

放射虫研究在古海洋学中的进展*

PROGRESS IN THE STUDY ON RADIOLARIANS IN PALEOCEANOGRAPHY

常凤鸣 庄丽华 阎 军

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

放射虫是海洋微体古生物的一个重要类群,广泛分布于从赤道至两极的各种海域,同时垂直分布于从表层到上千米深的水层中,其分布格局和群落结构受水体温度、盐度、生物产量和营养盐含量等环境因素控制,又与水体的迁移交换密切相关^[1]。沉积物中的放射虫化石蕴含着丰富的古生态、古海洋环境等地质历史信息,其丰富的种类性、极高的分异度和对突发性海洋-气候事件的灵敏反应,对建立高分辨率地层层序、恢复古气候及重建高精度短时间序列的古环境具有重要意义。特别是其不易溶的硅质壳,在 CCD 以下的深海区具有其他钙质类微体化石不可替代的作用。自 Møyn 1834 年首次研究放射

虫以来已有 160 多年的历史^[1],初期侧重于分类描述、生态分布的研究,DSDP 和 ODP 的相继开展,大大促进了其在古海洋学方面的进展。本文综述了放射虫在生态分布、生物地层、古海洋学参数测定和古海洋环境记录等方面的研究进展,揭示了放射虫在古海洋学研究中的发展趋势和广阔前景。

1 放射虫分布特征及其与环境的关系

1.1 水平分布特征

Casey 1977 年总结指出热带大洋(特别是印度洋和太平洋)、环南极大洋及北极大洋区分别具有特有的放射虫种群,但深层水体中可生活着世界性的种群,赤道大洋

区放射虫的分异度和丰度最大,向两极递减。之后 Renate 1990 年、Boltovskoy 1987 和 1991 年的调查研究也证实了这一结论。最近在格陵兰~冰岛~挪威等海域的调查显示,温暖的大西洋区表层沉积物中硅质类放射虫种数最大,寒冷的北冰洋和极地海域放射虫的种数极少。Kruglikova 1993 年和 1997 年通过对从北极区到北半球北部大洋

* 国家自然科学基金资助项目
49736210 号。

第一作者:常凤鸣,出生于 1973 年,博士,主要从事海洋地质与古海洋学研究。电话:2879062-2203。

收稿日期:2001-02-20;

修回日期:2001-03-07

与边缘海现代硅质类放射虫的对比研究发现,在大西洋和太平洋的北极区存在着特殊的地方性种而且优势种的百分值差别很大。同时总结了从北极到南极世界范围内沉积物中放射虫的定量分布特征,提供了不同海区和气候带下放射虫科级水平的相对丰度特征,并对世界大洋不同区域中种和高级阶元的分异度和生态分布做了总结。这些成果说明全球的放射虫总体分布格局已基本查明,将对古海洋学的研究起重要作用。

1.2 深度分布特征

有关放射虫的深度分布,Casey 1977年总结出了7条特征界线,并指出垂直分带与水体的物理化学条件有关。Kling 1979年划出中、北太平洋区硅质类放射虫垂直分布的4个带:表层带、次表层上部丰度最大带、次表下层下部丰度最大带和深部带,并指出某一深度带的种类不会出现在另一深度带中。Bolotovskoy 1996年在东热带大西洋的研究划分出3个深度带;陈木宏1996年通过对南海表层沉积物中放射虫的分异度和丰度分析,总结了97个种的深度分布特征,提出了7条深度界线,并说明了其中5条显著界线的特征。Abelmann等^[3]研究了从南太平洋到南大西洋亚热带区现生放射虫垂直分布模式,发现现代硅质类放射虫的丰度最大值在混合层以下、温跃层之上,指出沉积物中化石放射虫的垂直分布因地理位置而异,在不同的海区放射虫的深度分布特征不尽相同,并阐明了有关大量现生和化石种的垂直分布和丰度变化特征。目前虽然对大多数因素种的垂直分布特征还不了解,但对放射虫组合的深度分布已经有了明确的认识。

