

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.02.012

# 南海北部沉积物中浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 壳体氧同位素指示的冬季表层海水温度

许慎栋<sup>1,2,3</sup>, 陈文煌<sup>1</sup>, 邓文峰<sup>1</sup>, 贾国东<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 广西大学海洋学院, 南宁 530004;  
3. 广西大学珊瑚礁研究中心, 南宁 530004; 4. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**有孔虫壳体的氧同位素值( $\delta^{18}\text{O}$ )是由其生长时海水 $\delta^{18}\text{O}$ 和温度决定的,在海水 $\delta^{18}\text{O}$ 已知的情况下,可以由壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值估算海水温度。本文以南海北部沿岸地区9个站位的柱状沉积物中浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 为研究对象,测试了其壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。分别以相应站点夏季与冬季表层海水的实测 $\delta^{18}\text{O}$ 值代入温度公式,估算了对应的夏季与冬季的海水温度值。然后把计算结果与 World Ocean Atlas(WOA)数据库相应站点的海水温度数据作比较。结果表明,计算出的夏季海水温度与 WOA 的夏季温度有较大差别,而计算出的冬季海水温度则与 WOA 的冬季海水温度基本相当。这说明 $\delta^{18}\text{O}_{\text{ruber}}$ 记录的是该区域冬季表层海水的温度,此区域内 *G. ruber* 这一属种的生产力和沉积通量在东亚冬季风盛行期间出现了最高值。

**关键词:**浮游有孔虫;氧同位素;表层海水温度;南海北部

中图分类号:P736.22 文献标识码:A 文章编号:0256-1492(2016)02-0101-07

浮游有孔虫壳体是海洋沉积物中生物成因碳酸盐的重要组成<sup>[1-2]</sup>,其中蕴含了丰富的环境信息,对于古海洋学以及生物地球化学过程的重建具有重要意义。水柱中有孔虫的沉降和在沉积物中的埋藏在时间上可能是不均匀的,因为它们的生产力通常具有季节性的变化。比如在加纳利群岛附近, *Globigerinoides ruber* (白色)在每个季节都有出现,季节性变化不明显; *Globigerinoides bulloides* 的高沉降通量主要出现在冬季和上升流影响的夏、秋季节,与较高的初级生产力密切相关。 *Pulleniatina obliquiloculata* 和 *Globigerinoides truncatulinoides* 的季节变化则非常明显,最高通量主要出现在冬季,在其他季节则表现出极低的通量,这与混合层中出现的叶绿素最大值有着显著相关性<sup>[3]</sup>。另有学者通过对日本海沟黑潮区浮游有孔虫季节性通量的变化研究发现: *G. bulloides* 和 *Globigerinoides quinqueloba* 主要出现在早春季节,而在冬季 *Globigerinoides glutinata*、*Globigerinoides falconensis*、*Globigerinoides inflata* 和 *G. truncatulinoides* 的通量则最大,这与冬季风影响下表层水体垂直混合

作用加强有着密切关系<sup>[4]</sup>。而在南海,也有学者通过沉积捕获器的采样分析发现,浮游有孔虫总通量以及 *G. ruber* 的通量和百分含量在东北季风和西南季风盛行的冬、夏季出现高值,而 *G. bulloides* 等则在东北季风盛行的冬季出现高值。浮游有孔虫属种的通量除了呈现出季节性的变化之外还表现出明显的年际变化,进一步研究表明这种变化与东亚季风相关的表层初级生产力和海洋水文条件的变化相关<sup>[5-6]</sup>。目前野外对现代浮游有孔虫的调查方法主要有沉积物捕获器、浮游生物拖网和泵水取样。捕获器投放回收成本很高,不宜大面积区域使用;浮游拖网和泵水取样虽然可以大面积使用,但所得样品是某一时刻的,随机性较大,难以进行长时间尺度季节性变化的研究<sup>[7]</sup>。而通过沉积物中浮游有孔虫壳体中元素和同位素地球化学指标与海水环境参数的对比则有可能推测有孔虫生长的季节性问题。本文尝试运用南海北部沉积物中浮游有孔虫 *G. ruber* 壳体氧同位素所反映的温度来推测研究区域内这一属种生长的季节性特征。

## 1 材料与方法

本文分析了南海北部的9个沉积物短柱样。这些柱状样品采自2009年夏季,在箱式样中插管获得,柱长大多不足50cm。采样点的具体位置见图

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421206)

