

渤海沿岸流季节变化对青岛冷水团影响的初步分析

靳姗姗^{1,2,3}, 孙俊川^{1,2,3}, 魏泽勋^{1,2,3*}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;

3. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 青岛冷水团位于青岛外海海域, 具有独特的温盐结构和生消规律, 对近海水文和周围渔场有重要的影响。利用世界海洋数据库(WOD2013)和中国科学院海洋研究所开放航次的黄海断面观测资料, 及 ROMS 区域海洋模式, 对青岛冷水团的形成机制和演化过程进行了研究。结果表明, 青岛冷水团 3 月初现, 4 月形成, 5 月达到鼎盛, 6、7 月逐渐与黄海冷水团融合, 8 月开始衰减至 10 月消亡。渤海沿岸流秋冬季为北风驱动的正压流, 其携带的山东半岛北岸的低温水为青岛冷水团的形成提供水源; 春夏季为冷水团密度环流, 输运到青岛冷水团和黄海西侧冷水团之间的低温水促进了两水团的融合, 加快青岛冷水团的消亡。

关键词: 青岛冷水团; 渤海沿岸流; 季节变化; ROMS 模式

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)03-0317-12

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.03.002

青岛冷水团存在于青岛东南部外海的深层海域, 是春季黄海西部海域一个独立的水团现象^[1], 其核心区为水深 15 m 至底层且温度小于 7.5 °C 的冷中心^[1-3], 是以低温低盐为主要特征的季节性水团。该冷水团自 1959 年的全国海洋综合调查中被发现之后, 有关学者^[1-6]对其进行了调查和研究, 包括青岛冷水团的温盐性质^[3,6]、强度的年际变化^[1]、以及该水团与黄海冷水团^[6]和渔场^[2]的关系, 指出, 该冷水团是山东半岛北部低温低盐的沿岸水向南入侵, 在当地环境影响下形成的。青岛冷水团具有规律的长消过程, 即它在 3 月下旬初现, 4 月成型, 5 月鼎盛, 6 月减弱, 7 月消失。但也有学者指出^[7], 青岛冷水团直至 7 月仍然存在, 而且, 与黄海冷水团的冷中心在南黄海的范围相比, 青岛冷水团的冷中心范围更大。此外, 已有的研究也表明春季青岛冷水团的形成与渤海沿岸流密切相关^[1,3-4,6,8]。

渤海沿岸流(亦有学者称其为鲁北沿岸流)沿山东半岛北岸向东流动至成山角附近后, 流向转向南, 然后, 大致沿着山东半岛南岸向西南方向流动^[9]。已有资料表明, 渤海沿岸流每年的流向和路径大致不变, 流速表现为冬强夏弱。然而, 渤海沿岸流的形成机制在冬、夏两季却大不相同。冬季主要是受强烈的北风驱动影响, 而夏季, 主要是受温差导致的密度梯度的影响, 此时的流是黄海冷水团密度环流的一部分。

冬季, 渤海沿岸流将山东半岛北部沿岸水输送到青岛东南海域, 在山东半岛南侧的反气旋涡和太阳辐射加热的共同作用下, 在青岛外海形成了局地的低温低盐水, 其东侧为来自黄海暖流的高温高盐水。春季(3 月), 太阳辐射不断增强导致海表水升温, 青岛冷水团开始逐渐形成, 水团温度分布为中央低, 边缘高, 与周围的海水形成较强的温度梯度。5 月为冷水团的鼎盛期, 青岛冷水团中心位置在上层海水温度升高的影响下

收稿日期: 2016-11-14

资助项目: 国家自然科学基金项目——黄海暖流双核结构的数值模拟研究(41606040)和渤海海峡水交换及其机制研究(40976016); 国家科技支撑计划项目——渤海环境容量与水体交换评价技术及应用研究(2010BAC69B00)

作者简介: 靳姗姗(1991-), 女, 山东东阿人, 硕士研究生, 主要从事海洋水团方面研究. E-mail: jinss@fio.org.cn

* **通讯作者:** 魏泽勋(1970-), 男, 安徽巢湖人, 研究员, 博士, 主要从事海洋环流和潮汐潮流方面研究. E-mail: weizx@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

发生东移,并且水团盐度值开始升高。但是,水团冷中心的东移是黄海西侧海水热结构的变化,而不是整个水体的移动^[6]。到7月,青岛冷水团基本与黄海东侧冷水团融为一体,温跃层和青岛冷水团同时消失,消亡的动力机制是南黄海6—7月间偏南风的增强和温跃层以下反气旋涡的减弱,而消亡的热力机制是海面净热通量的下传和水平热量的输入^[10]。

以往的研究多是用断面观测资料对青岛冷水团进行分析,研究成果也多是基于单个航次的调查资料分析得到的,此外,基于多年水温资料研究得到的年际变化,其研究区域也大多是青岛冷水团存在的区域,很少涉及青岛冷水团从来源到形成直到消亡的整个形成机制和演化过程。因此,本文首先利用观测资料进行大致的分析,为了弥补由于观测资料不足对结果造成的影响,随后用区域海洋模式(ROMS)模拟得到的气候态数值,来完整的系统的研究青岛冷水团的形成机制和演化过程,以及渤海沿岸流的季节性变化对青岛冷水团的影响。

1 数据与方法

为了探讨青岛冷水团的季节变化和演化过程,搜集并整理了 WOD2013(World Ocean Database 2013)和中国科学院海洋研究所研究开放航次中相关的温盐资料。其中,WOD2013是由美国国家海洋资料中心(NODC)研发的2013版的世界海洋数据库,该数据库的温盐资料主要包括高分辨率的CTD、水温探测器(MBT,XBT)、漂流浮标(DRB,PFL)和锚定浮标(MRB)等观测数据。本文中选取的WOD2013观测资料为冬季(2004-02),观测站位为36°N断面,而中科院海洋所开放航次的观测资料为春季(2014-05)、夏季(2010-07)、秋季(2011-11),分布在33°N,34°N,35°N,36°N,37°N断面的具体的站位设置如图1所示。

文中采用的ROMS区域海洋模式(Regional Ocean Modeling System),是由罗格斯大学(Rutger University)和加利福尼亚大学洛杉矶分校UCLA(University of California, Los Angeles)共同研发,被广泛地应用于区域海洋研究中。ROMS模式基于Boussinesq近似和垂向静压近似,求解了自由表面Reynolds平均的三维Navier-stokes方程,水平方向采用Arakawa-C网格,垂向采用地形拟合坐标系(S-coordinate)。本文模式区域范围为(117°30′~127°00′E, 28°~41°N),涵盖了渤海、黄海和东海的部分海域,水平分辨率为(1/12)°×(1/12)°,垂向方向共分为26层,并且表层和底层进行了加密。地形数据采用美国国家地球物理数据中心提供的ETOPO1地形数据(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>)。模式的驱动场源自于COADS(The Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)气候态月平均的动量通量、热通量、淡水通量以及海表面温度和盐度。模式中加入了8个分潮,分别为 $K_1, O_1,$

