

# 南极普里兹湾及其邻近海域表层水镭同位素的分布及应用\*

陈倩娜<sup>1</sup> 任春燕<sup>1</sup> 李琦<sup>1</sup> 李敬轩<sup>1</sup> 贾仁明<sup>1</sup>  
郑敏芳<sup>1</sup> 邱雨生<sup>1,2</sup> 陈敏<sup>1,2</sup>

(1. 厦门大学海洋与地球学院 厦门 361102; 2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室 厦门 361102)

**摘要** 中国第 27 次南极科学考察期间(2010 年 12 月 30 日至 2011 年 1 月 16 日), 对普里兹湾及其邻近海域表层海水进行了  $^{226}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Ra}$  的分析, 结果表明:  $^{226}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Ra}$  比活度的变化范围分别为  $1.47\text{--}2.43\text{Bq/m}^3$  和  $0.17\text{--}0.45\text{Bq/m}^3$ , 平均值分别为  $2.13\text{Bq/m}^3$  和  $0.29\text{Bq/m}^3$ ,  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub> ( $^{228}\text{Ra}$  与  $^{226}\text{Ra}$  的活度比)的变化范围为  $0.08\text{--}0.20$ , 平均值为  $0.14$ 。根据盐度和  $^{226}\text{Ra}$  的质量平衡方程, 计算出研究海域表层水中冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水的份额。研究海域表层水中温度、盐度、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub> 和冰融水份额的空间分布显示, 在埃默里冰架前沿海域, 西侧海域较东侧海域具有低温、高盐、高  $^{226}\text{Ra}$ 、低  $^{228}\text{Ra}$ 、低  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>、低冰融水份额的特征, 证实埃默里冰架下水体东进西出的运动规律。根据埃默里冰架前东、西侧水体  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub> 的差异, 估算出埃默里冰架下表层水体东进西出所经历的时间为  $1.85\text{a}$ 。此外, 在普里兹湾湾口中部海域( $66.5\text{--}67.5^\circ\text{S}$ ,  $72^\circ\text{--}74^\circ\text{E}$ ), 观察到次表层水的上升通风作用, 该区域较高的  $^{228}\text{Ra}$  含量和  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub> 证明这些表层水体并非来自湾外绕极深层水的上涌, 而可能来自湾内埃默里冰架输出水体。

**关键词**  $^{226}\text{Ra}$ ;  $^{228}\text{Ra}$ ; 水团来源; 水体运动速率; 南极普里兹湾

**中图分类号** P734.2 **doi:** 10.11693/hyhz20140400116

天然存在的 4 种镭同位素都具有放射性, 其中  $^{223}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=11.4\text{d}$ ) 隶属锕系,  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=1600\text{a}$ ) 隶属铀系,  $^{224}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=3.6\text{d}$ ) 和  $^{228}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=5.75\text{a}$ ) 为钍系核素。海水中的镭主要以溶解态形式存在, 它们在海水中的分布更多地受到水文学过程的影响, 可应用于水体涡动扩散速率(Chung, 1980; Ku *et al.*, 1980)、停留时间(Nozaki *et al.*, 1989; Chen *et al.*, 2008)、层化作用(Yang *et al.*, 2007)、深海环流(Ku *et al.*, 1994)等不同时间尺度海洋学过程的研究。

开阔大洋表层水中  $^{226}\text{Ra}$  的含量较为均匀, 且很多海域的  $^{226}\text{Ra}$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  之间往往具有良好的线性正相关关系(Chung, 1980; Ku *et al.*, 1980)。Ku 等(1970)

对南大洋印度洋扇面表层水  $^{226}\text{Ra}$  的研究表明, 表层水  $^{226}\text{Ra}$  比活度自北向南逐渐升高( $1.46\text{--}2.92\text{Bq/m}^3$ ), 而深层水  $^{226}\text{Ra}$  比活度较表层高且基本恒定在  $3.65\text{Bq/m}^3$  左右。Ku 等(1976)测得南大洋 2km 以深水体的  $^{226}\text{Ra}$  含量几乎稳定在  $(3.58\pm 0.17)\text{Bq/m}^3$ , 而在南极辐合带, 表层水  $^{226}\text{Ra}$  含量由南向北从  $3\text{Bq/m}^3$  递降至  $1.33\text{Bq/m}^3$ 。Chung(1974)报道了南大洋太平洋扇面表层水  $^{226}\text{Ra}$  的含量为  $1.53\text{--}3.42\text{Bq/m}^3$ 。在 1973 年进行的国际海洋学调查航次(IWSOE73)中, 获得了威德尔海较高空间密度的  $^{226}\text{Ra}$  数据, 表层水  $^{226}\text{Ra}$  含量沿威德尔海涡流基本稳定在  $2.83\text{Bq/m}^3$  左右(Chung *et al.*, 1980)。

\* 南北极环境综合考察与评估专项, CHINARE2014-01-04-03 号, CHINARE2014-04-01-06 号; 国家自然科学基金杰出青年基金项目, 41125020 号; 厦门大学海洋科学国家人才基地项目, 2013C01 号。陈倩娜, 硕士研究生, E-mail: 1542017229@qq.com

通讯作者: 陈敏, 教授, E-mail: mchen@xmu.edu.cn

收稿日期: 2014-04-17, 收修改稿日期: 2014-06-15

海水中 $^{228}\text{Ra}$ 的分布主要受涡动扩散和平流过程所控制,因此是研究海水运动速率的理想示踪核素。Kaufman等(1973)首次报道了南大洋 $^{228}\text{Ra}$ 的含量,发现南大洋表层水中 $^{228}\text{Ra}$ 的比活度低于其它大洋,其成因与低 $^{228}\text{Ra}$ 中深层水的上涌有关。Li等(1980)实测了南大洋大西洋扇面极锋区南部海域( $62^\circ\text{S}$ ) $^{228}\text{Ra}$ 的比活度,发现测值低于方法的检出限( $0.017\text{Bq/m}^3$ )。Moore等(1986)研究了南大洋印度洋扇面 $^{228}\text{Ra}$ 的空间分布,发现南极近岸水体 $^{228}\text{Ra}$ 的含量较高,而开阔大洋 $^{228}\text{Ra}$ 含量较低。van der Loeff(1994)对南大洋大西洋扇面的研究发现了同样的空间变化规律。Hanfland(2002)综合6个航次的研究结果,揭示了南大洋大西洋扇面南极绕极流区域、威德尔海环流影响区域和威德尔海陆架区域 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 的含量与分布特征。Van Beek等(2008)对南大洋克伦格尔群岛附近海域10个站位的研究发现,中深层海水的 $^{228}\text{Ra}$ 含量极低,部分站位甚至低于检测限。

普里兹湾位于南极大陆印度洋扇区,处于极锋带以南,最南端位于 $69^\circ\text{S}$ 、 $75^\circ\text{E}$ 。普里兹湾湾口东端为四女士浅滩( $67.5^\circ\text{S}$ ,  $77.5^\circ\text{E}$ ),西端是福拉姆浅滩( $68^\circ\text{S}$ ,  $69^\circ\text{E}$ )。兰伯特大冰川自南极大陆深入湾内形成埃默里冰架,构成了普里兹湾湾内的西南边界。埃默里冰架前缘的陆架区,水深约为400—600m,而陆坡( $67^\circ\text{S}$ 附近)以北海域的水深则超过3000m(董兆乾等,2004)。在普里兹湾及其邻近海域,北部深水洋区存在由西向东流动的南极绕极流,近岸区域存在自东向西的沿岸流,普里兹湾内存在一个顺时针的气旋式冷涡(Smith *et al.*, 1984)。研究表明,普里兹湾及其邻近海域的海流特征主要表现为: $83^\circ\text{E}$ 以西存在逆时针环流,在 $83^\circ$ — $98^\circ\text{E}$ ,  $63^\circ\text{S}$ 的南、北区域各存在一个顺时针环流; $98^\circ\text{E}$ 以东海域主要由南向流所控制,但近岸存在一个顺时针涡旋(陈明剑等,1995)。普里兹湾及其邻近海域主要存在三种水团,即南极表层水、绕极深层水和南极底层水,陆架区还存在陆架水和冰架水(Deacon, 1937)。有关普里兹湾及其邻近海域镭同位素的研究报道基本来自国内研究人员的工作。尹明端等(2004)测定了1999年夏季普里兹湾及其邻近海域15个站位表层水的 $^{226}\text{Ra}$ 。郑敏芳等(2010)利用中国第22次南极科学考察在普里兹湾及其邻近海域获得的表层水 $^{226}\text{Ra}$ 含量,揭示了南极普里兹湾表层水的来源与运移路径。Chen等(2011)报道了中国第13次和第19次南极科学考察在普里兹湾及其邻近海

