

寇雄伟, 李昀英, 方乐铎, 等. 2016. 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. 2016. 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.

## 东亚夏季风活动与不同类型云的相关性研究

寇雄伟 李昀英 方乐铎 孙国荣 高翠翠

解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

**摘 要** 利用 1998~2007 年候平均卫星—台站融合降水资料以及 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) D1 云资料, 分别定义了标准降水指数和两类云指数。降水指数大值区的移动能很好的表征东亚夏季风活动, 两类云指数能分别反映某个区域深对流云 (DC)、高积云 (Ac) 和积云 (Cu) 云量的集中变化特征。根据不同地区降水集中时段以及降水量等气候特征, 结合中国气候区划 (温度带及干湿区) 及不同地域的地形特征, 把中国大陆受东亚夏季风影响的地区划分为五个子区域。利用 ISCCP D1 云气候资料和降水资料, 在候时间尺度上通过分析降水与不同云类、标准降水指数与两类云指数的相关性研究了东亚夏季风活动与不同类型云的对应关系。研究表明: ISCCP 定义的深对流云 (DC)、卷层云 (Cs) 与降水量在五个区显著正相关, 表明东亚夏季风活动伴随有大量的对流云及云砧出现; 高积云 (Ac)、积云 (Cu) 的总云量与降水量在五个区显著负相关, 表明夏季风活动增强时, Ac 和 Cu 云量减少; 层云 (St) 和层积云 (Sc) 与降水量在南方和北方分别呈显著的负相关和正相关, 说明季风活动在南方伴随着对流云的显著增加, 在北方则使层状云和对流云均有所增加; 高层云 (As)、卷云 (Ci) 和雨层云 (Ns) 与季风活动没有显著的相关性。

**关键词** 东亚夏季风 云类 云指数 相关性

文章编号 1006-9895(2016)03-0463-13

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.14293

## Relationships between East Asian Summer Monsoon Activities and Cloud Types

KOU Xiongwei, LI Yunying, FANG Lexin, SUN Guorong, and GAO Cuicui

*Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*

**Abstract** The standardized precipitation index and two types of cloud indices are defined based on the pentad averaged precipitation data and ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) D1 cloud data from 1998 to 2007. It is found that the precipitation index is a good indicator of East Asian summer monsoon activities, and the cloud indices can reflect well the cloud amount of deep convection (DC), altocumulus (Ac) and cumulus (Cu). Based on the climate characteristics of precipitation, combined with the division of climate in China (temperature zones, wet and dry areas) and topography of different regions, the area of continental China influenced by the East Asian monsoon is divided into five sub-regions from south to north. Correlation between monsoon activities (MA) and cloud types, as well as the relationship between the precipitation index and two types of cloud indices are studied separately in five sub-regions on pentad time

收稿日期 2014-10-16; 网络预出版日期 2015-11-25

作者简介 寇雄伟, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事气候学研究。E-mail: xiongwei1908@126.com

通讯作者 李昀英, E-mail: liyunying2005@163.com

资助项目 财政部/科技部公益类行业专项 201306068, 国家自然科学基金项目 41475069、41075034, 国家留学基金项目

**Founded by** the China R&D Special Fund for Public Welfare Industry (Grant 201306068), National Natural Science Foundation of China (Grants 41475069, 41075034), State Scholarship Fund from China Scholarship Council

scales. It is found that DC and cirrostratus (Cs) have significant positive correlations with MA in the five sub-regions, indicating that the monsoon occurs mainly with convective cloud. Ac and Cu have significant negative correlations with MA, indicating the active stage of the summer monsoon with the produced Ac and Cu. Stratus (St) and stratocumulus (Sc) have strong positive correlations with MA in North China but negative correlations in South China, respectively, which shows the characteristic of convective cloud in South China and a mixture of convective cloud and stratiform cloud in North China. Altostratus (As), cirrus (Ci) and nimbostratus (Ns) have no robust correlations with MA.

**Keywords** East Asian summer monsoon, Cloud types, Cloud index, Correlation

## 1 引言

我国东部夏季雨带的进退、雨季的长短起讫和雨型结构与东亚夏季风的进退及强弱变化密切相关。关于东亚夏季风与降水关系的研究已经较为深入,而降水的产生又与云密不可分。一般而言,对流云多产生阵性降水,时间短强度大;层状云可产生连续性降水,雨强相对较小但维持时间长,两种性质的降水对我国东部地区夏季降水的贡献都不容忽视(胡亮等, 2010; 杜振彩等, 2011)。并非所有云都能产生降水,但降水的产生必须有云的参与,并且不同性质的降水对应的云的类型也不同。分析东亚夏季风期间不同类型云的相应变化,一方面能够加深对东亚夏季风及其相伴随的云雨过程的认识,另一方面可为改善区域模式对季风、云、降水的模拟预报能力,提高我国东部地区夏季降水的预报及气候预测准确率提供参考(刘晓春等, 2012)。

以往研究云与降水的对应关系,多集中在局部地区,采用的资料也多为地面台站资料,研究通常是在月的时间尺度上分析云和降水的季节变化(蔡广珍等, 2010; 赵勇等, 2013),或者日内不同时次云和降水的对应关系(严异德和张国庆, 2007; 王青等, 2009)。虽然得到一些规律,但局地性较强,并且主要集中在高、中、低云量和总云量与降水的关系,对于不同种类云与降水的对应关系则较少涉及。部分学者用 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) D2 的月平均资料研究了不同种类云和降水的关系(陈勇航等, 2005a, 2005b; 李跃清和张琪, 2014),但由于资料的时间尺度为月平均,仍然不能对云和降水的关系进行细致描述。季风活动常常以候为单位进行表征,因此,在研究东亚夏季风降水与云的对应关系时,用候时间分辨率的资料能更好地表征季风活动。

Zhu et al. (1986) 指出东亚夏季风存在热带季风和副热带季风两种性质不同的季风。众多学者围

绕两种性质的季风展开研究(何金海等, 2007),发现热带季风通常产生对流降水,副热带季风多为锋面降水(左瑞亭等, 2004; 胡亮等, 2010, 2011)。并且同一性质的季风,因影响区域的温度以及水汽来源不同,降水性质也有本质的差别(尤丽钰等, 1990; 张庆云和陶诗言, 1998)。气候统计表明华南前汛期、江南雨季、江淮梅雨、华北雨季的平均降水量、降水集中时段、降水类型随着季风进退有一定的差异(丁一汇等, 2013)。因此,以降水的强弱变化来反映季风活动的强弱变化,进而研究东亚夏季风活动与不同种类云的对应关系时,必须考虑降水的区域性特征。

本文试图基于候时间尺度的 ISCCP D1 云资料(Rossow and Schiffer, 1999)以及融合降水资料,以降水量大小作为季风活动强弱的指标,分区域探究东亚夏季风活动与不同种类云的相关性。主要分析季风活动与不同种类云对应关系的时空变化特征,探寻哪类云与季风活动的变化具有时空上的一致性。

## 2 资料及处理方法

本文所用云资料为 ISCCP D1 全球逐 3 h (每日 8 个时次)云气候资料,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 D1 (<http://isccp.giss.nasa.gov> [2014-12-12]) 主要综合了 GEOS (Geodetic Earth Orbiting Satellite)、GMS (Geostationary Meteorological Satellite) 卫星的可见光和红外资料生成同一时间覆盖全球的资料集,适用于云气候分析。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) (图 1)。

本文所用降水资料为国家气象信息中心发布的基于经过质量控制后的全国 2425 个国家级气象台站观测的日降水量与美国气候预测中心研发的

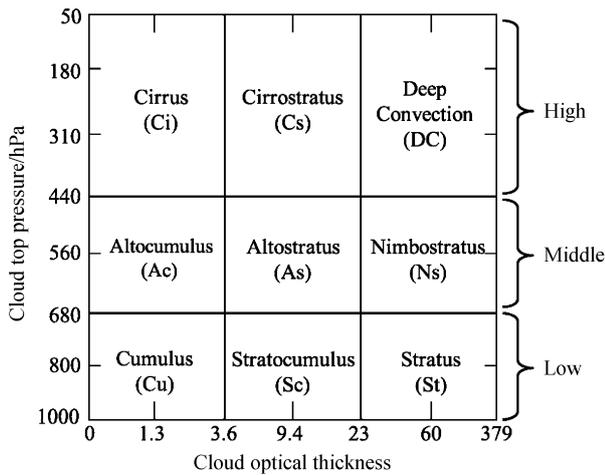


图1 ISCCP 云分类(卷云 Ci、卷层云 Cs、深对流云 DC、高积云 Ac、高层云 As、雨层云 Ns、积云 Cu、层积云 Sc、层云 St)  
Fig. 1 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) cloud classification (Cirrus; Cirrostratus; Deep Convection; Altostratus; Altostratus; Nimbostratus; Cumulus; Stratocumulus; Stratus)

