

近万年来冲绳海槽温跃层的高分辨率记录*

王吉良¹ 斋藤文纪² 大场忠道³ 翦知湔¹ 汪品先¹

(¹)同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092; (²)日本地质调查所海洋地质部, 日本筑波; (³)北海道大学地质环境科学研究所, 日本札幌)

摘要 通过对冲绳海槽北部 B-3GC 柱状样的分析, 在高分辨率地层学的基础上, 结合冲绳海槽南部柱状样的结果, 利用浮游有孔虫组合和氧碳稳定同位素对近万年来温跃层深度的变化进行探讨。结果表明, 5 400 a 之前, 温跃层较浅, 此后加深, 在大约 4 000~2 000 aBP 期间深度减小; 此外, 温跃层的变化与表层海水古温度的变化具有良好的正相关性。这些变化在冲绳海槽南北海区大体一致, 可能与黑潮暖流的变迁密切相关, 也说明黑潮主流轴 6 400 aBP 以后和 4 000~2 000 aBP 期间可能发生过强度或主流轴位置的变化。8 200~6 400 aBP 期间冲绳海槽中的黑潮分支可能在逐渐增强。

关键词 冲绳海槽 温跃层 表层海水古温度 黑潮 浮游有孔虫 稳定同位素

随着现代海洋学研究的深入, 人们开始认识到海气交换在气候变化中的重要性^[1]。通常除高纬度地区外, 海洋中只有温跃层以上的水体能与大气活跃地交换, 温跃层就成了影响气候变化的重要因素之一; 同时, 温跃层的变化还控制着海洋中营养物质的分布和浮游生物生态域的大小。因此, 古温跃层变化的研究也就成为现代古海洋学工作的热点之一。近些年来, 一些学者已开始利用温跃层上下微体化石组合及其壳体氧碳稳定同位素的差异来追溯温跃层的历史^[2~9], 但这方面的工作在中国刚刚起步。

作为西太平洋边缘海的重要组成部分, 冲绳海槽在古海洋学研究中的地位举足轻重。冲绳海槽古海洋学的主题之一是古黑潮及其分支的变迁, 黑潮区的表层水温较高, 温跃层较深, 与陆架区较低的表层水温和较浅的温跃层形成了鲜明的对照^[10~12]。因此, 利用温跃层深度的变化不仅可以对照研究本海区表层水温的变化, 还可以追溯黑潮及其分支的盛衰或位移。为此, 我们选取了冲绳海槽北部海区的柱状样, 尝试从氧碳稳定同位素、浮游有孔虫组合以及温跃层转换函数着手, 并结合冲绳海槽南部海区的分析结果, 对近万年来冲绳海槽温跃层的变化及其与黑潮变迁的关系进行探讨。

1 材料与方 法

1.1 材料

本次工作的重点是日本 B094-20 航次于 1994 年在 B-3GC 站位所采集的重力柱状样, 该站位于冲绳海槽的北部陆坡(128° 31.14'E, 31° 29.37'N), 在黑潮主要分支——对马暖流的东侧, 水深 555 m(图 1)。柱长 218 cm, 上下为均一的浅褐色粉砂质粘土, 无明显的浊流沉积, 在

2000-01-30 收稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49999560, 49776289)和上海青年科技启明星计划(批准号: 98QG14043)资助项目

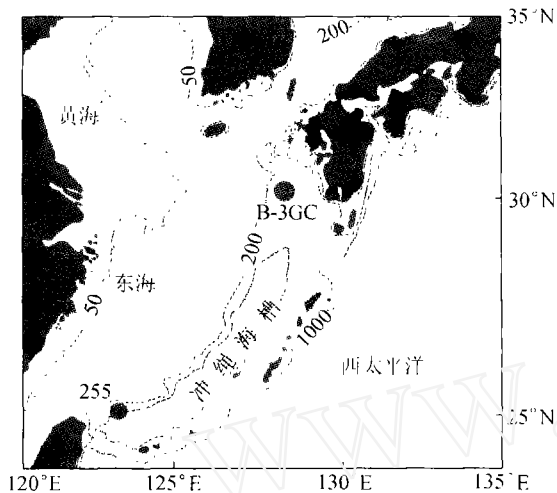


图 1 B-3GC 和文中所引用的 255 柱状样的站位图
(据文献[13]修改)
灰色阴影区代表黑潮及其分支

110~150 cm 的层位中富含火山灰物质. 按 2.5 cm 的采样间距, 从 8~218 cm 的层位上共采集样品 84 块进行分析.

