

云南中甸纳帕海古环境演化的有机碳同位素记录^{*}

殷 勇¹ 方念乔² 胡超涌³ 聂浩刚² 秦尊丽²

(1: 南京大学入地海洋科学系, 南京 210093; 2: 中国地质大学, 北京 100083; 3: 中国地质大学, 武汉 430074)

提 要 中甸纳帕海位于云贵高原横断山脉腹地, 其成因与碳酸岩类地层长期溶蚀有关。在丰水期和枯水期纳帕海的水位相差很大, 枯水期常形成浅水池沼, 因而造成枯水期和丰水期水生植被的发育状况有很大的差异。枯水期由于水生植物(飘浮和挺水植物)发育, 造成总有机碳和氢指数的增加, 有机碳同位素偏负, 丰水期出现相反的演化趋势。进一步推论表明在暖干的气候条件下纳帕海极易形成枯水位, 在冷湿的气候下可维持相对高的水位。古环境重建表明纳帕海在大约 32kaBP 和 15kaBP 出现环境的重大变迁, 32~15kaBP 出现高湖面。

关键词 总有机碳和氢指数 $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 古环境 中甸纳帕海

分类号 P597

湖泊中有机质含量、有机质来源类型和有机碳同位素的垂向变化是古环境和古气候波动的重要替代性指标^[1], 同时湖泊沉积中的有机成分既有外来的又有湖泊本身来源的, 因此为古环境重建提供了丰富的信息^[2-3]。总有机碳含量可反映湖泊生产力、碎屑输入和有机质的保存状况, 氢指数是指示有机质类型的重要指标, 并且可通过有机质沉积物氧化-还原状况的变化揭示湖面的波动。有机碳同位素更是湖泊古环境古气候研究中一项重要指标^[4-11], 虽然 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率涉及到自然界中碳循环这样一个十分复杂的问题, 但在一些湖水化学“敏感”的湖泊^[4](Sensitive Lake), $\delta^{13}\text{C}$ 值仍然可以作为指示植被类型变化的有效指标。

中甸纳帕海位于西南季风影响的区域, 同时兼受西风带南支和西太平洋副高的影响, 本地区特有的高山-深谷极大起伏地形(相对高差多在 2000m 以上)使得该地在古环境演变方面具有特殊的研究价值, 目前相关的研究仍是空白。本文拟从有机质含量、类型和有机碳同位素三个方面探讨纳帕海的古环境特别是古湖水位的波动历史。

1 地理环境概述

纳帕海(27.5°N, 99.5°E)位于云南迪庆藏族自治州中甸县, 平均海拔 3280m 以上。该地区地势北高南低, 为高原雪山地区。高山巨川相间排列, 构成地形极大起伏。特殊的地形地貌使该地区夏季降雨主要为锋面降雨^[12], 特别是有北方冷空气入侵时。

纳帕海并非断陷湖盆, 其成因与碳酸岩类地层经流水的长期溶蚀有关。现在纳帕海的西侧陡崖有落水洞 3 个, 湖底也有裂隙分布。高水位时过量湖水常常从落水洞中溢出, 枯水期时湖

^{*} 国家自然科学基金(49672135)和国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800)联合资助。

收稿日期: 2001-06-14; 收到修改稿日期: 2001-08-14。殷 勇, 男, 1964 年生, 博士, 高级工程师, email: wiyin@sina.com

水经流失往往形成浅水池沼^[13]。纳帕海现今湖水面积不足 5km²,大部分已干涸,为草地和可以通行的沼泽地。由于缺乏入湖河流,湖水主要依靠降雨、地表径流、冰融水和地下水补给,因此降雨/蒸发是维持湖水水位的主要因素。根据气象资料,中甸地区年平均降水量在 619.9mm,主要集中在 7-9 月份的雨季,年平均温度 5.4℃,属于高原温带半湿润区^[14]。

2 样品和实验

1998 年 5 月在距中甸纳帕海湖心 1km 处钻得 28.81m 长的岩芯,总有机碳、氢指数和有机碳同位素每隔 20cm 进行采样,共采得样品 163 个,总有机碳和氢指数用 Rock-Eval 热解仪进行测定。

