

文章编号 1001-7410(2008)04-621-08

新疆罗北洼地湖相沉积物有机碳同位素的变化序列及其古环境意义^{*}

罗 超^① 刘 卫 国^② 彭子成^① 杨 东^③
贺剑峰^① 刘桂建^① 张彭熹^④

①中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026 ②中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室, 西安 710075
③西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070 ④中国科学院青海盐湖研究所(二部), 西安 710043

摘要 测定了新疆罗布泊地区湖相沉积物 CK-2 钻孔样品的总有机碳含量 (TOC) 及其同位素组成、碳酸盐含量和 C/N 比值等环境代用指标, 以及石膏矿物的质谱-铀系年龄。测试结果表明, 20~9 kaBP 期间沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 在 -23.4‰~-16.1‰ 之间波动且阶段性明显, 与 TOC 呈现良好的相关关系, 整体变化趋势同南极 Dome C 冰芯中记录的全球大气 CO₂ 浓度一致; C/N 比值表明有机碳来源主要是陆生高等植物。因此大气 CO₂ 浓度变化是影响 20~9 kaBP 期间罗布泊湖相沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 值变化的主导因素, 周围山体上 C₃/C₄ 植物相对生物量的变化则是另一重要因素。依据 $\delta^{13}C_{org}$ 的变化序列将此时间段湖区古环境的演化分成 6 个阶段: 20.0~14.1 kaBP 期间受到末次盛冰期的影响, 气温偏低, 湖水丰沛; 14.1~13.3 kaBP 是一个气候不稳定期, 冷暖波动较频繁, 但以暖为趋势; 13.3~12.8 kaBP 期间经历了一段冷期, 于 12.8 kaBP 结束了末次冰期, 随后气候开始转暖至 11.8 kaBP; 其后气温再次变冷并维持到 10 kaBP; 最后从 10 kaBP 进入全新世暖期。 $\delta^{13}C_{org}$ 序列明显向偏负方向变化, 表明该地区变暖的趋势相当明显。罗布泊地区日益干旱化是全球气候变化的结果, 尤其是受到全球 CO₂ 浓度的不断升高所制约。

关键词 罗布泊地区 有机碳同位素 古气候 大气 CO₂ 浓度 C₃/C₄ 植物
中图分类号 P532 P534.622 O628.2 **文献标识码** A

湖泊沉积物作为古环境信息的有效载体, 一直以来都是第四纪研究中的热点, 其中对多种代用指标的研究日臻深入和完善, 但基于稳定同位素的方法却一直存在较大争议, 尤其是关于有机质中的同位素组成, 这是因为湖泊沉积物中有机质来源十分复杂, 既有陆生植物, 如 C₃, C₄ 和 CAM (crassulacean acid metabolism) 植物, 也包括了湖泊中的低等菌藻类、沉水植物、挺水植物和浮游植物等, 而湖泊沉积物中有机质碳同位素组成主要由其中有机质的来源决定; 另外, 它还受到湖泊的水化学性质、湖泊的营养化过程、大气 CO₂ 浓度、沉积环境等因素的影响^[1~3], 这些条件的变化对同位素分馏的影响是一个不可忽视的因素, 因此在对湖泊沉积物中有机碳同位素组成变化进行解释时就存在众多的不确定性

和多解性。一些研究者^[4~6] 将沉积物中有机质来源简化为 C₃ 和 C₄ 来源, 沉积物中有机质碳同位素组成由 C₃ 和 C₄ 植物数量的变化控制; 有机质碳同位素组成的轻重反映了古植被类型的变化和古气候特征^[7~9]。一般认为, 任何植物体的碳同位素组成主要与光合作用的 C₃ 和 C₄ 两种碳固定途径有关。C₃ 类植物的 $\delta^{13}C$ 值为 -26‰ 左右, 而 C₄ 类植物大约为 -13‰^[10]。C₃ 类植物在低温、潮湿的地区占有优势, 而 C₄ 类植物适应既干旱又高温的气候条件。有机质碳同位素值偏轻代表了以 C₃ 植物来源为主, 包括了几乎所有木本植物和部分草本植物; 偏重的有机质碳同位素值以 C₄ 植物来源为主, 以草本植物和部分灌木植物为代表。Brinca 等^[11] 从分子同位素地层研究的结论指出, 以植被类型探讨气候环境变

第一作者简介: 罗 超 男 25 岁 博士研究生 第四纪环境学专业 E-mail: luochao@mail.ustc.edu.cn

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 (批准号: 2004CB720208)、国家自然科学基金项目 (批准号: 40473006 和 40599424) 和高校博士学科点基金项目 (批准号: 20050358006) 资助

2007-08-23 收稿, 2007-12-30 收修改稿

通信作者: 彭子成 E-mail: pz@ustc.edu.cn

化的格局情况复杂, 需要结合所在区域的气候分带进行分析。余俊清等^[2]总结了近年来国内外关于湖泊沉积有机碳同位素与环境变化的研究进展, 提出了如大气 CO₂ 浓度主控、植被类型主控和产率主控等一系列模型。应当指出的是, 对于一个特定湖泊的古气候研究, 不能简单套用其他地区的模式来解释有机碳同位素组成同气候间的关系^[12]。

对于中国西北干旱区内陆湖泊来说, 多数具有封闭、半封闭的特征, 外源物质输入相对较少, 内源的水生植物对沉积物中有机质有较多的贡献。对于自生植物较少的湖泊, 周围山体的陆生植物则成为主导, 因此沉积物中有机质碳同位素组成可能更好地记录了区域古气候的演化史^[13-18]。本文选择位于新疆塔里木盆地东部的罗布泊湖相沉积物, 通过分析有机碳的来源特征及其碳同位素的组成变化, 以了解内陆湖泊中不同来源有机质碳同位素组成及其指标的古环境意义。

