

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 Yuning, 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.

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

高翠翠^{1,2} 李昀英¹ 寇雄伟³ 孙国荣¹

¹ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 韶关市气象局, 广东韶关 512000

³ 解放军 94595 部队, 山东高密 261500

摘 要 基于 1985~2011 年逐时地面台站观测云资料, 分析了对流云和层状云及其比例关系的时空演变特征, 结合逐日融合降水资料研究了对流云、层状云与季风雨带的对应关系。结果表明, 中国东部暖季 (5~9 月) 对流云发生频率平均为 15.4%, 层状云为 30.0%。对流云与层状云发生频率的比例在广东、广西、海南省东部和贵州省大部分地区大于 1, 其它地区均小于 1。伴随季风雨带的北进南退, 层状云发生频率和云量中心均与降水中心对应, 且层状云云带与季风雨带位置吻合, 随时间的演变趋势也相同, 说明季风雨带主要由层状降水构成, 对流云发生频率和云量大值中心则位于季风雨带南侧。对流云和层状云发生频率/云量的变化在华南地区和江淮流域呈显著负相关, 云的类型主要由大气稳定度决定。对流云和层状云发生频率在华北地区呈显著正相关, 水汽是形成云的决定因素。就降水频率而言, 华南地区层状云降水和层状云降水各占一定的比例, 而江淮流域和华北地区层状云降水频率更大。

关键词 对流云 层状云 降水 比例关系

文章编号 1006-9895(2017)03-0490-11

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1610.16138

The Ratio of Convective Clouds to Stratiform Clouds and Corresponding Precipitation during the Warm Season in Eastern China

GAO Cuicui^{1,2}, LI Yuning¹, KOU Xiongwei³, and SUN Guorong¹

¹ Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² Shaoguan Meteorological Office, Shaoguan, Guangdong 512000

³ 94595 Troops of PLA, Gaomi, Shangdong 261500

Abstract Based on hourly cloud observations at weather stations in China from 1985 to 2011, temporal and spatial distributions of convective and stratiform clouds and the ratio of convective to stratiform clouds are analyzed. Combined with merged daily precipitation data, the corresponding relations between convective (stratiform) clouds and monsoon rain belt are studied. The results indicate that in the warm season (May–September), the averaged occurrence frequency of convective clouds is 15.4% and that of stratiform clouds is 30.0% in eastern China. The ratio of occurrence frequency

收稿日期 2016-02-23; **网络预出版日期** 2016-11-14

作者简介 高翠翠, 女, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事气候学研究。E-mail: cc135900@163.com

通讯作者 李昀英, E-mail: liyuning2005@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、41205016

Founded by the China R&D Special Fund for Public Welfare Industry (Grant 201306068), National Natural Science Foundation of China (Grants 41475069, 41205016)

of convective clouds to that of stratiform clouds is greater than 1 in Guangdong, Guangxi, eastern Hainan and most areas of Guizhou Province, while it is less than 1 in other regions. The center of maximum occurrence frequency and areas of large amounts of stratiform clouds match well with the center of the monsoon rainfall. Their northward advances and southward retreats are consistent with the monsoon rain belt. This phenomenon indicates that precipitation on the monsoon rain belt is largely stratiform precipitation. On the other hand, the center of maximum occurrence frequency and areas of large amounts of convective clouds are located to the south of the monsoon rain belt. In South China and the Yangtze-Huaihe valley, changes in the occurrence frequency and amounts of convective clouds are opposite to those of stratiform clouds because the cloud types are dependent on atmospheric stratification. However, in northern China, convective clouds are positively correlated with stratiform clouds because atmospheric water vapor content is the critical factor that determines the formation and type of clouds. When the water vapor content increases in the monsoon season, the occurrence frequency and cloud cover of convective clouds and stratiform clouds both increase. If only considering the rainfall frequency, convective precipitation and stratiform precipitation coexist in southern China, but stratiform precipitation accounts for most of the precipitation in the Yangtze-Huaihe valley and North China.

Keywords Convective clouds, Stratiform clouds, Precipitation, Ratio of convective clouds to stratiform clouds

1 引言

云是大气动力过程和热力过程的外部表现,能反映大气内部的运动状况。对流云和层状云生成于不同稳定状态的大气环境中,但有时会伴随出现。中国东部夏季受副热带季风环流的影响,降水表现为对流降水和层云降水混合的特征,降水主要产生于地面观测的浓积云、积雨云、雨层云、层积云和层云/碎层云(李昀英等, 2015)。不同性质的降水是通过不同的微物理过程实现的,对流降水主要通过云水碰并增长形成雨滴,而层云降水主要是云冰粒子表面通过水汽扩散的凝结增长形成雨滴(Rutledge and Houze, 1987)。由于成云致雨方式不同,对流云和层状云以及它们所产生的降水的潜热加热垂直分布结构存在较大差异,层状云和对流云出现的比例关系在很大程度上决定了整个降水系统潜热加热的中心位置以及加热廓线的垂直梯度(Houze, 1982; Tao et al., 2010; 杜振彩等, 2011)。数值模式对二者比例关系的模拟可显著影响降水的模拟效果,现有的模式对对流降水的模拟普遍偏强,对层状降水则模拟偏弱(胡亮等, 2011; 王晓聪等, 2012)。另外,潜热加热的垂直结构对于 Madden and Julian Oscillation (简称 MJO) 信号的强度和传播也有重要影响,而积云对流凝结加热反馈是 MJO 形成及维持的主要动力学机制(李崇银, 1991),因此研究对流云和层状云的比例关系,对于更好地模拟 MJO 信号的强度和传播,以及提高模式对降水的模拟效果具有重要意义。

观测资料的分析结果可为模式模拟提供验证资料。学者们通常采用卫星资料研究云与降水的关

系。基于 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星资料,宋明坤等(2010)和胡亮等(2011)发现南海季风和东亚季风爆发前后降水的性质发生了很大变化,季风爆发后热带地区层云降水对总降水的贡献增大,而副热带季风区对流降水所占比重增加。刘鹏等(2010)的研究结果表明夏季中国南方层云降水频次是对流降水频次的 2 倍以上,而对流降水强度至少是层云降水强度的 4 倍,就整个中国南方而言,对流降水和层云降水对总降水量的贡献相当。傅云飞等(2007)和尚博等(2012)分别利用 TRMM 资料和 CloudSat 资料分析了降水云和非降水云的结构特征。这些研究侧重于不同性质降水的气候特征以及降水云和非降水云的结构特征,很少涉及对流云和层状云与降水的关系。李昀英等(2015)和寇雄伟等(2016)分析了中国地区不同类型云与降水的对应关系,但未涉及对流云与层状云比例关系的变化。由于卫星主要从云顶对云进行观测,对低云的观测误差较大,而地面观测则对低云的判识具有明显优势。因此本文利用逐时地面台站观测云资料和逐日融合降水资料,对中国东部暖季(5~9 月)对流云和层状云及其比例关系的时空分布特征进行研究,以期增加对对流云和层状云的比例关系以及对流云和层状云与季风雨带推进关系的认识,为提高模式对中国东部降水和 MJO 的模拟效果提供参考依据。

