

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0083

陈宏新,江善虎,李国芳,等.基于临界雨量推求复合预警指标的方法及应用[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):46-53.
CHEN H X,JIANG S H,LI G F,et al.Method for deriving composite warning index based on critical rainfall and its application [J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(4):46-53.(in Chinese)

基于临界雨量推求复合预警指标的方法及应用

陈宏新¹,江善虎¹,李国芳¹,李青²,刘昌军²,张晓祥³,任立良¹

(1.河海大学水文水资源学院,南京 210098;2.中国水利水电科学研究院,北京 100038;
3.河海大学地球科学与工程学院,南京 210098)

摘要:基于全国山洪灾害调查评价获取的山洪灾害防治断面临界雨量数据,依据流域产汇流原理充分考虑前期影响雨量 P_a 、临界雨量 P 和预警时段 H 对复合预警指标的不同影响,提出了由临界雨量推求复合预警指标的公式,并以江西婺源县为例说明了该公式的可行性及其应用过程,提出了一套完整的山洪灾害预警方案。结果表明:婺源县复合预警指标值的平均极差为5.4,平均变差系数为0.029,由临界雨量推求复合预警指标可行。将降雨开始时的前期影响雨量、实测或预报的雨量及其时段代入公式得实时复合预警指标值,再与断面复合预警指标阈值比较,达到或超过预警阈值即发布山洪预警,否则根据后续降雨情况重新判断是否预警。该方法充分利用事发之前的已有信息,能计算任意时段预警值,可为山洪灾害预警提供一种新的有效方法。

关键词:山洪;临界雨量;复合预警指标;平均变差系数;婺源县

中图分类号:P338 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Method for deriving composite warning index based on critical rainfall and its application

CHEN Hongxin¹,JIANG Shanhu¹,LI Guofang¹,LI Qing²,LIU Changjun²,ZHANG Xiaoxiang³,REN Liliang¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This study proposes a formula for computing composite warning index according to critical rainfall based on the critical rainfall data of flash flood disaster prevention and control sections obtained from national flash flood disaster investigation and evaluation. According to principles of basin runoff yield and concentration, this formula takes into full consideration the different effects of antecedent influence rainfall (P_a), critical rainfall (P), and early warning period (H) on composite warning index. In addition, this paper takes Wuyuan County in Jiangxi Province as a case study of the feasibility and application of this formula and proposes a complete warning plan for flash flood disasters. The results show that the average range of the composite warning index threshold in Wuyuan County is 5.4, and the average dispersion coefficient is 0.029. It is feasible to derive the composite warning index from the critical rainfall. The early warning plan is as follows; first, substitute the antecedent influence rainfall at the start of rainfall, the measured or forecast rainfall and its duration into the formula to obtain the real-time composite warning index value; then compare it with the cross-section composite warning index threshold. If it reaches or exceeds the warning

收稿日期:2019-01-15 修回日期:2019-05-07 网络出版时间:2019-06-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190531.1607.004.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFA601504);2017“全国典型类型区小流域复合预警指标特征与规律分析”山洪灾害防治项目;中央高校基本科研业务费专项资金(2017B10214)

作者简介:陈宏新(1995—),男,江苏南通人,主要从事水文学与水资源方面研究。E-mail:1529373112@qq.com

通信作者:江善虎(1983—),男,安徽安庆人,副教授,博士,主要从事水文过程模拟方面研究。E-mail:hik0216@163.com

threshold, then issue the flash flood warning; if not, repeat the steps according to the subsequent rainfall situation. This method makes full use of the existing information before the event and can calculate the warning value at any time. So it can be a new effective method for flash flood disaster warning.

Key words: flash flood; critical rainfall; composite warning index; average dispersion coefficient; Wuyuan County

山洪灾害是指山区溪沟中发生的暴涨洪水及由此引起的滑坡、泥石流等对人类生命和财产造成威胁的突发性灾害^[1]。目前山洪灾害已成为我国自然灾害中造成人员伤亡和财产损失的主要灾种之一,因此实施较为可靠的山洪灾害预警是我国山丘区防灾减灾的重要任务^[2]。

临界雨量是目前常用的山洪灾害预警指标。它是指一定时间内导致一个区域发生山洪灾害时降雨量达到或超过的最小量级或强度^[3]。临界雨量的确定有多种方法:国外广泛应用的是美国水文研究中心(HRC)的FFG系统^[4-5],FFG是指在特定时间内使某小流域出口断面发生洪水所达到的降雨深^[6],它较为全面地考虑了降雨、土壤含水量、流域下垫面特性3大因素,基于典型的降雨、产流、汇流、演进、预警指标反推等环节,进行预警指标的计算^[7],方法较成熟且提供预警指标的动态信息,现在仍在不断完善^[8];国内有水位-流量反推法^[9]、暴雨临界曲线法^[10]、比拟法^[11]、水动力学计算方法^[12]、降雨径流关系曲线插值法^[13]、降雨-水位关系预警^[14]等。其中近年来研究较多的是将临界雨量的推求与水文模型结合^[15-19],借助水文模型反算临界雨量,它充分考虑了降雨到形成致灾流量过程中的产汇流机制,但目前我国在实际计算中只能考虑几种特定情况下临界雨量的推求(如前期影响雨量(数值上等于初始土壤含水量) $P_a=1W_m$ (W_m 代表区域饱和土壤含水量)、 $0.8W_m$ 、 $0.5W_m$,预警时段长 $H=1,2,3$ h),而实际前期影响雨量可能并非预先设定的值,山洪的预警时段也不应只局限于几种整小时时段。

