

基于降雨洪峰关系曲线的沿河村落预警指标确定

王江婷¹, 杨同春², 李伟³, 徐征和^{1,4}, 桑国庆¹, 王坤¹

(1. 济南大学资源与环境学院, 山东 济南 250022; 2. 济南市小清河管理处, 山东 济南 250013;
3. 济南市锦绣川水库管理处, 山东 济南 250112;
4. 山东省地下数值模拟与污染控制中心, 山东 济南 250002)

摘要: 预警指标对流域的山洪预警有着重要的作用。主要以荣成市崂山小流域崂山大疃为例, 提出了确定雨量预警指标的方法。根据不同的土壤干湿程度, 基于降雨径流曲线获得降雨径流关系, 采用推理公式法计算设计洪水, 绘制降雨洪峰曲线; 根据崂山大疃现场调查, 基于曼宁公式获取水位流量关系曲线, 结合成灾水位推算临界流量, 根据降雨洪峰曲线, 由流量反推降雨。计算结果: 在 $Pa=40$ mm 的情况下, 崂山大疃的 3 个时段的临界雨量为 62 mm, 75 mm, 95 mm, 经过“折减”处理获得的 3 个时段预警指标, 准备转移指标为 56, 68, 86mm, 立即转移指标为 68, 83, 105 mm。

关键词: 预警指标; 土壤; 临界流量; 降雨径流

中图分类号: TV877

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2017)02-0036-06

1 引言

近几年, 山东省各地均有不同程度的山洪及中小河流地区由暴雨产生的灾害发生, 且发生频次呈现逐年上升态势。因此建立一套反应迅速、预警及时的山洪灾害、中小河流预警系统, 是当前水利系统开展的重点工作之一。预警系统建设中一个重要环节就是预警指标的确定, 预警指标的合理性直接决定了预警系统发挥作用的程度^[1]。预警指标包括雨量预警指标与水位预警指标两类。

根据目前的主要文献及应用情况山洪灾害预警指标主要有临界雨量和临界水位/流量, 国内山洪灾害预警指标确定方法大致可以划分为理论方法和经验方法两大类。目前主要的理论方法包括经典水文理论法、土壤饱和度—降雨径流关系法、水位/流量反推法以及暴雨临界曲线法。经验方法无明显的物理机理和推导过程, 主要根据事件相关性、地理条件相似性等原则, 确定山洪灾害预警指标, 目前最为主要的经验方法有统计归纳法、比拟法和内插法等^[2]。

本文主要以威海市荣成市崂山小流域为例介绍

利用降雨径流关系曲线确定沿河村落雨量预警指标, 雨量预警指标分析内容主要包括预警时段确定、土壤含水率确定、临界流量计算、临界雨量计算、预警指标(准备和转移)综合确定, 且取得了较为满意的结果。

2 降雨径流关系曲线法

2.1 计算原理

雨量预警指标和流域土壤含水量的高低密切相关。当土壤较干时, 降水下渗大, 产生地表径流小; 反之, 如果土壤较湿, 降水入渗少, 形成的地表径流大。所以在计算预警雨量时应该考虑土壤的干湿程度, 所以本文采用前期影响雨量加上降雨与径流关系曲线图来推求预警雨量, 因为土壤的干湿程度不同所以预警雨量也不同。计算过程: 根据水位流量关系图由成灾水位推求临界流量, 再根据降雨径流关系图在不同的土壤含水量的情况下计算预警雨量。

2.2 计算流程

计算流程如图 1 所示。

收稿日期: 2016-08-04

基金项目: 山东省省级水利科研与技术推广项目(SDSLKY201410); 山东省高等学校科技计划项目(J15LH08)

作者简介: 王江婷(1991-), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源方面研究。E-mail: 214495375@qq.com

