

# 南黄海冷水域 35°N 断面化学水文学特征及营养盐的季节变化

韦钦胜<sup>1,2</sup>, 傅明珠<sup>1,2</sup>, 葛人峰<sup>1,3</sup>, 臧家业<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)

**摘要:**基于 2006~2007 年 4 个季度月的现场调查资料, 研究了南黄海冷水域 35°N 断面化学水文学特征及营养盐的季节变化。结果表明, 冬季, 黄海暖流明显影响着断面东侧的水文状况, 且垂直混合作用在深水域并未到达海底, 使各要素在断面东西侧呈现出不同的分布状况, 其西侧呈上下均匀分布, 而东侧则表现为上层的垂直均匀分布状态和下层的梯度分布状态; 春季, 黄海暖流残留水的存在和青岛冷水团的出现是该断面上最显著的水文特征, 上层海水增温和垂直对流作用的减弱也使水体稳定性逐渐增强, 与冬季相比, 断面深水域 DO、pH 和各营养盐等值线走势更趋于转向水平方向, 且随“春华期”的到来, 上层水体中的营养盐浓度较冬季也明显下降, 并开始出现次表层叶绿素最大值现象; 夏季, 水体层化结构清晰, 断面上存在强大的温跃层及黄海冷水团, 并伴随有 DO 最大值和 pH 最大值现象, 各项营养盐均呈上层低、下层高的趋势, 且上层水体中的营养盐浓度较春季时又进一步降低, 而跃层以下水体中的营养盐浓度较春季时则有明显升高; 秋季, 海面降温及垂直对流作用的加强使水体稳定性降低, 但深水域水体的垂直交换依然不畅, 且断面东侧下层水体中各项营养盐浓度比夏季有明显升高。本研究进一步揭示了混合和层化等主要物理过程对各要素垂向分布及其季节变化规律的影响机制。

**关键词:**南黄海; 冷水域; 化学水文学特征; 营养盐; 季节变化

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)09-2063-12

## Chemicohydrographic Characteristics and the Seasonal Variations of Nutrients at 35°N Transect in the Cold Water Mass of the Southern Yellow Sea

WEI Qin-sheng<sup>1,2</sup>, FU Ming-zhu<sup>1,2</sup>, GE Ren-feng<sup>1,3</sup>, ZANG Jia-ye<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)

**Abstract:** Based on the four cruises during 2006-2007, the chemicohydrographic characteristics and the seasonal variations of nutrients at 35°N transect in the cold water mass of the Southern Yellow Sea were analyzed. The results showed that: In Winter, hydrological conditions in the eastern part of the section was significantly influenced by the Yellow Sea Warm Current, and the vertical mixing in the deep water had not reached the bottom, which led to the different distribution of the elements in the eastern and western part of the section, the vertically uniform distribution was presented in the west and the upper water of the east, while the stratification structure was found in the bottom water of the east. In Spring, the Yellow Sea warm current residual water and the Qingdao cold water mass were the most obviously hydrological characteristics, and because of the increasing of the temperature in the upper water and the weakening of the vertical mixing, the stability of the water column increased gradually; compared with winter, the contour trend of DO, pH and nutrients in deep water transferred to the more horizontal direction, and with the arrival of spring blooming, the nutrient concentrations in the upper water decreased significantly, besides, the subsurface chlorophyll maximum (SCM) phenomena also began to emerge. In Summer, the section was influenced by the thermocline and the Yellow Sea cold water mass, which was accompanied with the maximum value phenomenon of DO and pH, in addition, the nutrient concentrations were low in upper water and high in bottom water, and compared with spring, the further reduction of the nutrient concentrations existed in upper water, but the nutrient concentrations were increasing dominantly in the water below the thermocline. In Autumn, with the decreasing of the temperature in the upper water and the enhancing of the vertical mixing, the stability of the water column decreased, but the vertical mixing in the deep water was still not smooth, and the nutrient concentrations in the bottom water of the east were higher than those in summer. This study further revealed the influencing mechanism of the mixing, stratification as well as other physical processes on the vertical distribution and its seasonal variations of the elements.

**Key words:** Southern Yellow Sea; cold water mass; chemicohydrographic characteristics; nutrients; seasonal variation

收稿日期: 2009-08-13; 修订日期: 2010-01-27

基金项目: 国家 908 专项课题项目 (908-01-ST03, 908-01-BC14)

作者简介: 韦钦胜 (1981~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为海洋生物地球化学、化学水文学, E-mail: weiqinsheng@fio.org.cn

黄海不仅是人类活动和海洋经济开发集中的地带,同时也是陆地、海洋和大气等各种过程相互作用较为激烈的海区<sup>[1]</sup>,所以多年来一直都是备受关注的焦点.而黄海冷水团作为黄海的一个重要的海洋现象,国内外海洋学者尤其是中国学者更是对其展开了大量的考察和研究<sup>[2~9]</sup>.

南黄海冷水域中化学、生物和水文等环境因子具有非常明显的空间结构,是研究生源要素分布及其相互关系的理想海区,且考虑到 35°N 断面处于南黄海的中部,断面跨度较大,夏季该断面上大部分海域均处在黄海冷水团之中,而冬季黄海暖流在 35°N 以南和以北海域的流段也有着明显的不同<sup>[10]</sup>,所以此断面上特殊的水文状况也势必对生源要素的分布及季节变化造成一定的影响,同时,理化性质的四季变化也可用来反映黄海冷水团和黄海暖流在该断面上形成、强盛到逐渐减弱,直至消失的过程.鉴于 35°N 断面的典型代表性,诸多学者也对其水文或理化特征进行了实测或数值模拟研究<sup>[11~19]</sup>,然而,由于观测资料的缺乏,迄今人们对该断面上生物化学特性及水文特征的综合分析则较少<sup>[14]</sup>,对该断面的生态环境特征也还缺乏充分的认识.同时,南黄海作为一个陆海相互作用强烈的半封闭陆架浅海,随着沿岸工农业和经济的迅速发展,对其生态环境也产生了若干影响<sup>[20,21]</sup>,而近年来的气候变化也正通过驱动海洋物理环境的演变影响和控制着海洋中的化学和生物过程.本研究根据南黄海 2006~2007 年四季最新调查资料,详细分析南黄海冷水域 35°N 断面生源要素的分布特征及季节变化,并结合水文同步观测资料,探讨它们之间的相互关系,以期为进一步揭示层化、混合、潮锋和上升流等主要物理过程对生源要素垂向分布的影响机制奠定基础.

## 1 材料与方法

35°N 断面站位布设如图 1 所示,每个季节设置 12 个站(其中唯独夏季缺 F 站),图中冷水团范围是根据 2006 年夏季资料绘出.利用 Sea-Bird 917 CTD 仪测温度、盐度和深度,并用 Niskin 采水器采集水样(根据水深情况,取 0、10、30 m 和底层水样).DO 含量按 Winkler 法在现场进行测定(GB 17378.4-1998);海水 pH 值用 pH 计测定.营养盐数据按照《海洋监测规范》规定的方法,经过 0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤后,用 7230 型分光光度计现场测定得到,所有分析均用国家海洋局标准物质中心生产的营养盐标准系列制定工作曲线,其中硝酸盐采用铈-

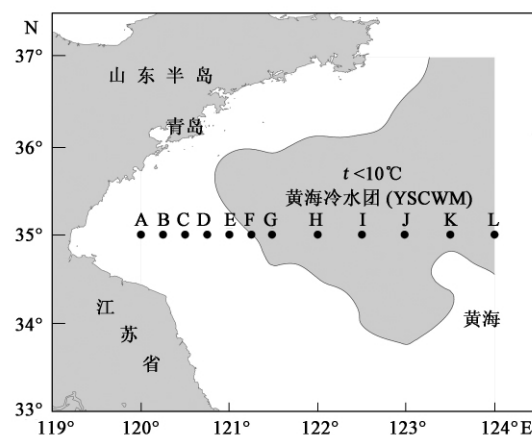


图 1 采样站位和夏季底层冷水团范围

Fig. 1 Sampling stations along transect 35°N and schematic diagram of the Yellow Sea cold water mass

镉还原法,测量精度为 99.5%;磷酸盐采用磷钼蓝法,测量精度为 99.1%;硅酸盐采用硅钼蓝法,测量精度为 99.3%.叶绿素 a 的测定采用荧光法,将样品用 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,并用 10 mL 体积分数为 90% 的丙酮溶液避光萃取 12 h 后,利用 TD-700 型荧光计测定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 四季各要素浓度的变化

为反映各生源要素浓度在南黄海冷水域 35°N 断面上的时空变化情况,表 1 汇总了其在表层、10 m 层、30 m 层、底层和整条断面中的浓度范围、平均值及其季节变化.

