

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017122101

中全新世冲绳海槽北部的水文气候变化:浮游有孔虫群落证据

徐焯^{1,2}, 常凤鸣^{1,3}, 李铁刚^{1,4}, 赵松^{1,2}, 崔亦鷗^{1,2}

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

4. 自然资源部第一海洋研究所海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 青岛 266061

摘要: 东海东北部的浮游有孔虫群落结构受长江冲淡水 and 黑潮暖流的显著影响。对冲绳海槽北部 NOKT-3 岩芯 178 个样品中浮游有孔虫的统计分析, 共鉴定出壳径大于 150 μm 的种属 28 种。其中, 低温低盐种 *Globigerina quinqueloba* 的百分含量在中全新世早期波动剧烈, 而中晚期呈逐渐下降趋势。*G. quinqueloba* 是长江冲淡水指示种, 长江冲淡水的强弱受到东亚夏季风降雨的控制。因此, 据 6330aBP 以来 *G. quinqueloba* 含量的变化将中全新世长江中下游地区的降雨量变化划分为 3 个阶段: (1) 6330~4950aBP 降雨较强, 为全新世适宜期; (2) 4950~4600aBP 期间降雨开始减少, 全新世适宜期结束; (3) 4600~3890aBP 间降雨量明显降低, 气候显著变干。降雨量这一变化过程的机制可能是全新世早期以来北半球太阳辐射量逐渐减小, 导致东亚夏季风强度减弱, 季风前缘锋面逐渐向东南方向退缩, 因而长江中下游地区中全新世降雨量逐渐降低。此外, 黑潮指示种 *Pulleniatina obliquiloculata* 含量的变化显示, 中全新世早期 6330~5100aBP 期间, 黑潮比较强, 对冲绳海槽的影响持续而强劲; 中全新世晚期 5100~4000aBP *P. obliquiloculata* 含量显著降低, 对应着 *P. obliquiloculata* 极小值事件 (PME), 表明中全新世晚期 PME 发生时区域气候并没有明显变冷, 且海槽北部的 PME 事件也无法用赤道太平洋长期的类 El Niño 状态来解释。

关键词: 东亚夏季风; 长江冲淡水; 黑潮; *P. obliquiloculata* 极小值事件; 中全新世

中图分类号: P736.2 **文献标识码:** A

The hydroclimate changes in the northern Okinawa Trough during middle Holocene: Evidence from planktonic foraminiferal assemblages

XU Ye^{1,2}, CHANG Fengming^{1,3}, LI Tiegang^{1,4}, ZHAO Song^{1,2}, CUI Yikun^{1,2}

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

3. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

4. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environment Geology, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract: Planktonic foraminifera assemblages in the northern East China Sea are significantly influenced by both the Changjiang Diluted Water and Kuroshio Current. A total of 28 species in the coarser fraction ($>150\mu\text{m}$) are identified based on planktonic foraminifera analysis of 178 samples from core NOKT-3 in the northern Okinawa Trough. The results show that variations in percentage of *Globigerina quinqueloba* is characterized by sharp fluctuation in early Mid-Holocene and gradual decline in late Mid-Holocene. This low temperature and low salt salinity species is an indicator of the Changjiang Diluted Water, which is controlled by the East Asian summer monsoon precipitation. Therefore, the evolution of precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River between 6330 and 3890aBP can be divided into three major stages based on variations in its con-

资助项目: 国家自然科学基金项目“过去 2000 年亚热带西太平洋水文气候变化的年际分辨率记录”(41476041); 国家自然科学基金项目“80 万年来热带西太平洋上水体 pH 和 pCO_2 演变及影响机理”(41230959); “全球变化与海气相互作用”专项项目“亚洲大陆边缘的古海洋与古地理演化”(GASI-GEOGE-04); “全球变化与海气相互作用”专项项目“西太平洋古气候研究”(GGASI-GEOGE-06-02); 中国科学院战略性先导科技专项课题“西太暖池与主流系演化的历史记录”(XDA10010305)

作者简介: 徐焯(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为古海洋与古环境, E-mail: xuyel5@mails.ucas.edu.cn

收稿日期: 2017-12-21; **改回日期:** 2018-04-21. 周立君编辑

tent; (1) high precipitation during the period of 6330~4950aBP, which corresponds to the Holocene optimum; (2) a decreased trend of precipitation from 4950 to 4600aBP, implying termination of the Holocene optimum; (3) a marked decrease in the monsoon precipitation between 4600 and 3890aBP, indicating an arid climate condition. This precipitation pattern could be related to the general weakening and southeastward retreat of the East Asian summer monsoon resulted from the decreased solar-radiation in the northern hemisphere during the Middle Holocene. Moreover, remarkably high abundance of *P. obliquiloculata* during 6330~5100aBP, which is normally an indicator species of the Kuroshio Current, suggests that influence of the Kuroshio Current in the Okinawa Through was persistently strong. The abundance of *P. obliquiloculata* sharply decreased during 5100~4000aBP, well corresponding to the so-called *Pulleniatina* minimum event (PME). Our results show that there were not a cold climate condition corresponding to the PME during the period of late Mid-Holocene. In addition, enhancement of the El Niño-like condition in the tropical Pacific region during this time window also can not fully explain the occurrence of PME in the northern Okinawa Trough.

Key words: East Asian summer monsoon; Changjiang Diluted Water; Kuroshio Current; *P. obliquiloculata* Minimum Event; Middle Holocene

中全新世过渡期(约 6kaBP) 是地质历史上距今最近的温暖期,该时期太阳辐射驱动与现代大气 CO₂ 浓度上升强迫的增温效应类似^[1]。了解中全新世气候环境变化的过程和机制是认识现代全球变暖成因和机制的一个重要途径,对预测未来全球气候增暖的情景具有重要意义。因此,距今 6ka 左右这一时段是过去全球变化研究中的一个重要时期。古气候研究成果表明 6kaBP 前后暖湿气候特征除了受到太阳辐射外部因素的控制外,还受到其他不确定因素的影响。东亚季风是全球大气环流的重要组成部分,控制和影响着亚洲大陆东部的干湿状况。目前众多高分辨率的孢粉^[2,3]、湖泊^[4]、珊瑚^[5]和考古学^[6]记录,特别是中国南方石笋 δ¹⁸O 记录^[7-9],揭示了全新世东亚夏季风的详细变化过程。

