

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2012.06165

博斯腾湖近 200 年来湖泊环境变化的 有机碳氮稳定同位素记录

郑柏颖^{1,2}, 曹艳敏^{1,2}, 张恩楼¹, 高光¹

(1 中国科学院 南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:通过对新疆博斯腾湖河口区与散水区沉积岩心中有机碳、氮稳定同位素分析, 结合烧失量、粒度、磁化率等指标, 在²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 年代测定的基础上, 探讨博斯腾湖近 200 年来有机质来源变化以及湖泊环境变化过程, 结果表明, 博斯腾湖流域的农业活动对湖泊散水区的影响比河口区早。1810—1883 年间由于流域内气候由湿转干, 湖泊水位下降导致较多陆源物质到达湖泊散水区, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 快速下降而 $\delta^{15}\text{N}$ 快速上升。1884 年新疆建省后, 农业活动导致 BST16 岩心的颗粒变小, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏负而 $\delta^{15}\text{N}$ 偏正。1950 年后大规模的农业活动导致 BST13 岩心的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 降低、 $\delta^{15}\text{N}$ 升高, BST16 岩心的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 缓慢上升说明湖泊营养水平开始缓慢上升。1900 年后 BST16 岩心的 $\delta^{15}\text{N}$ 快速下降与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 进一步上升表明了初级固氮藻类增加, 湖泊初级生产力进一步提高。

关键词:有机碳、氮稳定同位素; 湖泊环境变化; 博斯腾湖

中图分类号: P597

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2012)06-0165-07

湖泊沉积物有机碳稳定同位素、氮同位素在恢复历史时期湖泊生产力、确定湖泊物质来源变化、古环境气候变化、湖泊生态系统结构、营养状况以及碳、氮循环等方面得到了广泛应用^[1-6]。近年来, 随着人类活动对自然环境的干扰程度逐渐加强, 许多湖泊营养过剩^[7-8], 严重影响周边地区的生活与发展, 而了解湖泊营养变化过程有助于湖泊的科学管理。沉积物中有机碳、氮稳定同位素成为确定湖泊的营养水平及重建初级生产力的有效指标^[9-11]。对佛罗里达中部 4 个不同程度富营养化湖泊研究发现, 沉积物中有机碳、氮稳定同位素是指示湖泊营养水平变化的良好指标^[12]。我国东部许多受人类活动影响的浅水湖泊富营养化过程被湖泊沉积物中有机碳、氮稳定同位素忠实记录, 并与其他指标相互佐证^[5, 13-15]。

博斯腾湖地处我国内陆干旱区, 曾是中国内陆最大的淡水湖, 是下游库尔勒市的重要水源地, 具有调控水资源、农业灌溉、工业与生活用水、提供水生动植物资源和向塔里木河下游紧急调水等多种功能^[16]。但在自然和人类双重胁迫下, 博斯腾湖正面

面临着水位下降、水体咸化、湿地生境多样性受损、湖营养水平升高, 污水超负荷排入等诸多问题, 已有许多学者对此进行大量的研究^[17-22], 但目前大部分的研究主要是根据已有的监测资料研究湖泊的现状、变化过程及预测发展方向, 对于缺少监测资料的湖泊历史时期的环境变化过程了解不够, 另一方面, 由于博斯腾湖目前并未因营养过剩而对人类社会产生严重影响, 因而学者对湖泊初级生产力与营养水平变化的研究相对较少。但目前已有的资料表明博湖水体的营养水平正不断升高, 因而, 本研究在²¹⁰Pb/¹³⁷Cs 定年的基础上, 通过沉积物有机碳、氮稳定同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)等指标的分析, 研究近百年来博斯腾湖的湖泊物质来源以及初级生产力变化过程, 为湖泊可持续利用和科学管理提供背景资料。

1 研究区概况

博斯腾湖(41°56′~42°14′N、86°40′~87°26′E)属中生代断陷湖, 地处巴音郭楞蒙古自治州博湖县, 位于焉耆盆地的东南角最低洼处。东西长 55 km, 南北宽 20 km, 在水位为 1 048.5 m 时水面面积为 1 210.5 km², 平均水深 7.5 m, 最大水深 17 m。湖水主要由开都河补给, 其中占总入湖地表径流量 $4.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 84.2%, 而开都河既有高山冰川和永久积雪的补给, 又有中低山季节性积雪融水和夏季降雨的补给, 是唯一的常年入湖河流。其余为源

基金项目: 环保公益性行业科研专项(200909048); 水专项课题(2009ZX07106-0040)

