

doi:10.3799/dqkx.2015.072

# 浮游有孔虫标准化壳体重量测试方法 及在西太平洋的应用

安佰正<sup>1,2</sup>, 李铁刚<sup>1\*</sup>, 孙晗杰<sup>1</sup>, 熊志方<sup>1</sup>, 常凤鸣<sup>1</sup>

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071  
2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 使用标准化壳体重量法和传统壳体重量法分别对中国南海(South China Sea, 简称 SCS)站表层沉积物和 MD06-3052 岩心沉积物样品进行了测试, 获得了浮游有孔虫种属 *Globigerinoides ruber* (*G. ruber*) 的标准化壳体重量和传统壳体重量。通过对 SCS 站表层沉积物中 *G. ruber* 标准化壳体重量与传统壳体重量的比较, 认为在该海域使用标准化壳体重量替代性指标能够更好的排除壳体粒径的干扰。通过对 MD06-3052 岩心中 *G. ruber* 标准化壳体重量与南极 Vostok 冰心的 CO<sub>2</sub> 浓度 ( $pCO_2$ ) 曲线进行对比, 认为标准化壳体重量方法能够较好的反映出表层海水 [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] 的变化。标准化壳体重量方法快速简便, 指示性好, 在探讨晚更新世以来表层海水在全球碳循环的重要作用中, 是一个很有潜力的指标。

**关键词:** 标准化壳体重量; 浮游有孔虫; 碳酸盐; 碳循环; 西太平洋; 海洋地质。

中图分类号: P736.2

文章编号: 1000-2383(2015)05-0881-09

收稿日期: 2014-10-15

## Application of Planktonic Foraminifera Size-Normalized Shell Weight in the Western Pacific

An Baizheng<sup>1,2</sup>, Li Tiegang<sup>1\*</sup>, Sun Hanjie<sup>1</sup>, Xiong Zhifang<sup>1</sup>, Chang Fengming<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Planktonic foraminifera *Globigerinoides ruber* (*G. ruber*) shell weight of sediment samples from South China Sea (SCS) located in the South China Sea and MD06-3052 located in the western Pacific are tested using size-normalized shell weight method and traditional shell weight method. In comparison with traditional shell weight method, SCS data indicate that the size-normalized shell weight method for *G. ruber* can significantly reduce the influence of test size on foraminifera shell weight in the study area. Comparing the variation curves of CO<sub>2</sub> concentration ( $pCO_2$ ) recorded in Vostok ice core, MD06-3052 *G. ruber* data show that size-normalized shell weight can indicate the change of sea surface water [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] more effectively. The size-normalized shell weight method provides a reliable and rapid proxy for the weight analyses in the paleoceanographic study, and a potential proxy in studying the influence of surface sea water in global carbon cycle since Late Pleistocene.

**Key words:** size-normalized shell weight; planktonic foraminifera; carbonate; carbon cycle; the western Pacific; marine geology.

人为 CO<sub>2</sub> 的排放对全球气候变化的影响是当前科学界和公众关注的热点话题, 在过去 250 a 间,

大气 CO<sub>2</sub> 浓度 ( $pCO_2$ ) 上升了大约 40% (Solomon *et al.*, 2007; Doney *et al.*, 2009), 导致过多 CO<sub>2</sub> 进

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项项目 (No. XDA10010305); 国家海洋局专项项目 (No. GASI-04-01-02); 国家自然科学基金项目 (Nos. 41230959, 41206044).

**作者简介:** 安佰正 (1984-), 男, 博士研究生, 主要从事古海洋学、浮游有孔虫研究. E-mail: an\_baizheng@126.com

\* **通讯作者:** 李铁刚, E-mail: tgli@qdio.ac.cn

**引用格式:** 安佰正, 李铁刚, 孙晗杰, 等, 2015. 浮游有孔虫标准化壳体重量测试方法及在西太平洋的应用. 地球科学——中国地质大学学报, 40 (5): 881-889.

入表层海水,提高了溶解态  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{H}^+$  的浓度,导致大洋酸化加剧 (Orr *et al.*, 2005), 而  $[\text{CO}_3^{2-}]$  的降低,使得水体中的碳酸钙更易于溶解 (Fabry *et al.*, 2008). 同时这种变化对海洋生态和海洋碳库变动也带来了深刻的影响 (Cooley *et al.*, 2009; Logan, 2010).

事实上,在地质历史时期,大气  $p\text{CO}_2$  也存在着周期性的变化. Petit *et al.* (1999) 通过研究南极 Vostok 冰心重建的  $p\text{CO}_2$  变化记录,发现自 400 ka 到工业化之前的 4 个冰期—间冰期旋回中,大气  $p\text{CO}_2$  在 349 ~ 581  $\text{mg}/\text{m}^3$  变动. 其振幅在 200  $\text{mg}/\text{m}^3$  左右,这与工业化以来大气  $p\text{CO}_2$  的增幅 (543 ~ 736  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 相当. 随着古海洋和古气候研究的深入,探索大气  $p\text{CO}_2$  冰期—间冰期旋回的环境效应及其控制机制成为过去全球变化研究的重大科学问题.

当前国际上用来探讨古海洋碳酸盐变化和碳循环的替代性指标很多,主要有沉积物碳酸钙重量百分含量,浮游有孔虫碎壳率,浮游有孔虫壳体重量,有孔虫壳体 B/Ca、Zn/Ca、Mg/Ca 等 (Marchitto *et al.*, 2000; Broecker and Clark, 2001a; Hodell *et al.*, 2001; Anderson and Archer, 2002; Marchitto *et al.*, 2005; Fehrenbacher and Martin, 2011). 但以上大多数指标都是反映深部海水碳酸盐的变化. 实际上,大洋上层水体是海气交换和生物活动最活跃的部分,巨大的碳通量使得其在碳循环和全球变化中起着重要的作用. 大洋上层水体碳酸盐参数 (pH、 $[\text{CO}_3^{2-}]$  等) 的演变为探讨过去大气  $p\text{CO}_2$  的演变和全球碳循环变化提供了新的视角 (Palmer and Pearson, 2003).