全球 30 min、8 km 分辨率的 CMORPH (CPC MORPHing technique) 卫星反演降水产品 (Joyce et al., 2004) 融合的逐日降水量资料, 其主要是卫星微波资料的融合产品, 空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 空间范围为 ( $0^\circ \sim 60^\circ\text{N}$ ,  $60^\circ \sim 160^\circ\text{E}$ ), 资料序列自 1998 年 1 月 1 日起, 现已更新至 2013 年。该产品是通过引进先进的融合概念模型 (Xie and Xiong, 2011), 并根据实测样本调整了 CMORPH 产品误差随降水量的函数变化关系融合而成, 其有效结合了地面观测降水和卫星反演降水的优势, 定量评估显示该数据集在中国大陆地区优于国际上同类型产品 (潘昉等, 2012; 沈艳等, 2013; Shen et al., 2014)。由于 CMORPH 降水产品有一定误差, 因此站点稀疏地区的产品质量还有待提高, 而本文研究的东亚夏季风区台站布局密集, 在融合过程中以地面资料为主, 其值能代表季风降水的真实值。

为了分析季风流场与不同云类以及季风降水的对应关系, 本文还用到了 JRA-25 (Japanese Re-Analysis 25 years) 再分析资料中 700 hPa 的风场资料, 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, 本文根据需要对其进行了月平均。

考虑到降水资料和云资料的时间序列差异, 本文分别截取了两类资料 1998~2007 年 5~9 月的时间段。考虑到季风的移动特征, 本文分别对融合降水资料和 ISCCP D1 资料进行候平均, 每月 6 候, 5~9 月共 30 候。季风具有移动特征, 其推进过程中不

同地区云类型的差异较大, 因此本文将受东亚夏季风影响的中国大陆划分为五个子区域, 研究在某个区域内季风活动与不同类型云的对应关系, 分析这种对应关系在各分区是否一致。

### 3 不同区域东亚夏季风活动与云的对应关系

我国东部地区受东亚季风进退和强度异常的影响, 全国大范围地区经常发生降水和雨带位置异常, 进而导致严重的旱涝灾害。比如, 2003 年淮河流域受到特大暴雨袭击, 研究表明主要原因是 6 月 22 日入梅后的 1 个多月时间内季风雨带始终维持在淮河流域造成的。通过分析 2003 年江淮地区汛期降水 (6~8 月) 与 ISCCP 定义的深对流云 (DC) 的空间分布关系, 并结合 JRA-25 再分析资料分析其 700 hPa 季风环流特征。发现在我国东部大陆区域, 6 月季风降水主要集中在长江以南  $26^\circ \sim 30^\circ\text{N}$  的地区, DC 的大值区及 700 hPa 风场辐合区与降水带对应分布, 此时江淮流域还未进入汛期 (图 2a); 7 月季风降水带集中在  $30^\circ \sim 34^\circ\text{N}$  的江淮地区, 与 6 月相比, DC 云量有所增大, 风场辐合加强, 降水量达  $16 \text{ mm d}^{-1}$  (图 2b); 8 月季风降水集中区有所北抬, 主要位于  $32^\circ \sim 35^\circ\text{N}$ , 此时降水量减少为  $10 \text{ mm d}^{-1}$  (图 2c)。图 2 表明, 6~8 月季降水集中的区域与 DC 云量的大值区及 700 hPa 风场的辐合区都有较好的对应关系, 且随着时间地推移有一致的变化特征, 表明 DC 的变化能表征降水带和季风环流的变化。

通过以上个例分析, 发现季风、降水和对流云带的对应关系较好, 为了进一步揭示季风活动与不同种类云对应关系的气候特征, 本文用降水量大小表征季风活动的强弱, 在候时间尺度上通过分析东亚夏季风降水与不同种类云的相关性, 研究东亚夏季风活动与不同类云的对应关系。

#### 3.1 东亚季风区的划分

东亚夏季风的地域范围相当广泛, 就其经向延伸来看, 最北可达  $43^\circ\text{N}$  左右。由于东亚夏季风具有明显的移动特征, 不同地区受天气系统的影响及气团的属性也不同, 因此季风推进时在不同地区降水集中出现时间、降水量大小及降水性质也会有所差异, 与其对应的云的类型及云量可能也有不同。另一方面, 中国东部大陆地区自南向北气候差异明显, 温度、湿度等气象要素南北梯度分布不均

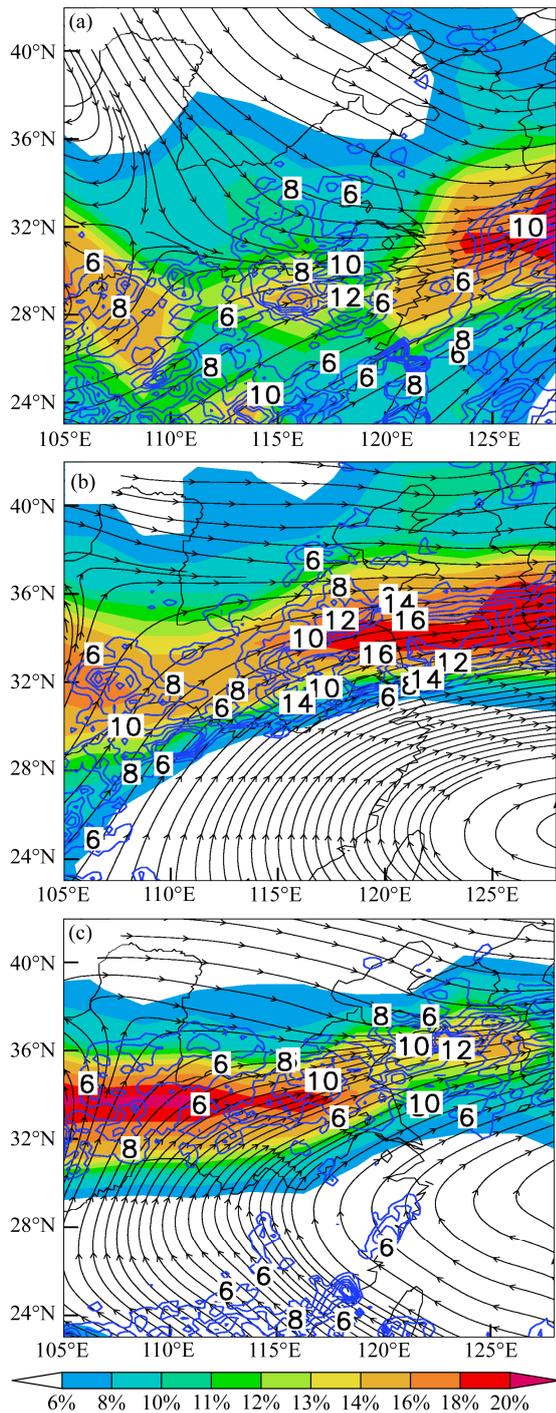


图2 2003年(a)6月、(b)7月、(c)8月的平均降水量(单位:  $\text{mm d}^{-1}$ , 实线, 蓝色)、DC云量(阴影)和700 hPa流场(实线)的空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of precipitation (units:  $\text{mm d}^{-1}$ , solid line, blue), cloud fraction of deep convection (shaded), and streamline at 700 hPa (solid line) averaged in (a) June, (b) July, and (c) August in the year 2003

匀, 并且不同区域的地形也有所差异, 对不同类型云的生成有一定的影响。

结合丁一汇等(2013)对中国气候区的划分(温度带、干湿区)及不同地域的地形特征, 本文根据季风移动及北跳特征、不同地区降水集中时段以及降水量等气候特征, 把受东亚季风影响的中国东部大陆划分为五个子区域, 由于大陆台站降水资料中没有台湾资料, 因此1区没有包括台湾; 考虑到季风影响不到东北地区, 因此5区也没有包括东北。划分结果如图3所示, 1区为华南沿海地区, 2区为江南地区, 3区为江淮地区, 4区为华北地区, 5区为内蒙古东部地区。下文出现的南方指1区、2区和3区, 北方指4区和5区。有关五个子区域的详细信息见表1。

### 3.2 不同区域季风活动与云类的相关性和稳定性分析

首先对1998~2007年ISCCP D1的9类云量以及融合降水资料的候平均值在五个子区进行区域平均, 通过分析不同区域候平均降水量与各类云量的相关性, 探寻哪类云与季风活动具有较好的时空对应关系。

