

赵海军,曹洁,潘玲,等.2007—2019年山东省短时强降水时空分布特征[J].海洋气象学报,2021,41(2):149-155.
ZHAO Haijun, CAO Jie, PAN Ling, et al. Spatio-temporal distribution of short-time severe precipitation in Shandong from 2007 to 2019[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(2): 149-155. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.02.015. (in Chinese)

2007—2019年山东省短时强降水时空分布特征

赵海军^{1,2}, 曹洁³, 潘玲⁴, 王庆华², 曹张驰², 毛国荣²

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.临沂市气象局,山东 临沂 276004; 3.中国科学院大气物理研究所,北京 100029; 4.日照市气象局,山东 日照 276800)

摘要: 选用山东123个国家级地面气象观测站2007—2019年地面逐小时降水资料,分析短时强降水分布特征,主要结论如下:1)其间共有695个短时强降水日、3337个短时强降水时次和6257个短时强降水样本,基于排序法确定山东省极端短时强降水阈值为 $71.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,鲁东南地区阈值最高,鲁中地区阈值最低。2)各站年均发生3.9次短时强降水天气,鲁东南地区短时强降水和极端短时强降水发生频次最多,半岛地区短时强降水发生最少,鲁西南地区极端短时强降水发生最少。3)短时强降水集中出现在6月中旬至8月下旬,又以8月上旬最多。4)日变化显著,呈现典型“双峰”特征,主要集中在午后至傍晚,其次是后半夜;6月中旬至8月下旬傍晚和后半夜发生短时强降水的可能性大,需重点关注。

关键词: 短时强降水;分位数;极端性;日变化

中图分类号: P466 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)02-0149-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.02.015

Spatio-temporal distribution of short-time severe precipitation in Shandong from 2007 to 2019

ZHAO Haijun^{1,2}, CAO Jie³, PAN Ling⁴, WANG Qinghua², CAO Zhangchi², MAO Guorong²

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031; 2. Linyi Meteorological Bureau, Linyi 276004; 3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 4. Rizhao Meteorological Bureau, Rizhao 276800, China)

Abstract Using the hourly precipitation data of national meteorological stations in Shandong from 2007 to 2019, the spatio-temporal distribution characteristics of short-time severe precipitation are analyzed. The results are as follows. There are 695 short-time severe precipitation days, 3337 short-time severe precipitation hours and 6257 short-time severe precipitation samples. Based on the sorting method, the extreme short-time severe precipitation threshold is $71.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. The highest threshold is in southeastern Shandong and the lowest is in central Shandong. The average annual occurrence times of short-time severe precipitation are 3.9. The maximum frequency of short-time severe precipitation is in southeastern Shandong, the minimum is in Shandong peninsula. The maximum frequency of extreme short-time severe precipitation is in southeastern Shandong, the minimum is in southwestern Shandong.

收稿日期:2021-02-01; 修订日期:2021-03-02

基金项目:国家自然科学基金重点项目(91937301);山东省气象局重点科研项目(2017sdqzx09);山东省气象局预报员专项(SDYBY2018-13)

第一作者:赵海军,男,高级工程师,主要从事灾害性天气研究,weazhj@163.com。

通信作者:曹洁,女,副研究员,主要从事中尺度动力学和灾害性天气研究,iamcaojie@126.com。

Short-time severe precipitation occurs mainly from mid-June to late August, and the most is in early August. The diurnal variation has double peaks, precipitation concentrate in the afternoon to evening, and then in late night. It is necessary to pay attention to the possibility of short-time severe precipitation around the evening and late night from mid-June to late August.

Key words short-time severe precipitation; quantile; extreme; diurnal variation

引言

短时强降水天气具有生命史短、尺度小、突发性强、天气变化剧烈等特征,雨强较大或持续时间较长则可能导致严重内涝,甚至引发山体滑坡、泥石流、山洪等次生灾害。近年来,随着气候变暖,极端降水事件频发,山东多次发生造成严重影响的短时强降水天气,引起社会广泛关注。如2007年7月18日,鲁中和鲁西北地区出现暴雨,济南17:20—18:20降水量达到151.0 mm;2009年8月17—18日,鲁南地区出现暴雨,费县18日01:00—02:00降水量为137.2 mm,00:00—03:00降水量为242.2 mm;2011年7月25日半岛南部地区出现强降水,乳山19:00—20:00降水量为127.8 mm,18:00—21:00降水量为249.5 mm。上述造成严重灾害的天气事件多发生在傍晚到夜间,给强降水预警和防灾抢险带来巨大挑战。