浮游有孔虫壳体重量是近几年发展起来的反映古海洋表层水体  $[\text{CO}_3^{2-}]$  的重要指标,主要依据是钙化过程中有孔虫壳重量主要受到周遭水体  $[\text{CO}_3^{2-}]$  的影响 (Bijma *et al.*, 1999). 用来获取浮游有孔虫壳体重量的方法主要有 2 种:一种是传统壳体重量方法,由 Broecker and Clark (2001b) 最早提出和应用;另一种是标准化壳体重量方法,由 Beer *et al.* (2010) 在前人的基础上进行改进并应用. 传统壳体重量方法是取特定粒径范围 (直径为 350 ~ 420  $\mu\text{m}$ ) 的浮游有孔虫壳体若干,测量其总重量并统计被称量的有孔虫壳体数量,然后计算出平均每个壳体的重量 (Lohmann, 1995; Broecker and Clark, 2001a, 2001b). 该方法被广泛用于北大西洋末次冰期—间冰期过渡期的表层海洋  $[\text{CO}_3^{2-}]$  和

$p\text{CO}_2(\text{aq})$  的重建 (Barker and Elderfield, 2002), 估算阿拉伯海全新世和末次冰期的  $[\text{CO}_3^{2-}]$  变化等,并得到了现代浮游生物拖网和表层沉积物中浮游有孔虫壳体重量研究的支持 (Mekik and Raterink, 2008; de Moel *et al.*, 2009; Moy *et al.*, 2009).

标准化壳体重量方法是在传统壳体重量方法的基础上,通过图像处理的手段,测量被称量的有孔虫壳体的直径,然后按照有孔虫重量与壳体直径成正比例的假设,计算出相当于 400  $\mu\text{m}$  直径的有孔虫壳体应有的重量 (Beer *et al.*, 2010). 该方法的核心在于选取成熟的浮游有孔虫壳体,并专注于浮游有孔虫的壳体厚度和密度参数,即具有相同粒径 (或标准化为相同粒径) 的成熟有孔虫个体的壳体重量变化. 该方法提出之后,在北大西洋海域进行的现代浮游有孔虫研究和表层沉积物样品的研究中,便有多种浮游有孔虫如 *Globigerinoides ruber* (*G. ruber*)、*Globigerinoides sacculifer*、*Globigerina bulloides* 等标准化壳体重量变化被证实可以作为过去表层海水碳酸根离子变化的可靠指标 (Beer *et al.*, 2010; Aldridge *et al.*, 2012; Marshall *et al.*, 2013). 浮游有孔虫标准化壳体重量方法亦被应用于古海洋学研究中,如 Davis *et al.* (2013) 在北大西洋将标准化壳体重量方法用于重建过去大气  $p\text{CO}_2$  的变化等. 由于标准化壳体重量方法被提出的时间较短,其在古海洋学方面的应用还处于发展阶段,现有的研究成果主要集中在大西洋海域,而在西太平洋海域和中国近海仍然缺少关于该方法和过去海洋表层碳酸根离子变化的研究和应用.

本研究中探讨的是浮游有孔虫标准化壳体重量方法. 该指标的测试方法由 Beer *et al.* (2010) 提出,本研究是在其方法的基础上进行了改进,并结合国内实验室中普遍具有的实验条件,以西太平洋 MD06-3052 岩心和中国南海 (South China Sea, 简称 SCS) 站表层沉积物样品为例,介绍了浮游有孔虫标准化壳体重量测试的实验步骤并进行了讨论. 该方法快速简便,能够很好地获得海洋沉积物中浮游有孔虫的标准化壳体重量,并有效地排除壳体大小对标准化壳体重量的影响,结果令人满意.

## 1 材料和方法

### 1.1 实验仪器与耗材

Leica 显微镜和图像处理系统一套,包括连接电脑一台,并安装有 LAS 图像采集系统 (Leica Appli-

cation Suits);体视显微镜一台(型号 Leica S6E),并带有摄像头且能与计算机连接通讯;ImageJ 软件(获取自 <http://rsbweb.nih.gov/ij/index.html>);分析天平一台(Sartorius CP2P,精度  $1\ \mu\text{g}$ );实验用恒温鼓风干燥箱一台(型号 DHG-9023A,可调节温度至  $50\ ^\circ\text{C}$ );50 mL 烧杯、5 mL 冻干瓶、 $63\ \mu\text{m}$  铜筛、黑色载玻片、锡杯和双氧水试剂(AR,体积含量为 30%)。

## 1.2 实验材料

本研究中使用的实验样品取自 MD06-3052 岩心( $14^\circ48.6042'\text{N}$ , $123^\circ29.3983'\text{E}$ )。该岩心取自西太平洋暖池北部、菲律宾岛以东的比科尔陆架上,柱长为 19.48 m,水深为 732 m。该岩心以橄榄灰到灰色粉砂质粘土和粘土质粉砂为主,仇晓华等(2012)利用有孔虫 *G. ruber* 的氧同位素曲线已获得该岩心的年代模式,其底部年龄在 MIS 6 期。笔者在该岩心 0~50 ka 期间(孔深为 0~680 cm)选取了 11 个层位样品进行浮游有孔虫 *G. ruber* 的壳体重量研究。