作者简介: 郑柏颖(1987—), 男, 硕士生, 主要从事湖泊沉积与环境演化研究, E-mail: zby104@126.com

通讯作者: 张恩楼, E-mail: elzhang@niglas.ac.cn

收稿日期: 2012-05-26; 改回日期: 2012-08-17. 文凤英编辑

于北部天山的乌拉斯台河、黄水沟、青水河、曲惠沟和乌什塔拉河等,出山口后河水被引入灌区,以地下水的方式补给湖泊。孔雀河是惟一的出流河,从大湖的西南角出水,流经铁门关峡谷向西经和什里克南至普惠后折而向东南流入罗布泊。湖区深居亚欧大陆中心,属温带大陆性干旱气候,年均气温 8.3°C ,年均降水量 64.7 mm ,蒸发量 $1\,881.2\text{ mm}$ ^[19,23]。

2 材料与方法

2.1 样品采集

2010 年 6 月利用重力采样器在博斯腾湖大湖区的河口区与敞水区各采集 2 根平行的柱状沉积岩心(图 1),所获得的沉积岩心水土界面清晰,表层沉积物未受扰动。现场以 0.5 m 间隔分样,样品密封于塑料袋内带回实验室并在 4°C 冰箱中冷藏以备分析。

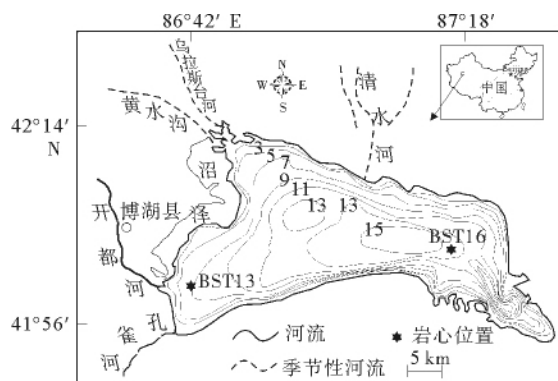


图 1 博斯腾湖采样点位置(等深线根据陈发虎文献^[17]所绘)

Fig. 1 Sketch map of Bosten Lake and sampling sites

(compiled after Chen et al., 2007)

2.2 年代指标测定

沉积岩心样品中²¹⁰Pb、²²⁶Ra 以及¹³⁷Cs 活度采用美国 EG & G Ortec 公司生产的高纯锗井型探测器(HPGe GWL2120215)测定。¹³⁷Cs 和²²⁶Ra 标准样品由中国原子能科学研究院提供,²¹⁰Pb 标准样品由英国利物浦大学做比标准,测试误差小于 10% 。

2.3 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 测定

取一定量的冻干研磨后的沉积物样品,加入 10% 的稀盐酸去除样品中碳酸盐后,用去离子水反复洗致中性烘干,研磨至 80 目以下。将样品用锡囊

封装好,经过 Flash EA1112 元素分析仪燃烧后气体送入 Delta^{Plus} Advantage 同位素质谱仪,测定样品的有机碳、氮同位素比率。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的计算以 VPDB 为标准, $\delta^{15}\text{N}$ 的值计算以 air- N_2 为标准。有机碳同位素的分析精度为 0.1% ,氮同位素分析精度为 0.15% ^[15]。

3 结果

3.1 年代确定

博斯腾湖采样点沉积岩心年代和沉积速率变化的详细研究成果已发表^[24],陈发虎等^[17]根据 Norris^[25]关于中国历史时期核武器的核爆试验当量报道,推算出 20 世纪 60—70 年代新疆博斯腾湖沉积物中¹³⁷Cs 应该有 3 个蓄积峰,分别为 1967—1970 年、1973 年以及 1976 年,再加上 1963 年全球核爆的高峰期,这 4 个蓄积峰在 BST13 与 BST16 两个采样点中均比较明显^[24]。由于历史时期沉积速率变化较大,CRS 模式的计算结果与已确定的¹³⁷Cs 时标有一定偏离,因而本研究采用多时标复合模式方法计算年代,将已确定的时标的深度数据加入复合模型,分段计算沉积岩心的年代,具体计算方法见文献^[26]。BST13 与 BST16 两个岩心的沉积速率变化过程比较相似(图 2),总体上都从 1950 年左右开始缓慢上升,在 1960—1980 年间出现一个沉积高峰后回落,而后继续一个缓慢的上升过程,1950 年开始的沉积加快以及 1970 年左右的沉积高峰对应于焉耆盆地两次大规模农业开荒^[27],表明博斯腾湖沉积速率变化与当地农业活动导致的流域侵蚀有关。