DC是典型的深对流云, Cs有时是DC的云砧, 因此这两类云所产生的降水属于对流降水; Ac和Cu光学厚度较小, 二者出现高度不同但同属于薄的积状云, 产生降水的概率较小; Sc属于波状云, 具有层积混合特征, 产生的降水属于混合降水; St则属于典型的层云, 产生的降水属于层状降水; As和Ns属于层状云, 伴随降水概率较大, 属于典型的层状降水(李昀英等, 2014)。针对每类云进行研究发现DC、Cs在五个区域都与降水呈显著的正相关; Ac、Cu与降水呈负相关, 显著性在各区略有不同, 但Ac+Cu(Ac与Cu云量之和)在五个区域均与降水有显著的负相关。因此本文主要对DC、Cs及Ac+Cu与降水的逐候对应关系进行分析(图4和图5)。St、Sc(3区不显著)在南方与降水有显著的负相关, 但在北方却与降水有显著的正相关。其它种类云, 如As和Ns, 虽然降水量较大, 但在冬春季也伴随大量降水, 与夏季风降水没有显著的相关性(图略)。

从5月1候到9月6候, 五个区域的DC和Cs云量都呈现先增加、后减少的趋势, 并且从南到北(从1区到5区), DC和Cs云量整体减小, 极值出现时间也非常一致, 但Cs比DC云量略大(图4)。有时Cs是DC消散后的云砧, 因此二者有相似的极值出现时间。各个区域DC和Cs云量与降水量

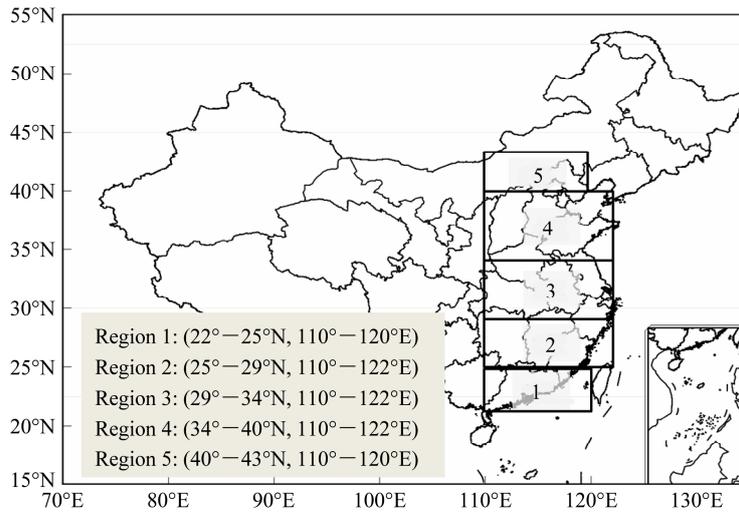


图3 中国东部大陆子区域的划分  
Fig. 3 Division of the sub-regions in eastern China

表1 中国东部地区五个子区域的气候特征  
Table 1 Climate characteristics of five subregions in eastern China

区域	温度带	干湿区	5~9 月降水量/mm (占全年比率)	季风活动及对应雨季	区域信息
1 区	南亚热带★	湿润区	1180 (68%)	5 月中旬季风爆发, 华南前汛期后期降水	中国大陆季风影响最早, 季风降水丰富, 沿海地区多台风
2 区	中亚热带☆	湿润区	977 (58%)	6 月上旬至 6 月中旬, 江南雨季, 第一次静止	北方强冷气团与南方湿润气团交锋最频繁, 地形复杂
3 区	北亚热带☆	湿润区	771 (64%)	6 月中旬至 7 月中旬, 江淮梅雨, 第二次静止	气候湿润, 江淮梅雨是其最具特色的气候现象
4 区	暖温带☆	半湿润区	494 (81%)	7 月中下旬至 8 月上旬, 华北雨季, 第三次静止	夏季风影响时段较短, 仅盛夏较多降水, 主要位于华北平原
5 区	中温带☆	半干旱区	320 (82%)	7 月下旬至 8 月中下旬, 内蒙古东部、东北雨季	多为季风到达最北端带来的降水, 主要位于内蒙古高原东部

注: ★盛行热带季风 ☆盛行副热带季风

的逐候变化趋势非常相似, 峰值几乎是伴随着降水峰值同时出现。云量峰值在 1 区为 6 月 1~2 候, 相应的降水量最大可达  $14\sim 16\text{ mm d}^{-1}$  (图 4a), 基本对应华南前汛期的后期降水, Chen (1994) 将其称为华南梅雨; 在 2 区为 6 月 3~4 候, 平均降水量约为  $12\text{ mm d}^{-1}$  (图 4b), 此时整个江南地区处于季风前缘; 3 区降水峰值在 6 月 5 候至 7 月 1 候出现, 可达  $10\sim 12\text{ mm d}^{-1}$  (图 4c), 正好为江淮梅雨期; 4 区和 5 区降水主要发生在 7 月至 8 月上旬, 降水量峰值分别为  $5\sim 6\text{ mm d}^{-1}$  和  $3\sim 4\text{ mm d}^{-1}$ , 出现在 7 月下旬至八月初 (图 4d、e), 从平均降水量来看, 4 区比 5 区大  $1\sim 2\text{ mm}$ , 符合华北地区和内蒙古东部地区的气候特征。以上分析也验证了本文对中国东部地区子区域划分的合理性。

从 5 月 1 候到 9 月 6 候, 1、2、3 区的 Ac+Cu 总云量均呈现增加的趋势, 而 4、5 区则呈现减小的趋势 (图 5a)。鉴于 Ac+Cu 云量在南方 1、2、3 区有相同地变化特征, 在北方 4、5 区有相同地变

化特征, 因此对南方的三个区和北方的两个区进行合并分析, 发现北方 Ac+Cu 总云量始终大于南方。南方降水在 6 月初突然增加, 而 Ac+Cu 云量对应减少, 当降水在 6 月 5 候达到极大值时, Ac+Cu 总云量最少, 之后降水突然减少, Ac+Cu 云量反而增加 (图 5b)。北方降水多集中在 7 月和 8 月初, 当降水在 6 月底开始增加时, Ac+Cu 云量对应减小, 整个北方雨季, Ac+Cu 云量都保持着低值 (图 5c)。进一步研究发现, 五个区域中, Ac+Cu 总云量总与降水呈反相关 (图略), 这说明季风活动增强时, Ac 和 Cu 云量减小。值得注意的是 8 月下旬和 9 月, 南方和北方 Ac+Cu 与降水的反相关并不明显, 这可能与季风活动减弱有关。

表 2 为本文依据候平均资料计算的 5~9 月不同区域降水量与 9 类云量以及 Ac+Cu 云量的相关系数, 并对相关系数进行了信度检验, 以便为下文定义云指数提供参考。

表 2 表明: (1) 在所有分区, DC、Cs 与降水

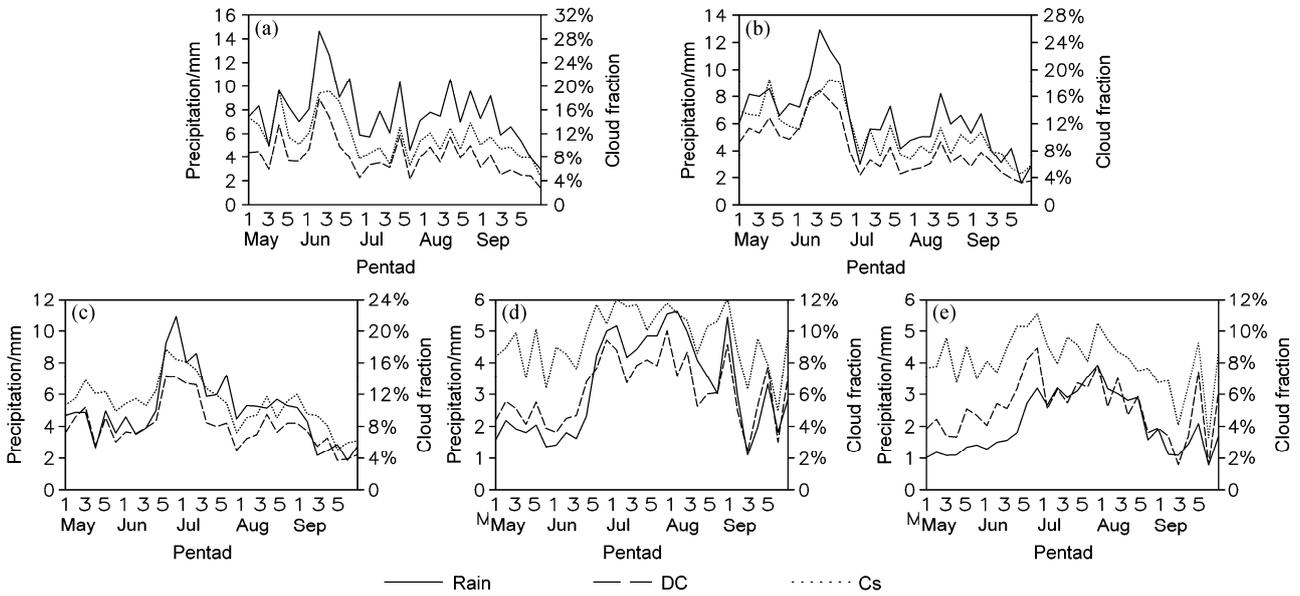


图4 DC云量(虚线, 右侧y轴)、Cs云量(点线, 右侧y轴)与降水量(单位:  $\text{mm d}^{-1}$ , 实线, 左侧y轴)在中国东部五个子区域的逐候变化: (a) 1区、(b) 2区、(c) 3区、(d) 4区、(e) 5区

