中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 2 期: 227 ~ 238
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

白令海南部上新世以来的放射虫生物地层

张强[①②*], 陈木宏[①], 张兰兰[①], 王汝建[③], 向荣[①], 胡维芬[①②]

① 中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广州 510301;
② 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;
③ 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
* E-mail: zhangqiang210@scsio.ac.cn

收稿日期: 2012-11-12; 接受日期: 2013-03-27; 网络版发表日期: 2014-01-13
国家自然科学基金项目(批准号: 41076026, 40906030, 41276051, 41030859)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CB956102)、中国科学院知识创新青年人才项目(编号: SQ200808)和国家高技术研究发展计划项目(编号: 2008AA093001)资助

摘要 国际上至今尚未在白令海建立起可供区域对比的晚新生代放射虫生物地层, 总体上该海区的地层序列研究程度较低. 利用 IODP323 航次 U1340 井位中保存较好的放射虫化石对白令海南部上新世以来的层序进行了详细的生物地层学分析, 从 604 m长的岩芯中获得放射虫 102 属、227 种. 依据该井位中放射虫地层标志种的分布特征, 建立白令海南部上新世以来的 5 个放射虫生物化石带并识别出 25 个放射虫地层事件; 综合 U1340 井位中有效的生物地层事件年龄和古地磁数据的综合分析结果建立相应的深度-年龄曲线, 估算了各生物地层事件绝对年龄的近似值; 对 U1340 井位与其他邻近海区已建立的早上新世晚期以来放射虫化石带进行系统对比, 进一步完善并解释了北太平洋中-高纬度的放射虫地层资料及其相互关系, 对比结果表明本文修订后的 *Botryostrobus aquilonaris* 带相当于前人同名化石带的中上部. 新提出的 *Druppatractus irregularis-Dorydruppa bensoni* 带和 *Spongodiscus* sp.带两个新化石带分别与北太平洋亚极区发育的 *Cycladophora sakaii* 带及 *Stylatractus universus* 带相当.

关键词
IODP 323 航次
U1340 井位
白令海
放射虫事件
生物地层

白令海是北太平洋北缘的半封闭边缘海, 其特殊的地理位置及水文条件(Takahashi, 2005)使该海区沉积物中钙质浮游生物种类贫乏, 硅质微体生物化石相对富集. 放射虫作为白令海高纬度海区微体古生物中个体丰富、保存较好的重要门类, 成为了开展该海区生物地层学研究的一个重要而有效的工具. 目前, 尽管在世界大洋的中、低纬度海区已经建立了较为详细、完善的新生代放射虫生物地层及其年龄框架(Sanfilippo 等, 1998; Nigrini 等, 2001), 但对高纬度海区的研究程度相对较低, 尤其在白令海几乎仍属空白. Ling(1973)初步分析了白令海 DSDP19 航次晚中新世至第四纪的放射虫, 但并未开展深入的生物地层学研究并建立相应的放射虫生物化石带, 近年来该海区工作主要局限于较短的柱状样品, 显然也未能给予详细分析和讨论(王汝建等, 2005a; Tanaka 等, 2005; Itaki 等, 2012).

迄今为止, 在北半球高纬度海区所积累的放射虫生物地层研究成果主要集中在白令海邻近的北太平洋亚极区. Hays(1970)利用活塞取芯样品, 首次在北太平洋北部建立了上新世以来的放射虫生物化石

中文引用格式: 张强, 陈木宏, 张兰兰, 等. 2014. 白令海南部上新世以来的放射虫生物地层. 中国科学: 地球科学, 44: 227–238
英文引用格式: Zhang Q, Chen M H, Zhang L L, et al. 2014. Radiolarian biostratigraphy in the Southern Bering Sea since Pliocene. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-013-4717-z

带; Shilov(1995)根据ODP Leg 145航次的放射虫研究结果提出了新的上新世与中新世放射虫化石带, 同时, Morley 等(1995)分析讨论了该航次研究井位中 40 个放射虫地层事件; Motoyama(1996)在西北太平洋亚极区开展了放射虫生物地层研究, 建立了北太平洋高纬度海区晚中新世至上新世的放射虫生物化石带; Kamikuri 等(2004, 2007)依据前人的资料(Funayama, 1988; Shilov, 1995; Motoyama, 1996), 对 ODP Leg 145 和 ODP Leg 186 航次的放射虫数据进行了综合分析, 提出了北太平洋亚极区的许多放射虫初现面与末现面的事件并厘定了其地层年龄, 这些研究成果的积累成功地奠定了北半球高纬度放射虫生物地层学发展的基础. 尽管如此, 由于受研究样品位置及海洋环境差异等因素的影响, 这些放射虫地层学资料在白令海的应用仍受到了一定的限制, 北太平洋亚极区出现的某些化石带标志种, 在白令海区可能缺失或由于个体稀少而难以被发现, 这在白令海 IODP323 航次的初步报告(Takahashi 等, 2011)及 U1340 井位的放射虫分析结果中已得到了证实. 因此, 开展白令海区详细的放射虫生物地层学研究对于建立白令海系统而合理的放射虫生物化石带, 完善该海区的放射虫生物地层学资料具有重要的价值和意义.

本文以白令海 323 航次 U1340 井位的岩芯为材料, 通过详细分析放射虫特征种的地层分布特征, 并结合该井位有效的生物地层事件年龄和古地磁数据, 首次建立了白令海南部上新世以来的放射虫生物地层及其年龄框架. 这一方面将进一步完善高纬度海区的微体古生物地层学资料, 为全球同时代的地层对比“搭桥”; 另一方面也为该海区古海洋学的深入研究提供生物地层学的基础资料.

1 材料与方法

本文所研究的 IODP323 航次 U1340 井位(53°24.0008′N, 179°31.2973′W)位于白令海鲍尔斯海脊南端的东侧(图 1), 水深 1295 m. 该井位钻取 A, B, C 共 3 个孔, 其中 A 孔钻取的岩芯长度最大, 约 604 m. 由于各孔的取样深度, 取芯率及取样质量之间存在差异, 因此最后的连续岩芯取样资料由各孔的岩芯通过层位对比组合而成, 以此获取的合成柱样长度为 604.5 m. 该井位沉积物主要由硅藻软泥和硅藻

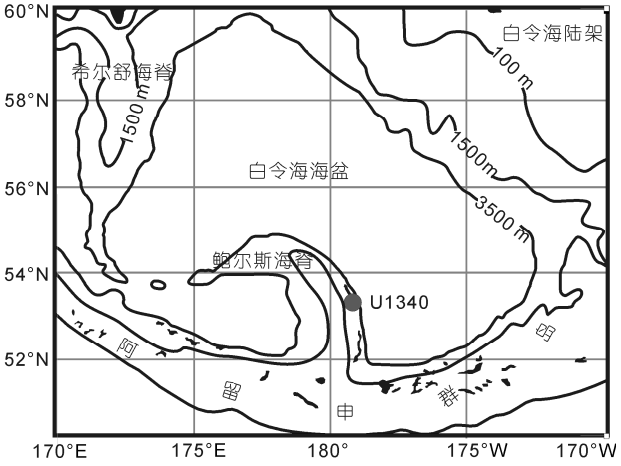


图 1　白令海 U1340 井位的地理位置

据王汝建等(2005b)修改

粉砂层组成, 少数层位含火山物质及陆源硅质碎屑, 放射虫保存状况良好至中等. 本文对整个岩芯柱的放射虫分析, 在井深 0~15 m 层段以 1.5 m 间隔取样, 在井深 15 m 以下的取样间隔为 6 m, 共分析放射虫样品 97 个.

