

三沙湾夏、冬季节温、盐分布特征及影响因素分析

林宏阳^{1,2}, 安佰超¹, 陈照章^{1*}, 孙振宇¹, 陈海阳¹, 朱佳¹, 黄凌风²

(1. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 2. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 利用 2012 年 8 月和 2013 年 1 月在三沙湾开展的 2 个航次调查所获得的温度、盐度资料, 分析三沙湾夏季和冬季温度、盐度的水平和垂直分布特征。结果表明: 三沙湾夏、冬季节在湾口均为低温高盐水、湾顶为高温低盐水, 这主要是受陆地径流的影响导致的; 但是湾顶与湾口的温、盐差异在冬季相比夏季要小很多, 温度差在冬季变小主要是受太阳辐射的季节差异导致的, 而盐度差变小则是由于浙闽沿岸水在冬季向南转向经潮流进入三沙湾导致的; 温、盐的垂直分布图表明三沙湾冬季海水混合相对均匀, 混合层深度比夏季要深, 这与季风强度的季节差异有关。

关键词: 三沙湾; 温度; 盐度; 季节变化

中图分类号: P 731.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2016)03-0349-08

三沙湾位于福建省东北部沿海, 是宁德市境内的一个封闭型海湾, 主要由官井洋、东吾洋、三都澳、盐田港等次级海湾组成(图 1), 三沙湾内水域开阔, 海湾总面积(扣除岛屿)约 675 km², 但其仅在海湾东南部有一峡口(即东冲口)与外海相连, 且口门宽仅约 3 km, 因此历来是避风良港^[1-2]。近年来由于富营养化等问题, 湾内水质、生态环境均受到不同程度的影响。

三沙湾的温盐分布、水动力条件及与外海的水交换等物理海洋学特征的研究, 对于提出海湾水质的物理修复方案具有重要指导意义。目前对于三沙湾水文方面的研究较少, 主要集中在海湾的潮汐特征、围垦对航道的影响等^[3-4], 且所用的观测资料十分有限, 因此, 更全面的现场观测对于了解三沙湾的水文状况十分必要。基于 2012 年 8 月和 2013 年 1 月 2 个航次的盐度(电导)-温度-深度(conductivity-temperature-depth, CTD)仪实测资料, 本文主要比较分析三沙湾在夏、冬季节温度和盐度的水平和垂直分布特征及其可能的影响因素。

1 观测数据及处理

2012 年 8 月 22 日和 2013 年 1 月 26 日, 厦门大

学分别组织开展了三沙湾夏季、冬季航次包括大面 CTD 观测在内的综合调查, 调查区域和站位基本覆盖整个三沙湾海区(见图 1)。夏季航次的调查站位比冬季航次多 4 个(图 1 中▲标记); 各站位进行调查时均有下放 CTD 仪, 收集该站点的温、盐垂直剖面数据。收集的数据经质量控制后, 在垂向上插值到每 0.5 m 一层。为得到各层的温、盐水平分布特征, 将该层所有站点的观测数据利用克里金插值(Kriging interpolation)法^[5]插值到 0.005°×0.005°的网格上, 搜索半径设为 10 个网格间距(即约 0.05°)。为验证网格化插值结果对所选取的插值方法的敏感性, 也采用距离平方反比(inverse distance squared)法^[6]对观测数据进行插值, 发现 2 种方法得到的结果相近, 但用克里金插值法得到的结果相对更为平滑一些。

在潮汐作用明显的海域, 潮流对于港湾中的温、盐分布通常具有重要影响, 因此我们也结合三沙湾中布放的水位计的观测数据分析上述 2 个航次开展期间的涨、落潮情况。由于湾内各处达到高潮或低潮的时间相差不多, 因此我们只选取位于海湾南部峡口处布放的东冲站(图 1 中★标记)水位计观测数据进行分析。2012 年 8 月 22 日和 2013 年 1 月 26 日前后东冲站的水位观测结果如图 2(a)和(b)所示, 从中可看出三沙湾内潮汐类型主

收稿日期: 2015-06-01 录用日期: 2015-08-18

基金项目: 国家海洋局公益项目(201205009-2)

* 通信作者: zzchen@xmu.edu.cn

引文格式: 林宏阳, 安佰超, 陈照章, 等. 三沙湾夏、冬季节温、盐分布特征及影响因素分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(3): 349-356.

Citation: LIN H Y, AN B C, CHEN Z Z, et al. Distribution of summertime and wintertime temperature and salinity in sansha bay [J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2016, 55(3): 349-356. (in Chinese)



