

DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2015. 03023

亚北极太平洋阿拉斯加湾 50 kaBP 以来 放射虫组合指示的古海洋变化

张海峰^{1,2}, 王汝建², 肖文申², 李文宝^{2,3}

(1. 国家海洋局 海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 杭州 310012;

2. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

3. 内蒙古农业大学 水资源保护与利用自治区重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要:利用 SO202-INOPEX 航次在亚北极太平洋阿拉斯加湾获取的沉积物岩心,以及基于 AMS¹⁴C 测年数据建立的年龄模式,开展了 50 kaBP 以来放射虫的古海洋学研究,获得如下认识:(1)*Cycladophora davisiana* 是阿拉斯加湾最具代表性的优势种放射虫,其次是 *Siphocampe arachnea* 和 *Acanthodesmia micropora*;(2)对放射虫的统计数据进行分析,提取出 4 个方差极大因子,可以代表不同的水团甚至是水体的混合作用,其中 *C. davisiana* 作为中层水团演化的替代性指标,对冰期-间冰期旋回和快速气候变化事件的响应较为敏感,其变化特征表明该区中层水团的演化主要受控于亚北极太平洋 NPIW 形成源区及其输送机制的变化;(3)基于放射虫标志种 *Ceratospyrus borealis*, *Actinomma boreale* / *Leptodermum* 和 *Rhizoplegma boreale* 的变化特征及其环境指示意义,认为 50 kaBP 以来阿拉斯加湾上层海洋环境的变化具有阶段性:LGM 之前,该区海洋表层生产力相对稳定,海冰消长与冰融水脉冲明显地响应于冰阶-间冰阶等气候旋回;LGM 期间,受大陆冰盖、大气环流和海洋环流变化的综合影响,冰融水事件以及海冰持续增加、生产力明显下降的状况可能较少出现;LGM 以来,在 B-A 和 YD 等快速气候变化事件的影响下,冰融水脉冲引起表层生产力快速增加,气候快速变冷则造成生产力急剧降低。

关键词:放射虫组合;中层水团演化;上层海洋环境;50 kaBP 以来;阿拉斯加湾

中图分类号:P736. 22

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2015)03-0023-14

阿拉斯加湾位于东北太平洋的亚北极区,其西部、北部和东部边界是北美大陆(阿拉斯加)高山林立的陡峭海岸,南部则是广阔的东北太平洋。其海底地形十分复杂,海盆深度向北逐渐变浅,具有许多深切入大陆架的深谷,以及大量与海岸交错的大小海湾^[1]。该区现代大气与海洋之间的相互作用会对北美西海岸的气候产生显著的影响^[2],在 PDO(Pacific Decadal Oscillation)正相位期间,阿留申低压增强导致阿拉斯加沿岸流(Alaska Coastal Current, ACC)加强并引起降雨,进而导致阿拉斯加东南部沿岸地区径流量的增加,反之则相应减弱。同时,区域性的气候条件反过来也影响该区的海洋环流系统

以及水体中营养盐的供应,并最终为该区特征性的高生产力生态系统提供保障^[1]。

目前,对阿拉斯加湾及其邻近的北美大陆末次盛冰期(Last Glacial Maximum, LGM)以来的古海洋学、古气候学研究已经取得了一些进展^[3-9],然而,放射虫这一极区古海洋学研究的有效指标在阿拉斯加湾的应用却一直不够深入。尽管已有学者指出,至少在末次冰期北太平洋的碳酸盐补偿深度(Carbonate Compensation Depth, CCD)比现代深^[10],阿拉斯加湾海盆中部突出的 Patton-Murray 海山群也有利于钙质沉积的保存,但作为典型的亚北极太平洋高纬海域,该区海洋沉积物中的放射虫动物群在古海洋学研究中仍然具有不可替代的作用。目前为数不多的研究表明,基于放射虫的转换函数^[11]估算的表层海水温度显示 LGM 期间该区 SST 降低了 2~4 °C^[2]。Kamikuri 等^[12]则利用 ODP 887 站位的岩心开展了上新世气候变冷对该区放射虫动物群和海洋环境的影响。此外, Takahashi^[13-15]利用沉积物捕获器(1 000 和 3 800 m 层位)研究了阿拉斯加湾南部海域放射虫通量的季节-年际变化及其对现代海洋环境和气候变化的响应。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41030859);国家自然科学基金中俄合作与交流项目(41211120173);南北极环境综合考察与评估专项项目(CHINARE2015-03-02);国家海洋局极地考察办公室对外合作支持项目(IC201105);中国地质调查局地质调查工作项目(水 [2015]02-013-012)

作者简介:张海峰(1986—),男,硕士,主要从事海洋地质学和古环境研究, E-mail: zhanghf@sio. org. cn

通讯作者:王汝建(1959—),男,教授,主要从事海洋地质学、古海洋学与古气候学研究, E-mail: rjwang@tongji. edu. cn

收稿日期:2015-04-12; **改回日期:**2015-05-08. 文凤英编辑

本文利用 2008 年 SO202-INOPEX 航次在阿拉斯加湾采集到的沉积物岩心,采用成熟的微体古生物学方法,在根据 AMS¹⁴C 测年数据建立的良好年龄模式的基础上,开展放射虫动物群的全属种鉴定和统计工作,并利用 Q 型因子分析等方法,结合全球气候变化的相关记录,探讨该区放射虫的属种分布特征及其所指示的古海洋变化,为亚北极太平洋古海洋与古气候演化的研究提供重要依据。

1 现代海洋环境

阿拉斯加湾的现代表层洋流主要受控于两个气旋式环流系统,即位于深海盆地中的亚北极环流以及位于陆架上的阿拉斯加沿岸流(图 1)。其中亚北极环流的南部边界为西风漂流(West Wind Drift, WWD),其到达北美西海岸分为两支:向南流动的加利福尼亚流(California Current, CC)和向北流动的阿拉斯加流(Alaska Current, AC),AC 是典型的东部边界流,具有大量漩涡和曲流^[1]。但也有学者认为,WWD 北侧存在一支同样自西向东流动的亚北极流^[16-18],且二者都来源于白令海西部东堪察加流向南流动形成的亲潮,其不同之处在于,二者到达东太平洋一侧加利福尼亚湾附近,WWD 转而向南形成 CC,而亚北极流则分而为二,一部分向南汇入 CC,另一部分则转而向北,在阿拉斯加湾形成 AC^[12,17]。不过,这些研究都指出 AC 在阿拉斯加湾北部受海岸和海底地形的控制,逆时针转向西南沿等深线流动,一部分形成逆时针流动的阿拉斯加环

流(Alaska Gyre, AG)^[12,17],另一部分水体则沿阿留申群岛向西流动,成为阿留申流(Alaskan Stream, AS)的起源,并发育成 AG 的西部边界流^[1,9],AS 在 Kodiak 岛西南边缘附近(约 155°W)流幅变窄(约 50 km)、流速增加(>50 cm/s),沿着阿拉斯加半岛的陆坡和阿留申群岛向西南方向流动^[1,19-20]。

ACC 对阿拉斯加湾地区具有重要意义,其在沿岸风和大量淡水径流的驱动下支配着阿拉斯加湾陆架上的环流系统,并控制着溶解和悬浮物质的搬运^[21-23]。强烈的气旋风从秋季开始持续到整个春季,而淡水径流量在晚春时节增加,并在秋季达到高峰,其年平均输入量超过密西西比河^[1]。该区 9—11 月是典型的湿季,6—7 月则相对较干^[1]。由于降水具有显著的季节性特征(冬季降雪、夏季降雨),同时,降水还会将沿岸地区的冰雪融化,因此,该区所经历的强烈的淡水事件中,地面径流的信号都强于降水信号,且径流量通常在 10 月出现最大值^[24]。到了冬季,表层水变冷和暴风使海水层化作用变弱,进而导致垂向混合作用增强,使上部混合层变深,下部水体中高含量的营养盐被输送到表层水^[25]。

尽管阿拉斯加湾地处亚北极区,但其表层海水温度(Sea-surface Temperature, SST)相对较高,夏季和冬季平均值分别约为 12.6 °C 和 5.4 °C^[3,26],表层海水盐度(Sea-surface Salinity, SSS)的年平均值则较低,约为 32.6 psu^[26],这种温盐特征,限制了海水的垂向对流^[27],导致没有深层水在此形成,而且底层水的氧含量相对较低^[3]。此外,由于海水中 CO₂ 的总溶解度较高,因此 CCD 面较浅(约 3 700 m)^[10,28]。

