

黄海西部沿岸冷水在夏季南黄海西部底层冷水形成和季节演变过程中作用的化学水文学分析*

韦钦胜^{1, 3} 于志刚³ 葛人峰² 王辉武² 王保栋¹

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋生态环境科学与工程国家海洋局重点实验室 青岛 266061;

2. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室 青岛 266061;

3. 中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室 青岛 266100)

提要 基于南黄海西部海域的四季水文和营养盐调查资料,从化学水文学的视角研究了黄海西部沿岸冷水在南黄海冷水团及其西部冷中心形成和季节演变中的作用,揭示了南黄海冷水团与青岛冷水团之间的内在联系,阐释了夏季黄海冷水团西部冷中心的形成机制。结果表明,冬、春季南黄海西部沿岸流沿陆架锋面南下流动。黄海西部沿岸流南下携带的冷水对春季青岛冷水团以及南黄海中层和底层冷水、夏季南黄海西部冷水团及其冷中心的形成具有重要的作用,南黄海西部底层冷水首先在青岛冷水团附近海域孕育,并在夏季发展为黄海冷水团的西部冷中心。入秋后,南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水开始消退,同时黄海西部沿岸流也重新携带冷水南下,并逐渐为翌年的青岛冷水团水、南黄海中层和底层冷水以及夏季南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水提供来源,由此形成夏季南黄海西部陆架锋东侧底层冷水的季节性演替。本研究深化了对黄海西部沿岸流和南黄海冷水团及其相互关系的认识,进一步揭示了南黄海西部冷水团水的来源。

关键词 黄海西部沿岸冷水; 黄海冷水团; 青岛冷水团; 中层冷水; 陆架锋; 化学水文学

中图分类号 P731, P734

本文所称“黄海西部沿岸冷水”特指南黄海西部沿岸流水主体(即上接鲁北沿岸流,并绕过成山头顺鲁南沿岸和苏北外海向东海输送的水流(孙湘平, 2006))。对这一重要的海洋现象,早在 20 世纪 30 年代初期,日本学者 Uda(1934, 1936)就曾指出,黄海海槽西侧存在向南运移的沿岸流,之后,对黄海西部沿岸流这一基本模式的认识未有重大变化(陈则实等, 1979; 汤毓祥等, 2000)。先前研究显示,黄海西部沿岸流水不仅对该海域的物质输运具有重要影响(杨作升等, 1992; 孙效功等, 2000),而且与春季青岛冷水团和南黄海中层冷水的形成密切相关(汤毓祥等, 1999; 邹娥梅等, 2000; 张启龙等, 1996, 2004; Zhang

et al, 2002; 于非等, 2005, 2006)。然而,迄今人们对冬半年黄海西部沿岸水具体路(途)径的分析和探讨尚不多见,对黄海西部沿岸水南下在南黄海冷水团形成过程中的作用也尚无系统的认识,而且针对南黄海冷水团的季节演变与青岛冷水团以及南黄海中层冷水的关系亦存在不同的观点(邹娥梅等, 2000; 张启龙等, 1996; 于非等, 2006)。本文利用 2006—2007 年四季在南黄海西部基于密集站位大面调查所获得的温度、盐度和营养盐观测资料,从化学水文学的视角分析和指示冬半年黄海西部沿岸水的输运过程和路径,在此基础上重点探讨这一黄海冷水在南黄海冷水团及其西部冷中心形成和季节演变过程中的作用,

* 我国近海海洋综合调查与评价专项课题, 908-01-ST03 号; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目——黄海冷水团变异及其对海洋生态系统的影响, GY02-2010T05 号。韦钦胜, 博士研究生, 助理研究员, E-mail: weiqinsheng@fio.org.cn

收稿日期: 2012-03-21, 收修改稿日期: 2012-06-23

进一步阐明南黄海冷水团与青岛冷水团和南黄海中层冷水之间的内在联系, 以期对黄海西部沿岸流和南黄海冷水团有更为深入的认识。

1 材料与方法

本文所用的调查数据源自 2006—2007 年“我国近海海洋综合调查与评价”专项之南黄海区块水体环境调查(由国家海洋局第一海洋研究所完成)。在南至 32.3°N、北至 37°N 的海区内共布设 15 条调查断面(山东半岛南部近岸区的一些站位不在这些断面上), 进行水文要素和水化学要素的观测, 调查分别于春季(2007-04-04—2007-04-26)、夏季(2006-07-14—2006-08-03)、秋季(2007-10-06—2007-11-05)和冬季(2007-01-08—2007-02-04)进行, 各航次具体断面位置以及站位设置见图 1。水体的温度、盐度和深度利用

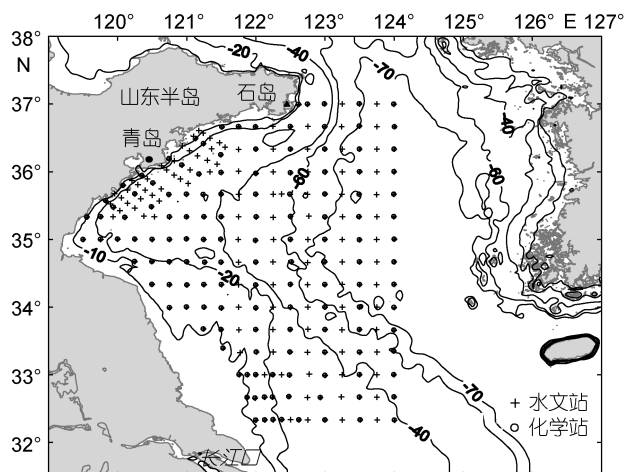


图 1 南黄海四季调查站位图

Fig.1 Locations of investigated stations in the southern Yellow Sea in four seasons

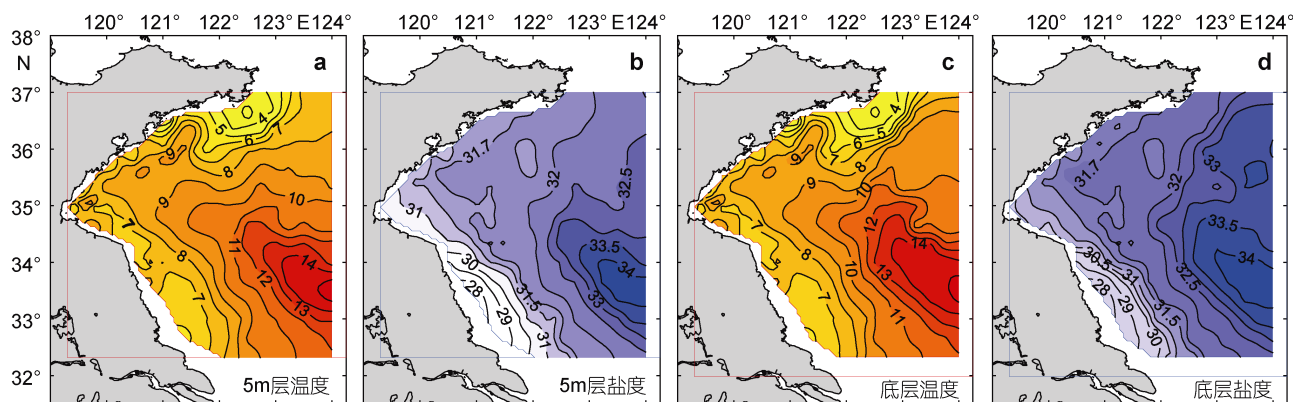


图 2 冬季南黄海温度(°C)、盐度的平面分布

Fig.2 Horizontal distribution of temperature (°C) and salinity in winter in the southern Yellow Sea

Sea-Bird 917 CTD 测定, 并用捆绑在 CTD 上的 Niskin 采水器采集营养盐测定所需水样(取 0、10、30m 和底层水样); 营养盐按照《海洋监测规范》规定的方法, 经过 0.45μm 的醋酸纤维膜过滤后, 用分光光度计现场测定, 其中硝酸盐(NO₃-N)采用锌-镉还原法, 亚硝酸盐(NO₂-N)采用奈乙二胺法, 铵盐(NH₄-N)采用次溴酸盐氧化法, DIN(溶解态无机氮) = NO₃-N + NO₂-N + NH₄-N, 磷酸盐(PO₄-P)采用磷钼蓝法, 硅酸盐(SiO₃-Si)采用硅钼蓝法。

2 结果与讨论

2.1 冬半年温度、盐度和营养盐平面分布对黄海西部沿岸水南向流动的指示

2.1.1 冬季 图 2 为冬季调查所获得的南黄海温、盐度分布图。可以看出, 5m 层和底层的温、盐度分布颇为相似, 源自山东半岛北岸的低温、低盐水[即鲁北沿岸流水(邹娥梅等, 2000; 郭炳火, 1993)]绕过成山角后向南黄海扩展, 在石岛外海形成一块明显的低温、低盐区, 最低水温小于 4°C。该低温、低盐沿岸水的南向延伸与由调查海域东南向西北延伸的高盐暖水舌形成强烈的对比, 且在一定程度上受到了暖水舌西北向入侵的阻碍, 但从山东半岛东南海域存在的低盐冷水来看, 此低盐冷水的前锋似乎可扩展到高温水舌内部与之部分混合和变性后继续南下, 进而与苏北沿岸的低温、低盐水交汇, 同时还与外海高盐暖水之间形成较强的陆架锋(此指温、盐度锋)。其它水层的温、盐度分布(图略)也与图 2 基本相同。上述低温、低盐水的南向流动即构成了冬季黄海西部沿岸流主体, 而与之对应的高盐暖水舌则为黄海暖流(汤毓祥等, 2000; Yu *et al.*, 2010)。

通过考察调查期间营养盐的分布状况,亦可进一步佐证上述黄海西部沿岸冷水现象。如图 3 所示,10m 层石岛外海域 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的含量均相对较高,并与此处的低温冷水吻合良好,且随鲁北沿岸流水继续向西南海域延伸。另外,相关研究也证实,冬季鲁北沿岸流可对山东半岛南部海域营养物质的物理输送起到重要作用,使得石岛外海出现营养盐高值区(郭炳火, 1993),并为山东半岛南部海域鳀鱼产卵场的形成提供较为有利的物质基础(高生泉等, 2003)。事实上,其它各层次的营养盐分布也总体具有这一分布特征(图略)。显然,营养盐的这一输运过程很好地指示和反映了上述冬季黄海西部沿岸冷水绕过成山角后的南下趋势。

