

田永青, 黄洪辉, 巩秀玉, 等. 2013 年南沙群岛海域温跃层的季节变化及形成机理[J]. 海洋学报, 2017, 39(12): 20–31, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2017.12.003

Tian Yongqing, Huang Honghui, Gong Xiuyu, et al. The seasonal variation of the thermocline and its formation mechanism in the sea area around Nansha Islands in 2013[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(12): 20–31, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.12.003

2013 年南沙群岛海域温跃层的季节变化及形成机理

田永青^{1,2}, 黄洪辉^{2*}, 巩秀玉², 余少梅², 靖春生¹, 高璐¹

(1. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所 广东省渔业生态环境重点实验室/农业部外海渔业开发重点实验室, 广东 广州 510300)

摘要: 利用调查数据及遥感数据揭示了 2013 年南沙群岛海域温跃层的季节变化特征, 温跃层上界深度平均值春、夏、冬季基本一致, 介于 45~47 m 之间, 秋季最大, 达 60 m; 温跃层厚度平均值夏、秋、冬季基本一致, 介于 85~87 m 之间, 春季相对较小, 为 78 m。温跃层强度平均值春、夏、秋、冬季几乎一致, 介于 0.13~0.15°C/m 之间。调查海域温跃层上界深度季节变化的形成机理为: 春季西深东浅的原因是西部受净热通量较小、大风速、负的风应力旋度以及中南半岛东部外海的中尺度暖涡和反气旋环流共同作用, 东部近岸海域净热通量高值、风速相对较小及风应力旋度引起的 Ekman 抽吸效应共同控制; 夏季深度分布较均匀的原因是 10°N 以北风致涡动混合强但受 Ekman 抽吸影响, 10°N 以南风致涡动混合弱但风应力旋度为负值; 秋季深度较其他季节平均加深 15 m 的原因是南沙群岛海域被暖涡占据, 暖涡引起的反气旋式环流使得温跃层上界深度被海水辐聚下压; 冬季正的风应力旋度产生的 Ekman 抽吸和冷涡引起的气旋式环流共同作用, 使得温跃层上界深度较秋季平均抬升 15 m。

关键词: 南沙群岛海域; 温跃层; 风应力旋度; Ekman 抽吸

中图分类号: P731.24

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2017)12-0020-12

1 引言

20 世纪 90 年代, 一些学者对南沙群岛海域的温跃层进行了研究^[1-4], 主要揭示了该海域温跃层三要素(跃层上界、厚度和强度)的时空分布特征及变化规律。但这些研究多限于单航次调查资料的分析结果, 基本没有探讨造成温跃层时空分布变化特征的机制。关于南海温跃层的季节变化, 徐锡祯等^[2]利用 1907—

1990 年间在南海积累的调查资料通过气候态平均后进行了阐述, 但这些资料在南沙群岛海域并不集中。而有关年周期内的温跃层季节变化研究更是鲜见报道。

影响温跃层的因素主要有太阳辐射、海面热收支、风应力产生的 Ekman 抽吸、Ekman 水平输运^[5-6]及海流^[7-11]等。Liu 等^[12], 陈希等^[13]分别研究了南海中部、北部海区的温跃层分布特征, 分析了净辐射

收稿日期: 2017-02-03; 修订日期: 2017-06-30。

基金项目: 广东省渔业生态环境重点实验室开放基金(LFE-2015-5); 国家重点研发专项(2016YFC1402607); 农业部财政重大专项(NFZX2013); 南海物理海洋与海洋气象科学考察历史资料整编(2017FY201402); 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2013035)。

作者简介: 田永青(1985—), 男, 河北省石家庄市人, 助理研究员, 主要从事南海环流动力学研究。E-mail: tianyongqing@tio.org.cn

* 通信作者: 黄洪辉(1972—), 男, 江西省南昌市人, 研究员, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: huanghh@scsfri.ac.cn

通量的分布状况及随季节的变化特征。陈希等^[13]分析认为,海面净辐射通量的增强是影响该海域温跃层形成的最重要因素之一。Liu等^[12]指出,海面净辐射通量的减弱,即海洋失去热量,会使海洋温跃层深度变浅。Liu等^[12]分析了1998年4月20日到1999年4月8日间连续锚定浮标资料,分析表明,南海中部温跃层的季节性变化主要由海表面风应力和净热通量的季节性变化引起的;而季节内变化主要由中尺度涡和净热通量的季节内变化引起的。Ekman抽吸、Ekman水平输运作用与南海温跃层深度的关系密切。周发琇等^[14-15]、Liu等^[16]、兰健等^[17]分别对南海温跃层的季节变化做过深入研究,认为局地风应力通过Ekman抽吸能够影响到温跃层的上升和下降。由于Ekman水平输运效应,冬季温跃层深度呈现西北较为深厚、东南较为浅薄的分布结构,而夏季东南部较深厚,西北部较浅薄。但以上研究均没有重点针对南沙群岛海域温跃层季节变化的动力机制分析。

南沙群岛海域地处南海南端,渔业资源丰富。温跃层往往是叶绿素的极大值深度所处位置,对渔场的形成具有重要的影响^[18]。本文利用中国水产科学研究院南海水产研究所2013年在南沙群岛海域开展的春、夏、秋、冬4个航次的调查数据,揭示该海域温跃层的季节变化及其形成机理,不但具有重要的科学意义,而且对探讨南沙群岛海域渔场变动规律提供重要的依据。

2 数据及方法

2.1 数据来源

本研究温度数据来源于中国水产科学研究院2013年在南沙群岛海域开展的4个航次的CTD调查,包括春(2013年3月15日至4月8日)、夏(2013年6月15日至2013年7月12日)、秋(2013年9月9日至27日)、冬(2013年11月18日至12月3日),调查范围 $4^{\circ}\sim 11.5^{\circ}\text{N}$, $108.5^{\circ}\sim 117.5^{\circ}\text{E}$ 。CTD获得数据采样间隔为 $1/24\text{ s}$,最后处理成垂向 1 m 间隔。具体站位布设见图1。

此外,还使用了调查期间月平均的ASCAT风场数据,空间精度 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,下载网站:<https://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/ASCATData.php>;月平均NCEP净热通量数据,空间精度约为 $1.875^{\circ}\times 1.875^{\circ}$,下载网站:<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>;AVISO高度计数据,空间精度 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,下载网址:<http://www.aviso>。

