不同降雨特征条件下舟曲县地质灾害危险性区划

魏兴丽[1,2]，何建勋[3]，于国强[1,2]

(1. 国土资源部 黄土地质灾害重点实验室，陕西 西安 710054；
2. 中国地质调查局 西安地质调查中心，陕西 西安 710054；3. 云南省水文水资源局 楚雄分局，云南 楚雄 675000)

摘　要：[目的] 合理区划甘肃省甘南藏族自治州舟曲县区域地质灾害危险性，为该区以及类似区域地质灾害危险性区划提供科学依据。[方法] 从舟曲县暴雨地质灾害触发因素入手，结合野外勘察，采用无限边坡稳定性 SINMAP 模型，开展不同降雨特征条件下区域地质灾害危险性区划研究，对不同级别下灾害区域面积和所占比例的迁移与转化规律进行定量评价。[结果] 地势低洼地区与地形湿度较高区域、灾害点分布规律一致，随着降雨量的逐渐增大，地表浅层土壤水分、土壤湿度区域面积逐渐增加，逐渐扩展到山脊和坡度较缓的斜坡单元；随着降雨预警级别的升高，1 h 雨量从 10 mm 升至 56 mm，稳定性区域面积比例和所占滑坡比例分别减少 22%和 38%，不稳定性区域比例值分别增加 121%和 125%，潜在不稳定区域面积和所占滑坡比例始终最高，均值高达 35%和 39%；同时，基本稳定区、潜在不稳定区正逐渐向不稳定区及极不稳定区迁移与过渡，发生地质灾害的潜在性逐渐增大，危险程度日益加剧；预警级别升至蓝色Ⅳ级时，地质灾害即被触发，预警级别升至黄色Ⅲ级后，危害程度发生质变，地质灾害危险程度显著加剧。[结论] 降雨是舟曲地质灾害的诱发因素，如遇合适的强降雨条件，地质灾害危险程度依然严峻。

关键词：舟曲；地质灾害；危险性区划

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2016)03-0224-06　　**中图分类号**：P642

文献参数：魏兴丽，何建勋，于国强. 不同降雨特征条件下舟曲县地质灾害危险性区划[J]. 水土保持通报，2016，36(3)：224-229. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.038

Risk Zoning of Regional Geo-hazards Under Different Rainfall Characteristics in Zhouqu County

WEI Xingli[1,2], HE Jianxun[3], YU Guoqiang[1,2]

(1. *Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, Ministry of Land and Resources, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey Bureau, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 3. *Chuxiong Branch Bureau of Laboratory of Eco-environment, Hydrology and Water Resources of Yunnan Province, Chuxiong, Yunnan* 675000, *China*)

Abstract: [Objective] We analyze the risk zoning of regional geo-harzards in order to provide a scientific basis for regional geo-hazards prevention and reduction in Zhouqu County, Gansu Province and similar areas. [Methods] We established regional risk assessment models for shallow geo-harzards under different rainfall characteristics, by using SINMAP model. [Results] The distribution pattern of disaster spot in low-lying areas was consistent with high humidity area. With the increasing of rainfall, the shallow soil moisture and area of wetness region increased gradually, and extended to the ridge and gentler slopes. With the rise of rainfall warning level, 1 hour rainfall amount increased from 10 mm to 56 mm. The area proportion and landslide proportion in the stable region decreased by 22% and 38%, respectively, the related proportion in the unstable region increased by 121% and 125%, respectively, and the related proportion in the potentially unstable region was the highest, and reached to 35% and 39%, respectively. Meanwhile, the basically stable

收稿日期：2015-06-26　　**修回日期**：2015-08-16

资助项目：国家自然科学基金项目“高山峡谷区域暴雨泥石流成灾临界阈值研究”(41302224)；陕西省科学技术研究发展计划项目“高山峡谷区域暴雨泥石流启动阈值研究—以舟曲泥石流为例”(2014KJXX-20)；国家地质找矿专项“西北地区典型重大突发地质灾害调查”(12120114025901)；国家地质找矿专项“秦岭及宁东矿产资源集中开采区地质环境调查”(121201011000150022)

第一作者：魏兴丽(1967—)，女(汉族)，陕西省长安市人，学士，高级工程师，从事地质灾害防灾减灾及矿山环境等方面调查研究。E-mail：wxltyf@163.com。

