

山洪灾害 预警预报技术

任波 李卫平 黄立志 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

山洪灾害 预警预报技术

任波 李卫平 黄立志 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书介绍了山洪灾害预警预报技术。全书共分为6章，主要内容包括山洪灾害及山洪预警预报，临界雨量的计算方法概述，流域模型反推法确定雨量预警指标，水位预警指标的确定，预警指标确定案例分析以及山洪灾害预报模型。

本书可供水文、水利、资源等相关专业的研究生、本科生及从事相关专业的科研、教学和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

山洪灾害预警预报技术 / 任波, 李卫平, 黄立志著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2018.8

ISBN 978-7-5170-6769-6

I. ①山… II. ①任… ②李… ③黄… III. ①山洪—
灾害防治 IV. ①P426.616

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第197412号

书 名	山洪灾害预警预报技术
作 者	SHANHONG ZAIHAI YUJING YUBAO JISHU 任 波 李卫平 黄立志 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.25印张 214千字
版 次	2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

山洪灾害是指山丘区由于降水而引发自然灾害的一类灾害的表现形式，在有些条件下可能伴随泥石流与滑坡发生。在山丘区由于水库坝体或河流堤防溃决、冰湖溃决等因素突然诱发的洪水也称作山洪。山洪主要受到地质地貌、水文气象、人类社会活动等诸多因素的综合影响。山洪的规模和灾害的严重程度取决于降雨强度、降雨量、降雨历时、河流及其流域前期条件，流域前期条件包括冰雪覆盖情况、土壤特性及湿度、城镇化规模、已建堤防、拦挡坝或水库情况。更为严重的是，人们在河漫滩居住，又缺乏完善的应急计划，必然会增加山洪潜在的破坏性。21世纪我国以及全世界山洪灾害更加突出，造成的生命和经济损失十分惨痛。山洪常常伴随泥石流，特别严重的案例是2010年8月8日甘肃省舟曲县的特大山洪泥石流灾害，造成1467人遇难和298人失踪。山洪灾害与极端降雨、地表脆弱和经济发展模式的关系密切。

我国地貌类型复杂多样，且以山地高原为主。广义的山丘区包括山地、丘陵和比较崎岖的高原，约占全国陆地面积的2/3。我国主要处于东亚季风区，暴雨频发，地质地貌复杂，加之人类活动的影响，导致山洪灾害频发，是世界上山洪灾害最严重的国家之一。山洪灾害不仅对我国山丘区的基础设施造成毁灭性破坏，而且对人民群众的生命安全构成极大的损害与威胁，已经成为山丘区经济社会可持续发展的重要制约因素之一。20世纪50年代以来，山洪灾害每年都造成数以百计的人员伤亡，是我国自然灾害造成人员伤亡的主要灾种之一。据1950—1990年资料分析，全国洪涝灾害死亡人数中，山丘区占67.4%；1997年全国山洪灾害造成的死亡人数占当年洪涝灾害总死亡人数的69%；1998年因长江大洪水受灾严重的湖南、湖北、江西和安徽四省的死亡人员，大部分死于山洪灾害。

中华人民共和国成立以来，我国山丘区建成了一大批防治山洪灾害的工程设施，但这些工程大都修建于20世纪60、70年代，建设标准不高，工程配套不完善、老化失修严重，病险工程不断增多。由于缺乏对山洪灾害防治的宣传和系统研究，人们主动防灾避灾意识不强，以至于在河道边、山洪出口一带建住房、搞开发，不断侵占河道，乱弃、乱建、乱挖使河道不断淤塞，泄洪能力严重萎缩，进一步加剧了山洪灾害的发生和损失。散布于山丘区的中小城镇和

居民点，多位于平川谷地，防洪工程标准低、质量差，有的甚至处于无设防状态，一旦山洪暴发，防不胜防。总体而言，目前我国防御山洪灾害能力十分薄弱。进入 21 世纪，国务院明确指出：“山洪灾害频发，造成损失巨大，已成为防灾减灾工作中的一个突出问题。必须把防治山洪灾害摆在重要位置，认真总结经验教训，研究山洪发生的特点和规律，采取综合防治对策，最大限度地减少灾害损失。”

为了保障山丘区人民生命财产安全，实现我国经济社会的全面发展，水利部会同国土资源部、国家气象局、住房和城乡建设部、原国家环保总局联合成立了全国山洪灾害防治规划领导小组、领导小组办公室和规划编写组。全国山洪灾害防治规划的编制分三个阶段：第一阶段由全国规划编写组统一编制全国山洪灾害防治规划任务书及技术大纲；第二阶段由有山洪灾害防治任务的各省（自治区、直辖市）根据任务书及技术大纲的要求，在全国规划编写组的指导下，开展山洪灾害现状调查，研究山洪灾害的成因、特点及分布规律，按照点面结合的工作思路，编制完成本地区的山洪灾害防治规划；第三阶段是全国规划编写组分析、综合、汇总各地山洪灾害防治规划，编制完成《全国山洪灾害防治规划》。