### 2.2 四季各要素的断面分布特征

#### 2.2.1 冬季(2007 年 1 月)

由图 2(a)可知:35°N 断面东侧(122°E 以东)水温较高,底层的增温增盐效应明显强于表层,这显然是受冬季黄海暖流水侵入的影响,并以 122.5°~123°E 范围内的底层海域温度最高,由此表明这是调查期间北上黄海暖流的流轴所在位置;断面深水域中、下层水体中盐度等值线的水平分布则预示着近底层水体存在弱层化现象,同时也说明冬季(1 月)深水区的垂直交换作用还未达海底;123.5°E 附近海域的上层水体的温度低于下层,这是因为底层受黄海暖流的入侵,温度较高,而上层较低的水温则是受冬季强劲北风影响,海面降温的结果,同时这也预示着此时水体稳定性不高,其垂直混合作用会进一步加强;在断面西侧(122°E 以西),温、盐度呈上下均匀分布.由此可见,冬季(1 月)水体垂直对流作用在整条断面上所表现出的程度是有所不同的.

表 1 相关要素在各水层和整条断面中的浓度范围、平均值及其季节变化  
Table 1 Range ,average and seasonal variations of the related variables concentration in each water layer and the whole section

| 层次     | 相关要素                                                    | 冬季           |      | 春季           |      | 夏季                      |      | 秋季           |       |
|--------|---------------------------------------------------------|--------------|------|--------------|------|-------------------------|------|--------------|-------|
|        |                                                         | 范围           | 平均值  | 范围           | 平均值  | 范围                      | 平均值  | 范围           | 平均值   |
| 表层     | DO/mg·L <sup>-1</sup>                                   | 8.73 ~ 10.26 | 9.26 | 9.37 ~ 9.98  | 9.60 | 6.86 ~ 7.73             | 7.27 | 7.16 ~ 7.99  | 7.42  |
|        | pH                                                      | 8.12 ~ 8.25  | 8.19 | 8.11 ~ 8.27  | 8.17 | 8.07 ~ 8.23             | 8.16 | 8.11 ~ 8.25  | 8.15  |
|        | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/μmol·L <sup>-1</sup>    | 0.05 ~ 5.29  | 2.63 | 0.52 ~ 1.52  | 1.10 | 0.18 ~ 0.59             | 0.33 | 1.74 ~ 8.08  | 3.20  |
|        | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/μmol·L <sup>-1</sup>   | 0.06 ~ 0.27  | 0.16 | 0.10 ~ 0.16  | 0.13 | ND <sup>1)</sup> ~ 0.19 | 0.06 | ND ~ 0.14    | 0.04  |
|        | SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -Si/μmol·L <sup>-1</sup> | 0.86 ~ 8.81  | 4.65 | 0.46 ~ 5.47  | 2.42 | ND ~ 1.43               | 0.41 | 0.92 ~ 5.75  | 3.90  |
| 10 m 层 | DO/mg·L <sup>-1</sup>                                   | 8.70 ~ 10.09 | 9.22 | 9.38 ~ 10.04 | 9.65 | 6.82 ~ 7.79             | 7.42 | 7.21 ~ 7.67  | 7.42  |
|        | pH                                                      | 8.13 ~ 8.25  | 8.19 | 8.12 ~ 8.28  | 8.18 | 8.00 ~ 8.22             | 8.13 | 8.12 ~ 8.25  | 8.16  |
|        | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/μmol·L <sup>-1</sup>    | 0.15 ~ 5.19  | 2.58 | 0.73 ~ 1.53  | 1.21 | 0.13 ~ 0.55             | 0.32 | 1.45 ~ 4.31  | 2.75  |
|        | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/μmol·L <sup>-1</sup>   | 0.07 ~ 0.29  | 0.18 | 0.09 ~ 0.21  | 0.14 | ND ~ 0.19               | 0.06 | ND ~ 0.14    | 0.04  |
|        | SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -Si/μmol·L <sup>-1</sup> | 0.77 ~ 8.72  | 4.74 | 0.56 ~ 9.65  | 2.85 | ND ~ 1.75               | 0.51 | 2.32 ~ 6.40  | 3.99  |
| 30 m 层 | DO/mg·L <sup>-1</sup>                                   | 8.56 ~ 8.84  | 8.73 | 8.60 ~ 9.64  | 9.12 | 6.15 ~ 9.95             | 8.34 | 6.37 ~ 8.28  | 7.04  |
|        | pH                                                      | 8.13 ~ 8.23  | 8.18 | 8.13 ~ 8.21  | 8.18 | 7.89 ~ 8.23             | 8.08 | 7.99 ~ 8.20  | 8.08  |
|        | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/μmol·L <sup>-1</sup>    | 4.07 ~ 5.40  | 4.74 | 2.20 ~ 5.70  | 3.44 | 0.55 ~ 9.84             | 3.69 | 2.31 ~ 11.12 | 5.80  |
|        | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/μmol·L <sup>-1</sup>   | 0.20 ~ 0.29  | 0.26 | 0.18 ~ 0.62  | 0.34 | 0.16 ~ 0.45             | 0.25 | ND ~ 0.44    | 0.20  |
|        | SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -Si/μmol·L <sup>-1</sup> | 7.36 ~ 8.81  | 8.15 | 4.49 ~ 11.05 | 6.68 | 0.99 ~ 7.48             | 3.62 | 6.40 ~ 13.38 | 8.86  |
| 底层     | DO/mg·L <sup>-1</sup>                                   | 5.26 ~ 10.20 | 8.54 | 7.33 ~ 9.43  | 8.68 | 5.65 ~ 7.89             | 6.89 | 5.19 ~ 7.58  | 6.51  |
|        | pH                                                      | 7.99 ~ 8.26  | 8.16 | 8.05 ~ 8.17  | 8.12 | 7.87 ~ 8.04             | 7.97 | 7.86 ~ 8.18  | 8.05  |
|        | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/μmol·L <sup>-1</sup>    | 0.28 ~ 15.50 | 5.26 | 0.97 ~ 9.57  | 4.54 | 0.26 ~ 13.33            | 5.58 | 1.72 ~ 18.36 | 7.23  |
|        | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/μmol·L <sup>-1</sup>   | 0.07 ~ 1.05  | 0.33 | 0.12 ~ 0.75  | 0.40 | 0.03 ~ 1.24             | 0.41 | 0.02 ~ 1.19  | 0.44  |
|        | SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -Si/μmol·L <sup>-1</sup> | 0.68 ~ 16.94 | 6.29 | 0.32 ~ 12.03 | 6.08 | ND ~ 18.64              | 6.44 | 3.90 ~ 23.96 | 11.00 |
| 整个断面   | DO/mg·L <sup>-1</sup>                                   | 5.26 ~ 10.26 | 8.97 | 7.33 ~ 10.04 | 9.29 | 5.65 ~ 9.95             | 7.37 | 5.19 ~ 8.28  | 7.11  |
|        | pH                                                      | 7.99 ~ 8.26  | 8.18 | 8.05 ~ 8.28  | 8.16 | 7.87 ~ 8.23             | 8.09 | 7.86 ~ 8.25  | 8.12  |
|        | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/μmol·L <sup>-1</sup>    | 0.05 ~ 15.50 | 3.64 | 0.52 ~ 9.57  | 2.43 | 0.13 ~ 13.33            | 2.33 | 1.45 ~ 18.36 | 4.56  |
|        | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/μmol·L <sup>-1</sup>   | 0.06 ~ 1.05  | 0.23 | 0.09 ~ 0.75  | 0.23 | ND ~ 1.24               | 0.19 | ND ~ 1.19    | 0.18  |
|        | SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -Si/μmol·L <sup>-1</sup> | 0.68 ~ 16.94 | 5.58 | 0.32 ~ 12.03 | 4.14 | ND ~ 18.64              | 2.63 | 0.92 ~ 23.96 | 6.61  |

