,提纯工作困难重重,已有的纤维素提取流程复杂,难以满足同位素测试的要求。而提纯工作是研究古气候的必要前提,是很重要的一个步骤。

植物组织中的纤维素,除存在于植物残体(如泥炭和树木残体)外,在有机质含量较高的湖泊沉积物中,还会以分散细粒形式存在于藻类细胞、浮游动物排泄物和无定形有机质中存在^[5~10]。此前的提取工作是依据 Green 等人^[11~13]提出的方法建立的,但相对于树轮和泥炭而言,湖泊沉积物因含有机质较少,增加了提取的难度。为此,陈毅凤等人^[6]建立了纤维素的提取方法,包括碱洗、酸洗、有机溶剂萃取(苯和甲醇 2:1 及丙酮)、ZnCl₂ 重液分离有机质、冰醋酸、饱和次氯酸钠溶液漂白样品、17% 的 NaOH 溶液碱洗和冷冻干燥样品。Wolfe 等人^[9,10,14]建立的一套提取流程包括酸洗、过筛、有机质萃取、漂白、碱洗、氢氧化物去除和重液浮选,以及纤维素提取方法^[15]基本是围绕上述方法进行的。上述两种方法的实验流程都比较复杂,有机质萃取(包括索氏抽提)耗时,样品损失量大,而且目前尚未有合适的重液浮选纯的纤维素;一般所用的重液(多聚钨酸钠)价格昂贵^[9,10]。因此,提纯工作和同位素分析方法制约了纤维素稳定同位素在古环境、古气候重建中的应用。

纤维素氧同位素测试最早采用的方法是高温镍管热解法^[17~19],需要的样品量较大。随着连续流质谱的开发,测试精度高、样品量少和较易操作的流程已成为测定纤维素氧同位素的理想方法。

为了解决纤维素的提取问题,笔者等经过反复实验,建立了一套有效的四阶段纤维素提取流程:5% NaOH 碱洗,5% HCl 酸洗,亚氯酸钠和冰醋酸漂白,以及 17.5% NaOH 碱洗(图 1)。实验产物的红外光谱分析显示,它与标准纤维素谱线图一致,表明提取物是纯的纤维素^[16]。此方法与前人的流程对比,无需重液浮选,简便易行,为推广工作奠定了基础。

