

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.341>



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

张兰兰^{1,2}, 胡邦琦^{3,4*}, 邱卓雅^{1,2}, 郭建卫³, 丁雪³, 陆钧^{1,2}, 向荣^{1,2}

1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 南海海洋研究所, 南海生态环境工程创新研究院, 广东广州 511458
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州 511458
3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071
4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266237

摘要: 为了多角度理解海洋纹层沉积物的形成过程, 利用在西菲律宾海采集到的含纹层硅藻席的 XT47 孔岩心样品, 进行多囊虫类放射虫的组合变化与环境意义分析。研究表明 XT47 孔岩心上段 260 cm 厚硅藻席沉积中含有丰富的放射虫, 丰度高于 2×10^4 个/克; 中段 260~460 cm 出现 5 次放射虫丰度高峰与红粘土的交替旋回沉积; 下段 460~630 cm 红粘土沉积层中放射虫稀少。依据放射虫地层种的初现生物事件, 470 cm 以深的年龄大于 0.34 Ma, 表明西菲律宾海硅藻质沉积形成于中更新世以来。此外, 受暖水影响控制的 *Tetrapyle* group 和 *Didymocyrtis tetrathalamus tetrathalamus* 相对丰度在末次冰盛期(LGM)呈现显著的低值期, 推测在 LGM 期西菲律宾海北赤道暖流的影响强度是变弱的。值得注意的是, 多囊虫类放射虫的丰度与生物硅含量的变化趋势出现明显的不同步现象, 推测 4 次生物硅含量高峰是由大型硅藻(盘筛藻)的急剧增加导致的, 即西菲律宾海 LGM 期盘筛藻的勃发呈现明显的阶段性强弱变化; 进一步发现盘筛藻的 4 次勃发强盛期对应着胶体虫相对丰度变化的低谷期和中深层冷水种相对丰度变化的高峰期, 前者指示上层水体成层化减弱、后者指示中深层水体中营养物增多。据此, 认为西菲律宾海 LGM 期盘筛藻勃发的 4 次强盛期是由于上层水体成层化减弱、下层水体中丰富的营养物上涌引起。研究结果可为菲律宾海盘筛藻勃发在 LGM 长时间持续并最终在海底形成厚达近 3 m 的硅藻席沉积提供了一种可能的解释。

关键词: 菲律宾海; 硅藻席沉积; 多囊虫类放射虫; 生态环境; 水团; 地层学。

中图分类号: P539

文章编号: 1000-2383(2021)03-853-13

收稿日期: 2020-09-08

Records of Polycystine Radiolaria in the Diatom Mats Sediments from the Western Philippine Sea and Their Environmental Significance

Zhang Lanlan^{1,2}, Hu Bangqi^{3,4*}, Qiu Zhuoya^{1,2}, Guo Jianwei³, Ding Xue³, Lu Jun^{1,2}, Xiang Rong^{1,2}

1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China
3. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China
4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41876056, 41976192, 41576044); 中国地质调查局项目(No. DD20191010); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(No. XDB40000000); 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(No. GML2019ZD0206)。

作者简介: 张兰兰(1978—), 女, 研究员, 从事海洋微体古生物与沉积研究, ORCID: 0000-0001-6299-0511. E-mail: llzhang@scsio.ac.cn

***通讯作者:** 胡邦琦, E-mail: bangqihu@gmail.com

引用格式: 张兰兰, 胡邦琦³, 邱卓雅, 等, 2021. 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. 地球科学, 46(3):853-865.

Abstract: In order to understand the formation process of marine laminar sediments from multiple perspectives, this paper studied the changes of polycystine radiolarian assemblages and their environmental significance by using the XT47 core samples with laminar diatom mats collected in the western Philippine Sea. Results show that there were abundant radiolarians, generally higher than 2×10^4 inds. g^{-1} in the upper 260 cm depth; five times of alternating deposition of maximum radiolarian abundances and red clay occurred at the middle 260–460 cm depth; radiolarians in the bottom 460–630 cm depth were rare. According to the early occurrence of radiolarian species, the sediment age of >470 cm depth was older than 0.34 Ma, suggesting the diatom sediments in the western Philippine Sea were formed since the Middle Pleistocene. The relative abundances of *Tetrapyle* group and *Didymocytis tetrathalamus tetrathalamus*, which are controlled by warm currents, significantly decreased during the last glacial maximum (LGM) period, indicating that the influence of North Equatorial warm current on the studied areas weakened during the LGM period. Interestingly, the variation of radiolarian abundance shows a different pattern, compared to the change of biogenic silica content, suggesting that the four peaks of biogenic silica content may be caused by the rapid increase of diatom, that is to say, the bloom of *Ethmodiscus rex* in the western Philippine Sea had a strong-weak fluctuation during the LGM period. Furthermore, four strong blooms of *Ethmodiscus rex* were found to be good correspondence to the low relative abundances of collodarians, and the high relative abundances of mediate-deep cold species. The former indicates that the stratification of upper water became weakened, and the latter reflects the increase of nutrients in mediate-deep water. Therefore, we believe that four strong blooms of *Ethmodiscus rex* during the LGM period may be caused by the weak stratification in the upper water and the upwelling of lower water with the abundant nutrients. Our results may provide a possible explanation for the long-term occurrence of the large diatom bloom and the formation of diatom mats with thickness up to three meters on the seafloor in the Philippine Sea.

Key words: Philippine Sea; diatom mats sediments; polycystine radiolaria; ecological environments; water masses; stratigraphy.

0 引言

作为一类单细胞浮游原生动物,多囊虫类放射虫从海水中吸收硅酸盐、形成硅质骨骼,其生活深度广泛,从海表层到深海均有不同种群栖息(Takahashi, 1991; Hatakeda, 2009; 张兰兰等, 2013; Matsuzaki *et al.*, 2020a);有些生活在真光层中的种类具有共生藻(Zhang *et al.*, 2018),因此,多囊虫类放射虫在海洋生态系统(如硅循环)中扮演着重要的角色(Takahashi, 1991; Zhang *et al.*, 2015).放射虫与硅藻是海洋中生物硅含量的主要贡献者(Takahashi, 1991),相较于硅藻壳体,多囊虫类放射虫壳体更难被溶解(汪品先, 1989; Martin *et al.*, 1991).多囊虫类放射虫的硅质骨骼因此能在大洋深海沉积物得到较好的保存,并成为古海洋、古环境和古气候重建研究中很好的替代性指标(Wang and Abelson, 2002; Zhang *et al.*, 2014; Matsuzaki *et al.*, 2014, 2020b).

菲律宾海处于热带西太平洋边缘,而热带西太平洋是全球最大的水汽热量辐散中心,在全球气候变化中发挥着重要的作用(Yan *et al.*, 1992).菲律宾海虽属于大洋寡营养区、生物生产力较低(Palmer and Pearson, 2003),但近年来,

前人在东菲律宾海帕里西维拉海盆(熊志方和李铁刚, 2017及其引用文献)、九州—帕劳海脊(Shibamoto and Harada, 2010)和西菲律宾海(陈敏等, 2014; Shen *et al.*, 2017)海底沉积物样品中陆续发现硅藻席的快速沉积事件.大型硅藻作为一种浮游植物,其大量的繁殖勃发,会对全球气候和大洋碳储库变化起重要影响(李铁刚等, 2015).本文采集的菲律宾海盆岩心 XT47 中也存在大量硅藻席沉积,且位于已发现硅藻席沉积报道区域范围之外(见图 1).目前,菲律宾海的放射虫研究多集中在局部海底表层沉积物组合分布上(Hernández-Almeida *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017; Qu *et al.*, 2020),缺乏在硅藻席这种异常大洋沉积事件中的相关研究报道.因此,本研究选择以含硅藻席沉积的岩心为材料,旨在揭示硅藻席这一异常大洋沉积事件发生过程中放射虫的种群组合变化及其所反映的环境信息,并从硅质浮游动物放射虫的同步海洋记录角度来增加对大型硅藻勃发及其快速堆积于海底形成纹层硅藻席机制的理解.

