

# 太湖 14000 年以来古环境演变的湖泊记录

瞿文川 薛 滨 吴艳宏 王苏民 吴瑞金

(中国科学院南京地理与湖泊研究所)

张平中 陈践发

(中国科学院兰州地质研究所)

**摘 要** 本文根据东西太湖短柱岩芯的沉积物的物理、化学、生物指标的综合分析,讨论了该区距今 14ka 来的古气候变化过程,结果表明 14.3-13.3kaBP,太湖水位低,环境指标甚至表现为暴露特征,反映了气候干旱;13.3-12.4kaBP,为偏暖湿的过渡阶段;该孔柱 270-280cm(11.5kaBP 左右)各类指标均明显反映冷干特征,可能是 Younger Drays 事件的记录,与我国东部其它地区有可比性;约 10.9-10kaBP,这一时期是整个研究时段内一个较显著的温暖期。表现为还原沉积环境和水位相对较深;约 10-7.2kaBP 为冷暖交替的过渡带;7.2-5.737kaBP 为暖湿气候;5.05kaBP 多项分析指标发生突变,反映物源发生显著变化,可能存在沉积间断;表层沉积物则呈现现代环境的特征,西太湖藻类生长茂盛,偏氧化的沉积环境。目前湖泊生产力较高,富营养化程度高,表现为藻型湖泊特征;东太湖有机质来源以东太湖中生长较为茂盛的维管水生植物为主,目前湖泊生产力较低,富营养化程度低,表现为典型的草型湖泊特征。

**关键词** 太湖 古环境演化 湖泊沉积记录

## 1 研究概况

太湖位于长江下游,是我国 5 大淡水湖泊之一,位于  $120^{\circ}30'E$ ,  $31^{\circ}30'N$  湖泊面积  $2428\text{km}^2$ ,平均水深 1.89m,为典型的平原浅水型湖泊。本地区属北亚热带南部向中亚热带北部过渡的季风气候;四季分明,无霜期长,热量充裕,降雨丰沛,平均温度为  $14.9 \pm 16.2^{\circ}\text{C}$ ,7 月平均气温  $27.7-28.6^{\circ}\text{C}$ ,1 月平均气温  $1.7-3.6^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 220-246 天,大于  $10^{\circ}\text{C}$  的活动积温为  $4760-5200^{\circ}\text{C}$ ,降水量为  $1000-1400\text{mm}^{[1]}$ 。

湖泊沉积是研究历史气候变化的有效手段。以往对于太湖地区的古环境古气候演变主要偏重于岩芯的岩性、结构、粒度、磁化率及古生物等几个指标的研究<sup>[2]</sup>。本文根据东、西太湖钻孔氢指数、有机碳同位素及有机化合物等环境多代用指标的分析,着重对 14ka 以来太湖沉积环境和气候演化过程进行系统探讨。

注:中国科学院重大项目和中国科学院湖泊调查分类第二轮联合资助

## 2 样品的采集与测试

1995年11月,作者采用重力采样器在西太湖的马迹山 SSE向水域(W<sub>1</sub>)获得 3.96m 岩芯;东太湖的水域中心 E<sub>1</sub> 获得 2.46m 的岩芯。样品 2cm 间距分样, 4°C 以下保存(图 1)

