

# 黄海和东海分界线附近水文、化学特征的 季节性演替\*

韦钦胜<sup>1, 2, 4</sup> 王辉武<sup>1, 3</sup> 葛人峰<sup>1, 3</sup> 谢琳萍<sup>1, 2</sup>

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 国家海洋局 海洋生态环境科学与工程重点实验室 青岛 266061; 3. 国家海洋局 海洋环境科学与数值模拟重点实验室 青岛 266061; 4. 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** 分析和探讨了黄、东海交界海域 32.3°N 断面化学水文学精细化特征的季节性演替, 结果显示: 化学、水文学要素的空间区域化分布与该断面上环流场的布局及其季节转换存在良好的对应关系, 水团配置对各要素含量及分布起着控制性作用; 冬、春和秋季, 在黄海西部沿岸流影响范围内出现的浊度和悬浮物浓度高值区多与营养盐浓度高值区和 pH 低值区相共存, 可能是受东海北部气旋式涡旋所产生的辐聚效应的影响, 此高值区中的悬浮物趋于向该海域的底层冷涡区沉积, 夏季此特征则不明显, 从而证实该海域悬浮物沉积作用具有“冬强夏弱”的特征; 夏季 123.5°—124.25°E 范围海域内存在海水下沉现象, 上层水体中的长江冲淡水可被携带至下层, 导致在夏季长江冲淡水东北向扩展过程中一部分冲淡水从其主体中分离出来; 夏季台湾暖流的阻隔作用使得悬浮物的影响范围远没有长江冲淡水的大, 促使水体和物质输运发生分离。同时, 根据水文和化学各要素分布之间的对应关系, 初步勾勒出了 32.3°N 断面 4 季的水团配置状况, 并通过分析东海北部冷水域典型站位的温、盐度垂直结构, 在一定程度上印证了该冷水的形成过程。

**关键词** 黄、东海交界海域; 长江冲淡水; 水团; 化学要素; 东海北部冷水

**中图分类号** P731; P734.2

黄、东海交界海域是我国重要的陆架海区, 素以高生产力而著称, 该海域水动力状况较为复杂, 长江冲淡水、北上的台湾暖流、南下的黄海沿岸流、黄海冷水团环流和东侧的对马暖流分支等水团的交汇及其相互作用构成了复杂的环流图像, 同时, 各海洋动力因素的配置、消长规律和变异情况以及它们之间的耦合作用所产生的复杂动力学环境又显著影响着该海域的生态环境, 是诸多海洋学者关注的焦点(毛汉礼等, 1965; 任允武等, 1965; 胡敦欣等, 1980; 苏育嵩等, 1989a, 1989b; 杨作升等, 1995; 邹娥梅等, 2001; 万瑞景等, 2002; 杨东方等, 2007; 张辉等, 2009; 王刚等, 2010)。

黄、东海交界海域 32.3°N 断面西侧位于长江口东北部, 靠近吕泗渔场, 受长江冲淡水东北向扩展、台湾暖流北侵以及苏北沿岸水的影响显著; 中部是黄海西部沿岸流向东海输送的途径海域; 东侧不仅位于冬半年黄海暖流进入南黄海的入口处以及夏季黄海冷水团的南部边界附近, 同时还邻近东海北部的冷涡(胡敦欣等, 1980; 苏育嵩等, 1986, 1989a; 王刚等, 2010)和济州岛西南部海域的泥质区(郭志刚等, 1999, 2003)。黄、东海交界海域复杂、特殊的水文动力状况对物质输运、黄海和东海水体交换以及生态环境等具有重要的影响, 32.3°N 断面化学水文学特性的四季演变不仅可用来指示长江冲淡水、台湾暖流、黄

\* 我国近海海洋综合调查与评价专项, 908-01-ST03 号; 国家自然科学基金青年基金项目, 41206068 号; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目, GY02-2007T08 和 GY02-2012G13 号。

通讯作者: 助理研究员, E-mail: weiqinsheng@fio.org.cn

收稿日期: 2011-06-10, 收修改稿日期: 2013-01-16

海西部沿岸流和黄海暖流等的配置和消长规律, 而且能够反映济州岛西南部海域底层冷水的变化。为此, 本文根据 2006—2007 年四季调查资料, 通过分析和研究黄、东海交界海域  $32.3^{\circ}\text{N}$  断面化学水文学精细化特征的季节性演替规律, 深入探讨该断面诸参数四季变化的主控因素及环流场的季节转换, 以期为正确认识黄、东海交界海域的生态环境特征及其时空变化规律等提供科学依据。

## 1 调查与方法

调查分别于冬季(2007-01-12—2007-01-13)、春季(2007-04-23—2007-04-25)、夏季(2006-07-17—2006-07-19)和秋季(2007-10-16—2007-10-17)进行, 各季节均设置化学、生物要素观测站 11 个(如图 1 所示, 相应季节的水文观测站在  $122.5^{\circ}\text{E}$  以东海域双倍加密)。利用 Sea-Bird 917 CTD 仪测温度、盐度、浊度和深度, 并用 Niskin 采水器采集水样(根据水深情况, 取 0m, 10m, 30m 和底层水样)。悬浮物浓度、溶解氧(DO)含量和海水 pH 值分别用重量法、Winkler 法和 pH 计法测定; 营养盐数据按照《海洋监测规范》规定的方法, 经过  $0.45\mu\text{m}$  的醋酸纤维膜过滤后, 用 7230 型分光光度计现场测得; 叶绿素  $a(\text{chl } a)$  采用荧光法测定得到。

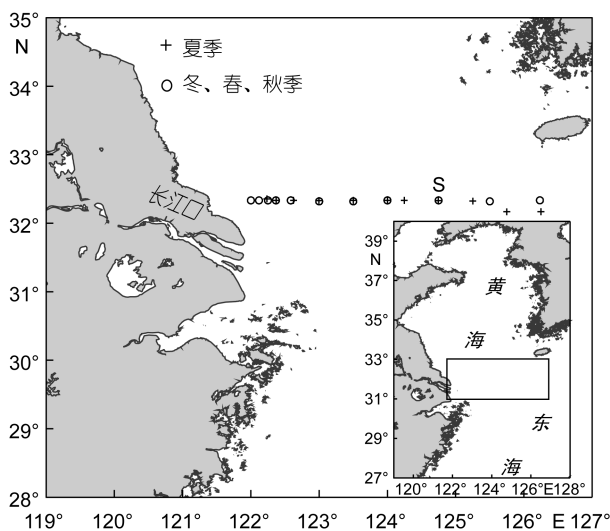


图 1 采样站位图

Fig.1 Locations of the stations

## 2 结果与讨论

### 2.1 四季各水文、化学要素的断面分布特征

#### 2.1.1 冬季 由图 2a, b 可清晰的看出冬季 $32.3^{\circ}\text{N}$

断面温、盐度的垂向结构。整体来看, 由于强烈的风混合作用, 断面上的温、盐度分布呈现垂向均匀状态, 且最明显的特征是存在东、西两个高盐的暖水区: 其中西暖水区位于  $123^{\circ}\text{E}$  附近海域, 这可能与夏季台湾暖流前缘水的残留有关, 当然也不排除还受到调查期间台湾暖流前缘水的影响, 但其温度较低, 由此似乎表明即使存在台湾暖流前缘水, 其在这里也已成强弩之末, 乐肯堂等(1990)在分析长江口-济州岛断面上的温、盐度结构时, 也曾注意到该现象, 东暖水区出现在  $125.25^{\circ}\text{E}$  以东, 这显然与对马暖流的分支—黄海暖流的侵入有关。两个暖水区之间的海域是黄海西部沿岸流影响的海区, 但并未出现低盐冷水块, 这一方面与东侧暖水的不断侵入以及与其发生一定程度上的混合而使黄海西部沿岸流部分变性所致, 再者西侧台湾暖流前缘水的温、盐度也不高, 从而使黄海西部沿岸流的低温、低盐特征表现的不明显, 但仍然可以看到其与两侧暖水所形成的较强锋面, 且与东侧暖流水所形成的温、盐度锋尤为突出, 这也在一定程度上反映出黄海西部沿岸流是沿黄海暖流锋面流动。 $122.25^{\circ}\text{E}$  以西海域温、盐度均较低, 这主要是受低温、低盐的苏北沿岸水的影响。

