

黄润琪, 谢玲玲, 李敏, 等. 湛江湾三维温盐特征季节变化观测分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(11): 46–60, doi:10.12284/hyxb2021156
Huang Runqi, Xie Lingling, Li Min, et al. Observational analysis on 3D distribution and seasonal variation of thermohaline characteristics in the Zhanjiang Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(11): 46–60, doi:10.12284/hyxb2021156

湛江湾三维温盐特征季节变化观测分析

黄润琪^{1,2}, 谢玲玲^{1,2}, 李敏^{1,2*}, 王丽菊^{1,2}

(1. 广东海洋大学 海洋与气象学院 近海海洋变化与灾害预警实验室, 广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学 广东省高等学校陆架及深远海气候、资源与环境重点实验室, 广东 湛江 524088)

摘要: 利用 2017 年 1–12 月的现场观测数据, 分析了湛江湾温盐的三维空间结构及季节变化特征。结果表明: (1) 2017 年湛江湾各站位年平均温度为 23~27℃、盐度为 19~27、位势密度为 11~17 kg/m³、浮性频率 (N^2) 为 $7 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$ 。浮性频率的垂向结构及水平分布与温度分布类似, 而位势密度则与盐度的变化趋势几乎一致; (2) 温度季节变化明显, 夏季最高, 秋季次之, 冬季最低, 冬夏温差最大达 15℃, 而盐度季节变化则不大。相较于季节引起的变化, 涨落潮对温度以及盐度影响较小。温度跃层夏季最强, 10 m 处温度最大梯度可达到 0.7℃/m, 春秋季节跃层抬升至 5 m 附近, 冬季水体上下混合均匀。夏季和秋季存在明显的盐跃层, 盐度梯度最大可达到 1.1 m⁻¹。跃层上下温盐的季节变化规律一致; (3) 水平分布上, 从湾顶区、湾颈区、大堤区、浅滩区到湾口区, 温度递减, 盐度递增, 湾顶区和湾口区平均温度差为 2.3℃, 盐度差为 2.7。温盐图分析显示, 不同季节水体呈现为不同的温盐条带, 湾口区基本为低温、高盐水体, 而湾顶区基本为高温、低盐水体, 其他区域水体介于上述两者之间。

关键词: 湛江湾; 温盐特征; 三维结构; 季节变化

中图分类号: P731.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)11-0046-15

1 引言

温度、盐度、密度是水体重要的基本物理要素^[1], 密度场的分布在很大程度上取决于温度场和盐度场, 而流场又与密度场密切相关, 故研究温度和盐度能为其他物理量的研究奠定基础。再者, 温盐是水团划分的主要示踪指标, 并与水体的其他物理性质有着很密切的关系, 因而温盐的分析常是其他物理量预报的基本前提。温度和盐度对生物多样性参数也有着显著的影响^[2], 即温盐的分布与浮游动植物等的分布关系密切, 故对于在养殖事业上有较大发展前景的港湾, 温盐的调查研究已成为一个重要环节。

前人对不同海湾的温盐特性做了大量的研究。

李树华^[3]利用现场观测资料得出钦州湾温盐的分布和变化主要受制于江河径流、降雨、潮流、海流、季风和日照辐射等。水平分布上, 由河口区到湾口区温度递减而盐度递增。垂向分布上, 夏季水温分层现象不明显, 而盐度由于径流和降雨的影响在湾内有较明显的分层现象; 冬季上下层的水温和盐度几乎趋于均匀。就季节变化而言, 夏季水温最高盐度最低, 而冬季水温最低盐度最高。林宏阳等^[4]分析了 2012 年 8 月和 2013 年 1 月在三沙湾获得的温度、盐度资料, 结果表明, 由于太阳辐射、陆地径流、潮流、季风的影响, 三沙湾夏季与冬季湾口均为低温高盐水、湾顶则为高温低盐水, 湾顶与湾口的温盐差异在冬季比夏季小, 冬季海水混合较均匀。傅子琅和胡建宇^[5]根据 1987

收稿日期: 2020-11-17; 修订日期: 2021-02-21。

基金项目: 国家自然科学基金(41776034, 41706025); 广东省冲一流专项资金(231419012, 231819002); 广东海洋大学科学基金配套经费(P15299); 广东省普通高校创新团队项目(2019KCXTF021)。

作者简介: 黄润琪(1996—), 男, 广东省东莞市人, 研究方向为物理海洋。E-mail: huangrunqi_ocean@163.com

* 通信作者: 李敏(1988—), 女, 博士, 山东省聊城市人, 研究方向为物理海洋。E-mail: limin_gdou@163.com

年在罗源湾两个航次的水温实测资料得出,罗源湾冬季水温较低且整个海区水温趋于均匀,而夏季水温较高且水平温差较大,水温由湾内向湾口递减。对于九龙江湾的盐度分布,前人做了较多的工作,研究表明,河口区高潮时表层盐度呈南高北低的分布状态,低潮时则相反;湾口区主要受外海水影响,涨潮时表层盐度分布比较均匀,退潮时九龙江冲淡水顺流而下,表层盐度分布呈舌状向外海伸展^[6-8]。Pritchard^[9]通过1950年在切萨皮克湾进行的两次观测所获得的盐度数据得出,切萨皮克湾的盐度随深度增加而增加,盐度-深度曲线呈反正切函数分布;从湾口向湾内看,右侧的盐度比左侧高。Najarian等^[10]采用两种模式的研究结果表明,运河对特拉华河口的水动力条件几乎没有明显的影响,但对盐度的影响显著。而对于特拉华河口盐度的分布,Cohen和McCarthy^[11]认为是由河流的淡水流量和入海口的海表面高度变化控制的,但盐度差异主要是沿通道的,通道两侧的盐度变化不大。盐度随潮流变化,在退潮时降低,在涨潮时增加。飓风也会通过影响海表面高度、风向和风速以及降水径流从而影响盐度。Posmentier和Racklin^[12]根据1973年监测数据得出哈德逊河口盐度垂向变化较大且存在明显层化结构,这种结构是由垂直扩散引起的。Uncles等^[13]根据1996年9月至1997年8月的调查观测得出特威德河口表层盐度的水平分布主要由淡水径流控制,径流强时表层盐度较低,径流弱时则相反。但无论径流强弱,盐度层化现象都较为明显。河流径流温度为2~18℃,沿海水域为6~15℃。

湛江湾位于广东省的西南部,雷州半岛的东北部,湾内有南三岛、特呈岛、东头山岛和东海岛等岛屿,与外海相隔,形成一个天然的屏障,湾内水域面积达160 km²,但由于西部东海大堤建成后隔断了湾内水体通过该西部通道与外海的交换,且南三河口窄水浅,与外海交流不足,即湛江湾主要通过位于南三岛和东海岛之间、宽约2 km的湾口与南海相通^[14],水动力主要以潮汐作用为主。

湛江湾属半封闭沉溺型港湾,是华南沿海的优良港湾,广东省第二大港,同时是华南最大的潮汐汉道^[15]。前人对湛江湾围填海、泥沙冲淤和潮汐潮流等问题进行了大量的研究^[16-25]。张乔民等^[16]研究了湛江湾内围垦工程对湾内局部海域的潮汐动力特征的改变,并指出至1975年,堵海围垦工程使湛江湾纳潮水域面积减小约1/3,相应纳潮量减少约1/4。夏华永等^[19]对湛江湾的海岸工程进行了数值模拟分析,分析表明,填海工程实施后由于纳潮面积的减小,潮流涨急

及落急时,整个湾内的流速都会减小。张志飞等^[20]采用二维水质数学模型,对湛江湾围填海工程实施后的潮流动力变化进行模拟,对比了湾内流态分布和特征点流速变化,计算了海湾纳潮量的变化,分析了围填海对于湾内水交换能力的整体及局部影响。模拟结果表明,涨潮时潮流从湾口涌入湾内,之后往西流向东头山岛北端并一分为二,一支往北,一支往西南方向。落潮时,潮流走向则正好相反。而工程对湾内流场的影响仅限工程附近水域,对主航道流速影响较小。陈达森和严金辉^[21]利用1987-2002年实测海流资料研究了湛江湾海区流场特征及其对水环境的影响,指出潮流流向在涨潮时主要向北,在落潮时主要向南,且落潮流速大于涨潮流速,而余流总体效应是指向湾外。李希彬等^[22]利用FVCOM模型建立了湛江湾附近海域的三维潮流模型,得出在湛江湾湾内余流场总体指向湾外,麻斜以北的海区主要受上游径流的影响,而湾口海区由于狭窄且水深,水流易于辐聚,导致湾口成为湛江湾的强流区。赵冲久^[23]通过实测数据得出海湾内一般只受小风区波浪影响,波浪动力较小,水流动力强,水体含沙量小,多年来处于冲淤平衡状态。赵婉璐和郝瑞霞^[24]采用ECOMSED数值模型,建立湛江湾顶海域的三维潮流数值模型并与原始资料进行了对比,发现湛江湾顶水道内的平均涨潮流速小于落潮流速,涨潮平均历时大于落潮平均历时,同一时刻表层流速大于底层流速。Lu等^[25]通过2017年4月和8月在湛江湾进行的两次采样分析表明,湛江湾表层沉积有机物为陆源和海源混合有机物,以海洋有机物为主,且由于季节性降雨对陆地径流的影响,湛江湾有机物的含量存在明显的季节性变化。

