

南极普里兹湾海水中冰川融化水和海冰融化水的含量*

蔡平河 黄奕普 陈 敏 刘广山 邱雨生 陈性保

(厦门大学海洋系, 厦门 361005)

金德秋 周锡煌

(北京大学化学系, 北京 100871)

摘要 根据中国第 13, 14 次南极科学考察普里兹湾的实测的 δD 及盐度, 运用质量平衡方程, 计算得第 13 次南极考察航次(1996 年夏季)普里兹湾海水中冰川(雪)融化水的比例为 0%~3.82%, 海冰融化水的比例为 -3.19%~4.78%. 在第 14 次南极考察航次(1997 年夏季)中, 冰川(雪)融化水和海冰融化水的比例分别为 1.53%~3.98%和 -3.80%~4.52%. 冰川(雪)融化水和海冰融化水的水平分布均凸现绕极深层水的涌升, 而不同深度处的水团图像存在显著的偏转, 这一现象可用 Ekman 深海漂流理论予以圆满的解释. 普里兹湾内冰川(雪)融化水的垂直分布呈均匀分布态势, 原因可能在于冰川(雪)的消融相对于湾内水体的垂直混合是一速率缓慢的过程. 海冰融化水的比例则随深度的增加而降低, 该分布模式显然系海冰的季节性消长造成的.

关键词 南极 普里兹湾 δD 冰川(雪)融化水 海冰融化水

大洋环流源于格陵兰附近的北大西洋, 北大西洋表层水受冷下沉形成北大西洋底层水, 后者流经南大洋时, 汇入南极底层水, 共同驱动着大洋环流. 由于南极底层水蕴含着极地冰川(雪)融化水组分, 极地冷源因此被携带至世界的其它海区, 从而影响了大洋的热收支, 并进一步调控着全球气候. 此外, 南极大陆邻近海域中冰川(雪)融化水比例的确定将为南极冰盖消融速率的研究提出一种全新的思路, 而后者是至今仍困扰着学术界的重大科学问题. 海水中冰川(雪)融化水的比例若得以确定, 结合海水的流量数据, 便可获知南极冰盖的消融速率及其对海平面变动的影响, 进而了解极地冰川对全球变化的响应程度.

确定冰川(雪)融化水及海冰融化水的含量, 仅依赖水文学的常规观测项目(如 CTD)通常难以奏效. 因为高纬度海区的海水, 常常包含 3 种或 3 种以上的组分, 组分的质量平衡方程亦要求提供 3 种或 3 种以上的保守性参数. 除质量和盐度外, 海水的 H, O 同位素组成(即 δD 或 δ^2H , $\delta^{18}O$)也是理想的保守性参数. H, O 是海水水分子的组成元素, 不同的水团常具有特征的 δD , $\delta^{18}O$ 值. 在高纬度海区, 海水通常蕴含海冰和冰川(雪)组分, 而海水、海冰和冰川(雪)的 δD , $\delta^{18}O$ 值不同, 海洋学家常利用这一特点确定海冰、冰川(雪)融化水的含量^[1~5]. 然而, 此项研究

2001-10-18 收稿, 2002-01-26 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49836010)和“九五”国家重大科技专项(编号: 98-927-01-05)资助项目

在我国尚属空白, 国际上的研究则荟集于北冰洋, 而有关南极大陆邻近海域的报道仍极为罕见.

1 样品的采集

普里兹湾(Prydz Bay)是南极大陆外缘面积仅次于威德尔海和罗斯海的第三大海湾, 地处

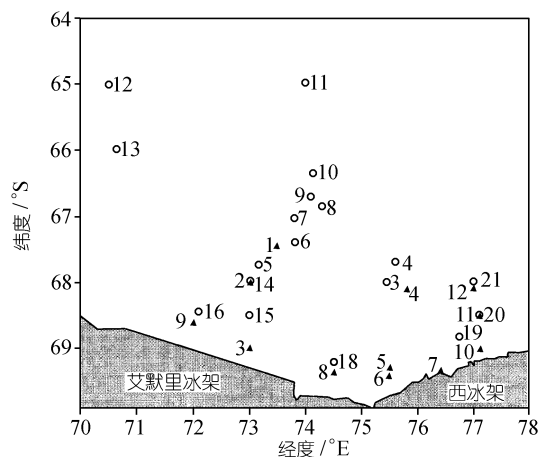


图 1 采样站位位置示意图
○, ▲ 分别代表第 13, 14 航次的站位

南大洋的印度洋扇形区. 湾内水深一般为 500~600 m, 局部水深可达 800 m. 在中国第 13 次(1996.11~1997.4)、第 14 次(1997.11~1998.4)南极科学考察期间, 在“雪龙”号考察船上采得普里兹湾及邻近海域(65°S~69°20'S, 70°E~78°E)30 个分层站的海水样品(采样位置如图 1 所示). 以附于 CTD 系统的 Go-Flo 采水器采集海水样品, 海冰和降雪(或积雪)采集后置于近 0℃的环境下缓慢融化, 即得冰川(雪)融化水和海冰融化水. 海水、冰川(雪)融化水和海冰融化水均以 50 ml 塑料瓶满装、蜡封并倒置保存. 返航后立即将样品送至北京大学化学系同位素质谱实验室进行预处理和 H 同位素的质谱测定.

2 样品中氢同位素的质谱分析

采用锌还原——封管法^[6]将水样转化为 H₂, 以英国 VG SIRA-24 型气体同位素质谱仪测量样品的 δD (δ^2H) 值.

2.1 水样转化

10 μ L 水样和 0.2 g 金属锌粒(英国 BDH 公司, ϕ 0.5~2 mm)于玻璃封管(ϕ 8 $\times$ 100 mm)内, 在 (450 $\pm$ 10)°C 下反应 2 h, 使水样完全转化成 H₂. 金属锌粒用稀硝酸清除表面氧化物后依次用自来水、去离子水、丙酮洗净, 然后真空干燥, 并保存于干燥氮气中. 称取 0.2 g 经处理的锌粒置于用特硬玻璃拉制成的带有厚壁尖细尾端的样品管(ϕ 8 $\times$ 160 mm)内后, 在欲熔封处拉成厚壁细管. 将一批样品管连至真空制样系统, 在优于 0.5 Pa 真空下, 从进样口用微量注射器注入 10 μ L 水样, 用液氮使水样全部冻入反应管, 与此同时用加热带和吹风机加热进样部位, 然后熔封. 一批制好的封管放入 450℃ 下的电炉中加热 2 h 使反应完全. 将封管置于进样器内, 连接至质谱计的进样口, 于 1.3×10^{-1} Pa 真空下折断其尖端, 将 H₂ 送入质谱计测量.