通讯作者：于国强(1979—)，男(民族)，内蒙古自治区包头市人，博士后，从事土壤侵蚀与水土保持及地质灾害等方面的研究。E-mail：yuguoqiang23@163.com。

and potential unstable region was gradually transferred into unstable and very unstable region. The potential of geological harzard occurrence in the study area was increasing gradually. The geo-hazards such as landslides and debris flow could be triggered when the warning level was raised to the level Ⅳ blue warning, while when the warning level was raised to the level Ⅲ yellow warning, the risk degree of geo-hazards was increased significantly. [Conclusion] Rainfall is a factor that induced geo-hazards in Zhouqu County. In case of heavy rainfall suitable conditions, the risk of geo-hazards remains severe.

Keywords: Zhouqu County; geological hazard; risk zoning

甘肃省舟曲县内地质灾害类型众多,成灾机理复杂,危害严重,历史上曾多次发生泥石流、滑坡等地质灾害,属于地质灾害重灾区。降雨既是灾害发生的动力来源,也是其形成的主要诱发因素[1-4]。降雨会使地下水位、基质吸力发生改变,也使岩土体内部结构、含水量、应力状态、强度发生改变,导致岩土体强度明显降低。因此,对于降雨型地质灾害危险性进行空间预测分析是一项重要而又艰难的工作,是进行监测预警的重要环节,对于灾后重建,防灾减灾具有十分重要的意义。

对地质灾害危险区划的研究工作,大致上可以分为 3 类[5-8]。第 1 类是针对地区地质灾害进行详细调查,分析潜在灾害地区[5-8]。根据区域内的地质、地形、气候等各项因子评估边坡的稳定度,但此类研究必须仰赖有经验的专家进行评估,才能精确地划设潜在危险区。第 2 类是利用统计方法,针对地质、水文因子进行统计归纳,找出影响地灾的重要因子。但统计方法强调归纳及相关性,因此必须有大量的资料及样本,才具有代表性。第 3 类则是采用物理机制模型,进行地质灾害潜势分析。此类模型是依靠理论推导,比较边坡抗滑力与下滑力,推估边坡失稳的可能性。由于降雨常常是触发边坡失稳的主要驱动力,因此许多模型是结合水文模型与无限边坡库伦破坏模型,利用 GIS 与数值高程模型(DEM)进进行模拟,再和实际灾害事件进行对比,验证模型准确性并评估潜在危险区,这类模拟多以降雨型地质灾害为主。水文模型可大致区分为 2 类:一是稳定状态模型,假设水文状况不随时间变动,最大的优点在于操作较简单,并且可以表现相对稳定;但由于过于简化的假设,也经常导致不符合真实状况的推论。二是动态水文模型,考虑随着时间变动的水文状态,模拟结果可能较接近真实状况,但其操作需要考虑许多参数。由于模型参数选取,观测资料准确度、观测时间有限,可能造成模拟结果的不确定,尤其当处理的问题扩展到其他研究区、其他季节时,复杂程度更是增大。

在 Montgomery 和 Dietrich 物理机制模型的基础上,Pack R T 等[8]建立了 SINMAP(stability index mapping)模型,兼具以上 2 种水文模型优点,在 ArcGIS 平台下,将无限斜坡确定性模型与基于 DEM 的水文分析模型进行集成,综合考虑降雨引起的地下水分布对滑坡的影响,以及地质条件、地形地貌、水文及气候、土壤、植被等因素,同时解决了水文和岩土体参数不确定性的途径,使该模型具有一定的通用性。

因此,本研究拟从舟曲县暴雨地质灾害触发因素入手,结合野外勘察、水文气象监测,开展舟曲县地质灾害临界阈值研究,采用 SINMAP 模型,对不同降雨预警级别下,灾害点分布范围、变化趋势、危险性分布等进行研究,开展舟曲县地质灾害危险性区划及空间预测,最终建立舟曲县地质灾害预警模型,以期为舟曲区域乃至高山峡谷区地质灾害预警提供有效手段,为中国山区城镇建设、工程建设及减灾防灾提供科学技术支撑。

