

中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与 中尺度对流系统日变化关系分析^{*1}

陈 炯¹ 郑永光¹ 张小玲¹ 朱佩君²

CHEN Jiong¹ ZHENG Yongguang¹ ZHANG Xiaoling¹ ZHU Peijun²

1. 国家气象中心, 北京, 100081

2. 浙江大学, 杭州, 310027

1. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2. *Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

2012-06-13 收稿, 2013-01-21 改回.

陈炯, 郑永光, 张小玲, 朱佩君. 2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析. *气象学报*, 71(3): 367-382

Chen Jiong, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, Zhu Peijun. 2013. Analysis of the climatological distribution and diurnal variations of the short-duration heavy rain and its relation with diurnal variations of the MCSs over China during the warm season. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(3): 367-382

Abstract The short-duration heavy rain (hereafter SDHR) is one type of severe convective weather, and can directly or indirectly lead to large property and life losses. Based on the qualified hourly rain-gauge data from the 876 stations during April – September of 1991 – 2009 provided by the National Meteorological Information Center of China, the spatiotemporal distribution of SDHR over China during the warm season (April – September) is presented, and the comparison between SDHR and the MCS diurnal variations is focused on. It is found that the frequency spatial distributions of the SDHR denoted by hourly rainfall ≥ 10 mm, 20 mm, 30 mm and 40 mm are very similar to that of heavy rainfall (daily rainfall ≥ 50 mm) over China (excluding Taiwan). However, the frequencies of the SDHR denoted by hourly rainfall ≥ 50 mm are much lower than those ≥ 20 mm/h, and, therefore, their spatial distributions are also much different. The most active SDHR region is South China, and the second most active regions are southern Yunnan Province, Sichuan Basin, southern Guizhou Province, Jiangxi Province, the lower reaches of the Yangtze River, and so on. The heaviest hourly rainfall over China (excluding Taiwan) is more than 180 mm (over Hainan Island), and there are lots of SDHR events with hourly rainfall ≥ 50 mm over the inactive SDHR regions, such as the western Xinjiang Uygur Autonomous Region, the middle and eastern Inner Mongolia Autonomous Region. The monthly variations of SDHR show that the most active SDHR month is July, and August the second most active. The pentad variations of SDHR reveal that the evolvement of SDHR has a characteristic of intermittence, and the most active SDHR pentad is the fourth pentad of July. The SDHR frequencies enhance slowly and weaken rapidly with the advance and withdraw of the summer monsoon over East Asia as shown in the monthly and pentad variations of SDHR over China. Over the entire China, the most active diurnal peak is 16:00 – 17:00 BT, the second and third active peaks 01:00 – 02:00 BT and 07:00 – 08:00 BT, respectively, and the most inactive period 10:00 – 13:00 BT. The diurnal variations of SDHR show that the active periods and propagation of SDHR and MCSs are different over the different regions of different underlying surface, with a single peak, two peaks, multiple peaks and continued active type, which are not only associated with the larger-scale atmospheric circulation, but also closely related to the terrain and land-sea distributions, for example, over South China, Guizhou Province, and Sichuan Province.

* 资助课题: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206004, GYHY201206003, GYHY200906003), 973 项目(2013CB430106)。

第一作者: 陈炯, 主要从事数值模式研发和中尺度气象研究。E-mail: cjiiong@cma.gov.cn

通讯作者: 郑永光, 主要从事强对流天气研究。E-mail: zhengyg@cma.gov.cn

Key words Short-duration heavy rain, Climatology, Spatiotemporal distributions, Diurnal variations, Propagation

摘要 短时强降水是强对流天气的一类。基于中国国家气象信息中心质量控制后的 1991—2009 年 876 个基本基准气象站整点逐时降水资料,通过不同时段的发生时次频率分析,给出了中国暖季(4—9 月)不小于 10、20、30、40、50 mm/h 短时强降水的时空分布特征,并重点同利用静止气象卫星红外相当黑体亮度温度(T_{BB})资料获得的中尺度对流系统(MCS)日变化特征进行了对比分析。结果表明,中国短时强降水时次频率地理分布同暴雨(≥ 50 mm/d)分布都非常相似,但 50 mm/h 以上的短时强降水时次频率非常低,地理分布差异显著。短时强降水发生频率最高的区域为华南,其次为云南南部、四川盆地、贵州南部、江西和长江下游等地。最大降水强度可超过 180 mm/h(海南);在短时强降水发生频率很低的区域,也有超过 50 mm/h 的强降水。从月际变化来看,7 月最为活跃,其次为 8 月。逐候变化显示,短时强降水具有显著的间歇性发展特征(跳跃性分布的特征),但总体上呈现缓慢增强、迅速减弱的特点;以 7 月第 4 候最为活跃。中国总体平均的短时强降水的频率和最大强度的日变化有 3 个峰值,主峰在午后(16—17 时,北京时),次峰在午夜后(01—02 时)和早晨(07—08 时);中午前后(10—13 时)最不活跃。中国短时强降水和中尺度对流系统的日变化特征基本一致,但午夜后时段二者存在较大差异。不同区域的短时强降水和中尺度对流系统日变化具有不同的活跃时段和传播特征,具有单峰型、双峰型、多峰型和持续活跃型等日变化类型,这不仅与较大尺度的天气系统环流相关,且与地势、海陆等地理分布密切相关。

关键词 短时强降水,气候,时空分布,日变化,传播

中图法分类号 P466 P445

1 引言

短时强降水是强对流天气的一类,易于导致城市内涝和山洪、泥石流、滑坡等地质灾害(例如 2010 年 8 月 8 日甘肃舟曲的特大泥石流灾害),是强对流天气业务预报的重点之一。中国中央气象台定义的短时强降水是指小时降水量 ≥ 20 mm^①;中国的暴雨是指日降水量 ≥ 50 mm。短时强降水和暴雨都主要是由中尺度对流系统(MCS)造成,因此,经常伴有雷电天气。短时强降水强调的是降水的强对流特征及短时特征,暴雨则不仅包含对流特征,更强调降水的持续性特征,这是因为暴雨不仅包含对流云降水,还包含层状云降水的缘故。

对中国的暴雨、极端降水、雷暴和冰雹的气候分布特征已有较多分析(张家诚等,1985;中国气象局,2007;申乐琳等,2010;黄琰等,2011),郑永光等(2007,2008)使用地球静止气象卫星相当黑体亮度温度(T_{BB})资料分别分析了北京及周边地区、中国及周边地区的中尺度对流系统的时空分布特征;王晓芳等(2012)给出了中国长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统的组织类型特征;但中国暖季的短时强降水的气候分布特征还不清楚。

Yu 等(2007a,2007b)使用 1991—2004 年自动观测降水资料分析了中国大陆的夏季降水日变化特征和降水持续时间关系;李建等(2008)、Li 等(2008)

分析了北京单站夏季降水日变化基本气候特征及其长期演变趋势和中国南方降水日变化的季节变化特征;Zhou 等(2008)利用地面雨量计观测和卫星观测的降水资料进一步分析了中国夏季降水频率和强度的日变化特征;Chen 等(2010)给出了中国长江流域夜间长时间持续降水峰值的向东传播的原因。姚莉等(2009)基于 1991—2005 年中国逐时降水资料分析了 8 mm/h 以下和以上雨强的时空分布特征。这些研究在中国降水的日变化、持续性、传播特征和成因及其气候变化特征方面取得了非常重要的成果,但由于强对流导致的短时强降水发生频率低,并未直接给出表征强对流活动的短时强降水天气的分布特征。Zhang 等(2011)基于 1961—2000 年逐时降水资料,以 ≥ 20 mm/h 为标准给出了中国中东部暖季(5—9 月)极端小时降水的地理分布、日变化及其气候变化特征。虽然夏季是中国的主要降水季节,但春秋季节也是中国南方重要的强对流天气多发季节,尤其春季是华南重要的前汛期降水季节(黄土松等,1986)。因此,本文利用 1991—2009 年共 19 年逐时降水资料来分析中国暖季(4—9 月)的短时强降水气候特征以弥补中国降水和强对流天气气候特征研究的不足,并同基于静止气象卫星 T_{BB} 资料获得的中尺度对流系统气候分布特征进行对比,以进一步充实对该类天气的天气气候规律认识,从而为该类天气的预报提供气候学基础。

①中国中央气象台网站 www.nmc.gov.cn

2 资料和方法

本文所用逐时降水资料来源与 Yu 等(2007a, 2007b)和姚莉等(2009)所用资料基本一致,不过资料时间跨度为 1991—2009 年 4—9 月。该资料由中国国家气象信息中心提供,并经过质量控制,未包含

台湾省的资料;每个时次的逐时降水量指的是该时次之前 1 h 的降水量。本文实际使用的资料为 1991—2009 年 4—9 月的时间跨度超过 15 年的测站资料,其站点数为 549 个(图 1);所用资料中最近相邻站的平均距离约为 100 km,但总的来说东密西疏。

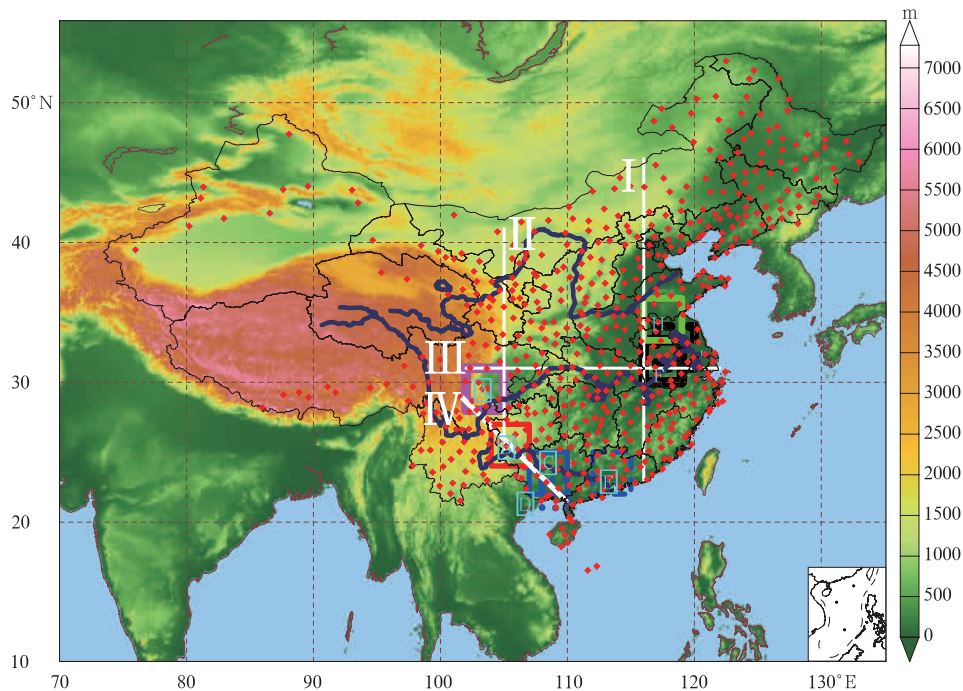


图 1 中国的地形分布(彩色填充)、所用气象观测站点分布(红色圆点)及不同的区域选择

(I、II、III和IV为剖面分析基线;A、B、C、D、E、F、G和H为选择的短时强降水和 $T_{BB} \leq -52^\circ\text{C}$ 日变化矩形区域;参见正文)