3.2 有机碳氮稳定同位素变化

敞水区 BST16 沉积岩心中有机碳、氮稳定同位素变化过程(图 3)表明,27.5 cm 以下 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 相对偏正,稳定在 -25% 左右,而相应的 $\delta^{15}\text{N}$ 则稳定在 2% ~ 3% 之间,处于相对偏低的时期;27.5~24 cm 的岩心的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 从 -25% 快速下降到 -27% ,而 $\delta^{15}\text{N}$ 也从 3% 快速上升到 5.5% ;25~20 cm 之间的沉积物中的有机碳、氮稳定同位素比较稳定,变化不大, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 稳定于 -27% , $\delta^{15}\text{N}$ 则稳定于 6% ;25~5.5 cm 之间的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 变化不大,但有向偏正方向发展的趋势,从 -27% 慢慢上升到 5.5 cm 处的 -26.5% 左右,而 $\delta^{15}\text{N}$ 则持续稳定在 6% 左右;5.5 cm 以上 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 快速地从 -26.5% 上升到 -25% ,同时 $\delta^{15}\text{N}$ 略有下降,从 6% 下降到 5% 。

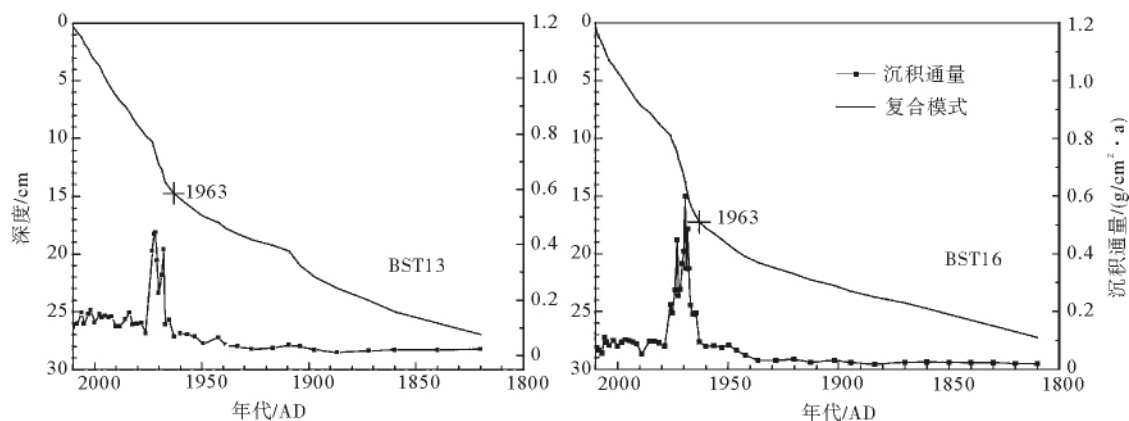
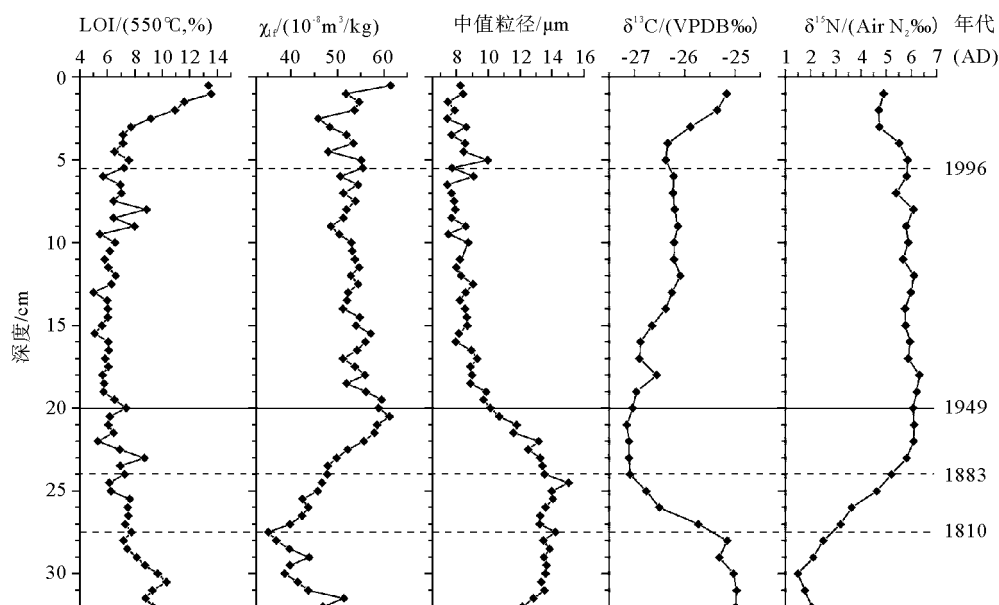


