

江苏暖季短时强降水的时空不均匀特征分析

沈伟^{①②},袁慧玲^{②③*},陈曦^②,王文清^①,赵燕华^①

① 江苏省宿迁市气象局,江苏 宿迁 223800;

② 南京大学 大气科学学院与中尺度灾害性天气教育部重点实验室,江苏 南京 210023;

③ 江苏省气候变化协同创新中心,江苏 南京 210023;

* 联系人,E-mail:yuanhl@nju.edu.cn

2016-08-24 收稿,2017-02-13 接受

国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB430106);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206005);江苏省北极阁开放基金(BJG201605);江苏省气象局青年基金科研项目(Q201711);江苏省气象局预报员专项(JSYBY201613)

摘要 利用江苏近10 a(2005—2014年)暖季(5—9月)69站逐时降水资料,详细分析了短时强降水的空间分布、年际变化、季节内演变以及日变化特征。分析结果表明:短时强降水空间分布不均,整体上北部比南部活跃,最活跃区均位于沿淮西部,高强度短时强降水多发生在淮东北部,且空间分布集中。近10 a来江苏短时强降水整体呈减少趋势,主要表现为北部地区减少最为显著。短时强降水季节内分布不均匀,以7月最为活跃,高强度短时强降水在8月最为频繁;其逐候分布显示,梅期短时强降水骤增,于7月第2候达到峰值,盛夏期间高强度短时强降水增多,8月第3候达到峰值。江苏短时强降水的日变化整体呈双峰结构,主峰和次峰分别出现在傍晚17时(北京时间,下同)和清晨07时,高强度短时强降水多发于午后;短时强降水日变化存在季节内演变的阶段性特征和地域性差异,其中梅期和盛夏两个高发阶段均呈单峰结构,但梅期峰值出现在清晨,盛夏阶段峰值则出现在傍晚;由南向北,日变化特征由单峰向双峰、多峰演变,在淮河以南地区日峰值大多出现在午后至傍晚,而淮河以北地区多出现在夜间至清晨。

关键词

短时强降水;
日变化;
时空不均匀;
暖季

短时强降水指在较短的时间内雨量达到或超过某一量值的天气现象,属于强对流天气的一类。它常常造成农田被淹、城市内涝等洪涝灾害,甚至诱发山体滑坡、泥石流等地质灾害,严重影响地方经济发展和人类生命安全。江苏省地处亚热带与暖温带过渡的东亚季风区,天气气候条件复杂多变,特别是在全球变暖的气候大背景下,极端强降水事件发生率增多(仇娟娟和何立富,2013)。据沈澄等(2015)统计,2004—2013年江苏省由短时强降水及其相关暴雨造成的洪涝灾害,共导致31人死亡,1 927.03万人口受灾,2 911.79×10³ hm²农作物受灾,2.5万间房屋倒塌,直接经济损失超过202.8亿元人民币。同时,短时强降水主要由中小尺度天气系统造成,具有发展迅速、局地性强等特征,一直是天气预报的难

点和挑战。鉴于其高致灾性和预报难度,气象学者一直将其视为研究重点(尹承美等,2010;张京英等,2010;陈永仁和李跃清,2013;段鹤等,2014;何晗等,2015;陈元昭等,2016)。

过去基于台站日降水资料,我国学者针对暴雨、雷暴、冰雹等强对流天气已开展了众多研究(陶诗言,1980;张芳华和高辉,2008;陈海山等,2009;余蓉等,2012;俞小鼎等,2012;王丽芳等,2013;王秀明等,2014;林建和杨贵名,2014;苗春生等,2015),并取得了一系列进展。近年来,随着自动气象站的广泛使用,小时资料开始得到更多重视。姚莉等(2009)基于1991—2005年中国逐时降水资料分析了我国1 h雨强的时空分布特征;Zhang and Zhai(2011)利用1961—2000逐小时雨量,给出了中国

引用格式: 沈伟,袁慧玲,陈曦,等,2017.江苏暖季短时强降水的时空不均匀特征分析[J].大气科学学报,40(4):453-462.

Shen W, Yuan H L, Chen X, et al., 2017. Temporal and spatial heterogeneity of warm-season short-time heavy rainfall in Jiangsu Province[J]. Trans Atmos Sci, 40(4):453-462. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160824002. (in Chinese).

中东部暖季短时强降水的时空分布、日变化和气候特征;Li et al.(2013)基于 1954—2010 年降水资料,从小时尺度考察了极端降水事件的持续性和季节特征;Chen et al.(2013)结合静止气象卫星 TBB 资料,对比分析了 1991—2009 年暖季短时强降水时空分布特征。总的来说,短时强降水整体呈增多趋势,其空间分布南部多于北部,东部多于西部;季节特征表现为夏季最活跃,特别是 7 月;而日分布大部分地区以午后至傍晚最为活跃,并存在区域差异和季节差异。可见,短时强降水在时空分布上具有显著的不均匀性特征和区域性差异。

但是以上研究的基本数据空间分辨率低,所采用的江苏站点稀疏,无法完全细致的反映江苏地区短时强降水的区域性特征。因此基于空间分辨率更高的小时降水资料,对江苏地区短时强降水时空分布特征开展系统性分析,有利于揭示江苏地区短时强降水的区域性特征,为短时强降水的预报提供气候背景。

1 资料和方法

1.1 资料

2004 年江苏自动站观测资料作为正式资料存档,2005 年起全省各地市已完成自动站单轨业务运行,观测方式已由传统的人工观测向自动观测方式转变。综合考虑资料的连续性、稳定性和可比性,最终选定 2005—2014 年江苏省具有代表性的 69 个气象站逐小时降水资料进行研究,该资料由江苏省信息中心收集并进行严格质量控制。站点分布如图 1 所示,虚线代表纬线(间隔 0.5 个纬度),将江苏由南向北划分为 8 个区域,即 1 区和 2 区代表沿江苏南地区,3 区、4 区和 5 区代表江淮地区,6 区、7 区和 8 区代表淮北地区。

1.2 方法简介

关于短时强降水的阈值,各地区的标准不一致。结合江苏气候特征以及实际业务,将短时强降水定义为:1 h 降水量大于等于 20 mm,这与中央气象台对短时强降水的业务规定相一致。在资料使用中,当某站点 1 h 雨量超过 20 mm,则记作该站点发生 1 次短时强降水;短时强降水频次指在某时段内研究区域的所有站点发生短时强降水的总次数;短时强降水的区域特征用区域平均值来表示,即区域内所有站点短时强降水频次与站点数的比值。在分析短时强降水日变化过程中,参照公式(1),对不同时刻短时强降水频次进行标准化处理, $f(h)$ 为 h 时刻的

