

应用镭-226 解读南极普里兹湾表层水的来源与运移

郑敏芳¹, 陈敏^{1,2*}, 杨俊鸿¹, 张润¹, 马嫜¹, 杨伟锋^{1,2}, 邱雨生^{1,2}

(1. 厦门大学 海洋与环境学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 中国第 22 次南极科学考察航次(2005 年 12 月至 2006 年 1 月)期间, 利用 Mn-纤维富集大体积表层海水中的 Ra 同位素, 并通过²²²Rn 直接射气法测量²²⁶Ra 的比活度, 结果表明, 普里兹湾表层水的²²⁶Ra 比活度变化为 0.92~2.09 Bq/m³, 平均值为 1.61 Bq/m³, 在深海区域表现出²²⁶Ra 含量高的特征。从空间分布看, 表层水²²⁶Ra 比活度呈现出由湾内向湾外增加的反常态势, 反映出不同 Ra 含量水团的混合影响。²²⁶Ra 比活度与盐度的关系证实研究海域表层水的 Ra 含量主要受三种端元水体的混合所控制: 其一为具有镭含量高、盐度高特征的南极夏季表层水; 其二为低镭、低盐特征的冰融水; 其三为高盐、中等镭含量的普里兹湾中深层水, 该水体的²²⁶Ra 纯粹由海底沉积物间隙水向上扩散所维持。结合 S-²²⁶Ra 示踪体系及上述三端元混合模型, 计算出各组成水体的比例并描绘出它们的空间分布。南极夏季表层水的份额由湾外向湾内逐渐降低, 并且在 68°E 断面向南影响范围较大; 冰融水的比例由湾内向湾外降低, 并且在湾内东部的高温水体中具有最大贡献; 普里兹湾中深层水中受沉积物镭来源影响比较显著的区域出现在湾内西北部, 其影响向湾外逐渐降低。冰融水与普里兹湾中深层水份额分别于普里兹湾湾顶东、西部出现高值的分布特征证实埃默里冰架前沿海流东进、西出的运移规律。

关键词: 南极普里兹湾; ²²⁶Ra; 水团来源

中图分类号: P619.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2010)04-0088-10

1 引言

镭属于碱土金属元素, 而且在所有碱土元素中具有最低的电离能(5.28 eV), 因而易于形成强的离子键。在氧化性海水中镭主要以 Ra²⁺ 的溶解态形式存在, 其在海水中的分布更多地受控于物理海洋学过程, 因而镭同位素可作为不同时间尺度海洋学过程的天然示踪剂, 并且被运用于深海热盐环流^[1]、水平与垂直涡动扩散速率^[2-3]、水体停留时间^[4-5]、海洋生态系演化^[6]等的研究中。

海水中的²²⁶Ra 主要来自海底沉积物²³⁰Th 的衰变, 并且通过间隙水扩散进入上覆水体中, 因而在中低纬度的大部分海域海水中的²²⁶Ra 含量通常呈现近岸海域高于大洋海域、深海水高于表层水的分布特征^[7-9]。在 GEOSECS, TTO, WOCE 等国际合作研究计划实施期间, 对全球海洋²²⁶Ra 的含量与分布进行了广泛研究, 但有关南大洋中²²⁶Ra 的研究仍比较少。Ku 等^[8]给出了南大洋—印度洋扇区 3 个测站²²⁶Ra 含量的垂直分布, Chung^[10]报道了南大洋—太平洋扇区 6 个测站表层水²²⁶Ra 的含量。在

收稿日期: 2009-04-29; **修订日期:** 2010-02-01。

基金项目: 国际极地年中国行动计划项目; 国际海底区域研究开发“十一五”项目(DYXM-115-02-4-06); 福建省自然科学基金杰出青年基金项目(2009J06026)。

作者简介: 郑敏芳(1985—), 女, 福建省惠安市人, 硕士研究生, 从事同位素海洋化学研究。E-mail: glittering_cat@163.com

*** 通信作者:** 陈敏(1970—), 男, 广东省兴宁市人, 教授, 博士, 从事同位素海洋化学研究。E-mail: mchen@xmu.edu.cn

GEOSECCS 期间获得南大洋约 22 个测站 ^{226}Ra 含量的数据^[11-14];1973 年对南大洋威德尔海进行的国际海洋学调查航次(IWSOE 73),获得威德尔海某断面 ^{226}Ra 较高分辨率的分布图象^[15]。最近 Hanfland^[16]通过 6 个航次的调查,揭示了南大洋一大西洋扇区南极绕极流、威德尔海环流、威德尔海陆架海水中 ^{226}Ra 的含量与分布特征;Charette 等^[17]报道了南大洋一印度洋扇区克伦格尔群岛附近海域($46^{\circ}\sim 46.30^{\circ}\text{S}$, $51.30^{\circ}\sim 52.30^{\circ}\text{E}$)某断面及 1 个测站 ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{224}Ra 和 ^{223}Ra 的含量分布,并且应用其估算溶解态 Fe 的水平与垂直输送通量;Beek 等^[18]实测了南大洋克伦格尔群岛附近海域($48^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{S}$, $68^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$)10 个站位 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 含量的垂直分布,根据 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ _{A.R.}计算水体的垂直涡动扩散速率,揭示水团的运移路径。尹明端等^[19]和曾宪章等^[20]报道了中国第 15 次南极科学考察航次于普里兹湾及其邻近海域获得的 15 个测站表层水溶解态 ^{226}Ra 的含量。综合上述有关南大洋 ^{226}Ra 的数据,可以获得如下几点认识:(1)已报道南大洋表层水 ^{226}Ra 比活度为 $0.91\sim 3.01\text{ Bq/m}^3$,南极绕极流水体较其南部和北部海域具有 ^{226}Ra 含量高的特征;(2)南大洋水柱中 ^{226}Ra 含量的垂直分布比较均匀,只是在近底层水体存在含量增加的趋势;(3)因更多关注于水体混合速率方面的示踪,已有的研究大多利用短寿命的 ^{228}Ra , ^{224}Ra , ^{223}Ra 来示踪水团运移的路径与速率,尚未见直接基于 ^{226}Ra 来探讨南大洋水文学问题的报道。对于一些已比较了解其来源与迁出过程的长寿命核素(如 ^{226}Ra)而言,与稳定元素类似,可应用于水团来源与组成的鉴别,这也是本研究的立意所在。