图2 勃斯腾湖两个采样点的年代和沉积通量

Fig. 2 Age-depth plot and dry mass accumulation rate of the two sediment cores in Bosten Lake

图3 勃斯腾湖 BST16 岩心的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、中值粒径、磁化率与烧失量变化序列
(烧失量数据来源于文献[24], 磁化率、粒度数据来源于文献[28])Fig. 3 Vertical changes in grain size, MS, LOI, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in core BST16

位于河口区的 BST13 沉积岩心的有机碳氮稳定同位素变化过程(图 4)大致可以分为 3 个阶段: 21~17 cm 的稳定同位素变化不大, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 稳定在 -23‰ 左右, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 则稳定于 2.5‰ 左右; 有机碳、氮稳定同位素在 17 cm 处发生较大变化, 17~9 cm 的岩心中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 从 -23‰ 快速下降到 9 cm 处的 -25‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 则快速上升, 从 2.5‰ 上升到 9 cm 处的 4.5‰ ; 9 cm 以上的岩心同位素比较稳定, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在 -25‰ 左右波动, 变化较大, 总体呈略偏正趋势, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 则稳定在 4.5‰ 左右, 略有偏负趋势。

3.3 磁化率、粒度、烧失量的变化

BST16 岩心中, 磁化率、粒度、烧失量变化过程

如图 3 所示, 32~27.5 cm 磁化率呈下降趋势, 从 $50 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 下降到 $10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 而在 27.5~20 cm, 磁化率快速上升, 20 cm 处达 $60 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 20 cm 以上的磁化率稳定在 $55 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 左右。粒度的变化与磁化率的变化趋势相反, 24 cm 以下沉积物的中值粒径稳定在 $16 \mu\text{m}$ 左右; 25~20 cm 中值粒径快速降低, 从 $16 \mu\text{m}$ 降低到 $10 \mu\text{m}$ 左右; 20 cm 以上岩心的中值粒径呈缓慢降低的过程, 基本上稳定在 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 。

BST16 钻孔在 27.5 cm 以下部分烧失量较高, 但有下降的趋势, 从 9% 下降到 27.5 cm 处的 7% 左右, 而后直至 5 cm 处一直稳定在 6%~8% 之间小幅波动。5 cm 以上的烧失量快速增加, 从 7% 快速

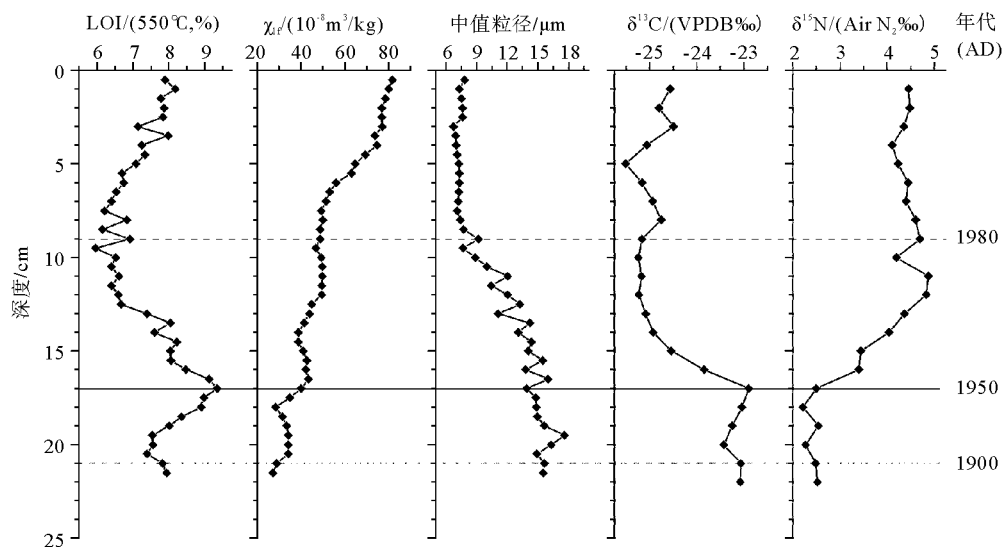


图4 博斯腾湖 BST13 岩心的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、中值粒径、磁化率与烧失量变化序列
(烧失量数据来源于文献[24], 磁化率、粒度数据来源于文献[28])

