

关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环 相互作用的研究*

黄荣辉 陈 文 丁一汇 李崇银

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 季风和 ENSO 是影响亚洲和中国气候变化的两大系统, 随着气候动力学研究的深入, 国内外学者对季风及其与 ENSO 循环相互作用的研究取得了很大进展。作者回顾了近年来国内外关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究进展, 主要综述了中国学者关于亚洲季风的认识与表述的深化, 特别是对于季风的特征、系统性和年循环现象的认识。还回顾了中国关于亚洲季风的季内、年际和年代际变化、亚洲季风与 ENSO 循环相互作用等方面的研究进展。此外, 还提出在季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用方面需进一步研究的问题。

关键词: 季风; ENSO; 动力学; 相互作用

1 引言

季风是全球气候系统中一种重要的大气环流系统, 它能带来“干”与“湿”不同气候状态的盛行风向随季节变化的环流系统, 如东亚在夏季盛行偏南风并带来大量降水, 而冬季盛行偏北风并带来寒冷而干燥天气。由于季风对陆地降水有着密切关系, 所以季风严重影响着季风区的经济、工农业生产和人民生活, 尤其是给亚澳地区带来大范围的旱涝灾害, 给这些地区的经济带来严重损失。每年, 由于亚洲季风的异常所引起的旱、涝、寒害、雪灾、沙尘暴等灾害, 给中国造成约 2000 亿元以上的经济损失, 占国家 GDP 的 3%~6% 左右。因此, 亚澳季风的变化与异常一直是这些地区气象学家的主要研究课题, 也是当今国际 CLIVAR (气候变化与可预测性) 研究计划的重要研究内容之一。

由于季风变化和异常对中国的工农业生产、国民经济以及人民生活影响很大, 因此, 中国气象学家很早就重视这个问题的研究, 可以说, 中国气象学者关于季风的研究对促进国际季风研究起到重要作用。早在 60 多年前, 中国著名气象学家竺可桢^[1] 首先提出东亚夏季风对中国降水的影响, 之后, 涂长望和黄仕松^[2] 研究了东亚夏季风的进退对中国气候的季节内变化的影响。这些研究开辟了关于东亚夏季风变化及其对东亚气候影响的研究之路。继他们之后, 陶诗言等^[3~5]、陈隆勋等^[6] 和丁一汇^[7] 关于东亚夏季风的结构、性质作了系统的研究, 并且作了系统的回顾^[8]。最近几年, 中国学者在关于季风的表述与变化, 特别是关于季风的季内、年际和年代际变化及其对东亚

气候的影响作出系统的研究, 并且, 关于季风变化机制的研究也取得重要进展。

在全球气候系统中, 与季风系统具有同等重要的应是发生在热带太平洋的厄尔尼诺—南方涛动循环 (包括 El Niño 和 La Niña 事件), 一般简称为 ENSO 循环。由于厄尔尼诺事件的发生给全球气候带来严重影响, 因此, 全球海洋学家和气象学家非常重视 El Niño 和 La Niña 事件特征和机理的研究, 特别是国际热带海洋与全球大气 (TOGA) 研究计划的实施对于揭示 El Niño 和 La Niña 事件的形成过程及其物理机制起到突破性的作用。一些学者^[9~14] 从不同观点研究了发生在热带太平洋的 ENSO 循环的物理过程, 从而对 ENSO 循环的机理取得突破性进展, 大大提高了对 El Niño 和 La Niña 事件发生的预测水平。

上述这些学者的研究结果也表明了 El Niño 和 La Niña 不仅仅是一种事件, 而且是一种周而复始的循环, 这种循环对亚洲季风有严重影响, 而亚洲季风对此循环也有很大作用, 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 CLIVAR 中一个重要研究领域。鉴于 ENSO 循环与亚洲季风相互作用研究的重要性, 我国学者在这方面也作了不少重要的研究^[15~18]。

最近几年, 在“国家重点基础研究发展规划”、“国家攀登计划”以及国家自然科学基金的资助下, 特别是实施了“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”项目之后, 我国大气和海洋研究学者系统地研究了季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用这一气候系统的关键科学问题, 并取得许多创新的重要研究成果。本文将主要回顾和综述最近几年中国科学家在季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用这一国际科学前沿领域研究中所取得的最新进展。

2 关于亚洲季风的表述与认识

正如在引言中所述, 季风应是能带来不同降水型的盛行风向随季节的变化^[19]。关于这一点, 早在一千年前我国宋朝就认识到季风是能带来雨的“舶来风”。然而, 关于季风的认识随着研究的扩展而变得多样性, 有的学者强调季风主要表现在降水方面^[20, 21], 而有的学者强调季风主要表现在风场的变化^[22~25]。的确, 季风在不同地区有不同表现, 有的地区更多表现在降水的季节变化 (如南亚地区); 而有的地区不仅表现在盛行风向随季节的变化, 也表现在降水随季节有很大的变化。

2.1 关于季风的定义与季风指数

由于对季风认识的不同, 因此就产生对衡量季风强弱标准—季风指数定义的不同。目前关于亚洲季风指数有两种定义: 一种从热力学要素出发来定义季风指数, 如陶诗言和陈隆勋^[20] 从季风降水的多寡来定义季风指数, 涂长望和黄仕松^[2] 从 θ_{sc} 来定义季风指数, Murakami 和 Matsumoto^[21] 从 OLR 来定义季风指数; 另一种从动力要素来定义季风指数, 如 Webster 和 Yang^[22]、曾庆存等^[23] 从季风区的高低空纬向风的差来定义季风指数, 张庆云和彭京备^[25] 利用高低纬纬向风的差来定义季风指数, 郭其蕴^[26] 和施能等^[27] 利用与动力要素有关的海平面气压来定义季风指数。这两种定义各有利弊, 前者容易被热力条件所影响, 而后者不是很适用于东亚季风区。这主要是由于东亚季风是一种副热带季风, 它的经向分量比较大, 并且南亚夏季风强, 我国江淮流域和日本、

韩国的夏季降水反而减弱。近来,黄刚和严中伟^[28]的研究表明:东亚夏季风(EASM)的年际变化可以更好地应用一种与动力因子有关的EAP指数来描述,这种指数是利用Nitta^[29]、黄荣辉和李维京^[30]所指出的东亚/太平洋(EAP)型遥相关所定义的一种东亚夏季风指数。

2.2 关于亚洲季风系统组成的认识

在20世纪80年代初,由于对亚洲季风进行了大量研究,对亚洲季风的认识产生了一个飞跃,认识到亚洲季风不仅仅是一种气流的季节性变化,而且是一种由多个成员所组成的气候系统,即亚洲季风系统,特别是对此系统的组成、锋系性质的认识。

2.2.1 东亚夏季风系统的组成及其与印度季风系统的异同

由南亚季风和东亚季风形成了世界上最强的季风系统,许多学者认为它们同属一个季风系统。然而,最近我国许多研究表明:这两个季风系统有许多不同特征,东亚夏季风具有副热带季风特征,而印度季风属热带季风;并且,东亚夏季风的平均结构在许多方面与印度夏季风不同。根据Krishnamurti的研究^[31],印度季风系统的主要组成部分包括:位于印度北部的季风槽、南半球的马斯克林高压、青藏高原上空的反气旋、南亚高压、高空自北半球向南半球的越赤道气流以及索马里低空越赤道气流。而根据陶诗言和陈隆勋^[20]的研究,东亚夏季风系统的成员(图1)包括:南海和赤道西太平洋的季风槽(或ITCZ)、印度的西南季风气流、沿100°E以东的越赤道气流、西太平洋副高和赤道东风气流、中纬度的扰动、梅雨锋以及澳大利亚的冷性反气旋。因此,东亚夏季风系统是一个与印度季风系统相对独立的一个环流系统。这个系统不仅受到印度西南季风环流系统的影响,而且还受到副热带高压和中纬度扰动系统的影响。