2 资料与方法

2.1 资料

统计分析采用的云资料是经过质量控制的全国台站 1985~2011 年 5~9 月的逐时地面观测云资

料, 该云资料所有站点的出勤率均在 90% 以上。该资料集包括两个时段的数据, 前一段为 1985~2006 年, 共 114 个站点; 后一段为 1997~2011 年, 共 136 个站点。两段数据的多数站点是重合的, 后一段资料站点略多。该逐时地面观测资料包括总云量、十属云(卷云 Ci、卷积云 Cc、卷层云 Cs、高积云 Ac、高层云 As、雨层云 Ns、层积云 Sc、层云 St、积云 Cu 和积雨云 Cb) 的分云量、各类云云底高度及降水有无等信息, 观测时可能只有一种云出现, 也可能几类云伴随出现, 多种云伴随出现时记录所有观测到的云类。两个时段资料集的可靠性和一致性已通过对比重合时段(1997~2006 年) 总云和各类云的发生频率和云量的观测结果得到验证(高翠翠等, 2015)。由于光强和视觉的原因, 地面人工观测会产生一定的观测误差, 但多年气候平均值可显著减小人工观测的随机性和不稳定性。

降水资料采用中国国家气象信息中心提供的 1998~2011 年 5~9 月的逐日融合降水资料, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。该融合降水资料是由经质量控制的全国 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全球 30 min、8 km 分辨率的 CMORPH (climate prediction center morphing technique) 卫星反演降水产品融合而成。该产品有效结合了地面观测降水和卫星反演降水的优势, 在降水量值和空间分布上比其它资料更合理(沈艳等, 2013; Shen et al., 2014)。该融合降水产品在站点稀疏地区的质量还有待提高, 但本文研究的中国东部地区台站稠密且分布较均匀, 在资料融合过程中以台站资料为主, 因此降水量值较准确。

如无特殊说明, 本文统计的云气候值均为 1985~2011 年 5~9 月的站点平均值, 云随时间的演变均为 1985~2011 年多年平均日值或旬值的演变; 降水量的气候值为 1998~2011 年 5~9 月的格点平均值, 降水随时间的演变为 1998~2011 年的多年平均日值随时间的演变。

2.2 统计方法

本文根据云的性质将其分为对流云和层状云两类进行分析, 其中对流云包括 Cu 和 Cb, 层状云包括 As、Ns、Sc 和 St, 对流云中的一种云单独出现或两种云同时出现记为对流云出现, 层状云中的一种云单独出现或多种云伴随出现记为层状云出现。对流云和层状云有时候会伴随出现, 两者伴随出现时说明大气层结并不稳定, 本文将这种情况归

类为对流云的发生。因此将暖季对流云的发生频率定义为统计时段内对流云出现次数(对流云单独出现次数与对流云和层状云同时出现次数之和) 占该时段内总观测次数的百分比, 而层状云发生频率则定义为统计时段内层状云单独出现的次数占该时段内总观测次数的百分比。

由于使用逐时观测云资料研究云与季风降水随时间变化的对应关系振荡较明显, 本文计算了对流云和层状云的日发生频率。对流云的日发生频率定义为统计时段内某一日对流云出现的时次占多年间该日观测次数的百分比, 在统计时段内多年某一日的总观测次数为年份数乘以 24 次, 个别站点可能存在个别时次缺测的情况, 但本文统计所用站点的出勤率均在 90% 以上。层状云日发生频率的计算方法与对流云日发生频率的计算方法相同, 但为统计时段内某日层状云单独出现次数占该日观测次数的百分比。对流云与层状云的比例是对流云与层状云发生频率的比值。对流云(层状云) 日云量距平值为统计时段内某日对流云(层状云) 云量的平均值与暖季多年平均对流云(层状云) 云量之差。文中将对流云出现时伴随的降水定义为对流云降水, 将层状云单独存在时伴随的降水定义为层状云降水, 对流云(层状云) 降水频率是对流云(层状云) 降水的次数占总降水次数的百分比。

夏季东亚季风爆发后雨带由我国华南向华北推进, 在推进过程中分别在华南、江淮和华北经历 3 次北跳。本文将中国东部受季风雨带影响的地区划分为 3 个区域, 分别为华南地区 ($21^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$)、江淮流域 ($26^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$) 和华北地区 ($34^{\circ} \sim 41^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$), 分区域分析云发生频率和降水随时间的演变。

3 对流云与层状云发生频率的分布特征

对流云与层状云是在不同大气稳定状态下形成的, 二者的发生频率在中国东部地区分布形势存在显著差异。暖季中国东部对流云发生频率(图 1a) 平均为 15.4%。夏季风爆发后, 我国东部水汽含量明显增大, 大气不稳定性也显著增强(图略), 这为我国南方对流云的形成提供了有利条件。广东、广西、海南和贵州大部分地区对流云的发生频率超过 32%, 大值中心位于海南东部, 最大值达 47.3%。暖季中国东部层状云发生频率(图 1b) 平均为

