

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水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).

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*

侯淑梅^{1,2} 孙敬文³ 孙鹏程⁴ 谷山青⁵ 邱 燊^{6,7} 刘 程⁴

1 山东省气象台, 济南 250031

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 中南财经政法大学, 武汉 430073

4 山东省海阳市气象局, 海阳 265100

5 山东省滨州市气象局, 滨州 256612

6 上海师范大学地理系, 上海 200234

7 山东省气候中心, 济南 250031

提 要: 利用 2008—2017 年 4—10 月山东省加密自动气象观测站(简称全部站)和国家气象观测站(简称国家站)逐小时 1 mm 以上降水量资料,通过对比分析,探究不同分辨率数据对极端短时强降水时空分布特征的刻画效果。结果表明如下:全部站小时降水量的偏态特征比国家站明显,若分析小时降水量的平均状态,两者均具有代表性,若分析短时强降水的极端性,全部站数据更具有优越性。将各站第 99.5%分位数作为极端短时强降水的阈值最合理,全部站和国家站对于 30~45 mm 阈值的空间分布特征相似,45 mm 以上的阈值,全部站的数值和范围均大于国家站。山东省大部地区的极端短时强降水强度集中在 40~60 mm·h⁻¹,全部站和国家站在此区间的空间分布特征相似。国家站数据不能刻画 40 mm·h⁻¹以下和 60 mm·h⁻¹以上的极端短时强降水的空间分布特征。极端短时强降水强度的空间分布特征与地理位置及地形特征密切相关。鲁东南地区的极端短时强降水强度、日最大降水量及夏季降水量、年降水量均居山东省之首,鲁西北地区虽然强降水频次高、强度大,但与年降水量和夏季降水量没有正相关关系。全部站与国家站极端短时强降水频次的月变化和日变化特征一致,但国家站不能完全代表山东省极端短时强降水强度的月变化和日变化平均状况,全部站数据能更准确地反映山东省的时间变化特征。

关键词: 加密自动气象观测站,极端短时强降水,对比分析,阈值,时空分布

中图分类号: P468

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.006

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

HOU Shumei^{1,2} SUN Jingwen³ SUN Pengcheng⁴ GU Shanqing⁵ QIU Can^{6,7} LIU Cheng⁴

1 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

* 山东省自然科学基金项目(ZR2016DM20)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-041)及山东省气象局课题(2016sdqxz01和2014sdqxm21)共同资助

2018 年 9 月 14 日收稿; 2019 年 12 月 2 日收修定稿

第一作者:侯淑梅,研究方向为灾害性天气预报及机理分析. Email:shmh0808@163.com

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430073

4 Haiyang Meteorological Office of Shandong Province, Haiyang 265100

5 Binzhou Meteorological Office of Shandong Province, Binzhou 256612

6 Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234

7 Shandong Climate Center, Jinan 250031

Abstract: Using the densely-observed hourly precipitation (>1 mm) data of the automatic weather stations (referred to as the all stations) and the national meteorological stations (referred to as the national stations) in Shandong Province from April to October 2008–2017, this paper compares the characteristics of spatio-temporal distribution of extreme short-time severe precipitation with different resolution data. The results are as follows. The skewed characteristics of hourly precipitation at all stations are more obvious than those of the national stations. For the average state of hourly precipitation, both are representative. However, for the analysis of the extremes of short-time severe rainfall, the all stations data are more advantageous. It is most reasonable to use the 99.5th percentile of each station as the threshold for extreme short-time severe precipitation. The spatial distribution characteristics of the 30–45 mm threshold are similar for all stations and national stations. For thresholds above 45 mm, the values and ranges of all stations are both greater than those of the national stations. The extreme short-time severe precipitation intensity in most parts of the province is concentrated at 40–60 mm \cdot h $^{-1}$, and the spatial distribution characteristics of all stations and national stations in this interval are similar. National-station data can not reflect the spatial distribution of extreme short-time severe precipitation with intensity below 40 mm \cdot h $^{-1}$ and above 60 mm \cdot h $^{-1}$. The spatial distribution characteristics of extreme short-time severe precipitation intensity are closely related to geographical location and topographical features. The extreme short-time precipitation intensity, daily maximum precipitation, summer precipitation and annual precipitation in the southeastern Shandong Province rank first in the province. Although the frequency and intensity of severe precipitation are high in northwestern Shandong, they have no positive correlations with annual precipitation and summer precipitation. The monthly and diurnal variations of the extreme short-time severe precipitation frequency of all stations are consistent with those of the national stations. However, the national-station data can not fully represent the monthly and diurnal variations of the extreme short-time severe precipitation intensity in the province. The data of all stations can more accurately reflect the time variation features of precipitation in the province.

Key words: dense automatic weather station, extreme short-time severe precipitation, comparative analysis, threshold, spatio-temporal distribution

引言

大量研究指出,我国多数地区极端强降水量或暴雨降水量在总降水量中的比重有所增加,极端强降水或暴雨级别的降水强度也有增强(Zhai et al, 2005;孙凤华等,2007;陈晓光等,2008)。这种现象不仅出现在降水量和极端强降水增加的南方和西部,甚至出现在降水量和极端强降水减少的华北和东北(翟盘茂和潘晓华,2003;孙凤华等,2007)。全

国半数以上大城市年平均极端降水强度变化呈增加趋势,大连、青岛、上海、福州、厦门等沿海大城市极端降水强度增加趋势较为明显(王萃萃和翟盘茂,2009)。

观测研究表明,很多极端强降水事件是集中在几小时之内完成的(孙兴池等,2006;湛芸等,2012;侯淑梅等,2014b;田付友等,2018)。极端短时强降水事件突发性强、降水时段集中,常常引起山洪暴发、泥石流、城市内涝等各种灾害,严重影响工农业生产,造成重大财产损失和人员伤亡(翟盘茂等,

2016;何立富等,2016)。2007年济南“7·18”大暴雨,小时最大降水量高达 151 mm,为济南市有气象记录以来历史最大值,造成极大的经济损失和人员伤亡(杨芙蓉等,2007)。2011年7月25日乳山日总雨量为 296.3 mm,最大雨强为 $127.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,小时雨量和日总雨量均突破该站历史极值,造成多人死亡和严重的经济损失(杨晓霞等,2013)。