黄荣辉等^[32]的研究也表明,夏季东亚季风区的水汽分布和输送特征与印度季风区有很大差别。由于印度季风区水汽分布比较均匀,东西和南北梯度均比较小;而东亚季风区水汽分布却很不均匀,南北梯度很大。因此,在东亚季风区水汽的辐合、辐散主要是由于湿度平流所造成,而印度季风区水汽的辐合辐散主要是由于风场的辐合辐散所造成的。他们还指出,印度季风区夏季的水汽输送特征是以纬向输送为主要,经向输送很小,而东亚季风区夏季的水汽输送特征则是经向输送分量很大。

2.2.2 梅雨锋的性质

东亚季风系统不同于南亚季风系统还表现在东亚季风系统有梅雨锋。梅雨锋是东亚夏季风降水的主要雨带,东亚地区夏季旱涝灾害的发生与梅雨锋紧密相关。由于梅

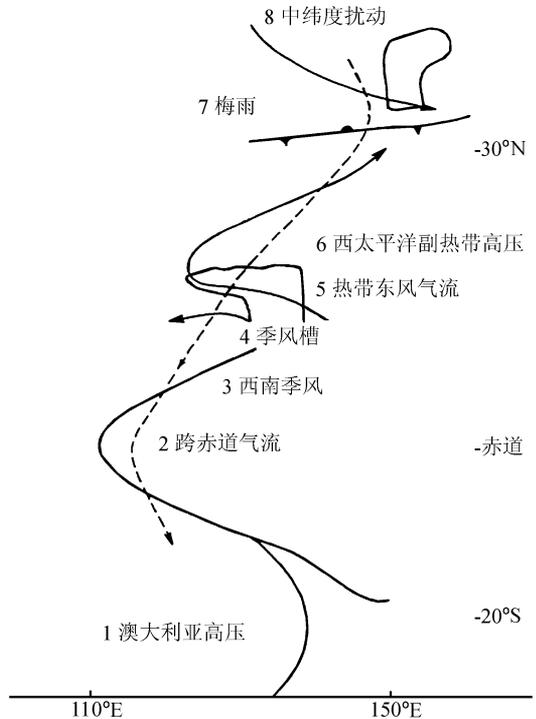


图1 东亚夏季风系统成员的配置(引自文献[20])

雨锋的形成和维持不仅受到印度西南气流和西太平洋副热带高压西部的东南气流的影响,而且也受到中纬度西风带气流的影响,因此,梅雨锋带是一个强水汽辐合带,也是对流活动多发带。陶诗言等^[33]的研究指出:在梅雨锋上有强的对流活动和强降水系统,它与低空急流以及强的湿度梯度相联系;并且,梅雨锋是一种多尺度系统,它包括了行星尺度、天气尺度系统以及中、小尺度系统。此外,他们的研究还表明了,在梅雨季节,不管中国、日本还是韩国其夏季大量降水均与梅雨锋上中尺度扰动紧密相关。中国学者还对梅雨锋的结构作了深入的研究,陶诗言等^[34]和张小玲等^[35]的研究指出,梅雨锋的形成与维持虽与西风带的槽后南下的弱冷空气活动有关,但它已不具有温带锋面的结构,而在垂直的动力、热力结构均具有准热带系统的特征。此外,许多学者的研究还表明:虽然在锋系分布上,我国江淮流域的梅雨锋与日本的 Baiu 锋、朝鲜半岛的 Changma 锋是一个系统,但是,不管从大尺度还是从中尺度角度来看,我国江淮流域的梅雨锋结构都与日本的 Baiu 锋以及朝鲜半岛的 Changma 锋有所不同^[36~38],并且在梅雨锋成熟阶段,我国江淮流域的梅雨锋低层的南风分量比日本和韩国南部强得多,而且在江淮流域的梅雨锋区,湿度也明显高于韩国和日本。

梅雨锋的强弱直接影响着东亚季风区的洪涝与干旱灾害的发生,陶诗言等^[33]的研究表明了,在印度季风强的夏季,东亚季风区的梅雨锋往往偏弱,甚至有的年份发生空梅。

从以上的分析可以看到,东亚夏季风与印度夏季风虽同属于亚洲季风系统,但东亚夏季风与印度夏季风无论从成员、结构来看,或者从水汽输送、降水特征来看均具有不同特征,因此,东亚夏季风与印度夏季风是既有相互联系,又具有不同特征、相对独立的两个亚洲季风子系统。

2.3 季风的年循环

无论从地面的风系、降水,或者从高空的环流、温度分布来看,季风是一种年循环现象。Li 和 Yanai^[39]分析了季风区对流层上层的温度变化, Tomas 和 Webster^[40]分析了季风区的垂直速度的变化,他们的结果都说明了季风是一种年循环现象。亚洲季风的年循环还表现在对流层下层风场的北进与南退。Tao 和 Chen^[8]指出了亚洲季风的变化首先表现在东亚夏季风的爆发上。在亚洲季风变化中,南海地区的夏季风爆发最早,一般平均在 5 月中旬爆发,比印度夏季风爆发早一个月左右。南海夏季风的爆发标志着东亚夏季风的来临和中国雨季的开始,因而它具有重要的预报意义^[41~43]。根据 1998 年南海季风试验期间获得的资料所进行的研究表明,南海夏季风的爆发最早在南海北部,大约在 5 月第 4~5 候,以后迅速地扩展到整个南海地区,并且,南海、中印半岛季风几乎是同时爆发的^[44]。此外,研究还表明,亚洲季风在南海爆发之后,它将阶段性地北进,从爆发之后经过二次阶段北进和三次停滞,最后在 8 月上旬季风可以到达华北和东北地区。他们的研究还表明,并不是所有的年份夏季风都能推进到华北地区的,当季风强度较弱,或北方冷空气偏强时,季风一般只能推进到江淮地区。在这种情况下,由于北方得不到充分的水汽供应,而南方又频繁地受到夏季风扰动的影响,这就很容易发生南涝北旱的异常降水分布,1999 年就是一个明显的例子^[45]。在 1999 年 8 月中旬,当东亚夏季风到达华北之后,它并不停滞在此区域就迅速南撤了,使得华北地区发生了严重干旱。

东亚夏季风的撤退是非常迅速的,这是东亚夏季风变化的一种特征^[7]。一般,从 8

月中旬以后,夏季风从华北迅速南撤,在不到 2 周内就很快地撤退到南海北部,并一直停留在那里到 10 月中旬。在 10 月中旬之后,东亚冬季风沿东亚沿岸向南吹到了东海和南海,后再折向西南吹向中印半岛和东南亚地区,这种冬季风可以维持到第二年的 4、5 月份。

东亚夏季风与冬季风这种交替盛行,年年如此,周而复始一直循环下去。亚洲冬季风对于夏季风有重要影响,孙淑清等^[46]指出,强的东亚冬季风(简称 EAWM)能影响之后的 EASM。Chen^[47]也指出,强的 EASM 之后,夏季西太平洋副热带高压偏北,江淮流域的夏季将出现闷热干旱;相反,江淮流域将发生洪涝,例如,在 1997 年冬季弱的 EASM 导致了 1998 年夏季的严重洪涝,这证实了 EASM 和之后的 EASM 之间的联系。

3 关于亚洲夏季风的变化及其机理的研究

正如上面所述,由于亚洲季风受到许多气候因子的影响,因此,东亚夏季风的年际和季内变化是很大的,且很复杂。

3.1 亚洲季风的季节内变化

东亚夏季雨带的进退与东亚季风前沿的进退有着密切的关系^[48],因此,东亚夏季风(简称 EASM)的季节内变化可以从东亚夏季风雨带的进退很好看出来。图 2a 是沿 115°E (110~120°E 平均)的 5 天降水纬度—时间剖面图,图 2a 清楚地表明:从 5 月到 6 月上旬以前,雨带位于长江流域的南部,然后在 6 月中旬,雨带突然向北移到长江流域和淮河流域,这时江淮流域的梅雨季节开始;并且,从图 2a 还可以看到,7 月中下旬,雨带再一次向北突跳,由于雨带的向北移动使得长江流域的梅雨季结束了,而华北和东北的雨季开始了。东亚夏季风雨带的维持与北移依赖于东亚夏季风的爆发和维持。图 2b 是东亚夏季风爆发的平均日期^[20]。把图 2a 与图 2b 相比较,可以看到东亚夏季风雨带的北移和东亚夏季风的爆发是一致的。根据图 1b 的结果,日本 Baiu 季节的开始日期和我国长江流域的入梅期是相类似的,而在这之后韩国才出现了 Changma 季节。根据 Lu 和 Chung 的研究^[37],韩国 Changma 季节的降水异常与我国淮河流域的夏季降水异常之间有很好的相关性。