复合预警指标法以我国台湾的降雨驱动指标法^[20]为基础,可充分考虑雨强、前期影响雨量、场次累积雨量等降雨要素对山洪灾害的影响^[21]。郭良等^[21]采用经验频率法将复合预警指标与山洪联系起来,绘制出预警临界线并在北张店小流域应用。王路等^[22]根据历史洪水资料建立复合雨量指标与洪峰流量之间的回归方程,由警戒流量得到复合雨量指标阈值并在彭坊小流域进行应用。传统复合预警指标法的优点在于直接利用了历史雨洪资料分析预警指标与山洪之间的相关性,直观明了。但当研

究范围较大时,其工作量巨大。

因此,本文基于全国山洪灾害调查评价获取的大量山洪灾害防治断面的临界雨量数据,提出一种基于临界雨量推求复合预警指标的新方法,并以婺源县为例进行实证研究。该方法既解决了临界雨量受固定初始土壤含水量和时段的限制而不能连续化的问题,也能避免运用传统方法确定复合预警指标的巨大工作量,很好地衔接了山洪灾害调查评价成果。

1 复合预警指标推求方法

1.1 复合预警指标的确定

传统的复合预警指标法认为雨强、前期影响雨量和场次累积雨量是影响山洪的重要因素,复合预警指标应该是三者的函数关系^[21]。本文以预警时段代替雨强,将预警时段内的临界雨量看作场次累积雨量,即复合预警指标 R_T 为前期影响雨量 P_a 、不同组合情景下临界雨量值 P 和预警时段 H 三者的函数关系

$$R_T = f(P_a, P, H) \quad (1)$$

传统的复合预警指标法习惯上把前期影响雨量与场次累积雨量的和称为有效累积雨量,复合预警指标应与有效累积雨量呈正比,而依据流域降雨产流的物理机理,前期影响雨量 P_a 对产流的作用较本场次降雨量的影响要小,因此本文在计算复合预警指标时赋予 P_a 一个折减系数;同时,不同雨强对产流的作用存在差异,雨强越大时越易产生径流,复合预警指标应与雨强成正比关系、与预警时段 H 成反比关系。并且本次研究要求计算出的复合预警指标值在同一断面不同情景(不同前期影响雨量、不同时段)下的变化不能太大,因此为了减小时段 H 对复合预警指标的影响,使同一断面不同时段复合预警指标值基本维持稳定,此时在计算中再赋予 H 一个系数以减小其变动范围。通过反复推理演算,最终确定复合预警指标 R_T 为

$$R_T = (k_1 \times P_a + P) / H^{k_2} \quad (2)$$

式中: k_1, k_2 为系数,一般都小于1,可通过参数系统优化确定。

1.2 参数 k_1 、 k_2 的确定

每一个临界雨量值对应一个前期影响雨量值和一个预警时段值,三者构成一种组合情况,根据每一种情况下的临界雨量数据,先输入一组假定的 k_1 、 k_2 值,代入复合预警指标计算公式得到该参数下区域各断面复合预警指标值,即每个断面产生一个复合预警指标系列,然后计算每个断面复合预警指标系列值的均值、极差、均方差和变差系数,最后计算所有断面变差系数的平均值得到区域复合预警指标值的平均变差系数(即平均 C_v)以观察这组参数下变差系数系列水平的高低。因为变差系数 C_v 常用来比较不同水平变量数列的离散程度及平均数的代表性,所以本文以此作为优化目标进行反复试算,最终得到使平均 C_v 值在理想范围内的 k_1 、 k_2 值,即认为这组参数下各断面变差系数普遍偏小,复合预警指标的平均值具有较好的代表性。试算步骤见图 1。