2.1.2 春季 图 4 为春季调查所获得的南黄海温、盐度平面分布。可以看出,在山东半岛及苏北沿岸低盐水和外海暖流水之间的海域,5m 层存在一明显的低温、低盐水舌,底层的低温水舌亦非常显著,该低

温冷水与东侧的外海暖流水之间形成强度不等的陆架锋(此亦指温、盐度锋),并紧贴锋面西侧南下,至 34°N 附近海域时转向东南方向,继续扩展至 33°N 以南,这充分显示了春季黄海西部沿岸流的南下过程。从温、盐度分布来看,该冷水舌的流动较冬季更明显,这是因为冬季黄海暖流西偏(Huang *et al*, 2005; 邢传玺等, 2010)可能对黄海西部沿岸流在石岛外海的南下过程具有一定的阻碍作用,而春季黄海暖流强度逐渐变弱,其残留水也向深水域退缩(邹娥梅等, 2000)(此时 5m 层 35°N 断面上代表黄海暖流主体西侧外缘水的 9°C 等温线已由冬季的 121°E 附近东移至 122.5°E 以东),受此动力条件改变的影响,黄海西部沿岸流沿陆架锋的流动也更明显,并相应的向东推移。由此可见,相比冬季而言,春季黄海西部沿岸流在山东半岛东南海域的流段可能会具有较多的上游(源地)沿岸水(即鲁北沿岸水)成分。进一步分析还发现,由于春季上层黄海暖流强度的削弱较底层快,还

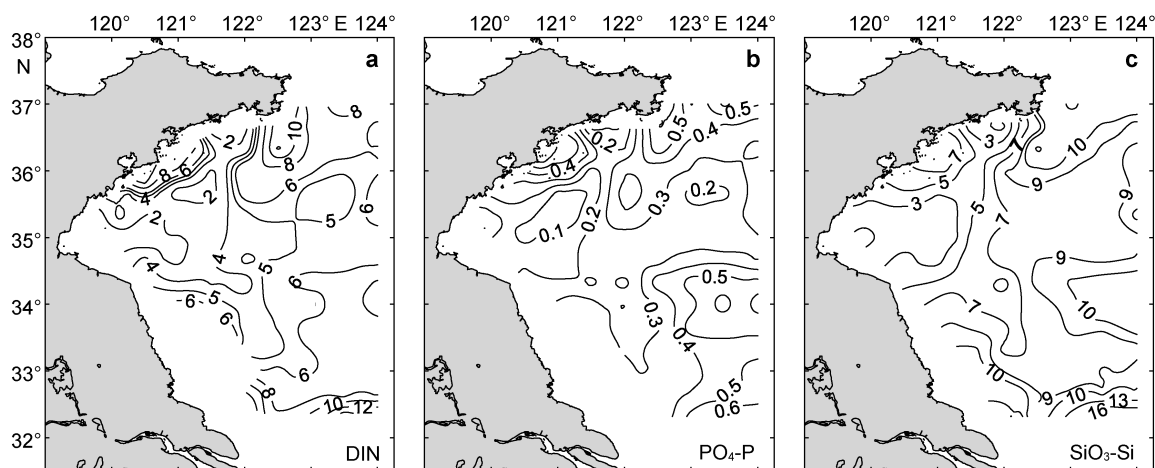


图 3 冬季南黄海 10m 层营养盐浓度($\mu\text{mol/L}$)的平面分布

Fig.3 Horizontal distribution of nutrients ($\mu\text{mol/L}$) in the 10m layer in winter in the southern Yellow Sea

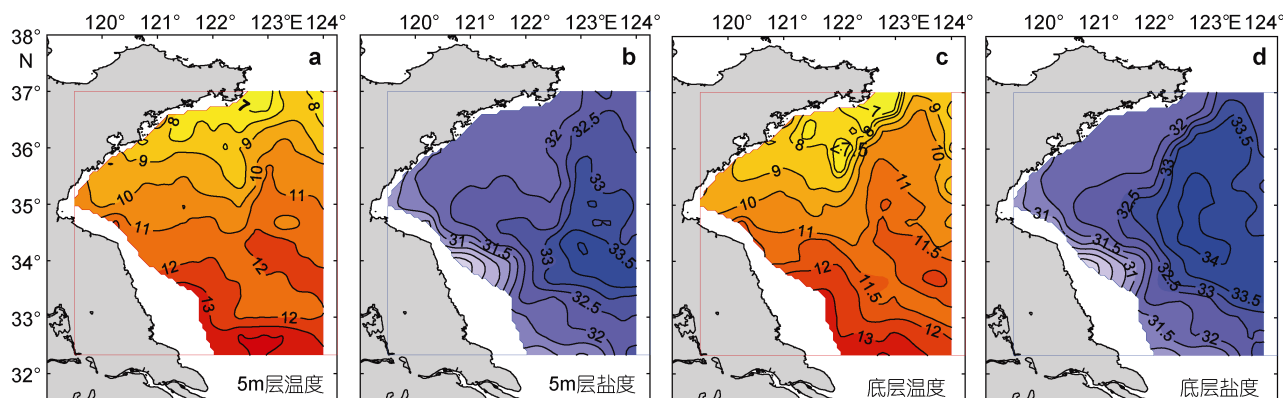


图 4 春季南黄海温度($^\circ\text{C}$)、盐度的平面分布

Fig.4 Horizontal distribution of temperature ($^\circ\text{C}$) and salinity in spring in the southern Yellow Sea

使得此时黄海暖流在上层的东移程度明显强于底层, 进而导致上层黄海西部沿岸流位置的东向推移较底层也更为显著。受黄海西部沿岸冷水南下的影响, 山东半岛东南部海域的底层还出现了小于 7.5°C 的冷中心(图 4c), 而且此海域在 15m 至底层的其它各水层也均存在一冷中心(图略), 此即为春季青岛冷水团(张启龙等, 1996, 2004; Zhang *et al*, 2002; 于非等, 2005, 2006)核心区。

根据图 5 所示的春季 10m 层营养盐平面分布, 亦能发现石岛外海的高营养盐水舌依然向西南方向扩展, 且与该海域低温冷水舌的扩展方向较为一致(表层营养盐和温度分布亦具有此特征, 图略), 这同样在一定程度上反映了黄海西部沿岸冷水南下的水动力过程。

以上观测事实表明, 冬、春季南黄海西部沿岸流沿陆架锋面(此指外海高盐水与沿岸水间所形成的温、盐度锋)南下流动。

2.2 冬半年温度、盐度和营养盐断面分布对黄海西部沿岸水南向流动的指示

2.2.1 冬季

由图 6 所示的 36.7°N 和 36°N 断面温、盐度分布来看, 此两断面在外海高盐暖水的西侧海域自表至底均存在一低温、低盐带(温度分别低于 4°C 和 6°C , 盐度均小于 31.8)。而图 7 所示的 DIN 浓度分布表明, 在上述两断面的西侧自表至底还均有一小范围的营养盐高值区(浓度分别大于 $10\mu\text{mol/L}$ 和 $7\mu\text{mol/L}$)($\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的分布亦有此现象, 图略), 并与此处的低温、低盐带位置大致吻合。结合图 2 所示的温、盐度平面分布, 可进一步判断这是黄海西部沿岸冷水绕过成山角后继续南下所致。上述低盐冷水带东侧较高的水温 and 盐度则是受冬季黄海暖流水侵入的影响。

入的影响。

2.2.2 春季

为了深入分析春季黄海西部沿岸冷水向南黄海的入侵, 本文重点考察 37°N 、 36°N 、 35.3°N 和 34.3°N 断面上的温、盐度分布情况。由图 8 可知, 上述 4 条断面上一个显著的特征是: 东侧海域的温度和盐度普遍较高, 而且其温、盐度由南向北呈递减趋势, 这便是春季黄海暖流水的主体所在。各断面温、盐度分布的另外一个显著的共同点表现为: 在陆架锋西侧附近均存在一低盐冷水区, 该冷水区与东侧的高温、高盐黄海暖流水形成甚强的温、盐度锋面。其中 37°N 断面上的低盐冷水区出现在 122.75°E 附近; 36°N 断面上的冷水区则位于 122.25°E 处, 较 37°N 断面向西推移了 0.5° ; 35.3°N 断面上的冷水区进一步向西移动, 总体出现在 122°E 附近海域; 而 34.3°N 断面上的冷水区则又转而向东移动, 位于 122.25°E 附近。上述 4 条断面上冷水区的存在也充分印证了黄海西部沿岸冷水沿陆架锋的南向流动, 各断面冷水区位置的东西向移动和变化则反映了春季黄海西部沿岸流在南黄海的路径变化(走势), 即绕过成山角后首先向南黄海西南部不断推进, 再转而折向东南方向, 这与图 4 温、盐度分布所显示的低温水舌的走势也是一致的。值得注意的是, 由于沿途黄海西部沿岸流强度的变化以及其与东侧高盐暖水的逐步混合, 还使得上述 4 条断面上冷水区内盐度由北向南呈逐渐升高的趋势(图 8)。与此同时, 春季相关断面上的营养盐分布(以 37°N 和 36°N 两典型断面上的 DIN 分布为例, 图 9)也在一定程度上指示了黄海西部沿岸水的南下, 如图所示, 37°N 断面西侧低盐冷水区附近(122.75°E — 123°E)的营养盐高值区显然是黄海西部沿岸冷水南

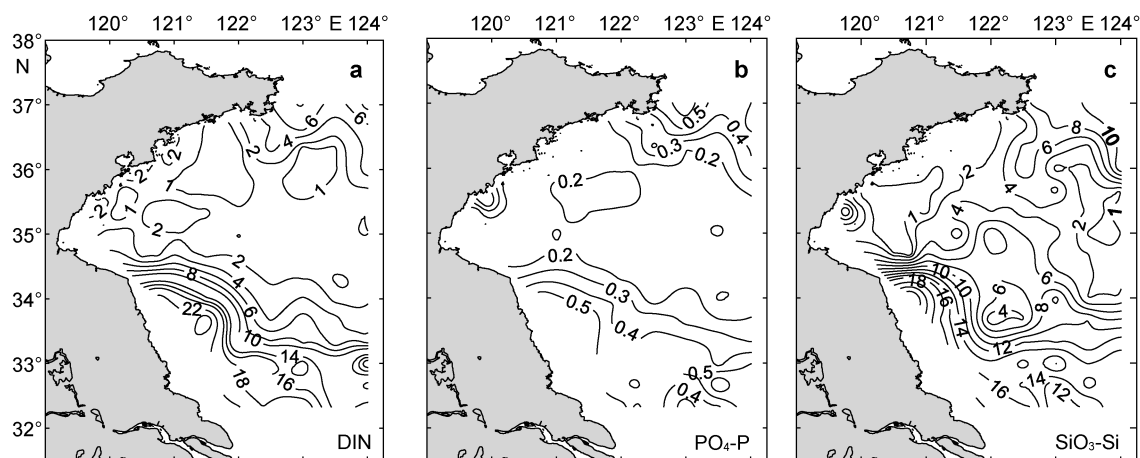


图 5 春季南黄海 10m 层营养盐浓度($\mu\text{mol/L}$)的平面分布

Fig.5 Horizontal distribution of nutrients ($\mu\text{mol/L}$) in the 10m layer in spring in the southern Yellow Sea

