

利用卫星数据分析南大洋夏季表层水叶绿素和温盐年际分布特征*

许苏清^{1,2} 陈立奇^{1,2**}

1. 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361005; 2. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005

摘要 基于中国南极考察第16和第21航次现场走航观测的数据, 从卫星遥感获得资料分析了南大洋夏季海表层水的叶绿素和温盐在1999—2000年和2004—2005年间的年际月平均变化。结果表明: 南大洋叶绿素分布呈现随时间变化向岸梯度递增, 高值区主要在冰边缘、岛屿附近和陆架海域; 海表层水温由南向北呈现明显的随时间变化梯度递增, 2℃等温线随年际变化南移至66°S, 在南极辐散带和0经度断面上有明显的SST高值区; 表层水的盐度呈不规则的盐度值或高或低的空间块状分布。从生产力与温盐三方面佐证了南大洋上升流的存在。

关键词 中国南极考察 遥感 南大洋 叶绿素 温盐

占全球海洋面积20%的南大洋在全球碳循环自然源和人为源CO₂与大气之间的交换起着关键的作用, 是大气CO₂的主要汇。大气CO₂向海洋转化过程中的“生物泵”和“物理泵”作用是南大洋碳循环研究中的重要关键过程^[1-3]。南大洋生产力的分布和温盐分布在海洋生物地球化学研究中具有重要作用, 对海洋吸收大气CO₂具有重要的意义。但对南大洋浮游植物的现存生物量和初级生产力的分布特征研究还局限于局部海区的区域分布和季节变化, 估测的南大洋光合浮游生物年产量有很明显的差距^[4]。南大西洋扇区和南印度洋扇区作为一个整体, 还未得到较大面积的研究。进行大尺度的环南极现场观测, 获取更多的现场数据, 为估测海洋初级生产力的准确性, 评价南大洋生物资源和南大洋碳循环^[5]以及氮循环^[6]研究提供科学依据是十分必要和及时的, 然而受极地恶劣气候影响, 南大洋大面积的海域调查需要投入大量的人力物力, 现场大面积的调查

资料获取比较困难。本研究以中国南极考察第16和第21次的现场走航叶绿素和温盐观测资料为基础, 利用卫星遥感获得的同步数据资料, 分析了从1999—2000年和2004—2005年间, 在南大西洋和印度洋扇区, 揭示了夏季表层水叶绿素和温盐的月平均分布变化特征。

1 数据来源和方法

1.1 现场数据

本研究采用中国南极考察第16航次和21航次的现场观测海表层水叶绿素数据(www.pric.org.cn)。在雪龙船中山站和长城站往返期间(航线如图1所示), 用塑料圆桶定时采集表层海水分析获得叶绿素数据。测定方法是: 用GF/F滤膜过滤250 mL或150 mL水样, 滤膜用来测定叶绿素a(Chl-a)浓度, 滤液用来测定营养盐浓度。滤膜被立即放入90%丙酮(丙酮:水[v:v]=90:10), 在-20℃的冰箱内提取1 d, 用荧光光度计(Turner designed Fluorome-

2008-12-30 收稿, 2009-02-24 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40531007, 40676062, 40276001)、中国极地科学战略研究基金(批准号: 20080217)、极地科学基金“南极区域保护与管理”和国家财政部国际极地年中国行动计划专项资助项目