为了对传统壳体重量和标准化壳体重量方法做一个直观的对比,笔者从 SCS 站( $7.1962^\circ\text{N}$ , $112.3198^\circ\text{E}$ ,位于南海海盆之南的陆架区)的表层沉积物样品中挑选了 20 个 *G. ruber* 的壳体,并将其每一个壳体作为一个组,分别进行单个壳体重量称量和直径测量,获得标准化壳体重量和传统壳体重量二者与有孔虫直径之间的关系。

## 1.3 实验步骤

本研究的实验流程见图 1。实验过程中需要注意,在去除碎屑杂质之后,挑选浮游有孔虫壳体用于摄取照片时,笔者用毛笔将待选有孔虫壳体打湿,选取没有黑色斑点等可疑杂质的完整个体(Mekik and Raterink, 2008);考虑到国内现有的实验条件和图像处理软件的易用性,在进行图像处理时,选取了使用频率较多的图像处理软件 ImageJ 来获得浮游有孔虫壳体的直径数据(Abramoff *et al.*, 2004)。

**1.3.1 样品预处理** 将样品在  $50\ ^\circ\text{C}$  的温度下低温烘干,取 5 g 左右干样,加清水充分浸泡使其分散。利用孔径为  $63\ \mu\text{m}$  的铜筛进行清洗,将剩余的粗组分烘干,用  $300\ \mu\text{m}$  的铜筛分选出粗组分并装入 5 mL 的冻干瓶中保存,以供后继分析所用。

在体视显微镜下挑取浮游有孔虫 *G. ruber* 壳体 30~50 枚,放入玻璃小瓶中。首先用体积含量为 5% 双氧水溶液浸泡 30 min 以去除有机杂质,然后用双蒸水洗去残留的双氧水。之后加入适量双蒸水超声 8 s(频率为 40 kHz),吸去上油液,以去除碎屑

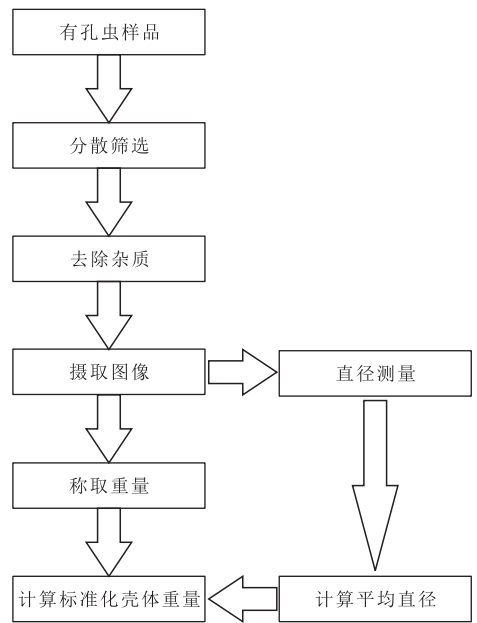


图 1 浮游有孔虫标准化壳体重量方案流程

Fig.1 Process of planktonic foraminifera size-normalized shell weight method

杂质,放入烘箱中  $50\ ^\circ\text{C}$  下低温烘干。

**1.3.2 图像采集和重量测量** 对于每个层位的样品,笔者在体视显微镜下用润湿的毛笔挑选出干净无损的有孔虫壳体,放至黑色载玻片上并使所有有孔虫口面向下,相对集中摆放,摆放好之后有孔虫互不接触;打开显微镜上的摄像头,使用图像采集系统 LAS 摄取照片。本步骤中,在挑选有孔虫壳体时应注意先用毛笔蘸取适量的纯净水将壳体打湿,只选择无损伤且无明显斑点的壳体。本实验中使用的 *G. ruber* 其口面具有 3 个较大的房室,将该面向下放置时,有利于使所有有孔虫个体被从同一角度拍摄,并且更容易保持稳定。

图像采集结束之后,将已拍照有孔虫壳体转移到预先称重的锡杯中,在  $50\ ^\circ\text{C}$  烘箱中烘干 12 h,使用百万分之一分析天平称量以获得有孔虫总重量。在本研究中,该重量同时用于计算浮游有孔虫传统壳体重量和有孔虫标准化壳体重量,以便二者进行对比。

**1.3.3 图像处理** 在本研究中,浮游有孔虫的直径是通过测量壳体的最小外切圆获得的。使用 ImageJ 软件打开由 LAS 采集的图像,并放大至合适大小,使图像中有孔虫的部分充满视野。依次对图像进行锐化(sharpen)和寻找边缘(find edges)处理,使图像中的有孔虫壳体呈现出明显的边界轮廓(图 2)。

使用画圆(oval)获得壳体的最小外切圆(图 3)。

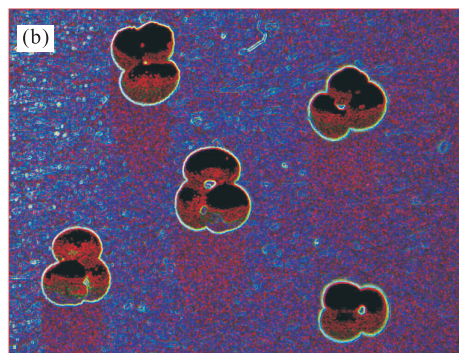
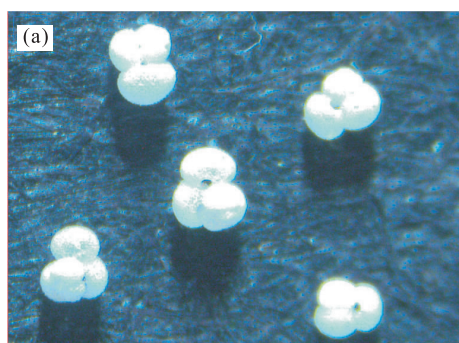


