

潘红,陈敏,童金炉,等. 2003—2012 年间白令海峡断面淡水构成的时空变化[J]. 海洋学报,2015,37(11): 135—146, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.013

Pan Hong, Chen Min, Tong Jinlu, et al. Spatial and temporal variations of freshwater components at a transect near the Bering Strait during 2003—2012[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 135—146, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.013

2003—2012 年间白令海峡断面淡水构成的时空变化

潘红¹, 陈敏^{1,2*}, 童金炉¹, 邱雨生^{1,2}, 郑敏芳¹

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

摘要: 通过对 2003—2012 年间白令海峡 64.3°N 断面海水氧同位素组成的分析, 应用海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和盐度的质量平衡关系区分出淡水中河水和海冰融化水组分的贡献, 探讨白令海峡淡水组成的分布特征及其年际变化。研究表明, 断面东侧阿拉斯加沿岸水影响区呈现低 $\delta^{18}\text{O}$ 值、低盐、高温、高河水组分的特征, 西侧阿拉德尔水具有高 $\delta^{18}\text{O}$ 值、高盐、低海冰融化水的特征, 中部白令陆架水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、盐度和淡水组成则居于上述二者之间。阿拉斯加沿岸水影响区河水组分的份额约为阿拉德尔水和白令陆架水的 2 倍, 并呈现出 2010 年 > 2012 年 > 2003 年 > 2008 年的时间变化规律, 受控于育空河入海径流量的时间变化。白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区的海冰融化水份额较为接近, 均比阿拉德尔水影响区的海冰融化水份额高约 45%。海冰融化水的年际变化表现出 2003 年 > 2008 年 \approx 2012 年 > 2010 年的规律, 受控于白令海海冰的年际变动。从断面淡水构成看, 通过白令海峡的淡水平均由 46% 的河水和 54% 的海冰融化水构成, 且阿拉德尔水、白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区河水组分与海冰融化水组分的比值自 2003 年至 2012 年间呈增加趋势, 证明太平洋入流中淡水构成的变化对北冰洋海冰的融化也起着一定的作用。

关键词: 白令海峡; 淡水; 海冰融化水; 河水; 时间变化; ^{18}O

中图分类号: P722.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)11-0135-12

1 引言

白令海峡位于西伯利亚和阿拉斯加之间, 是太平洋与北冰洋连接的唯一通道, 也是太平洋和北冰洋海水交换的必经之地。太平洋入流经过狭窄的白令海峡后直接进入楚科奇海, 并输送至加拿大海盆等北冰洋中心区域^[1-2]。由于太平洋水体的密度小于大西洋水, 进入北冰洋的太平洋水主要影响水深较浅的楚

科奇陆架区和北冰洋海盆区的上层水体, 是北冰洋上跃层形成的关键因素, 对北冰洋海冰的融化、北冰洋的海—冰—气相互作用, 甚至北大西洋深层水的形成均有重要影响^[3-11]。与此同时, 由太平洋入流输送进入北冰洋的营养组分和污染物质等, 对北冰洋生态系统也会产生明显影响^[12-15]。

太平洋入流通过白令海峡时, 水团自西向东依次出现阿拉德尔水 (Anadyr Water, AW)、白令陆架水

收稿日期: 2015-05-01; 修订日期: 2015-06-19。

基金项目: 南北极环境综合考察与评估专项 (CHINARE2015-03-04-03, CHINARE2015-04-03-05); 国家自然科学基金杰出青年基金项目 (41125020); 海洋公益性行业科研专项 (2011105022-4)。

作者简介: 潘红 (1982—), 女, 山东省青岛市人, 博士生, 从事同位素海洋化学研究。E-mail: hongpan@stu.xmu.edu.cn

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

(Bering Shelf Water, BSW) 和阿拉斯加沿岸水 (Alaska Coastal Water, ACW)^[16-18]。阿拉德尔水具有季节性低温高盐的特征, 盐度一般高于 32.5, 主要位于白令海陆架圣劳伦斯岛西侧^[12, 17, 19]。白令陆架水是位于圣劳伦斯岛南部陆架区的当地水团, 由白令陆坡流和海冰融化水、河水等淡水组分混合形成, 白令陆架水的盐度比阿拉斯加沿岸水高, 但比阿拉德尔水低, 通常介于 31.8~32.5 之间^[17, 20]。阿拉斯加沿岸水通常沿着阿拉斯加沿岸由南向北运动, 由于受到育空河等河流输送的河水影响, 呈现出高温低盐 ($S < 31.8$) 的特征^[17, 20]。

Woodgate 和 Aagaard^[1] 利用 1990—2004 年间于白令海峡获得的水体流速观测数据, 计算出通过白令海峡的太平洋入流的流量平均为 $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 其中最大流量出现在夏季。与大西洋水相比, 太平洋水的盐度较低, 因而太平洋入流是北冰洋淡水的来源之一。已有估计显示, 通过太平洋入流输送进入北冰洋的淡水量 ($1\ 670 \text{ km}^3/\text{a}$) 约占北冰洋淡水输入总量的一半^[3, 21]。白令海陆架区是太平洋入流的源地, 其夏季淡水组分受到河水和海冰融化水的共同影响。影响白令海的河水组分主要来自 3 条河流, 即起源于阿拉斯加中部的库斯科科温河 (Kuskokwim River) 和育空河 (Yukon River), 以及来自西伯利亚西部的阿拉德尔河 (Anadyr River)^[1], 其中育空河输送的河水贡献最大, 每年约有 208 km^3 的育空河河水输送进入白令海陆架区^[22], 并通过阿拉斯加沿岸流输送至圣劳伦斯岛北部及更远区域^[23]。

尽管此前对太平洋入流通过白令海峡向北冰洋输送的淡水通量有一定的了解, 但对于其淡水来源构成仍知之甚少。Cooper 等^[12] 通过分析 1990—1993 年夏季白令海和楚科奇海海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布, 发现高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的阿拉德尔水在白令海峡附近海域会与低 $\delta^{18}\text{O}$ 的河水混合, 之后再经过白令海峡输入至楚科奇陆架。Woodgate 和 Aagaard^[1] 在白令海峡的观测也显示, 太平洋入流的海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现出明显的季节变化和空间变化, 反映出淡水来源构成的变化。对于北极和亚北极海域, 河水组分的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比海水和海冰融化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低得多^[5, 24], 因而借助海水 $\delta^{18}\text{O}$ 和盐度的质量平衡, 可以很好地定量水体中河水和海冰融化水的贡献^[5, 11, 24-28], 从而揭示白令海峡淡水来源构成的时空变化, 掌握太平洋入流淡水组分的变化规律及影响因素。本研究利用中国第 2~5 次北极科学考察在白令海峡相邻断面获得的海水 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,

定量海水中河水组分和海冰融化水组分的贡献, 揭示不同来源淡水组分在白令海峡的分布特征, 探讨白令海峡河水组分和海冰融化水组分的年际变化及其调控因素。

2 方法

2.1 样品采集

中国第 2~5 次北极科学考察期间, 均在白令海峡 64.3°N 附近海域布设了东西向观测断面, 该断面西至 171.5°W , 东至 167°W , 较好地覆盖了太平洋入流进入白令海峡的主要区域 (图 1)。与此同时, 4 个航次的海水样品均采集于采样年份夏季的 7 月 19—29 日之间, 这为对比不同年份白令海峡的淡水组成提供了可能。