Fig. 1 Orographic and geographic synopsis of China (color shaded), the meteorological observation stations (red dots), and the selected regions (the white solid lines of I, II, III and IV denote the positions for the different cross sections, and the blue rectangles of A, B, C, D, E, F, G and H indicate the region for the diurnal curves of SDHR and $T_{BB} \leq -52^\circ\text{C}$; for further detail see text)

中国目前尚无统一的短时强降水定义标准,中国中央气象台对短时强降水的定义是小时降水量 ≥ 20 mm。美国易导致暴雨的短时强降水为 ≥ 20 mm/h (Davis, 2001)。Zhang 等(2011)给出的以 ≥ 20 mm/h 为标准作为中国中东部暖季极端小时降水的原因是其年平均分布与暴雨分布基本一致。根据尺度分析和降水量与垂直速度的关系, ≥ 10 mm/h 的降水一般是由中小尺度天气系统造成的,而 ≥ 50 mm/h 的降水主要是由小尺度天气系统导致。

为了给出不同强度短时强降水的气候分布特征,本文分析了 ≥ 10 、20、30、40、50 mm/h 共 5 个级别短时强降水的时空分布。需要说明的是,由于本文所用资料中人为地将降水资料划分为整点资料,这可能导致部分连续 1 h 超过指定阈值的降水量被划分到两个时段而未达到本文所确定的短时强降水阈值标准,因此,本文统计的短时强降水时次频率要低于实际发生的频率。

具体的统计方法为,根据给定的 1 h 降水量阈值标准,针对具体分析时段,分别对不同研究区域内

各个观测站 1 h 降水量不小于该阈值标准的时次数进行计数,然后除以各个观测站总有效观测时次数,得到的百分比即为各个研究区域内各站点 1 h 降水量不小于该阈值的发生频率。该发生频率为时次频率。为了展示中国大陆区域的小时降水量的最大强度分布特征,也给出了中国最大 1 h 降水量的空间分布和平均的日变化特征。

本文还使用了多年夏季静止气象卫星 T_{BB} 资料来分析对流活动日变化特征,以便与短时强降水日变化特征进行对比。该资料来源与郑永光等(2008)所用资料基本一致,不过资料时间跨度由 1996—2006 年(缺 2004 年)增加为 1996—2007 年(缺 2004 年)的 6—8 月,并转换为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬度网格。所用的统计方法与郑永光等(2008)完全一致,即统计每一个网格点的 $T_{BB} \leq -52^\circ\text{C}$ 发生频率。需要说明的是, T_{BB} 资料的空间分辨率显著高于本文所用的 549 个气象测站分布所达到的空间分辨率(约 100 km)。

3 地理分布特征

图 2 给出了中国 ≥ 20 和 ≥ 50 mm/h 的短时强降水频率分布及最大 1 h 降水量空间分布特征。短时强降水 ≥ 10 (图略)、 ≥ 20 (图 2a)、 ≥ 30 (图略)、 ≥ 40 mm/h (图略) 时次频率的空间分布非常类似,与 Zhang 等(2011)基于 1961—2000 年逐时降水资料获得的中国中东部 ≥ 20 mm/h 降水地理分布基本一致,但 ≥ 50 mm/h 频率(图 2b)的空间分布与其他强度差别较大。这主要是因为 ≥ 50 mm/h 的降水主要由小尺度天气系统造成,其发生频率非常低,属于极端天气的原因。根据中国中央气象台短时强降水的定义、Zhang 等(2011)给出的中国中东部极端小时降水定义、美国易于造成暴洪的小时降水量标准(Davis, 2001)和不同强度短时强降水的分布特征,本文主要以 ≥ 20 mm/h 的降水分布给出中国的短时强降水时空分布特征。

图 2a 表明中国 ≥ 20 mm/h 短时强降水频率地理分布与年平均暴雨日数分布(张家诚等,1985;中国气象局,2007)非常类似。总体来看,短时强降水天气的分布具有中国南部比北部活跃,东部比西部活跃,平原、谷地较相邻的高原、山地活跃等特点。由于中国雨带的季节性移动与东亚夏季风密切相关(陶诗言,1980),因此,易受到夏季风影响的区域则

短时强降水天气较为活跃,大陆腹地因难以受到夏季风影响而短时强降水天气不活跃。

短时强降水的这种地理分布特征与卫星观测的中国年闪电密度分布(马明等,2004;中国气象局,2007)也具有较好的一致性,这也从气候分布的角度表明短时强降水与闪电活动密切相关。中国短时强降水与雷暴分布(中国气象局,2007)、中尺度对流系统分布(郑永光等,2008)具有一定的一致性,但也存在显著的差别:总体来看,山地和高原区域的雷暴及中尺度对流系统则较为活跃(中国气象局,2007;郑永光等,2008),而平原和谷地区域的短时强降水则较为活跃。具体来看,短时强降水最活跃区域(图 2a)主要位于华南,最大时次频率达 0.62%;四川盆地西南部、西南地区东南部、黄淮东部、江淮、江西、浙江东部沿海、福建大部分地区等是短时强降水的次活跃区。 ≥ 20 mm/h 短时强降水日数(1 d 中至少发生 1 次 ≥ 20 mm/h 短时强降水为 1 个 ≥ 20 mm/h 短时强降水日)的地理分布(图略)与 ≥ 20 mm/h 短时强降水时次频率一致,华南 ≥ 20 mm/h 短时强降水年最多日数可达 30 d。短时强降水的这种多个活跃中心的地理分布特征与不同区域的地势分布密切相关,相关研究(陶诗言,1980;黄土松等,1986)也已表明中国的暴雨分布受地形影响明显。

图 2b 表明 ≥ 50 mm/h 的短时强降水时次频率非常低,最大值仅为 0.08%,即 10000 个时次(约 417 d)中最多发生 8 个时次 ≥ 50 mm/h 的短时强降水。统计 1991—2009 年 4—9 月的每个气象测站小时降水量 ≥ 50 mm 的时次数发现,广东阳江 ≥ 50 mm/h 次数最多,为 64 次。从总体地理分布来看,除同是 ≥ 20 和 ≥ 50 mm/h 短时强降水的活跃区之外,福建沿海、浙江沿海、河南中部、河北南部、辽宁西南部也是 ≥ 50 mm/h 短时强降水的活跃区域,这种分布特征同张家诚等(1985)给出的中国 ≥ 100 mm/d 暴雨分布非常相似。 ≥ 50 mm/h 短时强降水活跃区分布较 ≥ 20 mm/h 分布显得更为零散,这可能与产生该天气的系统尺度较小有关,也可能与特殊的地形分布有关;从区域分布来看,中国东南沿海地区 ≥ 50 mm/h 的短时强降水比内陆地区更为活跃,这可能与沿海地区易于受到台风或者东风波等热带系统影响有关。

最大小时降水量可以从另一个侧面表征极端强对流天气的强度。图 2c 表明中国最大小时降水量

的分布与短时强降水的频率分布截然不同。图 2c 显示,大陆腹地由于难以受到夏季风影响,大气中的水汽量较少,因此,最大小时降水量大多都低于 50 mm/h;易受到夏季风影响的中国中东部等区域的南、北方最大小时降水量也存在一定差异,华南最大小时降水量超过 120 mm/h 的站点较多,但北方也有较多站点超过 80 mm/h、部分站点超过 120 mm/h,因此,从最强的小时降水量来看,南、北方最强对流活动的强度差异并不是很大。

需要指出的是,本文所使用的小时降水量观测资料来自国家基本基准气象站,虽然具有相当的代表性,但其在一定程度上代表的是一定区域内的平

均小时降水状况,且本文的最长资料时间跨度仅为 19 年,因此,本资料中的测站最大小时降水量并不能完全代表极端的小时降水量状况。据相关文献,极端小时降水可能会更强,如 1978 年 7 月 11 日辽宁缸窑岭 1 h 降水量达 185.6 mm(水利部长江水利委员会水文局等,1995;水利部水文局等,2006),1975 年 8 月 5 日河南林庄 1 h 降水量达 198.3 mm(丁一汇等,2009),1979 年 5 月 12 日广东阳江茅洞 1 h 降水量达 220.2 mm,1979 年 6 月 11 日广东澄海东溪口 1 h 降水量达 245.1 mm(黄士松等,1986)。

