



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20140159

济州岛西南海域水团组成的周年变化

张 帅, 王玉衡, 徐霏霏
(天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

摘 要: 济州岛西南海域被认为是多种水团的“集散区”, 水团分析有助于理解当地的水文特征以及海洋渔业资源的分布和变动. 基于欧洲海洋核心模型(NEMO), 利用浓度混合分析方法, 定量地给出了该海域各水团混合比例的空间分布以及体积分数, 其水团空间组成的周年变化: 1—4月2个水团, 东西两侧分别为黑潮上层水和东海陆架混合水, 黑潮上层水占有明显优势, 体积始终在50%以上; 5—7月4个水团, 西侧表层为东海表层水, 底层为东海底层冷水, 东侧表层为黑潮表层水, 底层为黑潮次表层水, 黑潮次表层水占优势, 体积一直在45%左右; 8—12月3个水团, 东海底层冷水消失, 其余3个继续存在, 黑潮表层水占优势, 体积基本都在50%以上, 黑潮次表层水主导底层, 势力8月最强, 以后逐月变弱.

关键词: 水团; 混合比例; 济州岛; 周年变化

中图分类号: P76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2015)06-0044-08

Annual Variation of Water Mass Distribution in the Southwestern Sea of Cheju Island

ZHANG Shuai, WANG Yuheng, XU Peipei

(College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The southwestern sea of Cheju Island is influenced by many different water masses. Water mass analysis can help to understand local hydrological characteristics and fishery resources. Based on the simulation of Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO) and the multi-concentration mixing proportion scheme, the spatial distribution and the mixing ratio of different water masses in this area, along with their volume percentage and annual variation were quantitatively defined. From January to April, two water masses dominated: Shelf mixed water of the East China Sea (EM) and Kuroshio water of the East China Sea (KE), and the latter showed dominant position, as its volume percentage was always above 50%. From May to July, four water masses existed, including Surface water of the East China Sea (ES), Bottom cold water of the East China Sea (BCW), Kuroshio surface water (KES), and Kuroshio subsurface water (KEB), while the last kind dominated the area with its volume percentage around 45%. From August to December, BCW disappeared, and the other three water masses still existed. During this period, KES was the dominant water mass with its volume percentage mostly above 50%, but KEB dominated the bottom with its power reaching the peak in August, and becoming weaker and weaker in the following months.

Key words: water mass; mixing proportion; Cheju Island; annual variation

在浅海区, 海洋水团是指理化性质相近、占据一定空间并且具有规律性的季节变化的水体^[1]. 而所谓水团分析, 主要就是指水团边界的划分, 确定水团的基本特征以及分析水团形成、变化及相互作用的规

律^[2]. 水团分析不仅有助于理解当地水文特征, 而且在海洋渔业方面也有重要意义, 这是因为水团的分布和变动会对海洋渔业资源的分布和生长有重要影响^[2-4].

收稿日期: 2014-12-07; 修回日期: 2015-01-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973计划”资助项目(2011CB403606)

作者简介: 张 帅(1989—), 男, 河南开封人, 硕士研究生; 通信作者: 王玉衡, 讲师, yuheng.w@tust.edu.cn.

数字出版日期: 2015-07-31; 数字出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20150731.1008.004.html>.

毛汉礼等^[5]利用浓度混合法定量分析了南黄海和东海北部夏季的水团组成, 认为主要由大陆沿岸水、黄海夏季深层冷水、黑潮表层水 (Kuroshio surface water, KES)、黑潮次表层水 (Kuroshio subsurface water, KEB) 等 4 个彼此接触相互混合的水团组成; 喻祖祥等^[2]在明确了水团变性的概念后, 通过逐步检验聚类法发现长江口及济州岛附近海域周年内存在着 4 个大洋水团, 6 个变性水团; 苏育嵩等^[6]使用温盐深测量仪 (CTD) 获取的资料分析了底层的水团分布, 得出春夏季出现的东海东北部区域的底层冷水是冬季离岸南下的黄海低温水和外海高盐水相互混合得到的; Hur 等^[7]基于 40 年平均的观测数据, 利用聚类分析法, 发现黄东海主要由黑潮水、黄海表层水、黄海底层水、混合水、沿岸水等组成, 并且它们有明显的月际变化; 朱文武^[8]利用三维可视化技术, 从水团相互作用的角度, 以频率分割法确定边界, 主要分析了边界的变化, 研究发现 100 m 以浅的黑潮水和陆架水边界在台湾东北海域和九州西南海域凸向陆架程度相对较大。

济州岛西南海域, 横跨黄东海, 毗邻日本海, 为陆架浅海区域, 属于东亚季风气候, 该区域受到陆地和气象条件的影响显著; 并且此研究区域是黑潮、台湾暖流、黄海暖流、黄海沿岸流、长江冲淡水以及黄海冷水团的综合作用区域, 有着明显的时空变化, 对这样的区域进行水团划分, 研究水团的组成有着现实而重要的意义。而以往的水团研究多是定性的水团分析, 本文利用 Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO) 数值模型模拟的温度、盐度结果, 通过浓度混合分析法, 定量研究了济州岛西南海域的水团组成的周年变化。