湛江湾海域内有大量的滩涂,是湛江主要的水产养殖基地。近年来,湛江湾海域水环境问题日益突出,海岸环境问题与海洋水文特征息息相关,可以看到随着港口经济的发展,对湛江湾水文环境的科学认识是对其进行合理开发利用的重要前提,然而前人关于湛江湾的研究工作主要集中在湛江湾水动力环境和潮汐作用的问题上,关于湛江湾海域温盐特征的报道和研究工作较少。蒋城飞等^[26]利用2015年10月观测数据得出,湛江港海域盐度在水平分布上由湾内往湾外逐渐递增,叶绿素a浓度由湾内往湾外逐渐递减,水深比较浅的区域水温较高,同时在航道入海口底层存在着“低温、高盐、低叶绿素浓度”的相对稳定的冷水团结构。陈春亮等^[27]应用ECOMSED海洋模式计算了电厂温排水对湛江湾海域影响的范围,结果表明电厂温排水只影响附近区域,对整个湛江湾而言

影响不大。夏季最高瞬时温升 7.25℃, 冬季最高瞬时温升 6.55℃, 冬季温升影响面积较夏季小。汤德福等^[28]通过 2013 年 1 月在湛江湾颈部处布放的浮标得出该位置水温的垂向分层, 发现从表层到底层温度逐渐下降, 表层和底层最高温差可达 4.5℃。刘泉兵^[29]通过 2017 年 11 月在湛江湾选取的 8 个站位采集的数据得出, 随着水深增加, 水温下降而盐度增大, 而水深 15 m 以浅的站位垂向温度变化幅度较小。Zhou 等^[30]对 2017 年在湛江湾采集的水样进行分析, 结果表明, 月平均盐度与月降水量呈显著负相关关系, 且降雨对湛江湾的影响主要是通过陆地径流的增加实现。

综上所述, 对湛江湾温盐特征的研究工作亟需开展。本文基于前人的研究基础上, 利用现场观测数据, 对湛江湾温盐的三维空间结构、季节变化特征进行分析, 并探究其可能的影响因素。

2 数据与方法

根据湛江湾的自然地理环境分布特征, 设置的 26 个调查站位如图 1 中黑色圆点所示, 站位基本覆盖整个海湾, 水深最浅为 3 m, 最深位于湾口主航道处, 达到 40 m。为方便分析, 本文将研究区域划分为湾顶区、湾颈区、大堤区、浅滩区和湾口区 5 个区域, 如图 1 中绿框所示。本文所用数据为 2017 年 1–12 月每月进行现场站位观测所得数据。观测方法为利用一艘船进行逐站位定点观测, 每次观测用时约 3 d。各

月观测日期和站位顺序并不一致, 具体观测时所处潮位如后文第 4 节所示。个别站位由于观测受限没有采集数据或因数据未能通过质量控制而被剔除, 导致部分站位数据缺失。

温度、盐度和压力由美国 Sea-Bird 海洋仪器公司出产的 SBE19 plus 温盐仪 (Conductivity-Temperature-Depth, CTD)^[31–32]测得, 温度的测量精度为 0.005℃, 分辨率为 0.000 1℃, 电导率的测量精度为 0.000 5 S/m, 分辨率为 0.000 01 S/m, 压力的精度为 0.1% 的满量程, 分辨率为 0.002% 的满量程。观测数据进行质量控制后垂向平均得到 1 m 间隔的温盐剖面, 并由海水状态方程计算得到位势密度, 进而计算出浮性频率 (即 Brunt-Väisälä 频率), 公式为

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}, \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度; ρ 为位势密度; z 为深度^[1]。

3 温度、盐度、位势密度及浮性频率年平均特征

3.1 垂向分布

图 2 给出了湛江湾年平均温盐密及浮性频率的垂向分布, 断面选取如图 1 中红色实线所示。为了研究方便, 本文位势密度以位势密度超量表示。

可以看出, 2017 年湛江湾的年平均温度为 23~27℃, 年平均盐度为 19~27, 年平均位势密度为 11~

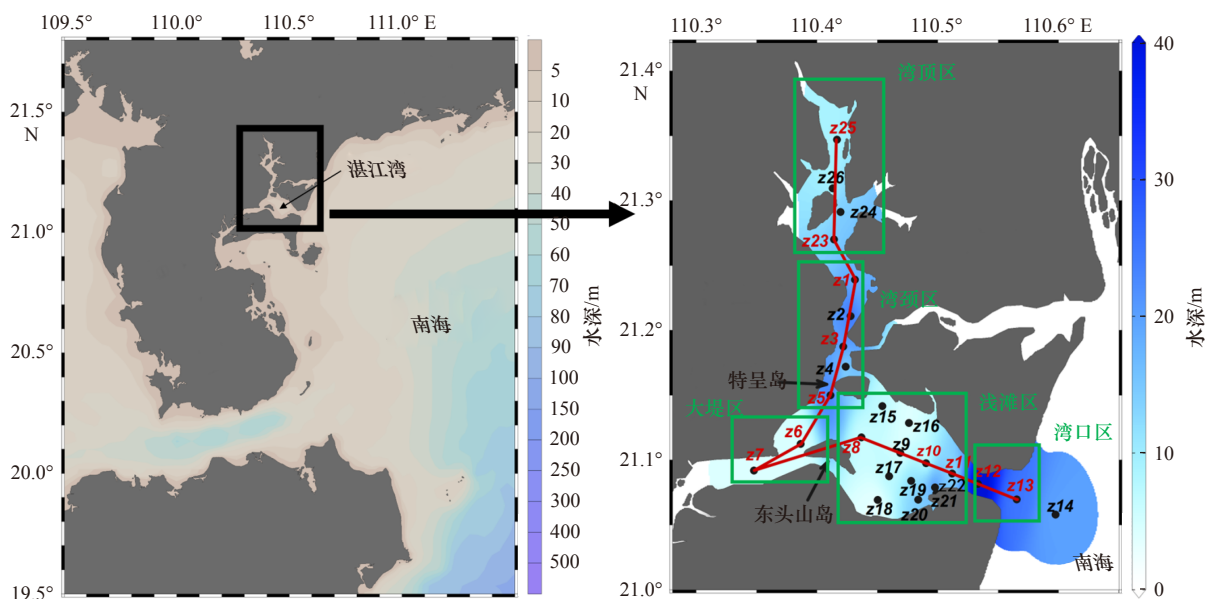


图 1 湛江湾地形及观测站位分布

Fig. 1 Topography and distribution of survey stations in the Zhanjiang Bay

黑色圆点为所有调查站位; 红色实线连接的站位为本文选取的断面; 绿框为本文划分的区域

The black dots represent all survey stations; the red curve shows the section analyzed in this paper; the green boxes denote the divided regions

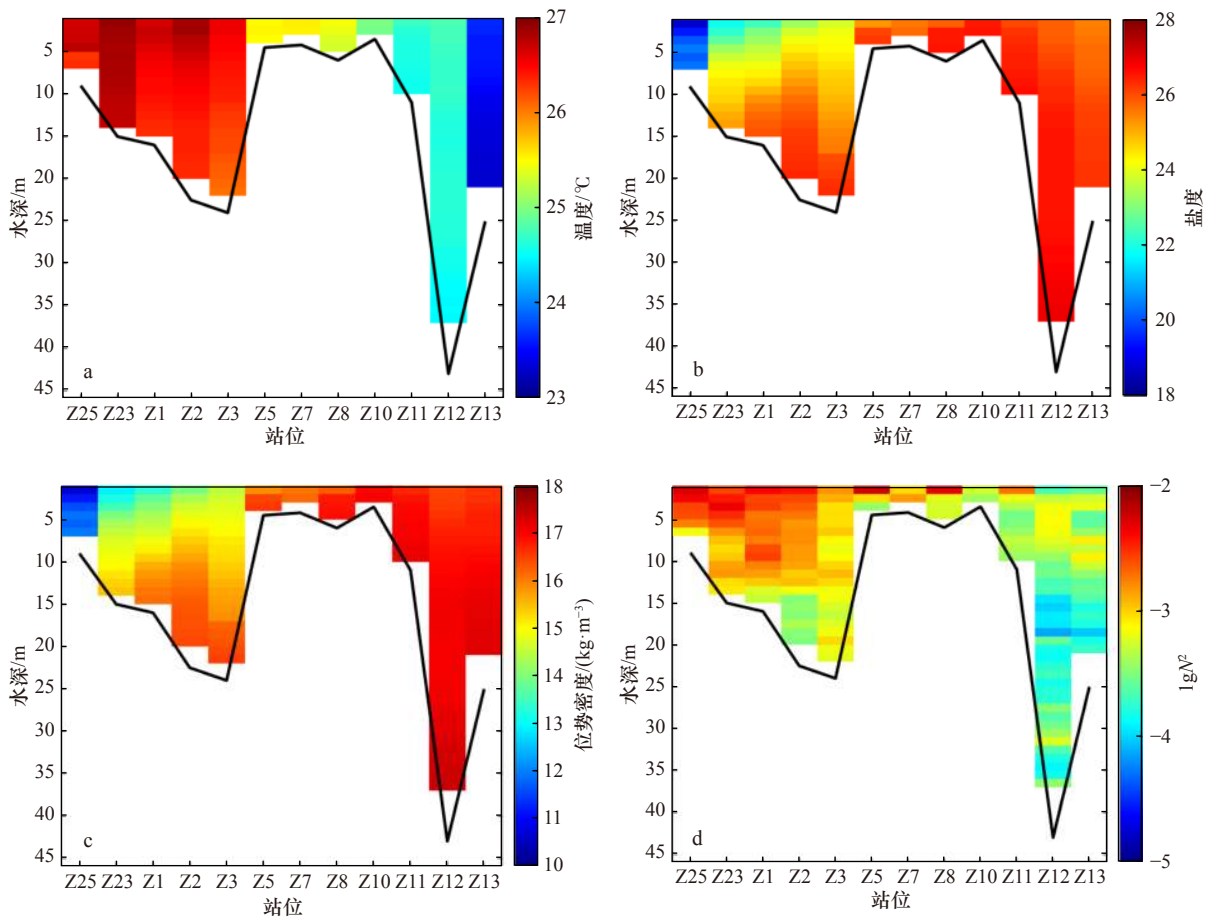


图2 纵断面各站年平均温度(a)、盐度(b)、位势密度(c)及浮性频率(d, N^2 单位: s^{-2})

