

文章编号 1001-8166(2006)05-0474-08

放射虫现代生态学的研究进展及其应用前景 ——利用放射虫化石揭示古海洋、古环境的基础研究

张兰兰, 陈木宏, 向荣, 张丽丽

(中国科学院南海海洋研究所边缘海地质与古环境开放实验室, 广东 广州 510301)

摘要 放射虫以其不易溶解的硅质壳体在古海洋、古环境研究中起着不可替代的作用, 其种类组合与海洋物理、水文环境有着很好的对应关系。随着放射虫在古海洋环境研究中的广泛应用以及研究手段的改进, 放射虫现代生态学研究在世界各大洋得到了广泛开展。中国加入综合大洋钻探计划, 势必会加快我国古海洋学的研究步伐, 放射虫作为海洋微体古生物中的一个重要类群, 其生态学知识是重建古海洋、古环境的基础。因此, 有必要向我国学术界提供放射虫现代生态学的研究成果及最新发展趋势, 促使我国放射虫的研究与国际接轨, 以提供更多的古海洋、古环境替代性指标。

关键词 放射虫, 现代生态学, 古海洋学, 综合大洋钻探, 浮游生物拖网, 沉积物捕获器
中图分类号 Q178.53 文献标识码 A

在古海洋环境研究中, 放射虫作为一个重要的信息传递载体, 起着不可替代的作用。20 世纪 70 年代相继开始实施的深海钻探 (DSDP)、大洋钻探 (ODP) 和综合大洋钻探 (IODP) 计划以及研究手段的改进, 极大地促进了古海洋学的研究进展。放射虫作为古海洋学研究的一个重要工具, 被广泛的用于重建古海洋、古气候和古环境变化研究。“将今论古”一直是放射虫环境替代指标的应用基础, 因此, 放射虫现代生态学的研究越来越得到重视, 不断改进的取样仪器为放射虫现代生态学研究得以进行提供了技术保障。目前, 国内放射虫现代生态学的研究非常缺乏, 主要集中于古海洋学重建方面的研究, 然而, 我国有着独特地理位置和海洋环流的海域是进行放射虫生态研究的绝佳环境之一, 这就使得开展我国放射虫现代生态学的研究显得尤为重要和有意义。

本文着重分析了国际上放射虫现代生态学的研究成果及最新的发展趋势, 从分析放射虫在古海洋研究中的应用情况, 重点提出放射虫现代生态学研究的迫切性及其所面临的问题。旨在全面认识国际放射虫的研究现状, 借鉴并发挥我国海洋的独特优势及现有技术水平来开展我国放射虫现代生态学的研究, 放射虫现代生态学研究的深入可为利用放射虫进行古海洋学研究探寻更多的替代性指标, 并可进一步促进放射虫化石在古海洋研究中应用的广度和深度。

1 放射虫简介

放射虫作为海洋微体古生物中的一个重要类群, 单细胞, 营海生漂浮生活, 以甲壳类动物的幼虫、硅藻、颗石藻、沟鞭藻甚至挠足类为食, 但又被浮游有孔虫及其它海洋无脊椎动物等所捕食, 是微食物

收稿日期 2006-03-30, 修回日期 2006-04-20

* 基金项目 国家自然科学基金项目“热带边缘海放射虫的沉积分布规律及典型生态特征”(编号 40476024); 中国科学院知识创新工程项目“晚第四纪中国海洋与陆地相互作用中的海洋古环境特征研究”(编号 KZCX3-SW-220); 科技部社会公益研究专项“南沙群岛及其邻近海区综合调查研究”(编号 2001DIA50041); 国家重点基础研究发展计划项目“地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录研究”(编号 2000078500); 科技基础性工作和社会公益研究专项“中国综合大洋钻探计划预研究”(编号 2003DB3J114) 资助。

作者简介 张兰兰(1978-), 女, 山东青州人, 硕士研究生, 主要从事海洋微体古生物现代生态与古生态研究。
E-mail: zhang_lanlan@eyou.com

环与大洋食物链之间的一个重要环节,是大洋生态系统的一个重要组成部分^[1]。放射虫在海水中的生活寿命一般为半个月到一个月,生命长短受各种环境因素(温度、盐度、营养盐和水团运动等)影响,其生活耐力又因不同种类而异^[2]。

放射虫死亡后,细胞质体分解,所遗下的骨骼壳即开始沉降,能沉积于海底,成为沉积物或化石保存下来的只有壳体为硅质的泡沫虫目(*Spumellaria*)和罩笼虫目(*Nassellaria*),两者又合称为多孔放射虫(*Polycystine Radiolaria*)。放射虫在分类问题上一直存在很多争议,目前比较公认的是依据放射虫骨骼的形态特征进行分类。放射虫(*Radiolaria*)在生物分类中属于原生动物门(*Protozoa*)肉足虫纲(*Sarcodina*)放射虫亚纲,共分4个目:泡沫虫目(*Spumellaria*)、罩笼虫目(*Nassellaria*)、等辐骨虫目(*Acantharia*)和稀孔虫目(*Phaeodaria*)。其中,泡沫虫目(*Spumellaria*)和罩笼虫目(*Nassellaria*)的骨骼由纯的二氧化硅(SiO_2)组成,稀孔虫目(*Phaeodaria*)为有机与 SiO_2 的混合物或碳酸盐,等辐骨虫目(*Acantharia*)是以一种与几丁质有关的特殊有机质(硫酸锶)为组分^[3]。今天,尤其在古海洋学研究中,通常所说的放射虫(*Radiolarians / Radiolaria*)指的就是 *Polycystine Radiolaria*,壳体由生物硅组成,不含有机成分。

