

黄旗海岩芯烧失量分析与冰后期环境演变

刘子亭^{1,2}, 余俊清², 张保华¹, 张丽莎²

(1. 聊城大学环境与规划学院, 山东 聊城 252059;

2. 中国科学院青海盐湖研究所西安二部, 陕西 西安 710043)

摘要:重建闭流型湖泊的水位及环境变化, 可以为研究冰后期及全新世以来的气候变化及季风环流演变提供不可或缺的关键信息。对 HQH4 岩芯烧失量与川蔓藻化石种子的研究结果显示, 黄旗海湖区在全新世到来之前的气候寒冷, 湖面冰封期较长, 夏季温度较低, 致使湖泊的有机生产率和自生碳酸盐产量比全新世低很多。黄旗海从全新世早期起进入了稳定的湖泊发展阶段后有机生产率显著上升, 自生碳酸盐产量同步大幅度增长。在 10 200~6 800 a BP 期间, 烧失量出现显著波动, 很大程度上反映了气候发生暖湿—冷干—暖湿—冷湿的变化。在 6 800~3 800 a BP 期间, 烧失量较高而且波动较小, 反映了中全新世黄旗海以稳定的温暖湿润气候为主, 湖水水位变化不大, 有机质和碳酸盐生产力较高。从 3 800 a BP 起, 气候逐渐变凉, 间有多次冷暖干湿的剧烈变化, 水位波动频繁。

关键词:黄旗海; 湖底岩芯; 烧失量; 川蔓藻; 冰后期环境演变

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2008)04-0001-05

烧失量 (LOI) 测定作为一种重要的研究方法, 被广泛应用于湖泊沉积物成分分析及气候环境变化研究中^[1-7]。利用黄旗海湖泊沉积物的烧失量和水生植物川蔓藻的化石种子的分析, 结合前人工作定量重建了黄旗海湖泊水位波动和区域气候、水文以及植被的变化历史, 恢复了黄旗海冰后期的气候环境演变过程。

1 方法与结果

黄旗海位于内蒙古高原南缘阴山山系大青山东段灰腾梁脚下, 地理位置为北纬 $40^{\circ}48' \sim 40^{\circ}54'$, 东经 $113^{\circ}11' \sim 113^{\circ}24'$, 湖面海拔 1 264 m, 地貌区划属集宁—张北熔岩台地的组成部分。湖盆边缘为山地和玄武岩台地所环绕, 湖泊四周为湖积平原, 以玄武岩台地、低缓丘陵及湖积平原为主。黄旗海为一构造断陷

湖, 长轴呈东北—西南走向, 西南部水域开阔, 往东北方向收敛, 形似一不对称的“直角三角形”。多年平均年降水量 379 mm, 其中 7~8 月占全年总降水量 60%, 降水集中; 多年平均年蒸发量 2 267 mm 为年降水量的 6 倍, 空气相对湿度为 30%~60%, 表现为典型中温带大陆性半干旱季风气候特征。黄旗海湖长 20 km, 宽 7~10 km, 湖岸线周长 60 km, 面积 71.93 km², 水深 3~4 m, 西南浅, 东北深, 最大深度为 10 m, 流域面积 4 800 km², 盆地面积 360 km², 共有河流沟溪 21 条, 霸王河、泉玉林河、磨子山河、谢家沟河、大坝沟河、平地泉河等直接注入黄旗海。

利用黄旗海冬季坚固的冰封面作为稳固的司钻平台, 在湖心中央成功地获取了高质量的湖底沉积岩芯 (样品测试方法详见文献 [8])。根据烧失量的变化情况, 对其随深度变化的曲

收稿日期: 2008-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49971074); 国家自然科学基金项目 (40571173); 中国科学院青海盐湖所创新前沿项目 (CX200302); 山东省博士基金项目联合资助

作者简介: 刘子亭 (1970—), 男, 硕士, 副教授, 地球化学专业。

线作了分带处理, 自下而上烧失量共分为 4 带, 又根据带内的变化分出带内的若干阶段 (图 1)。

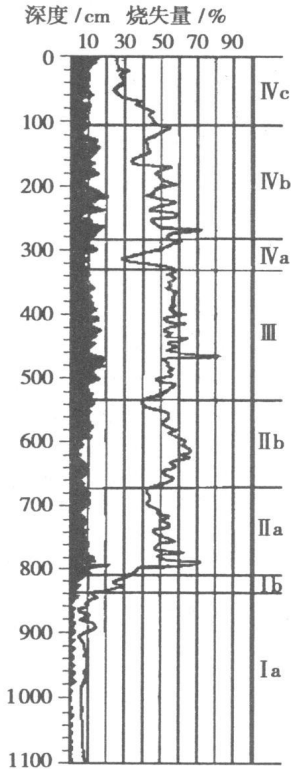


图 1 黄旗海 HQH4 钻孔岩芯烧失量曲线图
Fig 1 Curves of loss on ignition values versus sediment depths of core HQH4 from Lake Huangqihai Inner Mongolia

