

青岛湾潮间带活体底栖有孔虫 *Ammonia aomoriensis* (Asano, 1951) 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值的季节变化

俞宙菲^{1,2}, 类彦立¹, 李铁刚^{1,3,4}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家海洋局第一海洋研究所, 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 近岸浅水底栖有孔虫是陆架海区古环境重建的重要手段, 但是至今对其活体的研究非常缺乏。2014年6月至2015年5月对青岛湾潮间带活体底栖有孔虫 *Ammonia aomoriensis* 进行了连续12个月的采样, 用虎红染色以确认活体。对壳径范围在200~550 μm 的活体壳体, 以每增加50 μm 壳径为一组, 进行 $\delta^{18}\text{O}$ 测试。结果显示, *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的月平均值的季节变化趋势与温度和盐度一致, 与温度反相关, 与盐度正相关, 即青岛湾 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值受温度和海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响, 其壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出了很好的季节性波动。但是 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化滞后于所测温度和盐度约2个月, 其记录的是虫体在生长周期内在真实钙化温度下分馏所得的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

关键词: 潮间带; *Ammonia aomoriensis*; 壳体氧同位素; 季节变化

中图分类号: P67 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)07-0132-08
doi: 10.11759/hyxx20160323001

温度控制无机碳酸钙沉降时的氧同位素分馏^[1-4]。McCrea 通过在 4~80℃ 环境下文石和文石-碳酸钙混合物的沉降实验, 证实了温度对无机碳酸钙沉降同位素组成的控制作用^[5]。随后, Epstein 等^[6]用生长在 7~30℃ 环境的生物碳酸钙进行校正, 显示出温度与生物壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 之间负相关的关系。20世纪80年代, 这种控制作用进一步通过野外和培养实验在浮游有孔虫得到了证实^[7-9]。通过对深海钻孔顶部样品中底栖有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试, 建立了诸多底栖有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 与水温的关系式, 包括 *Uvigerina*^[10-11], *Cibicides* 和 *Planulina*^[11-12]。利用深海底栖有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 来反映深海底层水温度和全球冰量的变化, 在古海洋环境重建中已得到广泛的应用^[13-17]。

但是, 由于对浅水底栖有孔虫的野外调查研究甚少, 底栖有孔虫活体 $\delta^{18}\text{O}$ 对时间序列(季节)响应的记录十分缺乏。Fontanier 等对采自法国比斯开湾的活体底栖有孔虫 *C. pachydermus* 和 *Uvigerina* 等进行了两年的调查, 没有观察到壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化^[18]。Filipsson 等对 Havstens 湾 20 m 水深和 Gullmar 湾 119 m 水深的有孔虫 *Stainforthia fusiformis* 进行了16个月的调查, 也没有发现温度和盐度的季节变化与壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的关联^[19]。但 Wefer 和 Berger^[20]的研究发现热带浅水大型

底栖有孔虫 *Marginopora vertebralis* 和 *Cyclorbiculina compressa* 的壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出明显的季节变化。

Ammonia aomoriensis 主要分布在北海和日本沿海的潮间带、湿地和咸水湖环境^[21-22]; 是波罗的海泥质沉积物里的常见种^[23]; 在中国黄海广泛分布, 是青岛湾的优势种之一^[24]。分子和生态调查研究显示, 在中国陆架海域 *A. aomoriensis* 为客观存在的种类, 其形态变化与温度无相关性, 但微球型初房比率与海水盐度显著正相关^[25]。在世界上关于 *A. aomoriensis* 的研究较少, 很可能是因为这个种常被误鉴定为 *A.*

收稿日期: 2016-03-23; 修回日期: 2016-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(41476043, 41230959, 41176132); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA11030104); 大陆架科学钻探项目(GZH201100202); 海洋生物群落结构对气候变化的响应(GASI-03-01-03-01; DOME(MEA)-01-01-E; No. 201303; MGK1210)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41476043, No. 41230959, No. 41176132; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA11030104; Continental Shelf Drilling Program of China, No. GZH201100202; Response of marine biotic community structure to climate change, National Program on Global Change and Air-Sea Interaction, GASI-03-01-03-01; DOME(MEA)-01-01-E; No. 201303; MGK1210]

作者简介: 俞宙菲(1987-), 女, 江苏常州人, 博士研究生, 研究方向: 海洋地质学, E-mail: yuzhoufei5@126.com; 李铁刚, 通信作者, E-mail: tgli@fio.org.cn

tepida [26] 或 *A. beccarii* [22, 24, 27]。

青岛湾潮间带环境的季节性变化很明显, 鉴于浅水底栖有孔虫野外调查数据的匮乏, 本文对青岛湾活体有孔虫的优势种 *A. aomoriensis* 进行了连续 12 个月的壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 采样测试, 探讨了其壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值对潮间带环境季节变化的响应。