近年来,短时强降水形成机理与预报方法的研究受到广泛关注(Shaw et al, 2011; Mishra et al, 2012; Sen Roy and Rouault, 2013; 周泓等, 2013), 田付友等(2014), Zheng et al(2016)对中国短时强降水时空分布等气候特征进行了分析研究,取得了很多有意义的成果。围山东省绕极端短时强降水事件开展了一系列普查和研究,但大多数的统计分析工作是基于国家级地面气象观测站(简称国家站)的数据。山东省一共有 123 个国家站(含泰山站),站点间距离在 20~100 km,共有 1500 多个区域加密自动气象观测站(简称区域站,国家站与区域站的总和简称全部站),站点间距离为 2~20 km。目前,中国气象局正在全力推进 5 km 分辨率的智能网格预报,国际会议、重大赛事和重要社会活动需要精细天气预报。过往对于短时强降水的认识主要基于国家站数据,基于国家站数据的极端短时强降水特征是否具有代表性? 基于全部站与国家站数据的强降水特征是否不同? 为了适应智能网格预报以及日益增长的气象服务需求,基于两种数据的极端短时强降水时空分布特征的对比分析尤为重要。

相比于时间序列超过 30 年的国家站数据,区域站数据的时间跨度短,数据质量也存在一定差距。本文通过对比全部站与国家站对极端短时强降水时空分布特征的刻画,分析两种资料各自优势特点,为业务人员提供更有参考,为提高极端短时强降水预报准确率提供可能。

1 资料与方法

1.1 资料

研究表明,山东省的短时强降水主要发生在每年的 4—10 月(赵宇等,2004;杨晓霞等,2006;侯淑梅等,2014a;高留喜等,2014)。本文所用资料为 2008—2017 年 4—10 月山东省 122 个国家站(不含

泰山站)和 1416 个区域站逐小时降水量数据、济南多普勒天气雷达资料及 FY 卫星资料。

1.2 质量控制

由于区域站数据质量控制不够完善,常在晴天有 $<1 \text{ mm}$ 的弱降水量出现,因此本文选取 1 mm 以上的小时降水量作为统计样本。

山东省各区域均出现过小时降水量 $>40 \text{ mm}$ 的天气过程(杨学斌等,2015;徐珺等,2014;杨晓霞等,2015),孙继松等(2015)对北京市极端暴雨进行分析时,使用了小时降水量 $\geq 40 \text{ mm}$ 作为阈值之一。在近 10 年山东省 122 个国家站的最大小时降水量中最小观测值为 40.5 mm ,有 680 站次小时降水量 $>40 \text{ mm}$,即平均每年有 68 站次小时降水量达到 40 mm 以上。因此,基于全部站的山东省极端短时强降水关注的重点可能是 40 mm 以上的小时降水量。为确保极端短时强降水阈值的准确性,本文对全部站小时降水量 $\geq 40 \text{ mm}$ 的降水记录,通过多普勒天气雷达、卫星云图以及与周边区域站的降水资料进行对比,主观判断降水记录的正确性,剔除错误记录。若单站一日内出现两次以上超过 40 mm 的错误记录,则删除该站当日数据。

通过上述筛选后,单个测站最多降水记录为 1390 条,超过 1000 条降水记录的测站为 252 个。为使测站数据更具有统计意义,只保留降水记录超过 500 条、最大小时降水量 $>30 \text{ mm}$ 的测站。通过上述所有质量控制后,共筛选出 1538 个测站(含 122 个国家站)的降水序列作为研究对象。从图 1 可见,这些测站比较均匀地分布在全省各地。

1.3 方法

对每个测站 $>1 \text{ mm}$ 的小时降水量按递增顺序排序,根据百分位法,确定极端短时强降水阈值。若某站小时降水量大于该站的阈值,则认为该站出现 1 站次极端短时强降水事件,该降水量累加进该站极端强降水量(定义见表 1)。例如,某站极端短时强降水的阈值为 40 mm ,若某时次降水量 $\geq 40 \text{ mm}$,则该站极端强降水频次增加 1 站次,并将该时次降水量累加进该站极端强降水量。以此类推,对于 1538 个测站分别进行同样的统计。

1.4 地理分区及地形分布

根据山东省地形及气候特点,山东省气象台将

山东省分为四大区域,分别为鲁西北、鲁中、鲁南和半岛,并根据业务需要,将每个区域继续细分为两个小区域:鲁西北的西部、鲁西北的东部;鲁中的西部、鲁中的东部;鲁西南、鲁东南;半岛北部和半岛南部(图 1)。其中鲁西北和鲁西南地区为平原,鲁中是海拔为 500~1000 m 的山区,泰山主峰高 1545 m,鲁东南为海拔 200~500 m 的山地,半岛三面环海,除少数海拔达 700 m 的山峰,大部分为 200~300 m 的丘陵。

2 小时最大降水量

由全部站小时最大降水量分布区间可见(表 1),86.4%的测站小时最大降水量集中在 40~80 mm,<40 mm 的测站只有 60 站,占全部站的 3.9%,说明 1.2 节用 40 mm 作为质量控制线是合理的。

全部站小时最大降水量出现次数最多的为 50~60 mm,共有 482 站,占全部站的 31.34%,其次

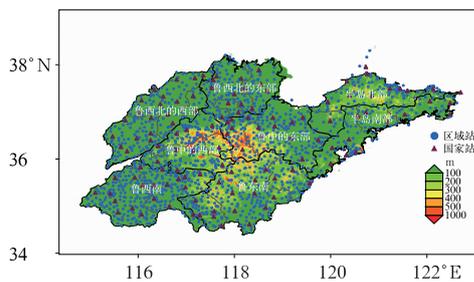


图 1 山东省地理分区(黑色实线)、区域站(深蓝色圆点)、国家站(紫色三角形)和地形高度(填色)分布

Fig. 1 Geographical division of Shandong Province (black solid line), regional stations (dark blue dot), national stations (purple triangle) and terrain height (shadow)

是 60~70 mm,共出现 358 站,占全部站的 23.28%。国家站小时最大降水量占比最多的前三个区间与全部站相同,也是 40~70 mm。小时最大降水量是 137.2 mm,出现在 2009 年 8 月 18 日 02 时的费县,其次是 127.8 mm,出现在 2011 年 7 月 25 日 20 时的乳山,均出现在国家站。

从全部站小时最大降水量分布(图 2a)可见,全省大部地区的小时最大降水量介于 50~70 mm,70 mm 以上的测站主要分布在鲁西北和鲁东南地区,<50 mm 的测站主要集中在鲁中的东部以及半岛南部地区,该区域无论是多年平均的大雨强度还是暴雨强度均是全省的低值区(董旭光等,2014)。从全省国家站的小时最大降水量(图 2b)可见,对于 50~70 mm 的小时最大降水量,鲁西北、鲁中和半岛地区国家站与全部站分布相似,鲁南地区国家站基本是 60 mm 以上,而全部站却是在大范围的 50 mm 的区域内镶嵌着一些 60 mm 的测站。对于 70~80 mm 的区域,国家站的范围明显大于全部站,对于 50 mm 以下和 80 mm 以上的小时最大降水量,国家站的范围明显小于全部站,尤其是在鲁西南和鲁中地区,国家站没有 90 mm 以上的测站。由此可见,由于国家站的站点稀疏,插值半径选取较大,一方面夸大了半岛南部、鲁东南及鲁西北的西部地区的 70~90 mm 的强降水区范围,另一方面缩小了鲁中的东部和半岛南部 50 mm 以下强降水的范围,而且无法刻画鲁西北的东部、鲁中和鲁西南地区的 70 mm 以上强降水离散性和局地性的分布特点。