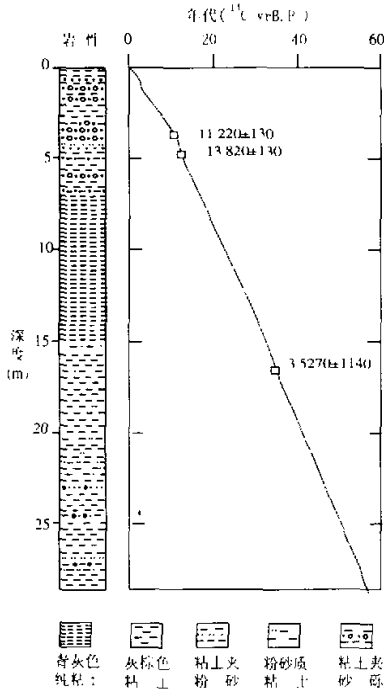


图 1 中甸纳帕海钻孔深度—年代和岩性柱状图

Fig. 1 Diagram showing depth versus chronology and lithological column from the Napahai Lake

呈颜色偏淡的细小碎片;第三段(14.99-28.81m),主要为中棕色、深黄棕色粘土夹黄棕色亚砂土。顶部棕色粘土含大量腐植质,镜下据植物碎片的横切面可判断为各类草本植物的茎干。常见钙质生物壳体碎片,偶见硅藻,但属种未定。

据镜下鉴定,细砂/粗砂一类沉积物的主要骨架颗粒为石英和长石,其次为方解石、赤铁

有机碳同位素的试验过程如下:将原始湖泊样在低于 60° 的温度下烘干,碾磨至 80 目以下。用 5% 稀盐酸浸泡 24h,反应后除去无机 CaCO₃,用蒸馏水反复冲洗到无氯为止并重新在低温下烘干。

将制备好的样品约 50mg 送入意大利产 NC2500 色谱/质谱仪(EA/MS)测定。样品进入氧化裂解炉后,在高温下(1020℃)瞬间燃烧,并有 Pt 和 CuO 作为助燃剂。燃烧后生成 CO₂ 带有许多杂气,如过量 O₂、NO 和 SO₂ 等,由 He 气携带进入还原炉,过量 O₂ 还原成 CuO,NO 还原成 N₂,SO₂ 还原成 S 等。进入色谱柱之前,自动脱水,然后色谱柱将 CO₂ 和 N₂ 自动分离,直接送入质谱仪测量结果。测量精度小于 ±0.1‰,样品的重复测量误差小于 ±0.2‰。

3 分析结果

3.1 岩性、特征及¹⁴C 测年

根据岩性特征将整个岩芯分成三段(图 1):第一段(0-6.06m),主要为灰橄榄色、灰黑色粘土夹黄棕色砂砾岩,顶部、中部和近底部的粘土颜色较深含植物碎片和炭片,多为腐植质粘土夹层,在显微镜下植物纤维结构清晰可辨;第二段(6.06-14.99m),灰橄榄绿色和橄榄灰色粘土形成纹层状互层,岩性致密、质纯,上下粒度均一,几乎不含粉砂一类的粗颗粒物。有机质含量低,在镜下

矿、稠石和粘土矿物,另有零星分布的铁、锰水合物,颗粒细小无法鉴定.粘土矿物经X射线分析主要有绿泥石、伊利石和高岭石.

位于3.75m、4.05m和16.6m的泥炭层,经 ^{14}C 定年分别为 $11220 \pm 130\text{aBP}$ 、 $13820 \pm 130\text{aBP}$ 和 $35270 \pm 1140\text{aBP}$,其余年龄据湖泊沉积固结模式(图1)用最小二乘法求得^[15].

3.2 总有机碳(TOC)、氢指数(HI)和有机碳同位素($^{13}\text{C}_{\text{org}}$)分布特征

总有机碳(TOC)、氢指数(HI)和有机碳同位素($^{13}\text{C}_{\text{org}}$)被广泛用来判定有机质来源和数量,进而恢复古环境古气候^[1-5].中甸纳帕海TOC、HI和 $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 三者的高低变化有着良好的对应关系.其中TOC和HI有非常好的正相关性,两者的变化几乎亦步亦趋,但TOC、HI与有机碳同位素($^{13}\text{C}_{\text{org}}$)呈很好的反相关关系(图2).

中甸纳帕海总有机碳含量在0.05% - 4.59%之间变化,平均0.65%;氢指数在2 - 453之间波动,平均值为56. TOC和HI的峰值出现在27.31m、16.75m、4.86m、3.09m和钻孔的顶部.6.06 - 14.99m出现TOC的极值,TOC在0.21% - 0.82%之间波动,平均值仅0.32%.