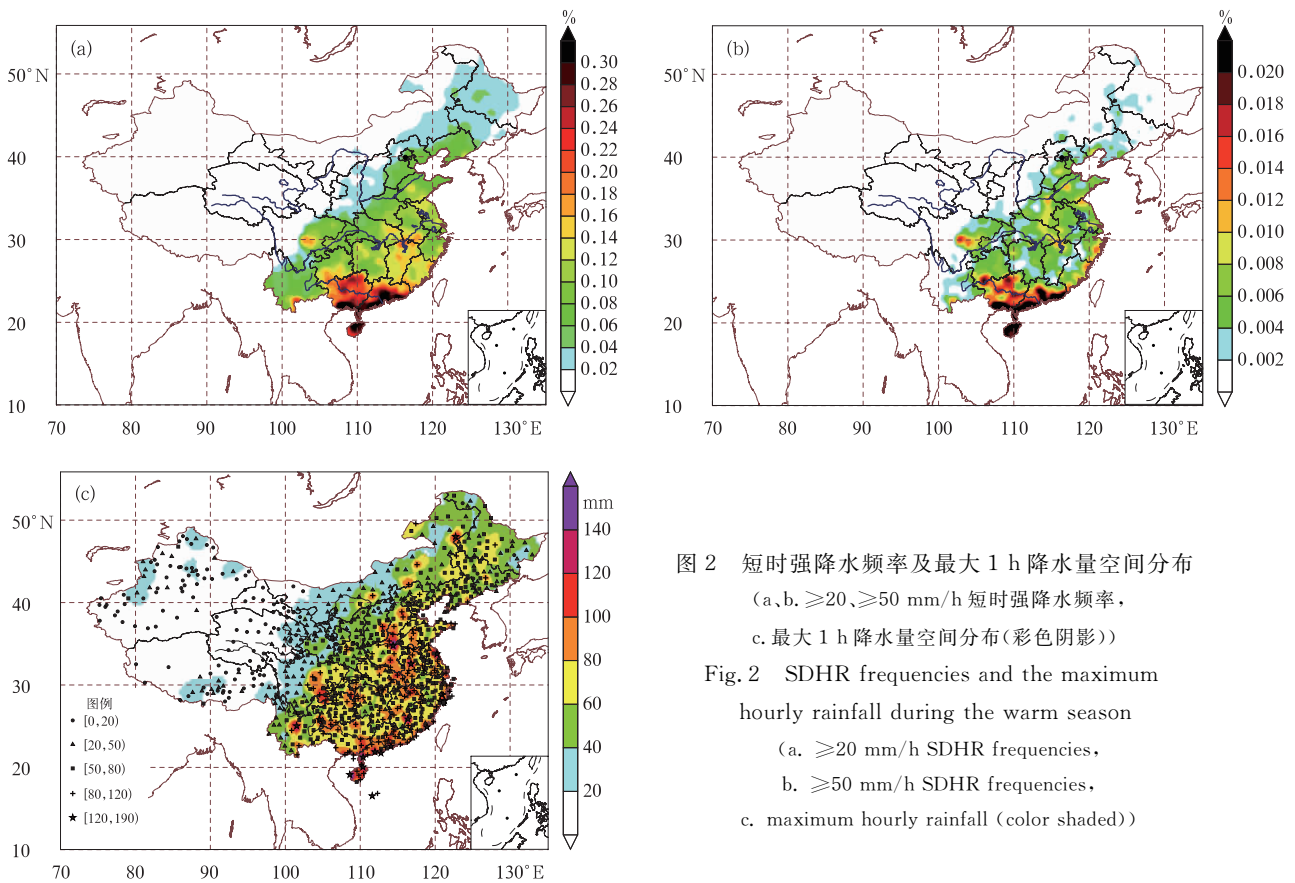


图 2 短时强降水频率及最大 1 h 降水量空间分布

(a, b. ≥ 20 、 ≥ 50 mm/h 短时强降水频率,
c. 最大 1 h 降水量空间分布(彩色阴影))

Fig. 2 SDHR frequencies and the maximum hourly rainfall during the warm season
(a. ≥ 20 mm/h SDHR frequencies,
b. ≥ 50 mm/h SDHR frequencies,
c. maximum hourly rainfall (color shaded))

4 季节和候变化特征

4.1 季节变化

夏季是中国的主要降水季,也是对流天气的活跃季。图 3 表明中国短时强降水主要发生在夏季,这与常规认知一致;其次为春季(4—5 月);秋季(9 月)短时强降水显著减弱。对比夏季短时强降水分

布(图 3b)和整个暖季分布(图 2a)可以看到,二者的地理分布非常类似,这表明夏季中国短时强降水的分布特征决定了整个暖季的分布特征,也表明夏季风是影响中国短时强降水分布的首要因素。

图 3a 表明,春季中国短时强降水天气主要出现在华南、江南和云南南部等地。春季短时强降水最为活跃的区域是华南,尤其是广西东部和广东西部

地区, 这和华南区域的前汛期降水(黄士松等, 1986)密切相关。需要说明的是, 春季虽然暖湿气团主要位于华南和江南, 但在华北南部和山东西部甚至东北南部也会发生短时强降水天气。如 2003 年 4 月 17 日山东济阳出现超过 20 mm/h 的降水; 2009 年 5 月 9—10 日河北南部、山东西北部、河南西部和北部出现大范围超过 20 mm/h 的短时强降水; 2012 年 4 月 24—25 日, 河北中南部、山东西北部、辽宁中南部出现大范围超过 20 mm/h 的短时强降水天气。

如前所述, 图 3b 表明中国夏季的短时强降水天气分布决定了暖季的短时强降水天气分布, 但短时强降水的活跃区和活跃中心夏季比整个暖季更加突出和明显。图 3b 还表明, 夏季风影响的边缘区域短时强降水天气也显著活跃, 比如甘肃南部、陕西、山西、内蒙古中东部等, 2010 年 8 月 8 日导致甘肃舟曲特大山洪泥石流的最大小时降水量达 77.3 mm。

图 3c 表明, 秋季(9 月)中国短时强降水天气显著减弱, 华南沿海、海南、福建沿海和浙江沿海等地短时强降水较活跃, 云南南部、四川盆地、江西北部

等地的局部也有一定频率的短时强降水天气。但 2009 年 11 月 9—10 日江南大部分地区出现大范围短时强降水天气, 最大小时降水量超过 60 mm。

总体来看, 夏季风的进退决定了中国雨带的位置(陶诗言, 1980)。但春季的短时强降水同夏季风和冷空气活动都密切相关, 4 月的华南降水大多为锋面性质的降水, 5 月中旬南海夏季风建立后, 华南的强降水天气增多(黄士松等, 1986; 周秀骥等, 2003), 对流活动已较活跃。夏季, 尤其是 7、8 月, 同一天中国经常出现两条甚至 3 条短时强降水带, 一条与中高纬度的冷空气活动密切相关, 另一条与夏季风和副热带高压(副高)密切相关, 该条短时强降水带经常比前者要活跃得多。9 月, 850 hPa 西太平洋副高环流减弱, 中国大陆东部 40°N 以南为极地变性高压区中的反气旋性环流控制(中央气象局, 1975), 短时强降水频率迅速减弱, 但由于此季节热带辐合带达到最北的位置, 因此, 经常有台风、东风波等热带天气系统给中国华南、东南沿海带来短时强降水天气。

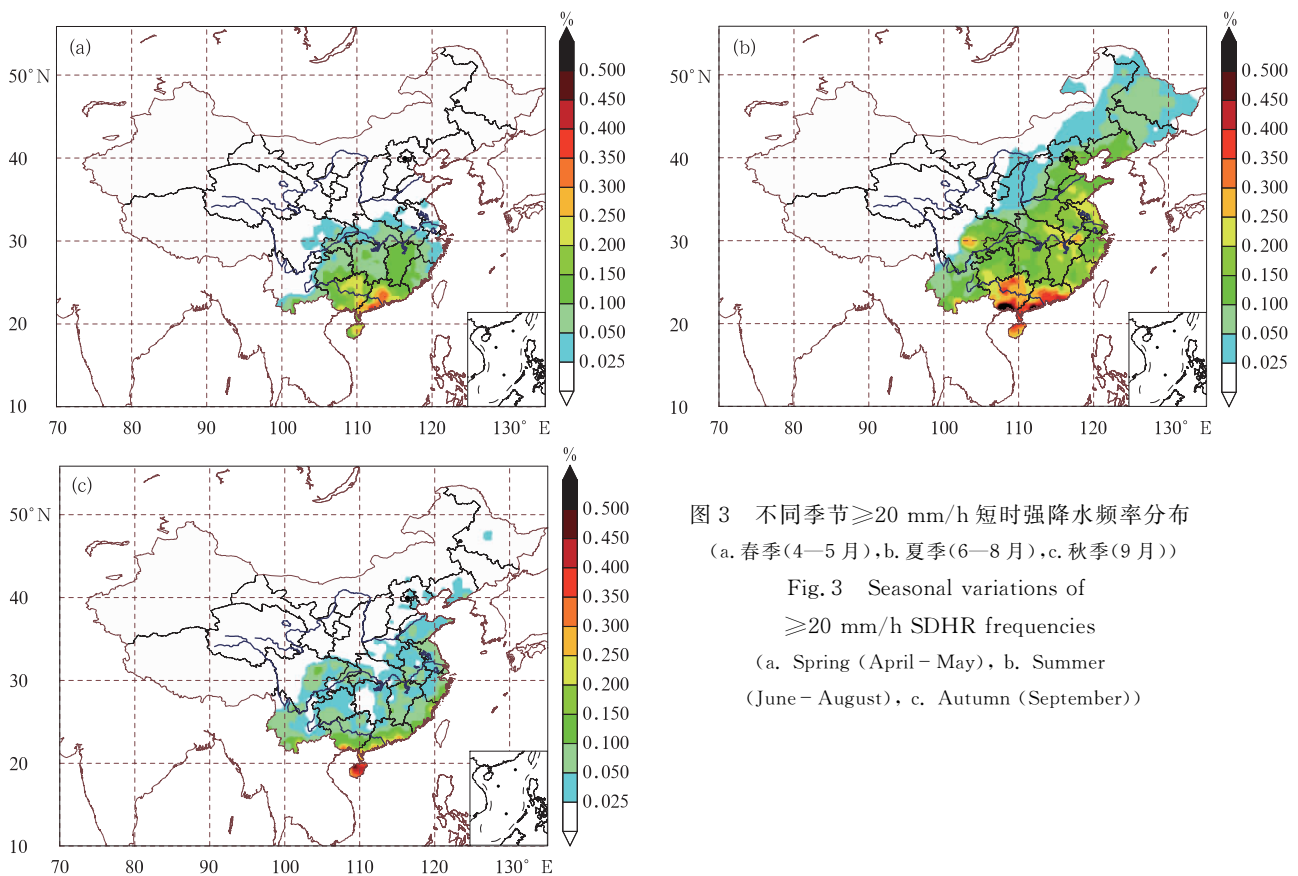


图 3 不同季节 ≥ 20 mm/h 短时强降水频率分布
(a. 春季(4—5 月), b. 夏季(6—8 月), c. 秋季(9 月))