1.3 放射虫分布的影响因素

通过对现生和沉积物中放射

虫属种的定量统计,用因子分析方法确定不同的属种组合,研究其组成、分布与环境因素的关系,大量成果表明不同的放射虫组合总是很好地对应着不同性质的水团,并对控制放射虫分布和组合成分的环境因素有了一定的认识。最近几次大规模的调查研究又取得了更加详细的资料,如Katsuo 1999年在日本Shimoda沿岸的研究显示,在冷、中温、暖3种水体条件下,放射虫的种数、组合成分和丰度有着明显的差异;而Bolotovskoy 1998年在格陵兰~冰岛~挪威海域的研究表明,放射虫组合因子与夏季表层水温有很好的相关性。这表明温度是控制其分布的重要因素。Chen 1997年和Molina Cruz 1999年的研究表明在各种不同的海区放射虫组合总是很好地对应着温度、盐度、营养盐、生物产量等物理、化学性质不同的水团。Abelmann等的研究^[3]发现放射虫丰度在贫营养盐的亚热带地区低,而在上升流发育区明显增大,放射虫组合的分布和组成与水深、水团分布、水文界限和营养盐密切相关。综上所述温度、盐度、营养盐含量及表层水体的生产力是控制放射虫分布及其组合特征的基本因素。另外,放射虫的分布、组合还与上升流、洋流等水体的迁移交换密切相关,Molina Cruz 1999年在加利福尼亚湾、Matul 1998年在Benguela上升流北部等地区的调查表明放射虫以非该区的大洋性种类占优势,同时在深部水体中出现了表层分布的种类,这充分说明了水体迁移交换对其分布的影响。El Niño 1992年发生时,赤道中至东太平洋表层水体和沉积物中放射虫组合以西太平洋高含量的种类占优势,这与南赤道流的减弱有关,同时受源自西太平洋的表层水增强的影响;El Niño之后的冷期其组合特征则受亚热带

和赤道水团相互作用的影响^[4]。可见放射虫分布格局和群落结构是温度、盐度、营养盐等因素与水体迁移交换共同作用的结果,而在不同的区域其主导因子不同。

1.4 沉积物 and 对应水体中放射虫的比较

沉积物中的放射虫组合与上覆水体中现生群落是否一致直接关系到放射虫所指示环境的准确性。Abelmann 1997年和Molina Cruz 1999年研究发现在一些地区沉积物与上覆水体中的放射虫组合一致,而另外一些区域则存在着差异,二者相似和差异的程度决定于区域内的水动力状况。但从总体来看,沉积物中的放射虫组合代表了某一海区较长时间的环境产物,其整体组合特征具有相对稳定性^[5]。要对这一领域有更好的认识必须对放射虫壳体的沉降过程以及其埋藏、保存机制作大量的工作。最近人们已开始关注这一问题,1999年Popova、陈木宏研究了放射虫壳体的沉降过程;其他一些学者则研究了其壳体在沉降、保存过程中的溶蚀作用和它们与环境的关系以及其在沉积物中的搬运和迁移。

2 放射虫生物地层学

生物地层学旨在建立沉积序列的时间框架和标尺,是研究古海洋环境演变的基础和前提。放射虫生物地层学的研究对深海,尤其CCD面以下的研究至关重要,而在低纬度和部分高纬度大洋区,放射虫又是判断地层年龄的重要化石。借助于一些足够长的连续深海岩芯,放射虫生物地层,特别是对低纬度新生代时间序列的建立,近年来取得了卓著成果。通过直接与其他微体化石带和古地磁年代表的对比,低纬度赤道太平洋和热带印度洋地区的标准放射虫化石带已经建立,这些放射虫化石带适

用于热带和亚热带较广的纬度范围^[2]。Sanfilippo 1998 年分析总结了已有的新生代低纬度不同时代放射虫化石带,发表了完整的新生代放射虫地层序列,并准确标定了各带界线的年龄,说明了各带的放射虫事件。这标志着低纬度区新生代放射虫生物地层已经确立,它所划分的地层序列必将在古海洋学的研究中起到巨大的作用。

Motoyama 1996 年和 Atsushi 1997 年指出不同地理区域生活着不同特征的放射虫类群,放射虫生物化石带有着极强的区域性。目前适应于南、北极海域及其他高纬地区的化石带也已建立或正在建立中,但尚需广泛验证、修订和归纳总结。总体来看新生代放射虫生物地层学已相当成熟。

放射虫是微体古生物中多样性最好、个体发育最丰富的一个类群,其演化速率随着地质年代的更新不断加快。随着放射虫种类演化和个体发育研究的进展以及放射虫生物地层学与氧、碳同位素资料结合的加强,有望在高分辨率的放射虫生物地层学研究方面取得突破性进展。同时利用 ODP 提供的足够长的深海岩芯,使得放射虫生物地层学正向中生代、古生代等更老的地层序列推进,而 Vishnevskaya 1997 年对古生代~中生代西北太平洋放射虫发展演化的详细研究所取得的成果必将大大促进这一工作的进展。