通过对比浊度、悬浮物(图 2c、d)和温、盐度分布图还可发现,  $123^{\circ}\text{E}$  附近海域浊度和悬浮物含量均较低, 与两侧水体形成鲜明的对比, 只有洁净的外海水才具有这样的特征, 这就进一步佐证了此处台湾暖流的存在, 它一方面犹如一道屏障(杨作升等, 1992; 孙效功等, 2000; 郭志刚等, 2002)阻挡了西侧苏北沿岸水的南部前沿向外海扩展, 促使后者向岸退缩, 另一方面受其顶托作用的影响, 还可使黄海西部沿岸流以及不断汇入其中的苏北沿岸水外缘水具有转向东南方向的趋势, 从而使台湾暖流成为了分隔苏北沿岸水的南部前沿与黄海西部沿岸流的洁净“水障”(杨作升等, 1991)。 $125.25^{\circ}\text{E}$  以东海域中的浊度和悬浮物含量均较低, 很好地体现了黄海暖流清水的特征。 $123.5^{\circ}\text{E}$ — $125.25^{\circ}\text{E}$  范围海域则为浊度和悬浮物浓度的高值区, 这显然与冬季较强的黄海西部沿岸流的物质输运过程密切相关, 而且受东侧黄海暖流的影响, 悬浮物进一步向东的扩散和输运过程还受到一定程度的阻碍, 此外, 与北上的黄海暖流和南下的黄海西部沿岸流两股反向海流的侧向切变效应密切相关的东海北部气旋式涡旋对物质产生的辐聚效应(胡敦欣等, 1980)在这一高值区的形成过程中还可能发挥着重要作用。 $122.25^{\circ}\text{E}$  以西所出现的高

浊度、高悬浮物浓度区则主要是低温、低盐的苏北沿岸水沿近岸向南运输的结果。

为了进一步探讨 32.3°N 断面上化学要素与温度、盐度的对应关系, 图 2e—2h 给出了 pH 和各项营养盐的分布图。在断面西部海域(125°E 以西), 营养盐含

量整体较高, 且可分为 3 个亚区: 即 122.25°E 以西高值亚区、123.25°E 以东高值亚区以及 122.25°—123°E 范围内的中部次高值亚区。122.25°E 以西的营养盐含量高值亚区与该区低温、低盐和低 pH 水体相对应, 进一步表明此为苏北沿岸水影响区; 123.25°E 以东的

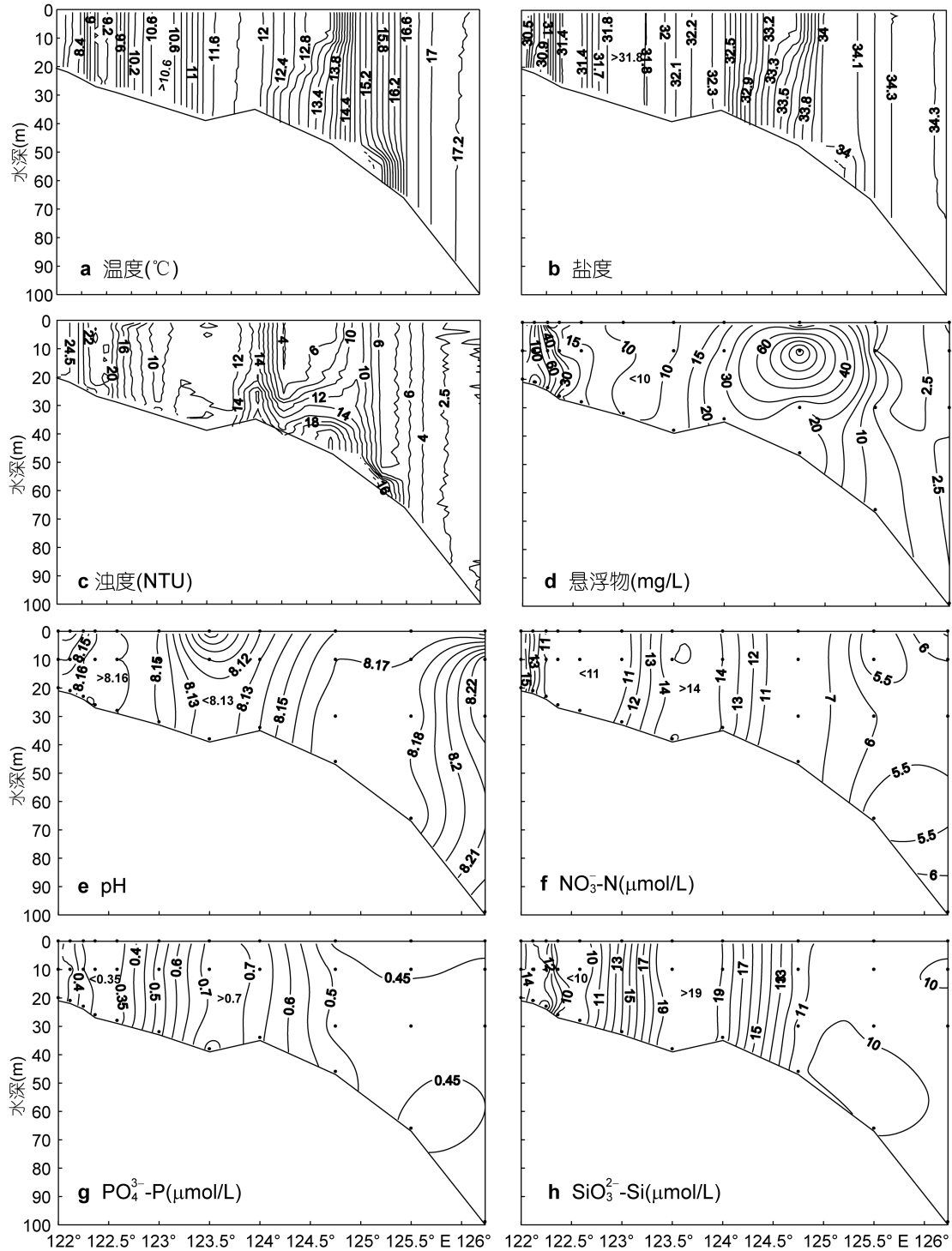


图 2 冬季 32.3°N 断面化学、水文学(温度和盐度)要素分布  
 Fig.2 Profiles of chemical and hydrological parameters in section 32.3°N in winter

高值亚区与相对低温、低盐的黄海沿岸流水相对应, 同时, 123.25°E 附近海域所存在的 pH 低值区亦表明此处水体具有沿岸水的性质, 当然, 冬季较强的垂直接合作用将营养盐由底至表的输送在该营养盐高值区形成过程中也可发挥着重要作用; 122.25°—123.25°E 范围的中部次高值亚区内温度、盐度和 pH 则相对较

高, 应是受台湾暖流水的影响所致。在断面东部深水水域(125°E 以东), 营养盐含量相对较低, pH 较高, 该区对应于高温、高盐水体( $T > 15^{\circ}\text{C}$ ,  $S > 34$ ), 具有明显的外海水性质, 而且自西往东温度和盐度也逐渐增加(图 2a、b), 这再次证实应是黄海暖流水影响区。