普里兹湾位于南极大陆印度洋扇区,是南极除威德尔海和罗斯海之外的第三大海湾,也是中国南极考察站中山站的所在地。普里兹湾呈西南—东北走向的喇叭状,开口最东端是四女士浅滩(70°S , 76°E),最西端为福拉姆浅滩(68°S , 69°E)。兰姆伯特大冰川自南极大陆伸入普里兹湾内,所形成的埃默里冰架成为该海湾的西南边界。海湾陆架区水深较浅($400\sim 600\text{ m}$),而在 67°S 附近陆坡以北则为水深超过 $3\ 000\text{ m}$ 的深水洋区^[21-22]。特定的地理环境和海底地形特点成为探索极地海域对全球变化响应与反馈的理想区域,诸如普里兹湾是否是南极底层水的源地之一、冰间湖的成因及其对海域水文学性质的影响、冰架与海洋的相互作用等科学问

题^[21-24],多年来一直是国内外科学家关注的焦点。

本研究拟通过对南极普里兹湾及其邻近海域表层水 ^{226}Ra 的研究,揭示该海湾 ^{226}Ra 的分布特征,并结合水文学数据,定量区分冰融水、南极夏季表层水和普里兹湾中深层水的贡献,通过揭示各来源水体的空间分布,探讨其影响因素及相关物理海洋学过程。

2 样品采集与分析

海水样品采自中国第 22 次南极科学考察航次,于南半球夏季期间(2005 年 12 月至 2006 年 1 月)采集。在普里兹湾及其邻近海域 4 个经向断面上共采集 18 个站位的表层海水,其中在 I 断面(68°E)和 II 断面($70^{\circ}30'\text{E}$)各设置 6 个站,在 III 断面(73°E)设置 5 个站,在 IV 断面设置 1 个站;在埃默里冰架前缘海域采集了 6 个站的表层海水样品,从东往西依次为 IS1,IS2,IS3,IS5,IS9 和 IS11 站(图 1 和表 1)。另外,于中山站附近($69^{\circ}22'\text{S}$, $76^{\circ}23'\text{E}$)采集了大量海冰/冰雪样品(图 1),用于冰融化水中 ^{226}Ra 的测量。

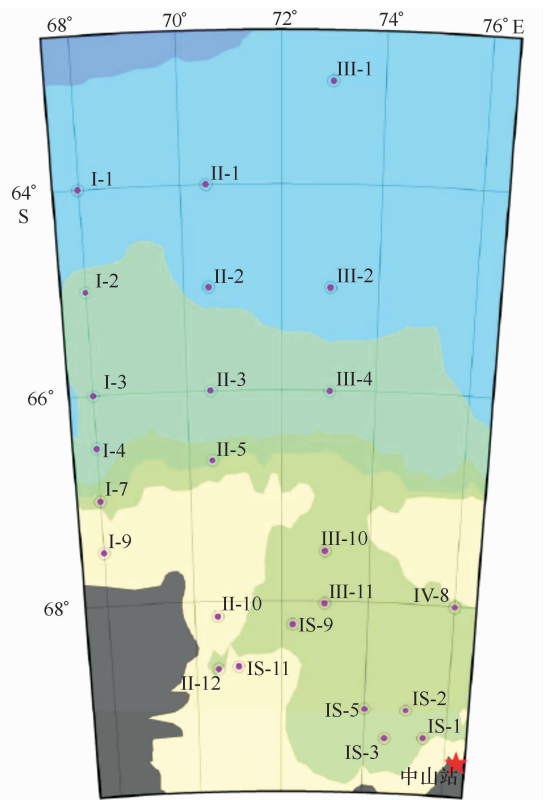


图 1 南极普里兹湾及其邻近海域 ^{226}Ra 采样站位

表 1 普里兹湾及其邻近海域表层水 ^{226}Ra 比活度及由 $\text{S-}^{226}\text{Ra}$ 示踪体系计算出的各端元水体份额

站位	南纬/(°)	东经/(°)	水深/m	温度/℃	盐度	$A(^{226}\text{Ra})/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$f_{\text{a}}(\%)$	$f_{\text{i}}(\%)$	$f_{\text{p}}(\%)$
I-1	64.00	67.98	3250	0.58	33.719	1.95 ± 0.04	65.6	2.2	32.2
I-2	65.00	67.99	3000	0.93	33.845	1.89 ± 0.04	62.8	1.7	35.5
I-3	66.00	68.00	2500	0.92	34.037	1.36 ± 0.03	38.5	0.6	60.9
I-4	66.50	68.00	2800	0.85	34.009	2.09 ± 0.04	71.9	1.3	26.8
I-7	67.00	68.00	1600	0.88	33.964	1.93 ± 0.04	64.6	1.3	34.1
I-9	67.50	68.00	240	-0.89	32.522	1.22 ± 0.03	32.8	5.5	61.6
II-1	64.00	70.51	3500	0.93	33.748	2.00 ± 0.04	67.9	2.1	30.0
II-2	65.00	70.51	3100	1.72	33.956	1.61 ± 0.03	49.9	1.1	49.0
II-3	66.00	70.50	2300	1.11	33.966	1.71 ± 0.04	54.5	1.1	44.4
II-5	66.66	70.50	1911	1.27	33.231	1.40 ± 0.03	40.7	3.3	56.0
II-10	68.14	70.53	364	0.30	33.408	1.71 ± 0.03	54.8	3.0	42.2
II-12	68.63	70.52	477	0.96	33.134	1.16 ± 0.03	29.8	3.4	66.8
III-1	63.00	73.00	3500	0.92	33.908	1.80 ± 0.04	58.7	1.4	39.9
III-2	65.01	73.01	3500	0.72	34.132	1.90 ± 0.04	63.1	0.7	36.2
III-4	66.01	73.03	2300	1.17	34.075	1.46 ± 0.03	43.0	0.6	56.4
III-10	67.53	72.99	611	1.11	31.931	1.74 ± 0.04	57.0	8.0	35.0
III-11	68.02	73.00	664	3.83	33.379	1.59 ± 0.04	49.3	3.0	47.7
IV-8	68.01	76.01	468	2.65	33.113	1.71 ± 0.04	55.0	4.0	41.0
IS-1	69.25	75.45	478	2.59	32.994	1.61 ± 0.04	50.5	4.3	45.2
IS-2	69.00	75.00	855	3.41	33.032	1.99 ± 0.04	67.8	4.5	27.7
IS-3	69.27	74.51	819	-0.37	30.169	1.16 ± 0.03	31.4	13.4	55.2
IS-5	69.00	74.00	686	1.54	31.060	0.92 ± 0.03	19.9	10.2	69.9
IS-9	68.29	71.85	573	-1.23	33.733	1.65 ± 0.04	51.9	1.9	46.2
IS-11	68.61	71.00	540	0.81	33.465	0.96 ± 0.03	20.4	2.2	77.4
范围				-1.23~3.83	30.16~34.13	0.92~2.09	19.9~71.9	0.6~13.4	26.8~77.4
平均值				1.11	33.27	1.61	50.1	3.4	46.5