通讯作者: 徐征和(1968-), 男, 山东聊城人, 教授, 博士, 主要从事水文及水资源和农田水利方面研究。E-mail: xu4045@163.com

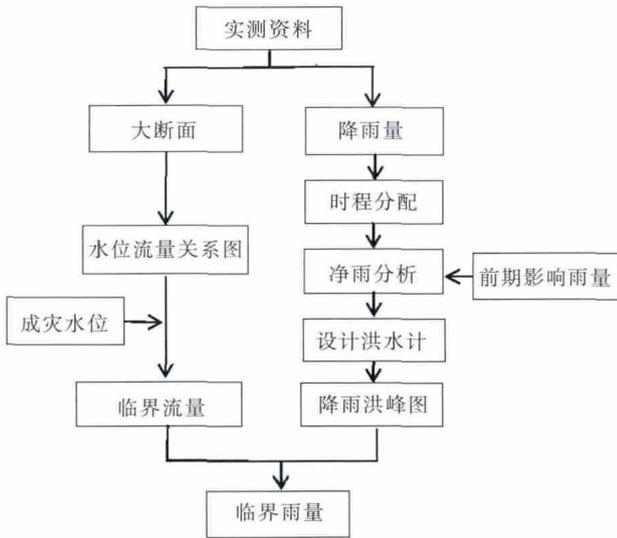


图1 计算流程图
Fig.1 The calculation flow

3 预警指标实例计算

3.1 成灾水位及临界流量计算

3.1.1 水位流量关系推求

雨量预警一般是采用水位反推流量,再根据流量推算雨量来进行的,水位~流量关系曲线可将防灾对象河道控制断面设计洪水洪峰流量转换为对应的水位,同时可将河道控制断面成灾水位转化为对应的成灾流量,根据成灾流量转化为相应的临界雨量。根据实测的大断面,利用曼宁公式推求水位流量关系,曼宁公式中的部分参数是根据水利手册获得的。曼宁公式^[9]表达式如下:

$$Q=A \cdot v=A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: Q 为流量 (m^3/s); A 为断面过流面积 (m^2); v 为过流断面平均流速 (m/s); n 为糙率; R 为水力半径; J 为洪水水面线比降。

关于比降的确定,根据实测沿河村落纵剖面调查数据,如下表1,通过河底高程和河长计算平均坡降,坡降计算公式如下:

$$J=[(h_0+h_1)l_1+(h_1+h_2)l_2+\dots+(h_{n-1}+h_n)l_n-2h_0L]/L^2 \quad (2)$$

式中: $h_0, h_1, h_2 \dots$ 为自下游到上游沿程各点的河底高程, m ; l_1, l_2, l_3, l_4 为相邻两点间的河长, m ; L 为河段全长, m 。基于此方法计算的崂山小流域河道比降为 0.0037。

糙率根据水力手册选定,河道为 0.04 和河滩糙

表1 崂山大疃河道纵断面

Table1 The longitudinal profile of the Datuan River

| 序号 | 经度 | 纬度 | 水平距/m | 高程/m |
|----|------------|----------|---------|------|
| 1 | 122°24'47" | 37°5'39" | 0.00 | 9.00 |
| 2 | 122°24'49" | 37°5'39" | 35.24 | 8.82 |
| 3 | 122°24'50" | 37°5'39" | 75.70 | 8.81 |
| 4 | 122°24'52" | 37°5'39" | 107.66 | 8.79 |
| 5 | 122°24'58" | 37°5'38" | 269.21 | 7.63 |
| 6 | 122°25'3" | 37°5'38" | 385.21 | 6.45 |
| 7 | 122°25'5" | 37°5'39" | 429.47 | 6.39 |
| 8 | 122°25'7" | 37°5'40" | 505.36 | 6.42 |
| 9 | 122°25'16" | 37°5'44" | 760.73 | 5.45 |
| 10 | 122°25'21" | 37°5'46" | 879.87 | 5.25 |
| 11 | 122°25'25" | 37°5'46" | 986.56 | 4.97 |
| 12 | 122°25'26" | 37°5'46" | 993.25 | 3.77 |
| 13 | 122°25'30" | 37°5'44" | 1115.78 | 3.65 |
| 14 | 122°25'33" | 37°5'45" | 1182.29 | 3.50 |
| 15 | 122°25'34" | 37°5'46" | 1233.41 | 3.32 |
| 16 | 122°25'35" | 37°5'47" | 1253.38 | 3.25 |
| 17 | 122°25'35" | 37°5'49" | 1309.75 | 3.38 |
| 18 | 122°25'36" | 37°5'51" | 1388.35 | 3.19 |