中甸纳帕海的有机碳同位素($^{13}\text{C}_{\text{org}}$)最低值-28.8‰,最高-21.5‰,平均-24.8‰.从钻孔底部至21.49m, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在-26.97‰至-23.45‰间波动,趋于偏负且低于均值,其间没有出现特别偏正的同位素值(图2).21.49m - 17.75m之间, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 明显偏正,在19.87m处出现一个峰值, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 可达-21.54‰.之后在16.55m出现明显偏负, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 为-26.63‰.14.99m - 6.06m之间, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 明显偏正,但变化幅度小.6.06m - 1.79m, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 逐渐偏负,至2.89m处出现整个剖面的最低值(-28.8‰).1.79m以后, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值又逐渐偏正,接近顶部迅速偏负.

3.3 古环境意义

3.3.1 总有机碳和氢指数的古环境意义 纳帕海湖小而浅,其水位高低受当地环境气候的影响很大.据对纳帕海现今环境的调查其成因与碳酸盐类地层的长期溶蚀有关,丰水期和枯水期的水位相差很大,枯水期的湖水几经流失常形成浅水池沼^[13].这一机制使得中甸纳帕海在丰、枯水期(或高/低水位期)的植被发育状况存在很大的差异(图3),枯水期由于湖岸滩地的大量暴露,草本植物尤其是水生和湿生草本大量发育,这些植物腐烂后就地堆积,有机碳的堆积速率快速增加,在有机质分解导致的还原环境下有机碳得以大量保存,因而造成沉积物中有机碳和氢指数的上升.在丰水期,由于水位的大幅度提升,湖岸带被淹没,可供草本植物生长的区域缩小,使得在盆地中实际堆积的有机碳含量下降,造成沉积物中有机碳和氢指数降低.因此纳

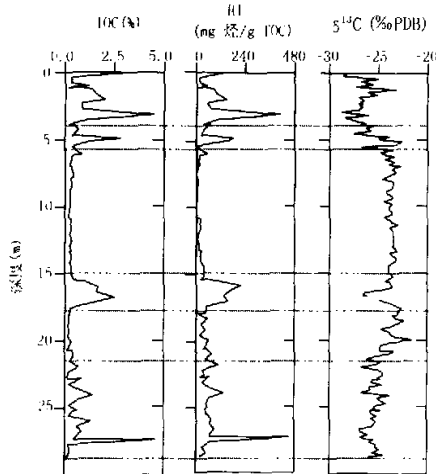


图2 中甸纳帕海总有机碳、氢指数和有机碳同位素变化曲线

Fig.2 Total organic carbon, Hydrogen Index and organic carbon isotope from the Napahai Lake

帕海有机碳和氢指数的高值代表湖水水位下降的枯水环境,低值代表湖水水位上升的丰水环境(图2).这种特点在若尔盖沼泽湖泊兴错湖的研究中也得到证实^[16].

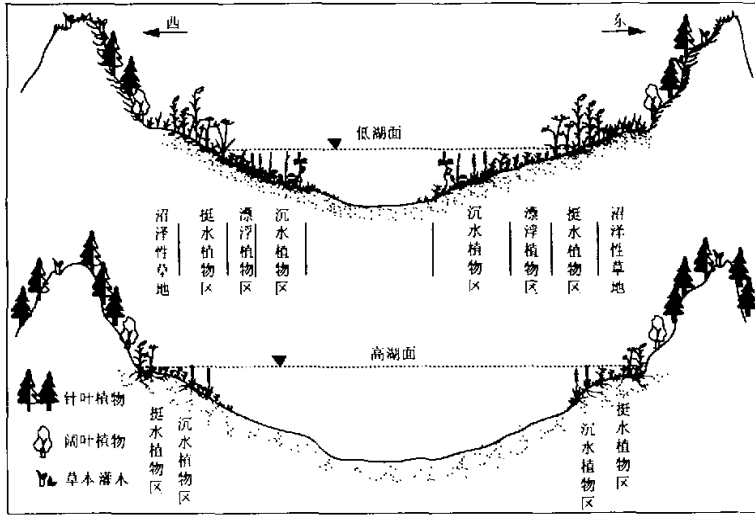


图3 中甸纳帕海枯水期和丰水期水生植被生态示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing different ecological assemblages during low-stand and high-stand level

上述结论与其它替代性指标存在很好的对应关系(图1),如有机碳和氢指数的峰值与颗粒粒径的谷值对应(粒径变小通常代表地表径流水动力条件减弱).同时有机碳和氢指数的增加还与指示浅水环境的腹足类或瓣鳃类的增加相对应,表明期间确实有过湖水位的降低.

