

南黄海和东海海水 ^{18}O 的组成及其意义*

杜金秋 陈敏 曹建平 邱雨生 童金炉 马嫿 杨俊鸿

(厦门大学海洋与环境学院 厦门 361005)

提要 对 2006 年夏季采自南黄海和东海的海水进行了 ^{18}O 同位素组成的分析, 结合温度与盐度的分布, 探讨了影响研究海域海水 $\delta^{18}\text{O}$ 分布的主要因素。结果表明, 南黄海和东海海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 与盐度之间具有良好的线性正相关关系, 据此确定出夏季黑潮水和陆地径流水的特征 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 0.20‰—0.45‰和 -9.85‰。依据海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布, 探讨了黑潮水、长江冲淡水和黄海冷水团对研究海区 $\delta^{18}\text{O}$ 分布的影响, 结果显示, 夏季黑潮水仅影响到台湾东北部陆架坡折以外的海域, 其影响路径可能以气旋式涡旋的形式出现; 在长江口附近海域, 长江径流水进入东海后, 对长江口东北部海域的影响范围较其南部更为宽广, 可到达济州岛西南部。在南黄海海域, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布可清晰指示出南黄海冷水团的位置, 黄海冷水团的形成可能与冬季的黄海暖流具有一定的联系。

关键词 南黄海, 东海, 海水 ^{18}O , 水团组成

中图分类号 P731

海洋中存在各种各样的放射性同位素和稳定同位素, 它们具有特定的化学性质和地球化学行为, 可为各种海洋学过程提供准确可靠的时标, 给出海洋学过程的速率特征和机理。 ^{18}O 是水分子的组成部分, 海水中的 ^{18}O 丰度主要受控于两个过程: 其一为相变过程中伴随的同位素分馏, 其二是来源及同位素组成各不相同的水体之间的混合和交换。因此, 表层海水的蒸发和大气冷凝导致的降雨、海冰的形成与融化、海水与大陆径流淡水的混合、表层水与深层水的交换、海水的涡动扩散等过程均在不同程度上对海水的氧同位素组成产生影响, 从而使海水 ^{18}O 同位素含量呈现非均匀分布。借助海水 ^{18}O 的丰度及其分布, 可揭示海洋水团组成以及水体运动路径。

不同来源的水体往往具有不同特征的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 据此可揭示水体的来源信息。Tan 等(1980)报道了巴芬湾各种水团的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 进而探讨巴芬湾底层水的形成; Craig(1966)分析了红海和索尔顿湖地热卤水的氧同位素组成, 并研究了太平洋和印度洋深层水的来源; Fairbanks(1982)根据 $\text{H}_2^{18}\text{O}/\text{H}_2^{16}\text{O}$ 比值阐明了纽

约湾和缅因湾陆架水和陆坡水的来源; Torgensen (1979) 建立了借助 $\delta^{18}\text{O}-S$ 关系鉴别沿岸水团的方法; Dansgaard(1960)根据菲律宾海沟水体中的 ^{18}O 丰度阐明水体完全交换所需的时间长短。李培泉等 (1988) 依据 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化确定出西太平洋海域 4 个不同的水团; 吴世迎(1988)测定了南大洋和近岸水的氧同位素组成, 据此确定了长江冲淡水和南极冰川融化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围。陈敏等(2007)结合海水 ^{18}O 和其他地球化学要素, 定量确定了北冰洋海水中大西洋水、太平洋水、海冰融化水和河水所占的份额, 由此确定出加拿大海盆“上跃层水”的形成缘于太平洋水的输入, 初步阐明了上跃层水的形成与维持机制。

由于不同水团具有不同的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征, 因而海洋水体 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布可用于指示水团运移的路径、水体的水平涡动扩散和垂直涡动扩散过程。Broecker(1974)综合分析了大西洋、太平洋、南大洋等各种水团的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与盐度的关系, 通过绘制主要大洋深层水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与盐度的关系, 指出全球大洋深层水的主要来源有两个: 一是由北大西洋表层水形成的北大西洋深

* 国家重点基础研究发展规划项目, 2005CB422305 号; 福建省自然科学基金项目, 2009J06026 号。杜金秋, E-mail: jin-qiu609@gmail.com

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

收稿日期: 2010-10-15, 收修改稿日期: 2012-06-10

层水;二是起源于威德尔海的南极底层水。黄奕普等(1996)分析了春季期间南海东北部海域海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的水平、垂直和断面分布,发现春季期间黑潮水入侵了南海,但仅限于 119°E 以西,且其影响深度在800 m以浅水层。洪阿实等(1994)通过对热带西太平洋海水中氧同位素组成及其分布进行分析后指出,表层海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布反映出该海区存在纬向定常流,从 $\delta^{18}\text{O}$ 的纬向断面分布可看出低 $\delta^{18}\text{O}$ 底流的爬升。张锡根等(1998)通过对中太平洋与东太平洋海盆水、孔隙水 ^{18}O 的研究,指出两个海区的底层水均来源于南极底层流,并受到结冰效应的影响,水体向太平洋流动过程中与大西洋底层水发生了混合。

黄、东海拥有世界上最大的陆架之一,其地形在南北方向上呈狭长状,等深线主要呈南北走向,水文特征分布深受这一海底地形的影响。长江口位于海区西岸,而强大的西边界流——黑潮及其分支和延伸部分位于海区以东,二者对海区的水文特征影响极大。管秉贤(1985)指出,黄、东海的环流包含两个系统,其一为源自大洋的高温、高盐水流系,即黑潮及其分支和延伸部分;其二为沿岸的低盐水流系,即长江冲淡水和其他大陆径流。总的来说前者向北流动,后者向南流动。在夏季,长江冲淡水势力极盛,低盐水舌向东及东北方向伸展甚远。邹娥梅等(2001)指出,冲淡水核心区($S<26$)可抵达 $125^\circ30'\text{E}$,几乎可扩展到济州岛附近,并在 $122^\circ30'\text{E}$ 以西转向东北方向。海区温、盐等分布还受黑潮及其分支走向及强弱的影响,黑潮从台湾东部进入东海后,大量入侵陆架,由于复杂地形的影响使其路径呈现多种变化(于非等,2002)。夏季,由季节性温跃层导致黄海底层存在强的冷水团。汤毓祥等(2000)研究了南黄海环流的若干特征,指出夏季黄海表层东侧存在北上环流,认为主要是由内循环的陆架水组成,而底层被冷水团占据,且环流为逆时针方向。

本研究于2006年夏季期间采集了南黄海、东海的海水样品,分析测定了海水 ^{18}O 含量,以揭示南黄海和东海海水 ^{18}O 的含量与分布特征,并据此探讨主要水团和海流对此海区 ^{18}O 分布的影响,基于海水 ^{18}O 的含量及其分布揭示研究海区的水文学信息。

1 样品采集与方法

1.1 样品采集

研究样品于2006年6—7月采自南黄海和东海,共布设了8个断面57个站位,空间位置落在 25° —

35°N 、 120° — 126°E 之间(图1),其中S03断面为南黄海 35°N 的东西向断面,采样时间为2006年7月14—15日,共布设了10个采样站位,站位水深由西往东逐渐增加,但均浅于90 m;S04、S05和fj断面覆盖长江口外海域,三个断面共有18个站,站位水深由长江口向外海逐渐增加,但均小于95 m,采样时间为2006年7月6—13日;S07断面从浙江沿海向外延伸,布设了8个站,水深介于14—96 m之间,样品采集时间为2006年7月4—6日;S08断面位于温州湾向外海延伸的内陆架内,6个站位的水深由近岸的18 m(S0801站)逐渐增加至98 m(S0806站),采样时间为2006年7月3日;S10断面位于台湾北部,由台山列岛附近海域向东南方向延伸,共有9个站,站位水深由近岸海域的23 m(S1001站)变化至台湾东北部海域的1769 m(S1010站),样品采集时间为2006年6月28日—7月1日;S09断面为连接S08和S10断面外海站位所形成的西北-东南向断面,共设置了6个站,站位位于外陆架至陆坡附近海域,水深介于103—1600 m之间,采样时间为2006年7月2日。

