

吴照宪,罗亚丽,刘希,等,2022. 2011—2018 年安徽暖季短时强降水及其环流背景统计特征[J]. 气象,48(8):963-978. Wu Z X, Luo Y L, Liu X, et al, 2022. Statistical characteristics of the hourly heavy rainfall events over Anhui Province during the 2011—2018 warm seasons and the associated synoptic circulation patterns[J]. Meteor Mon, 48(8):963-978(in Chinese).

2011—2018 年安徽暖季短时强降水 及其环流背景统计特征^{*}

吴照宪¹ 罗亚丽² 刘希^{3,4} 程东兵¹

1 安徽省池州市气象局, 池州 247000

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210009

4 南京气象科技创新研究院, 南京 210009

提 要: 采用 2011—2018 年 5—8 月逐 10 min 的地面稠密降水资料, 统计分析了安徽省小时强降水 (hourly heavy rainfall, HHR) 事件在入梅前期、梅雨期、出梅后期的时空分布特征。结果表明, 安徽省大别山至皖南山区西南部一带是 HHR 事件的易发区域, 安徽省西南、东北地区 HHR 事件对暖季总降水贡献高达 30%~40%。入梅前期, 安徽省 HHR 事件日的发生频次低, 雨强较弱; 梅雨期持续时间长、累计雨量大; 出梅后期雨强较大, 持续时间短。按第 99 百分位阈值, 60% 以上极端持续时间 (≥ 360 min) 和极端累计雨量 (≥ 138.0 mm) HHR 事件出现在梅雨期, 而 60% 以上极端 10 min 雨强 (≥ 25.0 mm) HHR 事件出现在出梅后期。梅雨期, HHR 事件频次在凌晨 06 时和午后 17 时出现峰值; 出梅后期, 呈现明显的午后 16 时单峰结构。根据旋转 T 模式主成分客观分析法, 将安徽省梅雨期 HHR 事件划分为低涡/切变型或锋面型 (SP2 型) 和西北低槽型 (SP1 型); 出梅后期则为南方低压或台风低压型 (SP6 型) 和西北低槽型 (SP1 型)。其中, 梅雨期 SP2 型 HHR 事件主要发生在大别山区、皖南山区及其过渡地带, 是梅雨期 HHR 事件的主要贡献者; 而 SP1 型 HHR 事件主要在大别山区、皖南山区及安徽东北部等山区较易发生。出梅后期, SP1 型 HHR 事件呈现北多南少特点, 而 SP6 型在大别山和皖南山区有较明显的 HHR 事件发生, 是出梅后期 HHR 事件的主要贡献者。

关键词: 安徽, 暖季, 小时强降水事件, 客观天气分型, 统计特征

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041001

Statistical Characteristics of the Hourly Heavy Rainfall Events over Anhui Province During the 2011—2018 Warm Seasons and the Associated Synoptic Circulation Patterns

WU Zhaoxian¹ LUO Yali² LIU Xi^{3,4} CHENG Dongbing¹

1 Chizhou Meteorological Office of Anhui Province, Chizhou 247000

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210009

4 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210009

Abstract: Using the 10 min surface rainfall observations in Anhui Province during the 2011—2018 warm seasons (May to August), the spatio-temporal distributions of hourly heavy rainfall (HHR) events during

^{*} 国家自然科学基金项目 (41775050)、中国气象局预报员专项 (CMAYBY2020-059) 和江苏省气象学会青年科研基金 (KQ202006) 共同资助
2021 年 5 月 8 日收稿; 2022 年 4 月 8 日收修定稿

第一作者: 吴照宪, 主要从事短时临近天气预报预警工作. E-mail: 342901wzx@163.com

通讯作者: 刘希, 主要从事中尺度天气研究. E-mail: liuxi@cma.gov.cn

the pre-Meiyu, Meiyu, and post-Meiyu periods are comparatively analyzed. The results show that the HHR events frequently occur over the areas from Dabie Mountains (Mt. DB) to the southwest of the southern Anhui Mountains (Mt. WN). The contribution of the HHR events over the southwest and northeast of Anhui Province to the total precipitation during the warm-season reaches 30%–40%. During the pre-Meiyu period, the HHR events have a lower occurrence frequency and weaker rainfall intensity than in the Meiyu and post-Meiyu periods. The HHR events during the Meiyu period last longer and produce a larger rainfall accumulation than those during the pre- and post-Meiyu periods, while those during the post-Meiyu period have larger intensity but shorter duration. Defined according to the 99th percentile threshold, more than 60% of the extreme persistent (accumulated rainfall) HHR events take place during the Meiyu period, while more than 60% of the extreme rainfall intensity HHR events with 10 min rainfall ≥ 25 mm occur during the post-Meiyu period. The HHR events' occurrence frequency peaks at 06:00 BT and 17:00 BT during the Meiyu period, but exhibits a prominent single peak at 16:00 BT during the post-Meiyu period. Based on the rotating T model of the principal component analysis, the main synoptic circulation patterns of the HHR events can be classified as the southwest vortex/shear type or front type (SP2) and northwest trough type (SP1) during the Meiyu period. The SP2 type HHR events are the major contributor to the HHR accumulation and mainly occur in Mt. DB, Mt. WN and their transition zones. HHR events of the SP1 type tend to occur in mountainous areas such as Mt. DB, Mt. WN and northeastern Anhui. During the post-Meiyu period, the two major patterns are the southern low-pressure or typhoon type (SP6) and northwest low trough type (SP1). The major contributor to the HHR accumulation is the SP6 type HHR events that occur mainly in Mt. DB and Mt. WN, while the SP1 type HHR events take place more in the north than in the south.

Key words: Anhui Province, warm season, hourly heavy rainfall (HHR) event, objective classification of synoptic pattern, statistical characteristic

引言

小时强降水(hourly heavy rainfall, HHR)是一种强对流天气,会带来地表径流量的激增,易造成山洪、泥石流、城市内涝等次生灾害,且预报难度大,因此其特征和成因受到国内外学者的广泛关注(Chen et al, 2013; Luo et al, 2016; 王珏等, 2019; 范元月等, 2020; 苏锦兰等, 2021)。安徽省位于中国大陆东部,横跨江淮流域。受东亚季风影响显著(陶诗言等, 2004),梅雨期的暴雨、短时强降水频发(谢五三等, 2017),HHR的雨量、频次具有复杂的年际、季节和日变化特征(杨玮和程智, 2015; 黄勇等, 2012)。安徽境内地形复杂,南北差异大(图1),HHR成因和气象灾害特征也有明显的差异(丁仁海和王龙学, 2009; 刘裕禄等, 2017; 朱红芳等, 2015)。皖南山区和大别山区是HHR的高发区域,淮北平原则常出现短时极端强降水(童金等, 2017)。

国内外对区域性强降水有较多的统计分析(Iwasaki, 2012; 2015; 付超等, 2019; 侯淑梅等, 2020; 方德贤等, 2020; 战云健等, 2021),也针对短时强降水的环流特征开展了研究,包括:短时强降水个例及其特征演变(张芳华等, 2020)、短时强降水天气过程的对比分析(吴进等, 2018)或短时强降水环流主观分型(Luo et al, 2016)。其中,郝莹等(2012)把安徽短时强降水环流背景分为低槽东移型、西北气流型和台风型,分析了强降水持续的主要原因和预警指标。

客观分类方法在气象学和气候学中有着悠久的历史。这些方法最重要的应用之一是大气环流分型。客观分类方法可通过两种方法实现:气团分型和环流分型。气团分型方法使用单个地点、多个变量(如气压、风速和温度)来确定天气类型;而环流分型方法则使用海平面气压或位势高度等变量来描述大气环流(Huth et al, 2008)。大多数分类方法在欧洲(Plaut and Simonnet, 2001; Huth, 1993; 1996a;

1996b; Cahynová and Huth, 2010) 和北美 (Cavazos, 1999; Gevorgyan, 2013) 首先得到开发和应用。近年来,我国学者在天气气候、大气环境 (Zhang et al, 2012; 2018; Zhao et al, 2013; He et al, 2017) 等方面进行环流客观分型的研究越来越多,并取得了较好的应用效果。

本研究利用近年来投入使用的安徽省稠密观测站录得的分钟级降水资料,统计 2011—2018 年 5—8 月安徽暖季不同时期短时强降水事件降水量、频次的时空分布,并采用旋转主成分客观分析法对短时强降水天气影响系统进行分型,以探讨安徽省 (非)HHR 事件日主要影响系统及其特征。

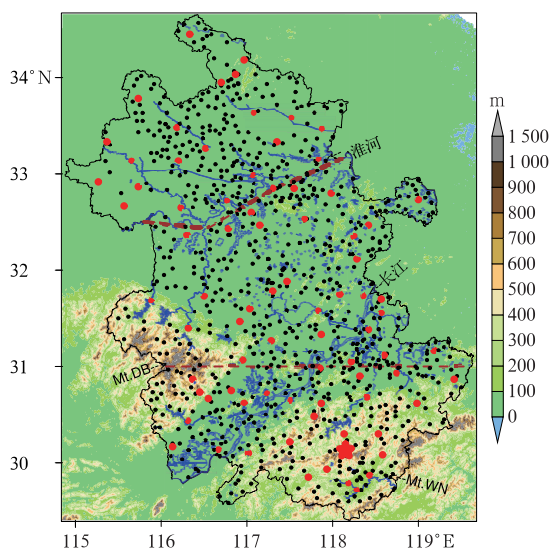


图1 安徽境内有长江和淮河横跨东西 (浅蓝色线条),大别山(Mt. DB)位于长江-淮河之间的西部区域,长江以南为皖南山区(Mt. WN) (填色为地形高度;橙色粗虚线自北向南把安徽省划分为淮北地区、江淮之间和江南地区三个区域;红点:国家基本站;★:黄山站;黑点:加密自动观测站)

