

基于SODA3资料的西北太平洋海气边界层 主要特征及相关性分析

王洪兵^{1,3}, 张高英², 齐琳琳³, 刘健文²

(1.解放军理工大学, 江苏 南京 211101; 2. 61741 部队, 北京 100094;
3. 空军研究院战场环境研究所, 北京 100085)

摘 要: 基于SODA3.3.1海洋数据集2011—2015年逐月和逐5 d平均资料,对西北太平洋海域表层和次表层海温、混合层深度、风应力及风应力旋度的分布特征进行了分析,使用相关系数和相关矩方法分析了海温与混合层深度、风应力旋度的相关关系及变化特征。结果表明:西北太平洋表层海温在赤道附近存在冷中心;混合层深度呈北高南低分布,在黑潮延伸体以南有两个极大值中心;风应力秋冬季方向偏北且取值较大(冬季为全年最大),春季方向偏西,夏季方向偏南,两季风应力较小,西北太平洋表层海温与混合层深度在大部海域呈负相关,冬夏两季相关系数较高,在赤道附近相关系数下降,厄尔尼诺年下降趋势小,拉尼娜年下降趋势大,次表层海温与混合层深度大部呈正相关,黑潮流域呈负相关,相关区域主要位于15°N以北。表层海温与风应力旋度相关区域主要位于15°N以北,呈正相关,1—3月份和7—10月份相关性较高,次表层海温与风应力旋度相关区域分布零散无规律。

关键词: 西北太平洋;海温;混合层深度;风应力;相关关系

中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)01-0064-16

1 引言

西北太平洋西临亚洲,北连浅而窄的白令海,并通过白令海峡与北冰洋沟通^[1],不仅生物资源丰富,而且地理位置优越,具有重要的政治、经济、军事地位^[2]。海洋系统作为一个有机的整体,各种海洋现象及物理过程相互影响相互联系。海洋上混合层是大气与海洋之间动量、热量和质量交换的中介,海表海温是海洋影响大气的关键变量,海面风应力则反应了大气对海洋的动力效应,它们对海洋上混合层的动力及热力过程有重要影响。对西北太平洋海温、混合层和风应力的研究对于研究海气相互作用、发展耦合模式和其他海洋研究工作都有很强的支撑意义,对于各项海上活动特别是军事活动也具有重要的参考价值。

很多学者针对西北太平洋海洋特征进行了大量的研究,海温方面吴凡等^[3]使用NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration,美国国家海洋和大气管理局)卫星海表海温产品研究发现西北太平洋海表海温存在显著的约13 a周期的年代际模态和2~5 a的类厄尔尼诺模态;杜华栋等^[4]发现赤道太平洋次表层海温存在显著的ENSO模态;高飞等^[5]和陈秋颖等^[6]分别利用Argo网格化产品和SODA(Simple Ocean Data Assimilation,海洋简单数据同化资料数据集)资料描述了进行西北太平洋海域海温的季节分布特征;吴迪生等^[7]、林玉英等^[8]和许金镜^[9]分别研究了西北太平洋海温与内地降水和大气系统的关系;Huang等^[10]和Salinger等^[11]的研究结果显示西北太平洋海温有持续上升趋势。混合层方面,安玉柱等^[12]使用Argo资料分析了全球大洋

收稿日期: 2017-03-30; 修回日期: 2017-06-04。

基金项目: 国家“863”计划项目(2012AA091801); 国家自然科学基金青年基金(41005030, 41205044)。

作者简介: 王洪兵(1989-),男,硕士在读,主要从事海洋气象研究。E-mail: 841308724@qq.com

通讯作者: 齐琳琳(1973-),女,高级工程师,博士,主要从事海洋气象研究。E-mail: 2304820835@qq.com

的混合层深度分布,发现混合层深度普遍呈现出冬季深,夏季浅的特征,赤道西北太平洋为障碍层多发地区;李泓等^[13]分析了太平洋区域混合层深度年际变率的地理分布和季节变化,发现在赤道西北太平洋存在纬向高变率带;李丽平等^[14]对热带太平洋地区混合层深度的年际异常进行了分析,发现部分月份混合层深度异常与ENSO事件密切相关。风应力方面,吴海燕等^[15]使用模式表明风应力对于赤道太平洋有显著影响;李克让等^[16]使用COADS(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set,综合海洋-大气资料集)的风场资料,计算并分析了西北太平洋风应力场的纬向和经向逐月变化特征;杨清华等^[17]基于GSSTF(Goddard Satellite-based Surface Turbulent Fluxes)资料分析发现西北太平洋风应力存在非常明显的年周期和天气尺度周期,并且存在显著的低频震荡。3种要素的相互关系也是一个研究热点,其中热带太平洋地区的风应力对SST有重要作用,热带西北太平洋地区的风应力异常对ENSO循环有很重要的作用^[18],姜鹏等^[19]利用FSU资料分析了热带太平洋地区风应力异常场结构与ENSO的联系;姜霞^[20]研究了南海地区海表温度与混合层深度及风应力旋度的相关关系。

考虑到目前针对西北太平洋海洋特征的研究仍有诸多不足,如次表层海温、混合层深度及风应力的月份特征研究较少,在月乃至更小尺度上各要素相关关系的研究也很少。为此,本文利用最新发布的高时空分辨率海洋再分析SODA3资料,着重对西北太平洋表层和次表层海温、混合层深度以及风应力月变化特征,以及海温与混合层深度、风应力间的相关关系作了分析,旨在细化揭示西北太平洋海洋特征基础上,进一步探讨要素间的相关性和的变化规律,为提高海洋预报保障能力奠定基础。

2 数据与方法

2.1 数据

本文使用的是由马里兰大学和德州农工大学合作开发的SODA数据集。参与同化分析的主要包括世界海洋数据库(World Ocean Database, WOD)的温度和盐度廓线数据、实测温度数据、大西

洋热带-海洋浮标组群(TAO/Triton)以及Argo浮标的观测数据,以及COADS的混合层温度数据、再分析海表风场数据、全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)的月平均降水通量数据、卫星海平面测高仪测得的海平面高度和改进的红外甚高分辨率辐射仪(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)测得的海表温度数据等。该数据集第二版(SODA2)已在国内外相关研究中已经得到广泛运用^[5-6,17]。本文使用的数据集版本为3.3.1^[21-22],较之前的SODA2有较大改进,不仅在同化方法上对误差修正进行了更新,而且数据集的年限更新到了2015年,并且在原只提供月平均数据基础上还增加了5 d平均数据,更有利于海洋要素分析的精细化。考虑到SODA2资料的可靠性已经得到国内外学者的广泛认可,而SODA3属于SODA2基础上的优化和发展,所以可以认为SODA3资料是可靠的。该资料空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,经纬度范围是 $0.25^{\circ} \sim 359.75^{\circ} \text{E}$, $74.75^{\circ} \text{S} \sim 89.75^{\circ} \text{N}$,垂直方向上的各层之间是不等间距的,一共有40层,数据集提供的变量包括海温(temp)、盐度(salt)、纬向海流速度(u)、径向海流速度(v)、垂直海流速度(w)、密度(prho)、纬向海表风应力(taux)、经向海表风应力(tauy)、海表面高度(ssh)、混合层深度(包括3种mlt、mlp、mls,其中mlt和mls是分别基于海温和盐度判据得到的,mlp则是基于密度(浮力)判据得到,判定标准为选择比表层浮力小 0.0003 m/s^2 的深度为混合层深度)、海表净热通量(net_heating)、盐通量(salt_flux_total)、海底压(anompb)。本文主要使用了2011—2015年的逐月数据和逐5 d数据,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,变量使用了海温、混合层深度和风应力3种,其中混合层数使用的是mlp。

本文研究区域为 $0^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$, $120^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$,研究深度为5 m(代表表层,下文直接用表层表述)和122 m(代表次表层,下文直接用次表层表述),因海洋表层10 m各项要素分布基本均匀,而选取5 m作为表层可以有效避免“淡盖”现象^[12],而之所以同时选取122 m作为研究对象,是因为在研究区域内,100~200 m深度恰好为北太平洋次表层水和南太平洋次表层水的分布深度,而且西北太平洋次表层海温特别是暖池区次表层海温与厄尔尼诺以及其

他天气系统有密切的关联,特别是120 m深度是暖池区垂向海温距平最大的层次^[23]。

2.2 相关性分析方法

2.2.1 相关系数

度量两个连续型变量的关系的密切程度,常常使用相关系数,它又称皮尔逊相关系数。对两个连续型的大气变量 X 和 Y ,相关系数计算式为:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (1)$$