** 通信作者, E-mail: Lchen203@263.net

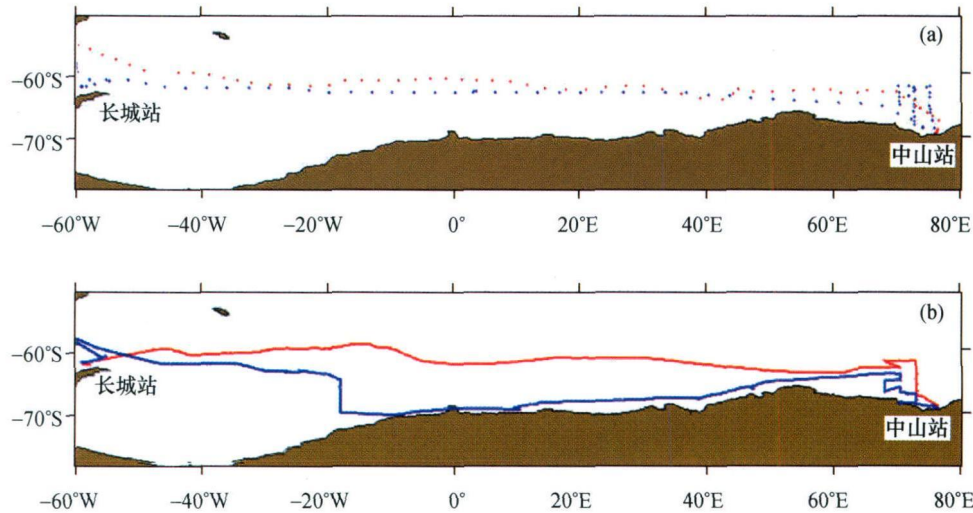


图 1 (a) 为 16 航次航线, (b) 为 21 航次航线
红色线为 12 月份航线, 蓝色线为 1 月份

ter)测定 Chl-a 浓度. 浓度单位为: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

海表层水盐度数据和海表层水水温数据由美国生产的走航 YSI-600 仪器和电极式盐度计 SYC2-2 测量而得.

1.2 遥感数据

遥感海表层水叶绿素 *a* 浓度资料是由美国 NASA 于 1997 年发射的 Seawifs 水色遥感卫星提供的三级产品 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). 时间范围是 1999 年 12 月, 2000 年 1 月, 2004 年 12 月和 2005 年 1 月, 空间范围是 $50^{\circ}\text{S} - 75^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{W} - 80^{\circ}\text{E}$.

水色遥感卫星是利用传感器接收到的来自太阳和大气可见光区域的光谱信息获取海洋上层内叶绿素浓度. SeaWiFS (sea viewing wide field of view sensor) 三级产品是由单轨数据经几何校正投影地理定位得到的日平均海表层水 Chl-*a* 浓度数据并根据标准的叶绿素计算法则得到最后的数据. SeaWiFS 传感器具有 8 个波段的配置, 分别为 412, 443, 490, 510, 555, 670, 765, 865 nm, 其中 6 个带宽为 20 nm 的为可见光波段, 另外 2 个带宽为 40 nm 的是专用于大气校正的近红外波段, 提高了大气校正和探测的精度和测量的灵敏度. SeaWiFS 传感器测量 Chl-*a* 的浓度范围在 0.01 到 $64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 数据误差为 35%^[7,8]. 资料空间分辨率为 $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$, 覆盖范围全球表层海域. 下载的 Chl-*a* 数据经过克里金插值处理成 0.25° 纬度 $\times 1^{\circ}$ 经度, 140×101

的网格数据, 搜索半径为 60×15 , 时间尺度是日平均. 网格化的数据与现场航线上的实测叶绿素数据比对, 剔除了与实测数据比对明显异常的数据. Seawif 遥感叶绿素比船测走航叶绿素数据偏高, 误差范围在 $0.12 - 0.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 误差率为 22%—35% 之间.

遥感 SST 数据是由 NOAA 发射的极轨卫星 AVHRR 提供的 NCEP (National Centers for Environmental Prediction 美国国家环境预报中心) 全球 Reynolds 最优插值海表层水水温, 从美国 NASA JPL 网站下载 (<http://podaac.jpl.nasa.gov/reynolds>). 时间范围是 1999 年 12 月, 2000 年 1 月, 2004 年 12 月和 2005 年 1 月, 空间范围是 $50^{\circ}\text{S} - 75^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{W} - 80^{\circ}\text{E}$.

NCEP Reynolds 最优插值海表层水水温覆盖全球表层海域, 由现场水温数据和卫星遥感水温数据通过 Reynolds 最优插值得出的精度为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格数据, 时间尺度为周平均和月平均, 数据时间范围从 1981 年开始. 其中现场数据由船载观测和浮标观测而得, 卫星遥感数据由挂载在 NOAA 环境卫星上的多通道 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 微波辐射计海表层水温度产品而得. 下载的 SST 数据先处理成日平均数据, 再经过克里金插值处理成 0.25° 纬度 $\times 1^{\circ}$ 经度, 140×101 的网格数据, 搜索半径为 10×2.5 , 时间尺度是日平均. 网格化的数据与现场航线上的实测水温数据

比对, 遥感水温数据高于在 -2°C 和 2°C 的数据视为异常值, 予以剔除. 遥感水温比船测水温数据偏高, 误差范围在 $0.2-0.5^{\circ}\text{C}$ 之间, 误差率为 $10\%-25\%$ 之间.