3 古海洋学参数

3.1 海水表层温度(SST)

目前古温度定量估计最常用的方法是 Imbrie 和 Kipp 1971 年创建的转换函数法,即通过沉积物中微体化石的定量估计,用因子分析和多元回归分析求出微体化石组合与表层海水冬、夏温度间的关系,从而将古生物信息转换为古温度信息。Pisias 1979 年在太平洋、Mortley 1989 年在南大西洋和南印

度洋分别建立放射虫的古温度转换函数,Abelmann 1999 年和陈木宏等 1998 年也分别建立了南极大洋大西洋区和中国南海区域的转换函数。放射虫古温度转换函数的广泛应用,对古气候的研究起了重大作用,如对 ODP 794 A, DSDP 438 A 和 DSDP 440 B 所取岩芯分析表明,在上新世 4.8~2.8 MaB.P. 期间日本海、西太平洋地区表层海水温度普遍低于现在;而在 3.95~4.55 MaB.P. 期间,夏季表层海水温度高于目前;大约 4.0 MaB.P. 左右沿岸冬季表层水温高于目前 2~4℃,而 3.4~2.8 MaB.P. 期间表层海水温度达到最低值^[6]。尽管转换函数法多年来一直是定量估计古温度时最广泛使用的方法,但由于其适应范围的局限性和本身受到的挑战,必须探索可供代替的其他更好的古温度估算途径或处理放射虫化石数据的方法。

3.2 表层生产力指标

海洋表层生产力的变化,既以生物泵效应而涉及全球碳循环,又可因上升流驱动而反映风向和强度,在古海洋学中的重要性日益显著。对古生产力放射虫指标的研究已开展多年,Takahashi 1997 年利用放射虫分异度指数,Bareille 1991 年和 Diester 1995 年利用放射虫在沉积物中的聚集速率、Gupta 1992 年利用硅藻/放射虫比(D/R)等参数来指示古表层初级生产力的变化;同时也认识了一些在高生产力地区富集的指示种 *Neodenticula seminiae*, *Cenotopyxis borealis* 等。Diester 1995 年将放射虫古初级生产力指标应用于南极大洋发现,从中新世(约 45 MaB.P.)到渐新世(约 33 MaB.P.),该区古生产力逐渐增加,并识别出古生产力突然增大的 3 个带和其具有的 430 ka 周期。参照 Herguera 1991 年依据赤道西北太平洋底栖有孔虫丰度与表层初级生产力的经验关系而建立的古生产力估计公式,陈木宏 1999 年也开

始探索放射虫的古初级生产力定量估计函数。

3.3 上升流指数(URI)

海岸上升流是季风气候的重要海洋学标志,借助于沉积物中放射虫化石记录的上升流发育和变化,可以追踪古季风的信息,对于古气候的研究相当重要。沉积物中放射虫壳体的分布能很好地反映上升流活动区的海洋学状况,多年来,大量学者的工作已经识别出了一些在上升流发育海区占优势的种和稳定的组合。Molina Cruz 1984 年指出虽然这些种及其组合能生活在多种不同的环境中,但它们总是对上升流发育的环境表现出极大的亲和性。借助于放射虫与上升流的这种密切关系,Vè nec 1995 年和 Matul 1998 年建立了一些反映上升流发育和变化的放射虫指标。在现代亚热带、亚极区、加利福尼亚湾和 South Arabia 等著名上升流发育区的高生产力水体中硅藻/放射虫比率是相当高的,所以沉积物中的硅藻/放射虫比率是古表层初级生产力又一很好指标,Gupta 1992 年通过对放射虫种群组合和不同类群比的比较又把硅藻/放射虫比率和次表层放射虫组合的丰度作为上升流的指标。

利用放射虫的上升流指标,Labracherie 1983 年在 Arabian 沿岸发现间冰期时季风上升流曾加强,而冰期时特别是在 18 kaB.P. 左右只有弱的上升流存在,并在暖期(早于 11 kaB.P.)有增强的趋势。根据放射虫及其组合对上升流的指示作用,Haslett 和 Vergnaud Grazzini 1995 年成功地研究了不同海区的古上升流发育状况;Heusser 1997 年在古气候特别是古季风研究中,利用化石放射虫的上升流指标很好地揭示了西北太平洋岩芯中记录的 350 kaB.P. 以来东亚古季风发育特征与演变历史。同时 Gupta 1996, 1997 年在对印度洋古季风形成路径与摆动在该海区的响应研