国内诸多学者研究了我国不同区域的逐时降水长期变化特征和日变化特征,得出许多降水发生规律和变化特征等方面的成果。研究发现随气候变暖,强对流灾害性天气呈频发趋势^[1-2];中国夏季降水日变化具有明显的区域性,全国大部分区域短时强降水的峰值多出现在下午或傍晚^[3-5];在华北、华东和西南区域,短时强降水的发生与地形关系密切,其频次和极端性也在增加^[6-11]。对于山东省的降水事件也有许多研究,高留喜等^[12]结合业务实际,用三种统计方法对比分析了山东省极端短时强降水阈值,建议值为70~75 mm·h⁻¹;董旭光等^[13-14]、杨学斌等^[15]、高理等^[16]分析了山东暖季小时雨量的时空分布特征;侯淑梅等^[17-18]基于加密自动气象观测站和国家级气象观测站资料,分析了极端短时强降水特征,构建了分类天气学概念模型。此外还有一些针对省内大城市短时强降水特征方面的研究^[19-20]。

受海陆差异及地形影响,山东省降水时空分布差异明显,多角度认识省内及各区域短时强降水和极端短时强降水的发生规律,对防御山洪地质灾害和治理城市内涝等具有重要意义。选用山东省123

个国家级地面气象观测站2007—2019年的地面逐小时观测资料,分析山东省及省内各区域短时强降水的时空分布、不同分位数样本和极端短时强降水的特征,为气候变暖背景下短时强降水天气的发生机理研究及短临预报预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 使用资料

为确保数据准确且观测方式统一,选用国家气象信息中心提供的2007—2019年山东省123个国家级地面气象观测站(含泰山站)的逐小时地面观测资料。

本文使用短时强降水相关定义如下:

- 1) 短时强降水标准:小时降水量 $R \geq 20.0$ mm;
- 2) 短时强降水站次:达到短时强降水标准的次数总和;
- 3) 短时强降水时:同一时1站或以上达到短时强降水记为1个短时强降水时;
- 4) 短时强降水日:同一日(08:00至次日08:00)1站或以上达到短时强降水记为1个短时强降水日。

1.2 分级计算方法

选用 $R \geq 20.0$ mm的资料,剔除错误数据,采用传统排序法(百分位法)计算山东省极端短时强降水阈值。即对所有样本升序排列,如取1 000个时次的降水量资料,则95%分位数阈值为第949位和951位降水量的中间值(或线性插值)^[6-13]。

2 时空分布特征

为详细了解山东省短时强降水发生规律,基于气候特征和预报习惯将全省划分为5个区域,即鲁西北、鲁中、鲁西南、鲁东南和半岛地区^[12],分别有35、26、19、19和24站。

基于百分位法计算山东全省及分区域短时强降水的不同分位数阈值,对比短时强降水和极端短时强降水的发生频次和分布情况。

2.1 分级统计特征

2007—2019年山东省共发生6 257站次短时强

降水,站均发生 50.9 次;鲁东南地区站均发生 63.4 次,明显高于其他区域,是山东短时强降水发生频次最多的区域;鲁西北地区站均发生频次与全省接近,为 51.0 次;鲁西南和鲁中地区站均发生频次略低于全省平均,分别为 49.3 次和 48.5 次;半岛地区站均发生频次低于全省平均值,为 44.6 次。

从代表样本平均发生情况来看,全省的 50%和 75%分位数阈值(小时雨量,下同)分别为 26.6 mm 和 34.1 mm;鲁西南地区最高,为 27.4 mm 和 35.5

mm;鲁东南地区最低,为 26.2 mm 和 32.5 mm;鲁中和半岛地区略低于全省值;鲁西北地区略高于全省值。从代表短时强降水极端性的 99%和 99.5%分位数阈值来看,全省为 71.2 mm 和 80.5 mm;鲁东南地区均最高,为 75.5 mm 和 88.1 mm;鲁中地区最低,为 64.8 mm 和 71.6 mm;鲁西北和半岛地区的 99%和 99.5%分位数阈值与全省值接近;鲁西南地区 99.5%分位数阈值较全省值低 5.3 mm(表 1)。

