

杨银,李岩瑛,陈豫英,等,2019. 基于 Copula 函数的甘肃河东短时强降水特征分析[J]. 气象,45(5):632-640. Yang Y, Li Y Y, Chen Y Y, et al, 2019. Characteristics of short-time heavy rainfall in Hedong Area of Gansu based on copula-function[J]. Meteor Mon, 45(5):632-640(in Chinese).

基于 Copula 函数的甘肃河东短时强降水特征分析*

杨 银^{1,2,3} 李岩瑛⁴ 陈豫英^{1,2,3} 陈自艳⁵ 刘 蓉⁵

1 宁夏气象台,银川 750002

2 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室,银川 750002

3 宁夏气象防灾减灾重点实验室,银川 750002

4 武威市气象局,武威 733000

5 兰州市气象局,兰州 730000

提 要: 利用 1960—2014 年兰州、临夏、合作、定西、武都、天水、平凉和西峰逐分钟降水资料,分析甘肃河东强降水频次的时空分布特征,建立基于 Copula 函数的持续时间和过程雨量的联合分布,基于该函数开展强降水发生概率分析研究。结果表明:(1)甘肃河东近 55 年来平均强降水频次为 1.64 次/(a·站),主要特征为持续时间短、过程雨量小,平均持续时间为 2.88 h,过程雨量为 23.4 mm,持续时间小于 1 h 的概率高达 13.4%;(2)强降水主要发生在汛期(4—9 月),月变化服从正态分布,墨西哥帽小波分析表明频次存在着显著的 22~23 a 和 13~15 a 的年代际和 3~7 a 的年际变化;(3)强降水发生概率从大到小依次为平凉、西峰、天水、定西、武都、临夏、兰州和合作,相应的陇东最大,陇南次之,中部地区最小。

关键词: Copula 函数,强降水,发生概率,甘肃河东

中图分类号: P468, P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.004

Characteristics of Short-Time Heavy Rainfall in Hedong Area of Gansu Based on Copula-Function

YANG Yin^{1,2,3} LI Yanying⁴ CHEN Yuying^{1,2,3} CHEN Ziyang⁵ LIU Rong⁵

1 Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002

2 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002

3 Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan 750002

4 Wuwei Meteorological Office of Gansu Province, Wuwei 733000

5 Lanzhou Meteorological Bureau, Lanzhou 730000

Abstract: Based on minutely precipitation collected from Lanzhou, Linxia, Hezuo, Dingxi, Wudu, Tianshui, Pingliang and Xifeng weather stations in Hedong Area of Gansu Province during 1960—2014, the spatio-temporal distribution characteristics of heavy rainfall frequencies are analyzed. Besides, the risk analysis on duration and accumulated precipitation is obtained by Copula function based on a bivariate Copula distribution model for heavy rainfall variables. The results show that: (1) The main characteristics of heavy rainfall in Hedong Area during recent 55 years are short duration and low accumulated precipitation. The occurring frequency is 1.64 time/(a·station), average duration is 2.88 h, average accumulated

* 国家自然科学基金重点项目(41630426)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430206)共同资助

2017 年 11 月 27 日收稿; 2019 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者:杨银,主要从事天气预报及其方法研究. Email:864304644@qq.com

通信作者:李岩瑛,主要从事天气预报及研究工作. Email:lyyqxj@163.com

precipitation is about 23.4 mm and the probability of duration less than 1 h is up to 13.4%. (2) Heavy rainfall occurs mainly from April to September, and the monthly variation is in the normal distribution. The Mexico Hat wavelet analysis shows that there are obviously interdecadal changes of 22–23 years and 13–15 years, and interannual changes 3–7 years in the heavy rainfall. (3) The frequency of heavy rainfall from large to small is Pingliang, Xifeng, Tianshui, Dingxi, Wudu, Linxia, Lanzhou and Hezuo in order. Correspondingly, the maximum frequency occurs in eastern Gansu, second in southern Gansu, and the smallest central Gansu.

Key words: Copula function, heavy rainfall, probability, Hedong Area of Gansu

引 言

强降水作为气象灾害的重要诱因之一,已经成为中国多数城市和地区一种严重的致灾因子,容易诱发城市内涝、泥石流和山体滑坡等灾害,造成严重的财产损失和人员伤亡。近年来,在甘肃河东地区(以下简称河东地区)短时强降水造成的灾害非常严重,如2010年7月7—8日舟曲和2012年5月10日定西由短时强降水分别引起的泥石流和暴洪都造成了严重的人员伤亡和财产损失(曲晓波等,2010;杨小银等,2013;张之贤等,2013)。

国内较多的气象学者通过逐小时降水数据对强降水的变化特征、环流分型等方面进行了研究(白晓平等,2016;陈元昭等,2016;杨波等,2016;伍红雨等,2017;李强等,2017;董旭光等,2017;王丛梅等,2017;杨萍等,2017)。以上研究在强降水的日变化、年际变化、强度变化等特征变化方面取得了显著成果,但对强降水发生概率的探讨较少。Kim et al (2012)指出强降水持续时间、过程雨量和降水强度是描述强降水的重要指标,因此国内外学者通过建立强降水持续时间与过程雨量的二元 Copula 分布函数分析强降水的发生概率(De Michele and Salvadori, 2003; Zhang and Singh, 2007; Vandenberghe et al, 2011; 张强等, 2011; 曹伟华等, 2016)。Copula 方法还被用于干旱(张玉虎等, 2014; 刘晓云等, 2015; Rauf and Zeephongsekul, 2014)、水文(周念清等, 2014; 郭爱军等, 2015)等多个领域。在参考借鉴上述研究的基础上,本文采用1960—2014年河东地区逐分钟降水资料细致分析了强降水频次的时空分布特征,构建强降水持续时间和过程雨量的二元 Copula 函数,并基于该函数分析了强降水的发生概率。希望研究结果能够进一步加强对该地区强降水的认识,从而供预报业务参考。

