

# 青岛冷水团的生成与演变研究\*

黄 浩 陈学恩 林 璘

(中国海洋大学 海洋与大气学院 青岛 266100)

**摘要** 本文基于现场观测资料并结合 FVCOM 三维海洋模式的模拟结果,研究了 2010 年青岛冷水团生消过程和演变机制。结果表明,山东半岛东南海域的中层冷水是青岛冷水团的雏形,于 4 月中旬演变为青岛冷水团,位于青岛东南外海 40m 以下的盐度锋面中;刻画了青岛冷水团的消亡过程:5 月青岛冷水团的北部底层水并入南黄海底层冷水中,构成南海海的西部冷中心;而南部水团面积大幅减小,温盐特征大幅上升;6 月上旬,青岛冷水团完全被南黄海底层冷水吞并,青岛冷水团完全消亡;揭示了青岛-石岛近海反气旋涡、黄海冷水团锋面密度环流对青岛冷水团的作用,前者是青岛冷水团存在的动力机制,后者加剧了底层海域的水平热量交换,促使了青岛冷水团的消亡。

**关键词** 青岛冷水团;中层冷水;青岛-石岛近海反气旋涡;黄海暖流;黄海冷水团锋面密度环流  
**中图分类号** P731 **doi:** 10.11693/hyhz20190600106

青岛冷水团(Qingdao Cold Water Mass, QCWM),存在于春季(3—6 月)青岛东南外海(120°30′—123°00′E, 35°00′—36°30′N)25m 以下的深层水域,是一个低温中盐(6.5—8.0°C, 31.5—32.5)季节性独立水团(郑东等, 1983),最早发现于 1959 年的中国海洋普查(赫崇本等, 1959)。由于其存在时间短、空间尺度小,多认为其由黄海沿岸水变性而成,属于黄海冷水团的一部分(林金祥等, 1981; 邱道立等, 1989; 邹娥梅等, 2000)。20 世纪 80 年代,对山东半岛渔场渔期洄游路线的研究发现,青岛冷水团的生消变化与周围渔场关系密切(郑东等, 1983; 张元奎等, 1989)。众多学者基于水团分析方法对青岛冷水团的成因和性质进行了一些研究,就青岛冷水团的季节演变得到一些认识:4 月下旬形成,5 月发展至鼎盛,并逐渐向东移动,温度与盐度均有所升高,6 月以后,逐渐与黄海底层冷水团相融而消失(郑东等, 1983; 张存义, 1986);虽然其存在时间较短,但具有独特的生消规律,被认为是一个独立水团。而后, Zhang 等(2002)基于观测数据,分析了青岛冷水团的水体来源和水团的温盐特性,认为青岛冷水团由绕过山东半岛南下

的渤海沿岸流在当地环境下形成,具有低温低盐高溶解氧的特性。张启龙等(2004)分析了青岛冷水团强度变化特征并认为其 3—4 月为形成期,5 月为鼎盛期,6—7 月为消亡期。但有航次观测到青岛冷水团在 8 月仍存在(鞠霞等, 2013)。于非等(2005, 2006)分析了青岛冷水团与黄海冷水团的关系,青岛冷水团 6 月份已经处于黄海冷水团边缘锋区,不再是局地的独立水团,而应是黄海冷水团的一个局地冷中心。之后,张启龙等(2016)基于气候态数据资料,提出了青岛冷水团的消亡的动力机理为反气旋涡的减弱,热力机理为热通量的下传和水平输入。靳姗姗等(2017)以气候态月平均资料驱动数值模式,对青岛冷水团进行了模拟,认为渤海沿岸流(也称鲁北沿岸流)输送的冷水为春季青岛冷水团的主要来源。

随着观测技术不断提高,对南黄海西部的水文环境认识不断深入。张启龙等(1994, 1996)观测到黄海逆温层的存在,并初步指出黄海暖流入侵对其的作用。1996 年中韩黄海水循环动力学合作调查发现南黄海西部存在中层冷水,认为其源于成山头近海的低盐冷水(汤毓祥等, 1999)。而将此时的青岛冷

\* 国家重点研发计划项目, 2016YFC140130 号;国家自然科学基金课题, U1706218 号。黄 浩, 硕士研究生, E-mail: haohuangjoseph@foxmail.com

通信作者: 陈学恩, 博士生导师, 教授, E-mail: xchen@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-06-06, 收修改稿日期: 2019-08-13

水团(122°E, 36°05'N)与上述中层冷水的核心位置(122°—122°30'E 附近)比较,发现二者的核心位置十分相近。邹娥梅等(2001)分析了南黄海西部中层冷水的季节演变规律,发现中层冷水于4月形成,5月达到鼎盛,6月逐渐北缩开始衰弱,这也与青岛冷水团的季节演变规律也大体一致。韦钦胜等(2011, 2013)分析了南黄海西部海域的四季水文和营养盐调查资料,认为青岛冷水团实质为山东半岛东南部海域中层冷水的核心部分。

需要指出,以往对青岛冷水团研究结论往往是分析观测资料得到的,张存义(1986)等基于南黄海20a的温盐资料,发现青岛冷水团的位置在不同年份存在差异,但没有给出青岛冷水团位置变化的机制解释。韦钦胜等(2013)提出了南黄海西部中层冷水和青岛冷水团有关,但没有对其进行更进一步的研究讨论。Li等(2015)指出冬季黄海暖流的强度能够影响到春夏季黄海冷水团的盐度。但就黄海暖流对青岛冷水团的形成是否产生影响没有进行研究,单个调查航次资料不足以刻画青岛冷水团的形成与演变特征,气候态资料则不足以刻画青岛冷水团的消亡过程。

为了揭示青岛冷水团生消过程和南黄海西部中

层冷水、青岛—石岛近海反气旋涡的关系,阐述青岛冷水团的变化机理,分析黄海冷水团锋面密度环流对上述海洋过程的影响,本文以2010年为例,基于有限体积近岸海洋模式FVCOM获得的高分辨率数值模式结果,结合前人的研究,对上述科学问题进行了阐述。本文结构如下:第一部分对使用的数据进行描述,第二部分基于实测资料对青岛冷水团形态特征进行分析,第三部分从模拟结果详细刻画青岛冷水团的生消过程和分析南黄海西部流场的变化对青岛冷水团的影响,第四部分总结青岛冷水团的生消机理。