表 1 山东省区域短时强降水极值及分位数阈值

Table 1 Extreme and quantile of short-time severe precipitation in Shandong Province

区域	站数	站次	短时强降水极值			不同分位数对应小时雨量阈值/mm				
			小时雨量/mm	站点	发生时间	50%	75%	95%	99%	99.5%
鲁西北	35	1 784	104.2	商河	2007071816	27.0	34.4	52.1	69.8	79.9
鲁中	26	1 262	101.8	长清	2010080902	26.5	33.8	51.0	64.8	71.6
鲁西南	19	936	92.8	单县	2019072721	27.4	35.5	54.8	70.8	75.2
鲁东南	19	1 204	137.2	费县	2009081802	26.2	32.5	52.5	75.5	88.1
半岛	24	1 071	127.9	乳山	2011072520	26.2	33.8	52.4	71.9	79.7
全省	123	6 257	137.2	费县	2009081802	26.6	34.1	52.6	71.2	80.5

2.2 地理分布特征

小时降水量 $R \geq 20.0$ mm 发生总次数的大值站点主要分布在鲁东南和鲁西北地区,其中临沂市和枣庄市周边的发生总次数普遍超过 70 次;次数较少区域主要在半岛中部、鲁西南西部和鲁中地区,普遍低于 40 次;单点发生次数前 5 位为泰山、临沂、兰陵、枣庄和禹城,分别为 81、77、74、71、71 次;发生次数最少前 4 位为寿光、东明、诸城和海阳,分别为 30、32、34、34 次;发生 35 次的有烟台、成山头、巨野、昌邑、平度和阳谷(图 1a)。

50%分位数阈值为 26.6 mm,发生总次数分布情况与 $R \geq 20.0$ mm 的发生情况基本一致,总次数较多的区域主要分布在鲁东南、鲁西北、鲁西南东部地区和泰山周边,半岛中部、鲁中大部分和鲁西南西部地区较少;单点发生次数前 5 位为泰山、庆云、莒县、临沂和济宁,分别为 47、44、42、41 和 39 次;发生次数最少的为海阳,仅 15 次,东明和成山头为 16 次(图 1b)。

75%分位数阈值为 34.1 mm,发生次数较多的区域主要在鲁西南东部、鲁西北、鲁东南南部地区和泰山周边,半岛中部和菏泽周边地区较少;单点发生次数前 3 位为庆云、泰山、鱼台,分别为 27、23 和 22 次,济宁、邹城和兰陵发生 21 次;发生次数最

少为东明,仅 4 次,高密和莘县为 6 次(图 1c)。

95%分位数阈值为 52.6 mm,全省 13 a 间共发生 313 站次,站均发生 2.5 次;次数较多区域主要分布在鲁西北、鲁东南和鲁西南地区,较少区域在半岛西部、鲁西南和鲁中地区;单点发生次数前 3 位为惠民、临沭和鱼台,分别为 9、8、7 次,长清、平阴、泰山、邹城、黄岛和兰陵均为 6 次;滨州、博兴、周村、桓台、禹城、成山头、石岛、宁阳、泗水、沂南、成武和薛城未发生 $R \geq 52.6$ mm 的短时强降水(图 1d)。

99%分位数阈值为 71.2 mm,全省 13 a 间共发生 63 站次,站均发生 0.5 次,仅 43 站出现过该强度极端强降水,分布较为分散。其中泰山、聊城、沂水和临沭均发生 3 次,费县、兰陵、五莲、胶南、黄岛、长清、鱼台、东阿、冠县、滕州、惠民和乳山均发生 2 次,其余有 27 站发生过 1 次。其他 80 站没有出现(图 1e)。

99.5%分位数阈值为 80.5 mm,共发生 33 站次,全省年均发生不足 3 次,站均发生 0.3 次,仅 28 站出现过 $R \geq 80.5$ mm 的极端强降水。其中沂水发生 3 次,兰陵、胶南和乳山发生 2 次,24 站发生过 1 次。其他 95 站没有出现(图 1f)。