2.1.2 春季 由图 3a、b 来看, 春季 32.3°N 断面

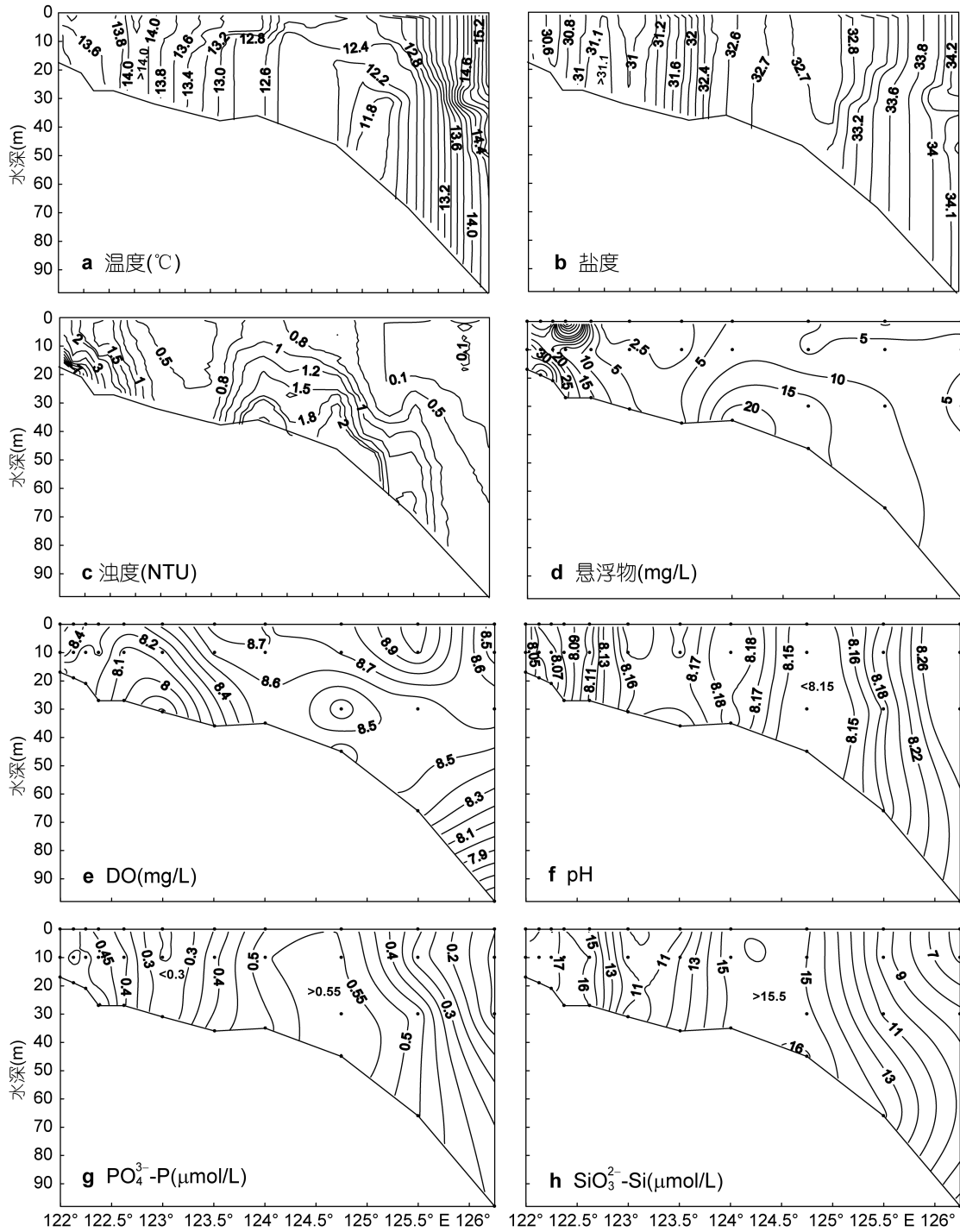


图 3 春季 32.3°N 断面化学、水文学要素分布

Fig.3 Profiles of chemical and hydrological parameters in section 32.3°N in spring

温、盐度分布具有如下显著特征: 1) 122.5°—123.25°E 范围海域内存在一弱高温带, 这必然是受台湾暖流前缘水的影响所致, 122.75°E 附近海域相对较高的盐度也进一步佐证了台湾暖流的存在; 2) 在 123.5°—125.5°E 范围海域的中、下层水体中出现冷水现象, 并向周围海域扩展和渗透, 冷水范围内盐度也相对较低, 且在冷水两侧形成较强的海洋锋, 这标志着由冬半年黄海西部沿岸流南下并存储在东北北部海域所形成的底层冷水(苏育嵩等, 1986, 1989b; 郭炳火等, 2004)已经成型; 3) 125.5°E 以东海域为高温、高盐区, 与冬季相类似, 这也是黄海暖流的影响所致, 但较冬季时有向深水移动的趋势, 这显然是黄海暖流的逐渐衰退所致。同时, 需要指出的是, 冬季 32.3°N 断面上黄海西部沿岸流影响范围内并未出现冷水块, 而在春季则尤为明显, 这是由于春季近岸和上层水体受热增温较快, 且黄海暖流逐渐向东退缩, 所以使得黄海西部沿岸流影响范围内在冬季未出现的冷水块, 于春季时逐渐显现出来, 而这一现象也将有助于温跃层的形成。另外, 122.5°E 以西主要受长江冲淡水和苏北沿岸水的影响, 温、盐度较低。

由图 3c、d 可知, 浊度和悬浮物浓度分布最显著的特点是: 均存在 2 个低值区和 2 个高值区, 低值区分别在 123.25°E 附近海域和 125.5°E 以东, 高值区则分别位于 122.5°E 以西和 124°—125.5°E 范围海域内。与温、盐度分布图相比较, 还发现 123.25°E 附近海域以及 125.5°E 以东的浊度和悬浮物含量低值区分别与其所处的高温、高盐带总体相吻合, 前者显然是台湾暖流前缘水存在的又一旁证, 而后者则与黄海暖流水相对应; 124°—125.5°E 范围海域内的浊度和悬浮物含量高值区与此处的低盐冷水区相对应, 其成因与冬季相同, 体现了主要是受黄海西部沿岸流所携物质的影响所致, 而且可能是受东海北部气旋式涡旋所产生的辐聚区的影响, 也使得悬浮物大致在该海域的底层冷涡中心沉积, 显然, 这样的物源保障和动力作用均有利于东海陆架北部泥质区的形成(杨作升等, 1995; 郭志刚等, 1999, 2003); 122.5°E 以西的浊度和悬浮物含量高值区则与长江冲淡水和苏北沿岸水的扩展有关。同时, 进一步分析还发现, 与冬季相仿, 洁净的台湾暖流和黄海暖流类似屏障(杨作升等, 1991, 1992; 孙效功等, 2000; 郭志刚等, 2002)的作用在阻挡其西侧悬浮体向东输运过程中也发挥着重要作用。

此外, 通过对比各化学要素(图 3e—3h)和温、盐

度(图 3a、b)的分布趋势, 还可发现化学要素含量的高、低值区分布也与断面上的水文特征或水团分布具有良好的对应关系。其中受台湾暖流前缘水的影响, 使得 123°E 附近海域表现为 DO 含量的低值区和营养盐含量的次高值区; 124.5°E 附近海域营养盐高值区的存在可能主要是冬半年黄海西部沿岸流南下所携营养物质并存储于此的结果, 并形成 pH 低值区; 125.5°E 以东海域的营养盐含量相对较低, pH 较高, 体现了主要受外海暖流水的影响; 122.5°E 以西 pH 值较低、营养盐含量相对较高, 这显然是长江冲淡水和苏北沿岸水的扩展所致。