Fig. 3 Seasonal variations of
 ≥ 20 mm/h SDHR frequencies
(a. Spring (April–May), b. Summer
(June–August), c. Autumn (September))

4.2 月和候变化

图4给出了中国短时强降水天气的月变化和候变化以进一步展示不同月份和候的演变特征。图4a为中国大陆总体测站平均 ≥ 20 mm/h短时强降水时次频率月和候分布。图4a表明中国大陆短时强降水时次频率月和候分布总体上为单峰型分布,4—7月逐步升高,7月达到鼎盛期,8月开始降低,9月迅速降低,呈现出缓慢增强、迅速减弱的特点。这与东亚夏季风活动的特点密切相关,东亚夏季风5月中旬前后建立,7月底达到鼎盛,9月迅速南撤(陈隆勋等,1991)。从月份分布来看(图4a划线),单峰型特征更为显著,7月短时强降水最活跃,4月最不活跃。

从候分布来看(图4a实线),7月第4候短时强降水最活跃,其次为8月第1和第2候,4月第1候最不活跃。从候分布还可以看出,短时强降水的频率分布呈显著的间歇性和阶段性发展特征,具有多个极大值分布,即活跃期,这与东亚夏季风以阶段性而非连续性的方式推进和撤退(丁一汇等,2009)所导致的中国的几个降水集中期密切相关。4、5月的短时强降水活跃期对应于中国的华南前汛期。5月中旬—6月上旬南海夏季风已建立,为华南前汛期降水的集中期(黄土松等,1986),表现为6月第1候的短时强降水活跃期;6月下旬和7月上旬中国江淮流域进入梅雨期,表现为6月第6候的短时强降水活跃期;7月中下旬和8月上旬,华北进入雨季,江淮流域也会出现二度梅降水期和副高边缘及内部的热对流降水,这表现为7月第4候、8月第1

和第2候的短时强降水活跃期;8月下旬华南进入后汛期,主要受台风以及东风波等热带天气系统影响,表现为8月下旬短时强降水仍较活跃;9月华南、东南沿海等受北进的热带辐合带影响,表现为9月第4候的短时强降水活跃期。

为了进一步展示中国短时强降水活跃区的候变化特征,选择 105°E (图略)和 116°E (图4b)分析了纬度-候的短时强降水时次频率演变。从总体来看, 105°E (图略,位置见图1的II线)和 116°E (图4b,位置见图1的I线)经线上短时强降水候变化都表现为间歇性和阶段性发展、单峰型和多峰型并存、低纬度比高纬度活跃、低纬度活跃期长为多峰型、高纬度活跃期短为单峰型等特点。图4b还清楚地展现了暖季 116°E 经线上短时强降水时次频率缓慢增强、迅速减弱的特点,同时展现出短时强降水天气向北推进慢、南撤迅速的特点,这与东亚夏季风的活动特点(陈隆勋等,1991)一致。

图4b是沿 116°E 经线上短时强降水的月、旬、候分布和北进南撤等特征:春季(4—5月)短时强降水主要位于华南和江南,但也有较低频率在江淮、华北南部出现短时强降水天气,总体向北推进不是太远;6月短时强降水天气仍主要位于华南和江南,6月上中旬比5月有所北进,但中下旬迅速向北推进,到达华北中部 40°N 附近;7月中旬达到最北端,8月下旬南撤到华北南部,9月中下旬迅速回撤到华南。这与东亚夏季风北进和南撤以及西太平洋副高的北跳和南撤(丁一汇等,2009)完全一致。

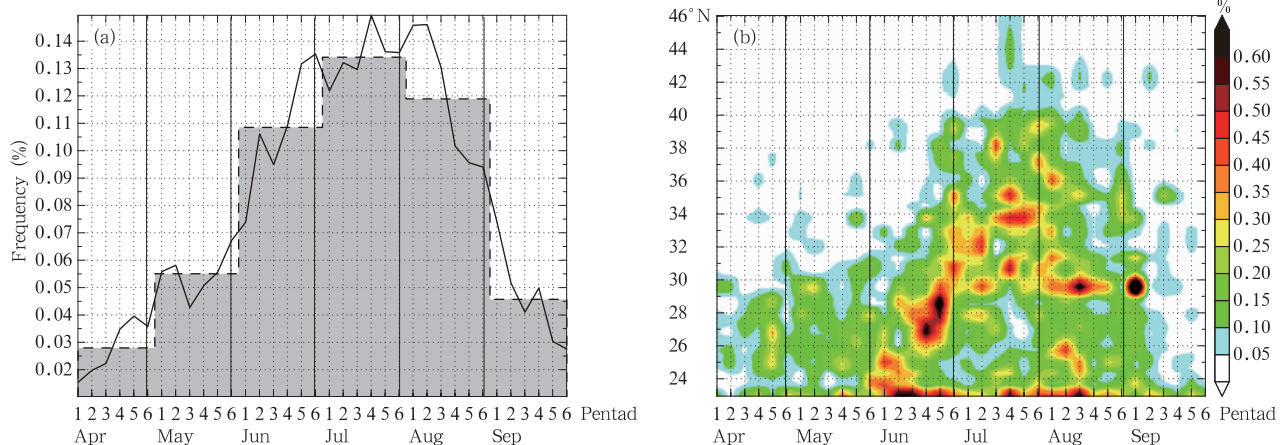


图4 ≥ 20 mm/h 短时强降水频率月和候分布频率

(a. 所有测站平均月变化(划线)和候变化(实线)曲线, b. 沿 116°E 候-纬度分布)

Fig. 4 Monthly and pentad variations of ≥ 20 mm/h SDHR frequencies

(a. the nationwide average monthly variation curve (dashed line) and pentad variation curve (solid line),

b. the pentad-latitude cross section along 116°E)

图 4b 表明华南沿海区域(23°N 附近)短时强降水天气持续活跃,候变化相对其他区域不显著,尤其是 6—8 月,这与使用静止气象卫星 T_{BB} 资料分析的该区域夏季对流活动候变化特征一致(郑永光等, 2011),与丁一汇等(2009)给出的整个华南区域平均的降水候分布特征显著不同。116°E 经线上的华南 24°—25°N 附近区域、江南、江淮、华北南部短时强降水候变化呈现为多峰型,这种多峰特征是因为这些区域在不同的夏季风影响阶段受到不同类型天气系统影响的缘故;华北北部(40°N 以北)主要为单峰型,这是东亚夏季风北进达到鼎盛的结果。

图 4b 不同区域的短时强降水候变化显示各个区域主要活跃时段显著不同,但共同的特点是主要活跃时段都是发生在东亚夏季风向北推进或者达到鼎盛的时段,次活跃时段发生在夏季风气团内或者夏季风南撤时段。

5 日变化特征

降水和对流活动(如雷暴、冰雹、中尺度对流系统等)都具有显著的日变化特征(张家诚等, 1985; Yu, et al, 2007a; 中国气象局, 2007; 郑永光等, 2007, 2008; 李建等, 2008), Zhou 等(2008)还对比分析了雨量计观测的降水和卫星资料估计的降水特征, Zhang 等(2011)给出了中国中东部暖季(5—9 月) ≥ 20 mm/h 降水日变化特征,但尚未见短时强降水同对流活动的日变化和传播特征的对比分析。因此,本部分给出中国 and 不同区域的短时强降水的日变化和传播特征及其与 $T_{BB} \leq -52^\circ\text{C}$ 相关特征的对比分析。

$T_{BB} \leq -52^\circ\text{C}$ 可以表征 α 中尺度对流系统和 β 中尺度对流系统(郑永光等, 2007, 2008),其代表的是大气中各种对流活动的综合,既可能包含有雷暴、闪电等较弱的对流活动,也可能包含有冰雹、雷雨天大风、短时强降水等强对流活动。同郑永光等(2008)研究类似,本文以 $T_{BB} \leq -52^\circ\text{C}$ 代表中尺度对流系统。需要说明的是,本文所用气象测站的空间分辨率远低于静止气象卫星 T_{BB} 的空间分辨率。

5.1 总体日变化特征

图 5 分别给出了暖季(4—9 月)中国大陆地区和中国大陆降水活跃区域(主要指安徽、福建、江苏、

山东、上海、浙江、江西、黑龙江、吉林、辽宁、北京、河北、内蒙古、山西、天津、广东、广西、海南、河南、湖北、湖南、云南、贵州、四川、重庆等省、市、区)测站平均的短时强降水频率及中国大陆总体测站平均的最大小时降水量日变化分布,作为对比,也分别给出了中国大陆总体和降水活跃区域夏季平均的中尺度对流系统日变化分布。

测站平均的短时强降水频率和测站平均的最大小时降水量日变化的计算方法为:使用资料时间跨度超过 15 年的测站 1 h 降水资料,按照每一个时次分别计算每个测站的短时强降水频率和查找每个测站的最大小时降水量,然后对每一个时次的各个测站短时强降水频率和最大小时降水量进行测站平均,从而获得测站平均的短时强降水频率和最大小时降水量日变化分布。

从中国大陆总体测站平均的短时强降水频率和最大小时降水量(图 5)来看,最突出的特征为三峰型日变化特征,主峰在午后(16—17 时,北京时,下同),但在午夜后至清晨时段又出现两个次峰,分别为 01—02 和 07—08 时,最不活跃时段为上午。短时强降水频率和最大小时降水量的日变化基本一致,最大小时降水量在午后至前半夜略滞后于频率峰值,即最大强度的时段略滞后于最大频率时段;午夜后至清晨二者变化趋势完全一致,说明强度和频率的变化一致。从二者的时间变率来看,午后至前半夜变化迅速,午夜后变化平缓。中国大陆降水活跃区域的短时强降水频率日变化趋势与中国大陆总体平均情况完全一致,只是降水活跃区域的短时强降水频率更高,这是因为非活跃区频率较低从而使中国大陆总体平均频率值降低的缘故。

中国大陆总体和降水活跃区域的平均中尺度对流系统日变化都呈现为单峰型特征,但二者存在一些差异。首先,中国大陆总体平均中尺度对流系统日变化较降水活跃区域的位相约落后 1 h,这是由于青藏高原中尺度对流系统日变化特征所致,青藏高原是中国的一个中尺度对流系统活跃区,该区域由于经度差异的原因对流活动活跃时段比中国大陆整体降水活跃区域滞后。其次,午夜至清晨时段,中国大陆降水活跃区域的对流活动显著较中国大陆平均活跃,这是因为中国大陆降水活跃区域中几个区