本研究用于分析的海表层水盐度数据主要是由美国 NODC 提供的气候态月平均盐度资料(High resolution Temperature and Salinity of WORLD OCEAN ATLAS 2001 和 2005, 简称 WOA05, <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01>). 该资料采用客观分析技术将原始观测资料处理成水平分辨率 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的格点数据, 在垂直方向5500 m 深度以浅分为33层, 分别为0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1750, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 m 层, 采用三次样条插值得到标准层上的值, 本研究采用0 m 即海表层的盐度数据. 下载的海表层水盐度数据经过克里金插值处理成 0.25° 纬度 $\times 1^{\circ}$ 经度, 140×101 的网格数据, 搜索半径为 20×5 , 时间尺度是日平均. 网格化的数据与现场航线上的实测盐度数据比对, 误差范围在 $0.03-0.535$ 之间, 误差率在 1.6% 以下.

2 结果和讨论

2.1 Chl-a 月平均变化分布情况

南大洋的叶绿素分布呈现出很明显的时空分布特征, 与 Moore 等的研究结果一致^[9,10]. 南大洋大部分开阔的海域叶绿素浓度相对较低, 而营养盐浓度较高, 通常认为南大洋是典型的高营养盐低叶绿素的海域^[11]. 然而, 在冰边缘, 冰间湖, 岛屿和陆架附近的海域, 在南大洋夏季和春季会发生大尺度的浮游植物水华的现象^[12-14]. 当冰边缘消退的时候, 低盐融冰淡水形成较低密度的表层水, 减少水体垂直方向上的混合并使混合层变浅, 因此, 浮游植物能够在高光的稳定水体中繁殖, 边缘海冰区的生产力迅速提高.

本研究得出月平均的叶绿素分布图, 由图2我们进行分析, 南大洋叶绿素分布呈现如下特征:

(1) 叶绿素分布呈现随时间变化的向岸梯度增

加分布的特征. 由16航次和21航次的叶绿素分布图上可以很明显地看出, 叶绿素的浓度分布呈现随时间变化的向岸梯度增加分布特征. 在生产季节的早期(1999年12月和2004年12月), 高生产力发生在北部海域, 而随着气温升高(2000年1月和2005年1月), 海冰沿东南方向消退, 叶绿素浓度值朝海冰向海岸消退同样的方向增长. 在南大洋夏季的时候, 叶绿素浓度值在近岸较高, 而离岸远的海域叶绿素浓度较低.

雪龙船在12月份向西航行期间, 正值南极初夏, 所有测站的水温均低于 0°C , 盐度高; 初夏太阳辐射增强, 表层海水蒸发, 盐度浓缩, 叶绿素a浓度和初级生产力较低, 海水中的营养盐未能被有效利用, 硅酸盐、磷酸盐和硝酸盐的浓度均较高. 1月份是雪龙船由西向东返程时期, 正当南极夏季, 水温增高, 盐度下降(冰雪融化使表层海水盐度降低), 陆缘冰破裂外漂移并逐渐消融, 冰藻释放于海水, 因有相对于南极冬季时的高温, 适宜的盐度和经冬季积累的丰富营养盐浓度, 使生物现存量 and 初级生产力迅速提高, 叶绿素a浓度比20天前高 68% .

(2) 叶绿素高值区出现在冰边缘、岛屿附近和陆架海域. 由月平均叶绿素分布图上可以看出来, 叶绿素高值区主要分布在以下几个区域: 陆架冰边缘海区, 南乔治亚群岛海域、马尔维纳斯群岛, 和南极半岛附近海域.

融冰淡水会影响海区的物理, 化学和生物海洋过程^[15]. 随着季节性融冰的海冰退化, 低盐的融冰淡水产生低密度的稳定海表层水减少了垂直方向上的混合, 并降低混合层的厚度, 相应的浮游植物能够在高光度的稳定水体中繁殖, 产生相对较高的生产力. 这种现象发生在威德尔海和罗斯海以及其他环南极冰边缘海域^[12,16-18]. 在季节性海冰区的叶绿素平均值可达 $3.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大值可达 $190\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[16].

南极洲附近的岛屿周围的海水具有高叶绿素浓度的特征. 南乔治亚岛是很典型的高生产力的海域, 具有高密度的浮游植物和浮游动物^[19]. 南乔治亚岛高生产力主要归因于铁的供应和氮的快速循环, 合适的温度以及较浅的稳定近海岸水柱^[19]. 南乔治亚岛附近海区的叶绿素平均值高达 $2.8\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 最高值可