Fig. 4 Pentad variation of the cloud fraction of DC (Deep Convection, dashed line, right y-axis), cloud fraction of Cs (Cirrostratus, dotted line, right y-axis), and precipitation (units:  $\text{mm d}^{-1}$ , solid line, left y-axis) in five regions in eastern China: (a) Region 1; (b) region 2; (c) region 3; (d) region 4; (e) region 5

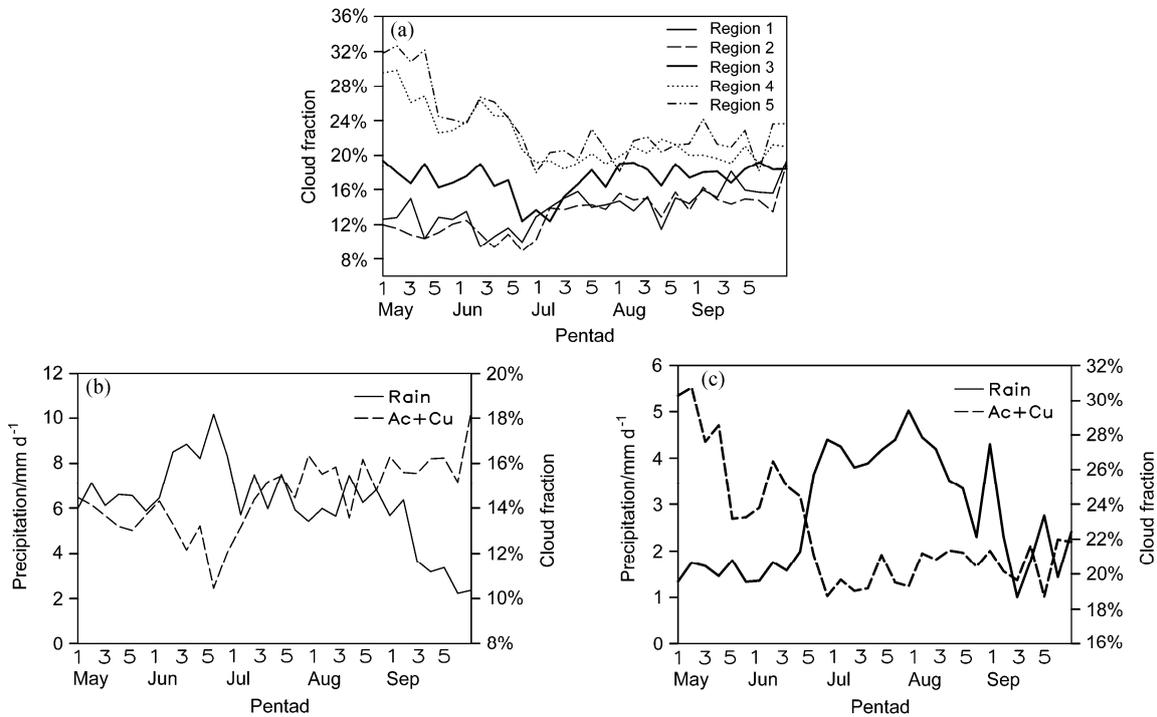


图5 (a) Ac+Cu云量在中国东部五个区域的逐候变化。Ac+Cu云量(虚线, 右侧y轴)与降水量(单位:  $\text{mm d}^{-1}$ , 实线, 左侧y轴)在(b)南方和(c)北方的逐候变化

Fig. 5 (a) Pentad variation of cloud fraction of Ac+Cu in five regions in eastern China. Pentad variation of cloud fraction of Ac+Cu (dashed line, right y-axis) and precipitation (units:  $\text{mm d}^{-1}$ , solid line, left y-axis) in (b) southern China and (c) northern China

表 2 不同区域气候平均的候平均降水量与各类云量的相关性

Table 2 The correlation between pentadly mean precipitation and cloud fraction of all cloud types in different regions

区域	候平均降水量与各类云量的相关系数									
	DC	Cs	Ci	Ac	As	Ns	Cu	St	Sc	Ac+Cu
1 区	<b>0.92</b>	<b>0.85</b>	<u>0.38</u>	-0.10	0.29	0.14	<b>-0.76</b>	<u>-0.36</u>	<b>-0.50</b>	<b>-0.77</b>
2 区	<b>0.95</b>	<b>0.89</b>	0.15	-0.14	<b>0.62</b>	0.27	<b>-0.66</b>	<u>-0.35</u>	<u>-0.41</u>	<b>-0.75</b>
3 区	<b>0.89</b>	<b>0.79</b>	<u>0.44</u>	-0.31	0.07	<u>-0.40</u>	<b>-0.49</b>	<u>-0.42</u>	0.07	<b>-0.73</b>
4 区	<b>0.89</b>	<b>0.77</b>	<b>-0.55</b>	<b>-0.69</b>	<b>0.54</b>	0.02	-0.17	<b>0.52</b>	<b>0.70</b>	<b>-0.65</b>
5 区	<b>0.75</b>	<b>0.57</b>	<u>-0.41</u>	<b>-0.70</b>	<b>0.51</b>	<u>0.37</u>	-0.14	<b>0.77</b>	<b>0.83</b>	<b>-0.65</b>

注：粗体数字通过了 0.01 的显著性水平检验，下划线数字通过了 0.05 的显著性水平检验。

量的变化都具有很好的正相关，DC 与降水的相关性大于 Cs 与降水的相关性，这也说明东亚夏季风活动增强时，对流云明显增加。(2) Ac、Cu 虽然和降水量呈负相关，但相关性具有区域差异，即 Ac 与降水的负相关在北方显著，而 Cu 与降水的负相关在南方显著。Ac+Cu 总云量与降水在五个区域具有稳定的负相关，说明季风活动增强时，Ac、Cu 云量减小，因此一定程度上可用二者之和来表征东亚夏季风活动。(3) St、Sc (3 区为弱正相关) 在南方与降水有显著的负相关，但在北方却与降水有显著的正相关，说明季风活动在我国南方增强时对流云显著增加，在北方增强时层状云与对流云均有所增加。有研究表明江淮梅雨锋云系表现出典型的大范围层状云系中嵌有对流云(形成层积混合降水)的特征(洪延超等, 1984)，但 ISCCP 分辨率较低，难以分辨大面积层状云中的对流云。Sc 属于波状云，与层积混合云系中的层状云是不同的两类云。表 2 表明 Sc 在 1、2 区与降水有显著负相关，在 4、5 区有显著正相关，而 3 区为南北交界处，降水强度及性质的分布结构变化较大(方思达和江志红, 2013)，与季风降水的相关性有可能会不出现不显著的情况。(4) As 和 Ns 虽然也与季风降水有正相关，即东亚夏季风到来时层云降水也有所增加，但其显著性在各区并不一致，因此，As 和 Ns 在表征季风活动时指示意义并不强。

#### 4 标准降水指数与云指数的对应关系

由于降水和云具有地域性差异，单独用降水量不能很好地突出季风降水的特征。为了深入研究云雨之间的对应关系并消除地域差异，本文定义了相应的降水指数和云指数。通过分析降水指数和云指数之间的相关性，进一步探究东亚夏季风活动与云的对应变化关系。

#### 4.1 标准降水指数的定义及代表性检验

关于东亚夏季风进退与我国汛期降水关系的研究由来已久(涂长望和黄仕松, 1944; Tao and Chen, 1987; Huang et al., 2003; Ding, 2004)，普遍认为季风雨带的移动在我国大陆上表现为三个阶段静止和两次突然北跳。东亚夏季风高温高湿的特性是形成云雨天气的必要条件，前人从这一角度出发定义了各种温湿指标来描述东亚夏季风的爆发、推进和撤退，揭示了季风活动的一些规律。考虑到季风降水具有一定的地域特征，因此本文借鉴江志红等(2006)的方法，定义了标准降水指数，旨在使不同地区降水的强弱变化具有可比性。研究中发现江志红等取五点滑动平均后降水的大值区被平滑掉，低值区被堵塞，丢失了部分降水信息。因此本文在定义标准降水指数时未进行滑动平均。本文首先计算日降水指数，然后进行候平均得到候平均标准降水指数  $S_{\text{Rain}}$ 。