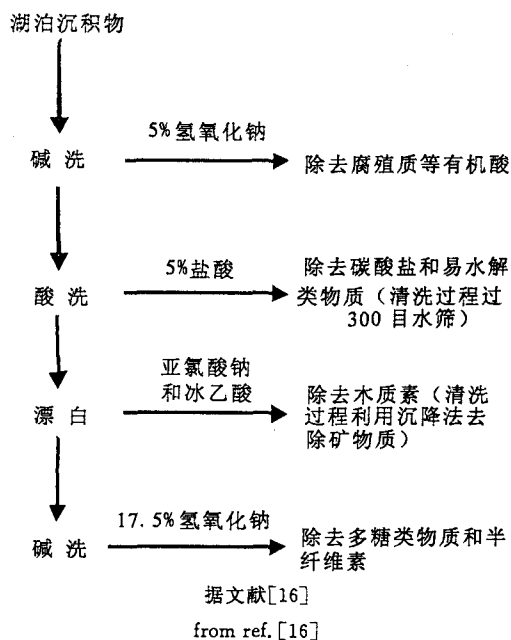


图 1 湖泊沉积物纤维素提取实验流程图

Fig. 1 The experimental procedures for extracting cellulose from lake sediments

2 纤维素和水体氧同位素分馏系数

纤维素是由右旋葡萄糖分子链接而成的大分子聚合物,结合在纤维素碳链上的氢、碳和氧原子的同位素组成在植物的腐烂分解过程中,同位素组成不再进一步发生明显交换,从而保存了纤维素生成时的气候环境条件信息^[12]。因此,沉积物 α -纤维素的稳定同位素能真实地反映原始环境信息,是研究古气候的理想材料。在利用纤维素氧同位素进行古气候研究时,最重要的结论是纤维素氧同位素能够定量恢复历史时期湖水的氧同位素组成。研究表明,水生植物纤维素氧同位素与其生长介质的氧同位素分馏系数是一常数^[20~25](表 1)。不同学者给出了不同的解释,归纳起来主要有两种。Epstein 等人^[20]认为水生植物合成纤维素时所需的氧来自其生长环境的水介质和溶于水中的 CO₂,因此根据 CO₂ 与 H₂O 之间的分馏系数算出了纤维素比其寄宿主体的氧同位素偏重 27‰,是一个常数。但是这以观点遭到多数学者的反对,一个很明显的问题是 CO₂ 与 H₂O 之间的分馏系数受温度的影响,而纤维素与其寄宿主体之间的氧同位素不受温度的影响^[21]。另一种观点认为纤维素氧同位素组成主要受纤维素合成过程中羰基水合作用的影响,羰基和水中的氧同位素交换过程是不受温度控制的。实验表明,羰基和水中的氧同位素分馏系数为 1.025~1.030,与纤维素和水体之间的氧同位素分馏系数一

致^[21~24]。因此,湖泊水生植物(含藻类)纤维素氧同位素只受水体氧同位素组成和纤维素合成过程中的氧同位素生物化学分馏控制。培养实验或野外实验给出了纤维素合成过程中与水体的氧同位素分馏系数(表 1),这个值非常稳定,约为 1.028 ± 0.0002 ($\alpha = R_{\text{cellulose}}/R_{\text{water}}$ 。 $R_{\text{cellulose}}$ 代表纤维素 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 值, R_{water} 代表水体 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 值),且不受植物种类、光合作用模式、水体温度等因素影响^[9,10,20~26]。显然,水体氧同位素组成事实上直接决定了湖泊水生植物纤维素氧同位素的组成。反之,湖泊水生植物纤维素

