

北黄海四季水团划分及化学特性比较

黄江婵 臧璐 石晓勇* 张传松

(中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100)

摘要 在对 2006 年 7 月~2007 年 10 月北黄海 4 个航次调查资料分析的基础上,对北黄海四季水团进行了基本划分,并将各季水团内的 DO 及营养盐浓度进行了比较。结果表明,由冬到秋,每个季节北黄海水体由表到底分别可划分为 4、7、5、5 个水团;其中辽南沿岸水和黄海水团是常年存在的;鸭绿江冲淡水 and 黄海冷水团于春、夏、秋季存在,冬季消失;渤、黄海混合水团是秋季消失;其他水团则是季节性的存在。在冷水团存续期间,其内部营养盐的浓度均处于较高水平,尤其在秋季,为整个海区的最高值,PO₄-P 均值高达 0.9 μmol/L。

关键词 水团 DO 营养盐 黄海

中图分类号 S931.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2012)01-0017-11

Study on the seasonal water masses classification and characteristics in the northern Yellow Sea

HUANG Jiang-chan ZANG Lu SHI Xiao-yong* ZHANG Chuan-song

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

ABSTRACT Based on the four cruises carried out from July 2006 to October 2007 in the northern Yellow Sea(NYS), the water masses in four seasons in the NYS were classified, and the chemical properties in different water masses were discussed according to the temperature and salinity data. Then the nutriment structure in every season in NYS were analyzed. The results showed that the northern Yellow Sea water can be classified into 4, 7, 5, 5 water masses each season; Coastal water in southern Liaoning (Ys1) and Yellow Sea water masses were present all year round; Yalu River freshwater and the Yellow Sea cold water mass(YC)disappeared in winter; Yellow Sea and Bohai Sea mixed water mass disappeared in autumn; Other water masses were seasonally presented. In the duration of the YC, its internal concentration of nutriment was at a high level, especially in fall, with PO₄-P up to 0.9 μmol /L.

KEY WORDS Northern Yellow Sea Water mass DO Nutriment

北黄海海域诸水团的温盐性质一方面受外海高盐水和沿岸低盐水系的影响,另一方面又受气象与陆地水文条件的影响,各水团的变化规律不尽相同。以往对北黄海水文特征和水团分析进行过很多研究(毛汉礼等

国家 908 专项(908-01-ST02)资助

* 通讯作者。E-mail: shixy@ouc.edu.cn, Tel: (0532)66782143

收稿日期: 2011-05-08; 接受日期: 2011-05-16

作者简介: 黄江婵(1985-), 女, 硕士, 主要从事海洋生态污染化学研究。E-mail: huangjiangchan@163.com

1964;翁传学等 1989;赵保仁 1996;冯士箎 1999;李凤岐 1999),通常用温盐(T-S)图解进行水团分析。T-S图解在分析大洋水团方面应用相当广泛,但当涉及近海海域尤其是陆架浅水区时,水团受到各类较强影响(混合、扰动、对流等),各个水团的温盐性质不够明显,反应在T-S图上即为一系列杂乱无章的点集,因而单独使用T-S图解进行水团划分难免有偏差,采用多参数的综合分析势必能够提高分析的准确度。在聚类时仅采用温度和盐度作为观测量进行聚类,就可将T-S图解进行精确的定量分析,是水团分析中一种较为经典的方法。

然而,在聚类的过程中选取不同的参数会导致聚类结果间出现较大的差异。此外,在海洋中由于水团的抬升或下沉,可能出现越层聚类的现象,这些都是聚类分析的不足之处,我们应当借助其他手段、方法或结合文献加以修正。海洋中溶解氧(DO)和营养盐虽受物理、生物和化学等过程影响,但是在一定情况下,它们也是划分水团的重要参数(顾宏堪等 1981;崔清晨 1982)。在生物活动小的情况下,DO和营养盐的分布与保守性的温、盐具有相同分布特征,这时它们的含量也具有一定的保守性(蒋国昌等 1990)。在不同水团中,DO和营养盐的含量有一定差异,在各类水团中能呈现不同分布特征,并能明显地显示环流结构和混合状况。本研究在初步的T-S聚类结果的基础上结合水团内的DO及营养盐浓度对水团区域进行微调,希望更加符合实际情况。

1 调查与方法

分别于夏季(2006-07-23~2006-08-06)、冬季(2007-01-03~2007-01-16)、春季(2007-04-24~2007-05-04)和秋季(2007-10-14~2007-10-25)4个季节进行大面航次调查,调查站位和范围如图1所示,共计19条断面。各调查站位的温、盐及水深等参数使用SeaBird 911-Plus CTD进行现场测量,同时用12 L Niskin采水器采集各深度水样(主要为表层、10 m、30 m和底层),分别测定DO和营养盐。其中,DO用Winkler法现场测定;营养盐样品现场经GF/F滤膜(450°C灼烧4 h),过滤后使用营养盐自动分析仪(QuAAtro, Bran + Luebbe GmbH Co)测定。PO₄-P用磷钼蓝分光光度法,标准偏差为0.012 μmol/L,检测限0.024 μmol/L;SiO₃-Si用硅钼蓝分光光度法,其标准偏差为5 μg/L,检测限1.2 μg/L。NO₂-N和NO₃-N采用重氮-偶氮分光光度法(其中硝酸盐在重氮化反应前先用镉-铜还原圈还原),其标准偏差为0.03 μmol/L,检测限0.03 μmol/L;NH₄-N用次溴酸盐氧化法测定分析,其标准偏差为0.03 μmol/L,检测限0.02 μmol/L。DIN = NO₃-N + NO₂-N + NH₄-N。