1 材料与方法

1.1 样品的采集和处理

沉积物样品采自青岛湾泥砂质潮间带(图 1a, b),

从 2014 年 6 月至 2015 年 5 月每月中旬采样一次, 共 12 个月。退潮时采取表层 1 cm 沉积物, 保存于采样瓶中, 并加入适量海水。采样时用水银温度计测量气温、水温和泥温, 用手持式盐度计测量海水盐度。样品带回实验室后, 去掉海水, 立即加入虎红和酒精的混合溶液对活体 *A. aomoriensis* 进行染色。放置 48 h 后, 将沉积物用 300 目(约 48 μm)的筛绢过水冲洗, 粗粒部分放置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干。从烘干的样品中挑出被虎红染色的 *A. aomoriensis* 活体(图 1d)用于进一步分析。

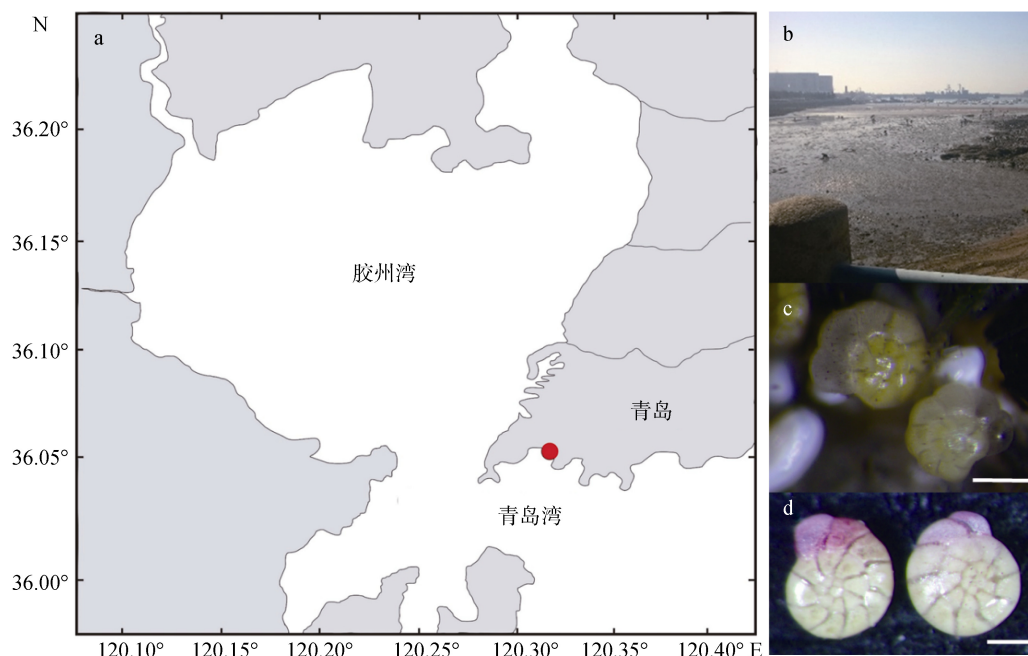


图 1 活体 *Ammonia aomoriensis* 及其采样点

Fig. 1 Living *Ammonia aomoriensis* and the sampling site

a. 青岛湾采样点; b. 潮间带现场照片; c. 活体 *A. aomoriensis*(见黄色原生质); d. 经虎红染色后用于测试壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的 *A. aomoriensis*。图中标尺为 200 μm

a. Sampling site in Qingdao Bay, Yellow Sea, China; b. Photograph of the intertidal flats; c. Living *A. aomoriensis* with yellow protoplasm; d. Individuals stained for stable oxygen isotope measurement. The scale bar is 200 μm

1.2 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 测试

有孔虫按壳径每增加 50 μm 间隔被划分成 7 个组: 200~250 μm , 250~300 μm , 300~350 μm , 350~400 μm , 400~450 μm , 450~500 μm 和 500~550 μm 进行 $\delta^{18}\text{O}$ 测试。壳径测量由实体显微镜 LEICA S8AP0 利用 cellSens Standard 软件完成。从各个壳径范围分别挑取 4~32 枚 *A. aomoriensis*。将每份样品放入 0.3 mL 的玻璃小管内, 用解剖针扎破壳体。先加入适量 3% 的次氯酸钠溶液, 用于除去被虎红染色的原生质。两小时后吸掉废液, 用去离子水清洗 3 次。再加入适量 5% 的 H_2O_2 溶液浸泡壳体约 2 h, 期间可轻轻敲打玻

璃小管管壁使 H_2O_2 溶液和壳体充分反应, 去除有机杂质。再加入丙酮溶液洗去壳体表面粘附的油脂, 超声 30 s 后用针管吸去浊液, 加水再洗 3 次, 放入 50 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥之后待测试。氧同位素测试在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室 GV IsoPrime 质谱仪上进行, 通过 NBS18 标准校正为 PDB 标准, 本文数据测试标准误差是 0.07‰。

2 实验结果

表 1 显示了 2014 年 6 月至 2015 年 5 月不同壳径范围的活体 *A. aomoriensis* 的壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值和月平均