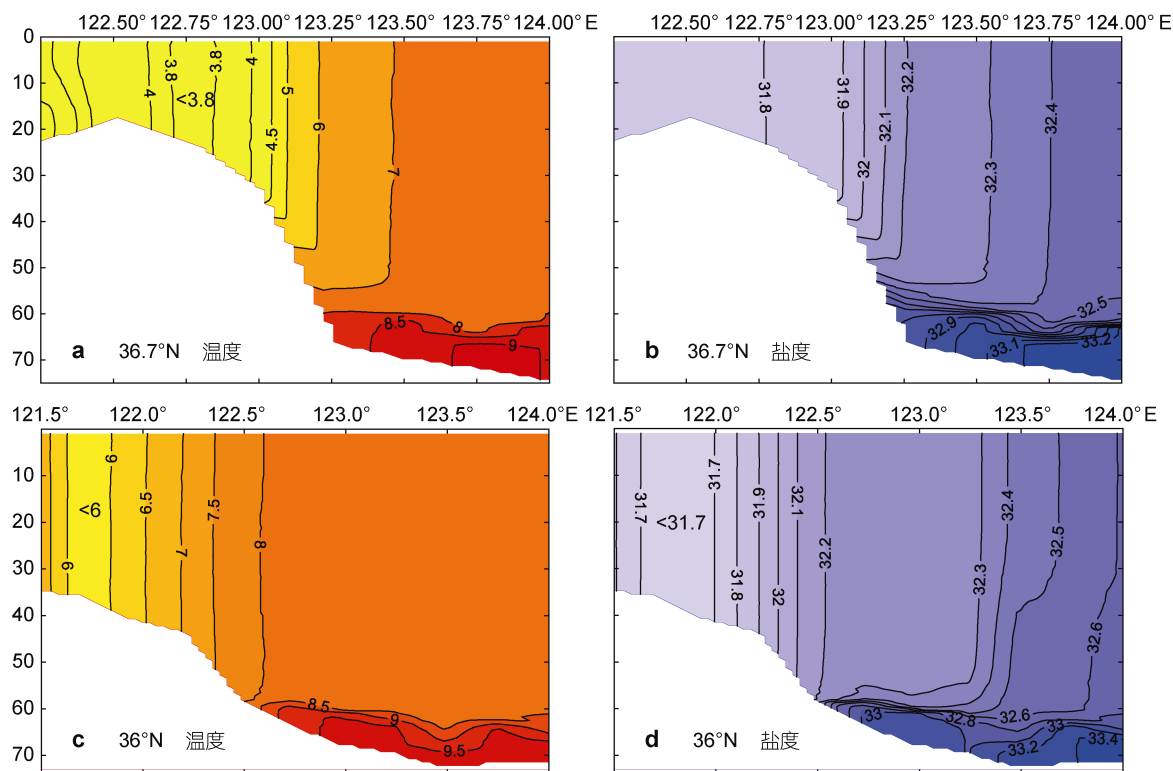


图 6 冬季南黄海相关断面温度(°C)、盐度的垂直分布

Fig.6 Vertical distribution of temperature (°C) and salinity in related transects in winter in the southern Yellow Sea

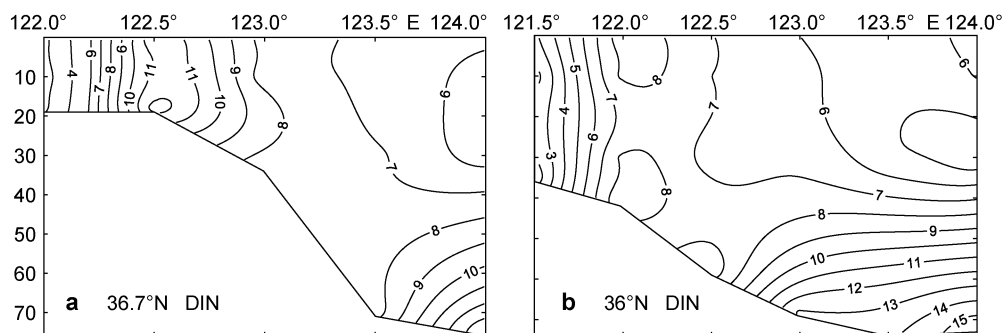


图 7 冬季南黄海相关断面 DIN 浓度($\mu\text{mol/L}$)的垂直分布

Fig.7 Vertical distribution of DIN ($\mu\text{mol/L}$) in related transects in winter in the southern Yellow Sea

下将一部分营养物质输运至此的结果;而 36°N 断面上 122.25°—122.75°E 范围内营养盐高值区的出现除与潮混合引起的底层高营养盐水的涌升有关外,也同黄海西部沿岸冷水对营养物质的南下输送存在一定的联系。

进一步分析还发现,36°N 和 35.3°N 断面上陆架锋西侧附近的冷水区均在中层形成低温中心(亦称为中层冷水现象),而 37°N 和 34.3°N 断面上的冷水区的低温中心则位于底层,且各断面冷水区以上水体均已开始形成温跃层。上述中层冷水在中韩“黄海水循环动力学及物质输运”合作研究项目 1996 春季调查

中就被发现(汤毓祥等, 1999; 邹娥梅等, 2000)。本次调查还显示,中层冷水在 35.7°N、35°N 和 34.7°N 等断面的陆架锋区西侧附近也均存在(图略)。由中层冷水出现的断面位置可以推断,中层冷水主要存在于山东半岛东南部水深相对较大的海域,这是因为低密的黄海西部沿岸流携带冷水由水深较浅的 37°N 断面西侧进入南黄海后,会覆盖在强度减弱缓慢且具有相对较高水温的底层黄海暖流水之上,而此时上层水体已开始受热增温,所以冷水得以在该海域的中层水体形成;随着黄海西部沿岸流继续南下至苏北浅滩外侧海底坡度变化较大的海域附近时,由于

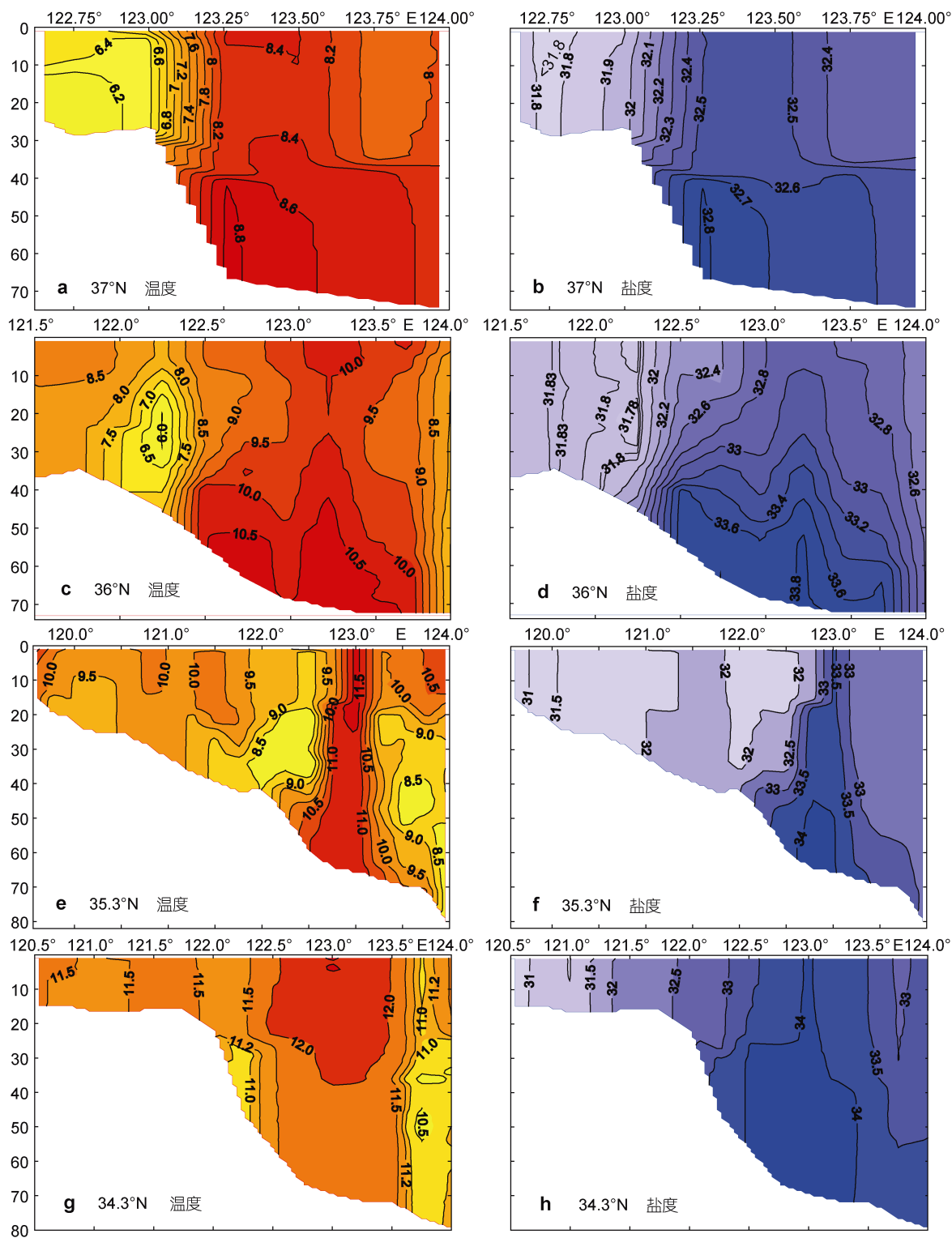


图 8 春季南黄海相关断面温度(°C)、盐度的垂直分布

Fig.8 Vertical distribution of temperature (°C) and salinity in related transects in spring in the southern Yellow Sea

