

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020092903

菲律宾海及其邻近海域表层沉积物中放射虫的分布对不同区域环境的响应

邱卓雅^{1,2,3}, 张兰兰^{1,2}, 胡邦琦⁴, 常虎^{1,2,3}, 程夏雯^{1,5}, 向荣^{1,2}

1. 中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301
2. 中国科学院南海生态环境工程创新研究院, 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 510301
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
5. 海南大学, 海口 570100

摘要: 为了解菲律宾海放射虫的区域分布特色, 利用同样的样品处理方法, 对菲律宾海及其邻近海域的 44 个表层沉积样中的放射虫进行对比分析, 鉴定统计了 500 个属种, 物种多样性较高。菲律宾海表层沉积物中放射虫的群落结构和丰度变化幅度较大, 反映了菲律宾海更为复杂的区域生态环境或沉积环境; 南海北部放射虫丰度非常高且罩笼虫目占据较大优势, 表明南海北部区域营养盐和生物生产力较高; 冲绳海槽放射虫丰度相对较低且泡沫虫目占据绝对优势, 推测冲绳海槽的海底沉积环境可能不利于放射虫壳体的埋藏富集。RDA 分析结果显示暖水种在冲绳海槽的分布与夏季 125 m 温度呈明显的正相关, 可能与夏季黑潮次表层水的影响有关; 在南海北部, 暖水种的分布主要受冬季 75 m 硅酸盐和夏季 200 m 磷酸盐的影响控制, 说明高浓度的硅酸盐可能更加有利于罩笼虫目的发育繁殖; 菲律宾海主要是次表层水的环境因子影响着放射虫暖水种的分布, 比如 75 m 冬季盐度、200 m 年均溶解氧含量和 125 m 夏季温度。此外, 菲律宾海中深层水(1000~3000 m)不同层深 66 个环境变量和生活于该水体中的 5 个冷水种的 RDA 分析结果, 显示菲律宾海北部区域主要与 1000 m 硅酸盐浓度呈显著正相关, 可能与富含硅酸盐的北太平洋中深层水南下进入菲律宾有关; 而在菲律宾海中南部的分布则主要与 1000 m 硅酸盐浓度呈显著负相关, 与 2000 m 溶解氧和 2200 m 磷酸盐和硝酸盐呈明显正相关, 可能与具有高溶解氧低硅酸盐性质的绕极深层水由南端进入菲律宾海后, 一部分水体向上进入菲律宾海中层水有关。

关键词: 放射虫暖水种和冷水种; 环境变量; RDA 分析; 表层沉积物; 菲律宾海及其邻近海域

中图分类号: P736.22

文献标识码: A

Radiolarian distribution in surface sediments of the Philippine Sea and adjacent areas and its response to environment

QIU Zhuoya^{1,2,3}, ZHANG Lanlan^{1,2}, HU Bangqi⁴, CHANG Hu^{1,2,3}, CHENG Xiawen^{1,5}, XIANG Rong^{1,2}

1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, Guangzhou 510301, China
2. Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 510301, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China
5. Hainan University, Haikou 570100, China

Abstract: In order to understand the distribution pattern of radiolarians in the Philippine Sea, this article, based on a unified method for sample processing and analysis, made analysis and comparison of radiolarians for 44 surface sediment samples taking from the Philippine Sea and its adjacent regions. A total of 500 radiolarians species are identified, suggesting a very high species diversity. The community structure and abundance of radiolarians in the surface sediments of the Philippine Sea vary greatly, suggesting complex regional ecological or sedimentary

资助项目: 国家自然科学基金项目“东印度洋不同深度水团中现代放射虫的生态特征及其古环境意义”(41876056), “东北印度洋末次冰盛期以来放射虫的时空分布及其环境变化响应”(41576044), “菲律宾海盆底层水体性质对中更新世气候转型的响应机制”(41976192); 中国地质调查局项目(DD20191010); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0206)

作者简介: 邱卓雅(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋微体古生物和沉积环境, E-mail: qiu Zhuoya@scsio.ac.cn

通讯作者: 张兰兰(1978—), 女, 副研究员, 从事海洋微体古生物与沉积研究, E-mail: llzhang@scsio.ac.cn

收稿日期: 2020-09-29; **改回日期:** 2020-12-02. 周立君编辑

environments. The abundance of radiolarians dominated by *Nassellaria* is also very high in the northern South China Sea, indicating that the northern South China Sea is rich in nutrients and high in biological productivity. However, the radiolarian abundance, dominated by *Spumellaria*, is relatively low in the Okinawa Trough. It is speculated that the submarine environment of the Okinawa Trough is not so conducive to the accumulation and preservation of radiolarian shells. 8 warm water species group living in the euphotic layer and 162 environmental variables at different depths of the 0~200 m water layers are selected for RDA analysis. The results show that the distribution of these warm water species in the Okinawa Trough is significantly positively correlated with the summer temperature in 125 m of water depth, probably owing to the influence of the summer Kuroshio subsurface water. The distribution of warm water species in the northern South China Sea is mainly affected by winter silicate of 75 m and summer phosphate of 200 m. It means that high-concentration silicate is more conducive to the production of *Nassellaria*. In the Philippine Sea, however, environmental factors mainly in the subsurface water affect the distribution of warm water species, such as winter salinity of 75 m, 200 m annual dissolved oxygen content and summer temperature of 125 m. In addition, the RDA analysis results of 66 environmental variables at different depths of the medium-deep water (1 000~3 000 m) of the Philippine Sea and 5 cold water species living in this layer show that the northern Philippine Sea is mainly positively correlated with the silicate concentration of 1 000 m. This may be related to the fact that the silicate-rich intermediate-deep water mass of the North Pacific moving southward into the Philippine Sea. The distribution in the central and southern part of the Philippine Sea is mainly negatively correlated with the concentration of silicate at 1 000 m, and is significantly positively correlated with dissolved oxygen at 2000 m. It may be related to the Circumpolar Deep Water with high dissolved oxygen content and low silicate entering from the southern end of the Philippine Sea, and part of the water upwardly enter the intermediate layer of the Philippine Sea.

Key words: warm water and cold water radiolarian species; environmental variables; RDA; surface sediments; Philippine Sea and its adjacent sea area

作为营漂浮生活的单细胞原生动物,活体放射虫在海洋中的分布通常受到特定性质的海洋水团和环境的影响,死亡后其硅质壳体可作为化石在海底沉积物中得到良好的保存,这种化石组合在一定程度上代表了上覆水体的放射虫群落组成,提供了放射虫属种在水体中的空间分布特征以及和环境变量关系的相关信息^[1-3]。太平洋深层水流通性较差,海水具有较强的腐蚀性,碳酸钙质的微体化石极难保存,而放射虫(即多囊虫类放射虫)具有不容易被溶解的无定形硅,拥有比钙质生物壳体更深的溶解深度,在海底沉积研究,尤其是在碳酸钙补偿深度以下的深海区域的古海洋环境和古气候研究中发挥着重要作用^[4-7]。因此,在菲律宾海这样的深海海域,硅质生物壳体群作为海底沉积物中的主要生源要素,是进行古海洋和古气候重建研究的重要环境替代性指标。

菲律宾海是热带与亚热带海洋之间进行热量交换和信号传递的重要纽带,对全球热平衡起着重要调节作用^[8-9]。菲律宾海作为大洋寡营养区,生物生产力较低^[10]。然而,在东菲律宾海和西菲律宾海海底沉积物中却发现了大量的纹层硅藻席沉积^[11-12],硅藻席沉积层中富含多囊虫类放射虫,利用放射虫群落结构和丰度变化趋势所反映出的水文环境变化信息,可为大型硅藻在长时间尺度的勃发机制解释上提供更多的信息^[11]。同时,目前在西太平洋及其边缘海已开展了诸多放射虫研究工作,如陈木宏

等通过对南海表层沉积物中放射虫的群落组合及其分布特征的分析,初步探讨了热带西太平洋边缘海放射虫的现代沉积分布特征^[6,13];还有研究利用浮游生物拖网和垂直多联网样品,调查了南海和东海现代放射虫物种的分类、分布及其生态学特征^[14-15];常凤鸣和董志等通过对冲绳海槽表层沉积物中的放射虫优势种及群落组成的分析,讨论了多种环境因素对放射虫组成分布的影响^[16-17];还有研究者利用西北太平洋的多个边缘海海底表层沉积物中的放射虫数据,初步探讨了放射虫在西北太平洋的生物地理分区^[18-19],并尝试利用多变量统计分析开发放射虫生态模型,以期通过沉积物放射虫数据重建过去海表温度^[20-21]。因此,放射虫在西北太平洋的菲律宾海具有重要的研究意义,但目前该海域现代放射虫的研究相对较少,对其组成分布与环境因子的关系知之甚少,尤其是对放射虫的特征属种与不同水层环境变量之间关联的研究较为欠缺。

本文以菲律宾海及其邻近海域(南海北部和冲绳海槽)为研究区域(图1),对所有样品采用相同的处理分析方法,对比分析放射虫在菲律宾海及其邻近海域表层沉积物中的沉积记录及其区域分布特征;结合数理生态学方法,讨论放射虫特定属种组合与不同水深环境变量之间的关联,旨在为中低纬度尤其是菲律宾海这一深水海域的古海洋环境、古气候和古水团性质的区域研究提供更多的环境替代性指标。