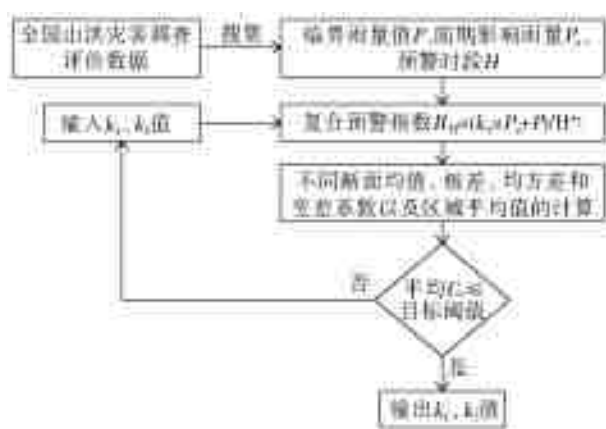


图 1 k_1 、 k_2 值试算流程

Fig. 1 Trial flow chart of k_1 and k_2

2 应用区域与数据

2.1 研究区概况

婺源县属亚热带湿润季风季候区,多年平均气温 $16.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量 $1\ 962.3\text{ mm}$,4—6 月为汛期,平均雨量在 $200\sim 300\text{ mm}$ 以上。婺源县地处江西省上饶市下辖县,位于江西省东北部,赣、浙、皖三省交界处。全县面积大约 $2\ 947.51\text{ km}^2$,其中山区面积大约 $2\ 337\text{ km}^2$,占总面积的 79.3% 。该县属饶河水系,天然水系发育,再加上充沛的雨量和复杂的地形地貌,县内山洪灾害频发,历史山洪灾害数据显示:1955—2014 年婺源县共发生了 179 次较大山洪灾害^[23]。

2.2 临界雨量数据及其可靠性分析

2013—2016 年我国实施了山洪灾害调查评价

项目,其中分析评价的一项重要工作为预警指标确定,即:根据成灾水位计算成灾流量和临界雨量,根据临界雨量和预警响应时间,综合确定准备转移和立即转移预警指标。我国山洪灾害调查评价项目采用经验法、水文计算法和分布式水文模型模拟法等方法计算获取了全国 17 万个沿河村落的设计洪水、临界雨量预警指标^[24];刘业森^[25]等还开发设计了全国山洪灾害调查评价成果数据管理平台,为各级山洪灾害调查评价数据管理与共享提供了参考。本文从全国山洪灾害调查评价数据库收集了婺源县 90 个山洪灾害防治断面(图 2)的临界雨量指标值,并对其可靠性进行了分析。

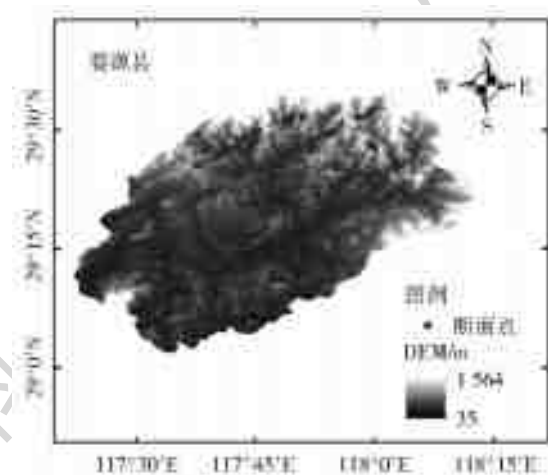


图 2 婺源县及断面分布

Fig. 2 Wuyuan County and distribution of sections

一般而言,临界雨量值需要满足以下基本条件:同一断面临界雨量值随预警时段的增大而增大、随前期土壤含水量的增加而减小。本文搜集的 90 个断面临界雨量数据经分析都满足上述要求,如图 3(仅列出 $P_a=0.8Wm$ 情况下 90 个断面 3 种预警时段的临界雨量结果)和图 4(紫阳镇雍溪村不同初始土湿下 3 种预警时段的临界雨量值)所示:同一断面临界雨量值随前期土壤含水量的增加而减小、随预警时段的增大而增大;不同断面同一预警时段临界雨量值存在明显的波动,3 种预警时段下的波动趋势基本吻合。在 $P_a=0.8Wm$ 情况下,1 h 临界雨量最高可达 69 mm ,最低只有 40 mm ;2 h 临界雨量最高可达 85 mm ,最低只有 49 mm ;波动幅度较大的是 3 h 临界雨量,最高的有 99 mm ,最低的只有 56 mm 。

为进一步分析临界雨量数据的合理性,本文又利用克里金法将临界雨量进行空间展布,见图 5,可以看出:3 种前期影响雨量下不同时段临界雨量空间分布趋势基本一致,在西南部和北部一块区域集中出现临界雨量较低值,容易发生山洪灾害,较高值

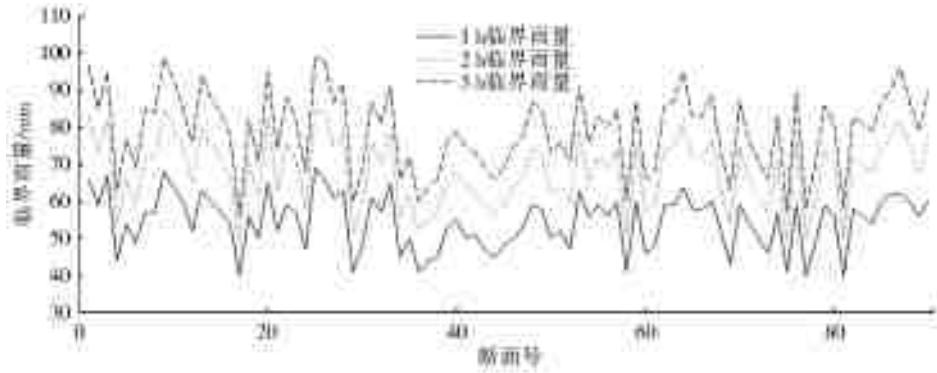


图3 90个断面在 $P_a=0.8 Wm$ 情况下临界雨量结果
Fig.3 Critical rainfall results of 90 sections at $P_a=0.8 Wm$

