冲绳海槽晚更新世以来高分辨率古海洋学研究进展

High-resolution paleoceanographic study of the Okinawa Trough Since the late Pleistocene

余 华¹, 李巍然¹, 刘振夏², 金秉福¹, 熊应乾²

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266003; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2005)01-0054-05

冲绳海槽位于东海陆架边缘, 具有较快的沉积速率和较高的地层分辨率, 其中蕴藏着关于陆地、海洋及其相互作用的丰富信息, 它是东海从第三纪到全新世有连续沉积的惟一地区, 记录了东海完整的冰期-间冰期旋回。近 10 多年来在冲绳海槽开展了一系列高分辨率的古海洋研究, 作者旨在对其中所取得的一些成果进行总结, 并对今后的研究提出一些看法和建议。

1 年代地层学

精确的定年是进行高分辨率古海洋学研究的一个重要前提。80 年代晚期氧同位素地层学进入高分辨率阶段, 在近 30 万年来的每个氧同位素分期的内部分出了众多的“事件”可应用于定年; 加速器质谱 (AMS) 的出现使测试样品的用量减少到常规方法要求的千分之一; 格陵兰冰盖顶部相距 28 km 的 GRIP 和 GISP2 两孔, 记录了相同的 11 万年高分辨率古气候变化, 揭示了一系列的气候周期和突变事件, 成为晚第四纪最佳的古环境序列; 而正在不断发展和完善的¹⁴C 测年校正技术也使得海洋沉积物所记录的古海洋、古环境信息可与冰芯记录的高分辨率信息进行对比, 所有这些都使海洋沉积的年代分辨率大为提高。冲绳海槽由于地形复杂、构造运动和火山活动频繁, 因而沉积环境十分复杂, 要在该区取得一个沉积连续、记录完整的岩心比较困难。幸运的是, 近年来随着取样技术的发展, 已经在冲绳海槽获取了一批时间跨度长, 年代分辨率高的岩心, 从而在世界深海古海洋研究进入到高分辨率新阶段的同时, 也使得有可能对

取自冲绳海槽的岩芯建立精确的年龄模式, 进而探讨一些高分辨率的古海洋学事件。

目前冲绳海槽时间跨度最长的岩心是位于海槽中段东部陆坡的 Z14-6 孔 (27°07'N, 127°27'E, 水深 739 m, 岩心长 896 cm)。苍树溪^[1]以 *Globigerinoides ruber* (pink) 的绝灭位作为生物地层控制界限, 建立了 160 ka 以来分辨率较高的氧同位素地层系统。在与太平洋 V19-29 和 V28-238 岩心的氧同位素曲线对比后, 划分了氧同位素 1, 2, 3, 4, 5, 6 期及 5a, 5b, 5c, 5d, 5e 亚期。将 Z14-6 岩心的氧同位素曲线与 Martinson 的高分辨率氧同位素地层进行对比, 还获得分辨率更高的氧同位素事件^[2]。近来在冲绳海槽北部、中部、南部还获得了一些具有详细的、高质量的 AMS¹⁴C 测年数据的钻孔。冲绳海槽南部的 255 钻孔 (25°12'N, 123°07'E, 水深 1 575 m, 岩心长 655 cm) 底部年龄达 18 540 aBP, 可作为该区末次盛冰期以来的高分辨率地层代表^[3]。中部的 DGKS9603 重力柱状岩心 (28°08.869'N, 127°16.238'E, 水深 1 100 m, 岩心长 585 cm), 以 14 个 AMS¹⁴C 年龄数据为主, 氧同位素曲线佐证为辅, 通过二者的互相印证建立了 50 kaBP 以来较为完善的年代模型^[4,5], 该孔可作为冲绳海槽中部 50 kaBP 以来高分辨率的地层代表。而北部 B-3GC (31°29.37'N, 128°

收稿日期: 2002-10-08, 修回日期: 2003-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40176014)

作者简介: 余华, (1977-) 女, 土家族, 湖南张家界人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋沉积学, 电话: 0532-2032060

31.14°E,水深 555 m,岩心长 218 cm)共获得了 22 个可靠的 AMS¹⁴C 年龄数据,柱样底部年龄为 9810 aBP,是该区全新世以来高分辨率的地层代表^[3]。这些都为冲绳海槽区地层的划分和对比提供了可靠的依据。