Fig. 1 Anhui Province having the Yangtze River and Huaihe River flowing from west to east (light blue lines) with the Dabie Mountains (Mt. DB) located in the west part of the area between the two rivers and the Wannan (south of Anhui) Mountains (Mt. WN) south to the Yangtze River (Colored denotes terrain height, unit: m; orange thick dashed lines divide Anhui Province into three regions from north to south: Huabei, Jianghuai and Jiangnan; red dots represent the national basic ground stations; black dots are the densely distributed automatic weather stations; the red pentagram stands for the Huangshan Station)

1 资料与方法

1.1 资料

本文选取安徽省气象局提供的 2011—2018 年 5—8 月地面稠密自动观测站录得的逐 10 min 降水资料,分析安徽省暖季 HHR 事件的时空分布特征。按气候界限值及年、日、小时、10 min 降水量空间及时间一致性原则,对数据进行质量控制(任芝花等, 2010; 陶士伟等, 2009)。剔除 8 年内观测记录缺测或丢失率超过 5% 的站点。利用逐 6 min 的雷达反射率资料仔细验证了每次降水过程,得到 81 个国家基本站和 808 个地面稠密自动观测站用于本研究 (图 1)。

根据中国气象局对短时强降水事件的定义,本研究将小时降水量超过 20 mm 定义为 HHR (Zhang and Zhai, 2011)。为了更好地描述 HHR 的过程性和致灾性,本文参考 Li et al (2017) 将 HHR 从开始到结束的过程称之为 HHR 事件,即将未来 10 min 累计降水大于或等于 0.1 mm,且未来 1 h 累计降水大于或等于 20 mm 的时刻定义为 HHR 事件的开始。随后,每 10 min 计算一次未来 1 h 内的累计降水,若某时刻的小时累计降水小于或等于 5 mm,则将时刻定义为 HHR 事件的结束。HHR 事件持续时间为开始与结束之间的小时数。

当一个地理区域一天内 (20—20 时),至少 5 个站点记录了 HHR 事件时,认定该区域为一个 HHR 事件日,反之则为一个非 HHR 事件日。按此划分原则,分别确定安徽省江南、江淮与淮北地区 (图 1) 的 (非)HHR 事件日。若某一天三个区域均出现 (非)HHR 事件日,则将该日定义为全省性 (非)HHR 事件日。

按照安徽省气候中心每年划分及公布的入梅、出梅日 (表 1),将 2011—2018 年安徽省暖季 (5 月 1 日至 8 月 31 日) 划分为入梅前期 (5 月 1 日至入梅日)、梅雨期 (入梅日—出梅日) 和出梅后期 (出梅日至 8 月 31 日) 三个阶段。2011—2018 年安徽暖季梅雨期共 207 d,入梅前期和出梅后期分别为 384 d、385 d。经统计,2011—2018 年 5—8 月全省共出现 478 个 HHR 事件日,入梅前期、梅雨期和出梅后期分别有 106、148 和 224 个 HHR 事件日,全省性 HHR 事件日分别有 16、32 和 70 d。

表 1 2011—2018 年入梅、出梅日及梅雨天数

Table 1 The beginning and ending dates and duration of Meiyu period during 2011—2018

年份	入梅日	出梅日	梅雨天数/d
2011	6 月 9 日	7 月 1 日	22
2012	6 月 25 日	7 月 21 日	26
2013	6 月 20 日	7 月 7 日	17
2014	6 月 25 日	7 月 20 日	25
2015	6 月 15 日	7 月 26 日	41
2016	6 月 18 日	7 月 20 日	32
2017	6 月 21 日	7 月 12 日	21
2018	6 月 19 日	7 月 12 日	23

利用 2011—2018 年 5—8 月欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)第五代全球气候大气再分析资料(ERA5;时间分辨率为 1 h,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,垂直层次从 1000 hPa 至 1 hPa 共 37 层, <https://cds.climate.copernicus.eu/>)对 HHR 事件日主要天气模型进行客观分型,进一步分析各大气环流模型的特征。

1.2 大气环流分型

客观环流分型方法多样,其中斜旋转 T 模态主成分分析法(TPCA)对预定类型的再现、时间和空间稳定性,以及对预设参数的依赖性等方面表现较好(Huth et al,2008)。T 模态是按时间序列对网格点数据进行主成分分析,建立每个时间网格点的主成分类型,其中输入数据的列表示时间序列,行对应于网格点。TPCA 方法在欧洲地区的天气分型中得

到广泛应用和发展,该算法已经在“欧洲地区天气模型分类协调与应用”方案(COST733)中被发展为软件“cost733class-1.2”(Philipp et al, 2016;<http://cost733.geo.uniaugsburg.de>)。

针对 2011—2018 年 5—8 月的 HHR 事件日,进行大气环流分型的数据为 ERA5 再分析资料前一日 20 BT、当日 02、08、14 BT 共 4 个时次的平均场(与 HHR 事件统计时间一致),空间范围设为($24^{\circ} \sim 42^{\circ} \text{N}$, $108^{\circ} \sim 126^{\circ} \text{E}$),分型的数目设为 9 种环流型。本文对比了 500 hPa、850 hPa 的平均单要素(位势高度)和多要素(850 hPa 位势高度、风场 U 分量、风场 V 分量和温度平均场)分别作为 TPCA 分型的物理量场。结果表明利用 850 hPa 多要素(位势高度、风场 U 分量、风场 V 分量和温度平均场)的 TPCA 分型结果(如图 7 中 SP1、SP2 和 SP6 型)与 HHR 的主观天气分型结果(郝莹等,2012; Luo et al,2016)较为接近,能很好地区别所呈现的梅雨期和梅雨后期的重要天气系统(如:梅雨锋、低层气旋、副热带高压等)。故本文采用 850 hPa 多要素天气分型结果,讨论 HHR 事件的天气模型特征。

2 HHR 事件的时空分布特征

2011—2018 年安徽省暖季(5—8 月)平均降水呈现“南多北少,山区多平原少”的特点,主要降水中心位于皖南山区以及大别山区域(图 2a)。根据 1.1 节 HHR 定义,2011—2018 年暖季,安徽总共出现

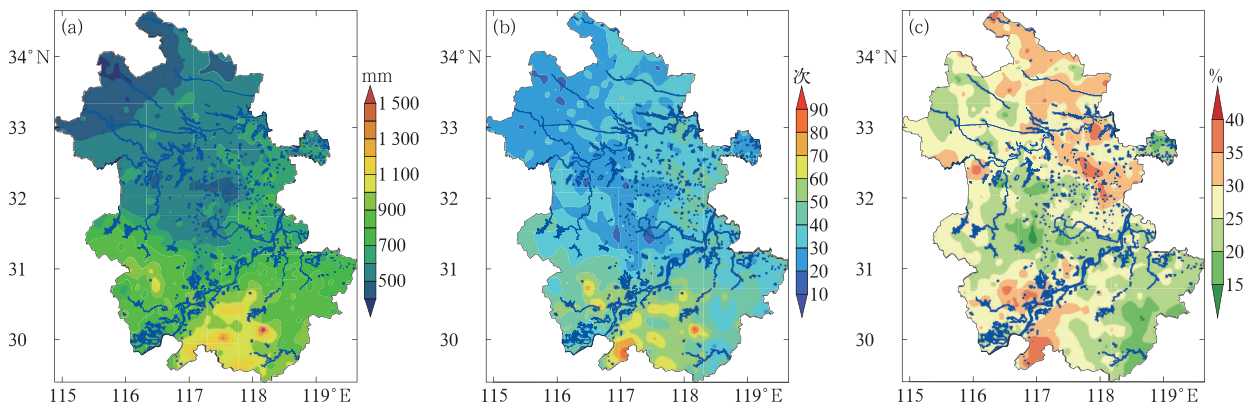


图 2 2011—2018 年 5—8 月安徽省(a)年均降水量,(b)HHR 事件 8 年累计总频次,(c)HHR 对暖季总雨量的贡献率

Fig. 2 Spatial distribution of (a) average annual rainfall, (b) total frequency of HHR events in eight years and (c) their relative contribution to the total rainfall during the warm season (May—August) in Anhui Province from 2011 to 2018

32946 个站次 HHR 事件。与暖季平均降水的空间分布相一致,皖南山区和大别山地区是 HHR 事件的高发区域(图 2b)。皖南山区的黄山风景区(30.1°N、118.1°E)是安徽省暖季降水的极值中心(图 2a),也是最频繁的 HHR 事件中心,所辖观测站 HHR 事件总频次均在 85 次以上(图 2b)。大别山地区 and 皖南山区西南部的 HHR 事件贡献了其暖季平均降水量的 30%~40%(图 2c),但黄山地区 HHR 事件对暖季总降水量的贡献相对较少(25%~30%,图 2c)。与江南地区相比,江淮之间东部和淮北地区东部 HHR 发生的频次较少(图 2b),但是贡献了该区域 30%以上的暖季降水(图 2c)。江淮之间中部和淮北地区西北部是 HHR 事件的低发区,部分站点 8 年暖季 HHR 事件的总频次不足 15 次(图 2b),对暖季总降水量的贡献也相对较少(<20%)。

入梅前期(图 3a),安徽共发生 HHR 事件 6051 个站次,日均 15.8 个站次,年平均雨量自南向北逐渐减小。梅雨期发生 HHR 事件 13147 个站次,日均 63.5 个站次,年平均降水量是入梅前期的 2 倍以上(图 3b)。大别山地区 and 皖南山区的 HHR 降水量分布与该地区暖季 HHR 事件发生频次和对暖季降水贡献的分布高度一致(图 3b,图 2b,2c),表明该地区的暖季 HHR 主要是在梅雨期产生的。出梅后期 HHR 事件共出现 13748 个站次,日均 35.6 个站次,发生频次明显低于梅雨期,高于入梅前期(图 3c)。

