

西南太平洋第四纪晚期古海洋研究进展

吴莹莹, 丁 旋, 刘秀明

(中国地质大学海洋学院, 北京 100083)

摘 要: 深海大洋钻探计划(Deep Sea Drilling Project, 简称 DSDP)、国际大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, 简称 ODP)、国际海洋全球变化研究计划(International Marine Global Changes Studies, 简称 IMAGES)等在西南太平洋地区的开展, 使西南太平洋晚第四纪古海洋学的研究取得了迅速发展并成为古海洋学研究的热点所在。西南太平洋在中更新世气候转型方面主要表现为在此期间深层西边界洋流强度较弱以及冰期—间冰期旋回周期从 40 ka 向 100 ka 的过渡。至于西南太平洋在冰期—间冰期旋回方面主要表现为各海洋锋有规律的迁移, 即间冰期阶段向南迁移, 冰期阶段向北迁移, 但有时锋的位置会受到水深的影响, 特别是查塔姆海隆及新西兰东南岸外的亚热带锋和坎贝尔高原处的亚南极锋。还探讨了西南太平洋所代表的南半球气候与北半球气候的密切联系, 并指出南半球气候波动领先于北半球。

关键词: 古海洋学; 第四纪晚期; 西南太平洋

中图分类号: P736.22; P534.63 **文献标志码:** A

文章编号: 1000-7849(2013)06-0057-08

西南太平洋在古海洋和古气候学研究中扮演着尤为重要的角色。首先, 相对于北半球, 南半球海洋所占面积更大, 海洋的连通性也更好, 南半球水团锋面的迁移能更灵敏地反映冰期—间冰期(glacial-interglacial, 简称 G-I)的变化。西南太平洋除了存在对冰期—间冰期气候反映灵敏的多种海洋锋外, 还存在多种重要洋流, 全球最大的深层西边界洋流以及全球等温循环系统的主要支流都通过新西兰东的西南太平洋通道进入太平洋^[1]。特殊的海洋学特征使西南太平洋对气候扰动极为敏感^[2], 不仅海洋锋及洋流会随冰期—间冰期变化而发生变迁, 西边界深层流的强度更与中更新世气候转型密切相关。此外, 西南太平洋海洋锋的迁移还会因地理格局的控制而出现特殊的情况, 如新西兰东的南岛锋在冰期—间冰期变化中可能出现与开阔大洋中相反的迁移情况, 因此西南太平洋又是探讨相对海平面变化与全球海平面变化关系的最佳地区。

其次, 古海洋研究中关于气候长期变化的驱动力问题一直存在争议。解释更新世气候记录变化的传送带模式指出, 气候响应起源于北大西洋, 随后由北大西洋深层水(North Atlantic deep water, 简称 NADW)的流量变化传播全球, 而北大西洋深层水流量改变引起的环流变化能够影响南大洋的养分循环, 却并不会给南半球气候带来重要影响^[3]。南大洋 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究显示, 北半球长期和短期

气候波动均滞后于南半球^[3]。通过西南太平洋地区与北半球气候记录的对比, 能够揭示这种南、北半球气候波动的先后关系, 而该地区亚热带洋流的变化与冰体积变化的对比, 又能够揭示南半球海洋气候主要是极地的驱动还是热带的驱动。

最后, 西南太平洋对全球气候变化有较大的影响。西南太平洋地处亚热带和极地气团作用处, 存在世界上平均最强的海洋风—南半球西风带^[4]。该西风带通过“Ekman 运输”(一个由风驱动的表面洋流)使表层水离开南极大陆, 在此“Ekman 流”南侧因水体离岸产生上升流, 并使等密度面沿南极绕极流(Antarctic circumpolar current, 简称 ACC)路径强烈倾斜, 由于水体混合优先发生在这些等密度面, 从而使 2 500 m 之下的深层水暴露在大气中, 促进南大洋深层水通风(暴露于大气)^[4-8]。西风带的强弱及其位置直接影响到上升流的强弱, 控制着南大洋深层水通风, 从而驱动大气 CO_2 浓度的变化和全球气候的变化^[8-9]。气候温暖时南大洋西风带更强和(或)向极地迁移, 造成更大量的水体离岸, 从而引起深层水上涌的增强, 加强了深层水通风; 气候寒冷时南大洋西风带较弱和(或)向赤道迁移, 减少了深层水的上涌, 深层水通风减弱^[8]。此外, 寒冷气候会使 CO_2 溶解度增大, 造成大气 CO_2 含量下降, 也会使南极周围的海水分层加强并导致浮冰扩展增厚, 进而引起 CO_2 在深海积聚, 造成 CO_2 更大程度的减

收稿日期: 2012-09-21 编辑: 刘江霞

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176055)

作者简介: 吴莹莹(1988—), 女, 现正攻读海洋地质专业博士学位, 主要从事古海洋学的研究。E-mail: wyyzrc@163.com

通信作者: 丁 旋(1964—), 女, 副教授, 主要从事海洋学与微体古生物学研究。E-mail: dingx@cugb.edu.cn

少^[8,10-11]。而此时西风带向赤道的迁移减弱了载有吸入 CO₂ 的深层水的上涌,为形成分层和更厚的浮冰提供了有利条件,因此南大洋的风/通风关系是一个正反馈,大气 CO₂ 和南极温度的变化都是反馈的一部分^[8],明显地放大了全球气候变化的信号。

1 西南太平洋现代海洋学特点

西南太平洋由温暖的珊瑚海(Coral Sea),较冷、较高盐的塔斯曼海(Tasman Sea)以及南大洋(Southern Ocean)构成^[12]。西南太平洋包括多个海洋锋(oceanographic fronts),从北向南依次为塔斯曼锋(Tasman front,简称TF)、亚热带锋(subtropical front,简称STF)、亚南极锋(subantarctic front,简称SAF)以及极锋(polar front,简称PF),各个海洋锋将不同的表层水团分隔(图1)。同时,西南太平洋也包括多种洋流,如东澳大利亚洋流(East Australian current,简称EAC)、南岛流(Southland current,简称SC)等。