## 1 数据来源及描述

根据青岛冷水团的范围,从国家自然科学基金项目“渤海海域科学试验研究”共享航次数据中选取青岛冷水团鼎盛期的4、5月期间大面站观测资料,观测时间分别为2010年4月20日—2010年5月5日和2014年4月27日—5月19日,关注区域为山东半岛东南海域,数据集变量涵盖温度、盐度和溶解氧三种,调查船为中国海洋大学“东方红2号”科学考察船,航次的具体站位布设如图1a所示。

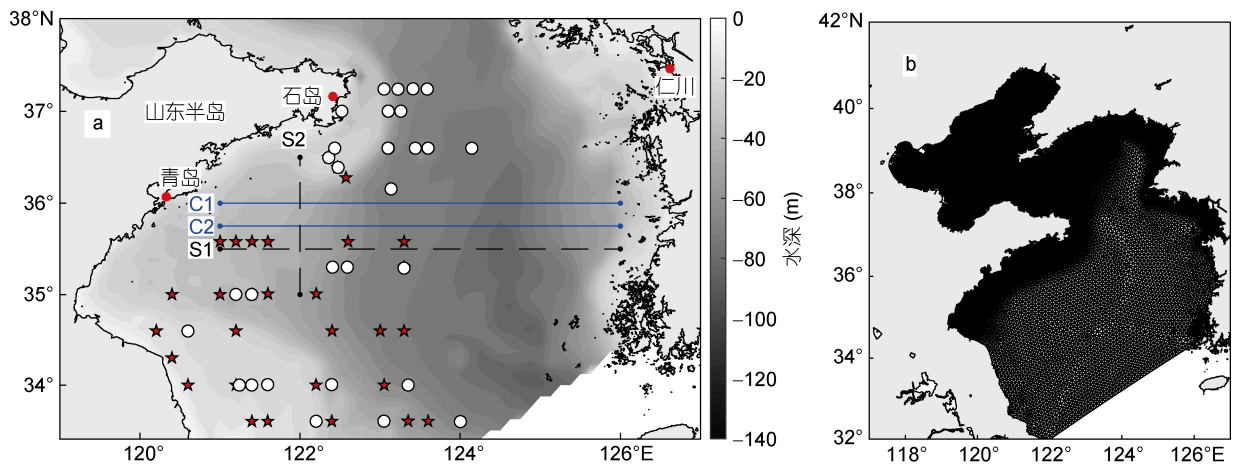


图1 观测站位示意图(a)与渤海黄海区模式网格(b)

Fig.1 Observation stations of the study areas and the gridding of Bohai Sea and Yellow Sea regional model (b)

注: C1, C2, S1, S2 分别对应为 36°N, 35.75°N, 35.5°N, 122°E 断面; 红色五角星: 2010 年 4 月航次站位; 白色圆点: 2014 年 5 月航次站位

由于有限次的调查资料不足以对青岛冷水团的生消过程进行刻画,因此本文基于有限体积近岸海洋模式FVCOM计算了2010年1月1日—12月31日的高分辨率的日平均的数值模式结果。模式的计算区域覆盖了渤海黄海区(117—127°E, 32—42°N),网格最高分辨率为290m,最低分辨率为14.7km,开边

界设置在江苏南通启东与朝鲜半岛西南部连线,网格的具体分布如图1b所示。模式中加入了八大主要分潮,开边界正压驱动的分潮调和常数来自美国俄勒冈州立大学(Oregon State University)潮汐同化反演模式(OSU Tidal Data Inversion);斜压驱动的温盐数据来自WOA13(World Ocean Atlas 2013)数据集,将

逐月的气候态数据线性插值后作为开边界处的温度与盐度, 并采用松弛迭代(Nudging)的方法, 原始方程斜压项改变, 进而改变开边界处流场的大小, 从而考虑黄海暖流的影响。模式强迫场来自 ERA—interim 分辨率为  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$  的数据集, 加入了海表面温度、蒸发、降水、气压、风速、比湿和热通量。

## 2 青岛冷水团的观测特征

对 2010 年 4 月下旬与 2014 年 5 月上旬的观测资料进行质量控制, 插值后得到的南黄海西部底层温盐分布如图 2 所示。4 月下旬(图 2a, 2b), 在青岛至石岛外海, 低温低盐水舌沿着 30m 等深线伸至  $36^{\circ}\text{N}$  以南, 与外海之间形成较强的温度与盐度梯

度。表明在春季 4 月下旬, 渤海沿岸流绕过山东半岛, 沿着岸线向山东半岛东南海域运输了大量低温低盐水, 在石岛外海( $122.3^{\circ}\text{E}$ ,  $36.5^{\circ}\text{N}$ )和青岛东南外海( $121.8^{\circ}\text{E}$ ,  $36^{\circ}\text{N}$ )形成了两个冷中心。核心水温约为  $6^{\circ}\text{C}$  和  $5^{\circ}\text{C}$ , 相应的盐度为 31.5 和 31.7, 对应的观测时间为 4 月 21 日前后。其中位于青岛东南外海的  $6^{\circ}\text{C}$  闭合低温水体, 核心温度较低, 面积较大, 结构比较稳定, 即是以往调查出现的青岛冷水团; 水团形态与低温低盐水舌形态几乎一致, 均呈现 NE—SW 向分布, 一定程度也反应渤海沿岸流是青岛冷水团的主要水体来源。同时 32 和 32.5 等盐线的西北向舌状分布, 表征青岛冷水团也受到黄海暖流高盐水的影响。

