

# 赤道东北太平洋沉积物中生物钡的分布特征

倪建宇<sup>1</sup>, 张 美<sup>1</sup>, 周怀阳<sup>2</sup>

(1 国家海洋局 海底科学重点实验室, 国家海洋局 第二海洋研究所, 杭州 310012)

(2 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640)

**摘要:**分析了赤道东北太平洋海域沉积物中 Ba、Ti、Al 和有机碳(C<sub>org</sub>)的含量。研究表明,研究区沉积物中钡为 0.198%~0.792%;采用标准陆源物质扣除法获得的生物钡(Ba<sub>bio</sub>)的含量为 0.162%~0.764%,占沉积物中总钡含量的 81.6%~96.5%,平均为 88.7%,其在沉积物中的分布表现为上部一致,下部变化较大;有机碳(C<sub>org</sub>)的含量为 0.18%~0.58%,并表现为随沉积物深度的增加而降低。沉积物中 Ba<sub>bio</sub>/Ti 的比值表现为东区高于西区,且向高纬度降低的特点,而沉积物中 C<sub>org</sub>/Ti 和 Ba<sub>bio</sub>/Ti 则表现为负相关关系,表明研究区沉积物中钡可能和上层海洋生产力的相关性不明显。

**关键词:**生物钡;有机碳;赤道东北太平洋

**中图分类号:**P736.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**0256-1492(2006)02-0049-06

上层海洋生物直接成因的生产力标志物如碳酸盐、有机碳和生物硅等在沉降过程中以及在沉积中都将发生不同程度的降解,存在着保存率低的特点,主要应用于高生产力海域古生产力的研究中,而占全球海洋面积 50% 以上的 3 000 m 以深的海域,由于这些生产力的直接产物在地质记录中保存甚少而难以精细地描述它们的历史,但在全球碳循环的研究中这部分海域也是不容忽视的。因此,近年来海洋地球化学家们一直在探索更为有效的生产力标志物,以自生成因重晶石为赋存形式的生物钡是其中一种较为有前途的标志物,一方面由于自生成因重晶石较低的溶解率且在氧化至弱氧化环境下不受早期成岩作用的影响,使得其在地质记录中具有较高的保存率(30% 以上)<sup>[1]</sup>;另一方面,沉积物捕获器获取的资料表明它和表层海洋新生产力即碳的输出通量之间存在着显著的且是可预测的正相关性,且在生产力高的海域,沉积物中也含有较高的钡<sup>[1-3]</sup>。因此,近年来,自生成因重晶石在海相沉积物中的分布常被用来研究现代海洋和古海洋化学组分以及海洋生产力的变迁<sup>[4-8]</sup>。本文拟通过分析东北赤道太平洋海域沉积物中生物钡(Ba<sub>bio</sub>)以及 Ba<sub>bio</sub>/Ti 比值的分布特征,探讨其与上层海洋的关联。

**基金项目:**国家自然科学基金青年基金项目(40206012);国家海洋局青年海洋科学基金项目(2002601);同济大学海洋地质国家重点实验室基金;大洋矿产资源勘探开发专项基金项目(Dy105-02-01)

**作者简介:**倪建宇(1969—),男,博士,研究员,主要从事海洋地球化学和环境地球化学研究, E-mail: jianyun@so. zj. edu. cn

**收稿日期:**2005-05-07; **改回日期:**2005-09-12. 周立君编辑

## 1 地质背景

研究区域位于赤道东北太平洋海域的克拉里昂—克里帕顿断裂带多金属结核区的西部,由间隔约 8°~10° 的东区和西区组成(图 1)。研究区域水深一般为 4 800~5 200 m,局部可达 5 300~5 400 m,平均水深大于 5 000 m,为深海丘陵区。沉积物以深海硅质黏土和硅质软泥为主,沉积速率在小于 0.5 mm/ka 至几毫米每千年之间变化。区域内碳酸盐的补偿深度(CCD)在 4 400~4 800 m 之间,因此,除海山上有少量碳酸盐沉积外,区内沉积物中不含碳酸盐沉积。多年(1994—2003年)夏秋季上层