图 2 ImageJ 软件对图像进行锐化和寻找边缘  
Fig.2 Sharpen and find edges using ImageJ

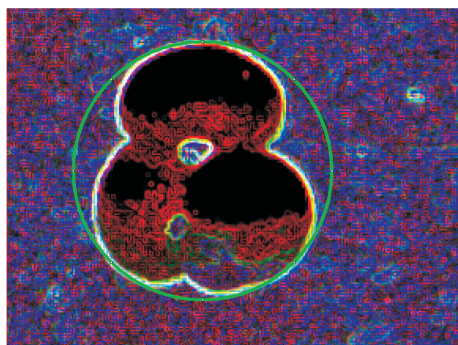


图 3 使用 ImageJ 软件获得有孔虫的最小外切圆  
Fig.3 Get minimum excircle of foraminifera shell using ImageJ

该外切圆的直径即本研究中计算标准化壳体重量时使用的有孔虫壳体的直径。

**1.3.4 标准化壳体重量计算** 使用标准化壳体重量公式计算出每个层位的浮游有孔虫标准化壳体重量。标准化壳体重量使用如下公式计算而来：

$$SNSW = \frac{W}{\sum_{i=1}^n (R_i)} \cdot R_{\text{standard}}, \quad (1)$$

其中,  $W$  为该层位的被测有孔虫壳体总重量 ( $\mu\text{g}$ );  $R_i$  为该层位的壳体直径 ( $\mu\text{m}$ );  $n$  为该层位的壳体个数 (个);  $R_{\text{standard}}$  为标准化直径 ( $\mu\text{m}$ ), 本研究中使

用的是  $400 \mu\text{m}$  (在本研究中使用的浮游有孔虫 *G. ruber* 的直径均大于  $300 \mu\text{m}$ , 且其直径主要集中在  $400 \mu\text{m}$  附近, 因此为了方便计算和进行数据对比, 笔者采用  $400 \mu\text{m}$  为标准化直径, 即把每个层位的有孔虫平均壳体重量均转化到  $400 \mu\text{m}$  有孔虫的对应壳体重量);  $SNSW$  为标准化壳体重量 ( $\mu\text{g}$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 标准化壳体重量与传统壳体重量方法的对比

当前测定壳体重量的方法主要有 2 种, 分别为传统壳体重量方法和标准化壳体重量方法。传统壳体重量方法是从样品中筛选特定粒径范围的有孔虫壳体 (一般约为  $50 \mu\text{m}$ ), 用天平称出壳体总重量之后, 直接计算出该样品有孔虫壳体的平均重量 (Broecker and Clark, 2001b; Broecker and Clark, 2004)。这一方法在很多海域得到了广泛应用, 如大西洋、印度洋、南大洋等, 并取得了良好的使用效果 (Moy *et al.*, 2009; Naik *et al.*, 2010; Aldridge *et al.*, 2012; Mekik *et al.*, 2012)。但在很多情况下, 沉积物样品由于受到陆源物质输入或营养供给匮乏等因素的影响, 其有孔虫丰度很低, 无法获得足量的粒径范围接近的有孔虫壳体, 这些因素限制了传统壳体重量指标的使用。

标准化壳体重量方法是从传统壳体重量方法改进而来 (Beer *et al.*, 2010)。该方法对称量的每一个有孔虫壳体进行直接测量, 然后将壳体重量折算到平均壳体直径以获得标准化壳体重量。标准化壳体重量主要反映出有孔虫壳体壁的厚度和密度, 相对于传统壳体重量, 能够更好地排除壳体大小对重量的影响, 在有孔虫数量有限的样品中也能获得稳定的测试结果 (Hull *et al.*, 2011; Aldridge *et al.*, 2012)。

**2.1.1 SCS 站表层沉积物标准化壳体重量与传统壳体重量对比** SCS 站表层沉积物样品中获得的数据给出了一个很直观的标准化壳体重量与传统壳体重量的对比 (图 4)。传统壳体重量方法, 其表现出的有孔虫壳体重量与有孔虫直径之间具有显著的相关性 (相关系数  $R=0.840$ )。而标准化壳体重量, 因为是将有孔虫的壳体重量标准化到  $400 \mu\text{m}$  所对应的重量, 即主要反映有孔虫壳壁的厚度和密度的变化, 因此其与有孔虫直径之间没有明显的相关性 (相关系数  $R=0.299$ )。在进行研究间的有孔虫壳体重量比较时, 标准化壳体重量方法能够更好地排除所使用

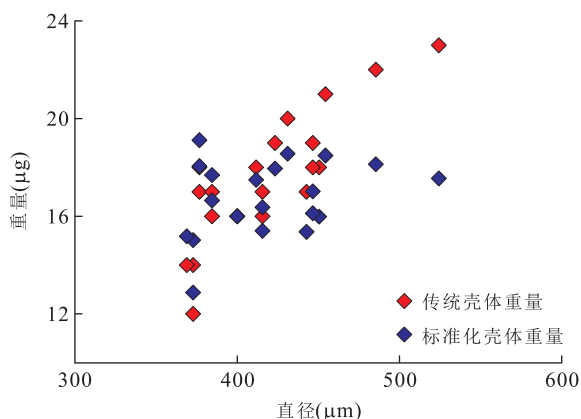


图4 SCS站浮游有孔虫 *G. ruber* 传统壳体重量方法与标准化壳体重量方法的对比

Fig.4 Traditional shell weight method and size-normalized shell weight method for *G. ruber* in SCS