两个变量相关是否密切还需要做显著性检验。这里使用如下统计量进行检验:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2)$$

2.2.2 相关矩

相关矩是描述两个连续型变量在某时刻的瞬时相关关系密切程度的统计量^[24]。相关矩定义为:

$$c_i = x_{zi} y_{zi} \quad (3)$$

式中: x_{zi} 和 y_{zi} 分别表为两变量第 i 个样品标准化距平值,该统计量的平均值就是一般的相关系数,该统计量的标准差反映了两个序相关矩围绕相关系数的平均变幅。

3 海洋要素特征分析

本节中使用的是2011—2015年的逐月数据,将对应月份平均后得到的逐月数据进行分析。分析中采用季节变化与月变化相结合的方法,四季划分按如下标准:冬季12—2月,春季3—5月,夏季6—8月,秋季9—11月。为了方便描述,按照黑潮区域(28°N以北)、中部区域(17°~28°N)和赤道区域(17°N以南)来指代各区域。

3.1 海温特征

图1给出了表层流场和海温场分布,可以看到,整个西太主要存在两支流系且年变化较小:南部以北赤道流系为主;北部以黑潮流系。北赤道流系由北赤道流和北赤道逆流以及几个涡旋(棉兰老涡旋和哈马黑拉涡旋)组成,其中北赤道流与北赤道逆流在5°~10°N之间形成了一个气旋式环流。黑潮流系主要由黑潮、黑潮延伸体以及一系列涡旋组

成。对于海温场可以看到,冬季(12—2月)3个月温度场极为接近,从海温场上看,海温由南至北逐渐降低,受太阳辐射影响显著。赤道区域常年为28℃以上暖水(赤道表层水)所占据,是西北太平洋海温最高和梯度最小的海域,东侧等温线沿纬线分布,西侧转为竖直分布。在7°N,133°E附近存在一个气旋式环流结构,对应着棉兰老涡旋的位置。中部区域为过渡带,在整个西北太平洋梯度最大,130°E以东等温线平直分布并略向东北倾斜,25°N附近存在一个等温线密集区,梯度最大超过1℃。130°E以西海温场较为复杂,存在多个冷、暖水舌和冷中心。黑潮区域是西北太平洋海温最低的海域,等温线多成竖直分布,经向梯度较大,且存在一个冷中心(33°N,137°E),对应着黑潮延伸体南侧的涡旋。而春季(3—5月)海水由南向北开始增温,标志是暖水的向北扩张。赤道区域首先增温,同时其海温梯度进一步变小,5月份,整个海域大部海温处于29℃以上。随着南部暖水向北蔓延,中部区域的海温梯度密集区也在逐渐向北收缩,6月份28℃等温线已经到达25°N附近,中段等温线呈现向北弯曲的态势,形成了一条较宽阔的暖水舌,西侧的海温场分布仍表现出强烈的黑潮特征。黑潮区域海温场形态没有显著变化。到了夏季(6—8月份),随着海水进一步增温,整个西北太平洋的海温场形态趋于一致。赤道区域为均匀的暖水区,海温在29℃以上,中部区域海温梯度密集区已经消失,到8月份,中部区域完全被暖水占据,冷暖水舌和冷中心近乎消失,已经无法表征黑潮的踪迹。黑潮区域的海温梯度显著下降,但在日本以南近岸的一片狭长区域仍然维持着密集的海温梯度,并且存在明显的暖水舌。秋季(9—11月份)作为由夏季向冬季的过渡,海水开始降温,其海温场的变化与春季呈现出反相的特点。

对于次表层流场和海温场而言(见图2),次表层流场与表层极为一致,海温相对表层形态更为复杂,一个显著特征是在赤道区域出现了一个较强的冷中心,中心位置位于7°N,132°E,冷中心北侧存在一条高温带,海温的分布也趋于规律,表现为由南向北逐渐降低的态势。冬季的次表层海温持续降低,等温线大致沿纬线分布,但比表层曲折,黑潮区域冷暖水舌的形态仍然非常明显,日本沿岸等温线

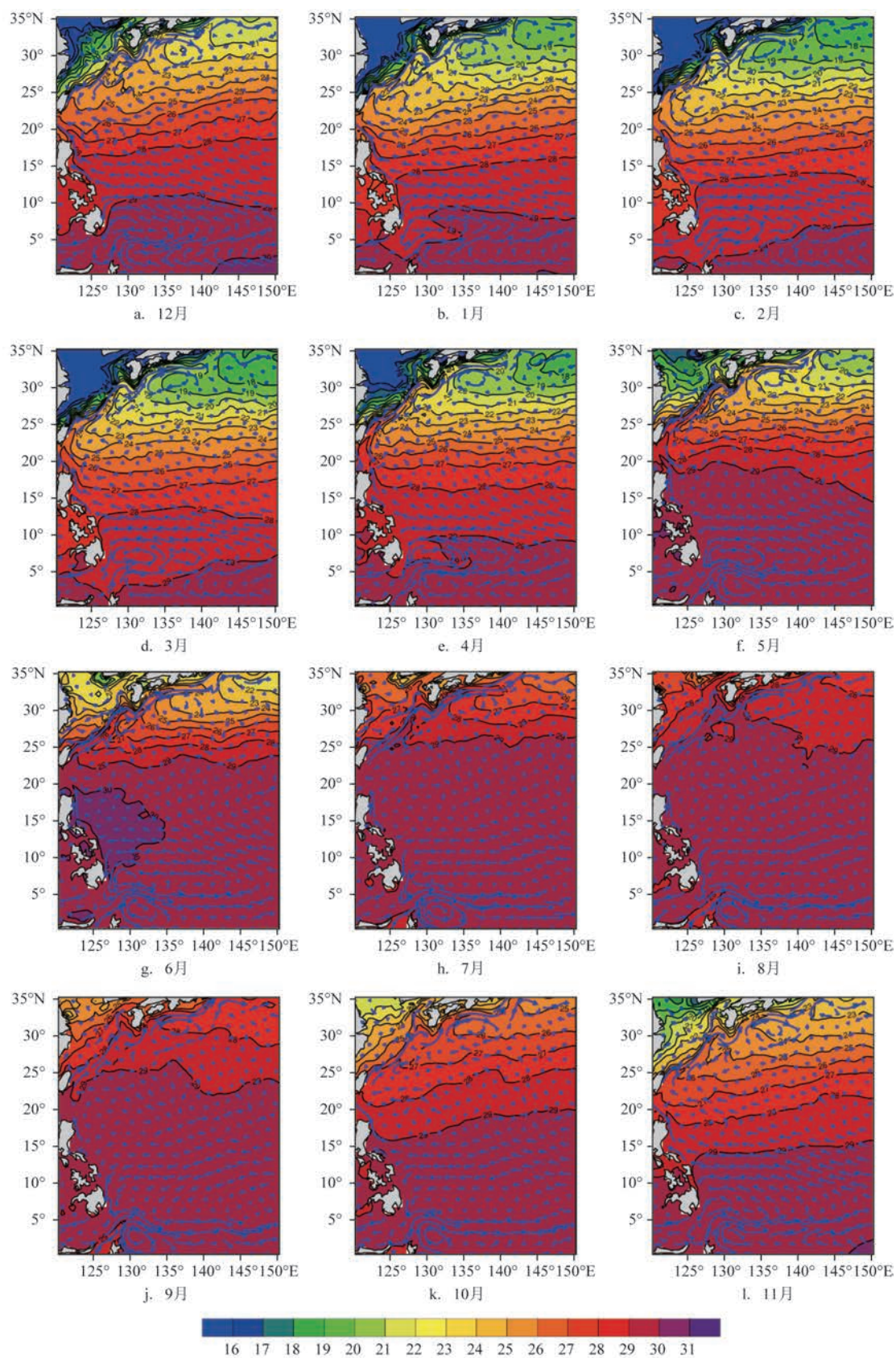


图1 2011—2015年西北太平洋表层平均海温逐月分布(单位:℃,阴影表示海温,箭头表示流场)

