

李丽平, 王盘兴, 管兆勇. 太平洋区域季内振荡的一种负反馈过程 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(3): 317-325.

## 太平洋区域季内振荡的一种负反馈过程

李丽平, 王盘兴, 管兆勇

(南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 利用 1981—2002 年美国国家气象中心 (National Meteorological Center, NMC) 逐日海表温度 (sea surface temperature, SST)、10 m 高处风场 ( $V$ ) 及逐月混合层厚度 (mixed layer depth, mld) 资料, 研究了太平洋区域海表温度季内振荡的气候及异常特征, 重点探讨了北太平洋区域海表温度季内振荡的维持机制。研究发现, 太平洋区域海表温度存在 3 个季内振荡强度气候高值区, 即热带东太平洋 (终年存在)、西北太平洋 (北半球春、夏、秋存在)、西南太平洋 (南半球夏季前后存在), 它们出现在气候混合层厚度最小的区域和季节。海表温度季内振荡强度年际异常与混合层厚度年际异常存在显著负相关, 在物理上, 这种关系比它与海表温度异常的关系更直接。北太平洋区域 5—9 月地面风场与海表温度季节内振荡的基本耦合模态揭示出以漂流和感热输送为动力的一个负反馈过程, 它存在于薄混合层海区, 这是该海区强海表温度季内振荡的维持机制。

**关键词:** 季内振荡; 海表温度; 太平洋区域

**中图分类号:** P434 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)03-0317-09

## A Negative Feedback of the Intraseasonal Oscillation in the Pacific Ocean

LI Liping WANG Pan-xing GUAN Zhao-yong

(School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

**Abstract** The climatological and anomalous features of the intraseasonal oscillation (ISO) in the Pacific domain have been investigated using the NMC (National Meteorological Center) sea surface temperature (SST), winds at 10 m and monthly mixed layer depth (mld) from 1981 through to 2002. Three centers of strong ISO in the SST are detected in the Pacific. The center of SST ISO in the eastern equatorial Pacific can be detected in all the year; however, the other two centers in the northwest and the southwest Pacific respectively are season-dependent. In the summer hemisphere, the intensity of ISO seems much stronger than that in the winter hemisphere. These three strong ISO regions are closely related to the variations of the oceanic mld. The thinner the mld, the more active the ISO. This suggests that the ISO in the Pacific involves the ocean dynamical processes. On the other hand, the SVD1 mode of the SST and the winds at 10 m above the ocean surface shows that the ISO is coupled with the surface air motion through a negative feedback between the atmosphere and the Ocean, and exists in the sea area where the mld is thinner. Which explains the existence of SST intraseasonal oscillation in the North Pacific.

**Key words** intraseasonal oscillation; sea surface temperature; Pacific ocean

### 0 引言

30~60 d 振荡 (intraseasonal oscillation, ISO) 不

仅是大气也是海洋季内尺度变化的主要模态<sup>[1]</sup>。许多观测研究<sup>[2-8]</sup>表明, 平均海表温度 (sea surface temperature, SST) 较高的热带暖池区域 SST 存在季

收稿日期: 2007-03-09 改回日期: 2007-06-18

基金项目: 江苏省高校青蓝工程资助项目; 江苏省高校自然科学研究指导性计划项目 (06KJ170114); 江苏省气象灾害重点实验室资助项目 (KIME060101)

作者简介: 李丽平 (1971—), 女, 山西寿阳人, 博士, 副教授, 研究方向为短期气候预测, li\_liping@163.com.

节内变化特征。该区域跟 ISO 有关的大气对流、地面通量与 SST 关系的广泛研究<sup>[3, 5, 7, 9-14]</sup>证实,赤道暖池的 SST 季内变化主要由季内尺度的地面风应力、表面热通量和辐射通量驱动。研究<sup>[9, 14-15]</sup>也指出,海面上 ISO 事件经过时引起的混合层厚度的变化会影响 SST 季内振荡的强度。一些学者<sup>[16-17]</sup>指出,北半球夏季中美洲附近的赤道东太平洋区域海洋 ISO 有局地增强的现象。

近几年,国内学者对海洋季节内振荡也做了不少研究<sup>[18-20]</sup>。孙即霖等<sup>[21]</sup>分析了热带太平洋赤道区域低频波动的特征,发现季内振荡在赤道海区是一个普遍现象。Liu 等<sup>[22]</sup>指出,热带西太平洋赤道附近从表层 10 m 到 250 m 的速度场、温度场都具有显著的 50 d 振荡。刘秦玉等<sup>[23]</sup>根据 3 a 卫星高度计 (TOPEX /POSE DON) 资料和海洋环流模式模拟计算的海平面高度资料研究发现,在热带太平洋不同海区季内振荡主周期的空间分布有差别。周发琇等<sup>[24]</sup>证实南海表层和浅层水温存在季节内振荡,且在深水区与浅海区主振荡周期有差别。而 Zhang<sup>[25]</sup>也发现热带赤道西太平洋上层海洋的热力结构显示出显著的季节性变率。汪晓娇等<sup>[26]</sup>发现,季节内振荡在南海海表水温、海面风分量、海气通量等要素中都存在。

综上所述,国内外关于海洋季节内振荡的研究已取得诸多研究成果,而暖池区域海表温度季内振荡的研究相对较成熟,但对太平洋其他区域海表温度季内振荡的研究相对较薄弱。本文将从气候及异常两个方面研究太平洋区域海表温度季内振荡的时(季节、年际)、空(地理分布)特征,并重点探讨北太平洋夏季海表温度季内振荡产生和维持的机制。太平洋海温异常与东亚季风异常具有密切关系<sup>[27-30]</sup>,本文的研究成果对进一步明确太平洋区域海气相互作用特征具有科学意义,也将为我国短期气候预测提供一定线索。

## 1 资料及其预处理

### 1.1 资料

(1)海表温度:使用 NMC(National Meteorological Center)的逐日海表温度 (SST)场资料。高斯格点,格点总数  $192 \times 94$  全球范围;时间长度 1981 年 1 月 1 日—2002 年 12 月 31 日。

(2)海洋混合层厚度 (mH):COADS (comprehensive ocean-atmosphere data set)的逐月混合层厚度场资料序列;空间范围为  $0^\circ \sim 90^\circ \text{E} \sim 180^\circ \sim 90^\circ \text{W}$