海水样品由CTD-Rosette采水器自各站位不同深度采集,至甲板后马上转入30 ml聚乙烯塑料瓶中,将瓶子空气驱赶干净后,气密保存,带回陆地实验室进行海水 ^{18}O 的分析。

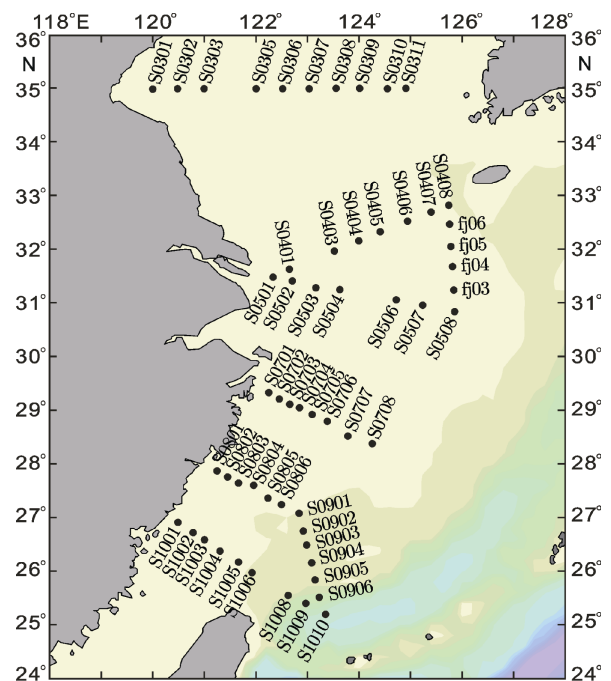


图1 2006年夏季黄、东海 ^{18}O 采样站位
Fig.1 Sampling locations for H_2^{18}O measurements in the Yellow Sea and the East China Sea in summer 2006

1.2 海水 ^{18}O 的测量

在同位素海洋学研究中, 通常关心的不是某种同位素的绝对含量, 而是其同位素组成的相对比值(如 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)。为便于比较, 提高测量精度, 同位素比值的测量总是相对于某一预先选定的标准, 并以千分偏差表示, 即 ^{18}O 丰度一般用 $\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{样品}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1000$ 表示。世界平均大洋水 SMOW(Standard Mean Ocean Water)被选定作为测定水中氧同位素的标准, 并假定这个水体的同位素组成 $\delta^{18}\text{O}=0$ 。对于毫升量级水体的 ^{18}O 同位素分析, 通常采用在高精度气体质谱仪上进行同位素分析。

本研究采用常温(25°C)下 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 平衡法进行海水 ^{18}O 同位素的测定, ^{18}O 同位素丰度通过 Finnigan Delta^{plus} XP 稳定同位素比值质谱仪测得。水样测量期间, 每间隔 10—20 份样品加入 3—5 份不同 ^{18}O 丰度的标准样品同时测量, 通过标准样品所建立的测量值与真实值之间的线性关系计算出样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。所有样品均进行了 6 次以上的重复分析, 如果重复测量的精度比 $1\sigma = 0.04\text{‰}$ 来得差, 则再次进行测量, 文中所报道 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均精度均好于 $1\sigma = 0.02\text{‰}$ 。

2 结果

2.1 $\delta^{18}\text{O}$ 的含量

调查海区海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为 -3.16‰ — 0.97‰ , 平均值为 -0.16‰ 。从温度、盐度分布可看出, 研究水体垂向上可区分为混合层、盐跃层和深水层, 为考察海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的含量与变化, 分别就陆架区和陆坡区的这三种水体进行了比较。陆架区和陆坡区的混合层(上均匀层)大多位于 0—10 m, 个别站位 <10 m, 少量站位可达 30 m。陆架区水体的盐跃层(盐度变化梯度 $>0.01/\text{m}$)一般在 10—30 m, 个别站位达到 50 m; 陆坡区水体的盐跃层从混合层底至 50 m, 个别站位可达 75 m。表 1 列出了陆架区和陆坡区混合层、盐

跃层和深水层海水温度、盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围, 以及 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值。陆坡区海水 $\delta^{18}\text{O}$ 均为正值, 对应的盐度也都在 33.5 以上, 盐跃层和深水层海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于混合层的相应值。陆架区海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显低于陆坡区, 而且由表(混合层)及底(深水层)呈明显的升高趋势, 与盐度的垂向变化规律一致。与陆坡区不同, 陆架区受陆地径流输入淡水的影响显著, 导致其水体盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低, 其中位于长江口附近的 S0501 站表层水盐度低至 21.36, 对应的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -3.16‰ , 皆为调查期间的最低值。

2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布

2.2.1 S03 断面 S03 断面 $\delta^{18}\text{O}$ 、盐度和温度的垂向层化作用较强(图 2)。从 S0301 站到 S0311 站有低盐、低 $\delta^{18}\text{O}$ 水由西向东伸展, 但影响深度越来越小(图 2a 和图 2b)。S0305 站至 S0311 站存在高盐、高 $\delta^{18}\text{O}$ 的深层水, 其核心位置在 123° — 124°E 的 30—60 m, 向西可扩展至 121.5°E 附近。该断面温度的垂向变化梯度较大, 20 m 深度附近存在较强的温跃层(图 2c), S0311 站底层水温仅 7.67°C , 低温水的影响可达 30 m 以浅。与低温、高盐水对应的是, 这些水体具有明显较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征。

2.2.2 S04 断面 S04 断面西部存在高温、低盐、低 $\delta^{18}\text{O}$ 的水体, 由西向东延伸至 S0405 站, 其垂向影响深度不足 10 m(图 3a,b,c)。该水体盐度低于 31, $\delta^{18}\text{O}$ 大多低于 -1‰ , 反映出淡水输入的影响。断面东部 S0406、S0407 和 S0408 站深层水具有低温、高盐和高 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征, 垂向范围局限在 40 m 以深的区域(图 3)。

2.2.3 S05 断面 S05 断面 $\delta^{18}\text{O}$ 、盐度和温度的分布与 S04 断面类似, 西端表层水体具有低盐、低 $\delta^{18}\text{O}$ 特征, 这些水体由 S0501 站向东延伸, 且逐渐变薄, 至 S0507 站后基本消失, 同样反映出低 $\delta^{18}\text{O}$ 冲淡水的影响(图 4a,4b)。断面东部 S0508 站深层水具有低温、高盐和高 $\delta^{18}\text{O}$ 特征, 并具有向西扩展的趋势(图 4c)。

表 1 陆架区和陆坡区混合层、盐跃层和深水层水体的温度、盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 值

Tab.1 Temperatures, salinities and $\delta^{18}\text{O}$ values in the shelf and slope regions

层次	陆架区				陆坡区			
	$T(^{\circ}\text{C})$	S	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$		$T(^{\circ}\text{C})$	S	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	
			范围	平均值			范围	平均值
混合层	16.25—29.15	21.36—34.48	-3.16—0.58	-0.53	27.38—29.58	33.54—34.32	0.09—0.43	0.30
盐跃层	7.87—27.03	28.07—34.76	-1.77—0.92	-0.22	18.03—28.88	34.01—34.71	0.28—0.75	0.54
深水层	7.67—26.94	29.53—34.77	-1.43—0.97	0.01	3.94—27.18	34.30—34.83	0.12—0.97	0.48