**2.1.3 夏季** 整体来看, 夏季 32.3°N 断面温、盐度分布最显著的特征是存在较强的温、盐度跃层, 具有清晰的上混合层-跃层-下混合层的三层垂直结构(图 4a、b)。进一步分析发现, 该断面上的水文特征分布还可分为 3 个区域: 即 123.5°E 以西海域的强盐跃层区和 124.25°E 以东海域的强温跃层区以及 123.5°—124.25°E 范围海域的弱跃层区。究其原因, 123.5°E 以西海域强盐跃层区的形成是夏季长江冲淡水北转和台湾暖流增强以及抬升的结果, 致使表层被低盐的冲淡水所覆盖, 而 10m 以下水体则被高盐的台湾暖流水控制。124.25°E 以东海域的强温跃层区一方面与上层水体增温有关, 再者东海北部底层冷水与黄海冷水团南侧边缘区冷水的融合可能也在一定程度上影响到温跃层的强弱。123.5°—124.25°E 范围海域的层化特征不明显, 这可能与夏季长江口门外 31°—32°N、123.5°—124.5°E 海域存在的反气旋式涡(邹娥梅等, 2001)所造成的海水下沉有关, 由图 4a、b 所示的温、盐度分布也可以看出该海域的海水下沉现象, 使得 123.5°—124.25°E 范围海域的水温较同层次的两侧海水温度高, 而盐度低于同层次的两侧海水, 邹娥梅等(2001)的分析结果亦同样显示了该附近海域的海水下沉特征; 同时, 123°E 以西海域台湾暖流抬升(韦钦胜等, 2011)所引起的水体下沉作用、潮混合(Moon *et al*, 2010; Wu *et al*, 2011)以及黄海冷水团气旋式环流(赵保仁等, 1991)可能也有助于 123.5°—124.25°E 范围海域内高温、低盐水的形成, 可见, 这部分水具有一定的混合水特性。需要指出的是, 尽管 32.3°N 断面上的长江冲淡水主要分布在 123.5°E 以西的 10m 层以上海域, 但 123.5°—125.75°E 范围海域的上层仍然存在夏季长江冲淡水北转过程中所输运来的一部分冲淡水(由图 4b 所示的盐度分布可以看出), 而且由于 123.5°—124.25°E 范围海域内

的海水下沉作用, 上层水体中的长江冲淡水还被携带至下层, 导致在夏季长江冲淡水东北向扩展过程中一部分冲淡水从其主体中分离出来, 这与 Moon 等 (2010) 和 Wu 等 (2011) 基于数值模式的研究结果较为吻合, 为进一步阐释该现象, 作者将在后续工作中结合更丰富的水文和水化学现场调查资料对其进行深入的分析研究。

根据图 4d 所示的悬浮物浓度分布, 可将 123.5°E 作为界限把 32.3°N 断面分成西部高值区和东部低值区, 西部悬浮物浓度高值区的存在显然是长江冲淡水入海悬浮泥沙影响的结果, 同时台湾暖流从中、底层水体向断面西侧的入侵所起到的屏障作用(郭志刚等, 2002)还阻挡了西部浓度高值区中的悬浮物向外

海的运输, 以致悬浮物的影响范围远没有冲淡水的大, 在一定程度上导致水体和物质的运输分离。与冬、春季相比, 悬浮物浓度分布的基本格局亦发生了一定的变化, 主要体现在以下两个方面: 1) 整体上来看, 夏季悬浮物浓度显著低于冬、春季(尤其是冬季); 2) 冬、春季黄海西部沿岸流影响区的悬浮物浓度高值区在夏季已不明显。由于 32.3°N 断面冬、春季黄海西部沿岸流影响区的悬浮物浓度高值区邻近济州岛西南部海域的冷涡泥质区, 所以这可在一定程度上印证该海域悬浮物沉积作用具有“冬强夏弱”的特征(郭志刚等, 1999, 2003)。

由图 4c 所示的浊度分布可知, 123.5°E 以西的高浊度区也对应了断面西部悬浮物浓度高值区, 成因

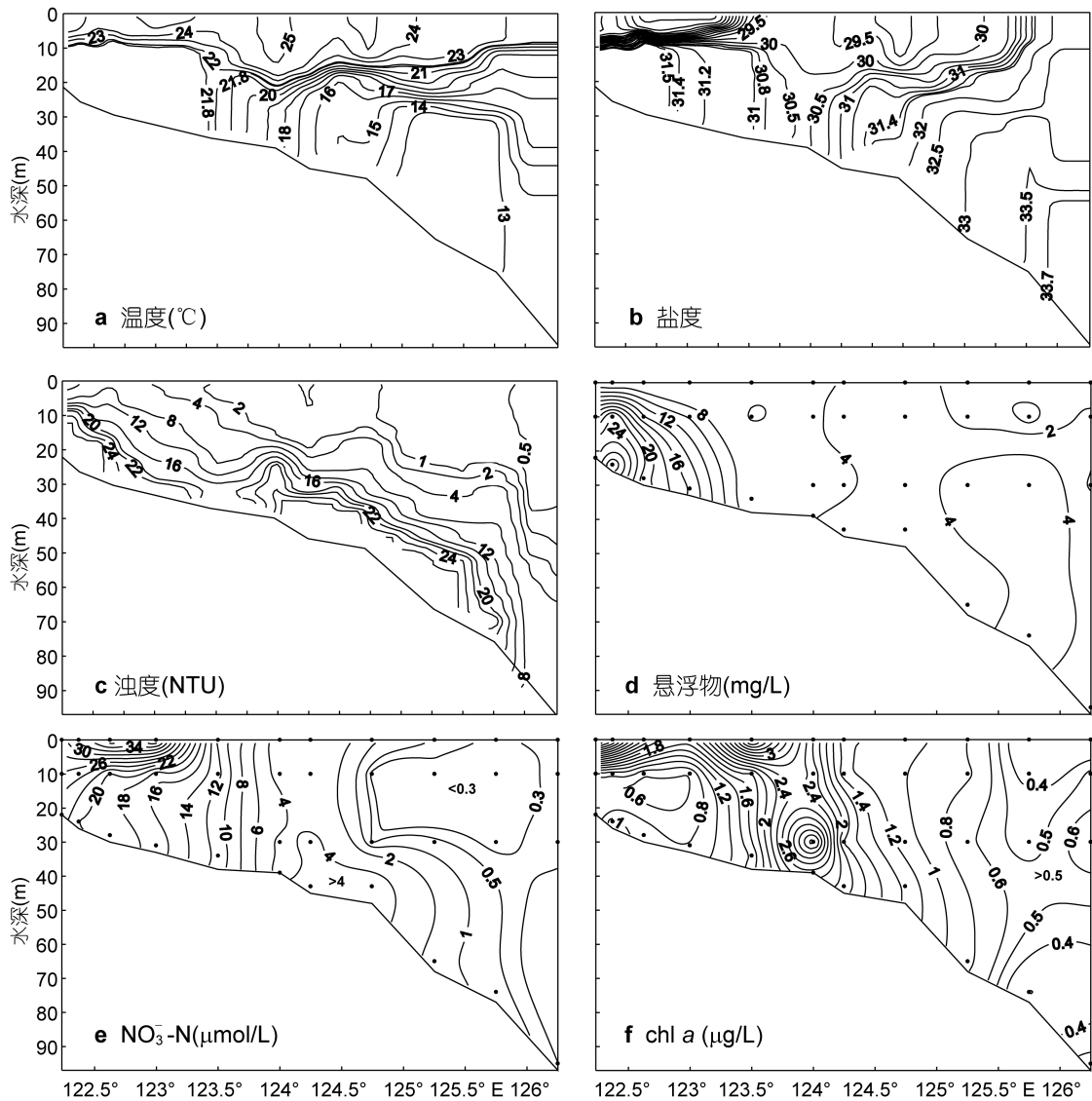


图 4 夏季 32.3°N 断面化学、水文学要素分布

Fig.4 Profiles of chemical and hydrological parameters in section 32.3°N in summer