Fig. 2 Sections of annual mean temperature (a), salinity (b), potential density (c) and buoyancy frequency (d, unit of N^2 is s^{-2})

黑线为站位水深

The black curve shows the water depth of the section

17 kg/m^3 , 年平均浮性频率(N^2)约为 $10^{-5} \sim 10^{-2} s^{-2}$ 。总体上, 断面温度和浮性频率随着水深的增加而减小, 而位势密度与盐度均随着水深的增大而增大且变化趋势几乎一致, 说明该断面上海水密度主要受盐度影响。根据前人对跃层的定义, 一般对于水深小于 200 m 的水域, 温度梯度大于 $0.2^\circ C/m$ 的水层定义为温跃层, 盐度梯度大于 $0.1 m^{-1}$ 的水层为盐跃层, 密度梯度大于 $0.1 kg/m^4$ 的水层为密度跃层^[31]。从图 2 中各要素断面分布可以看出, 水深 10 m 以浅的站位大部分混合均匀, 其余站位在 5~10 m 附近存在跃层。水平上, 湾顶附近水体呈现高温、低盐、低位势密度及强层结的特征, 而靠近湾口则为低温、高盐、高位势密度及弱层结的海水。

具体而言, 温度(图 2a)随着水深的增加而降低, 该结果与汤德福等^[28]得出的水温垂向变化规律一致。水深 10 m 以浅的大部分站位混合均匀, 温跃层不明显, Z3 站位在水深 10 m 附近温跃层明显。靠近

湾顶的站位温度较高, 大都高于 $25^\circ C$, 其中 Z23 站位温度最高达到 $26.9^\circ C$; 大堤至湾口的站位温度较低, 大都在 $23 \sim 25^\circ C$, 其中位于湾口的 Z13 站位温度最低为 $23.3^\circ C$ 。盐度(图 2b)随着水深的增加而增大, 水深 10 m 以浅的站位盐度随水深变化不大, 其余站位水深 10 m 以深盐度明显增大。水平上, 受淡水径流影响较大的湾顶处 Z25 站位盐度最低为 18.7, 湾口处 Z12 站位盐度最高为 26.9, 即从湾顶到湾口, 盐度增大, 最大差异可达 8。位势密度(图 2c)主要受盐度的影响, 变化趋势几乎与盐度一致。浮性频率(图 2d)在湾顶附近及水深 10 m 以浅较大, 最大达 $5 \times 10^{-3} s^{-2}$, Z12 站位水深 20 m 附近浮性频率最小, 为 $7 \times 10^{-5} s^{-2}$, 总体而言, 浮性频率随着水深的增加而减小。

3.2 水平分布

根据研究海域的水深及上述各要素的垂向分布, 这里分别以 2 m 层、5 m 层、10 m 层表征该海域年平均温度(图 3a 至图 3c)、盐度(图 3d 至图 3f)、位势密

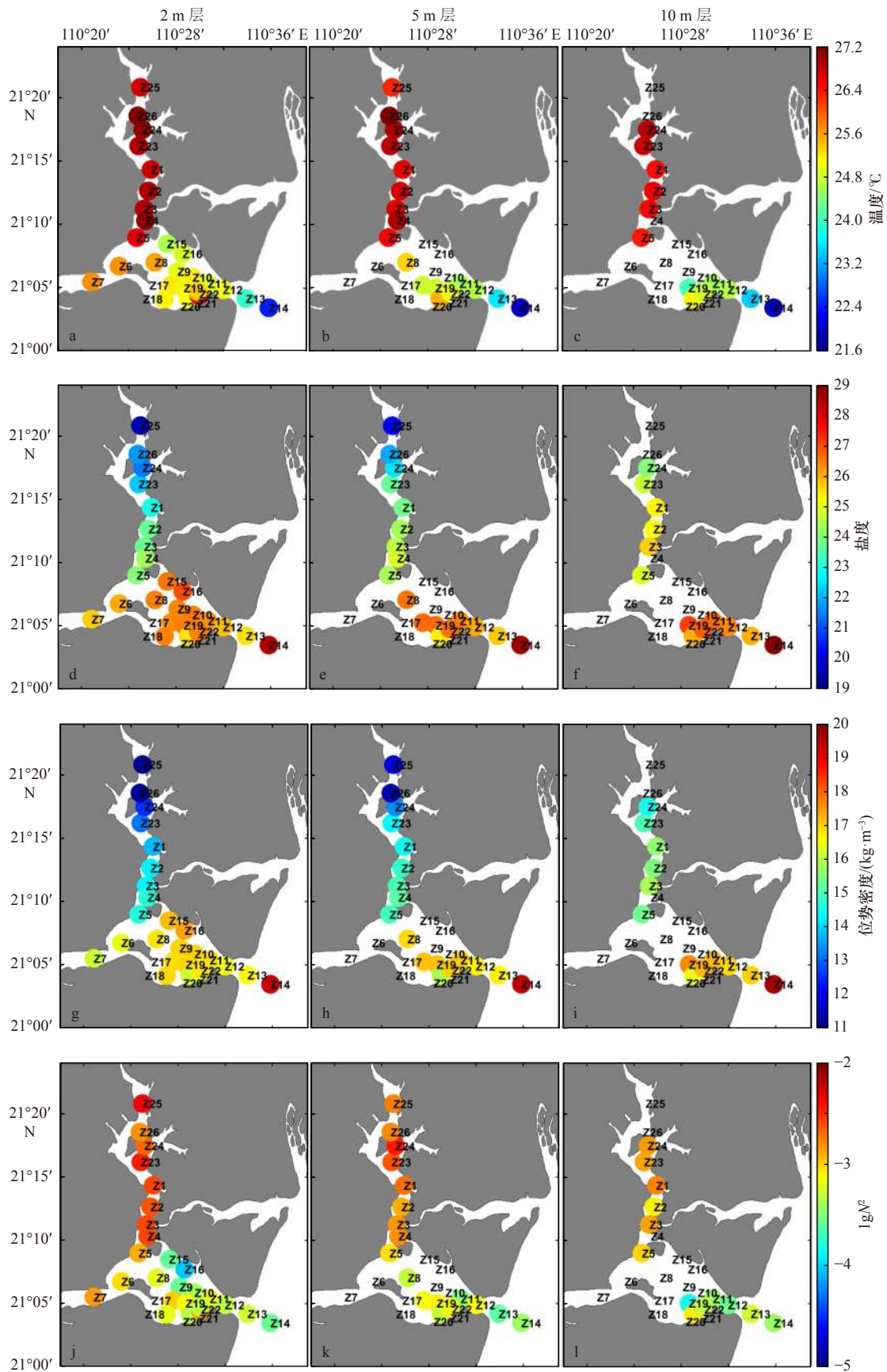


图3 湛江湾各站2 m层、5 m层、10 m层年平均温度(a-c)、盐度(d-f)、位势密度(g-i)、浮性频率(j-l, N^2 单位: s^{-2})水平分布
 Fig. 3 Annual mean temperature (a-c), salinity (d-f), potential density (g-i), and buoyancy frequency (j-l, unit of N^2 is s^{-2}) at 2 m, 5 m, and 10 m at each station in the Zhanjiang Bay

度(图3g至图3i)以及浮性频率(图3j至图3l)的水平分布。总体来看,湾颈至湾顶处为高温、低盐、低位势密度、强层结水,浅滩区附近及湾口处为低温、高盐、高位势密度、弱层结水,即温度和浮性频率呈现内高外低的特征,且随着水深的增加而降低,盐度和位势密度为内低外高,垂向上随着水深的增加而增大。这些特征在3.1节各要素的断面年平均分布中也有所呈现。

具体来看,表层2 m年平均温度(图3a)介于22.0~27.1℃,湾颈及湾顶附近温度较高,除去位于火电厂附近的Z24站位、Z26站位外,最高温出现在Z4站位处,浅滩区及湾口附近温度较低,最低温在Z14站,即表层温度呈现内高外低的特征(图3a)。5 m层和10 m层的温度水平分布特征(图3b,图3c)与表层分布特征大致相近,均呈现内高外低的特征。5 m层温度较低,介于21.8~26.9℃,湾颈处Z4站位温度最高,最低温出现在湾口处Z14站位。3层相比,10 m层温度最低,为21.6~26.7℃,湾颈附近降温明显,其余站位温度均低于25℃,最低温出现在湾口附近。其中Z20站位、Z21站位由于位于排污口附近,温度比周围水域较高,最高能达到26.6℃。

湛江湾表层2 m年平均盐度(图3d)介于19.5~28.5,湾颈至湾顶盐度较低,湾顶处Z25站位盐度最低为19.5,湾口附近盐度最高为28.5,即表层盐度呈现内低外高的特征。5 m层和10 m层的盐度水平分布特征(图3e,图3f)与表层分布特征相似,均呈现内高外低的特征。相比于表层,5 m层和10 m层湾顶处盐度增大明显,湾口附近变化较小,10 m层盐度最大,均高于24。其中位于排污口附近的Z20站位盐度较周围水域低,为25.5。水平盐度梯度随水深变化不大,该结论与Pritchard^[9]在切萨皮克湾所得结果类似。

年平均位势密度在不同水深的水平分布特征(图3g至图3i)与盐度分布特征相似。表层2 m(图3g)位势密度为11.2~19.3 kg/m³,最小值出现在湾顶附近Z25站位,湾口处Z14站位为最大值。5 m层(图3h)分布特征与表层类似,但位势密度略大,为11.8~19.4 kg/m³。3层相比,10 m层(图3i)位势密度最大,均大于14.5 kg/m³,湾口处最大为19.6 kg/m³。

