

浮游有孔虫壳体 Mg/Ca 值——SST 的替代性指标

陈 萍¹, 方念乔², 胡超涌², 丁 旋²

1. 安徽理工大学资源与环境工程系, 安徽淮南 232001

2. 中国地质大学海洋地质学研究中心, 北京 100083

摘要: 通过对东北印度洋区 MD77181 和 MD81349 两支岩心中 *Globigerinoides sacculifer* 壳体极为精细的清洗和溶样后, 由 ICP-MS 测试获得了近 260 ka 以来 Mg/Ca 值. 结果表明 Mg/Ca 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化趋势较为吻合, 随温度的增加而升高. 浮游有孔虫 *G. sacculifer* 壳体 Mg/Ca 值是海洋表层水温 (SST) 良好的替代性指标. 运用函数式 $\text{Mg/Ca} = 0.4717 \exp(0.0825 * \text{SST})$ 计算表明, 包括印度洋在内的中、低纬地区, LGM 时期的 SST 与全新世的温差大于最初 CLIMAP 推测的 2 °C, 很可能达到 4 °C.

关键词: 浮游有孔虫壳; Mg/Ca 值; 海洋表层水温 (SST).

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2004)06-0697-06

收稿日期: 2004-04-28

Mg/Ca Ratio in Planktonic Foraminifera Shells: A Proxy for the SST

CHEN Ping¹, FANG Nian-qiao², HU Chao-yong², DING Xuan²

1. Department of Resources and Environment Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

2. Institute of Marine Geology and Geophysics, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: A series of Mg/Ca ratios of planktonic foraminifera shell *Globigerinoides sacculifer* in two cores in the NE Indian Ocean were measured by ICP-MS after careful cleaning and dissolving. The results show Mg/Ca ratio and $\delta^{18}\text{O}$ change accordingly. The Mg/Ca ratio increases with the rise of temperature. This study demonstrates Mg/Ca ratio of planktonic foraminifera shell may serve as a proxy for the past sea surface temperatures (SST). The formula $\text{Mg/Ca} = 0.4717 \exp(0.0825 * \text{SST})$ was applied to calculating and the result shows that in low and middle latitudes, including the NE Indian Ocean, the difference of SST between LGM and the Holocene is about 4 °C which is higher than the 2 °C estimated by CLIMAP.

Key words: planktonic foraminifera shells; Mg/Ca ratio; sea surface temperature.

重建历史时期的海洋表层水温 (SST) 是古海洋学研究的重要环节, 是了解过去全球气候与环境变化的关键. 20 世纪 50 年代 Chave 最早注意到, 现代大洋内随纬度的变化浮游有孔虫壳体中 Mg 的含量有差异, 提出生物碳酸钙壳体中 Mg 的含量是生物生长时水温的函数; 之后, Savin and Douglas (1973) 和 Bender *et al.* (1975) 的研究也表明, 一些有孔虫如 *Globigerinoides sacculifer* 钙质壳体形成时 Mg 的含量与水温密切相关; 80 年代 Cronblad and

Malmgren (1981) 通过对深海沉积的有孔虫 *Globigerina bulloides* 和 *G. inflata* 壳体中 Mg、Sr 含量的研究, 首次将 Mg/Ca、Sr/Ca 值的变化与古气候的波动联系起来; Delaney *et al.* (1985) 通过对现生种养殖、大洋表层样及深海岩心中有孔虫壳体的系统研究提出若温度上升 10 °C, Mg 含量可增加 40%~130%; 90 年代以来, 随着测试手段的更新和测试精度的提高, 利用生物壳体推测古 SST 被越来越多的学者所重视. Nürnberg *et al.* (1996) 对化石

基金项目: 国家自然科学基金项目“西太平洋—北印度洋热传输与云贵地区降雨的耦合史研究”(No. 40272074); 安徽省教育厅自然科学基金项目; 安徽理工大学博士基金项目“海洋生物沉积物化学指标的古环境意义研究”.