1　研究区概况

舟曲县位于甘肃省南部。该县总面积为 3 008.98 km^2,海拔在 1 500～3 500 m 的区域占县面积的 90% 以上,其中海拔在 2 500～3 000 m 的区域占县面积的 33.14%。海拔较低的河川地带,气候温和湿润,高山地带则较为寒冷,春季温暖回升快而稳,秋季温凉阴雨多。多年平均气温 13.0 ℃,历年极端最高气温 35.2 ℃(19740723);极端最低气温 －10.2 ℃(19751214)。历年最大积雪深度达 3.0 cm,最大冻土深度达 24.0 cm[1-2]。白龙江横贯舟曲县城,县境内干流总长 70.7 km。白龙江为嘉陵江上游一级支流。白龙江流域内山峦重迭,沟壑纵横,河谷下切甚深,河道曲折,川峡相间,水流湍急,是一个典型的高、中山峡谷区,流域面积 1 330 km^2。该区属西秦岭构造带的西延部分,在构造形态上为一北西向古生界复背斜,其轴部位于白龙江南部,核部地层为志留系。境内以坪定—化马断层为主,构成北西、南东向断裂带,其走向与区域性断裂带走向基本一致,为正断层,其错段山体而呈现阶梯状断块山特征。断裂两侧岩层破碎,褶曲强烈,角砾岩、破碎岩十分发育,沿断裂有泉水出露,断裂宽一般数十厘米,最宽 1.2 m。新构造运动在境内十分活跃,表现为山地强烈隆升,流水急剧下切。该区地下水类型分为基岩裂隙水和第

四系松散岩类孔隙水。基岩裂隙水赋存于二叠系基岩构造和风化裂隙内，主要靠大气降水补给，多以泉的形式排向沟底。自水尽头沟出露的泉水流量最大，枯水期流量约16 L/s，丰水期流量达到20～60 L/s，其余泉水流量很小。第四系松散岩类孔隙水主要赋存于沟床碎石土层中，接受大气降水和地表水入渗补给，沿沟谷向下游排泄[1-2]。

2 研究方法

2.1 SINMAP模型原理和方法

SINMAP的详细理论参见文献[8]。本研究利用修正后的无限边坡理论配合数值地形、卫星影像资料与地质资料进行边坡稳定性评估。SINMAP方法以无限斜坡模型为基础，分析促使地表土层稳定的抗滑力与使之失衡的下滑力之间的平衡关系，以这2种力的比率作为衡量斜坡稳定性的指标即安全系数(F_S)，无限边坡模式已被广泛地使用在滑坡的评估上，其形式各类不一，安全系数无量纲形式为：

$$F_S=\frac{c+\cos\theta(1-wr)\tan\phi}{\sin\theta} \quad (1)$$

式中：无量纲土壤黏聚力 $c=(c_r+c_s)/(h\rho_s g)$；c_r——植物根系黏聚力(N/m^2)；c_s——土壤本身黏聚力(N/m^2)；θ——坡度(°)；ρ_s——湿土密度(kg/m^3)；ρ_w——水密度(kg/m^3)；g——重力加速度(9.81 m/s^2)；令 $h=D\cos\theta$，D——土壤铅直深度(m)，$h=D\cos\theta$，$w=D_w/D=h_w/h$；ϕ——土壤内摩擦角(°)，令 r 为水与土体的相对密度，表达式为 $r=\rho_w/\rho_s$。

SINMAP模型是使用了TOPMODEL模型中计算地形湿度指数 的方法，经过了适当的假设得出，该方法已被广泛使用和采纳[6-10]，其表达式为：$w=\min\left(\frac{R_a}{T\sin\theta},\ 1\right)$。其中 T 为土体输水性系数(导水系数)，R 为稳定状态时的流量(有效降雨量)，θ 为坡度，a 为比集水区面积。下同。本模式使用稳定状态的假设，但是并不是指一般长时间的稳定状态，而是指有效降雨所能形成的较短时间内的状态。比值 R/T 为与雨强及土壤输水性有关的一个综合参数[8]。

当 $F_S>1$，边坡稳定，数值越高，稳定程度越好。当 $F_S=1$，处于临界平衡状态，此时若有外力作用(降雨、地震)，斜坡失稳。当 $F_S<1$，斜坡无条件失稳。

进行稳定性评价时，由于参数具有时间、空间不确定等原因，输入准确参数十分困难。因此在模型中引入滑坡稳定性指标概念，并提供了一种解决参数不确定性或变性的概率方法。滑坡稳定性指标SI根据 F_S 所得的概率计算而得：

$$SI=\mathrm{Prob}(F_S>1) \quad (2)$$

令 $R/T=x$，$\tan\phi=t$，同时定义了这3个变量的均匀分布的上限和下限，$C\sim U(C_1,C_2)$，$x\sim U(x_1,x_2)$，$t\sim U(t_1,t_2)$。当取 C_1，t_1 和 x_2 时，F_S 最小，此时稳定性处于最差状态，此时处于这样的情况的区域的 F_S 依然大于1，则斜坡无条件稳定。