传统壳体重量(红色)与壳体直径的相关系数  $R=0.840$ ; 标准化壳体重量(蓝色)与壳体直径的相关系数  $R=0.299$

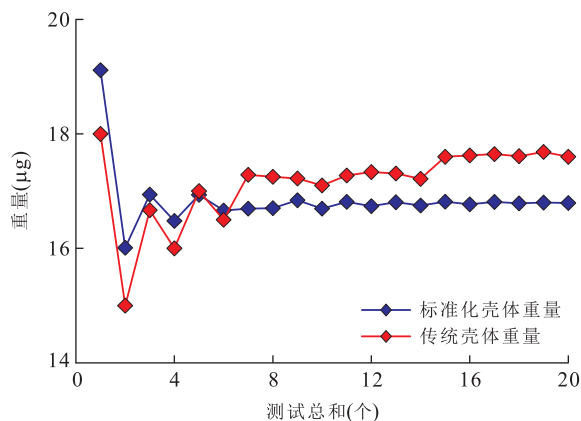


图5 SCS站表层沉积物浮游有孔虫 *G. ruber* 壳体重量与样本中壳体总数的关系

Fig.5 Relationship of shell weight and sum of *G. ruber* of surface sediments in SCS

的壳体的直径不同所带来的干扰。

基于 SCS 站表层沉积物的数据,笔者可以通过将有孔虫直径和重量逐一累加到样本中,探讨标准化壳体重量与样本中壳体总数之间的关系(图5)。可以看出,当样本中有孔虫数量超过6个时,标准化壳体重量方法便能获得相对稳定的数值。而传统壳体重量方法需要更多的有孔虫数量才能取得稳定的数值。这表明在进行有孔虫壳体的研究时,相对于传统壳体重量,标准化壳体重量可以依靠更少的完整有孔虫壳体便能够有效地表达出样品中有孔虫壳体重量的变化。这也是标准化壳体重量方法以反映有孔虫壳体壁的厚度和密度为主而具有的优势。

**2.1.2 MD06-3052 岩心标准化壳体重量与传统壳体重量对比** 使用标准化壳体重量方法对选取的 MD06-3052 站 11 个样品进行了测试,分别挑选 6~13 枚浮游有孔虫 *G. ruber* 进行分析,其分析结果见表 1。从表 1 中可以看出,传统壳体重量结果与标准化壳体重量结果存在较大的差别,在样品 2 中,两者的差异可以高达 2.15  $\mu\text{g}$ 。为了评价在本研究中,标准化壳体重量结果的可靠性,进一步计算了 MD06-3052 多个层位的传统壳体重量和标准化壳体重量与壳体粒径的相关关系(图 6)。数据表明,在 MD06-3052 岩心中,在可用的有孔虫化石丰度较低的情况下,传统壳体重量方法获得的壳体重量与壳体粒径之间呈现出明显的相关性(相关系数  $R=0.742$ )。而同样的样品使用标准化壳体重量方法获得的壳体重量指标,其与壳体粒径的相关性则较小,这表明,相对于传统壳体重量方法,标准化壳体重量方法能够有效的降低壳体粒径的干扰。

在西太平洋及其邻近海域很多岩心位于溶跃面之下,或受陆源物质输入的影响较大,岩心中保存的浮游有孔虫化石含量较低,这对传统壳体重量方法的使用和古海洋学研究造成了一定的影响(汪品先等,1986;徐建等,2001;张兰兰等,2010)。标准化壳体重量方法相对于传统壳体重量方法进行测试时需要的有孔虫数量较少,因此更具有实用优势(Aldridge *et al.*, 2012; Regenberg *et al.*, 2013)。

## 2.2 MD06-3052 岩心 *G. ruber* 标准化壳体重量与大气 $p\text{CO}_2$ 变化对比

为了查明标准化壳体重量与地质历史时期大气  $p\text{CO}_2$  的关系,将 MD06-3052 岩心的 *G. ruber* 标准化壳体重量与同期南极 Vostok 冰心记录中大气  $p\text{CO}_2$  曲线进行了对比(Petit *et al.*, 1999)。结果显示,在 0~50 ka 期间,浮游有孔虫标准化壳体重量其平均值为 12.34  $\mu\text{g}$ ,最高值为 14.07  $\mu\text{g}$ ,出现在末次冰期盛冰期;最低值为 8.84  $\mu\text{g}$ ,对应于全新世晚期。标准化壳体重量表现出冰期间冰期变化特征。同期的南极冰心  $\text{CO}_2$  记录亦显示出冰期低间冰期高的变化趋势。在大气  $p\text{CO}_2$  从冰期的低浓度(约 388  $\text{mg}/\text{m}^3$ )向间冰期的高浓度(约 543  $\text{mg}/\text{m}^3$ )变化过程中,浮游有孔虫的标准化壳体重量下降了 30%以上(图 7)。

## 2.3 标准化壳体重量对西太平洋表层海水 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 的指示作用

许多室内培养实验都表明浮游有孔虫的壳体重量会受到其生长时周遭水体的  $[\text{CO}_3^{2-}]$  的影响

表 1 MD06-3052 岩心浮游有孔虫 *G. ruber* 标准化壳体重量及传统壳体重量

Table 1 Size-normalized shell weight and traditional shell weight of planktonic foraminifera *G. ruber* from MD06-3052

样品号	样品层位(cm)	年代(ka BP)	壳体数量(个)	传统壳体重量( $\mu\text{g}$ )	标准化壳体重量( $\mu\text{g}$ )
1	54~56	3.34	6	7.83	8.84
2	182~184	10.58	11	8.45	10.60
3	238~240	14.45	6	12.50	12.97
4	278~280	19.00	13	14.85	14.07
5	342~344	24.41	11	13.00	13.23
6	390~392	28.00	9	12.89	12.97
7	430~432	30.86	6	12.33	12.73
8	486~488	34.87	11	12.64	13.02
9	574~576	41.17	11	13.64	13.84
10	646~648	46.25	11	11.27	12.46
11	678~680	48.32	8	10.00	11.06