氧同位素则可靠记录了湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化。为了进一步揭示水生植物能在多高精度上记录水体 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化, Sauer 等人^[18] 分别在具不同氧同位素组成的水体中培植水生苔藓, 研究表明, 新生长苔藓的纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 与水体 $\delta^{18}\text{O}$ 呈出非常好的线性关系, $\delta^{18}\text{O}_{\text{cellulose}} = 0.882 \delta^{18}\text{O}_{\text{water}} + 28.3\text{‰}$, 两者的相关系数高达 0.9997, 误差仅为 0.2‰(图 2)。这进一步证实了水生植物纤维素氧同位素可定量记录湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化。这就证明湖泊沉积物中的水生植物纤维素氧同位素能指示湖水的氧同位素组成。

表 1 不同植物纤维素与其生存介质水的氧同位素分馏系数

Table 1 The oxygen isotope fractionation between cellulose and waters in the different types of plant

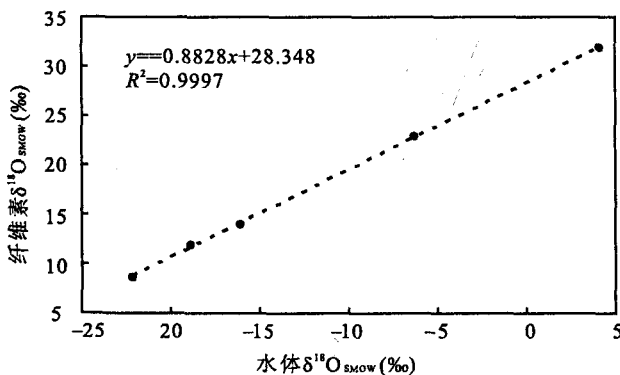
Freshwater plants	Field or Laboratory	t/°C	$\alpha_{\text{cell-water}}$	资料来源
<i>Ceratopteris sp.</i>	L(水芹)	20	1.0292	文献[22]
<i>Cryptocoryne sp.</i>	L(椒草)	25	1.0289	文献[22]
<i>Isoetes howellii</i>	L(Submerged Aquatic CAM Plant)	25	1.0290	文献[13]
<i>Vallisneria spiralis</i>	L(水蓴)	25	1.0285	文献[13]
<i>Chara contraria</i>	L(对枝轮藻)	25	1.0280	文献[13]
Green algae	F		1.0294	文献[25]
Aquatic moss	F		1.0287	文献[14]
<i>Eicchornia</i>	F		1.0278	文献[23]
<i>Sphagnum sp.</i>	F(水藓)		1.0260	文献[26]
<i>Eicchornia-leaves</i>	F		1.0255	文献[26]