2.2 质谱测量

用英国 VG SIRA-24 型气体同位素质谱仪测量样品的 δD 值, δD 定义为:

$$\delta D(\%) = \left(\frac{R_{3/2\text{样品}}}{R_{3/2\text{参考}}} - 1 \right) \times 1000,$$

式中 $R_{3/2}$ 为质量数 3 与 2 的同位素丰度比.

采用双进样双接收同时测量 $m/e=2, 3$ 的离子流强度, 给出相对于工作参考气体的 δD 值.

在测量中, H_3^+ 对 $m/e=3$ 离子流强度的贡献被自动扣除。

分析中采用国家一级标准物质 GBW 04401 ($\delta D_{VSMOW} = -0.4\text{‰}$)、GBW 04404 ($\delta D_{VSMOW} = -428.3\text{‰}$) 与样品同时转化并进行比对测量, 以给出相对于 VSMOW 的 δD 值。

每个水样均平行两次测定取平均值, 分析精度一般优于 1‰。

3 结果与讨论

3.1 冰川(雪)融化水和海冰融化水含量的确定

表 1 列出样品的采集深度、盐度(S)及 δD 值。海水样品的 δD 值介于 $-6.5\text{‰} \sim 0.5\text{‰}$ 。由于绕极深层水(CDW)是侵入南极大陆边缘海的唯一的水团^[7], 因此理论上南极边缘海的海水系绕极深层水与冰川(降雪)、海冰长期相互作用衍生形成的, 即绕极深层水、冰川(雪)融化水和海冰融化水是构成普里兹湾海水的 3 种组分。依据质量平衡方程, 即可确定各组分的比例:

$$F_{CDW} + F_{MW} + F_{SIM} = 1, \quad (1)$$

$$F_{CDW} \cdot S_{CDW} + F_{MW} \cdot S_{MW} + F_{SIM} \cdot S_{SIM} = S, \quad (2)$$

$$F_{CDW} \cdot \delta D_{CDW} + F_{MW} \cdot \delta D_{MW} + F_{SIM} \cdot \delta D_{SIM} = \delta D. \quad (3)$$

式中 F 代表组分的比例, S 为盐度, δD 代表样品的 δD 值。下标 CDW 代表绕极深层水, MW 为冰川(雪)融化水, SIM 为海冰融化水。实测结果表明, 两次考察的冰川(雪)融化水的 δD 分别为 $(-146.7 \pm 0.4)\text{‰}$ 和 $(-155.1 \pm 0.6)\text{‰}$, 平均为 $(-151.0 \pm 0.4)\text{‰}$ 。在中国第 15 次南极考察期间, 刘广山等^[8]系统采集了普里兹湾附近区域的降雪、积雪以及淡水湖的湖水(即雪融化水)样品, 并测其 δD , 得降雪和积雪的 δD 平均为 -159.6‰ , 湖水的 δD 平均为 -153.7‰ , 与本项研究的实测值相吻合。降雪的盐度通常很低, 可将其近似视为零, 即 $S_{MW} = 0$ 。第 13, 14 航次实测的海冰融化水的 δD 分别为 $(16.7 \pm 0.1)\text{‰}$ 和 $(16.4 \pm 0.5)\text{‰}$, 平均为 $(16.6 \pm 0.3)\text{‰}$ 。盐度 $S_{SIM} = 6.2$ ^[5]。海冰系海水冷凝形成, 在凝析过程中, 由于同位素分馏效应, 富含重同位素的水体优先凝析, 因此海冰的 δD 值高于海水的 δD 值。在平衡态下, 海水凝析过程 H 同位素的分馏系数为 1.0204 ^[9], 即海冰 δD 值理论上应比其下覆海水的 δD 值高 20.4‰ 。如表 1 所示, 调查期间, 普里兹湾表层水的 δD 值平均约为 -4.0‰ , 平衡态下凝析的海冰, 其 δD 值应为 16.4‰ , 与本项研究的实测结果完全吻合。绕极深层水核心的盐度 $S_{CDW} = 34.70$ ^[10], 实测结果表明其 δD 值约为 0.0‰ 。中国第 15 次南极科学考察期间, 曾宪章等¹⁾和刘广山等²⁾分别实测了绕极深层水的 H 同位素组成, 其核心 δD 值亦为 0.0‰ 。

组分的特征 S 和 δD 值一经确定, 带入方程式(1)~(3), 得:

$$F_{CDW} + F_{MW} + F_{SIM} = 1, \quad (4)$$

$$34.70 F_{CDW} + 6.2 F_{SIM} = S, \quad (5)$$

$$-151 F_{MW} + 16.6 F_{SIM} = \delta D. \quad (6)$$

依据上述方程, 可以计算出研究海域内任一水样各组分的比例 F_{CDW} , F_{MW} 及 F_{SIM} , 结果列于表 1。计算结果显示, 海冰融化水的比例既可以是正值, 也可以是负值。例如, 第 14 次南极考察航次的 2 号站 0 m 层, $F_{CDW} = 93.52\%$, $F_{MW} = 2.61\%$, $F_{SIM} = 3.87\%$, 其蕴含的物理意义是, 100 g 海水系由 93.52 g 绕极深层水、2.61 g 冰川(雪)融化水及 3.87 g 海冰融化水混合而成。而对于同一站位的 200 m 层, F_{CDW} , F_{MW} 和 F_{SIM} 分别为 99.59%, 2.43% 和 -2.02% , 意味着 100 g 的海水系