1 使用资料和方法介绍

1.1 使用资料

使用资料为1960—2014年兰州、临夏、合作、定西、武都、天水、平凉和西峰逐分钟降水资料(图1)。本文定义一次强降水事件为过程雨量 ≥ 10 mm,雨强 ≥ 5 mm \cdot h $^{-1}$,连续1 h无降水视为一次降水过程结束。按照持续时间将(0,1] h划分为超短历时强降水,(0,3] h划分为短历时强降水,(3,6] h划分为较长历时强降水,>6 h划分为长历时强降水。按照降水量将(10,25]、(25,50]、>50 mm分别划分为中雨、大雨和暴雨及以上量级强降水。地理上将兰州、临夏、合作划分为甘肃省中部地区,将武都、天水、定西划分为陇南地区,将平凉、西峰划分为陇东地区。需要说明的是定西使用资料为定西市岷县站资料,平凉使用资料为平凉市崆峒站资料。

1.2 方法介绍

研究主要讨论河东地区强降水频次的时空分布特征和强降水发生概率,使用常规统计分析、Kendall 秩相关系数分析、正态分析和墨西哥帽小波分析等方法研究强降水频次的时空分布特征,通过构

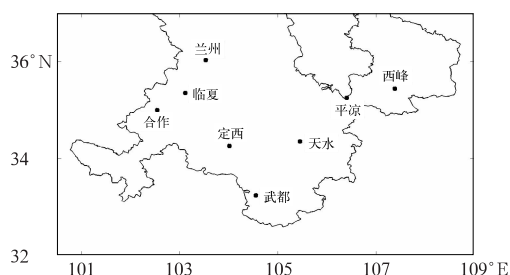


图1 研究区域位置和气象站分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of meteorological stations

建最优 Copula 函数并基于该函数分析强降水发生概率。Copula 函数介绍参见曹伟华等(2016)。构建最优 Copula 函数,分为两个步骤:(1)分别建立强降水过程雨量和持续时间的边缘分布函数。目前强降水中广泛采用的分布函数有指数、广义极值、伽玛、对数正态、韦伯、广义帕累托分布(Vandenberghe et al,2011;Rauf and Zeephongsekul,2014;曹伟华等,2016)等。采用 EasyFit 统计分布拟合软件(包含上述提到的 6 种分布函数在内的 61 种分布函数)对各站强降水持续时间、过程雨量进行拟合并根据 K-S 检验选择最优分布函数,表 1 给出拟合结果。在表 1 中 P 值表示实际样本分布和拟合分布之间的差异性, P 值越大差异性越小,当 $P=1$ 时表示两组数据基本相同, D 值是 K-S 检验的统计量,用于检验拟合分布函数假定是否成立,即在假定的显著性水平检验区间和样本数量下得出 D 值,然后计算实际样本与拟合样本的最大离差,若最大离差小于 D 值,则说明在该显著性水平检验下假定成立,反之则不成立。(2)建立边缘分布函数后需要选择合适的 Copula 函数来描述各致灾因子的联合分

布。一般气象上常用的 Copula 函数为二元 Archimedean Copula 函数族,其成员分别为 Gumbel Copula、Clayton Copula、Frank Copula(公式、参数范围参见曹伟华等,2016)。选用这 3 种 Copula 函数作为候选,通过极大似然估计确定 Copula 函数参数值,并通过 CvM 检验对候选 Copula 函数进行拟合优度检验,以挑选最优 Copula 函数。拟合结果如表 2 所示:合作最优 Copula 函数为 Clayton Copula,其余站为 Frank Copula(在 0.01 显著性水平检验下)。 P 值越小说明该 Copula 函数越不适用于来拟合目标站点数据。

2 结果分析

2.1 强降水频次时空分布特征

2.1.1 强降水频次、持续时间、过程雨量

如表 3 所示,河东地区近 55 年来平均强降水频次为 1.64 次/(a·站),逐年来看,0.5~2.5 次·站⁻¹ 的年份占 87%,大于 3.0 次·站⁻¹ 的年份仅

表 1 边缘分布函数参数及 K-S 检验结果

Table 1 Parameters of the fitted cumulative distribution functions and the results of K-S test

站名	持续时间				过程雨量			
	分布函数	D 值	P 值	参数	分布函数	D 值	P 值	参数
兰州	Dagum	0.05	1	$k=2.58, \alpha=1.96, \beta=2.07$	Fatigue. Life	0.08	0.92	$\alpha=1.23, \beta=7.91, \gamma=9.37$
临夏	Dagum	0.05	0.96	$k=0.52, \alpha=3.08, \beta=4.05$	Fatigue. Life	0.06	0.98	$\alpha=1.06, \beta=11.62, \gamma=8.74$
合作	Johnson SB	0.05	1	$\delta=0.79, \zeta=0.56, \lambda=7.77, \gamma=0.86$	Gen. Pareto	0.06	0.98	$k=0.07, \mu=9.21, \sigma=14.78$
定西	Burr	0.05	0.98	$k=0.86, \alpha=3.08, \beta=1.89, \gamma=0$	Gen. Pareto	0.08	0.96	$k=0.18, \mu=9.86, \alpha=9.39$
天水	Log-Logistic	0.06	0.86	$\alpha=1.92, \beta=1.78, \gamma=0$	Gamma	0.06	0.94	$\alpha=0.75, \beta=19.63, \gamma=9.99$
武都	Log-Logistic	0.05	0.95	$\alpha=2.25, \beta=1.78, \gamma=0$	Gen. Pareto	0.04	0.99	$k=0.16, \mu=8.59, \sigma=9.89$
西峰	Burr	0.05	0.95	$k=0, \alpha=2.94, \beta=1.87, \gamma=0.01$	Log-Pearson3	0.04	0.96	$\alpha=3.03, \beta=0.30, \gamma=2.08$
平凉	Log-Logistic	0.04	1	$\alpha=2.26, \beta=2.12, \gamma=0$	Log-Logistic	0.04	1	$\alpha=1.19, \beta=6.13, \gamma=10.02$

注:全部拟合函数通过 0.01 的显著性水平检验。

Note: All fitting functions passed the significance level test of 0.01.