率 0.06,河道大断面和水力半径由实测资料获取,为了避免漫滩漫堤时水位流量关系曲线出现错误,在计算漫滩漫堤流量时,采用了《水力学》中的计算方法,即在漫滩漫堤处将断面分开,然后分别计算主河槽流量及漫滩、漫堤流量,最终合成水位流量关系图。图2为崂山小流域河道的水位流量关系图。

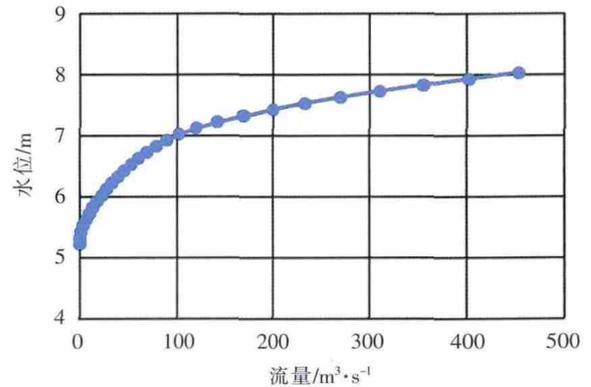


图2 水位流量关系图

Fig.2 The relationship between water level and flow

3.1.2 成灾水位确定

成灾水位的确定,主要根据现场调查结果,现场调查了沿河村落的三个断面的成灾水位,最后根

据当地实际情况(见图3),综合确定崂山小流域崂山大疃全村内的控制断面处成灾水位为6.44 m(见图4)。确定方法如下。

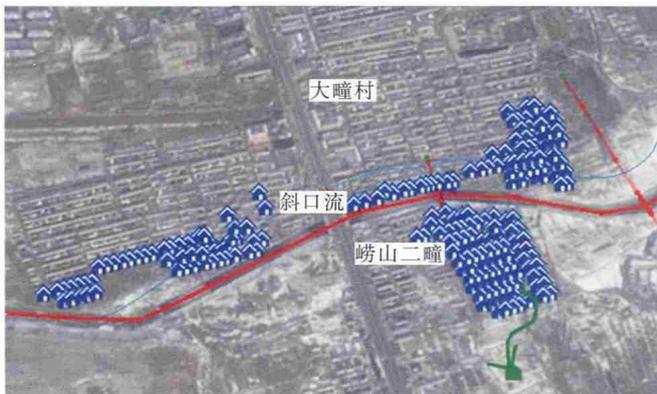


图3 崂山大疃断面全貌

Fig.3 The whole view of the cross sections of the Datuan River

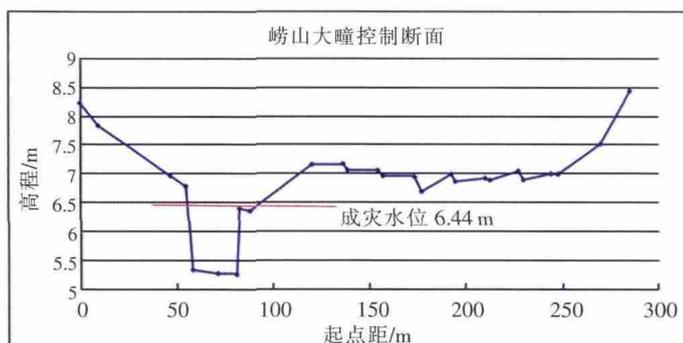


图4 成灾水位示意图

Fig.4 The water level of making flood hazard

以控制断面水位为中心,以水面(洪痕)比降为斜率做水面线。利用GIS将居民户投影到纵断面上,然后用各种频率下水面线去切沿河村落居民户,扣除村内远离河流的低洼户,将切到的最低一户宅基高程利用水面线斜率反算到控制断面处的高程作为成灾水位,如图5所示。

