



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

浮游有孔虫表层水种不同形态类型壳体的Sr/Ca记录

贾 奇, 李铁刚, 熊志方, 秦秉斌

Comparison in Sr/Ca ratios of different morphotypes of surface dwelling planktonic foraminifera species

JIA Qi, LI Tiegang, XIONG Zhifang, and QIN Bingbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023071401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于浮游有孔虫Mg/Ca温度重建的末次盛冰期以来北欧海表层温度的变化

Sub sea surface temperatures in the Nordic Seas during the LGM by planktic foraminiferal Mg/Ca temperature reconstructions

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 122

Cd元素的古海水化学性质及有孔虫壳体Cd/Ca比值的古海洋学意义

Hydrochemical behaviors of Cd in paleoceans and a review of Cd/Ca ratio in foraminifera shells as a paleoceanographic proxy

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 122

南海南部上层水体浮游有孔虫的组成与分布特征

Assemblage and distribution of planktonic foraminifera in the upper water layer of southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 124

南海中部全新世以来海山深潜区有孔虫的地球化学记录及反映的气候变化

Geochemical record of foraminifera and its reflection on climate change in the central South China Sea since Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 100

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

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

assemblages

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 113

长江远端三角洲表层沉积物中底栖有孔虫分布及其对环境的指示

Distribution of benthic foraminifera in the surficial sediments of Changjiang distal delta and its environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 127



关注微信公众号，获得更多资讯信息

贾奇, 李铁刚, 熊志方, 等. 浮游有孔虫表层水种不同形态类型壳体的 Sr/Ca 记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 10-16.
JIA Qi, LI Tiegang, XIONG Zhifang, et al. Comparison in Sr/Ca ratios of different morphotypes of surface dwelling planktonic foraminifera species[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 10-16.

浮游有孔虫表层水种不同形态类型壳体的 Sr/Ca 记录

贾奇¹, 李铁刚^{1,2}, 熊志方^{1,2}, 秦秉斌¹

1. 自然资源部第一海洋研究所海洋地质与成矿作用重点实验室, 青岛 266061

2. 崂山实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237

摘要: 浮游有孔虫表层水种 *Globigerinoides ruber* (白色) 和 *Trilobatus sacculifer* 壳体是过去海洋环境信息的重要载体, 其壳体 Sr/Ca 比值在重建古海洋环境变化中具有较大潜力, 因此本文旨在探讨 *G. ruber* (白色) 和 *T. sacculifer* 的不同形态类型 Sr/Ca 比的差异及其影响因素。对取自西菲律宾海的 MD06-3047B 沉积物岩芯中 *G. ruber* 的两种形态类型, 即 *G. ruber* (sensu stricto, s.s.) 和 *G. ruber* (sensu lato, s.l.), 以及 *T. sacculifer* 的两种形态类型, 即 *T. sacculifer* (with sac) 和 *T. sacculifer* (without sac) 壳体的 Sr/Ca 进行了测试分析。结果显示, MIS 3 期 (~ 48 ka) 以来, MD06-3047B 岩芯中 *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 的 Sr/Ca 差异较小; 而 *T. sacculifer* (with sac) 和 *T. sacculifer* (without sac) 的 Sr/Ca 存在显著差异, 且前者显著高于后者。通过与同站位表层海水温度和盐度等记录的对比, 发现研究区 *G. ruber* s.s., *G. ruber* s.l. 和 *T. sacculifer* (without sac) 壳体的 Sr/Ca 可能主要受控于海水温度, 而 *T. sacculifer* (with sac) 壳体 Sr/Ca 受到海水盐度的影响。

关键词: 浮游有孔虫; 形态类型; *G. ruber* (white); *T. sacculifer*; Sr/Ca

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023071401

Comparison in Sr/Ca ratios of different morphotypes of surface dwelling planktonic foraminifera species

JIA Qi¹, LI Tiegang^{1,2}, XIONG Zhifang^{1,2}, QIN Bingbin¹

1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

2. Laboratory for Marine Geology, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

Abstract: Surface-dwelling foraminifera species *Globigerinoides ruber* (white) and *Trilobatus sacculifer* are the main proxy carriers for past oceanic environments. The Sr/Ca ratios of foraminifera play an important role in reflecting paleo-oceanic environmental changes. To understand the potential differences between the Sr/Ca ratios of these different morphotypes of *G. ruber* (white) and *T. sacculifer* and relevant affecting factors, we compared the Sr/Ca measurements of the two basic morphotypes of *G. ruber* (*G. ruber* sensu stricto and *G. ruber* sensu lato) and *T. sacculifer* (with sac and without sac) via the analysis of surface and downcore samples of sediment from Core MD06-3047B in the Western Philippine Sea. Results reveal that the Sr/Ca ratios of the two morphotypes of *G. ruber* (white) show a little difference since MIS 3 (~ 48 ka), while those of two types of *T. sacculifer* are significantly different from each other, of which that of *T. sacculifer* (without sac) is generally greater than that of the with-sac type. By comparing the seawater temperature and salinity from the same site, we found that the Sr/Ca ratios of *G. ruber* s.s., *G. ruber* s.l. and *T. sacculifer* (without sac) in our study area might be affected mainly by seawater temperature, and those of *T. sacculifer* (with sac) are mainly affected by surface salinity.

