

# 湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 所揭示的环境气候信息

吴敬禄 王苏民 沈吉

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放实验室, 南京 210008)

**摘要** 根据我国不同纬度和高海拔地区青藏高原东部地区湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  组成特征的分析, 就其揭示的环境气候意义作了探讨。研究表明, 湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  波动间接地反映气候冷暖的波动, 但高原与平原地区湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值变化具有不同的环境气候意义。这与陆生植物  $\text{C}_3$  及  $\text{C}_4$  植物的分布密切相关, 据此初步划分为三种有机质  $\delta^{13}\text{C}$  古气候类型。

**关键词** 湖泊沉积物 有机质  $\delta^{13}\text{C}$  古气候

## 1 引言

近年来, 把湖泊沉积物中有机质稳定碳同位素作为重要的环境指标, 已普遍得到重视<sup>[1~3]</sup>。一般认为决定湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  的主要因素, 是湖泊沉积物有机质的来源, 相应地湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  与气候存在着间接的对应关系, 随着气温从低到高的变化, 湖泊沉积物中有机碳逐渐富集重碳同位素。但是某些湖泊的研究成果显示了相反的趋势<sup>[4]</sup>。本文拟依据我国若干湖泊的研究结果, 就湖泊沉积物中有机质  $\delta^{13}\text{C}$  的环境意义和成因机理作一扼要的探讨。

## 2 样品采集及分析

近年作者对我国不同纬度和高海拔区青藏高原东部地区的湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  进行了研究, 包括江苏固城湖、江西鄱阳湖、内蒙呼伦湖、贵州草海及青藏高原东部的若尔盖盆地。这为分析湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  组成特征及与古气候环境间关系提供了可能。

本文中有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值测定是先采用燃烧法获取纯净  $\text{CO}_2$  气体, 然后在 MAT-251 型质谱仪上测定  $\text{CO}_2$  气体的  $\delta^{13}\text{C}$  值。所分析的  $\delta^{13}\text{C}$  按下式计算:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}})_{\text{样品}} - (\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}})_{\text{标准}}}{(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}})_{\text{标准}}}$$

仪器分析精度为  $\pm 0.02\%$ , 分析结果参照国际 PDB 标准。

• 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995-03-10; 接受日期: 1995-09-06。

作者简介: 吴敬禄, 男, 1965年生, 在职博士生。1989年浙江大学地球科学系毕业, 1992年在中国科学院南京地理与湖泊研究所获硕士学位。现主要从事稳定同位素地球化学研究。

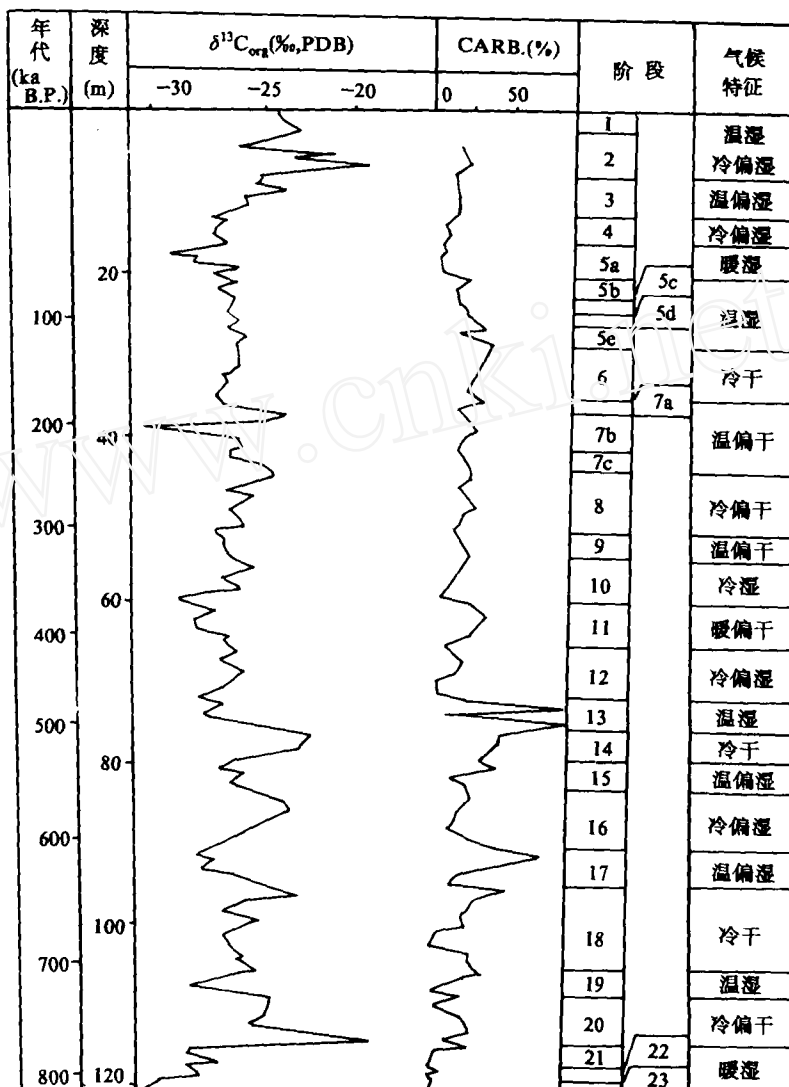
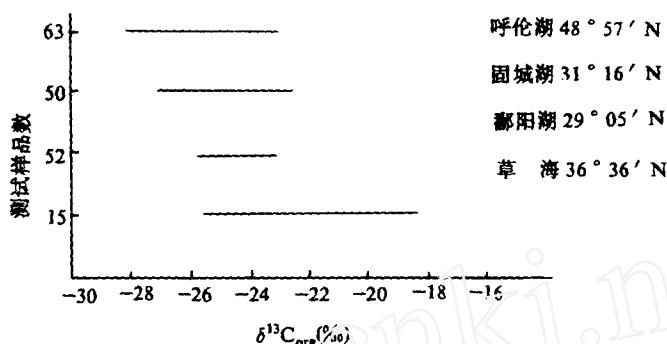


