

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2016. 01. 012

海洋古温标研究新进展及其在冲绳海槽区的应用

赵京涛^{1,2}, 李军^{1,2}, 窦衍光^{1,2}, 王利波^{1,2}, 白凤龙^{1,2}, 胡邦琦^{1,2}, 邹亮^{1,2}

(1. 国土资源部 海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

摘要:表层海水古温度的重建是古海洋学研究的重要内容之一,其反演的表层洋流的演化对全球气候变化研究意义重大。近年来,3种新兴的地球化学温度指标(Mg/Ca、 U_{37}^K 和 TEX_{86})应用十分广泛,但也是各有利弊。在冲绳海槽地区,不同古温标的应用结果差异较大,机理有待进一步探讨。从全球角度总结了3种古温标的适用性及优缺点,剖析了具体应用过程中不同古温标的区域性和时间性差异。重点综述了冲绳海槽区古温标研究历史和研究现状,强调了区域性古温标适用性研究的重要性,提出了该区域末次冰消期以来古温度演化机理研究面临的挑战。

关键词:古温标; Mg/Ca; U_{37}^K ; TEX_{86} ; 冲绳海槽

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2016)01-0123-10

全球温盐环流因其在高低纬热传输过程中的重要作用,在全球气候变化中扮演着与大气环流相当的重要角色。温盐环流的稳定性、变率以及与之相联系的极向热输送,对局地 and 全球气候产生明显影响。作为温盐环流的一个分支—表层洋流的演化在全球气候变化中的作用不言而喻。不同环境特征下海水古温度的精确估算是表层洋流演化研究的一个基本内容,其结果也是气候模型的一个重要边界条件。多年以来,诸多科学家致力于海水古温度的重建工作,用到的载体也由早期的无机类(海洋生物壳体)逐步发展至现今的有机类(脂类)。

最早的古温度恢复指标是浮游有孔虫壳体的氧同位素组成,但是,该指标受全球冰体积变化^[1]、壳体保存情况^[2]、种间生命效应和海水化学组成(碳酸根离子浓度和海水盐度)^[3]等诸多因素影响。基于有孔虫属种组合变化的转换函数法是另一种早期的海水温度估算方法^[4],但易受生物壳体的选择性溶蚀和现代类比技术的限制^[5],且人为因素影响明显,难以获得精确的海水温度信息。

随着新兴的地球化学温度指标(如 Mg/Ca、 U_{37}^K 和 TEX_{86} 等)的兴起和应用,全球不同海区古温度重建工作开展的如火如荼。本文首先总结了上述3种古温标的适应性及优缺点,进而阐述了与其生物载

体有关的不同古温标间的区域性和时间性差异,然后分析了冲绳海槽区不同古温标研究和应用现状,最后提出了末次冰消期以来冲绳海槽区古温度演化机理研究所面临的新的挑战,同时,进一步强调了区域性古温标适用性研究的重要性。

1 三种古温标的特性及优缺点

1.1 Mg/Ca

浮游有孔虫壳体的 Mg/Ca 是一种有效的无机地球化学温度指标^[6],虽然该指标同样受海水元素和化学组成^[1,7]以及与有孔虫相关的种间生命效应和壳体溶蚀^[8,9]等因素的影响,但不同海区的可靠性验证结果表明,生活于不同水深有孔虫壳体的 Mg/Ca 可以反映表层、混合层和温跃层水温,同时,针对不同的影响因素建立了不同属种的温度校正公式^[10-14]。同一表层属种壳体的 Mg/Ca 和 $\delta^{18}O$ 的配对使用,在去除全球冰体积效应影响后,可以提取当地海水的氧同位素信息,进而反映海水盐度变化,为区域性季风降雨^[15-16]、陆源淡水输入^[17]和洋流演化^[18-19]等提供参考。不同生活水深的有孔虫(例如表层种和温跃层种)壳体 Mg/Ca 转换的温度对比,可以提供上层水体变动记录^[20]。

1.2 U_{37}^K

相比于上述无机古温标,有机古温标的主要优点在于其受海水元素和同位素组成的影响较小。最

基金项目: 国家自然科学基金项目(41406074, 40906033, 41106058)

作者简介: 赵京涛(1980—),男,主要从事海洋地质研究。
Email: zhaojingtao113@163.com

收稿日期: 2015-04-10. **改回日期:** 2015-05-08. 张光威编辑

早应用的有机古温标是基于海洋颗石藻产生的长链不饱和烯酮的 U_{37}^k , 该指标受藻类生理学因子影响, 例如营养、光照限制和成岩作用等^[21-22]。自从 Brassell 等^[23]发现颗石藻 *Emiliania huxleyi* 长链烯酮化合物不饱和度与海水表层温度存在显著相关性以后, 前人分别从室内生物培养、悬浮颗粒物、沉积物捕获器样品和深海岩心的表层样品等方面对二者关系进行了大量研究, 建立了 U_{37}^k 与海水表层温度的关系式, 其中 Prahl 和 Wakeham^[24]的 *E. huxleyi* 培养公式和 Müller 等^[25]对现代海洋 370 个表层沉积物分析建立的关系式非常相近, 也最为常用。据此重建了全球不同时期、区域的表层海水温度变化^[26-29], 成为古温度重建中非常重要的指标之一。

1.3 TEX₈₆

TEX₈₆是一种新兴的有机古温标, 该指标是基于海洋浮游型奇古菌产生的甘油二烷基甘油四醚化合物(GDGTs, 即 Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers)的四醚指数建立^[30-31]。相对于 U_{37}^k , TEX₈₆可以应用于不饱和烯酮产量极少的高温海区(大于 28 °C)和极地区域, 年代可以超过 145 Ma^[32-33]。Wuchter 等^[34]的培养实验表明, 海洋古菌产生的 GDGTs 分子中, 五元环的数目主要受温度的控制, 随后, 他们在 11 个海域的现代水体调查分析表明, 在时间上, 表层水体中的海洋古菌在冬季和春季丰度较高, 在空间上, 海洋古菌主要在 100 m 以下水体出现高丰度, 透光带以下(150~1 500 m)样品 TEX₈₆指标仍与表层水体温度相关性较强^[35]。紧接着, 上述研究者在东北太平洋和阿拉伯海再次印证了深部水体和表层沉积物中的 TEX₈₆指标能够很好的记录表层海水温度^[36]。Kim 等^[31]整合了全球具有代表性的 426 个表层沉积物样品数据对前人的公式进行修正, 提出了在 -3~30 °C 范围内分别适用于低温(<15 °C,)和高温(>15 °C,)环境的校正公式。

