

基于降雨强度-历时的安徽省黄山市滑坡分组阈值研究

李子豪^{1,2}, 王钧^{2,3}, 郭婷婷¹, 侯捷⁴, 张俊香⁵, 官清华^{2,3}, 张洪岩⁶

[1.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650031; 2.广东省科学院广州地理研究所/广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东 广州 510070; 3.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458; 4.安徽地质环境监测总站, 安徽 黄山 245000; 5.黄山学院 旅游学院, 安徽 黄山 245041; 6.深圳市地质环境监测中心, 广东 深圳 518034]

摘要: [目的] 对安徽省黄山市降雨型滑坡的降雨强度-历时阈值进行研究, 拟为黄山市各区县精细化滑坡预警提供技术支持。[方法] 以黄山市 2004—2019 年历史滑坡点及其对应的降雨数据为研究样本, 基于经验性阈值 Caine 模型, 通过比较滑坡前有效降雨量的方式确定诱发滑坡降雨历时, 建立各区县降雨强度-历时(*I-D*) 阈值曲线。考虑到 *I-D* 曲线在灾害预警中的实用性, 以歙县滑坡点为例, 将该县诱发滑坡的降雨事件按照气象预报的雨强标准分为小中雨组、大雨组和暴雨及以上组。根据雨强的分组情况建立歙县复合型降雨 *I-D* 阈值。[结果] 黄山市降雨型滑坡多由中长历时降雨诱发, 复合型 *I-D* 阈值更能体现各雨况对滑坡的诱发作用, 此阈值可直接使用气象预报的降雨对滑坡进行预警。[结论] *I-D* 阈值具有强烈的区域适用性, 依据气象预报对降雨强度分组的滑坡复合型降雨阈值曲线, 可使用气象预报的降雨数据进行区域滑坡预警。

关键词: 降雨型滑坡; 降雨强度; 有效历时; *I-D* 阈值; 复合型阈值

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)01-0184-07

中图分类号: P64, P642.22

文献参数: 李子豪, 王钧, 郭婷婷, 等. 基于降雨强度-历时的安徽省黄山市滑坡分组阈值研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 184-190. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.025; Li Zihao, Wang Jun, Guo Tingting, et al. Landslide classification threshold in Huangshan City of Anhui Province based on rainfall intensity-duration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 184-190.

Landslide Classification Threshold in Huangshan City of Anhui Province Based on Rainfall Intensity-Duration

Li Zihao^{1,2}, Wang Jun^{2,3}, Guo Tingting¹, Hou Jie⁴,
Zhang Junxiang⁵, Gong Qinghua^{2,3}, Zhang Hongyan⁶

[1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650031, China; 2. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences/Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou, Guangdong 510070, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou, Guangdong 511458, China; 4. Anhui Geological Environment Monitoring Station, Huangshan, Anhui 245000, China; 5. Tourism College, Huangshan University, Huangshan, Anhui 245041, China; 6. Shenzhen Geological Environment Monitoring Center, Shenzhen, Guangdong 518038, China]

Abstract: [Objective] The rainfall intensity-duration threshold of rainfall-induced landslides in Huangshan City, Anhui Province was studied in order to provide technical support for detailed landslide early warning in all districts and counties of Huangshan City. [Methods] Rainfall duration of induced landslides was determined by comparing the effective rainfall before landslides at historical landslide points, and by using corresponding rainfall data in Huangshan City from 2004 to 2019. The rainfall intensity-duration (*I-D*) threshold curve for each district and county was established based on the empirical threshold Caine model. Considering the

收稿日期: 2020-07-23

修回日期: 2021-10-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“华南强降水诱发的群发性滑坡表土液化机理与流态化过程”(41977413); 国家自然科学基金青年项目(42101084); 南方海洋科学与工程广东省实验室项目(GML2019ZD0301); 云南省教育厅科学研究基金(KKJ201821014); 安徽省自然科学基金资助项目(2008085QD170); 广东省科学院项目(2020GDASYL-20200301003; 2020GDASYL-040101; 2020GDASYL-20200102002)。

第一作者: 李子豪(1996—), 男(汉族), 黑龙江省齐齐哈尔市人, 硕士研究生, 研究方向为滑坡预警。Email: 89927952@qq.com。

通信作者: 官清华(1981—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 研究员, 主要从事生态减灾研究。Email: gongqh@gdsa.ac.cn。

applicability of $I-D$ curve in disaster early warning, and taking the landslide point in Shexian County as an example, the rainfall events that induced landslides in Shexian County were divided into the small and moderate rain group, the heavy rain group, and the heavy rain or above group according to the rain intensity standard of the meteorological forecast. The $I-D$ threshold of combined rainfall in Shexian County was established according to the grouping classification of rain intensity. [Results] Most of the rainfall-induced landslides in Huangshan City were induced by long and medium duration rainfall. The complex $I-D$ threshold could better reflect the inducing effect of various rainfall conditions on landslides, and this threshold could be directly used for early warning of landslides using precipitation forecasts. [Conclusion] $I-D$ threshold has strong regional applicability, and the landslide rainfall threshold grouped by rainfall intensity according to precipitation forecasts is suitable for the construction of a landslide early warning system in this region.

