

文章编号: 1000-2022(2003) 05-0646-07

## 太平洋混合层厚度( $d_{ml}$ ) 年际异常的初步分析

李 泓, 李丽平, 王盘兴, 占瑞芬, 支风梅

(南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044)

**摘 要:** 用太平洋区域 30 a 逐月混合层厚度( $d_{ml}$ ) 及浅层海温( $T_s$ ) 距平资料, 分析了 20°S 以北太平洋区域  $d_{ml}$  年际变率的地理分布和季节变化, 得到两个纬向  $d_{ml}$  高变率带, 它们分别位于北太平洋(45°N 附近) 和赤道中、西太平洋。重点分析了赤道太平洋  $d_{ml}$  高变率带, 并对其上混合层气候位置、 $d_{ml}$  年际异常与 El Nino 事件关系及伴随强 El Nino 事件的  $d_{ml}$  正异常东传等作了初步分析。

**关键词:** 太平洋区域; 混合层厚度( $d_{ml}$ ); 年际异常; El Nino 事件

**中图分类号:** P733 **文献标识码:** A

混合层是指温跃层以上水温基本均一的暖水层。实际工作中, 常取低于表层海水温度  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}^{[1]}$  (或  $1\text{ }^{\circ}\text{C}^{[2]}$ ) 的水体所在深度作为混合层下界, 而混合层上界为 0 m, 故下界深度即为混合层厚度(mixed layer depth, 缩写为  $d_{ml}$ )。由于海洋温度实测资料的匮乏, 以往关于混合层和温跃层的研究多数根据较短资料给出局部海洋的二者结构, 例如文献[3-5] 给出的大西洋东北部、湾流和赤道太平洋上的研究结果。

近年来的研究表明, 混合层在海气相互作用过程中具有重要作用。在存在强温跃层的海域和季节, 温跃层稳定的层结隔断了混合层与其下海水的热量交换, 使参与海气相互作用的海洋仅限于混合层<sup>[6]</sup>。巢纪平等<sup>[7]</sup>的研究认为, 深厚混合层(有大的热容量) 与弱海气相互作用相联系。张向东等<sup>[8]</sup>的研究指出, 热带太平洋区域风应力的年际异常可引起  $d_{ml}$  的扰动, 它可能是 ENSO 循环的一种动力机制。张人禾等<sup>[9]</sup>则分析了赤道太平洋混合层厚度的变化机制。可见, 关于  $d_{ml}$  的研究有实际需要。同时, 海洋研究也提供了一些质量较好的资料, 使对  $d_{ml}$  的全面分析成为可能。

本文利用 1969—1998 年混合层厚度距平( $d_{ml}$ ) 与太平洋浅层海温( $T_s$ ) 资料, 对太平洋区域混合层厚度年际异常的时(指季节、年际) 空(指地理区域) 变化、 $d_{ml}$  年际异常与 El Nino 事件的关系及伴随强 El Nino 事件  $d_{ml}$  正异常沿赤道东传等作了初步分析。

收稿日期: 2002-09-06; 改回日期: 2002-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49975025)

作者简介: 李 泓(1971-), 女, 浙江杭州人, 硕士, 现为美国马里兰大学气象学博士研究生。

1 资料及预处理

1.1 资 料

资料来源于美国 Scripps 海洋研究所环境数据分析中心(JEDAC)。根据研究工作需要, 考虑到一些辅助资料(El Nino 事件历史资料) 质量, 本文选用了如下资料: 1) 1969—1998 年 30 a 热带和北太平洋区域(20°S ~ 60°N) 逐月混合层厚度距平( $d'_{ml}$ ) 资料, 网格距为  $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 2^\circ \times 5^\circ$ ; 2) 同期、同区域、同格点网、浅层 11 个标准层的月平均海温距平( $T_s$ ) 资料, 11 个标准层为 0、20、40、60、80、120、160、200、240、300 和 400 m。