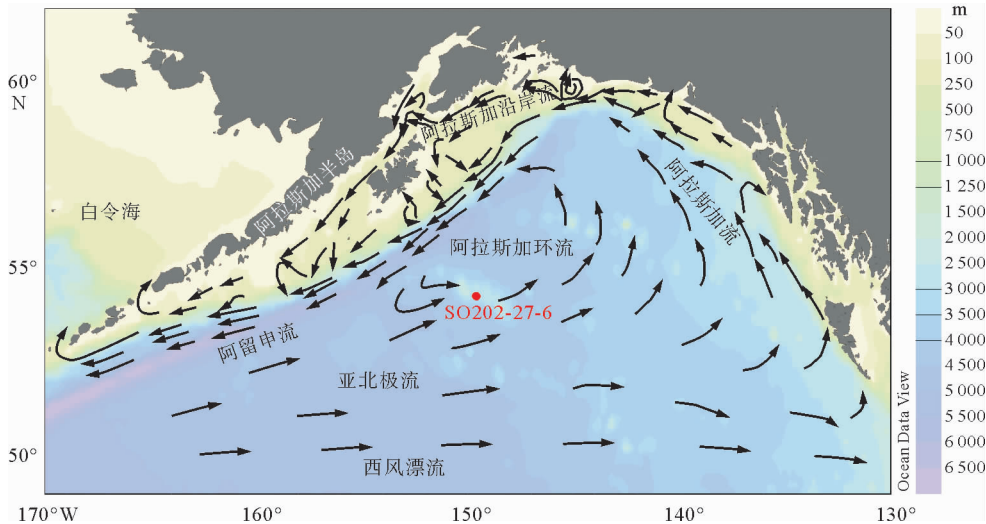


图 1 阿拉斯加湾现代表层洋流系统及 SO202-27-6 站位位置(现代表层洋流系统据文献[1,17]重绘)

Fig. 1 Modern surface circulation system (arrows) and location of Site SO202-27-6 (dot) from Gulf of Alaska, subarctic Pacific(Modern surface circulation system is redrawn after references[1,17])

2 材料与方法

2.1 材料来源

本文研究的沉积物岩心编号 SO202-27-6 (54°17.77' N、149°36.01'W,水深 2 919 m),位于亚北极太平洋阿拉斯加湾海域 Patton 海山西侧(图 1),岩心长度 2.91 m,采样间隔 0~1 m 为 4 cm,1~2.88 m 为 5 cm,样品总数 61 个。由德国 R/V Sonne 号科学考察船于 2008 年 7—8 月实施的 SO202-INOPEX 航次期间利用船载的箱式取样器获取。该站位沉积物以硅质生物软泥为主,含大量钙质生物碎屑和陆源泥质组分,受生物扰动较强烈,见两层明显的火山灰,其中上层(ID93,ID94)位于 119~122 cm 之间,呈略发白的灰色,火山灰的粒度等级为砂质粉砂,其底部界限明显;下层(ID95)位于 135~138 cm 之间,为灰橄榄绿色的细粒火山灰层。二者的来源可能是阿留申-阿拉斯加火山带的火山喷发。另外,在 161~167 cm 还有一层较薄的浅灰色火山灰层(ID96),可能含有细粒的火山玻璃碎屑。

2.2 研究方法

放射虫样品的处理和薄片制备采用德国阿尔弗雷德·魏格纳极地与海洋研究所(AWI)微体古生物室的标准方法^[29-30],利用双目生物显微镜进行放射虫的鉴定和统计,每个样品统计 300~400 枚个体,然后计算每一个属种的百分含量,并选择至少在

一个样品中百分含量大于 2%的属种进行 Q 型因子分析,提取出因子组合,并对其进行解释。Q 型因子分析采用的是经过修改的 CABFAC 程序^[31]。以上工作均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

3 年龄框架

阿拉斯加湾 SO202-27-6 站位岩心的年龄框架是根据 10 个样品中浮游有孔虫(*Neogloboquadrina pachyderma* sin.)的 AMS¹⁴C 测年数据建立的,校正程序为 Calib 7.0,选用的碳储库年龄约为 840±220(全新世)至 1 365±200 a(冰期)(Maier 等,未发表数据),校正后的数据采用线性内插方法得到每个采样点所在深度的年龄,本文中顶部采样点(3.5 cm)年龄约 7.565 kaBP,底部采样点(287.5 cm)年龄约 49.725 kaBP(图 2),并据此估算了各时期的沉积速率。

在此年龄模式基础上,本文在讨论阿拉斯加湾放射虫的古海洋学意义时所对比的 Heinrich 事件的时间节点来自 Barbante 等人^[32]的结果。此外,Blockley 等^[33]结合 NGRIP 冰心中氧同位素曲线总结了 60 kaBP 以来(至 2000 年)冰期-间冰期旋回中气候事件的时间节点,认为共有 17 次冰阶(Stadial, GS)与间冰阶(interstadial, GI)旋回,并初步分析了 48 kaBP 以来的 12 次旋回,总体上与前人所采用的 D/O 旋回一致,因此,本文采用的 GI-8、GI-12 等与前人在白令海古海洋学研究所表述的 D/O-8、D/O-12^[34-36]是对应的。

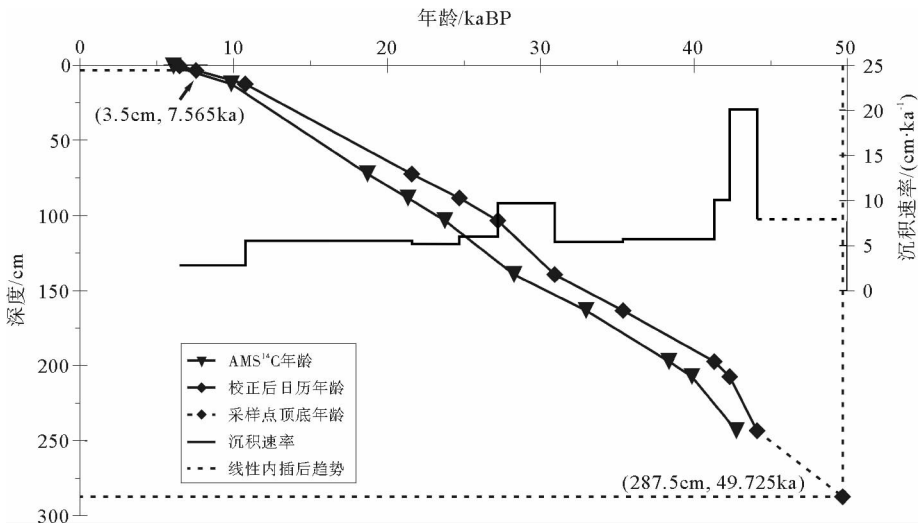


图 2 阿拉斯加湾 SO202-27-6 站位年龄模式(据 Maier et al., 未发表资料)

Fig. 2 Depth-age model of Site SO202-27-6 from Gulf of Alaska, subarctic Pacific (according to Maier et al., unpublished data)

4 结果

4.1 放射虫的优势种及其丰度变化

本研究对采自 SO202-27-6 站位岩心的 61 个沉积物样品中的放射虫进行鉴定和统计,共鉴定出 72 个属 112 个种,其中在至少一个样品中百分含量大于 2% 的种 41 个(表 1)。经对比发现,最具代表性

表 1 阿拉斯加湾 SO202-27-6 站位主要放射虫属种及其百分含量

Table 1 Main radiolarian species and their percentages in Site SO202-27-6 from Gulf of Alaska, subarctic Pacific

分类群	最大值	最小值	平均值
<i>Cycladophora davisiana</i>	28.62	3.45	16.38
<i>Siphocampe arachnea</i>	15.67	4.89	9.88
<i>Acanthodesmia micropora</i>	12.50	3.42	6.91
<i>Phortidium pylonium</i>	7.44	1.63	4.16
<i>Stylodictya validispina</i>	7.89	0.97	3.64
<i>Botryocampe inflata</i>	7.82	0.65	3.37
<i>Stylochlamidium venustum</i>	8.55	0.63	3.16
<i>Ceratospyris borealis</i>	8.78	0.32	2.99
<i>Pseudodictyophimus gracilipes</i>	7.49	0.61	2.88
<i>Spongotrochus glacialis</i>	5.00	0.63	2.39
<i>Actinomma</i> sp.	4.26	0.32	2.07
<i>Spongurus?</i> sp.	4.89	0.00	1.94
<i>Stylatractus</i> sp.	5.02	0.00	1.92
<i>Stylatractus pyriiformis</i>	3.86	0.62	1.81
<i>Lophospyris</i> sp.	3.91	0.00	1.64
<i>Spirema haliomma</i>	6.23	0.00	1.63
<i>Dictyophimus hirundo/crasise</i>	3.45	0.00	1.62
<i>Pseudodictyophimus plathycephalus</i>	2.93	0.28	1.56
<i>Streblacantha circumtexta</i>	3.73	0.00	1.49
<i>Larcospira minor</i> (Jorgensen)	3.62	0.00	1.41
<i>Spongodiscidae</i> (juvenile)	3.95	0.00	1.34
<i>Lithocampe</i> sp.	3.00	0.00	1.26
<i>Actinomma boreale/leptoderma</i>	2.71	0.00	1.25
<i>Lithocampe plathycephala</i>	3.77	0.31	1.17
<i>Plectacantha</i> spp.	3.27	0.00	1.06
<i>Actinomma delicatulum</i>	2.86	0.00	0.95
<i>Cornutella profunda</i>	2.81	0.00	0.84
<i>Antarctissa?</i> sp.	7.30	0.00	0.76
<i>Plectacantha aikiskos</i>	2.74	0.00	0.72
<i>Lithelius minor</i>	3.55	0.00	0.69
<i>Larcopyle butschlii</i>	2.63	0.00	0.68
<i>Pseudodictyophimus</i> spp.	2.83	0.00	0.66
<i>Peridium</i> sp.	2.91	0.00	0.61
<i>Phortidium</i> sp.	2.59	0.00	0.60
<i>Cyrtopera languncula</i>	2.41	0.00	0.55
<i>Peripyramis circumtexta</i>	2.17	0.00	0.39
<i>Phormacantha hystrix</i>	2.13	0.00	0.39
<i>Plectacantha</i> group	2.41	0.00	0.35
<i>Larcospira</i> sp.	2.05	0.00	0.33
<i>Hexaspyris</i> sp.	2.41	0.00	0.32
<i>Botryostrobis aquilonaris</i>	4.61	0.00	0.26