塔斯曼海中的东澳大利亚洋流由南赤道洋流(South Equatorial current)到达昆士兰海岸(Queensland coast, 14°~18°S)分叉形成,流入塔斯曼锋^[14-17]。塔斯曼锋将温暖的亚热带水体分隔在其北边,而将温带水体分隔在其南边^[14-17]。塔斯曼锋部分在约 31°S 离开澳大利亚海岸延伸至新西兰北,偶尔沿澳大利亚东岸向塔斯马尼亚(Tasmania)运输一些水体,并在该处形成温暖涡流^[17-18]。除塔斯曼锋外,塔斯曼海中还存在着亚热带锋。在塔斯曼海南部,亚热带锋是较暖、较咸的亚热带塔斯曼海水与较冷、较淡的南大洋表层亚南极水之间的动力锋边界^[12]。在塔斯曼海中亚热带锋位于约 45°S,当它靠近南岛(South Island)西陆架时,围绕斯图尔特岛(Stewart Island)向南偏移,然后向东北方向沿南岛大陆架东部抵达查塔姆海隆(Chatham Rise),其东翼在西南太平洋已向北偏至约 43°S^[13,19]。

南岛南岸和东岸周围亚热带锋形成近平行于岸线方向的南岛锋(Southland front,简称SF)。南岛锋以其特有的温盐特征易于识别,近岸一侧为暖而高盐的亚热带水(subtropical water,简称STW),远岸一侧为冷而低盐的亚南极水(subantarctic water,简称SAW),两者共同组成沿着南岛东岸的外陆架和上陆坡向北流动的南岛流^[13,19]。

南大洋不仅包括亚热带锋,还包括亚南极锋和极锋。新西兰南边,极锋将亚南极水分隔在其北边(大约 55°S 和 60°S 之间),而将寒冷的南极水(Antarctic water)分隔在其南边。Heath^[20]在亚热带锋和极锋之间的 50°S 附近定义了亚南极锋,亚南极锋

在向东进入南太平洋之前沿坎贝尔高原(Campbell Plateau)陡峭的东南边缘流动。它将亚南极水分成北边和南边两带,前者为澳大利亚亚南极水(Australasian subantarctic water, ASW),后者为绕极亚南极水(circumpolar subantarctic water, CSW),绕极亚南极水由南极绕极流(Antarctic circumpolar current, ACC)的分支形成^[19,21]。

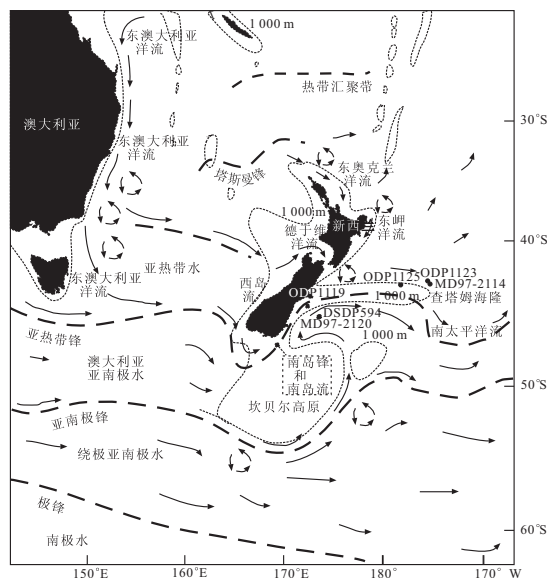


图1 西南太平洋区域表层洋流系统及表层锋^[13]

Fig. 1 Regional surface current systems and surface fronts of the southwest Pacific^[13]

西南太平洋不仅存在多种表层水团,垂向上也明显分层。南岛流的向海部分,太平洋海水形成亚南极水(0~300 m)、亚南极模式水(subantarctic mode water,简称SAMW,300~800 m)、南极中层水(Antarctic intermediate water,简称AAIW,800~1 200 m)以及绕极深层水(circumpolar deep water,简称CDW,2 000~4 500 m)^[13]。绕极深层水是深层西边界洋流的主要水团,该洋流同南极绕极流一起通过新西兰东的西南太平洋通道,且以南极绕极流为主^[1,22]。

2 西南太平洋晚第四纪古海洋学研究现状

关于西南太平洋第四纪古气候与古海洋环境变化,前人通过对深海大洋钻探 DSDP594 站位、国际大洋钻探 ODP1119 站位、ODP1123 站位、国际海洋全球变化研究计划 MD97-2120 岩心及其他众多岩心的研究,已取得了重要进展。

Kawagata^[23]对塔斯曼锋迁移及其相关的古海洋变化进行了探讨。Carter 等^[13]、Weaver 等^[24]、Wilson 等^[19]以及 Scott 等^[25]对亚热带锋的迁移进

行了研究。Carter 等^[2]、Nelson 等^[21]、Pahnke 等^[26]以及 King 等^[27]对西南太平洋气候波动与机制及其与全球气候变化关系进行了系统的分析。Crundwell 等^[28]、Marino 等^[29]、Venuti 等^[30]则分析研究了西南太平洋中更新世气候过渡期的特征。