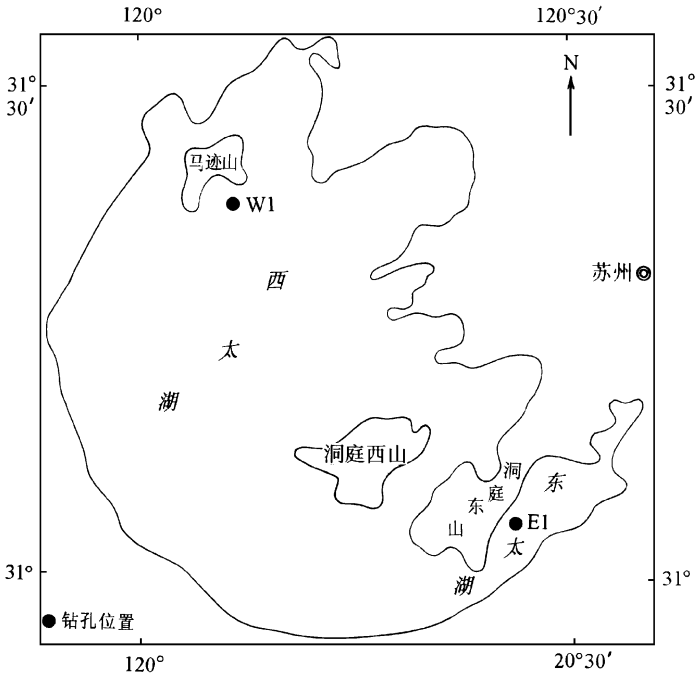


图 1 太湖钻孔位置图

Fig. 1 Core sites of Taihu Lake

### 2.1 沉积年代测定

作者利用低苯底液体闪烁计数法进行钻孔 <sup>14</sup>C 年龄年代测定

西太湖: 50–60cm 年代 5.936kaBP; 108–124cm 年代为 7.899kaBP; 202–212cm 年代 10.299kaBP; 374–384cm 年代为 14.188kaBP。结合亚利桑那大学和以前西太湖钻孔测年资料<sup>[3]</sup>,初步确定其年代序列(图 2)

东太湖: 200–250cm 深度的钻孔测年资料较丰富,初步确定其年代序列。东太湖硬黄土层,大约为 15.8kaBP。其上覆淤泥层的底界年代为 6.5kaBP<sup>[3]</sup>。

### 2.2 环境多代用指标的测定

总有机碳(TOC)的测试采用重铬酸钾容量法(外加热法)<sup>[4]</sup>;太湖沉积物中无机氮含量很低,用沉积物总氮含量代替总有机氮(TON),总氮的测试采用过硫酸盐-紫外分光光度法<sup>[5]</sup>。

磁化率( $\chi_{lf}$ ,  $\chi_{hf}$ ,  $\chi_{fd}$ )的测定采用英国 Bartington 公司生产的 MS<sub>2</sub> 型磁化率测量仪。

总有机碳同位素( $W^3C_{org}$ )的测试: 样品先用稀盐酸除去无机碳酸盐,烘干后装入石英管,在  $2 \times 10^{-4}$  Pa 的真空条件下,通入过量高纯氧气,以 900°C 高温灼烧 15 分钟,用不同冷冻剂分离、净化产生的 CO<sub>2</sub>,在 Finnigen-251 型质谱仪上测定其 <sup>13</sup>C 值,采用 PDB 标准。

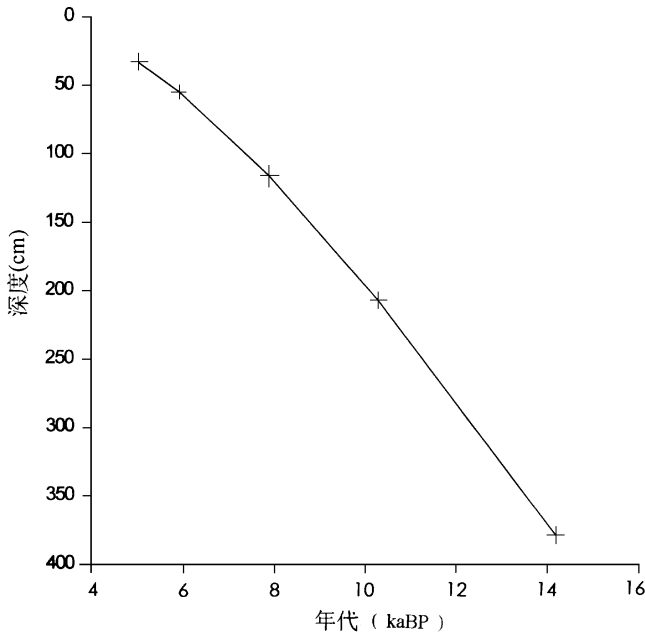


图 2 西太湖年代与深度关系

Fig. 2 Age-depth curve of West Taihu Lake core

色素含量的测试参考 Swain<sup>[6]</sup>的方法,采用 90% 丙酮萃取和萃取液的不同处理方法后,使用 752 紫外分光光度计,根据各色素的特点波长,分别测定叶绿素及其衍生物总量 (CD),总类胡萝卜素 (TC),颤藻黄素 (Osc)和蓝藻叶黄素 (Myx)的样液并计算各色素的含量。

氢指数 (HI)分析,将磨碎至 80 目以下的样品,称取 100mg,用 Rock-Eval 热解仪测定,结果以  $S_2 \times 100 / TOC$  计算,单位是 mg 烃 / g TOC,代表了每克有机碳热解所产生的毫克烃量<sup>[7]</sup>。