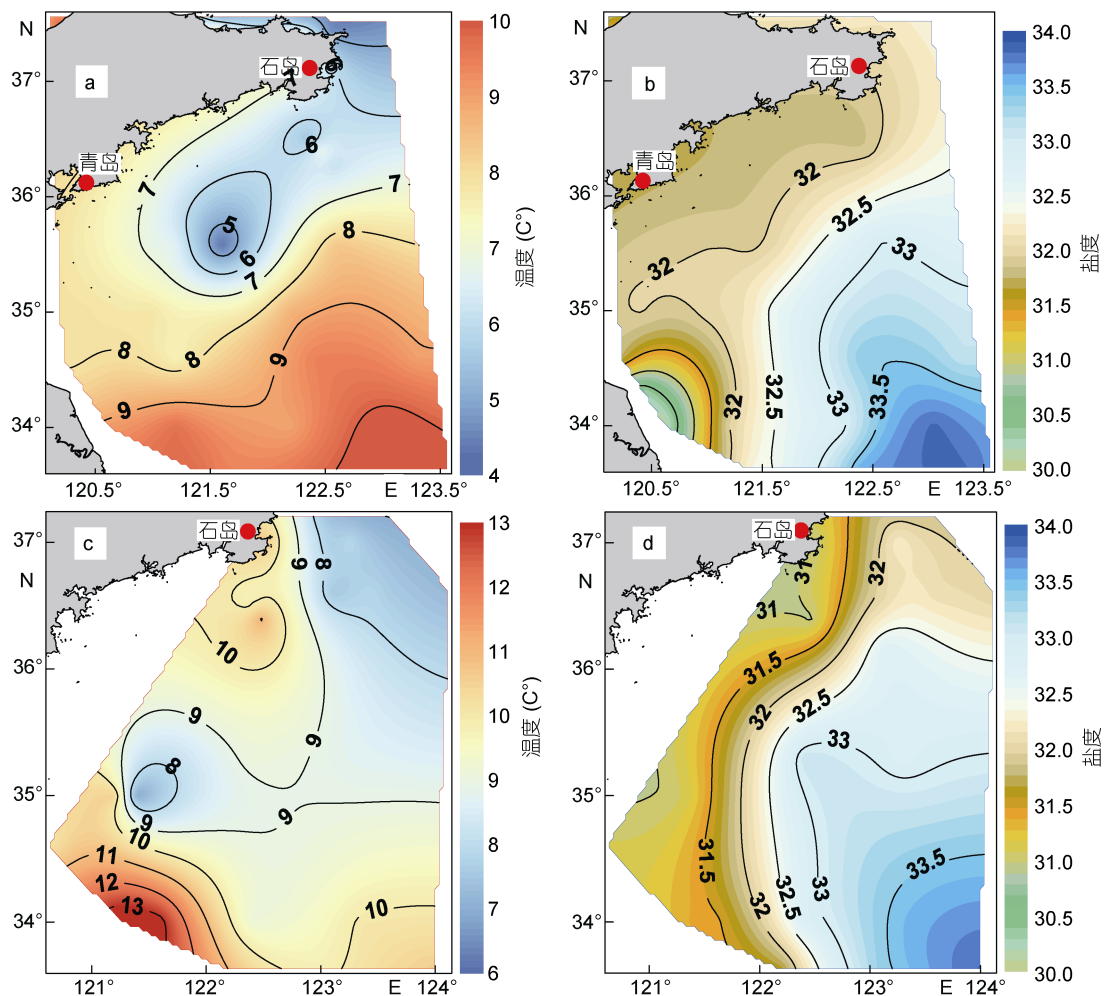


图 2 南黄海西部底层温( $^{\circ}\text{C}$ )、盐分布

Fig.2 Distribution of bottom temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and salinity in the southern Yellow sea

注: a 和 b 分别为 2010 年 4 月下旬航次的温度和盐度; c 和 d 为 2014 年 5 月上旬航次的温度和盐度

从 2014 年 5 月下旬底层温盐分布(图 2c、图 2d)中可以看出, 青岛至石岛近海底层的低温低盐水舌

已经消退, 但沿岸线仍存在着较强的盐度海洋锋。这是由于春季黄海高盐水势力的衰退, 加之降水和河

流入海淡水量的增加,使 32、33 等盐线南退,造成青岛外海的海洋锋强度比 4 月下旬较大。青岛东南外海的底层冷中心位于  $121.5^{\circ}\text{E}$ ,  $35^{\circ}\text{N}$  附近,核心温度约为  $8^{\circ}\text{C}$ ,水团面积大幅缩小,且内部的盐度梯度较大,相应的观测时间为 5 月 6 日前后。这意味着:青岛冷水团在 5 月上旬受到内外海水的入侵,温盐特性相较之前发生较大变化,使其低盐特征并不明显,是一低温中盐水体。

两次航次均没有捕捉到南黄海西部中层冷水现象,这与航次调查的时间与站位设置有关。青岛冷水团形态强度的变化特征也与前人的结果(张启龙等, 2016; 靳姗姗等, 2017)基本吻合,综合以上分析显示:青岛冷水团于 4 月下旬在青岛-石岛外海底层鼎盛,是一个以低温中盐为特征的浅海水团;最低温度约为  $5^{\circ}\text{C}$  左右,存在于盐度锋面之中。于 5 月强度有所减弱;在其演变过程中,水团体积逐渐缩小,内部温度持续上升,并缓慢向南移动。

### 3 数值模拟结果讨论

#### 3.1 青岛冷水团的生消过程

通过分析由 FVCOM 海洋模式计算得到的 2010 年全年的底层温盐数据来细致刻画青岛冷水团的生消过程,选取青岛冷水团演变的代表时刻,绘制底层温度分布如图 3 所示,即形成前(图 3a)、鼎盛时(图 3b)、衰弱时(图 3c)、消亡前(图 3d)的四个

时刻。在 3 月(图 3a),在山东半岛东南海域黄海暖流暖水舌的西北路径已经衰退至  $36^{\circ}\text{N}$  以南,  $123^{\circ}\text{E}$  以东。由于其北上的阻碍作用迅速减弱,因而渤海沿岸流的路径开始向东推移,逐渐演变为南向流,沿 30m 等深线可扩展至  $36^{\circ}\text{N}$  以南,表现为温度低于  $6^{\circ}\text{C}$  的低温水舌。结合图 4a 青岛近海的 3 月底层盐度分布可见,山东半岛东南海域底层为温度盐度均较低的区域,低温低盐水舌绕过山东半岛向南入侵,直至青岛东海外海附近,存在 NE—SW 方向的低温低盐水舌,而黄海暖流的高温高盐水舌位于  $122^{\circ}\text{E}$  以东并呈现衰退趋势,这与刁新源(2015)分析的结果一致。冬季黄海暖流西北路径输送的高盐水则残留在青岛近海,使东西两侧高盐的黄海暖流水与中间的低盐水舌之间形成了较强的海洋锋。反映了青岛—石岛外海的低温低盐水舌在发展过程中,不断与周围高温高盐的黄海暖流残留水混合,为 4 月青岛冷水团的产生创造了独特条件。

在青岛冷水团形成之初,选取 S1 断面以及青岛冷水团形成位置(图 4a 中 A 点)的温度剖面,对青岛冷水团的形成特性进行刻画。3 月初,渤海沿岸流在山东半岛东南外海输送的低温水,叠加在底层的黄海暖流残留水之上,于 3 月初发展为南黄海西部的中层冷水(图 5a),处于在山东半岛东南外海的低盐冷水区 10—30m 的水层中,该层的温度(低于  $6^{\circ}\text{C}$ )低于它的上、下层(汤毓祥等, 1999)。结合 A 点温度剖面的演

