

# 北太平洋副热带西部模态水异常与东亚中高纬度 大气环流关系的一些新认识<sup>\*1</sup>

常蕊<sup>1,2</sup> 张庆云<sup>1</sup> 李荣凤<sup>1</sup>

CHANG Rui<sup>1,2</sup> ZHANG Qingyun<sup>1</sup> LI Rongfeng<sup>1</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京,100029

2. 中国气象局公共气象服务中心,北京,100081

1. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *Public Weather Service Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2009-08-25 收稿,2009-12-02 改回.

**Chang Rui, Zhang Qingyun, Li Rongfeng. 2011. A new understanding of the relationship between the Northwestern Subtropical Mode Water anomaly and the mid-high latitude atmospheric circulation over East Asia. Acta Meteorologica Sinica, 69(4):655-663**

**Abstract** Based on the SODA\_1.4.2 and NCAR/NCEP monthly reanalysis data from 1958 to 2001, the relationship between the seasonal and annual variations of the Northwestern Subtropical Mode Water (STMW) and the mid-high latitude atmospheric circulation over East Asia-the North Pacific is studied using the  $P$ -vector method in this paper. It is showed that: (1) The STMW is of significant seasonal variation: its volume increases in April, then gradually weakens in summer and autumn, and eventually shrinks to the smallest in December. It is also investigated that the significant seasonal variation of the STMW is closely linked to the seasonal evolution of the sea surface wind stress and net heat flux over the Northwestern Pacific, reflecting the characteristics of the seasonal evolution of mid-high latitude atmospheric circulation anomalies over East Asia to some extent. (2) Meanwhile, on the interannual timescale, the 3-year-period is one of the most significant oscillation cycles of the STMW index averaged from May to July. Besides the ocean dynamic process, the annual variation of the STMW is also controlled by the wind stress curl and net heat flux anomalies, which is relevant to the abnormal configuration of the mid-high latitude atmospheric circulation anomalies over East Asia during the precious winter. When the previous winter monsoon is strong (weak) over East Asia, the wind stress mixing and the net sea surface flux over the formation area of the STMW are enhanced (reduced), leading to the strong (weak) oceanic mixing process. Eventually, more (less) water mass with low potential vorticity comes into the thermocline area through subduction, causing the strong (weak) STMW event as time goes. Therefore, the intensity of the STMW reflects the integrated features of mid-high latitude atmospheric and oceanic circulations over the East Asia-the North Pacific during the previous winter, which might impose an effect on the East Asia climate anomaly.

**Key words** Northwestern Subtropical Mode Water, Seasonal and annual variations, Mid-high latitude atmospheric circulation anomaly

**摘要** 根据 1958—2001 年 SODA(Simple Ocean Data Assimilation)海洋同化资料和 NCAR/NCEP 再分析资料,利用等密度面  $P$ -矢量算法,分析探讨了北太平洋副热带西部模态水(简称 STMW)季节演变和年际变化与前期东亚—北太平洋中高纬度大气环流异常的关系。分析指出:(1)STMW 的体积具有显著的季节变化特征:4 月体积最大、强度最强,夏秋逐渐减弱,

\* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906014)、国家自然科学基金面上项目(40975022)和国家科技支撑计划课题(2009BAC51B02)。

作者简介:常蕊,主要从事海-气相互作用的研究。E-mail: changrui@mail.iap.ac.cn

12 月体积最小、强度最弱。研究进一步指出,STMW 体积的季节变化与西北太平洋中纬度地区的海表风应力及净热通量的季节演变过程紧密联系在一起,它在一定程度上反映了西北太平洋中纬度大气环流季节性演变的特征。(2) 年际尺度上,5—7 月 STMW 指数具有显著的 3 年左右的振荡周期,其年际变化不仅与海洋自身动力过程有关,还与前冬亚洲—太平洋中高纬度大气环流异常引起 STMW 形成区风应力动力混合及海表净热通量等因子异常有关:冬季东亚季风环流偏强(弱),STMW 形成区洋面风应力的动力混合作用及海表热力蒸发加强(减弱),使得海洋对流混合加强(减弱),进而加强(抑制)了混合均匀的低位涡水体进入温跃层,随着季节演变,造成 5—7 月 STMW 强度加强(减弱)。5—7 月 STMW 强弱年际变化是前期亚洲—太平洋中高纬度大气—海洋相互作用过程的综合反映,前冬东亚环流强弱变化与 5—7 月 STMW 强度变化的联系可能是通过东亚环流的强弱变化影响 STMW 形成区的动力混合及海表热通量过程实现。

**关键词** 北太平洋副热带西部模态水, 季节、年际变化, 中高纬度大气环流异常

**中图法分类号** P434+.4

## 1 引言

“模态水”是一个用来表示范围相对较大、温盐属性均匀的水体名词。研究发现北太平洋海域有 3 个模态水:副热带西部模态水、副热带东部模态水和副极地模态水。通常将 Masuzawa(1969)提出的副热带模态水(Sub-Tropical Mode Water 简称 STMW)用来特指北太平洋副热带西部模态水。STMW 形成于副热带环流北部黑潮延续体中海—气相互作用较强的海域,冬季表层海水冷却下沉,随后这种混合均匀的海水随黑潮回流向西南方向潜沉堆积,最终形成温度、盐度性质均一的水体(Masuzawa, 1969, McCartney, 1982),因而它携带了大量源地的冬季海、气状况的信息,是传递中低纬度海—气相互作用信息的重要载体之一(Hanawa, et al, 1995)。

