

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 Sciences (in Chinese), 34 (4): 802-814.

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

刘鹏 傅云飞

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

摘要 本文利用热带测雨卫星 (TRMM) 上搭载的测雨雷达 (PR) 十年的探测结果, 对夏季中国南方对流降水和层云降水的气候特征进行了分析。研究表明: 夏季中国南方层云降水频次较对流降水频次高出两倍以上, 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, 这两种类型的降水对总降水量贡献相当。日变化分析表明夏季中国南方大部分地区的对流降水主要出现在午后, 层云降水出现时间并不集中, 但这两类降水的频次日变化均显示了明显的地域性特征; 对降水廓线日变化的分析结果表明, 对流降水和层云降水廓线的日变化主要表现在“雨顶”高度的日变化, 即对流降水云的厚度有明显的日变化变化特征, 不同地区的降水廓线存在明显的差异。降水率剖面分析结果显示了对流降水的“雨顶”高度日变化较层云降水剧烈, 降水率的日变化则相反, 且层云降水率的地域性特征更强。

关键词 对流降水 层云降水 降水频次 条件降水强度 降水廓线

文章编号 1006-9895 (2010) 04-0802-13

中图分类号 P426

文献标识码 A

Climatic Characteristics of Summer Convective and Stratiform Precipitation in Southern China Based on Measurements by TRMM Precipitation Radar

LIU Peng and FU Yunfei

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract The characteristics of summer convective and stratiform precipitation in southern China are investigated based on measurements by TRMM Precipitation Radar (PR) from 1998 to 2007. Results indicate that the frequency of stratiform precipitation is two times higher than that of convective precipitation, but the conditional rain rate of convective precipitation is nearly four times larger than that of stratiform precipitation, which result in the two types of precipitation have the same contribution to total rain. The distributions of both convective and stratiform precipitation suggest remarkable regionality. The frequency of convective precipitation reaches the peak in the afternoon over most of southern China, while the frequency of stratiform precipitation distributes mildly. The diurnal cycles of convective and stratiform precipitation profiles are mainly displayed in the variation of “storm top”, namely, the variation of precipitation cloud depth. Moreover, the profiles of two types of precipitation over different regions are ob-

收稿日期 2009-06-15, 2009-11-30 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-Q11-04, 国家自然科学基金资助项目 40730950、40675027、40805008, 国家公益性行业支撑项目 GYHY (QX) 2007-6-32

作者简介 刘鹏, 男, 1984 年出生, 硕士研究生, 目前主要从事降水方面的研究。E-mail: lipe@mail.ustc.edu.cn

通讯作者 傅云飞, E-mail: fyf@ustc.edu.cn

viously distinct. The cross sections of two types of precipitation not only show that the variation of the “storm top” of convective precipitation is much sharper than that of stratiform precipitation, but also show the diurnal cycle of the conditional rain rate of stratiform precipitation is sharper than that of convective precipitation. The conditional rain rate of stratiform precipitation changes more significantly among different regions.

Key words convective precipitation, stratiform precipitation, precipitation frequency, conditional rain rate, precipitation profile

1 引言

夏季在偏南气流影响下, 中国大部分地区, 特别是西南和东部地区, 水汽充足、降水充沛。夏季降水的多少决定了中国大部分地区的旱涝程度, 且夏季降水局地性强, 常常引发洪涝或干旱及次生灾害, 影响社会的经济活动和人们的日常生活, 并带来重大的经济损失。因此, 我国气象工作者对夏季降水规律的研究极为重视。早期学者们利用地面雨量计资料, 从亚洲季风活动及大气环流变化角度对我国降水特点进行了大量研究, 取得了很多有意义的成果(竺可桢, 1934; 陶诗言, 1980; 郭其蕴和王继琴, 1981; 丁一汇和村上胜人, 1994; 丁一汇和孙颖, 2002; 王遵娅和丁一汇, 2008; 吕俊梅等, 2009)。但是, 由于降水强度和分布存在剧烈的时空变化, 而地面雨量计的分布密度有限, 其观测结果能否准确表述大范围实际的降水特点仍值得研究; 此外, 地面雨量计不对降水类型进行观测, 因此, 我们对夏季中国不同类型降水(如对流降水和层云降水)的气候特征了解有限。

随着 1997 年 11 月美国和日本联合研制的热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, 简称 TRMM)所携带的首部空基测雨雷达(Precipitation Radar, 简称 PR)升空, 利用其探测结果来研究不同降水类型的强度及分布、降水垂直结构特点变成可能, 因为 PR 能对降水类型进行有效地识别(Simpson et al., 1988; Iguchi and Meneghini, 1994; Kummerow et al., 1998)。利用 PR 对降水的探测结果, 国内外学者已开展了大量研究。例如, Fu and Liu (2001, 2003)对热带及东亚降水廓线特点进行了系统研究, 并解释了不同降水廓线所蕴含的物理意义, 发现热带陆地对流降水廓线明显不同于热带洋面对流降水廓线; Kodama and Tamaoki (2002)利用 PR 资料研究副热带地区降水的时空分布, 发现在副热带和中纬度之间存在一

个显著的大尺度强降水气候区(Subtropical Mid-latitude Precipitation Zones, 简称 SMPZs); Schumacher and Houze (2006)对热带(20°S~20°N)撒哈拉沙漠及热带东大西洋地区的层云降水和对流云降水的分布特征也进行了研究。此外, 国内学者还利用 PR 探测结果对中小尺度的降水类型及结构特点进行了研究(傅云飞等, 2003, 2005, 2007; 郑媛媛等, 2004; 何文英和陈洪滨, 2006)。这些工作为我们全面认识我国不同类型降水强度、分布及结构特点等规律奠定了基础。

TRMM 卫星从发射至今, PR 已运行十一年有余, 积累了海量降水资料, 为深入研究和层云降水的统计特征提供了有利条件, 如傅云飞等(2008)就利用 PR 十年(1998 至 2007 年)的探测结果对亚洲对流和层云降水季尺度特征进行了研究, 揭示了季节尺度亚洲对流和层云降水平均强度及出现频次的气候分布特点。但因篇幅所限, 傅云飞等(2008)对中国范围内降水的气候特点并未细致分析。鉴于此, 本文利用 1998 年至 2007 年 PR 逐日逐轨探测资料, 就夏季中国南方对流和层云降水的气候特征进行了分析研究。

2 资料和方法

TRMM 卫星是一颗非太阳同步卫星, 轨道与赤道的倾角约 35°, 轨道高度 350 km (2001 年 8 月 7 日后调整为 400 km), 环绕地球一周约需 91.6 min, 每天在 38°S~38°N 约有 16 条轨道。PR 天线的扫描角范围为±17°, 每条扫描线上有 49 个像素, 扫描宽度为 215 km; PR 给出的星下点水平分辨率为 4.5 km, 垂直分辨率为 250 m, 探测高度自地表向上至 20 km (Kummerow et al., 1998)。本文所用资料是 GSFC/NASA (Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration)发布的第六版 PR 二级产品 2A25, 它是逐日逐轨资料, 给出了逐条轨道上的三维降水

率。根据 TRMM PR 的降水反演方案, 2A25 资料提供了降水类型信息: 对流降水、层云降水和“其它”类型降水 (Awaka et al., 1998; Kummerow et al., 1998)。简单来说, PR 回波在 0°C 层附近出现亮带, 该降水廓线定义为层云降水廓线; 如果 PR 回波无亮带, 但回波中出现超过 39 dBZ 的信号, 则该降水廓线定义为对流降水廓线; 非上述两种情形的降水廓线定义为“其它”类型降水廓线 (傅云飞等, 2008)。考虑到 PR 的波长为 2.2 cm, 最小可探测的回波反射率约 17 dBZ, 其相应的降水率约 0.5 mm/h (Kummerow et al., 1998; Kozu et al., 2001), 因此, 我们忽略 PR 廓线累积降水率小于 0.5 mm/h 的样本。