1 材料和方法

本文分析的岩心 XT47 柱状样(133.22°E,

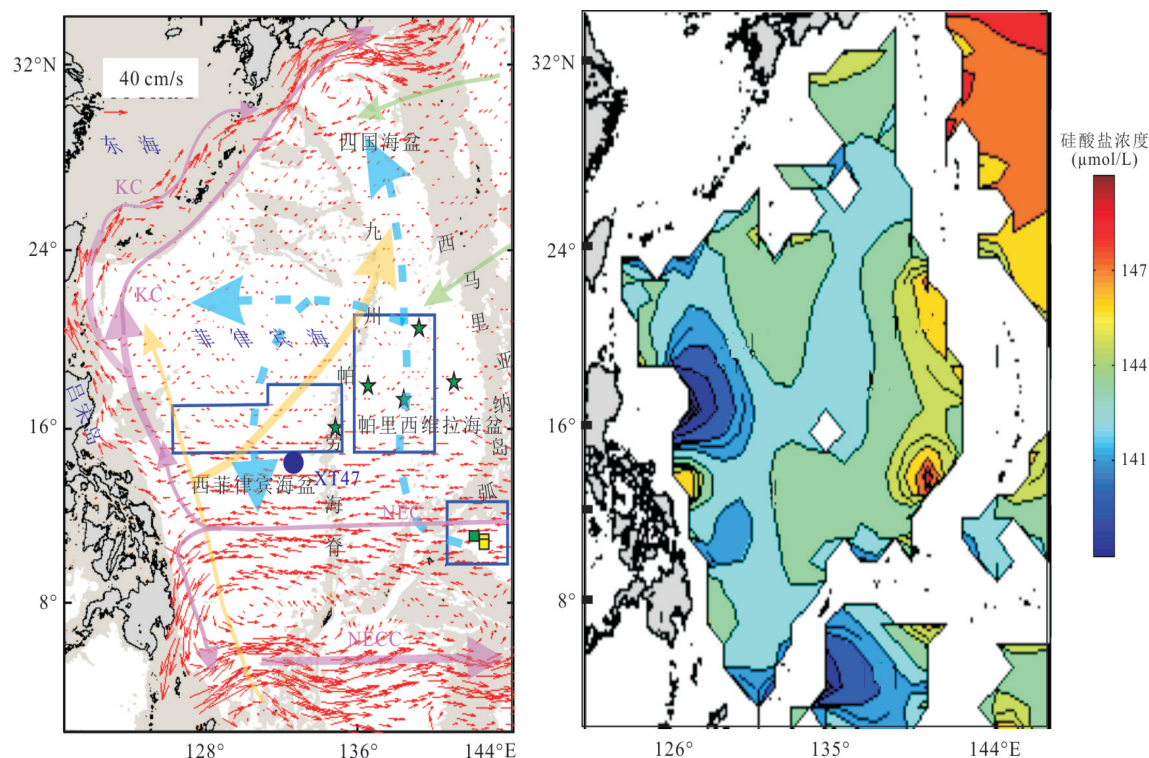


图1 研究站位XT47孔的取样位置

Fig.1 Location of the studied core XT47

蓝色框为目前西太平洋发现的硅藻席沉积区,引自熊志方和李铁刚(2017)、Shen *et al.*(2017)和Luo *et al.*(2018);粉色线箭头为海表层流,KC为黑潮,NEC为北赤道流,NECC为北赤道逆流,据Tomczak and Godfrey(2005).垂向平均地转流(0~100 m)和硅酸盐平面气候态分布(4 000 m深度)引自黄财京(2018);其中黄色线箭头为高溶解氧低硅酸盐的路径(3 000~4 000 m),绿色线箭头为高硅酸盐路径(3 000~4 000 m),蓝色线箭头为低温高盐路径(4 500 m以下),据黄财京(2018)

14.55°N,水深5 466 m)于2018年在菲律宾海使用重力柱状取样器取得,采集的岩心沉积柱长632 cm(图1).放射虫的实验室前期处理制片,采用每隔2 cm进行取样,在低于60 °C的烘干箱内烘干,称取一定质量,加入10%双氧水去除有机质、再加入10%盐酸去除碳酸盐质,利用自然沉降法(Zhang *et al.*, 2009, 2017)收集样品,并全部转移至若干载玻片上,用中性树胶和盖玻片进行封片处理,制成放射虫薄片(规格为24 mm×50 mm).

将制好的放射虫薄片,在尼康E800正置生物显微镜下进行放射虫的属种鉴定统计工作,首先按照每隔8 cm一个样进行放射虫鉴定统计,然后根据放射虫丰度变化趋势、每隔4 cm或2 cm进行加密分析,最终完成了191个样品的放射虫属种的鉴定统计(见表1).放射虫的属种鉴定依据来自低纬度海洋放射虫属种分类公开发表的资料(陈木宏和谭智源,1996;谭智源和陈木宏,1999;De Wever *et al.*, 2001;

Boltovskoy, 2010; Matsuzaki *et al.*, 2015; Zhang and Suzuki, 2017; 张杰等, 2020).每个样品至少统计400个个体,不足400个个体的样品,则对所有的薄片进行全部统计.

生物硅测试是在中国海洋大学海洋地球科学学院完成,具体步骤如下:称取100~150 mg样品于50 mL聚乙烯圆头离心管中,加入10%(体积分数)双氧水5 mL,混匀;30 min后加10%盐酸5 mL,混匀;静置30 min后加去离子水20 mL,在离心机中离心15 min(4 000 r/min),倾去上清液,样品于烘箱中60 °C干燥过夜.干燥后的样品加2 mol/L碳酸钠提取液40 mL,旋紧盖后用超声波振荡10 min以混匀,然后在85 °C水浴锅中加热.每隔1 h取出离心,取上清液125 μL测定硅浓度,连续提取8次.离心后的样品放入水浴前应混匀,取上清液的过程要迅速.硅浓度采用硅钼蓝法测定,测试波长为812 nm,所用仪器为紫外可见分光光度计.

表 1 本文进行放射虫鉴定统计分析的岩心 XT47 深度层、放射虫总丰度和三大目(泡沫虫、罩笼虫和胶体虫)的相对丰度

Table 1 Sampling depth, radiolarian abundances and relative abundances of three orders (Spumellaria, Nassellaria and Collodaria) in the core XT47 analyzed in this study