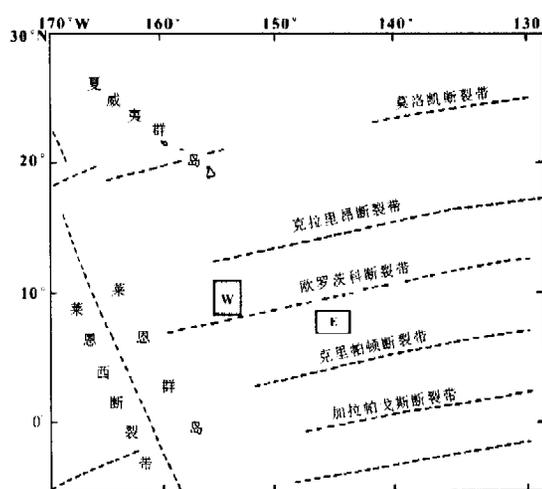


图 1 东北太平洋研究区区域略图(E 为东区, W 为西区)

Fig. 1 Sketch map of research area in Equatorial Northeastern Pacific

(E means eastern area, W means western area)

海洋生产力的平均值在东西区分别为 116.1 和 127.0  $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 都处于 100~150  $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  的低生产力区域内(陈兴群, 个人通信, 2005)。

## 2 样品采集与分析

样品分别来自 1999 年的 Dy95-10 和 2001 年的 Dy105-11 航次, 采样站位见表 1, 采样站位沿 145°W 和 154°W 经向布置。研究区内表层沉积物以不同色调的黄褐色或棕褐色硅质软泥和硅质黏土为主。由多管采样器获得的表层沉积物样品, 0~7 cm 按 1 cm, 7~15 cm 按 2 cm, 15 cm 以下按 3 cm 的间隔分割后冷冻保存, 沉积物在实验室内经低温(~60 °C) 干燥后在玛瑙研钵中研磨至小于 120 目。样品经三酸法( $\text{HNO}_3$ -HF- $\text{HClO}_4$ ) 溶解后分别在德国自由大学环境与资源地质系(1999 年采集的样品)和浙江大学分析测试中心(2001 年采集的样品)采用 ICP-AES 分析了 Ba、Al 和 Ti 等元素的含量, 采用双样平行分析控制分析精度, 其 Ba 精度为 5.3%, Al 和 Ti 为 2.6%。另外, 对 2001 年采集的沉积物样品, 经 1:1 (v/v) HCl 去除沉积物中无机碳组分后在同济大学海洋地质国家重点实验室采用元素分析仪(EA1110)分析了有机碳的含量, 分析精度为 0.3%。

## 3 结果与讨论

### 3.1 生物成因钡的估算

海洋沉积物和悬浮颗粒物中重晶石是钡的主要载体<sup>[9-10]</sup>, 按其来源可分为陆源碎屑、生物(自生)成因、热液沉淀等, 另外在铝硅酸盐矿物晶格中也含有

极少量的钡, 与海洋生产力有关的则是生物成因重晶石(也称自生成因重晶石)中所含的钡, 文献中所指生物钡的含量也主要是指生物成因重晶石中钡的含量, 也称自生钡或过量钡, 本文统称为生物钡( $\text{Ba}_{\text{bio}}$ )。关于生物成因重晶石的形成机制, 目前有两种解释, 一种认为是由生物作用形成的, 生物体将钡富集在它们的骨骼中<sup>[11]</sup>, 或在生物体原生质内沉淀形成重晶石微晶<sup>[12]</sup>, 但迄今为止未发现远海生物体沉淀生成重晶石的直接证据。另一种观点认为生物成因重晶石是通过非生物作用形成的, 在有机质絮凝体(如粪团等)内, 含硫蛋白质等有机物的分解导致粪团等絮凝体微环境中硫酸盐和/或钡的富集, 在达到重晶石饱和条件下, 重晶石发生沉淀形成无定形的硫酸钡聚合物<sup>[10]</sup>, 这种聚合物在沉降过程中通过再结晶作用而不断长大, 在沉降颗粒物中观察到的钡含量随水深的增加而增加的现象支持生物成因重晶石是由非生物过程形成的观点<sup>[1-2]</sup>。

