

关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用 研究最近的进展^{*}

黄荣辉 陈 文 P425 A

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘 要 综述和回顾了最近 6 年我国在实施国际气候变化与可预测性研究计划 (CLIVAR) 中在季风与 ENSO 循环相互作用方面的研究成果。特别是回顾了 ENSO 循环对东亚和我国降水、水汽输送、季风环流、西太平洋副热带高压的影响, 以及亚洲季风对 ENSO 循环的动力作用和 ENSO 循环的物理机制等的研究成果, 并且, 还回顾了关于季风与 ENSO 循环相互作用的数值模拟和可预测性的研究成果。同时指出今后在此领域急待研究的一些问题。

关键词: 亚洲季风; ENSO 循环; 副热带高压; 西风异常

1 引言

ENSO 事件发生会给全球带来严重的气候异常, 引起世界各地发生严重的气候灾害, 从而造成巨大的经济损失, 因此, 世界许多气象学家和海洋学家都在研究 ENSO 事件发生的规律及其产生机制。同样, ENSO 事件的发生对我国气候异常有着重要的影响, 研究表明: ENSO 事件的发生将会给我国华北地区带来干旱而给江淮流域带来洪涝, ENSO 事件的衰减又往往会带来洞庭湖、鄱阳湖、资水和沅江流域的洪涝。如 1998 年夏季长江流域、嫩江和松花江流域发生了 20 世纪仅次于 1954 年的特大洪涝^[1], 给我国工农业生产、国民经济建设带来了严重损失。

近年来的研究表明 ENSO 不仅仅是一种事件, 而是周而复始的循环。它对亚洲季风有严重影响, 而亚洲季风对 ENSO 循环也有很大作用, 因此, 季风与 ENSO 循环相互作用已是当前国际气候研究中的前沿课题之一, 也是国际气候变化与可预测性研究计划 (CLIVAR) 中一个重要的研究领域。

Bjerknes^[2]首先提出了关于 ENSO 事件产生机制的假设, 他提出 ENSO 事件是赤道东太平洋海气相互作用的结果。这个假设无论对于海洋科学或是对于大气科学的发展都起到很重要的作用。长时期许多气象学家与海洋学家都是引用这个假设。

由于在 20 世纪 80 年代国际上实施了热带海洋与全球大气研究计划 (TOGA), 获得了大量的热带太平洋海温和海流观测资料, 并发现许多新的事实, 特别是发现了在热带太平洋的增温始于西太平洋, 而后向中、东太平洋传播。与此同时, 许多大气和海洋学家对 ENSO 产生机制及海气相互作用的研究产生了浓厚兴趣, 特别对关于 ENSO 循

2002-02-20 收到, 2002-03-24 收到修改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900“我国重大气候灾害形成机理和预测理论的研究”(I)资助

环的动力学机制作了不少研究, 如 McCreay^[1]、McCreay 和 Anderson^[4]、Anderson 和 McCreay^[5]从观测事实及理论上提出赤道海洋波动在 ENSO 循环中的作用, Schopf^[6]和 Suarez^[6]从不稳定海气相互作用的观点提出了 ENSO 循环的物理机制。与 Schopf^[6]和 Suarez^[6]所提出的 ENSO 循环中不稳定海气相互作用机制不同, Philander^[7]、Yamagata^[8]、巢纪平和张人禾^[9]指出了热带海洋与大气相互作用可以产生不稳定的海气耦合波, 而 ENSO 循环可能是由于这种海气耦合波所引起。

上述这些研究和 TOGA 试验计划的研究成果都表明: 西太平洋暖池 (Warm pool) 处于暖的状态是 ENSO 事件发生必不可少的条件, 只有西太平洋暖池热容量处于异常大的状态, 随后才有可能发生 ENSO 事件。然而, 有的年份西太平洋暖池的温度异常高, 其热容量异常大, 但这些年的第二年并不发生 ENSO 事件。这说明西太平洋暖池处于异常暖的状态只不过是 ENSO 事件发生的必要条件之一, 还应有大气的条件, 因此, 分析在 ENSO 事件发生过程中热带太平洋大气环流的异常情况是必要的。

热带太平洋上空大气环流的异常不仅与热带太平洋海面海气相互作用有关, 而且与从印度洋上空传播而来的低频振荡以及亚澳季风环流异常有关。从实际观测资料分析和气候数值模拟研究都表明了亚洲季风与 ENSO 循环之间的相互作用是很明显的, Yamagata 和 Matsumoto^[10]、Yasunari^[11,12]等都指出了南亚夏季风的异常可能导致热带太平洋大气-海洋系统的异常, 异常弱 (强) 的南亚夏季风可能有利于 El Niño (反 El Niño 或 La Niña) 现象在赤道东太平洋的发生。并且, 观测事实也表明了不仅印度季风对赤道中、东太平洋增温起了重要作用, 而且东亚季风对 El Niño 事件也有重要影响。李崇银等^[13]指出了东亚冬季风对赤道太平洋 ENSO 事件的发生起到触发作用, 他提出频繁的寒潮爆发可以触发赤道东太平洋 ENSO 事件的产生。

最近几年, 在国家自然科学基金委员会“九五”重点基金资助项目“关于季风与 ENSO 循环相互作用研究”和国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害形成机理和预测理论的研究”的资助下, 我国大气和海洋学者系统地研究了 ENSO 循环与亚洲季风相互作用这一个气候系统的关键科学问题, 并取得许多具有创新的重要研究成果。本文将回顾与综述最近几年 (特别是 1995 年以来), 中国科学家在 ENSO 循环与亚洲季风相互作用这一国际 CLIVAR 计划的前沿科学领域研究中所取得的新成就。

