

热带东太平洋晚第四纪的古海洋及古气候记录

肖文申¹, 王汝建¹, 叶 瑛²

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 浙江大学地球科学系, 浙江杭州 310012

摘要: 热带东太平洋 8001 柱状样晚第四纪以来放射虫标志种 *Buccinospharea invaginata* 和 *Collosphaera tuberosa* 的研究发现, 它们的初现面(FAD)出现于柱深 22 cm 和 45 cm 处, 年龄分别为 0.21 Ma 和 0.42 Ma。它们的初现面年龄与 SPEC-MAP 氧同位素记录结合为该柱建立了地层框架。该柱放射虫丰度、生源蛋白石和有机碳含量、粒度的分析显示, 大约在氧同位素 11、9~8.4、5~3 和 1 期, 高的放射虫总丰度、第四纪常见种丰度和始新世—渐新世种丰度大致对应于高的中值粒径和平均粒径, 以及大约氧同位素 5 期以来增加的有机碳含量, 表明此期间贸易风增强, 搬运的陆源颗粒增大, 北赤道洋流加强, 导致上升流增强, 表层水生产力提高, 同时, 南极底层流的活动也加强。大约在氧同位素 10、8.3~6 和 2 期, 低的放射虫总丰度、第四纪常见种丰度和始新世—渐新世种丰度大致对应于减小的中值粒径和平均粒径, 反映此期间贸易风减弱, 搬运的陆源颗粒减小, 北赤道洋流减弱, 导致上升流消失, 表层水生产力降低, 同时, 南极底层流的活动也减弱。

关键词: 放射虫丰度; 表层水生产力; 贸易风; 南极底层流; 热带东太平洋; 晚第四纪。

中图分类号: P736.22

文章编号: 1000-2383(2006)02-0143-08

收稿日期: 2005-03-11

Late Quaternary Paleoceanographic and Paleoclimatic Records in the Tropical East Pacific Ocean

XIAO Wen-shen¹, WANG Ru-jian¹, YE Ying²

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China

Abstract: Radiolarians studied in Core 8001 of the northeast equatorial Pacific show that the first appearance datum (FAD) of *Buccinospharea invaginata* and *Collosphaera tuberosa* occur at depths of 22 and 45 cm respectively, and their FAD ages are 0.21 and 0.42 Ma. The stratigraphic framework of this core is established by the combination of the two FAD ages with the SPEC-MAP isotopic records in deep-sea sediments. Variations of radiolarian abundance, biogenic opal, organic carbon and grain size in this core indicate that the high radiolarian abundance during the MIS 11, 9–8.4, 5–3 and 1, with the high abundance of Quaternary and Eocene-Oligocene species, corresponds to the high median and mean grain sizes. Organic carbon increased during the MIS 5, reflecting the enhancing trade wind, which brought on increasing grain size in conveyed terrestrial detritus. The intensive north equatorial current led to the upwelling becoming stronger and high surface productivity, together with enhanced activity in the Antarctic bottom water. The low radiolarian abundance during the MIS 10, 8.3–6 and 2, coinciding with the low abundances of the Quaternary and Eocene-Oligocene species, corresponds to low median and mean grain sizes. This implies the weak trade wind caused the decreasing grain size of the transported terrestrial detritus and the slack north equatorial current resulted in the weak upwelling and low surface productivity, coming along the weak activity of the Antarctic bottom water.

Key words: radiolarian abundance; surface productivity; trade wind; Antarctic bottom water; tropical Eastern Pacific; Late Quaternary.

基金项目: 国家“十五”大洋资源与环境勘查与研究重大专项(DY105-1-04-3); 国家重点基础研究专项项目(G200078500); 国家自然科学基金项目(Nos. 40321603; 40276020; 9946011); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项(No. 200126); 高等学校骨干教师资助计划。

作者简介: 肖文申(1982—), 男, 在读硕士生, 目前在同济大学海洋与地球科学学院学习。E-mail: weshao@sohu.com

0 引言

20 世纪 70 年代以来,我国对热带中、东太平洋海底多金属结核矿产展开了大规模的调查和研究,取得了一系列的成果,同时也对上述多金属结核区的沉积物进行了海洋地质和古海洋学的研究,建立了中、东太平洋晚新生代以来的地层序列;分析了各沉积时期的沉积速率、沉积特征、古气候、碳酸钙补偿深度(CCD)、生物组合特征、南极底层流与沉积间断等;研究了古海洋环境与多金属结核形成的关系、古海洋事件与成矿作用等(许东禹等,1994a, 1994b 沈华悌等,1996;钱江初,1996;金翔龙,1997;韩建修等,1997;许东禹,1999). 但上述多金属结核区缺乏短时间尺度(晚第四纪)和时间分辨率相对较高的古海洋学研究,因此,本文试图通过东太平洋 8001 柱状样沉积物中的粒度、放射虫丰度、蛋白石和有机碳含量的分析,从中提取古海洋与古气候变化的信息,探讨该海区晚第四纪以来的古环境变化,追溯热带东太平洋古海洋和古气候的演变历史.