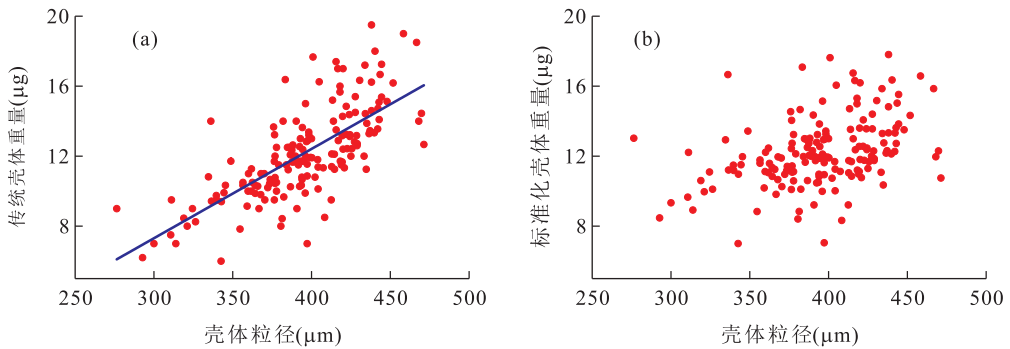


图 6 MD06-3052 岩心浮游有孔虫 *G. ruber* 传统壳体重量方法(a)与标准化壳体重量方法(b)的对比

Fig.6 Traditional shell weight method (a) and size-normalized shell weight method (b) for *G. ruber* in MD06-3052

图 6a 中相关系数  $R=0.742$ ;图 6b 中相关系数  $R=0.451$

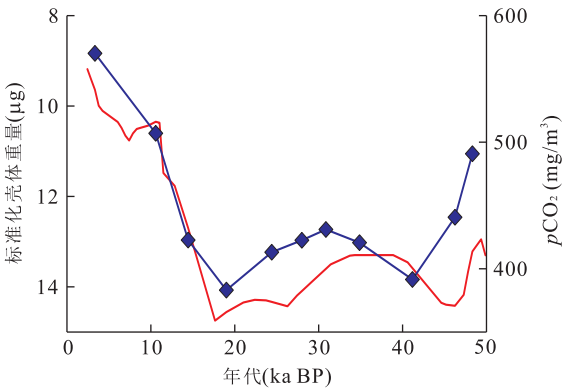


图 7 MD06-3052 岩心浮游有孔虫 *G. ruber* 标准化壳体重量(蓝色曲线)与南极冰心大气  $p\text{CO}_2$  变化曲线(粉色曲线)对比

Fig.7 Size-normalized shell weight of planktonic foraminifera *G. ruber* in MD06-3052(blue line) and Vostok  $p\text{CO}_2$  record (pink line)

et al., 2004). 在海气界面,随着大气  $p\text{CO}_2$  的升高,表层海水中  $p\text{CO}_2$  增加且 pH 下降,并导致水体中  $[\text{CO}_3^{2-}]$  下降,从而使得碳酸钙更易溶解,生活在表层海水中的浮游有孔虫壳体重量也会随之降低 (Fabry et al., 2008; Hönisch et al., 2012; Zeebe, 2012).

在近 50 ka 以来,南极 Vostok 冰心中的大气  $p\text{CO}_2$  主要表现为从未次冰期的低浓度阶段变化到全新世晚期的高浓度阶段 (Petit et al., 1999), 本研究中 MD06-3052 岩心的浮游有孔虫标准化壳体重量也相应地展示出了从未次冰期时的高壳体重量变化到全新世晚期的低壳体重量,这与室内培养实验的结论相吻合,而且这一现象在北大西洋和印度洋海域的研究中也有不少类似的记录 (Moy et al., 2009; Naik et al., 2010). 值得注意的是,本研究所选取的 MD06-3052 岩心所处水深较浅(700 m 左右),而西太平洋海域碳酸盐溶跃面的水深则达 3 400 m (陈荣华等, 1999),所以浮游有孔虫的壳体沉降到海底之后受到深部溶解作用的影响较低,其壳体主

(Spero et al., 1997; Bijma et al., 1999; Lombard et al., 2010). 当  $[\text{CO}_3^{2-}]$  低时,有孔虫壳体重量偏低,反之亦然 (Bijma et al., 1999, 2002; Russell

要受表层水体 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 的影响(Naik and Naidu, 2007)。

## 2.4 标准化壳体重量的影响因素

浮游有孔虫标准化壳体重量方法在实际使用中,仍然需要考虑2个方面的影响:

(1)称重时有孔虫壳体的湿度.在一般实验室中很难保持室内湿度的恒定,尤其是在空气潮湿的夏季,浮游有孔虫壳体的微细结构非常易于从空气中吸收水分从而变得潮湿,而这对于本身重量就很轻的有孔虫壳体来说,会产生相对比较大的重量变化.本研究中,在获取图像之后,称量重量之前,增加了烘干的步骤,以此来保持浮游有孔虫壳体的干燥,从而降低空气湿度带来的影响。

(2)有孔虫壳体中的杂质.对于壳体中的杂质,考虑到超声时间和强度对壳体壁薄的有孔虫有破坏的可能性,在实际清洗中,是很难将所有有孔虫都处理到房室中完全无碎屑的程度.而这只能依靠在最后挑选时将孔虫壳体润湿来选取相对无斑点无杂质的个体,以尽量避免杂质带来的影响。

## 3 结论

浮游有孔虫标准化壳体重量方法能够有效地指示过去表层海水中 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 的变化,在有孔虫化石丰度较低的沉积物样品中更有优势.相对于传统的壳体重量方法,标准化壳体重量方法能够有效地降低壳体粒径对研究结果造成的干扰.该方法操作简单,指示性好,具有分析实用价值,为古海洋研究者探索地质历史时期的表层海水 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 的演变提供了良好的实验支撑。

致谢:本研究使用的沉积物样品由国际海洋全球变化研究 Marco Polo IMAGES XIV 航次提供.沉积物样品的年代数据由中国科学院海洋研究所仇晓华博士提供.编辑和两位审稿人提出了诸多建议对本文章的质量提升有着很大的帮助,在此一并感谢。

## References

Abramoff, M. D., Magalhães, P. J., Ram, S. J., 2004. Image Processing with Image. *J. Biophotonics International*, 11(7):36-42.

