

对马海峡水团组成对日本海温盐分布影响的 季节及年际变化*

朱梦琪¹, 史洁^{1, 2**}, 郭新宇^{1, 3}, 高会旺^{1, 2}

(1. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 海洋国家实验室海洋生态与
环境科学功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 日本爱媛大学沿岸环境科学研究中心, 松山 7908577)

摘要: 基于 WOD13(World Ocean Database 2013)的温盐观测资料,分析了 对马海峡断面和日本海内一断面上温盐分布的季节变化特征,并利用水团组成混合比的方法探讨了 对马海峡断面处的水团组成对日本海内断面上温盐分布的影响的季节和年际变化。研究表明:对马海峡断面上水团组成呈现显著的季节变化。冬季,整个水层被高盐水占据;夏季,对马海峡表层出现高温低盐水,底层为高盐水,次表层为表层低盐水和底层高盐水的混合水体;春秋为过渡季节。日本海断面上,秋季温盐分布最为复杂,表层为高温低盐水,次表层为高盐水,其下为低温高密水。两个断面季节变化对比可以看出,夏季对马海峡断面处的水团组成会影响秋季日本海断面上的温盐分布。夏季对马海峡表层和次表层水是秋季日本海断面表层 50 m 以浅出现低盐水的主要原因;对马海峡深层高盐水主要影响秋季日本海断面 50~150 m 水层,混合比可达 0.82;其下为日本海固有水。夏季对马海峡处水团组成的年际变化也会影响秋季日本海断面上温盐分布的年际变化。长江流量较大的年份,夏季对马海峡表层和次表层低盐水的核心盐度值偏低,秋季其在日本海断面上的混合比就高于其他年份;对马海峡底层高盐水在日本海断面上混合比的年际变化则决定于其影响水层上的流场结构和温盐分布。

关键词: 对马海峡; 日本海; 水团混合; 季节变化; 年际变化

中图分类号: P731.16

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2019)04-009-13

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20180038

引用格式: 朱梦琪, 史洁, 郭新宇, 等. 对马海峡水团组成对日本海温盐分布影响的季节及年际变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 9-21.

ZHU Meng-Qi, SHI Jie, GUO Xin-Yu, et al. The seasonal and inter-annual variations of the influences of the water masses structures along the Tsushima Strait Section on the temperature and salinity distributions along the Japan Sea Section[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(4): 9-21.

黑潮为西北太平洋上的强西边界流,起源于吕宋岛,依次流经吕宋海峡、东海陆架海域和日本海,最终离开日本海岸向东流去,成为黑潮延伸体进入西北太平洋。黑潮具有高温高盐、流速快和流量大等特点,在从低纬度海区向中纬度海区输送热量的同时,也自南向北输送盐份和营养盐等物质。黑潮主轴大约在 30.51°N、129.1°E,处出现一黑潮分支从主轴分离出来通过对马海峡流入日本海,沿九州岛西侧向北输运^[1];该黑潮水向日本海的入侵形成了对马暖流^[2];Ichikawa 等认为,冬季对马暖流来源为九州岛西岸的黑潮分支,而夏季组成源还包括了台湾暖流^[3];Guo 等对对马暖流不同源的组成进行了定量分析进一步验证了此观点^[4]。因此黑潮的季节和年际变化会影响到日本海水

体环境的变化。

黑潮在沿其流轴方向进行水体输运的同时,也向其内侧的陆架海区输送盐份、营养盐等物质,其中在东海陆架,来源于黑潮的盐份、营养盐的输送量要远远大于长江等河流的输送量^[5-6]。黑潮向东海陆架进行水体输运的同时,东海陆架水也同时向黑潮区进行水量、营养盐的输送,两者的水交换具有双向性^[7]。由于东海陆架水与黑潮水之间进行水体交换,东海陆架水体环境的变化有可能通过对马暖流的输运对日本海产生潜在的影响。

对马暖流不仅由流入日本海的黑潮分支水组成,同时也携带了来自黄海和东中国海的低盐水^[8]。该低盐水主要是由长江冲淡水引起^[9]。Chang 和 Isobe 运

* 基金项目:国家自然科学基金项目(4576010)“东海陆架与黑潮之间的双向物质输运及其对日本海和西北太平洋的影响”专项资助
Supported by the National Natural Science Foundation of China “Onshore and Offshore Fluxes of Materials Between the Continental Shelf of East China Sea and Kuroshio Region and Their Impacts on the Japan Sea and Northwestern Pacific Ocean”(41576010)

收稿日期:2018-01-19; 修订日期:2018-05-15

作者简介:朱梦琪(1994-),女,硕士生,研究方向:环境动力学。E-mail:18354225031@163.com

** 通讯作者:E-mail:shijie@ouc.edu.cn

用普林斯顿海洋模式(POM)模拟发现68%的长江冲淡水在夏季朝东北方向输运,并最终途经对马海峡流入日本海^[10]。因此东海陆架水与长江冲淡水均会通过通过对马海峡对日本海水体环境造成影响。

日本海是一个典型的西北太平洋封闭型边缘海^[11],海底地形陡峭,水深最深可达3700m,主要通过通过对马海峡、津轻海峡、宗谷海峡和鞆海峡这四个海峡与外海相连,其中对马海峡作为日本海水体主要输入通道,将日本海与东中国海相连接,也是黑潮水进入日本海的主要通路,因此想要分析东中国海水体环境和黑潮对日本海水体环境的影响,首先要清楚对马海峡处水体环境变化对日本海产生的影响。因此,本文利用WOD13的温盐观测资料,研究探讨了对马海峡处不同水团对日本海典型断面的影响的季节和年际变化。

1 数据和方法

1.1 数据介绍

本文研究区域为日本海海域,范围为 $30^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$,所用的温度、盐度数据均来自美国国家海洋数据中心(National Oceanographic Data Center, NODC)制作的世界海洋数据集(World Ocean Data, WOD),图1(a)中黑点为1970—2008年研究区域内的实测站点分布图,其中选取对马海峡处和日本海内温度和盐度数据观测连续性较好的两个断面,分别命名为对马海峡断面(Tsushima Strait Section, TSC)和日本海断面(Japan Sea Section, JSS),断面上观测站位分布

如图1(b)所示。对马海峡断面经纬度范围为 $128.6^{\circ}\text{E}\sim 129.7^{\circ}\text{E}$, $33.4^{\circ}\text{N}\sim 34.6^{\circ}\text{N}$,包含10个站点,从朝鲜半岛至九州岛分别为T1~T10,其中最大水深位于T5站点处,为138m;日本海断面共包含8个站点(J1~J8),研究范围为 $37.0^{\circ}\text{N}\sim 40.0^{\circ}\text{N}$, $136.0^{\circ}\text{E}\sim 138.2^{\circ}\text{E}$,日本海断面水深最深为2664m,位于J4站点处,由于日本海断面500m以深水体性质稳定,温盐变化不大,因此本研究仅对日本海断面500m以浅水体的温盐分布进行分析。本文在分析两个断面温盐分布的季节变化时,运用的是1970—2008年多年平均的观测结果。

日本海内数据均为走航观测数据,不同航线观测的断面存在不同,因此日本海内虽然站点众多、断面众多,但多数断面的季节和年际的观测连续性较差,数据存在缺失。在研究对马海峡处水体对日本海水体产生的季节和年际的影响时,选取了两个数据观测连续性较好的断面,运用1994—2000年间的数据进行分析。

在分析长江冲淡水通过对马海峡对日本海影响时,所用的长江淡水通量数据来自于水利部长江水利委员会出版的《中国河流泥沙公报》中提供的长江大通站8月的径流量数据,时间跨度为1994—2000年。在分析日本海环流场对日本海断面上水团结构影响时,所用的1994—2000年流场数据来自于Hirose等运用RIAM Ocean Model建立的海洋模型对日本海海域进行模拟所得的模拟数据^[12],该网格分辨率为 $1/12^{\circ}\times 1/15^{\circ}$,垂向共分为38层。

