

2007 年春季南黄海中层冷水特征及成因

刁新源^{1,2,3,4}, 王建丰^{1,3}, 魏传杰^{1,3,4}, 司广成^{1,3}, 于非^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院海洋研究所 环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院海洋研究所 工程技术部, 山东 青岛 266071)

摘要: 本文根据 2007 年南黄海的 CTD 调查资料, 分析了南黄海中层冷水的 10 个示性特征及其分布特征, 指出 2007 年春季中层冷水主要出现于 35°N 以北的海域, 核心区主要位于 50 m 等深线附近, 中心深度位于 25~40 m, 宽度约为 100 km, 厚度为 10~25 m, 跃变强度为 0.04~0.14 °C/m。对比分析冬季与夏季温度、盐度及实测海流资料, 南黄海春季出现的中层冷水主要是黄海暖流、沿岸冷水以及春季表层升温等过程的综合作用结果。

关键词: 南黄海; 中层冷水; 示性特征; 成因

中图分类号: P72 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)04-0001-12

DOI: 10.11759/hyxx20200521002

毛汉礼等^[1]根据普查资料在《全国海洋普查报告》提出了东海逆温层现象。翁学传^[2]、蓝淑芳^[3]分别利用 1958—1965、1975—1980 及 1959—1981 年的东海水温资料, 对中层冷水特征进行了描述, 其中翁学传还对中层冷水形成的原因进行了探讨。丁宗信等^[4-5]利用 1983 年获取的高分辨率水文调查资料深入分析了黄、东海春、秋季出现的逆温现象, 明确指出黄海暖流和台湾暖流所带来的高温水在底层向北向岸伸展和切入是造成温度逆转的主要原因。基于 1959—1996 年 3—6 月份的水温资料, 徐伯昌等^[6]定义了中层冷水的 8 个示性特征值, 并指出东海西北部中层冷水于 3 月份出现, 4 月形成, 5 月强盛, 6 月消亡。这是国内科学家首次阐明中层冷水的时空分布特征及其产生和消亡的机制。

对于黄海的中层冷水现象, 张启龙等^[7-8]利用 1992 年的温、盐资料进行黄海的水团分析最早提出了黄海逆温层的存在, 并初步认为其成因是黄海暖流的入侵。同一时期, 利用中韩“黄海水循环动力学及物质输运”合作研究项目第一航次获得的 CTD (电导率、温度、深度, conductivity temperature depth) 资料, 汤毓祥等^[9]和邹娥梅等^[10]确认了黄海中层冷水现象的存在, 其研究指出, 初春黄海暖流减弱过程首先发生在上层, 底层的变化缓慢, 伴随着黄海暖流水北上势力的减弱, 上层陆架峰东移, 亦即黄海西部混合水向东、向南扩展。初春黄海西部混合

水位于水深约 30 m 的浅水区, 上层增温明显, 温跃层已形成, 下层(约 15 m 以下水层)仍保持冬季的低温状态, 但其密度比黄海暖流小。当这一水体向东、向南扩展至黄海暖流水上方时, 黄海西部的下层水便成为中层水, 且其位于密度跃层之内, 是风混合和潮混合作用最小的水层, 因此中层冷水得以维持。综合这些调查资料, 邹娥梅等^[11]绘制了黄海中层冷水的 8 个示性特征值, 结果表明南黄海的中层冷水具有明显的季节性, 同时也指出黄海暖流是其形成的主要原因之一。在这些工作基础上, 徐伯昌等^[12]通过中层冷水的自模函数模拟验证了含有中层冷水的垂直热结构同样存在自模性。

南黄海中层冷水现象的一个重要组成部分就是青岛外海的冷水团。1983 年, 郑东等^[13]初步分析了烟台、威海及石岛近海春季出现的冷水团的温、盐特性。随后, 张启龙等^[7-8, 14]利用 1980 年获得的温、盐资料分析指出青岛冷水团 3 月份出现, 4 月份形成, 5 月份

收稿日期: 2020-05-21; 修回日期: 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41176018, 41206014); 中国科学院战略性先导科技专项项目(A类)(XDA11020301)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, Nos. 41176018, 41206014; The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA11020301]

作者简介: 刁新源(1979—), 男, 山东青岛人, 博士生, 主要从事区域海洋学研究, 电话: 0532-82896905, E-mail: diaoxinyuan@qdio.ac.cn; 于非(1969—), 通信作者, 男, 山东青岛人, 研究员, 电话: 0532-82898187, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

达到最强, 6 月份减弱, 7 月份消失, 其来源是低温、低盐的鲁北沿岸水, 形成过程既有动力因素(逆时针环流)也有热力因素(春季增温)。后来张启龙等^[13]又利用 1959—1999 年获取的温、盐资料对青岛冷水团的长期变化趋势进行了分析, 指出其年际变化与 ENSO 循环有较好的相关特性。于非等^[15-16]利用美国海军高时空分辨率的通用数字环境模型(Generalized Digital Environmental Model, GDEM)三维水温资料分析指出, 春季在南黄海西侧会出现青岛冷水团, 且在冷水团的临近海域中还存在着中层冷水, 在春末夏初, 随着黄海冷水团的发展, 青岛外海冷水团所处海域事实上已经是黄海冷水团锋区所在, 从冷中心所处位置及温、盐性质看, 南黄海西侧冷水中心不应认为是局地型的冷水团所在, 应是黄海冷水团的组成部分。

本文展示了对黄海中层冷水的分布范围、示性特征及成因的分析结果。该分析是在以上研究的基础上, 利用 2007 年 4 月份高空间分辨率的大面调查资料, 结合潜标海流等观测结果开展的。

1 资料

本文采用 2007 年 4 月份南黄海调查资料, 调查区域自 30°~37°N, 124°E 以西海域。此次调查共设计调查站点 256 个 CTD 测站, 站间距为 15', 断面间隔 20', 垂向分辨率为 1 m, 这也是国内首次在该海域进行如此高空间分辨率的大面调查。调查使用美国 Seabird 公司的 SBE911 型 CTD 进行温度、盐度数据的采集, 温度精度为±0.001 °C, 电导率精度为±0.000 3 S/m。

与此次调查同步布放了 5 套潜标系统(M1、M2、M3、M4、M5), 位置见图 1, 具体信息见表 1。主要搭载了美国 RDI 公司的 Workhorse 型 300 kHz ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)和日本 Alec 公司的 TD(Temperature Depth)分别进行流速剖面、底层温度和深度观测。ADCP 采样的空间分辨率为 2 m, 时间间隔为 10 min, Alec TD 采样的时间间隔为 10 min。此外, 中国科学院海洋研究所近海观测网络系统于山东头外海布放综合观测浮标一套(图 1 中的 M6), 本文采用 2012 年 2 月—2012 年 5 月的资料进行分析。海流资料使用 RDI 300 kHz ADCP 向下观测, 垂向分辨率为 2 m, 采样时间间隔为 0.5 h。