冲绳海槽北部位于亚洲大陆东部的边缘海,其表层水文条件受黑潮及源于中国内陆长江冲淡水的影响和控制。东亚夏季风的活动控制了长江流域的降水,导致大量低温、高营养盐的长江冲淡水输入东海并影响到海槽北部,引起该区上层水体温盐度发生变化^[10,11]。因此,该区域水文参数对东亚季风的变化相当敏感,是通过海洋沉积物记录认识全新世东亚季风演变的一个重要区域。此外,起源于北赤道流的黑潮是低纬太平洋热量和水汽向中高纬传输的主要通道,其上部水体自台湾与南琉球岛弧之间的那与洼地进入冲绳海槽,沿着东海陆架外缘与琉球岛弧之间的冲绳海槽向东北方向流动,对东亚的气候变化有着深刻的影响。东海东北部是黑潮与长江淡水的混合区^[12],其表层水文条件既受黑潮的控制,又受长江冲淡水强弱的影响(图 1)。

目前,大量陆地记录及模型模拟研究已经重建了中全新世以来与东亚夏季风密切相关的长江中下游降雨的变化,并揭示了全新世适宜期的起止时间,

但在季风降雨的区域差异以及全新世适宜期的穿时性等方面仍有争论。本文利用冲绳海槽北部一个高分辨率的岩芯,通过对其中浮游有孔虫群落组合的分析,试图利用一些特征指示种的变化,揭示中全新世东亚季风降雨量以及黑潮强度变化的信息,以期全面认识全新世区域气候环境变化的过程和机制。

1 材料与方法

NOKT-3 岩芯取自东海东北部的冲绳海槽西侧坡底(29.57°N、127.98°E),水深 1050m,样长 6.64m。整个岩芯主要由粉砂质黏土和黏土质粉砂组成,有孔虫及生物碎屑较为丰富,未见明显的沉积间断和火山灰层。对岩芯以 2cm 间隔进行取样,共获得 332 个样品。本研究对岩芯上部 50cm 每隔 2cm、下部 50~664cm 每隔 4cm 取样,进行浮游有孔虫属种鉴定统计,共分析样品 178 个;同时,对所有 332 个样品进行粒度测试。此外,选取 4 个层位进行 AMS¹⁴C 年代测定(表 1)。

表 1 NOKT-3 岩芯的 AMS¹⁴C 年龄和校正后的日历年龄
Table 1 AMS¹⁴C and calendar year ages for core NOKT-3

样品编号	深度/cm	¹⁴ C 年龄 /aBP	日历年龄 /cal.aBP	2σ 年龄范 围/cal.aBP
Beta-466770	60~62	4240	4331	4232~4429
Beta-466771	164~166	4800	5095	4958~5231
Beta-466775	590~592	5530	5919	5845~5992
Beta-466776	644~646	5820	6236	6174~6298

用于浮游有孔虫鉴定和统计分析的样品利用传统的方法处理。取原始样品约 10g 放入烧杯中,在 50°C 的低温下烘干 24h,使其完全干燥并称重。加

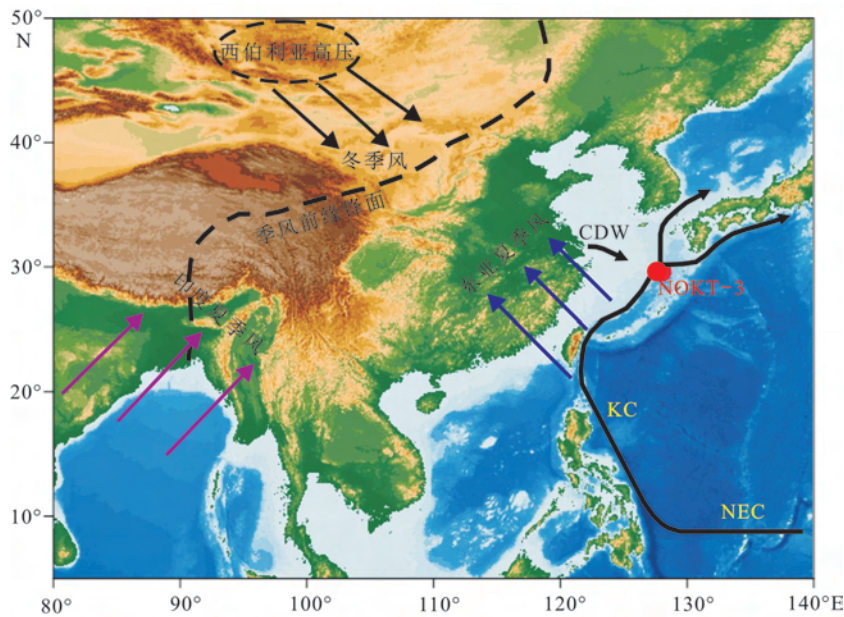


图 1 东亚现代大气环流及东海主要流系示意图

同时示意印度和东亚夏季风方向、西伯利亚高压冬季风位置以及夏季风锋面;CDW:长江冲淡水,NEC:北赤道流;KC:黑潮

Fig.1 Modern air circulation in East Asian and major ocean circulation in East China Sea

Also shown are directions of Indian and East Asian summer monsoon, approximate location of the Siberia High and winter monsoon, and the front of summer monsoon. CDW: the Changjiang Diluted Water, NEC: the North Equatorial Current, KC: the Kuroshio Current

入适量蒸馏水到烧杯中,同时加入少量过氧化氢去除样品中的有机质,浸泡 48h,使样品充分分散。之后用蒸馏水经 0.063mm 孔径的铜筛反复冲洗样品,并用毛刷不断轻刷铜筛底部的泥样,直至经过铜筛的水流清澈、无混浊。用蒸馏水把铜筛中剩余的粗组分冲回烧杯中,再次在 50°C 的低温下烘干并称重。利用二分法对大于 0.063mm 的组分进行逐级缩分。最后取其中一份,对大于 150 μ m 粗组分中的浮游有孔虫壳体在实体显微镜下进行鉴定统计,一般统计个体数 250~300 个。

为进行粒度分析,取原始样品 0.15g 左右,加入过量 H₂O₂ 去除有机质,待反应完成后再加入过量 HCl 去除 CaCO₃,全部反应完成后离心使沉积物与上清液分离,将多余的上层清液移除。对处理后的样品进行上机测试,采用 Cilas 1190L 激光粒度仪测试,测试范围为 0.04~2500 μ m,重复测试误差 < 3%。

2 结果

2.1 年龄模式与沉积速率

NOKT-3 岩芯的 4 个 AMS¹⁴C 年龄用 8mg 左右的混合种浮游有孔虫壳体 (*Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides sacculifer* 和 *Neogloboquadri-*

na dutertrei) 在美国 Beta 实验室测定。AMS¹⁴C 年龄利用 CALIB7.0.4 程序,基于海洋数据库 Marine13 校正为日历年龄,区域碳储库年龄差采用全球平均的 400 年(表 1)。以这 4 个 ¹⁴C 年龄为控制点,用线性内插和外推法建立整个岩芯的年龄模式。据该年龄模式得知该岩芯保存了 6330~3890aBP 的沉积记录,4cm 分析间隔的平均分辨率为 14.7a。