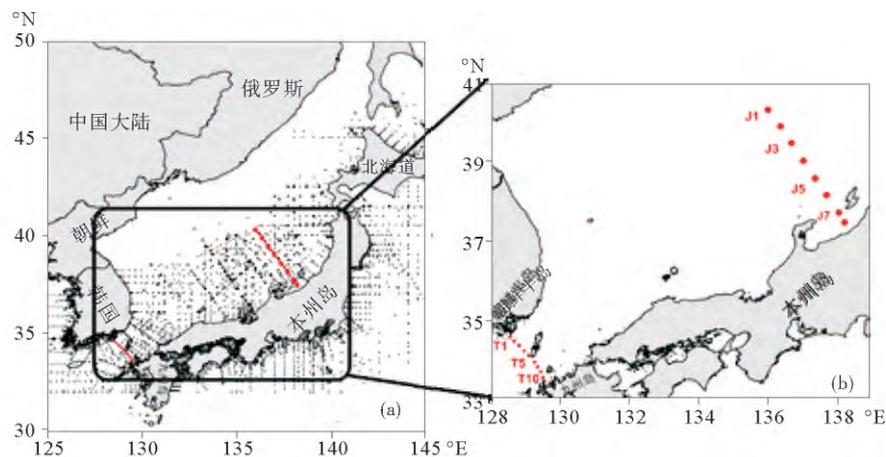


图1 研究区域(a)及研究断面所在位置(b)

Fig.1 The study area(a) and the stations at the two observational sections(b)

1.2 水团混合比方法

水团主要指占有一定空间且具有相近的物理、化学和生物性质和相似的变化趋势的水体。自从1916年水团这一概念引入海洋学之后, Jacobsen用T-S图解方法研究两个水团混合相互影响的问题,得出了水

团混合的线性反比关系的结论^[13]; Mille在分析北美陆架水时提出四个水团浓度混合分析方法^[14]。毛汉礼等对混合四边形计算进一步提出了几何解法^[15],依据T-S点聚图进行水团分析,得到四个水团的核心温度、盐度值,运用该浓度混合方法可以对不同水团的混合比进

行定量的分析。Chen 等认为, 东中国海水体与来自对马暖流的黑潮水的混合过程当中有六个水团参与, 并运用该方法对台湾海峡处的黑潮表层水、次表层水、台湾海峡水和其他三水团混合而成的陆架水的混合比进行计算分析^[16]; 田天等将巴士海峡附近海域水团分为表层、次表层、中层和深层水团, 运用该方法定量分析了四个水团在该海域内的分布情况, 证实了此方法计算多水团水体交换的可行性^[17]。本文在研究夏季对马海峡断面处的水团对秋季日本海断面上温盐分布影响时, 用的就是四个水团混合的方法。

2 结果

2.1 对马海峡断面上温度、盐度的季节变化特征

图 2 和 3 分别是对马海峡断面上温度、盐度分布的季节变化图。从垂直分布可以看出, 在冬、春季整个断

面的温度、盐度垂向分布比较均匀, 而夏、秋季, 层化现象更为明显。断面东西侧温盐分布存在差异, 断面西部温度、盐度均略低于东部水体。从图 2 可以看出, 冬季对马海峡断面上海温较低(以 2 月为例), 垂向分布比较均匀, 变化范围为 12.4~15.0 °C; 温度在水平方向上存在明显差异, 断面西侧的温度比东侧温度低 1.0~2.0 °C。春季(以 5 月为例), 由于太阳辐射的增强, 海表最高温度可达 18.6 °C, 水温垂向分布出现层化现象。夏季(以 8 月为例), 温度跃层大概位于 30 m 处, 断面东部跃层深度大于西部, 跃层以浅的水域温度均高于 24.0 °C, 表层水温可达 27.5 °C, 温跃层以下水温降低, 小于 20.0 °C; 水平方向的温度梯度更加显著, 在对马海峡东部的暖水相较于西部深厚, 以 20.0 °C 等温线为例, 在东部可达 60 m, 而在西部海域仅可达 25 m 左右。秋季由于海表降温, 水体层化现象逐渐消失。

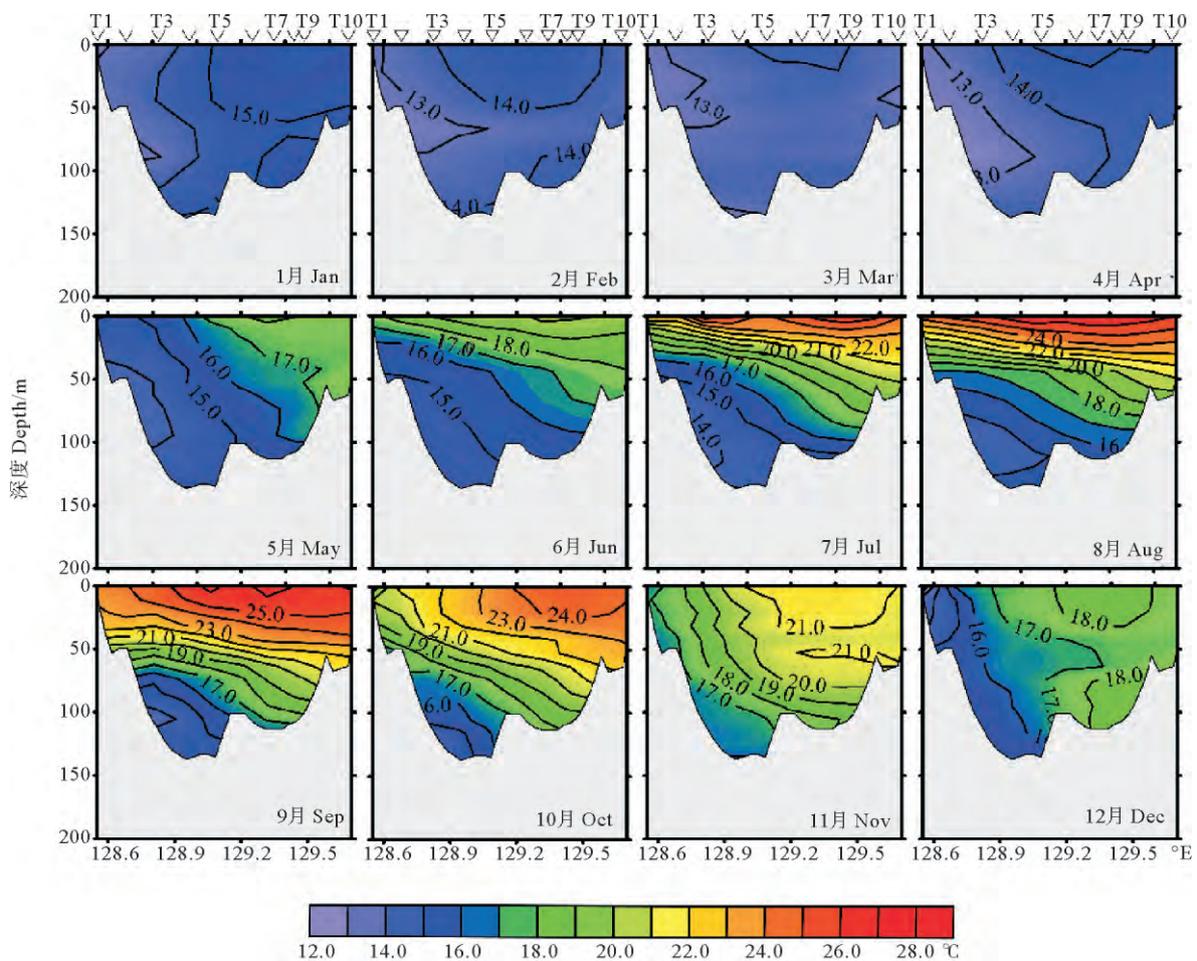


图 2 对马海峡断面上 1—12 月温度分布图

Fig. 2 Vertical distributions of temperature along the Tsushima Strait Section from January to December

冬季, 对马海峡断面上盐度变化范围为 33.95~34.65(见图 3), 盐度在垂直方向上较为均匀。6 月开始盐度出现垂向分层, 低盐水开始在断面西侧表层出现, 最低盐度约为 33.70, 盐度随着深度的增加而增加。

随着时间的推移, 盐度垂直分层更加明显, 低盐水的水平和垂直范围均逐渐扩大。到了夏季(8 月), 30 m 以浅的水域盐度低于 32.80, 最低盐度出现在表层, 为 32.10, 随着水深的增加, 盐度逐渐增大, 盐度最大可达

