

南海中部海域夏季水团温盐分布特征

魏 晓,高红芳

(国土资源部海底矿产资源重点实验室,广州海洋地质调查局,广州 510075)

摘 要:南海中部海域夏季水团的实测温盐深数据统计分析结果表明,研究区受南海暖池的影响,海域表层温度在 28~31.5 °C 左右,呈北高南低、西高东低的特征;表层盐度在 32~34.1 psu 左右,整体上呈南高北低、东高西低的分布特征。低盐区域主要分布在研究区西北部,与高温区域呈现重合的特点。综合研究表明,研究区受夏季风和海面净热通量的影响,海水层化作用较强,整体上混合层的厚度不大,温跃层比较发育,导致跃层的厚度比较大,最高可达 170 m,强度也较高,大部分区域温度梯度在 0.09~0.12 °C/m 之间;盐跃层的上界深度和厚度整体上都低于温跃层。结合表层温度和盐度的分布特征推测研究区东部和南部表层海水存在着较厚的低温高盐水体。

关键词:南海中部;温盐深;混合层;温跃层;盐跃层

中图分类号:P731.1

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.08004

海水的温度、盐度和深度(temperature-salinity-depth,简称 CTD)是海洋的最基本参数,开展温盐深测量,了解海水温度、盐度和深度之间的变化关系,对分析海洋环境有着十分重要的意义。南海是一个半封闭的边缘海,海底地形变化大,从周边向中央倾斜,依次分布着陆架和岛架、陆坡和岛坡、深海盆地等地貌类型。南海通过台湾海峡、吕宋海峡、民都洛海峡和巴拉巴克海峡、邦加海峡、加斯伯海峡和卡里马塔海峡、马六甲海峡等与东海、西太平洋和印度洋等相连。南海的温盐深相较于大洋具有明显的边缘海特征^[1]。研究区位于南海中部海域,海底地貌以深海盆地为主,绝大部分区域水深在 3 500 m 以上,属东亚季风区,自海面至 100 m 水层,海流受风影响很大,7 月份,区域内为西南风季风,海流流向为 SW 向,属于南海环流的一部分。表层海水的温、盐度分布特征

主要受季风、太阳辐射和表层海流的影响^[2]。在全球气候变化和区域可持续发展的背景下,以南海暖池为代表特征的南海物理气候状况日益受到人们的关注,过往的研究中,温盐的大面站现场观测数据十分稀少,而且存在观测时间不一致,站位分布稀疏的特点,因此,大多只能借助间接的手段来推断海洋温盐的时空分布。本文通过对研究区实测的大面站温盐深数据进行统计,分析研究区上层海洋热力学特征,揭示混合层和温盐跃层结构的分布、厚度、深度等要素,为今后南海物理海洋学研究提供基础资料。

1 研究方法

广州海洋地质调查局“海洋四号”船于 2012 年 5 月 7 日—5 月 25 日、7 月 1 日—8 月 23 日在南海中部海域进行了 17 个站位的温盐深测量,测量仪器采用美国 SBE 公司生产的 SBE-911/917 Plus 型系统,每个站位都做了自海面到海底(距底 10~20 m)的垂直剖面连续观测。研究区站位及剖面的设置主要遵循同纬度和同经度的原则,

收稿日期:2015-06-03

基金项目:中国地质调查局项目(1212011220117)

作者简介:魏 晓(1986—),男,硕士,助理工程师,主要从事海洋沉积动力学方面的研究工作. E-mail:smileriver11@163.com

覆盖研究区的大部分地区(图 1)。

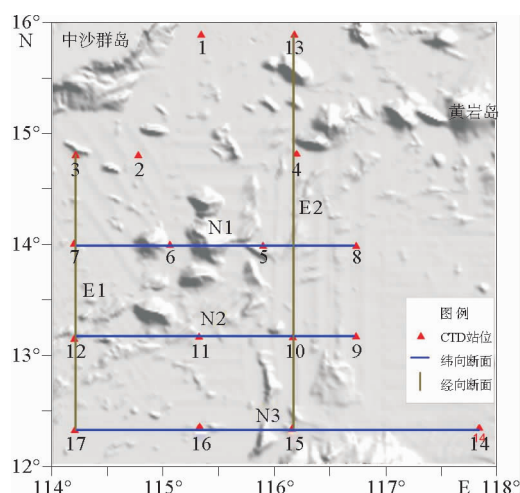


图 1 研究区 CTD 取样站位及剖面分布

Fig. 1 Location of CTD samples and cross sections in the study area

CTD 下放前,探头在海水表面停留感温 1~3 min,收放速度控制在 0.5~1 m/s,数据采集间隔为 0.5 s,表层温盐度为表层 10 m 以浅的平均数据,底层温盐度为距海底 10~20 m 的平均数据。通过对采集的温盐数据使用 MATLAB (2013b)软件进行线性内插,获取 0.5 m 深度间隔的数据进行温盐跃层的计算。