I 带 (1 100 ~ 807.5 cm): LOI_R 低于 10%。其中 I^a 段 (1 100 ~ 840 cm) 不及 3%, I^b 段 (840 ~ 807.5 cm) 逐渐上升, 但大多仍低于 10%。 LOI_R 在绝大部分时期在 10% 左右, 在 I^c 段, 烧失量在大部分时期不到 10%, 只是在 890 cm 和 860.4 cm 附近达到 16%; 在 I^b 段大幅度上升, 在 807.5 cm 达到 34%。

II 带 (807.5 ~ 534.5 cm): LOI_R 为 5% ~ 23%, 大部分时期在 10% 左右, 出现大幅度的波动。其中在 II^c 段 (807.5 ~ 675 cm), 烧失量持续上升并于 790 cm 处达到最高值 23%, 之后迅速降低到 10% 左右, 期间波动不大; 在 II^b 段 (675 ~ 534.5 cm), 烧失量于 620 cm 处出现 800 ~ 0 cm 间的最低值 5%, 之后回升并达到 12%。 LOI_R 为 40% ~ 72% 并出现大幅度波

动; II^a 带, 烧失量首先急剧上升, 在 790 cm 处达到全曲线的次高值 72%, 之后快速下降, 后又发生多次快速的升降变化, 总的趋势为下降, 在 675 cm 处降到 43%; II^b 段, 烧失量先是逐渐上升到 68%, 后缓慢下降, 在 634.5 cm 处降到 40%。

III 带 (534.5 ~ 330 cm): LOI_R 为 8% ~ 21%, 大部分时间在 10% 以上, 为全岩芯的最稳定的高值时期, 存在小幅波动。 LOI_R 多在 62% ~ 75% 之间, 在 463 cm 处出现最高值 84%, 整体上稳定, 出现多次小幅波动。

IV 带 (330 ~ 0 cm): LOI_R 为 6% ~ 21%, 大部分时期在 10% 以上, 出现多次短时间的高频大幅振荡。其中, IV^a 阶段 (330 ~ 284.5 cm) 出现一次明显降低过程; IV^b 阶段 (284.5 ~ 106.5 cm) 烧失量较高, 出现频繁的大幅度动荡; IV^c 阶段 (106.5 ~ 0 cm) 的烧失量为 10% 左右, 无大的起伏, 表现平稳, 在 20 cm 处开始上升, 至 0 cm 时达到 15%。 LOI_R 变化在 25% ~ 72% 之间, 且发生多次大幅振荡; IV^a 段出现一次大幅快速的下降, 由 60% 下降到 30% 后又回升到 60%; 在 IV^b 段又连续出现幅度超过 15% 的剧烈升降, 总体表现为下降的趋势; IV^c 带的烧失量由起初的 50% 逐渐下降到 0 cm 的 25%, 间有小幅波动。

在黄旗海 HQH4 钻孔岩芯 800 cm 处出现川蔓藻的种子, 其他层位没有发现。川蔓藻种子的丰度为 14 个 / 24 cm³。按照湖泊沉积速率为 0.8 mm/a 计算, 估算 HQH4 岩芯 800 cm 深处川蔓藻种子的年沉积率为 470 个 / m²。

镜下观察川蔓藻化石种子, 发现种子保存完整。在 800 cm 处附近, 岩芯沉积物以腐泥、纹泥、粘土及砂质粘土等为主, 偶见少量细纱及粉砂层, 且具有典型的湖积韵律和季节纹层, 为湖相沉积。根据川蔓藻化石种子的数量, 化石种子保存完整程度, 结合取芯区位于黄旗海的湖区以及湖底地势较为平缓的特点, 认为发现的川蔓藻化石种子不可能为经长距离搬运而来, 确定川蔓藻化石种子为坠落后的原地埋藏。