1) 曾宪章, 等. 普里兹湾海水的 ^{18}O , NO 分布特征及海洋学过程的示踪研究, 2002

2) 刘广山, 等. 南极普里兹海域不同水团的 δD 特征, 2002

表 1 南极普里兹湾海水的盐度(S)、 δD 值以及海水中绕极深层水(CDW)、冰川融化水(MW)和海冰融化水(SIM)的比例

测站/位置/采样日期	深度/m	$\delta D \pm \sigma$ ‰	S	$F_{CDW}/\%$	$F_{MW}/\%$	$F_{SIM}/\%$
13-3# 68° 01'S, 75° 27'E 1997-1-10	0	-4.4±0.2	33.725	97.21	2.90	-0.11
	25	-4.8±0.3	34.117	98.61	3.00	-1.61
	50	-4.1±0.5	34.289	99.11	2.53	-1.64
	100	-4.6±0.1	34.420	99.62	2.78	-2.40
	150	-4.3±0.1	34.462	99.73	2.59	-2.32
13-4# 67° 43'S, 75° 38'E 1997-1-10	200	-4.0±0.4	34.479	99.75	2.41	-2.16
	300	-3.6±0.3	34.504	99.78	2.17	-1.95
	450	-4.7±0.1	34.540	100.05	2.80	-2.85
	0	-4.0±0.4	33.438	96.17	2.77	1.06
	25	-3.9±0.2	34.051	98.27	2.50	-0.77
13-5# 67° 44'S, 73° 10'E 1997-1-10	50	-3.8±0.4	34.297	99.10	2.36	-1.46
	100	-4.6±0.1	34.368	99.44	2.80	-2.24
	150	-3.2±0.2	34.436	99.50	1.96	-1.46
	200	-2.6±0.1	34.505	99.66	1.58	-1.25
	300	-2.9±0.4	34.514	99.73	1.76	-1.49
13-6# 67° 02'S, 73° 48'E 1997-1-11	350	-3.4±0.1	34.522	99.82	2.05	-1.87
	0	-3.6±0.4	34.034	98.17	2.33	-0.50
	25	-4.8±0.4	34.205	98.91	2.97	-1.88
	50	-3.9±0.3	34.319	99.19	2.41	-1.59
	100	-2.7±0.1	34.489	99.62	1.65	-1.27
13-7# 67° 02'S, 73° 48'E 1997-1-11	150	-2.9±0.1	34.501	99.68	1.76	-1.45
	200	-3.0±0.2	34.500	99.69	1.82	-1.51
	300	-3.2±0.3	34.512	99.76	1.93	-1.69
	500	-4.2±0.3	34.579	100.12	2.49	-2.61
	0	-3.8±0.1	33.522	96.44	2.62	0.94
13-8# 66° 52'S, 74° 19'E 1997-1-12	25	-4.4±0.2	34.208	98.87	2.74	-1.61
	50	-3.5±0.1	34.348	99.24	2.16	-1.40
	100	-3.2±0.1	34.406	99.40	1.97	-1.37
	200	-4.8±0.1	34.535	100.04	2.86	-2.90
	250	-4.6±0.2	34.506	99.92	2.75	-2.67
13-9# 66° 41'S, 74° 07'E 1997-1-14	500	-4.8±0.5	34.628	100.36	2.83	-3.19
	0	-3.5±0.5	32.562	93.10	2.77	4.13
	25	-4.1±0.6	34.056	98.31	2.61	-0.92
	50	-4.0±0.5	34.157	98.64	2.52	-1.16
	100	-4.0±0.3	34.262	99.00	2.49	-1.49
13-10# 66° 22'S, 74° 09'E 1997-1-14	150	-4.9±0.6	34.340	99.39	2.98	-2.37
	200	-5.2±0.3	34.371	99.53	3.15	-2.68
	300	-4.6±0.2	34.459	99.76	2.77	-2.53
	400	-4.2±0.4	34.538	99.98	2.51	-2.49
	0	-4.2±0.5	33.748	97.26	2.78	-0.04
13-11# 64° 59'S, 73° 58'E 1997-1-15	25	-6.1±0.3	33.957	98.22	3.82	-2.04
	50	-5.5±0.2	34.110	98.67	3.41	-2.09
	100	-4.0±0.2	34.294	99.11	2.47	-1.59
	150	-3.5±0.2	34.331	99.18	2.17	-1.35
	200	-3.8±0.1	34.353	99.29	2.34	-1.63
13-12# 65° 02'S, 70° 30'E 1997-1-16	0	-4.5±0.4	32.847	94.21	3.26	2.53
	25	-4.9±0.2	33.704	97.20	3.20	-0.40
	50	-4.3±0.4	34.033	98.26	2.74	-0.99
	100	-3.8±0.2	34.298	99.10	2.36	-1.46
	150	-4.3±0.2	34.387	99.47	2.62	-2.09
13-13# 66° 52'S, 74° 19'E 1997-1-12	200	-3.4±0.2	34.606	100.11	2.02	-2.13
	300	-2.7±0.4	34.677	100.26	1.58	-1.85
	400	-2.3±0.4	34.692	100.26	1.35	-1.61
	0	-4.9±0.5	33.761	97.40	3.18	-0.58
	25	-4.3±0.4	33.771	97.36	2.83	-0.18
13-14# 65° 02'S, 70° 30'E 1997-1-16	50	-4.7±0.2	34.095	98.52	2.95	-1.47
	100	-4.4±0.6	34.385	99.48	2.68	-2.15
	150	-4.0±0.3	34.452	99.66	2.42	-2.08
	200	-2.9±0.1	34.510	99.72	1.76	-1.47
	300	-2.1±0.3	34.622	100.00	1.25	-1.25
13-15# 66° 52'S, 74° 19'E 1997-1-12	500	-1.6±0.1	34.691	100.17	0.94	-1.11
	1500	-0.2±0.5	34.679	99.95	0.12	-0.08
	2500	0.0±0.1	34.668	99.89	0.01	0.10
	0	-3.5±0.2	33.199	95.29	2.55	2.16
	25	-3.3±0.3	33.737	97.11	2.26	0.63
13-16# 66° 52'S, 74° 19'E 1997-1-12	50	-3.6±0.3	34.088	98.36	2.31	-0.67