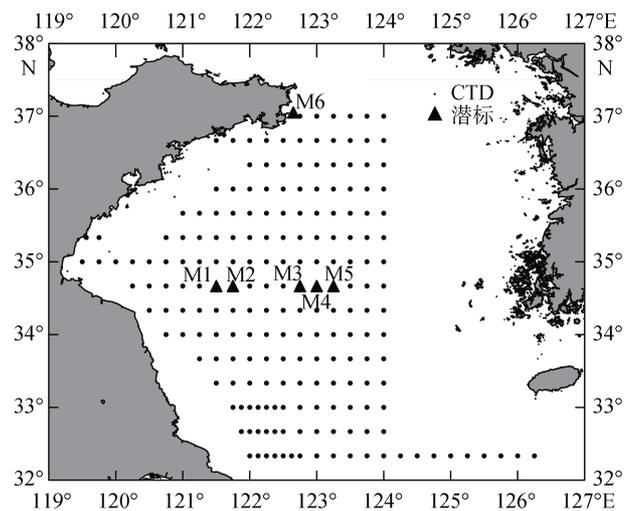


图 1 CTD、潜标站位

Fig. 1 CTD and submerged buoy stations

表 1 潜标站位

Tab. 1 Submerged Buoy Stations

| 站点名称 | 经度(E) | 纬度(N) | 水深/m | 投放时间 |
|------|------------|-----------|------|-----------------------|
| M1 | 121°30'02" | 34°39'53" | 40 | 2007-04-06—2007-05-27 |
| M2 | 121°44'56" | 34°40'04" | 46 | 2007-04-06—2007-04-12 |
| M3 | 122°45'00" | 35°00'00" | 80 | 2007-04-06—2007-05-27 |
| M4 | 123°00'03" | 34°40'00" | 83 | 2007-04-06—2007-04-22 |
| M5 | 123°15'00" | 34°39'56" | 86 | 2007-04-06—2007-05-26 |
| M6 | 122°39'00" | 37°03'08" | 42 | 2011-02-19—2011-05-06 |

2 中层冷水的时空分布特征

根据 2007 年 4 月份获取的现场 CTD 数据, 获取南黄海的温度、盐度的空间分布和断面分布, 如图 2、图 3 所示。

进入春季, 随着太阳辐射增强, 水温升高。由于

浅水区增温比深水快, 从表层温度分布上可以看到, 在苏北近海海域温度等值线近似平行于海岸线。同时可以看到一支非常明显的冷水南下深入南黄海西部, 其核心区域主要沿 50 m 等深线分布。从不同深度的温度分布上可以看到, 这支冷水在表层和中层其前锋大致可以达到 34°30'N, 而在底层则没有超

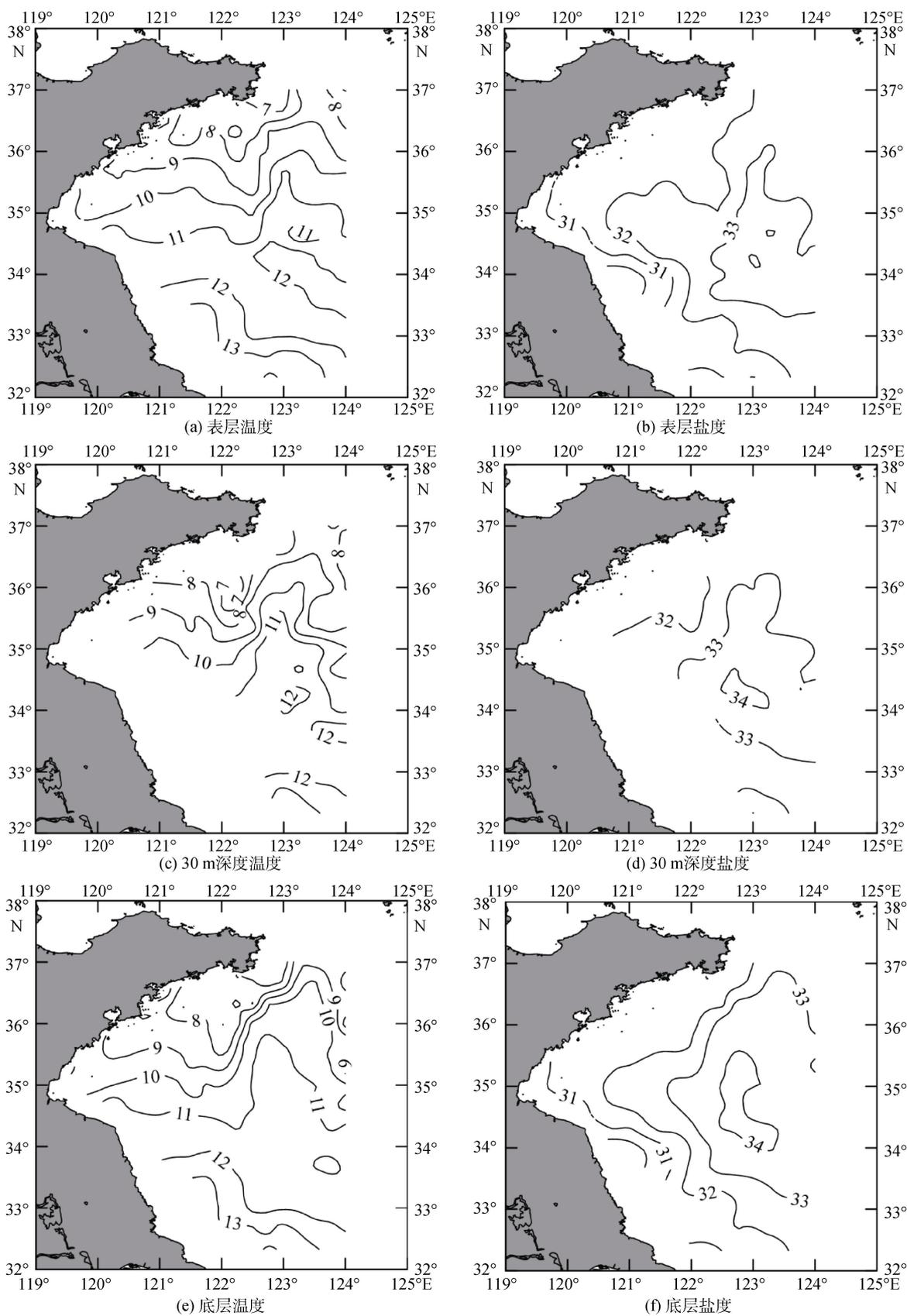


图 2 2007 年 4 月温度(°C)、盐度平面分布图

Fig. 2 Distributions of temperature (°C) and salinity on the surface, at 30 m depth, and at the bottom in April 2007