年平均浮性频率 N^2 (图3j至图3l)水平分布基本呈现内高外低的特征。特别之处在于表层2 m(图3j)和5 m层(图3k)湾颈及湾顶附近浮性频率最大,其次是湾口区和大堤区,最小值出现在浅滩区。3层均在 10^{-5} ~ 10^{-2} s⁻²之间,随着水深的增加而减小,10 m层(图3l)最小,均小于 1.5×10^{-3} s⁻²。

4 温盐季节变化特征

在潮汐作用明显的海域,潮流对于港湾中的温度、盐度分布通常具有重要影响,因此需要先评估潮流对湛江湾温盐分布的影响。由于湾内各处达到高潮和低潮的时间相差不多,所以这里我们利用国家海洋信息中心^[34]预报的湛江湾(21.17°N, 110.40°E)潮高数据,分析各个月份航次期间的涨落潮情况,结果如图4所示。

可以看到,大部分站位观测期间处于涨潮或落潮阶段,处于平潮阶段的站位较少,但各月份的观测都基本涵盖了涨潮、平潮以及落潮的站点,因而下文将对各区域划分成涨潮、平潮以及落潮3种情况进行讨论(其中平潮的情况包含了停潮)。部分站位数据缺失导致图像不完整,已在数据部分进行了说明。

4.1 垂向分布特征

由上文3.1节及前人研究工作^[35]可知,湛江湾密度主要由盐度控制,进而影响浮性频率,因此下文仅展示温度和盐度的季节变化特征。

2017年湛江湾各区域温度逐月垂向分布特征如图5所示。总体而言,夏季(6~8月)温度最高,为27.8~33.6℃,其次是秋季(9~11月),温度为19.5~32.3℃,春季(3~5月)为20.1~29.3℃,冬季(12至翌年2月)最低,为17.5~21.9℃。温度随着水深的增加而降低,夏季表层与底层温差最大,在10 m层附近存在明显的温跃层,可达到0.7℃/m,春季和秋季温跃层抬升至5 m层附近,冬季混合均匀。

具体地,湾顶区水深约16 m,温度为18.1~33.6℃。由于Z24站位、Z26站位位于火电厂附近,故该区域受排污水的影响而水温较高。夏季温跃层位于6~8 m,秋季抬升至4~6 m,冬季混合均匀。湾颈区水深约为20 m、温度为17.4~31.5℃,夏季温跃层位于10~12 m,其余季节温跃层不明显。大堤区水深约为5 m、温度为17.6~30.6℃,该区域水深较浅,水体混合均匀。浅滩区水深为5~30 m、温度为17.7~32.2℃,该区域站位较多,各站水深不同,个别站位位于化工厂排放口附近,故水温稍高。湾口区水深约为35 m、温度为17.5~31.1℃,该区域离外海较近,故水体特性接近外海低温、高盐的特性。

对比各区域处于涨潮、平潮以及落潮期间的温度分布特征,可以发现同区域同月份内,涨潮、平潮以及落潮所测得的温度相差不大。即影响温度分布特征的主要因素为区域及月份,而观测期间所处潮位对温度分布影响较小。各区域的涨落潮温度差约为

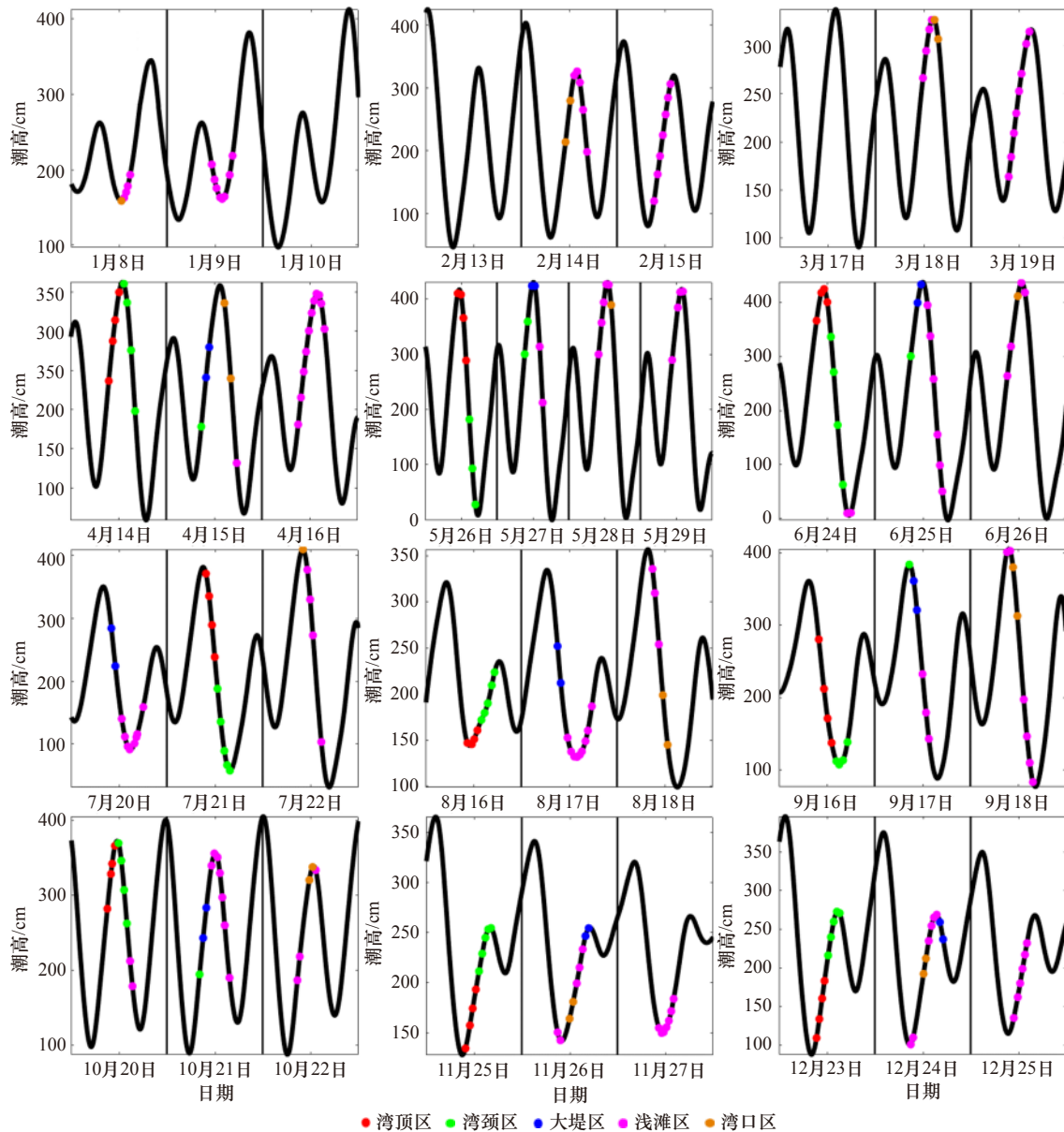


图4 各月份观测站位所处潮高

Fig. 4 Tidal height at observation stations in each month

1℃, 而不同月份温度差最大能达到约 15℃。

湛江湾 2017 年各区域盐度逐月垂向分布特征如图 6 所示。总体而言, 盐度垂向上随着水深的增加而升高, 夏季和秋季存在明显的盐跃层, 可达到 1.1 m^{-1} 。春季盐度为 19.7~30.2, 夏季盐度为 14.7~31.4, 秋季盐度为 17.8~29.6, 冬季盐度为 21.3~30.2。此外, 3-4 月及 6-8 月观测期间有雨, 故表层盐度较低。

具体地, 湾顶区盐度为 14.7~26.8, 该区域为淡水主要输入口, 故盐度较低, 尤其是在表层 10 m 以内。盐度在春季高而秋季低, 冬夏季介于两者之间。湾颈区盐度为 17.4~30.9, 盐跃层大概位于 10 m 上下。大堤区盐度较低, 为 19.1~28.0, 水深较浅且混合均匀。

浅滩区盐度为 18.6~29.9, 该区域站位较为复杂, 盐跃层大致在 5~10 m, 受邻近排污口影响, Z20 站位、Z21 站位盐度较低。湾口区盐度为 18.9~31.4, 该区域离外海较近故盐度较高。

不同于温度分布特征, 各区域在同月份内处于涨潮、平潮以及落潮期间的盐度有所区别, 但相较于季节变化引起的差异仍较小。各区域的涨落潮盐度差约为 2, 而不同月份盐度差最大能达到 13 左右。因此, 这里给出 4 个季节湛江湾温度、盐度、位势密度及浮性频率的断面分布以分析各要素垂向分布的季节变化(图 7)。