归纳起来,前人的研究主要集中在中更新世气候转型的古海洋、古气候特征,表层水团与洋流的变迁,以及西南太平洋所揭示的全球气候变化特征等方面。

2.1 中更新世气候转型期间的西南太平洋

中更新世气候转型(Mid-Pleistocene climate transition,简称MPT)是第四纪古气候研究的一个特殊时期,指距今60~120万年之间,气候变化的主导周期从早更新世的41 ka转变为之后的100 ka的特殊地质时期,其中心为距今90万年前^[31]。中更新世气候转型标志着地球气候系统对轨道驱动的季节日照率变化响应的根本转变,直接影响着现代气候模式的形成与演化^[28,32]。Huybers 等^[33-34]发现,早更新世几乎在每个黄赤交角周期都存在冰消期,从而出现40 ka周期,而晚更新世冰消期经常跳过一个或两个黄赤交角节拍,从而出现80 ka或者120 ka的冰期周期,即平均100 ka的变率。位于南大洋阿古拉斯海隆(Agulhas Ridge)的ODP1090站位相关数据证实了晚更新世冰期周期在80~120 ka之间变化这一说法,再一次证实了将冰期周期量化为40 ka倍数的黄赤交角步调假说^[29,35]。

在中更新世气候转型研究较为深入的南海发现,中更新世的气候转型不仅表现在轨道尺度的气候周期变化上,同时也体现在千年尺度气候波动的特征变化中。在对南海大洋钻探ODP1144站位沉积物做颜色反射率的小波分析时发现,千年尺度的气候波动在最近100万年都存在,并且在中更新世气候转型前后,这种类似于Dansgaard/Oeschger事件(简称D/O事件)的约1.5 ka气候周期的强弱在冰期/间冰期正好相反:转型前,千年尺度的气候波动在间冰期比较强;之后在冰期信号较强^[32]。然而,西南太平洋中更新世气候转型的研究涉及此方面的甚少,该地区中更新世气候转型是否在千年尺度气候波动中有所体现尚未明确。

此外,Schmieder 等^[35]通过对南太平洋的研究发现,中更新世气候转型不应是从“41 ka世界”向“100 ka世界”的逐渐过渡,而是全球环流系统第3种截然不同的形式,以较弱的深层水交换为标志。他们发现南太平洋中更新世气候转型以Marine Isotope Stage (MIS)24期间(大约距今920 ka)深层水循环突然而急剧的减弱为开始,继而进入以减弱的深层水循环为标志的中更新世气候转型中期,而

中更新世气候转型的终止则由深海环流的突然加强和稳定的100 ka冰期周期的形成共同定义^[35]。该结论同样适用于西南太平洋,位于新西兰东查塔姆海隆东北翼的MD97-2114岩心非磁滞剩磁/等温剩磁(ARM/IRM)比值数据显著的长期趋势就反映出中更新世转型期间深层西边界洋流上部强度的总体变化:过去300 ka中以及大约距今870 ka之前ARM/IRM比值相对较低,说明该阶段的洋流强度相对较弱;以ARM/IRM比值增大为标志的两个主要事件发生在大约距今870 ka和大约距今450 ka,说明大约距今870 ka和大约距今450 ka时的洋流强度相对较弱。新西兰东绕极深层水中部影响之下ODP1123站位沉积物粒度古洋流分析结果与以上结论一致,表明中更新世气候转型在距今860~450 ka期间影响显著^[30]。

Crundwell 等^[28]通过对ODP1123站位的研究将西南太平洋1.2 Ma以来分为与中更新世气候转型相关的4个海洋气候期。

(1)中更新世气候转型之前,距今1185~870 ka期间(MIS36—MIS22),表层海水温度波动周期为41 ka。同时,表层海水温度长期较冷且波动幅度不大,该现象和浮游有孔虫组合特征都体现出ODP1123站位亚热带水影响减弱,亚南极水影响增加,表明SAW北移。总体来看,中更新世气候转型之前是一个南半球温盐环流较强、极地冰盖扩展、南极绕极流活跃、南部深层水供应较多的时期。值得指出的是,MIS22增大的可分选粉砂粒度及显著的碳酸盐溶解表明MIS22期间深层西边界洋流正在逐渐加强。

(2)中更新世气候转型早期,距今870~620 ka期间(MIS21—MIS16),冰期—间冰期旋回周期处于40~100 ka之间的不稳定状态。该阶段碳酸盐保存的改善及平均可分选粉砂粒度的降低表明太平洋深层西边界洋流较弱。同时,表层海水温度在冰期—间冰期旋回中变化幅度减小,且该时期海洋气候形成明显的冰期、冰消期以及温带间冰期模式,表明ODP1123站位在冰期终止期出现亚南极和亚热带流短时间穿插的较不稳定气候。众多研究^[28,35-36]均证实,中更新世气候转型早期是温盐环流较弱、极地冰盖衰退且经向温度梯度较小的时期。

(3)中更新世气候转型晚期,距今620~435 ka期间(MIS15—MIS13),冰期—间冰期旋回周期为100 ka。此阶段增大的可分选粉砂粒度表明深层西边界洋流开始逐渐加强。同时表层海水温度相对较高,且在冰期—间冰期旋回中存在不明显的低幅度波动,此情况和浮游有孔虫组合特征体现出该时期ODP1123站位亚南极水影响明显减弱,而STW却

通过加强的东岬洋流而流入更多,表明亚热带锋相对稳定。研究表明中更新世气候转型晚期极地冰盖较小且动力较弱。

(4)中更新世气候转型的终止以 MIS12 期间主要的气候恶化期为标志。中更新世气候转型之后,距今 435~0 ka 期间,冰期-间冰期旋回周期为相对稳定的 100 ka。此时较大的平均可分选粉砂粒度表明深层西边界洋流较强。深层西边界洋流的逐渐加强是极地冰盖扩展从而沿新西兰东部深层水增加的结果。ODP1123 站位表层海水温度长期较冷且年平均温度波动幅度较大,并伴随着浮游有孔虫温带的逐渐减少和富营养混合层种的增加,体现出亚南极水的北移,此现象由南极绕极流的活跃以及风成环流促成。

