

李昀英, 寇雄伟, 孙国荣. 2019. 对比云和降水表征的东亚夏季风活动 [J]. 大气科学, 43 (2): 339–349. Li Yunying, Kou Xiongwei, Sun Guorong. 2019. Comparison of the East Asian summer monsoon activities represented by clouds and precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 339–349, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17285.

对比云和降水表征的东亚夏季风活动

李昀英¹ 寇雄伟² 孙国荣¹

¹ 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101

² 94595 部队气象台, 山东高密 261500

摘 要 利用 1998~2007 年候平均 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) D1 云资料和台站融合降水资料, 定义了两类云指数和降水指数, 分别反映东亚夏季风活动期间不同云类云量和降水量位置及强度的变化。用云指数和降水指数研究了东亚夏季风在中国大陆的推进过程, 发现两类指数均能表现东亚夏季风的停滞与北跳特征且具有时空上的一致性。基于云指数变化定义了中国东部华南、华东和华北三个区域季风活跃期、过渡期和中断期, 检验了季风活跃期和中断期云指数的差异、500 hPa 环流场和水汽场的差异, 验证了用云表征季风活动的合理性。对比了用云指数和降水指数定义的季风活动期, 发现两个指数定义的季风活跃期和中断期日数虽有差异但基本一致, 二者的区别在于降水指数偏重于对降水特征差异的描述, 云指数则更偏重于对不同类型云量差异的描述, 二者的差异还反映了降水性质的差异。

关键词 云指数 降水指数 东亚夏季风 活跃期 中断期

文章编号 1006-9895(2019)02-0339-11

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17285

Comparison of the East Asian Summer Monsoon Activities Represented by Clouds and Precipitation

LI Yunying¹, KOU Xiongwei², and SUN Guorong¹

¹ College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

² Meteorological Observatory of PLA 94595 Unit, Gaomi, Shandong Province 261500

Abstract Based on the pentad average ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) D1 cloud data and a merged station and satellite precipitation data from 1998 to 2007, two types of cloud index and precipitation index are defined, which respectively reflect changes in clouds and precipitation locations and precipitation intensity associated with the East Asian summer monsoon (EASM) activities. The cloud and precipitation indices are used to study the advancing process of the EASM in mainland China. It is found that both indices can well represent the quasi-stationary stage and the north jump of the EASM, and they are consistent spatially and temporally. Based on changes in the cloud indices, active, transitional and interruptive monsoon periods in three regions of South China, East China and North China are defined. Differences in the cloud indices as well as differences in the circulation and water vapor fields at 500 hPa between the active and interruptive periods are examined, and the reasonability of the cloud indices is proved. Comparison of monsoon activity periods defined by the cloud indices and precipitation index shows that the monsoon

收稿日期 2017-11-22; **网络预出版日期** 2018-06-07

作者简介 李昀英, 女, 1970 年出生, 教授, 主要从事云动力学与云气候学研究。E-mail: ghlyy@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项 2018YFC1507604, 国家自然科学基金项目 41475069

Founded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1507604), National Natural Science Foundation of China (Grant 41475069)

active (interruptive) days are basically the same. However, the difference between the cloud and precipitation indices is that the precipitation index emphasizes the change in precipitation, while the cloud indices emphasize the change in cloudiness. The difference between monsoon active (interruptive) days respectively defined by cloud and precipitation indices could also reflect differences in the feature and type of precipitation.

Keywords Cloud indices, Precipitation index, East Asian summer monsoon, Active period, Break period

1 引言

东亚季风对中国气候影响巨大。东亚夏季风的环流特征突出表现为大气中层 500 hPa 西太平洋副热带高压（简称副高）的活动，大气低层 850 hPa 风场的变化和雨带的停滞、跳跃性北进和南撤等（Zhou et al., 2009; Guo et al., 2015）。为了描述东亚夏季风的活动特征，前人分别从热力学和动力学的角度提出了许多指数来表征东亚夏季风活动，不同指数反映了季风活动期特定的物理量变化特征。降水指数（Lau et al., 2000; 江志红等, 2006）用降水多寡代表季风的强弱，风场类指数（Lu and Chan, 1999; 张庆云等, 2003）用风向的转换和风速的大小代表季风的爆发和强弱，温度场类指数（孙秀荣等, 2002）用海陆温度差异定义季风的强弱，还有气压差类指数（郭其蕴, 1983），环流场类指数（黄刚和严中伟, 1999），出射长波辐射类指数（Wang and Fan, 1999），大气热源指数（陈中钰等, 2010）等等。风场类指数直接描述季风的变化，其它指数间接反映季风的的活动，相比较而言，人们更关注季风活动引起的降水变化，因此降水指数的使用率更多一些。东亚夏季风控制区大气具有高度的不稳定性，而不同类型的云不仅可反映大气的稳定程度，且对降水的性质有指示意义，因此夏季风活动的任何“风吹草动”可能都首先在不同类型云的变化上有所体现。已有研究表明伴随季风的的活动，云的类型、云量等都有很大的变化（李积明等, 2009; Jiang et al., 2011; 汪会等, 2011; 杨大生和王普才, 2012; 彭杰等, 2013; 尹金方等, 2013），但迄今为止尚未见到用云指数表征东亚夏季风活动的研究。寇雄伟等（2015）的研究表明，季风活跃期，深对流云（DC）云量增加，高积云与积云之和（AU）的云量减少，并且降水达到极大值时，DC 云量也达到极大值，AU 云量则为极小值。该研究表明 DC 以及 AU 云量与季风活动具有较好的对应关系，可尝试用 DC 和 AU 云量定义云指数表征东亚夏季风活动。

本文的主要目的是尝试用云表征东亚夏季风

活动的进程，检验和验证用云表征东亚夏季风活跃期、过渡期和中断期的可行性和合理性，比较用云指数和降水指数表征东亚夏季风活动的差异，为理解和描述东亚夏季风活动提供一个新的视角。

2 资料和方法

2.1 资料简介

本文使用的云资料是 ISCCP（International Satellite Cloud Climatology Project）D1 全球逐 3 h（每日 8 个时次）云气候资料（Rossow and Schiffer, 1999），空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，资料年限为 1983 年 7 月至 2007 年 12 月。ISCCP 按照云顶高度和云光学厚度将云分为 9 类，高云包括卷云（Ci）、卷层云（Cs）和深对流云（DC），中云包括高积云（Ac）、高层云（As）和雨层云（Ns），低云包括积云（Cu）、层积云（Sc）和层云（St）。本文主要使用 DC、Ac 和 Cu 的云量资料。

本文使用的降水资料是国家气象信息中心发布的基于全国 2425 个国家气象台站观测的日降水量与 CMORPH（CPC MORPHing technique）卫星反演降水产品融合的逐日降水量资料（沈艳等, 2013; Shen et al., 2014），空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，空间范围为 $0^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ ， $60^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{E}$ 。考虑到不同资料时间序列的差异，分别截取了 1998~2007 年 5~9 月的云资料和降水资料以保持资料时限的一致性。考虑到融合降水资料中中国周边海域降水量的不确定性，本文将分析区域集中在中国东部的陆地区域。