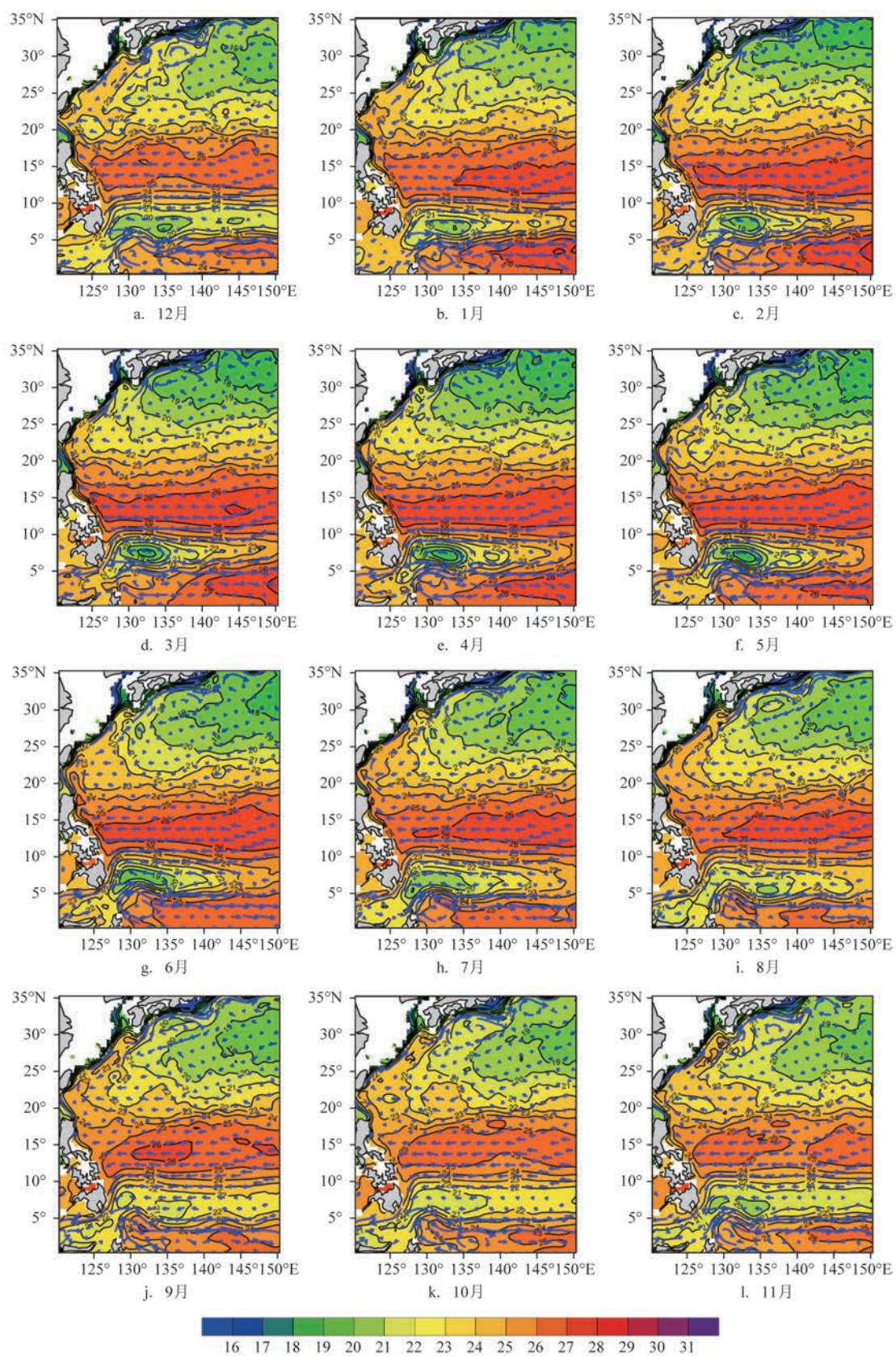


图2 2011—2015年西北太平洋次表层平均海温逐月分布(单位:℃,阴影表示海温,箭头表示流场)

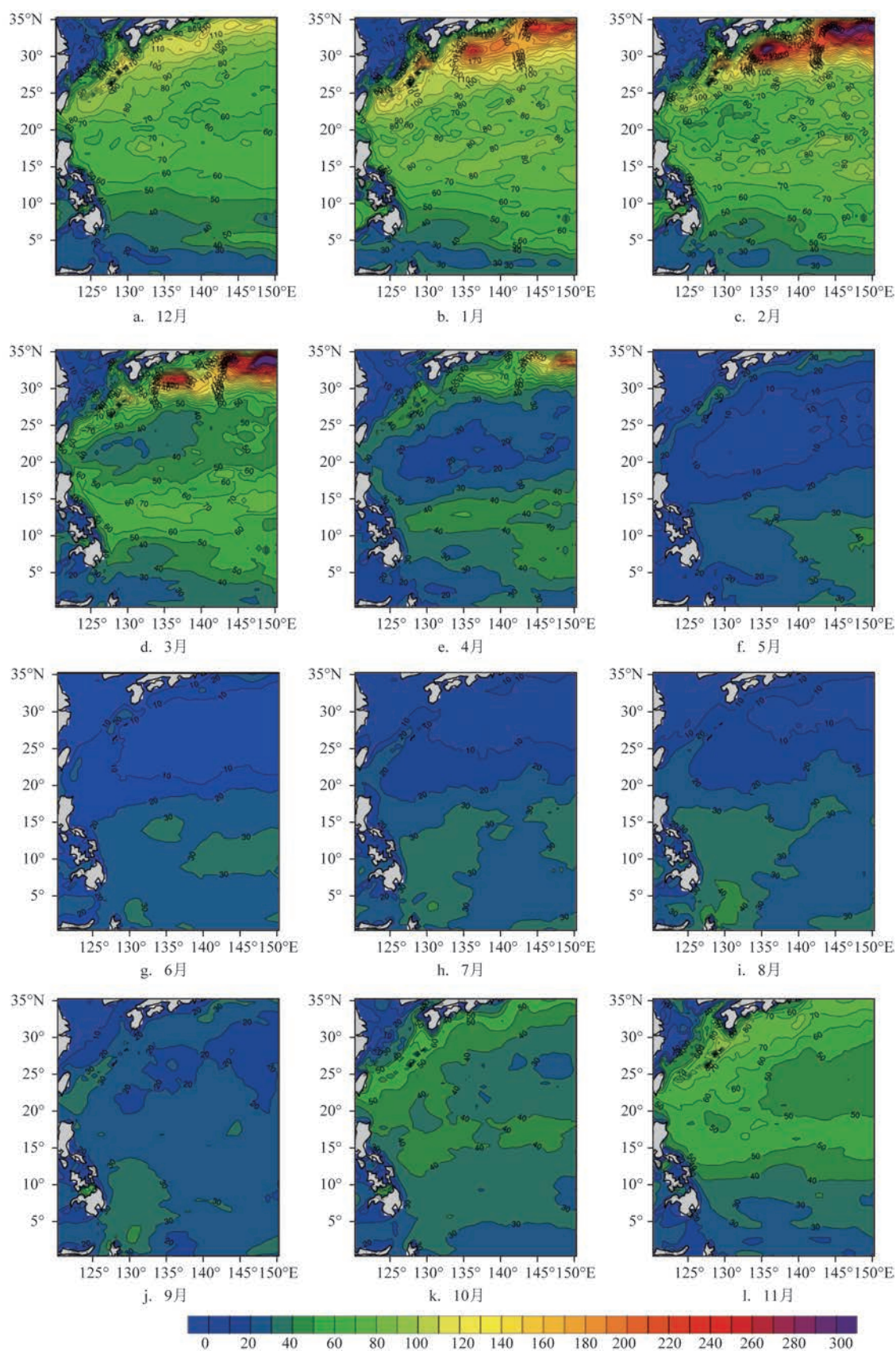


图3 2011—2015年西北太平洋混合层平均深度逐月分布(单位:m)

的分布形态也与表层极为接近,这说明次表层海温场的主要影响因素仍为太阳辐射和流场,但是太阳辐射影响出现了减弱,赤道冷中心最低海温为 22°C (2月份),整个海域最高海温出现在赤道冷中心南部东侧,为 28°C (1、2月份),最低海温出现在黑潮区域,为 18°C (2月份)。春季次表层海温达到了最低,而在分布形态上与冬季较为接近,极值海温也与冬季一致,主要变化表现在赤道冷中心出现了进一步的增强,这也是全年冷中心最强的时期,中心最低海温低于 21°C 。夏季次表层海温开始回升,一是表现在冷中心强度有明显减弱同时范围向西扩展,形成了一条低温带,中心海温升到了 23°C (7、8月份);二是表现在黑潮区域最低海温也出现了略微回升(升到了 19°C)。秋季海温的变化比较复杂,一方面是随着海温的上升,冷中心继续减弱,而东侧逐渐形成了一个新的闭合冷中心,整个低温带形成鞍型结构,同时黑潮区域最低海温继续上升到了 20°C ;另一方面冷中心北侧的高温带出现了显著的削弱,表现为高于 27°C 的水团面积大幅减小。