表 1 青岛湾潮间带 2014 年 6 月至 2015 年 5 月各月活体 *A. aomoriensis* 的壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 以及测量的环境因子

Tab. 1 The $\delta^{18}\text{O}$ values of living *A. aomoriensis* and measured water parameters every month from June, 2014 to May, 2015

采样日期 (年-月-日)	不同壳径壳体 $\delta^{18}\text{O}$ (‰)							月平均 $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	测量气 温(℃)	测量水 温(℃)	测量泥 温(℃)	测量 盐度
	200~ 250 μm	250~ 300 μm	300~ 350 μm	350~ 400 μm	400~ 450 μm	450~ 500 μm	500~ 550 μm					
2014-06-15	/	/	0.08	-0.02	0.20	0.50	0.60	0.27	29	24	23.5	30
2014-07-15	-0.20	-0.39	/	/	/	/	/	-0.30	25	23	23	29.5
2014-08-16	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	32.5	33	30	29
2014-09-15	-1.18	-1.42	/	/	0.36	/	/	-0.75	18	23.5	23	29
2014-10-14	-0.84	-1.27	-0.59	/	-0.23	/	/	-0.73	20	23	21	30
2014-11-14	/	-0.44	/	/	/	/	/	-0.44	12	15	14	30
2014-12-14	/	-0.22	-0.24	-0.28	-0.26	/	/	-0.25	4.7	8	8	30
2015-01-13	/	0.09	0.12	-0.23	0.06	/	/	0.01	4.8	5.9	6.2	31
2015-02-11	/	0.50	-0.02	0.00	0.07	0.17	/	0.14	4.2	5.8	3.8	31
2015-03-19	1.10	1.06	0.62	0.50	0.49	0.57	/	0.72	7.6	12	9	31
2015-04-17	/	0.70	0.87	0.70	0.66	0.72	0.58	0.71	11	13	11.5	30.5
2015-05-17	/	-0.02	0.02	0.04	0.00	/	/	0.01	14.8	18.6	16.9	30
壳径平均	-0.28	-0.14	0.11	0.10	0.15	0.49	0.59	/	/	/	/	/

"/" 表示没有数据

值, 以及测量的气温、水温、泥温和盐度值。野外测量的气温、水温和泥温的变化基本一致(图 2), 表现为夏季温度高(8 月最高), 冬天温度低(2 月最低)。测量气温的年变化范围为 4.2~32.5℃, 水温的年变化范围为 5.8~33℃, 泥温的年变化范围为 3.8~30℃。海水盐度的季节变化范围相对温度的变化要窄很多, 为 29~31, 体现为夏季月份最低, 而冬季月份最高, 全年的海水盐度波动为 2 个盐度单位。

A. aomoriensis 壳体的月平均 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出在 9 月和 10 月最轻, 在 3 月和 4 月最重的特点。全年变化

范围为-0.75‰到 0.72‰, 变化幅度为 1.47‰。从图 2 可以看到, *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化模式与温度和盐度的变化模式相同, 但是其变化要滞后于环境变化约 2 个月。

3 讨论

3.1 温度对 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响

Wefer 和 Berger 对采自于 1~3 m 水深(年最低温度 26℃在 2 月, 年最高温度 30℃在 7 月)的热带大型

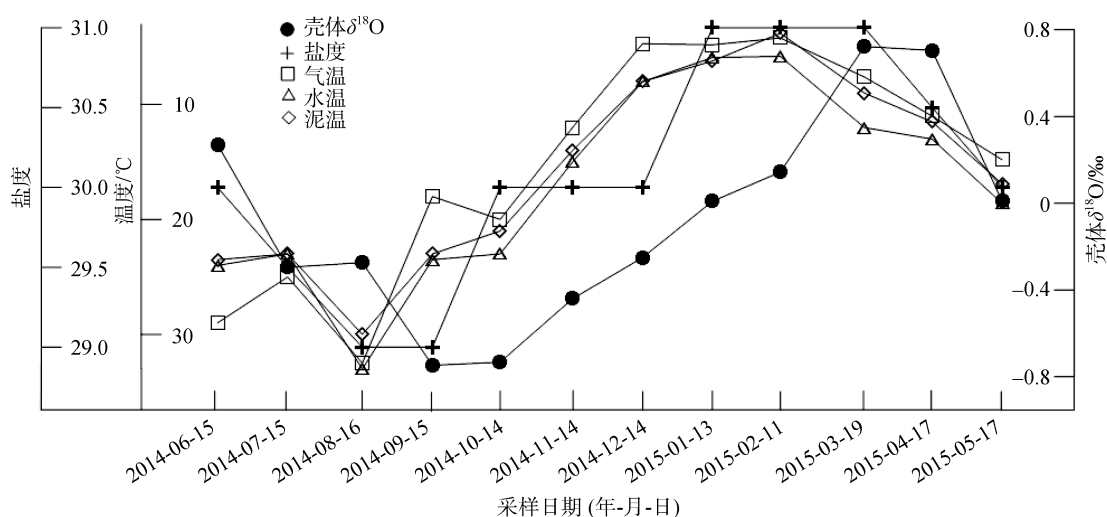


图 2 青岛湾潮间带 2014 年 6 月至 2015 年 5 月气温、水温、泥温和盐度, 以及活体 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 月平均值的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations in salinity and air, seawater, and sediment temperatures, and monthly averages of $\delta^{18}\text{O}$ in living *A. aomoriensis* from June, 2014 to May, 2015