从国家站日最大降水量(20 时至次日 20 时)的空间分布图(图 2c)可见,180 mm 以上的大值区主要分布在鲁东南和半岛地区,160 mm 的次大值区位于鲁西北,鲁中地区是全省最小的地区,一般在 140 mm 以下,这与山东省暴雨日降水强度(高理等,2013;董旭光等,2014)和汛期持续性降水过程平

表 1 山东省小时最大降水量分布区间

Table 1 Distribution interval of hourly maximum precipitation in Shandong Province

		小时最大降水量/mm							合计	
		<40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100		≥100
全部站	测站数/站	60	311	482	358	178	93	44	12	1538
	在全部站中的占比/%	3.90	20.22	31.34	23.28	11.57	6.05	2.86	0.78	100
国家站	测站数/站	0	20	32	37	11	12	6	4	122
	在国家站中的占比/%	0	16.39	26.23	30.33	9.01	9.84	4.92	3.28	100

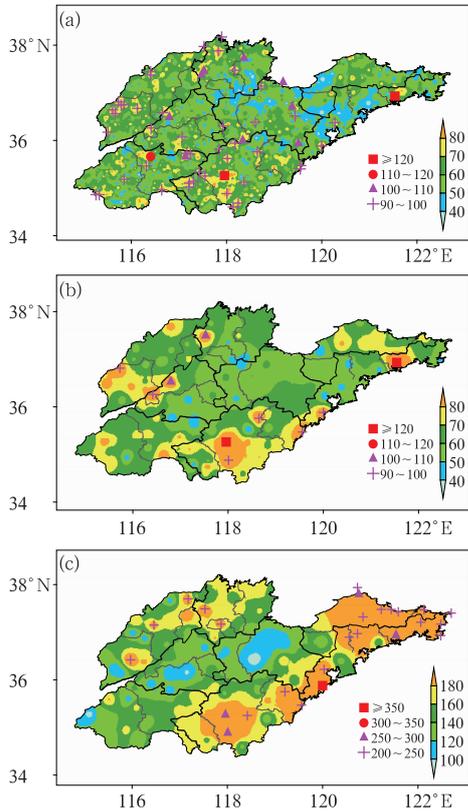


图 2 山东省全部站(a)和国家站(b,c)小时最大降水量(a,b)、日最大降水量(c)分布(单位:mm)

Fig. 2 Hourly maximum precipitation (a, b) and daily maximum precipitation (c) distribution of all stations (a) and national stations (b, c) in Shandong Province (unit: mm)

均雨强(董旭光等,2018)的分布特征相似。因此,鲁东南地区小时最大降水量和日最大降水量均为全省第一,鲁西北次之,鲁中的东部为全省最小,半岛地区日最大降水量与鲁东南相近,但小时最大降水量

却低于鲁东南。

3 极端短时强降水阈值

通过对第 2 节的分析发现,山东省各地的最大小时降水量分布是不均匀的,因此各站采用适合当地条件的极端短时强降水阈值更为合理。计算全部站小时降水量的第 98%、99%和 99.5%分位数(图 3a)发现,第 98%分位数的最小值、最大值和中位数分别为 15.4、38.7 和 24.3 mm,根据日常工作经验,用该值作为极端短时强降水阈值明显偏小。第 99%分位数的最小值、最大值和中位数分别为 19.8、62.4 和 31.2 mm,而第 99.5%分位数的最小值、最大值和中位数分别为 22.3、72.9 和 38.5 mm,二者的中位数从数值上比较接近,但从二者的箱线图分布特征可见,第 99%分位数箱体的上界小于第 99.5%分位数箱体的下界,第 99%分位数的分布区间主要集中在 28.3~34.5 mm,只有 70 个测站(4.5%)的第 99%分位数在 40 mm 以上,50 mm 以上的只有 3 个测站,这与近几年出现的小时降水量超过 50 mm,甚至超过 100 mm 的个例(湛芸等,2012;杨晓霞等,2013)相去甚远。

第 2 节的分析表明,全部站中 96.1%的测站小时最大降水量 ≥ 40 mm,由图 3a 可见,第 99.5%分位数主要集中分布在 34.6~42.9 mm,中位数为 38.5 mm,最接近 40 mm。 >40 mm 的测站有 620 个(40.3%), >50 mm 的测站有 86 个。从图 3b 可见,以全部站第 99.5%分位数作为极端短时强降水阈值时,强降水强度最小值、最大值和中位数分别为 28.8、85.3 和 47.5 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,更接近前文中提到的几个强降水个例的实况。以第 98%和 99%分位数

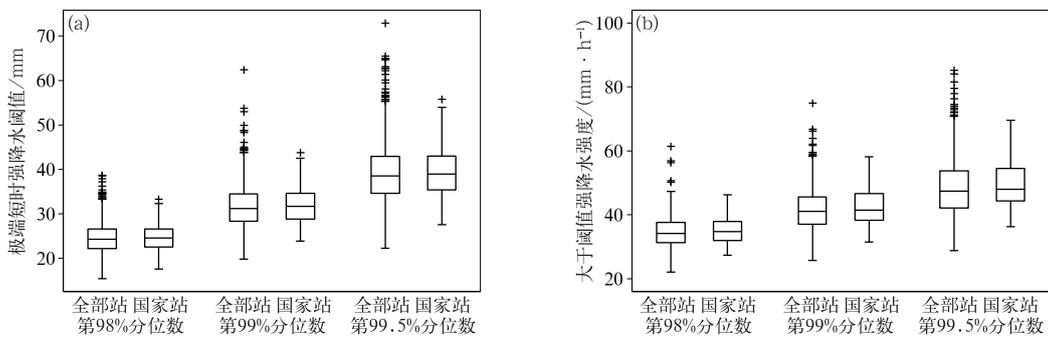


图 3 小时降水量第 98%、99%、99.5%分位数降水阈值(a)和超过阈值的降水强度(b)

Fig. 3 The thresholds of 98th, 99th, 99.5th percentile hourly precipitation (a), precipitation intensity exceeding the threshold (b)