1.2 预处理

对上述 30 a 距平资料作了中心化、标准化处理。为此, 设被截取的某空间点上的要素时间序列为

$$x_0(t), \quad t = 1 \sim 360. \tag{1}$$

它的另一形式为

$$x_0(t_m, t_y), \quad t_m = 1 \sim 12, t_y = 1 \sim 30. \tag{2}$$

右下标 0 为原距平资料(1955 年 1 月—1998 年 12 月) 标志;  $t_m, t_y$  可称为时序、月序、年序, 三者关系为:  $t = 12(t_y - 1) + t_m$ 。

由(2) 式, 求得 30 a 平均距平修正值

$$\bar{x}_0(t_m) = \frac{1}{30} \sum_{t_y=1}^{30} x_0(t_m, t_y) \tag{3}$$

及 30 a 距平序列(即异常序列)

$$x(t_m, t_y) = x_0(t_m, t_y) - \bar{x}_0(t_m). \tag{4}$$

相应的标准化距平序列为

$$x(t_m, t_y) = \frac{x_0(t_m, t_y)}{\sigma(t_m)}. \tag{5}$$

式中均方差

$$\sigma(t_m) = \left[ \frac{1}{30} \sum_{t_y=1}^{30} x^2(t_m, t_y) \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{6}$$

由(6) 式求得的标准化距平的另一形式为  $x(t)$ ,

$$x(t) = x(t_m, t_y). \tag{7}$$

本文用  $\sigma(t_m)$  表示年际变率, 用  $x(t)(x(t))$  表示包含(滤除) 方差季节变化的年际异常。

2 太平洋混合层厚度气候变率的时(季节) 空( $\lambda, \varphi$ ) 变化

利用  $d_{ml}$  均方差  $\sigma$  分析其年际异常强度的时( $t_m$ ) 空( $\lambda, \varphi$ ) 变化, 来了解太平洋区域  $d_{ml}$  的基本气候特征。

图 1、2 分别给出了年及四个季中月的太平洋  $d_{ml}$  均方差分布, 年均方差取月均方差的几何平均, 即

$$\sigma = \sqrt{\sum_{t_m=1}^{12} \frac{\sigma^2(t_m)}{12}}. \tag{8}$$

由图 1、2 得  $d_{ml}$  变率的基本特征为: 1) 终年存在两个纬向分布的高值  $\sigma$  带: 北太平洋高变

率带和赤道中、西太平洋高变率带(简称赤道太平洋高变率带,下同),它们被副热带低值区分隔开。2) 北太平洋高变率带强度(以内圈等值线 $\sigma$ 值定义)大,达 30 m(图 1);但季节变化大,春季强度达 60 m,冬季仅为 10 m,几乎不成为带(图 2)。3) 赤道太平洋高变率带强度小,仅为 10 m(图 1);但其季节变化小,1 月稍强,7 月稍弱(图 2)。

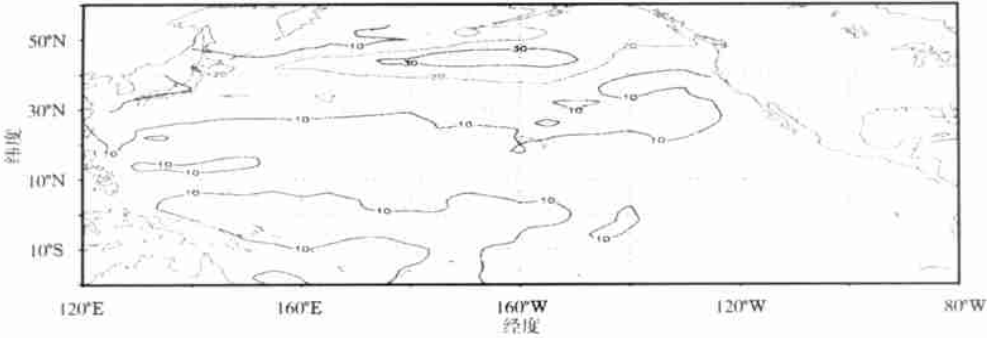


图 1 太平洋  $d_{m1}$  年均方差 (等值线间隔为 10 m)