岩心孔深 (cm)	放射虫总丰 度(个/克)	相对丰度(%)			岩心孔深 (cm)	放射虫总丰度 (个/克)	相对丰度(%)		
		泡沫虫 (%)	罩笼虫 (%)	胶体虫 (%)			泡沫虫 (%)	罩笼虫 (%)	胶体虫 (%)
1	80 634	50.95	42.65	6.40	439	78 254	52.64	45.03	2.33
3	66 265	44.15	53.22	2.63	443	59 538	55.62	42.71	1.67
5	122 489	40.80	55.19	4.01	445	33 169	48.78	48.98	2.24
9	19 580	40.16	55.17	4.68	447	18 501	48.63	48.43	2.94
13	44 324	33.23	62.80	3.96	449	51 295	56.45	40.82	2.73
17	77 000	32.45	65.20	2.35	451	22 997	53.44	43.51	3.05
21	86 129	34.27	61.66	4.07	453	27 524	34.16	61.11	4.73
25	102 132	38.12	58.20	3.68	455	21 117	36.55	60.23	3.22
29	144 468	31.27	64.43	4.30	457	1 881	38.51	57.14	4.35
33	31 274	39.26	55.06	5.68	459	2 101	24.14	67.82	8.05
37	33 478	35.28	61.69	3.03	461	2 492	36.49	54.95	8.56
41	55 070	34.10	58.86	7.05	463	2 419	35.23	58.03	6.74
45	32 230	37.50	58.48	4.02	465	1 770	35.88	58.02	6.11
49	112 791	37.98	55.89	6.14	467	2 330	31.35	67.03	1.62
53	91 427	32.32	60.14	7.54	469	1 006	38.46	60.26	1.28
57	51 170	33.04	62.83	4.13	471	2 134	40.70	54.07	5.23
61	39 487	62.50	30.84	6.66	473	3 302	42.25	55.99	1.76
69	27 954	49.01	46.22	4.77	475	1 194	38.46	61.54	0.00
73	32 628	52.80	44.07	3.13	477	297	48.00	44.00	8.00
77	51 796	67.21	29.53	3.26	479	505	37.84	59.46	2.70
81	51 493	64.50	30.63	4.87	481	157	35.71	57.14	7.14
85	33 380	58.94	38.69	2.37	483	567	23.91	71.74	4.35
89	44 163	63.88	34.36	1.76	485	173	23.08	76.92	0.00
93	28 211	62.35	34.15	3.50	487	801	47.62	52.38	0.00
97	40 760	57.27	40.91	1.82	489	846	56.92	41.54	1.54
101	69 304	69.10	28.92	1.98	491	220	35.29	64.71	0.00
105	86 413	59.75	36.48	3.77	493	35	33.33	66.67	0.00
109	28 000	55.59	40.10	4.31	497	253	60.00	40.00	0.00
113	36 970	54.83	42.44	2.73	499	89	57.14	42.86	0.00
117	70 790	58.45	36.89	4.66	501	18	50.00	50.00	0.00
121	70 204	60.27	33.72	6.01	503	238	42.11	52.63	5.26
125	73 846	61.71	35.12	3.17	505	12	100.00	0.00	0.00
129	77 951	52.56	39.64	7.80	507	27	50.00	50.00	0.00
133	78 869	58.24	35.48	6.27	509	299	45.83	54.17	0.00
137	74 074	51.58	45.26	3.16	511	145	66.67	33.33	0.00
141	37 761	45.25	46.80	7.94	513	13	100.00	0.00	0.00
145	52 364	57.41	36.34	6.25	515	473	47.50	50.00	2.50
149	45 960	46.62	46.87	6.52	517	51	50.00	50.00	0.00
153	65 529	57.64	37.73	4.63	519	12	100.00	0.00	0.00
157	70 833	51.76	42.12	6.12	521	0	0.00	0.00	0.00
161	69 008	59.29	33.41	7.30	523	77	66.67	33.33	0.00
163	58 542	57.35	38.98	3.67	525	12	100.00	0.00	0.00
165	67 839	54.21	42.98	2.81	527	11	100.00	0.00	0.00
167	59 197	58.81	38.33	2.86	529	13	100.00	0.00	0.00
169	38 621	49.60	48.41	1.98	531	23	0.00	100.00	0.00
171	62 446	51.84	45.62	2.53	533	85	57.14	42.86	0.00
173	54 093	59.10	38.76	2.14	535	24	0.00	100.00	0.00
177	51 941	57.14	39.78	3.08	537	0	0.00	0.00	0.00

续表1

岩心孔深 (cm)	放射虫总丰 度(个/克)	相对丰度(%)			岩心孔深 (cm)	放射虫总丰度 (个/克)	相对丰度(%)		
		泡沫虫 (%)	罩笼虫 (%)	胶体虫 (%)			泡沫虫 (%)	罩笼虫 (%)	胶体虫 (%)
179	119 041	60.37	37.27	2.36	539	0	0.00	0.00	0.00
185	86 162	48.18	49.46	2.36	541	0	0.00	0.00	0.00
187	116 117	60.65	37.04	2.31	543	0	0.00	0.00	0.00
191	47 450	51.07	46.08	2.85	545	34	33.33	66.67	0.00
195	81 380	54.44	41.59	3.97	547	26	100.00	0.00	0.00
203	145 814	52.87	43.06	4.07	549	231	66.67	33.33	0.00
211	93 857	50.91	44.29	4.79	551	38	0.00	100.00	0.00
219	80 203	50.10	43.89	6.00	553	0	0.00	0.00	0.00
227	101 007	48.65	44.04	7.31	555	0	0.00	0.00	0.00
235	102 464	51.42	45.26	3.32	557	23	100.00	0.00	0.00
243	78 310	57.25	38.17	4.58	559	37	66.67	33.33	0.00
251	87 423	52.83	44.58	2.59	561	25	50.00	50.00	0.00
259	136 774	57.78	40.09	2.12	563	36	33.33	33.33	33.33
265	141 608	53.56	41.33	5.11	565	62	40.00	60.00	0.00
273	83 643	55.76	38.83	5.42	567	0	0.00	0.00	0.00
279	15 838	41.16	54.26	4.57	569	0	0.00	0.00	0.00
283	7 182	44.85	53.53	1.63	571	0	0.00	0.00	0.00
287	4 952	45.72	52.08	2.20	573	0	0.00	0.00	0.00
291	2 214	44.77	51.74	3.49	575	11	0.00	100.00	0.00
295	4 148	48.21	46.73	5.06	577	0	0.00	0.00	0.00
299	7 133	49.76	49.51	0.73	579	0	0.00	0.00	0.00
303	6 782	44.29	53.15	2.56	581	0	0.00	0.00	0.00
307	5 539	33.97	62.95	3.09	583	0	0.00	0.00	0.00
311	31 118	47.15	48.97	3.87	585	25	0.00	100.00	0.00
323	57 605	50.98	44.42	4.60	587	0	0.00	0.00	0.00
327	113 304	49.93	45.67	4.40	589	0	0.00	0.00	0.00
335	29 490	45.33	49.60	5.07	591	11	0.00	100.00	0.00
339	22 028	54.60	42.05	3.35	593	0	0.00	0.00	0.00
343	2 746	34.40	63.30	2.29	595	0	0.00	0.00	0.00
351	11 266	48.13	50.47	1.40	597	0	0.00	0.00	0.00
355	55 870	55.06	41.83	3.11	599	0	0.00	0.00	0.00
359	76 111	55.08	38.98	5.93	601	0	0.00	0.00	0.00
371	150 934	52.49	43.70	3.81	603	0	0.00	0.00	0.00
375	130 891	56.53	42.16	1.31	605	0	0.00	0.00	0.00
379	25 908	53.76	44.33	1.91	607	0	0.00	0.00	0.00
387	5 535	58.28	38.69	3.03	609	0	0.00	0.00	0.00
391	17 064	50.36	47.22	2.42	611	0	0.00	0.00	0.00
395	78 242	58.43	40.64	0.94	613	0	0.00	0.00	0.00
401	114 955	46.44	49.47	4.09	615	0	0.00	0.00	0.00
403	67 473	54.72	42.51	2.77	617	0	0.00	0.00	0.00
407	24 497	37.15	60.53	2.32	619	0	0.00	0.00	0.00
411	23 144	58.78	40.05	1.17	621	0	0.00	0.00	0.00
415	7 300	56.59	41.48	1.93	623	12	100.00	0.00	0.00
419	8 728	57.77	40.87	1.36	625	0	0.00	0.00	0.00
423	17 693	58.88	38.69	2.43	627	0	0.00	0.00	0.00
427	19 104	62.86	34.29	2.86	629	13	100.00	0.00	0.00
431	35 831	56.72	40.55	2.73	631	0	0.00	0.00	0.00
435	59 447	49.77	48.19	2.04					

2 研究结果

2.1 XT47 孔的沉积层与年龄概况

XT47 孔的取心长度达到 630 cm, 取样位置位于西菲律宾海盆的厚层沉积物分布区(董冬冬等, 2017), 如图 2 所示, 该 XT47 孔的沉积层大致分为 3 个阶段, 即下段 460~630 cm 红粘土沉积层、中段 260~460 cm 硅藻泥与红粘土交替旋回沉积层和上段 260 cm 厚硅藻席沉积层. 海洋硅藻席沉积物中的可靠 AMS¹⁴C 定年还没有得到很好解决, 即沉积序列本身未发生过倒转, 但 AMS¹⁴C 测年却存在明显的倒置现象(熊志方等, 2010; 李铁刚等, 2015). 因此, 目前难以给出 XT47 孔准确的年代框架. XT47 孔硅藻席下层的 AMS¹⁴C 测年虽也存在倒置现象, 但硅藻席的底部(257 cm 深)年龄为 18.8 ka, 这与熊志方等(2010)对东菲律宾海 14 个岩心中硅藻席的 AMS¹⁴C 测年结果(16.05~28.60 ka)相吻合. XT47 孔硅藻席顶部(17 cm 深)AMS¹⁴C 测得的年龄约为 16.8 ka 符合前人的研究结论, 即硅藻席形成于全新世之前(李铁刚等, 2015).