本研究选用系统聚类对T-S数据进行分析。聚类前先对数据进行标准化处理:

$$ZX_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j}$$

式中, $i=1,2,\dots,N$ 代表样品数, $j=1,2,\dots,m$ 代表变量个数, \bar{X}_j 为变量平均值, S_j 为 j 变量的标准偏差, X_{ij} 为原始数据, ZX_{ij} 为标准化后的数据。

聚类参数及方法的选择:以温盐值为指标对样品(这里指的是观测站各个水层)进行分类。距离的选择本研究采用欧几里德平方和距离作为计算各样本间的距离:

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^m (zx_{ik} - zx_{jk})^2$$

式中, $i,j=1,2,3,\dots,n,i \neq j$ 代表样品数, $k=1,2,3,\dots,m$ 代表变量个数, zx 为标准化后的数据。

此外,通过对8种计算类间距离公式的对比,取用其中计算结果与温、盐点聚图最接近的重心法作为划分水团的依据:

$$d_r^2 = \frac{n_p}{n_r} d_{ip}^2 + \frac{n_q}{n_r} d_{iq}^2 - \frac{n_p n_q}{n_r^2} d_{pq}^2$$

式中, $n_r = n_p + n_q$,即 p 类与 q 类合并后成为 r 类, n_r 为该类的站数, d_r^2 为类间距离,即两类水团重心的距离,它起着直接控制合并标准的作用。

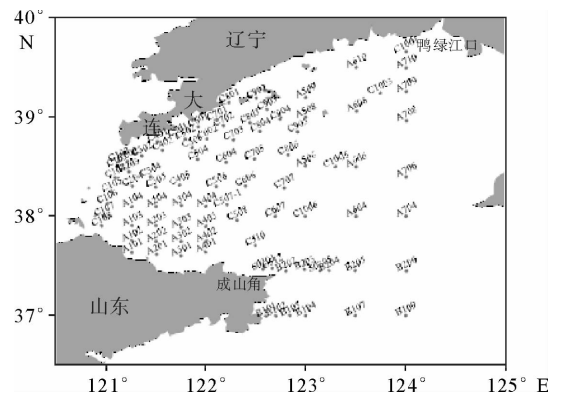


图1 调查海域

Fig. 1 Surveyed area

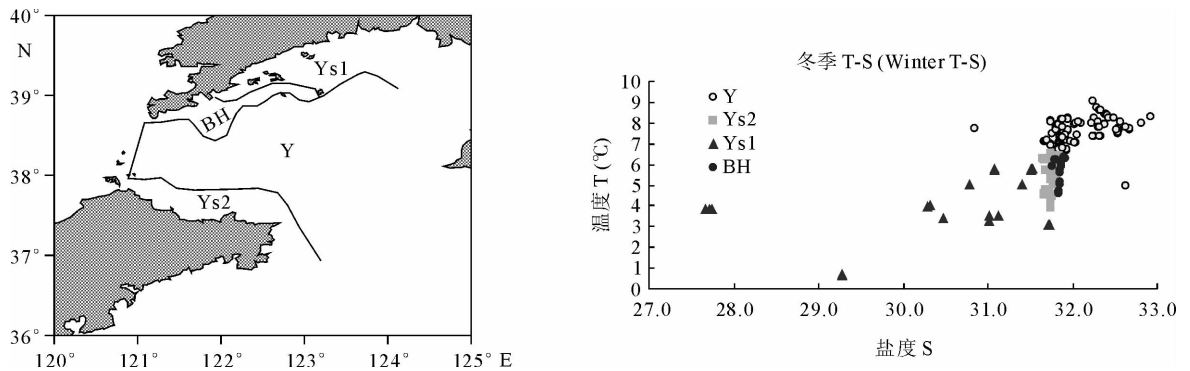
由于分析结果的处理主要依赖于树状结构图,且文献中对黄海海区水团个数的划分已经较为明确(毛汉礼等 1964;翁传学等 1989;赵保仁 1996;于非等 2006),故无需事先指定聚类的类数,只需将结果与文献对照即可。在 SPSS 15.0 软件上进行温盐聚类分析给出树状结构图(图略),再根据各季节在表底层的平面以及典型断面结构图可划分出不同季节水团的大致位置。但由于各水团所处的位置及范围大小树状图上判断比较困难,容易产生水团分布较混乱的感觉。因此需要结合温、盐和化学参数的分布,根据水团“内同性,外异性”的特点对初步划分的结果进行调整。

2 结果与讨论

2.1 水团划分结果

北黄海四季各水团水文特性见表 1。

冬季 在风搅拌、潮混合和不稳定对流等因素作用下,温、盐呈上下均匀分布,故水团划分的结果在表底层也是完全一致的(图 2)。



Ys1: 辽南沿岸水; Ys2: 鲁北沿岸水; Y: 黄海水团; BH: 渤-黄海混合水团

Ys1: Coastal water in southern Liaoning; Ys2: Northern Shandong coastal water; Y: Yellow Sea water; BH: B-H mixed water masses