Fig. 1 Yearly mean square deviation of  $d_{m1}$  for Pacific (The contour interval is 10 m)

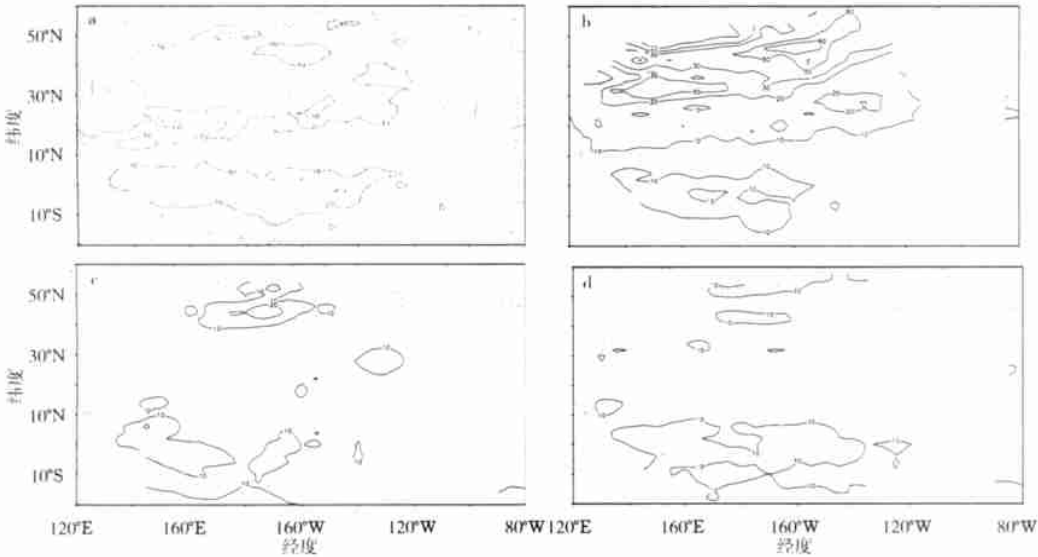


图 2 太平洋  $d_{m1}$  季中月均方差 (等值线间隔为 10 m)

a. 1 月; b. 4 月; c. 7 月; d. 10 月

Fig. 2 Monthly mean square deviation of  $d_{m1}$  for Pacific (The contour interval is 10 m)

a. Jan.; b. Apr.; c. Jul.; d. Oct.

由此可见,太平洋区域存在两个  $d_{m1}$  高变率带。北太平洋高变率带(45°N)强,但季节稳定性差;赤道太平洋高变率带相对较弱,但四季稳定存在。下面,从浅层海温异常角度对这两个高变率带作进一步的分析和讨论。

3  $d_{m1}$  高变率带上混合层气候位置估计

仅根据  $d_{m1}$  不能得到混合层气候态位置估计。但是,由混合层层结特性  $\frac{\partial T_s}{\partial Z} \approx 0$ , 及其下温跃

层(有一定厚度, 其 upper 即为混合层下界)层结特性  $\partial T_s / \partial z$  明显大于 0 可知, 假如某种海气相互作用过程导致层结稳定的温跃层产生明显的垂直方向的年际扰动, 则在温跃层气候位置附近将产生一个  $T_s$  的高变率层。据此, 可以由  $T_s$  气候变率(即  $T_s$  的  $\sigma$ )的  $\lambda \sim z$  剖面图间接估计混合层和温跃层的气候位置。

3.1 北太平洋混合层气候位置

绘制了各季中月太平洋 45°N 和赤道  $T_s$  的  $\sigma$  垂直剖面图, 结果发现二者在形态上差异极大。与北太平洋  $d_{ml}$  高变率带对应的 45°N  $T_s$  的  $\sigma$  垂直剖面图(略)的每张图上均不存在有组织的系统, 且不同季节的图差异甚大。因此, 依靠  $T_s$  变率的垂直剖面图估计该混合层位置是不可能的。