为了减少对放射虫化石的破坏并防止小个体放射虫的流失, 在样品处理过程中未进行过筛, 样品处理和薄片制备的主要过程如下: (1) 称取适量干样置于小烧杯中, 加入 25 mL 浓度 10% 的 H_2O_2, 持续反应 30 min; (2) 待反应完全后, 超声振荡 2 min, 再将烧杯移出静置于实验台上 2 min; (3) 倒去上层悬浊液, 往烧杯中注入去离子水, 静置 2 min; (4) 重复步骤(3), 直至烧杯中的水体清澈; (5) 将烧杯中富集有放射虫标本的液体转移至离心管中, 去除多余的水分之后, 均匀地涂抹于 1~2 个载玻片上, 滴加适量树脂并用盖玻片封片. 在双目透射生物显微镜下对每个薄片中的放射虫进行了鉴定和统计, 初步获得放射虫 102 属, 227 种. 为了对放射虫化石带进行详细的描述和分析, 本文选取了在北太平洋亚极区上新世以来的放射虫化石带中有过报道和描述的放射虫属种(Ling, 1973; Shilov, 1995; Morley 等, 1995; Motoyama, 1996; Kamikuri 等, 2004), 以及在 U1340 井位中保存较好、特征明显、便于鉴定, 且在地层中的分布有着明显变化特征的代表性属种共 31 个, 其中, 典型属种的形态特征及其在 U1340 井位中的地层分布分别如图 2 和 3 所示, 依据它们在地层中的详细分布特征识别出了 25 个放射虫地层事件(图 3).

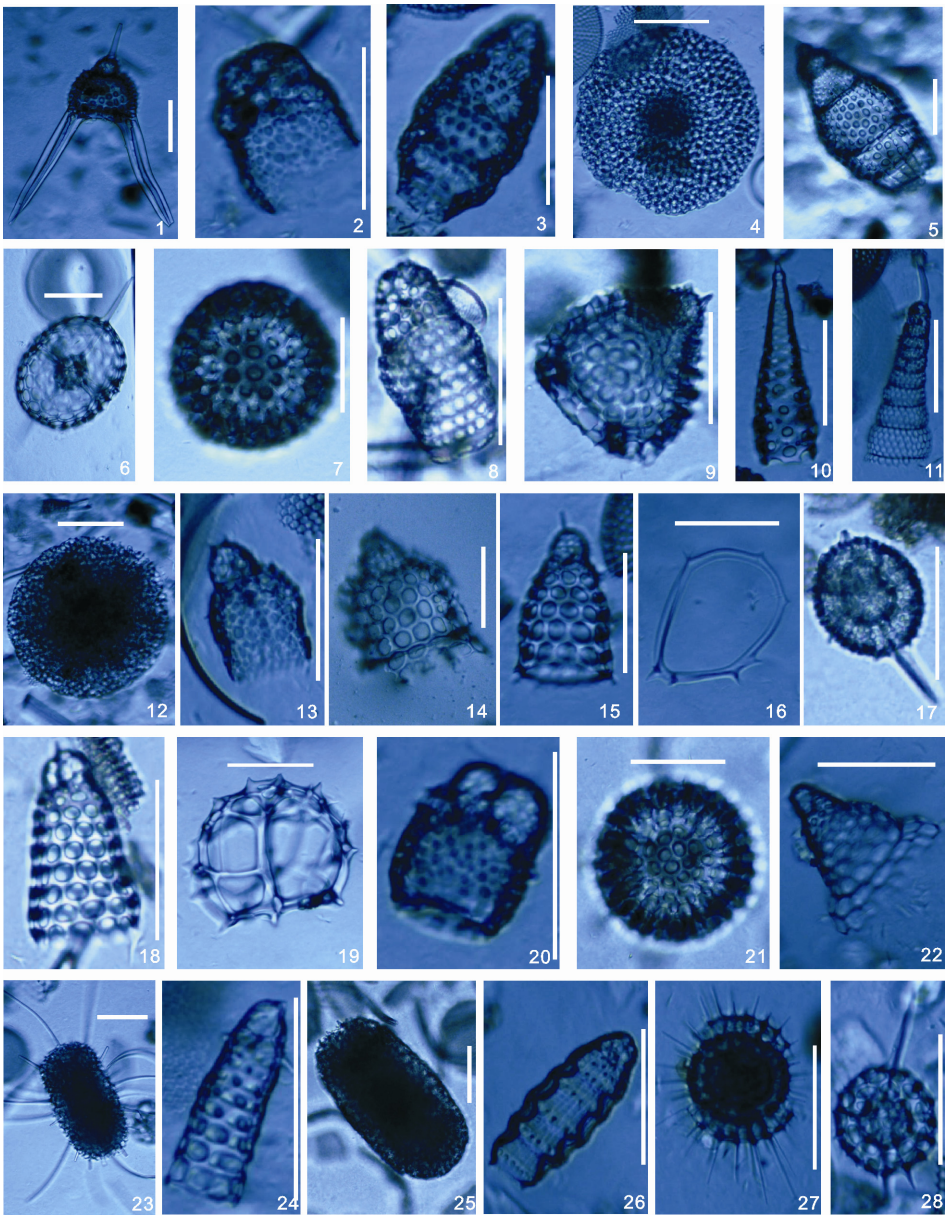


图 2　IODP323 航次 U1340 井位放射虫典型属种照片

比例尺均为 75 μm. 1-*Lychnocanoma nipponica sakii* Morley and Nigrini, U1340A-2H-3W, 52~54 cm. 2-*Amphimelissa setosa* (Cleve), U1340A-4H-6W, 2~4 cm. 3-*Botryostrobus aquilonaris* (Bailey), U1340A-2H-7W, 58~60 cm. 4-*Spongodiscus* sp. (Ling), U1340A-7H-6W, 2~4 cm. 5-*Eucyrtidium matuyamai* Hays, U1340A-20H-1W, 2~4 cm. 6-*Axoprunum acquilonium* (Hays), U1340A-31H-3W, 2~4 cm. 7-*Thecosphaera akitaensis* Nakaseko, U1340A-59X-5W, 2~4 cm. 8-*Phormostichoartus pitomorphus* Caulet, U1340A-34H-5W, 2~4 cm. 9-*Dictyophimus bullatus* Morley and Nigrini, U1340A-59X-5W, 2~4 cm. 10-*Cornutella profunda* Ehrenberg, U1340A-26H-5W, 2~4 cm. 11-*Cyrtopera laguncula* Heackel, U1340A-2H-4W, 53~55 cm. 12-*Spongopyle osculosa* Dreyer, U1340A-59X-5W, 2~4 cm. 13-*Lithomelissa setosa* Jørgensen, U1340A-29H-7W, 2~4 cm. 14-*Cycladoophora sakaii* Motoyama, U1340A-68X-1W, 2~4 cm. 15-*Cycladophora cornutoides* (Petrushevskaya), U1340A-2H-5W, 64~66 cm. 16-*Zygocircus acanthophorus* Popofsky, U1340A-2H-3W, 52~54 cm. 17-*Druppatractus irregularis* Popofsky, U1340A-35H-7W, 2~4 cm. 18-*Artostrobus joergenseni* Petrushevskaya, U1340A-12H-3W, 2~4 cm. 19-*Ceratospyris borealis* Bailey, U1340B-1H-2W, 15~17 cm. 20-*Saccospyris antarctica* Haecker, U1340A-2H-4W, 53~55 cm. 21-*Thecosphaera japonica* Nakaseko, U1340B-1H-2W, 15~17 cm. 22-*Cycladophora davisiana* Ehrenberg, U1340B-1H-2W, 15~17 cm. 23-*Amphibrachium* sp., U1340A-56X-3W, 2~4 cm. 24-*Artostrobus annulatus* (Bailey), U1340A-18H-3W, 2~4 cm. 25-*Spongurus pylomaticus* Riedel, U1340A-34H-5W, 2~4 cm. 26-*Siphocampe arachnea* (Ehrenberg), U1340A-2H-1W, 58~60 cm. 27-*Lithelius minor* Jørgensen, U1340A-23H-7W, 2~4 cm. 28-*Dorydruppa bensoni* Takahashi, U1340A-2H-2W, 52~54 cm

