

西太平洋暖池次表层海温异常 与 ENSO 循环的相互作用^{*}

穆明权 李崇银

(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)

摘 要 利用 1964~1993 年的太平洋次表层海温资料, 进一步分析研究了西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环的关系。合成及相关分析的结果进一步表明, 西太平洋暖池次表层海温的暖(冷)异常及其东传对 ENSO 的发生起着十分重要、且更直接的作用。然而, 赤道西太平洋异常纬向风是造成次表层海温异常东传的重要原因, 而纬向风的异常又是由于东亚冬季风异常活动所引起的, 这间接地说明了异常东亚冬季风对西太平洋暖池次表层海温距平东传的重要作用。通过研究还发现, ENSO 发生后, 北半球副热带地区将有次表层暖(冷)海温距平沿着 10~20°N 纬带西传, 这是导致西太平洋暖池次表层海温发生异常的重要原因之一。也就是说, 西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 循环之间是相互影响、相互作用的。

关键词: 西太平洋; 暖池; ENSO 循环; 异常纬向风; 东亚季风

1 引言

ENSO 的发生给世界各地带来严重的气候灾害^[1], 从而受到各国政府及科学家的高度重视。由于观测资料的不断丰富, 人们对 ENSO 的认识也更加深入^[2,3], 对传统 ENSO 机制理论, 不断提出新的挑战^[4~9]。所有这些都表明, 对 ENSO 的发生还没有一个较完善的解释, 对 ENSO 机制的探讨还须继续。李崇银 1988 年的研究工作已不再将人们的视线仅仅局限于赤道中东太平洋地区的海气系统, 而是指出了 El Niño 事件发生的前期征兆在赤道西太平洋地区^[10]; 同时, 进一步提出了强东亚冬季风与 El Niño 的相互作用及其过程^[11]。事实上, 异常东亚冬季风不仅仅与 El Niño 存在相互影响的关系, 而且与 ENSO 循环存在明显的相互影响、相互作用^[12,13]。这些结论都已得到了 GCM 数值模拟的证实^[14]。异常东亚冬季风可以激发 ENSO, 但 ENSO 的发生与赤道太平洋海—气系统的相互作用和演变有何联系尚不清楚。最近的研究虽已指出西太平洋暖池次表层海温正异常及其东传对 El Niño 事件的爆发起着十分重要的作用^[15], 不少问题还需要进一步研究。例如, 西太平洋暖池次表层海温异常的原因是什么, 异常东亚冬季风对暖池次表层异常海温有无影响, 或者说起着什么样的作用等等, 本文将就这些问题作一些分析研究。

1999-07-05 收到, 1999-11-15 收到再改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900 项目第一部分和国家自然科学基金资助项目 49635180、49823002 共同资助

所用的太平洋次表层海温资料为美国 Scripps 海洋研究所环境数据分析中心 (JEDAC) 11 个标准层的月平均资料, 这 11 个标准层为 0、20、40、60、80、120、160、200、240、300 和 400 m; 海表温度资料取自 NCAR; 所用的风场取自 NCEP 1 000 hPa 的再分析资料。

2 暖池次表层异常海温在 ENSO 循环中的演变

图 1 给出了太平洋暖池 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 区域次表层 (120~160 m) 海温异常 (SOTA) 以及 Niño 3.4 区 SSTA 的时间演变。从图 1 可以清楚地看到 1964~1993 年间, 每次 El Niño 事件 (例如 1965、1969、1972、1976、1982~1983、1986~1987、1991 年 El Niño) 爆发之前的半年到两年的时间里, 都有明显的正距平出现; 同时也能看到, 在大多数 La Niña 事件 (例如 1967、1970、1973、1975、1984、1988 年 La Niña) 爆发前, 暖池区次表层海温都有明显的负距平出现。较大的正、负距平都与 El Niño、La Niña 事件的爆发有关。而在 El Niño (La Niña) 事件发生之后, SOTA 却变为负 (正) 距平。计算两条曲线的相关系数, 它们的同期相关最强, 为 -0.74 。也就是说, 西太平洋暖池次表层异常海温与 Niño3.4 区 SSTA 基本上是种反位相关系。

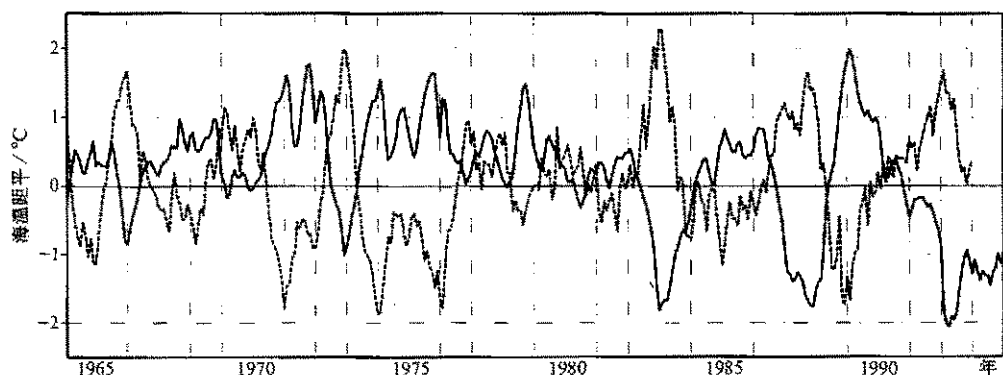


图 1 西太平洋暖池 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 次表层异常海温 (实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 及 Niño3.4 区 ($6^{\circ}\text{S}\sim 6^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 异常海表温度 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 随时间的演变

为了进一步揭示暖池次表层异常海温 (SOTA) 与 Niño 3.4 区 SSTA 的这种反位相特征, 根据大多数人的结果^[2,13,15], 我们对 1965~1993 年间 6 次 El Niño 事件和 6 次 La Niña 事件分别进行了合成 (因为 1965 年以前的资料缺测较多, 所以合成分析时没有选取 1965 年的 El Niño 事件)。这 6 次 El Niño 事件分别是 1968~1969、1972、1976、1982~1983、1986~1987、1991 年, 6 次 La Niña 事件分别是 1967、1970、1973、1975、1984、1988 年。由 Niño 3.4 区 SSTA (图 1) 随时间的演变不难看出, El Niño、La Niña 在年初发生, 年末达到最强, 因此本文所指事件的当年是发生年也是爆发年, 并由此而确定了其前一年及后一年。合成结果如图 2 所示。图 2a 为 6 次 El Niño 事件的合成。在 El Niño 发生之前的近一年半的时间里, 西太平洋暖池 SOTA