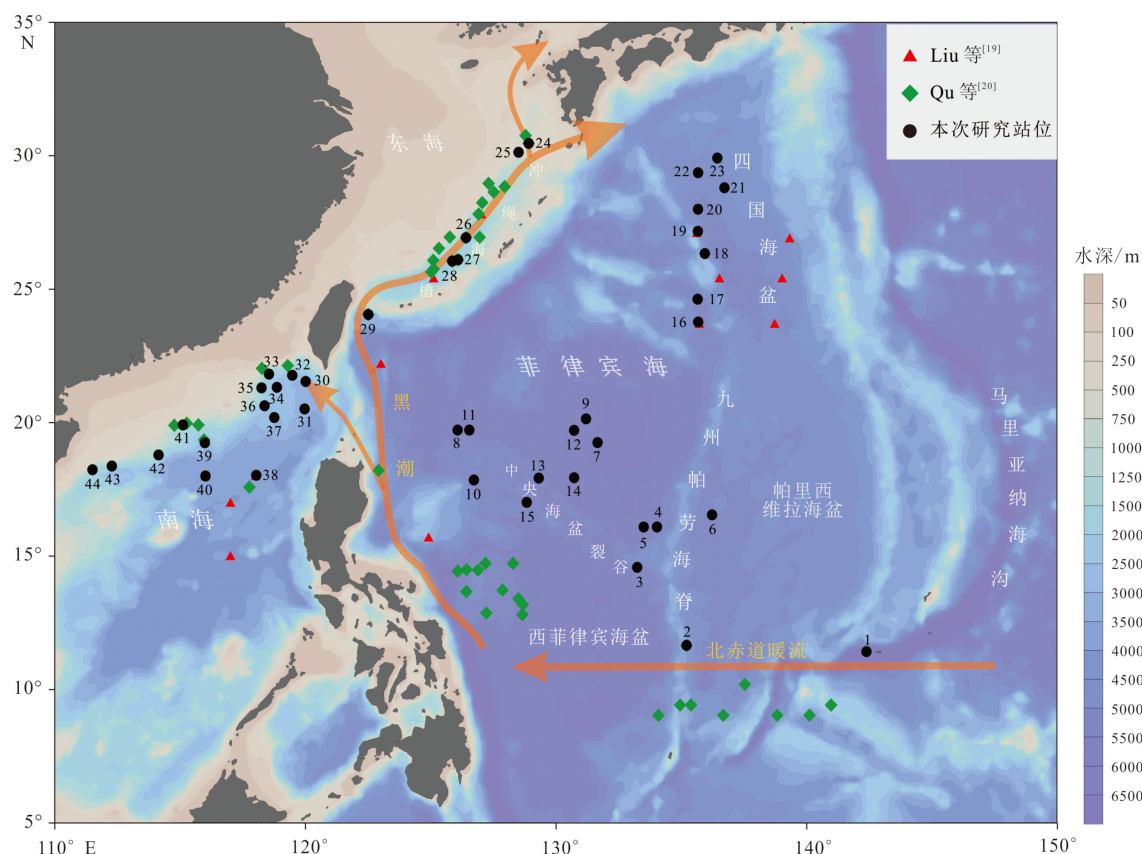


图 1 本次研究站位分布 (黑色圆点所示) 和以往研究站位 (红色三角形和绿色菱形所示)

Fig.1 Locations of sampling sites of this research (shown by the black dots) and previous research (shown by the red triangles and the green diamond)

1 区域概况

研究区域位于西太平洋, 范围包括菲律宾海、冲绳海槽和南海北部区域, 均为低纬度海区, 水温整体偏高, 季节变化明显, 主要受北赤道暖流-黑潮-棉兰老流的洋流体系影响。菲律宾海位于西太平洋暖池边缘, 北赤道暖流沿着西菲律宾海向西流动, 受地形阻挡作用分成南北两支, 一支向北形成黑潮, 一支向南形成棉兰老流^[22]。其中黑潮是世界上最大的西边界流之一, 具有高温、高盐特性, 黑潮主体主要沿吕宋岛-台湾-冲绳海槽向北流动, 但在吕宋岛北部出现分支经巴士海峡流向南海, 使得西菲律宾海、冲绳海槽和南海北部的水文特征均受到黑潮的影响^[23-25]。

研究区地形复杂, 冲绳海槽和南海北部均有一侧靠近陆架, 水深较浅, 其中冲绳海槽区域里水深大于 1000 m 的地方不超过海槽总面积的 10%^[17]。南海北部具有明显的半封闭边缘海的特性, 主要通过位于东北部的巴士海峡等通道与太平洋相连。相比之下, 菲律宾海拥有面积广阔的深海海盆, 海

盆中央发育的九州帕劳海脊把菲律宾海分割成西边的菲律宾海盆和东边的四国海盆、帕里西维拉海盆^[26]。同时, 菲律宾海发育有典型的沟-弧-盆体系, 东侧的伊豆小笠原海脊和马里亚纳海脊将菲律宾海与北太平洋分隔^[26]。这些底部地形在一定程度上影响菲律宾海的深水环流特性。

2 材料与方法

本文的研究样品分别取自菲律宾海、南海北部和冲绳海槽海底表层沉积物, 共 44 个样品, 其中 9 个为重力柱取样, 35 个为箱式取样, 均取自层 0~1 cm 的沉积物进行分析。菲律宾海 23 个站位的水深均超过 4092 m; 南海北部 15 个站位的水深范围为 1182~3888 m; 其余 6 个站位分布在冲绳海槽海域, 水深范围为 781~2064 m (图 1, 表 1)。

放射虫样品的处理制片采用定量分析方法, 即称取约 0.1 g 干样, 先后加入 10% 的 H_2O_2 和 10% 的 HCl 充分反应以去除有机质和碳酸盐类物质, 然后使用垂直沉降法收集放射虫^[15, 27], 最后用中性树胶进行封片。使用尼康 E800 正置生物显微镜对放射

表 1 研究站位位置、水深、放射虫丰度以及放射虫三大类（泡沫虫目、罩笼虫目和胶球虫目）的相对丰度
Table 1 Sampling locations, water depths, total radiolarian abundance, and relative abundance of Spumellaria, Nassellaria, and Collodaria of three order of radiolarian

站位号	位置	水深 /m	放射虫总丰度 /（枚/g）	泡沫虫目相对丰度/%	罩笼虫目相对丰度/%	胶球虫目相对丰度/%
1	11.4°N, 142.36°E	10853	60051	44.52	54.30	1.18
2	11.64°N, 135.19°E	4092	1061	74.90	20.59	4.51
3	14.56°N, 133.22°E	5466	80634	52.11	41.48	6.40
4	16.07°N, 134.01°E	5472	164	34.78	60.87	4.35
5	16.07°N, 133.48°E	5370	9	76.92	23.08	0
6	16.53°N, 136.21°E	5060	1181	54.31	40.52	5.17
7	19.23°N, 131.64°E	6059	1703	40.70	37.21	22.09
8	19.7°N, 126.06°E	5404	38204	43.91	52.88	3.21
9	20.12°N, 131.18°E	5801	898	19.32	63.64	17.05
10	17.83°N, 126.71°E	5380	81801	50.79	44.94	4.27
11	19.7°N, 126.53°E	4882	2325	42.65	35.29	22.06
12	19.69°N, 130.7°E	5761	14866	48.82	42.01	9.17
13	17.9°N, 129.3°E	5307	13600	53.21	41.44	5.35
14	17.92°N, 130.71°E	5708	32243	39.71	52.17	8.12
15	16.99°N, 128.82°E	5505	9293	48.04	43.20	8.76
16	23.74°N, 135.65°E	5270	21952	60.51	31.94	7.54
17	24.6°N, 135.63°E	5370	8269	67.19	25.52	7.29
18	26.31°N, 135.92°E	5392	8711	62.21	31.57	6.22
19	27.14°N, 135.64°E	5050	23250	62.57	34.67	2.76
20	27.97°N, 135.65°E	4865	17102	70.22	25.93	3.86
21	28.77°N, 136.7°E	4560	9257	73.62	20.41	5.96
22	29.34°N, 135.65°E	4439	3766	86.53	12.03	1.43
23	29.89°N, 136.42°E	4725	8901	72.12	24.65	3.23
24	30.44°N, 128.89°E	781	10235	85.24	11.99	2.77
25	30.1°N, 128.49°E	885	37924	55.23	44.40	0.37
26	26.9°N, 126.39°E	1266	3045	78.58	15.83	5.59
27	26.08°N, 126.08°E	2044	6414	76.65	16.95	6.40
28	26.03°N, 125.85°E	2064	10062	64.74	32.76	2.50
29	24.03°N, 122.5°E	1800	5740	73.34	22.96	3.70
30	21.52°N, 120°E	3010	7053	40.30	58.96	0.75
31	20.49°N, 119.96°E	3347	23908	32.93	65.87	1.20
32	21.75°N, 119.47°E	2709	115522	41.09	57.17	1.74
33	21.79°N, 118.54°E	2049	18319	47.58	50.97	1.45
34	21.3°N, 118.85°E	2620	46887	50.30	48.49	1.21
35	21.28°N, 118.24°E	2184	41087	51.43	47.43	1.14
36	20.61°N, 118.36°E	2540	90291	54.19	43.01	2.80

续表 1

站位号	位置	水深 /m	放射虫总丰度 / (枚/g)	泡沫虫目相对丰度/%	罩笼虫目相对丰度/%	胶球虫目相对丰度/%
37	20.17°N, 118.75°E	2893	90042	46.12	51.53	2.35
38	18.01°N, 118.03°E	3888	75833	41.76	56.26	1.98
39	19.22°N, 115.98°E	2612	86607	50.31	47.84	1.86
40	17.98°N, 116°E	3865	75229	35.37	62.44	2.20
41	19.89°N, 115.11°E	1182	83800	40.10	55.13	4.77
42	18.77°N, 114.13°E	1575	100490	53.66	44.39	1.95
43	18.35°N, 112.27°E	1564	101667	44.26	52.82	2.91
44	18.21°N, 111.5°E	1808	17314	43.18	55.33	1.50

虫进行属种鉴定, 为了保证放射虫数据统计的可靠性, 每个样品至少鉴定 300 个个体以上, 不足数量的样品则全部鉴定统计, 属种鉴定主要综合参考已发表的分类学文献资料^[27-31] 及其引用文献。