Key words: planktonic foraminifera; morphotype; *G. ruber* (white); *T. sacculifer*; Sr/Ca

浮游有孔虫壳体元素组成作为重要的海洋环境参数替代性指标, 在古海洋学研究中发挥着重要的作用。随着浮游有孔虫壳体元素比值测试技术的快速发展, 通过对浮游有孔虫壳体元素比值的分

析, 取得了一系列重要成果^[1-3]。其中, *Globigerinoides ruber*(白色) 和 *Trilobatus sacculifer* 壳体作为定量重建地质历史时期表层海水温度和盐度的重要信息载体, 得到了广泛的研究和应用^[1, 4-5]。然而, 在利用

资助项目: 国家自然科学基金项目“晚中新世以来印度洋-太平洋暖池水体交换过程及其气候效应”(41830539); 崂山实验室科技创新项目“新生代西太平洋环境演化的沉积记录及机制”(LSKJ202204200); 泰山学者工程专项——泰山学者特聘专家计划(ts20190963)

作者简介: 贾奇(1989—), 女, 副研究员, 主要从事古海洋学与古环境研究, E-mail: qjia@fio.org.cn

通讯作者: 李铁刚(1965—), 男, 研究员, 主要从事古海洋学与古环境研究, E-mail: tgli@fio.org.cn

收稿日期: 2023-07-14; 改回日期: 2023-08-08. 周立君编辑

G. ruber 和 *T. sacculifer* 壳体进行测试时, 通常忽略 *G. ruber* 和 *T. sacculifer* 不同形态类型的壳体对重建结果的可能影响。

大部分海洋沉积物样品中 *G. ruber* 壳体存在两种形态类型, 分别为狭义种(*sensu stricto*, s.s.)和广义种(*sensu lato*, s.l.)。根据分类学标准, *G. ruber* s.s. 壳体的主要形态为:一个近球形房室对称地生长于原有结构上, 而形成具有高角度拱形的较大口孔;而 *G. ruber* s.l. 壳体具有相对紧凑的结构特征:一个扁平的房室不对称地生长于原有结构之上, 从而形成具有中等角度的拱形和相对较小的口孔^[6]。研究发现浮游有孔虫 *G. ruber* 壳体的两种形态类型具有不同的稳定同位素组成, 且 *G. ruber* s.s. 的生活水深浅于 *G. ruber* s.l., 因此两种形态类型的 *G. ruber* 壳体记录的海洋环境信息可能存在差异^[4, 7-8]。此外, 也有研究发现热带和亚热带海区 *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 壳体的元素比值也存在差异^[4, 9]。

T. sacculifer 作为另外一个重要的浮游有孔虫混合层水种, 其壳体在古海洋学研究中也得到了广泛的应用^[10-11]。尽管从分类学角度来看, *T. sacculifer* 的分类更加复杂, 但其在形态方面的主要区分依据为是否具有最后一个似袋状房室^[12]。因此, *T. sacculifer* 从形态学上可以分为 *T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac)。Elderfield 等^[11] 和 Anand 等^[13] 通过对取自大西洋的沉积岩芯以及沉积物捕获器样品的分析, 发现 *T. sacculifer*(with sac)

和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体的元素比值同样存在一定的差异。

已有研究表明有孔虫壳体的 Sr/Ca 比值在第四纪以来存在着明显的冰期-间冰期变化特征, 可能是指示海水 Sr/Ca 水平的潜在替代性指标^[14-15]。此外, 有孔虫壳体 Sr/Ca 比值的变化可能可以指示第四纪冰期旋回中的海平面变化^[16]。也有研究发现浮游有孔虫壳体的 Sr/Ca 受海水温度和盐度等因素的影响^[17]。因此, 有孔虫壳体 Sr/Ca 是古海洋学研究的潜在指标之一。本文通过西菲律宾海 MD06-3047B 岩芯中 *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 以及 *T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体 Sr/Ca 比值的测试分析, 探讨它们之间是否存在显著性差异, 并分析不同形态类型壳体 Sr/Ca 比的影响因素, 为未来利用两个浮游有孔虫表层水种在该区域开展古海洋学工作提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究材料

MD06-3047B 岩芯(17°00.44'N、124°47.93'E)位于吕宋岛以东约 240 km 的西菲律宾海本哈姆高原(图 1a), 水深 2510 m。该沉积岩芯沉积连续, 没有发现明显的沉积间断以及浊流沉积层, 沉积柱状样主要由黄色粉砂质泥组成。根据前人研究, 西菲