34.56。表层低盐水体在秋季逐渐减弱,盐度垂直分层也逐渐消失。

为进一步研究对马海峡断面上水团组成的季节变化,本文绘制了1—12月的T-S点聚图(见图4中的红点)。由图可见,1—5月份,对马海峡断面上温盐值分

布较为集中,盐度较高,主要集中在34.20~34.80之间,温度较低,变化范围为12.6~15.0℃,水团密度均大于24.0,此时,水团组成较为单一。任慧茹等将黑潮分为三段:25°N以南为黑潮入口段,25°N~30°N为黑潮中间段,30°N~34°N为黑潮出口段^[18],本研究中对

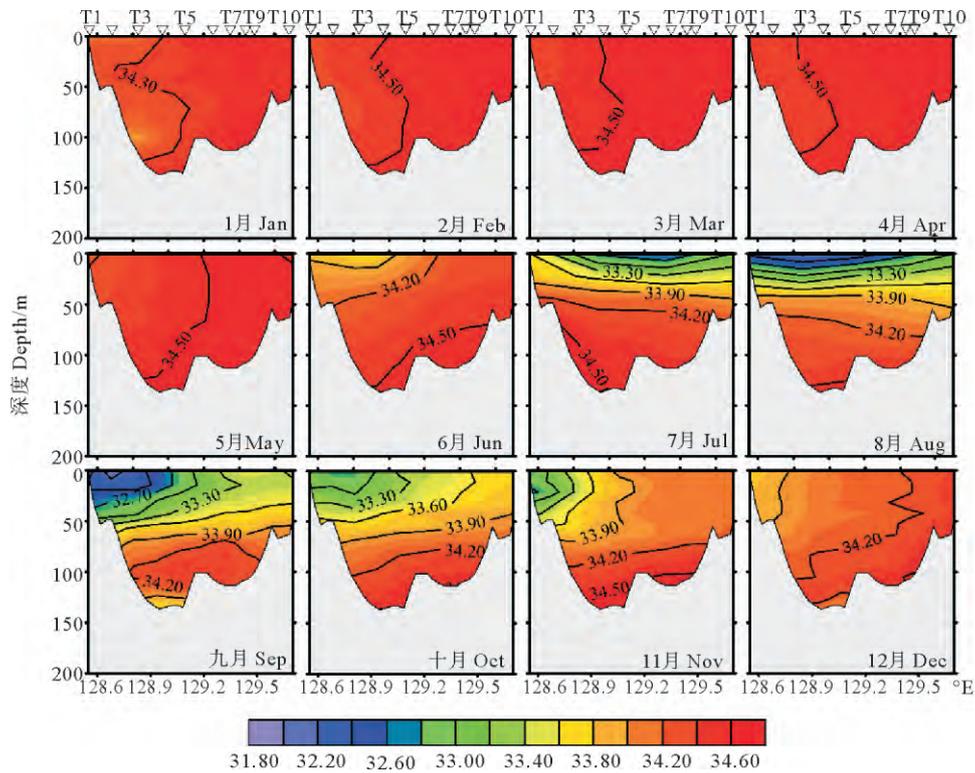
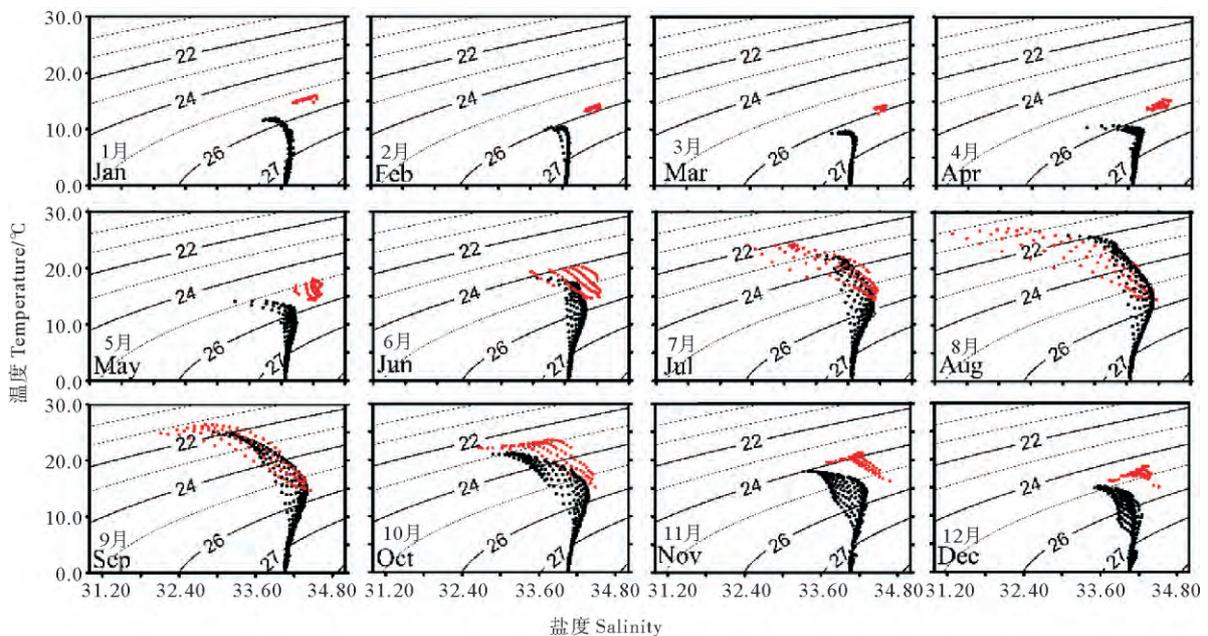


图3 对马海峡断面上1—12月盐度分布图

Fig. 3 Vertical distributions of salinity along the Tsushima Strait Section from January to December



(红色点代表对马海峡断面,黑色点代表日本海断面,黑色线为等密线。Red and black dots represent T-S dots at Tsushima Strait Section and Japan Sea Section, and the black lines are the isopycnals.)

图4 对马海峡断面和日本海断面上的1—12月份的多年平均(1970—2008)T-S点聚图

Fig. 4 Climatological T-S diagrams at Tsushima Strait Section and Japan Sea Section from January to December

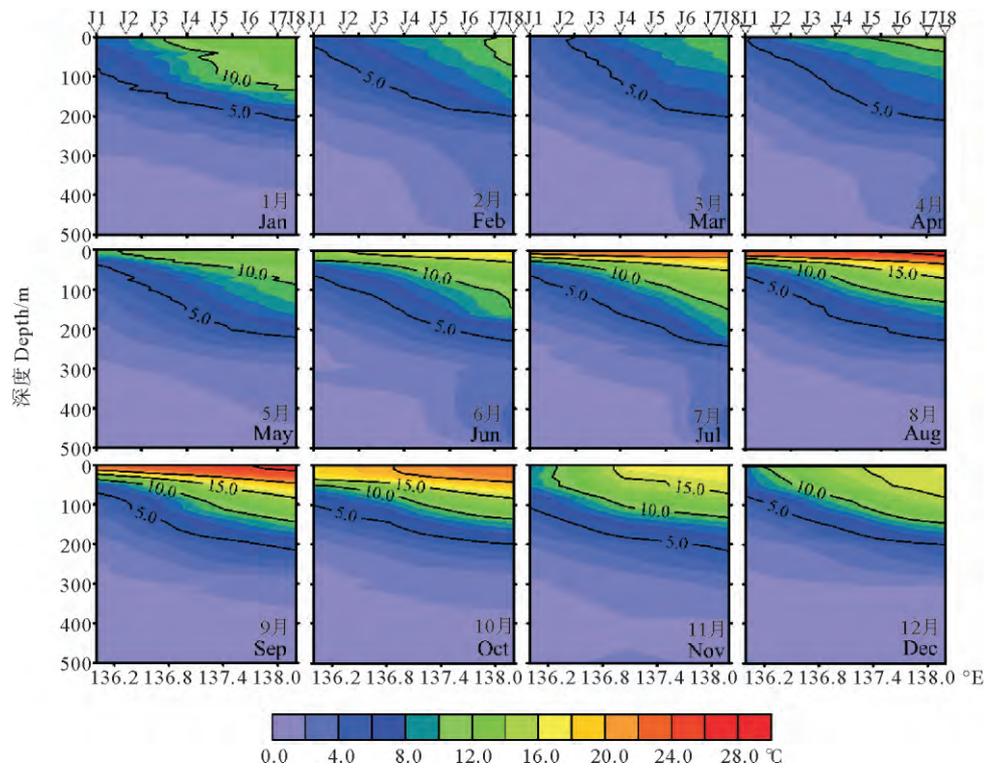


图 5 日本海断面上 1—12 月份的温度分布图

Fig. 5 Vertical distributions of temperature along the Japan Sea Section from January to December

