

浙江北湖桥岩芯记录的早—中全新世环境演变

叶 玮 程龙娟 朱丽东 李凤全 王天阳 金莉丹

(浙江师范大学地理与环境科学学院 浙江金华 321004)

摘 要 通过对浙江余杭北湖桥钻孔(简称 BHQ 孔)沉积物中总有机碳(TOC)和碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)的分析,结合碳氮比(C/N)、粒度参数、年代和孢粉资料,探讨了研究区域早中全新世期间气候演变规律。结果表明,BHQ 孔所在区域早中全新世期间,环境变化可以划分为3段:①11.4~8.7 ka B.P., $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在-27.24‰~-23.4‰范围内波动升高,TOC含量(0.19%~0.69%)呈显著增加趋势,指示气候由冷干逐渐转向温湿。②8.7~8.0 ka B.P.,TOC含量偏低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (-24.91‰~-22.93‰)较为偏正,指示气候呈冷干—温湿—温干。③8.0~4.2 ka B.P.,TOC含量(0.18%~2.18%)和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (-26.33‰~-19.09‰)变化频繁且幅度较大,但整体上TOC含量偏高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏负,指示该段时期内气候总体呈暖湿特征,且存在不同尺度的冷暖波动。其中在8.0~5.7 ka B.P.期间,TOC含量(0.43%~2.18%)明显偏高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (-25.79‰~-23.15‰)明显偏负,指示气候温暖湿润,对应于区域全新世大暖期;此外本段时期内还记录到5.5 ka B.P.和4.2 ka B.P.两次冷事件。由此表明湖沼相沉积物TOC及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 可以记录降水量和温度的变化状况,能有效指示古气候的变化规律,同时研究结果初步揭示了浙北地区早中全新世期间气候演变特点。

关键词 BHQ 钻孔 总有机碳 有机碳同位素 早中全新世 全新世大暖期

第一作者简介 叶 玮 女 1957年出生 研究员 第四纪环境变化 E-mail: lyg129@zjnu.cn

中图分类号 P532 **文献标识码** A

全新世是与人类关系最为密切的一段时期,它记录了人类文明的进程,不同地区利用不同代用指标对全新世环境气候的研究成果丰富。研究区域位于北半球中纬度亚热带东部季风区,地形多样,河网密布,古文化遗址分布广泛,易受海平面波动影响,是对全球气候变化响应较为敏感的地带。目前对全新世气候环境变迁的研究成果丰富^[1-5],但对浙江境内全新世气候环境的系统研究却显不足。学者们通过孢粉组合^[6-7]、全新世地层分析^[8-9]、有孔虫分析^[10]、粒度和地球化学指标及古人类遗址^[11-13]等对浙江部分地区进行了全新世环境演变的研究,但在全新世分期、特殊环境事件辨识方面研究较为薄弱,这给区域古环境对比带来困难,进而影响人们对古文化发展演化环境背景的认识。湖泊或湖沼沉积物中总有机碳(TOC)及有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)是反映沉积物有机质来源的重要参数^[14-15],已有不少研究表明总有机碳及其同位素作为环境的代用指标,虽然具有气候指示的多解性和复杂性,但在古气候重建领域依然得到广泛的应用^[16-21]。因此,本文基于对浙江北湖桥岩芯(BHQ孔)总有机碳含量及碳同位素记录的分析,

结合粒度、AMS¹⁴C年代数据、碳氮比和孢粉研究成果,综合分析BHQ孔所在地区早中全新世期间的气候变化特征,探讨区域环境变化对全球气候变化的响应模式,勾画出该时段考古文化形成的环境背景。

1 区域概况

杭嘉湖平原位于太湖以南,天目山以东,杭州湾和钱塘江以北,东边大致以江苏吴江至上海市金山一线与东太湖平原和长江三角洲平原相连接,区域内地势低平,平均海拔在2~4 m,河网密布^[8]。气候属于北亚热带南部向中亚热带北缘过渡类型,年平均降水量可达1 000~1 400 mm,降水主要集中在夏秋季,年均温15℃~16℃,≥10℃积温4 700℃~4 800℃,无霜期长达210~230天^[11]。

研究区域位于杭嘉湖平原西南部,地表水系较为发达,但流域面积较小,多数河流发源于浙西北的天目山和莫干山,并向东或向北注入东海和太湖^[22]。北湖桥钻孔位于东苕溪流域上游低山丘陵与平原过渡带(图1),沉积类型以湖沼沉积为主,厚度在15~30 m之间^[11]。

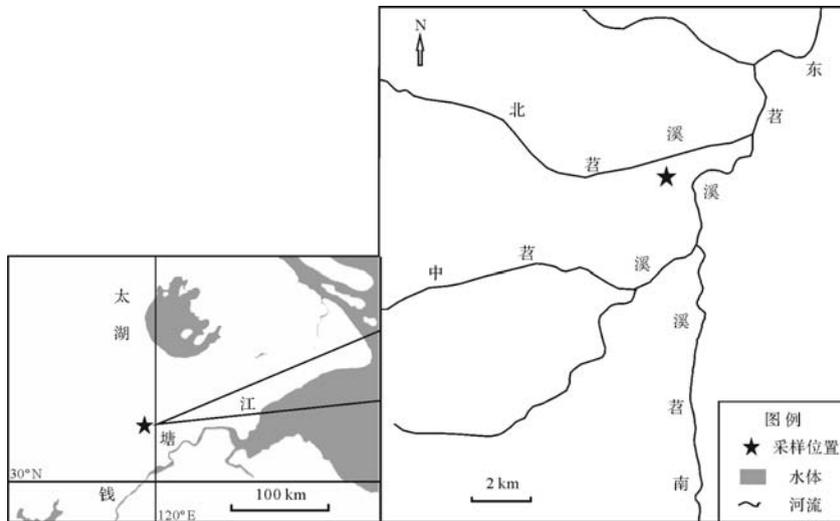


图1 BHQ孔的地理位置

Fig.1 Location of BHQ Core site

2 分析方法

综合研究区地形、沉积特征和古人类遗址分布等因素,选择在浙北杭嘉湖平原与浙西中山丘陵交界处的北湖草荡进行钻孔取样,钻孔孔号为ZK4,钻孔型号为100型,孔径10 cm,地理位置为30°22.443' N, 119°56.237' E,海拔6 m,孔深19.0 m,编号为BHQ^[11]。岩性为灰色、灰黄色黏土和粉砂,其间夹杂有植物碎屑、铁锰结核和钙结核等,其中,距地表0~1.625 m、2.35~4.775 m之间存在缺失(未能获取完整的柱样)。本文取样范围为距地表4.775~19 m,取样间隔10 cm,根据沉积特征在有些深度加密取样,共获得136个碳同位素分析样品。粒度样品按2.5 cm间隔取样,样品数量为535个。

样品总有机碳及其同位素分析由国家海洋局第三海洋研究所稳定同位素质谱实验室协助完成,分析仪器为稳定同位素质谱仪(Delta V Advantage),分析误差 $<0.2\%$ 。粒度和全氮的测定工作在浙江师范大学地理过程实验室完成,粒度数据由英国Malvern仪器有限公司生产的Mastersizer2000型激光粒度仪测定;全氮由ANT-300全自动定氮仪测定。

BHQ样柱共有8个测年数据,由北京大学核物理与核技术国家重点实验室加速器质谱仪实验室-第四纪年代测定实验室和美国迈阿密贝塔分析实验室(Beta Analytic Inc)共同完成,其中共4个有效的AMS¹⁴C年代数据为7 095 ± 35 a B.P.、7 170 ± 70 a B.P.、7 520 ± 40 a B.P.和9 570 ± 90 a B.P.,分别