图 2 冬季水团划分结果及温、盐点

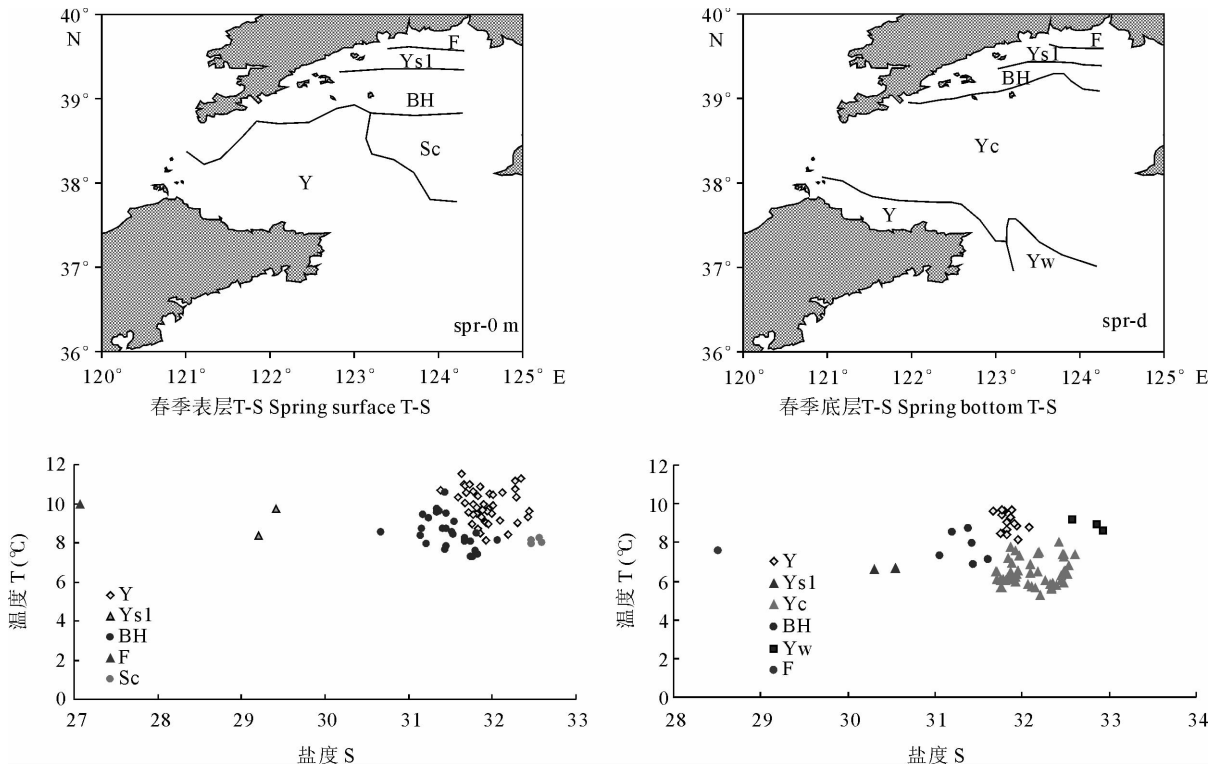
Fig. 2 Water mass in winter

整个调查海区主要有辽东半岛南岸的辽南沿岸水(Ys1)、沿山东半岛北岸向东流至成山角转而向南扩展的鲁北沿岸水(Ys2)(或称“黄海沿岸流”)以及占据海区中部绝大部分面积的黄海(混合)水团(Y)构成。另外,在黄海水团和辽南沿岸水之间还存在一个范围较小的带状区域,常常被称为“渤-黄海混合水团”(BH),其在鲁北沿岸水外侧的部分已与沿岸水混合得较均匀,因此本次调查中在辽南沿岸水外侧的“渤-黄海混合水团”与鲁北沿岸水的温盐性质相近。

春季 入春以后海面受热增温,强烈的对流混合终止,水体已逐渐开始出现较弱的层化现象,因此水团的配置在表、底层也开始产生差异(图 3)。

表层随着春季鸭绿江冰封期的结束,在江口附近的一小片区域,已出现盐度低于 27.1 的鸭绿江冲淡水(F)。在鸭绿江冲淡水的外侧则仍旧是盐度低于 29.5 的辽南沿岸水(Ys1),辽南沿岸水盐度水平比冬季略有下降,但其范围比冬季大大减小。而黄海水团在表层则依然是占据了绝大部分的面积,只是在海区的中、东部出现一片温度略低(8°C左右)而盐度较高(32.5左右)的水域,它的温、盐性质与底层的水团中的冷水团相近,因此极有可能是“下层冷水涌升现象”(赵保仁 1985、1987、1989、1992;苏育嵩 1996)所造成的,故将该区域定义为“表层冷水区”(Sc)。在黄海水团与辽南沿岸水之间则依然有渤-黄海混合水团存在,而且其范围比冬季有较大的扩张,自 124°E 一直延伸至辽东半岛最南端的老铁山水道。冬季时曾出现在山东半岛北岸的鲁北沿岸水,此时已完全与中央的黄海水团混为一体。