### 2.3 饱和烃分析

样品用  $CH_2Cl_2 : CH_3OH (2:1, V/V)$  溶剂进行索氏抽提 72 小时,用纯铜片进行脱硫。去掉沥青质的抽提物用不同极性溶剂在  $Al_2O_3 / SiO_2$  柱上进行分离,其中用石油醚分离饱和烃组分。对饱和烃组分用色谱-质谱联用仪 (Hp5890 毛细管气相色谱仪-Hp5989A 四级杆质谱仪) 进行分析。实验条件为: HP. 5 型毛细管柱 (30m × 0.25mm),载气为 He,程序升温 70 → 300°C,升温速率 4°C / min,离子源温度 250°C,电离电压为 70eV。

## 3 环境多代用指标的环境意义

### 3.1 TOC 及其 $\delta^{13}C$ 及其揭示的环境

近年来,应用钻孔岩芯中有机碳含量及其  $W^{13}C$  之变化作为古气候波动的信号,湖泊沉积有机碳同位素值直接取决于沉积物有机质的来源,在一定的湖泊背景条件下,根据其值的变化能够间接地反映古气候状况。Pearson 等认为在较冷的气候期,  $W^{13}C$  值是偏正的,较负的  $W^{13}C$  值表明陆源的或漂浮的有机物质注入湖泊。对青藏高原 RH 孔的研究也表明, RH 孔的  $W^{13}C$  偏负阶段代表偏湿的环境,  $W^{13}C$  偏正段为冷干的环境<sup>[7]</sup>。

太湖湖水主要来源于大气降水和地面流水。气候的差异控制了湖泊生物化学沉积作用。浅水地带生长大量沼泽植物,深水地带生长漂浮植物。低等的菌类和藻类以及其它生物死亡后,遗体中未被氧化和溶解部分沉积到湖底,成为脂肪、木质素和其它有机化合物的主要来源。东西太湖孔柱的  $W^3 C_{org}$  垂直分布与太湖地区 14kaBP 以来古气候波动相关。可以反映出 11-6kaBP 的暖湿期及西太湖可能受海侵的影响。太湖钻孔的  $W^3 C_{org}$  基本维持在 -20% - 26%, 其平均值较我国一些湖泊为高,如呼伦湖、固城湖、若尔盖古湖<sup>[8]</sup>。对于  $W^3 C$  值其中的一些波动,将在下面详细论述。

### 3.2 磁化率及其揭示的环境

湖泊沉积物的磁性参数是古气候、古环境的有效的代用指标<sup>[9]</sup>。影响磁化率、频率磁化率量值的因素多种多样,结合其它沉积学参数及物理、生物、化学指标,能够对湖泊沉积物的物源和沉积环境作出正确的解释。

太湖沉积物的低频磁化率  $\chi_{lf}$  值维持在  $30 \times 10^{-8} m^3 kg^{-1}$  左右,总的来说,在湖泊沉积物中属中-低值,总体波动不大。该沉积孔柱低频和高频磁化率值较接近。太湖沉积物磁化率其明显的变化发生在西太湖钻孔 35-45cm 显著降低;280-340cm 出现一段高值;250cm 左右也存在一谷值;顶部 5cm 磁化率一个峰值可能与人类活动有关。

### 3.3 湖泊沉积色素及其揭示的环境

湖泊沉积色素作为比 TOC 更为有效的环境代用指标,近年来在湖泊环境研究方面,愈加得到重视<sup>[10]</sup>,因为色素较有机碳稳定,分解较弱,根据其在沉积物中的含量、种类和有关参数可判识湖泊初始生产力,而湖泊生产力又与湖泊温度、光照、水深、盐度、营养态等密切相关,因此,测定湖泊孔柱的沉积色素,能够较好地重建湖泊环境的演化历史。

太湖样品的色素分析表明,总体含量偏低,其中东太湖 100-200cm 是色素含量明显的高值段,尤其是  $O_{sc}$  与  $M_{yx}$ ,揭示当时水温和营养态相对较高;西太湖 40cm 以上色素明显开始升高,暗示湖泊富营养化的开始。

### 3.4 氢指数 (HI) 及其揭示的环境

HI 分析已广泛地用于判识有机质的来源和氧化还原环境的一种手段,并取得了良好的效果。HI 的低值,可能是由于沉积物的陆上暴露,或是充分混合的含氧水柱的作用,使有机质类型发生变化<sup>[11-12]</sup>。同样,HI 的高值代表湖泊水深较大的稳定还原环境。