为了分析特定放射虫组合与菲律宾海及其邻近海域上层水体和 中 层 水 体 的 环 境 参 数 之 间 的 相 关 性, 采 用 了 冗 余 分 析 (RDA) 方 法。首 先, 选 择 了 8 个 生 活 在 海 水 真 光 层 的 暖 水 种 作 为 响 应 变 量, 这 8 个 放 射 虫 组 合 在 样 品 总 放 射 虫 数 量 中 的 相 对 丰 度 达 到 25.1%, 分 别 是 *Dictyocoryne elegans/muelleri*、*Didymocyrtis tetrathalamus*、*Phortidium polycladum/pylonium*、*Tetrapyle* group、*Acanthodesmia vinculata* (*Giraffospyris angulate*)、*Amphispyris reticulata*、*Botryocyrtis scutum*、*Pterocanium praetextum praetextum*^[32] (图 2, 1-10)。其中 *Dictyocoryne elegans/muelleri* 包 含 *Dictyocoryne elegans* 和 *Dictyocoryne muelleri* 两 个 种, *Didymocyrtis tetrathalamus* 包 含 *Didymocyrtis tetrathalamus tetrathalamus* 和 *Didymocyrtis tetrathalamus coronatus* 两 个 亚 种, *Phortidium polycladum/pylonium* 则 是 *Phortidium polycladum* 和 *Phortidium pylonium* 的 组 合。除 此 之 外 是 *Acanthodesmia vinculata*, 在 这 里 包 含 *Acanthodesmia vinculata* 和 *Giraffospyris angulate* 两 个 属 种。*A. vinculata* 最 初 由 Müller^[33] 定 义, 但 Müller 对 于 *A. vinculata* 最 初 的 定 义 描 述 并 不 十 分 清 晰, Haeckel^[34] 对 于 *G. angulate* 的 描 述 也 不 够 完 整。后 续 Petrushevskaya^[35]、Renz^[36]、Takahashi and Honjo^[37] 和 Matsuzaki^[31] 等 均 主 张 将 *A. vinculata* 和 *G. angulate* 作 为 同 物 异 名 处 理, 并 沿 用 最 早 出 现 的 种 名 *A. vinculata*。在 本 次 研 究 中, 鉴 定 时 并 未 对 *A. vinculata* 和 *G. angulate* 两 者 加 以 区 分 统 计, 而 是 作 为 同 物 异 名 处 理, 并 沿 用 最 早 出 现 的 种 名 *A. vinculata*。上 层 水 体 (0~200 m) 的 环 境 因 子 为 不 同 水 层 (以 25 m 为 间 隔) 年 均 以 及 冬 季 和 夏 季 的 温 度、盐 度、硅 酸 盐、磷

酸盐、硝酸盐和溶解氧含量, 共在上层水体选取环境变量 162 个。其次, 中层水体 (1000~3000 m) 的环境变量水深间隔为 200 m, 只选用全年平均温度、盐度、硅酸盐、磷酸盐、硝酸盐和溶解氧含量数据, 共 66 个; 对应的响应变量则是生活在 1000~3000 m 水层中的 5 个放射虫冷水种 *Actinomma leptodermum*、*Lithelius minor*、*Lithelius nautiloides*、*Cornutella profunda* 和 *Cycladophora davisiana*^[38] (图 2, 11-15)。由于相关现代放射虫研究较为缺乏, 对于生活在 200~1000 m 水层的放射虫属种, 尚未有很好的诊断方法, 因此, 我们暂未在文章中对这一深度的放射虫进行分析和讨论。

以上所有环境变量的原始数据均来自 World Ocean Atlas (WOA) 2018, 其中, 温度和盐度数据是基于 1/4°×1/4° (纬度×经度) 分辨率的 1955—2017 年的平均值, 其余的环境数据是基于 1°×1°分辨率的 1900 年以来的年平均值, 并将这些环境数据插值到所有采样位置。由于数据库分辨率原因, 部分区域某些水深的数据缺失, 因此, 在分析中去掉了环境数据不完整的站位, 在上层水的分析中保留了 35 个站位, 在中层水的分析中仅保留位于菲律宾海的 21 个站位。统计分析之前, 用去趋势对应分析 (DCA) 来判断物种数据相对丰度的线性或单峰特征, 以此确定最合适的排序模型。根据 DCA 结果, 第一条 DCA 轴的长度分别是 0.202 和 0.481 (<3), 表明物种数据具有线性特征, RDA 是更适合本次研究的模型。在选择环境变量时, 使用 999 个无限制排列的蒙特卡罗检验来选择 *p* 值较低的环境变量作为解释变量, 同时保证其方差膨胀因子 (VIF) 小于 5。此步骤的目标是选择更重要且相关性较弱的变量。以上分析中使用的 DCA 和 RDA 均由 CANOCO 4.5 (<http://www.canoco.com>) 软件执行。

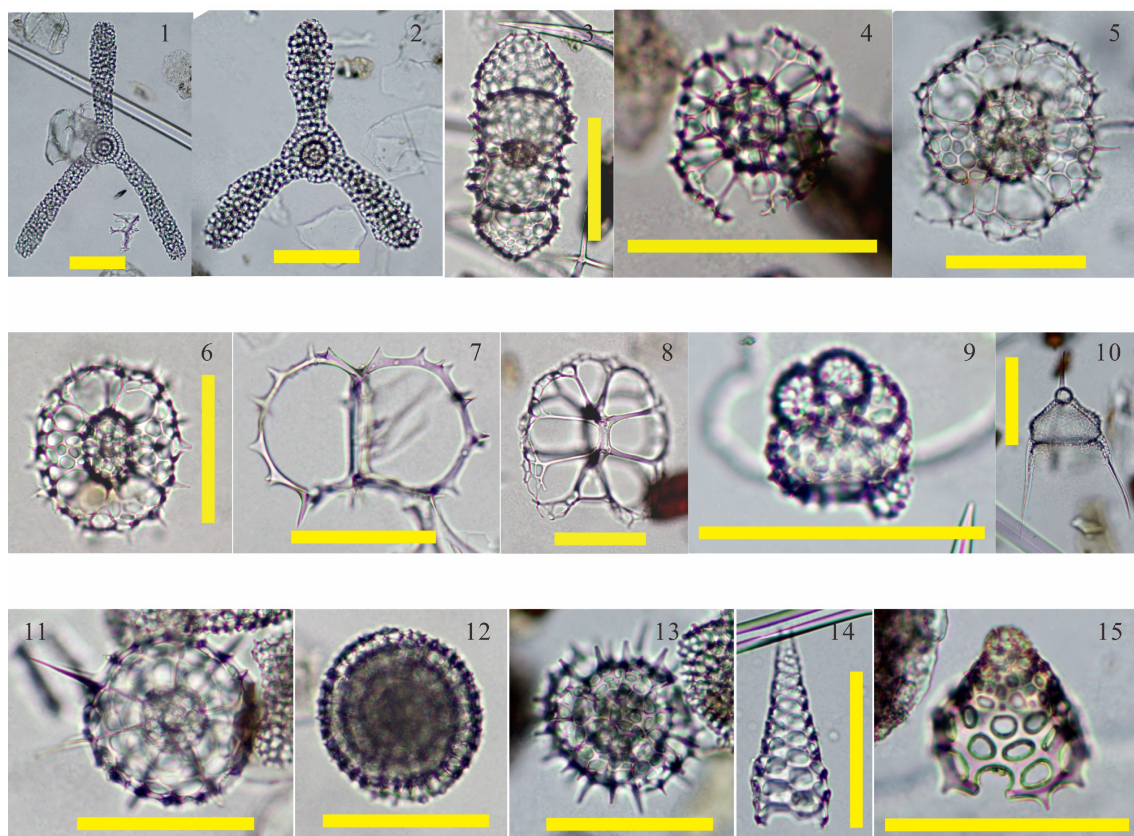


图2 研究区部分放射虫(比例尺为100 μm)

1. *Dictyocoryne elegans* (Ehrenberg) (站位号 29), 2. *Dictyocoryne muelleri* (Haeckel) (站位号 29), 3. *Didymocorytis tetrathalamus tetrathalamus* (Haeckel) (站位号 29), 4. *Phortidium pylonium* Zhang and Suzuki (站位号 27), 5. *Phortidium polycladum* Tan and Tchang (站位号 27), 6. *Tetrapyle* group (站位号 29), 7. *Acanthodesmia vinculata* (Müller) (站位号 27), 8. *Amphispyris reticulata* (Ehrenberg) (站位号 29), 9. *Botryocorytis scutum* (Harting) (站位号 29), 10. *Pterocanium praetextum praetextum* (Ehrenberg) (站位号 29), 11. *Actinomma leptodermum* (Jørgensen) (站位号 27), 12. *Lithelius minor* Jørgensen (站位号 27), 13. *Lithelius nautiloides* Popofsky (站位号 29), 14. *Cornutella profunda* Ehrenberg (站位号 29), 15. *Cycladophora davisiana* Ehrenberg (站位号 29)。

Fig.2 Some radiolarian species in the research area (Scale bars=100 μm)

3 结果

3.1 放射虫的群落组成

菲律宾海及其邻近海域表层沉积物中的放射虫种类丰富, 总共鉴定了 500 个种, 其中包含泡沫虫目 257 种, 罩笼虫目 214 种, 胶球虫目 29 种。放射虫三大类群(泡沫虫目、罩笼虫目和胶体虫目)在各个站位中的相对丰度, 如图 3 所示, 主要以泡沫虫目和罩笼虫目为主。冲绳海槽区域的站位均呈现出泡沫虫目占据绝对优势(55.23%~85.24%)、罩笼虫目的相对丰度较小(44.4%~11.99%)的特征。南海北部站位的罩笼虫目占比要略高于泡沫虫目, 其中泡沫虫目的相对丰度为 35.37%~55.13%, 罩笼虫目的相对丰度则达到 43.01%~65.87%。与冲绳海

槽和南海北部相比, 菲律宾海域的放射虫群落结构相对复杂, 其北部的四国海盆沉积区泡沫虫目占据较大优势, 但在中南部区域, 罩笼虫目和泡沫虫目优势交互出现, 该区域泡沫虫目相对丰度的变化幅度为 19.32%~86.53%, 罩笼虫目的相对丰度变化幅度也较大(12.03%~63.64%)。整体来看, 胶球虫目的总体占比非常少, 在南海北部的相对丰度最低(<5%), 在菲律宾海中部的 3 个站位相对丰度最高, 相对丰度数值超过 15%。

3.2 放射虫的丰度特征

菲律宾海及其临近海域表层沉积物中放射虫丰度分布如图 4 所示, 整个研究区域表层沉积物中保存的放射虫壳体丰度变化跨度较大, 每克沉积物干样中所含的放射虫壳体数量从几个到十几万个不等, 尤其是菲律宾海海区, 放射虫丰度值的变