横表 1



F: 鸭绿江冲淡水; Ys1: 辽南沿岸水; BH: 渤海混合水团; Y: 黄海水团; Sc: 表层冷水; Yc: 黄海冷水团; Yw: 黄海暖流余脉残余
 F: Yalu River freshwater; Ys1: Coastal water in southern Liaoning; BH: Bohai Sea and Yellow Sea mixed water; Y: Yellow Sea water;
 Sc: Surface cold water; Yc: Yellow Sea cold water; Yw: Yellow Sea warm remnants

图 3 春季水团划分结果及温盐点

Fig. 3 Water mass in spring

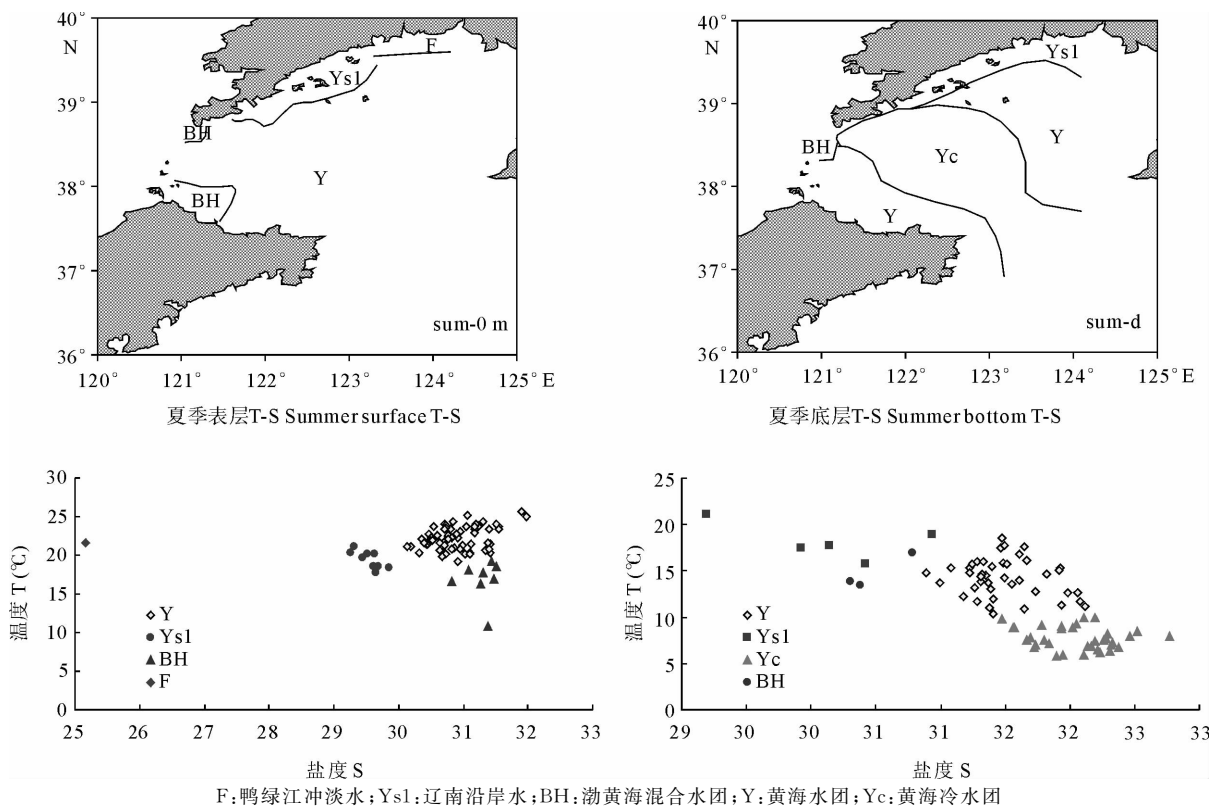
底层在海区北部的的水团配置与表层相类似,主要是鸭绿江口的鸭绿江冲淡水及其南侧的辽南沿岸水。而整个海区中部的绝大部分区域已被黄海冷水团(Yc)所占据,黄海水团则被挤压至山东半岛近岸的带状区域。此外,在冷水团与辽南沿岸水之间也同样存在渤-黄海混合水团。另外,在调查海区的东南方,有一水温 and 盐度水平均略高的水舌,与浦泳修等(1993)的调查“北黄海的暖水出现在南部,自靠近山东一侧进入北黄海”结果一致,因此定义它为黄海暖流余脉水残余(Yw)。

夏季 上层海水的继续增温、下层冷水的稳定层结以及水体的垂向流动性减弱等因素共同作用下,在上下均匀水体间形成了强度最大的温跃层,从而致使上、下层水体的水团划分结果展现出了完全不同的特性(图 4)。

表层在鸭绿江口依然有以低盐为特征的鸭绿江冲淡水存在,盐度在 25 左右。辽南沿岸水则出现在靠近辽东半岛南岸的沿岸区,盐度在 29~30 之间。黄海水团的范围在夏季进一步扩张,占据了表层 90% 以上的海区面积。此外,在渤海海峡两侧的两个较小范围的区域出现了曾分布于辽南沿岸水外侧的渤-黄海混合水团,如今其主体已发生较大变性而融入黄海水团,仅在海峡的两侧有所保留。