作者简介:许慎栋(1987—),男,主要从事海洋沉积和生物地球化学研究,E-mail:sdxu6379@163.com

通讯作者:贾国东,男,研究员,E-mail:jiagd@gig.ac.cn

收稿日期:2015-01-03;改回日期:2015-04-11. 文凤英编辑

1。其中 A5、A6、A8、A9 四个站点在珠江口外东南方向, S206 在珠江口以东位置, E601 站点位于珠江口以西位置, E501、D104、LE01 三个站点位于海南岛东侧。每个钻孔均采用<sup>210</sup>Pb 计年法进行了定年, 部分定年结果已经发表<sup>[8-9]</sup>, 沉积年限基本上在百年以内, 每个钻孔的详细信息与测年结果见表 1。

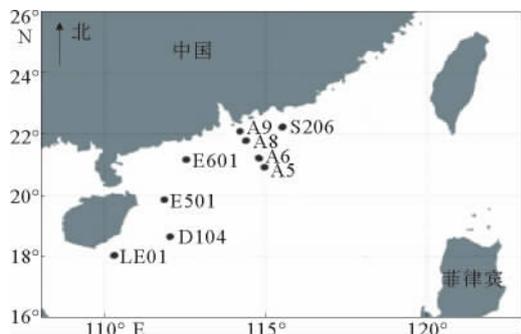


图 1 柱状样采样位置示意图

Fig. 1 Locations of sediment cores in the study area

对每个柱状样在现场按 2 cm 间隔取样, 用样品袋(8.5 cm 长, 7 cm 宽)密封, 冷冻保存。回到实验室后用冷干机冷冻干燥, 然后用水浸泡直至样品被泡开。把泡开的样品倒入 250 目, 孔径为 63 μm 的铜筛中, 用清水冲洗、烘干。从每个样品中挑选壳体大于 150 μm 的浮游有孔虫 *G. ruber* 完整个体 20 枚左右。之后, 将挑选好的有孔虫个体用稀释过的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (浓度约 10%) 放入 50 kHz 的超声波中超声 3 次, 每次约 20 秒, 放入烘箱 60 °C 烘干, 以备 δ<sup>18</sup>O 测试。δ<sup>18</sup>O 值相对于 V-PDB 标准, 测试精度好于 0.08‰, 所用仪器为 GV IsoPrime II 型稳定同位素质谱仪。

于 2009 年夏季和冬季还分别采集了区域内的表层海水样品, 各站位海水采集的详细信息见表 1。在实验室对海水的氧同位素 δ<sup>18</sup>O<sub>w</sub> 进行了分析测试, 数据已经发表<sup>[10]</sup>。水样的同位素值是相对于 V-SMOW 标准。仪器型号和分析精度同上。

对每个沉积柱站点的多年平均的年均、冬季(12 月—翌年 2 月)、夏季(6—8 月)水体温度资料进行了数据下载。数据来自 World Ocean Atlas (WOA) 的美国国家海洋数据中心——National Oceanographic Data Center (NODC) (<http://www.nodc.noaa.gov/>), 网格分辨率为 1/4°。收集的水深范围为 0~30 m。

*G. ruber* 为生长于海水混合层的典型有孔虫, 其壳体氧同位素与温度的关系如下<sup>[11]</sup>:

$$T = 14.9(\pm 0.1) - 4.80(\pm 0.08) \times (\delta^{18}O_{ruber} - \delta^{18}O_w) \quad (1)$$

其中: δ<sup>18</sup>O<sub>ruber</sub> 为有孔虫壳体氧同位素 (V-PDB);

δ<sup>18</sup>O<sub>w</sub> 为海水氧同位素 (V-PDB)。

在海水温度 15~30 °C 的范围内的相关系数 r<sup>2</sup> = 0.98, 标准误差为 ±0.5 °C。

上式中的 δ<sup>18</sup>O<sub>ruber</sub> 值直接由沉积柱中的有孔虫壳体得到, 我们对每个柱子的数据分别进行了平均计算, 以作为多年的平均值, WOA 的数据也是多年的平均值。而过去海水的 δ<sup>18</sup>O<sub>w</sub> 是无法得到具体实测值的, 我们是以当前海水(夏、冬季)采样后在实验室实测的数据近似代替。其依据是海水氧同位素 δ<sup>18</sup>O<sub>w</sub> 主要受温度、盐度以及河流输入的影响, 并且只有在冰期、间冰期等大的时间尺度上 δ<sup>18</sup>O<sub>w</sub>