作为阈值时,强降水强度的最大值分别是 61.4 和 74.9 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,与上述个例相比明显偏小。综合上述分析,将每个测站的第 99.5%分位数作为该站极端短时强降水的阈值,更符合近几年出现的强降水个例实况。

从国家站小时降水量第 98%、99%和 99.5%分位数的分布区可见(图 3a),国家站与全部站四分位间距框的分布区间相近,二者的中值差小于 1 mm,但是国家站的最小值大于全部站,最大值却远远小于全部站。全部站因为空间分辨率更高,能捕捉到更多的极端值,偏态特征比国家站更明显。从国家站与全部站大于阈值的强降水强度对比可见(图 3b),二者的四分位间距框分布区间差异不大,但是箱体上方的大值端,全部站的偏态特征远远大于国家站。因此,若分析小时降水量的平均状态,用国家站和全部站数据均具有代表性,若分析短时强降水的极端性,用全部站数据比仅用国家站数据更具有代表性。

Luo et al(2016)基于国家站 0.1 mm 以上的小时降水量,计算了中国 96°E 以东地区各站的第 99.9%、99%和 95%分位数,结果发现很多站的第 99%和 95%分位数小于中国气象局规定的短时强降水标准 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,因此选取第 99.9%分位数作为各站极端短时强降水阈值。由于本文所用资料是 1 mm 以上的小时降水量,对所用数据计算第 99.9%分位数发现,大多数测站超过第 99.9%分位数的站次只有 1 次,个例太少,不利于总结规律,因此最终确定使用第 99.5%分位数作为各站极端短时强降水的阈值比较合适。

由全部站第 99.5%分位数的空间分布(图 4a)可见,全省有 1365 个(88.75%)测站的阈值集中在 30~50 mm, <30 mm 和 ≥ 50 mm 的测站分别有 87

和 86 站。 >50 mm 的区域主要分布在鲁西北和鲁东南地区,最大值为 72.9 mm,出现在枣庄的熊耳山站。鲁西北、鲁中、鲁东南和半岛均有零散的阈值超过 55 mm,甚至 60 mm 以上的测站。 >35 mm 的区域主要分布在鲁中的东部和半岛南部地区。

对比国家站第 99.5%分位数的空间分布(图 4b)发现, ≥ 50 mm 的有 6 站,占国家站的 4.91%。主要分布在鲁西北和鲁东南地区,与全部站的分布特征相似,但占比小于全部站。最大值为 55.79 mm,出现在临沭站。 <35 mm 的区域主要分布在鲁中的东部和半岛南部地区。与全部站相比,30~45 mm 的区域分布特征比较相似,但 50 mm 以上的极端降水站点明显偏少,最大值和次大值均明显小于全部站,无论是极值的大小还是站数的占比均小于全部站。例如山东半岛东部的威海市,国家站数据的阈值为 30~35 mm,全部站数据的阈值为 35~40 mm,并且包含两个超过 60 mm 的测站。如果仅依赖国家站数据的统计特征,预报最大小时雨强时,可能出现预报偏小的情况。董旭光等(2017)基于 74 个国家站资料用第 98%分位数作为极端短时强降水的阈值,其阈值空间分布的区域性特征比图 4b 更加明显,山东省西部呈现出自北向南的带状大值区和鲁中的东部到半岛南部一个连续区域性低值区的特征。

可见,对于 30~45 mm 极端短时强降水阈值,全部站和国家站的空间分布相似,国家站的数据能反映这一区间极端强降水的分布特征,对于 45 mm 以上的极端短时强降水,国家站数据不能细致刻画其数值的极端性及其空间分布特征的分散性和局地性特征,尤其是鲁中的东部和半岛南部地区,虽然该地区大部分测站的阈值为 35~40 mm,但全部站数据能体现出该区域个别测站的阈值也能达到

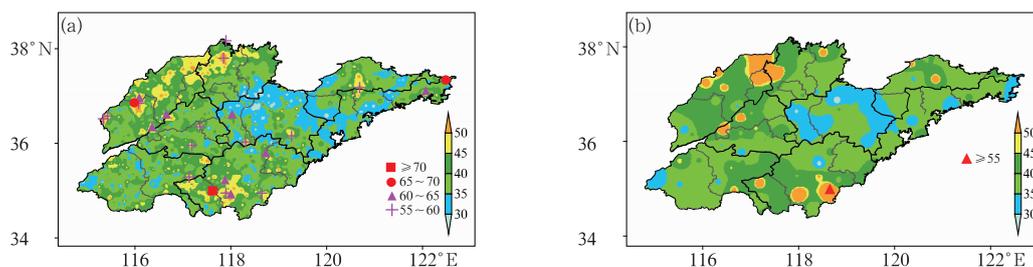


图 4 山东省全部站(a)和国家站(b)小时降水量第 99.5%分位数分布(单位:mm)

Fig. 4 Distribution of 99.5th percentile hourly precipitation at all stations (a) and national stations (b) in Shandong Province (unit: mm)

50 mm, 甚至 60 mm。实际预报时, 如果能判断出该地区可能出现极端强降水, 依据全部站数据的统计特征, 会很大程度上提高预报结论的准确性。

4 极端短时强降水的空间分布特征

4.1 空间分布特征

全部站共有 1132 个测站 (73.60%) 的极端短时强降水强度 (图 5a) 集中在 $40 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $< 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 有 245 个测站 (15.93%), 主要分布在鲁中的东部以及半岛南部地区。超过 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 有 3 个站, 最大值 ($85.25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 出现在临沂的南坊站。国家站 (图 5b) 数值也集中在 $40 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $< 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的测站零星地分布在鲁中的南部和半岛南部, $> 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的测站零散地分布在鲁西北和鲁东南地区。全部站与国家站 $40 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的分布区域比较接近, 鲁西北、鲁东南和半岛的部分地区为 $50 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 鲁西南和鲁中地区为 $40 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。但国家站不能反映 $> 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $< 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 极端短时强降水强度的分布特征, 一方面夸大了鲁中的东部和半岛南部地区的强降水强度, 另一方面低估了鲁西北和鲁东南地区的强降水强度。

综上所述, 无论是全部站还是国家站, 极端短时强降水强度的大值区主要分布在鲁西北、鲁东南和鲁中的南部地区, 说明在这些区域极端短时强降水的强度大, 易造成灾害。鲁中的东部和山东半岛的南部区域是全省最弱的地区。全部站和国家站对于 $40 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的分布特征相似, 国家站不能表现出 $< 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $> 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端短时强降水强度的分布特征。