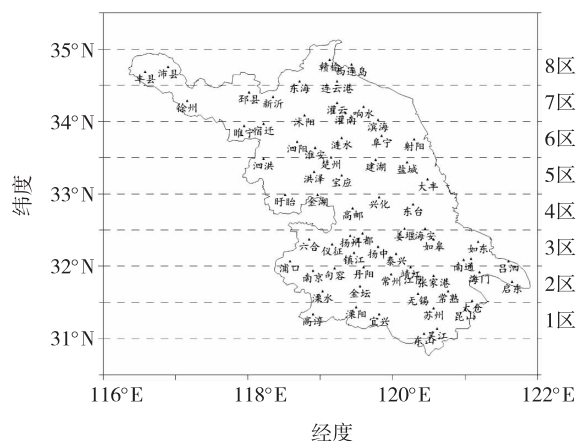


图 1 江苏 69 个自动气象站的空间分布

Fig.1 Distribution of 69 automatic weather stations in Jiangsu

频次, $F(h)$ 为标准化后的频次。

$$F(h) = \frac{f(h)}{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} f(i)} - 1. \quad (1)$$

为了细化短时强降水的研究,本文在分析大于等于 20 mm/h 短时强降水时空特征的基础上,增加了对 20~30 mm/h、30~50 mm/h 以及 ≥ 50 mm/h 这 3 个等级短时强降水的分析。需要指出的是,本文所用资料为整点资料,每个整点时次的降水量代表过去 60 min 到该整点为止的累计雨量,这将导致部分连续 60 min 雨量超过指定阈值的短时强降水被划分到两个小时段而无法被识别,因此,本文统计的短时强降水频次要低于实际的发生频次。

2 短时强降水概况及空间分布特征

统计发现:近 10 a 江苏暖季 69 站短时强降水 (≥ 20 mm/h) 累计频次 3 050 次,且随雨强的增大呈指数形式递减(图略),其中 20~30 mm/h、30~50 mm/h 以及 ≥ 50 mm/h 所占比例分别为 63%、32% 和 5%,而 ≥ 100 mm/h 的极端强降水极少发生,仅 5 次。

图 2 给出了近 10 a 江苏 ≥ 20 mm/h、20~30 mm/h、30~50 mm/h 和 ≥ 50 mm/h 的短时强降水年均频次以及最大 1 h 雨强的空间分布特征。可知,江苏短时强降水空间分布不均匀,总体上北部多于南部,这与江苏暴雨的空间分布较为类似(孙燕和朱明月,2014),说明江苏北部的对流天气整体上强于南部。具体来看, ≥ 20 mm/h 和 20~30 mm/h 的短时强降水的空间分布较为相似,最活跃的区域均位于沿淮西部,两个次活跃区分别为高邮湖附近和

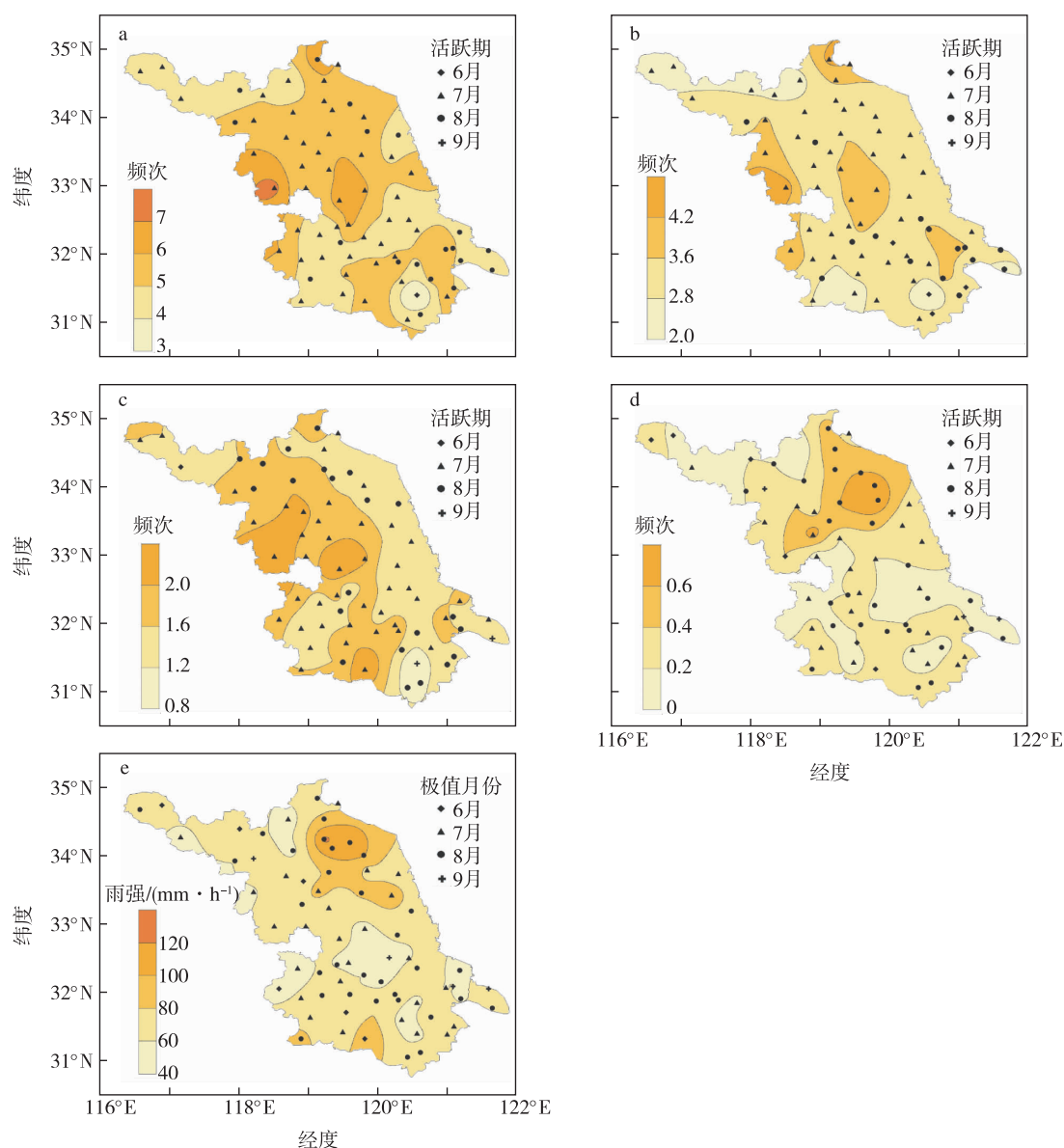


图2 短时强降水年均频次(阴影,单位:次)及其最活跃期的空间分布(a. ≥ 20 mm/h; b. $20 \sim 30$ mm/h; c. $30 \sim 50$ mm/h; d. ≥ 50 mm/h),以及最大小时降水的空间分布及出现月(e)