水深变浅且黄海暖流从底层的“楔入”程度较小(图 4c), 再加之温跃层的影响, 因而易在底层形成冷水区。上述中层冷水在山东半岛东南部海域得以存在的机制与汤毓祥等(1999)、邹娥梅等(2000)和于非等

(2005)给出的成因大致相同, 本文则还进一步指出海底地形对南黄海中层冷水的形成亦具有一定程度的影响, 而且这可能也是中层冷水具有一定地域性分布的原因所在。

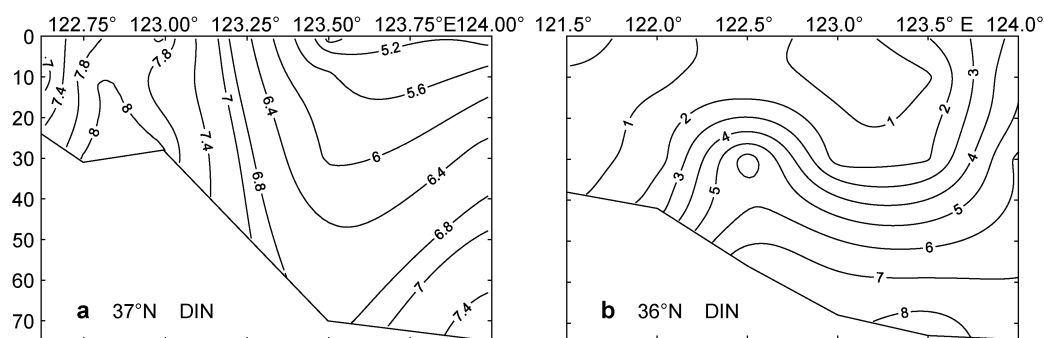


图9 春季南黄海典型断面 DIN 浓度($\mu\text{mol/L}$)的垂直分布

Fig.9 Vertical distribution of DIN ($\mu\text{mol/L}$) in typical transects in spring in the southern Yellow Sea

需要指出的是, 36°N 和 35.3°N 断面上的中层冷水还具有“上半部偏东、下半部偏西”的特征, 这与春季上、下层水体中黄海暖流势力削弱程度的不同步性有关(邹娥梅等, 2000), 即上层的减弱过程快于底层, 导致上层黄海西部沿岸流携带冷水沿陆架锋面流动的路径也向东移动, 而下层黄海西部沿岸流的路径则相对靠西且覆盖在一部分暖流水之上, 因而使得中层冷水在相关断面上呈现出上半部靠东、下半部靠西的分布状况。由图 4 所示的温、盐度分布也能看出自上层至底层冷水带位置由东向西偏移的状况。进一步分析发现, 春季山东半岛东南部海域的中层冷水中心温度(即最低温度)为 5.9°C , 位于 122.25°E 、 36°N 处的 25m 层, 该处与先前大多研究(张启龙等, 1996, 2004; Zhang *et al.*, 2002; 于非等, 2005, 2006)认为的青岛冷水团的核心位置大致吻合, 这意味着青岛冷水团实为山东半岛东南部海域中层冷水的核心部位。其实, 36°N 断面上的冷水现象在冬季(图 6c)就已开始出现, 只是春季较冬季向深水域移动, 这同样表明春季黄海暖流消退期, 黄海西部沿岸流的路径也相应向东推移。

综合上述分析可知, 冬、春季相关断面西侧(陆架锋附近)存在的冷水区及营养盐高值区也很好地区示和印证了黄海西部沿岸冷水的南向流动。

2.3 黄海西部沿岸水南向流动对夏季南黄海西部冷水团形成的作用

由前一部分的分析可知, 春季黄海西部沿岸流沿陆架锋面的流动对山东半岛东南部海域的南黄海中层冷水以及青岛冷水团的形成具有重要作用。那么, 冬、春季黄海西部沿岸流南下携带的冷水是否同夏季南黄海西部底层冷水团的形成也存在一定的联系呢? 为此, 本文选择对夏季 36°N 、 35.3°N 和 34.7°N 三条典型断面上的温、盐度分布进行研究, 并将其与

春季作对比分析。

由图 10a、b 可知, 36°N 断面上 10°C 等温线以内为南黄海西部底层冷水团, 其于 122°E 以西存在着因潮混合而形成的浅水陆架锋(赵保仁, 1985; 戚建华等, 1998), 而在该陆架锋东侧 122.25°E 附近海域的中下层有一明显的低温区($T < 8^{\circ}\text{C}$), 其核心(6.8°C)位于 122.5°E 的 35m 层; 与春季相比, 此低温中心温度升高, 位置向东移动, 且其所在的深度也较大, 这表明夏季 36°N 断面上的中层冷水仍然存在, 但此时已不甚明显。 35.3°N 和 34.7°N 断面上的温、盐度分布(图 10c—f)与 36°N 断面颇为相似, 即在陆架锋东侧的底层也存在一低温区, 温度均小于 9°C , 大致位于 122.25°E 附近; 与 36°N 断面不同的是, 此两断面陆架锋东侧的低温区内无中层冷水。仔细分析还可以发现, 在 36°N 断面 123.25°E 附近海域的底层还有一弱的高温、高盐区($T > 9^{\circ}\text{C}$, $S > 33.5$), 而在 35.3°N 和 34.7°N 断面东部深水域的底层, 也均同时存在一弱的高温、高盐区, 分别位于 123.25°E 和 123.5°E 附近海域。上述断面东部深水域底层中存在的高温、高盐区显然将跃层以下的底层冷水分为了三部分, 一是该处的弱高温水体, 另外两个则是位于其两侧的低温水体。

除 36°N 断面外, 夏季 36.3°N 和 35.7°N 断面陆架锋东侧附近也存在中层冷水, 且低温中心较春季也向东、向深水域移动, 同时其强度亦减弱(图略)。总体来看, 夏季山东半岛东南部海域的中层冷水分布范围较春季明显缩小, 这与入春以来底层黄海暖流势力的持续减弱使得温跃层之下的垂向冷水温度逐渐趋于一致有关, 而且黄海暖流势力的减弱也有利于中层冷水向深水域移动。

通过比较夏、春季上述断面的温、盐度分布还发现: 尽管各断面西部冷水区在夏季时位于潮致陆架锋东侧, 在春季时处于外海高盐暖水与黄海西部沿

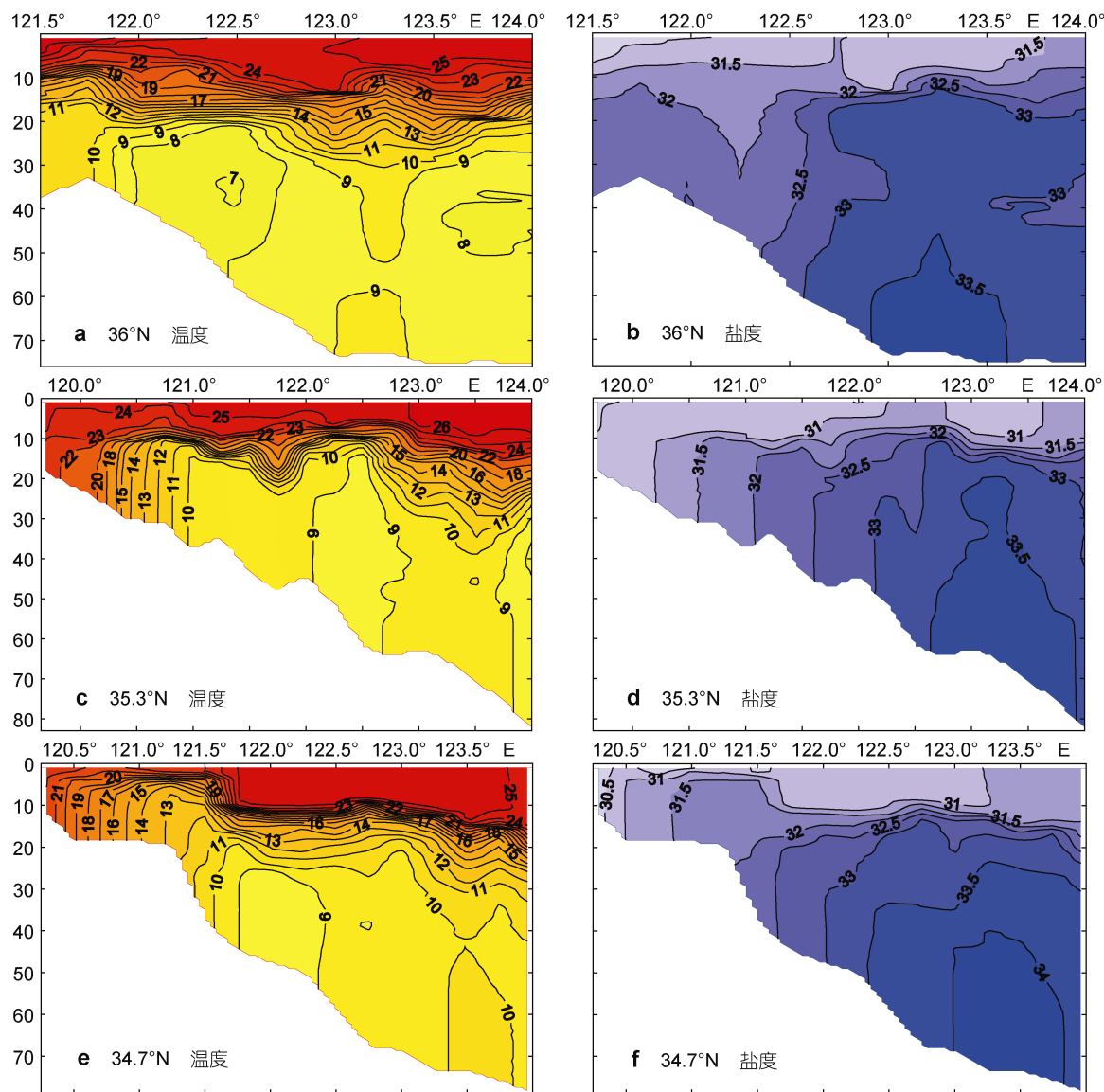


图 10 夏季南黄海相关断面温度(°C)、盐度的垂直分布

Fig.10 Vertical distribution of temperature (°C) and salinity in related transects in summer in the southern Yellow Sea