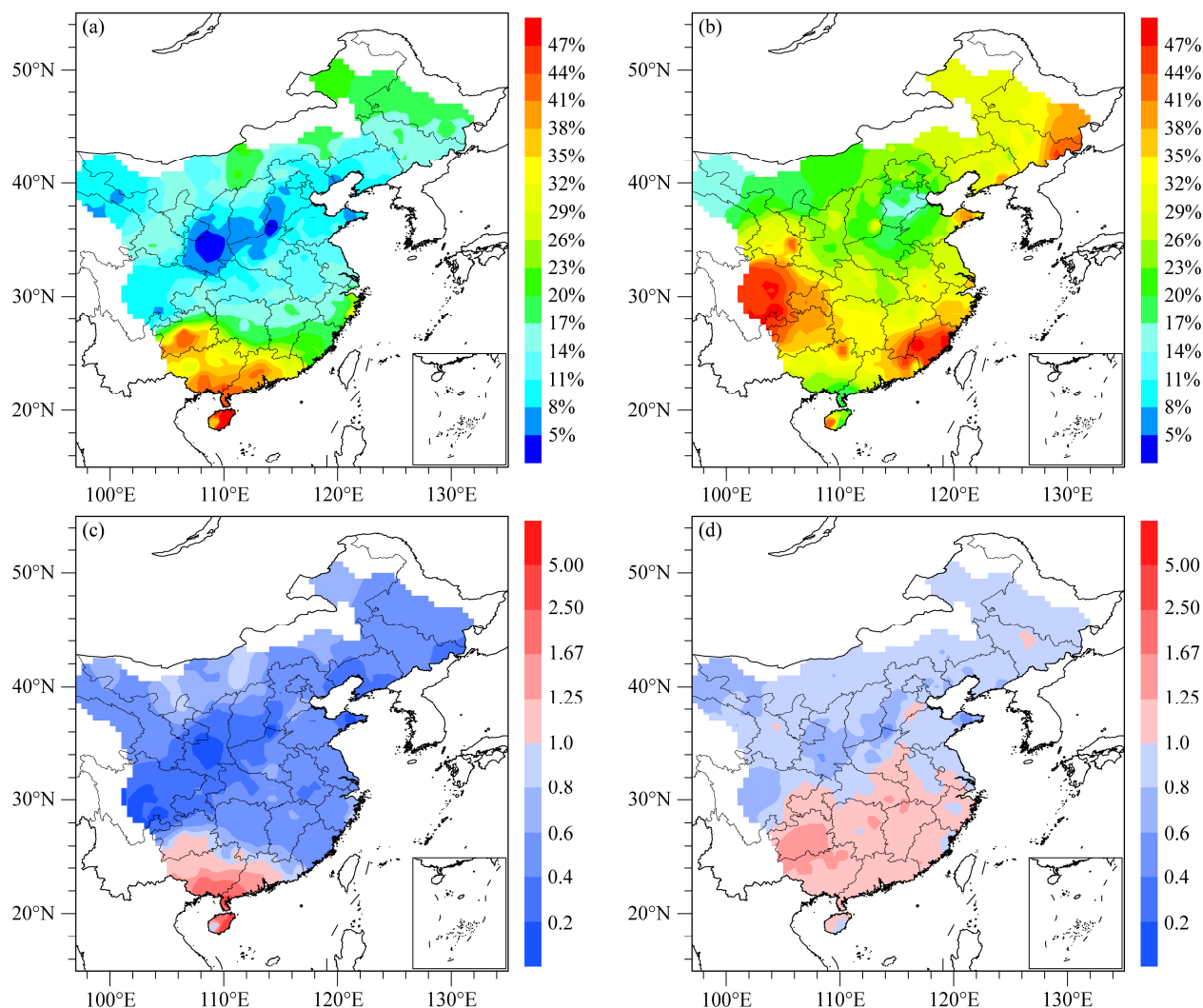


图 1 暖季 (a) 对流云和 (b) 层状云的发生频率; (c) 暖季对流云与层状云发生频率的比例; (d) 暖季对流云事件与层状云事件发生频率的比例

Fig. 1 Occurrence frequencies of (a) convective clouds and (b) stratiform clouds in the warm season; (c) the frequency ratio of convective clouds to stratiform clouds, and (d) the frequency ratio of convective cloud events to stratiform cloud events in the warm season

30.0%，存在 3 个大值中心，分别位于四川盆地（53.0%）、福建（52.7%）和长白山一带（47.2%）。四川盆地层状云的形成与青藏高原的大地形密切相关，是水汽在高原东侧逆温层下堆积的结果（李昉英等，2003）。对流云与层状云发生频率的比例（图 1c）在广东、广西、海南东部及贵州大部分地区大于 1，其它地区则小于 1，说明这些地区对流云发生频率大于层状云发生频率。总之，我国暖季对流云主要分布于华南沿海，而层状云的发生频率远大于对流云的发生频率，大值区位于四川盆地、福建地区和长白山一带。

中国东部地区对流云平均持续时数较小，不超过 4.2 h，而层积云和雨层云的平均持续时数分别为 9.6 h 和 6.1 h（高翠翠等，2015）。层状云出现时维持时间明显大于对流云，因此为了消除云的持续性特征对云发生频率的影响，增强可比性，以云事件为单位分析了对流云和层状云发生频率的比例关系。本文将连续出现或间断时间小于 1 h 的云定义为一个云事件，中断时间为 2 h 及 2 h 以上的云则被定义为不同的云事件。按照云事件统计的对流云和层状云发生频率的比例如图 1d 所示，北方对流云事件与层状云事件发生频率比例的分布形势与

图 1c 类似, 但比例较大, 即以事件为单位进行分析减小了对流云事件与层状云事件发生频率的差异。图 1d 表明对流云事件与层状云事件发生频率比例为 1 的平均位置位于长江中下游附近, 其南侧对流云事件发生频率较大, 北侧层状云事件发生频率较大。对流云与层状云事件发生频率比例大于 1 的范围较对流云与层状云发生频率的比例有所北扩, 差异较大的区域位于长江流域到南岭之间, 主要是由于该区域对流云事件的发生频率与对流云发生频率的分布形势差异不大, 而长江流域到南岭地区层状云的持续时间较长, 以事件为单位计算得到的该区域层状云事件的发生频率较小, 因此以事件为单位计算的对流云与层状云发生频率的比例在该区域大于 1。

4 对流云与层状云随季风推进的演变特征

4.1 云出现频率随季风推进的演变

季风雨带的北进南撤是东亚夏季风进退活动最直接的表现, 多年候平均 6 mm d^{-1} 等雨量线的北进能很好的表征夏季风的北进 (Lau and Yang, 1997), 因此该部分使用季风雨带的多年日平均 6 mm d^{-1} 的等雨量线表征东亚夏季风的位置, 研究对流云和层状云随季风推进的演变特征。5~9 月 $110^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 纬向平均的对流云和层状云的发生频率如图 2 填色部分所示, 等值线则代表 $110^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 纬向平均的降水量。

图 2a 为对流云发生频率和降水量随时间的演变图, 从图中可以看出 5 月中旬前后华南地区雨量明显增大, 此时对流云发生频率大于其暖季平均值 (15.4%) 的大值区位于季风雨带南侧。6 月中旬季风雨带和对流云发生频率的大值区开始向北推进和扩展, 到 7 月上旬雨带中心北推至 $32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 附近的江淮流域, 对流云发生频率的大值带北扩至 $29^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 。7 月中旬季风雨带再次向北推进, 8 月初到达华北地区, 但华北地区降水量明显小于华南地区和江淮流域。对流云发生频率的大值区在 7 月下旬北扩至 $34^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 附近, 并且自 7 月下旬到 8 月中旬维持在江淮流域。8 月中旬后华北地区和江淮流域的降水量迅速减小, 对流云带迅速南撤, 9 月中旬两者都撤回 22°N 左右的华南地区。图 2a 表明, 随季风雨带的北进, 对流云发生频率大值区向北扩展, 但其大值区位于雨带南侧, 即对流云主要