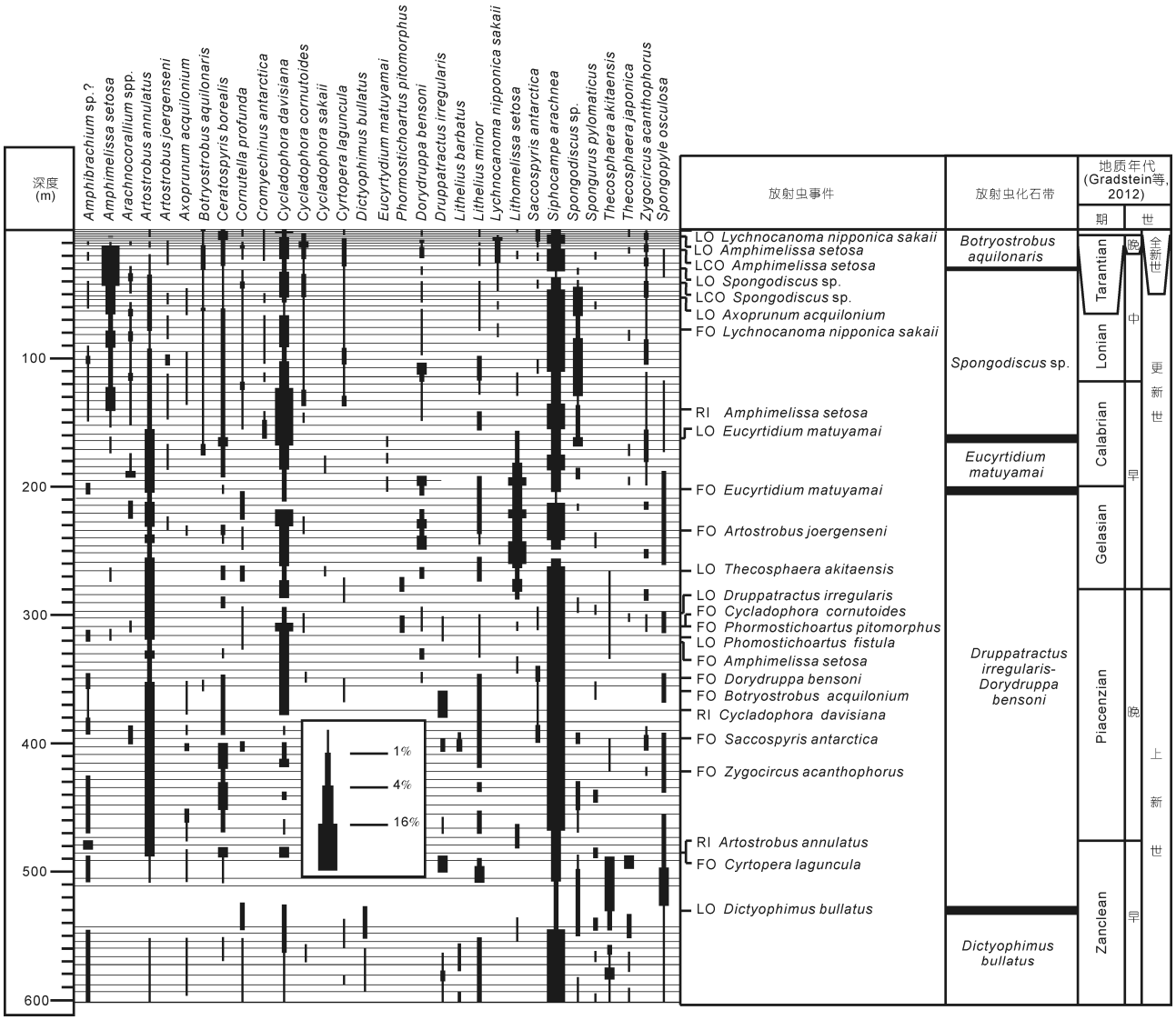


图 3　U1340 井位放射虫代表性属种的地层分布

FO: 初现面; LO: 末现面; LCO: 末次常现面; RI: 快速增加

每个样品统计的放射虫个体数量为 500 枚以上, 个体相对含量表示为: 稀少(<1%)、少量(1%~4%)、常见(4%~16%)、大量(>16%) .

2　U1340 井位的深度-年龄曲线

由于研究井位中有孔虫等钙质类微体化石仅在少数层位零星出现, 且保存较差, 致使该井位缺少有效的氧同位素变化曲线及放射性同位素测年数据, 因此, 该井位放射虫化石带的地质时代主要依据北太平洋亚极区的放射虫生物地层事件及该研究井位中硅藻和古地磁数据(Takahashi 等, 2011)而确定(详见本文 3.1 节). 为了进一步校正和厘定 U1340 井位中放射虫化石带及放射虫事件的绝对年龄, 依据该井位中硅藻、硅鞭毛虫、放射虫等有效的生物地层事件年龄和古地磁数据(表 1)建立了相应的深度-年龄曲线(图 4), 该曲线中各年龄控制点的确定依据如下原则: (1) 同一地层位置的古地磁数据与生物地层事件年龄比较接近时, 采用古地磁的绝对年龄数据; (2) 古地磁年龄与生物地层事件年龄之间存在较大偏差, 且同一深度或邻近位置出现两个或两个以上地层年龄较吻合的生物地层事件时, 取用生物地层事件的

表 1　U1340 井位的古地磁和生物地层事件及其地质年龄 [a)]