利用中、低纬度放射虫生物地层种的初现面 (first appearance datum, 简称 FAD) 生物事件

(Haslett, 1994; Sanfilippo and Nigrini, 1998; Nigrini and Sanfilippo, 2001; Nigrini *et al.*, 2006; Kamikuri *et al.*, 2009), 提供了岩心 XT47 孔下段, 4 个参考年龄点(见表 2), 分别是: *Buccinosphaera invaginata* Haeckel 的 FAD 年龄为 0.34 Ma (该孔 FAD 深度为 471 cm)、*Collosphaera tuberosa* Haeckel 的 FAD 年龄为 0.51 Ma (该孔 FAD 深度为 473 cm)、*Pterocanium praetextum praetextum* (Ehrenberg) 的 FAD 年龄为 1.30 Ma (该孔 FAD 深度为 503 cm)、*Cycladophora davisiana* Ehrenberg 的 FAD 年龄为 2.61 Ma (该孔 FAD 深度为 565 cm). 因此, XT47 孔中段的硅藻泥与红粘土交替旋回沉积时间跨度可能达到 0.34 Ma~18.8 ka, 当然不排除存在沉积间断的现象.

2.2 多囊虫类放射虫的群落结构

西菲律宾海的多囊虫类放射虫的物种多样性比较高, 笔者在所分析的岩心 XT47 柱状样中共识别出约 428 个物种, 其中, 泡沫虫目和罩笼虫目的物种最为丰富, 分别为 193 种和 197 种; 相较于泡沫虫目和罩笼虫目, 胶体虫目物种数显著减少, 但也达到 38 种. 在个体数量上, 胶体虫占比也是最小的, 低于 10%(见表 1 和图 3). 显然, 泡沫虫目和罩笼虫目

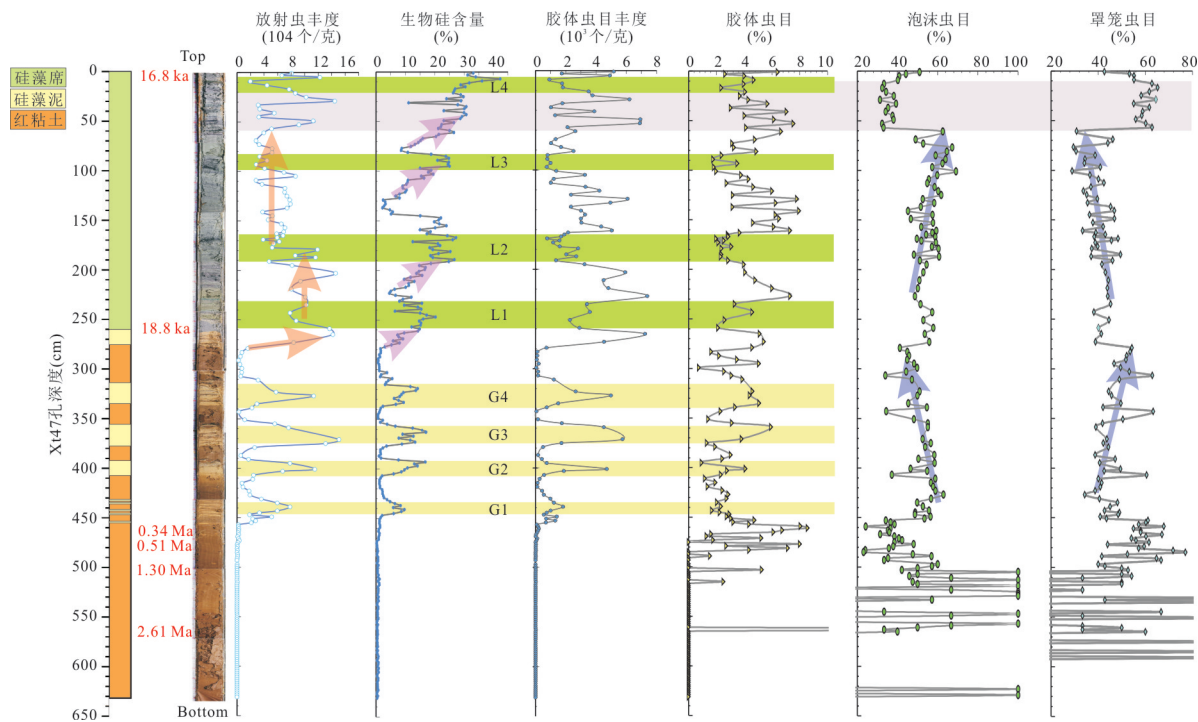


图2 XT47 孔的多囊虫类放射虫丰度、生物硅含量、胶体虫目丰度和相对丰度、以及泡沫虫目和罩笼虫目的相对丰度随深度变化

Fig.2 Variations of abundance of polycystine radiolarians, biogenic silica content, abundance and relative abundance of Colloporinae, relative abundances of Spumellariae and Nassellariae with depth of core XT47

表 2 XT47孔放射虫地层种的初现面(FAD)生物事件年龄					
Table 2 Biological event ages of the first appearance datum of radiolarian biostratigraphic species in the core XT47					
种名	生物事件	FAD年龄范围(Ma)	平均FAD年龄(Ma)	XT47的FAD层深(cm)	参考文献
<i>Buccinosphaera invaginata</i> Haeckel	FAD	0.24~0.45	0.34	471	Haslett (1994); Nigrini <i>et al.</i> (2006); Sanfilippo and Nigrini (1998)
<i>Collosphaera tuberosa</i> Haeckel	FAD	0.42~0.58	0.51	473	Haslett (1994); Kamikuri <i>et al.</i> (2009); Nigrini <i>et al.</i> (2006); Sanfilippo and Nigrini (1998)
<i>Pterocanium praetextum praetextum</i> (Ehrenberg)	FAD	1.27~1.33	1.30	503	Kamikuri <i>et al.</i> (2009)
<i>Cycladophora davisiana</i> Ehrenberg	FAD	2.50~2.71	2.61	565	Haslett (1994); Kamikuri <i>et al.</i> (2009); Nigrini <i>et al.</i> (2006); Sanfilippo and Nigrini (1998)

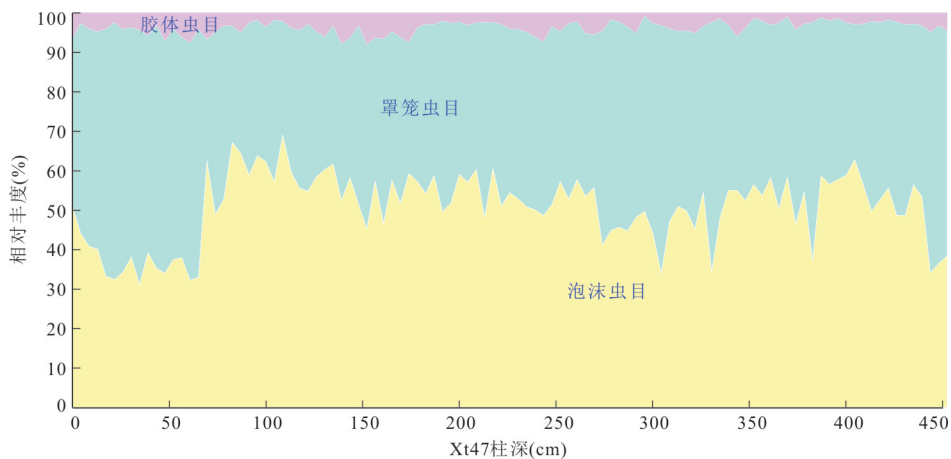


图 3 多囊虫类放射虫三大类群在岩心 XT47 孔中的相对丰度堆积面积

Fig.3 Accumulative area chart of the relative abundances of three orders of polycystine radiolarians in the core XT47

是多囊虫类放射虫最具优势的两大类群,两者的相对丰度之和在整个岩心 450 cm 厚的沉积层中高于 90%.总体上,研究区沉积物中泡沫虫目的优势略高于罩笼虫目;在 450~60 cm 沉积层中,泡沫虫目的相对丰度基本上略高于罩笼虫目;但在进入 60 cm 开始,罩笼虫目相对丰度迅速增加、高于泡沫虫目;在岩心顶端泡沫虫目的相对丰度恢复优势.