的优势种放射虫是 *Cycladophora davisiana*, 其含量分布范围为 3.45% ~ 28.62%, 平均值为 16.38%; 其次是 *Siphocampe arachnea*, 其含量为 4.89% ~ 15.67%, 平均值为 9.88%; *Acanthodesmia micropora* 的含量则为 3.42% ~ 12.50%, 平均值为 6.91%。另外, *Botryocampe inflata*, *Pseudodictyophimus gracilipes*, *Phortidium pylonium*, *Stylochlamidium venustum*, *Antarctissa?* sp., *Ceratospyris borealis*, *Stylatractus pyriiformis*, *Stylodictya validispina* 等属种在样品中的平均含量也都超过了 2%, 详见表 1。此外, *Rhizoplegma boreal* 和 *Actinomma boreale/leptodermum* 等属种, 虽然丰度较低(平均百分含量都 < 2%), 但因其具有环境指示意义, 故而也对其进行了深入的讨论。

4.2 放射虫的因子分析结果

利用前述 Q 型因子分析方法, 对上述放射虫鉴定和统计结果进行因子计算, 得到 4 个方差极大因子(表 2), 共说明总方差的 95.39%, 可以很好地解释放射虫种群的变化。样品中各因子的载荷分布(表 2, 图 3)显示, 因子 1 在大部分样品中都占优势地位, 在 16 kaBP 之前平均值约为 0.8, 16 kaBP 以来约为 0.5; 因子 2 与因子 1 具有明显的反相关关系, $R = -0.943$, 在约 16 kaBP 之前平均约为 0.5, 16 kaBP 以来约为 0.8; 因子 3 在绝大多数样品中的因子得分值都小于 0, 且振荡幅度较大, 与之相似的是因子 4 的得分除了在顶部少数几个样品中出现高值, 基本上都在 0 附近小幅摆动。通过与 3 个因子分析结果以及 5 个因子分析结果的对比发现, 4 个因子分析结果相对最为合理。

根据以上因子的载荷分布(图 3)和 4 个因子方差极大因子得分矩阵(表 2), 确定因子 1 为 *C. davisiana* 组合, 方差极大因子得分高达 0.956, 占该组合因子得分绝对值之和的比例为 42%, 成为因子 1 中绝对的优势种。因子 2 为 *S. arachnea* 组合, 同时还包括 *P. pylonium*, *B. inflata* 等属种, 三者共占该组合因子得分绝对值之和的 27% 以上。另外, *Larcospira minor* (Jorgensen) 和 *Spongodiscidae* (juvenile) 虽然在样品中含量较低, 但是也表现出与因子 2 相似的分布特征。因子 3 则是 *A. micropora* 组合, 其次是 *Lophospyris* sp., 共占该组合因子得分绝对值之和的 20%, 此外 *P. gracilipes* 等属种也有一定的贡献。因子 4 则至少由 4 个以上的属种组成, 以 *S. venustum*, *C. borealis* 的高得分为

特征,其次是 *S. validispina* 和 *Stylatractus* sp. , 外,*Streblacantha circumtexta* , *S. glacialis* 等属
共占该组合因子得分绝对值之和的 43% 以上。另 种也具有与该因子组合相似的特征。

表 2 阿拉斯加湾 SO202-27-6 站位放射虫 Q 型因子分析的方差极大因子得分矩阵
Table 2 Varimax factor score matrix based on the Q-mode factor analysis of radiolarians in Site SO202-27-6
from Gulf of Alaska, subarctic Pacific

属种	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
<i>Cycladophora davisiana</i>	0.956	−0.114	−0.162	−0.022
<i>Siphocampe arachnea</i>	−0.031	0.67	−0.498	−0.404
<i>Acanthodesmia micropora</i>	0.165	0.452	0.526	−0.041
<i>Phorticum pylonium</i>	0.015	0.26	−0.053	0.068
<i>Stylodictya validispina</i>	0.096	0.136	0.116	0.314
<i>Botryocampe inflata</i>	0.091	0.19	0.152	−0.117
<i>Stylochlamidium venustum</i>	−0.027	0.054	−0.502	0.494
<i>Ceratospyris borealis</i>	−0.027	0.203	0.049	0.497
<i>Pseudodictyophimus gracilipes</i>	0.071	0.071	−0.117	0.103
<i>Spongotrochus glacialis</i>	0.05	0.078	−0.063	0.108
<i>Actinomma</i> sp.	0.066	0.073	0.024	−0.005
<i>Spongurus?</i> sp.	0.04	0.09	0.04	0.09
<i>Stylatractus</i> sp.	0.002	0.106	0.034	0.319
<i>Stylatractus pyriformis</i>	0.017	0.094	0.005	0.135
<i>Lophospyris</i> sp.	0.033	0.132	0.188	0.009
<i>Spirema haliomma</i>	0.058	0.069	0.061	−0.034
<i>Dictyophimus hirundo/crasise</i>	0.092	−0.014	−0.025	0.042
<i>Pseudodictyophimus plathycephalus</i>	0.039	0.081	0.067	0.031
<i>Streblacantha circumtexta</i>	−0.005	0.099	0.012	0.163
<i>Larcospira minor</i> (Jorgensen)	0.001	0.117	0.093	0.101
<i>Spongodiscidae</i> (juvenile)	−0.004	0.141	0.131	0.016
<i>Lithocampe</i> sp.	0.011	0.071	−0.038	−0.025
<i>Actinomma boreale/leptoderma</i>	0.022	0.064	0.041	0.091
<i>Lithocampe plathycephala</i>	0.024	0.067	0.059	0.047
<i>Plectacantha</i> spp.	0.022	0.038	−0.037	−0.005
<i>Actinomma delicatulum</i>	0.045	0.036	0.097	0.037
<i>Cornutella profunda</i>	0.017	0.054	0.041	−0.011
<i>Antarctissa?</i> sp.	−0.049	0.082	−0.141	−0.022
<i>Plectacantha aikiskos</i>	−0.01	0.057	−0.015	0.03
<i>Lithelius minor</i>	−0.003	0.069	0.073	0.062
<i>Larcopyle butschlii</i>	−0.01	0.024	−0.12	0.034
<i>Pseudodictyophimus</i> spp.	0.012	0.051	0.057	−0.013
<i>Peridium</i> sp.	−0.005	0.052	−0.001	0.002
<i>Phorticum</i> sp.	0.014	0.014	−0.01	0.067
<i>Cyrtopera languncula</i>	0.023	0.02	0.022	−0.027
<i>Peripyramis circumtexta</i>	0.016	0.004	−0.024	−0.031
<i>Phormacantha hystrix</i>	0.016	0.013	0.017	−0.003
<i>Plectacantha</i> group	−0.011	0.04	−0.003	−0.008
<i>Larcospira</i> sp.	0.002	0.017	−0.016	0.005
<i>Hexaspyris</i> sp.	−0.015	0.038	−0.015	0.002
<i>Botryostrobos aquilonaris</i>	−0.047	0.075	0.024	0.105