图 1 青藏高原东部若尔盖深钻揭示的古气候演化特征

Fig. 1 Organic matter  $\delta^{13}C$  in sediments from the core of the eastern Tibetan Plateau and paleoclimate

### 3 分析结果与环境解释

对青藏高原东部若尔盖盆地 120m 深钻 190 个层位样品有机质  $\delta^{13}C$  特征分析表明(图 1):有机质  $\delta^{13}C$  低值段对应暖期, $\delta^{13}C$  值高对应于冷期<sup>[5]</sup>,结果与 Lerman 等的研究一致<sup>[4]</sup>。而对我国其它地区的一些湖泊研究发现, $\delta^{13}C$  值具有随纬度增加而减低的特征(图 2),即从高纬到低纬度具有逐渐富集重碳同位素的趋势。与 Stuiver 对分布于世界不同纬度的 12 个湖泊晚更新世以来沉积有机质  $\delta^{13}C$  变化特征统计结果一致<sup>[1]</sup>,这间接地说明了湖泊沉积物中有机质  $\delta^{13}C$  组成随环境气温的升高而富集重碳同位素<sup>[1]</sup>。对固城湖、女山湖等湖泊晚更新世以来沉积物中有机质  $\delta^{13}C$  分析也表明<sup>[5]</sup>,暖期对应于  $\delta^{13}C$  值高值,冷期对应于低值。因

图 2 晚更新世以来湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  分布与纬度的关系Fig. 2 Range of  $\delta^{13}\text{C}$  values of the organic fraction of lake sediments

此青藏高原地区与我国其它地区的湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  波动指示的气候意义是不同的。作者认为这与湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  的形成有关。