作者简介: 陈萍 (1958—), 女, 教授, 1982 年本科毕业于安徽理工大学, 2002 年获中国地质大学理学博士学位, 主要从事能源、环境与基础地质研究.

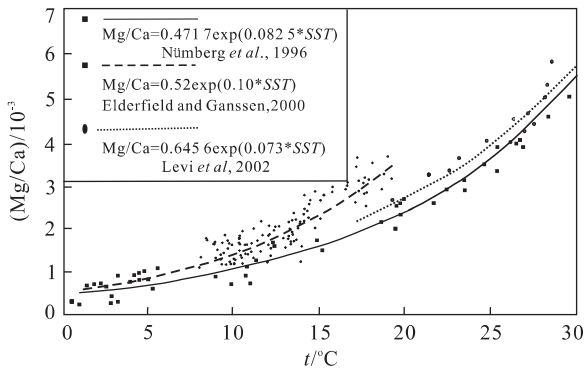


图 1 Mg/Ca 值与温度的函数关系

Fig. 1 Relation between Mg/Ca ratio and temperature

Neogloboquadrina pachyderina 和现生种 *G. sacculifer* 壳体的系统测试分析表明, Mg/Ca 值与生长时的水温具有良好的相关性, 同时给出了水温与 Mg/Ca 值的函数方程; Elderfield and Ganssen (2000) 等分别在各自的研究中得出了 Mg/Ca 与水温为指数关系的结论 (图 1)。利用 Mg/Ca 值计算 SST 方法的优越性在于: (1) 浮游有孔虫分布海域广, Mg/Ca 即时记录了壳体生长时的水温状况; (2) 测试 Mg/Ca 可与测试 $\delta^{18}\text{O}$ 用相同的有孔虫壳体, 有很好的可比性; (3) 只要样品处理仔细, 计算结果在很大程度上排除了人为因素 (陈萍, 2003)。

1 材料与方法

本次研究选取法国 Marion Dufresgna 号科考船在东北印度洋区钻得的 MD77181 和 MD81349 两支岩心为研究对象。MD77181 岩心位于 $95^{\circ}03'\text{E}$, $17^{\circ}23'\text{N}$, 水深 2 271 m, 心长 13.98 m; MD81349 岩心位于 $89^{\circ}22'\text{E}$, $1^{\circ}01'\text{S}$, 水深 2 505 m, 心长 4.3 m。

1.1 取样、挑样

MD77181 (沉积速率较高) 每隔 20 cm 取样, 计 61 个样品; MD81349 (沉积速率较低) 每隔 10 cm 取样, 计 46 个样品。每样品取 1.5~2 g 沉积物干样。将干样首先以标准微体古生物学方法处理, 经浸泡、冲洗、过筛, 获得大于 $150\ \mu\text{m}$ 的有孔虫个体, 然后在双目显微镜下, 挑出个体较大的 ($354\sim 500\ \mu\text{m}$) *G. sacculifer* 15~30 个, 约 $300\sim 800\ \mu\text{g}$ 。