岸水所形成的温、盐度锋面的西侧,而且夏季个别断面上冷水区的低温核心还存在向东、向深水域移动的趋势,但毋庸置疑的是,夏、春季冷水区的位置总体上还是保持了较好的一致性。这一结果表明,夏季南黄海西部陆架锋东侧底层冷水与春季该海域的冷水具有“同源性”,即春季黄海西部沿岸流南下携带的冷水不仅为山东半岛东南部海域冷水区的形成具有重要作用,而且也为夏季南黄海西部陆架锋东侧底层冷水的形成提供了良好的前提条件。至于冷水位置由春季时的陆架锋西侧转为夏季时的陆架锋东侧,是因为夏季较强的海面热输入(万邦君等, 1990)导致上层水体增温异常显著,再加之潮混合作用,使得夏

季温、盐度锋出现在更靠近岸边的浅水区,从而将春季存留下来的大部分黄海西部沿岸冷水包络在夏季潮致锋面以内。同时,夏季各断面东部深水域的高盐暖水位置与春季时也较为相近,只不过此暖水的势力较春季已显著减弱,范围也缩小,这则在一定程度上表明夏季各断面东部深水域含有黄海暖流残留水(或黄海暖流变性水),即意味着南黄海西部冷水团内部存留了部分黄海暖流水。

相关断面上的营养盐分布也可用来指示夏季温跃层以下底层冷水的不同组成部分。以 35.3°N 这一典型断面上的 DIN 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 分布为例,由图 11 可知,在 122°E 和 123.5°E 附近海域均存在一营养盐高值中

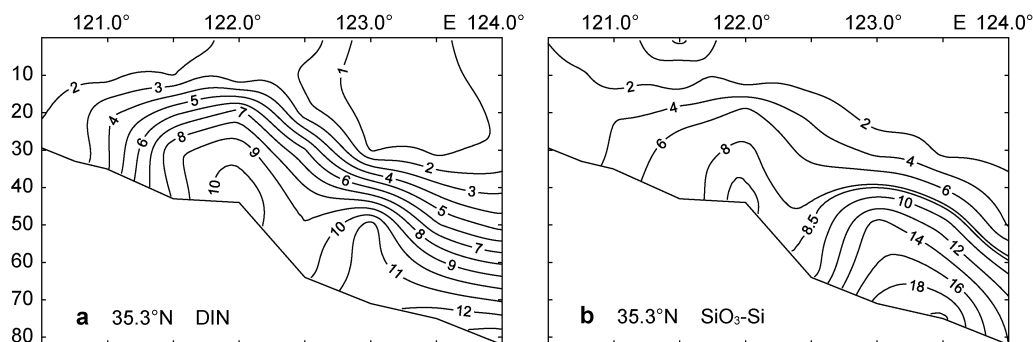


图 11 夏季南黄海典型断面营养盐浓度($\mu\text{mol/L}$)的垂直分布

Fig.11 Vertical distribution of nutrients ($\mu\text{mol/L}$) in typical transects in summer in the southern Yellow Sea

心($\text{PO}_4\text{-P}$ 分布亦具有此特征, 图略), 并分别与该断面陆架锋东侧的低温区和深水区的弱高温区大致相对应, 这不仅显示了冷水团内部不同的水文条件可对营养盐分布产生一定的影响, 同时也在一定程度上表明上述低温区和弱高温区内的水的理化特性和来源不同。

为进一步分析夏季南黄海西部底层冷水的位置及其内部结构, 并以此指示陆架锋东侧的底层冷水情况, 图 12 给出了夏季南黄海西部海域 25m 层、30m 层和底层的温度平面分布。由图可见, 各层较为明显的一个特征是均在山东半岛东南部 122.25°E 、 36°N 附近海域存在一小于 8°C 的冷中心, 该冷中心与春季底层(图 4c)及 36°N 断面上(图 8c)的冷水区位置也比较接近, 因此该海域也是夏季青岛冷水团的所在位置。同时, 夏季南黄海西部底层冷水团内部的冷水还主要存在于三个区域, 其一主要集中在底层冷水的西部(亦即南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水), 而且 9°C 等温线以内的冷水大致呈舌状沿 122.5°E 由北向

南而后偏向东南伸展, 其位置与图 4c 所示的春季黄海西部沿岸冷水带位置也总体相一致, 底层 122.25°E 、 36°N 附近海域的冷中心(7.3°C)可看作是该冷水的核心所在, 此区域的冷水在 25m 层和 30m 层也异常明显; 另外一个分布在冷水团的东南角, 在图中表现为沿 123°E 由南向北扩展的相对弱高温、高盐($T > 9^\circ\text{C}$, $S > 33.5$)水体; 第 3 个则位于底层冷水的东部。此结果表明夏季南黄海西部底层冷水是由不同性质的次级水团组成的, 这与 1984 年和 1986 年 7 月中美南黄海合作调查结果(Zhao *et al*, 1986; 赵保仁等, 1991)相吻合, 参照赵保仁等(1991)的观点, 以上三个区域的底层冷水可认为是构成夏季南黄海西部底层冷水的三个次级水团, 并可分别命名为南黄海西部本地冷水、冬、春季存留于本地的黄海暖流残留水和南黄海东部本地冷水。显然, 这里所说的黄海西部本地冷水主要系由冬半年黄海西部沿岸流南下输运而来, 该冷水的存在使得整个南黄海冷水团内部的温、盐特性并不完全均一, 具有空间异质性(存在一定的地域性差

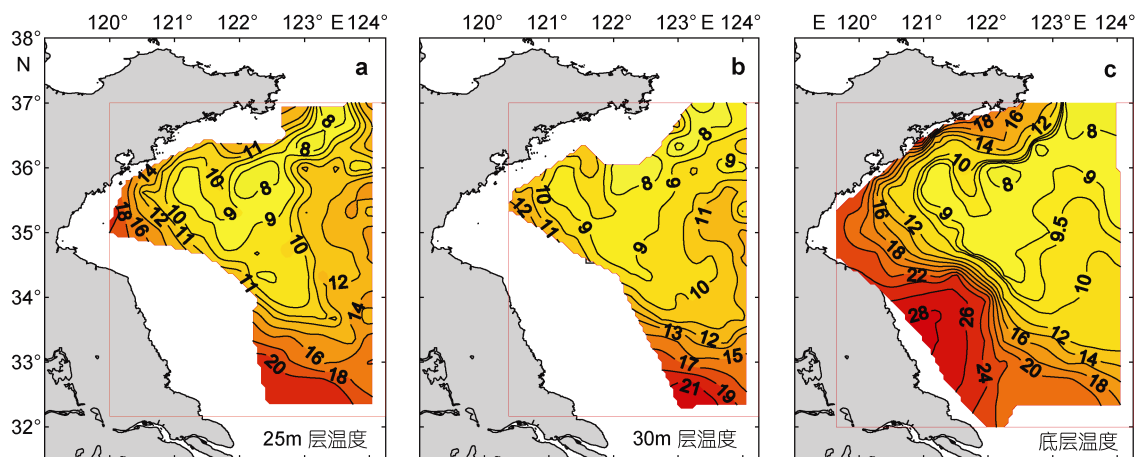


图 12 夏季南黄海温度($^\circ\text{C}$)的平面分布

Fig.12 Horizontal distribution of temperature ($^\circ\text{C}$) in summer in the southern Yellow Sea

异)。上述夏季南黄海西部底层冷水的内部结构与由温、盐度断面分布所揭示的跃层以下底层冷水可分为三个部分也相一致。结合前述夏、春季温、盐度断面分布的对比分析结果,可进一步获得如下认识:随黄海西部沿岸流输运而来的冷水不仅是春季青岛冷水团水以及南黄海中层和底层冷水的主要来源,而且也为此后南黄海西部底层冷水的逐步形成提供了较低的环境水温背景值,并有利于南黄海西部底层冷水在山东半岛东南部的青岛冷水团附近海域逐渐孕育和发展,且为黄海冷水团西侧冷中心的形成奠定了基础。

需要指出的是,入夏后由于潮致陆架锋(赵保仁, 1985; 戚建华等, 1998)的存在,使得与其相关的夏季底层冷水的边界具有向浅水域扩张的趋势,同时山东半岛东南部海域的中层冷水核心又向东、向深水移动,而且中层冷水的存在范围也在缩小,再加之夏季强度减弱的南黄海中层冷水还具有与南黄海西部底层冷水融为一体的趋势,因此整体上看,此时存在于山东半岛东南部海域的冷水(即青岛冷水团)已不应认为是局地型的冷水,而更应该被看作是南黄海冷水团的重要部分,并成为黄海冷水团西部冷中心的所在。该认识与于非等(2006)的观点接近。同时,上述分析结果也从侧面反映了山东半岛东南部海域的冷水与冬、春季的黄海暖流残留水在南黄海冷水团形成过程中,两者“殊途(源)同归”,即虽然来源不同,却最终都将在夏季成为南黄海冷水团的一部分。冬、春季黄海西部沿岸流南下输运而来的冷水与黄海暖流残留水势力的相对强度还共同决定了两者在南黄海西部冷水团中的权衡和比例,而且处于南黄海西部冷水团内部的这两个次级水团可能也是诱使其内

部气旋式环流(赵保仁等, 1991)(由图 12c 所示的温度分布似乎可以判断出冷水团内部气旋式环流的存在)形成的重要因素之一。这一认识使人们进一步认清了夏季南黄海西部冷水团水的来源,同时亦丰富和深化了前人关于“黄海冷水团是冬季在黄海本地形成”的观点(赫崇本等, 1959)及其内涵。

因此,上述调查结果和分析不仅充分印证了春季黄海西部沿岸流南下携带的冷水对夏季南黄海西部冷水团的形成具有重要的作用,而且证明了黄海西部的底层冷水及其冷中心首先在山东半岛东南部的青岛冷水团附近海域孕育。

2.4 秋季南黄海西部冷水团衰退期内的底层冷水

图 13 为秋季调查所获得的南黄海西部 5m 层和底层温、盐度分布。由图 13c 可知,南黄海西部底层冷水团($T < 10^{\circ}\text{C}$)依然存在,并在其周围形成非常强的温、盐度锋,但其范围明显小于夏季(图 12c),且锋面位置向深水退缩。进一步分析还发现,秋季南黄海西部冷水团内部的冷水结构与夏季时也比较相似,不同之处主要表现在:(1)秋季南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水范围显著缩小,且温度升高;(2)秋季冷水团内部东南海域的黄海暖流水(图 13c、d, $T \geq 10^{\circ}\text{C}$, $S \geq 33.3$)呈舌状向北扩展,其 10°C 等温线已由夏季的 34.7°N 处北伸至 36°N 附近海域;(3)秋季冷水团内东部海域的冷水范围也较夏季缩小。上述结果反映出入秋后水体垂向混合作用的增强已使得南黄海冷水团显著向深水退缩,同时黄海暖流水向南黄海的入侵强度也开始增加,受黄海暖流顶托以及冷水团向深水退缩的共同影响,南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水主要存在于紧贴陆架锋的狭窄海域内,而且其核心区位置($T < 9.5^{\circ}\text{C}$, 图 13c)较夏季时