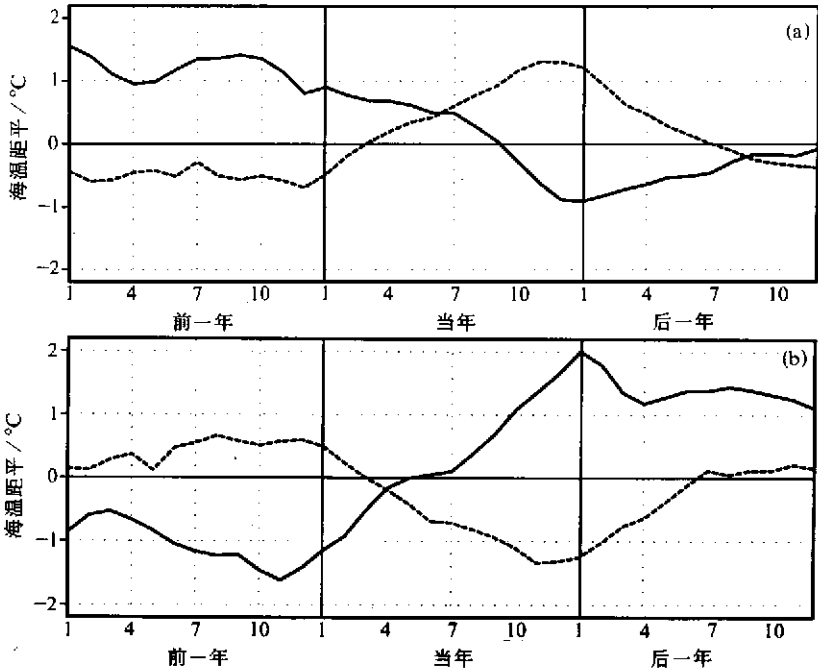


图 2 西太平洋暖池 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 次表层异常海温 (实线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 及 Niño 3.4 区 ($6^{\circ}\text{S}\sim 6^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 异常海表温度 (虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 随时间的演变
(a) 6 次 El Niño 事件的合成; (b) 6 次 La Niña 事件的合成

一直为正距平, 最大值可达正 1.5°C 以上, 而事件爆发后, SOTA 为负距平。图 2b 为 6 次 La Niña 事件的合成。其异常形势基本上与图 2a 的相反。也就是说, 在 La Niña 事件发生之前, 西太平洋暖池 SOTA 为持续的负值, 当 La Niña 事件爆发后, 转为正距平。因而, El Niño 事件和 La Niña 事件爆发前后, 暖池次表层异常海温与 Niño 3.4 区 SSTA 几乎完全反相。

3 暖池次表层异常海温的东传与 ENSO 的发生

已有研究对暖池次表层异常海温的东传与 ENSO 的发生作了初步分析, 本文将以合成分析结果, 对这一问题进行更全面的研究, 以期反映其本质特征。

图 3 为 6 次 El Niño 合成的沿 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 逐月海温距平深度-经度分布。在 El Niño 爆发前一年的 4 月份 (图 3a), 当赤道东太平洋地区还是大片的负距平时, 西太平洋暖池区就已出现十分显著的正海温距平, 正距平中心在暖池次表层的 $120\sim 160\text{ m}$ 深度; 之后, 这个正距平中心不断发展, 并沿斜温层东传。在 El Niño 爆发当年 4 月份 (图 3e), 正距平已出现在赤道南美沿岸, 且赤道东太平洋海洋表面温度也出现明显正距平。El Niño 爆发之后, 正异常中心不断发展; 到了 El Niño 爆发后一年的 1 月份 (图 3h), 正异常中心可达 1.4°C 以上, 并在 $20\sim 60\text{ m}$ 处出现最大值。另外, 在西太平洋暖池区次表层正海温距平沿着赤道斜温层东传、并向中东太平洋表层扩展的同时, 暖

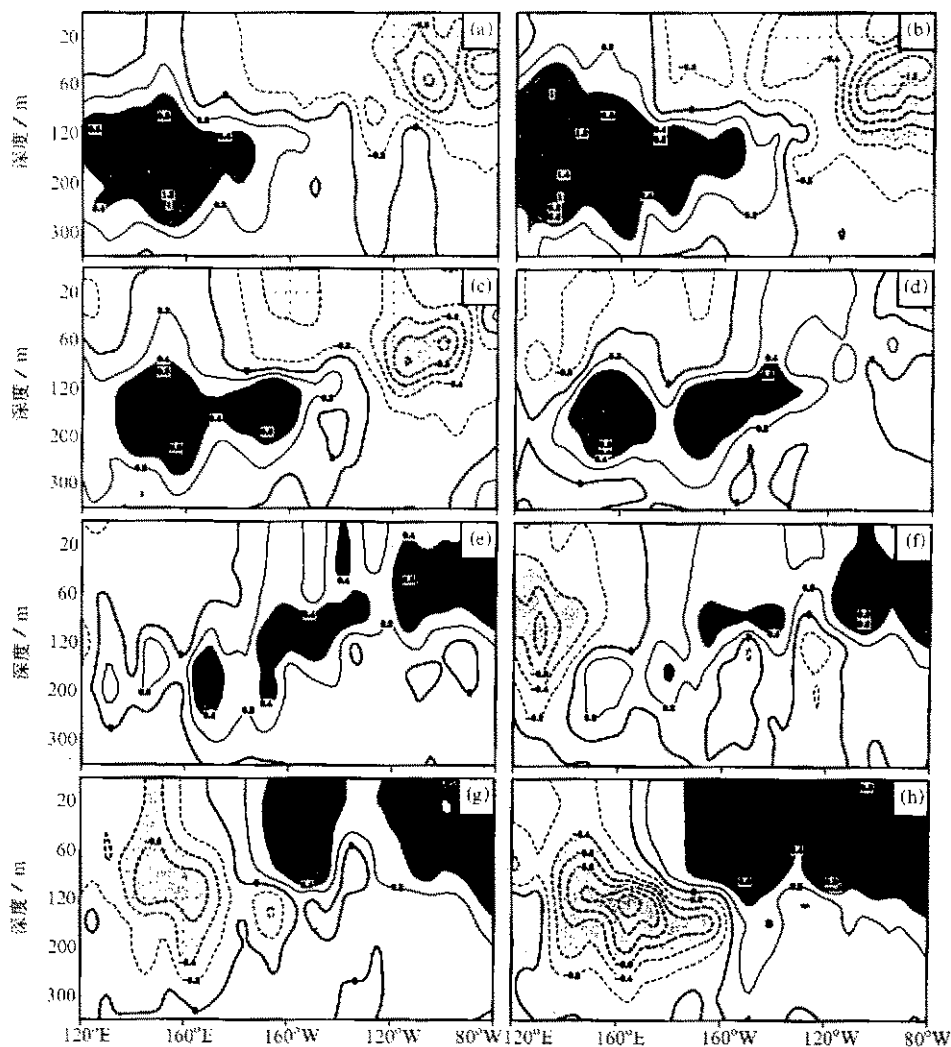


图3 6次 El Niño 事件合成的赤道太平洋地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 海温距平的深度-经度剖面