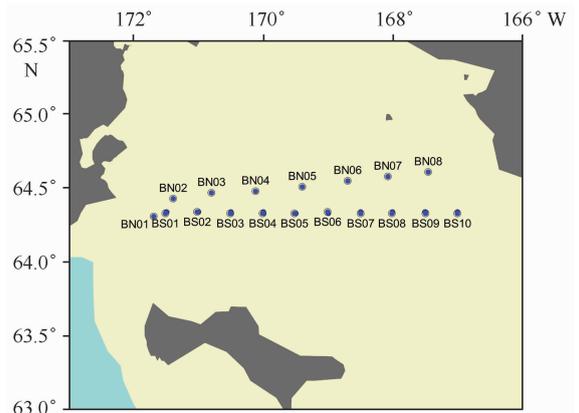


图 1 2003—2012 年间白令海峡断面海水氧同位素研究的采样站位

Fig. 1 Sampling locations for seawater oxygen isotopes in the Bering Strait during 2003 to 2012

中国第 2 次北极科学考察期间, 于 2003 年 7 月 28—29 日采集了 BS 断面自西向东依次为 BS01、BS02、BS03、BS04、BS05、BS06、BS07、BS08、BS09 和 BS10 站共 10 个站的海水样品 (图 1), 各站位采集了由表及底 3~4 层的样品, 共获得海水样品 41 份, 用于海水氧同位素组成的分析。中国第 3 次北极考察期间, 于 2008 年 7 月 27 日在该断面采集了 BS01、BS03、BS04、BS05、BS07、BS09 站共 6 个站位不同深度的海水样品 (图 1), 共获得 28 份水样用于海水氧同位素组成的分析。在中国第 4 次北极科学考察航次期间, 于 2010 年 7 月 19 日采集了该断面 BS01、BS02、BS03、BS04、BS05、BS06、BS07、BS08、BS09 和 BS10 站共 10 个站位不同深度的海水样品, 获得了 43 份水样用于海水氧同位素组成分析。中国第 5 次北极科学

考察尽管设置的断面稍有不同,但其中的 BN 断面与此前中国第 2、3、4 次北极科学考察的 BS 断面十分接近,故于 2012 年 7 月 26—27 日在 BN 断面采集了自西向东依次为 BN01、BN02、BN03、BN04、BN05、BN06、BN07 和 BN08 站共 8 个站位的样品(图 1),共获得 32 份不同水深的海水样品用于海水氧同位素分析。

水样由 CTD-Rosette 采水器自不同深度采集,至甲板后马上转入 50 cm³ 聚乙烯塑料瓶中,并用封口膜气密保存,带回实验室进行海水氧同位素组成的分析。温度、盐度由 CTD 现场观测获得,其中中国第 2 次北极科学考察采用的观测仪器是 Mark-III,温度测量精度为 0.003°C,电导率测量精度为 0.000 3 s/m;其他航次采用的观测仪器为 Sea-Bird SBE 911plus 型,温度测量精度为 0.001°C,电导率测量精度为 0.000 3 s/m。

2.2 海水氧同位素组成分析

采用恒温下(25°C)CO₂-H₂O 平衡法进行海水氧同位素组成的测定^[27,29]。海水¹⁸O 丰度利用 Finnigan Delta^{plus} XP 稳定同位素质谱仪测得,并相对于 IAEA VSMOW 标准给出 δ¹⁸O 值:

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{样品}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] \times 1000, \quad (1)$$

本研究海水 δ¹⁸O 值的测量精度为 1σ=0.02‰。

2.3 河水组分和海冰融化水组分的计算

夏季白令陆架水体可视为冬季白令陆架水、河水(包括陆地径流和降雨)和海冰融化水混合形成。Danielson 等^[19]利用锚系 Sea-Bird 温度-电导率测量仪实测了白令陆架和圣劳伦斯岛冰间湖冬季海水的温度和盐度,盐度变化范围介于 31.53~34.51 之间,平均为 32.60。显然,白令陆架冬季可形成盐度高达 34.51 的水体,该盐度值可作为冬季白令陆架海水的特征值。采用 Cooper 等^[12]类似的方法,由本研究 4 个航次获得的海水 δ¹⁸O 值与盐度的相关关系:δ¹⁸O (‰)=0.271·S-9.411(图 2),可计算出冬季白令陆架水 δ¹⁸O 的特征值为-0.06‰。白令海北部陆架的河水组分主要受到育空河输入的影响,Östlund 和 Hut^[24]根据 60°N 以北区域降雨和育空河河水的 δ¹⁸O 实测值,通过加权平均得到河水组分的 δ¹⁸O 值为-21‰。Cooper 等^[12]建立的白令陆架海水 δ¹⁸O 值与盐度的关系方程也可推断出输入白令海陆架河水组分的 δ¹⁸O 特征值为-21.1‰。因此,本研究将研究区域河水组分的盐度和 δ¹⁸O 特征值分别确定为 0

和-21%。白令海北部陆架区为季节性海冰覆盖区域,季节性海冰的盐度变化(5<S<12)通常比多年海冰大,在许多研究中一般以 S=6 作为季节性海冰的特征盐度值^[12,25]。在海冰形成与融化过程中,不同质量数的氧原子会产生同位素分馏。Macdonald 等^[30]实测得北极海冰形成过程的氧同位素分馏系数为(2.57±0.1)‰,与实验室平衡条件下测得的氧同位素分馏系数(2.9‰)十分接近。考虑到冬季白令海峡整个水体大多为海冰覆盖,故本研究以实测获得的海水 δ¹⁸O 平均值(-0.7‰)与氧同位素分馏值(2.6‰)之和作为海冰 δ¹⁸O 的特征值(1.9‰)。这种处理方式也与此前许多研究所采纳的方法类似^[5,30-32]。

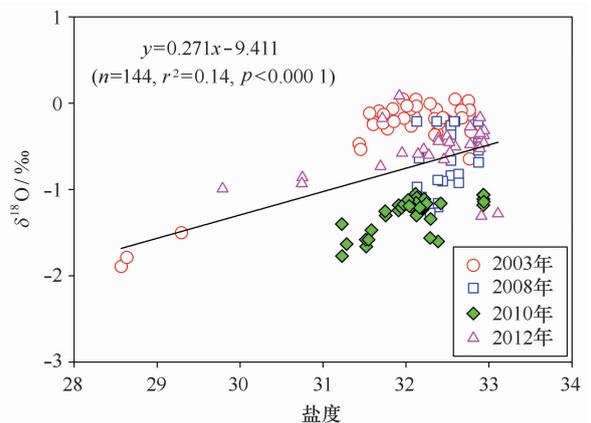


图 2 白令海峡海水 δ¹⁸O 值与盐度的关系

Fig. 2 Relationship between seawater δ¹⁸O and salinity in the Bering Strait

基于上述结果,冬季白令陆架水、河水和海冰融化水 3 个端元的盐度和 δ¹⁸O 特征值见表 1。由于海水的盐度、δ¹⁸O 值是保守性参数,根据质量守恒规律,当来源不同的水体进行混合时,混合所形成水体的盐度和 δ¹⁸O 值将等于各来源水体盐度和 δ¹⁸O 值的质量比例加权值^[4,12,16,24-28,30-32]。研究海域海水是由冬季白令陆架水、河水(包括陆地径流和降雨)和海冰融化水混合形成,因而根据下面的盐度和海水 δ¹⁸O 值的质量平衡方程,即可计算出海水样品中冬季白令陆架水、河水和海冰融化水的贡献:

$$f_{\text{wBSW}} + f_{\text{RW}} + f_{\text{SIM}} = 100\%, \quad (2)$$

$$f_{\text{wBSW}} \cdot S_{\text{wBSW}} + f_{\text{RW}} \cdot S_{\text{RW}} + f_{\text{SIM}} \cdot S_{\text{SIM}} = S_{\text{obs}}, \quad (3)$$

$$f_{\text{wBSW}} \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{wBSW}} + f_{\text{RW}} \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{RW}} + f_{\text{SIM}} \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{SIM}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{obs}}, \quad (4)$$

