

南海表层沉积物中放射虫多样性与丰度的分布与环境

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: 采用定量分析方法,较系统地探讨了整个南海不同环境表层沉积物中放射虫的分布特征及其环境指示意义。结果显示:南海表层沉积物中放射虫的种类多样性和个体丰度随着水深而增加,表明南海较深水处的放射虫壳体溶解现象不明显;上升流活动和海底火山喷发有利于放射虫的大量繁殖,产生区域性的沉积富集;反之,较深水的陆坡区沉积物中出现放射虫种类与丰度异常减少,可能属浊流搬运再沉积的结果,物源来自陆架或上陆坡;种类组成以热带—亚热带特征为主,还包含了一定数量的冷水种或极区种,表明在特定海区的古环境分析中采用单一指标判断可能会造成误解。沉积物中放射虫的综合指标较好地反映了南海的生态与沉积环境特征。

关键词: 放射虫;沉积分布;表层沉积物;南海。

中图分类号: P736.21

文章编号: 1000-2383(2008)04-0431-12

收稿日期: 2007-10-29

Distributions of Radiolarian Diversity and Abundance in Surface Sediments of the South China Sea and Their Environmental Implications

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) has relatively complete physiographical units and ecologic environments, where there are a lot of preservative radiolarian species and specimens in the sediments. Methods of quantitative statistics and clustering were used to analyze the radiolarian assemblages in surface sediments of the SCS, to understand their compositions and distributions. Results of clustering analyses show that the radiolarian assemblages in the SCS surface sediments may mainly be grouped as five types, including assemblages of shallow shelf, coral slope, central basin, southern rich nutrition and summer upwelling, corresponding to different special marine environments with certain radiolarian communities of dominant species. It is also indicated that the north, central and south of the SCS present as three areas of different ecologic conditions, such as the northern sea area affected mostly by terrigenous input, central sea area controlled mainly by the central basin waters, submarine volcanic and summer upwelling activities and the southern sea area falls obviously into a typical coral environment, where there is a better ecologic and sedimental environment for radiolarian existing than that in the northern sea area. The radiolarian assemblages and distributions in the SCS surface sediments well reflect different marine ecologic conditions and sedimental environments, which may be used as reliable evidences for paleoceanographic explanation.

Key words: radiolaria; sedimentary distribution; surface sediment; South China Sea.

0 引言

放射虫是海洋浮游生物中重要的一类含硅质骨骼微体类群,其在水中的生态过程与在海底的保

存状况一定程度反映了海洋动力环境发展的结果,具有特殊的生态环境指示作用。利用沉积物中放射虫的保存特征反演海洋生态环境的历史,对海洋科学中认识生态群落演变特征和了解过去自然规律是

必不可少的研究手段。如在重大国际合作计划 ODP184 南海航次的钻探岩芯样品研究中由于缺乏南海上升流现代微体指标的对比依据,以及放射虫在深海沉积物中保存状况与古生态和沉积环境关系资料不足,使古环境解释中存在一些质疑,由于缺乏确切证据而影响探索自然规律的深入开展。

以往南海水体与表层沉积物中的放射虫研究区域主要在北部和中部海区,重点是报道种类组成与分类描述(谭智源和宿星慧,1981;宿星慧和谭智源,1985;陈木宏和谭智源,1989,1996)、分布特征与对应环境和水团的关系(陈文斌,1987;Chen and Tan,1999;王金宝等,2005;张兰兰等,2005)、以及季节性沉积通量与季风(王汝建等,2000c)等,还利用放射虫沉积分布特征与现代海洋表层水温和初级生产力关系探讨建立了古海洋学转换函数公式(陈木宏等,1998,1999)。而在南部海区的相关研究却显得较为粗略,总体上针对性不够,诸如放射虫对上升流及相关环境因素的生态与沉积特征等许多重要信息,尚未被详细分析与揭示。在南海放射虫生物地层学与古环境分析方面也已开展了大量的研究工作,揭示第四纪和晚中新世的化石带(王汝建和 Abelman,1999;陈木宏等,2002),探讨不同历史时期中古季风环境与古生态特征的变化事件(王汝建等,2000a,2000b;Wang and Abelman,2002;杨丽红等,2002,2003;Chen *et al.*, 2003;Wang *et al.*, 2003;张丽丽等,2007)。由于南海具有明显的区域性特征,古环境分析中的各种替代性指标需要通过进一步的现代过程考察结果做检验,因此,通过系统性的分析工作,总结归纳南海放射虫的整体分布特征,才能较为客观地从中发现典型区域的生态环境与沉积记录,提取用于追踪自然演变规律与历史过程的可靠古生态环境沉积学替代性指标。

本文通过分析取自整个南海区域海底表层沉积物中的放射虫样品,对南海南部、中部和北部的表层沉积资料进行对比与综合研究,探讨典型的热带西太平洋边缘海放射虫的现代沉积分布特征,重点讨论放射虫的种类组成、区域多样性和群落丰度分布及其与海洋环境的主要关系,揭示在特殊海区中放射虫沉积信息所指示的区域性海洋环境特征,并提供海洋地质学中可作为古环境讨论依据的放射虫分析参数和基础性资料。

1 材料与方法

研究材料主要由中科院南海所海洋地质研究室历年在南海调查区所采集,本项研究共选取 146 个海底表层样品。表层取样的区域为 $108^{\circ}00'00''\sim 119^{\circ}00'00''\text{E}$, $3^{\circ}30'00''\sim 23^{\circ}00'00''\text{N}$,覆盖了整个南海海区的北部、中部和南部的近岸、陆架、陆坡以及中央深海盆区域,包括 15~4 380 m 的水深范围(图 1)。

每个分析站位取 30 g 沉积物干样做定量处理。样品的分析处理是根据沉积物组份的不同,采用不同的方法,使各种沉积物类型中的放射虫标本得到较完整的富集和挑选,并能定量地统计分析。按样品所处的区域水深范围及沉积物组成特征大致可分为 3 种类型:(1)陆架型:沉积物中石英、长石等陆源碎屑及各种钙质生物壳体较多。样品用水和适量 H_2O_2 和焦磷酸钠浸泡,加热使沉积物充分松散,并加入适量盐酸,待反应至钙质生物壳完全溶解为止,然后用 0.063 mm 网筛冲洗,水洗干净并烘干后,用四氯化碳进行浮选,浮选时需充分搅拌使标本悬浮起来并尽快倒入 0.063 mm 的筛绢或滤纸进行过滤,即为干净的放射虫标本,供制片之用;(2)陆坡型:沉积物中以有孔虫等钙质生物壳体为主。样品经浸泡并直接加入适量盐酸,水洗干净后,剩下标本几乎为硅质生物或含少量火山物质、石英等,便可烘干直接做片;(3)深海盆型:沉积物中除粘土质以外,基本上为硅质壳体,有时含有少量的钙质壳体。此类样品仅需做水洗处理,干净并烘干后,只要将少量钙质壳挑出即可做片。各类样品分别经过上述方法处理后,做定量片时,一般取用 0.02 mg 的纯净标本置于载玻片上,放上一滴酒精,用挑样针将标本搅匀并适当铺开,使标本均匀的散布在盖玻片大小范围的区域内,然后在酒精灯上慢火烤干,再用中性树脂封片。这样制成的定量薄片基本可使盖玻片下的标本均匀分布(除陆架区的样品外,每片可封有 500 个以上标本),便于在生物镜透射光中鉴定、计数。