(a) El Niño 前一年4月份; (b) 前一年7月份; (c) 前一年10月份; (d) 当年1月份;

(e) 当年4月份; (f) 当年7月份; (g) 当年10月份; (h) 后一年1月份

池区次表层海温又开始出现负异常, 在 El Niño 事件达到成熟时, 这个负距平中心已达到 -1.2°C 以下。

对于 6 次 La Niña 事件的合成, 结果如图 4 所示, 与 El Niño 合成结果几乎相反。在 La Niña 爆发前一年的 4 月份 (图 4a), 当赤道东太平洋地区还是大片的正距平时, 西太平洋暖池区就已出现十分显著的负海温距平, 最大负距平亦在暖池次表层; 之后, 这个负距平中心不断发展, 且沿温跃层东扩。La Niña 爆发当年 4 月份 (图 4e), 负距平已出现在赤道南美沿岸, 且赤道东太平洋海洋表面温度也出现明显负距平。La Niña 爆发之后, 负异常中心不断发展, 到了 La Niña 爆发的后一年 1 月份 (图 4h), 负异常

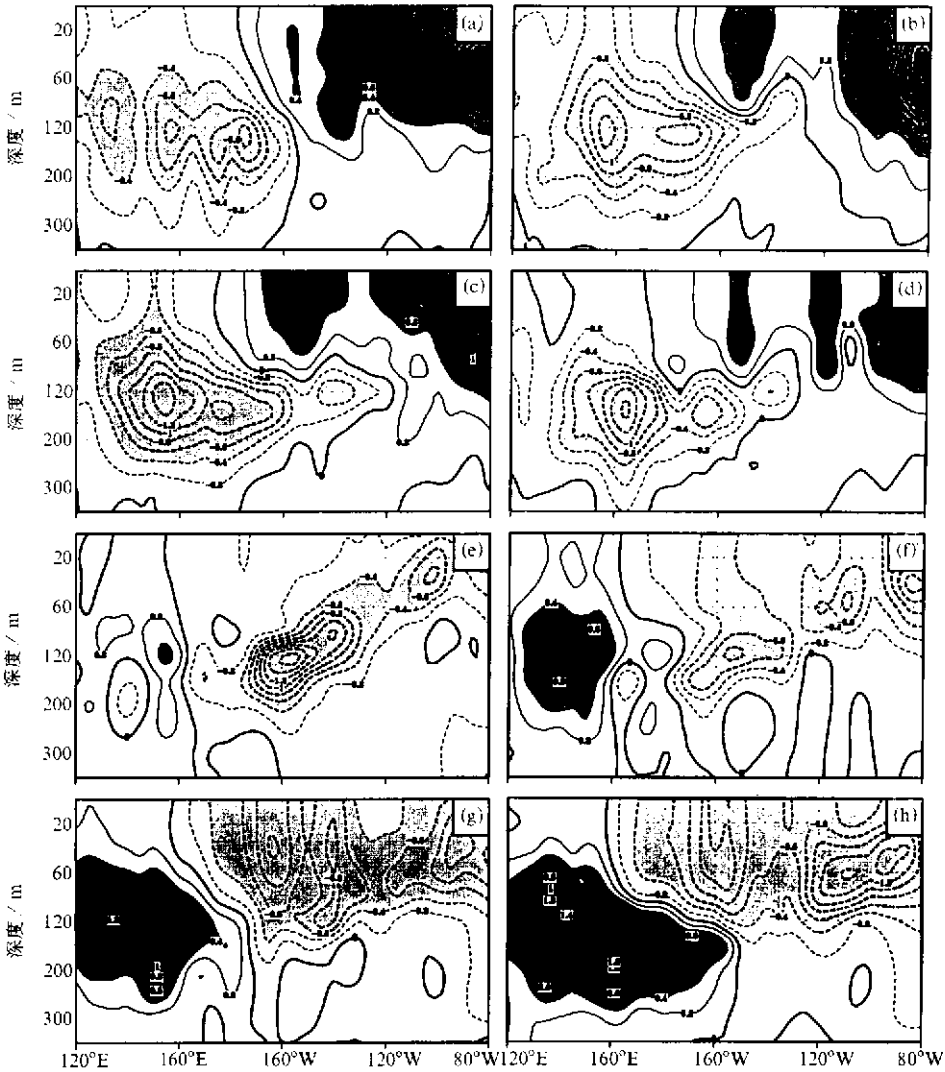


图 4 同图 3, 但为 6 次 La Niña 事件的合成结果

中心已达 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 并在 60 m 附近出现最大值。另外, 在西太平洋暖池区次表层负海温距平沿着赤道斜温层东传, 并向中东太平洋表层扩展的同时, 暖池区次表层海温又开始出现正异常, 在 La Niña 事件达到成熟时, 这个正距平中心已达到 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

图 3、4 更清楚地反映了赤道东、西太平洋海温距平的反相特征的形成过程, 它们在次表层最明显, 即一个距平中心位于西太平洋暖池区的次表层 120~200 m 处, 另一个符号相反的距平中心位于东太平洋的次表层 20~60 m 处。

4 异常东亚冬季风对赤道中西太平洋地区海气系统的影响

为了便于描写暖池次表层海温异常的东传, 基于上面的分析, 我们可以定义一个暖

池次表层异常海温东传的指数,就是用 $120\sim 160\text{ m}$ 深度处 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{W}$) 地区的平均海温减去 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $120\sim 140^{\circ}\text{E}$) 地区的海温平均值表示。若有正海温距平由西太平洋沿赤道 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 向中太平洋传播,该指数为正,反之为负。该指数随时间的演变,其结果如图 5a 所示(以实线表示)。该图中的虚线是利用 NCEP 再分析资料,计算得到的赤道西太平洋地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $120\sim 160^{\circ}\text{E}$) $1\,000\text{ hPa}$ 的异常纬向风随时间的演变。从图 5a,可清楚地看到,暖池次表层暖水东传与赤道西太平洋地区的异常西风对应相当好,而大多数冷水东传都与异常东风对应。计算这两条曲线的时滞相关系数,其结果如图 6 所示(图中虚线)。当赤道西太平洋异常纬向风超前暖池次表层异常海温东传 $3\sim 4$ 个月时,其正相关系数达最大,最大值可达 0.65 。图 5a 的结果表明了赤道西太平洋暖池次表层异常海温的东传与赤道西太平洋异常纬向风有密切关系。