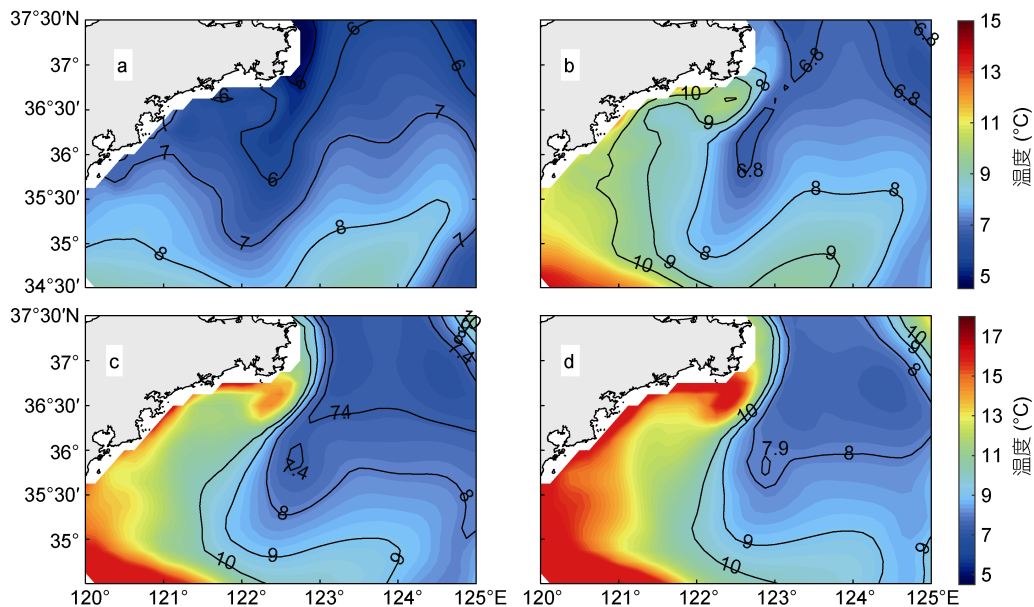


图 3 青岛冷水团演变过程的模拟结果

Fig.3 Stimulated evolution of the Qingdao Cold Water Mass  
a: 03月27日; b: 04月27日; c: 05月21日; d: 06月10日

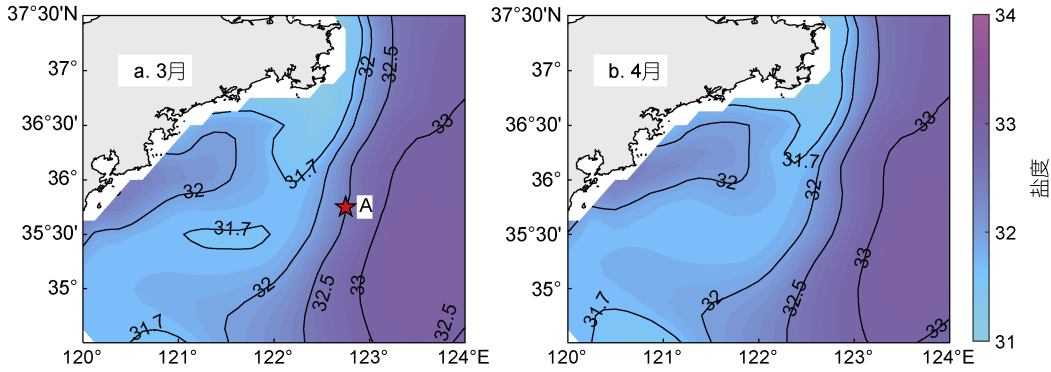


图 4 模拟的 3 月(a)与 4 月(b)南黄海底层盐度月平均分布

Fig.4 Stimulated distribution of bottom mean monthly salinity in March (a) and April (b) of the southern Yellow Sea  
注: A 点(122.75°E, 35.75°N)为青岛冷水团的形成中心位置

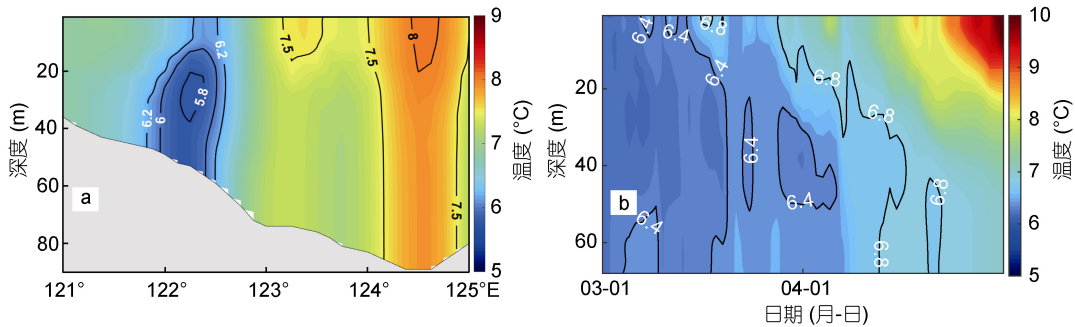


图 5 南黄海西部中层冷水(a)与其演变过程(b)

Fig.5 Development of the western intermediate cold water in the southern Yellow Sea

注: a: 3 月 6 日 S1 断面温度分布, 其中 125°E 以东略去; b: A 点(122.75°E, 35.75°N)3—4 月剖面温度时间序列; 白色标注: 中层冷水区域; 黑色标注: 黄海暖流区域

变过程(图 5b), 在 3 月下旬, 山东半岛东南外海(122.5—123°E, 35.5—36°N)的 25—40m 深处形成一闭合低温水体, 6.4°C 等温线呈闭合状, 根据以往的调查结果(邹娥梅等, 2001; 韦钦胜等, 2013), 即为南黄海西部中层冷水的核心部分, 但此时并不具有独立的水团结构。随着表层水温上升, 季节性温跃层开始形成, 阻碍了热量的下传, 4 月初, 南黄海西部中层冷水与底层水混合后, 底层冷水团在 40m 以深迅速发展。这一模拟结果, 从数值上验证了“青岛冷水团是南黄海西部中层冷水的核心部分(韦钦胜等, 2013)”这一认识。