续表 1

测站/位置/采样日期	深度/m	$\delta D \pm \sigma / ‰$	S	$F_{CDW} / ‰$	$F_{MW} / ‰$	$F_{SIM} / ‰$	测站/位置/采样日期	深度/m	$\delta D \pm \sigma / ‰$	S	$F_{CDW} / ‰$	$F_{MW} / ‰$	$F_{SIM} / ‰$
13-13#	100	-2.8±0.2	34.333	99.10	1.76	-0.86	13-19#	200	-2.0±0.3	34.448	99.39	1.25	-0.64
	150	-2.7±0.1	34.465	99.54	1.66	-1.19		300	-2.5±0.1	34.472	99.53	1.54	-1.07
	200	-2.5±0.3	34.590	99.94	1.50	-1.44		500	-2.6±0.6	34.500	99.64	1.59	-1.23
	300	-2.9±0.2	34.671	100.27	1.70	-1.97		700	-2.5±0.4	34.516	99.69	1.52	-1.21
1997-1-16	500	-2.1±0.1	34.690	100.23	1.23	-1.46	13-20#	0	-2.3±0.1	33.943	97.69	1.60	0.71
	1500	-1.5±0.2	34.671	100.09	0.89	-0.98		25	-2.5±0.5	34.080	98.19	1.67	0.14
	2300	0.5±0.2	34.667	99.82	0.00	0.18		50	-2.4±0.1	34.297	98.92	1.54	-0.46
	0	-3.8±0.3	33.230	95.43	2.72	1.85		100	-2.6±0.1	34.372	99.20	1.63	-0.83
67° 58'S, 72° 59'E	25	-4.0±0.4	33.941	97.90	2.59	-0.50	1997-1-23	150	-2.7±0.1	34.435	99.43	1.67	-1.10
	50	-3.5±0.5	34.259	98.93	2.19	-1.12		200	-3.2±0.1	34.459	99.58	1.95	-1.53
	100	-2.6±0.4	34.399	99.30	1.62	-0.92		300	-3.4±0.1	34.483	99.69	2.06	-1.75
	150	-2.7±0.3	34.478	99.58	1.65	-1.23		600	-2.8±0.2	34.535	99.79	1.69	-1.48
1997-1-22	200	-2.5±0.1	34.504	99.64	1.53	-1.17	13-21#	0	-4.2±0.1	33.438	96.20	2.88	0.92
	300	-2.2±0.3	34.535	99.71	1.34	-1.05		25	-2.6±0.4	33.918	97.64	1.78	0.57
	550	-2.3±0.1	34.622	100.02	1.37	-1.39		50	-3.2±0.2	34.292	99.01	2.01	-1.01
	0	-3.9±0.3	34.033	98.20	2.50	-0.71		100	-2.7±0.1	34.407	99.34	1.68	-1.01
13-15#	25	-3.7±0.1	34.360	99.30	2.28	-1.58	1997-1-23	150	-3.0±0.1	34.464	99.57	1.83	-1.40
	50	-4.6±0.1	34.418	99.62	2.78	-2.40		390	-3.6±0.2	34.523	99.85	2.16	-2.01
	100	-5.1±0.3	34.456	99.81	3.06	-2.87		0	-3.3±0.2	32.826	93.98	2.56	3.45
	150	-4.9±0.4	34.475	99.85	2.94	-2.79		25	-3.0±0.4	32.942	94.34	2.35	3.31
1997-1-22	200	-4.0±0.4	34.487	99.78	2.41	-2.19	67° 27'S, 73° 32'E	50	-3.0±0.3	34.235	98.78	1.91	-0.69
	300	-4.6±0.1	34.502	99.90	2.75	-2.66		100	-2.6±0.4	34.345	99.11	1.64	-0.75
	500	-4.5±0.1	34.515	99.94	2.69	-2.63		150	-2.9±0.3	34.429	99.44	1.79	-1.22
	0	-3.1±0.1	34.151	98.51	2.00	-0.51		200	-2.5±0.3	34.494	99.61	1.53	-1.14
13-16#	25	-3.0±0.1	34.272	98.91	1.90	-0.81	14-1#	300	-3.5±0.1	34.493	99.73	2.11	-1.85
	50	-4.0±0.1	34.433	99.59	2.43	-2.02		400	-3.5±0.4	34.505	99.77	2.11	-1.89
	100	-3.9±0.1	34.492	99.78	2.35	-2.13		0	-3.3±0.1	32.692	93.52	2.61	3.87
	150	-4.0±0.1	34.499	99.82	2.40	-2.22		25	-4.0±0.4	34.065	98.33	2.55	-0.88
1997-1-22	200	-4.2±0.2	34.504	99.86	2.52	-2.38	68° 00'S, 73° 00'E	50	-4.1±0.1	34.286	99.10	2.54	-1.63
	300	-4.3±0.4	34.516	99.91	2.57	-2.49		100	-3.9±0.5	34.415	99.52	2.37	-1.89
	450	-4.5±0.5	34.532	99.99	2.69	-2.68		150	-3.9±0.1	34.428	99.56	2.37	-1.93
	0	-4.4±0.2	34.131	98.60	2.76	-1.37		200	-4.0±0.2	34.433	99.59	2.43	-2.02
13-18#	25	-4.5±0.2	34.126	98.60	2.82	-1.42	1998-2-1	300	-4.1±0.2	34.411	99.53	2.49	-2.02
	50	-4.3±0.6	34.373	99.42	2.62	-2.05		500	-4.5±0.5	34.462	99.75	2.71	-2.46
	100	-4.2±0.1	34.456	99.70	2.54	-2.23		600	-4.9±0.3	34.527	100.03	2.92	-2.95
	150	-4.7±0.1	34.465	99.79	2.83	-2.62		0	-4.8±0.4	32.162	91.89	3.67	4.44
1997-1-23	200	-4.0±0.2	34.469	99.71	2.41	-2.13	14-3#	25	-4.9±0.3	33.922	97.95	3.13	-1.08
	300	-3.5±0.5	34.485	99.71	2.12	-1.82		50	-5.0±0.2	34.255	99.11	3.07	-2.18
	500	-3.6±0.2	34.502	99.78	2.17	-1.95		100	-4.5±0.3	34.335	99.32	2.75	-2.07
	750	-3.1±0.2	34.520	99.78	1.87	-1.65		150	-4.4±0.1	34.367	99.42	2.68	-2.10
13-19#	0	-3.1±0.5	33.952	97.82	2.07	0.11	1998-1-30	200	-4.8±0.6	34.382	99.52	2.91	-2.43
	25	-1.9±0.2	34.149	98.35	1.30	0.35		300	-5.1±0.1	34.420	99.69	3.07	-2.76
	50	-2.4±0.4	34.338	99.06	1.52	-0.59		500	-5.3±0.6	34.439	99.78	3.18	-2.96
	100	-2.2±0.4	34.398	99.24	1.39	-0.63		750	-4.9±0.5	34.494	99.92	2.93	-2.85
1997-1-23	150	-2.0±0.1	34.453	99.41	1.25	-0.66	14-4#	0	-3.2±0.5	32.502	92.86	2.62	4.53