1) ND 表示低于检测限

生源要素的分布特征是:在 35°N 断面东侧的底层海域,由于水体存在弱层化现象,使各要素的分布具有一定的层化或锋面结构,其中营养盐含量随着深度的增加而增加,而 DO 浓度和 pH 则是随着深度的增加而降低,且下层水体的营养盐含量明显高于上层水体(<30 m),而 DO 和 pH 则是明显低于上层,究其原因,断面东侧下层较高的营养盐是夏季层化以来有机物分解释放营养盐并逐步积聚的结果,同时也形成 DO 和 pH 的低值区;在断面东侧的上层水体,各要素基本呈现了垂直均匀分布,且营养盐浓度明显高于秋季(见 2.2.4),这是随着水体垂直混合作用的增强,营养盐向上层扩散的结果;在断面的西侧(122°E 以西),受浅水区较强的垂直混合作用的影响,各要素表现为上下均匀分布,另外,该海域较低的浊度(数据未发表)和良好的光照条件也使其具有较高的 Chl-a 浓度[图 3(h)],同时表明大量营养盐被消耗,从而使营养盐含量较低.此外,对比温度、DO、pH 和 Chl-a 的分布趋势[图 2(a)、2(c)、2(d)、2(h)],还发现 DO 和 pH 的分布与水温基本相应,并呈负相关关系,而它们与 Chl-a 的分

布则呈现出一定的正相关,但存在一定的偏差,如 DO 浓度的 2 个高值区(120.5°和 123.5°E 附近海域)与 Chl-a 浓度的高值区(121°和 123°E 附近海域)并不完全一致,这主要是由于 Chl-a 浓度高值区的水温相对较高,不利于 DO 在水中的保存,从而使两者分布之间存在一定的偏差.

2.2.2 春季(2007 年 4 月)

春季,由于表层海水受热增温,涡动混合作用减弱,温跃层开始形成,所以温、盐度垂直结构处在由冬季型向夏季型的过渡阶段<sup>[22]</sup>.由图 3(a)可知:受春季黄海暖流残留水<sup>[23]</sup>的影响,断面右侧尤其是 123°E 附近海域温度明显较高;在 121.5°E 附近海域及 122.75°E 以东,上层水体温度高于下层,这是上层水体的增温效应以及垂直对流作用的减弱所致,而在 120.5°E 以西的浅水域却仍然表现出较强的垂直对流作用,使上下水体温、盐度基本一致,由此可见,春季水体增温和垂直对流作用的减弱在整条断面上所表现出的程度也是有所不同的;在 121.5°~122°E 附近海域的底层出现一低温中心( $t < 10^{\circ}\text{C}$ ),而在断面东侧 123°E 附近海域的底层存

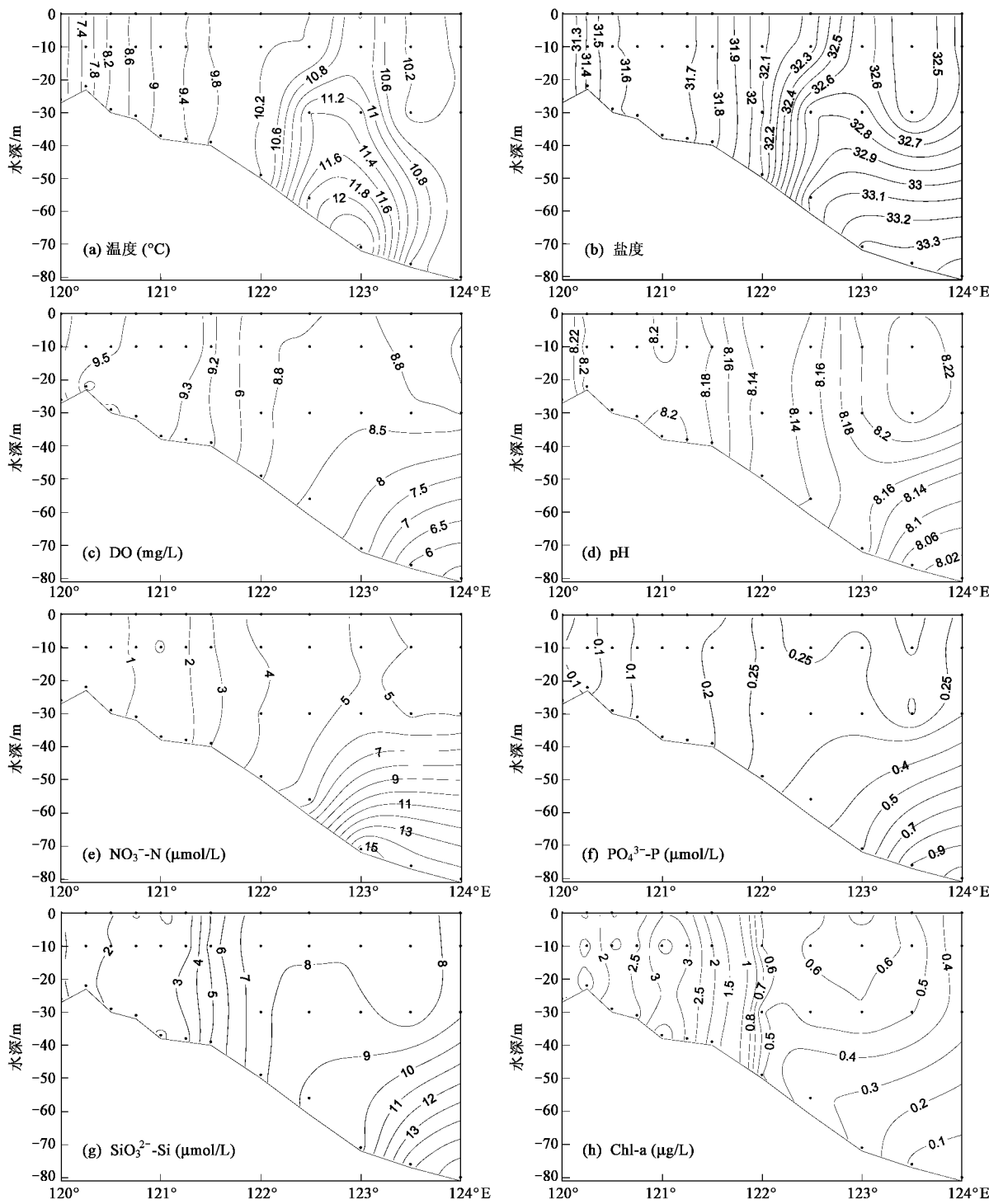


图 2 冬季(2007 年 1 月)南黄海 35°N 断面温度、盐度、化学要素和 Chl-a 分布

Fig.2 Vertical distributions of temperature ,salinity ,chemical parameters and Chl-a in section 35°N in Winter

在一个温度  $> 11.4^{\circ}\text{C}$  的弱暖中心 ,其中低温中心乃是受青岛冷水团<sup>[24~26]</sup>的影响所致 ,张启龙等<sup>[22]</sup>也曾报道过这一现象 ,显然青岛冷水团的存在对该海域在 20 m 层附近开始出现的温跃层[图 3(a)]起到了重要作用 ,东侧的弱暖中心则是黄海暖流变性

水<sup>[23]</sup>的残迹 ,且此处的相对高盐中心[图 3(b)]也进一步证实了这一点 ,同时这一弱暖水体的存在也说明黄海冷水团目前尚处于形成阶段 ;在  $122.5^{\circ}\text{E}$  附近海域 ,即西侧的青岛冷水团和东侧的黄海暖流残留水的交界面处 ,存在较强的温、盐度锋面 ,且基