1 数据和方法

1.1 浓度混合分析方法

黄东海地形图 (矩形框内为研究区域) 如图 1 所示。研究区一方面受大陆沿岸冲淡水影响, 另一方面受黑潮表层水的楔入、次表层水的涌升, 导致该区域水文状况复杂^[9]、 $T-S$ 点聚图散乱, 聚类分析等方法难以取得理想效果^[4], 应用浓度混合分析方法能更好地看出水团的扩展和混合情况, 了解水团的范围和变化。

Jacobsen^[10]首次用 $T-S$ 点聚图来研究 2 个水团的混合问题, 得出了著名的 2 水团混合的线性反比关系, 开创了用 $T-S$ 图解定量分析水团的先河 (图

2(a)); Штокман^[11]利用线性反比理论, 研究了 3 个温度、盐度各自均匀的水团之间的相互混合, 即混合三角形 (图 2(b)); Miller^[12]基于线性反比理论, 在 $T-S$ 点聚图上作混合四边形, 将四边形的每条边 4 等分, 然后顺序连接对边上的等分点, 以此获取混合比例; 毛汉礼等^[5]对 4 水团混合比例的计算提出了几何解法, 方法独特, 只可惜计算量较大, 而且仅适用于温度、盐度差别较大的水团, Chen 等^[13]、田天等^[14]分别利用此方法对 PN 断面、南海北部进行了水团分析; 徐斯等给出的混合四边形诺模图^[15] (图 2(c)), 计算较为简单。

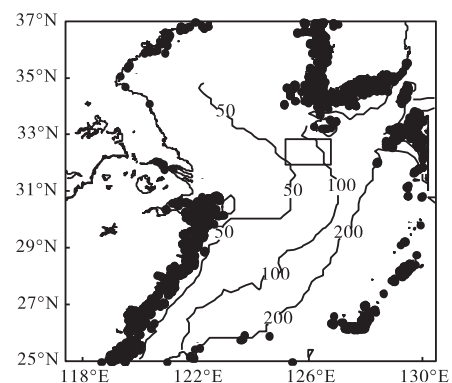


图 1 黄东海地形图 (矩形框内为研究区域)

Fig. 1 Geography of the Yellow Sea and the East China Sea (the study area is within the rectangle)

两个水团混合比例的计算公式为

$$P = \frac{l_2}{l} m_1 + \frac{l_1}{l} m_2 \quad (1)$$

式中: $m_1 m_2$ 是 $T-S$ 点聚图上确定的一条线段, 长度为 l ; P 为线段上的任意一点, 它到 m_1 的距离为 l_1 , 到 m_2 的距离为 l_2 , l_2/l 为 P 所含的 m_1 的成分, 以下的形式同理。

3 个水团混合比例的计算公式为

$$P = \frac{l_2}{l} m_1 + \frac{l_1}{l} m_2 + \frac{n}{n} m_3 \quad (2)$$

其中: $\Delta m_1 m_2 m_3$ 是 $T-S$ 点聚图上确定的三角形; P 为三角形内任意一点; l 为 $m_1 m_2$ 的长度, n 为 $m_1 m_3$ 的长度。

4 个水团混合比例采用徐斯的诺模图, 把四边形的每条边 10 等分, 根据点所在的方格来确定混合比例 (图 2(c))。

浓度混合法水团个数和核心值的确定原则: 互临水团混合, 在 $T-S$ 点聚图上呈现为多边形, 混合多边形的角数就是参与混合的水团的个数, 顶点 (或平均极值点) 就是对应的水团的核心温盐值^[15]。