由于沉积物中存在大量的陆源物质, 无法直接定量测定沉积物中生物成因钡( $\text{Ba}_{\text{bio}}$ )的含量, 因此, 常用的方法是根据所测定的钡的总量(Ba)与估算的陆源碎屑钡之间的差值来计算生物成因钡的含量:

$$\text{Ba}_{\text{bio}} = \text{Ba} - \text{Ti}_{\text{sed}} \times \left( \frac{\text{Ba}}{\text{Ti}} \right)_{\text{PAAS}} \quad (1)$$

式中:  $\text{Ti}_{\text{sed}}$  为沉积物中 Ti 的含量,  $(\text{Ba}/\text{Ti})_{\text{PAAS}}$  为晚太古代标准页岩(PAAS)中的 Ba/Ti 比( $(\text{Ba}/\text{Ti})_{\text{PAAS}} = 0.11$ )<sup>[13]</sup>。通常 Al 和 Ti 都可作为陆源组分的指示元素, 但 Murray 和 Leinen<sup>[14]</sup>指出, 在生物颗粒沉降通量较高的海域, 生物颗粒物可从水体中吸附大量的铝; Dymond 等<sup>[15]</sup>还指出硅藻可能是水体中吸附态铝的主要运输者, 沉积物中的 Al 并不

表 1 太平洋海域表层沉积物中元素的含量

Table 1 Sampling stations, water depth and surface sediment chemical data in the Pacific

航次	站位	经度 (W)	纬度 (N)	水深 /m	Al /%	Ba /%	Ti /%	$\text{C}_{\text{org}}$ /%	$\text{Ba}_{\text{bio}}$ /%	Al/Ti	$\text{Ba}_{\text{bio}}/\text{Ba}$ /%	$\text{Ba}_{\text{bio}}/\text{Ti}$
Dy95-10	ES9902	145°24'00"	08°27'09"	5 376	6.36	0.280	0.346		0.242	18.4	86.4	0.70
	ES9910	145°20'00"	08°21'52"	5 258	6.57	0.337	0.426		0.389	19.5	91.3	1.15
	W9510-02	154°07'10"	10°28'59"	5 146	6.23	0.253	0.382		0.211	16.3	83.4	0.55
	W9510-04	154°05'40"	09°22'30"	5 157	5.96	0.336	0.305		0.302	19.5	90.0	0.99
	W9510-11	154°07'47"	10°58'00"	5 224	5.28	0.198	0.331		0.162	16.0	81.6	0.49
	WS9907	153°59'45"	10°01'38"	5 045	6.07	0.334	0.356		0.295	17.1	88.3	0.83
Dy105-11	W2001-02	154°07'42"	10°30'34"	5 102	5.94	0.231	0.365	0.473	0.191	16.3	82.6	0.52
	E2001-01	145°13'30"	09°05'18"	5 342	5.80	0.298	0.317	0.463	0.263	18.3	88.3	0.83
	ES0109	145°19'29"	08°21'07"	5 136	6.19	0.359	0.325	0.580	0.323	19.0	90.0	0.99

注: 样品为表层 0.5 cm 处沉积物; 此处仅给出了各站位第一个样品的分析数据, 各站位全柱样的分析数据可向第一作者索取(jianyumi@sio.zj.edu.cn)。

