

一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系

李建平 曾庆存

中国科学院大气物理研究所，北京 100029

摘要 作者按曾庆存等所定义的标准化风场季节变率（和利用新的资料重新作了计算，为与国外传统的和至今大多数学者的定义一致，取 $^* = -2 > 0$ （即冬、夏风向差大于 $/2$ ）作为季风区，结果涵盖了迄今国内外所指出的全球所有季风区（但比曾庆存等算得的区域略为小些），尤其是热带季风区正处于冬季和夏季赤道幅合带（ITCZ）位置所夹的范围内。其后，用李建平和曾庆存建议的动态风场标准化季节变率 $^* = m - 2$ （ m 形式上与 * 相似，但依赖于年份 m ）作为各年季风指数，计算了各主要季风区区域平均的 * 的年际变化，得到南亚夏季风和东亚夏季风自 20 世纪 70 年代中期起、南海夏季风自 20 世纪 80 年代起和西非夏季风自 1967 年起都有不同程度的长期减弱趋势，尤其以西非夏季风减弱最明显。西非夏季风指数和南亚夏季风指数与当地夏季雨量呈显著正相关，东亚夏季风指数与中国和东亚夏季雨量的空间分布有一定的统计相关结构，而南海夏季风指数则与全球各海区夏季降水和海平面气压异常有较好的大范围统计相关。

关键词 标准化季节变率 季风 季风指数 季风区 年际变化

文章编号 1006-9585 (2005) 03-0351-15 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

A New Monsoon Index, Its Interannual Variability and Relation with Monsoon Precipitation

LI Jian-Ping and Zeng Qing-Cun

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The normalized seasonality of winds presented firstly by Zeng is calculated again by use of new datasets. To consist with the traditional and known definitions from many researchers, we take the region where $^* = -2 > 0$, i.e., the difference in wind direction between winter and summer is larger than $/2$ as monsoon region. The geographical extent of the global monsoons from the method here covers all monsoon regions over the world known so far (however, the domain here is slightly smaller than that from Zeng), especially the tropical monsoons are just included in the region between the positions of the Intertropical Convergence Zone or ITCZ in winter and summer. Then, the interannual variations of areal average * of some key monsoons as the broad scale monsoon index proposed by Li and Zeng are analyzed by virtue of the dynamical normalized seasonality (DNS) of winds $^* = m - 2$ (m is similar to * but depends on year m). The long-term decreasing trends with different extent can be found in the intensities of the South Asian summer monsoon (SASM) and East Asian summer monsoon (EASM) since the mid-1970s, the South China Sea summer monsoon (SCSSM) since 1980s, and the West African summer monsoon (WASM) since 1967, especially the most remarkably weakening in the WASM. Both the West African summer monsoon index (WASMI) and the South Asian summer monsoon index (SASMI) are significant positively correlated with the summer precipitation over the local monsoon regions, respectively, and there is statistical structure in the

收稿日期 2005-08-23 收到，2005-08-31 收到修定稿

资助项目 国家自然科学重点基金项目 40233027 和国家杰出青年科学基金项目 40325015

作者简介 李建平，男，1969 年生，博士，研究员，博士生导师，主要从事气候学、季风、非线性动力学、数值计算等方面的研究。

E-mail: ljp@lasg.iap.ac.cn

correlation map between the East Asian summer monsoon index (EASMI) and summer rainfall in China and East Asia, and there exist better statistical correlations over large regions in every Oceans between the South China Sea summer monsoon index (SCSSMI) and summer global rainfall and sea level pressure anomalies.

Key words normalized seasonality, monsoons, monsoon index, monsoon region, interannual variation

1 引言

季风是大气环流中季节变化最为显著的系统, 尤其是它与雨量有密切关系, 一直受到人们的关注。人们从不同角度和不同的理解定义了季风及其强度, 如季风区和季风指数等(详见下列各节所引文献)。我们认为由曾庆存等^[1~4]所提出的环流场标准化季节变率(seasonality)也许是最为直接、最简单明了和反映出环流基本特性的一个指标, 而曾庆存等^[3]定义的季节强度(或季风强度) I 或动态环流标准化变率 $\frac{I}{m} = \frac{m}{m-2}$ 则是可直接和简单明了地反映季风年际变化的指标。本文就专用 $\frac{I}{m} = \frac{m}{m-2}$ 和 $\frac{I}{m}$ 分别定义季风区和研究季风指数的年际变化及其与夏季季风雨量的关系。

2 资料

本文使用的基本资料是NCEP/NCAR月平均再分析资料^[6](1948~2003年)以及其计算的气候月平均风场资料(1968~1996年), 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向上从1000 hPa到10 hPa共17层。其他资料包括:Xie-Arkin降水分析资料^[7](1979~1997年), 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 全球陆地月平均降水历史数据集^[8](1900~1998年), 分辨率为 $2.5^\circ \times 3.75^\circ$; 扩展重建的Reynolds海表温度资料(ERSST)^[9](1948~2001年), 分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$; 全印度次大陆季节平均的降水指数(AIRI)^[10](1958~1998年); 以及中国气象局气象信息中心资料室提供的中国160站月平均降水资料(1958~1999年)等。

3 新的季风指数

曾庆存等^[1,2,4]所提出的风场标准化季节变率定义如下:

$$\frac{I}{m} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_7}{\bar{V}}, \quad (1)$$

其中 \bar{V}_1 和 \bar{V}_7 分别是1月和7月的气候平均风矢量, \bar{V} 是1月和7月气候平均风矢量的平均(即 $\bar{V} = (\bar{V}_1 + \bar{V}_7)/2$), 量 A 的范数

$$A = \left(\iint / A /^2 dS \right)^{1/2}, \quad (2)$$

式中 S 代表所计算的区域。在实际计算中可用5点公式计算范数的近似值, 即在点 (i, j) ,

$$A_{i,j} = S \left[(/ A_{i-1,j}^2 / + 4 / A_{i,j}^2 / + / A_{i+1,j}^2 /) \cos_j + / A_{i,j-1}^2 / \cos_j + / A_{i,j+1}^2 / \cos_j \right]^{1/2},$$

式中 j 是点 (i, j) 所在纬度, $S = a / 4$, a 是地球平均半径, 和分别代表经向、纬向方向上的分辨率, 单位是弧度。在计算标准化季节变率时, S 是不必计算的, 因为在(1)式的分子、分母中都出现。可证^[11]: 1) 当 \bar{V}_1 与 \bar{V}_7 固定时, \bar{V}_1 与 \bar{V}_7 之间的夹角 (θ) 是标准化季节变率的严格增函数; 2) 令 \bar{V}_1 与 \bar{V}_7 之间的夹角为 θ , 则当 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时, $\frac{I}{m} < 2$; 当 $\theta = 90^\circ$ 时, $\frac{I}{m} = 2$; 当 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时, $\frac{I}{m} > 2$ 。可见 $\theta = 2$ 为冬夏的盛行风是否基本反向的临界值。因此更为方便的是在(1)式的右端减去2(而为方便起见记为 $\frac{I}{m}^*$), 即取

$$\frac{I}{m}^* = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_7}{\bar{V}} - 2, \quad (3)$$

于是, $\frac{I}{m}^* > 0$ 就反映季风是盛行风向有显著的转变这一主要环流特征。为了和长久历史上人们对热带季风现象的直接感受以及以前文献中对热带季风区的定义相吻合或接近, 我们就定义 $\frac{I}{m}^* > 0$ 的地区为季风区。上述曾庆存等^[1~4,12,13]的工作也是这样做的, 只不过是按照(1)式计算的, 只是未说明 $\frac{I}{m}^* > 2$ 是风向差大于 90° 且以此值为季风区界线。本文将用更长的历史资料进行计算, 并直接按(3)式把 $\frac{I}{m}^* > 0$ 的地区作为季风区。必须指出的是, 这是与国外工作易于比较才这样作的。其实季风区不一定就要风具有季节性反向, 要看怎样才最为实用而定。

为了研究年内或季节内的环流演变、季节划分以及年际变化, 曾庆存等^[11]建议使用两个物理

量（标量或矢量） F_1 和 F_2 的“相关系数”（“相似度”） R 、“差异度” d^2 和“投影率”（“强度指数”） I 等来刻画，其中

$$R = \frac{(F_1, F_2)}{F_1 \cdot F_2}, \quad (4)$$

$$d^2 = \frac{F_1 - F_2}{F_1^2 + F_2^2}, \quad (5)$$

$$I = \frac{(F_1, F_2)}{F_1^2} = RA, \quad (6)$$

其中 (F_1, F_2) 为内积（投影）， A 为“强度比” F_2 / F_1 。也可用如下 d^{*2} 来代替 d^2 ：

$$d^{*2} = \frac{F_1 - F_2}{F^2}, \quad (5)$$

式中 F 为 $(F_1 + F_2) / 2$ 。这些量之间有密切关系（详见曾庆存等的有关文献 [1~5, 12~15]）。

若取 F_1 为夏季典型的量， F_2 为各月（或一定时段）的平均量，则由 R 或 d^2 可决定夏季始和终的时间。若取 F_2 为各年夏季（典型月或典型季度）的量，则 d^2 和 I 可表示年际变化，当研究季风时，它们也是某种“季风指数”（尤其是 I ）。具体计算结果详见文献 [13~16]。

仿照公式 (3)，曾庆存等^[3]和李建平等^[17]用

$$*_{m,n} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_{m,n}}{\bar{V}} - 2 \quad (7)$$

来计算季节变化和年际变化，而称之为动态标准化变率指数（或季风指数），其中 \bar{V}_1 是 1 月气候平均风矢量， \bar{V} 是 1 月和 7 月气候平均风矢量的平均， $\bar{V}_{m,n}$ 是某年 (n) 某月 (m) 的月平均风矢。本文用 (7) 式作季风年际变化的进一步研究。