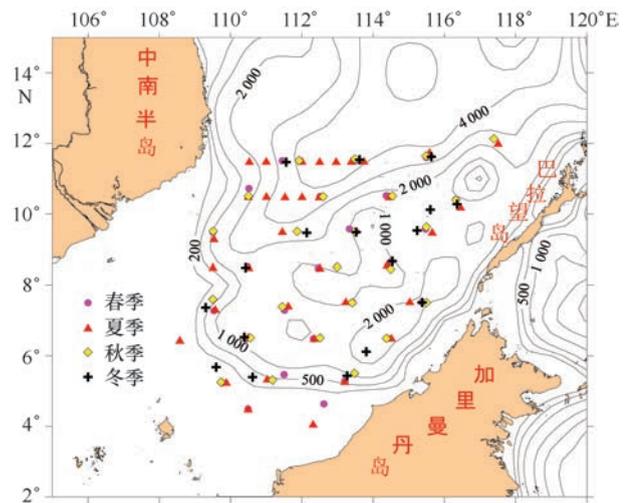


图1 2013年南沙群岛海域调查站位分布

Fig.1 The position distribution of the survey around the Nansha Islands sea area in 2013

oceanobs.com/en/data/index.html。

2.2 计算方法

确定温跃层的方法一般是先选定温跃层强度的最低指标值,把该温度垂向梯度值大于等于最低指标值所在深度范围称之为跃层。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;温跃层上、下界深度对应的温度值之差除以跃层厚度所得的值为跃层的强度。跃层强度 $\Delta T/\Delta Z$ 的最低指标值选取依据《海洋调查规范》^[19-20]:

$\Delta T/\Delta Z=0.05^{\circ}\text{C}/\text{m}$,当水深大于 200 m 时;

$\Delta T/\Delta Z=0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$,当水深小于 200 m 时。

在计算中发现南海温跃层为季节性温跃层和永久性温跃层并存,为探讨规律性特征,本文仅针对永久性温跃层进行研究。个别测站永久性温跃层出现多跃层现象,但跃层间垂向间隔较小(多小于 10 m),则取第一跃层的上界为温跃层的上界,最后一跃层的下界为温跃层的下界,并由此求得温跃层的深度、厚度和强度。

另外,调查海域西南部陆架海域调查水深小于 200 m ,陆坡区地形变化剧烈,单纯以 200 m 水深界定温跃层标准阈值往往会使得温跃层上界深度出现不连续。为避免此现象发生,在 200 m 水深附近测站温跃层标准选取按照吴魏等^[21]的方法,即若大多数为深水站,其他测站位于深水和浅水交接处,则取深水站标准;反之则取浅水站标准。在本文操作中靠近陆坡区的测站按深水标准,位于大陆架西南部的浅水测

站则按浅水标准计算,以此方法保证了温跃层上界深度的连续性。

3 结果分析

根据以上计算方法获得南沙群岛调查海域温跃

层季节变化特征如表 1 所示。

3.1 温跃层上界深度

由温跃层上界深度数据绘得温跃层上界深度季节分布如图 2 所示。

表 1 2013 年南沙群岛海域温跃层季节变化特征值

Tab.1 The seasonal characteristic value of thermocline around the Nansha Islands sea area in 2013

季节	上界深度/m				厚度/m				强度/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$			
	平均值	最大值	最小值	均方差	平均值	最大值	最小值	均方差	平均值	最大值	最小值	均方差
春	46	74	17	15	78	147	7	32	0.13	0.28	0.08	0.04
夏	47	57	30	7	87	152	32	23	0.13	0.26	0.09	0.03
秋	60	83	40	11	86	117	19	26	0.15	0.39	0.11	0.06
冬	45	70	18	15	85	143	10	32	0.13	0.26	0.09	0.04

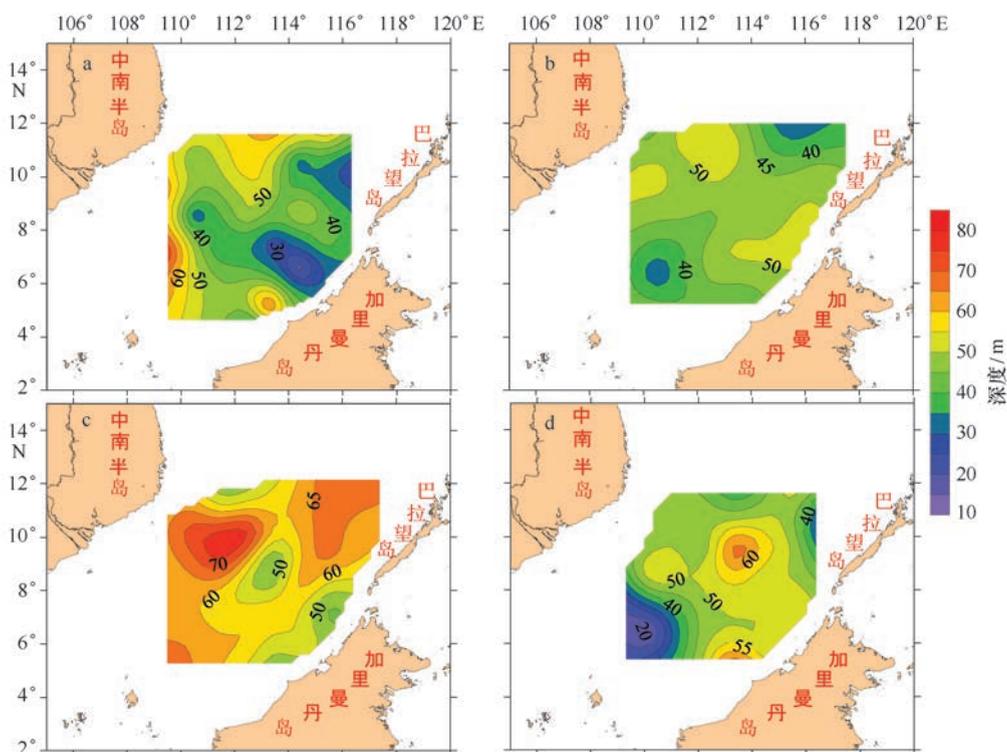


图 2 2013 年南沙群岛海域温跃层上界深度季节分布

Fig.2 The seasonal distribution of thermocline upper-bounds depth around the Nansha Islands sea area in 2013

a.春;b.夏;c.秋;d.冬

a.Spring; b.summer; c.autumn; d.winter

由图 2 可知,温跃层上界深度在调查海域总体分布特征如下:春季西部深东部浅,夏季分布整体较为均匀,除东北、西南部小于 40 m 外,其他调查海域均

在 40~50 m 之间;秋季整个调查海域普遍加深,仅加里曼丹岛外海和中南半岛东部外海小部分海域小于 55 m 外,其他海域均深于 60 m;冬季除调查海域东

北、西南部海域小于 45 m 外,中部海域均大于 45 m。

再结合温跃层特征值表 1 可知,温跃层上界深度平均值秋季(9月)最深,可达 60 m。春、夏、冬季基本一致,介于 45~47 m 之间;上界深度的最大值为秋季最深,可达 83 m。夏季最小,为 57 m。春、冬季介于 70~74 m 之间;上界深度的最小值仍是秋季最大,可达 40 m。夏季次之(30 m),春、冬季最小,约为 17 m。