表层海水样品由“雪龙”号科考船上的表层采水系统采集,采样深度为距海表面约 10 m 深度处。先把大体积海水样品(140 dm³)盛装于 2 个聚氯乙烯桶中,之后通过重力虹吸作用使其流过装填着 14 g Mn-纤维的富集柱以提取海水中的镭。富集过程中海水流速控制在 200~250 cm³/min,以充分富集水样中的镭同位素。富集完成后,将含镭的 Mn-纤维封装于塑料袋中,带回陆上实验室进行后续分析。对于海冰/冰雪样品,让其在室温下自然融化,之后按同样流程进行处理。

^{226}Ra 的活度利用 ^{222}Rn 直接射气法测量^[25]。首先将富集了镭同位素的 Mn-纤维甩干水分后装入特制的扩散管中,抽真空,密封 5~7 d,让子体 ^{222}Rn

逐渐生长出来,随后将 ^{222}Rn 气体送入预先抽成真空的 ZnS 球状闪烁室中,放置 3 h 以确保 ^{222}Rn 子体的生长,最后通过氡钍分析仪(FD-125 型,北京核仪器厂制造)测量其中的活度。

^{226}Ra 比活度由下式计算得出:

$$A(^{226}\text{Ra}) = \frac{k(^{226}\text{Ra})(N_{\text{s}} - N_{\text{b}})}{\alpha V \eta_{\text{c}} \eta_{\text{d}} t},$$

式中, $A(^{226}\text{Ra})$ 为水样中 ^{226}Ra 的比活度(Bq/m³); $k(^{226}\text{Ra})$ 为仪器测量 ^{226}Ra 的装置系数(Bq/cpm); $N_{\text{s}}, N_{\text{b}}$ 分别为相同测量时间下样品和本底测量的计数; α 为 ^{222}Rn 的累积系数; V 为水样体积(m³); η_{c} 为 Mn-纤维对水样 ^{226}Ra 的富集效率; η_{d} 为 Mn-纤维的射气效率; t 为样品及本底的测量时间(min)。

文中所给²²⁶Ra 比活度数据均为 $\pm 1\sigma$ 计数统计误差,并已对本底计数、样品计数和回收率的误差进行了误差传递计算。

3 结果

3.1 温度、盐度

调查期间普里兹湾及其邻近海域的表层水温为 $-1.23\sim 3.83^{\circ}\text{C}$,平均为 1.11°C (见表1)。高温区出现在埃默里冰架东部外缘海域,水温超过 3°C ,从而形成了高纬度海区上层海水温度高于其低纬度区的反常分布(图2)。这种情况在以往对普里兹湾及

其邻近海域的调查中均有发现,例如,在1990—1991年夏季湾顶区表层最高水温为 2.8°C ,而其以北海域的表层水温均比湾顶区的低^[21]。表层水温违反纬度常规分布特征(即海水表层温度一般随纬度的升高而降低)的形成原因,被归因于风场作用下海冰覆盖区域变化所致。在南半球的初春季节,在强大的南极下降风作用下,当研究海域北部及深海洋区仍被海冰覆盖时,在湾顶区已出现开阔的冰间水域,这里的表层水具有更长的时间来吸收太阳辐射,从而使水温升高,进而导致普里兹湾夏季表层水温的上述分布^[21]。

