

# 长江口及其邻近海区环流和温、盐结构动力学研究

## III 温度结构\*

刘兴泉 侯一筠 尹宝树 杨德周

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

**摘要** 数值模拟结果表明: 冬季长江口及其邻近海区温度分布为近岸低, 外海高; 近岸和海底地形变化缓慢区温度呈垂直均匀分布, 海底地形变化显著的陡坡区生成温度锋; 外海深水区的中上层温度低且呈垂直均匀分布, 底层温度高并形成弱的分层。春季, 近岸温度高、外海低; 近岸温度大致呈垂直均匀分布, 外海出现明显分层; 长江口以北温度表层低、底层高; 长江口及其以南表层和底层温度低, 而中层高; 陡坡区至外海生成温度锋, 随着温度锋自陡坡至外海的下移, 锋面以上温度逐渐变为垂直均匀分布, 而锋面以下温度却大致呈水平均匀分布。夏季, 海区的温度分布和春季一样, 为近岸高、外海低; 长江口及其以南近岸浅水区温度呈垂直均匀分布; 长江口以北和长江口及其以南的外海温度自表层至底层由高变低且大致呈水平均匀分布, 并在表层至次表层生成强温跃层, 跃层强度随水深增加迅速减弱, 深底层温度几乎呈均匀分布且保持低温特征。秋季, 海区的温度分布与冬季相同, 也为近岸低, 外海高; 在长江口以北, 近岸温度为表层高, 底层低; 外海底层温度低且大致呈水平均匀分布, 而底层以上温度高且大致呈垂直均匀分布; 长江口及其以南, 近岸温度呈垂直均匀分布, 陡坡至外海的表层至底层生成弱的温度锋, 随温度锋自陡坡至外海的下移, 锋面以上温度逐渐变为垂直均匀分布, 长江口以南陡坡区的底层温度几乎呈均匀分布。

**关键词** 长江口邻近海区; 温度; 垂直分布; 温跃层; 锋面

**中图分类号** P731 doi: 10.11693/hyh20140900260

本研究的第一部分(刘兴泉等, 2008a)和第二部分(刘兴泉等, 2008b)已分别对研究方案、定解条件和环流的基本特征进行了较详尽的阐述。本文是该研究的第三部分, 是根据其研究方案基于定解条件(陈达熙, 1992)所获得的与研究海区垂直环流对应的  $31^{\circ}\text{N}$ 、 $31.5^{\circ}\text{N}$  和  $32.0^{\circ}\text{N}$  纬度断面的温度分布, 并给出了  $122.0^{\circ}\text{E}$ 、 $122.5^{\circ}\text{E}$  和  $123.0^{\circ}\text{E}$  经度断面温度的数值模拟结果。通过对数值结果的分析, 揭示长江口及其邻近海区温度分布特征及其季节变化规律, 阐明温跃层和温跃锋的生成机制及其动力成因。

长江口及其邻近海区的温度结构及其季节变化,

一直受到海洋学者的广泛关注。毛汉礼等(1964)和任允武等(1964)根据 1959 年 6—7 月和 1—2 月的中外调查资料对夏季和冬季南黄海和东海北部( $28^{\circ}$ — $37^{\circ}\text{N}$ )的水文特征以及海水类型(水系)进行了分析。蓝淑芳等(1984)和苏育嵩等(1989)相继对东海北部陆架区底层冷水和东海北部区域底层冷水团的形成及其季节变化进行了分析。赵保仁等(1992)利用 1985 年 8 月至 1986 年 10 月长江口海域的调查资料对该海域的温、盐度和上升流现象分布进行了分析。唐晓晖等(2004)利用 2001 年 7—8 月和 2002 年 1 月 CTD 观测资料对长江口邻近海区夏季和冬季的水文特征进行了分析。

\*中国科学院知识创新工程重要方向项目, KZCX2-YW-201 号; “十一五”国家科技支撑计划重点项目, 2006BAC03B04 号; 国家自然科学基金重点项目, 50339040 号。刘兴泉, 副研究员, E-mail: xqliu07@163.com

收稿日期: 2014-09-29, 收修改稿日期: 2014-09-29

郑晓琴等(2008)利用三维模型对长江口及邻近海域夏季温盐特征进行了数值分析。刘浩等(2013)对长江口水域水体结构的季节变化进行了分析。以上资料和数值分析都为本研究海域温度结构的数值模拟结果提供了验证依据。

## 1 冬季的温度分布

图 1 和图 2 分别是冬季研究海区 31.0°N、31.5°N、32.0°N 纬度断面和 122.0°E、122.5°E、123.0°E 经度断面温度的数值模拟结果, 其等值线间距均为 0.2°C。由图 1 和图 2 的等温线分布可以看出, 在长江口以北(32°N)的浅水区, 自近岸大约至 123.5°E 等温线与海面垂直, 自 123.5°E 至外海等温线在近底层与海面呈垂直分布, 而自近底层至表层逐渐变为大致与海面平行分布。在长江口(31.5°N)及其以南(31°N)海底地形变化显著的陡坡区等温线呈不规则的环状或弧形分布, 近岸至陡坡的浅水区和陡坡至外海的深水区等温线大致与海面呈垂直分布。