1 研究区地质背景

中国多金属结核开辟区位于热带东太平洋海域的克拉里昂—克里帕顿断裂带的西部,赤道上升流区的北侧边缘,由间隔约 8°~10°的西区 and 东区构成(图 1). 开辟区水深一般为 4 800~5 200 m,局部可

达 5 300~5 400 m,平均水深>5 000 m,为深海丘陵区. 沉积物以深海黏土和硅质软泥为主,沉积速率在小于 0.5~n mm/ka 之间变化. 区域内碳酸钙的补偿深度(CCD)在 4 400~4 800 m 之间,因此,除海山上有少量碳酸钙沉积外,区内沉积物中几乎不含碳酸钙沉积. 沉积物氧化还原电位和 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值的分析结果表明,区内沉积物处于氧化至弱氧化环境(倪建宇等,2001, 2002). 影响本区的大气环流为赤道以南和以北东西向的 2 股贸易风(Molina-Cruz, 1977),而在本区活动的底层洋流为南极底层流(ABW,即 Antarctic bottom water),南极底层流对太平洋多金属结核富集带的影响始于始新世. 目前,该海区洋底的南极底层流速度平均在 2 cm/s 左右(韩建修等,1997).

2 材料与分析方法

热带东太平洋 8001 柱状样位于 9°54. 4508'N, 154°26. 6025'W,水深 5 170 m(图 1). 柱状样长度 46 cm,按 1 cm 等间距取样共计 46 个样品. 沉积物为灰黄色和黄棕色,以硅质粘土、硅质软泥和深海粘土为主. 分别对这 46 个样品进行了放射虫丰度的统计、生源有机碳和蛋白石含量测定以及沉积物的粒度分析. 所有的分析和实验都是在同济大学海洋地质重点实验室完成. 放射虫的分析采用德国阿尔弗雷德·魏格纳极地与海洋研究所微体古生物室的标

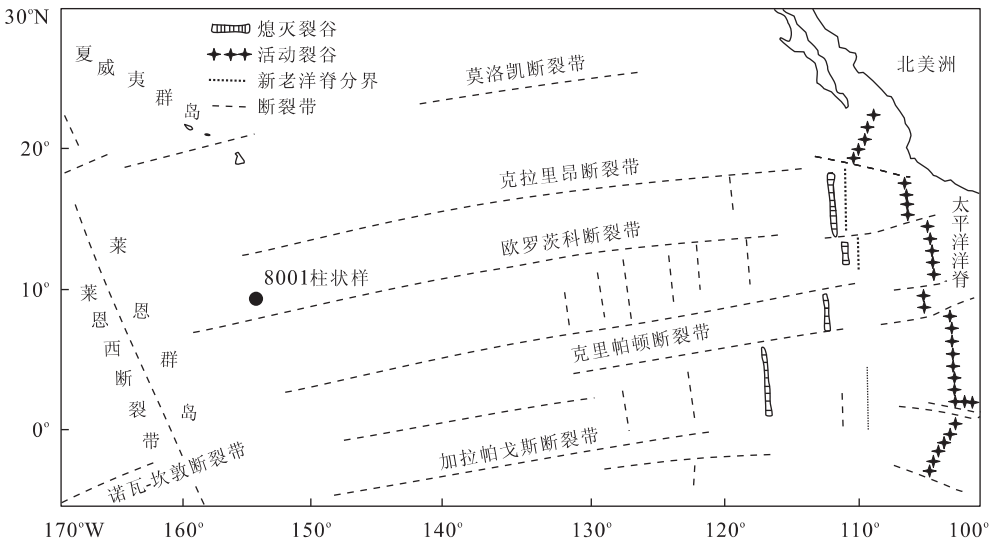


图 1 热带东太平洋中国多金属结核开辟区区域略图和 8001 柱状样位置(倪建宇等,2001)
Fig. 1 Sketch map of the China pioneer area for multimetallic nodules in the tropical Eastern Pacific Ocean and location of Core 8001

准方法进行放射虫的处理和薄片的制作(Abelmann *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2003),然后镜下统计和鉴定放射虫。有机碳含量测试是用意大利生产的有机元素分析仪 EA1110,可同时测定C、H、N、S等元素的含量,数据误差小于0.2%。蛋白石含量测定是采用硅钼蓝比色法(Mortlock *et al.*, 1989),该方法的实验误差小于3%。沉积物的粒度分析是在Coulter全自动激光粒度分析仪上进行测试。

3 地层划分

在低纬度和高纬度大洋区,如赤道太平洋、印度洋和南大洋,放射虫是判定深海沉积物年龄的重要化石。通过与其他微体化石带和由绝对年龄确定的古地磁年代表的对比,低纬度赤道太平洋和热带印度洋的标准放射虫带已经建立(Sanfilippo *et al.*, 1985, 1998)。这些放射虫带适用于热带和亚热带地区较广的纬度范围。热带东太平洋海域中国多金属结核开辟区的生物地层学研究显示,由于生物钙质沉积难于保存,因此放射虫作为地层划分和对比的工具在深海沉积物的研究中发挥了极其重要的作用(许东禹等,1994a, 1994b;韩建修等,1997;金翔龙,1997)。

