

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.

# 山东省汛期小时极端强降水分布 和变化特征<sup>\*</sup>

董旭光 顾伟宗 曹洁 孟祥新

山东省气候中心,济南 250031

**提 要:** 利用山东省 1961—2012 年 74 个气象站逐时降水数据,分析研究了山东省汛期(5—9 月)小时极端强降水的时空变化和日变化特征。结果表明:(1)山东省小时极端强降水量和频次呈大致的带状分布,由东南沿海向西北内陆递减。山东中西部极端小时强降水强度较大,鲁西、鲁西北、鲁西南及半岛西部一带极端强降水量占比较高。(2)山东历年各站平均小时极端降水量、频次、强度均呈不显著的增多增强趋势。鲁南、鲁西北和半岛东部、北部等地降水量增多趋势明显,鲁南、鲁东南、鲁西、半岛中东部降水强度增强趋势明显。(3)下午(15 时)至傍晚(20 时)是山东省小时极端强降水主要发生时段。降水量和降水频次在 11—18 时呈减少趋势,其他时段多为增加趋势。降水强度的变化在上午基本为减弱趋势,其他时段多为不同程度的增强趋势。(4)7 月小时极端降水量和降水频次最大,一日中有两个高值中心。(5)山东夜间两个时段 21 时至次日 02 时、03—08 时段平均和大部分区域极端强降水有增多趋势。

**关键词:** 小时强降水,日变化,时空分布,变化趋势

**中图分类号:** P468

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.006

## Variation Features of Hourly Precipitation in Shandong Province in Flood Season During 1961—2012

DONG Xuguang GU Weizong CAO Jie MENG Xiangxin

Shandong Climate Centre, Jinan 250031

**Abstract:** Based on the hourly precipitation data from 74 meteorological stations in Shandong Province during 1961—2012, the spatio-temporal and diurnal variation characteristics of hourly extreme rainfalls in Shandong during the flood season (May to September) were analyzed. The results show that the hourly extreme rainfall amount and frequency in Shandong are roughly in zonal distributions, decreasing from the southeast to the northwest inland. The intensity of hourly extreme precipitation in the west central part is larger than that in other parts of Shandong. The precipitation in the west, northwest, southwest and western peninsula accounts for a higher proportion. The regional average extreme precipitation, precipitation frequency and intensity show no significant upward trends. The increasing trend of precipitation in the south, northwest, northeast and northeastern peninsula is evident, and the precipitation intensity in the south, southeast, west and eastern central part of the peninsula rises obviously. The period from 15:00 to 20:00 BT is the main occurrence period of hourly extreme precipitation in Shandong Province. The amount and frequency of precipitation decline during the period from 11:00 to 18:00 BT, while in other periods the trends are upward. Precipitation intensity in the morning shows a downward trend while at other times it

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41275073)和山东省气象局科研项目(2015sdqxm05、2016sdqzx02)共同资助

2016 年 6 月 16 日收稿; 2017 年 3 月 31 日收修定稿

第一作者:董旭光,主要从事气候变化和气候应用研究. Email:dongxugg@sina.com

is in an opposite way. The hourly precipitation and frequency are the largest in July with two high-value centers in the day time. During the two periods of 21:00—02:00 BT and 03:00—08:00 BT, the average extreme precipitation and rainfall at most of the stations show ascending trends.

**Key words:** hourly extreme precipitation, diurnal variations, spatio-temporal distributions, changing trend

## 引 言

受全球及区域尺度气候变化影响,不同区域极端天气气候事件明显增多,气候变化和极端气候事件以及他们之间的关系是当前国际社会十分关注的科学问题。Zhai et al(2005)指出,过去 50 多年(相对于 2005 年)我国东部地区降水日数下降,但极端强降水日数增加。虽然华北地区夏季降水减少趋势明显(王遵娅等,2004),但极端降水量在总降水量中的比重呈增加趋势(翟盘茂等,2007)。由于降水分布在时空上的高度不均匀性,只有逐时或更高时间分辨率上的降水资料才能更加准确地反映降水强度信息和降水演变过程的特征。日累计降水量在表征降水强度时会过高估计长时间连续性弱降水的强度,低估短时强降水的强度。近几年,随着长时间序列的逐时、逐分钟降水资料的出现,越来越多的研究关注小时或更短时间尺度的降水特征。Yu et al(2004;2007a;2007b)和 Yu and Zhou(2007)利用长序列的逐时台站降水资料分析发现,中国夏季降水的日变化具有明显的区域性,而长持续性降水的峰值多位于夜间和清晨,短持续性降水的峰值多出现在下午或傍晚。在华北地区,夏季降水总量和频次有所减少,但降水强度在增加。诸多国内学者研究了不同区域的逐时降水长期变化特征和日变化特征,得到一些有意义的结论(殷水清等,2012;李建等,2008;原韦华等,2014;姚莉等,2010;常熠,2015;彭芳等,2012;胡迪和李跃清,2015;杨玮和程智,2015;郑祚芳等,2013),同时,刘伟东等(2014)利用聚类分析方法,田付友等(2014)利用  $\Gamma$  函数和李建等(2013)利用 5 年一遇极端降水对不同区域短时降水进行了讨论。