由纬度和经度断面等温线的变化趋势可以看出,

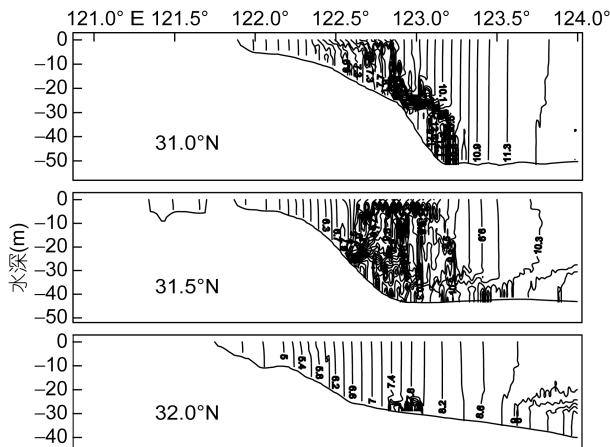


图 1 冬季纬度断面温度分布

Fig.1 Temperature profile on latitude sections in winter

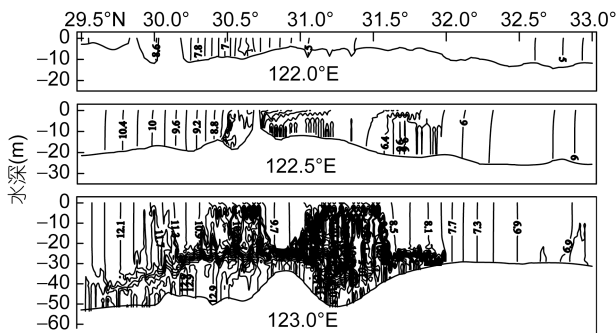


图 2 冬季经度断面温度分布

Fig.2 Temperature profile on longitude sections in winter

在长江口以北(32°N)海底地形变化缓慢的浅水区, 与海面垂直的等温线在近岸分布密集, 外海分布稀疏, 并自近岸至外海逐渐由密变疏。在长江口(31.5°N)和其以南(31°N), 近岸和外海与海面垂直的等温线分布稀疏, 陡坡区环状或弧形等温线分布密集, 尤其是长江口以南的近底层凹向海底的弧形等温线分布更为密集, 且自陡坡至近岸和外海由密变疏。这表明, 在长江口以北, 温度的水平变化在近岸显著, 在外海缓慢。在长江口及其以南, 陡坡区温度的水平变化显著, 而陡坡两侧的近岸和外海变化缓慢。

由等温线的分布特征和变化趋势表明, 冬季在长江口以北的浅水区, 自近岸至 123.5°E 温度由低变高且呈垂直均匀分布, 而自 123.5°E 至外海温度由底层至表层逐渐由垂直均匀变为水平均匀分布。在长江口及其以南, 近岸和外海温度变化缓慢且大致呈垂直均匀分布, 陡坡区的温度变化显著, 从而在近岸浅水区与外海深水区之间水深变化显著的陡坡区形成温度锋。冬季长江口及其邻近海区的温度分布为近岸低、外海高, 近岸温度只有 4°C 左右, 长江口以北外海温度可达 9°C 以上, 而长江口及其以南外海温度可超过 10.5°C 和 11.5°C。陡坡区(图 2, 123.5°E)的温度为上层低, 底层高, 其中长江口以南(31°N)的底层有一个温度达 12.5°C 的暖水块。就 31°N 和 32°N 断面的数值模拟结果与毛汉礼等(1964)和唐晓晖等(2004)冬季的分析结果比较发现, 温度总的分布特征和变化趋势基本相同, 由此证实冬季其它区域的模拟结果将与观测结果一致。

将图 1 和图 2 中各断面等温线分布和变化趋势比较发现, 在长江口以北, 除了外海的底层温度呈现弱的分层外, 其余区域温度均呈垂直均匀分布, 其分布特征与刘浩等(2013)的结论一致。而自长江口向南, 近岸至陡坡与海面垂直等温线分布的水平跨距逐渐减小, 而陡坡至外海与海面垂直等温线分布的水平跨距却逐渐增大, 陡坡区密集等温线分布的宽度逐渐变窄。这表明, 冬季随着自北向南岸坡和水深的增大、海面温度的增高及东海沿岸流流幅的变窄、流速的增强(刘兴泉等, 2008a), 近岸至陡坡温度的垂直均匀分布宽度自长江口向南逐渐减小。随着自南向北水深变浅, 台湾暖流减弱(刘兴泉等, 2008b), 陡坡至外海温度的垂直均匀分布宽度自南至长江口逐渐增大。陡坡区温度锋的强度自南向北逐渐减弱, 其宽度由小变大。由此表明, 冬季长江口及其邻近海区的温度分布和变化趋势不仅与海区岸坡、水深变化有关, 而