完全来自陆源碎屑,因此,将 Ti 作为陆源碎屑的指示性元素是较为合适的。

### 3.2 生物钡和有机碳的分布

从分析结果来看,研究区域内沉积物中钡为 0.198%~0.792%,显著高于 PAAS 的 0.065%;钡的含量为 0.198%~0.396%。 $C_{org}$  的含量为 0.18%~0.58%,平均值为 0.38%,从有机碳在沉积物剖面中的分布(图 2)可见,研究区内沉积物中的有机碳含量相对较低,通常低于 0.5%,且随沉积物采样深度的增加而降低,反映沉积物中有机碳含量随着深度的增加而逐渐分解的特点。

沉积物中生物钡的含量为 0.162%~0.764%,平均值为 0.317%,占沉积物中总钡含量的 81.6%~96.5%,平均为 88.7%,其垂直分布见图 3,大体可分为 3 种形态,一种是稳定型,如 W9510-04,即在采样深度内沉积物中  $Ba_{bio}$  的含量基本稳定,底层和表层的差异不大;第 2 种是跃升型,如 ES0109,即在采样深度的 0~10 cm 内  $Ba_{bio}$  的含量基本稳定,但 10 cm 以下则随深度的增加而升高;第 3 种则为降低型,仅见于 ES9910 站,即在采样深度的 0~10 cm 内  $Ba_{bio}$  的含量基本稳定,但 10 cm 以下则随深度的增加而降低。W2001-02 站则较为特殊,在采样深度内顶部和底部沉积物中  $Ba_{bio}$  的含量基本稳定,但中部则显著增加,可达其表底部含量的 3 倍左右。总体上生物钡在大部分站位 0~10 cm 范围内沉积物中的含量基本稳定,其含量约为 0.3%,而 10 cm 以下则变化较大,且各站之间存在着一一定的差异性。大量的研究表明,沉积物中生物钡的含量随上层海洋营养状况而变化,在高生产力海域,其下伏沉积物

中生物钡的含量也显著增高<sup>[4-8]</sup>。已有的研究表明<sup>[16-18]</sup>,研究区域内沉积物按沉积物颜色、生物扰动程度和放射虫年代学可分为两个沉积物单元,其中东区沉积物以均一的黄色、黄棕色的单元 1 为主,放射虫年代学研究表明,其为晚第四纪沉积;西区则表现为厚度不等(3~10 cm 左右)的黄色、黄棕色单元 1 覆盖在深(暗)棕色、深褐色单元 2 之上,单元 2 的放射虫年代学研究表明其为渐新统一始新统的沉积,两者之间的界面代表着一沉积间断面。Jeong 等<sup>[18]</sup>的研究也表明研究区域内受太平洋板块西向运动的控制,地层空间分布呈现由东南向西北渐老的特点。因此,沉积物中生物钡的剖面分布可能反映了研究区域在古新近纪时与第四纪以来的海洋环境存在一定的差异。

### 3.3 $Ba_{bio}/Ti$ 、 $Al/Ti$ 和 $C_{org}/Ti$

通常沉积物中元素的剖面分布受沉积物质量堆积率(MAR)的影响明显,Murray 和 Leinen<sup>[14]</sup>指出沉积物中  $Al/Ti$  和沉积物的质量堆积率之间呈现一致的变化性,因此元素对之间的比值不受沉积物堆积速率的影响,以下我们主要从元素对比值来讨论研究区沉积物中  $Ba_{bio}/Ti$ 、 $Al/Ti$  和  $C_{org}/Ti$  的分布及其与上层海洋初级生产力之间的关系。研究区域内  $Al/Ti$  比值为 12~25,平均为 18,和 PAAS 的  $Al/Ti$ (=17) 比值接近,表明研究海域陆源输入单一。表层沉积物中  $Ba_{bio}/Ti$  的比值表现为东区高于西区,且向高纬度降低的特点(图 4),与 Murray 等<sup>[19]</sup>在赤道太平洋 135°W 和 140°W 经向剖面上所观察到的表层沉积物中  $Ba/Ti$  比值自赤道向高纬度降低的纬度分布特点一致,并与研究区上层水