2 关于 ENSO 循环对东亚季风和气候异常影响的研究

2.1 ENSO 循环对于东亚季风和气候的影响

ENSO 循环对于东亚夏季风降水有很大影响。早在 20 世纪 80 年代, 黄荣辉和吴贻芳^[14]已指出了 ENSO 事件的不同阶段对于中国夏季降水有不同的影响。在此研究基础上, 黄荣辉^[15]利用 1951~1999 年 49 年我国降水的详细观测资料, 分析了 ENSO 循环 (包括了 El Niño 和 La Niña 事件) 不同阶段我国旱涝的分布, 指出了 ENSO 循环的不同阶段东亚旱涝灾害的分布有很大差异。如图 1a 和 1b 所示, 在 El Niño 事件的发展阶段, 我国江淮流域以及日本和韩国的夏季风降水偏多, 而华北和江南地区的降水偏少, 经常出现干旱灾害; 相反, 在 El Niño 事件的衰减阶段, 我国江淮流域以及日本和

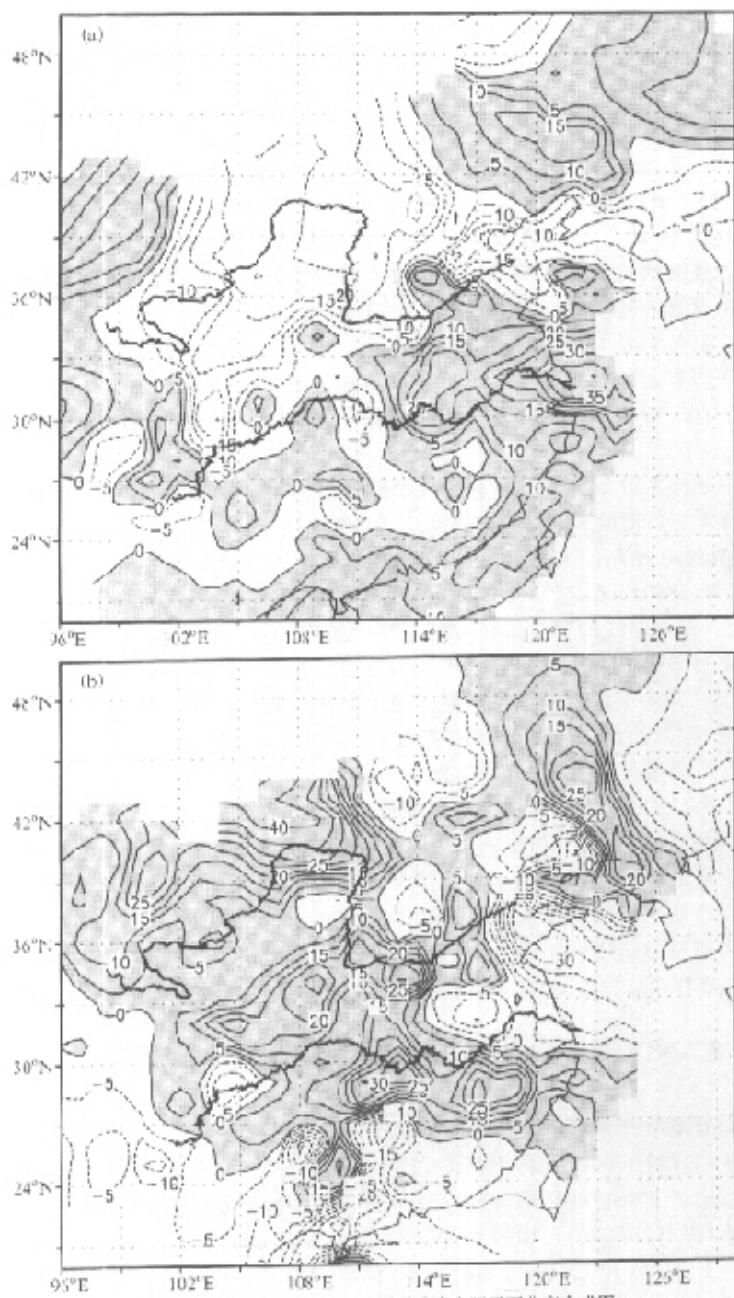


图1 ENSO 循环不同阶段我国夏季降水距平百分率合成图

(a) El Niño 事件发展特征; (b) El Niño 事件的衰减阶段;