2 结果与讨论

2.1 表层海水温度、盐度分布特征

CTD 取样时间在夏季,该季节太阳辐射强烈,表层海水整体温度较高,呈 NW 高、SE 低的特点(图 2),在研究区西北部靠近中沙群岛海域表层温度较高,其最高温度在 31℃左右,等温线呈现环形,内高外低。区域内最高值和最低值相差 3℃左右。等温线分布比较均匀。研究区表层海水盐度呈现 NW 低、SE 高的特点,与温度的变化趋势相反,西北部形成外高内低的环形等值线,形成一个闭合的低盐区,中央区域最低盐度在 31.5 psu 左右。盐度的最大值出现在研究区的东部,接近 34。盐度等值线的分布不均且比较零乱,越靠近极值,等值线越密集(图 3)。

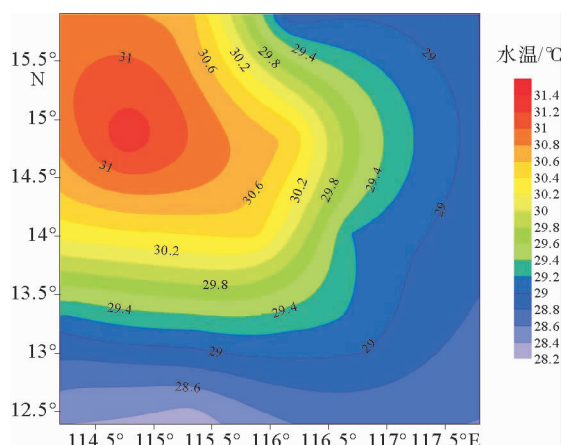


图 2 夏季表层海水温度分布特征

Fig. 2 Summer temperature distribution of the surface seawater

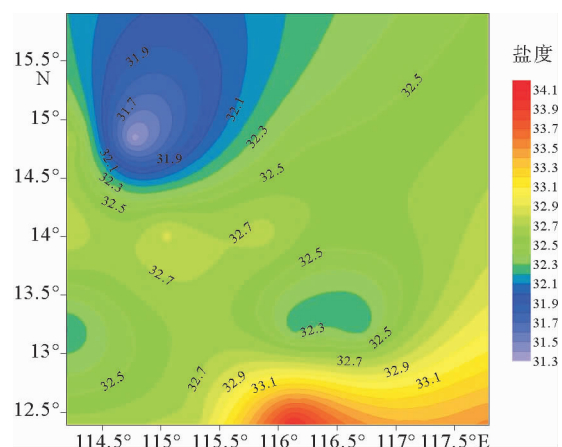


图 3 夏季表层海水盐度分布特征

Fig. 3 Summer salinity distribution of the surface seawater

影响南海上层环流的因素主要为季风、黑潮及南海暖流,河川径流和地形因素的影响导致南海有众多的中尺度涡旋的发生^[3]。图 2 和图 3 表明在研究区西北部靠近中沙群岛的海域可能存在一个涡旋,形态呈卵圆形,中心位置在 15°N、115°E 附近,直径约 160 km 左右,对于表层海水来说,密度是温度和盐度的函数,它随盐度的增加而增大,随温度的增高而减小,因此,该涡旋具有高温、低盐和低密的特点。

2.2 底层海水温度、盐度分布特征

底层海水温度的高低主要与地形相关,水深的地方底层温度较低。研究区大部分区域位于海

盆区,水深变化小,因此,底层温度的变化不大,整体上只有 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的差值,基本上分布于 $2.4\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。海底底层水温分布整体上呈现西南角和中部区域较高,东部和北部区域较低的特点(图 4)。

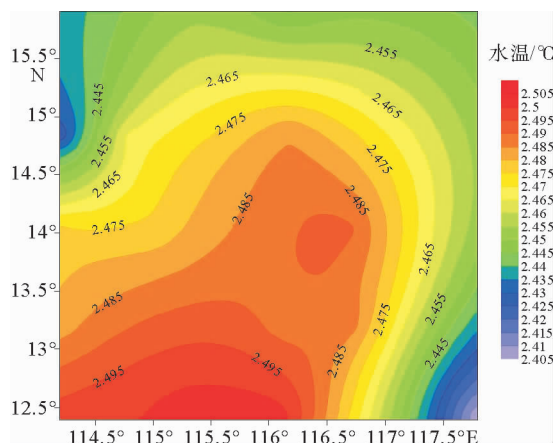


图 4 夏季底层海水温度分布特征

Fig. 4 Summer temperature distribution of the bottom seawater

底层海水的盐度变化受水深影响,海水密度、盐度与水深变化呈正比。底层海水盐度的分布比较均匀,绝大部分区域在 34.32 psu 上下波动,变化值较小,其分布趋势与表层盐度分布趋势接近,但与底层温度分布等值线并无对应关系,表明此时温度对盐度的影响并不占主导地位,主要与水深有关(图 5)。