在8001柱状样的放射虫标志种研究中,发现第四纪的标志种 *Buccinosphaera invaginata* 的初现面(first appearance datum, 即FAD)出现于柱深22 cm处,而 *Collosphaera tuberosa* 的初现面(FAD)出现于柱深45 cm处。它们的初现面(FAD)具有时间标志作用,可以用来确定地层的时代,且可划分与对比地层。*B. invaginata* 和 *C. tuberosa* 的初现面年龄分别是0.21和0.42 Ma(Sanfilippo *et al.*, 1985, 1998;王汝建和Abelmann, 1999; Wang *et al.*, 2003)。由此可以推断该柱45 cm以上的地层年龄小于0.42 Ma,属于RN16放射虫带。然而,由于8001柱状样只有46 cm长,因此推断该柱的底部年龄约为0.42 Ma,该柱22 cm以上的地层年龄小于0.21 Ma,属于晚第四纪放射虫 *B. invaginata* 带(RN17)。以上2个放射虫初现面的研究为该柱提供了基本的年代框架。由于该柱缺乏绝对的年龄资料和氧同位素记录,因此,采用以上2个标志种的初现面年龄,并结合SPECMAP氧同位素记录(Imbrie *et al.*, 1984)建立该柱地层框架。

4 结果和讨论

4.1 放射虫丰度变化

该柱放射虫的研究显示,沉积物中绝大部分为第四纪常见种,但伴有少量的始新世—渐新世种。从放射虫丰度的统计结果可以看出,约0.42 Ma以来放射虫丰度呈现明显的变化(图2)。柱深45~40 cm和柱深37~31 cm,大约相当于氧同位素11和9~8.4期,放射虫总丰度相对较高,平均 121×10^5 枚/g,最高值达 286×10^5 枚/g;柱深31~15 cm,大约相当于氧同位素8.3~6期,放射虫总丰度基本保持在一个低的水平,并没有太大的变化,平均值为 87×10^5 枚/g;放射虫总丰度最高峰出现在柱深14~4 cm之间,大约相当于氧同位素5~3期,平均 314×10^5 枚/g,最高峰达 424×10^5 枚/g;柱深4 cm之上,放射虫总丰度又降低,最低达 50×10^5 枚/g,至顶部,大约相当于氧同位素1期,放射虫总丰度又小幅度地增加,而第四纪常见种丰度却与总丰度表现出相同的趋势。

根据第四纪常见种丰度与始新世—渐新世种丰度以及第四纪常见种与始新世—渐新世种的百分含量,可以推断在第四纪的沉积物中出现始新世—渐新世的放射虫种,是再沉积作用造成的。而造成再沉积作用的原因是该区域活跃的南极底层流,因为南极底层流的加强会使原先沉积在洋底的沉积物搬运再沉积(许东禹等,1994a;沈华悌等,1996;韩建修等,1997;金翔龙,1997;许东禹,1999)。因此,从始新世—渐新世种丰度和百分含量可以推测南极底层流的强弱变化。

虽然第四纪常见种的丰度作为一个背景值左右着其百分含量的大小,但只能作为当时表层生产力大小的标志,并不能反映南极底层流的强弱。因此,判断南极底层流作用的强弱主要是根据始新世—渐新世种丰度。由图2可以看出,柱深45~40 cm和柱深37~31 cm,大约相当于氧同位素11和9~8.4期,始新世—渐新世种丰度和百分含量有3次较大的波动,总体含量较高,这一段时期丰度最高可达 21×10^5 枚/g,百分含量最高可达22.30%,反映这段时期南极底层流曾经3次增强,造成洋底沉积物的再沉积。此后南极底层流的活动减弱,恢复正常沉积。在柱深19 cm处,即大约相当于氧同位素6期,始新世—渐新世种个体百分含量突然增加,但其个体丰度并没有显著的增加,因此,推断南极底层流