4 全球季风系统的三维结构

4.1 全球对流层低层季风区的地理分布

图 1 给出根据 NCEP/NCAR 再分析资料计算 850 hPa 气候平均风场 (1968~1996 年) 按 (3) 式 $* > 0$ 得到的全球对流层低层季风区的地理分布。非常清楚，所有经典的季风区如亚澳季风区^[18~20]、西非季风区^[18, 21, 22] 等都被一一勾画出来，并且美洲季风系统^[23]也清晰可见。显然，从图 1 可知全球对流层低层季风系统按所处纬度可以分为三类：热带季风系统（图 1 中的红色区域）、副热带季风系统（图 1 中的绿色区域）和在温寒带中的季风区（图 1 中的蓝色区域）（注：由于资料不同，曾庆存等^[2, 4]是用 1979~1991 年的

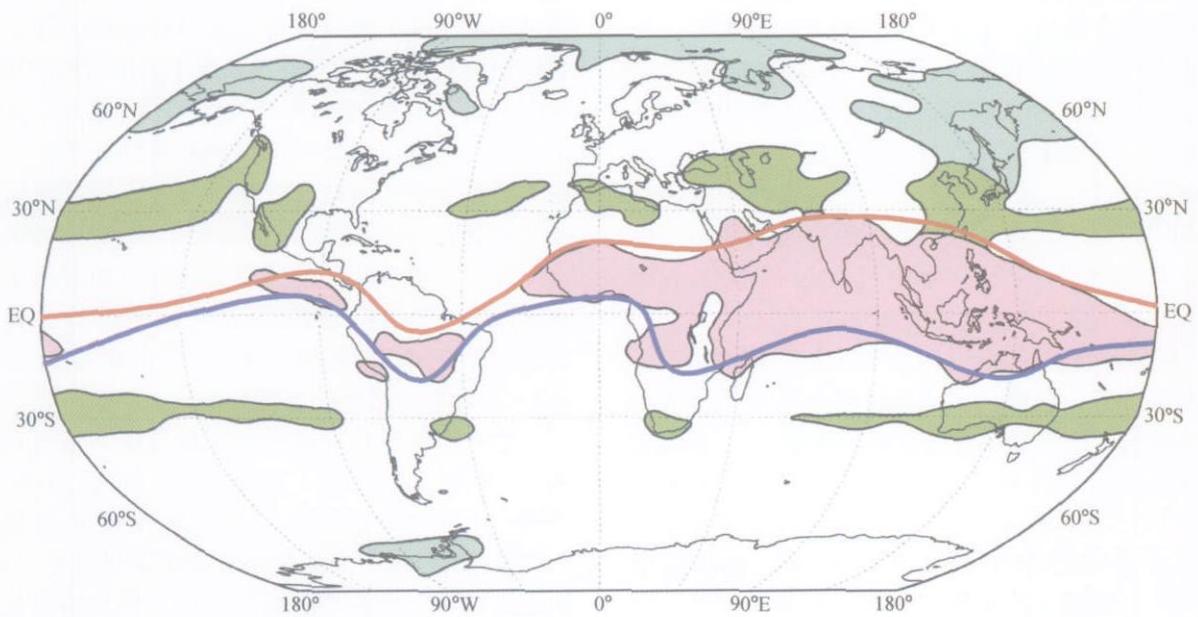


图 1 全球地面季风的地理分布。图中红色、绿色及蓝色区域分别表示热带季风区、副热带季风区和温寒带季风区，红色和蓝色粗实线分别代表夏季和冬季热带幅合带 ITCZ 的位置

Fig. 1 Geographical extent of the global surface monsoons. The red, green, and blue areas indicate the tropical, subtropical, and temperate-frigid monsoons, respectively. The red and blue thick lines represent the ITCZ in summer and winter, respectively.

NCEP/ NCAR 再分析资料, 且计算格点也不同, 所以本图与那里的图在细节上有些差别)。

热带季风系统的主体由一个相当宽广的区域组成, 该区域在东西方向上从西非一直向东延伸到印度尼西亚和所罗门群岛, 向南伸展到马达加斯加和北澳大利亚, 向北则可扩展到青藏高原南部边缘所在纬度。在这个巨大的区域中包括的经典热带季风有南亚季风^[18, 19, 21]、印度尼西亚季风^[18, 21]、南海季风^[20, 24, 25]、澳洲季风^[18, 19, 21]、西北太平洋季风^[26~28]、西非季风^[18, 21, 22, 28]和索马里-西印度洋季风^[19, 29]等。此外, 热带季风系统还包括如南美季风区^[30]、中美季风区^[31] (注: 我们所算得的中美季风区不在中美陆地上, 而是在其西边不远的东太平洋上) 等。我们同时将冬、夏热带幅合带 (ITCZ) 中心线也标在图 1 上, 可见此二线所包含的区域正好与热带季风系统重合。这绝非偶然的巧合, 而是由于推动热带季风的两大推动力及其相互作用的必然结果^[32]。行星热对流环流是热带季风的“第一推动力”, 地表面特性差异 (海陆热力特性差异以及地形高度等) 所导致的准定常行星波为“第二推动力”。ITCZ 所处位置就是这两种推动力共同作用所致的行星热对流环流圈的实际南北界线。这两大推动力在东半球合拍而配合得宜, 在西半球反向而相消大半, 从而使得行星热对流的上升中心 (即对应于实际 ITCZ 的位置) 南北位移的季节变化在东半球极为显著, 在西半球非常微弱, 结果热带季风在亚澳区内最为明显, 在热带东太平洋和大西洋则盛行“信风”。第二推动力的存在是使理想的纬向对称的热带行星季风在实际中呈现出局域性的原因^[32]。

副热带季风系统与热带季风系统相比, 在面积上小得多, 在形状上呈狭长的带状分布, 这与副热带高压的季节性移动有密切关系^[2, 4]。副热带季风系统的主要成员有东亚季风^[33~35]、北美季风^[36, 37]、北非季风^[22, 38]、沿着伊朗高原和青藏高原北部边缘的中亚地区内陆季风^[38]及高原季风^[33, 39]、南澳大利亚季风^[22]、南非季风^[22, 38]、以及沿着南北纬 30 附近的海洋上狭长地带^[2, 4]。值得注意的是在副热带季风中东亚季风是最为典型的, 范围最为宽广, 它与 30°N 附近的北太平洋上空的副热带季风相联, 从东亚地区一直延伸到北

美西海岸, 从而构成一个联接两个大陆的环流系统。在副热带季风中, 除了东亚季风、北美季风以及高原季风研究较多, 其他副热带季风还没有被系统地研究过。

在温寒带中的季风区是三类季风系统中范围最小的, 且主要出现在北半球, 它涵盖了如在远东地区的远东季风^[2, 4, 22, 38]、阿拉斯加北部地区^[2, 4, 22, 38]和北极部分地区^[2, 4, 22, 38]等等。温寒带中的季风目前很少被深入讨论, 究其原因是与人们的传统认识即把季风和干湿之间的联系绝对化了分不开的。Ramage^[21]就特别强调指出避免把天气如“湿润的夏季/ 干燥的冬季”作为季风的标准, 否则会引起混乱。看来, 对季风这个古老的概念需要进一步从观念上更新。

图 2 按上述 NCEP/ NCAR 再分析资料计算和图 1 给出的季风区范围而标出的对流层低层季风区和非季风区的冬、夏盛行环流及半永久性气压系统的分布。由图可见, 在亚澳非洲热带季风区的冬季 (图 2a), 在其北半球部分 (约 0°~20°N, 20°W~140°E 之间) 均盛行东北季风, 其南半球部分 (约 0°~10°S, 20°~160°E 之间) 均盛行西北季风; 在夏季 (图 2b), 则分别盛行西南季风和东南季风。在东亚副热带季风区, 冬季盛行西北季风, 在与热带季风汇合处则分裂成两股即东北季风和西北季风 (图 2a); 而夏季则由西南季风和东南季风^[40]两股季风汇合 (图 2b)。由此, 从流系的分布上看, 热带季风区内相对比较单一, 而东亚副热带季风则较为复杂 (北美副热带季风区亦是如此)。由图还可见, 与季风系统相联系的半永久性气压系统从冬到夏要么是其性质发生了根本的改变 (即由高压变成低压或反之), 要么是其在位置上有显著的移动。这是一个重要的特征。

4.2 全球季风系统的垂直分布

季风不仅仅是对流层低层的现象, 它可以扩展到对流层上层, 甚至在平流层更为显著^[2, 4, 11, 13, 15]。今用新的资料计算气候平均风场 (1968~1996 年) 标准化季节变率结果也是这样, 因而这里不再给出各层的平面图, 而只给出其纬向平均的分布 (图 3)。由图可知, 全球季风有非常鲜明的垂直结构, 具有显著的斜压性, 并呈现出南、北半球的一定的不对称性 (这与南北两半球海陆分布上的差异有关), 北半球的季风系统确