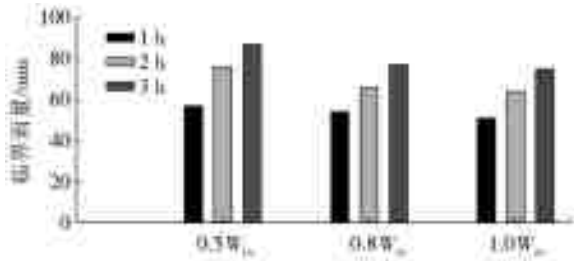


图4 紫阳镇雍溪村不同初始土湿下临界雨量
Fig.4 Critical rainfall with different antecedent soil moisture in Yongxi Village, Ziyang Town

大都集中在南部和东部,山洪灾害危险度低。这与李华威^[23]等之前提出的婺源县山洪灾害危险度分布图基本吻合:山洪灾害危险度较高的小流域主要集中在婺源县的北方和西南方,山洪灾害危险度较低的小流域大多集中在婺源县南部和东部。同时,在空间图中也表现出:同一前期影响雨量下,随着预警时段的增长,区域临界雨量最低值和最高值逐渐增大;同一时段下,前期影响雨量越大,区域临界雨

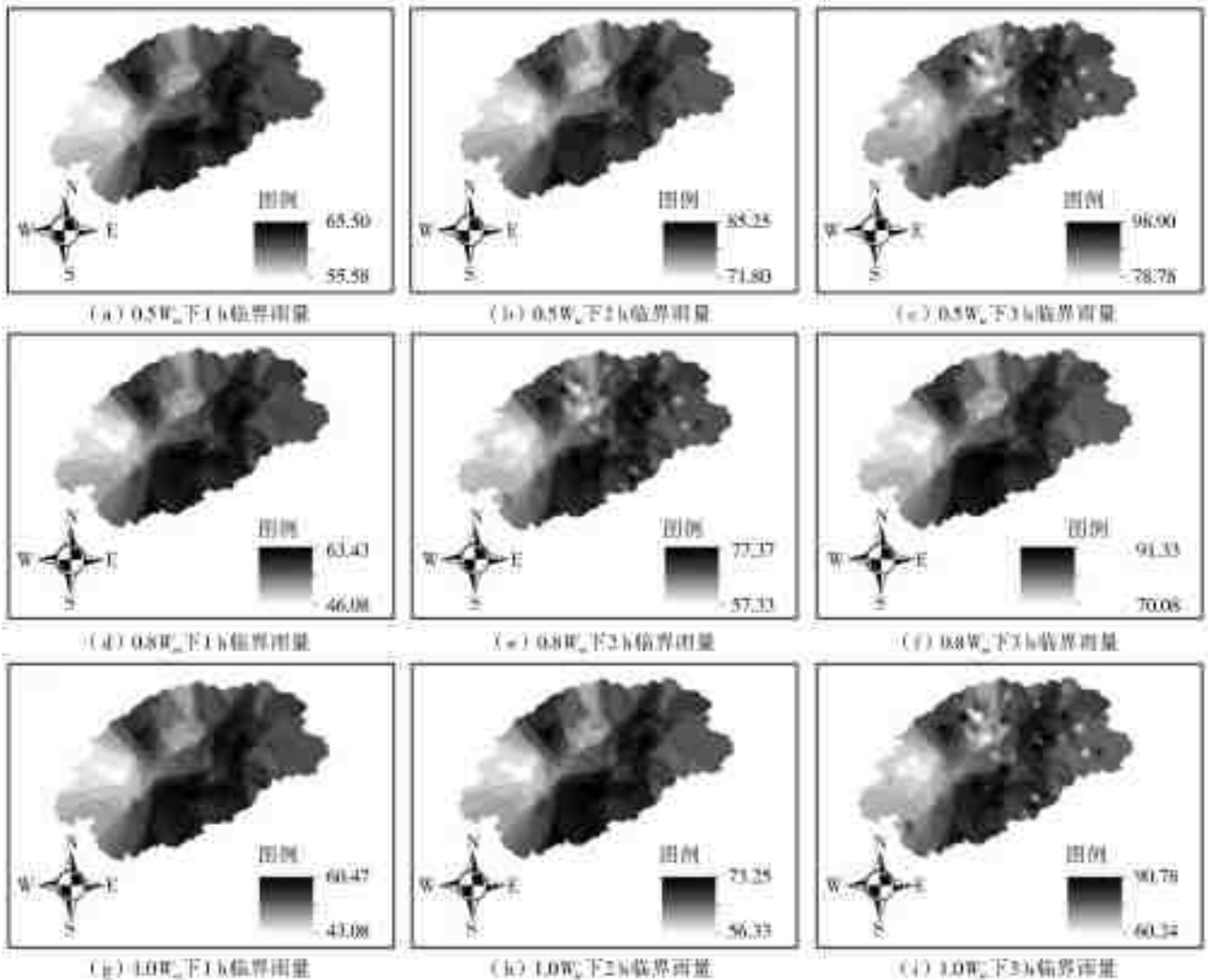


图5 婺源县各断面(90)不同情景下临界雨量空间分布
Fig.5 Spatial distribution of critical rainfall in different scenarios at each section (90) in Wuyuan County