Fig. 4 Vertical changes in grain size, MS, LOI, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in core BST13

增加到表层的 14% 左右。

BST13 岩心中, 磁化率、粒度、烧失量变化过程如图 4 所示, 磁化率在 1950 年以前稳定在 $40 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 左右, 1950 年以后开始缓慢上升, 从 1950 年 (17 cm) 的 $40 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 上升到 2010 年的 $80 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。而沉积物中值粒径 1950 年前稳定在 $17 \mu\text{m}$ 左右, 1950 年后开始从 $17 \mu\text{m}$ 缓慢地下降到 9 cm 处 (1900 年) 的 $7 \mu\text{m}$, 而后稳定在 $7 \sim 8 \mu\text{m}$ 之间。

BST13 岩心的烧失量变化从下往上可分成 3 个阶段, 从 21 cm 处的 7.5% 上升到 17 cm 处的 9.5%, 而后降低到 9 cm 处的 6.5% 左右, 9 cm 以上烧失量呈缓慢上升的趋势, 从 6.5% 上升到 8% 左右。

4 讨论

湖泊沉积物中有多种有机质来源, 主要有水生植物、陆地植物及土壤腐殖质, 不同的有机质具有不同的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ [29] (图 5)。陆地植物直接利用大气中的 N_2 , 其 $\delta^{15}\text{N}$ 通常为 $2\text{‰} \sim 10\text{‰}$, 土壤有机氮或腐殖质源于植物的固氮作用, 因而有机氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 与大气中的氮相似, 约为 0, 耕作土壤会加速植物组织的分解, 有机质的硝化、反硝化、氨化及挥发作用都会发生同位素的分馏, 从而加速 $\delta^{15}\text{N}$ 的富集 [27]。而藻类 N 元素的主要来源是 NO_3^- , 其 $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为 $+7\text{‰} \sim +10\text{‰}$ [6], 因而湖泊内源有机质的 $\delta^{15}\text{N}$

较陆源有机质高。随着湖泊营养水平的提高, 有以下几方面的原因会导致湖泊沉积物中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值升高: (1) 植物在光合作用过程中倾向于利用轻同位素, 但在初级生产力高的湖泊里, 碳的轻同位素有可能被耗尽, 藻类只能利用重同位素来合成有机物; (2) 在浅水碱性湖泊中, 快速增长的初级生产力会消耗水中溶解的少量的 CO_2 , 在这种情况下, 藻类会利用湖泊中的生物碳酸盐合成有机物, 而碳酸盐中的 $\delta^{13}\text{C}$ 比空气中的 CO_2 重 8‰ , 从而导致沉积物中的 $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 富集; (3) 在高营养的湖泊中, 沉积物以及敞水区可能长期处于厌氧状态, 在这种情况下, 甲烷细菌倾向于分解有机物成为较轻同位素的 CH_4 以及较重同位素的 CO_2 [30]。综合 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 及其他环境代用指标, 可以反映沉积物有机质来源及湖泊营养水平的变化过程。

BST13 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 总体上较 BST16 高, 这主要是由于 BST13 水深较浅, 有少量的沉水植物生长, 而处于敞水区的 BST16 采样点则无沉水植被分布, 因而河口区的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 总体明显高于敞水区。1810 年前 (BST16 岩心 27.5 cm 以下), 该地区气候比较湿润 [30], 湖泊初级生产力较高, 沉积物中内源有机质的比例较高, 导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 则稳定在 2‰ 左右, 与大气中氮气比较接近。1810—1883 年间该地区气候变干 [30], 对内陆干旱地区湖泊而言, 气候干旱则入湖径流量减少, 水位降低, 导致陆源碎屑物质比较容易到达湖泊中心区域, 磁化率也开始缓慢上升, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 开始急剧地下降,