TEX₈₆古温标基于古菌生物标志物比值产生, 不受表层水体营养状况、盐度等参数的影响, 而且受成岩作用影响也相对较小, 能应用于更广泛的区域和更古老的地层中, 是一种极具应用潜力的温度指标^[37]。但是, 该指标在实际应用中需要排除陆源 GDGTs 的影响^[36], 例如 Herfort 等^[38]在对北海南部现代水体调查和表层沉积物的研究中发现, 该海区 TEX₈₆温度较高的站位与附近莱茵河高的陆源有机质输入有关, 从而指出在近岸陆源输入影响明显的海区, TEX₈₆指标需要与 BIT(Branched and Iso-

prenoid Tetraether)指标结合使用, 以排除陆源有机质输入的影响。

另外, TEX₈₆指标的载体—海洋古菌的生活水温范围较广^[39-40], 导致了该指标实际应用的复杂化^[41]。例如南非西部岸外本格格拉上升流区的研究结果显示, TEX₈₆温度低于 U_{37}^k 指示的年均 SST, 这一差异反映了产于次表层水体的古菌在上升流驱动下升至表层水体, 表层 TEX₈₆温度实际代表次表层水温^[42]。Lopes dos Santos 等^[43]在东热带大西洋同样发现了该海区 TEX₈₆温度低于 U_{37}^k 指示的年均海表水温, 指示次表层海水温度, 并利用二者差值反演了热带海区上层水体结构演化。Jia 等^[44]对南中国海表层沉积物中 TEX₈₆和 U_{37}^k 对比研究发现, 基于 Kim 等^[45]公式得出的 TEX₈₆温度高于实际年均表层水温和 U_{37}^k 温度, TEX₈₆与实际年均表层水温相关性较差($r^2=0.44$), 与 30~125 m 的次表层水温相关性较好($r^2=0.69$), 从而对前人公式进行修正, 建立了南中国海区 TEX₈₆次表层温度公式。南中国海北部长时间尺度(35.6 万年)TEX₈₆和 U_{37}^k 的对比研究表明, U_{37}^k 指示表层海水温度, TEX₈₆指标反映的是次表层水温, 两者间的差值反映了该区混合层厚度变化, 进而重建了东亚冬季风演化历史^[46]。

2 三种古温标应用的区域性和时间性差异

近年来, 不同海区基于不同指标开展的海水古温度演化研究表明, 无机(Mg/Ca)和有机(U_{37}^k 和 TEX₈₆)古温标之间存在系统差异, 尤其是有机古温标因其生物载体的生活空间范围和繁盛季节等因素影响, 在实际应用中出现了与区域环境特征(大气环流、洋流、区域上升流和陆源输入等)相关的多种解释机制。

Huguet 等^[47]在西阿拉伯海的研究中发现, 沉积岩心顶部 TEX₈₆和 U_{37}^k 温度均与该区域年均海表水温一致, 但在 2.3 万年以来的地质记录中, TEX₈₆温度较 U_{37}^k 温度变化幅度更大, 并且显示出南半球气候变化趋势, 从而推测两种指标的载体生活季节的差异是主要因素, 前者受控于南半球相关的西南季风, 后者与北半球相关的东北季风相关。鄂霍次克海的沉积样品测试结果表明, 该海区 TEX₈₆指标反映了当地夏季表层温度, U_{37}^k 指标则代表了秋季表层温度^[48]。意大利南部陆架区表层沉积物样品的测试结果表明, 该海区 U_{37}^k 指示冬春季节颗石藻繁盛时期的海水表层温度, TEX₈₆在近岸浅水区具有

和 U_{37}^k 相同的指示意义,而在大部分远岸站位则与夏季表层温度对应^[49]。Richey 等^[50]在墨西哥湾开展十年际分辨率的古温度研究中发现,该区 TEX_{86} 指标携带混合层上部水体夏季海表温度信号,表层浮游有孔虫 Mg/Ca 指标则更倾向于代表年均海表温度,海洋古菌和 *Globigerinoides ruber* 生长季节和深度分布的不同是两指标间差异的主要原因。南中国海北部 MD97-2146 孔的研究结果表明,岩心顶部 TEX_{86} 温度与当地夏季表层温度吻合,与 U_{37}^k 温度相比, TEX_{86} 温度更能体现 2.8 万年以来冰期-间冰期波动,且与陆地石笋 $\delta^{18}O$ 记录的冰消期过程对应良好,反映了该区域冰消期千年尺度上大气和海洋环境的重组^[51]。Wang 等^[52]利用浮游有孔虫 Mg/Ca 和 U_{37}^k 指标重建了西南印度洋 3.7 万年以来的古温度变化,认为浮游有孔虫 Mg/Ca 指标反映的是冬季海表温度,且追踪了南极冰消期变暖过程, U_{37}^k 指标反映了夏季 SST,与代表北大西洋冰消期过程的大西洋径向翻转流对应良好,进而得出了该区域不同季节海水表层温度变化分别受控于南北两个半球气候变化的结论。