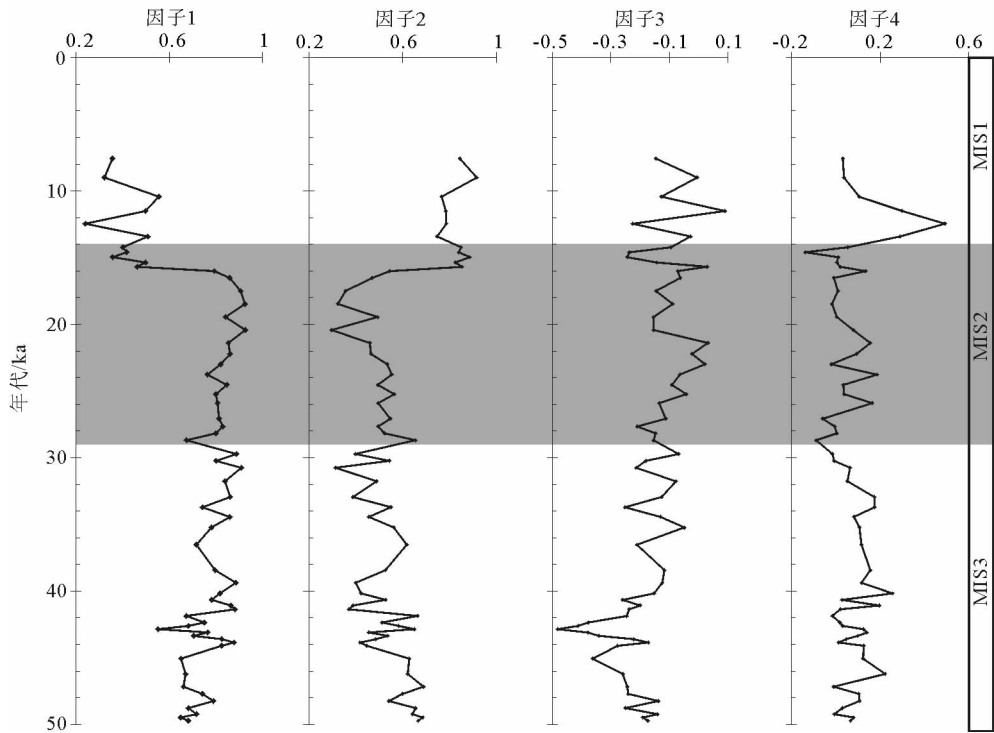


图3 阿拉斯加湾 SO202-27-6 站位因子分析所得的放射虫组合载荷分布特征
Fig. 3 Distribution pattern of radiolarian assemblage loadings based on Q-mode factor analysis in Site SO202-27-6 from Gulf of Alaska, subarctic Pacific

5 讨论

5.1 阿拉斯加湾放射虫组合的环境指示意义

如前所述,SO202-27-6 站位中因子 1 是典型的 *C. davisiana* 组合,该种广泛分布于世界大洋表层沉积物中,尤其在两极高纬海域,是最主要的一个优势种。Tanaka 和 Takahashi^[37] 认为 *C. davisiana* 生活在发育良好的低温中层水体中,这与鄂霍次克海浮游拖网和捕获器样品显示的 *C. davisiana* 是一个中层水种(200~500 m)的结果相符^[38-41]。综合鄂霍茨克海浮游拖网样品、捕获器样品和表层沉积物样品的数据^[39]可以发现,*C. davisiana* 可能捕食细菌和碎屑物质,随着向深部输送的有机悬浮物和碎屑物质的季节性高峰而大量繁殖,并栖息于冷而富氧的中层水体中。目前在北太平洋及其边缘海的古海洋学研究中,*C. davisiana* 作为中层水的良好指标,发挥了重要作用^[35-37, 42-49],甚至可以定性指示冬季海冰的扩张^[50]。因此,因子 1 代表阿拉斯加湾地区的北太平洋中层水(North Pacific Intermediate Water, NPIW)组合(图 4)。

前人对放射虫生态学的研究表明,放射虫 *S.*

venustum 和 *Spongodiscidae*(juvenile)在白令海陆架边缘水深 139~235 m 最丰富,指示较高的表层生产力^[51],这二者和 *S. glacialis* 相对更适应表层水环境,这样的表层水季节性变化较强,且由于季节性海冰融化或融冰水注入,其温度和盐度也较低^[46,52]。Tanaka 和 Takahashi^[37] 认为 *S. venustum* 的分布可能是由于受到了海冰或融冰水的影响,沉积物岩心中 *S. venustum* 较少可能表明当时低温、低盐的表层水环境,在这种环境下 *S. venustum* 和 *S. glacialis* 的幼年个体分布很普遍。更直接的证据则表明亚北极太平洋 *S. venustum* 的生活深度为 50~100 m,*C. borealis* 的生活深度为 50~250 m^[36,53]。因此,因子 4 代表阿拉斯加湾表层水组合,甚至可以作为表层生产力的指示种群组合(图 4)。

因子 2 中的主要优势种是 *S. arachnea*,前人对白令海表层沉积物和捕获器样品的研究指出,*S. arachnea* 是该区最丰富的种之一^[46,52,54],主要生活于 500 m 以下较冷的中层水下部至深层水中,可以作为深层水的替代物,与 Ling 等^[51] 的研究相一致。然而,有学者指出由于阿拉斯加湾现代表层海水温度相对较高、盐度较低,导致该区并没有深层水生成^[3],但在地质历史时期是否也如此尚无法确定。因

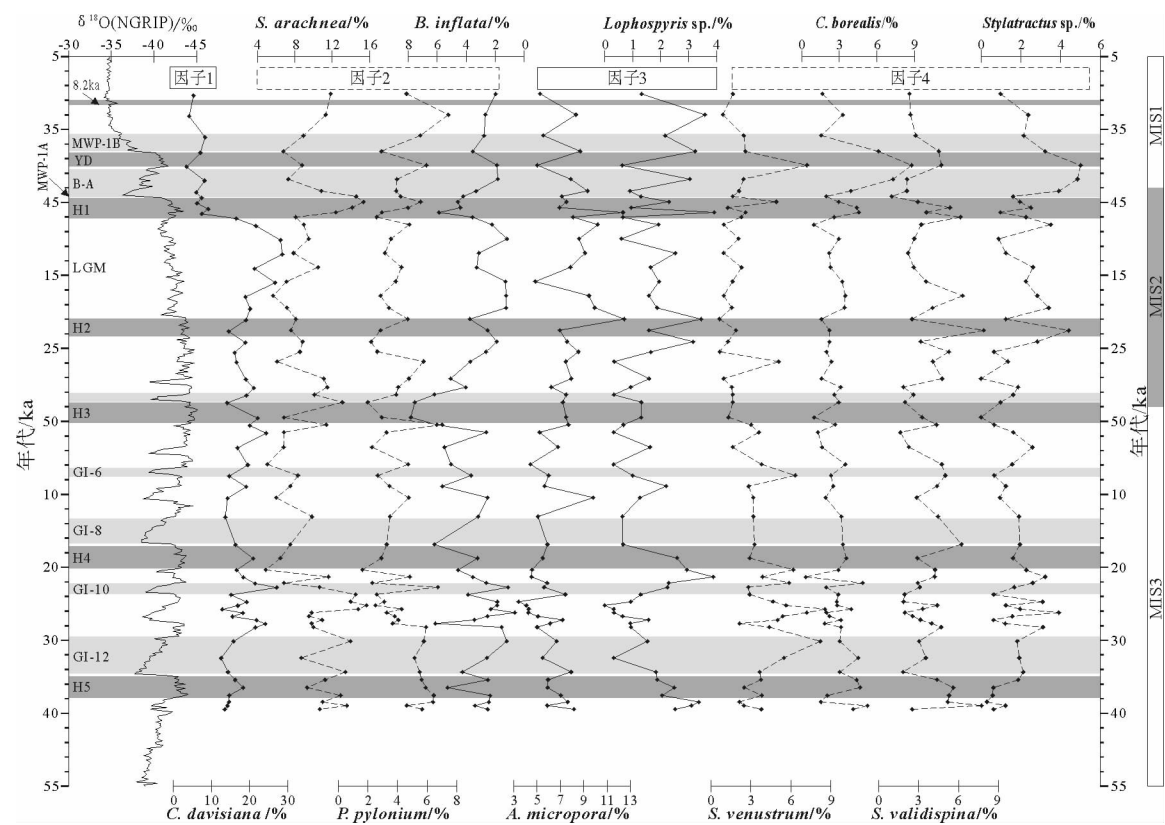


图 4 阿拉斯加湾 SO202-27-6 站位各因子组合主要属种百分含量的变化
Fig. 4 Percentage changes of dominant species in each factor assemblage in Site
SO202-27-6 from Gulf of Alaska, subarctic Pacific

子 1 和因子 2 之间具有显著的反相关关系(图 3), 分别作为这两个因子的主要优势种的 *C. davisiana* 和 *S. arachnea* 可能具有较强的竞争关系, 因此, 因子 2 可能代表的是中层水下部与深层水的混合水体, 而非确切的深层水组合(图 4)。