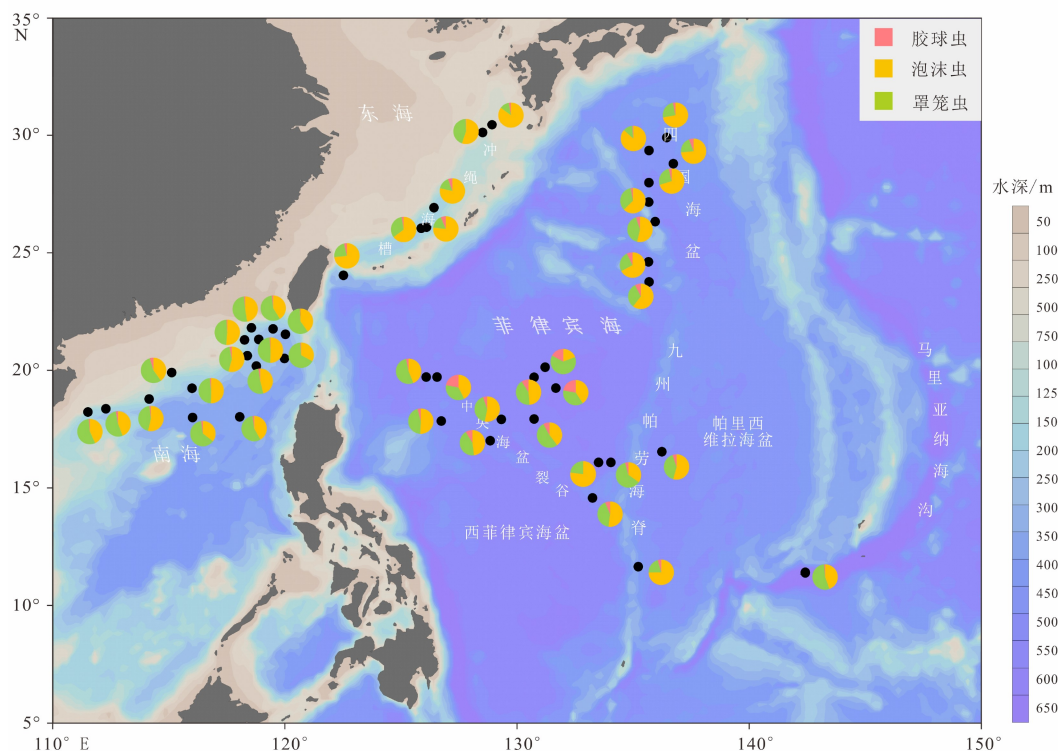


图 3 菲律宾海及其邻近海域表层沉积物中放射虫的三大类群占比分布

Fig.3 Relative abundances of three Order of radiolarians in surface sediments of the Philippine Sea and adjacent waters.

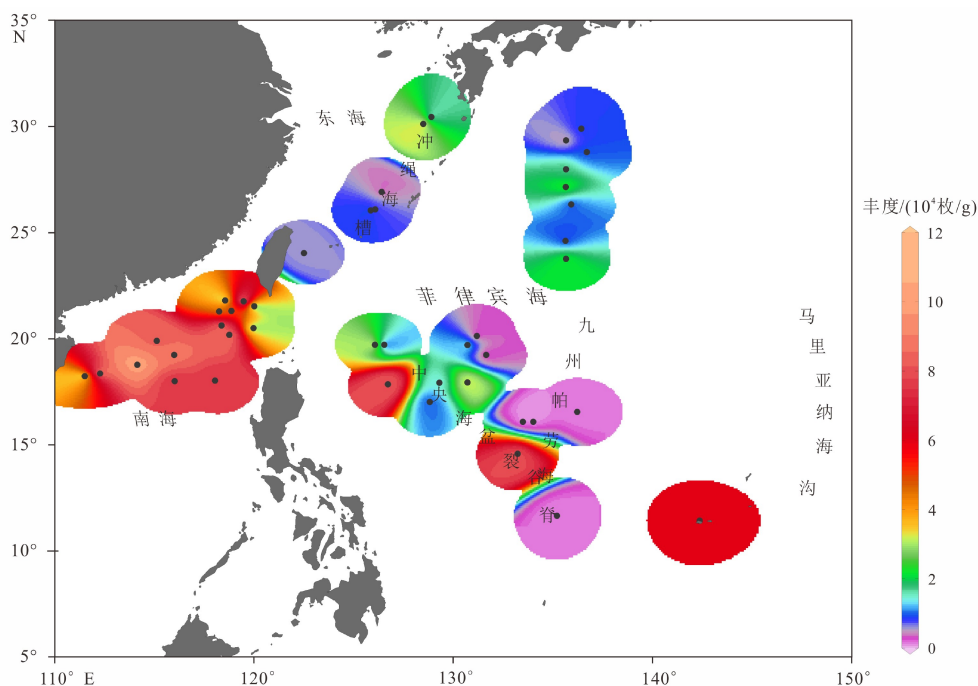


图 4 菲律宾海及其邻近海域表层沉积物中放射虫绝对丰度分布

使用 Ocean Data View (ODV) (<https://odv.awi.de/>) 绘制, 采用 VG 网格化算法。

Fig.4 Radiolarian absolute abundance in surface sediments of the Philippine Sea and adjacent waters

The map was drawn using VG grid method by Ocean Data View (ODV) (<https://odv.awi.de/>).

化幅度为 9~81801 枚/g; 冲绳海槽和南海海域放射虫丰度值的变化范围分别为 3045~37923 枚/g 和 7052~115522 枚/g。如图 4 所示, 南海北部放射虫

丰度普遍较高, 冲绳海槽放射虫丰度相对整体较低, 菲律宾海北部海底表层沉积物中的放射虫丰度与冲绳海槽放射虫丰度分布特征相似, 但菲律宾海

中南部放射虫丰度变化幅度较大。

3.3 RDA 分析

根据对放射虫属种相对含量和研究区域上层海水(0~200 m)环境变量的 RDA 分析,结果显示前两个轴可以解释物种数据的 38.8%(RDA 1 占 32.5%, RDA 2 占 6.3%),同时解释了 91.1%的物种与环境变量的关系(表 2)。200 m 年均溶解氧(Oxy_a200m), 75 m 冬季平均硅酸盐(Si_w75m)和 200 m 夏季平均磷酸盐(Pho_s200m)是最重要的解释变量。暖水种和环境变量的排序如图 5a 所示, *P. polycladum/pylonium*、*A. vinculata*、*A. reticulata*、*B. scutum* 和 *P. praetextum praetextum* 与环境变量 Si_w75m 和 Pho_s200m 具有显著正相关; *Tetrapyle* group 和 *D. tetrathalamus* 与温度变量 Tem_s125m 呈明显的正相关; *D. elegans/muelleri* 则与环境变量 Tem_s125m 和 Sal_w75m 具有相关性;对于环境变量 Oxy_a200m 来说,响应变量中 *P. polycladum/pylonium* 与它正相关, *A. vinculata* 未表现出明显相关性,其余物种均与 Oxy_a200m 呈负相关关系。根据暖水种样本数据和环境变量的排序图(图 5b), 冲绳海槽海域暖水种的分布

表 2 菲律宾海放射虫组合和环境变量的 RDA 分析结果
Table 2 RDA results of radiolarian assemblage and environmental variables in the Philippine Sea (I for warm species-upper environments, II for cold species-intermediate environments)

类型	参数	轴1	轴2	轴3	轴4	总方差
I	特征值	0.325	0.063	0.03	0.006	1
	物种-环境相关性	0.676	0.686	0.614	0.489	
	变量累积百分比					
	物种数据	32.5	38.8	41.8	42.4	
	物种-环境关系	76.3	91.1	98.2	99.5	
	所有特征值总和					1
	所有典范特征值总和					0.426
	特征值	0.268	0.113	0.052	0	1
	物种-环境相关性	0.87	0.554	0.455	0.271	
	变量累积百分比					
II	物种数据	26.8	38.1	43.2	43.3	
	物种-环境关系	61.9	88	99.9	100	
	所有特征值总和					1
	所有典范特征值总和					0.433
	特征值					

注: I 暖水种-上层水环境因子, II 冷水种-中深层水环境因子。

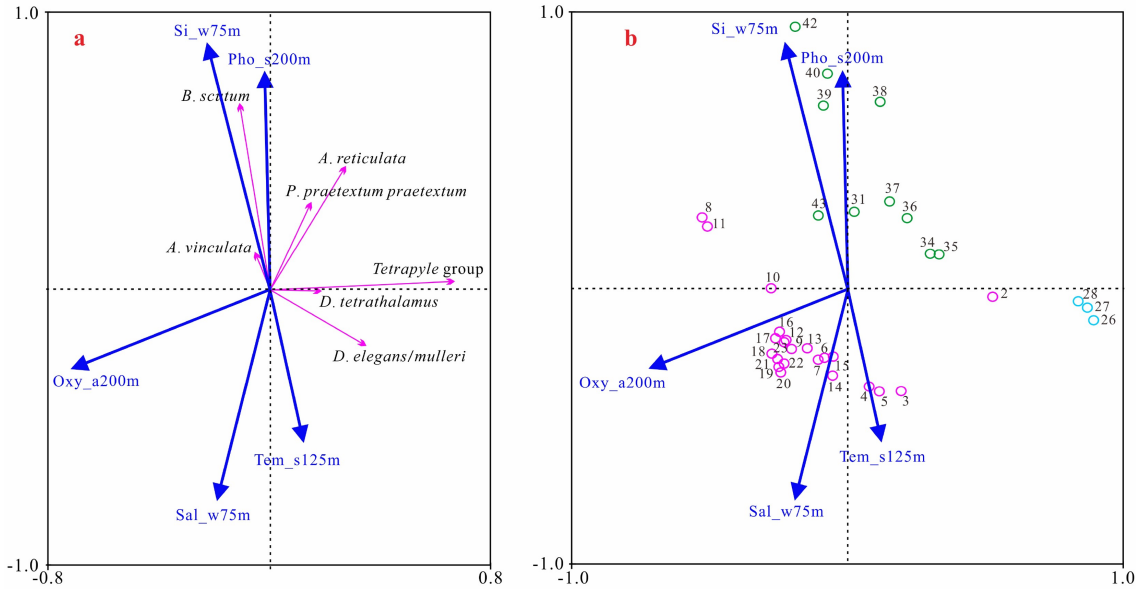


图 5 放射虫暖水种和上层水环境变量的 RDA 排序图

a. 物种和环境变量排序图, b. 样品和环境变量排序图。蓝色圆圈代表冲绳海槽站位, 绿色圆圈代表南海站位, 洋红色代表菲律宾海站位。Oxy_a200m 为 200 m 年均溶解氧含量, Si_w75m 为 75 m 冬季平均硅酸盐含量, Pho_s200m 为 200 m 夏季平均磷酸盐含量, Tem_s125m 为 125 m 夏季平均温度, Sal_w75m 为 75 m 冬季平均盐度。

Fig.5 The sequence diagram of the RDA of warm water radiolarian species and upper water environmental variables

a. Sequence diagram of species and environmental variables, b. Sequence diagram of samples and environmental variables. The blue circle represents the station of Okinawa Trough, the green circle represents the station of South China Sea, and the magenta represents the station of Philippine Sea. Oxy_a200m is the annual mean dissolved oxygen content at 200 m, Si_w75m is the winter mean silicate content at 75 m, Pho_s200m is the summer mean phosphate content at 200 m, Tem_s125m is the summer mean temperature at 125 m, and Sal_w75m is the winter mean salinity at 75 m.