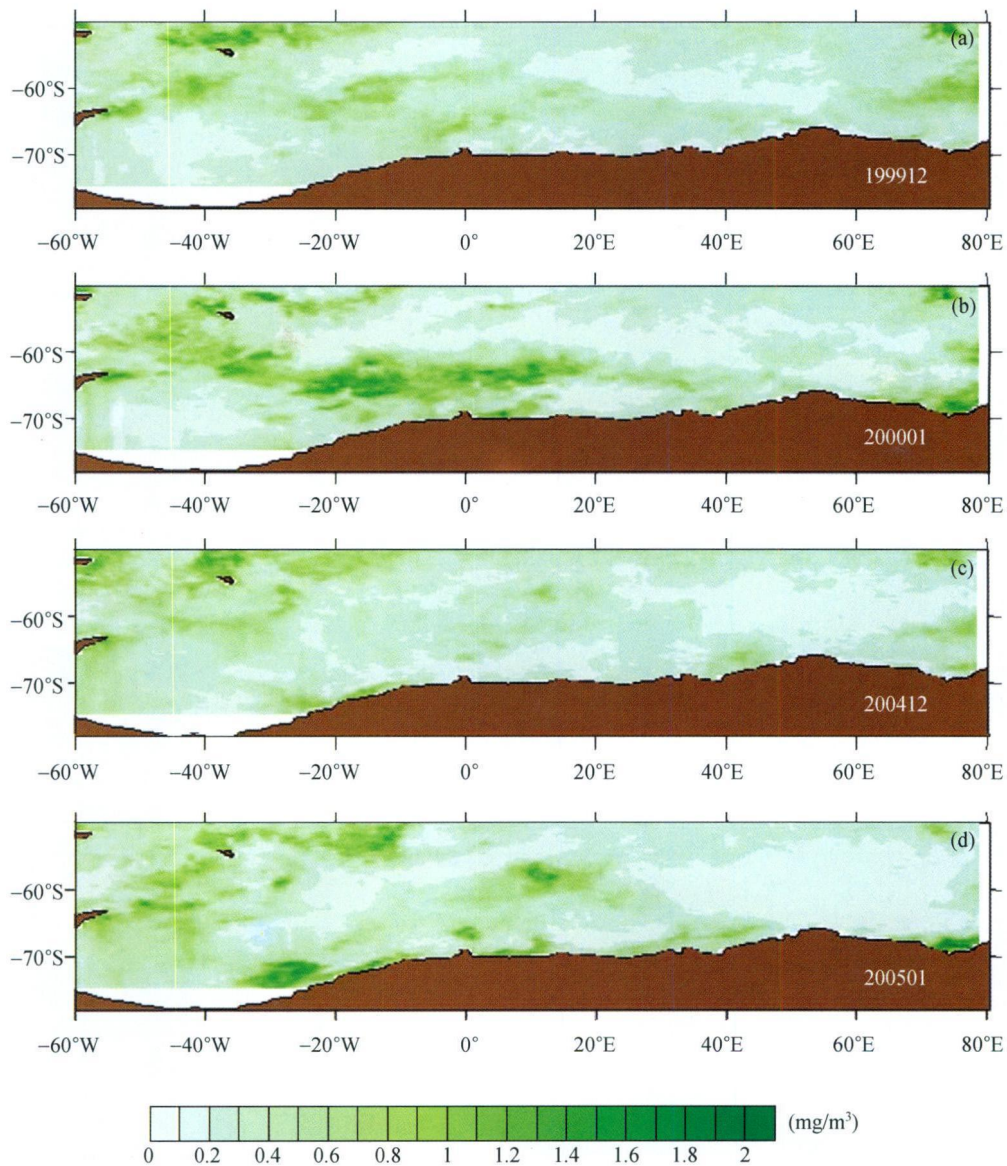


图2 1999.12(a), 2000.1(b), 2004.12(c), 2005.1(d)叶绿素月平均分布图

达 $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[19]。马尔维纳斯群岛附近也是高生产力的海区^[20]，南极半岛附近的陆架海水也是南大洋中高生产力的海区之一。具有高密度的浮游植物和浮游动物^[21-23]。南极半岛西侧海区的叶绿素平均值为 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，最高值为 $38 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[24-26]。

从叶绿素月平均分布图可以看出，16航次期间1999年12月的海区叶绿素浓度值偏低，浓度范围为 $0.09-1.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，而2000年1月的海区叶绿素浓度值有所升高，浓度范围为 $0.15-2.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。21航次期间叶绿素分布情况也是1月份比12月份高很多，12月份的浓度范围为 $0.1-1.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，1月

份的浓度范围为 $0.16-3.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.2 研究海域的 SST 月平均变化情况