亦然; 124°E 以东中、上层水体中的低浊度分布可在一定程度上进一步说明随长江冲淡水入海的悬浮物基本上未越过 124°E 附近海域; 124°E 以东底层水体中的浊度较高, 这可能跟该海域中、上层水体中较高的浮游植物 chl *a* 浓度(图 4f)密切相关, 是浮游生物繁殖所产生的有机碎屑沉降而引起的结果。

从 32.3°N 断面  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度的分布情况来看(图 4e), 123.5°E 以西的上层水体为最高值区, 这显然也是长江冲淡水东北向扩展所致, 图 4b 所示的盐度分布亦证实了这一点。在 123.5°—124.5°E 范围海域, 营养盐基本呈垂直均匀分布, 这同样与该海域所存在的海水下沉现象以及反气旋式涡旋(邹娥梅等, 2001)有关。124.5°E 附近海域的底层出现小范围的营养盐浓度高值区, 其与春季时该断面上的东海北部底层冷水位置(图 3a)相吻合。124.5°E 以东海域的上层水体营养盐含量较低, 这应该是入春以来浮游植物生长不断消耗的结果, 且由于温、密跃层的存在, 阻挡了下层营养盐向上层的输送, 然而, 该海域营养盐的这一分布状况则有利于在具有适宜光照条件的跃层下界附近出现 chl *a* 最大值层(图 4f)。另外, 由图 4e 所示的 chl *a* 分布还可以看出, 123.5°—124.5°E 范围海域底层水体中较高的 chl *a* 浓度可能主要与海水下沉对上层浮游植物的携带有关, 这也在一定程度上完善了作者先前在探讨长江口东北部海域上升流时对 32.3°N 断面(124°E 以西)chl *a* 分布受控机制的认识(韦钦胜等, 2011)。

**2.1.4 秋季** 秋季温、盐度垂直结构处于由夏季型向冬季型转变的过渡阶段。温、盐度的分布状况(图 5a、b)表明, 水体的垂直混合作用由浅水区向深水域总体呈逐渐减弱的趋势, 在 125°E 以西海域, 温、盐度基本呈上下均匀分布, 浅水区的垂直交换作用已到达海底, 而在 125°E 以东海域却仍然存在三层结构, 但与夏季相比, 跃层已明显下沉且向外海域退缩。进一步分析则发现, 秋季 32.3°N 断面还存在若干令人感兴趣的水文特征, 最明显的现象便是冷、暖水块的交替存在, 并在其交汇处形成较强的海洋锋。其中冷水块出现在 122.25°E 以西、123.5°E 附近海域以及 125°—125.75°E 范围海域的上层水体, 暖水块出现在 122.25°—123°E 和 123.75°—124.5°E 范围海域以及 125.75°E 以东海域的中上层水体。各冷、暖水块的形成跟秋季该断面上复杂的水团配置及其消长规律密切相关。其中 122.25°E 以西海域的低盐冷水是入秋后苏北沿岸水向西退缩, 并随偏北季风的加

强, 向南运输的结果。秋季苏北沿岸水的贴岸南下所起到的顶托作用, 可加速长江冲淡水由北缩回并使其主体往南扩展, 并在一定程度上将台湾暖流前缘水向外海推进, 因此, 会使得 32.3°N 断面上的长江冲淡水及其夏季残留水也仅存在于 122.75°E 附近海域, 呈现出高温、低盐的特征, 而台湾暖流前缘水则存在其东侧 123.5°E 附近海域, 由于台湾暖流前缘水的温度并不高, 且秋季两侧水体的降温效应尚不显著, 从而使其呈现出冷水特征。台湾暖流水和长江冲淡水的存在所起到的动力屏障作用则可在一定程度上促使黄海西部沿岸流具有转向东南方向的趋势(邹娥梅等, 1999), 使后者出现在 32.3°N 断面离岸较远的 125°—125.75°E 范围海域的上层水体(可从该处存在的弱低盐区得到印证)。125.75°E 以东海域中上层水体中的高盐暖水是外海水的侵入所致, 这表明此时黄海暖流的侵入已影响黄海东南部海域。至于 123.75°—124.5°E 范围海域的弱高盐暖水, 本文推断秋季此海域也可能存在一反气旋式涡旋, 从而使其南部海域的暖水影响到该海域所致, 呈现出混合水的性质。此外, 需要特别指出的是, 秋季随着跃层的逐渐下沉以及向外海域的退缩, 存在于 32.3°N 断面东侧的东海北部冷水以及黄海冷水团南侧边缘区冷水有东移的趋势, 并逐渐衰退和消亡, 仅占据着 124.5°E 以东的底层水域, 然而随着黄海西部沿岸流的逐渐增强, 可将冷水源源不断的输入到 125°—125.75°E 范围海域的上层, 这预示着此时水体稳定性不高, 垂直对流混合会不断促使上层水体下沉, 进而为来年东海北部底层冷水的再次形成提供基础, 但由于黄海暖流从 125.75°E 以东海域不断向西扩展, 这部分冷水此后也将会有所向西移动。可见, 秋季也可认为是存在于 32.3°N 断面上的原东海北部冷水逐渐消失、新的冷水逐步形成的过渡阶段。

浊度和悬浮物浓度的分布(图 5c、d)显示, 32.3°N 断面西端(123°E 以西)为浊度和悬浮物浓度的高值区, 表明此为苏北沿岸水和长江冲淡水的影响所致; 123°E 附近海域为浊度和悬浮物浓度的相对低值区, 这是具有清水特征的台湾暖流前缘水影响的结果; 124°E 附近海域则存在浊度和悬浮物浓度的相对高值区, 其可能与反气旋式涡旋有关; 断面东部以 125.5°E 附近海域的底层为中心出现浊度和悬浮物浓度高值区, 且与该海域上层的黄海西部沿岸流相对应, 这一斜面上高值区的存在亦表明近底层可能为辐聚区, 由上层黄海西部沿岸流运输而来的悬浮物

可随海水向该断面上的东海北部冷涡区输送, 并不断往海底沉积(胡敦欣等, 1980)。

由图 5e—5g 可知, 秋季 32.3°N 断面上营养盐也具有明显的空间区域化分布特征, 且与断面上的温、盐度分布呈现出良好的对应关系。其中 122.25°E 以

西海域的营养盐高值区是苏北沿岸水贴岸南下影响的结果; 而 122.5°—123°E 范围海域所存在的几乎封闭的营养盐高值区则跟该断面上的长江冲淡水及其夏季残留水密切相关; 123.5°E 附近海域的营养盐次高值亚区应是受台湾暖流前缘水的影响所致; 断面