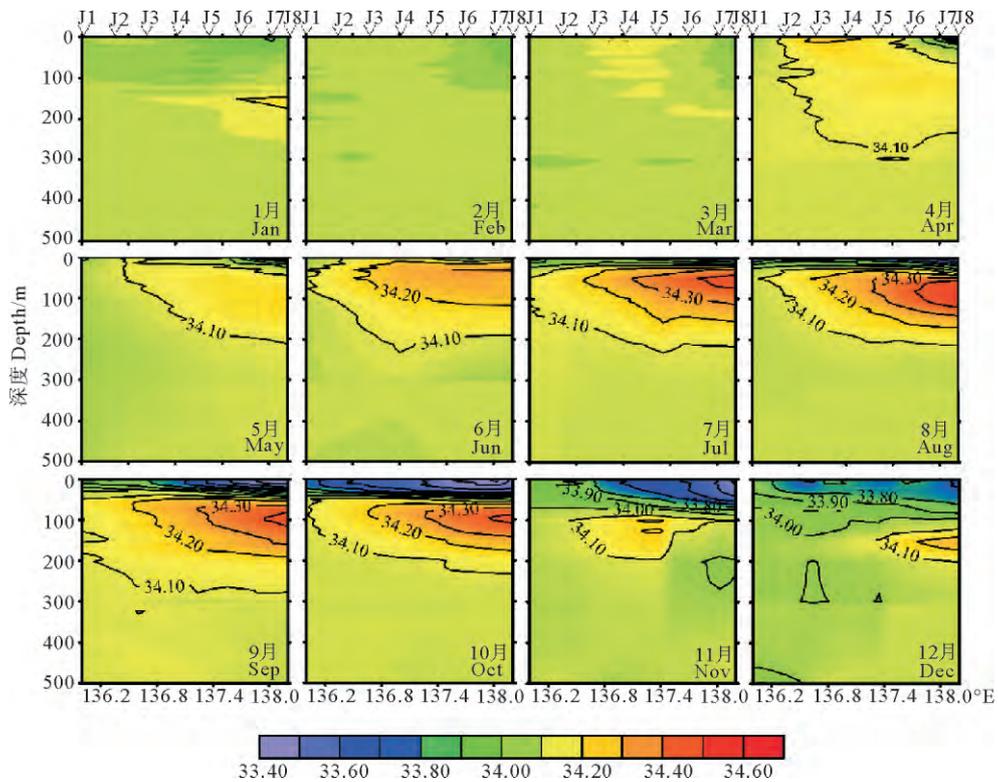


图 6 日本海断面上 1—12 月份的盐度分布图

Fig. 6 Vertical distributions of salinity along the Japan Sea Section from January to December

马海峡断面冬季盐度范围与黑潮出口段上层高盐水盐度(34.50)相符,说明此时对马海峡处水团主要受到黑

潮水的影响。6月开始,T-S点聚图显示温盐点的分布开始变得分散,说明水团性质较冬季发生了变化,出现

了低盐低密的点,密度小于 24.0。夏季(8月),T-S 点聚图显示此时该断面水团组成最为复杂。其中,密度小于 22.0 的水体对应温度较高,主要分布在 24.2~27.0 °C,盐度较低,最低可达 31.29,本研究将其定义为对夏季马海峡表层水,主要分布在对马海峡 10 m 以浅的区域。盐度低于 34.05,温度变化范围为 18.9~24.2 °C,对应密度在 22.0~24.0 的水体主要分布在对马海峡断面 10~30 m 水层,本研究将其定义为夏季对马海峡次表层水。此外,盐度大于 34.05,温度范围在 14.6~18.9 °C 之间,对应密度大于 24.0 的点所表征的水团主要分布在 30 m 以深的水层,本研究将其定义为对马海峡高盐水。从秋季到冬季(9~12月),T-S 点聚图显示夏季对马海峡表层水和次表层水逐渐消失,而对马海峡高盐水逐渐从马海峡断面的深水层,发展到冬季变为占据整个水层。

综上,从全年看来,夏季对马海峡表层水以高温低盐为主要特征,春季开始发展,夏季成熟,秋冬季节逐渐消失;对马海峡高盐水以低温高盐为主要特征,夏季表层低盐水盛行时,将其限制在 30 m 以深,而冬季则占据整个水层;夏季对马海峡次表层水则为夏季表层水和深层高盐水的混合水。因此,夏季对马海峡断面处的水团组成最为丰富和复杂。

2.2 日本海断面上温度、盐度的季节变化特征

日本海断面上各月温度的分布如图 5。冬季 2 月时断面温度为四季最低,500 m 以浅水层温度均低于 10.0 °C,表层温度最高,垂直方向上出现分层现象,随着深度的增加,温度逐渐降低;水平方向看,等温线发生倾斜,断面东侧(近岸区域)温度高于断面西侧(离岸区域)。春季(5月),由于太阳辐射的增强,海表温度进一步升高,海表温度可达 12.6 °C,水体层化现象增强。到了夏季(8月),海表温度达到全年最高,约为 25.0 °C,温度大于 20.0 °C 的水集中在 25 m 以浅,垂向温度层结达到全年最强。秋季(11月),海表温度降低,层化现象较夏季有所减弱。

图 6 为日本海断面上盐度分布的季节变化。冬季(2月),整个断面上盐度分布较为均匀,未出现明显的盐度层结,盐度分布范围为 33.87~34.07。春季(5月),近岸水域 20 m 以浅水域出现低盐水,盐度低于 33.90,并向离岸方向扩展;低盐水层以下至 200 m 水层出现高盐水,盐度高于 34.10;200 m 以深的水域,盐度分布较为均匀,盐度值约为 34.06。夏季(8月),表层低盐水由近岸区域扩展为整个断面;次表层高盐水盐度增高,最大可达 34.40,影响范围为全年最大。到了秋季,表层低盐水达到最强,10 月低盐水覆盖整个断面的 30 m 以浅水层,盐度值低于 33.70;次表层高盐水在表层低盐水之下,二者之间存在很强的盐度梯度。

从日本海断面上各月的 T-S 点聚图(见图 4 中的黑点)可以看出,该断面在 2 月份时温盐点分布比较集中,温度低于 12.3 °C,盐度变化范围为 33.60~34.40,对应密度较高,大于 26.0。春季,从 T-S 点聚图上可以看出,出现了高温低盐水,温度高于 10.0 °C,5 月份时温度最高可达 19.7 °C,盐度较低,约为 33.00,与冬季相比,海水密度减小,出现了密度范围为 24.0~26.0 的水体。到了夏季,温盐点分布变得发散,该断面水团组成变得复杂,高温低盐表层水、高盐次表层水及低温高密的日本海固有水同时存在。到了秋季,高温低盐表层水发展最为成熟,盐度在 10 月份达到全年最低。之后,表层低盐水和次表层高盐水逐渐消退,到了冬季,断面被日本海固有水占据。

2.3 对马海峡断面上的水团对日本海断面影响的季节变化

由对马海峡断面(见图 2、3)和日本海断面(见图 5、6)温盐分布和 T-S 点聚图(见图 4)的逐月变化的对比,可以看出对马海峡断面处的温盐变化可以影响日本海断面上水体的温盐变化。夏季(8月),对马海峡断面处的水团组成较为丰富和复杂,对马海峡表层被低盐水占据,此时虽然日本海断面表层盐度也降低,但是直到 9、10 月才将至最低;而夏秋季节,对马海峡 30 m 以深和日本海断面的次表层均为高盐水,T-S 点聚图上可以看出这两个水团性质一致;此外,日本海断面水深在 500 m 以深的水层常年被局地以低温高密为特点的固有水所占据,此水团的特征盐度约为 34.07^[19]。根据前人研究,对马暖流经东部通道海流的平均流速为 26 cm/s^[20],依据此流速计算,水体从对马海峡断面输运到日本海断面需要的时间为 39.4 d。水体流经两个断面的时间间隔大约为 1~2 个月。因此,本研究认为对马海峡断面 8 月的水团组成将影响日本海断面 9—10 月的温盐分布。由于日本海断面 10 月份数据连续性较好,因此本研究运用浓度混合分析的方法,分析了 8 月对马海峡处的水团组成对 10 月日本海断面温盐分布的影响。