2 黄旗海冰后期环境演变

根据对黄旗海 HQH4 岩芯烧失量和沉水

植物川蔓藻种子的特征及其所提供的环境信息分析, 结合沉积物¹⁴C年代学、岩性地层学等综合分析, 可将黄旗海冰后期气候环境的演变过程分为 4 个带。

I 带 (1 100 ~ 807.5 a BP, 16 000 ~ 10 220 a BP), 岩性以砾石、粗砂及泥质粉砂为主, 局部可见少量砂质粘土, IO_{LR} 与 IO_{ER} 在大部分阶段分别低于 2% 和 10%。在 I 亚带 (1 100 ~ 840 a BP, 14 000 ~ 10 640 a BP), 岩性为粗砂、细砂、砾石夹泥质粉砂, IO_{LR} 与 IO_{ER} 分别低于 1% 和 10%, 为全岩芯的最低段, 反映有机质生产力和碳酸盐沉积都非常低。在 I b 亚带 (840 ~ 807.5 a BP, 10 640 ~ 10 220 a BP) 之间, 岩性为粗砂、砾石夹细砂、粉砂; IO_{LR} 与 IO_{ER} 分别从 1% 和 11% 持续上升到 12% 和 35%, 反映温度升高, 降水增加, 有机质生产力开始上升。

青海湖深水区湖底岩芯的研究^[9-10]表明, 末次冰消期晚期自生碳酸盐的低值对应于气候寒冷和降水增多的时期, 高值对应于蒸发强、干旱化的气候环境条件。因此, I 带应为黄旗海末次冰期持续及由末次冰期向冰后期的转换时期和黄旗海的成湖期, 表现为气候在大部分时间内寒冷干燥, 湖面冰封时间较长, 降水和蒸发都很弱, 湖水较浅, 可能为湖滨岸和浅湖沼交替相沉积。寒冷干燥的气候环境既控制了陆生植物的生长又造成湖面冰封期较长, 从而抑制了水生植物的生长, 促进了沉积物中有机质的分解, 同时也不利于碳酸盐的沉积。在后期温度有所升高, 有效降水开始增大。温度的升高和降水的增多为生物的生长提供了有利的条件, 有机质沉积上升, 植物光合消耗二氧化碳过程和升温引起的二氧化碳溶解度的降低也促使碳酸盐的沉积。

II 带 (807.5 ~ 534.5 a BP, 10 220 ~ 6 770 a BP), 岩性以湖相粘土为主, 局部可见少量砂质粘土, 出现湖相季节纹泥, 具典型的湖积韵律和季节纹层。X 衍射分析表明在 800 a BP (10 120 a BP) 处有一层白云石, 其它以文石为主。此带又可以分为两个亚带。II a 亚带 (807.5 ~ 675 a BP, 10 220 ~ 8 510 a BP), 岩性以湖相粘土为主, 局部可见少量砂质粘土, 具典型湖积韵律; IO_{LR} 与 IO_{ER} 从 807.5 a BP 持续上

升, 在 790 a BP (10 000 a BP) 处分别出现全程最高值 23% 和次高值 72%, 之后下降, 在 675 a BP 分别降到 10% 和 43%。在 800 a BP (10 120 a BP) 处出现沉水植物川蔓藻化石种子。结合在 800 a BP 处文石层的存在, 表明至 790 a BP (10 000 a BP) 期间温度持续升高, 降水和蒸发增强, 导致水位上升但低于 4 m 能够满足川蔓藻的生长, 有机质生产力大增, 同时加快了碳酸盐的沉积, 并于 790 a BP (10 000 a BP) 处形成高值。之后温度逐渐下降, 水位上升并超过 4 m 川蔓藻不能生长, 有机质生产力有所下降, 湖水盐度的降低也减缓了碳酸盐的沉积速度。II b 亚带 (675 ~ 534.5 a BP, 8 510 ~ 6 770 a BP), 岩性以湖相粘土为主, 局部可见少量砂质粘土, 具湖积韵律; IO_{LR} 与 IO_{ER} 分别为 5% ~ 10% 和 40% ~ 67%, IO_{LR} 从 10% 降到 5% 又回升至 12%, IO_{ER} 则首先从 43% 升至 78%, 然后又降到 40%。

本带气候表现为暖湿—冷干—暖湿—冷干的特征, 为黄旗海湖泊的发育时期。初期烧失量的急剧上升至次高值和沉水植物川蔓藻的存在明确地指示着温度的快速上升和降水的增多, 使得湖泊水位上升并超过 4 m 极大地促进了生物生长和有机质沉积增多, 以及碳酸盐的沉积, 说明黄旗海地区由末次冰期的寒冷干燥向冰后期的温暖湿润的转换过程是快速而剧烈的。之后温度的下降又减缓了碳酸盐的沉积, 有机质含量逐渐降低。后期的暖湿和冷湿变化使得生物生长和碳酸盐沉积又发生了剧烈的变化。