本书共 6 章，第 1 章介绍山洪灾害及山洪预警预报，包括山洪灾害及山洪预警概述、雨量预警介绍、水位预警介绍；第 2 章为临界雨量的计算方法概述，包括典型区域临界雨量计算、无资料区域临界雨量计算、几种常见的临界雨量理论计算方法、计算方法评估；第 3 章介绍了用流域模型反推法确定雨量预警指标，主要为设计暴雨计算过程、产流计算过程、汇流计算过程、成灾水位及成灾流量、预警时段与土壤持水度、流域模型反推法计算临界雨量、综合确定预警指标、合理性分析；第 4 章为水位预警指标的确定，包括水位预警指标、临界水位的计算步骤、综合确定预警指标；第 5 章主要为案例分析，包括区域概况，成灾流量及成灾频率计算、临界雨量计算、临界水位计算、综合确定预警指标；第 6 章是本书的重点，比较详细地列举了山洪灾害预报模型，包括新安江模型、水箱模型、HBV 模型、萨克拉门托模型、回归模型、人工神经网络模型、模糊数学方法、灰色系统模型、非线性时间序列分析模型等。

本书以山西省某小流域为研究区域，山西省由于地处黄土高原的东翼且地形种类各式各样，主要包括山地、高原、丘陵、等类别，因此导致山洪灾害时有发生，对其社会经济以及人民生命财产安全构成严重威胁。以沿河村落为计算单元，在实测调查研究区域的历史山洪、地形地貌和河流水系等数据的基础上，根据本地区现阶段山洪防治状况，结合《山洪灾害分析评价方法指南》

《山西省水文计算手册》和《山西省典型小流域山洪灾害预警指标研究》理论方法和技术研究的指导，采用流域水文模型法以及“同频推同频”法分别建立山洪灾害雨量预警的模型和山洪灾害水位预警的模型。

雨量预警指标的确定主要是采用流域水文模型法，针对研究区域临界雨量的计算。根据设计暴雨计算设计洪水，采用双曲线正切的产流模型以及单位线流域的汇流模型，对小流域沿河村落进行产汇流模型分析计算，得出其各时段降雨洪峰流量；结合小流域沿河村落的成灾流量，依据不同的前期持水度，推导出各典型时段下小流域沿河村落临界雨量。按照预警等级划分规定，综合确定山洪灾害雨量预警的指标，最终建立山洪灾害雨量预警指标计算的模型。

水位预警指标的确定主要是采用“同频推同频”法，结合分析一定距离内小流域沿河村落上游的水位站水位，将该水位站水位用作山洪灾害预警指标的方式。根据小流域沿河村落控制断面成灾流量对应的成灾水位，推算位于上游水位站相应的水位，作为预警临界水位。按照预警等级划分规定，综合建立山洪灾害水位预警的指标计算模型。

雨量预警模型以及水位预警模型的建立，不仅促进了更好地发挥山洪灾害监测预报系统的作用，而且通过直接应用于山西省山洪调查评价工作中，为山西省山洪防治工作提供了准确的理论指导和科学依据，增强了山西省山洪预警的理论基础和技术研究。有利于协助防灾减灾工作人员决策的制定与实现，为山西省整体社会的和谐以及人民生命财产的安全提供了坚实的保障。

本书由大同市山洪灾害分析与评价工作小组策划，由大同市水文水资源勘测分局任波、黄立志以及内蒙古科技大学李卫平执笔。其中任波参与了第1章的撰写工作，黄立志参与了第2章的撰写工作，敬双怡参与了第3章的撰写工作，莘明亮参与了第4章的撰写工作，齐璐参与了第6章的撰写工作，齐璐、郝梦影、王智超共同参与撰写了第5章的编写工作。感谢陈阿辉、王晓云、王非、贾晓硕、李岩、崔亚楠、王铭浩、唐若凯、隋季斌、王泽君、原浩、于治豪、吕雁翔、李美玲在专著撰写过程中的大力协助。

本书在编写过程中得到了多方面的大力支持，在此，向所有支持本书出版的同行专家和朋友一并表示深切的谢意。

鉴于我们水平有限，经验不足，不免在许多方面存在疏漏，热诚希望读者提出宝贵意见。

作者

2018年6月

目 录

前言

第 1 章 山洪灾害及山洪预警预报	1
1.1 概述	1
1.2 雨量预警	5
1.3 水位预警	7
第 2 章 临界雨量的计算方法概述	10
2.1 典型区域临界雨量计算	10
2.2 无资料区域临界雨量计算	15
2.3 几种常见的临界雨量理论计算方法	18
2.4 计算方法评估	23
第 3 章 流域模型反推法确定雨量预警指标	25
3.1 设计暴雨计算过程	25
3.2 产流计算过程	29
3.3 汇流计算过程	33
3.4 成灾水位及成灾流量	36
3.5 预警时段与土壤持水度	39
3.6 流域模型反推法计算临界雨量	40
3.7 综合确定预警指标	41
3.8 合理性分析	41
第 4 章 水位预警指标的确定	43
4.1 水位预警指标	43
4.2 临界水位计算	43
4.3 综合确定预警指标	46
第 5 章 预警指标确定案例分析	47
5.1 区域概况	47
5.2 成灾流量及成灾频率计算	49
5.3 临界雨量计算	68
5.4 临界水位计算	70
5.5 综合确定预警指标	72

