

南海表层沉积物中放射虫的组合特征与海洋环境

陈木宏, 张兰兰, 张丽丽, 向荣, 陆钧

中国科学院边缘海地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广东广州 510301

摘要: 南海拥有较齐全的边缘海地理地貌与生态环境, 沉积物中保存的放射虫种类繁多, 个体丰富. 本文采用数理统计与聚类分析方法, 对表层沉积物中放射虫的组合特征进行了较为详细的定量分析, 以期获得可靠的放射虫组合与分布的特征. 聚类分析结果显示, 放射虫组合在南海表层沉积物中的分布大致可区分为 5 种类型: 陆架浅水区型、陆坡珊瑚礁区型、中央海盆区型、南部富营养区型和夏季上升流区型, 它们分别对应于特有的海洋环境, 并由含有某些优势种类的放射虫群落所组成. 进一步分析还表明, 南海的北部、中部和南部分别表现为 3 个不同生态环境的海区: 北部海区受陆源影响较为明显; 中部海区被中央水团、海底火山活动和夏季上升流活动所控制; 南部海区总体上属于典型的珊瑚礁海洋环境, 生态与沉积环境明显优越于北部海区. 南海表层沉积物中放射虫的组合分布特征较好地响应和反映了所在海区的生态环境与沉积条件, 是探讨古海洋环境的重要依据.

关键词: 放射虫; 组合特征; 海洋环境; 表层沉积物; 南海.

中图分类号: Q911.6

文章编号: 1000-2383(2008)06-0775-08

收稿日期: 2008-04-29

Radiolarian Assemblages in Surface Sediments of the South China Sea and Their Marine Environmental Correlations

CHEN Mu-hong, ZHANG Lan-lan, ZHANG Li-li, XIANG Rong, LU Jun

CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China

Abstract: The South China Sea (SCS) features relatively complete physiographical units and ecologic environments of marginal sea, where there are a lot of radiolarian species and specimens preserved in the sediments. Methods of quantitative statistics and clustering were used in this paper to analyze the radiolarian assemblages in surface sediments of the SCS so as to obtain their characteristics of compositions and distributions. Result of clustering analysis shows that the radiolarian assemblage in the surface sediments may be mainly divided into five groups, namely, assemblages of shallow shelf, coral slope, central basin, southern rich nutrition and summer upwelling, corresponding to different special marine environments respectively and consisting of certain radiolarian communities of dominant species. It is also indicated that the northern, central and southern SCS take on as three different ecologic costal areas respectively, such as the north affected mostly by terrigenous input, the central area controlled mainly by the central basin waters, submarine volcanic and summer upwelling activities, and the south generally belonging to a typical coral environment where there is a better ecologic and sedimental environment for radiolarian than in the northern SCS. The radiolarian assemblages and distributions in the SCS surface sediments are well responding to and reveal the marine ecologic conditions and sedimental environments, which may be important evidences for paleoceanographic exploration.

Key words: Radiolarian; assemblage character; marine environment; surface sediment; South China Sea.

基金项目: 国家自然科学基金课题 (Nos. 40476024, 40631007); 国家“973”项目课题 (No. 2007CB815905); 国家科技支撑计划课题 (No. 2006BAB19B03).

作者简介: 陈木宏 (1956—), 男, 研究员, 主要从事微体古生物与海洋沉积地质学研究. E-mail: mhchen@scsio.ac.cn

放射虫在海洋沉积物中的组合特征及其分布的区域特征反映了海区的生态环境和沉积条件,是地质记录中一个重要的综合性生态与沉积信息,它对利用保存在沉积物岩石或岩心中的微体古生物类群进行古海洋环境或岩相古地理分析具有科学的参考价值。