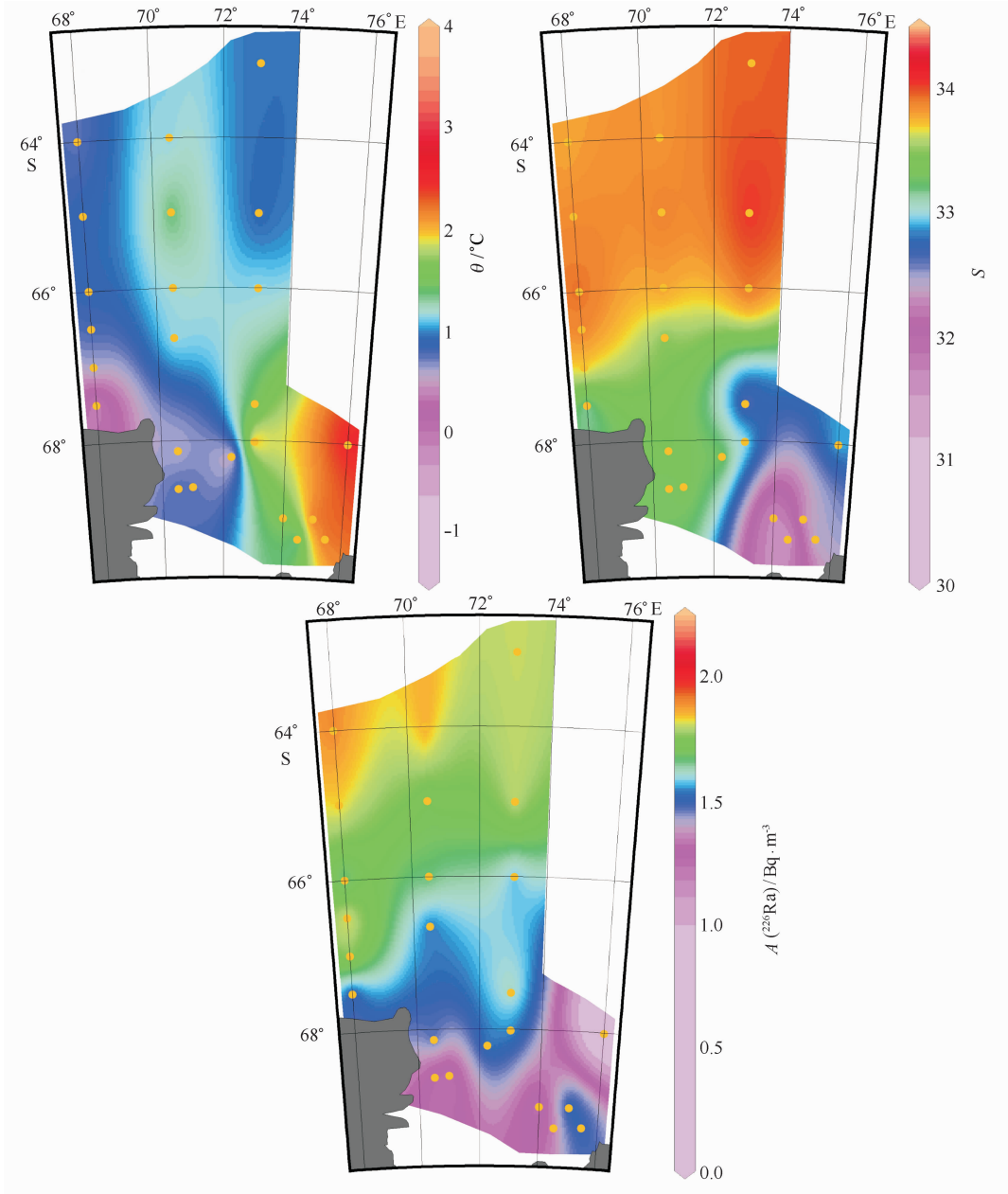


图2 普里兹湾及其邻近海域表层水温度(θ)、盐度(S)和²²⁶Ra 比活度的分布

研究海域表层水盐度变化范围较大,为30.16~34.13(见表1),较大幅度的变化与南极夏季冰川和海冰的融化有关。从图2可以看出,研究海域北部面临开阔的南印度洋洋区,并且在64°S附近海域存在上升流,因此表层水盐度较高,而南部海域受埃默里冰架冰川融化水与海冰融化水等的影响,盐度较低。在前述的埃默里冰架东部外缘海域的高温区,表层水盐度均低于33,其中在IS-3站最低达到30.169,充分反映了冰融水的影响。

3.2 ^{226}Ra

表层水 ^{226}Ra 比活度为0.92~2.09 Bq/m³,平均为1.61 Bq/m³(见表1),该平均值与中国第15次南极科学考察于普里兹湾邻近海域的相应值(1.55 Bq/m³)^[19]相吻合,而且与邻近站位的测值也非常一致,例如,在本研究的II-10站(68.14°S, 70.53°E)表层水 ^{226}Ra 比活度为(1.71±0.03) Bq/m³,在第15次南极科学考察航次的S2-13站(68.47°S, 70.46°E)表层水的测值为(1.77±0.15) Bq/m³;在本研究的III-2站(65.01°S, 73.01°E)表层水 ^{226}Ra 比活度为(1.90±0.04) Bq/m³,在第15次南极科考的S3-4站(65.08°S, 72.95°E)表层水的测值为(1.76±0.16) Bq/m³。相隔6 a时间两个航次之间结果的一致表明本研究所得结果能代表夏季期间普里兹湾及其邻近海域 ^{226}Ra 的含量水平。

位于调查海域北部的深海区(水深大于2 000 m)表层水 ^{226}Ra 比活度平均值为1.78 Bq/m³,最高达到2.09 Bq/m³,明显高于太平洋(1.07 Bq/m³)^[6,9]、大西洋(1.23 Bq/m³)^[11]、北冰洋(1.07 Bq/m³)^[26]等开阔大洋表层水及南海(1.10 Bq/m³)^[27-29]、白令海(0.71 Bq/m³)^[26]、日本海(1.35 Bq/m³)^[30]等边缘深海盆表层水的测值,体现出普里兹湾外海表层水镭的比活度高的特征。

尽管普里兹湾外海表层水 ^{226}Ra 的比活度比其他开阔大洋与边缘海的高,但仍低于对南大洋绕极流所在海域南极表层水(AASW)镭的比活度的报道值。Chung^[13]报道威德尔海南极绕极流附近海域表层水 ^{226}Ra 平均比活度为2.83 Bq/m³; Chung^[14]测得南大洋—印度洋扇区南极表层水 ^{226}Ra 的比活度为2.58 Bq/m³; Hanfland^[16]给出了南大洋—大西洋扇区高分辨率的 ^{226}Ra 比活度分布,发现表层水 ^{226}Ra 比活度从极锋区北部约1.33 Bq/m³向南逐渐增加至南极绕极流所在区域的

2.58 Bq/m³。南极绕极流附近海域南极表层水所具有的 ^{226}Ra 比活度高的特征被归因于富含 ^{226}Ra 的深层水于南极绕极流附近海域上升所致^[12,18]。

普里兹湾及其邻近海域表层水 ^{226}Ra 比活度呈现由湾顶向外海逐渐增加的态势(见图2),这与中低纬度海域通常出现 ^{226}Ra 比活度随离岸距离增加而降低的情况截然不同,反映了极地海域水团构成对 ^{226}Ra 空间分布的影响。在湾顶附近海域,尽管水深较浅,但由于受冰融水影响较显著,导致表层水呈现 Ra 比活度相对小的特征。本研究调查航次期间,实测中山站附近冰融水中的 ^{226}Ra 比活度仅为(0.17±0.03) Bq/m³,冰融水中 ^{226}Ra 比活度小与结冰过程中盐分从冰体剥离至盐卤水的过程有关^[26]。在普里兹湾外海,由于受到南极绕极流附近南极表层水的影响,表层海水 ^{226}Ra 含量较高。已有研究显示,澳大利亚以南海域南极绕极流位于44°~59°S,而且在59°~64°S附近存在上层南极绕极深层水较强烈的涌升^[31],这些携带镭含量高的信号的表层水与湾内海水混合就导致调查海域 ^{226}Ra 比活度由近岸向外海增加的反常分布。