域的中尺度对流系统夜发性显著的原因,比如两广地区、四川盆地、云贵高原东北部、江淮流域等(郑永光等,2008,2010,2011)。

对比中国大陆总体和降水活跃区域的短时强降水和中尺度对流系统日变化特征可以看到,四者的变化趋势具有一定的一致性,但也存在明显差别。四者的共同特征是:都是下午最为活跃,这是因为下午对流活动较活跃的缘故;从时间变率来看,都是午后至前半夜变化迅速,午夜后相对前一时段变化平缓。不同点是:短时强降水与中尺度对流系统频率量级显著不同,中尺度对流系统频率显著高于短时强降水,其峰值频率约为短时强降水峰值频率的40倍;中尺度对流系统日变化比较连续光滑;短时强降水夜发性特征更显著,为多峰型日变化,中尺度对流系统夜发性相对不显著,为单峰型日变化。

图5也表明虽然中国大陆下午对流活动较多,但只有非常少的部分能够达到短时强降水的强度;

午夜后中国大陆总体的对流活动虽然较少,但其达到短时强降水强度的比例显著高于午后时段,这也表明午夜后中国的对流活动主要以降水为主,其他强对流天气发生频率显著降低,尽管有统计表明中国大陆少数地区的冰雹天气也具有一定的夜发性特征(Zhang, et al, 2008)。

图5中的日变化特征还表明午后的热对流所导致的短时强降水频率和最大1h降水量都高于午夜后时段。午夜后出现短时强降水天气较活跃的原因是,从天气系统来看,与 α 中尺度对流系统密切相关,这是因为部分尺度较大的中尺度对流系统尤其是 α 中尺度对流系统能够维持12h以上的缘故,这与Yu等(2007b)分析获得的长时间持续降水是导致午夜后降水峰值的结论一致;从区域分布来看,与不同区域的对流活动活跃时段不同(郑永光等,2008,2010,2011)有关,下文将进一步分析不同区域的短时强降水日变化特征。

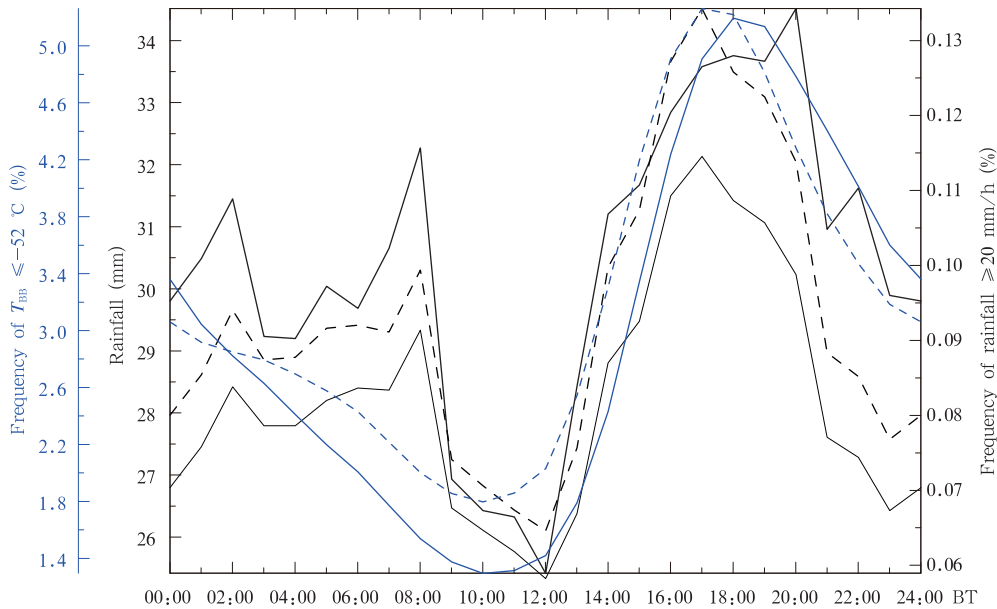


图5 全中国(细黑色实线)和降水活跃区域(黑色划线)平均的 ≥ 20 mm/h 短时强降水频率、全中国平均的最大小时降水量日变化(粗黑色实线)、全国(蓝色实线)和降水活跃区域(蓝色划线) $T_{BB} \leq -52$ °C日变化曲线
 Fig. 5 Diurnal variations of the SDHR ≥ 20 mm/h and $T_{BB} \leq -52$ °C averaged frequencies and average maximum hourly rainfall
 (black thin solid line denotes the nationwide average ≥ 20 mm/h SDHR frequencies, black dashed line denotes the rain-active region average ≥ 20 mm/h SDHR frequencies, black thick line denotes the nationwide average maximum hourly rainfall, blue solid line denotes the nationwide average $T_{BB} \leq -52$ °C frequencies, and blue dashed line denotes the rain-active region average $T_{BB} \leq -52$ °C frequencies)

图 6 给出了中国不同时段短时强降水频率分布。总体来看,同图 5 所显示的下午时段(15—20 时)短时强降水最活跃、上午时段(09—14 时)最不活跃的特征一致。但图 6 更进一步展示了不同的时段短时强降水活跃区域分布显著不同,也展示了短时强降水天气日变化的传播特征。

午后至傍晚(14—20 时,图 6c)短时强降水频率高,且高频区范围分布广,这不仅与较大尺度天气系统(如低压槽、梅雨锋等)提供的有利对流环境相关,且与地形分布、午后的热对流(郑永光等,2007,2008)等密切相关。前半夜至凌晨(20—02 时,图 6d)短时强降水频率显著减弱,但四川盆地西南部、贵州南部、广西西北部以及两广沿海短时强降水都具有较显著的夜间发展特征。后半夜至早晨(02—08 时,图 6a)短时强降水频率高频区范围较前半夜

继续有所收缩,四川盆地西南部、贵州南部等地显著减弱,但广西西北部以及两广沿海短时强降水显著加强。上午至午后(08—14 时,图 6b)虽然短时强降水较不活跃,但中国的沿海地区、四川盆地东部以及长江中下游等区域仍较活跃,这可能表明这些区域容易受到海陆分布(对于沿海区域)或者地势分布导致的局地环流或者较大尺度天气系统(如梅雨锋、东风波等)等的影响;值得注意的是,该时段华南沿海的陆地区域短时强降水频率较后半夜至早晨显著增强,这可能与该地的海风环流在上午加强(黄士松等,1986)有关。

Zhang 等(2011)指出四川盆地和贵州 ≥ 20 mm/h 降水具有显著地夜发性。图 6 表明中国以下 3 个区域短时强降水具有显著的夜发性和传播特征:

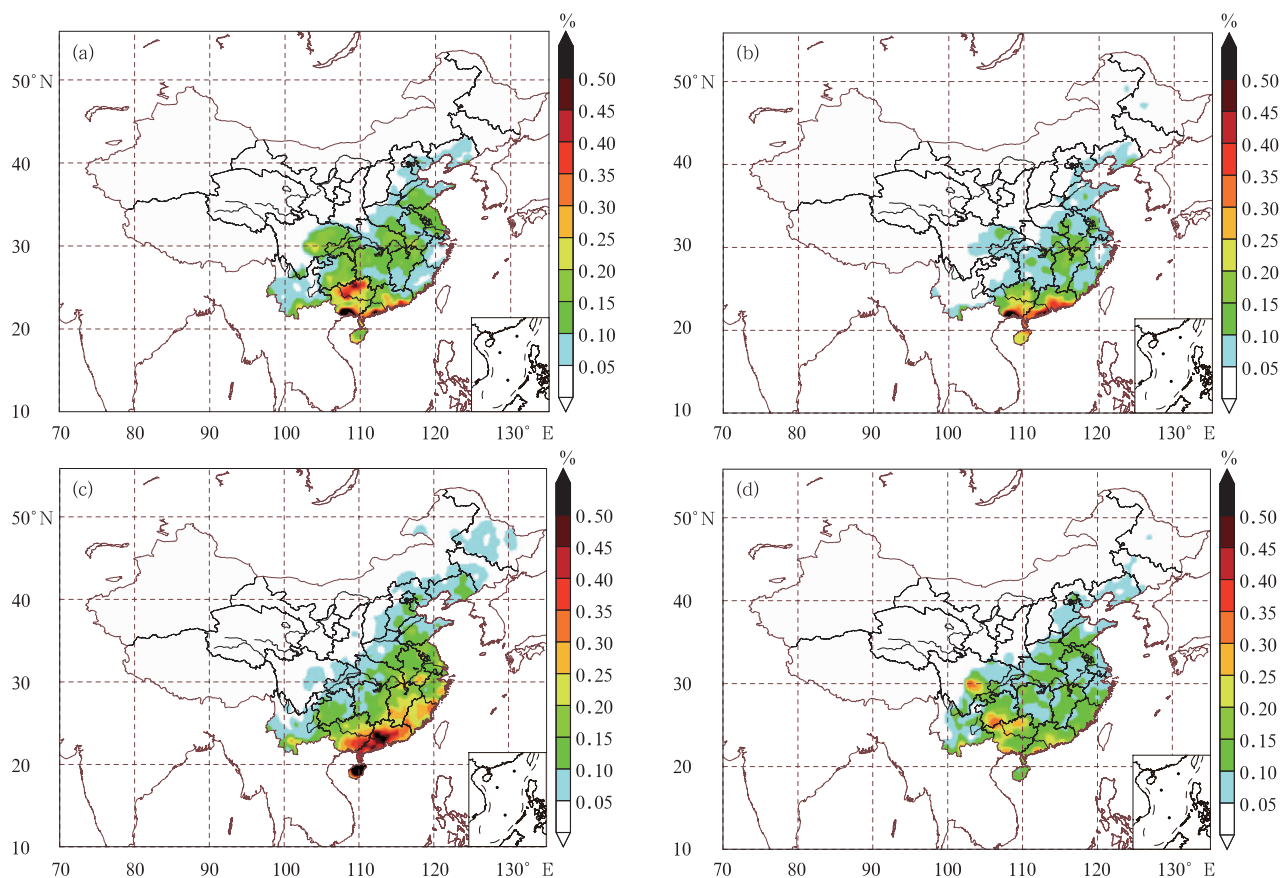


图 6 不同时段 ≥ 20 mm/h 短时强降水频率分布

(a. 02—08 时, b. 08—14 时, c. 14—20 时, d. 20—02 时)