近年来,因短时极端强降水导致的灾难性事件屡有发生,2010 年舟曲短时强降水引起的特大山洪灾害事故(曲晓波等,2010;廖留峰等,2012;黄勇和覃丹宇,2013),2007 年 7 月 18 日济南市区和商河出现短时强降水造成济南死亡 30 多人。2007 年 8 月 17 日鲁中强降水使华源煤矿发生灌水事件造成 172 人死亡(高留喜等,2014)。短时强降水具有持

续时间短、雨强大、突发性等特点,易形成暴雨洪涝,影响农作物生长,也是引发山体滑坡、泥石流、山洪等山地灾害的直接因素,并且难以防范,会造成社会经济损失甚至会威胁人类生命,极端短时强降水往往造成危害更大(姚莉等,2010)。太阳辐射引起的空气对流、海陆风转换、山谷风转换等是产生时强降水和造成降水日变化的根本原因(孙贞等,2009;丁仁海和周后福,2010)。位于中国中东部的山东省汛期降水受中低纬度季风环流和中高纬度冷空气活动、海陆地理特征差异,以及下垫面特征等的共同影响,具有显著的时空变化及日变化。

山东省位于中国中东部沿海,属暖温带季风气候区,受海陆位置及区域内地形地貌特征差异影响,降水时空分布差异明显,旱涝等自然灾害频发。研究山东小时降水的长期变化特征对于山洪地质灾害的防御、水土保持具有重要意义。受地面观测资料的限制,以往针对山东降水方面的研究主要侧重利用长时间序列的日、月等尺度上的降水资料研究其时空分布及变化特征(高留喜和刘秦玉,2005;徐宗学等,2007;杨士恩和王启,2007;迟竹萍,2009;董旭光等,2014)。因此,本文利用山东 74 个气象站点 1961—2012 年汛期逐时降水资料,探讨各降水指标的长期变化趋势和日变化特征,从而为科学认识该地区短时降水时空变化,为区域降水的短时临近预报服务、城市排水系统规划以及进一步的降水机理研究提供参考。

## 1 资料和方法

选取中国气象局国家气象信息中心提供的逐时降水资料,该资料经过质量控制。受资料限制,本文选用了山东 74 个气象站 1961—2012 年汛期 5—9 月逐时降水资料。

文中使用的降水指标包括第 98 百分位降水量、频次和降水强度等。将降水量  $\geq 0.1$  mm 的时次定义为降水小时;降水频次为时段内有降水的小时数,降水强度为时段内的小时降水量之和除以降水频次,同时采用国际上常用的百分位阈值定义极值方法确定各站小时极端强降水频次、强度,具体方法为

以某站 1961—2012 年共 52 年汛期逐时降水量序列为基础,确定第某百分位对应的降水量作为该站小时极端强降水量的阈值,当小时降水量超过该阈值时,认为该时次出现了极端强降水事件,极端强降水频率为时段内超过降水量阈值的小时数,极端强降水强度为时段内超过降水阈值的小时降水量之和除相应的降水频次。

在研究降水长期特征时,采用最小二乘法计算线性趋势,并对趋势进行显著性水平检验。采用反距离加权(inverse distance weighted, IDW)插值法(张明军等,2009)对小时极端降水参数结果进行插值。

2 结果分析

2.1 不同强度小时强降水变化特征

为了给出不同强度小时强降水的长期变化特征,文中分析了山东省各站第 90、95、98、99、99.5 等分位小时降水的阈值特征(表 1)。由表 1 可知,山东省第 90 和 95 分位小时降水平均阈值均低于  $10.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,出现频次分别为 0.62%、0.31%,降水量占比分别为 58.7%、42.4%,小时降水发生概率和降水量占比较高。第 99 和 99.5 分位小时降水平均值分别达  $24.1$ 、 $31.3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,出现频次和降水量占比较低。根据尺度分析和降水量与垂直速度的关系,  $\geq 10.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降水一般由中小尺度天气系统造成,而  $\geq 50.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降水主要由小尺度天气系统导致(陈炯等,2013)。因此第 90 和 95 分位小时降水不具有典型的小时强降水特征,第 99 和 99.5 分位小时降水阈值则过于严格。第 98 分位小时降水阈值为  $17.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,最低为  $13.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,最高为  $19.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,出现频率为 0.12%,降水量占比为 25.1%,结合 Zhang and Zhai(2011)给出的与暴雨分布一致的  $\geq 20.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  为中国中东部

极端小时降水标准,本文以第 98 分位小时降水为标准,分析其时空变化规律和日变化规律。

2.2 小时极端强降水基本特征

2.2.1 第 98 分位小时降水强度阈值

山东省第 98 分位的小时强降水阈值空间分布见图 1,其他分位阈值空间分布与第 98 分位类似(图略)。潍坊中西部、淄博中部阈值最小,低于  $15.6\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,德州、济南中部、泰安南部、济宁中东部、枣庄、临沂中西部阈值最大,超过  $18.3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,另外,半岛中部阈值也超过  $16.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.2.2 空间分布