4.2 空间分布与地理特征的关系

从图 5 可知极端短时强降水强度的大值区主要分布在鲁西北、鲁中的南部和鲁东南地区。从山东省地形图可见 (图 1), 鲁中地区为海拔为 $500 \sim 1000 \text{ m}$ 的山区, 鲁东南是海拔 $200 \sim 500 \text{ m}$ 的山地。研究表明, 鲁中山区的地形与暴雨天气过程关系密切 (张可欣等, 2007; 阎丽凤等, 2013; 朱义青等, 2015), 地形的抬升作用, 造成低层辐合加强和垂直速度增强, 有利于不稳定能量的积累和水汽辐合, 从而增强降雨强度 (周雪松等, 2012)。高留喜等 (2011) 研究指出, 鲁中山区海拔高、尺度大, 山体较宽, 强降水出现在迎风坡上游, 鲁东南山地海拔低、尺度小, 降水增益发生在迎风坡上或小丘附近。因此西南或东南风急流遇到鲁中和鲁东南地形阻挡抬升, 导致鲁中山区的南部和鲁东南地区发生强降水的频次和强度比其他地区更多。基于国家站的日降水资料研究表明, 鲁东南地区的极端强降水往往伴有强劲的西南风或东南风低空急流, 特大暴雨多与低空急流有关 (曹钢锋等, 1988; 侯淑梅等, 2014a), 因此该地区的极端短时强降水不仅强度大, 而且范围广, 分布呈大范围区域性特点, 年降水量和夏季降水量 (6—8 月) 均居山东省之首 (Zhuo et al, 2014; 万明波和董旭光, 2015), 也说明该区域的强降水常伴有短时强降水, 极端短时强降水强度与年降水量和夏季降水量呈正相关关系。

鲁西北地区为平原, 南临鲁中山区, 东朝渤海, 西与华北平原连接一体。夏季天气晴朗时气温上升较快, 与华北平原共同形成一个高能中心。在大气层结不稳定时, 若北方冷空气入侵, 常造成该区域出现对流降水, 因而鲁西北地区极端短时强降水频次高、强度大、空间分布比较零散。鲁西北的年平均降

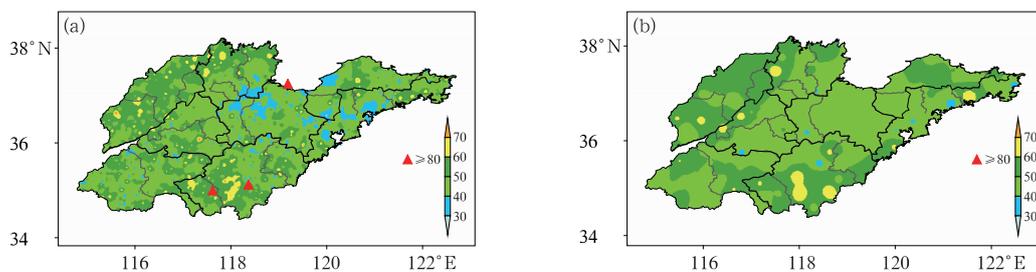


图 5 山东省全部站 (a) 和国家站 (b) 极端短时强降水强度的空间分布 (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 5 Distribution of extreme short-time severe precipitation intensity at all stations (a) and national stations (b) in Shandong Province (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

水量和夏季降水量均为全省的低值区(Zhuo et al, 2014; 万明波和董旭光, 2015), 说明该区域的极端短时强降水因其局地性、持续时间短等特点, 与年降水量和夏季降水量没有正相关关系。

5 极端短时强降水的时间分布特征

5.1 月变化特征

由全部站逐月的极端强降水频次(图 6a)可见, 极端短时强降水有明显的月变化, 呈现明显的中间高两头低的特征。极端短时强降水主要集中在 7—8 月, 频次分别为 3148 和 2597 站次, 占有极端短时强降水频次的 87.3%。牛若芸等(2018)的统计表明, 中国 95°E 以东地区区域性暴雨以 7 月出现次数最多, 华北集中出现在 7、8 月, 可见区域性暴雨与极端短时强降水的时间分布特征具有一致性。其次是 6 月, 出现 632 站次, 其余月份频次很少。国家站(图 6b)与全部站的月变化趋势一致。

全部站极端短时强降水强度(图 6c)范围为 37~49 mm·h⁻¹, 同样呈现中间高两头低的特征。7、8 月的强度分别为 48.1 和 48.9 mm·h⁻¹, 最小值 37.3 mm·h⁻¹ 出现在 4 月。国家站(图 6d)4 月没

有出现极端短时强降水, 5—10 月极端短时强降水强度没有明显月变化规律, 9 月的极端强降水强度最强, 为 51 mm·h⁻¹。

Chen et al(2013)在研究中国暖季短时强降水时空分布特征时发现, 7 月第 4 候短时强降水最为活跃, 短时强降水的发生频率随着东亚夏季风的到来缓慢增加, 随其消退而迅速降低。7—8 月山东省处于副热带高压外围, 低空急流强盛, 将西太平洋和孟加拉湾的水汽源源不断地输送到山东。同时, 低纬度天气系统活跃, 热带气旋北上或者受其外围影响, 常常在山东省引发短时强降水。从第 2 节的分析可知, 10 年来最大和次大的小时降水量分别出现在 8 月和 7 月。从图 6a 和 6b 可知, 国家站由于站点稀疏, 监测到的极端短时强降水的站次数明显少于全部站, 9 月 10 年间只有 20 站次, 因此平均后只能代表少数监测到极端短时强降水的测站的实况, 不能完全代表全省的极端短时强降水的平均状况。全部站由于站点间距小, 监测到的极端短时强降水站次数是国家站的 9 倍, 能监测到不同空间范围短时强降水的波动性, 平均后更能代表全省的平均状况。

可见, 极端短时强降水频次和强度均有明显的月变化, 7—8 月频次最多, 强度最大。全部站与国

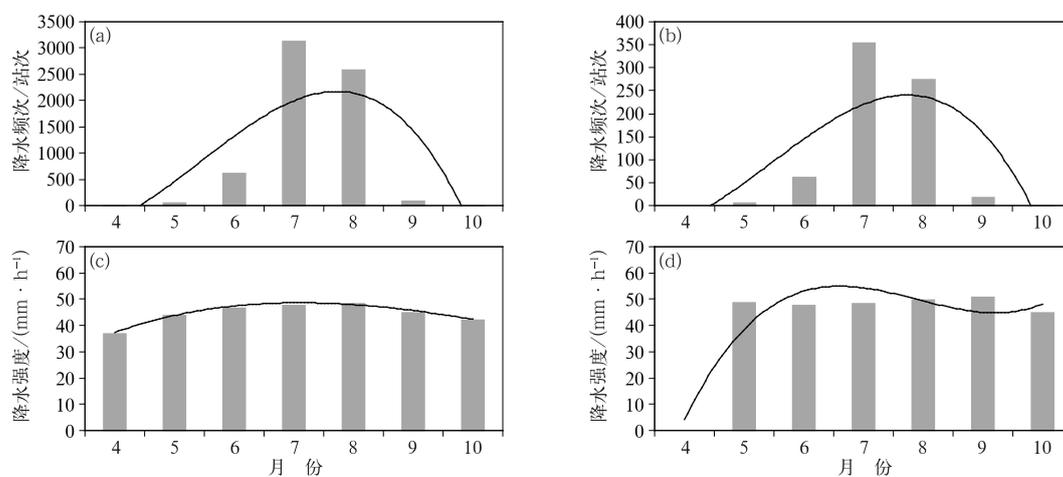


图 6 山东省全部站(a,c)和国家站(b,d)极端短时强降水月变化

(a,b)极端强降水频次,(c,d)极端强降水强度

(黑色曲线为多项式拟合的趋势线)