太湖沉积物中,HI 和 TOC 有较好的相关性。东太湖的 25-35cm;西太湖的 40cm 均发生突变,反映了有机质来源的变化和沉积环境的巨变。西太湖 346cm-382cm 的 HI 零值,可能反映了当时湖面的下降乃至出露情况。

### 3.5 有机标记化合物及其揭示的环境

沉积物中有机化合物在气候环境方面研究的应用是近年来的一个新热点。一般来说,烃类含量高的地段,有机质的输入高且保存条件好,代表温暖的气候条件。同来源于植物的有机质相比,来源浮游生物和细菌的有机质中含有较高的烷烃成分,因而水位相对深一些。烷烃的组成和特征可以反映有机质的来源。尽管烷烃在多种有机体中均存在,但不同来源的有机质有不同烷烃组成。如浮游植物—短链的正烷烃 ( $C_{15}$  和  $C_{17}$ ) 为主,具有一定的奇偶优势;高等植物来源的正烷烃 ( $C_{27}$ - $C_{29}$ ) 为主,具明显的奇偶优势。此外烷烃中植烷和姥鲛烷比值可以指示环境的氧化还原程度等<sup>①</sup>。

① 张干,南京固城湖 GS-1 孔沉积物中有机类脂化合物的组成及其古气候古环境意义。博士论文,1995

## 4 东西太湖钻孔揭示的 1.4ka 以来古气候和环境

根据沉积年代序列,综合分析东、西太湖各项环境代用指标(图 3 图 4),太湖地区 1.4ka 以来经历了如下的古气候、古环境过程:

### 4.1 东太湖

(1) 6.58–6.45ka BP,相当于该孔柱 246–220cm, TOG 总氮量(TN) HI 色素值低;  $W^3C$  值较高;饱和烃、芳烃、非烃及沥青质等含量均较低,反映出冷干的气候特征。

(2) 6.45–6.05ka BP,相当于该孔柱 220–145cm, TOG TN HI 色素升高;  $W^3C$  值明显变低;饱和烃、芳烃、非烃及沥青质等含量呈上升趋势。反映出偏暖湿的气候特征。但有一次降温过程,大约在 6.1ka BP,特征是 HI 曲线出现峰谷,  $W^3C$  值出现峰值。

(3) 6.05–5.80ka BP,相当于该孔柱 145–95cm, TOG TN HI 等出现峰值;  $W^3C$  值低;饱和烃、芳烃、非烃及沥青质等含量较高。反映出极暖湿的气候特征。

(4) 5.8–5.05ka BP,相当于该孔柱 95–35cm, TOG TN HI 等逐渐降低;  $W^3C$  逐渐升高;饱和烃、芳烃、非烃及沥青质等含量逐渐变低。反映出逐渐变干的趋势。

(5) 5.05–2.575ka BP,相当于该孔柱 35–20cm, TOG TN HI  $W^3C$  饱和烃、芳烃、非烃及沥青质等几乎所有指标均发生突然变化,反映出 30–35cm(约 5–5.5ka BP)左右可能存在沉积间断,物源发生很大变化。

(6) 2.575ka BP 至今,有逐渐变冷干过程。而表层相当于该孔柱 4–0cm 呈现现代东太湖特征。东太湖为高碳低氮区,碳氮比(C/N)值较高,主要来源于湖区的维管水生植物,生长茂盛,色素含量较高;同时湖水水位较低。生标对此有较灵敏反映,东太湖表层沉积物的碳数的分布范围  $C_{16}–C_{33}$ ,主峰碳为  $C_{17,29}$ ,长短链比(L/H)为 0.63,  $C_{31}/C_{17}$  为 0.95,奇偶优势指数 OEP 为 3.38。对照东太湖主要水生植物的饱和烃分布特征其碳数分布范围  $C_{15}–C_{35}$ ,主峰碳为  $C_{29}$ , L/H 为 0.42,  $C_{31}/C_{17}$  为 1.44,奇偶优势指数 OEP 为 3.22。我们可以认为东太湖表层沉积物有机质来源以东太湖中生长较为茂盛的维管水生植物为主,目前湖泊生产力较低,富营养化程度低,表现为典型的草型湖泊特征。

### 4.2 西太湖

(1) 14.3–13.3ka BP,相当于该孔柱 396–335cm, HI 值低,两次出现 0 值; TOG TN 等含量较低,磁化率在本段表现为相对低值,同时  $W^3C$  值较高,反映了湖水位低,甚至可能是沉积物的陆上暴露,气候干旱的特征。