P_1, Q_1, M_2, S_2, N_2 和 K_2 ,其数据源自于俄勒冈大学提供的TPXO7.0(<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>)数据集。模式的初始场和开边界条件,由太平洋区域气候态模拟结果(中国科学院海洋研究所杨德周博士等)插值得到^[11],通过实测资料证实,该模拟结果对东中国海环流的刻画比较精准^[12]。模式共

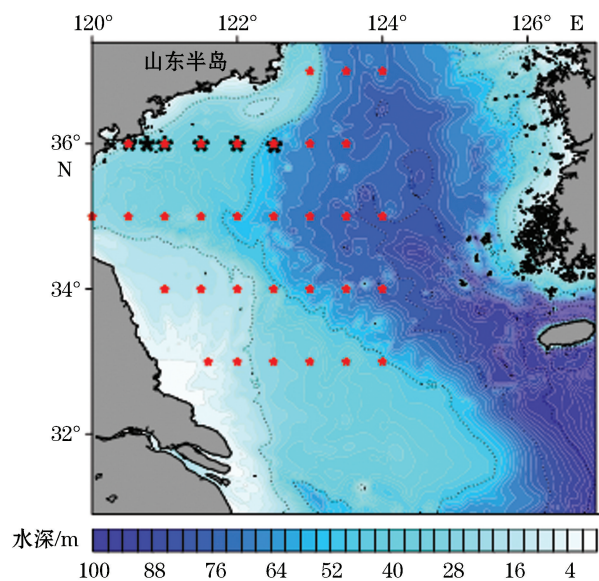


图1 WOD2013资料观测站位(黑色)和中科院海洋所开放航次观测站位(红色)

Fig.1 Observation stations of WOD2013 (black stars) and cruised conducted by the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (red stars)

积分了 10 a,本文采用了第 10 年的气候态模拟结果进行相关讨论。

2 结果与讨论

2.1 青岛冷水团资料分析

已有的研究^[1,3-4]表明:青岛冷水团是由来源于冬季山东半岛北岸海域的低温低盐水,沿岸绕过山东半岛后在青岛外海的局地环境影响下形成的。本节将进一步通过实测的温盐资料及气候态的海表面温度图和离水辐射率图,分析青岛冷水团的来源以及季节变化。

图 2 为 2014-05 春季航次资料分析得到的黄海西部表层和底层的温盐平面分布图。表层分布图中,在黄海中部高盐水与山东半岛近岸低盐水之间存在明显的盐度锋面,而存在于在山东半岛的东南海域的一条低温、低盐的水舌,大致沿着该锋面向西南延伸至苏北近岸海域,这表明渤海沿岸流携带低温低盐水,进入黄海后沿山东半岛南岸向西南流动。在底层温度分布图中,最为显著的现象是一片独立的低温水域,存在于青岛东南海域(约 122°E,36°N),核心温度约为 5 °C,呈 NE—SW 方向分布,该冷水团区域的西侧边界与盐度锋面基本平行。

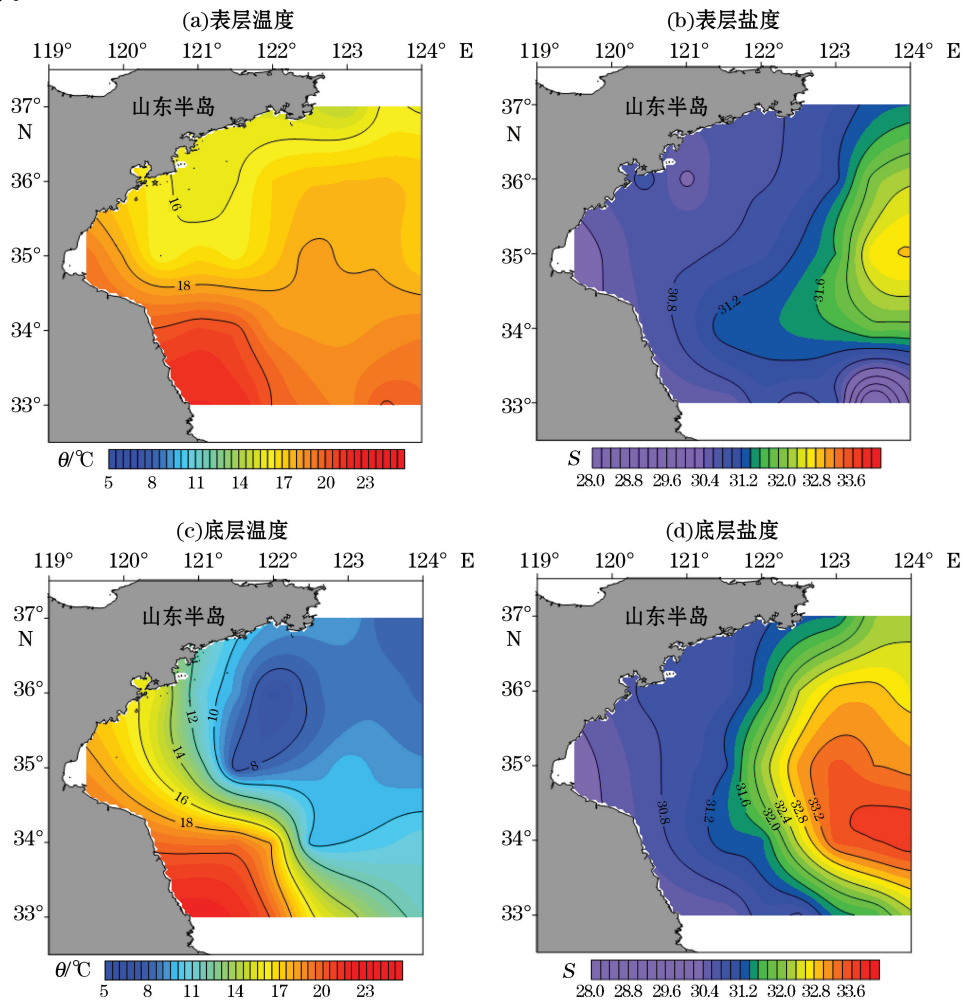


图 2 2014-05 黄海温度盐度平面分布

Fig.2 Distribution of temperature and salinity in Yellow Sea in May, 2014

分析 MODIS 气候态 2 月份 SST(图 3a)和 SeaWiFs 气候态 2 月份 670 nm 离水辐射率 nlw 分布(图 3b)得到:冬季,低温水和浑浊水从山东半岛北岸沿岸向东流动至成山角,在此转向后继续沿着山东半岛沿岸向南流动,这股沿岸流与东侧较为清澈的高温黄海暖流水形成了明显的悬浮物浓度锋面和温度锋面^[13-14]。此时,在大约(123°E,35°N)附近出现从黄海暖流主轴分离的青岛分支,而在黄海暖流主轴和青岛分支之间则楔入了渤海沿岸流南下携带的冷水,该冷水被黄海暖流的高温高盐水所环抱。此外,在图 3b 中还能发现,在青岛外海的离水辐射分辨率与山东半岛北部和东部的沿岸水基本相同,这也可以进一步证明青岛冷水团的水来源于山东半岛北岸的说法。