本研究选的四个水团包括夏季对马海峡表层水(见图 7:A 点)、夏季对马海峡次表层水(见图 7:B 点)、对马海峡高盐水(见图 7:C 点)和日本海断面深层固有水(见图 7:D 点),并且根据 8 月对马海峡断面和 10 月日本海断面两个断面的 T-S 点聚图,确定了四个水团的核心温盐值(见图 7)。A 点温度为 26.7 °C、盐度为 31.90,温度较高,盐度较低,为夏季对马海峡表层高温低盐水的核心温盐值;C 点温度为 15.2 °C、盐度为 34.56,主要代表对马海峡高盐水;B 点是夏季对马海峡次表层水团的核心温盐点,是由夏季对马海峡表层低盐水与高盐水混合形成的,温度为 23.5 °C,盐度为

33.65; D点温度为 0.05 °C, 盐度为 34.07, 代表日本海断面处常年位于深层的低温高密的固有水团。A、B、C 三个不同水团核心温盐点均为 8 月对马海峡断面上的水团, 其在该断面上的具体位置如图 8 所示: A 位于水深 0 m, 128.98°E; B 位于水深 30 m, 129.34°E; C 位于水深 125 m, 129.06°E。将 A、B、C 三点的盐度值与对马海峡断面上其他实测点做了相关性分析并将相关性叠加得到: A、B、C 三点相关性大于 0.2 的区域共占整个断面面积的 82.7%, 因此本研究认为所选的三点特征温盐值可以代表三个特征水团。

分布图。绿色线为混合比值为 0.5 的等值线。可以看出, 日本海断面上 50 m 以浅水域主要受夏季对马海峡表层水和次表层水的共同影响, 对马海峡表层水的最大混合比为 0.36, 没有超过 0.50, 而次表层水的影响范围更大, 最大混合比可达 0.73。对马海峡高盐水主要影响日本海断面水深 50~150 m 的近岸区域 (见图 9(c)), 这主要是由于流经对马海峡东部通道的对马暖流水主要沿本州岛西海岸输运造成, 混合比最高值出现在近岸 150 m 水深处, 最大可达 0.82。日本海断面上水深 200 m 以下主要受到日本海固有水的影响, 混合比大于 0.75。

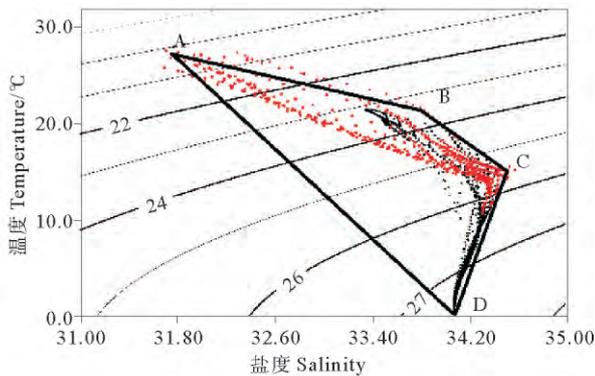


图 7 8 月对马海峡(红点)和 10 月日本海断面(黑点)的 T-S 点聚图及四个水团组成的混合四边形

Fig. 7 The T-S dots of the cores of four water masses at the Tsushima Strait Section in August (red dots) and the Japan Sea Section in October (black dots)

图 9 为计算所得的 4 个水团(夏季马海峡表层水、夏季对马海峡次表层水、对马海峡高盐水和日本海固有水)在 10 月日本海断面上多年平均混合比的

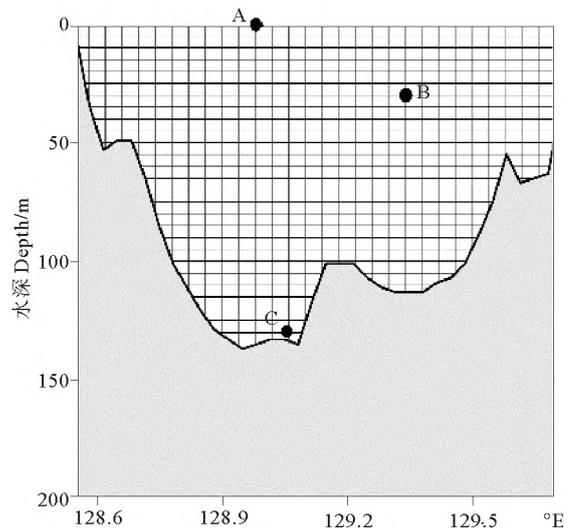
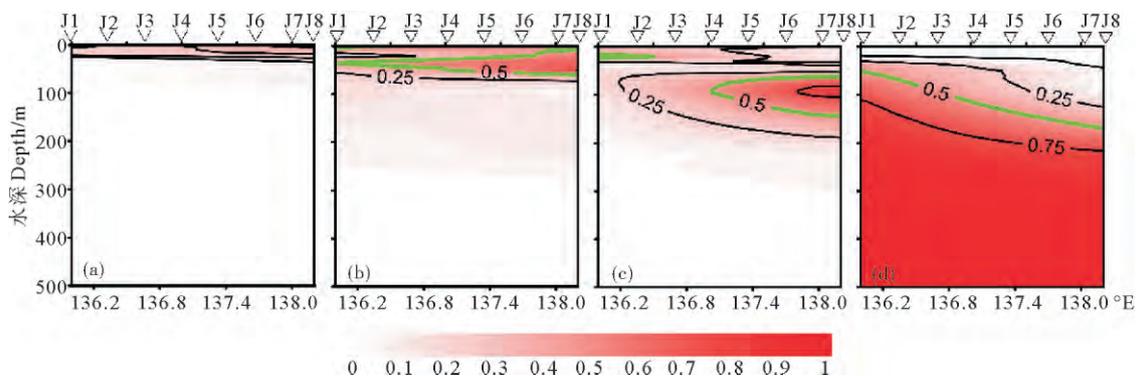


图 8 A、B、C 三个水团核心值在对马海峡断面上的位置

Fig. 8 The locations of the cores of the three water masses (A, B and C) at the Tsushima Strait Section



((a): 夏季对马海峡表层水; (b): 夏季对马海峡次表层水; (c): 对马海峡高盐水; (d): 日本海固有水。(a): Summer Tsushima Strait Surface water; (b): Summer Tsushima Strait subsurface water; (c): Tsushima Strait high salinity water; (d): Japan Sea local water.)

图 9 10 月日本海断面上四个水团在混合比分布图

Fig. 9 The distribution of water mixing ratios along the Japan Sea Section

2.4 对马海峡断面上的水团对日本海断面影响的年际变化

图 10 为 1994—2000 年 10 月日本海断面上盐度分布图。可以看出,各年该断面盐度分布的基本特征一致,均由表层低盐水、次层高盐水和深层水组成,但三部分水的盐度值和分布范围存在明显的年际变化。1994 和 2000 年,表层低盐水的盐度值较低,扩展范围较为广泛,占据了整个断面的 30 m 以浅水域;而 1996 年,该低盐水的扩展范围较小,断面西侧 J1、J2、J3 三个

站位没有明显的低盐水存在。次表层高盐水的年际变化特征与表层低盐水并不一致,1995 和 1998 年次表层高盐水在断面上占据的水平垂直范围均较为广泛,而 1997 年次表层高盐水则较弱。根据图 10 中分析可知,10 月日本海断面的温盐分布受到夏季对马海峡断面处水体的影响,因此推测,10 月日本海断面水团强弱的年际变化也应决定于夏季对马海峡处水团分布的年际变化。