标准降水指数定义为

$$S_{\text{Rain}}(t) = [R(t) - R_S] / \sigma_S, \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

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

其中， $R(t)$  为第  $t$  日的降水量， $R_S$  为 5~9 月日平均降水量， $n$  为 5~9 月的总天数， $\sigma_S$  反映本站点 5~9 日降水量的时间变率。由定义式可见， $S_{\text{Rain}}$  的极大值区，就是该时段降水最集中的区域。故可根据  $S_{\text{Rain}}$  大值区的移动，分析雨带的进退及强弱变化，进而表征季风活动。

由图 6 可见，早在 5 月 1 至 3 候华南地区就对应降水的大值区，陈隆勋等(2000)指出，这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，是典型的副热带雨带。5 月中下旬(5 月 4、5 候)季风爆发时，华南沿海降水量突然增加，其最大值出现在 6 月 2 候左右，平均降水量在  $16 \sim 18 \text{ mm d}^{-1}$ ， $S_{\text{Rain}} > 0.4$ ，之后降水大值区北移。

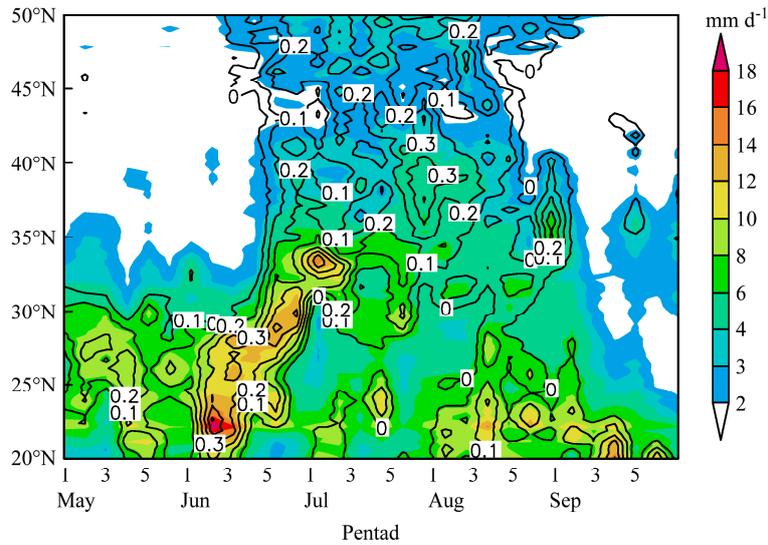


图 6 1998~2007 年 5~9 月 110°~120°E 候平均降水量 (单位: mm, 阴影) 和标准降水指数  $S_{\text{Rain}}$  (实线) 的时间纬度剖面  
Fig. 6 Time-latitude cross section of pentad-mean precipitation (mm, shaded) and standard rainfall index  $S_{\text{Rain}}$  (solid line) averaged in 110°-120°E from May to September 1998-2007

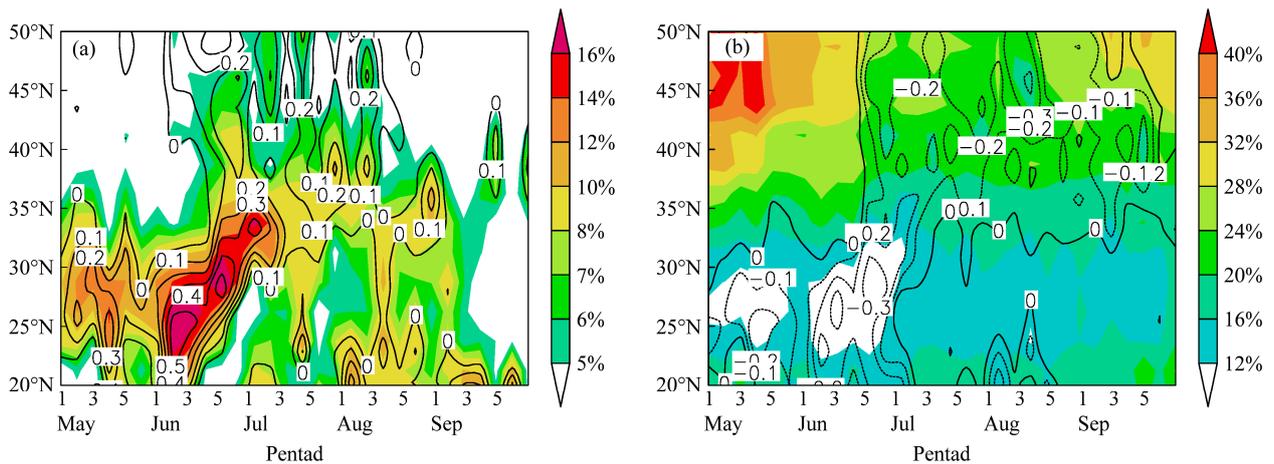


图 7 1998~2007 年 5~9 月 110°~120°E 候平均 (a) DC 云量 (% , 阴影) 和  $S_{\text{DC}}$  云指数 (实线) 以及 (b) Ac+Cu 云量 (% , 阴影) 和  $S_{\text{AU}}$  云指数 (实线) 分布  
Fig. 7 Time-latitude cross sections of pentad-mean (a) cloud fraction of DC (% , shaded) and cloud index  $S_{\text{DC}}$  (solid line), (b) cloud fraction of Ac+Cu (% , shaded) and cloud index  $S_{\text{AU}}$  (solid line) averaged in 110°-120°E from May to September 1998-2007

6 月 2~3 候, 降水带北跳至江南地区, 平均降水量达  $12\sim 14 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $S_{\text{Rain}} > 0.3$ 。6 月 4~5 候, 降水逐渐跳至江淮流域, 梅雨季节到来, 并持续到 7 月 2 候左右, 此时平均降水量达  $14\sim 16 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $S_{\text{Rain}} > 0.5$ 。7 月 2~3 候, 降水继续北推至华北地区, 一直持续到 5~6 候, 平均降水量在  $8\sim 10 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $S_{\text{Rain}} > 0.2$ 。之后降水到达最北端, 整个内蒙东部地区平均降水量达  $4\sim 6 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $S_{\text{Rain}} > 0.1$ 。以上分析表明: 在我国东部地区由南到北,  $S_{\text{Rain}}$  的大值区与降水的时空位置对应较好, 随着季风的北移, 雨

带也逐渐向北推进,  $S_{\text{Rain}}$  能很好地表征东亚夏季风降水带的移动特征。另外, 我们对每个区域  $S_{\text{Rain}}$  与降水的对应关系进行了代表性检验, 发现二者有很好的对应关系。

#### 4.2 云指数的定义及代表性检验

鉴于标准降水指数能很好地表征降水的集中变化及季风强弱变化, 本文以同样的方法计算了与降水呈稳定正相关变化的 DC 云指数  $S_{\text{DC}}$  和与降水呈稳定负相关变化的 Ac+Cu 云指数  $S_{\text{AU}}$ , 并检验了两类云指数的区域代表性。

云指数的大值区能反映某个区域云类及云量的集中变化。 $S_{DC} > 0$  的区域与 DC 云量的大值区对应较好 (图 7a), 并且  $S_{DC}$  从南向北最大值所出现的时间与该区 DC 云量极大值出现的时间一致, 与图 4 分析结论相符。 $S_{AU} < 0$  的区域对应的是该区 Ac+Cu 云量的小值区 (图 7b), 虽然二个区域不完全重合, 但  $S_{AU}$  对表征 Ac+Cu 云量的变化仍然比较明显。

为检验定义的云指数的区域代表性, 本文分别

研究了五个子区域的 DC 云量与  $S_{DC}$  的对应关系 (图 8) 及 Ac+Cu 总云量与  $S_{AU}$  的对应关系 (图 9)。

在五个子区域, 云指数  $S_{DC}$ 、 $S_{AU}$  与各自相应的 DC、Ac+Cu 随时间的变化相一致, 并表现出地域特征差异 (图 8、图 9)。可见, 两类云指数在表征各自所对应的云的变化时具有代表性, 在中国东部地区, 可用两类云指数  $S_{DC}$ 、 $S_{AU}$  的变化, 分别探究伴随季风活动的降水与 DC 的正相关变化以及与 Ac+Cu 的负相关变化, 即季风活动增强时 DC 增加、