1 研究区概况

罗布泊及其邻近地区, 位于新疆塔里木盆地的东部(地理位置和沉积环境如图 1), 海拔相对较低, 面积约 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$, 地理位置为 $39^\circ 45' 10'' \sim 40^\circ 45' 40'' \text{ N}$ $90^\circ 09' 55'' \sim 92^\circ 10' 30'' \text{ E}$ 年均降雨量约为 22mm, 蒸发量约为 3000mm。每年 100 多天有 6 级以上大风, 夏季最高气温达 $40 \sim 50^\circ \text{C}$, 是我国西部最干旱的地区之一。地表的自然景观呈现为戈壁、沙漠、盐漠、风蚀残丘等, 自然环境极其恶劣。但

是历史上该地区却曾经是河流交错、湖泊密布, 是塔里木河和孔雀河的归宿地, 有着 4000 年前的土著人活动, 还有史书记载的西域重镇——楼兰, 孕育了上千年的楼兰文明, 但至公元 330 年以后, 盛极一时的文明即销声匿迹了, 随后罗布泊的植被也逐渐衰亡, 直至发展到现今盐壳覆盖、荒漠至极的状况^[9]。

罗布泊地区是典型的中亚干旱区之一, 气候的变化由纯的西风环流所控制, 是连接中低纬度亚洲季风环流与高纬北大西洋海洋环流的枢纽地区, 另外它还是青藏高原北缘气候变化的敏感区, 因此揭示该地区的气候变化, 能够建立起低纬度亚洲季风区与高纬北大西洋环流之间的桥梁, 有助于对北半球大气环流的整体研究。特殊的地理位置和流域植被分布特征, 使罗布泊湖相沉积物中有机质碳同位素组成的变化具有重要的古环境意义。

2 样品采集及分析

1997 年 10 月中国科学院青海盐湖研究所组织了罗布泊科学考察队, 在罗北洼地进行了科学钻探, 取得了全长为 50.14m 的岩芯 CK-2 孔 ($40^\circ 47' \text{ N}$ $91^\circ 03' \text{ E}$)。从图 1 中可以看出, 钻孔位于罗布泊地区的东北部, 远离古湖泊的河流输入口, 这一特殊的地理位置在避免了河流扰动的同时, 还可能使沉积物中有机质避免受到河流输入的影响, 从而使分析显得相对简单。本文研究取自 CK-2 钻孔自距顶部 0.94 ~ 7.03m 部分的样品。

沉积物剖面主要以不同粒径和颜色的粉砂为

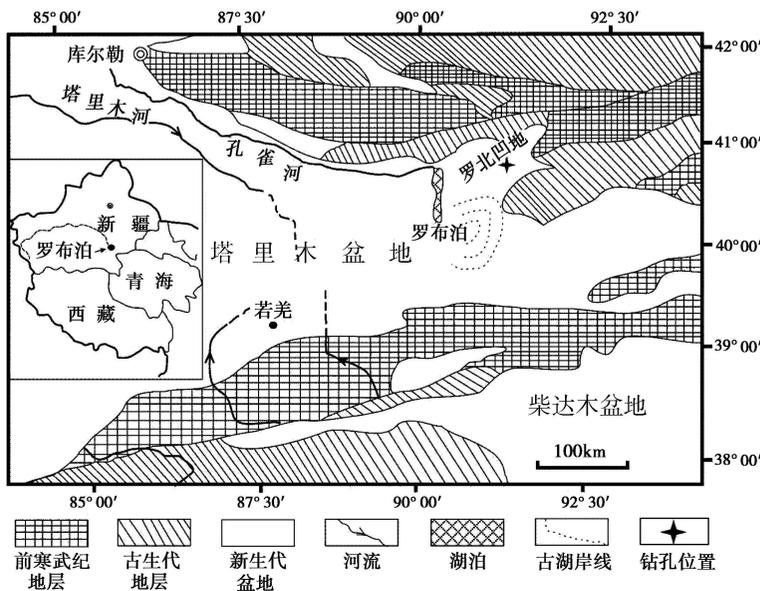


图 1 罗布泊及周边地区地质和 CK-2 钻孔位置示意图

Fig 1 Location of CK-2 core in Lop Nur Lake Xinjiang Northwestem China and the circumjacent region

主,其中富含分选良好的原生石盐和石膏矿物(沉积剖面如图2)。沉积物年代序列由5个石盐和石膏矿物的质谱-铀系年龄线性内插法得到^[20]。样品的铀系年龄测试在中国科学院壳幔物质与环境重点实验室室内完成,所用仪器为Finnigan MAT-262-RFC型质谱仪。

对柱状的沉积剖面按照5m间隔取样,分别进行碳酸盐含量、总有机碳(TOC)、总有机氮(TN)以及有机碳同位素组成的测定。称取预先研磨至120目的粉末状样品0.25g加入定量2mol/L的HC多次搅拌,浸泡过夜(约8~10小时),然后用已知浓度的NaOH溶液滴定,计算出样品中的碳酸盐含量;TOC含量采用重铬酸钾氧化法测定,在中国科学技术大学极地实验室完成;有机氮含量由中国科学院、水利部水土保持研究所完成;有机碳同位素组成的测试则在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室内进行。样品经过除去碳酸盐后洗至中性、烘干、称量约150mg置于外径为3~4mm的石英管内,加入适量棒状氧化铜及铂金丝作催化剂,抽真空后密封石英管,在850℃的马弗炉中灼烧4小时。冷却后的石英管在真空系统中破碎,生成的CO₂气体用液氮冷冻,并进一步纯化。提取富集纯化后的CO₂在Finnigan MAT251型同位素质谱仪上测定出碳同位素比值,分析结果按下