主要受 Tem_s125m 的影响控制; 南海北部研究区暖水种的分布与营养盐 Si_w75m 和 Pho_s200m 呈正相关、与其余 3 个环境变量(Oxy_a200m 、 Tem_s125m 和 Sal_w75m)呈负相关; 菲律宾海暖水种在菲律宾海北部的分布与 75 m 冬季盐度和 200 m 年均溶解氧含量显著正相关, 但在菲律宾海中南部的分布与环境变量关系相对较为复杂, 有一些站位(3—7、9)与温度和盐度变量密切相关, 有些站位(8 和 11)与硅酸盐、磷酸盐和溶解氧含量密切相关(图 5b)。

对冷水属种相对含量与其生活的中深层水体(1000~3000 m)中不同层深的环境变量的 RDA 分析, 结果显示前两轴可以解释物种数据的 38.1% (RDA 1 占 26.8%, RDA 2 占 11.3%), 同时解释了 88.0% 的物种与环境变量的关系(表 2)。在 5 个冷水种和环境变量的排序图中, $L. minor$ 和 $C. davisiana$ 与 3000 m 温度和 2000 m 溶解氧含量呈负相关, 与 2200 m 硝酸盐和磷酸盐呈显著正相关; $L. nautiloides$ 与 2200 m 硝酸盐和磷酸盐以及 2000 m 溶解氧含量均呈正相关, 与 1000 m 硅酸盐浓度呈负相关关系; $C. profunda$ 和 $C. davisiana$ 与 1000 m 硅酸盐浓度具有正相关关系(图 6a)。根据菲律宾海冷水种样本数据和环境变量的排序图(图 6b), 菲律宾海可以分为西北区域和南部区域。排序图下半部分的点均位于菲律宾海的西北区域, 且都与 1000 m 硅酸盐浓度具有正相关关系, 其中西北区域最北边的 3 个站位(21—23)还受营养盐相关变量影响, 与 Pho_2200m 和 Nit_2200m 的值正相关, 剩余站位受 Tem_3000m 影响较

大。位于排序图上部分的是菲律宾海中南部站点, 其分布与 2000 m 溶解氧含量、3000 m 温度、2200 m 硝酸盐和磷酸盐呈正相关关系, 与 1000 m 溶解氧含量呈显著负相关关系。

4 讨论

4.1 放射虫群落结构和丰度的区域分布及其影响因素

依据原生动物高阶分类现状^[7, 39], 将研究区域海底沉积物中的放射虫即多囊虫类放射虫分为 3 个目: 罩笼虫目、泡沫虫目和胶体虫目, 并据此进行群落结构上的区域分析。目前从多囊虫类放射虫目阶类群结构的角度来进行分析的文章报道虽不多, 但对其环境指示意义已有较好的认知。胶体虫的生活水深因其具有共生藻类而局限于真光层水体中^[32]。Zhang 等^[40]对南海冬春季表层水体中的多囊虫类放射虫进行研究发现: 当水体层化强、低营养盐时, 胶体虫在多囊虫类放射虫中的占比会增高; 反之, 当水体混合增强、高营养盐时胶体虫目的占比会降低, 罩笼虫目的占比则会升高。在菲律宾海、南海北部和冲绳海槽的海底表层沉积物中, 多囊虫类放射虫的三大类相对丰度分布(图 3)具有明显的区域性分布差异。南海北部罩笼虫目占据绝对优势, 推测南海北部研究海域的营养盐可能更为丰富; 胶体虫目在菲律宾海的中部占比较高, 表明

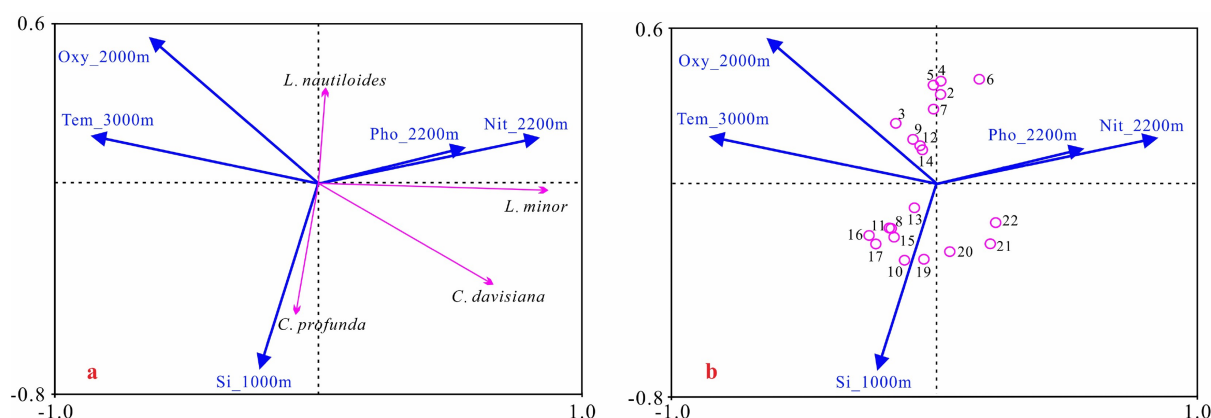


图 6 典型冷水种和中层水环境变量 RDA 分析排序图

a. 物种和环境变量排序图, b. 样品和环境变量排序图。Oxy_2000m 为 2000 m 年平均溶解氧含量, Tem_3000m 为 3000 m 年平均温度, Si_1000m 为 1000 m 年平均硅酸盐含量, Pho_2200m 为 2200 m 年平均磷酸盐含量, Nit_2200m 为 2200 m 年平均硝酸盐含量。

Fig. 6 RDA sequence diagram of typical cold water species and intermediate water environmental variables

a. sequence diagram of species and environmental variables, b. sequence diagram of samples and environmental variables. Oxy_2000m is the annual mean dissolved oxygen content at 2000 m, Tem_3000m is the annual mean temperature at 3000 m, Si_1000m is the anneal mean silicate content at 1000 m, Pho_2200m is the anneal mean phosphate content at 2200 m, and Nit_2200m is the anneal mean nitrate at 2200 m.

菲律宾海中部可能属于低贫营养盐区,这与最近关于西菲律宾海末次冰盛期胶体虫目相对丰度变化与大型硅藻的勃发有较好对应关系的研究结果^[11]相一致;在冲绳海槽和菲律宾海北部,占据绝对优势的泡沫虫目,可能反映了该研究区域对罩笼虫目不利的生态环境或沉积环境。这种根据群落结构得出的推论,得到了多囊虫类放射虫的丰度数据的支持,如图3所示,冲绳海槽和菲律宾海北部放射虫丰度较低,南海北部放射虫却极为丰富。

尽管本文在冲绳海槽选取的研究站点不多,但从跨区域对比分析的角度,已具较好的代表性。董智等^[17]针对冲绳海槽北部、中部和南部表层沉积物中放射虫属种进行了详细研究,其样品中放射虫的丰度统计均低于5000枚/g,但本文分析的冲绳海槽表层沉积物中放射虫的丰度值却相对偏高,为3000~38000枚/g,这种数值上的差异可能与样品处理制片方法的不同有关。这也说明了采用同一样品处理制片方法,对菲律宾海及其邻近海域(南海北部和冲绳海槽)进行对比分析的必要性。

冲绳海槽位于菲律宾海的西北部,该海域表层沉积物中的放射虫已有较多的研究报道^[17,41-43]。谭智源和陈木宏^[29]认为冲绳海槽放射虫沉积分布特征主要受环流系统水动力条件影响控制。有研究认为,受地形影响,黑潮可能会携带台湾东部以及东北部的沉积物进入冲绳海槽,造成台湾东北部区域较高的沉积速率^[44]。该区域沉积环境同样不利于放射虫壳体的富集,出现放射虫丰度相对较低的现象(图4)。在冲绳海槽北端即九州西南区的两个站位放射虫丰度相对较高(图4),这与董智等^[17]的最北端站位放射虫丰度值偏高相对应,可能与九州西南海域一年中均存在营养盐的高值中心有关^[45]。虽然尚未找到有关冲绳海槽海域上覆水体中现生放射虫的研究报道,但该研究区域海底表层沉积物中胶体虫占比不高,表明上层水体中营养盐不会很低,但该区域沉积物中总的放射虫壳体丰度也普遍较低,其中泡沫虫目还占据绝对优势,有研究指出泡沫虫骨骼相较罩笼虫骨骼溶解较慢^[46]。因此,我们推测冲绳海槽的海底沉积环境可能不利于罩笼虫目放射虫壳体的埋藏富集。此外,我们分析了一些典型优势属种与上层水体中不同层深的环境因子的关系,RDA分析结果显示放射虫暖水种在冲绳海槽的分布主要受125 m夏季温度的影响控制(图5b),而125 m正属于黑潮次表层热带水的深度范围,具有盐度最高、水温较高的水体性质^[45]。同时,不同于黑潮表层水的影响范围局限在冲绳海槽海域,黑

潮次表层水在夏季可以入侵至东海陆架50 m等深线处^[45],这说明黑潮次表层水在夏季拥有较高的强度和较大的影响范围。数据RDA分析结果进一步表明,放射虫典型暖水种在冲绳海槽的分布主要是受到了夏季黑潮次表层水的强度控制。