综合分析可知,西北太平洋海域表层与次表层海温的分布主要因素都是太阳辐射和流场,但表层海温受太阳辐射影响更大,分布更为规律,而次表层流场的影响更加显著,温度场分布也更加复杂。

3.2 混合层深度特征

海洋与大气之间的质量、动量和能量交换都是通过混合层进行的,而混合层深度直接反映了参与海气相互作用的热含量和动量大小。图3给出了西北太平洋混合层深度的逐月特征。可以看到,冬季(12—2月份)混合层深度为全年最深,总体表现为由南向北逐渐加深分布,其中,赤道区域南部(10°N 以南)为低值区,最小值在30 m以内,黑潮区域为高值区,并且存在两个高值中心,为整个西北太平洋最大值,中间区域呈均匀分布。这种分布特征与海温和流场都具有密切联系。12月份,混合层深度分布均匀,南北梯度较小。1—2月份,黑潮区域混合层深度持续加深,到2月份,最大值超过300 m,为整个西北太平洋全年混合层深度最大值。而春季(3—5月份)混合层深度开始迅速减小,同时南北梯度随之减小,趋于均匀分布。3月份, $17^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 之间混合层深度显著减小,中心最小值达到30 m以

内,与赤道低值区相当,黑潮区域混合层深度也有显著减小,赤道区域变化则不明显,整个西北太平洋混合层深度呈现为深浅交错的分布形态。4—5月份,混合层深度及其梯度继续减小,黑潮区域高值区消失,北部低值区扩大,深度进一步减小,整个西北太平洋呈南深北浅分布,且梯度较小(30 m以内)。到了夏季(6—8月份),其分布形态与春季的5月基本一致,3个月的分布非常接近,南北梯度很小,也是全年中混合层最浅的季节,这种分布形态与这一时期暖水覆盖整个洋面直接相关。进入秋季(9—11月份),混合层深度开始加深,分布上也逐渐转为北深南浅。9月份,混合层尚未出现明显改变,仍表现为夏季分布形态。10月份,黑潮区域混合层深度开始加深,其他海域没有显著变化,11月份,中部区域混合层深度也开始加深,开始建立起北深南浅的分布态势。

3.3 海面风应力特征

相对海面风,风应力更有效表示出了大气对海洋的动力效应,其中,风应力旋度即为风应力涡度,假若风应力是无旋的,海洋环流将消失^[12],因此,风应力旋度可以很好地反映出风场运动通过Ekman抽吸影响海水的垂直运动,从而对海洋三维运动产生重要影响。通过分析风应力和风应力旋度的逐月分布(见图4)不难发现,冬季(12—2月),西北太平洋风应力偏南,以 24°N 为界,北侧风应力偏东南呈顺时针走向,南侧风应力方向偏西南转为逆时针走向,受强大的冬季风影响,冬季的风应力也相应较大,从对应的风应力旋度场来看,大致可以 15°N 为界,在此以北一直到黑潮延伸体流域风应力旋度为负,黑潮延伸体流域的风应力旋度为正值, 15°N 以南大部区域风应力旋度为正,而在棉兰老涡旋附近分布有小范围的负值区,1月份在黑潮区域($25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间)存在一个较大的负旋度区,在日本近岸则存在正旋度区。而春季(3—5月),风应力强度迅速减小,并且方向逐渐转为了偏北。风应力旋度大致仍表现为北负南正分布,而黑潮延伸体流域的正值区和棉兰老涡旋附近的负值区分别有所扩大,强度上看负旋度最大值出现在了赤道附近,旋度最大值出现在了黑潮延伸体流域,中间大部海域强度都较小,夏季(6—8月),风应力以偏南为主,

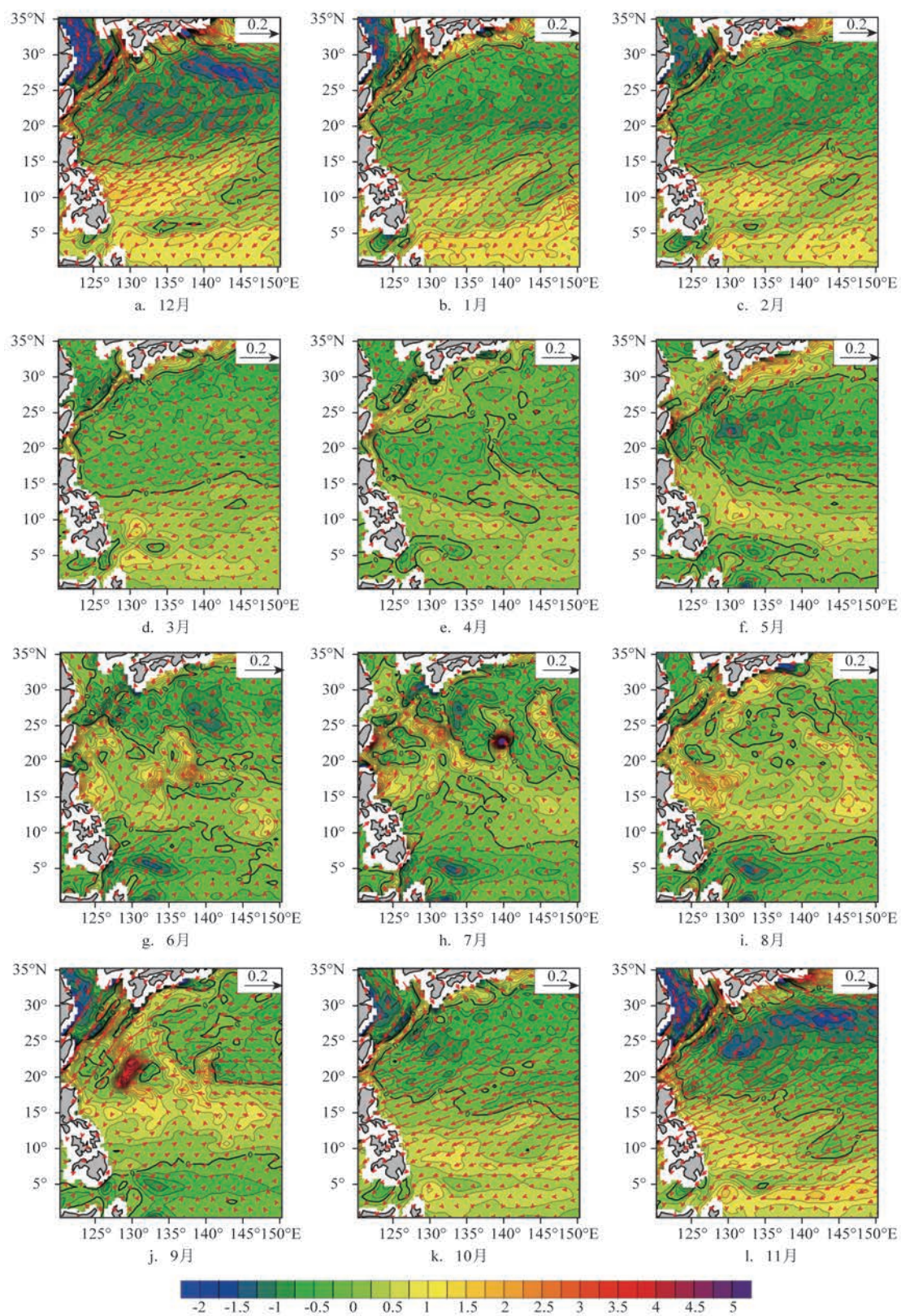


图4 2011—2015年西北太平洋平均风应力及风应力旋度逐月分布(阴影表示风应力旋度,箭头表示风应力)

呈逆时针走向。从风应力旋度来看,10°N以南以负旋度为主,并且在棉兰老涡旋附近存在一个极大值区,10°~20°N则以正旋度为主,同时在中间靠东一侧海域分布多个零散的极大值,其中在5月份24°N,140°E存在一个显著的极大值中心。20°N以北同样以负旋度为主。到了秋季(9—11月),风应力向冬季形态过渡,逐渐由偏南转向偏北。风应力旋度的分布来看,随着南部负值区的收缩消失,整个海域再次呈现为北负南正的形态,其中9月份分布仍与夏季相近,在20°N,130°E附近存在一个显著的极大值区。