除了以上 ODP1123 站位关于水团变迁的研究, Hayward 等^[37]也通过新西兰东、西站位表层海水温度的对比研究对西南太平洋中更新世气候转型及之后的水团变迁进行了总结:STF 在中更新世气候转型内的冰期较在中更新世气候转型后的冰期向北迁移更远;在大多数间冰期峰期与现今位置接近,但在 MIS11 和 MIS5.5 南移。MPT 内的冰期-间冰期旋回中 STF 纬度迁移约为 6°,在 MPT 后仅有 3°~5°,与塔斯曼海晚更新世 STF 迁移幅度大致相同。

2.2 西南太平洋冰期-间冰期旋回中表层水团与洋流变迁

西南太平洋存在的多种海洋锋会随着冰期-间冰期变化而发生位置迁移。塔斯曼锋的纬度迁移由与西太平洋暖池(West Pacific Warm Pool)体积相关的东澳大利亚洋流的强度引起^[17,38]。表现为间冰期阶段从其现在位置向南迁移至约 35°S;冰期期间向北迁移,在末次冰盛期塔斯曼锋甚至迁移到了约 26°S^[17,23]。更新世亚南极锋和亚热带锋的迁移则如同现今亚南极锋和亚热带锋的季节迁移,在较寒冷气候期向北迁移而在较温暖期向南迁移^[39-42]。在开阔大洋中,至少在末次冰期-间冰期旋回期间,亚南极锋和亚热带锋不受地形控制纬度迁移可达 6°,但该纬度迁移在塔斯曼海中似乎较小,记录显示为 2°~3°^[22,39,43]。就冰盛期而言,塔斯曼海亚热带锋的北移足以大幅度减弱或者截断南岛南端亚热带水的供应,使整个新西兰高原东部的水体全部由冷的表层亚南极水和南极中层水-绕极深层水的上涌供应^[18]。然而亚南极锋和亚热带锋的强度和位置都受到深度影响,因而受古地理格局影响在部分地区会出现特殊的迁移模式。如亚热带锋在冰期-间冰期旋回中与查塔姆海隆顶部的深度存在“锁定”关系^[18,44]。此外,新西兰东南岸外南岛锋的迁移同样

具有特殊性,通常南岛锋的迁移与海平面变化存在着密切的关系。当海平面上升时,南岛锋向近岸方向迁移,冷而低盐的亚南极水覆盖范围将向陆地方向推移;当海平面下降时,南岛锋向远岸方向迁移,暖而高盐的亚热带水覆盖范围将向海洋方向推移^[13,19,45]。

Wilson 等^[19]通过对邦蒂海槽(Bounty Trough)上陆坡 ODP1119 站位和查塔姆海隆南翼 DSDP594 站位浮游有孔虫组合等的对比研究,发现在大部分间冰期阶段,两个站位的夏季表层海水温度一致,指示 2 个站位都位于亚南极水覆盖之下,南岛锋随海平面上升移动到这两个站位向陆一侧(图 2-A);而在大部分冰期阶段,近岸的 ODP1119 站位比 DSDP594 站位要暖约 4°C,表明该时段它们处于不同的表层水团之下,指示随海平面下降南岛锋向远岸方向移动到这两个站位之间(图 2-C),但 MIS20 是个例外;MIS20 期间 ODP1119 站位的表层海水温度与 DSDP594 站位一致下降,是过去 900 ka 唯一的一个 ODP1119 站位夏季表层海水温度(4°C)与 DSDP594 站位相似的冰期,此时两个站位都位于混合的绕极亚南极水-澳大利亚亚南极水水团之下(图 2-D),Wilson 等^[19]认为这与亚热带锋被南岛阻断有关,致使沿新西兰南岛东南海岸没有南岛锋存在,沿岸没有温暖的亚热带水入侵。此外, Carter 等^[13,45]利用西南太平洋不同水团具有各自特征的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,从而可作为追踪水团历史的重要工具这一特点,在 ODP1119 站位研究了不同水团的活动历史,得出与正常相反的结果,即早冰期阶段海平面下降南岛锋向海移动,伴随着温暖的亚热带水入侵;而在晚冰期和间冰期阶段海平面上升南岛锋向陆移动,导致更冷的亚南极水占主要地位。但是,与上述情形不同,在 MIS11 和 MIS5 峰期, ODP1119 和 DSDP594 两个站位的夏季表层海水温度都较现代更暖,指示南岛锋向海移动,更多的亚热带水进入该区(图 2-B)。Wilson 等^[19]认为这可能与此时亚热带锋较典型的间冰期阶段向南移动更远有关。

类似于地理格局对亚热带锋迁移的影响,新西兰南亚南极锋的迁移也受到坎贝尔高原的影响。末次冰盛期其位置沿深度锁定在坎贝尔高原陡峭的边缘处,除了高原之上表层水显著地降温外同目前的状况一样^[44,46]。

冰期不受坎贝尔高原影响的亚南极锋位置则显著北移^[21,44,47],同时南岛东的亚热带锋向东南移动,使亚南极锋和亚热带锋更接近或至少在南岛东的邦蒂涡流(Bounty Gyre)中。在冰期鼎盛期,以上结果使亚热带锋和亚南极锋在南岛东的近海处融合为一个加强的、海洋学梯度极大的锋系统^[2,13]。