由上界深度的均方差分布可知,春、冬季上界深度分布差异最大,秋季次之,夏季最小。

3.2 温跃层厚度

由温跃层厚度数据绘得温跃层厚度季节分布如

图 3 所示。

由图 3 可知,调查海域温跃层厚度总体分布特征如下:春季由北向南呈深—浅—深—浅的形态,加里曼丹岛北部外海为最大厚度值出现区,中心区可超过 140 m;夏季呈中心厚四周薄,最大值中心超过 150 m,位于 7°N,111°E;秋季大体呈中部厚南北薄,10°N 以北中南海岛东南部和 7°N 以南的调查区域厚度均小于 80 m,中东部海域深度大于 100 m;冬季呈中部薄四周厚的形态,中部海域小于 70 m,四周除西南部陆架浅水区小于 60 m 外均大于 80 m。此外,西南部浅水陆架区常年厚度较薄。

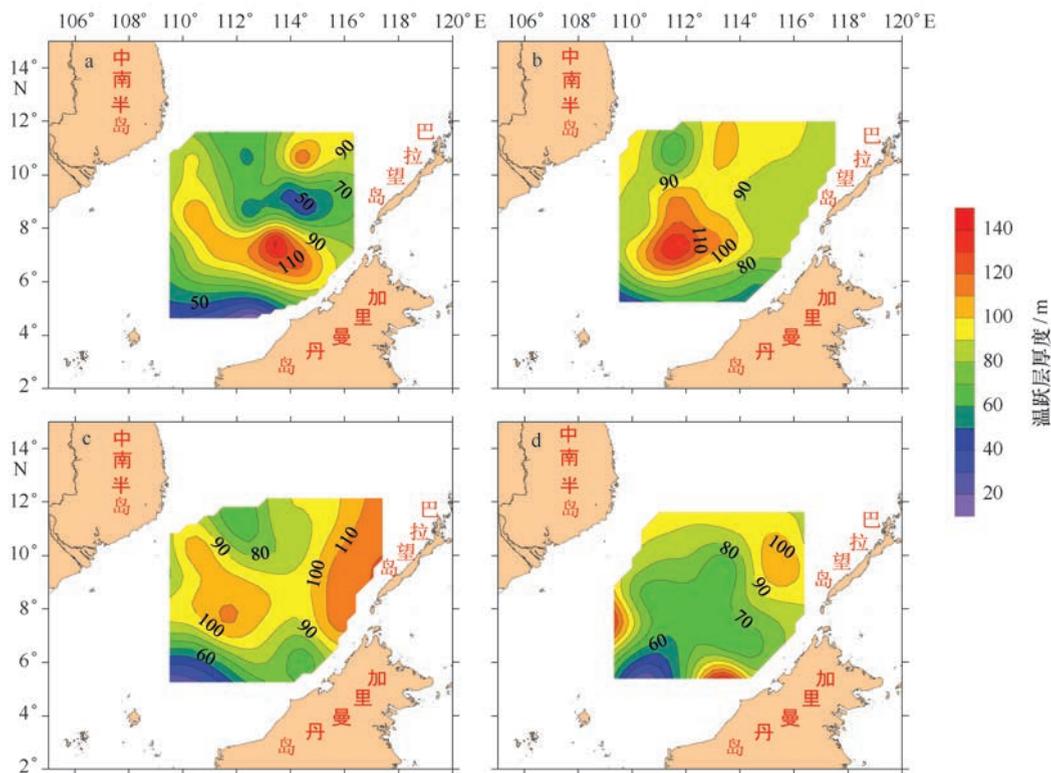


图 3 2013 年南沙群岛海域温跃层厚度季节分布

Fig.3 The seasonal distribution of thermocline thickness around the Nansha Islands sea area in 2013

a.春;b.夏;c.秋;d.冬

a.Spring; b.summer; c.autumn; d.winter

温跃层厚度的特征值由表 1 可知,温跃层厚度平均值夏、秋、冬季几乎一致,介于 85~87 m 之间。春季相对较小,为 78 m;温跃层厚度最大值春、夏、冬季差别不大,介于 143~152 m 之间。秋季相对较薄,为 117 m;温跃层厚度最小值夏季最大,可达 32 m。秋季次之,为 19 m。春、冬季最小,仅 7~10 m。从厚度的均方差分布可知,春、冬季差异大于夏秋季。

3.3 温跃层强度

由温跃层强度数据绘得温跃层强度季节分布如图 4 所示。

温跃层强度为温跃层上、下界深度对应的温度值之差除以跃层厚度所得的值,强度值与厚度成反比。从图 4 也可看出温跃层强度分布与温跃层厚度呈很好的对应关系,即温跃层厚度大的区域温跃层强度弱。

由图4可知,调查海域温跃层强度分布总体为春季由北向南呈强—弱—强的形态;夏季大体呈中间弱四周强;秋季分布总体为中部弱南北强;冬季大体为中心区域强四周弱。西南部浅水陆架区常年温跃层强度很强,强度值大于 $0.15^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

温跃层强度的特征值具体由表1可知,温跃层强

度平均值春、夏、秋、冬季几乎一致,介于 $0.13\sim 0.15^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 之间;温跃层强度最大值秋季最大,达 $0.39^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。春、夏、冬季接近,介于 $0.26\sim 0.28^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 之间;温跃层强度最小值春夏秋冬几乎也一致,介于 $0.08\sim 0.11^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 之间。

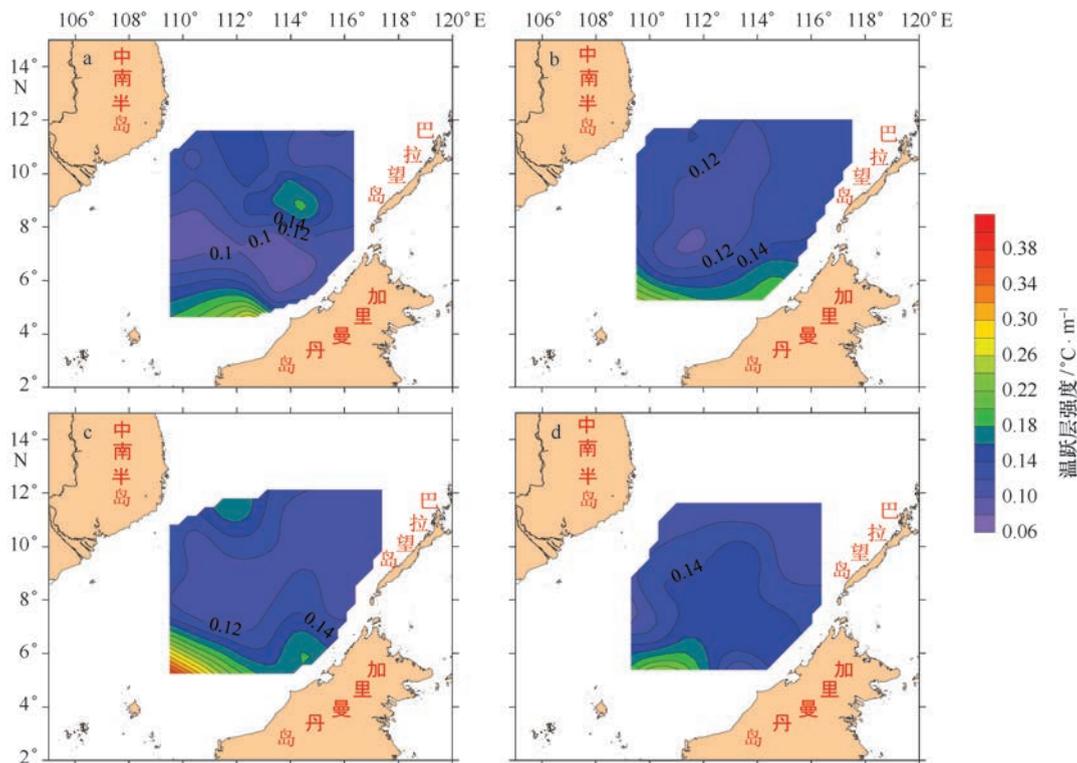


图4 2013年南沙群岛海域温跃层强度季节分布

Fig.4 The seasonal distribution of thermocline intensity around the Nansha Islands sea area in 2013