量最低值和最高值越小。这与之前临界雨量值需要满足的基本条件相吻合,因此本文收集的婺源县临界雨量数据可靠性较高。

3 应用结果与分析

3.1 参数计算结果

根据复合预警指标理论公式,采用试算法计算公式中的参数。表 1 列举了试算过程中取不同 k_1 、 k_2 值下婺源县复合预警指标值的平均极差和平均 C_v ,可以看出:保持 k_2 不变,随着 k_1 的增大,婺源县复合预警指标值的平均极差逐渐增大,平均离散系数先减小后增大($k_2 = 0.1, 0.2$)或逐渐增大($k_2 = 0.3, 0.4$);当 k_1 相同时, $k_2 = 0.2$ 情况下婺源县复合预警指标值的平均变差系数普遍相对较小;当 $k_1 = 0.2, k_2 = 0.3$ 时,婺源县复合预警指标值的平均极差和平均变差系数最小,分别为 5.4 和 0.029,此时各断面不同情景下复合预警指标之间相差不大,各断面复合预警指标值的平均值代表性良好。

通过比较分析最终得出计算婺源县复合预警指标理论公式中的参数 k_1 、 k_2 分别为 0.2、0.3,并据此计算出婺源县各断面复合预警指标值。

表 1 不同 k_1 、 k_2 值下统计参数结果

Tab. 1 Statistical parameter results with different values of k_1 and k_2

k_2	k_1	平均 C_v	平均极差	k_2	k_1	平均 C_v	平均极差
0.1	0.2	0.089	19.9	0.3	0.2	0.029	5.4
	0.3	0.079	21.6		0.3	0.042	9.9
	0.4	0.078	25.2		0.4	0.061	16.0
	0.5	0.084	29.5		0.5	0.076	23.6
	0.6	0.092	39.2		0.6	0.096	29.7
0.2	0.2	0.047	10.5	0.2	0.066	11.9	
	0.3	0.041	11.3	0.3	0.08	17.6	
	0.4	0.051	14.5	0.4	0.098	24.2	
	0.5	0.066	18.9	0.5	0.114	31.4	
	0.6	0.080	23.9	0.6	0.130	38.8	

3.2 复合预警指标计算结果

图 6 是复合预警指标均值的空间分布图,明显可以看出:婺源县复合预警指标均值呈东部高西部低的分布趋势,与临界雨量整体空间分布基本一致,且与 3 种不同前期土湿下 1 h 临界雨量的分布相似性最大,在西部集中一块区域其值极低,在中部和南部高值分布呈带状。这与提出的求复合预警指标的理论公式相吻合:预警时段和前期影响雨量一定时,复合预警指标与临界雨量呈正比;且当预警时段为 1 h 时,公式中的 H^{k_2} 为 1,两者的相关关系更好。

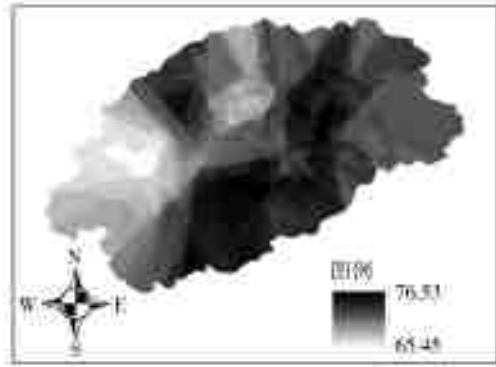


图 6 复合预警指标均值的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of mean value of the composite warning index

从图 7 和图 8 又可以看出:每个断面复合预警指值的均值分布呈波浪形发展,其值在 56.8~84.9,最大相差约 30。统计每个断面不同情况下各自复合预警指标值的最大值、最小值可以发现:最大值分布在 61.7~88.0,最小值分布在 51.8~82.0;同一断面不同情况下的复合预警指标值差异不大,最大极差仅有 9.9,最小极差只有 2.9。图 9 是婺源县 90 个断面复合预警指标 C_v 值的分布图,其中最大 C_v 值有 0.069,最小 C_v 值仅有 0.014,且 C_v 值大多集中分布在 0.015~0.035。由此可见:同一断面不同情况下复合预警指标值的离散程度不大,