自 Masuzawa (1969)提出 STMW 后,海洋学家从海洋内部动力过程对其进行了较多的研究:Talley (1988)在 Levitus(1982)年平均资料的分析基础上,指出用位势涡度不大于  $2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的区域来界定 STMW,其中心大致位于  $25.4\sigma_{\theta}$  等密度面上。Suga 等(1989)利用  $137^{\circ}\text{E}$  断面的观测资料,论证了这一结果,并指出在  $137^{\circ}\text{E}$  断面上,冬季形成的模态水经过半年就南移到  $26^{\circ}\text{N}$ ,一年以后移到  $23^{\circ}\text{N}$  附近(Suga, et al, 1995a)。Suga 等(1995b)利用历史水文资料分析了 STMW 的季节变化,指出冬季形成的模态水体积在一年左右的时间会显著减小,并且推论出它的主体通过黑潮回流向西南方向平流。Suga 等(1995b)和 Qiu 等(2006)研究指出,STMW 的年际变化与黑潮大弯曲的发生有关,在黑潮大弯曲发生的年份,异常的中尺度涡旋将黑潮延续体的高位涡水体带入混合层中,

使上层海洋层结加强,抑制了混合层的加深和模态水的产生,造成模态水体积偏小。从上述分析可见,有关 STMW 的研究主要集中在海洋内部动力过程(如中尺度涡、黑潮大弯曲、海洋层结及混合等),所用资料基本是断面观测资料或岛屿观测资料。

近年来,吴国雄等(1996, 1997, 2000)、任雪娟等(2007a, 2007b)探讨了东亚大气环流的年际变化与西北太平洋地区海表温度的关系。吴国雄等(2000)研究指出,强东亚季风期间,有利于西北太平洋地区形成异常气旋性流场,从而对关键海域的海表温度产生调节作用。其研究主要探讨了东亚季风环流影响海表温度异常的物理过程,对海洋次表层水团属性、次表层海洋环流异常没有进一步讨论。随着高分辨率的海洋同化资料及大气环流资料的不断增多,为深入探讨东亚大气环流异常与西北太平洋次表层模态水属性异常的可能联系提供了基本条件。

本文根据 1958—2001 年高分辨率的简单海洋同化资料(SODA)(Carton, et al, 2004)和等密度面  $P$ -矢量方法,首先计算了 1958—2001 年北太平洋海域逐月位势涡度,用位势极小来界定 STMW。在此基础上,重点探讨 STMW 季节、年际变化的时空特征与西北太平洋地区的风应力混合、海表热力蒸发、海洋深对流过程及其与东亚—北太平洋中高纬度大气环流异常的关系。

## 2 资料与方法

所用资料:(1)1958—2001 年 SODA 海洋同化温盐资料,水平分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,垂直不等距分为 40 层,其同化资料包括世界海洋图集-1994 的温度、盐度资料(MBT、XBT、CTD、站点资料),以及其他的水文、海表温度等资料(Carton, et al,

2004)。(2)NCAR/NCEP再分析的1958—2001年月平均风场、高度场资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay, et al, 1996)。(3)海表净热通量资料是通过计算ERA-40资料中感热、潜热、长波辐射和短波辐射的总和而得到的一个综合热力指标,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的月平均资料,时间跨度从1958年1月到2001年12月。

为了更好地分辨垂直结构,按以下4种不同的间隔把温、盐资料用3次样条插值到246个层上:0—100 m间隔为5 m,100—1000 m间隔为10 m,1000—2500 m间隔为20 m,2500 m深度以下间隔为50 m。然后以海平面(0 hPa)作为参考面,按照各层面上的温度和盐度计算出相应的位势密度( $\sigma_{\theta}$ ,单位: $\text{kg}/\text{m}^3$ )和位势涡度。用 $\Delta\sigma_{\theta} = 0.025$ 的间隔分层,在 $22.2 \leq \sigma_{\theta} \leq 27.725$ 范围内,每个水柱最多可有222个 $\sigma_{\theta}$ 层。位势涡度定义为: $PV = (f/\rho) \times (\Delta\sigma_{\theta}/\Delta Z)$ ,其中, $f$ 为科氏参数, $\rho$ 是水体密度, $\Delta\sigma_{\theta} = 0.025$ 是位势密度面的间隔, $\Delta Z$ 是两个位势密度面的深度差,计算方法和理论参阅文献(Chu, et al, 2000)。

在讨论气候态下STMW的季节特征时,为避免多次插值计算所带来的误差,本文首先计算了SODA温、盐资料逐月的气候平均值,再对气候平均的逐月温、盐数据进行插值,计算等密度面上的位势涡度。

STMW指数定义为:位涡不大于 $2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的水体体积。混合层深度定义为与海表位势密度相差 $0.125\sigma_{\theta}$ 的等密度面所在的深度(Levitus, 1982)。

### 3 STMW的季节变化

图1给出的是西太平洋海域( $130^{\circ}$ — $170^{\circ}\text{E}$ )气候平均的4、7、10和1月(春、夏、秋和冬)等密度面上的位涡分布,阴影表示位势涡度不大于 $2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的区域,代表STMW的范围。由图1a可见,春季闭合低位涡水体的南边界位于 $26^{\circ}\text{N}$ ,北边界位于 $32^{\circ}\text{N}$ 附近,从夏到冬,STMW的体积随着向南潜沉而损耗,经过夏到秋季的潜沉,闭合低位涡水体的南边界位于 $25^{\circ}\text{N}$ ,北边界位于 $30^{\circ}\text{N}$ (图1b和c);冬季(1月)闭合低位涡水体的南、北边界分别位于 $24^{\circ}$ 和 $29^{\circ}\text{N}$ (图1d)。图1所示的四季STMW变化表明,STMW基本是一个属性均匀、南北跨越