季风环流场的分析使用了 JRA-25（Japanese Re-Analysis 25 years）再分析资料（Onogi et al., 2007）。该资料空间分辨率为 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ ，时间分辨率为逐 6 h，本文对其进行了候平均。

2.2 云指数和降水指数的定义

降水指数有多种定义方式（Wang and Ho, 2002; 江志红等, 2006; Sperber et al., 2013; Zou and Zhou, 2015），都可以有效地描述季风降水特征且差异不太大。由于云和降水具有地域性差异，单独用云量和降水量不能很好地突出季风活动的特征。为

消除地域差异, 本文借鉴江志红等(2006)的方法定义了云指数和降水指数。首先计算逐日云指数和降水指数, 进一步进行候平均得到云指数和降水指数的候平均值。

云指数和降水指数 $[S(t)]$ 定义为

$$S(t)=[R(t)-R_s]/\sigma_s, \quad (t=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

$$\sigma_s = [\sum_{t=1}^n (R(t)-R_s)^2 / n]^{1/2}, \quad (2)$$

其中, $R(t)$ 为第 t 日的物理量(降水量或云量), R_s 为 5~9 月日平均物理量, n 为 5~9 月的总天数。 σ_s 反映了站点 5~9 月物理量的时间变率。

用上式定义了三个指数, 分别是降水指数 S_{Rain} 、DC 云指数 S_{DC} 和 AU 云指数 S_{AU} 。由定义式可见, 云指数和降水指数的极大值区, 就是该时段该物理量集中出现的区域, 可根据云指数和降水指数大值区的移动, 表征季风活动的时空位置变化。

寇雄伟等(2015)的研究表明, 在我国东部地区 S_{Rain} 的大值区与降水的时空位置对应较好, 随着季风的北进, 雨带也逐渐向北推进, S_{Rain} 能很好地表征东亚夏季风雨带的移动特征。DC 云指数 S_{DC} 和 AU 云指数 S_{AU} 则能够反映某个区域 DC 及 AU 云量的集中变化, 且 DC 云指数和 AU 云指数呈相反变化关系, DC 云指数的大值区对应 AU 云指数的小值区。因此, 结合 S_{DC} 的正极值区和 S_{AU} 的负极值区也能够很好的表征季风带的移动, 进而用来表征季风的推进特征。我们研究发现 $S_{\text{Rain}} \geq 0.2$ 的区域较好地反映了我国东部夏季风降水增加的区域。因此, 定义 $S_{\text{Rain}} = 0.2$ 的等值线在 1 候中北跳达 3 个纬度作为一次雨带北跳标志。研究也发现 $S_{\text{DC}} \geq 0.2$ 的区域反映了伴随夏季风活动的增强, DC 云量集中增加区域, $S_{\text{AU}} \leq -0.1$ 的区域则反映了伴随夏季风活动的增强 AU 云量的集中减少区域。因此, 同样定义 $S_{\text{DC}} = 0.2$ 和 $S_{\text{AU}} = -0.1$ 的等值线在 1 候中同时北跳达 3 个纬度作为一次云带北跳的标志。

3 云指数和降水指数表征的东亚夏季风进程

1998~2007 年平均 5~9 月典型候期的降水指数和云指数的分布见图 1。5 月初, S_{Rain} 与 S_{DC} 大值区及 S_{AU} 的小值区均位于 $25^\circ \sim 28^\circ \text{N}$ 的华南地区(图 1a)。陈隆勋等(2000)指出, 这一时期的降水是由冷空气和副高转向的西南风和冬春西风槽西风汇合而形成的, 并非季风降水。降水在中国大陆东南部出现以后便向南传播, 直至南海夏季风爆

发后在华南沿海与季风雨带汇合。此时华南沿海降水量增加, 可达 $10 \sim 12 \text{ mm d}^{-1}$, 季风雨带出现第一个停滞维持期。同时 DC 云量也相应增加(图 1b), AU 云量相应减少(图 1c), 中国东部气候开始受东亚夏季风的影响。

随着夏季风进一步向北推进, 副高开始控制中国南方陆地, 副高脊线位于 18°N 以南。整个华南地区的降水量都开始增加并在 6 月上旬达 $18 \sim 20 \text{ mm d}^{-1}$ 。通常把这段时间之前的降水称为华南前汛期。对比这一时期 DC 以及 AU 云量的变化, 发现 S_{DC} 、 S_{AU} 和 S_{Rain} 具有同步的变化特征, 在同一时段降水集中出现的区域, DC (AU) 云量相应地增加(减少)。

6 月中旬, 副高脊线北跳至 20°N 以北, 并稳定在 $20^\circ \sim 25^\circ \text{N}$ 之间, 季风雨带已经北推至 27°N 。6 月第 5 候, 雨带出现了第一次北跳(图 1d), 从 27°N 附近北跳至 30°N 的长江中下游地区, 雨带也进入了第二个停滞维持阶段, 即江淮梅雨期。此时华南地区的降水量显著减少, 而长江中下游降水量增加到 $14 \sim 16 \text{ mm d}^{-1}$ 。研究表明, 梅雨带通常在 30°N 的华东地区, 呈准纬向分布, 图中 S_{Rain} 分析的雨带符合这一分布特征, 对应的 DC 云量的大值带(图 1e)和 AU 云量的小值带(图 1f)也呈现类似的分布特征。

7 月第 2 候, 副高脊线再次北跳, 越过 25°N , 稳定在 30°N 以南, 雨带的大值区已由 30°N 推进至 34°N 的淮河流域(图 1g), 实现了雨带的第二次北跳。江志红等(2006)把这段时期雨带的移动称为一次突变, 并且分别把突变前后两个阶段的雨季称为江南梅雨和淮河梅雨。考虑到其同属于北亚热带气候区(丁一汇等, 2013), 并且历史上淮河流域梅雨与长江流域梅雨分离的年份并不多见, 因此把突变前后这段时间统称为江淮梅雨, 认为其同属于雨带的一个停滞维持阶段。DC 大值带(图 1h)的位置与降水带具有较好的对应关系, AU 小值带(图 1i)的中心位置更偏东一些。

7 月第 4 候, 副高脊线越过 30°N , 雨带的东端已延伸至华北地区, 实现了第三次北跳(图 1j)。在此期间, 整个华北地区的降水量都有不同程度的增大, 可达 6 mm d^{-1} , 而此时长江以南地区降水量显著减少。 S_{Rain} 和 S_{DC} 、 S_{AU} 的突变几乎是同时发生的, 并且 38°N 左右华北降水增加的区域, DC 云量显著增加(图 1k), AU 云量显著减少(图 1l), 表