图中阴影区表示“+”距平, 虚线区表示“-”距平

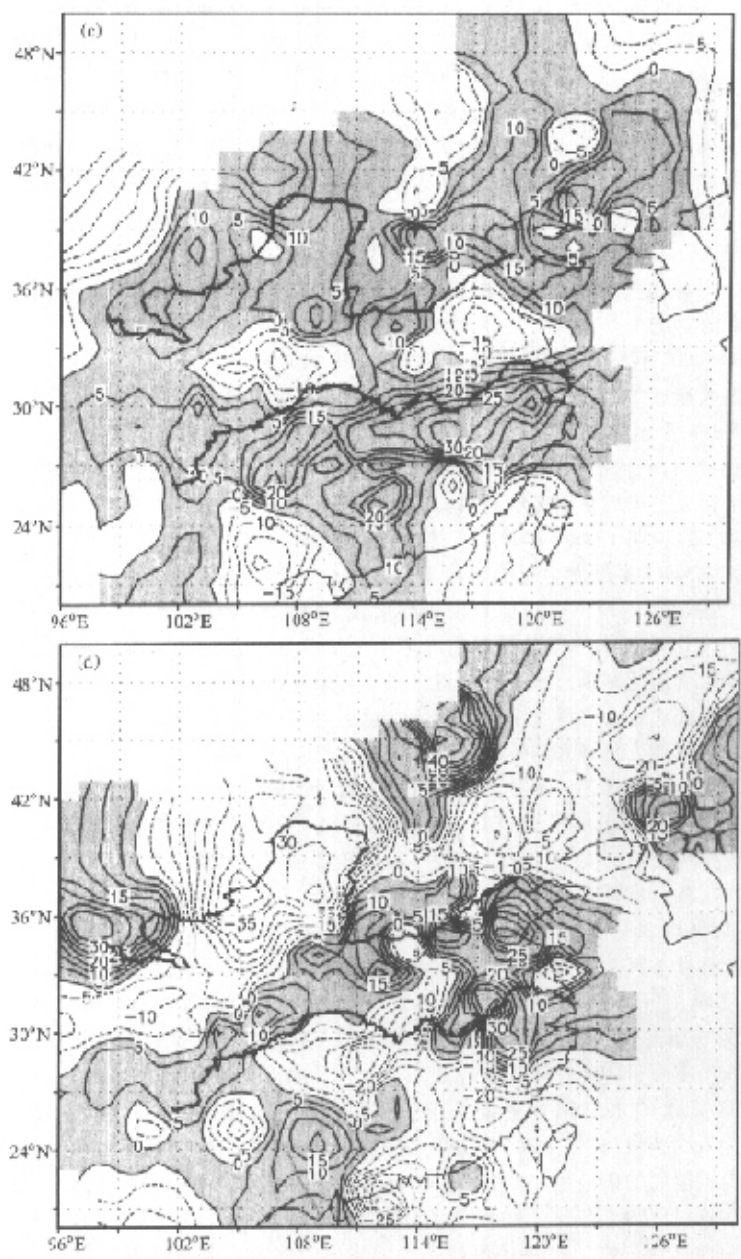


图 11(续) ENSO 循环不同阶段我国夏季降水距平百分率合成图

(c) La Niña 事件的发展阶段; (d) La Niña 事件的衰减阶段

图中阴影区表示“+”距平, 虚线区表示“-”距平

韩国的夏季风降水偏少, 往往出现干旱, 而江南地区, 特别是洞庭湖和鄱阳湖流域降水偏多, 经常出现洪涝灾害。我国重大旱涝灾害一般发生在 ENSO 事件的发展与衰减阶段。如图 1c 和 d 所示, 在 La Niño 事件的不同阶段, 我国降水距平分布也不一样。倪东鸿和孙照渤^[16]的研究也证实了上述结论。

ENSO 循环不仅影响东亚夏季风, 而且还影响东亚冬季风。陈文和 Graf^[17]以及陈文等^[18]的研究表明了 ENSO 事件的成熟期我国东部沿海冬季风偏弱, 经常发生暖冬现象。陶诗言和张庆云^[19]分析了 1980 年以来 El Niño 和 La Niño 年冬、春季高度场和流场, 指出 El Niño 年冬季亚洲上空的环流型呈现出东亚冬季风偏弱, 不利于寒潮的向南爆发。金祖辉和陶诗言^[20]也从观测资料分析进一步研究了 ENSO 循环对中国冬、夏季气候异常的影响。

2.2 ENSO 循环对热带西太平洋和东亚季风环流的影响

正如上面所述, 在 ENSO 循环的不同阶段, 江淮流域夏季降水具有不同特征, 这是由于 ENSO 循环对于热带西太平洋和东亚季风环流有重要影响。张人禾等^[21]利用 ENSO 事件成熟期合成的 850 hPa 流场异常的距平风场分布, 表明了 El Niño 事件成熟期, 热带西太平洋与东亚区域有明显的西南气流的异常, 副热带中太平洋有明显的西北气流异常。这说明 ENSO 事件对于热带西太平洋和东亚季风环流有很大的影响。

为什么 ENSO 事件发生对热带西太平洋和东亚上空季风环流有很大影响, 任保华和黄荣辉^[22]的研究表明: 这可能是由于热带太平洋海温异常所产生的对流活动异常分布所引起的。ENSO 事件成熟期, 在赤道中太平洋和以东地区对流活动加强, 而在热带西太平洋对流活动减弱, 从而使赤道太平洋面上的对流活动异常形成了一个偶极子结构, 显然, 在赤道太平洋上空的热源异常也会形成一个偶极子结构。这种热力异常结构有利于在热带西太平洋和我国南海地区强迫出反气旋环流的异常, 从而使得我国江淮流域的西南季风环流加强; 并且, 由于准定常行星波的传播, 中、高纬地区环流也将产生异常。Wang 等^[23]指出了 ENSO 对东亚夏季风环流的影响有滞后效应, 在 El Niño 事件达到成熟期之后的夏季, 东北亚往往出现异常强的反气旋, 并且热带西太平洋高压异常偏西, 这就会加强副热带东亚地区的季风环流。

2.3 关于 ENSO 循环对亚洲水汽输送影响的研究

由于亚洲夏季风从海洋带来大量水汽到印度、中印半岛和东亚地区, 因此, 季风环流将严重影响南亚和东亚地区的水汽输送, 从而严重影响这些地区的降水。黄荣辉等^[24]从欧洲中期天气数值预报中心 (ECMWF) 观测资料分析, 指出东亚夏季风所造成的水汽输送不同于印度季风, 东亚夏季风水汽经向输送要大于纬向输送, 并且, 引起东亚季风区降水的水汽辐合主要是由于季风气流引起的水汽平流所造成。张人禾等^[25]、张人禾^[26,27]利用 NCEP/NCAR 观测资料分析了 ENSO 循环对东亚季风区水汽输送的影响。他们的研究表明: 在 El Niño 发展到最盛期的冬季, 热带西太平洋和海洋性大陆存在着对流冷却异常, 使得热带对流层产生 Rossby 波响应, 从而在菲律宾周围产生反气旋性气流异常, 这种环流使得我国华南沿岸水汽输送增强, 导致这里降水增强; 并且, 与 El Niño 事件相伴随的弱印度季风也减少了对东亚和中国上空的水汽输送, 从而使得我国华北地区降水往往偏少。而在 ENSO 事件的衰减期或在 La