发生在季风影响区。

图 2b 表明层状云发生频率与季风雨带的大值中心基本重合, 并且表现出与季风雨带较一致的北推过程。5 月份至 6 月上旬层状云发生频率的大值中心和雨带维持在 22°N 以北的华南地区, 并且两者的大值中心基本吻合, 说明华南中北部的前汛期降水主要为层状云降水。6 月中旬到 8 月初, 随季风雨带的北推, 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, 8 月中旬层状云云带和季风雨带到达华北地区。随层状云云带的北进, 其南侧层状云的发生频率明显减小。值得注意的是 7~9 月, 另一条层状云大值带维持在 $24^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$, 均值在 36% 左右, 位置不随时间变化, 该大值带位于华南后汛期雨带和对流云发生频率大值带北侧, 这表明相对于层状云降水, 对流云降水对华南后汛期降水的贡献更大。在云发生频率大值带和季风雨带推进的过程中, 可以发现云和季风的演变是不对称的, 北进的过程比较缓慢, 而南撤过程相对迅速。

图 2a 和 b 表明, 对流云形成的降水零散地分布于季风降水带南侧的季风影响区, 其性质可能是热对流降水; 而季风雨带与层状云带高度重合, 说明季风降水主要由层状云降水构成。

对流云与层状云发生频率的比例 (下文简称“比例”) 随时间表现出明显的北跳特征 (图 2c)。5 月至 6 月上旬比例大于 1 的大值中心维持在 22°N 以南, 6 月中、下旬大值带向北推进了 1 个纬度左右, 7 月初北跳至江淮流域, 由于 7 月上、中旬江淮流域对流云多发, 而层状云发生频率较小, 这段时间比例的大值中心维持在江淮流域。比例大于 1 的大值带在 7 月下旬再次北跳, 到达最北位置 36°N , 8 月上旬又南退至 34°N 左右, 并维持到 8 月下旬, 之后迅速南撤。总体上, 比例大于 1 的大值带位于季风雨带的南侧, 且其北进和南撤进程滞后于季风雨带。

为了进一步探讨我国东部对流云与层状云发生频率比例的时空特征, 本文还统计了 6~8 月逐旬对流云与层状云发生频率的比例 (图 3)。6 月上旬比例 (图 3a) 大于 1 的大值带位于贵州南部、广西大部分地区、广东南部和海南东部; 6 月中、下旬比例大值带向北扩展, 广东地区大值带的北扩尤为明显 (图 3b、c), 从图 3b 和 c 也可以看出与 6 月上旬相比, 6 月中、下旬经湖南到湖北东部和河

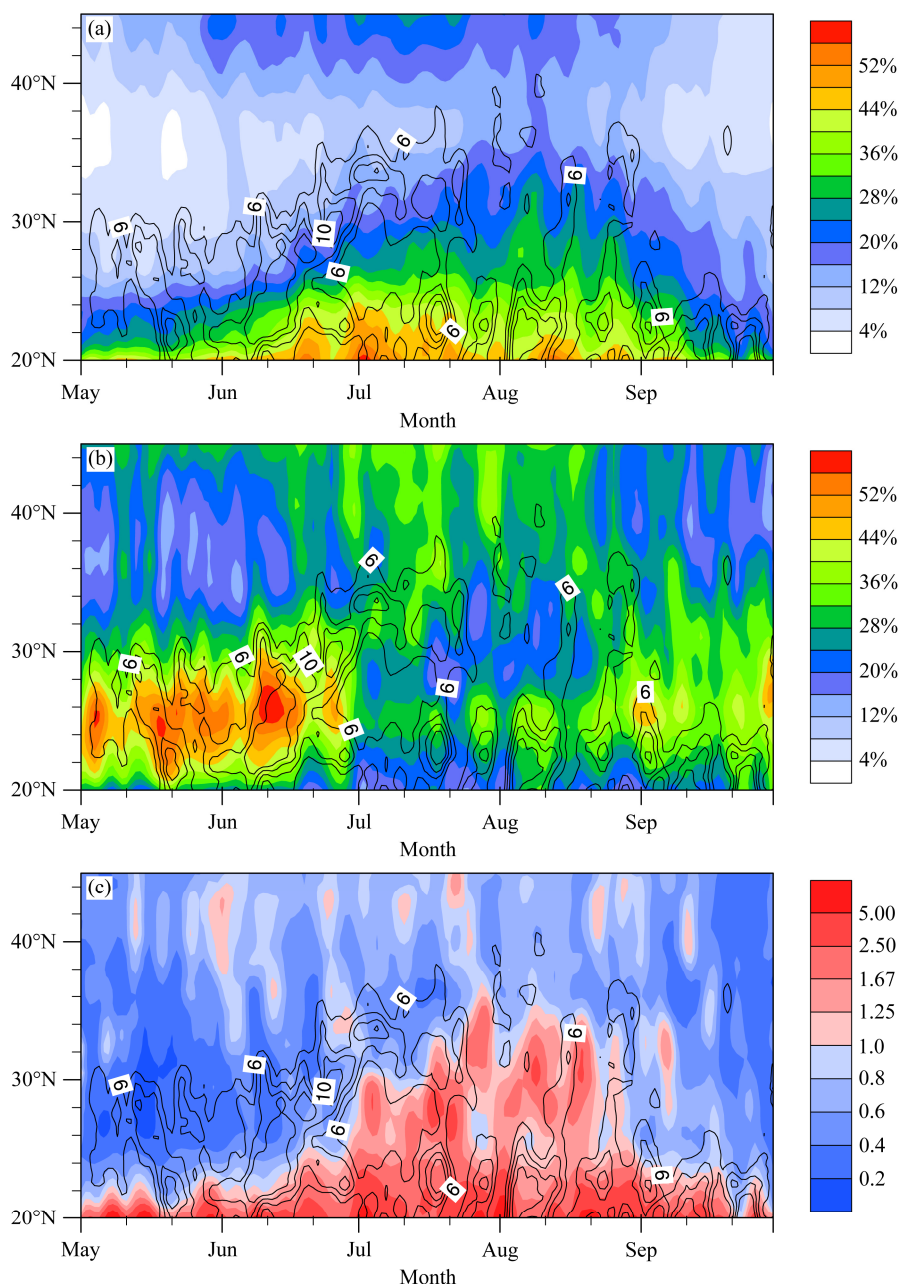


图2 110°~122°E 平均日降水量 (单位: mm; 等值线) 随时间的演变; 110°~122°E 平均 (a) 对流云、(b) 层状云日发生频率 (填色) 以及 (c) 对流云与层状云发生频率的比例 (填色) 随时间的演变

Fig. 2 Variations of precipitation (units: mm; contours) and occurrence frequencies (shaded) of (a) convective clouds, (b) stratiform clouds, and (c) the frequency ratio (shaded) of convective clouds to stratiform clouds, averaged over 110°–122°E