$\sim 0^\circ, 30^\circ \text{S} \sim 30^\circ \text{N}$ ,分辨率  $\Delta \lambda \times \Delta \varphi = 2^\circ \times 1^\circ$ ,覆盖时段为 1979 年 1 月—2001 年 12 月;美国 Scripps 海洋研究所环境数据分析中心的 1955 年 1 月—1998 年 12 月逐月混合层厚度距平资料,分辨率为  $\Delta \varphi \times \Delta \lambda = 2^\circ \times 5^\circ$ ,空间范围为  $0^\circ \sim 90^\circ \text{E} \sim 180^\circ \sim 90^\circ \text{W} \sim 0^\circ, 60^\circ \text{S} \sim 60^\circ \text{N}$ 。

(3)地面以上 10 m 处风场 (V):使用 NCEP/NCAR 再分析资料中地面以上 10 m 处风场资料序列;高斯格点,格点总数  $192 \times 94$  全球范围;时间长度为 1948 年 1 月—2002 年 12 月。

### 1.2 滤波

对逐个格点、1981—2002 年、长为 8 035 d 的海表温度场和风场序列,首先去除其季节循环(即去除平均值、年波和半年波),再用参数  $n = 182 \text{ d}$  的 Lanczos 带通滤波器(通过段为 30~60 d),滤出季内振荡分量,记为  $T_{\text{SST}}、V$ 。

### 1.3 季内振荡强度指数 E 的定义

定义 12 月—次年 2 月为冬季,取 12 月 1 日、3 月 1 日、6 月 1 日、9 月 1 日为北半球冬、春、夏、秋季开始日,各季长 90 d 按定义式

$$E_{\text{SST}}(p, t_s, t_y) = \left[ \sum_{t_d=1}^{90} T_{\text{SST}}^2(p, t_d, t_s, t_y) \right] / 90 \quad (1)$$

$$E_V(p, t_s, t_y) = \left[ \sum_{t_d=1}^{90} \|V\|^2(p, t_d, t_s, t_y) \right] / 90 \quad (2)$$

分别求得海温场和风场季内振荡分量在  $t_y$  年、 $t_s$  季、第  $p$  点的  $E_{\text{SST}}(p, t_s, t_y)、E_V(p, t_s, t_y)$ ,它是 ISO 强度的度量,其中  $\| \cdot \|$  为求模运算符。对指定均匀经纬格点网上的区域  $\Omega$  不计面积因子  $\cos \varphi$  时,根据下式求得  $t_y$  年、 $t_s$  季区域平均 ISO 强度指数。

$$E_{\text{SST}}^*(t_s, t_y) = \left[ \int_{\Omega} E_{\text{SST}}(p, t_s, t_y) \text{d}\varphi \right] / \Omega \quad (3)$$

$$E_V^*(t_s, t_y) = \left[ \int_{\Omega} E_V(p, t_s, t_y) \text{d}\varphi \right] / \Omega \quad (4)$$