而相应的 $\delta^{15}\text{N}$ 则开始快速上升,说明陆源有机质输入量增加。1884 年新疆建省后,当地政府采取一系列的措施恢复农业生产,博斯腾湖流域内开始较大规模地屯田垦荒,1883—1950 年间大量的陆源物质由于农业耕作而随地表径流进入湖泊,导致 BST16 岩心的中值粒径变小, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏负而 $\delta^{15}\text{N}$ 则偏正,同时,由于陆源物质的大量带入导致磁化率上升。但这一时间段内的 BST13 的有机质依然是以内源有机质为主,有限规模的农业耕作仍未对河口区产生大的影响,这可能与湖泊水动力有关,河口区水动力强,仍以沉积粗颗粒为主,而农业活动带来细颗粒物则被带到离河口区较远的区域沉积下来。

自 1950 开始,焉耆盆地进行了大规模的绿洲开发^[18],流域内的人类活动特别是农业耕作导致大量的细颗粒物输入湖泊,本应以粗颗粒沉积为主的河口区其沉积物的中值粒径在 1950 年后快速下降,而相应的磁化率也开始上升,同时,由农业活动带入的有机质也沉积于河口区,外源有机质的大量输入导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 快速下降以及 $\delta^{15}\text{N}$ 快速上升。20 世纪末以来博斯腾湖开始出现富营养化现象^[19],内源有机质比例增加,1996 年后 BST16 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 也快速地从 -26.5‰ 上升到 -25‰ ,同时 LOI 也快速上升,说明这一时期内源有机质快速上升,湖泊营养正快速升高,而 $\delta^{15}\text{N}$ 的下降则可能与初级固氮藻类的繁殖有关:固氮藻类直接利用空气中的氮气作为其氮源,其 $\delta^{15}\text{N}$ 与空气中的 N_2 相近,因而较其他藻类低。同时 BST13 岩心中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 也呈现略微偏正的趋势。可以看出近 10 年来博斯腾湖初级生产力快速增加,湖泊有向富营养化方向发展的趋势。

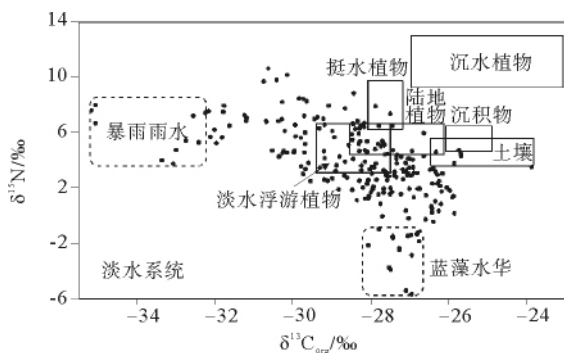


图5 不同来源的有机质同位素^[31]

Fig. 5 Isotopes of organic matters from different sources

5 结论

通过河口区与敞水区两岩心的有机碳、氮稳定同位素分析,并结合粒度、磁化率、烧失量等指标的研究发现,近 200 年来新疆博斯腾湖的环境变化过程可以分为 5 个阶段:1810 年前该地区气候比较湿润,湖泊的生产力较高,因而沉积物的烧失量也比较高,沉积物中有机质来源以内源有机质为主,因而该时期的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正而 $\delta^{15}\text{N}$ 偏负;1810—1883 年间 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 快速降低与 $\delta^{15}\text{N}$ 的快速上升表明陆源有机质的输入增加,这主要是由于气候变干,湖泊水位降低,较多陆源物质到达湖泊敞水区;1883—1949 年沉积物的中值粒径快速降低,这主要是流域内农业活动加强所致;1950—1996 年间由于周边地区农业活动加强导致陆源碎屑大量输入,人为的排放无机盐及有机质导致湖泊营养水平上升,水生植物数量开始增加,因而,该阶段的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 较之前一阶段偏正;1996 年后 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 快速上升,反映出湖泊内源有机质比例开始增加,而 $\delta^{15}\text{N}$ 的下降则可能与初级固氮藻类的增加有关,这是湖泊营养增加的典型表现。

BST13 钻孔与 BST16 的理化指标变化过程具有较好的一致性。两岩心的差异在于河口区钻孔的各指标在 1950 年前后发生较大变化,而 BST16 的这一变化发生更早,并且变化幅度相对较小。这可能是由于 1950 年前人类活动对湖泊生态环境的干扰程度相对较小,因而开都河河口区由于其水动力较强仍然以粗颗粒沉积为主,细颗粒被湖流带向远离河口的敞水区沉积。而在 1950 年后由于农业活动规模迅速扩大,产生的细颗粒物快速增加,导致本应以沉积粗颗粒泥沙的河口区变成以细颗粒沉积为主,有机碳氮稳定同位素也发生相应改变。

致谢:采样得到龚志军副研究员、汤祥明博士及新疆博斯腾湖研究所等多名工作人员的大力帮助与支持,夏威夷高级工程师与刘恩峰副研究员提供测年数据及其年代算法,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Bernasconi M S, Barbieri A, Simona M. Carbon and nitrogen isotope variations in sedimenting organic matter in Lake Lugano[J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(8):1755-1765.
- [2] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic and paleoclimatic processes [J]. Organic Geochemistry, 1997, 27(5/6): 213-250.

