

文章编号: 1001-8166(2003)05-0697-09

# 极地海洋钻探研究进展\*

王汝建

(同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 南极和北极海域的深海钻探(DSDP)和大洋钻探(ODP)研究所取得的成就是举世瞩目的, 为人类研究过去全球变化打开了新的视野。它们揭示了北大西洋高纬度海区新近纪的古海洋学和古气候的演化历史, 发现了早更新世“41 ka 世界”千年尺度的气候波动, 以及冰期表层水温与深层水的耦合颤动, 说明冰期旋回中冰消期气候的不稳定性。检验了新近纪环南极洋流的形成历史, 并揭示了南极新生代的气候变冷和冰盖的演变历史, 以及证实了南大洋温度变化领先于全球冰量的变化。2004 年北极罗蒙诺索夫脊的综合大洋钻探(IODP)将宣告科学探索新时代的到来, 其研究将重建北冰洋新生代环境变化和气候的演变历史, 展示北冰洋在全球气候变化中的作用。

**关键词:** 北极; 南极; 大洋钻探; 罗蒙诺索夫脊钻探; 新生代气候演化; 古海洋学

**中图分类号:** P72; P71      **文献标识码:** A

## 0 引言

自 20 世纪 70 年代以来, 南极和北极海域成为深海钻探(DSDP)和大洋钻探(ODP)的重要海区, 也是深海钻探和大洋钻探, 乃至 21 世纪即将开始的综合大洋钻探(IODP)计划的重要学术目标之一。在南极和北极相关海域进行的深海钻探和大洋钻探已达 28 个航次, 184 个站位。这些钻探研究所取得的成就举世瞩目, 如发现南极古新世末的增温事件, 始新世大暖期, 早渐新世冰盖增大事件; 北极冰盖的形成; 以及新生代变冷的原因之争的洋流说等<sup>[1]</sup>, 为人类探测整个地球系统打开了异常广阔的视野。而未来在北冰洋罗蒙诺索夫脊的钻探将为科学界提供一个观察全球气候系统的新视野, 将是可与人类登月相比拟的海洋盛事。本文试图回顾和展望两大洋钻探(ODP)取得的进展以及介绍即将进行的北冰洋罗蒙诺索夫脊钻探, 对于推动和促进我国的极地研究具有重要意义。

## 1 北冰洋相关海域的钻探研究

**1.1 北大西洋—北冰洋通道钻探: 151 和 162 航次**  
北极和亚北极海对全球气候和大洋系统产生重要的影响。北冰洋与北大西洋之间的通道为浅层和深层水交换以及北半球的海洋和大气环流变化研究提供了途径。由于这些过程具有全球意义, 因此 ODP 设计了一个计划来研究这些途径的地质和古海洋学历史, 称为北大西洋—北冰洋通道(NAAG), 在这个计划的框架下, 151 航次调查了挪威—格陵兰海西部(冰岛海盆和格陵兰东部边缘), 法拉姆海峡(Hovgrd 脊和北冰洋与挪威—格陵兰海之间的深海槛)和斯瓦尔巴德北部耶麦克(Yermak)海盆上的几个地方<sup>[2]</sup>。162 航次是这个计划的第二部分, 该航次集中钻探格陵兰—苏格兰脊北部和南部以及挪威—格陵兰海的几个地方(图 1)。北大西洋—北冰洋海道钻探计划的主要成功在于了解了: ①挪威—格陵兰海有冰以前的古海洋学; ②确定北大西洋北

\* 收稿日期: 2003-06-23; 修回日期: 2003-07-27.

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“地球圈层相互作用中的深海过程和深海纪录”(编号: G200078500); 国家自然科学基金项目“白令海晚第四纪古海洋学记录及其对全球气候变化的响应”(编号: 40276020); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项“太平洋暖池在第四纪古海洋与古气候演变中的作用”(编号: 200126)资助。