位于样柱深度8.75~8.80 m、8.95~8.90 m、12.675~12.725 m和18.30~18.35 m,由Calib 7.1软件校正为日历年(分别为7 872~7 895 a B.P.、7 931~8 048 a B.P.、8 323~8 389 a B.P.和10 918~11 089 a B.P.),其与深度具有很好的相关性($R^2=0.935$)。根据已测定的粒度数据和岩性特征,在对整个样柱分层的基础上,结合已测得年代数据,计算出各层的沉积速率并推算整段年代,其中8.75~8.80 m和8.95~8.90 m两组数据控制的层段沉积物岩性为黏土质粉砂,计算出8.9~6.7 m段沉积速率为0.094 3 cm/a,并以此沉积速率进行外推,至8.9 m处和6.7 m处沉积年代分别为8 016.5 a B.P.和5 684.5 a B.P.;8.9~17 m段沉积岩性为粉砂,以12.675~12.725 m处实测年代为控制点,结合8.9 m处推测年代,计算得到粉砂段沉积速率为1.119 cm/a,同理推算出17 m年代为8 739 a B.P.;17~18.5 m段沉积物为黏土质粉砂,结合18.30~18.35 m处实测年代和17 m推算年代,计算出该段沉积速率为0.058 5 cm/a;19~18.5 m为粉砂质砂,按照粉砂段沉积速率推算出底界年代为11 363 a B.P.;6.7~4.775 m沉积类型为粉砂和黏土质粉砂,利用内插和外延法,按照8.9~17 m和8.9~6.7 m段沉积速率,推算出顶界4.775 m处年代为4 178 a B.P.,进而得到整个样柱各段的年代。

另外,4.775~8.75 m范围内分别在样柱深度4.9~4.925 m、5.02~5.05 m、6~6.05 m和6.95~6.975 m于不同时间共送4个样进行AMS¹⁴C测年,但均因碳含量偏低而未测出相应年代数据。针对该问题,除了

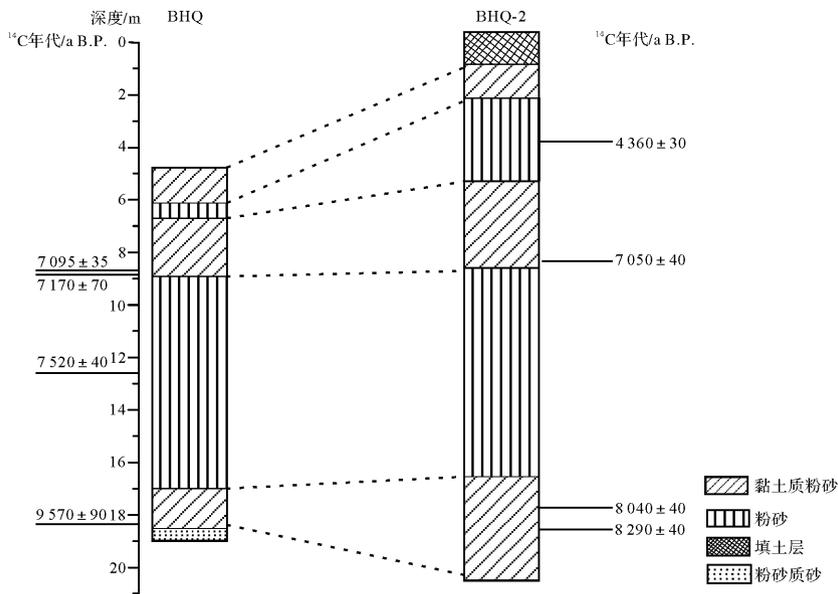


图2 BHQ与BHQ-2孔岩性对照

Fig.2 Lithology comparison between BHQ and BHQ-2 Core

上述利用内插和外延法推算年代外,在北湖草荡BHQ钻孔附近还采集一平行样柱,编号为BHQ-2,并由美国迈阿密贝塔分析实验室(Beta Analytic Inc)进行AMS¹⁴C年代测定,根据两个钻孔沉积类型对照以及现有年代推算^[23],可知两根样柱沉积类型基本对应,因此间接证明了BHQ孔年代推断的合理性(图2)。

3 实验结果与分析

3.1 沉积物粒度组成与分布特征

粒度分析结果(图3)显示,BHQ孔沉积物以粉砂组分(4~63 μm)占优势,其含量为20.63%~88.91%,平均值为71.58%;黏土组分(<4 μm)占

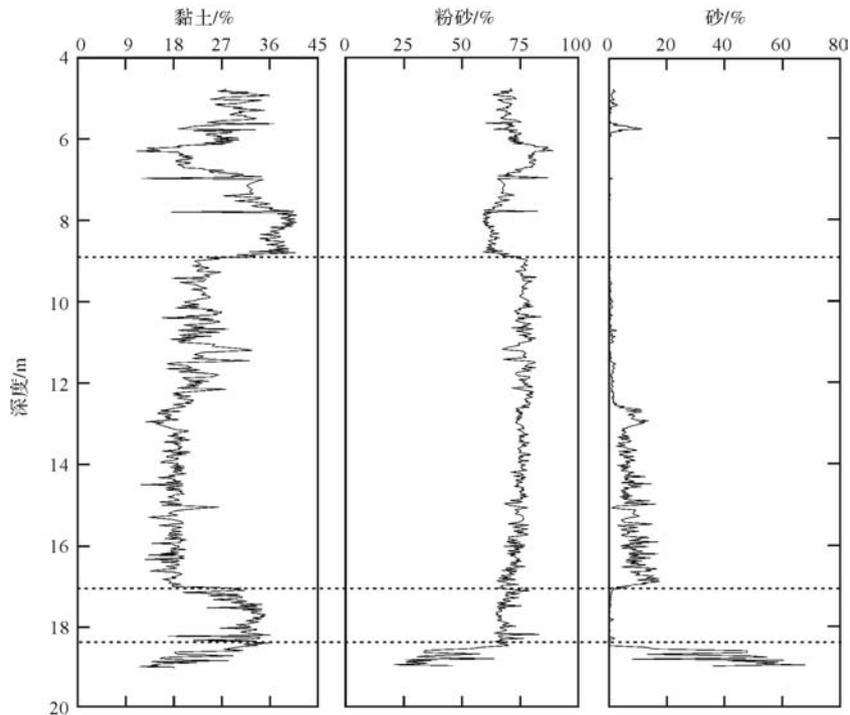


图3 BHQ孔沉积物粒度分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of grain sizes in sediments of BHQ Core

11.09% ~ 41.01%，平均值为 24.13%；砂组分 (>63 μm) 含量为 0~67.88%，平均值为 4.23%。按照国际三角图图解法，沉积物多属于粉砂和黏土质粉砂。

根据样柱沉积物粒度组成的变化特点，将整个样柱分为以下几段：

(1) 19~18.5 m，该段为粉砂质砂，砂含量平均值为 39.09%，粉砂含量平均为 40.87%，黏土含量平均值为 23.04%。由下而上黏土和粉砂含量波动上升，砂含量则波动下降，沉积物粒径由粗逐渐变细。

(2) 18.5~17 m，黏土质粉砂，黏土含量平均值为 30.73%，粉砂含量平均达到 68.48%，砂含量平均仅为 0.79%。该段黏土平均含量较下段增高，粉砂含量由下而上有逐渐增加趋势。

(3) 17~8.9 m，粉砂，黏土和粉砂平均含量分别为 20.02% 和 75.25%，砂平均含量为 4.73%，由下而上呈逐渐减少趋势。此段中，在孔深 12.65~8.9 m 内，黏土含量明显增加，砂含量减少并趋于零。