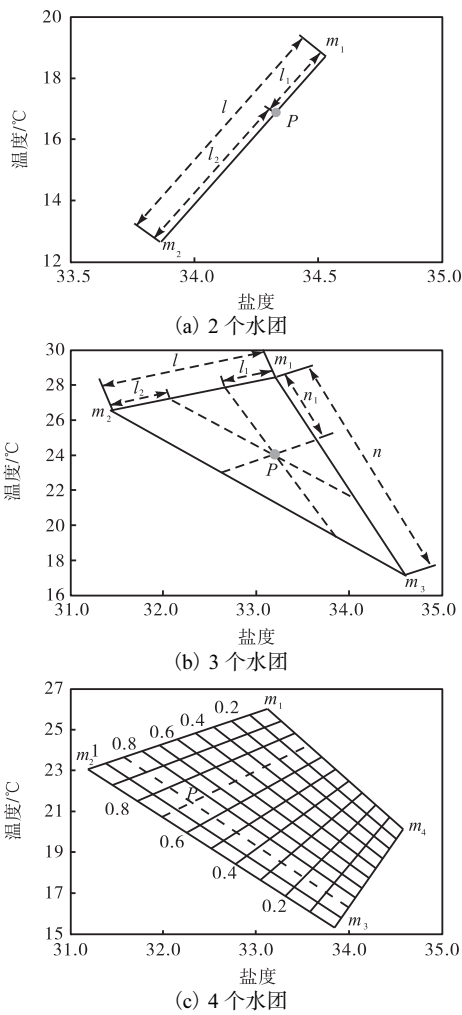


图2 水团互混原理图

Fig. 2 Water masses mixing with one another

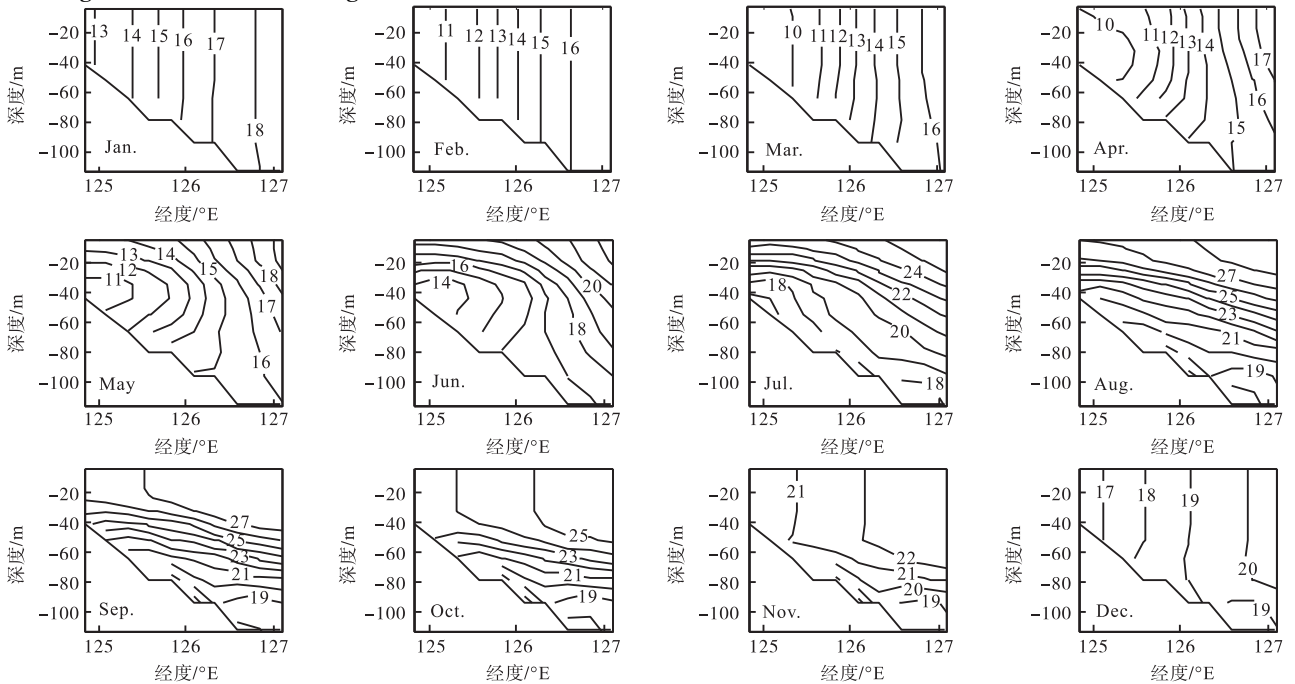


图3 32.2°N断面多年(1958—2007年)平均温度

Fig. 3 Climatological averaged temperature (1958-2007) at 32.2°N

1.2 NEMO模型模拟结果处理

NEMO模型是全球海洋模型,该模型在西北太平洋海区使用“双向嵌套”技术,将全球模式与西北太平洋模式嵌套,模拟海洋水文和水动力过程.西北太平洋海区的水平分辨率为 $1/4^\circ$,垂向分为46层,200 m以内的陆架区有14层,表层处为3 m.模型采用Common Ocean-ice Reference Experiment(CORE2)每天4次的风场和海气通量驱动,模拟了1958—2007年西北太平洋的海洋物理环境,较好地反映了黄、东环流及温度、盐度的季节、年际变化^[16-18].基于NEMO模型模拟的1958—2007年的温度、盐度数据,通过多年月平均,获得12个月气候态平均的温度、盐度数据,然后利用浓度混合分析方法,获取水团核心值表、混合比例图、体积分数表.

2 结果

根据区域所处纬度,其季节划分是1—3月为冬季,4—6月为春季,7—9月为夏季,10—12月为秋季.

2.1 32.2°N断面水文要素周年变化

模型结果在研究海区共有5条断面(32.2°N、32.4°N、32.6°N、32.8°N、33.0°N),5条断面水文要素的垂向分布相似,选取32.2°N断面作为代表进行分析.32.2°N断面多年(1958—2007年)平均温度和平均盐度曲线分别如图3、图4所示.