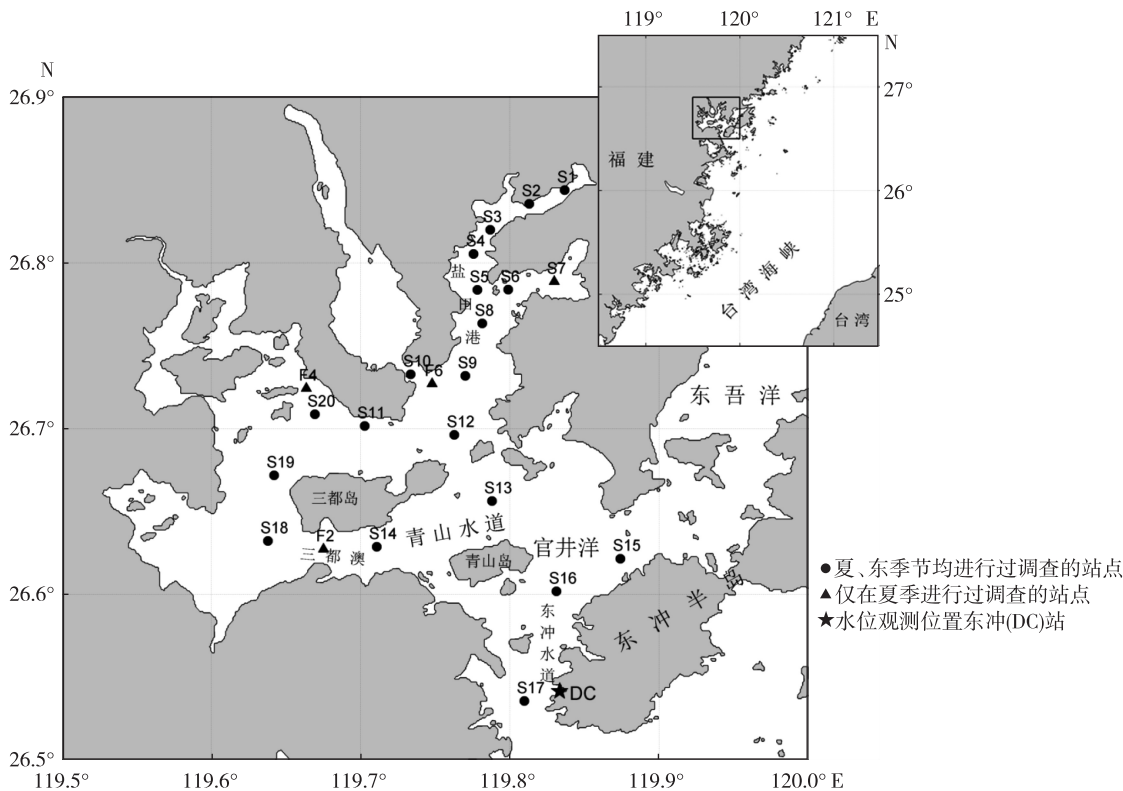


图 1 三沙湾相关岛屿、水道名称及航次站位图

Fig. 1 Map of the Sansha Bay labelled with selected islands, channels and the sampling stations

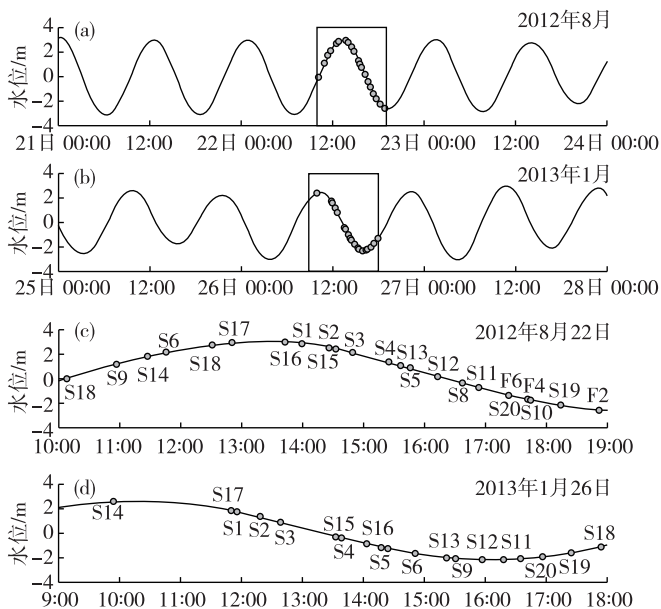
要为正规半日潮.2 个航次开展时对应的时间范围在图中用方框表示,并分别在图 2(c)和(d)中进行放大显示,可清楚地看出各站调查开展时的涨、落潮情况.另外,图 2 表明 2 次观测期间潮差均约为 5.5 m.

2 夏、冬季温、盐水平分布特征

本节先分别描述三沙湾夏、冬季温、盐在不同深度的水平分布特征,再比较两季的差异及其成因.