每个样品至少鉴定统计放射虫 300 个个体,由此得到的物种 1% 丰度的置信水平已达 95%,不足 300 个个体的样品则对全部标本进行鉴定统计。如果整张玻片中放射虫的个体数较少,则要结合备份片做出补充观察和统计,以确保准确反映该取样点的生物沉积面貌。

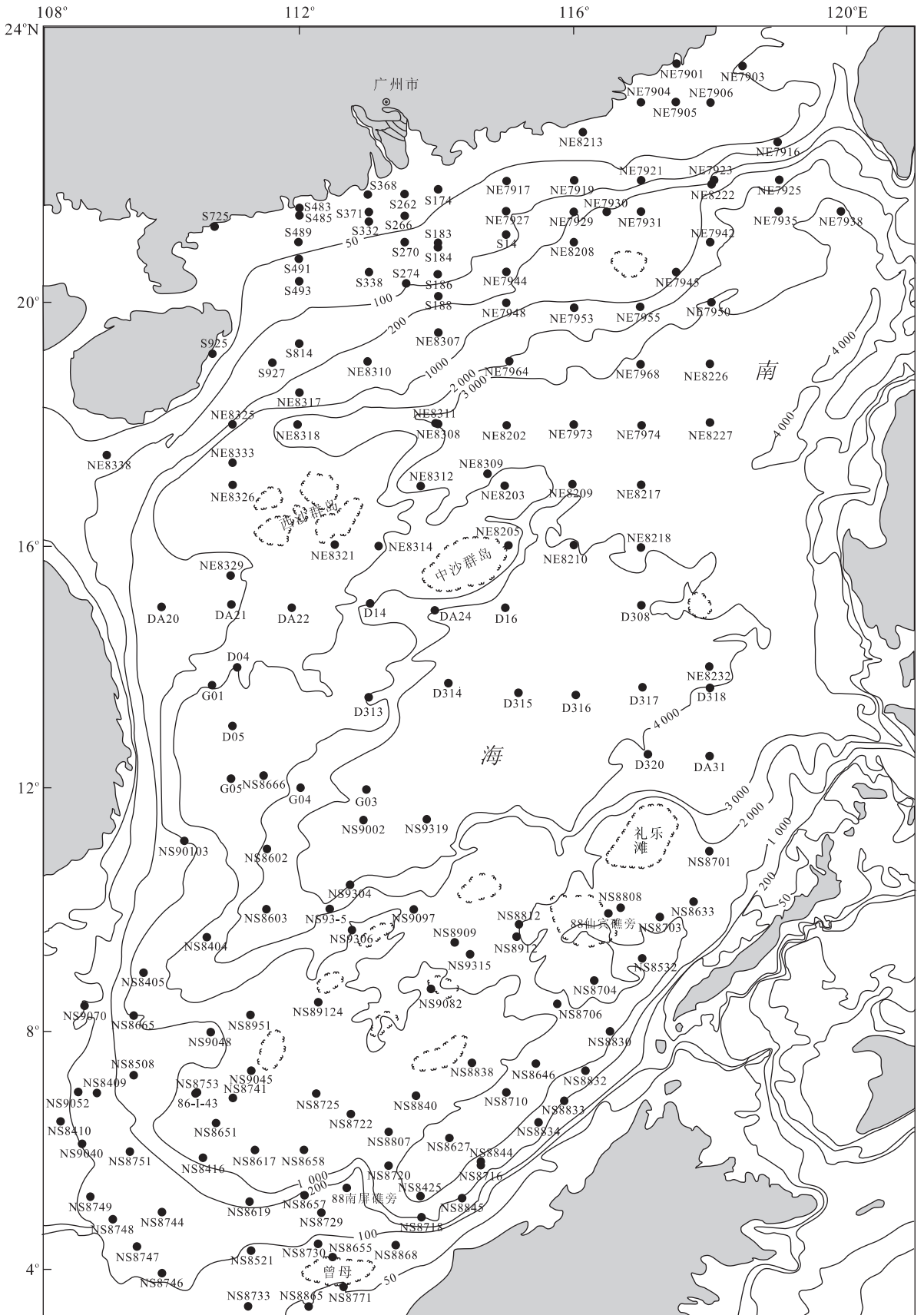


图1 南海表层沉积物取样站位分布

Fig. 1 Map of the South China Sea and stations of surface sediment samples

2 分析结果

2.1 个体丰度的区域分布与深度特征

沉积物中放射虫遗骸个体保存丰度的区域分布特征是群落生态分布与海洋水动力和物化条件下的综合沉积保存结果,是恢复古生态环境演变的重要地质记录.南海作为一个盆地式的西太平洋最大边缘海,海底表层沉积物中放射虫的分布特征应该反映了海区的生态环境和沉积环境.通过定量分析整个海区的放射虫分布状况,发现沉积物中放射虫丰度分布具有明显的区域性特征,与海洋动力环境紧密关联.

图 2 是综合整个南海的放射虫丰度分析结果,显示南海沉积物中保存的放射虫遗壳丰度变化很大,每克沉积物干样中所含的壳体数量从几个个体到超过 200 000 个个体.总体上,个体数量的分布等值线与海底等深线走向相似,尤其在南海北部海区随水深增大,个体数量增加的规律较为明显,而在中部海区和南部海区则出现一些特殊的分布现象.

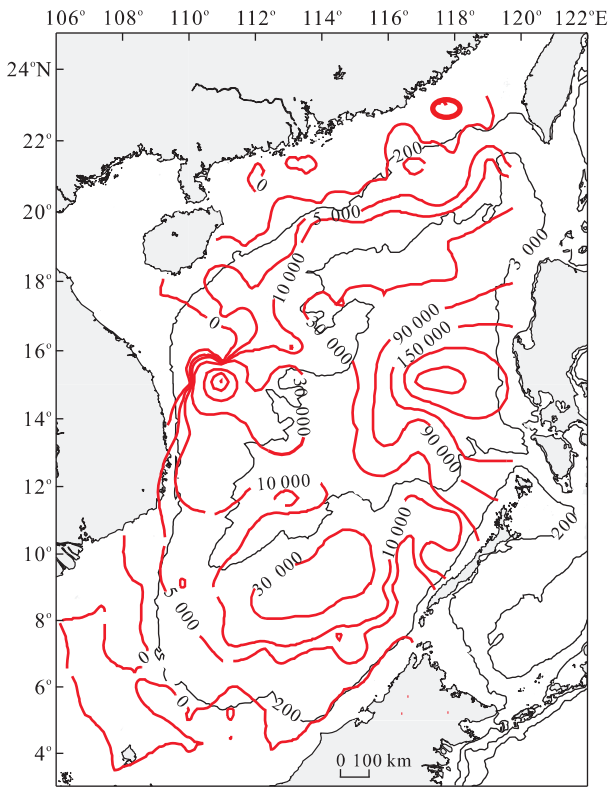


图 2 南海表层沉积物中放射虫个体丰度分布(个/g 干样)

Fig. 2 Distribution of radiolarian abundance in the South China Sea surface sediments (individuals/g, dried sample)

如在中部海区的东部区域,形成了一个很显著的富集中心,位于黄岩岛周围的海底约 4 000 m 深处,该高富集区也是整个南海区域表层沉积物中的放射虫最高含量分布区,达到近 200 000 个/g 干样,沉积物中同时还含有大量的火山玻璃碎屑,表明与海底的火山活动有关.在中部海区的西部区域,也出现另一个小范围的富集中心,该分布区位于西沙群岛以南,该区域表层沉积中钙质超微化石丰度也相对比较高(王勇军等,2007),有何特殊的海洋环境关联尚不清楚,有待于进一步的分析.