3.3.2 有机碳同位素的古环境意义 湖泊沉积的有机质是不同来源的有机质的混合,包括原地和异地有机质.陆源C3植物的 $^{13}\delta C_{org}$ 值分布范围为 -24% 至 -34% ,平均值为 -27% ,C4植物的 $^{13}\delta C_{org}$ 值在 -6% 至 -19% 范围内,CAM植物 -9% 至 -34% ^[17,18].湖泊中原地有机质包括浮游植物和水生大型植物(飘浮植物、挺水植物和沉水植物)^[18](图3),浮游植物若利用大气 CO_2 作为光合作用的碳源,其 $^{13}\delta C_{org}$ 值偏负;若利用水中的 HCO_3^- 作为光合作用的碳源,其 $^{13}\delta C_{org}$ 值偏正.飘浮和挺水植物主要从大气 CO_2 中吸收碳作为光合作用的碳源,其的 $^{13}\delta C_{org}$ 值与陆地C3类植物接近,如挺水植物通常可偏负至 -24% 至 -30% ^[1,19].沉水植物直接利用水中的 HCO_3^- 作为光合作用的碳源,趋向于重的碳同位素值^[4].

湖泊是一个非常复杂的水文和生态系统^[1,4],有自己的新陈代谢历史和碳循环途径,其沉积物中有机质的同位素组成能够提供环境方面的信息.其 $^{13}\delta C$ 值可因湖盆及其地层背景而异,因此在利用 $^{13}\delta C_{org}$ 值时必须考虑各湖盆的地质、水文和生态背景^[4].对于纳帕海,由环境和气候条件的改变造成的植被类型的变化、有机碳堆积过程中的氧化-还原条件的改变以及水体中碳同位素组成可能是决定 $^{13}\delta C$ 组成的主要因素.

枯水期时纳帕海湖水水位急剧下降发育浅水池沼,飘浮植物和湖岸边的挺水植物大量生长,加上有机碳堆积量增加,保存条件变好,使 $^{13}\delta C_{org}$ 偏负;而在高水位期由于水生植物不发育,输

入湖盆的绝对碳量减少,有机碳堆积量降低,飘浮植物对有机碳的贡献增大,加上碳酸盐岩的溶蚀作用加强,水体中 HCO_3^- 离子含有较多老碳组分,并影响植物的碳同位素组成,这些都使 $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正.上述机制造成中甸纳帕海的 $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏负段代表暖干条件下的枯水位环境, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正段代表冷湿条件下的丰水位环境(图 2).

3.3.3 中甸纳帕海 57kaBP 以来古环境重建 根据总有机碳、氢指数和有机碳同位素的演化特点,将纳帕海 57kaBP 来的环境演化重建如下(图 2):

1)28.81-21.49m(ca. 57-43kaBP):根据 TOC、HI 和 $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的变化特点,枯水位和高水位交替出现,湖水位处于明显的波动阶段但幅度不大.在 27.31m 总碳(TOC)和氢指数(HI)出现峰值并与 $^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的谷值很好的对应,表明有机碳堆积速率增加,湖水位明显下降出现浅水池沼,现场作岩芯记录时在该段见大量腹足类和瓣腮类,表明湖水确有降低.

2)21.49-17.7m(ca. 43-37kaBP):总碳和氢指数出现低值,由于湖面的上升,大部分湖岸被淹,水生和湿生草本植物大量减少,使得有机碳堆积量下降,有机碳同位素明显趋向于偏正,波动范围在 -26.2‰至 -21.54‰之间,其平均值远远超过整个剖面的均值 -24.8‰.

3)17.75-14.99m(ca. 37-32kaBP):总碳和氢指数迅速升高,出现明显的低湖面环境,由于形成浅水池沼,广大的湖岸遍布水生和湿生草本植物,有机碳堆积速率迅速增加,有机碳同位素急剧偏负.