式(2)~(4)中, f 、 S 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别表示份额、盐度和

$\delta^{18}\text{O}$ 值;下标 wBSW、RW 和 SIM 分别代表冬季白令海水、河水和海冰融化水; S_{obs} 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{obs}}$ 分别代表水样的盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 观测值。 f_{SIM} 的计算值可正可负,正值表示海冰的净融化,负值表示海冰的净形成。研究中为了表征每个站位水柱中河水或海冰融化水的平均份额,将各深度层次计算出的河水和海冰融化水份额对样品深度进行梯形积分,获得各站位河水和海冰融化水的积分高度,进而将积分高度除以积分深度,得到每个站位河水或海冰融化水的平均份额。

由式(2)~(4)计算出的河水和海冰融化水的份额会受到所取盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值的影响,其中冬季白令陆架水 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值、河水 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值、海冰融化水盐度端元值和海冰融化水 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值的不确定度较大,故有必要对其可能的影响进行灵敏度分析。在保持其他端元值不变的情况下,逐一调整上述端元值为所采纳数值的 $\pm 30\%$,通过对比所计算出的河水和海冰融化水份额的变化幅度,来考察这些端元值对计算结果的影响。当冬季白令陆架水的 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值(‰)变化为 -0.06 ± 0.02 时,河水组分(f_{RW})和海冰融化水组分(f_{SIM})的最大变化幅度分别为 2.9% 和 2.5% ;当河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值(‰)变化为 -21 ± 6 时,河水组分(f_{RW})和海冰融化水组分(f_{SIM})的最大变化幅度分别为 35% 和 35% ;当海冰融化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值(‰)变化为 1.9 ± 0.6 时,河水组分(f_{RW})和海冰融化水组分(f_{SIM})的最大变化幅度分别为 2.9% 和 2.5% ;当海冰融化水的盐度端元值变化为 6 ± 2 时,河水组分(f_{RW})和海冰融化水组分(f_{SIM})的最大变化幅度分别为 0% 和 7.5% 。显然,河水和海冰融化水份额的计算结果主要受河水端元 $\delta^{18}\text{O}$ 取值的影响,其他端元盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值的取值所导致的计算结果偏差小于 7.5% 。就白令海陆架而言,文献报道的河水组分的 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值取值范围介于 $-18\text{‰} \sim -21\text{‰}$ 之间^[5,12,30-32],因而本研究计算得到的河水和海冰融化水组分份额的最大偏差应小于 20% 。

表 1 冬季白令海水、河水和海冰融化水的盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 端元值
Tab. 1 The endmember values of salinity and $\delta^{18}\text{O}$ for winter Bering sea water, river water and sea-ice melted water

端元	S	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
冬季白令陆架水	34.51	-0.06
河水	0	-21
海冰融化水	6	1.9

3 结果

3.1 温度

2003—2012 年间 4 个航次研究断面海水温度的平均值为 $(3.27 \pm 2.85)^\circ\text{C}$,最高温度出现在 2003 年夏季 BS10 站的 0 m 层(10.50°C),最低温度出现在 2012 年夏季的 BN08 站近底层(-0.34°C)。

4 个航次温度的断面分布均呈现出共同的特点,即在断面东部(约 169.5°W 以东)的 20 m 以浅水体温度较高,断面西部 20 m 以深温度较低,并在 10~20 m 深度处存在较强温度跃层,温度跃层所处深度由东向西逐渐变浅(图 3a、3d、3g、3j)。从年际变化看,2003 年断面西侧表层水体和 2010 年断面西侧整个水柱均表现出较高温度现象(图 3a、3g),这被归因于受沿岸冲淡水和加热过程的影响^[33]。比较而言,2012 年断面西侧近底层低温水体向东扩张较为明显,最东侧 BN08 站近底层水体温度也低于 -0.2°C (图 3j)。

3.2 盐度

研究断面 4 个航次海水的平均盐度为 32.20 ± 0.71 ,盐度最低值出现在 2003 年航次该断面最东侧 BS10 站的表层($S=28.57$),最高值出现在 2012 年航次 BN08 站近底层($S=33.11$)。

4 个航次均在断面 169.5°W 以东约 20 m 以浅水体中出现盐度低值(图 3b、3e、3h、3k),恰好对应于温度高值出现的区域(图 3a、3d、3g、3j)。比较而言,2003 年夏季断面东侧表层水体盐度较低,而 2008 年夏季断面东侧表层水体盐度较高(图 3b、3e、3h、3k)。研究断面西侧的近底层水具有明显较高的盐度(图 3b、3e、3h、3k),也与温度的低值相对应(图 3a、3d、3g、3j)。同样,2003 年最西侧 BS01 站 20 m 以浅盐度也较低,对应于温度的高值(图 3a、3b),反映出淡水输入的影响。

若以 $S < 32$ 作为阿拉斯加沿岸流水体的盐度特征^[20,33],则可由盐度的断面分布看出,2003 年、2008 年、2010 年和 2012 年阿拉斯加沿岸流低盐水体的影响向西可分别达到 168°W 、 168°W 、 170°W 和 171°W ,只是其影响深度往西逐渐变浅(图 3b、3e、3h、3k)。若以 $S > 32.8$ 作为阿拉德尔水的盐度特征,则 2003 年、2008 年、2010 年和 2012 年阿拉德尔高盐水体仅分别影响到 171.5°W (BS01 站)、 171.5°W (BS01 站)、 171.5°W (BS01 站)和 170.8°W (BN01、BN02 站)(图 3b、3e、3h、3k),即阿拉德尔水团仅影响研究断面最西侧的 1~2 个站。因此,位于断面中部介于阿拉德尔

水与阿拉斯加沿岸水之间的水体,表现出 $32 < S < 32.8$ 的特征,即为白令陆架水。

3.3 海水 $\delta^{18}\text{O}$

4 个航次研究断面海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-1.89\text{‰} \sim 0.06\text{‰}$ 之间,平均值为 $(-0.70 \pm 0.51)\text{‰}$ 。最高值出现在 2012 年断面东侧 BN07 站 20 m 层,最低值出现在 2003 年断面东侧 BS10 站 0 m 层。

海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的断面分布显示,东侧水体具有较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,特别是 20 m 以浅水体,而西侧近底层

水体呈现高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的特征(图 3c、3f、3i、3l),分别对应于盐度的低值区和高值区(图 3b、3e、3h、3k),反映出东侧阿拉斯加沿岸流、中部白令陆架水和西侧阿拉德尔水的影响。值得指出的是,2008 年、2012 年航次在断面最东侧近底层水中出现了海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的低值(图 3f、3l),但相应区域海水盐度较高、温度较低(图 3j、3k),可能反映出海冰形成时所释放高盐水体的残留影响。