$24^{\circ}$ — $32^{\circ}\text{N}$ 纬度带上准定常的常年存在的闭合低位涡水团,其中心大致位于 $25.4\sigma_{\theta}$ 密度面上,春季(4月)STMW的体积是一年中的最大期,冬季(12月)体积最小,这与Talley(1988)的分析结果一致,说明本文的计算方法及STMW的定义具有一定的科学性和可靠性。

为了清楚看出STMW模态水的强度随时间的变化特征,计算了气候平均的逐月STMW指数与年平均STMW指数的差值,即各月STMW指数的距平分布(图2)。可以发现,冬半年(10—3月)STMW体积指数距平为负,STMW体积指数最大负距平出现在冬季12月;夏半年(4—9月)STMW体积指数距平为正,最大正距平出现在春末4月。

由于STMW是传递中低纬度海-气相互作用信息的重要载体之一,它的季节演变反映了西北太平洋中纬度地区的大气-海洋相互作用的异常状况特征,因此,有必要进一步了解北太平洋地区的风应力、海表热通量和海洋-大气状况的季节变化特征。

这里重点从大气外强迫的角度分析外部大气强迫与混合层(代表了STMW的形成效率)季节变化的关系,给出北太平洋地区多年平均的风应力和风应力涡度的空间分布(图3)及STMW形成区( $27^{\circ}$ — $33^{\circ}\text{N}$ , $137^{\circ}$ — $157^{\circ}\text{E}$ )平均的海表净热通量和混合层深度的逐月变化(图4)。由图3、4可见,STMW形成区的海表风应力(纬向和经向风)及海表净热通量和混合层深度具有显著的季节变化特征,最显著的转折点出现在4月和10月。10月一次年1月的冬半年,STMW形成区域呈现为西北风,表明该区域受来自东亚大陆中高纬度地区西北干冷空气控制,日本东南海域出现了风应力的显著负涡度中心(图3d),向下的埃克曼抽吸有利于冬季海表冷海水的下沉运动,风的动力混合作用加强(图3a、3d);同时,该海域的海表净热通量小于0(图4),表明热力作用的结果使海表大量失热。在上述动力和热力效果共同作用下,STMW形成区的海水对流混合开始加强,混合层逐渐加深(图4混合层深度大于50 m)。随着机械混合与失热效果(10月一次年2月)的累积,2—3月混合层达到最深,约170 m(图4)。