2.3 多囊虫类放射虫的丰度变化

该岩心上段 260 cm 厚硅藻席沉积中含有丰富的放射虫、丰度高于 2×10^4 个/克;中段 260~460 cm 出现 5 次放射虫丰度低谷与高峰的旋回,分别对应着红粘土和硅藻泥的交替旋回沉积,高峰期的放射虫丰度值高于 4×10^4 个/克;下段 460~630 cm 红粘土沉积层中放射虫稀少(表 1 和图 2),由于该段沉积物中放射虫个体数量较少、缺乏统计学意义,故在下面讨论群落结构演变与环境意义时,只对上段和中段沉积记录即中更新

世以来的放射虫丰度与组合变化进行讨论.

3 讨论

3.1 多囊虫类放射虫的丰度变化及其环境意义

海洋硅质生物中硅藻壳体,相比较放射虫壳体,更易被溶解(Zhang *et al.*, 2015),所以在西菲律宾海硅藻大量存在时,会使得海水中硅酸盐浓度偏高,有利于放射虫壳体在沉降埋藏过程中很好地保存;此外,海水中丰富的营养物供应硅藻勃发的同时也有利于放射虫的发育繁盛.XT47 孔上段 260 cm 厚的硅藻席中盘筛藻为绝对优势种,但以碎片为主、很难通过统计数量来计算其丰度,而小个体的硅藻数量相对较少,在盘筛藻勃发的过程中,放射虫的丰度很高、且物种多样性丰富.该孔的位置位于目前在西太平洋已报道硅藻席沉积区的外围(图 1),从图 1 可以发现,菲律宾海的硅藻席沉积分布区

与该区域 4 000 m 硅酸盐高浓度平面气候态分布区相一致,虽然目前对于 LGM 或更早时期该区域硅酸盐分布数据尚且未知,但几十年气候态平均的硅酸盐高浓度分布,说明该区域底层水中硅酸盐含量较高,从而有助于硅质生物壳体(如硅藻和放射虫等)的长时间埋藏保存.海洋里的生物硅主要是由硅藻、放射虫和海绵骨针组成,相邻海区南海深表层沉积物中放射虫对生物硅的贡献率较高(Zhang *et al.*, 2015),而且笔者在样品薄片里发现海绵骨针数量也没有很多,表明 XT47 孔的生物硅含量主要由硅藻和放射虫组成.因此,笔者从放射虫丰度变化趋势和生物硅含量变化趋势对比的角度来分析盘筛藻的丰度变化.如图 2 所示,260 cm 厚硅藻席沉积物中的生物硅含量高值并未一直保持稳定,而是呈现出 4 次阶段性的高低波动变化;放射虫的丰度变化幅度较为复杂、缺乏如生物硅一样的规律性变化,与生物硅含量变化呈现明显不同步的阶段性高低波动.因此,笔者推测生物硅含量 4 次高峰期是由大型硅藻的量变所主导的,即上段 260 cm 厚硅藻席沉积中生物硅含量的 4 次高峰期对应着盘筛藻勃发的强盛期,表明大型硅藻(盘筛藻)的勃发具有阶段性的强弱变化,而且发生了 4 次勃发的强盛期即 L1(230~260 cm)、L2(160~190 cm)、L3(80~100 cm)和 L4(0~20 cm)期.

探究大型硅藻的突然勃发与纹层硅藻席沉积的成因机制及其在相关碳、硅循环过程中的角色非常重要(李铁刚等, 2015),因为海洋大型硅藻的突然勃发及其快速沉降堆积到海底的这种大洋异常沉积事件,会伴随着大规模的有机碳和生物硅输出,在海洋酸化和全球气候变化中扮演着重要角色(熊志方和李铁刚, 2017).研究表明进入 LGM,亚洲风尘对西太平洋的输入增强(Xiong *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2015).熊志方和李铁刚(2017)在系统分析总结了国内外对海洋大型硅藻勃发的研究结果之后,提出热带西太平洋硅藻席形成的新模式:“风尘触发硅藻席沉积”,即大型硅藻利用表层水中亚洲风尘溶解的硅酸,被风尘铁刺激,在成层化的水体环境中累计勃发,然后以“秋季倾泻”方式沉积到海底形成硅藻席.那么,如此长时间尺度上的大型硅藻勃发是如何维持的?所需营养盐供应是从哪里来的呢?XT47 孔 260 cm 厚的硅藻席沉积所显示的 LGM 期盘筛藻勃发的 4 次强盛期是什么因素驱动的?

本文是首次在西菲律宾海发现大型硅藻的勃

发期具有阶段性的强弱波动现象,而且 XT47 孔硅藻席沉积中盘筛藻的强盛期正好与胶体虫目相对丰度的 4 次低谷相对应(图 2).张杰等(2020)对胶体虫目的分类及生态环境意义有过详细评述:胶体虫是多囊虫类放射虫中唯一能营群居生活的类群、且出现时间最晚,是中、低纬度新生代生物地层划分应用中放射虫最年轻的地层种(Nigrini and Sanfilippo, 2001).本文 XT47 孔用于确定底段远洋红粘土沉积层顶部的 2 个年龄点的地层种 *Buccinosphaera invaginata* Haeckel 和 *Collosphaera tuberosa* Haeckel 就是属于胶体虫目.胶体虫目的属种具有与之共生的藻类,只生活在真光层水体(Zhang *et al.*, 2018).前人研究表明,胶体虫往往在层化水体中含量丰富(Anderson, 1983; Caron *et al.*, 1995; Dennett *et al.*, 2002).笔者在研究南海表层水体中胶体虫目的冬春季分布时,发现冬季期间营养盐较高的南海表层水体中胶体虫相对丰度值低于春季(Zhang *et al.*, 2020),进一步证实了在中、低纬度胶体虫目的相对丰度高值主要出现在表层水体层化强、营养低的水体中,反之,则说明在上层水体层化弱、营养盐比较高的水体中胶体虫含量相对较低.因此,XT47 孔 260 cm 厚硅藻席沉积层中,胶体虫低含量期均对应着生物硅含量高峰即盘筛藻勃发的强盛期,表明 LGM 盘筛藻勃发期该海区上层水体成层化发生过 4 次减弱,在水体成层化减弱时,营养物得到大量补充、促进了盘筛藻的强勃发,表明大型硅藻的勃发被触发之后保持长时间的维持是需要后续营养物补给的.整个 LGM 时期,亚洲风尘被认为在东菲律宾海的影响都很强且其强度一直保持相对稳定(Xiong *et al.*, 2015),未发现有关阶段性的强弱变化.那么,如果在相邻的西菲律宾 LGM 时期亚洲风尘的强度也一直保持相对稳定的话, LGM 盘筛藻勃发期的 4 次强盛期,丰富营养物补充的动力很有可能是由于上层水体成层化减弱、来自下层富营养的水体涌升.