在冰期-间冰期古环境对比研究中,气候条件的剧烈转化造成颗石藻类和古菌类载体生长和分布之间明显的时空差异,使这两种指标在恢复古温度过程中存在多元化解释。东地中海尼罗河三角洲地区 2.7 万年以来基于两种有机指标的温度重建结果表明,末次冰期两种古温度吻合良好,都能显示北半球降温事件在该海区的印记,而进入全新世,现代尼罗河流域的发育导致当地生态系统改变,古菌类更适应于夏季繁盛,颗石藻类易于在冬季/早春繁盛,从而出现 TEX_{86} 温度高于 U_{37}^k 温度^[53]。Huguet 等^[54]重建的地中海西部 13~24.5 ka 的古水温记录表明, TEX_{86} 和 U_{37}^k 温度都能反映该海区冰期-间冰期温度变化,但前者在较暖的间冰段明显高于后者,表明 TEX_{86} 的载体海洋古菌的生活季节更倾向于温暖的夏季。Lopes dos Santos 等^[55]在澳大利亚东南部墨累河峡谷岸外开展的单孔多指标对比表明,该区域末两次冰期旋回中 U_{37}^k 代表年均海表水温, TEX_{86} 则代表南方冬季表层温度,冰消期两者温度差异减小则可能是古菌生长季节变化、该区域季节性海表水温差异减小或是影响冬季表层水温的 Leeuwin 流减弱。

综合前人研究结果可以看出,不同海区由于气候及水动力条件的差异,在应用多指标反演古水温演化过程中出现时间(季节,冰期/间冰期)和空间(水深,离岸远近)上的异同,开展典型海区不同温标

间的对比和应用研究将有助于我们更充分的理解区域海洋温度的演变,以及与此相关的大气环流、洋流和陆海相互作用等古海洋学变化,为全球气候变化研究提供基础数据。

3 冲绳海槽区古温标的研究和应用

冲绳海槽地区海水古温度研究始于十九世纪末,历经十多年的积累,研究站位从北往南已有十余个,古温度替代指标从开始的浮游有孔虫转换函数发展为现今浮游有孔虫 Mg/Ca 、 U_{37}^k 和 TEX_{86} ,时间序列已拓展至 150 kaBP(表 1、图 1)。冲绳海槽中部(A7 孔)浮游有孔虫 Mg/Ca 记录揭示了该海区冰消期海水表层温度与北大西洋气候和东亚季风记录变动的关联性和一致性^[56]。临近岩心(Z14-6 孔、MD012404 孔和 DGKS9604 孔)有孔虫转换函数和 U_{37}^k 记录同样证明了上述关联性,并且时间尺度拓展至 MIS6 期^[57-59]。海槽北部相邻岩心(MD98-2195 和 KY07-04-01 孔)有孔虫 Mg/Ca 、 U_{37}^k 和 TEX_{86} 3 种古温标的对比研究发现,该海域冰消期变暖过程一方面与北半球高纬区气候对应,但同时受长江冲淡水影响明显^[17,60-61]。由图 2 可以进一步看出,LGM 以来冲绳海槽北部 3 种古温标反演的古温度变化存在系统差异, Mg/Ca 计算得出的古温度整体偏高, U_{37}^k 古温度居中,而 TEX_{86} 古温度最低,但其变化阶段性更加明显。

但是,冲绳海槽南部恢复的古温度记录似乎不符合上述理论。例如海槽南部(ODP 1202B 孔) U_{37}^k 记录表明该海区冰消期变暖落后于格陵兰冰体积和陆地季风变动^[64],从沉积学角度看,该岩心位置靠近台湾东北部的高沉积速率区^[67],极高的沉积速率对古温标的应用产生影响。作者利用青岛海洋地质研究所 2012 年在冲绳海槽南部获取的柱状岩心样品进行了不同古温标的测试,初步结果见图 1(OKT-3 孔,待发表数据)。1.8 万年以来 OKT-3 孔基于浮游有孔虫 *G. ruber* Mg/Ca 、 U_{37}^k 和 TEX_{86} 建立的 3 条古温度曲线变化趋势近乎一致,且绝对值相差无几,共同显示了与北半球高纬区气候相关的演化规律。岩心顶部 3 种指标恢复的温度介于 27.4~28.3 °C 之间,均高于岩心所在位置年均海表水温(25.4 °C),与夏季海表水温(28.7 °C)接近。这一结果明显区别于海槽北部 KY07-04-01 和 MD98-2195 岩心已有的单孔对比研究成果(图 2),说明冲绳海槽区域上述 3 种古温标的具体指示意义仍需进一步确定。

研究者们利用南海转换方程计算的冲绳海槽中部和北部沉积岩心顶部 *G. ruber* 壳体 Mg/Ca 温度数据,与现代亚热带西北太平洋地区 *G. ruber* 繁盛期(夏季)的海表水温一致,从而认为该海区 *G. ruber* 壳体 Mg/Ca 温度代表夏季海水表层温度^[17,56,61]。海槽中部 PN 断面沉积捕获实验表明颗石藻 *Emiliania huxleyi* 在 4—5 月的春季勃发^[68],海槽北部 2008 年春季悬浮体颗粒有机物调查研究表明,5 月份不饱和烯酮含量在 5~20 m 水深最高, U_{37}^k 与该层海水温度一致^[69]。另外,海槽北部 KY07-04-01 岩心顶部样品恢复的 U_{37}^k 温度值与现代该孔附近 5 月海表水温一致^[70]。由此,研究者认为基于长链不饱和烯酮的 U_{37}^k 温度在海槽地区主要代表春季海水表层温度^[61]。Nakanishi 等 2008 年春季开展的海槽北部颗粒有机物调查,同时发现海槽区站位 300 m 以下层位 TEX₈₆ 温度基本恒定,且

与表层或近表层水体温度一致^[69]。海槽北部 KY07-04-01 和 MD98-2195 岩心顶部测试结果均表明 TEX₈₆ 温度与年均海水表层温度一致^[61,70]。

基于上述冲绳海槽地区不同温度指标的调查研究和应用情况可以看出:(1)现代水体调查工作较少,不同温标具体指示意义(水深、季节等)研究不多,前人研究区主要集中在海槽北部和中部,南部海域几近空白;(2)以海底表层沉积物为基础的区域性古温标校正公式尚未建立;(3)单孔多指标对比研究工作缺乏,仅北部区域有过报道,且不同历史时期指标间差异机制解释尚不明确。