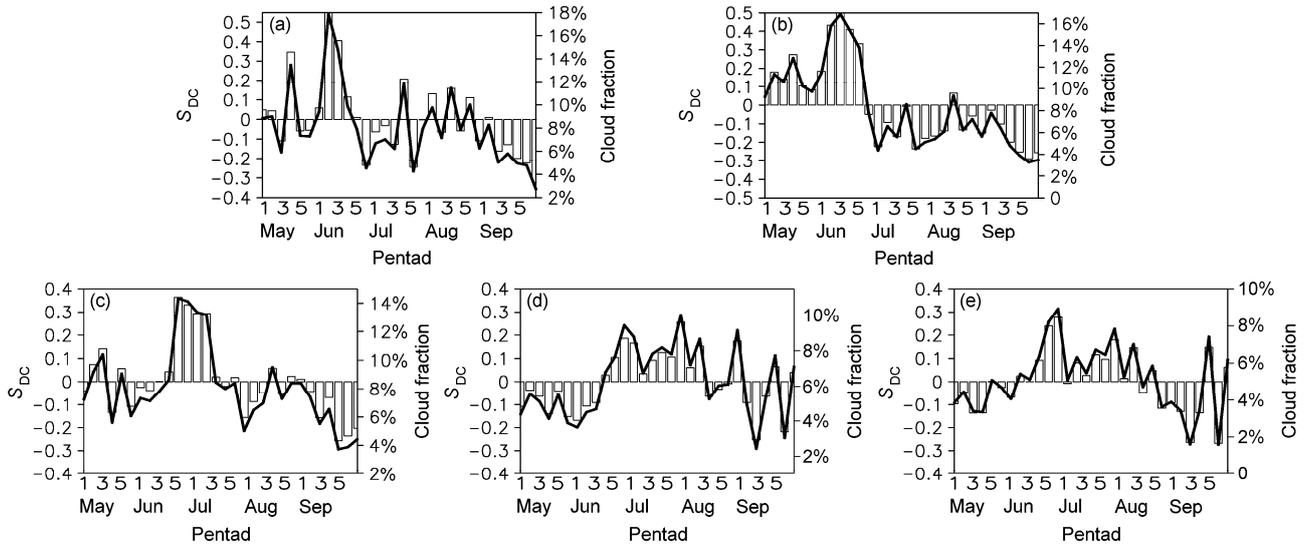


图 8 中国东部五个区域 DC 云量 (%，实线，右侧 y 轴) 与云指数  $S_{DC}$  (直方图，左侧 y 轴) 的逐候变化: (a) 1 区、(b) 2 区、(c) 3 区、(d) 4 区、(e) 5 区

Fig. 8 Pentad variation of cloud fraction (%; solid line; right coordinate) of DC and cloud index  $S_{DC}$  (histogram, left coordinate) in five regions in eastern China: (a) Region 1; (b) region 2; (c) region 3; (d) region 4; (e) region 5

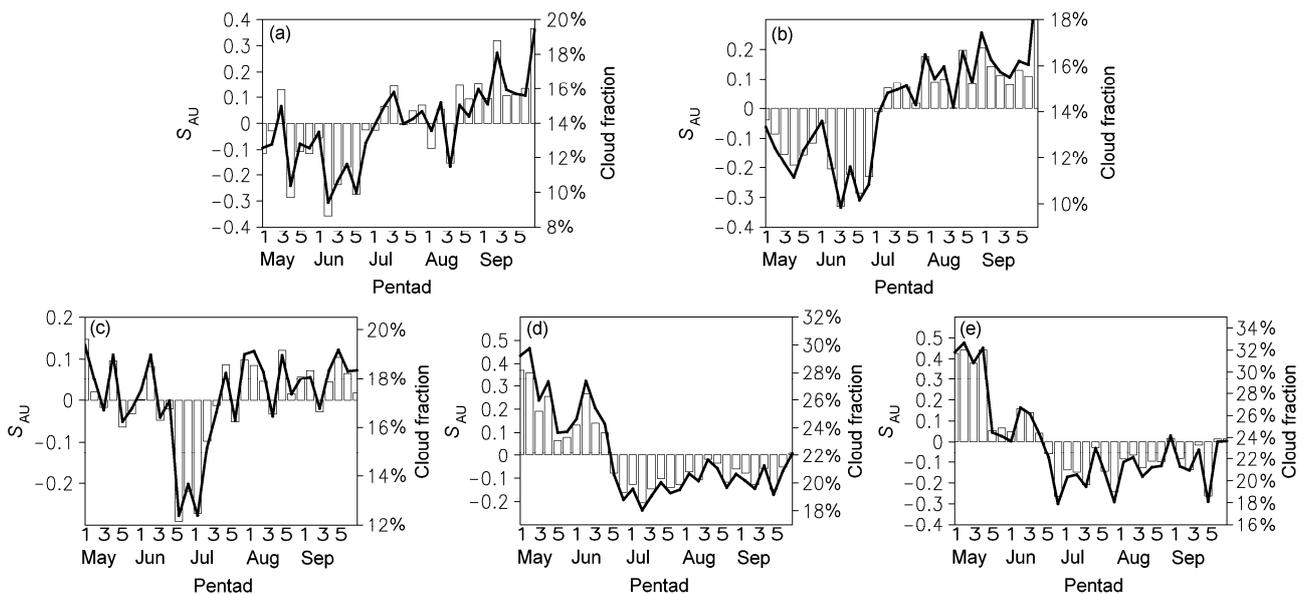


图 9 同图 8, 但为 Ac+Cu 云量与云指数  $S_{AU}$

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for cloud fraction of Ac+Cu and cloud index  $S_{AU}$

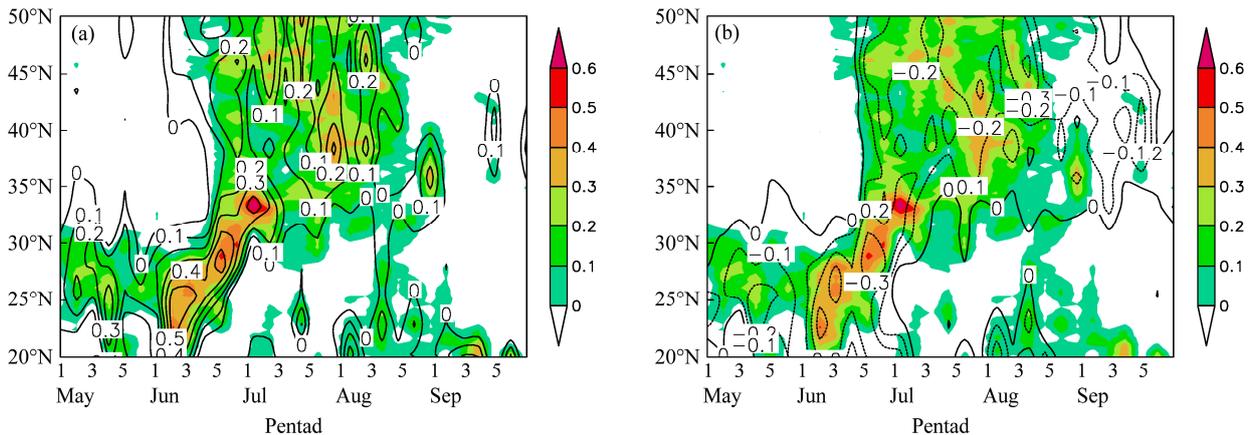


图 10 1998~2007 年 5~9 月 110°~120°E 候平均标准降水指数  $S_{\text{Rain}}$  (阴影) 与 (a)  $S_{\text{DC}}$  云指数 (等值线)、(b)  $S_{\text{AU}}$  云指数 (等值线) 的时间纬度剖面

Fig. 10 Time-latitude cross sections of pentad-mean standard rainfall index  $S_{\text{Rain}}$  (shaded) and (a) cloud index  $S_{\text{DC}}$  (solid line) and (b) cloud index  $S_{\text{AU}}$  (solid line) averaged in 110°-120°E from May to September 1998-2007

Ac+Cu 减小, 季风活动减弱时 DC 减小、Ac+Cu 增加。

### 4.3 标准降水指数 ( $S_{\text{Rain}}$ ) 与两类云指数 ( $S_{\text{DC}}$ 和 $S_{\text{AU}}$ ) 的对应关系

虽然东亚夏季风的位置、强弱、持续时间的变化受多种天气系统影响, 但最终都表现在云带和雨带的变化上 (He et al., 2007; Zhou et al., 2008, 2009a, 2009b; Luo et al., 2011, 2013)。标准降水指数可通过反映降水的强弱变化, 进而表征季风的时空位置变化; 云指数则能反映某一时间相应云类及云量集中出现的区域, 两者的区域代表性已进行了检验。因此, 季风活动和不同类云的相关变化就可以用标准降水指数和云指数的对应关系来表示。