作者简介: 王汝建(1959-), 男, 云南昆明人, 教授, 主要从事海洋微体古生物学及古气候与古海洋学研究工作。

E-mail: rjwangk@online.sh.cn

部到格陵兰—苏格兰脊南部, 挪威—格陵兰海西部, 法拉姆海峡以及耶麦克海台冰盖的开始; ③沉积作

用的变化对沉积环境周期性的响应。

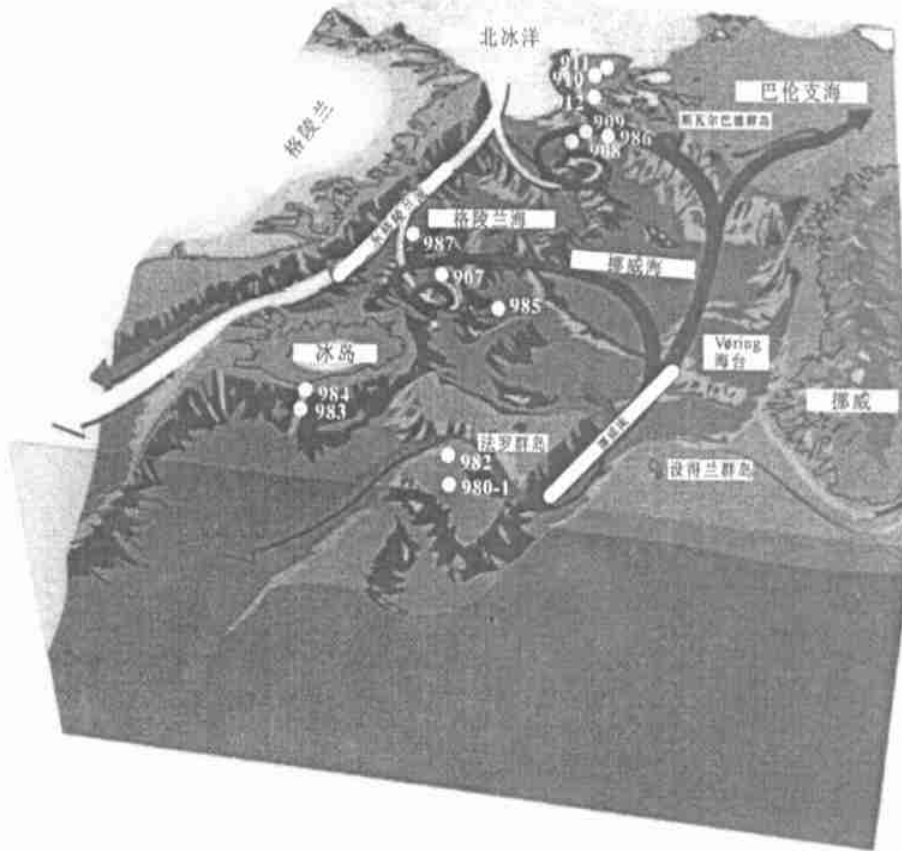


图 1 挪威—格陵兰海地形图和 ODP151 和 162 航次站位<sup>[2,3]</sup>

**Fig. 1 Physiographic diagram of the Norwegian-Greenland sea and sites of ODP Legs 151 and 162**  
包括从北大西洋进入挪威—格陵兰海(格陵兰—苏格兰脊)和从挪威—格陵兰海进入北冰洋(法拉姆海峡)的通道  
including the gateways from the north Atlantic ocean into the Norwegian-Greenland sea (Greenland-Scotland ridge)  
and from the Norwegian-Greenland into the Arctic ocean (Fram Strait)

#### 1.1.1 151 航次研究成果

151 航次有 8 个科学目标<sup>[2]</sup>, 它们分别为: ① 北欧海域新生代古海洋学; ② 北部高纬度区新生代气候演化; ③ 海洋沉积物对北欧海域古海洋变化的响应; ④ 北欧海域表层水团的变化; ⑤ 海冰分布的时空变化; ⑥ 通道问题; ⑦ 北欧海域深部水团的演化; ⑧ 山岳冰川和环北冰洋大陆冰盖的历史。针对这些目标, 151 航次期间, 在挪威—格陵兰海西部, 法拉姆海峡, 耶麦克海台钻探了 7 个站位, 研究北半球高纬区深海盆的古海洋和气候历史, 北冰洋与穿过法拉姆海峡的挪威—格陵兰海之间的水团交换模式, 以及周围陆架和陆地区域的新近纪和第四纪冰期历史<sup>[3]</sup>。当挪威—格陵兰海还是很小时并且由一系列盆地组成的时候, 来自北大西洋的表层水穿过这个地区并且恢复了亚热带硅质壳, 植物区面貌。只有

到渐新世晚期和中新世早期才形成凉到温和的水。海冰盖或冰山出现的第一个信号是在晚中新世, 在冰岛海台较早些, 在调查过的北部和东部较晚些。海冰盖和冰山输入的影响起先来自格陵兰, 后来来自西北欧洲, 在上新世的过程中得到了加强, 这种影响在格陵兰南部约 3~4 Ma 前和在法拉姆海峡和欧洲西北部约 2.6 Ma 前达到了极致。在上新世和第四纪过程中, 可以观察到冰期与间冰期之间的快速变化。一些沉积物特征反映了米兰柯维奇周期, 早期历史中的周期主要是与斜率相关; 在过去的 600~700 ka 中, 周期主要与偏心率有关。法拉姆海峡温暖的中上新世切断了筏冰搬运历史, 并且与格陵兰东北部的北方森林的发展完全一致。

#### 1.1.2 162 航次研究成果

162 航次的研究为北部高纬度海区在百年到百

万年时间尺度上对全球气候系统所起的作用提供了新的认识<sup>[4]</sup>。从冰岛南部钻取的沉积序列以异常高的堆积速率为特征, 可以进行气候替代物以及地球磁场千年尺度变化的研究, 特别是通过扩展这些高分辨率记录到过去几百万年。162航次的研究揭示了千年尺度气候变化的幅度和频率, 以及轨道和千年尺度上水团垂直和水平梯度的演化, 检验北大西洋表层和深层环境的长期历史。

(1) 千年尺度的气候变化。162航次期间进行了许多地球物理的测量, 其中令人兴奋的是冰岛(980~984站)南部远洋沉积序列中沉积物的亮度记录。Ortiz等<sup>[5]</sup>证明散射光谱反射系数的测量为北大西洋沉积物碳酸钙含量提供了一个快速而准确的替代物。由980到982站反射系数获得的碳酸钙记录与北大西洋552、607和609站的碳酸钙记录相比, 变化相同。162航次站位的高沉积速率显示, 主要的亚米兰柯维奇频率变化具有近7.6~8.4 ka和4.8~6.1 ka的周期, 这种周期存在于北半球冰期强化的上新世之前和之后。5 Ma校正的岁差记录分析说明, 一些千年尺度的变化可能来自于岁差驱动的非线性相应。为了对千年频率上发生的气候和水文学变化有一个更好地理解, Oppo等<sup>[6]</sup>研究了980站晚更新世300年分辨率的亚极地气候记录。氧同位素11和12期以及相对的冰消期, 终止期5的研究证明气候周期的特征和方式相似于末次冰期旋回。因此, 这项研究首次提出千年尺度的气候变化在晚更新世是普遍存在的。Oppo等研究中最令人兴奋的方面是, 证明除最暖期外, 表层水温—深层水的耦合颤动存在于所有时期。实际上, 这种在冰期终止期观察到的耦合颤动是与末次冰期旋回的发现相一致, 说明冰消期气候的不稳定性, 如新仙女木期是千年尺度气候颤动正规序列中的一部分。McManus等<sup>[7]</sup>研究了980站晚更新世千年尺度气候变化的记录, 证明千年尺度的表层和深层水变化存在于第四纪最近5个气候周期中, 并发现表层水文学的变化幅度与出现千年尺度的表层水温响应受到气候状态的控制(如大陆冰的数量)。当底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值超过3.5‰, 大部分冰期千年尺度表层水温变化达到4~6°C。在间冰期冰量下降, 表层水温变化只有1~2°C。这些研究证明, 相似于末次冰期旋回中Dansgaard-Oeschger周期的千年尺度气候颤动也出现在早更新世的“41 ka世界”。这项研究显示, 冰山输送到亚极地北大西洋的周期性变化与深层水(底栖有孔虫) $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 变化相关, 指示大陆冰盖