Keywords: rainfall-induced landslide; rainfall intensity; effective duration; $I-D$ threshold; compound threshold

安徽省黄山市 2020 年已查明地质灾害隐患点 1 395 处, 占全省总数 30%, 其中半数以上为滑坡隐患点, 威胁着 4 237 间房屋, 1.40×10^4 人生命与 5.40×10^8 元财产安全, 已严重威胁到黄山市人民生命财产安全与经济社会发展。由于独特的地质环境与气象条件, 黄山市滑坡多由降雨诱发。例如, 2013 年 6 月 30 日上午 8 时至 10 时, 徽州区降雨量超过 100 mm, 强降雨诱发的滑坡等山地灾害, 造成 11 人伤亡、毁坏房屋 977 间, 农作物受灾面积 3 639 hm^2 , 波及人口达 75 000 人, 灾情严重。目前, 中国采用最多的滑坡预警方式是以行政区为单位的气象预警^[1], 触发滑坡的临界降雨条件一直是预警研究的核心问题^[2]。因此, 降雨阈值的研究在黄山市滑坡预警体系建设中至关重要。

Guzzetti 等^[3]在浅层滑坡与临界降雨强度-历时关系的研究中提出了引发滑坡的经验型降雨阈值, 之后世界各地学者基于大量滑坡灾害点和降雨数据得出各区域降雨与滑坡的关系^[3-9](表 1)。目前国内外对经验性降雨阈值模型的研究主要围绕累计降雨量 E , 降雨强度 I 和降雨历时 D 三者之间关系进行。其中降雨强度-历时 ($I-D$) 阈值是经验性降雨阈值中研究最多、应用最广泛的一种, 一些国家和地区的滑坡预报预警系统主要以降雨强度-历时关系阈值为基础建立, 如: 美国加利福尼亚州的旧金山湾区、中国香港、日本以及巴西里约热内卢等地^[10]。

表 1 全球滑坡 $I-D$ 阈值^[3-9]

适用国家和地区	$I-D$ 阈值关系	降雨历时取值
全球 (Caine)	$I = 14.82D^{-0.39}$	$0.17 < D < 500$
全球 (Guzzetti)	$I = 2.2D^{-0.44}$	$0.10 < D < 1\ 000$
中国	$I = 85.72D^{-1.15}$	$3 < D < 48$
浙江宁海县	$I = 26.59D^{-0.54}$	$1 < D < 48$
鄂西地区	$I = 4.0D^{-0.51}$	$1 < D < 300$
天水地区	$I = 6.03D^{-0.58}$	$3 < D < 240$
镇江地区	$I = 45.6D^{-0.63}$	$1 < D < 500$

全球各地降雨型滑坡的孕灾条件、降雨历时的取值范围不同, 致使 $I-D$ 曲线走势相同但系数上存在较大差异。Guzzetti 等^[4]比较全球范围内的 124 条 $I-D$ 阈值曲线, 发现各地区的阈值差异显著, 可见 $I-D$ 阈值具有时空变异性。伍宇明等^[11]通过比较福建省各地区滑坡的降雨阈值, 发现高年降雨量、多极端降雨量和受台风影响的地区触发滑坡的降雨阈值相对较高。在阈值刻画精准度方面, 詹良通基于数值模拟分析了坡度、土层厚度、土体力学参数、雨型等因素对浅层残积土滑坡 $I-D$ 阈值的影响^[12]。林巍等^[13]建立不同坡度、土层厚度、滑坡规模的降雨型滑坡 $I-D$ 阈值, 发现降雨阈值大小与这 3 个因素密切相关, 滑坡坡度在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 时降雨阈值最小。在滑坡预测方面, 盛逸凡等^[14]根据 $I-D$ 阈值曲线得到了桑植县滑坡不同发生概率下的降雨阈值, 并以此进行滑坡灾害危险性等级划分; 赵海燕等^[15]基于不同岩土体滑坡的 $I-D$ 阈值曲线, 预测在降雨历时为 3 d、有效雨强为 22.4 mm/d 的降雨工况下各岩土体滑坡发生的时间概率。

尽管国内外学者对降雨型滑坡的 $I-D$ 阈值曲线进行了大量研究, 但仍有不足之处: 滑坡对应的降雨数据不够精准, 滑坡发生的时间通常只能精确到日尺度, 滑坡点距雨量监测站较远, 导致诱发滑坡的实际雨量记录不准确; 传统的 $I-D$ 模型使用累积降雨量、不折减前期降雨的统计方法。本文在考虑滑坡发生有效降雨量和降雨历时起始点的基础上, 改进传统的 $I-D$ 阈值模型, 并采用修正后的模型建立黄山市各区县滑坡的降雨阈值。此外, 将气象预报与降雨型滑坡预警体系相结合, 考虑降雨强度对降雨阈值的影响, 将歙县诱发滑坡的降雨事件按照气象预报雨量级别进行分组, 得出不同降雨强度下滑坡的复合型 $I-D$ 阈值曲线, 此阈值表征各雨量等级诱发的滑坡灾害, 以期为黄山市降雨型滑坡的精细化预警提供阈值依据。