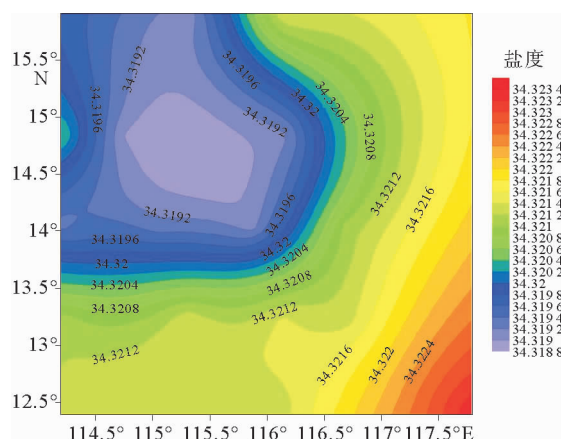


图 5 夏季底层海水盐度分布特征

Fig. 5 Summer salinity distribution of the bottom seawater

2.3 海水温度、盐度垂向分布特征

2.3.1 表层混合层和障碍层

海—气通量变化过程和风浪搅拌作用使海洋表层产生具有一定厚度、水温均一的水层,即海洋混合层,也称为上均匀层。海洋混合层对大气与海洋之间的动量、热量和质量的交换起着重要的作用。混合层的深度定义为温度比表层低 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的深度,其特点为温度(盐度,密度)垂直变化小,平均温度接近海表温度(sea surface temperature,简称 SST),存在显著的季节和年际变化,温度与深度呈反相变化,受到风、冷却等作用的驱动混合,混合层与温跃层的交换主要通过夹卷作用^[4]。

分别取 10 m 的平均温度和盐度作为表层温度和盐度进行计算,以减小局部异常值的影响。通过对实测数据的计算和分析发现,研究区西部和中部混合层深度较薄,一般在 35 m 以下;东部和南部较深厚,厚度一般在 50 m 左右。

研究区温跃层和盐跃层的深度并不一致,导致温度均匀层与密度均匀层的深度不重合,此时存在一个水层,温度基本均匀,但密度随深度急剧增大。障碍层减弱了混合层底部夹卷的冷却效应,影响着海洋热收支、海面温度、以及海洋与大气的热交换^[5],障碍层的热障作用促进了南海暖水的发展,但研究区内存在的障碍层的深度远薄于赤道西太平洋,除少数站位如 2 号站厚 48 m 外,障碍层的厚度一般在 20 m 以内(表 1)。

2.3.2 跃层

跃层通常以强度、深度、厚度 3 项来表示它的特征^[6];跃层上、下端点所在深度分别为跃层上、下界深度;跃层下界深度与上界深度之差为跃层的厚度;跃层上、下界深度对应的水文要素值之差除以跃层厚度所得的结果为跃层强度^[7]。自海面到海底将海水分为 N 层,每层深度标号为 $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$;水温标号为 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$;盐度标号为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ 。采用“从强选取”的原则,当一个温盐剖面中某一段的垂直梯度大于临界值时,确定该段为温盐跃层。由于研究区水深 $>200\text{ m}$,在本文计算中,跃层强度临界值分别为:

表 1 研究区测站海水温跃层、盐跃层特征

Table 1 Thermocline and halocline of seawater in the study area

项目	温跃层站位			盐跃层		
	强度/($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	上界深度/m	厚度/m	强度/(psu/m)	上界深度/m	厚度/m
1	0.102	18	82	0.015	20	42
2	0.114	76	75	0.011	28	98
3	0.091	41	128	0.015	24	81
4	0.089	14	154	0.016	24	58
5	0.082	21	169	0.013	33	80
6	0.081	28	167	0.011	29	79
7	0.079	21	183	0.012	30	93
8	0.112	53	111	0.023	52	49
9	0.096	49	110	0.014	19	95
10	0.092	39	164	0.016	32	71
11	0.091	20	138	0.024	21	37
12	0.077	9	162	0.023	8	55
13	0.121	42	118	0.022	41	64
14	0.086	55	162	0.020	52	52
15	0.113	51	101	0.026	50	43
16	0.061	50	119	0.015	59	42
17	0.091	30	116	0.015	31	32

温跃层强度: $(\Delta T/\Delta Z)=0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$;

盐跃层强度: $(\Delta S/\Delta Z)=0.01\text{ psu}/\text{m}$ 。

式中: ΔT 为温度差;

ΔS 为盐度差;

ΔZ 为深度差;

温度梯度 $>0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 水层为强温跃层, 盐度梯度 $>0.012\text{ psu}/\text{m}$ 的水层为强盐跃层^[8]。

(1) 温跃层

研究区位于深水海盆区, 海水内部的温度分布具有低纬深海大洋的跃层性质。根据跃层存在时间的长短分为季节性跃层(浅跃层)和永久性跃层(深跃层)^[9]。由于取样时间在夏季, 正值浅跃

层处于强盛期, 与深跃层的上界深度间隔较小, 两者之间界线难以区分, 因此, 将浅跃层与深跃层合二为一作为单跃层处理, 仅就其特征进行分析。

研究区西北部靠近中沙群岛, 水深相对较浅, 温跃层的上界深度较大, 但厚度低、强度高, 上界深度一般在 $30\sim 60\text{ m}$, 厚度却 $<100\text{ m}$, 其强度可达 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上; 在中西部区域, 跃层的上界深度较小, 一般在 $5\sim 30\text{ m}$, 其厚度最大, 在 $145\sim 170\text{ m}$ 之间, 强度较低, 在 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以下; 在研究区东北部, 跃层的上界厚度在 40 m 左右, 厚度在 $115\sim 145\text{ m}$ 之间, 强度很高, 在 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上, 最高可达 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (图 6)。