质量平衡与温盐环流之间的耦合行为。这些事件在时间尺度上不到5000年, 或许接近2000年重现一次<sup>[7]</sup>。

(2) 上新世—更新世气候演化。980~985站获得的新世—更新世连续记录为这个地区轨道尺度和长期气候演化提供了有价值的信息。为检测1.4~2.0 Ma北大西洋深层水(NADW)和冰期北大西洋中层水(GNAIW)的历史和它们之间的相互作用, 根据981和983站的底栖有孔虫同位素记录, 发现这些站位(深度约1980~2200 m)没有冰期北大西洋中层水的证据<sup>[8]</sup>。但是, 983站底层水有相对高的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值。这种高密度、富营养的水团在间冰期非常显著, 而那个时期是以甚至比南极底层水还要高的 $\delta^{18}\text{O}$ 和低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为特征。因此, 这种高密度水加入北大西洋深层水。更新世北大西洋垂直水团结构的变化显示中等深度的大西洋东北部除了在终止期以短时间的流通性差为特征外通常在冰期和间冰期具有很好的流通性<sup>[9]</sup>。在冰期—间冰期过渡中观察到的底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 的突然降低指示中层水团的生产在这段时间停止, 直到间冰期条件完全达到才得以恢复。同时还证明晚更新世著名的筏冰事件以几乎每一个冰期的结束为特征。根据极地区域上新世—更新世冰盖的发展历史, Solheim等<sup>[10]</sup>提出格陵兰和巴伦支海冰盖在晚新近纪的演化差别很大。986和987站的磁性地层学显示东格陵兰边缘冰川沉积出现在晚中新世(约7 Ma BP), 但在斯瓦尔巴德—巴伦支海边缘只出现在2.5 Ma BP。

(3) 地球磁场的历史。地球磁场古强度记录受全球范围(轴向两极)磁场控制, 因此可以作为全球对比的证据。这样一个全球对比工具对古气候学研究具有重要意义, 这种千年尺度的地磁古强度记录变化的对比是可以做得到的。由于古气候研究的焦点转向米兰柯维奇尺度, 所以对这种分辨率的气候记录的实用方法的发展变得更重要。162航次站位高精度地磁记录为建立千年尺度的气候记录的地磁对比方法做出了巨大的贡献。通过地球动力学的计算机模拟和所提供的地球磁场的高分辨率记录, 为物理学控制地球磁场的变化提供了新的认识<sup>[4]</sup>。

## 1.2 格陵兰东部与东南部边缘: 152和163航次

163航次是第二个东南格陵兰边缘的钻探航次, 其核心是旨在揭示与第三纪大陆破裂相关的巨大玄武岩堆积体<sup>[11]</sup>。与152航次一起<sup>[12]</sup>, 163航次研究大陆边缘的断裂特征, 特别是评价冰岛地幔柱对断裂和早期扩张的影响, 这些调查是建立在洛卡

尔和  $V_{\phi ring}$  海台海向反射体层序的早期深海钻探和大洋钻探基础上的(81 和 104 航次), 随着海向反射体层序的出现以及格陵兰、法罗群岛、西不列颠岛上第三纪玄武岩暴露至地表, 形成了北大西洋火山岩省。163 航次主要成果包括: ①完成了  $63^{\circ}N$  东格陵兰边缘火山演化的记录, 从大陆破裂到洋壳的产生; ②取得了海向反射体层序火山作用的控制年龄, 以及东格陵兰海向反射体层序中出现的两个磁极翻转事件的初步确定; ③通过  $66^{\circ}N$  与  $63^{\circ}N$  玄武岩成分的比较, 确定冰岛地幔柱的组成。

### 1.3 挪威海与巴芬湾和拉布拉多海: 104 和 105 航次

挪威海 104 航次 3 个站位(642 ~ 644 站)提供了重建过去 55 Ma 以来沉积古环境的资料<sup>[13]</sup>。3 个站位钻穿了  $V_{\phi ring}$  海台上古近纪和较新的岩石和沉积物, 但在  $V_{\phi ring}$  海盆只达新近纪上部和第四纪沉积物。古气候证据显示, 在早古近纪  $V_{\phi ring}$  海台中部被生长在适宜于红土壤潮湿气候的致密植被所覆盖。 $V_{\phi ring}$  海台中部自从那时下沉一直到现在中等深度, 而  $V_{\phi ring}$  海台的边缘自从其形成以来, 处于中层和深层水的位置。在始新世和渐新世, 气候尽管不像以前潮湿, 但气候持续温暖。暖和而潮湿的气候一直持续到早中新世, 但是到早中新世最晚期, 气候从暖湿变成温和。从中新世最晚期到上新世/更新世界限, 气候进入其冰期环境, 在过去的 2.6 Ma 期间, 气候以冰期/间冰期事件为特征。在  $V_{\phi ring}$  海台下沉以后, 连续的远洋沉积环境从始新世持续到第四纪。第一个冷水团和间歇性冰盖的标志首次出现在 5.5 Ma BP(根据筏冰碎屑)。自从那时以后, 表层水维持凉到温和, 常常被温和水团的入侵所干扰。主要冰盖出现在 2.6 Ma BP 和大约 1.2 Ma BP。冰期表层水是以筏冰碎屑、粗粒的陆源物质连续输入到  $V_{\phi ring}$  海台为特征。