底栖有孔虫 *M. vertebralis* 和 10 m 水深(年最低温度 16℃在 2 月, 年最高温度 29.5℃在 8 月)的 *C. compressa* 进行了壳体同位素分析, 结果显示其壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 具有很好的季节变化^[20]。放置于 Cariaco 海盆 3 a 的沉积物捕获器显示, *Globigerinoides ruber* (pink)的壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 基本精确地记录了该海区表层水温度的季节变化^[28]。对加利福尼亚湾 7 a 的沉积物捕获器研究也显示 *G. ruber* 的壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 精确地记录了表层水温度的季节变化^[29]。但是由于自然环境的复杂性, 有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 对温度的响应可能会受到干扰。Fontanier 等^[18]对法国 Biscay 湾约 550 m 水深的 *C. pachydermus* 和 *Uvigerina* 等活体底栖有孔虫进行研究, 没有观察到壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化。Filipsson 等^[19]对 Havstens 湾 20 m 水深和 Gullmar 湾 119 m 水深的 *S. fusiformis* 进行了 16 个月调查, 结果表明温度和盐度的季节变化与壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 没有显著关系, 认为海水 $\delta^{18}\text{O}$ 对温度的作用有一定的抵消。另外, 相对于野外调查, 能更好地控制变量的培养实验也证实了温度对有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的控制作用。例如将 *Bulimina aculeata* 和 *B. marginata* 分别放置于 4℃, 7℃, 14℃和 21℃下培养, 实验表明其壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 随温度升高而变轻^[30]。另一组 *B. marginata* 在 4~19℃的培养实验表明, 在控制壳径的前提下, 温度对壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的控制作用为 -0.22‰/℃^[31]。将浅水底栖有孔虫 *A. beccarii* 在 10~27℃, 盐度 18~33 范围内培养, 观察到壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 随温度升高而线性变轻^[32]。

近岸浅水环境的季节性波动比深海大, 如本研究的采样点青岛湾潮间带季节温差变化非常明显, 冬夏差异高达约 27℃(表 1)。*A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值在变化模式上与温度和盐度的年际周期性变化一致, 显示对温度和盐度变化响应显著。但是, 其最轻值出现在 2014 年 9~10 月, 而最重值出现在 2015 年 3~4 月, 比温、盐的变化滞后了约 2 个月。

根据 Shackleton^[10], Lynch-Stieglitz 等^[12]和 Toyofuku 等^[32]所得的有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的分馏平衡方程, 假设海水 $\delta^{18}\text{O}$ 不变且 *A. aomoriensis* 分馏平衡, 温度升高 1℃, 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 将偏轻 0.21‰~0.25‰, 青岛湾潮间带冬季和夏季泥温的最大差值约为 26℃, 则壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的年变化幅度应该有 5.46‰~6.5‰, 而实际的变化幅度只有 1.47‰。其可能是因为真实的钙化温度差没有测量的那么大, 夏季 *A. aomoriensis* 的丰度非常低, 可能高温不适合这个种的生长, 因此它们在温度较低的时间内钙化。另外, 也有可能是受到了生命

效应的影响。

3.2 盐度对 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响

有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 除了受温度的控制以外, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 也会对其产生影响^[33-34]。海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与水循环中的分馏密切相关, 主要受蒸发、大气水汽交换、降雨以及淡水输入(降雨、河流和冰盖融化)的影响^[35-36]。由于这些过程最终可以在盐度上体现出来, 因此海水 $\delta^{18}\text{O}$ 与盐度之间存在很好的线性正相关关系^[37], 但是 $\delta^{18}\text{O}$ -盐度关系式存在海区差异^[12, 38]。另外, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化比盐度更复杂, 显著的季节和年际变化可能给海水 $\delta^{18}\text{O}$ 或海水 $\delta^{18}\text{O}$ -盐度的关系带来偏差, 其原因有大气中的附加分馏或海冰的形成^[38]。

在中国边缘海, 吴世迎^[39]首先建立了黄河三角洲海区海水 $\delta^{18}\text{O}$ 与盐度的关系: $\delta^{18}\text{O}_w = 0.25S - 8.39$ 。随后, Kim 等^[40-41]将对马暖流的数据与前人在长江口、黄河口和黑潮区的数据相结合, 得到 $\delta^{18}\text{O}_w = 0.24S - 8.13$ ^[42]。杜金秋等于夏季对黄、东海 8 个断面 57 个站位的海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行了测定, 得到关系式: $\delta^{18}\text{O}_w = 0.29S - 9.85(r^2 = 0.67)$ ^[43]。Ye 等^[36]在夏季和冬季对黄、东海的表层海水 $\delta^{18}\text{O}$ 做了调查, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与盐度呈正相关但存在季节差异: $\delta^{18}\text{O}_w = 0.27S - 10.68(r^2 = 0.68, p < 0.001, \text{夏季})$; $\delta^{18}\text{O}_w = 0.24S - 8.66(r^2 = 0.89, p < 0.001, \text{冬季})$, 大气强迫的季节差异(潮湿温和的夏季风和强劲干燥的冬季风)和区域降水会给海水 $\delta^{18}\text{O}$ 带来季节和空间上的差异。