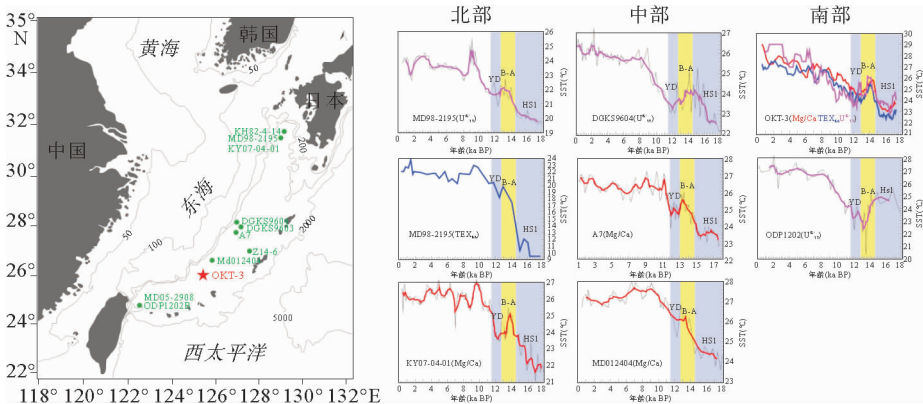
4 讨论和展望

近年来,随着地球化学温度指标的推广和应用,末次冰期以来中低纬度海区温度变化的受控机制研

表 1 冲绳海槽地区已有海水古温度研究站位和相关信息(以研究年代为序)

Table 1 Sites for Sea surface temperature (SST) studies and related information in the Okinawa Trough (ordered by ages)

站位号	北纬	东经	水深/m	岩心长/m	岩心年龄/kaBP	温度指标	参考文献
KH82-4-14	31.74	129.035	740	10.35	36	转换函数	[62]
DGKS9603	28.147 8	127.270 6	1 100	5.92	45	转换函数	[63]
ODP1202B	24.804	122.5	1274	110	28	U_{37}^k	[64]
A7	27.82	126.978 3	1 264	4.5	18	Mg/Ca	[56]
MD98-2195	31.638 8	128.943 8	746	33.65	42	U_{37}^k	[60]
Z14-6	27.1167	127.45	739	8.96	150	U_{37}^k	[57]
MD012404	26.647 3	125.812 5	1 397	43.67	40	转换函数	[58]
DGKS9604	28.277 3	127.023 8	766	10.76	37	U_{37}^k	[59]
MD012404	26.647 3	125.812 5	1 397	22	40	Mg/Ca	[65]
KY07-04-01	31.639 2	128.944	758	14.1	18	Mg/Ca	[17]
ODP1202B	24.804	122.5	1 274	10	2.7	TEX ₈₆	[66]
MD98-2195	31.638 8	128.943 8	746	33.65	42	TEX ₈₆	[61]



图中 YD:新仙女事件;B-A:Bølling-Allerød 暖期;HS1:Henrich Stadial 1

图 1 冲绳海槽已有海水温度研究站位和不同指标恢复的古温度(参考文献见表 1)

Fig. 1 Sites for SST studies and SST records recovered by different proxies (references showed in Table 1)

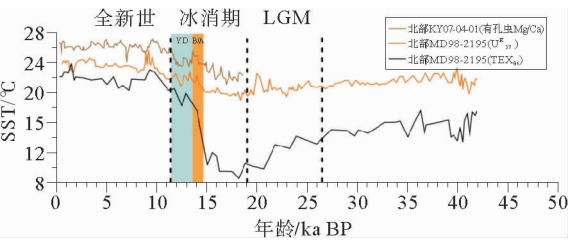


图 2 冲绳海槽北部临近岩心不同指标反演的末次冰期以来海水温度变化(参考文献见表 1)

Fig. 2 SST records based on different proxies in the northern Okinawa Trough since the last glaciation (references showed in Table 1)

究也出现了新的突破,以往的以冰体积变化为主导的北半球高纬区气候控制理论逐渐被南北半球协同调谐理论所代替。例如,Chen 等^[65]通过对比海槽中部 MD012404 孔和 A7 孔^[56]浮游有孔虫 *G. ruber* Mg/Ca 反演的 4 万年以来表层海水温度变化结果,发现了末次冰期以来,该海区数个千年尺度表层海水温度升高事件都与北大西洋降温事件(除 YD 事件)和南极变暖事件对应,该海区冰消期呈现出类似于南极式的两步升温过程,从而引发了北大西洋式“大气过程”和南极式“海洋过程”对冲绳海槽黑潮流经区域表层海水温度竞争控制的讨论。其实早在 2008 年 Chang 等^[58]在巴西暖流区的研究中就已经提出,由于巴西暖流的热传输作用引起热带大西洋在北半球降温事件中表层海水温度升高。

Lea 等^[10]基于有孔虫 Mg/Ca 建立的西赤道太平洋暖池区表层海水温度记录显示,热带海区冰消期变暖领先于北半球冰体积变化约 3 千年,与南极冰心记录的大气 CO₂ 浓度变化一致,表明与辐射作用相关的温室气体效应是整个热带海区温度变化的主要营力。热带印度洋西部^[71]和北部^[72]岩心中浮游有孔虫 Mg/Ca 记录的冰消期变暖过程都与南极冰心温度记录吻合良好,研究者们认为形成于近南极锋带北部的亚南极模式水(SAMW)向北输移,经印度尼西亚穿越流上升至水表,影响了印度洋区表层水体温度。Mix^[73]综述前人研究进展,提出了“起因于南极底层水上涌的全球大气二氧化碳浓度升高导致热带海洋变暖,由此触发了北半球冰消期,引发海平面上升以及其他”的假设,更是将南半球高纬区气候效应提高至全球气候变化主导地位。