它们是区域  $\Omega$  上  $t_y$  年、 $t_s$  季趋于平均 ISO 强度的度量。

季内振荡分量场的时间序列、其强度指数场的时间序列及其区域平均值的时间序列,是本文的主要分析对象。

## 2 SST 季内振荡强度的季节变化特征

上节定义的季内振荡强度指数是海表温度季内振荡强度的表征量,下面给出其多年平均逐季分布情况,并分析其与气候混合层厚度的关系。

图 1 给出了逐季海表温度季内振荡强度指数的分布。由图 1 可见,存在 3 个 SST 季内振荡活跃

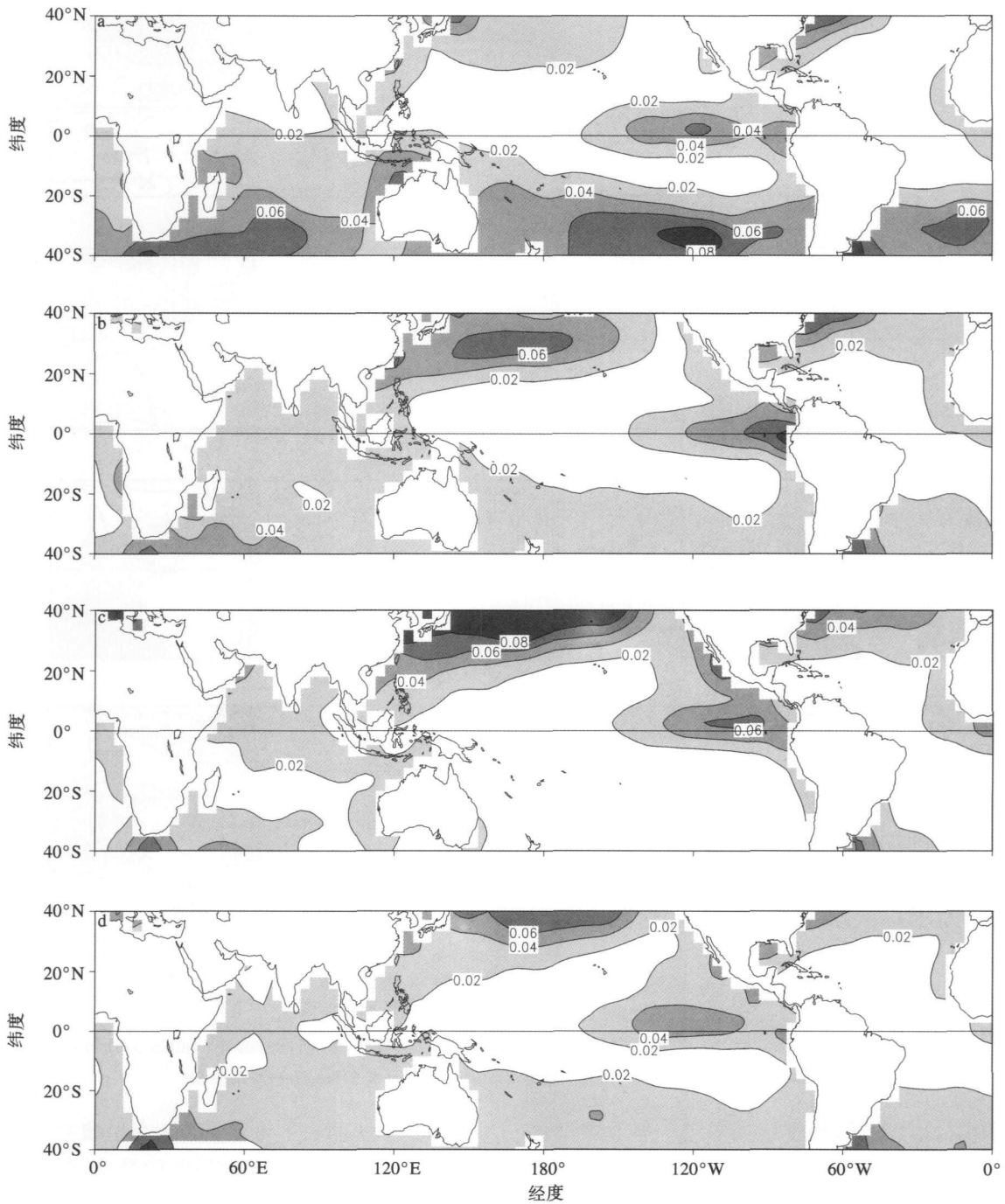


图 1 SST 的逐季 ISO 强度分布 (等值线间隔  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ , 阴影区值  $> 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ )

a 12 月—次年 2 月; b 3—5 月; c 6—8 月; d 9—11 月

Fig. 1 Climatological fields of SST ISO intensity (Contour interval is  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ ; the shaded values  $> 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ )

a December-February; b March-May; c June-August; d September-November

区, 即热带东太平洋 (tropical equatorial Pacific, TEP), 终年存在; 西北太平洋 (north western Pacific, NWP), 北半球春、夏、秋 3 季存在, 夏季最强; 西南太平洋 (south western Pacific, SWP), 南半球春末、夏、秋初存在, 夏季最强。热带西太平洋 (tropical western Pacific, TWP) 终年为同纬度带季内振荡的

不活跃区。

研究<sup>[9, 14-15]</sup>指出, 海洋混合层厚度的变化会影响 SST 季内振荡的强度。为进一步分析太平洋区域二者的关系, 用 1982—2001 年逐月混合层厚度场计算得到逐年季平均的混合层厚度场序列。图 2 给出了逐季混合层厚度分布场。与图 1 中 3 个 SST

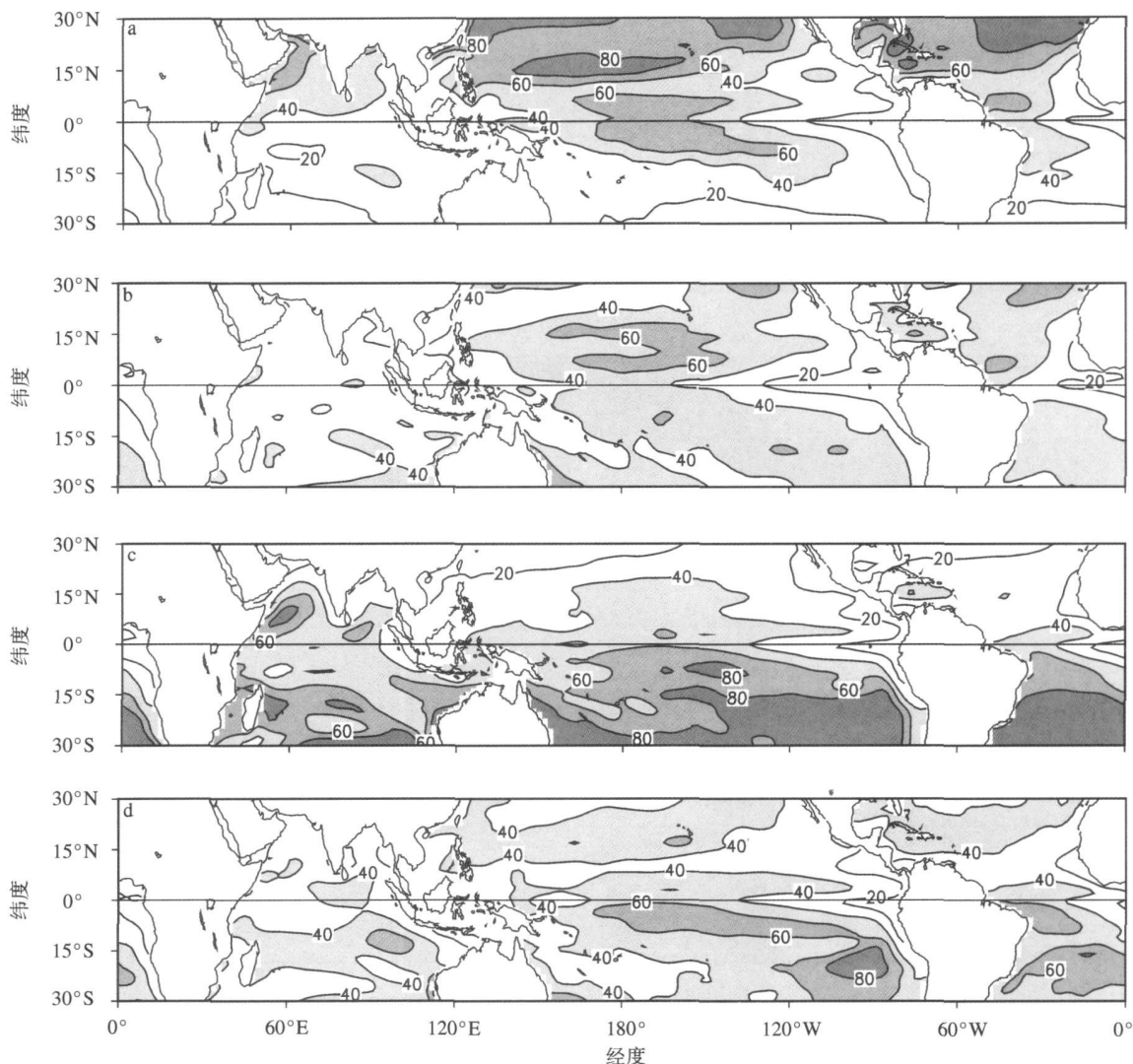


图 2 逐季混合层厚度 (等值线间隔 20 m, 阴影区值 > 40 m)

a 12月—次年 2月; b 3—5月; c 6—8月; d 9—11月

Fig. 2 Climatological fields of mixed-layer depth (Contour interval is 20 m; the shaded values > 40 m)

a December-February; b March-May; c June-August; d September-November

季内振荡活跃区相比, 热带东太平洋 4季为同纬度混合层较薄区域, 西北太平洋 (西南太平洋) 在 6—8月 (12月—次年 2月, 为南半球夏季) 前后混合层厚度最薄。热带西太平洋虽然 4季均在混合层厚度低值带内, 但它是同纬度混合层相对厚的区域。因此, 气候上强的 SST 季内振荡区域与气候上薄的混合层厚度区同季出现, 位置重合。