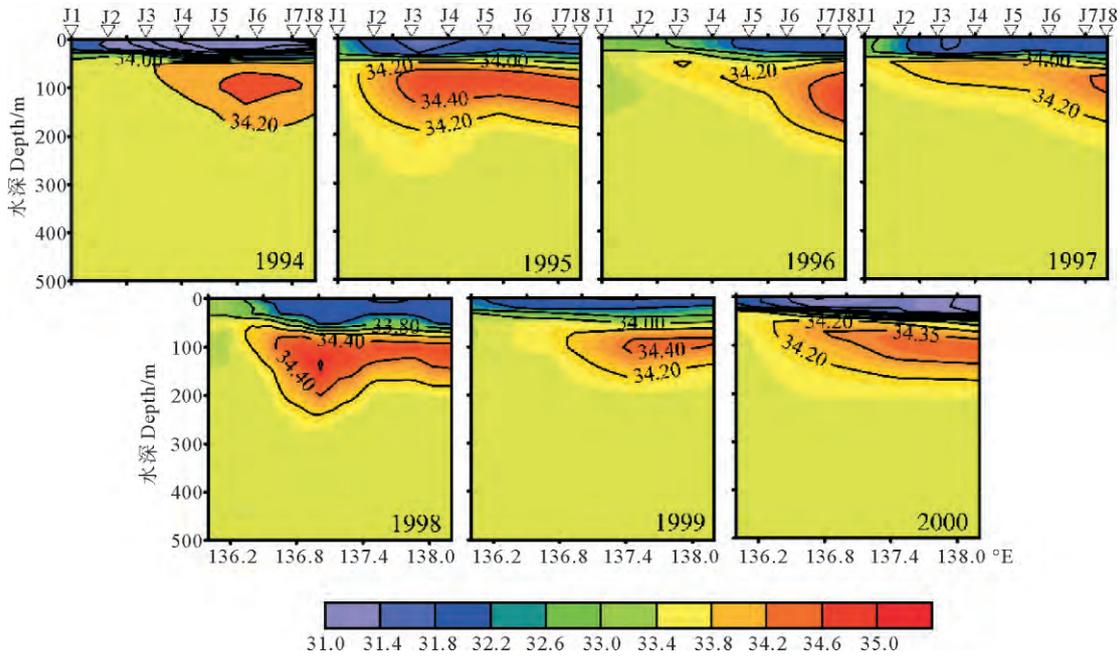
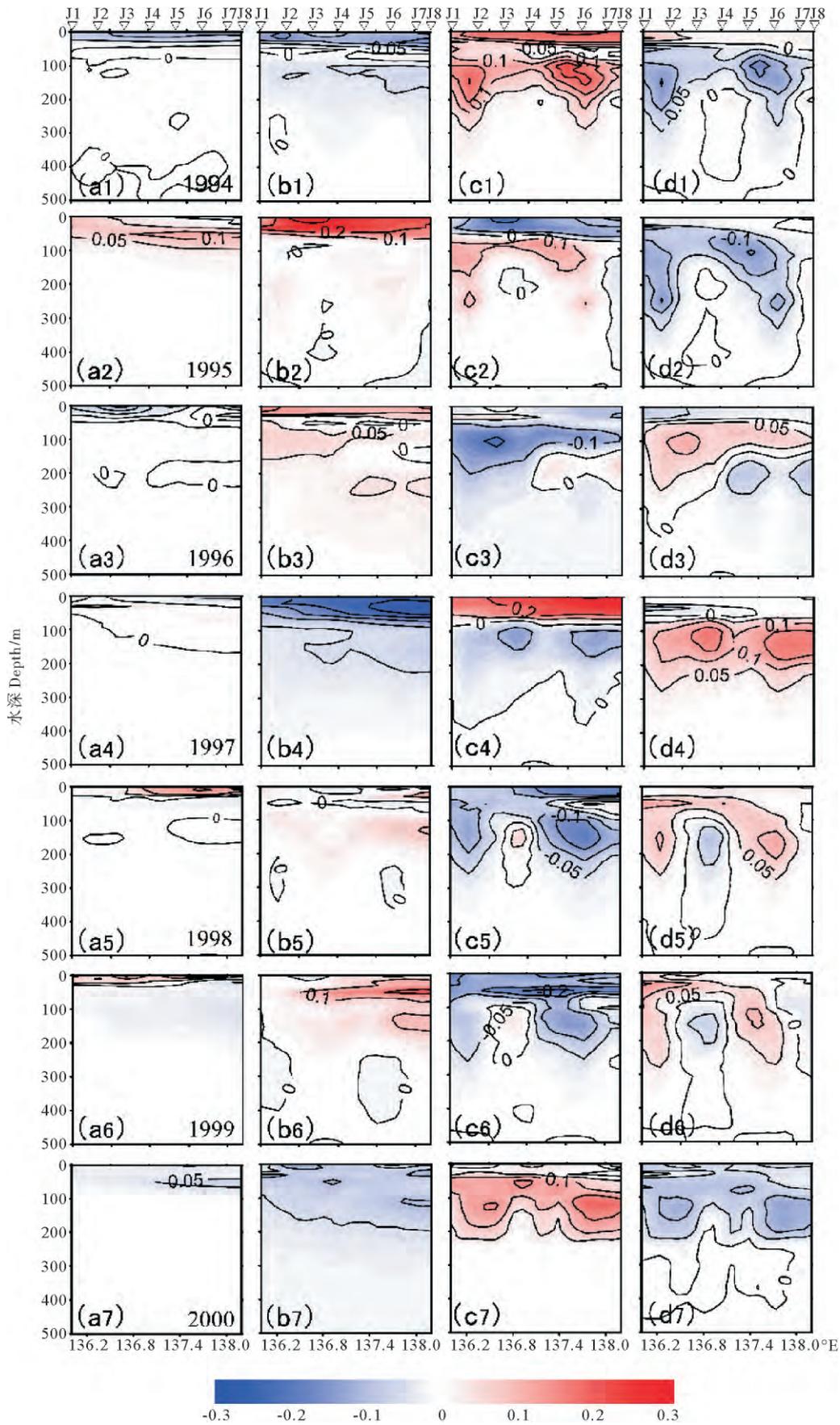


图 10 日本海断面上 1994—2000 年 10 月份的盐度分布图

Fig. 10 Vertical distributions of salinity along the Japan Sea Section in October from 1994 to 2000

本研究基于观测,首先统计了 1994—2000 年 8 月对马海峡断面处表层、次表层和深层水温盐值的年际变化,即各年 A、B、C 三个水团的核心温盐值。日本海深层固有水的核心温盐值(即 D 点的温盐值)年际变化不大,设为定值(0.05 °C、34.07)。进而,根据 1994—2000 年 10 月日本海断面处的温盐分布情况,计算了各年 A、B、C、D 4 个水团所占的混合比的年际变化。图 11 为 1994—2000 年日本海断面上混合比与七年平均混合比之差的分布图。可以看出,夏季对马海峡表层水对日本海断面的影响存在明显的年际变化(见图 11:a1~a7),在 1995 和 1998 年较强,分别比多年平均值高出 0.14 和 0.15;1994、2000 年影响较弱,分别低于多年平均值 0.12 和 0.07。夏季对马海峡次表层水对日本海断面的影响在 1995、1996、1998 和 1999 这 4 年较强,1995 年影响最强,50 m 以浅水层混合比高出多年平均值 0.18,1998、1999 年混合比在日本海断面东侧(J3~J8)较强,最高值分别出现在近岸 30 和 50 m 处,分别高于

多年平均值 0.12 和 0.26;1994、1997 和 2000 年影响较弱,1997 年为 7 年之中影响最弱的年份,低于多年平均值 0.28。对马海峡高盐水对日本海断面影响的年际变化主要体现在 200 m 以浅水层,其中 1994 年高盐水影响较强,1994 年日本海断面 30 m 以浅水层混合比高于年平均混合比 0.15,影响最大的点在位于 J6 站点水深 100 m 处,高于多年平均值 0.24;1996、1997、1998 和 1999 这四年,高盐水的影响较弱,200 m 以浅水层混合比均低于多年平均值;1995、1997 年这两年则是表层和次表层影响呈现一强一弱的相反的变化趋势,其中 1995 年 50 m 以浅水层混合比较低,低于多年平均值 0.15,而次表层高于多年平均值 0.15,1997 年变化趋势则与 1995 年相反。日本海断面固有水在断面上 200 m 以深属于的混合比年际变化不显著,主要由于此水层常年只被日本海固有水占据;而在 200 m 以浅该水团的混合比水域年际变化显著,其中 1994、1995 和 2000 年混合比较弱,最低值分别低于多年平均混合



((a)夏季对马海峡表层水;(b)夏季对马海峡次表层水;(c)对马海峡高盐水;(d)日本海固有水。(a)Summer Tsushima Strait surface water; (b) Summer Tsushima Strait subsurface water; (c)Tsushima Strait high salinity water; (d)Japan Sea local water.)