为便于统计和作图, 我们将逐日逐轨道 2A25 资料进行了格点化处理, 生成 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 空间分辨率的格点资料。该格点资料给出了 0.5° 格点内 TRMM PR 探测降水类型、相应的条件降水强度及降水频次和各类型降水的三维降水率等信息 (傅云飞等, 2008)。

在进行统计分析之前, 我们首先给出了 1998 至 2007 年 PR 探测的夏季 (6、7、8 月) 中国南方对流降水和层云降水样本分布情况 (见图 1)。图 1 表明在 100°E 以东的中国地区, 夏季对流降水的样本数大于 300, 100°E 以西的高原大部分地区, 对流降水样本数也在 100 以上; 对于层云降水来说, 在中国南方大部分地区的样本数均在 1000 以上, 只有青藏高原西部的样本数不足 1000, 但样本数仍然可观。以上对两种类型降水样本数的统计不但说明我们的研究基于大样本, 具有统计意义, 同时也说明了层云降水发生概率大于对流降水发生概率这一现象。

3 结果

3.1 降水频次和降水强度

PR 给出的 1998 年至 2007 年夏季中国南方平均对流降水和层云降水频次分布如图 2 所示。图 2a 表明, 夏季中国南方大部分地区对流降水频次小于 2.0%, 最大频次也仅为 2.5% 左右。其中华南丘陵地区、四川盆地以东山区、江淮之间及东南沿海对流降水频次相对高 (大于 1.5%), 四川盆地、大巴山及武陵山东部、长江口地区对流降水频次相对低 (小于 0.75%)。与对流降水频次相比, 层云

降水频次高, 高原以东地区均在 2.0% 以上, 最高可超过 8% (图 2b)。其中, 层云降水频次高值区位于高原东南部的我国西南大部分地区、秦岭南部地区及浙江山区, 降水频次均超过 5%。此外, 层云降水频次较对流降水频次高出两倍以上。以上分析表明, 尽管夏季是中国南方暴雨等强对流天气的多发季节, 但降水仍多以层云降水的形式出现。

Liu and Fu (2001) 利用 TRMM PR 前 3 年的探测结果 (第 4 版资料) 已经对全球热带地区降水的条件降水强度进行了统计分析, 研究结果表明深厚对流降水平均条件降水强度为 8.6 mm/h, 层云降水平均条件降水强度为 1.3 mm/h。Fu et al. (2003) 研究发现, 夏季东亚大陆对流降水和层云降水平均条件降水强度分别达 15.5 mm/h 和 2.1 mm/h。由此可见, 虽然对流降水的频次小, 但其条件降水强度却很大, 层云降水则反之。本文将针对夏季中国南方地区作进一步探讨, 并且基于更长时间资料的统计分析, 结果也更具客观性。

图 3 给出了十年平均的夏季中国南方 (图 3a) 对流降水和 (图 3b) 层云降水条件降水强度分布。它表明夏季中国南方绝大部分地区对流降水条件降水强度在 8.0 mm/h 以上, 并且江淮流域还出现了 13.0 mm/h 以上的区域, 低值区则主要位于青藏高原南部和中国西南地区, 但其值仍然在 6.0 mm/h 以上; 而大部分地区的层云降水条件降水强度仅在 1.0~2.5 mm/h 之间, 最大值也不超过 3.0 mm/h。此外, 我们还可以清晰地看到, 层云降水条件降水强度由东南向西北递减的分布特点。图 3 充分揭示了对流降水条件降水强度比层云降水条件降水强度大的事实。

表 1 给出的是 1998 年至 2007 年 6 月、7 月、8 月和夏季 (JJA) 中国南方对流降水和层云降水平均条件降水强度。夏季中国南方对流降水平均条件降水强度达 8.4 mm/h, 是层云降水平均条件降水强度 (1.7 mm/h) 的四倍多。另外, 从条件降水强度的时间变化上看, 7 月对流平均条件降水强度最大 (8.6 mm/h), 8 月最小, 为 8.3 mm/h; 层云降水的平均条件降水强度也在 8 月达到最小 (1.7 mm/h), 但整个夏季其条件降水强度相差不超过 0.1 mm/h。这一变化可能是因为 8 月雨带已经移至华北地区, 此时中国南方大部分地区受副热带高压控制, 降雨相对减少。

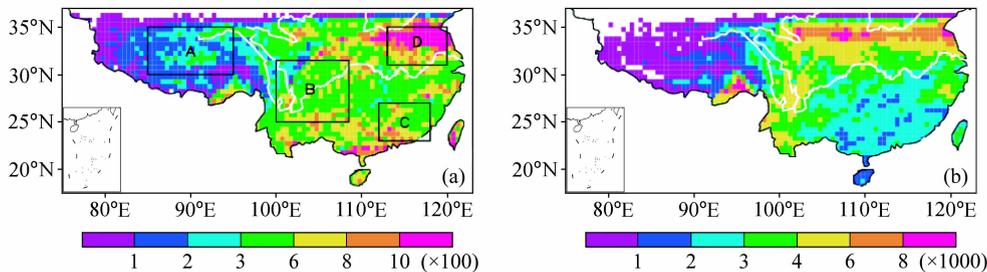


图 1 1998~2007 年 TRMM PR 探测的夏季中国南方 (a) 对流降水和 (b) 层云降水像素分布

Fig. 1 Distribution of summer (a) convective and (b) stratiform precipitation pixels in each grid detected by TRMM PR in southern China from 1998 to 2007

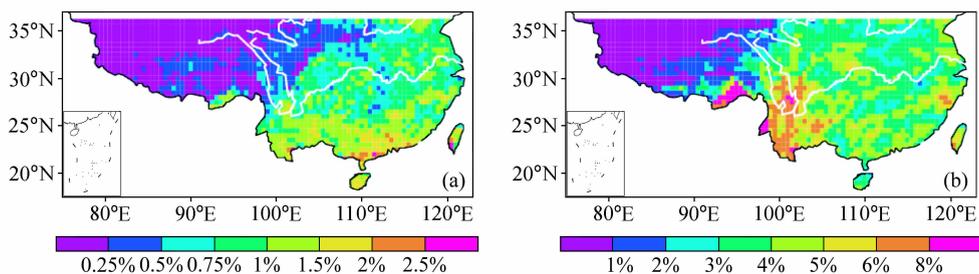


图 2 夏季中国南方 1998~2007 年 10 年平均的 (a) 对流降水和 (b) 层云降水频次分布

Fig. 2 Distribution of summer (a) convective and (b) stratiform precipitation frequency in each grid detected by TRMM PR in southern China from 1998 to 2007

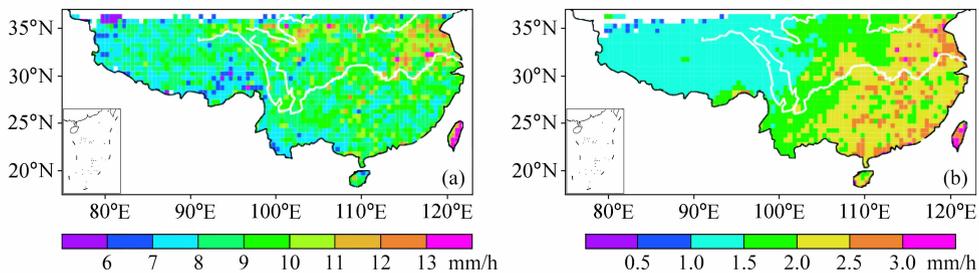


图 3 夏季中国南方 1998~2007 年 10 年平均的 (a) 对流降水和 (b) 层云降水条件降水强度

Fig. 3 Distribution of conditional rain rate for summer (a) convective and (b) stratiform precipitation in each grid detected by TRMM PR in southern China from 1998 to 2007