(4) 8.9~4.775 m，以黏土质粉砂沉积为主，黏土、粉砂和砂的平均含量分别为 30.04%、69.4% 和 0.56%。根据粒度曲线变化特征，本段自下而上可进

一步分为三层：第一层 (8.9~6.7 m) 和第三层 (6.125~4.775 m) 为黏土质粉砂，黏土含量平均值分别为 34.3% 和 28.5%，粉砂平均为 65.62% 和 70.04%；第二层 (6.7~6.125 m) 为粉砂，与第一层相比，黏土含量减少，粉砂含量平均值上升为 80.9%。

3.2 沉积物 TOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 C/N 变化特征

根据实验结果 (图 4)，BHQ 孔柱状沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 变化在 -27.24‰ ~ -19.09‰ ，平均值为 -24.06‰ ；TOC 变化范围在 0.18% ~ 2.18% 之间，平均为 0.48%；C/N 值 (4.65~19.59) 自下而上波动上升，平均值为 10.7。通过对 BHQ 孔 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 间的相关性分析 (表 1)，发现两者之间总体存在较弱的负相关关系，相关系数 R 值为 -0.287 。根据上述资料，BHQ 孔由下而上可分为四段：

第一段 (19~17 m)， $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在 -27.24‰ ~ -23.4‰ 间变化，平均为 -24.73‰ ，TOC 变化范围为 0.19% ~ 0.69%，平均 0.49%，TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 之间呈明显正相关，相关系数达到 0.767。C/N 值在 4.65~12.02 之间波动，平均值为 8.13，总体偏小。本段又可以分为上下两部分：下部 19~18.5 m， $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 平均值为 -26.9‰ ，

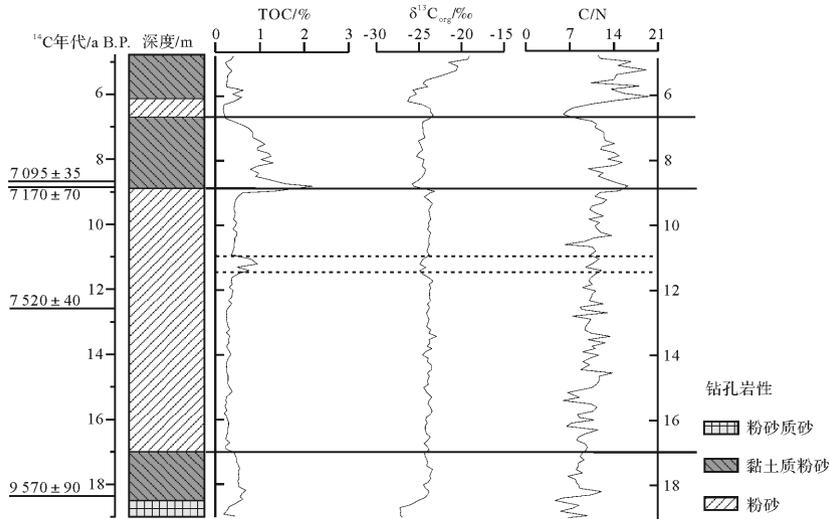


图 4 BHQ 孔沉积物岩性特征和 TOC 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、C/N 变化曲线

Fig.4 Lithological features and content changes of TOC, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and C/N ratio in sediments of BHQ Core

表 1 BHQ 孔 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 相关关系

Table 1 The correlation between TOC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ of BHQ core

	4.775~19/m	4.775~8.9/m	6.7~8.9/m	8.9~17/m	17~19/m
TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的 Pearson 相关性	-0.287 * *	-0.437 * *	-0.455 *	-0.428 * *	0.767 * *
显著性 (双侧)	0.001	0.005	0.038	0	0
样品数量 (N)	136	39	21	76	21

注：置信水平：* * . 在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关；* . 在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

较全孔均值明显偏负,并在 18.71 m 处达到全孔最低值(-27.24‰),TOC 和 C/N 均值分别为 0.34% 和 7.57,低于全孔均值;上部 18.5~17 m,TOC 平均含量为 0.53%,明显高于下部, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 平均值为-24.05‰,相比下部偏正,C/N 平均值增加至 8.31,且波幅变大(4.65~12.02)。

第二段(17~8.9 m), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 总体变化不大,其均值分别为-23.92‰和 0.4%,两者之间呈负相关($R=-0.428$),C/N 平均值(10.34)较第一段明显增加。该段由下而上进一步分为上、中、下三部分:下部(17~11.5 m),TOC 含量明显下降,平均值(0.29%)低于整段均值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 平均值为-23.87‰,与全段均值接近,但略高于全孔均值;C/N 在 5.89~13.76 之间剧烈波动,平均为 9.94。中部(11.5~11.05 m), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 出现突变,TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 之间呈现显著反向波动变化,其中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 平均值为-24.62‰,较全段均值明显偏负,TOC 平均值(0.7%)明显高于全段均值;与此对应,C/N 平均值(10.95)增大。上部(11.05~8.9 m),TOC 变化在 0.36%~0.61%间,平均为 0.44%,明显较中部低,但略高于底部; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 均值为-23.81‰,较中部偏正而与下部接近;C/N 在 6.21~13.61 之间波动,平均为 10.98,和中部相似。

第三段(8.9~6.7 m),TOC 平均含量 1.06%,最高达 2.18%,是全孔最高层段,但整体由下而上呈波动下降; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 变化在-25.79‰~-23.15‰之间,平均含量为-24.67‰,较第一、二段明显偏负;C/N 在 7.61~14.79 间波动,平均达到 12.7,明显高于第一、二段。本段 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 之间呈负相关关系,相关系数-0.455。

第四段(6.7~4.775 m),TOC 均值为 0.32%,是四段中 TOC 均值最小的层段; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 则在-26.33‰~-19.09‰之间变化,平均为-23.23‰,与第二段均值接近;C/N 在 5.97~19.59 范围内,平均为 12.85,成为全孔 C/N 均值最高的层段。该段由下而上又可以分为三部分:下部(6.7~6.175 m),TOC 在 0.18%~0.23%范围内波动,均值为 0.2%,明显低于全孔均值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量变化在-24.62‰~-23.32‰之间,平均为-23.79‰,接近本段均值;C/N 平均为 7.6,明显低于本段均值。中部(6.175~5.825 m),TOC 含量(0.39%~0.63%)升高,平均为 0.51%,高出全段均值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量在-26.33‰~-25.31‰之间,平均为-25.86‰,为全孔最偏负的段层;C/N 平均为 15.72,为全孔各段平均最高,并在 6.05 m 出现全孔最大值(19.59)。上部(5.825~4.775 m),TOC 含量显著下降,

平均为 0.3%; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 明显偏正,并达到全孔最大值(平均为-21.75‰),而 C/N 均值达到 14.5,为全孔次高值。