关于东亚季风的季内变化特征,中国学者已作了系统的研究。早在 20 世纪 50 年代, Yeh 等^[49]首先发现,在 6 月上、中旬,东亚地区上空大气环流季节转换具有突变性,他们指出,东亚地区行星尺度的环流的突变将导致 EASM 的爆发;到了 20 世纪 80 年代初 Krishnamurti 等^[50]和 McBride^[51]也指出印度夏季风环流和澳大利亚夏季风环流季节转换的突变性。然而, Huang 和 Sun^[52]的研究表明:东亚大气环流在 6 月上中旬的突变与菲律宾的对流活动有密切的关系。由于 EASM 的季节内变化与西太平洋副热带高压有密切关系,而西太平洋副热带高压的位置及其变化与菲律宾周围的对流活动有密切的联系。因此, EASM 的季内变化与菲律宾周围的对流活动有明显的联系。Huang 等^[52~54]的研究表明了西太平洋副热带高压的异常北跳和菲律宾的对流活动有密切的联系。若夏季菲律宾的对流活动增强,则西太平洋副热带高压在 6 月中上旬北跳是明显的,这样,我国长江和淮河流域以及韩国、日本夏季降水就偏弱;相反,当菲

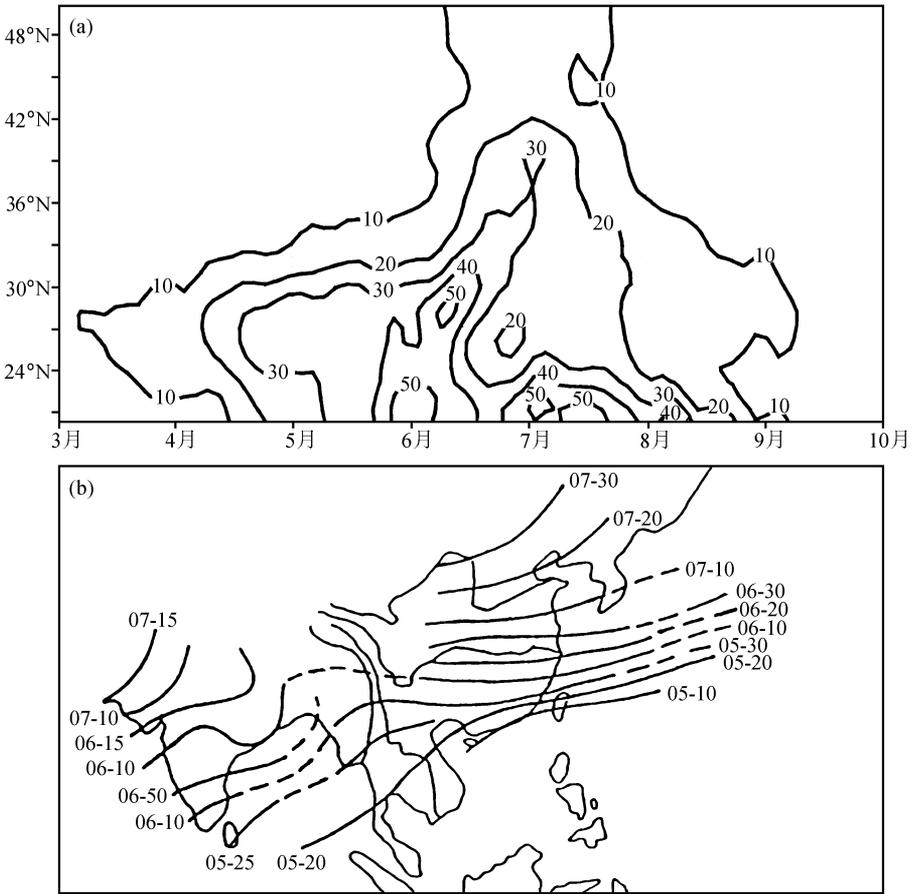


图2 (a) 东亚地区 1961~2000 年平均的沿 115°E (110°~120°平均) 5 天降水量的纬度—时间剖面图 (单位: mm); (b) 东亚夏季风暴发的平均日期 (引自文献 [20])

律宾夏季对流活动减弱, 则西太平洋副高的北跳就不明显, 长江流域和淮河流域以及韩国、日本的夏季降水就偏强。最近, 曹杰等^[55] 从非线性动力学理论分析研究了菲律宾附近对流活动强弱对西太平洋副热带高压影响的物理机制。

西太平洋暖池的热状态不仅强烈地影响着西太平洋副热带高压的季节内变化, 而且还影响东亚夏季风的爆发, Huang 和 Wu^[56] 的研究结果表明: 暖池热状态和菲律宾对流活动不仅影响着西太平洋副热带高压的季内变化, 而且影响着南海季风爆发的早晚。如图 3a 所示, 当西太平洋暖池海水变暖, 则对流活动从中印半岛向菲律宾以东加强, 且西太平洋副热带高压可能向北异常移动, 在这种情况下, 南海夏季风 (SCSM) 可能提前爆发; 相反, 如图 3b 所示, 当暖池处于冷状态, 则菲律宾的对流活动减弱, 西太平洋副热带高压可能偏南、偏西, 在这种情况下, SCSM 可能爆发晚。这可能是由于西太平洋暖池热状态严重地影响着 Walker 环流与 Hadley 环流所致。

3.2 东亚夏季风的年际变化

正如第 2 节所述, 亚洲夏季风的年际变化是很大的, 为此, 许多科学家定义了亚洲季风指数, 以便表述亚洲季风的年际变化。图 3 是黄刚和严中伟^[28] 定义的一种衡量东亚夏季风年际变化的指数 (简称 EAP 指数) 的年际变化, 图中正负指数分别描述我