出梅后期 HHR 降水量的水平分布较为平均,仅淮北区东部有相对大值区,造成该区域相对较大的 HHR 降水贡献(图 2c)。

HHR 事件的雨强、持续时间和过程累计降水量也是社会关注的重点。分别按入梅前期、梅雨期、出梅后期和整个暖季(5—8 月)分别绘制 HHR 事件的 10 min 雨强、持续时间和过程雨量箱线图(图 4)。入梅前期和梅雨期 HHR 事件的 10 min 雨强差异不大,平均值分别为 $10.2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ 和 $10.7 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$;但是梅雨期 HHR 事件的持续时间明显增长,第 95 百分位值高达 260 min,平均持续时间为 104.4 min,分别是入梅前期和出梅后期的 1.08 倍和 1.33 倍。梅雨期更大的过程累计降水量,可能是由于梅雨期水汽供应充足,且梅雨锋稳定少动,有利于降水系统稳定维持所致(张小玲等,2004)。出梅后期,10 min 雨强明显增强,平均值为 $11.8 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$,第 95 百分位值为 $20.6 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$,而入梅前期和梅雨期分别是 $18.0 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ 和 $18.2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$;但是出梅后期 HHR 事件的维持时间大大缩短,中位数仅为 60 min,约为入梅前期和梅雨期中位数的 75%。较短的 HHR 持续事件导致出梅后期的过程累计降水量的平均值低于梅雨期间,略高于入梅前期,这可能与副热带高压(以下简称副高)控制下快速生消的午后中小尺度对流系统有关(翟菁等,2016)。

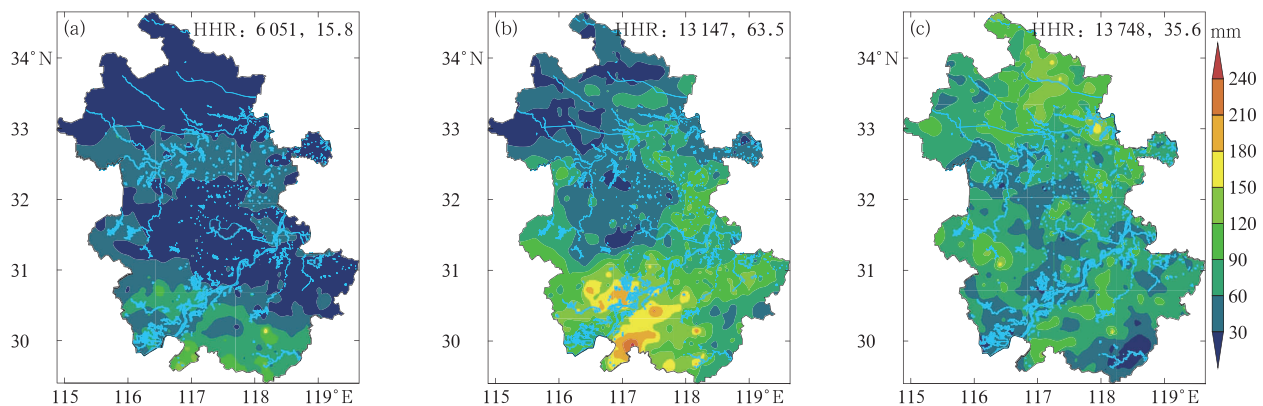


图 3 2011—2018 年 5—8 月(a)入梅前期,(b)梅雨期和(c)出梅后期 HHR 事件的年平均降水量
(右上角数字分别为 HHR 事件总站次和日均站次)

Fig. 3 Annual precipitation produced by the HHR events during the (a) pre-Meiyu, (b) Meiyu and (c) post-Meiyu periods in Anhui Province during May—August of 2011—2018
(Numbers of total stations and daily averaged stations recording the HHR events are labeled at the upper right corner of each panel)

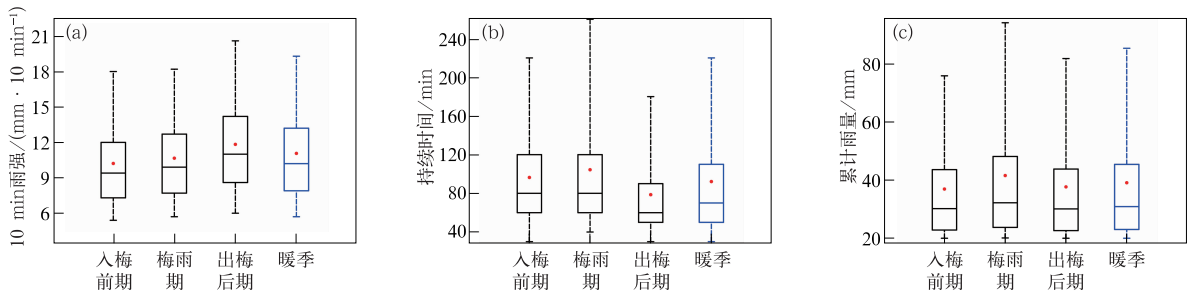


图 4 2011—2018 年入梅前期、梅雨期、出梅后期以及整个暖季的 HHR 事件(a)10 min 雨强, (b)持续时间和(c)过程累计雨量箱线图
(箱线图上下端横线分别代表第 95、5 百分位值,箱顶、箱底分别代表第 75、25 百分位值,中间横线为中位值,圆点代表平均值)

Fig. 4 Box plots of (a) 10 min rainfall intensity, (b) duration and (c) accumulated rainfall of HHR events during the pre-Meiyu, Meiyu, post-Meiyu periods and the whole warm season in Anhui Province from 2011 to 2018
(The short horizontal lines at the top and bottom of the box plot represent the 95th and 5th percentiles, respectively; the top and bottom of each box represent the 75th and 25th percentiles, respectively; the middle horizontal line represents the median, while the red dot represents the mean value)

表 2 入梅前期、梅雨期和出梅后期极端 HHR 事件*
在整个暖季的频次占比(单位:%)

Table 2 The percentage of extreme HHR events* during the pre-Meiyu, Meiyu and the post-Meiyu periods against the total HHR events during the whole warm season (unit: %)

	极端持续时间 频次占比	极端累计雨量 频次占比	极端 10 min 雨强频次占比
入梅前期	12.1	9.1	11.9
梅雨期	66.7	63.6	28.0
出梅后期	21.2	27.3	60.1

* : 极端 HHR 事件包括超过第 99 百分位的持续时间、累计雨量或 10 min 雨强。
* : Extreme HHR events are defined as the duration, accumulated rainfall or 10 min rainfall intensity exceeding the 99th percentile values during the whole warm season.

极端 HHR 事件具有很强的致灾性。这里采用百分位法(Zhai et al,2005;Wu et al,2019),确定第 99 百分位阈值,分别统计了入梅前期、梅雨期和出梅后期中极端持续时间(≥ 360 min)、极端过程雨量(≥ 138.0 mm)和极端 10 min 雨强(≥ 25.0 mm)的 HHR 事件在整个暖季的频次占比。如表 2 所示,梅雨期极端持续时间 HHR 事件在整个暖季的频次占比高达 66.7%,易造成极端 HHR 过程累计雨量(63.6%);极端 10 min 雨强 HHR 事件多出现在出梅后期(60.1%),此时大气不稳定能量较大,更易出现极端的短时降水率(图 4a)。

如图 5 所示,HHR 事件的 10 min 累计站次和累计雨量在入梅前期、梅雨期和出梅后期具有显著不同的日变化差异。入梅前期,HHR 事件的累计站次和累计雨量在 08—10 时呈现单峰结构,但是日变化幅度不大。梅雨期间,HHR 事件的累计站次

和累计雨量呈现双峰结构,峰值分别位于 03—07 时和 14—18 时;与下午相比,上午 HHR 事件的累计站次相当,但是造成更大的累计雨量,表明上午 HHR 的持续事件更长。这与相关研究(Yu et al, 2007;Zhou et al,2008;Luo et al,2013)结果是一致的,HHR 事件的频次及累计雨量的夜间峰值可能

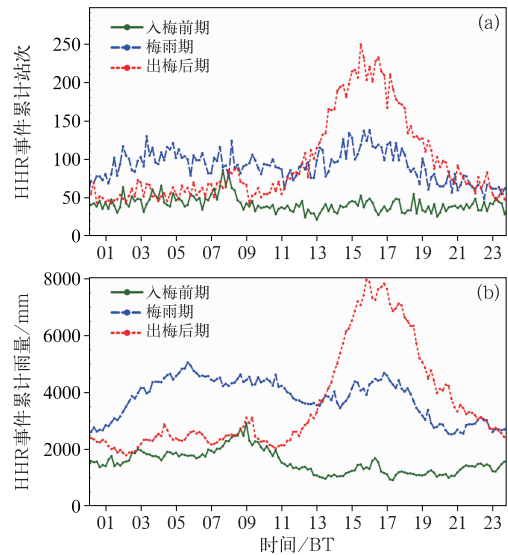


图 5 2011—2018 年 5—8 月入梅前期、梅雨期和出梅后期逐 10 min HHR 事件的(a)累计站次和(b)累计雨量的日变化

Fig. 5 Diurnal variations of (a) station numbers and (b) accumulated rainfall of 10 min HHR events during the pre-Meiyu, Meiyu and the post-Meiyu periods during May—August of 2011—2018

与边界层内非地转风的惯性振荡(Xue et al, 2018)有关。出梅后期,安徽多受副高控制,午后太阳辐射较强,地面受热不均匀,大气不稳定度高,易出现强对流性天气,HHR事件累计站次与累计雨量具有明显的午后单峰结构,峰值明显高于梅雨期和入梅前期。

为进一步分析HHR事件的日变化特征,分别统计了2011—2018年暖季HHR事件的不同持续时间的频次日变化、不同10 min雨强的频次日变化,以及旬累计频次的日变化(图6)。如图6a, 6b所示,HHR事件频次的最高峰值出现在下午15—16时(> 350次),持续时间多为1 h, 10 min雨强可达 $28 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ 。频次的次峰值出现在03时前后,持续时间相对较长(可达3.5 h),而10 min雨强相对较小(约 $5 \sim 20 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$)。如图6c所示,6月中旬之前,HHR事件频次没有明显的日变化。6月下旬至7月上旬(梅雨期),HHR事件频次存在双峰结构,即在黎明前和下午均有一个峰值;而7月中旬以后,HHR事件频次日变化呈现出明显的午后单峰特征,8月上旬尤为明显。以上表明,暖季HHR事件的凌晨峰值是由梅雨期贡献的,暖季HHR事件的下午峰值主要是由出梅后期贡献的。