且与冬季长江径流、东海沿岸流和台湾暖流以及二者之间升降流的强弱有密切关系。

冬季海面温度低,在剧烈偏北风的作用下,东海沿岸流增强,使得自北向南近岸至陡坡浅水区的温度呈垂直均匀分布,且保持低温特征。并随着自北向南岸坡度和水深增大,温度的垂直均匀程度逐渐减小。冬季南下东海沿岸流的增强,必然导致北上台湾暖流的增强;由于冬季台湾暖流从南边界进入研究海区时水温呈垂直均匀分布,因此台湾暖流北上途中其流经区域的水温也呈垂直均匀分布,其均匀程度随着自南向北水深的变浅和台湾暖流的减弱逐渐减小。冬季由于南下东海沿岸流和北上台湾暖流的增强,导致强水平对流之间陡坡区的垂直对流增强,水平对流减弱。因此使得陡坡区水温的垂直扩散加快,水平扩散减慢,从而在沿岸流与台湾暖流之间的陡坡区形成强温度锋。由于陡坡区的升降流自南向北逐渐减弱,温度锋强度也自南向北随着升降流的减弱而减弱,其厚度逐渐增大。

## 2 春季的温度分布

图3和图4分别是春季研究海区31°N、31.5°N、32°N纬度断面和122.0°E、122.5°E、123.0°E经度断面温度的数值模拟结果,等值线间距均为0.2°C。由图3和图4断面等温线分布可以看出,春季研究海区等温线在近岸浅水区和外海上层与海面垂直分布。而在近岸以远的陡坡至外海的表层到次表层等温线在近岸一端上翘,外海一端下垂,中间上凸,呈弧形分布;而至底层其弧形等温线逐渐变为中间下凹,而两端上翘的弧形分布,在陡坡区外缘(31.5°N)上层上凸和底层下凹的等温线在表层和底层之间逐渐变成环状分布。

由图3和图4可以看出,春季近岸浅水区等温线分布稀疏;与近岸相比,外海表层至次表层的等温线分布更稀疏。而近岸以远自陡坡区表层过渡到外海的次表层的等温线在表层至次表层分布密集,特别是外海的次表层分布更密集,并自表层至次表层到底层逐渐由密变疏。而陡坡区外缘的表层和底层弧形等温线之间的环状等温线(31.5°N)在陡坡外缘分布密集,并自陡坡外缘至近岸和外海逐渐由密变疏。这表明,春季近岸浅水区和近岸以远至外海的表层和次表层以上水温在垂向上几乎没有变化,而水平变化也较缓慢。近岸以远至外海的表层过渡到次表层水温的垂直和水平变化都较显著。

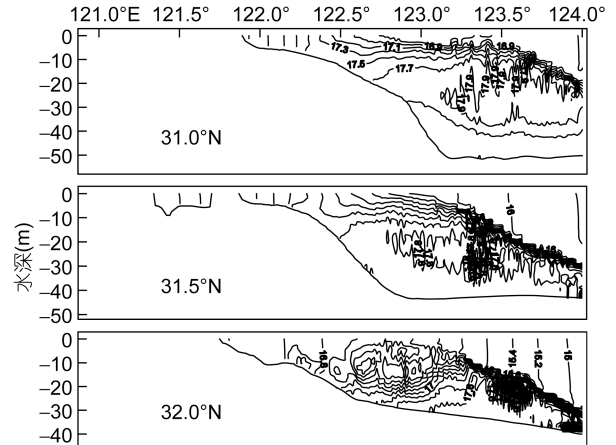


图3 春季纬度断面温度分布

Fig.3 Temperature profile on latitude sections in spring

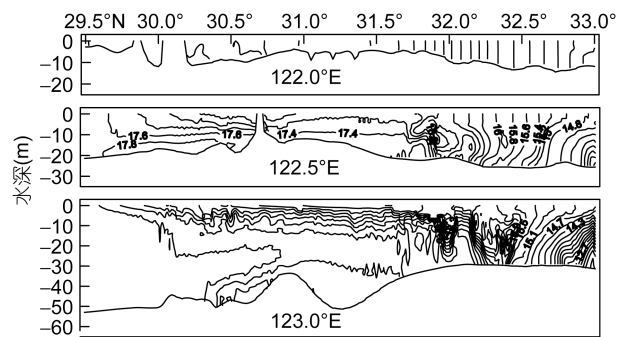


图4 春季经度断面温度分布

Fig.4 Temperature profile on longitude sections in spring

由图3和图4等温线的分布特征和变化趋势表明,春季研究海区的近岸浅水区和外海的上层温度呈垂直均匀分布,近岸以远至外海的表层至次表层和底层温度出现较强的分层,这表明春季研究海区已形成温跃层,这与刘浩等(2013)温跃层形成于春季的结论一致。春季随近岸和海面的持续升温,由于水温的水平变化和垂直变化加快而形成弱的负温跃层或较强的温度锋。温跃层和温度锋的下面,除了陡坡外缘(31.5°N)温度的水平变化显著外,其余区域的温度变化缓慢,特别是深、底层变化尤为缓慢,使得底部区域的水温几乎呈均匀分布。陡坡区的表层和底层弧形等温线之间的温度又大致呈垂直均匀分布。春季长江口及其邻近海区的温度分布为近岸高,外海低。长江口以北近岸温度可接近17°C,外海的表层至次表层只有15°C,长江口及其以南近岸的温度可超过18°C,而外海分别可达16°C到17°C。长江口及其以北海区,表层温度低,底层温度略高,表层温度为16°C左右,底层温度可超过17.5°C;长江口及其以南海区表层和底层温度低,中层温度高,表层和底层分别低于