(2) 13.3–12.4ka BP,相当于该孔柱 335–300cm, HI 升高,饱和烃、芳烃、非烃及沥青质等逐渐升高;有孔虫丰度较高;磁化率在整个研究阶段呈明显高值;反映为偏暖湿的过渡阶段。

(3) 12.4–10.9ka BP,相当于该孔柱 300–230cm,多项环境指标出现高-低-高现象,反映了气候的暖-冷-暖波动。其中在 275cm 左右 TOG TN C/N HI 色素出现峰谷;同时  $W^3C$  较高,有孔虫、磁化率丰度也低,反映此时的冷干阶段,这与我国东部相邻地区有一定的可比性<sup>[13]</sup>。

(4) 10.9–10ka BP,相当于该孔柱 230–200cm,这一时期是一个较显著的温暖期。  $W^3C$  曲线出现峰谷, HI 升高; TOG 色素、有孔虫丰度较高,饱和烃、芳烃、非烃及沥青质等含量较高,呈偏湿的气候。正烷烃表现为 OEP 高值;姥鲛烷与植烷相对含量比值( $Pr/Ph$ )的低值特征,说明沉积的还原环境和水位相对较深。

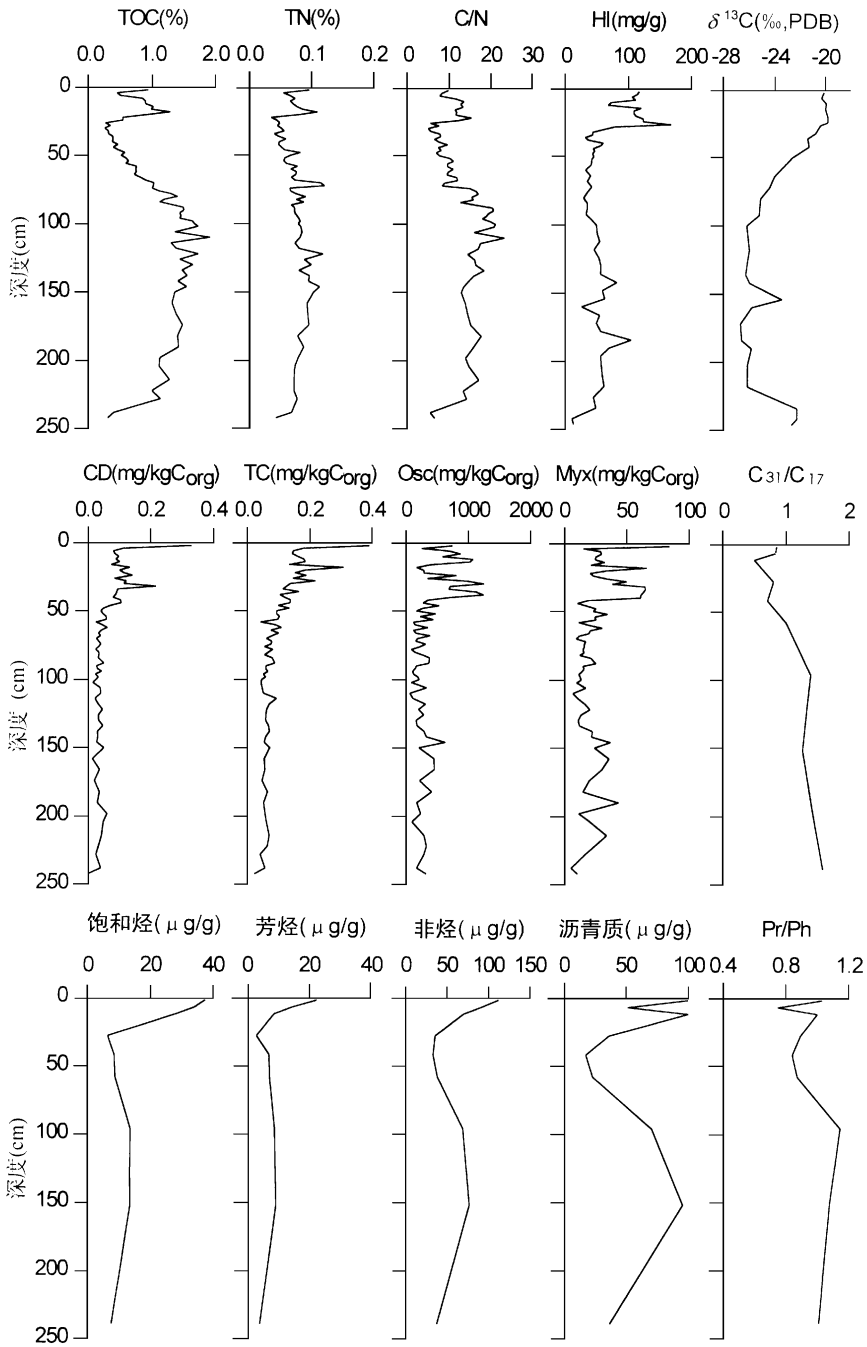


图 3 东太湖钻孔 6.5ka以来各项代用指标的分布

Fig. 3 The distribution of the proxies from East Taihu Lake core since 6.5kaBP  
 TOC. 总有机碳; TN. 总氮; C/N. 总有机碳与总有机氮之比; HI. 氢指数;  $\delta^{13}C$ . 总有机碳同位素; CD. 叶绿素及衍生物总量;  
 TC. 总类胡萝卜素; Osc. 颤藻黄素; Myx. 蓝藻叶黄素; Pr/Ph. 姥鲛烷与植烷相对含量比值