长期以来,人们对世界范围以及一些区域性的放射虫生态和沉积特征已做了一定程度的详细研究,积累了大量资料。早在 19 世纪人们已开始利用世界各海区的大量浮游拖网和海底沉积物样品,对放射虫的生态、沉积与地理分布作了大范围的初步调查(Haeckel, 1887),尤其是 20 世纪中期以来,针对不同大洋的各类放射虫专项调查与研究也逐渐展开,主要分析并区别了不同纬度带的太平洋表层水中 7 个放射虫生物地理区类群,并将它们与不同区域的水团分布对应(Casey, 1971),在北太平洋中部的研究发现该海区水体中存在着 4 个放射虫垂直分布带(Kling, 1979),它们与不同深度的水团相关,而且可与太平洋的不同地理类群(Casey, 1971)的种类对比,说明由于太平洋低纬区的深部水团与高纬度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。千岛—堪察加海域放射虫在水体中深度分布的详细调查认为,放射虫种类的水深分布可分为广深型和狭深型两大类群(Reshetnyak, 1955)。太平洋中部一条剖面上浮游拖网中的放射虫群落组合特征分析发现,一些放射虫的种类存在一定的水深分布范围(Renz, 1976)。利用南海中部和北部海底表层沉积物中放射虫种类的分析结果,已初步对 97 个放射虫种类的沉积深度分布作了分析归纳,并推测这些种类的沉积深度与生态深度密切相关(Chen and Tan, 1997),这一认识最近已在日本海得到部分种类的证实(Itaki, 2003)。通过对浮游拖网和沉积捕捉器等样品的研究,人们还了解到从南太平洋到南大西洋亚热带区域的活体放射虫水平与垂直分布模式,发现放射虫(硅质类与稀孔虫类)的丰度在贫营养盐的亚热带区较低,而在纳米比亚上升流区却明显增加(Abelmann and Gowing, 1996, 1997)。已有研究表明,放射虫的生态和沉积特征与水团的性质、迁移、交换和分布密切相关。因此,我们必须结合其纵、横两个分布方向的联系和对比去寻找真正的生态环境因素,才能发现和利用其生态与沉积分布的客观规律。然而,至今为止,国际上尚未对一个完整海区的

沉积放射虫做过定量的数理统计和组合分析。

国内外对放射虫在海洋表层沉积物的定量组合分析也很少,开展此项工作需要对一个海区的各种不同类型样品进行较为全面的种类鉴定以及对每一个种类的丰度作详细的统计,进而才能定量分析每个组合内部的相关性和不同组合之间的差异性。

以往南海表层沉积物中放射虫的组合分析范围仅局限于中部和北部,初步得出组合分布与相关区域水团的相互关联结果(Chen and Tan, 1997)。本文是在进行了整个南海沉积物中放射虫的种类多样性和个体丰度的详细分析(陈木宏等, 2008)基础上,对包括南海南部、中部和北部在内的完整海区作了较为系统的定量组合分析,以期通过各个组合的分布特征及其与现代海洋环境的对应关系,达到系统认识不同区域海洋环境特征在海底沉积物中的放射虫多参数记录。

1 材料与方法

本研究共选取了覆盖整个南海北部、中部和南部的近岸、陆架、陆坡以及中央深海盆区域的 103 个海底表层样品。表层取样的区域为 $108^{\circ}00'00'' \sim 119^{\circ}00'00''\text{E}$, $3^{\circ}30'00'' \sim 23^{\circ}00'00''\text{N}$, 包括 15 ~ 4 380 m 的水深范围(陈木宏等, 2008), 样品在南海具有很好的系统代表性。

各种不同类型沉积物样品的放射虫标本处理方法和鉴定统计方法见陈木宏等(2008)。

放射虫种类与丰度变量的样品站位组合分析采用 R 型因子计算。其原理是计算出每 2 个样品之间放射虫组合的相似性或相似程度,并进行所有样品的最优化排列组合,从而直接给出样品的聚类结果,即站位的最相似性组合,每一个组合具有相似的放射虫群特征。而各个组合中的优势种或代表种提取同样采用聚类分析方法,选取 34 个有代表性的优势种类作为分析对象,聚类过程是在计算各个样品中放射虫优势种含量的相似性基础上进行的,该组合结果实际上与样品组合的结果密切相关,两者分别得出两个不同方面的组合信息,但相互之间在样品分布和种类分布上是一致的。在本项实验中,我们还对种类组合同时进行 Q 型因子分析(限于本文内容及篇幅,不在文中叙述),验证了上述聚类分析的可靠性。所有计算分析和聚类过程均利用了数理统计软件(SPSS),并直接获得分析结果。

2 分析结果

根据南海沉积物中放射虫优势种和特征种在整个海区各站位样品中的相对含量统计结果建立数据库,首先利用数理统计软件(SPSS)进行放射虫组合的样品站位聚类分析(图 1),其结果是将相似或相近程度较大的不同站位样品划分为相同类群,并与其他类群存在明显的差异,各自代表一定环境条件下的产物。据此,我们将聚类分析的各站位归类结果标示在南海的站位图上,并进行区域上的鉴别与划分(图 2),从中了解放射虫组合在南海的区域性分布特征及其与各个代表性海洋环境之间的对应关系。

结果表明,南海沉积物中放射虫组合分布具有明显的典型区域代表性,共划分出 5 种类型的分布区,其中类型 II 还可进一步细分为 II-1 和 II-2,各自较好地代表了不同的海洋环境特征。