南东部比例随时间逐步增大。7 月上旬比例大于 1 的大值带向北扩展至长江流域, 并且比例明显增大 (图 3d)。7 月中旬比例大于 1 的大值带略微向北推进, 范围变化不大 (图 3e)。7 月下旬到 8 月上旬比例的大值带进一步向北扩展, 8 月上旬比例有 2 个大值中心, 分别位于华南地区和江淮流域 (图

3f、g)。8 月中、下旬比例大值区迅速南撤, 江淮流域比例大于 1 的范围缩小, 比例的值也明显减小。从上面的分析可以看出, 夏季广西和广东地区南部对流云与层状云发生频率的比例始终大于 1, 说明该地区对流云发生频率始终大于层状云发生频率。受季风影响后, 对流云与层状云的比例显著增大。

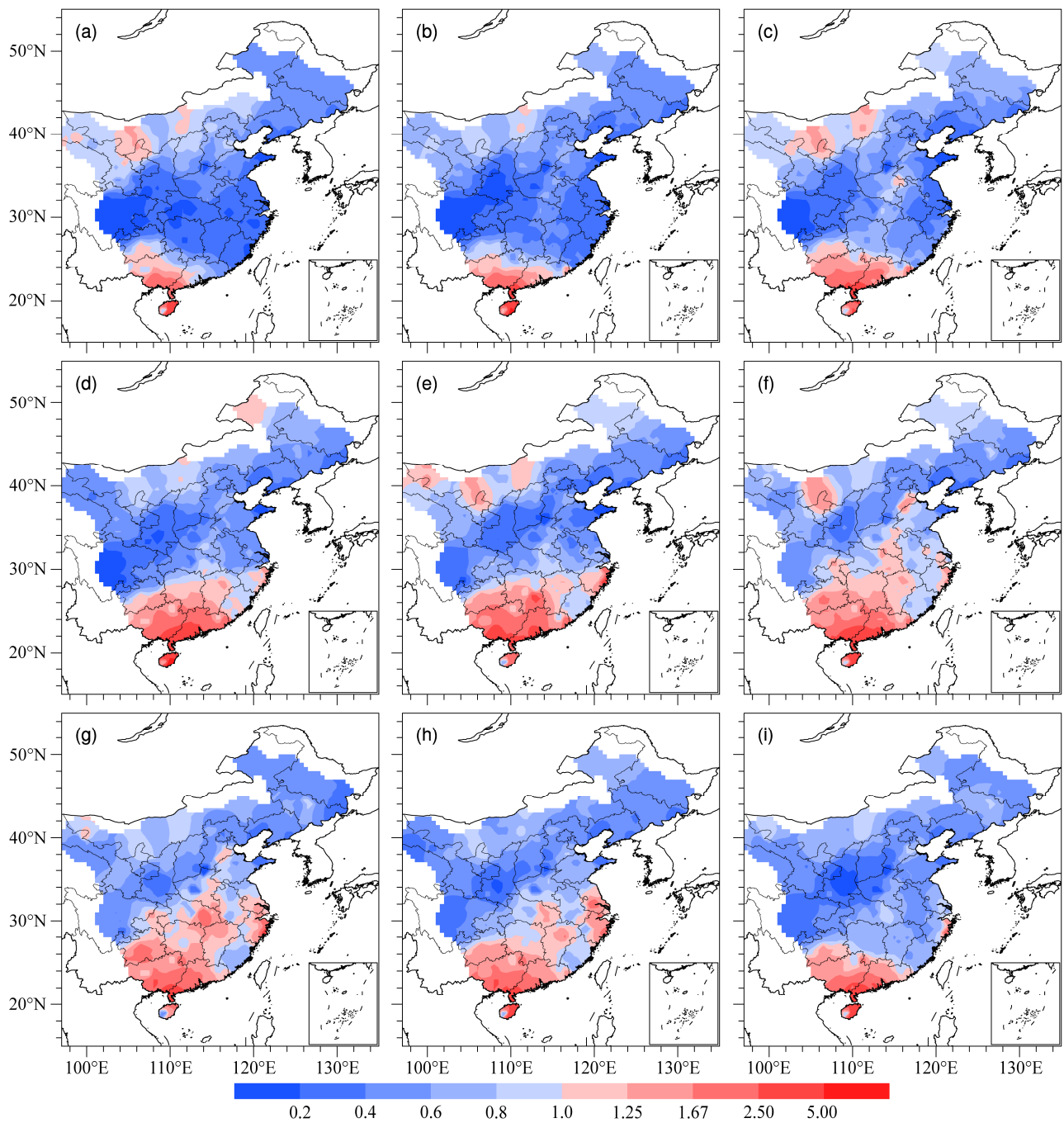


图3 (a、b、c) 6月、(d、e、f) 7月、(g、h、i) 8月对流云与层状云发生频率比例的空间分布: 上旬(左列); 中旬(中间列); 下旬(右列)
Fig. 3 Spatial distribution of 10-day averaged frequency ratio of convective clouds to stratiform clouds in (a, b, c) June, (d, e, f) July, and (g, h, i) August: The first 10 days (left column); the second 10 days (middle column); the third 10 days (right column)

随季风的北进, 比例大值区也逐步向北扩展, 但在中国绝大部分地区, 层状云发生频率仍占绝对优势。

4.2 云量随季风推进的演变

层状云出现时覆盖范围远比对流云大, 为了方便比较两者云量随季风雨带推进的变化, 也为了消

除不同纬度间的差异, 本文计算了对流云和层状云云量的距平值来研究两者云量与季风雨带推进的关系。云量距平值为 1985~2011 年多年平均的日云量与 5~9 月平均云量之差。图 4 填色部分为 110°~122°E 纬向平均的对流云和层状云日云量距

平值的时间纬度剖面图, 等值线表示相应降水量距平值的纬向平均值。

对流云云量大值中心随时间的变化表现出与季风雨带较为一致的特征(图 4a), 但对流云云量大值区位于季风雨带南侧。对流云云量距平值大于 0.2 成的大值区随季风雨带逐步向北推进, 并表现出明显的北跳特征, 这是由于季风雨带的推进主要受西太平洋副热带高压(副高)影响, 而对流云通常出现在副高脊线南侧。副高脊线通常在 6 月中旬出现第一次北跳, 并稳定在 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间; 7 月中旬再次北跳, 越过 25°N , 并于 7 月底或 8 月初到达最北位置。从图 4a 中可以看出对流云云量大值中心也分别于 6 月中旬和 7 月中旬发生北跳, 并于 7 月底到达最北位置, 这与副高北跳的时间和位置基本一致, 可见季风雨带及其南侧的对流云受副高影响显著。