3 HHR事件天气模型特征

梅雨期和出梅后期,HHR事件的累计降水、发生频次等特征存在较大的时空分布差异。梅雨期

HHR事件的持续时间长、过程雨量相对较多,出梅后期持续时间短而雨强大,这与不同阶段的大尺度环流背景和天气影响系统密切相关。本节采用TP-CA方法对入梅前期、梅雨期和出梅后期HHR事件日的大气环流进行客观分型,并进一步分析主要天气形态的大气环流特征。

按850 hPa多要素分型,共分为9种天气模型(图7),其中HHR发生频次最高的前3种依次是SP1、SP2、SP6。SP1型为伴有强西南气流的西北低槽型,占总HHR事件的27.2%;SP2型为低涡/切变型(或锋面型),占26.8%;SP6型为南方低压(或台风低压型),占14.9%;其余6种环流型的HHR事件日总占比仅为31.1%,分别为弱切变型(包括南方切变SP3型,9.0%;暖式切变SP4型,8.8%),东北—西南走向高空槽SP5型占6.3%,台风SP8、SP9型分别占5.6%、1.3%,高压/反气旋SP7型仅占0.2%。

分别统计各环流型在2011—2018年暖季安徽入梅前期、梅雨期和出梅后期出现HHR事件日的天数,SP1、SP2和SP6型的HHR事件日占比大,更容易出现HHR事件(图8)。入梅前期HHR事件总共出现6051个站次(图3右上角),不及梅雨期和出梅后期一半,且雨强相对较弱。故本文重点探讨梅雨期SP1、SP2型和出梅后期SP1、SP6型HHR事件日的降水量分布,分析(非)HHR事件日天气型特征,对比分析SP1型在梅雨期和出梅后期HHR事件日的天气型特征的异同。

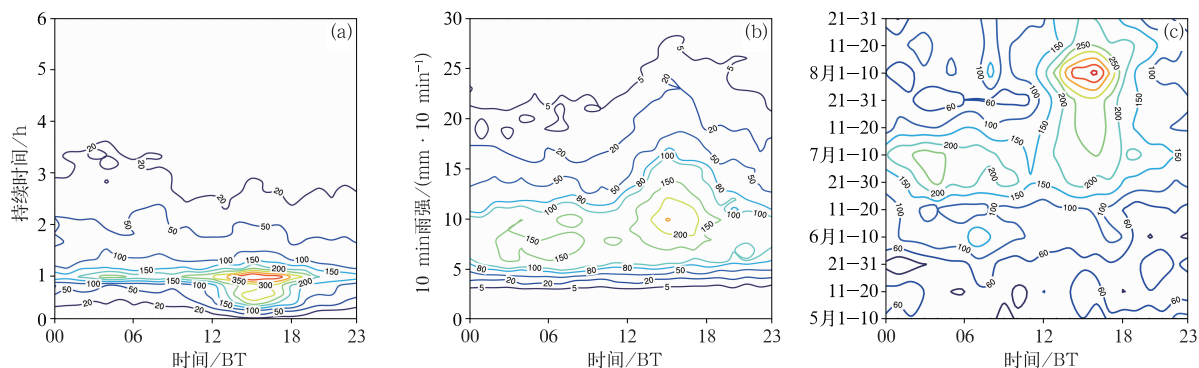


图6 2011—2018年暖季HHR事件(a)持续时间的逐时累计频次,

(b)10 min雨强的逐时累计频次和(c)旬累计频次的逐时累计频次的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of hourly frequencies of (a) duration, (b) 10 min rainfall intensity of HHR events and (c) numbers of HHR event in each decade during the warm season from 2011 to 2018

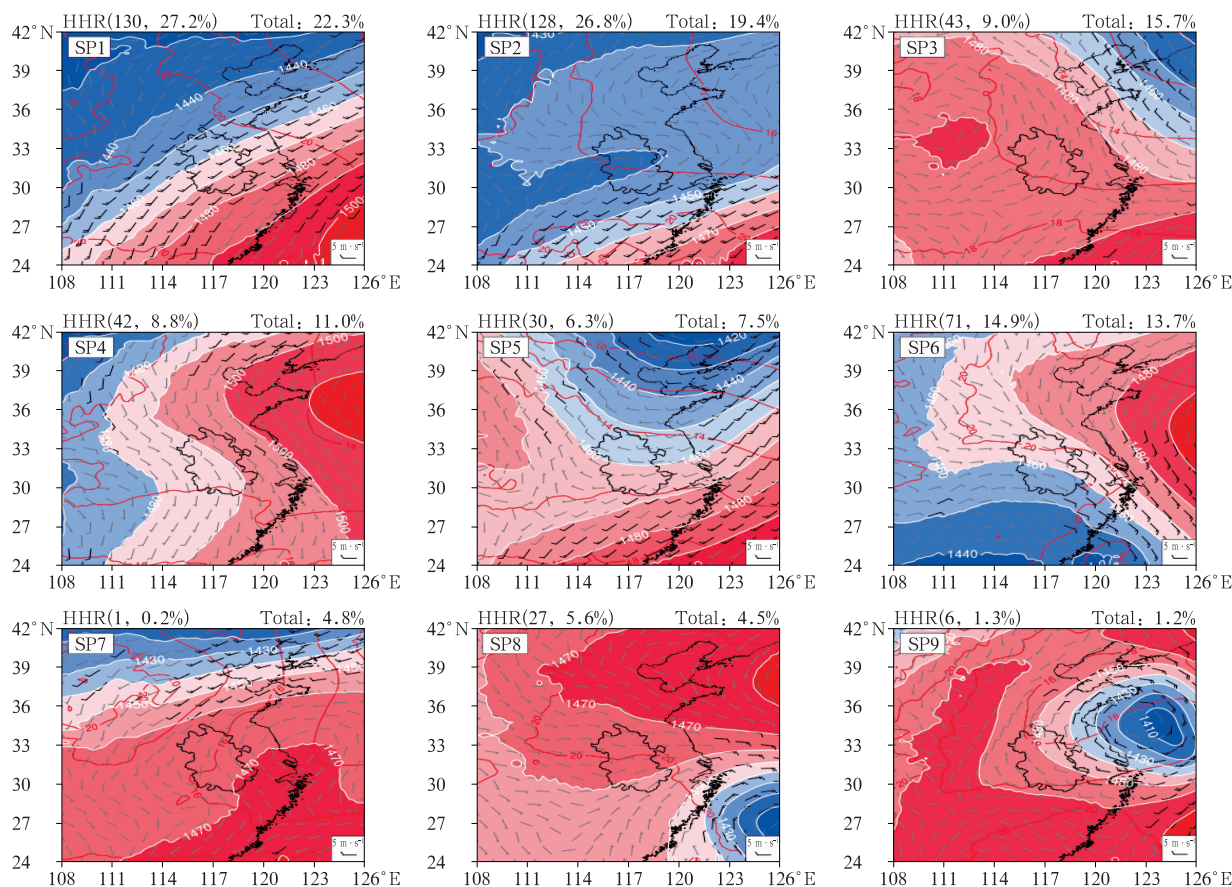


图 7 利用 2011—2018 年 5—8 月中国东部地区 850 hPa 位势高度(单位:gpm)、
风场(风羽)和温度(红实线,单位:℃)所建立的 9 种天气类型

(左上角显示该天气类型产生 HHR 事件日的天数及百分比,右上角为该天气类型出现的百分比)

Fig. 7 The established 9 synoptic weather types by the geopotential height of 850 hPa (unit: gpm),
wind field (barb) and temperature (red solid line, unit: °C)
over eastern China during May—August of 2011—2018

(The upper left of each panel shows the number of days and percentage of HHR events produced by the present synoptic
weather type; the upper right of each panel shows the percentage of occurrences of each synoptic weather type)

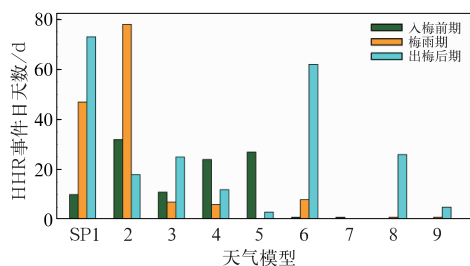


图 8 2011—2018 年 5—8 月入梅前期、
梅雨期和出梅后期中 9 种天气模型
的 HHR 事件日天数

Fig. 8 Numbers of HHR event days in the
nine synoptic types during the pre-Meiyu,
Meiyu and the post-Meiyu periods
during May—August of 2011—2018

3.1 主要天气型的降水特征

梅雨期间,在 SP1 型影响下,安徽省东部及大别山区、皖南山区西南部 HHR 事件日站点平均降水量约为 20 mm(图 9a),其他地区降水偏少。SP2 型降水空间分布模态与 SP1 型明显不同,降水量更大,32°N 以南地区平均降水量均超过 20 mm,尤其是大别山至皖南山区一带站点 HHR 事件日平均降水量最大达 40 mm 左右(图 9b)。比较梅雨期 HHR 事件年均降水量(图 3b),SP2 型是安徽省梅雨期 HHR 事件日降水量的主要贡献者,SP1 型次之。