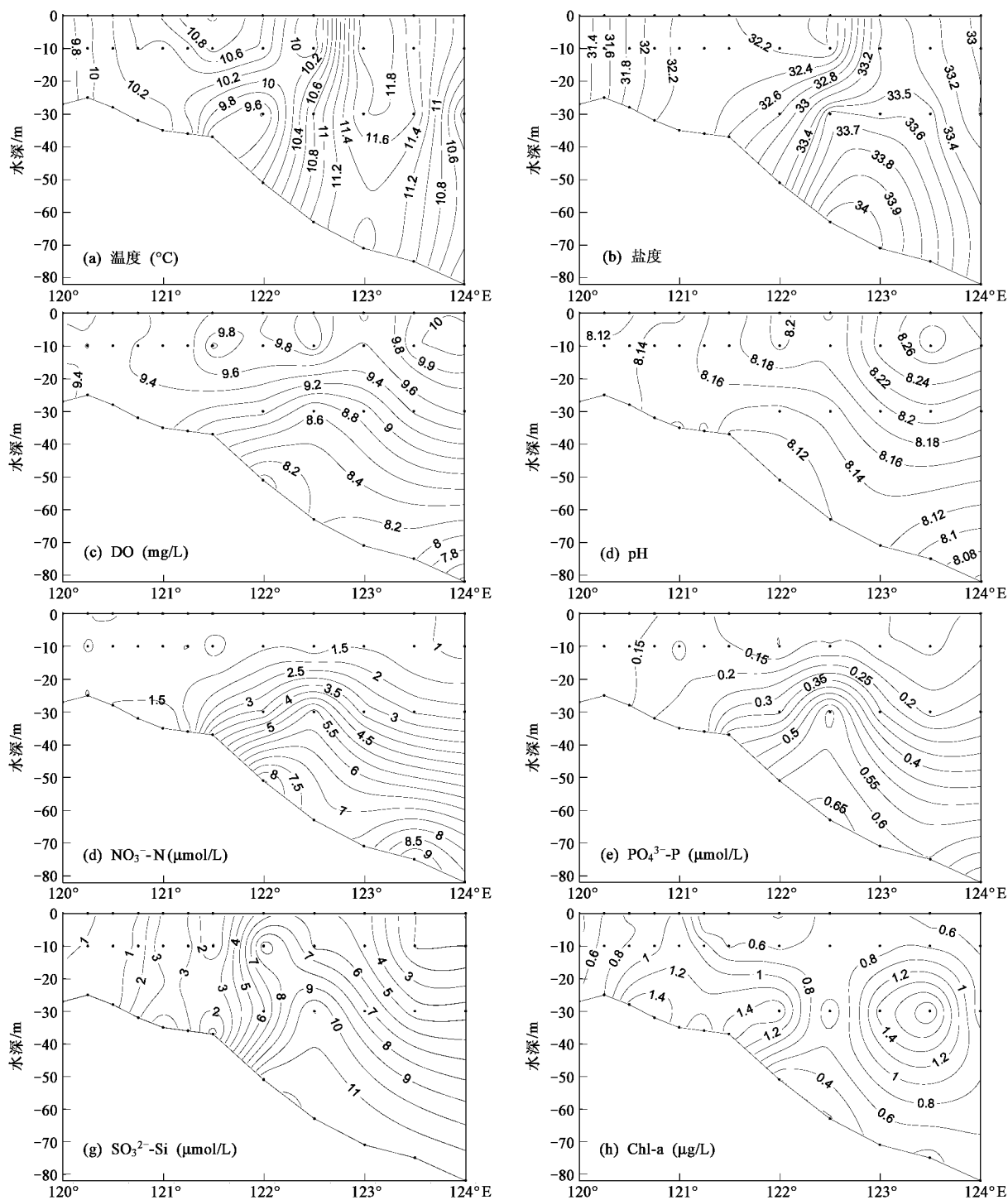


图3 春季(2007年4月)南黄海 35°N 断面温度、盐度、化学要素和 Chl-a 分布

Fig.3 Vertical distributions of temperature, salinity, chemical parameters and Chl-a in section 35°N in Spring

本呈垂直均匀分布。

4月南黄海中央海域正值浮游植物“春华”期,真光层中叶绿素a含量较高[图3(h)],且在30m深的海域附近形成了叶绿素a垂直分布的最大值现象(subsurface chlorophyll maximum, SCM),强烈的光合作用会产生大量的氧,然而,从图3(c)可以看出,

氧最大值并未出现在叶绿素最大值处,而是出现在10m以浅的上层水体,这是因为本次调查期间,温跃层还未形成,真光层以内叶绿素a光合作用产氧还不能在叶绿素最大值附近海域得以保存,而是具有向上扩散的趋势,所以上层水体中DO含量较高,而且上层水体中氧含量的2个高值区(122°E附近

海域和  $123^{\circ}\text{E}$  以东),也分别对应了 30 m 层附近海域的 2 个 Chl-a 高值区;由图 3(c)还可看出,近底层 DO 浓度较低,这主要是有机质氧化分解而消耗氧所致.由图 3(d)可知,真光层水体中的光合作用也使得其 pH 值较高,并与 DO 具有相似的分布趋势.与冬季相比,断面深水域 DO、pH 和各营养盐等值线走势更趋于转向水平方向,并且随“春华期”的到来,上层水体中的营养盐浓度较冬季也明显下降.比较 Chl-a 与营养盐的分布特征后还可发现,20~30 m 层附近海域的 2 个 Chl-a 高值区( $122^{\circ}\text{E}$  以西和  $123.5^{\circ}\text{E}$  附近海域)也基本对应了营养盐的低值区,这是浮游植物大量繁殖而消耗营养盐的结果,而在  $122.5^{\circ}\text{E}$  附近海域则存在底层水体的涌升现象,使营养盐含量较高,但可能是受水体浊度的影响,使该海域 Chl-a 含量却较低.

### 2.2.3 夏季(2006 年 7 月)

夏季太阳辐射普遍增强,表层水温进一步升高<sup>[27]</sup>.由图 4(a)、4(b)可知:此时调查断面上温、盐度垂直结构层化清晰,存在强大的温、盐跃层,呈现为上混合层-跃层-下混合层 3 层结构,上混合层水温高、盐度低且分布均匀,其下是强大的温、盐跃层,跃层以下大部分海域被黄海冷水团所覆盖,温度较低而盐度较高<sup>[28]</sup>.

由图 4(c)可知:上层水体中的 DO 浓度较春季大幅度下降,这显然是随着温跃层的完全形成,上层水体温度进一步升高所致,但依然呈过饱和状态[图 4(d)];从温跃层上界处氧浓度开始逐渐增加,到跃层下界附近处达到最大值,随后随着深度的增加,DO 浓度便逐渐降低,并在底层形成 DO 的低值区;冷水域中 DO 最大值总体上处于受黄海冷水团影响的温跃层的下界附近,而且在  $123.25^{\circ}\text{E}$  以东海域,DO 最大值处也呈过饱和状态,并与 pH 最大值现象[图 4(e)]及 SCM 现象[图 4(i)]同时存在,但  $123.25^{\circ}\text{E}$  以西海域中的氧最大值处却并未出现过饱和,这与此处较低的水温有关;下层水体较低的 DO 浓度及其饱和度,是异养生物的呼吸作用和有机质的分解耗氧以及层化而引起的水体垂直交换不畅等原因所致<sup>[27]</sup>.进一步分析还发现,  $35^{\circ}\text{N}$  断面锋区由于受强潮流的影响,  $122^{\circ}\text{E}$  附近海域出现了底层低氧水体的涌升现象.此外,对比 DO 和 Chl-a 的分布情况[图 4(i)],可知:DO 最大值浓度与该处 Chl-a 浓度之间并不存在对应关系,这在一定程度上说明氧最大值浓度主要是与春季以来浮游植物光合作用产氧在温、密跃层处的不断积累和保存有关,而

非观测之时 Chl-a 的光合作用产氧.