通过外推法获得的 NOKT-3 岩芯顶部年龄为 3890aBP,缺失了约 4ka 的沉积物,这与现场取样记录中显示的岩芯上部含水量极高,导致岩芯顶部在取样过程中缺失的记录一致。现有研究显示,东海全新世以来的沉积物厚度变化很大,大致为近岸地层厚,向远岸变薄,甚至缺失^[13]。NOKT-3 岩芯的沉积速率在 3890~5095aBP 期间约为 0.136cm/a, 5095~5919aBP 间达 0.519cm/a,而 5919~6330aBP 之间又降低为 0.164cm/a,远高于东海陆坡与冲绳海槽全新世的平均沉积速率 0.02 cm/a^[13]。NOKT-3 岩芯位于冲绳海槽北部西坡,靠近东海陆架东北冷涡沉积区^[14]。该冷涡沉积区全新统下段沉积速率为 0.1cm/a 左右,近百年来可达 0.3cm/a^[13],接近 NOKT-3 岩芯的沉积速率。同时,粒度分析结果显示中全新世 NOKT-3 岩芯的沉积物以砂和粉砂为主(图 2),这与冷涡沉积区全新世自下而上由黏土质粉砂夹细砂薄层渐变为粉砂

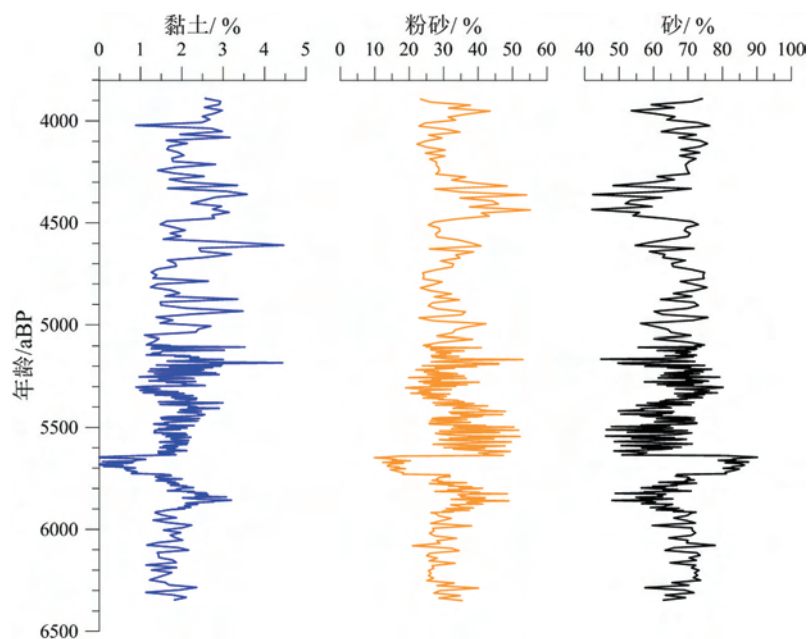


图2 岩芯 NOKT-3 沉积物黏土、粉砂和砂含量变化

Fig.2 Vertical variations in percentage of clay, silt and sand in core NOKT-3

质黏土和黏土的岩芯基本一致。此外,我们并没有在岩芯中发现火山灰层,且4个AMS¹⁴C年龄并无倒转的现象,因此可以排除火山灰和浊流事件的影响,岩芯的高沉积速率是可信的。

2.2 浮游有孔虫群落组成特征

NOKT-3岩芯沉积物中浮游有孔虫无论属种还是个体数量都较为丰富,基于Ujiié等对冲绳海槽现代有孔虫的分类方案^[15],共鉴定出壳径大于150 μ m的浮游有孔虫28种,178个样品的平均丰度为1232枚/g干样(图3)。前人的研究显示,冲绳海槽北部浮游有孔虫的分布受黑潮暖流影响,与暖流的主流轴相对应的区域浮游有孔虫丰度大于5000枚/g^[16]。由于NOKT-3岩芯极高的沉积速率,其对浮游有孔虫丰度可能产生了稀释作用,因此该岩芯中浮游有孔虫的丰度较小。鉴定结果显示,百分含量至少在一个样品中大于10%的优势种共计6种,按平均百分含量排序,依次是*Globigerinita glutinata*、*Globigerina bulloides*、*Neogloboquadrina dutertrei*、*Globigerinoides ruber*、*Globigerinoides sacculifer*和*Pulleniatina obliquiloculata*,这6个优势种占整个岩芯浮游有孔虫个体总数的75%以上。百分含量至少在一个样品中大于5%的常见种共4种,依次为*Globigerina calida*、*Globigerina quinqueloba*、*Neogloboquadrina pachyderma*(d)和*Globigerinoides conglobatus*。其余18个为

稀有种。

*G. glutinata*百分含量为13%~28%,平均含量可达20%,是热带-亚热带到极地表层水种^[17]。*G. bulloides*百分含量为6%~32%,平均含量可达19%,是典型的过渡带和亚极地-极地种,同时也是上升流海区高生产力的代表种^[17]。*N. dutertrei*含量为8%~21%,平均含量可以达到14%,生态习性与*G. bulloides*类似、喜营养与强烈混合作用或与上升流活动密切相关^[17]。*G. ruber*在岩芯中的含量为9%~20%,平均含量达到14%,是广泛分布于热带-亚热带的表层水种^[17]。*G. sacculifer*的含量为1%~15%,平均含量达到6%,是在寡营养盐水体中最占优势的广盐性热带-亚热带次表层水种^[18-22]。*P. obliquiloculata*在岩芯中的含量较低,为1%~10%,平均为5%,是丰度最大值位于温跃层和叶绿素极大值层附近的热带暖水种^[23,24]。*G. calida*在岩芯中的含量为0%~5%,平均仅有1.5%,一般生活在热带-温带海洋营养盐水体中^[21]。*G. quinqueloba*含量为0%~7%,平均为3.4%,在亚极地-极地区普遍存在,丰度从高纬到低纬海区递减^[17,18]。*N. pachyderma*(d)含量也较低,为0%~9%,平均为2.4%,其生活在北极极地锋面以南的过渡海区^[25]。*G. conglobatus*的百分含量范围是0~6%,平均仅为2%,生活在热带-亚热带透光层水体中^[22](图3)。