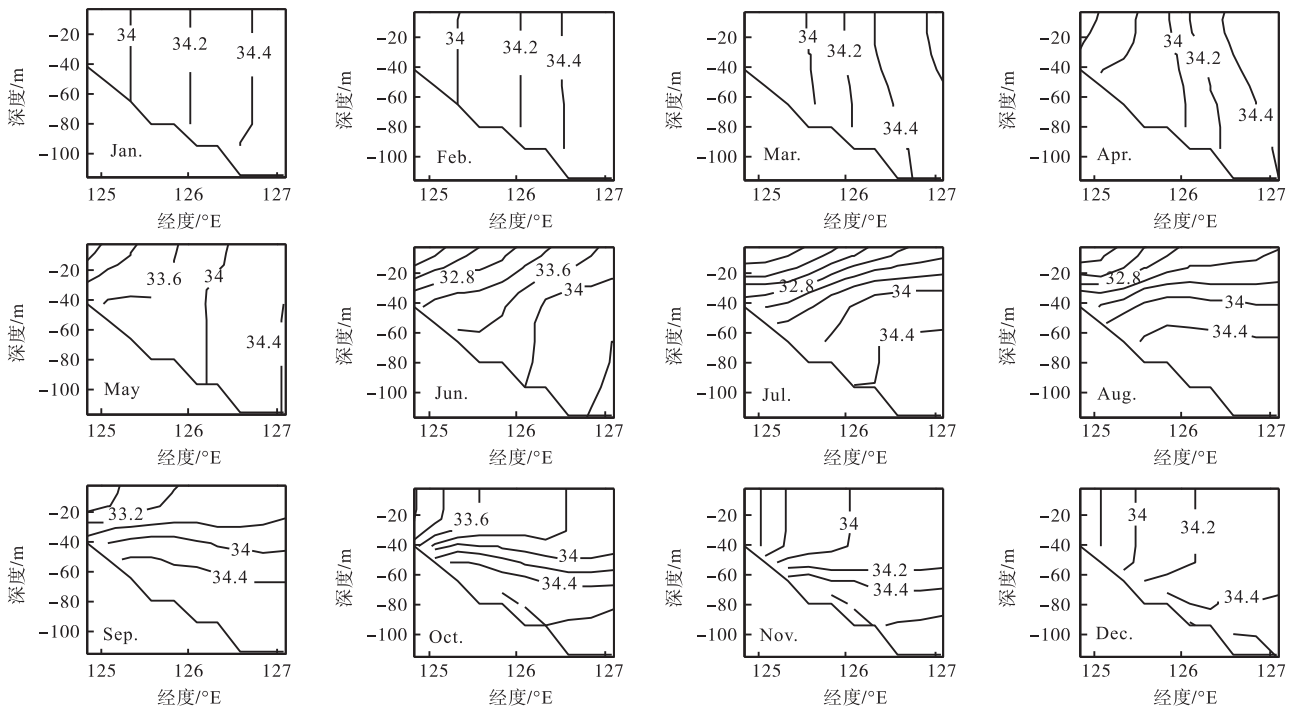


图 4 32.2°N断面多年(1958—2007年)平均盐度
Fig. 4 Average climatological salinity (1958-2007) at 32.2°N

济州岛西南海域温盐分布有明显的周年变化,不同水团在垂直方向穿插,形成了复杂的温盐结构. 冬季温盐垂直分布呈现上、下均匀一致的状态,西侧相对低温低盐,东侧相对高温高盐;4月温盐垂直均匀的分布状态被破坏,西侧低温趋向底层,最低值 9.24 °C,低盐趋向表层,最低值 33.4,东侧高温高盐在表层,分别为 17.9 °C、34.6;5—7月,西侧低温倒扣在底层,盐度水平梯度增强,7月表层出现年内盐度最小值 31.2,东侧高温在表层,高盐趋向底层;8—

9月,相同深度上,西侧温度小于东侧,8月出现温度年内最大值 28.5 °C,西侧表层为低盐中心,东侧底层为高盐中心;10—11月,垂向混合层逐月增厚,水平方向,西侧温度盐度小于东侧,垂直方向,表层温度大于底层温度,表层盐度小于底层盐度;12月,基本垂向均匀,西侧低温低盐,东侧高温高盐.

2.2 水团数量的周年变化

每个月各个水团的核心温盐值见表 1,多年平均的 T-S 点聚图如图 5 所示.

表 1 每个月各个水团的核心温盐值
Tab. 1 Monthly core temperature and salinity of water masses

水团名称	核心温度/°C											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
KE	18.7	17.3	16.9	17.9								
EM	12.7	10.2	9.1	9.6								
KES					19.5	22.5	26.0	28.4	27.9	25.5	23.0	20.6
KEB					17.6	17.3	17.8	17.1	17.4	17.1	17.5	18.3
ES					13.4	18.4	23.0	26.5	26.2	23.6	20.1	16.2
BCW					10.5	12.2	15.3					
水团名称	核心盐度											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
KE	34.5	34.6	34.6	34.6								
EM	33.9	33.9	33.8	33.5								
KES					34.3	33.8	33.1	33.2	33.6	33.9	34.2	34.4
KEB					34.4	34.5	34.6	34.6	34.7	34.7	34.7	34.7
ES					32.6	31.6	31.2	31.4	32.4	33.2	33.4	33.6
BCW					33.6	33.5	33.8					