综合青岛冷水团的演变过程, 青岛冷水团于 4 月下旬在青岛东南外海(122.75°E, 35.75°N 附近)鼎盛, 6.8°C 等温线呈封闭状, 呈 NE—SW 方向并迅速发展, 在其周围海域形成较强的温度梯度。此时绝大多数海域已经出现了较强的垂向温跃层, 表、底层的温度分布差异逐渐增大。到 5 月下旬(图 3c), 青岛冷水团的面积有所缩小, 水体在温跃层的屏障作用下, 存在于

123°E, 35.5°N 以南的底层水域, 但水团特性已经发生显著变化, 核心温度迅速上升至 7.4°C, 水团形状由原来的 NE—SW 状演变为“球”状。同时, 潮汐海洋锋的增强造成黄海底层冷水团向西南延伸(赵保仁, 1985), 7.4°C 等温线可以南伸至 37°N 以南。此时的青岛冷水团温度上升至和黄海冷水团边界水温相近, 逐渐与黄海底层冷水相融。图 3d 中可以看到, 6 月初, 青岛冷水团已经位于夏季黄海冷水团核心 8°C 等温线中, 这意味着此时的青岛冷水团已经完全被黄海冷水团所吞并, 标志着青岛冷水团正式消亡。

需要指出, 有部分学者认为青岛冷水团夏季仍然存在, 且冷中心范围较大(鞠霞等, 2013)。但夏季观测所谓的“青岛冷水团”均已经存在于南黄海潮汐海洋锋面内, 属于黄海冷水团的一个局地冷中心, 此时的“青岛冷水团”的温盐特性已经发生变化, 与春季 4 月具有独特温盐特性的青岛冷水团并不相同。此外, 对于本次青岛冷水团的温盐模拟结果, 4 月核心温度与实测相差 1°C 左右, 这可能是没有使用数据同化所

造成的;除此之外,由于没有考虑径流的影响,以及开边界的黄海暖流的强迫设置使与实际存在偏差,造成模拟的冷水团位置与实测偏东。

为了进一步分析青岛冷水团的垂向演变特征,选取C1与C2两个断面进行刻画(图1a),并计算出青岛冷水团核心温盐的月变化如表1所示。从图6的C1断面月平均的温盐分布可以看到,3月,36°N断面东西两侧均存在冷中心,分别位于122.5°E附近和125°E以东,水温均低于6°C,冷中心之间为较高温的黄海暖流残留水(高于7°C)。随着春季黄海暖流强度的减弱,到4月(图6c),C1断面的西部冷中心向深层移动并逐渐底层水混合,在底层形成一闭合冷水,核心温度为6.4°C,青岛冷水团正式形成。至此,南黄海底层存在着三个冷水团:西侧的青岛冷水团、中部南黄海底层冷水团和东侧的仁川外海冷水团。但底层

(图6d)青岛冷水团的核心盐度有所升高。结合表1中3、4月青岛冷水团区域的核心温度盐度定量结果,揭示了在青岛冷水团的形成过程中,青岛冷水团存在于底层的盐度锋面中,底层黄海暖流残留水与渤海沿岸流输入的低温低盐水不断混合,使其盐度不断升高,成为春季青岛冷水团的水来源。

表1 青岛冷水团核心月平均温盐特性  
Tab.1 Mean monthly temperature (°C) and salinity in the core of Qingdao Cold Water Mass

月份	温度(°C)	盐度
3	5.4	31.7
4	6.4	31.8
5	7.4	32.4
6	8.2	32.6

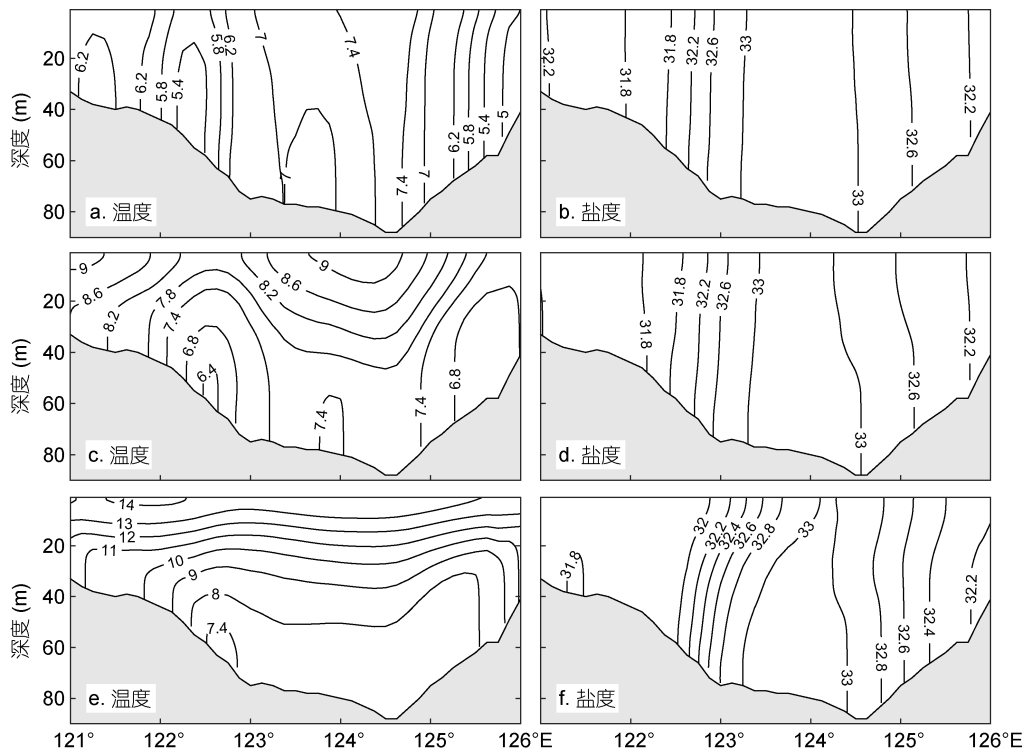


图6 3月(a, b)、4月(c, d)和5月(e, f)C1断面温度(°C)与盐度月平均分布

Fig.6 Distribution of mean monthly temperature (°C) and salinity in C1 transect in March (a, b), April (c, d), and May (e, f)

从5月C1断面的温盐分布变化可以得到(图6e),南黄海底层西部冷中心已经出现,并位于南黄海底层冷水的8°C等温线内,进一步印证5月黄海底层冷水已经出现南扩和西伸现象。结合5月C2断面的温度分布(7a)特征得到,青岛冷水团的北部(36°N以北)最先与南黄海底层冷水融为一体,而残余的冷水核