已有的研究表明,湖泊沉积物中有机质  $\delta^{13}\text{C}$  与沉积物中有机质来源密不可分。湖泊沉积物中有机质主要来源于环境陆生植物及湖泊水生生物,不同的有机质来源决定了湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  的变化范围较大,其波动大约在  $-7\text{‰} \sim -38\text{‰}$ , 变幅接近  $30\text{‰}$ <sup>[7]</sup>。根据光合作途径不同,陆生植物分为  $\text{C}_3$ 、 $\text{C}_4$  和 CAM 三类植物<sup>[8]</sup>。在低温条件下, $\text{C}_3$  及  $\text{C}_4$  类植物的光合作用强度基本接近,温度增高则  $\text{C}_4$  植物的光合强度明显升高,在  $30 \sim 35\text{ }^\circ\text{C}$  时, $\text{C}_4$  植物光合强度约为  $\text{C}_3$  植物的二倍<sup>[9]</sup>。在高温及高光强条件下,植物常因缺水,气孔开放减小,细胞间隙内的  $\text{CO}_2$  减少; $\text{C}_3$  植物在这样的条件下,光合作用即明显受到抑制,而  $\text{C}_4$  植物仍能较好地适应,并保持较强的光合强度,因而  $\text{C}_4$  植物对生长地的高光强、高温及干旱表现出一定的生理适应性。CAM 植物优势在于可在极度干旱条件下进行光合作用(如仙人掌类植物)。不同植物光合作用中在光强及温度上的差异造成了一系列生理上的不同,体现在植物体有机质  $\delta^{13}\text{C}$  的不一致变化。Smith 和 Epstein<sup>[10]</sup>作了系统研究后认为, $\text{C}_3$  类植物  $\delta^{13}\text{C}$  分布在  $-24\text{‰} \sim -37\text{‰}$  之间, $\text{C}_4$  类植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-9\text{‰} \sim -19\text{‰}$  范围内,而 CAM 类植物变化范围大,约在  $-10\text{‰} \sim -30\text{‰}$  之间。水生植物  $\delta^{13}\text{C}$  与植物光合作用所需要的  $\text{CO}_2$  来源有密切关系,根据其大气中  $\text{CO}_2$  的关系,可简单分为漂浮植物及沉水植物<sup>[11]</sup>,其中挺水植物、浮游植物及浮叶植物同属于漂浮植物,漂浮植物中的  $\delta^{13}\text{C}$  值接近于  $\text{C}_3$  类植物,挺水植物  $\delta^{13}\text{C}$  值大约在  $-24\text{‰} \sim -30\text{‰}$  之间。漂浮植物如利用无机成因的溶解  $\text{CO}_2$  合成有机质,将导致其  $\delta^{13}\text{C}$  值偏高。沉水植物合成有机质所需  $\text{CO}_2$  来源于水中溶解的  $\text{CO}_2$ ,而水溶  $\text{CO}_2$  的来源本身较为复杂,但主要来源于大气  $\text{CO}_2$  及无机碳酸盐水解的供给,这与湖水的化学性质有关<sup>[12]</sup>。如湖水硬度大,pH 值高,则将减小大气  $\text{CO}_2$  在水中的溶解度,从而导致沉水植物合成有机质所需的碳主要由  $\delta^{13}\text{C}$  值偏高的重碳酸根提供,造成沉水植物  $\delta^{13}\text{C}$  值偏高。

综上所述,湖泊沉积物中有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值与气候存在着一定联系。 $\text{C}_4$  类植物( $\delta^{13}\text{C}$  值较高)适合生长于暖偏干的气候条件,而  $\text{C}_3$  类植物( $\delta^{13}\text{C}$  值较低)分布广,除受温度制约,还明显受湿度控制。 $\text{C}_3$  植物间的  $\delta^{13}\text{C}$  值也受温度制约。一般情况下,温度升高促进光合作用进一

步加强以及受同位素动力作用影响,使 $C_3$ 类植物 $\delta^{13}C$ 值偏负<sup>[10]</sup>。湖泊水生生物中 $\delta^{13}C$ 明显受湖水化学性质影响,而湖水的pH值、硬度等特性间接地反映了当时的气候状况。除此以外,湖泊沉积有机质 $\delta^{13}C$ 值与湖泊初始生产力、沉积物的沉积速率等因素有一定的关系<sup>[11,12]</sup>。

据上分析,作者认为我国平原地区湖泊沉积物中有机质 $\delta^{13}C$ 组成随气温升高而富集重碳同位素的原因有二:(1)与 $C_4$ 类植物随纬度分布特征有关。Ehleringer<sup>[13]</sup>研究认为从北纬30°到北纬50°左右, $C_4$ 类植物种数含量从80%降到0;吴乃琴等<sup>[14]</sup>也认为高温和干旱气候是 $C_4$ 植物的主要分布区,随纬度增高 $C_4$ 植物的百分含量明显降低,这与湖泊沉积物有机 $\delta^{13}C$ 随纬度变化特征相对应。(2)随纬度增高相应地温度降低,从而导致水体中溶解 $CO_2$ 增大。Degens<sup>[15]</sup>认为浮游生物合成有机质过程中与温度无直接依赖关系,但与 $CO_2$ 供给量成反比,即水溶解 $CO_2$ 供给越充分则合成有机质中 $\delta^{13}C$ 值越偏负。所以湖泊沉积物中有机质 $\delta^{13}C$ 具有随温度升高而偏正的趋势。对高纬或高海拔地区而言由于 $C_4$ 植物受到很大的生长限制并趋向于消失<sup>[14]</sup>。因此这些地区的气候与有机质 $\delta^{13}C$ 间的关系则应具有不同的机理解释。