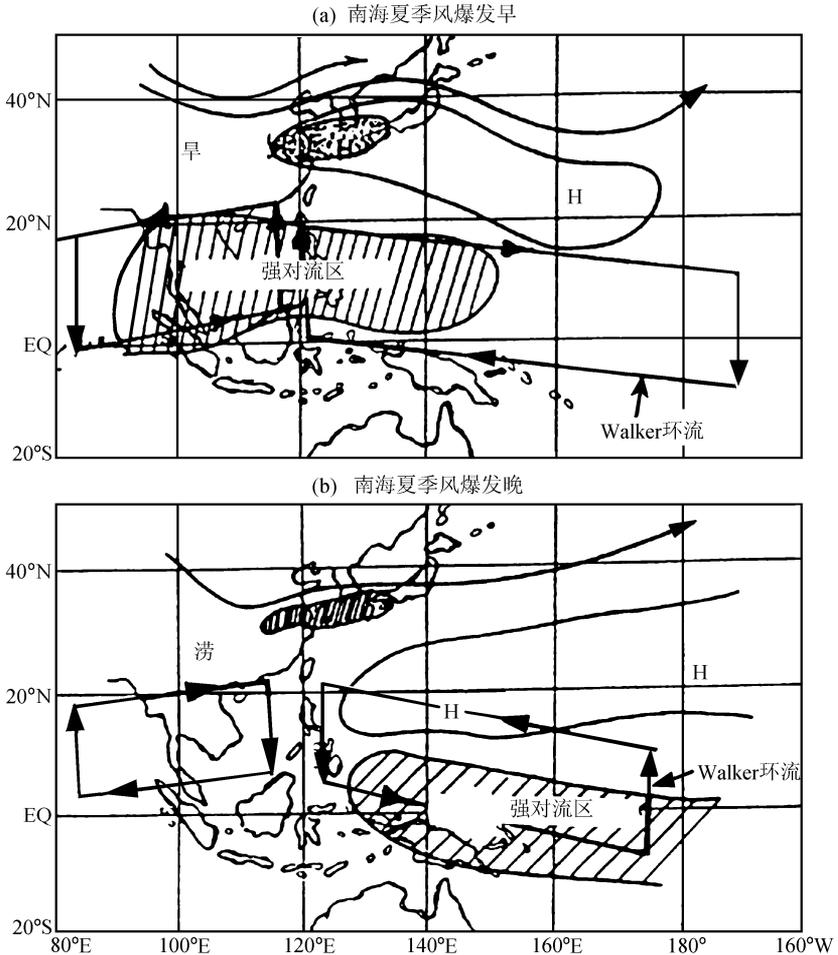


图3 西太平洋暖池热状况、西太平洋副热带高压、南海季风爆发日期之间的关系

(a) 西太平洋暖池处于暖状态；(b) 西太平洋暖池处于冷状态

国江淮流域的夏季降水小于或大于平均值的情况。从图4可以清楚地看到EASM的年际变化是明显的。

从图4可以看到东亚（特别是我国长江、淮河流域）夏季风降水的强弱，如1998年夏发生在长江流域的特大洪涝灾害^[57]，可以用EAP指数很好地表述出来。近来的研究表明东亚夏季的水汽输送和降水存在着明显的准两年振荡，特别在长江流域和淮河流域夏季季风降水的2~3年周期的振荡是很突出的^[58,59]。

EASM年际变化的原因是复杂的，它受许多因素影响（见图5）。从图5可以看到：EASM的年际变化不但被印度季风所影响，还和西太平洋副热带高压、中纬度扰动、西太平洋暖池、赤道太平洋ENSO循环和青藏高原、极冰、欧亚大陆的雪盖和陆面过程等等因素有关。关于这些物理因子对东亚夏季风的影响已在“关于中国重大气候灾害与东亚气候系统、水汽输送之间关系的研究”一文中阐述，本文不再重复。

3.3 EASM的年代际变化

东亚夏季风不仅有明显的季内与年际变化，而且有明显的年代际变化。黄荣辉

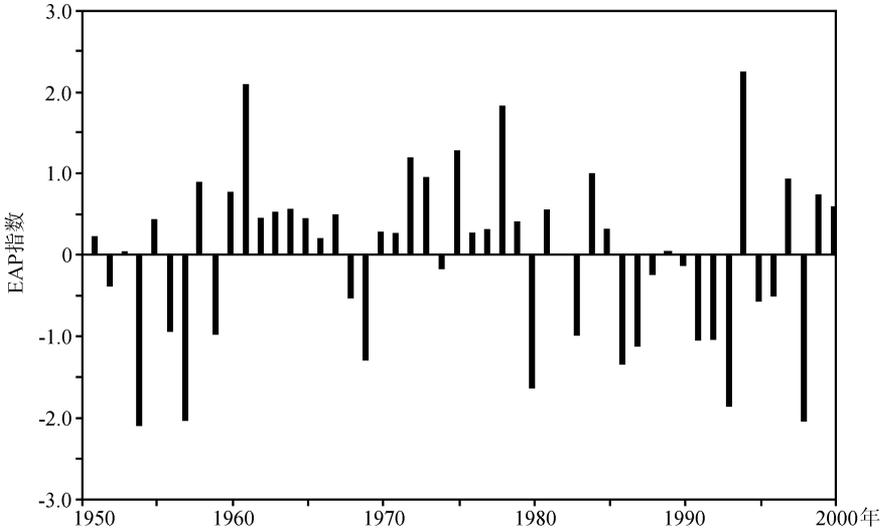


图 4 1951~2000 年夏季 EAP 指数的年际变化 (引自文献 [28])

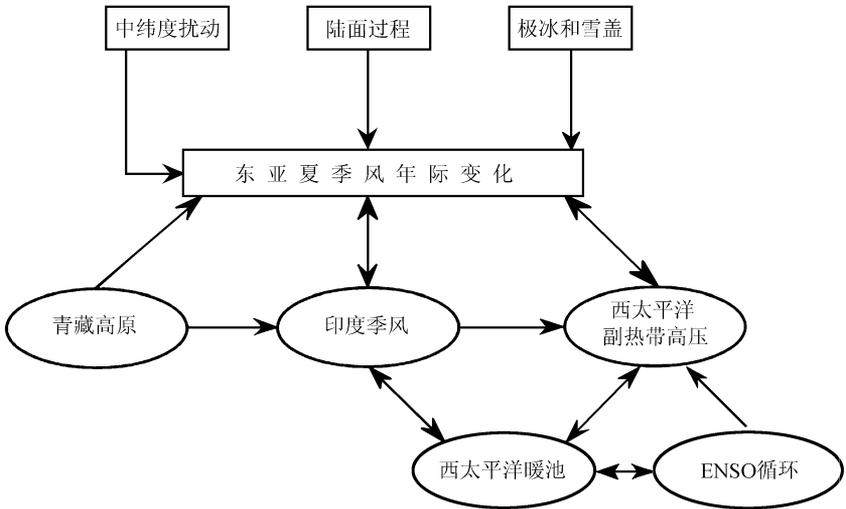


图 5 影响东亚夏季风年际变化的物理因子示意图

等^[60,61]系统地分析了东亚夏季风降水的年代际变化。从 20 世纪 50~90 年代的夏季降水异常分布可以清楚地看到, 80~90 年代东亚的夏季降水和 70 年代有明显的区别。如图 6 所示, 从 1977 年长江流域降水明显增加, 而华北和黄河流域出现相反的情况, 出现了持续性严重干旱。

黄刚^[62]和王会军^[63,64]的研究指出, 发生在东亚地区降水的年代际变化主要是由于亚洲季风从 20 世纪 70 年代后期减弱所致。黄荣辉^[61]和周连童等¹⁾对热带太平洋海表温

1) 周连童、黄荣辉, 关于我国气候年代际变化特征及其可能成因的研究, 气候与环境研究, 2003, 8 (即将发表)。

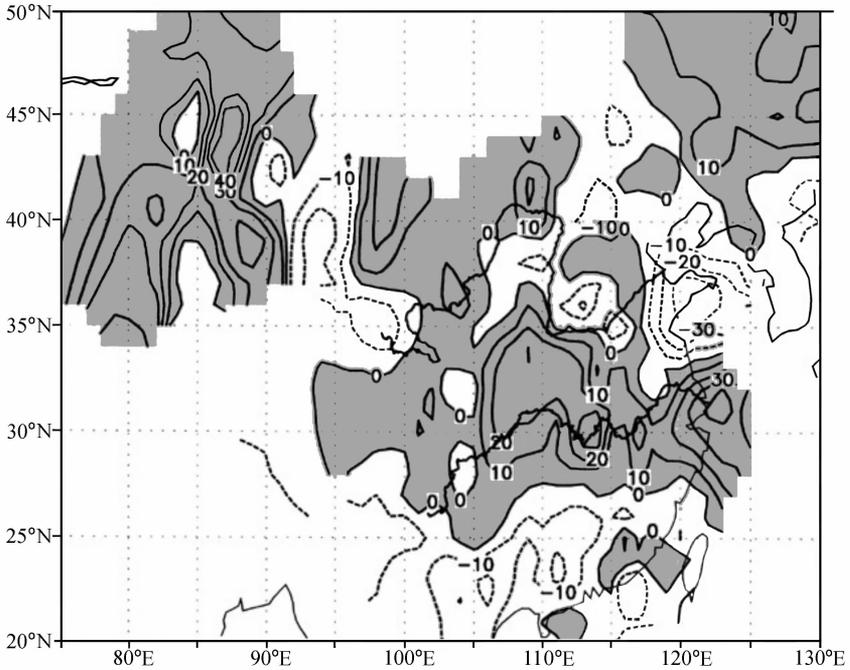


图 6 中国 1977~2000 年与 1967~1976 年夏季 (6~8 月) 平均降水距平百分率之差
阴影区为正值, 虚线区为负值

度异常的年代际变化的分析结果表明: 赤道中、东太平洋 SST 异常有明显的年代际变化, 即在 20 世纪 70 年代热带中、东太平洋的海水是冷的, 而 80~90 年代海水变暖了; 这些研究还指出, 从 1977 年到现在, 热带中、东太平洋发生了年代际的 El Niño 现象, 这个年代际的 El Niño 事件减弱了亚洲季风, 从而也减弱了亚洲季风输向华北地区的水汽, 造成了华北地区夏季降水持续减少。