表 2 CvM 检验结果以及 Copula 函数参数值

Table 2 CvM test results and parameters of the fitted Copula

站名	参数 θ	Clayton		Frank		Gumbel	
		统计量	P 值	统计量	P 值	统计量	P 值
兰州	5.7390	0.2789	0.1552	0.2344	0.2101	0.2603	0.1760
临夏	9.4391	0.1961	0.2770	0.1599	0.3667	0.1884	0.2941
合作	2.0438	0.1360	0.4395	0.1449	0.4106	0.1899	0.2907
定西	4.7672	0.4386	0.0572	0.3388	0.1054	0.3982	0.0731
天水	5.8689	0.3670	0.0885	0.2769	0.1573	0.3245	0.1156
武都	5.7335	0.5014	0.0394	0.3950	0.0746	0.4582	0.0524
西峰	4.8858	0.4654	0.0486	0.4007	0.0721	0.4551	0.0517
平凉	6.0662	0.5267	0.0339	0.4003	0.0722	0.4684	0.0478

表 3 1960—2014 年河东地区强降水基本统计特征

Table 3 Basic statistics of heavy rainfall events in Hedong Area from 1960 to 2014

站名	次数	频次 /次·a ⁻¹	持续时间/h			过程雨量/mm		Kendall 秩 相关系数
			最小	最大	平均	最大	平均	
兰州	44	0.81	0.53	11.42	2.71	89.4	23.2	0.50
临夏	68	1.26	0.47	15.27	3.50	81.2	26.9	0.68
合作	55	1.53	0.70	7.12	2.90	84.4	22.9	0.61
定西	93	1.86	0.45	10.15	2.51	74.5	21.3	0.46
天水	88	1.63	0.43	13.72	3.16	94.9	24.6	0.54
武都	107	2.10	0.16	11.03	2.40	72.2	20.0	0.51
西峰	120	2.22	0.33	19.42	2.73	115.8	23.5	0.47
平凉	94	1.74	0.33	30.88	3.14	169.4	24.6	0.54

注:定西 2012 年、合作 2010 和 2011 年资料缺失。
Note: Dingxi data in 2010, Hezuo data in 2010 and 2011 were missing.

占 4%,平均持续时间为 2.88 h,平均过程雨量为 23.4 mm。其中 2010 年 7 月发生在平凉的一次强降水持续时间最长为 30.88 h,过程雨量最大为 169.4 mm。河东地区强降水持续时间与过雨量为明显的正相关,Kendall 秩相关系数达到 0.54,基于这种较高的相关性,为后续采用 Copula 函数进行发生概率研究奠定了基础。

从过程雨量统计概率分布可以看出(图 2a),随着过程雨量的增加,河东地区强降水发生概率迅速减小;过程雨量在 10~15 mm 概率为 38.7%,15~20 mm 时迅速减小至 19.4%,20~25 mm 占 12.9%;中雨量级强降水发生的概率占 71%,大雨量级强降水占 22.6%,暴雨以上量级强降水仅占 6.4%。

从持续时间统计概率分布可以看出(图 2b),随着持续时间的增加,河东地区强降水发生概率先增加后减小;持续时间在 1.5~2 h 概率最高,占

18.7%,1.0~1.5 h 次之,占 16.4%,0.5~1.0 h 和 2.0~2.5 h 相当,均占 11%左右;超短历时强降水占 13.4%,短历时强降水占 67.6%,较长历时强降水占 24.2%,长历时强降水占 8.0%;超过 12 h 的概率仅为 0.8%。综合来看河东地区强降水以中雨量级、短历时为主。

2.1.2 强降水频次月变化特征

如图 3 所示,强降水频次从 4 月开始至 10 月结束,5 月增多到 0.14 次,占 9%,6 月快速增加为 0.31 次,占 19%,至 7 月达到峰值为 0.57 次,占 35%,8 月回落为 0.44 次,占 27%,进入 9 月迅速减少为 0.14 次,占 9%。99%的强降水发生在汛期(4—9 月),6—8 月最集中(1.32 次),占到了强降水的 81%,近 55 年来只有平凉在 10 月出现过一次强降水。对强降水频次月变化进行正态分布检验发现(图 4a),其服从数学期望为 7.59、方差为 1.20 的正态分布(在 0.01 显著性水平下通过 K-S 检验,临界

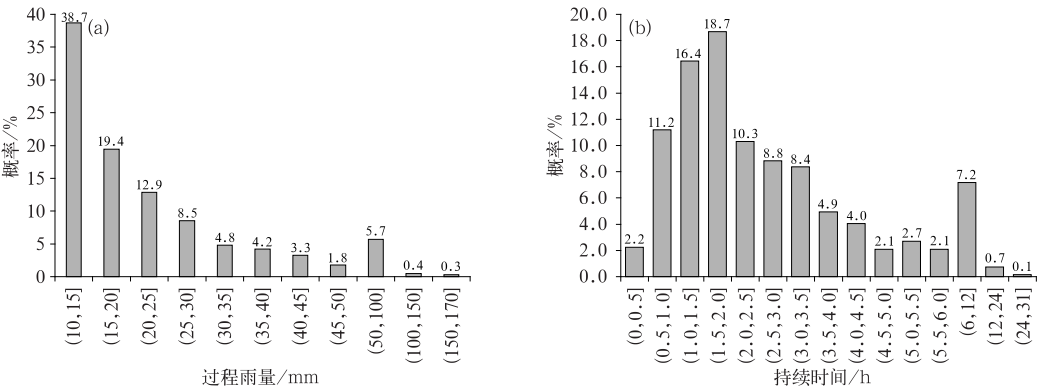


图 2 1960—2014 年河东地区强降水过程雨量(a)和持续时间(b)概率分布

Fig. 2 Statistical probabilities of heavy rainfall processes
in Hedong Area from 1960 to 2014
(a) accumulated precipitation, (b) duration