第 6 章 山洪灾害预报模型	75
6.1 新安江模型	75
6.2 水箱模型	79
6.3 HBV 模型	82
6.4 萨克拉门托模型	88
6.5 回归模型	90
6.6 人工神经网络模型	94
6.7 模糊数学方法	99
6.8 灰色系统模型	103
6.9 非线性时间序列分析模型	106
附录 水文计算用表	109
附表 1 皮尔逊Ⅲ型曲线 ϕ_p 值表	109
附表 2 皮尔逊Ⅲ型曲线 K_p 值表	113
附表 3 瞬时单位线 $S(t)$ 曲线表	131
参考文献	137

第 1 章 山洪灾害及山洪预警预报

1.1 概述

1.1.1 山洪灾害的概念与形成

山洪灾害是指暴雨在山丘地区引起的地面径流暴涨暴落，威胁沿河村落居民生命及财产安全的一种自然灾害，包括溪河洪水、泥石流、滑坡等灾害。本书所研究的山洪灾害预警技术只针对溪河洪水引发的山洪灾害，对滑坡、泥石流等所引发的山洪灾害暂不做研究。山洪与平原地区发生的洪水不同，它特指短历时强降雨引起的山丘区小溪沟水量暴涨的现象，山洪汇流时间较短，一般只有几分钟或几小时，但山洪发生区下垫面透水能力弱，坡降陡，因此山洪水量较为集中，流速较大，破坏力也极大，对道路、桥梁、房屋、农田、堤坝及水库都有极大危害。

我国许多学者对山洪灾害发生区的降雨情况、地质地貌特征、河网水系密度、防洪标准、河道情况及人类活动等方面进行了深入分析研究，最终认为山洪灾害主要是由以下 3 个方面因素所致。

(1) 复杂多样的地形地貌和稠密的河流水系为山洪灾害提供了孕育基础，这是引发山洪灾害的地理因子。形成山洪的地形特征往往是中高山区，相对高度差大，河谷坡度陡峻，切割深度大，侵蚀沟谷发育，表层为植皮覆盖有较厚的土体，土体下面为中深断裂及其派生级断裂切割的破碎岩石层。其地质大部分是渗透强度不大的土壤，如泥质岩、板页岩发育而成的抗蚀性较弱的土壤，遇水易软化、易崩解，极有利于强降雨后地表径流迅速汇集，一遇到较强的地表径流冲击，就会形成山洪灾害。

(2) 我国夏季经常爆发的短历时暴雨为山洪灾害提供了充沛的水源条件，这是造成山洪灾害的降雨因子。水体既是山洪泥石流的组成部分，又是激发因素，主要来自降雨。降雨激发山洪的原因：①前期降雨和一次连续降雨共同作用；②前期降雨和最大 1h 降雨量起主导激发作用。山顶土体含水量饱和，土体下面岩层裂隙中的压力水体压力剧增。当遇暴雨，能量迅速累积；致使原有土体平衡破坏，土体和岩层裂隙中的压力水体冲破表面覆盖层，瞬间从山体中上部倾泻而下，造成山洪和泥石流。山丘区不稳定的气候系统，往往造成持续或集中的高强度降雨。据统计，发生山洪灾害主要是由于受灾地区前期降雨持续偏多，这使得土壤水分饱和，地表松动，遇局地短时强降雨后，降雨迅速汇集成地表径流从而引发溪沟水位暴涨，可见，山洪灾害主要还是由持续的降雨和短时强降雨引发的。

(3) 人们缺乏防洪防灾的意识，滥垦滥伐，导致森林草地破坏及水土流失极其严重，各类工程措施与非工程措施建设不完善，如防洪堤坝拦蓄洪水能力低，山洪灾害预测手段

落后，这是诱发山洪灾害的人为因素。人类活动所造成的山丘地区土地过度开发，陡坡开荒，乱砍滥伐森林，工程建设对山体造成破坏，这些改变地形、地貌，破坏天然植被，使山体失去水源涵养作用，均易引发山洪。

1.1.2 山洪的危害与防治

山洪冲毁房屋、田地、道路和桥梁，常造成人身伤亡和财产损失。例如，1977年7月29日，山西省运城市翟王山一带降特大暴雨（暴雨中心持续2h50min，降雨464mm），所有河沟山洪直泻，冲毁小型水库4座，民房坍塌5500间，死伤455人，南同蒲铁路停车42h。冲毁农田35000亩（1亩 \approx 666.67m²），冲走粮食75万kg，财产荡然无存，灾情十分严重。1988年8月6日，山西省汾阳县大暴雨形成边山河道洪水齐发，冲毁河堤，淹村庄96个，受灾3万余人，死亡50余人，水利设施40处均毁于洪水，全县损失近两亿元。