高留喜等^[12]于 2014 年基于业务实际选用 1999—2011 年的地面逐小时降水资料,统计分析给

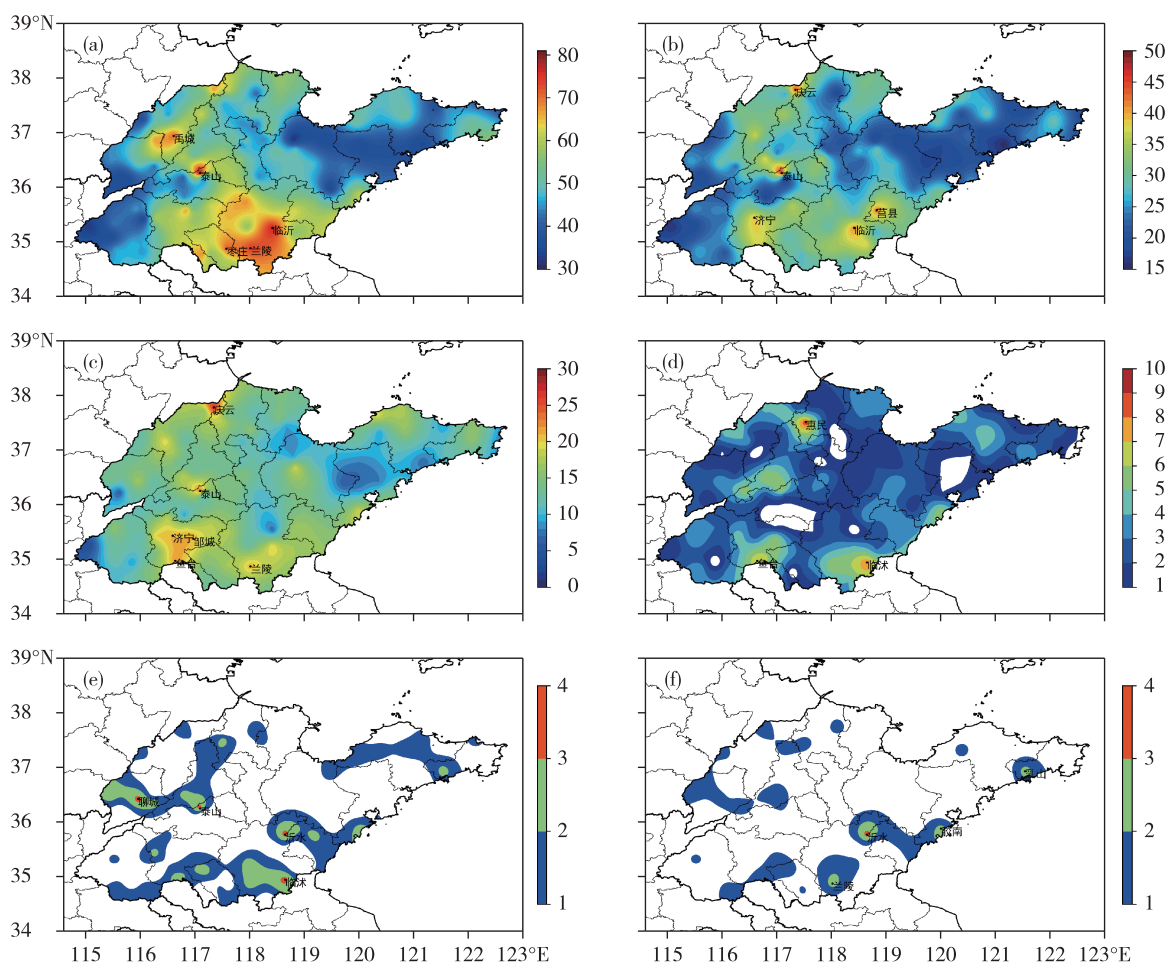


图1 山东短时强降水分布(a. 雨强 $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, b. 雨强 $\geq 26.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, c. 雨强 $\geq 34.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, d. 雨强 $\geq 52.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, e. 雨强 $\geq 71.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, f. 雨强 $\geq 80.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;色阶,单位:次)

Fig.1 Distribution of short-time severe precipitation (a. rainfall intensity $\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, b. rainfall intensity $\geq 26.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, c. rainfall intensity $\geq 34.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, d. rainfall intensity $\geq 52.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, e. rainfall intensity $\geq 71.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, f. rainfall intensity $\geq 80.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; color scale, units: time)