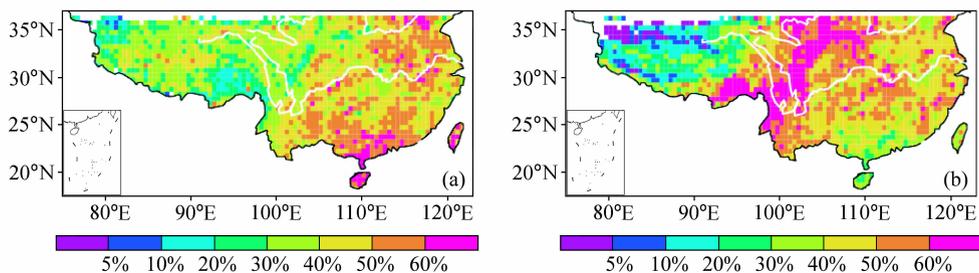


图 4 夏季中国南方对流降水 (a) 和层云降水 (b) 对总降水量贡献的水平分布

Fig. 4 Distribution of summer convective (a) and stratiform (b) precipitation's contributions to total rain in each grid detected by TRMM PR in southern China from 1998 to 2007

表 1 中国南方 1998~2007 年 10 年平均的条件降水强度
Table 1 Averaged conditional rain rate for summer convective and stratiform precipitation detected by TRMM PR in southern China from 1998 to 2007

	平均条件降水强度/mm·h ⁻¹	
	对流降水	层云降水
6 月	8.5	1.8
7 月	8.6	1.8
8 月	8.3	1.7
夏季	8.4	1.7

通过以上分析,可以看到夏季中国南方对流降水频次较层云降水频次低,条件降水强度却相反。降水频次或条件降水强度的变化都会对局地降水量的变化产生影响,以下就两种类型降水对夏季中国南方降水量的贡献作进一步的探讨。

图 4 给出的是基于 PR 十年探测结果的夏季中国南方对流降水和层云降水对总降水量贡献的水平分布。如图 4 所示,尽管夏季中国南方层云降水频次比较大,是对流降水频次的 2 倍以上,但由于对流降水的条件降水强度远远大于层云降水的条件降水强度(4 倍多),以至于除青藏高原以东部分地区外的中国南方大部分地区二者对降水量的贡献比较接近,部分地区对流降水对总降水量的贡献甚至超过层云降水对总降水量的贡献,如青藏高原。

为定量分析整个中国南方地区夏季对流降水和层云降水对总降水频次和总降水量的贡献,我们给出了对流降水和层云降水对总降水频次贡献(图 5a)和对总降水量贡献(图 5b)的面积比例。对流降水和层云降水对总降水频次贡献的面积比例(图 5a)清晰地显示出夏季中国南方大部分地区对流降水对总降水频次的贡献不超过 30%,出现面积比例最大的频次贡献也仅为 20%左右;而在大部分地区,层云降水对总降水频次的贡献超过了 50%,且主要集中于 50%~90%之间,再次证明了夏季中国南方降水多以层云降水的形式出现。但由于对流降水的条件降水强度比层云降水的条件降水强度大得多,使得二者对总降水量贡献的曲线变化非常一致(图 5b),亦即就整个中国南方地区而言,夏季两种类型降水对总降水量的贡献是相当的。分析表明,夏季中国南方地区的降水,尽管多以层云降水的形式出现,但由于条件降水强度差别的原因,导致二者对总降水量贡献差别不大。

此外,为了解不同条件降水强度对相应类型降水像素的贡献,我们选定了四个典型区域[图 1a 中的 A(青藏高原)、B(西南地区)、C(中国南部)、D(中国东部)]进行分析。图 6 给出了四个典型区域对流降水和层云降水不同条件降水强度的像素占相应类型总降水像素的比例,显然各区域之间存在着一定差异。最显著的就是青藏高原的对流降水,该区域不同条件降水强度的对流降水像素对该类型降水像素的贡献随着条件降水强度的增加并不像其它三个区域一样迅速地减小,而是有一个先增加随后再迅速减小的变化趋势,其最大比例对应的条件降水强度在 6 mm/h 左右。相比于对流降水,不同区域、不同条件降水强度对层云降水像素贡献的差别不是特别明显,四个典型区域不同条件降水强度对层云降水像素贡献的变化趋势比较一致,都随着条件降水强度的增大而减小,只不过青藏高原减小的速度更快。以上分析说明,青藏高原是一个非常典型的降水区域,该区域不同条件降水强度对对流降水像素的贡献呈现出与其它区域明显的不同。

3.2 近地面降水日变化

大气降水最显著的特征之一就是日变化,研究降水日变化是充分理解天气系统、气候系统及水汽循环区域特征的一个重要方面。当降水在一天特定的时间经常发生时,通常暗示着大气条件和物理过程在此时段内有利于强对流活动(Sorooshian et al., 2002)。Yu et al. (2007) 利用地面雨量计研究指出,中国夏季降水日变化具有明显的地域性,不同的区域,降水日变化具有明显的不同,且降水率峰值出现的时间也有很大差异。可是,由于地面雨量计分布密度有限,青藏高原降水的日变化并不清楚,而且地面雨量计不对降水类型进行观测,对两者的日变化特点也就不甚了解。下面,我们将利用 PR 十年的探测结果,针对夏季中国南方地区对流降水和层云降水日变化特征进行分析研究。

为更好地理解夏季中国南方对流降水和层云降水日变化特征,我们把一天划分成六个时段:凌晨[03~06 时(Local Solar Time, 当地时,下同)]、早晨(07~10 时)、正午(11~14 时)、午后(15~18 时)、夜晚(19~22 时)和午夜(23 时~02 时)。

图 7 给出的是 1998~2007 年 PR 探测夏季中国南方间隔 4 小时的对流降水频次,由图可见,中国南部、西南和东南沿海等地的夏季对流降水显示

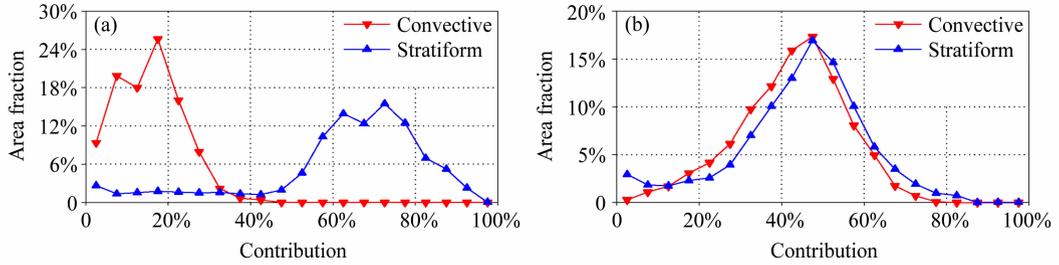


图 5 对流降水和层云降水对 (a) 总降水频次和 (b) 总降水量贡献的面积比例

Fig. 5 Area fractions of convective and stratiform precipitation's contributions to (a) rain frequency and (b) total rain

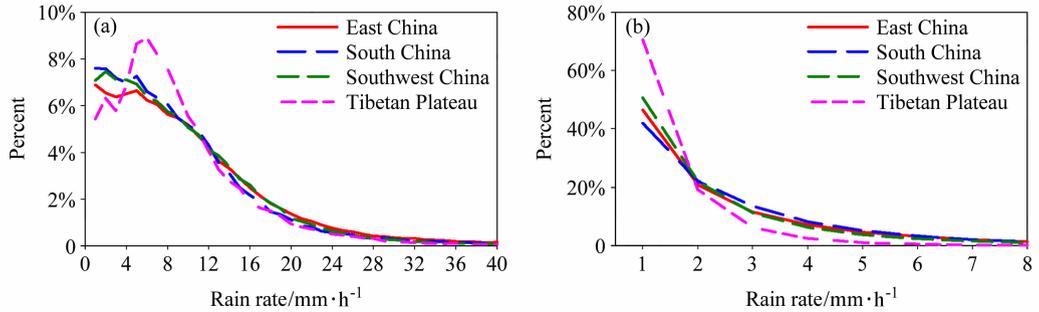


图 6 图 1a 中四个典型区域 (a) 对流降水和 (b) 层云降水的不同条件降水强度像素占相应类型总降水像素的比例

Fig. 6 Area fractions of convective (a) and stratiform (b) rain rates to the corresponding total rain pixels for four typical regions shown in Fig. 1a