山东省第 98 分位小时降水量、频次和强度空间分布见图 2。降水量和频次呈大致的带状分布,由东南沿海向西北内陆递减,鲁东南的临沂中南部、日照沿海及半岛东南部降水量最大,超过  $147.4\text{ mm}$ ,鲁北的东营、滨州、潍坊西北部及半岛北部降水量最小,低于  $113.9\text{ mm}$ 。降水频次空间分布与降水量类似,但带状分布相对更明显,鲁东南和半岛东南部降水频次最高,多年平均高于 5.2 次,向西北内陆逐步递减,鲁西北的德州西部、滨州和东营北部最低,低于 4.1 次。多年平均降水强度的空间分布与降水量、频次则明显不同,山东中西部极端小时强降水强度较大,超过  $28.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,其中德州、济南—泰安—济宁中部及枣庄和临沂南部降水强度超过  $28.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,是山东极端小时强降水强度最大的区域,另外,半岛中部内陆地区降水强度也较大,超过  $28.0\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。潍坊中西部、淄博中东部及半岛北部沿海地区降水强度最小,低于  $25.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

受海陆位置和地形的影响,鲁中山区东南部和半岛东部的极端小时强降水量和频次明显高于同纬度其他地区,山东省汛期期间,来自东南部黄海海上的湿润空气受鲁中山区和半岛内陆丘陵的阻挡抬

表 1 不同百分位小时极端强降水阈值  
Table 1 The threshold of difference percentile of hourly extreme precipitation (HEP) in Shandong

百分位	小时强降水阈值/mm			出现频次 百分比/%	降水量 百分比/%
	最小值	最大值	平均值		
99.5	25.1	36.8	31.3	0.03	9.7
99	19.1	27.0	24.1	0.06	15.9
98	13.9	19.9	17.2	0.12	25.1
95	7.9	11.2	9.6	0.31	42.4
90	4.7	6.4	5.4	0.62	58.7

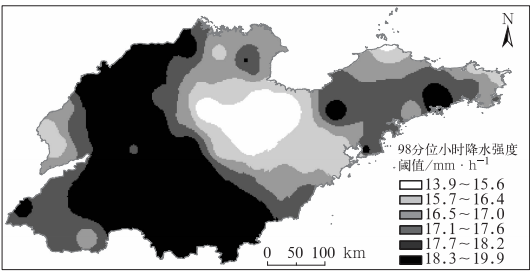


图 1 山东省小时强降水阈值  
(单位:  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) 的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the threshold of HEP (unit:  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) in Shandong

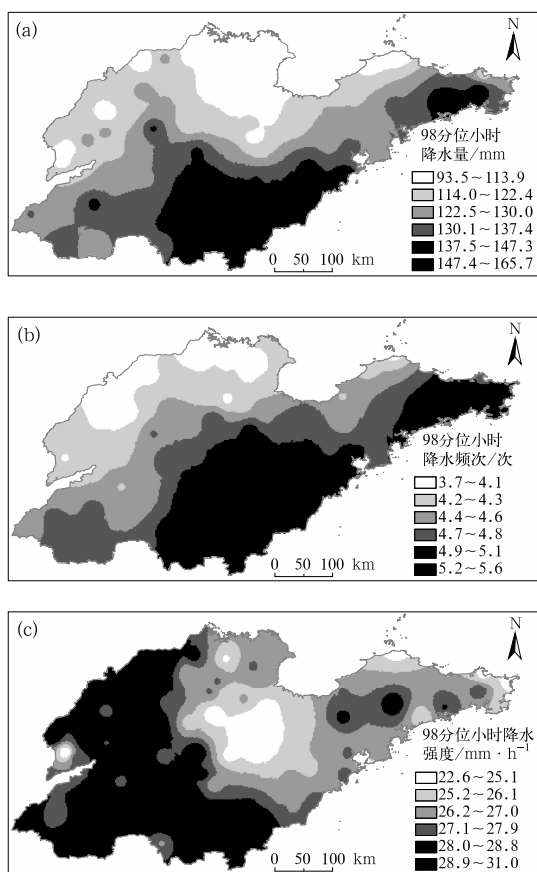


图 2 山东省小时极端降水量(a, 单位:mm)、频次(b, 单位:次)、强度(c, 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of HEP amount (a, unit: mm), frequency (b, unit: n), intensity (c, unit:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) in Shandong

升,造成该地区的极端小时强降水量和频次明显高于西北内陆和北部沿海,是山东省小时强降水的多发区。极端小时强降水强度大值区主要位于山区和丘陵的迎风面。

### 2.2.3 贡献率

山东省汛期极端强降水量占总降水量比率地区间差异明显(图 3),鲁西、鲁西北、鲁西南及半岛西部一带极端强降水量占比较高,普遍高于 26.0%,部分区域占比高于 27.0%;鲁中山区东部、半岛中东部极端强降水量占比相对较低,普遍低于 24.0%,部分区域占比低于 23.7%。

## 2.3 小时极端强降水变化趋势

山东省历年各站平均小时极端强降水量的气候

倾向率为  $0.29 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,呈不显著的增多变化趋势(变化趋势显著表示通过了 0.05 显著性水平检验,变化趋势不显著则反之,下同;图略),20 世纪 60 年代至 80 年代末期,极端降水量呈波动中减少的变化趋势,21 世纪以来极端降水量增多趋势明显。降水频次历年变化与降水量类似,其增加趋势极微弱,气候倾向率为  $0.002 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。山东省平均降水强度的气候倾向率为  $0.14 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,趋势系数为 0.1789,增强趋势不显著,20 世纪 90 年代以前,降水强度变幅不大,1968 年极端降水强度最小,仅  $24.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,对应着山东省降水偏少年,2000 年极端降水强度最大,达  $30.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