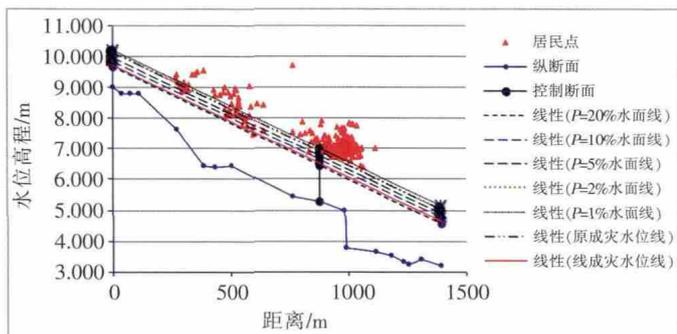


图5 水面线-人口关系图

Fig.5 The relationship between water surface profile and population

3.2 降雨洪峰曲线绘制

3.2.1 设计暴雨计算

(1) 崂山大疃暴雨计算

山东省水文局提供了荣成区域崂山小流域跋山水库站的最大10 min、1 h、3 h、6 h、24 h短历时暴雨实测资料,采用P-型频率曲线对实测暴雨系列适线,取 $C_s=3.5C_v$,推求出跋水站10 min、1 h、3 h、6 h、24 h设计暴雨特征值(均值、变差系数 C_v 、偏差系数 C_s)。

(2) 暴雨时程分配

进行暴雨时程分配时,首先确定小流域汇流时间,因为汇流时间小于降雨历时,因此这里计算采用全面汇流计算公式,在3.2.3节会详细说明。确定汇流时间内设计暴雨时程分配。流域汇流时间是指雨水从流域最远点流至流域出口所需的时间,反映小流域产汇流特性。根据以下公式^[4]:

$$Q=0.278 \times F \times (R_i/t) \quad (3)$$

$$\tau = \frac{0.278L}{mJ^{1/3}Q^{1/4}} \quad (4)$$

式中: Q 为降雨洪峰 (m^3/s); F 为小流域汇流面积 (m^2); R_i 为净雨深度 (mm/h); t 为降雨历时 (h); τ 为汇流时间 (h); L 为沿主河道从出口断面至分水岭的最长距离 (km); J 为河道平均坡度。 $\theta = \frac{L}{J^{1/3} \cdot F^{1/4}}$ 为流

域特性参数; m 为汇流参数, m 根据 θ 取值查《水利水电工程设计洪水计算规范》得。

自最大时段净雨开始,向前后相邻时段连续累加得到不同时段的累计雨量,采用试算法与图解法相结合计算得到相应的汇流时间。崂山小流域汇流时间为3.5 h。

崂山小流域的暴雨时程分配参照山东省水文图集集中荣成地区最大24 h雨型。根据“自最大降雨处向两边延伸,优先拓展最大降雨”的原则,对一组各种历时的暴雨计算最大强度时间与暴雨历时的比值,按照各次降雨历时加权平均后,这个比值作为所占汇流时间各时段降雨的比例^[5]。即根据雨峰所在时段为起始时段,向左向右分别增加时段,直至累计时段个数与流域汇流时间时段数相等或略长时为止。不同时段雨量之间采用“同频相包”方法进行分配。图6为崂山小流域频率为1%的情况下,暴雨时程分配。