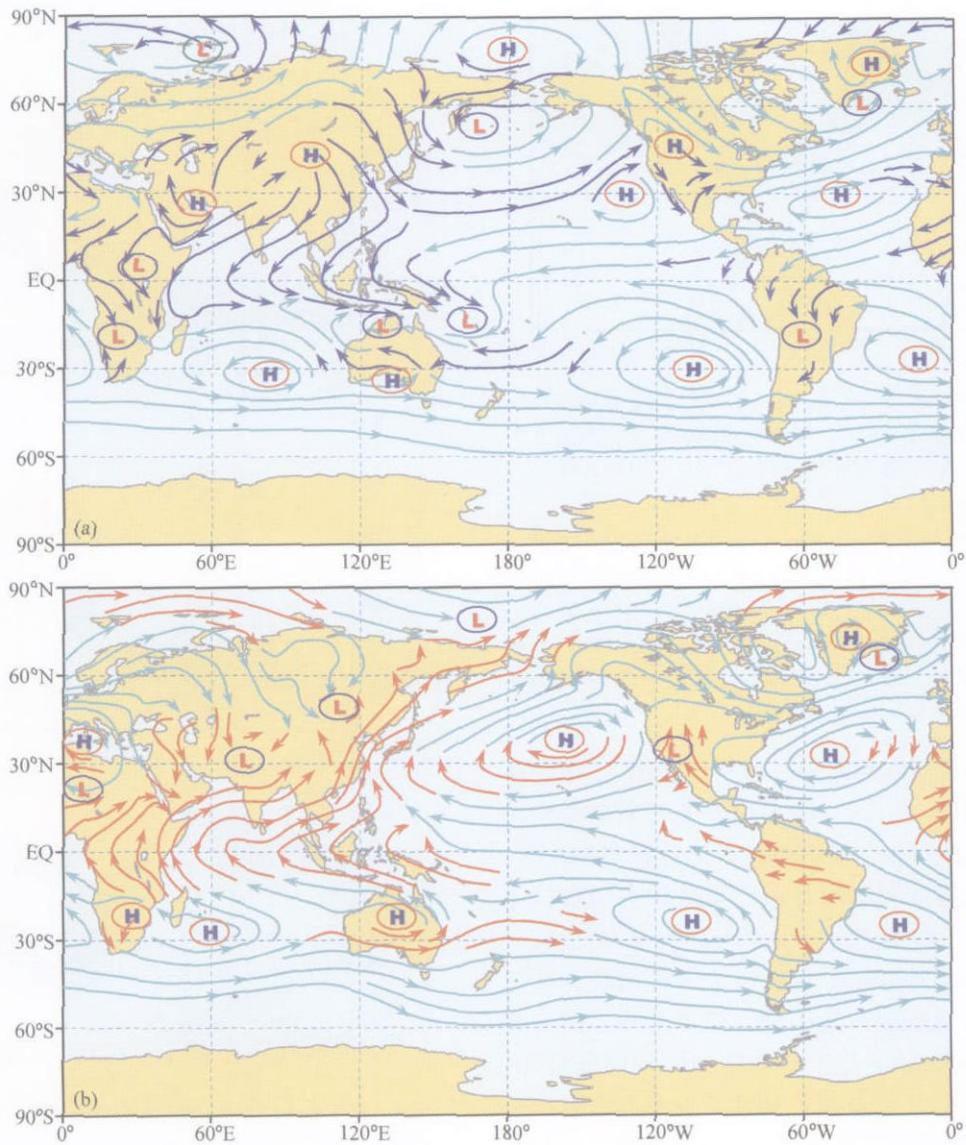


图 2 850 hPa 层上全球季风流场和非季风流场的分布。(a) 冬季; (b) 夏季。图中 H 代表高压, L 代表低压, 蓝色流线代表冬季风, 红色流线代表夏季风, 绿色流线代表非季风情形。这里的季节均以北半球为准

Fig. 2 Stream line distributions of the global monsoon and non-monsoon winds at 850 hPa. (a) DJF (boreal winter); (b) JJA (boreal summer). H denotes high pressure and L low pressure. The blue lines represent the boreal winter monsoon streams, the red ones the boreal summer streams, and the green ones the non-monsoon streams

比南半球的强且范围更为宽广。在对流层低层(500 hPa 层以下), 全球存在 4 个季风区, 即热带季风、南北半球副热带季风及北半球温寒带季风区(本文算得的南半球温寒带季风区范围太小, 因而本文略去不计)。在 500 hPa 层以上全球仅有两支季风区。从垂直分布上看, 南北半球副热带季风系统是最为深厚的, 可以从对流层低层一直扩展到平流层低层, 尽管在对流层低层较弱且范

围狭小, 但其强度和范围不断随高度增强和加大。此外, 副热带季风系统的范围正好是冬、夏纬向平均的副热带高压脊线之间所包括的区域, 且副热带季风系统的强度轴线与年平均的副热带高压带脊线基本重合(图 3), 这些都表明副热带季风区是与副热带高压系统紧密相关的。

热带季风垂直分布的一个重要特征是在热带地区 50 hPa 层以下以国际日期变更线和 500 hPa

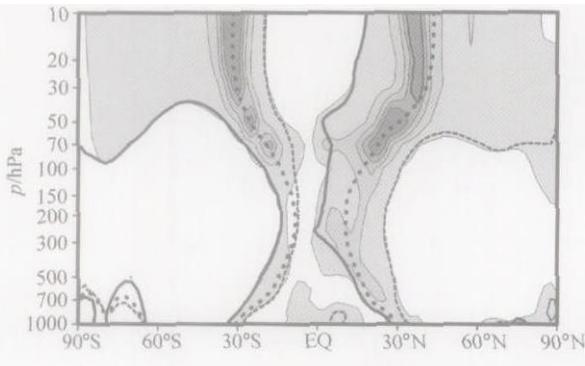


图3 由气候平均风场 (1968~1996年) 得到的全球标准化季节变率 * 的纬向平均分布。等值线间隔为2, 阴影为大于0的区域, 粗实线、虚线和点线分别表示1月、7月和这两个月平均的东西风零线

Fig. 3 Zonal mean distribution of the normalized seasonality * of the climatological wind field (1968—1996). The contour interval is 2 and the shaded areas are above 0. The thick, thin and dotted lines denote the zero lines of zonal-mean zonal winds in January and July and those of the average of zonal-mean zonal winds of the two months, respectively

层为分界线呈反对称结构。这一点在图4a中的热带地区 ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$) 标准化季节变率的平均纬向分布上反映得很清楚。不过, 即使在热带地区, 热带季风的强度和结构在南北半球也有明显的不同 (图4b、c), 说明了季风的复杂性和多样性。

由于以前对温带季风很少深入研究, 这里单独拿出来对其垂直结构做一简单分析。图5是 $50 \sim 70^{\circ}\text{N}$ 之间标准化季节变率的平均纬向分布。由图可见一个非常有趣的现象, 就是位于 $120 \sim 180^{\circ}\text{E}$ 的北半球温带季风系统相当深厚, 可以从对流层一直扩展到平流层, 与平流层季风相通。

5 不同季风区的年际变化及与雨量的关系

这一节选取南亚、东亚、南海和西非等北半球中四个关键的季风区进行分析, 它们的范围分别是南亚季风区 ($5 \sim 22.5^{\circ}\text{N}$, $35 \sim 97.5^{\circ}\text{E}$)、东亚季风区 ($10 \sim 40^{\circ}\text{N}$, $110 \sim 140^{\circ}\text{E}$)、南海季风区 ($0^{\circ} \sim 25^{\circ}\text{N}$, $100 \sim 125^{\circ}\text{E}$)、西非季风区 ($5 \sim 17.5^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W} \sim 40^{\circ}\text{E}$)。为了方便起见, 将区域平均动态标准化季节变率所定义的南亚夏季风指数 (6~9月)、东亚夏季风指数 (6~8月)、南海

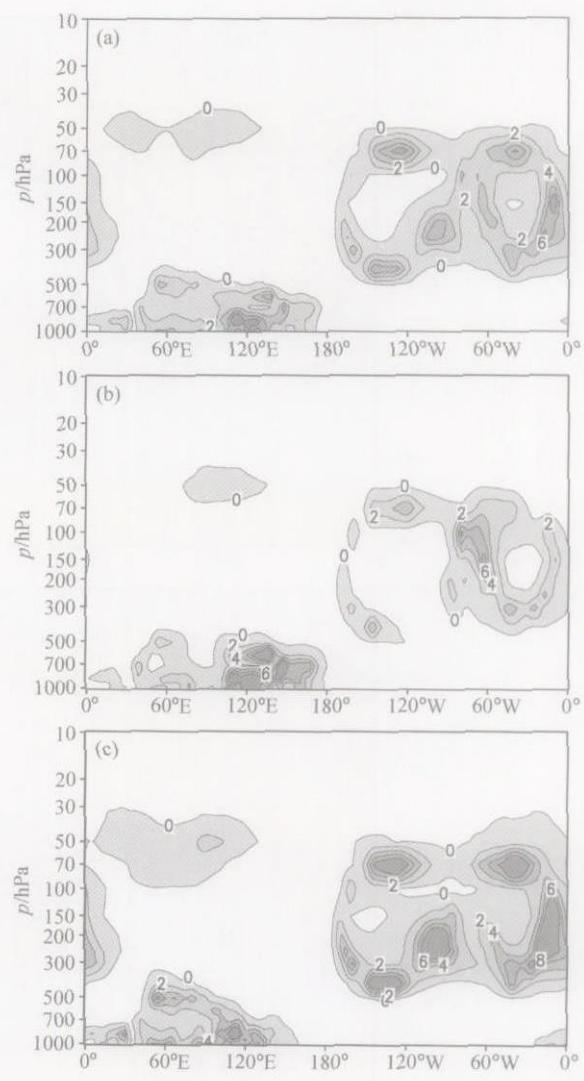


图4 同图3, 但为平均纬向垂直分布情形。(a) 热带地区 ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$) ; (b) 南半球热带地区 ($10^{\circ}\text{S} \sim 0^{\circ}$) ; (c) 北半球热带地区 ($0^{\circ} \sim 10^{\circ}\text{N}$)

Fig. 4 Same as in Fig. 3, but for the mean zonal-vertical distribution. (a) The tropics ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$) ; (b) The tropics in the Southern Hemisphere ($10^{\circ}\text{S} \sim 0^{\circ}$) ; (c) The tropics in the Northern Hemisphere ($0^{\circ} \sim 10^{\circ}\text{N}$)

夏季风指数 (5~10月) 和非洲夏季风指数 (5~9月) 分别记为 SASMI、EASMI、SCSSMI 和 WASMI, 用来研究季风年际变化及与雨量的关系。SASMI、EASMI 和 WASMI 是用 850 hPa 风场资料计算得到, 而 SCSSMI 是由 925 hPa 风场资料得到, 这是根据区域平均的标准化季节变率描述这些地区雨季起始时间的特点确定的^[5]。