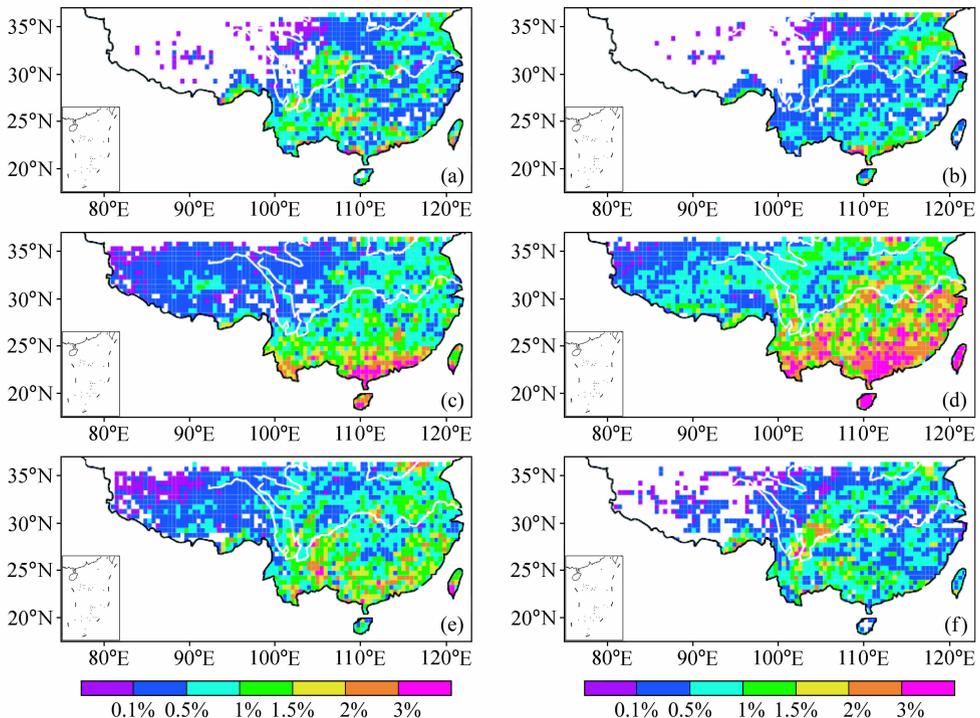


图 7 1998~2007 年 PR 探测夏季中国南方间隔 4 小时的对流降水频次: (a) 凌晨; (b) 早晨; (c) 正午; (d) 午后; (e) 夜晚; (f) 午夜

Fig. 7 Summer convective precipitation frequency every four hours in southern China detected by TRMM PR from 1998 to 2007 for (a) early morning, (b) morning, (c) noon, (d) afternoon, (e) evening, and (f) midnight

出了强烈的日变化特征：午后（图 7d），这些区域的对流降水频次均在 2% 以上，相当一部分地区甚至超过 3%，而其它时段，只有两广的部分地区对流降水频次能达到 3%，其它地区的对流降水频次都不高，仅有零星区域在 1.5% 以上。与这些地区相比，黄淮之间的夏季对流降水日变化则显得相对平缓，对流降水频次在 $(1 \pm 0.5)\%$ 范围内波动，并没有表现出明显的高发时段。此外，青藏高原地区无论在什么时段，对流降水频次在中国南方地区都是最小的，最大值不超过 1%，对流降水主要集中在正午到夜晚之间，其它三个时段几乎没有对流降水发生。上述结果表明，夏季中国南方大部分地区的对流降水主要集中在午后，其频次在该时段内达到最大，但其具有明显的地域性特征。

夏季中国南方间隔 4 小时的层云降水频次分布（如图 8 所示）显示层云降水日变化较对流降水日变化相对平缓。青藏高原同样是层云降水频次分布的低值区，大部分地区没有超过 4%，但其东南部有所例外，我们可以看到，该区所有时段的层云降水频次都在 6% 以上，甚至超过 10%。青藏高原东南部的我国西南大部分地区，是我国层云降水的高发区，但该地区的层云降水日变化不是很剧烈：6 个时段的层云降水频次都很高，大部分区域的层云降水频次都超过 6%，甚至达到 10% 以上。而华南地区层云降水的日变化相对剧烈，午后是该地区层云降水的多发时段，降水频次超过 10%，午夜至凌晨层云降水发生相对较少，降水频次在 2% 以下，而其它三个时段在 4%~8% 之间。

为更加清楚地了解对流降水和层云降水的日变化特征，图 9 给出夏季中国南方对流降水和层云降水频次峰值出现的时间分布。对流降水频次峰值出现的时间分布表明，夏季中国南方大部分地区对流降水多出现在午后，但也显示出一定的地域性，如四川盆地及其周围地区，对流降水多出现在午夜和凌晨，而江淮地区对流降水频次峰值则出现在早晨。与对流降水相比，层云降水的地域性特征更加明显：东南沿海层云降水频次峰值出现在午后，青藏高原大部分地区在午后到午夜之间出现，其它地区则在前一天的 22 时到第二天的 14 时之间达到峰值。也就是说，中国南方地区夏季层云降水频次峰值出现的时间存在由东向西的“阶梯”变化。

另外，从四个典型区域（如图 1a 所示）对流降

水和层云降水出现概率（某时段某类型降水的像素与该类型降水总像素之比）的日变化曲线（图 10 所示）可以看出，中国南方不同区域，其对流降水和层云降水出现的概率呈现出显著的差别。青藏高原地区（图 10a），对流降水和层云降水出现概率日变化的趋势较为一致，两种类型的降水都在午后达到峰值，但对流降水的概率曲线较窄，也就是说对流降水出现的时间比较集中，而层云降水的概率变化相对平缓。与青藏高原地区最为相似的区域是中国南部，对流降水和层云降水出现时间主要集中在午后，但仍然可以看到两个区域存在一定的差异：20~24 时之间也是中国南部对流降水和层云降水的高发时段，但是其峰值明显比午后时段低。对于中国西南地区，对流降水和层云降水概率的日变化存在明显不同：对流降水的出现主要集中在 15 时至午夜 04 时之间，层云降水则主要出现在 00~08 时，造成这种位相平移的原因是什么，我们需要进一步深入研究。而中国东部，对流降水表现出双峰的形式（上午和午后两个时段），但该区域的层云降水并没有显现出明显的双峰，主要集中在 06~14 时之间。上面的分析指出，夏季中国南方对流降水和层云降水呈现明显的地域性特征，不同的区域，其对流降水和层云降水的概率曲线有很大的差别，即使是在同一地区，两种类型降水发生概率的日变化也存在一定的不同，这可能跟触发这两类降水发生的天气系统的类型有关。

3.3 降水垂直结构日变化

降水廓线是由测雨雷达回波信号反演得到的降水率随高度的分布，它实际上反映了降水云团的热力结构、动力结构和微物理过程特征（傅云飞等，2008）。如陆面和洋面降水廓线的差异就与两者降水云中上升气流的差异有关（Zipser and Lutz, 1994）；再如，降水廓线随高度向地表增加（或减少）的现象则为降水粒子在下降过程中增长（或破碎、蒸发减少）所致（Fujiyoshi et al., 1980；Szoke et al., 1986；Hobbs, 1989）。利用 TRMM PR 探测资料，Liu and Fu (2001) 和 Fu et al. (2003) 的一些研究结果已经表明对流降水、层云降水廓线及“其它”类型降水廓线之间存在明显差异；对于同一种降水类型，即使地表降水率不同，它们的平均廓线仍具有相似性；两种类型降水区域平均降水廓线斜率随高度的变化与降水云中水成物（Hydro-