3.2.2 小流域净雨分析

雨量预警指标和流域土壤含水量的高低密切相

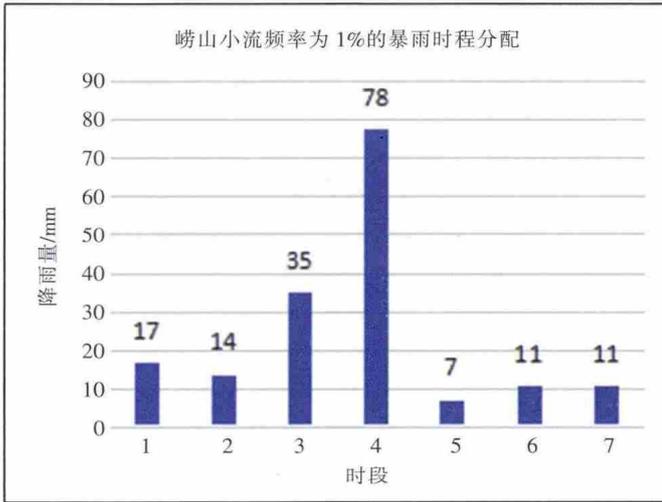


图6 暴雨时程分配图

Fig.6 The rainstorm distribution

关。当土壤较干时, 降水下渗大, 产生地表径流小; 反之, 如果土壤较湿, 降水入渗少, 形成的地表径流大。根据《水文图集》, 荣成市土壤最大蓄水量为60 mm。因此结合小流域实际状况, 土壤较干、一般和较湿三种情况下土壤前期影响雨量 Pa 分别取值 12 mm、40 mm、48mm。相应缺水量为 48mm、40mm、12mm。

算例中荣成市崂山小流域采用了山东省水文图集中的降雨径流相关系数, 根据荣成产流分区查找相关降雨径流相关线型 3 号线, 并根据《山东省中小河流治理工程初步设计设计洪水计算指导意见》和分析计算, 选用 3 号降雨径流关系线查算。取 $Pa=40$ mm, 建立降雨径流关系曲线图, 计算结果如下表 2 所示。

(1)净雨量计算: 根据实测暴雨资料法, 由设计暴雨时段雨量成果中相应重现期雨量值和建立的径流关系曲线查找相应的净雨量。

(2)净雨时程分配: 根据暴雨时程分配确定不同时段不同频率降雨; 按逐时段累积降雨量查累积径流量; 由相邻时段的累积径流量之差得时段净雨量。

表2 崂山小流域净雨计算结果

Table2 The calculated results of the net rainfall in the Laoshan watershed

| 流域 | Pa/mm | 时段 | 重现期时段雨量值/mm | | | | |
|-------|---------|----|-------------|------|------|------|-------|
| | | | 5 a | 10 a | 20 a | 50 a | 100 a |
| 崂山小流域 | 40 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2 | 0 | 2 | 4 | 6 | 7 |
| | | 3 | 10 | 12 | 15 | 19 | 22 |
| | | 4 | 25 | 33 | 41 | 52 | 60 |
| | | 5 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 |
| | | 6 | 4 | 5 | 6 | 8 | 9 |
| | | 7 | 4 | 5 | 6 | 8 | 9 |

3.2.3 设计洪水计算

降雨初期的雨水主要消耗于土壤表层的湿润、植物截留以及洼地蓄水, 因而没有地表径流的产生。随着降雨的继续, 土壤表层湿润度逐渐增加。当降雨强度大于地表入渗能力时, 地面开始产生径流, 直至降雨强度由大再渐减到小于当时的地表入渗能力时, 产流过程才停止。

主要是采用推理公式法, 分为部分汇流和全面汇流两种情况, 公式形式如下:

(1)当降雨历时 $t < \tau$ 时, 此时是部分汇流, 采用以下公式计算洪峰:

$$Q_m = 0.278 \frac{h_t}{\tau} F \quad (5)$$

(2)当 $t > \tau$ 时, 产生全面汇流, 采用以下公式计算洪峰:

$$Q_m = 0.278 \frac{h_t}{\tau} F \quad (6)$$

式中: F 为流域面积 (km^2); τ 为汇流时间 (h); h_t 为净雨量 (mm)。 h_t 为产流历时 τ 内的产流量 (mm)。

根据现场调查, 崂山流域 1956 年 9 月 8 号发生强降雨, 降雨时间超过 24 h, 造成山洪灾害, 是崂山流域发生过的比较严重的山洪, 因此以此次降雨作为例子进行计算, 所以此次降雨洪峰计算主要是采用公式 (6)。已知净雨, 根据前期土壤干湿情况, 分析计算各个暴雨频率典型预警时段降雨形成的洪水, 主要信息为洪峰流量、上涨历时和洪水历时等^[6]。

3.3 预警时段的确定

预警时段指雨量预警指标中采用的典型降雨历时, 此次崂山小流域预警时段确定方法如下。

(1)最长时段确定: 将小流域中的分析对象上游集水区的汇流时间作为每个沿河村落预警指标的最长时段。

(2)典型时段确定: 针对每个沿河村落, 对于小于最长时段的其他时段的确定, 根据防灾对象所在地区暴雨特性、流域面积大小、平均比降、形状系数、下垫面情况等因素, 确定比汇流时间小的短历时预警时段, 60 min、180 min 等, 一般选取 2~3 个典型预警时段, 最小预警时段选为 1h、2h、3h、6h。

(3)综合确定: 充分参考前期基础工作成果的流域单位线信息, 结合流域暴雨、下垫面特性以及历史山洪情况, 综合分析防灾对象所处河段的河谷形

态、洪水上涨速率、转移时间及其影响人口等因素后，确定各防灾对象的各个典型预警时段，从最小预警时段直至流域汇流时间。

根据上述预警时段的确定原则，崂山大疃的预警时段分别为 1h, 2h 和 3.5h。

3.4 临界雨量的确定

3.4.1 插值法

内插是在已知数据集自变量的范围内建立和计算一个逼近函数的过程。假设数据 (x_i, y_i) 的顺序为 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ 。插值提供了一种在 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ 上对 $y=f(x)$ 的逼近方法。外插是在给定自变量的范围之外求解函数插值的方法，假设数据 (x_i, y_i) 的顺序为 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ 。外插提供了 $x < x_1$ 或 $x > x_n$ 上求解函数插值的方法^[7]。

采用实测的降雨资料和以上的洪水分析结果，取 $Pa=12、40、48$ mm，根据插值法内插值原理，以荣成市崂山大疃村为例，以洪峰为插值节点，绘制不同频率，不同的土壤干湿情况下各个时段的洪峰-降雨关系曲线，如图 7 所示。

3.4.2 预警指标计算

由获得的成灾水位以及水位流量关系曲线，根据插值法可以查读临界雨量值，用此法可以获得汇流时间内不同的时间节点在不同的土壤干湿程度下的雨量值，如算例中的崂山大疃，汇流时间为 3.5 h，临界流量为 $51 \text{ m}^3/\text{s}$ ，可以查读土壤较干情况下，1 h 的临界雨量为 70 mm，2 h 的临界雨量为 85 mm，3.5 h 的临界雨量为 108 mm，结果如表 3 所示。

预警分为准备转移预警和立即转移预警，故临界雨量应包括准备转移和立即转移对应的临界指标。通常情况下，由于临界雨量是从成灾水位对应流量的洪水推算得到，因此对于准备转移和立即转移指标，是在临界雨量基础上根据准备转移时间及洪水过程线综合进行“折减”处理，综合考虑防灾对象所处河段河谷形态、洪水上涨速率、预警响应时间和站点位置等因素，在临界雨量的基础上综合确定准备转移和立即转移的预警指标，在此次计算中准备转移指标是在临界雨量的基础上乘以 0.9 获得，立即转移是在临界雨量的基础上乘以 1.1，表 3 所列是崂山大疃在不同的土壤干湿情况下的预警指标。