Fig.2 Distribution of annual short-time heavy rainfall frequency and the most active period(a. ≥ 20 mm/h, b. $20 \sim 30$ mm/h, c. $30 \sim 50$ mm/h, d. ≥ 50 mm/h) and (e) Spatial distributions of the maximum hourly rainfall and its occurrence month

连云港东北部,而太湖东侧的苏州附近为最不活跃区; $30 \sim 50$ mm/h 短时强降水频次整体上西部多于东部,主活跃区依然位于沿淮西部,两次活跃区分别为高邮湖附近和太湖西侧的宜兴附近; ≥ 50 mm/h 短时强降水发生频次很低,范围更加集中,主要发生在淮北东部;而 ≥ 100 mm/h 的5次极端强降水事件(图略),有4次发生在淮北东部,且均是在台风外围暖湿云系与西风带冷槽系统相结合的环流背景下产生的,这为强降水的发生提供了充沛水汽和不稳定能量。同时,淮北东部地势低平,向北、向西地势

均有所增高,其北侧连云港境内有云台山的阻挡,导致近地面层气流辐合,对局地强降水有增幅作用(吴海英等,2015)。由此可见, ≥ 100 mm/h 的极端强降水发生条件苛刻,故发生区域尤为集中。

1 h 最大降水量可以从侧面反映极端强对流天气的强弱,图 2e 可以看出,江苏 1 h 最大降水量均在 40 mm 以上,其空间分布与 ≥ 50 mm/h 的强降水频次的分布特征较为相似, ≥ 80 mm/h 的站点主要分布在淮北东部,该区域内共有 3 个站点的 1 h 雨强超过 100 mm/h,以灌云站最大,达 124.2 mm/h。

可见,不同等级强降水的空间分布存在差异,高强度短时强降水易发生在淮北东部,空间集中程度高,该特征对极端强降水的预报和防御具有一定参考意义。

3 短时强降水的多时间尺度特征

3.1 年际变化

图 3a 给出了近 10 a 间江苏暖季短时强降水的年际变化特征,整体来看,近 10 a 短时强降水频次整体呈减少趋势(95%置信度的显著性检验),2005—2012 年频次均大于 10 a 平均值,且年际变化幅度不大,其中 2011 年短时强降水 431 次,为最多的一年,而 2013 和 2014 年仅 236 次,明显低于平均值,并列最少;20~30 mm/h、30~50 mm/h 短时强降水整体亦呈减少趋势,其中 20~30 mm/h 的减少趋势最为显著(99%置信度的显著性检验),是整体呈减少趋势的主要因素; ≥ 50 mm/h 的短时强降水频次年际差异小,变化趋势不明显;而 ≥ 100 mm/h 的极端短时强降水只发生在 2011 年和 2012 年。短时强降水的空间分布存在年际差异(图 3b),2005—2008 年以及 2012 年为典型的“北多南少”型分布,2009—2011 年呈“南多北少”型分布特征,2013 年和 2014 年整体偏少。进一步分析了短时强降水区域特征的年际变化趋势,发现:5~8 区(沿淮及淮北地区)减少最为显著(95%置信度的显著性检验),1~4 区(江淮南部及苏南地区)变化趋势不明显。由上分析可知,近 10 a 来江苏短时强降水频次整体呈减少趋势,这是由江苏北部地区短时强降水显著减少造成,而高强度(≥ 50 mm/h)短时强降水变化

趋势不明显。

3.2 季节内振荡

江苏地区 ≥ 20 mm/h 的短时强降水以 7 月(比重 42%)和 8 月(比重 31%)最为活跃,其次为 6 月和 9 月,5 月最不活跃(图 4a)。对于 20~30 mm/h 和 30~50 mm/h 的短时强降水(图略),7 月明显比 8 月活跃,但随着雨强的增大,8 月发生频次的比重有所增大;而雨强 ≥ 50 mm/h 的短时强降水(图略),8 月发生的频次开始多于 7 月;强度更强的 ≥ 100 mm/h 的极端强降水大都发生在 8 月。

由图 2 也可以看出 ≥ 20 mm/h 和 20~30 mm/h 短时强降水活跃期空间分布基本一致,且大多数站点出现在 7 月,仅江苏东南部的南通、苏州一带站点的活跃期为 8 月;对于 30~50 mm/h 的短时强降水来说,淮北一带活跃期为 8 月的站点迅速增多,并占主导地位,江淮及苏南地区仍以 7 月为主,极少数站点的活跃期出现在 6 月或 9 月;而 ≥ 50 mm/h 的短时强降水活跃期出现在 8 月的站点明显多于 7 月,全省仅江淮之间部分站点的活跃期出现在 7 月,其他大部分地区活跃期均以 8 月为主,少数站点出现在 6 月和 9 月。1 h 最大雨量出现月与 ≥ 50 mm/h 短时强降水的活跃期较为相似,极值出现在 8 月站点数量明显偏多。

短时强降水的月际分布特征与东亚夏季风活动的特征密切相关,东亚夏季风 5 月开始建立,7—8 月为其最强盛的时期,9 月迅速减弱南撤(陈隆勋等,1991)。此外,8 月多晴热高温天气,午后热力对流旺盛,同时热带系统相对活跃,特别是东南沿海登陆台风或远距离台风外围云系携带大量的水汽和能