除上述锋迁移外,末次冰盛期深水开阔大洋环境下,南大洋中西南太平洋部分的极锋也向北迁移至少 3~5 纬度^[21,46,48-49]。DSDP594 站位微体化石变化表明冰期期间绕极亚南极水取代了间冰期的澳大利亚亚南极水,与 $\delta^{18}\text{O}$ 所指示的表层水降温一致,如此显著的变化证实了极锋的北移^[21]。但冰期极锋的显著北移与南岛东亚热带锋的补偿变化不能相平衡,因而末次冰期亚热带锋和极锋间的亚南极水体带(澳大利亚亚南极水和(或)绕极亚南极水)出现压缩和降温,同时强烈的极地风使南部的表层水北流,加之大陆坡上部较温暖的塔斯曼海水流入南岛流,以上共同作用产生了极陡的纬度热量梯度^[21,44,46]。

不仅表层水团和海洋锋会随冰期一间冰期旋回迁移,西南太平洋的多种洋流也会随冰期一间冰期旋回而发生变化。如冰期压缩的亚南极水体,低海平面和扩大加强的西风系统会导致澳大利亚亚南极水改变和南岛流加强^[46]。末次冰期冰川引起的海平面下降最终导致库克海峡(Cook Strait)的关闭^[50],使南岛流更顺畅地沿北岛东南岸向北流动更远,进而使东岬洋流中的亚热带水及其产生的怀拉帕涡流(Wairarapa Eddy)沿查塔姆海隆北侧进一步离岸^[46]。大约距今 15 ka 前库克海峡的打开使南岛流向北岛东边的流动减弱,并时而向北岛的西边发生转向^[44,51]。

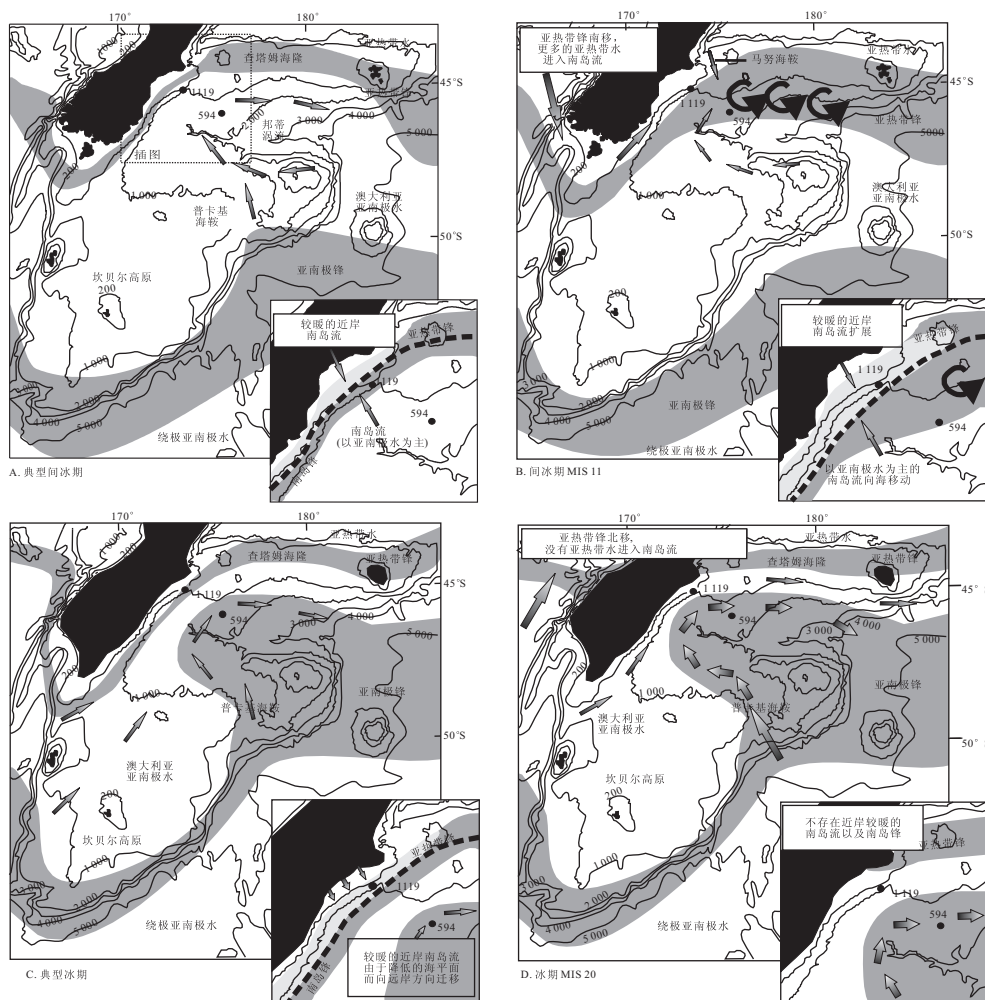


图 2 新西兰东南的古海洋学重建^[19]

Fig. 2 Paleoclimatic reconstructions of southeast New Zealand

此外,主要由风驱动的南极绕极流在冰期强大的西风下也会加强,并且冰期南极绕极流中的南部锋系统,即极锋的向北迁移使南极绕极流(尤其是坎贝尔高原周围与亚热带锋相关部分)进一步加强^[52-54]。除了加强的洋流,坎贝尔高原显著的深度控制阻止南极绕极流跨过高原北移,只有南极绕极