16.5°C 和 17.5°C, 而中层温度高于 18°C。

比照图 3 和图 4 中各断面等温线的分布特征和变化趋势发现, 近岸浅水区和陡坡至外海深水区的表层至次表层与海面垂直的等温线, 以及陡坡处与海面平行的等温线自南至北和自近岸至外海都由疏变密。这表明, 春季随着自南向北和自近岸至外海岸坡的减缓和深水的变浅, 台湾暖流的减弱, 研究海区近岸和陡坡至外海的表层到次表层温度的水平变化自南向北逐渐加快, 台湾暖流流经的陡坡区温跃层和陡坡至外海的表层至次表层温度锋的强度自南至北和自近岸至外海逐渐增大, 陡坡至外海表层至次表层混合层的厚度随着温跃层和温度锋的下移逐渐增大。因此, 春季长江口及其邻近海区的温度分布特征和演变过程除了与该季节的海面温度、长江径流、东海沿岸流和台湾暖流有关, 而且还与东海沿岸流和台湾暖流二者之间陡坡区升降流的强弱有密切关系(刘兴泉等, 2008a; 2008b)。

春季, 研究海区已由冬季的偏北风转为偏东风, 且风速减弱, 东海沿岸流减弱且只能影响长江口以北近岸海区。由于东海沿岸流的减弱使得海区的水平对流减弱, 因此垂直对流减弱。春季天气变暖, 海面开始升温, 极易导致近岸浅水区和受台湾暖流影响小的陡坡至外海表层至次表层以上温度呈垂直均匀分布。虽然春季天气变暖, 但由于海水增温的滞后作用, 因此海面温度仍然较低。由南边界进入海区且楔入底层的台湾暖流高温水在北上途中, 在陡坡区升降流的作用下, 与上层和外海低温水混合, 温度发生显著变化, 从而在陡坡至外海的表层至次表层生成弱的负温跃层和温度锋。虽然春季台湾暖流随着自南向北岸坡的减缓和深水的变浅而减弱, 台湾暖流流经区温跃层和温度锋的强度自南向北并没有太大变化, 但陡坡至外海表层至次表层的温跃层和温度锋逐渐下移, 其上混合层的厚度逐渐增大。

### 3 夏季的温度分布

图 5 和图 6 分别是夏季研究海区 31°N、31.5°N、32°N 纬度断面和 122.0°E、122.5°E、123.0°E 经度断面温度的数值模拟结果, 等值线间距均为 1.0°C。由图 5 和图 6 断面等温线分布可以看出, 夏季在长江口以北(32°N)海区, 等温线在近岸微微上翘, 而自近岸以远至外海变为几乎与海面呈平行分布。在长江口(31.5°N)及其以南(31°N)海区, 自南边界到长江口等温线在近岸与海面呈垂直分布, 而自近岸以远到外海