样品以标准微体古生物学方法处理, 对大于 0.154mm 的粗组分进行分样并从中挑出 200~500 枚浮游有孔虫完整壳体, 进行鉴定、统计. 同时, 按一定的壳体大小和数量, 从样品中挑出浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 和 *Pulleniatina obliquiloculata* 的洁净无沾染壳体, 在日本北海道大学环境地球科学院实验室进行氧碳稳定同位素的分析(表 1, 表 2). 此外, 还挑出 *Neogloboquadrina dutertrei* 的洁净壳体, 送至美国华盛顿大学第四纪同位素实验室测定 AMS¹⁴C 年龄.

表 1 对 B-3GC 柱状样所进行的地球化学分析及采样数据

地化分析类型	所用浮游有孔虫	壳体大小/mm	壳体个数	采样间距/cm	样品数量
氧碳稳定同位素测定	<i>G. ruber</i>	0.35~0.50	>20	2.5	82
	<i>P. obliquiloculata</i>	0.50~0.70	>20	2.5	84
AMS ¹⁴ C 测年	<i>N. dutertrei</i>	>0.154	>1 000	10.0	22

1.2 温跃层深度的研究方法

1.2.1 古生态法 现代生态学的研究表明, 浮游有孔虫的分布与水深和温跃层密切相关^[2~4, 14, 15]. *Globorotalia menardii*, *Neogloboquadrina pachyderma* 和 *N. dutertrei* 等在中低纬海区主要生活于温跃层以下的深层水中. 当温跃层变深时, 这些深水种生存空间变小, 含量相应降低; *Globigerinoides sacculifer*, *G. ruber* 和 *Globigerinita glutinata* 等浅水种主要分布于温跃层以上的浅水中, 其丰度随着温跃层深度的加大而增加. 因此, 这两类浮游有孔虫的含量可以作为温跃层深度变化定性指标^[2~4, 8, 9]. 最近, Andreason 等人^[5]根据太平洋 189 个表层样中的浮游有孔虫组合, 结合现代温跃层深度的情况, 建立了温跃层深度的转换函数, 误差为 ± 27 m.

1.2.2 同位素法 利用氧碳稳定同位素也可以定性地研究温跃层深度的变化^[6]. *G. ruber* 主要生活在 50 m 以上的浅水中, 而 *P. obliquiloculata* 在温跃层附近的水层中最为繁盛^[2~4, 14, 15], 因此两者壳体中氧同位素的差值 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_{G. ruber} - \delta^{18}\text{O}_{P. obliquiloculata}$), 在盐度不变的情况下可以反映表层水与温跃层水的温差(温度梯度). 如果温跃层变浅, 上部水体的温度梯度则相应增大, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 偏高; 反之, 当温跃层加深时, 上下水层的温度比较接近, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 偏低^[6]. 由于冲绳海槽北部海区周边没有大的河流, 淡水输入对氧同位素的影响甚小, 影响 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 的主要因素主要是上下水体的温度差, 所以可以用 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 来作为本研究区温跃层深度变化的指标. 上部水体的混合程度也是影响温跃层深度的重要因素. 通常来讲, 上部水体的混合程度大, 热量易于向水下传导^[16], 导致温跃层比较深; 反之, 温跃层浅. $\delta^{13}\text{C}_{G. ruber}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{P. obliquiloculata}$ 分别代表了上下水层的碳同位素分布情况. 因此, $\Delta\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{G. ruber} - \delta^{13}\text{C}_{P. obliquiloculata}$) 可反映上部水体的混合程度, 假如 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 较小, 说明上部水体的混合程度大, 均一性较好, 温跃层相对较深^[6].