南大洋的水文结构呈现出既复杂而又多变的水文环境特征。这种特殊的水文结构随之产生了许多性质不同的水团。本研究海区是属于南极夏季表层水(AASW)，位于极锋(50°S)^[27]和南极大陆之间。整个海区的水体的温盐结构受季节性海-气之间的相互作用，水平对流以及海冰形成和消退的影响^[28]。从卫星遥感获得的海表层水温 SST 是重要的遥感海洋参数之一，海表层水温呈现明显的梯度变化，

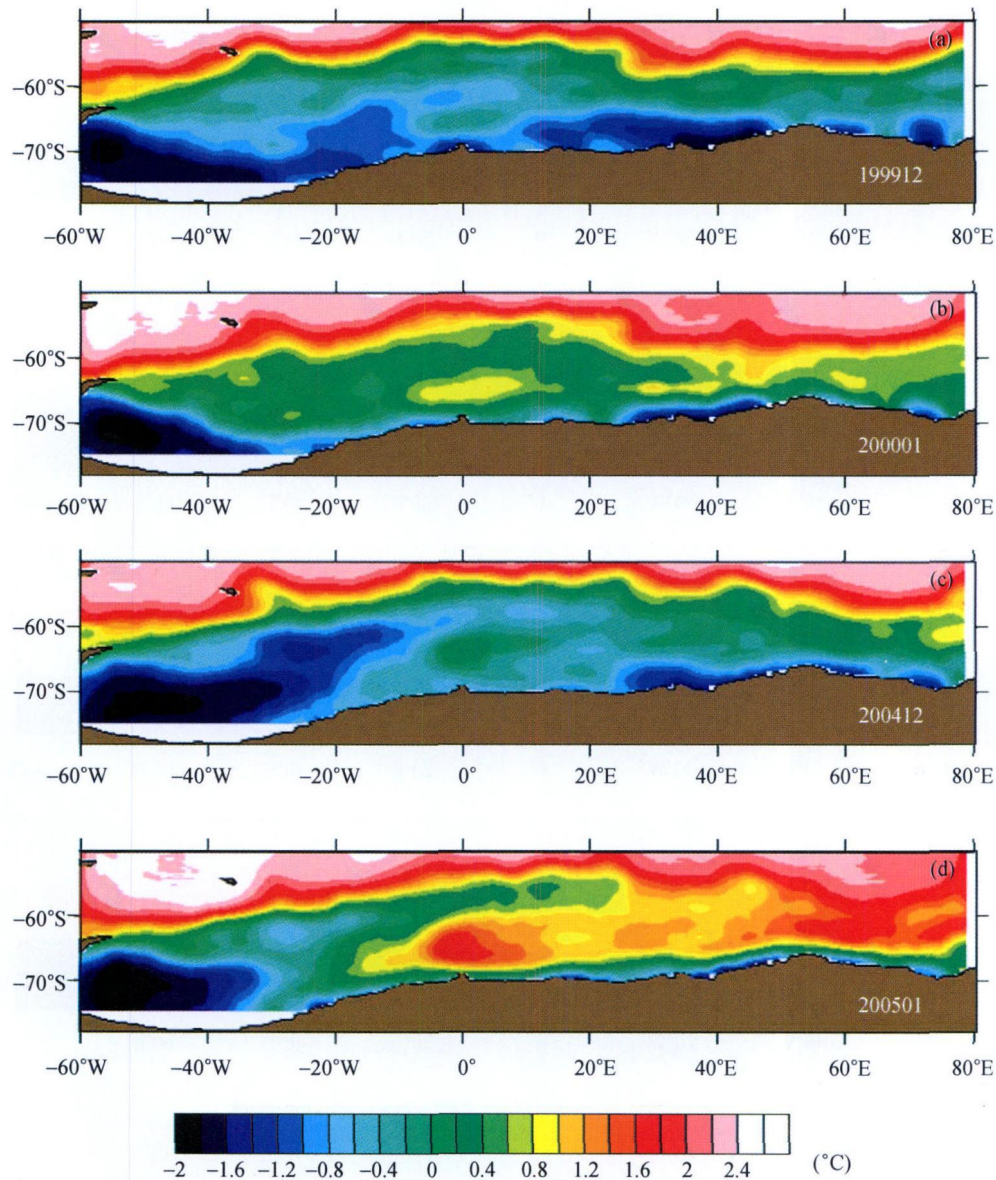


图3 1999.12(a), 2000.1(b), 2004.12(c), 2005.1(d) SST月平均分布图

能表征海域内定量的热量特征, 例如锋的分布^[29], 以及表征明显的底层水涌升现象。

本研究得出了月平均的 SST 分布图, 由图3 我们进行分析, 南大洋 SST 分布呈现如下特征:

(1) 水温由南向北呈现明显的随时间变化梯度递增分布趋势。从 16 航次和 21 航次的表层海水水温月平均分布图上可以明显看出, 温度由南向北逐渐升高, 2°C 等温线最北界至 50°S。从 12 月到 1 月份, 随着太阳热量的增加, 海冰消退, 表层海水的温度增温逐渐向南极大陆边缘逼近, 16 航次期间

2°C 的等温线最南可达 60°S, 而在 21 航次期间 2°C 的等温线则到 66°S。16 航次和 21 航次的 1 月份海区的平均水温比 12 月份的平均水温明显高很多。

(2) 在南极辐散带(73°E, 64°S)和 0 经度断面上(0°E, 65.5°S)两处有明显的 SST 高值区。南极底层水具有高温高盐和高 $p\text{CO}_2$ 值的特征^[30]。在普里兹湾的南极辐散带, 由于北向而来的西风 and 南向而来的东风的相互作用, 引起南极绕极流在该处强烈的涌升现象^[27]。蒲书箴等也指出在 CWB(的北侧陆缘水边界)绕极底层水在普里兹湾南极辐散带具

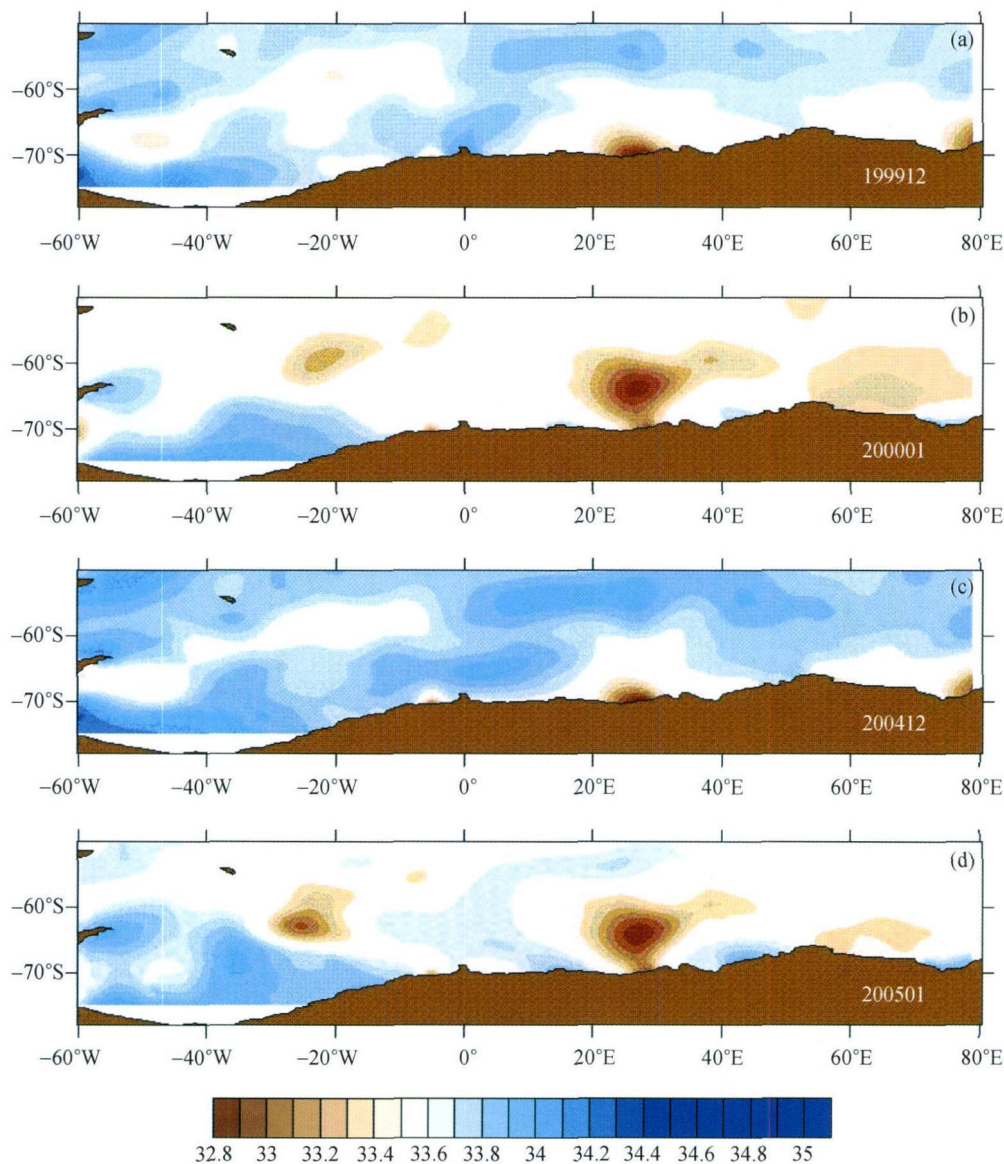


图4 1999.12(a), 2000.1(b), 2004.12(c), 2005.1(d)盐度月平均分布图

有很明显的涌升现象^[31]。在0经度的断面上,以65.5°S为中心,在64°S到67°S附近,环流的相互作用引起底层水的涌升,带来海表层水相对较高的盐度及相应较高的 $p\text{CO}_2$ 值^[32,33]。底层水涌升区域中心温度比涌升区外的水体温度差别分别是:在16航次高达0.4℃,在21航次则高达0.9℃。

2.3 研究海域盐度的月平均变化