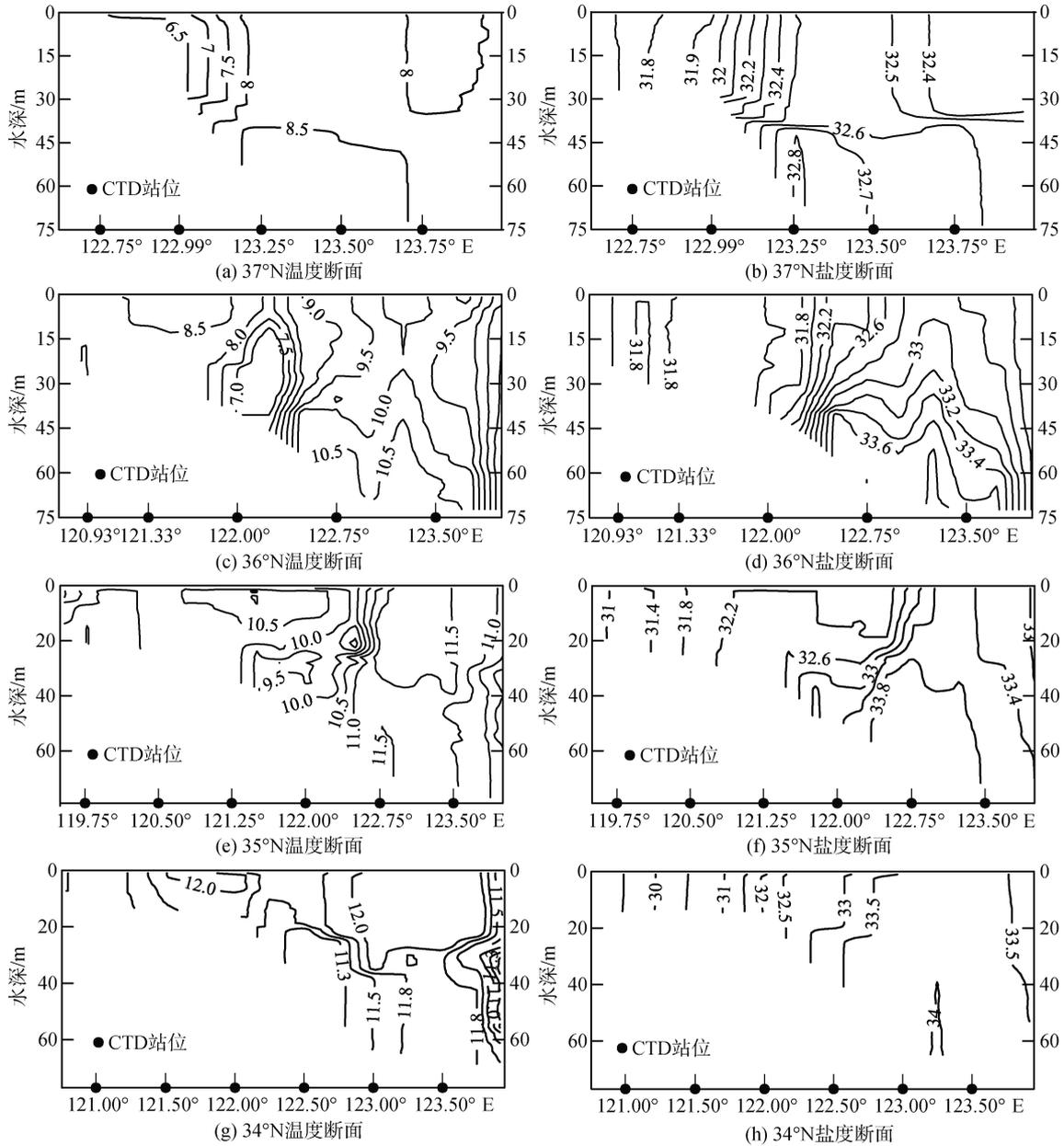


图3 2007年4月温度(°C)、盐度断面图

Fig. 3 Cross-sectional distributions of temperature (°C) and salinity in April 2007

过 35°N。在北部其宽度与经度的比值约为 1，向南逐渐降低至 0.5，且这种特征在中层最为明显，呈现为一个独立的低温水块(图 2c)，但在表层和底层则不是十分明显，说明这支冷水主要位于水体的中层。在南下的过程中，这支冷水的温度从山东头海域的 7 °C 慢慢被周围水体加热至 10 °C 左右，同样在中层其低温保持能力强于表层和底层。从盐度上看在表层和中层存在向南的低盐舌，只是在底层已经没有明显的低盐舌。低盐舌的分布范围与冷水分布大致相当，盐度自最北端的小于 32 逐步增高至 33。