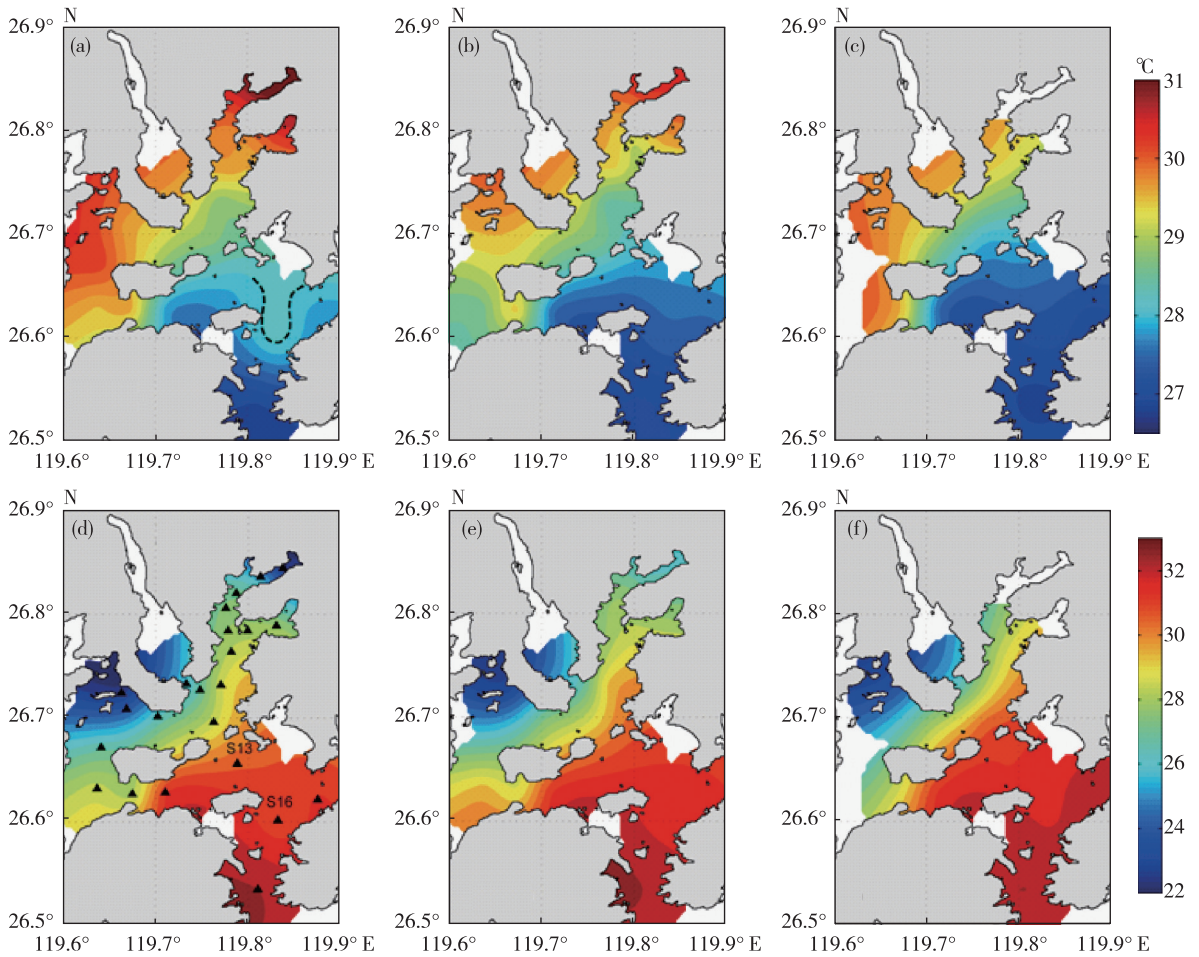
2.1 夏季

三沙湾夏季的温、盐在不同深度的水平分布特征如图 3 所示.从图 3(a)可看出夏季表层温度介于 27~31 °C 之间;湾口处表层温度约 27 °C,湾顶处(如盐田港)则超过 30 °C,即表层温度呈现“内高外低”的特征.温度梯度方向与湾内各水道的地理方位大体一致,如三都岛南、北部海域温度梯度大致呈东西向,而在盐田港和东冲水道则呈南北向.三都岛南部海域的温度梯度最大,达到约 0.4 °C/km.垂向变化上,5 和 10 m 层的温度水平分布特征(图 3(b)和(c))与表层在大范围上相近,即均呈现“内高外低”的特征,不同之处主要表现在:1) 较深层的海水温度较低;2) 在 10 m 层,三都岛南、北部海域的温度梯度略有增大.



(a)和(b)中的方框表示夏、冬季航次观测时间,框内圆圈表示各站位观测实施时东冲站的水位及对应的时间;(c)和(d)分别为(a)和(b)图中方框放大显示的结果.

图 2 夏、冬季航次前、后东冲站的水位观测结果
Fig. 2 Sea level observations collected at Station Dongchong during the days before and after the summer and winter cruises



(a)~(c)为 0,5,10 m 层的温度;(d)~(f)为 0,5,10 m 层的盐度,(d)中的▲表示用于进行网格化插值的站点。

图 3 三沙湾夏季温度、盐度在不同深度的水平分布图

Fig. 3 Horizontal distributions of summertime temperature and salinity at different layers in the Sansha Bay