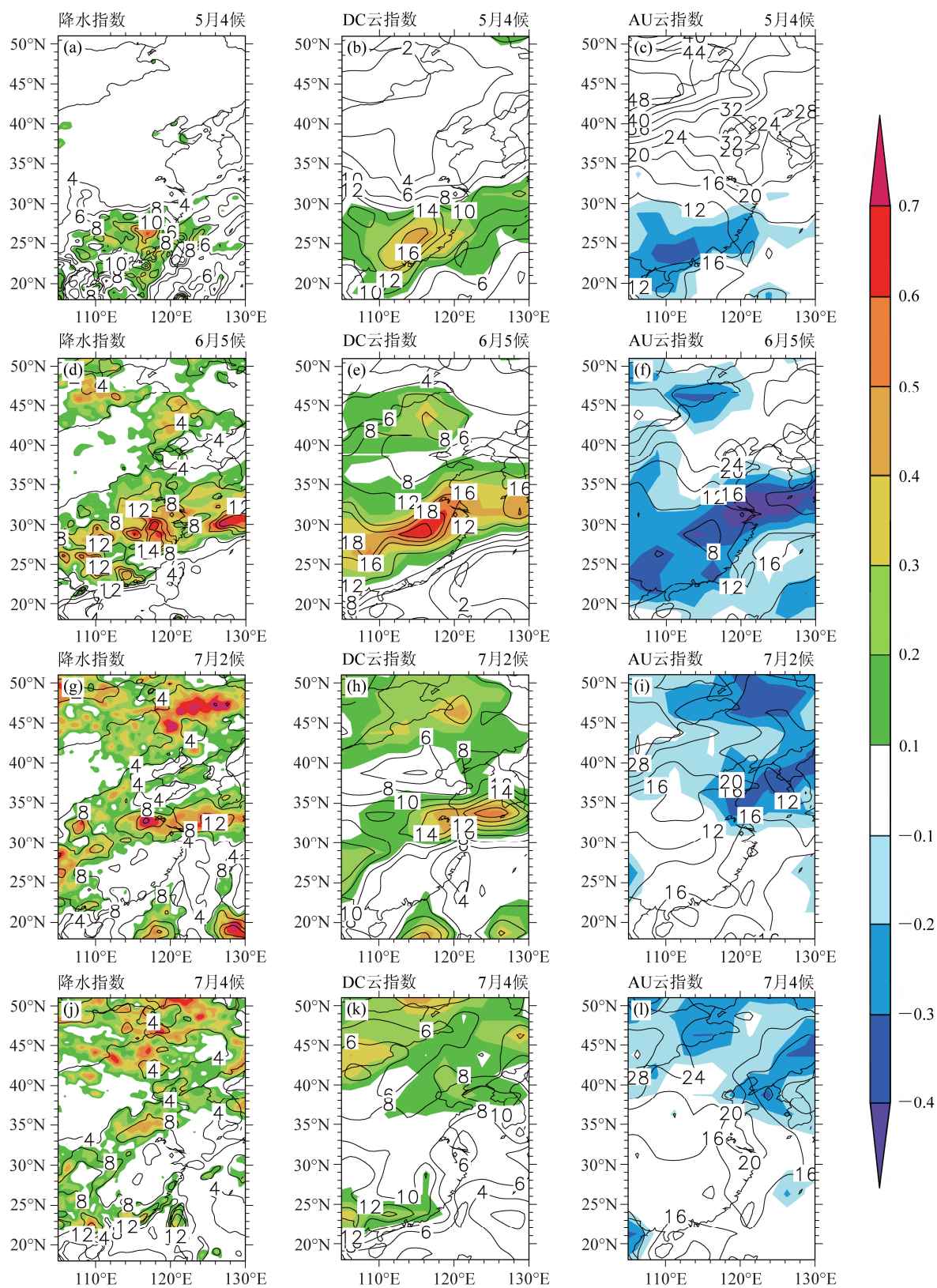


图1 典型候平均降水量(等值线, 单位: mm d^{-1})及降水指数 S_{Rain} (阴影)、DC云量(等值线, 单位: %)及其指数 S_{DC} (阴影)、AU云量(等值线, 单位: %)及其指数 S_{AU} (阴影)的气候分布

Fig. 1 Spatial distributions of typical pentadal average precipitation (contours, units: mm d^{-1}) and precipitation index S_{Rain} (shaded), DC cloud amount (contours, units: %) and DC cloud index (shaded), AU cloud amount (contours, units: %) and AU cloud index (shaded)

明云指数和降水指数表征的季风推进特征具有一致性。

7月下旬和8月上旬雨带一直维持在全年最北位置,此时北方的DC(AU)云量处于集中增加(减少)的时段。8月中旬开始,全国雨量普遍减少,雨带北界也逐渐向南回撤。8月底,雨带最北端已经回落至黄河流域,此时云带也相应地到达了这一区域。9月第1候,降水带已回撤至华南地区,北方雨季结束,DC云量在整个北方都有所减少,AU云量则有所增加,9月第3候季风迅速退出中国大陆(图略)。

从以上分析可见, S_{Rain} 为0.2的等值线能较好的反映中国东部夏季风活动的推进过程,与之相对应的是 S_{DC} 为0.2的等值线和 S_{AU} 为-0.1的等值线也能表征DC云带随雨带的推进和AU云带随雨带的变化,进而用来描述季风活动。以上的研究表明降水指数和云指数均能表现出季风的推进和北跳特征,且基本具有时空变化上的一致性。

4 云指数和降水指数表征的东亚夏季风活动期

前面的研究表明云指数和降水指数表征季风推进的过程具有基本的一致性,下面将分别从云指数和降水指数的角度进一步定义季风活动的活跃期、过渡期和中断期,并比较两种指数定义季风活动的异同。

4.1 各区域受东亚夏季风影响时段的判定

东亚夏季风在中国东部有明显的推进和北跳特征,各区域夏季风影响时段显然是不同的,这与印度季风有很大不同。由于东亚夏季风在华南地区(A区)、江淮地区(B区)和华北地区(C区)分别有三次阶段性静止,并给这三个区域带来明显的降水过程,因此在定义东亚夏季风活跃期、过渡期和中断期时,本文将中国东部陆地划分为三个区域(图2),这三个区域降水的分布、降水量的大小都有显著差异。A区为华南地区($21^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$),B区为江淮地区($28^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$),这与Luo et al. (2013)的区域划分一致,C区为华北地区($34^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$)。由于降水资料和云资料分辨率的差异,三个区域包含资料(降水量,云量)的格点数分别为A区(1344, 18),B区(1152, 18),C区(1344, 18)。

结合降水指数和两类云指数对逐年季风推进

时间及所处位置进行分析。当某个子区域在某候开始出现 $S_{\text{Rain}}\geq 0.2$ 、 $S_{\text{DC}}\geq 0.2$ 和 $S_{\text{AU}}\leq -0.1$ 的等值线,则认为该子区域开始受季风影响,当该等值线消失并在之后一直未出现时,认为该子区域季风影响结束。定义各子区域季风影响时段是为了剔除非季风降水的影响。图3为本文确定的A区、B区、C区逐年的季风影响时段,其平均影响时间分别为23.1候、16.6候、13.2候。