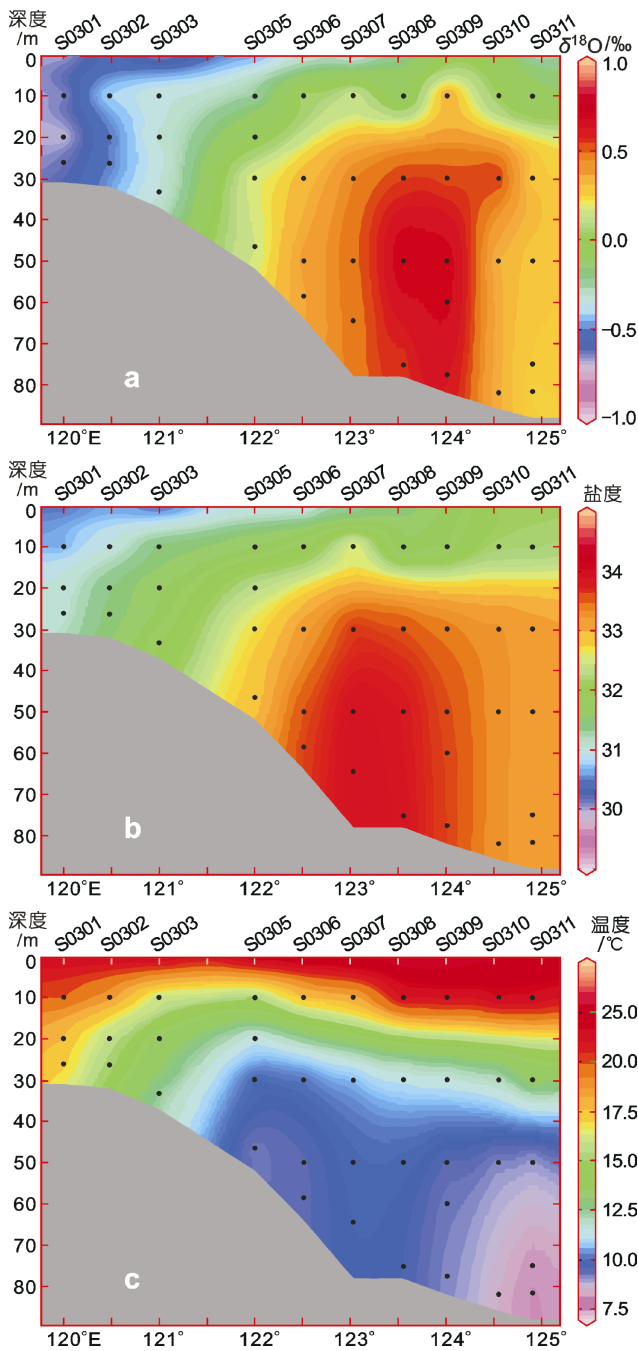


图2 S03断面 $\delta^{18}\text{O}$ (a)、盐度(b)和温度(c)的分布

Fig.2 Distributions of $\delta^{18}\text{O}$ (a), S (b) and T (c) in section S03

2.2.4 S07断面 在S07断面,海水 $\delta^{18}\text{O}$ 和盐度的分布相似,都在S0701站出现低值,并向东延伸至S0705站10 m以浅区域。此外,S0708站表层水体也具有相对低盐、低 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征(图5a, 5b)。该断面温度的分布显示,S0708站0—30 m深存在明显的高温水体,其影响范围达123°E。另外,在S0701至S0705站之间,以及S0708站的深层水具有相对低温的特点

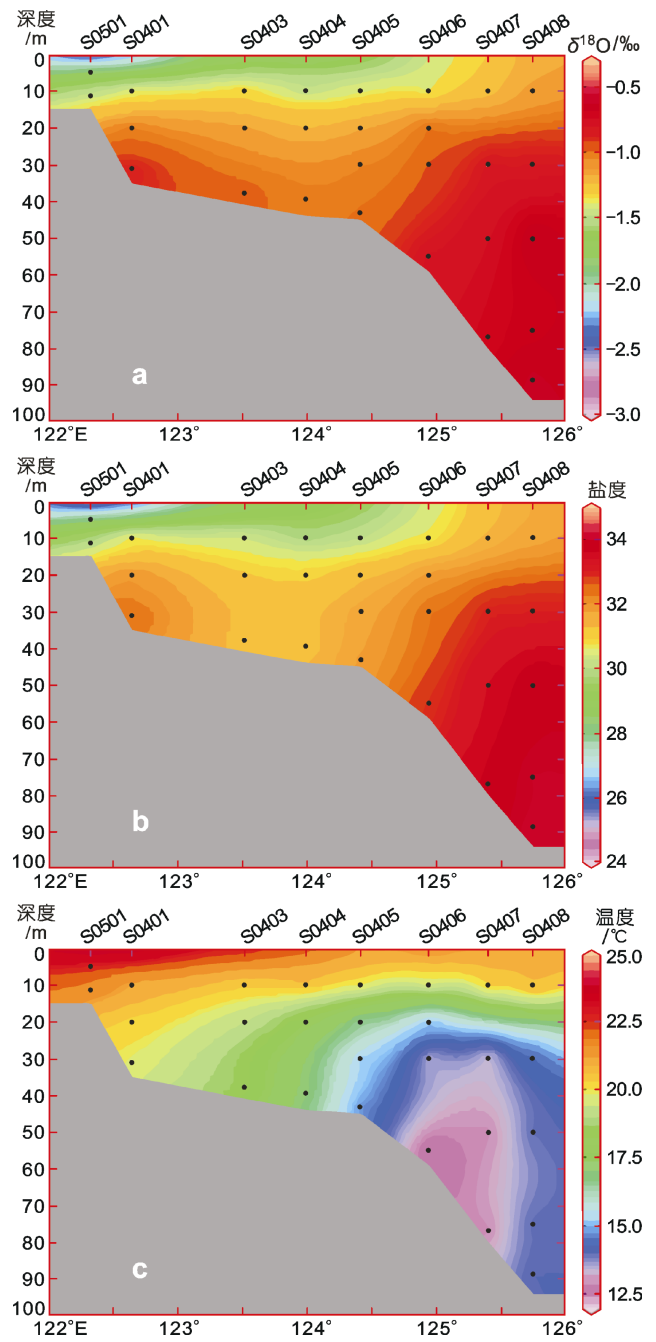


图3 S04断面 $\delta^{18}\text{O}$ (a)、盐度(b)和温度(c)的分布

Fig.3 Distributions of $\delta^{18}\text{O}$ (a), S (b) and T (c) in Section S04

(图5c)。

2.2.5 S08断面 S08断面近岸水体具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 特点,并向东扩展到S0805站,深度在20 m以浅。S0901站由表及底海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值均较高,S0804站近底层水也存在 $\delta^{18}\text{O}$ 的高值(图6a)。与海水 $\delta^{18}\text{O}$ 类似, $\delta^{18}\text{O}$ 的高低值往往伴随着盐度的高低值(图6b),二者具有很好的对应关系。该断面温度的分布显示,温跃层位于