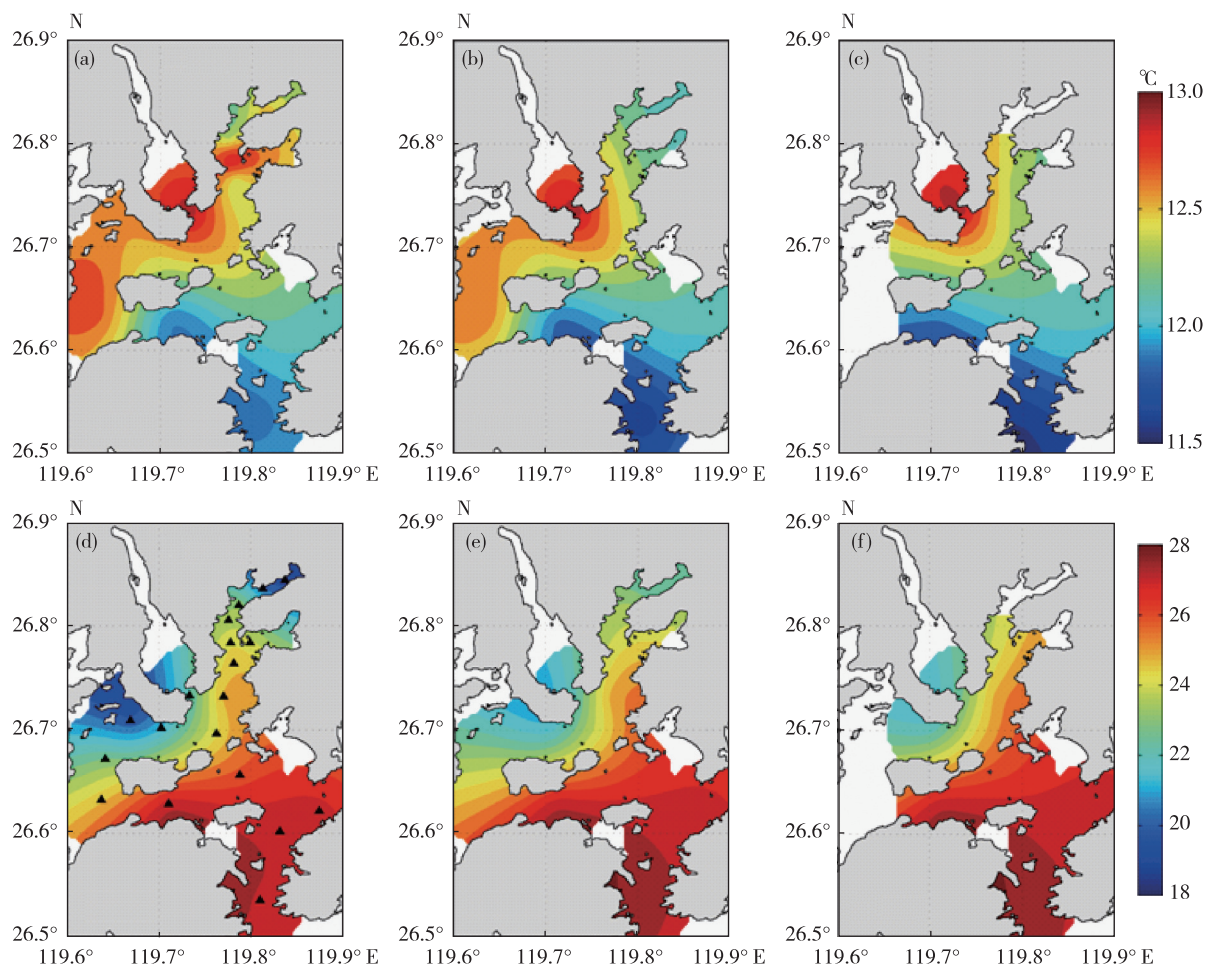
夏季表层盐度介于 22~33 之间(图 3(d)):湾口处盐度较高(接近 33),湾顶处盐度较低,特别是三都岛西北部海域和盐田港湾顶(仅 22~23),即表层盐度呈现“内低外高”的特征.与温度梯度分布相似,盐度梯度方向也与各水道的地理方位大致相同,且在三都岛南部海域梯度最大.垂直方向上,5 和 10 m 层的盐度水平分布特征(图 3(e)和(f))也与表层相近.

比较图 3 的温度和盐度分布特征可以看出,三沙湾夏季湾口主要为低温高盐水,湾顶为高温低盐水,这主要是受陆地径流的影响导致的.三沙湾西北侧有赛江、霍童溪等中、小溪流注入^[3],这可以解释海湾西北侧的低盐特征(图 3).从图 3 还可看出在官井洋附近(S13 和 S16 站点位置见图 3(d))有一向南延伸的高温低盐的舌状结构(如图 3(a)粗虚线所示),这在表层温度和 10 m 层盐度分布图中尤为明显.从图 2(b)可看出当进行 S13 调查时,水位正逐渐下降且接近距

平为 0 的时间点,说明该站调查进行时正处于落潮流较强的时候,因此湾内水体正加速往外流,这可能是造成上述舌状结构的原因.

2.2 冬季

三沙湾冬季的温、盐在不同深度的水平分布特征如图 4 所示.从图 4(a)中可看出表层温度介于 12~13 °C 之间,与夏季类似,冬季表层温度分布依然呈现大致“内高外低”的特征,但是最高温度出现的位置有所不同,例如:夏季盐田港最高温度出现在湾顶,而冬季则出现在湾中部.冬季表层温度梯度方向大致与夏季相近,但幅度弱很多,例如:梯度最大的三都岛南部海域的表层温度梯度幅值约 0.1 °C/km,仅为夏季的 25%.垂直方向上,温度除总体略微变低外,“内高外低”的水平分布特征没有发生改变(图 4(b)和(c)).最大的变化发生在 10 m 层的温度梯度方向上(图 4(c)):盐田港、三都岛南部海域的表层温度等值线分别



(a)~(c)为 0,5,10 m 层的温度;(d)~(f)为 0,5,10 m 层的盐度,(d)中的▲表示用于进行网格化插值的站点.

图 4 三沙湾冬季温度、盐度在不同深度的水平分布图

Fig. 4 Horizontal distributions of wintertime temperature and salinity at different layers in the Sansha Bay

呈南北向、东西向,而 10 m 层的温度等值线则刚好相反.冬季温度梯度方向的这一垂向变化在夏季没有出现.