2 放射虫的现代生态分布

作为海洋生物沉积的主要类群之一及其具有的硅质壳体属性,沉积物中的放射虫被广泛的应用于古海洋、古气候和古生态研究中。然而,要想更好的揭示过去就必须首先深入的了解现在。近年来,随着放射虫生态学研究的深入开展,人们从中获取了许多新的放射虫蕴含环境信息的指标,这些新信息或新指标的提取与应用,将对揭示古环境变化具有重要意义,也为发展和深化放射虫学科展示了良好前景,体现了放射虫研究在当前国际前沿课题中的作用越来越明显。

2.1 放射虫现代生态分布与海洋环境的关系

自从1834年Meyen^[4]描述第一个活体放射虫后,前人克服活体放射虫个体比较小(一般50~300 μm)、细胞有机体复杂和实验室内难以培养等困难,对放射虫的现代生态分布特点做了大量的研究工作。结果表明,放射虫地理分布十分广泛,从寒武纪出现至今,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

格局和群落结构受海洋物理性质(温度、盐度、深度、营养盐含量等)和水文性质(上升流、洋流、水团性质与结构等)等因素影响控制,甚至表现出非常密切的关系^[5]。

不同的放射虫种类对海洋中的温度和盐度等物理、化学条件具有不同的适应性,因而产生一些放射虫种类分布的特定区域,如Casey^[6]归纳并区别了太平洋表层水中的7个放射虫群:亚极区—过渡区的类群、过渡区类群、亚极区—中间型的类群、过渡区—中央区的类群、中央浅水区的类群、赤道区的类群和浅水赤道区—中央区的类群,并将它们与不同区域的水团分布对应。然而,上述各类群的多数种类均出现于南海中、北部的表层沉积物中^[2],说明这种生物地理划分的概念有待进一步理解与认识。Casey^[7]还曾总结指出热带大洋及环南极大洋区分布着各自相似的放射虫类群,北极大洋区具有其特有的种群,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。之后的调查研究也大多证实了这一结论^[8-10]。

放射虫的生态分布与水深有关,而沉积物中放射虫遗壳的分布规律、保存状况、含量富集的程度等也受到水深的影响和控制。因此,水深既是生态分布的环境因素,也是沉积分布的环境条件。Haeckel^[11]利用Challenger调查船采集到全世界各海区的大量浮游拖网和海底沉积物样品,探讨了放射虫的水深分布特征,划分了5个深度带,并指出在表层水生活的种类不会分布到深层。Reshetnyak^[12]对千岛—勘察加海域放射虫的深度分布做了详细的调查,结果表明,从表层到深度8 km的深层水中生活着特征不同的类群,她按分布的深度范围分为广深型和狭深型两大类。Kling^[13]划出中、北太平洋区硅质放射虫垂直分布的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,而且各个带中的种类分别可与Casey^[6]的上述各个不同地理类群的种类对比,说明由于太平洋低纬度区的深部水团与高纬度区的表层水团的交换作用,使高纬度的表层水放射虫类群在低纬度的深层水中出现。上述工作仅是涉及放射虫大的类群分析和生态深度分布问题,而未对具体种类的详细深度分布特征进行讨论。Renz^[13]研究了太平洋中部一条剖面上的浮游拖网中放射虫群落的组成特征,发现一些放射虫的种类存在一定的水深分布范围,如 *Saturnalis circularis*, *Bathropyramis* sp. 和 *Calocyclus monu-*

mentum 等仅分布于 200 m 以深的水层中。陈木宏等^[1]在定量统计南海中、北部海底表层沉积物中放射虫的分异度和丰度基础上对 97 个放射虫种类的深度分布作了分析归纳,总结各个种的深度分布特征提出 7 条特征界线。不久又将其中的 5 条较显著界线作特征说明^[14]。Abelmann 等^[15]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、温跃层以上,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。

Abelmann 等^[15]还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。在加利福尼亚湾^[16]、秘鲁 Connection 上升流区^[17]等的研究显示这些区域放射虫的分布和组合特征深受海洋水体交换和上升流活动的影响。

现代生态调查显示,火山活动和厄尔尼诺等突发事件能导致海洋环流和物理、化学性质的巨大改变,从而影响水体中放射虫的群落结构和分布特征。Iyer 等^[18,19]研究表明现代放射虫与火山物质的分布有很好的相关性。在赤道太平洋,专门调查航次资料记录表明 1992 年 El Niño 发生时东太平洋表层水体和沉积物中的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,同时受到源自西太平洋表层水的影响增强的影响,El Niño 之后变冷期的放射虫组合特征则表现为受其它两个亚热带和赤道水团相互作用的影响^[20,21]。Casey 等^[22]还研究了加利福尼亚湾区域 El Niño 发生时放射虫的特征变化,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映。

此外,放射虫冷水种和暖水种的指示作用在古海洋环境研究中受到特别关注。冷水种是指出现于寒冷水域的种类,而暖水种则是一些主要分布在热带表层水的种类。目前放射虫冷、暖水种在不同海区的指示作用还不确切,参考依据主要来源于 Abelmann^[15]、Petrushevskaya^[23]、Cleveland^[24,25] 等在世界大洋范围内确定的温度指示种。