我国坐落于亚洲东南边陲，北方大部分区域春、秋、冬三季少雨，但夏季却有频发的暴雨。每年夏季，我国自南向北都会依次在不同区域出现暴雨，包括华南地区的早期暴雨，江淮一带的梅雨时期，华北与东北一带频发的夏季暴雨，以及夏季后期再次出现在华南一带的热带暴雨。我国人口占世界总人口的1/5以上，是一个人口大国，而生活在山丘地区的人口占全国总人口的1/3，可见我国山丘地区人口分布广泛。我国还是一个山丘地区面积广阔的国家，山丘地区不仅指山地，也包括丘陵和比较崎岖的高原，我国山丘地区面积占据了全国2/3的土地面积，远远超过了世界平均水平。近年来，山丘地区经济水平不断提高，成为我国社会经济重要的一部分。频发的暴雨、复杂多变的地形地貌、分布广泛的人口、不断发展的经济，这些因素使我国成为一个遭受山洪地质灾害严重的国家。据我国防汛抗旱总指挥部统计，我国29个省（自治区、直辖市），274个地级市，1836个县（区）具有山洪灾害防治任务，防治区面积达到463万km²，受威胁人口达5.6亿，山洪灾害防治形势十分严峻。因此，自2006年起，由国务院及国家发展和改革委员会牵头，在全国范围内开展了山洪灾害防治项目。针对山洪灾害的防治要注意以下三点：

1. 明确防治工作目标

山洪防治工作的目标是：确保人员安全，确保水库大坝安全，确保重要城镇安全，确保重要交通干道和通信干线的安全，最大限度地减轻灾害损失，实现人与自然和谐相处。

2. 开展两项基础工作

要搞好山洪防治，实现工作目标，必须扎实开展好以下两项基础工作。

(1) 合理划分山洪影响区域。针对各地的气候和地质及地貌条件，在认真分析历史山洪灾害造成危害的基础上，确定山洪易发区，做到胸中有数，这是山洪防治的首要工作。在此基础上再根据山洪灾害发生的可能性及危害性的程度大小，一般将山洪易发区划分为危险区和警戒区。

危险区是指已发生过滑坡、崩塌和泥石流的地区，以及河道两侧处于20年一遇洪水水位以下的低洼地带或洲滩；警戒区是指经监测一旦遇到强降雨时，极有可能发生山体滑坡、崩塌和泥石流的地区，以及河道两侧处于20年一遇洪水水位至历史最高洪水水位之间的地带。

(2) 探索规律,科学确定灾害特征雨量。由于山洪是由降雨形成的,因此,科学确定山洪致灾的特征雨量是山洪防治,特别是制定山洪防御方案的关键依据。一般可根据当地下垫面条件和对历史山洪灾害形成及演变过程的分析,确定警戒雨量和危险雨量。

警戒雨量是指当一定时段降雨量达到某一特征值,且如果降雨仍继续,即有可能发生山洪灾害的雨量;危险雨量是指当一定时段降雨量达到某一特征值,即有可能发生山洪灾害时的雨量。特征雨量一般按 1h、2h、…、6h 来划分降雨时段,并分析确定出相应的特征雨量,具体划分和确定方法要根据当地实际情况选择。

3. 正确处理三对关系

(1) 正确处理避灾与治理的关系。山洪及其灾害的突发性和破坏性,往往使人们防不胜防,措手不及,也极大地增加了治理难度。因此,必须坚持避治结合,避重于治的原则;必须坚持使人们远离山洪,主动避开灾害这一指导思想。在思想认识上要由单纯拒山洪于门外转变为使人们远离山洪,真正做到主动避灾,从根本上减轻灾害损失。与此同时,对治理任务相对较轻的地区,必须加大治理的力度。

(2) 正确处理当前与长远的关系。山洪防治涉及面广,工作难度大,特别是山洪影响区内人口较多,要在短时间内实施避灾措施,全部外迁到安全地区的工作量十分巨大,也不现实。同时,山洪治理的任务十分繁重,是一项长期性工作,必须分步实施。因此,对这些地区当前必须采取以防为主,辅以相应治理措施的方针,当务之急是要落实好山洪防御方案,并根据防治规划,逐步实施避灾和治理措施。

(3) 正确处理发展与保护的关系。要全面建设小康社会,发展是执政兴国的第一要务,工业化和城镇化进程必然日益加快,在此过程中,特别是在基础设施建设过程中,对山洪影响区采取相应的保护措施是十分必要的。首先是危险区、警戒区内不能规划居民区;其次是危险区内不能规划兴建企业及基础设施;最后企业及基础设施建设要尽量避开警戒区,如必须从警戒区经过或必须在其中建设时,除对企业和基础设施本身要采取山洪保护措施以外,还必须对企业或基础设施建设可能诱发的山洪灾害采取可靠的治理措施。