出的全省极端短时强降水阈值标准为 74.8 mm 。综合分析,建议将所有短时强降水样本的 99%分位数作为极端短时强降水阈值,即 71.2 mm ,各区域由高到低为鲁东南、半岛、鲁西南、鲁西北和鲁中,对应阈值为 75.5 、 71.9 、 70.8 、 69.8 和 64.8 mm ;鲁东南地区短时强降水和极端短时强降水发生频次最多,半岛地区短时强降水发生最少,鲁西南地区极端短时强降水发生最少。

2.3 年分布特征

全省各站年均发生 3.9 次短时强降水,总频次大于 4 次的站点多分布于鲁东南、鲁西南地区 and 泰山周边。鲁东南地区最多,为 4.9 站次,有 10 a 高于同年全省平均,有 7 a 为发生次数最多区域;鲁西北地区为 3.9 次,有 7 a 高于同年全省平均,为 2010 年和 2015 年发生次数最多区域;鲁中地区为 3.8

次,有 4 a 高于同年全省平均,为 2018 年发生次数最多区域;鲁西南地区为 3.7 次,有 5 a 高于同年全省平均,为 2016 年发生次数最多区域;半岛地区最少,为 3.4 次,有 4 a 高于同年全省平均,为 2014 年发生次数最多区域(图 2)。

2018 年山东接连遭受 3 个台风影响,站均年发生次数最多,为 5.2 次。各区域站均发生次数由多到少依次为鲁中地区 2018 年 6.8 次,鲁东南地区 2013 年 6.5 次,鲁西南地区 2016 年 5.5 次,鲁西北地区 2018 年 5.3 次和半岛地区 2007 年 5.1 次。2014 年全省大范围旱情持续,雨季降水过程偏少,站均年发生次数最少,仅 2.2 次,为鲁东南、鲁中和鲁西南地区的站均发生次数最少年份,其中鲁东南地区为统计次数最少区域,仅 1.7 次,鲁中和鲁西南地区分别为 2.0 次和 1.9 次。

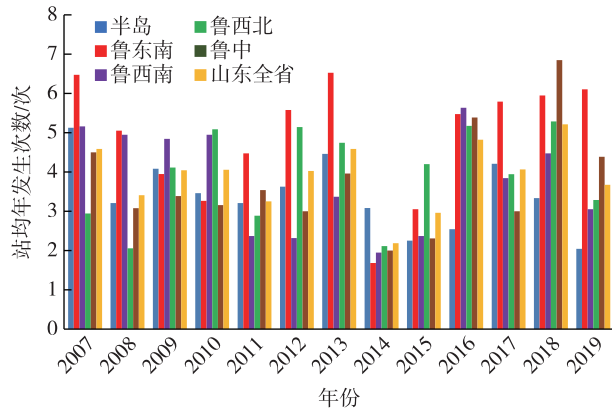


图 2 山东短时强降水站均年发生次数
Fig.2 Station average annual occurrence times of short-time severe precipitation

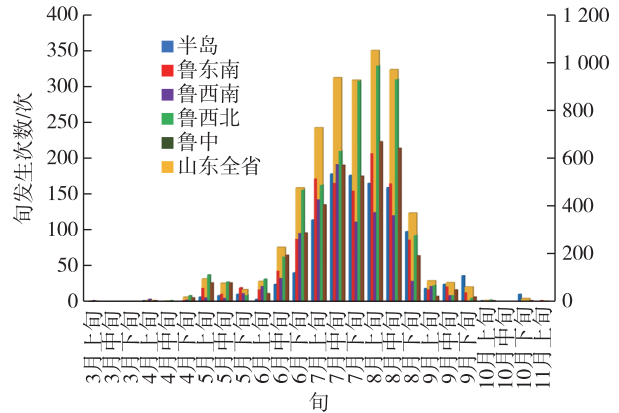


图 4 山东短时强降水旬发生次数(纵坐标:左侧为各区域,右侧为山东全省)
Fig.4 Ten-day occurrence times of short-time severe precipitation in Shandong (The left ordinate is for each area, the right ordinate is for Shandong Province)