- [3] Kaushal S, Binford M W. Relationship between C:N ratios of lake sediments, organic matter sources, and historical deforestation in Lake Pleasant, Massachusetts, USA [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22: 439-442.
- [4] Leng M J, Marshall J D. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004(23): 811-831.
- [5] Wu J L, Lin L, Gagan M K, et al. Organic matter stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) response to historical eutrophication of Lake Taihu, China [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 563: 19-29.
- [6] Meyers P A, Teranes J L. Sediment organic matter [M]// Last, W M, Smol J P. Tracking environmental changes using lake sediment, vol. 2: physical and geochemical methods. London: Kluwer Academic Publishers, 2001: 239-270.
- [7] Zhang E L, Bedford A, Jones R, et al. A subfossil chironomid-total phosphorus inference model for lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51: 2125-2132.
- [8] Yang X D, John A, Dong X H, et al. Surface sediment diatom assemblages and epilimnetic total phosphorus in large, shallow lakes of the Yangtze floodplain: their relationships and implications for assessing long-term eutrophication [J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53: 1273-1290.
- [9] Teranes J L. The record of nitrate utilization and productivity limitation provided by d^{15}N values in lake organic matter—A study of sediment trap and core sediments from Baldeggersee, Switzerland [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45: 801-813.
- [10] Neumann T, St gbauer A, Walpersdorf E, et al. Stable isotopes in recent sediments of Lake Arendsee, NE Germany: response to eutrophication and remediation measures [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 178: 75-90.
- [11] Teranes J L, McKenzie J A, Lotter A F, et al. Stable isotope response to lake eutrophication: calibration of a high-resolution lacustrine sequence from Baldeggersee, Switzerland [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44: 320-333.
- [12] Brenner M, Whitmore T J, Curtis J H, et al. Stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) signatures of sedimented organic matter as indicators of historic lake trophic state [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22: 205-221.
- [13] Wu Y H, L cke A, Wang S M. Assessment of nutrient sources and paleoproductivity during the past century in Longgan Lake, middle reaches of the Yangtze River China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2008, 39: 451-462.
- [14] Liu E F, Shen J, Yang L Y, et al. Assessment of heavy metal contamination in the sediments of Nansihu Lake Catchment, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 161: 217-227.
- [15] Zhang E L, Liu E F, Jones R, et al. A 150-year record of recent changes in human activity and eutrophication of Lake Wushan from the middle reach of the Yangtze River, China [J]. *Journal of Limnology*, 2010, 69: 235-241.
- [16] 金海龙, 王晓峰, 王哲, 等. 新疆博斯腾湖资源开发与环境保护研究 [J]. *水土保持研究*, 2002, 9(3): 58-61. [JIN Hailong, WANG Xiaofeng, WANG Zhe, et al. Study on resources development and environmental protection of the Bosten Lake [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(3): 58-61.]
- [17] 陈发虎, 黄小忠, 张家武, 等. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(1): 77-85. [CHEN Fahu, HUANG Xiaozhong, ZHANG Jiawu, et al. Humid little ice age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(1): 77-85.]
- [18] 周成虎, 罗格平, 李策, 等. 博斯腾湖环境变化及其与焉耆盆地绿洲开发关系研究 [J]. *地理研究* 2001, 20(1): 14-23. [ZHOU Chenghu, LUO Geping, LI Ce, et al. Environmental change in Bosten Lake and its relation with the oasis reclamation in Yanqi Basin [J]. *Geographical Research*, 2001, 20(1): 14-23.]
- [19] 夏军, 左其亭, 邵诚民. 博斯腾湖水资源可持续利用——理论·方法·实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 3-17, 31-39. [XIA Jun, ZUO Qiting, SHAO Chengmin. The Sustainable Use of Water Resources of Bosten Lake [M]. Beijing: Science Press, 2003: 3-17, 31-39.]
- [20] 李卫红, 陈跃滨, 徐海量, 等. 博斯腾湖的水环境保护与可持续利用对策 [J]. *地理研究*, 2003, 22(2): 185-191. [LI Weihong, CHEN Yaobin, XU Hailiang, et al. A study on water environmental protection and sustainable utilization of Bosten Lake, Xinjiang [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 185-191.]
- [21] 刘俊琢, 张成君, 安娟, 等. 新疆博斯腾湖表层沉积物中硅藻分布特征及影响因素分析 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 270-274. [LIU Junzhuo, ZHANG Chengjun, AN Juan, et al. Modern diatom distribution and influence factors analysis of the surface sediment in Bosten Lake, Xinjiang [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(2): 270-274.]
- [22] 孙占东, Opp C, 王润, 等. 博斯腾湖流域山区地表径流对近期气候变化的响应 [J]. *山地学报*, 2010, 28(2): 206-211. [SUN Zhandong, Opp C, WANG Run, et al. Response of land surface flow to climate change in the mountain regions of Bosten Lake Valley, Xingjiang, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(2): 206-211.]
- [23] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 345-346. [WANG Sumin, DOU Hongshen. Lake in China [M]. Beijing: Science Press, 1998: 345-346.]
- [24] 郑柏颖, 张恩楼, 高光. 近百年来新疆博斯腾湖初级生产力的变化 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 466-473. [ZHENG Boying, ZHANG Enlou, GAO Guang. The change of primary productivity of Boston Lake in Xinjiang over the past century [J]. *Journal of Lake Science*, 2012, 24(3): 466-473.]
- [25] Norris R S, Burrows A S, Fieldhouse R W. British, French, and Chinese nuclear weapons [M]. Boulder: Westview Press, 1994: 333-336.
- [26] Appleby P G. Chronostratigraphic techniques in recent sedi-