由图 10 可知,  $S_{\text{DC}} > 0$  的区域与  $S_{\text{Rain}} > 0$  的区域整体对应较好, 其等值线近乎重合, 并且二者大值区也在时空分布上一致 (图 10a), 进一步分析可知, 伴随着季风的爆发、北推, 季风所影响区域降水明显增加, 对应的 DC 云量也显著增加, 并且与降水保持同步。  $S_{\text{AU}} < 0$  的区域与  $S_{\text{Rain}} > 0$  的区域整体上对应, 并且其极值区与降水的极值区在时间上保持一致 (图 10b), 可见伴随着季风的爆发、移动, 季风所影响区域降水明显增加时, Ac+Cu 总云量明显减小, 并且与降水保持同步。

前面已经分区域研究了降水量和各类云量在各个区域的对应关系, 为了进一步验证季风降水与 DC、Ac+Cu 在不同地区的相关关系, 还分析了  $S_{\text{Rain}}$  和  $S_{\text{DC}}$ 、 $S_{\text{AU}}$  在五个子区域的逐候平均变化, 见图 11, 计算了其相关系数, 并对相关系数进行了信度

检验 (表 3)。

由图 11 可以看出, 从 5 月 1 候到 9 月 6 候, 五个区域  $S_{\text{Rain}}$  与  $S_{\text{DC}}$  表现为一致的变化趋势,  $S_{\text{Rain}}$  与  $S_{\text{AU}}$  则表现为相反的变化趋势, 并且  $S_{\text{Rain}}$  的极大值分别与  $S_{\text{DC}}$  的极大值、 $S_{\text{AU}}$  的极小值有很好的对应关系, 其极值从 1 区到 5 区渐次出现。

表 3 标准降水指数  $S_{\text{Rain}}$  与云指数  $S_{\text{DC}}$ 、 $S_{\text{AU}}$  的相关性

Table 3 The correlation between standard rainfall index and cloud indices  $S_{\text{DC}}$  and  $S_{\text{AU}}$

	不同子区域两类指数的相关系数				
	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区
$S_{\text{Rain}}$ 与 $S_{\text{DC}}$	0.92	0.95	0.88	0.90	0.75
$S_{\text{Rain}}$ 与 $S_{\text{AU}}$	-0.77	-0.78	-0.67	-0.63	-0.66

注: 均通过了 0.01 的显著性水平检验

在 5~9 月东亚夏季风活动的时间内, 五个子区域  $S_{\text{DC}}$  与  $S_{\text{Rain}}$  呈显著的正相关,  $S_{\text{AU}}$  与  $S_{\text{Rain}}$  呈显著的负相关 (表 3), 表明随着季风的爆发和北推, 季风所影响的区域, 降水量增加, DC 云量相应的随之增加, 而 Ac+Cu 云量减小。云指数和降水指数的稳定变化关系证明了不同类型云量的变化也可以表征季风活动。

## 5 结论

前人从季风高温高湿的特征出发定义了各种温湿指标表征季风活动, 但用云作为指标表征季风活动的研究工作目前并不多见。DC 以及 Ac+Cu 与季风活动的对应变化关系证明可以从云的角度出发定义相应的指标表征季风活动。

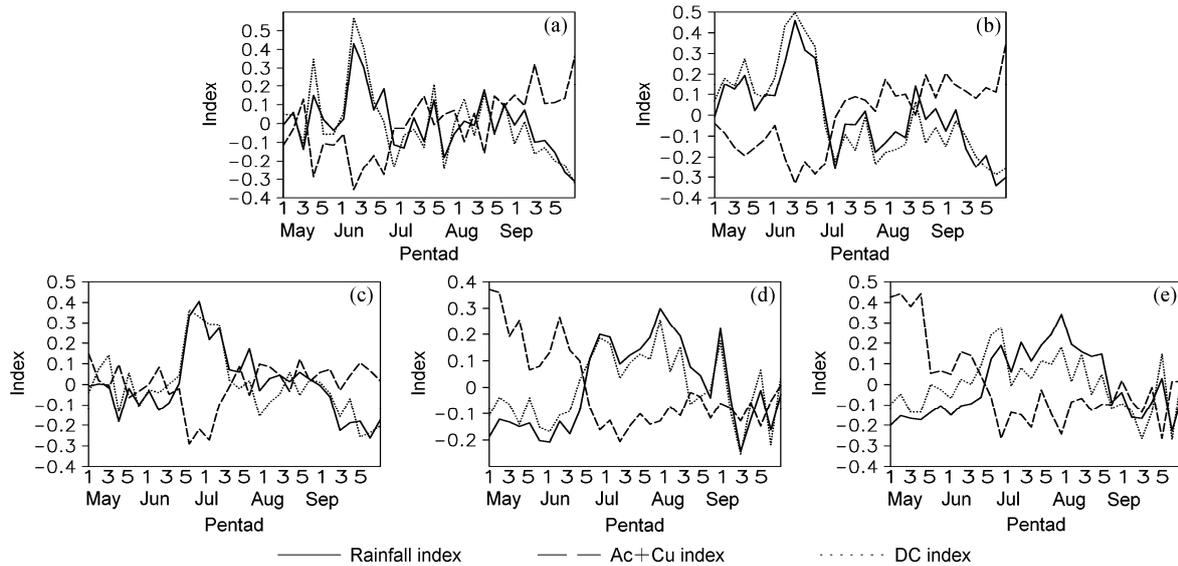


图 11 标准降水指数  $S_{\text{Rain}}$  (实线) 与 DC 云指数  $S_{\text{DC}}$  (点线)、Ac+Cu 云指数  $S_{\text{AU}}$  (虚线) 在中国东部五个子区域的逐候变化: (a) 1 区、(b) 2 区、(c) 3 区、(d) 4 区、(e) 5 区

Fig. 11 Pentad variation of standard rainfall index (solid line), cloud index of DC (dotted line) and cloud index of Ac+Cu (dashed line) in five regions in eastern China: (a) Region 1; (b) region 2; (c) region 3; (d) region 4; (e) region 5

本文根据不同地区降水集中时段以及降水量等气候特征, 结合中国气候区划(温度带及干湿区)及不同地域的地形特征, 把受东亚季风影响的中国东部地区划分为五个子区域: 华南沿海地区、江南地区、江淮流域、华北地区、内蒙古东部地区。通过分析五个区域候平均降水量和不同类型云量的相关性, 研究了东亚夏季风活动与不同云类的对应关系。结果表明: (1) DC、Cs 与降水在五个区域呈显著的正相关, 表明东亚夏季风活动增强时对流云量明显增加; (2) Ac 与 Cu 之和在五个区域与降水呈负相关, 表明夏季风活动增强时, Ac 和 Cu 云量会相应减小; (3) St、Sc 在南方与降水呈显著的负相关, 但在北方却与降水呈显著的正相关, 说明我国南方季风活动较强时对流云增加, 北方在季风活动较强时层状云和对流云均有所增加; (4) As 和 Ns 虽然也与季风降水有正相关, 即东亚夏季风到来时层云降水也有所增加, 但其显著性在各区并不一致, 因此, As 和 Ns 在表征季风活动时指示意义并不强。

在尽可能保留降水信息的基础上, 借鉴前人的方法, 定义了标准降水指数  $S_{\text{Rain}}$ , 在候时间尺度上分析了其与降水的时空匹配关系, 发现  $S_{\text{Rain}}$  大值区的移动能较好的表征季风活动, 其到达某一区域的

时间与以往对东亚夏季风的气候统计特征相一致。仿照降水指数的定义方法, 分别定义了两类云指数  $S_{\text{DC}}$  和  $S_{\text{AU}}$ , 两类云指数能够反映某一区域云类及其云量的集中变化。

研究了标准降水指数  $S_{\text{Rain}}$  和云指数  $S_{\text{DC}}$ 、 $S_{\text{AU}}$  之间的对应关系, 发现季风活动影响到某地区使该地区降水增加时, 相应的 DC 云量随之增加, Ac+Cu 云量随之减少, 并且降水达到极大值时, DC 云量也达到极大值, Ac+Cu 云则为极小值, 反之亦然。该结论说明 DC 以及 Ac+Cu 总云量与季风活动具有较好的对应变化关系, 可用不同类型云量表征东亚夏季风活动。

### 参考文献 (References)

蔡广珍, 王东平, 贾小琴, 等. 2010. 临夏盛夏地方性云的统计特征及其对降水的指示关系 [J]. 干旱气象, 28 (3): 338-341. Cai Guangzhen, Wang Dongping, Jia Xiaoqin, et al. 2010. Statistical character about parochial cloud and its instruction relation to rainfall in midsummer in Linxia of Gansu Province [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 28 (3): 338-341, doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2010.03.016.

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.