域获得的 $^{226}\text{Ra}$ 比活度,指出普里兹湾外海域 $^{226}\text{Ra}$ 的含量要高于湾内。何文涛(2012)利用中国第26次南极科学考察在普里兹湾及其邻近海域获得的 $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}$ ,揭示了埃默里冰架前沿海域上层水体的运移路径和迁移时间,探讨了普里兹湾附近海域南极底层水形成的可能性。

本研究利用中国第27次南极科学考察航次所采集的样品,开展了 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 的研究,以揭示南极普里兹湾及其邻近海域表层水中 $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}$ 的含量与分布特征;借助盐度和 $^{226}\text{Ra}$ 两个保守要素的三组分质量平衡方程,计算海水中冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水的份额,揭示冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水的空间分布规律;综合水文要素、同位素等空间分布特征,阐明普里兹湾及其邻近海域表层水的运动路径和交换速率。

## 1 样品采集与分析

### 1.1 样品采集

2010年12月至2011年1月的南半球夏季期间,于 $63^\circ$ — $70^\circ\text{S}$ 、 $70^\circ$ — $76^\circ\text{E}$ 之间的普里兹湾及其邻近海域采集了26个站位的表层水样。站位主要分布在4个断面,即埃默里冰架前沿的IS断面、南北向贯穿湾内外的P3断面、普里兹湾外陆坡和深海区的P2断面和位于湾口的东西向A1断面,此外,在湾口海域还采集了B1-03站、B1-02站和P4-08站的表层水(图1)。采样区域涵盖普里兹湾湾顶区( $68.5^\circ$ — $69.5^\circ\text{S}$ ,  $70^\circ$ — $76^\circ\text{E}$ )、湾口区( $66^\circ$ — $67.5^\circ\text{S}$ ,  $72^\circ$ — $74^\circ\text{E}$ )和湾外南极绕极流影响区( $64^\circ$ — $66^\circ\text{S}$ ,  $70^\circ$ — $74^\circ\text{E}$ )。

每份水样(约180L)由“雪龙船”表层采水系统采集后,装于塑料桶中。用虹吸方式将海水流经装有5g白纤维和12g  $\text{MnO}_2$ 纤维的PVC管,流速控制在250mL/min以内。海水全部流过纤维后,将锰纤维取出,装入塑料袋中,带回实验室进行镭同位素的分析。该方法是十分成熟的方法,已经过多次实验证明,研究中所采用的锰纤维量在所述流速下可将该体积海水中的Ra吸附完全(谢永臻等,1994)。

### 1.2 分析方法

**1.2.1 温度、盐度** 温盐数据由中国第27次南极科学考察队所携带的海鸟911 plus CTD在各站位现场测得,其中电导率的测定精度为 $\pm 0.0002\text{mS/cm}$ ,温度的测定精度为 $\pm 0.002^\circ\text{C}$ 。测得的电导率按照UNESCO(1988)的方法转换为实用盐度。

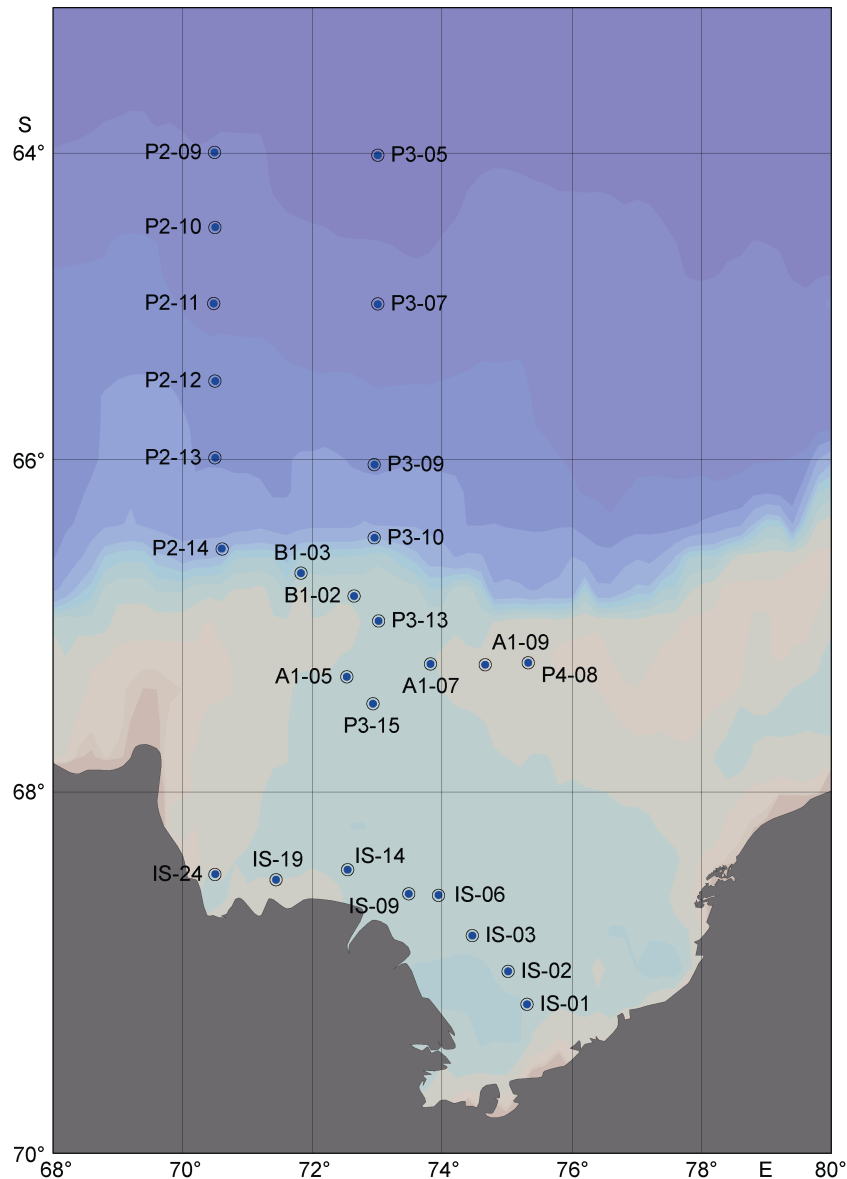


图 1 普里兹湾及其邻近海域镭同位素的采样站点

Fig.1 Sampling locations in the Prydz Bay and its adjacent areas

**1.2.2  $^{226}\text{Ra}$**   $^{226}\text{Ra}$  通过间接测量  $^{222}\text{Rn}$  子体的方法来确定其放射性活度。将富集了 Ra 同位素的锰纤维装入特制扩散管中, 经 4—10min 的抽真空后, 密封 5—7d, 此时  $^{222}\text{Rn}$  将不断由  $^{226}\text{Ra}$  生长产生。之后, 将  $^{222}\text{Rn}$  送入处于真空状态的 ZnS(Ag) 闪烁室, 放置 3h, 以确保  $^{222}\text{Rn}$  的子体得以充分生长, 最后用氡钍分析仪(FD-125型, 北京核仪器厂)测量闪烁室中的放射性强度(谢永臻等, 1994)。

$^{226}\text{Ra}$  比活度的计算公式如下:

$$A_{226} = \frac{k_{226} \cdot (N_s - N_b)}{\alpha \cdot V \cdot \eta \cdot t}$$

式中,  $A_{226}$  为  $^{226}\text{Ra}$  比活度( $\text{Bq}/\text{m}^3$ );  $k_{226}$  为  $^{226}\text{Ra}$  测量的装