西菲律宾海 XT47 孔 LGM 硅藻席沉积之前,笔者还发现了一段硅藻泥与远洋红粘土的交替旋回沉积互层,如图 2 所示,远洋红粘土中放射虫丰度和生物硅含量都极低,硅藻泥中放射虫和生物硅含量丰富、高峰期的对应性非常高即都出现 4 个高峰 G1、G2、G3 和 G4,可能该时期放射虫对生物硅的贡献占主导.因缺乏有效的高质量定年方法来确定该段沉积的年代框架,笔者虽怀疑这 4 次旋回沉积互

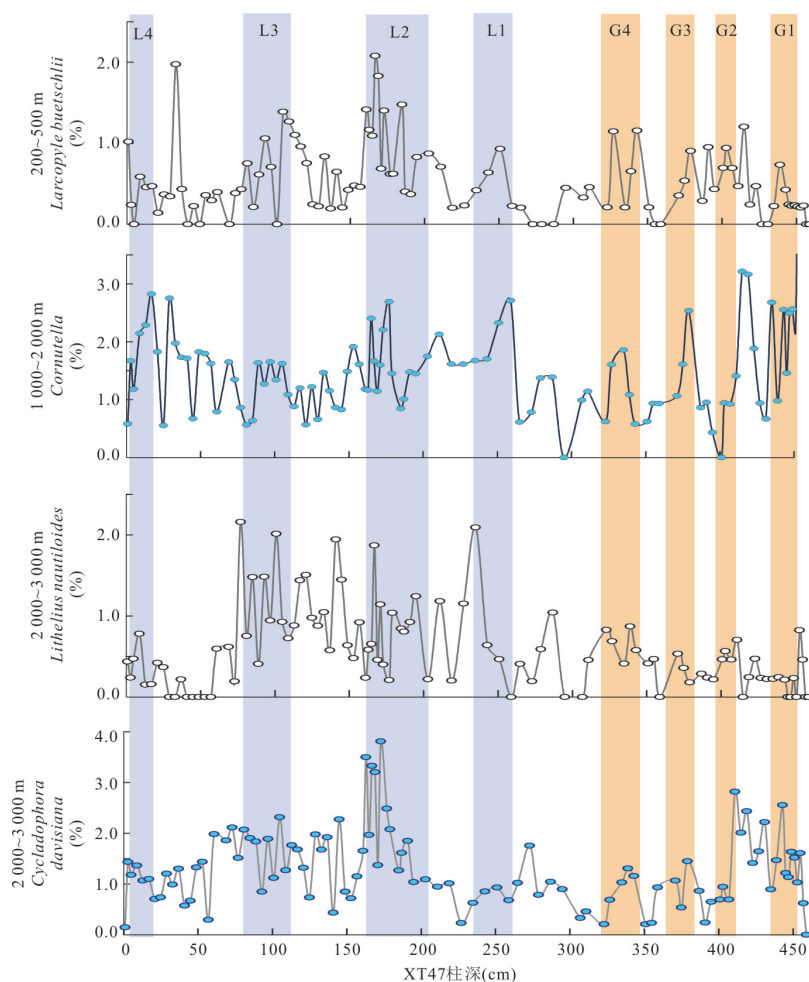


图4 典型中深层冷水种的相对丰度随岩心深度变化

Fig.4 Variations of relative abundances of typical cold species dwelling in mediate-deep water with core depth

层可能与冰期—间冰期的气候旋回事件有关,但不能确定.目前,只能根据放射虫的生物地层事件,大致地判断该段260~460 cm沉积互层形成于约0.4 Ma,即中更新世之后.该段硅藻泥沉积层中盘筛藻碎片也非常多,因此笔者认为西菲律宾海盘筛藻的勃发不只是发生在LGM时期、在中更新世至LGM期间也发生了几次盘筛藻的勃发.

3.2 XT47孔典型属种的阶段性变化及其水团意义

现代放射虫的生态分布研究表明,多囊虫类放射虫有些属种具有特定的生活深度(Hatakeda, 2009; 张兰兰等, 2013).利用多囊虫类放射虫典型属种的这种明显的垂直深度分带特性,笔者可以分析研究区域不同时间尺度上的水体性质变化.Matsuzaki *et al.* (2020a)对菲律宾海北部的一个3 000 m深的浮游连续分层拖网样品进行了研究,认为 *Cycladophora davisiana* 和 *Lithelius nautiloides* 在低纬

度主要生活在2 000~3 000 m水深处, *Cornutella profunda* 生活在1 000~2 000 m水深处, *Larcopyle cf. buetschlii* 则主要生活在200~500 m水深处.这些生活在中层和深层水体中的放射虫属种在西菲律宾海XT47孔中相对丰度随孔深变化如图4所示,它们的相对丰度高峰较好地对应着盘筛藻的4次强勃发L1、L2、L3和L4期.中层和深层水体中冷水种的相对丰度比较高反映出中深层水通风增强、硅酸等营养物增多,表明在LGM盘筛藻勃发的4次强盛期,中层和深层水体中富含营养物.前面利用胶体虫目占比这一替代性指标,指示LGM盘筛藻勃发的4次强盛期均对应着上层水体成层化减弱.有研究表明整个LGM期,亚洲风尘对东菲律宾海的影响都很强且强度一直保持相对稳定(Xiong *et al.*, 2015),也就是说风尘携带的营养物是稳定的,那么,相邻的西菲律宾LGM时期亚洲风尘的强度应该也一直保持相对稳定,导

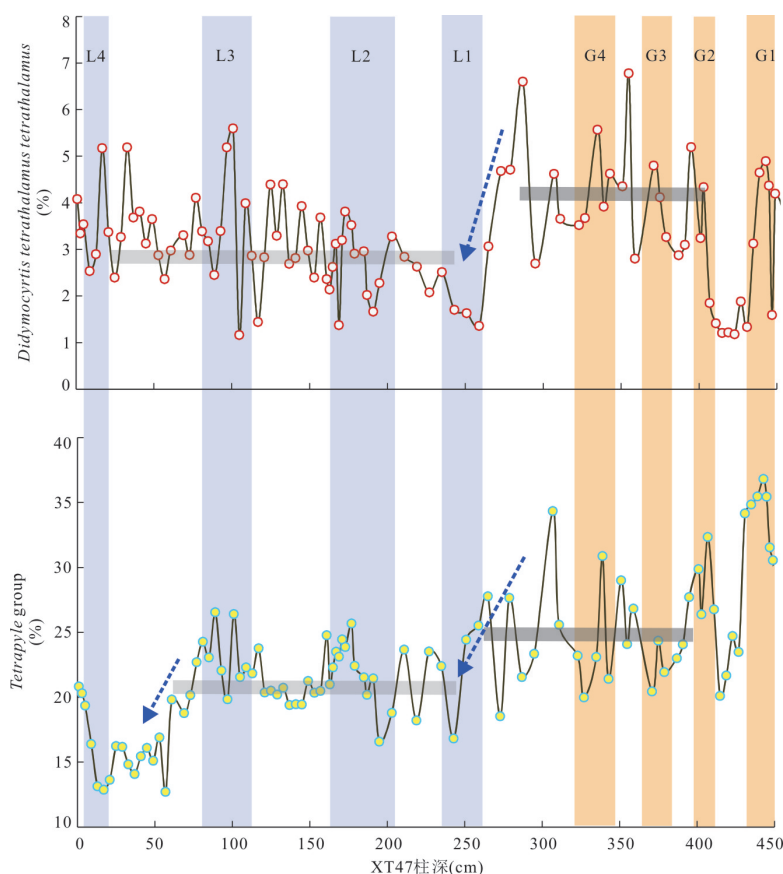


图 5 典型浅水暖水种的相对丰度随岩心深度变化

Fig.5 Variations of relative abundances of typical warm species dwelling in shallow water with core depth

致 LGM 发生盘筛藻勃发的 4 次强盛期则很可能是源于上层水体成层化减弱、中深层富含营养物的水体涌升引起。

多囊虫类放射虫有些属种具有共生藻,只能生活在真光层水体中(Zhang *et al.*, 2018),如图 5 所示的 *Tetrapyle* group、*Didymocyrtis tetrathalamus tetrathalamus*、*Peromelissa phalacra* 和 *Pterocanium/Pterocorys* group. 研究表明 *Tetrapyle* group 主要生活在中低纬度且受暖水团控制(Ishitani and Takahashi, 2007; Ishitani *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2020),被视为暖水团的示踪者(Matsuzaki *et al.*, 2018). *D. tetrathalamus tetrathalamus* 是西太平洋区域的关键种、也受暖水影响(Anderson *et al.*, 1990; Zhang *et al.*, 2020),常被用以指示如黑潮等暖水团的变化(Chang *et al.*, 2003). 在西菲律宾海, *Tetrapyle* group 和 *D. tetrathalamus tetrathalamus* 在 XT47 孔的相对丰度在 LGM 期呈现明显的低值期,笔者推测该海域北赤道暖流在 LGM 期的影响强度是减弱的。