式计算:

$$\delta^{13}C(\text{‰}) = \left\{ \left[\frac{(^{13}C/^{12}C)_{\text{样品}}}{(^{13}C/^{12}C)_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000 \right\}$$

分析结果参照国际HDB标准(‰)。工作标准的测量误差<0.4‰(2σ)^[21]。各项指标的分析结果如图3所示。

3 结果与讨论

3.1 年代模式

图2中给出了CK-2孔沉积剖面5个年龄的测定结果。在0.94m处为9063±130 aB.P.; 2.05m处为10120±130 aB.P.; 4.00m处为12850±210 aB.P.; 5.50m处为14038±240 aB.P.; 6.73m处为19010±230 aB.P.。根据分段回归插值法,建立了CK-2岩芯自7.03m到顶部0.94m样品20 kaB.P.至9 kaB.P.的年龄序列,其深度与年龄值的对应如图2。从图2中可以观察到该孔沉积速率由慢到快的变化过程,反映了由于水体减小,沉积物析出由缓慢到加快的过程。这与岩芯中矿物组成的变化有着很好的对应,从图2看出沉积序列中先是出现石膏矿物,且粒径逐渐变大,而后石盐矿物开始出现,粒径同样由小变大。这反映出气候的不断趋向暖干,盐湖的成熟度也在加剧增加。

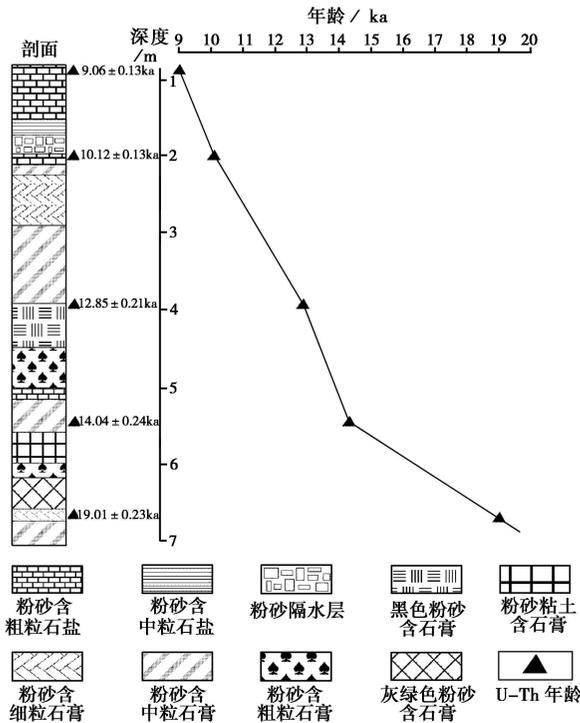


图2 CK-2孔沉积剖面(部分)及深度-年龄对应关系示意图

Fig. 2 Detailed stratigraphic column and age/depth correlation of core CK-2 core

3.2 沉积物中有机质的来源

有机碳在湖泊沉积物中的含量较少,尤其是如罗布泊这种极端干旱区的湖泊。从图 3看出,有些层位的有机碳含量甚至低至 1%,尽管如此它仍是沉积物很重要的一种组分,区分其来源特征对于认识区域的古环境变化有着重要的意义。 C/N 比值是区分沉积物中有机碳来源的重要指标,由于有机氮优先出现在植物的原蛋白和核酸中,低等植物如湖藻和大型藻类的原蛋白含量为 24%左右,远高于陆生禾木科或莎草科植物的原蛋白含量为 6%左右。因此,前者的 C/N 比值较低,仅为 5~12左右,而后者的 C/N 比值可以高达 45~50。正因为不同种类植物的 C/N 比值具有这种鲜明的差异,通过测定沉积物中有机质的 C/N 比值,就能够大体判别其中的有机质是源于湖泊自生还是湖泊以外^[2]。只有弄清楚沉积物中有机碳来源,其同位素组成的分析才有意义。

CK-2孔样品的 C/N 比值表明,沉积序列中该值在约 20~60之间波动,大部分样品的 $C/N > 40$ 。这说明 CK-2孔中有机碳主要是外源的高等植物碎屑,且来源稳定,湖生低等植物虽然在有些时间段内会对沉积物中有机质有些影响,但这个贡献很小。由于采样点的罗北洼地远离河流输入口,流域植被对沉积物有机质的影响较小,所以周围山体上的植物种类和数量的变化是影响该沉积物中有机碳变化的主要原因。结合 TOC含量的变化曲线可以看出,20~9 kaB.P.期间(对应的深度范围为 7.03~0.91m) C/N 比值的高低变化基本对应着 TOC含量

的高低变化。这反映了在沉积物中 TOC含量的增加主要是陆源有机质的贡献, C/N 的高值对应于陆源有机质的贡献增加,表明了外源有机质对沉积物中 TOC的影响显著。