105 航次 645 站(西巴芬湾)、646 和 647 站(拉布拉多海)的钻探结果和地震反射记录对这个地区的深水环流历史和沉积作用对新生代气候变化的响应以及构造演化提供了重要的证据<sup>[14]</sup>。一个重要的水团变化出现在晚上新世约 2.5 Ma 前筏冰的开始。在巴芬湾底层水活动的证据是来自岩芯结构的研究和沿着西部边缘明显的漂移特征。可能至少自中中新世晚期等深流是活动的, 晚中新世和第四纪其强度明显下降。645 站的记录显示巴芬湾底层水的形成出现在晚新近纪, 与这个时期气候的恶化相对应, 但是巴芬湾不是晚上新世输送到拉布拉多海的深部水团的重要源地。拉布拉多海许多深水环流

事件紧密对应于北大西洋深水环流事件和重要的全球气候变化事件以及古海洋学事件。

## 2 北极圈之梦——挑战高纬度钻探

全球气候模式表明极地对海洋—大气系统强迫的变化极其敏感。极地雪和冰的存在与消失通过其反照率的作用影响全球热量的分布, 并且极地大洋是致密的冷的底层水源, 影响世界大洋温盐环流。尽管北极大洋在气候演变中起重要作用, 但从高纬度岩芯中只获得了很少的资料。冰雪覆盖的北冰洋, 在阻挡科学家数十年后, 将成为最后一个被科学钻探组织征服的大盆地。高纬度的北极地区钻孔成功将是可与人类登月相比拟的海洋盛事。仍蒙着神秘面纱的这片冰冻的海洋, 将是首次开展的综合大洋钻探计划(IODP)最先涉足的地方之一, 将宣告科学探索新时代的到来<sup>[15]</sup>。在大洋钻探建议书中, 533-Full2 项目建议“北冰洋中部的古海洋及构造演化”, 在 2000 年和 2001 年都是排名第一。这项钻探既有望在 2004 年夏天作为一项 IODP 项目来实施。该提案大胆地在极地心脏地带对几乎贯穿北极点的罗蒙索夫脊的 7 个站位进行钻探和研究(图 2), 其首要目标就是钻取掩埋该脊的半远洋沉积物以重建新生代环境和气候记录以及确定下部基岩的组成和来源, 借此揭示该脊的隆升和沉降历史<sup>[16]</sup>。

项目建议书中提出了北极科学钻探的关键问题: ①极地大暖期时北极的响应; ②极地深海盆中水团的物理、化学特征的变化及通道打开的海洋学响应; ③极地海洋生物和营养肥力历史; ④北极的海冰历史; ⑤冰筏和地区冰盖发展历史; ⑥与天然气水合物堆积相关的不稳定冻土中甲烷的释放过程; ⑦北极大洋大火山岩省的历史及其环境影响。其核心聚焦于北极在全球气候系统的作用, 尤其是十年至百万年尺度的气候系统(即构造尺度 105 ~ 107 年; 轨道尺度 104 ~ 106 年; 海洋尺度 103 ~ 105 年; 乃至快速和短时间尺度变化事件 101 ~ 102 年)。为了理解北极在各时间尺度上对全球气候变化的影响, 还提出其它若干科学问题: ①北极的海冰历史, 北极何时出现永久海冰? 海冰曾多次出现和消失吗? 什么情况下海冰形成和消失? ②什么时候首次出现环北极冰盖? 一旦建立, 其生长和消亡的变化历史; ③北极水团循环和分层在新生代怎样演化? 水团特征的变化怎样影响全球温盐环流(中或深层水)? ④全球大暖期时北极的环境特征; ⑤北极主要的生物地球化学循环的变化; ⑥北极海洋生物及其生产力历史; ⑦

盆地构造演化怎样影响地区和全球气候？

作为北半球主要热量的汇, 北冰洋在全球海洋—气候系统中起着主要的作用。它是世界大洋冷而致密的中层和底层水源。永久海冰对地球反照率、大气环流和淡水分布有巨大的影响, 季节性和长期变化对全球热量分布、气候、营养、生物和沉积物有

直接的影响。北冰洋是否影响全球气候, 或其怎样响应这些变化是不清楚的。而未来罗蒙诺索夫脊的钻探及其研究将向世界展示北极在全球变化中的作用, 将为科学界提供一个观察全球气候系统的新视野<sup>[16]</sup>。



图 2 北冰洋地形图和 533-Full12 项目建议钻探站位<sup>[16]</sup>, 7 个站位几乎贯穿罗蒙诺索夫脊

Fig. 2 Physiographic diagram of the Arctic ocean and proposal 533-Full12 calls for seven drill sites along the Lomonosov ridge in the central Arctic ocean