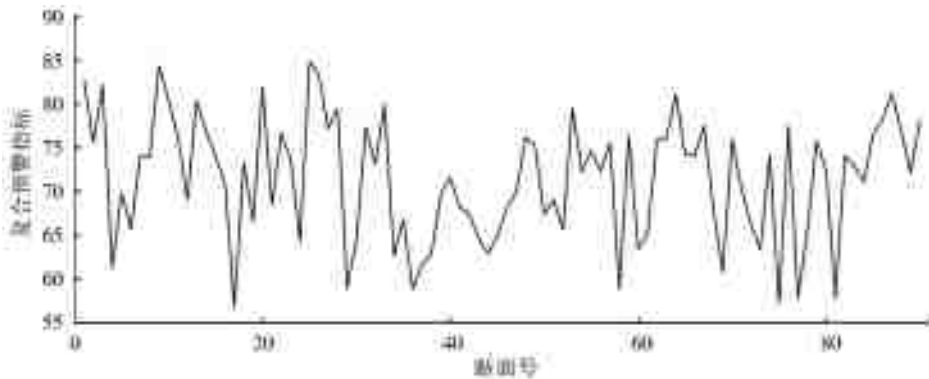


图 7 90 个断面复合预警指标值的均值

Fig. 7 Mean value of the composite warning index at the 90 sections

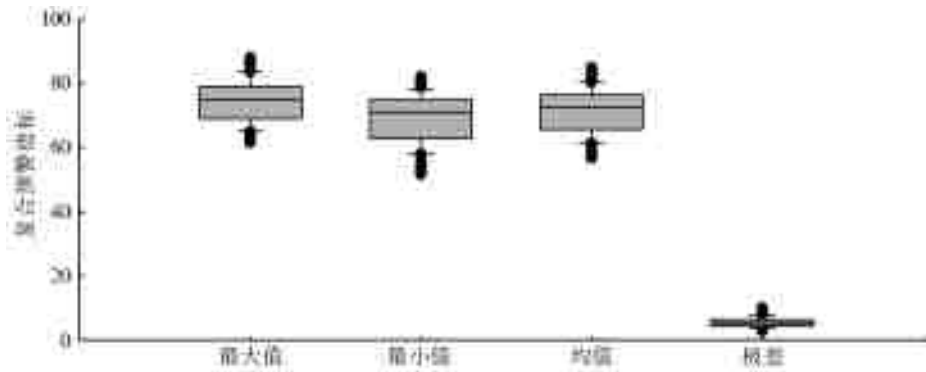


图8 婺源县各断面(90)复合预警指标箱线图

Fig. 8 Box plot of composite warning index for each section (90) in Wuyuan County

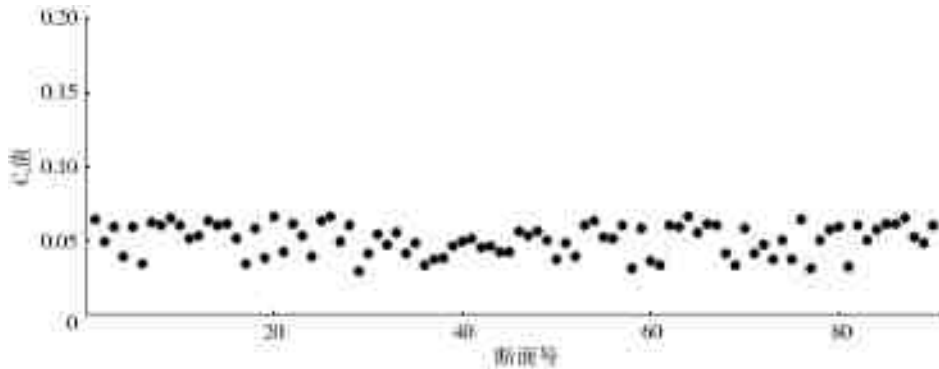


图9 婺源县各断面复合预警指标 C_v 值分布

Fig. 9 Distribution of C_v of composite warning index for each section in Wuyuan County

即各断面复合预警指标值的平均值代表性良好,可作为各断面发生山洪灾害时的预警阈值。这也达到了该方法理论上要求同一断面不同情景下的复合预警指标值差异不要太大的要求,因此理论公式 $R_{T1} = (0.2 \times P_a + P) / H^{0.3}$ 在婺源县有较好的适用性。

综上所述,本文研究的复合预警指标(断面复合预警指标 C_v 值最大为 0.069,最小为 0.014)较临界雨量(断面临界雨量 C_v 值最大为 0.23,最小为 0.152)更加稳定,即与临界雨量相比,各断面无需分情况确定多个预警阈值,复合预警指标均值可作为断面的预警阈值,且根据公式可计算任意前期影响雨量下任意时段的预警指标值,解决了临界雨量受固定初始土壤含水量和时段限制而不能连续化的问题。同时,与传统的复合预警指标法相比,本文提出的方法由于能充分利用事发之前的已有信息,根据公式即可确定复合预警指标值,避免了运用传统法时分析历史雨洪资料的巨大工作量。