Fig. 6 Diurnal variations of the SDHR ≥ 20 mm/h frequencies for the different periods

(a. 02:00—08:00 BT, b. 08:00—14:00 BT, c. 14:00—20:00 BT, d. 20:00—02:00 BT)

第1个需要关注的区域是贵州、广西与广东。广西与广东沿海区域、贵州南部至广西一带短时强降水具有显著的传播特征。广西与广东区域的短时强降水在14—20时发展加强;20时以后显著减弱,活跃区域主要位于海岸线附近;02时后短时强降水频率加强并向内陆传播;08—14时频率继续加强并显著向山区方向传播。贵州南部至广西区域的短时强降水在20—02时开始活跃;02时后向东南方向传播,广西西北部显著活跃;08—14时,短时强降水传播到广西中部地区,甚至传播到广东。这种传播特征同基于静止气象卫星 T_{BB} 资料分析的中尺度对流系统日变化及传播特征(郑永光等,2008,2010,2011)一致,这与该区域的地势分布及其所导致的局地山谷风环流、海陆风环流等密切相关。但这些局地环流在何种天气形势下导致短时强降水和中尺度对流系统的这种传播特征还需要进一步研究分析。

第2个值得关注的区域是四川盆地。该区域西南部的短时强降水在20—02时显著活跃,02—08时短时强降水减弱,并向四川盆地东北方向传播;14—20时短时强降水天气最不活跃。该区域的短时强降水下午最不活跃,前半夜最活跃,夜雨特征显著。这与该区域的中尺度对流系统日变化及传播特征(郑永光等,2008,2010)一致,也可能与该区域地势分布所导致的山谷风环流密切相关。

第3个值得关注的区域在长江中下游地区和江淮流域,该区域是中国的梅雨降水区(陶诗言,1980)和中尺度对流系统多发区(郑永光等,2008)。该区域14—20时短时强降水显著活跃,20—02时显著减弱,但02—08时短时强降水再度活跃。

5.2 不同区域日变化特征

本文分别选择 105°E 、 116°E 两条经线、 31°N 纬线(图1中Ⅲ线)和四川西南部—广西东南部直线($(28.9^{\circ}\text{N}, 101.7^{\circ}\text{E})$ — $(21.5^{\circ}\text{N}, 109.9^{\circ}\text{E})$)(图1中Ⅳ线)来分析不同代表区域的短时强降水和中尺度对流系统日变化特征(图7)。从图7可见,短时强降水和中尺度对流系统日变化特征非常类似,但中尺度对流系统日变化比较连续光滑、传播特征更清晰,其原因是受中尺度对流系统云砧影响,观测的 T_{BB} 演变比较连续,且 T_{BB} 是瞬时观测的缘故。

105°E 经线的短时强降水和中尺度对流系统日变化(图7a、b)表明两种夜发性对流活动的日变化特征。云贵高原(24° — 28°N)的短时强降水和中尺

度对流系统下午至前半夜活跃,午夜后持续,并呈现为从南向北传播的特征;该区域的对流活动为下午和夜间活跃型,上午最不活跃,这种日变化特征与使用闪电资料获得的日变化特征(王颖等,2009)一致。四川盆地(28° — 32°N)的短时强降水和中尺度对流系统22时活跃,日出后显著减弱,下午最不活跃,也呈现为从南向北传播的特征;该区域的对流活动为午夜后至上午较活跃,下午最不活跃。

116°E 经线展现了单峰型、多峰型和持续活跃型的短时强降水和中尺度对流系统日变化特征(图7c、d),下午为主要活跃时段;但短时强降水和中尺度对流系统的传播特征相对 105°E 不是很突出。该经线 23°N 附近为海岸线附近区域,呈现为持续活跃型的短时强降水和中尺度对流系统日变化特征,尤其短时强降水的持续性特征更为显著。该经线 23.5° — 28°N 为广东和江西南部区域,中尺度对流系统主要为单峰型日变化特征,但短时强降水呈现为单峰型和多峰型两种特征,这种差异可能与中尺度地形分布所导致的降水分布差异有关;从海岸线附近 23° — 26°N 区域短时强降水和中尺度对流系统呈现为自南向北的传播特征,这与郑永光等(2011)所得结果一致。 28° — 32°N 为江西北部 and 安徽南部区域,短时强降水呈现为较显著的多峰型特征,中尺度对流系统虽然多峰型不显著、但也具有较显著的夜发性特征。 34° — 46°N 为河南山东交界地带和华北区域,短时强降水和中尺度对流系统主要具有双峰型的日变化特征,主峰在下午,次峰在午夜。

31°N 纬线展现了多峰型的短时强降水和中尺度对流系统日变化(图7e、f)特征,同时展现了 102° — 110°E (四川盆地)和 111° — 118°E (鄂皖)区域短时强降水和中尺度对流系统的向东传播特征,以及四川盆地短时强降水和中尺度对流系统夜间和上午较活跃的特征。该纬线四川盆地地区,呈现为夜间和上午活跃的短时强降水和中尺度对流系统日变化特征,尤其 103° — 108°E 区域呈现为显著的夜发性特征和午夜后的向东传播特征;但盆地西侧的川西高原区域(102°E 附近)中尺度对流系统下午较活跃,短时强降水不活跃。该纬线 112° — 118°E 区域短时强降水和中尺度对流系统为多峰型的日变化特征,主活跃时段为下午至前半夜,午夜后为次活跃阶段,但午夜后东向传播特征非常显著,尤其短时强降水传播特征较中尺度对流系统更清晰。

对中国副热带地区深对流活动气候分布特征研究发现,川西高原中尺度对流系统具有 19 时后向东南方向传播到云贵高原北部、云贵高原东北部地区中尺度对流系统 19 时后向东南方向的广西北部传播的特征(郑永光等,2010)。因此,本文选择自川西高原东南部经云贵高原东北部(贵州西南部)至广西沿海的直线((28.9°N, 101.7°E)—(21.5°N, 109.9°E))剖面来分析该区域短时强降水和中尺度对流系统的日变化和传播特征。该条直线上展现了不同下垫面区域的不同类型短时强降水和中尺度对流系统日变化特征和传播特征(图 7g、h)。

该直线展示的短时强降水和中尺度对流系统日变化类型有:(1)川西高原东南部((28.6°N, 102°E)—(27.2°N, 103.6°E))的短时强降水和中尺度对流系统呈单峰型日变化特征,且中尺度对流系统从午后持续到午夜后,持续时间较长,但短时强降水主要发生在夜间、频率较低;(2)贵州西部((27.2°N, 103.6°E)—(26.3°N, 104.6°E))主要为热对流日变化特征,中尺度对流系统主要出现在下午,持续时间短,夜间不活跃,该区域短时强降水非常不活跃;(3)贵州西南部((26.3°N, 104.6°E)—(24.8°N, 106.2°E))短时强降水和中尺度对流系统为单峰型日变化特征,但短时强降水和中尺度对流系统都较活跃且持续时间长,从午后一致持续到日出前,这种日变化特征与 105°E 的 24°—28°N 区域短时强降水和中尺度对流系统日变化以及使用闪电资料获得的日变化特征(王颖等,2009)一致;(4)广西西部盆地((24.8°N, 106.2°E)—(23.9°N, 107.3°E))的短时强降水和中尺度对流系统主要发生在 20—08 时,与 105°E 的 28°—32°N 四川盆地区域的短时强降水和中尺度对流系统日变化类似;(5)广西南部沿海区域短时强降水持续时间长、频率高,短时强降水和中尺度对流系统主要发生在 02—18 时,日落后至午夜短时强降水和中尺度对流系统频率显著降低。

该直线展示的短时强降水和中尺度对流系统传播特征有:(1)川西高原东南部((28.6°N, 102.0°E)—(27.2°N, 103.6°E))短时强降水和中尺度对流系统从西北向东南的传播特征;(2)贵州西部(27.2°N, 103.6°E)短时强降水和中尺度对流系统下午显著活跃,向东南方向传播,00 时到达贵州广

西交界区域(24.8°N, 106.2°E),午夜后继续向东南方向传播,04 时到达广西南部偏北区域(22.9°N, 108.3°E),06 时到达广东沿海;(3)广西沿海(21.5°N, 109.9°E)02—18 时短时强降水持续活跃,但从中尺度对流系统来看,04 时后中尺度对流系统显著活跃,12 时后向西北方向传播,18—20 时后传播方向分为两支,一支至 00 时继续传播到达贵州广西交界区域,另一支向东南撤退至广西沿海区域。

正如郑永光等(2008, 2010, 2011)的分析,中国不同区域的对流活动日变化与传播特征表明其与地势分布、海陆分布等导致的局地热力环流,比如山谷风、海陆风等密切相关,短时强降水也是如此。关于华南降水的日变化特征与山谷风、海陆风等的关系,在黄士松等(1986)研究中也有较多分析,尤其山谷风与海陆风同相叠加所致的降水(黄士松等, 1986)和对流活动(郑永光等,2011)日变化和传播特征更为显著;关于北京及其周边地区的中尺度对流系统日变化及其传播特征在郑永光等(2007)研究中有较多分析。但短时强降水和中尺度对流系统的日变化和传播特征不仅仅是局地热力环流作用的结果,还与大尺度环流背景、大尺度天气系统的移动以及中尺度对流系统引导气流等密切相关,因此,如何从大、中尺度天气系统和局地环流的多尺度相互作用方面来研究短时强降水和中尺度对流系统的日变化和传播成因是下一步需要开展的工作。