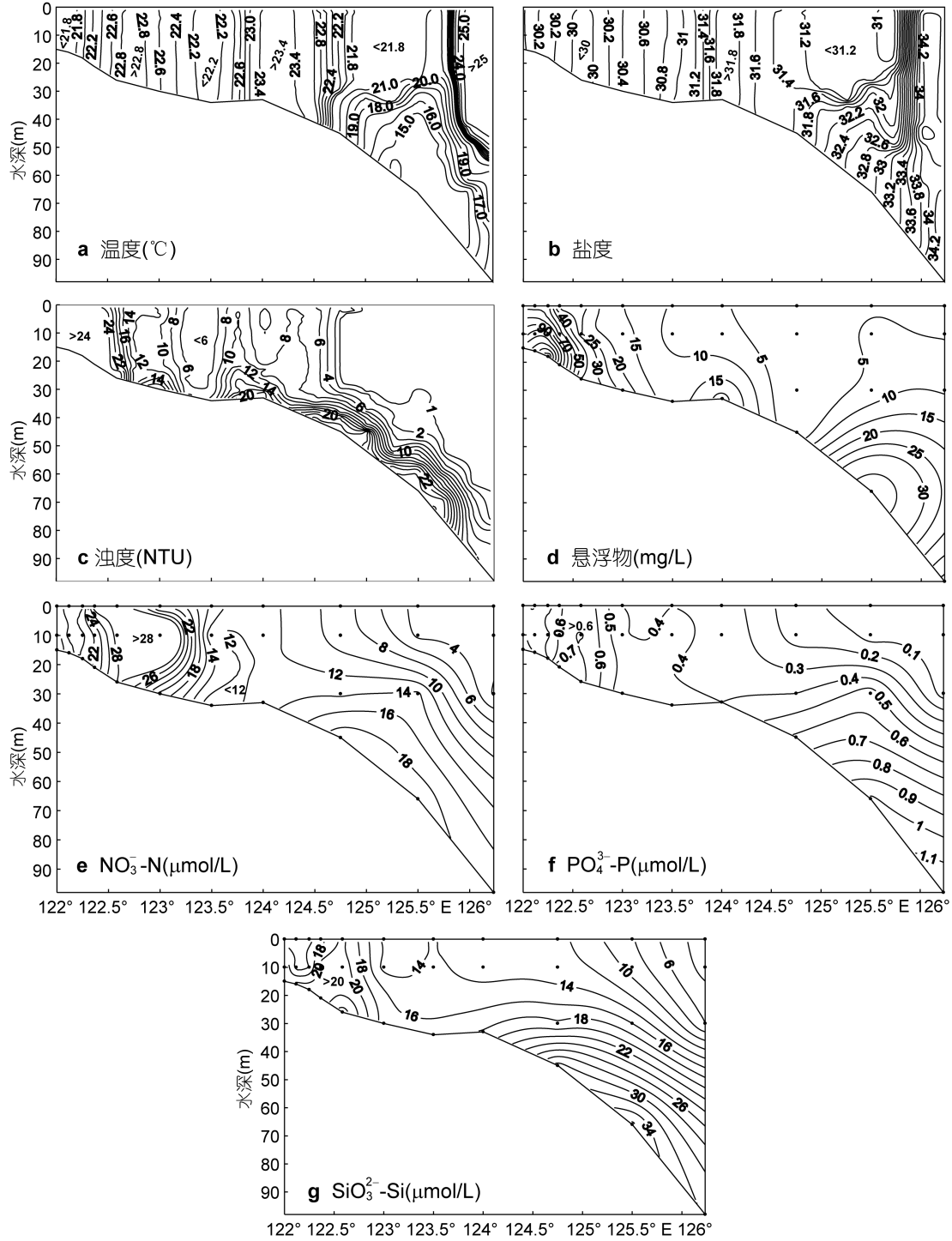


图 5 秋季 32.3°N 断面化学、水文学要素分布

Fig.5 Profiles of chemical and hydrological parameters in section 32.3°N in autumn



东部海域中、下层水体中的营养盐含量也较高,且明显高于夏季,并基本与夏季存在于该断面东侧的强温跃层区相对应,这主要是自跃层形成以来下、底层水体中有机物分解释放营养盐而逐渐积累的结果,但秋季渐强的垂直混合作用已使其具有向上层扩散的趋势,并逐步向冬季垂直均匀型分布转变;断面东部上层水体中的营养盐含量较低,这是洁净外海暖流水(黄海暖流)的输入所致,图 5a、b 所示的温、盐度分布亦证实了这一点。

## 2.2 断面各水系分布

如前所述,黄、东海毗邻海域  $32.3^{\circ}\text{N}$  断面化学水文学特征的季节变化在一定程度上指示了该海域各水团的特性和消长规律。为了进一步探讨该断面上的水系分布情况,本文根据水文和化学各要素分布之间的对应关系,并按照水团往往具有相对独特的理化性质及大体一致的变化趋势(李凤岐等, 2000)这一特性,同时结合相关水团分析方法(张启龙等, 1985; 翁学传等, 1992; 李凤岐等, 2000),初步勾勒出了  $32.3^{\circ}\text{N}$  断面四季的水团配置。

冬季,存在 4 个水团(图 6a),即苏北沿岸水、台湾暖流水(主要为夏季的残留水)、黄海西部沿岸流水和黄海暖流水。其中苏北沿岸水仅出现在断面西侧的

近岸海域,而且受其东侧台湾暖流残留水的阻挡,此部分沿岸水也很难向外海扩展;黄海西部沿岸流和黄海暖流占据了断面东侧大部分海域,由于冬季黄海西部沿岸流和黄海暖流均较强,从而使黄、东海之间的水交换主要是通过北上的黄海暖流和南下的黄海沿岸流进行。另外,断面东部黄海暖流还具有向西侧的浅海陆架入侵的趋势,并逐渐渗入到黄海西部沿岸流海域的底层,其结果将有助于加剧水体的垂直混合,使上层由黄海西部沿岸流运输而来的冷水下沉,因此,该断面上的黄海西部沿岸流水可认为是此后东海北部冷水的雏形或前身。

春季,  $32.3^{\circ}\text{N}$  断面被苏北沿岸水、长江冲淡水、台湾暖流前缘水、混合水和黄海暖流水 6 个水团所占据(图 6b)。该季节此断面上最显著的特征是东海北部底层冷水已经形成,黄海暖流明显向外海退缩。同时,由于长江冲淡水的部分北转,还使得断面西侧近岸海域被长江冲淡水和苏北沿岸水共同控制。

夏季,东海北部的底层冷水较春季更为强大,并与黄海冷水团南侧边缘水相融合,使得断面东侧的整个中、下层水体具有冷水的特征;夏季台湾暖流也显著强于冬、春季,占据了断面西侧中、下层的大部分海域。分析还发现,受断面东侧黄海暖流消退以

