

山洪灾害临界雨量研究综述

程卫帅

(长江科学院水资源综合利用研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 临界雨量是一个关键的山洪灾害预警指标。按其技术原理将临界雨量推求方法划分为数据驱动的统计归纳法和基于灾变物理机制的水文水力学法分别进行评述, 并介绍了临界雨量指标的两个拓展: 动态临界雨量和暴雨临界曲线, 综述了临界雨量不确定性分析的研究进展。通过综述发现: 中国目前主要应用的是较简单的统计归纳法; 临界雨量推求主要考虑前期降雨量(前期土壤饱和度)和时段累积降雨量两个因素的影响或仅后者一个; 临界雨量指标难以反映山洪灾害的规模; 考虑临界雨量不确定性有助于提高预警质量, 但如何充分考虑其影响仍然是一个挑战。

关键词: 山洪灾害; 临界雨量; 前期土壤饱和度; 降雨强度; 累积降雨量

中图分类号: TV 122; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)06-0901-08

中国山洪灾害呈多发、易发、频发、重发的特点, 全国 1 836 个县级行政区具有山洪灾害防治任务。山洪灾害已成为威胁人民群众生命财产安全的突出隐患, 是中国防洪减灾工作中亟待解决的突出问题。近年来, 中国加大了山洪灾害防治力度, 2006 年国务院批复全国山洪灾害防治规划, 启动山洪灾害防治试点建设, 2009 年将试点范围扩展到全国 103 个县级行政区。山洪灾害预报预警是山洪灾害防治体系的重要组成部分, 是减少人员伤亡和财产损失的有效手段。山洪灾害预警是根据气象、水文等预报信息预测山洪灾害将要发生时发布的紧急指令或信号。在用于判断山洪灾害发生与否的临界流量/水位法、临界雨量法等方法中, 临界雨量法是国内外应用最为广泛的一种^[1-2]。这是因为临界雨量法能够更好地被公众理解和接受, 更重要的则是出于延长预见期的考虑, 近年来由于降雨预报技术的进步, 部分国家山洪灾害预报的预见期可达 6 h^[1]。临界雨量法(rainfall threshold approach)又称雨量比较法(rainfall comparison method), 一般根据预报降雨量与临界雨量的比较, 预测山洪灾害发生与否及其严重程度和紧急程度, 并据此发布警报信息。因此, 山洪灾害临界雨量指标是山洪灾害预报预警的重要基础, 相关研究对山洪灾害防治有着重要的意义。近 10 多年来, 国内外关于山洪灾害预报预警技术包括临界雨量指标的分析计算技术的研究取得了长足的进步, 鉴于临界雨量指标在山洪灾害预报预警中的重要性, 本文对其研究进展进行专门综述。

1 山洪灾害临界雨量的界定

山洪灾害的定义目前并不统一, 分歧主要在于山洪灾害是否包括滑坡和泥石流灾害。国外文献中对应的术语通常认为是 flash flood, 尽管 flash flood 常伴发滑坡和泥石流, 但其本身并不包括滑坡和泥石流。本文中如无特别说明, 山洪灾害指降雨激发的山区溪流洪水灾害。

临界雨量的概念广泛出现在包括滑坡和泥石流在内的广义山洪灾害预报预警研究中^[3-6]。临界雨量是预报预警的核心指标, 直接影响漏报率和空报率。临界雨量有时也被表达为临界雨强, 但目前临界雨量经常被

收稿日期: 2013-04-15; 网络出版时间: 2013-09-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20130912.1140.001.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201201063)

作者简介: 程卫帅(1977-), 男, 湖北崇阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事水资源及水灾害风险管理研究。

E-mail: chengws@mail.crsri.cn

表达为一定时段的累积雨量, 多由一组不同时段累积雨量共同构成, 而不是单位时间的累积雨量, 这与临界雨强有很大差别。

山洪灾害临界雨量的定义方式目前有两种: ① 从降雨量直接定义, 当某一时段的降雨量达到或超过某一雨量时, 山洪灾害发生, 这个雨量就是临界雨量, 如《全国山洪灾害防治规划》的定义; ② 从溪流临界水位(流量)间接定义, 即在目标河段断面生成临界水位(流量)的累积降雨量^[1]。