3.3 CK-2剖面沉积物中 $\delta^{13}C_{org}$ 变化及其影响因素

CK-2孔样品 TOC及其碳同位素($\delta^{13}C_{org}$)组成分析结果如图 3 其中碳同位素的变化范围为 -23.4‰~-16.1‰,波动较为剧烈。观察图 3 在距顶部 7.03~5.65m 部分,对应年龄为 20.0~14.1 kaB.P.,沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 是整个序列中最偏正的阶段,此时间段正好是末次冰期晚期。末次冰期晚期湖泊沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 值偏正的特征在俄罗斯东西伯利亚贝加尔湖^[22]、日本琵琶湖^[23]以及东非肯尼亚山脉的 Sacred湖^[24]等世界范围内的很多湖泊中都有清楚的记录。不同的作者对此给出了不同的解释,其中讨论最多的就是全球大气 CO_2 浓度的影响。那么 CK-2孔样品 $\delta^{13}C_{org}$ 序列与大气 CO_2 浓度是否存在联系呢?对比剖面沉积物中 $\delta^{13}C_{org}$ 值同全球大气 CO_2 浓度的变化曲线^[25](图 4)可以发现,二者变化趋势几乎一致,因此可以认为,大气 CO_2 浓度变化是影响 20~9 kaB.P.时期 CK-2孔沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 变化的主导因素,这与刘强等^[26]在东北四海龙湾玛珥湖的研究结论一致。但是观察图 4 沉积物中 $\delta^{13}C_{org}$ 的变化较大气 CO_2 浓度的变化要复杂的多。前人研究表明^[27],大气 CO_2 浓度对植物碳同位素组成影响有限,因此某些层位 $\delta^{13}C_{org}$ 异常的谷值和峰值仅用大气 CO_2 浓度来解释是不充分的,那么这些

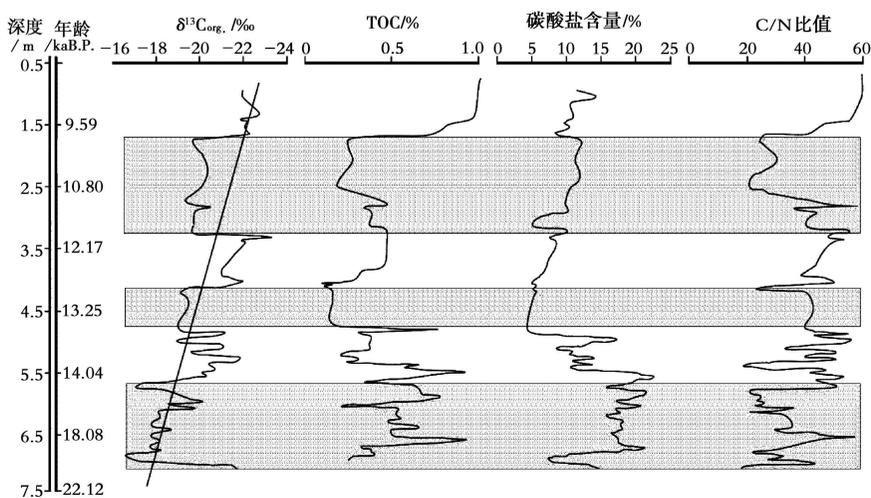


图 3 CK-2孔(部分)样品 $\delta^{13}C_{org}$, TOC 碳酸盐含量和 C/N 值的变化序列

Fig. 3 Sequences of $\delta^{13}C_{org}$, TOC, carbonate contents and C/N of CK-2 core

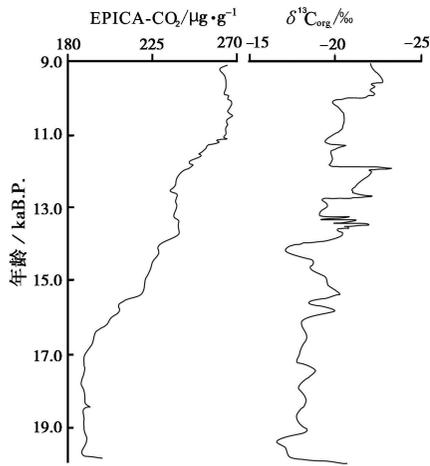


图4 CK-2孔(部分) $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 变化序列
与大气 CO_2 浓度^[25]的对比

Fig. 4 Comparison between $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ sequence
and the atmospheric CO_2 concentration

现象又是如何造成的呢?

由于光合作用固定大气 CO_2 的途径不同, C_3 、 C_4 和 CAM 植物有不同的碳同位素组成。陆源 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 $-37\text{‰} \sim -24\text{‰}$ 之间, 平均值为 $-27\text{‰} \pm 2\text{‰}$, C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-19\text{‰} \sim -9\text{‰}$, 平均值 $-13\text{‰} \pm 2\text{‰}$ ^[28]。CAM 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围较大, 介于 C_3 和 C_4 植物之间, 随环境不同而变化, 主要生长于干旱区及沙漠中。Nakai^[29] 指出在湖泊沉积中, 有机质的绝对含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值有较好的相关性: 在较温暖的时期内, 湖泊生产力高, 沉积物中有机碳含量增加而且有更多的 HCO_3^- 贡献给湖泊以保持高生产力的需要; 而在较冷的时期, 湖泊中绝对碳含量减少, 有机质相对亏损 ^{13}C 有较轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。因此可以说明在干旱一半干旱区封闭的内陆湖泊, 当水体增大时, 生物的生产力提高, 沉水植物以 HCO_3^- 或溶解的 CO_2 为主要碳源, 造成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏重; 而水体减小时, 以较少的挺水植物为主, 湖泊中有机碳含量偏低, 造成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏轻。