a.春;b.夏;c.秋;d.冬

a.Spring; b.summer; c.autumn; d.winter

4 温跃层季节变化的形成机理

由以上结果分析可知,调查海域温跃层顶界深度平均值春、夏、冬季几乎无变化,秋季加深了15 m。分布形态上夏、冬季类似。厚度平均值夏、秋、冬几乎一致,春季比其他季节小8 m左右。分布形态上夏、冬季温跃层深度表现却相反,即夏季中部深四周浅,冬季中部浅四周深。此外,南沙群岛海域温跃层特征值季节变化的形态也与南海中北部海域的温跃层特征值季节变化^[12-13,22]有很大差异,是什么机理造成该海域温跃层季节形态的差异呢?

影响温跃层的动力因素有净热通量、风应力及其引起的Ekman抽吸、Ekman水平输运^[5-6]及中尺度

冷、暖涡^[23]、环流^[7-11]等。下文将分别就各要素对南沙群岛调查海域温跃层上界深度的影响进行分析。

4.1 净热通量的影响

调查期间净热通量分布如图5所示。净热通量为海洋热量净收支,正值表示海洋吸热,负值表示海洋失热。单纯海洋吸热会使得海洋层结增加,温跃层上界深度变浅。反之,海洋失热将使得温跃层上界深度变深。Liu等^[12],陈希等^[13]在研究南海中部、北部海区的温跃层分布特征时认为海面净热通量与该海域温跃层的形成密切相关。

由图5可知,春季净热通量为全年中最高季节,加里曼丹岛北部外海为净热通量高值中心,最高可超过 $100\text{ W}/\text{m}^2$ 。海洋大量吸热使得该海域层结加强,

温跃层上界深度变浅。中南半岛东南外海海域为净热通量相对低值中心,即该海域海洋吸热较少,层结较弱,温跃层上界深度较深。净热通量分布与温跃层上界深度有较好的对应关系。

夏季净热通量整体相较春季大幅减少,使得海洋层结减弱,而温跃层上界深度却较春季并未明显增加,说明其他动力过程对该季节温跃层上界深度影响起主要贡献。

秋季净热通量分布与夏季形态一致,但略有增强。东北部调查海域海洋失热,西南部及加里曼丹岛近岸浅水陆架海域海洋为吸热中心。但该季节的温跃层上界分布较春、夏季明显加深,说明净热通量在

该季节并非重要因素,揭示了该海域其他动力过程占主导作用。

冬季净热通量为全年最低值,与秋季相比海洋大幅失热。大约 5°N 以北海域均为失热区,失热最强中心可达 80 W/m^2 。海洋强失热使得上层海洋层结减弱,该过程可使得温跃层上界深度加深。而温跃层上界深度平均值却较秋季抬升变浅 15 m 。表明冬季其他动力过程在该海域占主导,对温跃层的形成起抑制作用。

综上,南沙群岛海域的净热通量仅在春季与温跃层上界深度分布密切相关,其他季节对温跃层上界深度影响并非重要因素。

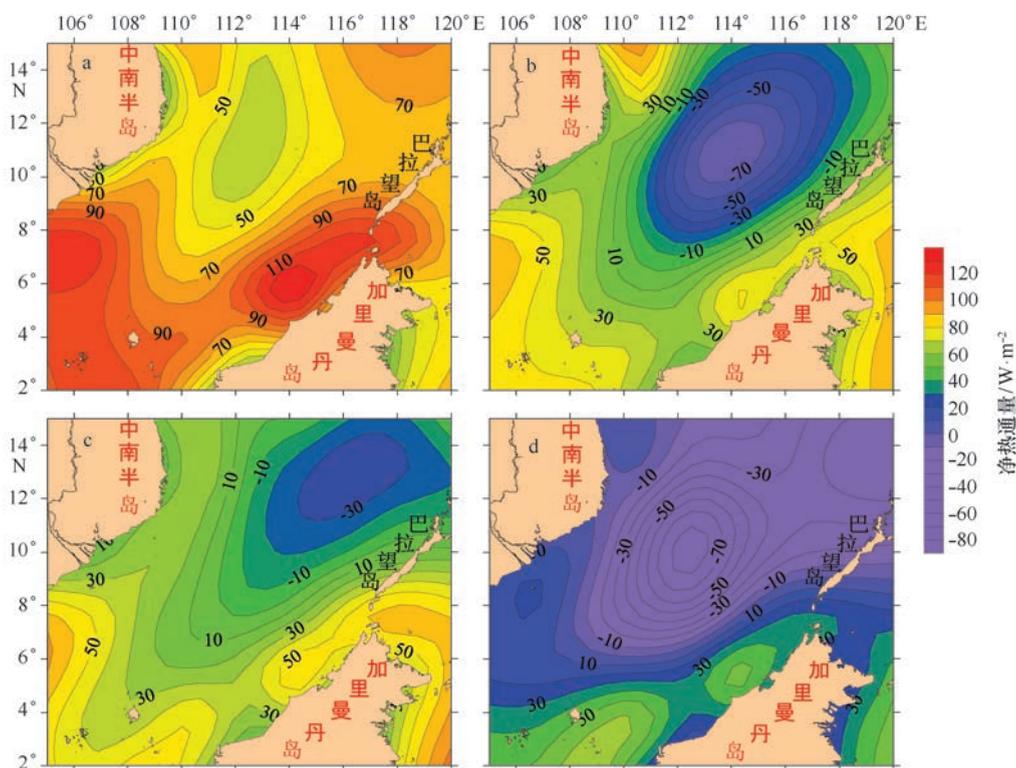


图5 2013年调查期间南沙群岛海域净热通量季节分布

Fig.5 The seasonal distribution of the net heat flux around the Nansha Islands sea area during the survey in 2013

a.春;b.夏;c.秋;d.冬

a.Spring; b.summer; c.autumn; d.winter

4.2 风应力及引起的 Ekman 抽吸

风应力取决于风速的大小,故本文近似以风速大小表征风应力大小。风速大时可引起的涡动混合增强,进而混合层加深,温跃层上界深度变深。反之,风速小时,弱的涡动不足以加深温跃层上界深度。