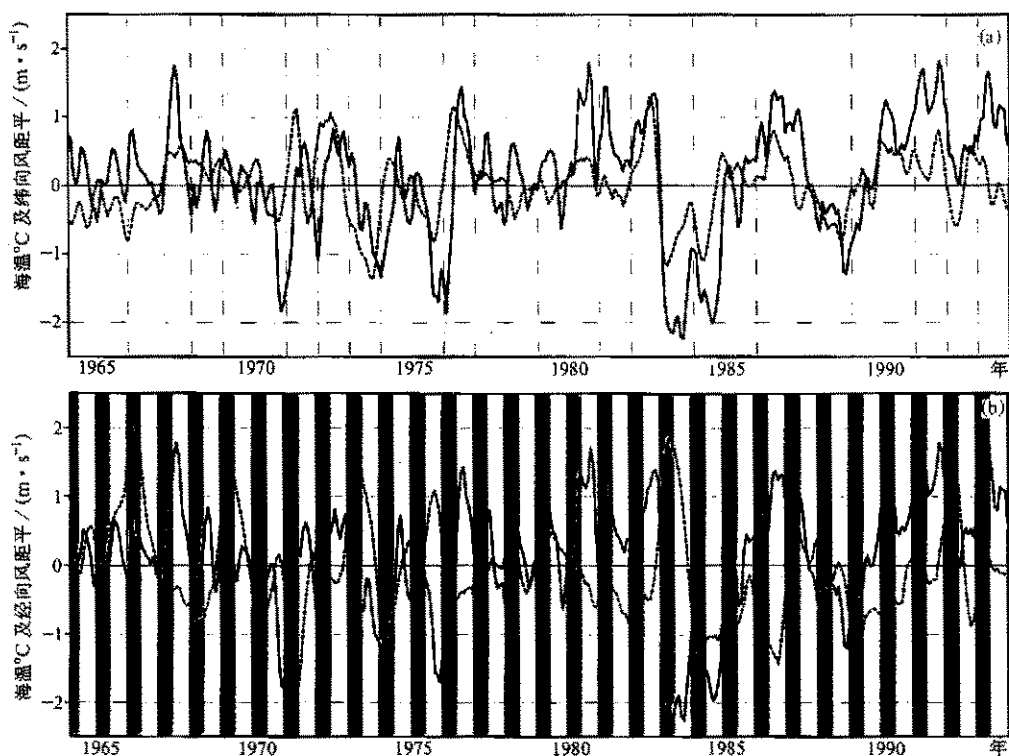


图 5 西太平洋暖池次表层 ($120\sim 160\text{ m}$) 异常海温东传(实线,单位: $^{\circ}\text{C}$)与赤道西太平洋地区异常纬向风(虚线,单位: m s^{-1}) (a) 以及与西北太平洋地区异常经向风(虚线,单位: 2 m s^{-1}) (b) 随时间的演变(阴影区为冬半年 11~4 月份)

谈到赤道西太平洋地区异常西风,很自然地联系到我们以前的研究工作,即异常东亚冬季风对赤道中西太平洋地区气候系统的影响。那么,异常冬季风与暖池次表层异常海温东传的关系如何?我们利用 NCEP 再分析资料,将 $1\,000\text{ hPa}$ 西北太平洋地区 ($20\sim 30^{\circ}\text{N}$, $120\sim 150^{\circ}\text{E}$) 经向风距平平均作为异常东亚冬季风指数,负值表示为异常北风,东亚冬季风偏强,反之为弱冬季风。异常东亚冬季风与暖池次表层海温异常的东传

随时间的演变如图 5b 所示。由图 5b 可以清楚地看到, 异常东亚冬季风活动与暖池次表层海温距平的东传关系也较为密切。大多数暖海温东传之前, 西北太平洋地区北风偏强, 负海温距平东传之前, 对应的是异常南风。这种特征在冬半年更明显。为了进一步说明二者的密切关系, 对它们也作了相关分析。结果如图 6 所示 (图中实线)。当异常东亚冬季风超前暖池次表层海温距平东传 4~5 个月时, 负相关最好, 相关系数可达 -0.27, 远远超过 99% 的信度水平。

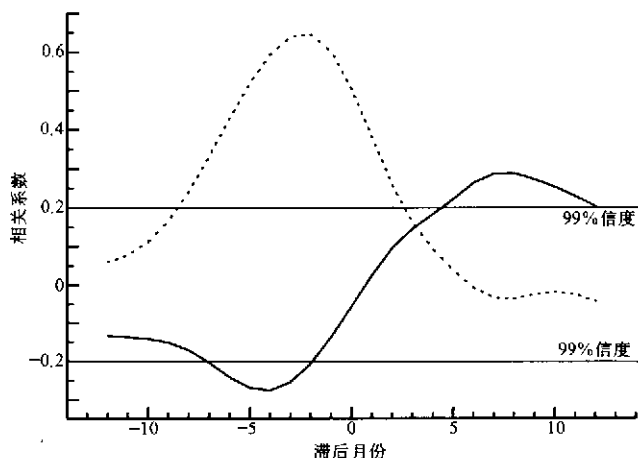


图 6 西太平洋暖池次表层 (120~160 m) 异常海温东传与赤道西太平洋异常纬向风 (虚线) 以及与西北太平洋地区异常经向风 (实线) 的时滞相关系数随时间的演变 (负值表示异常海温东传超前)

已有的研究表明, 异常强 (弱) 东亚冬季风能够激发出赤道西太平洋地区的异常西 (东) 风^[10~13]。为了进一步说明二者的密切关系, 我们利用 NCEP 再分析资料, 对二者进行了相关分析。为了在时间上与暖池次表层海温保持一致, 仅选取了 1964~1993 年 30 年月平均结果, 并作了距平处理。将 1 000 hPa 上西北太平洋地区 (20~30°N, 120~150°E) 经向风距平平均作为异常东亚冬季风指数, 这个指数与全球纬向风距平求超前相关, 其相关系数水平分布如图 7 所示。图 7 清楚地表明, 若东亚冬季风偏强时, 其后 3~9 个月时间内, 赤道中西太平洋地区有异常西风发生, 当冬季风超前纬向风 3 个月时, 其主要负相关区位于赤道西太平洋; 此时最大负相关中心并不是正好位于赤道上, 而是位于 10°N 附近地区。随着时间的推移, 这个负相关区向中太平洋、向赤道推移。当冬季风超前 9 个月时, 明显的负相关区已移过日界线。