序号	地层事件	生物类别	Takahashi等 (2011)		本文	
			深度 (m)	年龄 (Ma)	深度 (m)	年龄 (Ma)
a	LO *Lychnocanoma nipponica sakaii*	放射虫	8.9	0.05	4.35	0.05
b	LO *Amphimelissa setosa*	放射虫	8.9	0.08~0.1	5.5	*0.06*
c	LO *Spongodiscus* sp.	放射虫	18.7	0.28~0.32	29.92	*0.23*
d	LO *Proboscia curvirostris*	硅藻	37.6	0.3		
e	LO *Thalassiosira jouseae*	硅藻	37.6	0.3	37.6	0.3
f	LO *Proboscia barboi*	硅藻	37.6	0.3		
g	LO *Axoprunum acquilonium*	放射虫	18.7	0.2~0.4	46.44	*0.35*
h	LO *Dictyocha subarctios*	硅鞭毛虫	118.4	0.6~0.8	118.4	*0.79*
i	B Brunhes	古地磁	117.9	0.781	117.9	0.781
j	T Jaramillo	古地磁	146.4	0.998	146.4	0.998
k	B Jaramillo	古地磁	155.9	1.072	155.9	1.072
l	LO *Eucyrtidium matuyamai*	放射虫	161.2	0.9~1.5	161.92	*1.17*
m	FCO *Proboscia curvirostris*	硅藻	201.2	1.7~2.0	201.25	1.83
n	FO *Eucyrtidium matuyamai*	放射虫	201.3	1.7~1.9		
o	LO *Stephanopyxis horridus*	硅藻	229.9	1.9~2.0	229.9	*2.10*
p	LO *Thecosphaera akitaensis*	放射虫	267.9	2.4~2.7	265.7	*2.45*
q	FO *Phormostichoartus pitomorphus*	放射虫	309.7	2.15~3.63	312.05	2.90
r	LO *Phormostichoartus fistula*	放射虫	314.4	2.8~3.0		
s	FO *Neodenticula koizumii*	硅藻	531.0	3.7~3.9	531.0	3.84
t	LO *Dictyophimus bullatus*	放射虫	531.0	3.8~4.0		

a) 斜体数字表示估算值; 本文与 Takahashi 等(2011)中放射虫地层事件深度数据的差异源自分析样品分辨率的不同, 本文的样品分辨率较高, 因此相应的深度数据以本文为准. FO: 初现面; LO: 末现面; FCO: 首次常现面; B: 底界; T: 顶界

平均年龄值作为相应的年龄控制点, 以此得到该井位八个不同深度有效的绝对年龄值: 0.05 Ma/4.35 m, 0.3 Ma/37.6 m, 0.781 Ma/117.9 m, 0.998 Ma/146.4 m, 1.072 Ma/155.9 m, 1.83Ma/201.25 m, 2.9 Ma/312.05 m, 3.84 Ma/531 m(表 1). 假定相邻年龄控制点之间的沉积速率均保持不变, 依据最后两个年龄控制点所确定的沉积速率推算出 U1340 井位底部的年龄值约为 4.15 Ma, 地质时代为早上新世晚期(Zanclean 晚期). 研究井位中其他深度的绝对年龄通过在该曲线的两个年龄控制点之间采用线性内插的方法估算得到, 由此获得 U1340 井位中放射虫地层事件及其他生物地层事件绝对年龄的近似值(表 1 中斜体数字及表 2 所示). 由于 U1340 井位的放射虫地层事件年龄数据主要引自北太平洋亚极区的放射虫资料(Motoyama, 1996; Motoyama 等, 1998; Saito, 1999; Kamikuri 等, 2004, 2007), 因此两者之间的年龄数据存在较好的一致性(表 1), 其中, 采用线性内插法得到的放射虫地层事件 *Amphimelissa setosa*(Clever)末现面和 *Spongodiscus* sp.(Ling)末现面的近似年龄值与北太平洋亚极区的相应数据存在着微小偏差, 这可能与区域性的海洋环境差异有关.

3　放射虫化石带及其地层对比

3.1　放射虫化石带

在生物化石带的划分中, 某些特殊属种的首现面和末现面具有时间标志作用, 可以用来确定地层

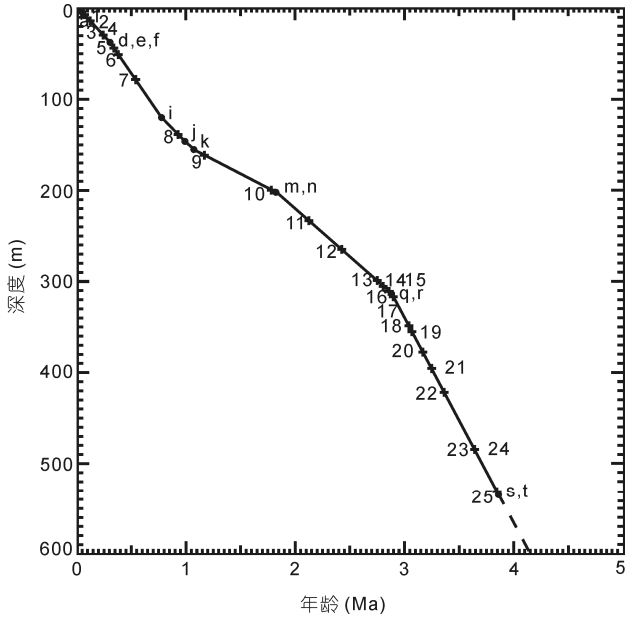


图 4　U1340 井位的深度-年龄曲线

"●"表示年龄控制点, 字母与表 1 相对应; "+"表示放射虫事件, 数字与表 2 相对应

时代及进行地层的划分与对比. 上新世以来北太平洋亚极区用以划定放射虫化石带的主要地层标志种之中(Motoyama, 1996; Motoyama 等, 1998; Saito, 1999; Kamikuri 等, 2004), *Botryostrobus aquilonaris* (Bailey), *Eucyrtidium matuyamai* Hay 和 *Dictyophimus bullatus* Morley and Nigrini 在 U1340 井位较为常见, 而 *Sylatractus universus* Hays 和 *Cycladophora sakaii* Motoyama 仅在少数层位零星出现甚至完全缺失, 不满足建立相应放射虫化石带的基本原则和要求(Hollis, 1976). 为了划分白令海 U1340 井位完整且相对合理的放射虫化石带, 本文依据该研究井位的放射虫资料, 新提出了三个用来划分放射虫生物化石带的地层标志种: *Spongodiscus* sp., *Druppatractus irregularis* Popofsky 和 *Dorydruppa bensoni* Takahashi, 由此得到用以建立U1340井位放射虫生物化石带的6个地层标志种 *Botryostrobus aquilonaris*, *Spongodiscus* sp., *Eucyrtidium matuyamai*, *Druppatractus irregularis*, *Dorydruppa bensoni* 和 *Dictyophimus bullatus*. 依据井位中放射虫标志种的分布特征, 并参考北太平洋亚极区的放射虫生物地层学研究成果(Morley, 1985; Shilov, 1995; Morley 等, 1995; Motoyama, 1996; Motoyama 等, 1998; Saito, 1999; Kamikuri 等, 2004), 可在U1340井位中划分出五个放射虫生物化石带, 从下往上依次为: *Dictyophimus bullatus* 带、*Druppatractus irregularis-Dorydruppa bensoni* 带、*Eucyrtidium matuyamai* 带、*Spongodiscus* sp. 带和 *Botryostrobus aquilonaris* 带(图 2) .