图 11 1994—2000 年日本海断面上混合比与 7 年平均混合比之差的分布图

Fig. 11 The differences between every years' and climatological averaged mixing ratios from 1997 to 2000

比 0.17、0.16 和 0.13, 而 1996、1997 和 1999 年日本海固有水混合比较大, 其中 1997 年最高, 出现在 100~200 m 水深处, 最高高于年平均值 0.19。

通过对比 4 个水团在日本海断面混合比的年际变化可以发现, 夏季对马海峡表层水和次表层水对日本海断面的混合比的影响的年际变化趋势基本一致, 共同体现了对马海峡处低盐水在日本海断面的影响。对马海峡高盐水和日本海固有水在日本海断面上混合比的年际变化则呈现相反的趋势, 当对马海峡高盐水的影响较强时, 日本海固有水影响就较弱, 反之亦然。

3 讨论

3.1 对马海峡表层水在日本海断面上混合比年际变化的原因分析

Senju 等发现长江冲淡水排放量与对马海峡处盐度的变化具有相关性, 证实了对马海峡上层低盐水是受长江冲淡水的影响^[21]。因此, 长江冲淡水水量的年际变化会影响对马海峡断面处低盐水的强度和扩展范围。由于流经对马海峡东部通道的水体作为对马暖流的第一分支沿日本本州岛西海岸运输^[22], 则日本海断面处表层盐度的年际变化将会受到长江冲淡水流量的影响。

本研究将 1994—2000 年夏季对马海峡表层水在日本海断面上 30 m 以浅水层上的平均混合比的年际变化与长江大通站 8 月的径流量进行比较 (见图 12),

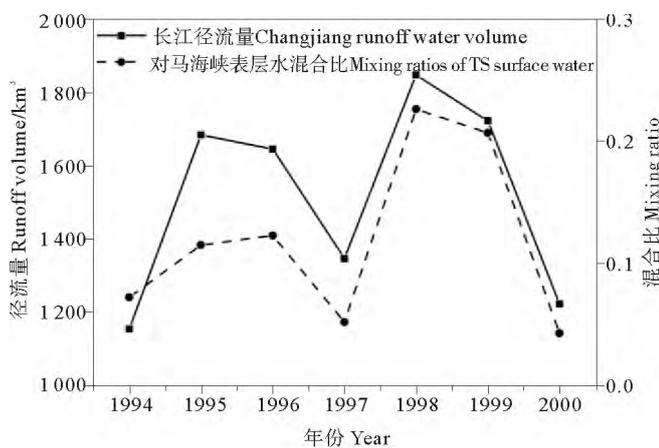


图 12 8 月大通站长江冲淡水径流量 (实线) 与夏季对马海峡表层水在日本海断面上混合比 (虚线) 的年际变化

Fig. 12 The inter-annual variations of the runoff of the Changjiang River at Datong station (full line) and the mixing ratios of the summer Tsushima Strait water (dotted line) in the upper water layer along the Japan Sea Section

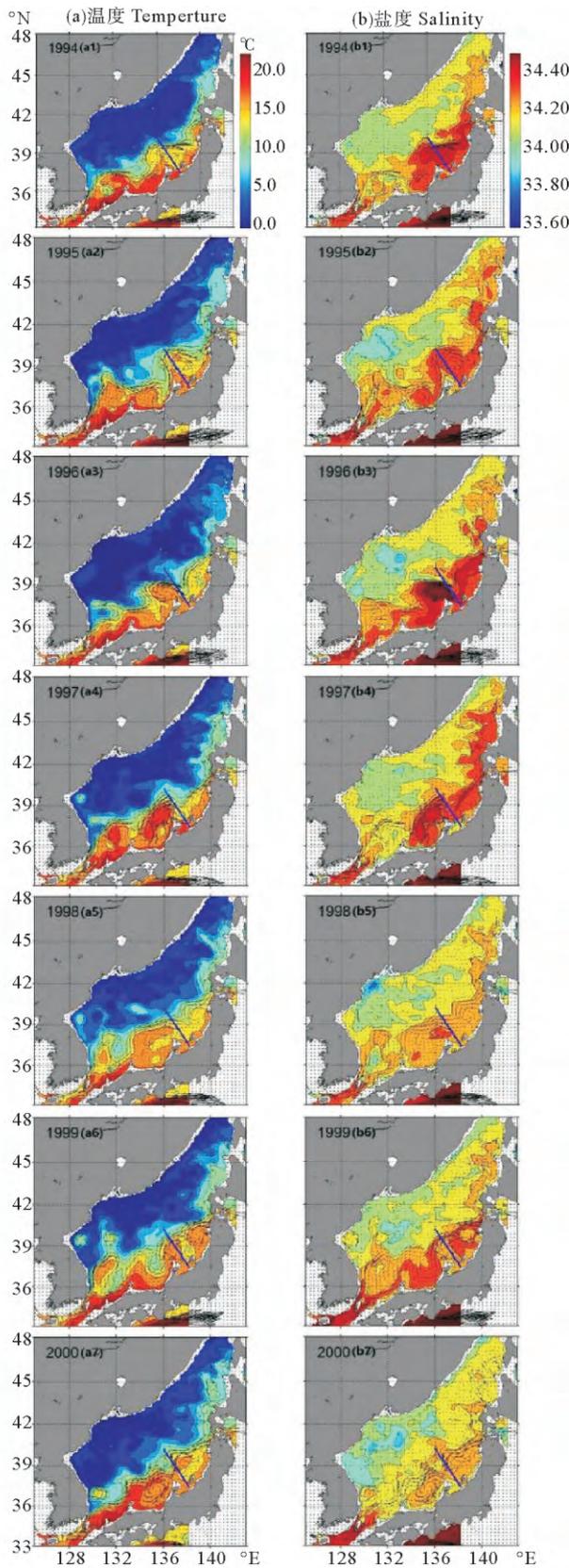
可以看出二者存在显著的正相关关系, 相关系数可达 0.88。长江流量较小的年份, 如 1997 和 2000 年, 对马海峡表层水核心盐度值较高, 分别为 31.91 和 31.89, 而对马海峡表层水在日本海断面上的混合比也为 7 年的最低值, 混合比大小仅为 0.052 和 0.043。1995 和 1998 年为长江流量较大的年份, 文献记载此两年长江均发生特大洪水^[23-24]。受此影响, 对马海峡断面表层水的核心盐度值较低, 分别为 31.39 和 31.27, 其在日本海断面上的混合比也较常年有所增大, 其中 1998 年混合比未 7 年最高, 30 m 以浅的平均混合比可达到 0.227。

3.2 夏季对马海峡高盐水在日本海断面上混合比年际变化的原因分析

图 13 为 1994—2000 年 10 月份的日本海 100 m 水深处的流场分布图, 可以看出, 日本海东海岸处存在多个顺时针环流。Sasajima 等指出, 日本海东海岸处此类涡旋是由于斜压不稳定造成的, 是局地产生的涡旋^[25]。此类顺指针涡旋可以引起该层海水产生辐聚下沉, 将该层海水带到更深层^[26]。1994、1995、1999 和 2000 年正好有此顺时针涡旋位于在本研究的日本海断面上; 1996 和 1997 年该涡旋位置较上述四年偏西南, 位于日本海断面西南侧, 未跨越日本海断面; 1998 年日本海断面附近则无明显顺时针涡旋的存在。

1994、1995 和 2000 年 10 月, 该顺时针涡旋处水体的温度、盐度均高于周围海域。由于顺时针的涡旋使海水产生辐聚下沉, 因此位于日本海断面处的顺时针涡旋会引起次表层高温、高盐水向下扩展, 进而高盐水团在日本海断面上 100~200 m 水层的混合比高于多年混合比平均值 (见图 11)。而 1999 年日本海断面处虽然也存在顺时针涡旋, 但从 100 m 层温盐分布可以看出, 断面处盐度低于周围水体, 主要是由于次表层高盐水较弱 (见图 10) 导致, 因此该年虽然有辐聚现象, 但不能使高盐水体在断面上的影响范围扩大, 故高盐水在 100~200 m 水层的混合比低于多年混合比平均值。1996、1997 和 1998 年, 日本海断面处并无顺时针涡旋存在, 因此未产生海水辐聚下沉, 高盐水在 100~200 m 水层的混合比也低于多年混合比平均值。

综上所述可以看出日本海断面处的顺时针涡旋造成的海水辐聚下沉使日本海断面次表层高盐水体向下扩展, 混合比高于其他年份, 同时会将其下的日本海固有水限制在较低的水层, 使日本海固有水在 100~200 m 水层的混合比低于其他年份。



(其中蓝色实线为断面 2。The blue line represents the section 2.)