山东省小时极端强降水量和降水频次的气候倾向率空间分布类似(图 4),山东各站降水量变化趋势在  $-15.91 \sim 22.88 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,降水频次变化趋势在  $-0.60 \sim 0.83 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。鲁西、半岛南部、鲁北等地共 28 站降水量有减少趋势,但减少趋势均不显著。鲁南、鲁西北和半岛东部、北部等地共 46 站降水量有增多趋势,少数区域增多趋势达到  $7.32 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  以上,其中长岛、文登、蒙阴、禹城、微山和济阳 6 站的增多趋势显著。山东各站降水强度变化趋势在  $-2.02 \sim 2.26 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,呈增强趋势的站点共 42 个,减小趋势的站点共 32 个。鲁南、鲁东南、鲁西和半岛中东部降水强度增强趋势明显,部分区域超过  $0.44 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,其中平阴、乳山、长岛 3 站增强趋势显著,变化趋势均超过  $0.12 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,仅东明站减小趋势显著,变化趋势超过  $-0.20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

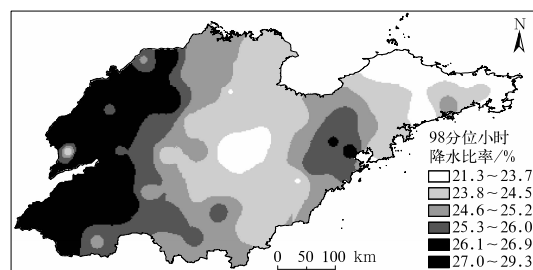


图 3 山东省小时极端强降水对汛期总降水量的贡献率(单位:%)

Fig. 3 Contribution rate of HEP (unit: %) amount to total precipitation amount of flood season in Shandong

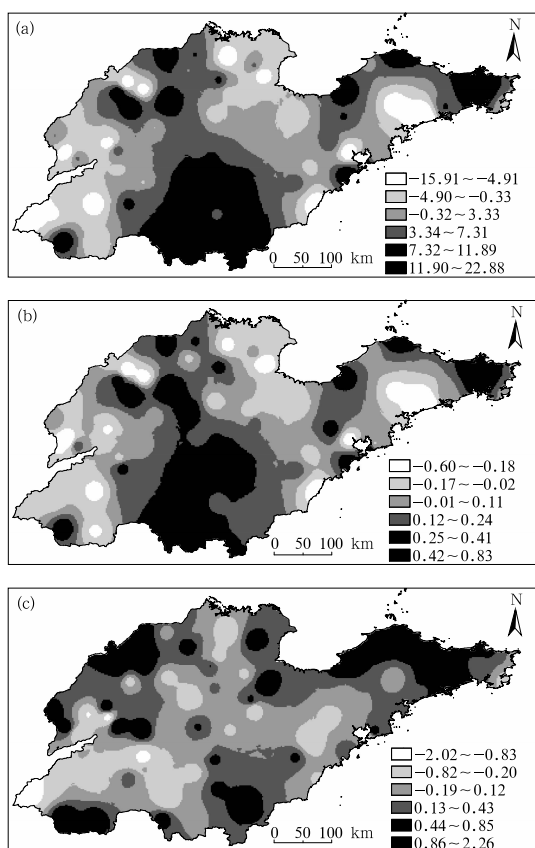


图4 山东省小时极端降水量[a, 单位: $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ], 降水频次[b, 单位: $\text{次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ], 降水强度[c, 单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]的变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of inter-annual changes of HEP amount [unit:  $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ], frequency [unit:  $\text{n} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ], intensity [unit:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ] in Shandong

## 2.4 小时降水日变化特征

### 2.4.1 基本特征

图5为山东省汛期各时次平均小时极端强降水。由图5可见,降水量和降水频次在01—06和15—20时为高值时段,07—14和21—24时为低值

时段。其中,18时最大,分别为7.0 mm、0.24次,11时最小,分别为3.5 mm、0.13次。降水强度高值时段主要出现在下午(13时)至傍晚(20时),低值时段则主要出现在凌晨(04时)至正午(12时),其中,18时最大,为 $29.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,05时最小,为 $25.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。下午(15时)至傍晚(20时)是山东省极端强降水主要发生时段,上午(09时)至下午(14时)、21—24时是山东省极端强降水产生较少时段,凌晨(01时)至上午(08时)降水频次较高,但降水强度相对较小。

### 2.4.2 变化趋势

山东省小时极端强降水气候倾向率变化见图6。由图可见,逐时降水量变化趋势在 $-0.46 \sim 0.36 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,降水频次在 $-0.017 \sim 0.015 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,降水量和降水频次在11—18时呈减少趋势,其他时段多为增加趋势。除13和16时降水量及13、14、16时降水频次减少趋势显著外,其他时次降水量和降水频次变化趋势均不显著。降水强度的变化在上午基本为减弱趋势,其他时次多为不同程度的增强趋势,除14时降水强度增强趋势显著外,其他时次降水强度变化趋势均不显著。从整体上看,虽然11—18时降水量和降水频次呈减少趋势,但降水强度确呈增强趋势,尤以14时增强趋势最显著。