现代生态学的另一明显进展是揭示了一些放射虫分布的季节性与年际间的变化特征,主要反映了表层水的生产力及其相关参数的变化。在不同季节里,放射虫通量表现了较大的变化,尤其一些种类的

含量变化与季节相对应,如 *Lithomelissa setosa* 在太平洋亚极区东部明显属春季类型并可作为一个春季指示者和强生产力信号^[26]。在白令海 3 200 m 深的沉积捕获器中所记录的结果表明, *Cycladophora davisian* 在秋季含量增加,而 *Stylochlamydidium venustum* 在该海区虽属优势种之一,但最高含量是出现于春季。在该区的柱状样中,这两个种类的百分比含量呈现相反的变化趋势^[27]。然而,能够对环境变化有敏感反映的种类仅属少数,它们可被作为代表环境变化的指示者。

可见,放射虫的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,但这主要是对放射虫组合大类群在世界大洋的分布趋势的总认识,而对绝大多数种的温度、盐度适应范围和垂直分布特征还缺乏详细的了解,冷、暖水种在不同海区的指示意义还不够确切,对控制放射虫生态分布的环境主导因子的认识还相对较肤浅,尤其是在一些区域性海区。

2.2 研究方法及最新进展

近年来,放射虫现代生态的研究随着水样取样技术的改进而不断深入与细化。最初,用水瓶取样^[28]缺点是:研究的海水量比较少,取样深度难以加大,含有过多的幼体及杂质,不利于样品的处理与分析。后来改用浮游拖网,有 2 种:开放式的^[29],不利于分析探讨放射虫丰度与种群的深度生态分布;封闭式的,可以进行浮游分层式拖网取样,对放射虫种群从海洋最表层到上千米深的生态深度分布进行详尽的研究^[12,30-32]。最近则开始利用时间系列沉积物捕获器来进行放射虫通量及其种群组成在不同年代不同季节变化的研究^[33]。在我国利用时间系列沉积物捕获器主要是进行沉降颗粒物^[34]、有孔虫通量^[35]以及硅质生物通量^[36]等的研究,还未见有专门进行有关放射虫的研究报道。

进入 21 世纪以来,取样技术的改进使得放射虫现代生态学的研究获得了许多新的成果,主要集中在种群组合的深度分布和年季变化及其与海洋环境的关系。Nimmergut 等^[30]研究了放射虫一些特征种在 0 ~1 000 m 的生活深度,并发现一些种类组合与水团性质、结构有着极好的对应关系,可以作为重建过去水团分布和结构的一个指标。Okazaki^[32]发现表层(0 ~100 m)放射虫的种类组成能较好的反映表层水温度异常(SSTA)变化,从而可以用于重建过去的 SSTA 变化,反映过去的 El Niño 和 La Niña 事件的变化。Okazaki^[32]得出放射虫生产力不仅与表

层水浮游植物生产力有关,还与中层水微生物生产力有关。加大放射虫生活深度及其与环境关系的研究,尤其是种水平上的,不仅可以更好地理解放射虫的现代生态分布特征,而且还能探寻更多的环境替代性指标,提高放射虫在古海洋学研究中应用的价值。然而,放射虫的研究成果的应用有一定的区域性限制,为解决这个问题,今后应加大一些典型性区域性海区的研究力度,并对不同大洋和海区进行放射虫种类的现代生态分布作横向和纵向的比较。

3 放射虫在古海洋学研究中的应用

放射虫作为微体古生物中多样性最好、个体发育最丰富的一个类群,以其不易溶解的硅质壳体在碳酸盐补偿深度(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。沉积物中放射虫的分布特征是由海洋中生态环境和沉积条件综合作用所决定的,反映了各种有关因素的制约和代表一定的环境特征。

近年来,随着深海钻探(DSDP)和大洋钻探(ODP、IODP)计划的相继开展以及研究手段的改进,放射虫在古海洋学和古气候方面的研究得到很大的促进。放射虫化石被广泛用于海表温度(SST)变化^[37]、海洋环流^[38]、古生产力和上升流事件^[17, 39]等重建的指标。

其中,在利用微体古生物定量研究古海洋温度中,目前国际上普遍使用的有效方法是 Imbrie等^[40]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。我国学者近些年来在研究南海等海域的古温度时所普遍应用的就是 Thompson^[41]在西北太平洋建立的有孔虫转换函数公式。放射虫的转换函数研究也早已开展,主要研究区域在太平洋^[42]、南大西洋与南印度洋^[43, 44]和南海^[45],不同海区的古温度—放射虫转换函数已被陆续建立,并逐渐应用到古环境分析中,获得一些重要结论,如第四纪的印度洋暖池古海表温度随轨道偏心率的频率而浮动,从而缓解了温室效应的影响等^[46]。古温度转换函数方法也正在被逐渐推广到其他古海洋学方面的研究中,如尝试建立放射虫与古初级生产力的转换函数,其研究成果为探索过去环境变化提供了新指标、新方法和新思路^[47]。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。