图3表明该沉积柱中有机质含量与有机碳同位素组成变化趋势具有反相关性, 即有机质含量的高值对应有机碳同位素组成的偏负。沉积物中有机碳同位素的 $\delta^{13}\text{C}$ 值处于 C_3 和 C_4 类植物峰之间, 但更接近 C_3 类植物的峰值, 又如3.1中所述, 沉积物中有机碳主要是外源, 说明在该地区湖相发育的阶段, 沉积物中有机质来源主要是 C_3 类植物, C_4 类植物也有贡献, 因此对于湖泊沉积物如何响应气候与环境的变化, 该研究区有其独特的区域特征。Sukumar

等^[30] 针对印度的热带季风气候, 在解释他们的研究结果时, 认为平均气温较高将减少霜冻, 夏季降水量增加, 从而有利于 C_3 植物的繁殖; 而气温下降只会对 C_4 植物有利。很多现代过程的研究也表明^[31], 湿度对植物碳同位素的组成有重要的影响。对于罗北洼地周围的山体来讲, 气温对植物中 C_3 和 C_4 类别的比例控制同样遵从这一模式。当平均气温较高的时候, 山体的融水较多, 环境潮湿, 这使得 C_3 类植物占优势, 应当注意, 温暖虽然造成山体上冰雪融水增多, 但是由于蒸发的加剧, 湖区却是趋于干旱; 相反, 当气候偏冷的时期, 山体环境就偏干, C_3/C_4 就会减小。因此对于有机质来源主要为周围山体植物的 CK-2孔沉积物来说, 其有机碳同位素的改变就可以与环境温度建立起联系: 温度升高, 沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值负偏; 温度降低则偏正。值得注意的是, 如果湖泊自生的有机质在沉积物 TOC 中占到一定的比重后, 这种相关性就可能不一定显著了。

3.4 有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 序列指示的主要气候变化阶段

在本文研究的 20~9 kaBP 时间范围内, 根据4.2部分的结果, 再结合 TOC 及碳酸盐含量等代用指标, 可以建立如下的沉积序列: 其中第1阶段 (20.0~14.1 kaBP) 有机碳含量较高, 但是有机碳的同位素组成却偏正, 这与该沉积序列其他阶段显著不同, 同时 C/N 比值偏低, 说明水生植物在此阶段对沉积物中 TOC 值有一定程度的影响。此阶段区域气候和环境受末次盛冰期的影响, 整体温度偏低, 蒸发较弱, 湖水丰沛, 湖生生物的繁殖相对活跃, 这种水热配置的特征与同处西风区的美国 Owens 湖^[32] 的沉积记录一致; 而山体上由于环境冷干, 更多的发育成 C_4 植物, 这两点原因造成了整体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏正, 且阶段的平均值在整个序列中最正; 第2阶段 (14.1~13.3 kaBP) 是一个气候不稳定期, 反映在各种代用指标的剧烈波动上, 尤其是 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 C/N 比值, 表明此阶段气候变化的复杂性, 水体和山体植物对沉积物有机碳来源的主导性更替频繁, 但是 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负, C/N 比值趋高, 相应为暖干环境; 第3阶段 (13.3~12.8 kaBP), TOC 和碳酸盐含量都处于低值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏正, C/N 比值稳定在 40 左右, 湖水水面仍处在一个较高水平上, 但因气温较低, 湖泊自生的生物量已经显著减少; 第4阶段 (12.8~11.8 kaBP) 末次冰期的影响已经消失, 气候开始转暖。由于蒸发的加强, 水体显著减小, 表现在沉积物碳酸盐的增加, C/N 比值均大于 40 水生

生物对沉积物有机碳的影响已经微乎其微,主要来源为山体植物。由于气候转暖,冰雪融水增多,山体整体气候潮湿, C_3 类植物占了优势, $\delta^{13}C_{org}$ 值偏负;第5阶段(11.8~10.0 kaBP), $\delta^{13}C_{org}$ 值发生了4‰的变化并转向偏正,且在很短的时间内发生,说明山体植物种类的变化对温度非常敏感。 C/N 比值和 TOC值在这一阶段都分成两段,在经历一个短暂的高值后才发生显著的降低,处于新仙女木相应的冷湿期;第6阶段(10.4~9.0 kaBP)预示着全新世暖期的开始,从图3中可以看到,沉积物碳酸盐含量显著增加,表明水体迅速的收缩, C/N 比值和 TOC值均大幅增加,表明外源植物已在沉积物有机碳的贡献中占据绝对主导, $\delta^{13}C_{org}$ 值偏负, C_3 类植物占优,气候环境总体趋势为暖干。

由 CK-2孔有机碳同位素组成的变化情况及其原因分析来看,罗布泊湖相沉积物中 $\delta^{13}C_{org}$ 值与我国西北季风影响区以及青藏高原地区的湖泊^[31]有显著不同。虽然同属于干旱区,但大多数西北季风区湖泊^[34-35],内源的水生植物对沉积物中有机质贡献较多,末次冰期以来湖泊中有机质碳同位素组成偏重的有机质主要来源于水生植物。但罗布泊却不具有这种特征,有机质碳同位素组成的环境意义之解释也与季风区湖泊显著不同,这更说明了湖泊沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 值作为气候代用指标的复杂性、区域性。但是结合 TOC碳酸盐含量以及 C/N 比值等指标,CK-2孔沉积物 $\delta^{13}C_{org}$ 值就具有了显著的古气候意义。虽然有数个冷暖阶段的变化,但20~9 kaBP期间,罗布泊 $\delta^{13}C_{org}$ 曲线序列的总趋势(见图3中趋势线)是往偏负的方向变化,反映了区域气候的逐步转暖,这与我们之前用其他古环境代用指标(如磁化率、粒度、色度等)的研究结果^[36]一致。