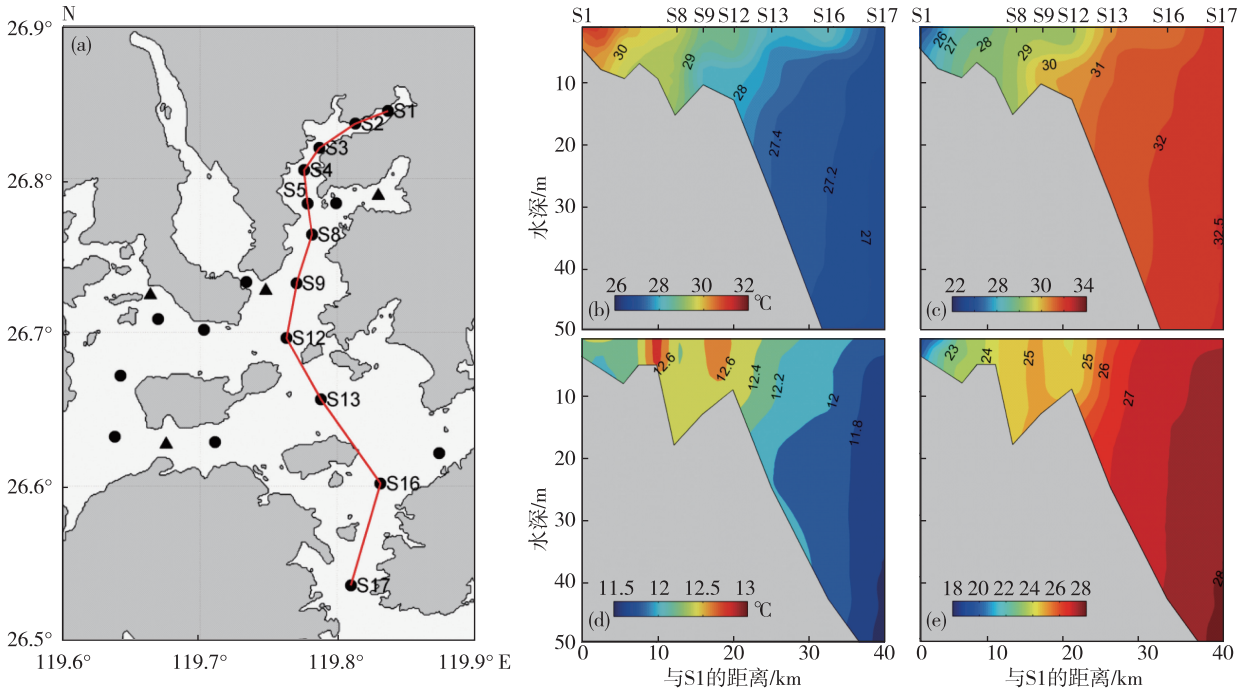
冬季表层盐度分布特征(图 4(d))与夏季相似,即维持了“内低外高”的特征,但盐度值普遍降低了 3~5.另外,三都岛南部海域的盐度在夏季为自西向东递增,而冬季则为自西北向东南递增;东冲口附近夏季表层盐度存在较弱的南北向梯度,而冬季该处表层盐度的水平分布则较均匀,盐度值介于 27.0~27.5 之间.垂直方向上,5 和 10 m 层的盐度分布特征(图 4(e)和(f))与表层几乎完全相同,但盐度值略有升高.

综上所述可以看出,与夏季的温、盐分布特征相似,三沙湾冬季湾口主要为低温高盐水,湾顶为高温低盐水,这仍是受陆地径流的影响导致的.然而,夏季湾顶与湾口的温差达到 4 °C 左右,而冬季温度仅约 1 °C.这一差异主要是由于太阳辐射的季节差异导致的,即冬

季陆地径流的表面温度与外海水相差不多而在夏季则相差较大,这也是三沙湾表层温度梯度幅值在夏季比冬季要大的原因.同样,湾顶与湾口的盐度差在冬季也比夏季小(冬、夏分别为 7 和 10 左右),这是由于浙闽沿岸水在冬季向南转向^[7],与冬季主要由东北风驱动的浙闽沿岸流^[8]一起顺岸南下,这一盐度较低的海流在潮流作用下会进入三沙湾,从而降低了海湾内外的水体盐度差异.

3 夏、冬季温、盐垂直分布特征

为研究三沙湾内温度和盐度分别在夏季和冬季的垂向分布特征,并探讨外海水对湾内温、盐三维结构的影响,我们根据现有调查站位选取了一个从湾顶至湾口的断面(如图 5(a)中的连线),分析该断面的温、盐垂向结构.所选断面在夏、冬季节的温、盐垂直分



(a)中站点连线所组成的即为(b)~(e)中的温、盐断面;(b)夏季温度;(c)夏季盐度;(d)冬季温度;(e)冬季盐度。

图 5 三沙湾湾顶至湾口处温、盐垂直分布特征

Fig. 5 Vertical distributions of temperature and salinity from the inlet to the mouth of the Sansha Bay

布如图 5(b)~(e)所示,该图证实了三沙湾海水温度“内高外低”(图 5(b)和(d))、盐度“内低外高”(图 5(c)和(e))的特征。

从夏季温、盐沿所选断面的垂直分布可看出盐田港内(S1~S8)由于水深较浅,海水温度和盐度在垂向上分布较为均匀,而盐田港至青山水道之间(S9~S12)4~7 m 层位置及官井洋附近(S13~S16)3~4 m 层位置存在较薄的温度和盐度跃层(图 5(b)和(c)).其中 S9~S12 间温跃层的垂向温度梯度比 S13~S16 间的要小,前者约 0.13 °C/m,而后者达到 0.3 °C/m;相反地,S9~S12 间的盐跃层的垂向盐度梯度比 S13~S16 间的要略大,前者变化约 0.33/m,而后者变化不超过 0.2/m.在靠近外海的东冲口附近,温、盐跃层强度大大减弱,但表层温、盐数值仍比中深层略大.傅子琅等^[9]曾在罗源湾(位于三沙湾西南部)也发现夏季湾内较浅的区域水温上下均匀,而水深较大区域上层水温略高于下层。