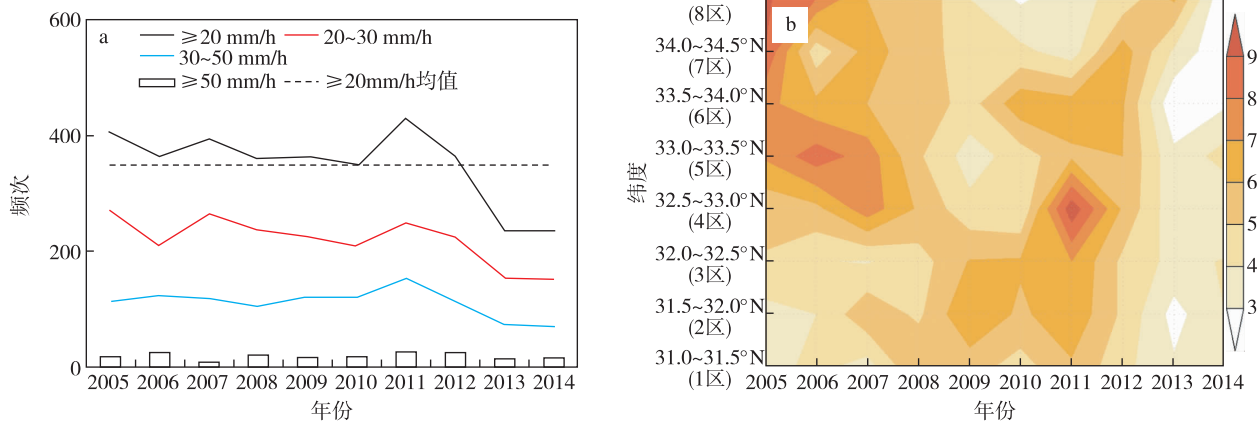


图 3 江苏短时强降水频次的年际变化(a)和江苏短时强降水区域特征的年际变化(b)

Fig.3 (a) The annual variation of frequency of short-time heavy rainfall in Jiangsu; (b) The annual variation of regional characteristics of short-time heavy rainfall in Jiangsu

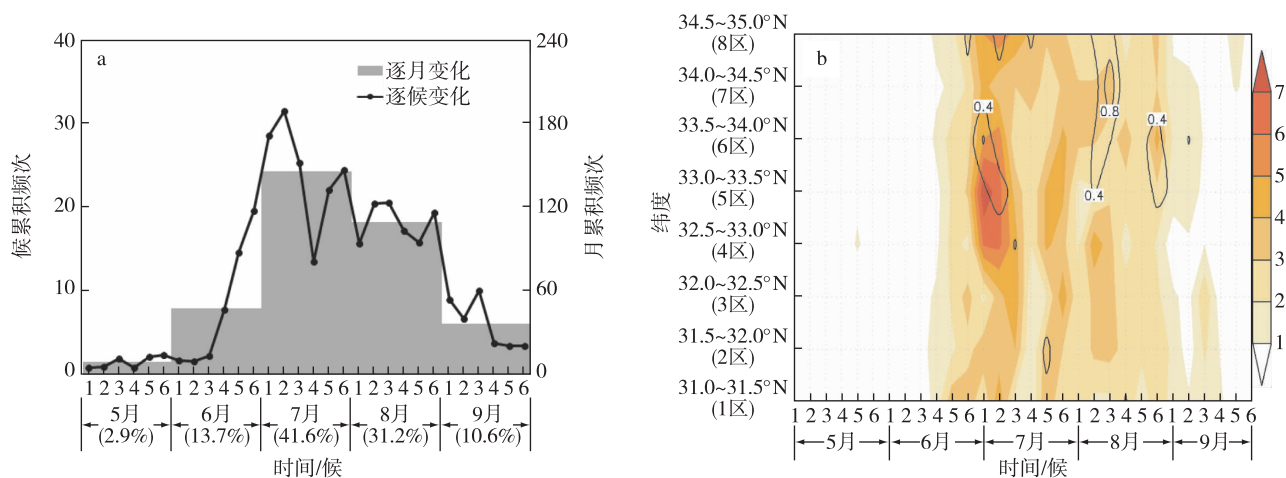


图4 短时强降水年均频次逐月、逐候变化(a),以及各区域短时强降水的逐候演变(b;阴影和实线分别表示 ≥ 20 mm/h和 ≥ 50 mm/h短时强降水区域平均值的逐候特征)

Fig.4 (a) Monthly (columnar) and pentad (line) annual frequency of short-time heavy rainfall; (b) Pentad variation of short-time heavy rainfall in different regions (shading: ≥ 20 mm/h; contour: ≥ 50 mm/h)

量,促使雨量剧增,故8月强度更大的极端强降水容易多发生。

逐候演变(图4a,实线)可以看出,整个暖季短时强降水频次分布呈“迅速增多、振荡性减少”的特征,且具有显著的阶段性发展特征,在这与西太平洋副热带高压的季节性北跳和南撤有很好的对应关系(丁一汇和张建云,2009)。结合各个区域短时强降水的逐候演变特征(图4b),可以看出,5月至6月第4候,副热带高压偏南偏弱,脊线位于 15°N 以南,正值华南前汛期,江苏短时强降水不活跃;6月第5候至7月第3候随着夏季风迅速向北发展,副热带高压第1次北跳,脊线稳定在 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间,江苏进入梅雨期,短时强降水骤增,表现为7月第2候的短时强降水活跃期,活跃区域位于3~6区(江淮地区);梅雨过后,7月中下旬副热带高压再次北跳西进,脊线在 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 附近,雨带北抬至黄河流域,江苏短时强降水减少,但处于副高边缘,容易产生热对流降水,表现为7月第6候的短时强降水次活跃期,活跃区域位于4~6区(江淮北部);8月初副热带高压脊线越过 30°N ,受副高控制,气温较高,午后热对流天气依旧活跃,同时热带系统活动开始频繁,表现为8月第3候高强度(≥ 50 mm/h)短时强降水的活跃期,其活跃区域位于6~7区(淮北地区);8月下旬至9月副热带高压脊线南落至 25°N 以南,江苏短时强降水迅速减少。根据副热带高压季节性变化特征,以及近10 a江苏入梅/出梅的平均日期(6月20日/7月13日),可将整个暖季分为以下4个阶段:梅前(5月至6月第4候)短时强降

水最不活跃;梅期(6月第5候至7月第3候)短时强降水骤增;盛夏(7月第4候至8月第4候)为高强度短时强降水的活跃时段;夏末秋初(8月下旬至9月)短时强降水迅速减少。