- Chen G T J. 1994. Large-scale circulations associated with the East Asian summer monsoon and the Mei-yu over South China and Taiwan [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 72 (6): 959–983.
- 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 2005a. 西北地区空中云水资源的时空分布特征 [J]. *高原气象*, 24 (6): 905–912. Chen Yonghang, Huang Jianping, Chen Changhe, et al. 2005a. Temporal and spatial distributions of cloud water resources over northwestern China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (6): 905–912, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2005.06.009.
- 陈勇航, 黄建平, 王天河, 等. 2005b. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系 [J]. *应用气象学报*, 16 (6): 717–727. Chen Yonghang, Huang Jianping, Wang Tianhe, et al. 2005b. Temporal and spatial distribution of the different clouds over northwestern China with the relation to precipitation [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 16 (6): 717–727, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.06.002.
- Ding Y H. 2004. Seasonal March of the East Asian Summer Monsoon [M]// Chang C P. *East Asian Monsoon*. Singapore: World Scientific Publishing, 3–53.
- 丁一汇, 王绍武, 郑景云, 等. 2013. 中国自然地理系列专著: 中国气候 [M]. 北京: 科学出版社. Ding Yihui, Wang Shaowu, Zheng Jingyun, et al. 2013. *China Natural Geography Monograph Series: Chinese Climate (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press.
- 杜振彩, 黄荣辉, 黄刚, 等. 2011. 亚洲季风区积云降水和层云降水时空分布特征及其可能成因分析 [J]. *大气科学*, 35 (6): 993–1008. Du Zhencai, Huang Ronghui, Huang Gang, et al. 2011. The characteristics of spatial and temporal distributions of convective rainfall and stratiform rainfall in the Asian monsoon region and their possible mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 993–1008, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.01.
- 方思达, 江志红. 2013. 全球变暖背景下江淮地区降水强度分布结构变化的特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 18 (6): 757–766. Fang Sida, Jiang Zhihong. 2013. Analysis of the change in the precipitation intensity distribution in the Yangtze-Huaihe River basin under global warming [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (6): 757–766, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12050.
- He J H, Ju J H, Wen Z P, et al. 2007. A review of recent advances in research on Asian monsoon in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (6): 972–992, doi:10.1007/s00376-007-0972-2.
- 何金海, 祁莉, 韦晋, 等. 2007. 关于东亚副热带季风和热带季风的再认识 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1257–1265. He Jinhai, Qi Li, Wei Jin, et al. 2007. Reinvestigations on the East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1257–1265, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.20.
- 洪延超, 黄美元, 王首平. 1984. 梅雨云系中亮带不均匀性的理论探讨 [J]. *大气科学*, 8 (2): 197–204. Hong Yanchao, Huang Meiyuan, Wang Shouping. 1984. A theoretical study on inhomogeneity of bright band in Mei-yu frontal cloud system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 8 (2): 197–204, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1984.02.10.
- 胡亮, 李耀东, 何金海. 2010. 东亚热带季风与副热带季风降水特征研究的回顾与展望 [J]. *热带气象学报*, 26 (6): 813–818. Hu Liang, Li Yaodong, He Jinhai. 2010. Review of and outlook on the study of precipitation associated with East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 26 (6): 813–818, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.06.023.
- 胡亮, 李耀东, 杨松, 等. 2011. 东亚热带与副热带季风区对流降水和层云降水季节变化特征对比分析研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 41 (8): 1182–1191. Hu Liang, Li Yaodong, Yang Song, et al. 2011. Seasonal variability in tropical and subtropical convective and stratiform precipitation of the East Asian monsoon [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (10): 1595–1603, doi:10.1007/s11430-011-4225-y.
- Huang R H, Zhou L T, Chen W. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (1): 55–69, doi:10.1007/BF03342050.
- 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:10.3321/j.issn:0375-5444.2006.07.001.
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. *J. Hydrometeor.*, 5 (3): 487–503, doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2.
- 李跃清, 张琪. 2014. 西南地区夏季云量与降水的关系特征分析 [J]. *自然资源学报*, 29 (3): 441–453. Li Yueqing, Zhang Qi. 2014. Contemporaneous relationships between summer cloudiness and precipitation over Southwest China [J]. *J. Nat. Resour. (in Chinese)*, 29 (3): 441–453, doi:10.11849/zrzyxb.2014.03.008.
- 李昉英, 方乐铨, 寇雄伟. 2014. 卫星—地基—模式统一的自动观测云分类原则和标准的研究 [J]. *地球物理学报*, 57 (8): 2433–2441. Li Yunying, Fang Lexin, Kou Xiongwei. 2014. Principle and standard of auto-observation cloud classification for satellite, ground measurements and model [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 57 (8): 2433–2441, doi:10.6038/cjg20140805.
- 刘晓春, 范水勇, 毛节泰. 2012. 云顶参数与降水间关系的统计分析和数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 17 (2): 125–138. Liu Xiaochun, Fan Shuiyong, Mao Jietai. 2012. Statistic analysis and numerical simulation on the relationship between cloud top parameters and precipitation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (2): 125–138, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10120.
- 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.
- Luo Y L, Zhang R H, Qian W M, et al. 2011. Intercomparison of deep convection over the Tibetan Plateau–Asian monsoon region and subtropical North America in boreal summer using CloudSat/CALIPSO data [J]. *J. Climate*, 24 (8): 2164–2177.
- 潘昉, 沈艳, 宇婧婧, 等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验 [J]. *气象学报*, 70 (6): 1381–1389. Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70 (6): 1381–1389, doi:10.

- 11676/qxxb2012.116.
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80(11): 2261–2287, doi:10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2.
- 沈艳, 潘昞, 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]. *Trans. Atmos. Sci. (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.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. New York: Oxford University Press, 60–92.
- 涂长望, 黄仕松. 1944. 中国夏季风之进退 [J]. *气象学报*, 18 (1): 1–20. Tu Changwang, Huang Shisong. 1944. The advances and retreats of the summer monsoon in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 18 (1): 1–20.
- 王青, 钟亦侠, 吴兮, 等. 2009. 浅析郴州云与降水的关系 [J]. *湘南学院学报*, 30 (5): 48–50, 59. Wang Qing, Zhong Yixia, Wu Xi, et al. 2009. Analysis of relationship between clouds and precipitation in Chenzhou [J]. *Journal of Xiangnan University (in Chinese)*, 30 (5): 48–50, 59, doi:10.3969/j.issn.1672-8173.2009.05.015.
- Xie P P, Xiong A Y. 2011. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D21): D21106, doi:10.1029/2011JD016118.
- 严异德, 张国庆. 2007. 结古地区云与降水关系的分析 [J]. *青海科技*, 14 (5): 19–21, 22. Yan Yide, Zhang Guoqing. 2007. Analysis of relationship between clouds and precipitation in Jiegu [J]. *Qinghai Science and Technology (in Chinese)*, 14 (5): 19–21, 22, doi:10.3969/j.issn.1005-9393.2007.05.008.
- 尤丽钰, 沈如桂, 冯志强. 1990. 高层辐散对热带季风发展的作用 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 29 (3): 168–176. You Liyu, Shen Rugui, Feng Zhiqiang. 1990. Effects of divergent fields in the upper troposphere to the development of summer monsoons in East Asia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese)*, 29 (3): 168–176.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水 [J]. *应用气象学报*, 9 (增刊): 17–23. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Asia and its influence on the rainfall over eastern China in summer [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 9 (Suppl): 17–23.
- 赵勇, 崔彩霞, 贾丽红, 等. 2013. 中国天山区域云量的变化及其与降水的关系 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 7 (6): 1–7. Zhao Yong, Cui Caixia, Jia Lihong, et al. 2013. The change of cloud coverage in Tianshan Mountain in China and its relation with precipitation [J]. *Desert and Oasis Meteorology (in Chinese)*, 7 (6): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2013.06.001.
- Zhou T J, Zhang L X, Li H M. 2008. Changes in global land monsoon area and total rainfall accumulation over the last half century [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (16): L16707, doi:10.1029/2008GL034881.
- Zhou T J, Wu B, Wang B. 2009a. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian–Australian monsoon? [J]. *J. Climate*, 22 (5): 1159–1173, doi:10.1175/2008JCLI2245.1.
- Zhou T J, Wu B, Scaife A A, et al. 2009b. The CLIVAR C20C project: Which components of the Asian–Australian monsoon circulation variations are forced and reproducible? [J]. *Climate Dyn.*, 33 (7–8): 1051–1068, doi:10.1007/s00382-008-0501-8.
- Zhu Q G, He J H, WANG P X. 1986. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 3 (4): 466–477, doi:10.1007/BF02657936.
- 左瑞亭, 曾庆存, 张铭. 2004. 季风及季风与西风带相互关系的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 28 (1): 7–22. Zuo Ruiting, Zeng Qingcun, Zhang Ming. 2004. A numerical simulation of monsoon and the correlation between monsoon and westerlies [J]. *J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 28 (1): 7–22, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.01.02.