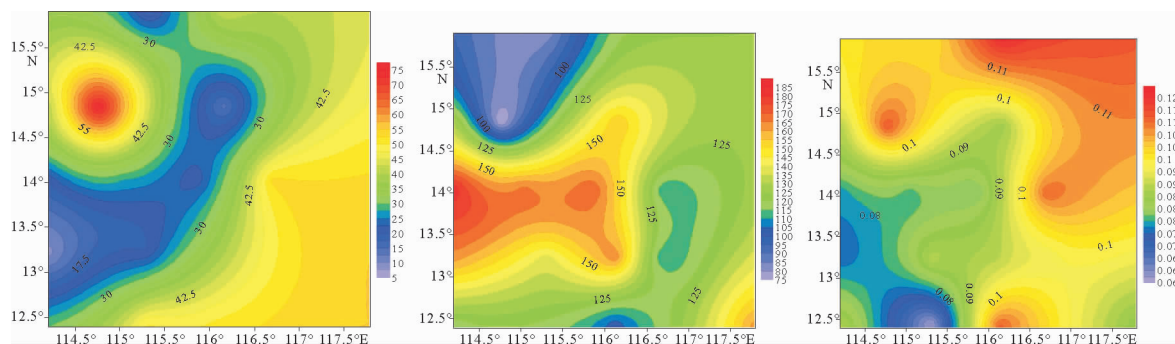


图 6 a 温跃层上界深度等值线图(m); b 温跃层厚度等值线图(m); c 温跃层强度等值线图($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

Fig. 6 a. Isopach map of the thermocline upper-boundary depth (m); b. Isopach map of the thermocline thickness (m); c. Isopach map of the thermocline intensity ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

(2) 盐跃层

表层盐度低,深层盐度高,盐度随深度的增加而递增,这是盐度垂直分布的一般规律,夏季太阳辐射强,海水的稳定度较大,涡动混合最弱,使这一时期的盐度垂直分布具有层化显著,盐跃层强的特点。

盐跃层的上界深度整体上呈现西低东高的趋势,上界深度的最小值出现在研究区西南部海域,最低值在 5~10 m 之间,盐跃层的厚度也最低,大部分区域在 50 m 以下。在南部和中东部区

域,上界深度可达 50 m 以上,盐跃层的厚度在 50~85 m 之间,盐跃层的强度在 0.015~0.025 psu/m 之间。结合表层盐度的分布图可知在研究区东部和南部表层存在着较厚的高盐水体(图 7)。

2.3.3 温盐度站位分布特征

中层至底层的海水,温盐度变化趋势差异性非常小,仅选取 500 m 以浅的 CTD 数据进行重点分析,同时根据本研究区内 CTD 站位的水深及位置分布特征从 17 个站位中选取了 3 个典型站位进行分析(图 8)。

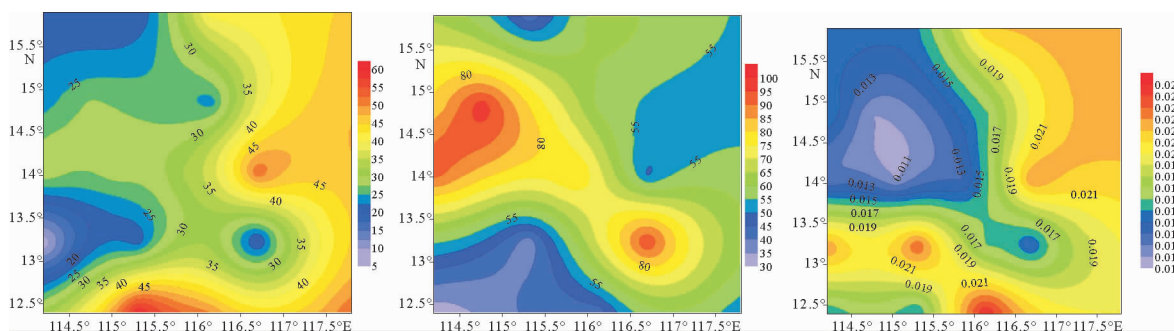


图 7 a 盐跃层上界深度等值线图(m); b 盐跃层厚度等值线图(m); c 盐跃层强度等值线图(psu/m)

Fig. 7 a. Isopach map of the halocline upper-boundary depth (m); b. Isopach map of the halocline thickness (m); c. Isopach map of the halocline intensity (psu/m)