Aldridge, D., Beer, C. J., Purdie, D. A., 2012. Calcification in the Planktonic Foraminifera *Globigerina bulloides* Linked to Phosphate Concentrations in Surface Waters

of the North Atlantic Ocean. *Biogeosciences*, 9(5): 1725-1739. doi:10.5194/bg-9-1725-2012

Anderson, D.M., Archer, D., 2002. Glacial-Interglacial Stability of Ocean pH Inferred from Foraminifer Dissolution Rates. *Nature*, 416(6876):70-73. doi:10.1038/416070a

Barker, S., Elderfield, H., 2002. Foraminiferal Calcification Response to Glacial-Interglacial Changes in Atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Science*, 297(5582):833-836. doi:10.1126/science.1072815

Beer, C.J., Schiebel, R., Wilson, P. A., 2010. Technical Note: On Methodologies for Determining the Size-Normalised Weight of Planktic Foraminifera. *Biogeosciences*, 7(7): 2193-2198. doi:10.5194/bg-7-2193-2010

Bijma, J., Hönisch, B., Zeebe, R.E., 2002. Impact of the Ocean Carbonate Chemistry on Living Foraminiferal Shell Weight: Comment on "Carbonate Ion Concentration in Glacial-Age Deep Waters of the Caribbean Sea" by W.S. Broecker and E. Clark. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(11):1064. doi:10.1029/2002GC000388

Bijma, J., Spero, H.J., Lea, D. W., 1999. Reassessing Foraminiferal Stable Isotope Geochemistry: Impact of the Oceanic Carbonate System (Experimental Results). In: Fischer, G., Wefer, G., eds., *Use of Proxies in Paleoclimatology: Examples from the South Atlantic*. Springer, Berlin, 489-512.

Broecker, W. S., Clark, E., 2001a. Glacial-to-Holocene Redistribution of Carbonate Ion in the Deep Sea. *Science*, 294(5549):2152-2155. doi:10.1126/science.1064171

Broecker, W. S., Clark, E., 2001b. An Evaluation of Lohmann's Foraminifera Weight Dissolution Index. *Paleoceanography*, 16(5):531-534. doi:10.1029/2000PA000600

Broecker, W.S., Clark, E., 2004. Shell Weights from the South Atlantic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(3): Q03003. doi:10.1029/2003GC000625

Chen, R. H., Meng, Y., Li, B. H., et al., 1999. Variations in the Lysocline of Carbonate in the Southern Okinawa Trough during the Last 20000 Years. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(1): 25-30 (in Chinese with English abstract).

Cooley, S. R., Kite-Powell, H. L., Doney, S. C., 2009. Ocean Acidification's Potential to Alter Global Marine Ecosystem Services. *Oceanography*, 22(4):172-181.

Davis, C.V., Badger, M.P.S., Bown, P.R., et al., 2013. Calcification Response to Climate Change in the Pliocene. *Biogeosciences Discussions*, 10(4): 6839-6860. doi: 10.5194/bgd-10-6839-2013

de Moel, H., Ganssen, G.M., Peeter, F.J.C., et al., 2009. Planktic Foraminiferal Shell Thinning in the Arabian Sea due to An-