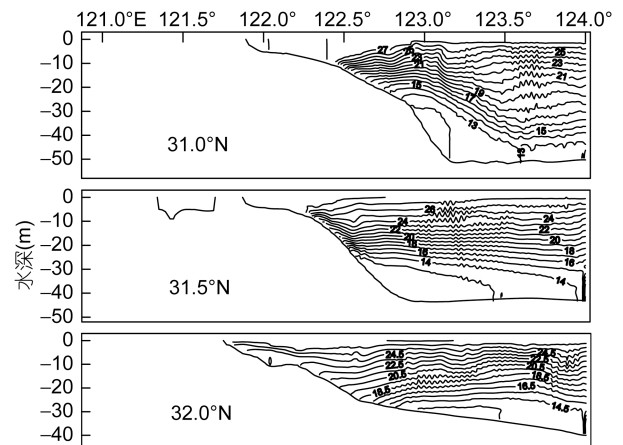


图 5 夏季纬度断面温度分布

Fig. 5 Temperature profile on latitude sections in summer

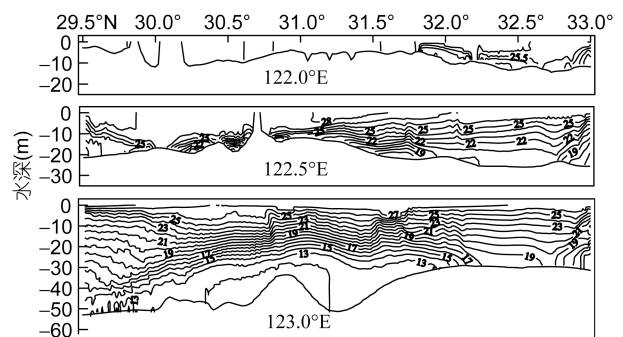


图 6 夏季经度断面温度分布

Fig. 6 Temperature profile on longitude sections in summer

则由略微下垂变为大致与海面平行分布。而外海与海面平行的等温线由表层到底层逐渐变为两端下垂、中间略上凸的弧形分布。

由图 5 和 6 中各纬度和经度断面等温线变化趋势看出, 在长江口以北(32°N)海底地形变化缓慢的浅水区, 近岸上翘而外海与海面平行的等温线, 在近岸自表层至底层分布均较稀疏; 近岸以远至外海的表层至次表层分布密集, 且自次表层到底层逐渐由密变疏, 在深底层变得尤为稀疏。在长江口(31.5°N)及其以南(31°N), 近岸与海面垂直的等温线分布非常稀疏; 近岸下垂而外海大致与海面平行的等温线, 在长江口陡坡至外海的次表层分布密集, 自次表层至表层和底层逐渐由密变疏, 而底层变得特别稀疏; 在长江口以南陡坡区的上层等温线分布密集, 且自陡坡至外海和表层至底层逐渐由密变疏, 底层变得非常稀疏。由等温线变化趋势表明, 夏季受长江径流影响最甚的长江口及其以南近岸区域, 温度在水平方向变化较缓慢, 而在垂向上几乎没有变化。其它区域温度在水平方向变化更为缓慢, 而垂向上特别是长江口

及其以南陡坡区的上层变化非常显著。

海区等温线分布特征及变化趋势表明,夏季受长江径流影响最甚的长江口及其以南近岸区域温度呈垂直均匀分布。其它区域温度总体上大致呈水平均匀分布,而在垂向上出现剧烈分层,从而在长江口以北和长江口及其以南陡坡至外海生成强温跃层(郑晓琴等,2008;刘浩等,2013)。其强度自表层至底层逐渐减弱,深底层特别是陡坡附近温度大致呈均匀分布,并保持低温特征。由长江口以南( $31^{\circ}\text{N}$ )陡坡处等温线的上凸表明该区域出现底层低温涌生。夏季长江口及其以南温度垂直均匀分布区,近岸温度高,近岸以远温度低,其中长江口以南近岸为  $29^{\circ}\text{C}$ ,近岸以远为  $28^{\circ}\text{C}$ ,近岸与近岸以远的温差只有  $1^{\circ}\text{C}$ 。长江口近岸和近岸以远温度均高于  $27^{\circ}\text{C}$ ,近岸与近岸以远温差还不到  $1^{\circ}\text{C}$ 。其它区域均为表层高,底层低,且自表层至底层由高变低。在长江口以北外海表层温度可达  $26^{\circ}\text{C}$ ,底层温度低于  $14^{\circ}\text{C}$ ,表底层温差可超过  $12^{\circ}\text{C}$ ,深底层温度大致呈均匀分布。长江口及其以南外海表层温度均为  $27^{\circ}\text{C}$ ,底层分别低于  $13^{\circ}\text{C}$  和  $12^{\circ}\text{C}$ ,表底层温差达  $14^{\circ}\text{C}$  和  $15^{\circ}\text{C}$ ,陡坡区的底层温度几乎呈均匀分布。将  $31^{\circ}\text{N}$  和  $32^{\circ}\text{N}$  断面的数值模拟结果与毛汉礼等(1964)和唐晓晖等(2004)夏季的分析结果比较看出,温度的分布特征和变化趋势并没有太大差异,由此证实夏季其它区域的模拟结果也与观测结果一致。

比照图5和图6中各纬度和经度断面的等温线分布不难发现,夏季研究海区近岸至陡坡区与海面垂直等温线分布自南向北由密变疏,其与海面的垂直程度逐渐减小。而自陡坡至外海的水平分布等温线的疏密程度自南向北没有太大变化,但其在近岸陡坡一端的上凸程度逐渐减小,陡坡至外海底层等温线由疏变密。这表明,夏季随着海区自南向北岸坡和水深的减小,海面温度的由高变低和台湾暖流的减弱,近岸浅水区温度的水平变化和垂直均匀分布程度逐渐减小,陡坡区的跃层强度随底层冷水涌升的减弱而减小,其厚度却逐渐增大。因此,夏季长江口及其邻近海区的温度分布及温跃层的成因除了与海区的岸坡、水深变化有关外,还与夏季的海面温度变化、长江径流、台湾暖流的强弱和海区环流特征有关。

夏季研究海区由春季的偏东风转为东南风,风速弱于春季,更弱于冬季。夏季东海沿岸流只能影响海区的北边界附近区域。海区的水平对流随东海沿岸流的减弱而减弱,垂直对流也随之减弱,因此夏季研