为了清楚显示 SST 季内振荡强度与混合层厚度的上述关系, 依据图 1、2 划定了 4 个指标区, 即 (1) 热带东太平洋 (TEP):  $140^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$ ,  $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ ; (2) 西北太平洋 (NWP):  $160^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$ ,  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{N}$ ; (3) 西南太平洋 (SWP):  $160^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$ ,  $30^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{S}$ ; (4) 热带西太平洋 (TWP):  $130^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$ ,  $5^{\circ}\text{S}$

$\sim 5^{\circ}\text{N}$ 。表 1 给出了 4 个季节 4 个区域平均的混合层厚度值。SST 季内振荡最强的夏季, 西北太平洋 (西南太平洋) 混合层厚度为  $24.87\text{ m}$  ( $20.82\text{ m}$ ), 为 4 个季节中混合层厚度最薄的季节, 热带东太平洋也比同纬度的热带西太平洋区域混合层厚度薄, 这些都反映了图 1、2 所示的气候关系。

表 1 区域气候平均的混合层厚度

Table 1 Regionally mean climatological

	mixed-layer depth				m
	TEP	NWP	SWP	TWP	
12月—次年 2月	30.68	72.28	20.82	50.22	
3—5月	21.60	37.79	42.39	43.46	
6—8月	36.93	24.87	80.14	48.40	
9—11月	38.33	44.19	40.36	43.67	

众所周知, 海洋是热惯性巨大的系统, 季内振荡作为海洋中的一种快变过程是很难发展的。但当混合层厚度较小 (例如混合层厚度  $< 40 \text{ m}$ ) 时, 因为参与变化的仅是海洋上层与混合层对应的较薄的一部分海水, 其热惯性较之整个海洋要小得多, 故季内振荡的发展是可能的。

### 3 SST 季内振荡强度异常的原因

涉及季内振荡强度年际异常的研究较少, 其年际异常的机制还不清楚, 本文主要分析其与混合层厚度及海表温度异常的关系, 为进一步研究其年际异常机制提供线索。

表 2 给出了太平洋指标区逐季海表温度季内振荡强度指数与混合层厚度的相关系数。可见, 热带东太平洋 (4 季)、西北太平洋 (夏季) 区域二者为显著负相关, 在西南太平洋 (4 季) 为负相关 (南半球秋、冬季负相关显著)。热带西太平洋区域二者 4 季无显著相关, 原因在于该区混合层厚度较大。

表 2 太平洋指标区逐季季内振荡强度指数与混合层厚度的相关系数

Table 2 Seasonally correlation coefficients between intraseasonal oscillation intensity index and mixed layer depth

	TEP	NWP	SWP	TWP
12月—次年 2 月	-0.79 <sup>1)</sup>	0.27	-0.37	-0.18
3—5 月	-0.43 <sup>1)</sup>	-0.42	-0.59 <sup>1)</sup>	0.06
6—8 月	-0.59 <sup>1)</sup>	-0.60 <sup>1)</sup>	-0.49 <sup>1)</sup>	0.28
9—11 月	-0.72 <sup>1)</sup>	-0.30	-0.036	-0.31

注: 1) 通过 0.05 的显著性水平检验。

上述结果表明, SST 季内振荡强度显著异常发生在混合层厚度小的区域和季节 (SWP 区除外), 混合层厚度异常变小 (增大) 伴随 SST 季内振荡增强 (减弱); 在物理上, 这与气候分析中 SST 季内振荡强度与混合层厚度的关系具有内在一致性。

研究<sup>[2-8]</sup>指出, SST 季内振荡强度异常与海表温度存在一定关系。本文计算了太平洋指标区域内 SST 季内振荡强度指数与海表温度的相关系数, 热带东太平洋区域为 -0.68 西北、西南太平洋区域为 0.23 0.25 热带西太平洋区域的相关不显著, 可见, SST 季内振荡强度与海表温度相关性随区域而变。相比之下, 表 2 给出了一致的负相关, 关系简洁。统计结果的这种差异表明, SST 季内振荡强度与混合层厚度的相关更接近于物理本质, 而与海表温度的相关是间接和表象的。海表温度异常对海表温度季内振荡强度异常的影响需要通过影响混合层

厚度来产生影响, 这在第 4 节中可以看出。

### 4 北太平洋夏季海表温度和风场季内振荡关系的基本模态

文献 [31] 指出, 在海气界面上, 大量的动能仅从风传输到海洋, 潜热通量总是从海洋指向大气, 感热的总向上通量也比向下通量大。海洋、大气这两种介质的动力学性质是由这些占优势的单向能量输送联系起来的。前文分析表明, 北半球夏季的海洋混合层厚度最薄, 而其海表温度季节内振荡最强。那么北太平洋区域海表温度和表面风场在季内尺度上存在怎样的相互作用? 下面采用向量奇异值分解 (singular value decomposition SVD) 方法<sup>[32]</sup>, 从 1982—2001 年共 20 a 的 5—9 月北太平洋  $T_{\text{SST}}$  和  $V$  场逐日序列 (长度为 153 d) 中提取其相互作用的基本模态 (即 SVD 第 1 模态), 以阐明该区域海气界面附近两种介质季内振荡的基本物理过程。