续表1

测站/位置/采样日期	深度/m	$\delta D \pm \sigma$ ‰	S	$F_{CDW}/\%$	$F_{NW}/\%$	$F_{SIM}/\%$
14-4#	25	-3.1±0.1	32.908	94.24	2.42	3.34
68°04'S, 75°50'E	50	-3.6±0.2	34.171	98.64	2.28	-0.92
	100	-3.5±0.3	34.352	99.25	2.16	-1.41
	150	-3.6±0.1	34.386	99.38	2.21	-1.59
	200	-3.3±0.3	34.402	99.40	2.03	-1.42
1998-2-1	300	-3.7±0.5	34.435	99.56	2.25	-1.81
	440	-3.8±0.4	34.460	99.66	2.30	-1.96
	0	-3.3±0.2	33.727	97.08	2.26	0.66
14-5#	15	-3.5±0.5	33.766	97.24	2.36	0.40
69° 08'S, 75° 30'E	25	-3.8±0.2	34.061	98.29	2.44	-0.72
	50	-3.7±0.3	34.207	98.78	2.33	-1.11
1998-1-23	100	-3.5±0.3	34.366	99.30	2.16	-1.46
	200	-3.6±0.2	34.399	99.42	2.21	-1.63
	580	-4.1±0.1	34.437	99.62	2.48	-2.10
	680	-4.3±0.1	34.453	99.70	2.60	-2.29
14-6#	0	-3.8±0.2	33.151	95.16	2.75	2.09
	15	-4.0±0.1	33.211	95.39	2.84	1.76
69° 21'S, 75° 30'E	25	-3.7±0.1	33.270	95.56	2.65	1.79
	50	-3.9±0.2	33.700	97.06	2.62	0.32
	100	-3.5±0.1	34.233	98.84	2.20	-1.04
1998-2-17	150	-3.9±0.4	34.322	99.20	2.41	-1.60
	220	-4.0±0.4	34.397	99.47	2.44	-1.91
14-7#	0	-5.5±0.3	33.015	94.91	3.79	1.30
	15	-5.8±0.1	32.935	94.67	3.99	1.34
69° 21'S, 76° 25'E	25	-5.8±0.4	32.953	94.74	3.98	1.28
	50	-5.5±0.4	33.746	97.42	3.54	-0.96
	100	-5.5±0.2	34.129	98.74	3.41	-2.14
1998-2-18	150	-5.3±0.4	34.273	99.21	3.24	-2.45
	200	-5.6±0.4	34.325	99.42	3.40	-2.82
	300	-5.6±0.4	34.403	99.69	3.37	-3.06
14-8#	400	-5.9±0.6	34.443	99.87	3.53	-3.40
	550	-5.9±0.3	34.467	99.95	3.53	-3.47
	0	-4.4±0.6	33.730	97.23	2.90	-0.13
	25	-4.3±0.6	33.938	97.93	2.77	-0.70
69° 21'S, 74° 30'E	50	-4.4±0.5	34.184	98.79	2.75	-1.53
	100	-4.4±0.4	34.293	99.16	2.71	-1.87
	150	-4.3±0.6	34.354	99.36	2.63	-1.99
1998-1-30	200	-4.8±0.4	34.368	99.47	2.92	-2.39
	300	-4.4±0.2	34.397	99.52	2.67	-2.19
	500	-4.6±0.1	34.419	99.62	2.78	-2.40
	600	-5.7±0.6	34.432	99.80	3.42	-3.22
14-9#	700	-6.2±0.4	34.453	99.94	3.71	-3.64
	0	-4.1±0.1	33.263	95.59	2.88	1.53
	25	-4.7±0.5	34.109	98.57	2.95	-1.51
	50	-5.5±0.5	34.265	99.20	3.36	-2.57

测站/位置/采样日期	深度/m	$\delta D \pm \sigma$ ‰	S	$F_{CDW}/\%$	$F_{NW}/\%$	$F_{SIM}/\%$
14-9#	100	-5.6±0.2	34.336	99.46	3.39	-2.86
68° 35'S, 72° 00'E	150	-6.0±0.4	34.342	99.53	3.63	-3.16
	200	-6.0±0.1	34.364	99.61	3.62	-3.23
	300	-6.4±0.1	34.401	99.79	3.84	-3.63
	400	-6.5±0.2	34.434	99.91	3.89	-3.80
1998-2-1	0	-3.6±0.1	33.118	95.02	2.64	2.34
	25	-3.2±0.1	33.735	97.09	2.20	0.71
	50	-4.2±0.4	34.051	98.30	2.67	-0.98
68° 58'S, 77° 05'E	100	-4.5±0.2	34.267	99.08	2.78	-1.86
	150	-4.7±0.2	34.304	99.24	2.88	-2.12
	200	-4.5±0.3	34.340	99.34	2.75	-2.09
	300	-4.4±0.1	34.389	99.49	2.68	-2.17
14-11#	500	-4.6±0.2	34.423	99.63	2.78	-2.41
	600	-5.5±0.4	34.438	99.80	3.30	-3.10
	0	-4.3±0.4	33.376	96.00	2.96	1.04
	25	-5.4±0.1	33.412	96.26	3.59	0.15
68° 30'S, 77° 05'E	50	-5.5±0.4	33.995	98.28	3.45	-1.73
	100	-5.8±0.2	34.273	99.27	3.53	-2.80
	150	-5.5±0.2	34.324	99.41	3.34	-2.75
1998-2-1	200	-5.3±0.5	34.355	99.49	3.21	-2.70
	300	-5.0±0.3	34.385	99.65	3.03	-2.58
	450	-5.4±0.4	34.411	99.69	3.25	-2.95
14-12#	0	-4.0±0.2	32.895	94.31	2.95	2.74
	25	-4.3±0.3	33.229	95.49	3.01	1.49
68° 04'S, 77° 00'E	50	-4.2±0.6	34.212	98.86	2.62	-1.48
	100	-4.9±0.4	34.313	99.29	2.99	-2.29
	150	-4.6±0.2	34.356	99.40	2.80	-2.21
	200	-4.5±0.1	34.382	99.48	2.74	-2.22
1998-2-1	300	-4.9±0.6	34.402	99.60	2.96	-2.56
	450	-4.5±0.5	34.466	99.77	2.71	-2.48