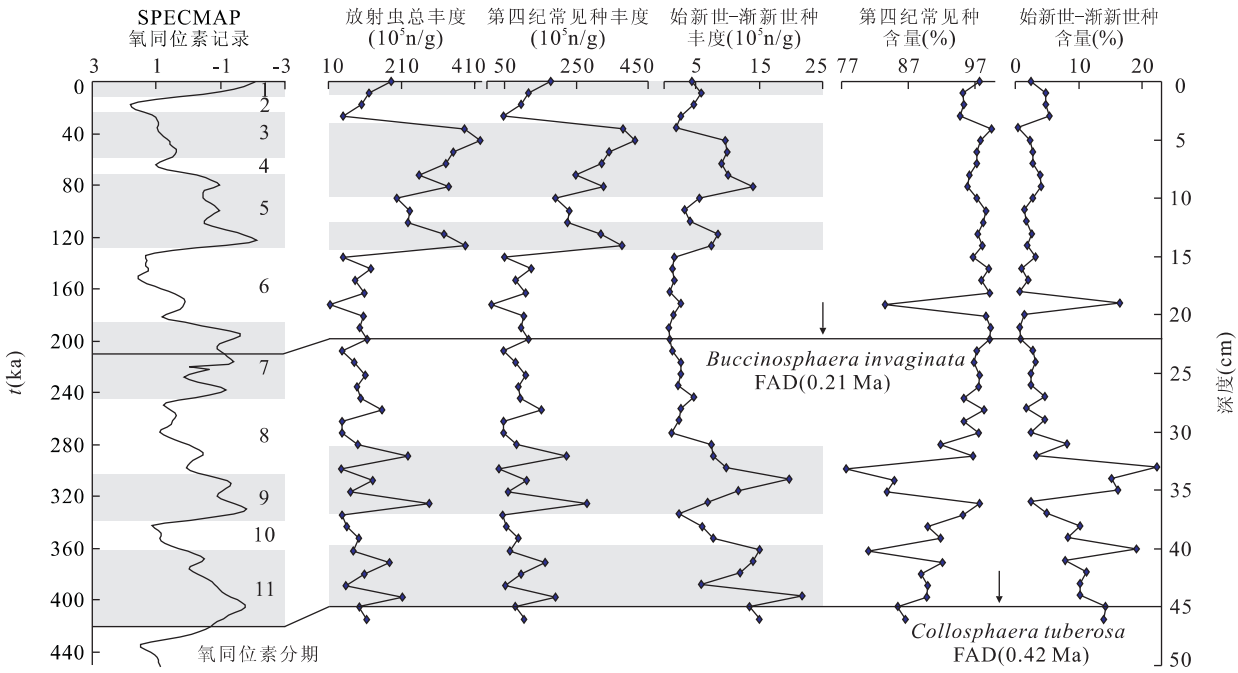


图 2 热带东太平洋 8001 柱状样中放射虫丰度的变化与 SPECMAP 氧同位素记录的对比

Fig. 2 Correlation of the radiolarian abundances in Core 8001 of the tropical Eastern Pacific Ocean with the SPECMAP oxygen isotopic records in deep-sea sediments

并没有增强,可能是当时表层生产力低下,因为总丰度和第四纪种常见种丰度都降低,并且南极底层流的腐蚀性加速了放射虫壳体的溶解.在硅质溶解作用过程中,不同种类的壳体存在着差异(Johnson, 1974, 1976;王汝建,2000).始新世—渐新世种壳体相对比较粗壮,不易溶解,而第四纪种相对纤细,容易溶解,结果就导致始新世—渐新世种百分含量的异常.柱深 14~5 cm,大约相当于氧同位素 5~3 期,始新世—渐新世种丰度也相对较高,因此,推测南极底层流在这段时期也得到了加强.而始新世—渐新世种百分含量没有明显增加的原因可能是这段时期表层生产力旺盛,总丰度和第四纪种常见种丰度都大量增加了,使始新世—渐新世种百分含量相对显得比较低.柱深 4 cm 至顶部,大约相当于氧同位素 2~1 期,第四纪种常见种丰度和始新世—渐新世种丰度及其含量都出现小幅度增加,南极底层流可能曾稍稍地强化了.

放射虫能够反映表层海水生产力的变化,因此保存在沉积物中的放射虫可以用来解释过去表层水的生产力状况与沉积过程(Caulet *et al.*, 1992; Wang *et al.*, 2003).沉积物中放射虫丰度的变化受几个因素控制:表层水营养与生产力、溶解作用、钙质和陆源物质的稀释作用.8001 柱状样位于 CCD

面以下,钙质含量微乎其微,陆源物质的输入主要靠东西向贸易风的风力,因此,稀释作用可以忽略不计.而在该海区起主要作用的是表层水营养与生产力和溶解作用,其中,控制表层水营养与生产力的因素为陆源物质的输入和上升流的强弱(Molina-Cruz, 1977).由于 8001 柱状样位于北赤道贸易风强盛区的边缘(图 3),受到贸易风和上升流的强烈影响,因此显示出较高的表层水营养与生产力.而溶解作用主要与南极底层流的腐蚀性相关,高的始新世—渐新世种丰度伴随着高的放射虫破碎壳证实了这一点.

赤道东太平洋晚第四纪以来放射虫含量在间冰期增加,冰期下降.尽管冰期高纬度和低纬度地区温差加大,导致大气环流增强,大洋环流强化,但对于赤道东太平洋来说并不太干冷.而与冰期相反,间冰期赤道东太平洋更湿润,中美洲大陆植被更茂盛,贸易风更强.因此,陆源物质的输入增多,上升流增强,使得表层水生产力增加,从而造成放射虫含量的增加(Romine and Moore, 1981; Janecek and Rea, 1985; Kennington *et al.*, 1999).由图 2 放射虫丰度曲线的波动可以看出,柱深 45~32 cm 大约相当于氧同位素 11~8.4 期,放射虫总丰度、第四纪常见种和始新世—渐新世种丰度都出现高峰,显示了较

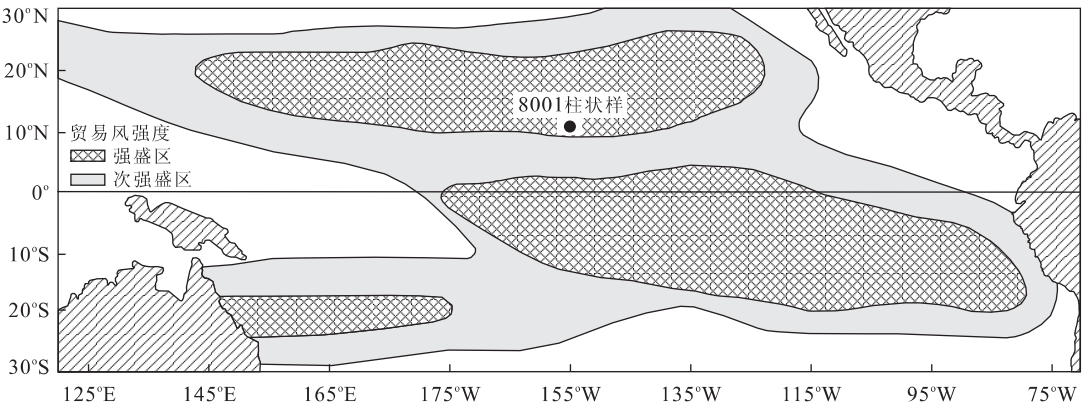


图 3 赤道太平洋贸易风强度图和 8001 柱状样的位置(据 Molina-Cruz, (1977)重绘)