两种定义的区别在于山洪灾害临界条件判别方式的不同。前者直接比较降雨量, 通常采用统计归纳方法进行判别: 统计分析时段累积雨量与山洪灾害的对应关系, 利用时段雨量的某个统计特征值来为依据判别灾害发生与否, 这个特征值即为临界雨量。后者通过比较溪流水位(流量)来判断灾害发生与否, 并根据河道安全水位(泄量)反推临界雨量, 采用的方法是水文水力学方法。

上述两类方法也是目前推求山洪灾害临界雨量的主要方法, 本文据此分类对临界雨量推求方法进行综述。文献[2]将水文水力学方法称为理论方法, 将统计归纳法与内插法、比拟法合称为经验方法。内插法和比拟法不能独立完成临界雨量推求, 本文将其附在统计归纳法中介绍。

2 临界雨量推求的统计归纳法

统计归纳法是一种数据驱动型的临界雨量分析计算方法, 不关注山洪灾害发生发展过程涉及到的物理机制, 直接从降雨数据系列与山洪灾害数据系列推求临界雨量, 方法简单, 应用方便, 对数据的需求相对较少。在国外, 统计归纳方法的研究和应用较少^[7], 而在中国, 由于资料、经费等因素的限制以及其他原因, 统计归纳方法是实际应用中的主要方法。较早采用的方法主要是灾害实例调查法、灾害与降雨频率分析法, 并辅以内插法和比拟法, 后来出现了从历次山洪灾害的最大平均面雨量和最大单站雨量中取最小值进而推求区域临界雨量的方法^[8]。

自《全国山洪灾害防治规划》开始编制以来, 中国报道了许多关于当地山洪灾害临界雨量推求的研究^[8-13], 绝大部分文献的内容是各种统计归纳法在当地的实际应用和比较分析。研究表明: 在同一地区采用不同统计归纳方法得到的临界雨量指标并不一致, 多数情况下获得的临界雨量初值不能直接应用, 需结合专家经验作进一步确认; 多数文献建议通过综合对比分析最终确定临界雨量指标, 或将临界雨量指标取为下限值或自下限值开始的某一数值区间。

由于实践中暂时无法对山洪灾害进行全面的监测, 被监测到的通常只是那些损失或规模足以引起人们关注的山洪灾害, 因此统计归纳法得出的临界雨量很可能并非“真正的”临界雨量, 而是足以引起人们关注的那些山洪灾害的临界雨量。在理论上这是一个缺陷, 但在实践中也许可以成为一个优点, 因为山洪灾害预警的重点正是那些损失或规模足以引起人们关注的山洪灾害。但需要指出, 当预警指标涉及灾害损失时, 应当特别关注区域社会经济条件的变化。

对于小流域而言, 流域下垫面条件尤其是河道特征较易发生不可忽视的变化, 山洪灾害临界条件也随之变化, 历史临界雨量对于预测未来临界雨量的意义有时会有限, 这一定程度地破坏了统计归纳法的理论基础, 破坏严重时需要对数据系列进行修正, 在实用方面则影响统计归纳法的可靠性。在这个意义上, 统计归纳法是一种因陋就简的临界雨量推求方法。

推求山洪灾害临界雨量的统计模型可以建得很复杂, 并利用数据挖掘技术来充分利用历史资料, 但目前尚未见到这类研究报道, 这是一个可以尝试的研究方向。由于全国山洪灾害防治规划带来的实用化倾向, 国内流行的研究思路是简单实用, 当前得到应用的统计归纳法均较简单。

2.1 有资料地区临界雨量推求的统计归纳方法

2.1.1 从面雨量推求区域临界雨量

采用滑动平均法计算目标区域内与历次山洪灾害对应的各时段最大面平均雨量, 然后从这些最大面平均雨量中取最小值作为区域临界雨量初值, 然后在初值上下根据经验取一定的变幅, 构成区域临界雨量区