99.59 g 绕极深层水和 2.43 g 冰川(雪)融化水混合后凝析出 2.02 g 海冰而得. 由表 1 可以看出, 第 13 航次普里兹湾海水中的冰川(雪)融化水的比例为 0.0%~3.82%, 海冰融化水的比例为 -3.19%~4.78%, 而第 14 航次, 冰川(雪)融化水和海冰融化水的比例分别为 1.53%~3.98%和 -3.80%~4.52%.

3.2 冰川(雪)融化水和海冰融化水的水平分布

依据列于表 1 的冰川(雪)融化水和海冰融化水的比例, 我们绘制出第 13 航次普里兹湾 0, 25, 50, 100, 150, 200, 300 m 层 F_{MW} 和 F_{SIM} 的水平分布. 为了便于阐述, 图 2((a), (b))仅示出具有代表性意义的 50 和 200 m 层的冰川(雪)融化水的水平分布, 图 3((a), (b))则示出 100 和 200 m 层海冰融化水的水平分布. 其余层次的 F_{MW} 和 F_{SIM} 的水平分布模式与之雷同. 如图 2、图 3 所示, 冰川(雪)融化水和海冰融化水的水平分布凸现出两种水团的并存: 一是核心处于(66.5°S, 74°E)、具有低 F_{MW} 、高 F_{SIM} 特性的水团; 另一水团中心约位于(67°S, 74°E), 赋性高 F_{MW} 、低 F_{SIM} . 两种水团相依伴, 形状恰如展翅的蝴蝶. 由 S 及 δD 特性观之, 前一种水团应为绕极深层水涌升所致, 后一种水团位于普里兹湾内, 当属普里兹湾陆架水. 由于普里兹湾是一具海槛结构的海盆, 湾内外水体交换困难, 故湾内水体的停留时间较长, 有利于冰川(雪)融化水和海冰凝析时伴生的盐卤水在湾内的累积. 因此, 普里兹湾陆架水具有高冰川(雪)融化水、高盐卤水

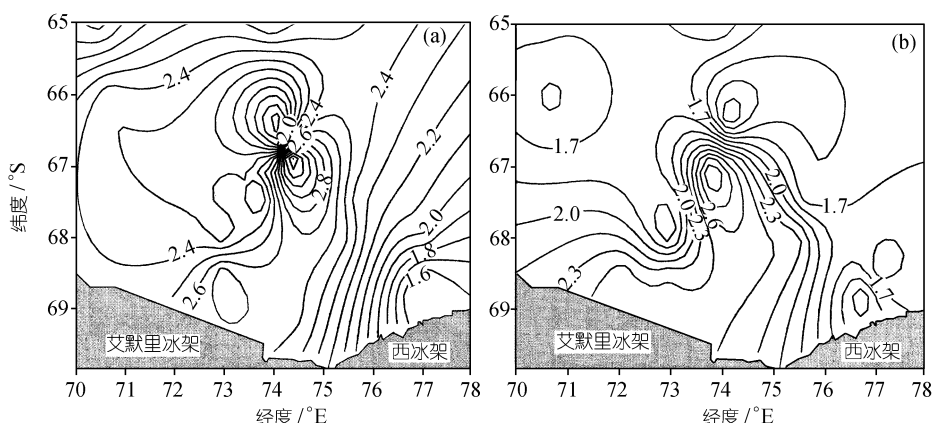


图 2 第 13 航次普里兹湾 50 m (a), 200 m (b) 层冰川(雪)融化水(单位: %)的水平分布

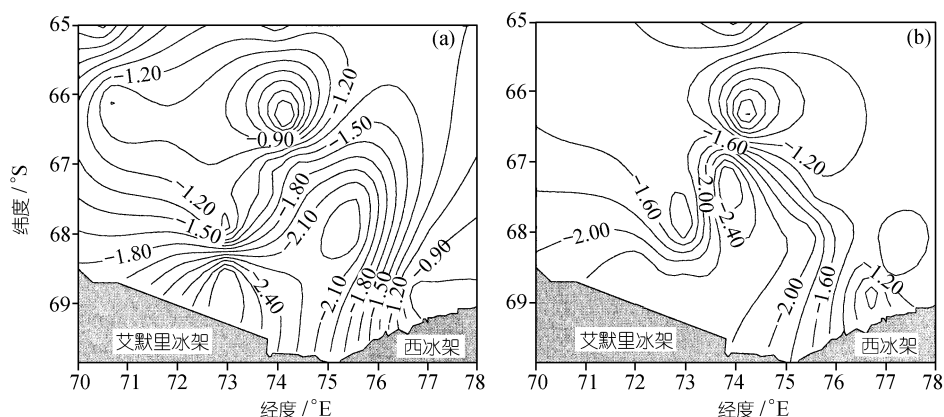


图 3 第 13 航次普里兹湾 100 m (a), 200 m (b) 层海冰融化水(单位: %)的水平分布

(即高 F_{MW} , 低 F_{SIM}) 特性. 对于湾外水团, 情形则相反: 由于绕极深层水的涌升, 湾外水体的更新速率快, 停留时间短, 不利于冰川(雪)融化水和盐卤水的累积. 因此, 湾外的水团秉赋低冰川(雪)融化水、低盐卤水(即低 F_{MW} 、高 F_{SIM}) 特性.