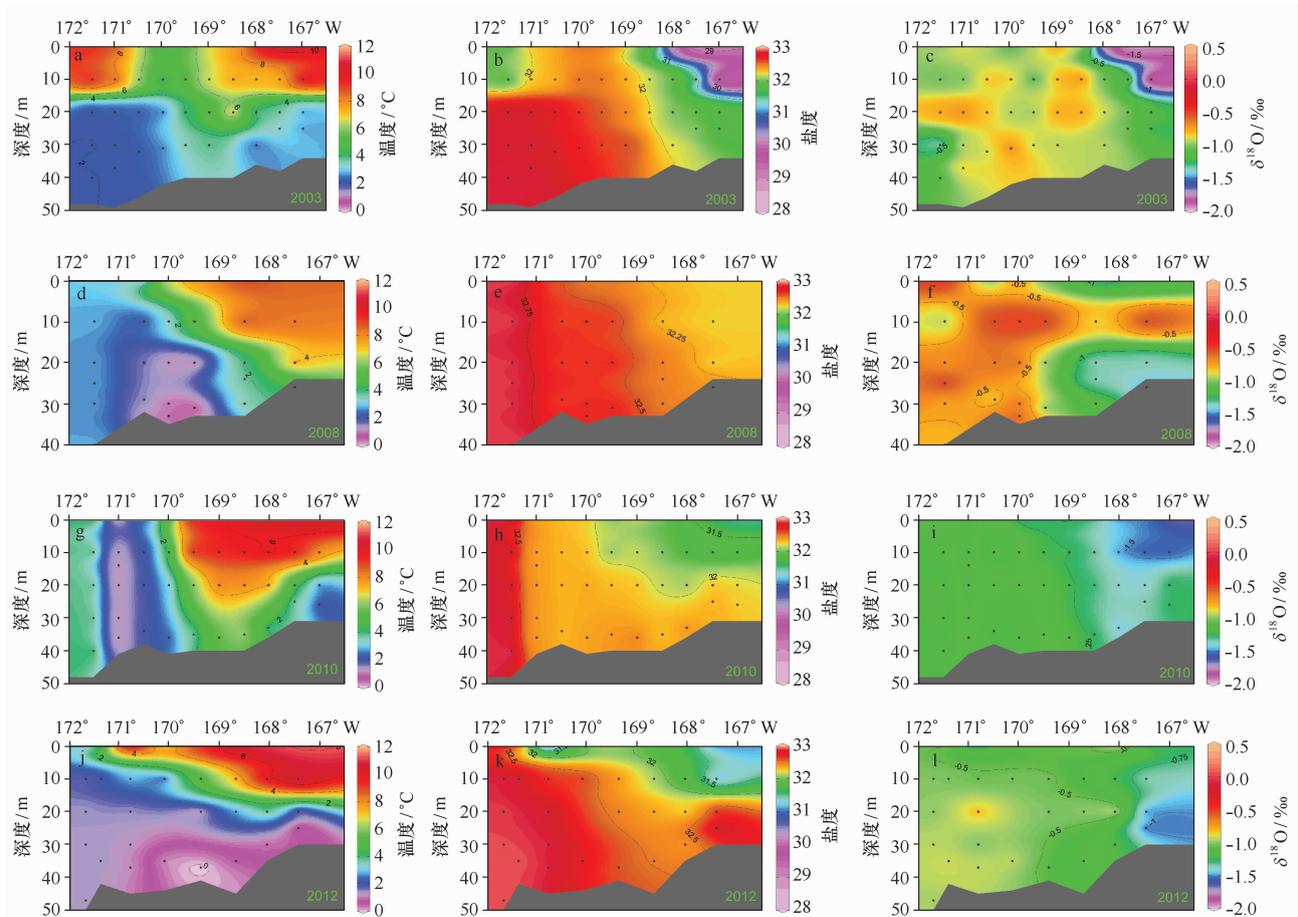


图 3 白令海峡温度(a,d,g,j)、盐度(b,e,h,k)和 $\delta^{18}\text{O}$ (c,f,i,l)的断面分布

Fig. 3 Sectional distribution of temperature(a,d,g,j), salinity(b,e,h,k) and $\delta^{18}\text{O}$ (c,f,i,l) in the Bering Strait during 2003 to 2012

4 讨论

4.1 河水组分的时空变化

由海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和盐度质量平衡方程计算出的河水组份份额表明,白令海峡 4 个航次河水组份份额的变化范围为 $0.1\% \sim 9.6\%$ 之间,平均为 $(3.4 \pm 2.6)\%$ 。河水组份份额的最高值出现在 2003 年断面

最东侧 BS10 站的 0 m 层,最低值出现在 2003 年西侧的近底层(BS02 站 20 m 层和 BS04 站 31 m 层)。

从河水组份份额的空间变化看,四个航次均表现出共同的特征,即断面东侧比西侧具有明显较为丰富的河水组份,且上层水体比下层高(图 4a、4c、4e、4g),这与东侧阿拉斯加沿岸流的影响相符合。阿拉斯加沿岸流在北上输运过程中,获得了育空河淡水的输