3.3 日变化

3.3.1 日变化特征

如图5a给出了不同等级短时强降水频次的日变化特征,并在其基础上,将一天分为上半夜(21—02时,北京时间,下同)、清晨(03—08时)、上午(09—14时)和午后(15—20时)4个时段分别进行研究(图5b)。可以看出, ≥ 20 mm/h的短时强降水的日变化呈双峰分布特征,午后(比重32.4%)为短时强降水的最活跃时段,主峰值出现在18时,清晨(比重25.9%)仅次于午后,次峰出现在07时,而上半夜和上午为短时强降水的低发时段; $20\sim 30$ mm/h、 $30\sim 50$ mm/h短时强降水的日变化与 ≥ 20 mm/h基本一致,呈双峰结构;而 ≥ 50 mm/h的短时强降水日变化呈多峰结构,午后短时强降水频次明显增多,并呈锯齿状变化,共出现3个峰值,依次为16时、18时和20时,进入上半夜短时强降水迅速减少,而清晨04时出现了第4峰值。图5b可以看出,3个等级短时强降水的最活跃时段均在午后(比重依次为:31.9%,32.7%和36.7%),但次活跃时段不同, $20\sim 30$ mm/h和 $30\sim 50$ mm/h出现在清晨(比重分别为27.1%和24.6%),而 ≥ 50 mm/h次活跃时段出现在上半夜(比重23.4%),其最不活跃时段为清晨(比重19.7%)。可见随降水增强,午后和上半夜发生短时强降水的比重有所增大,而清晨比重明显

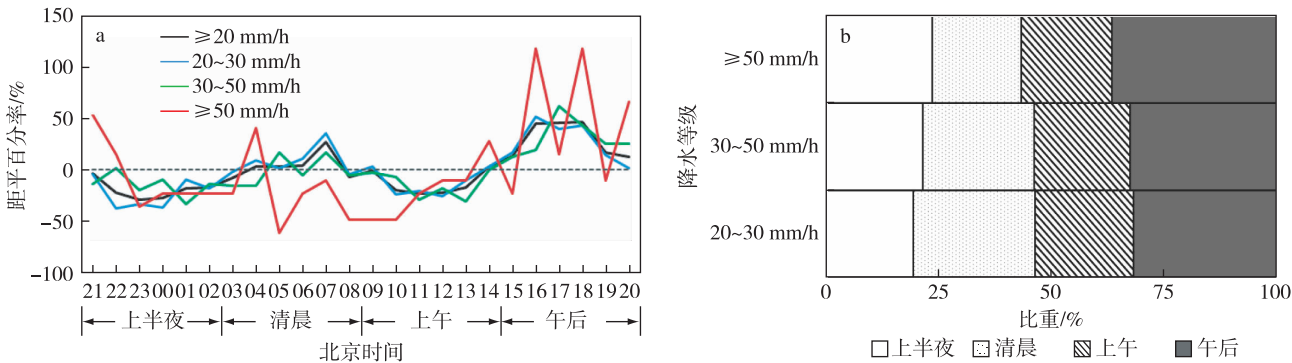
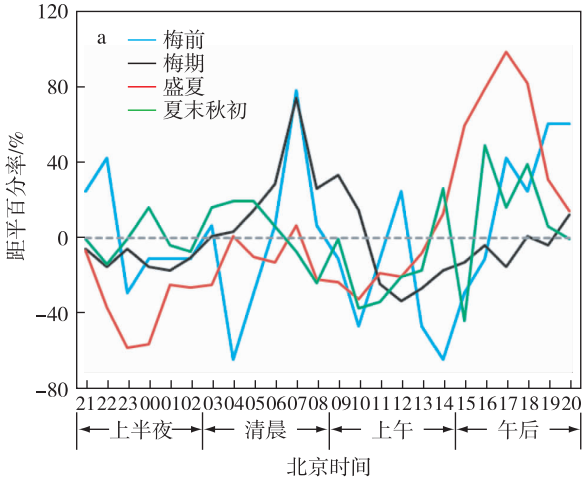


图 5 不同等级短时强降水频次的标准化日变化(a)及日内 4 个时段所占比重(b)
Fig.5 (a) Normalized diurnal variations of short-time heavy rainfall and (b) the percentages in four time intervals (late night early morning, forenoon and afternoon) with different intensity levels

减小,高强度短时强降水更倾向发生在午后。
根据以往研究(丁一汇,2005;郑永光等,2010;郝莹等,2012;林春泽等,2016),午后地面受太阳辐射的影响,增温明显,常在近地面层形成下暖上冷的不稳定层结,在一定的动力和热力作用的抬升下,触发不稳定能量的释放,如有充沛的水汽配合,易产生强降水,这也导致高强度的短时降水更加集中发生在午后;对于清晨的次活跃时段,有研究指出(Lin et al.,2000;Chen et al.,2010;Chen et al.,2013),午夜后对流活动明显少于午后,但是达到短时强降水标准的比例却显著高于午后,一方面是由于夜间—清晨云顶辐射冷却造成的不稳定层结的增强,另一方面,清晨低空西南季风气流增强,有利于低层暖湿气流的输送。

3.3.2 日变化的季节内振荡

短时强降水在在梅前、梅期、盛夏和夏末秋初四



个阶段的日变化亦存在显著的差异(图 6)。梅前短时强降水日变化呈多峰结构,主峰出现在清晨;梅期和盛夏短时强降水的日变化均呈单峰结构,但峰值出现时间不同,梅期峰值出现在清晨 07 时,而盛夏峰值出现在傍晚 17 时;夏末秋初短时强降水亦呈多峰结构,主峰出现在傍晚。总的来说,整个暖季短时强降水日变化特征(主峰时间)经历了“多峰(清晨)—单峰(清晨)—单峰(午后)—多峰(午后)”的演变。

图 6b 是短时强降水日变化的逐候演变。可以看出梅期的清晨和盛夏的午后对整个暖季短时强降水的贡献最大(方框),亦是短时强降水整体呈双峰结构的直接原因。梅期,从 6 月第 5 候至 7 月第 3 候,除了短时强降水频次的骤增,其日分布更加集中于清晨,7 月第 2 候 03—10 时短时强降水占全天的 48.9%,该时段内除了出现主峰(07 时),还出现了

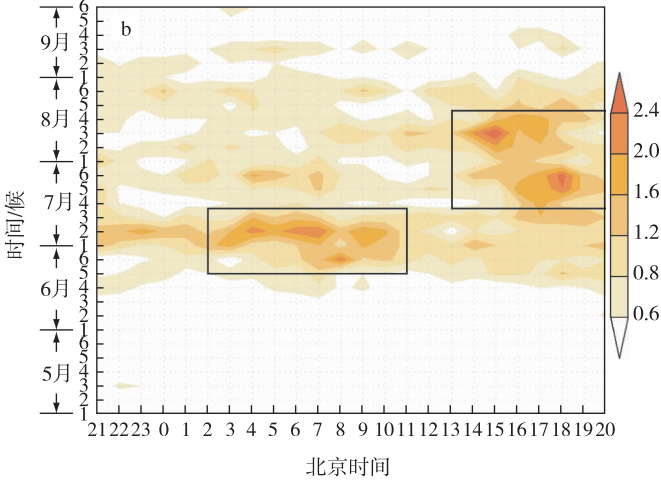


图 6 暖季 4 个阶段短时强降水频次的标准化日变化(a),以及短时强降水频次日变化特征的逐候演变(b;方框区域代表短时强降水的高发时段)