Fig. 6 Monthly variation of extreme short-time severe precipitation at all stations (a, c) and national stations (b, d) in Shandong Province

(a, b) frequency, (c, d) intensity

(Black curve represents polynomial fitted trend line)

家站极端短时强降水频次的变化趋势相同,但国家站不能完全代表全省极端短时强降水强度的月变化特征。

5.2 日变化特征

由全部站逐时极端强降水频次分布(图 7a)可见,极端短时强降水有明显的日变化,呈现双峰特征,最小值 130 站次出现在 12 时,之后逐渐上升,峰值 424 站次出现在 17 时,之后缓慢下降,在 01 时出现次高峰 307 次。极端短时强降水频次 >300 站次的时间集中在 16—22 时。国家站(图 7b)虽然各时次的频次与全部站有差异,但总趋势的分布特征也呈现双峰特征,第一峰值也出现在傍晚,第二峰值出现在清晨。

全部站极端短时强降水强度(图 7c)范围为 $45 \sim 52 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,呈现两头高中间低的特征,有明显的日变化。强度最大的时间出现在 23—24 时,分别为 $51.0, 51.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,这与华北地区夏季降水强度只有凌晨一个峰值的结论相同(韩函等,2017)。最小值($45.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)出现在 10 时。国家站极端短时强降水强度(图 7d)的趋势线与全部站相同,但是各时次的强度与全部站差异较大,最明显的是 13 时强度($54.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)为日峰值,明显高于其他时刻及全部站所有时刻。原因与 5.1 节相同,由于国家站在每个时刻监测到极端强降水的站次数明显小于全部站,因此其平均值不能完全代表全省的平均分布。

由此可见,极端短时强降水的频次和强度均有明显的日变化,谷值均出现在上午到中午,下午逐渐上升。傍晚出现极端短时强降水的频次最多,夜间的强度最大。全部站与国家站极端短时强降水频次和强度的变化趋势比较接近,但国家站不能完全代表全省极端短时强降水强度的日变化特征。

6 结 论

本文利用近 10 年全部站与国家站 1 mm 以上逐小时降水量,对山东省极端短时强降水的时空分布进行了对比分析,得到以下结论。

(1) 对比全部站与国家站小时降水量的第 98%、99% 和 99.5% 分位数的箱线图表明,二者四分位间距框的分布区间基本一致,但全部站大值区的偏态特征比国家站明显。因此,若分析小时降水量的平均状态,二者均具有代表性,若分析短时强降水的极端性,全部站数据更具有优越性。

(2) 分析表明,将第 99.5% 分位数作为各站极端短时强降水阈值比较合理。全部站和国家站的阈值空间分布特征的相同点是,阈值范围在 $30 \sim 45 \text{ mm}$ 的分布特征基本一致,为区域性分布, $>40 \text{ mm}$ 的区域主要分布在鲁西北和鲁东南地区, 35 mm 以下的测站主要分布在鲁中的东部和半岛南部地区,其他地区为 $35 \sim 40 \text{ mm}$ 。不同点是,全部站 45 mm 以上的测站明显多于国家站,最大值也大于国家站,预报小时最大雨强时要特别注意这些

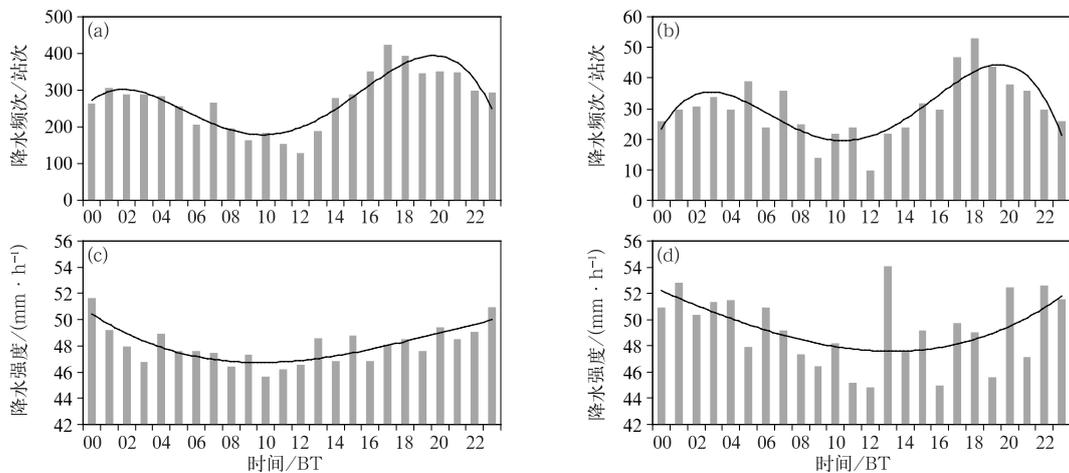


图 7 同图 6,但为日变化

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for daily variation

局地的极端性。

(3) 对于小时最大降水量,鲁中的东部和半岛南部为 60 mm 以下,其他地区在 60 mm 以上,70 mm 以上的测站主要分布在鲁西北和鲁东南地区。鲁东南和鲁西北地区小时最大降水量与日最大降水量成正比,半岛地区二者之间没有明确的相关关系。与全部站相比,国家站数据一方面夸大了半岛南部、鲁东南及鲁西北的西部地区的 70~90 mm 的强降水区范围,另一方面缩小了鲁中的东部和半岛南部 50 mm 以下强降水的范围,而且无法刻画鲁西北的东部、鲁中和鲁西南地区的 70 mm 以上强降水离散性和局地性的分布特点。

(4) 全省大部地区的极端短时强降水强度集中在 40~60 mm·h⁻¹,此区间的分布特征全部站和国家站相似。<40 mm·h⁻¹的测站分布在鲁中的东部和半岛南部地区,>60 mm·h⁻¹的测站分布在鲁西北和鲁东南地区,但国家站数据不能表现上述分布特征。