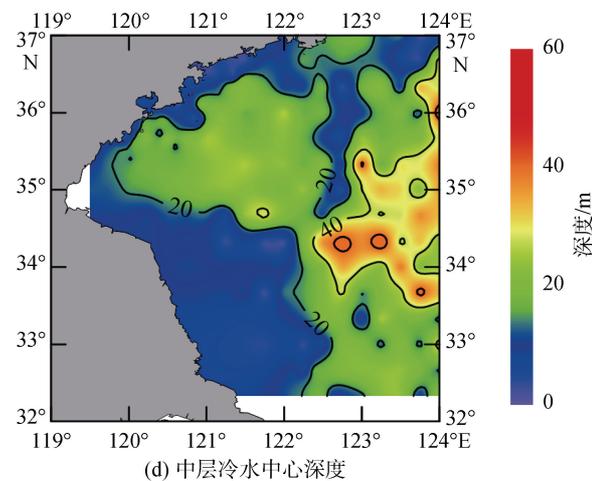
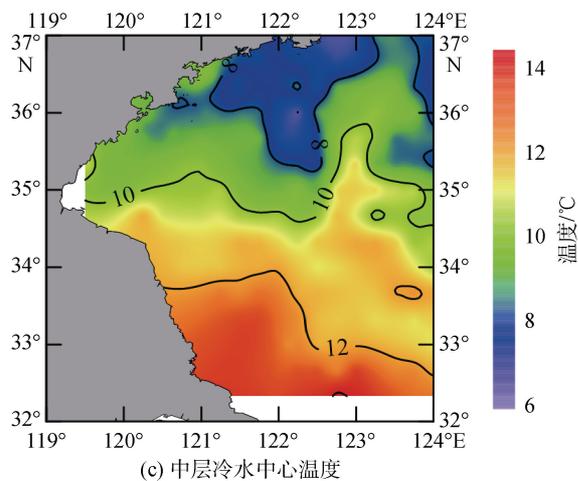
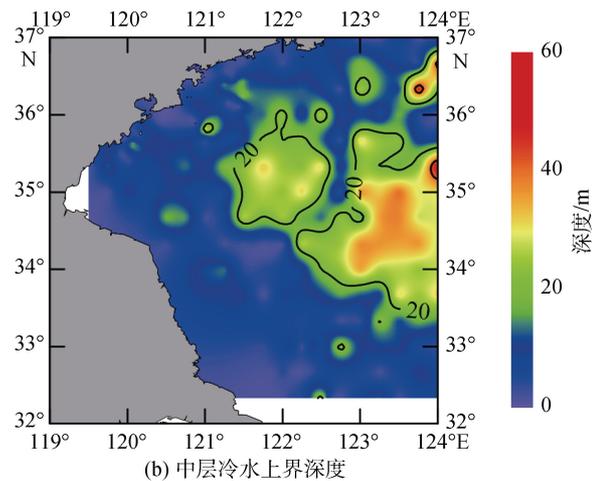
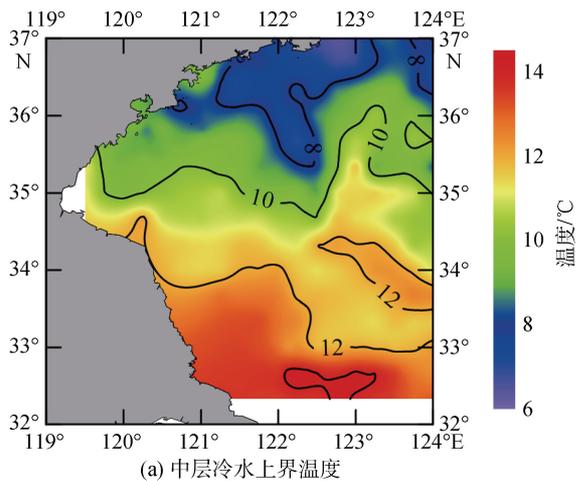
为了更清楚地描述这支中层冷水的特征，我们选择了比较有代表性的 37°N, 36°N, 35°N 和 34°N 断面进行分析。首先，从 37°N 断面(图 3a、图 3b)可以发现，这支冷水位于中底层，其核心温度小于 6.2 °C，盐度小于 31.8，厚度约为 10 m，低盐中心与低温中心重合。到了 36°N 断面(图 3c、图 3d)，流幅宽度达到 0.75 个经度，冷水核心深度位于 25 m，温度仍然保持 6 °C 左右，盐度基本保持不变，但是盐度并没有像温度一样出现低值中心，而是在冷水核周围形成强的锋面区域，表明此处流速较大，冷水比较集中。

到达 35°N 断面(图 3e、图 3f), 流幅宽度增大至 1.5 个经度, 且出现两个冷水核心, 分别位于 20 m 和 30 m, 温度升高至 9 °C, 盐度升高至 32.5, 其周围锋面已经没有 36°N 那么强盛, 可以看出冷水达到这个位置由于流速减缓幅度扩大, 已经远不如 36°N 集中。而达到 34°N 断面(图 3g、图 3h), 由于黄海暖流已经无法影响此处, 温度、盐度与周围水体非常接近, 独特的中层冷水现象消失。盐度断面分布最主要的特征是, 在中底层冷水比较集中的区域, 底层盐度一般高于上层, 显示出底层明显受到具有较高盐度的黄海暖流的影响。

为了描述中层冷水的分布特征, 沿用了徐伯昌等^[6]对中层冷水所作的定义, 计算了南黄海中层 8 个冷水示性特征(图 4): 冷中心深度(h_2)和温度(T_2); 上边界深度(h_1)和温度(T_1); 下边界深度(h_3)和温度(T_3); 冷水厚度(h_T)和跃变强度(G)。除此之外, 为了更好地刻画中层冷水的属性, 对比中层冷水跃变强度与上下层的差别, 还定义了上层跃变强度(G_U)和下层跃变强度(G_D)。上层跃变强度是指自上界深度至中心深度之间的中层冷水跃变强度, 同样下层跃

变强度即指中心深度至下界深度之间的中层冷水跃变强度。

2007 年春季中层冷水上界深度大致位于 15~30 m, 且随着水深加大其上界深度也在加大; 上界温度为 7~13 °C, 存在明显的由北向南逐步递增的趋势, 且有显著的低温舌自山东头海域向南延伸; 中心深度位于 25~40 m, 温度分布趋势与上界温度分布趋势甚为一致, 但是比上界温度大约低 1 °C 左右; 下界深度位于 30~55 m, 温度分布趋势与上界及中心温度分布趋势一致, 与中心温度差异不明显。从厚度和跃变强度分布图上可以看出(图 4g、图 4h)中层冷水的厚度 10~25 m, 跃变强度为 0.04~0.14 °C/m, 中层冷水比较发达的区域位于 50 m 等深线以深的区域。在上、下层跃变强度分布图(图 4i、图 4j)中可以看到, 中心位置上下跃变强度差异较大, 上层跃变强度范围为 0.04~0.24 °C/m, 而下层跃变强度范围为 0.04~0.1 °C/m, 下层跃变强度明显弱于上层。其原因是春季表层增温迅速, 跃层发育比较强盛, 因此造成上层温度梯度较大。