1.2 洗样

由于壳体经历了相当长时间的埋藏, 其外部以机械混染、吸附和氧化膜粘帖等各种形式不可避免地受到周围环境的“污染”。测试前对壳体样品的清

洗是保证测试结果准确有效的关键。Boyle (1991) 和 Hastings *et al.* (1998) 曾对清洗方法和步骤做了详细的实验分析及讨论, 不同的清洗程度对测试结果的影响是相当大的。本次综合了他们提出的清洗方法, 主要步骤及过程如下: (1) 将有孔虫壳放入经酸沥滤的 1.5 mL 的聚丙烯离心管中, 加入去离子水 (DDI) 1 mL 浸泡 24 h 后超声波清洗 10 s, 将上层浊液用胶头吸管小心地吸掉, 如此 5 次。再加入 1 mL DDI, 用离心机离心 10 s, 将离心管底部聚积的微小颗粒用吸管小心地吸掉, 如此 3 次。此步骤目的在于将机械混染的杂质剔除; (2) 将新鲜配好的 1 mL 混合液 (16 M 的 NH_4OH , 0.25 M 的柠檬酸和 1 M 的 $\text{NH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 加入离心管中, 加盖, 在 $70\ ^{\circ}\text{C}$ 的热水浴中反应 30 min, 每隔 2 min 超声 10 s。取出离心管将上层液体吸掉。此步骤目的是以混合液的还原性除去铁锰氧化物粘帖在壳体上的“外衣”; (3) 在离心管中加入 1 mL DDI, 超声 10 s, 离心 10 s, 将上层液体用胶头吸管小心地吸掉, 如此 3 次; (4) 将 1 mL 配好的混合液 (0.15% H_2O_2 , 1 M 的 NaOH) 加入离心管中, 加盖, 在 $60\ ^{\circ}\text{C}$ 热水浴中反应 30 min, 每 10 min 超声 1 次, 每次 1 min, 将上层液体吸掉。此步骤目的是以混合液的氧化性除去壳体中可能带有的有机质等杂质; (5) 将离心管中加入 1 mL DDI, 在 $60\ ^{\circ}\text{C}$ 水浴中加热 5 min, 超声 20 s, 将上层液体吸掉, 如此 3 次再用室温的 DDI 清洗 3 次; (6) 将新鲜配好的 1 mL 0.001 N 的高纯 HNO_3 溶液加入离心管中淋洗样品, 而后将上层液体吸掉, 如此 2 次; (7) 在离心管中加入 1 mL DDI, 超声 10 s, 用离心机离心 10 s, 将上层液体用胶头吸管小心地吸掉, 如此 5

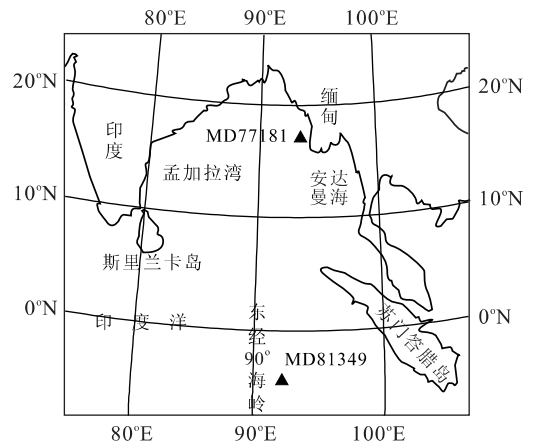


图 2 岩心位置

Fig. 2 Location of cores

次;(8)将离心管中样品在 40 °C 恒温下烘干.经清洗后的样品在双目显微镜下观察,壳体边缘清晰,纯白洁净.

1.3 溶样

将清洗后的壳体样品放入 10 mL 刻度管中,按 1 mg/10 mL 的比例,加入配制好的浓度为 0.1 M 的 HNO₃ 溶液(高纯),摇匀,溶解(溶解时间大于 12 h 以保证壳体充分溶解).

以上整个清洗、溶样阶段需要洁净和超精细的操作,既要成岩及后生作用带入壳体的元素杂质剔除,还须避免清洗过程中由于器皿、用具及环境对壳体造成的“二次污染”.

1.4 上机测试

在微量元素浓度测试的常用方法中,电感耦合等离子体质谱 ICP-MS 分析法是当今较为先进的方法,对有孔虫壳体微量元素的研究起了很大的推动作用.本次测试在中国地质大学(北京)电感耦合等离子体质谱仪实验室完成,采用英国 Micromass 公司生产的 Platform 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试,测试结果见表 1.