值得注意的是, 图 2(a), 3(a)与图 2(b), 3(b)之间存在显著且饶有深意的差异. 例如, 图 2(a)与图 3(a)显现的两种水团, 其分界轴线呈西南-东北走向, 而图 2(b)与图 3(b)的水团, 分界轴线则呈东南-西北走向, 仿若飞舞的蝴蝶, 翩翩飞行中逆时针偏转了 90° . 这种水团结构图象的偏转可用 Ekman 深海漂流理论予以合理的解释. 由于该区域盛行东风, 在强劲东风的作用下, 海域的表层形成一股方向指向风向左方 45° 的风海流^[11]. 依据 Ekman 深海漂流理论, 随着水深的增加, 风海流的流强逐渐减弱, 流向愈往风向之左方偏转. 因此, 图 2(a), 3(a)所展现的水团图象, 其等值线向西南延伸, 而 100 m 以深的水团图象, 等值线却向东南延伸(如图 2(b), 3(b)所示).

图 4(a, b)摘示出第 14 航次普里兹湾 50 m 层 F_{MW} 和 F_{SIM} 的水平分布, 其余层次的水平分布模式与之雷同. 尽管第 14 航次的测站均位于 67°S 以南, 即普里兹湾内, 但图 4(a)仍清楚地显示随着向普里兹湾的纵深, 水体中冰川融化水的含量逐渐升高. 图 4(a)的另一个显著特征是展示冰川融化水含量的等值线多数与冰架外缘线近乎平行, 且愈接近冰架, 水体中冰川融化水的含量愈高. 这种分布态势表明普里兹湾的海水, 其冰川融化水组分主要来自于冰架的消融. 比较图 4((a), (b))与图 2((a), (b))、图 3((a), (b))可以发现海水组成存在着显著的年际变化. 第 14 航次普里兹湾的海水, 其 F_{MW} , F_{SIM} 均显著高于第 13 航次的相应值. 原因可能在于第 14 航次的调查时间正值 El-Niño 盛行期, 该区域的气温明显高于往年同期. 受气温升高的影响, 冰架及海冰的消融加剧, 因此海水的 F_{MW} , F_{SIM} 值明显升高.

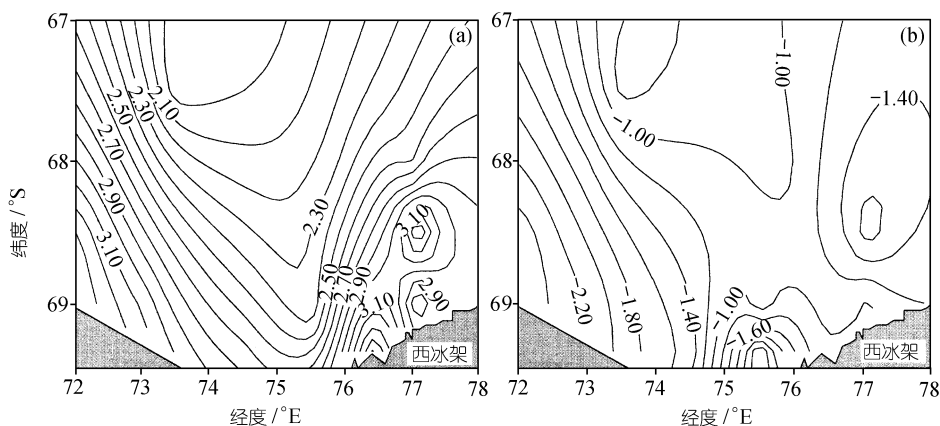


图 4 第 14 航次普里兹湾 50 m 层冰川融化水(a)和海冰融化水(b)(单位: %)的水平分布

3.3 冰川(雪)融化水和海冰融化水的垂直分布

通观表 1, 研究海域内的冰川(雪)融化水存在两种垂直分布模式: 一类模式为冰川(雪)融化水的含量基本呈垂向均匀的分布态势, 属于此类模式的测站集中于普里兹湾内; 另一类模式则显示冰川(雪)融化水比例随深度的增加而降低, 属于此类模式的测站多位于普里兹湾以外的开阔海域, 如第 13 航次的 8~13 号测站. 海冰融化水的垂直分布则不同: 湾内测站, 海冰

融化水的比例随深度的增加而降低; 湾外开阔海域的测站, 随深度的增加, 海冰融化水的分布呈先降后升的态势. 图 5(a), (b) 分别表示具有代表性的第 14 航次湾内 2 号站以及第 13 航次湾外 12 号测站的冰川(雪)融化水及海冰融化水的垂直分布图象. 促成湾内冰川(雪)融化水垂向均匀的分布模式的原因可能在于普里兹湾是一具海槛结构的海盆, 水体的停留时间较长. 冬季海冰凝析时, 高盐高密度盐卤水的伴生及沉降加剧了湾内水体的垂直混合, 导致该海域的水体具有较快的垂直混合速率. 在此背景下, 如果冰川(雪)的消融相对于水体的垂直混合是一个速率较慢的过程, 则必然造成冰川(雪)融化水的垂向均匀的分布模式(如图 5(a)所示). 对于湾以北开阔海域的测站, 随着深度的增加, 水体愈来愈接近绕极深层水的核心, 此时, 冰川(雪)融化水和海冰融化水的比例均近乎零. 因此, 冰川(雪)融化水的比例随深度的增加而降低(如图 5(b)所示). 位于湾内的测站, 海冰融化水随深度增加而降低, 这种分布模式与海冰的季节性消长有关. 夏季, 太阳辐照增强, 海冰逐渐消融, 形成的海冰融化水盐度较低、密度较小, 因而主要滞留于表层水中. 表层水以深, 海冰融化水的比例势必逐渐降低; 冬季, 海冰凝析, 附生的盐卤水因禀赋高盐、高密度特性而下沉, 后逐渐累积于湾底. 这一过程周而复始、年复一年, 结果导致盐卤水的比例随深度的增加而升高(盐卤水的比例越高, 即 F_{SIM} 值愈负), 净效应亦为海冰融化水随深度的增加而降低. 夏季海冰消融及冬季盐卤水下沉的叠加效应便促成了湾内测站海冰融化水的深度分布模式(如图 5(a)所示). 对于湾以北开阔海域的测站, 次表层以浅海冰融化水的深度分布模式与湾内相一致, 即深度增加, F_{SIM} 值愈负. 但随深度的进一步增加, 水体愈来愈接近绕极深层水的核心, 此时, F_{SIM} 趋于 0. 因此, 随深度的增加, 湾外测站海冰融化水的分布呈先降后升的模式(如图 5(b)所示).