1.1.3 山洪灾害预警预报

1.1.3.1 国外预警指标研究进展

山洪灾害作为自然灾害的重要组成部分之一,已经给全世界各国的社会经济和人民生命财产安全造成影响。为此,从 20 世纪 70 年代起,世界各国都结合本国的实际情况对山洪灾害预警方法做出许多研究,并且成果显著。世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)在 20 世纪 90 年代开始将山洪预警作为工作的一部分,着力推进全面化山洪灾害管理机制,与美国等相关国家开展了关于山洪预警相关项目的研究。奥地利人 H. Olitski 提出了关于山洪空间预警方法的“荒溪分类及危险区制图指数法”,它的基本原理主要是根据山洪灾害危险等级划分、形成机理和地质地貌,划分三种不同的危险区域,分布于山沟口冲击锥上或者山体沟道内,从而实现山洪灾害预警预报的目的。美国国家水文研究中心根据相关组织及机构的要求提出了山洪预警指标 FFG (Flash Flood Guide) 作为山洪预警系统建设的基础思路,该思路主要依据小流域实时降雨量,结合水文模型模拟

计算此时土壤饱和度，并反推出达到预先设定的预警指标值可能的降雨量，当实际降雨量达到或超出该计算值时山洪灾害可能发生。美国国家水文研究中心研发出了一套山洪预警指南系统，该系统根据山洪灾害发生迅速、预期短等特点，依托美国国家天气预报机构实时监测小流域降雨量以及估算本地区以后降雨数值和分布，从而实现高效、精确地预警山洪灾害。意大利根据本国情况开发了中小河流洪水预报系统，该系统主要使用 Topkapi 分布式水文模型，根据各小流域的气候、水文等特点，开展在不同环境下小流域的山洪灾害预警。日本由于地形复杂以及季风气候显著，较早地开展了山洪预警预报方面的研究，而且开发出多种预警预报系统，主要包含实效雨量法、权重判别分析法、土壤雨量指数法和汇流时间降雨强度法四种典型的研究方法。

针对流域的特征水位/流量，欧洲各国主要是采用正太分位数法以及蒙特卡洛法模拟，结合流域土壤饱和度对地表径流过程产生的影响，利用贝叶斯损失函数最小化确定临界水位/流量。或者选择特定的流域水文计算模型，采用数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）提取流域数字信息，进一步推算洪水过程，结合临界流量反推出对应各时间段降雨量。美国水文研究中心为了使水位预警工作更加方便，采用 GIS 技术设计和研发水位预警系统，结合水文监测预报工作的特殊性，通过数据的传送与接收、处理与分析等过程，实现了地图操作、属性查询、水位预警、应急预案等功能。

1.1.3.2 国内预警指标研究进展

我国幅员辽阔、地形地貌复杂、气候类别多样，小流域水文气象等自然条件种类繁多，加之我国关于山洪灾害监测预警预报研究起步相对较晚，这导致在相关领域的研究比较薄弱。虽然如此，但近年来，不少科研人员以及专家学者在山洪灾害防治与监测预警方面开展了许多研究，成果显著。周金星根据山洪灾害危险发生等级及其性质将危险区域划分作为工作的重点，取得了具有针对性的研究结论；赵然杭、王敏等针对关键性问题，基于山洪灾害防治时的具体情况，采用 P-III 型频率分析法以及单站临界雨量法确定雨量预警方法；李昌志、郭良在山洪临界雨量确定方法述评中以经验法和理论法为基础，分别研究了常用的预警方法；陈真莲、黄国如等以清远市连州瑶安小流域为例，采用水位反推法以及区域临界雨量法分析计算临界雨量；江锦红、邵利萍将河道流量作为研究对象，以水量平衡方程为理论基础，采用暴雨临界曲线研究山洪预警方法并验证其合理性；张红萍、刘舒等结合山溪洪水发生机理和特性，从临界雨量角度出发，采用同频反推法分析计算；刘媛媛、胡昌伟等针对资料匮乏小流域地区进行山洪灾害风险图的计算和划分；段生荣依据典型小流域地形地貌、水文气象等多种自然条件，采用降雨灾害频率分析法、产汇流分析法以及实测雨量分析法进行对比，综合确定临界雨量计算方法；王仁乔、周月华等以实际气象站、水文站测量数据为依据，结合逐步订正原理综合计算临界雨量；钟敦伦等按照山洪灾害活动规律，将其分为发展期、活跃期和衰退期三个阶段；程卫帅基于前期土壤的持水度以及时段所积累的降雨量两个方面，从临界雨量出发进行预警；张玉龙等以云南省山洪典型区域为例采用克里金空间差值法进行临界雨量计算。

山西省水文计算手册中水位预警指标是通过分析防灾对象所在地上游一定距离内水位站的洪水位，将该洪水位作为山洪预警指标的方式。根据预警对象控制断面成灾水位，推

算上游水位站的相应水位，作为临界水位进行预警。水位站的临界水位计算采用水面线推算法，根据成灾水位对应的流量按水面线法推算上游水位站的相应水位。水位预警指标分为两种：一是立即转移指标，临界水位即为水位预警的立即转移指标；二是准备转移指标。将临界水位减去 0.3m 作为水位预警的准备转移指标。