Fig. 3 Annual mean trade-wind field in the equatorial Pacific Ocean and location of Core 8001

高的表层生产力,同时也反映了南极底层流的加强所造成的再沉积。柱深 31~15 cm,大约相当于氧同位素 8.3~6 期,放射虫总丰度的变化不明显,代表了低的表层生产力。柱深 14~4 cm,大约相当于氧同位素 6~3 期,放射虫总丰度、第四纪常见种和始新世—渐新世种丰度都出现大幅上升,显示了表层生产力的突然升高,也反映了南极底层流的加强所造成的再沉积。

4.2 有机碳和蛋白石含量的变化

热带东太平洋 8001 柱状样 0.42 Ma 以来有机碳和蛋白石含量的变化显示,柱深 45~22 cm,大约相当于氧同位素 11~7 期,有机碳含量除柱深 34 cm 处出现高峰外,都保持在一个比较低的范围内,平均值为 0.26%;而柱深 18 cm 至顶部,大约相当于氧同位素 6 期以来,有机碳含量一直呈现明显增高趋势,平均值达 0.38%。与此同时,蛋白石含量的变化却与之明显不同。柱深 45~37 cm,大约相当于氧同位素 11~10 期,蛋白石含量由高到低,显示下降的趋势。柱深 37~4 cm,大约相当于氧同位素 9~3 期,蛋白石含量的变化不明显,基本在 7.10%~9.96% 范围内波动,平均为 8.14%,但分别在柱深 30 cm 和 22 cm 处出现 9.30% 和 9.96% 的高峰。柱深 4 cm 以上,大约相当于氧同位素 2~1 期,蛋白石含量突然减少,顶部更是降到了 4% 左右(图 4)。

海洋沉积物中有机碳含量的多少以及有机碳的堆积速率能够直接反映地质历史时期的表层水生产力的高低 (Kawahata *et al.*, 1998)。柱深 18 cm 至顶部,有机碳含量的明显增加与放射虫总丰度、第四纪常见种和始新世—渐新世种丰度的大幅上升大致相对应,说明大约氧同位素 6 期以来表层生产力的

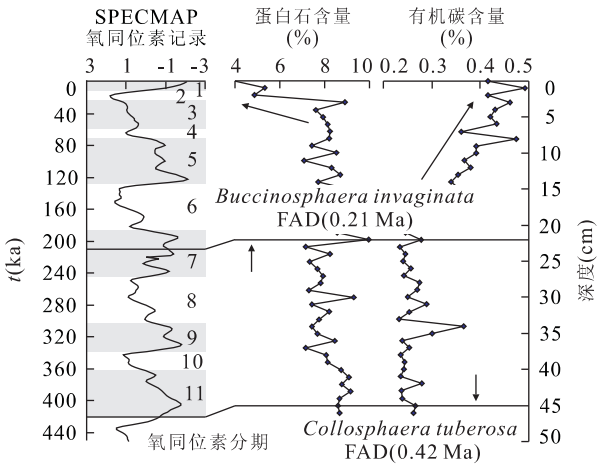


图 4 热带东太平洋 8001 柱状样中的有机碳和蛋白石含量的变化与 SPECMAP 氧同位素记录的对比

Fig. 4 Correlation of the organic carbon and opal contents in Core 8001 of the tropical Eastern Pacific Ocean with SPECMAP oxygen isotopic records in deep-sea sediments

增加。但柱深 18~4 cm,蛋白石含量并没有明显的变化,具体原因有待进一步查明。尽管 8001 柱状样恰好位于现代硅质浮游生物的高生产率带(同济大学海洋地质系,1989),但柱深 4 cm 以上蛋白石含量却突然降低,推测原因可能是末次冰盛期后的快速变暖导致硅质浮游生物生产力的下降。另外,柱深 18 cm 至顶部,蛋白石含量与放射虫丰度变化明显不一致,推测原因可能是蛋白石作为硅质浮游生物的沉积包含了硅藻、放射虫、海绵骨针、硅鞭藻等,而不同硅质浮游生物溶解作用的差异性 (Johnson, 1974, 1976) 可能导致蛋白石含量与放射虫丰度异常波动。柱深 4 cm 以上,始新世—渐新世种丰度的小幅上升和蛋白石含量的突然降低可能与南极底层流