(5) 10- 9.5kaBP,相当于该孔柱 200- 175cm, TOG TN 饱和烃、芳烃等含量为相对高

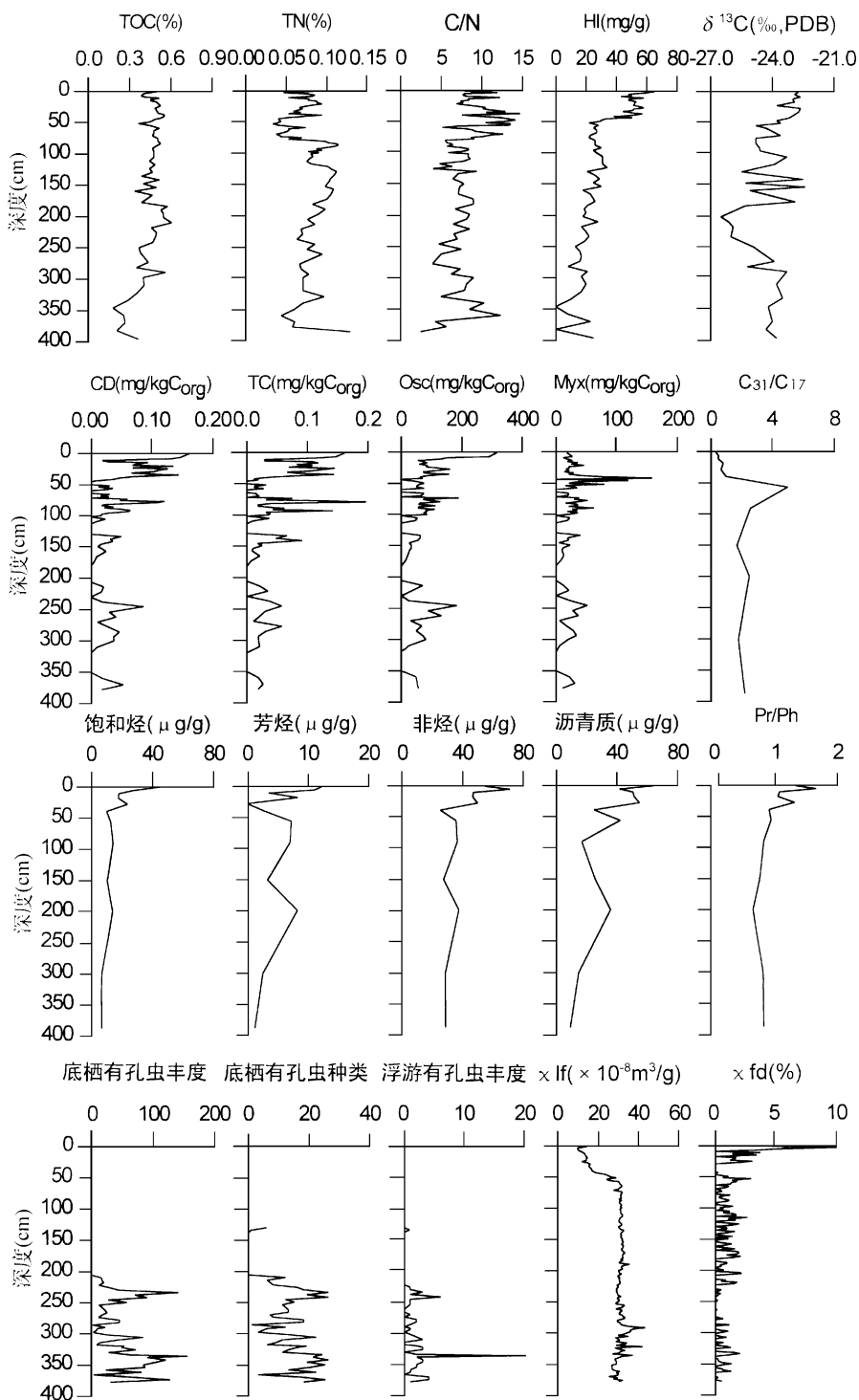


图 4 西太湖钻孔 1.4ka 以来各项代用指标的分布

Fig. 4 The distribution of the proxies from West Taihu Lake core since 1.4ka BP

$\chi_{lf}$ : 低频磁化率;  $\chi_{fd}$ : 高频磁化率; 其它图例同图 3

值,而有孔虫、色素丰度低,说明当时地表径流不发育,表现全新世初期的暖干阶段。

(6) 9.5—7.2kaBP,相当于该孔柱 175—100cm,变化剧烈,TOC 色素含量高,偏暖湿过渡阶段

(7) 7.2—5.737kaBP,相当于该孔柱 100—50cm,为整个研究时段一个暖湿期 TOC TN HI 值较高;色素等含量丰富;芳烃、非烃及沥青质含量也较高

(8) 5.737—4.9kaBP,相当于该孔柱 50—30cm, TOC HI  $W^3 C \chi I f C_{31} / C_{17}$  等指标发生突变,藻类开始发育,反映物源变化,可能存在沉积间断。

(9) 4.9kaBP至今,相当于该孔柱 30—0cm 现代环境:藻类生长茂盛,偏氧化的沉积环境西太湖表层沉积物的碳数的分布范围  $C_{15}—C_{33}$ ,主峰碳为  $C_{17}$ ,短碳链 (<23)组分与长碳链 (>23)组分相对含量 L/H 为 1.04,  $C_{31} / C_{17}$  为 0.40,奇偶优势指数 OEP 为 1.65 对照西太湖主要水生植物蓝藻的饱和烃总离子流图,其碳数分布范围为  $C_{16}—C_{34}$ ,主峰碳为  $C_{17}$ , L/H 为 4.85,  $C_{31} / C_{17}$  为 0.01,奇偶优势指数 OEP 为 1.55,且西太湖为高碳高氮区, C/N 值较低,仅为 7.95,主要来源于湖区生长较为茂盛的蓝藻,湖泊富营养化程度较为严重。