取北太平洋区域 ( $120^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{W}$ ,  $15 \sim 40^\circ\text{N}$ ) 相应时段逐日季内振荡  $T_{\text{SST}}$  场时间序列, 记为  $T_{\text{SST}}(t_d, t_y)$ ,  $t_d = 1, 2, \dots, T_d$  ( $T_d$  是每年总日数 153),  $t_y = 1, 2, \dots, T_y$  ( $T_y$  为总年数 20); 与之匹配的时滞  $\tau$  的  $V$  场时间序列记为  $V(t_d - \tau, t_y)$ ,  $\tau$  取  $0, \pm 5, \pm 10, \pm 15, +20 \text{ d}$ 。SVD 对  $V$  超前  $T_{\text{SST}}$   $\tau$  的两要素场集进行; 求得其最优时滞相关后, 用它相应的奇异向量构成相应风场  $V$ 、海表温度场  $T_{\text{SST}}$  的 8 位相基本配置图, 以阐明海气界面附近季内振荡的基本物理过程。

表 3 给出北太平洋 5—9 月时滞  $\tau$  的第 1 模态导出量  $\rho_1$  (第 1 模态对协方差矩阵的方差贡献)、 $r_1$  (第 1 模态时间系数的相关系数),  $\rho_1$ 、 $r_1$  对显著性水平  $\alpha = 0.05$  均是显著的。可见,  $V$  超前  $T_{\text{SST}}$  约 15 d (抛物线法确定的精确日为 14.93 d) 时二者相关关系最强。

表 3 北太平洋区域  $V$  超前  $T_{\text{SST}}$   $\tau$  的 SVD 的  $\rho_1$ 、 $r_1$

Table 3 Variance percentage  $\rho_1$  and temporal correlation coefficient  $r_1$  of the SVD1 of  $V$  at  $\tau$  days lead and  $T_{\text{SST}}$  in the North Pacific

$\tau$	$\rho_1 / \%$	$r_1$	$\tau$	$\rho_1 / \%$	$r_1$
20	35.7	0.64	0	29.5	0.60
15	40.2	0.72	-5	38.8	0.69
10	36.4	0.79	-10	36.7	0.74
5	31.5	0.70	-15	32.2	0.65

图 3 给出了北太平洋 5—9 月  $V$  超前  $T_{\text{SST}}$  15 d 的 SVD 第 1 对奇异向量 (图 3a) 及其时间系数 (图

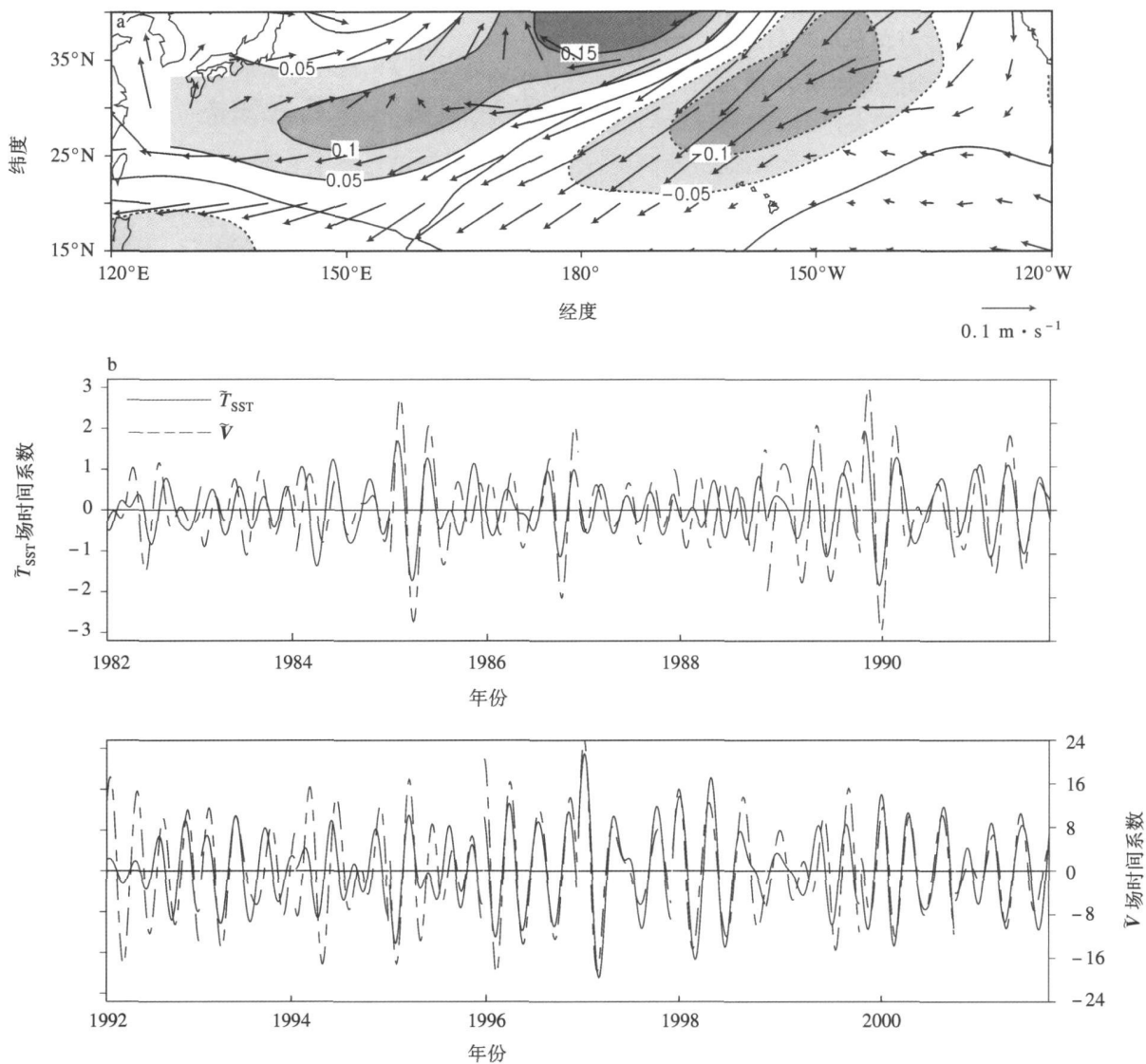


图 3 北太平洋 5—9 月  $V$  超前  $T_{SST}$  15 d 的 SVD 第 1 模态

a 奇异向量 (箭头表示  $V$ , 单位:  $m/s$ ; 阴影区表示  $T_{SST}$ , 单位:  $^{\circ}C$ ); b 时间系数

Fig. 3 The SVD 1 of  $V$  at 15-d lead and  $T_{SST}$  in the North Pacific

a Singular vectors (vectors and shadings denote  $V(m/s)$  and  $T_{SST}(^{\circ}C)$ , respectively); b time series