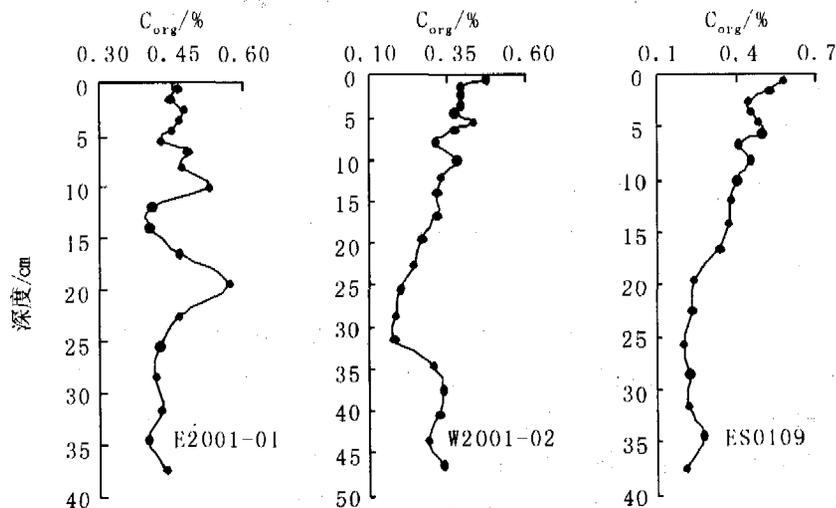


图 2 东北太平洋沉积物中有机碳( $C_{org}$ )的剖面分布

Fig. 2 Profile distributions of organic carbon in sediments in the Northeastern Pacific