在本研究中, 青岛湾的季节性非常明显, *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化与盐度的变化呈正相关, 由上述公式推算, 青岛湾全年的盐度变化为 2, 相应的海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化幅度为 0.48‰~0.58‰, 可能会对 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化带来一定的影响。

3.3 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 季节变化的滞后

根据有孔虫壳体的生长特征, 出现滞后的原因可能来自于以下几个方面。首先, 在野外采得的有孔虫壳体记录的信息是它在生长期间的信息, 而我们现场测得的环境因子数据只是一瞬间的^[44]。*Ammonia* 属的实验室培养结果显示, 有孔虫个体从繁殖幼体到成体, 大概需要几个月的时间。*A. beccarii* 在 10~27℃、盐度 18~33 的培养条件下在 2 个月内才长到 300 μm 以上^[32]; *A. tepida* 在 20℃, 盐度 32 的条件下, 2 个月最大长到 700 μm ^[45]; *Ammonia* sp. 在 26℃下 2~3 个月内只长到 247~288 μm ^[46]; *A. tepida*

在 25℃ 条件下 1 个月生长了 10~21 个房室^[47]; *A. aomoriensis* 在 18 中 6 周最多只生长了 100 μm ^[27], 而 *A. aomoriensis* 在 1 个月(25℃, 盐度 32)的时间内只生长了不到 200 μm ^[26]。目前唯一关于浅水底栖有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化的报道来自于热带大型底栖有孔虫 *M. vertebralis* 和 *C. compressa*, 它们分别采自于 1~3 m 水深和 10 m 水深, 由于个体较大, 可用解剖针进行分房室测试, 每份样品 1~10 个房室, 从而避免与早期房室的混合, 精确地恢复了壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 变化时间序列, 没有出现滞后现象^[20]。本文用来测试的 *A. aomoriensis* 壳径范围为 200~550 μm , 由此推测, 实验得到的 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 月平均值可能记录了若干个月的环境信息, 而且不同季节有孔虫壳体的生长速度差异较大。*A. aomoriensis* 的个体相对于大型有孔虫要小, 为了满足上机要求的样品用量, 不可能对壳体进行分房室测试, 从而无法剔除不同时间段、不同温度条件下生长的壳室的影响。

其次, 有孔虫的生长情况非常复杂。有孔虫早期的房室小且生长快, 后期房室大且生长慢^[34, 48-50]。*A. tepida* 的生长速率从最开始的一天一个房室降低到一周一个房室^[47]。Bradshaw^[48]在实验室观察了 *Streblus beccarii* var. *tepidus* 的生长情况, 发现其成体在 1 个月内只生长了 5~8 个房室(10~35℃)。另外, 有孔虫壳体的形成可能是集中在某个时间段(几小时)完成的^[46]。利用微计算机断层扫描技术(显微 CT)对野外共生大型有孔虫 *Heterostegina depressa* 进行房室体积扫描, 发现其生长出现潮汐周期(约 14.8 d)和月相周期(约 29.5 d), 可能是因为潮汐所产生的强烈的潮流影响到了半附着的底栖有孔虫^[51-52], 细粒沉积物被悬浮而减弱了光的强度, 但增加了无机营养物质, 从而影响了内共生体, 且内共生的微藻在满月的时候光合作用速率更高^[53]。月光的增强和潮汐浊流引起的水体中光的减弱这两个因素之间的相互作用, 导致时而相互助益时而相互削弱^[54]。这种潮汐和月亮周期在浮游有孔虫^[55-59]和其它大型底栖有孔虫也有观察到。

4 结论

本文对青岛湾潮间带浅水底栖有孔虫 *A. aomoriensis* 进行了连续 12 个月的活体采样, 现场测量气温, 水温, 泥温和盐度, 对虎红染色的活体进行分壳径(200~550 μm , 50 μm 间隔)壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 测试。研究显示, 青岛湾 *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值受温度与海

水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响, 其壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值表现出了很好的季节性波动。但是, *A. aomoriensis* 壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 滞后于温度和盐度的变化约 2 个月, 有孔虫壳体记录的是其在生长期间, 在真实钙化温度下, 分馏所得的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

参考文献:

- [1] Urey H C. The thermodynamic properties of isotopic substances[J]. Journal of the Chemical Society, 1947, 0: 562-581.
- [2] Kim S T, O'Neil J R. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(16): 3461-3475.
- [3] Tarutani T, Clayton R N, Mayeda T K. The effect of polymorphism and magnesium substitution on oxygen isotope fractionation between calcium carbonate and water[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1969, 33(8): 987-996.
- [4] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. The Journal of Chemical Physics, 1969, 51(12): 5547-5558.
- [5] McCrea J M. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale[J]. The Journal of Chemical Physics, 1950, 18(6): 849-857.
- [6] Epstein S, Buchsbaum R, Lowenstam H A, et al. Revised carbonate-water isotopic temperature scale[J]. Geological Society of America Bulletin, 1953, 64(11): 1315-1326.
- [7] Erez J, Luz B. Experimental paleotemperature equation for planktonic foraminifera[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47(6): 1025-1031.
- [8] Bouvier-Soumagnac Y, Duplessy J C. Carbon and oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera from laboratory culture, plankton tows and recent sediment: Implications for the reconstruction of paleoclimatic conditions and of the global carbon cycle [J]. The Journal of Foraminiferal Research, 1985, 15(4): 302-320.
- [9] Bouvier-Soumagnac Y Y, Duplessy J C, Bé A W H. Isotopic composition of a laboratory cultured planktonic foraminifer *O. universa*, implications for paleoclimatic reconstructions[J]. Oceanologica Acta, 1986, 9: 519-522.
- [10] Shackleton N J. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*: Isotopic changes in the ocean during the last glacial[J]. Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, 1974, No. 219: 203-209.
- [11] Marchitto T M, Curry W B, Lynch-Stieglitz J, et al.

- Improved oxygen isotope temperature calibrations for cosmopolitan benthic foraminifera[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 130(0): 1-11.
- [12] Lynch-Stieglitz J, Curry W B, Slowey N. A geostrophic transport estimate for the Florida Current from the oxygen isotope composition of benthic foraminifera[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14(3): 360-373.
- [13] Dunbar R B, Wefer G. Stable isotope fractionation in benthic foraminifera from the Peruvian continental margin[J]. *Marine Geology*, 1984, 59(1-4): 215-225.
- [14] Labeyrie L D, Duplessy J C, Blanc P L. Variations in mode of formation and temperature of oceanic deep waters over the past 125000 years[J]. *Nature*, 1987, 327(6122): 477-482.
- [15] Zachos J C, Quinn T M, Salamy K A. High-resolution (104 years) deep-sea foraminiferal stable isotope records of the Eocene-Oligocene climate transition[J]. *Paleoceanography*, 1996, 11(3): 251-266.
- [16] Shakun J D, Lea D W, Lisiecki L E, et al. An 800-kyr record of global surface ocean and implications for ice volume-temperature coupling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 426: 58-68.
- [17] Elderfield H, Ferretti P, Greaves M, et al. Evolution of ocean temperature and ice volume through the mid-pleistocene climate transition[J]. *Science*, 2012, 337(6095): 704-709.
- [18] Fontanier C, Mackensen A, Jorissen F J, et al. Stable oxygen and carbon isotopes of live benthic foraminifera from the Bay of Biscay: Microhabitat impact and seasonal variability[J]. *Marine Micropaleontology*, 2006, 58(3): 159-183.
- [19] Filipsson H L, Nordberg K, Gustafsson M. Seasonal study of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in living (stained) benthic foraminifera from two Swedish fjords[J]. *Marine Micropaleontology*, 2004, 53(1-2): 159-172.
- [20] Wefer G, Berger W H. Stable isotopes in benthic foraminifera: Seasonal variation in large tropical species[J]. *Science*, 1980, 209(4458): 803-805.
- [21] Makoto S T, Hiroshi K, Masashi T. Phylogenetic relationships among genus *Ammonia* (Foraminifera) based on ribosomal DNA sequences, which are distributed in the vicinity of the Japanese Islands[J]. *Frontier Research on Earth Evolution*, 2005, 2: 1-10.
- [22] Hayward B W, Holzmann M, Grenfell H R, et al. Morphological distinction of molecular types in *Ammonia* - towards a taxonomic revision of the world's most commonly misidentified foraminifera[J]. *Marine Micropaleontology*, 2004, 50(3-4): 237-271.
- [23] Haynert K, Schönfeld J, Polovodova A I, et al. The benthic foraminiferal community in a naturally CO_2 -rich coastal habitat of the southwestern Baltic Sea[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(11): 4421-4440.
- [24] 类彦立, 李铁刚. 奥茅卷转虫 *Ammonia aomoriensis* (Asano, 1951)与毕克卷转虫 *Ammonia beccarii* (Linnaeus, 1758)(有孔虫)的分类学以及在黄东海分布的温盐深特征比较研究[J]. *微体古生物学报*, 2015, 32(1): 1-19.
- Lei Yanli, Li Tiegang. *Ammonia aomoriensis* (Asano, 1951) and *Ammonia beccarii* (Linnaeus, 1758) (foraminifera): Comparisons on their taxonomy and ecological distributions correlated to temperature, salinity and depth[J]. *Acta Micropaleontologica Sinica*, 2015, 32(1): 1-19.
- [25] Lei Y, Li T, Nigam R, et al. Environmental significance of morphological variations in the foraminifer *Ammonia aomoriensis* (Asano, 1951) and its molecular identification: A study from the Yellow Sea and East China Sea, PR China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, Dio: 10.1016/j.palaeo.2016.05.010.
- [26] Mewes A, Langer G, de Nooijer L J, et al. Effect of different seawater Mg^{2+} concentrations on calcification in two benthic foraminifers[J]. *Marine Micropaleontology*, 2014, 113: 56-64.
- [27] Haynert K, Schönfeld J. Impact of changing carbonate chemistry, temperature, and salinity on growth and test degradation of the benthic foraminifera *Ammonia aomoriensis*[J]. *The Journal of Foraminiferal Research*, 2014, 44(2): 76-89.
- [28] Tedesco K, Thunell R, Astor Y, et al. The oxygen isotope composition of planktonic foraminifera from the Cariaco Basin, Venezuela: Seasonal and interannual variations[J]. *Marine Micropaleontology*, 2007, 62(3): 180-193.
- [29] Wejnert K E, Pride C J, Thunell R C. The oxygen isotope composition of planktonic foraminifera from the Guaymas Basin, Gulf of California: Seasonal, annual, and interspecies variability[J]. *Marine Micropaleontology*, 2010, 74(1-2): 29-37.
- [30] Filipsson H L, Bernhard J M, Lincoln S A, et al. A culture-based calibration of benthic foraminiferal paleo-temperature proxies: $\delta^{18}\text{O}$ and Mg/Ca results[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(4): 1335-1347.
- [31] Barras C, Duplessy J C, Geslin E, et al. Calibration of $\delta^{18}\text{O}$ of cultured benthic foraminiferal calcite as a function of temperature[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(4): 1349-1356.
- [32] Toyofuku T, Suzuki M, Suga H, et al. Mg/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ in the brackish shallow-water benthic foraminifer *Ammonia 'beccarii'*[J]. *Marine Micropaleontology*, 2011, 78(3-4): 113-120.
- [33] Vincent E, Killingley J S, Berger W H. Stable isotope composition of benthic foraminifera from the equatorial