表 2　U1340 井位放射虫事件及其估算年龄值 a)

序号	放射虫事件	深度 (m)	年龄 (Ma)
1	LO *Lychnocanoma nipponica sakaii*	4.35	0.05
2	LO *Amphimelissa setosa*	5.5	0.06
3	LCO *Amphimelissa setosa*	11.7	0.11
4	LO *Spongodiscus sp.*	29.92	0.23
5	LCO *Spongodiscus sp.*	43.43	0.33
6	LO *Axoprunum acquilonium*	46.44	0.35
7	FO *Lychnocanoma nipponica sakaii*	79.92	0.55
8	RI *Amphimelissa setosa*	139.92	0.96
9	LO *Eucyrtidium matuyamai*	161.92	1.17
10	FO *Eucyrtidium matuyamai*	202.22	1.85
11	FO *Artostrobus joergenseni*	233.72	2.14
12	LO *Thecosphaera akitaensis*	265.72	2.43
13	LO *Druppatractus irregularis*	299.73	2.78
14	FO *Cycladophora cornutoides*	309.72	2.87
15	FO *Phormostichoartus pitomorphus*	309.72	2.87
16	LO *Phormostichoartus fistula*	313.22	2.89
17	FO *Amphiemelissa setosa*	316.22	2.91
18	FO *Dorydruppa bensoni*	349.22	3.06
19	FO *Botryostrobus acquilonium*	354.72	3.09
20	RI *Cycladophora davisiana*	378.22	3.19
21	FO *Saccospyris antarctica*	396.52	3.27
22	FO *Zygocircus acanthophorus*	422.32	3.39
23	RI *Artostrobus annulatus*	485.62	3.65
24	FO *Cyrtopera laguncula*	485.62	3.65
25	LO *Dictyophimus bullatus*	531.0	3.84

a) FO: 初现面; LO: 末现面; LCO: 末次常现面; RI: 快速增加

(ⅰ) *Dictyophimus bullatus* 延限带(Motoyama, 1996)

该化石带首先由 Motoyama(1996)提出, 分别以 *Dictyophimus robustus* 的首现面和末现面作为该化石带的底界和顶界. Kamikuri(2004)认为 *Dictyophimus robustus* Motoyamai 是 *Dictyophimus bullatus* Morley et Nigrini 的幼年个体, 因此将该化石带更名为 *Dictyophimus bullatus* 带, 相应地以 *Dictyophimus bullatus* 的末现面和首现面作为该化石带的顶、底界. 本文采用 Motoyama(1996)对该化石带的定义和 Kamikuri

(2004)对该化石带进行更名后的名称. 该化石带中, *Dictyophimus bullatus* 个体数量较少(<4%); 化石带的上部 *Siphocampe arachnea*(Ehrenberg)大量出现, 接近顶部其含量变小; *Cycladophora davisiana* Ehrenberg 和 *Spongopyle osculosa* Dreyer 近于连续出现, 且含量逐渐增大. 常见属种有 *Theosphaera akitaensis* Nakaseko. 主要的放射虫事件为 *Dictyophimus bullatus* 的末现面.

地层年龄: 研究井位中 *Dictyophimus bullatus* 带的顶界即 *Dictyophimus bullatus* 的末现面, 与硅藻化石 *Neodenticula koizumii* Akiba & Yanagisawa 的首现面(3.7~3.9 Ma)(Yanagisawa 等, 1998; Maruyama, 2000)同时出现在井深 531 m 处. 因此, 该化石带代表的地质时代为上新世 Zanclean 期. 依据该井位的深度-年龄曲线确定其顶界在 U1340 井位的绝对年龄约为 3.84 Ma. 受柱样的长度的限制, *Dictyophimus bullatus* 带的底界, 即 *Dictyophimus bullatus* 的首现面在该井位中未能完全确定. 因此, 该井位中 *Dictyophimus bullatus* 带可能只发育了一部分, 其顶界的地层年龄为 3.84 Ma.

(ⅱ) *Druppatractus irregularis-Dorydruppa bensoni* 间隔带(新建)

该化石带以 *Dictyophimus bullatus* 的末现面作为该化石带的底界, *Eucyrtidium matuyamai* 的首现面作为该化石带的顶界. 在该化石带中, *Siphocampe arachnea* 连续大量出现, 其含量在该化石带中占绝对优势, 其次为 *Cycladophora davisiana* 和 *Artostrobus annulatus*(Bailey). *Lithomelissa setosa* Jørgensen 在该化石带的中部零星出现, 至上部含量增大; *Spongodiscus* sp.在这个带的下部连续出现, 中上部消失, 至柱样上部的地层中复又出现; *Druppatractus irregularis* 断续出现于该化石带的中下部, 往上个体消失; *Dorydruppa bensoni* 首现于该化石带中部, 往上频繁出现, 但含量较低, 至该化石带顶部含量略有增加; *Cycladophora sakai* 仅在个别样品中出现, 且个体数量十分稀少. 常见属种有 *Amphibrachium* sp., *Ceratospyris borealis* Bailey, *Lithelius minor* Jørgensen 和 *Spongopyle osculosa*. 该化石带中可识别出的放射虫事件包括 *Dorydruppa bensoni*, *Artostrobus joergenseni* Petrushevskaya, *Amphimellisa setosa* (Cleve), *Phormostichoartus pitomorphus* Caulet, *Botryostrobus aquilonaris* (Bailey), *Cyrtopera laguncula* Haeckel, *Zygocircus acanthophorus* Popofsky, *Saccospyris antarctica* Haecker 和 *Cycladophora cornutoides* (Petrushevskaya) 的首现面; *Thecosphaera akitaensis*, *Phormostichoartus fistula* Nigrini 和 *Druppatractus irregularis* 的末现面; *Cycladophora davisiana* 和 *Artostrobus annulatus* 含量快速增加.

地层年龄: 研究井位中, 该化石带的顶界与该井位中硅藻 *Proboscia curvirostris*(Jousé) Jordan & priddle 首次常现面(地层年龄 1.7~2.0 Ma)(Yanagisawa 等, 1998; Maruyama, 2000)的层位近于一致, 出现在井深 201.3 m 处, 依据中新世-更新世年龄的最新标定结果(2.588 Ma)(Gradstein 等, 2012), 其地质时代为上新世 Zanclean 末期至更新世 Gelasian 期, 地层年龄为 3.84~1.85 Ma.

讨论: 在北太平洋中-高纬度海区, 同地质时代的放射虫化石带有 *Cycladophora sakaii* 带(Motoyama, 1996) 和 *Lamprocyrtis heteroporos* 带(Hays, 1970, emend Foreman, 1975). *Cycladophora sakaii* 带分别以 *Eucyrtidium matuyamai* 的首现面和 *Dictyophimus robustus*(=*Dictyophimus bullatus*)的末现面作为该化石带的顶、底界, 在 ODP186 航次的井位中均有出现(Kamikuri 等, 2004), 其平均地层年龄为 4.3~1.98 Ma. *Lamprocyrtis heteroporos* 带分别以 *Eucyrtidium matuyamai* 的首现面和 *Lamprocyrtis heteroporos*(Hays)的首现面作为该化石带的顶、底界, 在北太平洋 DSDP18, 32, 56, 57, 86 航次的井位中(Kling, 1973; Foreman, 1975; Sakai, 1980; Reynolds, 1980; Morley, 1985)普遍发育, 其平均地层年龄为 2.8~2 Ma. 前文已提及, *Cycladophora sakaii* 仅在极少数层位零星出现, *Lamprocyrtis heteroporos*(Hays)则在研究井位中完全缺失, 因此, 本文依据该井位中放射虫种属的分布特征及化石带划分的基本原则和要求(Hollis, 1976)新建立了 *Druppatratus irregularis Dorydruppa bensoni* 带, 用以取代西北太平洋亚极区发育的 *Cycladophora sakaii* 带.