以上分析结果表明, 虽然异常东亚冬季风与暖池次表层海温距平东传有较为密切的关系, 但是, 可以明显地看到, 它是通过激发赤道西太平洋地区异常纬向风, 进而与暖池次表层海温距平东传发生作用。因为, 从相关系数的大小, 可以明显地看到, 异常东亚冬季风与赤道西太平洋地区异常西风以及该异常西风与暖池次表层异常海温东传的关系更为密切。而且图 6 清楚地表明了冬季风异常超前赤道西太平洋西风异常 1~2 个月时间, 也说明了东亚冬季风异常对西风异常起激发作用。

5 ENSO 的发生对暖池次表层海温的影响

以上分析表明, 赤道西太平洋暖池次表层异常海温东传对 ENSO 的发生, 起着十分重要、直接的作用。然而, 暖池次表层海温为什么会出现异常, 或者说其异常机制是什么? 这一节将主要讨论这个问题。

为了从总体上反映 1964~1993 年间 6 次 El Niño 事件和 La Niña 事件的共同特

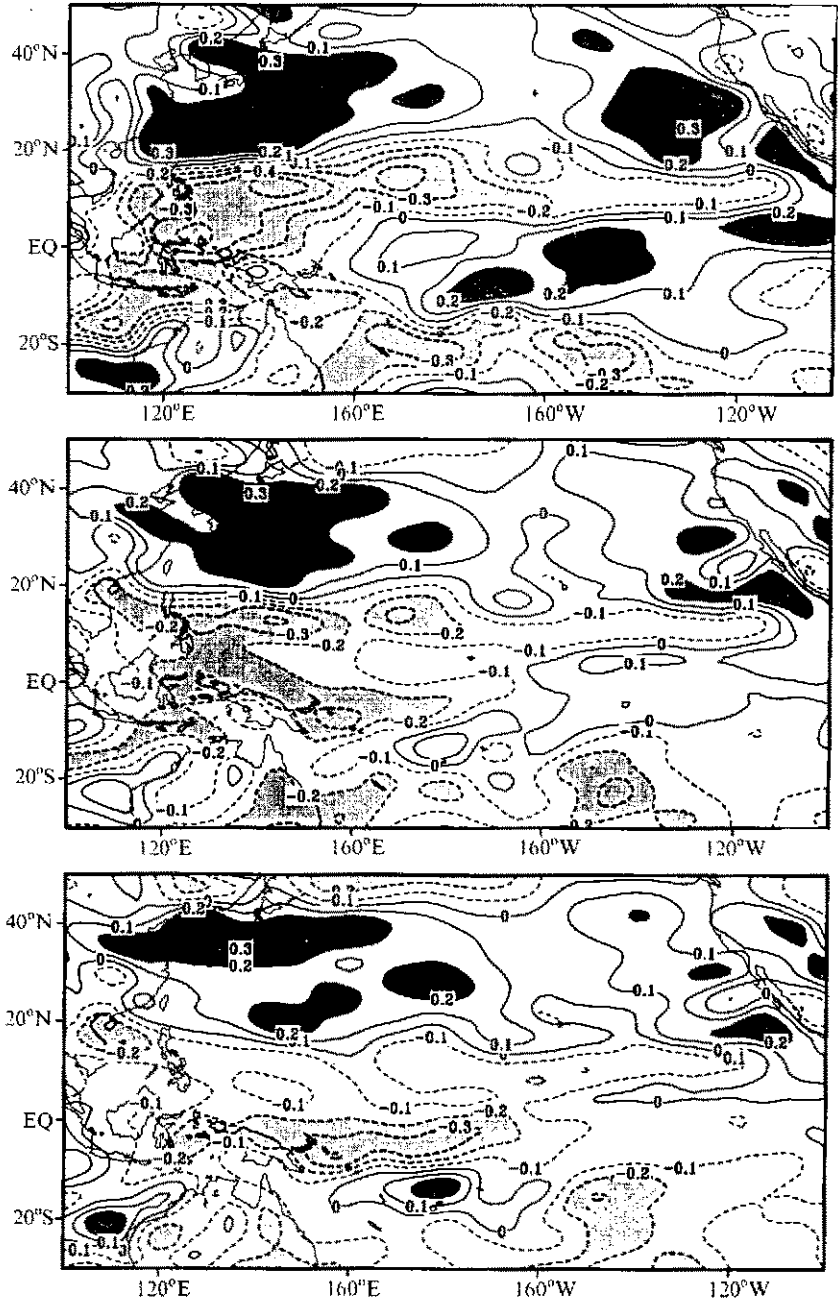


图7 异常东亚冬季风与纬向风距平超前相关系数的水平分布
(a) 东亚冬季风超前3月; (b) 超前6月; (c) 超前9月

征, 本节将以合成分析方法, 探讨 El Niño、La Niña 事件爆发对西太平洋暖池次表层海温的影响。因此, 以下所讨论的都是事件爆发之后的异常形势。我们将 El Niño、La Niña 事件的发生年定义为爆发的当年。本文第 3 节的结果表明, 西太平洋暖池次表层

异常海温是沿着赤道斜温层向东太平洋表层扩展的, 即由西太平洋较深层 (120~200 m 向东太平洋近表层 (20~60 m) 传播。为了较真实地反映这种特征, 我们讨论热带太平洋次表层海温距平的“水平”分布 (图 8 和图 9)。这里用加引号的“水平”二字, 是因为图 8、9 的海温距平是沿着赤道太平洋斜温层深度取的平均, 西太平洋为 120~160 m 层的平均, 中太平洋为 80~120 m 层的平均, 东太平洋为 40~60 m 层的平均。

图 8 是 El Niño 爆发后的第一到第二年太平洋次表层异常海温的“水平”分布。图 8a 为 El Niño 事件达到顶峰时的情况, 西负、东正的反位相的分布形势非常清楚。到了 6 月份 (图 8b), 可以看到东太平洋 10°N 附近有一支暖水正向西传播; 之后, 这支暖水继续西传, 到了 El Niño 事件爆发后的第二年 2 月份 (图 8d), 这支暖水移到了 160°E 附近; 6 月份 (图 8e), 移到了 140°E 地区, 且强度不断加强, 同时已由西太平