心位置处于122.7°E, 35.75°N附近,与南黄海底层冷水二者相邻。到6月初(图7c),青岛冷水团已经融入南黄海低层冷水,构成了南黄海低层冷水的西部冷中心。结合表1中5、6月青岛冷水团区域的核心温度盐度定量结果,揭示了在青岛冷水团的消亡过程中,青岛冷水团存在于底层的盐度锋面中,其北部逐

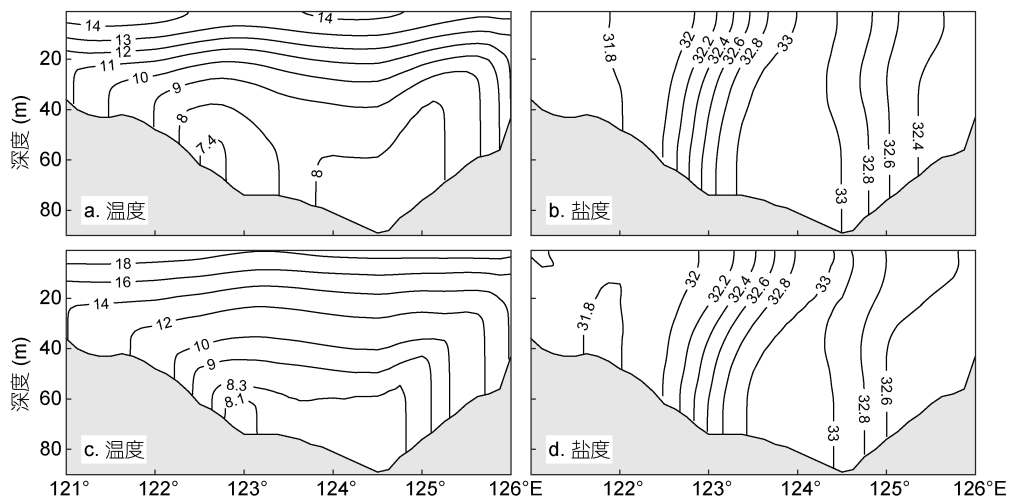


图 7 5 月(a, b)、6 月 10 日(c, d)C2 断面温度(°C)与盐度分布

Fig.7 Distributions of temperature (°C) and salinity in C1 transect in May (a, b) and on June 10 (c, d)  
注: a, b 为 5 月 C2 断面温盐月平均结果; c, d 为 6 月 10 日 C2 断面温盐日平均结果

渐被南扩的黄海冷水团所吞并, 造成水团形状改变, 温度盐度显著上升, 面积大幅缩小。到 6 月上旬, 青岛冷水团完全和南黄海低层冷水相融, 成为南黄海低层冷水的西部冷中心。

### 3.2 南黄海西部流场的演变特征及其对青岛冷水团的影响

已有研究表明, 青岛—石岛附近海域存在一个中尺度反气旋式涡旋(Zhang *et al*, 1987), 其位置与青岛冷水团的位置相近, 徐丹亚等(1998, 1999)从数值上揭示了夏季偏南风激发的东北向流与南下的沿岸流相互作用, 进而形成了反气旋涡旋。本次模拟结果

显示, 青岛—石岛近海反气旋涡在 4 月初现, 5 月在 20m 以深正式形成。图 8 展示了 4—7 月份南黄海西部月平均 20m 流场结构, 在 4 月(图 8a), 山东半岛东南外海上空盛行东南季风, 在山东半岛沿海岸域 20m 层激发起较强的东北向流, 沿着岸线流向石岛近海, 与南下强度较弱的渤海沿岸流相遇, 形成不闭合的顺时针环流, 至 5 月在 122°E, 35.5°N 附近演变成为闭合反气旋式涡旋(图 8b)。该涡旋核心(122.4°E, 35.7°N)流速非常小(低于 1cm/s), 且由于西侧海域水深较浅, 受风的作用较大, 涡旋边界的西侧流速大于东侧, 从位置和特征来看, 即是以往研究的青岛—石

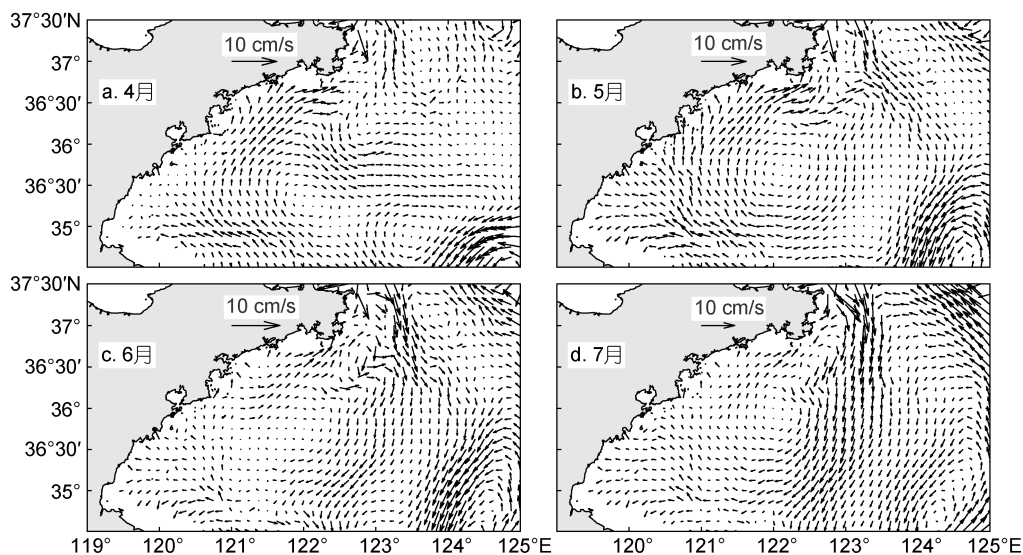


图 8 南黄海西部 4—7 月月平均 20m 层流场

Fig.8 The stimulated western mean monthly 20m flow fields in the southern Yellow sea from April to July

岛近海反气旋涡。6月(图 8c), 在石岛东部外海 123°E 以东, 南向流有所增强, 显示黄海冷水团锋面密度环流开始形成。至 7 月(图 8d), 该南向流逐渐增强, 与南黄海东部的北向流形成气旋式环流, 这与赵保仁(1987)的观点一致。青岛—石岛近海反气旋涡于 6—7 月持续减弱, 8 月完全消亡(图未展示)。