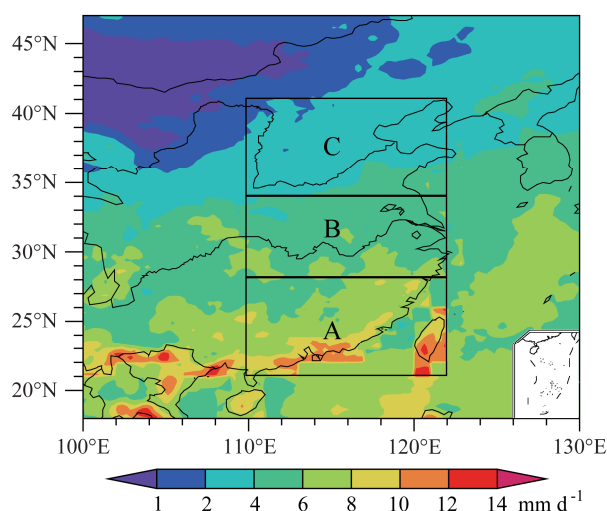


图2 1998~2007年中国大陆东部5~9月平均降水量(阴影,单位: mm d^{-1})及区域划分(A 华南地区、B 江淮地区、C 华北地区)

Fig. 2 May to September average precipitation (shaded, units: mm d^{-1}) in eastern China from 1998 to 2007. Box A denotes the region of South China, box B denotes the region of Jianghuai, box C denotes the region of North China

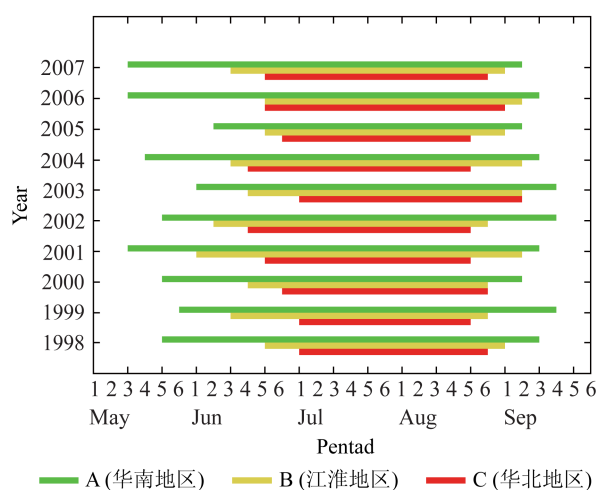


图3 1998~2007逐年A区、B区和C区季风影响时段(横坐标为候,纵坐标为年)

Fig. 3 Annual monsoon influencing periods from 1998 to 2007 in regions A, B and C (horizontal coordinate is pentad, vertical coordinate is year)

4.2 季风活动期的定义

在季风影响时段内,当季风处于活跃期时,积云对流增强,季风降水量增加,DC云量随之增加,AU云量相应减少。当季风处于中断期时,积云对流减弱,相应地降水量及云量表现出相反的变化特征。结合季风影响时各物理量的强度及范围的变化,本文分别用降水指数和云指数定义了季风活跃期、过渡期和中断期。

降水指数 S_{Rain} 表征季风活跃期和中断期时,用 A_{Rain}^+ 、 A_{Rain}^- 分别表示 $S_{\text{Rain}} > 0$ 和 $S_{\text{Rain}} < 0$ 的格点占所在区域格点总数的比例。活跃期、过渡期和中断期的定义见表 1。

表 1 降水指数表征季风活跃期、过渡期和中断期的定义
Table 1 Definition of active, transitional and interruptive phases of the monsoon represented by the precipitation index

季风活动不同阶段满足的条件 (A_{Rain} 、 S_{Rain})	
活跃期	$A_{\text{Rain}}^+ \geq 0.5$, $S_{\text{Rain}} \geq 0.1$ 或 $A_{\text{Rain}}^+ \geq 0.4$, $S_{\text{Rain}} \geq 0.2$
中断期	$A_{\text{Rain}}^- \geq 0.5$, $S_{\text{Rain}} \leq -0.1$ 或 $A_{\text{Rain}}^- \geq 0.4$, $S_{\text{Rain}} \leq -0.2$
过渡期	其它不满足条件的候

云指数 S_{DC} 、 S_{AU} 表征季风活跃期和中断期时,用 A_{DC}^+ 和 A_{DC}^- 分别表示 $S_{\text{DC}} > 0$ 和 $S_{\text{DC}} < 0$ 的格点占所在区域格点总数的比例,用 A_{AU}^+ 和 A_{AU}^- 分别表示 $S_{\text{AU}} > 0$ 和 $S_{\text{AU}} < 0$ 的格点占所在区域的格点总数的比例。令 $A_{\text{Cloud}}^+ = A_{\text{DC}}^+ + A_{\text{AU}}^+$, A_{Cloud}^+ 表示与季风降水呈正相关变化的格点数占总格点数的比例;令 $A_{\text{Cloud}}^- = A_{\text{DC}}^- + A_{\text{AU}}^-$, A_{Cloud}^- 表示与季风降水呈负相关变化的格点数占总格点数的比例。活跃期、过渡期和中断期的定义见表 2。

表 2 云指数表征季风活跃期、过渡期和中断期的定义
Table 2 Definition of active, transitional and interruptive phases of the monsoon represented by the cloud indices

季风活动不同阶段满足的条件 (A_{Cloud} 、 S_{DC} 、 S_{AU})	
活跃期	$A_{\text{Cloud}}^+ \geq 1.2$, $S_{\text{DC}} \geq 0.01$, $S_{\text{AU}} \leq -0.01$ 或 $A_{\text{Cloud}}^+ \geq 1.0$, $S_{\text{DC}} \geq 0.05$, $S_{\text{AU}} \leq -0.05$
中断期	$A_{\text{Cloud}}^- \geq 1.2$, $S_{\text{DC}} \leq -0.01$, $S_{\text{AU}} \geq 0.01$ 或 $A_{\text{Cloud}}^- \geq 1.0$, $S_{\text{DC}} \leq -0.05$, $S_{\text{AU}} \geq 0.05$
过渡期	其它不满足条件的候

4.3 云指数和降水指数表征东亚夏季风活动期合理性的检验

对云指数和降水指数分别定义的逐年季风活跃期、过渡期和中断期的物理量各自进行合成分析。季风活跃期、过渡期和中断期降水量和降水量

指数、云量和云指数的空间分布,以 A 区为例见图 4。图 4 表明活跃期降水的大值中心与 S_{Rain} 的正极值中心对应,中断期降水的小值区与 S_{Rain} 的负极值中心对应(图 4a-c),云量和云指数的对应关系也非常好(图 4d-i)。云指数和降水指数表征的季风活动均能表现出季风活跃期、过渡期和中断期各物理量的变化,即降水指数、DC 云指数均表现为活跃期 > 过渡期 > 中断期,而 AU 云指数正好相反。研究发现当某一子区域季风处于中断期时,其它子区域的降水指数可能会较大,这也反映出季风在三个区域并没有一致的变化特征,应分区域进行研究。