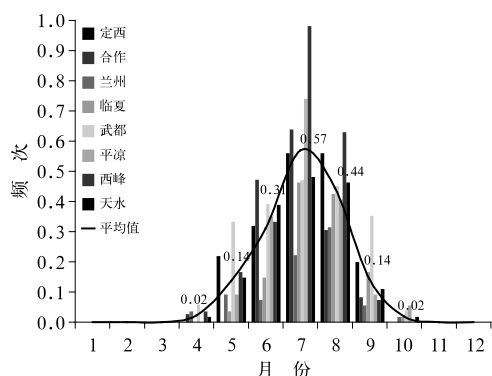


图 3 1960—2014 年河东地区强降水频次月变化
Fig. 3 Monthly change of heavy rainfall frequency in Hedong Area from 1960 to 2014

值为 0.127; D 值为 0.03, P 值为 1), 偏度系数为 -0.140 , 峰度系数为 -0.145 , 表明相对于标准正态分布其概率密度峰值略微偏右(峰值出现在 7 月并且 8 月概率要大于 6 月)且偏低。从 Q-Q 图(图 4b)可以看出, 6 月初至 8 月底更加遵循正态分布。

2.1.3 强降水频次周期变化

图 5a 为墨西哥帽小波系数实部, 由图可见河东地区近 55 年来强降水频次存在着 18~32、4~10 a 的特征时间尺度区间, 同时在整个时间尺度上出现了 3 个偏多中心以及 2 个偏少中心, 分别为 1968、1988、2012、1976 和 2003 年, 此外强降水频次的变化趋势在这 2 个区间上都在加快, 从图 5d~5f 中可以看到振幅都在增强。图 5b 为小波系数模值, 由图可见 28~32 a 特征时间尺度模值较大, 尤其是 1975 年以后, 准 20 a 和 4~10 a 的特征时间尺度在 1995 年以后显著增加, 表明对应时间段内周期性变

化显著。进一步由小波方差图(图 5c)可以看出, 存在着 4 个较为明显的峰值, 从大到小依次为 32、22、9 和 5 a 特征时间尺度, 分别对应图 5d~5f 小波系数的周期性变化(5 a 特征时间尺度图略去), 32、22、9、5 a 特征时间尺度对应的河东地区强降水频次的周期变化分别为 22~23、13~15 a 的年代际变化和 5~7、3~4 a 的年际变化, 周期变化显著, 振幅增强。需要说明的是为了考虑小波分析的边界效应问题, 对原始数据序列头尾增加了 5 a 的对称延伸。

2.2 基于 Copula 函数的强降水发生概率分析

深入研究河东地区强降水发生概率特征, 能够提升该区域应对强降水灾害风险的能力。基于 Copula 函数分析强降水发生概率, 包括两方面内容: (1) 计算强降水持续时间和过程雨量的联合概率密度函数, 以此分析强降水的分布类型以及概率密度。例如出现较大过程雨量的强降水, 尤其是较短持续时间强降水的联合概率密度值, 其值越高则代表发生概率越强。(2) 重现期是一种量化致灾因子发生概率的指标, 而重现期对应的过程雨量是城市排水规划设计的重要依据, 为城市防灾工程设计和制定应急措施提供依据, 对于城市灾害风险评估和管理具有重要意义。一般情况下某一过程雨量对应的重现期以及某一重现期对应的过程雨量都是在一个固定的持续时间内, 例如: 最大雨量对应的重现期, 默认的规定了持续时间为 24 h, 又人为地将一场可能的强降水过程分为两段(08—08 时或 20—20 时); 在城市暴雨公式编制中对重现期的统计也没有考虑具体的持续时间。因此考虑不同持续时间下的

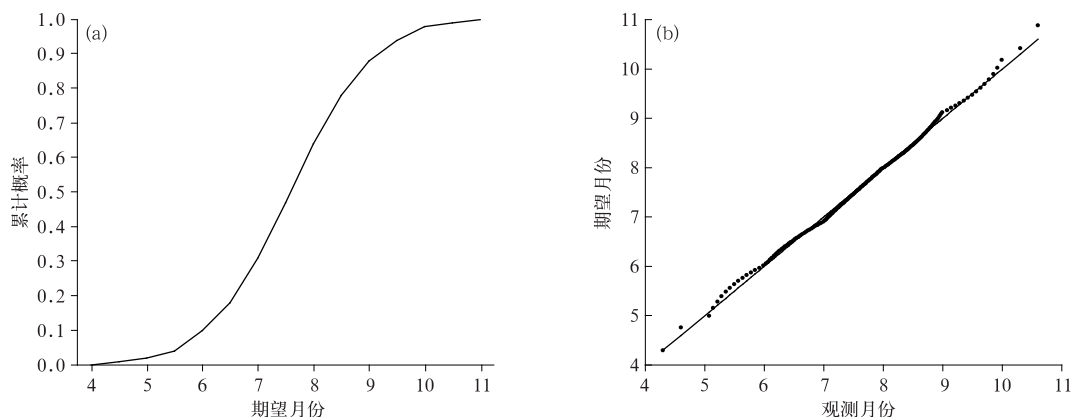


图 4 1960—2014 年河东地区强降水频次月际变化正态分布(a)及 Q-Q 图(b)