5.1 南亚夏季风

南亚夏季风是最为典型的季风。目前已提出

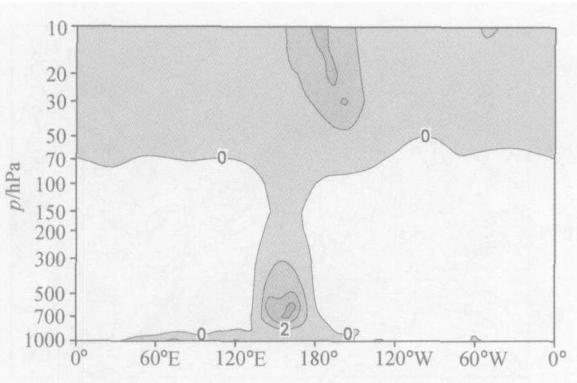


图 5 同图 4, 但为 50~70°N 纬带内的情形

Fig. 5 Same as in Fig. 4, but for the belt between 50~70°N

表 1 不同南亚夏季风强度指数之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between various SASM indices

	SASMI	WYI	MHI	AIRI	SASMI1	SASMI2
SASMI	1.00	0.72 *	0.58 *	0.68 *	0.88 *	0.63 *
WYI		1.00	0.49 *	0.49 *	0.65 *	0.46 *
MHI			1.00	0.63 *	0.61 *	0.08
AIRI				1.00	0.73 *	0.08
SASMI1					1.00	0.26
SASMI2						1.00

注：表中的计算是基于 1958~1998 年期间 6~9 月季节平均序列。

* 指达到 99.9% 置信水平的相关系数。SASMI、SASMI1 和 SASMI2 分别是 850 hPa 面上区域 (5~22.5°N, 35~97.5°E), (2.5~20°N, 35~70°E) 和 (2.5~20°N, 70~110°E) 平均的标准化季节变率, WYI^[41] 是区域 (0~20°N, 40~110°E) 平均的 850 hPa 和 200 hPa 面上纬向风切变, MHI^[42] 是区域 (10~30°N, 70~110°E) 内平均的 850 hPa 和 200 hPa 面上经向风切变, AIRI^[10,43] 是全印度次大陆季节平均的降水指数。

Note: Calculations in Table 1 are based on the time series of seasonal means of June—September during 1958—1998. Coefficients beyond the 99.9% confidence level are denoted by “*”. South Asian summer monsoon index (SASMI), western South Asian summer monsoon index (SASMI1) and eastern South Asian summer monsoon index (SASMI2), the dynamical normalized seasonality of winds at 850 hPa averaged over the domains (5~22.5°N, 35~97.5°E), (2.5~20°N, 35~70°E) and (2.5~20°N, 70~110°E), respectively. WYI^[41], the zonal wind shear between 850 hPa and 200 hPa averaged over the region (0~20°N, 40~110°E). MHI^[42], the meridional wind shear between 850 hPa and 200 hPa averaged over the area (10~30°N, 70~110°E). All Indian Rainfall Index or AIRI^[10,43], the seasonally averaged precipitation over the Indian subcontinent from June to September.

很多好的南亚夏季风年际变化的强度指数, 如 Webster 和 Yang 指数 (WYI)^[41], 季风 Hadley 环流指数 (MHI)^[42], 全印度降水指数 (AIRI)^[10,43] 和对流指数 (CI)^[44] 等等。表 1 给出本文

提出的南亚夏季风指数与其他指数的相关系数。由表可见, 南亚夏季风指数 SASMI 与 WYI, MHI 和 AIRI 指数之间都有很好的正相关关系, 且南亚夏季风指数 SASMI 与全印度降水指数 AIRI 的正相关关系明显要好于 WYI 和 MHI 两个指数, 这说明我们提出的南亚夏季风指数 SASMI 在描述印度夏季风降水年际变化方面更优。而且, 从全印度降水指数、南亚夏季风指数与夏季印度降水场的相关图 (图 6a、b) 可见, 两者得到的印度夏季风区内降水相关型是非常相似的, 显著的正相关区位于印度大陆上 (图 6a、b)。

南亚夏季风区可能包含两个相对独立的分量, 即区域 (2.5~20°N, 35~70°E) 和 (2.5~20°N, 70~110°E), 分别称为南亚西区和东区, 这两个区内的夏季风与印度夏季降水有不同的关系和作用。上述两个区域平均的标准化季节变率指数得到南亚西区和东区夏季风强度指数, 分别记为 SASMI1 和 SASMI2。如表 1 所示, 南亚西区和东区夏季风强度指数 SASMI1 和 SASMI2 之间的相关很弱, SASMI1 与 WYI, MHI 及 AIRI 之间有很强的正相关, 但 SASMI2 与 MHI 和 AIRI 的相关非常小 (~0.08), 这与 Wang 和 Fan^[35] 的结论一致。这说明 SASMI1 和 SASMI2 与南亚地区夏季季风降水场之间有截然不同的关系。南亚西区夏季风强度指数 SASMI1 与夏季降水场的显著正相关区位于印度中部和北部以及孟加拉湾地区 (图 6c), 而南亚东区夏季风强度指数 SASMI2 与夏季降水场的显著负相关区分布在从阿拉伯海穿过热带北印度洋直到印度尼西亚和马来西亚等广大地区 (图 6d)。因此, 与 SASMI 相关的南亚地区夏季降水异常的分布呈现出一个南-北偶极型 (图 6b)。

图 7a、b、c 分别给出南亚夏季风指数 SASMI、南亚西区夏季风指数 SASMI1 和南亚东区夏季风指数 SASMI2 的年际变化。自 1950 年代以来至 1980 年代, 南亚夏季风指数持续减弱, 并在 1970 年代中期发生了一次年代际变化, 由强南亚夏季风阶段变为弱夏季风阶段。近 20 年来南亚夏季风指数又呈走强趋势, 表明印度夏季风降水强度有上升趋势。南亚西区夏季风指数 SASMI1 的变化与 SASMI 非常接近, 只是近 20 年来的增强趋势比 SASMI 更明显。南亚东区夏季风指数

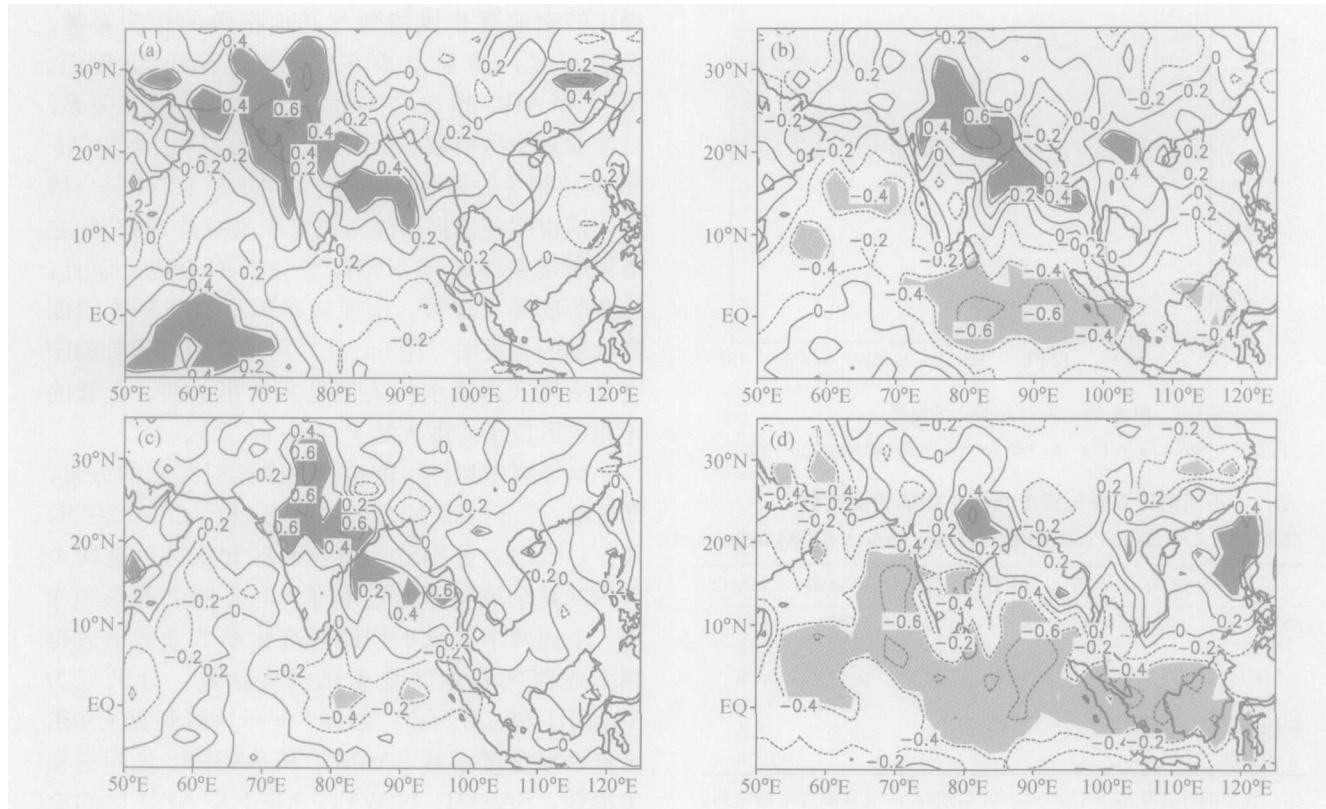


图 6 南亚夏季 (6~9 月) 降水场与 (a) 全印度降水指数^[10,43] ARI, (b) 南亚夏季风指数 SASMI, (c) 南亚西区夏季风指数 SASMII 和 (d) 南亚东区夏季风指数 SASMI2 的相关 (1979~1997 年)。阴影表示达到 95% 置信度的区域