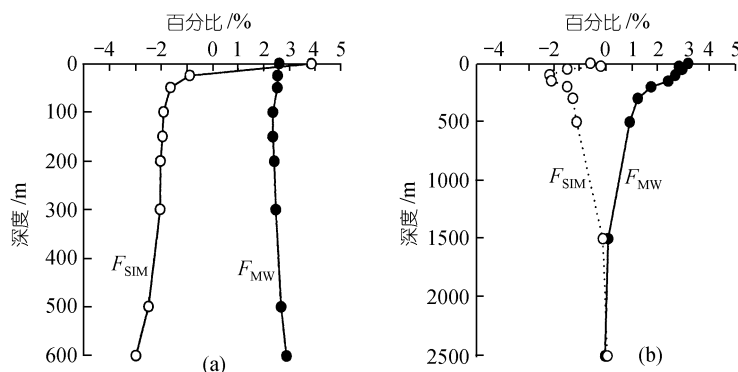


图 5 普里兹湾及邻近海域冰川(雪)融化水及海冰融化水垂直分布之典型模式

4 结论

利用实测的 δD 及盐度, 运用质量平衡方程计算得中国第 13 次南极科学考察期间, 普里兹湾海水中冰川(雪)融化水和海冰融化水的比例分别为 $0\% \sim 3.82\%$, $-3.19\% \sim 4.78\%$, 而第 14 航次, 二者分别为 $1.53\% \sim 3.98\%$, $-3.80\% \sim 4.52\%$. 计算结果的误差直接取决于 δD 及盐度的分析精度. 由于盐度的分析精度一般优于 0.001% , 因而 δD 的分析精度是影响结果误差的决定性因素. 从表 1 可以看出, δD 的相对标准偏差一般小于 $\pm 10\%$, 由此计算出的冰川(雪)融化水和海冰融化水的比例的相对误差也应在 $\pm 10\%$ 之内.

冰川(雪)融化水和海冰融化水的水平分布凸现了相依伴的两种水团, 构成状如蝴蝶的水文结构. 位于湾以北开阔海域的水团, 系统绕极深层水涌升所致, 具有低冰川(雪)融化水、高海冰融化水比例的特征. 湾内水团系普里兹陆架水, 具有高冰川(雪)融化水、低海冰融化水比例的特征. 两种水团特性之差异主要归因于水体停留时间的不同.

不同深度处的冰川(雪)融化水和海冰融化水的水平分布图象存在显著的差异, 这一现象可用 Ekman 深海漂流理论予以合理的解释.

普里兹湾内的冰川融化水呈垂向均匀的分布态势, 这是因为湾内水体停留时间长, 而冰川(雪)的消融相对于湾内水体的垂直混合是一速率缓慢的过程. 海冰融化水则随深度的增加而降低, 缘于夏季海冰消融和冬季盐卤水下沉的叠加效应. 湾外开阔海域的测站, 其冰川融化水和海冰融化水的分布与湾内测站有所不同, 原因在于水深增至一定深度, 必将触及绕极深层水的核心, 此时 F_{MW} , F_{SIM} 均趋于零.

本项研究的结果对南极冰盖物质平衡的研究具有重要的启迪作用. 因为依据本文所计算出的海水中冰川融化水的含量, 若能结合普里兹湾与开阔大洋的水交换速率的数据, 即可推算出该区域内冰架的消融速率. 推而广之, 如果将该方法应用于南极大陆的所有边缘海中, 便可以估算出南极冰盖的消融速率, 为南极冰盖物质平衡的研究提供一项不可或缺的数据.

致谢 矫玉田先生为本项研究提供 CTD 资料, 傅子琅教授对本文的修改提出了宝贵的意见, 作者一并表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 1 Bedard P C, Hillaire-Marcel, Page P. ^{18}O modeling of freshwater in Baffin Bay and Canadian coastal waters. *Nature*, 1981, 293: 287~289
- 2 Fairbanks R G. The origin of continental shelf and slope water in the New York Bight and Gulf of Maine: Evidence from $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ ratio measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 5796~5808
- 3 Kipphut G W. Glacial meltwater input to the Alaska Coastal Current: Evidence From Oxygen isotope measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 5177~5181
- 4 Schlosser R, Bayer R, Foldrik A, et al. ^{18}O and helium as tracers of ice shelf water and water/ice interaction in the Weddell Sea. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 3253~3264
- 5 Macdonald R W, Raton D W, Carmack E C. The freshwater budget and under-ice spreading of Mackenzie River water in the Canadian Beaufort Sea based on salinity and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurement in water and ice. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 895~919
- 6 金德秋, 张忠起. 锌还原——封管法用于微量水中氢同位素的质谱分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 1988, 24(6): 665~671
- 7 Frew R D, Heywood K J, Dennis P F. Oxygen isotope study of water mass in the Princess Elizabeth Trough Antarctica. *Marine Chemistry*, 1995, 49(2-3): 141~153
- 8 刘广山, 黄奕普, 金德秋, 等. 南极雪的氢氧同位素组成. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2001, 40(3): 664~668
- 9 Lenmann M, Siegenthaler U. Equilibrium Oxygen- and Hydrogen-isotope fractionation between ice and water. *Journal of Glaciology*, 1991, 37: 23~26
- 10 Smith N R, Dong Z, Kerry K R, et al. Water masses and circulation in the region of Prydz Bay Antarctica. *Deep-Sea Research*, 1984, 31: 1121~1147
- 11 Middleton J H, Humphries S E. Thermohaline structure and mixing in the region of Prydz Bay, Antarctica. *Deep-Sea Research*, 1989, 36: 1255~1266