Fig. 4 Monthly variation of heavy rainfall frequency in Hedong Area from 1960 to 2014
(a) normal distribution, (b) Q-Q graph

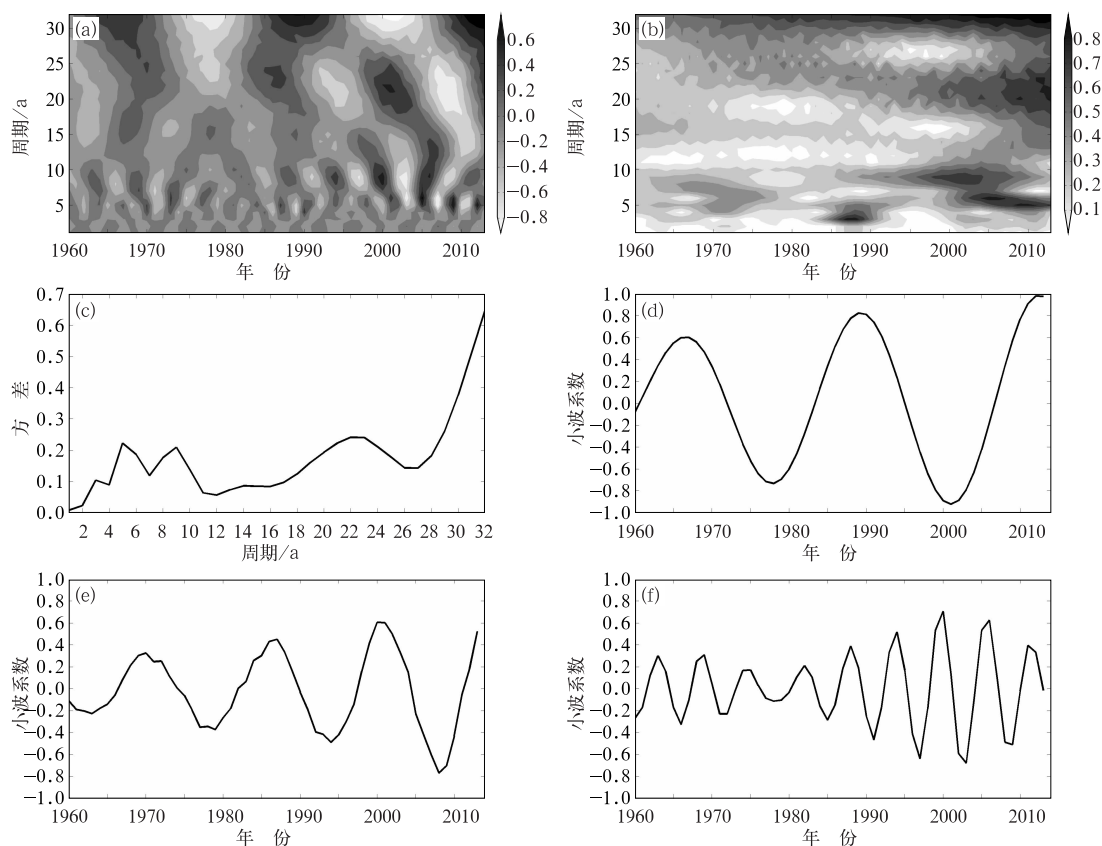


图5 1960—2014年河东地区强降水小波分析实部(a)、小波模(b)、小波方差(c), 以及32 a(d)、22 a(e)和9 a(f)特征时间尺度小波系数

Fig. 5 Wavelet analysis of heavy rainfall precipitation in Hedong Area from 1960 to 2014
(a) real part coefficient, (b) wavelet modulus, (c) wavelet variance and characteristic time scale of 32 a (d), 22 a (e), 9 a (f)

有条件重现和过程雨量能够更加精细地刻画强降水的发生概率,这两个致灾因子的发生概率指标更加科学合理,能解决强降水造成的诸如城市内涝、山洪、泥石流、洪水等灾害中涉及时间的具体问题。有无条件重现期定义如下:

(1) 无条件重现期:定义为大于等于一定过程雨量的强降水平均出现的时间间隔,可表示为:

$$T_w = \tau_t / [1 - G(r)] \quad (1)$$

式中, T_w 表示无条件重现期, τ_t 表示强降水平均时间间隔,以西峰为例,53 a里共出现120次强降水,则 $\tau_t = 53/120 = 0.412 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$, $G(r)$ 为过程雨量的分布函数。

(2) 有条件重现期(简称为条件重现期):定义为在一定持续时间内过程雨量超过一定阈值的强降水平均出现的时间间隔。通过边缘分布函数和二元 Copula 函数构建条件概率表达式[见式(2)]进而计算条件重现期[见式(3)]。

$$P(R \geq r | T \leq t) = 1 - H(t, r) / F(t) = 1 - C(F(t), G(r)) / F(t) \quad (2)$$

$$T_y = \tau_t / P(R \geq r | T \leq t) = \tau_t / [1 - C(F(t), G(r)) / F(t)] \quad (3)$$

式中, P 为持续时间小于某阈值(t)、过程雨量大于某阈值(r)的强降水条件概率, C 为相同情况下 Copula 联合密度分布函数, F 为持续时间分布函数, T_y 为条件概率下的条件重现期。

2.2.1 强降水联合概率密度分析

基于选定的最优 Copula 函数,分析河东地区8站过程雨量与持续时间的联合概率密度分布(图6),各站联合概率密度分布均不相同,共同特征为中间部分(中间持续时间段、中间过程雨量)和短历时、中雨以上的概率密度较低。从概率密度峰值来看,合作为单峰分布,主要集中在过程雨量 $< 15 \text{ mm}$ 、持续时间 $< 1.5 \text{ h}$,峰值高达16%。其余7站为双峰分布,一个峰值均出现在过程雨量 $<$