### 3 南极相关海域钻探的研究

#### 3.1 塔斯马尼亚通道—新生代气候和海洋学发展:

##### 189 航次

新生代以其冰盖的发展为特征, 高纬度区持续地变冷最终形成了冰盖, 起初在 南极, 后来在北半球。70 年代早期人们提出气候变冷和南极冰冻圈

的发展是随着环南极洋流持续地与南极大陆的热隔离所形成的。这股洋流是由于古近纪塔斯马尼亚以南的塔斯马尼亚通道和渐新世最早期德雷克通道的打开而形成的。

189 航次 5 个站位检验上述理论并且提炼和扩展了上述理论, 极大地促进了人们对南大洋及其相关的南极气候演化的了解<sup>[17]</sup> (图 3)。晚始新世以

前,孢子和花粉在南极的出现说明,南极相对温暖,几乎没有冰,有利于温带雨林和南方山毛榉和蕨类的发展,属“暖室”世界。晚始新世(37 Ma BP),塔斯马尼亚陆桥与南极洲分离,陆桥及其边缘陆架开始下沉,冷的表层流开始从西面环绕南极流动。到早渐新世,来自热带的暖流被南极周围的环南极洋流切断,导致气候的变冷和冰盖的形成,从而造成了

全球的变冷。新近纪早期德雷克通道打开,并且塔斯马尼亚通道继续打开,使环南极洋流强化和加宽,把南极与低纬度热水的影响完全隔开。约 15 Ma 前,东南极冰冻圈演化成冰盖。这加强了全球变冷和温盐环流。“冰室”世界到来了。189 航次结果概括了南极新生代从“暖室”到“冰室”期的演化。

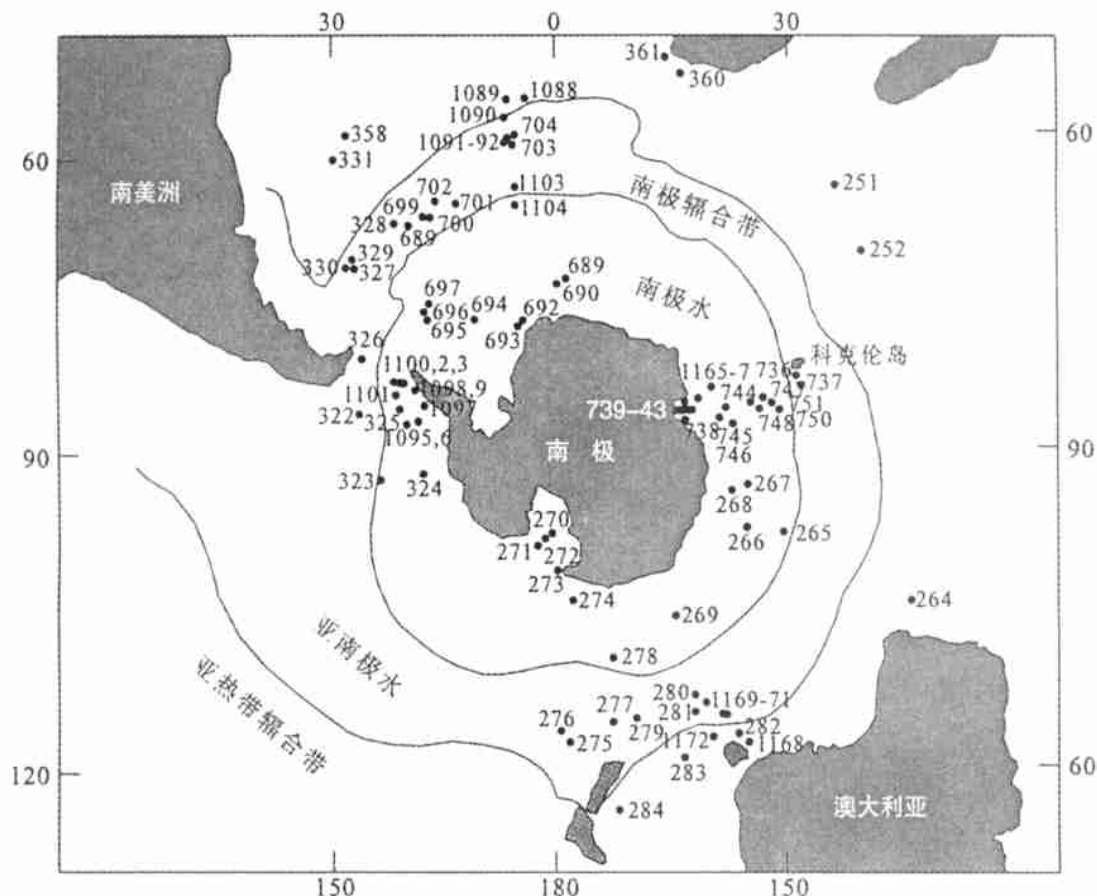


图 3 南极周围海域的水团及深海钻探和大洋钻探站位

Fig. 3 Present-day location of surface water masses of the southern Hemisphere numbers indicate DSDP and ODP sites

### 3.2 普里兹湾—科克伦海台—南极冰期历史和古海洋学: 188、120 和 119 航次

普里兹湾至科克伦海台 3 个航次的钻探研究显示, 188 航次离穿过普里兹湾陆架、陆坡和海隆的 3 个站位提供了从全新世到中生代长时间和短时间尺度的古环境变化的新证据<sup>[18]</sup>。陆架站位(1166 站)证明东南极冰川作用的最早阶段是从温带气候(如有植被)、接近冰川到冰期和间冰期的过渡环境,在陆架上有间歇性的水下冰川。陆坡上的 1167 站取到了新近纪最晚期的沉积物样品,证明冰期与间冰期旋回中陆上侵蚀区的快速沉积和冰盖前的冰海沉