问题的本质在于, 中高纬海区海表温度( $T_{ss}$ )较热带地区低许多, 以 45°N 的太平洋区域为例, 计算得到其 1、4、7、10 月的  $T_{ss}$  多年时空平均值[ $\overline{T_{ss}}$ ]分别为 7.8、7.7、15.2、14 ; 而深海的相应值与热带区域相同(约为 0 )。因此, 北太平洋(45°N)的温跃层很弱, 且存在明显季节变化(冬、春季无严格意义温跃层); 从而导致该区域混合层下界的模糊。这种情形 Perry<sup>[3]</sup>在东北大西洋海区温跃层研究中早已指出。

3.2 赤道混合层气候位置

与赤道太平洋  $d_{ml}$  高变率带对应的赤道  $T_s$  的  $\sigma$  垂直剖面图(图 3)上清晰地显示出一个极大值带, 它横贯赤道太平洋; 四季位置稳定、强度变化不大。极大值轴线(粗实线)所在深度自东

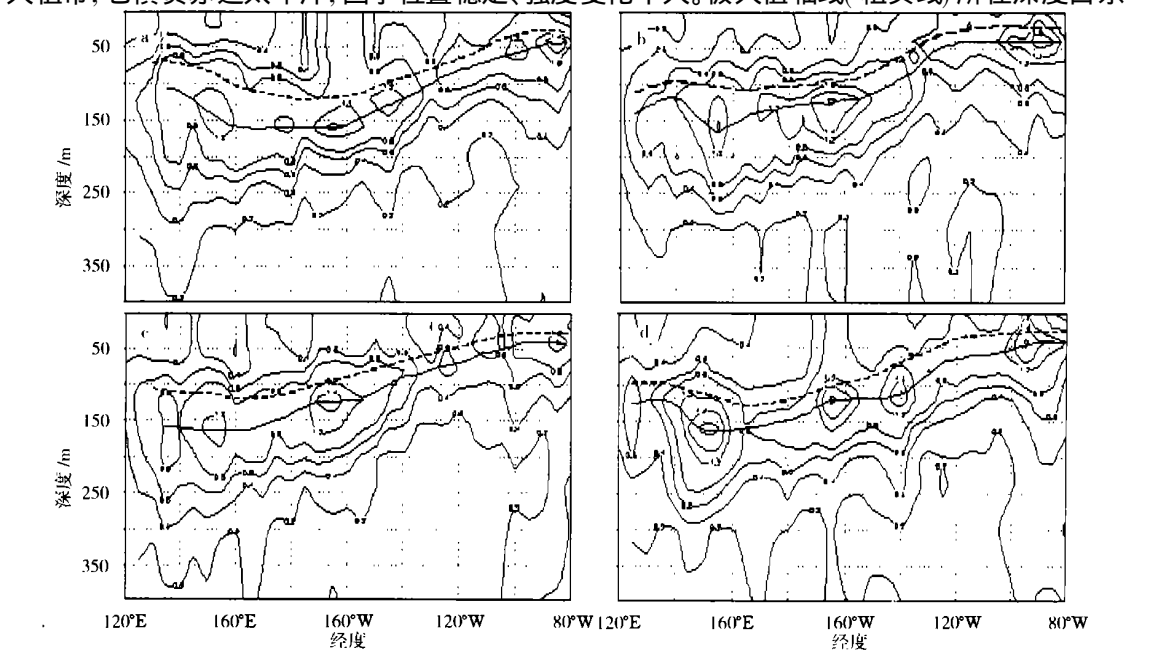


图 3 赤道太平洋  $T_s$  均方差垂直剖面  
(图中粗实、虚线为温跃层  $\partial T_s / \partial z$  高值层平均深度和混合层下界估计, 等值线间隔为 0.2 )  
a. 1 月; b. 4 月; c. 7 月; d. 10 月

Fig. 3 Vertical section of mean square deviation of  $T_s$  in the equatorial Pacific  
(The thick solid and dashed line denote mean depth of  $\partial T_s / \partial z$  high value level and below boundary estimation of mixing level respectively, the contour interval is 0.2 )  
a. Jan. ; b. Apr. ; c. Jul. ; d. Oct.