冬季温、盐沿所选断面的垂直分布特征与对应的水平分布特征相吻合,如温度最大值出现在盐田港中部的 S5 附近.温、盐断面分布在不同季节的差异除了冬季温、盐在绝对数值上均比夏季要小外,最大的不同体现在温、盐的垂向结构上:冬季海水上、下混合均

匀,混合层深度相比夏季明显加深,特别是从盐田港口至官井洋附近(S8~S16).这是由于冬、夏季的风场强度不同导致的,研究区域内冬季盛行强劲的东北季风,海气界面存在较强的动量交换,有助于水深较浅的港湾内水体在垂向上进行较强地混合,从而使得其温、盐垂向分布较均匀.相较而言,夏季盛行的西南季风强度相对较弱,加上夏季较强的太阳辐射,有利于如图 5(b)和(c)中所示的季节性薄跃层形成。

4 温-盐图解(T-S diagram)

为进一步分析湾内水体的温、盐属性,我们以夏季为例通过温-盐图解(图 6)来大致划分湾内水团特征,以便于分析湾外海水在潮汐作用下对于湾内水体产生的影响.从图 6(a)的夏季表层温-盐图解可看出,靠近湾口(S13~S17)测到的主要为低温高盐水团,而靠近湾顶(S1,S2,F4,S20)主要为高温低盐水团,其他站点所测的水团温、盐则相对适中,介于上述两者之间,这与图 3(a)和(d)结果一致.随着深度增加,除湾顶等水深较浅的位置数据相应缺失外,温-盐图解结构大致与表层相近(图 6(b)),当深度超过 20 m 后,则仅剩近湾口的低温高盐水团(图 6(c)).图 6(d)显示了三

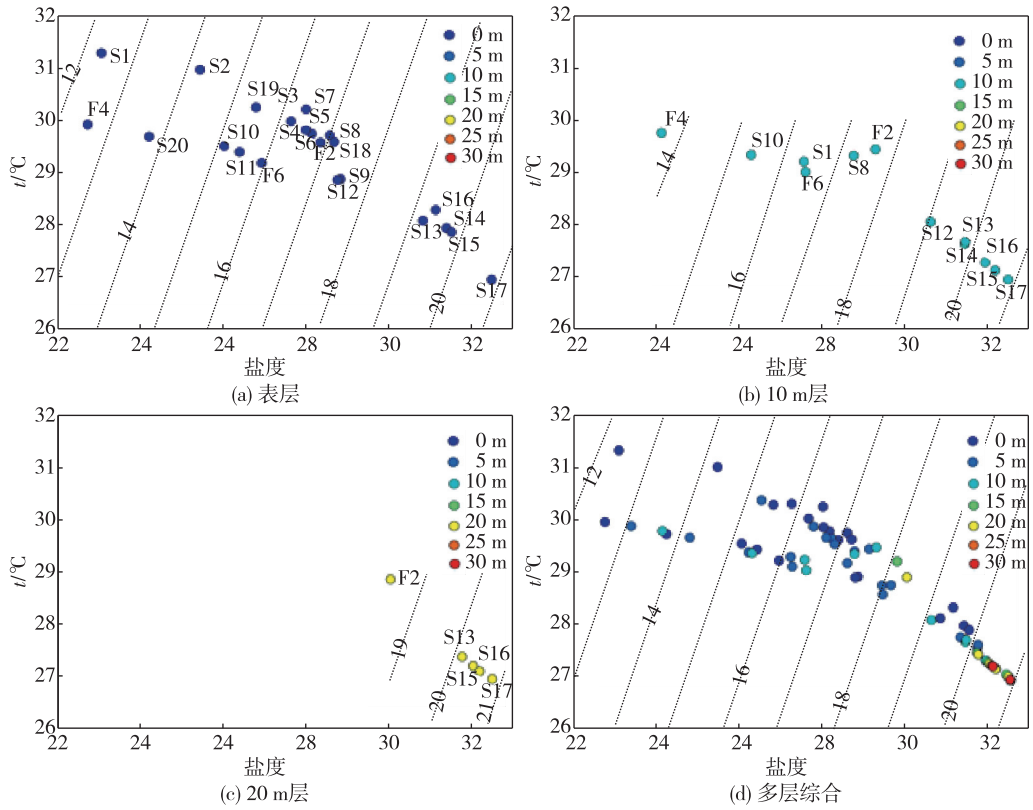


图 6 三沙湾夏季温-盐图解
 Fig. 6 Summertime T-S diagram in the Sansha Bay

沙湾内水团特性随深度的变化,亦可反映水团的水平(湾顶或湾口)和垂向(表层或深度)位置。

Hansen 等^[10]曾基于盐量收支变化提出用(基于盐度的)相对层化和相对流速 2 个参数来对河口进行分类,并基于此分析陆地径流和外海水对于河口局地环流和水体垂向结构的相对贡献.王晋沅等^[11]将该方法应用到厦门湾海域,指出九龙江河口区的盐度通量主要受外海潮汐作用影响.我们对该方法进行拓展,用温、盐垂向梯度的平均幅度来分析湾内水体在夏、冬季的层化特征。