在 12°N 以南的南部海区,越南岸外的陆坡区有一个放射虫个体含量的相对高分布区,其 10 000 个/g 干样的等值线明显向东突出并延伸至约 114°E 处,该区正好是夏季上升流的活动范围.另一个值得注意的异常现象是放射虫丰度 5 000 等值线在东南面存在凹凸状的相对高值域,可能与南沙海槽南部存在较弱的冬季上升流有关.放射虫分布在南海南部的的主要富集区位于该海区大范围陆坡珊瑚礁环境的中央,含量可达 30 000 个/g 干样以上,明显高于北部陆坡区,但远低于中部的海盆火山活动区.

分析放射虫丰度随海水深度的变化特征,发现南海在水深约 4 200 m 范围内的海底表层沉积物中保存的放射虫丰度总体上呈现出随着水深增加而逐渐增加的变化趋势,在一些上升流和火山活动区的站位,样品中还出现异常的高值特征(图 3a).这些现象不仅可为解释南海的古环境变化提供依据,同时还证明了在南海水深 4 200 m 以浅的沉积环境中并未出现放射虫类生物硅的明显被溶解现象.南海放射虫类生物硅在沉积过程中的被溶解作用可能主要是发生于 4 200 m 以深的区域海底环境中.

2.2 种类多样性的区域特征与深度特征

生物种类的数量决定生物多样性的程度.南海属低纬度的边缘海,在世界各海区中放射虫的种类多样性应属于较高的海域.南海表层沉积物中放射虫种类数量的分布特征具有明显的规律性(图 3b 和图 4).

图 4 显示,南海海底沉积物中保存的放射虫种类数量明显地随水深加大而增加.无论是在南海的北部还是南部海区,200 m 等深线以浅区域的放射虫种类数量基本上只有约 30 种,种类数量等值线与海底等深线基本一致,有着类似的走向趋势.

在陆坡区,南海北部与中部和南部存在一定的差异,北部陆坡放射虫种类数量随水深增加较为缓

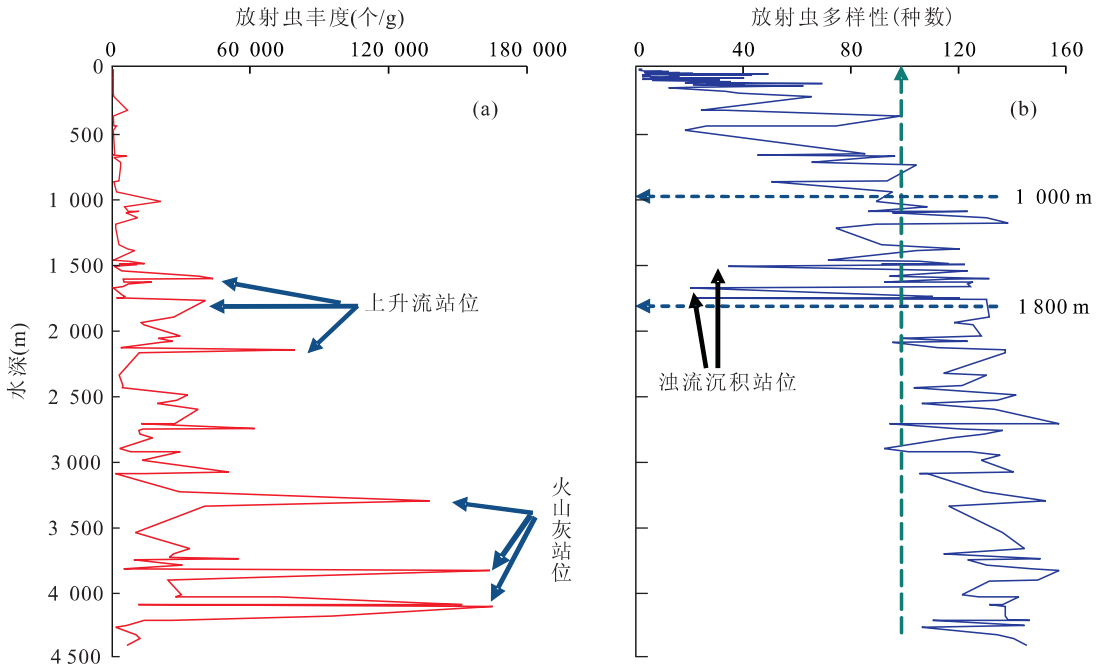


图 3 南海表层沉积物中放射虫丰度(个/g)和种数与水深关系

Fig. 3 Relations of radiolarian abundance (ind./g) and diversity preserved in surface sediments with water depth in the South China Sea

慢, 3 000 m 等深线以浅区域的放射虫种类数量均在 120 种以内, 等值线就在等深线附近, 走向一致; 而在南海中部和南部海区, 放射虫种类数量的等值线虽然与海底较浅水等深线的走向很相似, 但是 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 以浅的大片中、下陆坡区放射虫种类数量超过 120 种, 其种类多样性明显高于南海北部海区。

总体上, 南海放射虫种类的多样性特征出现在海盆区, 均在 120 种以上, 其中最为繁盛的区域呈现在中部海盆的东面, 约 14°N 和 19°E 附近的区域, 超过 150 种, 该区也是南海沉积物中放射虫丰度最大的海域。

南海放射虫种类多样性与海水深度关系也较为明显, 图 3b 显示在水深 0~1 000 m 种类数量快速地增加到近 100 种, 之后仍呈现为逐渐增加的趋势, 至约 1 800 m 以深海底, 放射虫的种类数量基本维持在 120 种上下浮动, 表明起码有 83% 的放射虫种类是生活在 0~1 000 m 的水深范围, 仅有少于 17% 的种类分布在 1 000 m 以深的深层水中。由于统计工作量的限制, 沉积物中放射虫种类的数量统计仅代表相对的结果, 实际上还有许多未被列入, 包括数量不少的未定种, 更加精确的数据有待于建立完善

的分类系统和完整的种类鉴定之后才能实现。

图 3b 中放射虫种类数量与水深的变化关系曲线上出现不同程度的震荡, 在某一水深范围的数量值甚至变化很大, 其原因除了存在局部区域的特殊生态结果之外, 还与海底的沉积物类型有关, 往往在水动力条件较强的区域, 沉积物颗粒组成较为粗大, 对放射虫壳体的沉积与保存均不利, 或由海底浊流带来的较浅处沉积物重新沉积, 因此影响了放射虫在沉积物中保存的完整性与原地性及其种类的数量。如在东沙群岛东、南侧的 79-45 站和 79-42 站, 沉积物类型在该区以砂或粉砂为主, 它们的水深分别为 1 520 m 和 1 685 m, 但放射虫种类数量仅有 35 种和 21 种, 明显地低于相近水深范围的其他站位(图 3b)。无论如何, 从整个南海的分布趋势观察, 放射虫种类数量随水深而增加的规律性是普遍存在的。