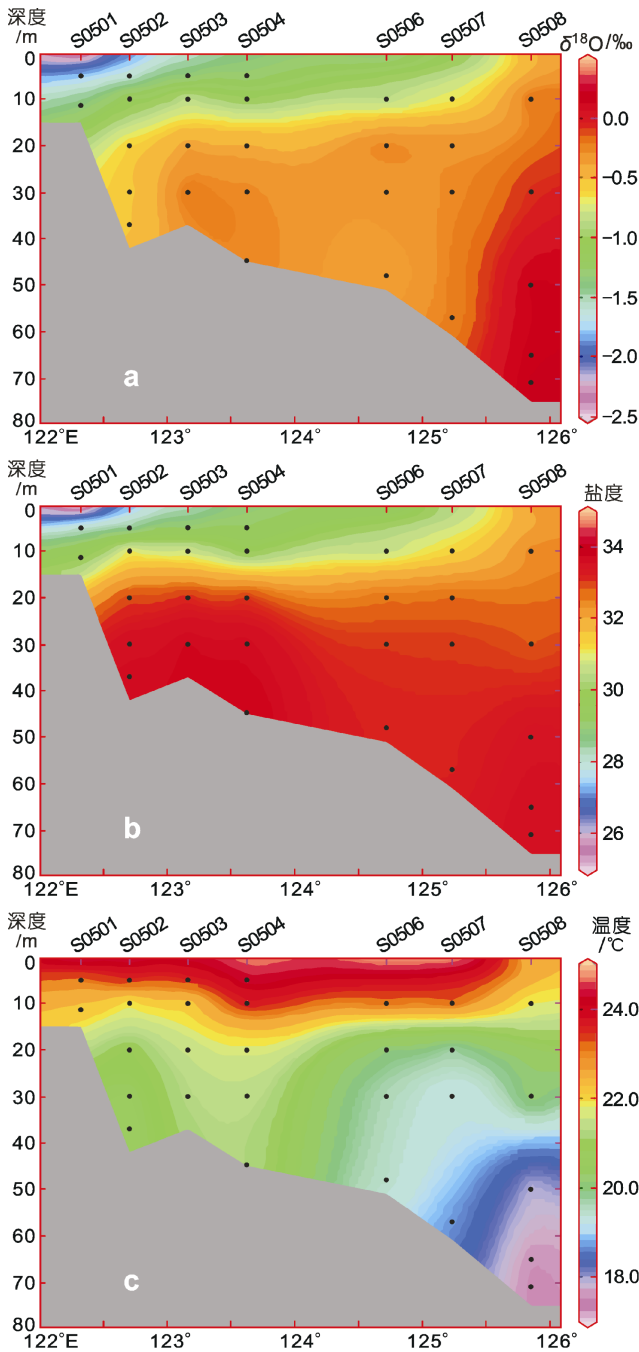


图 4 S05 断面 $\delta^{18}\text{O}$ (a)、盐度(b)和温度(c)的分布

Fig.4 Distributions of $\delta^{18}\text{O}$ (a), S (b) and T (c) in Section S05

40—60 m 区间, 温跃层将底部的低温水体与上层温暖水体分开(图 6c)。

2.2.6 S09 断面 该断面陆坡站位(S0906 站和 S1010 站)的表层及次表层水具有高 $\delta^{18}\text{O}$ 特征, 最高值出现在次表层水中, 与盐度的分布类似(图 7a, 7b)。从盐度、 $\delta^{18}\text{O}$ 分布看, 高 $\delta^{18}\text{O}$ 、高盐水体由外海向陆坡方向扩展, 但未明显影响到陆架区, 陆架区水体仍

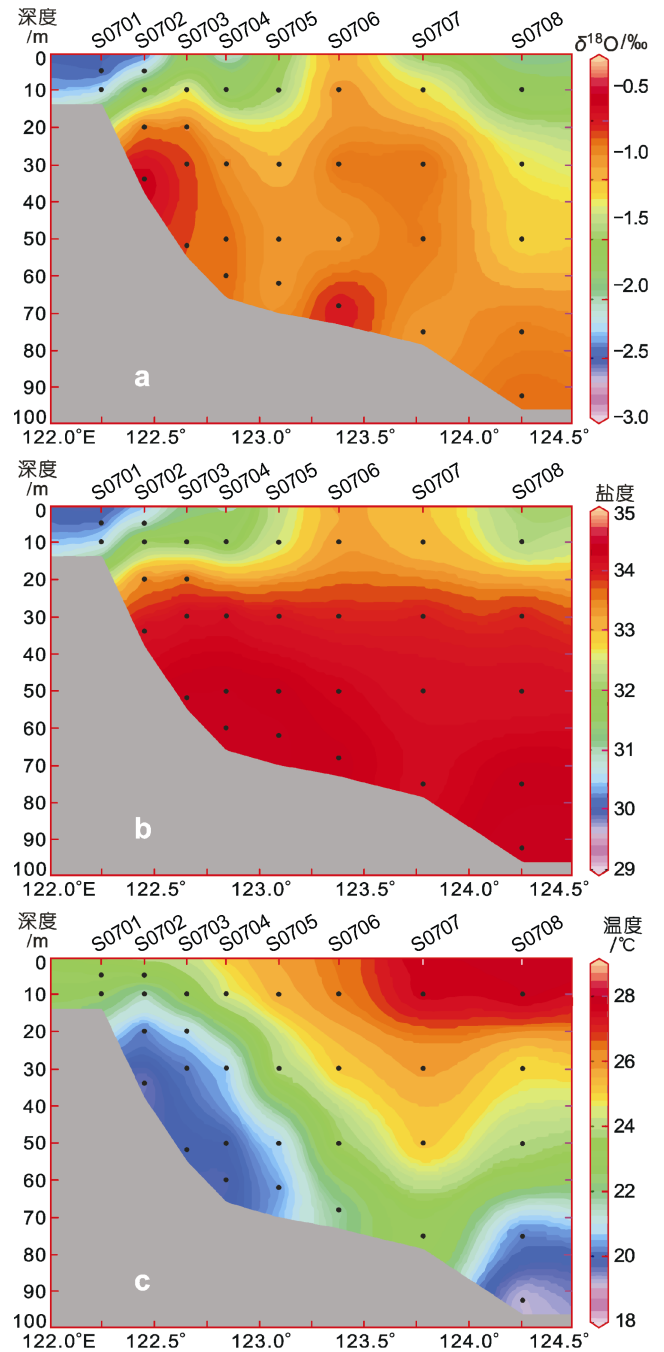


图 5 S07 断面 $\delta^{18}\text{O}$ (a)、盐度(b)和温度(c)的分布

Fig.5 Distributions of $\delta^{18}\text{O}$ (a), S (b) and T (c) in Section S07

具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 、低盐的特征。该断面温度的分布显示, 陆坡站位水体温度层化作用较陆架站位来得强, 陆坡站位温度垂向变化在 200—800 m 区间具有较大的梯度(图 7c)。

2.2.7 S10 断面 S10 断面海水 $\delta^{18}\text{O}$ 分布的最明显特征是陆坡站位(S1008 站、S1009 站和 S1010 站)次表层水具有高的 $\delta^{18}\text{O}$, 其数值大于 0.4‰, 深度在 75—