4 讨论

4.1 表层水 ^{226}Ra 的来源分析

普里兹湾及其邻近海域表层水 ^{226}Ra 比活度与盐度的关系显示,所有测值均落在由三种端元水体所围绕的三角形区域内(见图3),证明研究海域的 ^{226}Ra 含量受控于这三种水体互相混合的比例。根据研究海域水团组成与 ^{226}Ra 的地球化学性质,这三种端元水体应分别对应于冰融水、南极夏季表层水与普里兹湾中深层水。(1)冰融水:在夏季期间南极表层水明显受到海冰融化水与冰川融化水的影响,这些冰融淡水具有低盐与 ^{226}Ra 含量小的特征;根据本研究实测普里兹湾附近区域冰融化水 ^{226}Ra 含量及文献报道的冰融水盐度变化^[32-33],可确定冰融水盐度与 ^{226}Ra 的比活度分别为4和0.17 Bq/m³。(2)南极夏季表层水:南极绕极流附近海域中深层海水的涌升导致普里兹湾外海海域具有盐度高、 Ra 含量高的特征;根据水文学研究结果,普里兹湾外海南极夏季表层水的盐度一般为33.5~34.56^[34],考虑到冰融水对盐度的影响,本研究取盐度34.56作为南极夏季表层水的端元特征值,此前的研究显示,南大洋绕极流附近海域表层水的 ^{226}Ra 比活度为2.17~3.17 Bq/m³。

m^3 , 其中对南大洋—印度洋扇区南极表层水的 ^{226}Ra 比活度的报道值为 2.58 Bq/m^3 [14,18], 本研究取 2.58 Bq/m^3 作为南极夏季表层水 ^{226}Ra 的端元特征值。(3)普里兹湾中深层水: 由于普里兹湾中深层水得到沉积物间隙水中 ^{226}Ra 的补充, 其含量通常高于表层; 通过水体的垂向交换, 中深层水体将对表层水体 ^{226}Ra 含量产生影响; 对南大洋—印度洋扇区与大西洋扇区少量站位的研究显示, 整个水柱中 ^{226}Ra 的比活度在垂向上基本呈均匀分布, 只是在近底层水中存在增加的态势 [16—18], 显示出由沉积物间隙水向上覆水体提供的 ^{226}Ra 是海水 ^{226}Ra 的一个来源; 鉴于此, 本研究将普里兹湾中深层水体视作一个整体, 其 ^{226}Ra 含量除受南极表层水、冰融水的影响外, 尚得到沉积物的补充。从沉积物间隙水向上覆水体提供的 ^{226}Ra 的含量特征值由已报道的近底层水体(距海底小于 100 m) ^{226}Ra 比活度(平均为 3.09 Bq/m^3)与中深层水体(100 m 以深至距海底小于 100 m) ^{226}Ra 比活度(2.57 Bq/m^3)之差(0.52 Bq/m^3)确定, 其物理意义表示当中深层水体不存在其他 ^{226}Ra 来源时, 由沉积物间隙水向上覆水体提供的 ^{226}Ra 将使这些水体 ^{226}Ra 比活度维持在 0.52 Bq/m^3 水平。由于本研究将普里兹湾中深层水体视为一个整体, 故其与物理海洋学水团的区分不同, 它实际上包括从水文学上区分出的普里兹湾冬季水、普里兹湾陆架水与普里兹湾底层水等水团 [35—38], 这些水团的盐度变化介于 $34.0 \sim 34.7$, 本研究取普里兹湾冬季水盐度 34.0 作为该水体的特征盐度端元值, 因为该层水体距离表层最近。

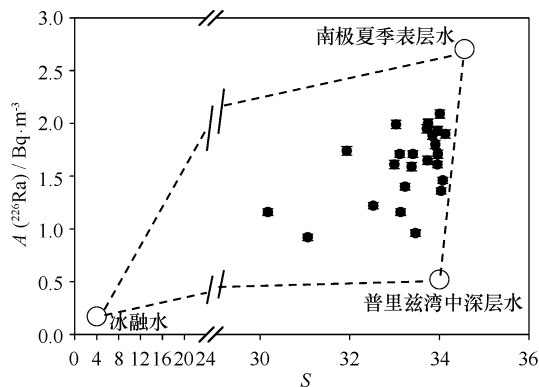


图3 ^{226}Ra 比活度与盐度的关系

4.2 各构成水体的贡献及其分布

根据上述分析, 研究海域水体中的 ^{226}Ra 含量

与盐度完全取决于上述三种水体的混合情况, 结合 $S-A(^{226}\text{Ra})$ 示踪体系, 可确立如下质量平衡关系:

$$f_a + f_i + f_p = 1,$$

$$f_a S_a + f_i S_i + f_p S_p = S,$$

$f_a A_a(^{226}\text{Ra}) + f_i A_i(^{226}\text{Ra}) + f_p A_p(^{226}\text{Ra}) = A(^{226}\text{Ra})$, 式中, f_a , f_i 和 f_p 分别代表南极夏季表层水、冰融水和普里兹湾中深层水的份额; S_a , S_i 和 S_p 分别代表上述三种水体端元的盐度特征值; $A_a(^{226}\text{Ra})$, $A_i(^{226}\text{Ra})$ 和 $A_p(^{226}\text{Ra})$ 分别代表上述三种水体端元的 ^{226}Ra 比活度的特征值。根据4.1节所述各端元水体 ^{226}Ra 比活度与盐度的特征值以及实测样品的 ^{226}Ra 比活度与盐度即可计算出南极夏季表层水、冰融水和普里兹湾中深层水在各表层水中所占的比例。