4 结论

基于上述讨论,对于 CK-2孔20~9 kaBP期间(距顶7.03~0.94m部分)沉积物的研究,得出以下主要结论:

(1)沉积物中 C/N 比值均大于20,有些层位甚至达到大于60且几乎与 TOC值同步变化,指示沉积物有机碳来源主要为陆生高等植物。

(2)全球大气 CO_2 浓度的变化是导致 CK-2孔 $\delta^{13}C_{org}$ 变化的主导因素,而周围山体上 C_3/C_4 植物生物量的相对变化除了起到叠加作用外,还呈现出几个峰值和谷值的转换。

(3)结合其他的环境代用指标,利用 $\delta^{13}C_{org}$ 值的

变化序列,重建了20~9 kaBP间的区域古气候的变化序列,6个冷暖交替的阶段界限比较明显,说明沉积物有机碳同位素的组成具有明显的古环境意义。需要说明的是,这种意义须建立在辨别沉积物有机碳来源的基础上。

(4)自20 kaBP,即末次冰期晚期以来,该地区变暖的趋势相当明显,湖泊呈现干旱化,这是受到全球 CO_2 量的增加、全球气候变暖的总体趋势所影响。罗布泊地区的环境变化,在水热配置上具有显著的西风区特征,即暖期干旱,冷期湿润;但是应当看到,沉积序列 $\delta^{13}C_{org}$ 同全球大气 CO_2 浓度变化的一致性,且全新世暖期起始时间同步于全球其他地区,说明罗布泊在千年一百年尺度上的环境也同样受到全球变化的制约。

感谢 本实验在中国科学院地球环境研究所进行,得到了曹蕴宁老师和张普、王宁、王周峰博士研究生的帮助,并进行了有益的讨论,在此表示衷心地感谢。

参考文献 (References)

- 1 吴敬禄,王苏民.湖泊沉积物中有机质碳同位素特征及其古气候.海洋地质与第四纪地质,1996 16(2): 103~109
Wu Jinglu, Wang Sumin. Climate versus changes in $\delta^{13}C$ values of the organic matter in lake sediments. Marine Geology & Quaternary Geology 1996 16(2): 103~109
- 2 余俊清,王小燕,李军等.湖泊沉积有机碳同位素与环境变化的研究进展.湖泊科学,2001 13(1): 72~78
Yu Junqing, Wang Xiaoyan, Li Jun et al. Paleoenvironmental interpretations on organic carbon isotopic records from lake sediments. A critique. Journal of Lake Sciences 2001 13(1): 72~78
- 3 Street Perrott F A, Ficken K J, Huang Y S et al. Late Quaternary changes in carbon cycling on Mt Kenya East Africa: An overview of the $\delta^{13}C$ record in lacustrine organic matter. Quaternary Science Reviews 2004 23: 861~879
- 4 张平中,王先彬,陈践发等.湖相有机质的氢指数及碳同位素组成—湖面波动评价的指标——以 RH孔为例.科学通报,1995 40(18): 1682~1685
Zhang Pingzhong, Wang Xianbin, Chen Jianfa et al. Hydrogen index and carbon isotope compositions of lacustrine organic matters: indices evaluating lake level fluctuation taking an example of the RH core. Chinese Science Bulletin 1995 41(3): 229~233
- 5 饶志国,陈发虎,曹洁等.黄土高原西部地区末次冰期和全新世有机碳同位素变化与 C_3/C_4 植被类型转换研究.第四纪研究,2005 25(1): 107~114
Rao Zhiguo, Chen Fahu, Cao Jie et al. Variation of soil organic carbon isotope and C_3/C_4 vegetation type transition in the western Loess Plateau during the last glacial and Holocene periods. Quaternary Sciences 2005 25(1): 107~114
- 6 朴河春,刘丛强,朱书法等.贵州石灰岩和砂岩地区 C_4 和 C_3 植物营养元素的化学计量对 N/P 比值波动的影响.第四纪研究,