- ments[M]. In: Last W M, Smol J P. Tracking environmental change using lake sediments, Volume 1: Basin analysis, coring, and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, 2001: 171-196.
- [27] 张俊, 周成虎, 李建新. 新疆焉耆盆地近 40 年土地利用与土地覆被演化[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 31-37. [ZHANG Jun, ZHOU Chenghu, LI Jianxin. Land use and land cover change of Yanqi basin, Xinjiang in the recent 40 years [J]. Resources Science, 2004, 26(6): 31-37.]
- [28] Zhang E L, Zheng B Y, Cao Y M, et al. The effects of environmental changes on chironomid fauna during the last century in Bosten Lake, Xinjiang, NW China [J]. Fundamental and Applied Limnology, 2012.
- [29] 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 208-234. [SHEN Ji, XUE Bin, WU Jinglu, et al. Lake Sediment and Environmental Evolution [M]. Beijing: Science Press, 2010: 208-234.]
- [30] Stiller M, Magaritz M. Carbon-13 enriched carbonate in interstitial waters of Lake Kinneret sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1974, 19: 849-853.
- [31] Cloern J E, Canuel E A, Harris D. Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco bay estuarine system [J]. Limnology and Oceanography, 2002, 47: 713-729.

C, N STABLE ISOTOPE RECORDS OF ENVIRONMENTAL CHANGES IN BOSTEN LAKE DURING THE PAST 200 YEARS

ZHENG Boying^{1,2}, CAO Yanmin^{1,2}, ZHANG Enlou¹, GAO Guang¹

(1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Two sediment cores were recovered from the Bosten Lake in order to investigate the changes in both the lake system and source of organic materials during the last 200 years. Based on $^{210}\text{Pb}/^{137}\text{Cs}$ chronology, stable isotopes of organic carbon and nitrogen as well as Loss on Ignition (LOI), grain size and magnetic susceptibility (MS) were analyzed. The results indicate that the agricultural activities in the catchment of the Bosten Lake have much earlier influence in the lake center rather than in the river mouth. Due to the general increase in regional humidity during 1810—1883 AD, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ declined rapidly in the core BST16, while abrupt increases in $\delta^{15}\text{N}$ were found as more terrestrial material could reach the lake center. After the establishment of Xinjiang Province in 1884 AD, intensified agricultural activities have led to marked decrease in the medium grain size, and relatively higher $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and lower $\delta^{15}\text{N}$ in the core BST16. Since 1950 AD, large scale agricultural activities have led to the rapid decrease in $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and increase in $\delta^{15}\text{N}$, indicating a general increase in the trophic level. Further decrease in $\delta^{15}\text{N}$ together with the increasing $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ after the 1990's indicates that nitrogen fixation by algae began to dominate the lake primary productivities.

Keywords: stable isotopes of organic carbon and nitrogen; primary productivity; nutrient change; Bosten Lake