1 研究区概况

1.1 区域地质概况

黄山市界于 $117^{\circ}02'—118^{\circ}55' E$ 和 $29^{\circ}24'—30^{\circ}24' N$, 总面积 $9\ 807\ km^2$ 。地处皖南山区, 丘陵和山地约占总面积的 80% , 地形起伏大, 坡度多在 30° 以上, 相对高差达 $1\ 700\ m$ 。大地构造位于江南古陆北缘下扬子凹陷, 滑坡易发区位于扬子板块南部和江南隆起带过渡段之间, 第四纪以来新构造运动比较活跃, 强烈侵蚀作用形成多山地貌。区内断裂构造较发育, 主要为 NE 向和 EW 向, 休宁断裂带将黄山市山脉, 丘陵和平原区分开。出露岩性主要有花岗岩类、千枚岩、页岩和砂岩, 风化强烈, 第四系覆盖通常在 $10\sim 15\ m$ 左右, 残坡积层碎石土和强风化层为两类易发滑坡的工程地质岩组, 复杂的地质条件为滑坡的孕育提供了有利条件。黄山市为亚热带湿润性季风气候, 多年平均降雨量 $1\ 774.5\ mm$, 年均降雨 $160\ d$, 多落于南坡, 降水集中在 4—7 月, 占全年雨量的 56% 。每年 5—6 月为“梅雨”季节, 常出现暴雨天。该市多山的地貌类型、复杂的地质条件、暴雨久雨事件和众多的人类工程活动导致了大量的滑坡发生, 造成了灾难性的经济损失和人员伤亡。

1.2 黄山市滑坡时空分布特征

潘国林等^[16]指出黄山市地势高低起伏较大, 岩性复杂, 软变质岩发育且风化作用强烈, 斜坡残坡积层较厚、人类工程活动日益强烈这些地质环境特征为滑坡灾害孕育提供了基础条件。同时汛期雨量充沛、强降雨是滑坡的主要诱因, 降水沿孔隙、裂隙和裂缝直接渗入结构疏松的坡体内, 随着雨水入渗岩土体抗剪强度降低、斜坡抗滑力下降, 导致黄山市成为安徽省滑坡灾害最为发育的地区。

黄山市滑坡发育规律具有分布广、点数多、以小型浅层滑坡为主、相对密集分布在丘陵区的特点。小型滑坡占滑坡总数的 95% , 滑坡易发于山地向平原过度的坡脚地带, 易发坡度为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的中陡斜坡, 其中坡度大于 30° 的滑坡占总体的 89% , 滑坡多发育在高程 $100\sim 300\ m$ 范围内; 同时地质构造对滑坡的发育有明显的区位控制作用, 滑坡灾害点多沿断裂构造线呈条带状分布, 如渔亭—潜口沿线与际联—徽城沿线所夹带状的滑坡高发区。从空间分布(图 1)来看, 黄山市降雨型滑坡分布具有不均匀性和集群性, 祁门县、休宁县、歙县、黄山区与徽州区交界区域滑坡灾害点最密集, 数量占全市的 71% , 集中发育在祁门县彭龙—新安、休宁县五城—板桥、歙县的长陔—巨川、昌溪—金川等地势起伏较大、岩体风化破碎、人类

工程活动密集的区域。歙县前震旦纪浅变质碎屑岩、休宁县与黟县交界处古生代碳酸盐岩、碎屑岩的出露区域由于岩体风化强烈和残积土层较厚, 滑坡点密集, 黄山区与徽州区交界区域海拔较高, 地形起伏大, 存在许多坡度大于 45° 的高陡斜坡, 地层岩性主要为花岗岩, 风化较强烈, 同时该区临近黄山核心旅游区, 人类工程活动频繁, 有利于滑坡的发育。滑坡分布与公路沿线存在局部吻合现象, 如歙县滑坡高发区与苏村—唐里公路、北岸—深渡公路、北岸—岔口公路等线路重合, 这是由于强烈人类工程活动所致。

从时间分布看, 80% 的滑坡灾害发生在每年的 4—7 月(图 2), 可见黄山市滑坡与降雨在时间上具有较好的对应关系, 且紧随暴雨久雨发生, 呈现“即雨即滑”和群发的特性。春、秋两季的滑坡灾害多滞后长历时降雨发生。每年汛期, 多由连续阴雨和台风期间的强降雨触发滑坡。