南大洋表层海水盐度的分布主要受季节性的海水升温和融冰淡水混合的影响^[27]。本研究计算出了月平均的盐度分布图,对图4的分析,我们获得夏

季研究海域盐度分布呈现如下特征:

表层水混合层的盐度分布受融冰淡水的影响呈现不规则的空间分布,呈盐度值或高或低的块状分布。在12月份,南大洋开始进入夏季,海冰逐渐消退,然而融冰淡水与海水还未充分混合,因此表层海水盐度较高,高盐水块(盐度值大于33.95)主要位于普里兹湾西侧、恩德比海盆(Enderby basin)和南极半岛东侧。而在1月份,随着日照增强,气温继续回升,融冰淡水与海水充分混合,表层海水盐度值有所下降,低盐水块(盐度值低于33.75)主要位于30°E附近和20°W附近,盐度较高水体主要

在威德尔海区。16航次和21航次的海区盐度分布大体一致。

3 结论

南大洋的生产力和温盐的变化主要受太阳辐射和海冰变化的影响,水温的变化影响着盐度的变化,而生产力的变化与温盐息息相关。1999—2000年和2004—2005年间,月平均的叶绿素的分布表现出了随时间变化的向岸梯度增加分布的特征,高值区主要出现在冰边缘、岛屿附近和陆架海域。1月份的海区生产力比12月份的明显提高;海表层水水温由南向北呈现明显的随时间变化梯度递增分布趋势,2004—2005年间的 2°C 等温线南移至 66°S 。在南极辐散带(73°E , 64°S)和 0°E 经度断面上(0°E , 65.5°S)两处有明显的SST高值区;表层水的盐度分布呈现不规则的空间分布,呈盐度值或高或低的块状分布,两个航次海区盐度分布大体一致。本研究从生产力和温盐三要素年际月平均分布的分析,同时印证了在南极辐散带和 0°E 经度断面上存在着上升流,该区域海水具有高温高盐低叶绿素值的特征。