III 带 (534.5 ~ 330 a BP, 6 770 ~ 3 810 a BP), 岩性以湖相粘土为主, 局部可见少量砂质粘土, 具典型湖积韵律; IO_{LR} 为 9% ~ 20%, 比 II 带有所升高; IO_{ER} 大多在 50% ~ 60% 之间, 比较稳定, 在 468 a BP (5 930 a BP) 处 IO_{LR} 与 IO_{ER} 几乎同时出现 20% 和 85% 的高值。反映这一时期气候温暖湿润, 降水可能略高于蒸发, 湖泊水位稳定, 气候波动较小, 生物生长状况旺盛, 有机质和碳酸盐沉积稳定。在 468 a BP (5 930 a BP) 处发生快速升温过程, IO_{ER} 出现全程最高值, 反映为一短时间尺度气候显著变暖事件。

IV带 (330~0 a BP) 岩性以湖相粘土、湖相粘土和腐泥为主, 局部可见少量砂质粘土, 具典型湖积韵律; LOI_R 与 LOI_T 分别为 6%~21%和 30%~72%, 出现多次大幅度波动, 可以分为 3 个亚带。IV^a亚带 (330~284.5 a BP) 岩性以湖相粘土为主, 局部可见砂质粘土, 具典型湖积韵律; LOI_R 由 10%下降到 8%, LOI_T 则由 60%大幅度下降到 30%, 后分别回升至 12%和 61%, 反映此亚带为一次比较明显的降温过程, 造成有机质和碳酸盐沉积下降。IV^b亚带 (284.5~106.5 a BP) 岩性以湖相粘土和腐泥为主, 局部可见少量砂质粘土, 具典型湖积韵律, 烧失量波动剧烈。说明此亚带气候发生多次温度升降、降水蒸发增减的过程, 湖泊水位出现动荡, 此带的气候表现出温湿和暖干变化的不稳定性。IV^c带 (106.5~0 a BP) 岩性以湖相腐泥和粘土为主, 局部可见少量砂质粘土, 可见湖积韵律, 为湖泊衰退时期, LOI_R 保持在 10%, 比 IV^a带有所下降, LOI_T 从 56%持续降低到 26%, 反映温度降低, 为凉干的气候环境, 蒸发量大于降水量, 湖泊变浅, 植物生长受到一定影响, 碳酸盐沉积下降明显。

3 结 论

根据 HQH4 钻孔岩芯中烧失量和沉水植物川蔓藻种子的研究, 结合湖相介形类和介壳稳定同位素环境记录^[11], 将湖区冰后期的气候与环境演变的主要特征概述如下:

1. 末次冰期晚期 (~10 200 a BP)。本区气候以寒冷干燥为主, 湖泊为水位较浅的湖滨岸和浅湖沼交替环境, 湖面冰封期较长。植物生长状况很弱, 沉积物中有机质积累和碳酸盐形成过程极差, 烧失量为最低值。在临近结束的较短时期内气候条件有大的改观, 温度上升, 水位有所升高, 植物生长环境得到改善, 促进了有机质和碳酸盐的沉积, 为由末次冰期向冰后期的过渡时期, 黄旗海处于成湖期;

2 全新世早期 (10 200~6 800 a BP)。气候冷暖的波动明显, 降水和蒸发的变化较大。

其中在 10 220~8 500 a BP 气候由前期的暖湿转为冷干, 水位持续上升至 4m 以上, 湖面面积扩张, 湖水淡化, 湖心区的有机质和碳酸盐沉积减弱, 烧失量下降。初期烧失量的急剧上升和沉水植物川蔓藻的生长明确指示着黄旗海地区由末次冰期到冰后期的转换过程为一快速变暖增湿过程。在 8 500~6 800 a BP 阶段, 气候由暖湿转冷湿, 有机质和碳酸盐沉积过程变化平稳, 烧失量出现较长时间的缓慢升降。为黄旗海的发育阶段;

3 中全新世 (6 800~3 800 a BP)。在绝大部分时期内气候温暖湿润而稳定, 湖泊生产力较高, 碳酸盐沉积稳定, 烧失量分别在 10%以上和 50%以上。在 5 900 a BP 左右发生一次快速升温过程, 有机质和碳酸盐沉积急剧升高到 20%和 84%, 指示为一次气候突然变暖事件;