沉积物中放射虫壳体的分布能很好的反映上升流活动区的海洋学状况, Molina-Cruz^[17]研究发现一些在上升流发育海区占优势的种和稳定的组合虽然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,已建立了一些反映上升流发育和变化的放射虫指标^[48]。根据放射虫及其组合对上升流的指示作用,近年来人们成功地研究了不同海区的古上升流发育状况,如 Haslett等^[49]研究了上新世—更新世东赤道太平洋上升流的发育状况。在一些上升流的发育受季风驱动的特殊区域,利用其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等^[46, 50, 51]研究了东北赤道太平洋晚中新世以来与古季风活动相关的水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以作为古季风的指标,在0.2~1.4 MaBP年间季风摆动具有明显的12万年旋回,这与地球轨道偏心率的变化周期10万年相一致。在古气候特别是古季风研究中,化石放射虫的上升流指标也很好的揭示了西北太平洋岩芯中记录的350 ka BP以来东亚古季风发育特征与演变历史^[52]。此外, Sabin^[53]和 Matul^[54]依据放射虫化石记录,研究了15~13 ka BP期间北太平洋环流的纬度变化。Howe^[55]和 Pudsey^[56]恢复了南极环流的演变历史。

突发性海洋—气候事件如火山活动和厄尔尼诺等,对放射虫的群落结构和分布特征有显著的影响。邱传珠^[57]发现火山玻璃的富集区与放射虫软泥的分布区一致^[1]。印度洋沉积物中记录了1万年前火山热液事件活动的放射虫组合变化。在 Santa Barbara 海盆的全新世沉积物中, Weinheimer^[58]发现了放射虫记录的古厄尔尼诺和反厄尔尼诺事件。

总之,沉积物中的放射虫壳体蕴含着丰富的古生态、古海洋环境等地质历史信息,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。目前,放射虫作为单一指标,在古海洋研究中的解释力度还显得比较单薄,须结合氧、碳同位素等地球化学以及其他微体古生物等信息资料,才能促使古环境的解释范围和时间跨度的研究领域的发展壮大。

4 放射虫现代生态学的发展前景

随着放射虫化石在古海洋研究中的应用的加强和

推广 放射虫现代生态学研究的重要性日渐突出。以往放射虫的生态学知识主要是通过研究表层沉积物中放射虫组合与海洋水体环境参数相比较获得的(假设两者有着直接的联系)^[14, 59, 60]。然而,表层沉积物是成百上千年、由海表至海底沉积的产物,是一种时间和空间上积累的概念。放射虫活体群落特征如通量、季节性变化和深度分布等方面的信息了解的并不多。

因此,近年来放射虫生物学家们利用取样瓶、浮游拖网甚至时间系列捕获器,在世界各大洋广泛展开放射虫的现代生态学研究,例如在赤道太平洋^[13, 20, 28, 61]、墨西哥湾和加勒比海^[62]、南大洋^[63]、加利福尼亚洋流区域^[64]、赤道大西洋东部^[65]、格陵兰海^[66]、挪威海^[67]、日本海^[31]、北太平洋西北部^[32, 33]、北太平洋中部^[12]、鄂霍次克海与北太平洋西北部^[32]和鄂霍次克海^[30, 68]。这些研究主要集中于放射虫丰度和特征种的深度分布及其年、季性变化,一些种类分布与表层水温及水团的密切关系。

为了更好的开展对地层中保存良好的放射虫资料进行研究,并进一步增加其可信度,还加强了对沉积物 and 对应水体中放射虫的比较研究。Molina-Cruz 等^[69]在加利福尼亚洋流区和 Takuya Itaki^[31]在日本海分别作了这种比较性研究,结果表明,在加利福尼亚洋流区沉积物中的放射虫组合主要由上覆水体中混合层的放射虫组合组成,但也有少数站位例外,在日本海,沉积物中放射虫组合的深度分布与水体中的主要种类深度分布具有很好的相关性。这说明在这些区域性海区放射虫沉积分布类型与特征可较大程度代表生态分布类型与特征,从而在一定程度上证实了利用这些区域沉积物中的放射虫组合进行古海洋、古环境重建的可靠性。

然而,不同的海域因其所处的地理位置不同而各具有独特的海洋环境与环流,这种海洋环境特色必将在对环境变化反映比较敏感的放射虫组成与生态分布上有所体现,并且放射虫化石在古海洋研究中的应用均需要结合地球化学资料或其他微体古生物资料来进行古环境、古生态解释。因此,这种表层沉积物与其上覆水体中放射虫的比较研究具有非常大的价值与意义,它不仅确定放射虫作为单一指标反映古环境的程度,还有利于加深对放射虫本身生态与沉积分布,以及沉降过程和地层保存情况的理解。

目前,放射虫现代生态学方面的研究在一些典型区域性海区相对于开放性大洋还是比较薄弱,但

这些区域性海区因其独特的海洋环境条件往往会具有特有的放射虫群落组合。例如,属热带—亚热带气候的南海中北部表层沉积物中出现了极区或亚极区的放射虫组合^[1],南海南部上层水体中出现了被定为极区冷水种的种类^[29]。相信随着区域性海区各项研究工作的深入开展,无论是对增添放射虫的区域生态学、沉积学和生物地理知识,还是对进一步的古海洋环境、甚至古气候变化应用研究均具有重要的科学意义。