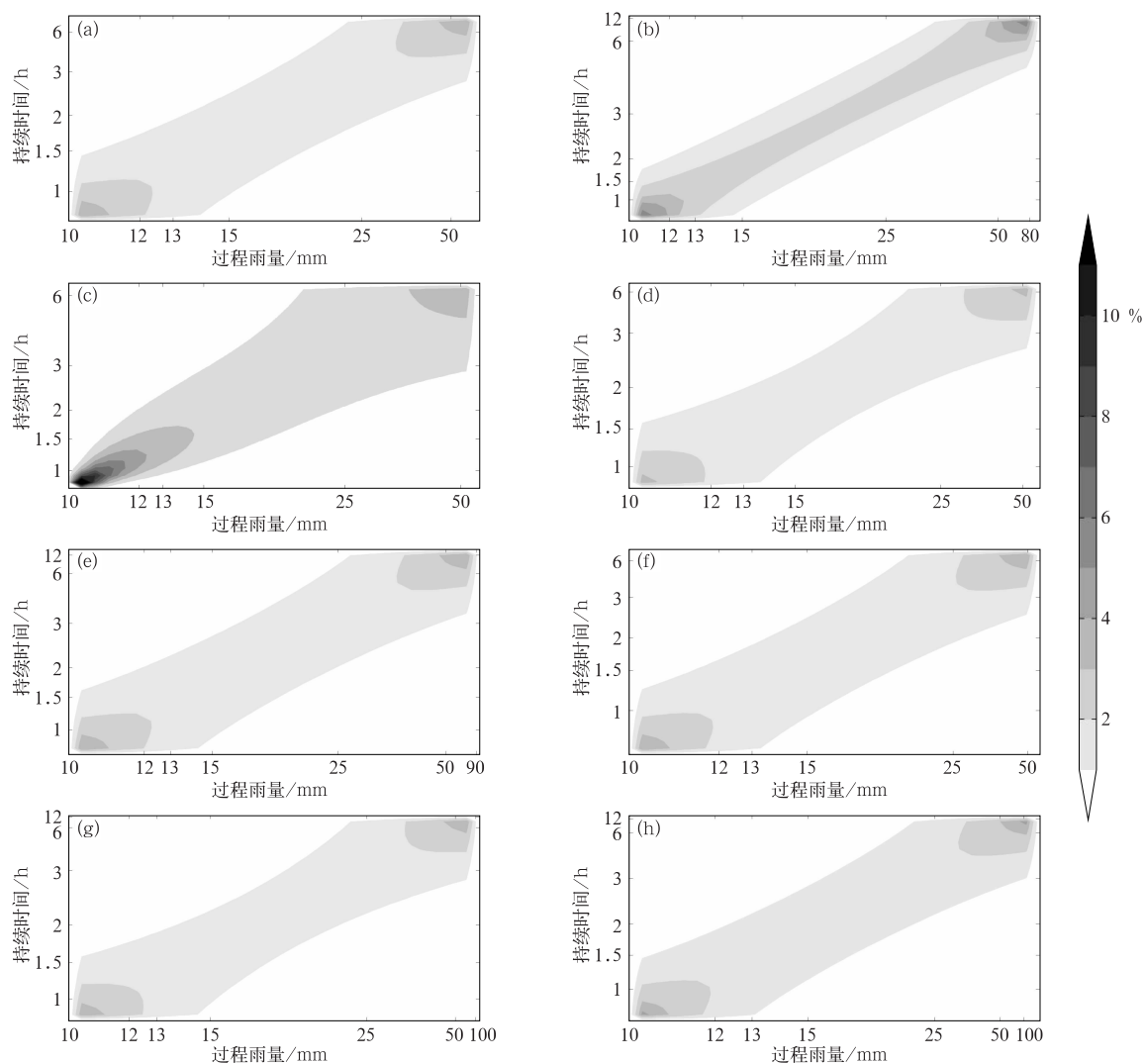


图 6 基于 Copula 函数的 1960—2014 年河东地区过程雨量与持续时间的联合概率密度分布(阴影:概率)

(a) 兰州, (b) 临夏, (c) 合作, (d) 定西, (e) 天水, (f) 武都, (g) 西峰, (h) 平凉

Fig. 6 Copula-based probability density distribution of accumulated precipitation and duration in Hedong Area from 1960 to 2014

(shaded area: probability)

(a) Lanzhou, (b) Linxia, (c) Hezuo, (d) Dingxi, (e) Tianshui,

(f) Wudu, (g) Xifeng, (h) Pingliang

13 mm、持续时间 <1.5 h,其中临夏概率密度峰值为 5.9%,其余 6 站在 4%左右;另一个峰值出现在较长降水历时、较大过程雨量,例如兰州出现在过程雨量 >35 mm、持续时间 >4 h,峰值为 4.2%。对相同承灾体而言,较短持续时间、较大过程雨量的强降水造成的危害性最大,以持续时间 <6 h、过程雨量 >50 mm 为例,从大到小分别为平凉、西峰、天水、武都、定西、兰州、临夏,其中平凉最高概率密度为

3.5%,合作最低,不足 1.5%。

2.2.2 强降水条件重现期分析

计算特定过程雨量 $[(25, 50]$ mm]下不同持续时间的条件重现期(表略)发现:条件重现期随着降水历时的增加而迅速减小,随着过程雨量的增加而迅速增大,短历时强降水条件重现期的变化剧烈,较长历时强降水条件重现期变化相对平稳;以过程雨量 >50 mm 为例:超短历时强降水发生的可能性极

小,条件重现期均在百年以上;短历时强降水条件重现期在几十至百年之间,其中西峰最低为 18.9 a,平凉次之为 28 a;较长历时强降水和长历时强降水(分别对应暴雨蓝色和暴雨橙色预警):河东地区条件重现期平均值为 15、11 a;陇东地区最短,约为 10、8 a,陇南地区和中部地区相当,分别为 16、12 a;西峰最短,分别为 9、8 a,平凉、天水次之,武都最长,分别为 21、17 a。