置系数( $\text{Bq}/\text{cpm}$ );  $N_s$ 、 $N_b$  分别为样品和本底的放射性计数(counts);  $\alpha$  为  $^{222}\text{Rn}$  的积累系数;  $V$  为水样的体积( $\text{m}^3$ );  $\eta$  为测量过程中  $^{222}\text{Rn}$  自锰纤维释放的射气效率;  $t$  为样品及本底的测量时间(min)。

**1.2.3  $^{228}\text{Ra}$**   $^{228}\text{Ra}$  通过分析  $^{228}\text{Ra}$ - $^{228}\text{Ac}$  平衡体系中的  $^{228}\text{Ac}$  ( $t_{1/2}=6.13\text{h}$ ) 获得。 $^{226}\text{Ra}$  测量完成后, 将锰纤维上的镭同位素用盐酸沥取, 借助  $\text{Ba}(\text{Pb})\text{SO}_4$  共沉淀将 Ra 进一步富集。经 DTPA 溶液溶解沉淀后, 放置 48h 以上, 此时子体  $^{228}\text{Ac}$  与母体  $^{228}\text{Ra}$  的放射性活度达到平衡。借助  $\text{BaSO}_4$  沉淀除去溶液中的 Ra 后, 用一氯乙酸溶液将其中的  $^{228}\text{Ac}$  萃取出来, 经稀  $\text{HNO}_3$  反萃取纯化后, 形成  $\text{Ce}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$  沉淀, 并将含有  $^{228}\text{Ac}$

的沉淀转移至特制的、由定量滤纸制作的测量环中,送入低本底  $\alpha/\beta$  计数仪(BH1217 型,北京核仪器厂)测定其中的  $\beta$  射线强度(谢永臻等, 1994)。 $^{228}\text{Ra}$  的比活度由下式计算获得:

$$A_{228} = \frac{(N_s - N_b) \cdot e^{\lambda \Delta t}}{V \cdot \eta \cdot t}$$

式中,  $A_{228}$  为测定时刻的  $^{228}\text{Ra}$  比活度( $\text{Bq}/\text{m}^3$ );  $N_s$ 、 $N_b$  分别为相同测量时间下样品和本底的放射性计数;  $\lambda$  为  $^{228}\text{Ac}$  的衰变常数( $1.885 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$ );  $\Delta t$  是分析流程中  $^{228}\text{Ac}$  的衰变时间(即  $^{228}\text{Ac}$  分离至测量的时间间隔, min);  $V$  为水样的体积( $\text{m}^3$ );  $t$  为样品及本底的测量时间(min);  $\eta$  是所采用分析流程  $^{228}\text{Ra}$  的全程回收率, 该全程回收率由  $^{232}\text{Th}$ - $^{228}\text{Ra}$  平衡标准溶液确定。

$^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$  比活度的分析误差以  $\pm 1\sigma$  计数统计误差表示, 其中已对本底计数、样品计数和回收率的统计计数误差进行了误差传递计算。

## 2 结果

### 2.1 温度、盐度

普里兹湾及其邻近海域表层水的温度和盐度分别为  $-1.75$ — $0.36^\circ\text{C}$  和  $32.99$ — $33.99$ (表1)。整体上看, 温度呈现由湾顶向湾外先减小而后增加的趋势, 盐度则呈现由湾顶向湾外先增加后减小的趋势(图2)。表层水温的分布违反了常规的纬度分布特征, 从湾顶向湾口呈现由南向北降低的特征, 这可能与风场作用下海冰覆盖区域的变化或者与埃默里冰架水体的输出有关。在南半球的春季, 当研究海域北部及深海洋区仍被海冰覆盖时, 在强大的南极下降风作用下, 湾顶区往往已出现了开阔的冰间水域。这些水体吸收太阳辐射的时间更长, 水温得以升高, 进而形成普里兹湾夏季表层水的水温由湾顶向湾口降低的分布特征(董兆乾等, 2004; 蒲书箴等, 2007)。另一方面, 低温水体由埃默里冰架向湾口的输运也会导致湾顶东侧海域高于西侧及湾中部海域的情况出现(Shi *et al.*, 2011; 高郭平等, 2013)。就盐度分布而言, 湾顶因受海冰/冰川融化水的影响, 盐度较低, 从而形成盐度自湾顶向外增加的趋势。

温盐的分布同时表明,  $66.5^\circ$ — $67.5^\circ\text{S}$ 、 $73^\circ\text{E}$  附近同时出现温度的极小值和盐度的极大值, 从 P3 断面位密的分布可以看出, 该区域(P3-13 站附近海域)存在较为明显的上升流, 其影响可达表层(图3)。上升流将低温、高盐的次表层水输送至表层, 造成该区域温

度、盐度的异常分布。

### 2.2 $^{226}\text{Ra}$

普里兹湾及其邻近海域表层水  $^{226}\text{Ra}$  比活度的变化范围为  $1.47$ — $2.43 \text{Bq}/\text{m}^3$ , 平均值为  $2.13 \text{Bq}/\text{m}^3$ (表1)。在此前的研究中, Ku 等(1970)实测了南大洋印度洋扇面 3 个测站  $^{226}\text{Ra}$  的垂直分布, 表层水  $^{226}\text{Ra}$  比活度介于  $1.46$ — $2.92 \text{Bq}/\text{m}^3$  之间, 且自北向南逐渐增高。Broecker 等(1976)报道南极辐合带表层水  $^{226}\text{Ra}$  含量从南部海域的  $3 \text{Bq}/\text{m}^3$  降低至北部海域的  $1.33 \text{Bq}/\text{m}^3$ 。 $58^\circ$ — $70^\circ\text{S}$ 、 $30^\circ\text{W}$ — $0^\circ\text{E}$  之间威德尔海的  $^{226}\text{Ra}$  含量基本稳定在  $2.83 \text{Bq}/\text{m}^3$  左右(Chung *et al.*, 1980)。Hanfland(2002)给出南大洋大西洋扇面( $40^\circ$ — $75^\circ\text{S}$ ,  $75^\circ\text{W}$ — $20^\circ\text{E}$ )  $^{226}\text{Ra}$  的比活度介于  $0.91$ — $3.01 \text{Bq}/\text{m}^3$  之间。Chen 等(2011)依托中国第 13、19 次南极科学考察获得的普里兹湾及其邻近海域  $^{226}\text{Ra}$  的比活度平均为  $2.26 \text{Bq}/\text{m}^3$ 。郑敏芳等(2010)依托中国第 22 次南极科学考察测得的普里兹湾及其邻近海域表层水  $^{226}\text{Ra}$  含量介于  $0.92$ — $2.09 \text{Bq}/\text{m}^3$  之间。何文涛(2012)根据中国第 26 次南极科学考察的研究结果, 给出普里兹湾及其邻近海域表层水  $^{226}\text{Ra}$  比活度的变化范围为  $1.51$ — $2.28 \text{Bq}/\text{m}^3$ 。由此可见, 南大洋表层水  $^{226}\text{Ra}$  比活度的报道值落在  $0.91$ — $3.01 \text{Bq}/\text{m}^3$  之间。本研究测得的普里兹湾及其邻近海域表层水  $^{226}\text{Ra}$  比活度( $1.47$ — $2.43 \text{Bq}/\text{m}^3$ )落在上述范围之内, 与 Ku 等(1970)、Chen 等(2011)、郑敏芳等(2010)、何文涛(2012)的报道值比较接近。

普里兹湾及其邻近海域表层水的  $^{226}\text{Ra}$  含量由湾顶向外海逐渐增加, 且东部海域表层水的  $^{226}\text{Ra}$  低于西部海域(图4a), 与中国第 26 次南极科学考察航次观察到的情况类似(何文涛, 2012)。需要指出的是,  $^{226}\text{Ra}$  除了在  $66^\circ\text{S}$  以北的湾外开阔海域出现高值外, 在湾口( $66.5^\circ$ — $67.5^\circ\text{S}$ ,  $72^\circ$ — $74^\circ\text{E}$ )和湾顶中部海域也存在  $^{226}\text{Ra}$  的高值(图4a), 其中湾口  $^{226}\text{Ra}$  的高值区恰好对应于低温、高盐出现的位置(图2), 反映出上涌水体对表层  $^{226}\text{Ra}$  含量的影响。