4 结果与讨论

4.1 沉积物 TOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 及 C/N 所指示的环境意义

前人研究表明,沉积物 TOC 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量高低主要取决于沉积物有机质来源。对于湖泊而言,沉积物有机质主要来自湖泊内生植物和外源陆生植物,陆生植物按其不同的光合作用机理可以划分为 C3、C4 和 CAM 三类植物^[24-25]。C3 类植物多生活在温度较低,日照不强的凉爽湿润环境下,有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围在-37‰~-24‰之间;C4 类植物主要生活在温度较高,日照较强的环境中, $\delta^{13}\text{C}$ 值在-19‰~-9‰范围内;而 CAM 类植物则处于 C3 和 C4 两类植物之间,主要生活在极度干旱的环境条件下,有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值在-30‰~-10‰之间^[26-27]。其中 C3 类植物分布较为广泛,尤其在中国东部地区,大多数进行光合作用的植物固碳途径是通过 C3 途径实现^[28-30]。湖泊内源植物类型主要分为沉水植物和漂浮植物,其中漂浮植物又包括挺水植物、浮游植物和浮叶植物。沉水植物 $\delta^{13}\text{C}$ 含量变化在-20‰~-12‰范围内,相当于重碳同位素^[31],而漂浮植物主要利用大气中的 CO_2 作为光合作用吸收碳,其 $\delta^{13}\text{C}$ 较为偏轻,最小可达-35.5‰,其中挺水植物 $\delta^{13}\text{C}$ 范围在-30‰~-24‰^[26]。因此,沉积物有机质来源明显受到气候的影响^[18]。不同地区的研究成果表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 对气候冷暖状况的反映不同。有研究者指出, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量高指示气候的暖期,反之则指示气候的冷期^[16,32],也有研究表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量变化与温度之间存在负相关关系^[17,33]。显然,利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 指标推演环境变化时需要谨慎,不仅要考虑区域环境差异和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 对气候变化的多解性和敏感程度^[18],还应结合其他代用指标进行综合分析。另外,湖泊沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的高低不仅受气候因子的影响,还可能与成岩作用有关^[32]。本文研究的钻孔位于地势低平的亚热带地区,BHQ 样柱时间跨度范围为全新世早中期,沉积物松散,可以不考虑成岩作用造成的有机质减少及其对有机碳同位素的影响^[28]。综上所述,影响 BHQ 孔沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量变化的因子主要为有机质来源和气候变化两个方面。

沉积物 C/N 的大小常作为指示其有机质来源的指标。根据前人研究成果,C/N 值大于 20,指示湖泊

有机质主要来源为陆生植物;C/N 分布在 4~10, 则说明湖泊有机质主要来源于湖泊内生藻类植物;C/N 在 10~20 之间, 则反映了湖泊有机质来源兼具外来陆生植物和湖泊内生植物两种类型^[28,34-35]。BHQ 孔 C/N 变化范围为 4.65~19.59, 平均值为 10.7, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值变化范围为 -27.24‰ ~ -19.09‰, 平均值 -24.06‰, 由此可以初步判定, BHQ 孔沉积物有机质主要来源为湖泊内生藻类和陆生 C3 类植物。

由于湖泊沉积物 TOC 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量高低对气候变化的指示具有多解性, 除了上文中通过利用 C/N 指标进行沉积物有机质来源的判定外, 本文在讨论气候变化时, 还对 BHQ 孔分段进行了 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 间的相关性分析, 结果表明 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 间关系整体趋于负相关, BHQ 孔沉积物有机质总量增加时, 有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 趋于偏负, 认为这可能与周边河流所携带的陆生植物有机质的输入有关。周雪花等通过对部分地区湖沼沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 相关性阈值分析表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在 TOC 含量处于较高阶段时对环境的指示意义可能会更加明确^[36]。另外, 也有研究表明 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 间存在或正或负的相关关系^[17-18,37-38]。沉积物 TOC 含量的变化可以直接反映湖泊的生产力状况, 还可以说明湖泊有机质的输入情况^[39]。温度和降水量则是控制植物生长的关键要素^[14,19,40], 因此 TOC 含量的变化往往和气候因子间关系密切, 并直接关系到 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量的变化。马龙等^[14] 对内蒙古高原的安固里淖内陆湖泊采样研究表明, TOC 含量高低变化可反映温度的变化, 即 TOC 含量高, 温度偏高, 反之偏低。Stockhausen^[41] 认为 TOC 含量是降水量的代用指标, 高 TOC 表示高降水量, 低 TOC 则指示低降水量。由于 BHQ 孔所在区域全新世沉积环境主要是湖沼^[11], 植物类型以及初级生产力水平的变化受到区域内有效湿度的较多限制, 湖区流域内降水量丰富的时期, 陆生植物迅速繁殖生长, 携带入湖的有机质会明显增加, 湖内藻类植物也会由于湖泊水位增加得到充分的繁殖空间, 有机物产量高, TOC 含量

也会相应增加;反之, 在较为干旱时期, 陆生植物生长受到水分限制, 湖内水生植物生长受限, 从而使得沉积物有机质含量减少。而湖泊沉积物粒度特征反映了湖泊水动力的特征, 间接指示湖泊水位的高低变化, 进而反映湖区气候的干湿状况^[42-43]。沉积物粒度较粗指示湖泊水位偏低, 气候干旱;沉积物粒度较细则指示湖泊水位偏高, 气候湿润^[11]。BHQ 孔沉积物 TOC 与粒度参数的相关性分析表明, TOC 含量与黏土含量间具有显著的正相关关系, 相关系数达到 0.738(表 2)。综合 BHQ 孔 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 以及 TOC 与粒度的相关性分析, 本文将 TOC 作为研究区域降水量的代用指标, 将 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 作为温度的代用指标。

4.2 BHQ 钻孔记录的早—中全新世气候变化特征

基于有机碳资料, 并结合孢粉、粒度及年代数据(图 5), 可将 BHQ 孔所在的浙江杭嘉湖平原地区早中全新世期间气候变化划分为 3 个阶段:

(1) 11.4~8.7 ka B.P.(19~17 m), 粒度由粉砂质砂向黏土质粉砂过渡, C/N 在 4~12 间波动, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 平均为 -24.73‰, TOC 平均 0.49%, 并有逐渐增大的趋势。该段时期内 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 TOC 两者间呈正相关同步上升趋势, 纵观全样 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 间相关性分析, 该时期是唯一一段表现为正相关关系的层位。本段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 含量均较低, 在气候干旱期间, 苕溪河流对该区域的影响减弱, 研究区内为浅湖相环境, 内生挺水植物繁盛使得 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏负, 随着 TOC 含量增加, 降水量呈增加趋势。结合该段孢粉组合特征, 孢粉总数量呈现增加趋势, 其中乔木占优势, 落叶阔叶数量高于针叶, 并且落叶栎+栗属花粉含量自下而上呈增加趋势^[44]。表明自新仙女木冷期结束后, 研究区域气温逐渐升高, 湖水面随着降水量增加逐渐扩大, 湖泊水位升高则有利于湖泊内生沉水植物繁殖 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 趋于偏正), 气候特征表现为早期冷干, 后期逐渐转为温湿。这与前人的研究结果有较好的吻合度, 例如方修琦等利用文献中收集的古温度记录, 定量重建了中国全新世百年分辨率气温集成序列, 其中

表 2 BHQ 孔 TOC 与粒度参数间相关性

Table 2 The correlation between TOC and particle sizes of BHQ core

		总有机碳	黏土	粉砂	砂
总有机碳	Pearson 相关性	1	0.738 * *	-0.348 * *	-0.303 * *
	显著性(双侧)		0	0	0
	样品数量(N)	136	136	136	136