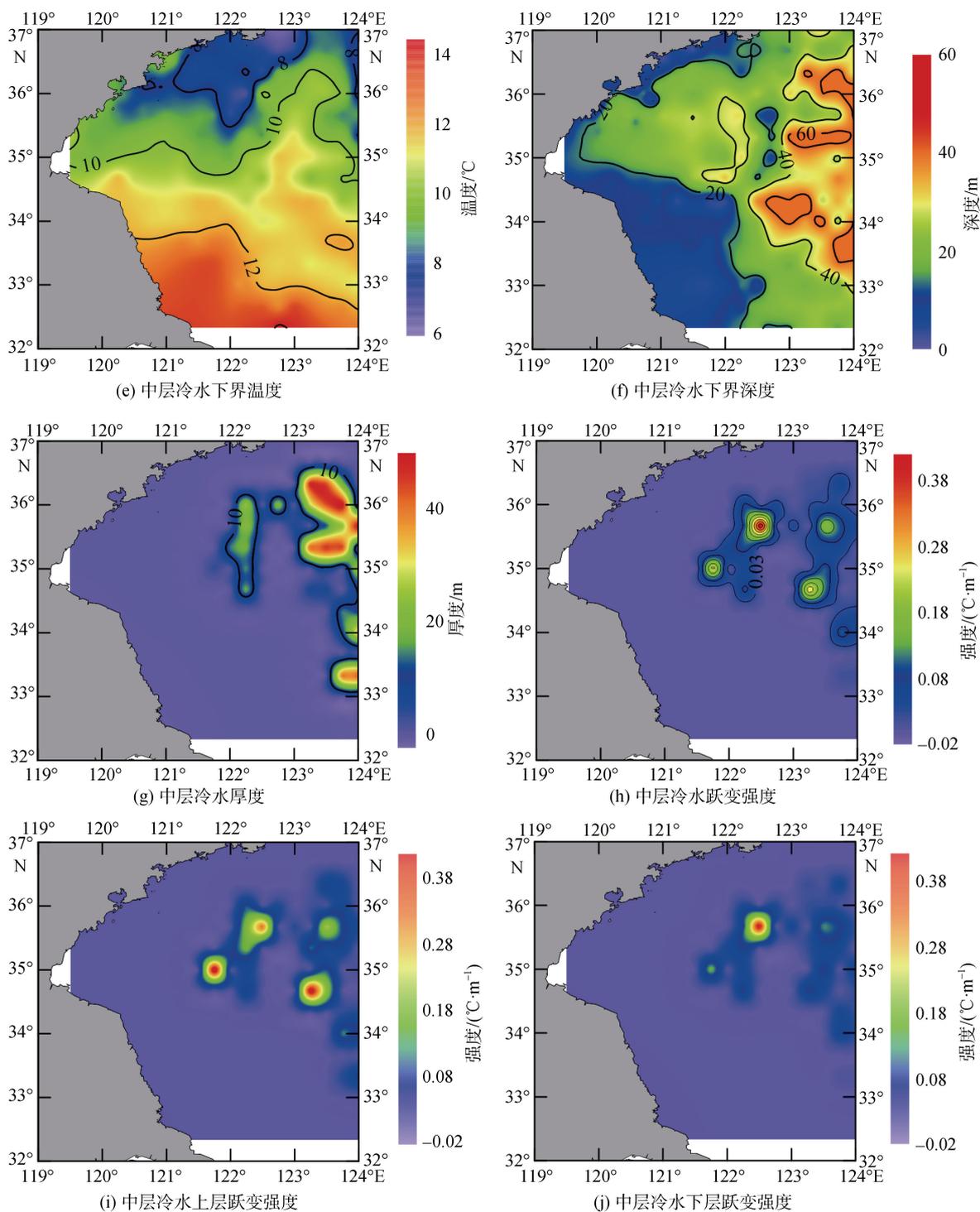


图 4 中层冷水示性特征

Fig. 4 Indicator indexes of middle-layer cold water

3 成因分析

通过比较春季与冬季的盐度和温度分布，可以初步确定中层冷水的来源。图 5 和图 6 分别给出了相同站位春季温度和盐度与冬季温度和盐度之间的

差值(ΔT , ΔS)的平面和断面分布。在春季，不论是陆地还是海洋均处于增温过程，陆地增温比海洋快，因此越是靠近岸边的区域海洋增温幅度越大，但是在中层冷水经过的区域，其增温幅度明显小于苏北近岸区域(图 5a、图 5c、图 5e)，而同时盐度也比

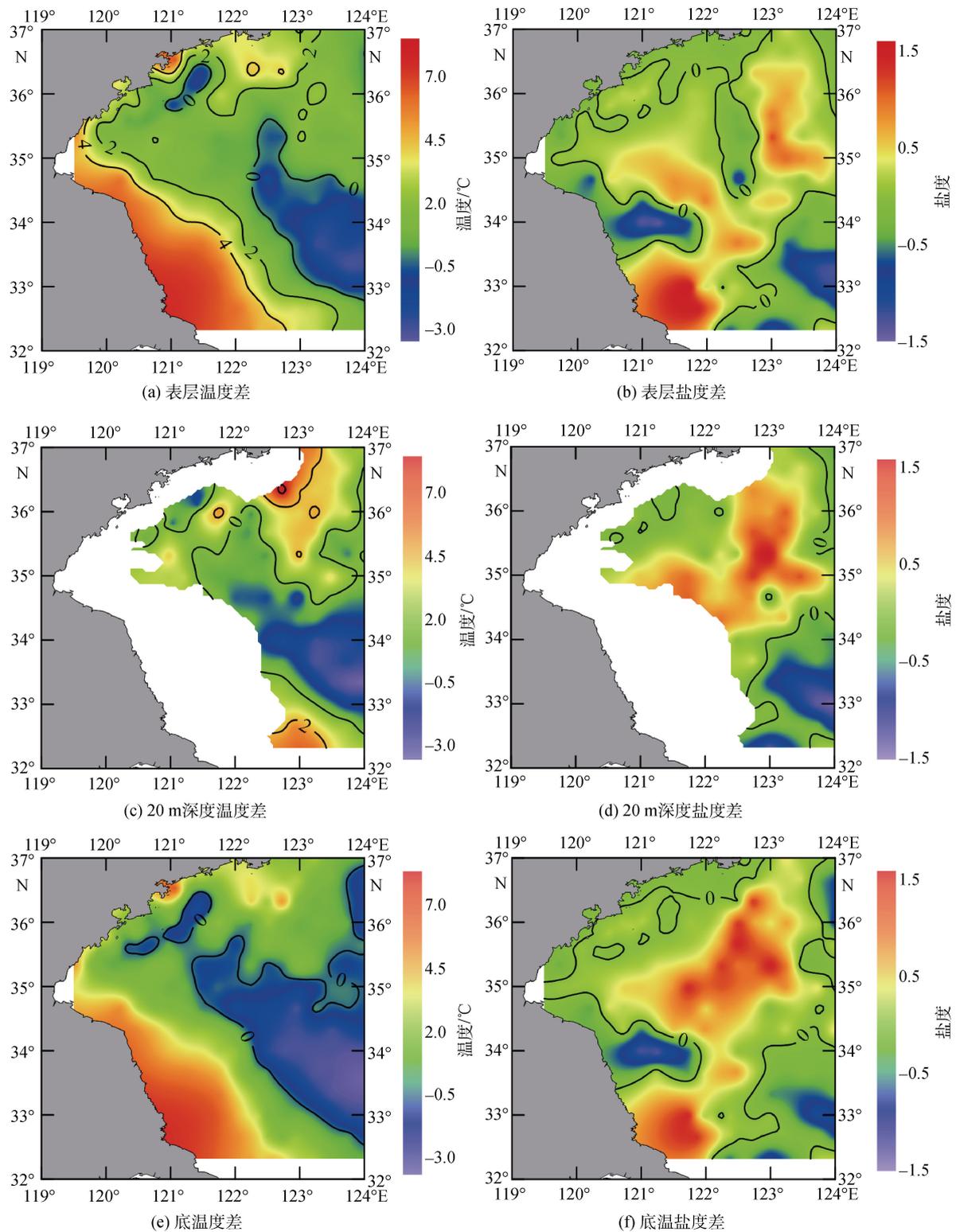


图 5 春季与冬季温度盐度差值平面图(a. 表层温度差值; b. 表层盐度差值; c. 20 m层温度差值; d. 20 m层盐度差值; e. 底层温度差值; f. 底层盐度差值)