### 2.3 $^{228}\text{Ra}$

普里兹湾及其邻近海域表层水  $^{228}\text{Ra}$  的比活度为  $0.17$ — $0.45 \text{Bq}/\text{m}^3$ , 平均值为  $0.29 \text{Bq}/\text{m}^3$ , 低于威德尔海近岸水体中  $^{228}\text{Ra}$  的比活度( $(0.39 \pm 0.09) \text{Bq}/\text{m}^3$ )(van der Loeff, 1994), 但高于南大洋深海区表层水的报道值( $<0.02$ — $0.26 \text{Bq}/\text{m}^3$ )(Kaufman *et al.*, 1973; Moore *et al.*, 1986; van der Loeff, 1994; Hanfland, 2002)。与何文涛(2012)于中国第 26 次南极科学考察航次获得的普里

表 1 普里兹湾及其邻近海域表层水中  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$  比活度、 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  和冰融水、南极夏季表层水、普里兹湾中深层水的份额  
 Tab.1 Surface  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  and fractions of the ice-melted water, Antarctic surface water and Prydz deep water

站位	采样日期 (月/日/年)	经度 (°E)	纬度 (°S)	站位水深 (m)	温度 (°C)	盐度	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$^{228}\text{Ra}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>	$f_i$ (%)	$f_a$ (%)	$f_p$ (%)
IS-01	12/30/2010	75.307	69.197	734	0.06	33.75	2.12±0.02	N.D.	N.D.	3.06	64.14	32.79
IS-02	12/31/2010	75.014	69.017	761	0.01	32.99	1.86±0.03	N.D.	N.D.	5.77	53.03	41.19
IS-03	12/31/2010	74.465	68.817	723	-0.19	33.22	2.29±0.02	0.45±0.08	0.20±0.04	4.87	72.43	22.70
IS-06	1/1/2011	73.943	68.590	695	0.23	33.80	2.42±0.02	0.34±0.06	0.14±0.03	2.81	77.76	19.43
IS-09	1/1/2011	73.492	68.584	786	-0.39	33.30	2.02±0.02	0.34±0.03	0.17±0.02	4.66	59.98	35.36
IS-14	1/1/2011	72.536	68.444	762	-0.86	33.42	2.35±0.02	0.23±0.05	0.10±0.02	4.17	74.93	20.90
IS-19	1/2/2011	71.439	68.501	600	-0.39	33.56	2.09±0.02	0.27±0.05	0.13±0.03	3.74	63.13	33.13
IS-24	1/2/2011	70.501	68.472	1012	-1.56	33.63	2.19±0.02	0.35±0.06	0.16±0.03	3.45	67.42	29.12
P3-15B	1/4/2011	72.938	67.487	591	-0.80	33.63	2.43±0.02	0.26±0.08	0.11±0.03	3.40	78.50	18.10
P3-13	1/4/2011	73.016	66.990	509	-1.70	33.99	2.20±0.02	0.36±0.05	0.16±0.02	2.19	67.68	30.13
P3-10	1/5/2011	72.954	66.485	1551	-1.68	33.82	2.28±0.02	0.20±0.06	0.09±0.03	2.76	71.48	25.76
P3-09	1/5/2011	72.954	66.030	2473	-1.54	33.54	2.32±0.02	0.33±0.05	0.14±0.02	3.74	73.56	22.70
P3-07	1/5/2011	73.003	65.003	3361	-0.28	33.26	1.98±0.02	0.17±0.06	0.09±0.03	4.82	58.31	36.87
P3-05	1/6/2011	73.009	64.014	3658	0.36	33.40	2.32±0.02	0.21±0.06	0.09±0.03	4.22	73.68	22.10
P4-08	1/12/2011	75.330	67.242	395	0.45	33.60	2.00±0.03	0.31±0.05	0.16±0.03	3.60	58.91	37.49
A1-09	1/12/2011	74.663	67.252	431	0.16	33.60	2.03±0.02	N.D.	N.D.	3.60	60.28	36.12
A1-07	1/12/2011	73.815	67.249	490	-0.42	33.69	2.05±0.02	0.24±0.14	0.12±0.07	3.27	61.11	35.63
A1-05	1/12/2011	72.525	67.327	571	-0.68	33.78	1.96±0.02	0.35±0.15	0.18±0.08	2.98	56.93	40.09
B1-02	1/13/2011	72.641	66.839	527	-1.33	33.56	2.06±0.02	0.33±0.06	0.16±0.03	3.72	61.46	34.82
B1-03	1/13/2011	71.818	66.699	532	-1.44	33.45	2.03±0.02	0.33±0.05	0.16±0.03	4.11	60.41	35.47
P2-14	1/13/2011	70.608	66.551	2040	-1.75	33.78	2.33±0.02	0.32±0.04	0.14±0.02	2.94	69.24	27.82
P2-13	1/15/2011	70.503	65.988	2627	-0.94	33.44	1.93±0.02	0.28±0.06	0.15±0.03	4.13	68.18	27.68
P2-12	1/15/2011	70.499	65.499	2953	-0.65	33.38	2.03±0.02	N.D.	N.D.	4.31	71.88	23.81
P2-11	1/16/2011	70.484	64.997	3147	-0.60	33.35	1.47±0.03	0.18±0.06	0.12±0.04	4.39	73.73	21.89
P2-10	1/16/2011	70.503	64.497	3301	0.32	33.35	2.30±0.02	0.19±0.07	0.08±0.03	4.48	58.22	37.30
P2-09	1/16/2011	70.491	63.997	3477	0.32	33.41	2.31±0.02	0.40±0.06	0.17±0.03	4.18	73.67	22.15

N.D. 表示没有数据;  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub> 代表  $^{228}\text{Ra}$  与  $^{226}\text{Ra}$  的活度比;  $f_i$ 、 $f_a$  和  $f_p$  分别代表冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水所占的比例

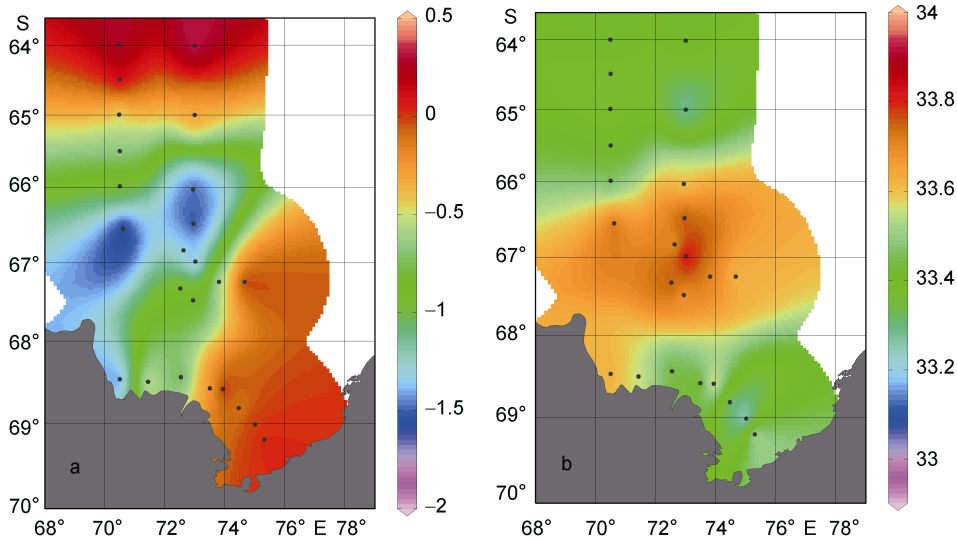


图 2 普里兹湾及其邻近海域表层水体温度(°C, a)和盐度(b)的分布

Fig.2 Distributions of surface temperature (°C, a) and salinity (b) in the Prydz Bay and its adjacent areas