Fig. 6 Correlation maps between the seasonal (June—September) rainfall (1979~1997) and (a) ARI^[10,43], (b) SASMI, (c) SASMII, and (d) SASMI2. The shaded areas indicate significant at the 95 % confidence level

SASMI2, 在近 30 年来一直呈现弱季风阶段, 表明在这一期间北半球热带印度洋地区的夏季降水持续偏多。根据南亚夏季风指数 SASMI 的谱分析 (图略) 表明, SASMI 没有特别明显的周期, 只是存在 3 年、8 年、30~40 年的周期谱峰。

5.2 东亚夏季风

东亚夏季风不同于热带季风, 是属于副热带季风性质^[34,35,45,46] (这里所说的东亚季风是不包括南海季风)。图 8a、b 给出东亚夏季风指数 EASMI 与中国和东亚夏季降水场的相关分布, 表明东亚夏季风指数 EASMI 与长江中下游地区夏季降水呈现显著的负相关关系, 即东亚夏季风偏强时, 长江中下游地区夏季降水偏多, 反之亦然。这说明东亚夏季风指数 EASMI 可以很好地反映长江中下游地区夏季降水的年际变化。此外, 东亚夏季风指数 EASMI 与东亚夏季降水的相关图上

(图 8b) 清楚显示出太平洋-日本遥相关型分布^[47~49], 且 EASMI 与菲律宾邻近海域和西太平洋暖池地区的对流活动有最强的正相关, 因此, 东亚夏季风指数 EASMI 也可以很好地反映该地区夏季对流活动强度的变化。

图 9 给出东亚夏季风指数 EASMI 的时间序列, 表明东亚夏季风强度有很强的年际变化^[50~53] 和年代际变化, 特别是自 1950 年代以来至今, 东亚夏季风指数呈线性减弱趋势, 在 20 世纪 80 和 90 年代东亚夏季风强度很弱, 而这一阶段里长江中下游地区夏季降水偏多。谱分析结果 (图略) 指出, 东亚夏季风指数 EASMI 有 2~3 年和 10 年左右的谱峰, 即具有一定的准两年振荡和年代际振荡特征。

图 10 是东亚夏季风指数 EASMI 与夏季全球海表温度的相关图。图中显示, 东亚夏季风指数与西太平洋暖池、南海以及热带印度洋地区的海

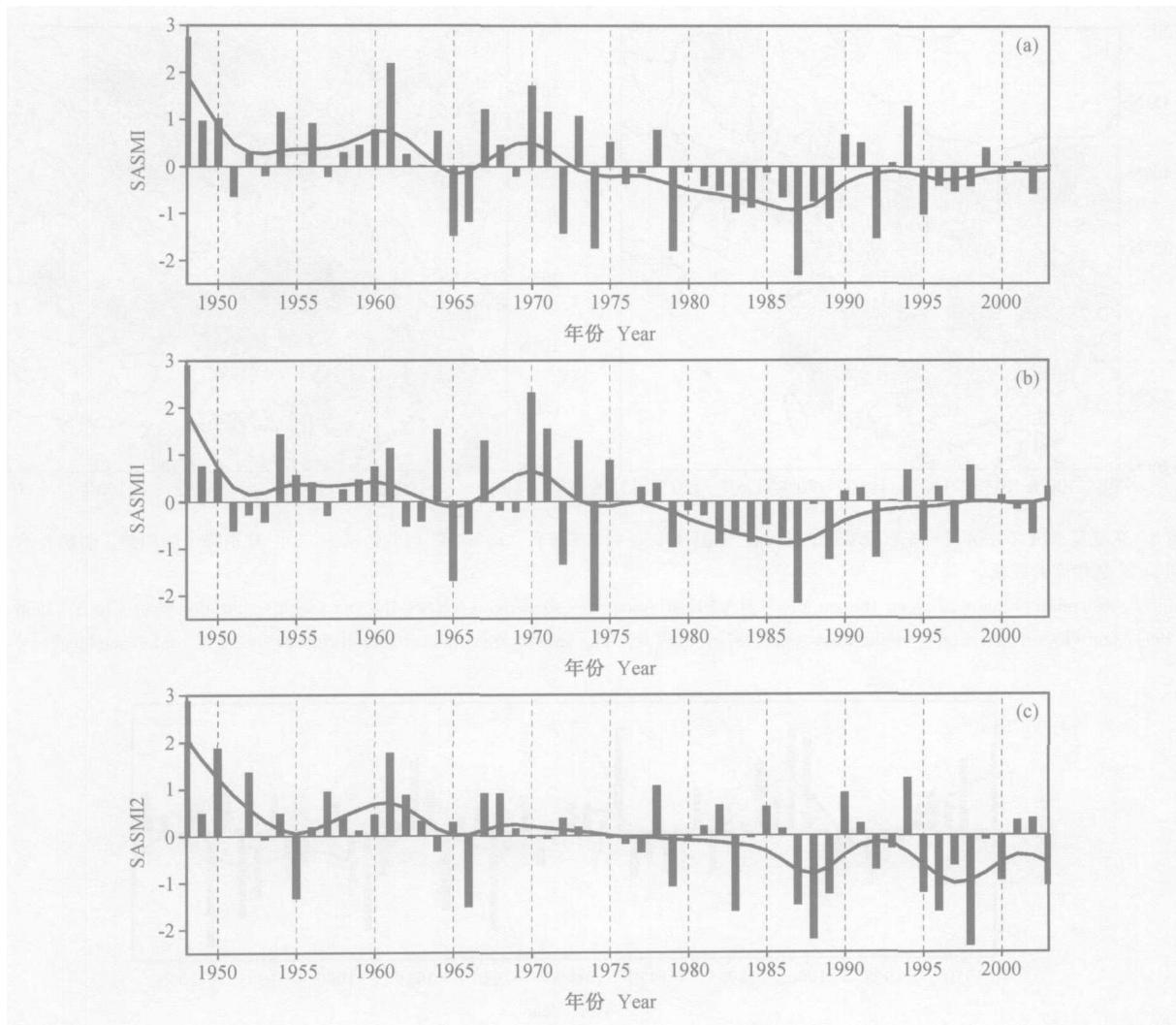


图 7 南亚 (a)、南亚西区 (b) 和南亚东区 (c) 夏季风指数 SASMI、SASMII 和 SASMI2 的标准化时间序列 (1948~2003 年)。图中粗实线是 9 年高斯滤波曲线

Fig. 7 Normalized time series of the of (a) the SASMI, SASMII and SASMI2 (1948—2003). The thick solid lines indicate 9-year Gaussian-type filtered values

温有大范围显著负相关，也即与大暖池的海温异常有密切关系。当大暖池地区夏季海温异常暖时，东亚夏季风偏弱，反之，当大暖池地区夏季海温异常冷时，东亚夏季风则偏强。另外，一个正相关区位于黄海、日本海及日本以东的太平洋地区（图 10）。

5.3 南海夏季风

南海季风是亚澳季风系统中一个十分重要的成员^[20, 23~25]，最近得到很大的关注^[25, 50]。图 11 是南海夏季风指数 SCSSMI 与全球夏季降水的相关分布，可见，在北半球夏季，SCSSMI 与西太平洋暖池、10~25°N 的北太平洋、南美季风区和

东南太平洋等地区的降水都有大范围显著正相关，而与从阿拉伯海横跨热带印度洋到印度尼西亚和马来西亚的广大地区、中美到加勒比海以及 10~20°N 的北大西洋和环绕澳大利亚西南印度洋地区有很好的负相关。这个强的遥相关型说明南海季风指数与全球各海区夏季降水异常有较好的大范围统计相关关系。

由图 12 可知，南海夏季风指数 SCSSMI 与夏季全球海平面气压的同时相关图中存在一个显著的全球尺度遥相关型。在强（弱）的南海季风时，大气质量发生大范围的转移以至于海平面气压在

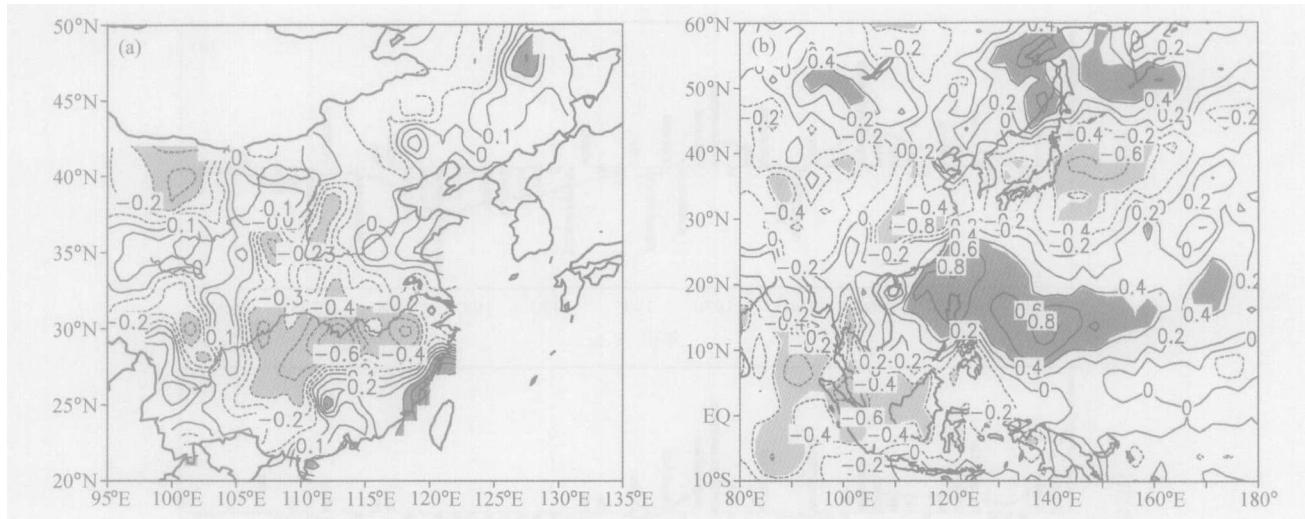


图 8 东亚夏季风 (6~8 月) 指数 EASMI 与 (a) 中国 (1958~1999 年)、(b) 东亚 (1979~1997 年) 夏季降水的相关。阴影表示达到 95% 置信度的区域