由于大部分山洪危险区域缺乏历史实测水位资料，黄丽玲等以设计暴雨计算不同频率的设计洪水，从而进一步计算控制断面的各级设计洪水位。为了验证其合理性，根据现有的历史调查洪水位进行对比，综合分析得出山洪灾害水位预警指标。

1.2 雨量预警

1.2.1 雨量预警的概念和作用

山洪灾害是由地形地貌、地层岩性、大气降雨等多种因素综合作用的结果，其中降雨是最活跃、最主要的因素，降雨量或雨强的控制性指标（临界雨量或临界雨强）是山洪灾害气象预报预警与制定综合防治规划方案的关键依据。一个流域或区域的临界雨量（强）是指在该流域或区域内，该流域或区域发生溪河洪水、泥石流、滑坡等山洪灾害时的降雨量或降雨强度。目前，临界雨量的确定方法主要有灾害与降雨频率分析法、内插法、比拟法、区域临界雨量分析法、产汇流分析法、单站临界雨量分析法，其中前三种是针对无资料或资料较缺乏的地区进行临界雨量分析计算的方法；区域临界雨量分析法所确定的区域山洪灾害临界雨量可作为判断区域内有无山洪灾害发生的指标，但无法判别区域内受灾面积的大小及灾害严重程度；产汇流分析法受降雨的时空分布、流域下垫面情况、流域地貌地质、河网水力条件等多方面的影响，在实际应用中缺乏精确性；单站临界雨量法是通过对不同雨量站长时间系列资料进行综合对比分析筛选，计算出临界雨量值，这对雨量站和雨量站点资料精度要求较高。

1.2.2 雨量预警的方法

一般情况下，山洪成灾的原因是由于局地暴雨形成洪水，导致河水急速上涨，水位超过河岸高度形成漫滩，上滩洪水对农田和房屋造成安全威胁。因此，通常可以将河水漫滩的水位定为警戒水位。根据上滩水位，结合实测河流断面资料估算出相应的流量，即为上滩流量，也可称为警戒流量。由于径流是由降雨产生的，从达到上滩流量的时刻开始往前推，在一定时间之内的累计降雨量称为警戒临界雨量。山洪的大小除了与降雨总量、降雨强度有关外，还和流域土壤饱和程度或前期影响雨量指数（antecedent precipitation index, API）密切相关。当土壤较干时，降水入渗大，产生的地表径流小；反之，如果土壤较湿，降水入渗少，形成的地表径流大。因此，在建立山洪警戒临界雨量指标时，应该考虑山洪防治区中小流域的土壤饱和情况，给出不同初始土壤含水量条件下的警戒临界雨量。土壤含水量指标可以采用土壤饱和度、也可以用 API 表示，其中土壤饱和度可以由分布式水文模型输出。流域面平均雨量可以采用空间插值方法由雨量站点的观测资料计算得到。

随着流域土壤饱和度的变化，山洪预警临界警戒雨量值也会随之发生变化，故称之为动态临界警戒雨量。

本书将临界雨量的时间尺度依次划分为 1h、3h、6h、12h 以及 24h 的临界雨量，实际应用中，当 1h 累积降雨量达到 1h 临界警戒雨量时，就发布预警，如果 1h 累积降雨量未达到 1h 临界雨量，那么继续对降雨进行监测，检查 3h 累积降雨量是否达到 3h 临界雨量，如果达到就发布预警，如果没有达到，则继续监测 6h 累积降雨，依次类推，直到完成 24h 累积降雨的监测为止。

1.2.3 雨量预警的指标分析方法

1. 山洪灾害调查成果数据

山洪灾害调查成果的数据类型众多，包括防治区信息、小流域信息、水文气象成果数据、危险区信息和沟道断面测量成果数据等。数据格式包括调查成果关系型数据、调查成果多媒体数据、调查评价基础工作底图和调查标绘成果空间数据等；其中用于小流域洪水预报的山洪调查成果数据主要包括小流域地理空间数据、小流域信息、水文气象成果和沟道断面测量成果；小流域地理空间数据主要包括小流域水系面、最长汇流路径、汇流时间和出口节点等；小流域信息包括历史山洪灾害现场调查数据、监测站信息、防治区涉水建筑物信息、土壤植被、地形地貌、小流域相关防治区社会经济概况等；水文气象成果包括洪水水文要素摘要、日降水量、日水面蒸发量、暴雨统计参数、洪峰流量统计参数等；沟道断面成果包括沟道历史洪痕测量、沟道纵断面成果、沟道横断面成果等。