湖泊沉积物有机质纤维素主要源于湖泊中的水生植物和藻类,因其较难降解而常以细粒分散的形式保存于藻类细胞、浮游动物排泄物和无定形有机质中^[5,9],成为湖水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的忠实记录。但在应用之前必须首先确定沉积物有机质确实是来源于湖泊水生植物,因为陆源植物合成纤维素的氧与湖水

无关^[9]。沉积物中有机质的 C/N 值可有效指示有机质的来源:湖泊水生植物 C/N 值一般小于 10,而陆源有机质则通常大于 20^[27~29]。此外,还可用有机质和纤维素碳同位素的相关性进一步确定湖泊沉积物有机质的来源^[9]。

3 定量古气候

湖泊沉积物纤维素氧同位素虽然可以用来测知历史时期的湖水氧同位素组成,但由于影响湖水氧同位素组成因素的复杂性^[30]:主要受大气降水氧同位素组成、入湖径流及其同位素组成、蒸发强度,以及湖泊水文条件等因素影响,而且这些因素在不同历史时期往往有不同的表现^[30~32],造成了与碳酸盐氧同位素指标一样,只能定性地恢复古气候信息。而在用碳酸盐氧同位素进行古气候解释时,往往不得不出种种假设和推定,或通过多种指标进行综合判断,使所获的古气候信息成为定性的指标。如湖水寄宿时间较长的封闭湖泊,湖水氧同位素主要受降水/蒸发比的影响,碳酸盐氧同位素在一定程度上只能反映湖区的干湿变化^[31~34];在湖水寄宿时间较短的开放型湖泊,蒸发作用对湖水氧同位素的影响较小,碳酸盐氧同位素可反映大气降水氧同位素



据文献[14]

from ref. [14]

图 2 苔藓纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 与水体 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关关系

Fig. 2 The correlation between $\delta^{18}\text{O}$ values of moss cellulose and the water

变化;中高纬度地区因大气降水氧同位素与气温呈正相关关系^[35-37],碳酸盐氧同位素还可进一步指示气温的变化^[38,39]。

研究证实湖泊自生碳酸盐在沉淀时通常与水体能达到氧同位素平衡^[30,31,40,41],其氧同位素组成受沉淀时水体氧同位素组成和水体温度的控制。研究人员已建立了一些碳酸盐氧同位素、水体氧同位素与温度之间的定量方程,目前普遍采用的是 Craig 方程^[30,42]:

$$t(^{\circ}\text{C}) = 16.0 - 4.14(\delta_c - \delta_w) + 0.13(\delta_c - \delta_w)^2$$

式中, t 为水体温度, δ_c 为碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB 标准), δ_w 为水体 $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW 标准)。

从 Craig 方程的简单计算可见,当水体氧同位素组成不变时,温度每升高 1°C ,碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低约 0.24% ,这一结论至今被广泛使用。