由图 4(f)~4(h)可知,硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐的断面分布特征颇为相似,均呈上层低、下层高的趋势,且它们在  $121^{\circ}\text{E}$  以东海域中、下层水体中的分布与 pH 的分布规律也大致相同,其中上层水体中的营养盐浓度较春季时又进一步降低,这是跃层以上浮游植物的生长而不断消耗营养盐所致,而跃层以下水体中的营养盐浓度较春季时则有明显升高,下层有机质的分解以及较强的温、密跃层对水体垂直交换作用的阻碍是形成这一现象的主要原因.此外还发现,在  $122^{\circ}$  及  $123^{\circ}\text{E}$  附近海域的温跃层处,营养盐存在向上层扩散的趋势,其中  $122^{\circ}\text{E}$  附近海域营养盐等值线的抬升现象与陆架锋区的上升流<sup>[29]</sup>有关,而  $123^{\circ}\text{E}$  附近海域温跃层处营养盐等值线的抬升,则在一定程度上可佐证跃层附近的薄壳内有上升流的存在<sup>[5]</sup>.由于 Chl-a 最大值的形成与营养盐相关,所以  $122^{\circ}\text{E}$  附近海域的水体涌升向上层输送的营养盐,使得上层水体维持了较高的 Chl-a 含量,而该海域的底层因水体浊度较高(数据未发表),制约了光合作用,从而 Chl-a 含量较低[图 4(i)]; $123^{\circ}\text{E}$  附近海域温跃层处上升流所导致的营养盐等值线的抬升,与上层水体 Chl-a 高值等值线的下凹相对应,这也正是反映了浮游植物对营养盐的消耗,同时,温跃层处的上升流也使得该海域并未出现 SCM 现象.在  $123.5^{\circ}\text{E}$  以东海域,营养盐在跃层下界及以下水体中积累,并受适宜光照强度的影响,因而使得在温跃层下界附近海域形成叶绿素最大值层[图 4(i)].

### 2.2.4 秋季(2007 年 10 月)

由图 5(a)、5(b)可知,温、盐度分布的显著特点是,在  $121.5^{\circ}\text{E}$  以东海域的 30~40 m 水深附近,存在温、盐跃层,而且温跃层的强度和范围较夏季明显减弱和缩小,这是由于入秋以来风力增强,海面降温,水体稳定性降低,从而促使跃层下沉,冷水团往外海域退缩所致.同时,深水域弱层化现象的存在也表明秋季(10 月)深水区的垂直交换作用还尚不强烈.在断面的西侧( $121.5^{\circ}\text{E}$  以西),温、盐度呈上下均匀分布,表明秋季(10 月)浅水区的垂直交换作用已到达海底.

由图 4(c)~4(g)可知,DO、pH 及各项营养盐的分布形态极为相似;在断面东侧( $121.5^{\circ}\text{E}$  以东)的下层海域(>30 m),各要素等值线近似呈水平分布,同时也表现出一定的弱层化或锋面结构,这表明海水的垂直交换依然不畅,而且它们的分布趋势及

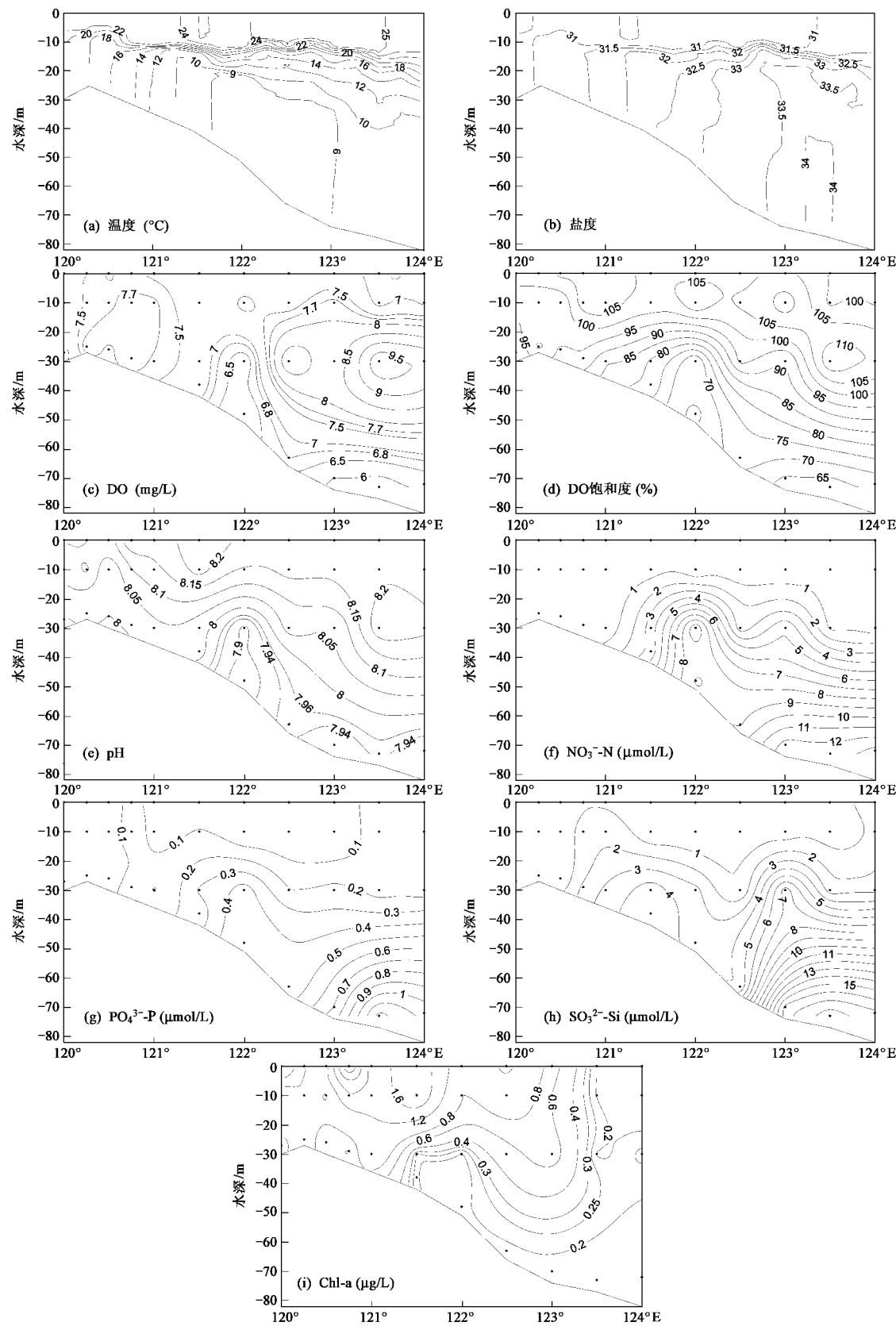


图 4 夏季(2006 年 7 月)南黄海 35°N 断面温度、盐度、化学要素和 Chl-a 分布

Fig. 4 Vertical distributions of temperature, salinity, chemical parameters and Chl-a in section 35°N in Summer