间^[8]。只要面雨量在该区间内，区域内就有可能发生山洪灾害。

本法适用于雨量站密度相对较小的区域，区内雨量站不能控制的部分地区实际上可认为是通过内插法得到的临界雨量。本法可判断区内山洪灾害发生与否，但无法确定山洪灾害发生的场次和规模，只能作大致的定性估计。本法资料需求相对简单，只需要降雨和相应的山洪灾害资料。

2.1.2 单站临界雨量法

与上法类似，本法也只需要降雨资料系列和山洪灾害调查资料。采用滑动平均法得到单个站点与历次山洪灾害对应的各时段最大雨量，取其最小值作为该站的临界雨量初值。临界雨量初值可以采用其他方法进行修正，如王仁乔等^[9]采用的灾害降雨同频率分析法。统计所有站点临界雨量初值中的最小值、平均值，二者构成的区间成为区域临界雨量区间^[8]。

当山洪灾害调查资料不全且无法做补充调查时，可用流量与降雨同频率分析方法来计算单站临界雨量，即假设流量(或水位)和降雨同频率，根据安全泄量(水位)的频率计算分析同频率的各时段降雨量，此即临界雨量^[10]。这种方法比较简单，只要有降雨资料和河道安全泄量(水位)及其频率就可以得到临界雨量指标，但后者有时难以获得。

本法的精度比面雨量法高。理论上，当雨量站密度大到可以控制每个小流域时，预警信息可针对小流域分别发布，也就可以估计区域内山洪灾害发生的场次，但一般这不太可能实现。

2.2 无资料或资料不足地区临界雨量推求的统计归纳方法

(1) 当目标区域中具有实测降雨资料系列的雨量站覆盖了大部分地区、但仍然存在部分无资料的空白区时，可采用内插法推求临界雨量^[8-9]。

(2) 当目标区域无资料或实测降雨资料系列很短，但仍有条件进行对比分析，可在有资料区域发现相似区域或小流域时，可采用比拟法推求临界雨量^[8-9]。比拟法要求至少存在一个与目标区域条件相似的有资料的区域或小流域，本质上仍然是资料不足地区临界雨量的推求方法。

内插法和比拟法是将有资料地区临界雨量移用到无资料或资料不足地区的经验方法，无法独立地完成临界雨量推求，但可作为各类临界雨量推求方法的补充，这里暂列入统计归纳法的范畴。

(3) 目标区域无资料、但可能通过调查获得灾害实例及其对应雨量资料时，可采用灾害实例调查方法来推求临界雨量：通过全面调查获得灾害实例及其对应雨量资料，统计分析得到临界雨量^[8-12]。

(4) 目标区域无资料、通过调查只能获得灾害发生数量而无法获得对应雨量资料时，可以采用灾害与降雨频率分析来推求临界雨量：基于灾害场次的调查分析山洪灾害发生频率，并假设灾害与降雨同频率，则与灾害频率相同的设计降雨量可作为临界雨量^[10-12]。

灾害实例调查法、灾害与降雨频率分析法都是统计方法，可独立完成区域临界雨量的推求，在实践中应用较广。二法精度均存在问题，虽可通过对比分析进行修正，但在用作关键预警指标时仍应持谨慎态度，在资料条件具备时应尽快采用更可靠的方法复核临界雨量。

3 临界雨量推求的水文水力学方法

水文水力学方法以山洪灾害形成的水文学过程、水力学过程为基础。本法资料需求较多，对灾害、降雨、下垫面条件、径流、河道特性等资料都有相应要求。其原理也较简单，即从河道断面临界流量(水位)反推临界雨量，文献^[13]将本法称为流量反推法。

在国外，临界雨量法中最具代表性的方法是 FFG (flash flood guidance) 方法^[1, 14]，其中临界雨量采用水文水力学方法推求。FFG 直译为山洪指导，实际上就是临界雨量。FFG 方法是美国水文研究中心(HRC)提出的山洪灾害早期预警方法，从 20 世纪 70 年代至今一直在持续改进^[15-18]，最近进展是将 FFG 与分布式水文模型结合起来，给出网格 FFG (GFFG)^[18]。FFG 法在无资料地区精度较差，在输入数据方面应作改进^[19]。