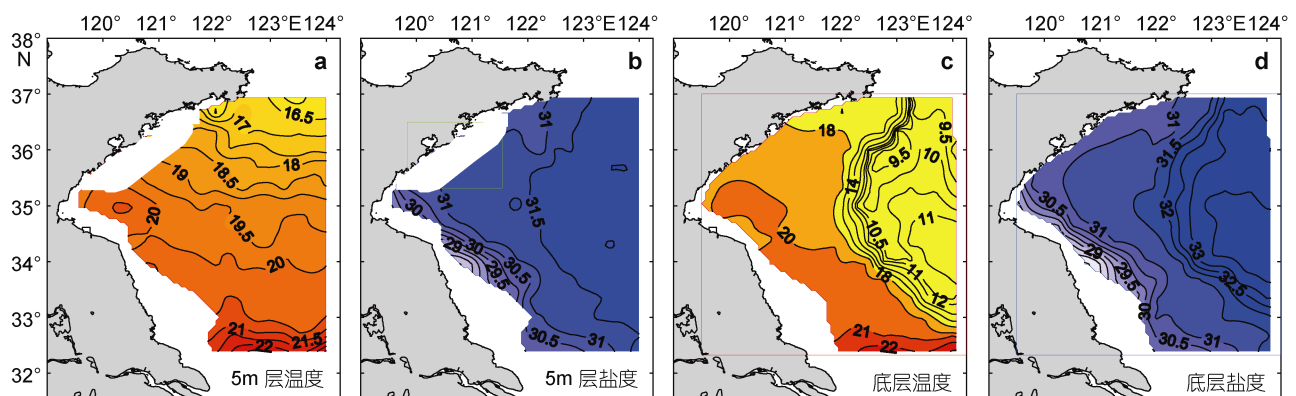


图 13 秋季南黄海温度($^{\circ}\text{C}$)、盐度的平面分布

Fig.13 Horizontal distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$) and salinity in autumn in the southern Yellow Sea

注: 调查期间青岛外海与其它海域的同步性较差, c 图为由(准)同步化处理后的温度数据绘制而成(葛人峰等, 2010)

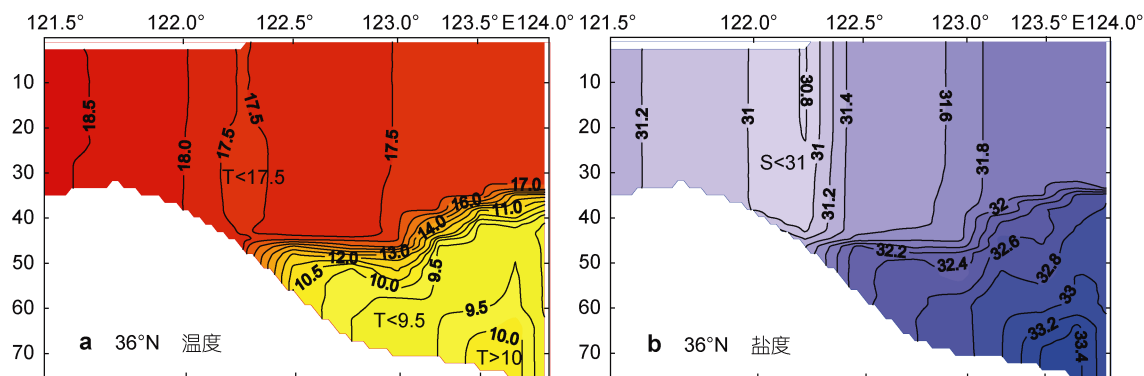


图 14 秋季南黄海 36°N 断面温度(°C)、盐度的垂直分布

Fig.14 Vertical distribution of temperature (°C) and salinity along 36°N transect in autumn in the southern Yellow Sea

($T < 8^\circ\text{C}$, 图 12c)还向东北方向移动。此时黄海冷水团西侧冷中心依然存在, 位于 123°E 、 36°N 处, 只是此低温中心温度(9.3°C)较夏季有所升高, 其位置也相应东移。由图 14 所示的 36°N 断面温、盐度分布亦可以看出, 此断面陆架锋东侧的冷水已东移至 123°E 附近, 同时黄海暖流水也开始从冷水团底部向北入侵。上述观测结果意味着, 随着水体垂向混合作用和黄海暖流势力的进一步增强, 秋季南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水会逐渐消失, 最后将完全融入到势力渐强的黄海暖流水中。

需要指出的是, 秋季石岛外海还出现了向西南海域凸起的低温、低盐水舌(图 13a、b), 这表明来自鲁北沿岸的冷水在绕过山东半岛顶端后又已具有重新入侵南黄海的迹象, 并沿着石岛外海的盐度锋面西侧南下。图 15 给出了秋季表层营养盐含量的平面分布, 由此可发现石岛外海的高营养盐水舌也具有向西南方向扩展的迹象, 可被认为是秋季来自鲁北

沿岸的冷水在绕过山东半岛顶端后开始侵入南黄海的又一佐证。同时, 秋季 36°N 断面 122.25°E 附近海域(亦处于底层温、盐度锋西侧)自表至底的低温、低盐带($T < 17.5^\circ\text{C}$, $S < 31$)也开始出现(图 14), 其成因一方面可能与入秋后渐强的垂向混合作用促使夏季存在于此的底层冷水(图 10a)上涌有关; 另一方面则与黄海西部沿岸冷水的南下存在一定的联系, 而这也在一定程度上预示着源自鲁北沿岸的黄海西部沿岸流已开始对南黄海产生影响。此外, 根据 36°N 断面的营养盐分布可知(图 16, 以 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 为例), 该断面西侧 121.75°E — 122.25°E 范围内自表至底的营养盐高值区也与此处的低温、低盐带位置总体相对应(DIN 分布也具有此现象, 图略), 这更进一步显示入秋后黄海西部沿岸流携带营养物质向南黄海的入侵。

以上分析表明: 入秋后, 一方面南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水在逐渐消退, 而另一方面黄海西部沿岸流又开始携带冷水沿陆架锋西侧南下, 随着

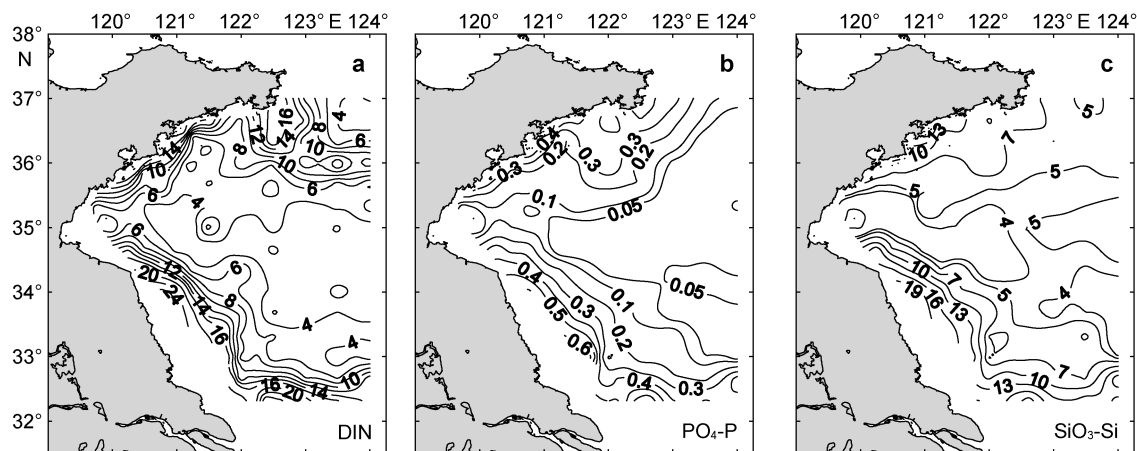


图 15 秋季南黄海表层营养盐浓度($\mu\text{mol/L}$)的平面分布

Fig.15 Horizontal distribution of nutrients ($\mu\text{mol/L}$) in surface in autumn in the southern Yellow Sea

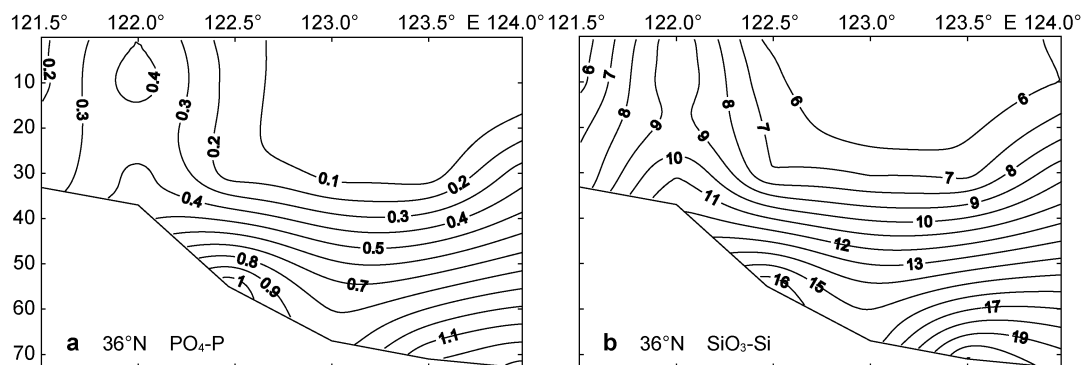


图 16 秋季南黄海 36°N 断面营养盐浓度($\mu\text{mol/L}$)的垂直分布

Fig.16 Vertical distribution of nutrients ($\mu\text{mol/L}$) along 36°N transect in autumn in the southern Yellow Sea

时间的推移, 这将逐渐为来年出现在山东半岛东南海域的青岛冷水团水、南黄海中层和底层冷水以及夏季南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水提供来源。显然, 上述过程共同形成了夏季存在于南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水的季节性演替。

2.5 南黄海西部冷水团与黄海西部沿岸流关系的进一步分析

2.5.1 黄海西部沿岸流强弱对南黄海冷水团及其西部冷中心的影响

上述分析所揭示的冬、春季黄海西部沿岸流南下所携带的冷水与夏季南黄海西部冷水团之间的联系, 不仅有助于阐明南黄海冷水团与春季青岛冷水团以及南黄海中层和底层冷水之间的内在关联, 同时也为探讨南黄海西部底层冷水的来源提供依据。