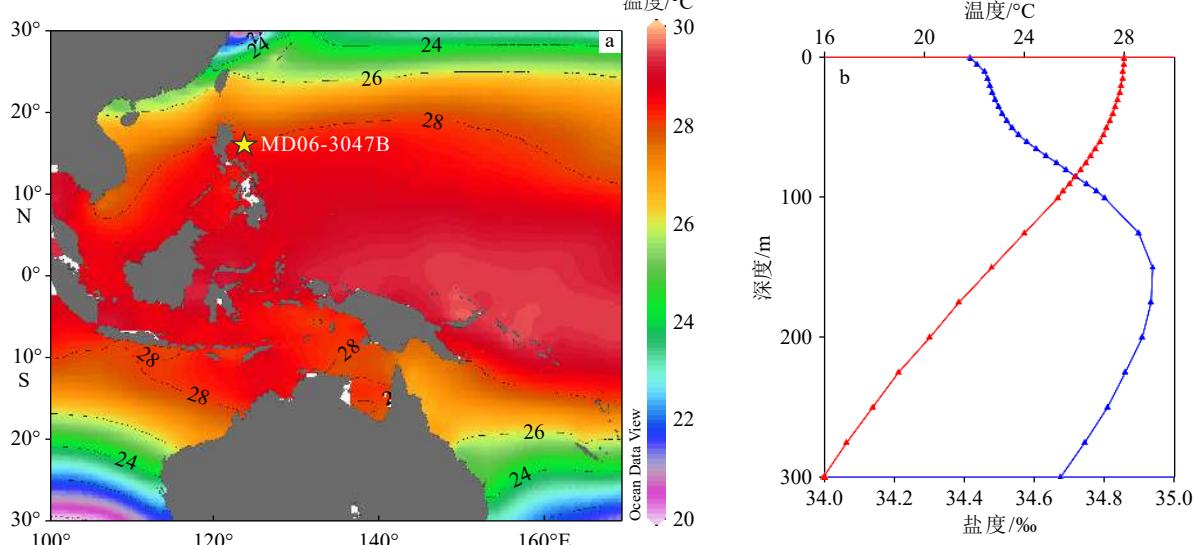


图 1 MD06-3047B 孔站位信息

a: 年均表层海水温度信息, b: MD06-3047B 孔附近的垂向温度与盐度信息。数据引自 WOA13^[20]。

Fig.1 The location of Site MD06-3047B

a: The annual mean sea surface temperature, b: profiles of water temperature and salinity around Site MD06-3047B.

The data are from World Ocean Atlas 2013^[20].

律宾海现代碳酸盐溶跃面深度约为 3400 m^[18], MD06-3047B 孔位于海区溶跃面深度之上, 因此该沉积物岩芯中有孔虫保存程度较好^[19]。在本次研究中, 我们选取钻孔岩芯上部 60 cm, 按 4 cm 间隔取样, 取得 15 个层位的样品。每个层位样品分别挑选 30~50 枚粒径范围为 250~300 μm 的 *G. ruber* s.s.、*G. ruber* s.l.、*T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体(图 2)。并对这 59 个有孔虫样品(*G. ruber* s.s.有一层位缺失)进行 Sr/Ca 比值测试。尽管 *G. ruber* 和 *T. sacculifer* 的生活水深存在差异, 但两者的平均钙化深度均位于混合层内^[7, 13], 该层内海水温度和盐度随深度的变化较小(图 1b)。

1.2 壳体元素测试

有孔虫壳体的清洗主要依据 Barker 等^[21]的方法。首先, 将有孔虫壳体在显微镜下压碎, 保证每个房室均被打开; 分别对每一个有孔虫样品用去离子水进行超声清洗 5 次、乙醇(优级纯)超声清洗 2 次、去离子水清洗 2 次, 用以去除黏土等; 用加热的 H₂O₂ 缓冲溶液进行氧化处理, 并用去离子水进行清洗, 以去除有机质等; 在镜下剔出非有孔虫壳体碎片的杂质(暗色矿物、絮尘等); 转移并进行淋洗保存等待上机测试。元素测试在中国科学院海洋研究所电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)上进

行。通过对标准溶液(Sr/Ca=1.20 mmol/mol)进行 45 次重复测试分析, 得到 Sr/Ca 测试的标准偏差为 1.1% (1σ)。

1.3 统计分析

为了从统计学角度分析 *G. ruber* 和 *T. sacculifer* 不同形态类型壳体的 Sr/Ca 比值差异, 我们依照 Antonarakou 等^[8]的方法, 对 MD06-3047B 岩芯中上述 4 类有孔虫壳体的 Sr/Ca 测试结果进行韦尔奇检验。首先, 假设相比较的两组数据均值结果相当, 如果 *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 或 *T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体的 Sr/Ca 结果相当, 即接受虚假设($H=H_0$), 说明 *G. ruber* 或 *T. sacculifer* 不同形态类型的 Sr/Ca 比值的差异不大; 相反, 如果对比结果存在显著差异, 即拒绝虚假设($H=H_a$), 说明不同形态类型壳体的 Sr/Ca 存在显著差异。

2 壳体 Sr/Ca 结果

MD06-3047B 孔的年龄框架由 Jia 等建立^[19], 主要依据全球大洋底栖有孔虫氧同位素堆叠曲线^[22], 并辅以粉红色 *G. ruber* 末现面(~ 120 ka)作为参考点^[23]而确立。本次研究的样品时间跨度约 48 ka,