积环境。海隆上 1165 站钻探记录证明了由下到上中新统气候从温暖到冷的过渡,并自早中新世以来叠加了短期的冰川波动。这些站位的古环境变化可能标志着从具河流冰水沉积的陆上冰川系统的温湿期(13~14 Ma 以前,中中新世)转变到的陆架和冰下沉积系统的干冷期(晚中新世以来)。中中新世以来筏冰碎屑含量的明显变化说明这种转变出现在温湿和干冷的冰川系统之间。120 航次南科克伦海台上 748 站渐新统最下部筏冰碎屑的出现是冰冻圈事件的重要证据,推测冰盖在渐新世最早期(35.8~36.0 Ma)到达海面,并且这种影响是直接的和深远

的<sup>[19]</sup>。除了筏冰碎屑外,这个事件在748站还通过大陆周围表层水团的急剧变冷表现出来,如冷水钙质超微化石含量增加,浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值增加以及沉积物中硅质生物含量增加。海台上底层水温也降低,而大陆上的冰量增加。这与119航次的结果是一致的<sup>[20]</sup>。中始新世晚期到晚始新世东南极出现冰川作用,渐新世最早期东南极出现大陆冰盖。尽管119航次的结果只提供了东南极新近纪冰期历史的一瞥,但他们的确提供了晚中新世晚期和上新世冰盖波动的证据以及穿过普里兹湾冰川的变大和变小的证据。

### 3.3 南极冰期历史和海平面变化: 178 航次

178航次期间钻探了南极半岛的太平洋边缘海,以了解其过去10Ma的冰期历史,并检验可用于南极边缘及其它地区的钻探设计<sup>[21]</sup>。生源蛋白石含量显示,东南太平洋的变化与全球气候变化相一致:晚中新世变凉,早上新世变暖,更新世由凉转冷。根据筏冰碎屑南极半岛的冰盖在这个时期一直存在;并且粘土矿物学显示,冰盖的大小足以从地面移动到陆架边缘。1096和1095站位沉积参数的频谱分析没有显示通常与轨道日照变化相关的频率优势。南极半岛与陆上、海洋沉积记录说明冰期开始于不同的时期。通过底栖有孔虫氧同位素记录可以确定渐新世(到中新世最早期)为中等冰量,早中新世(15~17Ma)或许无冰,随后的晚中新世为中等冰量,上新世至更新世的冰量更大。

### 3.4 南大洋古海洋学: 177 航次

古近纪环南极洋流的发展是南大洋演化的关键事件,因为它允许大洋洋盆之间的输送,并且可能形成一个全球温盐环流圈。它的发展依赖于塔斯马尼亚通道和德雷克通道的打开。1090站的研究首先发现晚始新世蛋白石极大期在37.5~33.5Ma BP之间,可与南大西洋的南大洋区类似的沉积比较<sup>[22]</sup>。与这种广泛的晚始新世蛋白石输出有关的有机碳埋葬的增加可能是大气 $\text{CO}_2$ 下降和全球气候变冷所造成的。其次,1090站早渐新世(32.8~31.3Ma BP)沉积间断标志着未受阻碍的环南极洋流的建立和沿南极边缘致密而冷的底层水的形成。南大洋(1090站)与其它大洋之间17Ma前强的氧同位素梯度显示南大洋深部水要比北大西洋或太平洋深部水冷且更咸。1092站首次可以确认的筏冰碎屑出现在约3.18Ma BP,并且自从那以后筏冰碎屑高峰持续变大,在2.8Ma BP达到最大值。这种情况类似于附近704站和北半球高纬度区所发现的,

说明可能与北半球冰盖的扩大相关。中层水和深部水之间垂直的碳同位素梯度类似于过去400ka大气 $\text{CO}_2$ 分压的变化,支持了南大洋深部水通气作用的变化像 $\text{CO}_2$ 变化机制的观点。最近4个冰消期的南大洋温度和深水化学变化与极地大气温度和Vostok冰芯中记录的大气 $\text{CO}_2$ 变化是同时的。这种关系支持了冰期与间冰期 $\text{CO}_2$ 分压变化的物理机理,并且与强调海冰作用和控制大气 $\text{CO}_2$ 分压的深部大洋通气作用的现代模型相一致。1090站浮游有孔虫夏季温度、底栖有孔虫氧同位素和沉积物组分频谱分析结果中观察到100ka周期的加强首先在约1.2Ma前,0.9Ma以后大大地加强了。浮游有孔虫氧同位素最小值和由转换函数估计的夏季温度的增加领先于冰期终止期底栖氧同位素最小值几千年,从而确认南大洋温度变化领先于全球冰量的变化<sup>[22]</sup>。1094站筏冰碎屑出现于过去1Ma的冰期,其变化幅度类似于末次冰期。在过去4个气候旋回中,每一个间冰期的早期都以低的筏冰碎屑丰度为标志,紧接着变冷,随着新冰期的开始,恢复了筏冰碎屑搬运。