为了进一步展示不同下垫面区域短时强降水和中尺度对流系统的日变化特征,图 8 给出了中国几个短时强降水活跃区平均的 ≥ 20 mm/h 短时强降水和 $T_{bb} \leq -52^\circ\text{C}$ 日变化曲线,这些区域分别是:四川盆地西南部(28°—31°N, 102°—105°E, 图 1 中 A);贵州西南部(24°—27°N, 104°—107°E, 图 1 中 B);广西中部(22°—25°N, 107°—110°E, 图 1 中 C);广西沿海(21°—23°N, 108°—110°E, 图 1 中 D);广东中部(22°—25°N, 112°—115°E, 图 1 中 E);安徽中南部(30°—33°N, 116°—119°E, 图 1 中 F);江淮东部(31°—34°N, 117°—120°E, 图 1 中 G);鲁西南苏皖北部(33°—36°N, 116°—119°E, 图 1 中 H)。需要说明的是,为了突出频率较低区域的短时强降水和中尺度对流系统的日变化,图 8a、b 中分别采用了两种不同区间的纵坐标。

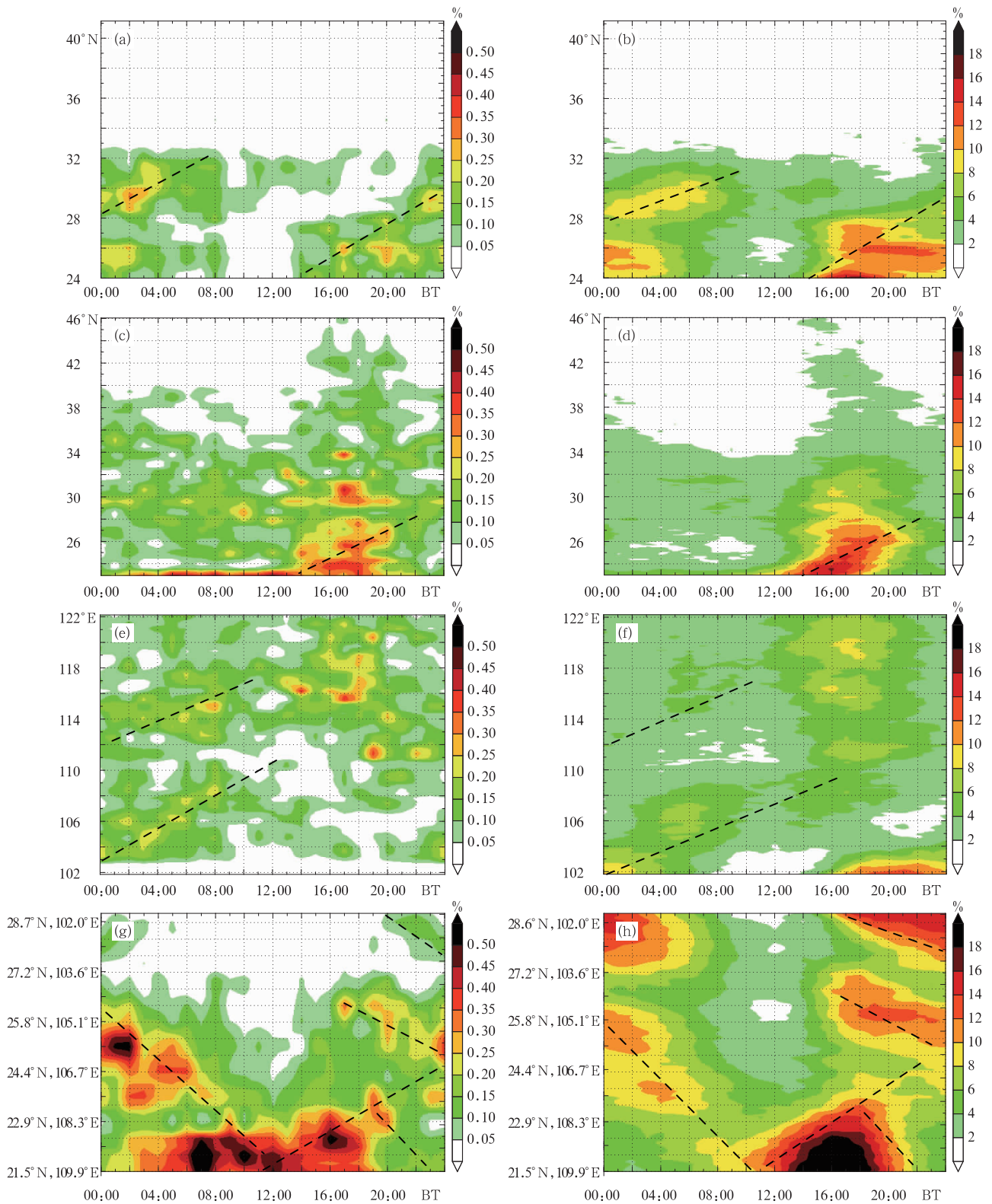


图7 ≥ 20 mm/h 短时强降水(a,c,e,g)和 $T_{BB} \leq -52$ °C 频率(b,d,f,h)的不同剖面日变化和传播特征(划线)
 (a,b. 沿 105°E , c,d. 沿 116°E , e,f. 沿 31°N , g,h. 沿直线 $(28.9^{\circ}\text{N}, 101.7^{\circ}\text{E}) - (21.5^{\circ}\text{N}, 109.9^{\circ}\text{E})$)
 Fig.7 Cross sections of the diurnal variations of the SDHR ≥ 20 mm/h and $T_{BB} \leq -52$ °C frequencies
 (the dashed black lines denote the propagation. (a), (c), (e), (g) for the SDHR frequencies along 105°E
 and 116°E , 31°N and the straight line $(28.9^{\circ}\text{N}, 101.7^{\circ}\text{E}) - (21.5^{\circ}\text{N}, 109.9^{\circ}\text{E})$, respectively;
 (b), (d), (f), (h) for $T_{BB} \leq -52$ °C frequencies along the 105°E and 116°E ,
 31°N and the straight line $(28.9^{\circ}\text{N}, 101.7^{\circ}\text{E}) - (21.5^{\circ}\text{N}, 109.9^{\circ}\text{E})$, respectively)

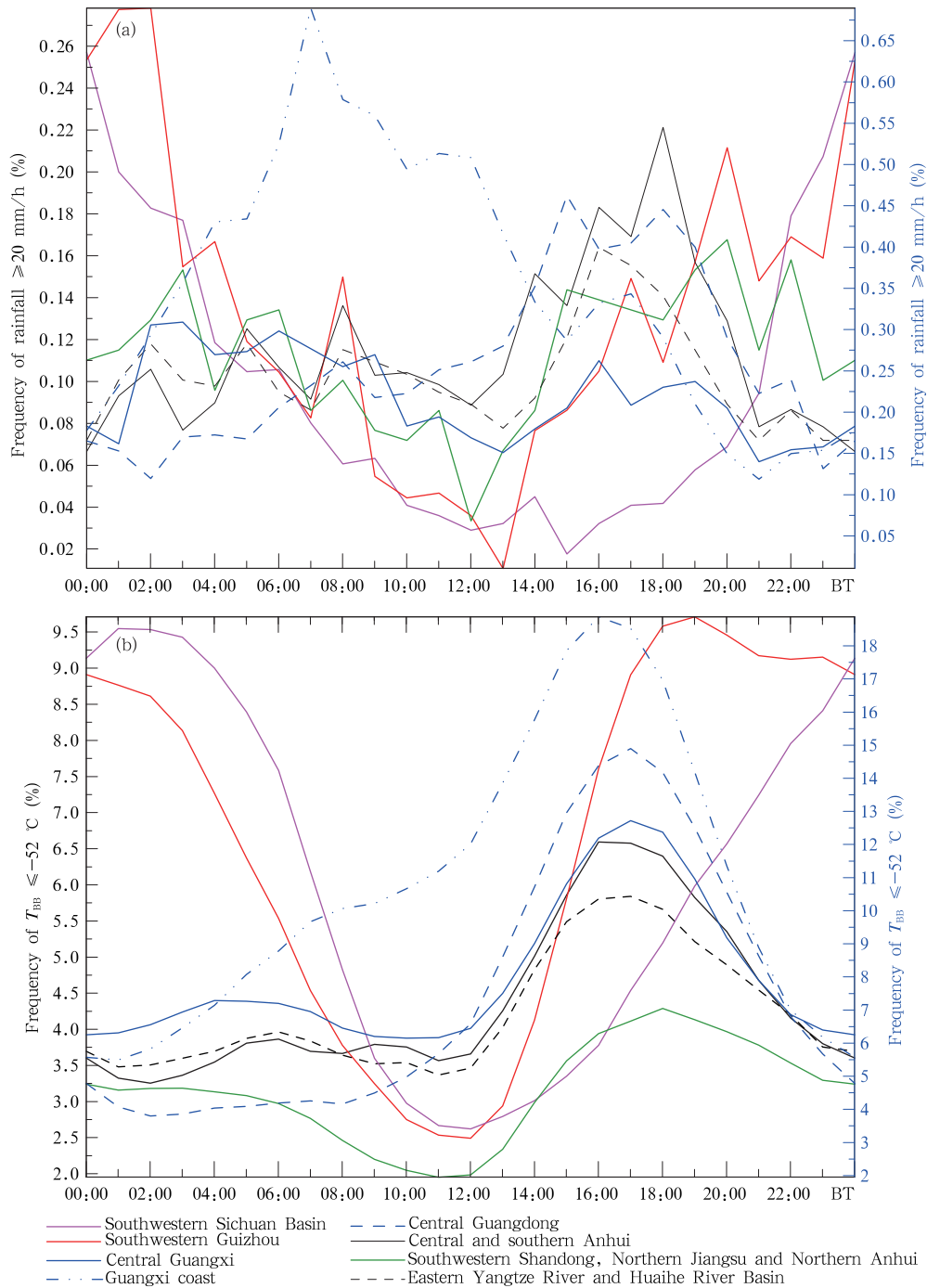


图 8 不同区域 ≥ 20 mm/h 短时强降水(a)和 $T_{BB} \leq -52$ °C (b) 频率日变化

(广西中部、广西沿海、广东中部等蓝色曲线使用右侧的蓝色纵坐标轴；
其他区域等其他颜色曲线使用左侧黑色纵坐标轴)

Fig. 8 Diurnal variations of the SDHR ≥ 20 mm/h (a) and $T_{BB} \leq -52$ °C (b) frequencies (%)
(the curves for the middle Guangxi, the coastal area of Guangxi, and the middle
Guangdong etc. use the blue right axis; and the curves for other regions use the black left axis)