- 2005 **25**(5): 552~560
Piao Hecun, Liu Congqiang, Zhu Shufa et al. Variations of C_4 and C_3 plant N:P ratios influenced by nutrient stoichiometry in limestone and sandstone areas of Guizhou. *Quaternary Sciences* 2005 **25**(5): 552~560
- 7 马剑英, 陈发虎, 夏敦胜等. 荒漠植物红砂稳定碳同位素组成的空间分布特征. *第四纪研究*, 2006 **26**(6): 946~954
Ma Jianying, Chen Fahu, Xia Dunsheng et al. Spatial distribution characteristics of stable carbon isotope compositions in desert plant. *Quaternary Sciences* 2006 **26**(6): 946~954
- 8 王丽霞, 李心清, 郭兰兰. 中亚干旱半干旱区 C_3 植物 $\delta^{13}C$ 值的分布及其对气候的响应. *第四纪研究*, 2006 **26**(6): 955~961
Wang Lixia, Li Xinqing, Guo Lanlan. The distribution of $\delta^{13}C$ value of C_3 plant and its response to climate in arid and semiarid Central East Asia. *Quaternary Sciences* 2006 **26**(6): 955~961
- 9 赵兴云, 王建, 钱君龙. 用树轮 $\delta^{13}C$ 重建 1685 年以来的大气 CO_2 浓度变化趋势. *第四纪研究*, 2005 **25**(5): 545~551
Zhao Xingyun, Wang Jian, Qian Junlong. Reconstruction of atmospheric CO_2 concentration changes since 1685 by tree ring $\delta^{13}C$ annual series. *Quaternary Sciences* 2005 **25**(5): 545~551
- 10 王国安. 稳定碳同位素在第四纪古环境研究中的应用. *第四纪研究*, 2003 **23**(5): 471~484
Wang Guoan. Application of stable carbon isotope for paleoenvironmental research. *Quaternary Sciences* 2003 **23**(5): 471~484
- 11 Bräncat D, Yamada K, Ishiwatari R et al. Molecular isotopic stratigraphy of long-chain n-alkanes in Lake Baikal Holocene and glacial age sediments. *Organic Geochemistry* 2000 **31**: 287~294
- 12 刘兴起, 王苏民, 沈吉等. 16ka 以来青海湖沉积物有机碳同位素的变化特征及其影响因素. *自然科学进展*, 2003 **13**(2): 169~173
Liu Xingqi, Wang Sumin, Shen Ji et al. The evolution characteristic and the effect factors of the organic $\delta^{13}C$ in the sediment of Qinghai Lake since 16kaBP. *Progress in Natural Science* 2003 **13**(2): 169~173
- 13 吴敬禄, 刘建军, 王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征. *第四纪研究*, 2004 **24**(5): 585~590
Wu Jinglu, Liu Jianjun, Wang Sumin. Climatic change record from stable isotopes in Lake Aibi Xinjiang during the past 1500 years. *Quaternary Sciences* 2004 **24**(5): 585~590
- 14 曹洁, 张家武, 张成君等. 青藏高原北缘哈拉湖近 800 年来湖泊沉积及其环境意义. *第四纪研究*, 2007 **27**(1): 100~107
Cao Jie, Zhang Jiawu, Zhang Chengjun et al. Environmental changes during the past 800 years recorded in lake sediments from Hala Lake on the Northern Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences* 2007 **27**(1): 100~107
- 15 隆浩, 王乃昂, 李育等. 猪野泽记录的季风边缘区全新世中期气候环境演化历史. *第四纪研究*, 2007 **27**(3): 371~381
Long Hao, Wang Naifang, Li Yu et al. Mid-Holocene climate variations from lake records of the East Asian monsoon margin: A multi-proxy and geomorphological study. *Quaternary Sciences* 2007 **27**(3): 371~381
- 16 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起等. 乌伦古湖介形组合及其壳体同位素记录的全新世气候环境变化. *第四纪研究*, 2007 **27**(3): 382~391
Jiang Qingfeng, Shen Ji, Liu Xingqi et al. Holocene climate reconstruction of Wulungu Lake (Xinjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and stable isotopes. *Quaternary Sciences* 2007 **27**(3): 382~391
- 17 常凤琴, 张虎才, 陈玥等. 柴达木盆地察尔汗古湖贝壳剖面碳酸盐和瓣鳃化石碳氧稳定同位素. *第四纪研究*, 2007 **27**(3): 427~436
Chang Fengqin, Zhang Hucan, Chen Yue et al. Stable isotopes of carbonate and fossil shells from the shell bar section of the paleolake Qarhan Qaidam Basin. *Quaternary Sciences* 2007 **27**(3): 427~436
- 18 李世杰, 张宏亮, 施雅风等. 青藏高原甜水海盆地 MIS 3 阶段湖泊沉积与环境变化. *第四纪研究*, 2008 **28**(1): 122~131
Li Shijie, Zhang Hongliang, Shi Yafeng et al. A high resolution MIS 3 environmental change record derived from lacustrine deposit of Tianshuihai Lake Qinghai Tibet Plateau. *Quaternary Sciences* 2008 **28**(1): 122~131
- 19 袁国映, 袁磊. 罗布泊历史环境变化探讨. *地理学报*, 1998 **53**(增刊): 83~89
Yuan Guoying, Yuan Lei. An approach to the environmental changes in Lop-Nur history. *Acta Geographica Sinica* 1998 **53**(Suppl.): 83~89
- 20 Peng ZC, Liu WG, Zhang PX et al. Precise timing of lacustrine gypsum in Luobupo Xinjiang using the thermal ionization mass spectrometry U-series method. *Chinese Science Bulletin* 2001, **46**(18): 1538~1541
- 21 Liu Weibao, Huang Yongsong, An Zhisheng et al. Summer monsoon intensity controls C_4/C_3 plant abundance during the last 35 ka in the Chinese Loess Plateau. Carbon isotope evidence from bulk organic matter and individual leaf waxes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2005 **220**(3~4): 243~254
- 22 Horikuchi K, Minoura K, Hoshino K et al. Paleoenvironmental history of Lake Baikal during the last 23000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 2000 **157**(1~2): 95~108
- 23 Meyers P A, Horie S. An organic carbon isotopic record of glacial-postglacial change in atmospheric PCO_2 in the sediments of Lake Biwa, Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 1993 **105**(3~4): 171~178
- 24 Street Perrott F A, Huang Y S, Perrott R A et al. Impact of lower atmospheric carbon dioxide on tropical mountain ecosystems. *Science* 1997, **278**: 1422~1426
- 25 Monnin E et al. EPICA Dome C Ice Core High Resolution Holocene and Transition CO_2 Data. *IGBP/PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2004-055*
- 26 刘强, 刘嘉麒, 陈晓雨等. 18.5ka BP 以来东北四海龙湾玛珥湖全岩有机碳同位素记录及其古气候环境意义. *第四纪研究*, 2005 **25**(6): 711~721
Liu Qiang, Liu Jiaqi, Chen Xiaoyu et al. Stable carbon isotope record of bulk organic matter from the Shaolongwan maar lake Northeast China during the past 18.5 ka. *Quaternary Sciences* 2005 **25**(6): 711~721
- 27 Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Plant Physiology* 1982 **9**: 121~137
- 28 Smith B N, Epstein S. Two categories of $^{13}C/^{12}C$ ratio for higher plants. *Plant Physiology* 1971 **47**(3): 380~384
- 29 Nakai N. Carbon isotopic variation and the paleoclimate of sediments from lake Biwa. *Proceedings of the Japan Academy* 1972 **48**: 516~521
- 30 Sukumar R, Ramesh R, Pant R K et al. A $\delta^{13}C$ record of Late