4 结论

本文以荣成市崂山流域崂山大疃为例，简单的介

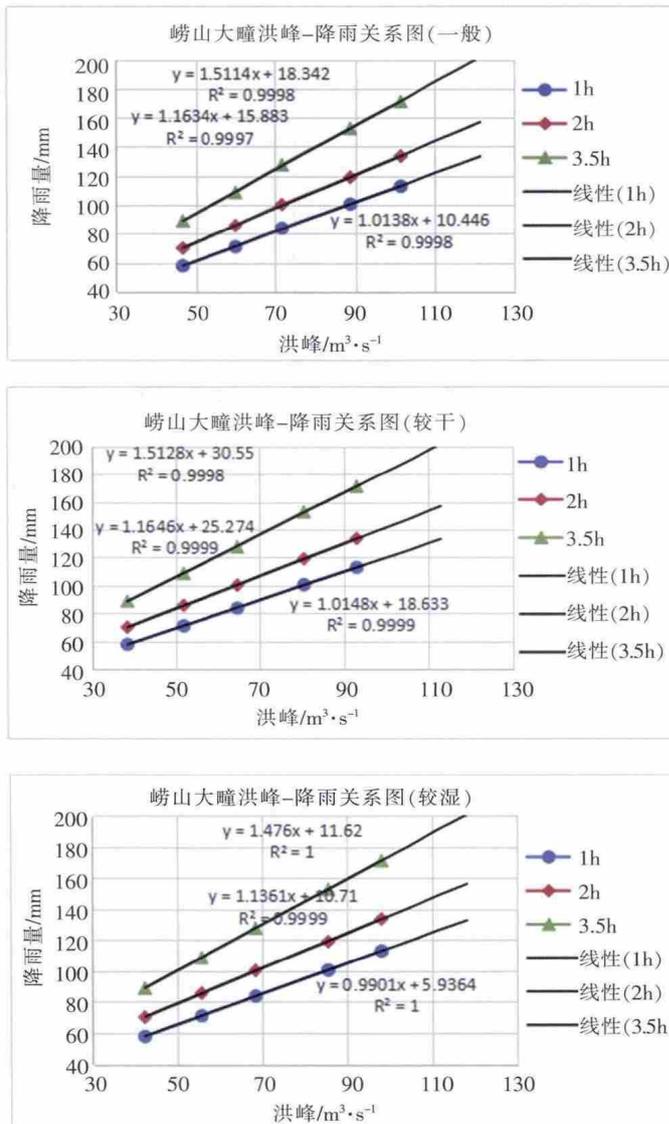


图 7 降雨-洪峰关系曲线图

Fig.7 The rainfall flood peak curves

表 3 崂山大疃预警指标确定

Table3 The early-warning Indexes for the Datuan River

| 评价对象 | 预警时段/h | 临界流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | 临界雨量/mm | | | 准备转移/mm | | | 立即转移/mm | | |
|------|--------|--|---------|----|----|---------|----|----|---------|-----|----|
| | | | 较干 | 一般 | 较湿 | 较干 | 一般 | 较湿 | 较干 | 一般 | 较湿 |
| 崂山大疃 | 1 | | 70 | 62 | 56 | 63 | 56 | 51 | 77 | 68 | 62 |
| | 2 | 51 | 85 | 75 | 69 | 76 | 68 | 62 | 93 | 83 | 76 |
| | 3.5 | | 108 | 95 | 87 | 97 | 86 | 78 | 118 | 105 | 96 |

绍了降雨径流关系法计算预警指标，根据实测大断面资料以及 GIS 软件进行综合确定成灾水位，比直接确定成灾水位更可靠，因此临界指标的确定相对而言也比较可靠，对小流域的预警精度有所提高，