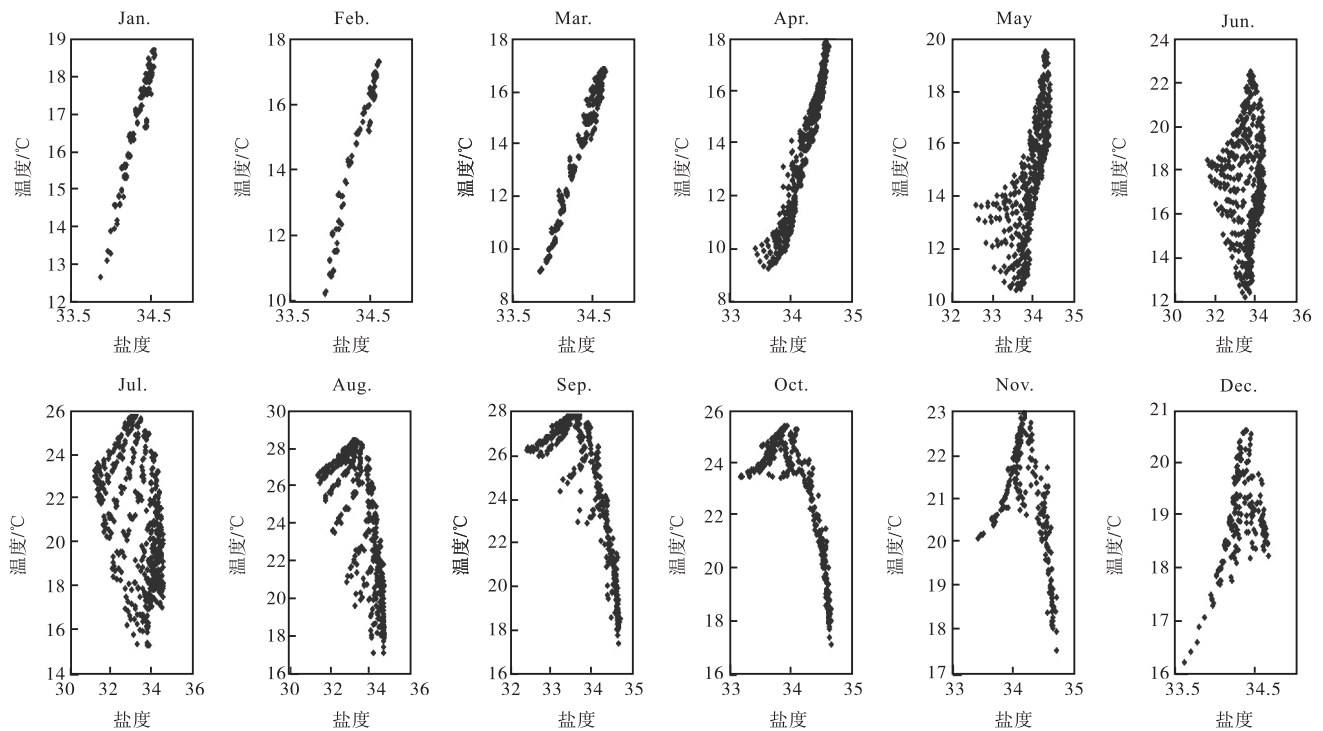


图5 多年(1958—2007年)平均的每个月的 T-S 点聚图
 Fig. 5 Monthly T-S diagrams of the climatological averaged temperature and salinity (1958-2007)

从图 5 可以看出 T-S 点聚图有着明显的形状变化:1—3 月为明显的线性,4 月为准线性分布,同属于 2 个水团混合的线性模型;5—7 月呈现为四边形,属于 4 个水团混合;8—12 月呈现为三角形,属于 3 个水团混合。

根据济州岛附近的水文特征和水团分析^[19-20],结合水团核心温度、盐度值(表 1)和 T-S 点聚图(图 5),发现 1—4 月的低温低盐水为东海陆架混合水(Shelf mixed water of the East China Sea, EM),高温高盐水为黑潮上层水(Kuroshio water of the East China Sea, KE);5—7 月低盐的表层水为东海表层水(Surface water of the East China Sea, ES),低温的底层水为东海底层冷水(Bottom cold water of the East China Sea, BCW),高温的表层水为黑潮表层水,高盐的底层水为黑潮次表层水;8—12 月的低盐水为东海表层水,高温次高盐的表层水为黑潮表层水,高盐的底层水为黑潮次表层水。