Fig. 8 Correlation maps between the summer (JJA) East Asian monsoon index (EASMI) and (a) precipitation over China (1958—1999), and (b) precipitation over the East Asia (1979—1997). The shaded areas indicate significant at the 95 % confidence level

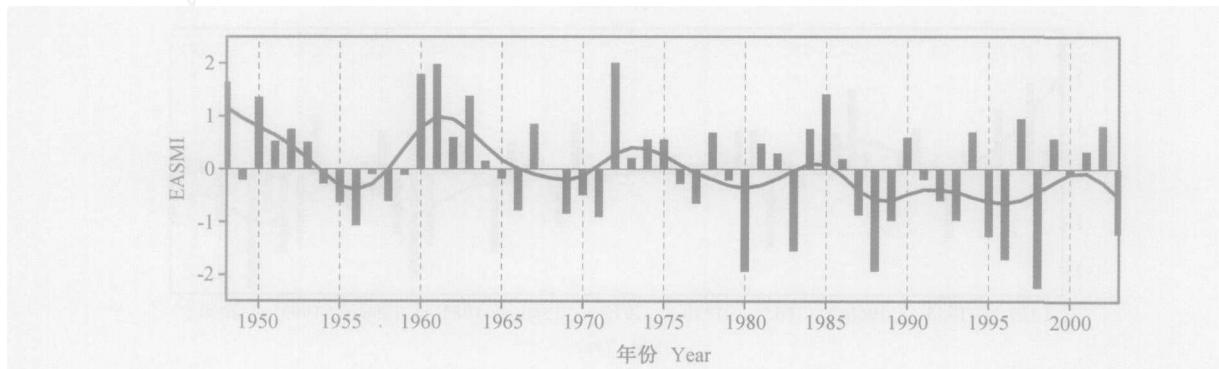


图 9 同图 7, 但为东亚夏季风指数 EASMI

Fig. 9 Same as in Fig. 7, but for the EASMI

几乎整个太平洋异常减少 (增加), 在整个印度洋和北美-大西洋地区异常增加 (减少)。

南海夏季风指数 SCSSMI 的时间序列 (图 13) 表明, 在 1955 年前南海夏季风强度明显较强, 之后一直到 1970 年代表现基本正常, 但进入 1980 年代至今, 南海夏季风指数处于一个负位相阶段, 特别是最近 10 年其强度达到近 50 年来的最弱期。

5.4 非洲夏季风

非洲夏季风与其他季风系统存在的一个明显不同的地方是它由显著的年代际时间尺度变化所控制 (图 14)。在 1967 年左右非洲夏季风强度发生了一次强的年代际突变, 在此之前, 非洲夏季

风指数处于强的正位相时期, 之后, 则持续了长达近 40 年的弱夏季风阶段。这次年代际突变可能对非洲撒哈拉地区自 1960 年代末期至今发生的持续干旱有关键性的作用。计算表明, 非洲夏季风指数 WASMI 与撒哈拉地区夏季平均降水之间存在很高的正相关, 1958~1998 年间两者的相关系数高达 0.76 (图略)。从非洲夏季风指数 ASMI 与非洲夏季降水场的相关分析可知 (图 15), 显著的正相关区位于 10~20°N 之间的非洲从西到东的广大地区, 正好包含撒哈拉干旱地区。这说明非洲夏季风的强度变化对撒哈拉地区的夏季降水会有很大影响。根据强弱夏季风年 925 hPa 面上水汽通量的合成分析 (图略) 可知, 在非洲夏季

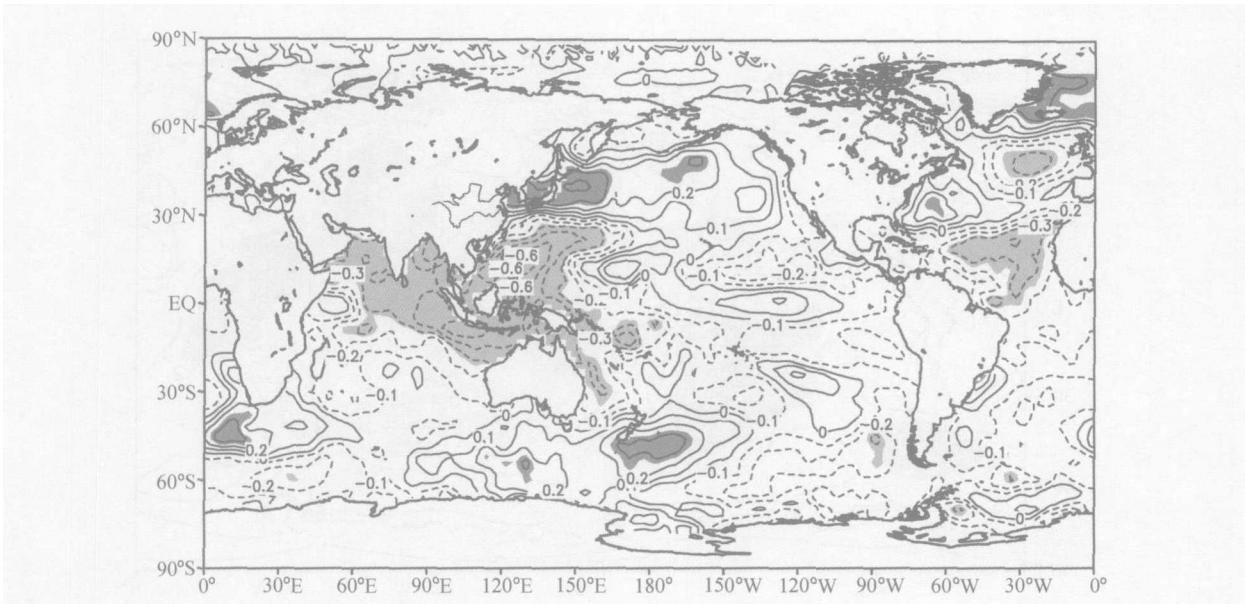


图 10 东亚夏季风指数 EASMI 与夏季全球海表温度的相关 (1948~2001 年)。阴影表示达到 95 % 置信度的区域

Fig. 10 Correlation map between the EASMI and global summer surface sea temperature (SST) (1948—2001) . The shaded areas indicate significant at the 95 % confidence level

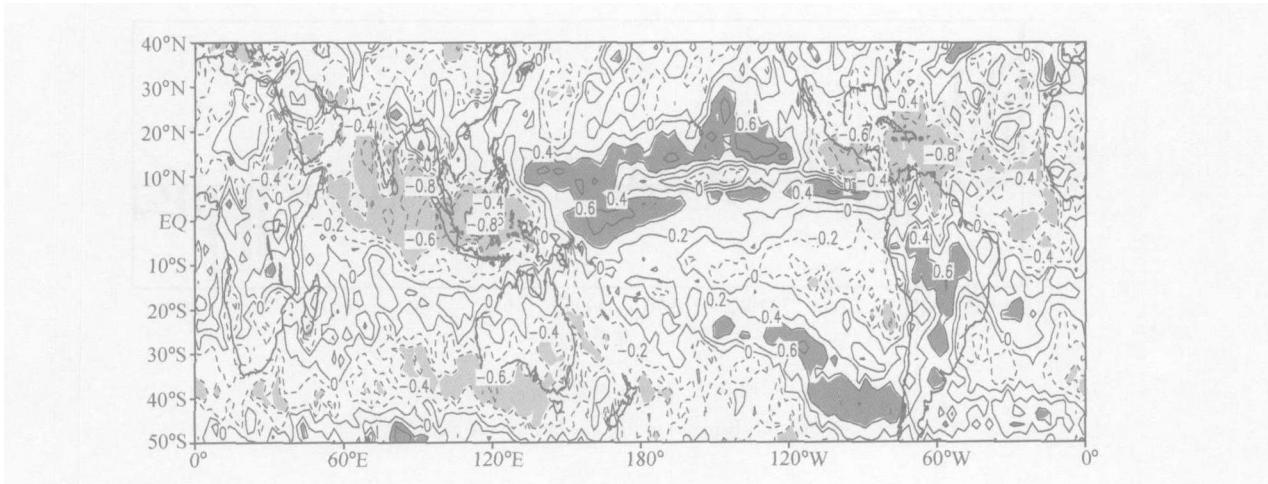


图 11 同图 10, 但为南海夏季风 (5~10 月) 指数 SCSSMI 和全球夏季降水场 (1979~1997 年)

Fig. 11 Same as in Fig. 10, but for the South China Sea summer (May—October) monsoon index (SCSSMI) and summer global precipitation (1979—1997)

风持续弱的时期 (1968~2003 年), 非洲季风区是显著的东北风异常, 从大西洋进入到撒哈拉地区的水汽通量比正常气候年份减少了大约 40 %~60 % 左右, 而在非洲夏季风持续强的时期 (1948~1966 年), 非洲季风区是显著的西南风异常, 从大西洋进入到撒哈拉地区的水汽通量增多, 大约比正常气候年份增加 40 %~80 %。这个事实表明持续弱的非洲夏季风可以

导致从大西洋到撒哈拉地区的水汽通量的持续减少, 从而, 供给该地区致雨的水汽是严重不足的。此外, 非洲夏季风指数与巴基斯坦、印度西北、阿富汗南部和伊朗东南等地区的夏季降水也有大范围的显著正相关 (图略), 说明非洲夏季风强度也与发生在这些地区的夏季持续干旱有一定关联。

