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,构成南黄海的西部冷中心;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 了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

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

^{*} 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

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"渤黄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。





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 区域覆盖了渤黄海海域(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°×0.125°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°N 以南, 与外海之间形成较强的的温度与盐度梯 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°E,36.5°N)和青岛东南外海(121.8°E,36°N)形成了两个冷中心。核心水温约为6°C和5°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°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(°C)、盐分布 Fig.2 Distribution of bottom temperature (°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 温中盐水体。

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°E, 35°N 附近, 核心温度约 为 8°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

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°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°N 以南, 123°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°N 以南. 表现为温度低于 6℃ 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°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°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

37°30'N 37°30'N 34 37 **a**. 3月 b. 4⊟ 37 36°30' 36°30 33 医管 36 36 A 35°30 32 35°30 35° 35° 31 124°E 120 121 122 123 124°F 120 121 122 123





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。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 Qingudo Colu Water Muss			
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,进一步应证 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,在山东半岛沿岸海域 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



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输运的影响.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,周诗赉,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 MECHNISM 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