Fig.6 (a) Normalized diurnal variations of short-time heavy rainfall at four stages of warm-season and (b) Sub-seasonal evolutions of the normalized diurnal variations of short-time heavy rainfall (Box marks the peak times of short-time heavy rainfall)

两个次峰(04 时和 09 时);7 月第 3、4 候为梅期向盛夏的过渡阶段,该时期清晨峰值迅速减小,傍晚峰值开始突显;进入盛夏,午后成为短时强降水发生的集中时段,14—20 时短时强降水频次占全天的 46.1%,其中 7 月第 5、6 候峰值出现在 18 时,而 8 月第 2、3 候的峰值时间则提前至 15 时。

可见:江苏暖季短时强降水日变化的季节内演变亦具有阶段性特征,其中梅期和盛夏为短时强降水两个高发时段,却表现出截然相反的单峰结构,即梅期峰值出现在清晨,盛夏峰值出现在傍晚。这大概是由于梅雨期间多为持续性降水,阴雨寡照,天空云层厚,白天日照辐射可降低垂直分布的温度梯度,不稳定热力层结被消弱,夜间云顶辐射冷却以及低空急流在清晨系统性增强,成为短时强降水增多的主要因素;而盛夏期间,副高强盛,午后易产生短时热对流天气。

3.2.3 日变化的空间分布

图 7 为不同区域短时强降水的日变化特征。可以看出,短时强降水的日变化存在南北差异。苏南南部短时强降水日变化呈单峰结构,峰值出现在傍晚,午后(14—20 时)为短时强降水的最活跃时段,约占全天比重的 40%;向北,短时强降水的日变化先后呈现出双峰、多峰结构特征,午后的比重逐渐减小,但仍是一天中最活跃时段,而上半夜至清晨的比重明显增大,并对应 1 个或多个峰值。整体来看,由南向北,短时强降水日分布的集中程度在减弱,其高发时段有所分散。

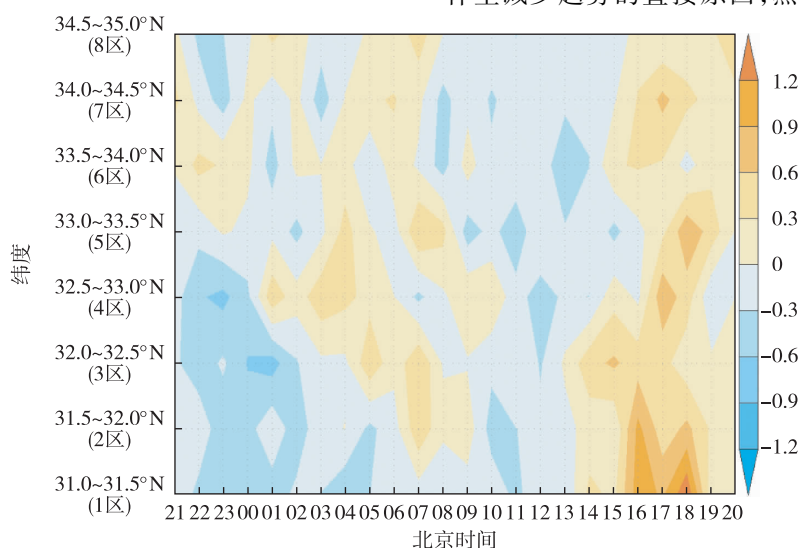


图 7 短时强降水频次的标准化日变化的南—北空间分布

Fig.7 Spatial distribution (north-south) of normalized diurnal variations of short-time heavy rainfall in different regions

图 8 给出了江苏暖季各站短时强降水频次的日峰值出现的时间空间分布,可以看出,淮河以南大部分站点的高发时段为中午至傍晚(12—18 时),其中江苏东南部的南通各站点峰值出现在正午(11—14 时),略早于其他站点,而淮河以北地区大部分站点的日峰值则出现在上半夜至清晨(21—08 时)。对比短时强降水峰值频次所占比重的空间分布(图 8 箭矢长度),发现苏南南部出现在午后的峰值频次所占比重明显偏大,也说明该区域短时强降水日分布集中程度最显著。

4 结论和讨论

本文基于江苏 2005—2014 年 5—9 月逐小时降水资料,分析了不同等级短时强降水的空间分布特征,并从年际尺度、季节内尺度以及小时尺度揭示了短时强降水的发生规律,结果表明:短时强降水时空分布不均,高强度短时强降水($\geq 50 \text{ mm/h}$)分布更为集中,这对极端强降水的预报预警具有一定参考意义。主要结论如下:

1) 江苏暖季短时强降水与暴雨的空间分布较为相似,整体上北部多于南部,最活跃区域位于沿淮西部;高强度($\geq 50 \text{ mm/h}$)短时强降水分布集中,其空间分布与最大小时雨强分布相似,大值区位于淮北东部。

2) 近 10 a 来,江苏南部地区短时强降水变化趋势不明显,北部地区减少显著,是江苏短时强降水整体呈减少趋势的直接原因,然而高强度短时强降水

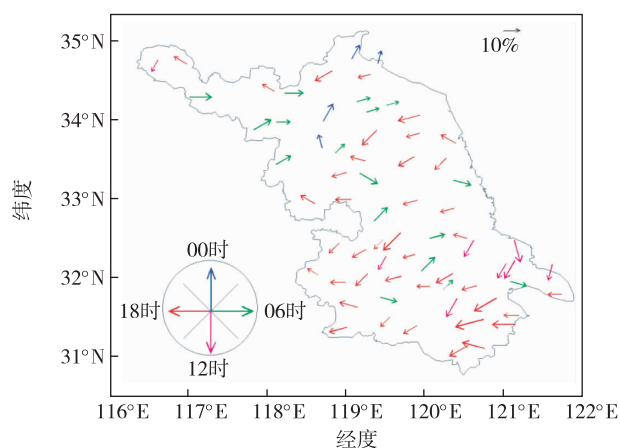


图 8 短时强降水频次日峰值出现时间的空间分布(箭头方向表示峰值出现时间,红色(紫色)箭头表示 15—20 时(09—14 时),蓝色(绿色)箭头表示 21—02 时(03—08 时);箭头长度表示对应峰值频次占全天的比重)