2 结果与讨论

MD77181 和 MD81349 两支岩心均有浮游有孔虫 *G. ruber* 壳体测得的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,与标准 SPECMAP 进行对比,结合大约 125 ka 的粉红色 *G. ruber* 绝灭事件,75 ka 的北印度洋“Toba”火山灰层事件等,可划分出较清楚的氧同位素期次(方念乔等,2001).图 3 显示 Mg/Ca 值的总体变化与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线变化趋势较为吻合,对应于冰后期和间冰期有较高值,而冰期为较低值.

不同学者的研究分别得出的有孔虫壳体中 Mg/Ca 值与其生长温度 t 变化的函数方程,在 0~30 °C 的温度范围内,几乎一致地呈指数相关(图 1).但由于样品区域及来源(现生种、表层样、岩心样)等的差异,不同学者给出的方程系略有不同.表 1 同时给出了 3 种不同方程计算出的本次研究样品 Mg/Ca 值的相应温度值.参考研究区现代 SST 值(26~28 °C), t_2 温度最为适合.此计算方程是 Nürnberg *et al.* (1996) 依据大量现生种 *G. sacculifer* 的养殖试验并综合分析了前人取自印度洋、大西洋及挪威海等区域的表层样和岩心样后获得的. t_1 和 t_3 计算值在本区均偏低,前者是 Levi *et al.* (2002) 在讨论

温度大于 20 °C 时 Mg/Ca 值与水温的关系时提出的;后者是 Hastings *et al.* (1998) 将指数方程中温度变化在 20~30 °C 时简化的直线方程.

从全球的角度来说,同时间段内(即同一冰期或间冰期内),区域的海水温度主要受纬度的控制.本次测试的 MD81349,位于赤道附近(1°01'0 S),氧同位素各期的温度一般高于同期纬度偏北的 MD77181 岩心(17°23'7 N)(图 3),这与纬度控制的全球温度变化的趋势是一致的.

MD77181 岩心的 1,5,7 期 Mg/Ca 值明显高于其他各期,其中 1 期内最高值为 4.17×10^{-3} (相应温度为 26.42 °C),平均值 3.75×10^{-3} (温度 25.12 °C).5 期内最高值为 4.10×10^{-3} (温度 26.21 °C),平均值 3.96×10^{-3} (温度 25.78 °C);而 2,4 期为 Mg/Ca 低值期,2 期内最低值为 3.17×10^{-3} (温度 23.08 °C),平均值 3.28×10^{-3} (温度 23.51 °C).4 期内最低值 3.19×10^{-3} (温度 23.16 °C),平均值 3.50×10^{-3} (温度 24.29 °C);3 期的划分属于一个小的间冰段,其 Mg/Ca 值平均为 3.59×10^{-3} (温度 24.61 °C),低于 1,5 期,仅略高于 2,4 期,若将 2~4 期看作一次大的冰期,则 Mg/Ca 值平均 3.46×10^{-3} (温度 24.19 °C)仍低于 1,5 期.从 MD77181 岩心 Mg/Ca 计算的温度来看,末次冰盛期(LGM)温度与全新世最大温差为 3.32 °C. MD81349 岩心,1 期 Mg/Ca 值明显高于其他各期次,最高值 4.79×10^{-3} (温度 28.11 °C),平均值 4.60×10^{-3} (温度 27.60 °C);5 期次之,最高值 4.62×10^{-3} (温度 27.65 °C),平均值 4.20×10^{-3} (温度 26.49 °C);2,3 期 Mg/Ca 值均较低,最低分别为 3.47×10^{-3} 和 3.55×10^{-3} (温度 24.19 和 24.47 °C),2 期内平均值 3.66×10^{-3} (温度 24.84 °C),3 期内平均值为 3.73×10^{-3} (温度 25.06 °C);4 期平均值为 4.05×10^{-3} (温度 26.05 °C).显然 3 期内平均温度不仅低于 4 期平均值,且低于 4 期最低温度,其原因可能是这一时期的赤道上升流活动使得中层较冷的水团上涌,降低了表层水的温度.从 MD81349 岩心计算的水温来看,末次冰期最盛期(LGM)的温度与全新世最大温差为 3.82 °C.