表 1 南海北部 9 个站位详细信息及<sup>210</sup>Pb 定年结果

Table 1 Site information and <sup>210</sup>Pb dating data of sediment cores

站位	纬度 (N)	经度 (E)	水深 /m	采样水深 /m	夏季海水采样时间	冬季海水采样时间	钻孔长度 /cm	质量累计速率 /gcm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	时间跨度/a	平均时间分辨率 /(a/2cm)
A5	21°00'	114°59'	102	0	2009.08.07	2010.01.19	24	0.28	1901—2006	9.6
A6	21°17'	114°45'	89	0	2009.08.07	2010.01.19	34	0.33	1902—2008	6.6
A8	21°48'	114°12'	45	0	2009.08.06	2010.01.19	48	0.35	1892—2008	2.4
A9	22°00'	114°00'	33	0	2009.08.06	2010.01.20	52	0.48	1936—2008	3.3
S206	22°00'	115°38'	84	0	2009.07.29	2010.01.22	42	0.58	1938—2008	1.67
E501	19°49'	111°26'	79	0	2009.07.24	2010.01.10	28	0.35	1900—2005	7.5
E601	20°55'	112°07'	53	0	2009.07.25	2010.01.09	30	0.54	1905—2009	3.47
LE01	18°00'	110°00'	96	0	2009.07.20	△	32	0.34	1885—2006	3.78
D104	18°44'	111°40'	198	0	2009.07.21	△	24	0.21	1895—2005	4.48

注: △表示确切采样时间不详。

才会发生显著的变化<sup>[12-14]</sup>。而在我们所研究的时间与空间尺度上,这些条件变化所引起  $\delta^{18}O_w$  值的改变不会对计算结果产生大的影响。但是本文所研究区域受到季风、洋流与降水的影响,其海水氧同位素在不同的季节上会存在较大的差异。此外需要指出的是在测试海水  $\delta^{18}O_w$  时采用的是相对 V-SMOW 标准,而有孔虫壳体  $\delta^{18}O_{ruber}$  值则是相对 V-PDB 标准,故在进行海水温度的计算时需要把它们换算成统一的 V-PDB 标准,换算公式为<sup>[15]</sup>:

$$\delta^{18}O_{w\ VPDB} = \delta^{18}O_{w\ SMOW} - 0.27\text{‰}$$

## 2 结果与讨论

本文所研究 9 个钻孔的  $\delta^{18}O_{ruber}$  序列见图 2,其中由于样品原因个别数据缺失;各个钻孔  $\delta^{18}O_{ruber}$  平均值以及相应站位夏、冬季的海水氧同位素值  $\delta^{18}O_w$

见表 2。由 WOA 数据库获得的各站点 0~30 m 表层海水 4 个季节的温度如图 3 所示。夏季水温范围为 27.0~28.2 °C,冬季水温范围为 20.2~24.3 °C。

由于目前只有各站点的夏、冬季表层海水  $\delta^{18}O_w$  数据,我们尝试将其分别代入公式(1)来计算相应的温度,并将其与 WOA 的温度资料进行对比。结果发现:利用夏季海水氧同位素  $\delta^{18}O_{w-s}$  计算出来的温度平均值变化范围为 10.9~18.3 °C,每个站点得出的计算值都比相应的夏季海水的 WOA 温度值低十多度,这一结果显然是不合理的。相反,利用冬季海水氧同位素  $\delta^{18}O_{w-w}$  与  $\delta^{18}O_{ruber}$  估算出来的海水温度范围为 17.7~22.4 °C,这些数据与各站点冬季海水的 WOA 温度基本相当,它们的差值在 0.1~2.5 °C 之间(图 3)。因此,可以推测:在研究区内沉积有孔虫中  $\delta^{18}O_{ruber}$  记录下的信息具有季节偏向性,而且偏向的是冬季环境。