4 结论

本文研究的西菲律宾海含纹层硅藻席的岩心 XT47 孔采集位置在空间上拓展了目前已报道的硅藻席沉积分布区的范围. 该项研究首次针对大洋异常硅藻席沉积记录,进行了硅质生物放射虫的研究,研究结果有助于多角度理解与探究大洋硅藻席的形成机制. 该岩心上部 260 cm 厚硅藻席沉积中含有丰富的放射虫、丰度高于 2×10^4 个/克;中段 260~460 cm 出现 5 次放射虫丰度高峰与红粘土的交替旋回沉积,可能与冰期—间冰期气候旋回时间有关;下段 460~630 cm 红粘土沉积层中放射虫稀少. 依据放射虫地层种的初现生物事件,470 cm 以深的年龄大于 0.34 Ma,表明研究海域含纹层硅藻席沉积形成于中更新世以来. 依据放射虫丰度与生物硅含量未出现同步的变化趋势,笔者推测 LGM 期西菲律宾海盘筛藻的勃发具有阶段性的强弱变化,即 260 cm 厚硅藻席沉积过程中可能发生了 4 次盘筛藻的强勃发事件,分别在 230~260 cm (L1)、160~190 cm (L2)、80~100 cm (L3) 和 0~20 cm

(L4),正好与胶体虫目相对丰度的4次低谷相对应,表明西菲律宾海LGM期盘筛藻勃发的4次强盛期均对应着上层水体成层化减弱.同时,多囊虫类放射虫在菲律宾海的中层和深层水种的相对丰度高峰对应着盘筛藻的4次勃发强盛期,表明LGM期盘筛藻勃发的4次强盛期中层和深水中营养物大幅度增多.因此,笔者推测导致LGM发生盘筛藻勃发的4次强盛期的原因可能是上层水体成层化减弱、中深层富含营养物的水体涌升引起.此外,受暖水影响控制的 *Tetrapyle* group 和 *D. tetrathalamus tetrathalamus* 在 XT47 孔的相对丰度在 LGM 期呈现出显著的低值期,表明西菲律宾海在 LGM 期北赤道暖流的影响强度是变弱的.

致谢:感谢自然资源部第一海洋研究所熊志方研究员和中国科学院海洋研究所徐兆凯研究员在数据分析解释中给予的讨论建议!

References

- Anderson, O. R., 1983. Radiolaria. Springer, New York.
- Anderson, O. R., Bryan, M., Bennett, P., 1990. Experimental and Observational Studies of Radiolarian Physiological Ecology: 4. Factors Determining the Distribution and Survival of *Didymocystis Tetrathalamus Tetrathalamus* with Implications for Paleoecological Interpretations. *Marine Micropaleontology*, 16(3-4): 155-167. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(90\)90001-3](https://doi.org/10.1016/0377-8398(90)90001-3)
- Boltovskoy, D., Kling, S. A., Takahashi, K., et al., 2010. World Atlas of Distribution of Recent Polycystina (Radiolaria). *Palaeontologia Electronica*, 13(3): 18A.
- Caron, D. A., Michaels, A. F., Swanberg, N. R., et al., 1995. Primary Productivity by Symbiont-Bearing Planktonic Sarcodines (Acantharia, Radiolaria, Foraminifera) in Surface Waters near Bermuda. *Journal of Plankton Research*, 17(1): 103-129. <https://doi.org/10.1093/plankt/17.1.103>
- Chang, F. M., Zhuang, L. H., Li, T. G., et al., 2003. Radiolarian Fauna in Surface Sediments of the Northeastern East China Sea. *Marine Micropaleontology*, 48(3-4): 169-204. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(03\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(03)00016-1)
- Chen, M., Lan, B. B., Shen, L. N., et al., 2014. Characteristics of Diatom Distribution in the Surface Sediments of the Western Philippine Basin. *Acta Micropaleontologica Sinica*, 31(4): 321-334 (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 (in Chinese).
- De Wever, P., Dumitrica, P., Caulet, J. P., et al., 2001. Radiolarians in the Sedimentary Record. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- Dennett, M. R., Caron, D. A., Michaels, A. F., et al., 2002. Video Plankton Recorder Reveals High Abundances of Colonial Radiolaria in Surface Waters of the Central North Pacific. *Journal of Plankton Research*, 24(8): 797-805. <https://doi.org/10.1093/plankt/24.8.797>
- Dong, D. D., Zhang, Z. Y., Zhang, G. X., et al., 2017. Tectonic and Sedimentary Features of the West Philippine Basin and Its Implication to the Basin Evolution—Evidence from a Seismic Transection. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 48(6): 1415-1425 (in Chinese with English abstract).
- Haslett, S. K., 1994. Plio-Pleistocene Radiolarian Biostratigraphy and Palaeoceanography of the Mid-Latitude North Atlantic (DSDP Site 609). *Geological Magazine*, 131(1): 57-66. <https://doi.org/10.1017/s0016756800010499>
- Hatakeda, U. K., 2009. Compiled Ecological Data on Living Polycystine Radiolarians. *News of Osaka Micropaleontologists*, 14(14): 31-41
- Hernández-Almeida, I., Cortese, G., Yu, P. S., et al., 2017. Environmental Determinants of Radiolarian Assemblages in the Western Pacific since the Last Deglaciation. *Paleoceanography*, 32(8): 830-847. <https://doi.org/10.1002/2017pa003159>
- Huang, C. J., 2018. Analysis of the Characteristics of Deep Water Mass and Circulation in the Philippine Sea (Dissertation). Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya (in Chinese with English abstract).
- Ishitani, Y., Takahashi, K., 2007. The Vertical Distribution of Radiolaria in the Waters Surrounding Japan. *Marine Micropaleontology*, 65(3-4): 113-136. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.06.002>
- Ishitani, Y., Takahashi, K., Okazaki, Y., et al., 2008. Vertical and Geographic Distribution of Selected Radiolarian Species in the North Pacific. *Micropaleontology*, 54(1): 27-39.
- Kamikuri, S. I., Motoyama, I., Nishi, H., et al., 2009. Neogene Radiolarian Biostratigraphy and Faunal Evolution Rates in the Eastern Equatorial Pacific ODP Sites 845 and 1241. *Acta Palaeontologica Polonica*, 54(4): 713-742. <https://doi.org/10.4202/app.2008.0076>
- Li, T. G., Xiong, Z. F., Zhai, B., 2015. Laminated Diatom Mat Deposits from the Low-Latitude Western Pacific Linked to Global Carbon Cycle. Ocean Press, Beijing (in Chinese).