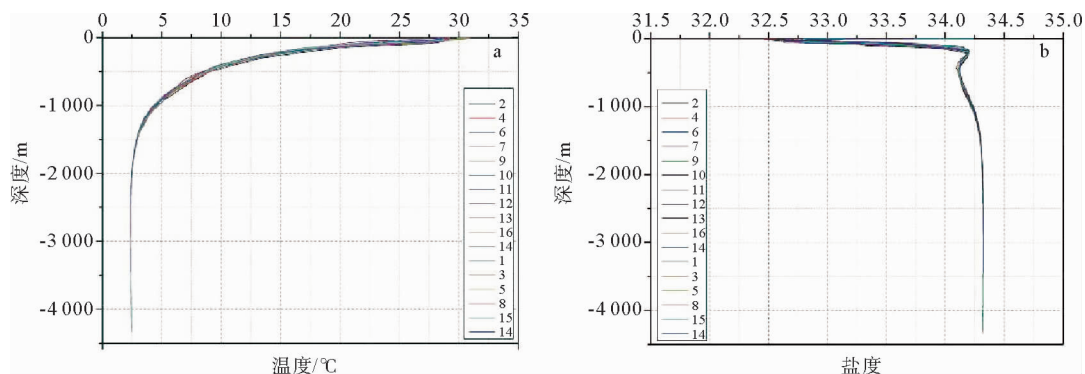


图 8 站位温度(a),盐度(b)变化与水深关系

Fig. 8 The relation of temperature (a), salinity (b) and water depth

由于浅跃层的底界深度和深跃层顶界深度之间的间隔距离非常小,当做一个跃层进行处理,取第 1 个跃层的上界深度为跃层的上界深度,最后一个跃层的下界深度为跃层的下界深度,由此确定跃层的深度、厚度和强度。如果由此定出的跃层强度达不到最低指标值,则对多个跃层依其深度进行

是适当的组合,最后从中确定出跃层,其强度要满足最低指标值,同时其厚度也要尽可能大^[10]。

(1) 典型站位温度分析

3、8、14 号站位分别处于本研究区西北部、中部和东南部。多跃层的现象比较普遍,其中 3 号站位位于中沙群岛附近,受到复杂的海底地形和海

流的影响,表层温度最高,而浅跃层也比较明显,其余站位浅跃层并不显著。

3 个站位的深跃层所处的深度和厚度基本相

同,变化并不大,其中位于研究区中部的 8 号站,深跃层的强度最大,最大值可达 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$,3 号站位的深跃层强度最小, $<0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (图 9)。

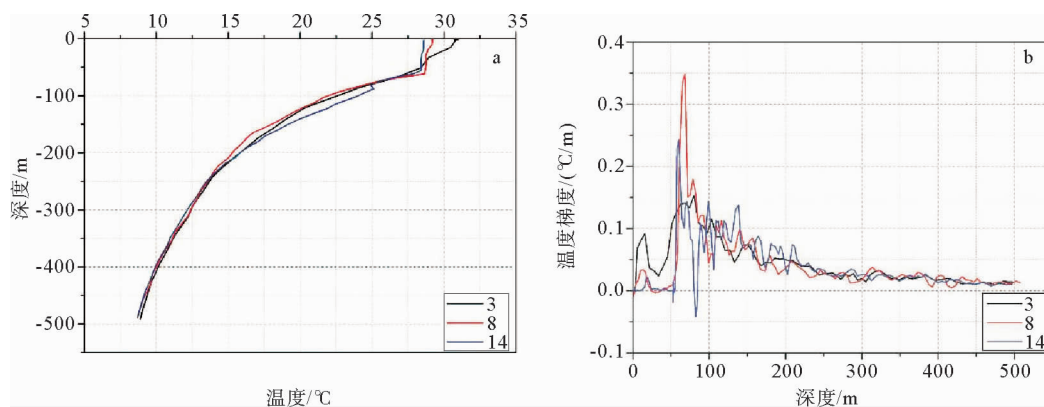


图 9 典型站位温度(a)及温度梯度变化(b)与水深关系

Fig. 9 The relation of the temperature(a) and temperature gradient(b) at typical stations

(2) 典型站位盐度分析

3、8 和 14 号 3 个站位具有非常明显的盐跃层,在表层盐度方面,14 号站位最大,8 号与 3 号站位的大小接近,但表层盐度最稳定的是 8 号,在表层至 70 m 水深的水层,盐度变化非常小,但在盐跃层内的盐度变化非常大。在盐跃层内,温度

梯度较小的是 3 号站位,14 号站位处于高盐水舌影响的区域,表层盐度大,但随深度增加,迅速减小,表明相对浅薄的高盐水层的下面仍为冬季遗留的低盐水层。在 100 m 以深的水层,3 个站位的盐度变化趋于一致(图 10)。

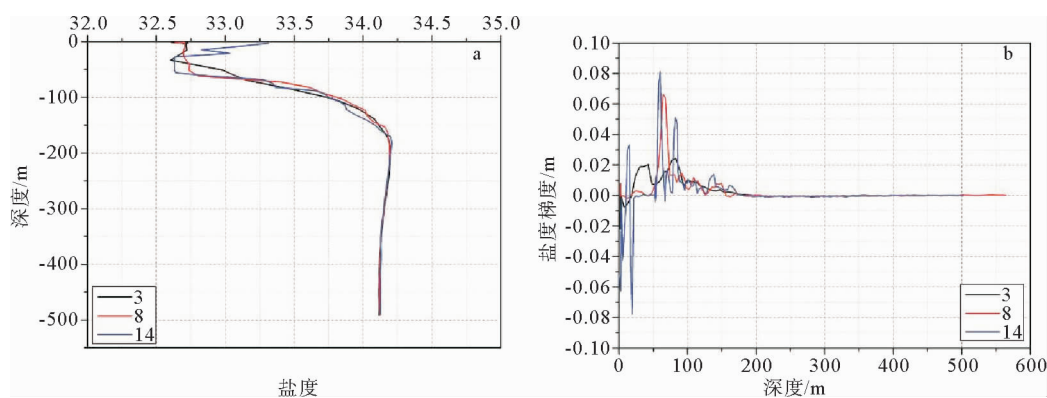


图 10 典型站位盐度(a)及盐度梯度变化(b)示意图

Fig. 10 The relation between salinity(a) and salinity gradient(b)