我国放射虫现代生态学方面的研究相对比较缺乏,以往的放射虫研究主要集中在放射虫的分类^[1, 70, 71]、沉积物中放射虫的组合分布^[1, 5, 14]、计算古温度^[45]与初级生产力的转换函数^[47]和晚更新世生物地层学^[72]等方面,最近大洋钻探计划在南海取样提供了高质量长时间序列的地层样品,从而开始了有关长时间序列放射虫动物群演化特征^[73]及其所反映的古生态环境事件^[74]、季风活动^[75]和古海洋事件^[76]的研究。近年来,随着取样技术条件的改善,开始对有着独特地理位置和独特环流的南海南部开始有关放射虫现代生态学的研究^[29]。南海南部不仅是典型的热带边缘海区,与西太暖池密切相关,对东亚季风气候变化有着举足轻重的作用,也是研究全球变化的重要区域。沉积物中保存的放射虫可能蕴含了与东亚季风演化的丰富信息,进一步开展该海区放射虫的环境信息与指标等基础性研究,无疑将对包括 IODP 等重大研究计划在南海的实施发挥重要作用。

总体来说,目前放射虫现代生态学的研究领域还不够广泛,有关放射虫现代生态的研究成果具有一定的区域限制,以至于种水平的生态分布及其对环境的指示作用还不是很明确。因此,有必要继续增强对放射虫生态学上尤其是区域性空间分布上的研究,不仅要加强其地理分布和生物区系研究、群落结构和种水平的生态特征的调查研究,还要关注冷水种和暖水种在不同海区的指示意义以及加强对控制放射虫生态分布的环境主导因子的认识,从而便于更准确的利用沉积物中的放射虫组合来解释不同海区古海洋环境的变化。同时,还要加强沉积物中放射虫遗壳与其上覆水体中现代放射虫组合的相关分析,以便获取更多的有关放射虫现代生态与古生态的信息,并进一步确定利用沉积放射虫组合进行古海洋、古气候和古环境重建的可信度,加强放射虫在古海洋研究应用中的广度和深度。

参考文献(References):

- [1] Chen Muhong, Tan Zhiyuan. Radiolaria from Surface Sediments of the Central and Northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1996: 1-271. [陈木宏, 谭智源. 南海中、北部沉积物中的放射虫[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-271.]
- [2] Anderson O R. Radiolaria[M]. Springer-Verlag New York Inc, 1983: 1-355.
- [3] Haeckel E. Report on the Radiolaria collected by H. M. S. Challenger during the years 1873-1876, "Chall"[R]. Rept, Zoology, 18: i-cxxxviii, 1887: 1-1803. pls. 1-140.
- [4] Meyer F. Beitr ge zur Zoologie. Gesammelt auf einer Reise um die Erde[J]. Nov Act. Acad. Leop-Carol. 1834, 16: 125-218, Taf. 27-36.
- [5] Tan Zhiyuan, Chen Muhong. Radiolaria from the China Offing Sea[M]. Beijing: Science Press, 1999: 1-404. [谭智源, 陈木宏. 中国近海的放射虫[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-404.]
- [6] Casey R E. Radiolaria as indicators of past and present water masses[C]. Funnel B M, Riedel W R, eds. The Micropaleontology of Oceans. Cambridge: Cambridge University Press, 1971: 331-337.
- [7] Casey R E. The Ecology and Distribution of recent Radiolarian [C]. Ramsay A T S. Oceanic Micropaleontology Vol. 2. London: Academic Press, 1977: 809-846.
- [8] Boltovskoy D. Sedimentary record of radiolarian biogeography in the equatorial to Antarctic western Pacific Ocean[J]. Micropaleontology 1987, 33(3): 267-281.
- [9] Renate E R, Peter R B, Takahashi K. Radiolarians from the North Pacific ocean: A latitudinal study of their distributions and fluxes [J]. Deep-sea Research 1990, 37(11): 677-696.
- [10] Boltovskoy D. Current and productivity patterns in the Equatorial Pacific across the last Glacial Maximum based on radiolarian east-west and downcore faunal gradients [J]. Micropaleontology, 1992, 38(4): 397-413.
- [11] Reshetnyak V V. Vertikalnoe raspredelenie radiolaryi Kurilokamchatskoi vpadiny [J]. Trudy Zoologicheskii Instituta Akademii Nauk S. S. R 1955, 21: 94-101.
- [12] King S A. Vertical distribution of polycystine radiolarians in the central North Pacific [J]. Marine Micropaleontology, 1979, 4: 295-318.
- [13] Renz G W. The distribution and ecology of radiolaria in the central Pacific: Plankton and surface sediments [J]. Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography 1976, 22: 267.
- [14] Chen M, Tan Z. Radiolarian distribution in surface sediments of the northern and central South China Sea [J]. Marine Micropaleontology 1997, 32: 173-194.
- [15] Abelmann A, Gowing M M. Spatial distribution pattern of living polycystine radiolarian taxa-baseline study for paleoenvironmental reconstructions in the southern ocean (Atlantic sector) [J]. Marine Micropaleontology 1997, 30: 3-28.
- [16] Pias N G, Murray D W, Roelofs A K. Radiolarian and silicoflagellate response to oceanographic changes associated with the 1983 El Niño [J]. Nature 1986, 320: 259-262.
- [17] Molina-Cruz A. Radiolarian as indicator of upwelling processes: The Peruvian Connection [J]. Marine Micropaleontology 1984, 9: 53-75.
- [18] Iyer S D, Prasad M S, Gupta S M, et al. Evidence for recent hydrothermal activity in the central Indian basin [J]. Deep-Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers, 1997, 44(7): 1167-1184.
- [19] Iyer S D, Prasad M S, Gupta S M, et al. Hydrothermal activity in the laboratory experiments [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research 1997, 78(3-4): 209-220.
- [20] Welling L A, Pias N G, Johnson E S, et al. Distribution of polycystine radiolarian and their relation to the physical environment during the 1992 El Niño and following cold event [J]. Deep Sea Research 1996, 43(4-6): 413-434.
- [21] Welling L A, Pias N G. Radiolarian fluxes, stocks and population residence times in surface waters of the central Pacific [J]. Deep Sea Research 1998, 45(4-5): 639-671.
- [22] Casey R E, Cason T L, Weinheimer A L. The modern California current system and radiolarian responses to "normal" (anti-El Niño) conditions [J]. Field Trip Guidebook-Pacific Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists 1986, 45: 1-7.
- [23] Petrushevskaya M G. Radiolaria in the plankton and recent sediments from the Indian Ocean and Antarctica [C]. Funnel B M, Riedel W R, eds. The Micropaleontology of Oceans. Cambridge: Cambridge University Press, 1971: 319-329.
- [24] Cleve P T. Notes on some Atlantic planktonic organisms [J]. Kgl. Svenska Vetensk-Akad, Handl 1900, 34(1): 1-22.
- [25] Cleve P T. Plankton from the Indian Ocean and the Malay Archipelago [J]. Kgl. Svenska Vetensk-Akad, Handl 1901, 35(5): 1-8, 8 pls.
- [26] Takahashi K. Time-series fluxes of Radiolaria in the eastern subarctic Pacific Ocean [C]. Yao A, ed. Proceedings of the Fifth Radiolarian Symposium - News of Osaka micropaleontologists, special Volume 1997, 10: 299-309.
- [27] Itaki T, Kozo T, Maita Y. Seasonal change of Cycladophora davisiana (Radiolaria) in the Bering Sea: its significance for paleoceanography [C]. Yao A, ed. Proceedings of the Fifth Radiolarian Symposium - News of Osaka micropaleontologists, special Volume 1997, 10: 293-298.
- [28] Petrushevskaya M G. Spumellarian and Nassellarian radiolaria in the plankton and bottom sediments of the central Pacific [C]. Funnel B M, Riedel W R, eds. The Micropaleontology of Oceans. Cambridge: Cambridge University Press, 1971: 309-317.
- [29] Zhang Lanlan, Chen Muhong, Lu Jun, et al. Living polycystine radiolarian fauna in upper water column of southern South China Sea and its distribution [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(3): 55-64. [张兰兰, 陈木宏, 陆钧, 等. 南海南部上层水体中多孔放射虫的组成与分布特征 [J]. 热带海洋学报, 2005, 24(3): 55-64.]
- [30] Nummargut A, Abelmann A. Spatial and seasonal changes of radiolarian standing stocks in the Sea of Okhotsk [J]. Deep-Sea Research I 2002, 49: 463-493.
- [31] Itaki T. Depth-related radiolarian assemblage in the water-column and surface sediments of the Japan Sea [J]. Marine Micropaleontology 2003, 47: 253-270.
- [32] Okazaki Y, Takahashi K, Itaki T, et al. Comparison of radiolarian vertical distributions in the Okhotsk Sea near the Kuril Islands and in the northwestern North Pacific off Hokkaido Island [J]. Marine Micropaleontology 2004, 51: 257-284.
- [33] Okazaki Y, Takahashi K, Onodera J, et al. Temporal and spatial flux changes of radiolarians in the northwestern Pacific Ocean during 1997-2000 [J]. Deep-Sea Research 2005, 52: 2240-2274.
- [34] Chen Jianfang, Zheng Lianfu, Chen Ronghua et al. Fluxes and constituents of Particulate matter in the South China Sea in com-