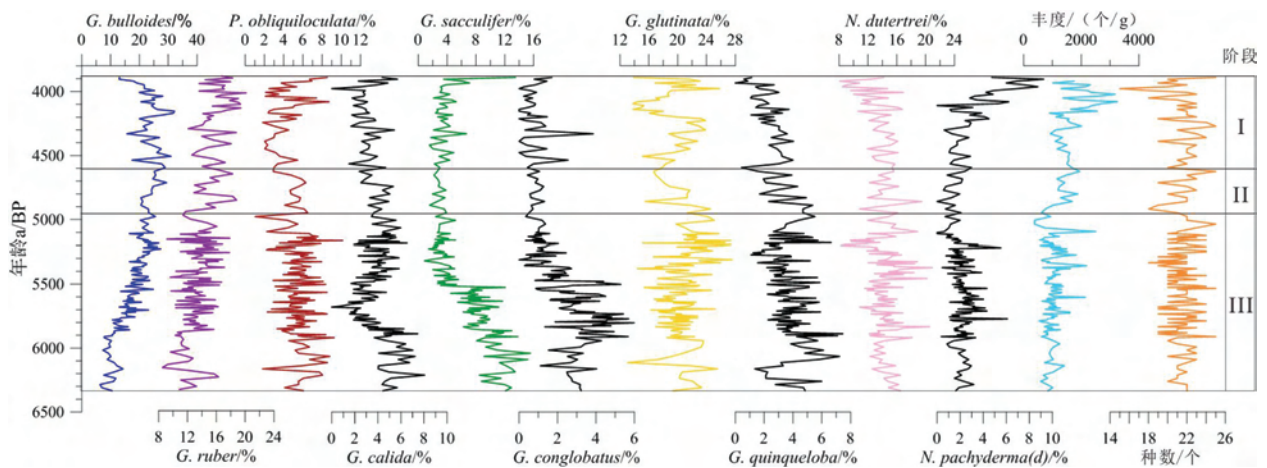


图 3 岩芯 NOKT-3 中浮游有孔虫种数、丰度和优势种的百分含量变化

Fig.3 Vertical variations in plankton foraminifer species, abundance and percentage of dominant species in core NOKT-3

2.3 浮游有孔虫组合变化特征

浮游有孔虫是全球海洋中广泛分布的一类钙质微生物,其群落组成和结构主要受温度、盐度、营养盐等多种因素的影响。因此,浮游有孔虫组合特征的变化可以反映上层海洋温、盐和生产力等环境因子的演化,是进行海洋古环境重建的重要依据。NOKT-3 岩芯中 6330aBP 以来的浮游有孔虫组合变化可以分为 3 个阶段:

(1) 阶段 III (6330~4950aBP)

热带-亚热带混合层浮游有孔虫种 *G. sacculifer*、*G. calida* 和 *G. conglobatus* 在这一阶段含量达到最高,平均含量分别为 6.5%、3.9% 和 2.4%,并呈现逐渐降低的趋势。而热带-亚热带表层水种 *G. ruber* 含量较高,其平均含量可达 13.7%,而且比较稳定。冷水种 *N. pachyderma* (d) 平均含量较低,为 2.1%,且没有大幅度的变化;黑潮指示种 *P. obliquiloculata* 百分含量比较高,平均达 5.6%。低温低盐种 *G. quinqueloba* 含量波动剧烈,平均为 1.1%~7.1%;喜营养和低温的 *G. bulloides* 含量呈明显增加趋势,其含量从 6.3% 上升至约 25%(图 3)。总体上,这一时期以热带-亚热带属种 *G. ruber* 和 *G. sacculifer* 占优势为主要特征。

(2) 阶段 II (4950~4600aBP)

这一阶段低温低盐种 *G. quinqueloba* 百分含量明显降低,下降幅度达 3%。同时,高温高盐的黑潮指示种 *P. obliquiloculata* 含量保持了较高的值,稳定在 5.0% 左右。热带-亚热带属种 *G. ruber*、*G. sacculifer*、*G. calida* 和 *G. conglobatus* 的含量没有明显的变化;*G. bulloides* 属种百分含量基本稳定,其波动幅

度不超过 6%(图 3)。这一时期以低温低盐种 *G. quinqueloba* 百分含量明显降低为主要特征。

(3) 阶段 I (4600~3890aBP)

这一阶段黑潮指示种 *P. obliquiloculata* 平均含量明显降低(由 5.5% 下降到 4.1%)。同时,*N. dutertrei* 的百分含量也明显降低到 10.98%。冷水种 *N. pachyderma* (d) 的含量在约 3990aBP 开始出现明显的增加趋势,上升的幅度可达 5% 左右。低温低盐种 *G. quinqueloba* 含量由 4% 降低到 1.5%,延续了前一阶段下降的趋势。热带-亚热带属种 *G. ruber*、*G. sacculifer*、*G. calida* 和 *G. conglobatus* 的含量没有明显的变化。*G. bulloides* 含量呈现了明显的逐渐下降趋势,下降幅度约 9%(图 3)。这一时期以低温低盐种 *G. quinqueloba* 百分含量持续降低和冷水种 *N. pachyderma* (d) 含量呈逐渐上升趋势为主要特征。

3 讨论

3.1 中全新世东亚夏季风降水的变化

进入全新世之后(11.1kaBP)、尤其是约 7.3kaBP 以来,海平面升高和黑潮重新进入冲绳海槽导致夏季长江向东海输送的低温低盐水体大部分局限于内陆架地区^[26-29]。但冲绳海槽北部陆源植物碎屑输入量记录显示,中全新世冲绳海槽北部的 TOC/TON 大于 8,脂肪酸长链 C_{28}/C_{26} 出现小幅度的增加且木质素酚的含量大于 0.1^[30]。这说明尽管受水障作用的影响,夏季长江输入的陆源碎屑物质很少能到达冲绳海槽^[27],但传输距离更远的陆源植

物碎屑却可以输送到研究区^[26]。同时,海槽北部捕获器中现代沉积物的有机碳、有机氮同位素组成与东海内陆架沉积物十分相近^[31],且夏季长江冲淡水最强时,有机碳和生源硅的通量也达到峰值^[32]。以上记录表明,尽管中全新世海平面很高,但长江冲淡水依然能够影响到冲绳海槽北部海区,进而导致浮游有孔虫群落特征发生相应的变化。

浮游有孔虫 *G. quinqueloba* 在亚极地-极地海区普遍存在,其最适水温范围为 5~17°C^[33],是全球低温表层水体中的优势种。东海表层沉积物中,*G. quinqueloba* 主要分布于低温低盐的河口地区,且在盐度小于 30‰的长江口其百分含量甚至超过 50%^[34]。此外,Xu 等发现末次冰消期,当冲淡水稀释作用导致海槽北部表层海水盐度显著下降时,*G. quinqueloba* 占绝对优势(约 30%),甚至超过其在末次盛冰期的百分含量^[34]。可见,*G. quinqueloba* 对表层海水盐度的变化十分敏感,其含量的变化可以指示中国大陆冲淡水影响的强弱。全新世以来海平面逐渐升高,与冰期相比,一方面长江冲淡水距离岩芯处更远,另一方面黑潮增强,夏季黑潮对长江冲淡水的阻挡作用相应增加,最终导致全新世海槽北部长江冲淡水指示种 *G. quinqueloba* 含量较冰期时低。因此,在 NOKT-3 岩芯中 *G. quinqueloba* 含量普遍低于 10%。