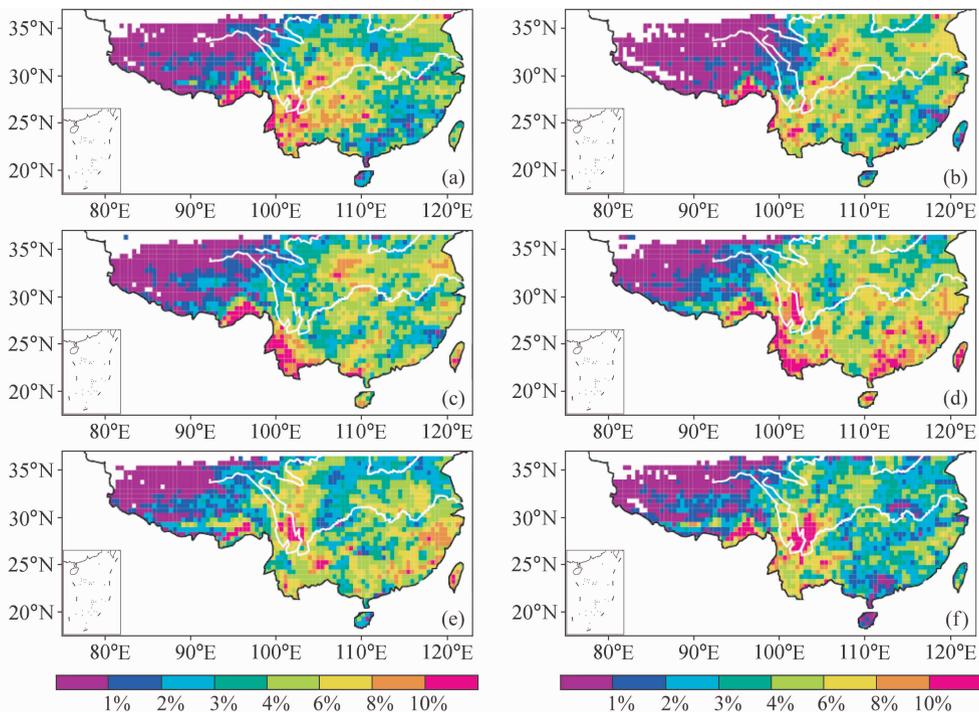


图 8 同图 7，但为层云降水频次

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for stratiform precipitation frequency

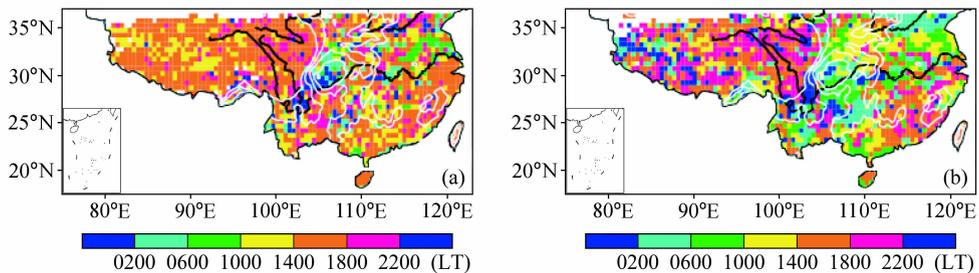


图 9 1998~2007 年 PR 探测夏季中国南方 (a) 对流降水 (b) 层云降水频次峰值出现时间分布

Fig. 9 Peak time of summer convective (a) and stratiform (b) precipitation frequency in southern China detected by TRMM PR from 1998 to 2007

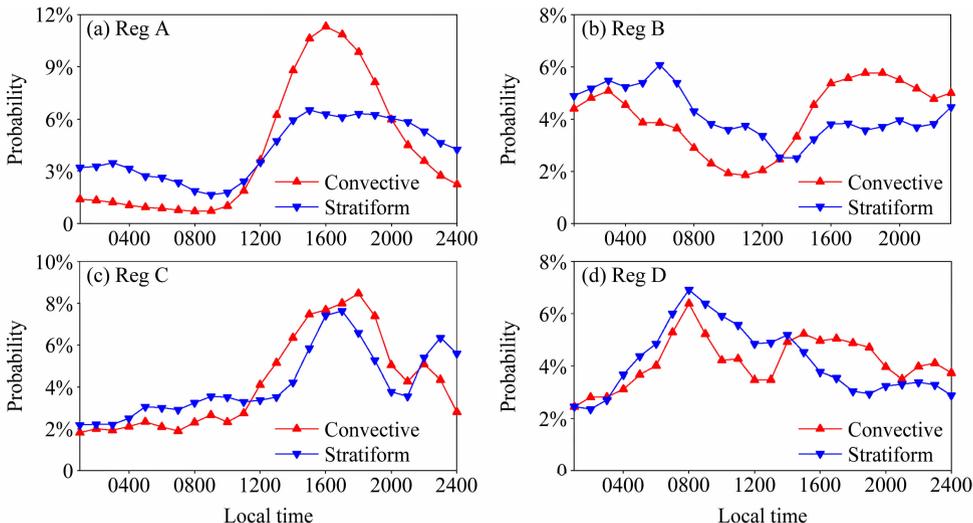


图 10 四个典型区域对流降水和层云降水概率的日变化

Fig. 10 Diurnal cycles of convective and stratiform precipitation probability in the four typical regions

meteors) 随高度的分层分布一致。

为了解夏季中国南方对流降水和层云降水廓线的日变化特点,图 11、12 分别给出了四个典型区域(青藏高原、中国西南、中国南部和中国东部)(如图 1a 所示)对流降水和层云降水间隔四小时的平均廓线。两种不同类型降水廓线存在明显的外形差异:对流降水廓线显示此类降水云深厚,“雨顶”(storm top,为 TRMM PR 测得的第一个回波信号高度,它与测雨雷达的波长有关)可伸展至 9~16 km 之间,而层云降水“雨顶”高度在 9 km 以下。

就对流降水平均廓线(图 11)而言,其日变化特征主要体现在“雨顶”高度(即降水云厚度)日变化,其次才表现为近地表降水率的变化。如夏季中国东部地区(图 1a 的 D 区域)的对流降水平均降水廓线(图 11d)表明,早晨对流降水的平均“雨顶”高度最低,在 11 km 附近,而夜晚可达 16 km,两者之差在 5 km 左右,而其它时段约为 14 km,该区域对流降水“雨顶”高度显示明显的日变化特征;该区域的近地表降水率午夜最小(9.36 mm/h),早晨达到最大,为 11.12 mm/h,其值在(10±1)mm/h 之间波动,可见近地表降水率也存在明显的日变化,但不如“雨顶”高度日变化剧烈。夏季中国南部地区(图 1a 所示 C 区域)的对流降水平均降水廓线(图 11c)与中国东部地区较为相似。“雨顶”高度在夜晚达到最大,约 14.5 km,而最低值则出现在早晨(约 9.5 km),两者的差值也在 5 km 左右。但是,该区域所有时段的近地表降水率都在 10 mm/h 以下,最大值也仅为 9.10 mm/h(早晨),与中国东部地区存在着一定的差异。