放射虫种类的多样性不仅与海区气候条件下的物理-化学特征和营养盐状况紧密相关, 同时还与所在海区的水体深度有关。由于浮游性的放射虫可生活于各个不同深度的水层, 使较浅海底的沉积物中只能保存少量表层或上层水生活的种类, 而在较深海底的沉积物中却可集中各个不同深度上覆水层的类群, 必然拥有更多的种类多样性。

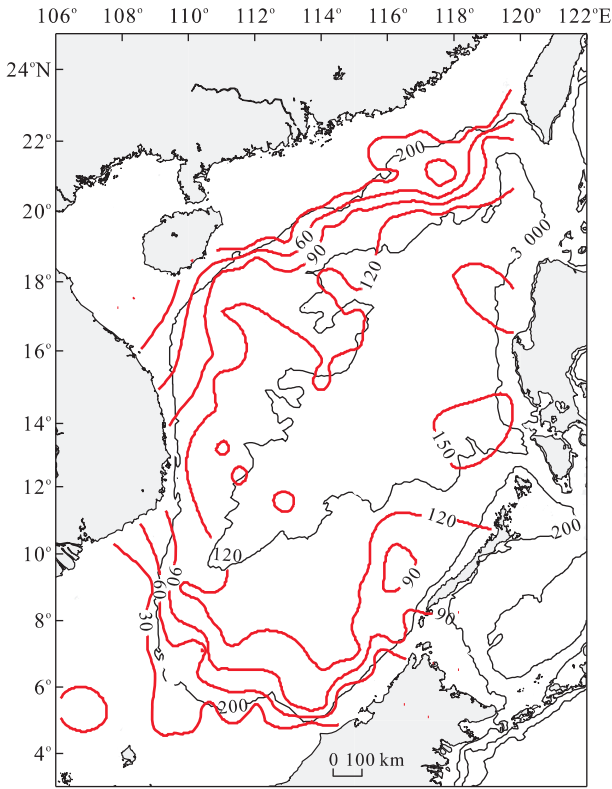


图 4 南海表层沉积物中放射虫种类数量分布

Fig. 4 Distribution of radiolarian diversity in the South China Sea surface sediments

2.3 优势种组成与分布特征

本项目对南海表层沉积物中的放射虫种类作了较为全面的鉴定,总计共有近 480 种,其中包括未定种类约 100 种。根据对整个海区各个站位沉积物中的放射虫种类个体数量的统计结果,累计每一个种类的统计数量,并计算其在所有站位累加个体统计数量总和中的百分比含量,确定南海表层沉积物中放射虫的优势种类(表 1),它们依序是 *Tetrapyle quadriloba* (含 *T. octacantha*) (13.24%), *Ommatartus tetrathalamus t.* (5.39%), *Giraffospyris angulata* (2.91%), *Pterocorys campanula* (2.31%), *Euchitonia triangulum* (2.17%), *Euchitonia furcata* (2.07%), *Streblacantha circumtexta* (2.05%), *Spongaster tetras t.* (1.87%), *Pterocanium praetextum p.* (1.65%), *Dictyocoryne profunda* (1.45%), *Siphonosphaera polysiphonia* (1.22%), *Monozonium pachystylum* (1.22%), *Acrosphaera spinosa* (1.20%), *Larcopyle butschlii* (1.18%), *Anthocytidium ophirensense* (1.06%), *Amphispyris reticulata* (1.03%), *Octopyle octospinosa*

(1%) 和 *Pterocanium trilobum* (0.99%) 等,这 18 个种群在沉积物中的累计丰度占到全部种类丰度的 44.01%,而其他近 462 种类的个体数量仅占 55.99%。

其他的个体数量占全区放射虫动物群含量在 1%~0.5% 范围的主要种类还有: *Eucyrtidium hexagonatum*, *Heliodiscus asteriscus*, *Phorticium pylonium*, *Hexaconitium senticetum*, *Spongodiscus americanus*, *Lophospyris pentagona p.*, *Larcospira quadrangula*, *Carpocanium sp.*, *Tetrapyle circularis*, *Lithomelissa thoracites*, *Lithelius minor*, *Hexalonche octocolpa*, *Spongodiscus resurgens*, *Lithelius xanthiformis*, *Artostrobium auritum*, *Lithopera bacca*, *Hexalonche aristarchi*, *Botryocyrtes scutum*, *Lamprocyclus maritima m.*, *Hexalonche philosophica*, *Euchitonia elegans*, *Actinomma arcadophorum*, *Anthocytidium zanguebaricum*, *Druppatractus testudo*, *Lithelius spiralis*, *Spongotrochus glacialis*, *Eucyrtidium acuminatum*, *Lithostrobos seriatus*, *Pterocorys hertwigii* 等,这些种类在南海各站位出现的频率也相对较高,在一些特殊区域的丰度也较大,是构成南海放射虫动物群区域特征的代表种,大多数为热带海区的表层水种,其中还包含了如 *Spongotrochus glacialis*, *Druppatractus testudo*, *Lithostrobos seriatus* 等冷水环境或较深水团中生活的种类,以及 *Artostrobium auritum*, *Botryocyrtes scutum*, *Lithelius minor*, *Euchitonia furcata*, *Siphonosphaera polysiphonia* 等上升流区指示种。此外,如 *Theocalyptra davisi* 这样的高纬度冷水特征种在南海却明显含量很低,其丰度仅占动物群的 0.17%,在南海海区明显属于稀有种类。

上述统计结果表明,南海表层沉积物中放射虫的优势种类组成以热带—亚热带暖水种为主,南、北海区存在一定差异,它们的个体发育优势较为明显,同时还显示其他大量的种类属于个体发育或出现频率均较少的稀有种,尤其还存在近 1/5 的未定种类有待进一步地详细鉴定与分类,整个放射虫动物群的完整面貌还远未被清楚认识,包括具有区域特色的新种类需要通过进一步的专项研究工作才能被有效确定和建立。这些有关放射虫种类组成的基本特征说明,作为半封闭性边缘海的南海必然具有其独特的生态环境和生物地理特征,该海区中的放射虫