阿拉斯加湾的放射虫区分出的这 4 个因子组合中, 因子 3 是相对较难确定其指示特征的组合, 该组合主要由 *A. micropora* 和 *Lophospyris* sp. 组成。尽管 Popofsky^[55] 于 1908 年即已指出 *A. micropora* 的生活水深为 0~150 m, 但对该种的关注却并不多。Abelmann^[56] 在南大洋 Powell Basin 和 Bransfield Strait 的表层沉积物及布放在后者水深 300~1 800 m 的捕获器中都发现了该种, 但并没有对其进行讨论; Hays 和 Morley^[57] 对来自鄂霍次克海中部的沉积物捕获器样品的研究发现, *A. micropora* 在 1 061 m 的捕获器中通量远大于其在 258 m 层位中的通量, 因此 Hays 等^[58] 认为其生活深度在 200 m 以下。Okazaki 等人^[41] 曾在鄂霍次克海西南部 50~100 m 水体中发现了活体 *Lophospyris* sp., 此外, 整个亚北极地区, 对因子 3 组合具有一定贡献的 *P. gacilipes* 则生活在 50~250 m 深度^[36,53]。因

此, 因子 3 可能更倾向于指示阿拉斯加湾不同深度水体混合作用的变化, 而非某一特定深度的水团(图 4)。

5.2 阿拉斯加湾中层水团的演化

虽然与白令海相比(王汝建等, 张海峰等, 未发表资料), 阿拉斯加湾各时期 *C. davisiana* 的百分含量都相对较低, 但仍然是绝对的优势种。通过与 NGRIP 冰心中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的对比可以发现, 50 kaBP 以来 *C. davisiana* 的含量与其具有较好的一致性(图 5); $\delta^{18}\text{O}$ 降低、气候变冷时, *C. davisiana* 含量增加, 尤其是在 H5-H3 和 LGM 这些冷期中都十分明显; 反之, 在 GI 等暖期和末次冰消期以来, $\delta^{18}\text{O}$ 增加、*C. davisiana* 含量降低; 但在 H2 期间似乎略有不同, 其含量出现了先减少后增加的变化。值得注意的是, 50 kaBP 以来, *C. davisiana* 最显著的特征是其在 LGM 期间达到了最高值, 但随着 LGM 的结束经历了一次快速而剧烈的变化: 在不到 2 000 年时间里从近 30% 锐减至 10% 以下, 此后一直维持在全新世较低的水平(图 5)。

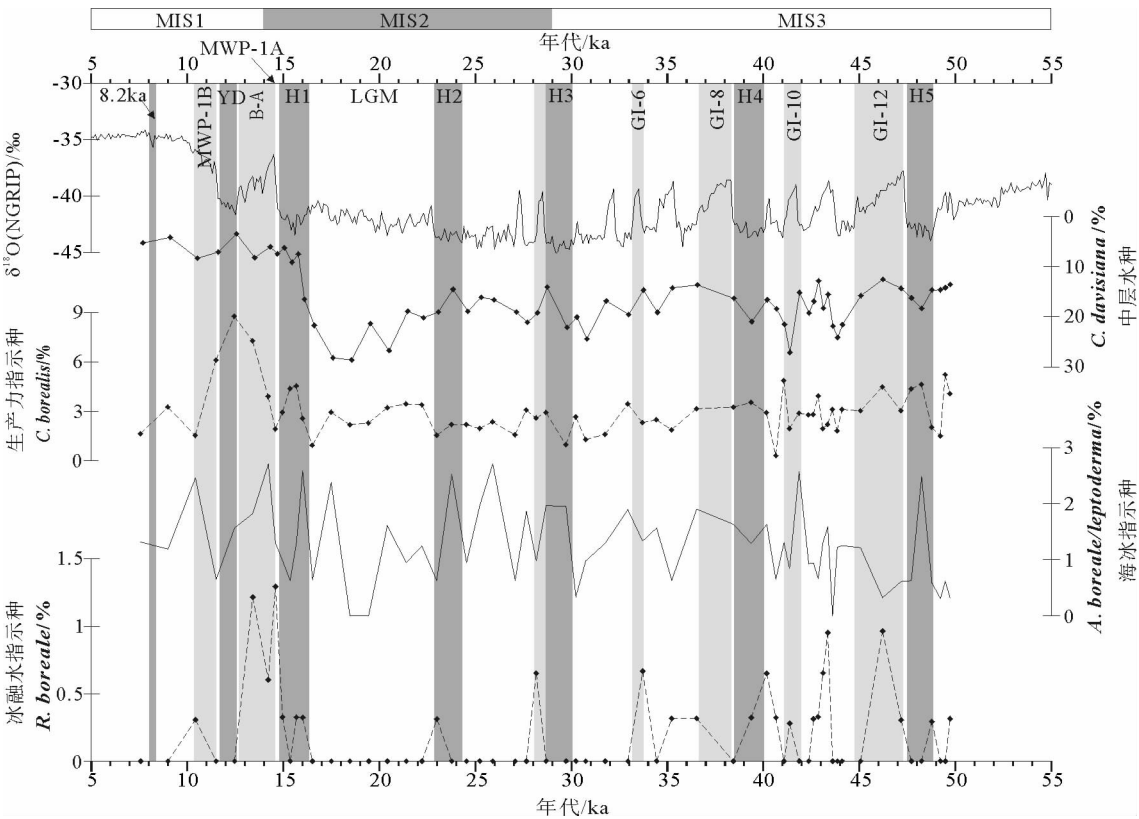


图5 阿拉斯加湾 SO202-27-6 站位主要放射虫标志种百分含量的变化

Fig. 5 Percentage changes of main indicative radiolarian species in Site SO202-27-6 from Gulf of Alaska, subarctic Pacific

究其原因,可能与 NPIW 源区的转换密切相关。前人研究指出 NPIW 按不同阶段形成于亚北极太平洋、鄂霍次克海和白令海^[59-61]。鄂霍次克海和白令海的表层沉积物中的 *C. davisiana* 相对含量的研究表明,该种现代主要生活在鄂霍次克海^[62],而根据鄂霍次克海^[42]、白令海^[37,46,63]以及亚北极太平洋^[37] MIS5 以来的沉积物中 *C. davisiana* 相对含量的变化,可能 LGM 期间由白令海输送到北太平洋中等深度的冷而富氧的水体比来自鄂霍次克海的水量更多,Tanaka 和 Takahashi^[37]据此进一步总结认为近 100 kaBP 以来 NPIW 的源区发生了如下变化:MIS5—3 期间 NPIW 同时形成于鄂霍次克海和白令海,LGM 期间源区为白令海,LGM 之后至现代则转而形成于鄂霍次克海,这得到了现代鄂霍次克海水文学研究^[64]的证实。但近来的研究成果为此提出了更进一步的解释,首先北太平洋古海洋学模型的结果显示,LGM 期间输入北太平洋的淡水量降低^[65-66],可能导致亚北极北太平洋西北环流区(NW Gyre)、鄂霍次克海、白令海以及阿拉斯加湾的表层盐度比现在高 1~1.2 psu^[49],这足以引起表层至 1 000 m 深度上的对流^[65],进而有利于冷而富氧的 NPIW 的形成。其次,Matul 和 Abel-

mann^[67]以及 Matul 等^[68]在鄂霍次克海的几个 OIS2 期(相当于 MIS2 期)沉积物岩心中也发现了 *C. davisiana* 含量高达 40%~50% 的沉积层,表明海盆在中层水体的通风作用中扮演了重要角色。Matul 等^[49]总结了包括上述材料在内的亚北极北太平洋及其边缘海沉积物中 *C. davisiana* 的含量和分布等大量数据资料,认为 MIS2 期间,白令海、鄂霍次克海、西北环流区以及阿拉斯加湾等海区可能都有通风良好的中层水形成和扩张。

在这样的情况下,首先在阿拉斯加湾并没有发生中层水通风作用的时期,无论 NPIW 形成于白令海、鄂霍次克海还是同时来源于两个海区,原本冷而富氧的水团经过长途跋涉到达阿拉斯加湾,可能已然受到了北太平洋其他水团的影响,进而导致 *C. davisiana* 种群的发育受到了限制,因此,阿拉斯加湾 *C. davisiana* 的含量总体上低于白令海。其次,在 LGM 之前 NPIW 稳定地形成于白令海和鄂霍次克海,输送至阿拉斯加湾之后,其水体环境对冰期一间冰期的气候变化、尤其是对 Heinrich 事件等快速气候变化的响应,被 *C. davisiana* 忠实地记录下来。LGM 期间,虽然形成于鄂霍次克海的 NPIW 减少,甚至消失,但来自白令海的 NPIW 却仍然可

以源源不断地通过深达 4 420 m 的堪察加海峡流向北太平洋,进而到达阿拉斯加湾,同时,在此期间由于气候寒冷、海冰覆盖面积增大,可能导致海水的混合作用减弱,故而从白令海输送至此的 NPIW 可能比 LGM 之前受到的影响更小、生活于其中的 *C. davisiana* 的生产力更接近白令海的水平,因此,无论 LGM 期间阿拉斯加湾是否确实存在由中层水通风作用形成的自生 NPIW,都不会对该区的 *C. davisiana* 生产造成负面影响,如果这种区域性的中层水通风作用确实存在,反而会为 LGM 期间 *C. davisiana* 生产力的增加甚至达到最大值提供更加有利的条件。但另一方面,也不能过高地估计该区自生 NPIW 的积极作用,因为即使其确实存在,可能也无法与来自白令海的 NPIW 的生产力相提并论。