从图6可知,春季加里曼丹岛的南部近岸海域风

速小于北部海域,小风速造成的海洋涡动混合弱,而且靠近加里曼丹岛的南部近岸海域风应力旋度为正值,即 Ekman 抽吸效应容易诱发深层水上涌。深层水上涌将使得温跃层上界深度抬升变浅,温跃层厚度增加;北部风速大,使得混合加强,而且风应力旋度为负值,均利于温跃层上界深度加深。

夏季整个南沙调查海域 10°N 以北风应力旋度为正值,即 Ekman 抽吸效应易于底层水上涌。同时该海域风速较大,又增加了海洋上层混合,两者作用相互削弱; 10°N 以南风应力旋度为负值,易于表层水上辐聚下沉,利于温跃层上界深度加深。但南部海域风速较小,产生的海洋涡动混合弱,又不利于温跃层上界深度加深。故整个调查海域温跃层上界深度较为均匀。

秋季整个南沙调查海域净热通量、风应力旋度、

风场分布均与夏季基本一致,但温跃层上界普遍加深。造成此现象应为其他因素在主导。

冬季整个南沙调查海域为全年中海洋失热最强季节,利于温跃层上界深度加深。另外,风速在 8°N 以北的海域达到全年中最大值,大风速增强了海洋上层混合。但该季节温跃层上界深度并未显著增加,相反较秋季变浅 15 m。从风应力旋度分布可知,整个调查海域几乎均为正值,即受 Ekman 抽吸效应,整个调查海域温跃层上界深度抬升变浅。

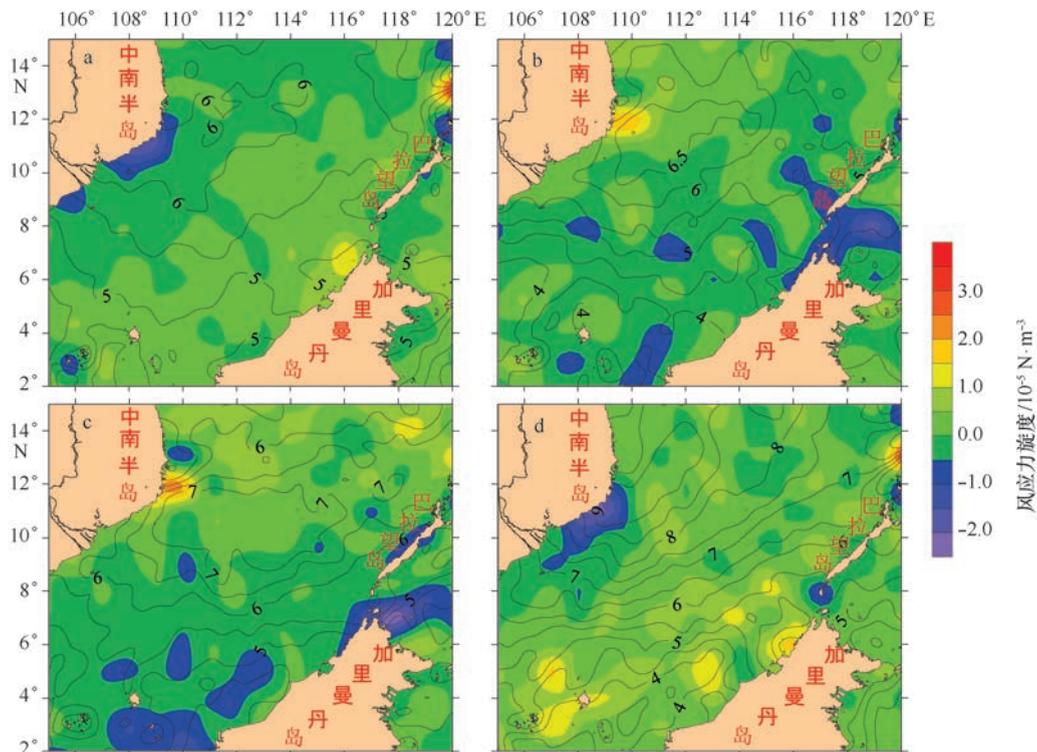


图 6 2013 年调查期间南沙群岛海域风速(图中等值线,单位: m/s)及风应力旋度(图中色标,单位: 10^{-5}N/m^3)季节分布

Fig.6 The seasonal distribution of the wind speed(contour line,the units; m/s) and the wind stress curl (color patch, units: 10^{-5}N/m^3) around the Nansha Islands sea area during the survey in 2013

a.春;b.夏;c.秋;d.冬

a.Spring; b.summer; c.autumn; d.winter

4.3 风应力引起的 Ekman 水平输运

很多学者^[19,24-25]研究南海深水海盆时指出受季风影响,冬季温跃层深度呈现西北部较深厚、东南部较为浅薄的分布结构,夏季东南部较深厚,西北部较浅薄。而南沙群岛海域却并未表现出如此分布形态,冬季东南部较厚,夏季整个调查海域温跃层上界深度分布大体一致。表明 Ekman 水平输运对南沙群岛海域温跃层上界深度影响不是主要因素。

4.4 中尺度涡和海流

潘爱军和刘秦玉^[23]研究北太平洋副热带西部模态水时指出中尺度的暖涡能够加深混合层厚度,相反冷涡起到抑制减弱混合层厚度的作用。此外,海流的平流作用可以使得不同性质的水团相互混合,温跃层上界深度和厚度也会发生改变。大尺度的环流引起海水的辐聚或辐散同样能改变温跃层上界深度及厚度^[7-11,25]。

春季中南半岛东部外海海表水位为高值异常中心,表明中南半岛东部外海存在一中尺度暖涡(图7a)。该暖涡引起该海域如图2所示的温跃层上界深度加深。蔡树群等^[9]的研究结果显示春季南沙群岛海域中部出现一东北向强流,强流以北存在一反气旋环流,与此暖涡位置一致。东南海域海表水位差异不大,表明中尺度涡现象不明显。温跃层上界深度在巴拉巴克海峡北部出现一较大值区域,Cai等^[10]分析1994年春季数据时发现该海域为暖水区,冬季残留

在此的反气旋环流使得暖水下压,温跃层上界深度加深。

夏季整个调查海域海表水位高度差异未出现显著的中尺度涡现象(图7b)。但南沙群岛海域环流结构为一个大的反气旋^[8,11],反气旋环流使得中心海水辐聚下压,故中部温跃层上界深度较厚。就局部而言,温跃层上界深度在东北部和西南部出现两个小值区,原因是在东北部存在一南沙中西部气旋、西南部存在万安气旋^[8,11],气旋环流使得海水上升辐散。