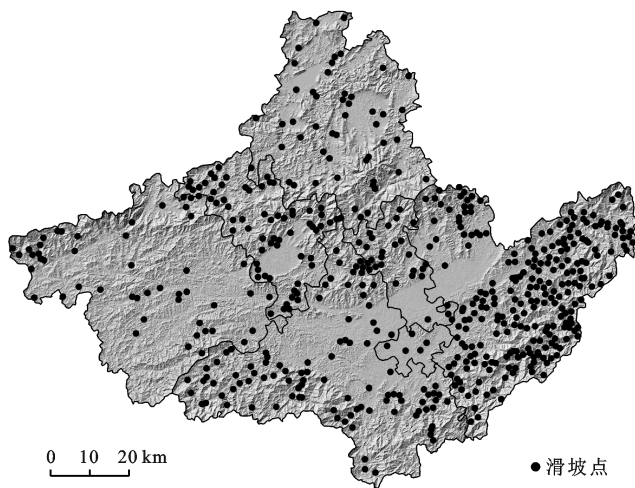


图 1 黄山市降雨型滑坡点分布

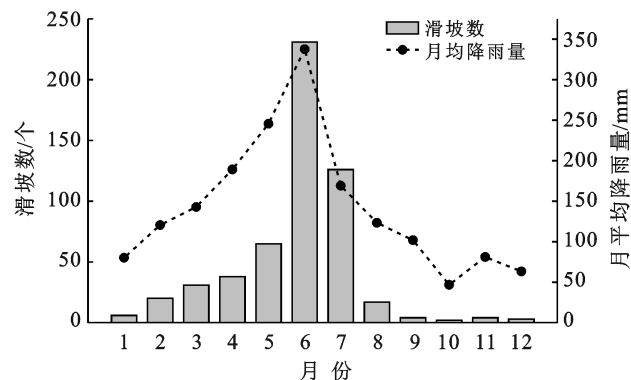


图 2 黄山市滑坡年内时间分布特征

2 数据来源与方法

2.1 滑坡与降雨数据

本文数据来源于安徽省地质环境监测总站提供

的 2004—2019 年黄山市滑坡灾害点数据及其对应的降雨事件。选用其中 313 个滑坡发生后立即进行实地调查且有滑坡前逐小时降水资料的灾害点,其中浅层滑坡比例 98%,将其建立为本研究的滑坡样本,滑坡样本符合黄山市的滑坡发育规律。该滑坡降雨阈值研究考虑的降雨参数包括:有效降雨量、降雨历时、累计雨量、平均降雨强度。本研究综合考虑触发滑坡的当日降雨和前期雨量两者的共同作用,统计触发滑坡的有效降雨量,通过比较有效降雨量确定触发滑坡的降雨历时,降雨历时内的雨量为诱发滑坡的累计雨量。国内多位学者已探讨滑坡与灾前降雨天数的关系^[17],并以相关性最大的前期降雨天数建立各区域的降雨预警体系^[18]。黄健敏等^[19]基于 Logistic 回归模型,得出黄山市前 5 d 的累积降雨量与滑坡发生之间的关系最大。因此,本文选取滑坡前 120 h 降雨量作为诱发滑坡的降雨数据,降雨场次分割以雨量大于 0.1 mm/h 的时间作为降雨量统计开始时间,以雨量连续 6 h 均小于 1 mm 的时间作为雨量统计结束时间^[20]。

2.2 降雨历时 D 与有效雨量的统计

因滑坡前期的降雨中只有部分雨量对滑坡起触发作用,诱发滑坡灾害的降雨历时 D 需要确定起始时间,赵衡等^[7]通过比较有效降雨量的方法来确定 D 的起始时间,确定某一时刻 T ,若 T 之前历次降雨过程的有效降雨量之和 $\sum R_i$ 小于 T 时刻之后直至 D 结束时刻之间历次降雨过程降雨量之和的 10%,即 $\sum R_i \leq 10\% \sum R_{cp}$,则 T 为降雨历时的起始时间。结合黄山市滑坡多滞后于降雨发生,避免滑坡前 24 h 降雨量少或者无雨、前 120 h 内存在高降雨量的情况,改进以 T 时刻当天最早的降雨场次开始时间作为 D 的起始时刻,截止时刻为滑坡发生或最后一次降雨场次结束时刻,两时刻内的时间段为降雨历时 D ,雨水入渗岩土体的渗流响应时间不计入降雨历时。本文根据有效降雨量公式计算滑坡发生前逐小时的有效降雨量^[7]。

$$R_{cp} = \sum_{i=1}^{120} a^{n_i} R_i \quad (1)$$

式中: R_{cp} 为滑坡发生前第 i 小时的有效降雨量; R_i 为滑坡发生前逐小时的降雨量; n_i 为距滑坡发生时刻的时间长度,单位为天(d)且可为小数; a 为经验衰减系数,实际上反映了前期降雨的流失、坡面径流、入渗和蒸发特征,与地形地貌、岩土体性质、温度和风力等因素有关,此处取 0.8^[21]。

2.3 经验性降雨阈值模型

本文采用 Guzzetti 等^[3]提出的降雨强度—历时 ($I-D$) 阈值模型,该模型理论上比累积降雨量、最小

激发降雨强度等单个因子预报阈值更加科学。该经验性模型基于已发生的降雨型滑坡点,使用统计的方法将诱发滑坡的降雨历时 D 和平均降雨强度 I 绘制在双对数坐标系中,通过幂函数表征降雨历时和降雨强度的关系,降雨历时越短,诱发滑坡所需要的降雨强度越大,随着降雨历时增加,诱发滑坡所需要的降雨强度呈下降趋势。