2.4 月分布特征

各区域短时强降水自 5 月逐渐增多,6 月迅速增多,该阶段多为大陆性强对流导致的短时强降水。7—8 月为山东主雨季,短时强降水主要集中在该时期,占全年总数的 79.6%,其中 7 月最多,占 41.4%。鲁西南、鲁东南和半岛地区 7 月最多,鲁中和鲁西北地区 8 月最多(图 3),与山东雨季开始和副热带高压北上的季节性规律一致。

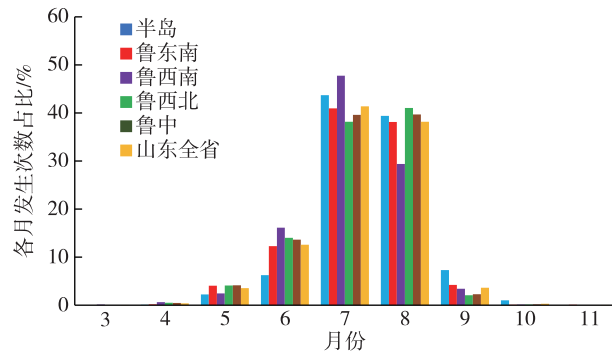


图 3 山东短时强降水各月发生次数占总次数的百分比
Fig.3 Percentage of monthly occurrence times of short-time severe precipitation

2.5 旬分布特征

全省的短时强降水主要出现于 6 月中旬至 8 月下旬,占全年总数的 90.8%;7 月上旬至 8 月中旬占 73.6%,7 月中旬至 8 月中旬期间每旬的发生站次均超过 900 次,占 62.0%,又以 8 月上旬最多,占 16.8%(图 4)。

全省 4 月中旬前共发生 7 站次短时强降水,4 月下旬出现 18 站次短时强降水,主要出现在鲁西北和鲁中地区,与高空冷平流活跃,地面气温迅速升高,导致强对流天气增多有关。5 月上中旬大部分

站点开始出现短时强降水,鲁西北、鲁中和鲁东南地区发生站次较其他区域偏多,与冷空气南下或高空冷涡活动有关;同时半岛地区近地面气温回升,开始出现短时强降水。5 月下旬鲁西北地区发生站次较中旬减少,鲁中地区没有发生。6 月上旬起,半岛以外地区发生站次开始稳定增加。6 月中下旬是高空冷涡影响山东最为频繁的阶段,强对流天气多发,各区域发生站次迅速增加。7 月上旬至 8 月下旬为各区域短时强降水发生最为集中的阶段,与山东省预报员经常提到的“七上八下”相对应。

2.6 日分布特征

山东省短时强降水具有显著的日变化,表现为“双峰”特征,站均发生次数以午后到傍晚最多,集中于 15:00—20:00,其次是后半夜,集中于 02:00—05:00。鲁西北、鲁东南和鲁西南地区也呈“双峰”特征,但峰值时段不同。鲁西北地区第一峰值集中在 16:00—20:00,第二峰值在 05:00—10:00;鲁东南地区第一峰值在后半夜,集中于 02:00—06:00,第二峰值在 14:00—18:00;鲁西南地区第一峰值集中在 17:00—20:00,第二峰值在 03:00—05:00。鲁中地区为“单峰”特征,午后到前半夜发生次数最多,集中在 19:00—21:00。半岛地区呈现“三峰”特征,上午、下午及后半夜发生次数较多,中午和前半夜较少(图 5)。

2.7 日发生站次特征

2007—2019 年共 695 个短时强降水日,发生站次最多的为 2007 年 7 月 18 日 130 站次,其次为 2019 年 8 月 10 日 124 站次,第三位为 2018 年 8 月