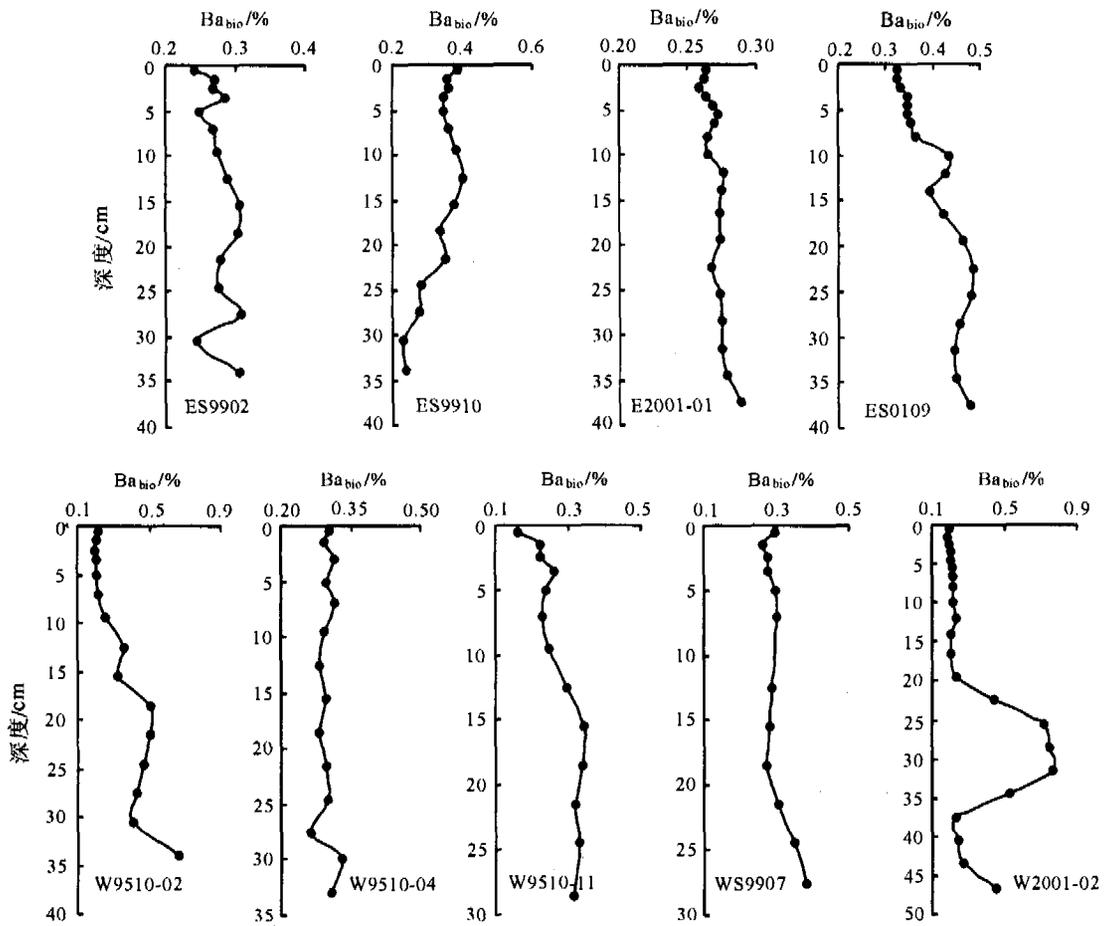


图3 东北太平洋沉积物中生物钡(Ba<sub>bio</sub>)的剖面分布

Fig. 3 Profile distributions of biogenetic barium in sediments of the Northeastern Pacific

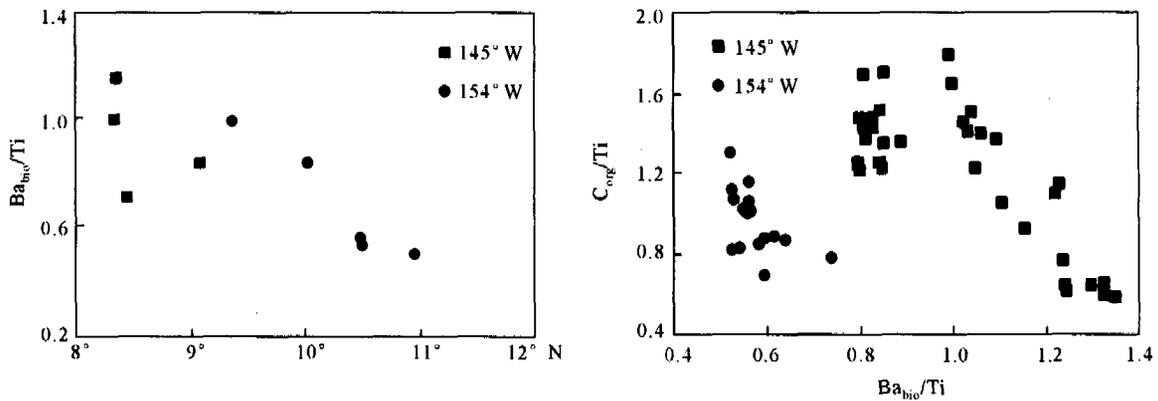


图4 东北太平洋表层沉积物中 Ba<sub>bio</sub>/Ti 的纬度分布(左)及 C<sub>org</sub>/Ti 和 Ba<sub>bio</sub>/Ti 的关系(右)

Fig. 4 Ba<sub>bio</sub>/Ti in surface sediments at 145°W and 154°W (Left) and relationship between C<sub>org</sub>/Ti and Ba<sub>bio</sub>/Ti (Right) in the Northeastern Pacific

体的初级生产力向高纬度降低的分布格局<sup>[19]</sup>相似。沉积物中 C<sub>org</sub>/Ti 和 Ba<sub>bio</sub>/Ti 则表现为负相关(图4),由于开大洋沉积物中的有机碳主要来自上层水体的输出生产力,当其在水柱中沉降时将不断地分解,使得当其到达海底沉积物时含量极低,且主要是难以被微生物所利用的难降解有机质,随着沉积物深度的增加,沉积物中的有机碳含量将趋于稳定,