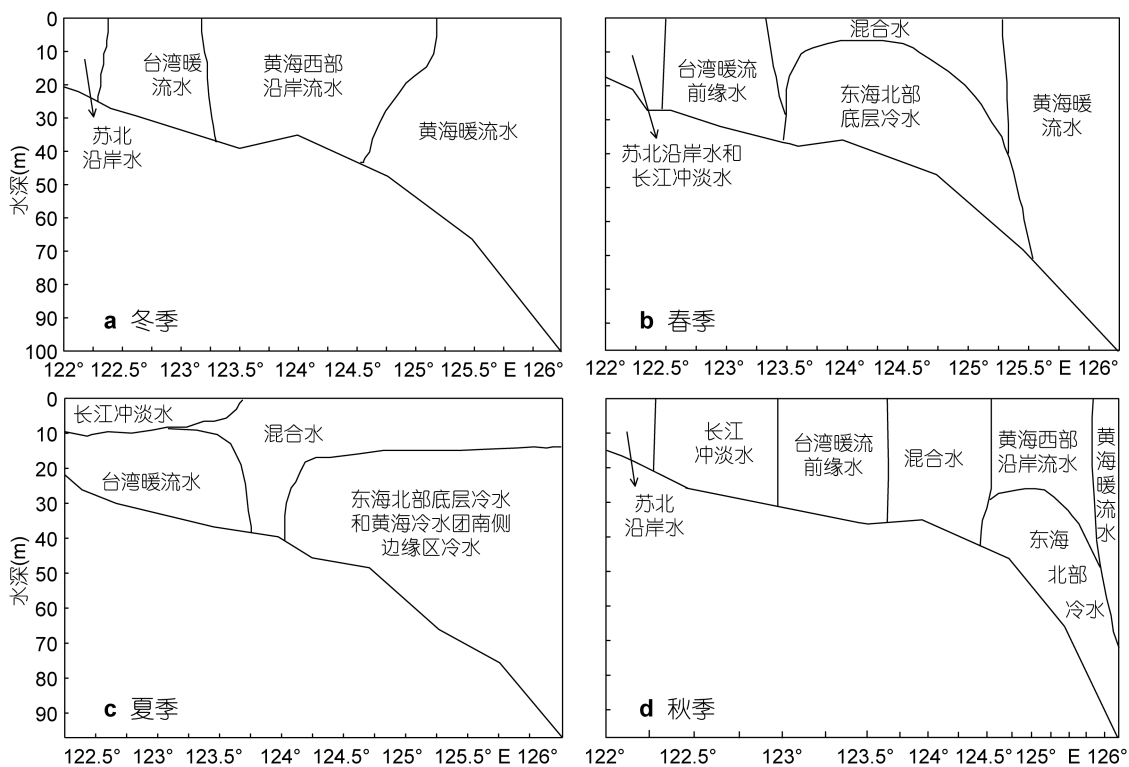


图 6 黄、东海毗邻海域  $32.3^{\circ}\text{N}$  断面水团配置的四季变化

Fig.6 Profiles of seasonal variation of the water masses in section  $32.3^{\circ}\text{N}$

及断面西侧较强台湾暖流挤压的影响, 32.3°N 断面上的东海北部冷水中心较春季时有所东移。另外, 由于夏季长江冲淡水的北转也尤为明显, 因而使得台湾暖流水的上方被冲淡水所覆盖。其他海区则具有明显的混合水特征。

秋季, 断面西侧浅水区自西向东依次被苏北沿岸水、长江冲淡水、台湾暖流前缘水和混合水所占据, 且各水团内部自表至底呈现出较好的均一性。相对于夏季而言, 32.3°N 断面上的东海北部冷水进一步向东退缩, 且该冷水的厚度也较夏季显著减小, 这与秋季垂向混合作用的逐渐增强、层化强度的减弱、跃层的下沉以及跃层向外海域的收缩有关, 此冷水的上层则主要是沿秋季黄海冷水团锋面南下输运而来的黄海西部沿岸流水。同时, 黄海暖流也已开始影响到断面的东部海域, 且随着冬季的到来, 这一暖水的影响范围会逐渐增大, 并使黄海西部沿岸流水向西移动。

### 2.3 东海北部冷水域的温、盐度垂直结构

如前所述, 32.3°N 断面上的东海北部冷水是一个较为显著的物理海洋现象, 为了进一步考察该冷水域中的水文结构, 本文拟以典型站位 S(124.75°E, 32.3°N)为例, 来探讨温、盐度的垂直分布特征。

由图 7 可以看出: 冬季, 温、盐度均表现为上层低、底层高的分布趋势, 这是因为上层主要是受低

温、低盐的黄海西部沿岸流水的影响, 下层则被高温、高盐的黄海暖流水所控制, 因而在冬季出现了如图 7a 所示的逆温层, 逆温层的存在表明此时水体稳定性不高, 垂直对流混合会逐渐促使上层水体下沉。春季, 逆温层消失, 温度呈上层高、下层低的分布趋势, 并在 10—15m 水深附近海域形成一定强度的温跃层; 跃层之下冷水的盐度明显比冬季低, 这表明此类冷水即为冬季期间由黄海西部沿岸流输运而来且下沉至此的低盐冷水与外海高盐水混合变性而形成(苏育嵩等, 1986); 该季节的底层冷水特征虽然清晰但不突出, 上、下层水体的温差也不大。夏季, 温、盐度的垂直结构与春季相似, 但温、盐跃层更加强大, 这显然跟上层水体的增温、冲淡水的输入以及降水过程相关, 此时, 底层冷水尤为明显, 其与上层水体的温差较春季时显著增大。秋季, 温、盐跃层下沉至 25—30m 水深附近海域, 跃层之下的冷水温度明显高于夏季, 表、底层温度差也显著减小, 这是入秋后垂直对流混合作用使上、下层水体趋于均一的结果, 显然, 此后底层冷水会逐渐消退。

以上分析结果在一定程度上印证了东海北部冷水的形成过程(苏育嵩等, 1989b; 郭炳火等, 2004), 即由冬半年黄海西部沿岸流输运而来的冷水在春季逐步演变而成, 在夏季最为强盛, 秋季转而消退。

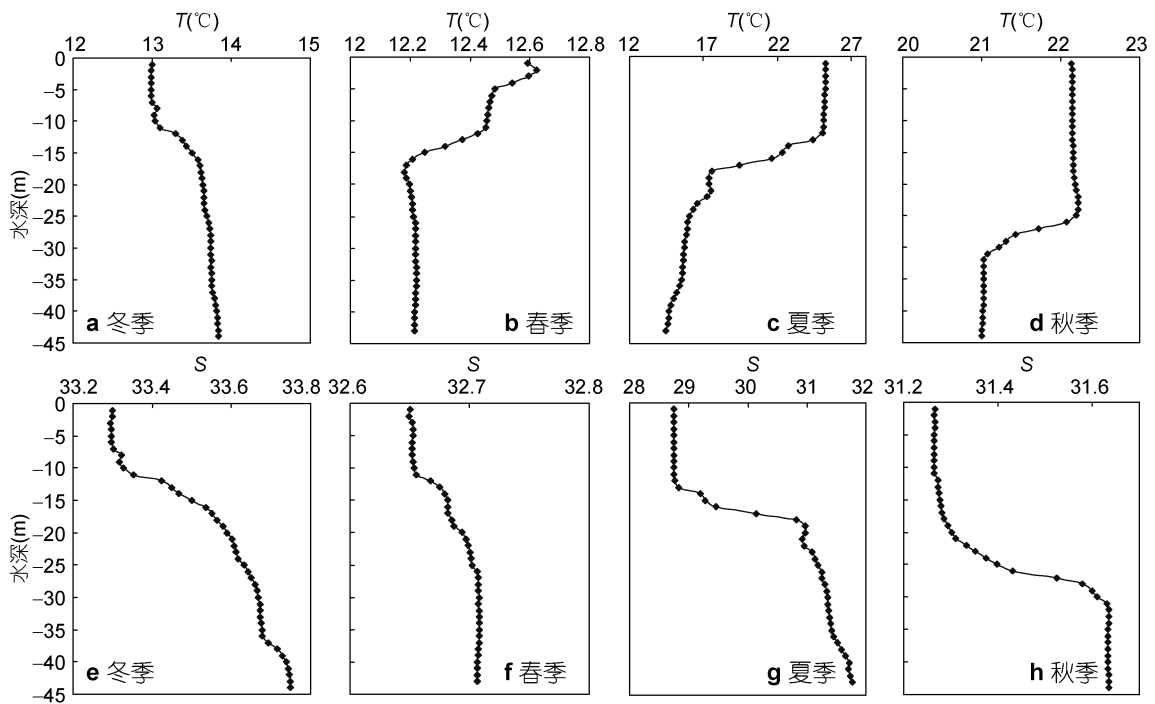


图 7 东海北部冷水域典型站位 S(124.75°E, 32.3°N)的温、盐度垂直分布

Fig.7 Vertical changes of temperature and salinity in representative station S in the cold eddy region of the northern East China Sea