(ⅲ) *Eucyrtidium matuyamai* 延限带(Hays, 1970; emend Foreman, 1975)

该化石带最初由 Hays(1970)提出, 分别以 *Eucyrtidium matuyamai* 的末现面和 *Lamprocyrtis heteroporos* 的末现面作为该化石带的顶、底界. Foreman (1975)将其定义修订为以 *Eucyrtidium matuyamai* 的延续范围作为该化石带的上、下界. 本文采用

Foreman(1975)对该化石带修订后的定义. 该化石带中, *Siphocampe arachnea* 含量较高, *Cycladophora davisiana* 自下而上含量逐渐增加, 在该化石带顶部, 其含量在种群中占绝对优势; *Lithomelissa setosa* 在该化石带中下部大量出现, 往上个体数量减少; *Eucyrtidium matuyamai* 在该化石中近于连续出现, 但含量很低(<1%); *Zygocircus acanthophorus* 连续出现, 但个体数量较少(<4%). 常见种属有 *Artostrobus annulatus* 和 *Ceratospyris borealis*. 该化石带中可识别出的放射虫事件为 *Eucyrtidium matuyamai* 的首现面和 *Eucyrtidium matuyamai* 的末现面.

地层年龄: 该化石带的顶界出现在井深 161.92 m 处, 位于古地磁 C1r.1n (Jaramillo)期底部(1.072 Ma)之下(Takahashi 等, 2011), 依据中新世-更新世的最新年龄数据(2.588 Ma)(Gradstein 等, 2012), 其地质时代为更新世 Calabrian 期, 地层年龄为 1.85~1.17 Ma.

(ⅳ) *Spongodiscus* sp.间隔带(新建)

该化石带以 *Eucyrtidium matuyamai* 的末现面为底界, *Spongodiscus* sp.的末现面为顶界. 在该化石带中, *Siphocampe arachnea* 和 *Cycladophora davisiana* 含量占优势, *Amphimelissa setosa* 和 *Spongodiscus* sp. 次之. *Arachnocorallium* sp., *Artostrobus annulatus*, *Botryostrobus aquilonaris* (Bailey), *Cycladophora cornutoides*, *Cornutella profunda* Ehrenberg 和 *Cyrtopera laguncula* 在化石带中连续出现, 但含量较低(<4%). 可识别出的放射虫事件包括: *Lychnocanoma nipponica sakaii* 的首现面; *Axoprunum acquilonium* (Hays)和 *Spongodiscus* sp.的末现面; *Spongodiscus* sp.的末次常现面; *Amphimelissa setosa* 含量迅速增加.

地层年龄: *Spongodiscus* sp.的末现面位于井深 29.92 m, 参考白令海及北太平洋亚极区的研究结果(Ling, 1973; Matul 等, 2002), 其年龄为 0.28~0.32 Ma, 因此, 该化石带的地质时代为更新世 Calabrian 期至 Lonian 期, 地层年龄为 1.17~0.23 Ma.

讨论: 在北太平洋中-高纬度海区, 相同地质时代的放射虫化石带为 *Stylatractus universus* 带, 它分别以 *Stylatractus universus* 的末现面和 *Eucyrtidium matuyamai* 的末现面作为化石带的顶、底界, 并在北太平洋海区被多次报道(Kling, 1973; Foreman, 1975; Sakai, 1980; Reynolds, 1980; Morley, 1985; Motoyama, 1996; Motoyama 等, 1998; Kamikuri 等, 2004). 在 U1340 井位中, *Stylatractus universus* 仅在极少数地层中出现, 不符合在该井位中建立 *Stylatractus universus* 带的基本原则和要求(Hollis, 1976). 本文依据 U1340 井位中放射虫种属的分布特征新提出了 *Spongodiscus* sp.带, 用以取代同时期的 *Stylatractus universus* 带, 以更好地开展白令海区的放射虫生物地层对比.

(ⅴ) *Botryostrobus aquilonaris* 间隔带(Hay, 1970), emend.

Hays(1970)首次将 *Eucyrtidium tumidium* 带定义为 *Stylatractus universus* 的末现面至海底表层之间的地层. 此后的研究中, Nigrini(1977)将 *Eucyrtidium tumidium* 归类为 *Botryostrobus aquilonaris* (Bailey)的同物异名种, 因此, Reynolds(1980)将 *Eucyrtidium tumidium* 带更名为 *Botryostrobus aquilonaris* 带. 本文采用 Reynolds(1980)所确定的化石带名称, 但由于本文的研究井位中不发育 *Stylatractus universus* 带, 无法确定 *Stylatractus universus* 的末现面, 因此, 本文将该化石带的底界修订为 *Spongodiscus* sp.的末现面, 顶界仍为海底沉积物的表面. 该化石带中, *Siphocampe arachnea* 含量占优势, *Cycladophora davisiana* 次之; *Amphimelissa setosa* 在该化石带的中下部大量出现, 往上个体消失; *Botryostrobus aquilonaris* 在化石带的底部含量增高(>1%)且连续出现, 至该化石带中上部含量降低(<1%). 常见属种有 *Ceratospyris borealis* 和 *Cycladophora cornutoides*. 可识别出的放射虫事件为 *Amphimelissa setosa* 和 *Lychnocanoma nipponica sakaii* 的末现面及 *Amphimelissa setosa* 的末次常现面.

地层年龄: 该化石带是中更新世以来的最后一个放射虫化石带, 其地质时代为更新世 Lonian 期至全新世, 地层年龄为 0.23 Ma 至今.

3.2 白令海与北太平洋中-高纬度的放射虫化石带对比

目前, 多数学者在北太平洋中-高纬度海区早上新世晚期以来的地层中划分了 5 个放射虫化石带(Hays, 1970; Kling, 1973; Foreman, 1975; Sakai, 1980; Reynolds, 1980; Morley, 1985; Motoyama, 1996; Motoyama 等, 1998; Kamikuri 等, 2004), 本文将 U1340 井位上新世以来的 5 个放射虫化带与其进行了对比(图 5).