但 LGM 结束之后,NPIW 源区的转换似乎对阿拉斯加湾 *C. davisiana* 的发育造成了严重的影响。首先是在源区转换的过程中,NPIW 生产效率下降,鄂霍次克海与北太平洋之间的水道深度也远低于堪察加海峡,其向北太平洋输送 NPIW 的能力可能弱于白令海,总体上输入北太平洋的水量随之降低,加之该区 LGM 期间可能存在的自生中层水也随 LGM 的结束而消失,同时,进入全新世之后全球气候回暖,阿拉斯加湾地区受到北太平洋开放大洋相对较暖的海水的影响可能加剧,导致该区 *C. davisiana* 含量总体上维持在较低的水平上。虽然 *C. davisiana* 的含量对气候变化做出了及时的响应,但在更高的时间分辨率上看似乎也有一定的差异。如 YD 期间, $\delta^{18}\text{O}$ 的特征表现为气候缓慢变冷后的快速升温,*C. davisiana* 总体上表现为对冷事件的响应,含量增加,但对 $\delta^{18}\text{O}$ 所反映的气候回暖却表现出增加的趋势(图 5),不过受采样分辨率的限制,还难以对这类现象进行更深入的探讨。此外,H2 期间 *C. davisiana* 所表现出的这种先降低后增加的趋势,似乎是对该时期更高分辨率上的短时间尺度的气候回暖的响应,但也有可能是由于沉积物受到生物扰动造成的,受采样分辨率的限制无法进行更详细的讨论。

5.3 阿拉斯加湾上层海洋环境的演变

前人研究表明,*R. boreale* 一般生活在高纬大洋的沿岸区域上部 150~200 m 水体中,这些区域受到营养盐充足的冰融水的影响,因而该种可以作为冰融水事件的替代性指标^[36]。亚北极太平洋现代沉积物捕获器长时间连续观测的结果甚至表明,

该种可以作为沿岸地区中尺度涡的指示种^[53]。*A. boreale/leptodermum* 则是现代北冰洋的标志种,生活环境一般是长期海冰覆盖、生产力受限制的较冷的表层水体,可以作为海冰的指示种^[36]。Takahashi^[14-15]对阿拉斯加湾时间序列沉积物捕获器中硅质生物的研究发现,*C. borealis* 时间序列的通量变化模式与硅藻优势种 *Neodenticula seminae* 的变化模式一致,*N. seminae* 占硅藻总通量的 70%,是该区高硅质生产力的主要贡献者,因此,*C. borealis* 也可以作为该区古生产力研究的有效指标。本文选取这 3 个标志种放射虫的变化特征及其环境指示意义,探讨 50 kaBP 以来阿拉斯加湾上层海洋环境的演变(图 5)。

首先,整个 MIS3 期至 LGM 开始这段时期,该区上层海洋环境似乎并未发生较大的改变,但在冰阶一间冰阶旋回以及 Heinrich 快速气候变化期中表现出明显的响应特征(图 5)。在此期间,尽管 *A. boreale/leptoderma* 和 *R. boreale* 的含量都较低,但二者之间反相位的变化模式仍然比较清晰(图 5),冷事件发生时,阿拉斯加湾海冰覆盖面积增加,*A. boreale/leptoderma* 含量增加,但寒冷的环境限制了 *R. boreale* 的发育,这在 H5-H3 等显著的快速变冷时期表现较为明显;当气候由冷转暖进入间冰阶时,海冰消融以及来自北美大陆上的冰川融水注入阿拉斯加湾,输送丰富的营养盐和有机质至此,不仅刺激了 *R. boreale* 的快速增加,也可以刺激硅藻等浮游植物以及 *C. borealis* 等表层-次表层放射虫的繁殖,促进表层生产力的增加。

LGM 期间,*R. boreale* 几乎绝迹,表明在此期间阿拉斯加湾并未发生有效的冰融水脉冲事件。*A. boreale/leptoderma* 变化较为剧烈,在 LGM 早期和晚期略有增加,但在中期约 2 000 年时间里几乎消失;与此相反的是,*C. borealis* 反而维持在一个相对稳定的水平上。这种复杂的变化特征可能不仅仅是阿拉斯加湾海洋环境的变化引起的,而与其所处特殊的区位环境有关。Sabin 和 Pisias^[2]的研究指出,LGM 期间,劳伦泰德冰盖(Laurentide Ice Sheet)重组了大气环流,使冬季阿留申低压增强,在西北太平洋靠近冰边缘区产生盛行的向东离岸流,这种大气环流模式的变化会引起湖泊的扩张以及山地冰川的推进。如此一来,一方面由西北太平洋向东流动的离岸流可能会将海冰边缘区的高生产力水体向阿拉斯加湾输送,另一方面北美大陆上的冰川也可能向阿拉斯加湾推进并倾泻大量陆源物质到海洋中,因此,尽管本站位所在区域可能受到海冰的严

酷影响,但依然得以维持一定的生产力。

另一个值得注意的关键时期是 H1 期间,*C. borealis* 不仅没有降低反而出现增加,似乎与该时期的气候环境背景相悖,但导致前者相对含量呈现增加趋势的主要原因可能是 *C. davisiana* 含量的急剧降低(图 5),而并不一定是其本身生产力的增加,这也得到了同样采自阿拉斯加湾 Pattern 海山的沉积物岩心研究结果的印证——研究表明该区 13 ka(校正后年龄约为 14.7 kaBP)之前的典型的海洋环境特征就是较低的 SST、寒冷的冬季以及显著的低生物生产力^[3]。在这样的背景下,H1 早期微小而短暂的气候回暖却足以引起该区海冰的消融,虽然并非大规模的消退,但足以刺激 *R. boreale* 的生长,与此同时,并未完全消退的海冰也为 *A. boreale/leptoderma* 的繁殖提供了条件。但随着气候进一步恶化,导致表层海洋环境急剧恶化,各属种的生命活动再次受到制约。

MIS1 以来,发生了两次主要的冰融水事件,MWP-1A(14.6~12.8 kaBP)和 MWP-1B(11.5~10.5 kaBP)(图 5),分别对应 B-A 和早全新世的变暖事件,其特征是海平面快速升高,来自北美大陆冰盖的大量冰融水注入到大洋中^[34,36,69],引起 *R. boreale* 的迅速响应,同时,大量营养盐和有机质的输入,也刺激了阿拉斯加湾生产力的增加,甚至达到 50 kaBP 以来的最高值。Vernal 和 Pedersen^[3] 指出该区 14.7~9 kaBP 期间微体化石通量的增加也表明在此期间生产力的增加,并进一步指出 14.7~10.0 kaBP 期间,该区海冰覆盖时间从每年 6 个月降到 0。Barron 等^[9] 利用地球化学指标和古生物学方法重建了阿拉斯加湾东部近岸区的生物生产力,结果显示 B-A 期间(14.7~12.9 kaBP)生产力急剧增加,YD 期间(12.9~11.7 kaBP)则迅速降低,直到全新世早期再次增加。本站位中 *C. borealis* 的含量在 B-A 期间也呈现出快速增加的趋势,但 YD 事件的突然发生对其造成了严重影响,在此期间急剧下降,甚至直到 MWP-1B 结束之后才得以再次恢复(图 5),与 Barron 等^[9] 的研究结果十分一致。与此相应,在进入 B-A 之后的数千年中,*A. boreale/leptoderma* 反而无法适应这种表层生产力较高的水体环境^[36],其生产受到限制而降低,清晰的呈现出与 *C. borealis* 反相位的变化(图 5)。

6 结论

(1) 通过阿拉斯加湾 SO202-27-6 站位 61 个沉

积物样品中的放射虫属种鉴定和统计,共识别出 72 个属 112 个种,在至少一个样品中百分含量大于 2% 的种 41 个。其中,最具代表性的优势种放射虫是 *C. davisiana*,其含量分布范围为 3.45%~28.62%,平均值为 16.38%;其次是 *S. arachnea* 和 *A. micropora*,其平均值分别为 9.88% 和 6.91%。

(2) 利用 Q 型因子分析方法对放射虫的统计数据因子计算,提取出 4 个方差极大因子,其中因子 1 和因子 4 分别代表中层水和表层水组合,其优势种分别为 *C. davisiana* 和 *S. venustum*;因子 2 更倾向于代表中层水下部与深层水的混合水体,优势种为 *S. arachnea*;因子 3 则可能指示的是不同深度水体的混合作用,其优势种为 *A. micropora*。