6330~4950aBP 时期,NOKT-3 岩芯中 *G. quinqueloba* 含量的显著高值(图 4)说明中全新世早期长江冲淡水持续强盛。现代长江冲淡水的强盛与中国大陆的降水异常密切相关,而降雨异常往往又与东亚夏季风的活动有密切关系。因此,6330~4950aBP 期间,*G. quinqueloba* 含量持续而显著的高值可能是东亚夏季风活动较强的反映。长江三角洲孢粉记录显示,中全新世 7600~4800aBP 期间长江三角洲地区亚热带常绿阔叶林和落叶阔叶混交林扩张,指示气候温暖湿润,对应中全新世适宜期^[3]。江汉平原 JZ-2010 剖面沉积物中 Rb、Sr 和 Ti 含量及 Rb/Sr、磁化率等多项指标也指示,中全新世早期约 6.0~5.2kaBP 期间,江汉平原处于全新世以来最湿润的环境^[35]。另外,模型模拟的结果也显示,约 6kaBP 为末次冰消期以来长江中下游河段夏季降雨量最大的时期^[36]。以上研究均显示,中全新世约 6330~4950aBP 时段长江中下游降雨量大,气候温暖湿润,东亚季风强盛,与海槽北部的浮游有孔虫记录相当一致。

4950~4600aBP 期间,尽管冲淡水指示种 *G. quinqueloba* 在这一时期仍占一定的优势,但其含量

显示了一个明显的下降趋势(图 4),对比暖水种(*G. ruber*、*G. sacculifer*、*G. calida* 和 *G. conglobatus*)与冷水种(*N. pachyderma* (d))含量比值指示的海水温度变化,发现表层海水温度在这一时期略有下降,但变化并不显著(图 5),说明该时期低温低盐的冲淡水对海槽北部的影响减小。这与江汉平原沉积物多项环境替代指标指示的 5.2~4.8kaBP 期间气候相对变干^[35],以及 4.8kaBP 开始长江三角洲地区亚热带阔叶林收缩、松树林和草原扩张记录的气候变干在时间上基本一致^[3],都说明这一时期季风开始减弱,长江中下游降雨量下降。

4600~3890aBP 期间,*G. quinqueloba* 含量进一步降低(图 4),指示东亚夏季风进一步减弱,长江冲淡水对海槽的影响相应减弱。同时,江汉平原剖面 JZ-2010 中沉积物磁化率和粒度指标也显示,4.47~4.20kaBP 江汉平原环境逐渐向偏干的方向发展,并经历了一次较长时间的湖面收缩,约 4.2kaBP 之后气候向干旱化急剧发展^[37]。此外,这一时间段也与长江三角洲植被记录和考古学证据指示的气候显著变干时期一致^[3,6,35]。可见,中全新世晚期约 4600~3890aBP 夏季风的进一步减弱导致了长江中下游降雨量明显减少,气候变干,引起海槽北部水文环境变化。

此外,作为目前东亚季风研究中应用最多的指标,长江中游和尚洞^[8]、三宝洞^[9]以及贵州董哥洞^[7]的高分辨率石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 都在约 4.9kaBP 开始出现明显的正偏,指示季风降雨逐渐减弱(图 4)。这与 6330aBP 以来 *G. quinqueloba* 的含量逐步下降趋势相当一致(图 4)。6330~4950aBP 高温高盐的黑潮指示种 *P. obliquiloculata* 含量相当稳定且暖水种/冷水种比值指示表层海水温度在这一时期没有发生显著的变化,说明黑潮的强度基本稳定(图 4、5)。因此,这一时期海槽北部表层海水盐度的变化主要受夏季风降雨的影响。这期间偏负的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指示东亚夏季风降雨较强,对应地 *G. quinqueloba* 高含量也显示冲淡水强,导致海槽北部表层海水盐度较低。同时,*G. quinqueloba* 含量的剧烈波动也与这一时期石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的频繁变化一致,说明这期间东亚夏季风强度波动较大。4950~3890aBP 期间(特别是 4600aBP 以来),*P. obliquiloculata* 低含量指示黑潮在这一时期减弱,因此 *G. quinqueloba* 含量的逐渐下降说明季风降雨下降,冲淡水减弱,导致海槽北部盐度上升。这一现象很好地对应了石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的逐渐正偏,也说明中全新世晚期东亚夏季风降雨减弱,冲淡水对海槽北部的影响减弱。

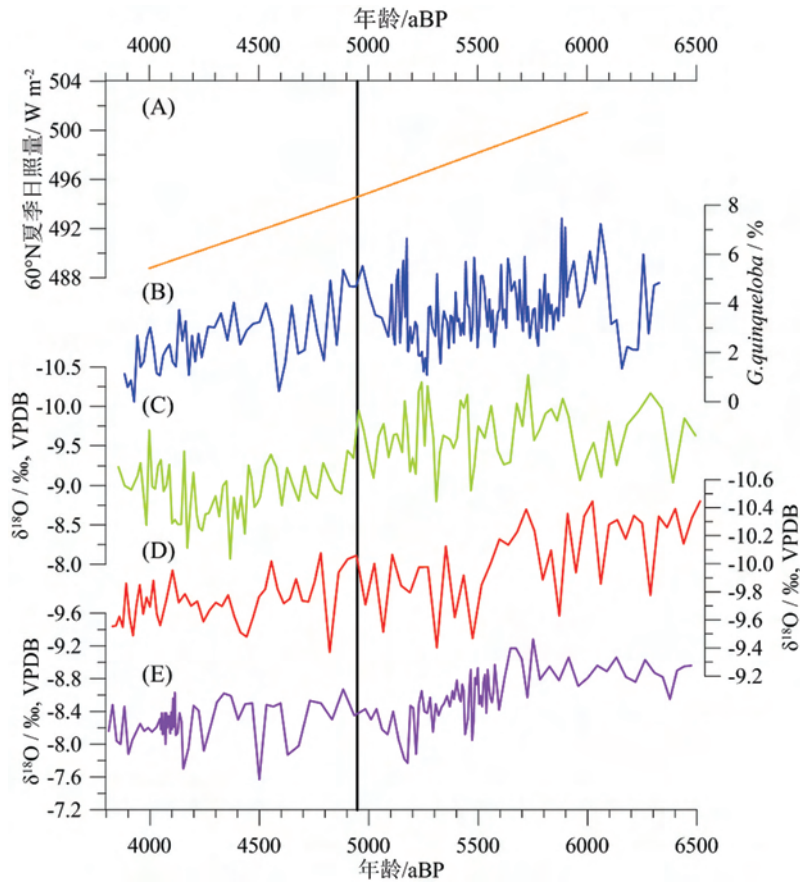


图 4 60°N 夏季日照量(A)与岩芯 NOKT-3 中浮游有孔虫 *G. quinqueloba* 百分含量(B), 和尚洞(C)^[8]、三宝洞(D)^[9]、董哥洞(E)^[7]石笋氧同位素记录的对比