尽管碳酸盐氧同位素古温度计理论和 Craig 方程早已建立,目前用湖泊沉积物碳酸盐氧同位素进行古气候的研究仍基本处于定性阶段,其原因也在于影响湖水氧同位素组成的因素的复杂多变^[30],而且这些环境因素对湖水氧同位素的影响在湖泊的不同历史演化时期往往是不同的^[30-32]。一些研究者则尝试以物理模型等手段用碳酸盐氧同位素来定量恢复古气候。如研究若尔盖盆地碳酸盐氧同位素记录时,从湖泊水体氧同位素平衡方程和相关的盐量平衡方程入手,建立了用碳酸盐氧同位素和古盐度求解湖水古温度的物理模型,恢复了 200 ka 以来的气温变化^[43]。但这种模型必须依靠已有的古盐度序列,而且有很多假设条件,如假定过去 200 ka 湖泊的水位稳定、湖水蒸发/入流比为 $0.9\sim 1.1$ 。事实上,一个湖泊在过去二十万年中没有水位波动是不太可能的。因此这种模型与实际情况有相当的差距。也有人通过介形虫壳体的 Sr/Ca 值与水体氧同位素的关系,以测定 Sr/Ca 值来恢复历史时期的湖水氧同位素组成,进而定量古温度的变化^[44];实质上由于实验与湖泊的自然变化是有很大差别的,所得出的结果自然也不甚理想。

综上所述,湖水氧同位素的多因素控制极大地限制了湖泊碳酸盐氧同位素和纤维素氧同位素在定量重建古气候的应用,要想在定量研究方面取得实质性的突破,必须有新的思路。显然,湖水氧同位素信息进行古气候解释时同样会受到湖水氧同位素多因素控制的困扰,单纯依靠纤维素氧同位素恢复的湖水氧同位素变化历史也只能作定性的推断。但

是,利用碳酸盐与纤维素氧同位素结合 Craig 方程,可能是恢复古温度变化的有效手段。近年来,这方面有一些有益的尝试。如利用贵州草海沉积物纤维素和碳酸盐氧同位素组成恢复古温度变化历史,表明在过去 500 a 间草海地区曾有 4 个明显的冷期,其中有 3 个可对应传统意义上的小冰期^[45-47]。此外,利用程海现代沉积物碳酸盐和水生植物纤维素氧同位素估算了碳酸盐沉淀时的温度大约为 20°C ,与程海地区夏季平均温度是一致的^[41]。还有人利用碳酸盐-纤维素和硅藻-纤维素氧同位素古温度计,证实了早全新温度比晚新仙女木高^[48]。这些研究都佐证了纤维素结合其他介质氧同位素组成可能是一种潜在的定量古温度指示剂。

4 研究展望

连续流质谱仪等高端仪器已应用于湖泊沉积物纤维素氧同位素的古气候、古环境重建工作。纤维素的提取方法也渐趋成熟,未来的研究侧重于湖泊沉积物有机质含量低的湖泊,使湖泊沉积物纤维素稳定同位素能广泛应用于各类湖泊。加强实验室条件下培植水生植物,可以进一步确认纤维素及其寄宿水体的氧同位素分馏系数。

当前古气候研究正从定性认识逐步转向气候要素的定量/半定量恢复,利用广布的湖泊沉积来定量/半定量恢复古气候是湖泊沉积记录研究的热点。前期研究主要考虑湖泊沉积物自生碳酸盐和硅藻的氧同位素组成。由于湖泊自生碳酸盐氧同位素组成和硅藻氧同位素组成同时受湖水氧同位素组成和湖水温度控制,目前还无法将两者对碳酸盐氧同位素的影响相区分,因此极大地限制了碳酸盐氧同位素在古气候定量/半定量重建方面的应用。纤维素结合碳酸盐氧同位素组成可能是一种潜在的定量古温度指示剂,在今后的湖泊沉积物研究中发挥极大作用;相信通过与各种古气候代用指标(如文献记录、石笋、泥炭等)的对比研究,发挥纤维素氧同位素指标在定量方面的优越性,一定能够实现量化的古气候、古环境研究。

参考文献 (References):

- [1] Urey H C. The thermodynamic properties of isotopic substances[J]. J. Chem. Soci., 1947, 108: 562-581.
- [2] McCrea J M. On the isotopic chemistry of carbonates and palaeo-temperature scale[J]. J. Chem. Phys., 1950, 18: 849-857.
- [3] Urey H C, Lowenstam H A, Epstein S, McKinney C R. Measurement of palaeotemperatures and temperatures of the