### 3.5 亚南极南大西洋和南极威德尔海: 114 和 113 航次

亚南极南大西洋114航次和南极威德尔海113航次16个站位的钻探显示,114航次所有钻探的孔中都含有筏冰碎屑。699A孔、701站和740A孔提供了筏冰事件的完整历史<sup>[23]</sup>。筏冰碎屑首次到达东北乔治亚海隆的669站出现时间是早中新世(23.54Ma BP),与后来的筏冰碎屑属同一类型。少量的筏冰碎屑首次到达中大西洋脊西侧701站是8.78Ma BP,更多的筏冰碎屑是在晚中新世(5.88Ma BP)到达701站,大量的砂和砾首次出现是4.42Ma BP。Meteor海隆南部的704站2.46Ma以前几乎没有或无筏冰碎屑,但2.46Ma BP以后,大量的筏冰碎屑出现在这个站位。筏冰的高峰时间可以很好地与701站(2.24Ma BP)和699站(2.38Ma BP)筏冰碎屑的输入进行对比。113航次钻探所获得的广泛的沉积学、生物学和同位素证据显示,南极及其周围大洋新生代连续变冷和冰冻圈的发展对大洋和大气环流、沉积物和生物圈产生深远的影响<sup>[24]</sup>。南极威德尔海白垩纪气候条件属温到凉的亚热带气候,没有冰冻圈发展的证据。690站的古新世剖面含有细粒的沉积物,可能是风尘来源的,来自于东南极,这些物质的出现说明气候是暖的、半干旱的大陆性气候。暖的趋势出现在晚古新世,在早

至中始新世早期(约 58~45 Ma)导致新生代的大暖期。显著的古环境和生物变化以古新世/始新世界线为标志,威德尔海此时的表层水温至 20 °C。氧同位素证据显示,威德尔海暖而咸的深层水出现在始新世。渐新世开始,冷的深层水开始在南极形成,并且取代了来自低纬度的暖水。南极冰冻圈的发展始于渐新世较早时候(36 Ma BP)。689 站氧同位素记录显示东南极在早渐新世至晚渐新世早期有冰生长的证据(同位素 $> 2.5\%$ ),中中新世以前大陆冰盖没有发展起来。南极冰盖发展在新近纪强化,导致了中新世最晚期至上新世最早期西南极永久冰盖的形成。威德尔海不同剖面沉积序列的比较显示东南极冰盖首先形成,接着是晚中新世西南极冰盖的形成。中到晚古近纪的气候主要是变冷,而古近纪最晚期到新近纪的变化主要是冰冻圈的发展。中新世最晚期和上新世最早期威德尔深海平原(694 站)陆源浊流的快速输入标志着西南极冰盖的生长。上新世最早期(约 4.8 Ma BP)694 站浊流沉积的停止说明西南极冰盖可能已经具永久性和稳定性特征。

#### 4 结 语

近 10 多年来南、北极海域钻探所取得的成就令人瞩目,为人类研究过去全球变化打开了新的视野。北极海域的 7 个钻探航次,如北大西洋—北冰洋通道钻探计划揭示了北半球高纬区深海盆的古海洋和气候历史,北冰洋与穿过法拉姆海峡的挪威—格陵兰海之间的水团交换模式,以及周围陆架和陆地区域的新近纪和第四纪冰期历史,发现了千年尺度的气候波动也存在于早更新世“41 ka 世界”,以及冰期表层水温与深层水的耦合颤动,说明冰消期气候的不稳定性。而南极海域南大洋、威德尔海、南极半岛边缘、普里兹湾至科克伦海台和塔斯马尼亚以南海域的 9 个钻探航次检验了新近纪早期塔斯马尼亚通道的打开,使环南极洋流强化和加宽,把南极与低纬度热水的影响完全隔开,导致气候的变冷和冰盖的形成,从而造成了全球变冷和温盐环流加强的理论,并根据筏冰碎屑沉积揭示了南极新生代的气候变化和冰盖的形成历史,以及发现南大洋温度变化领先于全球冰量的变化。2004 年罗蒙诺索夫脊的钻探及其研究将重建北冰洋新生代环境变化和气候的演变历史,将展示北冰洋在全球气候变化中的作用,为科学界提供了一个观察全球气候系统的新视野。

#### 参考文献(References):

[1] Jin Xingchun, Zhou Zuyi, Wang Pinxian. Ocean Drilling Program

and Earth Science in China[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995. 1-349.[金性春,周祖翼,汪品先.大洋钻探与中国地球科学[M].上海:同济大学出版社,1995.1-349.]

- [2] Thiede J, Myhre A. Introduction to the North Atlantic-Arctic gateways: Plate tectonic paleoceanographic history and significance[A]. In: Thiede J, Myhre A, Firth J, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results[C]. 1996, 151; 3-23.
- [3] Thiede J, Myhre A. The paleoceanographic history of the North Atlantic-Arctic gateways: Synthesis of the Leg 151 drilling results [A]. In: Thiede J, Myhre A, Firth J, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results[C]. 1996, 151; 645-658.
- [4] Raymo M. New insights into Earth's history: An introduction to Leg 162 postnise research published in journals[A]. In: Raymo M, Jansen E, Blum P, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results[C]. 1999, 162; 273-275.
- [5] Ortiz J, Mix A, Harris S, *et al.* Diffuse spectral reflectance as a proxy for percent carbonate content in North Atlantic sediments [J]. *Paleoceanography*, 1999, 14; 171-186.
- [6] Oppo D, McManus J, Cullen J. Abrupt climate events 500 000 to 340 000 years ago: Evidence from subpolar North Atlantic sediments[J]. *Science*, 1998, 279; 1 335-1 338.
- [7] McManus J, Oppo D, Cullen J. A 0.5 million year record of millennial-scale climate variability in the north Atlantic[J]. *Science*, 1999, 283; 971-975.
- [8] McIntyre K, Ravelo A, Delaney M. North Atlantic intermediate waters in the Late Pliocene-Early Pleistocene [J]. *Paleoceanography*, 1999, 14; 324-335.
- [9] Venz K, Hodell D, Stanton C, *et al.* A 1.0 Myr record of Glacial North Atlantic intermediate water variability from ODP Site 982 in the northeast Atlantic[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14; 42-52.
- [10] Solheim A, Fakiide J, Andersen E, *et al.* Late Cenozoic seismic stratigraphy and geological development of high latitude glacial continental margins: East Greenland and Svalbard-Barents Sea [J]. *Quat Science Review*, 1998, 17; 155-184.
- [11] Larsen M, Fittin G, Saunders A. Composition of volcanic rocks from the Southeast Greenland margin, Leg 163: Major and trace element geochemistry[A]. In: Larsen H, Duncan R, Allan J, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results[C]. 1999, 163; 63-75.
- [12] Larsen H, Saunders A. Tectonism and volcanism at the Southeast Greenland rifted margin: A record of plume impact and later continental rupture[A]. In: Saunders A, Larsen H, Wise S Jr, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results[C]. 1998, 152; 503-533.
- [13] Thiede J, Eldholm O, Taylor E. Variability of Cenozoic Norwegian-Greenland Sea paleoceanography and northern hemisphere paleoclimate: Synthesis of paleoenvironmental studies of ODP Leg 104, Voring Plateau, Norwegian continental margin[A]. In: Eldholm O, Thiede J, Taylor E, *et al.*, eds. Proceedings of