究中,放射虫的上升流指标也起到了重要的作用。

4 放射虫的古环境记录

目前对沉积物中放射虫记录的古环境的研究,在时间跨度上正从第四纪向第三纪甚至中生代推进,涉及的领域包括了海洋地质学的各个方面;同时其分辨率已达到了千年的时间尺度,与氧、碳同位素等地球化学资料的结合日益紧密,提高了其准确性。

4.1 古地理与古构造演化

地理条件的变化必将引起海洋环流等海洋水文状况的改变,进而影响海洋生物的生态环境,放射虫也不例外。*Molina Cruz* 1997 年研究发现,晚上新世中美洲海峡关闭期间,西赤道太平洋区罩笼虫目放射虫的相对丰度明显降低,这是由于海峡的关闭导致赤道西太平洋表层环流重组,使得该区接收的陆源物质增加,冲淡了放射虫的丰度。*Molina Cruz* 1996 年在 *Bajasur* 和墨西哥 *Trinidad* 阶地层中发现其中存在着—由上升流作用和加利福尼亚海流输入水形成的放射虫化石的鼻状沉积,这些放射虫化石组合的地层位置表明,形成加利福尼亚海湾的海底扩张过程是从—古边缘海盆地开始的;在该地层次级单元中外海大洋放射虫种的出现表明较低硅藻岩的年龄近于 7.5 Ma,说明在形成加利福尼亚海湾的海底扩张过程发生前,加利福尼亚海湾的河口地区曾发生过太平洋海水的侵入,因此加利福尼亚海湾是从—古河口演化发展而来的。

近年来人们发现在一些活动板块边缘的变质岩地层中所能找到的化石仅是放射虫,放射虫化石记录对于恢复古大陆格局及其构造演化具有重要作用。*Filatova* 1997 年对西北太平洋(俄罗斯部分)大陆构造中生代岩群起源的研究发现,放射虫化石的分布显示:早中生代建造在不同的古纬度区都有沉积;早-晚中生代的构造古环境占据了 3 000 km 的宽度,这一区

域后来缩减到 300 km 的范围。

4.2 古气候与古季风

要识别人类活动引起的气候变化幅度及预测未来气候的发展趋势,必须对人类活动存在以前古气候的演化历史有很好的认识。研究古气候记录及其变化的手段是多样的,放射虫由于其广泛的分布和与海洋环境间密切的关系,是古气候研究中不可或缺的工具。

现代研究表明海气相互作用对于沿岸气候有显著影响。*Sabin* 1996 年研究了东北太平洋基于放射虫的近千年尺度的古海洋表层温度变化与北美西部沿岸大陆气候变化间的关系,发现北太平洋环流的古纬度变化对于沿岸大陆气候有控制性作用;且在过去的 20 000 年间,海洋水文状况的变化与东北太平洋气压中心(北太平洋高压和阿留申低压)的迁移有着密切关系。

古季风是古气候研究的一个重要方面,上升流的发育在一些特殊区域往往受季风的驱动,利用沉积物中放射虫的上升流记录可以恢复古季风的发育和变化。*Gupta* 1995 年,1996 和 1997 年研究了东北赤道太平洋晚中新世以来和古季风活动相关的水体盐度变化与放射虫组合的关系,发现在赤道印度洋表层海水盐度的变化可作为古季风的指标,在过去的 0.2~1.4 MaB.P. 年间季风摆动具有明显的 120 ka 年的旋回,这与地球轨道偏心率的变化周期 10 Ma 相一致。利用放射虫的指示作用,*Heusser* 1997 年在西北太平洋恢复了 350 kaB.P. 以来东亚古季风发育特征与演变历史。

4.3 古海洋演化和古洋流记录

Molina 1984 年总结指出放射虫的分布不仅反映表层和次表层水体的地理分布特征,而且其在水体中垂向丰度和组合的变化还与水柱的物理化学性质密切相关,包含着有关海洋垂直结构的大量信息。*Pisias* 1986 年发现放射虫的分