- upper cretaceous of England, Denmark and southeastern United States[J]. *Geol. Soci. Amer. Bull.*, 1951, 26: 399-416.
- [4] Epstein S, Buchsbaum R, Lowenstam H A, Urey H C. Revised carbonate-water isotopic temperature scale[J]. *Geol. Soci. Amer. Bull.*, 1953, 62: 417-426.
- [5] Edwards T W D, McAndrews J H, Paleohydrology of a Canadian Shield lake inferred from $\delta^{18}\text{O}$ in sediment cellulose[J]. *Canadian J. Earth Sci.*, 1989, 26: 1850-1859.
- [6] 陈毅凤, 万国江. 泸沽湖沉积物 α -纤维素的提取及其稳定碳同位素研究初探[J]. *地质地球化学*, 1999, 4(27): 72-76. Chen Yifeng, Wan Guojiang. Extraction of cellulose from Lugu lake sediments and its stable carbon isotope[J]. *Geol. Geochem.*, 1999, 4(27): 72-76. (in Chinese with English abstract)
- [7] Bourbonniere R A, Meyers P A. Characterization of sedimentary humic matter by alkaline hydrolysis[J]. *Organic Geochem.*, 1983, 5: 131-142.
- [8] Wolfe B B, Edwards T W D, Aravena R. Rapid holocene hydrologic change along boreal treeline revealed by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in organic lake sediments, Northwest Territories, Canada[J]. *J. Paleolim.*, 1996, 15: 171-181.
- [9] Wolfe B B, Aravena R, Abbott M B, Seltzer G O, Gibson J J. Reconstruction of paleohydrology and paleohumidity from oxygen isotope records in the Bolivian Andes[J]. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoeco.*, 2001, 176: 177-160.
- [10] Wolfe B B, Falcone M D, Edwards T W D. Cellulose extraction from lake sediments for $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ analysis [M]. Waterloo: University of Waterloo, 2005.
- [11] Green J W. Wood cellulose [M]. New York: Academic Press, 1963: 9-20.
- [12] Yapp C J, Epstein S. A reexamination of cellulose carbon-bound hydrogen δD measurements and some factors affecting plant-water D/H relationships[J]. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 1982, 46: 955-965.
- [13] Sternberg L S L, DeNiro M J, Johnson H B. Isotope ratios of cellulose from plants having different photosynthetic pathways[J]. *Plant Physiol.*, 1984, 74: 557-561.
- [14] Sauer P E, Miller G H, Overpeck J T. Oxygen isotope ratios of organic matter in arctic lakes as a paleoclimatic proxy: field and laboratory investigations [J]. *J. Paleolim.*, 2001, 25: 43-64.
- [15] Kitagawa H, Tareq S M, Matsuzaki H, Inoue N, Tanoue E, Yasuda Y. Radiocarbon concentration of lake sediment cellulose from Lake Erhai in southwest China [J]. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2007, 259: 526-529.
- [16] 朱正杰, 陈敬安. 湖泊沉积物 α -纤维素提取方法[J]. *沉积学报*, 2009, 27(3): 36-39. Zhu Zhengjie, Chen Jing'an. The method of α -cellulose extraction from lake sediments[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(3): 36-39. (in Chinese with English abstract)
- [17] Edwards T W D, Buhay W M, Elgood R J, Jiang H B. An improved nickel-tube pyrolysis method for oxygen isotope analysis of organic matter and water[J]. *Chem. Geol.*, 1994, 114: 179-183.
- [18] Sauer P E, Sternberg L S L. Improved method for the determination of oxygen isotopic composition of cellulose[J]. *Anal. Chem.*, 1994, 66: 2409-2411.
- [19] 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 洪冰, 曾毅强, 李汉鼎, 冷雪天, Edwards T W D, Buhay W M, Elgood R J. 近 5 ka 温度的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(6): 525-530. Hong Yetang, Jiang Hongbo, Tao Faxiang, Hong Bing, Zeng Yiqiang, Li Handing, Leng Xuettian, Edwards T W D, Buhay W M, Elgood R J. The $\delta^{18}\text{O}$ temperature record of peat from Jinchuan for recent 5ka[J]. *Sci. China (series D)*, 1997, 27(6): 525-530. (in Chinese)
- [20] Epstein S, Thompson P, Yapp C J. Oxygen and hydrogen isotopic ratios in plant cellulose[J]. *Science*, 1977, 198: 1209-1215.
- [21] Yakir D. Variations in the natural abundance of oxygen-18 and deuterium in plant carbohydrates[J]. *Plant Cell Environ.*, 1992, 15: 1005-1020.
- [22] DeNiro M J, Epstein S. Isotopic composition of cellulose from aquatic organisms[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1981, 45: 1885-1894.
- [23] Benuing K R M, Kelts K, Ito E, Johnson T C. Paleohydrology of Lake Victoria, East Africa, inferred from $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in sediment cellulose[J]. *Geology*, 1997, 25: 1083-1086.
- [24] Wolfe B B, Edwards T W D. Hydrologic control on the oxygen-isotope relation between sediment cellulose and lake water, western Taimyr Peninsula, Russia; Implications for the use of surface-sediment calibrations in paleolimnology[J]. *J. Paleolimnology*, 1997, 18: 283-291.
- [25] Abbott M B, Wolfe B B, Aravena R, Wolfe A P, Seltzer G O. Holocene hydrological reconstructions from stable isotopes and paleolimnology, Cordillera Real, Bolivia[J]. *Quaternary Sci., Rev.*, 2000, 19: 1801-1820.
- [26] Aucour A M, Marcel C H, Bonnefille R. Oxygen isotopes in cellulose from modern and Quaternary intertropical peatbogs: implications for palaeohydrology [J]. *Chem. Geol.*, 1996, 129: 341-359.
- [27] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochem.*, 1997, 27: 213-250.
- [28] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. *Organic Geochem.*, 1993, 20: 867-900.
- [29] Dean W E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments[J]. *J. Paleolim.*, 1999, 21: 375-393
- [30] Leng M J, Marshall J D. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives[J]. *Quaternary Sci., Rev.*, 2004, 23: 811-831.
- [31] Talbot M R. A review of the palaeohydrological interpreta-