CLIMAP(1981)重建了热带大洋 LGM 时期 SST 的分布特征,结果表明热带太平洋和印度洋平均降温 2 °C 或更小.而如前所述本次获得的最大温差为 3.32~3.82 °C,显然与其结论不符.但 Webster and Stretten (1978) 和 Rind and Peteet (1985)

表 1 Mg/Ca 值与古海洋表层水温

Table 1 Mg/Ca ratios and the sea surface temperatures

样品号	深度/cm	(Mg/Ca)/10 ⁻³	t ₁ /C	t ₂ /C	t ₃ /C	样品号	深度/cm	(Mg/Ca)/10 ⁻³	t ₁ /C	t ₂ /C	t ₃ /C
181-61	7	4.17	25.56	26.42	25.85	181-6	1268	3.99	24.96	25.89	25.33
181-60	16	3.57	23.41	24.52	24.10	181-5	1298	4.22	25.72	26.56	25.99
181-59	47	3.37	22.62	23.82	23.51	181-4	1328	3.93	24.73	25.69	25.14
181-58	58	3.88	24.58	25.55	25.01	181-3	1348	3.60	23.53	24.62	24.18
181-57	82	3.39	22.72	23.90	23.58	181-2	1368	4.62	26.96	27.66	27.15
181-55	127	3.17	21.78	23.08	22.94	181-1	1388	3.67	23.81	24.87	24.40
181-54	140	3.18	21.84	23.13	22.98	349-1	1	4.79	27.46	28.11	27.65
181-53	162	3.38	22.67	23.86	23.55	349-2	11	4.37	26.18	26.97	26.41
181-52	182	3.48	23.06	24.21	23.83	349-3	21	4.63	26.99	27.68	27.18
181-51	202	3.15	21.69	23.00	22.87	349-4	31	3.71	23.95	25.00	24.51
181-50	222	3.32	22.43	23.65	23.38	349-5	41	3.51	23.20	24.33	23.93
181-49	252	3.77	24.16	25.18	24.68	349-6	51	3.96	24.83	25.78	25.22
181-56	262	3.45	22.94	24.11	23.75	349-7	61	3.47	23.04	24.19	23.82
181-48	282	3.33	22.48	23.69	23.41	349-8	71	3.84	24.43	25.42	24.89
181-47	305	3.31	22.38	23.60	23.34	349-9	81	3.55	23.36	24.47	24.05
181-46	330	3.75	24.11	25.13	24.63	349-10	91	3.67	23.80	24.87	24.40
181-45	352	3.64	23.68	24.76	24.30	349-11	101	3.84	24.44	25.43	24.90
181-44	371	3.90	24.64	25.61	25.06	349-12	111	4.31	26.01	26.82	26.26
181-43	420	3.57	23.43	24.54	24.11	349-13	116	3.78	24.21	25.23	24.72
181-42	441	3.74	24.08	25.11	24.61	349-14	131	3.97	24.90	25.83	25.28
181-41	456	3.43	22.86	24.04	23.69	349-15	141	4.27	25.89	26.71	26.14
181-40	466	3.54	23.30	24.42	24.01	349-16	153	3.85	24.45	25.44	24.91
181-39	476	3.72	23.98	25.02	24.53	349-17	163	4.10	25.32	26.21	25.64
181-38	496	3.53	23.26	24.38	23.98	349-18	173	4.18	25.60	26.46	25.89