为了进一步验证用云表征季风活动期的合理性,利用 JRA 环流资料分析了用云指数定义的季风活跃期、中断期 500 hPa 环流场和比湿场的分布特征。图 5 为各子区域季风活跃期、中断期 500 hPa 平均风场和比湿场减去整个季风活动阶段平均风场和比湿场的距平分布图。图 5 表明 A 区在季风活跃期受气旋式环流距平控制,风向为西南风,并且与比湿场正的距平中心配置较好(图 5a);在季风中中断期主要受反气旋式环流距平控制,风向为东北风,对应的是比湿场负的距平中心(图 5b)。B 区在季风活跃期处于南北风辐合区,风向以偏南风距平为主,配合水汽的正距平中心,DC 云量较多(图 5c);在季风中中断期,受 NE 风距平控制,南来的水汽输送被阻断使得季风活动受到抑制(图 5d)。C 区在季风活跃期为较强的西南风距平,大量的水汽被输送到北方形成水汽汇区(图 5e);在季风中中断期,受强的东北风距平控制,处于水汽负距平区(图 5f),DC 云量较少。季风活跃期和中断期环流场及水汽场的巨大差异,验证了用云指数表征季风不同活动期的合理性。

4.4 云指数和降水指数表征季风活动期的异同

对 1998~2007 年三个区域季风影响时段内季风活跃期、过渡期和中断期的降水量、DC 和 AU 云量进行了合成统计,如表 3 所示。从区域差异来看,降水量均表现为 A 区 > B 区 > C 区,表明降水量在我国由南向北呈阶梯型分布。DC 云量则表现为 A 区 ≈ B 区 > C 区, AU 云量表现为 A 区 ≈ B 区 < C 区,表明夏季风活动的对流降水特征在 A 区比 B 区显著。比较两种指数定义的季风活动不同阶段的降水量,在 A、B、C 区均可发现用降水指数定义的季风活跃期和中断期降水量的差异比云指数

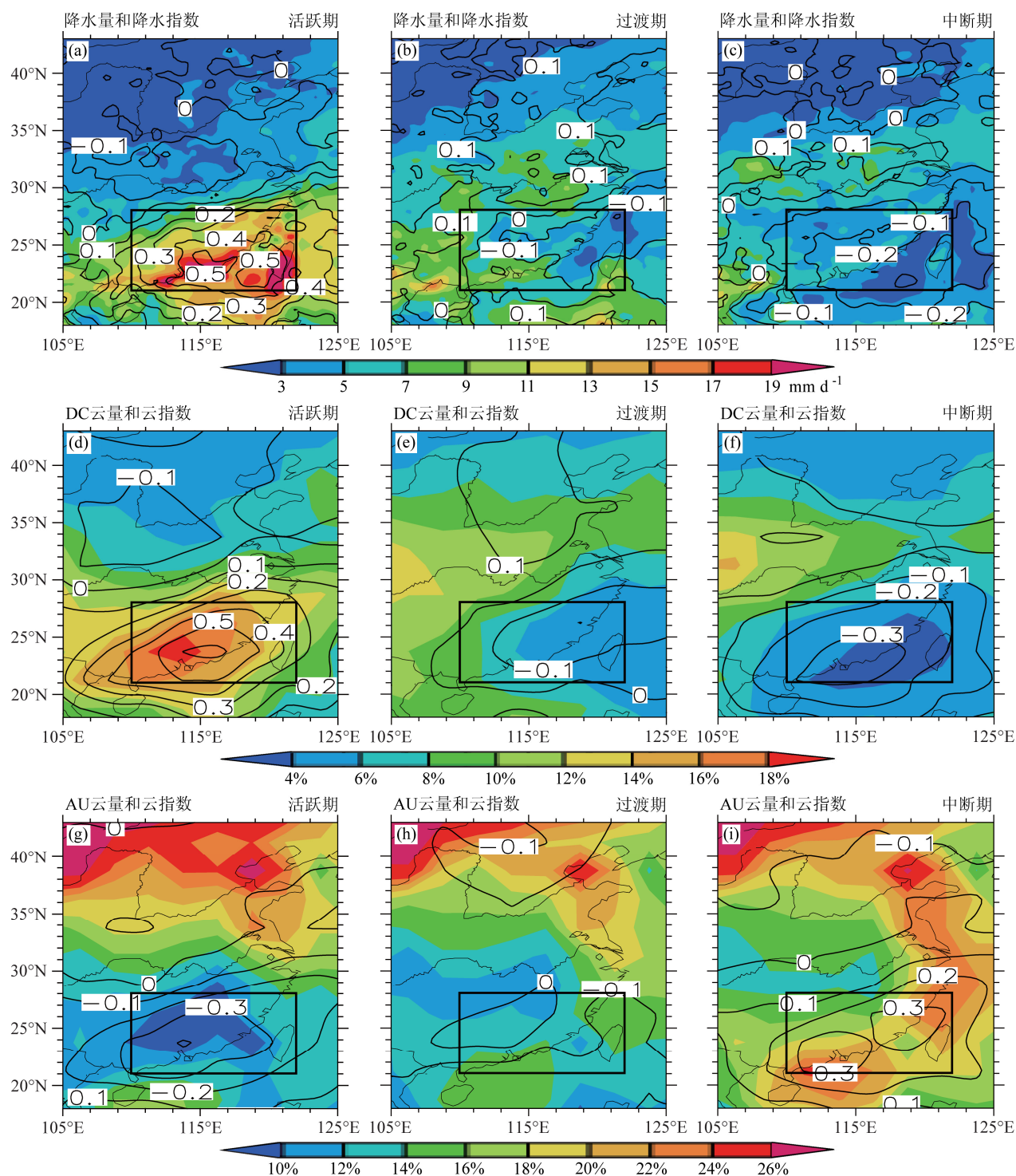


图4 A区季风活跃期、过渡期和中断期降水量(阴影, 单位: mm d^{-1})和降水指数(等值线)、云量(阴影, 单位: %)和云指数(等值线)的分布

Fig. 4 Spatial distributions of precipitation amounts (shaded, units: mm d^{-1}) and precipitation indices (contours), cloud amounts (shaded, unit: %) and cloud indices (contours) in active, transitional, and interruptive periods in region A

定义的活跃期和中断期降水量的差异更显著。同样的, 比较两种指数定义的季风活动不同阶段 DC、AU 云量, 在三个区域均可发现用云指数定义的季风活跃期、中断期云量的差异比降水指数定义季风