3b)。由图 3 可见,  $V$  场北太平洋中部受一支东北气流控制, 其西北侧为反气旋性切变区, 东南侧为气旋系统 (切变涡旋为主) 的一部分。  $T_{SST}$  (滞后 15 d) 与之对应部分分别为正、负海温区。这种海面风、海表温度的配置与通过漂流输送引起的稳定层结海洋 SST 分布相同 (即反气旋控制区表层海水辐合下沉, SST 偏高; 反之亦然)。图 3b 中近似的周期振荡 (统计求得其平均周期约为 50 d) 的振幅存在年际和季内差异; 图中时间轴对  $T_{SST}$  给出,  $t_d$  时  $V$  对应的值应为  $t_d - \tau$  时的值。图 3 给出的是海气系统中与季内振荡相应的  $V$ 、 $T_{SST}$  变化的基本模态, 时间系数表明它有约 50 d 的周期振荡。

因为基本模态从气候角度给出了风场和海表温度场季内振荡相关的主要部分, 且为驻波型振荡 (系统只发生强度改变, 不发生移动), 所以, 本文将时间系数的一个振荡理想化为一个周期  $T = 50$  d (位相为  $2\pi$ ) 的谐波  $\sin(2\pi t_d/T)$ 。根据能量守恒原则, 确定了与季内振荡风场、海表温度场对应的理想时间系数振荡的振幅, 分别为 10.62、1.11。图 4 给出了北太平洋区域间隔  $T/8$  (对应  $\pi/4$  位相) 的 8 个时刻 (位相) 的  $V$ 、 $T_{SST}$  配置。

图 4 表明,  $n = 0$  时 (图 4a), 存在一个强的风场和一个均匀的海温场。由于漂流作用, 将在西 (东) 部反气旋 (气旋) 区海面逐渐形成正 (负) 海温区; 同

时, 由于海向气的感热输送, 西(东)部的反气旋(气旋)开始减弱(图 4b)。该过程将持续至  $n = 2$  时(图 4c), 此时已形成一个强的东冷西暖的海温场,

而风场减弱为零场。从  $n = 2$ (图 4c)起至  $n = 4$ (图 4e), 一个相反的风场在海温场的作用下形成、加强, 并通过漂流削弱海温场, 最终使其成为 0 场。  $n$

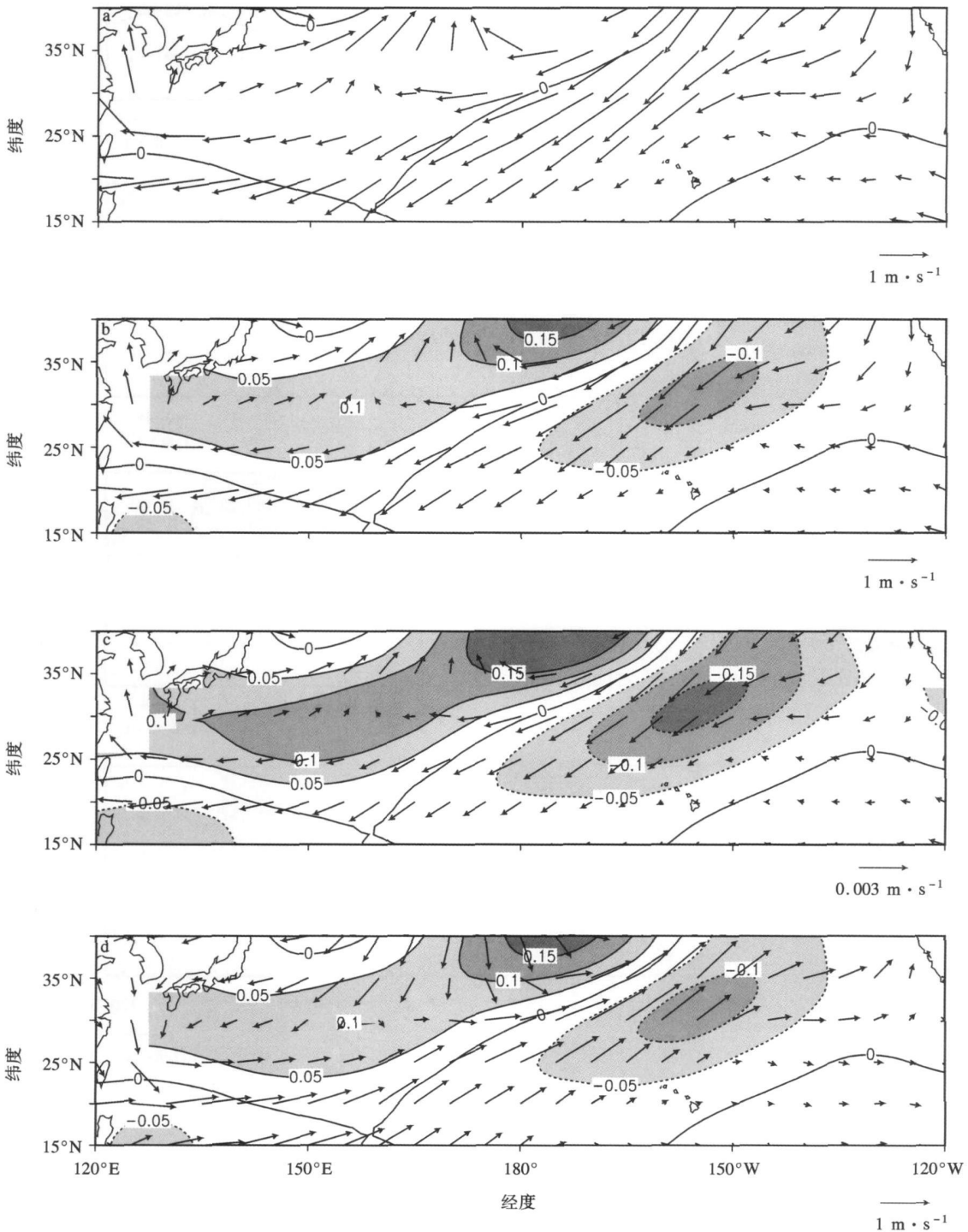


图 4 北太平洋 5—9 月  $V$ (单位:  $m/s$ )、 $T_{SST}$ (单位:  $^{\circ}C$ ) 在不同  $n$  时的同时关系