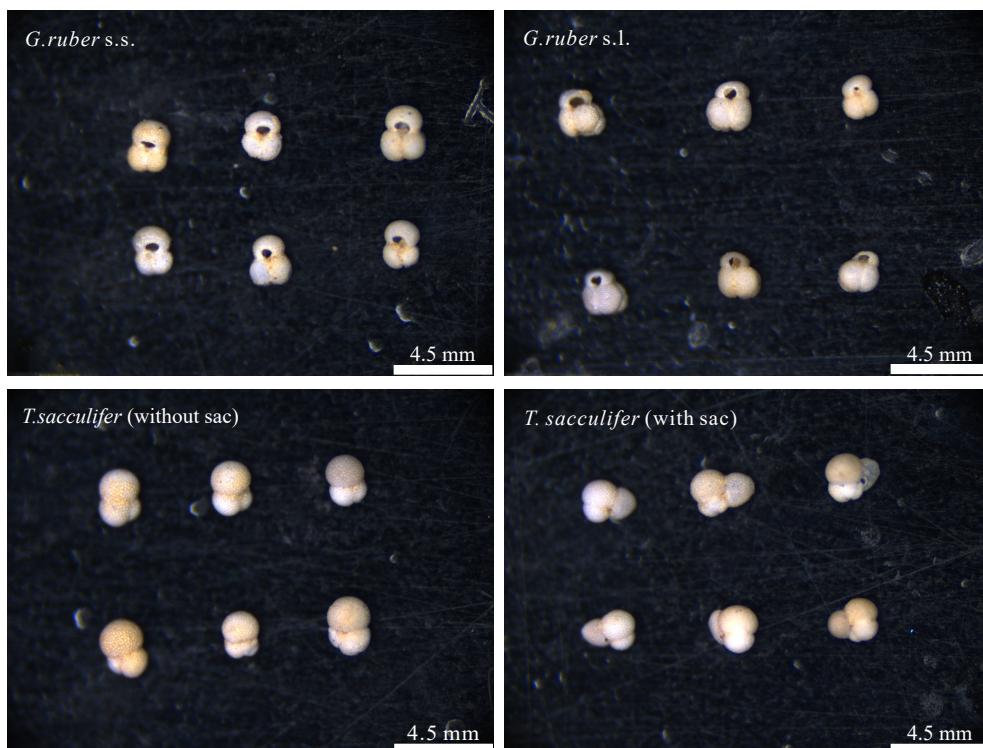


图 2 *G. ruber* 和 *T. sacculifer* 不同形态类型壳体的显微照片

Fig.2 Microphotographs of *G. ruber* and *T. sacculifer* morphotypes

覆盖了 MIS 3-1。图 3 所示为 MD06-3047B 孔 MIS 3 期以来的 *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 以及 *T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体的 Sr/Ca 比值。48 ka 以来 *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 壳体的 Sr/Ca 整体上具有相同的变化趋势, 其差值变化范围为 $-0.006 \sim 0.022$ mmol/mol, 平均差值约 0.006 mmol/mol。*G. ruber*(白色) 的两种形态类型壳体的 Sr/Ca 比值并没有表现出明显的阶段性高低变化规律, 但 *G. ruber* s.l. 壳体 Sr/Ca 波动幅度相对较大。*T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体 Sr/Ca 比值存在差异, 整体上 *T. sacculifer*(with sac) 壳体的 Sr/Ca 比值相对较高, 两者的差值变化范围为 $-0.008 \sim 0.034$ mmol/mol, 平均约 0.017 mmol/mol。

3 讨论

3.1 *G. ruber* 和 *T. sacculifer* 不同形态类型壳体 Sr/Ca 差异

如图 3 所示, *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 壳体 Sr/Ca 变化趋势较为一致, 平均差值仅约 0.006 mmol/mol,

小于 Sr/Ca 比值的测试误差 (± 0.011 mmol/mol)。*T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳 Sr/Ca 平均差值为约 0.017 mmol/mol, 大于测试误差 (± 0.011 mmol/mol)。同时, 统计学韦尔奇检验结果也显示 *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 壳体 Sr/Ca 平均值差异结果不具有显著差异; 而 *T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳 Sr/Ca 平均值差异显著 ($p < 0.05$, 表 1)。综上, 我们判断在 MD06-3047B 站位的附近海区 *G. ruber* 不同形态类型壳体 Sr/Ca 比值的差异较小; 而 *T. sacculifer* 不同形态类型壳体 Sr/Ca 的差异较大。因此, 在西菲律宾海区对浮游有孔虫表层水种 Sr/Ca 比值进行测试分析时, 如在样品量不足的情况下, 可以选择 *G. ruber* 的不同形态类型壳体, 但需要尽量选择 *T. sacculifer*(with sac) 或 *T. sacculifer*(without sac) 的单一形态类型壳体, 以免造成结果偏差。

3.2 不同形态类型壳体 Sr/Ca 差异的影响因素

浮游有孔虫壳体 Sr/Ca 主要受到海水 Sr/Ca、海水温度、盐度和溶解作用等因素的影响^[17, 24-27]。根据前人关于海水 Sr/Ca 的冰期-间冰期变化特征的研究可知, 海水 Sr/Ca 在冰期时高, 而在间冰期时