活跃期、中断期云量的差异更显著。这也反映出用降水指数和云指数表征季风活动的侧重点不同, 前者反映降水量的变化特征, 后者则主要反映云量的变化特征。

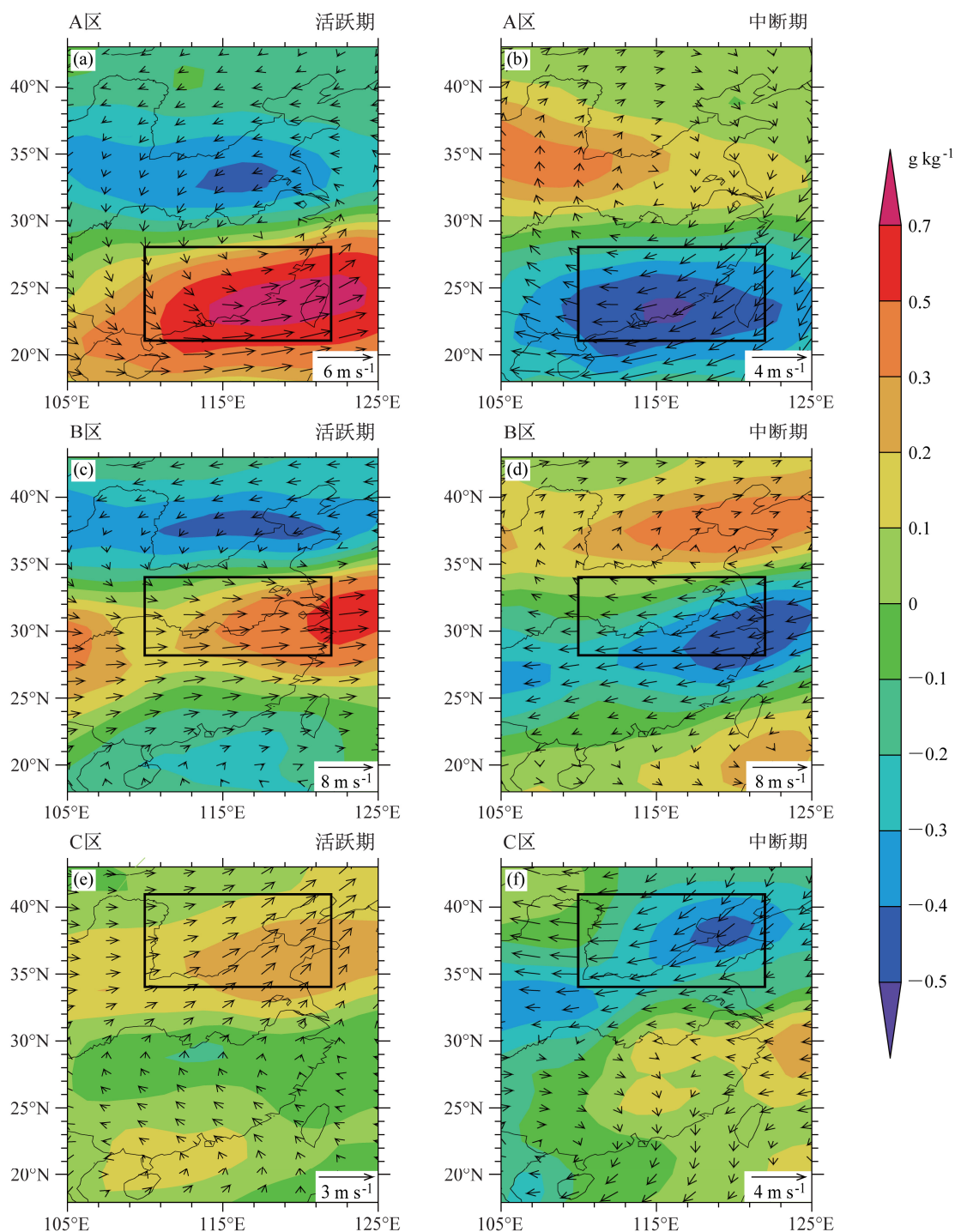


图 5 各子区域活跃期和中断期 500 hPa 平均风场 (矢量线, 单位: m s^{-1}) 和比湿场 (阴影, 单位: g kg^{-1}) 的距平分布

Fig. 5 Anomalous distributions of averaged wind fields (arrows, units: m s^{-1}) and specific humidity fields (shaded, units: g kg^{-1}) at 500 hPa in active and interruptive periods in three sub-regions

云指数和降水指数确定的 A 区、B 区和 C 区逐年季风活跃期、过渡期和中断期的分布如图 6 所示。图中每个方格都对应着某一年某一子区域的某一候。方格又分为下三角区和上三角区, 分别表示降水指数和云指数定义的季风活跃期 (黄色)、过渡

期 (绿色) 和中断期 (红色), 上、下三角颜色相同表示两种指数定义的季风活动一致。

云指数定义的季风活跃期、过渡期和中断期分别占整个季风影响时段的 37.2%、32.7%、30.1%, 降水指数定义的则分别占 37.8%、29.5%、32.7%,

说明两种指数定义的季风活动不同阶段持续时间较为一致。两种指数定义同一候季风活动相同的比例占整个季风活动的 59.0%，考虑到两种定义差异，如果季风活动在同一候分别被定义为活跃期和过渡期、中断期和过渡期的组合被认为是基本一致的，而活跃期和中断期的组合被认为差异较大，则差异较大的比例仅占整个季风活动期的 3.8%。

总体来看，A 区季风影响时段主要为 5 月下旬至 9 月上旬，活跃期主要集中在 6 月和 8 月，降水指数定义的活跃期和云指数定义的活跃期基本一致，说明 A 区表现出显著的对流降水特征。B 区季

风影响时段主要为 6 月中下旬至 8 月，活跃期主要集中在 6、7 月份，这与江淮梅雨持续时间及梅雨期降水量有关。整个季风活动时段内，降水指数定义的活跃期略多，云指数定义的中断期略多，说明降水的性质不完全是对流降水，层状降水也占一定的比例。6 月中旬到 8 月初，随季风雨带的北进，层状云发生频率的大值带也逐步向北推进，且层状云云带与季风雨带的位置随时间的演变非常一致，说明季风降水带主要是由层状云带构成的（高翠翠等，2017）。C 区季风影响时段为 7 月至 8 月下旬，以活跃期为主，这也是华北全年雨量最集

表 3 不同区域季风活跃期、过渡期和中断期降水量、DC 云量、AU 云量及其对应指数

Table 3 Precipitation amounts and indices, cloud amounts and cloud indices in active, transitional, and interruptive periods in three sub-regions