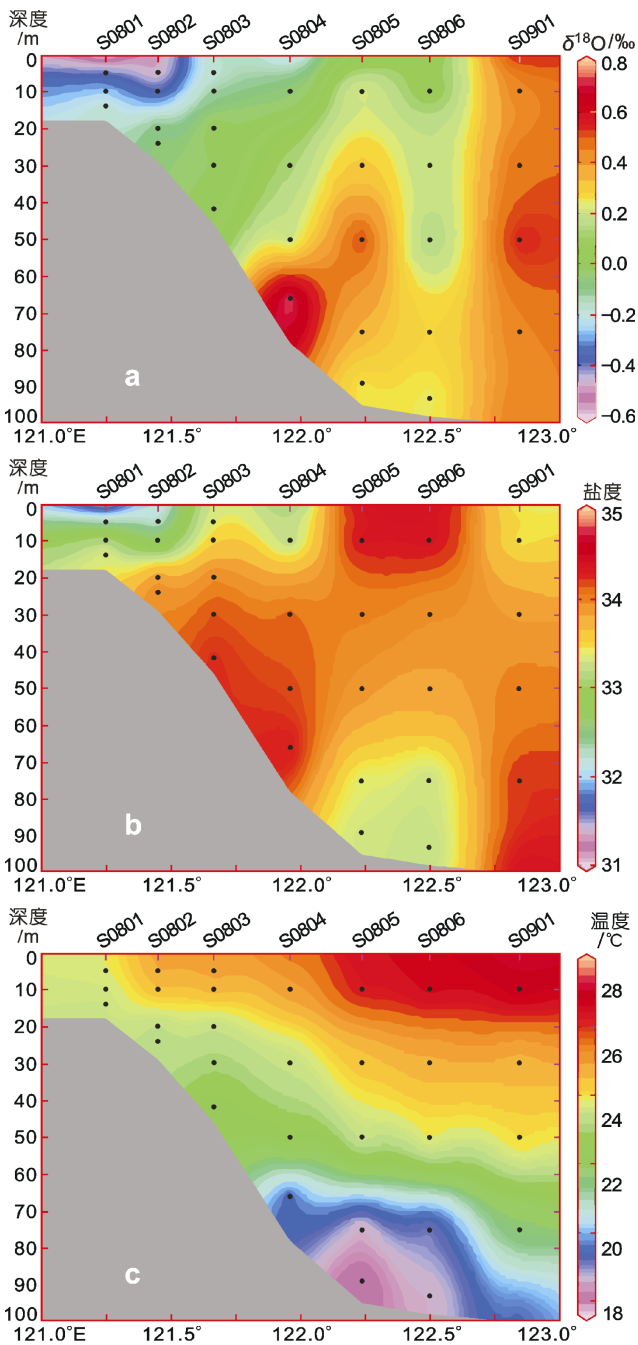


图6 S08断面 $\delta^{18}\text{O}$ (a)、盐度(b)和温度(c)的分布
Fig.6 Distributions of $\delta^{18}\text{O}$ (a), S (b) and T (c) in Section S08

300 m 之间(图 8a), 该水体同时具有高盐特征, 盐度高于 34.4(图 8b), 与次表层水相比, 其上、下层水体的盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对低些。从图 8a, 8b 还可以看出, 高盐、高 $\delta^{18}\text{O}$ 的水体并未侵入陆架, 陆架区仍呈现低盐、低 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征, 并在陆架破折处形成比较强的盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 锋面(图 8a, 8b)。温度的分布呈现由近岸向外海、由表及底降低的态势(图 8c)。

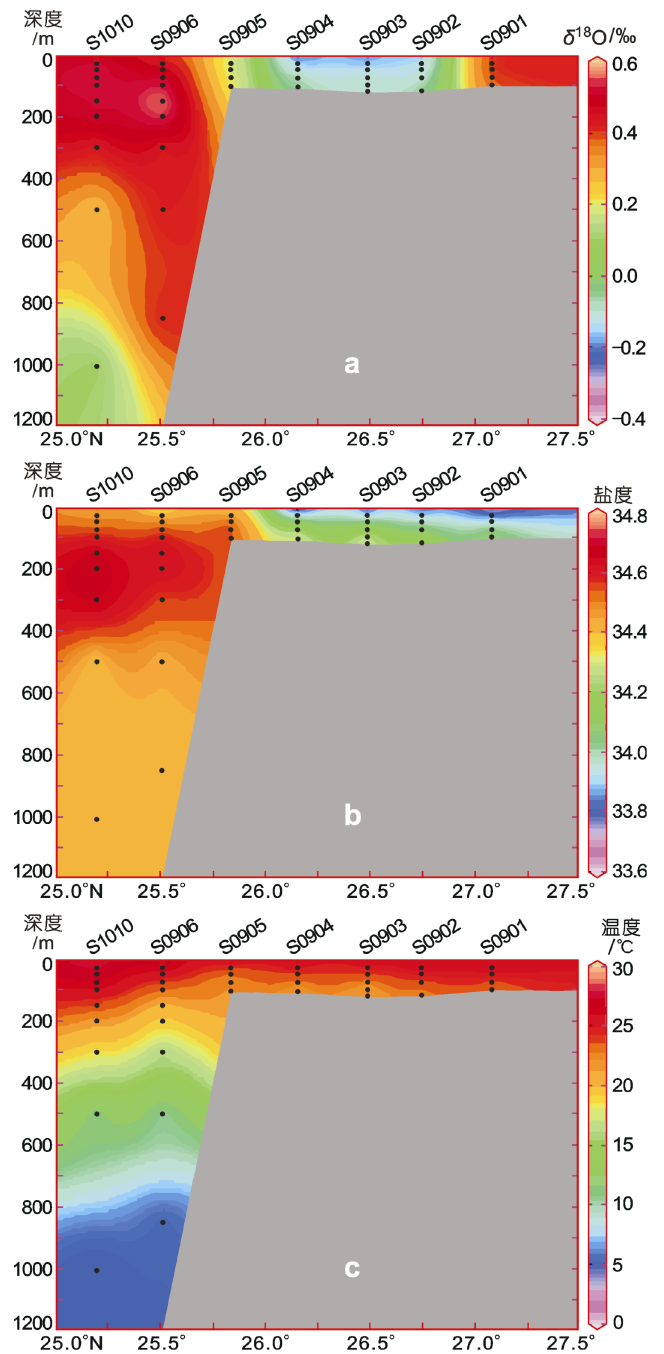


图7 S09断面 $\delta^{18}\text{O}$ (a)、盐度(b)和温度(c)的分布
Fig.7 Distributions of $\delta^{18}\text{O}$ (a), S (b) and T (c) in Section S09

2.2.8 fj 断面 fj 断面是位于济州岛西南部的南北向断面, 该断面海水 $\delta^{18}\text{O}$ 分布的最明显特征是南部和北部的 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在较大差异, 32°N 以北海域(包括 fj05、fj06 和 S0408 站)海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低, 而 32°N 以南海域(包括 fj03、fj04 和 S0508 站)海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 较高, 由此在 32°N 附近形成较强的 $\delta^{18}\text{O}$ 锋面(图 9a)。北部低 $\delta^{18}\text{O}$ 的上层水体具有低盐的特点, 而南部上层水