2.3 水团组成空间分布的周年变化

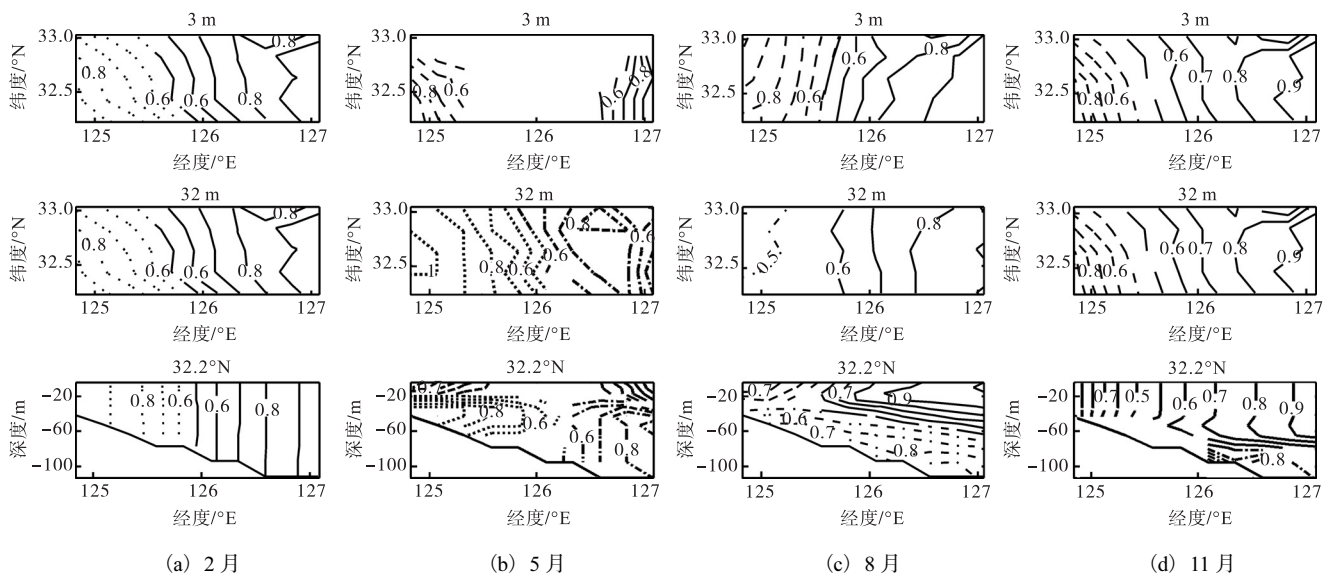
根据前面提到的方法计算了各月水团的混合比例以及各月各水团的体积分数(表 2),以 50% (0.5) 等混合比例作为水团的边界,选取可代表水团体积变化的 3 m、32 m 层和断面(32.2°N)进行分析,由于 12 个月图较多,选择 2、5、8、11 月等混合比例图代表周

年进行分析(图 6)。

1—4 月水团组成的基本空间格局:低温低盐的东海陆架混合水占据西侧,高温高盐的黑潮上层水占据东侧(图 6(a))。东北季风的作用下,水文要素垂向均匀,所以冬季水团等值线垂直分布,初春开始的增温降盐导致水团等值线垂向均匀状态被破坏。陆架混合水冬至初春逐月东扩,体积分数逐月增加,从 26% 逐渐增加到 42% (表 2)。因为冬至初春的 2 个水团的关系是此消彼长,所以黑潮上层水的变化与东海陆架混合水的变化相反。

表 2 每个月各个水团的体积分数
 Tab. 2 Monthly volume percent of water masses

月份	体积分数/%					
	KE	EM	KES	KEB	ES	BCW
1月	74	26				
2月	70	30				
3月	63	37				
4月	58	42				
5月			4	48	3	30
6月			11	45	5	21
7月			14	47	11	20
8月			35	54	8	
9月			51	40	7	
10月			58	31	10	
11月			62	22	11	
12月			48	17	14	



2月, 点线为东海陆架混合水, 实线为黑潮上层水; 5月, 虚线为东海表层水, 点线为东海底层冷水, 实线为黑潮表层水, 点划线为黑潮次表层水; 8、11月, 虚线为东海表层水, 实线为黑潮表层水, 点划线为黑潮次表层水

图 6 济州岛西南 3 m、32 m 和 32.2°N 断面等混合组成比例图 (2、5、8、11 月)

Fig. 6 Water mass formation proportion of 3 m, 32 m and 32.2°N section in the southwest of Cheju Island (Feb., May, Aug., Nov.)

5—7 月水团组成的基本分布格局: 西侧表层为东海表层水, 底层为东海底层冷水, 东侧表层为黑潮表层水, 底层为黑潮次表层水 (图 6(b)). 春末夏初, 东海表层水在表层 (3 m) 的变化最明显, 水平范围逐月东扩, 从 5 月最东的 125.3°E, 到 7 月的 126.3°E, 达到年内最东端, 但垂向范围变化不大, 从未在 32 m 层出现过, 其体积分数从 3% 逐月增到 11%; 东海底层冷水在这段时间在 32 m 层逐月西退, 从开始的最东的 126.1°E, 最后到 125.6°E; 在断面上厚度逐月变薄, 范围逐月减少, 体积分数从 30% 逐月降到 20%; 黑潮表层水在表层 (3 m) 逐月西扩, 从开始的最西的 126.6°E, 到夏初的 126.1°E, 下界深度处从 24 m 逐月增到 41 m, 其体积分数从 4% 逐月增到 14%; 黑潮次表层水的变化特点是垂向厚度逐月变薄, 水平向范围逐月增大, 体积分数变化较小, 维持在 45% 附近 (表 2).