降雨强度—历时曲线的表达式为:

$$I = aD^{-b} \quad (2)$$

式中: a, b 为统计参数; D 为诱发滑坡的降雨历时(h); I 为诱发滑坡的降雨强度(mm/h),由降雨历时内累计降雨量与降雨历时的比值确定。式中 a 值的物理意义是 $D=1$ 时的降雨量,即没有前期降雨的情况下,临滑前 1 h 的最小激发雨量。目前,许多研究中降雨历时 D 的确定都是凭借研究人员自身经验直接给出(一般取 3, 10, 15 d 等),这种方法可能存在产生较大误差的风险。本研究中通过比较滑坡前逐小时有效雨量得到影响滑坡稳定性的降雨历时 D 。依据经验性模型统计方法,使用降雨历时内的累计降雨量与降雨历时比值确定平均降雨强度,将触发滑坡的有效雨量与降雨阈值相结合。

3 结果与分析

3.1 黄山市各区县滑坡的降雨强度—历时 ($I-D$) 阈值

选取各区县共计 313 个滑坡样本,样本多分布于山地、丘陵地区的人类工程活动强烈处,根据诱发滑坡的降雨历时和平均降雨强度,建立各区县滑坡的降雨强度—历时关系曲线,单位为 I (mm/h), D (h)(见表 2,图 3),其中黄山区、黟县的地质环境条件和降雨情况相似且滑坡样本个数较少,因此将两个区域滑坡样本合并考虑。

表 2 黄山市各区县滑坡的降雨历时 $I-D$ 关系

区县	$I-D$ 阈值	降雨历时/h	滑坡数(个)	多发月份
黄山区—黟县	$I = 14.28D^{-0.34}$	$1 < D < 70$	36	7
徽州区	$I = 16.44D^{-0.39}$	$1 < D < 80$	41	6
屯溪区	$I = 9.81D^{-0.19}$	$1 < D < 68$	17	6
祁门县	$I = 20.84D^{-0.34}$	$1 < D < 89$	79	5, 6, 7
休宁县	$I = 9.30D^{-0.25}$	$1 < D < 78$	82	5, 6, 7
歙县	$I = 8.63D^{-0.33}$	$1 < D < 93$	57	5, 6, 7

黄山市诱发滑坡的降雨历时范围在 2~93 h 之间,平均降雨强度在 0.4~25 mm/h 之间,滑坡多由中长历时降雨诱发。各区县诱发滑坡所需的平均最

小累计降雨量为 16.5 mm, 即当滑坡前累计降雨量达 16.5 mm 时, 就可能引发滑坡。从黄山市西北向东南, 引发滑坡降雨历时内的累计降雨量呈逐渐降低的趋势, 黄山区一黟县和祁门县为 130~151 mm, 休宁县、屯溪区和歙县为 98~139 mm。黄山市不同区县滑坡的 $I-D$ 阈值差异相差甚远, 阈值时空变异性明显, 造成此现象的原因与各区县的地形地貌、地层岩性、岩石风化与破碎程度、降雨条件及人类工程活动等因素有关。因经验性 $I-D$ 阈值模型的数据源于各区域已发生的降雨型滑坡点, 此阈值具有强烈的区域适用性, 表明各区域内触发滑坡的降雨阈值情况, 故

根据降雨条件对滑坡进行预警应以适合的区域尺度为预警单元。将黄山区一黟县和歙县的滑坡降雨阈值相比较(图 4), 可知黄山区 $I-D$ 阈值更高, 触发滑坡灾害需要更大的雨强, 这与年平均降雨量和地质环境条件有直接关系。黄山区的多年平均降雨量为 1 774 mm, 比歙县多年平均降雨量高 120 mm, 这也符合强降雨区域的阈值高于全球的阈值的规律。歙县 2/3 为山地丘陵区, 地层岩性多为变质碎屑岩, 滑坡灾害多位于千枚岩出露区域, 该岩风化比较强烈且裂隙发育, 同时歙县削坡建房、开山修路, 矿山资源开采等人类工程活动强烈, 致使 $I-D$ 阈值相对较低。