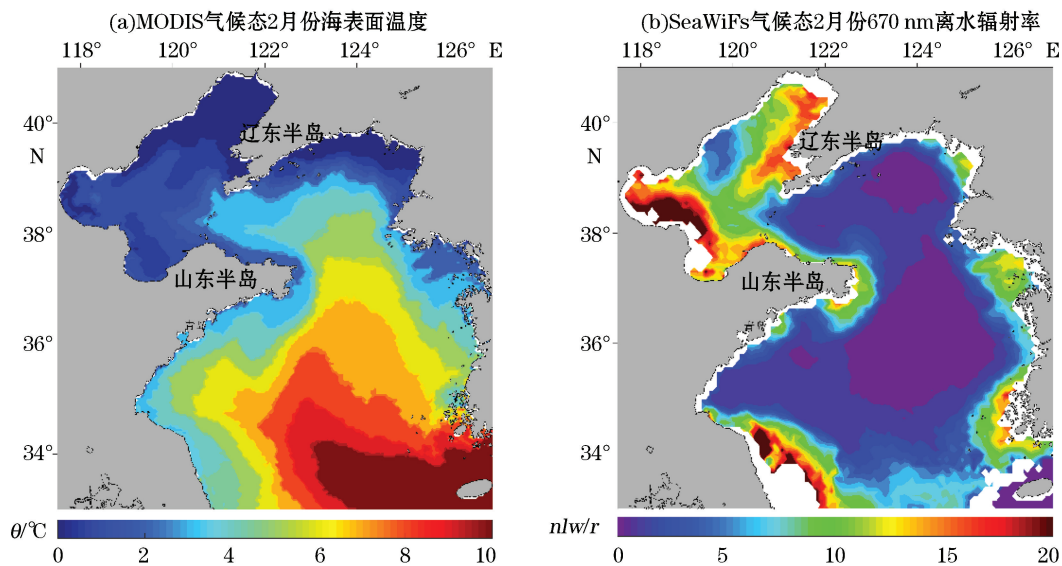


图 3 MODIS 气候态 2 月份海表面温度和 SeaWiFs 气候态 2 月份 670 nm 离水辐射率

Fig.3 Climatological sea surface temperature of MODIS in February, climatological 670 nm normalized water-leaving radiance of SeaWiFs in February

在冬季(2月)36°N 断面水温分布图(图 4a)中,同样可以看到,来自渤海沿岸流的冷水大致分布在 122°E,水深 30~40 m 之间的海域,冷水两侧是高温的黄海暖流水,由于该低温水独立存在,可以视为青岛冷水团的雏形^[7],水温为 4 °C 左右。5 月(图 4b),由于太阳辐射增强,对流、涡动混合减弱,破坏了冬季温度垂直分布的均匀状态,导致季节温跃层出现,青岛冷水团发展到鼎盛,核心大致位于 122°15'E,水温大概为 5 °C,此时的青岛冷水团被认为是黄海冷水团的一部分^[14]。7 月(图 4c),青岛冷水团核心东移到大致 122°30'E 处,水深为 50~60 m 左右,与仁川外海冷水团并为此时黄海冷水团的两个较强的冷中心^[15]。而到 11 月,降温导致垂向混合增强,青岛冷水团和温跃层几乎同时消失。青岛冷水团冷中心的温度分布表明,冷中心贴着海底,向更深的东南海域移动,它的移动方向大致为黄海海槽方向,这也进一步说明了,青岛冷水团与黄海冷水团逐渐融合使其成为黄海冷水团的一部分,而不再是一个独立的水团,标志着青岛冷水团的衰减直至消失。