		降水量/mm d ⁻¹ (S _{Rain})		DC 云量 (S _{DC})		AU 云量(S _{AU})	
		S _{Rain} 定义	S _{DC} 、S _{AU} 定义	S _{Rain} 定义	S _{DC} 、S _{AU} 定义	S _{Rain} 定义	S _{DC} 、S _{AU} 定义
A 区	活跃期	14.23(0.43)	13.32(0.36)	13.67%(0.34)	15.11% (0.44)	11.45% (-0.24)	10.93% (-0.30)
	过渡期	7.50(0.03)	6.56(-0.06)	7.55% (0.00)	6.31% (-0.10)	15.70% (0.00)	13.54% (-0.08)
	中断期	3.32(-0.28)	4.51(-0.20)	4.69% (-0.21)	3.69% (-0.26)	16.80% (0.11)	19.73% (0.28)
B 区	活跃期	10.67(0.40)	10.20(0.34)	13.91% (0.31)	15.35% (0.39)	13.41% (-0.17)	11.95% (-0.27)
	过渡期	5.70(0.02)	6.34(0.06)	8.56% (0.00)	8.70% (0.02)	16.13% (0.01)	16.03% (-0.01)
	中断期	3.08(-0.21)	4.39(-0.10)	4.77% (-0.22)	4.67% (-0.23)	18.59% (0.15)	19.21% (0.21)
C 区	活跃期	7.04(0.42)	6.28(0.33)	10.49% (0.29)	10.32% (0.28)	17.38% (-0.23)	17.07% (-0.25)
	过渡期	3.63(0.02)	3.77(0.02)	6.10% (0.00)	5.63% (-0.05)	20.63% (-0.03)	19.77% (-0.10)
	中断期	1.92(-0.19)	2.02(-0.06)	4.00% (-0.15)	3.48% (-0.18)	21.90% (-0.04)	26.69% (0.19)

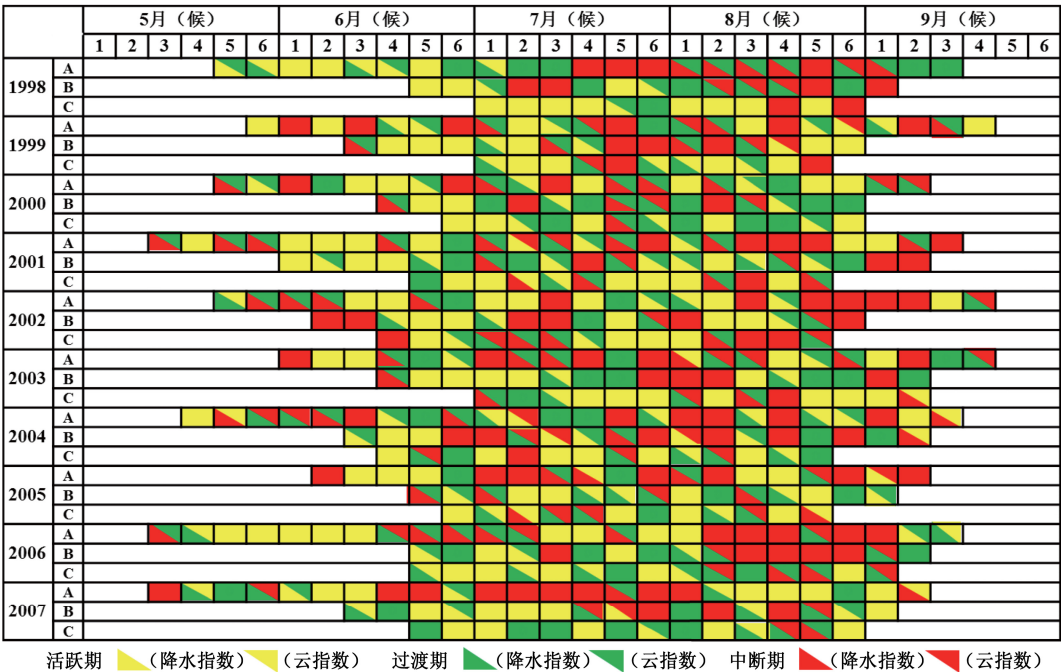


图 6 降水指数（下三角）和云指数（上三角）定义的 1998~2007 年 A 区、B 区和 C 区逐年季风活跃期（黄色）、过渡期（绿色）和中断期（红色）
Fig. 6 Annual monsoon active periods (yellow), transitional periods (green), and interruptive periods (red) defined by the precipitation index (lower triangles) and cloud indices (upper triangles) from 1998 to 2007 in three sub-regions A, B, and C

中的时间。在整个华北雨季,云指数定义的活跃期候数略多,降水指数定义的过渡期略多,说明对流云量较大时未必都产生很大的降水,北方对流云降水的效率没有南方大。

5 结论

对比云指数和降水指数表征的东亚夏季风活动可以加深我们对东亚夏季风特征的认识。本文从东亚夏季风活动期间云和降水量的分布特征、东亚夏季风在中国大陆推进的过程、东亚夏季风活跃期、过渡期和中断期的日数等方面对比了云指数 S_{DC} 、 S_{AU} 和降水指数 S_{Rain} 表征的东亚夏季风活动特征,通过夏季风不同活动阶段环流场和水汽场的差异验证了用云指数表征东亚夏季风活动的合理性。研究结论如下:

(1) 借鉴江志红等(2006)的方法定义了降水指数和两类云指数。DC 云指数代表了深对流云量,AU 云指数代表了中低空的浅对流云量。DC 云指数的大值带和 AU 云指数的小值带的位置变化可表征云带随季风的推进。云指数和降水指数均能表现出东亚夏季风在推进过程中的停滞与北跳特征,且具有时空上的一致性。

(2) 将中国东部陆地划分为华南地区(A区)、江淮地区(B区)和华北地区(C区)三个区域,通过降水指数和云指数的变化特征对各个区域逐年季风影响时段进行了判定,发现A区、B区、C区季风平均影响时间分别为23.1候、16.6候、13.2候,季风的影响时段从南向北递减。

(3) 根据云指数定义了季风活跃期、过渡期和中断期,检查发现中国不同区域季风活跃期和中断期云量和云指数有显著差异,验证了用云指数定义季风活动期的合理性。进一步通过分析500 hPa的季风环流场和水汽场,发现中国三个区域季风活跃期均有较一致的西南风或西风距平,并且有充沛的水汽输送,而季风中断期各子区域均为北风距平控制,水汽输送中断,抑制了季风的活动,从而进一步验证了用云指数表征季风不同活动阶段的合理性。

(4) 研究发现用云指数定义的季风活跃期、过渡期和中断期分别占整个季风影响时段的37.2%、32.7%、30.1%,用降水指数定义的则分别占37.8%、29.5%、32.7%;两种指数同时定义同一候为活跃期(或过渡期、中断期)的候数占整个季风活动期的

59.0%,云指数定义某一候为活跃期(中断期)而降水指数定义为中断期(活跃期)的候数只占整个季风活动时段的3.8%。这说明云指数和降水指数在表征季风活跃期和中断期上是基本一致的,但云指数和降水指数表征季风活动的侧重点有所区别,前者主要表征不同类型云量的变化,后者主要表征降水量的变化。