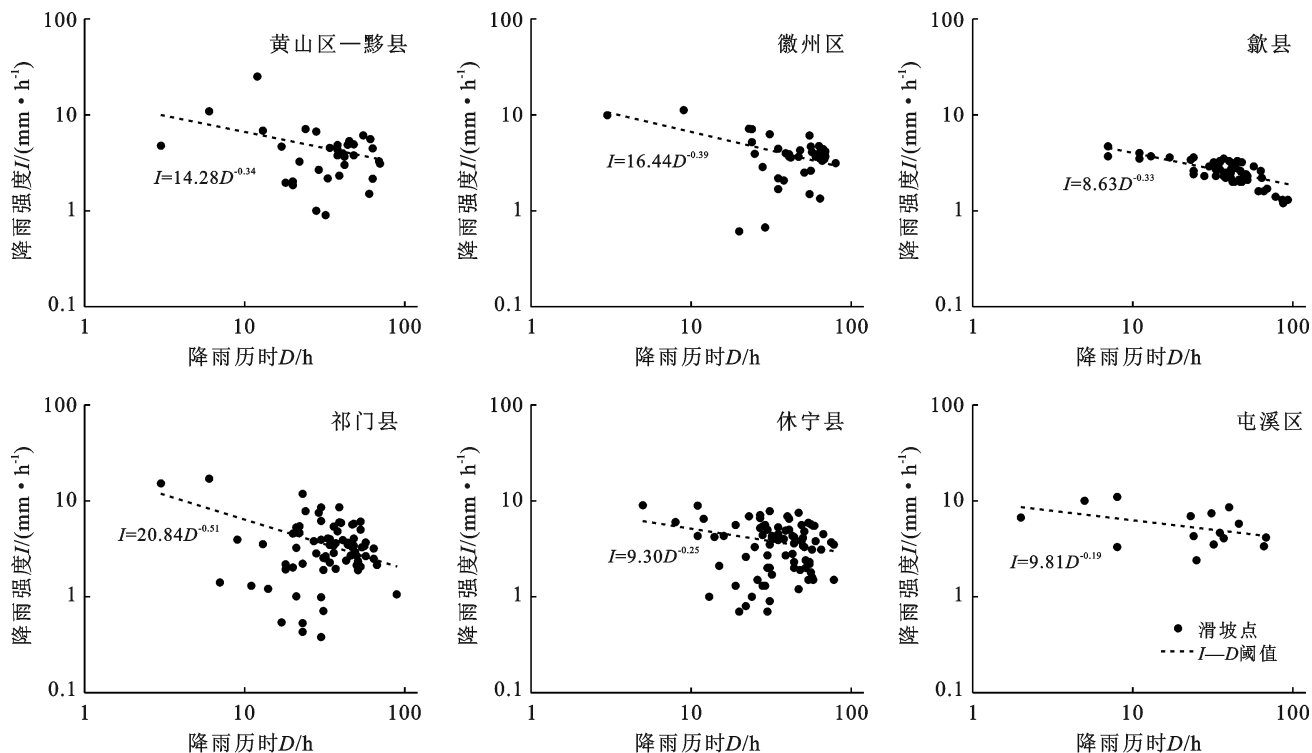


图 3 黄山市各区县的降雨阈值

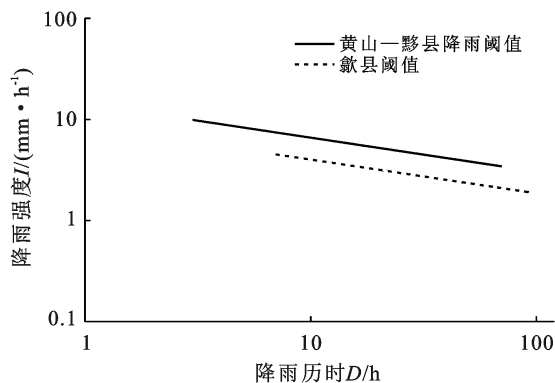


图 4 黄山区一黟县与歙县的 $I-D$ 阈值比较

3.2 歙县不同降雨强度的 $I-D$ 阈值

考虑了诱发滑坡的有效降雨量和降雨历时, 上述

$I-D$ 阈值在区域降雨型滑坡预警中更为适用。但降雨强度与降雨历时不能和气象部门的降雨数据对应, 导致此阈值无法根据气象预报的降雨事件对滑坡进行预警。针对此应用难题, 本研究对 $I-D$ 预警模型的统计方法进行改进, 按照气象预报的雨强和降雨历时标准将降雨型滑坡分组, 建立各雨强下的复合型 $I-D$ 降雨阈值, 达到基于气象预报进行滑坡预警的目的。

将诱发滑坡的降雨历时分成 3 类: 12 h 以内降雨、24 h 以内降雨、大于 24 h 降雨; 再结合中国气象部门的雨强划分标准(表 3), 根据平均降雨强度与降雨历时将诱发滑坡的降雨分为 3 组: 小中雨量组, 大雨量组和暴雨量及以上组(表 4)。以灾害点数多、降雨历时范

围大的歙县为例,将该县不同雨强诱发的滑坡进行分组,分别建立各组雨强下诱发滑坡的 $I-D$ 阈值。

表 3 中国气象局关于雨量的划分标准

雨量等级	12 h 降雨量	24 h 降雨量
小雨	0.1~4.9	0.1~9.9
中雨	5.0~14.9	10.0~24.9
大雨	15.0~29.9	25.0~49.9
暴雨	30.0~69.9	50.0~99.9
大暴雨	70.0~139.9	100.0~249.9
特大暴雨	≥140.0	≥250.0