流从高原向东转向深的查塔姆海隆东端时它才能向 ODP1123 站位迁移^[28]。

2.3 西南太平洋所揭示的全球气候变化特征

目前关于西南太平洋最近的气候波动主要与北极记录还是南极记录相关的争论异常激烈。研究发现,西南太平洋气候旋回与南极相似,至少可以追溯

到距今约 0.37 Ma 前(MIS11)。千年气候旋回明显的 ODP1119 站位伽马射线记录、沃斯托克氦同位素记录以及查塔姆海隆上 MD97-2120 岩心高分辨率氧同位素记录之间的对比显示出初步的对应关系。即使最保守的解释也说明西南太平洋和南极气候之间具有密切的甚至次千年尺度上的联系,因而南半球存在广泛而强烈的大气耦合^[2]。但是,冰期加强的南极绕极流会使南半球中、高纬度气候退耦。因而在冰消期和间冰期期间南半球中纬度和南极气候极度耦合,但在冰期阶段 MD97-2120 岩心比南极冰心具有更高的多变性^[2,26]。西南太平洋和南极气候之间的密切联系说明西南太平洋的气候记录能够代表南半球。通过西南太平洋记录与北半球记录的对比,发现千年尺度的气候调节过程是全球性的^[26-27]。对 DSDP594 站位表层海水温度的研究发现, MIS12 期间出现了千年尺度的表层海水温度波动,这些波动与代表北半球的北大西洋在末次冰期旋回中的哈因里奇事件(存在 7~10 ka 旋回)相似。此外, DSDP594 站位的气候如同北大西洋一样,在冰盖生长阶段出现最大的波动,且二者都在冰期最盛期附近更频繁地出现一些表层海水温度事件^[27,55-56]。这些相似情况的出现,说明了千年尺度上西南太平洋与北大西洋气候记录的一致^[26-27],也就是说南、北半球千年尺度上的气候变化一致。

此外,西南太平洋 MD97-2120 岩心一些短暂的浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 和浮游有孔虫 Mg/Ca 比值记录的表层海水古温度(sea surface temperature, 简称 SST)变化与北半球记录的冰期气候波动相似说明两个半球间的气候直接相关。MIS6 内,距今 154~138 ka 期间, MD97-2120 岩心 SST 的温暖异常和 $\delta^{18}\text{O}$ 的负异常,与北大西洋和热带太平洋记录的异常相似。MIS4 内,距今 68.3~65.6 ka 期间, MD97-2120 岩心类似的 SST 显著波动和 $\delta^{18}\text{O}$ 的减小,则在千年时间尺度上紧随伯德冰心(Byrd ice core)距今 70 ka 的温暖异常,且与格林兰 Dansgaard/Oeschger(D/O)19 事件(距今 69~66 ka 期间)重叠。此外,距今 46~41 ka 期间 MD97-2120 岩心的 $\delta^{18}\text{O}$ 异常与格林兰冰心记录中 D/O12 事件到 D/O9 事件的结构也极为相似^[26]。从以上诸多相似情形的出现不难看出南北半球的气候存在紧密的联系。

有关全球气候变化特征的研究在发现南北半球气候相关的同时,还发现南半球气候波动领先于北半球。分别代表北半球和南半球气候的南大洋 RC11-83 岩心 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录之间的对比显示,北半球长期和短期气候波动均滞后于南半球 1~2 ka (平均 1.5 ka)是过去 80 ka 的主要特点^[3]。位于西

南太平洋的 DSDP594 站位冰期冰融水现象证实南半球变暖确实领先于全球间冰期^[1]。此外,沃斯托克冰心记录和 DSDP594 岩心之间的对比同样表明南半球温度变化领先于北半球冰体积变化^[21]。

3 存在的问题及未来的研究方向

前人对西南太平洋第四纪古气候与古海洋环境的研究已取得重要进展,如:气候变化及周期、水团及洋流的迁移等。但仍存在诸多不足,如对第四纪极为重要的中更新世气候转型研究尚不够深入,未能揭示该地区中更新世气候转型在千年尺度气候波动中的体现,且受到钻孔位置所限,目前许多研究都不完善。例如,检验南岛锋是否向北迁移的岩心只有 ODP1119 站位,其向陆一侧没有可用来对比的其他站位,不能确定南岛锋是否向岸迁移至 ODP1119 站位向陆一侧。同时,西南太平洋的高分辨率研究极少,而低分辨率可能造成部分信息的缺失以及对比的不完善。此外,前人对西南太平洋的研究主要聚焦于地方性的海平面升降、水团和洋流周期性迁移,而涉及它们与全球海平面变化、古气候与古环境变化之间的对应关系的极少。

未来对于西南太平洋的研究将依靠更多的岩心站位及更高的分辨率来定量分析表层水团、洋流及锋在该区域的变迁历史,更深入地研究该地区中更新世气候转型的特征,探讨相对海平面变化与全球海平面变化的关系,进一步揭示南半球中纬度气候变化及其与全球气候变化的关系。

参考文献:

- [1] Hall L R, Carter L, Harris S E. Major depositional events under the deep Pacific inflow[J]. Geological Society of America, 2002, 30(6): 487-490.
- [2] Carter R M, Gammon P. New Zealand maritime glaciation: Millennial-scale southern climate change since 3.9 Ma[J]. Science, 2004, 304: 1659-1662.
- [3] Charles C D, Lynch-Stieglitz J, Ninnemann U S, et al. Climate connections between the hemisphere revealed by deep sea sediment core/ice core correlations[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1996, 142(1/2): 19-27.
- [4] Russell J L, Dixon K W, Gnanadesikan A, et al. The southern hemisphere westerlies in a warming world: Propping open the door to the deep ocean[J]. Journal of Climate, 2006, 19: 6382-6390.
- [5] Wyrtki K. The thermohaline circulation in relation to the general circulation in the oceans[J]. Deep Sea Research, 1961, 8(1): 39-64.
- [6] Gordon A L. Oceanography of Antarctic waters[J]. Antarctic Research Series, 1971, 15: 169-203.
- [7] Toggweiler J R, Samuels B L. New radiocarbon constraints on the upwelling of abyssal water to the ocean's surface[C]// NATO ASI Series. The global carbon cycle. Heidelberg, Ger-