$a n = 0 \quad b n = 1; \quad c n = 2 \quad d n = 3$

Fig 4 The simultaneous relationship of May-September  $V(m/s)$  and  $T_{SST}(^{\circ}C)$  in the North Pacific

$a n = 0 \quad b n = 1; \quad c n = 2 \quad d n = 3$



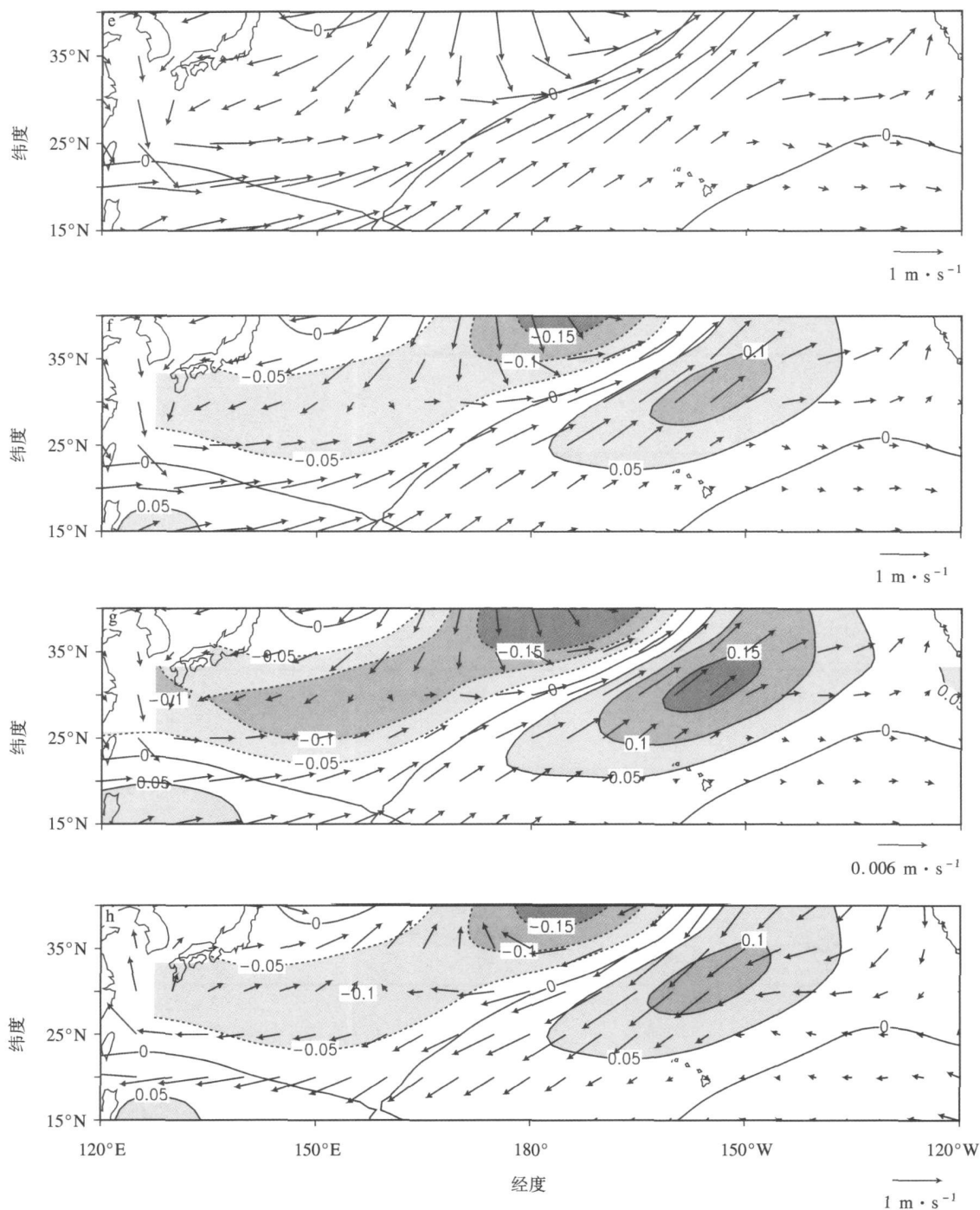


图 4 (续) e n = 4 f n = 5 g n = 6 h n = 7

Fig 4 (continued) e n = 4 f n = 5 g n = 6 h n = 7

从 4 变化至 7 的过程 (图 e—图 h) 类似于 n 从 0 变化至 3 的过程 (图 a—图 d), 只是风场、海温场的变化形势相反。

由此可见, 基本模态给出的季内振荡过程是一个负反馈过程。在这个过程中, 大气对海洋通过漂流起作用 (动力的), 海洋对大气通过感热输送起作用 (热力作用)。可以设想这一负反馈过程与薄的

混合层厚度有关, 但需要凭借详细的逐日浅层海温、海流资料的诊断才能予以证实。

## 5 结论

本文研究了太平洋区域海表温度季内振荡的气候及异常特征, 重点探讨了北太平洋夏季海气系统季内振荡相互作用的基本物理过程。结果发现, 太



平洋海表温度季内振荡存在 3 个气候高强度区, 即热带东太平洋, 终年存在; 西北太平洋, 北半球春、夏、秋季存在; 西南太平洋, 南半球夏季前后存在; 它们出现在气候混合层厚度最小的区域和季节。上述区域海表温度季内振荡强度年际异常与混合层厚度年际异常存在显著的负相关联系, 在物理上这种关系比它与海表温度异常的关系更直接。得到了北太平洋 5—9 月地面以上 10 m 高度处风场季内振荡与海表温度季内振荡的基本耦合模态, 该模态揭示出以漂流和感热输送为动力的一个负反馈过程, 它存在于薄混合层海区, 使得强海表温度季内振荡得以维持。该负反馈过程可能依赖于薄混合层存在的事实, 尚需逐日浅海温度和海流观测资料的进一步证实。