- parison with sediment accumulation rates [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 14-19. [陈建芳, 郑连福, 陈荣华, 等. 南海颗粒物质的通量、组成及其与沉积物积累率的关系初探 [J]. *沉积学报*, 1998, 16(3): 14-19.]
- [35] Chen Ronghua, Jian Zhimin, Zheng Yulong, et al. Seasonal variations of the planktonic foraminiferal flux in the central South China Sea [J]. *Journal of Tongji University*, 2000, 28(1): 73-77. [陈荣华, 翦知燕, 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.]
- [36] Wang Ruihan, Lin Jun, Zheng Lianfu, et al. Siliceous microplankton fluxes and seasonal variations in the central South China Sea during 1993-1995: Monsoon climate and El Niño responses [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(9): 974-978. [王汝建, 林隽, 郑连福, 等. 1993-1995 年南海中部的硅质生物通量及其季节性变化 季风气候和 El Niño 的响应 [J]. *科学通报*, 2000, 45(9): 974-978.]
- [37] Pisias N G, Roelofs A, Weber M. Radiolarian-based transfer functions for estimating mean surface ocean temperatures and seasonal range [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12: 365-379.
- [38] Ramine K. Late Quaternary history of atmospheric and oceanic circulation in the Eastern Equatorial Pacific [J]. *Marine Micropaleontology*, 1982, 7: 63-87.
- [39] Vane-Peyr M T, Caulet J P. Paleoproductivity changes in the upwelling system of Socotra (Somali Basin, NW Indian Ocean) during the last 72 000 years: Evidence from biological signatures [J]. *Mar. Micropaleontology*, 2000, 40: 321-344.
- [40] Imbrie J, Kipp N A. A new micropaleontological method for Quantitative Paleoclimatology: Application to a late Pleistocene Caribbean Core, in *The Late Cenozoic Glacial Ages*. Edited by Turekian, K K, Yale University Press, New Haven, CT, 1971: 71-181.
- [41] Thompson P. Plankton foraminifera in the western north Pacific during the Past 150 000 years: Comparison of modern and fossil assemblages [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1981, 35: 241-279.
- [42] Molina-Cruz A. Radiolarian assemblages and their relationship to the oceanography of the subtropical-southeastern Pacific [J]. *Marine Micropaleontology*, 1977, 2: 315-352.
- [43] Morley J J. A transfer function for estimating paleoceanographic conditions based on deep-sea surface sediment distribution of radiolarian assemblages in the South Atlantic [J]. *Quaternary Research*, 1979, 12: 381-395.
- [44] Morley J J. Radiolarian-based transfer functions for estimating paleoceanographic conditions in the South Indian Ocean [J]. *Marine Micropaleontology*, 1989, 13(4): 293-307.
- [45] Chen Muhong, Tu Xia, Cai Huimei, et al. Radiolarian transfer function for paleotemperature in the South China Sea [C]. Department of Geology, Peking University. *Collected Works of International Symposium on Geological Science Held at Peking University, Beijing, China*. Beijing: Seismological Press, 1988: 1 053-1 066. [陈木宏, 涂霞, 蔡慧梅, 等. 南海放射虫的古温度转换函数研究 [C]. 北京大学地质学系编, 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京: 地震出版社, 1988: 1 053-1 066.]
- [46] Gupta S M, Fernandes A A, Mohan R. Tropical sea surface temperature and the Earth's orbital eccentricity cycles [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(22): 3 159-3 162.
- [47] Chen Muhong, Huang Liangmin, Tu Xia, et al. Radiolarian transfer function for paleo-primary productivity in the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(3): 327-333. [陈木宏, 黄良民, 涂霞, 等. 南海放射虫与初级生产力的古海洋学转换关系 [J]. *科学通报*, 1999, 44(3): 327-333.]
- [48] Matul A G. On the radiolarian from the surface layer of the bottom sediments of the northern sector of upwelling [J]. *Oceanology*, 1998, 38(5): 687-692.
- [49] Haslett S K, Funnell B M. Sea-surface temperature variation and paleo-upwelling throughout the Mio-Pleistocene Olduvai subchron of the eastern Equatorial Pacific: An analysis of radiolarian data from ODP site 667, 847, 850 and 851 [C]. Mokuilevsky A, Whately R, eds. *Microfossils and Oceanic Environments*. University of Wales, Aberystwyth Press, 1996: 155-164.
- [50] Gupta S M. Quantitative radiolarian assemblages in surface sediments from the central Indian basin and their paleomonsoonal significance [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 1996, 47(3): 339-354.
- [51] Gupta S M, Fernandes A. Quaternary radiolarian faunal changes in the tropical Indian Ocean inferences to paleomonsoonal oscillation of 10 S hydrographic front [J]. *Current Science*, 1997, 72(12): 965-972.
- [52] Hauser L, Morley J. Monsoon fluctuations over the past 35 0 kyr-high-resolution evidence from northeast Asia of the northwest-Pacific climate proxies (marine pollen and radiolarians) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1997, 16(6): 565-581.
- [53] Sabin A L, Pisias N G. Sea surface temperature change in the northeastern Pacific Ocean during the past 20 000 years and their relationship to climate change in northwestern North America [J]. *Quaternary Research*, 1996, 46(1): 48-61.
- [54] Matul A G. On the relation of radiolarian distribution to the water mass participating in the formation of the North Atlantic deep water [J]. *Oceanology*, 1999, 39(1): 137-142.
- [55] Howe J A, Pudsey C J, Cunningham A P. Pliocene-Holocene contourite deposition under the Antarctic Circumpolar current, Western Falkland Trough, South Atlantic Ocean [J]. *Marine Geology*, 1997, 138(1-2): 27-50.
- [56] Pudsey C J, Howe J A. Quaternary history of Antarctic circumpolar current: Evidence from the Scotia Sea [J]. *Marine Geology*, 1998, 148(1-2): 83-112.
- [57] Qiu Chuanshu. A study of the characteristics and distribution of ferromanganese sediment and volcanic debris sediment in South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1983, 2(4): 269-277. [邱传珠. 南海铁锰沉积物和火山碎屑沉积物特征及其分布规律的研究 [J]. *热带海洋*, 1983, 2(4): 269-277.]
- [58] Weinheimer A L. Radiolarian indicators of El Niño and anti-El Niño events in Holocene sediments of Santa Barbara Basin [J]. *BAPG Bulletin*, 1986, 70(4): 482.
- [59] Molina-Cruz A, Martínez-López M. Oceanography of the Gulf of Tehuantepec, Mexico, indicated by Radiolaria remains [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 110: 179-195.
- [60] Abeinann A, Brathauer U, Gersonde R, et al. Radiolarian-based transfer function for the estimation of sea surface temperatures in the Southern Ocean (Atlantic sector) [J]. *Paleoceanography*, 1999, 14(3): 410-421.
- [61] Yamashita H, Takahashi K, Fujitani N. Zonal and vertical distribution of radiolarians in the western and central Equatorial Pacific in January 1999 [J]. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49: 2 823-2 862.
- [62] McMillen K J, Casey R E. Distribution of living polycystine radiolarians in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea, and comparison with the sedimentary record [J]. *Marine Micropaleontology*, 1978, 3: 121-145.