### 2.4.3 逐月变化特征

山东省汛期各月小时平均降水变化差异较大(图7)。5和9月各时次降水量变化不大,5月各时次降水量均低于0.27 mm,9月除04和06时外,其他时次均不超过0.5 mm;6月降水量存在明显的高值时段,为16—20时,超过0.8 mm,以18和19时最大,超过1.0 mm,09—14时最小,均低于0.5 mm;7月小时降水量最大,有两个高值中心,分别是01—03和15—20时,各时次降水量均超过2.5 mm,09—14时最小,均低于1.9 mm;8月逐时降水量相

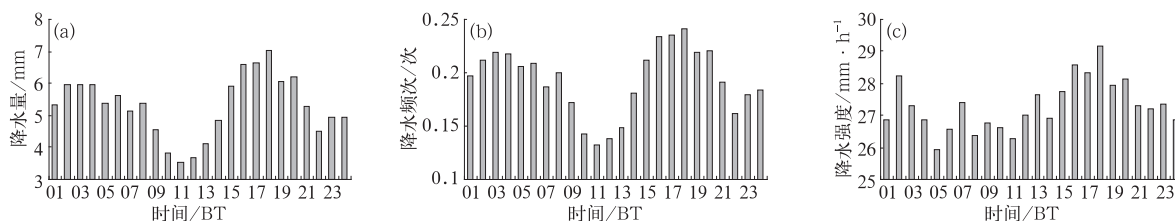


图5 山东省小时平均极端降水量(a)、降水频次(b)和降水强度(c)逐时变化

Fig. 5 Variations of average HEP amount (a), frequency (b), intensity (c) in Shandong

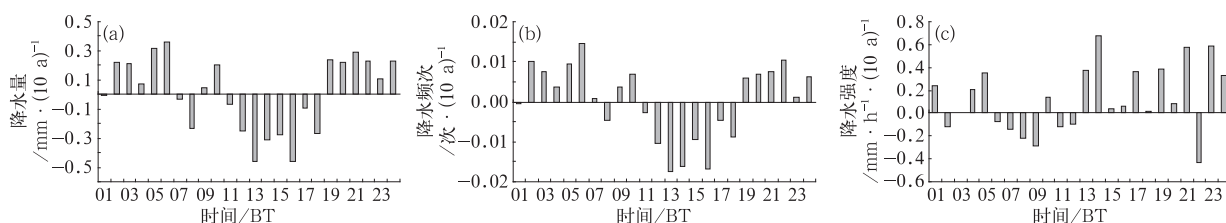
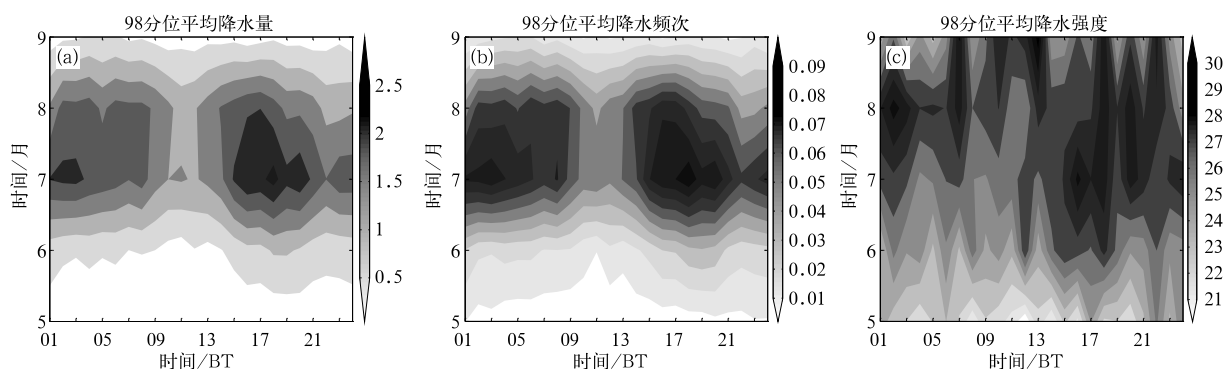


图6 山东省小时极端降水量(a)、频次(b)、强度(c)气候倾向率的逐时变化

Fig. 6 Climatic trends of HEP amount (a), frequency (b), intensity (c) in Shandong

图7 山东省小时极端降水量(a,单位:mm)、频次(b,单位:次)、强度(c,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )的各月逐时变化Fig. 7 Variations of hourly HEP amount (a, unit: mm), frequency (b, unit: n), intensity (c, unit:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) from May to September in Shandong

比7月减小,降水量时间变化与7月类似,有两个高值中心,分别是02—08和14—18时,各时次降水量超过2.0 mm,其他时次较低,尤以11和23时最低,为1.3 mm。

降水频次变化和降水量类似,以7和8月降水频次较高且有两个高值中心,其中7月最高,高值中心分别是01—04和16—20时,各时次均超过0.09次,8月高值中心分别是02—08和14—18时,各时次均超过0.07次;6月降水频次高值时段时16—20时,超过0.03次,11时最低,仅0.01次;5和9月各时次降水频次变化不大,5月除01时外,均低于0.01次,9月除06时外,均低于0.02次。