表 4 基于降雨历时和降雨量的划分

降雨等级	1 h 降雨强度	12 h 平均降雨强度	24 h 平均降雨强度
小中雨组	0.1~4.9	0.1~1.3	0.1~1.0
大雨组	5.0~10.0	1.3~2.5	1.0~2.0
暴雨及以上组	>10.0	>2.5	>2.0

改进后的复合型降雨阈值和关系如图 5 所示。由表 5 可见,其中包含小中雨量组,大雨量组和暴雨量及以上组的 $I-D$ 阈值曲线和关系式。若气象预报的降雨在阈值曲线上方时,预测此次降雨诱发滑坡的可能性高;反之,当预报降雨位于阈值下方,此降雨诱发滑坡的可能性低。经滑坡历史事件验证,歙县的 95% 滑坡事件由大雨以上量级降雨诱发。

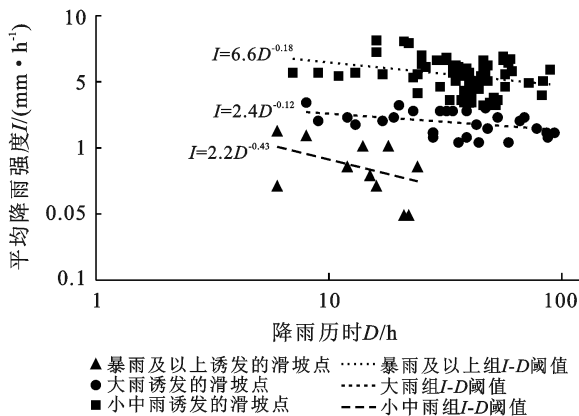


图 5 歙县基于雨强划分的降雨阈值变化特征

表 5 歙县基于降雨历时和降雨量的划分标准

雨量等级	$I-D$ 关系	雨量/mm	
		12 h	24 h
小中雨	$I = 1.49D^{-0.23}$ ($1 \leq D \leq 12$ h)	15	25
	$I = 16.53D^{-1.13}$ ($D \geq 12$ h)		
大雨	$I = 6.44D^{-0.55}$ ($1 \leq D \leq 12$ h)	30	50
	$I = 2.32D^{-0.11}$ ($D \geq 12$ h)		
暴雨及以上	$I = 4.67D^{-0.11}$ ($1 \leq D \leq 12$ h)	>30	>50
	$I = 11.06D^{-0.31}$ ($D \geq 12$ h)		

与分组前的歙县 $I-D$ 阈值曲线相比,此复合型阈值曲线的斜率更小,在短降雨历时中,更能体现峰值降雨强度对滑坡的诱发作用。根据气象降雨预报数据,基于 $I-D$ 阈值曲线模型将降雨历时 D 和平均降雨强度 I 生成生成动态曲线,根据天气预报的雨量等级选择对应的降雨型滑坡阈值曲线,采用数据分析软件判断动态曲线和阈值曲线相对位置,当两曲线距离较近时便可发出滑坡预警,当预判两曲线相交时降雨型滑坡可能发生。此基于气象预报对雨强和历时分组的复合型 $I-D$ 阈值,可直接根据气象预报的降雨数据情况对滑坡进行预警,更适用于歙县降雨型滑坡的精细化预警、预报。

4 结论

本文通过对黄山市 2004—2019 年各区县滑坡及其对应的降雨数据的研究,建立起各区县诱发滑坡的 $I-D$ 阈值曲线,并以歙县为例建立各雨强等级下的 $I-D$ 阈值曲线,提高了使用气象预报对降雨型滑坡预警的精准度。

(1) 黄山市滑坡“规模小,点数多,相对密集分布在低山丘陵区域”。从空间分布来看,密集分布在起伏度较大、断裂构造带与公路沿线区域。从时间分布看,80% 的滑坡发生在每年的汛期(4—7 月),且紧随暴雨久雨发生,呈现暴雨群发性,诱因是降雨与人类工程因素叠加。5 月为歙县、祁门、休宁县滑坡易发时段;6 月为歙县、休宁、祁门、徽州区滑坡易发时段;7 月为祁门、休宁、歙县、徽州区、黄山区—黟县滑坡易发时段;汛期需提高地质灾害警惕,加强防灾意识建设,通过重点区域防范减少受灾损失。

(2) 本文提出适合黄山市的降雨历时 D 和平均降雨强度 I 的确定方法,通过经验性降雨阈值模型分别建立黄山市各区县引发滑坡的降雨强度—降雨历时($I-D$)阈值,可知黄山市降雨型滑坡多由中长历时降雨诱发。各区县斜坡单元对当地的地质环境条件和气象降雨常态条件已经产生了一定的适应性,当降雨超过经验性降雨阈值曲线时发生滑坡灾害就成为大概率事件,本研究可为降雨型滑坡的预警体系提供技术支持。