山洪灾害预报预警是广受关注的领域，美国、日本、韩国、意大利等国都做过大量工作，提出多个预报

预警系统, 其中最具代表性的就是 FFG 系统 (FFGS)。FFG 系统已被应用于许多国家, 如美国、韩国、中美洲 7 国、湄公河流域 4 国等, 影响很大, FFG 系统及其临界雨量推求方法的改进是很活跃的研究领域, 本文以 FFG 系统的临界雨量推求方法为代表介绍水文水力学法。

3.1 临界雨量的通用推求方法

应用水文水力学方法推求临界雨量的主要步骤包括: ① 确定引发山洪灾害的临界流量(水位)值, 进而推求对应的不同历时的临界径流(净雨); ② 建立一定土壤饱和度条件下的降雨~径流关系, 从临界径流(净雨)推求相应的临界雨量。

3.1.1 临界径流推求

临界雨量值计算的关键是确定临界流量(水位)。可根据防洪标准直接确定临界流量(水位); 但一般小流域并不存在严格规划设计的防洪标准, 此时可选择几个代表性断面, 根据历史灾情和现有水工情确定各断面控制水位, 通过水力计算获得控制流量, 并将其作为临界流量^[13]。

逐个分析确定小流域控制水位和流量的工作量非常大, 资料的收集工作也很繁杂。在 FFG 系统中, 临界流量通常认为是目标断面的平滩流量。平滩流量可利用区域地理信息批量推求, 工作量相对小得多, 资料需求也更易满足。平滩流量确定后, 根据地貌瞬时单位线法或综合单位线法获得单位线峰值, 最后计算得到临界径流。

1999 年 Carpenter 等^[20] 基于水文学原理给出了临界径流计算的通用方法, 其中关键是平滩流量的推求, 方法主要有两种: ① 应用曼宁公式计算平滩流量, 河道特征参数和糙率通过地理信息系统获取; ② 通过统计方法推求, 因平滩流量与 1~2 年一遇河道流量之间存在良好的统计关系^[21], 于是有流量或雨量资料的地区容易得到平滩流量, 对于无资料地区, Carpenter 等^[22] 给出了一种根据流域面积和河道比降计算 2 年一遇流量的经验方法。应用第 2 种方法时, 应根据当地实际研究平滩流量究竟与哪种重现期流量具有良好的统计关系, 对无资料地区还应验证经验公式的适用性。

3.1.2 利用降雨~径流关系推求临界雨量

假设目标区降雨均匀分布, 利用水文模型建立不同历时的实测降雨~径流关系^[23]。在初始条件(如土壤饱和度和地下水储量等)不变的条件下, 利用水文模型获得某一历时产生的不同径流量及其对应降雨量, 并将其点绘在图上, 从而获得该历时的降雨~径流关系曲线。根据临界径流值, 容易查算得到临界雨量值。需要注意的是, 临界雨量是一定土壤饱和度条件下的临界雨量, 其他条件不变时, 土壤饱和度发生变化, 降雨~径流关系与临界雨量也随之变化。实际应用时可取几个典型的土壤饱和度, 分别计算不同历时的临界雨量。

可供选择的水文模型很多, 例如物理性模型、概念性模型、数据驱动型模型(统计模型和神经网络模型), 其中物理性模型近年来发展很快, 并被广泛应用于山洪预报, 研究表明物理性模型能给出更合理的结果^[1, 24-25]。因此在条件允许时, 应采用物理性水文模型来建立实测降雨~径流关系。

目前水文水力学方法主要考虑前期降雨量(前期土壤饱和度)和时段累积降雨量两个因素, 在多数情况下, 这两个因素也是影响临界雨量的主要因素, 因而是合理的。但在另一些情况下, 例如在主要由降雨强度驱动的山洪灾害(intensity-driven flash flooding)中^[1], 临界雨量的其他影响因素如地形、植被、土壤类型、地质、土地利用方式等下垫面特征参数对临界雨量的影响可能超过前期降雨量(前期土壤饱和度), 因此在实际应用现有方法时, 应注意分析其适用条件。