- many: Springer-Verlag, 1993: 333-366.
- [8] Toggweiler J R, Russell J L, Carson S R. Midlatitude westerlies, atmospheric CO₂, and climate change during the ice ages [J/OL]. *Paleoceanography*, 2006, 21: PA2005, doi: 10. 1029/2005PA001154.
- [9] 李文宝, 王汝建, 向霏, 等. 南塔斯曼海 800 ka 以来的海水表层温度与亚热带锋迁移历史[J]. *科学通报*, 2010, 55(24): 2413-2421.
- [10] Stephens B B, Keeling R F. The influence of Antarctic sea ice on glacial-interglacial CO₂ variations[J]. *Nature*, 2000, 404: 171-174.
- [11] Maqueda M A M, Rahmstorf S. Did Antarctic sea-ice expansion cause glacial CO₂ decline[J/OL]? *Geophysical Research Letters*, 2002, 29: 1011, doi: 10. 1029/2001GL013240.
- [12] Hamilton L J. Structure of the subtropical front in the Tasman Sea[J]. *Deep Sea Research*, 2006, 53(12): 1989-2009.
- [13] Carter R M, Gammon P R, Millwood L. Glacial-interglacial (MIS 1-10) migrations of the Subtropical Front across ODP Site 1119, Canterbury Bight, Southwest Pacific Ocean[J]. *Marine Geology*, 2004, 205: 29-58.
- [14] Karas C, Nürnberg D, Tiedeman R, et al. Pliocene climate change of the Southwest Pacific and the impact of ocean gateways[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 301(1/2): 117-124.
- [15] Elmstrom K M, Kennett J P. Late Neogene paleoceanographic evolution of Site 590; Southwest Pacific[C]// Kennett J P, von der Borch C C, Baker P A, et al. Initial Reports of the DSDP. Washington D. C.: U. S. Government Printing Office, 1986: 1361-1381.
- [16] Stanton B R. An oceanographic survey of the Tasman Front [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1981, 15(3): 289-297.
- [17] Pelejero C, Calvo E, Barrows T T, et al. South Tasman Sea alkenone palaeothermometry over the last four glacial/interglacial cycles[J]. *Marine Geology*, 2006, 230: 73-86.
- [18] Cresswell G. The East Australian current[C/OL]// CSIRO Marine Research, East Australian current, Tasmania, Australia: Academic Press, 2001; doi: 10. 1006/rwos. 2001. 0351.
- [19] Wilson K, Hayward B W, Sabaa A T, et al. A one-million-year history of a north-south segment of the Subtropical Front, east of New Zealand[J/OL]. *Paleoceanography*, 2005, 20, PA2004, doi: 10. 1029/2004PA001080.
- [20] Heath R A. A review of the physical oceanography of the seas around New Zealand-1982[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1985, 19(1): 79-124.
- [21] Nelson C S, Cooke P J, Hendy C H, et al. Oceanographic and climatic changes over the past 160,000 years at the Deep Sea Drilling Project Site 594 off southeastern New Zealand, southwest Pacific Ocean [J]. *Paleoceanography*, 1993, 8(4): 435-458.
- [22] McCave I N, Carter L, Hall I R. Glacial-interglacial changes in water mass structure and flow in the SW Pacific Ocean[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 1886-1908.
- [23] Kawagata S. Tasman front shifts and associated paleoceanographic changes during the last 250,000 years: Foraminiferal evidence from the Lord Howe Rise[J]. *Marine Micropaleontology*, 2001, 41(3/4): 167-191.
- [24] Weaver P P E, Neil H, Carter L. Sea surface temperature estimates from the Southwest Pacific based on planktonic foraminifera and oxygen isotopes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 131(3/4): 241-256.
- [25] Scott G H, Hall I R. Planktonic foraminiferal evidence on late Pliocene-Quaternary near surface water masses at ODP Site 1123B, northern Chatham Rise, east of New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2004, 205: 127-145.
- [26] Pahnke K, Zahn R, Elderfield H, et al. 340,000-Year centennial-scale marine record of southern hemisphere climatic oscillation[J]. *Science*, 2003, 301: 948-952.
- [27] King A L, Howard W R. Middle Pleistocene sea-surface temperature change in the southwest Pacific Ocean on orbital and suborbital time scales[J]. *Geology*, 2000, 28(7): 659-662.
- [28] Crundwell M, Scott G, Naish T, et al. Glacial-interglacial ocean climate variability from planktonic foraminifera during the Mid-Pleistocene transition in the temperate Southwest Pacific, ODP Site 1123[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 260(1/2): 202-229.
- [29] Marino M, Maiorano P, Lirer F, et al. Response of calcareous nannofossil assemblages to paleoenvironmental changes through the mid-Pleistocene revolution at Site 1090 (Southern Ocean) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280(3/4): 333-349.
- [30] Venuti A, Florindo F, Michel E, et al. Magnetic proxy for the deep (Pacific) western boundary current variability across the mid-Pleistocene climate transition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(1/2): 107-118.
- [31] 金海燕, 翦知湮. 南海北部 ODP 1144 站中更新世气候转型期有孔虫稳定同位素古气候意义[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 914-921.
- [32] 郑范, 李前裕, 陈木宏. 南海北部 1144 站中更新世浮游有孔虫的千年尺度古气候记录[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2006, 31(6): 780-786.
- [33] Huybers P, Wunsch C. Obliquity pacing of the Late-Pleistocene glacial cycles[J]. *Nature*, 2005, 434: 491-494.
- [34] Huybers P. Glacial variability over the last two million years: An extended depth-derived age model, continuous obliquity pacing, and the Pleistocene progression[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1/2): 37-55.
- [35] Schmieder F, von Döbenek T, Bleil U. The Mid-Pleistocene climate transition as documented in the deep South Atlantic Ocean: Initiation, interim state and terminal event[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2000, 179(3/4): 539-549.
- [36] Hall I R, McCave I N, Shackleton N J, et al. Intensified deep Pacific inflow and ventilation in Pleistocene glacial times[J]. *Nature*, 2001, 412: 809-812.
- [37] Hayward B W, Sabaa T, Kolodziej A, et al. Planktic foraminifera-based sea-surface temperature record in the Tasman Sea and history of the Subtropical Front around New Zealand, over the last one million years[J]. *Marine Micropaleontology*, 2012, 82/83: 13-27.
- [38] Wei K Y. Southward shifting of the Tasman Front at 4.4 Ma (early Pliocene): Paleobiogeographic and oxygen isotopic evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, 16(1): 97-106.
- [39] Howard W R, Prell W L. Late Quaternary surface circulation