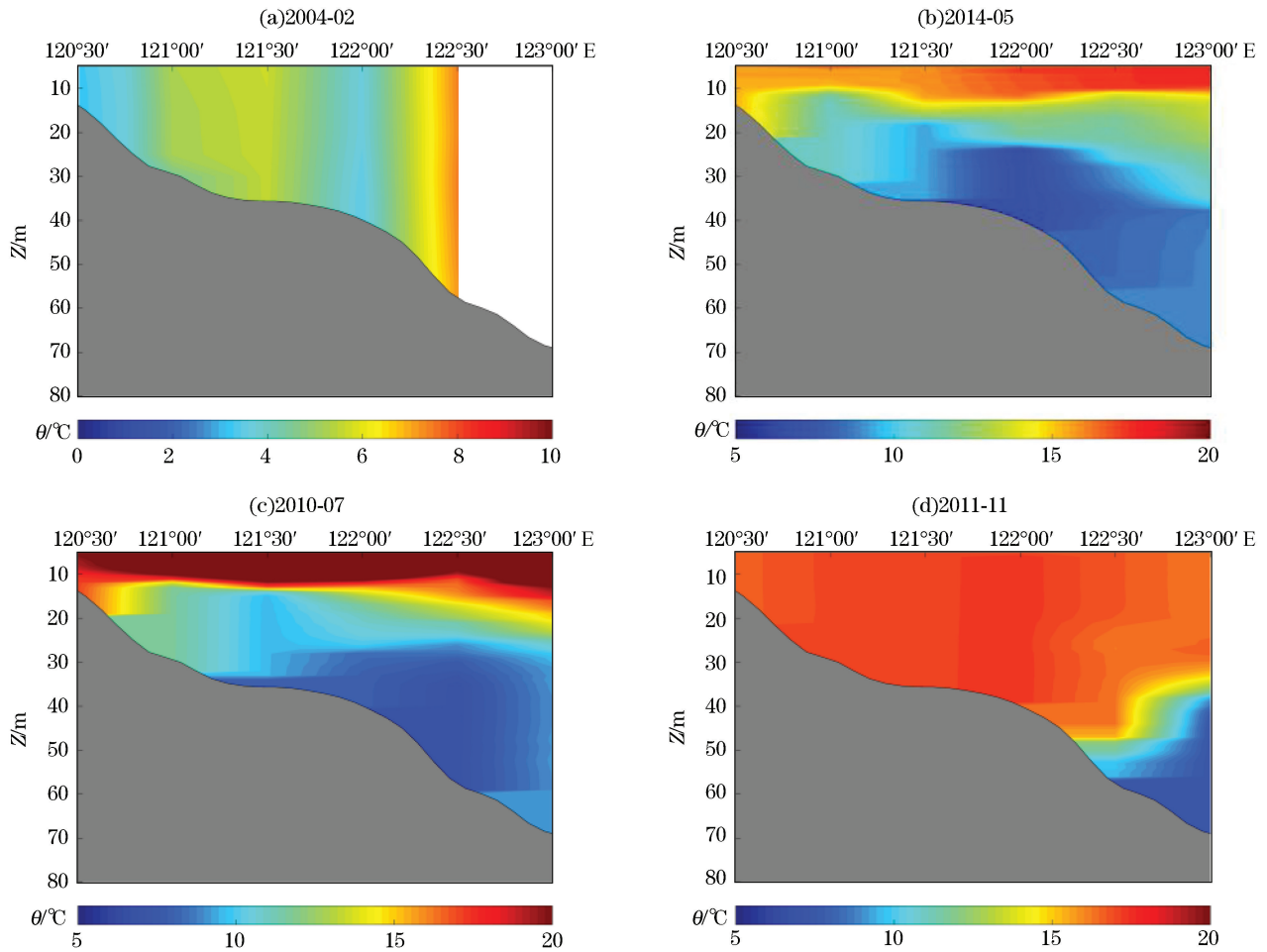


图4 黄海 36°N 断面水温分布图

Fig.4 Water temperature distribution at 36°N section of the Yellow Sea

2.2 数值模拟结果

以上分析基于有限的断面观测资料,不能够对青岛冷水团的形成和演化过程进行完整地研究,因此采用ROMS模式对青岛冷水团的形成演化过程进行数值模拟分析,基于得到的12个月的气候态数值模拟结果,对青岛冷水团的演化过程展开详细讨论。

冬季1—2月黄海暖流达到鼎盛,来自济州岛西南海域入侵黄海的高温水,在(123°E, 35°N)附近分成东北向和青岛方向2个分支,东北方向的分支进入北黄海海域;青岛方向的分支达到青岛外海后,沿山东半岛南岸岸线向东北流动。此时,南岸的冷水与黄海暖流青岛分支的高温水之间形成了明显的温度锋面,与2月的MODIS SST平面分布基本一致。而源自山东半岛北岸的冷水,在绕过成山角后,楔入到黄海暖流的2个分支之间,形成明显的被高温水所裹挟的低温水区。3月(图5c),随着北风的减弱,黄海暖流开始向济州岛方向退缩,在山东半岛东南近岸(122°15'E, 37°30'N)被之前黄海暖流2个分支裹挟水温低于4℃的冷水区,青岛冷水团的雏形为该冷水与成山头附近的冷水连成的冷水区,但是此时还不是独立的冷水团。需要指出的是,这片冷水区水的来源,便是青岛冷水团的水的来源,即山东半岛北部的近岸冷水。到4月(图5d),随着太阳辐射增强,近岸水开始快速升温,垂直分布的均匀状态遭到破坏,海水开始层化,青岛冷水团开始成为独立的冷水团并向南部较深的海域移动。与此同时,北黄海朝鲜近海冷水团和黄海东侧韩国近海冷水团均

开始形成,这3个冷水团被冬季黄海暖流的残留水隔离开来,分别成为独立的冷水团。5月,随着温度的升高,海水垂直方向的分层更为明显,青岛冷水团达到鼎盛,冷中心位置也移向外海(40 m左右)更深的海域,温度上升到6~7℃左右。此时,黄海冷水团范围的不断扩大和青岛冷水团冷中心的东移,促进了2个水团边界的混合,导致青岛冷水团和黄海东侧的冷水团的界限开始退化。6,7月,不同水团逐渐融合,代表黄海冷水团核心范围的10℃等温线(图6中白线)将3个冷水团包络在内,黄海冷水团达到鼎盛,而青岛冷水团已不再是独立的冷水团,而是黄海冷水团的一部分。8,9,10月青岛冷水团在垂向混合增强的影响下开始衰减,温度不断升高至不在10℃等温线的包络之内,此时,黄海冷水团仅存在于黄海海槽。至10月,青岛冷水团完全消失。到12月,黄海冷水团已经基本消失,而黄海暖流开始形成,暖水舌自济州岛西南向黄海内部延伸。此时,山东半岛北部近岸形成了明显的冷水沿岸流,为翌年青岛冷水团的形成提供冷水来源。

上述分析显示,青岛冷水团的冷水来源为山东半岛北部沿岸的低温水,由渤海沿岸流携带至青岛外海海域。该水团在3月开始形成,冷水团的核心位置随着地形和海面增温的共同作用而逐渐移向东南深水区,此外,它与黄海东侧冷水团也随着侧向混合的增强而不断融合,到7月成为黄海冷水团的一部分,之后,随着垂向混合的增强,青岛冷水团逐渐减弱至10月完全消失。需要指出的是上述所讨论的冷水团核心的移动并不是整个水体的移动^[8],而是海域热力结构的形态变化。

图7给出了模式模拟得到的黄海36°N和37°N断面气候态的近底层水温和经向流速随时间的演化图。在37°N温度断面中,冬季,在20~30 m等深线之间的123°E以西海域为低温水,在水深50 m左右的123°00'~124°30'E之间海域为高温水,与气候态的黄海底层温度平面分布图(图5a,图5b和图6f)对照后发现,低温水与山东半岛沿岸冷水对应,而高温水与黄海暖流对应。此外,从经向流速图中,黄海暖流东北分支的北向流动和渤海沿岸流(黑色方框)的南向流动形成了流向明显相反的2支流,与前面结论相符。从3月开始,渤海沿岸流随着季风转为南风而转为流速较弱的北向流,与此同时,黄海暖流也逐渐减弱。7月,黄海冷水团环流出现而黄海暖流消失,环流的西侧部分为图中123°15'E附近出现的较强的南向流,位于40~50 m等深线之间,在该南向流的西侧近岸则为狭窄的北向流。与37°N断面相比,36°N断面的温度和经向流速结构稍有不同是,冬季渤海沿岸流在122°E附近楔入到黄海暖流的2个分支之间(图7b黑框),而不是沿着山东半岛南岸流动,黄海暖流双分支在分布图中均能明显观察到。青岛冷水团在2月时分布范围较小,但温度低于4℃,至5月,冷水团随着分布范围不断扩大和水温逐渐升高,其核心逐渐东移,与核心逐渐西移的黄海东侧冷水团开始融合。此时,近岸的渤海沿岸流转为北向,而南向的冷水团环流大致在122°30'E开始形成。可以推断,冷水团环流将山东半岛北岸的中层冷水不断的输运到黄海东侧冷水团与青岛冷水团之间,促进2个水团不断融合。至7月,黄海东侧冷水团与青岛冷水团完全融为一体,此时的黄海冷水团达到鼎盛,之后不断向黄海海槽中部归缩,到11月基本消失。