8—12 月水团组成的基本分布格局: 西侧表层为东海表层水, 东侧表层为黑潮表层水, 底层为黑潮次表层水 (图 6(c)、(d)). 东海表层水在此期间的主要的变化发生在表层 (3 m), 8 月北宽南窄, 核心在北, 逐月过渡到南宽北窄, 核心在南, 随着秋季上混合层逐月加深, 该水团厚度变大, 夏末至秋末其体积分数先减后增; 黑潮表层水在这段时间一直占据着表层 (3 m)、32 m 层大半的部分, 其下界深度逐月增大, 其体积分数先增后降, 11 月最大 (62%); 黑潮次表层水 8 月水平范围达到年内最大值, 最西到达 124.8°E,

此后水平范围逐月减少, 厚度逐月变薄, 其体积分数从 54% 逐月降至 17% (表 2).

3 讨论

东海陆架混合水是北上的暖流水和南下的黄海沿岸水在东海陆架混合变性形成的. 冬季, 在台湾暖流和黄海暖流的影响下^[21], 一部分黄海沿岸水沿陆架向东南扩展, 从而导致东海陆架混合水的比例在研究区逐月增加, 汤毓祥等^[22]通过实测数据也得出过这样的结果, 不过他们的结果是定性的, 从气候态的定量结果来看: 1—4 月陆架混合水逐月东扩, 体积分数从 26% 逐月增到 42% (表 2).

东海表层水形成于 5 月, 是东海陆架混合水表层增温降盐后形成的, 在 5—9 月其核心盐度先降后升, 7—8 月最低, 这种变化与长江冲淡水的情况基本一致. 长江冲淡水的月际演变趋势是: 从 5 月开始长江径流逐月增加, 影响范围不断向东北方向的济州岛扩展, 7、8 月势力最强, 9 月以后迅速减弱^[23], 5—9 月该水团体积分数先增后减. 进入秋季, 随着长江冲淡水的收缩, 黄海沿岸水又开始向东偏南扩展, 在东北季风的作用下, 上混合层逐渐增厚, 东海表层水逐渐向东海陆架混合水过渡, 其体积分数在秋季逐月增加, 12 月达到 14% (表 2).

研究区西侧底层 5 月出现一个低温水团, 8 月在研究区消失. 5—7 月其核心温度分别为 10.5、12.2、

15.3℃,而苏育嵩等^[6]基于1981—1982年的实测资料研究东海底层冷水时将12℃定为6月底层冷水的特征温度,并指出该底层冷水在西侧高温黄海沿岸水和东侧不断涌升的黑潮次表层水的挤压下,逐月北缩最终于9月融入黄海冷水团而消失.他们的研究区的北部偏东与本研究区的西侧底层相重合,这里也正是本文低温水团核心温度所在之处,5—7月其体积分数从30%降到20%,8月黑潮次表层水占据底层(图8(c)),该水团从研究区消失.基于以上分析认为该水团为东海底层冷水.

冬季黑潮上层水的混合比例等值线垂向均匀(图6(a)),这是因为冬季强烈的对流混合作用使陆架浅海区的黑潮表层水和黑潮次表层水合二为一,厚度从表到底,这也是该水团被称为黑潮上层水的原因^[23].从5月开始,随着上层海水的增温降盐,上层的黑潮表层水与底层的黑潮次表层水开始分离.黑潮表层水的核心温度和盐度5—12月有明显的变化(表1),核心温度先增后减,8月最大,盐度先减后增,7月最小,其体积分数的变化是先增后减,11月达到最大62%(表2),其厚度的变化是从5月的25m左右逐月增加到12月的80m左右.黑潮次表层水的核心5—12月基本都位于100m以深的区域,所以性质较为稳定,核心温度盐度值基本保持不变,但其体积分数有明显的变化,其变化过程基本是先增后减,8月达到最大54%(表2),这种体积变化与黑潮次表层水逆坡涌升强度的变化有关,从6月左右,其涌升强度开始增大,其水平范围扩展,至8月范围最大,占据研究区的底层(图6(c)),此后,随着涌升的减弱和对流混合的增强,分布范围也缩小^[24],至1月,又与东海黑潮表层水混为一体.

4 结 论

(1) 济州岛西南海域1—4月有2个水团,表底水团一致,东西两侧分别是黑潮上层水和东海陆架混合水,就体积而言,黑潮上层水占有明显优势,体积分数始终在50%以上;5—7月有4个水团,表底被不同水团占据,西侧表层为东海表层水,仅是薄薄的一层,7月体积分数最大(11%),西侧底层为东海底层冷水,5—7月是低温中心,8月移出研究区,东侧表层为黑潮表层水,此阶段黑潮表层水体积不大,占有最大区域的是东侧底层的黑潮次表层水,体积分数一直在45%左右;8—12月有3个水团,表层水团是东

海表层水和黑潮表层水,底层的水团只有黑潮次表层水,表层黑潮表层水占优,总体而言黑潮表层水也是这一阶段的主导水团,体积分数基本都维持在50%以上,黑潮次表层主导底层,势力8月最强,以后逐月变弱.

(2) 黄海沿岸流、长江冲淡水、台湾暖流、黑潮在东海东北的入侵强度、黄海暖流等的消长变化决定了研究区水团的基本分布格局和进退趋势.

(3) 浓度混合分析法是基于纯内部混合的水团分析法,在浅海区有一定的适用性,但也有一定的局限性,计算结果会出现一些不合理的地方,需要根据经验加以识别.