Fig.4 Comparisons of summer insolation at 60°N (A) to percentage of *G. quinqueloba* (B) in core NOKT-3 and the $\delta^{18}\text{O}$ of stalagmite from Heshang (C)^[8], Sanbao (D)^[9] and Dongge Cave (E)^[7]

全新世适宜期是冰后期气候最稳定的时期,以气候温暖湿润为显著特征。相较于气温,东亚季风区的夏季风降水是决定季风区生态环境更为显著而敏感的因素^[38]。因此,有人把东亚季风区全新世适宜期定义为东亚夏季风降雨量最大时期^[36]。NOKT-3 岩芯中 *G. quinqueloba* 含量变化指示的 4950aBP 开始的夏季风降雨显著减少,说明长江中下游地区全新世适宜期结束于 4950aBP 左右。全新世以来北半球太阳辐射量逐渐减小,导致东亚夏季风强度减弱,季风前缘锋面位置逐渐向东南方向退缩。约 6~5kaBP 季风前缘锋面在长江中下游地区停留时间较长,导致这一地区的降雨量增加^[38]。约 5kaBP 之后夏季风继续减弱,其前缘锋面进一步向东南方向撤退,长江流域降雨量显著减少,温暖湿润的全新世气候适宜期结束。这一认识与 An 等人综合湖泊平面、湖泊和沼泽沉积以及孢粉序列等记录重建的长江中下游全新世适宜期结束时间(约 5kaBP)相当一致^[36]。

3.2 中全新世黑潮强度的变化

浮游有孔虫种 *P. obliquiloculata* 主要分布在 10°N~10°S 的热带-亚热带海区,其在西北太平洋的高丰度区与赤道流系统几乎一致。该种在东海的高丰度源于北赤道流分支——黑潮向东海的入侵,东海表层沉积物中,其含量高值一般见于黑潮主流轴^[34]。因此, *P. obliquiloculata* 经常被作为黑潮指示种^[29,30,39,40]。6330~5100aBP 期间 *P. obliquiloculata* 含量虽然波动比较频繁,但明显较高,其他热带-亚热带浮游有孔虫暖水种含量(包括 *G. ruber*、*G. sacculifer*、*P. obliquiloculata*、*G. calida* 和 *G. globatus*)也较高,且呈逐渐下降的趋势(图 5),指示中全新世早期黑潮对冲绳海槽的影响较强,但有逐渐减弱的趋势。冲绳海槽南部已有的记录显示,约 7.3kaBP 沉积速率突然增加并伴随着 *P. obliquiloculata* 含量的增加,指示黑潮重新进入冲绳海槽^[29]。对海槽区的其他多个岩芯中浮

游有孔虫群落组合和氧同位素的研究也发现,约12kaBP 琉球岛弧南部太平洋表层水温度开始升高,但直至约7kaBP 海槽和琉球岛弧北部黑潮主流轴海区的表层水温才开始显著上升。北部表层海水温度的升高滞后于太平洋,意味着约7kaBP 黑潮重新进入冲绳海槽^[30]。此外,海槽北部岩芯绿泥石/高岭石比率及对马暖流指示种(*G. glutinata*)等指标均指示约7.3kaBP 黑潮支流对马暖流才出现^[28]。可见,在约7kaBP 黑潮重新进入冲绳海槽后,在中全新世早期其强度较高。

中全新世晚期5100~4000aBP, *P. obliquiloculata* 含量低值对应着在赤道西太平洋、南海和冲绳海槽广泛发生的 *P. obliquiloculata* 极小值事件(PME)^[29,30,41]。NOKT-3 岩芯中约4.2kaBP *P. obliquiloculata* 含量出现一峰值,这与海槽北部和南部岩芯中记录的 *P. obliquiloculata* 含量普遍低值期间的一个异常高值相当一致^[29]。在西太平洋区域其 PME 主要发生在5~3kaBP 期间^[29,30,41],

有关 PME 发生时黑潮强度的变化存在很大争议,一种观点把这一时期 *P. obliquiloculata* 含量的显著低值归因于气候变冷导致的黑潮减弱^[29,42],这也与约4500~3000aBP 之间中国西部祁连山敦德冰芯、新疆河源地区山岳冰川、青藏高原湖泊和黄土高原磁化率记录的气候显著变冷一致^[43]。另一些研究认为 PME 可能与赤道太平洋类 El Niño 的气候条件有关^[30]。垂向上 *P. obliquiloculata* 丰度的最大值层位于温跃层和叶绿素极大值层附近^[23,24],也就是与海洋初级生产力有很大的关系。因此,当类 El Niño 发生时,赤道中太平洋表层水初级生产力降低,同时也引起黑潮流域表层水初级生产力降低,导致 *P. obliquiloculata* 丰度下降^[30]。

NOKT-3 岩芯中 PME 时期(5100~4000aBP), *G. ruber* 属种百分含量略有上升的趋势,其他热带-亚热带种 *G. sacculifer*、*G. calida* 和 *G. conglobatus* 的含量基本保持稳定。冷水种 *N. pachyderma* 含量在约3990aBP 才出现明显的增加(图3),上述