2 古海水表层温度

在古海洋学研究中古海水表层温度是一项至关重要的基础资料,利用古水温的平面分布可以再造古洋流、古水团的布局;而利用古水温的垂向(时间上)变化则可以判断古气候的变迁。目前冲绳海槽的古海水表层温度数据主要是通过 FP-12E 浮游有孔虫转换函数^[6]、 $U_{37}^{k_{37}}$ 长链烯酮不饱和指数^[7]、MAT(modern analog technique)和 SIMMAX 等方法获得。冲绳海槽晚更新世以来古海水表层温度的变化具有以下特点:(1) 受冰期-间冰期大旋回的影响,总体上说来间冰期海水表层温度高,而冰期低,但冰期和间冰期内部还存在次一级的水温波动,如在冰消期转暖中期发生的“新仙女木”低温事件。(2) 气候变冷时冬季温度降幅大,夏季温度降幅小,因此,冬、夏季节温差在冷期时明显增大。冲绳海槽中段近 50 kaBP 以来,冬夏表层水温差在冷期一般为 6~8℃,而暖期则较低,约为 4~5℃^[8]。(3) 氧同位素第 5 期,即末次间冰期,要比现今及全新世冰后期温暖,水温普遍较高,平均海水温度接近现代,其中 5e 亚期比现今还要温暖,最高温度高出现代近 1℃^[1]。(4) 末次冰期是距离现在最近的一次冰期,其中包括两个冰阶和一个间冰阶,受取样深度的限制,目前在冲绳海槽研究中最为详细的是距今 24 kaBP~12 kaBP 的末次冰期最盛期(氧同位素 2 期)。该期温度降幅非常大,冲绳海槽南部冬季海水表层温度降至 16.1℃,比现代冬季温度低 8.2℃,冬夏季节温差最大可达 9.9℃,而冰后期平均仅为 4~5℃^[9]。与相近纬度西北太平洋开放海区的古温度变化相比,冲绳海槽现代海水表层温度与末次盛冰期时的表层海水温度之差明显大于开放型大洋^[9,10],说明东海这一开放型边缘海对气候变化响应的敏感程度强于开放型大洋,对冰期-间冰期旋回中的气候变化具有“放大效应”,是进行古海洋研究的理想场所。(5) 冰消期以来海水表层温度明显增加,但在升温过程中也存在着一些变冷事件,刘振夏等认为冲绳海槽中段在 5 700 aBP(¹⁴C 年龄,即常规¹⁴C 年龄

减去 0.4 ka)至 1 930 aBP 之间有一次冷期,该冷期冬季降温 1.3~1.8℃,夏季降温 0.3~0.6℃,冬夏温差为 5.4℃^[8]。孟宪伟等^[11]最近也发现冲绳海槽中部在 1.7~1.6,5.1~4.8 和 8.1~7.4 cal kaBP(日历年)存在着 3 次降温事件,但降温幅度低于盛冰期。这些降温事件主要体现在海水表层温度变化曲线上,在有孔虫 $\delta^{18}O$ 变化曲线上表现得不太明显。(6) 现代冲绳海槽因南部受高温高盐黑潮水的影响,北部受低温低盐沿岸流的影响,形成了表层海水温度从海槽南部往北逐渐降低的趋势,而在地质历史时期,由于古气候的变化及其所导致的古环流格局的改变,如黑潮流路和强度的变化也影响着南北海槽的水温差。从已发表的古水温资料来看似乎冲绳海槽南部末次盛冰期与现代的季节温差大于中部,说明南部对气候变化的响应可能比中部更明显^[9]。相对于冲绳海槽南部和中部而言,北部比较缺乏定量的古水温资料。

3 古气候和古海洋事件

近年来在冲绳海槽根据浮游有孔虫浅水种壳体的 $\delta^{18}O$ 值、浮游有孔虫组合及据此求出的转换函数古温度测算值识别出了一系列千年和百年尺度的古气候和古海洋事件,研究这些事件对于探索当今世界气候突发变化及其灾害防护具有重要的现实意义。