图 13 日本海断面 1994—2000 年 10 月份水深为 100 m 处的流场图

Fig. 13 The flow fields in the Japan Sea at the depth of 100 m in October from 1994 to 2000

4 结语

通过对 WOD13 数据连续性的对马海峡断面和日本海断面的温度、盐度观测数据的分析发现, 季节上看, 秋季日本海断面上温盐分布受到夏季对马海峡断面上水团分布的影响。对马海峡表层和次表层低盐水使得秋季日本海断面上 50 m 以浅出现低盐水; 对马海峡底层高盐水主要影响日本海断面 50~150 m 水层, 其水团混合比可达 0.82 以上; 其下是日本海固有水。年际上看, 长江流量较大的年份, 夏季对马海峡表层和次表层低盐水的核心盐度值偏低, 则秋季在日本海断面上的混合比就高于其他年份; 对马海峡底层高盐水在日本海断面上混合比的年际变化则决定于其影响水层上的流场结构和温盐分布, 断面上出现顺时针涡旋和高盐水, 则海水辐聚下沉使对马海峡高盐水影响范围和强度增大, 其混合比也高于其他年份。

本文对对马海峡断面与日本海断面的温盐季节分布特征进行分析, 同时对对马海峡处不同水团对日本海影响的季节和年际变化进行了定量分析, 在前人的研究基础上更进了一步。在此研究的基础上, 接下来将对东中国海的营养盐、有机物等对日本海的影响进行定量分析与评价, 更加深入的探讨东中国海与黑潮的双向运输对日本海域的影响, 为进一步研究开阔大洋与边缘海之间的相互作用打下基础。

参考文献:

[1] Nitani H. Beginning of the Kuroshio[M]. Todyo: University of Todyo Press, 1972: 129-163.

[2] Lie H J, Cho C H, Lee J H, et al. Separation of the Kuroshio water and its penetration onto the continental shelf west of Kyushu [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1998, 103(C2): 2963-2976.

[3] Ichikawa H, Beardsley R C. The current system in the Yellow Sea and East ChinaSea[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58: 77-92.

[4] Guo X Y, Miyazawa Y, Yamagata T. The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: The origin of the Tsushima Warm Current[J]. Journal of Physical Oceanography, 2006, 36(12): 2205-2231.

[5] Chen C T A, Wang S L. Carbon, alkalinity and nutrient budgets on the East China Sea continental shelf[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1999, 104(C9): 20675-20686.

[6] Zhang J, Liu S M, Ren J L, et al. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf[J]. Progress in Oceanography, 2007, 74(4): 449-478.

[7] Zhao L, Guo X Y. Influence of cross-shelf water transport on nutrients and phytoplankton in the East China Sea: A model study [J]. Ocean Science, 2011, 7: 27-43.

[8] Isobe A, Ando M, Watanabe T, et al. Freshwater and tempera-

- ture transports through the Tsushima-Korea Straits[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C7): 3065. doi: 10.1029/2000JC000702.
- [9] Nof D. China's development could lead to bottom water formation in the Japan/East Sea[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(4): 609-618.
- [10] Chang P H, Isobe A. A numerical study on the Changjiang diluted water in the Yellow and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C9): 1-17.
- [11] Kim K, Kim K R, Min D H, et al. Warming and structural changes in the east (Japan) Sea: A clue to future changes in global oceans? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(17): 3293-3296.
- [12] Hirose N, Takayama K, Moon J H, et al. Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas[J]. *Umi to Sora(Sea and Sky)*, 2013, 89: 43-51.
- [13] Jacobsen J P. Eine graphische methode zur bestimmung des vermischungs-koeffizienten in meere[J]. *Gerlands Beitrage Geophysik*, 1927, 16: 404-412.
- [14] Miller A R. A study of mixing processes over the edge of the continental shelf[J]. *Journal of Marine Research*, 1950, 9(2): 145-160.
- [15] 毛汉礼, 任允武, 万国铭. 应用 T-S 关系定量地分析浅海水团的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1964, 6(1): 1-22.
Mao H L, Ren Y W, Wan G M. Quantitative analysis of water masses in shallow water with T-S relationship[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1964, 6(1): 145-160.
- [16] Chen C T A, Ruo R, Paid S C, et al. Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan[J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(1): 19-39.
- [17] 田天, 魏皓. 南海北部及巴士海峡附近的水团分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2005, 35(1): 9-12.
Tian T, Wei H. Analysis of water masses in the northern South China Sea and the Bashi Channel[J]. *Periodical of Ocean University*, 2005, 35(1): 9-12.
- [18] 任惠茹, 康建成, 李卫江, 等. 东海黑潮表层盐度分布特征及其影响因素[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(5): 55-61.
Ren H R, Kang J C, Li W J, et al. Kuroshio in the East China Sea surface salinity distribution characteristics and influencing factors[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(5): 55-61.
- [19] Yoshikawa Y, Awaji T, Akitomo K. Formation and circulation processes of intermediate water in the Japan Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(8): 1701-1722.
- [20] Takikawa T, Yoon J H, Cho K D. The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from ferryboat ADCP data [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(6): 1154-1168.
- [21] Senjyu T, Enomoto H, Matsuno T, et al. Interannual salinity variations in the Tsushima Strait and its relation to the Changjiang discharge[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(5): 681-692.
- [22] Hase H, Yoon J H, Koterayama W. The current structure of the Tsushima Warm Current along the Japanese Coast[J]. *Journal of Oceanography*, 1999, 55(2): 217-235.
- [23] 吴群英, 冯铁忱. 1995 年洪水长江中下游地区洪涝灾情[J]. *人民长江*, 1996(4): 48-49.
Wu Y Q, Feng T C. 1995 flood in middle and lower reaches of the Yangtze River flood disaster[J]. *Yangtze River*, 1996(4): 48-49.
- [24] Sasajima Y I, Nakada S, Hirose N, et al. Structure of the subsurface counter current beneath the Tsushima warm current simulated by an ocean general circulation model[J]. *Journal of Oceanography*, 2007, 63(6): 913-926.
- [25] Hwang C, Chen S A. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(C10): 23943-23965.

The Seasonal and Inter-Annual Variations of the Influences of the Water Masses Structures Along the Tsushima Strait Section on the Temperature and Salinity Distributions Along the Japan Sea Section

ZHU Meng-Qi¹, SHI Jie^{1, 2}, GUO Xin-Yu^{1, 3}, GAO Hui-Wang^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, Matsuyama 7908577, Japan)

Abstract: Based on the observed water temperatures and salinities along the Tsushima Strait Section and the Japan Sea Section from WOD13 (World Ocean Database 2013), the seasonal and interannual variations of the influences of the water masses structures along the Tsushima Strait Section on the temperature and salinity distributions along the Japan Sea Section were analyzed. The water masses structures along the Tsushima Strait Section showed obvious seasonal variations. In winter, the whole water column was occupied by the high-salinity water. In summer, the surface water at Tsushima Strait Section was characterized by high temperature and low salinity; the deeper water was of high salinity and the subsurface water was the mixture of the surface water and the deeper water. Compared the seasonal variations of temperatures and salinities along the two sections, it was suggested that the distributions of temperature and salinity at the Japan Sea Section were influenced by the structures of water masses at the Tsushima Strait Section. At the Japan Sea Section, the distributions of temperature and salinity in autumn were most complicated. The surface water was of low salinity, which was influenced by the Tsushima Strait Surface and Subsurface water. The Japan Sea Subsurface water was of high salinity, which was determined by the Tsushima Strait Deeper Water. The deeper water was of low temperature and high density, which was named as the Japan Sea Local Water. The water masses composition along the Tsushima Strait Section caused the inter-annual variations of the temperature and salinity distribution along the Japan Sea Section. The larger Changjiang runoff made the core salinity of summer Tsushima Strait Surface and Subsurface water lower, and therefore the mixing ratios was higher. The mixing ratios of the Tsushima Strait high salinity water to the Japan Sea Section was determined by the current structure and the temperature and salinity distribution in the subsurface layer.

Key words: Tsushima Strait; Japan Sea; water masses mixing; seasonal variation; inter-annual variation

责任编辑 庞 旻