入,因而呈现高温、低盐、高河水组分的特征。在断面的中部和西部,河水组分份额没有明显的空间差异,但最西侧站位河水组分份额似乎稍高(图 4a、4c、4e、

4g),这意味着阿拉德尔水团和白令陆架水团所含的河水组分较为接近。

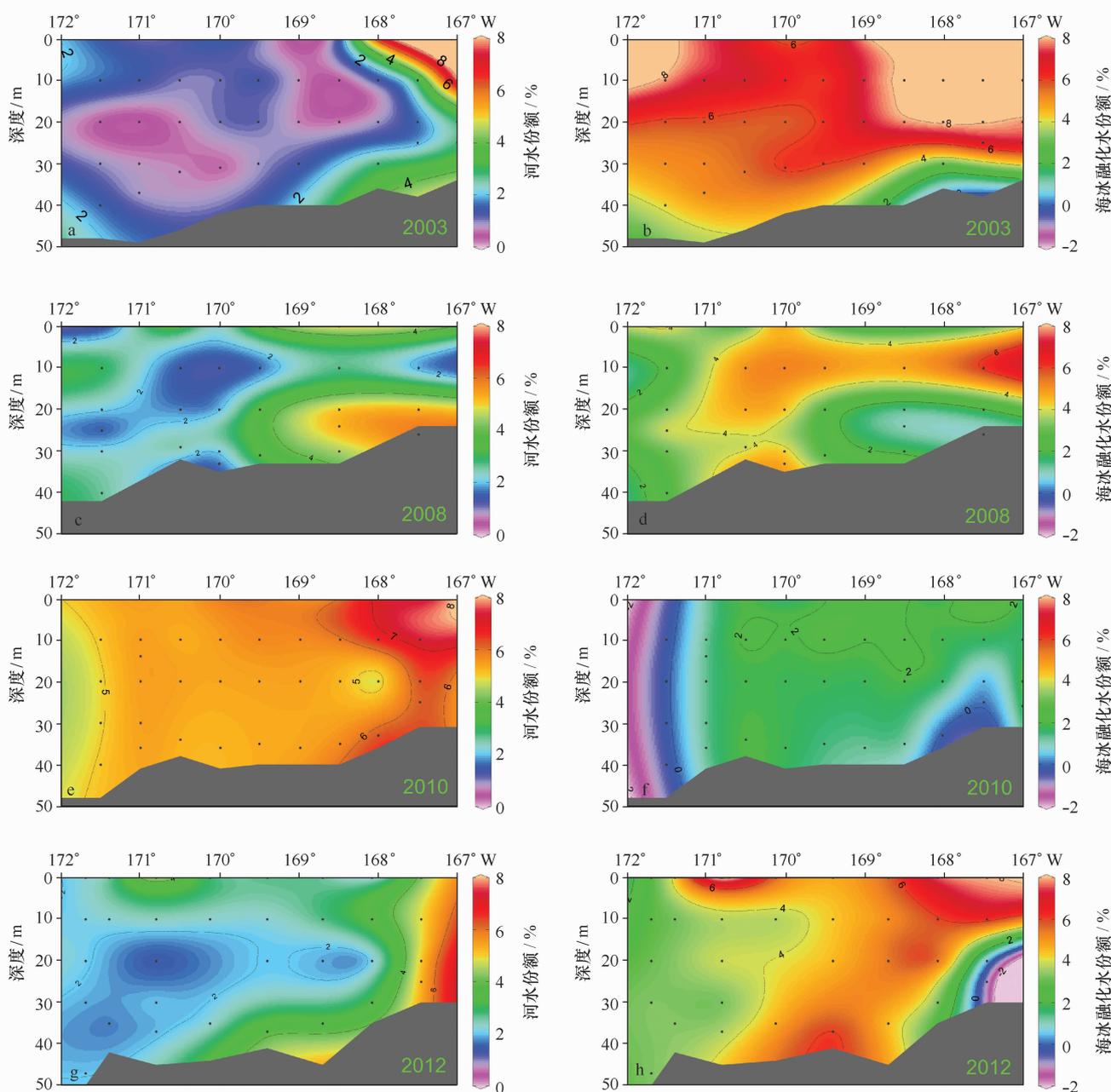


图 4 白令海峡河水份额(a,c,e,g)和海冰融化水份额(b,d,f,h)的断面分布

Fig. 4 Sectional distribution of f_{RW} (a,c,e,g) and f_{SIM} (b,d,f,h) in the Bering Strait

河水组分份额的时间变化显示,四个航次该断面河水组分的份额存在明显的年际变化,其中 2010 年夏季河水组分明显高于其他年份,与白令海峡北向淡水输送通量的高值相对应。Woodgate 等^[9]分析了

1991—2011 年间通过白令海峡向北输送的淡水通量,尽管输送通量存在年际变化和波动,但总体上呈现增加的态势,其中 2010 年通过白令海峡北向输送的淡水通量显著高于 2003 年和 2008 年。因此,2010 年白

令海峡向北冰洋输送淡水量的增加部分应归功于河水组分的增加。

前已提及,根据温度、盐度和海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布,研究断面由西向东依次受到阿拉德水(AW)、白令陆架水(BSW)和阿拉斯加沿岸水(ACW)的影响,其中阿拉德水团只影响该断面最西侧区域,阿拉斯加沿岸水主要影响 168.5°W 以东的区域,二者之间为白令陆架水。为保守起见,分别以断面最西侧的 BS01(BN01)站、最东侧的 BS09 和 BS10 站(BN08 站)、中部的 BS03(BN03)和 BS04(BN04)站分别作为阿拉德水、阿拉斯加沿岸水和白令陆架水的显著影响区,以上述各影响区代表性站位河水组分份额的平均值为依据,则可分析这 3 个区域河水组分的平均含量与年际变化情况。从 4 个航次的结果看,2003—2012 年间阿拉德水影响区、白令陆架水影响区和阿拉斯加沿岸水影响区的河水组分平均份额分别为 2.6%、2.5%和 5.1%。显然,阿拉德水和白令陆架水影响区的河水组分份额没有明显差别,但阿拉斯加沿岸水所含河水组分份额约为阿拉德水和白令陆架水的两倍,凸显出阿拉斯加沿岸流在向北冰洋输送河水组分方面起着重要的作用。

从 3 个水团影响区域河水组分份额的年际变化看,阿拉德水和白令陆架水影响区域河水组分的时间变化规律类似,均呈现 2010 年 > 2008 年 \approx 2012 年 > 2003 年的规律,而阿拉斯加沿岸水影响区域河水组分的时间变化则不同,呈现出 2010 年 > 2012 年 > 2003 年 > 2008 年的规律(图 5)。阿拉斯加沿岸水影响区河水组分份额的年际变化主要受控于向白令海陆架输入的育空河径流量的变化。由图 6 可以看出,阿拉斯加沿岸水影响区河水组分的平均份额与前一年育空河径流量之间尽管线性关系并不显著,但二者呈正相关关系,而与采样年份育空河的径流量没有明显的相关性,说明育空河径流量的变化在迟滞不到 1 年的时间里调控着阿拉斯加沿岸水影响区河水组分的多寡(育空河径流量数据来自美国地质调查局水信息系统: <http://nwis.waterdata.usgs.gov/ak/nwis/annual/>)。二者时间上的滞后与育空河径流量的季节变化和阿拉斯加沿岸流的流速有关。育空河流域盆地发源于加拿大落基山脉西麓,流经加拿大育空地区中部和美国阿拉斯加州中部,地处气候严寒的高纬度地区,河水主要以冰雪融水补给为主,一年中育空河约有 7~9 个月封冻,河水主要于每年 6—9 月间较为集中地输入白令海^[34—35]。另外,自育空河入

海口至研究断面的距离大于 430 km,即使阿拉斯加沿岸流的流速高达 40 cm/s ^[36],育空河输送的河水输运至研究断面也需要多于 120 d 的时间。本研究采样时间为 7 月 19—29 日之间,因此所采集阿拉斯加沿岸水影响区河水组分的高低更多地反映出上一年度育空河径流量的大小。Ge 等^[34]分析了 1977—2006 年间育空河径流量的变化,发现由于受冰雪融化加剧的影响,育空河径流量以年均 8%($520\text{ m}^3/\text{s}$)的速度递增,这可能意味着在过去几十年里,通过阿拉斯加沿岸流输入北冰洋的育空河水组分也呈增加态势,其对北冰洋生态系统的影响仍有待进一步的研究。

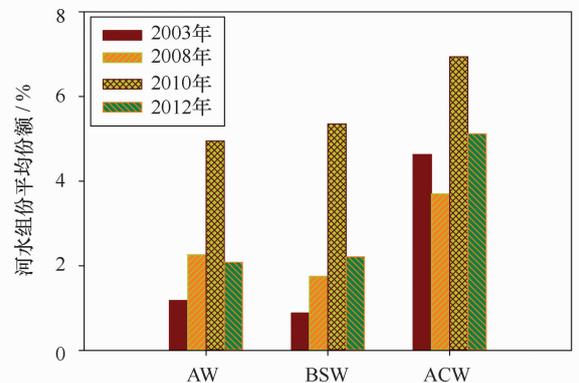


图 5 阿拉德水、白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区河水组分平均份额的年际变化

Fig. 5 Interannual variations of river water fraction in the regions influenced by the Anadyr Water, the Bering Shelf Water and the Alaska Coastal Water

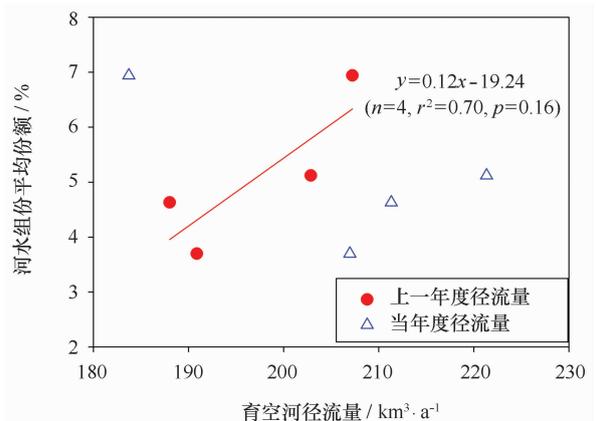


图 6 阿拉斯加沿岸水影响区河水组分平均份额与育空河径流量的关系

Fig. 6 The relationship between river water fraction in ACW-influenced region and the Yukon discharge