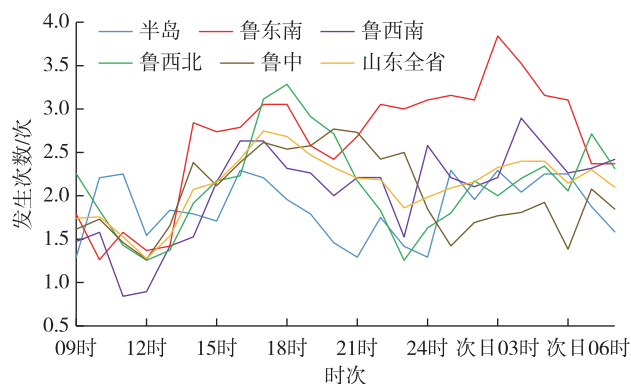


图5 山东短时强降水日变化特征

Fig.5 Diurnal variation feature of short-time severe precipitation in Shandong

19日109站次。全省单日发生站次1、2、3~4、5~9、10~19和 ≥ 20 站次的概率分别为21.9%、13.0%、15.0%、21.6%、16.4%和12.2%。各区域多为1~2站次的局地性短时强降水,占比由高到低依次为半岛、鲁东南、鲁中、鲁西南和鲁西北地区,其中半岛地区高达6成;5站次及以上区域性短时强降水占比2~3成,由高到低依次为鲁西北、鲁西南、鲁中、鲁东南和半岛地区(图6)。

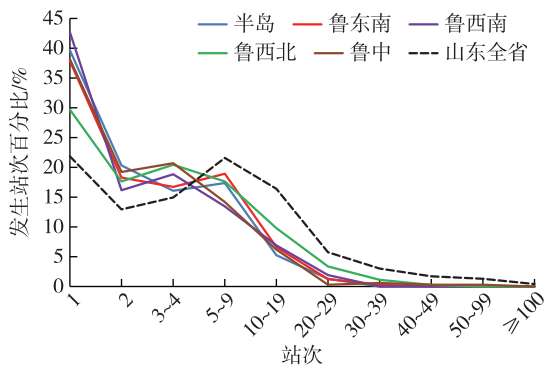


图6 单一短时强降水日发生站次百分比

Fig.6 Percentage of stations with short-time severe precipitation day

2.8 时发生站次特征

2007—2019年共有3337个时次发生短时强降水。发生短时强降水的时次中又以单站发生为主,占59.2%,2站发生的占20.0%,3站次及以上占20.9%,5站次及以上占5.8%,10站次及以上仅2.2%,占0.7%(图7)。对各区域而言,半岛和鲁中地区单站发生比例高于其他区域,多局地性短时强降水;鲁西北地区2站及以上站次发生比例高于其他区域;仅在2015年8月3日18:00—19:00鲁西北地区发生过1次10站次以上的短时强降水过程。

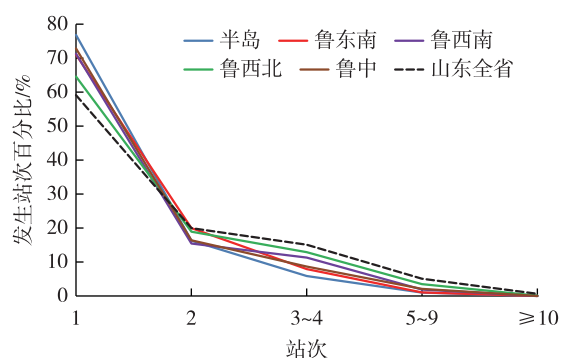


图7 单一短时强降水时发生站次百分比

Fig.7 Percentage of stations with short-time severe precipitation hour

2.9 初日和终日

全省大部地区短时强降水初日在5月,鲁西北、鲁中和鲁东南地区在5月上旬,鲁西南和半岛地区为5月下旬;初日最早为2016年3月4日,21:00—22:00曲阜降水量20.6mm。大部地区终日在9月,鲁西南和鲁西北地区在9月上旬,鲁中和鲁东南地区在9月中旬,半岛地区为9月下旬;最晚一次发生在2015年11月6日23:00—7日00:00,郯城降水量21.5mm。

3 结论与讨论

本文选用山东123个国家级地面气象观测站2007—2019年的地面逐小时观测资料,统计分析山东省短时强降水的分布、变化和极端短时强降水的特征,主要结论如下:

1) 2007—2019年共有695个短时强降水日、3337个短时强降水时次和6257站次短时强降水样本。日发生站次少于10站的超7成,约5成少于4站;时发生站次为单站的约6成,3站次及以上约2成。

2) 建议山东极端短时强降水阈值为 $71.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,各区域阈值由高到低依次为鲁东南地区 $75.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、半岛地区 $71.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、鲁西南地区 $70.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、鲁西北地区 $69.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和鲁中地区 $64.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。鲁东南地区短时强降水和极端短时强降水发生频次均最多,半岛地区短时强降水发生最少,鲁西南地区极端短时强降水发生最少。