因为夏季南黄海西部陆架锋东侧底层冷水的形成与冬、春季黄海西部沿岸流影响下青岛冷水团以及南黄海中层和底层冷水的出现密切相关, 同时夏季南黄海冷水团西部冷中心的强度也会受到后者强度的直接影响, 而青岛冷水团以及南黄海中层和底层冷水的强度又受黄海西部沿岸流冷暖程度的控制, 且由于黄海西部沿岸流的水温与冬季源地(位于北黄海南部)气温以及沿途海域的气温有关, 据此可以得出这样的结论: 夏季黄海冷水团西侧冷中心及其周围海域的温度与当年冬季北黄海南部气温以及黄海西部沿岸流南下时途经海域的气温具有内在的联系。张启龙等(2004)研究指出, 青岛冷水团强度的年际变化趋势与冬季(2 月)山东半岛北部沿岸地区气温的年际变化趋势基本一致, 这也从一个侧面为上述观点提供了例证。显然, 这一观点也进一步丰富和深化了前人对“夏季黄海冷水团温度与当年冬季附近地区气温有关(管秉贤, 1963)”的认识。此外, 据以上分析也

可推断, 冬、春季黄海西部沿岸流势力的年际变化还会影响到南黄海西侧冷中心位置的变动, 在黄海西部沿岸流势力强的年份, 南黄海西侧冷中心会向南移动, 反之, 南黄海西侧冷中心位置则偏北。翁学传等(1988)研究发现, 南黄海西侧冷中心位置存在南北向摆动的年际变化特征, 而且其冷中心温度存在较大的多年变幅。诚然, 上述推论可很好地解释这些现象。

冬、春季黄海西部沿岸流与夏季南黄海西部冷水团形成之间的关系还为今后南黄海冷水团研究提供了启示, 即不能仅局限于在南黄海本地, 而是需要从更宽广的区域海洋学研究的视角出发: 这是由于黄海西部沿岸流的源区连接着北黄海及渤海, 黄海西部沿岸流对冷水的输送与北黄海乃至渤海存在密切的联系, 应以黄海西部沿岸流为纽带, 将南黄海冷水团与北黄海乃至渤海的海洋变动和气候异常事件联系起来。近年来研究表明, 由于黄河入海流量的持续减少, 渤海盐度存在明显的年际尺度变化(吴德星等, 2004), 同时山东半岛成山角附近地区的气温还具有一定的气候态变化(江蓓洁等, 2007)。作者认为, 受这些变化的影响, 冬季来自渤海的水体于山东半岛北部形成的鲁北沿岸流(即黄海西部沿岸流北段)的温、盐特性也可能存在一定的年际变化, 而这一来自黄海西部沿岸流源区的信号也完全可能传递到南黄海冷水团中, 因此应加强这方面的系统性研究。

2.5.2 黄海西部沿岸冷水对夏季南黄海西部冷水团水贡献的化学水文学分析

需要进一步指出的是, 在黄海冷水团形成过程中, 不仅涉及动力学问题, 而且还涉及热力因素的作用(于非等, 2006)。由于山东半岛东南部海域的水深相对较大, 在水体层化逐渐增强的春至夏季, 受热力因素的影响, 再加之其东侧海域黄海暖流前缘水势力的不断衰弱, 冬半年输送

而来的黄海西部沿岸冷水更易在山东半岛东南部海域存留并最终成为夏季南黄海冷水团的重要部分。而对于存留于水深相对较浅的苏北浅滩外侧海域的黄海西部沿岸冷水, 由于该海域东侧底层的黄海暖流势力强于山东半岛东南部海域, 因此, 在热力因素和动力学作用的共同影响下, 冬半年输运而来的黄海西部沿岸冷水在此海域对夏季底层南黄海冷水团水的贡献整体上会相对较小。由图 4c 也可发现, 春季黄海西部沿岸冷水带的宽度自山东半岛东南部向南呈递减趋势; 而且图 8 还显示, 春季处于山东半岛东南部海域的 36°N 、 35.3°N 断面西侧的中层冷水面积显著大于位于苏北浅滩外侧 34.3°N 断面 122.25°E 附近的冷水面积; 同时, 37°N 、 36°N 、 35.3°N 和 34.3°N 断面上冷水区内盐度逐渐升高的现象亦在一定程度上表明低盐的黄海西部沿岸流主体对南黄海的影响程度由北向南逐渐降低(图 8)。另外, 由图 13c 所示的夏季底层温度分布也可看出, 黄海西部沿岸冷水在山东半岛东南部海域南黄海冷水团水中所占的比例较大, 而在南部的苏北浅滩外侧海域冷水中的比例则总体较小。以上事实同前述(2.3 部分)“冬半年输运而来的黄海西部沿岸冷水与黄海暖流残留水势力的相对强度将决定它们在南黄海西部冷水团中的权衡和比例”的认识相吻合。

通过分析春季底层营养盐含量的平面分布, 也可进一步印证上述论断。前面已指出(2.1.2 部分), 山东石岛外海的源自鲁北沿岸的黄海西部沿岸冷水具有较高的营养盐含量, 并呈舌状向南黄海扩展(图 5), 但底层(图 17)在该海域未见有向南呈梯度递减的高营养盐水舌, 而且底层的营养盐含量明显高于山东

石岛外海 10m 层的营养盐含量, 其原因同下述机制有关: 春季山东半岛东南部海域上层水体中浮游植物繁殖(Fu et al, 2009)可导致大量有机碎屑沉降并在底层发生分解, 这一过程所释放的营养盐进一步增加了存留于该海域底层的具有较宽流幅的黄海西部沿岸冷水中的营养盐含量。正是这一生物化学作用的扰动导致了山东半岛东南部海域向南扩展的高营养盐水舌未能显现出来, 而由于黄海西部沿岸冷水与其两侧海水温度的显著差异, 山东半岛东南部海域底层南下的低温水舌则非常明显。而对于存留于苏北浅滩外侧的流幅较窄的黄海西部沿岸冷水, 由于生物化学作用扰动的减弱, 这一冷水中的营养盐含量(图 17)又与山东石岛外海源自鲁北沿岸的黄海西部沿岸冷水的营养盐含量(图 5)相当, 而且该冷水与其两侧的具有较高营养盐含量的苏北沿岸水和南黄海中部分海水相比, 开始表现出相对低营养盐的特性, 并呈现出低营养盐水舌状分布且与该海域的冷水舌基本同步存在(图 17、图 4c)。由此可见, 春季南黄海西部底层营养盐分布中高营养盐含量水舌和相对低营养盐含量水舌与黄海西部沿岸冷水舌在不同区域显现程度的差异可进一步反映和证实, 由于流幅的变化, 黄海西部沿岸冷水在山东半岛东南部海域与苏北浅滩外侧海域对夏季黄海冷水团水的贡献会有所不同。应当指出的是, 春季在苏北浅滩外侧的 34°N 以南海域, 黄海西部沿岸冷水存在较大程度的东南向转向(由图 4 和图 17 可以看出), 这会使得春季 34°N 以南海域的东西向断面上又出现较多的黄海西部沿岸冷水(图略), 此现象将直接导致苏北浅滩外侧 34°N 以南海域中存留的黄海西部沿岸冷水对夏季黄

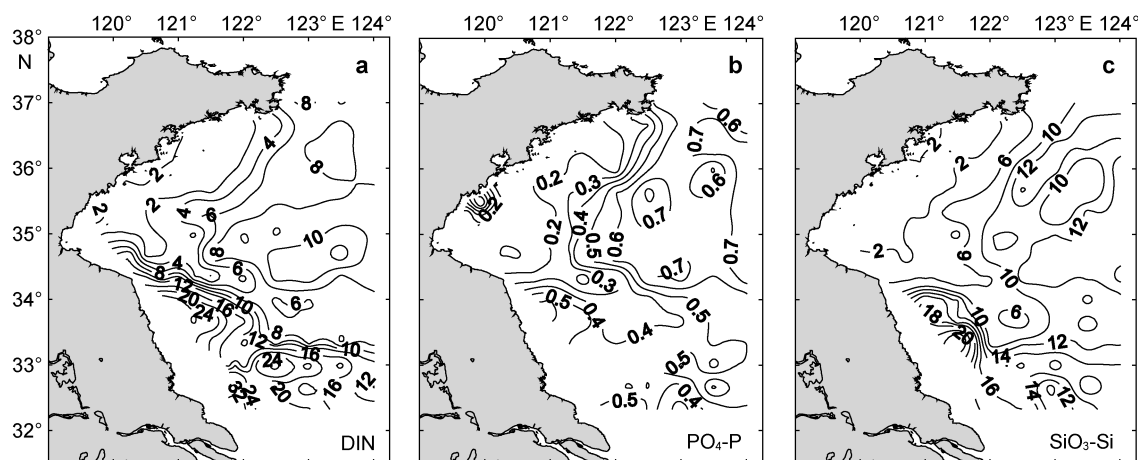


图 17 春季南黄海底层营养盐浓度($\mu\text{mol/L}$)的平面分布

Fig.17 Horizontal distribution of nutrients ($\mu\text{mol/L}$) in bottom in spring in the southern Yellow Sea

海冷水团水的贡献又变得复杂起来, 因此尚不能一概而论, 仍需要进一步深入研究。

在夏季南黄海西部底层冷水团形成过程中, 还涉及到黄海西部沿岸冷水与其周围海域海水(如黄海西部沿岸冷水东侧的黄海暖流残留水)的混合问题。早在 20 世纪 50 年代末, 赫崇本等(1959)就曾指出, 由于涡流的作用, 南黄海西部沿岸流与南黄海中部海水会发生一定的混合。但沿黄海西部沿岸水路径, 究竟有多少沿岸冷水参与到夏季南黄海冷水团的形成过程中来, 目前还不曾有人探讨, 尚需进行更深入的研究以及相关模拟计算。不过可以肯定的是, 黄海西部沿岸冷水与其周围海域海水的混合会在一定程度上削弱其低温特性, 并影响到夏季南黄海西部陆架锋东侧底层冷水最终形成后的温度, 这也是夏季山东半岛东南部海域底层低温中心温度(7.3°C , 见图 12c)较春季时(6.9°C , 见图 4c)稍高的原因所在。