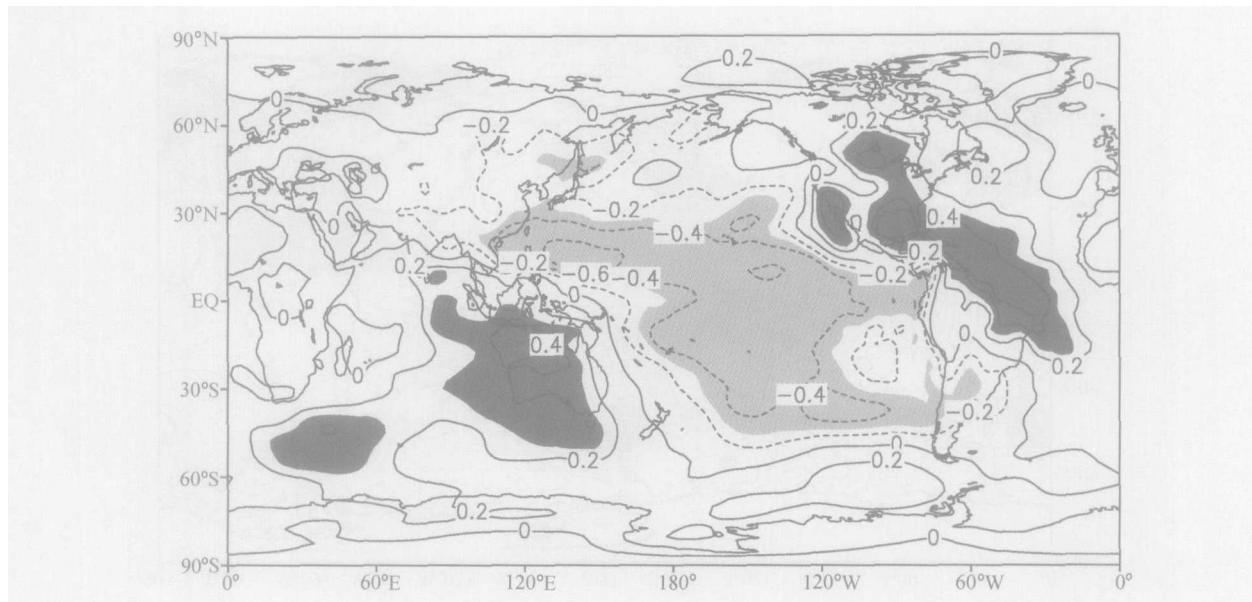


图 12 同图 11, 但为海平面气压 (1958~1997 年)。该图显示出在强的南海夏季风异常时期全球大气质量发生了大范围转移

Fig. 12 Same as in Fig. 11, but for sea level pressure (1958—1997) . The map shows that global shifts of atmospheric mass take place during strong SCSSM anomalies period

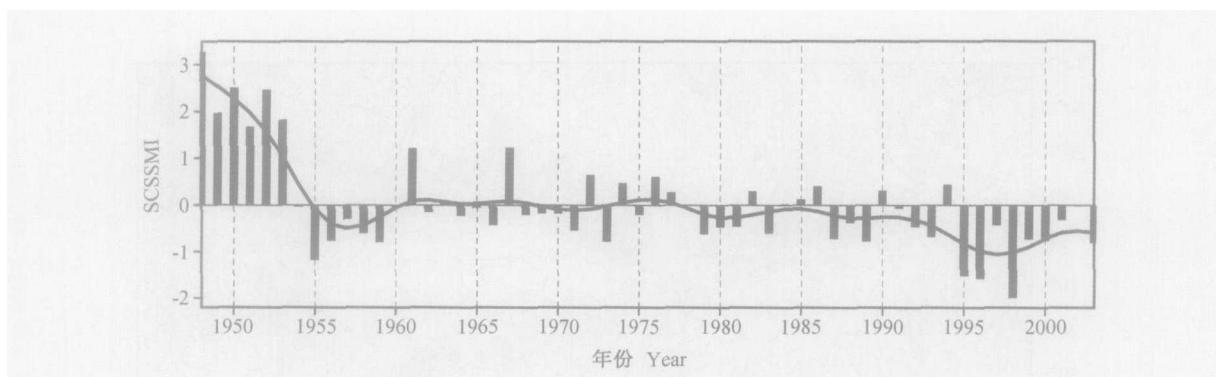


图 13 同图 7, 但为南海夏季风指数 SCSSMI

Fig. 13 Same as in Fig. 7, but for the SCSSMI

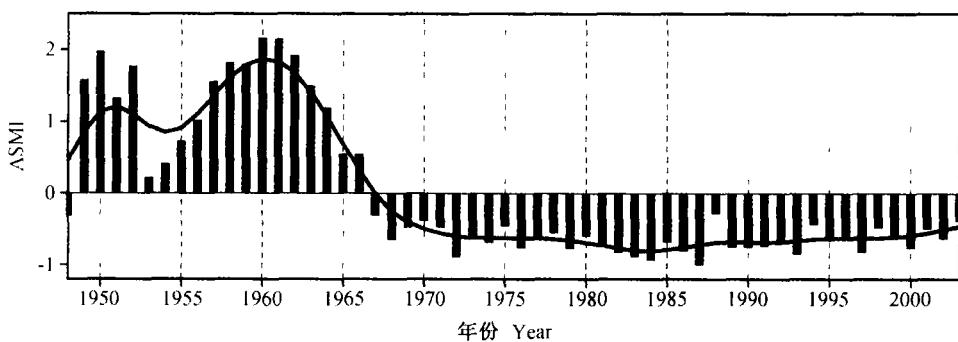


图 14 同图 7, 但为西非夏季风 (5~9 月) 指数 WASMI

Fig. 14 Same as in Fig. 7, but for the West African summer (May—September) monsoon index (WASMI)

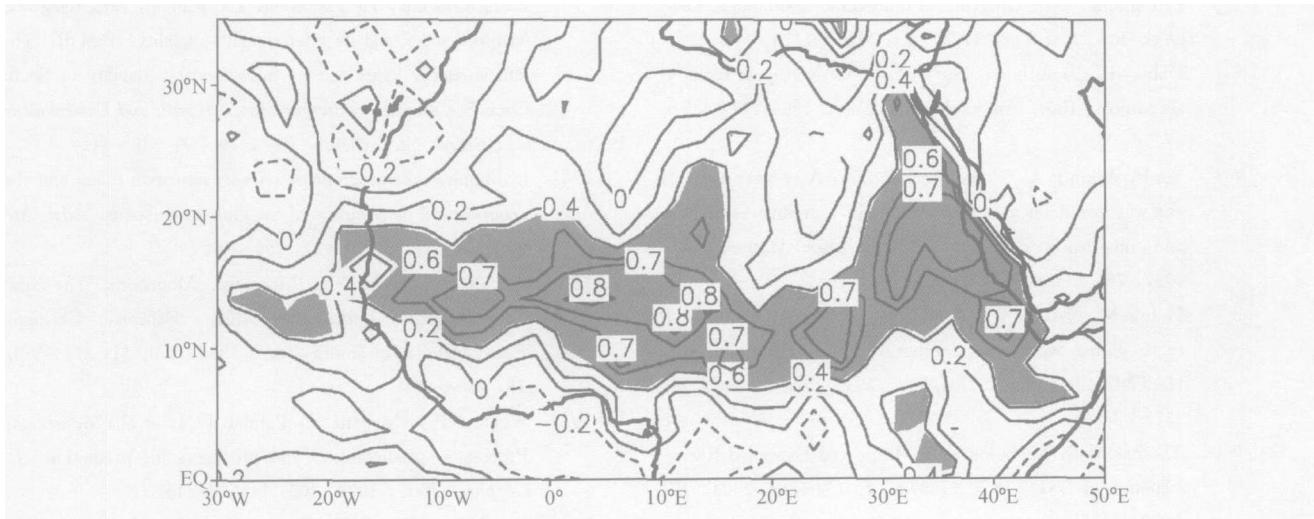


图 15 同图 11, 但为西非夏季风指数 ASMI 和非洲夏季 (5~9 月) 降水场

Fig. 15 Same as in Fig. 11, but for the WASMI and summer (May—September) Africa precipitation

6 小结与讨论

本文使用显著性环流标准化季节变率 ${}^* = -2 > 0$ 来定义季风区, 用 NCEP/NCAR 再分析 850 hPa 气候平均风场 (1969~1996 年) 进行计算, 得到的结果涵盖了迄今国内外所指出的全球所有季风区 (但比曾庆存等^[2,4]的季风区范围略小, 也许是由于算点不同和资料不同所致)。得到的热带季风区正好在冬和夏季 ITCZ 位置所夹的范围内, 也进一步从另一个角度证实了曾庆存等^[32]指出的热带季风的本质是由于太阳辐射的季节变化和南北两半球相互作用所致的现象。

仿照 * , 本文使用李建平和曾庆存^[3]建议的动态风场标准化 ${}^* = {}_m - 2$ 作为各年季风指数, 计算了各主要季风区区域平均的 * 的年际变化, 得到南亚和东亚两季风区自 20 世纪 70 年代中期起、南海季风自 80 年代起和西非季风自 1967 年起都有不同程度的长期减弱趋势, 尤以西非季风为甚。西非季风指数和南亚季风指数与当地雨量呈显著正相关, 东亚季风指数与中国和东亚雨量的空间分布有一定的统计相关结构, 而南海季风指数则与全球各海区夏季降水和海平面气压异常有较好的大范围统计相关。

应该指出, 本文只用 * 和 ${}^*_{m}$ 来研究季风及其年变。曾庆存等^[3]还建议了一些很直接和很简单明了的刻画季风本质特征及其演变的指标, 本

文结果值得与按那些指标计算的结果以及国外研究者所得结果作进一步比较研究。

致 谢 中国气象局气象信息中心资料室提供了中国 160 站月平均降水资料, 南素兰同学帮助绘制了文中图 10, 特此致谢!