- [63] Abemmann A , Gowing M M . Horizontal and vertical distribution pattern of living radiolarians along a transect from the Southern Ocean to the South Atlantic subtropical region [J] . *Deep-Sea Research I* 1996 , 43 : 361-382 .
- [64] Kling S A , Bortovskoy D . Radiolarian vertical distribution patterns across the southern California Current [J] . *Deep-Sea Research I* 1995 , 42 : 191-231 .
- [65] Dworetzky B A , Moiney J J . Vertical distribution of Radiolaria in the eastern Equatorial Atlantic : analysis of a multiple series of closely-spaced plankton tows [J] . *Marine Micropaleontology* , 1987 , 12 : 1-19 .
- [66] Swanberg N R , Eide L K . The radiolarian fauna at the ice edge in the Greenland Sea during summer , 1988 [J] . *Journal of Marine Research* 1992 , 50 : 297-320 .
- [67] Swanberg N R , Bjorklund K R . The radiolarian fauna of western Norwegian fjords : a multivariate comparison of the sediment and plankton assemblages [J] . *Micropaleontology* 1992 , 38 : 57-74 .
- [68] Okazaki Y , Takahashi K , Yoshitani H , et al . Radiolarians under the seasonal sea-ice covered conditions in the Okhotsk Sea : flux and their implications for paleoceanography [J] . *Marine Micropaleontology* 2003 , 49 : 195-230 .
- [69] Molina-Cruz A , Welling L , Caudillo-Bohorquez A . Radiolarian distribution in the water column , southern Gulf of California , and its implication in the Cenozoic constitution [J] . *Marine Micropaleontology* 1999 , 37 : 149-171 .
- [70] Su Singhui . Description of 11 new species of radiolaria from Xisha Islands [J] . *Oceanology Limnology Sinica* , 1982 , 13 (3) : 275-284 . [宿慧慧 . 我国西沙群岛放射虫十一新种 [J] . 海洋与湖沼 , 1982 , 13 (3) : 275-284 .]
- [71] Chen Muhong , Tan Zhiyuan . Description of a new genus and 12 new species of radiolaria in sediments from the South China Sea [J] . *Tropical Oceanology* 1989 , 8 (1) : 1-9 . [陈木宏 , 谭智源 . 南海沉积物中放射虫 , 1 新属 12 新种 , 热带海洋 , 1989 , 8 (1) : 1-9 .]
- [72] Wang R , Abemmann A . Pleistocene radiolarian biostratigraphy in the South China Sea [J] . *Science in China (Series D)* , 1999 , 29 : 137-143 .
- [73] Yang Lihong , Chen Muhong , Wang Ruijian , et al . Radiolarian fauna characters in southern South China Sea since 1 Ma BP [J] . *Journal of Tropical Oceanography* 2003 , 22 (5) : 9-15 . [杨丽红 , 陈木宏 , 王汝建 , 等 . 南海南部 1 百万年以来的放射虫动物群特征 [J] . 热带海洋学报 , 2003 , 22 (5) : 9-15 .]
- [74] Yang Lihong , Chen Muhong , Wang Ruijian , et al . Radiolarian record to paleoecological environment change events over the past 1.2 Ma BP in the southern South China Sea [J] . *Chinese Science Bulletin* 2002 , 47 (17) : 1478-1483 . [杨丽红 , 陈木宏 , 王汝建 , 等 . 南海南部 1.2 Ma BP 以来古生态环境变化事件的放射虫记录 [J] . 科学通报 , 2002 , 47 (17) : 1478-1483 .]
- [75] Chen M , Wang R , Yang L , et al . Development of east Asian summer monsoon environments in the late Miocene : radiolarian evidence from Site 1143 of ODP Leg 184 [J] . *Marine Geology* , 2003 , 201 : 169-177 .
- [76] Wang R , Abemmann A . Radiolarian responses to paleoceanographic events of the southern South China Sea during the Pleistocene [J] . *Marine Micropaleontology* 2002 , 46 : 25-44 .