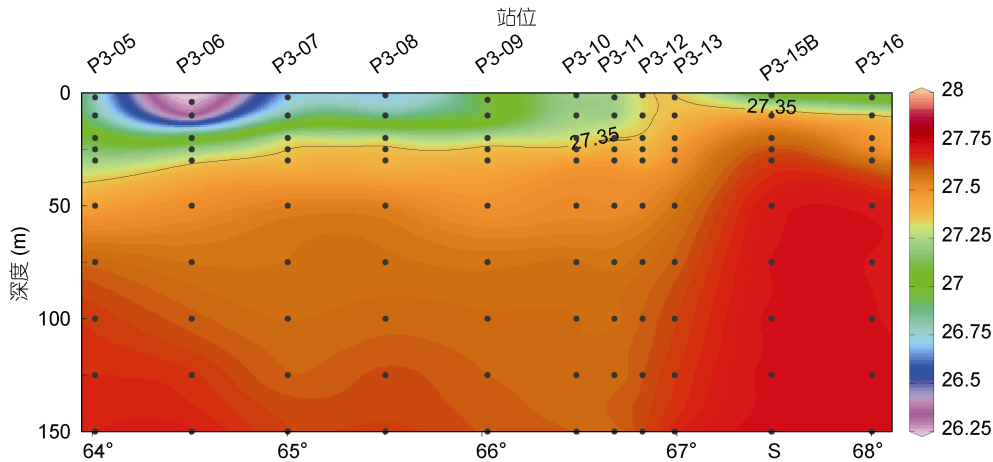


图 3 普里兹湾及其邻近海域 P3 断面位密(kg/m<sup>3</sup>)的分布

Fig.3 Distribution of potential density (kg/m<sup>3</sup>) at section P3 in the Prydz Bay and its adjacent areas

兹湾及其邻近海域表层水  $^{228}\text{Ra}$  含量(0.11—0.49Bq/m<sup>3</sup>, 平均值为 0.26Bq/m<sup>3</sup>)十分接近。

研究海域表层水  $^{228}\text{Ra}$  比活度呈现由湾顶向外海逐渐递减的态势,湾外开阔洋区的  $^{228}\text{Ra}$  含量最低(图 4a),反映出南极绕极流影响区域低  $^{228}\text{Ra}$  的特征。在湾内,湾顶中部海域  $^{228}\text{Ra}$  含量较低,而湾顶东侧海域  $^{228}\text{Ra}$  比活度高于湾顶西侧海域(图 4b)。值得注意的是,在  $^{226}\text{Ra}$  含量出现高值的湾口区(66.5°—67.5°S, 72°—74°E),  $^{228}\text{Ra}$  含量也较高(图 4b)。

#### 2.4 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ A.R.

普里兹湾及其邻近海域表层水  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  A.R. ( $^{228}\text{Ra}$  与  $^{226}\text{Ra}$  的活度比)介于 0.08—0.20 之间,平均值为  $0.14\pm 0.03$ ,与中国第 26 次南极科学考察航次的测值(0.06—0.32, 平均值为 0.16, 何文涛, 2012)十分接近。

研究海域  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  A.R. 呈现由湾顶向外海逐渐递减的态势,南极绕极流影响区  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  A.R. 较低,湾内水体相对较高(图 4c)。在湾内,湾顶东侧海域出现最高值,西侧海域出现次高值,湾口中中部海域(66.5°—67.5°S, 72°—74°E)也相对较高(图 4c)。

### 3 讨论

#### 3.1 水团来源构成分析

在普里兹湾及其邻近海域,所有  $^{226}\text{Ra}$  比活度与盐度的测值均落在由冰融水(包括海冰融化水和冰川融化水)、南极夏季表层水(夏季南极绕极流海域 100m 以浅水体)和普里兹湾中深层水(普里兹湾 100m 以深水体)等三种端元水体所围绕的三角形区域内(图 5),说明研究海域表层水  $^{226}\text{Ra}$  含量受控于这三种水体

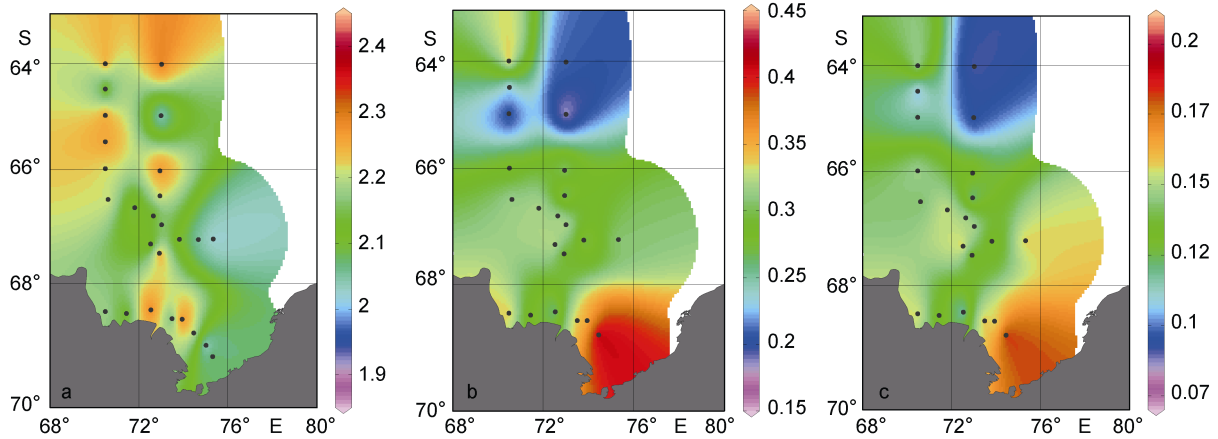


图4 普里兹湾及其邻近海域表层 $^{226}\text{Ra}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ , a)、 $^{228}\text{Ra}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ , b)和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  A.R.(c)的分布  
Fig.4 Distributions of surface  $^{226}\text{Ra}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ , a),  $^{228}\text{Ra}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ , b) and  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  A.R. (c) in the Prydz Bay and its adjacent areas

相互混合的比例(郑敏芳等, 2010; 何文涛, 2012; Zhang *et al.*, 2014)。由盐度、 $^{226}\text{Ra}$  的质量平衡可建立如下关系:

$$\begin{aligned} f_i + f_a + f_p &= 1 \\ f_i \cdot S_i + f_a \cdot S_a + f_p \cdot S_p &= S \\ f_i \cdot {}^{226}\text{Ra}_i + f_a \cdot {}^{226}\text{Ra}_a + f_p \cdot {}^{226}\text{Ra}_p &= A_{226} \end{aligned}$$

其中,  $f_i$ 、 $f_a$  和  $f_p$  分别代表冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水在水体中所占的比例;  $S_i$ 、 $S_a$  和  $S_p$  分别为三种端元水体的盐度特征值,  $S$  为样品盐度;  ${}^{226}\text{Ra}_i$ 、 ${}^{226}\text{Ra}_a$  和  ${}^{226}\text{Ra}_p$  分别为三种端元水体的  $^{226}\text{Ra}$  比活度特征值,  $A_{226}$  为实测样品中  $^{226}\text{Ra}$  的比活度。根据上述质量平衡方程, 即可获得表层水中冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水的份额。关于冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水盐度、 $^{226}\text{Ra}$  特征值的确定, 根据何文涛(2012)的研究, 冰融水盐度和  $^{226}\text{Ra}$  的特征值分别为 6.3 和  $0.17\text{Bq}/\text{m}^3$ , 南极夏季表层水的盐度和  $^{226}\text{Ra}$  特征值分别为 34.56 和  $2.92\text{Bq}/\text{m}^3$ , 普里兹湾中深层水的盐度和  $^{226}\text{Ra}$  特征值分别为 34.72 和  $0.73\text{Bq}/\text{m}^3$ , 本研究即采用这些特征值用于计算。本研究所采用的南极夏季表层水  $^{226}\text{Ra}$  端元值  $2.92\text{Bq}/\text{m}^3$ (何文涛, 2012)略高于郑敏芳等(2010)的相应值( $2.57\text{Bq}/\text{m}^3$ ), 产生差异的原因在于郑敏芳等(2010)是以南大洋印度洋扇面整个绕极流海域表层水的  $^{226}\text{Ra}$  含量为依据, 而本研究以南大洋印度洋扇面绕极流海域南侧区域表层水的  $^{226}\text{Ra}$  含量为依据。从空间分布看, 后者更接近研究海域。