2. 雨量预警指标分析

按照国家山洪灾害防治项目组发布的《山洪灾害分析评价技术要求》和《山洪灾害分析评价方法指南》中的指导意见，遵循雨量预警指标以模型分析法进行分析确定。其基本方法是根据成灾水位反推成灾流量，再由成灾流量反推临界雨量。重点通过分析成灾水位、预警时段、汇流时间、土壤含水量等，计算得到山洪防治对象的临界雨量，根据临界雨量和预警响应时间确定雨量预警指标，并分析成果的合理性。根据河道的警戒水位和河道水位—流量关系曲线推算出相应的成灾流量作为警戒流量，并将由警戒流量计算出的降雨量作为临界雨量。对于没有水位—流量关系曲线资料的测站，可根据山洪灾害调查沟道断面成果中的河道断面、河道纵坡和河床糙率，依据曼宁公式推算出水文站的水位—流量关系。警戒流量除了与降雨强度有关之外，还与土壤含水量（即前期影响雨量）密切相关。当土壤含水量较低，降水渗入地下很多，产生的径流则小；反之，如果土壤含水量较高，降水渗入地下很少，产生的径流则大。因此，依据警戒流量计算出警戒雨量时，还需考虑土壤含水量的情况，给出不同初始土壤含水量条件下的警戒雨量。土壤含水量指标可采用土壤饱和度或前期影响雨量表示。基于山洪灾害调查成果的雨量预警指标分析方法，主要是根据山洪灾害调查成果中的小流域地理空间数据和小流域信息，生成该流域的数字流域，再对小流域分区、分单元、分水系，建立小流域拓扑关系，进行小流域产汇流分析和洪水演进分析，得出小流域预报断面的洪水预报成果；之后再结合山洪灾害调查成果中的水文气象成果资料进行参数率定，确定分析方法中的参数。具体做法如下：

(1) 在预报范围内根据山洪灾害调查成果中的小流域水系分布、防洪涉水建筑物分布和水文监测站点分布情况，以及预报区域地形、地质和下垫面的不同，将小流域预报区域划分为几块，每块的出口即为预报断面。块内依据降雨分布的不均匀性，再划分为若干个单元进行洪水预报。

(2) 对于每一块小流域区域采用 ArcGIS 地理数据管理软件进行流域信息提取和单元划分，并兼顾到降雨分布不均匀的影响以及洪水向下游传播时在汇流时间和洪水削减方面的影响。这种单元划分方法既避免了单元间跨越分水岭的弊端，又减少了面雨量计算的误差。

(3) 对于每一小流域单元，用降雨径流模型做产流计算，并用马斯京根模型做汇流计算。通过分析山洪灾害调查提供的成灾水位、预警时段、土壤含水量等，根据成灾水位反推流量，再由流量反推降雨量，计算得到每一单元的临界雨量，并根据临界雨量和降雨历时确定雨量预警指标。

(4) 采用山洪灾害调查成果中多年的气象水文历史资料，对于每一块小流域预报区域进行参数率定，从而确定该分析方法中的相关参数值。

3. 雨量预警指标成果

运用基于山洪灾害调查成果的雨量预警指标分析方法，计算出山洪灾害防治区的成灾临界雨量，并得到临界雨量的降雨历时和预警等级。

1.3 水位预警

1.3.1 水位预警的概念和作用

水位预警是通过分析防灾对象上游一定距离内水位站的洪水位，将该洪水位作为水位预警的指标，根据预警对象控制断面成灾水位，是推算上游水位站相应水位的一种预警方式。

以溪河洪水为主的山洪采用水位预警的方式，具有物理概念直接、可靠性强、适用范围广的优势，尤其适用于支沟主沟汇流洪水顶托、流域内有调蓄工程、地下河或雪山融水等情况的山洪预警。水位监测站配合本地化的预警设备还可以对强行涉水过河、漂流、河边宿营等情况起到警示作用。

依据雨量预警指标和面雨量计算方法，能够比较准确地进行小流域洪水分析与预报，及时发布山洪灾害预警信息，为山洪应急响应提供充足的救灾时间。

1.3.2 水位预警的优点

1. 物理概念直接

山洪灾害主要是由降雨引起的河溪洪水、滑坡、泥石流等灾害。根据 2012—2015 年山洪灾害事件统计，造成人员伤亡的山洪灾害事件中 50% 以上为河溪洪水灾害。对于河溪洪水灾害，当前主要采用雨量预警或水位预警。对于当地群众而言，最为熟悉的指标是本

地河流上涨幅度，采用水位预警指标物理概念相对直接。在山洪灾害预警预报中，判断一个居民点是否会发生山洪灾害，最终都要归结为比较溪沟或者河道里的洪水位与预警点居民区高程的关系，即洪水位与成灾水位的关系。与雨量预警指标相比，水位预警指标概念更明确，省去了雨量预警指标中由降雨推求洪水的过程，使用更方便。

2. 可靠性强

由降雨发展为河溪洪水是一系列复杂的水文过程，当前的水文模型一般包括产流、坡面汇流、河道洪水演进等，雨量预警时，常常受到降雨预报不准确、水文模型不合理、人为活动等因素影响，而水位预警则省去了由雨转换为水的过程，可靠性更强。