3.1 Heinrich 事件

Heinrich 事件以北大西洋发生大规模冰川漂移事件为标志,代表大规模冰山涌进的气候效应而产生的快速变冷事件。这一事件在沉积物中的主要表现是粗颗粒含量和冷性有孔虫含量增多。目前在北大西洋共分辨出 6 次大的 Heinrich 事件,其时代依次为 66 000 aBP, 50 000 aBP, 35 500 aBP, 30 100 aBP, 24 100 aBP 和 16 800 aBP^[12,13]。

中国西北黄土和南海陆架等地也相继发现了 Heinrich 事件的印迹。通过对冲绳海槽中段近槽底 DGKS9603 岩心密集取样分析,获取了地层高分辨率的古海洋学信息,首次在冲绳海槽比较完整地分辨出了 H1-H5 事件,各期事件发生的时间及降温幅度见表 1。

3.2 新仙女木事件(YD-Younger Dryas)

新仙女木事件是末次冰期向全新世转暖过程中

表 1 冲绳海槽 DGKS9603 记录的 Heinrich 事件

事件	刘振夏 ^[14]			孟宪伟 ^[10]		李铁刚 ^[15]		
	持续时间 (cal ka B.P.)	丰值 (cal ka B.P.)	$T_{w, \delta, \delta}$ (°C)	持续时间 (cal ka B.P.)	年均温度 (°C)	发生时间 (cal ka B.P.)	暖季降温 (°C)	冷季降温 (°C)
H1	15.0 ~ 19.2	15.1 和 19.2	22.5	15.1 ~ 15.9	22.7	15.5	不明显	不明显
H2	短暂	24.4	21.1	20.9 ~ 21.6	20.6	22.5	2 ~ 5	3 ~ 6.5
H3	28.7 ~ 30.3	29.5	20.9	26.8 ~ 28.0	21.5	29.8	2 ~ 5	3 ~ 6.5
H4	36.2 ~ 38.5	37.1	21.6	33.3 ~ 33.7	21.5	35.1	2 ~ 5	3 ~ 6.5
H5	45.5 ~ 47.4	47.0	21.2	-	-	42.8	2 ~ 5	3 ~ 6.5

注： $T_{w, \delta, \delta}$ 指冬季表层海水温度，用 FP-12E 转换函数计算，年均温度用 U_{37} 法计算，冷季和暖季降温用 MAT 计算；- 表示无数据，表 2 同

的一次快速变冷事件，是迄今在冰心、陆地和海洋沉积物的古气候记录中研究最为详细的一次变冷事件。较为公认的 YD 事件的年代界于 11 ~ 10 kaBP 之间^[16]，最近 bond 等标定的界限是 12.9 ~ 11.5 cal kaBP^[13]，峰值出现在 12.2 cal kaBP。格陵兰冰芯高分

分辨率分析表明，YD 事件持续时间约 1.15 ~ 1.3 ka。自台湾学者谢英宗^[17]1996 年首次在冲绳海槽南部发现 YD 事件以来，目前至少又有 7 个岩芯分辨出了这一事件(表 2)。

表 2 冲绳海槽记录新仙女木事件的沉积柱状样

钻孔编号	纬度	经度	水深 (m)	发生时间 (ka B.P.)	识别标志及特征
OR281-12P	25°14.61'	123°14.99'	1 733	9.6	<i>Globigerinoides sacculifer</i> 和 <i>Neogloboquadrina dutertrei</i> 的 $\delta^{18}O$ 值降低 ^[17]
255	25°12'	123°06'	1 575	11.4 ~ 9.6	<i>Pulleniatina obliquiloculata</i> 含量降低， <i>G. sacculifer</i> 的 $\delta^{18}O$ 值降低，冬季表层水温降低约 2.4°C ^[18]
253	25°34'	123°01'	839	-	<i>P. obliquiloculata</i> 含量降低 ^[19]
170	26°38'	125°48'	1 470	-	<i>P. obliquiloculata</i> 含量降低 ^[19]
155	27°2.2'	126°10.5'	950	11 ~ 10	<i>N. dutertrei</i> 的 $\delta^{18}O$ 值降低，降温 1.8°C ^[20]
180	28°14.5'	127°32.5'	1 044	10.46 ~ 9.635	<i>G. sacculifer</i> 的 $\delta^{18}O$ 值降低 ^[21]
KL22	30°48.0'	128°28.0'	787	-	硅藻丰度和热带远洋种丰度突然增加 ^[22]
DGKS 9603	28°08.869'	127°16.238'	1 100	10.7 ~ 9.8	<i>G. sacculifer</i> 的 $\delta^{18}O$ 值降低，冬季表层水温为 21.3°C，比现在降低 2.4 ~ 3.4°C，夏季降低 0.7 ~ 1°C，冬夏表层水温差为 7°C ^[8, 14]