在海区的底层,鸭绿江冲淡水已与辽南沿岸水混合而变性并融入后者,因此辽南沿岸水的存在范围比春季时更大,也更贴近近岸,而其温盐性质与上层相比也发生了一些变化,导致与渤-黄海混合水团相类似。在春季占据底层绝大部分海域的冷水团在夏季已发生严重收缩,完全缩至海区中部以及东南部。而冷水团的东北以及西南部则被范围较广的黄海水团所包围。渤海海峡北侧,即老铁山水道则依旧被渤-黄海混合水团占据,从而间接指示夏季渤海水自海峡北侧流入北黄海的特征,这也与夏季渤海以及北黄海西部的反气旋环流是对应一致的。

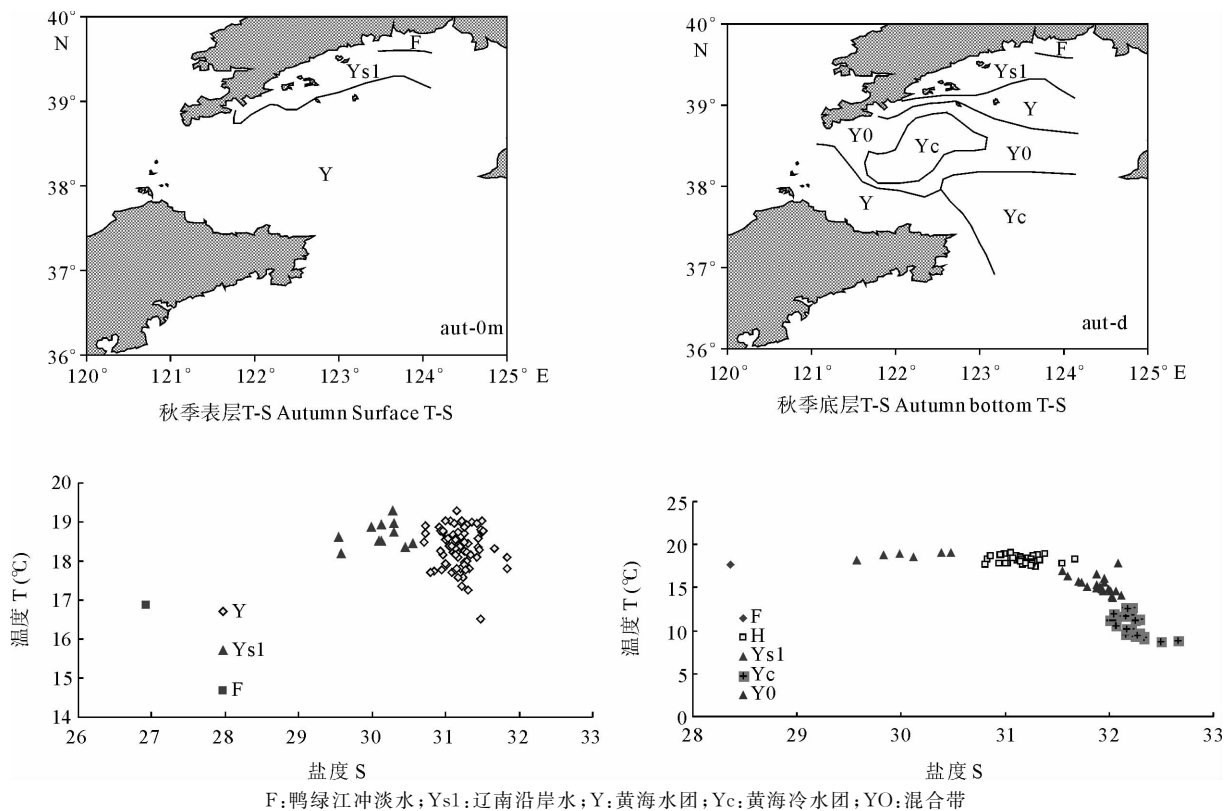
秋季 随着天气的降温、水体层化变弱等因素,表、底层水团的配置又有新的变化(图 5)。



F: Yalu River freshwater; Ys1: Coastal water in southern Liaoning; BH: Bohai Sea and Yellow Sea mixed water; Y: Yellow Sea water; Yc: Yellow Sea cold water

图 4 夏季水团划分结果及温盐点

Fig. 4 Water masses in summer



F: Yalu River freshwater; Ys1: Coastal water in southern Liaoning; Y: Yellow Sea water; Yc: Yellow Sea cold water; YO: Mixed zone

图 5 秋季水团划分结果及温盐点

Fig. 5 Water masses in autumn

表层鸭绿江口的冲淡水依然存在,但其盐度比夏季时高(在 27 左右),这与秋季径流量以及降水的减少有直接的关系。辽南沿岸流依然出现在冲淡水的外侧,与夏季相比,其分布的范围更为广泛。此季节黄海水团在表层仍是最为主要的水团,占据了辽南沿岸水以南的大面积海域,鲁北沿岸水仍与其混为一体。

底层与夏季相比,主要变化在于:冷水团的范围进一步缩小,并被分割为两块。一是在海区中部,外围被温度略高而盐度略低的水团所包围的冷水;另一块则是调查海区东南部的大面积海域。并且整个冷水区的水温也由夏季的低于 10°C 升至低于 13°C 。在鸭绿江口的冲淡水由于垂直混合作用的加强而出现在底层,其外侧的辽南沿岸水与表层的分布范围较一致。鲁北近岸的黄海水团也与夏季底层的分布较相似。而在辽南沿岸水以南的黄海水团范围则比夏季大为减小,被温、盐性质介乎它与冷水团之间的一个混合水团(Y0)所代替。