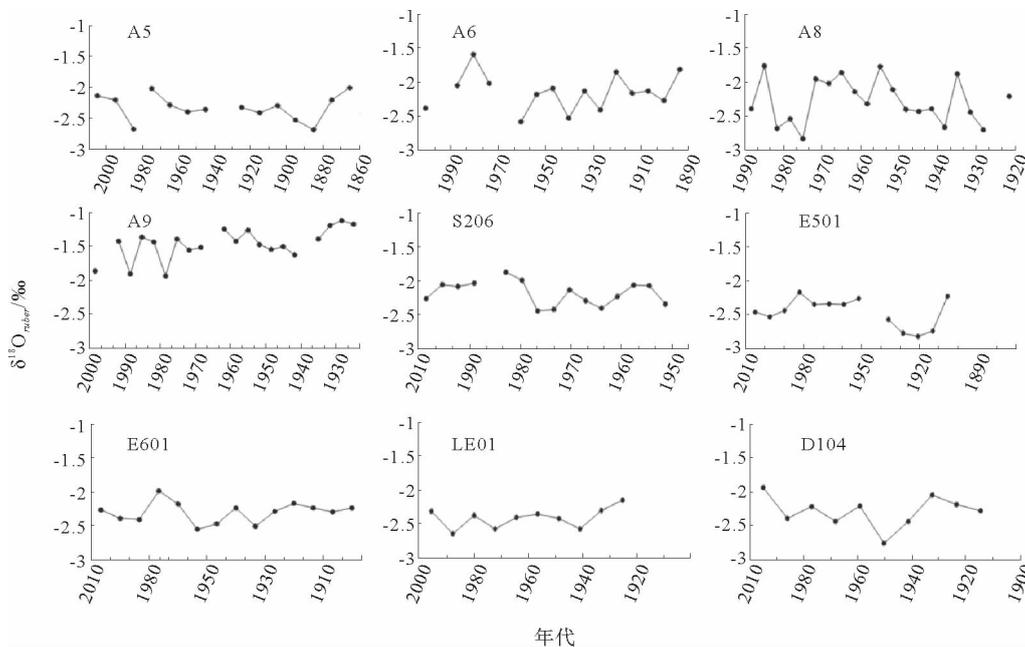


图 2 南海北部 9 个钻孔有孔虫壳体氧同位素测试结果(V-PDB)  
Fig. 2 The  $\delta^{18}O_{ruber}$  values of each sediment core (V-PDB)

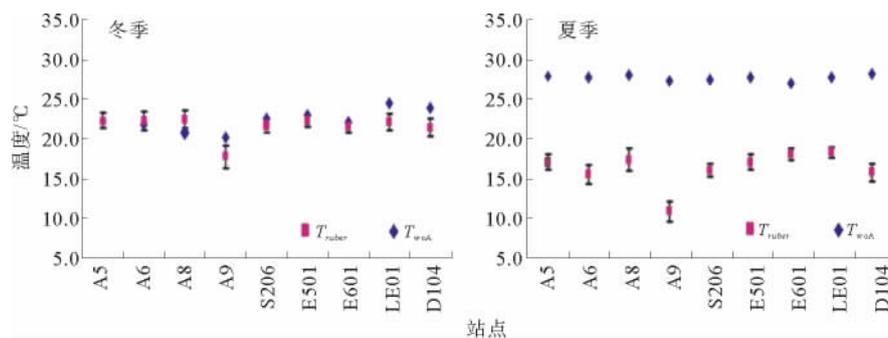
表 2 南海北部 9 个站点沉积柱有孔虫氧同位素  $\delta^{18}O_{ruber}$  平均值以及海水氧同位素  $\delta^{18}O_w$  值

Table 2 Average values of  $\delta^{18}O_{ruber}$  and water  $\delta^{18}O_w$  in each sediment core

	A5	A6	A8	A9	S206	E501	E601	LE01	D104
$\delta^{18}O_{ruber}$	-2.33±0.20	-2.14±0.25	-2.39±0.29	-1.42±0.27	-2.19±0.18	-2.47±0.21	-2.33±0.16	-2.42±0.15	-2.28±0.23
$\delta^{18}O_{w-s}$	-1.61	-1.75	-1.6	-1.97	-1.7	-1.54	-1.39	-1.44	-1.82
$\delta^{18}O_{w-w}$	-0.57	-0.35	-0.57	-0.93	-0.52	-0.71	-0.72	-0.7	-0.7

注: $\delta^{18}O_{ruber}$  为该站点整条沉积柱中 *G. ruber* 壳体氧同位素的平均值;

$\delta^{18}O_{w-s}$ 、 $\delta^{18}O_{w-w}$  分别为该站点夏季与冬季的海水氧同位素值(V-SMOW)。

图3 南海北部各站点  $T_{ruber}$  与  $T_{WOA}$  的比较Fig. 3 Comparison between the  $T_{ruber}$  and  $T_{WOA}$  for the study sites