(3) 作为阿拉斯加湾中层水团演化的替代性指标,50 kaBP 以来,*C. davisiana* 对 Heinrich 事件和 GI 间冰阶的响应较为敏感,其相对含量的变化与 NGRIP 冰心中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的气候变化具有较好的一致性;*C. davisiana* 的变化特征表明阿拉斯加湾中层水团的演化可能主要受控于亚北极太平洋 NPIW 形成源区及其输送机制的变化。

(4) 利用具有环境指示意义的标志种放射虫 *C. borealis*, *A. boreale/leptodermum* 和 *R. boreale* 的变化特征,探讨 50 kaBP 以来阿拉斯加湾上层海洋环境的演变,结果表明:MIS3 至 LGM 开始这段时期,表层生产力相对稳定,海冰消长、冰融水脉冲等变化明显地响应于 Heinrich 事件、冰阶一间冰阶旋回等气候变化;LGM 期间,上层海洋环境受大陆冰盖、大气环流和海洋环流变化的综合影响,可能冰融水、事件海冰持续增加和生产力严重受限的状况出现较少;LGM 以来,上层海洋环境对 B-A 和 YD 等快速气候变化事件的响应十分明显,表现为冰融水脉冲带来的表层生产力快速增加以及气候快速变冷导致的生产力急剧降低。

致谢: 本文是中德合作的一部分成果,感谢 SO202-INOPEX 航次全体人员,以及远在德国 AWI 的 Rainer Gersonde 等老师,为本文提供研究材料和相关年龄数据。

参考文献(References)

- [1] Stabeno P J, Bond N A, Hermann A J, et al. Meteorology and oceanography of the Northern Gulf of Alaska[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(7): 859-897.
- [2] Sabin A L, Pisias N G. Sea surface temperature changes in the northeastern Pacific Ocean during the past 20 000 years and their relationship to climate change in northwestern North A-

- merica [J]. *Quaternary Research*, 1996, 46: 48-61.
- [3] Vernal A, Pedersen T F. Micropaleontology and palynology of core PAR87A-10: A 23 000 year record of paleoenvironmental changes in the Gulf of Alaska, northeast North Pacific[J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(6): 821-830.
- [4] Calkin P E, Wiles G C, Barclay D J. Holocene coastal glaciation of Alaska[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(1): 449-461.
- [5] Finney B P, Gregory-Eaves I, Douglas M S V, et al. Fisheries productivity in the northeastern Pacific Ocean over the past 2 200 years[J]. *Nature*, 2002, 416(6882): 729-733.
- [6] Hu F S, Kaufman D, Yoneji S, et al. Cyclic variation and solar forcing of Holocene climate in the Alaskan subarctic[J]. *Science*, 2003, 301(5641): 1890-1893.
- [7] Anderson L, Abbott M B, Finney B P, et al. Regional atmospheric circulation change in the North Pacific during the Holocene inferred from lacustrine carbonate oxygen isotopes, Yukon Territory, Canada[J]. *Quaternary Research*, 2005, 64(1): 21-35.
- [8] Addison J A, Finney B P, Dean W E, et al. High-resolution records of mid-Holocene paleoceanographic change from the Subarctic Northeast Pacific Ocean[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. 2008, 1: 1458.
- [9] Barron J A, Bukry D, Dean W E, et al. Paleoceanography of the Gulf of Alaska during the past 15 000 years: results from diatoms, silicoflagellates, and geochemistry[J]. *Marine Micropaleontology*, 2009, 72(3): 176-195.
- [10] Karlin R, Lyle M, Zahn R. Carbonate variations in the Northeast Pacific during the late Quaternary[J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(1): 43-61.
- [11] Imbrie J, Kipp N G. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: application to a late Pleistocene Caribbean core[M]//The late Cenozoic glacial ages. Yale University Press New Haven, 1971, 3: 71-181.
- [12] Kamikuri S, Nishi H, Motoyama I. Effects of late Neogene climatic cooling on North Pacific radiolarian assemblages and oceanographic conditions[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 249(3): 370-392.
- [13] Takahashi K. Radiolarian flux and seasonality: climatic and El Nino response in the subarctic Pacific, 1982-1984 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987, 1(3): 213-231.
- [14] Takahashi K. Siliceous microplankton fluxes in the eastern subarctic Pacific, 1982-1986 [J]. *Journal of Oceanography*, 1997, 53: 455-466.
- [15] Takahashi K. Time-series fluxes of Radiolaria in the eastern subarctic Pacific Ocean[J]. *News of Osaka Micropaleontologists, Special Volume*, 1997, 10: 299-309.
- [16] Harrison P J, Boyda P W, Varela D E, et al. Comparison of factors controlling phytoplankton productivity in the NE and NW subarctic Pacific gyres[J]. *Progress in Oceanography*, 1999, 43(2): 205-234.
- [17] Fujii M, Yamanaka Y, Nojiri Y, et al. Comparison of seasonal characteristics in biogeochemistry among the subarctic North Pacific stations described with a NEMURO-based marine ecosystem model[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 202(1): 52-67.
- [18] Kishi M J, Ito S, Megrey B A, et al. A review of the NEMURO and NEMURO. FISH models and their application to marine ecosystem investigations[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(1): 3-16.
- [19] Reed R K. Flow of the Alaskan Stream and its variations[J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1984, 31(4): 369-386.
- [20] Reed R K, Staben P J. Recent observations of variability in the path and vertical structure of the Alaskan Stream[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(10): 1634-1642.
- [21] Royer T C. Baroclinic transport in the Gulf of Alaska. 2. A fresh-water driven coastal current[J]. *Journal of Marine Research*, 1981, 39(2): 251-266.
- [22] Staben P J, Reed R K, Schumacher J D. The Alaska coastal current: continuity of transport and forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 1995a, 100(C2): 2477-2485.
- [23] Staben P J, Hermann A J, Bond N A, et al. Modeling the impact of climate variability on the advection of larval walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the Gulf of Alaska[J]. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995b: 719-727.
- [24] Royer T C. Hydrographic responses at a coastal site in the northern Gulf of Alaska to seasonal and interannual forcing [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(1): 267-288.
- [25] Childers A R, Whitledge T E, Stockwell D A. Seasonal and interannual variability in the distribution of nutrients and chlorophyll a across the Gulf of Alaska shelf: 1998-2000[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(1): 193-216.
- [26] Levitus S. Climatological atlas of the world ocean[M]. NOAA Prof. Paper, U. S. Govt. Printing Off., Washington D. C. 1982, 13: 173.
- [27] Warren B A. Why is no deep water formed in the North Pacific? [J]. *Journal of Marine Research*, 1983, 41(2): 327-347.
- [28] Berger W H, Adelseck C G, Mayer L A. Distribution of carbonate in surface sediments of the Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81(15): 2617-2627.
- [29] Abelman A, Brathauer U, Gersonde R, et al. Radiolarian-based transfer function for the estimation of sea surface temperatures in the Southern Ocean (Atlantic Sector)[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14(3): 410-421.
- [30] Wang R, Abelman A. Radiolarian responses to paleoceanographic events of the southern South China Sea during the Pleistocene[J]. *Marine Micropaleontology*, 2002, 46(1): 25-44.
- [31] Klován J E, Imbrie J. An algorithm and Fortran-iv program