- of the Southern Indian Ocean and its relationship to orbital variations[J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(1): 79-117.
- [40] Barrows T T, Juggins S. Sea-surface temperatures around the Australian margin and Indian Ocean during the last glacial maximum[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24 (7/9): 1017-1047.
- [41] Morley J J. Variations in high-latitude oceanographic fronts in the Southern Indian Ocean: An estimation based on faunal changes[J]. *Paleoceanography*, 1989, 4(5): 547-554.
- [42] Sabaa A T, Sikes E L, Hayward B W, et al. Pliocene sea surface temperature changes in ODP Site 1125, Chatham Rise, east of New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2004, 205: 113-125.
- [43] Kawahata H. Shifts in oceanic and atmospheric boundaries in the Tasman Sea (Southwest Pacific) during the Late Pleistocene: evidence from organic carbon and lithogenic fluxes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 184 (3/4): 225-249.
- [44] Weaver P P E, Carter L, Neil H L. Response of surface water masses and circulation to late Quaternary climate change east of New Zealand[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(1): 70-83.
- [45] Carter R M, Fulthorpe C S, Lu H. Canterbury drifts at Ocean Drilling Program Site 1119, New Zealand: Climatic modulation of southwest Pacific intermediate water flows since 3.9 Ma [J]. *Geology*, 2004, 32(11): 1005-1008.
- [46] Nelson C S, Hendy I L, Neil H L, et al. Last glacial jetting of cold waters through the Subtropical Convergence Zone in the southwest Pacific off eastern New Zealand, and some geological implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 156(1/2): 103-121.
- [47] Wells P E, Okada H. Response of nannoplankton to major changes in sea-surface temperature and movements of hydrological fronts over Site DSDP 594 (south Chatham Rise, south-eastern New Zealand), during the last 130 ka[J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32(3/4): 341-363.
- [48] Morley J J, Hays J D. Comparison of glacial and interglacial oceanographic conditions in the south Atlantic from variations of calcium carbonate and radiolarian distributions[J]. *Quaternary Research*, 1979, 12(3): 396-408.
- [49] Heusser C J. Polar perspective of Late Quaternary climates in the southern hemisphere[J]. *Quaternary Research*, 1989, 32 (1): 60-71.
- [50] Nodder S D. Late Quaternary transgressive/regressive sequences from Taranaki continental shelf, western New Zealand [J]. *Marine Geology*, 1995, 123(3/4): 187-214.
- [51] Proctor R, Carter L. Tidal and sedimentary response to the late Quaternary closure and opening of Cook Strait, New Zealand: Results from numerical modeling[J]. *Paleoceanography*, 1989, 4(2): 167-180.
- [52] Stewart R B, Neall V E. Chronology of palaeoclimatic change at the end of the last glaciation[J]. *Nature*, 1984, 311: 47-48.
- [53] Shulmeister J, Goodwin I, Renwick J, et al. The Southern Hemisphere westerlies in the Australasian sector over the last glacial cycle: A synthesis[J]. *Quaternary International*, 2004, 118/119: 23-53.
- [54] Neil H, Carter L, Morris M. Thermal isolation of Campbell Plateau, New Zealand, by the Antarctic Circumpolar Current over the past 130 ka [J/OL]. *Paleoceanography*, 2004, 19, PA4008, doi:10.1029/2003PA000975.
- [55] McManus J F, Oppo D W, Cullen J L. A 0.5-million-year record of millennial-scale climate variability in the North Atlantic [J]. *Science*, 1999, 283: 971-975.
- [56] Oppo D W, McManus J F, Cullen J L. Abrupt climate change events 500,000 to 340,000 years ago: Evidence from subpolar North Atlantic sediments[J]. *Science*, 1998, 279: 1335-1338.

Research Progresses of Late Quaternary Paleoceanography in the Southwest Pacific

WU Ying-ying, DING Xuan, LIU Xiu-ming

(School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Deep Sea Drilling Project, Ocean Drilling Program, and International Marine Global Changes Studies have made the rapid development of the Late Quaternary paleoceanography study in the Southwest Pacific which became a hot topic in the paleoceanography research. The characteristic of Mid-Pleistocene Transition in the Southwest Pacific presented as the Deep Western Boundary Current's strength was weaker and the cycle of glacial-interglacial transited from 40 ka to 100 ka. The glacial-interglacial cycles in the Southwest Pacific during the period of Mid-Pleistocene Transition mainly presented as the regular migration of the Ocean Fronts, southward migration in the interglacial stage, and reverse direction in the glacial. Additionally, the position of the Ocean Fronts were influenced by the water depth under certain circumstance, especially for the Subtropical Front in the Chatham Rise and the southeast coast of the New Zealand, and for the Subantarctic Front in the Campbell Plateau. This paper also discusses the climatic relationship between the Southern Hemisphere and the Northern Hemisphere, and why the Southern Hemisphere's climate fluctuations stay ahead of the Northern Hemisphere.

Key words: paleoceanography; Late Quaternary; Southwest Pacific