一般而言, 普里兹湾及其邻近海域表层水大体由 50.1% 的南极夏季表层水、 3.4% 的冰融水和 46.5% 的普里兹湾中深层水混合形成(见表1), 其中南极夏季表层水和普里兹湾中深层水是其水体来源。从空间分布看, 南极夏季表层水的份额从 19.9% 变化至 71.9% (见表1), 呈现由湾外向湾内递减的趋势(见图4)。在普里兹湾外海海域, 在 68°E 和 70.5°E 断面南极夏季表层水的影响强于东部的 73°E 断面, 而在湾顶区域东部海域南极夏季表层水的份额要大于西部海域的。研究海域冰融水的份额介于 $0.6\% \sim 13.4\%$, 平均为 3.4% (见表1), 该平均值与中国第13次南极科学考察(1996年11月至1997年4月)于普里兹湾及其邻近海域利用($\delta\text{D-S}$ 体系计算得到的表层冰融水(海冰融化水与冰川融化水之和)的平均贡献(3.9%) [39] 相吻合。冰融水份额呈现由湾内向湾外递减的态势(见图4), 这一分布模式与海冰和冰架的分布密切相关, 冬季时海冰厚度由南向北逐渐变薄, 夏季在湾顶较早形成的湾顶开阔冰间水域导致湾顶表层海水吸收的净太阳辐射能较多, 海冰融化引起的淡水输入就表现为由南向北降低, 另一方面, 湾内南部接近埃默里冰架, 受冰川融化水的影响亦比较明显。在普里兹湾湾内的东部海域存在冰融水的高值区(见图4), 与该区域的高温水体(见图2)相对应, 反映了此处冰架或海冰融化的加强。普里兹湾中深层水份额的空间分布呈现由湾内向湾外降低的趋势, 并在湾内西部冰架外缘出现高值区(见图4)。普里兹湾中深层水在湾外的比例较低与湾外存在东向的绕极

流有关,该海流导致普里兹湾中深层水较难输送至普里兹湾以北海域,本研究所得到的普里兹湾

中深层水份额与离岸距离的关系证实了这一点(见图 5)。

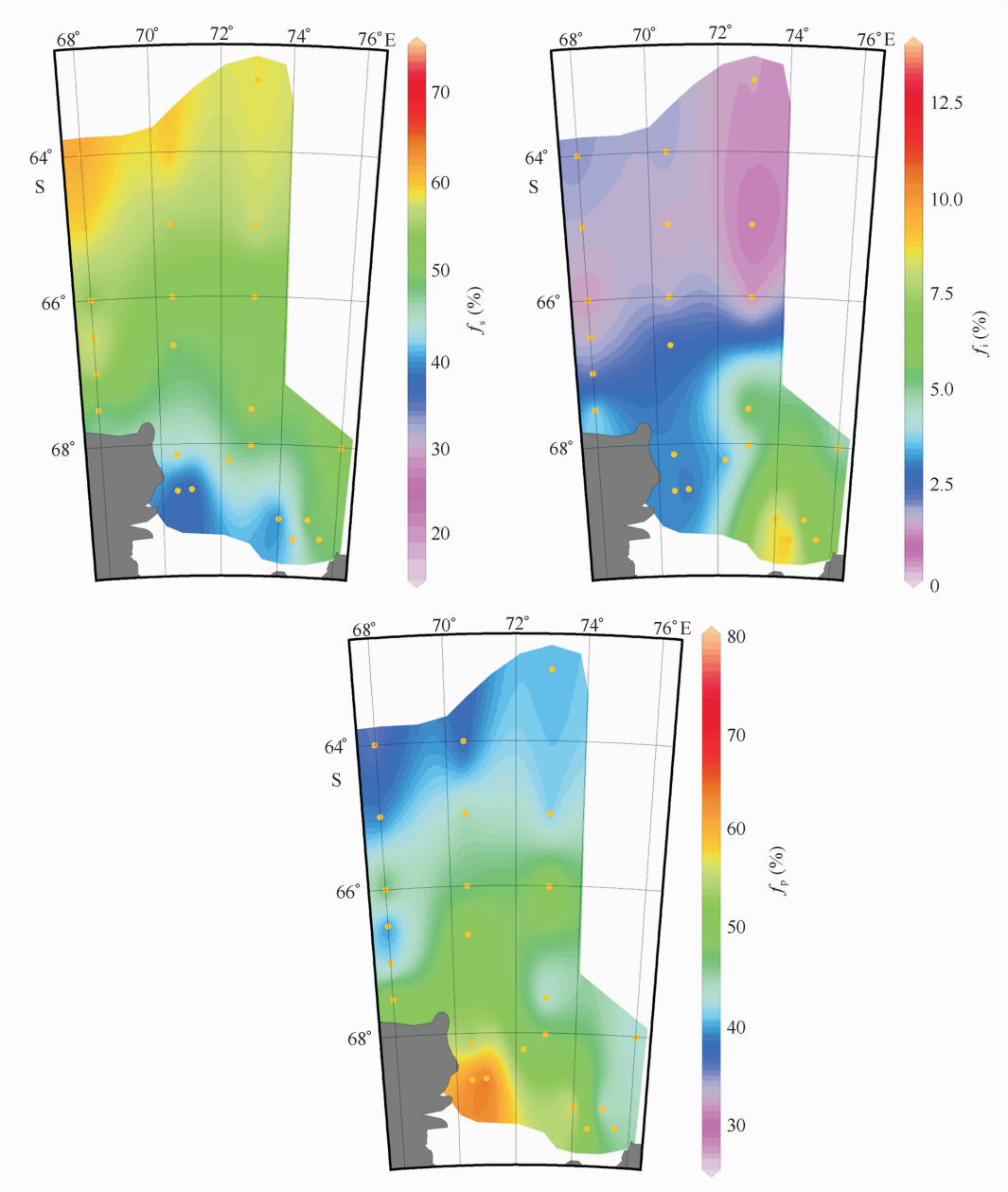


图 4 南极夏季表层水、冰融水和普里兹湾中深层水份额的空间分布

上述冰融水与普里兹湾中深层水份额分别于湾顶东部、西部出现高值分布的特征可支持埃默里冰架前沿海流“东进、西出”的论述^[34,38,40]。Leffanue 等^[40]通过对埃默里冰架前沿锚系及冰架钻孔 CTD 的常年时间系列观测证实,海流主要由埃默里冰架东部流入陆架区,并于西部以冰架水的形式流出。陈红霞等^[38]通过对中国第 19 次南极科学考察(2003 年 3 月)获得的 LADCP 和 CTD 资料的分析