(5) 极端短时强降水的空间分布特征与地理位置及地形特征密切相关,鲁东南地区的极端短时强降水强度及夏季降水量、年降水量均居全省之首,鲁西北地区虽然强降水频次高、强度大,但因其空间分布的分散性特征,与年降水量和夏季降水量没有正相关关系。

(6) 极端短时强降水频次和强度均有明显的月变化和日变化。7 月和 8 月频次最多、强度最大,谷值均出现在上午到中午,下午逐渐上升,傍晚出现极端短时强降水的频次最多,夜间的强度最大。对于极端短时强降水频次,全部站与国家站的月变化和日变化特征一致;对于极端短时强降水强度,由于国家站监测的站次数远远小于全部站,因此不能完全代表全省的平均状况,全部站数据能更准确地反映全省的时间变化特征。

参考文献

曹钢锋,张善君,朱官忠,等,1988. 山东天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社:161-162. Cao G F, Zhang S J, Zhu G Z, et al, 1988. Weather Analysis and Forecast in Shandong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press: 161-162(in Chinese).

陈晓光, Conway D, 陈晓娟, 等, 2008. 1961—2005 年宁夏极端降水事件变化趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 4(3): 156-160. Chen X G, Conway D, Chen X J, et al, 2008. Trends of extreme precipi-

tation events in Ningxia during 1961—2005[J]. Adv Climate Change Res, 4(3): 156-160(in Chinese).

湛芸,孙军,徐珺,等,2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象, 38(10): 1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10): 1255-1266(in Chinese).

董旭光,顾伟宗,曹洁,等,2017. 山东省汛期小时极端强降水分布和变化特征[J]. 气象, 43(8): 953-961. Dong X G, Gu W Z, Cao J, et al, 2017. Variation features of hourly precipitation in Shandong Province in flood season during 1961—2012[J]. Meteor Mon, 43(8): 953-961(in Chinese).

董旭光,顾伟宗,孟祥新,等,2014. 山东省近 50 年来降水事件变化特征[J]. 地理学报, 69(5): 661-671. Dong X G, Gu W Z, Meng X X, et al, 2014. Change features of precipitation events in Shandong Province from 1961 to 2010[J]. Acta Geogr Sin, 69(5): 661-671(in Chinese).

董旭光,顾伟宗,邱黎,等,2018. 山东省汛期小时降水过程时空分布特征[J]. 气象, 44(8): 1063-1072. Dong X G, Gu W Z, Qiu C, et al, 2018. Spatio-temporal distribution characteristics of hourly precipitation in Shandong Province in flood season[J]. Meteor Mon, 44(8): 1063-1072(in Chinese).

高理,胡桂芳,孙莎莎,2013. 山东夏季强降水的时空演变特征及成因[J]. 干旱气象, 31(4): 690-694, 731. Gao L, Hu G F, Sun S S, 2013. Temporal-spatial evolution feature of summer heavy rainfall in Shandong Province and causes analysis[J]. J Arid Meteor, 31(4): 690-694, 731(in Chinese).

高留喜,李静,刘畅,等,2014. 山东省短时极端强降水研究[J]. 气象科技, 42(3): 482-487. Gao L X, Li J, Liu C, et al, 2014. A study of short-range extreme heavy precipitations in Shandong[J]. Meteor Sci Technol, 42(3): 482-487(in Chinese).

高留喜,王彦,万明波,等,2011. 2009-08-17 山东特大暴雨雷达回波及地形作用分析[J]. 大气科学学报, 34(2): 239-245. Gao L X, Wang Y, Wan M B, et al, 2011. A study on radar-echo and the impact of terrain on the heavy torrential rainfall event in Shandong Province on 17 August 2009[J]. Trans Atmos Sci, 34(2): 239-245(in Chinese).

韩函,吴昊旻,黄安宁,2017. 华北地区夏季降水日变化的时空分布特征[J]. 大气科学, 41(2): 263-274. Han H, Wu H M, Huang A N, 2017. Temporal and spatial distributions of the diurnal cycle of summer precipitation over North China[J]. Chin J Atmos Sci, 41(2): 263-274(in Chinese).

何立富,陈涛,孔期,2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 559-569. He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 559-569(in Chinese).

侯淑梅,盛春岩,万文龙,等,2014a. 山东省极端强降水天气概念模型研究[J]. 大气科学学报, 37(2): 163-174. Hou S M, Sheng C Y, Wan W L, et al, 2014a. The conceptual models of extreme