布还与水体的水平迁移交换和垂直环流密切相关,能反映水体的三维特征。依据放射虫化石记录,*Haslett* 1996 年研究了上新世-更新世东赤道太平洋上升流的发育状况,*Boltovskoy* 1992 年揭示出末次盛冰期赤道太平洋的环流模式,*Sabin* 1996 年和 *Matul* 1999 年研究了 15~13 kaB.P. 期间北太平洋环流的纬度变化。*Molina-Cruz* 1997 年在中美洲和墨西哥太平洋沿岸的研究中发现上新世沉积物中放射虫的穿时特征可反映 *Rican* 沿岸流的形成。*Samthein* 1993 年研究发现大西洋放射虫化石记录了 12.3~8 kaB.P. 期间北大西洋深部水体的形成以及始新世赤道东大西洋的环流沉积。同样 *Gupta* 1994 年和 *Banakar* 1995 年在南极区发现了底流活动的放射虫证据,*Howe* 1997 年和 *Pudsey* 1998 年恢复了南极环流的演变历史。*Domack* 1986 年利用放射虫的指示作用成功地重建了 5.8 MaB.P. 和 10 MaB.P. 期间加利福尼亚流的历史。海洋环流格局的变化,通过海气相互作用影响着大气环流模式,而上升流的活动又往往受季风驱动,所以对海洋古环流的认识将促进对古气候的进一步了解。

4.4 突变事件

火山活动和 *El Niño* 等突发事件对局部、短期的海洋环境和放射虫的群落结构和分布特征有显著影响。*Iyer* 和 *Danelian* 1997 年研究表明现代放射虫分布与火山物质的分布有很好的相关性,印度洋沉积物中也记录了 10 000 年前火山热液活动的放射虫组合变化。*El Niño* 的发生能导致海洋环流和水体物理化学性质的巨大改变,从而影响水体中放射虫组合的特征。*Casey* 等 1983 年和 *Welling* 1992 年分别研究了加利福尼亚和赤道太平洋区域 *El Niño* 发生时放射虫组合的特征变化,结果表明放射虫组合对突发性的海洋气候事件引起的海洋水文状况和水体的迁移交换有灵敏的反应。在 *Santa Barbara*



海盆的全新世沉积物中, Weinheimer 1986 年发现了放射虫记录的古 El Niño 和 Anti-El Niño 事件。这些研究对于认识古环境变化中的一些高频事件具有重要意义。

5 结束语

目前新生代放射虫的研究已取得了众多成果,并继续保持着强劲的发展势头,而有关中生代和古生代放射虫的研究也日益增多,同时放射虫数据与氧、碳同位素等地球化学资料结合的趋势也日益增强,在古海洋学中其所解释的古环境范围和时间跨度日渐扩展,这一领域正在呈现出可喜的发展趋势。虽然与有孔虫等其他微体化石相比,放射虫研究的时间跨度、主题领域相当,但在某些方面尚存在着重大的差距。今后应特别注重以下几个方面的工作:生态学知识是古环境恢复的基础,所以必须进一步开展有关放射虫群落结构和种

的水平生态特征的调查研究,加强对控制其生态分布的环境主导因子的认识。同时争取在包括现代和地质历史时期放射虫的分类学上取得全面的突破性进展,加强其系统演化和个体发育的研究。并在继续研究第四纪放射虫的同时,向更老的地层序列推进。充分利用放射虫的高分异度和对环境变化反应灵敏的特点,提高其在古环境解释中的分辨率,加强与其他微体化石和同位素地球化学资料的结合,增强其研究结果的可对比性和准确性。☀

主要参考文献

- 1 谭智源、陈宏宏。中国近海的放射虫。北京:科学出版社,1999,1~404
- 2 王汝建。南海更新世的放射虫生物地层学,中国科学(D辑),1999,29(2):137~143
- 3 Abelmann A., Gowing M. M. . Spatial distribution pattern of living polycystine radiolarian taxa: baseline

- study for paleoenvironmental reconstructions in the southern ocean (Atlantic sector), *Marine Micropaleontology*, 1997, 30:3~28
- 4 Welling L. A., Pisias N. G. . Radiolarian fluxes, stocks and population residence times in surface waters of the central Pacific, *Deep Sea Research I*, 1998, 45(4~5): 639~671
 - 5 Weinheimer A. L. & Cayan D. R. . Radiolarian assemblages from Santa Barbara Basin sediments represent interdecadal variability, *Paleoceanography*, 1997, 12(5): 658~670
 - 6 Heusser L. E., Morley J. J. . Pliocene climate of Japan and environs between 4.8 and 2.8 Ma: a joint pollen and marine faunal study, *Marine Micropaleontology*, 1996, 27(1-4): 85~106

(本文编辑:李本川)