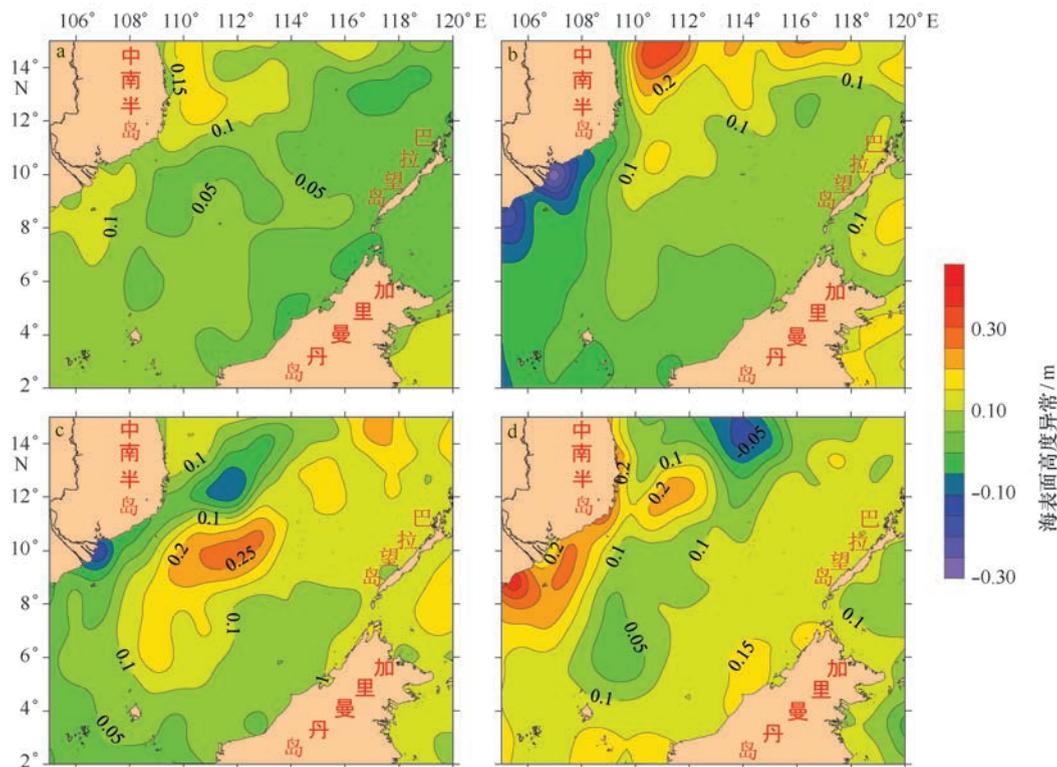


图7 2013年调查期间南沙群岛海域海表面高度异常季节分布

Fig.7 The seasonal distribution of the sea surface height anomaly around the Nansha Islands sea area during the survey in 2013

a.春;b.夏;c.秋;d.冬

a.Spring; b.summer; c.autumn; d.winter

秋季中南半岛及加里曼丹岛等近岸海域海表水位低,南沙群岛海域海表水位高(图7c),表明整个南沙群岛海域为一个大的暖涡结构。暖涡伴随反气旋式环流生成,故调查海域温跃层上界深度均被反气旋环流产生的海水辐聚下压,深度较夏季整体增加15 m。

冬季中南半岛及加里曼丹岛等近岸海域海表水位高,南沙群岛海域海表水位低(图7d),表明调查海域为一大的冷涡。冷涡伴随气旋式环流生成,故调查海域温跃层上界深度均被气旋式环流产生的海水涌

升而抬升。吴日升等^[26]在1998年的南海冬季全海域调查中也发现南沙群岛海域为一气旋式环流结构。就局部现象而言,调查海域西北部出现温跃层上界深度最小值区,原因是受南沙气旋影响,中部出现温跃层上界深度最大值区,原因是受反气旋影响^[8,11]。

综上,造成春季温跃层上界深度西高东低的机理为:调查海域北部净热通量相对较小,层结较弱。同时风速大,使得上层混合加强。风应力旋度为负值,利于温跃层上界深度加深。此外,中南半岛东部外海

的中尺度暖涡和反气旋式环流利于温跃层上界深度加深;加里曼丹岛的南部近岸海域风速小于北部,小风速造成的海洋涡动混合弱,且靠近加里曼丹岛的南部近岸海域风应力旋度为正值,Ekman 抽吸效应易诱发深层水上涌。深层水上升将使得温跃层上界深度抬升变浅,温跃层厚度增加。巴拉巴克海峡北部海域出现一温跃层上界深度大值区,原因是冬季残留的反气旋环流影响。

夏季,调查海域 10°N 以北 Ekman 抽吸效应易于底层水上涌,但风速较大,增强了海洋上层混合,两者作用相互削弱。 10°N 以南风应力旋度为负值,易于表层海水辐聚下沉,但南部海域风速较小,产生的海洋涡动混合弱,故整个调查海域温跃层上界深度较为均匀。就局部而言,中部温跃层上界深度相对较深是受大的反气旋环流作用。

秋季,整个南沙群岛海域为一暖涡结构。暖涡伴随反气旋式环流生成,温跃层上界深度被反气旋环流产生的海水辐聚下压,深度较夏季平均增加 15 m。

冬季,南沙群岛海域风应力旋度引起的 Ekman 抽吸和气旋式环流产生的海水涌升占主导,抵消了海

洋失热及强风引起的涡动混合效应,最终使得温跃层上界深度较秋季抬升 15 m。

5 讨论与结论

5.1 讨论

由前面的分析可知,净热通量仅在春季与温跃层上界深度有较好的对应关系。其他季节均非重要影响因素。这与南海中、北部的结论^[12-13]不一致。可能反映了净热通量在南沙群岛海域对温跃层的影响并不重要。造成的原因可能是南沙地处热带边缘海,这里太阳辐射等热通量的季节变化没有南海中、北部海域强。

温跃层的平均厚度几乎无季节变化,只有春季较夏、秋、冬季略薄 8 m 左右。可能反应了温跃层底部水体环境稳定。根据温跃层上界深度及厚度平均值,笔者绘制了温跃层底部 140 m 层的温度分布。