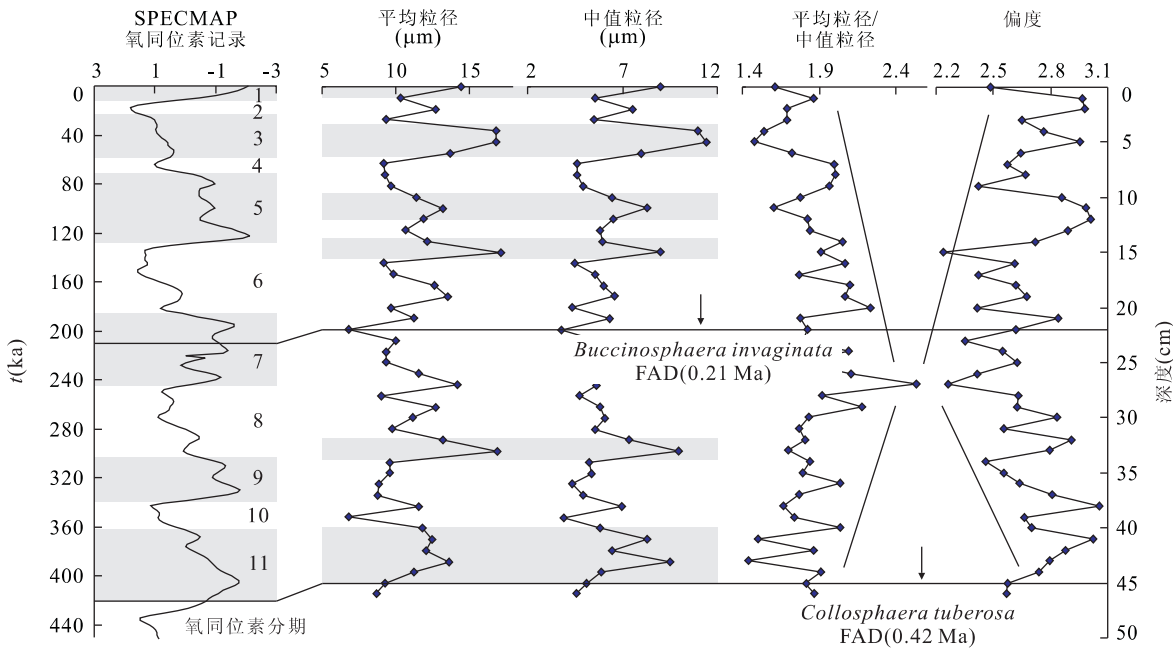


图 5 热带东太平洋 8001 柱状样中的粒度资料与 SPECMAP 氧同位素记录的对比

Fig. 5 Correlation of the grain size datum in Core 8001 of the tropical Eastern Pacific Ocean with SPECMAP oxygen isotopic records in deep-sea sediments

的溶解作用有关。

4.3 粒度变化的古气候信息

热带东太平洋 8001 柱状样 0.42 Ma 以来平均粒径、中值粒径、平均粒径/中值粒径、偏度等曲线变化显示,柱深 44~40 cm,大约相当于氧同位素 11 期,中值粒径和平均粒径增加(图 5)。柱深 32~31 cm,大约相当于氧同位素 8.4 期,中值粒径和平均粒径又增大。柱深 30~16 cm,大约相当于氧同位素 8.3~6 期,粒径相对较小。分别在柱深 15 和 11 cm 处,大约相当于氧同位素 6.0/5.5 和 5.3 期,粒径又出现 2 个高峰。柱深 6~4 cm,大约相当于氧同位素 3 期,粒径达到最高值,中值粒径最高达 11.43 μm。而柱状样顶部,大约相当于氧同位素 1 期,粒径又有小幅度的增加。相比之下,平均粒径/中值粒径和偏度曲线的变化呈现相反的趋势。柱深 45~27 cm,大约相当于氧同位素 11~8 期,平均粒径/中值粒径呈逐渐增加的趋势,而偏度却与之相反逐渐降低。柱深 27 cm 至顶部,大约相当于氧同位素 7~1 期,平均粒径/中值粒径呈逐渐下降的趋势,而偏度却与之相反逐渐增加。

受沉积介质的动力能和来源物质的原始大小控制的平均粒径和中值粒径表示粒度分布的集中趋势。平均粒径/中值粒径可以表示粗颗粒含量的多少,高比值代表粗颗粒含量低,而低比值代表粗颗粒

含量高。偏度用来判别粒度分布的不对称程度,高值代表粗颗粒含量多,而低值代表粗颗粒含量少(Pye, 1987b)。其中陆源碎屑的相对含量、粒度以及矿物成分反映了大气环流的强度和物源区的气候环境。尽管东太平洋沉积物中的粘土组分主要来源于北美河流沉积、东亚大陆的风成沉积和东太平洋火山岛屿(刘季花等,2004),并且粘土组分的粒径大小通常小于 2 μm(Pye, 1987a),但是 8001 柱平均粒径和中值粒径都大于 2 μm,因此,8001 柱平均粒径和中值粒径的高峰可能反映了贸易风的增强,因为该海区的搬运动力主要是贸易风和北赤道洋流的搬运,即贸易风强盛和北赤道洋流较强的时候,搬运粒径较粗的沉积物;贸易风和北赤道洋流较弱的时候,搬运粒径较细的沉积物(Janecek et al., 1985; Rea, 1990)。与放射虫丰度曲线的对比可以发现,平均粒径和中值粒径的高峰基本上对应于放射虫总丰度、第四纪常见种和始新世—渐新世种丰度的高峰,前者的低谷也基本上对应于后者的低谷,说明贸易风增强,搬运的颗粒较大,北赤道洋流增强,导致上升流强化,表层生产力提高,同时,南极底层流加强;贸易风相对较弱,搬运的颗粒较小,北赤道洋流减弱,导致上升流消失,表层生产力下降,同时,南极底层流减弱。