- the Ocean Drilling Program, Scientific Results [ C ] . 1989, 104: 1 067-1 118.
- [ 14 ] Arthur M, Srivastava S, Kaminski M, *et al.* Seismic stratigraphy and history of deep circulation and sediment drift development in Baffin Bay and the Labrador Sea [ A ] . In: Srivastava S, Arthur M, Clement B, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [ C ] . 1989, 105: 957-988.
- [ 15 ] Johnson A. Arctic dreams [ J ] . JOI/USSAC, Newsletter, 2001, 14 (1): 1-3.
- [ 16 ] Hovland M, Backman J, Coakley B, *et al.* The high-Arctic drilling challenge: Excerpts from final report of the Arctic's role in global change program planning group (APPG) [ J ] . JOIDES Journal, 2001, 27 (1): 7-20.
- [ 17 ] Exon N, Kennett J, Mabne M, *et al.* Proceedings of ODP, Initial Reports 2001, 189 [ M/CD ] . Available from: Ocean Drilling Program, Texas A & M University, College Station TX 77845-9547, USA.
- [ 18 ] O'Brien P, Cooper A, Richter C, *et al.* Proceedings of ODP, Initial Reports 2001, 188 [ M/CD ] . Available from: Ocean Drilling Program, Texas A & M University, College Station TX 77845-9547, USA.
- [ 19 ] Wise S Jr, Breza J, Harwood D, *et al.* Paleogene glacial history of Antarctica in light of leg 120 drilling results [ A ] . In: Wise S Jr, Schlich R, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [ C ] . 1992, 120: 1 001-1 029.
- [ 20 ] Barron J, Larsen B, Baldauf J. Evidence for Late Eocene to Early Oligocene Antarctic glaciation and observations on Late Neogene glacial history of Antarctica: Results from Leg 119 [ A ] . In: Barron J, Larsen B, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [ C ] . 1991, 119: 869-891.
- [ 21 ] Barker P, Camerlenghi A. Glacial history of the Antarctic Peninsula from Pacific margin sediments [ A ] . In: Barker P, Camerlenghi A, Acton A, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [ C ] . 2003, 178: 1-40.
- [ 22 ] Hodell D, Gersonde R, Blum P. Leg 177 synthesis: Insight into Southern Ocean paleoceanography on tectonic to millennial timescale [ A ] . In: Gersonde R, Hodell D, Blum P, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [ C ] . 2003, 177: 1-54.
- [ 23 ] Allen C, Wamke D. History of ice rafting at Leg 114 Sites, Subantarctic/South Atlantic [ A ] . In: Gieselski P, Kristoffensen Y, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [ C ] . 1991, 114: 599-607.
- [ 24 ] Kennett J, Barker P. Latest Cretaceous to Cenozoic climate and oceanographic developments in the Weddell sea, Antarctica: An ocean-drilling perspective [ A ] . In: Barker P, Kennett J, *et al.*, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [ C ] . 1990, 113: 937-960.

## PROGRESS OF OCEAN DRILLING IN POLAR REGIONS

WANG Ru-jian

(Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Achievements made by Deep Sea Drilling Project (DSDP) and Ocean Drilling Program (ODP) in the Antarctic and Arctic regions are the focus of world attention, opening a new insight for the past global change study. They reveal the paleoceanographic and paleoclimatic evolutionary history during the Neogene in the high latitude of the North Atlantic, find the millennial timescale climatic variability during the early Pleistocene “41 ka world” and couple the oscillation between surface temperature and deep water during the glacial periods, indicating the climatic instability of deglaciation during the glacial and interglacial cycles. They also test the formation history of the Antarctic Circumpolar Current, uncover the Cenozoic climate cooling and the evolutionary history of ice sheet in the Antarctic and confirm the “lead” of Southern Ocean temperature with respect to global ice volume, based on minimum planktonic  $\delta^{18}\text{O}$  values and increases in SST estimated by transfer functions lead the minimum in benthic  $\delta^{18}\text{O}$  by several thousand years at glacial terminations. The Arctic Lomonosov ridge which will be visited by the Integrated Ocean Drilling Program (IODP) in 2004 will declare in a new era of scientific exploration. The sediment study on the ridge will reconstruct the Cenozoic environmental change and climate evolutionary history in the Arctic and usher the role of the Arctic in global climate change.

**Key words:** Arctic; Antarctic; Ocean Drilling Program; Lomonosov Ridge drilling; Cenozoic climate evolution; Paleoceanography.