181-37	516	4.21	25.67	26.52	25.95	349-19	183	4.62	26.95	27.65	27.14
181-36	545	3.74	24.05	25.09	24.59	349-20	188	4.37	26.21	26.99	26.43
181-35	556	3.71	23.96	25.00	24.52	349-21	193	4.41	26.32	27.10	26.54
181-33	595	3.75	24.11	25.13	24.63	349-22	203	3.98	24.91	25.85	25.29
181-32	606	3.49	23.10	24.25	23.86	349-23	218	4.45	26.45	27.21	26.66
181-31	626	3.83	24.39	25.39	24.86	349-46	223	3.78	24.20	25.22	24.71
181-30	646	3.24	22.10	23.36	23.15	349-24	233	3.85	24.45	25.44	24.91
181-29	675	3.19	21.87	23.16	23.00	349-25	238	3.72	24.00	25.04	24.55
181-28	752	4.10	25.33	26.22	25.65	349-26	248	3.68	23.83	24.89	24.42
181-27	760	3.87	24.52	25.50	24.97	349-42	253	4.17	25.57	26.43	25.85
181-26	770	3.77	24.17	25.19	24.68	349-27	258	3.64	23.68	24.76	24.30
181-25	789	4.10	25.32	26.21	25.64	349-41	268	3.66	23.77	24.83	24.36
181-24	802	3.95	24.82	25.76	25.21	349-28	283	4.04	25.13	26.04	25.47
181-23	819	3.88	24.55	25.53	24.99	349-29	288	3.70	23.91	24.96	24.48
181-22	872	4.04	25.11	26.02	25.46	349-45	293	3.72	24.00	25.04	24.55
81-20	882	3.89	24.61	25.58	25.04	349-30	295	4.62	26.95	27.66	27.15
181-18	893	4.17	25.56	26.42	25.85	349-31	302	4.18	25.58	26.44	25.86
181-17	907	3.75	24.09	25.12	24.62	349-32	307	3.95	24.82	25.77	25.21
181-16	946	4.18	25.59	26.45	25.88	349-33	315	3.73	24.04	25.08	24.58
181-15	996	4.05	25.14	26.05	25.49	349-34	322	4.08	25.24	26.14	25.57
181-14	1027	3.68	23.85	24.91	24.43	349-35	332	4.22	25.72	26.56	25.99
181-13	1041	3.80	24.29	25.30	24.78	349-36	342	3.62	23.61	24.70	24.25
181-12	1087	3.57	23.44	24.54	24.11	349-37	352	3.91	24.68	25.64	25.10
181-11	1097	3.90	24.65	25.62	25.07	349-38	362	4.03	25.09	26.00	25.44
181-10	1147	3.69	23.89	24.95	24.46	349-39	370	4.18	25.60	26.46	25.88
181-9	1208	4.21	25.69	26.53	25.96	349-40	382	3.93	24.74	25.70	25.15
181-8	1228	3.92	24.71	25.67	25.12	349-44	387	4.31	25.99	26.80	26.24
181-7	1238	4.31	26.01	26.82	26.26	349-43	392	4.00	24.99	25.91	25.35