Fig.8 Spatial distributions of the diurnal peaks of short-time heavy rainfall frequency (The direction of the vector stands for the timing of the maximum frequency. The red (purple) vectors represent the peaks occurring during 15:00 BST—20:00 BST (09:00 BST—14:00 BST), the blue (green) vectors represent the peaks occurring during 21:00 BST—02:00 BST (03:00 BST—08:00 BST), and the length of vector stands for the percentage of the day's maximum frequency)

变化趋势不明显。

3) 江苏暖季短时强降水以 7 月最活跃期,而高强度短时强降水更多发生在 8 月;其逐候分布呈现

出“迅速增多、振荡性减少”的特征,且具有显著的阶段性发展特征,这与副热带高压系统的阶段性的北跳和南撤有关。梅期短时强降水骤增,以江淮地区 7 月第 2 候最为活跃;盛夏期间高强度短时强降水增多,以淮北地区 8 月第 3 候最活跃。

4) 短时强降水日变化整体呈双峰结构,主峰出现在傍晚 17 时,次峰为清晨 07 时;午后和清晨为短时强降水最活跃的两个时段,高强度短时强降水更倾向于发生在午后。暖季短时强降水日变化呈阶段性演变,梅期和盛夏这两个高发时期表现出相反的单峰结构,即梅期峰值出现在清晨,盛夏峰值则出现在傍晚,这也是短时强降水整体呈双峰结构的直接原因。短时强降水日变化特征存在区域性差异,由南向北,其日变化由单峰向双峰、多峰演变,而日峰值出现时间在淮河以南、以北地区存在显著差异,即淮河以南地区的峰值主要出现在午后到傍晚,而淮河以北地区的峰值多出现在夜间至清晨。

总的来说,短时强降水是在特定的大尺度环流背景下产生的,不同等级短时强降水的空间分布、年际变化、季节内演变以及日变化存在差异,这种不均匀的时空分布特征为短时强降水的潜势预报提供了必要的气候背景。而短时强降水的日变化具有明显的区域性和季节性差异,其成因复杂,不仅与白天太阳辐射和夜间云顶冷却关系密切,还与地形、海(湖)陆分布等下垫面有关,至于这些因素如何与大尺度环流系统(季风、副高等)相互作用尚需详细的研究。

参考文献 (References)

- 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]. *J Climate*, 23(4): 905-917.
- 陈海山, 范苏丹, 张新华, 2009. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异 [J]. *大气科学学报*, 32(6): 744-751. Chen H S, Fan S D, Zhang X H, 2009. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years [J]. *Trans Atmos Sci*, 32(6): 744-751. (in Chinese).
- Chen J, Zheng Y G, Zhang X L, et al., 2013. Distribution and diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China [J]. *Acta Meteor Sin*, 27(6): 868-888.
- 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等, 1991. 东亚季风 [M]. 北京: 气象出版社: 1-93. Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al., 1991. East Asia monsoon [M]. Beijing: China Meteorological Press: 1-93. (in Chinese).
- 陈永仁, 李跃清, 2013. “12. 7. 22” 四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响 [J]. *气象*, 39(7): 848-860. Chen Y R, Li Y Q, 2013. Characteristics of mesoscale convective system and its effects on short-time severe rainfall in Sichuan Basin during 21—22 July 2012 [J]. *Meteor Mon*, 39(7): 848-860. (in Chinese).
- 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来, 2016. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征 [J]. *气象*, 42(2): 144-155. Chen Y Z, Yu X D, Chen X L, 2016. Characteristics of short time severe rainfall events based on weatherflow and key environmental parameters in Pearl River Delta [J]. *Meteor Mon*, 42(2): 144-155. (in Chinese).
- 丁一汇, 2005. 高等天气学 [M]. 北京: 气象出版社: 443. Ding Y H, 2005. Advanced synoptic meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press: 443. (in Chinese).