南海北部通过吕宋海峡与西菲律宾海进行水体交换,有研究指出南海北部真光层中营养盐浓度高于西菲律宾海,而且颗石藻丰度也显著高于西菲律宾海^[47]。因此,南海北部表层沉积物中放射虫丰度显著高于菲律宾海(图4),主要原因可能是南海北部营养盐浓度要高于菲律宾海,而高浓度的营养盐给放射虫的大量繁殖提供了充足的营养物^[48]。Zhang等^[15]发现南海北部上层水体中现代放射虫高丰度出现在0~75 m或75~150 m水体中,叶绿素最大值在75 m的深度。放射虫真光层暖水种与0~200 m水体中不同层深的162个环境因子的RDA分析结果表明,放射虫典型暖水种在南海北部海域的分布与营养盐(冬季75 m硅酸盐和夏季200 m磷酸盐)密切相关,其中冬季75 m硅酸盐浓度的贡献最大(图5b)。Zhang等^[40]研究发现南海表层水体中冬季活动放射虫丰度显著高于春季,这与冬季强的水体混合导致的高营养盐有关。南海北部研究区域海底表层沉积物中放射虫的高丰度,主要是因为上层水体中活体放射虫的高生物量导致的,这与该海域罩笼虫高占比所反映出来的高营养盐的结论相一致。Takahashi^[48]认为罩笼虫骨骼的硅含量是多囊虫类放射虫中最高的,达到98%,而泡沫虫/胶体虫骨骼的硅含量为91%。因此,我们推测研究区水体中高浓度的硅酸盐可能加快了罩笼虫的发育繁殖,使其在多囊虫类放射虫中的占比升高。因此,南海北部海底沉积物中放射虫的丰度分布对该区域冬季75 m硅酸盐变化有很好的响应。除了冬季硅酸盐以外,南海北部的真光层暖水种分布还与夏季200 m磷酸盐浓度呈现较好的正相关关系。袁梁英和戴民汉^[49]研究发现南海北部上层磷酸盐的分布存在表层低、底层高的特征。冬季上层磷酸盐因水体混合较强,不存在明显的浓度跃层,而夏季上层磷酸盐出现显著的浓度跃层且跃层以下浓度急剧增大。因而,较高浓度的夏季200 m磷酸盐对放射虫暖水种在南海北部上层水体中的分布起着重要的影响作用。

菲律宾海区放射虫三大类分布情况复杂(图3),同时放射虫丰度也在该区域呈现出相对多样的分布(图4),这可能与菲律宾海复杂的海洋生态环境和沉积环境密切相关。从图4可以看出,与冲绳海

槽和南海北部不同, 菲律宾海海底表层沉积物中放射虫丰度在局部区域变化虽然比较大, 但在大部分站位丰度都较低, 这可能是因为菲律宾海属于贫营养海区^[50-51], 有研究认为南海表层叶绿素水平几乎是西菲律宾海的两倍^[52]。菲律宾海个别站位表层沉积物中的放射虫丰度具有较高的分布, 可能与局部区域环境有关。如位于马里亚纳海沟南部的站位 1 和九州帕劳海脊西侧的站位 3, 在这些局部区域曾发现大量硅藻沉积形成的硅藻软泥或硅藻席^[11, 53]。此外, 放射虫暖水种分布与上层水体中不同层深环境因子的 RDA 分析结果表明, 次表层水的环境因子起着决定性的控制作用, 其中最为显著的是冬季 75 m 盐度、年均 200 m 溶解氧含量和夏季 125 m 温度(图 5)。放射虫中深层冷水种分布与中深层水体中不同层深环境因子的 RDA 分析结果则表明, 菲律宾海北部研究站位中冷水种的分布主要受 1000 m 硅酸盐浓度的影响控制(图 6b), 这可能与富含硅酸盐的北太平洋中深层水体南下进入菲律宾海^[26, 54]有关。放射虫中深层冷水种在菲律宾海中南部的分布则主要与硅酸盐浓度呈显著负相关, 与溶解氧和营养盐则呈现明显的正相关, 比如 2000 m 的溶解氧和 2200 m 的磷酸盐和硝酸盐(图 6b)。表明该区域放射虫冷水种的分布可能是受到一支富含溶解氧、高磷酸盐、高硝酸盐和低硅酸盐的中深层水团(约 1000~2500 m)的影响。有研究发现深层 3000~4000 m 有一支高溶解氧低硅酸盐性质的绕极深层水从菲律宾海南端进入菲律宾海^[26], 在这之后, 一部分深层水从菲律宾海北部流出, 另一部分可能向上流入菲律宾海的中间层(<3000 m)^[55]。这给我们的结论提供了合理的佐证, 即具有高溶解氧低硅酸盐性质的绕极深层水由南端进入菲律宾海后, 一部分水体向上进入菲律宾海中层水, 影响菲律宾海中南部区域放射虫中深层冷水种的分布。

4.2 放射虫典型属种分布与上层水和中深层水的环境因子关系

多囊虫类放射虫有些属种具有特定的生活习性, 尤其是具有明显的垂直深度分带现象, 被认为是良好的古水团和古海洋变化重建的替代性指标^[56-59]。近年来, 结合 DAPI 染色识别共生藻的手段, 对生活于真光层的属种已经有很好的认识^[32]。同时, 对生活于中深层水的几个冷水种也有很好的确认^[38, 59]。目前, 学者们意识到生活于弱光带、无光带的中层水和深层水的属种的具体分布深度很难确定, 因为传统上利用虎红染色识别细胞质, 以区分活体和死

壳的方法已经受到了质疑^[60]。真实情况是, 一些生活在上层水的属种死亡后沉降到中层水, 甚至是深层水中, 其死亡之后还未来得及被降解完全的细胞质, 会被虎红试剂染色显示, 但该水层已不是它们的实际生活水深。此外, 多囊虫类放射虫尽管有相当一部分属种也生活于海水表层^[40], 但主要还是生活在上层水的叶绿素最大层^[15], 因此只是将海底表层沉积物中放射虫组合与海水最表层环境因子进行相关关系的分析还是不够的, 至少会影响其所得结论在应用上的可信度。本文尝试将上层水和中深层水的环境因子就不同水深间隔加以划分, 旨在进一步解析出影响生活于其中的典型属种分布的主要控制因子, 为古海洋研究提供更详细的参考资料。

本文选取的 8 个含量较高的放射虫属种均是热带亚热带暖水种^[38, 61], 其中 *Tetrapyle* group 和 *D. tetrathalamus* 被视为研究北太平洋亚热带环流的重要标志种^[21]。考虑到 *Tetrapyle* 这个属的种在公开发表的文献中同物异名现象较为严重^[27], 同时该属的种间生态意义差异尚未见报道, 因此我们将其作为一个具有共生藻、生活于上层水的暖水种组合^[32]。*Tetrapyle* group 在热带和亚热带海洋沉积物中含量较高, 是一个重要的中低纬度优势种^[62]。有研究发现该属种之所以会在热带区域有较大的相对丰度, 可能是因为其较短的生长周期(<1 周), 与营养盐高低无关^[61]。Matsuzaki 等^[63]认为 *Tetrapyle* group 可以作为黑潮暖流的指示种。黑潮具有高温、高盐、低营养盐的水体性质。我们的 RDA 分析结果显示 *Tetrapyle* group 的分布状况与上层水中营养盐环境变量相关性很小(图 5a), 主要和温度呈正相关关系。同样, *D. tetrathalamus* 与上层水中营养环境变化相关性也很小, 该种也被用于指示黑潮暖流^[16]。在南海, *D. tetrathalamus* 在上表层 0~25 m 含量较高^[2]。此外, 能够在黑潮这种低营养物水体中保持较丰富的 *Tetrapyle* group 和 *D. tetrathalamus*, 可能是因为它们自身具有的共生藻使其降低了对营养盐的需求, 生活环境反而与温度关系更为密切。RDA 排序图上显示 *Tetrapyle* group、*D. tetrathalamus* 和 *D. elegans/muelleri* 与 125 m 夏季温度具有正相关关系。此外, 作为西太平洋重要的表层暖水种之一, *D. elegans/muelleri* 的分布也与黑潮暖流的影响密切相关^[14]。在前一小节中, 我们有详细讨论, 环境变量 125 m 的夏季温度与夏季黑潮次表层水密切相关, 也就是说, 夏季黑潮次表层水对 *Tetrapyle* group、*D. tetrathalamus* 和 *D. elegans/muelleri* 有明显的控制作用, 这进一步证实了它们可被用于黑潮暖流指示种

的可信度,且表明它们实际上指示的主要是黑潮次表层水变化。如图 5a 所示,RDA 分析结果还显示 *B. scutum*、*A. vinculata*、*P. praetextum praetextum* 和 *A. reticulata* 与营养盐环境变量 75 m 冬季硅酸盐和 200 m 夏季磷酸盐呈显著正相关。有研究发现在南海现代水体中 *B. scutum* 和 *A. vinculata*(=*G. angulate*) 对冷涡(上升流)有很好的响应,推测它们可作为上升流的指示种^[45]。这与我们的研究结果一致,在上升流发育区,上层水中营养盐会大量增加,与营养盐具有明显正相关的属种也会大量发育繁殖。

中深层水的环境变量与 5 个典型冷水种的分布关系,受研究海域水深限制,只分析了菲律宾海的样品数据。目前,有关菲律宾海中深层水(1000~3000 m)研究的报道相对较少。作为西太平洋的一部分,菲律宾海深层水(>3000 m)被认为会受到亚极地中深层水的影响,由亚热带环流携带过来的高硅酸盐水体会从东边进入菲律宾海,沿着北边界向西延伸^[26]。Matsuzaki 等^[38]认为 *C. davisiana* 在北太平洋亚热带地区主要生活在太平洋中层水(600~800 m)之下,在 1000 m 以深的水体中较为丰富,与低温有关。在菲律宾海,*C. davisiana* 与 1000 m 硅酸盐和 2200 m 硝酸盐和磷酸盐具有较好的正相关关系,与 3000 m 温度和 2000 m 溶解氧呈显著负相关关系(图 6a)。*C. profunda* 在北太平洋生活深度超过 500 m^[64],在中纬度西北太平洋被认为与低溶解氧含量的中深层水有关^[37],RDA 分析结果进一步证实了这一点,即 *C. profunda* 与 1000 m 硅酸盐呈显著正相关关系,与 2000 m 溶解氧含量呈负相关关系(图 6a)。*L. minor* 与 2200 m 硝酸盐和磷酸盐呈明显的正相关关系,且与 *C. davisiana* 相似,也与 2000 m 溶解氧含量和 3000 m 温度呈显著负相关关系(图 6a),可能反映了两者的生活习性,即都喜好低溶解氧和低温环境。*L. nautilodes* 则与 2000 m 溶解氧和 2200 m 硝酸盐和磷酸盐都具有较好的正相关关系,与 1000 m 硅酸盐浓度呈显著负相关关系(图 6a),表明其在菲律宾海可能喜好低硅酸盐的中深层水。根据 RDA 的统计分析结果,我们认为 *C. davisiana* 和 *C. profunda* 在菲律宾海可能主要受北太平洋中深层水带来的低温、低溶解氧和高硅酸盐影响。*L. nautilodes* 的生活习性则正好相反,主要与中深层水的高溶解氧、低硅酸盐和相对较高温度的水团性质有关,这支水团可能是来源于具有高溶解氧、低硅酸盐性质的绕极深层水向上对于菲律宾海中层水的补充^[55]。