我们可以认为西太湖表层沉积物有机质来源以西太湖中大量繁殖的蓝藻为主,目前湖泊生产力较高,富营养化程度高,表现为藻型湖泊特征。表层磁化率峰值可能与现代人类活动或动力扰动有关。

## 5 结论

东太湖冰后期湖相沉积开始于 6.58kaBP,表明全新世的太湖已有 6500 年的历史。6.45—5.8kaBP 总体反映出偏暖湿特点:5.8—5.05kaBP 有一个逐渐变干的趋势;大约在 5.05kaBP 几乎所有指标均发生突然变化,反映出 30—35cm (约 5—5.5kaBP) 可能存在沉积间断,物源发生很大变化。现代东太湖特征为高碳低氮区, C/N 值较高,主要来源于湖区的维管水生植物,生长茂盛,色素含量较高;同时湖水水位较低

西太湖孔柱反映 14000 年以来太湖地区气候环境演化过程 14.3—13.3kaBP 湖水水位低,环境指标甚至表现为暴露特征,反映了气候干旱;13.3—12.4kaBP,为偏暖湿的过渡阶段;该孔柱 270—280cm (11.5kaBP 左右) 各类指标均明显反映冷干特征,可能是 Younger Drays 事件的记录,与我国东部其它地区有可比性;约 10.9—10kaBP,这一时期是整个研究时段内一个较显著的温暖期。表现为还原沉积环境和水位相对较深;约 10—7.2kaBP 为冷暖交替的过渡带;7.2—5.737kaBP 为暖湿气候;约 5.737—4.9kaBP 相当于该孔柱 50—30cm 多项指标发生突变,藻类开始发育,反映物源变化,可能存在沉积间断;约 4.9kaBP 至今,相当于该孔柱 30—0cm 现代环境:藻类生长茂盛,偏氧化的沉积环境。目前湖泊生产力较高,富营养化程度高,表现为藻型湖泊特征。