3.3 山洪预警方案

综合婺源县 90 个断面复合预警指标值的计算结果和分析情况可以得出,婺源县复合预警指标值的平均极差为 5.4,平均变差系数为 0.029,由临界雨量推求复合预警指标可行,理论公式 $R_{T1} = (0.2 \times$

$P_a + P) / H^{0.3}$ 能较好地适用于婺源县。据此,提出了一套婺源县具体山洪预警方案:将降雨开始时的前期影响雨量、实测或预报的雨量及其时段长代入该公式,得到实时复合预警指标值,再与断面复合预警指标阈值比较,达到或超过预警阈值即发布山洪预警。若本时刻未达到预警阈值而降雨仍继续,则滚动计算后续实时复合预警指标值,重新判断是否预警直至降雨减弱或停止。具体预警方案流程图见图 10。

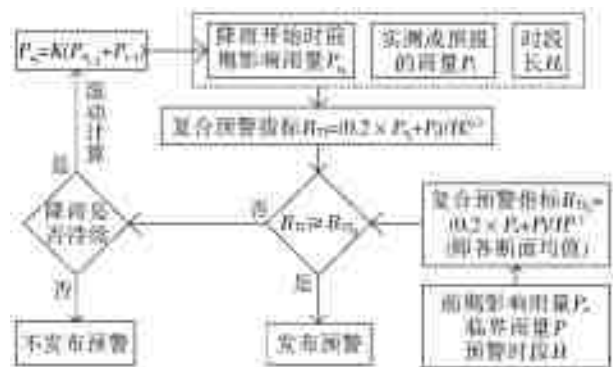


图10 婺源县山洪预警方案流程

Fig. 10 Flow chart of flash flood warning in Wuyuan County

4 结论

本文提出基于临界雨量推求复合预警指标的方

法,根据产汇流规律确定计算复合预警指标的理论公式为 $R_{II} = (k_1 \times P_a + P) / H^{k_2}$ 。并在婺源县进行了实际应用,得出婺源县 90 个断面复合预警指标值的均值,并将其作为断面复合预警指标阈值。婺源县复合预警指标值的平均极差为 5.4,平均变差系数为 0.029,由临界雨量推求复合预警指标可行,公式为 $R_{II} = (0.2 \times P_a + P) / H^{0.3}$ 。据此,提出基于复合预警指标的预警方案:将降雨开始时的前期影响雨量、实测或预报的雨量及其时段长代入公式,得到实时复合预警指标值,再与断面复合预警指标阈值比较,达到或超过预警阈值即发布山洪预警。若本时刻未达到预警阈值而降雨仍继续,则滚动计算后续实时复合预警指标值,重新判断是否预警直至降雨减弱或停止。

参考文献(References):

- [1] 刘淑雅,江善虎,任立良,等. 基于分布式水文模型的山洪预警临界雨量计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):384-390. (LIU S Y, JIANG S H, REN L L, et al. Calculation of critical rainfall for early-warning of mountain flood based on distributed hydrological model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(5):384-390. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.002.
- [2] 刘志雨. 山洪预警预报技术研究与应用[J]. 中国防汛抗旱,2012,22(2):41-45,50. (LIU Z Y. The study and application of mountainous flood warning and prediction technology[J]. China Flood & Drought Management, 2012, 22(2):41-45,50. (in Chinese)) DOI: 10.16867/j.cnki.cfdm.2012.02.014.
- [3] 程卫帅. 山洪灾害临界雨量研究综述[J]. 水科学进展, 2013, 24(6):901-908. (CHENG W S. A review of rainfall thresholds for triggering flash floods[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6):901-908. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.06.012.
- [4] NORBIATO D, BORGA M, DINALE R. Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds[J]. Meteorological Applications, 2009, 16(1):65-75. DOI: 10.1002/met.126.
- [5] HAPUARACHCHI H A P, WANG Q J, PAGANO T C. A review of advances in flash flood forecasting[J]. Hydrologica Processes, 2011, 25(18):2771-2784. DOI: 10.1002/hyp.8040.
- [6] BAE D H, LEE M H, MOON S K. Development of a precipitation-area curve for warning criteria of short-duration flash flood[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18:171-183. DOI: 10.5194/nhess-18-171-2018.
- [7] 毛北平. 垂向混合产流模型在无资料地区山洪灾害临界雨量计算中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(4):720-730. (MAO B P. Application of the vertically-mixed runoff model to the calculation of the rainfall threshold of flash floods in ungauged basins [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(4):720-730. (in Chinese)) DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2016.04.008.
- [8] DUGWON S, LAKHANKA R T, MEIJA J, et al. Evaluation of operational national weather service gridded flash flood guidance over the Arkansas Red River basin[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2013, 49(6):1-12. DOI: 10.1111/jawr.12087.
- [9] 叶勇,王振宇,范波芹. 浙江省小流域山洪灾害临界雨量确定方法分析[J]. 水文, 2008, 28(1):56-58. (YE Y, WANG Z Y, FAN B Q. An analysis method for ascertain critical rainfall of mountain flood disaster of small watershed in Zhejiang Province [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(1):56-58. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2008.01.013.
- [10] 江锦红,邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准[J]. 水利学报, 2010, 41(4):458-463. (JIANG J H, SHAO L P. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4):458-463. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.04.003.
- [11] 陈文辉. 山洪灾害防治非工程措施中预警指标的确定——以甘肃省陇南市宕昌县为例[J]. 广东水利水电, 2011(3):65-67. (CHEN W H. Determination of warning indicators in the torrential flood control non-engineering measure [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2011(3):65-67. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-0112.2011.03.021.
- [12] 潘佳佳,曹志先,王协康,等. 暴雨山洪水动力学模型及其简化模型的比较研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊):77-82. (PAN J J, CAO Z X, WANG X K, et al. Comparative study of simplified and full hydrodynamic models for flash floods [J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2012, 44(S):77-82. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.s1.052.
- [13] 徐少军,江炎生,毛北平,等. 基于降雨径流关系曲线插值法的山洪临界雨量计算[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(6):30-35. (XU S J, JIANG Y S, MAO B P, et al. Method of flash flood rainfall indicator determination based on rainfall-runoff charts [J]. China Flood