以往的研究^[9,14]认为渤海沿岸流终年路径大致不变,流速呈现冬强夏弱的特征。但本文中的模式结果表明:冬季在北风的作用下,渤海沿岸流的路径偏向近岸(30 m等深线以浅)。春季、夏季,季风逐渐由南风向北风转变,山东半岛的近岸流受风的影响也相应的发生改变,而在离岸较远的深水区(40 m左右),由于冷水团的斜压效应形成了南向的冷水团环流。进入秋季,季风转为北风,山东半岛的近岸流转为南向,北向的黄海暖所取代了冷水团环流。渤海沿岸流在冬季和夏季的形成机制不同,前者为北风驱动,后者为密度环流,路径也从30 m等深线向50 m等深线移动,而春季和秋季为渤海沿岸流的转换期,分别为弱的北向流和南向流。

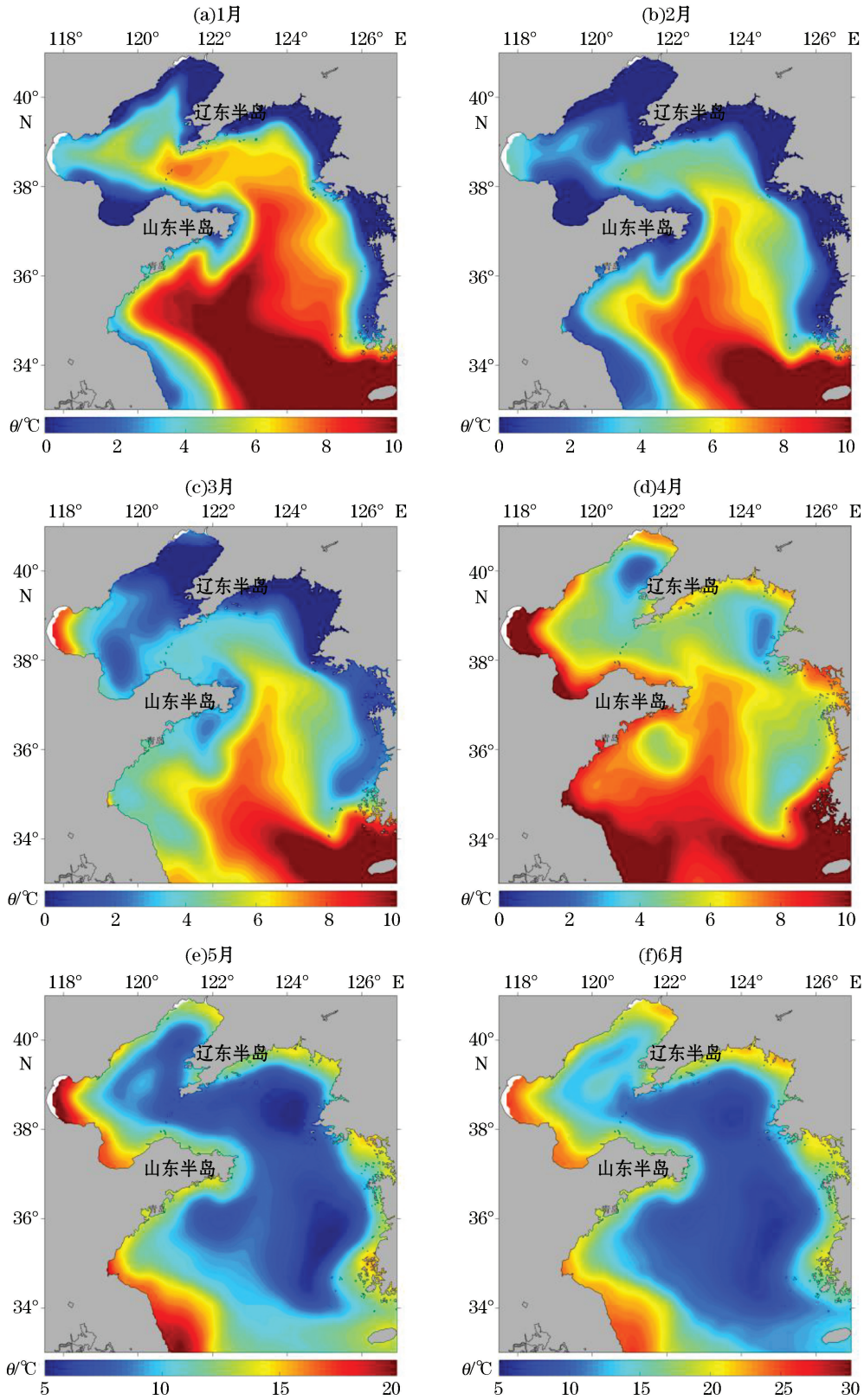
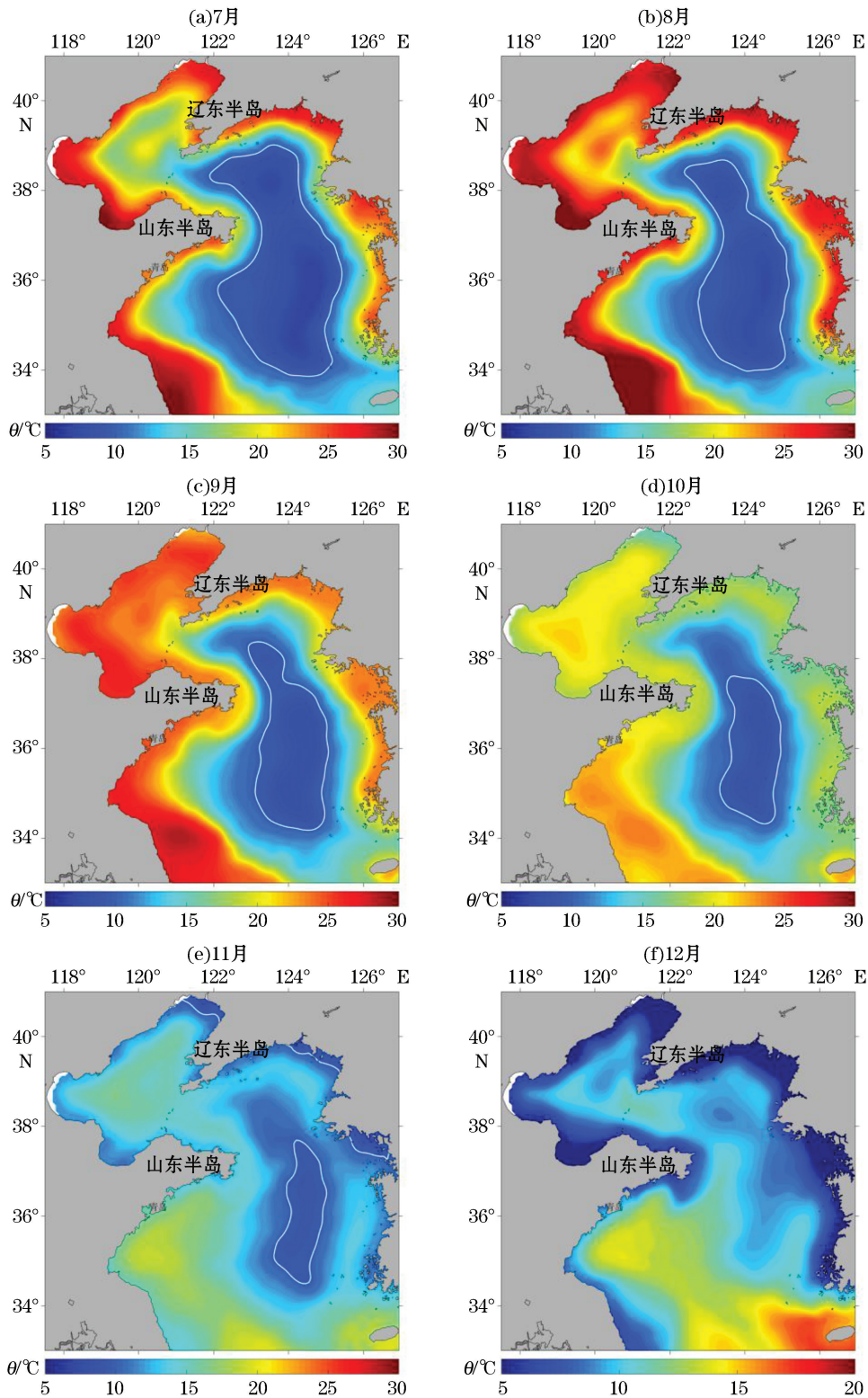