3.2 临界雨量指标的一种优化方法

临界雨量是山洪灾害预警的关键指标。是否发布山洪灾害预警, 取决于预报降雨量和临界雨量之间的关系。降雨预报具有不确定性, 从而山洪灾害发生与否也具有不确定性, 预警不可避免地会出现误报或漏报现象。预警信息发布及其后续避灾减灾措施需要付出成本, 因此在不确定性条件下, 临界雨量取值的变化将显著影响灾害损失。为使灾害期望损失尽可能地小, 临界雨量取值存在一个优化问题。这是山洪灾害临界雨量推求方法的一个新发展。

Martina 等^[26] 提出了一种不依赖于实时降雨预报的基于临界雨量的山洪灾害预警方法, 其中临界雨量指标

采用贝叶斯决策方法进行了优化：随机模拟得到长系列降雨量系列，输入水文模型得到前期土壤饱和度、最大流量系列；根据前期土壤饱和度类型，将对应降水量和最大流量分类成若干子系列，给出各子系列两个变量的联合概率密度函数，基于此构建描述贝叶斯成本效用函数。效用函数值取决于累积雨量与临界雨量之间的对比关系，以期望成本效用最小为目标，优化决策得到对应于不同前期土壤饱和度类型的山洪灾害临界雨量。2011 年 Montesarchio 等^[27] 基于雷达数据进一步发展了临界雨量优化模型，并采用了熵决策方法进行求解。

上法给出的结果是对应于不同前期土壤饱和度类型的临界雨量，能够比较方便地应用于山洪灾害的预报预警，但确定临界雨量的过程比较繁难，其中贝叶斯成本效用函数的合理构建尤为不易。优化方法考虑了不确定性和灾害损失，理论上临界雨量指标将因此而更优，但由于不确定性和灾害损失的影响因素很多，其可靠性还有待更多的验证。

4 临界雨量指标的拓展

4.1 动态临界雨量指标

临界雨量随土壤饱和度或前期降雨的变化而变化，动态临界雨量即考虑了土壤饱和度或前期影响雨量指数 (API) 影响的临界雨量。美国的 FFG 系统实际上也是基于动态临界雨量的。刘志雨等^[28] 提出了一种推求动态临界雨量的简单方法：将所有场次洪水前 24 h 的时段最大雨量及其对应的土壤饱和度组成状态空间，采用合适方法给出一条判别曲线，根据对应洪水流量是否超警将状态空间分为两部分，这条曲线就是该时段的动态临界雨量线。

这种动态临界雨量推求方法在总体构架上是一种数据驱动方法，所需资料包括水文、降雨和对应的土壤饱和度资料系列。但土壤饱和度资料往往不易获得，有时水文资料也缺乏，需根据降雨资料采用水文模型模拟得到。

该法在确定动态临界雨量时没有用到降雨~径流关系，而前期降雨不仅会影响前期土壤饱和度，还会影响山洪沟或河道的底水流量，如何考虑底水的动态变化对临界雨量的影响是本法需要研究解决的一个问题。此外，连续的动态临界雨量线在实际应用中并不方便，通常只需给出几个关键的土壤饱和度对应的临界雨量值就可满足山洪灾害预警的精度要求。

4.2 双指标的暴雨临界曲线

动态临界雨量指标考虑了前期土壤饱和度对临界雨量的影响，但土壤饱和度往往需要根据前期降雨量计算分析得到，而且是实时计算，在实际预警工作中这是一个不利因素，直接采用前期降雨量指标取代土壤饱和度指标可能是一个更好的选择。

江锦红和邵利萍^[29] 提出了一种基于降雨观测资料的山洪预警标准，以前期降雨量、降雨强度两个指标共同作为山洪灾害预警标准，根据最小临界雨量和临界雨力按双曲函数关系来绘制双指标的暴雨临界曲线（前期累计降雨量~前 1 h 降雨量关系曲线）。其中，最小临界雨量反映长历时暴雨河道最基本的泄洪能力，临界雨力反映当地的短历时暴雨特性、集水区域的产汇流特性和河道的泄洪能力。当暴雨点或由此点绘而成暴雨曲线位于暴雨临界曲线上时，可能发生山洪灾害。