## 参考文献:

- [ 1 ] Madden R A, Julian P R. Observations of the 40—50-day tropical oscillation—A review [ J ]. *Mon Wea Rev*, 1994, 122( 5 ): 814—837
- [ 2 ] Hendon H H, Salby M L. The life cycle of the Madden-Julian oscillation [ J ]. *J Atmos Sci* 1994, 51( 15 ): 2225—2237
- [ 3 ] Lin X, Johnson R H. Heating moistening and rainfall over the western Pacific warm pool during TOGA COARE [ J ]. *J Atmos Sci* 1996, 53( 22 ): 3367—3383
- [ 4 ] Zhang C D. Atmospheric intraseasonal variability at the surface in the tropical western Pacific Ocean [ J ]. *J Atmos Sci* 1996, 53( 6 ): 739—758
- [ 5 ] Lau K M, Sui C H. Mechanisms of short-term sea surface temperature regulation Observations during TOGA COARE [ J ]. *J Climate* 1997, 10( 3 ): 465—472
- [ 6 ] Fasullo J, Webster P J. Warm pool SST variability in relation to the surface energy balance [ J ]. *J Climate* 1999, 12( 5 ): 1292—1305
- [ 7 ] Woollough S J, Slingo J M, Hoskins B J. The relationship between convection and sea surface temperature on intraseasonal time scales [ J ]. *J Climate* 2000, 13( 12 ): 2086—2104.
- [ 8 ] Vecchi G A, Harrison D E. Monsoon breaks and subseasonal sea surface temperature variability in the Bay of Bengal [ J ]. *J Climate* 2002, 15( 12 ): 1485—1493
- [ 9 ] Shinoda T, Hendon H H. Mixed layer modelling of intraseasonal variability in the tropical Western Pacific and Indian Ocean [ J ]. *J Climate* 1998, 11( 10 ): 2668—2685.
- [ 10 ] Jones C, Waliser D E, Gautier C. The influence of the Madden-Julian Oscillation on ocean surface heat fluxes and sea surface temperature [ J ]. *J Climate* 1998, 11( 5 ): 1057—1072.
- [ 11 ] Weller R A, Anderson S P. Surface meteorology and air-sea fluxes in the western equatorial Pacific warm pool during the TOGA Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment [ J ]. *J Climate* 1996, 9( 8 ): 1959—1990
- [ 12 ] Sui C H, Li X, Lau K M, et al. Multiscale air-sea interaction during TOGA COARE [ J ]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125( 4 ): 448—462.
- [ 13 ] Chou S H, Zhao W, Chou M D. Surface heat budgets and sea surface temperature in the Pacific warm pool during TOGA COARE [ J ]. *J Climate* 2000, 13( 3 ): 634—649.
- [ 14 ] Hendon H H, Glick J. Intraseasonal air-sea interaction in the tropical Indian and Pacific oceans [ J ]. *J Climate* 1997, 10( 4 ): 647—661.
- [ 15 ] Lukas R, Lindstrom E. The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean [ J ]. *J Geophys Res* 1991, 96( suppl ): 3343—3357.
- [ 16 ] Knutson T R, Weickmann K M. 30—60 day atmospheric oscillation Composite life cycles of convection and circulation anomalies [ J ]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115( 7 ): 1407—1436.
- [ 17 ] Maloney E D, Hartmann D L. Modulation of eastern north Pacific hurricanes by the Madden-Julian oscillation [ J ]. *J Climate* 2000, 13( 9 ): 1451—1460
- [ 18 ] 李丽平, 王盘兴, 管兆勇. 大气季内振荡研究进展 [ J ]. *南京气象学院学报*, 2002, 25( 4 ): 565—572
- [ 19 ] 蒋国荣, 刘庭杰, 何金海. 热带季内振荡研究新进展 [ J ]. *南京气象学院学报*, 2005, 28( 2 ): 281—288
- [ 20 ] Zhang C. Madden-Julian Oscillation [ J ]. *Reviews of Geophysics* 2005, 43( 2 ): 1—36
- [ 21 ] 孙即霖, 李立. 赤道太平洋低频波动的某些特征 [ J ]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28( 3 ): 363—369
- [ 22 ] Liu Qinyu, Sun Jilin. Some characteristics of intraseasonal variation in the mixed layer of “Warm Pool” area [ J ]. *Chin J Ocean Limnol* 1996, 14( 4 ): 368—372.
- [ 23 ] 刘秦玉, 王启. 热带太平洋海平面高度季节内振荡的空间分布特征 [ J ]. *青岛海洋大学学报*, 1999, 29( 4 ): 549—555.
- [ 24 ] 周发秀, 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.
- [ 25 ] Zhang C. Intraseasonal variability of the upper-ocean thermal structure observed at 0° and 165° E [ J ]. *J Climate* 1997, 10( 12 ): 3077—3092
- [ 26 ] 汪晓娇, 刘庭杰. 南海海气界面通量及 SST 的季节内振荡 [ C ] // 气象科技与社会经济可持续发展: 中国气象学会 2005 年年会文集. 北京: 气象出版社, 2005 131.
- [ 27 ] 李丽平, 王盘兴, 郑秀云. 北太平洋浅层海温时空特征及区域海气相互作用的诊断分析 [ J ]. *南京气象学院学报*, 2003, 26( 2 ): 145—154
- [ 28 ] 李峰, 何金海. 太平洋区域海温跃变及其与东亚夏季风的关系 [ J ]. *气象科学*, 2001, 21( 1 ): 28—35
- [ 29 ] 徐洪蕾, 张铭. 东亚、南亚夏季降水对海温异常响应的数值模拟 [ J ]. *气象科学*, 2005, 25( 4 ): 331—337
- [ 30 ] 严华生, 吕俊梅, 琚建华, 等. 冬季太平洋海温变化对中国 5 月降水的影响 [ J ]. *气象科学*, 2002, 22( 4 ): 410—415.
- [ 31 ] Kraus E B. *A atmosphere-ocean interaction* [ M ]. Oxford: Clarendon Press 1972
- [ 32 ] 王盘兴, 周伟灿, 王欣, 等. 气象向量场的奇异值分解及其应用 [ J ]. *南京气象学院学报*, 1997, 20( 2 ): 152—157.