究海区的水交换减弱。由于夏季长江径流量大,长江高温水出河口后在偏南风 and 台湾暖流的共同作用下向外海和东北偏转,冲淡水浮于表层,台湾暖流多楔入底层。夏季剧烈的太阳辐射使海面持续增温,在一个相当长时间内海面始终保持高温状态。由于长江口及其以南近岸水浅,且受长江径流的影响较甚,极易导致温度的垂直混合,因此该区域温度以垂直均匀分布,且保持高温特征。除长江口及其以南近岸浅水区外,其它区域保持高温状态的表层高温水在与下层低温水混合过程中温度产生急剧变化,从而在表层至次表层生成强温跃层,其强度自表层至底层逐渐减弱,在底层特别是陡坡区底层其温度几乎呈均匀分布并保持低温特征。由于夏季在海底地形变化显著的陡坡区出现上升流,上升流使陡坡区底层冷水涌升,在陡坡区的跃层强度增大,而其厚度变薄且底层保持低温特征。由于陡坡区升降流自南向北随着台湾暖流减弱而减弱,因此陡坡区跃层强度也自南向北随底层冷水涌升的减弱而减弱,而厚度却逐渐增大,随着水深的变浅底部均匀层的厚度变薄。

#### 4 秋季的温度分布

图7和图8分别是秋季研究海区  $31^{\circ}\text{N}$ 、 $31.5^{\circ}\text{N}$ 、 $32^{\circ}\text{N}$  纬度断面和  $122.0^{\circ}\text{E}$ 、 $122.5^{\circ}\text{E}$ 、 $123.0^{\circ}\text{E}$  经度断面温度的数值模拟结果,等值线间距均为  $0.2^{\circ}\text{C}$ 。由图7和图8可以看出,秋季研究海区的等温线分布与冬季大致相似,在长江口以北( $32^{\circ}\text{N}$ )近岸区域等温线呈两端分别朝向近岸和海底而中部凸向海面和外海的弧形分布。外海底层等温线与海底平行,而底层以上则与海面呈垂直分布。在长江口( $31.5^{\circ}\text{N}$ )及其以南( $31^{\circ}\text{N}$ )近岸至陡坡浅水区和陡坡至外海深水区的近表层与近底层间等温线大致与海面垂直分布,而在陡坡区近表层至外海的近底层呈弧形分布。

由图7和图8中各纬度和经度断面等温线的变化趋势可以看出,秋季研究海区等温线的疏密程度和变化趋势均逊于冬季。在长江口以北( $32^{\circ}\text{N}$ )海底地形变化缓慢的浅水区,与海面垂直的等温线在近岸分布较密集,外海分布稀疏,且自近岸至外海逐渐由密变疏。在长江口( $31.5^{\circ}\text{N}$ )及其以南( $31^{\circ}\text{N}$ )海区,近岸至陡坡和陡坡至外海与海面垂直的等温线,在近岸分布较密集,外海分布稀疏,自近岸至陡坡和陡坡至外海逐渐由密变疏。近岸以远近表层至外海的近底层的弧形等温线分布密集,尤其是长江口以南( $31^{\circ}\text{N}$ )海区近底层凹向海底的弧形等温线分布更为密集,并至