既然  $\delta^{18}O_{ruber}$  记录下的是冬季海水的环境信息,那么可以进一步推测,区域内 *G. ruber* 的生产力和沉积通量应该在冬季达到最大。这一推测与对南海北部初级生产力和有孔虫沉积通量的季节性特征的研究结果基本一致。前人研究发现,在东亚冬季风盛行时期(11月至翌年3月)南海北部接受了显著的陆源风尘物质输入,给表层海水带来了丰富的营养物质,可明显促进浮游植物的迅速生长<sup>[16-17]</sup>。与此同时,冬季的海水表层温度降低明显,在盛行的冬季风作用下南海北部海区表层海水垂向混合作用加强<sup>[18]</sup>,会把下层海水中的N、P、Si等营养元素带到海水表层,也能进一步促进浮游植物的生长。东北季风影响下的南海北部海域初级生产力水平显著提高已经早有发现<sup>[19]</sup>,在这种情况下,以浮游植物为食的 *G. ruber* 的生物量也应该会相应提高,进而出现一个较高的沉积通量。相反,南海北部生产力受夏季风的影响较之于冬季风要偏弱,夏季风盛行时间一般为6—9月,西南季风会导致南海形成一个顺时针模式的环流,同时也会在不同海区形成上升流,并且为海洋表层生物生长带来了较为丰富的营养盐物质<sup>[20-21]</sup>。研究资料表明:南海北部近岸水域会受到夏季西南季风驱动的沿岸上升流的影响<sup>[22]</sup>,从而使 *G. ruber* 在夏季风盛行期间(7、8月)出现一个偏高的沉积通量,但其程度远没有冬季风作用下的沉积通量高。而在季风间期浮游有孔虫的相对通量则更低<sup>[23]</sup>。

除了A9、LE01、D104之外其他各站点的  $T_{WOA}$  值基本上都在  $T_{ruber}$  结果的标准误差范围之内(图3)。A9、LE01、D104三个站点的  $T_{ruber}$  算术平均值与对应  $T_{WOA}$  的差值分别达到了2.5°C、2.3°C和2.6°C,  $T_{ruber}$  均低于  $T_{WOA}$ 。这么大的差值显然已经超过了计算公式1)的误差范围。造成这种差值的原因可能有:(1)浮游有孔虫壳体的钙化水深的影

素与它们壳体的钙化层位是有一定关系的<sup>[24]</sup>,以巴拿马海盆中的活体浮游有孔虫 *G. ruber* 为例:主要在0~25 m的表层混合层中发生钙化,在25~37.5 m有小部分钙化,但在该层位以下则基本不再发生钙化。Wilke等2009年也发现有孔虫属种氧同位素是其生活的不同水深钙化的综合结果,包含了初级钙化和次级钙化的信息<sup>[25]</sup>,它们除了在表层混合层中钙化形成壳体外,在较冷的温跃层水体中同样发生了进一步的钙化。同时他们的研究结果还显示浮游有孔虫的钙化温度并没有和表层海水温度达到平衡而是均低于表层海水温度。以 *G. ruber* 为例,他们估算的钙化温度在冬季要低于海水表层温度大约2°C。本文中LE01、D104站点的水深都较深,其中D104站点接近200 m深。上述现象很有可能在这两个站点发生,即此处的有孔虫不仅在表层混合层水体中钙化形成壳体,在深度较大、温度较低的温跃层水体中也有进一步的钙化,从而导致了估算的海水温度值较实际的表层海水温度偏低。(2)本文所用的  $\delta^{18}O_w$  仅是对表层海水的一次采样结果,无法真正代表多年平均的海水  $\delta^{18}O_w$ ,个别站位出现较大偏差在所难免;(3)WOA的数据是对区域内有限数据的内插计算得出的,更适合于远海,而对靠近岸边的站点其误差可能会偏大<sup>[26]</sup>,这也许是A9站点计算值与WOA值相差较大的一个原因。