受东亚夏季风影响期间层状云云带与季风雨带随时间的演变较为吻合(图 4b), 说明季风雨带主要由层状云降水构成。5 月中旬至 6 月上旬层状云云带和雨带都维持在华南地区, 为华南前汛期; 6 月上、中旬云带和雨带开始北推, 云量和降水量增加明显, 7 月上旬雨带北推至江淮流域, 形成江淮梅雨; 7 月中旬雨带继续北推, 7 月底到达华北地区, 华北雨季开始; 8 月中旬层状云云带和雨带迅速南撤。另外, 我国北方层状云的云量也随夏季的到来迅速增大, 这主要是由于夏季风为我国北方带来了大量的水汽, 为云的形成提供了有利条件。

综上所述, 随季风雨带的逐步北推, 对流云和层状云均表现出与季风雨带较为一致的北推特征。层状云发生频率和云量的大值带都与季风雨带非常吻合, 且随季风雨带向北推进, 其发生频率和云量中心与雨带中心基本对应, 说明季风雨带主要由层状云降水构成, 且层状云发生频率和云量随时间的演变均能很好的反映季风雨带随时间的位置变化。对流云发生频率和云量大值带都随季风雨带向北推进, 但中心值都位于雨带南侧的季风控制区, 说明季风爆发后被季风控制的地区对流云显著增加, 对流降水量也随之增加, 相应地层状云发生频率降低, 层状降水量也随之减小。

4.3 云与季风降水的关系

中国东部跨越纬度范围大, 自南向北的气候差异显著, 不同区域对流云和层状云发生频率也存在较大差异。为了更好地了解不同区域对流云和层状

云与季风降水的关系, 本文根据云带和季风雨带的移动和北推及其对不同地区的影响, 将中国东部划分为华南地区、江淮流域和华北地区。对 5~9 月对流云和层状云发生频率以及逐日降水量进行区域平均, 分析不同区域对流云与层状云的日发生频率以及两者与降水量的相关关系。

图 5 中点线和实线分别表示标准化的对流云和层状云发生频率随时间的变化, 表 1 给出了各区域对流云与层状云的相关系数及两类云与降水的相关系数。结合图 5 和表 1 进行分析, 发现华南地区和江淮流域对流云和层状云发生频率随时间的变化呈显著负相关, 但华北地区对流云和层状云发生频率呈显著正相关, 相关系数为 0.73。夏季大气不稳定度增加, 为对流云的形成创造了有利条件, 而层状云通常是在相对稳定的大气状态下形成的, 大气的稳定性变差不利于层状云的形成。华南地区和江淮流域对流云的发生频率都表现出随季节增大且在夏季达到最大的特征, 与之相反, 层状云发生频率在夏季达到最小。华北地区对流云和层状云的发生频率几乎同时变化, 层状云发生频率在 7 月中旬达到最大, 对流云在 8 月上旬达到最大值。对流云和层状云云量随时间的变化与两种云发生频率随时间的变化类似。以上分析说明在华南地区和江淮流域水汽充沛, 大气稳定度是决定云类的首要因素。当大气不稳定度增强时, 对流云云量增加而层状云云量减小。在相对干燥的华北地区, 水汽则是决定云量多寡的主要因素, 水汽增大时, 对流云云量和层状云云量同时增加。

前文结果表明对流云和层状云都与季风雨带有密切的关系, 因此对三个区域云与降水的相关关系进行分析。图 5 中虚线表示标准化的降水量随时间的变化, 华南地区和江淮流域层状云发生频率和云量均与降水量呈显著的正相关。从图 5a 可以看出 5~6 月华南地区层状云发生频率和降水量随时间表现出较为一致的变化趋势, 说明华南地区前汛期和季风活跃期的降水主要为层状云降水。图 5b 表明江淮流域 5 月中旬至 7 月中旬层状云发生频率也表现出与降水量一致的变化趋势, 6 月上、中旬云带和雨带开始北推, 江淮流域层状云发生频率和降水量都明显增加。华北地区降水量随时间增大, 夏季达到最大, 与对流云和层状云发生频率随时间的变化特征基本一致, 计算结果表明华北地区对流云和层状云均与降水显著正相关(图 5c)。表 1 表

明,与层状云发生频率相比,层状云云量表现出与降水量更好的相关关系,华南地区层状云云量与降水量的相关系数达 0.57,江淮流域为 0.38(图略)。虽然对对流云发生频率和云量大值区与季风雨带向北推进的时间一致,但位于雨带南侧,因此对对流云发生频率和云量与降水的相关关系不显著。

表 1 不同区域对流云和层状云与降水量的相关系数
Table 1 Correlation coefficients of convective clouds and stratiform clouds with precipitation in three regions

区域	相关系数					
	f_c 和 f_s	f_c 和 P	f_s 和 P	a_c 和 a_s	a_c 和 P	a_s 和 P
华南地区	-0.73*	0.08	0.32*	-0.43*	0.08	0.57*
江淮流域	-0.64*	0.06	0.26*	-0.42*	0.00	0.38*
华北地区	0.73*	0.71*	0.73*	0.70*	0.67*	0.74*

注:表中 f_c (f_s) 指对流云(层状云)发生频率, a_c (a_s) 指对流云(层状云)云量, P 指降水量;加“*”的数字表示通过 99% 信度检验

4.4 云伴随的降水频率

夏季中国东部降水主要为对流云和层状云降水,就降水频率而言,我国东部两类云产生的降水占总降水的百分比平均为 94.1%,其它类云产生的降水占总降水的百分比不到 6%。对流云降水的频率相对较小,我国东部对流云降水的频率有两个大值区(图 6a),分别位于华南南部(46.5%)和内蒙古地区(24.9%)。层状云降水的频率平均为 79.1%(图 6b),24°N 以北的大部分地区层状云的降水频率超过 60%,大值中心位于四川盆地,达到 92.2%。中国东部层状云的降水频率大于对流云降水频率,华南地区是对流云降水与层状云降水频率比例最大的区域,其中海南东部两者比例达到 1.75。华南地区以北对流云与层状云降水频率的比例较小,其中陕西地区层状云降水的频率可以达到对流云降水频率的 10 倍,说明就降水频率而言,我国北方层状云降水占绝对优势。虽然对流云的降水频率不大,但其降水强度较层状云大得多,因此就降水量而言,对流云降水对总降水的贡献不容小觑。

总之,中国东部夏季降水主要来自对流云和层状云。就降水频率而言,我国华东地区的降水主要来自于层状云降水,华南南部对流云降水的频率超过层状云降水频率。对流云和层状云与季风雨带的推进均有很好的对应关系,对流云多位于季风雨带南侧,且随雨带的北推逐步向北推进;层状云与季风雨带大值中心重合,两者呈显著正相关。

5 结论

本文基于逐时地面台站观测云资料分析了对流云和层状云及其比例关系的时空特征,结合逐日融合降水资料分析了对流云和层状云与降水的相关关系,希望能为模式模拟结果提供验证资料。主要结论如下:

(1) 暖季中国东部对流云与层状云发生频率的分布形势有显著差异,且层状云发生频率远大于对流云发生频率。对流云发生频率平均为 15.4%,主要分布于贵州南部、广东、广西和海南东部;层状云发生频率为 30.0%,在我国东部存在 3 个大值中心,分别位于四川盆地(53.0%)、福建(52.7%)和长白山一带(47.2%)。

(2) 暖季对流云事件与层状云事件发生频率比例等于 1 的地区平均位于长江流域附近,在其南侧对流云事件的发生频率较大,在其北侧层状云事件的发生频率较大。暖季广东南部和广西南部对流云与层状云发生频率的比例始终大于 1,季风爆发后对流云与层状云的比例大值区逐步向北扩展,比例也显著增大,但两者发生频率比例大于 1 的大值区位于季风雨带南侧。

(3) 伴随季风的推进,对流云和层状云与季风雨带都有很好的对应关系。层状云发生频率和云量的大值中心均与降水中心高度重合,层状云带位置随时间的演变也与季风雨带随时间的演变基本一致,说明季风降水带主要由层状云降水组成;对流云发生频率和云量大值中心均位于季风雨带南侧,说明季风控制区主要为对流云降水。该结论与 Yuan (2010) 的结论不谋而合,即季风雨带主要是由持续性降水(层状云降水)构成,并且持续性降水随时间的演变表现出与季风雨带类似的变化特征,而季风中断期降水主要为短时降水(对流云降水)。

(4) 华南地区和江淮流域对流云和层状云云量及云发生频率呈显著负相关,大气稳定度决定了云的类型。在水汽充沛的情况下,大气不稳定性增加,对流云量及云出现频率增大,层状云量及云出现频率减小。华北地区对流云和层状云呈显著正相关,水汽决定了云量的多寡。在水汽不充足的常态下,当季风带来充沛的水汽时,对流云量和层状云量(云发生频率)同时增加。

(5) 中国东部对流云降水频率平均为 15.0%,层状云降水频率达到 79.1%。就降水频率而言,华

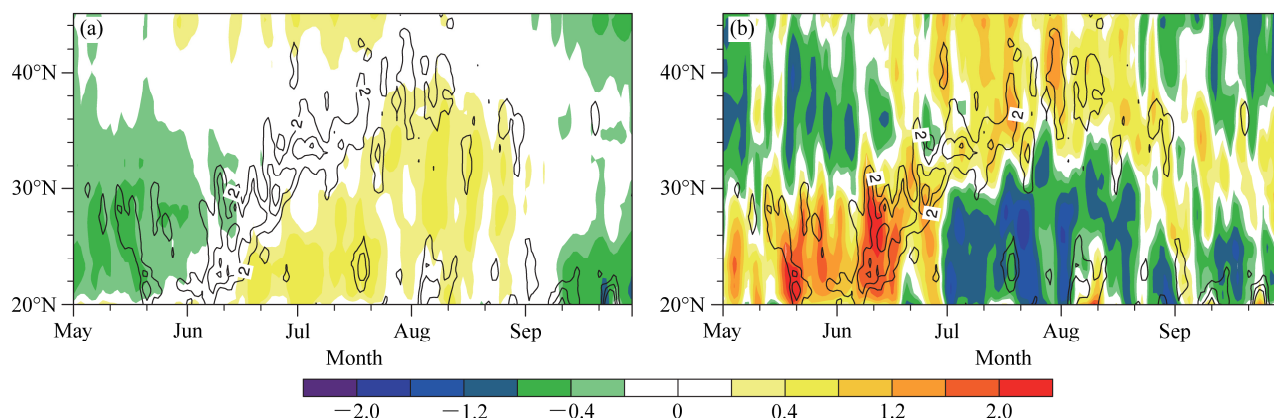


图 4 110°~122°E 平均日降水量距平值 (单位: mm; 等值线) 随时间的演变; 110°~122°E 平均 (a) 对流云、(b) 层状云日云量距平值 (填色) 随时间的演变

Fig. 4 Variation of daily precipitation anomaly (units: mm; contours) and anomalies of cloud amounts for (a) convective clouds (shaded) and (b) stratiform clouds (shaded), averaged over 110°–122°E

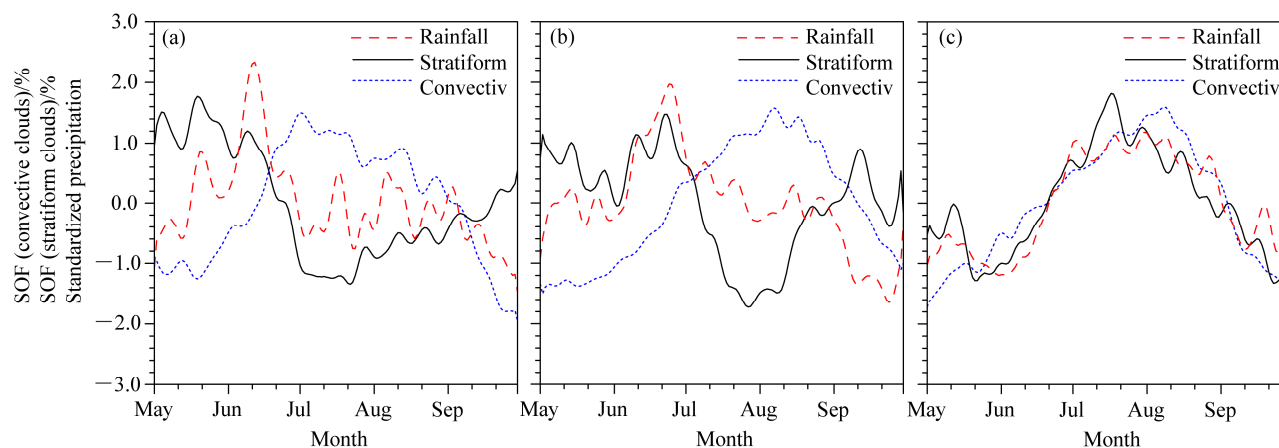


图 5 (a) 华南地区、(b) 江淮流域和 (c) 华北地区标准化的对流云和层状云发生频率以及降水量 (单位: mm) 随时间的变化 (点线代表对流云发生频率, 实线代表层状云发生频率, 虚线代表降水量)

Fig. 5 Variation of standardized occurrence frequencies of convective clouds (dotted lines) and stratiform clouds (solid lines), and standardized precipitation (units: mm, dashed lines) in (a) Southern China, (b) Yangtze-Huaihe valley, and (c) Northern China