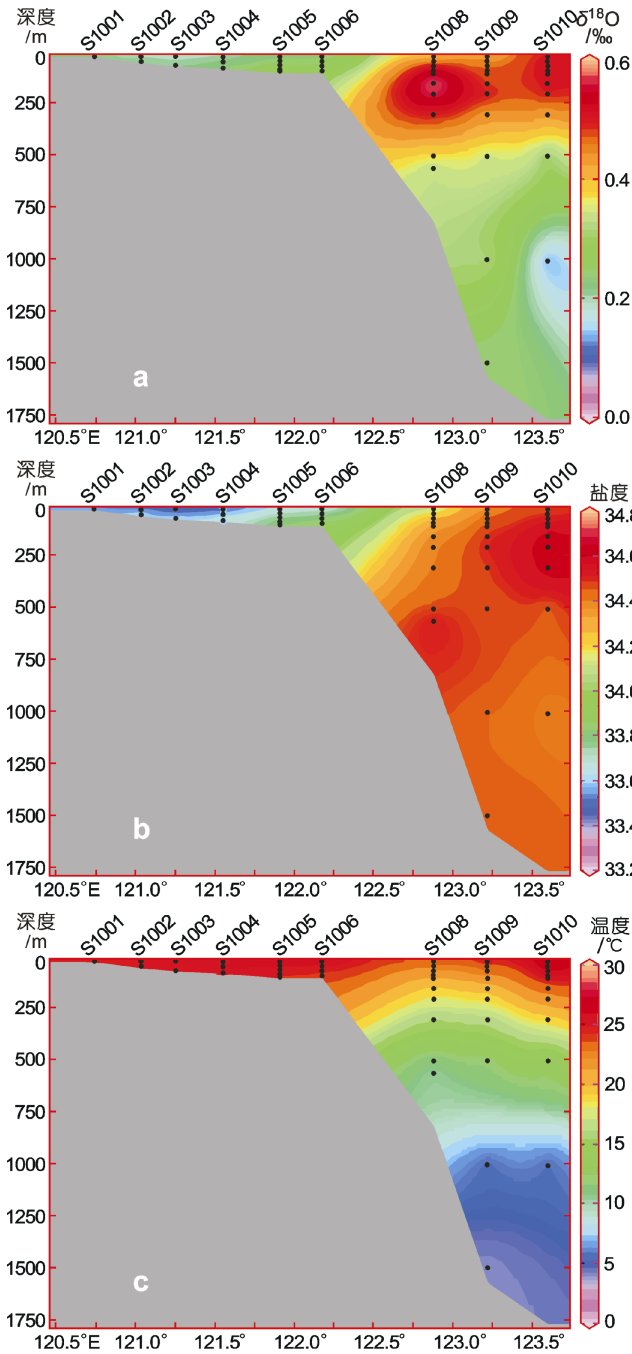


图 8 S10 断面 δ¹⁸O(a)、盐度(b)和温度(c)的分布

Fig.8 Distributions of δ¹⁸O(a), S(b) and T(c) in Section S10

体盐度相对较高, 深层水的盐度则在 fj03、fj04 站较低, 往南、北方向呈小幅增加态势(图 9b)。该断面温度的分布显示, fj04、fj05 和 fj06 站的深层存在冷水, 并呈现向上扩展的趋势, 导致 fj04 站和 fj05 站表层水较其南部和北部的水体温度更低(图 9c), 从位置及特征分析, 此水体应为济州西南冷涡区所在(郭炳火等, 2004)。

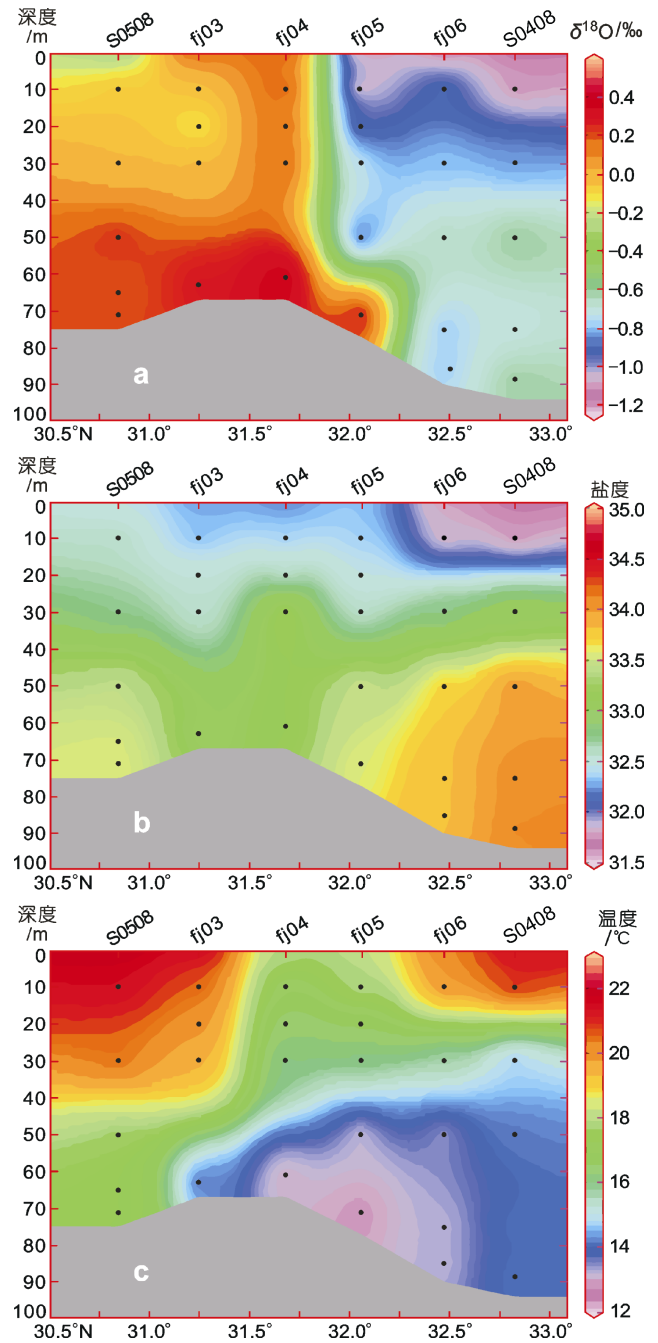


图 9 fj 断面 δ¹⁸O(a)、盐度(b)和温度(c)的分布

Fig.9 Distributions of δ¹⁸O(a), S(b) and T(c) in Section fj

3 讨论

3.1 海水 δ¹⁸O 与盐度的关系

由海水盐度和 δ¹⁸O 的分布可以看出, 调查期间二者的空间变化基本同步。实际上, 海水 δ¹⁸O 与盐度之间存在显著的线性正相关关系: $\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = 0.29S - 9.85 (n = 317, r^2 = 0.67)$ (图 10), 这种正相关关系的存在与二者受相同过程的影响有关。在海水蒸发/冷凝

过程中,海水氧同位素与盐度会同时发生变化,当海水蒸发时,由于同位素的分馏作用,较轻的同位素会优先富集在气相,因此,伴随着蒸发过程,海水盐度增加,而重同位素富集(即 $\delta^{18}\text{O}$ 值增大)。海水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与盐度之间所具有的相关关系意味着 $\delta^{18}\text{O}$ 的含量与分布是海洋水团来源和混合的理想示踪剂。依据海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值和盐度的线性拟合关系,可确定出影响东海和黄海陆地径流水和黑潮水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值。由拟合关系外推至 $S=0$ 可得,陆地淡水端元的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -9.85‰ ,落在已报道的长江河水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围内 $[-8.8\text{‰}—7.1\text{‰}$, (Zhang *et al.*, 1990); $-1\text{‰}—50\text{‰}$, (洪阿实, 1995)],与热带西太平洋雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $[-2.0\text{‰}—19.3\text{‰}$, 平均为 -8.4‰ , (任建国等, 2000)]相符合。黑潮为来自北赤道流北向分支的西边界流,具有高温、高盐的特点,黑潮源地水体的盐度介于 $34.20—35.02$ 之间,最高盐度出现在黑潮次表层水(袁耀初和孙湘平, 2005; 孙湘平, 2006),由上述拟合关系可计算出夏季黑潮水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值为 $0.20\text{‰}—0.45\text{‰}$ 。所得黑潮水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值与文献报道的基本符合,吴世迎(1988)和洪阿实等(1994)给出黑潮水 $\delta^{18}\text{O}$ 的最高值为 0.45‰ ; Kang等(1994)给出的东海黑潮分支($S=34.40$, $25^{\circ}10'\text{N}$, $121^{\circ}58.6'\text{E}$)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 0.2‰ ; 黄奕普等(1996)给出受黑潮影响的南海水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 $0.11\text{‰}—0.92\text{‰}$; Kim等(2005)通过分析对马海流水体的 $\delta^{18}\text{O}$,确定出黑潮水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值介于 $0.3\text{‰}—0.6\text{‰}$ 。