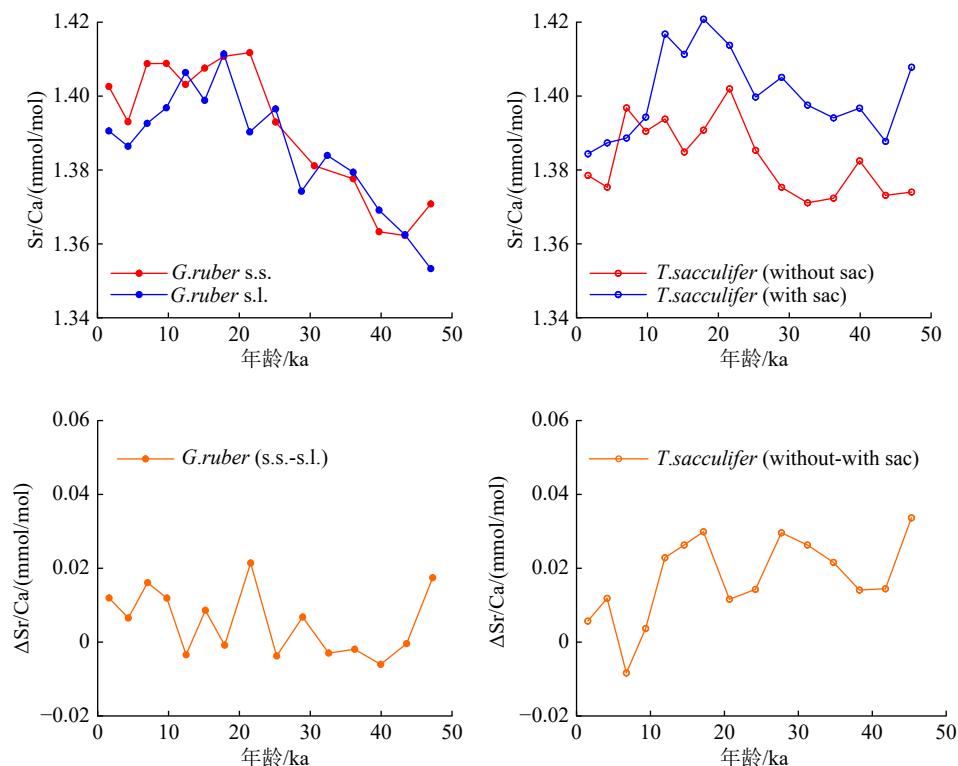


图 3 MD06-3047B 孔 *G. ruber* s.s.、*G. ruber* s.l.、*T. sacculifer* (with sac) 和 *T. sacculifer* (without sac) 壳体的 Sr/Ca 比值, 以及 *G. ruber* 和 *T. sacculifer* 不同形态类型壳体 Sr/Ca 差值

Fig.3 Shell Sr/Ca of *G. ruber* s.s., *G. ruber* s.l., *T. sacculifer* (with sac), and *T. sacculifer* (without sac) from Core MD06-3047B, and the difference in shell Sr/Ca between morphotypes of the species

表 1 MD06-3047B 孔 *G. ruber* s.s. 和 *G. ruber* s.l. 以及 *T. sacculifer* (with sac) 和 *T. sacculifer* (without sac) 壳体 Sr/Ca 平均值 (mmol/mol) 以及韦尔奇检验结果 ($p < 0.05$)

Table 1 Mean shell Sr/Ca (mmol/mol) of *G. ruber* s.s., *G. ruber* s.l., *T. sacculifer* (with sac), and *T. sacculifer* (without sac) of Core MD06-3047B with the results of the Welch's *t*-test at $p < 0.05$ level

	Sr/Ca		Sr/Ca
<i>G. ruber</i> s.s.	1.393	<i>G. sacculifer</i> (without sac)	1.383
<i>G. ruber</i> s.l.	1.387	<i>G. sacculifer</i> (with sac)	1.401
H	H_0	H	H_a

注：其中 $H = H_0$ 表示接受虚假设， $H = H_a$ 表示拒绝虚假设。

低^[28-29]。这一特征与我们的结果并不完全一致(图 4)，特别是 MIS 3 期的 Sr/Ca 整体低于 MIS 1 期。此外，不同形态类型壳体的 Sr/Ca 变化并没有表现出完全一致的变化，也说明其他因素在其中发挥作用。因此，海水 Sr/Ca 可能不是影响研究区浮游有孔虫壳体 Sr/Ca 变化特征的唯一因素。有研究表明，*G. ruber* 壳体 Sr/Ca 可能受到海水温度和盐度的影响，而受 pH 的影响较小^[26]，随着海水温度和盐度的升高，