注: * *. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

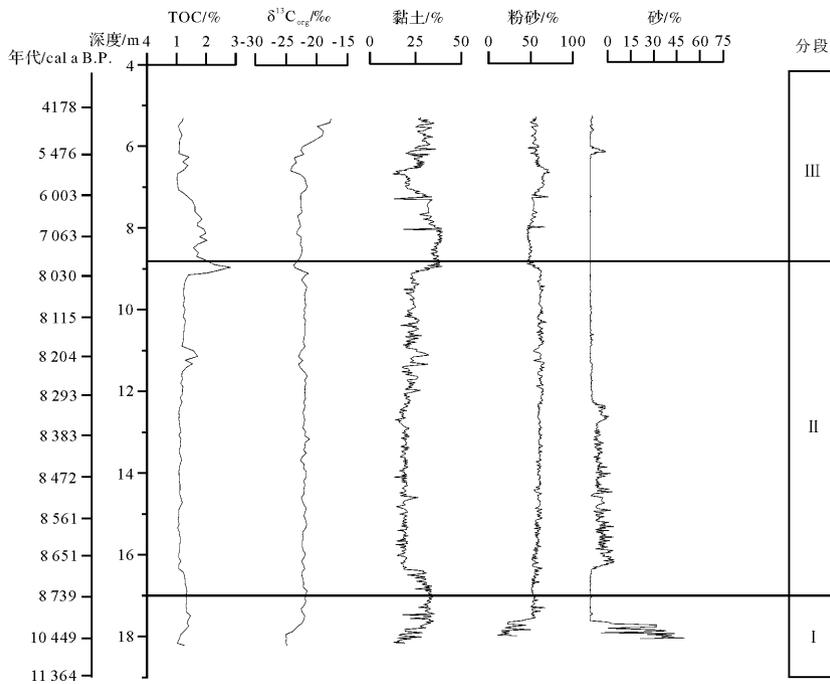


图5 BHQ 钻孔早中全新世期间各代用指标垂向变化

Fig.5 Vertical changes of proxies in BHQ core during Early-middle Holocene

早全新世(11.5~8.9 ka B.P.)气候表现为波动升温期^[45],谢树成等对长江中游地区基于泥碳及石笋的研究^[46]以及严钦尚等对杭嘉湖平原孢粉分析^[8]也得出类似结论。

(2) 8.7~8.0 ka B.P.(17~8.9 m),沉积类型为粉砂,沉积物 TOC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 呈小幅波动,TOC 较早期有所降低,C/N 在 5.89~12.82 之间变动,表明该阶段内有机质来源以湖泊内生植物为主。这一段可分为三个亚段:第一亚段(17~11.5 m),TOC 含量明显下降且低于平均值,对应沉积物中含量偏高的砂(平均为 6.56%),反映了湖水位的下降。综合各项指标推断,该段时期降水减少,湖水变浅。与之对应, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 则表现为偏正,孢粉数量较全新世早期也有明显下降,反映较为偏冷干的气候特征。第二亚段(11.5~11.05 m),TOC 含量明显升高,远超过全孔均值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 较第一、三亚段略有偏负,与此同时,沉积物中黏土含量在本段中显著高于上下相邻层,砂含量则低于上下相邻层。对应层段的孢粉组合中落叶松+栗属花粉、松属、阿丁枫科和枫杨等乔木均有所增加。由此推测,该段时期内降水量和温度出现了一次时间尺度小于百年的短暂增加过程,指示了温湿的气候环境。然而,在时间上此次温湿过程刚好与北大西洋冷事件之一的 8.2 ka B.P.冷事件时间上相近^[47]。目前关于 8.2 ka B.P.冷事件的研究成果表明,此次冷事件在中

国东部季风区表现为一次弱季风事件^[48-49],金章东等^[50]则对 8.2 ka B.P.冷事件是否在中国境内存在表示怀疑。从本文数据分析结果来看,此次温度和降水的变幅较小,时间尺度较短(约 20 年),而 8.2 ka B.P.冷事件表现为时间尺度在 500 a 以下,且降温幅度较大(约为 YD 事件的 1/2 或 1/3)^[47]。同时考虑到定年差异,因此认为该事件与北大西洋 8.2 ka B.P.冷事件的关系有待更加深入的研究。第三亚段(11.05~8.9 m),TOC 含量再次下降, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 接近全孔均值,孢粉组合特征表现为与第一亚段相似,呈波动下降趋势,但在花粉组合中反映温度升高的常绿栎+栲属花粉由下而上呈逐渐增加趋势(1.21%~9.71%),说明该段时期降水量减少,但温度有所上升,气候特征为温干。综上所述,早全新世中晚期,研究区域气候呈冷干—温湿—温干过渡特征,总体偏干。而周边地区研究成果表明该时期内有相似的气候特征,如巢湖早全新世期间(9 870~6 040 a B.P.)尤其在 8 910 a B.P.左右气候特征表现为干冷向温干方向发展^[51]。

(3) 8.0~4.2 ka B.P.(8.9~4.775 m),沉积类型以黏土质粉砂为主,粒度总体偏细。沉积物 TOC 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 含量变化幅度增大,并呈较为明显的反相关。另一方面,偏高的 C/N 指示湖泊有机质来源以陆生 C3 类植物和湖泊内生藻类为主。本段孢粉组合中常

绿乔木树种由下而上呈下降趋势。根据各类代用指标的变化特征,可以将这一时期分为四个亚段:第一亚段,8.0~5.7 ka B.P.(8.9~6.7 m),这段时期最显著特征是 TOC 含量明显升高,平均可达 1.06%,而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 则偏负,平均为 -24.67‰ , C/N 平均为 12.7。在孢粉组合中仍然以木本占优势,但阔叶与针叶树种的比值明显增大。各项指标综合反映该亚段降水量有明显增加,且温度偏高,气候温暖湿润,陆生 C3 植物和湖泊内生植物繁盛,区域水热组合达到最优,因此该段时期为研究区域的全新世大暖期^[52]。第二亚段,5.7~5.6 ka B.P.(6.7~6.175 m),沉积物为粉砂,TOC 含量下降, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 接近全孔均值。该段花粉组合中乔木植物占 36.37%,低于第一亚段,并且常绿栎+栲属(1.62%)花粉含量明显下降。显然,孢粉组合所揭示的环境变化与 TOC 含量下降一致,反映该亚段气候偏干冷,为研究区域一次较为明显的降温降湿期,且与 5.5 ka B.P.冷事件很好对应^[47]。第三亚段,5.6~5.2 ka B.P.(6.175~5.825 m),沉积物为黏土质粉砂,TOC 含量明显增加,并高出全孔均值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 则较为偏负。该亚段孢粉组合特征总体与第二亚段接近,但木本花粉中阿丁枫和枫杨的含量均达到全孔最高值,并且水稻花粉数量显著增加,最高含量达到 39.42%。综合各项指标推测,该时期气候温和湿润,水稻花粉数量显著增加,指示人类活动规模扩大,这可能与良渚文化的兴起有关。第四亚段,5.2~4.2 ka B.P.(5.825~4.775 m),TOC 含量再次下降,低于全孔均值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 则显著偏正,该亚段孢粉浓度为整个钻孔(研究段)的最低水平。因此推断,此亚段时期气候再次转向冷干,湖泊水位急剧下降,出现沼泽化趋势,气候突变时间与北大西洋 4.2 ka B.P.冷事件接近^[47]。综合来看,该时期研究区域气候以暖湿为主,同时出现不同时间尺度的冷事件波动,其中 8.0~5.7 ka B.P.期间水热条件达到最佳,对应于该区域的全新世大暖期,并且该时期的气候特征与方修琦、候光良及施雅风等人划分的全新世大暖期有很好的对应^[45,52-53]。另外,周边地区不少研究成果也表明中国东部季风区全新世大暖期的时间范围在 8.0~3.5 ka B.P.左右^[46,54-55],由于各地研究载体和代用指标以及定年模式不同,因而全新世大暖期时间跨度的划分存在差异,例如张强等指出南京江北地区约在 8 000~5 000 a 期间进入全新世的高温期^[56];太湖地区研究记录也表明该区域在 8.0~4.0 ka B.P.期间出现明显的高海面,新石器文化发展,气候暖湿^[57-58]。