纵观冲绳海槽北部和中部古温度恢复曲线(图 1)不难发现,相较于 HS1 时段,对应于 YD 时段的降温幅度并不能与北半球高纬区 NGRIP 冰心(图 3a)记录的变冷幅度对等,海槽区的古温度曲线(除

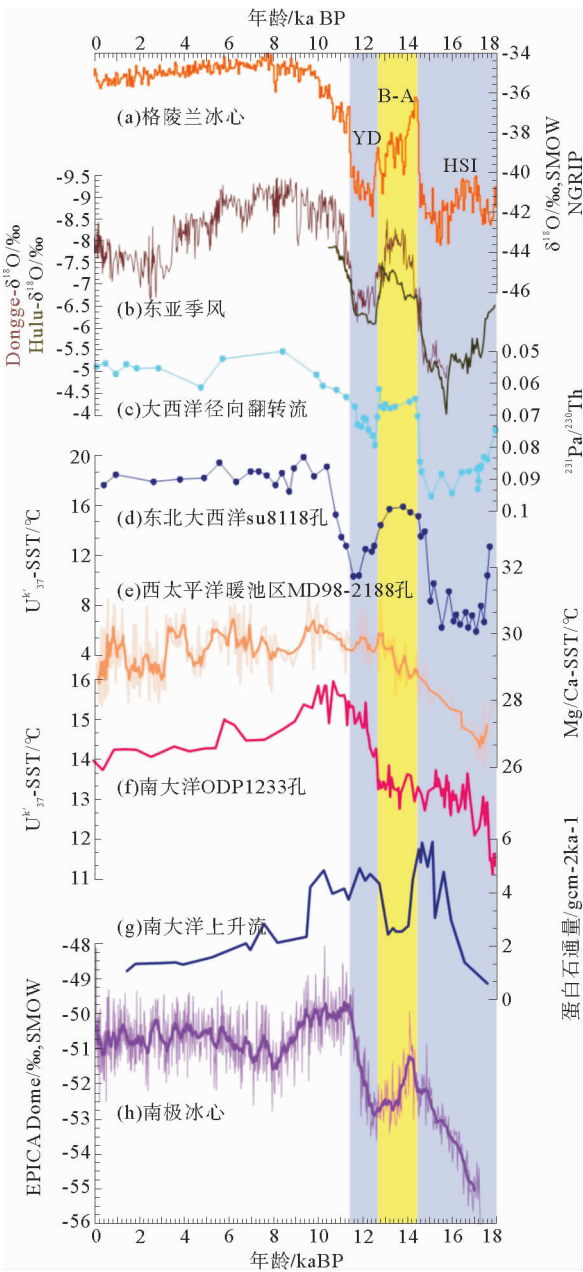


图 3 格陵兰冰心 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[75] (a); Dongge 和 Hulu 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[76,77] (b); 北大西洋 GGC5 孔 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ ^[78] (c); 东北大西洋 SU8118 孔 (38°N) U^k_{37} 温度记录^[26] (d); 西太平洋暖池区 MD98-2188 孔 (19°N) 有孔虫 Mg/Ca 温度记录^[20] (e); 南大洋高纬区 ODP1233 孔 (41°S) U^k_{37} 温度记录^[28] (f); 南大洋 TN057-13PC 孔蛋白石通量记录^[79] (g); 南极 Dome 冰心 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[5] (h)

Fig. 3 Records of (a) $\delta^{18}\text{O}$ of Greenland Ice Core^[75]; (b) $\delta^{18}\text{O}$ of Dongge and Hulu Cave^[76,77]; (c) $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ of core GGC5 in the north Pacific^[78]; (d) SST based on U^k_{37} of core SU8118 (38°N) in the northeastern Atlantic^[26]; (e) SST based on Mg/Ca of core MD98-2188 (19°N) in the western Pacific Warm Pool^[20]; (f) SST based on U^k_{37} of core ODP1233 (41°S) in the Southern Ocean^[28]; (g) Opal flux of core TN057-13PC in the Southern Ocean^[79]; (h) $\delta^{18}\text{O}$ of Dome Ice Core in Antarctica^[5]

南部 ODP1202B 孔)都能显示出类似南极两步式的冰消期升温过程。对比全球不同纬度带海洋古温度记录可以看出,北半球高纬度大西洋(图 3d)表层海水温度变化明显响应于北半球气候变化模式(图 3a 和 b)。Clark 等^[74]认为冰消期冰盖消融,大量冰融淡水注入北大西洋导致北大西洋径向翻转流(AMOC)减弱或停止(图 3c),从而引发了中低纬海区表层海水温度在 HS1 和 YD 时段降低。与北半球不同的是,南半球高纬区表层海水温度(图 3f)变化更接近于南极气候模式(图 3h)。Clark 等^[74]的全球气候模拟结果提出,南半球冰消期气候模式与 HS1 和 YD 时段南大洋上升流增强(图 3g),CO₂ 释放量增加引发的温室气体效应有关。

由图 3e 可以看出,西太平洋暖池区有孔虫 Mg/Ca 古温度记录同样显示出与南大洋高纬区(图 3f)古水温相似的变化模式,说明这种南极气候信号已经传导至西太平洋暖池区。那么,通过北赤道流与西太平洋暖池紧密相连的黑潮暖流区,其在地质历史时期的表层水体温度变化中是否也存在南极气候信息呢?南北半球高纬区气候在全球气候场里的角力在冲绳海槽区(受低纬影响的中纬度区域)如何体现呢?要深入探讨这一系列最新的科学命题,需要我们进一步明确不同古温标在冲绳海槽区的古海洋学内涵,将冲绳海槽地区上部水体温度变化过程置于全球大气和环流变化这一大环境场里进行分析研究,在其变动机制方面获得新的突破,为南北两半球间气候变化链接机制提供可靠的区域性参考数据。

参考文献 (References)

[1] Lea D W, Martin P A, Pak D K, et al. Reconstructing a 350 ky history of sea level using planktonic Mg/Ca and oxygen isotope records from a Cocos Ridge core [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21: 283-293.