综合上述分析可见,西北太平洋要素分布由南至北地域差异显著,极值中心主要位于赤道和黑潮流域附近,这除了太阳辐射的影响以外,南北两条

流系也起到了重要作用。对比前人研究,对于各要素主要分布与时间变化规律基本一致,而针对暖池、黑潮等重点区域,本文更加细致描绘了其空间分布以及月变化特征,同时也揭示了次表层海温的年循环特征。

4 要素间相关性分析

为了更深入揭示海气相互作用过程中热力过程与动力过程以及混合层之间的联系,在上述特征分析基础上,我们还选取了2011年、2012年、2013年和2015年4 a逐5 d数据进行了海温与混合层深度、海温与风应力旋度的相关性分析。这4个年份中2012年和2013年代表正常年份,2011年和2015

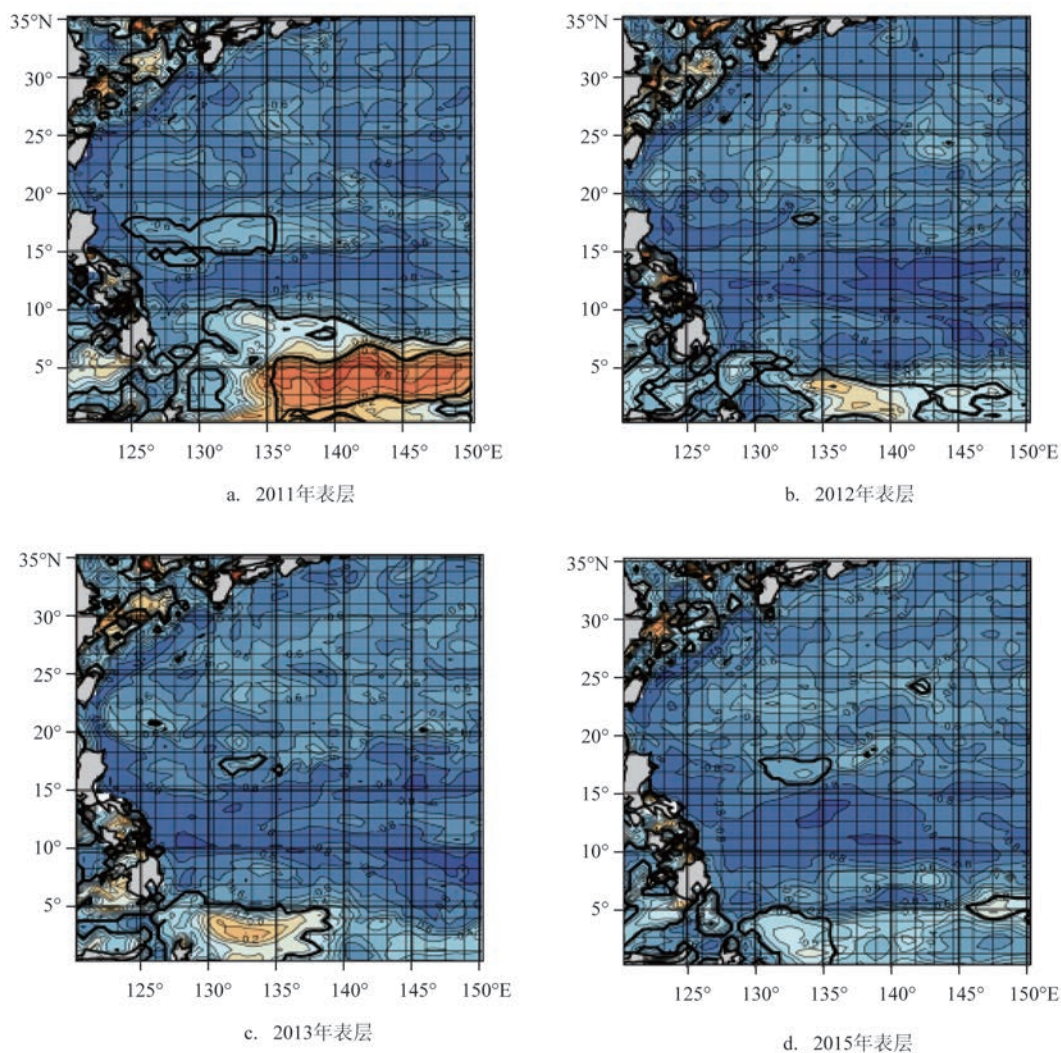


图5 西北太平洋海温与混合层深度相关系数分布(网格部分表示通过显著性95%检验)

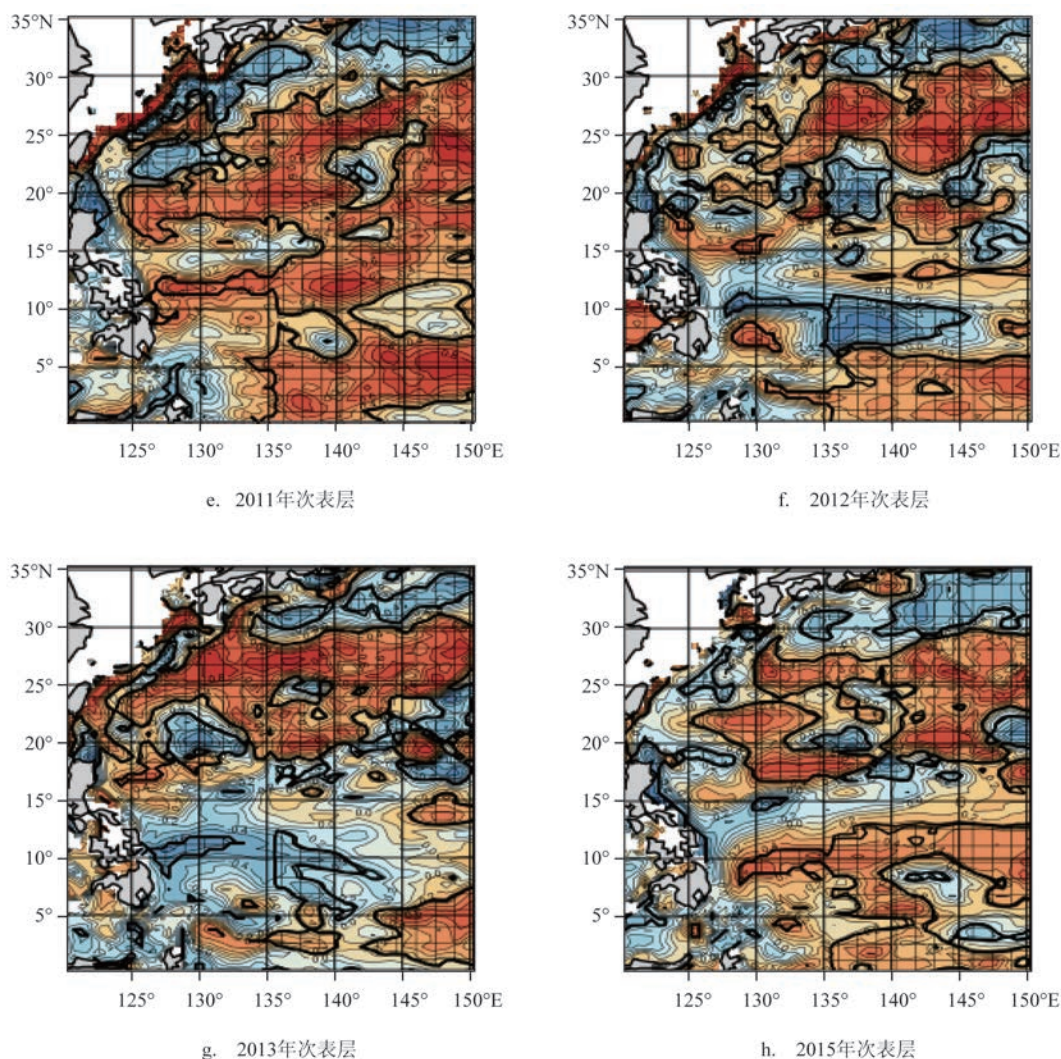


图5(续)

年分别为拉尼娜年和厄尔尼诺年,此外需说明的是之所以选择风应力旋度是考虑到风应力旋度通过作用Ekman抽吸能够更直接的影响到海水温度的变化。

4.1 海温与混合层深度相关分析

图5给出了4个年份海温与混合层深度相关关系的分布。可以看到,西北太平洋表层海温与混合层深度在大部分海域以负相关为主(相关系数基本都超过-0.6),这是因为海温的降低有利于混合层的加深。而在赤道附近海域,相关性与年份相关联,其中正常年份(2012年、2013年),在5°N以南为正相关,相关性在厄尔尼诺年要弱一些,而在拉尼娜