暴雨临界曲线法是基于观测或预报降雨量的，预警时不需要进行复杂的实时计算；绘制暴雨临界曲线的资料要求也不高，推求过程简单，实际应用时具有较大优势。但暴雨临界曲线只能根据前期累计降雨量与前 1 h 降雨量进行预警，缺乏不同时段的概念；本法预警判别的时间起点处地表径流应处于河道基流状态，退水不完全时需将多余流量折算成初始累计降雨量。

5 临界雨量的不确定性

近年来，考虑不确定性的山洪灾害预报预警方法已经得到比较广泛的关注^[30-34]，既有基于概率方法的研究，也有基于非概率不确定性分析方法如模糊理论（可能性理论）的研究。考虑不确定性将有助于降低山洪灾害预警系统的空报和漏报率，研究显示，预见期在 3 h 以内的山洪灾害预报结果的置信区间较小而且比

较稳定,采用不确定性预报方法对改善预报预警质量有较大帮助^[31]。尽管相关研究已经较常见,但如何在决策过程中考虑预报不确定性目前仍然是一个重大挑战。

山洪灾害预报预警不确定性研究关注的焦点是降雨不确定性,临界雨量的不确定性也得到一定关注。Ntelekos等^[30]对临界雨量值(FFG值)的不确定性进行了专门研究,考察了临界径流不确定性、水文模型参数及其初始状态的不确定性对临界雨量的影响,其中临界径流不确定性分析考虑了集水面积、出口断面水力深度、河长、河宽、河道比降、霍顿长度比等6个参数的不确定性。分析表明,临界径流不确定性对临界雨量的影响占主导地位,水文模型参数及其初始状态的不确定性对临界雨量的影响有限,其研究结果同时还显示,前期土壤饱和度较小时临界雨量的不确定性更大。

在Ntelekos等^[30]研究基础上,Villarini等^[34]进一步考察了降雨不确定性和临界雨量不确定性对山洪灾害预报的联合影响。这个问题难度很大,例如由于前期土壤饱和度的计算需要用到实测或预报的前期降雨量,于是降雨量和临界雨量之间存在显而易见的相关性,如何考虑这种相关性乃至如何分析降雨不确定性对前期土壤饱和度的影响都很困难,目前已有文献对此进行了初步分析^[35],但完全解决尚需时日。

临界雨量不确定性分析的主要困难在于基础资料的匮乏,合理确定各类参数的分布概型和分布参数比较困难。另外,对于小流域而言,流域下垫面条件尤其是河道特征较易发生不可忽视的变化,特别是在发生一次山洪灾害以后,其变化可能很剧烈,从而破坏数据的一致性,并导致下一次山洪灾害的临界条件发生变化。历史资料本身就不具备数据一致性,将依据历史资料分析计算(或利用历史资料调校模型)得到的临界雨量指标作为判断下一次山洪灾害的预报预警标准,其可靠性存在疑问。总之,如何考虑临界雨量指标的不确定性及其对预报预警的影响是很复杂的问题,需要进一步研究解决。

6 结论与展望

临界雨量是影响山洪灾害预警的关键指标,对山洪灾害防治的影响巨大。山洪灾害临界雨量推求方法很多,按其技术原理可大致分为统计归纳法和水文水力学法两类。本文通过总结山洪灾害临界雨量相关研究发现,尽管山洪灾害临界雨量推求方法取得长足进步,但仍然存在一些问题需要解决,未来研究应注意以下几方面的内容:

(1) 中国近期可考虑采用适当的方法提高统计归纳法的可靠性和适用范围,但就长期而言,研究重点应当是水文水力学法的改进完善和推广应用。

(2) 目前临界雨量指标解决的问题是灾害发生与否,未来应当研究解决如何定量地反映区域内山洪灾害发生场次以及灾害规模的问题。这个问题难度很大,但即使是初步探索也是有益的。

(3) 临界雨量不确定性及其对临界雨量指标优化以及其他决策的影响应予以重视,特别是临界雨量不确定性与降雨不确定性之间的关系及其对预警决策以及山洪灾害风险管理的联合影响。