(5) 云指数和降水指数表征的季风活动候数也有一定的差异,该差异反映了云和降水之间的联系。当降水指数较大而DC云指数较小时,反映了降水的性质多为持续性层状云降水;当降水指数较大,DC云指数也较大时,反映了降水的性质多为强的对流性降水;当降水指数较小而DC云指数较大时,反映了降水的性质多为弱的对流性降水。研究发现我国华南地区对流降水的特征比较显著,江淮地区对流降水和层状降水各占一定的比例,华北地区对流降水的效率较华南低。

参考文献 (References)

- 陈隆勋,李薇,赵平,等. 2000. 东亚地区夏季风爆发过程 [J]. 气候与环境研究, 5 (4): 345-355. Chen Longxun, Li Wei, Zhao Ping, et al. 2000. On the process of summer monsoon onset over East Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (4): 345-355, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2000.04.002.
- 陈中钰,巩远发,赵蕾. 2010. 用大气热源表征的东亚夏季风指数的研究 [J]. 成都信息工程学院学报, 25 (3): 275-280. Chen Zhongyu, Gong Yuanfa, Zhao Lei. 2010. An East Asian summer monsoon index defined by atmospheric heating source [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 25 (3): 275-280, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2010.03.010.
- 丁一汇,王绍武,郑景云,等. 2013. 中国气候 [M]. 北京: 科学出版社. Ding Yihui, Wang Shaowu, Zheng Jingyun, et al. 2013. Climate in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 高翠翠,李昀英,寇雄伟,等. 2017. 中国东部暖季对流云与层状云的比例及与降水的对应关系 [J]. 大气科学, 41 (3): 490-500. Gao Cuicui, Li Yunying, Kou Xiongwei, et al. 2017. The ratio of convective clouds to stratiform clouds and corresponding precipitation during the warm season in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (3): 490-500, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1610.16138.
- 郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析 [J]. 地理学报, 38 (3): 207-217. Guo Qiyun. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 38 (3): 207-217, doi:10.11821/xb198303001.
- Guo Z, Zhou T J, Wang M H, et al. 2015. Impact of cloud radiative heating on East Asian summer monsoon circulation [J]. Environmental Research Letters, 10 (7): 074014, doi:10.1088/1748-9326/10/7/074014.
- 黄刚,严中伟. 1999. 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化 [J]. 科学通报, 44 (4): 421-424. Huang Gang, Yan Zhongwei. 1999. The East

- Asian summer monsoon circulation anomaly index and its interannual variations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44 (14): 1325–1329, doi:10.3321/j.issn:0023-074X.1999.04.020.
- Jiang X N, Waliser D E, Li J L, et al. 2011. Vertical cloud structures of the boreal summer intraseasonal variability based on CloudSat observations and ERA-interim reanalysis [J]. *Climate Dyn.*, 36 (11–12): 2219–2232, doi:10.1007/s00382-010-0853-8.
- 江志红, 何金海, 李建平, 等. 2006. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化 [J]. *地理学报*, 61 (7): 675–686. Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. Northerly advancement characteristics of the East Asian summer monsoon with its interdecadal variations [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 61 (7): 675–686, doi:10.11821/xb200607001.
- 寇雄伟, 李昀英, 方乐铮, 等. 2015. 东亚夏季风活动与不同类型云的相关性研究 [J]. *大气科学*, 40 (3): 463–475. Kou Xiongwei, Li Yunying, Fang Lexin, et al. 2015. Relationships between East Asian summer monsoon activities and cloud types [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40 (3): 463–475, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.14293.
- Lau K M, Kim K M, Yang S. 2000. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 13 (14): 2461–2482, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2461:DABFCO>2.0.CO;2.
- 李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征 [J]. *大气科学*, 33 (4): 698–707. Li Jiming, Huang Jianping, Yi Yuhong, et al. 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based lidar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (4): 698–707, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.04.
- Lu E, Chan J C L. 1999. A unified monsoon index for South China [J]. *J. Climate*, 12 (8): 2375–2385, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2375:AUMIFS>2.0.CO;2.
- Luo Y L, Wang H, Zhang R H, et al. 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over South China and the Yangtze and Huai River basin [J]. *J. Climate*, 26 (1): 110–132, doi:10.1175/JCLI-D-12-00100.1.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85 (3): 369–432, doi:10.2151/jmsj.85.369.
- 彭杰, 张华, 沈新勇. 2013. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究 [J]. *大气科学*, 37 (1): 91–100. Peng Jie, Zhang Hua, Shen Xinyong. 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (1): 91–100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11188.
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80 (11): 2261–2288, doi:10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2.
- 沈艳, 潘旸, 宇婧婧, 等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估 [J]. *大气科学学报*, 36 (1): 37–46. Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (1): 37–46, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.005.
- Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 119 (6): 3063–3075, doi:10.1002/2013JD020686.
- Sperber K R, Annamalai H, Kang I S, et al. 2013. The Asian summer monsoon: An intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century [J]. *Climate Dyn.*, 41 (9–10): 2711–2744, doi:10.1007/s00382-012-1607-6.
- 孙秀荣, 陈隆勋, 何金海. 2002. 东亚海陆热力差指数及其与环流和降水的年际变化关系 [J]. *气象学报*, 60 (2): 164–172. Sun Xiurong, Chen Longxun, He Jinhai. 2002. Index of land-sea thermal difference and its relation to interannual variation of summer circulation and rainfall over East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (2): 164–172, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2002.02.005.
- Wang B, Fan Z. 1999. Choice of South Asian summer monsoon indices [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80 (4): 629–638, doi:10.1175/1520-0477(1999)080<0629:COASMS>2.0.CO;2.
- Wang B, Ho L. 2002. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon [J]. *J. Climate*, 15 (4): 386–398, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0386:RSOTAP>2.0.CO;2.
- 汪会, 罗亚丽, 张人禾. 2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1117–1131. Wang Hui, Luo Yali, Zhang Renhe. 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (6): 1117–1131, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.11.
- 杨大生, 王普才. 2012. 中国地区夏季 6~8 月云水含量的垂直分布特征 [J]. *大气科学*, 36 (1): 89–101. Yang Dasheng, Wang Pucai. 2012. Characteristics of vertical distributions of cloud water contents over China during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (1): 89–101, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.08.
- 尹金方, 王东海, 翟国庆, 等. 2013. 基于星载云雷达资料的东亚大陆云垂直结构特征分析 [J]. *气象学报*, 71 (1): 121–133. Yin Jinfang, Wang Donghai, Zhai Guoqing, et al. 2013. A study of cloud vertical profiles from the Cloudsat data over the East Asian Continent [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 71 (1): 121–133, doi:10.11676/qxxb2013.010.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 61 (4): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyun, Chen Lieting. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61 (4): 559–568, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.05.005.
- Zhou T J, Gong D Y, Li J, et al. 2009. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon recent progress and state of affairs [J]. *Meteor. Z.*, 18 (4): 455–467, doi:10.1127/0941-2948/2009/0396.
- Zou L W, Zhou T J. 2015. Asian summer monsoon onset in simulations and CMIP5 projections using four Chinese climate models [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32 (6): 794–806, doi:10.1007/s00376-014-4053-z.