表 1 南海表层沉积物中放射虫主要优势种及其排序

Table 1 Statistics collate of radiolarian dominant species in the South China Sea surface sediments

| | 全南海统计数 | 排序 | 中北部统计数 | 排序 | 南部统计数 | 排序 |
|------------------------------------|--------|----|--------|----|--------|----|
| 海区统计总个体数 | 43 567 | | 23 692 | | 19 875 | |
| <i>Tetrapyle quadriloba</i> | 3 357 | 1 | 2 176 | 1 | 1 181 | 3 |
| <i>Tetrapyle octacantha</i> | 2 409 | 2 | 994 | 3 | 1 415 | 1 |
| <i>Ommatartus tetrathalamus t.</i> | 2 350 | 3 | 1 139 | 2 | 1 211 | 2 |
| <i>Girafospyris angulata</i> | 1 266 | 4 | 735 | 4 | 531 | 5 |
| <i>Tholospyris sp.</i> | 1 096 | 5 | 542 | 6 | 554 | 4 |
| <i>Pterocorys campanula</i> | 1 007 | 6 | 639 | 5 | 368 | 10 |
| <i>Euchitonia trianglulum</i> | 947 | 7 | 432 | 9 | 515 | 6 |
| <i>Euchitonia furcata</i> | 900 | 8 | 502 | 7 | 398 | 9 |
| <i>Streblacantha circumtexta</i> | 894 | 9 | 446 | 8 | 448 | 8 |
| <i>Spongaster tetras tetras</i> | 813 | 10 | 343 | 12 | 470 | 7 |
| <i>Pterocanium praetextum p.</i> | 717 | 11 | 395 | 11 | 322 | 12 |
| <i>Dictyocoryne profunda</i> | 632 | 12 | 289 | 14 | 343 | 11 |
| <i>Siphonosphaera polysiphonia</i> | 532 | 13 | 253 | 16 | 279 | 14 |
| <i>Monozonium pachystylum</i> | 531 | 14 | 417 | 10 | 114 | 38 |
| <i>Acrosphaera spinosa</i> | 523 | 15 | 250 | 17 | 273 | 15 |
| <i>Larcopyle butschlii</i> | 512 | 16 | 309 | 13 | 203 | 22 |
| <i>Anthocytidium ophirens</i> | 461 | 17 | 270 | 15 | 191 | 23 |
| <i>Amphispyris reticulata</i> | 447 | 18 | 241 | 19 | 206 | 20 |
| <i>Octopyle octospinosa</i> | 435 | 19 | 125 | 40 | 310 | 13 |
| <i>Pterocanium trilobum</i> | 430 | 20 | 206 | 21 | 224 | 17 |
| <i>Eucyrtidium hexagonatum</i> | 419 | 21 | 235 | 20 | 184 | 24 |
| <i>Heliodiscus asteriscus</i> | 411 | 22 | 192 | 23 | 219 | 18 |
| <i>Phorticism pylonium</i> | 364 | 23 | 151 | 33 | 213 | 19 |
| <i>Hexacantium senticetum</i> | 363 | 24 | 159 | 29 | 204 | 21 |
| <i>Spongodiscus americanus</i> | 360 | 25 | 131 | 38 | 229 | 16 |
| <i>Lophospyris pentagona p.</i> | 335 | 26 | 183 | 24 | 152 | 28 |
| <i>Larcospira quadrangula</i> | 327 | 27 | 168 | 25 | 159 | 26 |
| <i>Carpocanium spp.</i> | 322 | 28 | 247 | 18 | 75 | 49 |
| <i>Tetrapyle circularis</i> | 304 | 29 | 198 | 22 | 106 | 40 |
| <i>Lithomelissa thoracites</i> | 297 | 30 | 168 | 26 | 129 | 35 |
| <i>Lithelius minor</i> | 291 | 31 | 147 | 34 | 144 | 31 |
| <i>Hexalonche octocolpa</i> | 283 | 32 | 161 | 28 | 122 | 36 |
| <i>Spongodiscus resurgens</i> | 270 | 33 | 116 | 43 | 154 | 27 |
| <i>Lithelius xanthiformis</i> | 264 | 34 | 120 | 42 | 144 | 32 |
| <i>Artostrobium auritum</i> | 247 | 35 | 125 | 41 | 122 | 37 |
| <i>Lithopera bacca</i> | 247 | 36 | 159 | 30 | 88 | 46 |
| <i>Hexalonche aristarchi</i> | 245 | 37 | 100 | 47 | 145 | 30 |
| <i>Botryocyrtis scutum</i> | 242 | 38 | 163 | 27 | 79 | 48 |
| <i>Lamprocyclas maritatis m.</i> | 239 | 39 | 72 | 51 | 167 | 25 |
| <i>Hexalonche philosophica</i> | 237 | 40 | 89 | 49 | 148 | 29 |
| <i>Euchitonia elegans</i> | 236 | 41 | 153 | 32 | 83 | 47 |
| <i>Actinomma arcadophorum</i> | 234 | 42 | 143 | 35 | 91 | 44 |
| <i>Anthocytidium zanguebaricum</i> | 220 | 43 | 126 | 39 | 94 | 43 |
| <i>Drupptractus testudo</i> | 216 | 44 | 80 | 50 | 136 | 34 |
| <i>Lithelius spiralis</i> | 213 | 45 | 114 | 44 | 99 | 42 |
| <i>Spongotrochus glacialis</i> | 210 | 46 | 135 | 37 | 75 | 50 |
| <i>Eucyrtidium acuminatum</i> | 209 | 47 | 107 | 46 | 102 | 41 |
| <i>Lithostrobos seriatus</i> | 207 | 48 | 159 | 31 | 48 | 52 |
| <i>Pterocorys hertwigii</i> | 207 | 49 | 138 | 36 | 69 | 51 |
| <i>Thecospaera grecoi</i> | 207 | 50 | 69 | 52 | 138 | 33 |
| <i>Lamprocyclas maritatis p.</i> | 201 | 51 | 93 | 48 | 108 | 39 |
| <i>Lophophaenoma witjazii</i> | 201 | 52 | 112 | 45 | 89 | 45 |

动物群特征明显有别于世界上任何其他海区。

3 讨论

南海是跨越热带—亚热带的西太平洋最大边缘海,具半封闭性特征,与太平洋连通的巴士海峡水深约 2 000 m,与苏禄海比邻的民都洛海峡和巴拉巴克海峡水深分别为 420 m 和 100 m,而位于南部的数个外连通道水深仅在 50 m 以内,这些通道使南海与外界大洋水体形成一定的交流,但通道水深同时也限制了深层水团的交换作用,因而形成南海独特的海洋生态环境。本研究将南海作为一个独立系统,分析放射虫在整个海区的沉积分布特征,从中发现它们与南海各种典型环境特征之间的不同程度关联,并分析沉积物中放射虫的不同组成特征对南海海洋环境的指示意义,以期提供古海洋变化的“将今论古”依据。

3.1 沉积深度对放射虫组成的影响

南海四周被岛陆包围,因此整个海区呈菱形盆地状,往中央海盆水体加深,最深处超过 4 800 m。本项研究的海底表层沉积物取样水深范围从 21 ~ 4 410 m,基本覆盖和包括了各个不同海底地貌单元的水深特性。

在南海的海底沉积物中,无论是放射虫的遗壳丰度还是种类多样性,均明显表现了从近岸、陆架、陆坡、到深海盆随水深加大而增加的趋势。这种分布趋势从海区的放射虫丰度和种类数量分布图(图 2 和 4),以及它们与水深关系(图 3)可以看出,即使在水深超过 3 000 ~ 4 000 m 的海盆区也未呈现明显减少的现象,表明放射虫硅质壳体在南海条件下的沉积溶解作用并不明显,其溶解深度应大于南海碳酸钙方解石的溶解深度,南海方解石的补偿深度约在 4 000 m(陈木宏和陈绍谋,1989)。