参 考 文 献

- 1 王 荣. 海洋生物泵与全球变化. 海洋科学, 1992, 1: 18—21
- 2 Longhurst AR, Harrison WG. The biological pump: Profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Prog Oceanog*, 1989, 22: 47—123
- 3 高众勇, 陈立奇, 王伟强. 南大洋二氧化碳源汇分布及其海-气通量研究. 极地研究, 2001, 13(3): 175—186
- 4 刘子琳, 宁修仁, 蔡显明, 等. 1999/2000年夏季环南极表层海水叶绿素 a 和初级生产力. 极地研究, 2000, 12(4): 235—244
- 5 Chen LQ, Gao ZY, Yang XL, et al. Comparison of air-sea fluxes of CO_2 in the Southern Ocean and the western Arctic Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 23(4): 643—653
- 6 Zhan L, Chen L. Distributions of N_2O and its Air-Sea Fluxes in Sea-water along Cruise Tracks between 30°S — 67°S and in Prydz Bay, Antarctica. *J Geophys Res*, 2009, doi: 10.1029/2007JC004406
- 7 Werdell PJ, Bailey S, Fargion G, et al. Unique data repository facilitates ocean colour satellite validation. *EOS Trans AGU*, 2003, 84: 379—385
- 8 Barbini R, Colao F, Fantoni R, et al. Comparison of SeaWiFS, MODIS-Terra and MODIS-aqua in the southern ocean. *J Remote Sens*, 2005, 26: 2471—2478
- 9 Marina M, Kendra LD, Chuanmin H. Spatial and temporal variability of SeaWiFS chlorophyll a distributions west of the Antarctic Peninsula: implications for krill production. *Deep-Sea Research*, 2008, 55: 377—392
- 10 Moore JK, Abbott MR. Phytoplankton chlorophyll distributions and primary production in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(12): 28709—28722
- 11 Holm-Hansen O, El-Sayed SZ, Franceschini GA, et al. Primary production and the factors controlling phytoplankton growth in the Southern Ocean. In: *Proceedings of the Third SCAR Symposium of Antarctic Biology on Adaptations within Antarctic Ecosystems*, 1977, 11—50
- 12 Smith WO, Nelson DM. Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea: Spatial coherence with the density field. *Science*, 1985, 227: 163—166
- 13 Sullivan CW, Arrigo KR, McClain CR, et al. Distribution of phytoplankton blooms in the Southern Ocean. *Science*, 1993, 262: 1832—1837
- 14 Arrigo KR, van Dijken GL. Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108: 3271
- 15 Mitchell BG, Holm-Hansen O. Bio-optical properties of Antarctic Peninsula waters: differentiation from temperate ocean models. *Deep-Sea Research*, 1991, 38: 1009—1028
- 16 El-Sayed SZ. Observations on phytoplankton bloom in the Weddell Sea. *Biology of the Antarctic Seas*, 1971, IV(17): 301—312
- 17 El-Sayed SZ, Taguchi S. Primary production and standing crop of phytoplankton along the ice-edge in the Weddell Sea. *Deep-Sea Research*, 1981, 28A: 1017—1032
- 18 Sedwick PN, DiTullio GR. Regulation of algal blooms in Antarctic shelf waters by the release of iron from melting sea ice. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24: 2515—2518
- 19 Atkinson A, Whitehouse MJ, Priddle J, et al. South Georgia, Antarctica: a productive, cold water, pelagic ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 216: 279—308
- 20 Peter W, Whitehouse MJ, Rachael S, et al. Plankton community structure south and west of South Georgia (Southern Ocean): Links with production and physical forcing. *Deep-sea Research*, 2007, 54: 1871—1889
- 21 Fraser WR, Trivelpiece WZ. Factors controlling the distribution of seabirds: Winter—summer heterogeneity in the distribution of Adeli penguin populations. *Antarctic Research Series*, 1996, 70: 257—272
- 22 Arrigo KR, Worthen D, Schnell A, et al. Primary production in Southern Ocean waters. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 15587—15600
- 23 Deibel D, Daly KL. *Polynyas: Windows into Polar Oceans*. Elsevier Oceanography Series, 2007, 74: 271—321

- 24 Holm-Hansen O, Mitchell BG. Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region. *Deep-Sea Research*, 1991, 38: 961-980
- 25 Smith RC, Dierssen HM, Vernet M. Phytoplankton biomass and productivity in the western Antarctic Peninsula region. *Antarctic Research Series*, 1996, 70: 333-356
- 26 Rodriguez F, Varela M, Zapata M. Phytoplankton assemblages in the Gerlache and Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) determined by light microscopy and CHEMTAX analysis of HPLC pigment data. *Deep-Sea Research*, 2002, 49: 723-747
- 27 Park YH, Charriaud E, Fieux M. Thermohaline structure of the Antarctic Surface Water/Winter Water in the Indian sector of the Southern Ocean. *Journal of Marine Systems*, 1998, 17: 5-23
- 28 Gordon AL, Huber BA. Thermohaline stratification below the Southern Ocean sea ice. *J Geophys Res*, 1984, 89: 641-648
- 29 Deacon GER. Physical and biological zonation in the Southern Ocean. *Deep-Sea Research*, 1982, 29(1A): 1-15
- 30 Hoppema M, Fahrbach E, Stoll MHC, et al. Annual uptake of atmospheric CO₂ by the Weddell Sea derived from a surface layer balance, including estimations of entrainment and new production. *Journal of Marine Systems*, 1999, 19(4): 219-233
- 31 Pu SZ, Dong ZQ, Hu XM, et al. Variability of the Continental Water Boundary near the Prydz Bay. *Marine Science Bulletin*, 2002, 4(1): 1-10
- 32 Gordon AL, Huber BA. Southern Ocean winter mixed layer. *J Geophys Res*, 1990, 95: 11655-11672
- 33 Hoppema M, Stoll MHC, de Baar HJW. CO₂ in the Weddell Gyre and Antarctic Circumpolar Current: Austral autumn and early winter. *Marine Chemistry*, 2000, 72: 203-220