图5 模拟的气候态的1—6月黄海近底层温度平面分布图

Fig.5 Simulated climatological temperature of the near-bottom layer in the Yellow Sea from January to June



注:白线代表 10 °C 等温线

图 6 模拟的气候态的 7—12 月黄海近底层温度平面分布图

Fig.6 Simulated climatological temperature of the near-bottom layer in the Yellow Sea from July to December

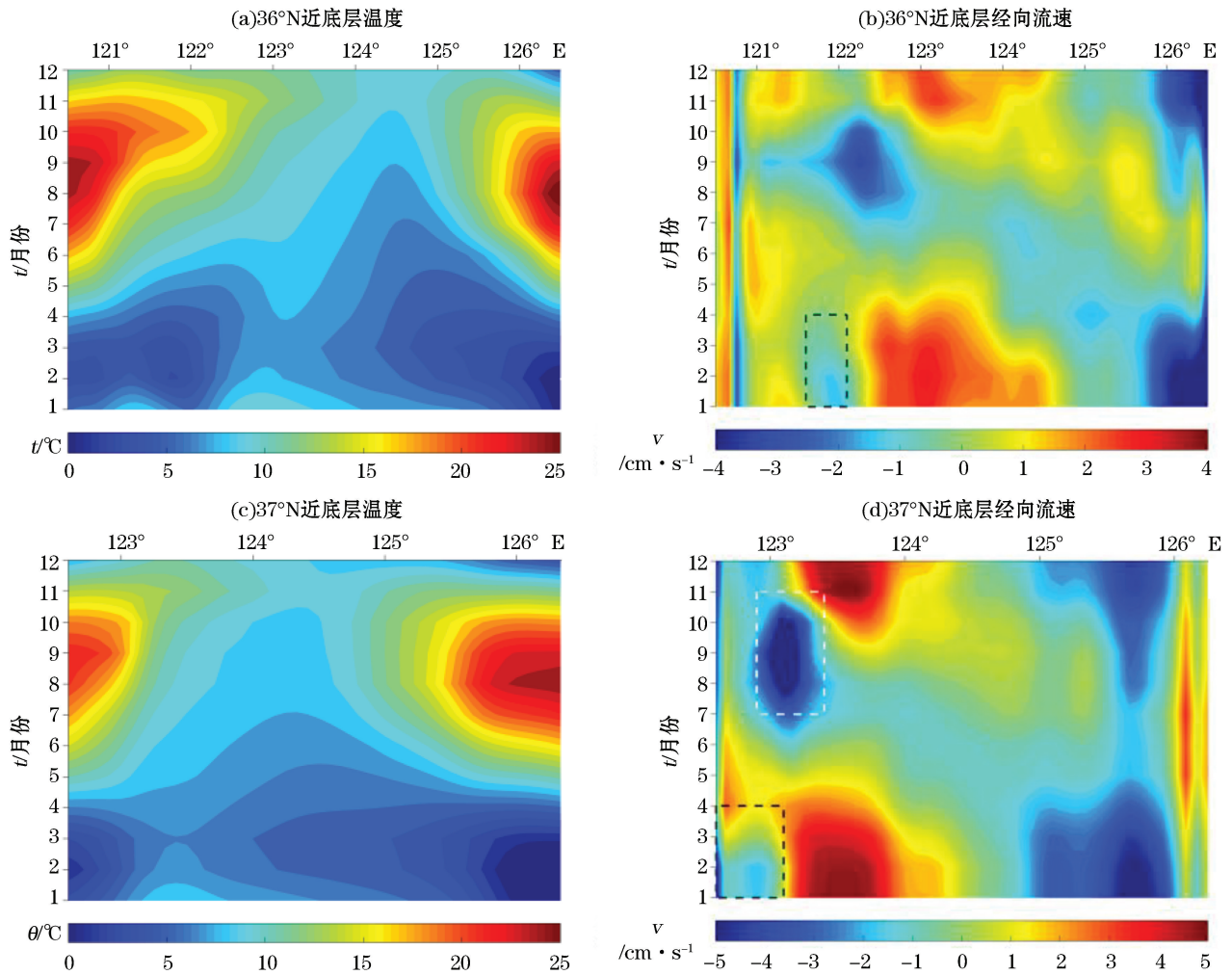


图 7 模拟的黄海断面近底层温度和经向速度随时间演化图

Fig.7 Evolution of the simulated temperature and meridional velocity of the bottom layer of the Yellow Sea