Fig. 5 Distributions of the temperature and salinity differences between spring and winter: (a) temperature difference on the sea surface; (b) salinity difference on the sea surface; (c) temperature difference at the 20 m layer; (d) salinity difference at the 20 m layer; (e) temperature difference on the seafloor; (f) salinity difference on the seafloor

冬季有所降低(图 5b、图 5d、图 5f)。这种趋势不论是在表层、中层还是底层均比较一致。

这种特征在差值的断面分布中更为清楚(图 6)。36°N 断面上, 对应于春季中层冷水的核心位置, 温度差异负值也出现在这个区域, 其分布态势与中层冷水分布态势完全一致, 而其他区域除了断面东端

的仁川外海冷水团^[14]区域外均出现了春季增温现象, 盐度差值分布也出现了同样的特点, 与温度降低同步, 盐度有所下降。而在 35°N 断面, 由于中层冷水的减弱, 这种分布趋势则不像 36°N 断面那样明显, 中层冷水区域没有出现降温的现象, 但是其增温幅度明显小于近岸区域。

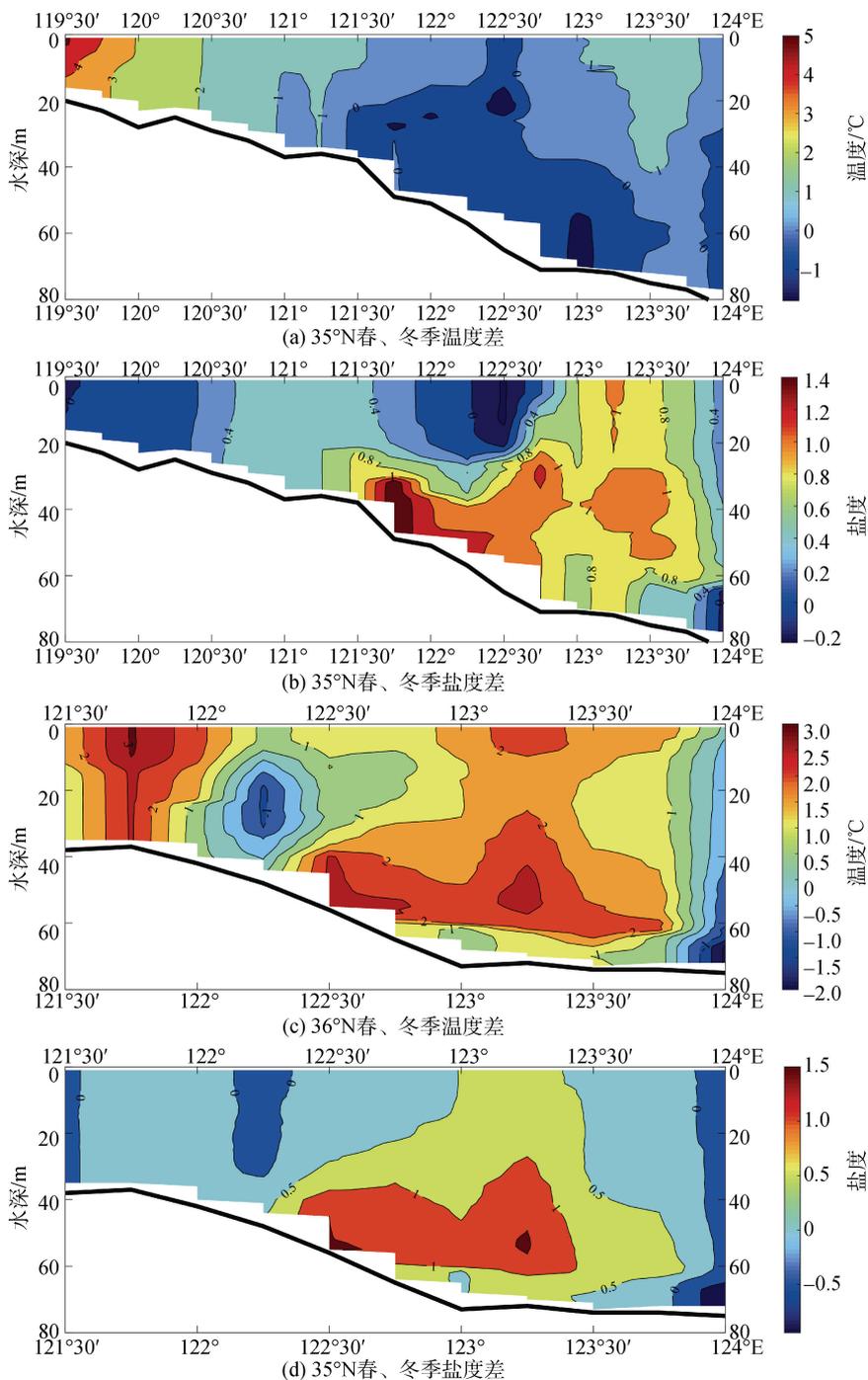


图 6 36°N、35°N 春季与冬季温度、盐度差值断面图

Fig. 6 Cross-sectional distributions of the temperature and salinity differences between spring and winter at 36°N and 35°N

结合温度与盐度差值的平面和断面分布,可以较为明显的看出在春季中层冷水存在的区域温度、盐度确实存在与春季增温过程相反的趋势。这种趋势可以从潜标数据的分析结果中得到解释。

根据上面的分析, M1、M2 站处于中层冷水影响的边缘,而 M3、M4、M5 站则处于黄海暖流的影响区域。从各站余流分布图(图 7)中可以看到,对应于与中层冷水存在的区域和深度, M2 站的余流在离海面 20 m 处向东南的流速最大,表明此处是来自其西北水域的中层冷水。而 M3、M4、M5 站的余流由表至底全部指向北方,这是因为虽然春季黄海暖流已经减弱^[17],但仍然存在。从这 5 站的余流分布中可以明显看出,中层冷水主要沿 50 m 等深线附近从山东头附近海域南下,底层温度的变化也印证了这一过程。

从图 8 中可以看到 M1、M2 两站的底层温度虽然存在天气尺度的变化,但均反映春季的增温过程,且因为中层冷水的发生深度主要位于中上层,底层并没有降温的反应。M1 站的底层温度由 10 °C 左右上升至 12 °C 左右,而 M2 站则是由 9.8 °C 上升至 11.2 °C,可见 M2 站的温度增幅(1.4 °C)远小于 M1 站的(2 °C)。