YD 事件的显著特征是气候变冷特别明显，气温的最大降幅可达 8°C^[23]。冲绳海槽 YD 的降温主要体现在冬季海水表层温度曲线上，在冰消期转暖中期冬季表层水温下降 2 ~ 3.4°C，但水温并没有回到盛冰期的状况。YD 期的冬季表层水温最低值仍比末次盛冰期高出 1.5 ~ 3.5°C^[19]。

YD 事件和 Heinrich 事件在冲绳海槽的释读证明它们可能是全球性的气候事件或至少其影响效应是全球性的。目前关于这些短周期气候事件的发生机

制还存在着许多争议，对冲绳海槽柱样的详细研究将有助于获得关于其起因的进一步认识。

3.3 普林斜氏虫 (*Pulleniatina obliquiloculata*) 低值事件

1996 年翦知 等^[18, 24]首次报道冲绳海槽及南海的 3 个钻孔在约 4 ~ 2 kaB.P. 之间存在着一个“普林斜氏虫最小值带”，近年来其它一些钻孔的高分辨率地层也记录到了该现象^[3, 15, 25]。但对于造成该现象的原因看法不一，翦知、李保华等认为普林斜氏虫低

值事件与冬季表层海水温度的变冷相一致,且与渤海、黄海、南海、中国大陆、欧洲和日本等地记载的 4~2 kaBP 的变冷事件相吻合,认为此事件是一个全球性事件,可能是东亚冬季风加强所导致,而不是黑潮主轴东移或强度减弱造成的,并且此事件很可能并不仅限于全新世,在以前的间冰期中也出现过^[3]。但 Ujiié 等则认为冲绳海槽发现的普林斜氏虫低值事件只是一个区域性的现象,与中全新世变冷事件无关,是台湾与南琉球群岛之间一个不连续的屏障妨碍黑潮全速进入冲绳海槽所造成的^[25],要想对这一古海洋事件获得更全面、准确的认识还需要进一步的工作。

3.4 $\delta^{13}\text{C}$ 宽幅低值事件

1989 年 Oppo 等人根据热带大洋不同的浮游有孔虫属种 $\delta^{13}\text{C}$ 的记录,发现了末次冰消期热带大洋表层水 $\delta^{13}\text{C}$ 的宽幅低值事件。并指出热带大洋表层水 $\delta^{13}\text{C}$ 是全球碳的收支变化、海-气同位素的平衡程度及上升流或不同水源影响的区域性变化的重要指标。随后,一些研究成果表明在热带太平洋低纬度区域,末次冰消期浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件在区域尺度上具有良好的可比性,是西赤道太平洋古海洋重要的区域性事件。最近李铁刚^[4]对取自冲绳海槽中部的 DGKS9603 孔浮游有孔虫 *Neogloboquadrina dutertrei* 和 *Globigerinoides ruber* $\delta^{13}\text{C}$ 记录进行了分析,发现该孔浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在 20~6 cal kaBP 期间出现明显的变轻事件,年代跨度较大,约为 14 ka,最大变幅为 0.4×10^{-3} ,最轻值出现在 15.7 cal kaBP 左右,与热带太平洋及其边缘海的表层水 $\delta^{13}\text{C}$ 低值事件具有非常好的可比性。该事件在接近中纬度的冲绳海槽中部的识别为“热带太平洋低纬度海区的水体演化在影响大区域乃至全球碳循环变化过程中发挥了重要作用”的观点提供了新的证据。

4 黑潮路径的演化

黑潮是冲绳海槽古海洋学研究的一个重要内容,它是冲绳海槽乃至整个东海海洋学最重要的特征之一。晚第四纪以来中国大陆及其临近海域的古环境变化主要受东亚季风和黑潮暖流的控制,因此,研究地质历史时期古黑潮路径的演化对了解东亚古气候变化有重要意义。关于末次冰期以来冲绳海槽古黑潮路径演化的研究已有作者进行过综述^[26],作者在此仅对