且绘制了降雨洪峰图,可以简单有效的查找预警指标,为以后的山洪灾害预警检验提供了工作基础,对其他相似小流域具有借鉴的意义。不足之处,在降雨径流计算中,由于小流域的部分资料不是很全,应该充分注意挖掘计算小流域的主要数据来源;在根据实测资料计算的河道比降为 0.003 7,而此时我们的水面线比降也是借用的这个河底比降,因此存在一定的误差,应该采用实测水面比降;根据实测资料综合确定成灾水位时,为了计算方便利用直线和水位对水面线进行概化,但是在这里应该是以河底形状作和水位来确定水面线;应该根据荣成市山洪的特点,在降雨、产流、汇流、预警各个环节合理地选择算法与参数值。

参考文献:

- [1] 丛立林,刘景文,张培顺. 小流域预警指标确定方法研究[J]. 东北水利水电, 2015,(6). (CONG Lilin, LIU Jingwen, ZHAGN Peishun. The research of early-warning index determination method of small watershed [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2015,(6). (in Chinese))
- [2] 李昌志,孙东亚. 山洪灾害预警指标确定方法 [J]. 防汛与抗旱, 2012,(9). (LI Changzhi, SUN Dongya. Determination of flood warning index for mountain flood [J]. Flood & Drought Management, 2012,(9). (in Chinese))
- [3] 王文英,李百克,邹文安. 曼宁公式在工程水文设计中的应用[J]. 东北水利水电, 2010,(5). (WANG Wengying, LI Baike, ZOU Wenan. The application of the manning formula in engineering hydrology design [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2010,(5). (in Chinese))
- [4] 任建民. 由推理公式推求小流域暴雨洪峰流量方法的探讨[J]. 甘肃水利水电技术, 1998,(4). (REN Jianmin. According to the reasoning formula to discuss the method of storm flood peak of small watershed [J]. Gansu Water Resources And Hydropower Technology, 1998,(4). (in Chinese))
- [5] 汪明明. 雨水池设计理论研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2008. (WANG Mingming .The Theoretical Research on Design of Rain-water Tanks [D]. BeiJing: Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [6] 李磊,朱永楠,谷洪钦. 推理公式在土耳其小流域设计洪水计算中的适用性分析[J]. 水文, 2016,36(2). (LI Lei, ZHU Yongnan, GU Hongqin. Adaptability study on rational formula for Turkish small watershed design flood calculation [J]. Journal of China Hydrology, 2016,36(2). (in Chinese))
- [7] 张洪波. 插值法的应用实例分析[J]. 华北科技学院学报, 2010,7(3). (ZHANG Hongbo. A case analysis of interpolation application [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2010,7(3). (in Chinese))

How to Determine Early-warning Index along River Based on Rainfall Flood Peak Curve

WANG Jiangting¹, YANG Tongchun², LI Wei³, XU Zhenghe^{1,4}, SANG Gouqing¹, WANG Kun¹

(1. College of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Xiaoqing River Management Office of Jinan City, Jinan 250013, China; 3. Administration Office of Jinxiuchuan Reservoir in Jinan, Jinan 250112, China; 4. Groundwater Numerical Simulation and Pollution Control Center of Shandong Province, Jinan 250002, China)

Abstract: Early-warning index is important in mountain flood warning. This paper put forward a method of determining rainfall warning index with the Datuan River in the Laoshan Basin as a case. According to the different degree of soil moisture, this paper also obtained the relationship between rainfall and runoff based on the rainfall-runoff curve, used reasoning formula method to calculate the design flood, and drew the rainfall flood peak curve. According to the investigation in the Datuan field of Laoshan, Manning formula was used to get water level-flow curve, and calculated critical flow. The results show that the critical rainfall in 3 durations in Laoshan Datuan respectively are 62 mm, 75 mm and 95 mm in the case of $P_a = 40\text{mm}$. The early-warning index in the 3 durations was got by "discount" processing, ready transfer indexes are 56mm, 68mm and 86 mm, and the immediate transfer indexes are 68mm, 83mm and 105 mm.

Key words: early-warning index; soil; critical flow; rainfall runoff