可以看出, 夏季整个湛江湾的温度均较高, 达到

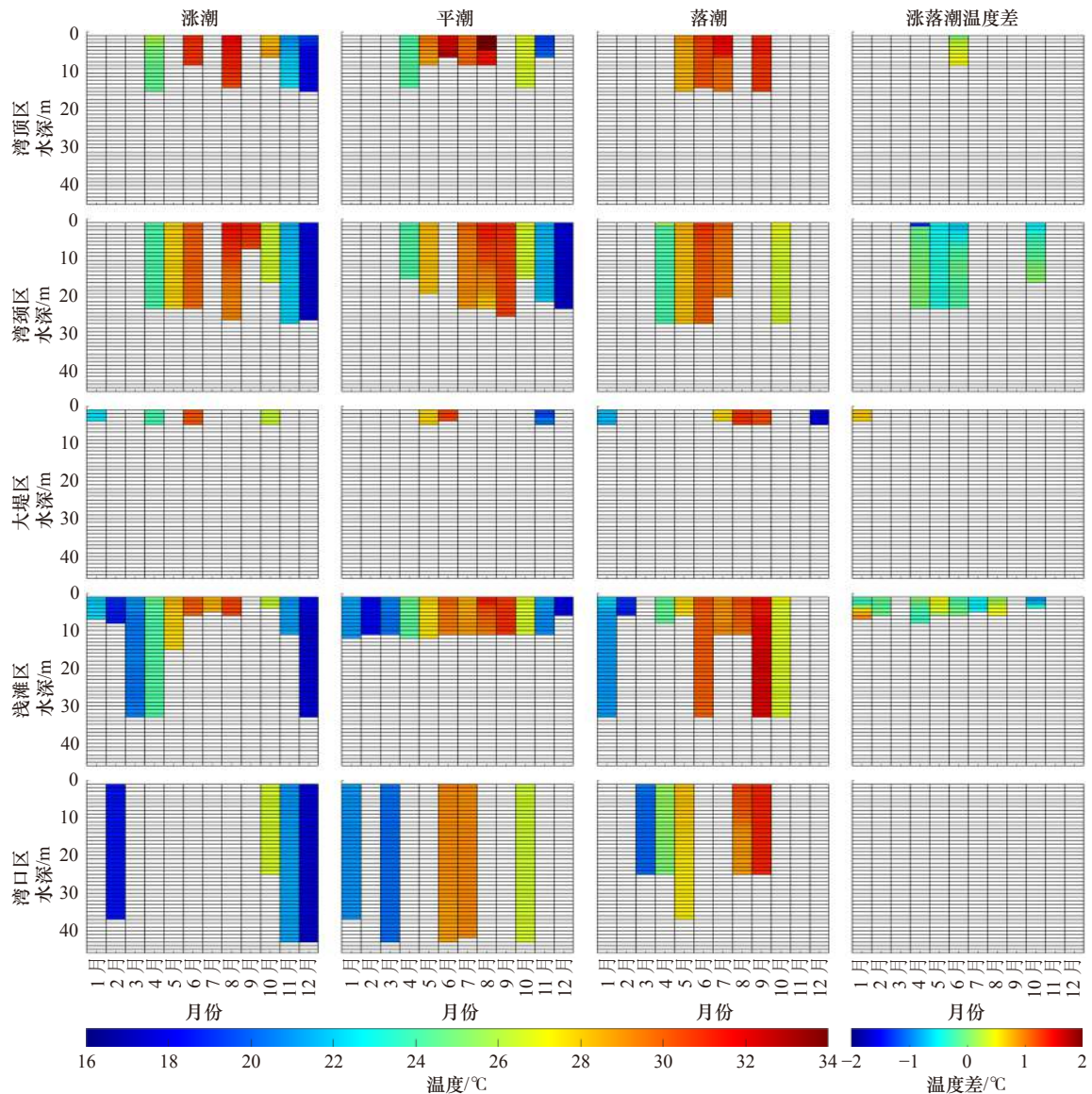


图5 各区域温度在涨潮、平潮和落潮阶段的逐月垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of temperature during flood tide, slack water, and ebb tide in each region for each month

28℃以上(图7b),而冬季湛江湾的温度较低,基本在20℃以下(图7d),冬夏季温度差最大能达到12℃。春季和秋季温度相对较为均匀(图7a,图7c),整个湾的温度差基本在5℃以内。夏季不同站位盐度相差较大且垂向存在明显层化现象,而冬季则相对较为均匀,应与冬季较强的混合过程有关。不同季节间盐度差值最大可达11.3。秋季平均盐度偏低主要因为9月份盐度明显偏低,这应与9月较多的降雨有关。位势密度变化趋势几乎与盐度一致,说明其主要受盐度的影响(图7i至图7l)。浮性频率在夏季最高,湾内区域达到 10^{-2} s^{-2} (图7n),说明夏季湾内层结较强,这从位势密度在夏季的分布也可以看出。秋季湾内层结仍较强而湾口区较弱(图7o),冬季和春季湾内外的层结均较弱,为 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ (图7m,图7p)。

4.2 水平分布特征

如前所述,各区域涨落潮所引起的温盐变化相对季节变化较小,故下文忽略涨落潮的影响,只分析温盐水平分布的季节变化特征。

湛江湾各区域温度在表层(2 m)、中层(10 m)、底层(离底2 m)的逐月变化如图8所示,其中对于水深小于12 m的区域则只取表层与底层。总体而言,5-9月各区域温度差异较大,其他月份差异较小。上层温度分布由高到低为湾顶区、湾颈区、浅滩区、大堤区、湾口区,即从湾顶到湾口逐渐递减。各区域温度的总体季节特征均为夏季最高,秋季降温,冬季最低,春季升温。

研究海域表层总体温度处于17.7~33.6℃,各区域表层温度的季节变化特征十分相似,从1月到2月

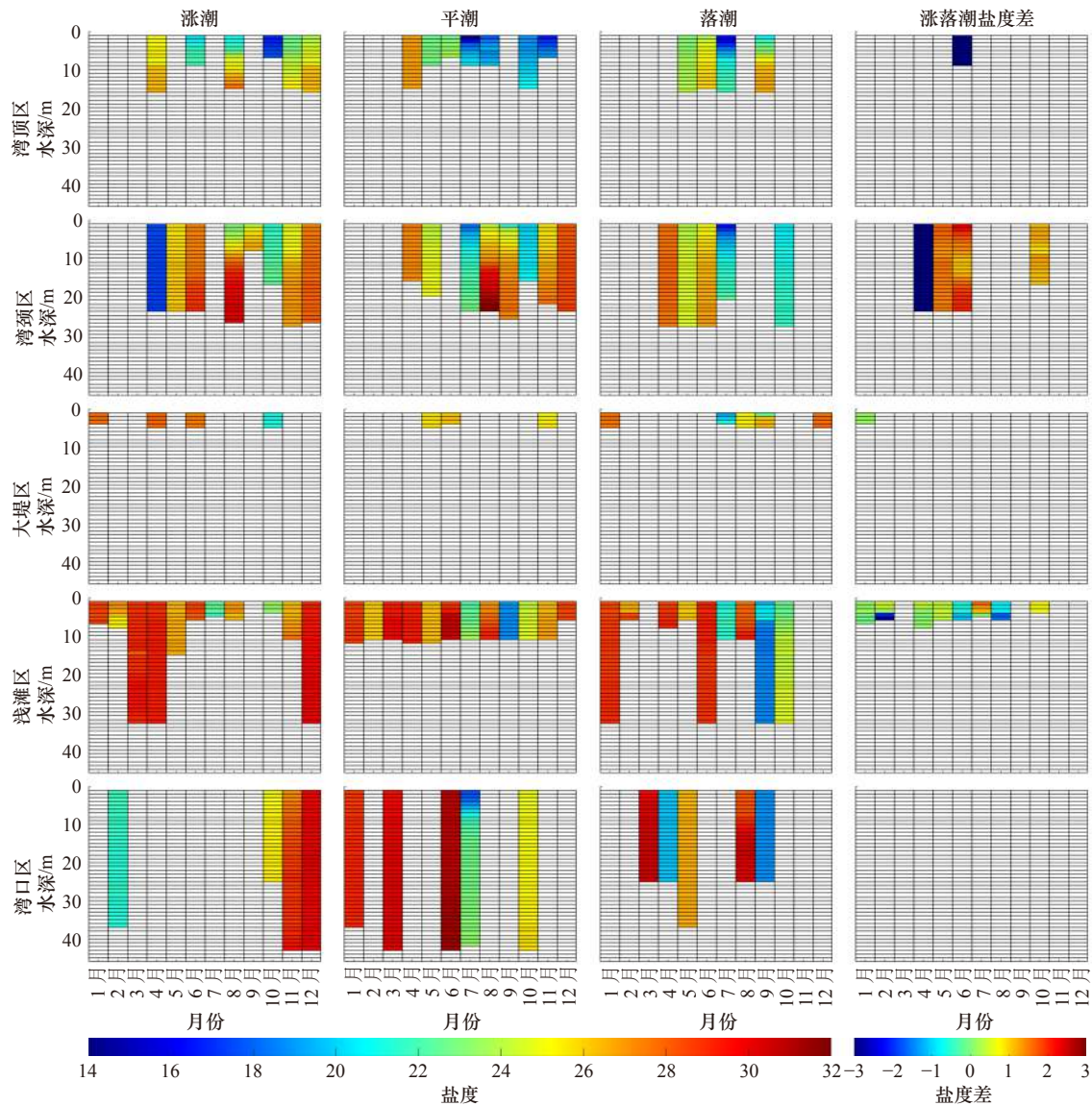


图 6 各区域盐度在涨潮、平潮和落潮阶段的逐月垂向分布

Fig. 6 Vertical distribution of salinity during flood tide, slack water, and ebb tide in each region for each month

降温, 水温为 18.2~21.7℃, 随后开始升温至 8 月达到峰值, 最后温度一直下降。查询湛江历史天气以及前人研究^[20]可知, 7 月观测期间受降雨影响而温度较低(图 8a)。各区域季节变化趋势虽一致, 但可以看出 5-9 月各区域温度差异较大, 最大达 3℃左右, 温度由高到低分别为湾顶区、湾颈区、浅滩区、大堤区、湾口区, 即从湾顶到湾口逐渐递减。某些月份由于缺失, 导致图中曲线不连续。

该海域中层总体温度为 17.6~31.4℃, 各区域中层温度的季节变化与表层温度变化大体一致, 也为夏季最高, 秋季降温, 冬季最低, 春季升温, 不过各区域间温度差异明显较表层小, 最大差异不到 2℃(图 8b)。温度水平分布亦是湾顶到湾口逐渐递减, 但中层温度较表层温度低。