Niño 事件的发展期, 由东亚夏季风从孟加拉湾、南海和热带西太平洋输送来的水汽在我国长江流域以及韩国和日本一带辐合, 往往引起严重洪涝。

2.4 关于 1997/1998 年 ENSO 循环的物理过程及其对东亚气候异常影响

1997/1998 年的 ENSO 事件是 20 世纪最强的一次, 它不仅对全球和东亚的气候异常有重要影响, 而且引起了我国严重的气候灾害。陶诗言等^[28]、黄荣辉等^[1]和颜宏^[29]利用详细观测资料, 分析了这次 ENSO 事件演变过程中的热带太平洋海面温度 (SST) 和次表层海温的演变过程及其对东亚气候异常的影响, 特别是对长江流域特大洪涝的影响, 并指出了 1997/1998 年 ENSO 事件对于 1997 年华北地区的干旱和 1998 年长江流域的特大洪涝有严重影响。

3 关于 ENSO 循环对西太平洋副热带高压的影响

由于夏季西太平洋副热带高压对东亚夏季风活动和降水的雨量分布有着重要影响, 因此, 研究 ENSO 循环对西太平洋副热带高压的影响具有重要科学意义和应用价值。Nitta^[30]从向外长波辐射 (OLR) 变化指出在东亚和菲律宾周围对流活动存在着 PJ 振荡, 与此同时, 黄荣辉和李崇银^[31]、黄荣辉和李维京^[32]、黄荣辉和孙凤英^[33]指出: 与 ENSO 循环有关的热带西太平洋热力状态及其上空对流活动, 对西太平洋副热带高压位置的年际和季内变化有重要影响。正如图 2 所示, 当热带西太平洋处于暖状态, (经

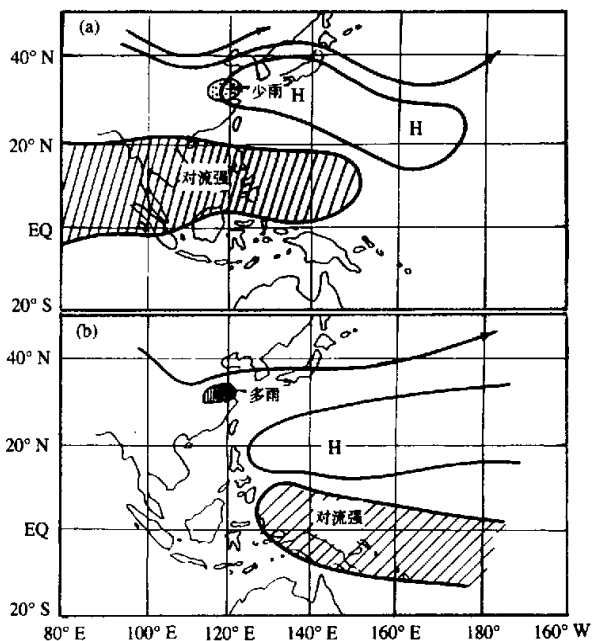


图 2 热带西太平洋热力状态、菲律宾周围的对流活动、西太平洋副热带高压和东亚夏季旱涝之间的关系

(a) 热带西太平洋暖池处于暖状态; (b) 热带西太平洋处于冷状态

常处于 La Niño 事件的发展阶段) 菲律宾周围的对流活动加强, 热带西太平洋副热带高压偏北、偏东, 在这种情况下, 江淮流域以及韩国和日本一带的夏季降水偏少; 而当热带西太平洋处于冷状态, 菲律宾周围的对流活动减弱, 热带副热带高压偏南、偏西, 在这种情况下, 江淮流域以及韩国和日本一带的夏季降水偏多, 并往往发生洪涝。

根据观测事实、理论分析和数值模拟的结果, Nitta^[30]、黄荣辉和李崇银^[31]、黄荣辉和李维京^[32]提出了北半球大气环流异常存在着东亚/太平洋型遥相关。黄刚和严中伟^[34]从此遥相关型出发定义了一个能很好表征东亚夏季风环流的季风指数, 这个指数不仅能很好地表征东亚季风环流的异常, 而且也可以很好地表征东亚夏季风降水的强度。最近 Lu 和 Dong^[35]从观测资料和理论分析表明了热带西太平洋上空的对流活动对热带西太平洋副热带高压的东西振荡也具有重要作用。黄荣辉等^[36]从熵度方程也说明了在 ENSO 事件的成熟期, 位于赤道中太平洋的强对流活动有利于热带西太平洋反气旋环流的形成。

4 关于亚洲季风和热带西太平洋以及 ENSO 循环之间关系的研究

亚洲季风和热带西太平洋以及 ENSO 循环是全球气候系统重要的成员, 它们之间存在着很强的相互作用, 研究这三者之间的关系不仅对于揭示全球气候系统的年际变化具有重要的意义, 而且对于揭示东亚气候年际变化也具有重要价值。

4.1 关于东亚冬季风异常对 El Niño 事件激发作用的研究

El Niño 事件产生的物理机制一直是近几年来气象学家和海洋学家关注的热门课题, 中国气象学家对 El Niño 事件和 ENSO 循环特别是关于亚洲季风在 ENSO 循环中的作用, 有较深入的研究。早在 20 世纪 80 年代末, 李崇银^[13]等就指出了东亚冬季风可能对赤道中、东太平洋的 El Niño 事件有激发作用, 随后, 李崇银^[37]又进一步地研究了东亚冬季风对赤道太平洋 El Niño 事件的激发作用, 他指出, 频繁的强寒潮使赤道西太平洋对流活动加强, 对流活动通过加强赤道西太平洋上空大气 30~60 天振荡从而激发 El Niño 事件的发生。近年来, 李崇银^[38~40]、李崇银和李桂龙^[41]、李崇银和廖清海^[42]系统地研究了东亚冬季风在 El Niño 事件发生过程的动力作用, 指出寒潮能引起赤道信风的减弱和赤道西风的加强, 从而对 El Niño 事件起到激发作用, 并提出 ENSO 循环与东亚冬季风相互作用的过程(见图 3)^[43]。