造成放射虫壳体在南海沉积物中随水深富集的主要原因是:(1)由于放射虫与其他一般浮游动物不同,在水体中可浮游生活于从表层水到数千米的深层水中,并出现不同水层的种类组成。因此,在未受溶解作用明显影响的情况下,水深越大,沉降到海底的种类越丰富,个体数量也越多;(2)随着水深加大,沉积环境离河口海岸的距离也加大,尤其到深海盆区接受来自陆源物质的沉积越来越少,沉积速率随之变小,使上覆各水层沉降下来的放射虫遗壳在海底沉积物中得到充分的富集和保存,并较小程度地

受到陆源物质稀释作用的影响。海洋沉积物中的这种放射虫组成规律性特征可广泛应用于古环境或岩相古地理分析,具有一般的适用性。

从南海表层沉积物中的放射虫分布特征看(图 2、3、4),异常现象主要出现于上升流和火山活动区,分别呈现为异常高特征值,以及出现由海底重力与地形作用下浊流搬运的再沉积,呈现异常低特征值。

3.2 上升流活动的放射虫响应

大洋海水中的硅一般是不饱和的,由于溶解硅以及其他营养物质含量的限制,放射虫通常在海洋中的大量繁殖受到一定的局限。世界大洋海底的大部分水深超过 4 000 ~ 5 000 m,在放射虫生物硅溶解深度以下的水体或沉积物中的放射虫遗壳往往难以得到埋葬保存。因此,生产率和保存率的共同制约使一般大洋深处海底沉积物中的放射虫遗壳非常贫乏,唯有在上升流强烈活动区是例外,在那里上升流活动给上层海水带来放射虫发育所需要的大量营养物质,使放射虫得到充分生长发育的条件,大量繁殖产生的遗壳即使在水深较大的环境中也由于未被溶解而得以沉积保存,这种世界性大洋放射虫的保存分布特征早已被发现报道(Broecker and Peng, 1982)。

南海作为边缘海,与世界大洋环境有一定区别,但海底沉积物中放射虫组成特征也一定程度地反映了放射虫分布与上升流活动密切相关的特征。南海的典型夏季上升流活动最早被发现在越南岸外附近(Wyrki, 1961),近年来随着研究的深入,又进一步揭示了该上升流随夏季时间的向东扩展演变过程与特征,尤其是在 8 月份达到最高峰时它的分布范围涉及到 115°E 区域(Xie *et al.*, 2003),表明该上升流活动影响范围的不仅局限在越南岸外的局部海域。

根据整个南海沉积物中的放射虫分布特征分析结果,在夏季上升流活动影响区的放射虫组成显示了明显的响应特征,主要表现在该区域出现放射虫丰度的异常高值区(图 2),种类多样性也较好(图 4),沉积物中的放射虫个体含量高于周围海域,形成一个相对富集区,无疑是上升流活动产生特殊生态环境的结果。从放射虫丰度与水深关系(图 3)中,也可清楚地看到上升流站位的样品中放射虫含量明显要高于邻近相似水深的样品含量,表明南海沉积物中放射虫的组成特征对上升流活动的响应特征是较为显著的。另外,通过对一些优势种和特征种的详细

分布特征分析,还发现可区别于其他海洋环境的南海上升流区的放射虫种类组合特征,主要由 *Arctostrobium auritum*, *Botryocyrtis scutum*, *Lithelius minor*, *Euchitonia furcata*, *Siphonospaera polysiphonia* 等构成有一定特色的优势种类,这些种类在上升流区放射虫动物群中的含量往往相对较高,可能属于较适应生活于温度偏低、盐度稍高和营养盐丰富的海洋上升流环境的放射虫类群。据此笔者可以将上述放射虫丰度和特征种组成作为追踪古上升流发育历史过程的替代性指标。

3.3 火山活动对放射虫富集的作用

在南海海底耸立着许多陡峭的海底高山,便是火山活动的遗迹。南海现代海底热流分布 (Shi *et al.*, 2003) (图 5a) 不同程度反映了与海底火山活动的关联。尤其在位于中央海盆东部约 4 000 m 水深处的黄岩岛附近区域,海底热流表现出明显的高值区,该区域附近的表层沉积物中火山玻璃等含量也相对比周围其他海区高 (邱传珠, 1983), 说明该处存在着近代的海底火山活动。放射虫丰度的分布特征也呈现该处是一个高值区,并成为南海表层沉积物

中放射虫的富集中心。图 5 中显示了放射虫富集中心与海底高热流值的区域性对应关系。两者之间以及火山玻璃分布证据等均较充分地说明放射虫的分布与海底火山活动密切关联,火山活动越强烈,则该海域的放射虫发育越繁盛,沉积物中堆积的放射虫遗壳越丰富。相关证据表明,海底火山活动与上升流活动类似,是促进海底沉积物中放射虫富集的重要因素。这些线索可以作为追踪古环境演变或历史上特征事件发生的可靠依据。

火山活动来自地球内部的热释放,岩浆在海底膨胀点集中且岩层薄又脆弱的地方突破,形成海底火山并喷出火山灰及火山碎屑,海底火山口不断喷发释放大量硫化氢物质,它们在被生活在火山口边缘的微生物氧化后成为供给上级食物链的营养物质,同时加速了微生物的繁衍,为放射虫的生长繁殖提供了充足的食物来源。同时还带出大量的 Fe、Si 等各种基础化学元素,为海洋水体不断补充生命活动所需的无机营养物质。在较深海底火山活动区域,因深水静压力巨大,使得喷发出的含铁硅酸盐火山物质溶解于海水中,其中的铁硅质主要形成富含铁