底层总体温度为 17.7~32.2℃, 温度的季节变化与表层温度的变化大致相似(总体温度为 17.7~32.2℃)。在 5-9 月除去水深较浅的大堤区和浅滩区, 各区域温度相差不大。空间分布大致也从湾顶到湾口逐渐递减, 但底层温度较低。

对比图 8a 至图 8c 可看出, 大堤区与浅滩区由于水深较浅, 水体混合较为均匀, 故 3 层水体温度相差不大。而对于湾顶区、湾颈区以及湾口区而言, 水温基本上从表层到底层逐渐递减, 尤其是湾顶区, 随水深加深降温明显, 最大降温幅度能达 4℃。

湛江湾各区域盐度在表层(2 m)、中层(10 m)、底层(离底 2 m)的逐月变化如图 9 所示。总体而言, 盐度分布由低到高为湾顶区、湾颈区、大堤区、浅滩区、湾口区, 即从湾顶到湾口逐渐递增, 各区域盐度

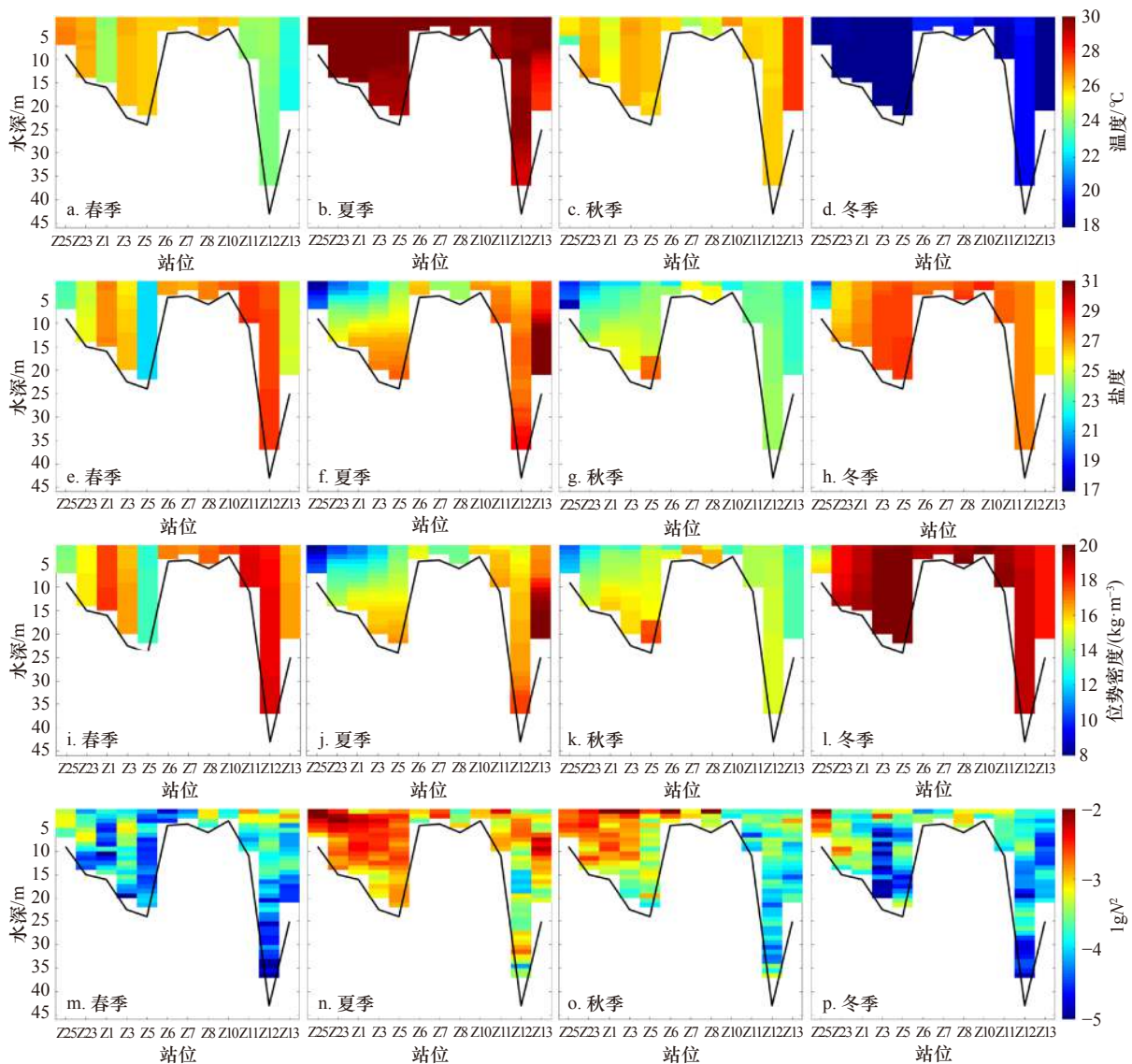


图7 四季温度(a-d)、盐度(e-h)、位势密度(i-l)及浮性频率(m-p, N^2 单位: s^{-2})断面分布

Fig. 7 Sections of temperature (a-d), salinity (e-h), potential density (i-l) and buoyancy frequency (m-p, unit of N^2 is s^{-2}) in four seasons

黑线为站点水深

The black curve shows the water depth of the section

存在明显月变化,这可能与径流、降雨等因素在不同季节的变化有关。

具体来看,各区域表层盐度为16.0~30.7(图9a),随月份呈现类似上下起伏变化(除了9月浅滩区和湾口区盐度偏低出现较大差异外),且变化幅度最大达到10以上(如湾口区)。除了4月、7月和9月外,盐度分布由低到高分别为湾顶区、湾颈区、大堤区、浅滩区、湾口区,即从湾顶到湾口逐渐递增。各区域中层盐度为18.6~30.8(图9b),其月变化与表层盐度月变化基本一致,不过盐度值较表层升高,尤其湾顶区盐度上升明显。底层盐度为18.8~31.3(图9c),其月

变化与表层盐度月变化也较为相似,且底层盐度明显高于表层。

对比图9a至图9c可看出,大堤区与浅滩区由于水深较浅,水体混合较为均匀,故3层水体盐度相差不大;而对于湾顶区、湾颈区以及湾口区而言,盐度基本上从表层到底层逐渐递增。7月的盐度异常低,如上文分析所提及,是7月观测期间站点处下雨所导致^[30]。

4.3 水体特征

为了进一步分析湛江湾的水文特征,我们通过温盐图来大致描述湾内水体特性,4个季节的 θ -S图

如图 10 所示。

可以看到, 靠近湾口区基本为低温、高盐水体, 温度大都低于 26°C, 盐度为 24~30。而靠近湾顶区基本为高温、低盐水体, 温度大都高于 25°C, 最高达到 32°C, 盐度较小, 为 14~26。湾顶区和湾口区平均

温度差为 2.3°C, 盐度差为 2.7。其他站位所测的水体温度、盐度则相对适中, 介于上述两者之间, 这与上文 3.1 节和 3.2 节得到的结果基本一致。由于 Z21 站位附近为化工厂排污口, 浅滩区存在几个高温、低盐值。总体上看, 各个季节温盐分布均呈现出条带状结

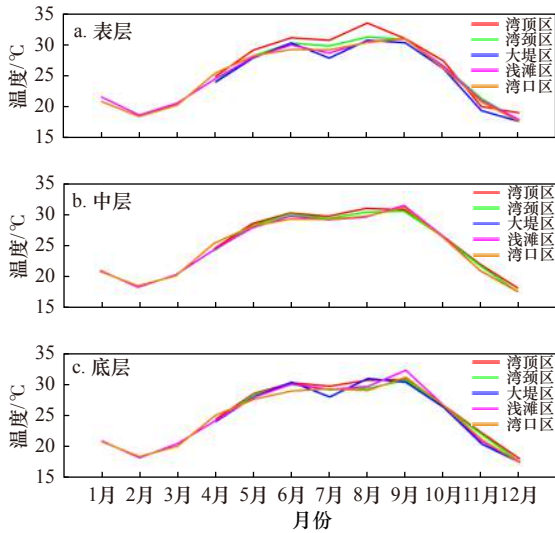


图 8 各区域表层(a)、中层(b)和底层(c)平均温度逐月分布

Fig. 8 Monthly mean temperature at the surface layer (a), middle layer (b) and bottom layer (c) in each region

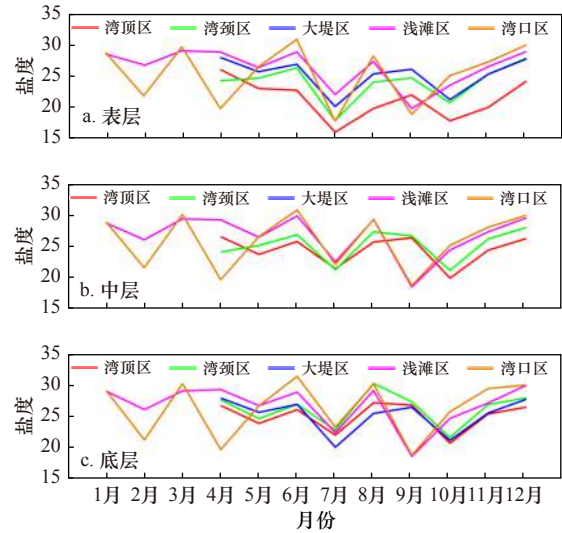


图 9 各区域表层(a)、中层(b)和底层(c)平均盐度逐月分布

Fig. 9 Monthly mean salinity at the surface layer (a), middle layer (b) and bottom layer (c) in each region