[2] Pearson P N, Ditchfield P W, Singano J, et al. Warm tropical sea surface temperatures in the Late Cretaceous and Eocene epochs [J]. *Nature*, 2001, 413: 481-487.

[3] Spero H J, Bijma J, LEA D W, et al. Effect of seawater carbonate concentration on foraminiferal carbon and oxygen isotopes [J]. *Nature*, 1997, 390: 497-500.

[4] Pflaumann U, Dıprat J, Pujol C Simmax: A modern analog technique to deduce Atlantic sea surface temperatures from planktonic foraminifera in deep-sea sediments [J]. *Palaeogeography*, 1996, 11: 15-35.

[5] Barbante C, Barnola J M, Becaglis S, et al. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica

[J]. *Nature*, 2006, 444: 195-198.

[6] Nurnberg D. Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 803-814.

[7] Ferguson J E, Henderson G M, Kucera M, et al. Systematic change of foraminiferal Mg/Ca ratios across a strong salinity gradient [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 265 (1-2): 153-166.

[8] Brown S J, Elderfield H. Variations in Mg/Ca and Sr/Ca ratios of planktonic foraminifera caused by postdepositional dissolution: Evidence of shallow Mg-dependent dissolution [J]. *Paleoceanography*, 1996, 11(5): 543-551.

[9] Egons S, Sadekov A, Dedeckker P. Modulation and daily banding of Mg/Ca in tests by symbiont photosynthesis and respiration: a complication for seawater thermometry? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 225(3-4): 411-419.

[10] LEA D W, PAK D K, SPERO H J. Climate Impact of Late Quaternary Equatorial Pacific Sea Surface Temperature Variations [J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1719-1724.

[11] Dekens D S, Lea D W, Pak D K, et al. Core top calibration of Mg/Ca in tropical foraminifera: Refining paleotemperature estimation [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2002, 3(4), doi:10.1029/2001GC000200.

[12] Rosenthal Y, Lohmann G P. Accurate estimation of sea surface temperatures using dissolutioncorrected calibrations for Mg/Ca paleothermometry [J]. *Paleoceanography*, 2002, 17 (3), doi:10.1029/2001PA000749.

[13] Anand P, Elderfield H, Conte M H. Calibration of Mg/Ca thermometry in planktonic foraminifera from a sediment trap time series [J]. *Paleoceanography*, 2003, 18(2), doi:10.1029/2002PA000846.

[14] McConnell M C, Thunell R C. Calibration of the planktonic foraminiferal Mg/Ca paleothermometer: Sediment trap results from the Guaymas Basin, Gulf of California [J]. *Palaeogeography*, 2005, 20, doi:10.1029/2004PA001077.

[15] Schmidt M W, Lynch-stieglitz J. Florida Straits deglacial temperature and salinity change: Implications for tropical hydrologic cycle variability during the Younger Dryas [J]. *Paleoceanography*, 2011, 26, doi:10.1029/2011PA002157.

[16] Lo Li, Lai Yung-Hsiang, Wei Kuo-yen, et al. Persistent sea surface temperature and declined sea surface salinity in the northwestern tropical Pacific over the past 7500 years [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 234-239.

[17] Kubota Y, Kimoto K, Tada R, et al. Variations of East Asian summer monsoon since the last deglaciation based on Mg/Ca and oxygen isotope of planktic foraminifera in the northern East China Sea [J]. *Paleoceanography*, 2010, 25, doi:10.1029/2009PA001891.

[18] Linsley B K, Rosenthal Y, Oppo D W. Holocene evolution of the Indonesian throughflow and the western Pacific warm pool [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 578-583.

[19] Cleroux C, Debret M, Cortijo E, et al. High-resolution sea surface reconstructions off Cape Hatteras over the last 10 ka