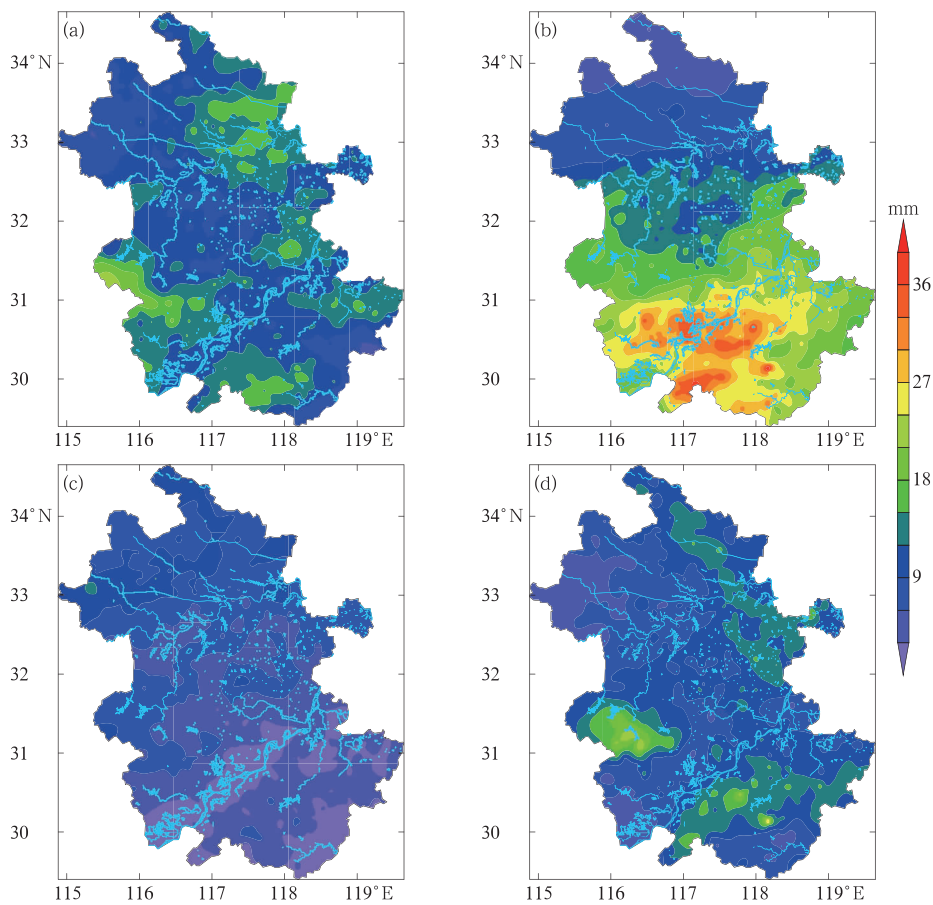


图 9 2011—2018 年 5—8 月梅雨期(a)SP1 型与(b)SP2 型, 出梅后期(c)SP1 型与(d)SP6 型天气模型下

HHR 事件日站点日平均降水量(前一日 20—20 时, 填色)

Fig. 9 Daily averaged precipitation (from 20:00 BT on the previous day to 20:00 BT on the very, colored) of HHR events under (a) SP1 and (b) SP2 types during the Mei-yu period, under (c) SP1 and (d) SP6 types during the post-Mei-yu period during May—August of 2011—2018

与梅雨期相比,出梅后期日降水量相对较少,主要是由于 HHR 事件持续时间短,日均站次较梅雨期少,局地性相对明显。同样是 SP1 型,出梅后期 HHR 事件日降水分布模态与梅雨期差别较大,呈现总量偏少、北多南少的特征(图 9c)。出梅后期 SP6 型皖南山区、大别山区 HHR 事件降水明显偏多,其次是安徽东北部地区(图 9d)。相比出梅后期 HHR 事件暖季年均降水量(图 3c),SP6 型是出梅后期 HHR 事件日降水的主要贡献者,SP1 型次之。

3.2 主要天气型环流特征

分别统计 SP1、SP2 和 SP6 型梅雨期和出梅后期 HHR 事件逐时频次(图略),结果显示与图 5 基

本一致。梅雨期 HHR 事件在凌晨频次高、累计雨量较大;而出梅后期 HHR 事件仅在午后有一个高频次中心。因此,以下分析采用梅雨期 02 时、出梅后期 14 时的 ERA5 再分析资料,探讨梅雨期 SP1、SP2 天气模型,出梅后期 SP1、SP6 天气模型及主要天气系统特征。

3.2.1 梅雨期天气模型

图 10 梅雨期 SP1 型 HHR 事件日,在对流层低层(图 10c)和边界层(图 10a)形成低空急流(风速 $> 12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),西南低空急流向安徽地区输送大量暖湿空气,形成暖湿舌(假相当位温 $> 340 \text{ K}$),整层水汽通量超过 $550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,可降水量超过 50 mm 。西南低空急流在安徽北部风速明显减弱,

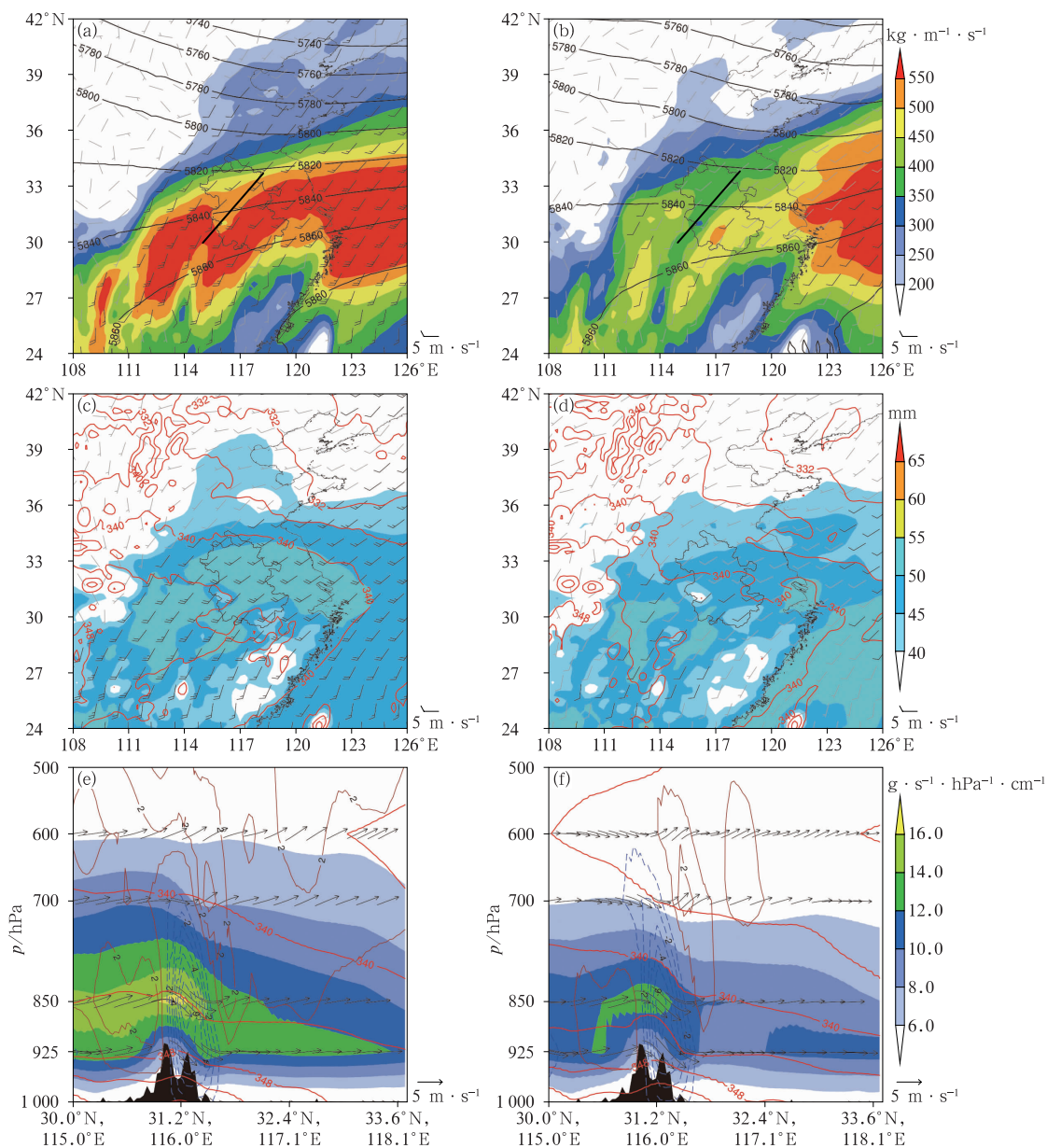


图 10 梅雨期 SP1 型(a,c)HHR 事件日与(b,d)非 HHR 事件日在 02 时的大气水平平均环流场
(a,b)500 hPa 位势高度(等值线,gpm)、925 hPa 风场(风羽,加粗表示风速大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和整层水汽通量积分(填色),
(c,d)850 hPa 假相当位温(等值线,单位:K)、风场(风羽)和整层可降水量(填色),
(e,f)图 10a,10b 中西南—东北走向黑色粗直线位置的垂直剖面
(黑色箭头:平行于剖面的风;水汽通量:填色;棕色和蓝色虚线:上升,下沉运动,
单位: $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;红色线:假相当位温,单位:K;黑色阴影:地形)

Fig. 10 The mean atmospheric circulations of SP1 type in (a, c) HHR event days, (b, d) non HHR event days at 02:00 BT during the Meiyu period (a, b) 500 hPa geopotential height (contour line, unit: gpm), 925 hPa wind (barb, a thick barb: larger than $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and vertical integrated water vapor flux (colored); (c, d) 850 hPa pseudo equivalent potential temperature (contour line, unit: K), wind field (barb), and total precipitable water (unit: mm); (e, f) vertical cross sections along the thick black lines in Figs. 10a, 10b (black arrow: wind parallel to cross-section; colored: water vapor flux; brown/blue dashed lines: ascending/descending motions, unit: $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; red solid line: the pseudo equivalent potential temperature, unit: K; black shadow: terrain)

在淮河以南形成风速辐合,有利于梅雨期 SP1 型 HHR 的形成。两条较明显的西南—东北向水汽输送通道(图 10a,10c)分别位于安徽大别山西北部 and 长江一线,与梅雨期 SP1 型 HHR 降水中心一致