在研究海域表层水的来源构成中, 冰融水份额( $f_i$ )为 2.19%—5.77%, 南极夏季表层水份额( $f_a$ )为 53.03%—78.50%, 普里兹湾中深层水份额( $f_p$ )为 18.10%—41.19%(表 1)。平均而言, 普里兹湾及其邻近海域表层水大体

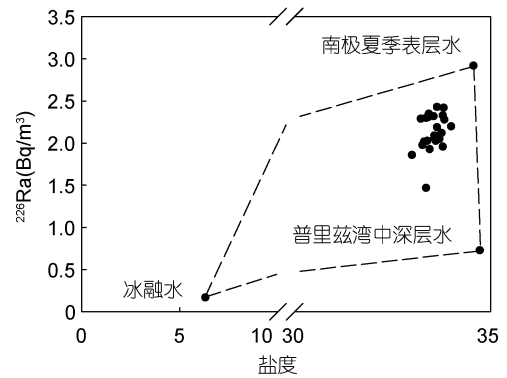


图5 普里兹湾及其邻近海域表层水中  $^{226}\text{Ra}$  比活度与盐度的关系  
Fig.5 Relationship between surface  $^{226}\text{Ra}$  and salinity in the Prydz Bay and its adjacent areas

由 3.82% 的冰融水、66.54% 的南极夏季表层水和 29.64% 的普里兹湾中深层水混合而成, 主要来源是南极夏季表层水和普里兹湾中深层水。本研究计算出的南极夏季表层水比例(66.54%)、冰融化水比例(3.82%)高于中国第22次南极科考(南极夏季表层水和冰融水比例分别为 50.11% 和 3.14%, 郑敏芳等, 2010)、中国第26次南极科考(南极夏季表层水和冰融水比例分别为 50.09% 和 2.27%, 何文涛, 2012)的报道值, 而普里兹湾中深层水的比例(29.64%)低于中国第22次南极科考(46.15%, 郑敏芳等, 2010)、第26次南极科考(47.64%, 何文涛, 2012)的相应值, 反映出水团来源构成受到站位空间分布、采样时间变化等的影响。从各来源水体的空间分布看, 冰融水份额由湾内向湾外呈现先减少而后增加的趋势, 且在普里兹湾湾顶东侧海域出现最大值(图6a)。湾外开阔海域表层水中较高的冰融水组分可能与风场作用下海冰

和早期冰融水的水平输运有关。在南极离岸风的作用下,海冰往往被输运到普里兹湾外侧海域融化(董兆乾等, 2004; 蒲书箴等, 2007), 与此同时, 湾内早期海冰或冰川融化产生的冰融水也会在表层水的携带下往湾外运动, 由此可导致湾外开阔海域存在较丰富的冰融水组分。值得注意的是, 湾顶东侧海域存在较高的冰融水组分(图6a), 恰好对应于温度的高值区(图2a), 而湾顶西部海域和湾口区存在较低冰融水组分(图6a), 与温度的低值区(图2a)、 $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}$ 次高值区, 以及 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_{\text{A.R.}}$ 的高值区(图4)相对应。这些空间分布特征与湾顶埃默里冰架前沿海

流东进西出的运动路径(Smith *et al.*, 1984; 陈红霞等, 2005; 郑敏芳等, 2010)和冰架下发生的融冰/结冰过程有关。

南极夏季表层水的份额呈现由湾外向湾内递减的趋势, 其中 $70.5^\circ\text{E}$ 断面南极夏季表层水的影响要强于其对 $73^\circ\text{E}$ 断面的影响(图6b), 反映出湾外南极表层水对湾内的影响在西部海域更为明显。普里兹湾中深层水的份额由湾内向湾外呈降低趋势, 且在湾内东侧海域出现高值(图6c)。整体上看, 研究海域南极夏季表层水与普里兹湾中深层水的空间分布呈镜像对称关系, 反映出两种水体的相互补充作用。

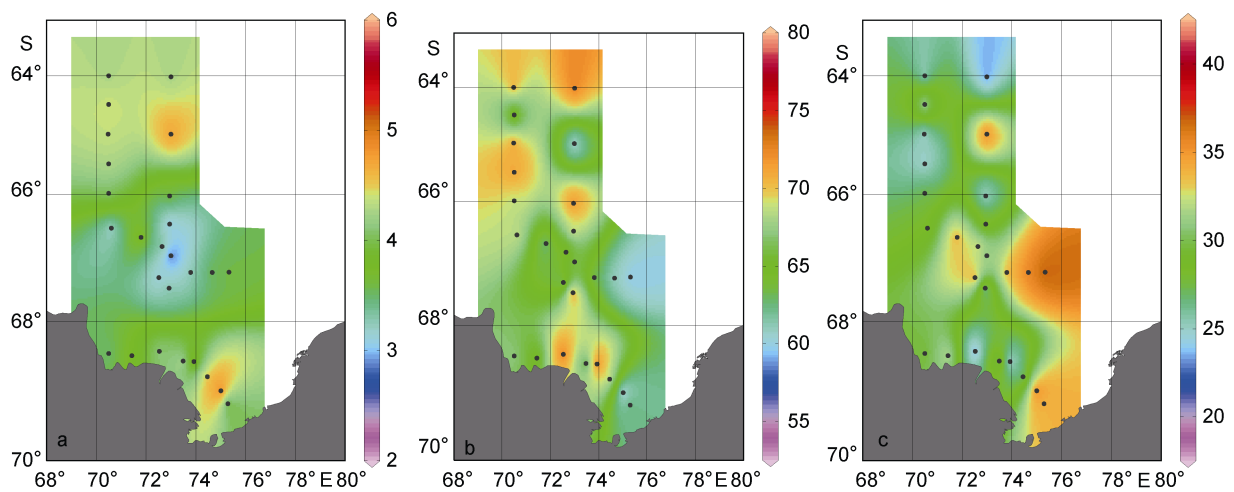


图6 冰融水(a)、南极夏季表层水(b)和普里兹湾中深层水份额(c)的空间分布(单位: %)

Fig.6 Distributions of fractions of the ice-melted water (%), Antarctic surface water (%), and Prydz deep water (%), c) in the Prydz Bay and its adjacent areas

### 3.2 埃默里冰架前沿海流的运动路径与速率

综合分析埃默里冰架前沿海域表层水中温度、盐度、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_{\text{A.R.}}$ 、冰融水份额的分布可以看出, 与埃默里冰架前湾东侧海域相比, 西侧海域具有低温、高盐、高 $^{226}\text{Ra}$ 、低 $^{228}\text{Ra}$ 、低 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_{\text{A.R.}}$ 、低冰融水份额的特征。东西侧海域水文要素、核素含量的上述差异反映出埃默里冰架前沿海流东进西出的运动路径, 佐证了此前研究者提出的论点(Smith *et al.*, 1984; 陈红霞等, 2005; 郑敏芳等, 2010)。当具有高温的南极沿岸流水体靠近埃默里冰架前沿东侧海域时, 与埃默里冰架的相互作用导致海冰/冰川融化加剧, 因而在冰架前沿东部海域表层水中观察到冰融水组分较高的特征。之后水体进入埃默里冰架下方运动, 与冰架的不断相互作用, 导致温度逐渐下降, 至冰点之下时, 发生海水结冰现象, 其伴随的盐析现象导致残留水体的盐度和 $^{226}\text{Ra}$ 含量增