4—7月的夏半年,STMW形成区的洋面受西南和东南暖湿气流控制(图3b、3c),该海域的风应力涡度不明显,说明夏半年,STMW形成区附近

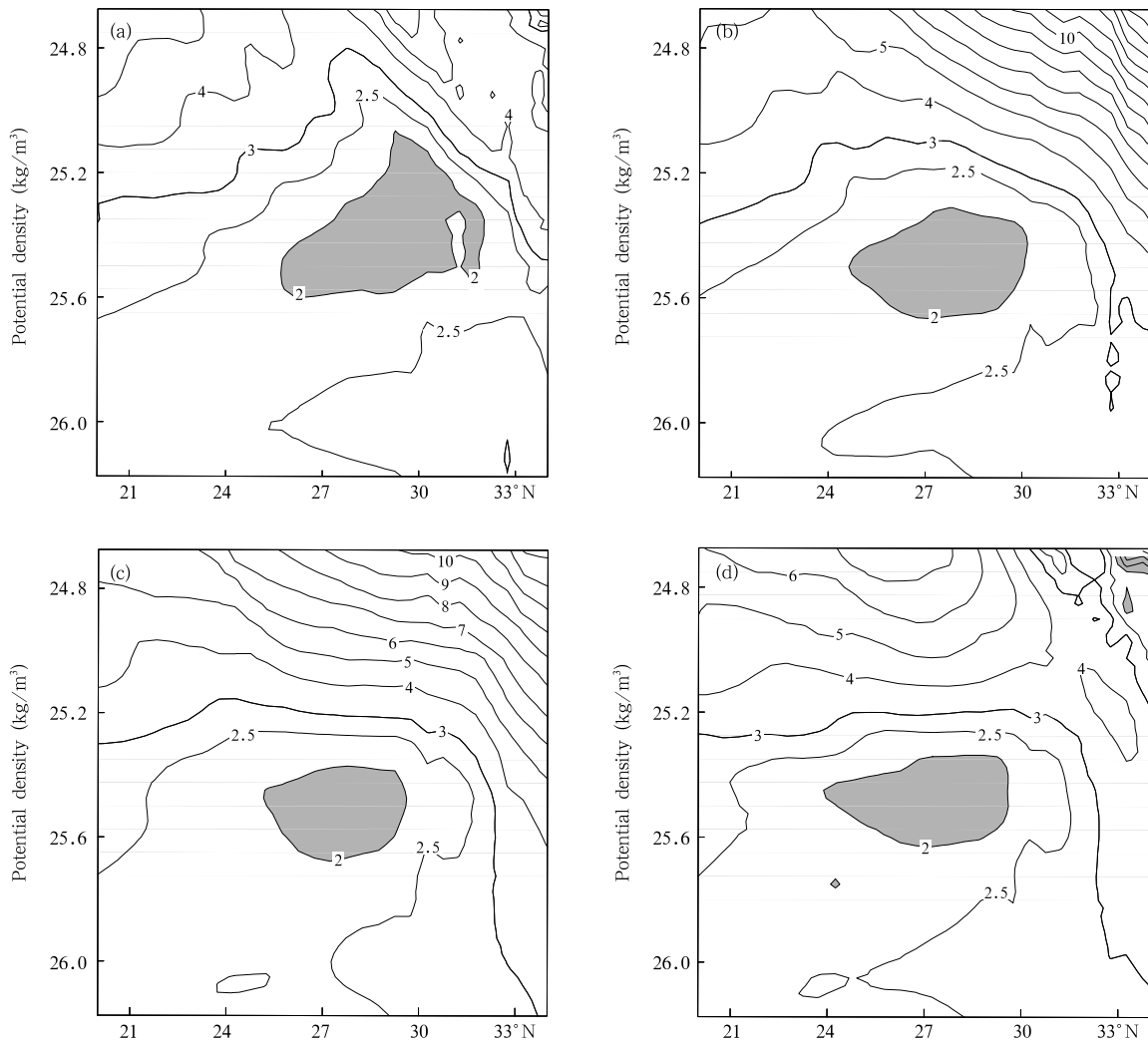


图1 130°—170°E 多年平均的4(a)、7(b)、10(c)和1(d)月的位势涡度分布  
(单位:  $10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 1 Long-term-mean potential vorticity averaged over 130° to 170°E in April (a), July (b), October (c) and January (d) (unit:  $10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )

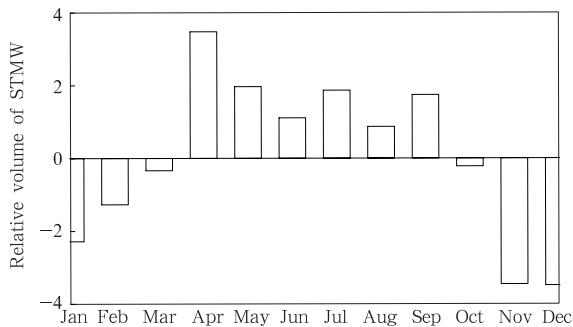


图2 气候平均的逐月 STMW 体积指数  
Fig. 2 Averaged monthly volume of the STMW over 1958 - 2001

风应力的动力混合作用逐渐减弱;此时,STMW 形成区受显著的正向海表净热通量控制,热力通量中心达到  $150 \text{ W/m}^2$ (图 4),说明海表从暖湿大气中不断得到热量,海表吸热过程中加强了该海域的海水层结,海水的静力稳定度加大,从而抑制了表层海水的对流混合过程。在上述动力与热力共同作用下,形成区附近的混合层急剧变浅(图 4),从 3 月的 170 m 到 4 月的 30 m 左右。可见冬半年是混合层逐渐加深、海表冷水深对流混合加强,低涡水体不断形成的阶段;春季随着混合层的急剧变浅,深对流混合过程结束,冬季混合层下部的低涡水体被温跃层

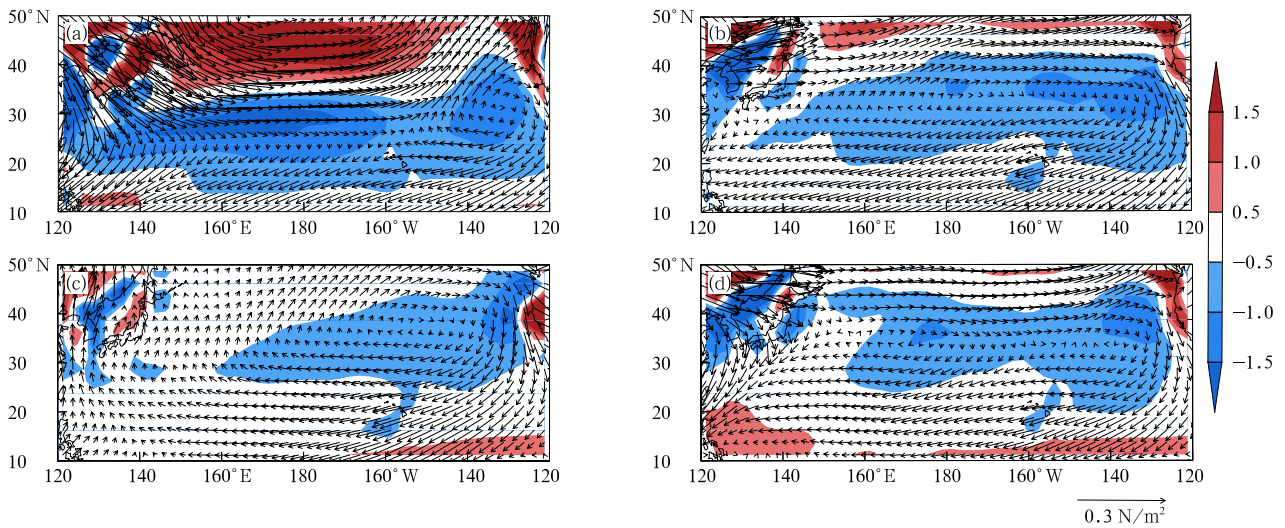


图3 北太平洋气候平均的1(a)、4(b)、7(c)和10月(d)的风应力(单位: $\text{N}/\text{m}^2$ )和风应力涡度(阴影区,单位: $10^{-7} \text{N}/\text{m}^3$ )  
Fig. 3 Averaged wind stress (unit:  $\text{N}/\text{m}^2$ ) and the wind stress curl (shaded, unit:  $10^{-7} \text{N}/\text{m}^3$ ) during (a) January, (b) April, (c) July and (d) October over the North Pacific