注: Mg/Ca=0.6456 exp(0.073 * t₁); Mg/Ca=0.4717 exp(0.0825 * t₂); t₃=2.898 * (Mg/Ca)+13.76.

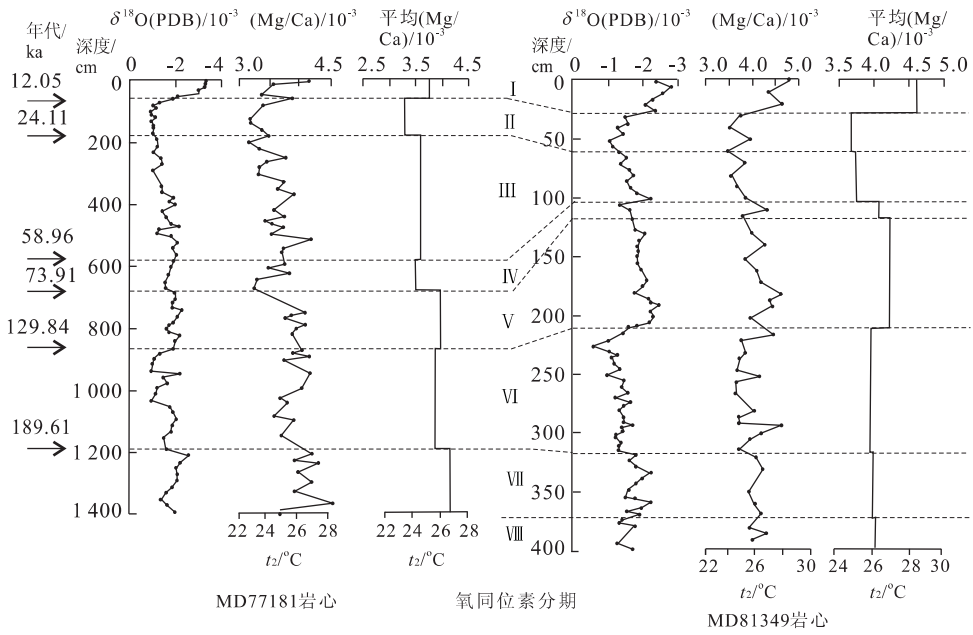


图 3 MD77181 和 MD81349 岩心 Mg/Ca 与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化对比

Fig. 3 Comparison with the change of $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca ratio in the MD77181 and MD81349 cores

等都曾指出, CLIMAP 重建的 SST 资料在热带太平洋和印度洋区域温度值的偏高是描述性 SST 模式模拟该时期气候的一大障碍. Rostekt *et al.* (1998) 对赤道印度洋 $\delta^{18}\text{O}$ 的温度计算也表明 LGM 的最低温度与现代温差大于 2°C . Lea *et al.* (2000) 对西太平洋赤道附近海域 150 ka 以来 Mg/Ca 值的 SST 计算, 温差可达 $3\sim 4^\circ\text{C}$. Nürnberg *et al.* (2000) 对东赤道大西洋 270 ka 以来两支岩心的有孔虫 Mg/Ca 和沉积物 U_k^{37} 的 SST 研究指出最大温差为 $3\sim 3.5^\circ\text{C}$. Levi *et al.* (2002) 对西赤道太平洋印尼多岛海的壳体 Mg/Ca 值及 U_k^{37} 水温计算表明, LGM 最低温度与现代温差约 $3.2\sim 4.8^\circ\text{C}$, 与本次研究结果基本吻合. 大量研究均表明热带太平洋和印度洋 LGM 时期最低温度与全新世的温差很可能大于最初 CLIMAP 推测的 2°C .

3 结论

本次通过对东北印度洋区中、低纬度的两支岩心近 260 ka 以来的有孔虫壳体 Mg/Ca 值与 SST 关系的研究表明: (1) 浮游有孔虫 *G. sacculifer* 壳体 Mg/Ca 值是海洋表层水温良好的替代性指标, 随温度的升高 Mg/Ca 值升高. Mg/Ca 与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势较为吻合, Mg/Ca 高值通常对应于 $\delta^{18}\text{O}$ 轻值; Mg/Ca 低值通常对应于 $\delta^{18}\text{O}$ 重值. (2) 指数方程: Mg/Ca

$\text{Ca} = 0.4717 \exp(0.0825 * \text{SST})$ [其中 Mg/Ca 单位为 10^{-3} , SST 单位为 $^\circ\text{C}$] 为最适合研究区内有孔虫壳体 Mg/Ca 值与海洋表层水温的函数式. 由此计算的东北印度洋区末次冰期最盛期与现代温差约 $3.32\sim 3.82^\circ\text{C}$. (3) 包括印度洋在内的中、低纬地区, 末次冰盛期 LGM 时期的大洋表层最低温度 SST 与全新世的最大温差大于最初 CLIMAP 推测的 2°C , 很可能达到 4°C .

References

Bender, M. L., Lorenson, R. B., Williams, D. F., 1975. Sodium, magnesium and strontium in the tests of planktonic foraminifera. *Micropaleobiology*, 21: 448-459.