本文中除了A9站位外,各个钻孔的  $\delta^{18}O_{ruber}$  平均值分布范围为  $-2.14 (\pm 0.25)\%$  ~  $-2.47 (\pm 0.2)\%$ ,整体平稳。之前相关学者通过对南海北部 *G. ruber* 的研究,结果显示地质时期的  $\delta^{18}O_{ruber}$  在冰期与间冰期存在较大幅度的波动,比如中更新世以来  $\delta^{18}O_{ruber}$  表现出较为明显的千年尺度周期波动,低值期  $\delta^{18}O_{ruber}$  大约在  $-2.5\%$ ,而高值期  $\delta^{18}O_{ruber}$  可达到  $-1\%$ 左右<sup>[27]</sup>。这么大的  $\delta^{18}O_{ruber}$  波动幅度意味着 SST- $\delta^{18}O_{ruber}$  不一定指示着冬季表层海水温度。此外,近年来基于沉积物捕获器以及浮

游生物拖网的大量研究结果表明:特定属种有孔虫在不同海区的最大生物通量存在着明显的季节性差异<sup>[28-31]</sup>,这些差异是由不同海区水团、水体结构和生产力的不同所致。因为在不同的水体条件下有孔虫的生存要素诸如温度、光照强度、温跃层深度、叶绿素等存在着较大的差异<sup>[32-33]</sup>。对于南海而言这种情况则更为复杂,整个海区处在典型的东亚季风气候区,夏季盛行西南季风(东亚夏季风)、冬季盛行东北季风(东亚冬季风)。此外,南海分布有上升流区、黑潮区、河口区、沿岸流区、海槽海盆区等典型区域,这些不同区域的上层水体结构存在着明显的差异,并导致了浮游有孔虫的种群分布差异以及季节性变化。因此需要强调的是,本文中的 SST- $\delta^{18}\text{O}_{ruber}$  指示了冬季表层海水温度这结论是在百余年来南海北部这一特定的时间、空间范围内得出的。此结论在不同时间尺度的地质时期或者其他海域的适用性如何还需进一步的研究去探讨。

### 3 结论

对南海北部 9 个短柱样沉积物中浮游有孔虫 *G. ruber* 的壳体  $\delta^{18}\text{O}$  进行了分析测试,在此基础上估算了有孔虫所生长的海水环境温度,估算的温度与冬季表层海水(0~30 m)温度相当,而与夏季海水温度相差很大。这意味着该研究区域内浮游有孔虫生产力以及沉积和埋藏通量在冬季是最强的,并因此导致了 *G. ruber* 壳体地球化学信息的冬季偏向性,但这种偏向性在不同时间尺度的地质时期以及其他海域的适用性如何还需更多的研究去探讨。

致谢:感谢 2009 年国家重点基础研究发展计划 CHOICE-C 夏季航次的所有船上工作人员。

### 参考文献 (References)

[1] Honjo S. Seasonality and interaction of biogenic and lithogenic particulate flux at the Panama Basin[J]. Science, 1982, 218 (4575):883-884.

[2] Liu K K, Kao S J, Hu H C, et al. Carbon isotopic composition of suspended and sinking particulate organic matter in the northern South China Sea-From production to deposition[J]. Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography, 2007, 54(14-15):1504-1527.

[3] Wilke I, Meggers H, Bickert T. Depth habitats and seasonal distributions of recent planktonic foraminifers in the Canary Islands region (29 degrees N) based on oxygen isotopes[J]. Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers, 2009, 56(1):89-106.

[4] Oda M, Yamasaki M. Sediment trap results from the Japan trench in the Kuroshio domain: Seasonal variations in the planktic foraminiferal flux[J]. Journal of Foraminiferal Research, 2005, 35(4):315-326.

[5] 陈荣华, 翦智溥, 郑玉龙, 等. 南海中部浮游有孔虫通量的季节变化[J]. 同济大学学报, 2000, 28(1):73-77. [CHEN Ronghua, JIAN Zhimin, ZHEN Yulong, et al. Seasonal variations of planktonic foraminiferal flux in the Central South China Sea [J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(1):73-77.]

[6] 陈荣华, 郑玉龙, Wiesner W G, 等. 1993—1996 年南海中部海洋沉降颗粒通量的季节和年际变化[J]. 海洋学报, 2006, 28(3):72-80. [CHEN Ronghua, ZHENG Yulong, Wiesner W G, et al. Seasonal and annual variations of marine sinking particulate flux during 1993—1996 in the central South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(3):72-80.]

[7] 刘芳, 向荣. 现代浮游有孔虫生态研究进展[J]. 微生物学报, 2010, 27(4):366-375. [LIU Fang, XIANG Rong. Advance in the study of modern planktonic foraminifera [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2010, 27(4):366-375.]