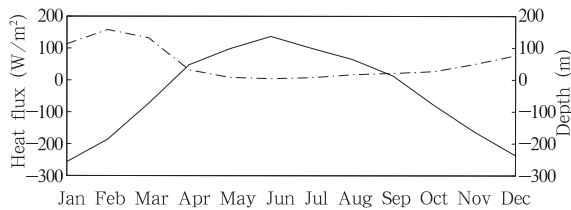


图4 STMW形成区海表热通量(实线,单位: $\text{W}/\text{m}^2$ )和混合层深度(虚线,单位:m)的季节演变曲线  
Fig. 4 Monthly variation of the net sea surface heat flux (solid line, unit:  $\text{W}/\text{m}^2$ ) and the mixing layer depth (dashed line, unit: m) averaged over the formation area of the STMW ( $23^\circ - 33^\circ \text{N}$ ,  $125^\circ - 155^\circ \text{E}$ )

与上部混合层隔开,从而隔绝了它与外界大气进一步的海气交换,这部分水体最终潜沉进入永久性温跃层,形成模态水。上述过程与 Stommel (1979) 提出的基于混合层季节变化的模态水形成机制基本一致。

综上所述,STMW 4月体积最大、强度最强;5—7月是稳定形成的时期;秋季体积和强度逐渐减弱;12月体积达到最小、强度最弱,且其显著的季节变化与海表风应力、海表净热通量及混合层深度的季节变化一致,也就是说 STMW 的季节变化反映了该区域的大气、海洋季节变化的综合结果。

#### 4 STMW 的年际变化

上述分析表明,多年平均逐月 STMW 体积指数的最大值出现在4月,最小值出现在12月,且5—7月是模态水开始在次表层稳定形成的时期。因此,利用1958—2001年逐年的 STMW 指数序列,进一步分析了体积指数最大月(4月)、最小月(12月)及稳定期(5—7月)平均 STMW 指数特征:12月与次年4月 STMW 指数相关系数是0.647,12月与次年5—7月 STMW 指数相关系数是0.733,4月与5—7月 STMW 指数的相关系数为0.825,可见不同月份 STMW 的年际变化之间有密切的联系,其信度水平平均达到1%的统计检验。

为了初步考察 STMW 的年际变化特征,对模态水体积指数最大月(4月)、最小月(12月)以及稳定期(5—7月)平均 STMW 指数进行功率谱分析发现:3年左右振荡周期是唯一通过5%信度检验的显著周期(图5)。说明除上节所述的季节变化外,STMW 的年际变化特征也很显著。

STMW 的季节变化与海表风应力、海洋埃克曼抽吸、海表热通量及混合层深度的季节调整过程紧密联系,STMW 的季节变化是该区域大气-海洋季节演变的综合反映。而有关 STMW 年际变化的研究,Suga等(1989, 1995a)和 Qiu等(2006)强调了海洋内部黑潮大弯曲及海洋中尺度涡的重要作用;

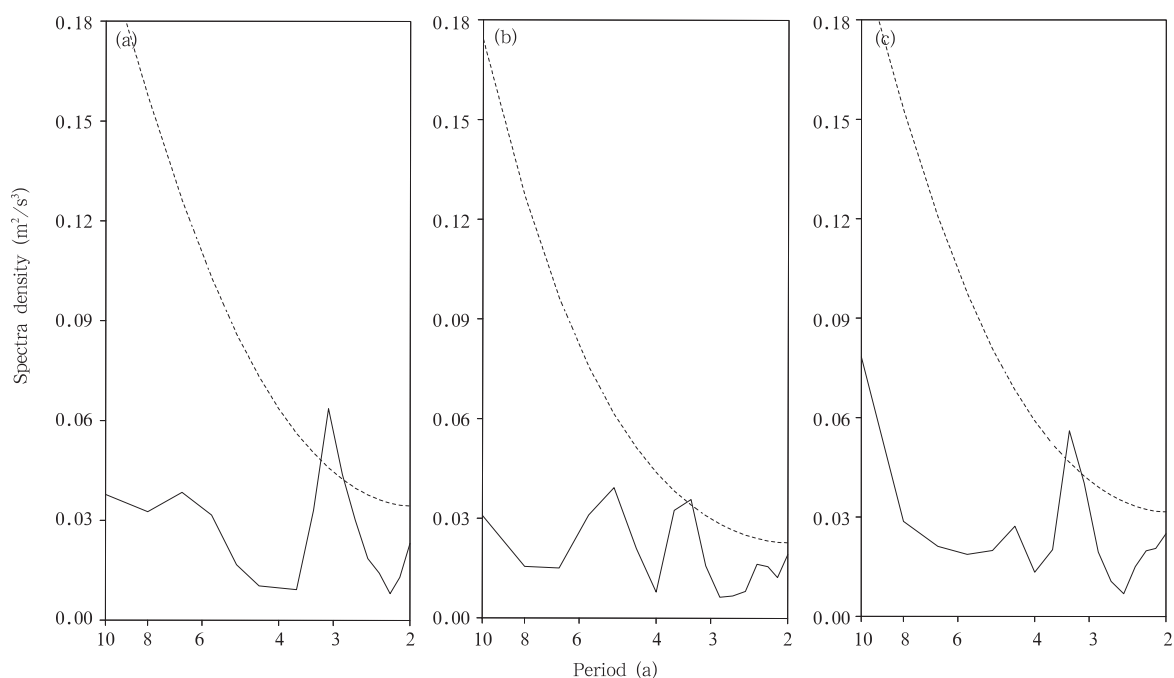


图5 1958—2001年STMW指数的功率谱分析(a. 4月, b. 5—7月平均, c. 12月)