5 结论

基于以上对 BHQ 孔早中全新世跨度近 7 000 a 的沉积物 TOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、C/N 及粒度等代用指标的分析发现,该孔沉积物记录了较为丰富的区域全新世气候变化信息。研究结果表明:

(1) BHQ 孔多项指标的综合能较好地反映沉积环境的变化。沉积物 TOC 含量和粒度组成可以用来指示研究区域降水量的变化,且 TOC 含量增高指示研究区域降水量增加,反之,指示降水量下降; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 辅以孢粉资料可以指示区域温度的变化,并根据 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 TOC 间相关性分析表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与温度间基本上呈现弱负相关关系; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 与 C/N 能有效指示湖泊沉积物有机质的主要来源。

(2) 综合各类代用指标,并与周边研究成果对比显示,BHQ 孔早中全新世沉积记录反映的气候变化可以划分为 3 段时期:①11.4~8.7 ka B.P.,为气候回暖期,本区域气候特征早期以冷干为主,之后降雨量显著增加,逐渐转向温湿。②8.7~8.0 ka B.P.,气候整体上偏干,呈冷干—温湿—温干过渡特征。③8.0~4.2 ka B.P.,气候特征以暖湿为主,同时存在不同时间尺度的冷事件波动。在孔深 8.9~6.7 m(8.0~5.7 ka B.P.),为水热条件最宜期,对应于研究区域的全新世大暖期;在 5.7~5.6 ka B.P.和 5.2~4.2 ka B.P.期间出现较为明显的降温降湿,这与北大西洋 5.5 ka B.P.冷事件和 4.2 ka B.P.冷事件相对应;在 5.6~5.2 ka B.P.期间,地层中大量稻属花粉的出现指示了人类活动的增加。

致谢 钱启俊、王彩霞、章云霞、严行志、孔祥忠、李岩、范庆斌及杨立辉老师等在该文章实验过程和撰写修改中提供了无微不至的帮助和建议,在此表示真挚的感谢。

参考文献 (References)

- 1 Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L, et al. The Holocene Asian Monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- 2 邵晓华,汪永进,程海,等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录[J]. *科学通报*, 2006, 51(1): 80-86. [Shao Xiaohua, Wang Yongjin, Cheng Hai, et al. Long-term trend and abrupt events of the Holocene Asian monsoon inferred from a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Shennongjia in central China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 221-228.]
- 3 吴敬禄,沈吉,王苏民,等. 新疆艾比湖地区湖泊沉积记录的早全新

- 世气候环境特征[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2003, 33(6): 570-575. [Wu Jinglu, Shen Ji, Wang Sumin, et al. Characteristics of an Early Holocene climate and environment from lake sediments in Ebinur region, NW China[J]. Science China (Seri.D): Earth Sciences, 2003, 33(6): 570-575.]
- 4 李世杰, 王小天, 夏威夷, 等. 青藏高原鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 578-584. [Li Shijie, Wang Xiaotian, Xia Weilan, et al. The Little Ice Age Climate fluctuations derived from lake sediments of Goulucuo, Qinghai-Xizang Plateau [J]. Quaternary Science, 2004, 24(5): 578-584.]
 - 5 王宁, 刘卫国, 徐黎明, 等. 青藏高原现代湖泊沉积物碳酸盐矿物氧同位素组成特征及影响因素[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 591-600. [Wang Ning, Liu Weiguo, Xu Liming, et al. Oxygen isotopic compositions of carbonates of modern surface lacustrine sediments and their affecting factors in Tibet Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 591-600.]
 - 6 刘静伟, 赵淑君, 程捷, 等. 杭州湾钱塘江两岸全新世以来的古植被及古气候研究[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 236-245. [Liu Jingwei, Zhao Shujun, Cheng Jie, et al. A study of vegetation and climate evolution since the Holocene near the banks of the Qiantang River in Hangzhou Bay[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 236-245.]
 - 7 陈学林. 杭嘉湖平原全新世沉积的孢粉组合及其意义[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1991(4): 84-90. [Chen Xuelin. The spore-pollen assemblage of the Holocene sediments and its significance in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 1991(4): 84-90.]
 - 8 严钦尚, 黄山. 杭嘉湖平原全新世沉积环境的演变[J]. 地理学报, 1987, 42(1): 1-15. [Yan Qinshang, Huang Shan. Evolution of the Holocene sedimentary environment in Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain [J]. Acta Geographica Sinica, 1987, 42(1): 1-15.]
 - 9 蔡祖仁, 林洪泉. 浙北杭嘉湖平原的全新世地层[J]. 地层学杂志, 1984, 8(1): 10-18. [Cai Zuren, Lin Hongquan. Holocene strata in northern Zhejiang Hangjiahu Plain[J]. Journal of Stratigraphy, 1984, 8(1): 10-18.]
 - 10 李保华, 王晓燕, 孔晓敏, 等. 浙江钱塘江冰后期有孔虫化石记录及其古环境意义[J]. 微体古生物学报, 2012, 29(2): 121-129. [Li Baohua, Wang Xiaoyan, Kong Xiaomin, et al. Post-glacial foraminiferal record of the southern Qiantang river estuary and its paleoenvironmental implications [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2012, 29(2): 121-129.]
 - 11 李黎霞. 浙江省全新世早期环境变化与文化响应[D]. 金华: 浙江师范大学, 2011. [Li Lixia. Environment change and civilization response during the Early Holocene in Zhejiang province[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2011.]
 - 12 叶玮, 李凤全, 沈叶琴, 等. 良渚文化期自然环境变化与人类文明发展的耦合[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2006, 29(4): 455-460. [Ye Wei, Li Fengquan, Shen Yeqin, et al. The coupling of natural environment and the development of human civilization during Liangzhu culture period[J]. Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences, 2006, 29(4): 455-460.]
 - 13 叶玮, 李黎霞, 朱丽东, 等. 浙江省全新世环境变化的文化响应[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2010, 33(4): 459-464. [Ye Wei, Li Lixia, Zhu Lidong, et al. Analysis of Holocene civilization responded to the paleo-environmental evolution in Zhejiang province [J]. Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences, 2010, 33(4): 459-464.]
 - 14 马龙, 吴敬禄. 安固里淖湖沉积物中总有机碳含量及其碳同位素的环境意义[J]. 自然资源学报, 2009, 26(4): 1099-1104. [Ma Long, Wu Jinglu. Environmental significance from organic carbon and its isotope of Angulinao Lake sediment [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 26(4): 1099-1104.]
 - 15 沈吉, 潘红玺, 夏威夷, 等. 南四湖沉积剖面中色素与有机碳同位素特征的古环境意义[J]. 湖泊科学, 1998, 10(2): 17-22. [Shen Ji, Pan Hongxi, Xia Weilan, et al. Character and paleoenvironmental significance of the pigment and organic $\delta^{13}\text{C}$ in sediments of Nansihu Lake[J]. Journal of Lake Science, 1998, 10(2): 17-22.]
 - 16 郭雪莲, 王琪, 史基安, 等. 青海湖沉积物有机碳含量与同位素和粒度特征及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(3): 99-103. [Guo Xuelian, Wang Qi, Shi Ji'an, et al. Characters of the total organic carbon and organic carbon isotope and grain size and paleoclimate significance in Qinghai Lake sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(3): 99-103.]
 - 17 吴敬禄, Luecke A, 李世杰, 等. 兴措湖沉积物有机碳及其同位素记录揭示的近代气候与环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 37-42. [Wu Jinglu, Luecke A, Li Shijie, et al. Modern climatic signals from records of contents of TOC and $\delta^{13}\text{C}$ in the Xingcuo Lake sediments in eastern Tibetan plateau, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(4): 37-42.]
 - 18 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 103-109. [Wu Jinglu, Wang Suming. Climate versus changes in $\delta^{13}\text{C}$ values of the organic matter in lake sediments[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1996, 16(2): 103-109.]
 - 19 Xu Hai, Li Ai, Tan Liangcheng, et al. Stable isotopes in bulk carbonates and organic matter in recent sediments of Lake Qinghai and their climatic implications[J]. Chemical Geology, 2006, 235(3/4): 262-275.
 - 20 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起, 等. 西风区全新世以来湖泊沉积记录的高分辨率古气候演化[J]. 科学通报, 2007, 52(9): 1042-1049. [Jiang Qingfeng, Shen Ji, Liu Xingqi, et al. A high-resolution climatic change since Holocene inferred from multi-proxy of lake sediment in westerly area of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9): 1042-1049.]
 - 21 游海涛, 刘嘉麒. 14 ka BP 以来二龙湾玛珥湖沉积物记录的高分辨率气候演变[J]. 科学通报, 2012, 57(24): 2322-2329. [You Haitao, Liu Jiaqi. High-resolution climate evolution derived from the sediment records of Erlongwan Maar Lake since 14 ka BP[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(24): 2322-2329.]
 - 22 马春燕. 浙江杭州东苕溪平原全新世沉积地貌环境演变及与新石器文明关系的初探[D]. 上海: 华东师范大学, 2012. [Ma Chunyan. The evolution of environment and geomorphology during the Holocene of the East Tiao creek plain, Hangzhou Zhejiang provinces and