- Pacific[J]. *Nature*, 1981, 289(5799): 639-643.
- [34] McCorkle D C, Bernhard J M, Hintz C J, et al. The carbon and oxygen stable isotopic composition of cultured benthic foraminifera[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2008, 303(1): 135-154.
- [35] Rohling E J. paleoceanography, physical and chemical proxies-Oxygen Isotope Composition of Seawater[C]// Scott A E, Cary J M. *Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition)*. Amsterdam: Elsevier, 2013: 915-922.
- [36] Ye F, Deng W, Xie L, et al. Surface water $\delta^{18}\text{O}$ in the marginal China seas and its hydrological implications. *Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science*, 2014, 147: 25-31.
- [37] Epstein S, Buchsbaum R, Lowenstam H A, et al. Carbonate-water isotopic temperature scale[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1951, 62(4): 417-426.
- [38] LeGrande A N, Schmidt G A. Global gridded data set of the oxygen isotopic composition in seawater[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(12): L12604.
- [39] 吴世迎. 渤、黄海水体的氧同位素组成研究[J]. *中国科学(B 辑)*, 1990, 7: 756-763.
Wu Shiyong. Oxygen isotope composition of seawaters in the Huanghai (Yellow) Sea and Bohai Sea[J]. *Science in China (Series B)*, 1990, 7: 756-763.
- [40] Kang D J, Chung C S, Kim S H, et al. Oxygen isotope characteristics of seawaters in the Yellow Sea[J]. *Oceanographic Literature Review*, 1995, 42(11): 279-284.
- [41] Zhang J, Letolle R, Martin J M, et al. Stable oxygen isotope distribution in the Huanghe (Yellow River) and the Changjiang (Yangtze River) estuarine systems[J]. *Continental Shelf Research*, 1990, 10(4): 369-384.
- [42] Kim K R, Cho Y K, Kang D J, et al. The origin of the Tsushima Current based on oxygen isotope measurement[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(3): L03602.
- [43] 杜金秋, 陈敏, 曹建平, 等. 南黄海和东海海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的组成及其意义[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(6): 1057-1066.
Du Jinqiu, Chen Min, Cao Jianping, et al. Oxygen isotope in seawater and its hydrological implication in the southern Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(6): 1057-1066.
- [44] Wollenburg J E, Raitzsch M, Tiedemann R. Novel high-pressure culture experiments on deep-sea benthic foraminifera — Evidence for methane seepage-related $\delta^{13}\text{C}$ of *Cibicides wuellerstorfi*[J]. *Marine Micropaleontology*, 2015, 117: 47-64.
- [45] Diz P, Barras C, Geslin E, et al. Incorporation of Mg and Sr and oxygen and carbon stable isotope fractionation in cultured *Ammonia tepida*[J]. *Marine Micropaleontology*, 2012, 92-93(0): 16-28.
- [46] Keul N, Langer G, de Nooijer L J, et al. Effect of ocean acidification on the benthic foraminifera *Ammonia* sp. is caused by a decrease in carbonate ion concentration[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(10): 6185-6198.
- [47] de Nooijer L J, Hathorne E C, Reichert G J, et al. Variability in calcitic Mg/Ca and Sr/Ca ratios in clones of the benthic foraminifer *Ammonia tepida*[J]. *Marine Micropaleontology*, 2014, 107(0): 32-43.
- [48] Bradshaw J S. Laboratory studies on the rate of growth of the foraminifer, “*Streblus beccarii* (Linné) var. *tepida* (Cushman)”[J]. *Journal of Paleontology*, 1957, 31(6): 1138-1147.
- [49] Stouff V, Lesourd M, Debenay J P. Laboratory observations on asexual reproduction (schizogony) and ontogeny of *Ammonia tepida* with comments on the life cycle[J]. *The Journal of Foraminiferal Research*, 1999, 29(1): 75-84.
- [50] Barras C, Geslin E, Duplessy J C, et al. Reproduction and growth of the deep-sea benthic foraminifer *bulimina marginata* under different laboratory conditions[J]. *The Journal of Foraminiferal Research*, 2009, 39(3): 155-165.
- [51] Hohenegger J, Yordanova E, Nakano Y, et al. Habitats of larger foraminifera on the upper reef slope of Sesoko Island, Okinawa, Japan[J]. *Marine Micropaleontology*, 1999, 36(2-3): 109-168.
- [52] Zuo S H, Zhang N C, Li B, et al. Numerical simulation of tidal current and erosion and sedimentation in the Yangshan deep-water harbor of Shanghai[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(3): 287-298.
- [53] Eder W, Briguglio A, Hohenegger J. Growth of *Heterostegina depressa* under natural and laboratory conditions[J]. *Marine Micropaleontology*, 2016, 122: 27-43.
- [54] Hohenegger J, Briguglio A. Methods for estimating individual growth of foraminifera based on chamber volumes[C]// Kitazato H, Bernhard J M. *Approaches to Study Living Foraminifera: Collection, Maintenance and Experimentation*. Japan, Tokyo: Springer, 2014: 29-54.
- [55] Bijma J, Erez J, Hemleben C. Lunar and semi-lunar reproductive cycles in some spinose planktonic foraminifera[J]. *Journal of foraminiferal research*, 1990, 20(2): 117-127.
- [56] Bijma J, Hemleben C, Wellnitz K. Lunar-influenced carbonate flux of the planktic foraminifer *Globigerinoides sacculifer* (Brady) from the central Red Sea[J].

- Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1994, 41(3): 511-530.
- [57] Erez J, Almogi-Labin A, Avraham S. On the life history of planktonic foraminifera: Lunar reproduction cycle in *Globigerinoides sacculifer* (Brady)[J]. *Paleoceanography*, 1991, 6(3): 295-306.
- [58] Jonkers L, Reynolds C E, Richey J, et al. Lunar periodicity in the shell flux of planktonic foraminifera in the Gulf of Mexico[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(10): 3061-3070.
- [59] Lončarić N, Brummer G-J A, Kroon D. Lunar cycles and seasonal variations in deposition fluxes of planktic foraminiferal shell carbonate to the deep South Atlantic (central Walvis Ridge)[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(7): 1178-1188.

Seasonal oxygen isotope variation of a living benthic foraminifera *Ammonia aomoriensis* (Asano, 1951) in the intertidal area of Qingdao Bay, Yellow Sea, China

YU Zhou-fei^{1, 2}, LEI Yan-li¹, LI Tie-gang^{1, 3, 4}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China, Qingdao 266061, China; 4. Function Laboratory of Marine Geology and Environment, National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Received: Mar. 23, 2016

Key words: intertidal flats; *Ammonia aomoriensis*; stable oxygen isotope; seasonal variation

Abstract: A successive 12-month study (June 2014 to May 2015) was conducted on the oxygen isotope composition ($\delta^{18}\text{O}$) of living benthic foraminifera *Ammonia aomoriensis*, from the intertidal flats of Qingdao Bay, Yellow Sea, China. $\delta^{18}\text{O}$ values were measured in different diameter test groups, ranging from 200 μm to 550 μm , at 50 μm intervals, from Rose Bengal stained specimens. The results showed that the fluctuant pattern of $\delta^{18}\text{O}$ was remarkably similar to the temperature and salinity changes, negative and positive, respectively. The variation in $\delta^{18}\text{O}$ in living *A. aomoriensis* was influenced by temperature and seawater $\delta^{18}\text{O}$, and exhibited a seasonal pattern which showed a time-lag of about two months. This result implies that the large shell of *A. aomoriensis* reflects the environmental $\delta^{18}\text{O}$ conditions during the months when the chambers form, and probably record the oxygen isotopes, obtained by fractionation under actual calcification temperatures, over the whole life cycle.

(本文编辑: 刘珊珊)