参考文献

- [1] Zeng Qingcun, Zhang Banglin, Liang Youlin, et al. The Asian summer monsoon: A case study. *Proceedings of the Indian Science Academy*, 1994, **60** (1) : 81~96
- [2] 曾庆存, 张邦林. 大气环流的季节变化和季风. *大气科学*, 1998, **22** (6) : 805~813
Zeng Qingcun, Zhang Banglin. On the seasonal variation of atmospheric general circulation and the monsoon. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22** (3) : 211~220
- [3] 曾庆存, 张邦林. 论大气环流的季节划分和季节突变 I. 概念与方法. *大气科学*, 1992, **16** (6) : 641~648
Zeng Qingcun, Zhang Banglin. On the seasons of general atmospheric circulation and their abrupt changes. Part I: General concept and method. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1992, **16** (4) : 329~336
- [4] Zeng Qingcun. The global monsoon system. *Proceedings of the Second International Symposium on Asia Monsoon System (ISAM2)*, Cheju, Korea, Meteorological Research Institute (METRI) and Korea Meteorological Administration (KMA), 2000, 23~27
- [5] Li Jianping, Zeng Qingcun. A unified monsoon index. *Geo-*

- phys. Res. Lett.*, 2003, **29** (8): 1151~1154
- [6] Kalnay E, Co-authors. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [7] Xie P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2539~2558
- [8] Hulme M, Osborn T J, Johns T C. Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 3379~3382
- [9] Thomas M S, Reynolds R W. Improved Extended Reconstruction of SST (1854—1997). *J. Climate*, 2004, **17**: 2466~2477
- [10] Parthasarathy B, Munot A A, Kothawale D R. All Indian monthly and seasonal rainfall series: 1871—1993. *Theor. Appl. Climatol.*, 1994, **49**: 217~224
- [11] 李建平, 曾庆存. 风场标准化季节变率的显著性及其表征季风的合理性. *中国科学 (D辑)*, 2000, **30** (3): 331~336
Li Jianping, Zeng Qingcun. Significance of the normalized seasonality of wind field and its rationality for characterizing the monsoon. *Science in China (Ser. D)*, 2000, **43** (6): 646~653
- [12] 曾庆存, 李崇银, 黄荣辉, 等. 大气环流季节和低频变化的动力学问题. *自然科学进展*, 1994, **4** (5): 532~542
Zeng Qingcun, Li Chongyin, Huang Ronghui, et al. On dynamical issues of seasonal and low frequency variations of atmospheric general circulation. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 1994, **4** (5): 532~542
- [13] Xue Feng, Zeng Qingcun. Diagnostic study on seasonal variation and interannual variability of wind field. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16**: 537~543
- [14] 张邦林, 曾庆存. 论大气环流的季节划分和季节突变 II. 个别年份的分析. *大气科学*, 1998, **22** (2): 130~136
Zeng Qingcun, Zhang Banglin. On the seasons of general atmospheric circulation and their abrupt changes. Part II: Case study of particular year. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, **22** (2): 103~111
- [15] 薛峰, 林一骅, 曾庆存. 论大气环流的季节划分与季节突变 III. 气候平均情况. *大气科学*, 2002, **26** (3): 307~314
Xue Feng, Lin Yihua, Zeng Qingcun. On the seasons of general atmospheric circulation and their abrupt changes. Part III: Climatology. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2002, **26** (3): 307~314
- [16] 张东凌, 何倦雄, 左瑞亭, 曾庆存. 季风指数及其年际变化 II. 南海夏季风分量动能强度指数及其年际变化. *气候与环境研究*, 2005, **10** (3): 333~341
Zhang Dongling, He Juanxiong, Zuo Ruiting, Zeng Qingcun. Monsoon index and its inter-annual variability. Part II: The kinetic energy index and its inter-annual variability in South China Sea summer monsoon region. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2005, **10** (3): 333~341
- [17] Li Jianping, Zeng Qingcun. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (2): 299~302
- [18] The New Encyclopædia Britannica. Monsoons. *The New Encyclopædia Britannica*, 15th Edition, Chicago: Encyclopædia Britannica, Inc., 1988, Vol. 11, 271, Vol. 16, 460~464
- [19] Webster P J, Magaña V, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability and prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14451~14510
- [20] Lau K M, Ding Y H, Wang J T, et al. A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**: 1261~1270
- [21] Ramage C S. *Monsoon Meteorology*. New York and London: Academic Press, 1971. 296 pp
- [22] Khromov S P. *Great Soviet Encyclopedia (A Translation of the Third Edition)*, Vol. 17. New York: Macmillan, 1978, 129
- [23] World Climate Research Programme (WCRP). CLIVAR Initial Implementation Plan. WCRP-103, WMO/ TD 869, ICPO 14, Geneva, Switzerland, 1998, 314 pp
- [24] 南海季风试验项目办公室. 南海季风试验科学计划 (SCSMEX). 北京: 南海季风试验项目办公室印发, 1995, 42 pp
SCSMEX Project Office. Scientific Plan of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). Published by SCSMEX Project Office, Beijing, 1995, 42 pp
- [25] 丁一汇, 李崇银, 何金海, 陈隆勋, 等. 南海季风试验与东亚夏季风. *气象学报*, 2004, **26** (5): 561~586
Ding Yihui, Li Chongyin, He Jinhai, Chen Longxun, et al. South China Sea monsoon experiment (SCSMEX) and the East-Asian monsoon. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2004, **26** (5): 561~586
- [26] Murakami T, Matsumoto J. Summer monsoon over the Asian continent and western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1994, **72**: 719~745
- [27] Wu R, Wang B. Interannual variability of summer monsoon onset over the Western North Pacific and the underlying processes. *J. Climate*, 2000, **13**: 2483~2501
- [28] Wang B, Wu R, Lau K M. Interannual variability of Asian summer monsoon: Contrast between the Indian and western North Pacific-East Asian monsoons. *J. Climate*, 2001, **14**: 4073~4090
- [29] Krishnamurti T N. Monsoons. *Encyclopedia of Climate and Weather*, Vol. 2. Schneider S H, Ed. New York, Oxford University Press, 1996, 1133~1144

- ford: Oxford University Press, 1996. 512~515
- [30] Zhou J Y, Lau K M. Does a monsoon climate exist over South America? *J. Climate*, 1998, **11**: 1020~1040
- [31] Lau K M. ENSO-Monsoon interactions. *Encyclopedia of Atmosphere Sciences*, Vol. 3, Holton J H, Ed., Elsevier Science Ltd., London: Academic Press, 2003, 1386~1391
- [32] 曾庆存, 李建平. 南北两半球大气的相互作用和季风的本质. *大气科学*, 2002, **26** (4): 433~448
- Zeng Qingcun, Li Jianping. On the Interaction between Northern and Southern Hemispheric Atmospheres and the Essence of Tropical Monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2002, **26** (3): 207~226
- [33] 高由禧, 徐淑英. 东亚季风的若干问题. 北京: 科学出版社, 1962, 106 pp
- Gao Youxi, Xu Shuying. *Some Issues of East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1962. 106 pp
- [34] Zhu Qiangen, He Jinhai, Wang Panxing. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction. *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **4**: 466~477
- Tao Shiyian, Chen Longxun. A review of recent research on the East Asia summer monsoon in China. In: *Monsoon Meteorology*, Chang C P, Krishnamurti T N, Eds. Oxford University Press, 1987. 60~92
- [36] Douglas M W, Maddox R A, Howard K. The Mexican monsoon. *J. Climate*, 1993, **6**: 1665~1677
- Higgins R W, Shi W. Dominant factors responsible for interannual variability of the summer monsoon in the Southwestern United States. *J. Climate*, 2000, **13**: 759~776
- [38] Pedelaborde P. *The Monsoons* (Tr. by M. J. Clegg). London: Methuen, 1963. 196 pp
- [39] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979, 278 pp
- Ye Duzheng, Gao Youxi. *Tibetan Plateau Meteorology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 278 pp
- [40] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. *地理学报*, 1934, **1** (1): 1~27
- Zhu Kezhen (Chu C C). Southeast monsoon and rainfall in China. *J. Geographical Society of China* (in Chinese), 1934, **1** (1): 1~27
- [41] Webster P J, Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**: 877~926
- [42] Goswami B N, Krishnamurthy V, Annamalai H. A broad scale circulation index for the interannual variability of the Indian summer monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, **125**: 611~633
- [43] Shukla J, Paolino D A. The Southern Oscillation and longrange forecasting of the summer monsoon rainfall over India. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**: 1830~1837
- [44] Wang Bin, Fan Zhen. Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, **80**: 629~638
- [45] Ding Yihui. *Monsoons over China*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer academic Publisher, 1994. 419pp
- [46] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 何金海, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362 pp
- Chen Longxun, Zhu Qiangen, Luo Huibang, He Jinhai, et al. *East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362 pp
- [47] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **65**: 373~390
- [48] Huang Ronghui, 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, 10~15 April, 1987, 40~51
- Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**: 243~256
- [50] 涂长望, 黄仕松. 中国夏季风之进退. *气象杂志*, 1944, **18**: 1~20
- Tu Changwang, Huang Shisong. The advance and retreat of the summer monsoon in China. *Meteorological Magazine* (in Chinese), 1944, **18**: 1~20
- [51] 陶诗言, 朱文妹, 赵卫. 论梅雨的年际变异. *大气科学* (特刊), 1988, 13~21
- Tao Shiyian, Zhu Wenmei, Zhao Wei. Interannual variability of Meiyu rainfall. *Scientia Atmospherica Sinica* (Special issue) (in Chinese), 1988, 13~21
- [52] 黄荣辉, 黄刚, 任保华. 东亚夏季风的研究进展及其需进一步研究的问题. *大气科学*, 1999, **23**: 129~141
- Huang Ronghui, Huang Gang, Ren Baohua. Advances and problems need for further investigation in the studies of the East Asian summer monsoon. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 1999, **23**: 129~141
- [53] Ding Yihui. Seasonal march of the East-Asian summer monsoon. In: *East Asian Monsoon*, Chang C P, Ed., Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004. 3~53