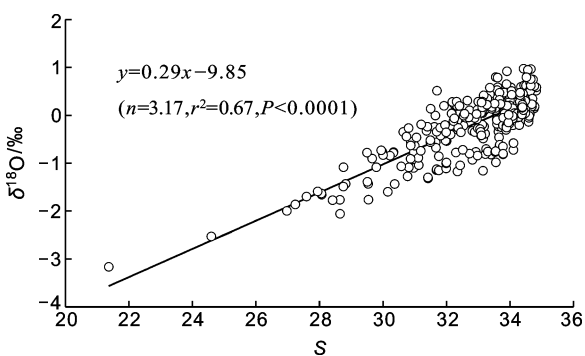


图 10 东海和南黄海海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 S 的关系

Fig. 10 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and S in the East China Sea and the southern Yellow Sea

3.2 海水 ^{18}O 分布的影响因素

3.2.1 长江冲淡水

伴随水分蒸发及降雨的发生,同位素分馏作用导致大气水蒸气相对贫乏 ^{18}O ,陆地淡水的来源归根结底来自降雨或降雪,因此陆地径流淡水中的 ^{18}O 丰度会明显低于海水。3.1中已确定

出陆地淡水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值为 -9.85‰ ,就研究海域而言,主要的陆地淡水来源为长江径流的影响,因而受长江冲淡水影响的海域,将呈现低 $\delta^{18}\text{O}$ 的特点。在研究海域的S04断面、S05断面和fj断面,均可看到由长江口向外扩展的低 $\delta^{18}\text{O}$ 水体,深度在 20 m 以浅,显示出长江冲淡水的影响。若以海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -1‰ (即水体中淡水比例大于 10%)作为受长江冲淡水明显影响的判据,则在靠北部的S04断面,低 $\delta^{18}\text{O}$ 的表层水体可向东扩展至 125.7°E 、 32.8°N 附近(S0408站)(图2a, 2b)。在靠南部的S05断面,低 $\delta^{18}\text{O}$ 的表层水体可向东影响至 124.7°E 、 31.1°N 附近(S0506站)(图3a, 图3b)。由此可见,长江冲淡水对S04断面的影响范围较S05断面来得大,这也可以从fj断面海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布得到佐证,在fj断面,靠近北部的表层水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显低于南部站位,其中fj05、fj06站表层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -1‰ 。综合上述信息可以看出,夏季调查期间长江冲淡水进入东海后,对其东北部水体的影响更为显著,其影响可及济州岛的西南部。与此前水文学研究得到的认识是一致的,郭炳火等(2004)、浦泳修(2005)指出,夏季长江冲淡水流出口门后,在惯性力的作用下,先以“射形流”或“拟射形流”的态势直下东南,大约在 $122.2—122.5^{\circ}\text{E}$ 区段,开始转向东北,舌状向东北的济州岛方向扩展,有些年份可越过 34°N 直抵南黄海中部。长江冲淡水舌偏向东北方向的原因被认为是夏季偏南风的风场作用(管秉贤, 1985; 赵保仁等, 1991; 郭炳火等, 1998; 邹娥梅等, 2001; 郑琰明等, 2009),其具体扩展方向取决于北上的台湾暖流与南下的苏北沿岸流在长江口以东强弱的对比(郭炳火等, 1998; 朱建荣等, 1998; 邹娥梅等, 2001)。

3.2.2 黑潮水

黑潮是北赤道流的一个向北分支的延伸,其源地大致在台湾东南和吕宋海峡以东海域(孙湘平, 2006)。由于源地海区具有强烈的净蒸发作用,黑潮水具有高盐和高 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征,3.1节中已确定出黑潮水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值为 $0.20\text{‰}—0.45\text{‰}$,因而受黑潮水影响的海域,将呈现高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的特点。在研究海域的S10断面和S09断面,可明显看出黑潮水对东海陆架、陆坡的影响情况。在S10断面,受黑潮水明显影响的区域位于S1006站(121.6°E)以东,即在陆架坡折以东的位置,但未观察到高 $\delta^{18}\text{O}$ 的黑潮次表层水的涌升(图8a)。在S09断面,高 $\delta^{18}\text{O}$ 值同样出现在陆架坡折(S0905站, 123.1°E)以东的区域,亦未观察到黑潮次表层水涌升的现象(图9a)。值得注意的是,在

受黑潮水影响明显的 S0906、S1008、S1009、S1010 四个站中, 对于盐度具有极大值(在 75—200 m)的黑潮次表层水, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值也呈极大值分布, 但 S0906 站和 S1008 站黑潮次表层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(平均值分别为 0.66‰和 0.78‰)高于 S1009 站和 S1010 站的相应值(平均值分别为 0.50‰和 0.53‰), 说明夏季黑潮水在台湾东北部海域的入侵可能是以气旋式涡旋的形式进行, 佐证了郭炳火等(2004)基于水文学研究得到的结论。在 S05、S07、S08 断面的最东端站位(图 4a、图 5a、图 6a), 未能观察到黑潮次表层水的高 $\delta^{18}\text{O}$ 特点, 与这些站位距离陆架外缘尚有一定距离有关, 但不能排除它们受黑潮表层水混合的影响。

3.2.3 黄海冷水团 黄海冷水团是黄海最显著的水文学现象之一, 具体指征夏季时残留在黄海海底洼地的冬季状态的水体。黄海冷水团的形成与季节性温跃层的形成有关, 春季始表层海水的逐渐增温导致温跃层的加强, 从而抑制上、下层水体的对流, 跃层之下的水体基本保持冬季遗留下的低温性质(孙湘平, 2006)。黄海冷水团的主要特征是温度低且温差大, 盐度较高但盐差小, 其温度变化范围一般为 5—12℃, 盐度变化范围通常为 31.5—32.5(苏纪兰和王大吉, 1995)。在本研究调查期间, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布同样清晰地指示出黄海冷水团的存在与影响。从 S03 断面海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布可以看出, S0305 站以东站位深层水(30 m 以深)具有明显较高的 $\delta^{18}\text{O}$, 正好对应于低温、高盐区域, 其东西向跨度约 3 个经度(122°—124.9°E), 恰好反映了南黄海冷水团的空间位置。若以 10℃等温线为外缘, 则调查区域南黄海冷水团的平均水温为 8.75℃, 最低达 7.67℃, 相应的海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值平均为 0.40‰, 较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值意味着南黄海冷水团与外海水体之间可能存在一定的联系。值得注意的是, S03 断面底层水温度的最低值出现在 124.9°E 附近(S0311 站, 图 2c), 而盐度和 $\delta^{18}\text{O}$ 的高值中心出现在 122.0—124.5°E 之间(S0305 站和 S0310 站之间, 图 2a, 2b), 较温度低值中心稍为偏西, 温度与盐度、海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值空间分布上的差异可能与黄海冷水团的形成与演变有关。于非等(2006)指出, 冬季由于受黄海暖流的影响, 存在沿黄海中央由南向北伸展至渤海海峡附近的暖水舌, 随后春、夏季的增温, 导致南黄海在冬季黄海暖流路径两侧分别形成两个冷中心。本研究观察到的最低温中心与于非等(2006)指出的南黄海东侧冷中心的位置符合, 其西侧观察到的相对高盐、高 $\delta^{18}\text{O}$ 水体则可能与冬季黄海暖流水有关。冬季黄海暖流水体是对马暖流水与东海混合水侧向混合而成, 并沿

黄海槽西侧北上, 具有高温、高盐的特征(汤毓祥等, 2000), 本研究于 S03 断面所观察到的较高 $\delta^{18}\text{O}$ 可证实这些水体并非局地陆架水形成, 而是与外海水具有一定的联系。