- its linkage with the Neolithic Civilization [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.]
- 23 金莉丹. 浙江瓶窑 BHQ-2 孔全新世环境记录 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2014. [Jin Lidan. The environmental records of BHQ-2 Core during Holocene in Pingyao, Zhejiang [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2014.]
 - 24 Bowen R. Isotopes and Climates [M]. London: Elsevier Applied Science, 1991: 128-131.
 - 25 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: 220-221. [Shen Ji, Xue Bin, Wu Jinglu, et al. Lake Sediments and Environmental Evolution [M]. Beijing: Science Press, 2010: 220-221.]
 - 26 Aravena R, Warner B G, MacDonald G M, et al. Carbon isotope composition of lake sediments in relation to lake productivity and radiocarbon dating [J]. Quaternary Research, 1992, 37(3): 333-345.
 - 27 Smith B N, Epstein S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants [J]. Plant Physiology, 1971, 47(3): 380-384.
 - 28 Meyers P A, Lallier-Vergés E. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates [J]. Journal of Paleolimnology, 1999, 21(3): 345-372.
 - 29 饶志国, 朱照宇, 贾国东, 等. 环北太平洋地区现代植被中 C_3/C_4 植物相对丰度与气候条件关系研究 [J]. 科学通报, 2010, 55(12): 1134-1140. [Rao Zhiguo, Zhu Zhaoyu, Jia Guodong, et al. Relationship between climatic conditions and the relative abundance of modern C_3 and C_4 plants in three regions around the North Pacific [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(12): 1134-1140.]
 - 30 O'Leary M H. Carbon isotopes in photosynthesis [J]. Bioscience, 1988, 38(5): 328-336.
 - 31 Pearson Jr F J, Copley T B. Stable isotope studies of Lakes [M] // Lemman A. Lakes: Chemistry, Geology, Physics. New York: Springer-verlag, 1978: 235-236.
 - 32 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 [J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(4): 401-404. [Shen Ji, Wang Suming, Yang Xiangdong. Measurements of organic carbon stable isotope in lacustrine sediments and its paleoclimate environment [J]. Oceanology Et Limnologia Sinica, 1996, 27(4): 401-404.]
 - 33 张恩楼, 沈吉, 夏威岚, 等. 青海湖沉积物有机碳及其同位素的气候环境信息 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 105-108. [Zhang Enlou, Shen Ji, Xia Weilan, et al. Environmental records from organic carbon and its isotope of Qinghai Lake sediment [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(2): 105-108.]
 - 34 Lütcke A, Schleser G H, Zolitschka B, et al. A Lateglacial and Holocene organic carbon isotope record of lacustrine palaeoproductivity and climatic change derived from varved lake sediments of Lake Holzmaar, Germany [J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(5/6/7): 569-580.
 - 35 Yang T N, Lee T Q, Meyers P A, et al. Variation in monsoonal rainfall over the last 21 kyr inferred from sedimentary organic matter in Tung-Yuan Pond, southern Taiwan [J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(23/24): 3413-3422.
 - 36 周雪花, 李育, 张成琦, 等. 东、中亚干旱一半干旱区全新世湖泊沉积 $\omega(\text{TOC})$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 意义的阈值问题 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2015, 51(1): 37-43. [Zhou Xuehua, Li Yu, Zhang Chengqi, et al. Threshold problem of TOC mass fraction and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ from Holocene lake sediments in arid and semi-arid regions of East and Central Asia [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2015, 51(1): 37-43.]
 - 37 李育, 王乃昂, 李卓仑, 等. 河西猪野泽沉积物有机地化指标之间的关系及古环境意义 [J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 334-341. [Li Yu, Wang Naiang, Li Zhuolun, et al. The relationship among organic geochemical proxies and their paleoenvironmental significances in the Zhuye Lake sediments [J]. Journal of Glaciology & Geocryology, 2011, 33(2): 334-341.]
 - 38 Saurer M, Siegenthaler U, Schweingruber F. The climate-carbon isotope relationship in tree rings and the significance of site conditions [J]. Tellus B, 1995, 47(3): 320-330.
 - 39 Meyers P A, Takemura K. Quaternary changes in delivery and accumulation of organic matter in sediments of Lake Biwa, Japan [J]. Journal of Paleolimnology, 1997, 18(3): 211-218.
 - 40 李军. 藏北高原湖泊表层沉积物有机碳、碳氮比以及有机碳同位素特征及其环境意义 [D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [Li Jun. TOC, C/N Ratio and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ characteristics of lake surface sediment in northern Tibetan Plateau and its environmental significance [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.]
 - 41 Stockhausen H, Zolitschka B. Environmental changes Since 13000 cal. BP reflected in magnetic and sedimentological properties of sediments from Lake Holzmaar (Germany) [J]. Quaternary Science Reviews, 1999, 18(7): 913-925.
 - 42 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义 [J]. 地理科学, 2005, 25(5): 590-596. [He Chunhua, Ding Haiyan, Zhang Zhenke, et al. Grain-size characteristics and their environmental significance of Hongze Lake sediments [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(5): 590-596.]
 - 43 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例 [J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 2003, 33(6): 563-568. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Zhang Feng, et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: sediment grain size as an example [J]. Science China (Series D): Earth Sciences, 2003, 33(6): 563-568.]
 - 44 陆文晨, 叶玮. 浙江瓶窑 BHQ 孔全新统孢粉组合特征与气候变化 [J]. 古地理学报, 2014, 16(5): 687-701. [Lu Wenchen, Ye Wei. Characteristics of pollen assemblage and climate change in the Holocene at Borehole BHQ in Pingyao area, Zhejiang province [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(5): 687-701.]
 - 45 方修琦, 候光良. 中国全新世气温序列的集成重建 [J]. 地理科学, 2011, 31(4): 385-393. [Fang Xiuqi, Hou Guangliang. Synthetically reconstructed Holocene temperature change in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(4): 385-393.]
 - 46 谢树成, 胡超涌, 顾延生, 等. 最近 13 ka 以来长江中游古水文变化 [J]. 地球科学, 2015, 40(2): 198-205. [Xie Shucheng, Hu Chaoyong, Gu Yansheng, et al. Paleohydrological variation since 13 ka BP in middle Yangtze region [J]. Earth Science, 2015, 40(2):