4)14.99-6.06m(ca. 32-15kaBP):总碳和氢指数迅速降低,并维持低值,表明湖水位迅速上升而且较为稳定.有机碳同位素迅速偏正,远远超过整个剖面的均值 -24.8‰,在 -24.4‰至 -22.8‰之间波动,波动范围仅 1.6‰,是整个剖面中波动范围最小的段落.该段极细均一致密的岩性也说明曾经有过稳定的高湖面.

5)6.06-3.15m(ca. 15-10kaBP):总碳和氢指数快速升高,湖水位总体在下降但仍有波动,有机碳同位素出现两次明显的偏轻,表明湖水位降低沼泽化程度加剧.期间有机碳同位素明显偏正与湖水位的波动上升有关.

6)3.15-0m(ca. 10-0kaBP):总碳和氢指数继续增加,有机碳同位素偏负,在 3.29m 和 2.89m 处分别出现最低值 -28.44‰和 -28.791‰.表明进入全新世中甸纳帕海湖水位进一步降低,以浅水池沼为主,水生及湿生草本植物迅速繁衍,有机碳堆积速率增加导致总碳和氢指数的增加以及有机碳同位素的降低.期间总碳和氢指数的降低,有机碳同位素的偏正与短暂的湖水位上升有关.

4 讨论和结论

中甸纳帕海的成因与碳酸岩类地层遭长期的溶蚀有关,没有人湖河流特殊的地貌成因造成纳帕海在枯水位期和丰水位期的水位相差很大,导致枯水位期和丰水位期纳帕海的植被特别是水生植被和湿生植被的发育状况完全不同,加上喀斯特地区冷湿时期的强烈溶蚀作用,对湖水化学的影响,完全可以通过总碳(TOC)、氢指数(HI)和有机碳同位素三个替代性指标来恢复当时的相对湖水位.值得注意的是在丰水位期(或高水位期),过量的湖水往往通过落水洞泄出,湖水的循环良好,湖底氧化作用加强,岩性编录发现在高水位期常常出现浅色调或棕色色调的泥岩.在这样一种环境下,有机质往往易分解,同位素分馏过程中 ^{12}C 被优先移走.另外浮游植物贡献增加和老碳的影响造成有机碳同位素迅速升高.

在纳帕海,高温有利于植物生长,滩地大范围出露为植物生长提供了地域,因此低水位期极可能发生在暖干或温干气候条件下,相应地丰水位期多半可形成于冷湿气候条件。因为寒冷的气候可造成湖底裂隙和落水洞的封冻,低温抑制蒸发,有效湿度加大。57kaBP 来的环境重建表明纳帕海的湖水位发生了 2 次重大的变化(图 1),第一次发生在约 32kaBP,以湖泊水位的大幅度上升为特点并伴有大气温度的大幅度下降,高湖平面取代了前期的中低湖面,高湖面状况一直可以维持约 15kaBP,在此期间中甸纳帕海可能以冷湿气候为主,相当于末次盛冰期。第二次环境变迁发生在约 15kaBP 时,与前一次相反,此次环境变迁是以湖泊水位降低发生广泛湖退为标志,成为全新世的环境特点。