- & Drought Management, 2015, 25(6): 30-35. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1673-9264.2015.06.011.
- [14] 吴承卿. 基于降雨—水位关系的临界雨量确定方法研究[J]. 人民珠江, 2016, 37(11): 21-25. (WU C Q. Study on the critical rainfall determination method based on the relationship between rainfall and water level[J]. Pearl River, 2016, 37(11): 21-25. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.2016.11.005.
- [15] 叶金印. 基于动态临界雨量的山洪预警方法研究与应用[J]. 气象, 2014, 40(1): 101-107. (YE J Y. Research and application of flash flood early warning method based on dynamic critical precipitation[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(1): 101-107. (in Chinese)) DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.012.
- [16] 陈瑜彬, 杨文发, 许银山. 不同土壤含水量的动态临界雨量拟定方法研究[J]. 人民长江, 2015, 46(12): 21-26. (CHEN Y B, YANG W F, XU Y S. Study of dynamic critical precipitation drafted method under different soil moisture content level[J]. Yangtze River, 2015, 46(12): 21-26. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.12.006.
- [17] 李昌志, 郭良, 刘昌军, 等. 基于分布式水文模型的山洪预警临界雨量分析——以涪水南支小流域为例[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(1): 70-76. (LI C Z, GUO L, LIU C J, et al. Flash flood early-warning indicators based on distributed hydrological model—a case study in south branch of Censhui watershed[J]. China Flood & Drought Management, 2015, 25(1): 70-76. (in Chinese)) DOI: 10.16867/j.cnki.cfdm.2015.01.029.
- [18] MIAO Q H, YANG D W, YANG H B, et al. Establishing a rainfall threshold for flash flood warnings in China's mountainous areas based on a distributed hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 371-386. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.04.054.
- [19] 包红军, 李致家, 王莉莉, 等. 基于分布式水文模型的小流域山洪预报方法与应用[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(2): 156-163. (BAO H J, LI Z J, WANG L L, et al. Flash flood forecasting method based on distributed hydrological models in a small basin and its application[J]. Torrential Rain and Disasters, 2017, 36(2): 156-163. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9045.2017.02.008.
- [20] 彭万兵, 赵东, 黄尔, 等. 重庆市复兴河小流域山洪灾害降雨驱动指标预警模型研究[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(4): 166-169. (PENG W B, ZHAO D, HUANG E, et al. Study on torrent disaster early warning model of rainfall driving index at Fuxing small watershed in Zhongqing [J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(4): 166-169. (in Chinese)) DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2018044.
- [21] 郭良, 王雅莉, 李青, 等. 复合预警指标在山洪灾害预警中的应用分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(7): 38-41. (GUO L, WANG Y L, LI Q, et al. Application composition warning index in flash flood early warning [J]. Yellow River, 2018, 40(7): 38-41. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2018.07.009.
- [22] 王路, 王文川, 李浩, 等. 基于复合雨量指标的山洪预警方法及其应用[J]. 水利水电快报, 2017, 38(10): 32-36. (WANG L, WANG W C, LI H, et al. Flash flood early warning method based on composition rainfall index and its application [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2017, 38(10): 32-36. (in Chinese)) DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2017.10.011.
- [23] 李华威, 万庆. 小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(3): 425-435. (LI H W, WAN Q. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watersheds [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(3): 425-435. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.00425.
- [24] 郭良, 张晓蕾, 刘荣华, 等. 全国山洪灾害调查评价成果及规律初探[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1548-1556. (GUO L, ZHANG X L, LIU R H, et al. Achievements and preliminary analysis on china national flash flood disasters investigation and evaluation [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(12): 1548-1556. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.01548.
- [25] 刘业森, 郭良, 张晓蕾, 等. 全国山洪灾害调查评价成果数据管理平台设计[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 196-202. (LIU Y S, GUO L, ZHANG X L, et al. Design of data management platform for national mountain flood investigation and evaluation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 196-202. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.06.028.