夏季中国西南地区的对流降水平均降水廓线的“雨顶”高度日变化也较为剧烈,其最高“雨顶”出现在午夜(约 15 km),最低值则出现在正午,其值约为 9 km,两者差值约 6 km,平均“雨顶”高度处于 12 km 附近。此外,该区域的降水率的最大值出现在 5 km 左右(冻结层),不像中国东部(5 km 以下降水率基本维持不变)和中国南部(近地表降水率最大),并且其地表降水率也比中国南部和中国东部地区小,其值在 5~10 mm/h 之间变化。青藏高原对流降水平均廓线则十分特别。该区域不同时段的对流降水廓线差别较大,但其“雨顶”高度的日变化不是很剧烈,最高“雨顶”高度不超过 14 km,最低值也在 10 km 以上;此外,该区域近

地表降水率的差别也较大,其值可在 2~10 mm/h 之间变化。

层云降水平均廓线和对流降水相比,不但形状有显著差别,而且日变化特征也存在明显的差异。青藏高原地区,层云降水平均廓线(图 12a)表明该区域层云降水的“雨顶”高度最高可达 9 km,并出现在午后,最低也在 7.5 km 以上(凌晨);其地表降水率仍然是四个区域当中最小的,但日变化剧烈。

其它三个区域层云降水“雨顶”高度没有显示出明显的日变化,不同时间段的层云降水“雨顶”高度大约都在 6.5 km 左右,且这三个区域的平均层云降水廓线均显示了清晰的冻结层高度,约 4.5 km。但这三个区域的层云降水近地表降水率存在一定的差别。夏季,中国东部地区的层云降水近地表降水率在这三个区域当中是最大的,且最大值出现在早晨;中国西南部的层云降水近地表降水率最小,在 2.0 mm/h 以下,最大值仅有 1.8 mm/h,出现在凌晨;中国南部的层云降水近地表降水率介于中国东部和中国西南部之间,近地表降水率集中在 2.0~2.3 mm/h 之间,并未表现出强烈的日变化。

为更加直观地了解降水垂直结构及空间分布特点,图 13 和图 14 分别给出了沿 28.0°N~32.0°N 间隔 4 小时对流降水率和层云降水率随高度的平均分布(即纬向—高度剖面图)。因为 PR 最小可探测的回波反射率约 17 dBZ,即对应 0.5 mm/h 的降水率,下面以大于 0.5 mm/h 的降水率范围进行分析。

对流降水“雨顶”高度分布有些凌乱,存在明显的地域性特征。如 105.0°E~110.0°E 之间的区域(对应四川盆地),该区域对流降水“雨顶”高度在午夜达到最大,在 12 km 以上,部分地区甚至接近 16 km;其它时段相对低,像正午时段,其对流降水“雨顶”高度仅 8 km 左右。图 13 还清晰地指示了 105.0°E 以西,对流降水“雨顶”高度存在由东向西逐渐升高的趋势。

与对流降水“雨顶”高度相比,对流降水率日变化较平缓,不是很剧烈,但其地域性特征十分明显。105.0°E 以西地区,降水率不超过 8 mm/h,而其以东地区存在降水率在 8 mm/h 以上的高度层;此外,105.0°E 东西两侧的降水率极值所处的高度层有所不同,其以西地区降水率极值所处的高度层

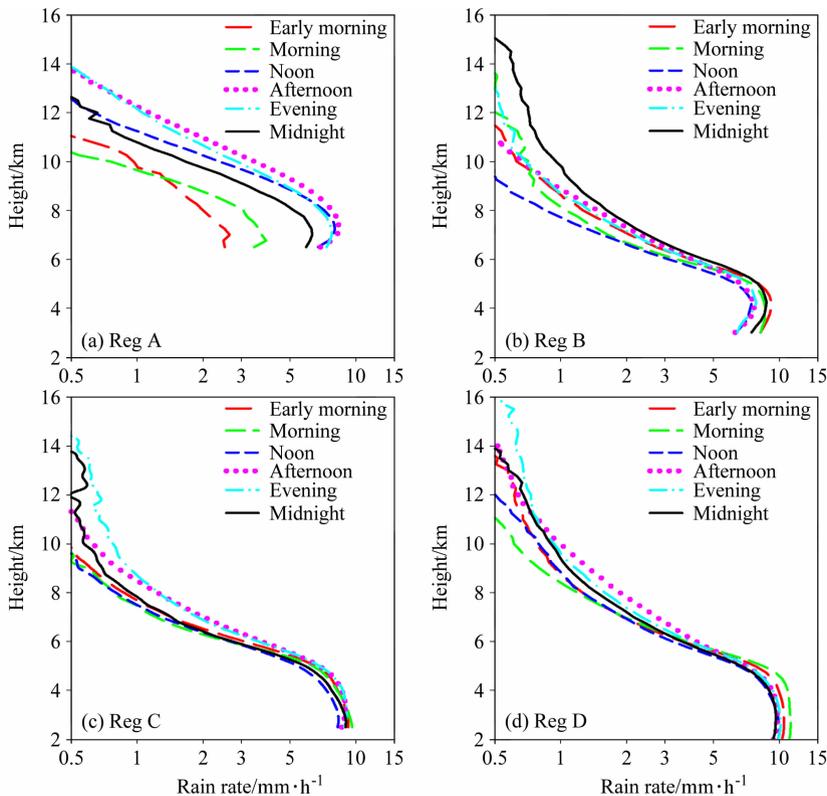


图 11 四个典型区域间隔 4 小时的对流降水廓线

Fig. 11 Convective precipitation profiles every four hours in the four typical regions

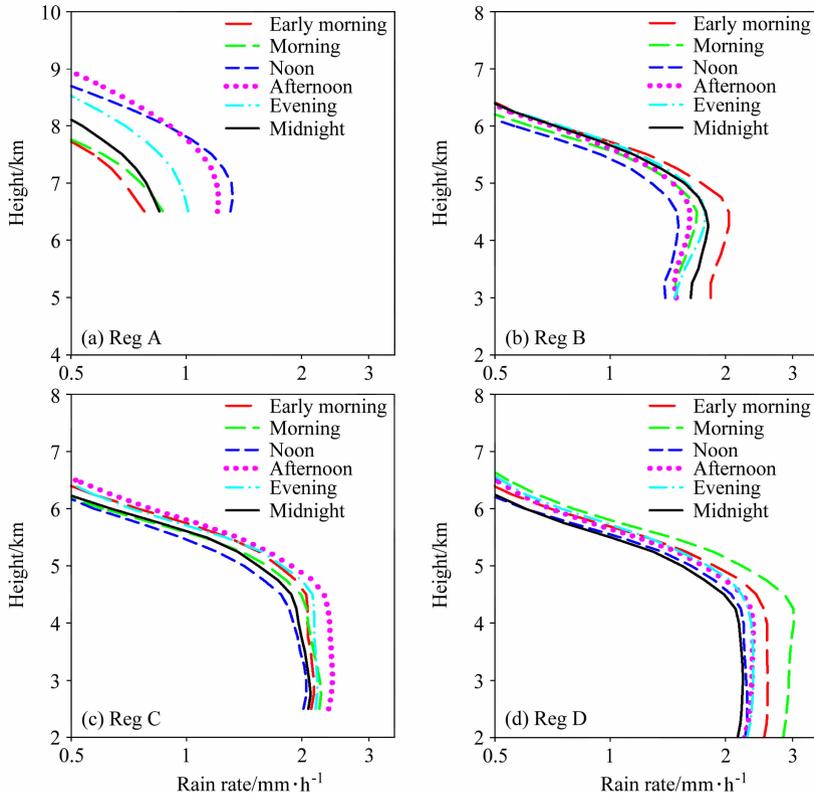


图 12 同图 11，但为层云降水廓线

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for stratiform precipitation profiles