致谢 成文过程中得到王苏民研究员和张振克博士的指点和帮助,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 1 张平中,王先彬,陈践发等. 湖相有机质的氢指数及碳同位组成—湖面波动评价的指标—以 RH 孔为例. 科学通报, 1995, 40:1682-1685
- 2 罗建育,陈镇东,万政康. 台湾大鬼湖的古气候研究. 中国科学(D 辑), 1996, 26(5):474-480
- 3 罗建育,陈镇东. 台湾高山湖泊沉积记录指示的近 4000 年气候与环境变化. 中国科学(D 辑), 1997, 27(4):366-372
- 4 Stuiver M. Climate versus changes in ^{13}C content of the organic component of lake sediments during the late Quaternary. *Quaternary Research*, 1975, 5:251-262
- 5 Nakai N. Carbon isotopic variation and the paleoclimate of sediment from lake Biwa. *Proc Jpn Acad*, 1972, 48:516-521
- 6 Troughton J H. Carbon isotope fractionation by plants. Proceedings of the 8th International Conference on Radiocarbon Dating. New Zealand; Wellington, 1972. 40-E57
- 7 Aravena R, Warner B G, MacDonald G M, et al. Carbon Isotope composition of lake sediments in relation to lake productivity and radiocarbon dating. *Quaternary Research*, 1992, 37:333-345
- 8 Pearson F J, Copen T B. Stable isotope studies of lake. In; Lerman A, ed. Lakes; Chemistry, Geology, Physics. New York: Springer-Verlag, 1978. 333-345
- 9 吴敬祿,王苏民. 湖泊沉积物中有机碳同位素特征及其古气候. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16:103-109
- 10 沈吉,王苏民,羊向东. 湖泊沉积物中有机碳稳定同位素测定及其古气候环境意义. 海洋与湖沼, 1996, 27:400-404
- 11 张振克,吴瑞金,王苏民等. 近 8kaBP 来云南洱海地区气候演化的有机碳稳定同位素记录. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18:23-29
- 12 羊向东,王苏民,童国榜等. 云南鹤庆古湖晚更新世的孢粉记录及其古气候学意义. 第四纪研究, 1998, (4):335-343
- 13 王苏民,襄鸿身. 中国湖泊志. 北京:科学出版社, 1998. 580
- 14 张宜光. 横断山区气候区划. 山地研究, 1989, 7:28-30
- 15 王苏民,王云飞,吉磊等. 若尔盖盆地湖泊深钻岩芯记录. 见:施雅风,李吉均,李炳元主编. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化. 广东:广东科技出版社, 1998. 161-213
- 16 吴敬祿,李世杰,王苏民等. 若尔盖盆地兴错湖沉积记录揭示的近代气候与环境. 湖泊科学, 2000, 12(4):291-296
- 17 Smith B, Epstein S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiol*, 1971, 47:380-384
- 18 Ehleringer J R. Genera known to possess the crassulacean acid metabolism (CAM) pathway. *Hort Science*, 1979, 14:217-222
- 19 Osta S, Deevey E S. Carbon in lake waters and its possible bearing on paleolimnology. *American Journal of Science*, 1960, 258A:253-272

Palaeoenvironmental Evolution Deduced from Organic Carbon Stable Isotope Compositions of Napahai Lake Sediments, Northwestern Yunnan, China

YIN Yong¹ FANG Nianqiao² HU Chaoyong³ NIE Haogang² QING Zunli²

(1: Department of Geo and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, P. R. China;

2: China University of Geosciences, Beijing 100083, P. R. China;

3: China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract

The Napahai Lake, situated in the hinterland of the Hengduan Mountains, is a basin by the erosion of carbonate rocks. The lake levels have experienced great fluctuation between low-stand and high-stand stages. The lake level changes directly influences the amount and distribution of aquatic plant communities that used different sources of carbon for photosynthesis, thereby imprinting the organic sediments with a characteristic ^{13}C composition. Another reason influencing the ^{13}C composition for bulk organic sediment, in this case, is the change of reduction-oxidation condition in the alternative stages. In addition with the strong dissolution of carbonate strata in humid-cool conditions, the lake level fluctuations and climatic changes could be reconstructed using HI, TOC and $\delta^{13}\text{C}$. The results show that increase in total organic carbon and hydrogen index correlates in general, with decrease in $\delta^{13}\text{C}$ values, which could be attributed to the flourishing of emerging and floating aquatic plants as well as a relative reduction environment in a low lake level associated with a warm-dry or temperate-dry climate. The decreases of TOC and HI often correlate well with $\delta^{13}\text{C}$ value increasing in a high lake level stage accompanied with a cool-humid climate, which might be attributed to low productivity of aquatic plants, oxidation that triggers decomposition of organic matters and strong dissolution of carbonate strata in humid-cool conditions.

The palaeo-environmental reconstruction shows that major environmental changes took place at 32kaBP and 15kaBP respectively. The lake levels exhibited frequent fluctuations between ca. 57–43kaBP, and then the lake level slightly rose from ca. 43kaBP to ca. 37kaBP. After then, the lake level dropped dramatically when the climate became warm and dry. From ca. 32kaBP, the lake level had a distinct rise due to cool-humid climate and kept high until the end of the Last Glacial Maximum. A warm-dry climate returned to the areas again and the lake level remained lowering during the Holocene. After the lake level rose in a minor amplitude from ca. 3–2kaBP, modern climate dominates the Napahai lake.

Key Words TOC, HI, $^{13}\text{C}_{\text{org}}$, environmental changes, Napahai Lake