降水强度时间变化明显有别于降水量和降水频次(图7c),5月各时次极端强降水强度相对较小,白天最低,多数时次低于 $23.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,夜间较高,个别时次高于 $26.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;6月正午(12时)至下午(19时)降水强度相对较大;7月15—20时有明显的高值中心,超过 $29.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;8月高值中心出现在18—20和01—03时,02时超过 $30.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;9月清晨至上午和夜间降水强度相对较大。

#### 2.4.4 不同时段极端强降水的空间分布

山东省汛期不同时段极端强降水空间分布明显

不同(图8),山东各地极端强降水主要出现在15—20时,半岛东部地区主要出现在03—08时,山东各地极端强降水在09—14时最小。15—20时,除半岛东部和西北内陆地区,山东大部地区极端强降水量超过 $35.0 \text{ mm}$ ,以鲁中山区南部、东部及西部少部分区域最大,超过 $45.0 \text{ mm}$ ;09—14时,山东中西部极端强降水量较小,低于 $25.0 \text{ mm}$ ,半岛东部高于 $35.0 \text{ mm}$ ;21时至次日02时,鲁南大部区域超过 $35.0 \text{ mm}$ ,鲁北及鲁中山区西北部则低于 $25.0 \text{ mm}$ ;03—08时半岛东部极端强降水最大,超过 $35.0 \text{ mm}$ ,少数区域达到 $55.0 \text{ mm}$ 以上。

#### 2.4.5 不同时段极端强降水变化趋势的空间分布

山东省汛期不同时段历年各站平均小时极端强降水量变化趋势差异明显(图略),夜间两个时段21至次日02时、03—08时降水量均有增加的变化趋势,气候倾向率分别为 $1.07$ 和 $0.69 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,但增多趋势均不显著,白天09—14和15—20时均有减少的变化趋势,气候倾向率分别为 $-0.85$ 和 $-0.62 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,减少趋势均不显著。20世纪60年代至80年代末期,4个时段的降水量呈波动中减少的变化趋势,21世纪以来4个时段极端降水量增多趋势明显。



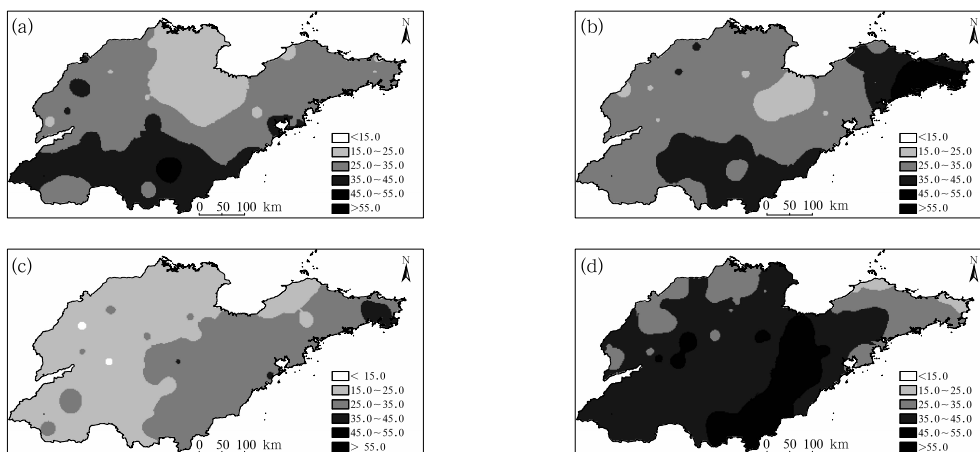


图 8 山东省不同时段小时极端降水量(单位:mm)空间分布

(a) 21 时至次日 02 时, (b) 03—08 时, (c) 09—14 时, (d) 15—20 时

Fig. 8 Spatial distribution of HEP amount (unit: mm) of different period in Shandong

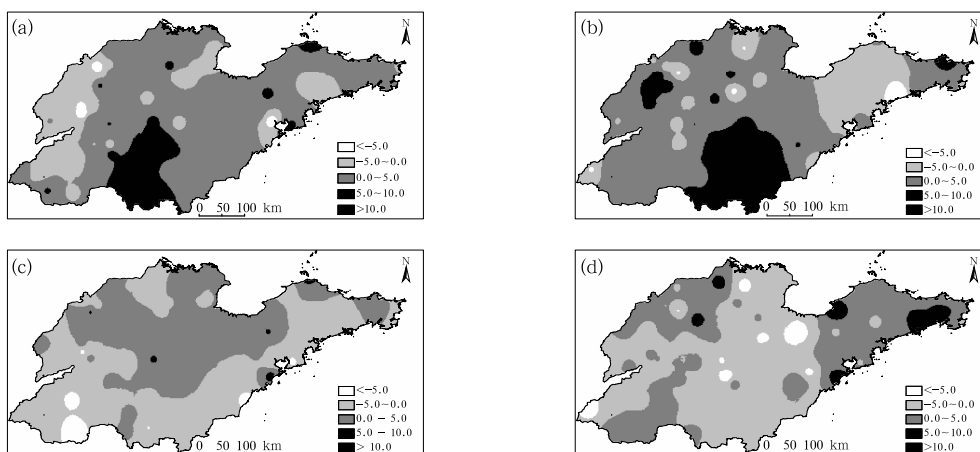
(a) 21:00—next 02:00 BT, (b) 03:00—08:00 BT, (c) 09:00—14:00 BT, (d) 15:00—20:00 BT