为了分析该涡旋的垂向演变, 从图 9 的 5—7 月 S1 断面经向流速分布(图 9a、图 9c、图 9e)分析得到, 在南黄海西侧陆架 20m 以深海域, 均存在较强的北向流, 表明春夏东南季风可以作用至山东半岛东南

近海底层。在 122—123°E 附近的南向流由于受到黄海冷水团锋面密度环流的影响, 流速逐渐增大, 至夏季 7 月, 影响范围能够延伸至 40m 深, 这与 Xia 等(2006)模拟的结果一致; 而 125°E 以东海域的北向流逐渐增强, 结合图 8c 的 20m 水平流场, 表明黄海冷水团锋面密度环流已经形成。图 9 下方 S2 断面纬向流速分布特征也表明, 5 月山东半岛东南外海的东向沿岸流强度较大, 主要位于 36°—36.5°N 处(图 9b), 与东西两侧的南北环流系统(图 9a)共同形成了青岛—石岛近海反气旋涡。

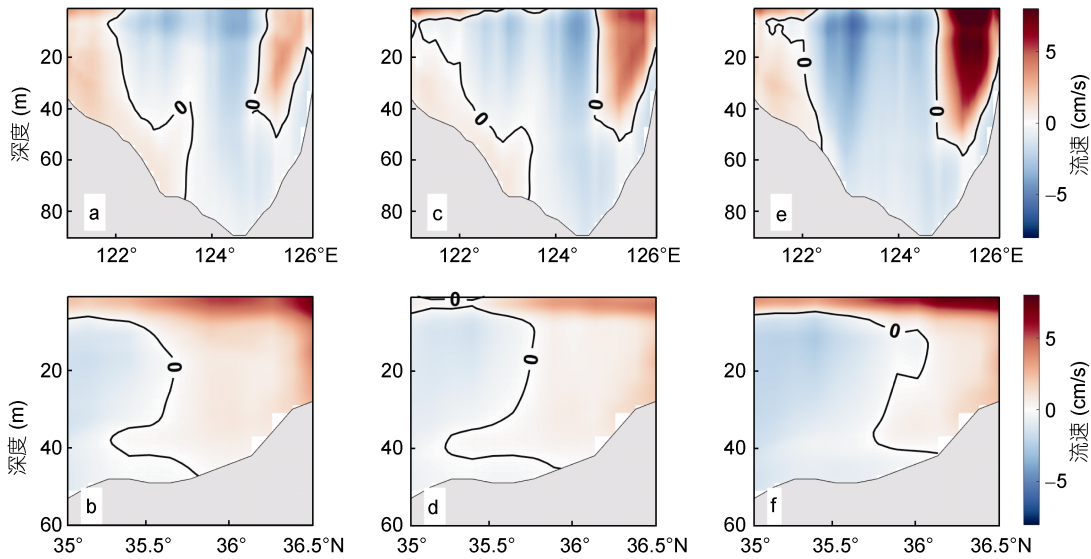


图 9 南黄海 S1 断面(a, c, e)经向、S2 断面(b, d, f)纬向流速填充图

Fig.9 Meridional and zonal velocity of S1 (a, c, e) and S2 (b, d, f) transects in southern Yellow Sea  
注: a 和 b、c 和 d、e 和 f 分别为 5、6、7 月月平均结果

伴随着海水层化的增强, 潮汐海洋锋使黄海冷水团边界向岸界扩展(赵保仁, 1985), 相应的黄海冷水团锋面密度环流逐渐增强并向西南岸界发展, 成为夏季的黄海沿岸流(赵保仁, 1987); 青岛—石岛近海反气旋涡的东部逐渐被较强的黄海冷水团锋面密度环流所作用。5—7 月盛行的偏南风均有助于山东半岛东南海域东北向沿岸流的发展, 对反气旋涡的形成是有利的(徐丹亚等, 1998), 但 S1 断面 122°E 附近的北向流区域与 S2 断面 36°N 附近的东向流区域均呈现缩小的趋势, 且强度有所减弱, 因此黄海冷水团锋面密度环流的入侵是造成青岛—石岛近海反气旋涡逐渐减弱的直接原因。至 8 月, 青岛—石岛近海反气旋涡完全消亡。

在 4 月, 青岛东南海域 20m 以下的青岛—石岛近海反气旋涡开始形成, 该涡旋核心强度较弱; 而青岛

冷水团的中心位置(122.5°E, 35.8°N)正处于该涡旋核心附近(122.4°E, 35.7°N), 能够保证青岛冷水团受水平扰动较小, 因此青岛—石岛近海反气旋涡的独特结构阻碍了水平热量的输送, 是青岛冷水团存在的动力机制。与此同时, 青岛东南海域跃层强度较大, 阻碍了表层向底层垂向热量的输送; 因而较强的温度跃层是青岛冷水团存在的热力机制。二者的共同作用使青岛冷水团在春季 4 月得以形成, 是青岛冷水团形成的必要条件。但随着黄海冷水团锋面密度环流逐渐增强, 破坏了青岛—石岛近海反气旋涡的结构, 并加剧了底层海域的水平热量交换, 加速了青岛冷水团的消亡。

结合前面的分析, 对青岛冷水团的演变有了新的认识, 渤海沿岸流输送的低温沿岸水, 首先在 3 月山东半岛东南外海 25m 层形成中层冷水, 而中层冷



水的核心是青岛冷水团的雏形, 验证了青岛冷水团 3 月 25m 层以下形成这一观测事实(Zhang *et al*, 2002)。中层冷水的演变过程受春季黄海暖流残留水的影响(邹娥梅等, 2000; 韦钦胜等, 2013), 随着黄海暖流残留水的不断衰退, 不断与底层水混合。而冬季黄海暖流强度与流轴存在显著的年际变化(王辉武等, 2009), 因此青岛冷水团不但盐度特性会受到黄海暖流高盐水的作用, 而且形成位置也会受到春季黄海暖流衰退强度的影响。猜测黄海暖流的强度与路径的年际震荡可能是造成青岛冷水团形成位置上的年际变化的原因, 从而能够使每年青岛冷水团存在时间更长或更短。若底层冷水团形成位置偏东, 5 月份受到黄海冷水团锋面密度环流的影响也随之增大, 青岛冷水团存在时间将会更短; 反之, 青岛冷水团的存在时间会更长; 这是因为形成位置偏西, 受黄海冷水团的影响时间也随之后移。