一些最新的研究成果进行总结。

关于末次冰期盛期黑潮是否迁移出冲绳海槽,以及黑潮在全新世何时重新进入冲绳海槽,一直是争论的比较激烈的 2 个问题,Ujiié 等早在 1991 年就提出末次盛冰期在台湾与琉球岛弧中南部之间存在陆桥,阻止了黑潮进入冲绳海槽,并根据最近他对取自琉球岛弧附近的 17 个重力柱状样中普林斜氏虫含量的变化认为,在 ~10 kaBP 陆桥消失,黑潮进入冲绳海槽^[25]。而在距今约 4 500 aBP ~ 3 000 aBP 之间,台湾与南琉球群岛之间又形成了一个不连续的地形屏障,阻止了黑潮全速进入冲绳海槽,黑潮强度减弱,并造成了冲绳海槽晚全新世普林斜氏虫含量急剧降低事件。翦知 等认为黑潮主流轴在 ~7.3 cal kaBP 重新进入冲绳海槽,且黑潮在全新世发生了一系列的以 1 500 a 和 700~800 a 为周期的突变事件,目前已分辨出的有发生在 ~0.6, 1.7, 3.3, 4.6, 5.9, 8.1 和 9.4 cal. ka BP 的黑潮强度减弱现象,为千年尺度的气候变化提供了新的证据。李铁钢等通过对冲绳海槽中部的研究认为自 16 cal ka BP 以来冲绳海槽开始受到黑潮的影响,而且在 15.5 cal ka BP, 11.4 cal ka BP 和 2.8~5.3 cal ka BP 强度减弱。其中 15.5 cal ka BP 和 11.4 cal ka BP 的黑潮强度减弱分别对应于北大西洋的 H1 事件和 YD 冷事件^[15]。黑潮路径的演化究竟是受构造运动的控制,还是受气候变化所导致的海洋环流的影响,以及黑潮变化的周期,这些都是需要进一步探讨的热点问题。

5 展望

冲绳海槽古海洋学研究取得了丰硕的成果,但也存在着一些问题,作者认为今后冲绳海槽古海洋学研究应加强以下几方面的内容:(1) 目前关于晚更新世以来冲绳海槽海水上层结构、深部水团、碳酸盐旋回、古海洋生产力、沉积速率等研究尚不全面深入,今后应加强这些方面的研究工作。(2) 现在在冲绳海槽古海洋学研究中常用的一些指标是:浮游有孔虫组合、碳氧稳定同位素曲线、海水表层温度等,今后还应寻找更多指标,如沉积物粒度、矿物、元素地球化学、生物地球化学指标等。从而在各指标间进行对比以更好地识别高分辨率的古海洋学事件。(3) 冲绳海槽沉积物记录的一些古气候和古海洋事件,如 YD, Heinrich

事件和普林斜氏虫低值事件可与陆地记录的古气候事件进行对比,今后应进一步利用冲绳海槽这一难得的研究区域加强海洋与陆地古气候、古环境变化的对比研究,以期在东亚古季风的演变、海洋和陆地的气候变化中的耦合关系及全球海洋-大气环流等重大的全球性问题上取得突破性进展。(4)由于取样技术的限制,目前对冲绳海槽古海洋的研究仅限于晚更新世,特别是最近四五万年。今后的研究工作应将冲绳海槽古海洋学研究推进到整个晚第四纪或更早。

参考文献:

- [1] 苍树溪, 阎军. 西太平洋特定海域古海洋学[M]. 青岛: 青岛出版社, 1992.
- [2] 杨子廉. 海洋地质学[M]. 青岛: 青岛出版社, 2000. 425.
- [3] Jian Z M, Wang P X, Yoshiki S, *et al.* Holocene variability of the Kurishio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean[J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2000, 184: 305 - 319.
- [4] 李铁钢, 刘振夏, Hall M A, 等. 冲绳海槽末次冰消期浮游有孔虫 δ_{13C} 的宽幅低值事件[J]. 科学通报, 2002, 47(4): 298 - 301.
- [5] 刘振夏, 李培英, 李铁刚, 等. 冲绳海槽 5 万年以来的古气候事件[J]. 科学通报, 2000, 45(16): 1776 - 1781.
- [6] Thompson P R. Planktonic foraminifera in the western North Pacific during the past 150 000 years: comparison of modern and fossil assemblages[J]. **Palaeo Palaeo Palaeo**, 1981, 35: 241 - 279.
- [7] Brassell S C, Eglinton G, Marlowe I T, *et al.* Molecular stratigraphy: A new tool for climatic assessment[J]. **Nature**, 1986, 320: 129 - 133.
- [8] 刘振夏, Saito Y, 李铁钢, 等. 冲绳海槽晚第四纪千年尺度的古海洋学研究[J]. 科学通报, 1999, 44(8): 883 - 887.
- [9] 李保华, 赵泉鸿, 王永吉, 等. 冲绳海槽南部两万年来的浮游有孔虫与古海洋学事件[J]. 海洋学报, 1997, 19(4): 90 - 98.
- [10] 孟宪伟, 杜德文, 刘振夏, 等. 东海近 3.5 万年来古海洋环境变化的分子生物标志物记录[J]. 中国科学(D 辑): 2001, 31(8): 691 - 696.
- [11] 孟宪伟, 刘焱光, 刘振夏, 等. 冲绳海槽全新世表层水温、盐度和大气 CO_2 恢复及其古气候意义[J]. 科学通报, 2001, 46(增刊): 80 - 83.
- [12] Bond G, Broecker W, Johnsen S, *et al.* Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice[J]. **Nature**, 1993, 365: 143 - 147.
- [13] Bond G, Showers W, Cheseby M, *et al.* A pervasive millennial-scale cycle in the North Atlantic Holocene and glacial climate[J]. **Science**, 1997, 278: 1257 - 1266.
- [14] 刘振夏, 李培英, 李铁刚, 等. 冲绳海槽 5 万年以来的古气候事件[J]. 科学通报, 2000, 45(16): 1776 - 1781.
- [15] Tiegang Li, Zhenxia Liu, Michael A, *et al.* Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera[J]. **Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology**, 2001, 176: 133 - 146.
- [16] Broekge W S, Andrge M, Wolffi W, *et al.* The chronology of the last deglaciation: Implication to the cause of the Younger Dryas Event[J]. **Paleoceanography**, 1988, 3(1): 1 - 19.
- [17] Shieh Y T, Wang C H, Chen M P, *et al.* The last glacial maximum to Holocene environment changes in the southern Okinawa Trough[J]. **Journal of Asian Earth Sciences**, 1997, 15(1): 3 - 8.
- [18] Li B H, Jian Z M, Wang P X. *Pulleniatina obliquiloculata* as paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20000 years[J]. **Marine Micropaleontology**, 1997, 32: 59 - 69.
- [19] 汪品先, 卞云华, 李保华, 等. 西太平洋边缘海的“新仙女木”事件[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(5): 452 - 460.
- [20] 吴世迎, 刘焱光, 李铁钢, 等. 冲绳海槽中段沉积岩芯的氧碳同位素测定和 YD 事件[J]. 质谱学报, 2000, 21(3 A): 159 - 160.
- [21] 刘焱光, 李铁钢, 吴世迎, 等. 冲绳海槽中部沉积岩芯的古海洋学研究[J]. 科学通报, 2001, 46(增刊): 68 - 73.
- [22] 蓝东兆, 许江, 陈承惠, 等. 冲绳海槽晚第四纪沉积硅藻及其古海洋学意义[J]. 台湾海峡, 2000, 19(4): 419 - 425.
- [23] Fanning A F, Weaver A J. Temporal-geographical melt-water influences on the North Atlantic conveyor: implications for the Younger Dryas[J]. **Paleoceanography**, 1997, 12(2): 307 - 320.
- [24] 翦知, 李保华, Pflaumann U 等. 西太平洋晚全新世变冷事件[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(5): 461 - 466.
- [25] Hiroshi U, Yurika U. Late Quaternary course changes of the kuroshio Current in the Ryukyu Arc region, northwestern Pacific Ocean[J]. **Marine Micropaleontology**, 1999, 37: 23 - 40.
- [26] 向荣, 曹奇原, 阎军. 古黑潮演化研究评述[J]. 海洋科学, 2000, 24(7): 34 - 37.

(本文编辑: 刘珊珊)