[8] Jia G D, Zhang J, Chen J F, et al. Archaeal tetraether lipids record subsurface water temperature in the South China Sea[J]. Organic Geochemistry, 2012, 50:68-77.

[9] 雷菲, 李志阳, 张杰, 等. 百余年来珠江口及邻近西部海域有机碳来源及其埋藏记录[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(2):62-66. [LEI Fei, LI Zhiyang, ZHANG Jie, et al. Sources and burial of organic carbon in coastal sediments off Guangdong Province during the past century[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(2):62-66.]

[10] Ye F, Deng W F, Xie L H, et al. Surface water  $\delta^{18}\text{O}$  in the marginal China sea and its hydrological implications[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2014, 147:25-31.

[11] Bemis B E, Spero H J, Bijma J, et al. Reevaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: Experimental results and revised paleotemperature equations[J]. Paleoclimatology, 1998, 13(2):150-160.

[12] Rostek F, Ruhland G, Bassinot F C, et al. Reconstructing sea surface temperature and salinity using  $\delta^{18}\text{O}$  and alkenone records[J]. Nature, 1993, 364:319-321.

[13] Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea[J]. Marine Geology, 1999, 156 (1):245-284.

[14] Oppo D W, Sun Y B. Amplitude and timing of sea-surface temperature change in the northern South China Sea: Dynamic link to the East Asian monsoon[J]. Geology, 2005, 33(10):785-788.

[15] Hut, G. Consultants group meeting on stable isotope reference samples for geochemical and hydrological investigations [R]. Report to the Director General, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1987:42.

[16] 陈建芳, 郑连福, Wiesner W G, 等. 基于沉积物捕获器的南海表层初级生产力及输出生产力估算[J]. 科学通报, 1998, 43 (6):639-642. [CHEN Jianfang, ZHENG Lianfu, Wiesner W

- G, et al. Estimation of surface primary productivity and export productivity in the South China Sea based on the sediment traps[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 639-642.]
- [17] 陈文斌, 徐鲁强, Jennerjahn T C. 南海北部颗粒通量的初步研究[C]// 郑连福. 南海海洋沉积作用过程与地球化学研究. 北京: 海洋出版社, 1993: 191-201. [CHEN Wenbin, XU Luqiang, Jennerjahn T C. A preliminary study on the flux of particles in the northern South China Sea[C]// ZHENG Lianfu. The study of marine sedimentation processes and geochemistry in the South China Sea, Beijing: China Ocean Press, 1993: 191-201.]
- [18] Wiesner M G, Zheng L, Wong H K. Fluxes of Particulate Matter in the South China Sea[M]. In: Ittekkot V, ed. Particle Flux in the Ocean. New York: John Wiley and Sons, 1996: 91-154.
- [19] 徐鲁强, 陈建芳, 唐运千. 南海北部沉降颗粒氨基酸通量及生物地球化学意义[J]. 海洋学报, 1997, 2: 57-64. [XU Luqiang, CHEN Jianfang, TANG Yunqian. Settling particulate amino acids flux and biogeochemical significance in the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 2: 57-64.]
- [20] 冉莉华, 郑玉龙, 陈建芳, 等. 南海北部和中部硅藻通量季节性变化及其对季风气候的响应[J]. 海洋学报, 2011, 33(5): 139-145. [RAN Lihua, ZHENG Yulong, CHEN Jianfang, et al. The influence of monsoon on seasonal changes of diatom fluxes in the northern and central South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(5): 139-145.]
- [21] Wyrski K. Physical Oceanography of the Southeast Asian waters[R]. UC San Diego; Scripps Institution of Oceanography, NAGA Report, 1961, 2.
- [22] Song X Y, Huang L M, Zhang J L, et al. Variation of phytoplankton biomass and primary production in Daya Bay during spring and summer[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 49(11-12): 1036-1044.
- [23] 王小华, 陈荣华. 2009—2010年南海北部浮游有孔虫通量和稳定同位素季节变化及其对东亚季风的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 104-115. [WANG Xiaohua, CHEN Ronghua. The influence of east Asian monsoon on seasonal variations in planktonic foraminiferal flux and stable isotope in the northern south China sea during 2009-2010[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(1): 104-115.]
- [24] Fairbanks R G, Sverdrup M, Free R, et al. Vertical-distribution and isotopic fractionation of living planktonic-foraminifera from the Panama Basin[J]. Nature, 1982, 298(5877): 841-844.
- [25] Wilke I, Meggers H, Bickert T. Depth habitats and seasonal distributions of recent planktonic foraminifera in the Canary Islands region (29 degrees N) based on oxygen isotopes[J]. Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers, 2009, 56(1): 89-106.
- [26] Hyun S K, Avijit G, Leslie K, et al. Developing a high-resolution climatology for the Central California coastal region[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27: 2135-2161.
- [27] 金海燕, 翦知湑. 南海北部 ODP1144 站中更新世气候转型期有孔虫稳定同位素古气候意义[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 915-921. [JIN Haiyan, JIAN Zhimin. Paleoclimatic instability during the Mid-Pleistocene transition: implications from foraminiferal stable isotope ODP Site 1144, Northern South China Sea[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 915-921.]
- [28] Wilke I, Meggers H, Bickert T. Depth habitats and seasonal distributions of recent planktonic foraminifera in the Canary Islands region (29°N) based on oxygen isotopes[J]. Deep Sea Research I, 2009, 10: 1-18.
- [29] Yamasaki M, Sasakia, Odama, et al. Western equatorial Pacific planktonic foraminiferal fluxes and assemblages during a La-Nina year (1999)[J]. Mar. Micropaleont., 2008, 66(3): 304-319.
- [30] Eguchino, Ujii H, Kamahatah, et al. Seasonal variations in planktonic foraminifera at three sediment traps in the subarctic, transition and subtropical zones of the central north Pacific Ocean[J]. Mar. Micropaleont., 2003, 48(1-2): 149-163
- [31] Mohiuddin M M, Nishimura T A, Tanaka Y, et al. Seasonal succession, vertical distribution, and dissolution of planktonic foraminifera along the Subarctic Front: Implications for paleoceanographic reconstruction in the northwestern Pacific[J]. Mar. Micropaleont., 2005, 55(3): 129-156.
- [32] Lin H, Hsieh H. Seasonal variations of modern planktonic foraminifera in the South China Sea[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2007, 54(14-15): 1634-1644.
- [33] Lin H, Wang W, et al. Seasonal variation of planktonic foraminiferal isotopic composition from the sediment traps in the South China Sea[J]. Mar. Micropaleont., 2004, 53(3-4): 447-460.