Fig. 5 Power spectra of the STMW index in (a) April, (b) May to July and (c) December from 1958 to 2001

潘爱军(2004, 个人交流)在热平衡方程的诊断基础上,定量研究了海表热通量、埃克曼流、垂直夹卷和地转平流在STMW形成过程中的贡献,指出海表热通量是引起STMW年际变化的主导因素,而海洋地转平流起第2位作用。可见STMW年际变化的研究,也基本集中在海洋内部过程(如黑潮大弯曲、海洋中尺度涡、海洋地转平流、垂直对流混合等)。相关研究都指出形成区海表热通量(冷却)变化在STMW的年际变化中起重要作用,但有关东亚中高纬度大气环流的动力、热力作用并不清楚。下面将重点探讨模态水形成区对流混合过程与东亚中高纬度大气环流异常的演变过程,与海表热通量异常的关系及其对模态水体积(强度)的年际变化的影响。

为了从大气环流的角度来探讨模态水体积的年际变化,对1958—2001年5—7月平均STMW指数序列进行滤波处理,去掉年代际趋势,仅保留年际变化信号。图6为去除年代际趋势的5—7月STMW指数的标准化序列。将大于0.6个标准差的1968、1971、1972、1975、1982、1986、1993和1996年定义为STMW强年;小于-0.6个标准差的1970、1973、1974、1979、1983、1984、1988、1995和1997年定义为STMW弱年(滤波后的开始年和结束年未考虑)。

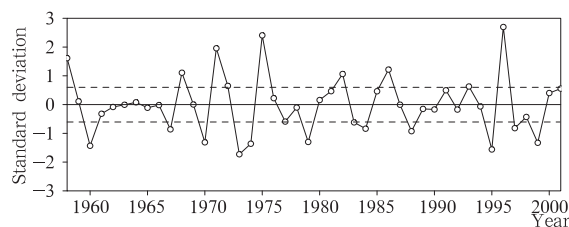


图6 标准化的STMW指数的年际变化(去除年代际趋势)

Fig. 6 Normalized time series of the high-pass filtered STMW index from 1958 - 2001 (the interdecadal variation has been removed)

为了探讨模态水强度年际变化的可能成因,根据5—7月模态水强、弱年的定义,给出5—7月模态水强年(图7a、c、e)、弱年(图7b、d、f)前冬(12月—次年2月)850 hPa位势高度与矢量风距平、海表净热通量距平及形成区(23°—33°N, 125°—155°E)区域平均的混合层深度距平合成。从图7a可见,5—7月STMW偏强年的前冬,850 hPa位势高度距平场(图中等值线)与风距平场(图中的矢量箭头)中,亚洲中高纬度西伯利亚地区的位势高度距平呈现正异常、风距平场出现反气旋性环流,说明西伯利亚地区受高压控制(阴影区表示信度水平超过0.05和0.01的信度,下同),此时西北太平洋中纬度海域上空的



位势高度出现负距平、风距平场呈现气旋性环流,东亚中高纬度沿海地区受偏北风距平气流控制,东亚冬季风环流偏强。来自东亚大陆中高纬度地区的较强偏西风距平控制了西北太平洋 STMW 形成区附

近的海域(图 7a),加强了冬季这一区域的干冷空气活动,受其影响,该海域表层海水的动力混合作用加强;同时,日本东南侧的西太平洋副热带海域海表净热通量出现负异常(图 7c),海洋热力作用为负异