2.2 各季不同水团间化学要素的比较

本研究将各水团内的 DO 及营养盐浓度进行统计、比对和验证。对表、底层之间各站位水层所在的水团,主要依据全层次水团划分的结果,结合表、底层的水团分类进行归类(有关北黄海四季各水团生源要素数据总结见表 2)。

冬季 在冬季存在的 4 个水团中,黄海水团的 DO 浓度与饱和度均是最低的,辽南沿岸水的 DO 浓度是最高的,而 DO 饱和度最高的鲁北沿岸水,其 DO 浓度却处于海区第 2 位(图 6)。位置介于黄海水团和辽南沿岸水之间的渤-黄海混合水团的 DO 浓度与饱和度也是介乎二者之间。整个海区的 DO 饱和度在冬季均低于 99.5%,这与冬季较低的水温密切相关,这一点可以从辽南沿岸水与鲁北沿岸水相反的 DO 浓度与饱和度关系得以印证,冬季处于海区最北端的辽南沿岸的水温是最低的,而在海区南部的鲁北沿岸水温则相对较高。

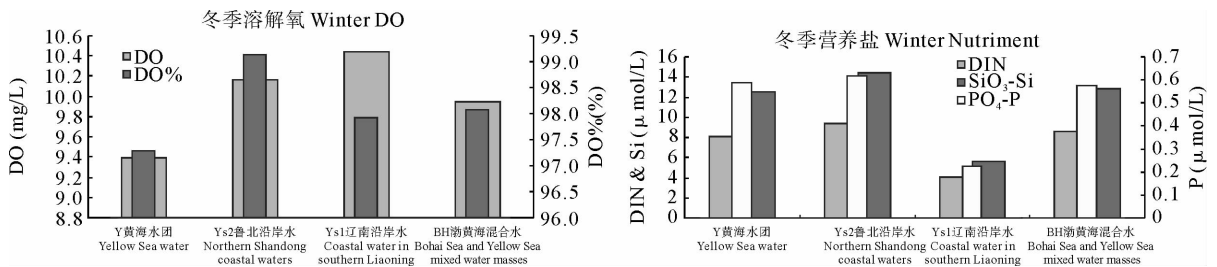


图 6 冬季水团间溶解氧和营养盐的比较

Fig. 6 Comparison of DO and nutrient among water masses in winter

与 DO 浓度变化相对应的,各项营养盐的浓度均值在辽南沿岸是最低的,黄海水团则较高,但是略低于鲁北沿岸水。渤-黄海混合水的营养盐浓度均值也同样介于前二者之间。

春季 在春季出现的 7 个水团中,最具突出特点的分别是黄海水团和暖流余脉水(图 7)。由于受到浮游植物活性增强的影响,黄海水团中 DO 浓度迅速飙升,而饱和度也相应升至海区最高,平均值高达 110%。暖流余脉水则由于水温较高且处于有机质沉降分解的底层,从而导致拥有海区最低的 DO 浓度及饱和度,并且在整个海区,除黄海暖流余脉水之外的各个水团的 DO 饱和度均大于 100%。此时是冷水团的形成阶段,虽然其特性还不十分明显,但从它的 DO 浓度与辽南沿岸水、鸭绿江冲淡水相差不大,而 DO 饱和度却较低可以看出它的冷水性质正逐步显现。

营养盐的总体变化几乎总与 DO 呈相反的趋势。毫无例外的,黄海水团中的营养盐浓度几乎成为整个海区最低的,而暖流余脉亦成为高值区,其 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度仅次于表层冷水且差距不大。较为特殊的是鸭绿江冲淡水拥有最高的 DIN 浓度和含量较低的 $\text{PO}_4\text{-P}$,这也与以往调查中对鸭绿江水具有高 N、低 P 特性的研究(刘素美等 2000)相一致。在冷水团区最为突出的是具有较高的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度,几乎与暖流余脉水中的浓度相当,均值可达 $0.3 \mu\text{mol/L}$ 。表层冷水在营养盐特征上也与冷水团类似,具有海区最高的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度,均值高达