4.2 关于西太平洋暖池及其上空环流与纬向风对 ENSO 循环动力作用的研究

早在 20 世纪 90 年代初, 黄荣辉和吴仪芳^[44]就指出西太平洋暖池及其上空的环流对 El Niño 事件产生热力和动力作用。黄荣辉等^[45]、黄荣辉和张人禾^[46]、黄荣辉等^[47]、张人禾和黄荣辉^[48]和黄荣辉等^[49]用大气和海洋观测资料, 详细而系统地分析了 1980 年以来热带西太平洋次表层海温、海洋热容量以及对流层下层和海表附近的环流异常, 同时分析了纬向风异常对 El Niño 和 La Niño 事件发生的热力、动力作用。并指出, 在 El Niño 事件发展前, 热带西太平洋上空对流层下层就会出现气旋性环流异常, 从而使印度尼西亚和赤道西太平洋上空产生西风异常; 而当 El Niño 事件发展到成熟阶段, 热带西太平洋上空对流层下层就会产生反气旋性环流异常, 从而使印度尼西亚和赤道西太平洋上空产生东风异常。还指出热带西太平洋上空的纬向风异常既与南亚季风异常有关,

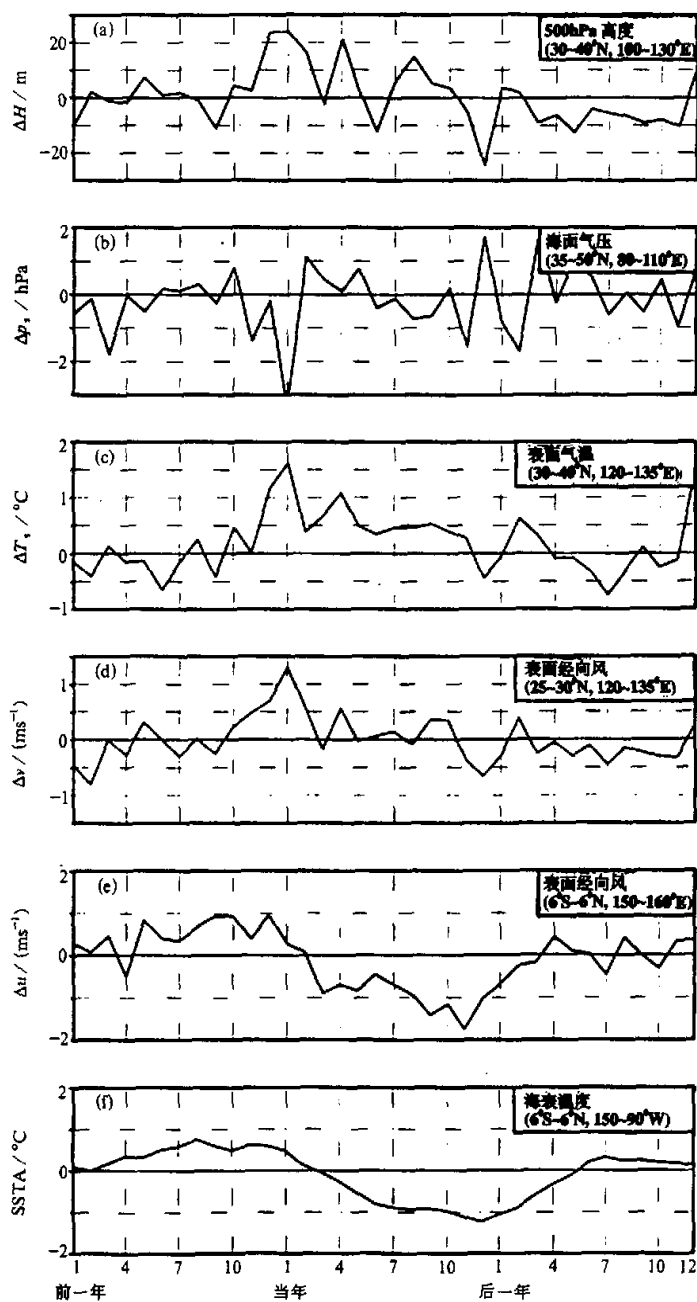


图3 东亚冬季风和赤道西太平洋表面附近纬向风异常与 El Niño 事件的关系
(引自文献[38])

也与东亚季风异常相关。

4.3 关于热带印度洋对 ENSO 循环动力作用的研究

El Niño 事件的发生除了由于热带太平洋海气相互作用外,还可能来自热带印度洋的海气相互作用。早在 20 世纪 80 年代,气象学家和海洋学家已认识到印度季风与 ENSO 循环之间存在一定关系。后来,Webster 和 Yang^[50]、Ju 和 Slingo^[51]也指出,南亚季风与 ENSO 之间存在着相互作用、相互调节的关系。

吴国雄和孟文^[52]的研究结果表明了赤道印度洋与东太平洋 SST 变化有显著的正相关,指出了这种正相关是由于赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空 Walker 环流之间显著耦合造成的,从而提出印度洋季风对 ENSO 的触发作用。最近,巢清尘和巢纪平^[53]指出,热带东印度洋的西风异常突然东传并在热带西太平洋加强,可以触发 El Niño 事件的发生。

4.4 关于 ENSO 循环物理过程的研究

如引言所述,从 20 世纪 60 年代迄今人们对 ENSO 循环的物理过程进行了大量深入而系统的研究,这使得 ENSO 循环的物理过程不断清楚。在前人研究的基础上,黄荣辉等^[47,49]在理论上利用一个简单赤道 β 平面近似的热带海气相互作用方程组,从实测海表风应力强迫讨论了 20 世纪 80~90 年代初所发生的 ENSO 循环以及 1997/1998 年 ENSO 循环的物理过程及其演变机理,指出热带西太平洋海表附近的环流异常和纬向风异常通过对赤道海洋暖(冷) Kelvin 波和冷(暖) Rossby 波的激发,从而对 ENSO 循环(包括 El Niño 事件和 La Niño 事件)起到重要作用。