(图 9a)。过大别山作东北—西南走向的垂直剖面(图 10e),受到大别山的地形抬升作用,西南低空急流(925~850 hPa)在山前有上升运动($> 2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),配合充沛的水汽,有利于在大别山区迎风坡形

成 HHR 强降水中心(图 9a)。西南气流越过大别山后继续向安徽北部平原输送暖湿空气,造成低层暖湿的不稳定层结,结合上升运动($>1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)有利于在淮北地区形成 HHR 降水。与 HHR 事件日的梅雨期 SP1 型相比,非 HHR 事件日 SP1 型的 500 hPa 槽不明显、副高显著东退,西南低层气流(925~850 hPa)风速明显较弱($\leq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。这导致安徽境内风速辐合较弱,暖湿空气输送不足,整层

水汽通量小于 $450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,可降水量不足 50 mm,不利于降水的产生。垂直剖面上(图 10f),大别山迎风坡和北部平原的上升运动和水汽通量在强度和范围上都明显减弱,不利安徽 HHR 的产生。

梅雨期 SP2 型与 SP1 型的天气背景差异较大。与 SP1 型相比,HHR 事件日的 SP2 型在对流层低层和边界层内存在一条准东西向的切变线(图 11a,棕色粗虚线标识),切变线南侧为强西南气流,北侧

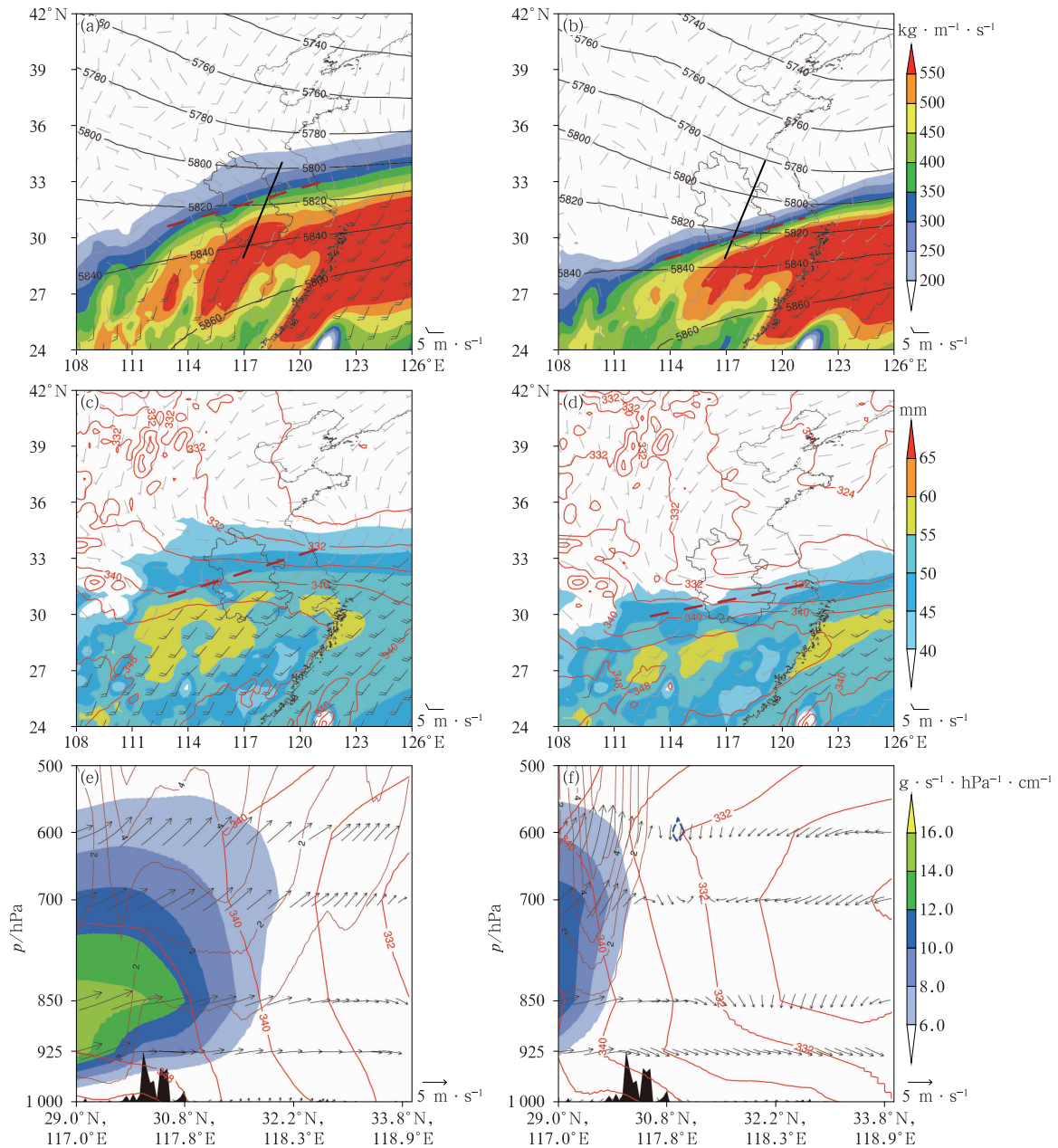


图 11 同图 10,但为梅雨期 SP2 型

(图 11c, 11d 中棕色粗虚线表示切变线)

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for the SP2 type during the Meiyu period

(in Figs. 11c, 11d, brown dashed line: shear line)

为较弱的东南气流。与切变线对应,850 hPa 假相当位温在江淮之间形成等值线密集区,有显著的梯度存在,具有较明显的江淮梅雨锋特征(图 11c)。切变线南侧水汽通量高达 $550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,安徽中部至南部地区可降水量达到 $50 \sim 60 \text{ mm}$ 。与 SP1 型相比,尽管 SP2 型 HHR 事件日的低层西南气流稍弱(约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),但是 SP2 型可降水量更大,水汽输送集中于淮河以南地区,尤其是皖南山区,导致 SP2 型更强的 HHR 集中在淮河以南地区(图 9b)。经过皖南山区的垂直剖面(图 11e)表明,SP2 型西南气流在皖南山区的迎风坡存在较明显上升运动($>2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),切变线以南对流中层的上升运动($>1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),有利于淮河以南 HHR 的产生。与梅雨期 HHR 事件日 SP2 型相比,非 HHR 事件日(图 11b,11d)安徽处于 500 hPa 高空槽后,低层切变线位于安徽南部边界,切变线以南的低层西南气流显著减弱($\leq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),整层水汽通量基本小于 $350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。安徽位于低层切变线北侧,受

到低空较弱的($\leq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)东南或偏东气流影响,整层大气可降水量不足 45 mm 。安徽受到低层反气旋的控制(图 11b,11d),切变线以北受较弱的低层下沉运动影响(图 11f,约 30°N 以北,600 hPa 以下),不利于 HHR 事件的发生发展。

3.2.2 出梅后期天气模型

与梅雨期 SP1 型对比,出梅后期 HHR 事件日 SP1 型的副高主体北抬,西南低层气流明显减弱($<10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;图 12c)。安徽地区出梅后期整层水汽通量减小,然而可降水量超过 50 mm ,淮北地区达到 $55 \sim 60 \text{ mm}$,同时温度上升,SP1 型在 850 hPa 假相当位温增大($>344 \text{ K}$;图 12c),可见安徽尤其淮北地区暖湿条件较好。从 850 hPa 和 925 hPa 风场看,风速辐合区也位于安徽淮北地区(图 12a,12c),利于安徽北部地区 HHR 事件的发生(图 9c)。在非 HHR 事件日,副高主体相对偏西偏北,5880 gpm 线控制安徽大部分地区,中低层风场辐合区向北移出安徽(图 12b,12d),安徽境内大部分地区的水汽

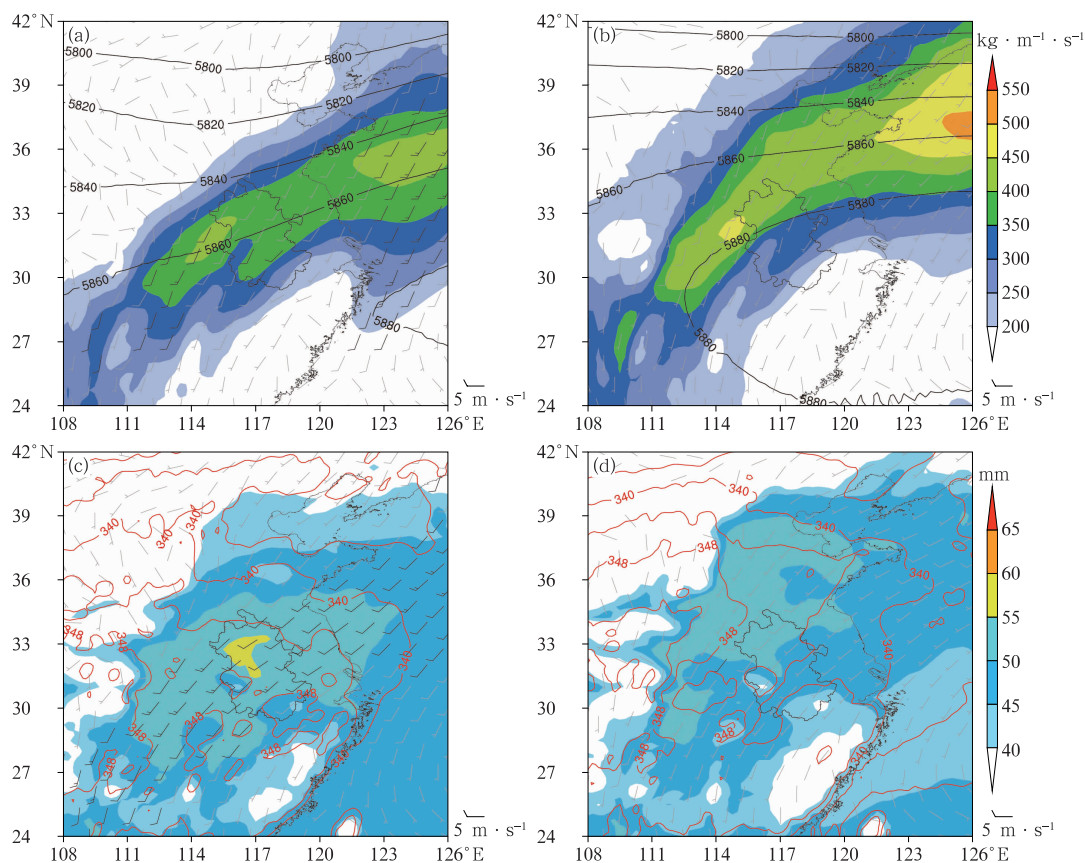


图 12 同图 10a~10d,但为出梅后期 14 时的大气水平平均环流
Fig. 12 Same as Fig. 10a—10d, but for the mean atmospheric circulations
SP1 type at 14:00 BT during the post-Meiyu periods