Progress and Prospect in Research on Living Radiolaria Ecology : A Basic Study of Paleoenvironmental and Paleoceanographic Reconstructions

ZHANG Lan-lan , CHEN Mu-hong , Xiang Rong , ZHANG Li-li
(Marginal Geology and Paleoenvironment Laboratory , South China Sea Institute
of Oceanology , Guangzhou 510301 , China)

Abstract : Polycystine radiolarians play an important role in the research of paleoceanography and paleoenvironment because of their indiscernible siliceous skeletons and the good corresponding relation between radiolarian assemblage and physical oceanography , hydrographical conditions . With widespread radiolarian application in paleoceanography reconstruction and the improvement of research measures , living radiolarians have been widely studied in the world . China has participated in such deep-sea research programs as IODP , which should accelerate the step of the study of paleoceanography . Radiolaria is an important fauna among the marine micropaleontology , whose ecology knowledge is the base of paleoceanographical and paleoenvironmental reconstruction . Therefore , it is very necessary to offer the latest achievement and progress trends in ecological studies on living radiolarians to research communities , with a view to making our research on radiolarian keep pace with the world and offering more proxies of paleoenvironment and paleoceanography .

Key words : Radiolaria ; Living ecology ; Paleoceanography ; IODP ; Plankton tow ; Time-series sediment trap .