同时,还对各个站位中放射虫优势种之间的相关性进行分析,划分种类的组合类型(图 3)及其对应的分布区域,获得各个种类组合的较好对应性特征。

根据上述分析结果,南海表层沉积物中放射虫的组合分布特征大致可被归纳为以下 5 种类型,分别表现了生态和沉积环境与放射虫优势或特征种类组成的对应关系。

类型 I. 陆架浅水区,主要分布在南海北部的陆架—上陆坡区和南海南部的部分陆架区,明显的属于近岸浅水或受陆源影响的环境,显示南海北部的分布范围大于南部海区,两个海区存在很大的差异。在该分布区沉积物中的放射虫主要种类组合是 *Tetrapyle octacantha*、*Hexacantium senticetum*、*Hexalonche philosophica*、*Octopyle octospinosa*。

类型 II. 陆坡珊瑚礁区,基本覆盖整个南海的陆坡珊瑚礁及部分海盆区,属于水深较大的正常海洋环境,但南北之间以及部分区域表现出各自的特色,聚类分析的进一步细分大致可给出 2 个次级类型的结果:II-1 类出现在南海南部、中部和北部的除了特殊环境区域之外的广大海域,应代表着南海放射虫动物群的普遍分布特征;II-2 类虽在聚类分析中表现出与 II-1 类之间的相对紧密关系(图 1),但两者也呈现出一定的差异,II-2 类主要出现在东沙群岛以南和南沙海槽附近的 2 个局部区域(图 2),可能代表冬季上升流活动区或受西太平洋表层水影响,因 II-2 在东沙以南和南沙海槽两处附近分别有

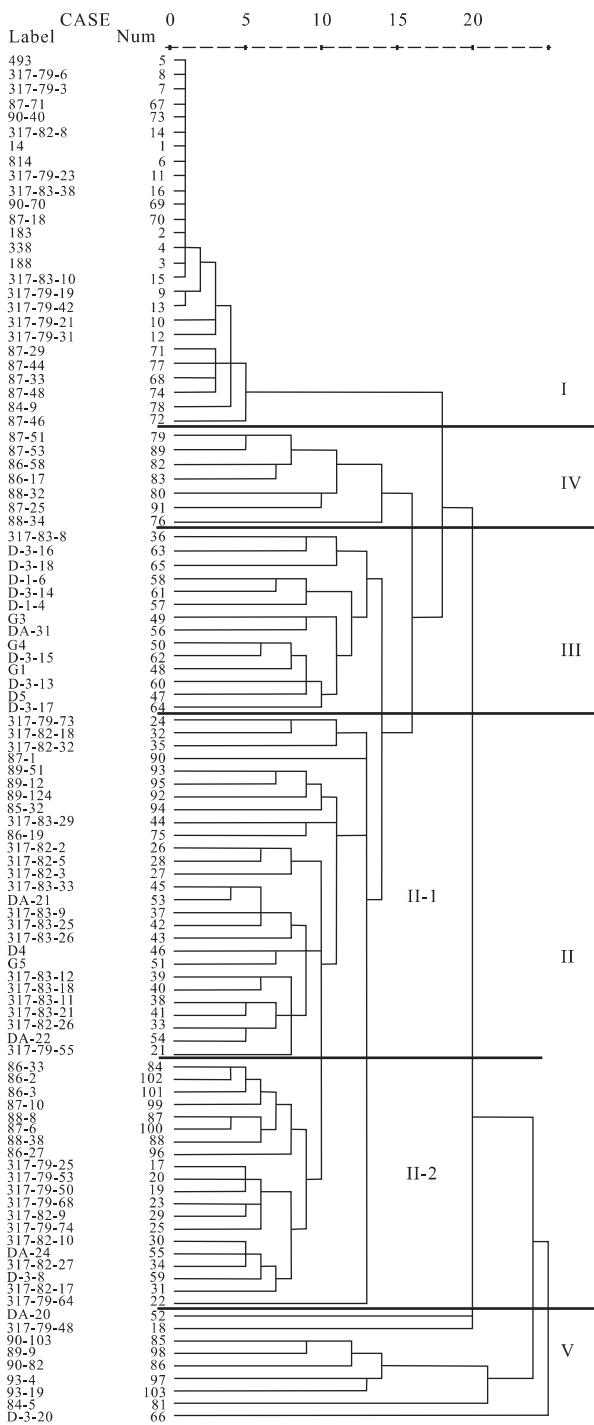


图 1 南海表层沉积物中放射虫组合的站位聚类树状图

Fig. 1 Hierarchical cluster diagram of sampling stations analyzed using radiolarian assemblage similarity in the South China Sea surface sediments