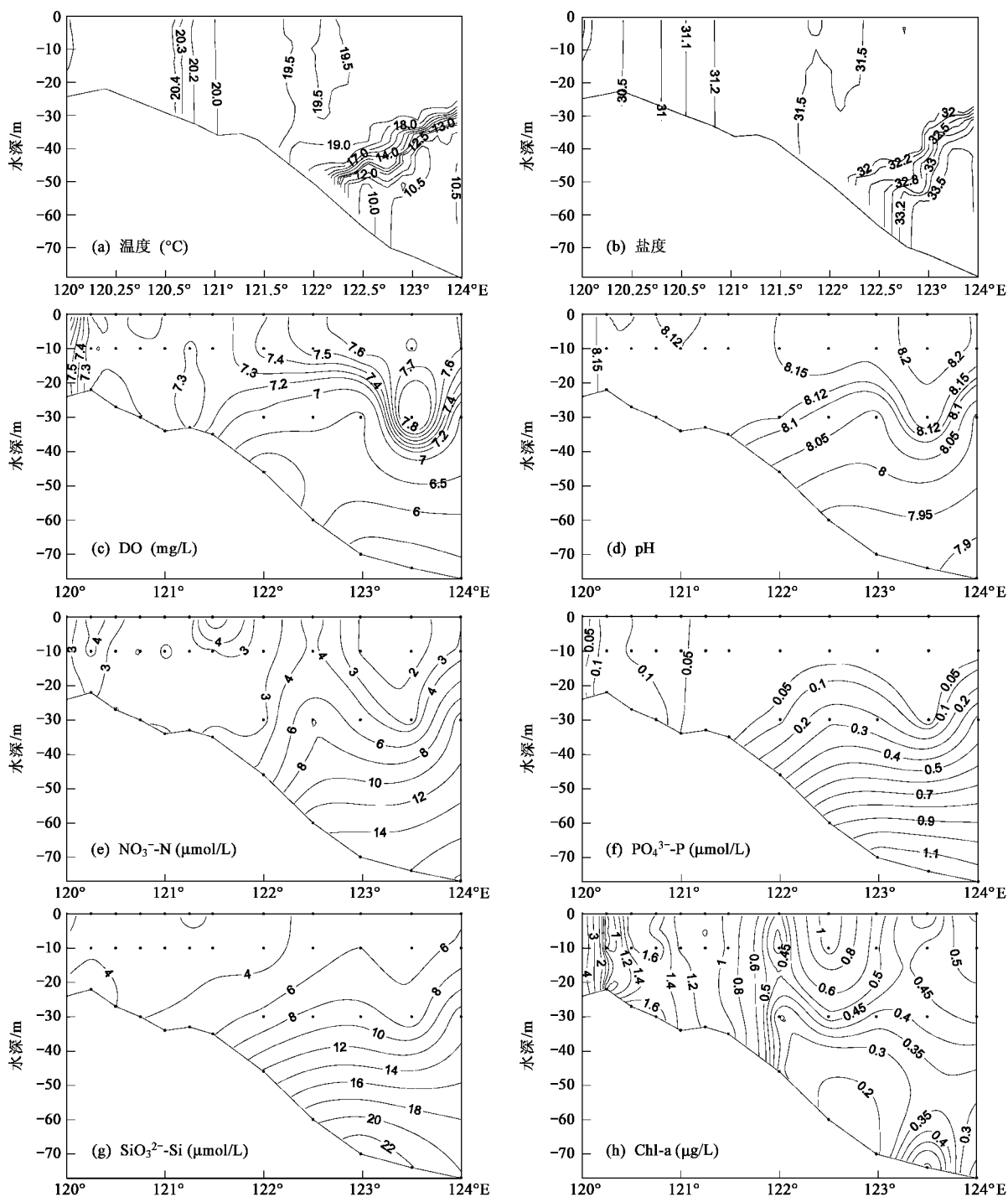


图5 秋季(2007年10月)南黄海35°N断面温度、盐度、化学要素和Chl-a分布

Fig.5 Vertical distributions of temperature, salinity, chemical parameters and Chl-a in section 35°N in Autumn

原因与冬季(1月)相仿,但与冬季(1月)时相比,其层化海域的范围较大,这显然说明自夏季至冬季,跃层逐渐下沉并向深水域退缩;在断面东侧的上层水体,各化学要素等值线均以123.5°E附近海域为中心呈下沉趋势,这是入秋以来垂直对流混合促使上层水体下沉的结果,而且下层水体中的营养盐较夏

季时又有所升高,这则与下层有机质的不断分解而释放营养盐有关;受地形的影响,122.5°E附近海域处(陆架锋区)较为强烈的潮混合作用可使低DO、低pH和高营养盐的底层水体具有涌升或沿坡爬升的趋势,并对各要素等值线的抬升起到一定的作用;同时,122.5°E附近海域在20~30m处各化学要素

等值线的抬升现象,也可在一定程度上说明黄海冷水域中的垂直环流<sup>[4-6,30]</sup>有将底层的高营养盐水体向真光层输送的趋势,而且可促使向冬季垂直均匀型转变,并为维持该海域上层水体中相对较高的 Chl-a 浓度 [ $>0.5 \mu\text{g/L}$ , 图 5(h)] 发挥着重要的作用;在断面的西半部 (121.5°E 以西),各要素呈现上下均匀分布,这是浅水区较强的垂直交换作用的结果。

对比各化学要素与 Chl-a [图 5(h)] 的分布特征还发现,123.5°E 附近海域的 20~30 m 处 DO 浓度出现最大值,而该处的 Chl-a 和营养盐浓度则相对较低,但相对于深水体的其他底层水体而言,123.5°E 附近海域的底层却具有较高的 Chl-a 浓度,这说明此处底层的 Chl-a 可能是由上层水体中 (20~30 m) 的 Chl-a 沉降而来,从而预示着调查前期上层水体具有较高的 Chl-a 浓度,而其光合作用产氧对 DO 浓度的最大值则发挥了重要作用,且秋季水体的下沉也不利于 DO 向上层的扩散,从而形成最大值,并同时出现 pH 的高值和营养盐的低值区;断面西侧较高的 Chl-a 浓度则预示着大量营养盐已被消耗,从而使营养盐含量较低。

### 2.3 各项理化参数季节变化之间的关系

本次最新调查资料显示,35°N 断面上各生源要素的分布具有明显的季节特征。为了进一步深入探讨冷水域中各要素的垂直分布、季节变化及其垂向运输规律,本研究选取典型站位 K (123.5°E, 35°N) 为代表,来分析生源要素的迁移变化机制及其循环过程。王保栋<sup>[14]</sup>曾于 2000 年根据“中韩黄海水循环及物质通量合作研究”项目 1996~1998 年的调查资料,对 K 站位上生源要素的季节变化进行过研究,但未涉及 1 月份的资料。

图 6 为 K 站位上水温和生源要素的季节变化图。如图 6(b) 所示,在表层和 10 m 层水体中,DO 含量的季节变化顺序是 4 月 > 1 月 > 10 月 > 7 月,而水温的变化趋势 [图 6(a)] 为 7 月 > 10 月 > 4 月 > 1 月,DO 与水温的变化趋势总体上相反,这说明上层水体中 DO 含量在很大程度上是受控于水温,其中 4~7 月,DO 含量的下降幅度比较大,这显然是源于水温的增加,使 DO 由于增温效应而排入大气中,导致夏季时含量较低;而且进一步分析后还发现,虽然 4 月的水温比 1 月要高,但 4 月的 DO 含量却明显高于 1 月,这是由于 4 月温跃层尚未形成,真光层以内浮游植物强烈的光合作用所产生的大量氧在 10 m 以下难以保存,而是会向上层水体扩散,从而使表层

和 10 m 层中 DO 含量较高;1 月 DO 含量明显高于 7 月和 10 月,这除了与 1 月相对较低的水温有关外,冬季较强的垂直混合作用也可能会促进海-气界面处氧气的向下输送。中层水体中 (30 m),DO 的季节变化顺序是 7 月 > 4 月 > 1 月 > 10 月,而水温的变化趋势则为 10 月 > 7 月 > 4 月 > 1 月,且 7 月和 10 月均出现了中层最大值现象;尽管 7 月水温略高于 4 月,但 DO 浓度却高出很多,这是由于 30 m 层大体上处于夏季温跃层的下界附近,具有相对较低的水温和较好的水体稳定性,所以春、夏季真光层中的光合作用产氧容易在此处进行积累,从而使氧含量由 4 月逐渐增大;从夏季到秋季,真光层中光合作用的减弱以及水体垂直混合作用的加强会使 DO 最大值逐渐减弱;1 月较强的垂直混合作用又可使上层氧气输送或渗透进来,从而使得氧含量得以回升。底层,水温相差不大,但 DO 含量却是由春季至秋季呈逐渐降低趋势,这显然是有机物不断分解耗氧的结果,至 1 月,由较强的垂直混合作用所输送下来的氧气又使其含量有所升高,但需要指出的是,由于本断面冬季 (1 月) 调查期间南黄海的垂直混合作用还未达到最强,而冬季调查结束后,存在垂直混合作用达到海底的情况 (如 2 月),使该海域底层的 DO 含量还将得以回升,并在一定程度上保持到本次春季调查期间,从而使春季底层的 DO 浓度也高于冬季 (1 月)。