应当指出的是, 春季南黄海中层冷水不仅存在于黄海西侧的山东半岛东南部海域, 也存在于黄海东侧的韩国仁川外海[即仁川外海冷水团(于非等, 2005)海域]; 在夏季, 南黄海冷水团还在南黄海东侧存在一个东部冷中心(翁学传等, 1988; 于非等, 2006); 而在冬半年, 黄海东部的低温沿岸水也向南流动, 并堆积于朝鲜半岛西侧海域(Uda, 1934, 1936; 于非等, 2005)。显然, 南黄海东、西两侧海域的水动力环境具有一定的相似性。因此, 本文的相关分析和结果也可对研究黄海东部低温沿岸水对春季仁川外海冷水团及其邻近海域的中层冷水、夏季南黄海东部底层冷水的形成提供借鉴。

3 结论

根据 2006—2007 年在南黄海开展的 4 季调查所获得的温度、盐度和营养盐资料, 分析探讨了冬半年黄海西部沿岸冷水的路径变化, 并重点研究了其在南黄海冷水团及其西部冷中心形成和季节演变过程中的作用。

(1) 冬、春季南黄海西部沿岸流沿陆架锋面南下流动, 特别是在初春时, 黄海暖流势力的减弱使得黄海西部沿岸冷水沿陆架锋的流动更为明显, 并相应的向东推移。冬、春季相关断面西侧(陆架锋附近)存在的冷水区和营养盐高值区也能很好的指示和印证黄海西部沿岸冷水的南向流动。

(2) 随黄海西部沿岸流输运而来的冷水是春季青岛冷水团以及南黄海中层和底层冷水的主要来源,

并为此后南黄海西部底层冷水的逐步形成提供了较低的环境水温背景值, 也为夏季黄海冷水团的西侧冷中心形成奠定了基础。这不仅印证了春季黄海西部沿岸流南下携带的冷水对夏季南黄海西部冷水团的形成具有重要的作用, 而且证明南黄海西部底层冷水首先在山东半岛东南部的青岛冷水团附近海域孕育。

(3) 夏季存在于山东半岛东南部海域的冷水(即青岛冷水团)已不应认为是局地型的冷水, 而更应该被看作是南黄海冷水团的重要部分, 并成为黄海冷水团西部冷中心的所在。这从一个侧面反映了山东半岛东南部海域的冷水与冬、春季的黄海暖流残留水在南黄海冷水团形成过程中“殊途(源)同归”, 即虽然来源不同, 但最终都将在夏季成为南黄海冷水团水的一部分。从而丰富和深化了前人关于“黄海冷水团是冬季在黄海本地形成”的观点及其内涵。

(4) 入秋后, 南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水在逐渐消退, 与此同时黄海西部沿岸流又开始携带冷水沿陆架锋西侧南下, 这又为来年出现在山东半岛东南海域的青岛冷水团水、南黄海中层和底层冷水以及夏季南黄海西部陆架锋东侧的底层冷水提供来源。上述几个过程共同作用, 形成了夏季南黄海西部陆架锋东侧底层冷水的季节性演替。

(5) 夏季黄海冷水团西侧冷中心及其周围海域的温度与当年冬季北黄海南部气温以及黄海西部沿岸流南下时途经海域的气温具有内在的联系。这进一步丰富和深化了前人对“夏季黄海冷水团温度与当年冬季附近地区气温有关”的认识, 并可解释“南黄海西侧冷中心位置具有南北向摆动的年际变化特征以及该冷中心温度存在较大多年变幅”的现象。

上述结论是从化学水文学的视角对温度、盐度和营养盐观测资料的分析而得出的。今后, 在现有调查的基础上还需要对冬半年黄海西部沿岸冷水的南下过程及其与夏季南黄海西部底层冷水形成和季节演变之间的内在关系开展定量研究和严格动力学模拟, 并利用水团示踪技术以及其它有效的可靠性指标(如生物标志化合物和同位素组成等)进行深入探讨。同时, 南黄海冷水团内部次级水团的存在, 还提示有必要对其进行精细化研究, 并在此基础上探讨黄海西部沿岸冷水的年际变动所引起的夏季南黄海西部冷水团变异及其生态效应等。

致谢 于非研究员和郭景松、刁新源、王关锁等水文组成员在 2006—2007 年南黄海调查任务执行期间

进行现场观测,为本研究的完成提供了水文资料支持;汤毓祥研究员通读全文,并提出宝贵意见,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, 张志欣, 兰 健等, 2005. 南黄海春季水温分布特征的分析. 海洋科学进展, 23(3): 281—288
- 万邦君, 郭炳火, 陈则实, 1990. 黄海热结构的三层模式. 海洋学报, 12(2): 137—148
- 邢传玺, 黄大吉, 2010. 冬季黄海暖流西偏机理数值探讨. 海洋学报, 32(6): 1—10
- 江蓓洁, 鲍献文, 吴德星等, 2007. 北黄海冷水团温、盐多年变化特征及影响因素. 海洋学报, 29(4): 1—10
- 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰等, 1999. 初春南黄海水文特征及环流状况的分析. 海洋学报, 21(5): 1—11
- 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—15
- 孙效功, 方 明, 黄 伟, 2000. 黄、东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律. 海洋与湖沼, 31(6): 581—587
- 孙湘平, 2006. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 106—109
- 杨作升, 郭志刚, 王兆祥等, 1992. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局. 海洋学报, 14(2): 81—90
- 吴德星, 牟 林, 李 强等, 2004. 渤海盐度长期变化特征及可能的主导因素. 自然科学进展, 14(2): 191—195
- 邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥等, 2000. 1996 年春季南黄海水文特征和水团分析. 海洋学报, 22(1): 17—26
- 张启龙, 侯一筠, 程明华等, 2004. 青岛冷水团强度的变化特征. 海洋科学集刊, 46: 13—21
- 张启龙, 翁学传, 杨玉玲, 1996. 南黄海春季水团分析. 海洋与湖沼, 27(4): 421—428
- 陈则实, 何元成, 林锡藩等, 1979. 黄海海流状况. 海洋研究, 3(增刊): 1—42
- 赵保仁, 1985. 黄海冷水团锋面与潮混合. 海洋与湖沼, 16(6): 451—460
- 赵保仁, Limeberner R, 胡敦欣等, 1991. 黄海南部及东海北部夏季若干水文特征. 海洋与湖沼, 22(2): 132—139
- 翁学传, 张以愚, 王从敏等, 1988. 黄海冷水团的变化特征. 海洋与湖沼, 19(4): 368—379
- 高生泉, 林以安, 金明明等, 2003. 山东半岛以南水域营养盐的时空分布及其与鲢鱼产卵场的关系. 海洋学报, 25(增刊 2): 157—166
- 郭炳火, 1993. 黄海物理海洋学的主要特征. 黄渤海海洋, 11(3): 7—18
- 戚建华, 苏育嵩, 1998. 黄海潮生陆架锋的数值模拟研究. 海洋与湖沼, 29(3): 247—254
- 葛人峰, 刘海行, 郭景松等, 2010. 现场水文观测资料的同步化处理. 海洋科学进展, 28(3): 299—304
- 赫崇本, 汪园祥, 雷宗友等, 1959. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 2(1): 11—15
- 管秉贤, 1963. 黄海冷水团的水温变化以及环流特征的初步分析. 海洋与湖沼, 5(4): 255—284
- Fu M Z, Wang Z L, Li Y, *et al*, 2009. Phytoplankton biomass size structure and its regulation in the Southern Yellow Sea (China): Seasonal variability. Continental Shelf Research, 29: 2178—2194
- Huang D J, Fan X P, Xu D F *et al*, 2005. Westward shift of the Yellow Sea warm salty tongue. Geophysical Research Letters, 32, L24613, doi:10.1029/2005GL024749
- Uda M, 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June 1932. Journal of the Imperial Fisheries Experiment Station (In Japan), 5: 138—190
- Uda M, 1936. Results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters during October and November 1933. Journal of the Imperial Fisheries Experiment Station (In Japan), 7: 91—151
- Yu F, Zhang Z X, Diao X Y *et al*, 2010. Observational evidence of the Yellow Sea Warm Current. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 28(3): 677—683
- Zhang Q L, Liu X Q, Cheng M H *et al*, 2002. Characteristics and formation cause of Qingdao cold water mass. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 20(4): 303—308
- Zhao B R, Xiong Q C, Zhang F G, 1986. The internal hydrographic structure of the Huanghai Cold Water Mass (HCWM) in summer. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 4(1): 27—40

CHEMICOHYDROGRAPHIC ANALYSIS OF THE ROLE OF THE YELLOW SEA WESTERN COASTAL COLD WATER IN FORMING THE SOUTHERN YELLOW SEA WESTERN BOTTOM COLD WATER AND ITS SEASONAL SUCCESSION

WEI Qin-Sheng^{1,3}, YU Zhi-Gang³, GE Ren-Feng², WANG Hui-Wu², WANG Bao-Dong¹

(1. Key Laboratory of Science and Engineering for Marine Ecological Environment, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266061; 2. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266061; 3. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, 266100)

Abstract Based on hydrologic and nutrient data obtained from four seasonal surveys during 2006—2007 in the southern Yellow Sea, the role of the Yellow Sea western coastal cold water in the formation of the southern Yellow Sea Cold Water Mass and its western cold core is discussed from the chemicohydrographic perspective. In addition, the inner relationship between the southern Yellow Sea Cold Water Mass and the Qingdao Cold Water Mass is revealed, and the formation mechanism of the western cold core of the Yellow Sea Cold Water Mass in summer is also expounded. The results show that: the Yellow Sea Western Coastal Current flows southward along the continental shelf front in winter and spring. The cold water carried by the Yellow Sea Western Coastal Current in winter and spring plays an important role in forming the Qingdao Cold Water Mass, the Southern Yellow Sea intermediate, and bottom Cold Water in spring as well as the Southern Yellow Sea Western Cold Water Mass and its western cold core in summer; the southern Yellow Sea Western Cold Water in bottom develops initially in the sea area near the Qingdao Cold Water Mass, and becomes the western cold core of the Yellow Sea Cold Water Mass in summer. With autumn coming, the bottom cold water in the east of the continental shelf front degrades gradually. Meanwhile, the Yellow Sea western coastal cold water begins to flow southward again, and hence provide the source for the Qingdao Cold Water, the southern Yellow Sea intermediate, and bottom Cold Water in spring as well as the southern Yellow Sea Western Cold Water in summer next year. Those processes consist of seasonal succession of the bottom water in the east of the continental shelf front in summer. The understandings of the Yellow Sea Western Coastal Current and the southern Yellow Sea Western Cold Water Mass as well as their relationship are further studied.

Key words Yellow Sea western coastal cold water; Yellow Sea Cold Water Mass; Qingdao Cold Water Mass; intermediate cold water; continental shelf front; chemicohydrography