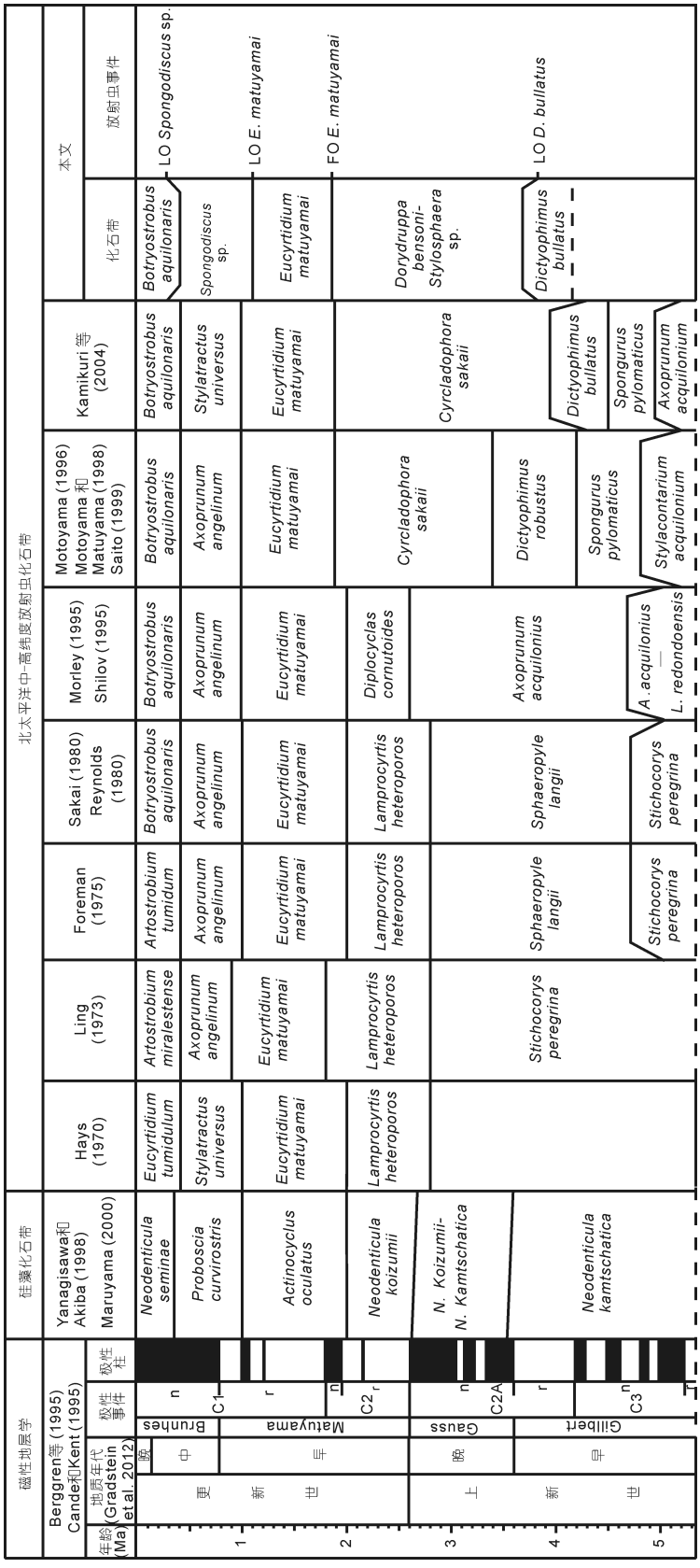


图 5　北太平洋中-高纬度放射虫与硅藻化石带对比图

虚线表示缺失

U1340 井位中建立的放射虫化石带自上而下依次为 *Botryostrobus aquilonaris* 带、*Spongodiscus* sp. 带、*Eucyrtidium matuyamai* 带、*Druppatractus irregularis-Dorydruppa bensoni* 带和 *Dictyophimus bullatus* 带. 第一个带 *Botryostrobus aquilonaris* 带, 前人普遍认为其底界在北太平洋海区的平均年龄为 0.43 Ma (Hays, 1970; Kling, 1973; Foreman, 1975; Sakai, 1980; Reynolds, 1980; Morley, 1985; Motoyama, 1996; Motoyama等, 1998; Kamikuri等, 2004), 本文修订后的 *Botryostrobus aquilonaris* 带底界在地层中的位置上移, 年龄更轻(0.23 Ma), 可与前人研究结果中 *Botryostrobus aquilonaris* 带的中上部进行对比, 此外, 该化石带在地质时代上还相当于北太平洋海区硅藻 *Neodenticula seminae* 带 (0.3 Ma 至今)(Yanagisawa 等, 1998; Maruyama, 2000). 第二个带 *Spongodiscus* sp.带与北太平洋地区的 *Stylatractus universus* 带底界均为 *Eucyrtidium matuyamai* 的末现面, 而 *Spongodiscus* sp.带顶界(0.232 Ma)较 *Stylatractus universus* 带顶界的地层年龄年轻(0.43 Ma), 因此, 本文U1340井位中 *Spongodiscus* sp.带相当于北太平洋中-高纬度海区的 *Stylatractus universus* 带与 *Botryostrobus aquilonaris* 带的中下部, 且与北太平洋海区硅藻 *Probocia curvirostris* 带(1.01/1.48~0.3 Ma)(Yanagisawa 等. 1998; Maruyama, 2000)相当. 第三个带 *Eucyrtidium matuyamai* 带与北太平洋中-高纬度海区广泛发育的 *Eucyrtidium matuyamai* 带的顶、底界定义一致, 地层年龄很接近, 因此, 两者可以很好地对比, 并与硅藻 *Actinocyclus oculatus* 带(2.0~1.01/1.48 Ma)(Yanagisawa 等, 1998; Maruyama, 2000)大致相当. 第四个带 *Druppatractus irregularis-Dorydruppa bensoni* 带沿用了 Motoyama(1996)对 *Cycladophora sakaii* 带的定义, 且两者的地质时代及地层年龄近于一致, 因此, 该化石带与北太平洋高纬度海区发育的 *Cycladophora sakaii* 带(3.4/4.3~1.98 Ma)可以进行很好地对比. 此外, 该化石带的中上部还可与 *Lamprocyrtis heteroporos* 带进行较好的对比, 相当于硅藻 *Neodenticula koizumii* 带(2.61/2.68~2.0 Ma) (Yanagisawa 等, 1998; Maruyama, 2000); 该化石带中下部可与 *Stichocorys peregrine* 带中上部、*Sphaeropyle langii* 带中上部和 *Axoprunum acquilonium* 带上部进行对比, 相当于硅藻 *N. koizumii-N. kamtschatica* 带(3.53/3.59~2.61/2.68 Ma)(Yanagisawa 等, 1998; Maruyama, 2000). 第五个带 *Dictyophimus bullatus* 带受柱状样长度的限制不能确定其底界, 但依据该化石带的主要特征及其在 U1340 井位中的顶界位置和地层年龄(3.84 Ma), 可暂且将该化石带与北太平洋高纬度地区发育的同名放射虫化石带 *Dictyophimus bullatus* 带(4.3/4.4~3.8/4.0 Ma)进行对比.

4 结论

(1) 对白令海 IODP323 航次 U1340 井位的放射虫进行了详细的鉴定和统计, 依据放射虫特殊属种在该研究井位中的分布特征, 识别出 25 个放射虫地层事件, 建立了白令海南部上新世以来的5个放射虫化石带, 自下而上依次为: *Dictyophimus bullatus* 延限带(Motoyama, 1996); *Druppatractus irregularis-Dorydruppa bensoni* 间隔带(新建); *Eucyrtidium matuyamai* 延限带(Hays, 1970; emend Foreman, 1975); *Spongodiscus* sp. 间隔带(新建); *Botryostrobus aquilonaris* 间隔带(Hay, 1970), emend.