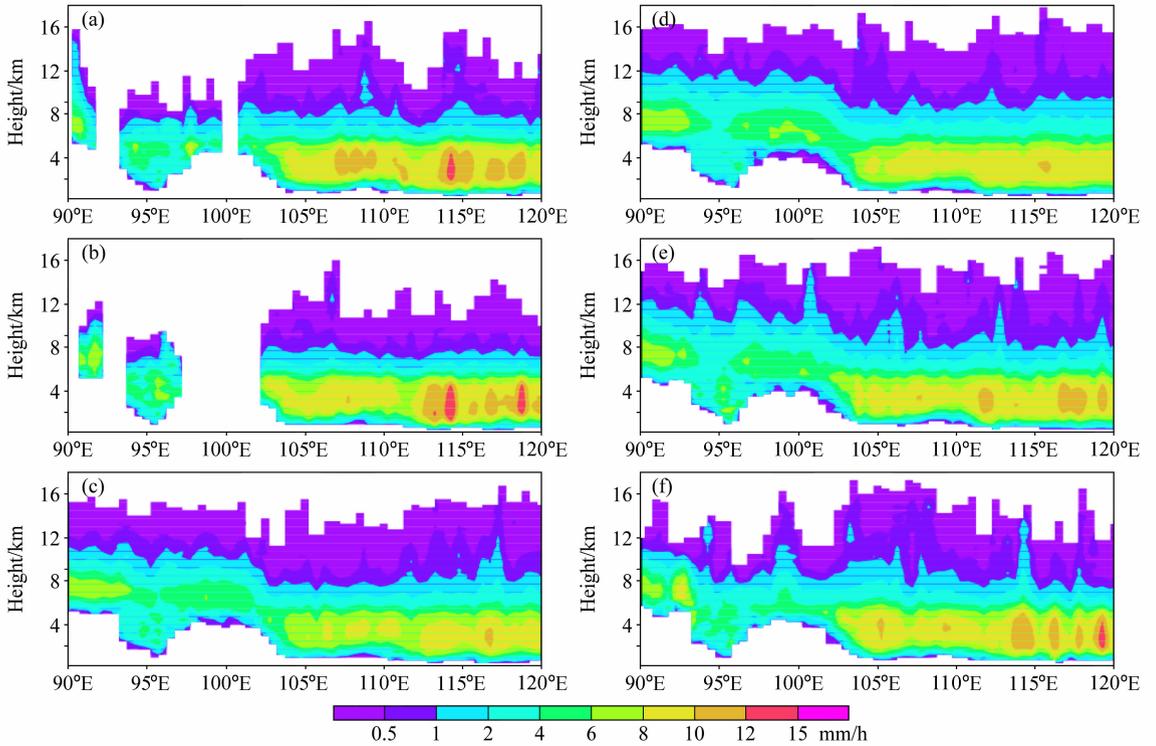


图 13 间隔 4 小时对流降水率沿 $28.0^{\circ}\text{N}\sim 32.0^{\circ}\text{N}$ 经度-高度剖面 (单位: mm/h): (a) 凌晨; (b) 早晨; (c) 正午; (d) 午后; (e) 夜晚; (f) 午夜

Fig. 13 Height-longitude cross sections of convective precipitation rate along $28.0^{\circ}\text{N}\sim 32.0^{\circ}\text{N}$ for (a) early morning, (b) morning, (c) noon, (d) afternoon, (e) evening, and (f) mid-night

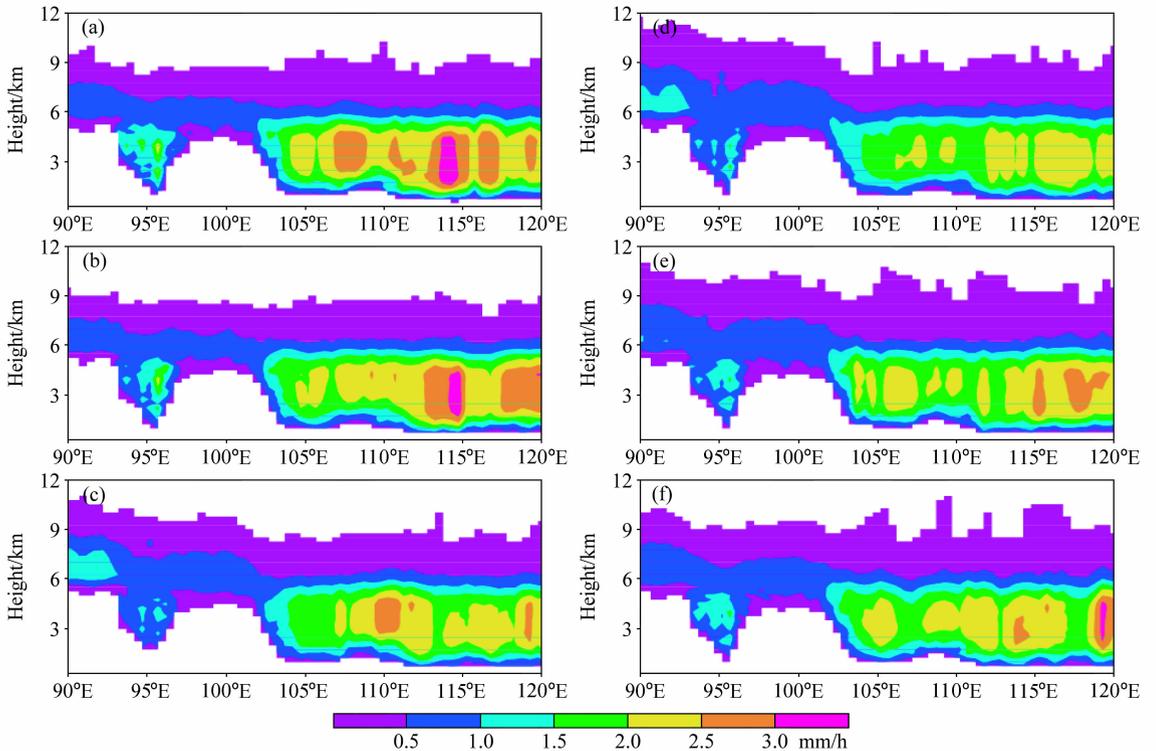


图 14 同图 13, 但为层云降水率

Fig. 14 Same as Fig. 13, but for stratiform precipitation rate

在 4 km 以上, 部分地区接近 8 km, 而以东地区则在 4 km 附近。

与对流降水相比, 105.0°E 以东层云降水“雨顶”高度显得十分均匀, 不同区域、不同时段“雨顶”高度都在 6 km 附近, 没有表现出明显的地域性和强烈的日变化特征。而 105.0°E 以西的层云降水“雨顶”高度日变化相对强烈, 午后部分区域的层云降水“雨顶”高度能达到 9 km 附近, 而其它大部分时段低于 9 km; 此外, 该区域层云降水“雨顶”高度也表现出了由东向西逐渐升高的趋势, 这一现象可能跟地形作用有关, 但需要进一步的研究。

105.0°E 以西层云降水率日变化比较平缓, 大部分高度的降水率都在 1.5 mm/h 以下, 而其以东地区的层云降水率日变化较明显。如在 115.0°E 附近、3 km 左右的高度, 凌晨(图 14a)和早晨(图 14b)均出现了大于 3.0 mm/h 的层云降水率, 而其它大部分时段层云降水率均小于 2.5 mm/h。

4 结论

夏季中国降水分布及变化一直受到中国学者的重视, 但以往的研究多是基于地面雨量计观测, 因此, 我们对夏季中国不同类型的降水特征严重缺乏认识。为了解夏季中国南方对流降水和层云降水的降水频次、降水强度及降水垂直结构的特征, 本文利用 TRMM PR 1998~2007 年共 10 年的探测结果, 对夏季中国南方这两种降水的上述特点进行了研究。通过分析, 取得如下结果:

(1) 对流降水和层云降水频次分析表明, 华南丘陵地区、四川盆地以东山区、江淮之间及东南沿海对流降水频次高(大于 1.5%), 四川盆地、大巴山及武陵山东部、长江口地区对流降水频次低(小于 0.75%)。层云降水频次较对流降水频次高出两倍以上, 层云降水频次高值区位于高原东南部的我国西南大部分地区、秦岭南部地区及浙江山区, 均超过 5%。统计条件降水强度表明, 对流降水条件降水强度多在 8 mm/h 以上, 而层云降水条件降水强度小于 3 mm/h。由于降水频次和条件降水强度的这种差异, 导致对流降水和层云降水对总降水量的贡献在中国南方大部分地区差别不大。