由图 8 可知,调查海域温度在该层的季节分布基本上都为中部海域高温,四周相对低温,且温度变化范围小。该结果印证了调查海域温跃层底部水体环境稳定的猜测。

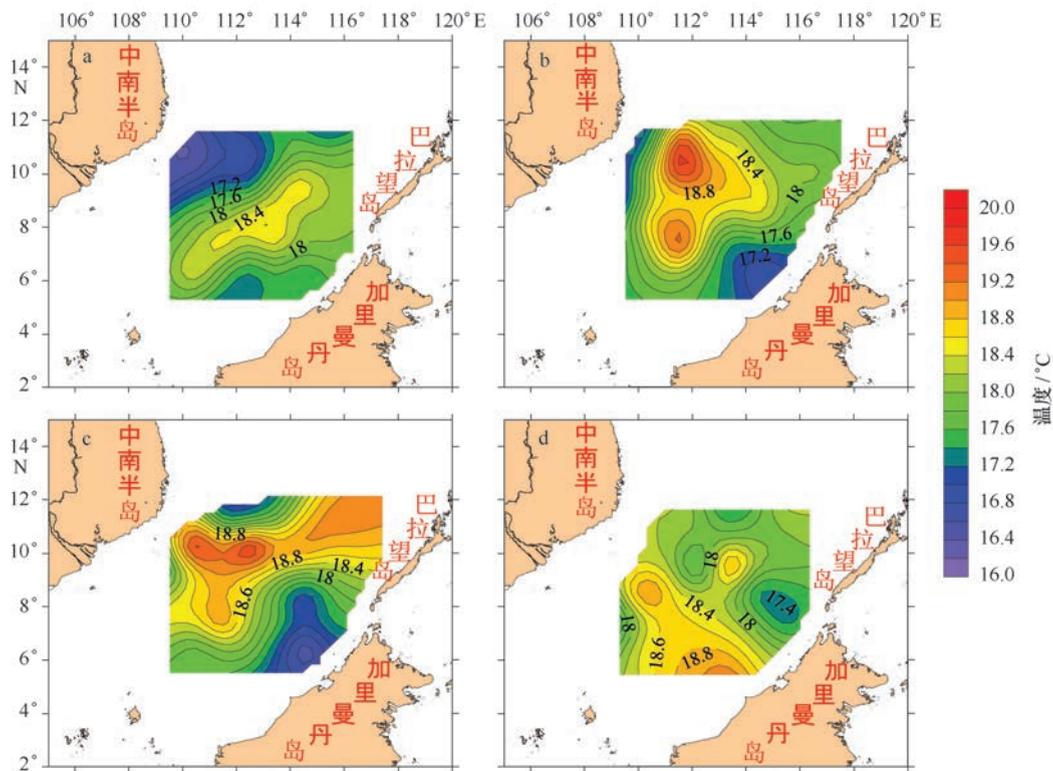


图 8 2013 年南沙群岛海域 140 m 层温度分布

Fig.8 The seasonal distribution of the temperature at 140 m layer around the Nansha Islands sea area in 2013

a.春;b.夏;c.秋;d.冬

a.Spring; b.summer; c.autumn; d.winter

5.2 结论

本文利用2013年在南沙群岛海域开展的春、夏、秋、冬四季调查数据及遥感数据,揭示了该海域温跃层的季节变化特征:

(1)温跃层上界深度的季节分布为:春季西深东浅,夏季分布整体较为均匀,秋季较其他季节平均加深15 m,冬季除调查海域东北、西南部海域小于45 m外,中部海域均大于45 m。调查海域上界深度平均值春、夏、冬季几乎一致,介于45~47 m,秋季最大,达60 m。

(2)温跃层厚度季节分布为:春季由北向南呈深—浅—深—浅的形态;夏季呈中心厚四周薄,最大值超过150 m;秋季大体呈中部厚南北薄;冬季为中部薄四周厚。温跃层厚度平均值夏、秋、冬季基本一致,介于85~87 m之间。春季相对较小,为78 m。

(3)温跃层强度季节分布为:春季由北向南呈强—弱—强的形态;夏季大体呈中间弱四周强;秋季总体上为中部弱南北强;冬季为中心区域强四周弱。西南部浅水陆架区常年温跃层强度较强,强度值大于 $0.15^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

(4)调查海域温跃层上界深度季节变化的形成机理为:春季西深东浅是由于西部净热通量相对较低、大风速、负的风应力旋度以及中南半岛东部外海的中尺度暖涡和反气旋环流协同作用,东部近岸海域净热通量高、风速相对小、且风应力旋度引起的Ekman抽吸效应易使得温跃层上界深度抬升变浅;夏季分布较均匀的原因是 10°N 以北风致涡动混合强、同时受Ekman抽吸效应影响的相互抑制, 10°N 以南受风致涡动混合弱和风应力旋度为负值的相互抑制。而中部的相对较高值区是受夏季南沙群岛海域大的反气旋式环流影响;秋季较其他季节平均加深15 m是因为整个南沙群岛海域为暖涡中心,暖涡引起的反气旋式环流使得温跃层上界深度被海水辐聚下压;冬季正的风应力旋度产生的Ekman抽吸和冷涡引起的气旋式环流共同作用,使得温跃层上界深度较秋季平均抬升15 m。

(5)不同于南海北、中部海域,Ekman平流效应及净热通量的季节变化对南沙群岛海域温跃层季节变化的影响不是很重要。

参考文献:

- [1] 邱章, 黄企洲. 南沙群岛海区温跃层时空分布的分析[G]//南沙群岛海区物理海洋学研究论文集I. 北京: 海洋出版社, 1994:64—80.
Qiu Zhang, Huang Qizhou. The analysis of the thermocline temporal-spatial distribution in the sea area of Nansha Islands[G]//The Journal of Physical Oceanography in the Nansha Islands I. Beijing: China Ocean Press, 1994:64—80.
- [2] 徐锡祯, 邱章, 龙小敏. 南海温跃层基本特征及一维预报模式[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(5):494—502.
Xu Xizhen, Qiu Zhang, Long Xiaomin. The radical characteristics and the one-dimensional calculation pattern of the South China Sea thermocline [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24(5): 494—502.
- [3] 何有海, 关翠华, 王盛安, 等. 南海南部热结构和水温的垂直分布[G]//南沙群岛海区物理海洋学研究论文集I. 北京: 海洋出版社, 1994: 167—177.
He Youhai, Guan Cuihua, Wang Sheng'an, et al. The heat structure and the vertical distribution of water temperature in the southern South China sea[G]//The Journal of Physical Oceanography in the Nansha Islands I. Beijing: China Ocean Press, 1994: 167—177.
- [4] 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):61—67.
Qiu Zhang, Xu Xizhen, Long Xiaomin. The characteristics of the sea water transition layer in the investigated area of Nansha Islands in Sept.1994 [J]. Tropic Oceanology, 1996, 15(2):61—67.
- [5] Chen Dake, Busalacchi A J, Rothstein L M. The roles of vertical mixing, solar radiation, and wind stress in a model simulation of the sea surface temperature seasonal cycle in the tropical Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1994, 99(C10):20345—20359.
- [6] McCreary J P, Kundu P K, Molinari R L. A numerical investigation of dynamics thermodynamics and mixed-layer processes in the Indian Ocean[J]. Progress in Oceanography, 1993, 31(3):181—244.
- [7] 邱章, 蔡树群. 与南沙深水区温跃层有关的海水平均温度的分布特征[J]. 热带海洋, 2000, 19(4):10—14.
Qiu Zhang, Cai Shuqun. Distribution characteristics of mean sea temperature relative to thermocline in deep water of Nansha Islands sea area[J]. Tropic Oceanology, 2000, 19(4):10—14.
- [8] 方文东, 郭忠信, 黄羽庭. 南海南部海区的环流观测研究[J]. 科学通报, 1997, 42(21):2264—2271.
Fang Wendong, Guo Zhongxin, Huang Yuting. A study on circulation observation in the southern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(21):2264—2271.
- [9] 蔡树群, 龙小敏, 陈荣裕, 等. 春季南沙群岛海区环流结构的探讨[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(2):37—44.
Cai Shuqun, Long Xiaomin, Chen Rongyu, et al. A study on circulation structure in spring in Nansha Islands sea area, South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(2):37—44.