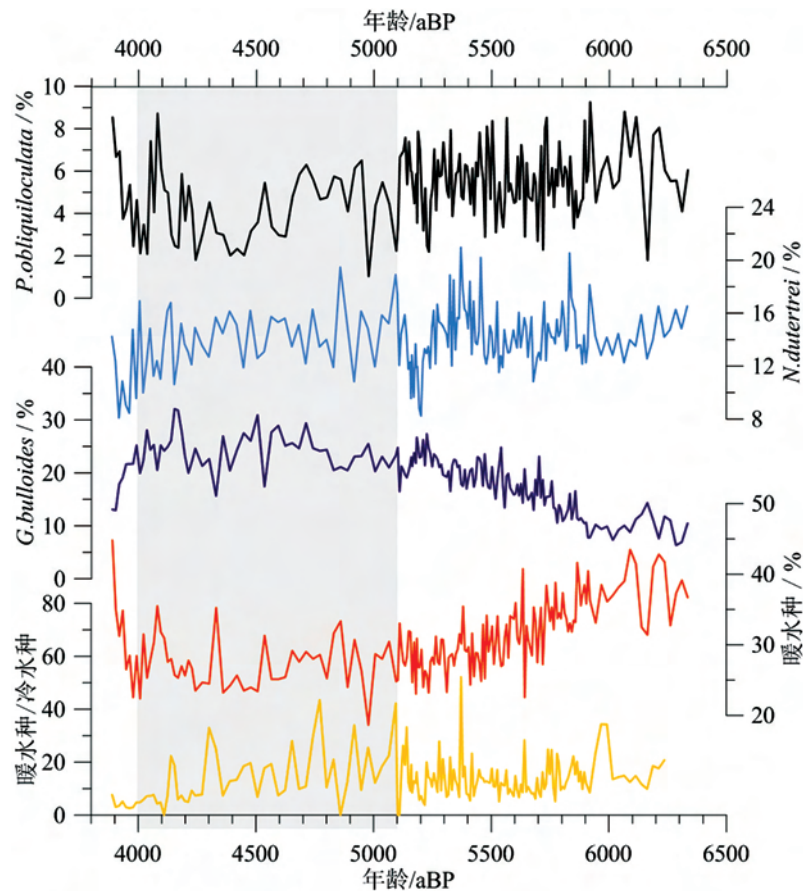


图5 岩芯 NOKT-3 中浮游有孔虫 *P. obliquiloculata*、*N. dutertrei* 和 *G. bulloides* 百分含量与暖水种百分含量和暖水种/冷水种比的对比(灰色部分代表 PME)

Fig.5 Comparisons of the percentage of *P. obliquiloculata*, *N. dutertrei* and *G. bulloides* to warm-species percentage and the ratio of warm species with cold species in core NOKT-3(Shade area indicates the PME)

暖水种与冷水种的比值在 PME 期间并没有显著变化(图 5)。可见,PME 发生时海槽北部表层水温度并没有明显的下降。研究显示,中全新世约 8~7kaBP 北半球日照量达到最大,使得北太平洋副热带高压达到顶峰;之后,随着北太平洋热带副高压的减弱,7kaBP 开始东赤道太平洋海区贸易风减弱,导致 El Niño 活动加剧,且在 5kaBP 以来的活动更加频繁^[44,45],这也得到厄瓜多尔泻湖沉积记录和秘鲁北部考古及古生物学证据的印证^[46]。长期强烈的类 El Niño 状态会导致赤道中太平洋海区及黑潮上游初级生产力降低。因此,有学者认为赤道太平洋地区长期的类 El Niño 状态可能是赤道、南海和冲绳海槽 *P. obliquiloculata* 丰度显著降低,PME 广泛发生的原因^[30]。但 NOKT-3 岩芯中指示表层水体生产力的属种 *G. bulloides* 和 *N. dutertrei* 的含量并没有发生显著降低(图 5)。可见,赤道太平洋长期的类 El Niño 状态导致黑潮流域生产力降低的机制也不足以解释 PME 事件在该区域发生的原因。

4 结论

(1)中全新世 6330aBP 以来东亚夏季风开始减弱,季风前缘锋面逐渐向东南方向退缩,长江中下游地区降雨的变化可以划分为 3 个阶段:6330~4950aBP 长江中下游地区降雨较强,处于全新世适宜期;4950~4600aBP 长江中下游地区降雨开始减少,全新世适宜期结束;4600~3890aBP 长江中下游地区降雨明显减少,气候变干。

(2)中全新世早期 6330~5100aBP 期间 *P. obliquiloculata* 含量高而稳定,说明黑潮较强,对冲绳海槽北部的影响持续而强劲;中全新世晚期 5100~4000aBP,*P. obliquiloculata* 含量显著减少对应着 *P. obliquiloculata* 极小值事件(PME),但气候变冷导致的黑潮减弱以及赤道太平洋长期类 El Niño 状态都不足以解释区域 PME 发生的原因。

参考文献 (References)

- [1] 郑伟鹏,俞永强. 一个耦合气候系统模式模拟的中全新世时期亚洲季风系统变化[J]. 第四纪研究, 2009, 29(6): 1135-1145. [ZHENG Weipeng, YU Yongqiang. Simulations of East Asian climate at 6kaBP[J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(6): 1135-1145.]
- [2] Chen Z Y, Song B P, Wang Z H, et al. Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta, China: sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation[J]. Marine Geology, 2000, 162: 423-441.
- [3] Yi S, Saito Y, Zhao Q H, et al. Vegetation and climate changes in the Changjiang (Yangtze River) Delta, China, during the past 13,000 years inferred from pollen records[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(14): 1501-1519.
- [4] Du Y, Cai S M, Zhang X Y, et al. Interpretation of the environmental change of Dongting Lake, middle reach of Yangtze River, China, by ²¹⁰Pb measurement and satellite image analysis[J]. Geomorphology, 2001, 41(2-3): 171-181.
- [5] Yu K F, Zhao J X, Wei G J, et al. Mid-late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and δ¹⁸O records of *Porites lutea* corals at Leizhou Peninsula, northern coast of South China Sea[J]. Global and Planetary Change, 2005, 47(2-4): 301-316.
- [6] Li B, Liu H, Wu L, et al. Linking the vicissitude of Neolithic cities with mid Holocene environment and climate changes in the middle Yangtze River, China[J]. Quaternary International, 2014, 321: 22-28.
- [7] Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1-2): 71-86.
- [8] Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 266(3-4): 221-232.
- [9] Dong J G, Wang Y J, Edwards R L, et al. A high-resolution stalagmite record of the Holocene East Asian monsoon from Mt Shennongjia, central China[J]. The Holocene, 2010, 20(2): 257-264.
- [10] Chang Y P, Wang W L, Yokoyama Y, et al. Millennial-scale planktic foraminifer faunal variability in the East China Sea during the Past 40000 Years (IMAGES MD012404 from the Okinawa Trough)[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2008, 19(4): 389-401.
- [11] Diekmann B, Hofmann J, Henrich R, et al. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary[J]. Marine Geology, 2008, 255(1-2): 83-95.
- [12] Kawahata H, Ohshima H. Vegetation and environmental record in the northern East China Sea during the late Pleistocene[J]. Global and Planetary Change, 2004, 41(3-4): 251-273.
- [13] 叶银灿,庄振业,刘杜娟,等. 东海全新世沉积强度分区[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 941-948. [YE Yincan, ZUANG Zhenye, LIU Dujuan, et al. Holocene depositional strength zoning in the East China Sea[J]. Journal of Qingdao Ocean University, 2002, 32(6): 941-948.]
- [14] Yang Z S, Saito Y, Guo Z G, et al. Distal mud area as a material sink in the East China Sea[M]. Japan: Hokkaido University Press, 1994: 1-6.
- [15] Ujiie Y, Ujiie H. Distribution and oceanographic relationships