年则要强很多,出现了一个显著正相关的区域(8°N以南),中心相关系数超过0.6,结合海温分布特征来看,正相关区域应该与气旋式环流有关。此外,在15°~20°N之间存在小片区域未通过显著性检验,区域范围正常年份很小,而在厄尔尼诺年稍大,拉尼娜年最大。次表层海温与混合层深度的相关性主要表现在17°N以北海域,以正相关为主,这在各个年份是一致的,而在17°N以南相关性在不同年份差异较大,显著相关区域较小,只有在2011年表现出较大范围的显著正相关。

为了更进一步揭示海温与混合层深度相关关系随时间的变化,我们按照以A(31.75°N, 135.25°E), B(13.25°N, 140.75°E), C(4.25°N, 142.25°E)为中心,

选取了 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 大小的3个代表性区域分别计算了相关矩。图6给出了4个年份西北太平洋海表温度与混合层深度相关矩随时间的变化,可以看到,区域A不同年份变化没有规律,区域B与C在不同年份均表现出相近的变化规律,这与相关系数一致,区域B和C在一年中存在两个时段取值较大:区域B为1—3月份(值较大)和5—9月份,区域C为1—3月份和7—9月份(值较大)。图7给出的是次表层海温与混合层深度的相关矩变化,从区域A、B来看,次表层的相关性随年份变化较大,并无显著规律,

区域C相对规律性显著一些,且其变化与表层存在着一定差别:12月份和1月份密切程度都比较高(两个时段相关矩绝对值都较大),相关性恰好相反。

4.2 海温与风应力旋度相关分析

图8给出了4个年份西北太平洋表层海温以及次表层海温与风应力旋度的相关系数分布。可以看到,所有年份表层海温与风应力旋度在 20°N 以北表现出了大范围的正相关,同时在 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$,