- 丁一汇,张建云,2009.暴雨洪涝[M].北京:气象出版社:16-23. Ding Y H, Zhang J Y, 2009. Rainstorm and flood [M]. Beijing: China Meteorological Press:16-23. (in Chinese).
- 段鹤,夏文梅,苏晓力,等,2014.短时强降水特征统计及临近预警[J].气象,40(10):1194-1206. Duan H, Xia W M, Su X L, et al., 2014. Features statistics and warning of flash heavy rains[J]. Meteor Mon, 40(10):1194-1206. (in Chinese).
- 郝莹,姚叶青,郑媛媛,等,2012.短时强降水的多尺度分析及临近预警[J].气象,38(8):903-912. Hao Y, Yao Y Q, Zheng Y Y, et al., 2012. Multi scale analysis and nowcasting of short time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 38(8):903-912. (in Chinese).
- 何晗,湛芸,肖天贵,等,2015.冷涡背景下短时强降水的统计分析[J].气象,41(12):1466-1476. He H, Shen Y, Xiao T G, et al., 2015. Statistical analysis of severe short time precipitation under cold vortex background[J]. Meteor Mon, 41(12):1466-1476. (in Chinese).
- Li J, Yu R C, Sun W, 2013. Duration and seasonality of hourly rainfall in the central eastern China[J]. Acta Meteor Sin, 27(6):799-807.
- 林春泽,刘琳,林文才,等,2016.湖北省夏季降水日变化特征[J].大气科学学报,39(4):490-500. Lin C Z, Liu L, Lin W C, et al., 2016. Characteristics of summer precipitation diurnal variations in Hubei Province[J]. Trans Atmos Sci, 39(4):490-500. (in Chinese).
- 林建,杨贵名,2014.近30年中国暴雨时空特征分析[J].气象,40(7):816-826. Lin J, Yang G M, 2014. Spatial-temporal characteristics of rainstorm in China during 1981—2010[J]. Meteor Mon, 40(7):8016-826. (in Chinese).
- Lin X, Randall D A, Fowler L D, 2000. Diurnal variability of the hydrologic cycle and radiative fluxes: Comparisons between observations and a GCM [J]. J Climate, 13(23):4159-4179.
- 苗春生,李婷,王坚红,等,2015.江淮流域梅雨锋暴雨南北雨带干冷空气侵入作用的对比研究[J].大气科学学报,38(1):76-84. Miao C S, Li T, Wang J H, et al., 2015. Comparison of dry-cold intrusions in north and south heavy rainfall zones during Meiyu front rainstorms in Changjiang-Huaihe valleys[J]. Trans Atmos Sci, 38(1):76-84. (in Chinese).
- 仇娟娟,何立富,2013.苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析[J].气象,39(5):577-584. Qiu J J, He L F, 2013. Comparative analysis on weather characteristics and convective parameters of torrential rain and hail in Yangtze River Delta[J]. Meteor Mon, 39(5):577-584. (in Chinese).
- 沈澄,孙燕,尹东屏,等,2015.江苏省暴雨洪涝灾害特征分析[J].自然灾害学报,24(2):203-212. Shen C, Sun Y, Yin D P, et al., 2015. Characteristic analysis of rainstorm-induced flood disaster in Jiangsu Province[J]. Journal of Natural Disasters, 24(2):203-212. (in Chinese).
- 孙燕,朱明月,2014.1961—2011年江苏夏季分级雨日的气候特征[J].气象科学,34(2):200-205. Sun Y, Zhu M Y, 2014. Climatic characteristics of summer rain days at different levels in Jiangsu from 1961 to 2011[J]. J Meteor Sci, 34(2):200-205. (in Chinese).
- 陶诗言,1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社:5-7. Tao S Y, 1980. The Heavy Rain in China[M]. Beijing: Science Press:5-7. (in Chinese).
- 王丽芳,濮梅娟,张雪蓉,2013.2011年梅汛期影响江苏两次大暴雨过程对比分析[J].气象科学,33(3):264-272. Wang L F, Pu M J, Zhang X R, 2011. A comparative analysis of two severe torrential rain processes in Jiangsu province during Meiyu period of 2011[J]. J Meteor Sci, 33(3):264-272. (in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2014.雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J].气象,40(4):389-399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2014. Discussion on basical issues of thunderstorm potential forecasting[J]. Meteor Mon, 40(4):389-399. (in Chinese).
- 吴海英,曾明剑,王卫芳,等,2015.1211号“海葵”台风登陆后引发两段大暴雨过程的对比分析[J].大气科学学报,38(5):670-677. Wu H Y, Zeng M J, Wang W F, et al., 2015. Comparative analysis on two rainstorm processes caused by typhoon HaiKui (1211) after landfall[J]. Trans Atmos Sci, 38(5):670-677. (in Chinese).
- 姚莉,李小泉,张立梅,2009.我国1小时雨强的时空分布特征[J].气象,35(2):80-87. Yao L, Li X Q, Zhang L M, 2009. Spatial-temporal distribution characteristics of hourly rain intensity in China[J]. Meteor Mon, 35(2):80-87. (in Chinese).
- 尹承美,梁永礼,冉桂平,等,2010.济南市短时强降水特征分析[J].气象科学,30(2):262-267. Yin C M, Liang Y L, Ran G P, et al., 2010. Feature analysis of severe short-range precipitation in Jinan urban area[J]. J Meteor Sci, 30(2):262-267. (in Chinese).
- 余蓉,张小玲,李国平,等,2012.1971—2000年我国东部地区雷暴、冰雹、雷暴大风发生频率的变化[J].气象,38(10):1207-1216. Yu R, Zhang X L, Li G P, et al., 2012. Analysis of frequency variation of thunderstorm, hail and gale wind in eastern China from 1971 to 2000[J]. Meteor Mon, 38(10):1204-1216. (in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(3):311-337. (in Chinese).
- 张芳华,高辉,2008.中国冰雹日数的时空分布特征[J].南京气象学院学报,31(5):687-693. Zhang F H, Gao H, 2008. Temporal and spatial features of hail days in China [J]. J Nanjing Inst Meteor, 31(5):678-693. (in Chinese).
- Zhang H, Zhai P M, 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over Eastern China in the warm season[J]. Adv Atmos Sci, 28(5):1177-1183.
- 张京英,陈金敏,刘英杰,等,2010.大暴雨过程中短时强降水机制分析[J].气象科学,30(3):407-413. Zhang J Y, Chen J M, Liu Y J, et al., 2010. Analysis of mechanisms of short-time rainfall in the process of strong rainfall[J]. J Meteor Sci, 30(3):407-413. (in Chinese).
- 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[J].北京大学学报(自然科学版),46(5):793-804. Zheng Y G, Wang Y, Shou S W, 2010. Climatology of deep convection over the subtropics of China during summer[J]. Journal of Peking University (Science Edition), 46(5):793-804. (in Chinese).

Temporal and spatial heterogeneity of warm-season short-time heavy rainfall in Jiangsu Province

SHEN Wei^{1,2}, YUAN Huiling^{2,3}, CHEN Xi², WANG Wenqing¹, ZHAO Yanhua¹

¹ Suqian Meteorological Bureau, Suqian 223800, China;

² School of Atmospheric Sciences and Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

³ Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change, Nanjing 210023, China

Based on hourly precipitation observation data during the warm season (May to September) of 2005—2014 from 69 gauge stations in Jiangsu, the spatial and temporal distributions of short-time heavy rainfall (≥ 20 mm/h) have been analyzed, which showed obvious heterogeneity in space and time. The occurrence frequency of short-time heavy rainfall in northern Jiangsu area was higher than that in the southern region, and its most active region is located in the western area along Huaihe River. Meanwhile, extreme short-time rainfall events (≥ 50 mm/h) frequently occurred in the eastern Huaibei with concentrated rainfall distributions. The occurrence frequency of short-time heavy rainfall showed the decreasing trend in the past decade, especially in northern Jiangsu. In general, July was the most active month of short-time heavy rainfall, and the extreme short-time rainfall events occurred most frequently in August. The pentad short-time heavy rainfall evolved with the phase variations that the frequency of short-time heavy rainfall increased rapidly during Meiyu season with the peak in the second pentad of July, and then the frequency of extreme short-time rainfall events increased obviously during mid-summer and reached its peak in the third pentad of August. In average, the diurnal variations of short-time heavy rainfall showed a double-peak pattern, with the highest peak around 17:00 BST and the secondary peak around 07:00 BST, while extreme short-time heavy rainfall events tended to occur in the afternoon. The diurnal variations of short-time heavy rainfall also demonstrated obvious sub-seasonal variability and spatial differences. It had a single peak in early morning during Meiyu season and a single peak in the evening during mid-summer. From the south to the north of Jiangsu, the diurnal pattern evolved from a single peak to double and multiple peaks. The peak appeared mostly in the afternoon in the southern area of Huaihe River, while mainly appeared during the night to early morning in the northern area of Huaihe River.

short-time heavy rainfall; diurnal variation; temporal and spatial heterogeneity; warm-season

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20160824002

(责任编辑: 张福颖)