- of modern planktonic foraminifera in the Ryukyu Arc region, Northwest Pacific Ocean[J]. *The Journal of Foraminiferal Research*, 2000, 30(4): 336-360.
- [16] 李铁刚,常凤鸣. 冲绳海槽古海洋学[M]. 北京:海洋出版社, 2009:34-35.[LI Tiegang, CHANG Fengming. *Paleoceanography in the Okinawa Trough*[M]. Beijing: Ocean press, 2009:34-35.]
- [17] Schiebel R, Hemleben C. *Planktic Foraminifers in the Modern Ocean*[M]. Berlin: Springer Nature, 2017.
- [18] Bé A. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera [M]. London: Academic Press, 1977, 1: 1-100.
- [19] Schmuker B, Schiebel R. Planktic foraminifers and hydrography of the eastern and northern Caribbean Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2002, 46: 387-403.
- [20] Naidu P D, Malmgren B A. A High-resolution record of Late Quaternary upwelling along the Oman Margin, Arabian Sea based on planktonic foraminifera [J]. *Paleoceanography*, 1996, 11(1): 129-140.
- [21] Conan S H, Brummer G J. Fluxes of planktic foraminifera in response to monsoonal upwelling on the Somalia Basin margin [J]. *Deep-Sea Research II*, 2000, 47: 2207-2227.
- [22] Schiebel R, Zeltner A, Treppke U F, et al. Distribution of diatoms, coccolithophores and planktic foraminifers along a trophic gradient during SW monsoon in the Arabian Sea[J]. *Marine Micropaleontology*, 2004, 51(3-4): 345-371.
- [23] Bé A, Tolderlund S D. Distribution and ecology of living planktonic foraminifera in surface waters of the Atlantic and Indian Oceans[J]. *Micropaleontology of Oceans*, 1971: 105-149.
- [24] Watkins J M, Mix A C, Wilson J. Living planktic foraminifera: tracers of circulation and productivity regimes in the central equatorial Pacific[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1996, 43(4-6): 1257-1282.
- [25] Reynolds L A, Thunell R C. Seasonal production and morphologic variation of neogloboquadrina pachyderma (ehrenberg) in the northeast Pacific[J]. *Micropaleontology*, 1986, 32(1): 1-18.
- [26] Ujiie H, Hatakeyama Y, Gu X X, et al. Upward decrease of organic C/N ratios in the Okinawa Trough cores; proxy for tracing the post-glacial retreat of the continental shoreline[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 165: 129-140.
- [27] Zheng X F, Li A C, Wan S M, et al. ITCZ and ENSO pacing on East Asian winter monsoon variation during the Holocene: Sedimentological evidence from the Okinawa Trough [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4410-4429.
- [28] Li T G, Xu Z K, Lim D, et al. Sr-Nd isotopic constraints on detrital sediment provenance and paleoenvironmental change in the northern Okinawa Trough during the late Quaternary [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 430: 74-84.
- [29] Jian Z M, Wang P X, Saito Y, et al. Holocene variability of the Kuroshio current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 184: 305-319.
- [30] Ujiie Y, Ujiie H, Taira A, et al. Spatial and temporal variability of surface water in the Kuroshio source region, Pacific Ocean, over the past 21000 years; evidence from planktonic foraminifera[J]. *Marine Micropaleontology*, 2003, 49(4): 335-364.
- [31] Kao S J, Lin F J, Liu K K. Organic carbon and nitrogen contents and their isotopic compositions in surficial sediments from the East China Sea shelf and the southern Okinawa Trough[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(6-7): 1203-1217.
- [32] Iseki K, Okamura K, Kiyomoto Y. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea[J]. *Deep-Sea Research II*, 2003, 50: 457-473.
- [33] Sautter L R, Thune R C. Seasonal variability in the ^{18}O and ^{13}C of planktonic foraminifera from an upwelling environment: sediment trap results from San Pedro Basin, southern California[J]. *Paleoceanography*, 1991, 6(3): 307-334.
- [34] Xu X D, Oda M. Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36000 years[J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 285-304.
- [35] 李枫, 吴立, 朱诚, 等. 江汉平原 12.76 cal. kaBP 以来环境干湿变化的高分辨率研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(7): 878-884. [LI Feng, WU Li, ZHU Cheng, et al. A high-resolution study of moisture evolution in the Jianghan Plain since 12.76 cal.kaBP[J]. *Geography*, 2012, 32(7): 878-884.]
- [36] An Z S, Porter C S, Kutzbach E J, et al. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 743-762.
- [37] 王晓翠, 朱诚, 吴立, 等. 湖北江汉平原 JZ-2010 剖面沉积物粒度特征与环境演变[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 480-486. [WANG Xiaocui, ZHU Cheng, WU Li, et al. Grain-size characteristics and sedimentary environment change of JZ-2010 section in Jianghan Plain, Hubei Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3): 480-486.]
- [38] 安芷生, 吴锡浩, 王苏民, 等. 中国中东部全新世气候适宜期与东亚夏季风变迁[J]. *科学通报*, 1993, 38(14): 1302-1305. [AN Zhisheng, WU Xihao, WANG Sumin, et al. Holocene optimum in center and eastern China and the evolution of the East Asian monsoon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38: 1302-1305.]
- [39] Li T G, Nan Q Y, Jiang B, et al. Formation and evolution of the modern warm current system in the East China Sea and the Yellow Sea since the last deglaciation[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(2): 237-249.
- [40] Ujiie Y, Asahi H, Sagawa T, et al. Evolution of the North Pacific Subtropical Gyre during the past 190ka through the interaction of the Kuroshio Current with the surface and intermediate waters [J]. *Paleoceanography*, 2016, 31: 1498-

- 1513.
- [41] Lin Y S, Wei K Y, Lin I T, et al. The Holocene Pulleniatina Minimum Event revisited: Geochemical and faunal evidence from the Okinawa Trough and upper reaches of the Kuroshio current[J]. *Marine Micropaleontology*, 2006, 59(3-4): 153-170.
- [42] Li T G, Liu Z X, Hall A M. Heinrich event imprints in the Okinawa Trough; evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 176(1-4): 133-146.
- [43] Wu W X, Liu T S. Possible role of the "Holocene Event 3" on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain of China[J]. *Quaternary International*, 2004, 117(1): 153-166.
- [44] Sawada K, Handa N. Variability of the path of the Kuroshio Current over the past 25000 years[J]. *Nature*, 1998, 392: 592-595.
- [45] Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch[J]. *Nature*, 2002, 420(6912): 159-162.
- [46] Sandweiss D H, Richardson J B, Reitz E J, et al. Geoarchaeological evidence from Peru for a 5000 Years B.P. onset of El Niño[J]. *Science*, 1996, 273: 1531-1533.