Boyle, E., 1991. Quaternary ocean paleochemistry. *Review of Geophysics*, 4: 634-638.

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

Chen, P., 2003. Research on the chemical indications of planktonic foraminifera shell in paleoceanography: Evidence from the sedimentary records of the NE Indian ocean during the last 260 ka. Thesis for the Ph. D. China University of Geosciences, Beijing, 99 (in Chinese).

CLIMAP Project Members, 1981. Seasonal reconstruction of

- the earth's surface at the last glacial maximum. *Geological Society of America Map and Chart Series MC* — 36.
- Cronblad, H. G. , Malmgren, B. A. , 1981. Climatically controlled variation of strontium and magnesium in Quaternary planktonic foraminifera. *Nature*, 291: 61—64.
- Delaney, M. L. , Be, W. H. , Boyle, E. A. , 1985. Sr, Mg, Na in foraminifera calcite shells from laboratory culture, sediment traps, and sediment cores. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 49: 1327—1341.
- Elderfield, H. , Ganssen, G. , 2000. Past temperature and $\delta^{18}\text{O}$ of sea surface ocean waters inferred from foraminiferal Mg/Ca rates. *Nature*, 405: 442—445.
- Fang, N. Q. , Chen, X. F. , Hu, C. Y. , et al. , 2001. Deep sea sedimentary records in the northeastern Indian Ocean and their response to the uplift of the Qinghai-Xizang plateau. *Quaternary Sciences* , 21(6): 490—499 (in Chinese with English abstract).
- Hastings, D. W. , Russel, A. D. , Emerson, S. R. , 1998. Foraminiferal magnesium in *Globeriginoides sacculifer* as a paleotemperature proxy. *Paleoceanography* , 13(2): 161—169.
- Lea, D. W. , Pak, D. K. , Spero, H. J. , 2000. Climate impact of Late Quaternary equatorial Pacific Sea surface temperature variations. *Science*, 289: 1719—1724.
- Levi, C. , Labeyrie, L. , Elderfield, H. , et al. , 2002. Assessing the dissolution effect on paleosalinity reconstruction from paired Mg/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ measurements in the planktonic foraminifer *G. ruber*. Lecture in Beijing.
- Nürnberg, D. , Bijma, J. , Hemleben, C. , 1996. Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 60(5): 803—814.
- Nürnberg, D. , Müller, A. , Schneider, R. R. , 2000. Paleo-sea surface temperature calculations in the equatorial east Atlantic from Mg/Ca rates in planktic foraminifera: A comparison to sea surface temperature estimates from oxygen isotopes, and foraminiferal transfer function. *Paleoceanography* , 15(1): 124—134.
- Rind, D. , Peteet, D. , 1985. Terrestrial conditions at the last glacial maximum and CLIMAP seasurface temperature estimates: Are they consistent? *Quaternary Research* , 24: 1—22.
- Rostek, F. , Bard, E. , Beaufort, L. , 1998. Sea surface temperature and productivity records for the last 240 ka on the Arabian Sea. *Oceanographic Literature Review* , 45(7): 1123.
- Savin, S. M. , Douglas, R. G. , 1973. Stable isotope and magnesium geochemistry of recent planktonic foraminifera from the south Pacific. *Geol. Soci. Amer. Bull.* , 84: 2327—2342.
- Webster, P. J. , Stretten, N. A. , 1978. Late Quaternary ice age climates of tropical Australasia, interpretations and reconstructions. *Quaternary Research* , 10(3): 279—309.

附中文参考文献

- 陈萍, 2003. 浮游有孔虫壳体的若干化学指标及其古海洋学意义: 以东北印度洋 260 ka 以来古海洋学研究为例. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 99.
- 方念乔, 陈学方, 胡超涌, 等, 2001. 东北印度洋深海记录基本特征及其对青藏高原隆升的响应. *第四纪研究* , 21(6): 490—499.