图 8 显示了模拟得到的黄海 2,5,7,11 月的气候态月平均、垂向积分平均的流场。与前面分析类似,2 月,渤海沿岸流整体沿近岸流动,在绕过成山角后流向山东半岛东南海域中部,北上的黄海暖流在其东侧。5 月,渤海沿岸流在比较弱的南风影响下为不明显的北向流,而此时黄海冷水团环流尚未形成。到了 7 月,在黄海冷水团边缘,形成了大致沿 50 m 等深线逆时针流动的明显的气旋式环流。冷水团环流从渤海海峡中部沿着 50 m 等深线绕过成山角流入黄海中部后,流速减弱,流幅变宽,基本沿着冬季黄海暖流的路径反向流动。至 11 月,季风转为北风,黄海暖流开始形成,冷水团环流消失,此时渤海沿岸流被北风所驱动,沿着山东半岛近岸南下,强度弱于冬季。渤海、黄海西部沿岸漂流瓶的漂流路径示意图^[16]证实了上述的讨论,与夏季漂流瓶轨迹相比,冬季明显更偏向近岸,而秋季进入黄海的漂流瓶则很少,春季则基本没有从山东半岛北部绕过成山角进入黄海的漂流瓶。

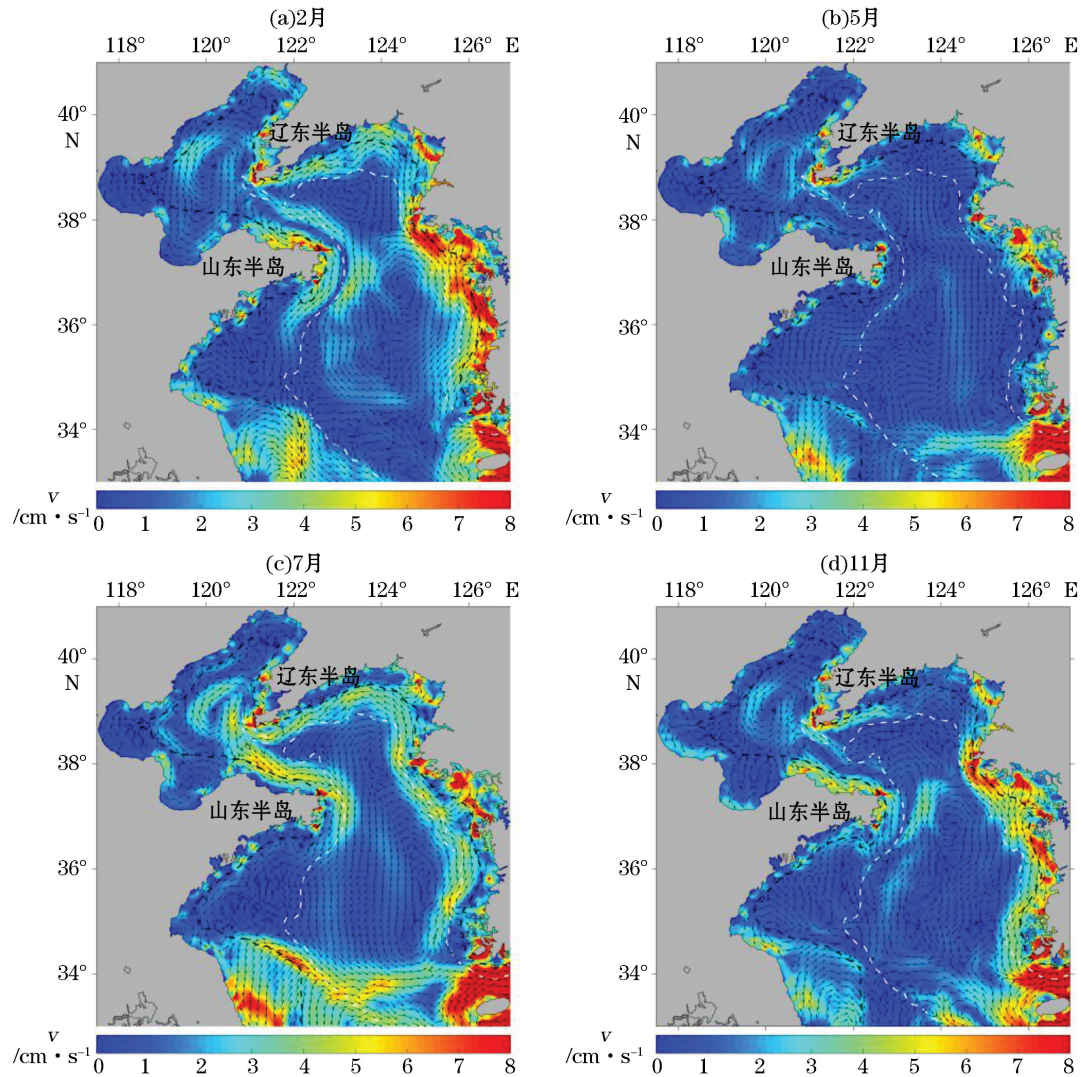


图8 气候态模拟得到的黄海月平均、垂向积分平均的流场

Fig.8 Simulated monthly mean vertically-averaged current fields of the Yellow Sea

3 结 论

基于现场观测资料和 ROMS 模式对青岛冷水团的形成机制和演化过程进行了细致的讨论, 得出了青岛冷水团的演化过程: 3 月初现, 5 月达到鼎盛, 7 月与黄海东侧冷水团融为一体, 10 月消失, 该过程与前人的研究成果基本一致。在实测资料的温度分布图中, 可明显观察到青岛冷水团的存在, 此外, SeaWiFs 2 月气候态的青岛外海离水辐射率与山东半岛北部和东部的沿岸水基本相同, 这与渤海沿岸流都可证明青岛冷水团的水来源于山东半岛北岸的说法。

模式结果显示, 渤海沿岸流春夏为北向流, 秋冬为南向流, 其形成机制分别为冬季的北风驱动和夏季的密度环流。冬季的渤海沿岸流在北风驱动下, 路径靠近近岸, 在绕过成山角后流向山东半岛东南海域, 被黄海暖流的 2 个分支所裹挟, 其携带的山东半岛北岸的低温水滞留在黄海暖流水之间, 在山东半岛东南近岸 ($122^{\circ}15'E, 37^{\circ}30'N$) 出现了水温低于 $4^{\circ}C$ 左右的冷水区, 视为青岛冷水团的雏形 (3 月), 不过此时还不是完全独立的冷水团。进入春季, 随着季风转为南风, 渤海沿岸流逐渐转为较弱的北向流, 在和山东半岛南岸的