3. 适用范围广

以溪河洪水灾害为主的山洪沟防洪治理采用水位预警的方式，具有物理概念直接、可靠性强、适用范围广的优势，尤其适用于支沟主沟汇流洪水顶托、流域内有调蓄工程、地下河或雪山融水等情况的山洪预警，对于这种类型的山洪，降雨和洪水没有直接对应关系，也就无法利用雨量进行预警，而水位预警不受降雨的影响，因此可以对该类山洪进行较准确地预警。相比雨量预警，水位预警对应的响应时间较短，缺少了产流、汇流的时间，只有洪水演进的时间可以利用。

1.3.3 水位预警的方法

1. 简易水位报警器

简易水位站是随着山洪灾害防治非工程措施项目建设而逐渐发展起来的，最初的方式为简易的水尺桩，水尺桩可为木桩或石柱型，对于无条件建桩的监测站，选择离河边较近的固定建筑物或岩石上标注水位刻度；水位监测尺的刻度以方便监测员直接读数为设置原则，并根据各监测点的实际情况，标注预警水位。2013年以后，效仿简易雨量报警器，简易水位站也增加了报警功能，逐步发展成了简易水位报警器。简易水位报警器用于沿河村落河流（溪沟）控制断面附近水位监测报警，具有实时水位监测、预警水位（准备转移、立即转移）阈值设定、报警以及报警数据查看等功能。当河流水位达到预警阈值时，可通过声、光信号自动进行原位报警，同时通过无线和有线方式将预警信号传输至下游报警终端，实现声、光同步报警。简易水位报警器具有以下特点：

(1) 水位监测和报警设备可一体化，进行原位报警；监测与报警设备也可分离，以实现上游监测、下游报警。

(2) 简易水位报警器主要用于洪水上岸情况下的山洪预警，同时还可对强行涉水过河、漂流、河边宿营等河道内人员活动起到警示作用。

2. 按河长布设水位监测站

(1) 布设规定。2010年印发的《山洪灾害防治非工程措施建设技术要求》、2013年印发的《山洪灾害防治非工程措施补充完善技术要求》对水位监测站布设做了如下规定：

1) 面积超过 100km^2 的山洪灾害严重的流域，且河流沿岸为县、乡政府所在地或人口密集区、重要工矿企业和基础设施的，布设自动水位监测站。

2) 流域面积 100km^2 以下的山洪灾害严重的小流域，河流沿岸有人口较为集中的居民

区或有较重要的工矿企业、较重要的基础设施，布设简易水位监测站。其他小流域，根据实际情况因地制宜布设简易水位监测站。

3) 对于下游有居民集中居住的水库、山塘，没有水位监测设施的，适当增设水位监测设施。对重要的小型水库，可适当布设自动水位监测站。

4) 水位站布设地点应考虑预警时效、影响区域、控制范围等因素综合确定，尽量在山洪沟河道出口、水库、山塘坝前和人口居住区、工矿企业、学校等防护目标上游。

5) 站网布设时应考虑通信、交通等运行管理维护条件。自动水位监测站布设的控制条件是流域面积 100km^2 以上，重点布设于县、乡政府所在地、重要的小型水库等部位；简易水位监测站则布设于人口集中的居民区等部位。事实上，无论是自动水位监测站还是简易水位报警器，均应根据河流的分布，布置于河流沿线。根据日本的经验，水位站布设的河长间距为 $10\sim 20\text{km}$ 。

(2) 修正后布设原则。修正后的布设原则为：

1) 山洪灾害严重的流域，按照河长间距为 $10\sim 20\text{km}$ 布设水位监测站。

2) 水位站布设地点应考虑预警时效、影响区域、控制范围等因素综合确定，尽量在山洪沟河道出口、山塘坝前和人口居住区、工矿企业、学校等防护目标上游。如安装简易水位报警器，报警器可放置于保护对象区内。

3. 确定预警指标

临界水位是水位预警方式的核心参数，指防灾对象上游具有代表性和指示性地点的水位；在该水位时，洪水从水位代表性地点演进至下游沿河村落、集镇、城镇以及工矿企业和基础设施等预警对象控制断面处，水位会到达成灾水位，可能会造成山洪灾害。临界水位通过上下游相应水位法和成灾水位法进行分析。一般下游防护对象成灾水位对应的上游监测站水位为立即转移水位，具体操作中，将立即转移水位降低一定幅度，确保有足够时间做好转移疏散准备，此水位为准备转移水位。山洪从水位站演进至下游预警对象的时间往往很短，给预警信息传递和人员转移带来很大的困难，为了解决此问题，需增加洪水速升的预警指标，在准备转移水位线以下设置一个水位上涨速率检测区间，即使河道内水位未达到洪水上岸预警指标，河道内水位速升达到已预设的上涨速率时也发出预警信息。

4. 建立雨量、水位互补的预警体系

当年降雨量达到 800mm 以上时，沿河村落人口集中的区域可增加配置水位监测站，形成以雨量预警和水位预警互补的体系。降雨发生后，首先根据雨强进行警戒，而后根据雨情、水情的发展逐步启动雨量预警指标、水位预警指标，以提高预警指标体系的可靠度，弥补单独用雨量预警或单独用水位预警带来的自身缺陷。