参考文献:

- [1] 苏育嵩,喻祖祥,李凤岐. 聚类分析法在浅海水团分析中的应用及黄、东海变性水团的分析[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(1): 1-12.
- [2] 喻祖祥,苏育青,俞光耀,等. 长江口及济州岛附近海域变性水团的初步分析[J]. 山东海洋学院学报, 1984, 14(3): 1-12.
- [3] 丁峰元,程家骅. 东、黄海水团动态与夏季休渔效果间的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2342-2248.
- [4] 李建生,林龙山,程家骅. 东海北部秋季小黄鱼分布特征及其与底层温度和盐度的关系[J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 348-356.
- [5] 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.
- [6] 苏育嵩,李凤岐,马鹤来,等. 东海北部底层冷水及双跃层初析[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(1): 75-86.
- [7] Hur H B, Jacobs G A, Teague W J. Monthly variations of water masses in the Yellow sea and East China seas, November 6, 1998 [J]. Journal of Oceanography, 1999, 55(2): 171-184.
- [8] 朱文武. 东海黑潮水和东海陆架水相互作用的时空变化研究[D]. 上海:上海师范大学, 2011.
- [9] 汤毓祥,李兴宰,赵哲,等. 东海东北部春季若干重要水文结构的分析[J]. 东海海洋, 1997, 15(4): 1-11.
- [10] Jacobsen J P. Eine graphische methode zur bestimmung des vermischungs-koeffizienten in meere[J]. Gerlands Beitrage Geophysik, 1927, 16: 404-412.
- [11] Штокман В Б. Геометрические свойства оS-кривых при смешении трех водных масс в неограниченном море докл[J]. АН СССР, 1944, 43(3): 351-355.
- [12] 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.
- [13] Chen C T, 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.
- [14] 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*, 2005, 35(1): 9-12.
- [15] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1999: 61-75.
- [16] 袁承仪. 黄海水温与环流变化特征及机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [17] Wei H, Yuan C Y, Lu Y Y, et al. Forcing mechanisms of heat content variations in the Yellow Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4504-4513.
- [18] Li J X, Wei H, Zhang Z H, et al. A modelling study of inter-annual variation of Kuroshio intrusion on the shelf of East China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(4): 537-548.
- [19] 苏育嵩, 李凤岐, 马鹤来, 等. 济州岛南部海区的双跃层现象[J]. *青岛海洋大学学报*, 1989, 19(1): 15-21.
- [20] 周培强, 孙日彦, 赵继胜. 长江口、济州岛海域温、盐分布探讨[J]. *青岛海洋大学学报*, 1990, 20(3): 49-55.
- [21] 楼如云, 袁耀初, 卜献卫. 1999年6月南黄海和东海东北部的天文及环流特征[J]. *海洋学报*, 2002, 24(增刊1): 42-52.
- [22] 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.
- [23] 孙湘平. 中国近海区域海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 242.
- [24] 刘树勋, 沈新强, 王幼琴, 等. 渤、黄、东海水团多年月平均分布与变化的初步分析[J]. *海洋学报*, 1993, 15(4): 1-11.

责任编辑: 周建军

(上接第43页)

- [23] Oren A. Diversity of halophilic microorganisms: Environments, phylogeny, physiology, and applications[J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2002, 28(1): 56-63.
- [24] Toi H T, Boeckx P, Sorgeloos P, et al. Bacteria contribute to *Artemia* nutrition in algae-limited conditions: A laboratory study[J]. *Aquaculture*, 2013, 388/389/390/391: 1-7.
- [25] Zhukova N V, Imbs A B, Yi L F. Diet-induced changes in lipid and fatty acid composition of *Artemia salina*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 1998, 120(3): 499-506.
- [26] Intriago P, Jones D A. Bacteria as food for *Artemia*[J]. *Aquaculture*, 1993, 113(1/2): 115-127.
- [27] El-Baky H H A, El-Baz F K, El-Baroty G S. Production of lipids rich in omega 3 fatty acids from the halotolerant alga *Dunaliella salina*[J]. *Biotechnology*, 2004, 3(1): 102-108.
- [28] Avnimelech Y, Kochba M. Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in biofloc tanks, using ^{15}N tracing[J]. *Aquaculture*, 2009, 287(1/2): 163-168.
- [29] De Schryver P, Crab R, Defoirdt T, et al. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2008, 277(3/4): 125-137.
- [30] Fernández R G. *Artemia* bioencapsulation I. Effect of particle sizes on the filtering behavior of *Artemia franciscana*[J]. *Journal of Crustacean Biology*, 2001, 21(2): 435-442.
- [31] D'agostino A. The vital requirements of *Artemia*: physiology and nutrition[M]// Persoone G, Sorgeloos P, Roels O, et al. *The Brine Shrimp Artemia*. Vol 2. Physiology, Biochemistry, Molecular biology. Belgium: Universa Press, 1980: 55-82.
- [32] Sui Liying, Deng Yuangao, Wang Jing. Impact of brine acidification on hatchability, survival and reproduction of *Artemia parthenogenetica* and *Artemia franciscana* in salt ponds, Bohai Bay, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(1): 81-87.

责任编辑: 郎婧