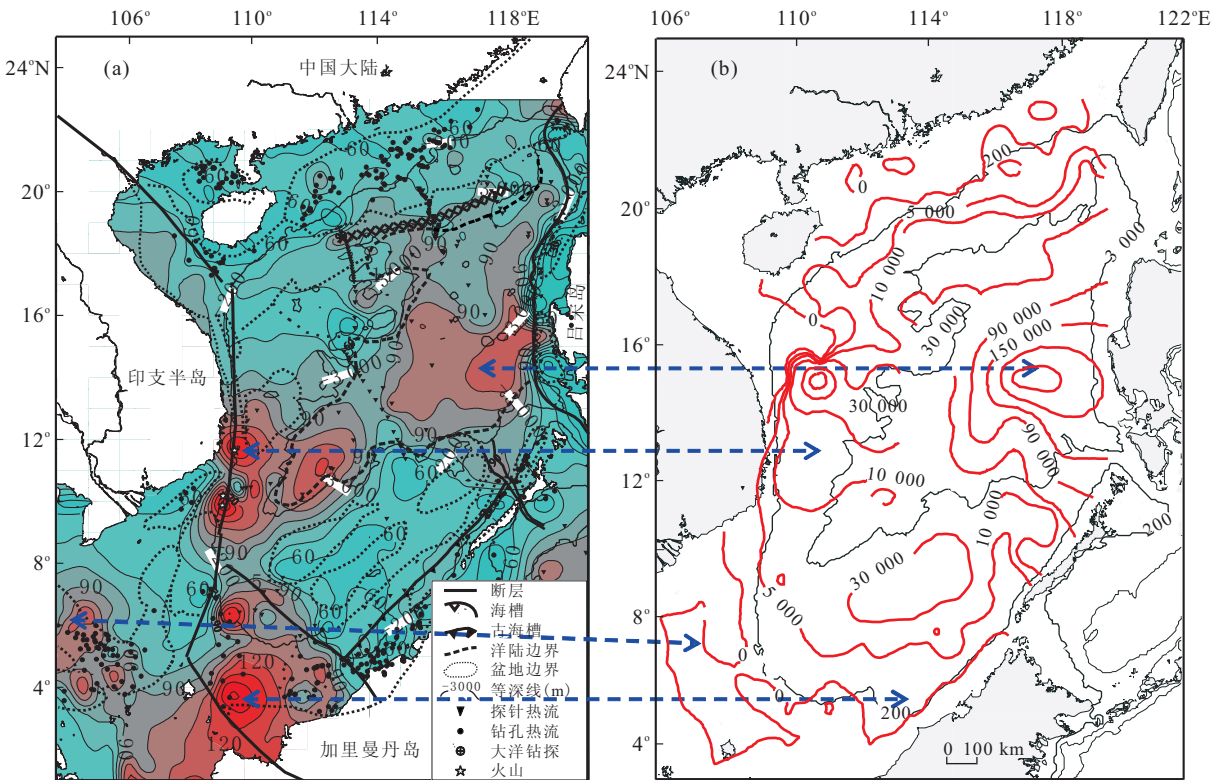


图 5 南海表层沉积物中放射虫丰度与海底热流分布关系

Fig. 5 Correlations of radiolarian abundance in surface sediments and oceanic heat flow in the South China Sea
a. 海底热流分布 (Shi *et al.*, 2003); b. 放射虫丰度分布

的二氧化硅胶体溶液,为放射虫等生物的硅质骨骼生长发育提供了更加丰富的重要营养物质。南海表层沉积物中放射虫的分布特征为此提供了直接的证据。

3.4 海水温度对放射虫分布的影响

从世界范围不同纬度带的海洋区域分析,海水温度对整个放射虫动物群的组成特征起着重要的控制作用(陈木宏和吴浩若,2000),前期工作还据此建立了各个不同海区的放射虫与表层海水温度的转换函数关系(陈木宏等,1998)。南海属于低纬度的边缘海,仅包括热带—亚热带范围,常年和季节性的海表温度变化幅度不大,因此放射虫动物群的整体生态响应表现为其他各种区域性环境综合因素主导了南海沉积物中放射虫的分布特征。尽管如此,根据南海放射虫沉积物中优势种丰度含量分布的分析结果,笔者仍可发现一些种类对温暖水团依赖的倾向性特征,如 *Ommatartus tetrathalamus t.*, *Spongaster tetras t.*, *Pterocanium trilobum* 和 *Lophospyris pentagona p.* 等种类,它们虽然广泛出现于南海海域,但相对较高含量均主要分布在偏南的暖水团控制区域中,说明这些种类具有暖水属性的代表特征。

南海沉积物中还分布有一些以往报道为冷水或极区属性的种类,如 *Spongotrochus glacialis* 在海底表层沉积物中的分布特征是最高含量出现在巴士海峡附近,往西进入南海后相对丰度呈现逐渐减少趋势,可能该种原先是通过巴士海峡的次表层水或深层水团携带进入南海的,并已逐渐适应南海环境。巴士海峡的海槛水深近 2 000 m,是南海与大洋的唯一深水通道。较深层水团的水温相对较低,具有冷水特征,放射虫冷水种虽然主要生活高纬度的冷水区,但通过大洋深水环流的迁移可一定程度生活在低纬度海域。该冷水种在南海不同历史时期的分布特征可用于指示古环境演变中南海与西太平洋深层水团交换状况的重要证据。

南海北部浅水区和北部湾,水温易受陆地及气象条件的影响。冬季水温较低,一般在 16~22 °C,等温线分布大致与海岸平行,温度由岸向外海递增,到南海中部表层水温达 25~26 °C。由于受东北季风漂流的影响,南海表层水温的分布并非与纬度平行,呈东北—西南向。南海夏季表层水温均达 28~29 °C,但西南季风的影响,导致越南中部、南部以及中国海南岛东岸等出现深层冷水涌升现象,造成夏季的上升流低温区,温度分别为 25 °C 和 23 °C。南海表层水

温度受上述因素影响,在区域上也控制了放射虫丰度和特征种的局部分布特征。

4 结论

笔者从南海不同典型生态与沉积环境及其相互关联的角度,采用定量统计方法,较系统地分析了整个海区的表层沉积物中放射虫的组成与分布特征,本文是此项研究结果的一部分,主要获得以下认识:

(1)南海沉积物中放射虫的分布具有明显的规律性,一般情况下种类多样性和生物个体丰度随着海水深度而增加,不同环境中的沉积物类型对放射虫壳体的保存产生影响,深海的较细颗粒沉积物有利于完整储藏沉积记录;现代南海的各种深度海洋环境中尚未发现沉积放射虫的蛋白石类硅质壳体(或骨骼)有明显的溶解现象。

(2)海洋上升流和海底火山活动可明显促进南海放射虫的繁殖发育,并在海底沉积物中相对富集,尤其是个体丰度明显增加,可作为追踪南海古海洋环境演变的有效替代性指标。

(3)海底浊流等重力作用下形成的深海再沉积现象,使较深海区沉积物中出现由较浅沉积的放射虫组成特征,表现为种类多样性和个体丰度均比周围非再沉积的显著减少,这一特征可以作为分析古海洋环境变化的重要依据。

(4)南海现代沉积物中的放射虫种类组合以热带—亚热带为主,但也包含有部分的一定数量的冷水种或极区种。因此,在古环境分析中必须考虑综合指标,使用单一指标可能会引起误解。放射虫的组成特征表明:南部海区与北部海区存在明显的生态环境差异,主要体现了热带与亚热带的不同海洋特征。

(5)南海放射虫的类型异常丰富,隐藏种类多样性的很大潜力,尽管笔者已经做了大量的种类鉴定和描述工作,但初步估计尚有一定数量的放射虫种类尚未被认知,有待于开展更加细致的南海放射虫生物系统分类研究。

References

- Broecker, W. S., Peng, F. H., 1982. Tracers in the sea. Eldigio Press, New York, 679.
- Chen, M. H., Chen, S. M., 1989. On carbonate dissolution and the distribution model of deep sea sediment types in South China Sea. *Tropic Oceanology*, 8(3): 20-26 (in

- Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Huang, L. M., Tu, X., et al., 1999. Radiolarian transfer function for paleo-primary productivity in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 44(3): 327—333 (in Chinese).
- Chen, M. H., Tan, Z. Y., 1989. Description of a new genus and 12 new species of radiolarian in sediments from the South China Sea. *Tropic Oceanology*, 8(1): 1—9, pls. 1—2 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Tan, Z. Y., 1996. Radiolaria from surface sediments of the central and northern South China Sea. Science Press, Beijing, 1—271, pls. 1—54 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Tan, Z. Y., 1999. Radiolarian distribution in surface sediments of the Northern and Central South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 32: 173—194.
- Chen, M. H., Tu, X., Cai, H. M., et al., 1998. Radiolarian transfer function for palaeotemperature in the South China Sea. In: Department of Geology, Peking University, ed., Collected works of international symposium on geological science held at Peking University, Beijing, China, Earthquake Press, Beijing, 1053—1066 (in Chinese).
- Chen, M. H., Wang, R. J., Han, J. X., et al., 2002. Radiolarians of Late Miocene from southern South China Sea and their environment implications. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2): 66—74 (in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Wang, R. J., Yang, L. H., et al., 2003. Development of East Asian summer monsoon environment revealed by radiolarians in the Late Miocene; Evidence from site 1143 of ODP Leg 184. *Marine Geology*, 201: 169—177.
- Chen, M. H., Wu, H. R., 2000. The recent studies on radiolarian and their application for paleoenvironment. *Research & Development of South China Sea*, 1: 6—16 (in Chinese).
- 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).
- 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): 271—276 (in Chinese with English abstract).
- 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: 265—277.
- Su, X. H., Tan, Z. Y., 1985. A preliminary investigation of colonial radiolarians of the Xisha Islands, Guangdong Province, China. *Studia Marina Sinica*, 24: 125—133, pl. 1 (in Chinese with English abstract).
- Tan, Z. Y., Su, X. H., 1981. Two new species of *Liriospyris* (Radiolaria: Trissocyclidae) from the Xisha Islands, China; With a discussion on their skeletal structures. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 6(4): 337—343, Plate: i—iii (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. B., Li, X. Z., Tan, Z. Y., 2005. Species composition and distribution of polycystine radiolarians (Protozoa) in the plankton from the northwestern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(6): 100—106 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J., Abelmann, A., 1999. Pleistocene radiolarian biostratigraphy in the South China Sea. *Science in China (Series D)*, 29(2): 137—143 (in Chinese).
- Wang, R. J., Abelmann, A., 2002. Radiolarian responses to paleoceanographic events of the southern South China Sea during the Pleistocene. *Marine Micropaleontology*, 46: 25—44.
- Wang, R. J., Abelmann, A., Huang, B. Q., 2000a. Relative abundance changes, stratigraphic and palaeo-oceanographic significance of radiolarian *Botryocyrtis scutum* in South China Sea since Pleistocene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(6): 553—556 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. J., Abelmann, A., Li, B. H., et al., 2000b. Abrupt variations of the radiolarian fauna at the mid-Pleistocene climate transition in South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 45(3): 314—318 (in Chinese).
- Wang, R. J., Lin, J., Zheng, L. F., et al., 2000c. Siliceous microplankton fluxes and seasonal variations in the central South China Sea during 1993—1995; Monsoon climate and El Niño responses. *Chinese Science Bulletin*, 45(9): 974—978 (in Chinese).
- Wang, R. J., Clemens, S., Huang, B. Q., et al., 2003. Quaternary palaeoceanographic changes in the northern South China Sea (ODP Site 1146); Radiolarian evidence. *Journal of Quaternary Science*, 18(8): 745—756.
- Wang, Y. J., Chen, M. H., Lu, J., et al., 2007. Distribution of calcareous nannofossils in surface sediments of South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 26(5): 26—34 (in Chinese with English abstract).
- 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, 2, 195pp. Scripps Inst. of Oceanogr., La Jolla, Calif. .
- 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.
- Yang, L. H., Chen, M. H., Wang, R. J., et al., 2002. Radiolarian record to paleoecological environment change events over the past 1.2 MaBP in the southern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 47(14): 1098-1102 (in Chinese).
- Yang, L. H., Chen, M. H., Wang, R. J., et al., 2003. Radiolarian fauna characters in southern South China Sea since 1 MaB. P. *Journal of Tropical Oceanography*, 22(5): 8-15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. L., Chen, M. H., Lu, J., et al., 2005. Living polycystine radiolarian fauna in the upper water column of southern South China Sea and its distribution. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(3): 55-64 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. L., Chen, M. H., Zhang, L. L., et al., 2007. Late Neocene radiolarian absence event in the southern South China Sea and its paleoceanographic implication. *Progress in Natural Science*, 17(9): 1244-1250 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 陈木宏, 陈绍谋, 1989. 南海碳酸盐溶解与深海沉积物类型. *热带海洋*, 8(3): 20-26.
- 陈木宏, 黄良民, 涂霞, 等, 1999. 南海放射虫与初级生产力的古海洋学转换关系. *科学通报*, 44(3): 327-333.
- 陈木宏, 谭智源, 1989. 南海沉积物中放射虫 1 新属 12 新种. *热带海洋*, 8(1): 1-9, 图版 1-2.
- 陈木宏, 谭智源, 1996. 南海中、北部沉积物中的放射虫. 北京: 科学出版社, 1-271, 图版 1-54.
- 陈木宏, 涂霞, 蔡慧梅, 等, 1998. 南海放射虫的古温度转换函数研究. 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, 1053-1066.
- 陈木宏, 王汝建, 韩建修, 等, 2002. 南海南部晚中新世的放射虫及其环境探讨. *热带海洋学报*, 21(2): 66-74.
- 陈木宏, 吴浩若, 2000. 近代放射虫的研究进展及其对揭示古环境的应用前景. *南海研究与开发*, 1: 6-16.
- 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.
- 邱传珠, 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): 271-276.
- 宿星慧, 谭智源, 1985. 西沙群岛群体放射虫的初步调查. *海洋科学集刊*, 24: 125-133, 图版 I.
- 谭智源, 宿星慧, 1981. 西沙群岛百合篮虫属(放射虫目: 三环虫科)两新种及其骨骼结构探讨. *动物分类学报*, 6(4): 337-343, 图版 i-iii.
- 王金宝, 李新正, 谭智源, 2005. 南海西北部浮游生物中多孔放射虫的组成与分布. *海洋学报*, 27(6): 100-106.
- 王汝建, Abelmann, 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.
- 王汝建, Abelmann, A., 黄宝琦, 2000a. 南海更新世以来 *Botryocystis scutum* (放射虫) 的丰度变化及其地层和古海洋学意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(6): 553-556.
- 王汝建, Abelmann, A., 李保华, 等, 2000b. 南沙海区放射虫组合在中更新世气候转型时的突然变化. *科学通报*, 45(3): 314-318.
- 王汝建, 林隽, 郑连福, 等, 2000c. 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. *科学通报*, 45(9): 974-978.
- 王勇军, 陈木宏, 陆钧, 等, 2007. 南海表层沉积物中钙质超微化石分布特征. *热带海洋学报*, 26(5): 26-34.
- 杨丽红, 陈木宏, 王汝建, 等, 2002. 南海南部 1.2 MaBP 以来古生态环境变化事件的放射虫记录. *科学通报*, 47(14): 1098-1102.
- 杨丽红, 陈木宏, 王汝建, 等, 2003. 南海南部/百万年以来的放射虫动物群特征. *热带海洋学报*, 22(5): 8-15.
- 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.
- 张丽丽, 陈木宏, 张兰兰, 等, 2007. 南海南部晚第三纪放射虫缺失事件及古海洋学意义. *自然科学进展*, 17(9): 1244-1250.