G. ruber 壳体 Sr/Ca 呈增大趋势。*T. sacculifer* 壳体 Sr/Ca 同样受到温度和盐度的影响^[27]，海水温度升高，*T. sacculifer* 壳体 Sr/Ca 越大，而盐度越高，Sr/Ca 越小。

如图 3 和图 4 所示，同一粒径范围下，MIS 3 期以来 *G. ruber* 两种形态类型的壳体 Sr/Ca 十分相似，说明两者的变化可能受到相同影响因素的控制。而 *T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体 Sr/Ca 存在显著差异(本文 3.1 节)，可能指示二者受不同因素的影响。进一步将 *G. ruber* s.s.、*G. ruber* s.l.、*T. sacculifer*(with sac) 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体 Sr/Ca 进行对比可发现(图 4)，*G. ruber* s.s.、*G. ruber* s.l. 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体 Sr/Ca 呈现较为一致的变化趋势，并两两进行线性相关分析，发现三组记录之间具有较好的相关性，因此这两个种的 3 种形态类型壳体 Sr/Ca 的记录可能受到相同因素的影响。为方便分析，将这三组记录进行堆叠平均(Sr/Ca_{stack})，并与同站位 48 ka 以来的表层海水温度和盐度等古海洋学记录^[19]进行对比和线性相关分析。结果显示 Sr/Ca_{stack} 与表层海水温度呈现线性正相关(图 5a)，从整体趋势上，*G. ruber* s.s.、*G. ruber* s.l. 和 *T. sacculifer*(without sac) 的 Sr/Ca 的增大对应表层海水温度的升高(图 4)。而 Sr/Ca_{stack} 与表层海水盐度替代性指标($\delta^{18}\text{O}_{\text{sw-ice}}$)之间不具有明显的相关性(图 5b)，并且 *G. ruber* s.s.、*G. ruber* s.l. 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体 Sr/Ca 与表层海水盐度的变化趋势也存在较大差异(图 4)。因此，研究区 *G. ruber* s.s.、*G. ruber* s.l. 和 *T. sacculifer*(without sac) 壳体的 Sr/Ca 变化可能主要受到表层海水温度的影响，而受到盐度的影响较小。其中，Sr/Ca 的高值并未完全出现在 MIS 1 期，而整体出现在末次冰消期，即 MIS 2 期向 MIS 1 期的过渡阶段(图 4)。这可能是由于太平洋区域存在显著的末次冰消期表层海水温度显著增暖的特征^[30]。此外，MD06-3047B 孔年龄框架由底栖有孔虫氧同

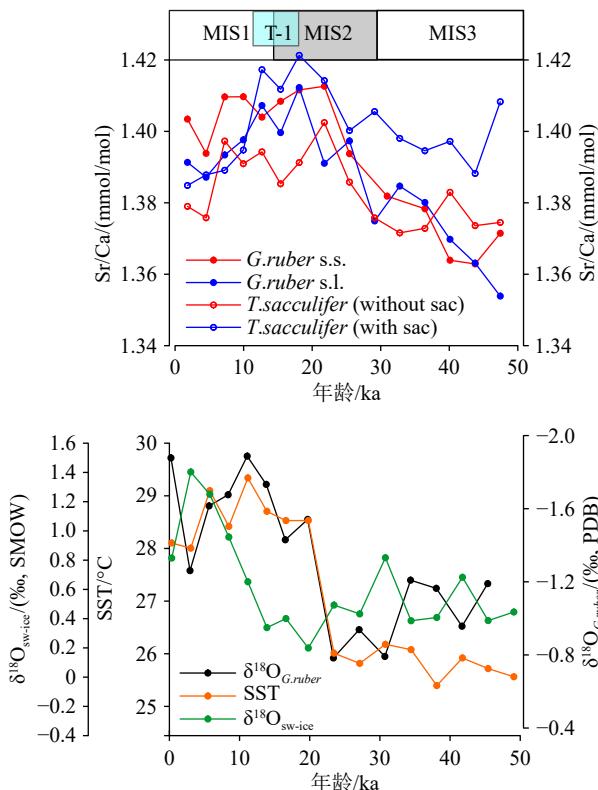


图 4 MD06-3047B 孔 *G. ruber* 和 *T. sacculifer* 不同形态类型壳体 Sr/Ca 与表层海水温度和盐度记录^[19]的对比
MIS 为氧同位素期次，T-I 为末次冰消期。

Fig.4 Comparison of shell Sr/Ca of *G. ruber* and *T. sacculifer* morphotypes with sea surface temperature and salinity^[19] from Core MD06-3047B

MIS: marine isotope stage, T-I: the last deglacial stage.