- Quaternary climate change from tropical peats in Southern India
Nature 1993 364 703~706
- 31 Zhang Chengjun, Chen Fahu, Jin Ming. Study on modern plant $\delta^{13}\text{C}$ in the western China and its significance. Chinese Journal of Geochemistry 2003 22 (2): 97~106
- 32 李红春, 朱照宇. 美国西部 Owens湖地球化学记录及其古气候意义. 第四纪研究, 2002 22(6): 578~588
Li Hongchun, Zhu Zhaoyu. Geochemical records and their paleoclimate significance in Owens Lake Western USA. Quaternary Sciences 2002 22(6): 578~588
- 33 朱立平, 鞠建廷, 王君波等. 湖芯沉积物揭示的末次冰消期开始时期普莫雍错湖区环境变化. 第四纪研究, 2006 26(5): 772~780
Zhu Liping, Ju Jianting, Wang Junbo et al. Environmental changes recorded in core sediments from the Pumoyun Co Lake of the Tibetan Plateau during the initial stage of the last deglacial period. Quaternary Sciences 2006 26(5): 772~780
- 34 张成君, 陈发虎, 施 祺等. 西北干旱区全新世气候变化的湖泊有机质碳同位素记录——以石羊河流域三角城为例. 海洋地质与第四纪地质, 2000 20(4): 93~97
Zhang Chengjun, Chen Fahu, Shi Qi et al. Carbon isotopic records of lake organic matter during Holocene climatic variations in the arid-semiarid areas of Northwest China——Taking Sanjiaocheng in the drainage area of the Shiyang River as an example. Marine Geology & Quaternary Geology 2000 20(4): 93~97
- 35 张成君, 陈发虎, 尚华明等. 中国西北干旱区湖泊沉积物中有机质碳同位素组成的环境意义——以民勤盆地三角城古湖泊为例. 第四纪研究, 2004 24(1): 88~94
Zhang Chengjun, Chen Fahu, Shang Huaming et al. The paleoenvironmental significance of organic carbon isotope in lacustrine sediments in the arid China: An example from Sanjiaocheng Paleolake in Minqin. Quaternary Sciences 2004 24(1): 88~94
- 36 罗 超, 杨 东, 彭子成等. 新疆罗布泊地区近 3.2 万年沉积物的气候环境记录. 第四纪研究, 2007 27(1): 114~121
Luo Chao, Yang Dong, Peng Zicheng et al. Climatic and environmental records in the sediment of the Luobei billabong in Lop-Nur Xinjiang in recent 32ka. Quaternary Sciences 2007 27(1): 114~121

STABLE CARBON ISOTOPE RECORD OF ORGANIC MATTER FROM THE LOP-NUR LACUSTRINE SEDIMENT IN XINJIANG, NORTHWEST CHINA

Luo Chao^① Liu Weigu^② Peng Zicheng^③ Yang Dong^④
He Jianfen^② Liu Guijian^③ Zhang Pengxi^④

① School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026; ② State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075; ③ School of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070; ④ Second Branch, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710043

Abstract

A $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ record of the organic matter ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) in lacustrine sediment of CK-2 core deposited during 20~9 kaBP, taken from the Luobei depression (40°47'N, 91°03'E), Lop-Nur Lake, Xinjiang, NW China is presented in this paper. The chronology is provided by the uranium/thorium disequilibrium dates. The results show that the $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values varies from -23.4‰ to -16.1‰ and have obvious correlation with the contents of organic matter. The C/N values indicate that the contents of organic matter in the sediment are mainly controlled by plants in the mountains around the district. The general synchronization between the $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in the CK-2 core and the atmospheric CO_2 concentration suggests that the change of the latter was the control factor to the variation of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values, but not the only one. It is generally accepted that the carbon isotope composition of plant material is correlated with C_3/C_4 pathways of carbon fixation in photosynthesis. Climate change influenced the ratios of C_3 and C_4 plants, which can be reflected in $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ variation in sediments. The balance between C_3 and C_4 plants depends on temperature and humidity. Results of this study confirm that the low $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values are corresponding to higher mean temperature, which caused a wetter environment on the mountains because of the more thawing snow.

The $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ record of CK-2 core showed six stages during 20~9 kaBP: 1) A period of extreme cold attributed to the last glacial maximum (LGM), occurred at 20.0~14.1 kaBP; 2) An instable stage between 14.1~13.3 kaBP is suggested by the dramatic variation of all proxies; 3) A short cold stage occurred at 13.3~12.8 kaBP; 4) The last glacial ended at 12.8 kaBP and the climate became warmer; 5) The period of a Younger Dryas-like cold event between 11.8~10.0 kaBP; 6) The beginning of the Holocene at 10.0 kaBP. Based on comprehensive research, it can be concluded that the extent of arid process was certainly the result of natural movement.

Key words: Lop-Nur organic carbon isotope, paleoclimate, atmospheric CO_2 concentration, C_3/C_4 plants