此外,关于放射虫不同属种准确的生活深度,

迄今为止还没有很好的解答。Zhang 等^[32]通过 DAPI 染色和荧光分析手段,识别出具有共生藻的放射虫属种,并据此提出这些属种的生活深度限于真光层水体中。Matsuzaki 等^[38]根据虎红染色识别活体的方法,来对放射虫进行生活深度划分。正如前面所提及的,放射虫个体在死亡沉降过程中其细胞质部分不会迅速被降解完全,因此通过虎红染色细胞质来识别活体的方法得到的未必是其真实的生活深度。然而,基于以上 RDA 统计分析的结果,即同一个种与不同深度水层的环境变量都呈现出较好的相关关系,从另外一个视角反映了它们的生活深度范围。如 *B. scutum*、*A. vinculata*、*P. praetextum praetextum* 和 *A. reticulata* 主要与 75 m 冬季硅酸盐和 200 m 夏季磷酸盐呈显著正相关,由此推测 *B. scutum*、*A. vinculata*、*P. praetextum praetextum* 和 *A. reticulata* 主要生活在次表层水体,水深范围大致为 75~200 m。*Tetrapyle* group、*D. tetrathalamus* 和 *D. elegans/muelleri* 主要与 125 m 夏季温度呈正相关关系,推测这 3 个属种的生活水深与 125 m 的水层有关。同理,*C. davisiana* 与 1000 m 硅酸盐和 2200 m 硝酸盐和磷酸盐具有较好的正相关关系,推测 *C. davisiana* 主要生活于 1000~2200 m 的水层,*C. profunda* 与 1000 m 硅酸盐呈显著正相关关系,推测 *C. profunda* 主要生活于 1000 m 左右的水深范围。*L. minor* 和 *L. nautilodes* 和 2200 m 硝酸盐和磷酸盐具有较好的正相关关系,其中 *L. nautilodes* 还与 2000 m 溶解氧呈正相关关系,推测 *L. minor* 和 *L. nautilodes* 主要与水深 2000 m 左右的水层有关。这与 Matsuzaki 等^[38]将 *C. davisiana*、*L. nautilodes*、*L. minor* 划分为深水组合(2000~3000 m),*C. profunda* 是中深层水属种(1000~2000 m)相符合。

5 结论

(1)在菲律宾海、南海北部和冲绳海槽的海底表层沉积物中多囊虫类放射虫的群落结构和丰度具有明显的区域性差异:南海北部研究区域表层沉积物中放射虫丰度普遍较高,可能与该区域放射虫的高生物量有关,这与该区域罩笼虫目高占比所反映出来的高营养盐的结论相呼应;冲绳海槽表层沉积物中放射虫丰度相对较低,而且泡沫虫目占据绝对优势,推测冲绳海槽的海底沉积环境可能不利于放射虫壳体的埋藏富集;菲律宾海海底表层沉积物中放射虫群落结构和丰度局部区域变化都比较大,反映出菲律宾海更为复杂的区域生态环境或沉积环境。

(2)研究发现,放射虫典型暖水种在冲绳海槽的分布主要受 125 m 夏季温度的影响控制,而 125 m 正属于黑潮次表层热带水的深度范围,表明放射虫典型暖水种在冲绳海槽的分布主要是受到了夏季黑潮次表层水的强度控制。典型暖水种在南海北部的分布与该区域 75 m 冬季硅酸盐呈显著的正相关关系,推测高浓度的硅酸盐有利于加快罩笼虫的发育繁殖,从而使其在该海域多囊虫类放射虫中占比升高。菲律宾海北部冷水种的分布主要受 1000 m 硅酸盐浓度的影响控制,这可能与富含硅酸盐的北太平洋中深层水体南下进入菲律宾海有关;放射虫中深层冷水种在菲律宾海中南部的分布则主要与硅酸盐浓度呈显著负相关,与溶解氧和营养盐则呈现明显的正相关,可能是由于具有高溶解氧低硅酸盐性质的绕极深层水由南端进入菲律宾海后,一部分水体向上进入菲律宾海中层水,从而影响放射虫冷水种的分布。

(3)RDA 分析发现夏季黑潮次表层水对 *Tetrapyle* group、*D. tetrathalamus* 和 *D. elegans/muelleri* 有着明显的影响控制作用,表明它们在研究海域主要指示黑潮次表层水的变化;*B. scutum*、*A. vinculata*、*P. praetextum praetextum* 和 *A. reticulata* 与营养盐环境变量具有明显的正相关关系,证实它们可用来指示水体营养盐的变化;在菲律宾海,*C. davisiana* 和 *C. profunda* 的分布主要受北太平洋中深层水带来的低温、低溶解氧和高硅酸盐海水影响;*L. minor* 也喜好低溶解氧和低温的中深层水;*L. nautilodes* 的分布更多地受到高溶解氧低硅酸盐性质的绕极深层水的影响。

致谢: 感谢中科院海洋研究所常凤鸣教授和上海海洋大学罗敏助理研究员提供相关样品。

参考文献 (References)

- [1] Gallinari M, Ragueneau O, Corrin L, et al. The importance of water column processes on the dissolution properties of biogenic silica in deep-sea sediments I. Solubility [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(15): 2701-2717.
- [2] Hu W F, Zhang L L, Chen M H, et al. Distribution of living radiolarians in spring in the South China Sea and its responses to environmental factors [J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(2): 270-285.
- [3] Itaki T. Depth-related radiolarian assemblage in the water-column and surface sediments of the Japan Sea [J]. *Marine Micropaleontology*, 2003, 47(3-4): 253-270.
- [4] Kamikuri S I, Moore T C. Reconstruction of oceanic circulation patterns in the tropical Pacific across the early/middle Miocene boundary as inferred from radiolarian assemblages [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 487: 136-148.
- [5] Sandoval M I, Boltovskoy D, Baxter A T, et al. Neogene paleoceanography of the eastern equatorial Pacific based on the radiolarian record of IODP drill sites off Costa Rica [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(3): 889-906.
- [6] 陈木宏, 张兰兰, 张丽丽, 等. 南海表层沉积物中放射虫多样性与丰度的分布与环境[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2008, 33(4): 431-442. [CHEN Muhong, ZHANG Lanlan, ZHANG Lili, et al. Distributions of radiolarian diversity and abundance in surface sediments of the South China Sea and their environmental implications [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(4): 431-442.]
- [7] 张杰, 张兰兰, 陈木宏, 等. 现代放射虫的高阶分类现状及其生态学意义[J]. *微体古生物学报*, 2020, 37(1): 82-98. [ZHANG Jie, ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, et al. The higher level classification of modern radiolarians and their ecological significance [J]. *Acta Micropaleontologica Sinica*, 2020, 37(1): 82-98.]
- [8] Hu D X, Wu L X, Cai W J, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate [J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 299-308.
- [9] Yan X H, Ho C R, Zheng Q N, et al. Temperature and size variabilities of the Western Pacific Warm Pool [J]. *Science*, 1992, 258(5088): 1643-1645.
- [10] Palmer M R, Pearson P N. A 23, 000-year record of surface water pH and PCO₂ in the western equatorial Pacific Ocean [J]. *Science*, 2003, 300(5618): 480-482.
- [11] 张兰兰, 胡邦琦, 邱卓雅, 等. 西菲律宾海硅藻席沉积中的多囊虫类放射虫记录及其环境意义[J]. *地球科学*, 2020. [ZHANG Lanlan, HU Bangqi, QIU Zhuoya, et al. Records of polycystine Radiolaria in the diatom mats sediments from the West Philippine Sea and their environmental significance [J]. *Earth Science*, 2020.]
- [12] 李铁刚, 熊志方, 翟滨. 低纬度西太平洋硅藻席沉积与碳循环[M]. 北京: 海洋出版社. 2015. [LI Tiegang, XIONG Zhifang, ZHAI Bin. *Laminated Diatom Mat Deposits from the Low-Latitude Western Pacific Linked to Global Carbon Cycle*[M]. Beijing: Ocean Press, 2015.]
- [13] Chen M H, Tan Z Y. Radiolarian distribution in surface sediments of the northern and central South China Sea [J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32(1-2): 173-194.
- [14] Matsuzaki K M, Itaki T, Kimoto K. Vertical distribution of polycystine radiolarians in the northern East China Sea [J]. *Marine Micropaleontology*, 2016, 125: 66-84.
- [15] Zhang L L, Chen M H, Xiang R, et al. Distribution of polycystine radiolarians in the northern South China Sea in September 2005 [J]. *Marine Micropaleontology*, 2009, 70(1-2): 20-38.
- [16] Chang F M, Zhuang L H, Li T G, et al. Radiolarian fauna in surface sediments of the northeastern East China Sea [J]. *Marine Micropaleontology*, 2003, 48(3-4): 169-204.
- [17] 董智, 石学法, 邹欣庆, 等. 冲绳海槽表层沉积物放射虫属种空间分