从图 7(a)可看出夏季 S1 的温、盐垂向梯度的平均幅度(分别用 $\partial T/\partial z$ 和 $\partial S/\partial z$ 表示)比其他站点要大得多,但因该站点水深太浅,我们不做过多讨论而主要关注其他站点的结果并对其进行放大显示.从图 7(b)可看出湾口区水体的温度垂向梯度与盐度垂直梯度的平均幅度值均小于 0.05/m,主要为外海水占据.若干近岸站点(F2、F4、F6、S10、S11 和 S20)的垂向温度梯度较小($<0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$),但垂向盐度梯度较大($>0.07/\text{m}$),这主要是由于外海水与陆地径流交汇造成的.其他站点大部分位于盐田港内或离该港较近,其温度梯度相对较大,主要是由于薄温跃层的存在导致的。

冬季各站点的温、盐垂向梯度的平均幅度分布如图 7(c)所示,从中同样发现 S2 的幅值相比其他站点大很多,这可通过图 5(d)和(e)得到验证.同样地,我们主要关注其他站点结果(如图 7(d)所示).总体来说,冬季温、盐垂向梯度的平均幅度分布相比夏季更为集中;大部分站点的垂向温度梯度比夏季小得多,而且除 S19 外,冬季大部分站点的垂向盐度梯度也较小($<0.05/\text{m}$).造成这一现象的原因在第 3 节已有论述,即主要是由于冬季海水上下混合加强,从而导致温、盐垂向梯度减弱。

5 结论与讨论

本文主要利用 2012 年 8 月和 2013 年 1 月夏、冬季 2 个航次的实测资料分析三沙湾不同季节的温、盐特征,得到如下主要结论:

1) 三沙湾夏季表层温度呈现“内高外低”的特征,温度梯度方向与湾内各水道的地理方位大体一致,且三都岛南部海域的温度梯度最强,达到约 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. 5 和 10 m 层的温度水平分布与表层相近.三沙湾夏季表层盐度呈现“内低外高”的特征,与表层温度分布对应较好,如梯度方向等.综合来说,三沙湾夏季湾口主

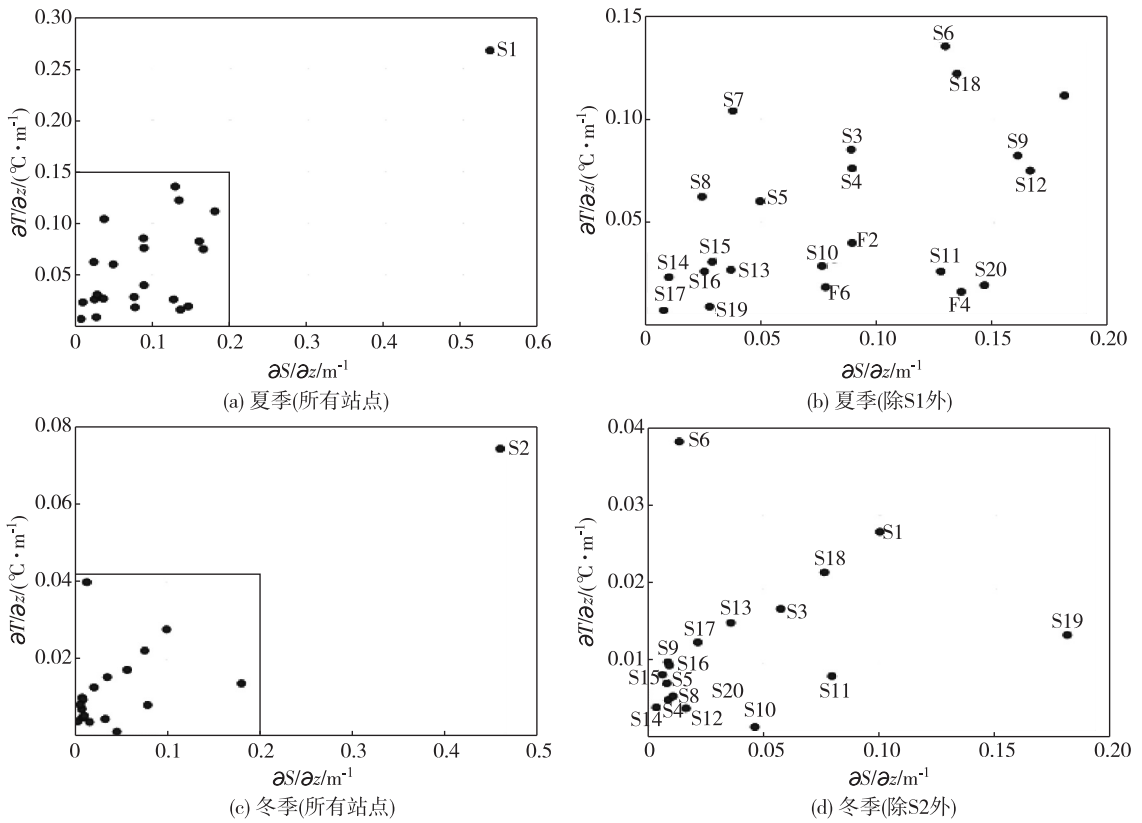


图 7 温、盐垂向梯度的平均幅度关系图

Fig. 7 Mean magnitudes of the temperature vertical gradient against salinity vertical gradient

要为低温高盐水、湾顶为高温低盐水,这主要是受陆地径流的影响.由于三沙湾内潮汐作用明显,潮差较大,其温、盐的水平分布还受到涨、落潮的影响.

2) 三沙湾冬季呈现与夏季类似的表层温度“内高外低”、盐度“内低外高”的特征,但是湾顶与湾口的温、盐差异相比夏季要小很多.温度差变小主要由太阳辐射的季节差异导致,而盐度差变小则是由于浙闽沿岸水在冬季向南转向经潮流进入湾内导致的.另外,冬季温、盐梯度的幅值相比夏季均有所减小,同样与上述原因有关.