横表 2

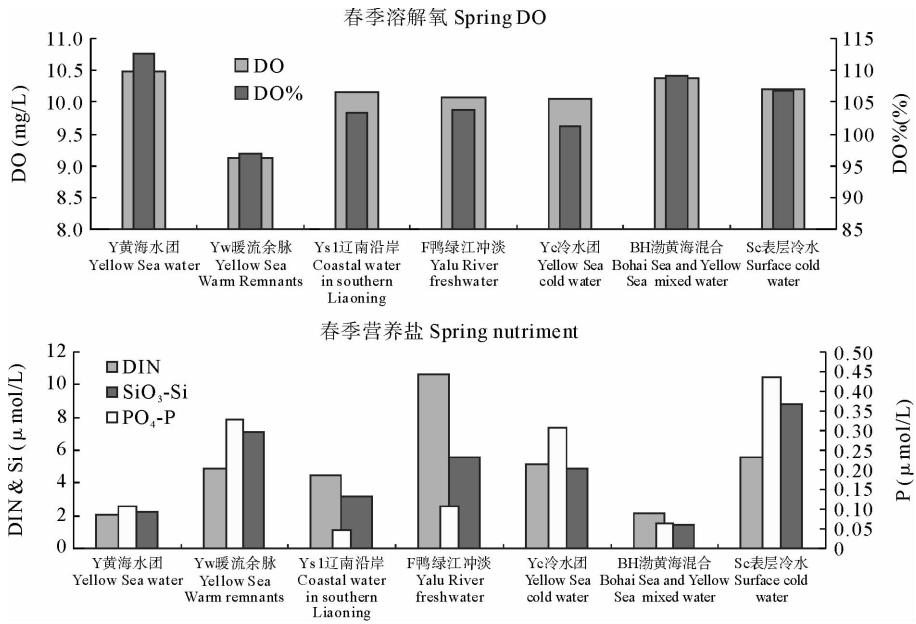


图 7 春季水团间溶解氧和营养盐的比较

Fig. 7 Comparison of DO and nutrient among water masses in spring

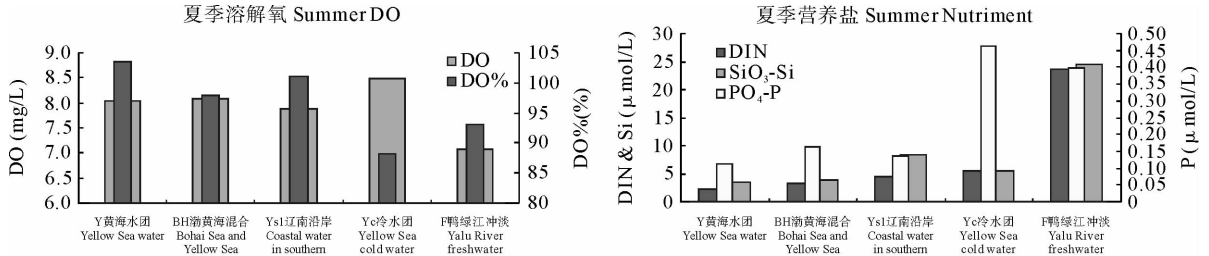


图 8 夏季水团间溶解氧和营养盐的比较

Fig. 8 Comparison of DO and nutrient among water masses in summer

0.35 $\mu\text{mol/L}$ 。整个海区来看,除暖流余脉水、冷水团及表层冷水之外,其他水团的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度均值皆低于 0.15 $\mu\text{mol/L}$ 。从表层冷水中 DO 的浓度及饱和度与相邻的渤-黄海混合水相当,营养盐的浓度却明显是后者的两倍以上,也可以说明表层冷水的产生是由于底层富营养的冷水涌升的结果。

夏季 总体来说,夏季各水团的 DO 浓度分布较均匀,几乎都在 8 mg/L 上下,只有鸭绿江冲淡水的含量较低,仅高于 7 mg/L。与其他水团相比,冷水团具有最高的 DO 浓度(接近 8.5 mg/L)和最低的饱和度(低于 90%),这更凸显出水温对于 DO 溶解度的影响(图 8)。

与鸭绿江冲淡水中含量较低的 DO 相对应的,其各项营养盐的含量具有绝对的优势,DIN 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度均超过 20 $\mu\text{mol/L}$,而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 也超过了 0.4 $\mu\text{mol/L}$,充分显示了其受到大量径流输入的影响之大。冷水团中营养盐的浓度远高于其上方及周围的黄海水团、渤-黄海混合水,DIN 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 几乎可达二者浓度之和,最为突出的是它的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量在整个海区来说都是最高的,平均浓度高于 0.45 $\mu\text{mol/L}$ 。

秋季 各水团 DO 的浓度分别比夏季有不同程度的降低,尤以冷水团的降幅最大(图 9),由高于 8 mg/L 降至低于 6 mg/L。各水团的 DO 饱和度也有不同程度降低,整个海区均低于 100%,冷水团中甚至降至 65%

以下。这可能与秋季浮游植物的活动性变弱从而使 DO 的生产量变少以及有机质沉降至下、底层分解耗氧等因素有关。

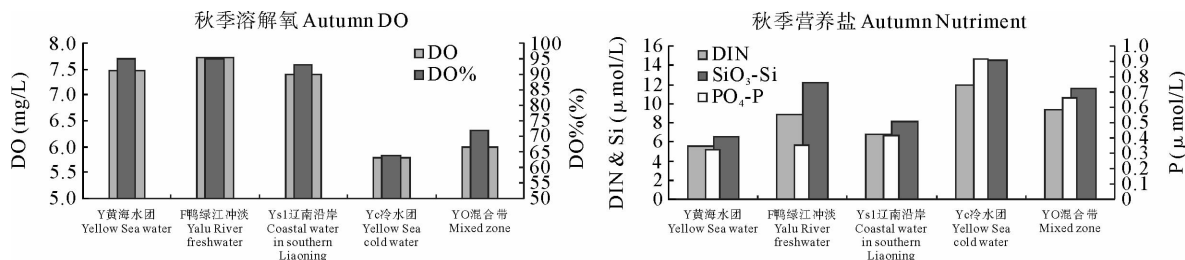


图 9 秋季水团间溶解氧和营养盐的比较

Fig. 9 Comparison of DO and nutrient among water masses in autumn

相应地,鸭绿江冲淡水之外的各水团中营养盐浓度均比夏季有所升高,并且冷水团的增长幅度是最大的,它的 $PO_4\text{-P}$ 浓度则依然是海区的最高值,均值高达 $0.9 \mu\text{mol/L}$ 。鸭绿江冲淡水由于受到秋季径流量减少的影响,各项营养盐的浓度均比夏季有较大幅度的下降。在黄海水团、冷水团及辽南沿岸水之间的混合水中各要素也同样是介于它们的中间值。