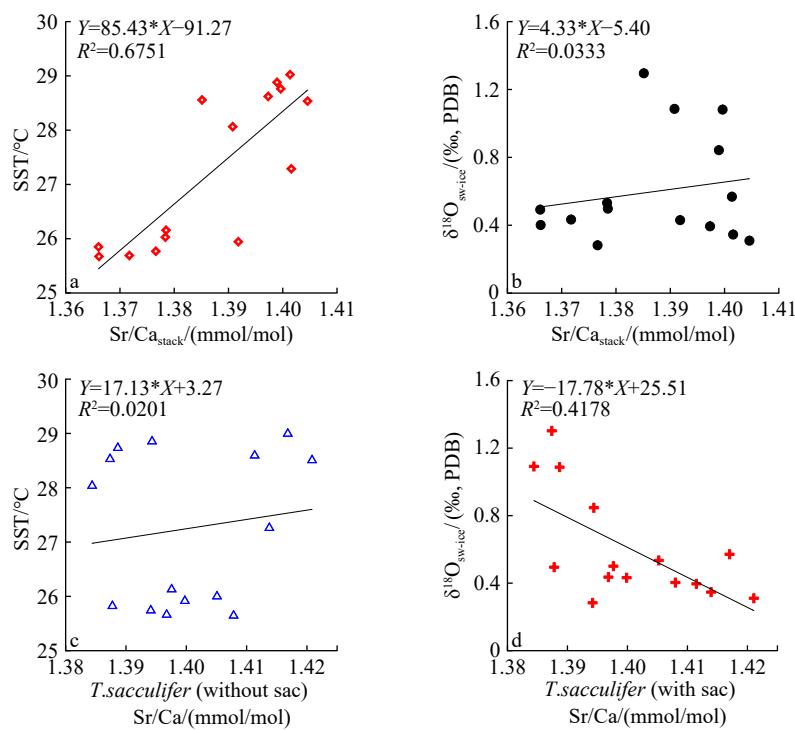


图 5 MD06-3047B 孔浮游有孔虫表层水种 Sr/Ca 与表层海水温度和盐度记录^[19]的线性相关分析

SST 为表层海水温度, $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw-ice}}$ 为表层海水盐度替代性指标(高值指示高盐), $\text{Sr/Ca}_{\text{stack}}$ 为 *G.ruber* s.s., *G.ruber* s.l. 和 *T.sacculifer*(without sac) 壳体 Sr/Ca 记录的堆叠结果。

Fig.5 Linear correlation of shell Sr/Ca ratio of planktonic surface-water-dwelling foraminifer species and sea surface temperature and salinity^[19] from Core MD06-3047B

SST: sea surface temperature, $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw-ice}}$: the proxy of sea surface salinity (high $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw-ice}}$ means higher salinity), $\text{Sr/Ca}_{\text{stack}}$: the stack of Sr/Ca records of *G.ruber* s.s., *G.ruber* s.l., and *T.sacculifer* (without sac).

位素建立, 而根据前人工作, 研究区 SST 在变化特征上超前于底栖有孔虫氧同位素的变化^[31]。

由于 *T.sacculifer*(with sac)壳体 Sr/Ca 与 *G.ruber* s.s.、*G.ruber* s.l. 和 *T.sacculifer*(without sac) 的变化趋势存在明显差异(图 4), 故将其单独进行分析。如图 5c 和图 5d 所示, *T.sacculifer*(with sac)壳体 Sr/Ca 与表层海水温度记录无显著相关性, 而与表层海水盐度呈反相关。因此, *T.sacculifer*(with sac)壳体的 Sr/Ca 可能主要受表层海水盐度的影响, 这一关系与 Dissard 等的研究结果一致^[27]。

4 结论

通过对西太平洋暖池北部边缘海区 MD06-3047B 孔中浮游有孔虫表层水种 *G.ruber*(*G.ruber* s.s. 与 *G.ruber* s.l.) 和 *T.sacculifer*(*T.sacculifer*(with sac) 与 *T.sacculifer*(without sac)) 壳体的 Sr/Ca 进行分析, 发现 MIS 3 期以来, *G.ruber* 不同形态类型壳体的 Sr/Ca 差异较小; 而 *T.sacculifer* 不同形态类型壳体的 Sr/Ca 相差较大。因此, 在利用 *G.ruber* 和

T.sacculifer 壳体的 Sr/Ca 结果重建古海洋信息的过程中, 如在样品量有限的条件下, 可以选择 *G.ruber* 壳体不同形态类型进行测试, 但应尽量选择 *T.sacculifer* 单一形态类型壳体。不同形态类型壳体 Sr/Ca 与海水温度和盐度古海洋学记录对比显示, 研究区 *G.ruber* s.s.、*G.ruber* s.l. 和 *T.sacculifer*(without sac) 壳体 Sr/Ca 可能主要受海水温度的影响; *T.sacculifer*(with sac) 壳体 Sr/Ca 主要受到盐度的影响。

致谢: 感谢中法合作 MARCO POLO 2 航次的全体工作人员在取样过程中提供的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Mohtadi M, Steinke S, Lückge A, et al. Glacial to Holocene surface hydrography of the tropical eastern Indian Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 292(1-2): 89-97.
- [2] Stott L, Poulsen C, Lund S, et al. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales[J]. *Science*, 2002, 297(5579): 222-226.