4 结论

对夏季黄、东海海区海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究表明, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 与盐度之间存在明显的线性正相关关系, 由此可确定出影响黄、东海海域的黑潮水和陆地淡水的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征, 夏季黑潮水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值介于 0.20‰—0.45‰之间, 而陆地径流水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值为 -9.85‰。黑潮水与长江河水截然不同的 $\delta^{18}\text{O}$ 特征为应用海水 ^{18}O 揭示调查海区黑潮水和长江冲淡水的影响奠定了基础。调查海域海水 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布显示, 在台湾东北部海域, 夏季黑潮水仅影响到陆架破折以外海域, 黑潮水的影响路径可能以气旋式涡旋的形式出现。在长江口附近海域, 长江冲淡水进入东海后, 对其东北部水体的影响更为显著, 其影响可及济州岛的西南部。在南黄海 35°N 断面, 海水 $\delta^{18}\text{O}$ 分布反映了南黄海冷水团的空间位置, 并佐证了于非等(2006)提出的南黄海冷水中心的形成与冬季黄海暖流有关的观点。本研究同时也表明, 组成水分子的 ^{18}O 稳定同位素是研究海洋水文学的理想示踪剂, 可为水体混合与交换、海流结构等提供有价值的信息。

致谢 中国海洋大学“东方红 2 号”科学考察船及 973 项目夏季航次全体科考人员在样品采集给予的帮助; 中国海洋大学吴德星教授、鲍献文教授、兰健副教授、林霄沛副教授等为本研究提供了温度、盐度等数据, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 于 非, 张志欣, 刁新源等, 2006. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析. 海洋学报, 28(5): 26—34
- 于 非, 臧家业, 郭炳火等, 2002. 黑潮水入侵东海陆架及陆架环流的若干现象. 海洋科学进展, 20(3): 21—28
- 朱建荣, 沈焕庭, 朱首贤等, 1998. 黄海冷水团对长江冲淡水扩展的影响. 海洋与湖沼, 29(4): 389—394
- 任建国, 黄奕普, 方志山等, 2000. 热带西太平洋雨水的氢、氧同位素组成. 海洋学报, 22(5): 60—64
- 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰等, 2000. 南黄海环流的若干特征. 海洋学报, 22(1): 1—16
- 孙湘平, 2006. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 1—376
- 苏纪兰, 黄大吉, 1995. 黄海冷水团的环流结构. 海洋与湖沼增刊, 26(5): 1—7
- 李培泉, 康兴伦, 1988. 海水中的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值及其应用. 海洋科学, 6: 44—47

- 吴世迎, 1988. 大洋和近岸水的氧同位素组成研究. 黄渤海海洋, 6(3): 43—54
- 邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥, 2001. 南黄海及东海北部夏季若干水文特征和环流的分析. 海洋与湖沼, 32(3): 340—348
- 张锡根, 阎保瑞, 1998. 太平洋水-沉积物系统氢氧同位素与海洋环境. 海洋地质与第四纪地质, 18(2): 27—34
- 陈敏, 邢娜, 黄奕普等, 2007. 加拿大海盆河水组分的平均停留时间. 科学通报, 24(52): 2889—2894
- 郑琰明, 康建成, 钟巍等, 2009. 2004年夏初、秋末长江口外海区冲淡水及羽状锋的盐度特征. 海洋与湖沼, 40(3): 275—282
- 赵保仁, Limeberner R, 胡敦欣等, 1991. 夏季南黄海和东海北部水文特征. 海洋与湖沼, 22(2): 132—139
- 洪阿实, 1995. 海洋环境中氧同位素示踪物技术. 海洋环境科学, 14(4): 16—20
- 洪阿实, 王明亮, 高仁祥等, 1994. 热带西太平洋海水氧同位素组成特征的初步研究. 海洋与湖沼, 25(4): 416—421
- 袁耀初, 孙湘平, 2005. 台湾以东的黑潮. 见: 苏纪兰, 袁业立主编. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社, 207—213
- 郭炳火, 李兴宰, 李载学, 1998. 夏季对马暖流黑潮水与陆架水的相互作用. 海洋学报, 8(3): 272—282
- 郭炳火, 黄振宗, 李培英等, 2004. 中国近海及邻近海域海洋环境. 北京: 海洋出版社, 1—446
- 黄奕普, 施文远, 金德秋等, 1996. 南海东北部重氢的分布与黑潮水入侵南海. 中国海洋学文集. 北京: 海洋出版社, 6: 71—81
- 浦泳修, 2005. 长江冲淡水. 见: 苏纪兰, 袁业立主编. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社, 245—246
- 管秉贤, 1985. 黄、东海浅海水文学的主要特征. 黄渤海海洋, 3(4): 1—10
- Broecker W S, 1994. Isotope as water mass tracers. Chemical Oceanography, 6(2): 143—151
- Craig H, 1966. Isotopic composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines. Science, 154: 1544—1548
- Dansgaard W, 1960. The content of heavy oxygen isotopes in the water masses of the Philippine Trench. Deep-Sea Res, 6: 346—350
- Fairbanks D G, 1982. The origin of continental shelf and slope water in the New York Bight and Gulf of Maine: evidence from $H_2^{18}O/H_2^{16}O$ ratio measurements. J Geophys Res, 87(C8): 5796—5808
- Kang D J, Chung C S, Kim S H *et al*, 1994. Oxygen isotope characteristics of seawaters in the Yellow Sea. La mer, 32: 279—284
- Kim K R, Cho Y K, Kang D J *et al*, 2005. The origin of the Tsushima Current based on oxygen isotope measurement. Geophysical Research Letters, 32, doi: 10.1029/2004GL021211
- Tan F C, Strain P M, 1980. The distribution of sea ice meltwater in the Eastern Canadian Arctic. J Geophys Res, 85(C4): 1925—1932
- Torgensen T, 1979. Isotopic composition of river run-off on the U.S. East coast: evaluation of the stable isotope versus salinity plots of coast water mass identification. J Geophys Res, 84: 3373—3375
- Zhang J, Letolle R, Martin J M *et al*, 1990. Stable oxygen isotope distribution in the Huanghe (Yellow River) and the Changjiang (Yangtze River) estuarine systems. Continental Shelf Research, 10(4): 369—384

OXYGEN ISOTOPE IN SEAWATER AND ITS HYDROLOGICAL IMPLICATION IN THE SOUTHERN YELLOW SEA AND THE EAST CHINA SEA

DU Jin-Qiu, CHEN Min, CAO Jian-Ping, QIU Yu-Sheng,
TONG Jin-Lu, MA Qiang, YANG Jun-Hong

(College of Oceanography and Environmental Sciences, Xiamen University, Xiamen, 361005)

Abstract Seawater samples were collected from the southern Yellow Sea and the East China Sea in 2006 summer for ^{18}O measurements. Oxygen isotope was used as a conservative tracer for water mass analysis along with temperature and salinity. A positive linear relationship was observed between $\delta^{18}O$ and salinity, and the $\delta^{18}O$ endmembers for the Kuroshio waters and the freshwaters was assessed to be 0.20‰—0.45‰ and -9.85‰, respectively. The distribution of $\delta^{18}O$ was influenced by the Kuroshio Water, the Changjiang River Water and the Yellow Sea Cold Water. The Kuroshio waters occupied only the slope regions northeastern of Taiwan Island, and entered the slope with a cyclonic trajectory. The Changjiang River waters turned to the northeastern after they entered the East China Sea. Its influence in the north of the Changjiang estuary extended to the southwestern of the Jizhou Island, and was farther than those in the south. In the Southern Yellow Sea, the Yellow Sea Cold Waters were manifested high $\delta^{18}O$ values, indicating the formation of the Yellow Sea Cold Water observed in summer was related to the Yellow Warm Current in winter.

Key words The Southern Yellow Sea, The East China Sea, Oxygen isotope, Water mass