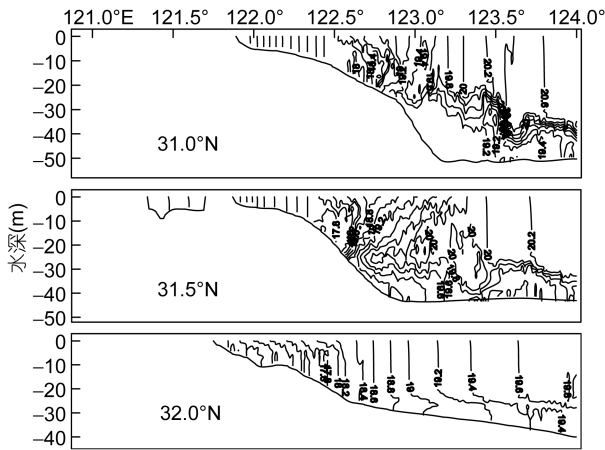


图 7 秋季纬度断面温度分布

Fig.7 Temperature profile on latitude sections in autumn

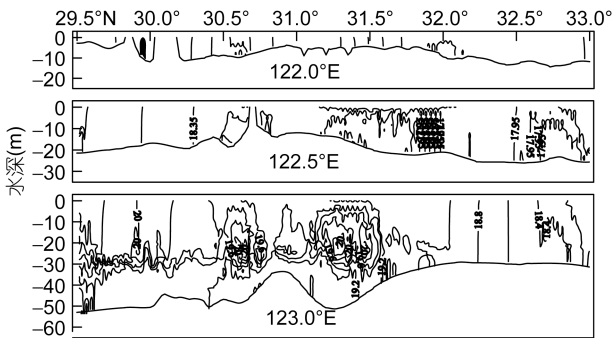


图 8 秋季经度断面温度分布

Fig.8 Temperature profile on longitude sections in autumn

海底逐渐由密变疏, 其中在长江口以南陡坡处底层变得尤为稀疏。

等温线的分布特征和变化趋势表明, 秋季在长江口以北的浅水区近岸温度为表层高, 底层略低且呈垂直均匀分布; 近岸以远表层至底层温度大致呈垂直均匀分布; 近岸以远至外海变为上层温度高且呈垂直均匀分布, 底层温度低并出现分层。在长江口及其以南, 温度自近岸至外海由低变高; 近岸浅水区和近岸以远至外海的近表层至近底层以上温度大致呈垂直均匀分布; 而近岸以远的近表层至外海的近底层特别是长江口以南温度变化显著, 从而在近岸以远近的表层至外海的近底层形成弱温度锋, 这与刘浩等(2013)秋季温跃层减弱稍有差异。在锋面以上温度高, 而锋面以下温度低, 其中长江口以南陡坡区底层温度几乎呈均匀分布且保持低温特征。秋季长江口以北近岸温度低于  $17^{\circ}\text{C}$ , 外海高于  $19.6^{\circ}\text{C}$ , 底层略低于上层。长江口及其以南近岸温度低于  $16^{\circ}\text{C}$ , 外海温度可高于  $21^{\circ}\text{C}$ , 上层最高温度可分别达  $20.2^{\circ}\text{C}$  和  $20.8^{\circ}\text{C}$ , 底层分别低于  $19.4^{\circ}\text{C}$  和  $19.8^{\circ}\text{C}$ 。

比照图 7 和图 8 中各纬度和经度断面等温线分布和变化趋势发现, 近岸与海面垂直的等温线其水平跨距和垂直程度自北向南逐渐减小。而外海与海面垂直的等温线的水平跨距和垂直程度自南至长江口逐渐变小, 而自长江口向北却逐渐变大, 陡坡处的温度锋也自南向北逐渐减弱。由此表明, 秋季随着海区自北往南岸坡和水深的增大、海面温度的增高及沿岸流流幅的变窄和流速的增强, 近岸温度的垂直均匀分布程度自北往南逐渐减小。随着自南往北水深的变浅, 台湾暖流和陡坡区升降流的减弱, 外海温度的垂直均匀分布程度自南至长江口逐渐减小, 而自长江口往北又逐渐增大, 陡坡处的温度锋自南往北逐渐减弱。因此, 秋季长江口及其邻近海区的温度分布和演变过程不仅与海区岸坡、水深变化变化有关, 而且也与秋季长江径流、东海沿岸流和台湾暖流以及陡坡区升降流的强弱有密切关系(刘兴泉等, 2008a; 2008b)。

秋季研究海区已由夏季的偏东南风转为偏北风, 其强度比冬季小。秋季在偏北风的驱动下, 南下东海沿岸流逐渐增强, 北上台湾暖流也随之增强, 导致二者之间的垂直对流增强。秋季天气变凉海面逐渐降温, 在东海沿岸流、台湾暖流和长江径流的共同作用下, 逐渐降温的表层水与其下面温度本来较低的水体产生混合。在长江口以北近岸, 东海沿岸流沿岸界向东南流动过程中, 可能是由于外海表层补偿流的作用, 使得近岸表层温度高、底层略低且呈垂直均匀分布; 在近岸以远, 可能是由于东海沿岸流与台湾暖流的切变效应, 温度自表层至底层几乎呈垂直均匀分布; 近岸以远至外海由于温度的垂直混合影响的深度有限, 因此上层温度高且呈垂直均匀分布, 底层温度低并出现分层。在长江口及其以南, 由于近岸水浅且受长江径流影响较甚, 而外海的近表层至近底层以上垂直混合充分, 因此温度均呈垂直均匀分布; 近岸以远的近表层至外海的近底层由于升降流使得底层冷水涌升和表层次高温水下沉而导致底层和表层间温度产生剧烈变化, 从而形成温度锋; 其中长江口以南锋面以下温度几乎呈均匀分布并保持低温特征。

## 5 结论

数值模拟及分析表明, 冬季研究海区的温度分布为近岸低, 外海高; 近岸和水深变化缓慢区呈垂直均匀分布, 外海深水区的上层温度低、底层温度高并呈现弱的分层; 海底地形变化显著的陡坡区生成温度锋, 其强度随陡坡区升降流自南向北的减弱而减弱, 而厚度增大。

春季研究海区的温度分布为近岸高、外海低;近岸温度大致呈垂直均匀分布,外海出现明显的分层;长江口以北温度为表层低、底层高;长江口及其以南表层和底层温度低、中层温度高;在陡坡区升降流的作用下,台湾暖流高温水与上层和外海低温水混合过程中温度产生显著变化,从而在陡坡至外海的表层至次表层生成弱的负温跃层和温度锋;随着温度锋自近岸至外海的下移,锋面以上温度逐渐变为垂直均匀分布,而锋面以下温度出现分层且大致呈水平均匀分布。

夏季研究海区的温度分布为近岸高、外海低;长江口及其以南近岸浅水区呈垂直均匀分布,长江口以北和长江口及其以南温度均为表层高、底层低,并自表层至底层由高变低且大致呈水平均匀分布,并在表层至次表层生成强温跃层,跃层强度自次表层至底层迅速减弱,深底层温度几乎呈均匀分布。在海底地形变化显著的陡坡区,上升流导致底层冷水涌升,使得跃层强度增大,而厚度变薄。