太平洋的不足 50 m 向西逐渐加深,在国际日界线及以西达 150 m 左右。然而,在印尼海域的 1、4、10 月,粗实线所在深度向西减小。显然,粗实线给出了赤道太平洋温跃层  $\partial T_s / \partial Z$  高值层平均深度的气候位置,而混合层下界的气候位置应在它的上面,图中粗虚线是对混合层下界气候位置的一个估计,它与温跃层气候位置随经度变化的特征相同。混合层的这种特征的成因被认为是信风作用所致<sup>[10]</sup>。

4 赤道太平洋混合层厚度年际异常的某些特征

混合层厚度年际异常即  $d'_{ml}$ 。这里主要分析它与 El Nino 事件的关系及强异常沿赤道的传播特征。为了完全消除季节变化,这里使用标准化混合层厚度距平  $d'_{ml}$ 。

4.1 区域平均  $d'_{ml}$  与 El Nino 事件的关系

定义  $t$  时刻在区域  $D$  上的平均值为

$$[d'_{ml}] = d'_{ml} \iint_D \frac{d'_{ml}(\lambda, \varphi) ds}{S_D} \tag{9}$$

式中,  $D$  为 CAC<sup>[11]</sup> 定义的 Nino3 (150 ~ 90 W, 5 N ~ 5 S)、Nino4 (160 E ~ 150 W, 5 N ~ 5 S)、Nino-west 区域 (130 ~ 150 E, 0 ~ 15 N),  $S_D$  为  $D$  区域面积; 由于上述三区域临近赤道, 故离散化 (10) 式未考虑面积因子  $\sin \varphi$ 。由此得到 Nino3、Nino4、Nino-west 区相应的  $[d'_{ml}]$  指数。图 4 给出了它们与 1969—1998 年间发生的 9 次 El Nino<sup>[12]</sup> 事件的关系。

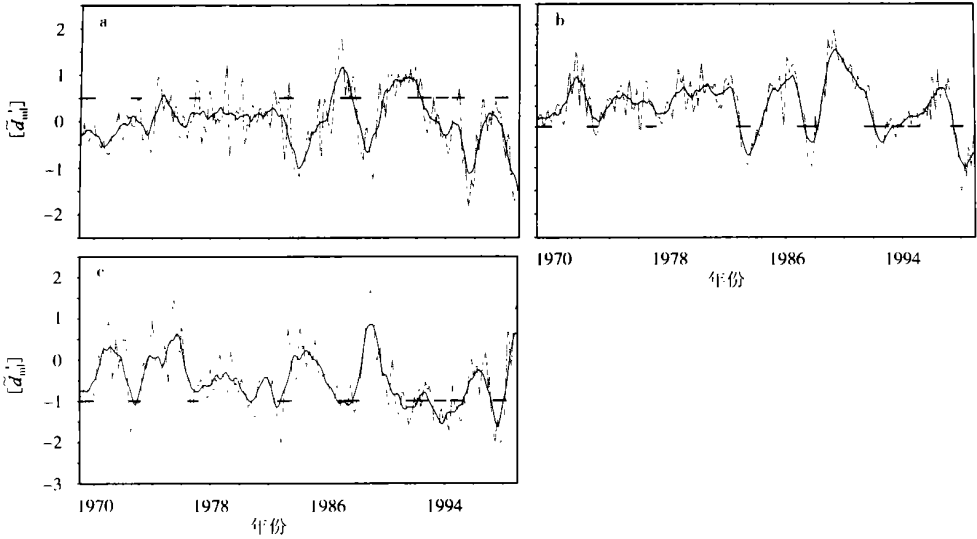


图 4 赤道太平洋上  $[d'_{ml}]$  与 El Nino 事件的关系

(短划线为  $[d'_{ml}]$  值,实线为 13 个月滑动平均值,粗线段为 El Nino 事件覆盖时段<sup>[12]</sup>)  
a. Nino3 区; b. Nino4 区; c. Nino-west 区

Fig. 4 The relation of  $[d'_{ml}]$  in the equatorial Pacific with El Nino events