输送和整层可降水量较 HHR 事件日明显偏小,不利于 HHR 事件的发生。

出梅后期 SP6 型大气环流和影响系统较 SP1 型、SP2 型明显不同,主要特点表现为华南地区有低压存在或台风登陆,副高较出梅后期 SP1 型更偏北,位置偏东。在 HHR 事件日,SP6 型南方低压或台风低压沿副高西南侧引导气流向北偏西方向移动,低压外围的东南气流向安徽地区输送水汽(图 13a),整层可降水量均较大,安徽中南部超过

60 mm(图 13c)。低压外围东北气流受大别山地形抬升影响,在大别山东北侧迎风坡有较强的上升运动(图 13e),造成大别山地区形成 HHR 事件降雨中心(图 9d)。在非 HHR 事件日(图 13b, 13d, 13f),副高强度更强,西端脊线位置偏西,到达安徽东部。此时,安徽受副高控制,由于南方低压偏南,整层水汽通量和可降水量均偏小,不利于安徽境内发生 HHR 事件。

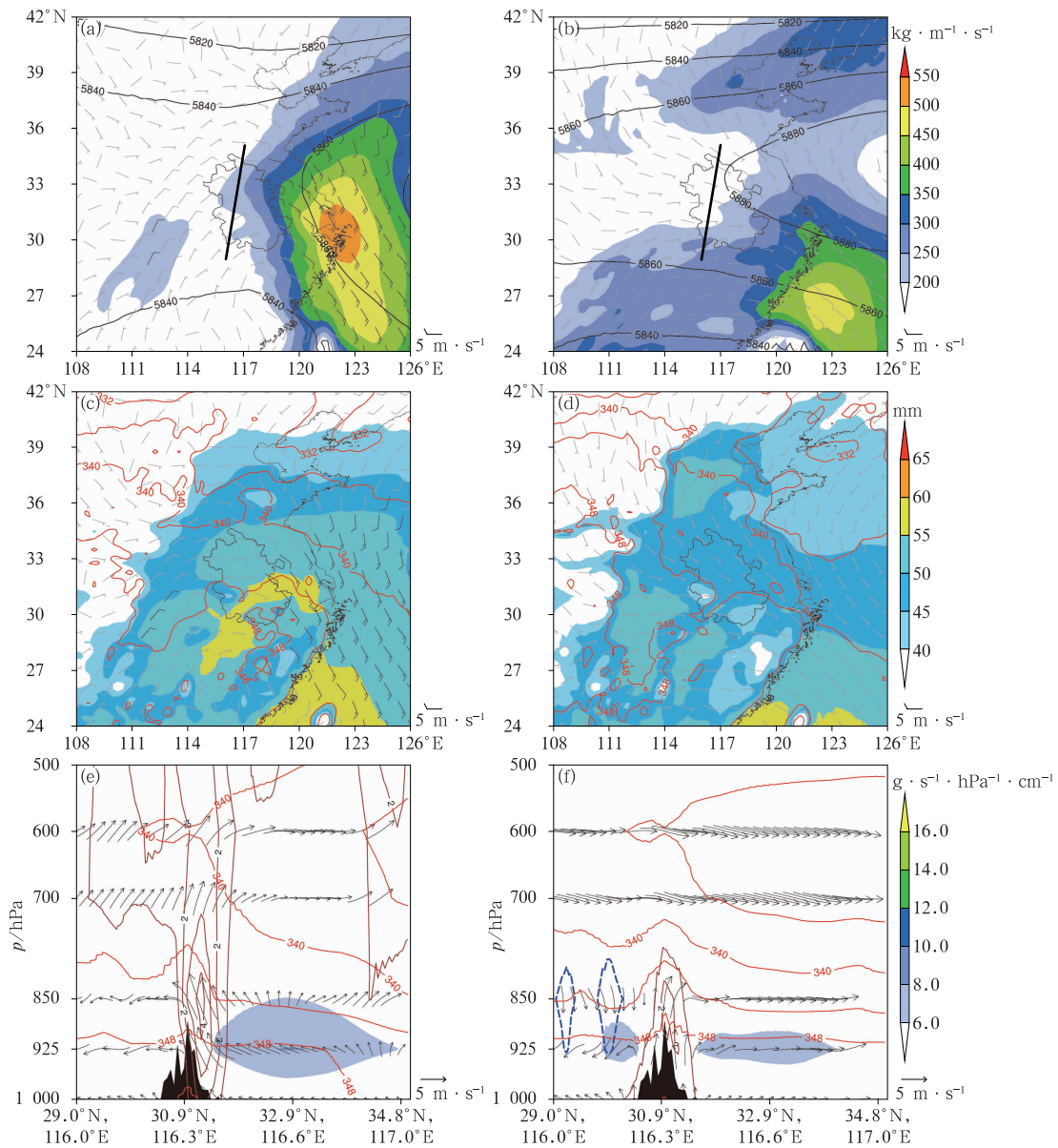


图 13 同图 10, 但为出梅后期 SP6 型 14 时

Fig. 13 Same as Fig. 10, but for the SP6 type at 14:00 BT during the post-Meiyu periods

4 结论与讨论

本文采用安徽省 2011—2018 年暖季(5—8 月)逐 10 min 地面稠密降水资料,统计分析了 HHR 事件时空特征。利用同时期的 ERA5 再分析资料,通过斜旋转 T 模式主成分客观分析法,探讨了安徽省暖季 HHR 事件的主要大气环流模型及影响天气系统特征。结论如下:

(1) 安徽大别山、皖南山区西南部及两者过渡地带是 HHR 事件的易发区域,皖南山区、黄山地区是安徽最频繁的 HHR 事件中心。安徽省西南、东北地区 HHR 事件对暖季总降水的贡献相对明显,达 30% 以上。江淮之间中部和淮北地区西北部,是 HHR 事件的低发中心,对暖季总降水量的贡献也相对较少。

(2) 安徽省 HHR 事件日在入梅前期频次低、雨强较弱;梅雨期持续时间长、累计雨量大;出梅后期雨强较大、持续时间短。按第 99 百分位阈值,60% 以上的极端持续时间(≥ 360 min)和极端累计雨量(≥ 138 mm)HHR 事件出现在梅雨期,而 60% 以上的极端 10 min 雨强(≥ 25.0 mm $\cdot 10$ min $^{-1}$)HHR 事件出现在出梅后期。

(3) 入梅前期,HHR 事件的累计站次和累计雨量在 08—10 时呈现单峰结构,日变化振幅不大。而梅雨期 HHR 事件峰值分别位于 03—07 时和 14—18 时,呈双峰结构,其中凌晨 HHR 事件累计雨量大,持续时间长,是暖季凌晨 HHR 事件的主要贡献者。出梅后期,HHR 事件具有明显的午后单峰特征,是暖季午后 HHR 事件的主要贡献者。

(4) 安徽省梅雨期 HHR 事件主要天气模型有西北低槽型(SP1 型)和低涡/切变型或锋面型(SP2 型)。在 SP1 型环流背景下,副高西伸北抬,对流层低层和边界层形成低空急流,在安徽大别山西北部和长江一带形成两个西南—东北向水汽输送通道,并在淮河以南尤其在山区迎风坡形成较强风速辐合,导致 HHR 频发。在 SP2 型环流背景下,南北气流在江淮之间对峙并形成切变线或锋区,暖区一侧尤其在皖南山区迎风坡有较强的水汽辐合和较大的整层可降水量,安徽省西南地区出现较强的 HHR 事件。

(5) 出梅后期主要天气模型为南方低压或台风低压型(SP6 型)和西北低槽型(SP1 型)。在 SP6 型

天气背景下,副高位置偏北,南方低压或台风低压沿副高西南侧引导气流向北偏西方向移动,低压外围东北气流受地形抬升影响,在大别山和皖南山区有较明显的 HHR 事件发生。而在 SP1 型天气背景下,副高主体偏北,水汽输送带和辐合区位于淮河流域及其以北地区,导致该模型下安徽 HHR 事件降水呈现北多南少的特点。