冬季上升流活动的文献记载(Liu *et al.*, 2004). 类型 II 沉积物中的放射虫主要种类组合分别是: *Ommatartus tetrathalamus* t.、*Euchitonina triangulum*、*Dictyocoryne profunda*、*Heliodiscus asteris-*

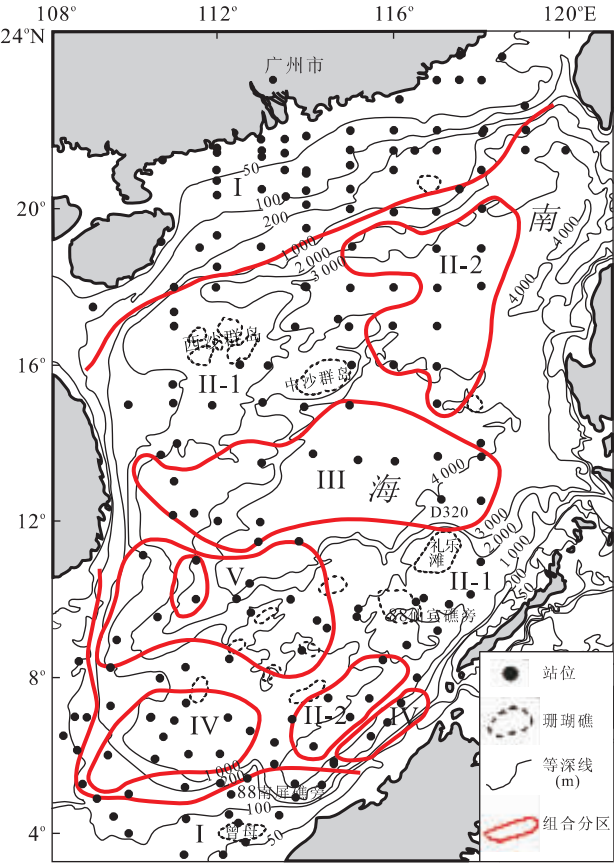


图 2 南海表层沉积物中放射虫组合的区域分布

Fig. 2 Sketch map showing regional distributions of radiolarian assemblages in the South China Sea surface sediments

I. 陆架浅水区; II-1. 陆坡珊瑚礁区; II-2. 冬季上升流区; III. 中央海盆区; IV. 南部富营养区; V. 夏季上升流区

cus. 此外,该组合也代表典型的热带海洋环境,其特征性种类还有:*Pterocanium trilobum*、*Lophospyris pentagona* p.、*Anthocytidium ophirense*、*Lophophaenoma witjazii*、*Pterocanium praetextum* p.、*Giraffospyris angulata*.

类型 III. 中央海盆区,明显地仅分布在南海中部的中央海盆区,不仅代表深水海盆环境,而且是北部与南部两个不同海洋生态环境区的中间过渡带. 该分布区受中央水团控制,受其他海流、水团或陆源物质等的影响较少,形成物理—化学—营养盐条件较为稳定的准远洋海洋生态环境. 在该分布区沉积物中的放射虫种类主要组合是:*Eucyrtidium hexagonatum*、*Lithostrobos seriatus*、*Larcopyle butschlii*、*Lithomelissa thoracites*、*Pterocorys campanula*、*Hexalonche octocolpa*.

类型 IV. 南部富营养区,是出现在南部热带海区

陆架—陆坡上的有限区域性产物,小范围的分布在南海的西南和东南两处,其所在区域地理位置的特殊性表明存在着不寻常的生态条件,如丰富的营养物质与温盐状况或受到正好位于该处的海底热流较高的影响(Shi *et al.*, 2003). 该类分布区沉积物中放射虫种类的主要组合特征是:*Spongaster tetras tetras*、*Lamprocyclas maritilis* m.、*Spongodiscus americanus*、*Druppattractus testudo*, 这些代表性种类虽然包括了泡沫虫目和罩笼虫目的两类不同生物结构类型,但它们的共同特征是个体及骨骼结构均明显地较为粗壮结实.