山东省汛期不同时段各地极端强降水气候倾向率差异明显(图 9), 21 时至次日 02 时和 03—08 时山东大部分区域极端强降水有增多趋势, 09—14 和 15—20 时呈减少趋势的区域明显增大。21—02 时, 仅鲁西大部、半岛和鲁北等少数区域有减少趋势, 其中胶州和东阿站减少趋势显著, 鲁南的济宁、枣庄一带增多趋势最明显, 超过  $5.0 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 其中长岛、滕州、平邑站增多趋势显著。03—08 时, 仅半岛中西部、鲁北和鲁西南等少数区域有减少趋势, 其中海阳站减少趋势显著, 鲁南的枣庄、临沂一带和鲁西北少数区域增多趋势最明显, 超过  $5.0 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 其中新泰、临沂等 7 站增多趋势显著。09—14 时, 仅鲁中山区及其以北、半岛北部有增多趋势, 单

县减少趋势、长岛增多趋势显著, 其他各站减少和增多趋势均不显著。15—20 时, 仅半岛、鲁西北及鲁西南少数区域有增多趋势, 其中无棣、莱州、乳山、胶南、文登等 5 站增多趋势显著, 潍坊站减少趋势显著。

### 3 结 论

(1) 山东省小时极端强降水量和频次呈大致的带状分布, 由东南沿海向西北内陆递减。山东中西部极端小时强降水强度较大, 潍坊中西部、淄博中东部及半岛北部沿海地区降水强度最小。鲁西、鲁西北、鲁西南及半岛西部一带极端强降水量占比较高,

图 9 同图 8, 但为极端降水量气候倾向率[单位:  $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]Fig. 9 Same as Fig. 8, but for climatic trend of HEP amount [unit:  $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ]

鲁中山区东部、半岛中东部极端强降水量占比相对较低。

(2) 山东省历年各站平均小时极端强降水量、降水频次、降水强度的气候倾向率分别为  $0.29 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $0.002 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  和  $0.14 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，均呈增多增强趋势，但变化趋势均不显著。鲁西、半岛南部、鲁北等地共 28 站降水量有减少趋势，但减少趋势均不显著；鲁南、鲁西北和半岛东部、北部等地共 46 站降水量有增多趋势，其中共 6 站增多趋势显著。鲁南、鲁东南、鲁西、半岛中东部降水强度增强趋势明显，其中共 3 站增强趋势显著。

(3) 下午(15时)至傍晚(20时)是山东省小时极端强降水主要发生时段，上午(09时)至下午(14时)、21—24时是山东省极端强降水产生较少时段，凌晨(01时)至上午(08时)降水频次较高，但降水强度相对较小。降水量和降水频次在 11—18 时呈减少趋势，其他时段多为增加趋势。降水强度的变化在上午基本为减弱趋势，其他时段多为不同程度的增强趋势。

(4) 山东省 7 月小时极端降水量和降水频次最大，有两个高值中心；降水强度在 7 月 15—20 时有明显的高值中心，8 月高值中心出现在 18—20 时和夜间 01—03 时，9 月清晨至上午和夜间降水强度相对较大。

(5) 山东夜间两个时段 21 时至次日 02 时、03—08 时降水量均有不显著的增加趋势，气候倾向率分别为  $1.07$  和  $0.69 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，白天 09—14、15—20 时段均有不显著的减少趋势，气候倾向率分别为  $-0.85$  和  $-0.62 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。各地极端强降水主要出现在 15—20 时，半岛东部地区主要出现在 03—08 时，山东各地极端强降水在 09—14 时最小。21 时至次日 02 时和 03—08 时山东大部分区域极端强降水有增多趋势，09—14 和 15—20 时呈减少趋势的区域明显增大。

## 4 讨 论

文中利用山东省 74 个气象站近 50 年的长期逐时降水资料，分析了山东汛期小时极端强降水的时空变化特征。受下垫面和海陆位置的影响，山东不同区域小时极端强降水差异明显。Qian(2008)研究表明，海陆风是沿海一带降水的重要因素，并向内陆

衰减，当风从海面吹向内陆，内陆下午的降水会增加，会增强强降水的峰值，形成山东东部和南部强降水的高值区。另外，山东降水主要受东亚季风的影响，当山东位于副热带脊的西部或北部时，山东盛行东南或西南季风，同时结合山东地形的共同影响，可能会造成山东西部的强降水。

山东汛期小时极端强降水主要集中在 7 和 8 月，强降水的日变化存在两个高值时段，下午至傍晚的强降水高值可能源于太阳辐射加热的局地对流活动的影响，由于太阳辐射加热的日变化，低层大气在下午和傍晚易于达到不稳定状态，并激发出局地湿对流活动，形成短时降水(Yu et al, 2007b)；而夜间至清晨的高值可能反映了东亚夏季风的影响。近几十年来中国北部地区夏季对流层上层冷却，东亚夏季风减弱(Yu et al, 2004; Yu and Zhou, 2007)，同时山东低层大气显著升温的背景下，使得区域内静力稳定度降低，更易于在午后和傍晚产生强对流活动，导致该时段小时极端强降水增加。He and Zhang(2010)认为山谷风热力环流是引起华北地区暖季山区和谷地降水日变化差异的重要原因。沿燕山—太行山系，山区太阳辐射加热导致降水峰值多在午后发生，其后在对流层中层平均气流引导下向下游及东南方向传播，可能与华北平原地区的清晨降水峰值的形成有关。同时，山谷风环流的上升支有利于局地降水的形成或加强，夜间山谷风环流的上升支与平原地区低层夜间西南急流叠加，有利于暖湿气流的输送，从而有助于平原地区夜间降水峰值形成(宇如聪等, 2014)。近几十年来，山东地表温度升高，尤其夜间最低气温升高最明显，城市热岛效应突显，而对流层中上层气温下降，导致上下层热力差异加剧，可能是造成山东 21 时至次日 02 时、03—08 时段极端强降水增多的原因之一。