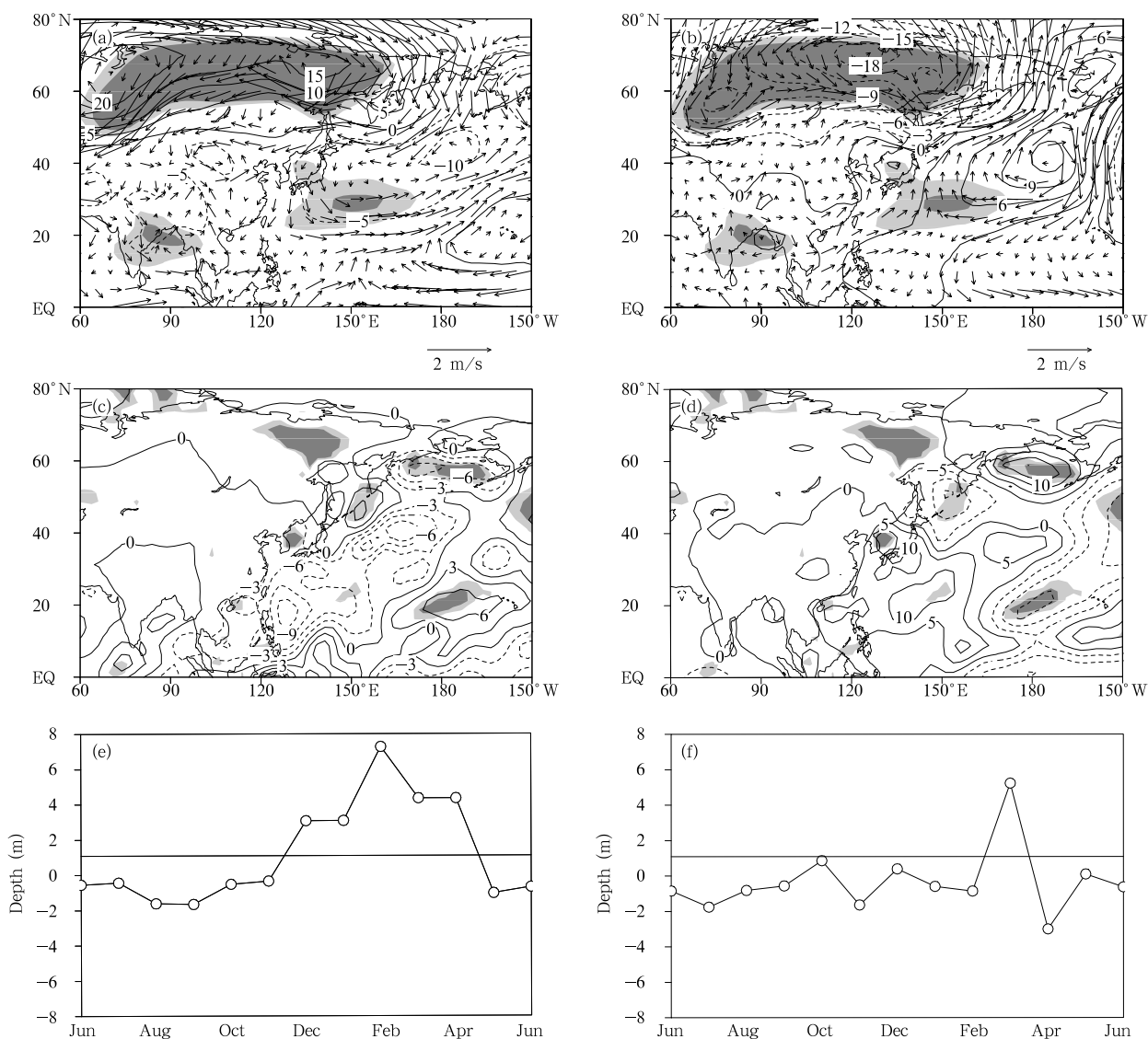


图 7 模态水强、弱年的前冬(12月—次年2月)850 hPa 位势高度距平(等值线,单位:gpm)与矢量风距平(单位:m/s) (a,b),海表净热通量距平(c,d,单位:W/m<sup>2</sup>,正号表示海表吸收热量)及形成区(23°—33°N,125°—155°E)区域平均的混合层深度距平(e,f,单位:m)(a,c,e为强年;b,d,f为弱年;图中虚线表示负异常,实线表示正常;浅和深的阴影区表示信度水平超过0.05和0.01的信度)

Fig. 7 Composite patterns of the previous winter (DJF) 850 hPa geopotential height anomaly (unit: m) with anomalous horizontal wind vectors (a, b, unit: m/s), the net sea surface heat flux (the positive anomalies indicate that the ocean gets heat from air, c, d, unit: W/m<sup>2</sup>) and the mixing layer depth (e, f, unit: m) averaged over the formation area of the STMW (23° - 33°N, 125° - 155°E) for the strong (a,c,e) and weak (b,d,f) STMW cases. Light and dark shadings indicate the significant values at 0.05 and 0.01 confidence levels, respectively

常,说明海洋大量失热,海表冷却作用加强。在这种加强的海水对流动力作用和表层热力冷却作用的共同影响下,STMW 形成区平均的混合层深度在前冬开始出现显著正异常(图 7e),说明模态水形成区附近的海水深对流混合过程加强,有利于更多的混合均匀的低位涡水体进入温跃层,随着季节演变,最终造成 5—7 月 STMW 体积(强度)出现正异常。

5—7 月 STMW 偏弱年的前冬各物理量距平分布(图 7b、d、f)与偏强年分布特征基本反位相:STMW 弱年前冬,亚洲中高纬度西伯利亚位势高度偏低、风距平场呈现气旋性环流;而西太平洋中纬度海域上空位势高度出现正距平、风距平场呈现反气旋性环流。在上述环流配置下,有利于东亚中高纬度沿海地区受偏南风距平气流控制,东亚冬季风环流减弱。STMW 形成区上空的北方干冷空气势力减弱(图 7b),海表风应力的动力混合作用被削弱;同时,日本东南的西太平洋副热带海域海表净热通量出现正异常(图 7d),海洋不断从大气中吸收热量,海表的热力冷却效应减弱,下潜混合作用受到抑制。与此动力和热力形势相对应,区域平均的混合层深度在前冬出现显著负异常(图 7f),模态水形成区的海水深对流混合过程减弱,抑制了混合均匀的低位涡水体进入温跃层,随着季节进展,最终使 5—7 月 STMW 体积(强度)出现负异常。

上述大气-海洋演变过程清楚表明,STMW 年际尺度强弱变化,除了与海洋本身的物理过程有关外(Suga, et al, 1989, 1995a, 1995b; Qiu, 2006; Qiu, et al, 2006),还与前期东亚冬季风环流强弱变化密切相关,副热带次表层海域 STMW 的年际变化较好地反映了前期中纬度大气-海洋相互作用的年际变化综合信息,前冬东亚环流强弱变化与 5—7 月 STMW 的强弱变化的联系可能是通过东亚环流的强弱变化影响 STMW 形成区的动力混合及海表热通量过程实现的。