- [10] Cai Shuqun, Long Xiaomin, Wang Shengan, et al. Spring upper warm water of the Nansha Islands sea area in the South China Sea and the numerical study on its dynamic mechanism[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(S11): 38-44.
- [11] Fang Wendong, Fang Gonghong, Shi Ping, et al. Seasonal structures of upper layer circulation in the southern South China Sea from in situ observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107(C11): 3202.
- [12] Liu Qinyu, Jia Yinglai, Liu Penghui, et al. Seasonal and intraseasonal thermocline variability in the central South China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(23): 4467-4470.
- [13] 陈希, 沙文钰, 李妍. 南海北部海区温跃层分布特征及成因的初步分析[J]. 海洋预报, 2001, 8(4): 9-17.
Chen Xi, Sha Wenyu, Li Yan. The elementary analysis for the distribution character of thermocline in the area of South China Sea[J]. Marine Forecasts, 2001, 8(4): 9-17.
- [14] 周发琇, 丁洁, 于慎余. 南海表层水温的季节内振荡[J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(1): 1-6.
Zhou Faxiu, Ding Jie, Yu Shenyu. The interseasonal oscillation of sea surface temperature in the South China Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1995, 25(1): 1-6.
- [15] 周发琇, 高荣珍. 南海次表层水温的季节内变化[J]. 科学通报, 2001, 46(21): 1831-1837.
Zhou Faxiu, Gao Rongzhen. The interseasonal variation of the subsurface temperature in the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(21): 1831-1837.
- [16] Liu Qingyu, Yang Haijun, Wang Qi. Dynamic characteristics of seasonal thermocline in the deep sea region of the South China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2000, 118(2): 104-109.
- [17] 兰健, 鲍颖, 于非, 等. 南海深水海盆环流和温跃层深度的季节变化[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 436-445.
Lan Jian, Bao Ying, Yu Fei, et al. Seasonal variabilities of the circulation and thermocline depth in the South China Sea deep water basin[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(4): 436-445.
- [18] 宋利明, 张禹, 周应祺. 印度洋公海温跃层与黄鳍金枪鱼和大眼金枪鱼渔获率的关系[J]. 水产学报, 2008, 32(3): 369-378.
Song Liming, Zhang Yu, Zhou Yingqi. The relationships between the thermocline and the catch rate of Thunnus albacares and Thunnus obesus in the high seas of the Indian Ocean[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(3): 369-378.
- [19] 张义钧, 范文静, 骆敬新, 等. GB/T 12763.7-2007 海洋调查规范第 7 部分: 海洋调查资料交换[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Zhang Yijun, Fan Wenjing, Luo Jingxin, et al. GB/T 12763.7-2007 The specifications for oceanographic survey-Part 7: Exchange of oceanographic survey data[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [20] 姜波, 吴新荣, 丁杰, 等. 南海温跃层深度计算方法的比较[J]. 海洋通报, 2016, 35(1): 64-73.
Jiang Bo, Wu Xinrong, Ding Jie, et al. Comparison on the methods of determining the depths of thermocline in the South China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(1): 64-73.
- [21] 吴巍, 方欣华, 吴德星, 等. 南海南部海区的障碍层[J]. 科学通报, 2001, 46(7): 590-594.
Wu Wei, Fang Xinhua, Wu Dexing, et al. The barrier layer in the southern sea area of the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(7): 590-594.
- [22] 蒋国荣, 郝少东, 杜涛, 等. 南海北部温跃层逐月变化特征分析[J]. 海洋预报, 2011, 28(3): 40-45.
Jiang Guorong, Hao Shaodong, Du Tao, et al. Monthly variabilities of the thermocline in the northern South China Sea[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(3): 40-45.
- [23] 潘爱军, 刘秦玉. 北太平洋副热带西部模态水形成区海洋涡旋对冬季垂直混合过程的影响[J]. 科学通报, 2005, 50(14): 1523-1530.
Pan Aijun, Liu Qinyu. The effect of the ocean eddy formed in subtropical western mode water in the North Pacific on the vertical mixing process in winter[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(14): 1523-1530.
- [24] 方雪娇, 王彩霞, 徐佳佳. 南海温跃层深度的季节和年际变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2013(3): 45-55.
Fang Xuejiao, Wang Caixia, Xu Jijia. Seasonal and interannual variations of the thermocline depth in the South China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2013(3): 45-55.
- [25] 施平, 杜岩, 王东晓, 等. 南海混合层年循环特征[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 10-17.
Shi Ping, Du Yan, Wang Dongxiao, et al. Annual cycle of mixed layer in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2001, 20(1): 10-17.
- [26] 吴日升, 郭小钢, 李立. 1998 年冬季南海的海洋水文特征与环流[J]. 海洋学报, 2002, 24(S1): 142-153.
Wu Risheng, Guo Xiaogang, Li Li. Winter hydrographic condition and circulation of the South China Sea in 1998[J]. Haiyang Xuebao, 2002, 24(S1): 142-153.

The seasonal variation of the thermocline and its formation mechanism in the sea area around Nansha Islands in 2013

Tian Yongqing^{1,2}, Huang Honghui², Gong Xiuyu², Yu Shaomei², Jing Chunsheng¹, Gao Lu¹

(1. *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China*; 2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment/Key Laboratory of Open-sea Fishery Exploitation, Ministry of Agriculture, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China*)

Abstract: With the survey and remote sensing data, we revealed the seasonal characteristics of the thermocline in the sea area around Nansha Islands sea area in 2013. Specifically, the mean value of the thermocline upper-bounds depth was almost the same in spring, summer and winter, which was around 45 to 47 m, and it was maximum in autumn which was as deep as 60 m. For the thermocline thickness, in the seasons of summer, autumn and winter it demonstrated almost the same mean value ranging from 85 to 87 m, while a slightly smaller value of 78 m was found in spring. The mean value of the thermocline intensity was almost the same throughout the year from spring to winter, which ranged from 0.13 to 0.15°C/m. The formation mechanism of such seasonal characteristics of thermocline upper-bounds depth was also revealed. In spring, it was deep in the west whereas shallow in the east. This is because that the western area was controlled by relatively low net heat fluxes, high wind speeds and the negative wind stress curl, and it is also influenced simultaneously by the mesoscale warm eddy and the anticyclonic circulation from the coastal area off the eastern Indo-China Peninsula; contrarily, the eastern area was controlled by relatively high net heat fluxes, low wind speed as well as the Ekman pumping effect induced by the wind stress curl. In summer, the depth was almost uniform from west to east. It was because that, in the north of 10°N, the wind-induced vortex mixing, though being strong, was undermined by the Ekman pumping, whereas in the south of 10°N the wind-induced vortex mixing, which although was weak, was affected by the negative wind stress curl. In autumn, the mean depth was 15 m deeper than those in the other three seasons. The reason was that the sea area of Nansha Islands was controlled by a warm eddy which induced the anticyclonic circulation that subsequently deepened the thermocline upper-bounds depth through the convergence of upper layer seawater. When it came to winter, the Ekman pumping induced by the positive wind stress curl and the cyclonic circulation caused by the cold eddy worked together, which lifted up the mean value of the thermocline upper-bounds depth by 15 m compared with that in autumn.

Key words: the Nansha Islands sea area; thermocline; wind stress curl; Ekman pumping