类型 V. 夏季上升流区,集中分布在南部海域的西北区,包括部分陆坡、西南海盆和珊瑚礁区,如此不同海底地貌或环境类型的生态环境相互紧密关联在一起,明显地是与越南岸外的夏季上升流活动及其演变分布区有关(Wyrki, 1961; Xie *et al.*, 2003),两者在区域上有很好的对应关系. 该分布区沉积物中放射虫种类的主要组合是:*Euchitonina furcata*、*Siphonosphaera polysiphonia*、*Artostrobium*

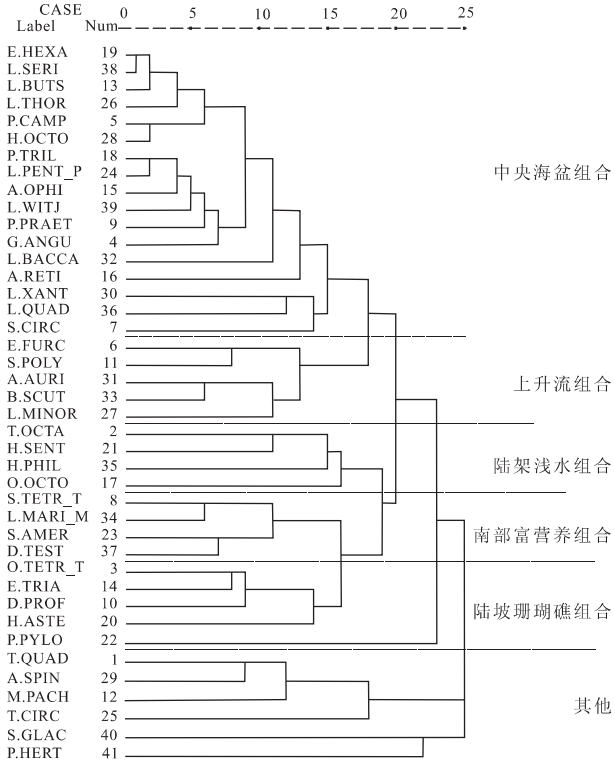


图 3 南海表层沉积物中放射虫优势种类的组合树状图

Fig. 3 Hierarchical cluster of radiolarian dominant species assemblages in the South China Sea surface sediments

auritum、*Botryocyrtis scutum*、*Lithelius minor*。此外,在该分布区中还包含有 2 个属于类型 II-2 的站位,表明小局部区域冬季上升流同时存在的可能性。

3 讨论

3.1 南海放射虫种类组合分布的热带—亚热带边缘海特征

南海属热带—亚热带气候,其西北侧紧靠东亚大陆,东南侧被吕宋岛和加里曼丹岛等岛链所包围,是西太平洋最大的边缘海。南海有多条通道与大洋及低纬海区相连,其中位于东北端的巴士海峡约 2 000 m 水深,南部的海峡水深均小于 100 或 50 m。作为具有一定地形地貌独立性特征的南海,生态环境自有其特殊的系统表现,尤其如放射虫这样一类完全生活于海洋的浮游性微体生物群,人们难以用一般的定性分析方法在特定海区区别出该类群生物壳体沉积分布的不同组合类型。前人研究曾认为虽然放射虫组成在南海不同区域内有一定的差异,但并不构成明显的组合分区(陈文斌,1987)。本文通过对每一个站位样品的种类多样性与丰度的定量统计分析,发现南海表层沉积物中的放射虫分布存在着上述 5 个主要组合特征,它们分别对应着一定区域环境,较充分地表现了西太平洋热带—亚热带边缘海所具有的各类典型环境特征产物。

珊瑚礁发育是南海的重要环境特征之一,分布范围较广,其生态环境影响和形成了南海放射虫组成的基本类型(图 2、图 3),放射虫组合类型 II 代表了这一特征环境的产物。

南海夏季上升流活动是东亚季风系统过程的一个特殊热带区域现象,已被许多研究工作所证实,其活动范围与我们划分的一个放射虫组合类型 V 的分布区域基本一致,表明该放射虫组合所代表的是夏季上升流发育的生态环境。

在西南部的巽它陆架—陆坡上,存在着另一个放射虫组合类型 IV,在该分布区域以往的浮游生物拖网研究已发现水体中的放射虫(张兰兰等,2005)、有孔虫(崔喜江等,2006)和硅藻(陆钧等,2006)的丰度均明显较高,海水中的营养盐(N, Si)也同时增加(林洪瑛和韩舞鹰,2001),表明南海表层沉积物中的放射虫组合类型 IV 与海水中的富营养盐特征密切相关。该组合分布区域的海底热流较高,在夏季也同样有上升流活动,多种环境因素之间的相互关系有待

于进一步的分析。

拥有 4 000 多米水深的宽阔中央海盆也是南海的重要组成部分和地形特色,该海域的水团性质与生态环境相对较为稳定,受陆地影响较少,放射虫组合类型 III 表现了独具的特征,沉积物中富集了生活于从表层水到深层水的各个不同深度水团的种类组合。在海盆区的东部,虽然存在着一个由海底火山活动引起的放射虫富集区(Chen and Tan, 1997; 陈木宏等,2008),但从放射虫种类的组合结果看并没有出现与火山活动相关的组合类型,表明在整个海盆区中放射虫动物群的组成结构基本稳定。