## 5 小结与讨论

根据 1958—2001 年 SODA 温盐同化资料和 NCAR/NCEP 再分析资料,利用等位势密度面  $P$ -矢量算法,探讨了 STMW 的季节、年际变化与东亚大气环流-北太平洋海表风应力、海表热通量等异常的关系。分析指出:气候平均态的 STMW 是一个属性均匀、南北跨越  $24^{\circ}$ — $32^{\circ}$ N 纬度带上的准定

常的闭合低位涡水团,其中心大致位于  $25.4\sigma_{\theta}$  密度面上,4 月 STMW 体积最大、强度最强,夏秋逐渐减弱,12 月体积最小、强度最弱;STMW 的季节变化与海表风应力、海表热通量及混合层深度的季节调整过程紧密联系。STMW 的年际变化除了受海洋自身动力过程(如黑潮大弯曲、中尺度涡和垂直对流混合等)异常影响外,还与东亚冬季环流强弱变化引起 STMW 形成区的风应力动力混合和海表蒸发等物理因子异常变化有关。年际尺度上,前冬东亚大气环流强弱变化与 5—7 月 STMW 强弱变化的联系可能是通过东亚环流的强弱变化影响 STMW 形成区的动力混合及海表热通量过程实现:冬季东亚季风环流偏强(弱),STMW 形成区洋面风应力的动力混合作用及海表热力蒸发加强(减弱),使得海洋对流混合加强(减弱),进而加强(抑制)了混合均匀的低位涡水体进入温跃层,随着季节发展,造成 5—7 月 STMW 的强度偏强(减弱)。

本文的研究表明,5—7 月 STMW 强度的年际变化反映了亚太地区海-气相互作用的综合过程。需要指出的是:次表层海洋中的 STMW 强、弱年际变化不仅保存了东亚—太平洋地区中高纬海-气相互作用的综合信息,同时在年际时间尺度上 STMW 从冬到夏的潜沉过程中具有较好的保守属性,因此探讨 STMW 强弱变化对中国年度、季度气候变化趋势的影响,有明确的物理意义,相关的工作值得进一步深入研究。

## 参考文献

- 潘爱军. 2004. 北太平洋副热带模态水及其形成机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 164pp.
- 任雪娟, 杨修群, 韩博. 2007a. 北太平洋冬季海-气耦合的主模态及其与瞬变扰动异常的联系. 气象学报, 65(1): 52-62
- 任雪娟, 张耀存. 2007b. 冬季 200 hPa 西太平洋急流异常与海表加热和大气瞬变扰动的关系探讨. 气象学报, 65(4): 550-560
- 吴国雄, 尉艺, 刘辉. 2000. 东亚持续强冬季风影响赤道海表温度初始异常的数值试验研究. 气象学报, 58(6): 641-652
- 吴国雄, 王敬方. 1996. 热带和热带外海表温度异常与低空环流特征比较. 气象学报, 54(4): 385-397
- 吴国雄, 王敬方. 1997. 冬季中高纬 500 hPa 高度和海表温度异常特征及其相关分析. 气象学报, 55(1): 11-21
- Carton J A, Giese B. 2004. Simple Ocean Data Assimilation (SODA) reanalysis effort. paper presented at CLIVAR Workshop on Ocean Reanalysis, Natl Cent for Atmos Res, Boulder, Colo (Available at <http://www.atmos.umd.edu/~ocean/soda1.2>).



- pdf)
- Chu P C, Li R F. 2000. South China Sea isopycnal-surface circulation. *J Phys Oceanogr*, 30: 2419-2438
- Hanawa K, Suga T. 1995. A review on the subtropical mode water of the North Pacific (STMW) // Sakai H, Noriki Y. *Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific*. Terra Scientific, 613-627
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77: 437-471
- Levitus S. 1982. *Climatological Atlas of the World Ocean*. NOAA/ERL GFDL Professional Paper 13, Princeton, N J, 173 (NTIS PB83-184093)
- Masuzawa J. 1969. Subtropical Mode Water. *Deep-Sea Res*, 16: 463-472
- McCartney M S. 1982. The subtropical recirculation of mode waters. *J Mar Res*, 40(Suppl): 427-464
- Qiu B, Hacker P, Chen S, et al. 2006. Observations of the subtropical mode water evolution from the Kuroshio extension system study. *J Phys Oceanogr*, 36: 457-473
- Qiu B, Chen S. 2006. Decadal variability in the formation of the North Pacific Subtropical mode water: oceanic versus atmospheric control. *J Phys Oceanogr*, 36: 1365-1380
- Stommel H. 1979. Determination of water-mass properties of water pumped down from the geostrophic flow below. *Proc Natl Acad Sci*, 76: 3051-3055
- Suga T, Hanawa K, Toba Y. 1989. Subtropical mode water in the 137° E section. *J Phys Oceanogr*, 19: 1605-1618
- Suga T, Hanawa K. 1995a. The subtropical mode water circulation in the North Pacific. *J Phys Oceanogr*, 25: 958-970
- Suga T, Hanawa K. 1995b. Inter-annual variations of North Pacific subtropical mode water in the 137° E section. *J Phys Oceanogr*, 25: 1012-1017
- Talley L D. 1988. Potential vorticity distribution in the North Pacific. *J Phys Oceanogr*, 18: 89-106