- Liu, L., Zhang, Q., Chen, M. H., et al., 2017. Radiolarian Biogeography in Surface Sediments of the Northwest Pacific Marginal Seas. *Science China Earth Sciences*, 60(3): 517–530. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5179-4>
- Luo, M., Algeo, T. J., Tong, H. P., et al., 2018. More Reducing Bottom-Water Redox Conditions during the last Glacial Maximum in the Southern Challenger Deep (Mariana Trench, Western Pacific) Driven by Enhanced Productivity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 155: 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.01.006>
- Martin, W. R., Bender, M., Leinen, M., et al., 1991. Benthic Organic Carbon Degradation and Biogenic Silica Dissolution in the Central Equatorial Pacific. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 38(12): 1481–1516. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(91\)90086-U](https://doi.org/10.1016/0198-0149(91)90086-U)
- Matsuzaki, K. M., Itaki, T., Sugisaki, S., 2020a. Polycystine Radiolarians Vertical Distribution in the Subtropical Northwest Pacific during Spring 2015 (KS15-4). *Paleontological Research*, 24(2): 113–133. <https://doi.org/10.2517/2019pr019>
- Matsuzaki, K. M., Itaki, T., Tada, R., et al., 2018. Paleooceanographic History of the Japan Sea over the Last 9.5 Million Years Inferred from Radiolarian Assemblages (IODP Expedition 346 Sites U1425 and U1430). *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1): 1–33. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0204-7>
- Matsuzaki, K. M., Nishi, H., Suzuki, N., et al., 2014. Paleooceanographic History of the Northwest Pacific Ocean over the Past 740 kyr, Discerned from Radiolarian Fauna. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 396: 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.12.036>
- Matsuzaki, K. M., Suzuki, N., Nishi, H., 2015. Middle to Upper Pleistocene Polycystine Radiolarians from Hole 902-C9001C, Northwestern Pacific. *Paleontological Research*, 19(s1): 1–77. <https://doi.org/10.2517/2015pr003>
- Matsuzaki, K. M., Suzuki, N., Tada, R., 2020b. An Intensified East Asian Winter Monsoon in the Japan Sea between 7.9 and 6.6 Ma. *Geology*, 48(9): 919–923. <https://doi.org/10.1130/g47393.1>
- Nigrini, C., Sanfilippo, A., 2001. Cenozoic Radiolarian Stratigraphy for Low and Middle Latitudes with Descriptions of Biomarkers and Stratigraphically Useful Species. Ocean Drilling Program, College Station. <https://doi.org/10.2973/odp.tn.27.2001>
- Nigrini, C., Sanfilippo, A., Moore Jr., T. J., 2006. Cenozoic Radiolarian Biostratigraphy: A Magnetobiostratigraphic Chronology of Cenozoic Sequences from ODP Sites 1218, 1219, and 1220, Equatorial Pacific. In: Wilson, P. A., Lyle, M., Firth, J. V., et al., eds., Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Ocean Drilling Program, College Station. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.199.225.2006>
- Palmer, M. R., Pearson, P. N., 2003. A 23, 000-Year Record of Surface Water pH and P_{CO_2} in the Western Equatorial Pacific Ocean. *Science*, 300(5618): 480–482. <https://doi.org/10.1126/science.1080796>
- Qu, H. X., Wang, J. B., Xu, Y., et al., 2020. Radiolarian Assemblage as an Indicator of Environmental Conditions in the Marginal Seas of the Western North Pacific. *Marine Micropaleontology*, 157: 101859. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2020.101859>
- Sanfilippo, A., Nigrini, C., 1998. Code Numbers for Cenozoic Low Latitude Radiolarian Biostratigraphic Zones and GPTS Conversion Tables. *Marine Micropaleontology*, 33(1–2): 109–156. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(97\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(97)00030-3)
- Shen, L. N., Chen, M., Lan, B. B., et al., 2017. Diatom Distribution as an Environmental Indicator in Surface Sediments of the West Philippine Basin. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 35(2): 431–443. <https://doi.org/10.1007/s00343-016-5306-8>
- Shibamoto, Y., Harada, K., 2010. Silicon Flux and Distribution of Biogenic Silica in Deep-Sea Sediments in the Western North Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(2): 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.10.009>
- Takahashi, K., 1991. Radiolaria: Flux, Ecology, and Taxonomy in the Pacific and Atlantic. In: Honjo, S., eds., Ocean Biocoenosis Series No. 3. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole. <https://doi.org/10.1575/1912/408>
- Tan, Z. Y., Chen, M. H., 1999. Offshore Radiolaria in China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Tomczak, M., Godfrey, J. S., 2005. Regional Oceanography: An Introduction. Pergamon Press, Oxford.
- Wang, P. X., 1989. Chemical Oceanography. In: Marine Geology Department of Tongji University, ed., Introduction to Paleooceanography. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Wang, R. J., Abelman, A., 2002. Radiolarian Responses to Paleooceanographic Events of the Southern South China

- Sea during the Pleistocene. *Marine Micropaleontology*, 46(1–2): 25–44. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(02\)00048-8](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(02)00048-8)
- Xiong, Z. F., Li, T. G., 2017. Marine Laminated Diatom Mats in Palaeoceanography and Biogeochemistry: Retrospective and Prospective. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 48(6): 1244–1256 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, Z. F., Li, T. G., Algeo, T., et al., 2015. The Silicon Isotope Composition of Ethmodiscus Rex Laminated Diatom Mats from the Tropical West Pacific: Implications for Silicate Cycling during the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*, 30(7): 803–823. <https://doi.org/10.1002/2015PA002793>
- Xiong, Z. F., Li, T. G., Zhai, B., et al., 2010. Clay Mineral Characteristics of Ethmodiscus Rex Diatom Mats from Low-Latitude Western Pacific during the Last Glacial and Implications for Their Formation. *Earth Science*, 35(4): 551–562 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. K., Li, T. G., Clift, P. D., et al., 2015. Quantitative Estimates of Asian Dust Input to the Western Philippine Sea in the Mid-Late Quaternary and Its Potential Significance for Paleoenvironment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(9): 3182–3196. <https://doi.org/10.1002/2015GC005929>
- Yan, X. H., Ho, C. R., Zheng, Q., et al., 1992. Temperature and Size Variabilities of the Western Pacific Warm Pool. *Science*, 258(5088): 1643–1645. <https://doi.org/10.1126/science.258.5088.1643>
- Zhang, J., Zhang, L. L., Chen, M. H., et al., 2020. The Higher Level Classification of Modern Radiolarians and Their Ecological Significance. *Acta Micropaleontologica Sinica*, 37(1): 82–98 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Zhang, L. L., Xiang, R., et al., 2020. Radiolarian Biogeographic Contrast between Spring of 2017 and Winter of 2017–2018 in the South China Sea and Malacca Strait. *Continental Shelf Research*, 208: 104245. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104245>
- Zhang, L. L., Chen, M. H., Hu, W. F., et al., 2013. Vertical Distribution of Living Radiolarians and Its Environmental Implication. *Journal of Tropical Oceanography*, 32(6): 101–107 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. L., Chen, M. H., Xiang, R., et al., 2009. Distribution of Polycystine Radiolarians in the Northern South China Sea in September 2005. *Marine Micropaleontology*, 70(1–2): 20–38. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2008.10.002>
- Zhang, L. L., Suzuki, N., 2017. Taxonomy and Species Diversity of Holocene Pylonoid Radiolarians from Surface Sediments of the Northeastern Indian Ocean. *Palaeontologia Electronica*, 20(3): 48A. <https://doi.org/10.26879/718>
- Zhang, L. L., Suzuki, N., de Nakamura, Y., et al., 2018. Modern Shallow Water Radiolarians with Photosynthetic Microbiota in the Western North Pacific. *Marine Micropaleontology*, 139: 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2017.10.007>
- Zhang, L. L., Wang, R. J., Chen, M. H., et al., 2015. Biogenic Silica in Surface Sediments of the South China Sea: Controlling Factors and Paleoenvironmental Implications. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 122: 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.11.008>
- Zhang, Q., Chen, M. H., Zhang, L. L., et al., 2014. Variations in the Radiolarian Assemblages in the Bering Sea since Pliocene and Their Implications for Paleooceanography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 410: 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.05.048>

附中文参考文献

- 陈敏, 兰彬斌, 沈林南, 等, 2014. 西菲律宾海盆表层沉积硅藻分布特征. 微体古生物学报, 31(4): 321–334.
- 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.
- 董冬冬, 张正一, 张广旭, 等, 2017. 西菲律宾海盆的构造沉积特征及对海盆演化的指示——来自地球物理大断面的证据. 海洋与湖沼, 48(6): 1415–1425.
- 黄财京, 2018. 菲律宾海深层水团与环流特征分析(硕士学位论文). 三亚: 中国科学院深海科学与工程研究所.
- 李铁刚, 熊志方, 翟滨, 2015. 低纬度西太平洋硅藻席沉积与碳循环. 北京: 海洋出版社.
- 谭智源, 陈木宏, 1999. 中国近海的放射虫. 北京: 科学出版社.
- 汪品先, 1989. 海洋化学. 同济大学海洋地质系编, 古海洋学概论. 上海: 同济大学出版社.
- 熊志方, 李铁刚, 2017. 海洋纹层硅藻席古海洋学与生物地球化学研究进展. 海洋与湖沼, 48(6): 1244–1256.
- 熊志方, 李铁刚, 翟滨, 等, 2010. 低纬度西太平洋末次冰期 Ethmodiscus rex 硅藻席粘土矿物特征及形成机制启示. 地球科学, 35(4): 551–562.
- 张杰, 张兰兰, 陈木宏, 等, 2020. 现代放射虫的高阶分类现状及其生态学意义. 微体古生物学报, 37(1): 82–98.
- 张兰兰, 陈木宏, 胡维芬, 等, 2013. 现生放射虫的水深分布及其环境指示意义. 热带海洋学报, 32(6): 101–107.