(The dashed line is the value of  $[d'_{ml}]$ , the solid line is the smoothed mean value of 13 months, the think line is the covered period of El Nino events)  
a. Nino3 area; b. Nino4 area; c. Nino-west area

由图 4 可知, 最近 30 a 间的 El Nino 事件与赤道东太平洋 $[d'_{ml}]$ 的峰及中、西太平洋的谷有较好同时性对应关系(赤道西太平洋关系更密切些)。即 El Nino 事件期间, 赤道东太平洋 $d_{ml}$ 增厚, 赤道中、西太平洋 $d_{ml}$ 变薄。这种现象是由于 El Nino 事件中赤道信风的东风分量较常年减弱, 使东太平洋海水涌升及表面海水(较暖)西传减弱<sup>[10]</sup>形成的。需要强调的是, 赤道中太平洋 El Nino 事件与 $[d'_{ml}]$ 的谷对应, 二者关系类同于赤道西太平洋(图 4c), 而不是赤道东太平洋。这与 El Nino 事件和 $T_s$ 的关系(赤道中太平洋类同于赤道东太平洋<sup>[13]</sup>)相反, 这说明 $d_{ml}$ 具有独立的分析价值。连同图 3 中 $T_s$ 的高气候变率区在赤道中、西太平洋明显大于东太平洋这个特点, $T_s$ 对该区域海气相互作用的研究可能比 $T_{ss}$ 更值得加以重视。另外, 从预测角度看, 几乎每次 El Nino 事件爆发之前的半年到两年间, 赤道西太平洋都有明显的正 $[d'_{ml}]$ 出现, 而在 El Nino 事件发生之后, $[d'_{ml}]$ 又变为负。这与穆明权等<sup>[14]</sup>关于暖池次表层异常海温在 ENSO 循环中的演变情形相似。

#### 4.2 $d'_{ml}$ 沿赤道的传播特征

图 5 给出了 $[d'_{ml}]$ 的时空剖面图。可见, 对于 20 世纪 70 年代较弱的 El Nino 事件, $d_{ml}$ 正异常东传不明显。80 年代起发生的 El Nino 事件强度大, 过程界限清楚, 事件发生之前存在明显的 $d_{ml}$ 正异常沿赤道东传现象; 这些特征在 1982—1983, 1986—1987 和 1991—1992 年三次过程中表现尤为明显。现在可以得出的结论是, 强 El Nino 事件发生前有强 $d_{ml}$ 正异常沿赤道东传。这方面的研究与短期气候预测直接有关, 有待深入。

### 5 结 论

用太平洋区域 30 a 逐月混合层厚度( $d_{ml}$ )及浅层海温( $T_s$ )距平资料分析了 20 S 以北太平洋区域 $d_{ml}$ 年际变率的地理分布和季节变化, 得到两个纬向 $d_{ml}$ 高变率带, 它们分别为北太平洋高变率带(位于 45°N)和赤道太平洋高变率带。北太平洋 $d_{ml}$ 高变率带最强, 但季节变化大, 用 $T_s$ 变率垂直剖面图无法确定其气候位置; 赤道太平洋 $d_{ml}$ 高变率带全年稳定存在, 在 $T_s$ 变率垂直剖面图上有清晰结构, 其强年际异常与 El Nino 事件关系密切。20 纪 80 年代以来, 伴随强 El Nino 事件发生有 $d_{ml}$ 正异常的东传。

### 参考文献:

[1] Levitus S. Climatological Atlas of the World Ocean[M]. Washington D C: U. S Government Printing office, 1982: 173.  
[2] 林传兰. 1964—1982 年热带西北太平洋海洋上层热含量的变化特征[J]. 热带海洋, 1990, 9(2): 78-85.  
[3] Perry J D. Sea temperatures at OWSI[J]. Meteorological Maganize, 1968, 97( 1147): 33-43.