3) 三沙湾温、盐的垂直分布特征同样显示了温度“内高外低”、盐度“内低外高”的特征.夏季,海湾中部 3~6 m 层位置存在一层较薄的温、盐跃层,而湾顶和湾口处海水则混合均匀;冬季,从湾顶至湾口海水均呈现上、下混合均匀的特征,混合层深度比夏季要深.温、盐垂向结构的季节差异是由于研究区域内季风和太阳辐射在不同季节的强度不同导致的.

4) 温-盐图解和温、盐垂向梯度分析表明湾口主要为外海水占据,海水性质较为均一.离岸较近海域则由于陆地径流和外海水的交汇在夏季呈现出较大的

垂向盐度梯度.盐田港内及附近区域在夏季的垂向温度梯度较其他区域略大.总体来说,冬季温、盐垂向梯度的平均幅度相比夏季要小,这主要是由于冬季海水混合加强导致的.

有关表层温度的水平分布差异,傅子琅等^[9]曾在罗源湾开展的调查发现,近岸区域的表层温度比湾内水深较大区域的水温在冬季更小,而在夏季则更大.他们主要通过海气界面的热通量因太阳辐射的季节性差异而产生的变化来进行解释,即冬季海洋热收入低于支出,而近岸区域由于水深浅、热容量较深水区小,因而失热更快,表层水温就比深水区低;夏季则情况相反.我们的观测结果也部分验证了他们的解释机制:图 3(a)表明夏季盐田港湾顶表层水温比深水区要大,而图 4(a)表明冬季盐田港湾顶表层水温比深水区要略小.但是这一特征在冬季对于三沙湾内其他浅水区的表层水温分布则表现得不是很明显,我们认为除了热通量的季节性变化这一机制外,季风的季节性差异也是一个重要的因素.冬季表层水温整体比夏季要低,除了太阳辐射减弱外,强劲的冬季季风加强了湾内海水的垂向混合,减弱了局地水体层结,也会造成表层

水温降低,而海水的垂直混合并不会直接造成浅水区和深水区海表温度的水平差异.当然,本文中的站位设置除盐田港外其他站位并不是特别靠近岸边,近岸区域的温、盐数值都是通过插值得到,也有可能没有捕捉到近岸区域温、盐分布的细小变化,因此有关浅水区和深水区海面温度的水平差异的机制问题,应辅进一步的观测进行深入的探讨.

参考文献:

- [1] 宁德地区地方志编纂委员会. 宁德地区志:上册[M]. 北京:方志出版社,1999:160-174.
- [2] 王义刚,宋志尧,姜翠玲,等. 福建省海湾数模与环境研究——三沙湾[M]. 北京:海洋出版社,2009:8.
- [3] 王义刚,王超,宋志尧. 福建铁基湾围垦对三沙湾内深水航道的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(6):99-101.
- [4] 叶海桃,王义刚,曹兵. 三沙湾纳潮量及湾内外的水交换

- [J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(1):96-98.
- [5] CRESSIE N A C. Statistics for spatial data [M]. New York:John Wiley & Sons,1993:105-210.
- [6] 林忠辉,莫兴国. 中国陆地区域气象要素的空间插值[J]. 地理学报,2002,57(1):47-56.
- [7] 顾玉荷. 长江冲淡水转向原因的探讨[J]. 海洋与湖沼,1985,16(5):354-363.
- [8] HU J, KAWAMURA H, LI C, et al. Review on current and seawater volume transport through the Taiwan Strait [J]. Journal of Oceanography,2010,66(5):591-610.
- [9] 傅子琅,胡建宇. 罗源湾的潮流和余流及水温的分布特征[J]. 厦门大学学报(自然科学版),1989,28(S1):28-33.
- [10] HANSEN D V, RATTRAY JR M. New dimensions in estuary classification [J]. Limnology and Oceanography,1966,11(3):319-326.
- [11] 王晋沅,江毓武. 九龙江河口盐度分布及其通量的动力过程分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2013,52(6):835-841.

Distribution of Summertime and Wintertime Temperature and Salinity in Sansha Bay

LIN Hongyang^{1,2}, AN Baichao¹, CHEN Zhaozhang^{1*},
SUN Zhenyu¹, CHEN Haiyang¹, ZHU Jia¹, HUANG Lingfeng²

(1.State Key Laboratory of Marine Environmental Science,Xiamen University,
2.College of the Environment and Ecology,Xiamen University,Xiamen 361102,China)

Abstract: Based on the temperature and salinity data collected during two cruises conducted in Sansha Bay in August 2012 and January 2013, we analyzed the horizontal and vertical distributions of summertime and wintertime temperature and salinity in this area. The results show that in both summer and winter, the baymouth is occupied by low-temperature, high-salinity water, while the opposite pattern occurs in the inlet. This is due primarily to the effect of river runoff. However, the differences in temperature and salinity between the mouth and the inlet are larger in summer. The smaller temperature difference in winter is mainly due to the seasonal variation of solar radiation. By contrast, the smaller salinity difference is probably because of the southward deflection of the Zhemín coastal water in winter; this low-salinity water can be carried into Sansha Bay by tidal currents. The vertical distributions of temperature and salinity indicate that the seawater is well mixed in the Sansha Bay in winter and the mixed layer depth is thus deeper compared to that in summer, which is attributed to the difference in the intensity of monsoon prevailing in winter and summer.

Key words: Sansha Bay; temperature; salinity; seasonal variation