由图 6(c) 可知,在表层和 10 m 层水体中,pH 的季节变化趋势是 4 月 > 10 月 > 1 月 > 7 月,春季浮游植物光合作用最为强烈,吸收大量的  $\text{CO}_2$ ,所以其 pH 值也是最高;而夏季受温跃层的影响,整个南黄海冷水域营养盐含量均较低,浮游植物光合作用会受到限制,从而也使得 pH 较低;10 月较弱的光合作用也使得 pH 高于冬季,但低于春季;另外,温度通过影响  $\text{CO}_2$  的扩散及其平衡浓度,也可对 pH 值产生影响。30 m 层,最显著的特点就是夏季 (7 月) 出现中层最大值现象,这显然是真光层中较强的浮游植物光合作用所致,并与 DO 最大值现象伴随 [图 6(b)]。底层 pH 的季节变化趋势是 4 月 > 1 月 > 7 月 > 10 月,由春季至秋季呈逐渐降低的趋势,这是生物的呼吸作用和有机物的氧化分解不断消耗海水中的氧而产生  $\text{CO}_2$  并逐渐积累的结果,至 1 月,较强的垂直混合作用又可使底层的  $\text{CO}_2$  向上层水体输送而使其含量逐渐减小,从而也使得 pH 值得以回升。

由图 6(d) 可以看出,上层水体中 (0~30 m),

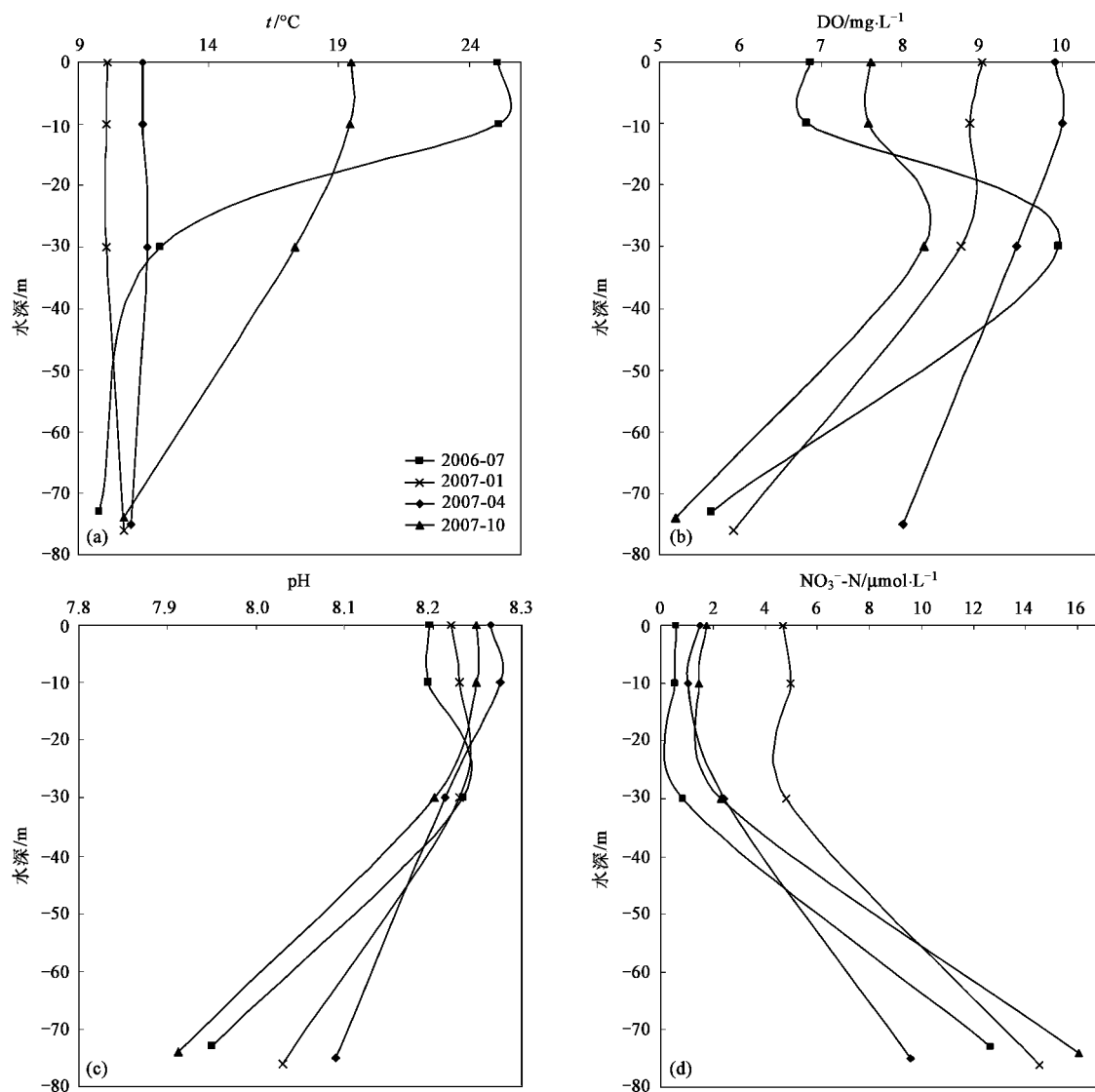


图6 南黄海冷水域K站(123.5°E, 35°N)水温、DO、pH和 $\text{NO}_3^-$ -N的季节变化

Fig. 6 Seasonal variations of temperature, DO, pH and  $\text{NO}_3^-$ -N of the station K in the cold water mass of the Southern Yellow Sea

自春季(4月)至秋季(10月),硝酸盐含量均较低,尤其是夏季,几乎被浮游植物消耗殆尽;然而底层水体中,硝酸盐则是自春季至秋季呈递增趋势,营养盐含量不断积累,这是因为自春季以来,下、底层水体中有机物的分解会不断释放营养盐,并受温、密跃层的阻挡而难以向上扩散,因而在下底层逐渐积累<sup>[13]</sup>;至1月,较强的垂直混合作用又可使底层的硝酸盐向上层水体输送而使其含量比10月有所减小,同时也使得冬季(1月)上层水体中(0~30 m)的营养盐高于其它月份。此外,通过对K站位上DO和营养盐的化学计量关系进行统计分析,结果表明:自春季至秋季,30 m层及底层水体中,DO与 $\text{NO}_3^-$ -N、DIN-N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P和 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si之间均存在较好

的负相关关系(图7)。这一结果也可进一步说明,下层水体中,营养盐的消耗或增加是时间跨度上生物化学作用的结果,而DO含量也是受到时间跨度上生物化学累积作用的影响,所以它们之间呈现较好的相关性也是自然而然的<sup>[28]</sup>。

### 3 结论

(1) 冬季,黄海暖流明显影响着35°N断面东侧的水文状况,且垂直混合作用在深水域并未到达海底,使各要素在断面东西侧呈现出不同的分布状况,其西侧呈上下均匀分布,而东侧则表现为上层的垂直均匀分布状态和下层的梯度分布状态。