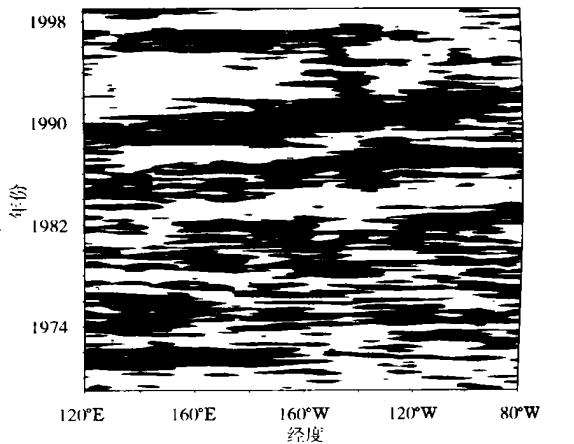


图 5 赤道太平洋 $d'_{ml}$ 标准场  
(10 S ~ 10 N 的平均) 时空剖面  
(图中阴影区为 $[d'_{ml}] \geq 0$ )  
Fig. 5 Temporal-spatial section of  
 $[d'_{ml}]$  in the equatorial Pacific  
(The shaded area denotes  $[d'_{ml}] \geq 0$ )

- [4] 章基嘉, 葛 玲, 孙照渤. 中长期天气预报基础[ M ]. 北京: 气象出版社, 1994: 266-267.
- [5] 赵其庚, 李 翼, 彭淑英. 近赤道太平洋上层海温的变化与 ENSO[ C ]// 国家气候中心 TOGA-COARE 课题组. 热带西太平洋海气相互作用考察及诊断模拟研究. 北京: 气象出版社, 1996: 35-44.
- [6] Perry A H. The Ocean-Atmosphere System[ M ]. New York: Longman, 1977: 160.
- [7] 巢纪平, 王彰贵. 简单的热带海气耦合波—Rossby 波的相互作用[ J ]. 气象学报, 1993, 51(4): 385-393.
- [8] 张向东, 张 晶. 热带太平洋特征模式以及埃尔尼诺形成动力机制[ J ]. 海洋学报, 1996, 18(1): 31-42.
- [9] 张人禾, 黄荣辉. El Nino 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 资料诊断和理论分析[ J ]. 大气科学, 1998, 22(4): 587-599.
- [10] 蒲书箴, 于 非. 1997/1998 厄尔尼诺的发生与发展[ J ]. 海洋学报, 1998, 20(6): 124-131.
- [11] NOAA Climate Analysis Center. Climate Diagnostics Bulletin[ M ]. Washington D C: U. S. Department of Commerce, 1986: 54.
- [12] 赵振国, 蒋伯仁, 陈国珍. ENSO 事件与青藏高原积雪和东亚大气环流的可能联系[ J ]. 山东气象, 1999, 19(4): 1-8.
- [13] Wang Pan-xing, He Jin-hai. Regional differences of temporal-spatial characteristics of air-sea interactions in tropical ocean[ J ]. Acta Meteor Sinica, 2001, 15(4): 407-419.
- [14] 穆明权, 李崇银. 西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环的相互作用[ J ]. 大气科学, 2000, 24(4): 447-460.

## A Study about Interannual Anomalies of Mixed Layer Depth in the Pacific

LI Hong, LI Li-ping, WANG Pan-xing,  
ZHAN Rui-fen, ZHI Feng-mei

( Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China )

**Abstract:** Monthly mean anomaly data( 1969—1998) of mixed layer depth( $d_{ml}$ ) and upper ocean temperature( $T_s$ ) are used to analyze the geographic distribution and the seasonal variation in interannual variability of  $d_{ml}$  in the Pacific. Two largest interannual variability zones of  $d_{ml}$  are found in the high latitude area in the North Pacific and in the central-western equatorial Pacific. The latter is primarily concerned. The climatic location of  $d_{ml}$ , the correlation between  $d_{ml}$  anomalies and El Nino events, and the eastward propagation of positive  $d_{ml}$  anomalies along the equator preliminarily accompanied with a strong El Nino event are analyzed.

**Key words:** Pacific region; mixed layer depth; interannual anomaly; El Nino event