由四季的总体情况来看,在冷水团存在期间最为突出的是,该水团内的 $PO_4\text{-P}$ 浓度几乎总是海区内最高的,且高值较为突出;而在冬季占据这一位置的黄海水团中的 $PO_4\text{-P}$ 浓度同样较高,这与“黄海冷水团是黄海营养盐贮库”(王保栋 2000)的结论相符。据此推测,夏、秋季积累在冷水团内的大量 $PO_4\text{-P}$,在冬季强烈的垂直混合作用下得以扩散。从另一方面说,冷水团中高浓度营养盐扩散的主要作用在于提升了整个海区的 $PO_4\text{-P}$ 浓度。

3 结语

1) 根据对调查海区四季的水团划分,在冬到秋季的季节交替过程中,每个季节由表到底分别可划分为 4、7、5、5 个水团。

2) 从 4 个季节的水团划分分析结果可以看出,辽南沿岸水和黄海水团是常年存在的;鸭绿江冲淡水和黄海冷水团于春、夏、秋季存在,冬季消失;渤、黄海混合水团是秋季消失;其他水团则是季节性的存在。黄海冷水团在春季初步形成,夏季达到鼎盛,秋季渐衰弱,直至冬季完全消失,这完全符合理论上冷水团的生消过程(缪经榜等 1990)。

3) 在黄海冷水团存续期间,其内部营养盐的浓度均处于较高水平,尤其在秋季,一跃成为整个海区的最高值,其中, $PO_4\text{-P}$ 均值高达 $0.9 \mu\text{mol/L}$ 。

4) 毛汉礼等(1964)曾指出温、盐图解对浅海水团进行分析时,只适于划分温盐相差较大水团。本研究先是利用温、盐资料对调查海区的水团进行基本的划分,分析结果的处理主要依赖于温盐(T-S)聚类树状结构图。在 SPSS 15.0 软件上进行温盐(T-S)聚类分析给出树状结构图,结合温盐和化学参数的分布,根据水团“内同性、外异性”的特点对结果初步划分,再将水团内的 DO 及营养盐浓度进行统计、比对和验证。这种方法弥补了 T-S 图解水团的不足,一定程度上更为准确合理。

参 考 文 献

- 毛汉礼,任允武,万国铭,1964. 应用 T-S 关系定量地分析浅海水团的初步研究. 海洋与湖沼, 6(1):1~22
- 中国科学院《中国自然地理》编委会, 1979. 中国自然地理-海洋地理. 北京: 科学出版社
- 王保栋, 2000. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系. 海洋学报, 22(6):47~54
- 冯士筭,李凤岐,李少菁,1999. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 1~503
- 李凤岐,苏育嵩,1999. 海洋水团分析. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1~397
- 刘素美,张 经,陈洪涛, 2000. 黄海和东海生源要素的化学海洋学. 海洋环境科学, 19(1): 68~74
- 苏育嵩,苏 洁,1996. 渤、黄海夏季低温带及其形成机制初析. 海洋学报, 18(1): 13~20
- 赵保仁,涂登志,毕亚文,1992. 黄海西部 34°N 断面潮生陆架锋的多年变化及跨锋断面的环流结构. 海洋科学, 2: 41~45
- 赵保仁,1996. 北黄海冷水团环流结构探讨——潮混合锋对环流结构的影响. 海洋与湖沼, 27(4): 429~436
- 赵保仁,1989. 渤、黄海及东海北部强温跃层的基本特征及形成机制的研究. 海洋学报, 11(4): 401~410
- 赵保仁,1987. 黄海潮生陆架锋的分布. 黄渤海海洋, 5(2): 16~23
- 赵保仁,1985. 黄海冷水团锋面与潮混合. 海洋与湖沼, 16(6): 451~460
- 翁学传,张以悬,王从敏,张启龙,1989. 黄海冷水团的变化特征. 青岛海洋大学学报, 19(1):119~131
- 浦泳修,林金祥,许小云,1983. 黄海西部流况的初步分析. 黄渤海海洋, 1(2): 8~20
- 顾宏堪,熊孝先,刘明星,李 延,1981. 长江口附近氮的地球化学. 山东海洋学院学报, 11(4):37~46
- 崔清晨译, Riley. J. R., Skirrow. G. 1982. 化学海洋学第二卷. 北京:海洋出版社
- 蒋国昌,王玉衡,1990. 东海冬季环流中溶解氧和营养盐分布特征. 海洋通报, 9(5):25~31
- 缪经榜,刘兴泉,薛 亚,1990. 北黄海冷水团形成机制的初步探讨 I. 模式解. 中国科学, B辑, 12:1 311~1 321