- 布特征及其影响因素[J]. 地学前缘, 2020, 27(6): 300-312. [DONG Zhi, SHI Xuefa, ZOU Xinqing, et al. Spatial distribution characteristics of radiolarian species in surface sediments from the Okinawa Trough and its influence factors [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(6): 300-312.]
- [18] Liu L, Zhang Q, Chen M H, et al. Radiolarian biogeography in surface sediments of the Northwest Pacific marginal seas [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(3): 517-530.
- [19] Qu H X, Wang J B, Xu Y, et al. Radiolarian assemblage as an indicator of environmental conditions in the marginal seas of the Western North Pacific [J]. Marine Micropaleontology, 2020, 157: 101859.
- [20] Hernández-Almeida I, Cortese G, Yu P S, et al. Environmental determinants of radiolarian assemblages in the western Pacific since the last deglaciation [J]. Paleogeography and Paleoclimatology, 2017, 32(8): 830-847.
- [21] Matsuzaki K M, Itaki T. New northwest Pacific radiolarian data as a tool to estimate past sea surface and intermediate water temperatures [J]. Paleogeography and Paleoclimatology, 2017, 32(3): 218-245.
- [22] Hsueh Y. The Kuroshio in the East China Sea [J]. Journal of Marine Systems, 2000, 24(1-2): 131-139.
- [23] Matsuno T, Lee J S, Yanao S. The Kuroshio exchange with the South and East China Seas [J]. Ocean Science, 2009, 5(3): 303-312.
- [24] 张弦, 俞慕耕, 江伟, 等. 菲律宾海及其邻近海区的水文特征[J]. 海洋通报, 2004(1): 8-14. [ZHANG Xuan, YU Mugeng, JIANG Wei, et al. Hydrologic characteristic of the Philippine Sea and its nearby areas [J]. Marine Science Bulletin, 2004(1): 8-14.]
- [25] 赵一阳, 何丽娟, 张秀莲, 等. 冲绳海槽沉积物地球化学的基本特征[J]. 海洋与湖泊, 1984, 15(4): 371-379. [ZHAO Yiyang, HE Lijuan, ZHANG Xiulian, et al. Basic characteristics of geochemistry of sediments in Okinawa trough [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1984, 15(4): 371-379.]
- [26] 黄财京. 菲律宾海深层水团与环流特征分析[J]. 中国科学院大学硕士学位论文, 2018. [HUANG Caijing. Analysis of the characteristics of deep water mass and circulation in the Philippine sea[D]. Master Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [27] Zhang L L, Suzuki N. Taxonomy and species diversity of Holocene pylonoid radiolarians from surface sediments of the northeastern Indian Ocean [J]. Palaeontologia Electronica, 2017, 20(3).
- [28] 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: 271. [CHEN Muhong, TAN Zhiyuan. Radiolaria from Surface Sediments of the Central and Northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1996: 271.]
- [29] 谭智源, 陈木宏. 中国近海的放射虫[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 404. [TAN Zhiyuan, CHEN Muhong. Radiolaria off the Coast of China[M]. Beijing: Science Press, 1999: 404.]
- [30] Boltovskoy D. Classification and distribution of South Atlantic recent polycystine Radiolaria [J]. Palaeontologia Electronica, 1998, 1(2): 116.
- [31] Matsuzaki K M, Suzuki N, Nishi H. Middle to Upper Pleistocene polycystine radiolarians from Hole 902-C9001C, northwestern Pacific [J]. Paleontological Research, 2015, 19(1): 1-77.
- [32] Zhang L L, Suzuki N, Nakamura Y, et al. Modern shallow water radiolarians with photosynthetic microbiota in the western North Pacific [J]. Marine Micropaleontology, 2018, 139: 1-27.
- [33] Müller J. Über die Thalassicollen, Polycystinen und Acanthometren des Mittelmeeres[M]. Abhandlungen: Konigliche Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1858: 1-62.
- [34] Haeckel E. Report on the radiolaria collected by H. M. S. Challenger during the Years 1873-1876[R]. Report on the Scientific Results of the Voyage of H. M. S. Challenger, 1887: 1-1803.
- [35] Petrushevskaya M G. Radiolarians of the Ocean [J]. Reports on the Soviet Expeditions. Academy of Sciences of the U.S.S.R., Zoological Institute, Explorations of the Fauna of the Seas, 1971, 9(17): 1-418.
- [36] Renz G W. Radiolaria from Leg 27 of the Deep Sea Drilling Project[R]. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project (U. S. Government Printing Office), 1974, 27: 769-841.
- [37] Takahashi K, Honjo S. Vertical flux of Radiolaria: A taxon-quantitative sediment trap study from the western tropical Atlantic [J]. Micropaleontology, 1981, 27(2): 140-190.
- [38] Matsuzaki K M, Itaki T, Sugisaki S. Polycystine radiolarians vertical distribution in the subtropical Northwest Pacific during Spring 2015 (KS15-4) [J]. Paleontological Research, 2020, 24(2): 113-133.
- [39] Adl S M, Bass D, Lane C E, et al. Revisions to the classification, nomenclature, and diversity of eukaryotes [J]. Journal of Eukaryotic Microbiology, 2019, 66(1): 4-119.
- [40] Zhang J, Zhang L L, Xiang R, et al. Radiolarian biogeographic contrast between spring of 2017 and winter of 2017-2018 in the South China sea and Malacca Strait [J]. Continental Shelf Research, 2020, 208: 104245.
- [41] 常凤鸣, 庄丽华, 李铁刚, 等. 冲绳海槽北部表层沉积物中的放射虫组合[J]. 海洋与湖泊, 2003, 34(2): 208-216. [CHANG Fengming, ZHUANG Lihua, LI Tiegang, et al. Modern radiolarian assemblages in surficial sediments of northern Okinawa Trough [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(2): 208-216.]
- [42] 程振波, 鞠小华. 冲绳海槽中部表层沉积物中的放射虫[J]. 海洋与湖泊, 1998, 29(6): 656-662. [CHEN Zhenbo, JU Xiaohua. Radiolaria from the surface sediments in the middle Okinawa Trough [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(6): 656-662.]
- [43] 王汝建, 陈荣华. 冲绳海槽南部表层沉积物中放射虫的初步研究[J]. 同济大学学报, 1996, 24(6): 670-676. [WANG Rujian, CHEN Ronghua. Preliminary study on the radiolaria from the surface sediments in southern Okinawa Trough [J]. Journal of Tongji University, 1996, 24(6): 670-676.]
- [44] 王越奇, 宋金明, 袁华茂, 等. 西北太平洋黑潮源区沉积特征及黑潮输入对东海沉积物的影响[J]. 海洋科学, 2018, 42(9): 112-126. [WANG Yueqi, SONG Jinming, YUAN Huamao, et al. Sedimentary characteristics of the Kuroshio origination area and the influence of the Kuroshio intrusion on sediments of the East China Sea [J]. Marine Sciences, 2018, 42(9): 112-126.]
- [45] 宋金明, 袁华茂. 黑潮与邻近东海生源要素的交换及其生态环境效应[J]. 海洋与湖泊, 2017, 48(6): 1169-1177. [SONG Jinming, YUAN Huamao. Exchange and ecological effects of biogenic elements

- between Kuroshio and adjacent east China sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48 (6): 1169-1177.]
- [46] 冯庆来. 放射虫古生态的初步研究[J]. 地质科技情报, 1992, 11 (2): 41-46. [FENG Qinglai. A preliminary study on the radiolarian palaeoecology [J]. Geological Science and Technology Information, 1992, 11 (2): 41-46.]
- [47] 梁文, NILANTHI P, 冉莉华, 等. 南海北部和西菲律宾海颗石藻种群特征及差异[J]. 微体古生物学报, 2017, 34 (3): 279-290. [LIANG Wen, NILANTHI P, RAN Lihua, et al. Community structures of the living coccolithophores in the northern South China Sea and the western Philippines sea [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2017, 34 (3): 279-290.]
- [48] Takahashi K. Vertical flux, ecology and dissolution of Radiolaria in tropical oceans: implications for the silica cycle [D]. Doctor Dissertation of Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 1981: 1-461.
- [49] 袁梁英, 戴民汉. 南海北部低浓度磷酸盐的测定与分布[J]. 海洋与湖泊, 2008, 39 (3): 202-208. [YUAN Liangying, DAI Minhan. The distribution of low-level phosphate in the northern South China sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39 (3): 202-208.]
- [50] Glud R N, Wenzhöfer F, Middelboe M, et al. High rates of microbial carbon turnover in sediments in the deepest oceanic trench on Earth [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6 (4): 284-288.
- [51] 杨海燕, 毛新燕, 郭新宇. 基于WOD数据集的西北太平洋混合层内营养盐浓度初步研究[J]. 中国海洋大学学报, 2018, 48 (8): 1-9. [YANG Haiyan, MAO Xinyan, GUO Xinyu. A preliminary study on nutrients concentration within the mixed layer in the northwest pacific based on WOD data [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48 (8): 1-9.]
- [52] Liu K K, Chao S Y, Shaw P T, et al. Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: observations and a numerical study [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2002, 49 (8): 1387-1412.
- [53] 张金鹏, 邓希光, 杨胜雄, 等. 马里亚纳海沟挑战者深渊南部7000 m水深处发现硅藻化石软泥[J]. 地质通报, 2015, 34 (12): 2352-2354. [ZHANG Jinpeng, DENG Xiguang, YANG Shengxiong, et al. Diatom ooze found in 7000 m submarine area of Challenger Depth in Mariana Trench [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34 (12): 2352-2354.]
- [54] 黄财京, 谢强, 陈举, 等. 菲律宾海底层水体在1990s—2010s之间的暖化[J]. 热带海洋学报, 2018, 37 (6): 26-32. [HUANG Caijing, XIE Qiang, CHEN Ju, et al. Bottom-water warming in the Philippine Sea between 1990s and 2010s [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37 (6): 26-32.]
- [55] Kawabe M, Fujio S. Pacific ocean circulation based on observation [J]. *Journal of Oceanography*, 2010, 66 (3): 389-403.
- [56] 张兰兰, 陈木宏, 胡维芬, 等. 现生放射虫的水深分布及其环境指示意义[J]. 热带海洋学报, 2013, 32 (6): 101-107. [ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, HU Weifen, et al. Vertical distribution of living radiolarians and its environmental implication [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32 (6): 101-107.]
- [57] Zhang Q, Chen M H, Zhang L L, et al. Variations in the radiolarian assemblages in the Bering Sea since Pliocene and their implications for paleoceanography [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 410: 337-350.
- [58] Matsuzaki K M, Itaki T, Tada R. Paleocceanographic changes in the Northern East China Sea during the last 400 kyr as inferred from radiolarian assemblages (IODP Site U1429) [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, 6: 22.
- [59] 畠田 健太郎. 现世放射虫に関する生態情報リスト[J]. 大阪微化石研究会誌, 2009, S1 (14): 31-41. [Hatakeda K. Compiled ecological data on living Polycystine radiolarian [J]. *News of Osaka Micropaleontologists (NOM)*, 2009, S1 (14): 31-41.]
- [60] Boltovskoy D. Vertical distribution patterns of Radiolaria Polycystina (Protista) in the World Ocean: living ranges, isothermal submersion and settling shells [J]. *Journal of Plankton Research*, 2017, 39 (2): 330-349.
- [61] Welling L A, Pisias N G. Radiolarian fluxes, stocks, and population residence times in surface waters of the central equatorial Pacific [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1998, 45 (4-5): 639-671.
- [62] Pisias N G. Vertical water mass circulation and the distribution of radiolaria in surface sediments of the Gulf of California [J]. *Marine Micropaleontology*, 1986, 10 (1-3): 189-205.
- [63] Matsuzaki K M, Itaki T, Tada R, et al. Paleocceanographic history of the Japan Sea over the last 9.5 million years inferred from radiolarian assemblages (IODP Expedition 346 Sites U1425 and U1430) [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5: 54.
- [64] Takahashi K. Radiolaria: Flux, Ecology, and Taxonomy in the Pacific and Atlantic [M]. Woods Hole, MA: Woods Hole Oceanographic Institution Ocean, 1991.