- [3] Koutavas A, Joanides S. El Niño-southern oscillation extrema in the Holocene and Last Glacial Maximum[J]. *Paleoceanography*, 2012, 27(4): PA4208.
- [4] Steinke S, Chiu H Y, Yu P S, et al. Mg/Ca ratios of two *Globigerinoides ruber* (white) morphotypes: Implications for reconstructing past tropical/subtropical surface water conditions[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(11): Q11005.
- [5] Gussone N, Eisenhauer A, Tiedemann R, et al. Reconstruction of Caribbean Sea surface temperature and salinity fluctuations in response to the Pliocene closure of the Central American Gateway and radiative forcing, using $\delta^{44/40}\text{Ca}$, $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca ratios[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 227(3-4): 201-214.
- [6] Wang L J. Isotopic signals in two morphotypes of *Globigerinoides ruber* (white) from the South China Sea: implications for monsoon climate change during the last glacial cycle[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 161(3-4): 381-394.
- [7] Kawahata H. Stable isotopic composition of two morphotypes of *Globigerinoides ruber* (white) in the subtropical gyre in the North Pacific[J]. *Paleontological Research*, 2005, 9(1): 27-35.
- [8] Antonarakou A, Kontakiotis G, Mortyn P G, et al. Biotic and geochemical ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, Mg/Ca, Ba/Ca) responses of *Globigerinoides ruber* morphotypes to upper water column variations during the last deglaciation, Gulf of Mexico[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 170: 69-93.
- [9] Steinke S, Kienast M, Groeneveld J, et al. Proxy dependence of the temporal pattern of deglacial warming in the tropical South China Sea: toward resolving seasonality[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(7-8): 688-700.
- [10] Wara M W, Ravelo A C, Delaney M L. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period[J]. *Science*, 2005, 309(5735): 758-761.
- [11] Elderfield H, Vautravers M, Cooper M. The relationship between shell size and Mg/Ca, Sr/Ca, $\delta^{18}\text{O}$, and $\delta^{13}\text{C}$ of species of planktonic foraminifera[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(8): 1-13.
- [12] André A, Weiner A, Quillévér F, et al. The cryptic and the apparent reversed: lack of genetic differentiation within the morphologically diverse plexus of the planktonic foraminifer *Globigerinoides sacculifer* [J]. *Paleobiology*, 2013, 39(1): 21-39.
- [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): 1050.
- [14] Stoll H M, Schrag D P, Clemens S C. Are seawater Sr/Ca variations preserved in Quaternary foraminifera? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(21): 3535-3547.
- [15] Lea D W, Mashiotta T A, Spero H J. Controls on magnesium and strontium uptake in planktonic foraminifera determined by live culturing[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(16): 2369-2379.
- [16] 陈萍, 方念乔, 胡超涌. 有孔虫壳体 Sr/Ca 对冰川旋回中海平面变化的响应 [J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 8-11
[CHEN Ping, FANG Nianqiao, HU Chaoyong. Sr/Ca Ratio of foraminifera shell response to the change of sea level with glacial-inter-
- [17] Cléroux C, Cortijo E, Anand P, et al. Mg/Ca and Sr/Ca ratios in planktonic foraminifera: Proxies for upper water column temperature reconstruction[J]. *Paleoceanography*, 2008, 23(3): PA3214.
- [18] Hilde T W C, Lee C S. Origin and evolution of the west Philippine basin: a new interpretation[J]. *Tectonophysics*, 1984, 102(1-4): 85-104.
- [19] Jia Q, Li T G, Xiong Z F, et al. Hydrological variability in the western tropical Pacific over the past 700 kyr and its linkage to Northern Hemisphere climatic change[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 493: 44-54.
- [20] Locarnini R A, Mishonov A V, Antonov J I, et al. World Ocean Atlas 2013, volume 1: temperature[M]/Levitus S, Technical A M. NOAA Atlas NESDIS 73. NOAA, 2013.
- [21] Barker S, Greaves M, Elderfield H. A study of cleaning procedures used for foraminiferal Mg/Ca paleothermometry[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(9): 8407.
- [22] Lisicki L E, Raymo M E. A Pliocene - Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1): PA1003.
- [23] Thompson P R, Bé A W H, Duplessy J C, et al. Disappearance of pink-pigmented *Globigerinoides ruber* at 120, 000-yr Bp in the Indian and Pacific Oceans[J]. *Nature*, 1979, 280(5723): 554-558.
- [24] 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.
- [25] Elderfield H, Cooper M, Ganssen G. Sr/Ca in multiple species of planktonic foraminifera: Implications for reconstructions of seawater Sr/Ca[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2000, 1(11): 1017.
- [26] Kisakürek B, Eisenhauer A, Böhm F, et al. Controls on shell Mg/Ca and Sr/Ca in cultured planktonic foraminiferan, *Globigerinoides ruber* (white)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(3-4): 260-269.
- [27] Dissard D, Reichart G J, Menkes C, et al. Mg/Ca, Sr/Ca and stable isotopes from the planktonic foraminifera *T. sacculifer*: testing a multi-proxy approach for inferring paleotemperature and paleosalinity[J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(2): 423-439.
- [28] Martin P A, Lea D W, Mashiotta T A, et al. Variation of foraminiferal Sr/Ca over Quaternary glacial-interglacial cycles: Evidence for changes in mean ocean Sr/Ca? [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2000, 1(12): 1004.
- [29] Stoll H M, Schrag D P, Clemens S C. Are seawater Sr/Ca variations preserved in Quaternary foraminifera? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(21): 3535-3547.
- [30] 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.
- [31] 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 Sci Rev*, 2002, 21(1-3): 283-293.