强降水日变化的研究应与强降水过程联系起来，关注强降水开始和结束时间的变化，同时也要考虑雨型的变化。另外，强降水日变化也要与云的演变过程结合起来，理解不同云系的宏观和微观特征与降水之间的关联，更好地认识和掌握强降水的演变规律。

## 参考文献

- 常煜, 2015. 内蒙古 5—9 月小时强降水时空变化特征[J]. 中国沙漠, 35(3): 735-743.
- 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等, 2013. 中国暖季短时强降水分布和日变化



- 特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报, 71(3):367-382.
- 迟竹萍, 2009. 近45年山东夏季降水时空分布及变化趋势分析[J]. 高原气象, 28(1):220-226.
- 丁仁海, 周后福, 2010. 九华山山区下垫面对局地降水的影响分析[J]. 气象, 36(3):47-53.
- 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.
- 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.
- 高留喜, 刘秦玉, 2005. 山东春季降水的时空变化特征分析[J]. 高原气象, 24(5):811-815.
- 胡迪, 李跃清, 2015. 青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J]. 大气科学, 39(1):161-179.
- 黄勇, 覃丹宇, 2013. 舟曲泥石流天气过程中云团合并的卫星观测[J]. 应用气象学报, 24(1):87-89.
- 李建, 宇如聪, 孙微, 2013. 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, 71(4):652-659.
- 李建, 宇如聪, 王建捷, 2008. 北京市夏季降水的日变化特征[J]. 科学通报, 53(7):829-832.
- 廖留峰, 汤懋苍, 高晓清, 2012. 2010年我国天灾预测结果的回顾[J]. 高原气象, 31(1):144-149.
- 刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等, 2014. 北京地区自动站降水特征的聚类分析[J]. 气象, 40(7):844-851.
- 彭芳, 吴古会, 杜小玲, 2012. 贵州省汛期短时降水时空特征分析[J]. 气象, 38(3):307-313.
- 曲晓波, 张涛, 刘鑫华, 等, 2010. 舟曲“8.8”特大山洪泥石流灾害气象成因分析[J]. 气象, 36(10):102-105.
- 孙贞, 高荣珍, 张进, 等, 2009. 青岛地区8月一次海风环流实例分析和WRF模拟[J]. 气象, 35(8):76-84.
- 田付友, 郑永光, 毛东艳, 等, 2014. 基于T函数的暖季小时降水概率分布[J]. 气象, 40(7):787-795.
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等, 2004. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 62(2):228-236.
- 徐宗学, 孟翠玲, 赵芳芳, 2007. 山东省近40a来的气温和降水变化趋势分析[J]. 气象科学, 27(4):387-393.
- 杨士恩, 王启, 2007. 山东夏季降水的气候特征及其成因[J]. 热带气象学报, 23(1):65-71.
- 杨玮, 程智, 2015. 近53年江淮流域梅汛期极端降水变化特征. 气象, 41(9):1126-1133.
- 姚莉, 赵声蓉, 赵翠光, 等, 2010. 我国中东部逐时雨强时空分布及重现期的估算[J]. 地理学报, 65(3):293-300.
- 殷水清, 高歌, 李维京, 等, 2012. 1961—2004年海河流域夏季逐时降水变化趋势[J]. 中国科学:地球科学, 42(2):256-266.
- 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等, 2014. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 72(5):948-968.
- 原韦华, 宇如聪, 傅云飞, 2014. 中国东部夏季持续性降水日变化在淮河南北的差异分析[J]. 地球物理学报, 57(3):752-759.
- 翟盘茂, 王翠翠, 李威, 2007. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展, 3(3):144-148.
- 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等, 2009. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化[J]. 地理学报, 64(7):798-806.
- 郑祚芳, 王在文, 高华, 2013. 北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响. 气象, 39(12):1635-1641.
- He H, Zhang F, 2010. Diurnal variations of warm-season precipitation over Northern China[J]. Mon Wea Rev, 138(4):1017-1025.
- Qian J H, 2008. Why precipitation is mostly concentrated over islands in the maritime continent[J]. J Atmos Sci, 65(4):1248-1441.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J, 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia[J]. Geophys Res Lett, 31(22):271-244.
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al, 2007a. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China[J]. Geophys Res Lett, 34(13):173-180.
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al, 2007b. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. Geophys Res Lett, 34(1):223-234.
- Yu R C, Zhou T J, 2007. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon[J]. J Climate, 20(21):5344-5355.
- Zhai P M, Zhang X, 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, 25(5):1177-1183.