表 2 B-3GC 柱状样同位素数据

深度/cm	$\delta^{18}\text{O}$		$\delta^{13}\text{C}$		深度/cm	$\delta^{18}\text{O}$		$\delta^{13}\text{C}$		深度/cm	$\delta^{18}\text{O}$		$\delta^{13}\text{C}$	
	<i>ruber</i> ^{a)}	<i>obl.</i> ^{b)}	<i>ruber</i> ^{a)}	<i>obl.</i> ^{b)}		<i>ruber</i> ^{a)}	<i>obl.</i> ^{b)}	<i>ruber</i> ^{a)}	<i>obl.</i> ^{b)}		<i>ruber</i> ^{a)}	<i>obl.</i> ^{b)}	<i>ruber</i> ^{a)}	<i>obl.</i> ^{b)}
9.25	-1.83	-1.30	0.99	0.85	79.25	-2.12	-1.23	1.22	0.96	149.25	-1.88	-0.74	0.75	0.97
11.75	-2.05	-1.05	1.07	0.91	81.75	-2.12	-1.13	1.25	1.01	151.75	-2.05	-0.75	0.66	1.01
14.25	-1.87	-1.01	1.05	0.91	84.25	-1.90	-1.20	1.20	0.92	154.25	-1.87	-0.65	0.87	0.95
16.75	-1.84	-0.94	1.10	0.95	86.75	-1.88	-1.27	1.23	1.00	156.75	-1.90	-0.53	0.73	1.06
19.25	-1.81	-1.13	1.03	0.87	89.25	-1.73	-1.22	1.10	1.03	159.25	-2.01	-0.71	0.71	0.95
21.75	-2.09	-1.00	1.02	0.92	91.75	-1.94	-1.16	1.15	0.95	161.75	-2.07	-0.79	0.69	0.94
24.25	-1.99	-1.09	0.93	0.94	94.25	-1.71	-0.96	1.45	1.05	164.25	-1.92	-0.61	0.61	0.98
26.75	-1.83	-1.37	1.03	0.89	96.75	-2.14	-1.34	1.08	0.88	166.75	-2.12	-0.64	0.67	0.90
29.25	-2.16	-1.05	0.90	0.99	99.25	-1.96	-1.02	0.98	0.92	169.25	-1.65	-0.62	0.69	0.95
31.75	-1.84	-0.79	0.98	1.03	101.75	-2.03	-1.20	1.25	0.97	171.75	-1.71	-0.73	0.81	0.88
34.25	-1.95	-1.27	1.15	0.80	104.25	-1.82	-1.22	0.92	0.98	174.25	-1.99	-0.54	0.56	0.98
36.75	-2.11	-0.90	0.91	1.06	106.75	-1.88	-1.07	0.94	0.97	176.75	-2.06	-0.56	0.72	0.91
39.25	-2.30	-0.85	1.18	0.95	109.25	-2.16	-0.80	0.93	1.06	179.25	-2.12	-0.61	0.60	0.93
41.75	-1.88	-0.82	1.10	1.05	111.75	-1.73	-0.79	0.95	1.03	181.75	-1.84	-0.58	0.57	0.82
44.25	-2.13	-0.81	1.17	0.97	114.25	-2.09	-0.73	0.97	1.00	184.25	-1.51	-0.66	0.57	0.83
46.75	-2.01	-0.67	1.05	1.09	116.75	-2.08	-0.92	1.03	0.98	186.75	-1.65	-0.61	0.58	0.90
49.25	-2.04	-1.06	1.12	0.97	119.25	-2.09	-0.75	0.73	1.04	189.25	-1.57	-0.46	0.77	0.89
51.75	-1.80	-0.81	1.19	1.10	121.75	-2.17	-0.77	0.62	0.98	191.75	-1.83	-0.58	0.51	0.92
54.25	-2.25	-1.00	1.16	1.00	124.25	-2.17	-0.67	0.82	0.94	194.25	-1.66	-0.38	0.54	0.88
56.75	-2.18	-0.99	1.13	1.04	126.75	-2.09	-0.95	0.72	0.87	196.75	-1.71	-0.39	0.55	0.84
59.25	-2.26	-0.78	1.25	1.07	129.25	-2.23	-0.79	0.67	0.91	199.25	-1.58	-0.33	0.60	0.86
61.75	-2.44	-0.92	1.08	1.07	131.75	-2.36	-0.81	0.66	0.95	201.75	-1.80	-0.26	0.63	0.97
64.25	-1.78	-0.85	1.28	1.05	134.25	-2.23	-0.89	0.65	0.95	204.25	-1.67	-0.31	0.48	0.84
66.75	-2.06	-0.6	1.10	1.03	136.75	-2.08	-0.88	0.67	0.99	206.75	-1.83	-0.30	0.62	0.88
69.25	-2.22	-0.95	1.06	1.10	139.25	-2.04	-0.85	0.65	0.91	209.25	-1.58	-0.43	0.56	0.93
71.75	-1.99	-0.94	1.02	1.08	141.75	-1.91	-0.69	0.71	0.94	211.75	-1.86	-0.32	0.55	0.79
74.25	-1.77	-1.11	0.99	0.99	144.25	-2.23	-0.86	0.84	0.98	214.25	-0.25		0.82	
76.75	-1.86	-1.21	1.11	0.93	146.75	-1.91	-0.83	0.64	0.96	216.75	-0.25		0.80	