2.3.4 温盐度断面分布特征

为了说明各海区温盐度垂直结构的特征,根据 CTD 站位分布,选择若干断面进行分析,

(1) 温度断面

SN 向 E1 断面:200 m 以浅的海域,水温垂直分布出现明显的起伏现象,尤其以 100 m 以浅的

水层,起伏现象最为突出,其主要特征为表层水温在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,上均匀层的厚度高纬度向低纬度方向逐渐变小,厚度范围在 10~30 m 之间,出现明显的温跃层。从等温线呈现上拱趋势是底层较冷海水涌升的结果(图 11a)。

SN 向 E2 断面:水温的垂直分布呈均匀一致

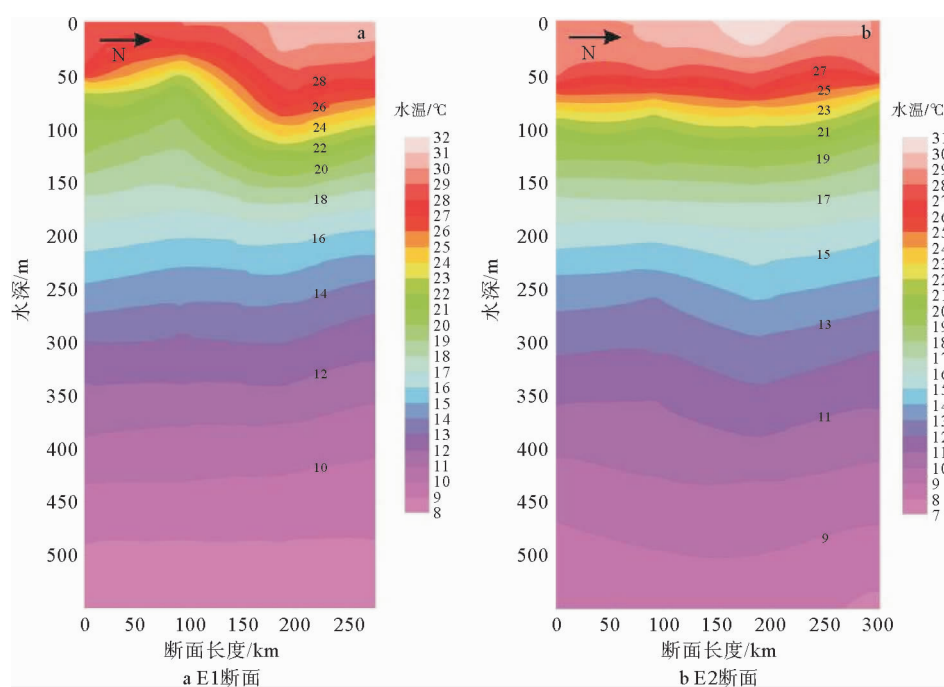


图 11 SN 向断面温度分布特征

Fig. 11 Temperature distribution along the south-north cross section

的状态,上均匀层的厚度变化不大,厚度在 50 m 左右,水温随深度增大稳定减小。温跃层明显且厚度均一(图 11b)。

EW 向 N1 断面:表层大部分水温在 30 °C 以上,自西向东,温跃层强度逐渐增大,而上均匀层的厚度逐渐减小,垂向上温度变化最为剧烈的水层分布于 50~150 m 之间,随水深的增大,断面

温度的变化较为一致(图 12a)。

EW 向 N2 断面:表层水温略低于 N1 断面,在 29.5 °C 左右,上均匀层的厚度很小,在 10~20 m 之间,自西向东,100 m 以浅的水层,同深度下水温逐渐变大,100 m 以深的水层,同深度下水温较为一致,表明在断面东部有较为高温的表层流存在(图 12b)。