综上所述,我们可以提出一个如图 4 所示的亚洲季风与 ENSO 循环相互作用的示意图。

4.5 关于热带东亚季风与 ENSO 循环数值模拟的研究

虽然从 20 世纪 80 年代起在国际上就用海气耦合模式来模拟 ENSO 循环,但用耦合模式来模拟东亚冬季风对 ENSO 发生的作用还不多。李崇银和穆明权^[54]、穆明权和李崇银^[55]利用海气耦合模式,分别模拟了东亚冬季风异常和东亚冬季风年际变化对 El Niño 事件产生的动力作用,结果表明:持续强东亚冬季风可以激发出 El Niño 事件,而持续弱东亚冬季风也可以激发 La Niño 事件,即异常的东亚冬季风是一个激发产生 ENSO 循环的重要机制。他们的模拟结果还表明:强的冬季风可以激发出暖性赤道 Kelvin 波,而弱的冬季风可以产生冷性赤道 Kelvin 波,这些赤道海洋波动对 ENSO 循环起到重要的动力作用。

4.6 关于东亚冬季风和暖池次表层以及 ENSO 循环相互作用的研究

穆明权和李崇银^[56]的研究表明:如图 5 所示,东亚冬季风造成的西北太平洋异常经向风可以引起热带西太平洋纬向风的异常,而热带西太平洋海表附近的纬向风异常可以通过激发赤道 Kelvin 波而造成暖海温的向东传播。并且他们指出,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。在 ENSO 发生后,北半球副热带地区将有次表层暖(冷)海温距平沿 10~20°N 纬带向西传播,这也是导致西太平洋暖池次表层海温发生异常的一个重要原因。李崇银和穆明权^[57]从观测事实的分析和数值模拟的结果进一步指出东亚冬季风和西太平洋暖池次表层以及 ENSO 循环之间的关系。

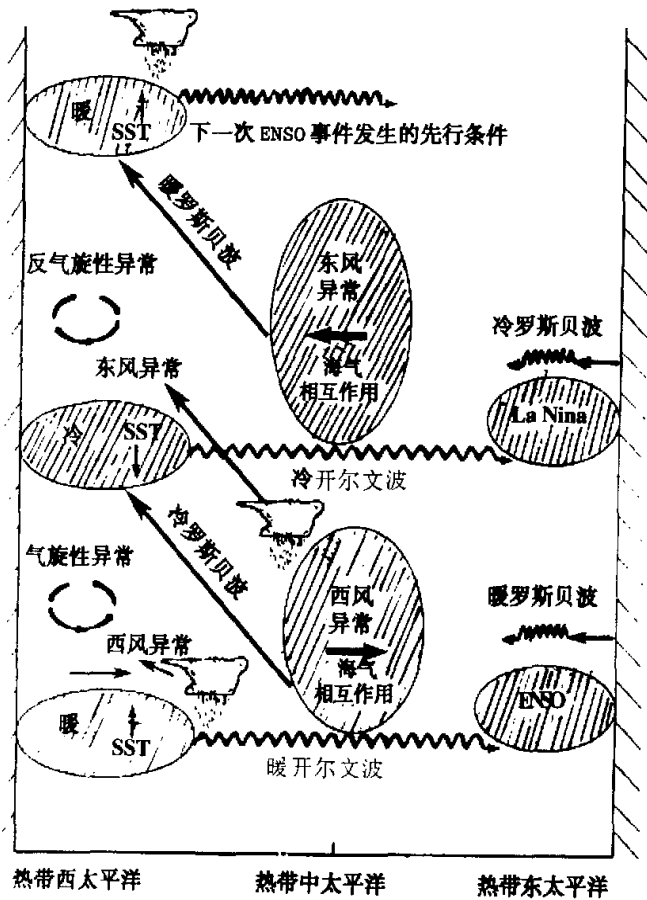


图4 亚洲季风与 ENSO 循环相互作用过程示意图

5 关于季风与 ENSO 相互作用中进一步研究的科学问题

综上所述,近年来由于我国旱涝等重大气候灾害预测的需要,对于季风与 ENSO 相互作用开展了卓有成效的研究,取得重要的进展。但是,在此领域中还有许多问题不清楚,需进一步进行研究。

(1) 关于亚澳季风系统与 ENSO 循环相互作用的物理过程。ENSO 循环不同阶段影响着亚澳季风环流与降水。但是,在亚澳季风系统中南亚季风、东亚季风与澳洲季风子系统,它们既相互联系又相互独立并具有不同变化特征的环流系统,因此 ENSO 循环对这三个子系统的影响的异同值得进一步深入研究;另一方面,这三个相互独立的子系统通过什么过程来影响 ENSO 循环,这些过程相互联系是什么,这些问题必须从观测资料分析,动力理论和数值模拟进一步加以深入研究,这也是 CLIVAR 计划中一个

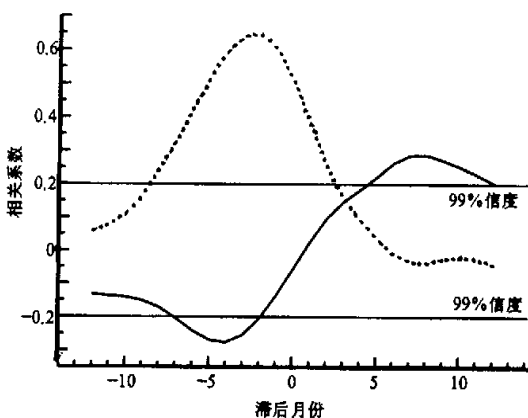


图5 西太平洋暖池次表层(120~160 m)异常海温东传与赤道西太平洋异常纬向风(虚线)以及西北太平洋地区异常经向风(实线)的时滞相关系数随时间的演变
负值表示异常海温东传超前
(引自文献[56])

重要研究内容。

(2) 关于热带西太平洋海流在 ENSO 循环中的作用。亚澳季风不仅影响着热带西太平洋的赤道海洋波动,也影响着赤道西太平洋的大洋环流,而大洋环流也影响着西太平洋暖池中暖水或冷水向东输送。因此,很有必要进一步研究热带太平洋洋流在 ENSO 循环中的作用,以便深入揭示 ENSO 循环的物理机制。