- [J]. *Paleoceanography*, 2012, 27 (1), doi: 10. 1029/2011PA002184.
- [20] Dang Hao-wen, Jian Zhi-min, Bassinot F, et al. Decoupled Holocene variability in surface and thermocline water temperatures of the Indo-Pacific Warm Pool [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(1), doi:10. 1029/2011GL050154.
- [21] Hoefs M J L, Versteegh G J M, Rijpstra W I C, et al. Post-depositional oxic degradation of alkenones: Implications for the measurement of palaeo sea surface temperatures [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(1): 42-49.
- [22] Gong Chang-rui, Hollander D J. Evidence for differential degradation of alkenones under contrasting bottom water oxygen conditions: implication for paleotemperature reconstruction [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3-4): 405-411.
- [23] Brassell S, Eglinton G, MARLOWE I, et al. Molecular stratigraphy: a new tool for climatic assessment [J]. *Nature*, 1986, 320: 129-133.
- [24] Prah F G, Wakeham S G. Calibration of unsaturation patterns in long chain ketone compositions for palaeotemperature assessment [J]. *Nature*, 1987, 330: 367-369.
- [25] Muller P J, Kirst G, Ruhland G, et al. Calibration of the alkenone paleotemperature index U37K' based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N-60°S) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62 (10): 1757-1772.
- [26] Bard E, Rostek F, Turon J L, et al. Hydrological Impact of Heinrich Events in the Subtropical Northeast Atlantic [J]. *Science*, 2000, 289: 1321-1324.
- [27] Kienast M, Steinke S, Stattegger K, et al. Synchronous Tropical South China Sea SST Change and Greenland Warming During Deglaciation [J]. *Science*, 2001, 291 (5511): 2132-2134.
- [28] Kiefer T, Kienast M. Patterns of deglacial warming in the Pacific Ocean: a review with emphasis on the time interval of Heinrich event 1 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24 (7-9): 1063-1081.
- [29] Prah F G, Mix A C, Sparrow M A. Alkenone paleothermometry: Biological lessons from marine sediment records off western South America [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(1): 101-117.
- [30] Schouten S, Hopmans E C, Schefub E, et al. Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: a new tool for reconstructing ancient sea water temperatures? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 204: 265-274.
- [31] Kim J H, Van Der Meer J, Schouten S, et al. New indices and calibrations derived from the distribution of crenarchaeal isoprenoid tetraether lipids: Implications for past sea surface temperature reconstructions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(16): 4639-4654.
- [32] Schouten S, Hopmans E C, Sinninghe Damste J S. The effect of maturity and depositional redox conditions on archaeal tetraether lipid palaeothermometry [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(5): 567-571.
- [33] Kim J H, Crosta X, Michel E, et al. Impact of lateral transport on organic proxies in the Southern Ocean [J]. *Quaternary Research*, 2009, 71(2): 246-250.
- [34] Wuchter C, Schouten S, Coolien M J L, et al. Temperature-dependent variation in the distribution of tetraether membrane lipids of marine Crenarchaeota: Implications for TEX₈₆ paleothermometry [J]. *Paleoceanography*, 2004, 19 (4), doi:10. 1029/2004PA001041.
- [35] Wuchter C, Schouten S, Wakeham S G, et al. Temporal and spatial variation in tetraether membrane lipids of marine Crenarchaeota in particulate organic matter: Implications for TEX₈₆ paleothermometry [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20 (3), doi:10. 1029/2004PA001110.
- [36] Wuchter C, Schouten S, Wakeham S G, et al. Archaeal tetraether membrane lipid fluxes in the northeastern Pacific and the Arabian Sea: Implications for TEX₈₆ paleothermometry [J]. *Paleoceanography*, 2006, 21 (4), doi: 10. 1029/2006PA001279.
- [37] 赵美训, 李大伟, 邢磊. 古菌生物标志物古海水温度指标 TEX₈₆ 研究进展 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(3): 75-84. [ZHAO Mei-xun, LI Da-wei, XING Lei. Using Archaeal Biomarker Index TEX₈₆ as a Paleo-sea Surface Temperature Proxy [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2009, 29(3): 75-84.]
- [38] Herfort L, Schouten S, Boon J P, et al. Application of the TEX₈₆ temperature proxy to the southern North Sea [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(12): 1715-1726.
- [39] Karner M B, Delong E F, Karl D M. Archaeal dominance in the mesopelagic zone of the Pacific Ocean [J]. *Nature*, 2001, 409:507-510.
- [40] Herndl G J, Reinthaler T, Teira E, et al. Contribution of Archaea to Total Prokaryotic Production in the Deep Atlantic Ocean [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(5): 2303-2309.
- [41] Kim J H, Romero O E, Lohmann G, et al. Pronounced subsurface cooling of North Atlantic waters off Northwest Africa during Dansgaard-Oeschger interstadials [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 339-340: 95-102.
- [42] Lee K E, Kim J H, Wilke I, et al. A study of the alkenone, TEX₈₆, and planktonic foraminifera in the Benguela Upwelling System: Implications for past sea surface temperature estimates [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(10), doi:10. 1029/2008GC002056.
- [43] Lopes Dos Santos R A, Prange M, Castaneda I S, et al. Glacial-interglacial variability in Atlantic meridional overturning circulation and thermocline adjustments in the tropical North Atlantic [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 300 (3-4): 407-414.
- [44] Jia Guo-dong, Zhang Jie, Chen Jian-fang, et al. Archaeal tetraether lipids record subsurface water temperature in the South China Sea [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 50: 68-77.