4 亚洲冬季风的变化

亚洲不仅是一个强夏季风区域, 而且也是一个强冬季风的地区。冬季风的特点是在中国的华北和东北、日本和韩国有强的西北风, 而在东亚沿海地区有强烈的东北风^[65~67]。强烈的冬季风不但给中国西北、华北、东北、朝鲜半岛和日本北部带来冬季的低温、寒潮等灾害, 还给华北、西北、韩国和日本的春季带来沙尘暴和扬沙天气。并且, 亚洲冬季风还能导致婆罗洲和印度尼西亚的海洋大陆地区的强对流活动, Chang 等^[68]和 Lau 等^[69]指出了东亚冬季风 (EAWM) 和海洋大陆地区的对流活动有密切的联系。

4.1 东亚冬季风 (EAWM) 的年际变化

陈文等^[66,67]系统地研究了 EAWM 的年际变化, 利用东亚沿岸的风场定义了一个 EAWM 指数。他们选择了中国东海 (25~40°N, 120~140°E) 和中国南海 (10~25°N, 110~130°E) 的 10 m 高度从 11 月到第二年 3 月的平均标准化经向风距平来定义 EAWM 指数 (如图 7)。这个指数不仅简单, 而且还和东亚 500 hPa 高度场有很高的相

关, 利用这个指数可以很好地表述东亚冬季风的变化。

从图 7 可以清楚地看到 EAWM 的年际变化是非常明显的, 图 7 中的指数若是负的, 则代表强 EAWM, 它说明该冬季沿东亚大陆是冷的, 且东亚沿海盛行强北风, 在这种情况下, 位于欧亚大陆对流层低层的高压是强的, 位于中国东北的 500 hPa 的东亚大槽也是强的; 相反, 若指数是正的, 则东亚大陆是暖的, 东亚沿海盛行弱北风, 东亚对流层低层的高压和 500 hPa 的东亚槽均较弱。此外, 图 7 也表明 EAWM 存在明显的年代际变化, 从 20 世纪 70 年代后期到 80 年代后期东亚冬季风似乎趋于减弱。

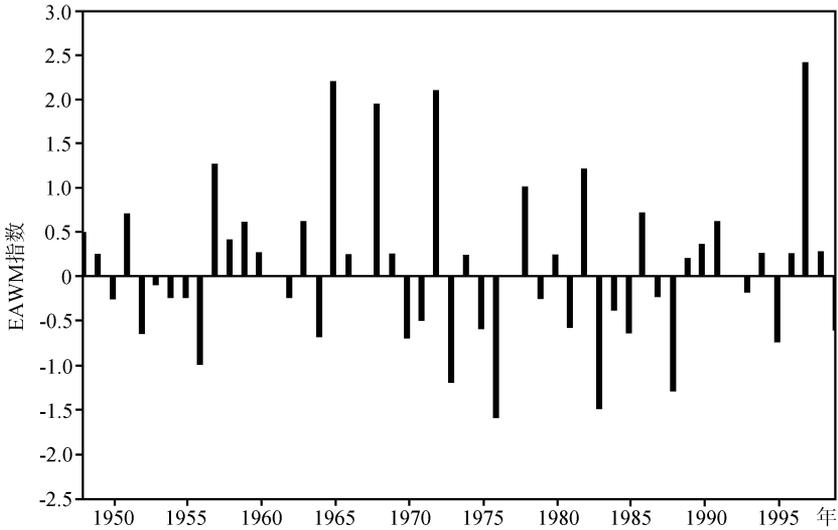


图 7 1951~2000 年东亚冬季风指数的年际变化

5 关于亚洲季风与 ENSO 循环之间关系的研究

亚洲季风和 ENSO 循环是全球气候系统重要的两大成员, 它们之间存在着很强的相互作用, 因此, 研究这两者之间的关系不仅对揭示全球气候系统的年际变化具有重要的科学意义, 而且对揭示东亚气候的年际变化也具有重要价值。关于 ENSO 循环对东亚季风的影响已在本期的“关于中国重大气候灾害与东亚气候系统、水汽输送之间关系的研究”一文中阐述, 本文主要综述关于亚洲季风对 ENSO 循环的动力作用方面的最新研究进展。

5.1 关于东亚冬季风异常对 El Niño 事件激发作用的研究

自从 20 世纪 80 年代国际实施 TOGA 研究计划之后, El Niño 事件产生的物理机制一直是气象学家和海洋学家研究的热门课题。无论是从 TOGA 的实验结果或是从 McCreay^[11] 和 Schopf 等^[13] 的理论研究, 都表明了 ENSO 循环产生的源地在热带西太平洋而不在东太平洋。热带西太平洋通过什么过程使暖海水传播到赤道中、东太平洋? 这个问题吸引中国气象学家对 ENSO 循环产生的物理机制, 特别是关于东亚冬季风对 ENSO 循环的激发作用作较深入的研究。早在 20 世纪 80 年代末, 李崇银等^[15] 就指出了频繁的东亚冬季风活动对赤道中、东太平洋的 El Niño 事件有激发作用, 随后, 李崇

银^[70]又进一步研究了这个问题。通过这些研究,他指出,频繁的强寒潮使赤道西太平洋对流活动加强,强的对流活动通过加强赤道西太平洋上空大气的30~60天振荡激发了El Niño事件的发生。近年来,李崇银等^[71~75]系统地分析和诊断了东亚冬季风在El Niño事件发生过程中的动力作用,指出冬季东亚的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。这些观测研究的结果进一步被数值模拟结果所证实,李崇银等^[76]和穆明权等^[77]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,他们的模拟结果表明: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可以激发出La Niña事件。因此,观测事实和数值模拟的结果都说明了异常的东亚冬季风是一个激发产生ENSO循环的重要机制。

5.2 关于热带西太平洋暖池和热带印度洋上空环流与纬向风异常对ENSO循环动力作用的研究

如引言所述,从20世纪60年代至今,国内外许多学者对ENSO循环的物理过程进行了深入而系统的研究,这使得ENSO循环的物理过程不断清楚。与国内外许多关于热带西太平洋对ENSO循环的热力作用研究的同时,在90年代初,黄荣辉和吴仪芳^[78]就指出西太平洋暖池热力对El Niño事件产生的热力作用。热带西太平洋不仅仅是ENSO循环产生的热力源地,而且,热带西太平洋上空的环流与纬向风异常为ENSO循环提供了动力条件。一些学者^[79~83]利用大气和海洋观测资料,系统地分析了1980年以来热带西太平洋次表层海温、海洋热容量以及热带西太平洋上空对流层下层和海表附近的环流异常和纬向风异常对El Niño和La Niña事件发生的热力、动力作用。这些研究(图8)表明: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。并且,这些研究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,也与东亚季风异常相关,这些研究进一步从观测事实来论证东亚季风对ENSO循环产生的动力作用。

El Niño事件的发生除了热带太平洋海—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,Yasunari^[84]和Ju等^[85]也指出了南亚季风与ENSO之间存在着相互作用、相互调节的关系。

吴国雄和孟文^[86]的研究结果表明:赤道印度洋与赤道东太平洋的SST变化之间存在着显著的正相关,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的Walker环流之间存在着显著的耦合关系而造成的。通过这些研究,他们提出印度洋季风对ENSO循环具有触发作用。最近,巢清尘和巢纪平^[87]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。