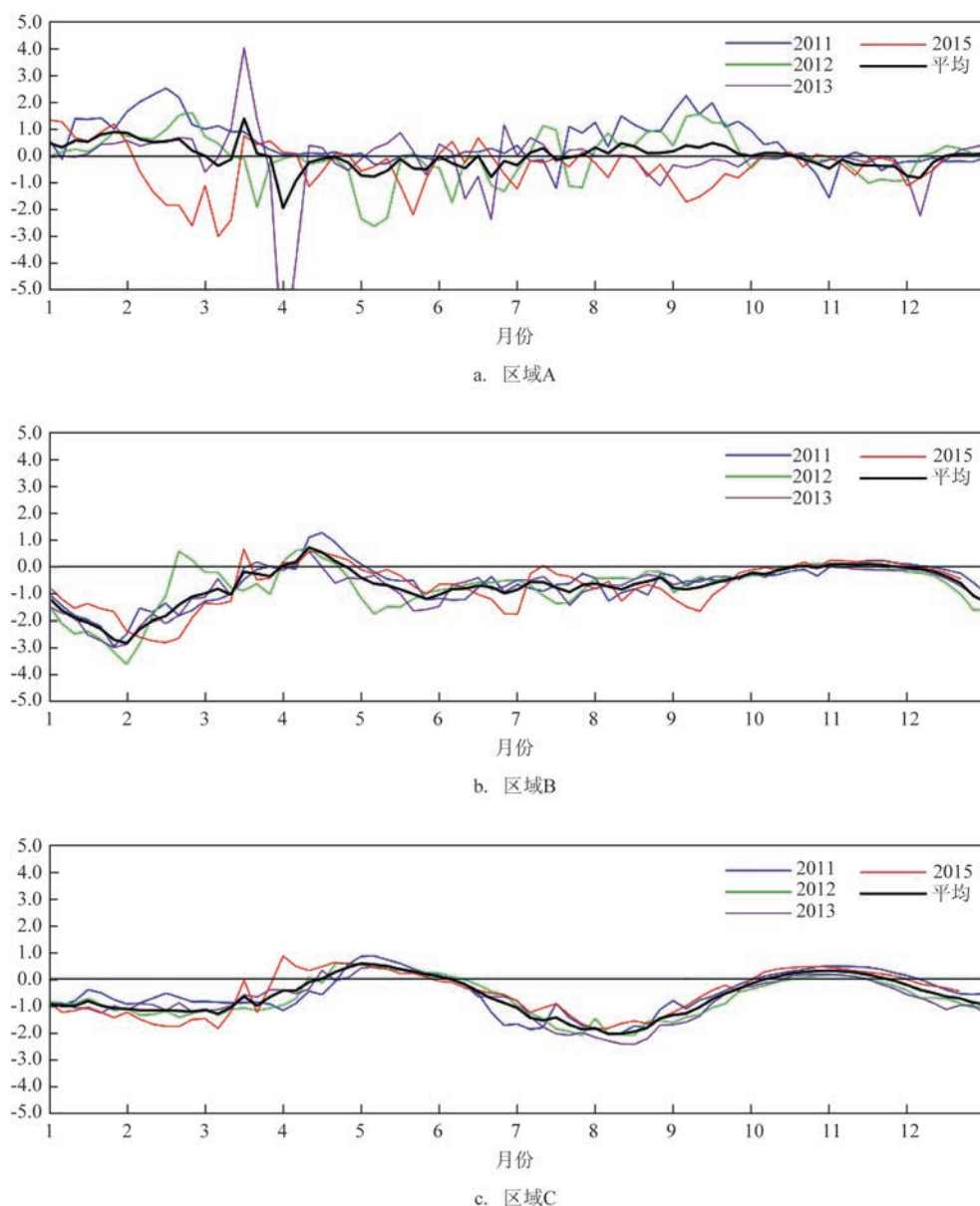


图6 西北太平洋表层海温与混合层深度相关矩随时间变化

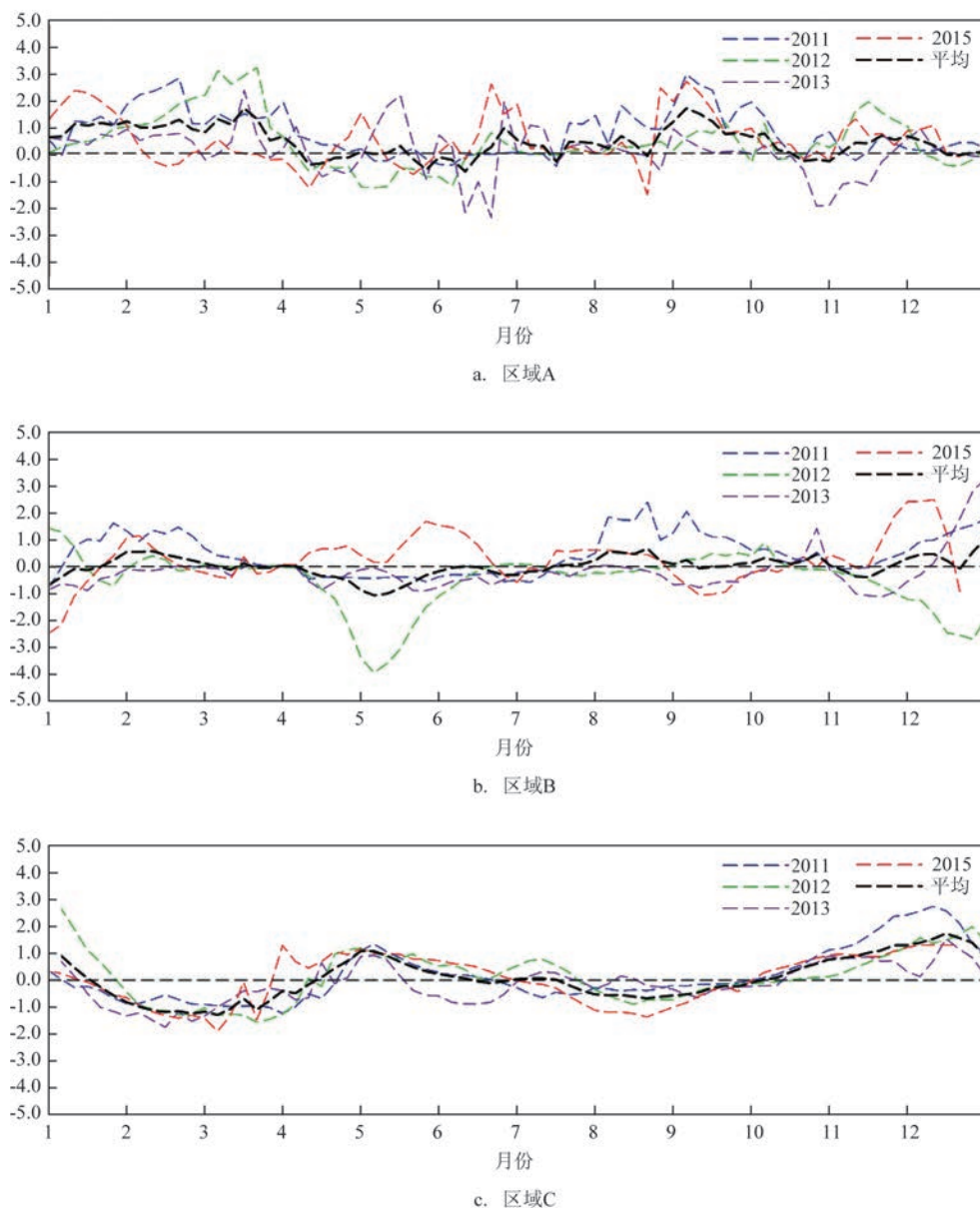


图7 西北太平洋次表层海温与混合层深度相关矩随时间变化

135°~145°E区域,异常年份的相关性明显低于正常年份。而在10°N以南相关性则表现的缺乏规律。次表层海温与风应力旋度的相关性在15°N以北海域相关区域非常零散杂乱,这在不同年份均是如此,而在15°N以南,各个年份差异较大,其中相关范围在异常年份要稍大于正常年份。按照上文方法,结合海温与风应力旋度相关性的分布特点,我们选取了北部黑潮区域表层海温(中心点:25°N,140°E)进行相关矩的分析,结果见图9。从图9可以看到,不同年份风应力旋度与海温的相关

性变化比较大,虽然如此,相关矩高值大致还是集中出现在1—3月份和7—10月份,其余时段相关矩取值都很小,结合前文分析可知,这两个时段也是海面风应力相对较大的时期。

本节针对西北太平洋海域海温与混合层深度、风应力旋度进行了相关分析,所得结果这与姜霞^[20]在南海海域得到的结论相符合,同时选取了普通年份与异常年份(厄尔尼诺、拉尼娜年)进行对比,结果表明3种要素之间存在着显著的相关性。

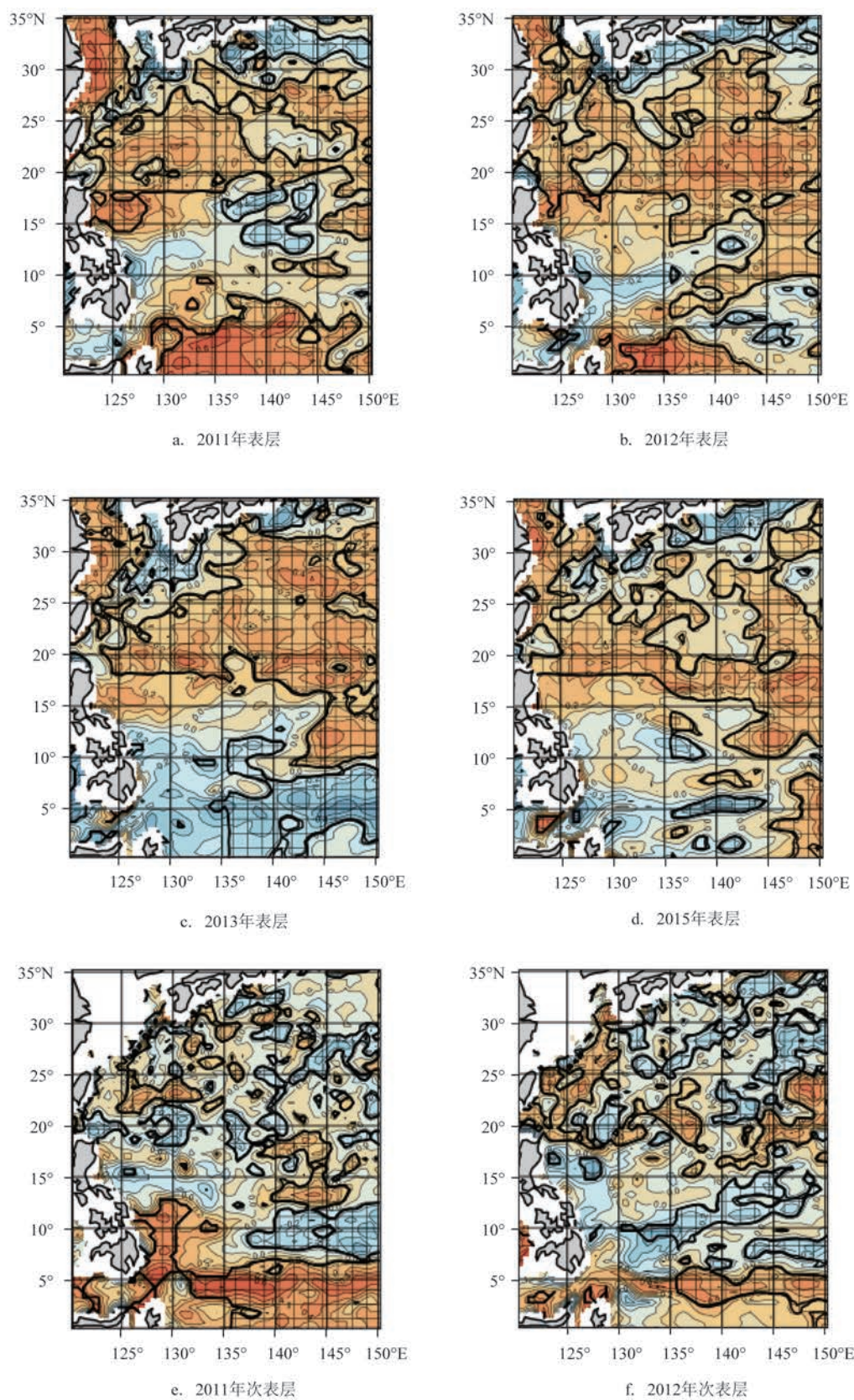


图8 西北太平洋海温与风应力旋度相关系数(网格部分表示通过显著性95%检验)

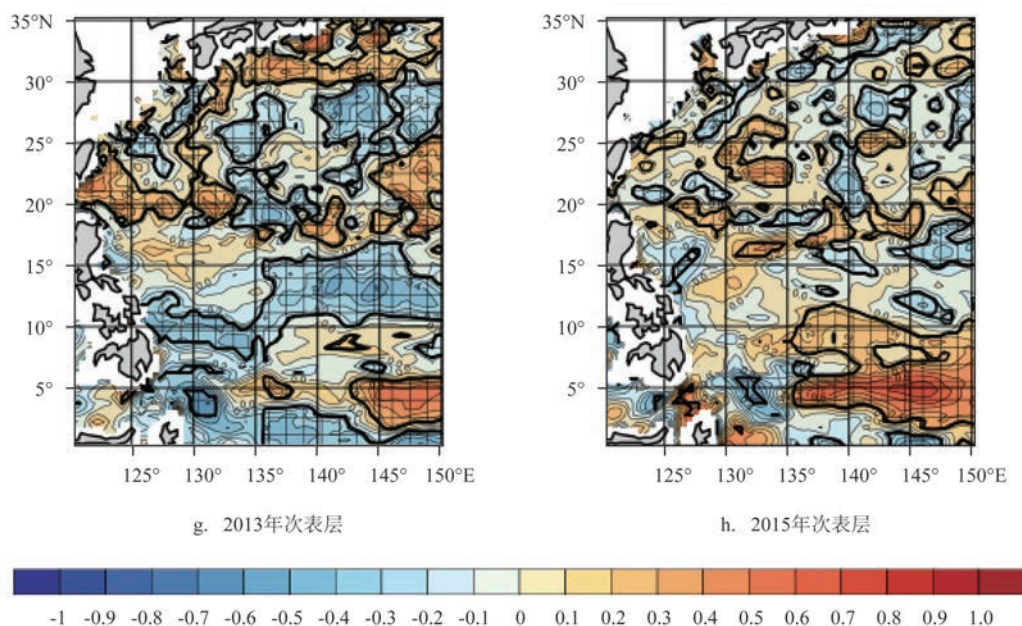


图8(续)