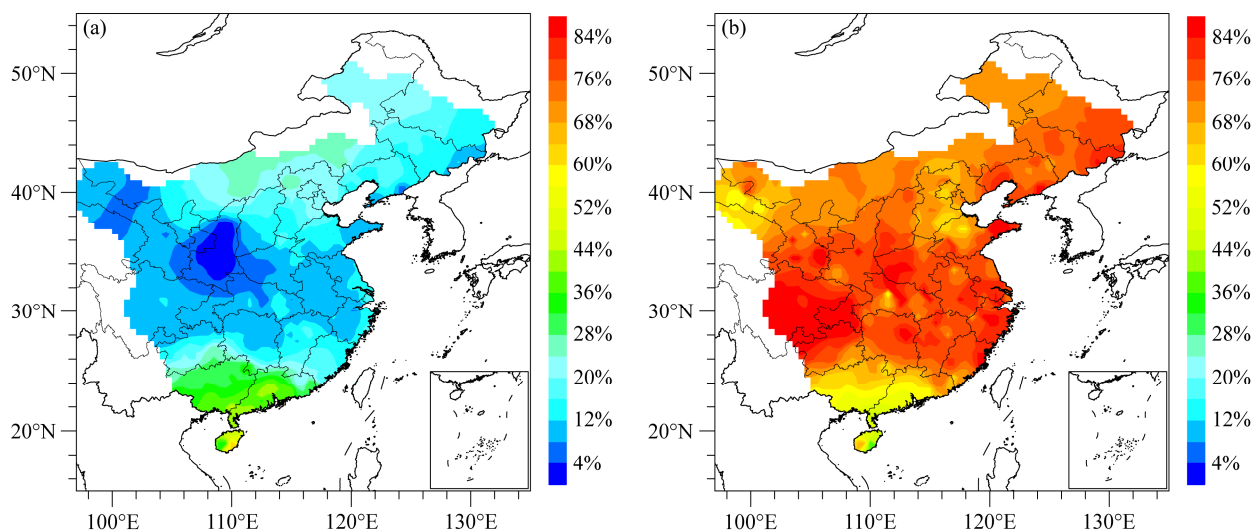


图 6 暖季 (a) 对流云和 (b) 层状云伴随降水的频率

Fig. 6 Frequencies of (a) convective precipitation and (b) stratiform precipitation in the warm season

南地区层状云降水和对流云降水各占一定的比例,而江淮流域和华北地区主要为层状云降水。

由于所收集的台站逐时云观测资料中没有匹配的逐时降水量资料,本文未能统计对流云和层状云降水的强度。我们知道虽然对流云的降水频率较小,但其降水强度较层状云大得多,因此各地区对流云降水对总降水量的贡献都不容忽视。

参考文献 (References)

- 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.
- 傅云飞, 宇如聪, 崔春光, 等. 2007. 基于热带测雨卫星探测的东亚降水云结构特征的研究 [J]. 暴雨灾害, 26 (1): 9–20. Fu Yunfei, Yu Rucong, Cui Chunguang, et al. 2007. The structure characteristics of precipitating clouds over the East Asia based on TRMM measurements [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 26 (1): 9–20, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2007.01.003.
- 高翠翠, 方乐铎, 李昀英, 等. 2015. 1985~2011 年中国不同类型云发生频率、持续时数及伴随降水概率 [J]. 暴雨灾害, 34 (3): 206–214. Gao Cuicui, Fang Lexin, Li Yunying, et al. 2015. Cloud occurrence frequency, duration time and accompanying rainfall probability in China during 1985–2011 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 34 (3): 206–214, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.03.002.
- Houze R A. 1982. Cloud clusters and large-scale vertical motions in the tropic [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 60 (1): 396–410.
- 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.
- 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 type [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 463–475, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.14293.
- Lau K M, Yang Song. 1997. Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon [J]. Adv. Atmos. Sci., 14 (2): 141–162, doi: 10.1007/s00376-997-0016-y.
- 李崇银. 1991. 大气低频振荡 [M]. 北京: 气象出版社, P15–16.
- 李昀英, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2003. 中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析 [J]. 气象学报, 61 (6): 733–743. Li Yunying, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2003. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in southern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (6): 733–743, doi:10.11676/qxxb2003.074.
- 李昀英, 寇雄伟, 方乐铎, 等. 2015. 中国东部云—降水对应关系的分析与模式评估 [J]. 气象学报, 73 (4): 766–777. Li Yunying, Kou Xiongwei, Fang Lexin, et al. 2015. Analysis and model evaluation of the relationship between clouds and precipitation over eastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73 (4): 766–777, doi:10.11676/qxxb2015.042.
- 刘鹏, 傅云飞. 2010. 利用星载测雨雷达探测结果对夏季中国南方对流和层云降水气候特征的分析 [J]. 大气科学, 34 (4): 802–814. Liu Peng, Fu Yunfei. 2010. Climatic characteristics of summer convective and stratiform precipitation in southern China based on measurements by TRMM precipitation radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 34 (4): 802–814, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.12.
- Rutledge S A, Houze R A. 1987. A diagnostic modelling study of the trailing stratiform region of a midlatitude squall line [J]. J. Atmos. Sci., 44 (18): 2640–2656, doi:10.1175/1520-0469(1987)044<2640:ADMSOT> 2.0. CO; 2.
- 尚博, 周毓荃, 刘建朝, 等. 2012. 基于 Cloudsat 的降水云和非降水云垂直特征 [J]. 应用气象学报, 23 (1): 1–9. Shang Bo, Zhou Yuquan, Liu Jianzhao, et al. 2012. Comparing vertical structure of precipitation cloud and non-precipitation cloud using Cloudsat [J]. J. Appl. Meteorol. Sci. (in Chinese), 23 (1): 1–9, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.01.001.
- 沈艳, 潘昶, 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.
- 宋明坤, 李耀东, 胡亮. 2010. 夏季风爆发前后南海地区降水性质的变化 [J]. 热带气象学报, 26 (3): 339–348. Song Mingkun, Li Yaodong, Hu Liang. 2010. An analysis of precipitation during South China Sea monsoon onset period in South China Sea [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 26 (3): 339–348, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.03.011.
- Tao W K, Lang S, Zeng X P, et al. 2010. Relating convective and stratiform rain to latent heating [J]. J. Climate, 23 (7): 1874–1893, doi:10.1175/2009JCLI3278.1
- 王晓聪, 包庆, 刘琨, 等. 2012. 两种对流参数化方案下降水和潜热加热空间结构的模拟及其影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (4): 587–598. Wang Xiaocong, Bao Qing, Liu Kun, et al. 2012. Features of rainfall and latent heating structure simulated by two convective parameterization schemes [J]. Sci. China Earth Sci., 54 (11): 1779–1788, doi: 10.1007/s11430-011-4282-2. .
- Yuan W H, Yu R C, Chen H M, et al. 2010. Subseasonal characteristics of diurnal variation in summer monsoon rainfall over central eastern China [J]. J. Climate, 23 (24): 6684–6695, doi:10.1175/2010JCLI3805.1.