- for large-scale Q-mode factor analysis and calculation of factor scores[J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1971, 3(1): 61-77.
- [32] Barbante C, Barnola J M, Becagli S, et al. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica[J]. *Nature*, 2006, 444(7116): 195-198.
- [33] Blockley S P E, Lane C S, Hardiman M, et al. Synchronisation of palaeoenvironmental records over the last 60 000 years, and an extended INTIMATE event stratigraphy to 48 000 b2k[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 36: 2-10.
- [34] Gorbarenko S A, Basov I A, Chekhovskaya M P, et al. Orbital and millennium scale environmental changes in the southern Bering Sea during the last glacial-Holocene: Geochemical and paleontological evidence[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(16): 2174-2185.
- [35] Itaki T, Uchida M, Kim S, et al. Late Pleistocene stratigraphy and palaeoceanographic implications in northern Bering Sea slope sediments: evidence from the radiolarian species *Cycladophora davisiana*[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2009, 24(8): 856-865.
- [36] Itaki T, Kim S, Rella S F, et al. Millennial-scale variations of late Pleistocene radiolarian assemblages in the Bering Sea related to environments in shallow and deep waters[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 61: 127-144.
- [37] Tanaka S, Takahashi K. Late Quaternary paleoceanographic changes in the Bering Sea and the western subarctic Pacific based on radiolarian assemblages[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(16): 2131-2149.
- [38] Nimmergut A, Abelmann A. Spatial and seasonal changes of radiolarian standing stocks in the Sea of Okhotsk[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2002, 49(3): 463-493.
- [39] Abelmann A, Nimmergut A. Radiolarians in the Sea of Okhotsk and their ecological implication for paleoenvironmental reconstructions[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, 52(16): 2302-2331.
- [40] Okazaki Y, Takahashi K, Yoshitani H, et al. Radiolarians under the seasonally sea-ice covered conditions in the Okhotsk Sea; flux and their implications for paleoceanography[J]. *Marine Micropaleontology*, 2003a, 49(3): 195-230.
- [41] Okazaki Y, Takahashi K, Itaki T, et al. Comparison of radiolarian vertical distributions in the Okhotsk Sea near the Kuril Islands and in the northwestern North Pacific off Hokkaido Island[J]. *Marine Micropaleontology*, 2004, 51(3): 257-284.
- [42] Okazaki Y, Takahashi K, Nakatsuka T, et al. The production scheme of *Cycladophora davisiana* (Radiolaria) in the Okhotsk Sea and the northwestern North Pacific: implication for the paleoceanographic conditions during the glacials in the high latitude oceans[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003b, 30(18), 1939, doi:10.1029/2003GL018070, 1-5.
- [43] Okazaki Y, Seki O, Nakatsuka T, et al. *Cycladophora davisiana* (Radiolaria) in the Okhotsk Sea; a key for reconstructing glacial ocean conditions[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(5): 639-648.
- [44] Itaki T, Ikehara K. Middle to late Holocene changes of the Okhotsk Sea Intermediate Water and their relation to atmospheric circulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(24), L24309, doi:10.1029/2004GL021384, 1-9.
- [45] Abelmann A, Gersonde R, Cortese G, et al. Extensive phytoplankton blooms in the Atlantic sector of the glacial Southern Ocean[J]. *Paleoceanography*, 2006, 21, PA1013, doi: 10.1029/2005PA001199, 1-9.
- [46] Wang R, Xiao W, Li Q, et al. Polycystine radiolarians in surface sediments from the Bering Sea Green Belt area and their ecological implication for paleoenvironmental reconstructions[J]. *Marine Micropaleontology*, 2006, 59(3): 135-152.
- [47] Itaki T, Ikehara K, Motoyama I, et al. Abrupt ventilation changes in the Japan Sea over the last 30 ky: evidence from deep-dwelling radiolarians[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 208(3): 263-278.
- [48] Itaki T, Khim B K, Ikehara K. Last glacial-Holocene water structure in the southwestern Okhotsk Sea inferred from radiolarian assemblages[J]. *Marine Micropaleontology*, 2008, 67(3): 191-215.
- [49] Matul A G, Abelmann A, Gersonde R, et al. Late quaternary distribution of the *Cycladophora davisiana* radiolarian species: Reflection of possible ventilation of the North Pacific intermediate water during the Last Glacial Maximum[J]. *Oceanology*, 2015, 55(1): 91-99.
- [50] Ohkushi K, Itaki T, Nemoto N. Last Glacial-Holocene change in intermediate-water ventilation in the Northwestern Pacific[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(14): 1477-1484.
- [51] Ling H Y, Stadum C J, Welch M L. Polycystine radiolaria from Bering Sea surface sediments[C]//*Proceedings of the Second Planktonic Conference, Roma*. 1970: 705-729.
- [52] 王汝建,陈荣华,肖文申. 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[J]. *微体古生物学报*, 2005, 22(2): 127-135. [WANG Rujian, CHEN Ronghua, XIAO Wenshen. Depth distribution pattern of radiolarians in surface sediments of the Bering Sea and their oceanography implications[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2005, 22(2): 127-135.]
- [53] Ikenoue T, Takahashi K, Tanaka S. Fifteen year time-series of radiolarian fluxes and environmental conditions in the Bering Sea and the central subarctic Pacific, 1990-2005[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 61: 17-49.
- [54] Itaki T, Takahashi K. Preliminary results on radiolarian fluxes in the central subarctic Pacific and Bering Sea[C]//*Proceedings of the Hokkaido Tokai University Science and Engineering*. 1995, 7: 37-47.

- [55] Popofsky A. Die Radiolarien der Antarktis. Deutsche Südpolar-Expedition (1901-1903) [J]. Zoologie, 1908, 10 (3): 185-305.
- [56] Abelmann A. Radiolarian taxa from Southern Ocean sediment traps (Atlantic sector) [J]. Polar Biology, 1992, 12 (3-4): 373-385.
- [57] Hays J D, Morley J J. The sea of Okhotsk: a window on the ice age ocean [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2004, 51 (4): 593-618.
- [58] Hays J D, Martinson D G, Morley J J. Biological and climatic consequences of a cold, stratified, high latitude ocean [J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 82: 78-92.
- [59] Talley L D. Distribution and formation of North Pacific intermediate water [J]. Journal of Physical Oceanography, 1993, 23 (3): 517-537.
- [60] Yasuda I. The origin of the North Pacific intermediate water [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 1997, 102 (C1): 893-909.
- [61] You Y. Implications of cabbeling on the formation and transformation mechanism of North Pacific Intermediate Water [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 2003, 108 (C5), 3134, doi:10.1029/2001JC001285, 1-24.
- [62] Morley J J, Hays J D. Oceanographic conditions associated with high abundances of the radiolarian *Cycladophora davisiana* [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 66: 63-72.
- [63] Wang R, Chen R. *Cycladophora davisiana* (Radiolarian) in the Bering Sea during the late Quaternary: A stratigraphic tool and proxy of the glacial subarctic Pacific Intermediate Water [J]. Science in China Ser. D: Earth Sciences, 2005, 48 (10): 1698-1707.
- [64] Shcherbina A Y, Talley L D, Rudnick D L. Direct observations of North Pacific ventilation: Brine rejection in the Okhotsk Sea [J]. Science, 2003, 302 (5652): 1952-1955.
- [65] Kim S J, Park Y G. Glacial ocean circulation and property changes in the North Pacific [J]. Atmosphere-Ocean, 2008, 46 (2): 257-275.
- [66] Wainer I, Goes M, Murphy L N, et al. Changes in the intermediate water mass formation rates in the global ocean for the Last Glacial Maximum, mid - Holocene and pre - industrial climates [J]. Paleoceanography, 2012, 27 (3), PA3101, doi: 10.1029/2012PA002290, 1-10
- [67] Matul A, Abelmann A. Quaternary water structure of the Sea of Okhotsk based on radiolarian data [C]//Doklady Earth Sciences. 2001, 381 (8): 1005-1007.
- [68] Matul A, Abelmann A, Khusid T, et al. Late Quaternary changes of the oxygen conditions in the bottom and intermediate waters on the western Kamchatka continental slope, the Sea of Okhotsk [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2015, in press.
- [69] Fairbanks R G. A 17 000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation [J]. Nature, 1989, 342 (6250): 637-642.

PALEOCEANOGRAPHIC CHANGES SINCE 50 kaBP
INFERRED FROM RADIOLARIAN ASSEMBLAGES IN
GULF OF ALASKA, SUBARCTIC PACIFIC

ZHANG Haifeng^{1,2}, WANG Rujian², XIAO Wenshen², LI Wenbao^{2,3}

(1. Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Hangzhou 310012;

2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092;

3. IMAR Key Laboratory of Water Resources Protecting and Utilization, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: The paleoceanographic record of radiolarian assemblage for the past 50 ka is investigated using a box core (SO202-27-6) obtained from the Gulf of Alaska, subarctic Pacific during the R/V Sonne cruise SO202-INOPEX. Ten AMS¹⁴C data are used for establishing the stratigraphic age model. The study suggests that: (1) *Cycladophora davisiana* is the most dominant radiolarian specie in the Gulf of Alaska during the past 50 ka, followed by *Siphocampe arachnea* and *Acanthodesmia micropora*. (2) The Q-mode factor analysis obtains 4 maximum variance factors, which represent different radiolarian assemblages. Among them, *C. davisiana* can be used as a proxy for intermediate water of the Gulf of Alaska, which was sensitive to the rapid climate change of glacial-interglacial cycle, and the variable pattern reveals that the evolution of intermediate water was controlled by the formation and transportation of NPIW from subarctic Pacific. (3) Based on the indicative radiolarian species for environmental changes, such as *Ceratospyris borealis*, *Actinomma boreale/leptodermum* and *Rhizoplegma boreal*, we argue that the upper ocean conditions in the Gulf of Alaska underwent periodic changes during the past 50 ka. Before LGM, relatively stable surface productivity, sea-ice expansion and retreat, and melt-water pulse (MWP) responded clearly to the interstadial (GI) to stadial (GS) cycles. During LGM, under the conditions of complex ice sheet effects, atmospheric circulation and oceanic currents, there were rarely WMP, continuous sea-ice extension and limited productivity in the Gulf of Alaska. Since LGM, rapid increase and decrease in surface productivity was caused by rich-nutrient water from MWP and by rapid cooling event, respectively.

Key words: radiolarian assemblage; intermediate water evolution; upper ocean conditions; past 50 kaBP; Gulf of Alaska