(4) 目前临界雨量常由一组不同时段的累积降雨量组成,是否存在一个最具代表性的时段累积雨量是值得研究的问题。如果存在,则需要进一步研究其区域特征是否显著、代表性有多强、可否单独成为临界雨量指标等问题。

参考文献:

- [1] HAPUARACHCHI H, WANG Q J, PAGANO T C. A review of advances in flash flood forecasting[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(18): 2771-2784.
- [2] 李昌志,孙东亚. 山洪灾害预警指标确定方法[J]. *中国水利*, 2012(9): 54-56. (LI Changzhi, SUN Dongya. Determination of flood warning index for mountain flood[J]. *China Water Resources*, 2012(9): 54-56. (in Chinese))
- [3] NEARY D G, SWIFT L W. Rainfall thresholds for triggering a debris avalanching event in the southern Appalachian Mountains [C]// COSTA J E, WIECZORE G F. *Reviews in Engineering Geology Volume VII*. Colorado: The Geological Society of America, 1987: 81-92.

- [4] DAHAL R K, HASEGAWA S. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya[J]. *Geomorphology*, 2008, 100(3): 429-443.
- [5] 姚令侃. 用泥石流发生频率及暴雨频率推求临界雨量的探讨[J]. *水土保持学报*, 1988, 2(4): 72-77. (YAO Lingkan. Discussion on deriving rainfall thresholds from debris flow occurrence frequency and Storm frequency[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 2(4): 72-77. (in Chinese))
- [6] 周伟,唐川,周春花. 汶川震区暴雨泥石流激发雨量特征[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 650-655. (ZHOU Wei, TANG Chuan, ZHOU Chunhua. Critical rainfall characteristics for rainfall-induced debris flows in Wenchuan earthquake affected areas [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 650-655. (in Chinese))
- [7] DE VITA P, REICHENBACH P, BATHURST J C, et al. Rainfall-triggered landslides: A reference list [J]. *Environmental Geology*, 1998, 35(2): 219-233.
- [8] 陈桂亚,袁雅鸣. 山洪灾害临界雨量分析计算方法研究[J]. *人民长江*, 2006, 36(12): 40-43. (CHEN Guiya, YUAN Yaming. Research on critical precipitation amount computation method of mountain torrential flood disaster[J]. *Yangtze River*, 2006, 36(12): 40-43. (in Chinese))
- [9] 王仁乔,周月华,王丽,等. 湖北省山洪灾害临界雨量及降雨区划研究[J]. *高原气象*, 2006, 25(2): 330-334. (WANG Renqiao, ZHOU Yuehua, WANG Li, et al. Research on rainfall thresholds of flash flood and rainfall zoning in Hubei province [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(2): 330-334. (in Chinese))
- [10] 赵然杭,王敏,陆小蕾. 山洪灾害雨量预警指标确定方法研究[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(9): 49-53. (ZHAO Ranhang, WANG Min, LU Xiaolei. Research on determination method for rainfall warning indexes of torrential flood disaster[J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(9): 49-53. (in Chinese))
- [11] 段生荣. 典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析[J]. *水利规划与设计*, 2009(2): 20-21. (DUAN Shengrong. Computing methods for rainfall thresholds of flash flood in typical small catchments[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2009(2): 20-21. (in Chinese))
- [12] 李德,陈广才,谢平,等. 乌鲁木齐市无资料地区山洪泥石流临界雨量推求[J]. *干旱区地理*, 2006, 28(4): 441-444. (LI De, CHEN Guangcai, XIE Ping, et al. Estimation of the critical rainfall resulting in outburst of floods and debris flows in the ungauged areas in Urumqi, Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2006, 28(4): 441-444. (in Chinese))
- [13] 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 Yong, WANG Zhenyu, FAN Boqin. 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))
- [14] 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.
- [15] MOGIL H M, MONRO J C, GROPER H S. NWS's flash flood warning and disaster preparedness programs[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1978, 59(6): 690-699.
- [16] SMITH K T, AUSTIN G L. Nowcasting precipitation: A proposal for a way forward[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 239(1): 34-45.
- [17] SHAMIR E, GEORGAKAKOS K P, SPENCER C. Evaluation of real-time flash flood forecasts for Haiti during the passage of Hurricane Tomas, November 4—6, 2010[J]. *Natural Hazards*, 2013, 67(2): 459-482.
- [18] DUGWON S, LAKHANKAR T, MEJIA 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; 1-12. DOI: 10.1111/jawr.12087.
- [19] NORBIATO D, BORGA M, DEGLI E S, et al. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 362(3): 274-290.
- [20] CARPENTER T M, SPERFSLAGE J A, GEORGAKAKOS K P, et al. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 224(1): 21-44.
- [21] HENDERSON F M. *Open channel flow*[M]. New York: Macmillan, 1966: 480-512.
- [22] CARPENTER T M, SPERFSLAGE J A, GEORGAKAKOS K P, et al. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 224(1): 21-44.
- [23] GEORGAKAKOS K P. Analytical results for operational flash flood guidance[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 317(1): 81-103.