a) *ruber* 代表 *G. ruber*, (b) *obl.* 代表 *P. obliquiloculata*

2 结果

2.1 年代框架的建立

利用 B-3GC 柱状样测得的 22 个 AMS¹⁴C 测年数据(表 3)具有很高的质量. 22 个 AMS¹⁴C 测年数据几乎没有年龄上下颠倒的情况, 同时, 它们与相应层位中地质事件的发生时间十分吻合. 比如 2 000~4 000 aBP 期间的 *P. obliquiloculata* 事件^[18, 17~19]和 6 300 aBP 日本 Kikai 火山喷发事件^[20](表 2). 根据这 22 个 AMS¹⁴C 测年数据可以建立极好的年代框架. 柱状样最底部的年龄为 9 410 a, 表明该柱状样代表了本区全新世近万年来的沉积, 平均每个样品 110 a, 而在沉积速率最高的层位, 样品的分辨率可以达到 15 a. 分辨率之高, AMS¹⁴C 测年数据之多, 在东海地区的全新世尚属首次.

2.2 冲绳海槽北部近万年来温跃层的变化

根据 B-3GC 柱状样中浮游有孔虫和氧碳稳定同位素数据, 利用以上所介绍的古生态法和同位素法对冲绳海槽北部海区温跃层的变化进行研究. 结果显示, 近万年来温跃层的大致呈加深的趋势, 并依据温跃层深度的变化可以将本海区近万年的历史划分为如下 4 个阶段(图 2):

表 3 B-3GC 柱状样测得的 AMS¹⁴C 测年数据^{a)}

层位/cm	测年数据/a	误差/a	层位/cm	测年数据/a	误差/a
0~10	210	60	110~120	6 130	60
10~20	450	70	120~130	6 790	60
20~30	1 380	60	130~140	6 980	60
30~40	2 390	60	140~150	6 970	60
40~50	2 660	60	150~160	7 440	60
50~60	3 140	60	160~170	7 700	60
60~70	3 620	60	170~180	8 230	70
70~80	3 930	60	180~190	8 490	60
80~90	4 090	60	190~200	8 670	60
90~100	4 950	70	200~210	9 150	60
100~110	5 490	60	210~218	9 410	60

a) 年龄未转换为日历年, 层位 30~90 为 *P. obliquiloculata* 低值带, 层位 110~150 中富含火山物质

(1) 阶段 I (9 400~6 400 aBP) 9 400~6 400 aBP 期间 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 和 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 值都偏高, 表明当时温跃层比较浅. 根据浮游有孔虫的组合又可以这个阶段细分为两个时期, 即 Ia(9 400~8 200 aBP)和 Ib(8 200~6 400 aBP). Ia 为浅温跃层时期, 利用转换函数计算所得的温跃层深度通常小于 160 m; 同时, 浮游有孔虫浅水种含量很低, 而浮游有孔虫的深水种含量却达到了本区近万年来的最高值. Ib 为温跃层逐渐变深, 表现为浮游有孔虫浅水种含量逐渐增加, 深水种的含量逐渐减少, 计算得出的温跃层深度也有增加的趋势.