近岸水快速增温的共同影响下,冬季滞留的冷水与黄海暖流残留水混合,4月形成独立的冷水团,冷水团的核心从 122°E 东移到 $122^{\circ}30'\text{E}$ 附近。5月,随着太阳辐射增强,海水层化明显,此时的冷水团达到鼎盛时期。但与此同时,近岸的渤海沿岸流为北向流,在冷水团的斜压效应的影响下,离岸较远的深水区南向的冷水团环流形成,不断的将山东半岛北岸的中层冷水输入青岛冷水团和黄海东侧的冷水团之间,两水团之间的界限开始退化。6,7月,两个水团逐渐融为一体,青岛冷水团成为黄海冷水团的一部分,黄海冷水团逐渐完整。随着季风转为北风和降温导致的垂向混合的增强,10月,青岛冷水团和冷水团环流逐渐消失,取而代之的是北向的黄海暖流。与此同时,受北风驱动,渤海沿岸流开始形成,路径靠近近岸,为翌年青岛冷水团的形成提供低温水来源,这进一步丰富和深化了前人关于渤海沿岸流和青岛冷水团形成机制和演化机制的认识。

致谢:世界海洋数据库(WOD2013)和中国科学院海洋研究所提供开放航次黄海断面观测资料,以及中科院海洋研究所超算中心提供计算支持。

参考文献(References):

- [1] ZHENG D, ZHANG R A. Analysis of spring water masses in the sea area off Yantai, Weihai and Shidao[J]. Marine Science Bulletin, 1983, 2(1): 61-68. 郑东, 张瑞安. 烟威及石岛近海春季水团分析[J]. 海洋通报, 1983, 2(1): 61-68.
- [2] ZHANG Q L, WENG X C, YANG Y L. Analysis of water masses in the south Yellow Sea in spring[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, 27(4): 421-428. 张启龙, 翁学传, 杨玉玲. 南黄海春季水团分析[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(4): 421-428.
- [3] ZHANG Q L, LIU X Q, CHENG M H, et al. Characteristics and formation causes of Qingdao Cold Water Mass[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2002, 20(4): 303-308.
- [4] ZOU E M, GUO B H, TANG Y X, et al. The hydrographic features and water masses analyses of the southern Huanghai Sea in the spring of 1996[J]. Haiyang Xuebao, 2000, 22(1): 17-26. 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.
- [5] YU F, ZHANG Z X, DIAO X Y, et al. Analysis of enolution of the Huanghai Sea Cold Water Mass and its relationship with adjacent water masses[J]. Haiyang Xuebao, 2006, 28(5): 26-34. 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.
- [6] WEI Q S, YU Z G, GE R F, et al. Chemicohydrographic analysis of the role of the Yellow Sea western coastal cold water in forming the Southern Yellow Sea western bottom cold water and its seasonal succession[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(4): 890-905. 韦钦胜, 于志刚, 葛人峰, 等. 黄海西部沿岸冷水在夏季南黄海西部底层冷水形成和季节演变过程中作用的化学水文学分析[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(4): 890-905.
- [7] JU X, XIONG X J. Distributions and seasonal changes of water temperature in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 55-68. 鞠霞, 熊学军. 渤、黄、东海水温季节变化特征分析[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 55-68.
- [8] YU F, ZHANG Z X, LAN J, et al. Analysis of water temperature distribution characteristics in the Southern Yellow Sea in spring[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(3): 281-288. 于非, 张志欣, 兰健, 等. 南黄海春季水温分布特征的分析[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(3): 281-288.
- [9] SUN X P. China offshore regional oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 95-129. 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 95-129.
- [10] ZHANG Q L, LIU Z L, QI J F, et al. Study on the extinction mechanism for Qingdao cold water mass[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(5): 27-33. 张启龙, 刘志亮, 齐继峰, 等. 青岛冷水团的消亡机理研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(5): 27-33.
- [11] YANG D Z, YIN B S, LIU Z L, et al. Numerical study on the pattern and origins of Kuroshio branches in the bottom water of southern East China Sea in summer[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117(C2): 138-144.
- [12] YANG D Z, YIN B S, LIU Z L, et al. Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(C5): 86-86.
- [13] WANG F, LIU C Y, MENG Q J. Effect of the Yellow Sea warm current fronts on the westward shift of the Yellow Sea warm tongue in winter[J]. Continental Shelf Research, 2012, 45(3): 98-107.
- [14] WANG Z Y, QIAO L L, YANG Z S, et al. Research on suspended sediment transport mechanisms along northeast coast of Shandong

- Peninsula in summer and in winter[J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(5): 81-90. 王勇智, 乔璐璐, 杨作升, 等. 夏、冬季山东半岛东北部沿岸悬浮物输送机制的初步研究[J]. *泥沙研究*, 2012(5): 81-90.
- [15] DIAO X Y. The study of Yellow Sea warm current, Yellow Sea cold water mass and their evolution process in spring[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. 刁新源. 黄海暖流、黄海冷水团及其春季演变过程研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2015.
- [16] ZHANG F G, MAO H L, LENG Y G. Analysis of drift bottle and drift card experiments in Bohai Sea and Huanghai Sea(1975—80)[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1987, 5(1): 67-72.

Effects of the Seasonal Variability of the Bohai Sea Coastal Current on the Qingdao Cold Water Mass

JIN Shan-shan^{1,2,3}, SUN Jun-chuan^{1,2,3}, WEI Ze-xun^{1,2,3}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*; 2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*; 3. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The Qingdao Cold Water Mass (QCWM), located in the offshore waters of Qingdao, has remarkable seasonal variability with unique temperature and salinity structure and significant impact on the fisheries and hydrological conditions in that region. In this paper, the formation and evolution of the QCWM are analyzed based on observations from the World Ocean Database (WOD2013) and cruises conducted by the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences as well as numerical simulations of the Regional Ocean Modeling System (ROMS). The results show that the QCWM appears in March, forms in April, and peaks in May. It merges with the Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM) in June, then starts to decay in August and diminishes in October. The Bohai Sea Coastal Current (BSCC) is barotropic current driven by the north wind during autumn and winter, which transports the low temperature water from the north coast of Shandong Peninsula to the QCWM. The BSCC is density circulation from spring to summer, which transports the cold water to the area between the QCWM and the west of the YSCWM and can decay the QCWM.

Key words: Qingdao Cold Water Mass (QCWM); Bohai Sea Coastal Current (BSCC); seasonal variability; Regional Ocean Modeling System (ROMS)

Received: November 14, 2016