(2) 春季,黄海暖流残留水的存在和青岛冷水

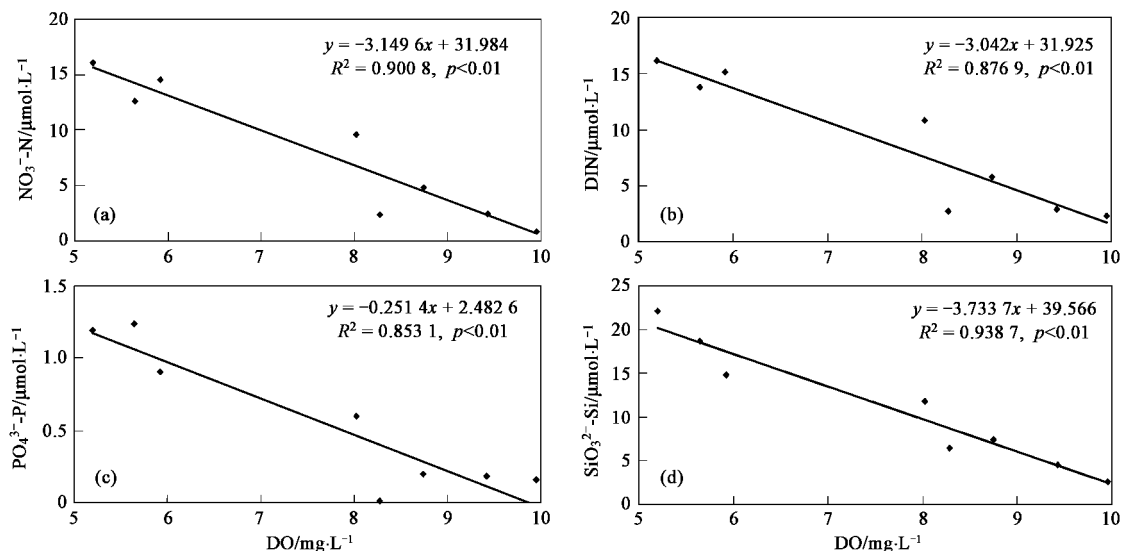


图7 春季至秋季南黄海冷水域 K 站(123.5°E, 35°N)30 m 层及底层水体中 DO 和营养盐的相关性

Fig. 7 Relationships of DO and nutrients in the layers of 30 m and bottom of the station K from spring to autumn in the cold water mass of the Southern Yellow Sea

团的出现是该断面上最显著的水文特征,上层海水增温和垂直对流作用的减弱也使水体稳定性逐渐增强,与冬季相比,断面深水域 DO、pH 和各营养盐等值线走势更趋于转向水平方向,且随着“春华期”的到来,上层水体中的营养盐浓度较冬季也明显下降,并开始出现 SCM 现象。

(3)夏季,水体层化结构清晰,断面上存在强大的温、密跃层及黄海冷水团,并伴随有 DO 最大值和 pH 最大值现象,各项营养盐均呈上层低、下层高的趋势,且上层水体中的营养盐浓度较春季时又进一步降低,而跃层以下水体中的营养盐浓度较春季时则有明显升高。

(4)秋季,海面降温及垂直对流作用的加强使水体稳定性降低,但深水域水体的垂直交换依然不畅,且断面东侧下层水体中各项营养盐浓度比夏季有明显升高,体现了其来自有机质的分解而不断释放的结果。

致谢:国家海洋局第一海洋研究所海洋生态研究中心和物理海洋室的 20 多位师生冒着风浪,进行现场观测,付出了艰辛劳动,在此一并表示衷心感谢!

#### 参考文献:

- [1] 王保栋,王桂云,郑昌洙,等. 南黄海营养盐的平面分布及横向输运[J]. 海洋学报, 1999, 21(6): 124-129.
- [2] 赫崇本. 黄海冷水团的形成及其性质的初步研究[J]. 海洋与

湖沼, 1959, 2(1): 11-15.

- [3] 袁业立. 黄海冷水团环流, I. 冷水中心部分的热结构和环流特征[J]. 海洋与湖沼, 1979, 10(3): 187-199.
- [4] 李惠卿, 袁业立. 黄海冷水团热结构及其环流解析研究[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(1): 7-13.
- [5] 袁业立, 李惠卿. 黄海冷水团环流结构及生成机制研究, I. 0 阶解及冷水团的环流结构[J]. 中国科学(B 辑), 1993, 23(1): 93-103.
- [6] 苏纪兰, 黄大吉. 黄海冷水团环流结构[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(3): 1-7.
- [7] 任慧军, 詹杰民. 黄海冷水团的季节变化特征及其形成机制研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2005, 20(增刊): 887-896.
- [8] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 26-34.
- [9] 刘敏, 朱开玲, 李洪波, 等. 应用 PCR-DGGE 技术分析黄海冷水团海域的细菌群落组成[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1082-1091.
- [10] 汤毓祥, 邹娥梅, Lie H J. 冬至初春黄海暖流的路径和起源[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 1-12.
- [11] 刘克修, 赵保仁. 黄海溶解氧垂直分布最大值的数值研究[J]. 海洋学报, 1997, 19(4): 80-89.
- [12] 王保栋, 王桂云, 郑昌洙, 等. 南黄海溶解氧的垂直分布特征[J]. 海洋学报, 1999, 21(5): 72-77.
- [13] 王保栋. 南黄海营养盐的垂直分布特性及其垂向输运规律[J]. 海洋环境科学, 1999, 18(1): 13-18.
- [14] 王保栋. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系[J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 47-54.
- [15] 田恬, 魏皓, 苏健, 等. 黄海氮磷营养盐的循环和收支研究[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 1-10.

- [16] 高生泉,林以安,金明明,等. 春、秋季东、黄海营养盐的分布变化特征及营养结构[J]. 东海海洋, 2004, 22(4):38-50.
- [17] 胡好国,万振文,袁业立. 南黄海浮游植物季节性变化的数值模拟与影响因子分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(6):74-88.
- [18] Liu S M, Zhang J, Chen S Z, *et al.* Inventory of nutrient compounds in the Yellow Sea [J]. Continental Shelf Research, 2003, 23:1161-1174.
- [19] Zhang S W, Wang Q Y, Lv Y, *et al.* Observation of the seasonal evolution of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1996-1998 [J]. Continental Shelf Research, 2008, 28:442-457.
- [20] Lin C L, Ning X R, Su J L, *et al.* Environmental changes and responds of ecosystem of the Yellow Sea during 1976-2000 [J]. Journal of Marine System, 2005, 55:223-234.
- [21] 贺志鹏,宋金明,张乃星. 南黄海溶解有机碳的生物地球化学特征分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4):478-488.
- [22] 张启龙,杨玉玲,程明华. 南黄海春季温、盐结构特征分析[J]. 海洋科学, 1994, 6:50-55.
- [23] 邹娥梅,郭炳火,汤毓祥,等. 1996年春季南黄海水文特征和水团分析[J]. 海洋学报, 2000, 22(1):17-26.
- [24] 张启龙,侯一筠,程明华,等. 青岛冷水团强度的变化特征[G]. 海洋科学集刊,第46集. 北京:科学出版社,2004. 13-21.
- [25] Zhang Q L, Liu X Q, Cheng M H, *et al.* Characteristics and formation cause of Qingdao cold water mass [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2002, 20(4):303-308.
- [26] 汤毓祥,邹娥梅, Lie H J, 等. 初春南黄海水文特征及环流状况的分析[J]. 海洋学报, 1999, 21(5):1-11.
- [27] 臧璐,石晓勇,张传松. 37°N 断面营养盐和溶解氧的四季分布特征及变化[J]. 海洋学报, 2009, 31(2):78-85.
- [28] 韦钦胜,葛人峰,王保栋,等. 南黄海冷水域西部溶解氧垂直分布最大值现象的成因分析[J]. 海洋学报, 2009, 31(4):69-77.
- [29] 赵保仁. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋区环流结构的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1987, 18(3):217-226.
- [30] 郭炳火. 黄海物理海洋学的主要特征[J]. 黄渤海海洋, 1993, 11(3):7-18.

## 《环境科学》荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号

2009年12月22日“第四届中国期刊创新年会”公布了“新中国60年有影响力的期刊”评选结果,《环境科学》荣获“新中国60年有影响力的期刊”称号. 此次评选,全国共有9000多种参评期刊,最终有161种期刊入选. 该评选活动是中国期刊协会、中国出版科学研究所为纪念新中国成立60周年,表彰和鼓励在政治、经济、文化、科技和社会发展领域中起到重要作用的期刊而举办的.