- precipitation weather in Shandong Province[J]. *Trans Atmos Sci*, 37(2):163-174(in Chinese).
- 侯淑梅,孙兴池,范苏丹,等,2014b. 切变线冷区和暖区暴雨落区分析[J]. *大气科学学报*, 37(3):333-343. Hou S M, Sun X C, Fan S D, et al, 2014b. Analysis on cold and warm sector heavy rain area of shear line[J]. *Trans Atmos Sci*, 37(3):333-343(in Chinese).
- 牛若芸,刘凑华,刘为一,等,2018. 1981—2015年中国95°E以东区域性暴雨过程时、空分布特征[J]. *气象学报*, 76(2):182-195. Niu R Y, Liu C H, Liu W Y, et al, 2018. Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to the east of 95°E in China during 1981—2015[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(2):182-195(in Chinese).
- 孙风华,杨素英,任国玉,2007. 东北地区降水日数、强度和持续时间的年代际变化[J]. *应用气象学报*, 18(5):610-618. Sun F H, Yang S Y, Ren G Y, 2007. Decade variations of precipitation event frequency, intensity and duration in the Northeast China[J]. *J Appl Meteor Sci*, 18(5):610-618(in Chinese).
- 孙继松,雷蕾,于波,等,2015. 近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. *气象学报*, 73(4):609-623. Sun J S, Lei L, Yu B, et al, 2015. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing Area[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(4):609-623(in Chinese).
- 孙兴池,王建国,薛德强,等,2006. 2005年9月18日山东突发性暴雨过程分析[J]. *中国海洋大学学报*, 36(4):595-600. Sun X C, Wang J G, Xue D Q, et al, 2006. Diagnostic analysis of an abrupt heavy rainfall in Shandong on 18 September 2005[J]. *Period Ocean Univ China*, 36(4):595-600(in Chinese).
- 田付友,郑永光,毛冬艳,等,2014. 基于 Γ 函数的暖季小时降水概率分布[J]. *气象*, 40(7):787-795. Tian F Y, Zheng Y G, Mao D Y, et al, 2014. Study on probability distribution of warm season hourly rainfall with Γ distribution[J]. *Meteor Mon*, 40(7):787-795(in Chinese).
- 田付友,郑永光,张小玲,等,2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. *气象*, 44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. *Meteor Mon*, 44(4):469-484(in Chinese).
- 万明波,董旭光,2015. 山东省1961—2010年降水的非均匀性特征[J]. *干旱气象*, 33(4):566-573. Wan M B, Dong X G, 2015. Nonuniformity characteristics of precipitation in Shandong Province during 1961—2010[J]. *J Arid Meteor*, 33(4):566-573(in Chinese).
- 王萃萃,翟盘茂,2009. 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*, 14(5):553-560. Wang C C, Zhai P M, 2009. Changes of precipitation extremes in China's large cities[J]. *Climatic Environ Res*, 14(5):553-560(in Chinese).
- 徐珺,杨舒楠,孙军,等,2014. 北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨[J]. *气象*, 40(12):1455-1463. Xu J, Yang S N, Sun J, et al, 2014. Discussion on the formation of a warm sector torrential rain case in North China[J]. *Meteor Mon*, 40(12):1455-1463(in Chinese).
- 阎丽凤,车军辉,周雪松,等,2013. 泰山地形对一次局地强降水过程动力作用的数值模拟分析[J]. *气象*, 39(11):1393-1401. Yan L F, Che J H, Zhou X S, et al, 2013. Numerical simulation analysis on dynamic effect of Taishan Mountain terrain on local severe rainfall[J]. *Meteor Mon*, 39(11):1393-1401(in Chinese).
- 杨芙蓉,尹承美,卓鸿,2007. 济南市“7.18”大暴雨雨情与灾情[J]. *暴雨灾害*, 26(4):381-382. Yang F R, Yin C M, Zhuo H, 2007. The rainfall and disaster of “7.18” heavy rain in Jinan[J]. *Torr Rain Dis*, 26(4):381-382(in Chinese).
- 杨晓霞,万丰,刘还珠,等,2006. 山东省春秋季节暴雨天气的环流特征和形成机制初探[J]. *应用气象学报*, 17(2):183-191. Yang X X, Wan F, Liu H Z, et al, 2006. Preliminary study on circulation characteristics and mechanism of rainstorm in spring and autumn of Shandong[J]. *J Appl Meteor Sci*, 17(2):183-191(in Chinese).
- 杨晓霞,王金东,姜鹏,等,2015. 山东半岛南部一次沿海强降雨成因分析[J]. *气象科技*, 43(3):512-521. Yang X X, Wang J D, Jiang P, et al, 2015. Causal analysis of a heavy rain along southern Shandong Peninsula Coast[J]. *Meteor Sci Technol*, 43(3):512-521(in Chinese).
- 杨晓霞,吴炜,姜鹏,等,2013. 山东省三次暖切变线极强降水的对比分析[J]. *气象*, 39(12):1550-1560. Yang X X, Wu W, Jiang P, et al, 2013. Contrastive analysis on three extreme heavy rainfalls triggered by warm shear line in Shandong Province[J]. *Meteor Mon*, 39(12):1550-1560(in Chinese).
- 杨学斌,代玉田,崔森,等,2015. 山东夏季两次切变线暴雨过程对比分析[J]. *气象科技*, 43(4):688-696. Yang X B, Dai Y T, Cui M, et al, 2015. Comparison analysis of two shearline-caused rainstorm processes in Shandong[J]. *Meteor Sci Technol*, 43(4):688-696(in Chinese).
- 翟盘茂,李蕾,周伯铨,等,2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. *应用气象学报*, 27(5):631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al, 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. *J Appl Meteor Sci*, 27(5):631-640(in Chinese).
- 翟盘茂,潘晓华,2003. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 58(S1):1-10. Zhai P M, Pan X H, 2003. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century[J]. *Acta Geogr Sin*, 58(S1):1-10(in Chinese).
- 张可欣,汤剑平,郜庆国,等,2007. 鲁中山区地形对山东省一次暴雨影响的敏感性数值模拟试验[J]. *气象科学*, 27(5):510-515. Zhang K X, Tang J P, Tai Q G, et al, 2007. Numerical sensitivity simulation of the topographic effects on heavy precipitation in

- Shandong Province[J]. *Sci Meteor Sin*, 27(5):510-515(in Chinese).
- 赵宇,张兴强,杨晓霞,2004. 山东春季一次罕见暴雨天气的湿位涡分析[J]. *南京气象学院学报*, 27(6):836-843. Zhao Y, Zhang X Q, Yang X X, 2004. Analysis of moist potential vorticity for an exceptional spring rainstorm in Shandong Province[J]. *J Nanjing Inst of Meteor*, 27(6):836-843(in Chinese).
- 周泓,尤红,李璠,等,2013. 2012年初夏滇中首场暴雨过程诊断分析[J]. *应用气象学报*, 24(6):741-752. Zhou H, You H, Li F, et al, 2013. Diagnostic analysis on the first summer rainstorm process of central Yunnan in 2012[J]. *J Appl Meteor Sci*, 24(6):741-752(in Chinese).
- 周雪松,阎丽凤,孙兴池,等,2012. “2007. 8. 17”山东大暴雨的数值模拟和诊断分析[J]. *气象*, 38(8):960-970. Zhou X S, Yan L F, Sun X C, et al, 2012. Numerical simulation and analyses on the 17 August 2007 heavy rainstorm in Shandong Province[J]. *Meteor Mon*, 38(8):960-970(in Chinese).
- 朱义青,赵海军,庄重,等,2015. 山东中部一次强对流天气的中尺度结构和闪电特征分析[J]. *干旱气象*, 33(5):830-837. Zhu Y Q, Zhao H J, Zhuang Z, et al, 2015. Mesoscale structure and lightning features of a convective weather process in center of Shandong Province[J]. *J Arid Meteor*, 33(5):830-837(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.
- 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.
- Mishra V, Wallace J M, Lettenmaier D P, 2012. Relationship between hourly extreme precipitation and local air temperature in the United States[J]. *Geophys Res Lett*, 39(16):L16403.
- Sen Roy S, Rouault M, 2013. Spatial patterns of seasonal scale trends in extreme hourly precipitation in South Africa[J]. *Appl Geogr*, 39:151-157.
- Shaw S B, Royem A A, Riha S J, 2011. The relationship between extreme hourly precipitation and surface temperature in different hydroclimatic regions of the United States[J]. *J Hydrometeor*, 12(4):319-325.
- 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.
- Zheng Y G, Xue M, Li B, et al, 2016. Spatial characteristics of extreme rainfall over China with hourly through 24-hour accumulation periods based on national-level hourly rain gauge data[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(11):1218-1232.
- Zhuo H, Zhao P, Zhou T J, 2014. Diurnal cycle of summer rainfall in Shandong of eastern China[J]. *Int J Climatol*, 34(3):742-750.