## 参 考 文 献

- 1 孙顺才、黄漪平等,太湖。北京:海洋出版社,1993,1—6
- 2 王建、汪永进、刘金陵等。太湖 16000 年沉积环境的演变。古生物学报,1996,35(2): 213—223
- 3 William Y B Chang,刘金陵,11000 年以来太湖的形成与演变。古生物学报,1996,35(2): 129—135
- 4 于天仁、王振权,土壤分析化学。北京:科学出版社,1980,15—17
- 5 钱君龙、张连第、乐美麟,过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷。土壤,1990,22(5): 258—262
- 6 Swain B Measurement and interpretation of sedimentary pigments. Freshwater Biology, 1985, 15: 53—75.
- 7 张平中、王先林、陈踐发等。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。科学通报,1995,40(18):



- 8 吴敬祿, 沈吉, 王苏民, 湖泊沉积物中有机质  $W^3C$  形成条件兼论若尔盖盆地中  $W^3C$  所示古气候特征. 青藏项目专家委员会编, 青藏高原形成演化, 环境变迁与生态系统研究, 学术论文年刊. 北京: 科学出版社, 1994, 175-181
- 9 吴瑞金, 湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其古气候意义. 湖泊科学, 1994, 5(2): 128-135
- 10 韩晓钟, 沈瀚, 王苏民等, 青海湖沉积物的色素含量及其意义. 刘东生, 安芷生主编, 黄土. 第四纪地质. 全球变化, 北京: 科学出版社, 1992, 116-121
- 11 Tisso B P, Welte D H, Petroleum Formation and Occurrence. Second Edition. Berlin: Springer Verlag, 1984, 538
- 12 Talbot M, Livingstone D A. Hydrogen index and carbon isotopes of lacustrine organic matter as lake level indicators. Palaeogeography, Palaeoclimatology, palaeoecology, 1989, 70: 121-135.
- 13 王苏民, 羊向东等, 江苏固城湖 15ka 来环境变迁与古季风关系探讨. 中国科学, 1996, 26(2): 137-141

## RECORD OF PALEOENVIRONMENTAL EVOLUTION OF TAIHU LAKE IN THE PAST 14000 YEARS

Qu Wenchuan Xue Bin Wu Yanhong Wang Sumin Wu Ruijing  
(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences*)

Zhang Pingzhong Chen Jianfa  
(*Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences*)

**Abstract** From the analysis of the magnetic susceptibility, TOC, TN, pigment, organic carbon isotope, HI, saturated hydrocarbon and  $^{14}C$  dating etc. of the sediment samples from cores of two boreholes in the Taihu lake, a knowledge of the evolution of paleoenvironment of the lake during the last 14ka is achieved. The results show that the lake has undergone the following stages. The Lake was at a low level, or even became exposed during 14.3-13.3kaBP, reflecting an arid climate. There existed a transitional stage during 13.3-12.4kaBP, the climate being slightly warm and wet. There are indications of a cold and dry climate around 11.5kaBP, probably corresponding to the Younger Drays event, comparable with other areas in east China. 10.9-10kaBP is obviously a warm period with a reducing environment and relatively deep water. There was an alternation of cool and warm climate during 10-7.2kaBP. It was warm and wet during 7.2-5.737kaBP. Many climate indicators changed suddenly in 5.05kaBP, probably a reflection of change in material source and a sedimentation break. The uppermost surficial sediment shows features of a modern environment. The West Taihu Lake is of algae-type with high production and high eutrophication and is characterized by oxidation environment and flourishing algae. The East Taihu Lake is of macrophyte-type with low production and low eutrophication where the organic material mainly came from the exuberant aquatic vascular plants.

**Key words** Taihu Lake, paleoenvironmental evolution, record of lake deposits

### 第一作者简介

瞿文川,男,1966年生,助理研究员。1992年南京大学化学系硕士研究生毕业。同年分配到中国科学院南京地理与湖泊研究所工作,主要从事湖泊沉积物有机地球化学研究工作。通讯地址:南京市北京东路73号南京地理与湖泊研究所。邮政编码:210008