证实埃默里冰架前沿的海流结构整体上为东进、西出,其中入流的源地是普里兹湾东侧的沿岸西向流。埃默里冰架前沿的海流状况可很好地解释本研究观察到的冰融水与普里兹湾中深层水的高值分布特征,当温暖的入流水从普里兹湾东侧进入埃默里冰架时,对冰架与海冰的加温使东侧出现冰融水的高值,当水体进入冰架下方后,在运移过程中水体不断冷却,同时不断得到由沉积物间隙水向上覆水体提

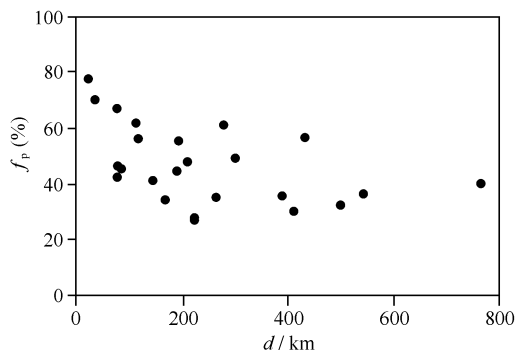


图 5 普里兹湾中深层水份额(f_p)与离岸距离(d)的关系

供的 ^{226}Ra ,因而在普里兹湾西侧流出地出现由沉积物镭支持的中深层水份额的高值(见图 4)。此外,由于在普里兹湾西侧存在冰间湖,它会造成较强的垂向对流,也可能对普里兹湾西侧中深层水份额的高值有所贡献。本研究在普里兹湾西侧冰架水流出区域并未同步观察到冰融水的高值,其原因与本研究定义的普里兹湾中深层水有关,即在埃默里冰架下方融化的冰融水的输出路径为次表层,它已涵盖在所定义的普里兹湾中深层水中。

参考文献:

- [1] KU T L, LUO S. New appraisal of radium-226 as a large-scale oceanic mixing tracer [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C5): 10255—10273.
- [2] CHUNG Y. Radium-barium-silica correlations and a two dimensional radium model for the world ocean [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 49: 309—318.
- [3] KU T L, HUH C A, CHEN P S. Meridional distribution of ^{226}Ra in the eastern Pacific along GEOSECS cruise tracks [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 49: 293—308.
- [4] NOZAKI Y, KASEMSUPAYA V, TSUBOTA H. Mean residence time of the shelf water in the East China and the Yellow Seas determined by $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ measurements [J]. Geophysical Research Letters, 1989, 16: 1297—1300.
- [5] CHEN M, XING N, HUANG Y P, et al. The mean residence time of river water in the Canada Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(5): 777—783.
- [6] YANG J H, CHEN M, QIU Y S, et al. ^{226}Ra evidence for the ecosystem shift over the past 40 years in the North Pacific Subtropical Gyre [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(6): 832—838.
- [7] BROECKER W S, LI Y H, CROMWELL J. Radium-226 and radon-222: concentration in Atlantic and Pacific Oceans [J]. Science, 1967, 158: 1307—1310.
- [8] KU T L, LI Y H, MATHIEU G G, et al. Radium in the Indian-Antarctic Ocean south of Australia [J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75: 5286—5292.
- [9] CHUNG Y, CRAIG H. Ra-226 in the eastern equatorial Pacific Ocean [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 17: 306—318.
- [10] CHUNG Y. Radium-226 and Ra-Ba relationships in Antarctic and Pacific waters [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1974, 23: 125—135.
- [11] BROECKER W S, GODDARD J, SARMIENTO J L. The distribution of ^{226}Ra in the Atlantic Ocean [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 32: 220—235.
- [12] KU T L, LIN M C. ^{226}Ra distribution in the Antarctic Ocean [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 31: 236—248.

5 结论

夏季期间普里兹湾及其邻近海域表层水 ^{226}Ra 比活度介于 $0.92 \sim 2.09 \text{ Bq/m}^3$, 平均为 1.61 Bq/m^3 , 其空间分布呈现由湾顶向外海增加的反常态势, 与近岸受镭含量低的冰融水、外海受镭含量高的南极夏季表层水影响有关。根据 ^{226}Ra 比活度与盐度的关系, 可确定出影响研究海域的三种端元水团: 南极夏季表层水、冰融水和受沉积物镭补充影响的普里兹湾中深层水。由质量平衡模型计算出的各端元水团比例的空间变化显示, 南极夏季表层水的贡献由湾外向湾内逐渐减小, 而冰融水与普里兹湾中深层水的比例由湾内向外海呈减小趋势。冰融水与普里兹湾中深层水的份额分别于埃默里冰架前沿的东西侧出现极大值分布, 这证实了埃默里冰架前海流东进、西出的流动特征。本研究结果同时也说明, ^{226}Ra 是极地海域水团组成与水体运动的良好示踪剂。

感谢中国第 22 次南极科学考察队和“雪龙”号考察船全体船员给予的大力支持!