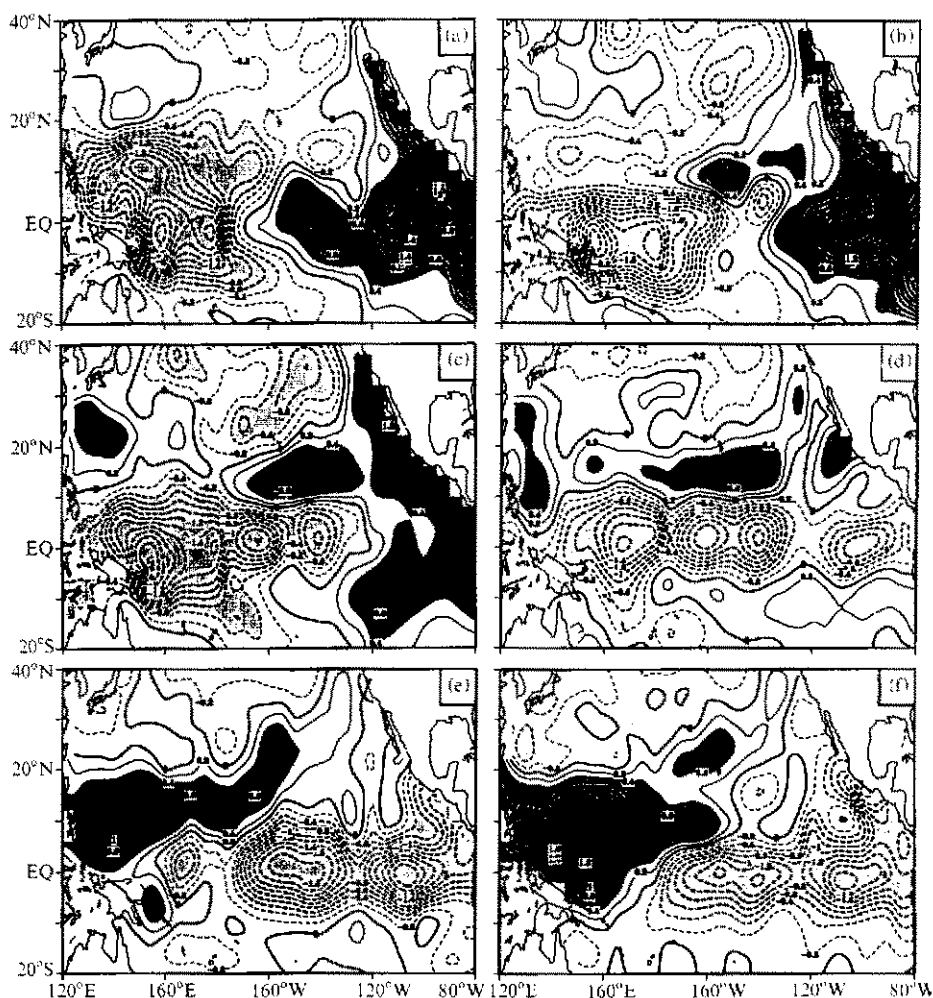


图 8 6 次 El Niño 事件合成的赤道太平洋地区沿着斜温层海温距平水平分布

(a) El Niño 爆发后一年 2 月份; (b) 后一年 6 月份; (c) 后一年 10 月份;

(d) 后二年 2 月份; (e) 后二年 6 月份; (f) 后二年 10 月份

洋向赤道靠近;到了10月份,正异常中心已大大加强,且中心强度超过了 2.0°C ,这个强大的暖水团的出现,正预示着下一次 El Niño 事件即将爆发。在赤道东太平洋次表层暖水减弱,并有一部分暖水沿 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 纬度带西传的同时,赤道西太平洋暖池次表层正有一异常冷水在东传,到了第二年10月份,这个冷水主体已移到了赤道南美沿岸,此时一个 La Niña 事件已经爆发。

对于6次 La Niña 事件的合成,其结果如图9所示,太平洋次表层海温的异常形势基本上与 El Niño 的相反。La Niña 事件爆发后一年的2月份(图9a),东太平洋 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 地区,已有冷水西传至 150°W 附近;之后,这支冷水强度不断加强,到了第二年2月份,这支冷水已移到了西太平洋沿岸,且冷水中心已向赤道靠近;第二年10月份(图9f),其强度已大大加强。在东太平洋冷水减弱,并有一部分冷水沿 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 纬度带西传的同时,西太平洋暖池区正有一支异常暖水沿赤道东传,到了第二年10月份(图9f),这个暖水团已移到了赤道南美沿岸,一次 El Niño 事件已经爆发。