4.2 海冰融化水的时空变化

4 个航次白令海峡断面海冰融化水份额的变化

范围为 $-1.9\% \sim 10.1\%$ 之间,平均为 $(4.0 \pm 2.7)\%$ 。海冰融化水份额的最高值出现在2012年断面中部BN03站的0 m层,最低值出现在2012年东侧近底层(BN08站25 m层)。

从海冰融化水组分的断面分布看,总体呈现出上层水体高于近底层水体,断面中部和东部海冰融化水份额高于西部的特征(图4b、4d、4f、4h)。特别需要指出的是,断面东侧近底层存在海冰融化水的低值,且在2010年和2012年表现为负值(图4f、4h),说明该区域近底层残存有冬季结冰所形成的盐卤水信号,其水动力作用较不活跃。与其他年份相比,2003年在断面西侧20 m以浅水体中,海冰融化水组分异常地呈高值分布(图4b),对应于温度的高值(图3a)和盐度的低值(图3b),表明这些水体受海冰融化水影响较为显著,其盐度的低值主要由海冰融化水增加所致,而非河水组分的贡献。2010年在断面最西侧的站位,整个水柱的海冰融化水组分均呈负值,表现出海冰形成所释放的盐卤水信号(图4f)。

若按不同水团影响区域进行划分后,以各影响区代表性站位海冰融化水组分的平均值为依据,2003—2012年间阿拉德尔水影响区、白令陆架水影响区和阿拉斯加沿岸水影响区的海冰融化水组分平均份额分别为3.0%、4.3%和4.4%,显然,白令陆架水影响区和阿拉斯加沿岸水影响区的海冰融化水份额较为接近,均比阿拉德尔水所含海冰融化水份额高约45%。从3个水团影响区海冰融化水份额的年际变化看,均表现为2003年 $>$ 2008年 \approx 2012年 $>$ 2010年的规律(图7)。本研究的海冰融化水组分是基于海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与盐度的质量平衡计算获得,反映的是海冰形成或融化的净结果,因此,某一年度海冰融化水组分的变化取决于上一年度冬季海水结冰过程中所释放的盐卤水体积、当年度融化的海冰体积以及这两种水体在研究海区经水动力作用的再分配。对于白令海陆架区而言,海冰的形成与融化存在明显季节变化,海冰的覆盖面积一般从10月开始增加,次年2—3月达到最大,之后逐渐减少,并于6—7月完全融化^[35]。由于未能获得白令海陆架海冰体积年变化的数据,本研究以航次实施年度及上一年度白令海陆架区海冰覆盖面积的平均值作为指标^[35],来评估海冰覆盖程度对夏季海冰融化水份额的影响。从图8可以看出,无论是阿拉德尔水影响区、白令陆架水影响区,还是阿拉斯加沿岸水影响区,夏季海冰融化水份额均与海冰覆盖面积呈负相关关系,意味着海冰的年

际变动调控着夏季海冰融化水组分的年际变化,与此同时,负相关关系的存在说明冬季结冰过程所释放盐卤水的多寡是决定所得夏季海冰融化水净份额的关键因素。当海冰覆盖面积增加时,冬季时会形成更多的海冰,由此产生更多具有相对低 $\delta^{18}\text{O}$ 特征的盐卤水,从而抵消夏季高 $\delta^{18}\text{O}$ 值海冰融化水的信号,导致计算出的净海冰融化水份额降低。

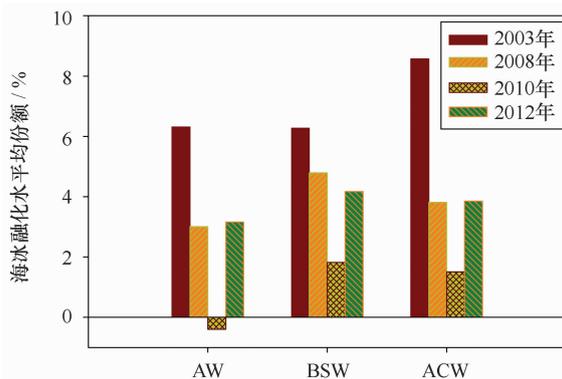


图7 阿拉德尔水、白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区海冰融化水平均份额的年际变化

Fig. 7 Interannual variations of sea-ice melted water fraction in the regions influenced by the Anadyr Water, the Bering Shelf Water and the Alaska Coastal Water

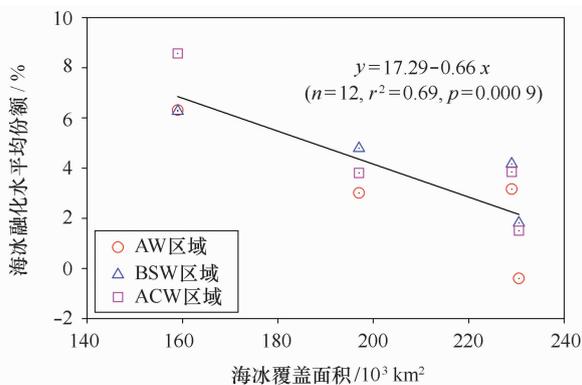


图8 阿拉德尔水、白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区海冰融化水份额与海冰覆盖面积的关系

Fig. 8 The relationship between sea-ice melted water fraction and the sea ice cover area in the regions influenced by the Anadyr Water, the Bering Shelf Water and the Alaska Coastal Water

4.3 淡水构成及其变化

研究断面4个航次河水组分和海冰融化水组分的平均份额分别为3.4%和4.0%,意味着夏季通过白令海峡的淡水大体由46%的河水和54%的海冰融

化水构成。从3种水团影响区淡水组成看,2003—2012年间阿拉德水影响区的淡水平均由46%的河水和54%的海冰融化水构成,白令陆架水影响区的淡水平均由37%的河水和63%的海冰融化水构成,而阿拉斯加沿岸水影响区的淡水平均由54%的河水和46%的海冰融化水构成。显然,就太平洋入流向北冰洋输送的河水而言,阿拉斯加沿岸流单位体积的贡献最为重要,其次是阿拉德水和白令陆架水;对于太平洋入流向北冰洋输送的海冰融化水,则是白令陆架水的贡献较重要,次者是阿拉德水和阿拉斯加沿岸水。

从研究断面淡水组成的时间变化看,阿拉德水、白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区河水组分与海冰融化水组分的绝对比值(f_{RW}/f_{SIM} 比值的绝对值)自2003年至2012年间呈增加的趋势(图9)。这种变化表明,2003—2012年间,太平洋入流向北冰洋输送的淡水中,河水组分相对于海冰融化水的贡献随时间的推移愈加重要。本研究所观察到的河水与海冰融化水比值随时间呈增加的态势与育空河径流量、白令海陆架区海冰覆盖度的变化是一致的。育空河是白令海河水组分的主要来源,1977—2006年间其入海径流量平均以每年8%的幅度($520\text{ m}^3/\text{s}$)增加^[34]。Brabets和Walvoord^[37]的研究表明,因阿拉斯加流域多年冻土的融化,以及降水的加强,育空河下游的年均径流量在1944—2005年间呈增加趋势,其中冬季和4月份的径流量增加更为明显。Chan等^[38]通过碳酸盐Ba/Ca比值的研究也证实,阿拉斯加沿岸水在2001—2006年间存在淡化的现象。Wendler等^[35]的研究则表明,1979—2012年间白令海海冰覆盖面积尽管存在年际波动,但总体呈增加的趋势,从1979年的 $1.4\times 10^5\text{ km}^2$ 增加至2012年的大于 $2.8\times 10^5\text{ km}^2$ 。如前文所述,冬季海冰形成的增加会导致夏季海冰净融化水份额的降低,因此,白令海入海径流量和白令海冬季海冰形成在过去几十年里随时间的增加可导致淡水构成中河水与海冰融化水的比值增加。与海冰融化水相比,河水含有更高的热含量(温度更高),即使在太平洋入流流量保持不变的情况下,其向北冰洋输入的热量也会增加,从而加剧北冰洋海冰的融化。已有研究表明,太平洋入流的流量在2001—2011年间平均以 $(0.03\pm 0.02)\times 10^6\text{ m}^3/\text{a}$ 的速率增加^[9],因此,太平洋入流流量的增加和淡水构成中河水组分份额的增加共同加剧了北冰洋海冰的融化。值得指出的是,白令海峡2010年河水和海冰融化水比值的