- [24] REED S, SCHAAKE J, ZHANG Z. A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(3): 402-420.
- [25] LOOPER J P, VIEUX B E. An assessment of distributed flash flood forecasting accuracy using radar and rain gauge input for a physics-based distributed hydrologic model[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 412: 114-132.
- [26] MARTINA M, TODINI E, LIBRALON A. A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2006, 10(3): 413-426.
- [27] MONTESARCHIO V, RIDOLFI E, RUSSO F, et al. Rainfall threshold definition using an entropy decision approach and radar data[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11(7): 2061-2074.
- [28] 刘志雨, 杨大文, 胡健伟. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(3): 317-321. (LIU Zhiyu, YANG Dawen, HU Jianwei. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2010, 46(3): 317-321. (in Chinese))
- [29] 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 Jinhong, SHAO Liping. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(4): 458-463. (in Chinese))
- [30] NTELEKOS A, GEORGAKAKOS K P, KRAJEWSKI W. On the uncertainties of flash flood guidance: Toward probabilistic forecasting of flash floods[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(5): 896-915.
- [31] CHEN S T, YU P S. Real-time probabilistic forecasting of flood stages[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1): 63-77.
- [32] YATHEENDRADAS S, WAGENER T, GUPTA H, et al. Understanding uncertainty in distributed flash flood forecasting for semi-arid regions[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(5): W05S19.
- [33] KRZYSZTOFOEICZ R. Bayesian system for probabilistic river stage forecasting[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 268(1): 16-40.
- [34] VILLARINI G, KRAJEWSKI W, NTELEKOS A, et al. Towards probabilistic forecasting of flash floods: The combined effects of uncertainty in radar-rainfall and flash flood guidance[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(1): 275-284.
- [35] GEORGAKAKOS K P. Modern operational flash flood warning systems based on flash flood guidance theory: Performance evaluation[C]// *Proceedings of International Conference on Innovation Advances and implementation of Flood Forecasting Technology*. Bergen: ACTIF, 2005: 1-10.

A review of rainfall thresholds for triggering flash floods*

CHENG Weishuai

(*Water Resources Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China*)

Abstract: The rainfall threshold is an important indicator of flash flood conditions. In this study, the existing methods for computing rainfall thresholds are divided into two categories and reviewed on the basis of their technical principles. The two categories include the data-driven statistical and inductive methods and the physical process-based hydrologic hydraulic methods. As expansions of rainfall thresholds, the dynamic rainfall threshold and the storm critical curve are also introduced and discussed together with advances in uncertainty analysis of rainfall thresholds. In our review, the statistical and inductive methods have been more widely accepted in China. Moreover, antecedent rainfall (or antecedent soil saturation) and cumulative rainfall at particular time intervals are the two governing factors commonly considered in the calculation of rainfall thresholds. Cumulative rainfall may be the loneliness factor to be considered at times. Further, it is found that the rainfall threshold conveys poorly the magnitude of flash flooding. Understanding of the uncertainty in rainfall threshold calculations would be helpful for the improvement of flash flood warnings. However, how to incorporate the uncertainty into the decision-making process still remains a major challenge.

Key words: flash flood; rainfall threshold; antecedent soil moisture; rainfall intensity; cumulative rainfall

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. 201201063).