5 结论

热带东太平洋中国多金属结核开辟区 8001 柱状样晚第四纪以来的放射虫地层学研究显示,该柱放射虫标志种 *Buccinospharea invaginata* 和 *Collosphaera tuberosa* 的初现面(FAD)分别出现于柱深 22 和 45 cm 处,年龄分别为 0.21 和 0.42 Ma。采用这 2 个标志种的初现面年龄,并结合深海大洋 SPECMAP 氧同位素记录为该柱建立了地层框架。该柱中的放射虫丰度、生源蛋白石和有机碳含量、粒度的分析表明,大约氧同位素 11、9~8.4、5~3 和 1 期,高的放射虫总丰度、第四纪常见种丰度和始新世—渐新世种丰度大致对应于高的中值粒径和平均粒径,以及大约氧同位素 5 期以来增加的有机碳含量,说明此期间贸易风增强,搬运的陆源物质颗粒增大,北赤道洋流加强,导致上升流增强,表层水生产力提高,同时,南极底层流的活动也加强。大约氧同位素 10、8.3~6 和 2 期,低的放射虫总丰度、第四纪常见种丰度和始新世—渐新世种丰度大致对应于减小的中值粒径和平均粒径,反映此期间贸易风减弱,搬运的陆源物质颗粒减小,北赤道洋流减弱,导致上升流消失,表层水生产力降低,同时,南极底层流的活动也减弱。

References

- Abelmann, A., Brathauer, U., Gersode, R., et al., 1999. Radiolarian-based transfer function for the estimation of sea-surface temperatures in the Southern Ocean (Atlantic sector). *Paleoceanography*, 14(3): 410—421.
- Caulet, J. P., Venec-Peyre, M. T., Vergnaud-Grazzini, C., et al., 1992. Variation of South Somalian upwelling during the last 160 ka; Radiolarian and foraminifera records in core MD 85674. In: Summerhayes, C. P., Prell, W. L., Emeis, K. C., eds., *Upwelling systems: Evolution since the Early Miocene*. *Geological Society Special Publication*, 64: 379—389.
- Han, J. X., Li, X. J., Cui, J. Q., et al., 1997. Relationship between paleoceanographic environment and polymetallic nodules formation. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—142 (in Chinese).
- Imbrie, J., Hays, J., Martinson, D., et al., 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger, A., Imbrie, J., Hays, J., et al., eds., *Milankovitch and climate, understanding the response to orbital forcing*, Part 1. Reidel, Norwell, MA, 269—305.
- Janecek, T. R., Rea, D. V., 1985. Quaternary fluctuations in the northern hemisphere trade winds and westerlies. *Quaternary Research*, 24: 150—163.
- Jin, X. L., 1997. Marine geology and deposit features for mineral belt of polymetallic nodules in eastern Pacific Ocean. Ocean Publishing House, Beijing, 1—443 (in Chinese).
- Johnson, T. C., 1974. The dissolution of siliceous microfossils in surface sediments of the eastern tropical Pacific. *Deep Sea Research*, 21: 851—864.
- Johnson, T. C., 1976. Controls on the preservation of biogenic opal in sediments of the eastern tropical Pacific. *Science*, 192: 887—890.
- Kawahata, H., Suzuki, A., Ahagon, N., 1998. Biogenic sediments in the West Caroline basin, the western equatorial Pacific during the last 330 000 years. *Marine Geology*, 149: 155—176.
- Kennington, K., Haslett, S. K., Funnell, B. M., 1999. Off-shore transport of neritic diatoms as indicators of surface current and trade wind strength in the Pliocene eastern equatorial Pacific. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 149: 171—181.
- Liu, J. H., Shi, X. F., Chen, L. R., et al., 2004. REEs and ϵ_{Nd} of clay composition in surface sediments of the East Pacific Ocean: Evidence of clay. *Science in China (Series D)*, 34(6): 552—561 (in Chinese).
- Marine Geology Department of Tongji University, 1989. Introduction to paleoceanography. Tongji University Press, Shanghai, 1—316 (in Chinese).
- Molina-Cruz, A., 1977. The relation of the southern trade winds to upwelling processes during the last 75 000 years. *Quaternary Research*, 8: 324—338.
- Mortlock, R. A., Froelich, P. N., 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in the pelagic marine sediments. *Deep Sea Research*, 36(9): 1415—1426.
- Ni, J. Y., Zhou, H. Y., Pan, J. M., et al., 2001. Geochemical characteristics of sediments from the China pioneer area, equatorial northeast Pacific Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(6): 94—100 (in Chinese with English abstract).
- Ni, J. Y., Zhou, H. Y., Pan, J. M., et al., 2002. Geochemistry of trace elements in sediments from the China pioneer area, equatorial northeast Pacific Ocean. *Geochimica*, 31(1): 71—77 (in Chinese with English abstract).