(2) 阶段 II (6 400~4 000 aBP) 这一阶段 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 0.9‰, 比相邻的阶段 I 和阶段 III 都要低; $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 的平均值也仅有 0.1‰, 明显低于阶段 I; 同时, 利用温跃层转换函数计算所得的温跃层深度的平均值也高达 184 m. 这些都说明此期间温跃层比较深.

(3) 阶段 III (4 000~2 300 aBP) *P. obliquiloculata* 事件(大约 4 000~2 000 aBP)^[8, 17~19]恰巧发生于本阶段. 这一期间, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 明显偏低, 平均值为 1.14‰, 利用转换函数计算所得的温跃层深度也比较小, 平均值仅为 169 m, 而且基本都在 135~180 m 之间, 说明该阶段的温跃层比较浅.

(4) 阶段 IV (2 300 aBP~现在) 这一阶段, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 的平均值、最大值和最小值都比其他 3 个

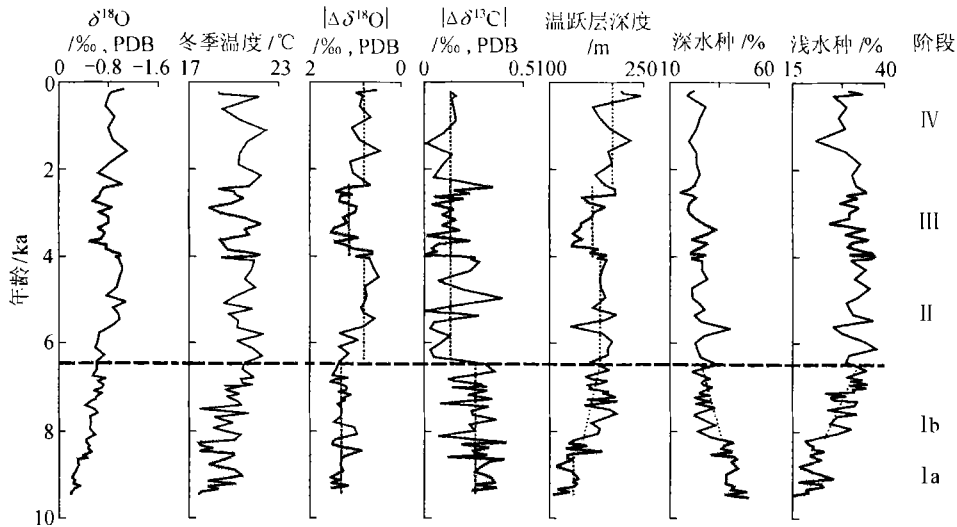


图 2 B-3GC 柱状样中温跃层变化的指标和表层海水温度的变化情况

阴影区表示浅温跃层阶段, 其中上部阴影区表示 *P. obliquiloculata* 低值带. 图中虚线为该阶段的平均值或线性趋势(阶段 Ib)

阶段低, 分别为 0.86‰、0.46‰ 和 1.11‰, 利用转换函数计算得出的温跃层深度也比其他几个阶段大, 这说明 2 300 aBP 至今是近万年来的第 2 次深温跃层阶段。