### 3 结论

本文分析和探讨了黄、东海交界海域 32.3°N 断面化学水文学精细化特征的季节性演替, 结果表明: 1) 化学、水文学要素具有显著的季节性空间区域化分布特征, 其与该断面上环流场的布局及其季节转换存在良好的对应关系, 水团配置对各要素含量及分布起着控制性作用; 2) 冬、春和秋季, 大致在黄海西部沿岸流影响范围内出现明显的浊度和悬浮物浓度高值区, 并多伴有营养盐浓度高值区和 pH 低值区的存在, 而且可能是受东海北部气旋式涡旋所产生的辐聚区的影响, 还使得悬浮物往往在该海域的底层冷涡区沉积, 夏季时此特征则不明显, 这在一定程度上印证了该海域悬浮物沉积作用具有“冬强夏弱”的特征; 3) 夏季 123.5°—124.25°E 范围海域内存在海水下沉现象, 上层水体中的长江冲淡水可被携带至下层, 导致在夏季长江冲淡水东北向扩展过程中一部分冲淡水从其主体中分离出来; 4) 夏季台湾暖流的阻隔作用使得悬浮物的影响范围远没有长江冲淡水的大, 促使水体和物质输运发生分离; 5) 印证了东海北部冷水的形成过程, 其是由冬半年黄海西部沿岸流输运而来的冷水在春季逐步演变而成, 在夏季最为强盛, 秋季转而消退。

同时, 32.3°N 断面上复杂的化学水文学特征还反映出, 存在于黄、东海毗邻海域且具有不同来源的水团可形成较强的海洋锋区。由于这些不同的水团混合所提供的互为补充的环境因子能够促进光合作用 (Salvide, 1976) 和初级生产过程, 因此有利于形成生产力较高的渔场。

**致谢** 现场调查中全体科考人员付出辛勤劳动, 冬季、夏季、秋季航次“北斗”号科考船全体船员和春季航次“科学 1 号”科考船全体船员给予通力配合和协作, 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室吴辉老师在交流过程中提供建议, 谨致谢忱!

### 参 考 文 献

万瑞景, 黄大吉, 张经, 2002. 东海北部和黄海南部鲢鱼卵和仔稚幼鱼数量、分布及其与环境条件的关系. 水产学报, 26(4): 321—330

王刚, 兰键, 孙双文, 2010. 东海冷涡中心位置及季节性变化的初步研究. 地球科学进展, 25(2): 184—192.

韦钦胜, 臧家业, 战闰等, 2011. 夏季长江口东北部上升流海域的生态环境特征. 海洋与湖沼, 42(6): 899—905

毛汉礼, 任允武, 孙国栋, 1965. 南黄海和东海北部(27°—38°N)夏季的水文特征以及海水类型(水系)的初步分析.

海洋科学集刊, 第 1 集: 23—77

乐肯堂, 毛汉礼, 1990. 南黄海冬季温盐结构及其流系. 海洋与湖沼, 21(6): 505—515

任允武, 孙国栋, 毛汉礼, 1965. 南黄海和东海北部(27°—38°N)冬季的水文特征以及海水类型(水系)的初步分析. 海洋科学集刊, 第 1 集: 78—125

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

苏育嵩, 1986. 黄东海地理环境概况、环流系统与中心渔场. 山东海洋学院学报, 16(1): 12—27

苏育嵩, 李凤歧, 马鹤来等, 1989a. 东海北部底层冷水及双跃层初析. 海洋与湖沼, 20(1): 75—86

苏育嵩, 李凤歧, 马鹤来等, 1989b. 东海北部区域底层冷水团的形成及其季节变化. 青岛海洋大学学报, 19(1): 1—14

李凤歧, 苏育嵩, 2000. 海洋水团分析. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1—397

杨东方, 高振会, 王凡等, 2007. 长江口理化因子影响初级生产力的探索 III. 长江河口区水域磷酸盐供给的主要水系组成. 海洋科学进展, 25(4): 495—505

杨作升, 郭志刚, 王兆祥等, 1991. 黄、东海毗邻海域悬浮体与水团的对应关系及影响因素. 青岛海洋大学学报, 21(3): 55—69

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

杨作升, 郭志刚, 王兆祥等, 1995. 黄、东海海域水团发育对底质沉积物分布的影响. 青岛海洋大学学报, 25(1): 75—84

邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥等, 1999. 秋季南黄海水文特征及海水的混合与交换. 海洋学报, 21(5): 12—21

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

张启龙, 翁学传, 1985. 应用对应分析法划分夏季东海水团的初步研究. 海洋科学, 9(2): 14—18

张辉, 石晓勇, 张传松, 2009. 32°N 断面二十年来生态环境的演化及变化趋势. 海洋学报, 31(3): 121—126

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

胡敦欣, 丁宗信, 熊庆成, 1980. 东海北部一个气旋式涡旋的初步分析. 科学通报, 25(1): 29—31

翁学传, 张启龙, 颜廷壮等, 1992. 台湾海峡中、北部海域春、夏季水团分析. 海洋与湖沼, 23(3): 235—244

郭志刚, 杨作升, 雷坤等, 1999. 东海陆架北部泥质区沉积动力过程的季节性变化. 青岛海洋大学学报, 29(3): 507—513

郭志刚, 杨作升, 张东奇等, 2002. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体输运的阻隔作用. 海洋学报, 24(5): 71—80

郭志刚, 杨作升, 范德江等, 2003. 长江口泥质区的季节性沉积效应. 地理学报, 58(4): 591—597

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, 82—83

Moon J H, Hirose N, Yoon J H *et al*, 2010. Offshore detachment process of the low-salinity water around Changjiang bank in the East China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 40: 1035—1053

Salvide G. A preliminary study of the distribution of chlorophyll

*a* in the vicinity of fronts in the Celtic and western Irish Seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 4: 617—625

Wu H, Zhu J R, Shen J *et al*, 2011. Tidal modulation on the Changjiang River plume in summer. *Journal of Geophysical Research*, 116: C08017

## CHEMICAL HYDROGRAPHY AND SEASONAL SUCCESSION IN THE BORDER BETWEEN YELLOW SEA AND EAST CHINA SEA

WEI Qin-Sheng<sup>1,2,4</sup>, WANG Hui-Wu<sup>1,3</sup>, GE Ren-Feng<sup>1,3</sup>, XIE Lin-Ping<sup>1,2</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Laboratory of Science and Engineering for Marine Ecological Environment, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 3. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 4. *Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

**Abstract** Chemical hydrography and seasonal succession at 32.3°N transect in the border between the Yellow Sea and the East China Sea were analyzed and discussed. The results present that the vertical profiles of chemical and hydrological parameters varied significantly in space and time in good correlation with ocean circulation and its seasonal transition across the section, indicating that the content and distribution of chemical elements were controlled by water mass distribution. In winter, spring, and autumn, an area in high-suspended matter concentration and turbidity in the route of the Yellow Sea Western Coastal Current was found accompanied by high-concentration nutrients and low-pH. In addition, by possible impact of the radiation from the cyclonic vortex in the northern East China Sea, suspended matters in this area tended to deposit at the cold eddy center. However, this phenomenon was not obvious in summer, which indicate that sedimentation of suspended matters was stronger in the winter but weaker in the summer. In summer, waters in the area of 123.5°—124.25°E sank, in which the Changjiang diluted water in the upper layers could be carried downward, leaving partial diluted water away from the main body during the northeastward expansion of the Changjiang diluted water. Observation showed that the intrusion in summertime of clean Taiwan warm current caused much less diffusion of suspended matters than did by the Changjiang diluted water, resulting in the separation of water and substance transports. Meanwhile, as per hydrological profiling and chemical element distributions, we outlined preliminary the distributions of water groups in four seasons at the transect, and the vertical distributions of temperature and salinity in representative station in the cold eddy of the northern East China Sea, from which the formation process of the cold water was confirmed to some extents.

**Key words** border region of the Yellow Sea and the East China Sea; Changjiang diluted water; water masses; chemical parameters; northern cold eddy of the East China Sea