- 198-205.]
- 47 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates [J]. *Science*, 1997, 278(5341): 1257-1266.
- 48 张银环, 杨琰, 杨勋林, 等. 早全新世季风演化的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究——以河南老母洞石笋为例 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 134-141. [Zhang Yinhan, Yang Yan, Yang Xunlin, et al. Early Holocene monsoon evolution of high-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records: in Henan Laomu cave [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 134-141.]
- 49 Yu Shiyong, Zhu Cheng, Wang Fubao. Radiocarbon constraints on the Holocene flood deposits of the Ning-Zhen Mountains, lower Yangtze River area of China [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2003, 18(6): 521-525.
- 50 金章东, Jimin Y U, 吴艳宏, 等. 8.2 ka BP 冷气候事件确实在中国发生过吗? [J]. *地质评论*, 2007, 53(5): 616-623. [Jin Zhangdong, Jimin Y U, Wu Yanhong, et al. Was there an 8.2 ka BP cooling event in China? [J]. *Geological Review*, 2007, 53(5): 616-623.]
- 51 王心源, 张广胜, 张恩楼, 等. 巢湖湖泊沉积记录的早-中全新世环境演化研究 [J]. *科学通报*, 2008, 53(增刊1): 132-138. [Wang Xinyuan, Zhang Guangsheng, Zhang Enlou, et al. Environmental changes during Early-middle Holocene from the sediment record of the Chaohu Lake, Anhui province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(Suppl.1): 132-138.]
- 52 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件 [J]. *中国科学(B辑)*, 1992(12): 1300-1308. [Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin, et al. The climatic fluctuation and important events of Holocene Megathermal in China [J]. *Science in China (Seri. B)*, 1992, (12): 1300-1308.]
- 53 候光良, 方修琦. 中国全新世分区气温序列集成重建及特征分析 [J]. *古地理学报*, 2012, 14(2): 243-252. [Hou Guangliang, Fang Xiuqi. Characteristics analysis and synthetical reconstruction of regional temperature series of the Holocene in China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(2): 243-252.]
- 54 马振兴, 黄俊华, 魏源, 等. 鄱阳湖沉积物近 8 ka 来有机质碳同位素记录及其古气候变化特征 [J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 279-285. [Ma Zhenxing, Huang Junhua, Wei Yuan, et al. Organic carbon isotope records of the Poyang Lake sediments and their implications for the paleoclimate during the last 8 ka [J]. *Geochimica*, 2004, 33(3): 279-285.]
- 55 谢远云, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原江陵地区近 9 ka B.P. 以来的气候演化: 有机碳同位素记录 [J]. *中国地质*, 2006, 33(1): 98-103. [Xie Yuanyun, Li Chang'an, Wang Qiuliang, et al. Climatic change over the past 9 ka in the Jiangling area, Jiangnan Plain: records of organic carbon isotopes [J]. *Geology in China*, 2006, 33(1): 98-103.]
- 56 张强, 朱诚, 姜逢清, 等. 南京江北地区晚更新世以来环境演变研究 [J]. *地理科学*, 2001, 21(6): 498-504. [Zhang Qiang, Zhu Cheng, Jiang Fengqing, et al. Environmental changes since Late-Pleistocene in north-bank of Yangtze River, Nanjing [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(6): 498-504.]
- 57 于世永, 朱诚, 王富葆, 等. 太湖流域全新世气候-海面短期振荡事件及其对新石器文化的影响 [J]. *地理科学*, 2000, 20(4): 331-336. [Yu Shiyong, Zhu Cheng, Wang Fubao, et al. Abrupt shifts in Holocene climate and sea-level on the Taihu basin and cultural implication [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(4): 331-336.]
- 58 赵宝成, 王张华, 陈中原, 等. 太湖平原碟形洼地沉积物记录的距今 8000 年以来植被、气候与地貌演变 [J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 321-330. [Zhao Baocheng, Wang Zhanghua, Chen Zhongyuan, et al. Climate, vegetation and geomorphology evolution since 8 ka BP recorded by sediments from dish-like depression of Taihu Lake Plain [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 321-330.]

History of Environmental Change during Early-Middle Holocene Recorded by Beihuqiao Core in Zhejiang China

YE Wei CHENG LongJuan ZHU LiDong LI FengQuan

WANG TianYang JIN LiDan

(College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: The study area is situated in the southwest of Hangjiahu plain, where the surface water system is developed and most rivers originate from Tianmu mountain and Mogan mountain in the northwest of Zhejiang. The sediment samples were collected from a core drilled at the Beihuqiao (BHQ) of Yuhang town, where the location is $30^{\circ}22.443' \text{ N}$, $119^{\circ}56.237' \text{ E}$. The BHQ core is 19.0 m in length, and core sediments are composed of homogeneous gray, clayey silt and silt with a little carbonate nodules except for an intercalation of silty sand in the lower part. No disturbance was observed in the whole core. The part (4.775~19.0 m) of the core was sampled at 2.5 cm increments. Four bulk samples were collected for AMS radiocarbon dating from the organic-rich sediments. And 136 samples were chosen for TOC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ analysis at about 10 cm intervals.

Combined with the proxies of grain size parameters, pollen data, C/N ratio and age data, and contrasted with researches of surrounding areas, TOC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in organic matter, BHQ core in Zhejiang province are analyzed to interpret the basic environmental information and climate changes during the Early-Middle Holocene. Results reveal that the paleoclimate changes in Hangjiahu plain during the Early-Middle Holocene which can be divided into three periods: (1) 11.4~8.7 ka B.P.. Organic carbon isotope increased in the range of -27.24‰ to -23.4‰ and TOC content increased obviously in the range of 0.19% to 0.69%, indicating that the cold-dry climate turned gradually to warm and humid in this period. (2) 8.7~8.0 ka B.P.. Compared with the last stage, TOC turned to be negative and fluctuated between 0.2%~1.33%, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ fluctuated slightly between -24.91‰ ~ -22.93‰ and tended to be positive. As a whole, the climate was dry, and presented cold-dry to humid and warm-dry trend. (3) 8.0~4.2 ka B.P.. The major characteristic of the climate in the northern of Zhejiang province was warm and humid, however, some cold-dry events also happened at different time scales in this period. And during the period, TOC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ fluctuated in 0.18%~2.18% and -26.33‰ ~ -19.09‰ ranges, respectively. Especially during 8.0~5.7 ka B.P., TOC content improved obviously in 0.43%~2.18% and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ tended to be negative in -25.79‰ ~ -23.15‰ , which indicated the Holocene Megathermal emerged in this region. Meanwhile, there were two cold events occurred in about 5.5 ka B.P. and 4.2 ka B.P.. During these two periods, TOC tended to down and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ had a positive fluctuation, and they also corresponded with the contemporaneous pollen data and grain sizes parameters.

Combined with multiple climatic proxies of BHQ core and the results of correlation analysis between these proxies, the BHQ core sediments provide a reliable basis interpretation of palaeoclimate. TOC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ of BHQ core can be good proxies of paleoclimate in this research zone and indicate the changes of precipitation and temperature respectively. At the same time, this study also effectively suggests the evolution law of paleoenvironment in the northern of Zhejiang province during the Early-Middle Holocene.

Key words: BHQ Core; total organic carbon; stable carbon isotope in organic matter; Early-Middle Holocene; Holocene Megathermal