河东地区各站不同持续时间、条件重现期下强降水的过程雨量(表 4),过程雨量随着持续时间的增加而增大,较短持续时间内增加更迅速,6 h 以后增幅极小,随着条件重现期的增加而增大,较短条件重现期内增加更迅速,20 年以后增加幅度较小;以兰州为例:5 年条件重现期下,持续时间在 3 h($0 < t$

≤ 3)、6 h($0 < t \leq 6$)、12 h($0 < t \leq 12$)的强降水过程雨量分别为 24.0、30.6、33.3 mm;10 a 条件重现期下,分别为 31.6、41.6、45.7 mm;20 a 条件重现期下,分别为 41.0、54.0、58.9 mm;30 a 条件重现期下,分别为 47.2、61.6、67.0 mm。以 20 a 条件重现期、12 h 持续时间为例,各站过程雨量均达到暴雨,除平凉最大为 118.8 mm 以外,其余站相差不大,对应的陇东地区过程雨量最大,陇南和中部地区相当。

通过 Copula 函数计算各站强降水联合概率密度分布、条件重现以及不同持续时间下的过程雨量的强降水发生概率分析,强降水发生概率从大到小依次为平凉、西峰、天水、定西、武都、临夏、兰州和合作,对应的陇东发生概率最大,陇南次之,中部地区最小。

表 4 Copula 函数计算的河东地区指定条件重现期与持续时间下的过程雨量(单位:mm)
Table 4 Accumulated precipitation for given condition return and durations based on Copula function in Hedong Area (unit: mm)

站名	5 a 一遇			10 a 一遇			20 a 一遇			30 a 一遇			50 a 一遇		
	$t \leq 3$ h	$t \leq 6$ h	$t \leq 12$ h	$t \leq 3$ h	$t \leq 6$ h	$t \leq 12$ h	$t \leq 3$ h	$t \leq 6$ h	$t \leq 12$ h	$t \leq 3$ h	$t \leq 6$ h	$t \leq 12$ h	$t \leq 3$ h	$t \leq 6$ h	$t \leq 12$ h
兰州	24.0	30.6	33.3	31.6	41.6	45.7	41.0	54.0	58.9	47.2	61.6	67.0	55.7	71.6	77.5
临夏	20.4	32.6	39.5	23.8	42.1	52.0	27.6	53.0	67.1	30.2	59.9	76.1	34.0	69.6	>81.0
合作	27.3	35.8	36.9	34.7	44.3	45.4	42.5	52.5	53.6	47.1	57.1	58.2	52.9	62.7	63.9
定西	26.9	33.1	34.6	34.3	42.6	44.6	43.1	48.9	56.1	49.0	60.8	63.6	57.2	70.5	73.7
天水	27.0	36.6	41.0	34.4	47.3	53.0	43.1	58.6	65.4	48.7	65.6	72.7	56.4	74.8	82.1
武都	26.0	31.8	33.6	32.2	40.1	42.5	39.6	49.4	52.5	44.6	55.5	58.8	51.6	63.7	67.4
西峰	30.4	38.9	41.6	39.3	51.7	55.6	50.9	68.0	73.3	59.1	79.7	85.8	72.0	97.0	104.4
平凉	24.2	35.9	41.9	33.0	56.9	69.3	48.0	93.5	118.1	61.4	127.0	162.0	86.2	>170.0	>170.0

3 结 论

利用 1960—2014 年兰州、临夏、合作、定西、武都、天水、平凉和西峰气象观测站逐分钟降水资料,开展两方面的研究,第一是使用统计分析、Kendall 秩相关系数分析、正态分析、墨西哥帽小波分析方法分析河东地区强降水频次的时空分布特征,第二是通过构建最优 Copula 函数并基于该函数来分析强降水发生概率,得到以下结果:

(1) 近 55 年来强降水频次为 1.64 次/(a·站),平均持续时间为 2.88 h,平均过程雨量为 23.4 mm,以短时、中雨组合型强降水为主,同时超短时强降水占 13.4%,由于持续时间短,这类强降水会导致更高的气象灾害风险,需要密切关注。

(2) 强降水主要发生在汛期(4—9 月),6—8 月最集中占 81%,频次的月变化服从数学期望 7.59、

方差 1.20 的正态分布;墨西哥帽小波分析表明强降水频次有着显著的 22~23 a 和 13~15 a 的年代际和 3~7 a 的年际变化。

(3) 基于 Copula 函数的强降水发生概率分析表明:河东地区各站强降水的发生概率从大到小依次为平凉、西峰、天水、定西、武都、临夏、兰州和合作,对应的陇东发生概率最大,陇南次之,中部地区最小。

参考文献

白晓平,王式功,赵璐,等,2016. 西北地区东部短时强降水概念模型[J]. 高原气象,35(5):1248-1256. Bai X P, Wang S G, Zhao L, et al, 2016. Conceptual models of short-time heavy rainfall in the east of Northwest China[J]. Plateau Meteor, 35(5):1248-1256 (in Chinese).
曹伟华,梁旭东,赵晗萍,等,2016. 基于 Copula 函数的北京强降水频率及危险性分析[J]. 气象学报,74(5):772-783. Cao W H, Liang X D, Zhao H P, et al, 2016. Copula-based frequency analy-