4 晚全新世 (3 800~0 a BP)。气候冷暖干湿变化剧烈而频繁发生, 表现出气候环境的明显的不稳定性。在 3 800~3 000 a BP 阶段发生一次大幅度降温过程, 植物生长状况下降, 有机质沉积降低, 碳酸盐沉积过程急剧减弱, LOI_R 降到 30%。3 000~1 500 a BP 时期气候趋于温干, 温度、降水和蒸发变化较多。在 1 500~0 a BP 阶段, 气候由温干趋于凉干, 温度降低, 降水少而蒸发强, 盐度逐渐增大, 湖水水位有所下降, 湖面逐渐收缩, 湖泊由发育阶段逐渐过渡到衰退阶段, 沉积岩芯可见典型湖积韵律。20 世纪 60 年代以来, 人口数量的剧增和生产活动区域范围的扩大, 以及温室效应和全球范围的暖化, 导致黄旗海湖区生态环境复杂多变。

参考文献:

- [1] Dean W F. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods J. Journal Sedimentary Research 1974 44(1): 242-248.
- [2] Korsman T, Nilsson M B, Landgren K, et al. Spatial variability in surface sediment composition characterised by near-infrared (NR) reflectance spectroscopy J. J Paleolimnol 1999 21(1): 61-71.
- [3] Dodson JR, Ramath A. An Upper Pliocene lacustrine envi-

environmental record from south-western Australia: preliminary results [J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2001, 167 (1): 309–320.

[4] He J, Q. Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results [J]. *J. Paleolimnol.* 2001, 25 (1): 101–110.

[5] Boyle J. A comparison of two methods for estimating the organic matter content of sediments [J]. *J. Paleolimnol.* 2004, 31 (1): 125–127.

[6] 刘子亭, 余俊清, 张保华, 等. 烧失量分析在湖泊沉积与环境变化研究中的应用 [J]. *盐湖研究*, 2006, 14 (2): 67–72.

[7] 张佳华. 烧失量数值波动对北京地区过去气候与环境的特征响应 [J]. *生态学报*, 1998, 18 (4): 343–347.

[8] 张丽莎, 余俊清, 刘子亭, 等. 黄旗海沉积岩芯烧失量变化曲线: 冰后期环境演变的有效代用指标 [J]. *盐湖研究*, 2007, 15 (1): 12–15.

[9] Yu J Q, Kelts K R. Abrupt changes in climatic conditions across the late-glacial/Holocene transition on the NE Tibetan Qinghai Plateau: evidence from Lake Qinghai, China [J]. *J. Paleolimnol.* 2002, 28 (2): 195–206.

[10] 余俊清, Kelts K R. 末次冰消期晚期青藏高原东北部气候变化 [J]. *第四纪研究*, 2002, 22 (5): 413–423.

[11] 李军, 余俊清. 黄旗海介形类及其壳体稳定同位素环境记录 [J]. *盐湖研究*, 2002, 10 (4): 13–18.

Investigation on Loss on ignition of Lake Huangqihai Core and Post-glacial Environmental Evolution

LIU Zi-ting², YU Jun-qing¹, ZHANG Bao-hua¹, ZHANG Li-sha²

(1. Environment and Planning College, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;
2. Xi'an Branch Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710043, China)

Abstract: Lake-level reconstruction for closed-basin lakes in China may provide key information for the study of Asian monsoon evolution in the Holocene. The authors investigate LOI and *Ruppia* macrofossil. The results indicate that Lake Huangqihai was in cold and arid climate conditions between 16 ~ 10.2 ka BP with ice cover for most of the year, which led to the organic and carbonate production much lower than that in the Holocene. An abrupt increase of seasonal inflow occurred at about 10.2 ka BP, as suggested by a layer rich in *Ruppia* seed in situ dropped from the rooted aquatic plant and by the well laminated lacustrine sediments. The data of LOI show that organic productivity increased markedly from the beginning of early Holocene. This, along with increased carbonate production, was most likely resulted from a substantial increase of summer temperature. In 10 200 ~ 6 800 a BP, distinct LOI fluctuation reflected the remarkable changes of climate and environment shifted from warm and dry, cold and wet, warm and wet to cold and wet. In 6 800 ~ 3 800 a BP, the high and stable LOI value indicated a stable environment with warm and wet climate, high productivity of authigenic carbonate and organic matter. From circa 3 800 a BP, the lake level began to decline and the regional climate became cold.

Key words: Lake Huangqihai; Sediment core; Loss on ignition; *Ruppia* L.; Post-glacial climate change