秋季研究海区的温度分布为近岸低、外海高;在长江口以北,温度为表层高、底层低;近岸表层出现弱的分层,表层以下呈垂直均匀分布;近岸以远温度自表层至底层呈垂直均匀分布,而外海的表层至次表层呈垂直均匀分布,底层出现分层。长江口及其以南近岸温度呈垂直均匀分布,陡坡至外海的近表层至近底层生成弱温度锋,强度至底层逐渐减弱;随温度锋自陡坡至外海的下移,锋面以上温度变为垂直均匀分布,锋面以下特别是长江口以南陡坡区的底层温度几乎呈均匀分布。

附注 本文初次投稿时间为2009年,于2014年重新投稿并被接收。

### 参 考 文 献

- 毛汉礼,任允武,孙国栋,1964.南黄海和东海北部(28°—37°N)夏季的水文特征以及海水类型(水系)的初步分析.海洋科学集刊,23—77
- 任允武,孙国栋,毛汉礼,1964.南黄海和东海北部(28°—37°N)冬季的水文特征以及海水类型(水系)的初步分析.海洋科学集刊,78—125
- 刘兴泉,尹宝树,侯一筠,2008a.长江口及其邻近海区环流和温、盐结构的动力学研究 I. 定解条件和研究方案.海洋与湖沼,39(1): 82—89
- 刘兴泉,尹宝树,侯一筠,2008b.长江口及其邻近海区环流和温、盐结构的动力学研究 II. 环流的基本特征,海洋与湖沼,39(4): 312—320
- 刘 浩,许文珊,2013.长江口水域水体结构的季节变化.上海海洋大学学报,22(2): 261—265
- 苏育嵩,李凤岐,马鹤来等,1989.东海北部区域底层冷水的形成及其季节变化.青岛海洋大学学报,19(1): 1—14
- 陈达熙,1992.渤海、黄海、东海海洋图集—水文分册.北京:海洋出版社
- 郑晓琴,丁平兴,胡克林,2008.长江口及邻近海域夏季温盐分布数值分析.华东师范大学学报(自然科学版),6: 14—23
- 赵保仁,乐肯堂,朱兰部,1992.长江口海域温、盐度分布的基本特征和上升流现象.海洋科学集刊,33: 15 - 26
- 唐晓晖,王 凡,2004.长江口邻近海域夏、冬季水文特征分析.海洋科学集刊,46: 42—66
- 蓝淑芳,顾传晟,傅秉照,1984.东海北部陆架区底层冷水的初步分析.海洋科学集刊,21: 75—86

## DYNAMICS OF CIRCULATION AND TEMPERATURE-SALINITY STRUCTURES IN CHANGJIANG RIVER MOUTH AND ITS ADJACENT SEA

### III. THE TEMPERATURE STRUCTURE

LIU Xing-Quan, HOU Yi-Jun, YIN Bao-Shu, YANG De-Zhou  
(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)

**Abstract** We analyzed the outcome of simulation on water temperature in the Changjiang River mouth this study. Water temperature in the Changjiang River mouth and its adjacent sea presented different distribution characteristics in winter, spring, summer, and autumn. In winter, water temperature is low nearshore, high in open sea; vertically uniform nearshore and offshore in the area of gentle slope. The temperature front forms in the areas of steep slope. Water temperature is low in middle and upper layers in open sea and vertically uniform, and high in the bottom layer that slightly stratified. In spring, water temperature is high nearshore and vertically uniform, and low in the open sea that stratified. In the north of the river mouth, water temperature is low in upper layer, and high in bottom layer. To the south of the river mouth, water temperature is low in the surface and bottom layers, high in mid-layer, and the temperature front forms down steep slope to the open sea. As the temperature front surface shifts from steep slope down to the outer sea, water temperature becomes uniform vertically above the front surface, whereas temperature is almost uniform horizontally below the front surface. In summer, water temperature is high in nearshore, low in the open sea. In the shallow areas of the Changjiang River mouth, temperature is uniform in vertical direction. In deep open sea away from the mouth to the north and south, temperature is almost uniform in horizontal direction with generation of stronger thermocline in the surface or subsurface layer. The thermocline intensity weakens rapidly as water deepens. Water temperature is almost uniform and low at deep bottom layer. In autumn, the pattern of water temperature profile is largely the same to the winter's: low nearshore and high off the coast. In the north of the Changjiang mouth nearshore, water temperature is high in surface layer and low in bottom layer, while in the open sea areas, the temperature is in overall uniform in horizontal direction above the bottom layer. The nearshore water temperature is even in vertical direction, while from steep slope to deep sea, water temperature forms a weak front through water column. As the temperature front gradually moves down oceanward, water temperature above the front turns vertically uninform. In the deep-steep areas south of the mouth, water temperature in bottom layer is almost evenly distributed.

**Key words** Changjiang River mouth and its adjacent area; temperature; vertical distribution; thermocline; temperature front