- sis and its application in hazard risk assessment of heavy rainfall in Beijing[J]. *Acta Meteor Sin*, 74(5):772-783(in Chinese).
- 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来, 2016. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J]. *气象*, 42(2):144-155. Chen Y Z, Yu X D, Chen X L, et al, 2016. Characteristics of short-time severe rainfall events based on weather flow and key environmental parameters in Pearl River Delta[J]. *Meteor Mon*, 42(2):144-155(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).
- 郭爱军, 黄强, 畅建霞, 等, 2015. 基于 Copula 函数的泾河流域水沙关系演变特征分析[J]. *自然资源学报*, 30(4):673-683. Guo A J, Huang Q, Chang J X, et al, 2015. Variation of relationship between runoff and sediment based on Copula function in the Jinghe River Basin[J]. *J Nat Res*, 30(4):673-683(in Chinese).
- 李强, 邓承之, 张勇, 等, 2017. 1980—2012 年 5—9 月川渝盆地小时强降水特征研究[J]. *气象*, 43(9):1073-1083. Li Q, Deng C Z, Zhang Y, et al, 2017. Study on spatio-temporal distribution characteristics of hourly heavy rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September during 1980—2012[J]. *Meteor Mon*, 43(9):1073-1083(in Chinese).
- 刘晓云, 王劲松, 李耀辉, 等, 2015. 基于 Copula 函数的中国南方干旱风险特征研究[J]. *气象学报*, 73(6):1080-1091. Liu X Y, Wang J S, Li Y H, et al, 2015. Characteristics of drought risk in southern China based on the Copula function[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(6):1080-1091(in Chinese).
- 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. Qu X B, Zhang T, Liu X H, et al, 2010. Analysis on the meteorological causes for the 8 August 2010 massive mudslide in Zhouqu, Gansu Province[J]. *Meteor Mon*, 36(10):102-105(in Chinese).
- 王丛梅, 俞小鼎, 李芷霞, 等, 2017. 太行山地地形影响下的极端短时强降水分析[J]. *气象*, 43(4):425-433. Wang C M, Yu X D, Li Z X, et al, 2017. Investigation of extreme flash-rain events on the impact of Taihang Mountain[J]. *Meteor Mon*, 43(4):425-433(in Chinese).
- 伍红雨, 李春梅, 刘蔚琴, 2017. 1961—2014 年广东小时强降水的变化特征[J]. *气象*, 43(3):305-314. Wu H Y, Li C M, Liu W Q, 2017. Variation characteristics of hourly heavy precipitation in Guangdong during 1961—2014[J]. *Meteor Mon*, 43(3):305-314(in Chinese).
- 杨波, 孙继松, 毛旭, 等, 2016. 北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J]. *气象学报*, 74(6):919-934. Yang B, Sun J S, Mao X, et al, 2016. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing[J]. *Acta Meteor Sin*, 74(6):919-934(in Chinese).
- 杨萍, 肖子牛, 石文静, 2017. 基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征[J]. *大气科学*, 41(3):475-489. Yang P, Xiao Z N, Shi W J, 2017. Fine-scale characteristics of rainfall in Beijing urban area based on a high-density autonomous weather stations (AWS) dataset[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(3):475-489(in Chinese).
- 杨小银, 宋广宁, 付培健, 2013. “5.10”岷县暴雨灾害天气过程的数值模拟和诊断分析[J]. *高原气象*, 32(3):798-805. Yang X Y, Song G N, Fu P J, 2013. Simulation and diagnostic analysis of ‘5.10’ rainstorm disaster weather process in Minxian of Gansu[J]. *Plateau Meteor*, 32(3):798-805(in Chinese).
- 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等, 2011. 基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J]. *地理学报*, 66(1):3-12. Zhang Q, Li J F, Chen X H, et al, 2011. Spatial variability of probability distribution of extreme precipitation in Xinjiang[J]. *Acta Geogr Sin*, 66(1):3-12(in Chinese).
- 张玉虎, 刘凯利, 陈秋华, 等, 2014. 区域气象干旱特征多变量 Copula 分析——以阿克苏河流域为例[J]. *地理科学*, 34(12):1480-1487. Zhang Y H, Liu K L, Chen Q H, et al, 2014. Bivariate probability distribution of meteorological drought characteristics in the Aksu Basin using Copula[J]. *Acta Geogr Sin*, 34(12):1480-1487(in Chinese).
- 张之贤, 张强, 赵庆云, 等, 2013. “8.8”舟曲特大山洪泥石流灾害天气特征分析[J]. *高原气象*, 32(1):290-297. Zhang Z X, Zhang Q, Zhao Q Y, et al, 2013. Analyses on disaster weather characteristics of massive mudslide in Zhouqu, Gansu on 8 August 2010[J]. *Plateau Meteor*, 32(1):290-297(in Chinese).
- 周念清, 赵露, 沈新平, 2014. 基于 Copula 函数的洞庭湖流域水沙丰枯遭遇频率分析[J]. *地理科学*, 34(2):242-248. Zhou N Q, Zhao L, Shen X P, 2014. Copula-based probability evaluation of rich-poor runoff and sediment encounter in Dongting Lake Basin[J]. *Acta Geogr Sin*, 34(2):242-248(in Chinese).
- De Michele C, Salvadori G, 2003. A generalized Pareto intensity-duration model of storm rainfall exploiting 2-copulas[J]. *J Geophys Res*, 108(D2):4067.
- Kim Y O, Seo S B, Jang O J, 2012. Flood risk assessment using regional regression analysis[J]. *Nat Hazards*, 63(2):1203-1217.
- Rauf U F A, Zeephongsekul P, 2014. Copula based analysis of rainfall severity and duration; a case study[J]. *Theor Appl Climatol*, 115(112):153-166.
- Vandenberghe S, Verhoest N E C, Onof C, et al, 2011. A comparative copula-based bivariate frequency analysis of observed and simulated storm events; a case study on Bartlett-Lewis modeled rainfall[J]. *Water Resour Res*, 47(7):W07529.
- Zhang L, Singh V P, 2007. Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas[J]. *J Hydrol*, 332(1-2):93-109.