相比之下,在陆架区由于受陆源输入物的影响,海水盐度偏低,沉积速率偏高,水体较浅,沉积物中的放射虫组合类型 I 以生活于表层水的类型为主,而且多数为广盐性,种类偏少,丰度较低,这一组合特征在南海的南部和北部陆架均表现了较好的一致性(图 1—3)。

尽管南海表层沉积物中放射虫的各种组合类型表现了上述的典型边缘海中不同生态环境特征,但在总体上也呈现为热带—亚热带气候的放射虫组合特征。通过对整个海区的定量统计(陈木宏等,2008),南海表层沉积物中占优势的种类主要是 *Tetrapyle quadriloba*、*T. octacantha*、*Ommatartus tetrathalamus* t.、*Girafospyris angulata*、*Pterocorys campanula*、*Euchitonia triangulum*、*Euchitonia furcata*、*Streblacantha circumtexta*、*Spongaster tetras* t.、*Pterocanium praetextum* p.、*Dictyocoryne profunda*、*Siphonospaera polysiphonia*、*Monozonium pachystylum*、*Acrosphaera spinosa*、*Larcopyle butschlii*、*Anthocytidium ophiurense*、*Amphispyris reticulata*、*Octopyle octospinosa* 和 *Pterocanium trilobum* 等,这些种类都广泛分布在热带—亚热带的太平洋(Haeckel, 1887; Nigrini, 1968, 1971; Casey, 1971; Renz, 1976)、印度洋和大西洋(Haeckel, 1887; Nigrini, 1967; Petrushevskaya, 1971),反映了南海放射虫动物群整体构成的热带—亚热带属性,与开放大洋有一定的相似特征。

3.2 南海放射虫种类组合分布的自然地理纬度带特征

通过较系统的数理方法分析和生态沉积分布分析研究,还进一步表明:南海放射虫的沉积分布存在着明显的 3 大类区域特征,分别与南海南部、中部和

北部有着很好的对应关系,从微体浮游动物群落的组成特征观测,表现了南海海域内的自然地理环境划分特征(陈木宏等,1996;赵焕庭,1996)及其生态学响应。

聚类分析的放射虫组合分布结果将中部海区的中央海盆独立为一个特殊的生态环境,并明显地将南部海区与北部海区分隔;放射虫种类多样性分布也表现了南、北海区的差异,北部从陆架到陆坡的放射虫种类数量随水深增加较为缓慢,在 3 000 m 等深线以浅区域,放射虫种类数量基本保持在 120 种以内,种类数量等值线与海底等深线的走向较为一致;而在南海南部海区,浅水区的放射虫种类数量等值线虽然与海底等深线的走向很相似,但在深水区的 120 种等值线与 3 000 m 等深线却明显不如北部海区那样相吻合,表现为在 3 000 m 以浅的大片、下陆坡区放射虫种类数量已经超过 120 种(陈木宏等,2008),表明南部海区的种类多样性明显高于北部海区,属于更加典型的热带珊瑚礁海洋环境。

南海的北部、中部和南部分别呈现为 3 个不同生态环境的海区,各自影响了放射虫繁殖发育。北部海区可能受陆源影响较为明显,放射虫的丰度随离岸距离和水深而逐渐增加;中部海区受海底火山活动(丘传珠,1983)和水体上升流(Wyrki,1961; Xie *et al.*, 2003)影响,在相对应的区域形成显著的放射虫丰度高富集区(Broecker and Peng, 1982);南部海区总体上属于典型的珊瑚礁海洋环境,除了部分巽它陆架区域之外,放射虫的生长发育较为正常,在南部中央的沉积物中形成明显的富集区域,其含量高于北部海区中的类似水深区域,表明南海南部海区的放射虫生态与沉积环境明显优越于北部海区。在陆架与陆坡区,南部海底沉积物中放射虫的种类组合中 *Pterocanium trilobum*、*Lophospyris pentagona* p.、*Anthocytidium ophirensense*、*Lophophanoma witjazii*、*Pterocanium praetextum* p.、*Giraffospyris angulata* 等占一定的优势,该类群代表典型的热带海洋环境的种类组合特征。而在北部的陆架与陆坡区,放射虫的优势种类组合一般以 *Tetrapyle octacantha*、*Hexaconitium senticetum*、*Hexalonche philosophica*、*Octopyle octospinosa* 等为主,代表一种亚热带环境的边缘海放射虫群落主要构成。