#### 4 结论

本文基于实测资料, 证实了春季 4—5 月青岛冷水团的存在。并结合数值资料刻画出青岛冷水团的演变过程: 于 3 月末初现, 4 月初形成, 5 月衰弱, 6 月上旬消亡。从数值上揭示了渤海沿岸流输送的低温低盐水最先在青岛—石岛外海形成南黄海西部中层冷水, 南黄海西部中层冷水的核心是青岛冷水团的雏形。春季较强的温度跃层是青岛冷水团存在的热力机制; 而青岛—石岛近海反气旋涡阻碍了水平方向的热量输送, 是青岛冷水团存在的动力机制。验证了黄海冷水团锋面密度环流对青岛冷水团消亡的作用, 即破坏了青岛—石岛近海反气旋涡的结构, 加剧了底层海域的水平热量交换。青岛冷水团的北部底层水首先并入南黄海底层冷水中, 发展成为南黄海的西部冷中心, 而南部底层水继续演变, 水团面积大幅减小, 温盐特征大幅上升与南黄海冷水团相邻。至 6 月上旬, 青岛冷水团完全并入南黄海底层冷水, 青岛冷水团完全消亡。

致谢 本文观测数据来自国家自然科学基金共享航次, 值航的是中国海洋大学“东方红 2 号”科考船和船上调查队, 在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

刁新源, 2015. 黄海暖流、黄海冷水团及其春季演变过程研究. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文  
于 非, 张志欣, 刁新源等, 2006. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析. 海洋学报, 28(5): 26—34

于 非, 张志欣, 兰 健等, 2005. 南黄海春季水温分布特征的分析. 海洋科学进展, 23(3): 281—288  
王辉武, 于 非, 吕连港等, 2009. 冬季黄海暖流区的空间变化和年际变化特征. 海洋科学进展, 27(2): 140—148  
韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨等, 2011. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质运输的影响. 地球科学进展, 26(2): 145—156  
韦钦胜, 于志刚, 葛人峰等, 2013. 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. 海洋与湖沼, 44(4): 890—905  
汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰等, 1999. 初春南黄海水文特征及环流状况的分析. 海洋学报, 21(5): 1—11  
邱道立, 周诗贵, 李昌明, 1989. 应用聚类分析法划分黄海水团的初步研究. 青岛海洋大学学报, 19(1): 86—98  
邹娥梅, 徐伯昌, 王宗山等, 2001. 南黄海西部中层冷水特征的时空变化. 黄渤海海洋, 19(2): 10—16  
邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥等, 2000. 1996 年春季南黄海水文特征和水团分析. 海洋学报, 22(1): 17—26  
张元奎, 贺先明, 高永福, 1989. 北黄海及渤海变性水团的初步分析. 青岛海洋大学学报, 19(1): 99—108  
张存义, 1986. 青岛冷水团强度的划分及其多年变化的分析. 海洋科学, 10(3): 48—51  
张启龙, 刘志亮, 齐继峰等, 2016. 青岛冷水团的消亡机理研究. 海洋学报, 38(5): 27—33  
张启龙, 杨玉玲, 程明华, 1994. 南黄海春季温、盐结构特征分析. 海洋科学, 18(6): 50—55  
张启龙, 侯一筠, 程明华等, 2004. 青岛冷水团强度的变化特征. 海洋科学集刊, 46(1): 13—21  
张启龙, 翁学传, 杨玉玲, 1996. 南黄海春季水团分析. 海洋与湖沼, 27(4): 421—428  
林金祥, 宋万先, 1981. 黄海冷水团的基本特征. 海洋研究, (4): 1—13  
郑 东, 张瑞安, 1983. 烟威及石岛近海春季水团分析. 海洋通报, 2(1): 61—68  
赵保仁, 1985. 黄海冷水团锋面与潮混合. 海洋与湖沼, 16(6): 451—460  
赵保仁, 1987. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋区环流结构的初步研究. 海洋与湖沼, 18(3): 218—226, 313  
徐丹亚, 赵保仁, 1998. 冬季青岛—石岛近海中尺度涡旋数值模拟. 海洋科学, 22(2): 64—67  
徐丹亚, 赵保仁, 1999. 青岛—石岛近海反气旋中尺度涡旋存在证据及数值模拟. 海洋学报, 21(2): 18—26  
靳姗姗, 孙俊川, 魏泽勋, 2017. 渤海沿岸流季节变化对青岛冷水团影响的初步分析. 海洋科学进展, 35(3): 317—328  
赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友等, 1959. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 2(1): 11—15  
鞠 霞, 熊学军, 2013. 渤、黄、东海水温季节变化特征分析. 海洋科学进展, 31(1): 55—68  
Li A, Yu F, Diao X Y, 2015. Interannual salinity variability of the northern Yellow Sea cold water mass. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 33(3): 779—789  
Xia C S, Qiao F L, Yang Y Z *et al*, 2006. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model. Journal of Geophysical Research: Oceans, 111(C11): C11S03  
Zhang Q L, Liu X Q, Cheng M H *et al*, 2002. Characteristics and

formation causes of Qingdao cold water mass. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 20(4): 303—308  
Zhang F G, Mao H L, Leng Y G *et al*, 1987. Analysis of drift

bottle and drift card experiments in Bohai Sea and Huanghai Sea (1975—80). Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 5(1): 67—72

## EVOLUTION AND MECHANISM OF THE QINGDAO COLD WATER MASS

HUANG Hao, CHEN Xue-En, LIN Lin

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean university of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** The evolution and mechanism of Qingdao Cold Water Mass (QCWM) in the South Yellow Sea off Qingdao in the south of the Shandong Peninsula, China, are studied using hydrological data and simulation results of three-dimensional ocean model FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model). We found that the intermediate cold water in the southeastern waters of the peninsula is the prototype of the QCWM stationed in the salinity front of bottom water after its full formation below 40m in April. In May, the northern part of the QCWM joins with the southern Yellow Sea Cold Water Mass (SYSWM) and forms the western cold center of the South Yellow Sea. Meanwhile, the southern part continues to shrink, in which temperature and salinity rise sharply, and merges to the SYSWM at last. In early June, the QCWM is taken entirely by SYSWM and disappears in the end. In addition, our numerical simulation shows that the Qingdao-Shidao offshore mesoscale anticyclonic eddy is the dynamic source of QCWM and the frontal density circulation of the Yellow Sea Cold Water Mass promotes the heat exchange, which accelerates the termination of QCWM.

**Key words** Qingdao Cold Water Mass (QCWM); intermediate cold water; Yellow Sea Warm Current; Qingdao-Shidao offshore mesoscale anticyclonic eddy; Yellow Sea Cold Water Mass frontal density circulation