(3) 基于气象预报的降雨雨强与历时将诱发滑坡的降雨事件分 3 组,建立歙县小中雨、大雨与暴雨及以上雨强级别的复合型降雨阈值曲线,此阈值可根据气象预报的降雨情况选用相对应的降雨型滑坡阈值曲线,根据气象预报的雨况和阈值进行区域性滑坡预警,便于当地应急部门和气象部门联合建立适合当地精细化的降雨型滑坡预警系统,在实际应用中达到

使用气象预报降雨数据预警滑坡的效果。

(4) 本文讨论的是统计学上滑坡的经验性降雨阈值,地形地貌、地质构造、地层岩性、当日激发雨强等因素对滑坡的诱发作用体现在有效降雨量的系数中。黄山市各区县滑坡的降雨阈值曲线存在较大差异,可见经验性降雨阈值有的区域适用性。滑坡的 $I-D$ 阈值曲线应视为一项长期的研究活动,后续需增加滑坡案例来完善阈值曲线的时效性。同时今后将结合黄山市的地质环境条件和滑坡特征建立更精确的降雨阈值预警滑坡系统,并在时间和空间上对其预报准确率进行验证。

[参 考 文 献]

- [1] 申怀飞,杨清洁,魏亿鑫,等.基于 GIS 的湖南省滑坡灾害风险和损失评估[J].水土保持通报,2020,40(6):146-152,329.
- [2] 官清华,黄光庆.基于气象—地形—水文—地质—人文耦合的滑坡灾害空间预警研究[J].灾害学,2013,28(3):20-23.
- [3] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update [J]. Landslides, 2008,5(1):3-17.
- [4] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and Southern Europe [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007,98(3/4):239-267.
- [5] 李巍岳,刘春,Marco Scaioni,等.基于滑坡敏感性与降雨强度—历时的中国浅层降雨滑坡时空分析与模拟[J].中国科学:地球科学,2017,47(4):473-484.
- [6] 麻士华,李长江,孙乐玲,等.浙江地区引发滑坡的降雨强度—历时关系[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(2):20-25.
- [7] 赵衡,宋二祥.诱发区域性滑坡的降雨阈值[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(5):1481-1487.
- [8] 丛佳伟.天水地区降雨型滑坡的降雨阈值研究[D].甘肃兰州:兰州大学,2020.
- [9] 燕晓莹,阎长虹,鄧泽郑.镇江地区降雨导致滑坡规律统计分析[J].高校地质学报,2019,25(5):772-778.
- [10] Li Changjiang, Ma Tuhua, Zhu Xingsheng. Ai Net and GIS based regional predictionsy stem for the spatial and temporal probability of rainfall-triggered landslides [J]. Natural Hazards, 2010,52(1):57-58.
- [11] 伍宇明,兰恒星,高星,等.台风暴雨型滑坡降雨阈值曲线研究:以福建地区为例[J].工程地质学报,2014,22(2):255-262.
- [12] 詹良通,李鹤,陈云敏,等.东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强—历时曲线的影响因素分析[J].岩土力学,2012,33(3):872-880,886.
- [13] 林巍,李远耀,徐勇,等.湖南慈利县滑坡灾害的临界降雨量阈值研究[J].长江科学院院报,2020,37(2):48-54.
- [14] 盛逸凡,李远耀,徐勇,等.基于有效降雨强度和逻辑回归的降雨型滑坡预测模型[J].水文地质工程地质,2019,46(1):156-162,172.
- [15] 赵海燕,殷坤龙,陈丽霞,等.基于有效降雨阈值的澧源镇滑坡灾害危险性分析[J].地质科技通报,2020,39(4):85-93.
- [16] 潘国林,洪天求,林桂香.皖南山区滑坡分类及形成机制研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(4):543-547.
- [17] 刘海知,马振峰,范广洲.四川省典型区域滑坡泥石流与降水的关系[J].水土保持通报,2016,36(6):73-77.
- [18] 费晓燕,柳锦宝,屈伯强,等.四川省降雨诱发滑坡灾害的气象预警模型[J].水土保持通报,2017,37(5):315-321,327.
- [19] 黄健敏,赵国红,廖芸婧,等.基于 Logistic 回归的降雨诱发区域地质灾害易发性区划及预报模型建立:以安徽歙县为例[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):98-105.
- [20] 王治兵.激发泥石流的前期降雨分割方法研究[D].四川成都:成都理工大学,2015.
- [21] 詹钱登,李明熹,黄婷卉.土石流发生降雨预警模式之研究[J].中华水土保持学报(中国台湾),2004,35(3):273-283.

(上接第 183 页)

- [33] 马小雪,王腊春,廖玲玲.温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别[J].环境科学,2015,36(1):64-71.
- [34] 马小雪,龚畅,郭加汛,等.长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例[J].环境科学,2021,42(7):3291-3303.
- [35] Kerger B D, Paustenbach D J, Corbett G E, et al. Absorption and elimination of trivalent and hexavalent chromium in humans following ingestion of a bolus dose in drinking water [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 1996,141(1):145-158.
- [36] 黄宏伟,肖河,王敦球,等.漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价[J].环境科学,2021,42(4):1714-1723.