对于青藏高原东部若尔盖盆地深钻有机质 $\delta^{13}C$ 波动所指示的古气候特征的解释,作者认为该地区虽然纬度不高,但海拔高,按照 $C_4$ 类植物的分布规律,在该钻孔研究时期内 $C_4$ 类植物对湖泊沉积物中的有机质贡献不大,主要来源于 $C_3$ 植物(较负 $\delta^{13}C$ 值)。另外,根据岩心的碳酸盐含量分析,全井碳酸盐含量较高(图1),湖水硬度较大,水生植物光合作用所需碳主要来源于重碳酸根,因而 $\delta^{13}C$ 偏正。在若尔盖地区,当气候温暖时,湖水淡化,湖水硬度降低,从而导致湖水中溶解大气 $CO_2$ 量增大,同时 $C_3$ 类植物较为繁盛,有机质含量增高,造成湖泊沉积物中有机质 $\delta^{13}C$ 值偏负;而在冷期, $C_3$ 类植物稀少,湖泊初始生产力低,重碳酸根离子含量增高,湖水硬度增大,导致沉积物中有机质 $\delta^{13}C$ 值增高。

陈践发等<sup>[16]</sup>对我国现代沼泽环境中有机质碳同位素组成特征进行了研究,认为随着纬度的增高沼泽泥炭 $\delta^{13}C$ 同样具有逐渐富集重碳同位素的趋势。另外,三江平原与若尔盖地区现代植被都以 $C_3$ 类植物为主<sup>[14]</sup>,三江平原沼泽泥炭具有偏负的 $\delta^{13}C$ 值,相应地其年平均气温比若尔盖地区高。作者认为沼泽环境中有机质 $\delta^{13}C$ 与气候间的关系具有与湖泊沉积物 $\delta^{13}C$ 相似的规律性,同时也说明湖泊沉积物有机质 $\delta^{13}C$ 主要取决于陆生植物的贡献,而湖泊水生生物提供的 $\delta^{13}C$ 增强了此种变化的幅度。

综上所述,对应于陆生植物 $C_4$ 类植物的自然分布特征可以将湖泊沉积中有机质 $\delta^{13}C$ 与气候间的关系作如下归纳: $C_4$ 植物主要分布的中、低海拔和纬度区,由于 $C_4$ 植物对有机质的贡献,湖泊沉积物中有机质的 $\delta^{13}C$ 高值一般对应于暖期;而高海拔或较高纬度区, $C_4$ 植物贡献很少或缺失,湖泊沉积物的有机质 $\delta^{13}C$ 高值一般对应于冷期。另外,在环境变化频繁,影响湖泊沉积物 $\delta^{13}C$ 条件复杂的一些地区或研究时期某时段,将影响湖泊沉积物 $\delta^{13}C$ 对古气候反应的敏感性。所以沉积物 $\delta^{13}C$ 在一些条件下(例如受流域水文特征、沉积环境变迁以及沉积物埋藏后的保存状况等因素影响)对气候的反应是不敏感的。鄱阳湖钻孔13m前后河湖相交界面 $\delta^{13}C$ 的明显波动就是一例<sup>①</sup>。因而,结合其它代用指标分析,湖泊沉积物

① 吴艳宏. 鄱阳湖湖口段沉积特征及其对湖泊演变的影响。中国科学院南京地理与湖泊研究所硕士论文,1995。

还可作为一个有用的环境指标。

#### 4 结论

(1) 湖泊沉积物有机质中  $\delta^{13}\text{C}$  值与气候间存在着一定的关系,但不是固定的模式。一般而言, $\delta^{13}\text{C}$  值高对应于气候暖期,低对应于冷期,这主要由  $\text{C}_4$  植物分布及水中溶解  $\text{CO}_2$  的含量所决定。在高纬或高海拔地区,由于受特殊的自然环境控制造成  $\delta^{13}\text{C}$  值低对应暖期,高对应冷期的格局。

(2) 湖泊沉积物中有机质  $\delta^{13}\text{C}$  除与有机质来源及气候因素有关外,还受潮水化学性质(pH 值、水的硬度等)、湖泊有机生产力、大气中  $\text{CO}_2$  浓度、流域水文特征及沉积环境等因素影响,造成  $\delta^{13}\text{C}$  值对气候响应的不敏感。

(3) 环境变迁在沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  记录中常常是明显的。河流、风砂等沉积物  $\delta^{13}\text{C}$  值不同于湖泊沉积中的  $\delta^{13}\text{C}$  值。因此, $\delta^{13}\text{C}$  值也可作为判别环境变迁或湖泊沉积间断的指标之一。