3 对比与讨论

根据 255 柱状样(123°07'N, 25°12'E, 水深 1 575 m, 见图 1)中浮游有孔虫属种组合的分析发现, 冲绳海槽南部海区近万年来温跃层深度的变化与北部大体一致, 也可以分为 4 个阶段(图 3): 在 6 420 aBP 之前, 浮游有孔虫浅水种含量偏低, 深水种丰度较高, 温跃层较浅; 在 6 400 aBP 之后, 浅水种含量增加, 而深水种含量降低, 表明温跃层加深; 在晚全新世变冷事件期间(即 B-3GC 柱状样的阶段 III), 255 柱状样中对上部水体结构变化反应灵敏的钙质超微化石 *Florisphaera profunda* 含量明显降低, 说明这一期间上部水体的混合程度减弱, 温跃层变浅^[7]; 而其他两个深温跃层阶段与 B-3GC 柱状样的结果一样。但是, 冲绳海槽近万年来南北温跃层的变化还是存在一定的南北差异, 主要表现在阶段 I 中: 北部 B-3GC 柱状样将该阶段明显地分为两个时期(图 2, 8 200 aBP 以后逐渐加深); 而南部的 255 柱状样无此特征(图 3)。这种差异可能与 9 000~6 400 aBP 期间 255 柱状样的沉积速率低有关。因而, 在 8 200~6 400 aBP 期间海槽南部温跃层是否逐渐加深尚需进一步研究。

由图 2 还可发现, 温跃层的深度与表层海水古温度具有良好的正相关性: 在阶段 I 和阶段 III 浅温跃层阶段, 转换函数计算所得的表层海水温度偏低; 当温跃层加深时, 表层海水古温度

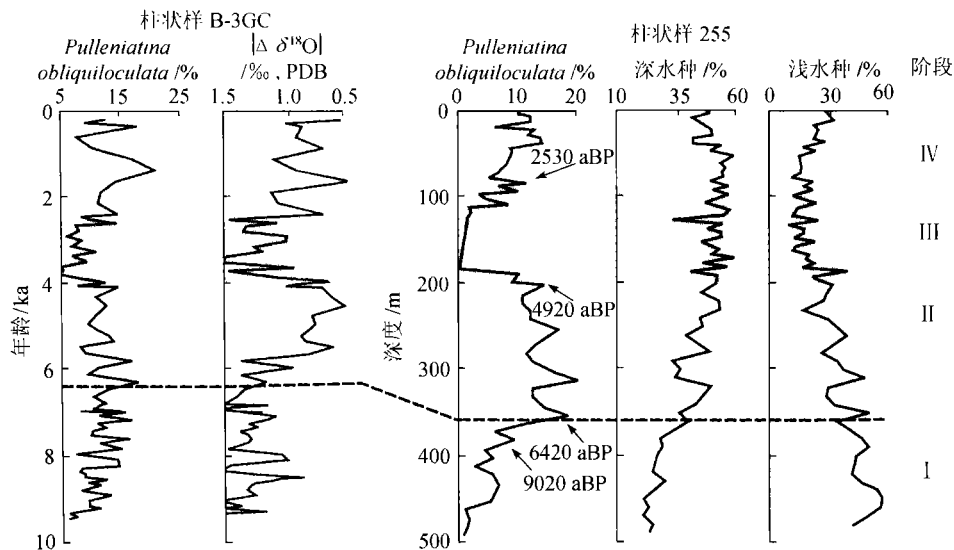


图 3 冲绳海槽南部 255 柱状样中温跃层的变化(据文献[8]修改)与 B-3GC 柱状样的对比
阴影区表示浅温跃层阶段, 也指示 *P. obliquiloculata* 低值带。虚线至阴影区为 *P. obliquiloculata* 高值带

也相应地增高。这一现象在冲绳海槽南部的 255 柱状样中也有所体现(图 3): 在 6 400 a 之前和 4 000~2 000 aBP 温跃层比较浅的时期, *P. obliquiloculata* 含量较低, 指示海水温度偏低; 而在其他两个阶段, 水温较高^[17-19]。

黑潮的变迁在很大程度上影响了冲绳海槽中温跃层深度和表层海水温度的变化。如前所述, 黑潮及其分支具有高温、高盐、流速快的特性^[10-12]。当黑潮存在而且强度较大的时候, 受