- tion of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates[J]. *Chem. Geol.*, 1990, 80: 261-279.
- [32] Anderson L, Abbott M B, Finney B P, Burns S J. Regional atmospheric circulation change in the north Pacific during the Holocene inferred from lacustrine carbonate oxygen isotopes, Yukon Territory, Canada[J]. *Quaternary Res.*, 2005, 64: 21-35.
- [33] Frogley M R, Tzedakis P C, Heaton T H E. Climate variability in Northwest Greece during the last interglacial[J]. *Science*, 1999, 285: 1886-1889.
- [34] 朱正杰, 莫建兵, 张维, 陈敬安, 曾艳. 贵州草海沉积物纤维素氧同位素研究及其古环境意义[J]. *地球与环境*, 2010, 38: 8-13.
Zhu Zhengjie, Mo Jianbing, Zhang Wei, Chen Jing'an, Zeng Yan. Oxygen isotopic composition of cellulose in sediments from Lake Caohai, and its paleoenvironmental implications [J]. *Earth and Environ.*, 2010, 38: 8-13. (in Chinese with English abstract)
- [35] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16: 436-468.
- [36] 罗维均, 王世杰, 刘秀明. 中国大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 区域特征及其对古气候研究的意义[J]. *地球与环境*, 2008, 36(1): 47-55.
Luo Weijun, Wang Shijie, Liu Xiuming. $\delta^{18}\text{O}$ values and implications for paleoclimate research in China[J]. *Earth and Environ.*, 2008, 36(1): 47-55. (in Chinese with English abstract)
- [37] 郑淑惠, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧同位素研究[J]. *科学通报*, 1983, 28(13): 801-806.
Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. Study on the hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation in China[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 1983, 13: 39-41. (in Chinese)
- [38] Yu Z C, Eicher U. Abrupt climate oscillations during the last deglaciation in central North America[J]. *Science*, 1998, 282: 2235-2238.
- [39] Anderson L, Abbott M B, Finney B P. Holocene climate inferred from oxygen isotope ratios in lake sediments, central Brooks Range, Alaska[J]. *Quaternary Res.*, 2001, 55: 313-321.
- [40] Zhu Z J, Chen J A, Li J, Zeng Y, Li J, Wang J F, Qi L. Synchronous variations of precipitation and temperature at Lake Qinghai, NE Tibetan Plateau during the past 800 years and their relations to solar activity: evidence from Li/Ca ratios and $\delta^{18}\text{O}$ values of ostracod shells[J]. *Climate of the Past Discussions*, 2009, 14: 1493-1520.
- [41] 朱正杰, 陈敬安. 程海沉积物碳酸盐来源辨识[J]. *湖泊科学*, 2009, 21: 382-386.
Zhu Zhengjie, Chen Jing'an. Distinguishing the source of carbonates from lake sediments of Lake Chenghai, Yunnan Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21: 382-386. (in Chinese with English abstract)
- [42] Craig H. The measurement of oxygen isotope palaeotemperatures[A]. In: Tongiorgi E (Ed.), *Stable isotopes in oceanographic studies and palaeotemperatures*[C]. Pisa, Consiglio Nazionale delle Ricerche Laboratorio di Geologia Nucleare, 1965: 161-182.
- [43] 吴敬禄, Schleser G H, 王苏民, Lücke A, 李世杰, 夏威夷, 施雅风. 若尔盖盆地 200 ka 以来氧同位素记录的古温度定量研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2000, 30(1): 73-80.
Wu Jinglu, Schleser G H, Wang Sumin, Lücke A, Li Shijie, Xia Weilang, Shi Yafeng. Quantitative recuperation of climatic sequences for the last 200 years in Xingcuo Lake, eastern Tibetan Plateau[J]. *Science in China (series D)*, 2000, 30(1): 73-80. (in Chinese)
- [44] 沈吉, 王苏民, 朱育新, Matsumoto R. 内蒙古岱海古水温定量恢复及古气候意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31: 1017-1023.
Shen Ji, Wang Sumin, Zhu Yuxin, Matsumoto R. Quantitative reconstruction of the lake water paleotemperature of Daihai Lake, Inner Mongolia, China and its significance in paleoclimate[J]. *Science in China (series D)*, 2001, 31: 1017-1023. (in Chinese)
- [45] 朱正杰. 湖泊沉积物碳氧同位素和介形虫 Li/Ca 比值与古环境重建[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2009.
Zhu Zhengjie. Stable carbon and oxygen isotopes in lake sediments and Li/Ca ratios of ostracod shells and paleoenvironmental reconstruction[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese with English Abstract)
- [46] Zhu Z J, Chen J A, Li D H, Li H, Shuang Y, Mo J, Ren S C. Co-analysis of $\delta^{18}\text{O}$ values of lake sediments cellulose and carbonate: A new indicator for temperature reconstruction [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2010, 74(12): A1235.
- [47] Zhu Z J, Chen J A. Temperature variations at lake Caohai, southern China during the past 500 years: Evidences from $\delta^{18}\text{O}$ values of lake sediments cellulose and carbonate[J]. Submitted to *Quaternary Sci. Rev.*, 2011.
- [48] Rozanski K, Klisch M A, Wachniew P, Gorczyca Z, Goslar T, Edwards T W D, Shemesh A. Oxygen-isotope geothermometers in lacustrine sediments: New insights through combined $\delta^{18}\text{O}$ analyses of aquatic cellulose, authigenic calcite and biogenic silica in Lake Gosiaz, central Poland [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2010, 74: 2957-2969.