或仅在极小的范围内波动。而沉积物中的生物钡由于不受成岩作用的影响,其在沉积物中的分布主要受不同来源的控制,因此,沉积物中 C<sub>org</sub>/Ti 和 Ba<sub>bio</sub>/Ti 之间的负相关可能反映了生物成因钡并不是研究区域内沉积物中钡的主要来源, Banakar 等<sup>[20]</sup>从印度洋的沉积物中发现生物钡和沉积物中锰的氧化物相关,表明铁锰氧化物对钡有吸附作用。

因此,区内生物钡和有机碳之间的关系还需要进一步研究确认。

#### 4 结论

(1) 研究区域内沉积物中钡为 0.198%~0.792%;其中生物钡的含量为 0.162%~0.764%,占沉积物总钡含量的 81.6%~96.5%,平均为 88.7%; $C_{org}$  的含量为 0.18%~0.58%。

(2) 沉积物中  $Ba_{bio}/Ti$  的比值表现为东区高于西区,且向高纬度降低的特点,而沉积物中  $C_{org}/Ti$  和  $Ba_{bio}/Ti$  则表现为负相关关系,表明研究区域内沉积物中钡可能和上层海洋生产力的相关性不明显。

**致谢:**感谢大洋一号科学考察船历任船长和船员以及考察队其他成员在现场调查和样品采集时所给予的帮助和支持!感谢同济大学赵泉鸿教授、杨守业教授和浙江大学吴建之高级工程师在样品分析过程中所给予的大量帮助,同时感谢国家海洋局第三海洋研究所陈兴群研究员提供其未发表的初级生产力数据。