从上述研究可以看到,中国学者在关于热带西太平洋和热带东印度洋上空对流层下层环流和纬向风异常对ENSO循环的动力作用方面的研究作出具有创新的研究。

上述观测分析研究的结果表明,热带西太平洋暖池与热带东印度洋上空对流层下层的大气环流和纬向风的异常对热带太平洋的ENSO循环起到重要的动力作用。中国

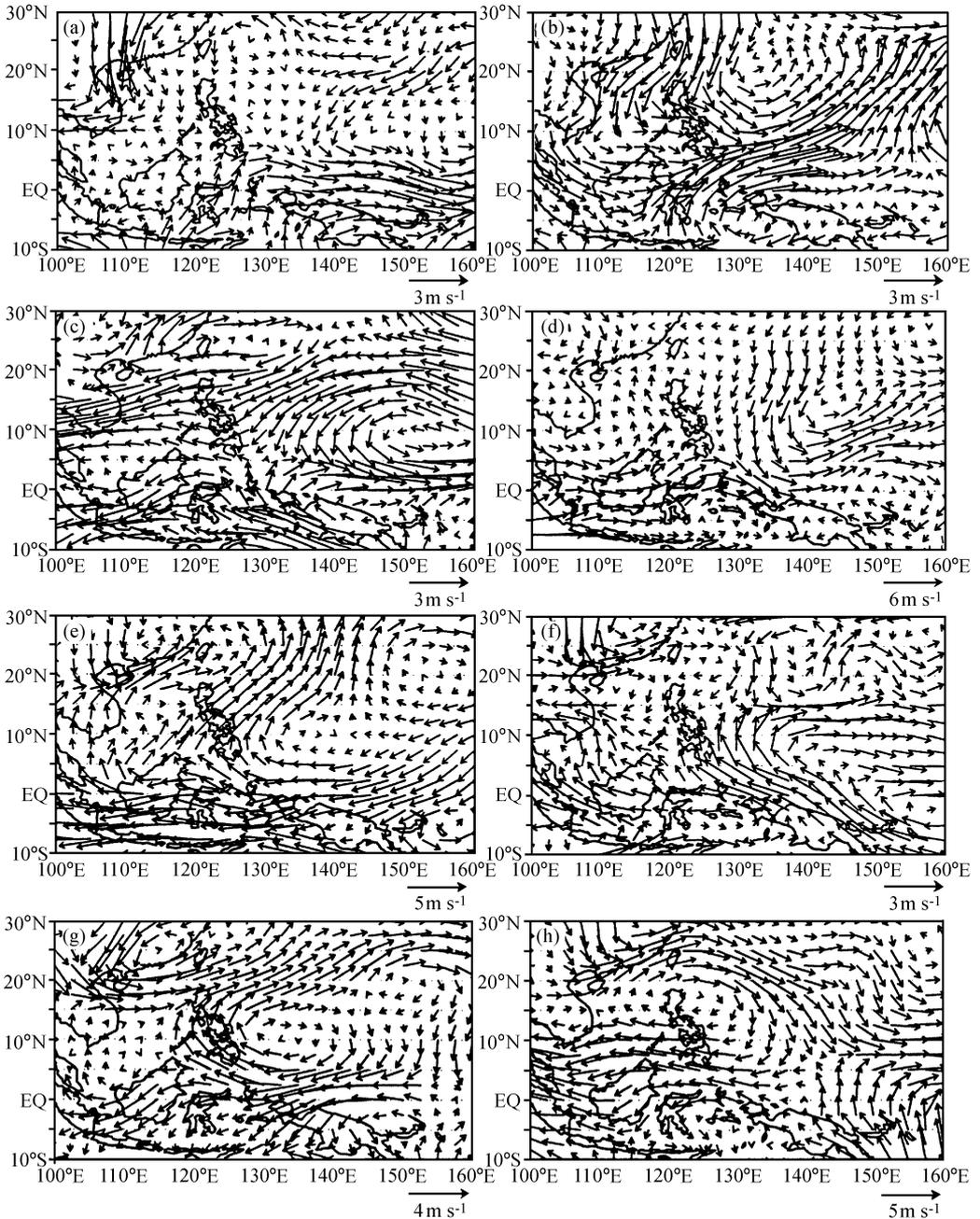


图 8 1980~1998 年 4 次 El Niño 事件发展阶段 (a~d) 以及成熟阶段 (e~h) 时热带西太平洋上空 850 hPa 距平风场分布

(a) 1982 年春季; (b) 1985 年春季; (c) 1991 年春季; (d) 1996 年秋季;

(e) 1982 年冬季; (f) 1987 年秋季; (g) 1992 年春季; (h) 1997 年秋季

学者进一步从热带太平洋海—气耦合的动力理论论证了这个结果。在前人研究的基础上, 黄荣辉等^[81]和张人禾等^[83]利用一个简单的赤道 β 平面近似的热带海—气相互作用的方程组, 并从实测的海表风应力强迫在理论上讨论了 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,指出了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 Niña 事件)起到重要作用。

综上所述,我们可以提出一个亚洲季风与 ENSO 循环相互作用的示意图(图 9)。

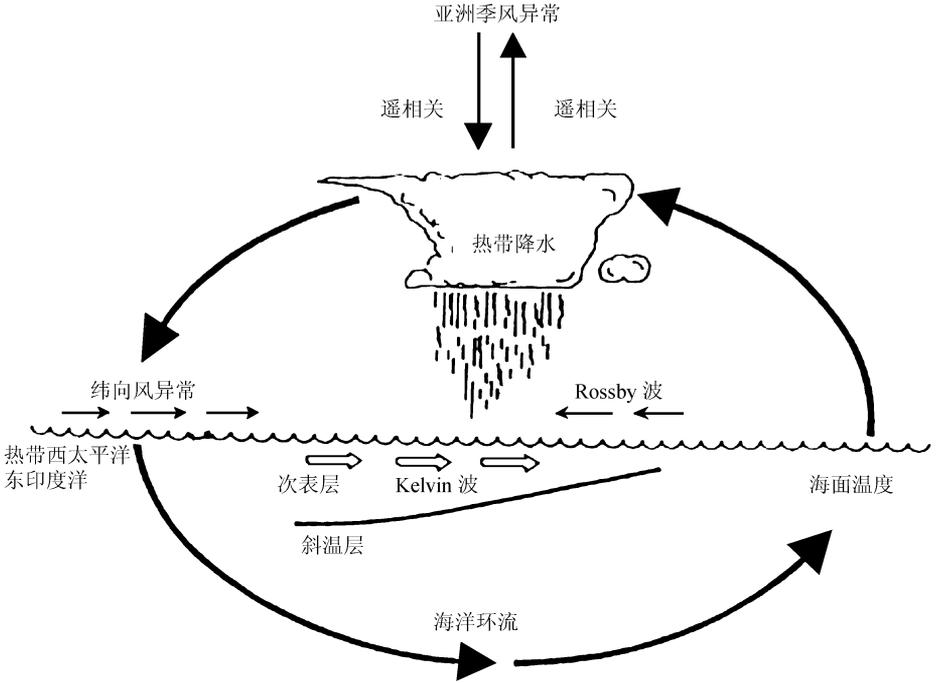


图 9 亚洲季风与 ENSO 循环相互作用过程示意图

5.3 关于东亚冬季风、暖池次表层和 ENSO 循环相互作用的研究

李崇银等^[76]和穆明权等^[77]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,他们的模拟结果表明: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可以激发出 La Niña 事件。因此,观测事实和数值模拟的结果都说明了异常的东亚冬季风是一个激发产生 ENSO 循环的重要机制。

上小节中已经阐述了热带西太平洋暖池的暖水为赤道中、东太平洋 ENSO 事件的发生提供了热力条件。一些学者^[77, 81, 83, 88]的研究表明: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 波而造成暖池的暖海水向东传播,从而形成 ENSO 事件的发生(见图 10)。这里有一个问题是值得研究的,为什么西太平洋暖池每隔几年就会剧烈升温?它是由于异常的赤道信风把大量赤道东太平洋海水吹到西太平洋,从而造成西太平洋暖池动力高度升高而致使海温升高,还是由于别的海洋热力过程所造成。为此,中国学者进行了深入的研究。