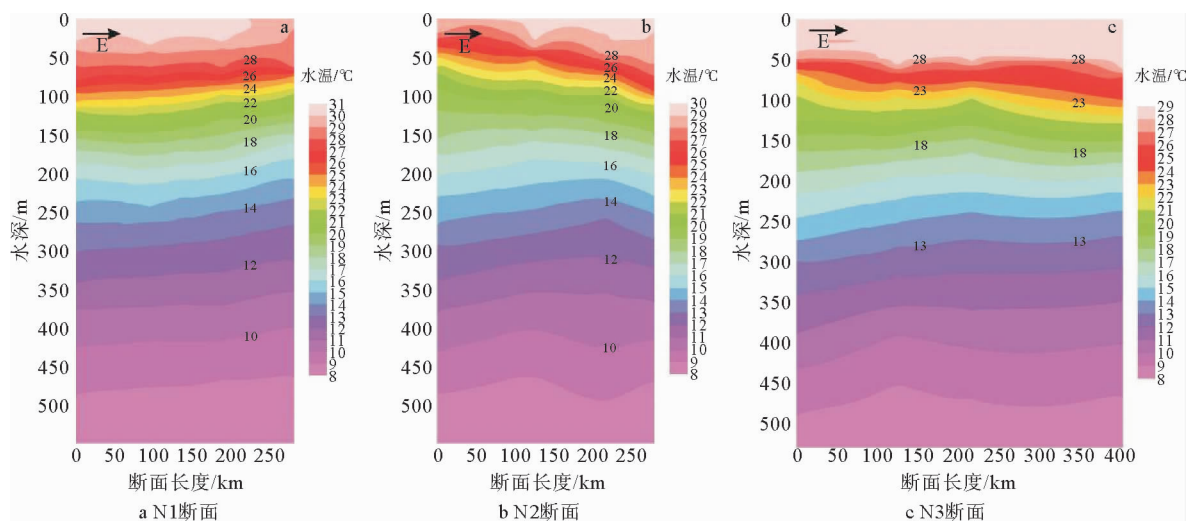


图 12 EW 向断面温度分布特征

Fig. 12 Temperature distribution along the east-west cross section

EW 向 N3 断面:上均匀层的厚度大且分布稳定,厚度在 50 m 左右,水温在 28~29 °C 之间,低于 N1 和 N2 断面,垂向上温度的变化速率也低于 N1 和 N2 断面,表明 N3 断面的水温比较稳定,表层环流和太阳辐射的影响较小(图 12c)。

(2) 盐度断面

E1 断面:150 m 以浅的海域,盐度垂直分布出现明显的起伏现象,尤其以 100 m 以浅的水层,起伏现象最为突出,其主要特征为表层盐度低,下层盐度高,表层盐度随深度增加快速升高,同深度下,低纬度的水层盐度要低于高纬度水层。

在 150 m 以深的海域,盐度随温度的增加无显著变化(图 13a)。

E2 断面:盐度的垂直分布呈均匀一致的状态,盐度随深度增大稳定增加,温跃层明显且厚度均一。在 150 m 以深的海域,盐度随温度的增加无显著变化(图 13b)。

N1 断面:表层盐度都比较低,在 50 m 以浅的水层一般在 33 psu 左右。在 50~150 m 的次表层,盐度变化剧烈,出现较强的盐跃层,在 >150 m 的水层,盐度 >34 psu,且随水深的变化非常缓慢(图 14a)。