3) 山东各站年均发生3.9次短时强降水,其中鲁东南地区最多为4.9次,半岛地区最少为3.4次。全省站均发生次数最多为2018年(5.2次),最少为2014年(2.2次)。

4) 山东短时强降水主要发生在7—8月(占79.6%),其中鲁西南、鲁东南和半岛地区7月最多,鲁中和鲁西北地区8月最多。逐旬统计全省短时强降水发生次数,则集中在6月中旬至8月下旬(占90.8%),其中7月上旬至8月中旬占73.6%,又以8月上旬最多(占16.8%)。

5) 山东短时强降水具有显著的日变化,表现为“双峰”特征,午后至傍晚发生频次最高,集中于15:00—20:00,其次是后半夜,集中于02:00—05:00;鲁西北、鲁东南和鲁西南地区也呈现“双峰”特征,但峰值时段不同;此外,鲁中地区为“单峰”特征,半岛地区为“三峰”特征。

本文根据山东省小时降水资料,统计分析了2007—2019年山东全省和分区域短时强降水的时空分布特征。在后续的工作中将继续研究短时强降水与复杂地形的关系,以及不同地区、不同季节短时强降水和极端短时强降水的潜势预报、概念模型等。

参考文献:

- [1] 翟盘茂,王萃萃,李威.极端降水事件变化的观测研究[J].气候变化研究进展,2007,3(3):144-148.
- [2] 王遵娅,丁一汇,何金海,等.近50年来中国气候变化特征的再分析[J].气象学报,2004,62(2):228-236.
- [3] 宇如聪,李建,陈昊明,等.中国大陆降水日变化研究进展[J].气象学报,2014,72(5):948-968.
- [4] 陈炯,郑永光,张小玲,等.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[J].气象学报,2013,71(3):367-382.
- [5] 李建,宇如聪,孙激.从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征[J].气象学报,2013,71(4):651-659.
- [6] 韩函,吴昊旻,黄安宁.华北地区夏季降水日变化的时空分布特征[J].大气科学,2017,41(2):263-272.
- [7] 王萃萃,翟盘茂.中国大城市极端强降水事件变化的初步分析[J].气候与环境研究,2009,14(5):553-560.
- [8] 孙继松,雷蕾,于波,等.近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报,2015,73(4):609-623.
- [9] 彭芳,吴古会,杜小玲.贵州省汛期短时降水时空特征分析[J].气象,2012,38(3):307-313.
- [10] 毛冬艳,曹艳察,朱文剑,等.西南地区短时强降水的气候特征分析[J].气象,2018,44(8):1041-1050.
- [11] 付超,谌芸,朱克云,等.2010—2016年江西省暖季短时强降水特征分析[J].气象,2019,45(9):1238-1247.
- [12] 高留喜,李静,刘畅,等.山东省短时极端强降水研究[J].气象科技,2014,42(3):482-487.
- [13] 董旭光,顾伟宗,邱粲,等.山东省汛期小时降水过程时空分布特征[J].气象,2018,44(8):1063-1072.
- [14] 董旭光,顾伟宗,曹洁,等.山东省汛期小时极端强降水分布和变化特征[J].气象,2017,43(8):953-961.
- [15] 杨学斌,代玉田,王宁,等.2006—2015年山东短时强降水时空分布特征[J].海洋气象学报,2018,38(2):103-109.
- [16] 高理,胡桂芳,孙莎莎.山东夏季强降水的时空演变特征及成因[J].干旱气象,2013,31(4):690-694.
- [17] 侯淑梅,孙敬文,孙鹏程,等.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水时空分布特征的对比分析[J].气象,2020,46(2):200-211.
- [18] 侯淑梅,盛春岩,万文龙,等.山东省极端强降水天气概念模型研究[J].大气科学学报,2014,37(2):163-174.
- [19] 张永婧,高帆,于丽娟,等.济南市短时强降水特征分析与天气分型[J].海洋气象学报,2017,37(3):109-116.
- [20] 张凯静,江敦双,丁锋.青岛市短时强降水的气候特征和天气系统分型[J].海洋气象学报,2018,38(1):108-114.