在 ENSO 发生之后,北半球副热带地区将有次表层暖海温距平沿 $10\sim 20^\circ\text{N}$ 纬带向西传播,这也是导致西太平洋暖池次表层海温再次增温,从而为下一次 ENSO 事件发

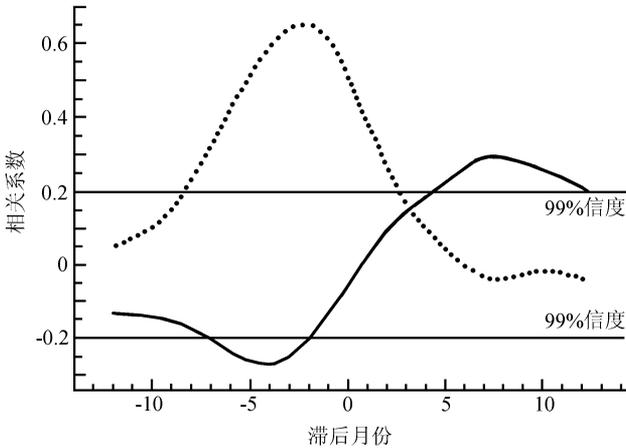


图 10 西太平洋暖池次表层 (120~160m) 异常海温东传与赤道西太平洋异常纬向风 (虚线) 以及西北太平洋地区异常经向风 (实线) 的时滞相关系数随时间的演变 (引自文献 [77]), 负值表示异常海温东传超前

生提供先行条件的一个重要原因。李崇银等^[88]从观测事实分析和数值模拟的结果进一步说明了东亚冬季风、西太平洋暖池次表层和 ENSO 循环之间的关系。

6 关于季风动力学以及季风与 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,对于季风动力学以及季风与 ENSO 相互作用开展了卓有成效的研究,取得重要的研究进展。但是,在此领域研究中还有许多问题不清楚,需进一步进行研究。

(1) 关于季风动力学:正如第一节所述,目前国内外学者关于季风动力学性质还没有统一的认识:有的学者认为季风是风不是雨,有的学者认为季风是雨不是风,而有的学者认为季风既是雨又是风。到底季风是风还是雨?这个问题值得进一步讨论。并且,亚洲季风系统内部存在着各种各样复杂的动力、热力过程,特别是东亚季风雨带包括着不同时空尺度的降水系统,这些不同时空尺度系统之间的相互作用对季风有重要的反馈作用。此外,季风环流的动力稳定性也对季风的活动和维持有重要的影响。然而,关于这些问题的研究不是很多,因此,亚洲季风系统的内部动力过程应进一步研究。

(2) 关于亚澳季风系统与 ENSO 循环相互作用的物理过程:ENSO 循环不同阶段对亚澳季风环流与降水的影响是不同的。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,它们是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相互联系是什么?通过什么过程来影响 ENSO 循环?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 研究计划中一个重要研究内容。

(3) 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。

(4) 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 Niña 事件发生的监测和预测能力发挥了重大作用。新世纪初,海洋探测技术将有大的发展,在海洋观测系统中正在实施地转海洋实时观测阵(ARGO)计划,并有可能逐渐代替自律拉格朗日环流探测浮标(ATLAS)观测系统,这无疑将进一步提高 El Niño 事件和 La Niña 事件发生的监测和预测水平。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今后一个很重要的研究课题。

(5) 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 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;并且,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 Niña 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,而不是仅仅用海—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相互作用的数值模拟能力,这是关于亚澳季风与 ENSO 循环相互作用中一个亟待研究的重要科学问题。

由于作者学识有限,文中只能综述作者所熟悉的研究进展,因此,文中难免遗漏掉一些在此领域很重要的研究成就。

参 考 文 献

- 1 竺可桢,东南季风与中国之雨量,地理学报,1934, **1**, 1~27.
- 2 涂长望、黄仕松,夏季风进退,气象杂志,1994, **18**, 1~20.
- 3 陶诗言、赵煜桂、陈晓敏,东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系,气象学报,1958, **29**, 119~134.
- 4 陶诗言、何诗秀、杨显芳,1979 年季风试验期间东亚地区夏季风爆发时期的观测研究,大气科学,1983, **7**, 347~355.
- 5 陶诗言、张庆云,亚洲冬夏季风对 ENSO 现象的响应,大气科学,1998, **22**, 399~407.
- 6 陈隆勋、朱乾根、罗会邦等,东亚季风,1991,北京:气象出版社,362pp.
- 7 Ding Yihui, *Monsoon over China*, Kluwer Academic Publishers, 1994, 550pp.
- 8 Tao Shiyan, and Chen Longxun, A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China, *Monsoon Meteorology*, Edited by C. P. Chang and T. N. Krishnamurti, Oxford University Press, 1987, 60~92.
- 9 Bjerknes, J., A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature, *Tellus*, 1966, **18**, 820~829.
- 10 Philander, S. G. H., The response of equatorial ocean to a relaxation of a trade winds, *J. Phys. Oceanogr.*, 1981, **11**, 176~189.

- 11 McCreary, J. P., A model of tropical ocean-atmosphere interaction, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**, 370~387.
- 12 Yamagata, T., Stability of a simple air-sea coupled model in the tropics, *Coupled Ocean-Atmosphere Model*, Edited by J. C. J. Bihoul, 1985, Elsevier, Amsterdam.
- 13 Schopf, P. S., and M. J. Suarez, Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**, 549~566.
- 14 Chao Jiping, and Zhang Renhe, The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities, *Acta Meteor. Sinica*, 1988, **2**, 275~287.
- 15 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*, 1988, 特刊, 125~132.
- 16 Huang Ronghi, and Wu Yifang, The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**, 21~32.
- 17 Li Chongyin, Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events, *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**, 36~46.
- 18 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.
- 19 Ramage, C., *Monsoon Meteorology*, International Geophysics Series 15, 1971, San Diego, Calif., Academic Press, 296pp.
- 20 Tao Shiyan, and Chen Longxun, The East Asian summer monsoon, Proceedings of International Conference on Monsoon in the Far East, Tokyo, Nov. 5-8. 1985, 1~11.
- 21 Murakami, T., and J. Matsumoto, Summer monsoon over the Asian continent and western North Pacific, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1994, **72**, 745~791.
- 22 Webster, P. J., and S. Yang, Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**, 877~926.
- 23 Zeng Qingcun, Zhang Banglin, Y. L. Liang et al., East Asian summer monsoon—a case study, *Proc. Indian Nation. Sci. Acad.*, 1994, **60**, 81~96.
- 24 乔之亭、陈烈庭、张庆云, 东亚季风指数的定义及其与中国气候的关系, *大气科学*, 2002, **26**, 69~82.
- 25 张庆云、彭京备, 夏季东亚环流年际和年代际变化对登陆中国台风的影响, *大气科学*, 2003, **27**, 97~106.
- 26 郭其蕴, 东亚夏季风强度指数及其变化的分析, *地理学报*, 1983, **38**, 207~217.
- 27 施能、朱乾根、吴彬贵, 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常, *大气科学*, 1996, **20**, 575~583.
- 28 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.
- 29 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.
- 30 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, 特刊, 95~107.
- 31 Krishnamurti, T. N., *Tropical Meteorology*, WMO Publications, Geneva, 1982.
- 32 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.
- 33 陶诗言等, *中国之暴雨*, 北京: 科学出版社, 1980, 225pp.
- 34 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.
- 35 张小玲、陶诗言、张庆云, 1998 年梅雨锋的动力、热力结构分析, *应用气象学报*, 2002, **13**, 257~268.
- 36 Kato, K., Seasonal transition of the lower-level circulation systems and East Asian June 500mb height, *Pap. Meteor. Geophys.*, 1989, **40**, 51~54.
- 37 Lu Riyu, and Y. S. Chuang, Interannual variations of the precipitation in Korea and the comparison with those in China and Japan, *J. Korean Environ. Sci. Soc.*, 1995, **4**, 345~356.
- 38 陶诗言、倪允琪、赵思雄等, 夏季中国暴雨的形成机理与预报研究, 北京: 气象出版社, 2001, 184pp.