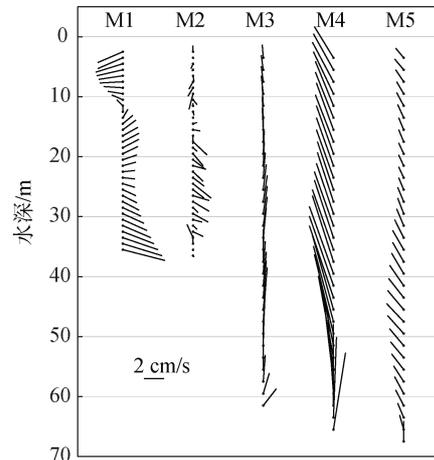


图 7 潜标站位余流

Fig. 7 Residual current at the submerged buoy stations

这恰恰是因为中层冷水主轴存在的区域位于 50 m 等深线附近, M2 站比 M1 站更靠近中层冷水的核心区域,因此其增温趋势低于 M1 站。而 M3、M4、M5 站的温度分布趋势与 M1、M2 存在明显的不同,其增温趋势远远低于前两站,这主要是因为此三站主要处于黄海暖流的控制区域,因此其温度并没有像前两站出现较大幅度的上升。

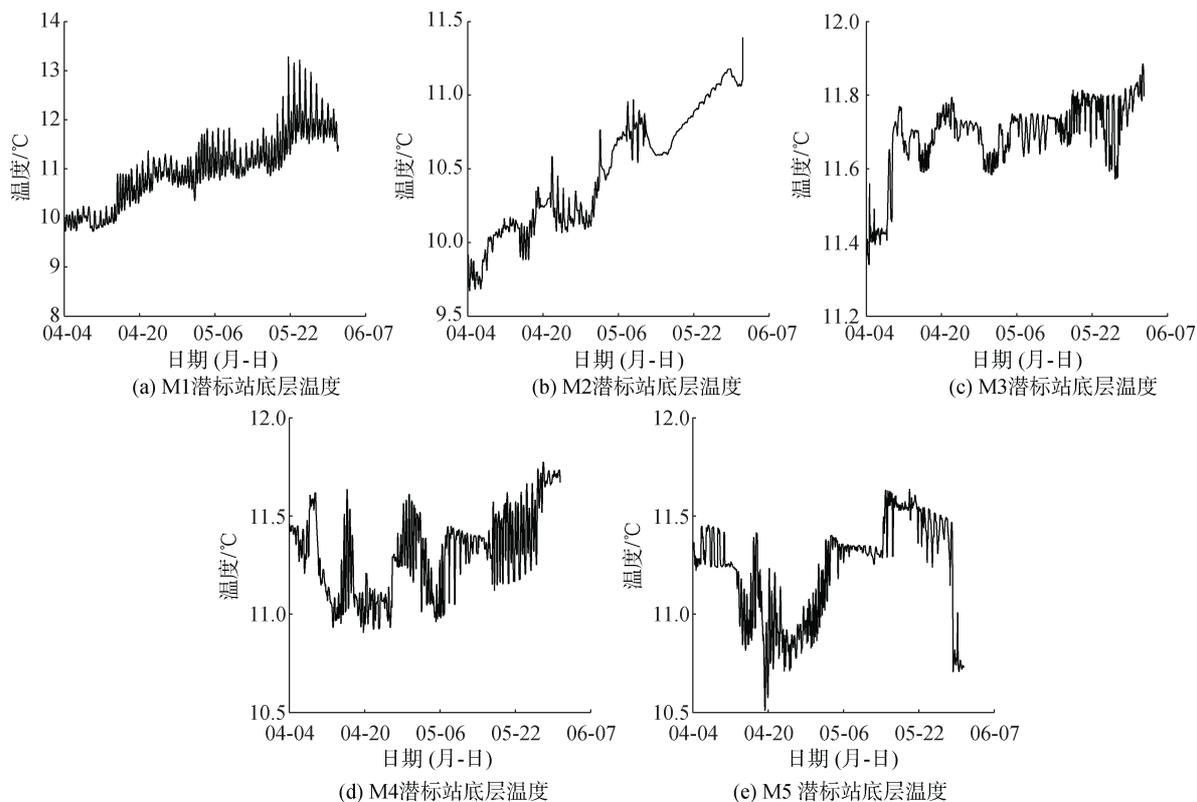


图 8 潜标站底层温度

Fig. 8 Bottom temperature at the submerged buoy stations

为了验证该部分冷水是否来自于山东头附近海域,课题组又取得了山东头海域长期海流观测数据来进行研究。该数据来自一套于2010年才开始布放的浮标系统,无法与2007年资料形成对比,但其余

流的分布态势也可以部分解释中层冷水的成因。

图9中可以看出自表层至中层自始至终存在一支稳定的南向海流,大小为10 cm/s,底层流速减小至5~6 cm/s,且某些时刻出现较弱的北向流。

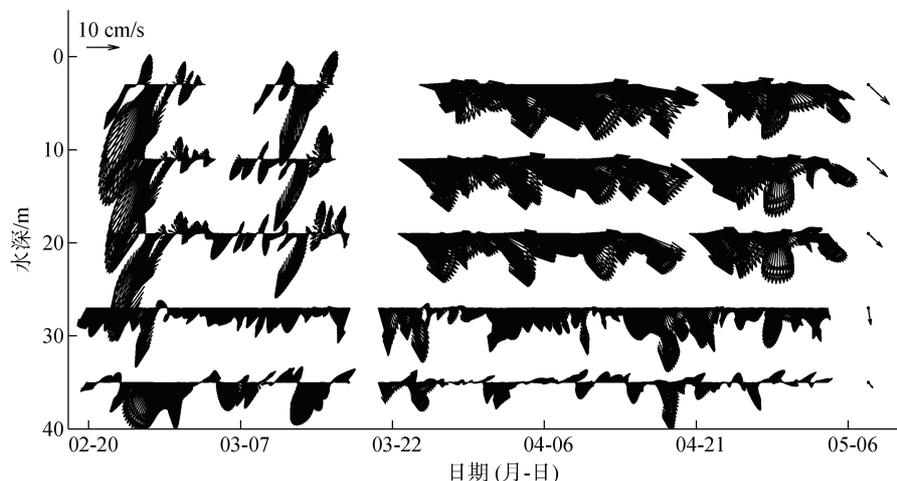


图9 2012年2—5月山东头海域余流

Fig. 9 Residual current at the ChengShanTou sea area from February to May 2012

4 结论

本文通过分析南黄海中层冷水的10个示性特征及其分布特征,对比冬季与夏季温度、盐度及实测海流资料,主要得到如下结论:

1) 2007年中层冷水主要存在于35°N以北的海域,核心区主要位于50 m等深线附近,中心深度位于25~40 m,宽度约为100 km,跃变强度约为0.04~0.14 °C/m,厚度在10~25 m之间,中层冷水的低温保持能力大于表层和底层,而底层盐度一般高于上层,显示出底层明显受到具有较高盐度黄海暖流的影响。

2) 春季中层冷水的形成主要受黄海暖流、沿岸冷水以及春季升温过程的影响。首先是南下的山东头外海水带来低温、低盐的海水,这支海流在南下过程中与局地增温的表层海水和底层黄海暖流水相遇,因为密度的原因插入两层海水之间,形成了低温、低盐的中层冷水。

参考文献:

[1] 毛汉礼,邱道立. 全国海洋综合调查报告,第三册,第四章:中国近海温、盐、密度的跃层现象[M]. 北京:科学出版社,1964:116.
MAO Hanli, QIU Daoli. National marinecomprehen-

sive survey report: Thermocline, halocline, pycnocline phenomena in China coastal waters[M]. Beijing: Science Press, 1964: 116.