#### 参 考 文 献

- 1 Stuiver M. Climate versus changes in  $\delta^{13}\text{C}$  content of the organic component of lake sediments during the late quaternary. *Quat Res.* 1975, 5: 252~262
- 2 Aravena R. Carbon isotope composition of lake sediments in relation to lake productivity and radiocarbon dating. *Quat Res.* 1992, 37: 333~345
- 3 Nier A O and Gulbransen E A. Variations in the relative abundance of the carbon isotopes. *Am Chem Soc.* 1939, 61: 697
- 4 Pearson F J and Coplen T B. Stable isotope studies of lakes. In: A Lerman, ed. *Lakes: chemistry, geology, physics.* New York: Springer-Verlag. 1978. 235~236
- 5 吴敬禄,沈吉等.湖泊沉积物有机质  $\delta^{13}\text{C}$  形成条件——兼论若尔盖古湖有机  $^{13}\text{C}$  所示的古气候特征.见:青藏高原项目办公室编. *青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统的研究学术论文年刊(1994)*. 北京:科学出版社,1995. 137~141
- 6 吉磊,王苏民等.浅钻岩芯揭示的固城湖 4000 年来环境演化. *湖泊科学*, 1993, 5(4): 316~323
- 7 Bown R. *Isotopes and climates.* London: Elsevier Applied Science. 1991. 128~131
- 8 Bown R. *Isotopes in the Earth Sciences.* London: Elsevier Applied Science. 1988. 456~457
- 9 中国科学院北京植物研究所植物生理生化研究室. *植物生理生化译丛(第二集)*. 北京:科学出版社,1976. 55~72
- 10 Smith B N and Epstein S. Two categories of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 1971, 47: 380~384
- 11 Nakai N. Carbon isotopic variation and the paleoclimate of sediments from Lake Biwa. *Proceedings of the Japan Academy.* 1972, 48: 516~521
- 12 Deines P. The Isotope composition of reduced organic carbon. In: Fritz P and Fontes J Ch, eds. *Handbook of environmental isotope geochemistry. Part 1.* Amsterdam: Elsevier Scientific Publishers, 1980. 49~74
- 13 Ehleringer J R. Genera known to possess the Crassulacean Acid Metabolism (CAM) pathway. *Hort Science*, 1979, 14(3): 217~222
- 14 吴乃琴,吕厚远等.  $\text{C}_3$ 、 $\text{C}_4$  植物及其硅酸体研究的古生态意义. *第四纪研究*, 1992, (3): 241~251
- 15 Degens E T. Biogeochemistry of stable carbon isotope. In: G Eglinton and M T J Murphy, eds. *Organic geochemistry.* Berlin: Springer-Verlag. 1969. 304~329
- 16 陈践发,徐永昌.沼泽环境中有机碳同位素组成特征. *科学通报*, 1992, (22): 2080~2082

## INFORMATIONS OF CLIMATE AND ENVIRONMENT DEDUCED FROM THE ORGANIC MATTER $\delta^{13}\text{C}$ OF LACUSTRINE SEDIMENTS

Wu Jinglu    Wang Sumin    Shen Ji

(Lake Sediment and Environment Laboratory, Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008)

### Abstract

By analyzing the characteristics of the organic matter  $\delta^{13}\text{C}$  in different-altitude and high-elevation (Qinghai-Xizang Plateau) lake sediments in China, the informations of climate deduced from the organic matter  $\delta^{13}\text{C}$  of the lake sediments are discussed. The results show that the organic matter  $\delta^{13}\text{C}$  content of lake sediments is to a certain degree correlative with climatic changes. In general, during colder climatic episodes, the  $\delta^{13}\text{C}$  values were lower, and higher during colder climatic episodes in the plateau region. Therefore, the variations of  $\delta^{13}\text{C}$  in lake sediments in plateau and plain areas have different climatic meanings. Further study shows that all of the aforementioned results have a close relation with the distributions of  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  plants.

On the basis of the above-mentioned results, three types of climate of organic matter  $\delta^{13}\text{C}$  are divided tentatively, i. e. : (1) in middle-low elevation and altitude areas, the higher value of  $\delta^{13}\text{C}$  in lake sediments responds to warmer climate period for  $\text{C}_4$  plant effect; (2) in high elevation or altitude areas, where  $\text{C}_4$  plant almost disappears, the higher value of  $\delta^{13}\text{C}$  in lake sediments responds to colder period; (3) in addition, the climatic indication of  $\delta^{13}\text{C}$  in some areas is insensitive because of the influences of such factors as the hydrology of the lake basin, the change of sedimental environment, the reservation of lake sediments, etc.

**Key Words** Lake sediments, organic matter  $\delta^{13}\text{C}$ , paleoclimate