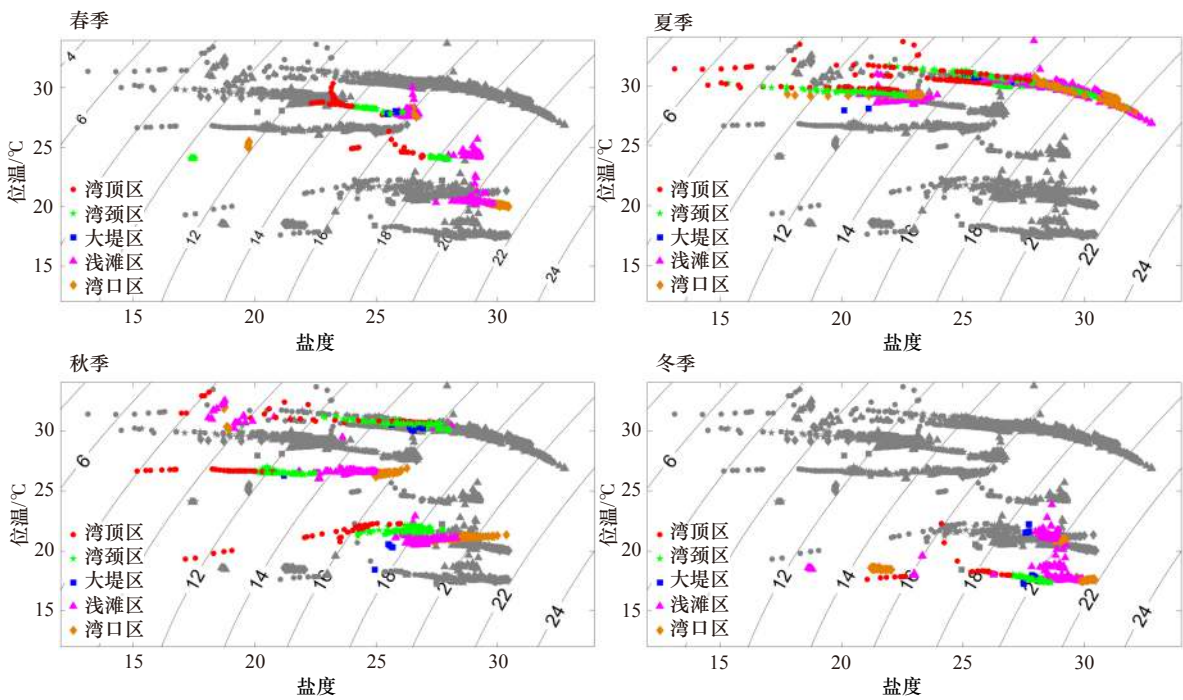


图 10 各区域四季温盐图

Fig. 10 Seasonal temperature-salinity diagram in each region

灰色实线为等位势密度线; 不同颜色的点分别代表各区域的站位; 灰点为 4 个季节所有的观测值

The gray lines denote the potential density contours; the dots with different colors denote the observations in different regions; the gray dots denote all the observations in four seasons

构,即温度差异较小而盐度差异较大,这也说明密度主要受盐度影响,与上文3.1节及前人研究结果一致。

就季节变化而言,夏季各区域温度都较高,大都达到28℃以上,而冬季温度普遍偏低,基本低于24℃。夏季湛江湾盐度变化范围较大,最大差值接近20,而冬季盐度分布则较为集中。春秋两季水温变化范围则介于冬夏两者之间,且春季盐度分布相对夏季集中。春秋两季水温基本呈温度差异较明显的3部分条带状分布,是由于各自季节内观测到的水温随3个月份的变化而变化,表征了水温随月份的逐渐升高(春季)或降低(秋季)的现象。

5 讨论

如前所述,湛江湾表层、中层和底层的温度呈现明显夏季高冬季低的特点,相对而言,盐度则均随月份呈现较大幅度的起伏变化(图9),这里本文从影响湛江湾盐度的因素方面分析其原因。前人研究显示^[25-26, 29-30],陆地径流、潮流作用以及降水等过程均对湛江湾的盐度有重要影响。其中,径流的作用主要来自湛江湾北部的遂溪河输入的低盐水,其在湾顶处以及近岸的区域尤为明显。潮流作用主要体现为外海的低温、高盐水通过涨潮过程进入到湛江湾,使湾内水体盐度偏高,退潮过程则相反,会将湾内较淡的水向外输运,该作用在湾口处影响最大。降水过程则一方面会在局地区域降低海水的盐度,另一方面也会通过影响陆地径流的方式影响到湛江湾的水体特征。其中,文中对于降雨的分析是通过查询湛江历史天气以及前人的研究中得到的^[30]。此外,湛江湾周边工厂排放水也会对局地及邻近海域的温盐特性产生影响^[27-30]。

由图9可知,盐度在2月、4月、7月、9月、10月存在较低值。通过分析各月份盐度的低值区发现,在2月,盐度低值主要出现在浅滩区和湾口区,尤其是Z20站位盐度异常低。而Z20站位正好邻近码头与工厂排放口,同时观测时间恰逢涨潮,很容易将工厂排放出的淡水带到该站位处从而导致其盐度较低。4月的盐度低值出现在湾口区的Z13站位和湾颈区的Z5站位,而这两个站位的观测日期均有降雨,故导致该两个站位盐度较低。在7月,盐度整体都偏低,对比7月的天气可知是由频繁降雨所导致。9月,浅滩区和湾口区整体盐度都偏低,同样也是因为该月份降雨较多的缘故,加上浅滩区以及湾口区站

位观测期间均处于落潮时期,共同导致了两个区域盐度偏低。在10月,盐度低值主要出现在湾顶区和湾颈区,而对比这两个区域由表层到底层的盐度分布可看出盐度低值仅出现在表层,说明该现象是陆地径流造成的。

6 结论

基于2017年湛江湾海区的CTD监测数据,分析了湛江湾温盐的三维空间结构、季节变化特征。得出如下主要结论:

(1)湛江湾2017年平均温度为23~27℃,夏季温度最高,大致为27.8~33.6℃,其次是秋季,温度为19.5~32.3℃,春季为20.1~29.3℃,冬季最低,为17.5~21.9℃。年平均盐度为19~27,春季盐度为19.7~30.2,夏季盐度为14.7~31.4,秋季盐度为17.8~29.6,冬季盐度为21.3~30.2。位势密度为11~17 kg/m³,浮性频率为 $7 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$ 。浮性频率的垂向结构及水平分布与温度分布类似,而位势密度则与盐度的变化趋势几乎一致。

(2)垂向结构:温度随着水深的增加而降低,温度季节变化明显,夏季最高,秋季次之,冬季最低,冬夏温差最大达15℃,而盐度季节平均值相当。相较于季节引起的变化,涨落潮对温度影响较小,对盐度影响显著。温度跃层夏季最强,10 m处上下温度最大梯度可达到0.7℃/m,春秋两季温跃层抬升至5 m上下,冬季水体上下混合均匀。夏季和秋季存在明显的盐跃层,盐度梯度最大可达到1.1/m。跃层上下温盐的季节变化规律一致。

(3)水平分布:温度分布由高到低分别为湾顶区、湾颈区、大堤区、浅滩区、湾口区,即从湾顶到湾口逐渐递减。各区域温度的总体季节变化均为夏季最高,秋季降温,冬季最低,春季升温。盐度分布由低到高分别为湾顶区、湾颈区、大堤区、浅滩区、湾口区,即从湾顶到湾口逐渐递增,但各区域盐度的季节变化规律不太明显。湾顶和湾口平均温度差为2.3℃,盐度差为2.7。湾口区基本为低温、高盐水体,而靠近湾顶区基本为高温、低盐水体,其他区域的水体介于两者之间。

多种因素的共同作用使得湛江湾的水文要素趋于复杂化。本文仅根据观测数据对湛江湾温盐特征作了一些简单的分析,对湛江湾的开发具有一定的参考作用。但为了适应湛江湾开发的需要,还须对湾内的各种水文特征进行详细的研究。

致谢：感谢广东海洋大学海洋与气象学院 2017 年 1-12 月湛江湾调查航次的所有工作人员为获取宝贵观测数据所付出的努力。感谢对此论文审阅并提出宝贵修改意见的审稿人，特此致谢。