参考文献

- 丁仁海,王龙学,2009. 九华山暴雨地形增幅作用的观测分析[J]. 暴雨灾害,28(4):377-381. Ding R H, Wang L X, 2009. Observational analysis of topographical effect on heavy rainfall in Jiuhua Mountain[J]. Torr Rain Dis, 28(4):377-381(in Chinese).
- 范元月,罗剑琴,张家国,等,2020. 宜昌极端短时强降雨中尺度对流系统特征分析[J]. 气象,46(6):776-791. Fan Y Y, Luo J Q, Zhang J G, et al, 2020. Characteristics analysis of mesoscale convective system causing the extreme flash rain in Yichang[J]. Meteor Mon, 46(6):776-791(in Chinese).
- 方德贤,董新宁,邓承之,等,2020. 2008—2016 年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学,44(2):327-340. Fang D X, Dong X N, Deng C Z, et al, 2020. Temporal and spatial distribution of precipitation in Chongqing during 2008—2016[J]. Chinese J Atmos Sci, 44(2):327-340(in Chinese).
- 付超,湛芸,朱克云,等,2019. 2010—2016 年江西省暖季短时强降雨特征分析[J]. 气象,45(9):1238-1247. Fu C, Chen Y, Zhu K Y, et al, 2019. Characteristics of flash heavy rain in Jiangxi warm season from 2010 to 2016[J]. Meteor Mon, 45(9):1238-1247(in Chinese).
- 郝莹,姚叶青,郑媛媛,等,2012. 短时强降雨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).
- 侯淑梅,孙敬文,孙鹏程,等,2020. 基于加密自动气象观测站和国家气象观测站的山东省极端短时强降雨时空分布特征的对比分析[J]. 气象,46(2):200-211. Hou S M, Sun J W, Sun P C, et al, 2020. Comparative analysis of spatio-temporal distribution characteristics of extreme short-time severe precipitation in Shandong based on the dense observations from automatic weather stations and national stations[J]. Meteor Mon, 46(2):200-211(in Chinese).
- 黄勇,张红,冯妍,2012. 近 38 年安徽省夏季降水日数和强度的分布与变化特征[J]. 长江流域资源与环境,21(2):157-167. Huang Y, Zhang H, Feng Y, 2012. Characteristics of precipitation days and intensity of Anhui province in summer during recent 38 years[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 21(2):157-167(in Chinese).
- 刘裕禄,杜其成,黄勇,2017. 黄山地区短时强降雨的地形增幅机制[J]. 气象,43(2):181-188. Liu Y L, Du Q C, Huang Y, 2017. The topographical enhancement mechanism of short-time heavy

- rainfall in Huangshan Mountain[J]. Meteor Mon, 43(2):181-188(in Chinese).
- 任芝花,赵平,张强,等,2010.适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法[J].气象,36(7):123-132. Ren Z H, Zhao P, Zhang Q, et al, 2010. Quality control procedure for hourly precipitation data from automatic weather stations in China[J]. Meteor Mon, 36(7):123-132(in Chinese).
- 苏锦兰,张万诚,宋金梅,等,2021.云南小时降水的时空分布变化研究[J].气象,47(2):133-142. Su J L, Zhang W C, Song J M, et al, 2021. Study on spatio-temporal distribution of hourly precipitation in Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 47(2):133-142(in Chinese).
- 陶士伟,仲跻芹,徐枝芳,等,2009.地面自动站资料质量控制方案及应用[J].高原气象,28(5):1202-1209. Tao S W, Zhong J Q, Xu Z F, et al, 2009. Quality control schemes and its application to automatic surface weather observation system[J]. Plateau Meteor, 28(5):1202-1209(in Chinese).
- 陶诗言,张晓玲,张顺利,2004.长江流域梅雨锋暴雨灾害研究[M].北京:气象出版社:30-33. Tao S Y, Zhang X L, Zhang S L, 2004. Study on Rainstorm Disaster of Meiyu Publishing House Front in the Yangtze River Basin[M]. Beijing: China Meteorological Press:30-33(in Chinese).
- 童金,魏凌翔,叶金印,等,2017.安徽省不同地形条件下汛期短时强降水时空分布特征[J].气象与环境学报,33(6):42-48. Tong J, Wei L X, Ye J Y, et al, 2017. Spatial-temporal distribution characteristics of short-time strong precipitation in the flood season under different terrains over Anhui Province[J]. J Meteor Environ, 33(6):42-48(in Chinese).
- 王珏,张家国,吴涛,等,2019.湖北省极端短时强降水 MCS 类型及特征分析[J].气象,45(7):931-944. Wang J, Zhang J G, Wu T, et al, 2019. MCS classification and characteristic analyses of extreme short-time severe rainfall in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 45(7):931-944(in Chinese).
- 吴进,李琛,于波,等,2018.两类短时强降水天气边界层气象要素变化特征[J].气象,44(7):902-910. Wu J, Li C, Yu B, et al, 2018. Study on the variation characteristics of meteorological elements in the boundary layer of two types of short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 44(7):902-910(in Chinese).
- 谢五三,吴蓉,宋阿伟,2017.1961—2015年安徽省小时降水变化特征与极值分布[J].灾害学,32(3):45-50. Xie W S, Wu R, Song A W, 2017. Variation characteristics and extreme value distribution of hourly precipitation of Anhui Province from 1961 to 2015[J]. J Catastrophol, 32(3):45-50(in Chinese).
- 杨玮,程智,2015.近53年江淮流域梅汛期极端降水变化特征[J].气象,41(9):1126-1133. Yang W, Cheng Z, 2015. Variation characteristics of extreme precipitation during Meiyu flood period over Yangtze-Huaihe Basin in recent 53 years[J]. Meteor Mon, 41(9):1126-1133(in Chinese).
- 翟菁,刘慧娟,黄勇,等,2016.安徽省热对流短时强降水的判别与特征分析[J].长江流域资源与环境,25(5):837-844. Zhai J, Liu H J, Huang Y, et al, 2016. The discrimination and analysis of thermal convective short-duration heavy precipitation in the Yangtze-Huaihe River Basin[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 25(5):837-844(in Chinese).
- 战云健,鞠晓慧,范邵华,等,2021.1965—2019年中国夏季分钟降水空间分布与长期趋势分析[J].气象学报,79(4):598-611. Zhan Y J, Ju X H, Fan S H, et al, 2021. An analysis of minute summer precipitation in China during 1965—2019[J]. Acta Meteor Sin, 79(4):598-611(in Chinese).
- 张芳华,陈涛,张芳,等,2020.2020年6—7月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J].气象,46(11):1405-1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F, et al, 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June—July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11):1405-1414(in Chinese).
- 张小玲,陶诗言,张顺利,2004.梅雨锋上的三类暴雨[J].大气科学,28(2):187-205. Zhang X L, Tao S Y, Zhang S L, 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front[J]. Chinese J Atmos Sci, 28(2):187-205(in Chinese).
- 朱红芳,王东勇,娄珊珊,等,2015.地形对台风“海葵”降水增幅影响的研究[J].暴雨灾害,34(2):160-167. Zhu H F, Wang D Y, Lou S S, et al, 2015. Numerical test of topography effect on rainfall amplification associated with Typhoon Haikui[J]. Torr Rain Dis, 34(2):160-167(in Chinese).
- Cahynová M, Huth R, 2010. Circulation vs. climatic changes over the Czech Republic: a comprehensive study based on the COST733 database of atmospheric circulation classifications [J]. Phys Chem Earth, 35(9-12):422-428.
- Cavazos T, 1999. Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in northeastern Mexico and southeastern Texas[J]. J Climate, 12(5):1506-1523.
- 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.
- Gevorgyan A, 2013. Main types of synoptic processes and circulation types generating heavy precipitation events in Armenia[J]. Meteor Atmos Phys, 122(1-2):91-102.
- He Z W, Zhang Q H, Bai L Q, et al, 2017. Characteristics of mesoscale convective systems in central East China and their reliance on atmospheric circulation patterns[J]. Int J Climatol, 37(7):3276-3290.
- Huth R, 1993. An example of using obliquely rotated principal components to detect circulation types over Europe[J]. Meteor Z, 2(6):285-293.
- Huth R, 1996a. An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods[J]. Int J Climatol, 16(8):893-922.
- Huth R, 1996b. Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component analysis[J]. Meteor Atmos Phys, 59(3-4):217-233.
- Huth R, 2000. A circulation classification scheme applicable in GCM studies[J]. Theor Appl Climatol, 67(1):1-18.

- Huth R, Beck C, Philipp A, et al, 2008. Classifications of atmospheric circulation patterns[J]. *Ann NY Acad Sci*, 1146(1): 105-152.
- Iwasaki H, 2012. Recent positive trend in heavy rainfall in eastern Japan and its relation with variations in atmospheric moisture[J]. *Int J Climatol*, 32(3): 364-374.
- Iwasaki H, 2015. Increasing trends in heavy rain during the warm season in eastern Japan and its relation to moisture variation and topographic convergence[J]. *Int J Climatol*, 35(8): 2154-2163.
- Li H Q, Cui X P, Zhang D L, 2017. A statistical analysis of hourly heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region during the warm seasons of 2007—2014[J]. *Int J Climatol*, 37(11): 4027-4042.
- Luo Y L, Wang H, Zhang R H, et al, 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over South China and the Yangtze and Huai River Basin[J]. *J Climate*, 26(1): 110-132.
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al, 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. *J Climate*, 29(24): 8703-8719.
- Philipp A, Beck C, Huth R, et al, 2016. Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software[J]. *Int J Climatol*, 36(7): 2673-2691.
- Plaut G, Simonnet E, 2001. Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe[J]. *Climate Res*, 17(3): 303-324.
- Wu M W, Luo Y L, Chen F, et al, 2019. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 58(8): 1799-1819.
- Xue M, Luo X, Zhu K F, et al, 2018. The controlling role of boundary layer inertial oscillations in Meiyu frontal precipitation and its diurnal cycles over China[J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(10): 5090-5115.
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al, 2007. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. *Geophys Res Lett*, 34(1): L01704.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al, 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. *J Climate*, 18(7): 1096-1108.
- 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.
- Zhang J P, Zhu T, Zhang Q H, et al, 2012. The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surroundings[J]. *Atmos Chem Phys*, 12(11): 5031-5053.
- Zhang X W, Chen D L, Yao T D, 2018. Evaluation of circulation-type classifications with respect to temperature and precipitation variations in the central and eastern Tibetan Plateau[J]. *Int J Climatol*, 38(13): 4938-4949.
- Zhao Y Y, Zhang Q H, Du Y, et al, 2013. Objective analysis of circulation extremes during the 21 July 2012 torrential rain in Beijing[J]. *Acta Meteor Sin*, 27(5): 626-635.
- 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]. *J Climate*, 21(16): 3997-4010.

(本文责编:俞卫平)