综合上述,南海沉积物中的放射虫组合分布具有一定的形成规律性与区域特殊性,通过详细分析

和对比海底沉积物岩心剖面中放射虫生物的综合组成特征,不同历史时期的古环境面貌、古地理特征和古生态条件是可以得到反演与追踪的。

利用放射虫多指标进行各个站位的聚类分析,充分提取和综合了各种生物信息,是采用数学工具实施复杂计算的结果,尽量避免主观划分组合所造成的人为局限,具有相对的合理性和可靠性。因此,尽管获得了较为符合客观实际的结果,但同时也造成聚类分析结果的内部关键因素仍难以被揭示,各类型之间的相互关系与实质区别还无法完全被解释清楚。作为辅助方法,上述结果中我们还分析各站位间的种类组成的相关性,并对相关性较好的种类进行聚类组合,结果发现各个放射虫种类组合的优势含量分布同样具有一定的区域性特征,与原有的站位聚类结果较为吻合,因此找到了放射虫群在区域分布差异上的部分原因。然而,只有详细建立海洋中各个不同生态环境的系统生物学模型(包括非优势种或稀有种等信息),才能进一步寻找和解释海洋环境的生态因素和生物群落的结构关联。上述组合与分区的结果仅提供南海沉积物中放射虫分布响应南海海洋环境特征的一个主要面貌或轮廓。

4 结论

放射虫类群在南海表层沉积物中的保存状况明显具有 5 种不同类型的组合特征,它们的分布区域分别对应于陆架浅水区、南部富营养区、陆坡珊瑚礁区、中央海盆区和夏季上升流区。每一个组合分布区分别由较典型的代表性种类相关组成,这些特征种类的组合指示了相应的生态与沉积环境,结合种类多样性和丰度的统计结果,可综合性地作为古海洋环境分析的重要依据。

南海的北部、中部和南部有纬度差异,分别呈现为 3 个不同自然地理的生态环境:北部海区可能受陆源影响较为明显;中部海区受海底火山活动和水体上升流影响,在相对应的区域形成显著的放射虫丰度高富集区;南部海区总体上属于典型的珊瑚礁海洋环境,在中央形成明显的富集区域,含量明显高于北部海区,表明南部海区的生态与沉积环境总体上优越于北部海区。