(3) 关于热带大洋海域的大气、海洋观测资料的同化问题。为了要揭示 ENSO 循环的机理,20 世纪 80 年代在热带海洋与全球大气研究试验(TOGA)的基础上发展了热

带大气海洋观测系统(TAO),这个观测系统对于提高 El Niño 事件和 La Niño 事件发生的监测和预测能力发挥了重大作用。新世纪初,在海洋观测系统中地转海洋实时观测阵(ARGO)将逐渐代替自律拉格朗日环流探测浮标(ATLAS)观测系统,这无疑将对进一步提高 El Niño 事件和 La Niño 事件发生的监测和预测水平发挥重要作用。然而,这些观测资料的收集、处理、同化和在模式中的应用将是一个很重要的研究课题。

(4) 关于亚澳季风系统与 ENSO 循环的模拟与可预测性问题。近几年来利用大气环流模式(GCM)或气候模式来模拟亚洲季风系统,特别是东亚夏季风降水的数值模拟一直没有实质性的提高,所有气候模式所模拟的季风环流系统不仅存在着区域尺度的误差,而且存在着系统性误差^[58,59]。因此,采用复杂的海气耦合模式对 ENSO 循环的模拟虽取得一定进展,但对 El Niño 和 La Niño 事件的发生时间和强度的模拟仍存在着较大偏差。这说明在亚洲季风系统的数值模拟中如何考虑实测 ENSO 循环的作用,而在 ENSO 循环中如何考虑实测亚澳季风系统风应力的作用,并不是仅仅用海气耦合模式所产生的风应力,这在气候数值模式中还不能很好解决。因此,如何提高对 ENSO 循环和亚澳季风系统的数值模拟能力和数值预测能力,是亚澳季风与 ENSO 循环相互作用中一个急待研究的重要问题。

综上所述,中国气象学家和海洋学家近几年来在季风与 ENSO 循环相互作用的特征、过程和物理机制方面取得了重要的研究进展,但是,在此领域还有许多重要而困难的科学问题需进一步深入研究。

由于学识有限,本文只能综述作者所熟悉的研究进展,因此,文中难免遗漏一些在此领域很重要的研究成果。

参 考 文 献

- 1 黄荣辉, 徐子红, 王鹏飞, 周连重, 1998年夏长江流域洪涝特征及其成因探讨, *气候与环境研究*, 1998, 3, 300~313.
- 2 Bjerknes, J., A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature, *Tellus*, 1966, 18, 820~829.
- 3 McCreary, J. P., A model of tropical ocean-atmosphere interaction, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, 111, 370~387.
- 4 McCreary, J. P. and D. L. T. Anderson, A simple model of El Niño and southern oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1984, 112, 934~946.
- 5 Anderson, D. L. T. and J. P. McCreary, Slowly propagating disturbances in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1985, 42, 615~628.
- 6 Schopf, P. S. and M. J. Suarez, Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1988, 45, 549~566.
- 7 Philander, S. G. H., The response of equatorial ocean to a relaxation of a trade winds, *J. Phys. Oceanogr.*, 1981, 11, 176~189.
- 8 Yamagata, T., Stability of a simple air-sea coupled model in the tropics, *Coupled Ocean-Atmosphere Model*, Edited by J. C. J. Bihoul, Amsterdam, Elsevier, 1985.
- 9 Chao Jiping and Zhang Renhe, The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities, *Acta Meteor. Sinica*, 1988, 2, 275~287.
- 10 Yamagata, T. and Y. Matsumoto, A simple ocean-atmosphere coupled model for the origin of a warm El Niño / Southern Oscillation event, *Philos. Trans. Roy. Soc. London, A*, 1989, 329, 225~236.
- 11 Yasumari, T., Impact of Indian monsoon on the coupled atmosphere / ocean system in the tropical Pacific, *Meteor. & Atmos. Phys.*, 1990, 44, 29~41.
- 12 Yasunari, T., The monsoon year-A new concept of the climatic year in the tropics, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1991, 72, 1331~1338.
- 13 李崇银, 陈于湘, 袁重光, El Niño事件发生的一个重要原因—东亚寒潮的频繁活动, *大气科学 (特刊)*, 1988, 125~132.
- 14 Huang Ronghui and Wu Yifang, The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, 6, 21~32.
- 15 黄荣辉, 关于我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究, *中国基础科学*, 2001, No.8, 4~8.
- 16 倪东鸿, 孙照渤, ENSO循环在夏季的不同位相对东亚夏季风的影响, *南京气象学院学报*, 2000, 23, 18~54.
- 17 Chen Wen and Hans F. Graf, The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relationship to global circulation, Max-Planck-Institute für Meteorologic Report, 1998, No.250.
- 18 Chen Wen, Hans F. Graf and Huang Ronghui, The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon, *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, 17, 48~60.
- 19 陶诗言, 张庆云, 亚洲冬季风对 ENSO 事件的响应, *大气科学*, 1998, 22, 399~407.
- 20 金祖辉, 陶诗言, ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究, *大气科学*, 1999, 23, 664~672.
- 21 Zhang Renhe, A. Sumi and M. Kimoto, Impact of El Niño on the East Asian monsoon, A diagnostic study of the 86 / 87 and 91 / 92 events, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, 74, 49~62.
- 22 Ren Baohua and Huang Ronghui, Interannual variability of the convective activities associated with the East Asian summer monsoon obtained from TBB variability, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, 16, 77~90.
- 23 Wang Yafei, Wang Bin and J. H. Oh, Impact of the preceding El Niño on the East Asian summer atmosphere circulation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, 79, 575~588.
- 24 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 东亚季风区的水汽输送特征及其与印度季风区的差别, *大气科学*, 1998, 22, 460~469.
- 25 Zhang Renhe, A. Sumi and M. Kimoto, A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, 16, 229~241.
- 26 张入禾, El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用, *高原气象*, 1999, 28, 567~574.
- 27 Zhang Renhe, Relations of water vapor transports from Indian monsoon with those over East Asia and the