- Pye, K. , 1987a. Mechanisms of fine-particle formation. In: Pye, K. , ed. , *Aeolian dust and dust deposits*. Cambridge University Press, Cambridge, 10—28.
- Pye, K. , 1987b. Dust deposition in the oceans. In: Pye, K. , ed. , *Aeolian dust and dust deposits*. Cambridge University Press, Cambridge, 171—197.
- Qian, J. C. , 1996. Relationship between the hiatus and polymetallic nodules in the CC area of the East Pacific Ocean. In: Shen, H. T. , Qian, J. C. , eds. , *Studies of polymetallic nodules in the China pioneer area, equatorial northeast Pacific Ocean*. Ocean Publishing House, Beijing, 16—22 (in Chinese).
- Rea, D. K. , 1990. Aspects of atmospheric circulation; The Late Pleistocene (0—950 000 yr) record of eolian deposition in the Pacific Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 78: 217—227.
- Romine, K. , Moore, T. C. Jr. , 1981. Radiolarian assemblage distributions and paleoceanography of the eastern Equatorial Pacific Ocean during the last 127 000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 35: 281—314.
- Sanfilippo, A. , Nigrini, C. , 1998. Code numbers for Cenozoic low latitude radiolarian biostratigraphic zones and GPTS conversion tables. *Mar. Micropaleontol.* , 33: 109—156.
- Sanfilippo, A. , Westberg-Smith, M. J. , Riedel, W. R. , 1985. Cenozoic radiolaria. In: Bolli, H. M. , Saunders, J. B. , Perch-Nielsen, K. , eds. , *Plankton stratigraphy*. Cambridge University Press, Cambridge, 631—712.
- Shen, H. T. , Chen, J. L. , Qian, J. C. , 1996. Polymetallic nodules and their forming environments in the China pioneer area, equatorial northeast Pacific Ocean. In: Shen, H. T. , Qian, J. C. , eds. , *Studies of polymetallic nodules in the China pioneer area, equatorial northeast Pacific Ocean*. Ocean Publishing House, Beijing, 16—22 (in Chinese).
- Wang, R. J. , Clemens, S. , Huang, B. , et al. , 2003. Late Quaternary paleoceanographic changes in the northern South China Sea (ODP Site 1146): Radiolarian evidence. *Journal of Quaternary Science*, 18(8): 745—756.
- Wang, R. J. , 2000. Low radiolarian abundance events and their paleoceanographic implications during the Pleistocene in the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 20(4): 75—80 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J. , Abelson, A. , 1999. Pleistocene radiolarian biostratigraphy in the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 42(5): 536—543.
- Xu, D. Y. , 1999. Paleooceanographic events and minerogenesis in the Pacific Ocean. In: Xu, D. Y. , ed. , *Marine geology and paleoceanography*, volume 13. Geological Publishing House, Beijing, 101—113 (in Chinese).
- Xu, D. Y. , Chen, Z. T. , Meng, X. Y. , 1994a. A study of Late Cenozoic paleoceanographic environment and events of the central Pacific Ocean. Geological Publishing House, Beijing, 1—176 (in Chinese).
- Xu, D. Y. , Yao, D. , Liang, H. F. , et al. , 1994b. Paleooceanographic environment of the forming polymetallic nodules. Geological Publishing House, Beijing, 1—111 (in Chinese).

附中文参考文献

- 韩建修, 李学杰, 崔建秋, 等, 1997. 古海洋环境与多金属结核形成的关系. 武汉: 中国地质大学出版社, 1—142.
- 金翔龙, 1997. 东太平洋多金属结核矿带海洋地质与矿床特征. 北京: 海洋出版社, 1—443.
- 刘季花, 石学法, 陈丽蓉, 等, 2004. 东太平洋沉积物中粘土组分的 REEs 和 ϵ_{Nd} : 粘土来源的证据. 中国科学(D 辑), 34(6): 552—561.
- 同济大学海洋地质系, 1989. 古海洋学概论. 上海: 同济大学出版社, 1—316.
- 倪建宇, 周怀阳, 潘建明, 等, 2001. 中国多金属结核开辟区沉积物地球化学特征. 海洋学报, 23(6): 94—100.
- 倪建宇, 周怀阳, 潘建明, 等, 2002. 中国多金属结核开辟区沉积物中微量元素地球化学特征. 地球化学, 31(1): 71—77.
- 钱江初, 1996. 东太平洋 CC 区的沉积间断与多金属结核的关系. 见: 沈华悌, 钱江初, 东太平洋多金属结核研究论文集. 北京: 海洋出版社, 33—38.
- 沈华悌, 陈建林, 钱江初, 1996. 东太平洋海盆勘查区多金属结核及其形成环境. 见: 沈华悌, 钱江初, 东太平洋多金属结核研究论文集. 北京: 海洋出版社, 16—22.
- 王汝建, 2000. 南沙海区更新世以来的放射虫丰度低值事件及其古海洋学意义. 海洋地质与第四纪地质, 20(4): 75—80.
- 王汝建, Abelson, A. , 1999. 南海更新世的放射虫生物地层学. 中国科学(D 辑), 29(2): 137—143.
- 许东禹, 1999. 太平洋古海洋事件和成矿作用. 见: 许东禹主编, 第 30 届国际地质大会论文集, 第 13 卷, 海洋地质学, 古海洋学. 北京: 地质出版社, 101—113.
- 许东禹, 陈宗团, 孟祥营, 1994a. 太平洋中部晚新生代古海洋环境及事件. 北京: 地质出版社, 1—176.
- 许东禹, 姚德, 梁宏锋, 等, 1994b. 多金属结核形成的古海洋环境. 北京: 地质出版社, 1—111.