- thropogenic Ocean Acidification. *Biogeosciences*, 6(9):1917–1925. doi:10.5194/bg-6-1917-2009
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., et al., 2009. Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> Problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1: 169–192. doi:10.1146/annurev.marine.010908.163834
- Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., et al., 2008. Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65(3): 414–432. doi:10.1093/icesjms/fsn048
- Fehrenbacher, J., Martin, P., 2011. Western Equatorial Pacific Deep Water Carbonate Chemistry during the Last Glacial Maximum and Deglaciation: Using Planktic Foraminiferal Mg/Ca to Reconstruct Sea Surface Temperature and Seafloor Dissolution. *Paleoceanography*, 26(2): PA2225. doi:10.1029/2010PA002035
- Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D. N., et al., 2012. The Geological Record of Ocean Acidification. *Science*, 335(6072): 1058–1063. doi:10.1126/science.1208277
- Hodell, D. A., Charles, C. D., Sierro, F. J., 2001. Late Pleistocene Evolution of the Ocean's Carbonate System. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(2): 109–124. doi:10.1016/S0012-821X(01)00430-7
- Hull, P. M., Norris, R. D., Bralower, T. J., et al., 2011. A Role for Chance in Marine Recovery from the End-Cretaceous Extinction. *Nature Geoscience*, 4(12): 856–860. doi:10.1038/NGEO1302
- Logan, C. A., 2010. A Review of Ocean Acidification and America's Response. *Bioscience*, 60(10): 819–828. doi:10.1525/bio.2010.60.10.8
- Lohmann, G. P., 1995. A Model for Variation in the Chemistry of Planktonic Foraminifera due to Secondary Calcification and Selective Dissolution. *Paleoceanography*, 10(3): 445–457. doi:10.1029/95PA00059
- Lombard, F., da Rocha, R. E., Bijma, J., et al., 2010. Effect of Carbonate Ion Concentration and Irradiance on Calcification in Planktonic Foraminifera. *Biogeosciences*, 7(1): 247–255. doi:10.5194/bg-7-247-2010
- Marchitto, T. M., Curry, W. B., Oppo, D. W., 2000. Zinc Concentrations in Benthic Foraminifera Reflect Seawater Chemistry. *Paleoceanography*, 15(3): 299–306. doi:10.1029/1999PA000420
- Marchitto, T. M., Lynch-Stieglitz, J., Hemming, S. R., 2005. Deep Pacific CaCO<sub>3</sub> Compensation and Glacial-Interglacial Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Earth and Planetary Science Letters*, 231(3–4): 317–336. doi:10.1016/j.epsl.2004.12.024
- Marshall, B. J., Thunell, R. C., Henahan, M. J., et al., 2013. Planktonic Foraminiferal Area Density as a Proxy for Carbonate Ion Concentration: A Calibration Study Using the Cariaco Basin Ocean Time Series. *Paleoceanography*, 28(2): 363–376. doi:10.1002/palo.20034
- Mekik, F., Raterink, L., 2008. Effects of Surface Ocean Conditions on Deep-Sea Calcite Dissolution Proxies in the Tropical Pacific. *Paleoceanography*, 23(1): PA1216. doi:10.1029/2007PA001433
- Mekik, F. A., Anderson, R. F., Loubere, P., et al., 2012. The Mystery of the Missing Deglacial Carbonate Preservation Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 39: 60–72. doi:10.1016/j.quascirev.2012.01.024
- Moy, A. D., Howard, W. R., Bray, S. G., et al., 2009. Reduced Calcification in Modern Southern Ocean Planktonic Foraminifera. *Nature Geoscience*, 2(4): 276–280. doi:10.1038/NGEO460
- Naik, S. S., Naidu, P. D., 2007. Calcite Dissolution along a Transect in the Western Tropical Indian Ocean: A Multiproxy Approach. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(8): Q08009. doi:10.1029/2007GC001615
- Naik, S. S., Naidu, P. D., Govil, P., et al., 2010. Relationship between Weights of Planktonic Foraminifer Shell and Surface Water CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> Concentration during the Holocene and Last Glacial Period. *Marine Geology*, 275(1–4): 278–282. doi:10.1016/j.margeo.2010.05.004
- Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., et al., 2005. Anthropogenic Ocean Acidification over the Twenty-First Century and Its Impact on Calcifying Organisms. *Nature*, 437(7059): 681–686. doi:10.1038/nature04095
- Palmer, M. R., Pearson, P. N., 2003. A 23 000-Year Record of Surface Water pH and pCO<sub>2</sub> in the Western Equatorial Pacific Ocean. *Science*, 300(5618): 480–482. doi:10.1126/science.1080796
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., et al., 1999. Climate and Atmospheric History of the Past 420 000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica. *Nature*, 399(6735): 429–436. doi:10.1038/20859
- Qiu, X. H., Li, T. G., Chang, F. M., et al., 2012. Turbidite Deposition Record and Its Mechanism since 150 ka BP in Western Philippine Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(4): 157–163 (in Chinese with English abstract).
- Regenberg, M., Schröder, J. F., Jonas, A. S., et al., 2013. Weight Loss and Elimination of Planktonic Foraminiferal Tests in a Dissolution Experiment. *Journal of Foraminiferal Research*, 43(4): 406–414. doi:10.2113/gsjfr.43.4.406
- Russell, A. D., Hönisch, B., Spero, H. J., et al., 2004. Effects of



- Seawater Carbonate Ion Concentration and Temperature on Shell U, Mg, and Sr in Cultured Planktonic Foraminifera. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (21): 4347—4361. doi:10.1016/j.gca.2004.03.013
- Spero, H. J., Bijma, J., Lea, D. W., et al., 1997. Effect of Seawater Carbonate Concentration on Foraminiferal Carbon and Oxygen Isotopes. *Nature*, 390 (6659): 497—500. doi:10.1038/37333
- Solomon, S., Qin, D. H., Manning, M., et al., 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, New York.
- Wang, P. X., Min, Q. B., Bian, Y. H., et al., 1986. Planktonic Foraminifera in the Continental Slope of the Northern South China Sea during the Last 130 000 Years and Their Paleo-Oceanographic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 60 (3): 215—225 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Huang, B. Q., Chen, R. H., et al., 2001. Distribution of Foraminifera in Surface Sediments of Northeastern South China Sea and Its Environmental Implications. *Journal of Tropical Oceanography*, 20 (4): 6—13 (in Chinese with English abstract).
- Zeebe, R. E., 2012. History of Seawater Carbonate Chemistry, Atmospheric CO<sub>2</sub>, and Ocean Acidification. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40: 141—165. doi:10.1146/annurev-earth-042711-105521
- Zhang, L. L., Chen, M. H., Chen, Z., et al., 2010. Distribution of Calcium Carbonate and Its Controlling Factors in Surface Sediments of the South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35 (6): 891—898 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈荣华, 孟翊, 李保华, 等, 1999. 冲绳海槽南部两万年来碳酸盐溶跃面的变迁. *海洋地质与第四纪地质*, 19 (1): 25—30.
- 仇晓华, 李铁刚, 常凤鸣, 等, 2012. 西菲律宾海 15 万年以来的浊流沉积及其成因. *海洋地质与第四纪地质*, 32 (4): 157—163.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等, 1986. 130 000 年来南海北部陆坡的浮游有孔虫及其古海洋学意义. *地质学报*, 60 (3): 215—225.
- 徐建, 黄宝琦, 陈荣华, 等, 2001. 南海东北部表层沉积中有孔虫的分布及其环境意义. *热带海洋学报*, 20 (4): 6—13.
- 张兰兰, 陈木宏, 陈忠, 等, 2010. 南海表层沉积物中的碳酸钙含量分布及其影响因素. *地球科学——中国地质大学学报*, 35 (6): 891—898.