## WINTER SURFACE SEAWATER TEMPERATURE IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA INDUCED FROM TEMPERATURE INDEX OF SHELL OXYGEN ISOTOPE OF *GLOBIGERINOIDES RUBER*

XU Shendong<sup>1,2,3</sup>, CHEN Wenhuan<sup>1</sup>, DENG Wenfeng<sup>1</sup>, JIA Guodong<sup>1,4</sup>

(1Guangzhou Institute of Geochemistry, Guangzhou 510640;

2. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004;

3. Coral Reef Research Center of China, Guangxi University, Nanning 530004;

4. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** The oxygen isotope value ( $\delta^{18}\text{O}$ ) of foraminiferal shell depends upon the  $\delta^{18}\text{O}$  and temperature of sea water. The seawater temperature, therefore, can be extracted from foraminiferal  $\delta^{18}\text{O}$  if the  $\delta^{18}\text{O}$  composition of sea water is known. In this paper, the planktonic foraminifera *Globigerinoides ruber* picked out from the nine sediment cores in the northern South China Sea were analyzed for  $\delta^{18}\text{O}$ . Using the published summer and winter sea water  $\delta^{18}\text{O}$  values at each site, we calculated the sea water temperature ( $T_{ruber}$ ), and then comparison was made for  $T_{ruber}$  and the 0~30m water temperature download from the World Ocean Atlas (WOA) database. Our data shows that there is a large difference between  $T_{WOA}$  and  $T_{ruber}$  when summer water  $\delta^{18}\text{O}$  was used in calculation, however, the difference was in a reasonable range when winter water  $\delta^{18}\text{O}$  was used. It suggests that  $\delta^{18}\text{O}_{ruber}$  reflects better the temperature and  $\delta^{18}\text{O}$  composition of winter seawater, and further implies that the productivity and deposition flux of *G. ruber* may reach the maximum when the East Asian Winter Monsoon prevails.

**Key words:** planktonic foraminifera; oxygen isotope; sea surface temperature; northern South China Sea