图 8a 表明,广东中部、安徽中南部、鲁西南苏皖北部和江淮东部都是 14—20 时短时强降水频率最

高,这与我国总体测站平均的短时强降水频率活跃时段类似;但四川盆地西南部在 00 时最活跃;贵州

西南部除了下午至傍晚较活跃外,主活跃时段在 02 时前后;广西中部和广西沿海主活跃时段在 02—08 时。需要说明的是,广西中部、广西沿海和广东中部即使短时强降水和中尺度对流系统的非活跃期也具有显著较高的发生频率,因此,图 8 中针对这 3 个区域给出了右侧的纵坐标轴。

图 8a 也表明短时强降水日变化存在单峰型、双峰型和多峰型,但不同区域短时强降水日变化的峰值时段、持续时间显著不同。短时强降水单峰型日变化区域包括广东中部和四川盆地西南部,但广东中部为下午单峰型,且活跃时段持续时间较长,四川盆地西南部为夜间单峰型,活跃时段持续时间较短。广西中部、广西沿海、贵州西南部强降水日变化为双峰型;但广西中部主峰在 02—10 时,次峰在 16—20 时,峰值差异不大;广西沿海双峰型日变化同广西中部类似,但频率显著高于广西中部,且午夜后至上午的主峰特别显著;贵州西南部主峰在 00—02 时,次峰在 16—20 时。安徽中南部、鲁西南苏皖北部和江淮东部短时强降水为多峰型日变化特征,日变化幅度显著小于四川盆地西南部和贵州西南部,这可能与这些区域是中国主要的梅雨降水区有关;其中鲁西南苏皖北部的日变化幅度显著大于其他两个区域,短时强降水活跃时段也长于其他两个区域。

中尺度对流系统日变化(图 8b)主要表现为单峰型、双峰型特征,多峰型特征相对不突出。四川盆地西南部和贵州西南部为夜间单峰型,但二者的活跃时段和活跃持续时间显著不同;其他区域主峰都位于下午至傍晚;广西沿海、广东中部和鲁西南苏皖北部都为单峰型日变化,但广西沿海在 04 时后中尺度对流系统就显著活跃;广西中部、安徽中南部和江淮东部次峰都位于午夜后,且不显著。

对比图 8a、b 短时强降水和中尺度对流系统频率的日变化特征可知,二者具有很强的一致性,主要包括:四川盆地西南部、贵州西南部、广西中部、广东中部、安徽中南部、鲁西南苏皖北部、江淮东部的短时强降水和中尺度对流系统活跃时段基本一致;广西沿海短时强降水的主峰活跃时段也是中尺度对流系统的活跃时段,虽然中尺度对流系统的主活跃时段在下午至傍晚。

短时强降水和中尺度对流系统频率的日变化也存在较大差异,如前所述,主要包括:短时强降水频率日变化不是很连续光滑,短时强降水频率显著低

于中尺度对流系统;除广西沿海外,短时强降水不同峰值频率的差异不如中尺度对流系统峰值频率差异显著;除四川盆地西南部和贵州西南部外,中尺度对流系统频率的主峰以下午至傍晚为主,午夜后的次峰相对不显著,这也表明午夜后的中尺度对流系统相对午后的对流系统产生短时强降水的比例更高。导致这些差异的主要原因是中尺度对流系统($T_{BB} \leq -52^{\circ}\text{C}$)表征的是大气中各种对流活动的综合,虽然中尺度对流系统都会产生降水,但往往部分中尺度对流系统、尤其是午后的热对流,其降水量经常达不到 20 mm/h 的标准,因此,二者的频率分布必然存在一定的差异。

6 结论和讨论

本文基于 1991—2009 年 4—9 月基本基准气象站逐时降水资料较系统地给出了中国大陆暖季短时强降水天气的地理分布、季月候和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化的关系。短时强降水天气发生时次频率较低,属于小概率事件,从 ≤ 40 mm/h 不同强度的短时强降水统计和中尺度对流系统统计特征来看,它们虽然存在一些差异,但具有很大相似性,因此,本文获得的短时强降水天气分布特征是具有天气学和气候学意义的。

总体来看,中国 ≥ 10 、20、30、40 mm/h 短时强降水地理分布与 ≥ 50 mm/d 暴雨非常类似;但 ≥ 50 mm/h 的短时强降水频率极低、高频区分布非常零散,与 ≥ 100 mm/d 暴雨分布类似。中国最大小时降水强度分布表明,最强小时降水量可超过 180 mm,短时强降水不活跃区也能够发生超过 50 mm/h 的强降水。

中国大陆总体的短时强降水频率月际分布为单峰型特征,与东亚夏季风活动密切相关,4—7 月频率逐步升高,9 月迅速降低,呈现出缓慢增强、迅速减弱的特点。从短时强降水频率候分布来看,7 月第 4 候短时强降水最活跃,其次为 8 月第 1、第 2 候;具有显著间歇性和阶段性发展特征,不同区域分别具有单峰型、多峰型等候变化特征;总体候变化表现为具有多个短时强降水活跃期。中国大陆春秋季节虽然短时强降水频率较低,但也会在华北等地出现较大范围的短时强降水天气。

中国大陆总体平均的短时强降水频率和最大小时降水量日变化为 3 峰型,主峰在 16—17 时,与中尺度对流系统主峰基本一致;但在午夜后至清晨又

有两个次峰,分别在 01—02 和 07—08 时,该时段与中尺度对流系统日变化差异较大;上午为最不活跃时段;午夜后的短时强降水频率变化平缓。

中国大陆不同区域的短时强降水日变化具有单峰型、双峰型、多峰型和持续活跃型等特征,但不同下垫面区域短时强降水日变化的峰值时段、持续时间显著不同。

中国大陆短时强降水和中尺度对流系统的日变化特征具有很强的一致性,但午夜后时段差异较大。

105°E、116°E 两条经线、31°N 纬线和四川西南部—广西东南部直线((28.9°N, 101.7°E)—(21.5°N, 109.9°E))上的短时强降水和中尺度对流系统的日变化和传播特征都表明,四川盆地、31°N 纬线的鄂皖区域、川西高原东南部经云贵高原东北部(贵州西南部)至广西沿海短时强降水和中尺度对流系统传播特征非常显著。

短时强降水和中尺度对流系统的日变化和传播特征与地势、海陆等地理分布密切相关。在日间太阳短波辐射加热和夜间地球放出长波辐射冷却的共同作用下,这些地理分布所引发的局地环流的辐合特征与短时强降水、中尺度对流系统的日变化及传播特征具有较好的一致性,但这种局地环流系统垂直方向非常浅薄,其如何与较大尺度环流系统相互作用而形成这种日变化特点还需要进行详细的分析研究。

致谢:感谢国家气象信息中心阮新高级工程师提供小时降水量资料。

参考文献

- 陈隆勋,朱乾根,罗会邦等. 1991. 东亚季风. 北京:气象出版社, 1-93
- 丁一汇,张建云. 2009. 暴雨洪涝. 北京:气象出版社, 16-23
- 黄土松,李真光,包澄澜等. 1986. 华南前汛期暴雨. 广州:广东科技出版社, 17-19
- 黄琰,封国林,董文杰. 2011. 近 50 年中国气温、降水极值分区的时空变化特征. 气象学报, 69(1): 125-136
- 李建,宇如聪,王建捷. 2008. 北京市夏季降水的日变化特征. 科学通报, 53(7): 829-832
- 马明,陶善昌,祝宝友等. 2004. 卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布. 中国科学 D 辑, 34(4): 298-306
- 申乐琳,何金海,周秀骥等. 2010. 近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究. 气象学报, 68(6): 918-931
- 水利部长江水利委员会水文局,水利部南京水文水资源研究所. 1995. 水利水电工程设计洪水计算手册. 北京:中国水利水电出版社, 197-218

- 水利部水文局,南京水利科学研究院. 2006. 中国暴雨统计参数图集. 北京:中国水利水电出版社, 25-26
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京:科学出版社, 5-7
- 王晓芳,崔春光. 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征. 气象学报, 70(5): 909-923
- 王颖,郑永光,寿绍文. 2009. 2007 年夏季长江流域及周边区域地闪时空分布及其天气学意义. 气象, 35(10): 58-70
- 姚莉,李小泉,张立梅. 2009. 我国 1 小时雨强的时空分布特征. 气象, 35(2): 80-87
- 张家诚,林之光. 1985. 中国气候. 上海:上海科学技术出版社, 411-436
- 郑永光,陈炯,陈明轩等. 2007. 北京及周边地区 5—8 月红层外云亮温的统计学特征及其天气学意义. 科学通报, 52(14): 1700-1706
- 郑永光,陈炯,朱佩君. 2008. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. 科学通报, 53(4): 471-481
- 郑永光,王颖,寿绍文. 2010. 我国副热带地区夏季深对流活动气候分布特征. 北京大学学报(自然科学版), 46(5): 793-804
- 郑永光,陈炯. 2011. 华南及邻近海域夏季深对流活动气候特征. 热带气象学报, 27(4): 495-508
- 中国气象局. 2007. 中国灾害性天气气候图集. 北京:气象出版社, 21-31
- 中央气象局. 1975. 中国高空气候. 北京:科学出版社, 11-17
- 周秀骥,薛纪善,陶祖钰等. 2003. '98 华南暴雨科学试验研究. 北京:气象出版社, 4-5
- Chen H M, Yu R C, Li J, et al. 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze river valley. J Climate, 23(4): 905-917
- Davis R S. 2001. Flash flood forecast and detection methods, severe convective storms. Meteo Monog, Amer Met Soc, 28(50): 481-525
- Li J, Yu R C, Zhou T J. 2008. Seasonal variation of the diurnal cycle of rainfall in Southern contiguous China. J Climate, 21(22): 6036-6043
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007a. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China. Geophys Res Lett, 34: L01704, doi:10.1029/2006GL028129
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al. 2007b. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China. Geophys Res Lett, 34, L13703, doi:10.1029/2007GL030315
- Zhang C X, Zhang Q H, Wang Y Q. 2008. Climatology of hail in China: 1961 - 2005. J Appl Meteor Climatol, 47(3): 795-804
- Zhang H, Zhai P M. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over Eastern China in the warm season. Adv Atmos Sci, 25(5): 1177-1183
- Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al. 2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations. J Climate, 21(16): 3997-4010