南海沉积物中的放射虫种类多样、个体丰富,遍布于从陆架到深海盆的各个区域,由于所包含的信息量巨大而复杂,尤其是不同区域性之间的组合特

征往往是渐变而难以主观判断,因此采用适当的数理统计方法是必要和可行的。本项研究作了一些探索,并获得了较为客观的分析结果。

References

- Abelmann, A., Gowing, M. M., 1996. Horizontal and vertical distribution pattern of living radiolarians along a transect from the southern ocean to the South Atlantic subtropical region. *Deep-Sea Research I*, 43(3): 361—382.
- Abelmann, A., Gowing, M. M., 1997. Spatial distribution pattern of living polycystine radiolarian taxa—baseline study for paleoenvironmental reconstructions in the southern ocean (Atlantic sector). *Marine Micropaleontology*, 30(1—3): 3—28.
- Broecker, W. S., Peng, F. H., 1982. Tracers in the sea. El-digio Press, New York, 679.
- Casey, R. E., 1971. Radiolarian as indicators of past and present water-masses. In: Funnell, B., Riedel, W. R., eds., The micropalaeontology of oceans. Cambridge University Press, Cambridge, 331—337.
- Chen, M. H., Cai, H. M., Tu, X., et al., 1996. Late Quaternary microbios and environment of the Nansha Islands and adjacent sea. Ocean Press, Beijing, 1—210 (in Chinese).
- Chen, M. H., Tan, Z. Y., 1997. Radiolarian distribution in surface sediments of the northern and central South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 32(1—2): 173—194.
- Chen, M. H., Zhang, L. L., Zhang, L. L., et al., 2008. Distributions of radiolarian diversity and abundance in surface sediments of the South China Sea and its environmental implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(4): 431—442.
- Chen, W. B., 1987. Radiolaria in surface sediments of the South China Sea. *Donghai Marine Science*, 5(1—2): 60—76 (in Chinese with English abstract).
- Cui, X. J., Xiang, R., Zheng, F., et al., 2006. A preliminary study of living planktonic foraminifera distribution and its affecting factors in southern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 25(4): 25—30 (in Chinese with English abstract).
- Haeckel, E., 1887. Report on the Radiolaria collected by H. M. S. Challenger during the years 1873—1876. “Chall”. Rept., *Zoology*, 18: i—clxxxviii, 1—1803, pls. 1—140.
- Itaki, T., 2003. Depth-related radiolarian assemblage in the water-column and surface sediments of the Japan Sea. *Marine Micropaleontology*, 47(3—4): 253—270.
- Kling, S. A., 1979. Vertical distribution of polycystine radiolarians in the central North Pacific. *Marine Micropaleontology*, 4: 295—318.
- Lin, H. Y., Han, W. Y., 2001. Distribution of nutrients in the Nansha Islands waters. *Marine Science*, 25(10): 12—14 (in Chinese).
- Liu, Q., Jiang, X., Xie, S. P., et al., 2004. A gap in the Indo-Pacific warm pool over the South China Sea in boreal winter: Seasonal development and interannual variability. *Journal of Geophysical Research*, 109(C07012), doi:10.1029/2003JC002179, 1—10.
- Lu, J., Chen, M. H., Chen, Z., 2006. Distribution of diatoms in the water and surface sediments of southern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 51(Suppl. II): 60—70 (in Chinese).
- Nigrini, C. A., 1967. Radiolaria in pelagic sediments from the Indian and Atlantic oceans. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Tech. Ser.*, 11: 1—109, pls. 1—9.
- Nigrini, C. A., 1968. Radiolaria from eastern tropical Pacific sediments. *Micropaleontology*, 14(1): 51—63, pl. 1.
- Nigrini, C. A., 1971. Radiolarian zonation in the Quaternary of the equatorial Pacific Ocean. In: Funnell, B. M., Riedel, eds., The micropaleontology of oceans. Cambridge University Press, Cambridge, 443—461.
- Petrushevskaya, M. G., 1971. Radiolaria in the plankton and recent sediments from the Indian Ocean and Antarctic. In: Funnell, B. M., Riedel, W. R., eds., The micropaleontology of oceans. Cambridge University Press, Cambridge, 319—329.
- Qiu, C. Z., 1983. A study on the characteristics and distribution of ferromanganese sediment and volcanic debris sediment in South China Sea. *Tropic Oceanology*, 2(4): 269—277 (in Chinese with English abstract).
- Renz, G. W., 1976. The distribution and ecology of radiolaria in the central Pacific plankton and surface sediments. *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography, University of California*, (22): 1—267, pls. 1—8.
- Reshetnyak, V. V., 1955. Vertikalnoe raspredelenie radiolaryi Kurilo-Kamchatskoi vpadiny. *Trudy Zool. Inst. Akad. Nauk. U. S. S. R.*, 21: 94—101.
- Shi, X. B., Qiu, X. L., Xia, K. Y., et al., 2003. Characteristics of surface heat flow in the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(3): 265—277.
- Wyrki, K., 1961. Physical oceanography of the Southeast Asian waters: Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand. NAGA

- Rep. 1961, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, Calif. . 2: 1—195.
- Xie, S. P. , Xie, Q. , Wang, D. X. , et al. , 2003. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations. *Journal of Geophysical Research*, 108(C8), 3261, doi:10. 1029/2003JC001867, 1—13.
- Zhang, L. L. , Chen, M. H. , Lu, J. , et al. , 2005. Living polycystine radiolarian fauna in upper water column of southern South China Sea and its distribution. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(3): 55—64 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H. T. , 1996. Physical geography of Nansha Islands. Science Press, Beijing, 1—402 (in Chinese).
- 陈木宏, 蔡慧梅, 涂霞, 等, 1996. 南沙群岛及邻近海区晚第四纪的微体生物与环境. 北京: 海洋出版社, 1—210.
- 陈木宏, 张兰兰, 张丽丽, 等, 2008. 南海表层沉积物中放射虫多样性与丰度的分布与环境. 地球科学——中国地质大学学报, 33(4): 431—442.
- 陈文斌, 1987. 南海中部表层沉积物中的放射虫. 东海海洋, 5(1—2): 60—76.
- 崔喜江, 向荣, 郑范, 等, 2006. 南海南部活体浮游有孔虫分布特征及其影响因素初探. 热带海洋学报, 25(4): 25—30.
- 林洪瑛, 韩舞鹰, 2001. 南沙群岛海域营养盐分布的研究. 海洋科学, 25(10): 12—14.
- 陆钧, 陈木宏, 陈忠, 2006. 南海南部现代水体与表层沉积硅藻的分布特征. 科学通报, 51(增刊 II): 66—70.
- 丘传珠, 1983. 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. 热带海洋, 2(4): 269—277.
- 张兰兰, 陈木宏, 陆钧, 等, 2005. 南海南部上层水体中多孔放射虫的组成与分布特征. 热带海洋学报, 24(3): 55—64.
- 赵焕庭, 1996. 南沙群岛自然地理. 北京: 科学出版社, 1—402.

附中文参考文献