高值恰好对应于北冰洋海冰覆盖面积的最小值,尽管北冰洋的海冰覆盖面积近30年来呈减少的趋势,但存在年际的波动变化^[39]。根据美国冰雪数据中心给出的北极海冰历年数据(http://nsidc.org/data/seaice_index/archives.html),2003年、2008年、2010年和2012年1月间北极海冰覆盖面积分别为 14.50×10^6 、 14.08×10^6 、 13.85×10^6 和 $13.86\times 10^6\text{ km}^2$,2010年海冰覆盖面积处于这4个年份的最小值,恰好对应于白令海峡夏季河水和海冰融化水相对比值的高值(图9)。

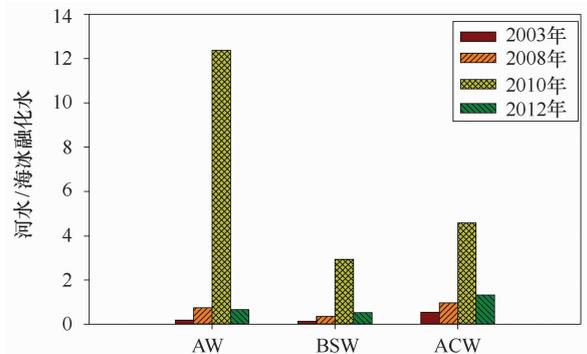


图9 阿拉德水、白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区河水与海冰融化水的比值变化

Fig. 9 Interannual variations of absolute ratio of the river water fraction to the sea-ice melted water fraction in the regions influenced by the Anadyr Water, the Bering Shelf Water and the Alaska Coastal Water

5 结论

利用中国第2~5次北极科学考察航次在白令海峡 64.3°N 纬向断面实测的海水氧同位素组成,借助海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和盐度的质量平衡关系,揭示了2003—2012年间河水组分、海冰融化水组分的断面分布特征和时间变化规律,获得如下几点认识:

(1)海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度、盐度的结合,可清晰地反映白令海峡断面不同水团的影响,东侧阿拉斯加沿岸水具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 值、低盐和高热的特征,西侧阿拉德水具有高 $\delta^{18}\text{O}$ 值、高盐的特征,中部白令陆架水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和盐度介于阿拉斯加沿岸水和阿拉德水之间。

(2)阿拉斯加沿岸水影响区河水组分的份额约为阿拉德水和白令陆架水的2倍,而阿拉德水和白令陆架水影响区的河水组分份额没有明显差别。阿拉斯加沿岸水影响区河水组分份额的时间变化呈现

出 2010 年 > 2012 年 > 2003 年 > 2008 年的规律, 主要受控于向白令海陆架输入的育空河径流量的时间变化。

(3) 白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区的海冰融化水份额比较接近, 均比阿拉德尔水影响区的海冰融化水份额高约 45%。海冰融化水的年际变化表现出 2003 年 > 2008 年 ≈ 2012 年 > 2010 年的规律, 主要受控于白令海海冰的年际变动。

(4) 通过白令海峡的太平洋入流中的淡水平均由 46% 的河水和 54% 的海冰融化水构成。阿拉德尔水、白令陆架水和阿拉斯加沿岸水影响区河水组分与海冰融化水组分的比值自 2003 年至 2012 年间总体呈增加的趋势, 说明淡水构成变化中河水组分的增加对北冰洋海冰的融化也起着一定的作用, 太平洋入流流量的增加和河水组分比例的增加共同加剧了北冰洋海冰的融化。

参考文献:

- [1] Woodgate R A, Aagaard K. Revising the Bering Strait freshwater flux into the Arctic Ocean[J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L02602.
- [2] Shi J X, Cao Y, Zhao J P, et al. Distribution of Pacific-origin water in the region of the Chukchi Plateau in the Arctic Ocean in the summer of 2003[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(6): 12–24.
- [3] Aagaard K, Carmack E. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation[J]. *J Geophys Res*, 1989, 94: 14485–14498.
- [4] Wadley M R, Bigg G R. Impact of flow through the Canadian Archipelago and Bering Strait on the North Atlantic and Arctic circulation: an ocean modelling study[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, 128(585): 2187–2203.
- [5] Chen M, Huang Y P, Jin M M, et al. The sources of the upper and lower halocline water in the Canada Basin derived from isotopic tracers[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(6): 625–639.
- [6] Shimada K, Kamoshida T, Itoh M, et al. Pacific Ocean inflow: influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L08605.
- [7] Chen M, Xing N, Huang Y P, et al. The mean residence time of river water in the Canada Basin[J]. *Chin Sci Bull*, 2008, 53(5): 777–783.
- [8] Woodgate R A, Weingartner T, Lindsay R. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat[J]. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L01602.
- [9] Woodgate R A, Weingartner T, Lindsay R. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column[J]. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L24603.
- [10] 高众勇, 孙恒, 陈立奇, 等. 夏季北冰洋淡水分布的总碱度示踪研究[J]. *极地研究*, 2012, 24(2): 120–128.
Gao Zhongyong, Sun Heng, Chen Liqi, et al. Summertime fresh water fractions in the surface water of the western arctic ocean evaluated from total alkalinity[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(2): 120–128.
- [11] Pan H, Chen M, Tong J L, et al. Variation of freshwater components in the Canada Basin during 1967–2010[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(6): 40–45.
- [12] Cooper L, Whitlege T, Grebmeier J, et al. The nutrient, salinity, and stable oxygen isotope composition of Bering and Chukchi Seas waters in and near the Bering Strait[J]. *J Geophys Res—Oceans*, 1997, 102: 12563–12573.
- [13] Chen M, Huang Y P, Guo L D, et al. Biological productivity and carbon cycling in the Arctic Ocean[J]. *Chin Sci Bull*, 2002, 47(12): 1037–1040.
- [14] 李宏亮, 陈建芳, 高生泉, 等. 西北冰洋中太平洋入流水营养盐的变化特征[J]. *海洋学报*, 2011, 33(2): 85–95.
Li Hongliang, Chen Jianfang, Gao Shengquan, et al. Nutrients variation of the Pacific inflow in the western Arctic Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(2): 85–95.
- [15] Chen M, Ma Q, Guo L D, et al. Importance of lateral transport processes to ^{210}Pb budget in the eastern Chukchi Sea during summer 2003[J]. *Deep-Sea Res II*, 2012(81/84): 53–62.
- [16] Grebmeier J M, Cooper L W, DeNiro M J. Oxygen isotopic composition of bottom seawater and tunicate cellulose used as indicators of water masses in the northern Bering and Chukchi Seas[J]. *Limnol Oceanogr*, 1990, 35: 1182–1195.
- [17] Zhao J P, Shi J X, Gao G P, et al. Water mass of the northward throughflow in the Bering Strait in the summer of 2003[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25(2): 25–32.
- [18] 陈敏, 李艳平, 邱雨生, 等. 白令海峡水团来源的镭同位素示踪[J]. *海洋学报*, 2011, 33(2): 69–76.
Chen Min, Li Yanping, Qiu Yusheng, et al. Water masses in the Bering Strait revealed by radium isotopes[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(2): 69–76.
- [19] Danielson S, Aagaard K, Weingartner T, et al. The St. Lawrence polynya and the Bering shelf circulation: new observations that test the models[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111: C09023.
- [20] 高郭平, 赵进平, 董兆乾, 等. 白令海峡海域夏季温、盐分布及变化[J]. *极地研究*, 2004, 16(3): 229–239.
Gao Guoping, Zhao Jinping, Dong Zhaoqian, et al. Distribution and variation of temperature and salinity around the Bering Strait[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(3): 229–239.
- [21] Whitefield J, Winsor P, McClelland J, et al. A new river discharge and river temperature climatology data set for the pan-Arctic region[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 88: 1–15.