(2) 利用 U1340 井位有效的古地磁数据及生物地层事件年龄的综合分析结果, 建立了 U1340 井位的深度-年龄曲线, 采用线性内插法估算了该井位放射虫化石带及 25 个放射虫事件绝对年龄的近似值, 并以此获得 U1340 井位的底界年龄为 4.15 Ma, 地质时代为早上新世晚期(Zanclean 晚期).

(3) 对 U1340 井位与北太平洋中-高纬度早上新世晚期以来的放射虫化石带进行了对比, 其中, 本文修订后的 *Botryostrobus aquilonaris* 带相当于前人同名化石带的中上部, 新提出的 *Druppatractus irregularis-Dorydruppa bensoni* 带和 *Spongodiscus* sp.带两个新化石带, 可分别与北太平洋亚极区发育的 *Cycladophora sakaii* 带和 *stylatractus universus* 带进行较好的对比.

致谢 本文研究样品由综合大洋钻探计划(IODP)提供.

参考文献

王汝建, 陈荣华. 2005a. 白令海晚第四纪的 *Cycladophora davisiana*: 一个地层学工具和冰期亚北极太平洋中层水的替代物. 中国科学 D 辑: 地球科学, 35: 149–157

王汝建, 陈荣华, 肖文申. 2005b. 白令海表层沉积物中放射虫的深度分布特征及其海洋学意义. 微体古生物学报, 22: 127–135

Berggren W A, Kent D V, Swisher C C, et al. 1995. A revised Cenozoic geochronology and chronostratigraphy. In: Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, et al, eds. Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation. Oklahoma: SEPM Spec Pub. 129–212

Cande S C, Kent D V. 1995. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. J Geophys Res, 100: 6093–6095

Foreman H P. 1975. Radiolaria from the North Pacific, Deep Sea Drilling Project, Leg 32. In: Larson R L, Moberly R, et al, eds. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 32. Washington D C: US Government Printing Office. 579–676

Funayama M. 1988. Miocene radiolarian stratigraphy of the Suzu area, northwestern part of the Noto Peninsula, Japan (in Japanese with English abstract). Contrib Inst Geol Paleontol Tohoku Univ, 91: 15–41

Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. 2012. The Geological Time Scale 2012. Amsterdam: Elsevier. 979–1010

Hays J D. 1970. Stratigraphy and evolutionary trends of Radiolaria in North Pacific deep-sea sediments. Geol Soc Am Mem, 126: 185–218

Hollis D H. 1976. International Stratigraphic Guide: A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure. 2nd ed. New York: Wiley. 53–67

Itaki T, Kim S, Rella S F, et al. 2012. Millennial-scale variations of late Pleistocene radiolarian assemblages in the Bering Sea related to environments in shallow and deep waters. Deep-Sea Res Part II, 61: 127–144

Kling S A. 1973. Radiolaria from the eastern North Pacific, Deep Sea Drilling Project, Leg 18. In: Kulm L D, Von Huene R, et al, eds. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 18. Washington D C: US Government Printing Office. 617–671

Kamikuri S, Nishi H, Motoyama I, et al. 2004. Middle Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy in the Northwest Pacific Ocean, ODP Leg 186. Isl Arc, 13: 191–226

Kamikuri S, Nishi H, Motoyama I. 2007. Effects of late Neogene climatic cooling on North Pacific radiolarian assemblages and oceanographic conditions. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 249: 370–392

Ling H Y. 1973. Radiolaria: Leg 19 of the Deep Sea Drilling Project. In: Creager J S, Scholl D W, et al, eds. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 19. Washington D C: US Government Printing Office. 777–797

Maruyama T. 2000. Middle Miocene to Pleistocene diatom stratigraphy of leg 167. In: Lyle M, Koizumi I, Richter C, et al, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 186. Ocean Drilling Program, College Station, TX. 63–110

Matul A, Abelmann A, Tiedemann R, et al. 2002. Late Quaternary polycystine radiolarian datum events in the Sea of Okhotsk. Geo-Mar Lett, 22: 25–32.

Morley J J. 1985. Radiolarians from the Northwest Pacific, Deep Sea Drilling Project Leg 86. In: Heath G R, Burckle L H, et al, eds. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 86. Washington D C: US Government Printing Office. 399–422

Morley J J, Nigrini C. 1995. Miocene to Pleistocene radiolarian biostratigraphy of North Pacific Sites 881, 884, 885, 886 and 887. In: Rea D K, Basov I A, Scholl D W, et al, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 145. Ocean Drilling Program, College Station, TX. 55–91

Motoyama I. 1996. Late Neogene radiolarian biostratigraphy in the subarctic Northwest Pacific. Micropaleontology, 42: 221–262

Motoyama I, Maruyama T. 1998. Neogene diatom and radiolarian biochronology for the middle-to-high latitudes of the Northwest Pacific region: Calibration to the Cande and Kent's geomagnetic polarity time scales (CK 92 and CK 95) (in Japanese with English abstract). J Geol Soc Japan, 104: 171–183

Nigrini C. 1977. Tropical Cenozoic Artostrobiidae (Radiolaria). Micropaleontology, 23: 241–269

Nigrini C, Sanfilippo A. 2001. Cenozoic radiolarian stratigraphy for low and middle latitudes with descriptions of biomarkers and stratigraphically useful species. ODP Technical Note, 27. Ocean Drilling Program, College Station, TX

Reynolds R A. 1980. Radiolarians from the western North Pacific, Leg 57, Deep Sea Drilling Project. In: Scientific Party, ed. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 56/57, Part 2. Washington D C: US Government Printing Office. 735–769

Saito T. 1999. Revision of Cenozoic magnetostratigraphy and the calibration of planktonic microfossil bio-stratigraphy of Japan against this new time scale (in Japanese with English abstract). J Japan Associat Petroleum Technol, 64: 2–15

Sakai T. 1980. Radiolarians from Sites 434, 435, and 436, Northwest Pacific, Leg 56, Deep Sea Drilling Project. In: Scientific Party, ed. Initial

Reports of the Deep Sea Drilling Project 56/57, Part 2. Washington D C: US Government Printing Office. 695–733

Sanfilippo A, Nigrini C. 1998. Code numbers for Cenozoic low latitude radiolarian biostratigraphic zones and GPTS conversion tables. Mar Micropaleontol, 33: 109–156

Shilov V V. 1995. Miocene-Pleistocene radiolarians from Leg 145, North Pacific. In: Rea D K, Basov I A, Scholl D W, et al, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Result 145. Ocean Drilling Program, College Station, TX. 93–116

Takahashi K. 2005. The Bering Sea and Paleoceanography. Deep-Sea Res Part II, 52: 2080–2091

Takahashi K, Ravelo A C, Alvarez Zarikian C A, et al. 2011. Expedition reports: Bering Sea paleoceanography. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, 323. Tokyo: Integrated Ocean Drilling Program Management International Inc. Doi: 10.2204/iodp.proc. 323.104.2011

Tanaka S, Takahashi K. 2005. Late Quaternary paleoceanographic changes in the Bering Sea and the western subarctic Pacific based on radiolarian assemblages. Deep-Sea Res Part II, 52: 2131–2149

Yanagisawa Y, Akiba F. 1998. Refined Neogene diatom biostratigraphy for the northwest Pacific around Japan, with an introduction of code numbers for selected diatom biohorizons. J Geol Soc Japan, 104: 395–414