- 39 Li, C., and M. Yanai, The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast, *J. Climate*, 1996, **9**, 358~357.
- 40 Tomas, R., and P. J. Webster, On the location of the intertropical convergence zone and nearequatorial convection. The role of inertial instability, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1997, **123**, 1445~1482.
- 41 Ding Yihui, Summer monsoon rainfalls in China, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**, 373~396.
- 42 Ding Yihui, Wang Qiyi, and Yan Junyue, Some aspects of climatology of the summer monsoon over the South China Sea, *From Atmospheric Circulation to Global Change*, Ed. by IAP, China Meteorological Press, 1996, 329~339.
- 43 丁一汇、马鹤年, 东亚季风的研究现状, 亚洲季风研究的新进展, 何金海编, 北京: 气象出版社, 1996, 1~14.
- 44 Ding Yihui, and Liu Yanju, Onset and the evolution of summer monsoon over the South China Sea during SCS-MEX field experiment in 1998, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79**, 255~276.
- 45 Ding Yihui, and Ying Sun, A study on anomalous activities of East Asian summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79**, 1119~1137.
- 46 孙淑清、孙伯民, 东亚冬季风环流异常与中国江淮流域夏季旱涝天气的关系, *气象学报*, 1995, **57**, 513~522.
- 47 Chen Wen, Impact of El Niño and La Niña on the cycle of East Asian winter and summer monsoons, *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2002, **26**, 359~376.
- 48 Wang, A. Y., Fong, S. K., Ding, Y. H., et al., Onset, maintenance and retreat of Asian summer monsoon, *Climatological ATLAS for Asian Summer Monsoon*, Edited by Fong, S. K. and Wang, A. Y., Macau, Macau Foundation, 251~318.
- 49 Yeh, T. C. (Ye Duzheng), Tao Shiyan, and Li Maicun., The abrupt change of circulation over the Northern Hemisphere during June and October, *Atmosphere and the Sea in Motion*, 1959, 249~267.
- 50 Krishnamurti, T. N., and Y. Kamanathan, Sensitivity of monsoon onset to differential heating, *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**, 1290~1306.
- 51 McBride, J. J., The Australian summer monsoon, *Monsoon Meteorology*, Edited by C. P. Chang and T. N. Krishnamurti, Oxford University Press. 1987, 203~232.
- 52 Huang Ronghui, and Li Weijing, 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.
- 53 Huang Ronghui and Sun Fengying, Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70** (1B), 243~256.
- 54 Huang, Ronghui, Yin Baoyu, and Liu Aidi, Intraseasonal variability of the East Asian summer monsoon and its association with the convective activities in the tropical western Pacific, *Climate Variability*, Edited by Ye, Duzheng et al., Chinese Meteorological Press, 1992, 134~155.
- 55 曹杰、黄荣辉、谢应齐等, 西太平洋副热带高压演变物理机制的研究, *中国科学 (D辑)*, 2002, **32**, 659~666.
- 56 Huang Ronghui, and Wu Shangsen, Impact of the thermal state of the tropical western Pacific on the onset of the South China Sea summer monsoon, *Proceedings of the Third International Symposium on Asian Monsoon System (ISAM3)*, Edited by A. Sumi, Okinawa, Japan, 2001, 18~21.
- 57 黄荣辉、徐予红、王鹏飞等, 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.
- 58 Lau, K. M., and S. H. Shen, Biennial oscillation associated with the East Asian summer monsoon and tropical sea surface temperature. *Climate variability*, Edited by Ye Duzheng et al., Chinese Meteorological Press, 1992, 53~58.
- 59 殷宝玉、王莲英、黄荣辉, 东亚夏季风降水的准两年振荡及其可能的物理机制, “灾害性气候预测及其对农业

- 年景和水资源调配的影响”项目论文集 II. 灾害性气候的过程及诊断, 黄荣辉等编, 北京: 气象出版社, 1996, 196~205.
- 60 黄荣辉、徐予红、周连童, 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势, 高原气象, 1999, **18**, 465~475.
- 61 Huang Ronghui, Decadal variability of the summer monsoon rainfall in East Asia and its association with the SST anomalies in the tropical Pacific, *CLIVAR Exchange*, 2001, **2**, 7~8.
- 62 黄刚, 东亚夏季风环流指数与夏季气候变化关系的研究, 应用气象学报, 1999, **10**, 61~69.
- 63 Wang Huijun, The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 376~386.
- 64 Wang Huijun, Instability of the East Asian summer monsoon—ENSO relations, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**, 1~11.
- 65 Staff member of Academia Sinica, On the general circulation over Eastern Asia (I), *Tellus*, 1957, **9**, 432~446.
- 66 Chen Wen, and H. F. Graf, The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relationship to global circulation, Max-Planck-Institute fur Meteorologic Report, 1998, No. 250.
- 67 Chen Wen, H. 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.
- 68 Chang, C. P., J. Erickson, and L. M. Lau, Northeasterly cold surges and near-equatorial disturbances over the winter-MONEX area during 1974, Part 1: Synoptic aspects, *Mon. Wea. Rev.*, 1979, **107**, 812~829.
- 69 Lau, K. M., and C. P. Chang, Planetary scale aspects of the winter monsoon and atmospheric teleconnection, *Monsoon Meteorology*, Edited by C. P. Chang and T. N. Krishnamurti, Oxford Uni. Press, 1987, 161~201.
- 70 李崇银, 东亚大槽的频繁活动与 El Niño 的发生, 中国科学 (B 辑), 1988, **18**, 667~674.
- 71 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.
- 72 Li Congyin, A further study on interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño, *Acta Meteor. Sinica*, 1996, **10**, 309~320.
- 73 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, 李崇银编, 北京: 气象出版社, 1998, 207~218.
- 74 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.
- 75 李崇银、廖清海, 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.
- 76 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.
- 77 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, 东亚季风和我国暴雨, 中国科学院大气物理研究所编, 北京: 气象出版社, 1998, 210~219.
- 78 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.
- 79 黄荣辉、傅云飞, 关于 ENSO 循环动力学研究的若干进展与问题, “灾害性气候预测及其对农业年景和水资源调配的影响”项目论文集 (II), 黄荣辉等编, 北京: 气象出版社, 1996, 172~188.
- 80 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.
- 81 Huang Ronghui, Zhang Xiaoyin, Zhang Renhe et al., 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.
- 82 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.
- 83 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.
- 84 Yasunari, T., Impact of Indian monsoon on the coupled atmosphere/ocean system in the tropical Pacific, *Meteor. Atmos. Phys.*, 1990, **44**, 29~41.

- 85 Ju, J., and J. M. Slingo, The Asian summer monsoon and ENSO, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1995, **121**, 1133~1168.
- 86 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.
- 87 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.
- 88 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**, 513~521

Studies on the Monsoon Dynamics and the Interaction between Monsoon and ENSO Cycle

Huang Ronghui, Chen Wen, Ding Yihui, and Li Chongyin

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

Abstract Monsoon and ENSO are two important systems influencing climate variations in Asia and China. With the deepening of study on climate dynamics, the great advances in the studies on the interaction between monsoon and ENSO cycle are achieved by Chinese scholars and the scholars in other countries. Thus, recent progresses in the studies on monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle are reviewed in this paper. Particularly, the deepening realizations and descriptions of Asian monsoon, especially the understandings of characteristics, system and annual cycle of monsoon, revealed by Chinese scholars are mainly synthesized in this paper. Moreover, the advances of the studies on the intraseasonal, interannual and interdecadal variabilities of Asian monsoon and the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle etc. achieved in China are also reviewed in this paper. Besides, the scientific problems in monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle, which should be studies further, are also put forward in this paper.

Key words: Monsoon; ENSO; dynamics; interaction