加。当这些水体在西侧海域由埃默里冰架输出时, 即可在西侧海域观察到相对于东侧海域低温、高盐、高 $^{226}\text{Ra}$ 、低冰融水组分的特点。 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_{\text{A.R.}}$ 的情况与 $^{226}\text{Ra}$ 恰好相反的原因在于,  $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_{\text{A.R.}}$ 的变化不仅受控于海水结冰过程的影响, 还受到 $^{228}\text{Ra}$ 自身衰变的影响。 $^{228}\text{Ra}$ 半衰期仅为5.75a, 比 $^{226}\text{Ra}$  ( $t_{1/2}=1600\text{a}$ )短得多。当水体在埃默里冰架下方由东向西运动的过程中, 伴随着时间的推移, 海水中的 $^{228}\text{Ra}$ 因放射性衰变其含量逐渐降低, 而 $^{226}\text{Ra}$ 变化极小。尽管海水结冰过程会导致残留水体中 $^{228}\text{Ra}$ 含量的增加, 但如果 $^{228}\text{Ra}$ 放射性衰变导致的损失量大于盐析作用所致的增加量时, 即可在冰架流出水体中观察到 $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_{\text{A.R.}}$ 低于流入冰架水体的现象, 这就是埃默里冰架前沿西侧海域比东侧海域具有低 $^{228}\text{Ra}$ 、低 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_{\text{A.R.}}$ 特征的原因。另外, 埃默里冰架前沿东侧海域表层水具有较高的 $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}_{\text{A.R.}}$



也与Moore等(1986)、van der Loeff(1994)、Hanfland (2002)报道的南极沿岸流水体具有较高的 $^{228}\text{Ra}$ 比活度相符合。

埃默里冰架前沿东、西侧海域 $^{228}\text{Ra}$ 的差异反映了 $^{228}\text{Ra}$ 放射性衰变和结冰/融冰过程的综合影响,但 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>的变化则仅受控于 $^{228}\text{Ra}$ 的放射性衰变,因此,根据埃默里冰架前沿东、西侧海域 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>的差异可估算出表层水体在埃默里冰架下方运动所经历的时间。以IS03站和IS24站分别作为东、西侧海域的代表,根据放射性衰变规律可建立如下方程:

$$\left(\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}\right)_{\text{A.R.}}^{\text{IS24}} = \left(\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}\right)_{\text{A.R.}}^{\text{IS03}} \cdot e^{-(\lambda_{228} - \lambda_{226})t}$$

其中 $\left(\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}\right)_{\text{A.R.}}^{\text{IS24}}$ 和 $\left(\frac{^{228}\text{Ra}}{^{226}\text{Ra}}\right)_{\text{A.R.}}^{\text{IS03}}$ 分别代表IS24站和IS03

站表层水的 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>,  $t$ 代表水体在冰架下由东侧运移到西侧所经历的时间, $\lambda_{226}$ 、 $\lambda_{228}$ 分别代表 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 的衰变常数。IS03站和IS24站的 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>分别为0.20和0.16(表1),由此可计算出 $t=1.85\text{a}$ ,也就是说,表层水体自东侧海域进入冰架下方运动,至西侧海域离开埃默里冰架所经历的时间为1.85a。何文涛(2012)根据埃默里冰架前沿海域100—480m深度区间 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>在东、西侧海域的差异,估算出100—480m区间水体从东侧运移至西侧所经历的时间为7.5—8.0a。显然,本研究获得的埃默里冰架下表层水体的运移速率要明显快于100—480m深度的水体,与何文涛(2012)揭示的水体运移速率随深度增加而降低的趋势相符合。若以中国第26次南极科学考察获得的表层水 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>数据(何文涛, 2012)进行计算,则中国第26次南极科学考察期间埃默里冰架下表层水体由东至西运移的时间为2.78a,稍长于上述中国第27次南极科学考察计算出的表层水运移时间。

### 3.3 普里兹湾湾口上升流水体的来源

在位于66.5°—67.5°S、72°—74°E的湾口中部海域,表层水呈现低温、高盐的特征(图2)。由P3断面位密的分布可以看出,以P3-13站为核心的湾口区域存在次表层水的上涌通风作用(图3)。这些上升的水体到底是来自湾外绕极深层水沿陆坡的爬升,或是来自湾内水体的上升输送是关系到普里兹湾是否有南极底层水形成的一个关键科学问题(乐肯堂等, 1996)。威德尔海和罗斯海是目前已知的南极底层水形成的两个源地,已有研究表明,南极底层水是由寒冷的陆架水和高盐的南极绕极深层水混合,产生密度较大

的水体沿陆坡下沉,然后进入海盆深层而形成,因而绕极深层水的涌升是南极底层水形成的重要条件之一。此外,近年来的研究表明,冰架低温、高盐水体的输出也可能成为南极底层水形成的机制之一(Ohshima *et al.*, 2013; 高郭平等, 2013)。

尽管此前物理海洋学的研究表明,绕极深层水可能在普里兹湾湾外73°E附近海域涌升(董兆乾等, 2004),但本研究获得的 $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>分布表明,湾口中部海域(66.5°—67.5°S, 72°—74°E)对应于低温、高盐水体的 $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>相对较高(图4b, 4c),其中P3-13站表层水的 $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>分别为0.36±0.05和0.16±0.02(表1),均明显高于受南极绕极流影响海域表层水的报道值( $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>分别为<0.02—0.26Bq/m<sup>3</sup>和<0.10, Kaufman *et al.*, 1973; Li *et al.*, 1980; Moore *et al.*, 1986; van der Loeff, 1994; Hanfland, 2002)。南极绕极深层水由于具有较长的停留时间,其 $^{228}\text{Ra}$ 含量通常很低。显然,湾口中部海域(66.5°—67.5°S, 72°—74°E)表层水中较高的 $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>排除了这些上升水体来自绕极深层水的可能。仔细对比普里兹湾湾内表层水温度和 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>的分布可发现,埃默里冰架前沿西侧海域和湾口中部海域的低温水体,恰好与较高的 $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>相对应(图2a, 4b, 4c),因此,普里兹湾湾口中部海域的上升流水体最有可能是来自埃默里冰架下方输出的水体。前已述及,沿岸水体由埃默里冰架东侧海域进入冰架下方,并由西侧海域离开冰架。在冰架下方,海水温度降低,盐度增加,导致埃默里冰架西侧海域输出的水体具有较高的密度,其输出后沿东北方向运动(严金辉等, 2012),期间水体温度逐步升高而盐度降低,到达湾口中部海域时,密度较低的水体上涌至表层,发生通风作用。上述解释也更为符合水体密度分布所展示的湾内水体等密线上凸的状况(图3)。

## 4 结论

2010年12月30日至2011年1月16日南半球夏季期间,普里兹湾及其邻近海域 $^{226}\text{Ra}$ 含量受控于冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水等三组分的混合比例,根据盐度和 $^{226}\text{Ra}$ 的质量平衡方程,普里湾及其邻近海域冰融水的份额介于2.19%—5.77%之间,平均为3.82%。水文学要素和镭同位素的空间分布显示,在埃默里冰架前沿海域,西侧海域较东侧海域表层水呈现低温、高盐、高 $^{226}\text{Ra}$ 、低 $^{228}\text{Ra}$ 、

低  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub>、低冰融水份额的特征,证实埃默里冰架水体东进西出的运动规律。在表层水体东进西出的运动过程,海水结冰的盐析作用导致了盐度和  $^{226}\text{Ra}$  的增加,以及冰融水份额的降低,而  $^{228}\text{Ra}$  的放射性衰变则导致了  $^{228}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub> 的降低。根据埃默里冰架前沿东、西侧海域  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub> 的变化,计算出埃默里冰架下表层水体东进西出所经历的时间为 1.85a。此外,在普里兹湾湾口中部海域,观察到次表层水上涌的通风现象,其较高的  $^{228}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ <sub>A.R.</sub> 指示出这些表层水体并非来自湾外南极绕极深层水,而可能是来自湾内埃默里冰架输出的水体。