- [13] CHUNG Y. ^{210}Pb and ^{226}Ra distributions in the circumpolar waters [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, 55: 205—216.
- [14] CHUNG Y. ^{226}Ra in the western Indian Ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 85: 11—27.
- [15] CHUNG Y, APPLEQUIST M D. ^{226}Ra and ^{210}Pb in the Weddell Sea [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 49: 401—410.
- [16] HANFLAND C. Radium-226 and Radium-228 in the Atlantic sector of the Southern Ocean [M]. *Rep Polar Mar Res*, 2002, 431: 1—135.
- [17] CHARETTE M A, GONNEEA M E, MORRIS P, et al. Radium isotopes as tracers of iron sources fueling a Southern Ocean phytoplankton bloom [J]. *Deep-Sea Research II*, 2007, 54: 1989—1998.
- [18] BEEK P, BOURQUIN M, REYSS J L, et al. Radium isotopes to investigate the water mass pathways on the Kerguelen Plateau (Southern Ocean) [J]. *Deep-Sea Research II*, 2008, 55: 622—637.
- [19] 尹明端, 曾文义, 吴世炎, 等. 南极普里兹湾海域铀系同位素的分布 [J]. *极地研究*, 2004, 16(1): 11—21.
- [20] 曾宪章, 曾文义, 尹明端, 等. 示踪物在指示南大洋水团组成和运动路径中的作用 [G]//陈立奇. 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, 2004: 72—86.
- [21] 董兆乾, 蒲书箴, 胡筱敏, 等. 南极普里兹湾及其邻近海域的水团研究 [G]//陈立奇. 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, 2004: 13—25.
- [22] 蒲书箴, 胡筱敏, 董兆乾, 等. 普里兹湾邻近海域的物理海洋学特征和海洋锋面的变化 [G]//陈立奇. 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, 2004: 36—58.
- [23] 乐肯堂, 史久新, 于康玲, 等. 普里兹湾水团和环流时空变化的若干问题 [J]. *海洋科学集刊*, 1998, 40: 43—54.
- [24] 史久新, 赵进平. 中国南大洋水团、环流和海冰研究进展(1995—2002) [J]. *海洋科学进展*, 2002, 20(4): 116—126.
- [25] 谢永臻, 黄奕普, 施文远, 等. 天然水体中 ^{226}Ra , ^{228}Ra 的联合富集与测定 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1994, 33(sup): 86—90.
- [26] 邢娜, 陈敏, 黄奕普, 等. 北冰洋、白令海 ^{226}Ra 的分布及其水文学意义 [J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(5): 430—440.
- [27] 谢永臻, 施文远, 黄奕普, 等. 南海东北部海水中的 ^{226}Ra [G]//台湾海峡及邻近海域海洋科学讨论会论文集编辑委员会. 台湾海峡及邻近海域海洋科学讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 1995: 225—239.
- [28] 谢永臻, 黄奕普, 邱雨生, 等. 南沙海域表层水中 ^{226}Ra 的分布 [G]//中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛海域的同位素海洋化学. 北京: 海洋出版社, 1996: 63—69.
- [29] 黄奕普, 陈性保, 姜德盛, 等. 1994 航次南沙海域 ^{226}Ra 的分布与变化 [G]//中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛海域的同位素海洋化学. 北京: 海洋出版社, 1996: 79—88.
- [30] 西村雅吉, 角皆静男, 乘木新一郎. 海洋化学—化学で海を解く [M]. 东京: 产业图书株式会社, 1993: 1—50.
- [31] 蒲书箴, 胡筱敏, 董兆乾, 等. 普里兹湾附近绕极深层水的底层水及其运动特征 [J]. *海洋学报*, 2002, 24(3): 1—8.
- [32] MACDONALD R W, PATON D W, CARMACK E C, et al. The freshwater budget and under-ice spreading of the Mackenzie River water in the Canadian Beaufort Sea based on salinity and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements in water and ice [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C1): 895—919.
- [33] 陈敏, 黄奕普, 金明明, 等. 加拿大海盆上、下跃层水形成机制的同位素示踪 [J]. *中国科学: D 辑*, 2003, 33(2): 127—138.
- [34] SMITH N. Water masses and circulation in the region of Prydz Bay, Antarctica [J]. *Deep-Sea Research*, 1984, 31(9): 1121—1147.
- [35] 乐肯堂, 史久新, 于康玲. 普里兹湾水团和热盐结构的分析 [J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27(3): 229—236.
- [36] 陈明剑, 侍茂崇, 高郭平. 普里兹湾大陆架外水域水文物理特征 [J]. *青岛海洋大学学报*, 1995(增刊): 235—249.
- [37] 蒲书箴, 董兆乾, 胡筱敏, 等. 普里兹湾海域的夏季上层水及其北向运动 [J]. *极地研究*, 2000, 12(3): 167—168.
- [38] 陈红霞, 潘增弟, 矫玉田, 等. 埃默里冰架前缘水的特性和海流结构 [J]. *极地研究*, 2005, 17(2): 139—148.
- [39] 蔡平河, 黄奕普, 陈敏, 等. 南极普里兹湾海水中冰川融化水和海冰融化水的含量 [J]. *中国科学: D 辑*, 2002, 32(8): 695—704.
- [40] LEFFANUE H, CRAVEN M. Circulation and water masses from current meter and T/S measurements at the Amery ice shelf [R]. SMEDSRUD L H. FRISP Report No 15. Bergen: Bjerknes Centre for Climate Research, 2004: 1—7.

Radium-226 as a tracer for the source and movement of water masses in the Prydz Bay of Antarctica

ZHENG Min-fang¹, CHEN Min^{1, 2}, YANG Jun-hong¹, ZHANG Run¹,
MA Qiang¹, YANG Wei-feng^{1, 2}, QIU Yu-sheng^{1, 2}

(1. *College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China*; 2. *State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

Abstract: Surface waters were collected from the Prydz Bay of Antarctica for measurements of ^{226}Ra activities during the 22nd China's antarctic research expedition (from December 2005 to January 2006). ^{226}Ra in large volume waters was extracted by Mn-fibers and measured by a ^{222}Rn emanation method. Results show that ^{226}Ra activity in the Prydz Bay ranges from 0.92 to 2.09 Bq/m³ with an average of 1.61 Bq/m³. High contents of ^{226}Ra were observed at deep open-ocean stations, which induced an offshore increase of ^{226}Ra activity. This unique distribution pattern in the Prydz Bay was ascribed to the influence of water masses with different ^{226}Ra signals. Based on the relationship between ^{226}Ra activity and salinity, three water masses were identified: (1) the antarctic summer surface water (AASSW) with a characteristics of high salinity and high content of ^{226}Ra ; (2) the ice-melted water (IMW) with a characteristics of low salinity and low content of ^{226}Ra ; and (3) the Prydz Bay deep water (PDW) with a characteristics of high salinity and intermediate content of ^{226}Ra . ^{226}Ra in the Prydz Bay deep water was assumed to be maintained only by the supply from the seabed sediments. The fractions of the above three water masses were estimated by mass balance calculation of salinity and ^{226}Ra activity. Results show that the AASSW fractions decrease from the deep open ocean to inshore, while the IMW and PDW fractions increase. The maximum fractions of the IMW and the PDW occur in the eastern and the western regions along the front of the Amery ice shelf, respectively, testifying the major flow into the shelf occurs at the eastern end and exits from the west.

Key words: Prydz Bay; ^{226}Ra ; water masses