#### 参考文献 (References)

- [1] Dymond J, Suess E, Lyle M. Barium in deep-sea sediment; a geochemical proxy for paleoproductivity[J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(2):163-181.
- [2] Francois R, Honjo S, Manganini S J, et al. Biogenic barium fluxes to the deep sea: implications for paleoproductivity reconstruction[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(2): 289-303.
- [3] Dehairs F, Fagel N, Antiam A N, et al. Export production in the Gulf of Biscay as estimated from barium-barite in settling material: A comparison with new production[J]. *Deep-Sea Res. I*, 2000, 47:583-601.
- [4] Paytan A, Kasten M, Chavez F P. Glacial to interglacial fluctuations in productivity in the equatorial Pacific as indicated by marine barite[J]. *Science*, 1996, 274:1 355-1 357.
- [5] Nurnberg C C, Bohrmann G, Schultzer M. Barium accumulation in the Atlantic sector of the Southern Ocean; results from 190 000-year records[J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(4): 594-603.
- [6] Schroeder J O, Murray R W, Leinen M, et al. Barium in equatorial Pacific carbonate sediment; Terrigenous, oxide, and biogenic associations[J]. *Paleoceanography*, 1997, 12:125-146.
- [7] Jeandel C, Tachikawa K, Bory A, et al. Biogenic barium in suspended and trapped material as a tracer of export production in the tropical NE Atlantic EUMELI sites[J]. *Mar. Chem.*, 2000, 71:125-142.
- [8] Pfeifer K, Kasten S, Hensen C, et al. Reconstruction of primary productivity from the barium contents in the surface sediments of the South Atlantic Ocean[J]. *Mar. Geol.*, 2001, 177:13-24.
- [9] Dehairs F, Chesselet R, Jedwab J. Discrete suspended particles of barite and the barium cycle in the open ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 49:528-550.
- [10] Gingele F, Dahmmke A. Discrete barite particles and barium as tracers of paleoproductivity in South Atlantic sediments[J]. *Paleoceanography*, 1994, 9(1):151-168.
- [11] Bernstein R E, Byrne R H, Schijf J. Acantharians; a missing link in the oceanic biogeochemistry of barium[J]. *Deep-Sea Res. I*, 1998, 45:491-505.
- [12] Schmitz B. Barium, equatorial high productivity, and the northward wandering of the Indian continent[J]. *Paleoceanography*, 1987, 2(1):63-77.
- [13] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust; Its Composition and Evolution* [M]. Blackwell, Oxford, 1985: 312.
- [14] Murray R W, Leinen M. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1996, 60(20):3 869-3 878.
- [15] Dymond J, Collier R, McManus J, et al. Can the aluminum and titanium contents of ocean sediments be used to determine the paleoproductivity of the ocean? [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(4):586-593.
- [16] 倪建宇,周怀阳,潘建明,等.中国多金属结核开辟区沉积物地球化学特征[J]. *海洋学报*, 2001, 23(6): 94-100. [NI Jian-yu, ZHOU Huai-yang, PAN Jian-ming, et al. Geochemical characteristics of sediments from China Pioneer Area equatorial northeast Pacific Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(6):94-100.]
- [17] 王汝建,叶瑛,周怀阳,等.热带东太平洋短柱样的放射虫地层学研究[J]. *微体古生物学报*, 2004, 21:227-336. [WANG Ru-jian, YE Ying, ZHOU Huai-yang, et al. Radiolarian stratigraphy of three short cores in the tropical east Pacific Ocean[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2004, 21:227-336.]
- [18] Jeong K S, Kang J K, Chough S K. Sedimentary processes and manganese nodule formation in the Korea Deep Ocean Study (KODOS) area, western part of Clarion-Clipperton fracture zones, northeast equatorial Pacific[J]. *Mar. Geol.*, 1994, 122:125-150.
- [19] Murray R W, Knowlton C, Leinen M, et al. Export production and terrigenous matter in the central equatorial Pacific Ocean during interglacial oxygen isotope stage 11[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 24:59-78.
- [20] Banakar V K, Parthiban G, Pattan J N, et al. Chemistry of surface sediment along a north-south transect across the equator in the Central Indian Basin; an assessment of biogenic and detrital influences on elemental burial on the seafloor[J]. *Chem. Geol.*, 1998, 147:217-232.

## BIOGENETIC BARIUM DISTRIBUTION IN EQUATORIAL NORTHEASTERN PACIFIC SEDIMENTS

NI Jian-yu<sup>1</sup>, ZHANG Mei<sup>1</sup>, ZHOU Huai-yang<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Submarine Geosciences, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;

2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Ba, Ti, Al and organic carbon contents of sediments from the abyssal Equatorial Northeastern Pacific were analyzed by ICP-AES and Elements Analyzer respectively. The Ba content varied between 0.198% and 0.792%. Biogenic barium ( $Ba_{bio}$ ) calculated using normative calculation varied between 0.162% and 0.764%, which was up to 81.6% and 96.5% of total barium in the sediments. The  $Ba_{bio}$  distributions in sediment profile show little variation in the upper sections, but large variations in lower sections. This suggests that the sediment setting perhaps changed since Tertiary in the region. The organic carbon ( $C_{org}$ ) contents varied between 0.18% and 0.58%, and decreased with sediment depth increasing. The  $Ba_{bio}/Ti$  ratio in eastern zone sediments is higher than that of western zone. The  $Ba_{bio}/Ti$  ratio also decreased with latitude increasing in the area. The  $C_{org}/Ti$  ratio and  $Ba_{bio}/Ti$  ratio display negative correlation, suggesting that there is little obvious correlation between surface oceanic nutrition level and  $Ba_{bio}$  contents of sediments in the region. So we should pay more attention to the application of biogenetic barium to paleoproductivity research.

**Key words:** biogenetic barium; organic carbon; Equatorial Northeastern Pacific