[2] 翁学传. 东海西北部海域中层冷水的初步分析[J]. 海洋科学集刊, 1984, 25: 63-74.
WENG Xuechuan. Preliminary analysis of the intermediate cold water in northwestern East China Sea[J]. Studia Marina Sinica, 1984, 25: 63-74.

[3] 蓝淑芳. 渤、黄、东海水温垂直结构统计特征分析[J]. 海洋科学集刊, 1985, 25: 11-25.
LAN Shufang. Statistical analysis of water temperature vertical structure in Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Studia Marina Sinica, 1985, 25: 11-25.

[4] 丁宗信. 黄、东海秋季温、盐度垂直分布及其逆转现象成因的初步分析[J]. 海洋科学, 1994, 18(2): 47-51.
DING Zongxin. Preliminary analysis of the vertical distribution of temperature and salinity and its cause of reversal in autumn in Yellow Sea and East China Sea[J]. Marine Sciences, 1994, 18(2): 47-51.

[5] 丁宗信, 蓝淑芳. 南黄海和东海冬、春季温度逆转类型的分布及成因分析[J]. 海洋科学, 1995, 19(1): 35-39.
DING Zongxin, LAN Shufang. Distribution and genetic analysis of winter and spring temperature reversals in South Yellow Sea and East China Sea[J]. Marine Sciences, 1995, 19 (1): 35-39.

[6] 徐伯昌, 王宗山, 邹娥梅, 等. 东海西北部中层冷水特征的时空变化[J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(2): 1-7.
XU Bochang, WANG Zongshan, ZOU Emei, et al. The

- spatial and temporal variations of the characteristics of the intermediate cold water in the northwest of the East China Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2000, 18(2): 1-7.
- [7] 张启龙, 杨玉玲, 程明华. 南黄海春季温、盐结构特征分析[J]. *海洋科学*, 1994, 18(6): 50-55.
ZHANG Qilong, YANG Yuling, CHENG Minghua. An analysis of characteristics of thermohaline structures in the south Yellow Sea in spring[J]. *Marine Sciences*, 1994, 18(6): 50-55.
- [8] 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.
ZHANG Qilong, WENG Xuechuan, YANG Yuling. Analysis of water masses in the south Yellow Sea in spring[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, 27(4): 421-428.
- [9] 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰, 等. 初春南黄海水文特征及环流状况的分析[J]. *海洋学报*, 1999, 21(5): 1-11.
TANG Yuxiang, ZOU Emei, LI Xingzai, et al. Analysis of hydrographic features and circulation situation in the southern Yellow Sea in early spring[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(5): 1-11.
- [10] 邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥. 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.
ZOU Emei, GUO Binghuo, TANG Yuxiang. The hydrographic features and water masses analyses of the southern Yellow Sea in the spring of 1996[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(1): 17-26.
- [11] 邹娥梅, 徐伯昌, 王宗山, 等. 南黄海西部中层冷水特征的时空变化[J]. *黄渤海海洋*, 2001, 19(2): 10-16.
ZOU Emei, XU Bochang, WANG Zongshan, et al. Spatial and Temporal Variations in the Characteristics of the Intermediate Cold Water in the West of the Southern Yellow Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2001, 19(2): 10-16.
- [12] 徐伯昌, 王宗山, 邹娥梅, 等. 南黄海西部中层冷水垂直热结构的自模性[J]. *黄渤海海洋*, 2001, 19(3): 1-7.
XU Bochang, WANG Zongshan, ZOU Emei, et al. Self-simulation of vertical thermal structure for the intermediate cold water in the west of Southern Huanghai Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2001, 19(3): 1-7.
- [13] 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.
ZHENG Dong, ZHANG Ruian. Analysis of spring water masses in the sea area of Yantai, Weihai and Shidao[J]. *Marine Science Bulletin*, 1983, 2(1): 61-68.
- [14] 张启龙, 侯一筠, 程明华, 等. 青岛冷水团强度的变化特性[J]. *海洋科学集刊*, 2004, 46: 13-21.
ZHANG Qilong, HOU Yijun, CHENG Minghua, et al. Variation Features in Qingdao Cold Water Mass Strength[J]. *Studia Marina Sinica*, 2004, 46: 13-21.
- [15] 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.
YU Fei, ZHANG Zhixin, LAN Jian, 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.
- [16] 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.
YU Fei, ZHANG Zhixin, DIAO Xinyuan, et al. Analysis of evolution of the Yellow Sea Cold Water Mass and its relationship with adjacent water masses[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(5): 26-34.
- [17] 赵胜, 于非, 刁新源, 等. 黄海暖流的路径及机制研究[J]. *海洋科学*, 2011, 35(11): 73-80.
ZHAO Sheng, YU Fei, DIAO Xinyuan, et al. The path and mechanism of the Yellow Sea Warm Current[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(11): 73-80.

Characteristics and formation of the middle-layer cold water of the South Yellow Sea in the spring of 2007

DIAO Xin-yuan^{1, 2, 3, 4}, WANG Jian-feng^{1, 3}, WEI Chuan-jie^{1, 3, 4}, SI Guang-cheng^{1, 3}, YU Fei^{1, 2, 3, 4}

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Department of Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: May 21, 2020

Key words: the South Yellow Sea; middle-layer cold water; indicator index; cause of formation

Abstract: Based on the conductivity temperature depth (CTD) observations in 2007, 10 characteristics of the middle-layer cold water (MLCW) and their spatial patterns were determined. In the spring of 2007, the MLCW was observed to the north of 35°N. The core of the MLCW was near the 50 m isobath, and the center was located at a depth of 25–40 m with a thickness of approximately 10–25 m and a vertical gradient of 0.04–0.14 °C/m. The comparison between temperature and salinity distributions from spring to winter and analysis of current observations showed that the MLCW was formed because of the combined effects of the Yellow Sea Warm Current, coastal cold water, and surface warming in the spring.

(本文编辑: 丛培秀)