- [22] Holmes R M, McClelland J W, Peterson B J, et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas[J]. *Estuaries and Coasts*, 2012, 35(2): 369—382.
- [23] Danielson S, Eisner L, Weingartner T, et al. Thermal and haline variability over the central Bering Sea shelf: seasonal and interannual perspectives [J]. *Cont Shelf Res*, 2011, 31: 539—554.
- [24] Östlund H G, Hut G. Arctic Ocean water mass balance from isotope data[J]. *J Geophys Res*, 1984, 89: 6373—6382.
- [25] Macdonald R, Paton D, Carmack E, et al. The freshwater budget and under-ice spreading of Mackenzie River water in the Canadian Beaufort Sea based on salinity and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements in water and ice[J]. *J Geophys Res*, 1995, 100: 895—920.
- [26] Bauch D, Erlenkeuser H, Andersen N. Water mass processes on Arctic shelves as revealed from $\delta^{18}\text{O}$ of H_2O [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 48: 165—174.
- [27] 董金炉, 陈敏, 潘红, 等. 夏季楚科奇海河水与海冰融化水组分的空间变化特征[J]. *海洋学报*, 2014, 36(10): 90—102.
Tong Jinlu, Chen Min, Pan Hong, et al. Distribution of river water and sea-ice melted water in Chukchi Sea in summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(10): 90—102.
- [28] Tong J L, Chen M, Qiu Y S, et al. Contrasting patterns of river runoff and sea-ice melted water in the Canada Basin[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(6): 46—52.
- [29] Bourg C, Stievenard M, Jouzel J. Hydrogen and oxygen isotopic composition of aqueous salt solutions by gas-water equilibration method[J]. *Chemical Geology*, 2001, 173: 331—337.
- [30] Macdonald R W, McLaughlin F A, Carmack E C. Fresh water and its sources during the SHEBA drift in the Canada Basin of the Arctic Ocean[J]. *Deep Sea Research I*, 2002, 49: 1769—1785.
- [31] Ekwurzel B, Schlosser P, Mortlock R A, et al. River runoff, sea ice meltwater, and Pacific water distribution and mean residence times in the Arctic Ocean [J]. *J Geophys Res—Oceans*, 2001, 106: 9075—9092.
- [32] Yamamoto-Kawai M, Tanaka N, Pivovarov S. Freshwater and brine behaviors in the Arctic Ocean deduced from historical data of $\delta^{18}\text{O}$ and alkalinity (1929—2002AD)[J]. *J Geophys Res—Oceans*, 2005, 110, doi: 10.1029/2004JC002793.
- [33] 赵进平, 史久新, 高郭平, 等. 2003 年夏季白令海峡北向流水体结构研究[M]//快速变化中的北极海洋环境. 北京: 科学出版社, 2011: 2—10.
Zhao Jinping, Shi Jiuxin, Gao Guoping, et al. Water mass of the northward throughflow in the Bering Strait in the summer of 2003[M]//Rapid Change in Arctic Ocean Environments. Beijing: China Science Press, 2011: 2—10.
- [34] Ge S, Yang D, Kane D L. Yukon river basin long-term (1977—2006) hydrologic and climatic analysis[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27: 2475—2484.
- [35] Wendler G, Chen L, Moore B. Recent sea ice increase and temperature decrease in the Bering Sea area, Alaska[J]. *Theor Appl Climatol*, 2014, 117: 393—398.
- [36] Woodgate R A, Aagaard K, Weingartner T J. Interannual changes in the Bering Strait fluxes of volume, heat and freshwater between 1991 and 2004[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L15609.
- [37] Brabets T P, Walvoord M A. Trends in streamflow in the Yukon River Basin from 1944 to 2005 and the influence of the Pacific Decadal Oscillation [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 371(1): 108—119.
- [38] Chan P, Halfar J, Williams B, et al. Freshening of the Alaska Coastal Current recorded by coralline algal Ba/Ca ratios[J]. *J Geophys Res—Biogeosciences*, 2011, 116, doi: 10.1029/2010JG001548.
- [39] Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, et al. The Arctic rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis[J]. *Climatic Change*, 2012, 110: 1005—1027.

Spatial and temporal variations of freshwater components at a transect near the Bering Strait during 2003—2012

Pan Hong¹, Chen Min^{1,2}, Tong Jinlu¹, Qiu Yusheng^{1,2}, Zheng Minfang¹

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen 361102, China)

Abstract: Seawater $\delta^{18}\text{O}$ at a transect along 64.3°N near Bering strait from 2003 to 2012 was determined, and the fractions of sea-ice melted water (SIM) and river water (RW) were calculated using mass balance of salinity and $\delta^{18}\text{O}$. The spatial distribution and interannual variability of freshwater components in the Bering Strait were dis-

cussed. Our results showed that the signals of depleted $\delta^{18}\text{O}$, low salinity, warmer temperatures and higher river runoff fractions were found in the region affected by the Alaska Coastal Water (ACW) on the eastern part of the section, while high $\delta^{18}\text{O}$, high salinity, and lower sea-ice melted water fractions were observed in the western part with the influence of Anadyr water. The moderate properties were revealed in the middle part of the section with the influence of the Bering Shelf Water. The fractions of river runoff in the region affected by the Alaska Coastal Water were approximately twice as much as in regions affected by the Bering Shelf Water and the Anadyr Water. The interannual variation of river runoff fractions in regions affected by the Alaska Coastal Water showed a characteristic of $2010 > 2012 > 2003 > 2008$, which was regulated by the interannual variation of the Yukon River discharge. The fractions of sea-ice melted water were similar in the regions affected by the Bering Shelf Water and the Alaska Coastal Water, and higher ($\sim 45\%$) than those in the region affected by the Anadyr Water. The interannual variation of sea-ice melted water fractions showed a characteristic of $2003 > 2008 \approx 2012 > 2010$, controlled by the interannual variation of sea ice cover in the Bering Sea. The freshwater pass through the Bering Strait was constitute of 46% river water and 54% sea-ice melted water in average. The fraction ratios of river water to sea-ice melted water in the regions affected by the Alaskan Coastal Water, the Bering Shelf Water, and the Anadyr Water increased during 2003 to 2012, indicating that the freshwater components in the Pacific inflow also play a role in sea ice melting in the Arctic Ocean.

Key words: Bering Strait; fresh water; sea-ice melted water; river water; temporal variation; ^{18}O