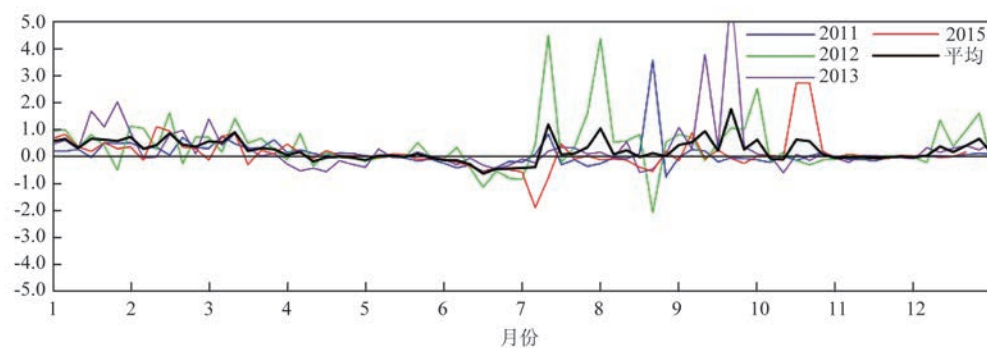


图9 西北太平洋海温与风应力旋度相关矩随时间变化

5 结论

本文基于 SODA3.3.1 海洋数据集 2011—2015 年逐月和逐 5 d 平均资料开展了西北太平洋海域表层和次表层海温、混合层深度、风应力及风应力旋度的分布特征分析,并在此基础上探讨了要素间的相关变化特征。认为:

(1)西北太平洋表层和次表层海温季节特征明显,表层海温表现为南高北低,中间密南北疏的分布特征,次表层与表层特征相似,并且在赤道附近

存在一个较强的冷中心。海温分布主要受到太阳辐射和流场影响;

(2)西北太平洋混合层深度表现为南浅北深的形态,在黑潮延伸体南部存在两个极大值中心,全年混合层深度在夏季最小,冬末春初达到最大;

(3)西北太平洋风应力季节变化显著,秋冬季方向偏北,这两季风应力较大,冬季为一年中最大,春季方向偏西,夏季方向偏南,这两季风应力较小。风应力旋度在冬季呈北负南正分布,夏季呈中间正南北负分布,春秋两季为过渡季节。最小值出现在 11—12 月(25°N 以北),最大值出现在夏秋季

的中部海域,黑潮区域全年为正值且取值较大;

(4)西北太平洋表层海温与混合层深度在大部海域呈负相关,冬夏两季相关系数较高,且纬度越高,年际变化越小。在赤道附近相关系数下降,下降趋势与海温有关,厄尔尼诺年下降趋势小,拉尼娜年下降趋势大,甚至出现显著正相关区域。次表层海温与混合层深度主要呈正相关,相关区域主要位于 15°N 以北,黑潮流域呈负相关,年际变化无显著规律;

(5)表层海温与风应力旋度相关区域主要位于 15°N 以北,呈正相关,1—3月份和7—10月份相关性较高,其他海域相关性不显著,次表层海温与风应力旋度相关区域分布零散无规律。

参考文献:

- [1] 张学宏. 西北太平洋海浪数值预报业务化系统[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [2] Accadia C, Zecchetto S, Lavagnini A, et al. Comparison of 10-m Wind Forecasts from a Regional Area Model and QuikSCAT Scatterometer Wind Observations over the Mediterranean Sea[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(5): 1945-1960.
- [3] 吴凡, 方明强, 管磊. 西北太平洋海表海温变化主成分分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2014, 44(3): 102-107.
- [4] 杜华栋, 李婧, 叶志敏, 等. 赤道太平洋次表层海温距平的EEOF分析及与厄尔尼诺的关系[J]. *海洋预报*, 2006, 23(4): 21-27.
- [5] 高飞, 张韧, 李臻, 等. 基于Argo网格产品资料的台湾以东海域海温场结构与温跃层特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2014, 33(1): 17-25.
- [6] 陈秋颖, 杨坤德. 西北太平洋海表海温的季节变化特征[J]. *电声技术*, 2010, 34(10): 65-68.
- [7] 吴迪生, 周水华, 张娟, 等. 太平洋—印度洋暖池次表层水温与南海夏季风爆发[J]. *海洋预报*, 2009, 26(4): 1-10.
- [8] 林玉英, 战淑芸, 杨淑瑞. 西北太平洋海温与影响我国北部海区冷空气的关系[J]. *海洋预报*, 1999, 16(2): 27-34.
- [9] 许金镜. 太平洋赤道附近海温与西太平洋副热带高压脊线北抬 25°N 关系的初步分析[J]. *海洋预报*, 2000, 17(1): 24-29.
- [10] Huang B, Liu Z. Temperature Trend of the Last 40 Yr in the Upper Pacific Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2010, 14(17): 3738-3750.
- [11] Salinger M J, Basher R E, Fitzharris B B, et al. Climate trends in the South-west Pacific[J]. *International Journal of Climatology*, 1995, 15(3): 285-302.
- [12] 安玉柱, 张韧, 王辉赞, 等. 全球大洋混合层深度的计算及其时空变化特征分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(7): 2249-2258.
- [13] 李泓, 李丽平, 王盘兴, 等. 太平洋混合层厚度(dml)年际异常的初步分析[J]. *南京气象学院学报*, 2003, 26(5): 646-652.
- [14] 李丽平, 靳莉莉, 王超, 等. 热带太平洋混合层深度的年际异常及其与中国夏季降水关系分析[J]. *热带气象学报*, 2010, 26(6): 659-666.
- [15] 吴海燕, 张铭, 李崇银. 热带太平洋对风应力拖曳系数响应的敏感性试验[J]. *海洋预报*, 2009, 26(2): 34-43.
- [16] 李克让, 林贤超, 吴忠祥. 太平洋风应力平均场的特征[J]. *地理学报*, 1996, 51(1): 25-32.
- [17] 杨清华, 张林. 西北太平洋表面风应力分布和周期特征分析[J]. *海洋预报*, 2005, 22(4): 36-45.
- [18] 严邦良, 张人禾. 热带西北太平洋风应力异常在ENSO循环中作用的数值试验[J]. *大气科学*, 2002, 26(3): 315-319.
- [19] 姜鹏, 吴洪宝. 热带太平洋风应力距平场的主振荡型分析[J]. *大气科学学报*, 2006, 29(2): 166-172.
- [20] 姜霞. 海洋动力过程对南海海面温度的影响[D]. 中国海洋大学, 2006.
- [21] Kumar P K D, Paul Y S, Muraleedharan K R, et al. Comparison of long-term variability of Sea Surface Temperature in the Arabian Sea and Bay of Bengal[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, 3: 67-75.
- [22] Carton J A, Chepurin G A, Chen L. An updated reanalysis of ocean climate using the Simple Ocean Data Assimilation version 3 (SODA3), manuscript in preparation[Z]. 2016.
- [23] 陈锦年, 何宜军, 孙树远, 等. 西北太平洋暖池变异及其对西北太平洋次表层海温场的影响[J]. *海洋学报*, 2002, 24(3): 35-44.
- [24] 黄嘉佑. 赤道东太平洋海温与我国夏季雨日的相关矩分析[J]. *气象学报*, 1989, 47(4): 475-478.

Characteristics and correlation analysis of temperature and mixed layer depth in the western Pacific based on SODA3

WANG Hong-bing^{1,3}, ZHANG Gao-ying², QI Lin-lin³, LIU Jian-wen³

(1. School of Meteorology of PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 China; 2. No.61741 Army of PLA, Beijing 100094;

3. Institute of Battlefield Environment, Air Force Academic, Beijing 100085 China)

Abstract: By using monthly and 5d data of SODA3.3.1 from 2011 to 2015, we analysis the characteristics of SST (sea surface temperature) and sub-surface temperature, MLD (mixed layer depth), wind stress and wind stress vorticity in the Western Pacific, and the relationships between them are discussed with correlation method. The results show that there is a cold center near the equator; MLD decreases from south to north, and there are two maximum centers near the Kuroshio extension. Wind stress direction is north in winter and autumn with a higher value, while wind stress direction is west in spring and south in summer. SST has a negative correlation with MLD in most areas and shows a downward trends near equator. This trend is more obvious in La Nina years and not obvious in El Nino year. Sub surface temperature has a positive correlation with MLD to the north of 15°N and negatively correlated with MLD in the Kuroshio area. SST has a positive correlation with wind stress vorticity to the north of 15° N. The correlation index is high during Jan. to Mar. and Jul. to Oct., and the correlation between sub-surface temperature and wind stress vorticity is irregular.

Key words: the Western Pacific; sea temperature; MLD; wind stress correlation