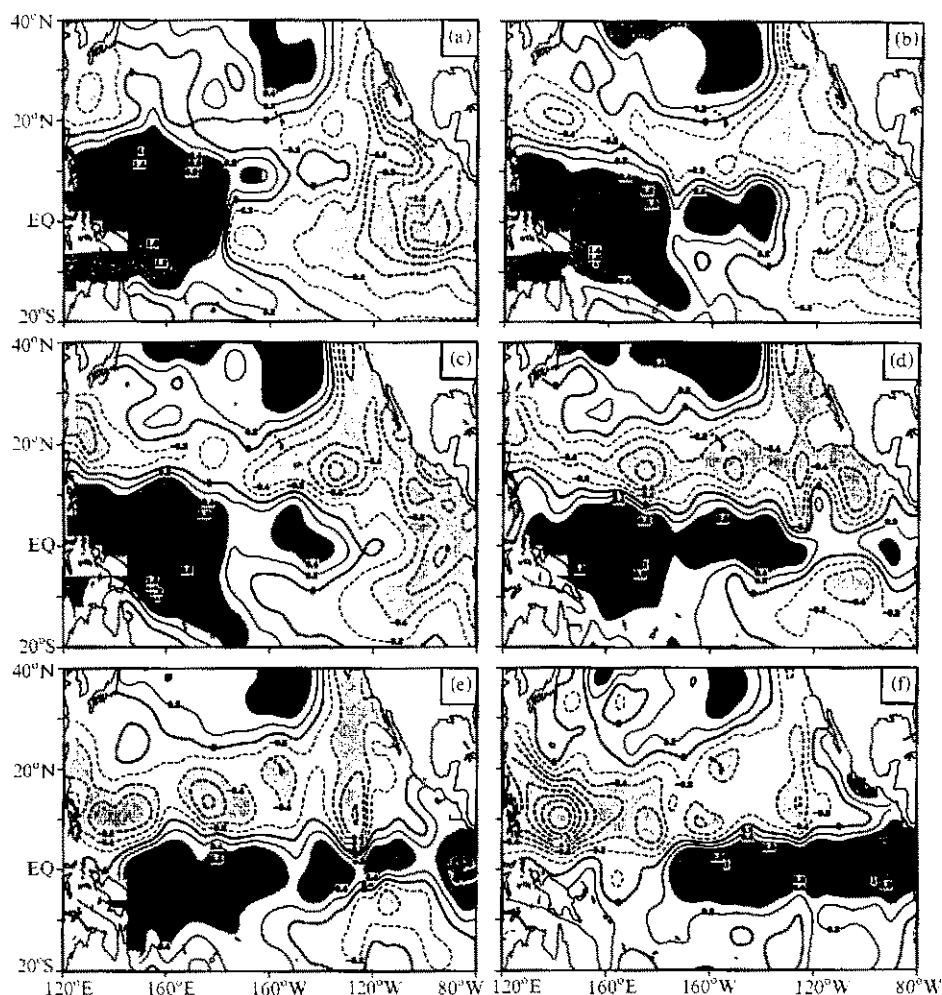


图9 同图8, 但为6次 La Niña 事件的合成结果

由图 8 和图 9 还可以看到一个十分有意义的现象, 那就是正(负)海温距平在 $10 \sim 20^\circ\text{N}$ 纬带由东向西传播的同时, 在西北太平洋日本以南($20 \sim 30^\circ\text{N}$)海区的次表层也有正(负)海温距平中心存在。而且这个海温距平中心有向南扩展并与由东太平洋西传来的海温距平中心合并的特征, 合并后的海温距平中心向赤道扩展, 最终在暖池区形成强的海温正(负)距平中心。也就是说暖池次表层海温异常似乎来自两个方面的影响, 其一是在 $10 \sim 20^\circ\text{N}$ 纬带由东太平洋向西传来的海温距平, 其二是由日本以南海区向南传来的海温距平。

6 暖池次表层异常海温与 ENSO 循环的相互作用

图 8、9 的结果已经很清楚地表明, 西太平洋暖池次表层海温异常与 El Niño 和 La Niña 存在明显的相互影响、相互作用的循环关系; 更直接地说, 太平洋次表层异常海温在赤道西、东太平洋之间循环出现。为了进一步揭示暖池次表层海温异常与 ENSO 循环的相互作用, 我们将具体地讨论每次 El Niño 和 La Niña 事件是否都存在这种循环关系, 其结果如图 10 所示。图 10 为热带太平洋地区海温距平沿着赤道斜温层的时间-经度、纬度剖面, 为了较真实地反映热带太平洋地区斜温层西深东浅的特征, 作图时在西太平洋取为 $120 \sim 160\text{ m}$ 深度的平均, 中太平洋为 $80 \sim 120\text{ m}$ 的平均, 东太平洋为 $40 \sim 60\text{ m}$ 的平均。其中, 图 10 中上面的图为沿 $10 \sim 20^\circ\text{N}$ 的时间-经度剖面, 中间的图为沿 $120^\circ\text{E} \sim 180^\circ$ 的时间-纬度剖面, 下面的图为沿 $6^\circ\text{S} \sim 6^\circ\text{N}$ 的时间-经度剖面。可以看到, 对于每次 El Niño 事件都有这样一种现象: 在 El Niño 爆发前的半年到两年的时间里, 西太平洋暖池次表层海温首先出现正异常, 当该异常海温沿着赤道斜温层东传, 到达赤道东太平洋后, 引起那里的海水升温, El Niño 事件爆发。之后, 东太平洋异常暖海温主要由 $150 \sim 100^\circ\text{W}$ 经度带出发沿着 $10 \sim 20^\circ\text{N}$ 斜温层西传, 到达太平洋西岸后, 折向赤道, 最终又在赤道西太平洋暖池区堆积, 使得那里出现较强的海温正距平。这种循环过程大致需要 3~5 年时间。同样, 对于大多数 La Niña 事件, 异常冷海温沿着斜温层在东西太平洋之间循环传播的现象也很清楚。尤其是 80 年代以后的几次冷暖事件, 异常海温的这种传播特征更加突出。因此, 该结果进一步说明了西太平洋暖池次表层异常海温与 ENSO 循环是相互作用、相互影响的。

7 结论与讨论

总结以上分析, 可以得到如下结论。西太平洋暖池次表层($120 \sim 160\text{ m}$)异常海温与赤道东太平洋次表层异常海温($40 \sim 60\text{ m}$)有一种反位相的翘翘板式变化现象。西太平洋暖池次表层海温发生异常后, 这种异常信号会沿着赤道斜温层向东, 并不断向东太平洋表层扩展, 引起 ENSO 发生。暖池次表层异常海温东传与赤道西太平洋异常纬向风有密切关系; 而赤道西太平洋地区纬向风的异常又是由异常东亚冬季风所激发产生的。这说明了异常东亚冬季风对西太平洋暖池次表层异常海温的东传具有重要作用。但是, 异常东亚冬季风与暖池次表层异常海温到底存在什么样的关系, 还需要更深入地探讨。