- summer rainfall in China, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 1005~1017.
- 28 陶诗言, 张庆云, 张顺利, 1998年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件, *气候与环境研究*, 1998, **3**, 290~299.
- 29 颜宏, 1998年中国特大洪涝灾害的天气气候特点, 成因分析及气象预报服务, *气候与环境研究*, 1998, **3**, 323~334.
- 30 Nitta, Ts., Convective activities in the tropical Western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **64**, 373~390.
- 31 Huang Ronghui and Li Chongyin, Influence of the heat source anomaly over the tropical Western Pacific on the subtropical high over East Asia, Proceedings of the International Conference on the General Circulation of East Asia, Chengdu, April 10~15, 1987, 40~51.
- 32 黄荣辉, 李维京, 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制, *大气科学*, 1988, Vol.12 特刊, 95~107.
- 33 Huang Ronghui and Sun Fengying, Impact of the tropical Western Pacific on the East Asian summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**, 243~256.
- 34 黄刚, 严中伟, 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化, *科学通报*, 1999, **44**, 421~424.
- 35 Lu Riyu and Dong Buwen, Westward extension of North Pacific subtropical high in summer, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79**, 1229~1241.
- 36 黄荣辉, 张人禾, 严帮良, 热带西太平洋纬向异常对ENSO循环的动力作用, *中国科学(D辑)*, 2001, **31**, 697~704.
- 37 Li Chongyin, Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events, *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**, 36~46.
- 38 Li Chongyin, Westerly wind anomalies over the equatorial Western Pacific and Asian winter monsoon, Proceedings of the Interannual Scientific Conference on the TOGA Programme, WCRP-91, WMO/TD, 1995, NO.717, 260~264.
- 39 Li Chongyin, A further study on interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño, *Acta Meteor. Sinica*, 1996, **10**, 309~320.
- 40 李崇银, 强东亚冬季风对El Niño激发作用的进一步研究, *中国气候变化与气候影响研究*, 北京: 气象出版社, 1998, 207~218.
- 41 李崇银, 李桂龙, 热带大气准定常行星波的活动与ENSO, *自然科学进展*, 1998, **18**, 15~19.
- 42 李崇银, 廖洁梅, 热带大气季节内振荡激发El Niño机制, *热带气象学报*, 1998, **14**, 97~105.
- 43 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**, 276~286.
- 44 黄荣辉, 吴仪芳, 关于ENSO循环动力学研究, 海洋环流研讨会论文集, 曾庆存等编, 北京: 海洋出版社, 1992, 41~51.
- 45 黄荣辉, 臧晓云, 傅云飞, 东亚季风与ENSO循环相互作用, *气候与环境研究*, 1996, **1**, 38~54.
- 46 黄荣辉, 张人禾, ENSO循环与东亚季风环流相互作用过程的诊断研究, 赵九章纪念文集, 叶笃正编, 北京, 科学出版社, 1997, 93~109.
- 47 Huang Ronghui, Zhang Xiaoyin, Zhang Renhe and Chen Jilong, The westerly anomalies over the tropical Pacific and their dynamical effect on the ENSO cycle during 1980~1994, *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15**, 135~151.
- 48 张人禾, 黄荣辉, El Niño事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析, *大气科学*, 1998, **22**, 587~599.
- 49 Huang Ronghui, Zhang Renhe and Yan Bangliang, Dynamical effect of the zonal wind anomalies over the tropical Western Pacific on ENSO cycles, *Science in China(Series D)*, 2001, **44**, 1089~1098.
- 50 Webster, P. T. and S. Yang, Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**, 877~926.
- 51 Ju, J. and J. M. Slingo, The Asian summer monsoon and ENSO, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1995, **121**, 1133~1168.
- 52 吴国雄, 孟文, 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和ENSO事件 I. 资料分析, *大气科学*, 1998, **22**, 470~480.
- 53 巢清尘, 巢纪平, 热带西太平洋和东印度洋对ENSO发展的影响, *自然科学进展*, 2001, **11**, 1293~1300.
- 54 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.
- 55 穆明权, 李崇银, 东亚冬季风异常对ENSO的激发——一个CGCM数值模拟研究, 东亚季风和中国暴雨, 大

- 气物理所编, 北京: 气象出版社, 1998, 210~219.
- 56 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, *大气科学*, 2000, **24**, 447~460.
- 57 Li Chongyin and Mu Mingquan, Relationship between East Asian winter monsoon, warm pool situation and ENSO cycle, *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**, 1448~1455.
- 58 黄荣辉, 陈金中, 陆日宇, 刘爱弟, 滤波在改进旱涝季度数值预测的作用, 灾害性气候的模拟与预测, 黄荣辉等主编, 北京: 气象出版社, 1996, 55~64.
- 59 Huang Ronghui, Wu Bingyi, Hong, S. G. and J. H. Oh, Sensitivity of numerical simulations of the East Asian summer monsoon rainfall and circulation to different cumulus parameterization schemes, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 23~41.

Recent Progresses in the Research on the Interaction between Asian Monsoon and ENSO Cycle

Huang Ronghui and Chen Wen

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In this paper, the achievements of the research on the interaction between monsoon and ENSO cycle in the implementing CLIVAR Programme in China for recent six years are synthesized and reviewed. Especially, the progresses in the research on the impacts of ENSO cycle on the precipitation in East Asia and China, water vapor transfer, monsoon circulation, the West Pacific subtropical high and the dynamical effect of Asian monsoon on ENSO cycle and the physical mechanism of ENSO cycle, and the achievements of the study on the numerical simulation and predictability of the interaction between monsoon and ENSO. Besides, some problems to be studied further in this aspect are also pointed out in this paper.

Key words: Asian monsoon; ENSO cycle; subtropical high; westerly anomaly