参考文献：

- [1] 冯士筌, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. An Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [2] 杨杰青, 史赞荣, 全为民, 等. 基于RDA与GAMs模型的东海近岸海域浮游动物与温盐关系[J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 72-84.
Yang Jieqing, Shi Yunrong, Quan Weimin, et al. Analysis of the relationships between zooplankton and temperature-salinity based on RDA and GAMs model in coastal East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(8): 72-84.
- [3] 李树华. 钦州湾的流况及其水文特征[J]. 海洋湖沼通报, 1988, 1988(3): 15-20.
Li Shuhua. Flow condition and hydrologic character in the Qinzhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1988, 1988(3): 15-20.
- [4] 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.
Lin Hongyang, An Baichao, Chen Zhaozhang, 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.
- [5] 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(1): 28-33.
Fu Zilang, Hu Jianyu. Distribution features of tidal current residual current and temperature in Luoyuan Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1989, 28(1): 28-33.
- [6] 张远辉, 王伟强, 黄自强. 九龙江口盐度锋面及其营养盐的化学行为[J]. 海洋环境科学, 1999, 18(4): 1-7.
Zhang Yuanhui, Wang Weiqiang, Huang Ziqiang. Salinity fronts and chemical behaviour of nutrient in Jiulongjiang Estuary[J]. Marine Environmental Science, 1999, 18(4): 1-7.
- [7] 刘广平, 胡建宇, 陈照章, 等. 九龙江口-厦门湾表层盐度分布特征及其与潮汐的关系[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(5): 710-713.
Liu Guangping, Hu Jianyu, Chen Zhaozhang, et al. Distribution characteristics of sea surface salinity and its relations to tide in Jiulongjiang Estuary-Xiamen Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2008, 47(5): 710-713.
- [8] 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.
Wang Jinyuan, Jiang Yuwu. The distribution of salinity and the dynamic process of salt flux in Jiulong River Estuary[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2013, 52(6): 835-841.
- [9] Pritchard D W. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system[J]. Journal of Marine Research, 1952, 11: 106-123.
- [10] Najarian T O, Harleman D R F, Thatcher M L. C & D Canal effect on salinity of Delaware estuary[J]. Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, 1980, 106(1): 1-17.
- [11] Cohen B, McCarthy L T. Salinity of the Delaware Estuary[R]. Newark DE Delaware Geological Survey University of Delaware, 1962.
- [12] Posmentier E S, Racklin J W. Distribution of salinity and temperature in the Hudson Estuary[J]. Journal of Physical Oceanography, 1976, 6(5): 775-777.
- [13] Uncles R J, Bloomer N J, Frickers P E, et al. Seasonal variability of salinity, temperature, turbidity and suspended chlorophyll in the Tweed Estuary[J]. Science of the Total Environment, 2000, 251-252: 115-124.
- [14] 应秩甫, 王鸿寿. 湛江湾的围海造地与潮汐通道系统[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1996, 35(6): 101-105.
Ying Zhifu, Wang Hongshou. The relationship between fill-block engineering and tidal inlet system response in Zhanjiang Bay[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1996, 35(6): 101-105.
- [15] 陈则实. 中国海湾志(第十分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
Chen Zeshi. Ocean bays of China (Volume Ten)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1999.
- [16] 张乔民, 宋朝景, 赵焕庭. 湛江湾溺谷型潮汐水道的发育[J]. 热带海洋, 1985, 4(1): 48-57.
Zhang Qiaomin, Song Chaojing, Zhao Huanting. Development of the tidal channel of drowned valley type in Zhanjiang Bay[J]. Tropic Oceanology, 1985, 4(1): 48-57.
- [17] 林微, 张乔民, 赵焕庭. 湛江港潮汐汊道落潮三角洲动力场模拟和沉积动态分析[J]. 热带海洋, 1995, 14(1): 54-61.
Lin Wei, Zhang Qiaomin, Zhao Huanting. A simulation of the hydrodynamic fields and analysis of sediment dynamics in Zhanjiang Ebb-Tidal delta[J]. Tropic Oceanology, 1995, 14(1): 54-61.
- [18] 贺松林, 丁平兴, 孔亚珍, 等. 湛江湾沿岸工程冲淤影响的预测分析 I. 动力地貌分析[J]. 海洋学报, 1997, 19(1): 55-63.
He Songlin, Ding Pingxing, Kong Yazhen, et al. Predictive analysis of the impact of erosion and deposition of Zhanjiang Bay coastal engineering I. dynamic geomorphological analysis[J]. Haiyang Xuebao, 1997, 19(1): 55-63.
- [19] 夏华永, 林迪洋, 钮智旺. 湛江湾填海工程对水动力条件的影响预测[J]. 海洋通报, 2006, 25(6): 47-54.
Xia Huayong, Lin Diyang, Niu Zhiwang. Prediction of effects of reclamation engineering on hydrodynamic conditions in the Zhanjiang

- Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2006, 25(6): 47–54.
- [20] 李志飞, 诸裕良, 何杰. 多年围填海工程对湛江湾水动力环境的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2016(3): 96–104.
Zhang Zhifei, Zhu Yuliang, He Jie. Influences of long term reclamation works on hydrodynamic environment in Zhanjiang Bay[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(3): 96–104.
- [21] 陈达森, 严金辉. 湛江湾海区流场特征及其对水环境的影响[J]. *科学技术与工程*, 2006, 6(14): 2100–2103.
Chen Dasen, Yan Jinhui. A characteristic and impact on water environment current in the gulf sea area of Zhanjiang[J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(14): 2100–2103.
- [22] 李希彬, 孙晓燕, 宋军, 等. 湛江湾三维潮汐潮流数值模拟[J]. *海洋通报*, 2011, 30(5): 509–517.
Li Xibin, Sun Xiaoyan, Song Jun, et al. Three-dimensional numerical simulation of tidal current in Zhanjiang Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(5): 509–517.
- [23] 赵冲久. 湛江湾水文泥沙特性分析[J]. *水道港口*, 1999(4): 16–21.
Zhao Chongjiu. Hydrographic and sediment analysis of Zhanjiang Bay[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 1999(4): 16–21.
- [24] 赵婉璐, 郝瑞霞. 基于ECOMSED模型的湛江湾水道三维潮流数值模拟[J]. *海洋科学*, 2015, 39(4): 83–86.
Zhao Wanlu, Hao Ruixia. Three dimensional numerical imitation of tidal current in the Zhanjiang Bay channel based on ECOMSED model[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(4): 83–86.
- [25] Lu Xuan, Zhou Fengxia, Chen Fajin, et al. Spatial and seasonal variations of sedimentary organic matter in a subtropical bay: implication for human interventions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1362.
- [26] 蒋城飞, 付东洋, 李强, 等. 秋季湛江港和入海口温盐结构及生态特征[J]. *海洋学报*, 2016, 38(11): 20–31.
Jiang Chengfei, Fu Dongyang, Li Qiang, et al. Thermohaline structure and ecological characteristics of the Zhanjiang Bay and its estuary in autumn[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(11): 20–31.
- [27] 陈春亮, 梁春林, 卢仕严, 等. 电厂温排水对湛江湾海水温升的数值模拟及生态影响评价[J]. *台湾海峡*, 2012, 31(4): 530–539.
Chen Chunliang, Liang Chunlin, Lu Shiyan, et al. Numerical simulation of seawater temperature rising and the ecological evaluation of the effect of thermal discharged from a power plant in Zhanjiang Bay[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(4): 530–539.
- [28] 汤德福, 吴群河, 刘广立, 等. 近岸海域水温垂向分层及同步监测浮标研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(2): 238–242.
Tang Defu, Wu Qunhe, Liu Guangli, et al. Research of vertical stratification and synchronous monitoring buoy of nearshore water temperature[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(2): 238–242.
- [29] 刘泉兵. 湛江湾海洋腐蚀环境及其对管线钢腐蚀行为的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2018.
Liu Quanbing. The marine corrosive environment in Zhanjiang Bay and its influence on corrosion behavior of the pipeline steel[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2018.
- [30] Zhou Fengxia, Lu Xuan, Chen Fajin, et al. Spatial-monthly variations and influencing factors of dissolved oxygen in surface water of Zhanjiang Bay, China[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(6): 403.
- [31] 林建国, 周雅静, 陈军. SBE19 CTD资料处理技术[J]. *海洋技术*, 2000, 19(3): 60–63.
Lin Jianguo, Zhou Yajing, Chen Jun. SBE19 CTD data processing technology[J]. *Ocean Technology*, 2000, 19(3): 60–63.
- [32] Van Haren H, Laan M. An *in-situ* experiment identifying flow effects on temperature measurements using a pumped CTD in weakly stratified waters[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2016, 111: 11–15.
- [33] 吴巍, 方欣华, 吴德星. 关于跃层深度确定方法的探讨[J]. *海洋湖沼通报*, 2001(2): 1–7.
Wu Wei, Fang Xinhua, Wu Dexing. On the methods of determining the depths of thermocline, halocline and pycnocline[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2001(2): 1–7.
- [34] 国家海洋信息中心. 潮汐表(第3册台湾海峡至北部湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
National Marine Data and Information Service. Tide Tables (Vol. 3 from the Taiwan Straits to the Beibu Gulf)[M]. Beijing: China Ocean Press, 2017.
- [35] 陈则实, 王文海, 吴桑云. 中国海湾引论[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.
Chen Zeshi, Wang Wenhai, Wu Sangyun. Introduction to the Ocean Bays of China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2007.

Observational analysis on 3D distribution and seasonal variation of thermohaline characteristics in the Zhanjiang Bay

Huang Runqi^{1,2}, Xie Lingling^{1,2}, Li Min^{1,2}, Wang Liju^{1,2}

(1. Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Key Laboratory of Climate, Resources and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea of Department of Education of Guangdong Province, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Using *in-situ* hydrographic observations from January to December 2017, 3D thermohaline structure and seasonal variation in the Zhanjiang Bay is investigated in this study. The results show that: (1) In 2017, the annual mean temperature is 23–27°C, the mean salinity is 19–27, the mean potential density is between 11–17 kg/m³, and the mean buoyancy frequency (N^2) is about 7×10^{-5} – 5×10^{-3} s⁻² in the Zhanjiang Bay. The vertical structure and horizontal distribution of N^2 are similar to that of the temperature, while the distributions of potential density and salinity are similar. (2) The temperature has significant seasonality with the highest value in summer, followed by autumn, and the lowest in winter. The maximum temperature difference between winter and summer reaches 15°C, while the seasonal mean of the salinity varies slightly. The ebb and flood have less influence on temperature and salinity, comparing with their seasonal variations. The thermocline is the strongest in summer with the maximum gradient reaches 0.7°C/m at 10 m, whereas it shallows to 5 m in spring and fall, and the water well mixed in winter. The halocline is prominent in summer and fall, with the maximum gradient 1.1 m⁻¹. The seasonal variation of the thermohaline in the upper layer and lower layer are consistent. (3) For the horizontal distribution, the temperature decreases and the salinity increases from the bay head, the mid bay, the bank region, the shoal region to the bay mouth. The average temperature difference between the bay head and the bay mouth is 2.3°C, and the salinity difference is 2.7. The temperature-salinity (θ - S) diagram shows banding distributions with one end as the low-temperature and high-salinity water in the bay mouth, one end as the high-temperature and low-salinity water in the bay head, and the other water masses are between them. Different bands are shown in different seasons.

Key words: Zhanjiang Bay; thermohaline characteristics; 3D structure; seasonal variation