(2) 夏季中国南方大部分地区的对流降水主要集中在午后, 中国南部、西南和东南沿海等地的对流降水频次日变化相对剧烈。相比之下, 层云降水

频次的日变化就显得平缓。对流降水和层云降水频次日变化均表现出明显的地域性特征。层云降水频次峰值出现的时间显示, 从东南到西北部之间存在明显的“阶梯”变化。与层云降水相比, 对流降水频次峰值出现时间的地域性差异不是特别显著, 除四川盆地和淮河流域地区外, 其它地区主要集中在午后。

(3) 对流降水和层云降水廓线的日变化主要表现在“雨顶”高度的变化, 即降水云的厚度变化。对流降水平均“雨顶”高度在 9~16 km 之间, 日变化显著; 层云降水“雨顶”高度则在 9 km 以下, 无明显日变化。此外, 降水廓线的日变化还表现在地表降水率的变化, 不同地区的降水廓线存在明显的不同, 以青藏高原最为典型。降水率剖面分析结果显示了对流降水的“雨顶”高度日变化较层云降水剧烈, 降水率的日变化则相反, 且层云降水率的地域性特征更强。

致谢 感谢日本国家空间发展署(JAXA)的地球观测研究中心(EORC)和美国航空航天局(NASA)的戈大德空间飞行中心(GSFC)为本研究提供了 TRMM PR 资料。对审稿人提出的宝贵意见表示感谢!

参考文献 (References)

- Awaka J, Iguchi T, Okamoto K. 1998. Early results on rain type classification by the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) precipitation radar [C]. Proceedings 8th URSI commission F Open Symp., Averbior, Portugal, 134-146.
- 丁一汇, 村上胜人. 1994. 亚洲季风 [M]. 北京: 气象出版社, 1-29. Ding Yihui, Katsuhito Murakami. 1994. Asia Summer Monsoon (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-29.
- 丁一汇, 孙颖. 2002. 东亚季风的季节进退与水汽输送 [J]. 天气与气候, 1(1): 18-33. Ding Yihui, Sun Ying. 2002. Seasonal surge and water vapor transfer of summer monsoon over East Asia [J]. Weather and Climate (in Chinese), 1(1): 18-33.
- 傅云飞, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2003. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究 [J]. 气象学报, 61(4): 421-431. Fu Yunfei, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2003. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and TMI [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61(4): 421-431.
- 傅云飞, 冯静夷, 朱红芳, 等. 2005. 西太平洋副热带高压下热对流降水结构特征的个例分析 [J]. 气象学报, 63(5): 750-761. Fu Yunfei, Feng Jingyi, Zhu Hongfang, et al. 2005. Structures of a thermal convective precipitation system happened in control-

- ling of the western subtropical Pacific high [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (5): 750–761.
- 傅云飞, 刘栋, 王雨, 等. 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征 [J]. *气象学报*, 65 (3): 316–328. Fu Yunfei, Liu Dong, Wang Yu, et al. 2007. Characteristics of precipitating and non-precipitating clouds in typhoon RANAN as viewed by TRMM combined measurements [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (3): 316–328.
- 傅云飞, 张爱民, 刘勇, 等. 2008. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析 [J]. *气象学报*, 66 (5): 730–746. Fu Yunfei, Zhang Aimin, Liu Yong, et al. 2008. Characteristics of seasonal scale convective and stratiform precipitation in Asia based on measurements by TRMM precipitation radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (5): 730–746.
- Fu Y, Liu G. 2001. The variability of tropical precipitation profiles and its impact on microwave brightness temperatures as inferred from TRMM data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 40: 2130–2143.
- Fu Y, Lin Y, Liu G, et al. 2003. Seasonal characteristics of precipitation in 1998 over East Asia as derived from TRMM PR [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20 (4): 511–529.
- Fu Y, Liu G. 2003. Precipitation characteristics in mid-latitude East Asia as observed by TRMM PR and TMI [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 81: 1353–1369.
- Fujiyoshi Y, Takasugi T, Gocho Y, et al. 1980. Radar-echo structure of middle-level precipitating clouds and the change of raindrops—Processes of mixing of precipitation particles falling from generating cells [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 58: 203–216.
- 郭其蕴, 王继琴. 1981. 近三十年我国夏季风盛行期降水的分析 [J]. *地理学报*, 36 (2): 187–195. Guo Qiyun, Wang Jiqin. 1981. Interannual variations of rain spell during predominant summer monsoon over China for recent thirty years [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 36 (2): 187–195.
- 何文英 陈洪滨. 2006. TRMM 卫星对一次冰雹降水过程的观测分析研究 [J]. *气象学报*, 64 (3): 364–376. He Wenying, Chen Hongbin. 2006. Analyses of evolutionary characteristics of a hail-storm precipitation from TRMM observations [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64 (3): 364–376.
- Hobbs P V. 1989. Research on clouds and precipitation: Past, present, and future [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 70: 282–285.
- Iguchi T, Meneghini R. 1994. Intercomparison of single-frequency methods for retrieving a vertical rain profile from airborne or spaceborne radar data [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 11: 1507–1516.
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 15: 809–817.
- Kodama Y M, Tamaoki A. 2002. A re-examination of precipitation activity in the subtropics and the mid-latitudes based on satellite-derived data [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 (5): 1261–1278.
- Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, et al. 2001. Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39 (1): 102–116.
- Liu G, Fu Y. 2001. The characteristics of tropical precipitation profiles as inferred from satellite radar measurements [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79: 131–143.
- 吕俊梅, 据建华, 江剑民. 2009. 近一百年中国东部区域降水的年代际跃变 [J]. *大气科学*, 33 (3): 524–536. Lü Junmei, Jü Jianhua, Jiang Jianmin. 2009. Interdecadal regime shifts of regional precipitation over eastern China during the last 100 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (3): 524–536.
- Schumacher C, Houze R A. 2006. Stratiform precipitation production over sub-Saharan Africa and the tropical East Atlantic as observed by TRMM [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132 (620): 2235–2255.
- Simpson J, Adler R F, North G R. 1988. A proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 69: 278–295.
- Sorooshian S, Gao X, Hsu K, et al. 2002. Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information [J]. *J. Climate*, 15: 983–1001.
- Szoke E J, Zipser E J, Jorgensen D P. 1986. A radar study of convective cells in mesoscale systems in GATE. Part I: Vertical profile statistics and comparison with hurricanes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43: 182–197.
- 陶诗言等. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyan, et al. 1980. Heavy Rainfall in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 255pp.
- 王遵娅, 丁一汇. 2008. 中国雨季的气候学特征 [J]. *大气科学*, 32 (1): 1–13. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic characteristic of rainy seasons in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (1): 1–13.
- Yu R, Zhou T, Xiong A, et al. 2007. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01704, doi: 10.1029/2006GL028129.
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. *地理学报* (创刊号), 1: 1–28. Chu Coching. 1934. The enigma of Southeast Monsoon in China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1: 1–28.
- 郑媛媛, 傅云飞, 刘勇, 等. 2004. 热带测雨卫星对淮河一次暴雨降水结构与闪电活动的研究 [J]. *气象学报*, 62 (6): 790–802. Zheng Yuanyuan, Fu Yunfei, Liu Yong, et al. 2004. Heavy rainfall structures and lightning activities in a cold-front cyclone happened in Huai River derived from TRMM PR and LIS observations [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (6): 790–802.
- Zipser E J, Lutz K R. 1994. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells; A strong indicator of storm intensity and lightning probability [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 1751–1759.