### 参 考 文 献

- 尹明端,曾文义,吴世炎等,2004. 南极普里兹湾海域铀系同位素的分布. 极地研究, 16(1): 11—21
- 乐肯堂,史久新,于康玲,1996. 普里兹湾区水团和热盐结构的分析. 海洋与湖沼, 27(3): 229—236
- 何文涛,2012. 西北冰洋和南极普里兹湾及其邻近海域镭同位素的示踪研究. 厦门: 厦门大学硕士学位论文, 75—83
- 严金辉,李锐祥,侍茂崇等,2012. 2011年1月普里兹湾埃默里冰架附近水文特征. 极地研究, 24(2): 101—109
- 陈红霞,潘增弟,矫玉田等,2005. 埃默里冰架前缘水的特性和海流结构. 极地研究, 17(2): 139—148
- 陈明剑,侍茂崇,高郭平,1995. 近普里兹湾大陆架外水域水文物理特征. 青岛海洋大学学报, 25(增刊): 235—249
- 郑敏芳,陈敏,杨俊鸿等,2010. 应用镭-226 解读南极普里兹湾表层水的来源与运移. 海洋学报, 32(4): 88—97
- 高郭平,董兆乾,侍茂崇等,2013. 南极普里兹湾关键物理海洋学问题研究进展及未来趋势. 上海海洋大学学报, 22(2): 313—320
- 谢永臻,黄奕普,施文远等,1994. 天然水体中  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$  的联合富集与测定. 厦门大学学报(自然科学版), 33(增刊): 86—90
- 董兆乾,蒲书箴,胡筱敏等,2004. 南极普里兹湾及其邻近海域的水团研究. 见: 陈立奇主编. 南极地区对全球变化的响应与反馈作用研究. 北京: 海洋出版社, 13—25
- 蒲书箴,葛人峰,董兆乾等,2007. Emery冰架北缘热盐结构的不均匀性及其成因. 海洋科学进展, 25(4): 376—382
- Broecker W S, Goddard J, Sarmiento J, 1976. The distribution of  $^{226}\text{Ra}$  in the Atlantic Ocean. Earth and Planetary Science Letters, 32(2): 220—235
- Chen M, Xing N, Huang Y P *et al*, 2008. The mean residence time of river water in the Canada Basin. Chinese Science Bulletin, 53(5): 777—783
- Chen Z G, Huang Y, Chen M *et al*, 2011. Meridional distribution of  $^{226}\text{Ra}$  in the west Pacific and the Southern Ocean surface waters. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 29(6): 1224—1236
- Chung Y C, 1974. Radium-226 and Ra-Ba relationships in Antarctic and Pacific waters. Earth and Planetary Science Letters, 23(1): 125—135
- Chung Y, 1980. Radium-barium-silica correlations and a two-dimensional radium model for the world ocean. Earth and Planetary Science Letters, 49(2): 309—318
- Chung Y, Applequist M D, 1980.  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in the Weddell Sea. Earth and Planetary Science Letters, 49(2): 401—410
- Deacon G E R, 1937. The hydrology of the Southern Ocean. London: Cambridge University Press, 1—24.
- Hanfland C, 2002. Radium-226 and radium-228 in the Atlantic sector of the Southern Ocean. Bremen: PhD thesis of Universität Bremen, 56—66
- Kaufman A, Trier R M, Broecker W S *et al*, 1973. Distribution of  $^{228}\text{Ra}$  in the world ocean. Journal of Geophysical Research, 78(36): 8827—8848
- Ku T L, Huh C A, Chen P S, 1980. Meridional distribution of  $^{226}\text{Ra}$  in the eastern Pacific along GEOSECS cruise tracks. Earth and Planetary Science Letters, 49(2): 293—308
- Ku T L, Li Y H, Mathieu G G *et al*, 1970. Radium in the Indian-Antarctic Ocean south of Australia. Journal of Geophysical Research, 75(27): 5286—5292
- Ku T L, Lin M C, 1976.  $^{226}\text{Ra}$  distribution in the Antarctic Ocean. Earth and Planetary Science Letters, 31(2): 236—248
- Ku T L, Luo S D, 1994. New appraisal of radium 226 as a large-scale oceanic mixing tracer. Journal of Geophysical Research, 99(C5): 10255—10273
- Li Y H, Feely H W, Toggweiler J R, 1980.  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Th}$  concentrations in GEOSECS Atlantic surface waters. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 27(7): 545—555
- Moore W S, Santschi P H, 1986. Ra-228 in the deep Indian Ocean. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 33(1): 107—120
- Nozaki Y, Kasemsupaya V, Tsubota H, 1989. Mean residence time of the shelf water in the East China and the Yellow Seas determined by  $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  measurements. Geophysical Research Letters, 16(11): 1297—1300
- Ohshima K I, Fukamachi Y, Williams G D *et al*, 2013. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. Nature Geoscience, 6(3): 235—240
- Shi J X, Cheng Y Y, Jiao Y T *et al*, 2011. Supercooled water in austral summer in Prydz Bay, Antarctica. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 29(2): 427—437
- Smith N R, Dong Z Q, Kerry K R *et al*, 1984. Water masses and circulation in the region of Prydz Bay, Antarctica. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 31(9): 1121—1147
- Van Beek P, Bourquin M, Reyss J L *et al*, 2008. Radium isotopes to investigate the water mass pathways on the Kerguelen Plateau (Southern Ocean). Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 55(5—7): 622—637
- van der Loeff M M R, 1994.  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Th}$  in the Weddell Sea. In: Johannessen O M, Muench R D, Overland J E, eds. The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment: The Nansen Centennial. Washington: Geophysical Monograph, 177—186
- Yang J H, Chen M, Qiu Y S *et al*, 2007.  $^{226}\text{Ra}$  evidence for the ecosystem shift over the past 40 years in the North Pacific Subtropical Gyre. Chinese Science Bulletin, 52(6): 832—838
- Zhang R, Zheng M F, Chen M *et al*, 2014. An isotopic perspective on the correlation of surface ocean carbon dynamics and sea ice melting in Prydz Bay (Antarctica) during austral summer. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 83: 24—33

## SURFACE DISTRIBUTION OF RADIUM ISOTOPES IN THE PRYDZ BAY AND ITS ADJACENT SEA AREAS

CHEN Qian-Na<sup>1</sup>, REN Chun-Yan<sup>1</sup>, LI Qi<sup>1</sup>, LI Jing-Xuan<sup>1</sup>, JIA Ren-Ming<sup>1</sup>,  
ZHENG Min-Fang<sup>1</sup>, QIU Yu-Sheng<sup>1,2</sup>, CHEN Min<sup>1,2</sup>

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract** <sup>226</sup>Ra and <sup>228</sup>Ra in surface water in the Prydz Bay Antarctica and its adjacent sea areas were measured during the 27<sup>th</sup> China Antarctic Research Expedition (from December 30, 2010 to January 16, 2011). Our results show that <sup>226</sup>Ra and <sup>228</sup>Ra activity concentrations ranged from 1.47 to 2.43Bq/m<sup>3</sup> and from 0.17 to 0.45Bq/m<sup>3</sup>, in average of 2.13Bq/m<sup>3</sup> and 0.29Bq/m<sup>3</sup>, respectively. <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra)<sub>A.R.</sub> varied from 0.08 to 0.20 in average of 0.14. Based on mass balance of salinity and <sup>226</sup>Ra, fractions of three components, i.e. ice-melted water, Antarctic summer surface water, and the Prydz Bay deep water, were calculated. Along the front of the Amery ice shelf, characteristics of low temperature, high salinity, high <sup>226</sup>Ra, low <sup>228</sup>Ra, low <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra)<sub>A.R.</sub> and low fraction of the ice-melted water were observed in the western region compared to the eastern region, indicating that waters flow into the ice shelf in the eastern region and exit in the western region. The elapsed time for surface water transport from the eastern to the western was estimated as 1.85 a according to the change of surface <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra)<sub>A.R.</sub>. In addition, ventilation of sub-surface water was observed in the central mouth of the Prydz Bay (66.5°—67.5°S, 72—74°E). Relatively high <sup>228</sup>Ra and <sup>228</sup>Ra/<sup>226</sup>Ra)<sub>A.R.</sub> in the central mouth of the Prydz Bay suggested that these surface waters came from the exported waters from the western Amery ice shelf, not from the upwelling of circumpolar deep water.

**Key words** <sup>226</sup>Ra; <sup>228</sup>Ra; water mass components; water transport; Prydz Bay