其影响冲绳海槽表层海水温度较高,温跃层相对较深;反之,表层海水温度较低,温跃层较浅。根据化石组合以及沉积作用等方面的研究发现,末次盛冰期以来,黑潮的主流轴或强度发生过多次明显的变化:末次盛冰期时,冲绳海槽中的黑潮强度大幅度下降,主流轴甚至可能东移退出了冲绳海槽,推测沿岸水可能成为控制冲绳海槽表层水的主要因素之一,从而导致表层海水温度下降,温跃层变浅;大约 6 400 a 之后,黑潮主流轴重新进入冲绳海槽^[8, 17~19, 21, 22],强度显著增大,温跃层相应加深;到 4 000~2 000 aBP 期间,由于黑潮减弱或主流轴东移^[17],温跃层变浅。本次工作也从温跃层这一角度上支持了以上末次冰期以来黑潮变迁的观点。此外,在 8 200~6 400 aBP 期间,尽管由于沉积作用的原因,目前只在 B-3GC 柱状样分辨出温跃层逐渐加深、表层水温逐渐增高的过程,这仍说明在此期间,冲绳海槽中黑潮的强度可能逐渐增大,只是在 6 400 aBP 之后,由于黑潮主流轴进入冲绳海槽等原因而导致黑潮显著增强。

参 考 文 献

- 1 叶笃正,曾庆存,郭裕福,主编.当代气候研究.北京:气象出版社,1991
- 2 Chen M -T, Prell W L. Faunal distribution patterns of planktonic foraminiferas in surface sediments of the low-latitude Pacific. *Paleo Paleo Paleo*, 1995, 137: 55~77
- 3 Ravelo A C, Fairbanks R G, Philander G. Reconstructing tropical Atlantic hydrography using planktonic foraminifera and ocean model. *Paleoceanography*, 1990, 5(5): 409~431
- 4 Ravelo A C, Fairbanks R G. Oxygen isotopic composition of multiple species of planktonic foraminifera: recorders of the modern photic zone temperature gradient. *Paleoceanography*, 1992, 7(6): 815~831
- 5 Andreason D J, Ravelo A C. Tropical Pacific Ocean thermocline depth reconstructions for the last glacial maximum. *Paleoceanography*, 1997, 12(3): 395~413
- 6 Schmit H, Berger W H, Bickert H, et al. Quaternary carbon isotope records of pelagic foraminifera: Site 806, Ontong Java Plateau. *Proc ODP, Sci Result*, 1993, 130: 397~409
- 7 成鑫荣,汪品先.运用超微化石探索晚第四纪冲绳海槽上层海水垂向结构的变化. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(2): 137~141
- 8 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. *海洋学报*, 1997, 19(4): 90~98
- 9 王吉良.全新世冲绳海槽北部温跃层深度的变化. *第四纪研究*, 1998, 3: 281~287
- 10 金翔龙,主编.东海地质.北京:海洋出版社,1992
- 11 国家海洋局第一海洋研究所,第二海洋研究所.黑潮调查研究论文集.北京:海洋出版社,1987. 1~345
- 12 国家海洋局科技司.黑潮调查研究论文集(四).北京:海洋出版社,1992. 1~332
- 13 Xu X, Oda M. Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36 000 years. *Marine Geology*, 1999, 156: 285~304
- 14 Bé A W H. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: Ramssy A T S, ed. *Oceanic Micropaleontology*. London: Academic Press, 1997. 1~100
- 15 Hemleben C, Spindler M, Anderson O R. *Modern planktonic foraminifera*. New York: Springer-Verlag, 1989. 220~257
- 16 Weller R A. Mixing in the upper ocean. *Nature*, 1987, 328(2): 13~14
- 17 翦知湣,李保华,Pflanmann U,等.西太平洋晚全新世变冷事件. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(5): 461~466
- 18 Li B, Jian Z, Wang P, et al. *Pulleniatina obliquiloculata* as a paleoceanographic indicator in the South Okinawa Trough during the last 20 000 years. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32: 59~69
- 19 汪品先,等.十五万年来的南海.上海:同济大学出版社,1995. 1~184
- 20 Machida H. Recent progress in tephre studies in Japan. *第四纪研究(日本)*, 1991, 3(23): 141~151
- 21 翦知湣, Saito Yoshiki, 汪品先,等.黑潮主流轴近 2 万年来的位移. *科学通报*, 1998, 43(5): 532~536
- 22 Sheih Y T, Chen M P. The ancient Kuroshio Current in the Okinawa Trough during the Holocene. *Acta Oceanography Taiwanica*, 1995, 34(4): 73~80