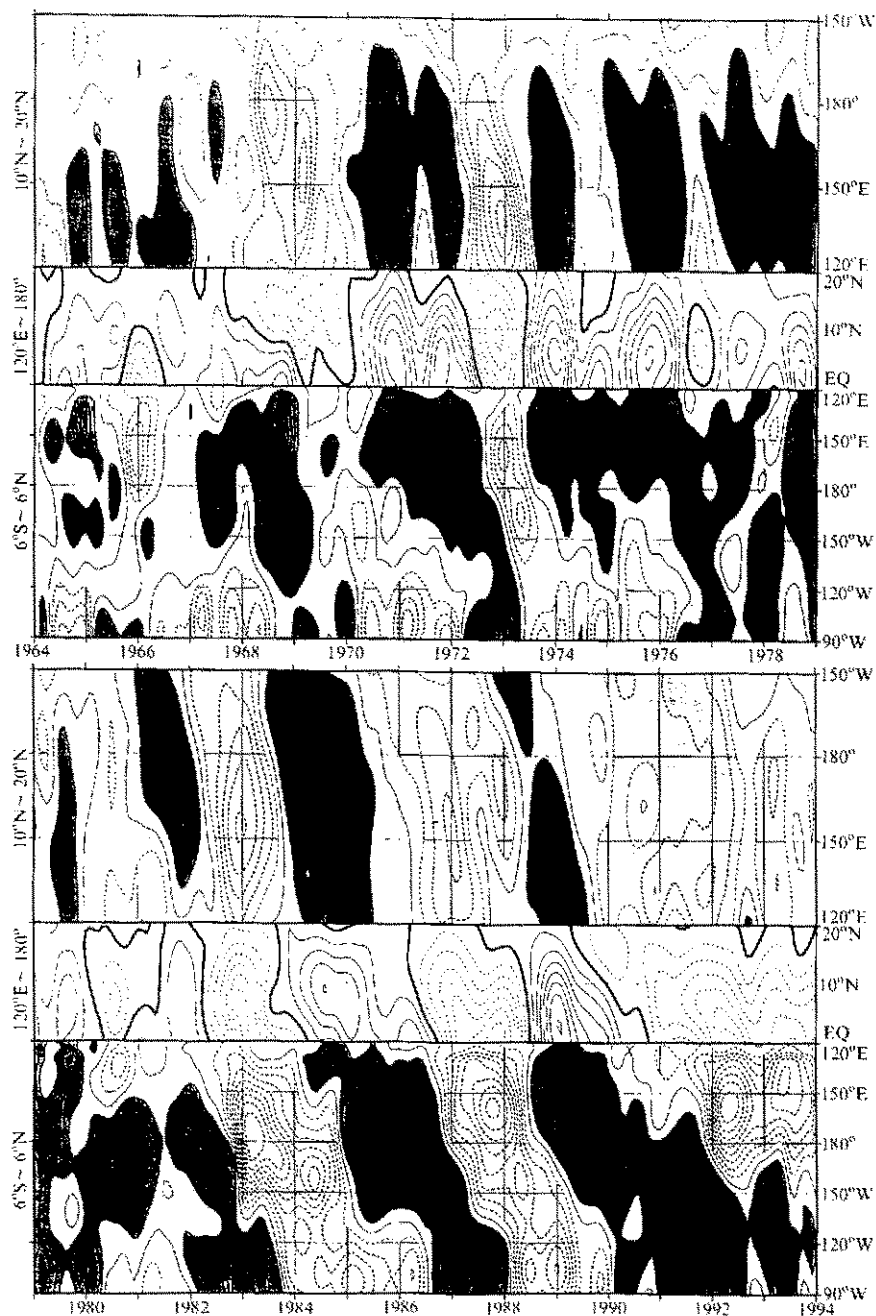


图 10 热带太平洋地区海温距平沿着赤道斜温层时间-经度(纬度)剖面(西太平洋取为 120~160 m 深度的平均, 中太平洋为 80~120 m 的平均, 东太平洋为 40~60 m 的平均)

上图为沿着 10~20°N 的剖面, 中图为沿着 120°E~180° 的剖面, 下图为沿着 6°S~6°N 的剖面
实线表示正距平, 虚线表示负距平, 粗实线为“0”线, 等值线间隔 0.3 °C

当 ENSO 发生后, 东太平洋异常海温会沿着 $10\sim 20^{\circ}\text{N}$ 向西传播, 在西北太平洋与由日本以南海区向南传来的异常海温合并, 其后向赤道方向扩展, 在暖池区形成强的次表层海温异常。因而, 西太平洋暖池次表层异常海温与 ENSO 之间存在明显的相互作用的循环关系。

在异常海温沿着 $10\sim 20^{\circ}\text{N}$ 由东太平洋向西传播之前, 西北太平洋的 $20\sim 30^{\circ}\text{N}$ 地区已有暖、冷海温距平存在, 它的向南传播及与东太平洋传来的暖、冷海温距平合并, 对暖池海温异常的形成有一定作用。然而, 是什么因素导致西北太平洋次表层海温发生异常, 这还需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 李崇银, 气候动力学引论, 北京: 气象出版社, 1995, 241~269.
- 2 Rasmusson, E. M. and T. H. Carpenter, Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation / El Niño, *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**, 354~384.
- 3 Wang Bin, Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades, *J. Climate*, 1995, **8**, 267~285.
- 4 Wyrtki, K., El Niño—the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, 1975, **5**, 572~584.
- 5 McCreary, J. P. and D. L. T. Anderson, A simple model of El Niño and the Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**, 934~946.
- 6 Schopf, P. S. and M. J. Suarez, Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**, 549~567.
- 7 Battisti, D. S., On the role of off-equatorial oceanic Rossby waves during ENSO, *J. Phys. Oceanogr.*, 1989, **19**, 551~559.
- 8 Philander, S. G. H., Ocean-Atmosphere interactions in the tropics: a review of recent theories and models, *J. Appl. Meteor.*, 1992, **31**, 938~945.
- 9 Kessler, W. S. and M. J. McPhaden, Oceanic equatorial waves and the 1991-93 El Niño, *J. Climate*, 1995, **8**, 1757~1774.
- 10 李崇银, 频繁强东亚大槽活动与 El Niño 的发生, 中国科学(B), 1988, **18**(6), 667~674.
- 11 Li Chongyin, Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events, *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**, 36~46.
- 12 Li Chongyin, ENSO cycle and anomalous winter monsoon in East Asia, SMR / 930-18, International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy, 1996.
- 13 穆明权, 李崇银, 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息 I. 观测资料分析, 大气科学, 1999, **23**, 276~285.
- 14 李崇银, 穆明权, 异常东亚冬季风激发 ENSO 的数值模拟研究, 大气科学, 1998, **22**, 481~490.
- 15 李崇银, 穆明权, 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常, 大气科学, 1999, **23**(5), 513~521.

Interactions between Subsurface Ocean Temperature Anomalies in the Western Pacific Warm Pool and ENSO Cycle

Mu Mingquan and Li Chongyin

(State Key Laboratory of Numerical Modeling Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract This paper further studies relationship between anomalies of subsurface ocean temperature in the western Pacific Ocean warm pool and ENSO cycle. Results of composite and correlation analyses

disclose that anomalies of subsurface ocean temperature in the warm pool and their eastward propagation have very important and direct effects on the occurrence of ENSO. Actually, the anomalous zonal wind at the equatorial western Pacific is the main force to push the anomalies of subsurface ocean temperature in the warm pool to propagate and expand eastwards. However, the anomalously zonal wind is the result of the anomalous winter monsoon in East Asia in our previous studies. So, it clearly reflects the indirect but important influence of the anomalous winter monsoon in East Asia on the eastward propagation of the subsurface ocean temperature anomalies in the western Pacific warm pool. Through further analyses, we also find that the anomalies of subsurface ocean temperature propagate westwards and come back from the eastern Pacific Ocean to the warm pool along $10\sim 20^{\circ}\text{N}$ after ENSO occurrence, and cause subsurface ocean temperature anomalies in the warm pool. Therefore, the anomalies of subsurface ocean temperature in the western Pacific warm pool strikingly interact with ENSO cycle.

Key words: western Pacific; warm pool; ENSO cycle; anomalous zonal wind; East Asian monsoon