- [45] Kim J H, Schouten S, Hopmans E C, et al. Global sediment core-top calibration of the TEX₈₆ paleothermometer in the ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(4): 1154-1173.
- [46] LI Da wei, ZHAO Mei xun, TIAN Jun, et al. Comparison and implication of TEX₈₆ and U₃₇^k temperature records over the last 356 kyr of ODP Site 1147 from the northern South China Sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 376: 213-223.
- [47] Huguët C, Kim J H, Sinninghe Damste J S, et al. Reconstruction of sea surface temperature variations in the Arabian Sea over the last 23 kyr using organic proxies (TEX₈₆ and U₃₇^k) [J]. *Paleoceanography*, 2006, 21(3), doi:10.1029/2005PA001215.
- [48] Seki O, Sakamoto T, Sakai S, et al. Large changes in seasonal sea ice distribution and productivity in the Sea of Okhotsk during the deglaciations [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2009, 10(10), doi:10.1029/2009GC002613.
- [49] Leider A, Hinrichs K U, Mollenhauer G, et al. Core-top calibration of the lipid-based U₃₇^k and TEX₈₆ temperature proxies on the southern Italian shelf (SW Adriatic Sea, Gulf of Taranto) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 300(1-2): 112-124.
- [50] Richey J N, Hollander D J, Flower B P, et al. Merging late Holocene molecular organic and foraminiferal-based geochemical records of sea surface temperature in the Gulf of Mexico [J]. *Paleoceanography*, 2011, 26(1), doi:10.1029/2010PA002000.
- [51] Shintani T, Yamamoto M, Chen M T. Paleoenvironmental changes in the northern South China Sea over the past 28 000 years: A study of TEX₈₆-derived sea surface temperatures and terrestrial biomarkers [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(6): 1221-1229.
- [52] WANG Yi-ming V, LEDUC G, REGENBERG M, et al. Northern and southern hemisphere controls on seasonal sea surface temperatures in the Indian Ocean during the last deglaciation [J]. *Paleoceanography*, 2013, 28(4): 619-632.
- [53] Castaneda I S, Schefub E, Patzold J, et al. Millennial-scale sea surface temperature changes in the eastern Mediterranean (Nile River Delta region) over the last 27,000 years [J]. *Paleoceanography*, 2010, 25(1), doi:10.1029/2009PA001740.
- [54] Huguët C, Martrat B, Grimalt J O, et al. Coherent millennial-scale patterns in U₃₇^k and TEX₈₆ temperature records during the penultimate interglacial-to-glacial cycle in the western Mediterranean [J]. *Paleoceanography*, 2011, 26(2), doi:10.1029/2010PA002048.
- [55] Lopes Dos Santos R A, Spooner M I, Barrows T T, et al. Comparison of organic (U₃₇^k, TEX₈₆^H, LDI) and faunal proxies (foraminiferal assemblages) for reconstruction of late Quaternary sea surface temperature variability from offshore southeastern Australia [J]. *Paleoceanography*, 2013, 28: 377-387.
- [56] SUN You-bin, OPPO D W, XIANG Rong, et al. Last deglaciation in the Okinawa Trough: Subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate [J]. *Paleoceanography*, 2005, doi:10.1029/2004PA001061.
- [57] ZHOU Hou-yun, LI Tie-gang, JIA Guo-dong, et al. Sea surface temperature reconstruction for the middle Okinawa Trough during the last glacial-interglacial cycle using C37 unsaturated alkenones [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 246: 440-453.
- [58] CHANG Yuan-pin, WANG Wei-lung, 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.
- [59] YU Hua, LIU Zhen-xia, BERNE S, et al. Variations in temperature and salinity of the surface water above the middle Okinawa Trough during the past 37kyr [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 281(1-2): 154-164.
- [60] IJIRI A, WANG Lue-jiang, OBA T, et al. Paleoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42,000 years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 219: 239-261.
- [61] Yamamoto M, Kishizaki M, Oba T, et al. Intense winter cooling of the surface water in the northern Okinawa Trough during the last glacial period [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69: 86-92.
- [62] XU Xue-dong, ODA M. Surface-water evolution of the eastern East China Sea during the last 36,000 years [J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1-4): 285-304.
- [63] LI Tie-gang, LIU Zhen-xia, HALL M, et al. Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 176(1): 133-146.
- [64] ZHAO Mei-xun, HUANG Chi-yue, WEI Kuo-yen. A 28,000 Year U₃₇^k Sea-Surface Temperature Record of ODP Site 1202B, the Southern Okinawa Trough [J]. *TAO*, 2005, 16(1): 45-56.
- [65] CHEN M-T, LIN X P, CHANG Y-P, et al. Dynamic millennial-scale climate changes in the northwestern Pacific over the past 40,000 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37, doi:10.1029/2010GL045202.
- [66] WU Wei-chao, TAN Wen-bing, ZHOU Li-ping, et al. Sea surface temperature variability in southern Okinawa Trough during last 2700 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39, doi:10.1029/2012GL052749.
- [67] LI Chuan-shun, JIANG Bo, LI An-chun, et al. Sedimentation rates and provenance analysis in the Southwestern Okinawa Trough since the mid-Holocene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(7): 1234-1242.
- [68] Tanaka Y. Coccolith fluxes and species assemblages at the shelf edge and in the Okinawa Trough of the East China Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2): 503-511.

[69] Nakanishi T, Yamamoto M, Irino T, et al. Distribution of glycerol dialkyl glycerol tetraethers, alkenones and polyunsaturated fatty acids in suspended particulate organic matter in the East China Sea [J]. *Journal of Oceanography*, 2012, 68: 959-970.

[70] Nakanioshi T, Yamamoto M, Tada R, et al. Centennial-scale winter monsoon variability in the northern East China Sea during the Holocene [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(9): 956-963.

[71] Kiefer T, Mccave I N, Eklderfield H. Antarctic control on tropical Indian Ocean sea surface temperature and hydrography [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(24), doi: 10.1029/2006GL027097.

[72] Naidu P D, Govil P. New evidence on the sequence of deglacial warming in the tropical Indian Ocean [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2010, 25(7): 1138-1143.

[73] MIX A C. Running hot and cold in the eastern equatorial Pacific [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25 (11-12): 1147-1149.

[74] Clark P U, Shakun J D, Baker P A, et al. Global climate evolution during the last deglaciation [J]. *PNAS*, 2012, 109 (19): E1134-E1142.

[75] Andersen K K, Azuma N, Barnola J M, et al. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period [J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 1471-51.

[76] WANG Yong-jin, CHENG Hai, EDEARDS R L, et al. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 2001, 294: 2345-2348.

[77] YUAN Dong-liang, CHENG Hai, EDWARDS R L, et al. Timing, Duration, and Transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon [J]. *Science*, 2004, 304(5670): 575-578.

[78] Mcmanus J F, Francols R, Gherardi J M, et al. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes [J]. *Nature*, 2004, 428: 834-837.

[79] Anderson R F, Ali S, Bradtmiller L I, et al. Wind-Driven Upwelling in the Southern Ocean and the Deglacial Rise in Atmospheric CO₂ [J]. *Science*, 2009, 323 (5920): 1443-1148.

**PROGRESS OF MARINE PALEO-TEMPERATURE PROXIES
AND THEIR APPLICATION IN THE OKINAWA TROUGH**

ZHAO Jingtao^{1,2}, LI Jun^{1,2}, DOU Yanguang^{1,2}, WANG Libo^{1,2},
BAI Fenglong^{1,2}, HU Bangqi^{1,2}, ZOU Liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resources,
Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Paleo-temperature reconstruction is one of the most important components in paleoceanographical studies. The evolution of surface currents driven by paleo-temperature plays an important role in global climate change. In recent years, three newly geochemical proxies (Mg/Ca, Uk'_{37} and TEX_{86}) have been widely accepted despite some defects. In the Okinawa Trough, there are obvious discrepancies among the results using different paleo-temperature proxies and the mechanism is unknown. In this paper, we summarized the applicability, merits and faults of the above three paleo-temperature proxies from a global perspective, and analyzed their temporal and spatial differences of the results. Emphases are put on the research history and status in quo of Mg/Ca, Uk'_{37} and TEX_{86} in the Okinawa Trough, the importance of regional applicability of these paleo-temperature proxies, and the future challenge of paleo-temperature evolution mechanism studies since the last deglaciation in the Okinawa Trough.

Key words: paleo-temperature proxy; Mg/Ca; Uk'_{37} ; TEX_{86} ; Okinawa Trough