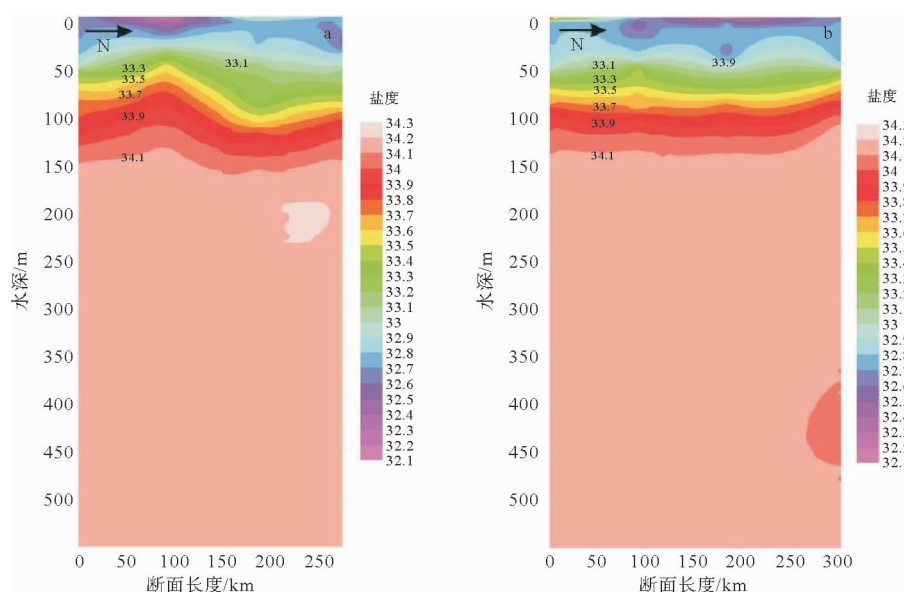


图 13 SN 向断面盐度分布特征

Fig. 13 Salinity distribution along the south-north cross section

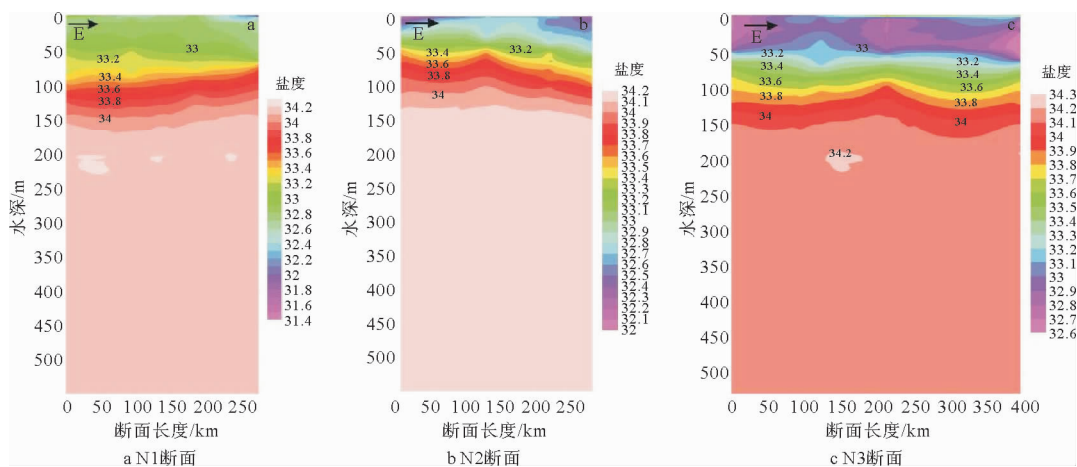


图 14 EW 向断面盐度分布特征

Fig. 14 Salinity distribution along the east-west cross section

N2断面:盐度的上均匀层非常薄,盐度一般 <33 psu,相较于N1断面,盐跃层上移了30 m左右。在150 m以浅的范围内,自西向东,同深度水层的盐度略有增加,在 >150 m的水层,盐度 >34 psu且变化趋于一致,且随水深的变化非常缓慢(图14b)。

N3断面:表层至50 m的水层,盐度分布不均匀,但都 <33 psu,50~100 m的水层为盐跃层的分布区域,与N1和N2断面类似,盐跃层内等盐线的分布基本上呈水平方向,体现了夏季盐度层化显著,分层效应强烈的特点(图14c)。

3 结论

(1)夏季为南海暖池活跃时期,研究区大部分测站表层温度在 28°C 以上,西北部区域最高温度可达 31.2°C 左右,表层温度分布具有“北高南低、西高东低”的特点;大部分区域表层盐度在32 psu以上,整体上“南高北低、东高西低”,低盐区域分布在研究区西北部,与高温区域呈现重合的特点。同时根据温盐度等值线的分布特征,表明本次温盐度调查在中沙群岛东南部捕捉到一个中尺度反气旋涡旋,气旋直径150 km左右。

(2)夏季研究区海域混合层受到季风和海面净热通量的影响,在西部和中部基本上被典型的南海水团所控制,与其他水团的交换作用较弱,海洋的层化作用较强,抑制了海水的垂直混合,因此,混合层相对较浅;而在东部和南部区域,表层水受到西太平洋水的影响,混合作用较强,混合层有所增厚。同时研究区海域存在障碍层,影响了表层和底层的热量交换,有助于南海暖水的形成,但其厚度基本不大,大部分区域在20 m以下。

(3)实测资料进一步证实南海的温盐深具有

典型的边缘海特征,海水物理性质变化较大的层位较浅,多在200 m以浅的水层,由于取样时间在夏季,温跃层发育比较活跃,导致跃层的厚度比较大,最高可达170 m,强度也较高,大部分区域在 $0.09^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以上。

(4)盐跃层的上界深度和厚度整体上都低于温跃层,在研究区西南部海域,盐跃层的上界深度和厚度都较低,上界深度在5~15 m之间,盐跃层的厚度也在50 m以下;在南部和中东部海域,上界深度可达50 m以上,盐跃层的厚度在50~85 m之间,盐跃层的强度在 $0.015\sim0.025$ psu/m之间。

参考文献:

- [1] 王东晓,陈举,陈荣裕,等. 2000年8月南海中部与南部海洋温、盐与环流特征[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(2): 98-109.
- [2] 刘长建,杜岩,张庆荣,等. 南海次表层和中层水团年平均和季节变化特征[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(1): 55-64.
- [3] 王桂华,苏纪兰,齐义泉,南海中尺度涡研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 882-886.
- [4] 王东晓,杜岩,施平. 南海上层物理海洋气候图集[M]. 北京:气象出版社, 2002.
- [5] 吴巍, Tomczak T, 方欣华, 等. 南海南部海区的障碍层[J]. 科学通报, 2001, 46(7): 590-593.
- [6] 毛汉礼,邱道立. 中国近海温、盐、密度的跃层现象[M]. 北京:学苑出版社, 1996.
- [7] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京:海洋出版社, 2006.
- [8] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准:海洋调查规范——海洋调查资料处理 GB12763. 7-91[S]. 北京:中国标准出版社, 1992.
- [9] 杜岩. 南海混合层和温跃层的季节动力过程[D]. 青岛:青岛海洋大学, 2002.
- [10] 邱章,徐锡祯,龙小敏. 1994年9月南沙群岛调查海区的跃层特征[J]. 热带海洋, 1996, 15(2): 62-67.

(下转第40页)

Key words: central South China Sea; CTD; mixing layer; thermocline; halocline