根据 F_S 计算结果，进行稳定性级别划分[8]（如表1所示）。

表1 滑坡稳定性指数SI的稳定性级别划分

稳定性级别	稳定性指数	稳定性划分
1	SI>1.5	极稳定
2	1.5>SI>1.25	稳定
3	1.25>SI>1.0	基本稳定
4	1>SI>0.5	潜在不稳定
5	0.5>SI>0.0	不稳定
6	SI=0	极不稳定

2.2 数据准备与参数设置

2.2.1 *数据准备* 经过地质灾害点实地调查，同时广泛收集研究区有关滑坡等地质灾害评估资料与制图所需的孕灾环境和致灾因子数据，包括舟曲县滑坡分布图、地形图、地质图、地貌图、土地利用图、土壤图、水文地质图等专题图件及研究区遥感影像。以一般调查区1∶50 000地质灾害测量(草测)、重点调查区1∶50 000地质灾害测量(正测)区分调查层次。其中一般调查区面积2 231.7 km^2，工作手段以遥感解译调查及野外核查为主；对重点调查区进行1∶50 000地质灾害测量，面积752 km^2，以野外调查与地面测绘为主要手段，并辅以适量的山地工程，对区内地质灾害全面系统地调查。按照上述调查要求，2011年野外工作共完成地质灾害调查点169处[9]。

2.2.2 *参数设置* 经过实地勘察我们注意到，大多数滑坡都是浅表层平移运动。许多山体灾害都源于崩积层、风化层和坡残积层物质。鉴于研究区基本属于高山峡谷区，有着相似的工程地质条件，同时模型中地质参数的输入值是采用区间范围确定，避免了引入难以确定的单一参数值的缺点，因此将研究区划分为同一校准区，区内采用相同的校准参数进行模拟运算，具有一定的代表性。

根据数学模型，我们需要考察以下参数，滑体相对容重 r，内摩擦角 ϕ，黏聚力 c，土体输水性系数(导水系数)T，坡度 θ，比集水区面积 a 和稳定状态时的流量(有效降雨量)R[8]。其中前4个参数为滑坡岩土体的物理力学性质；容重、内摩擦角、黏聚力根据对现场采取的原状试验样的室内土工试验结果，并参考

以前舟曲县的试验成果和滑坡,得出模型计算中的各物理参数见表 2。坡度及比集水区面积可以通过 ArcGIS 平台,从数字地形模型 DEM 中得出。

表 2　SINMAP 模型选取的基本参数值

ρ_s/(kg·m^{-3})	ϕ_{min}/(°)	ϕ_{max}/(°)	c_{min}	c_{max}
1900	22	38	0.28	0.42

难以确定的参数是滑坡体的导水系数 T(与滑坡体的渗透系数 K 和滑坡岩土体厚度有关)以及稳定状态时的流量(有效降雨量)R。在进行滑坡稳定性评价时,将 R/T 作为一个整体的单一因子进行考虑。比集水区面积 a 与 R/T 是决定饱和因子的 2 个重要变量。按照比集水区面积的确定方法,根据数字地形模型可以方便地计算确定每一个单元的比集水区面积,当选定模型单元时,单元的比集水区面积、坡度随之确定,因此,在此我们重点考察变量 R/T。一般认为饱和因子小于或等于 1,当饱和因子大于 1 时,一种比较合理的解释是存在地表径流。在合理的水文参数下,大于 1 的饱和因子分布应该与流域中真实的水系的分布吻合。通过反复验算可知当 R/T 大约介于 2 000～3 000 m 时,大于 1 的饱和因空间分布情况与舟曲流域真正的水系分布情况极为类似。即如果一个 30°的坡面的 T/R 介于 2 000～3 000 m,说明水流流经 2 000～3 000 m,坡面达到饱和[8]。

由于舟曲县滑坡、泥石流等地质灾害的发生大多是由于峰值降雨(暴雨)造成的,以舟曲县两年一遇降雨频率每 1 h 最大降雨量 10 mm[14]作为稳定状态时的流量(有效降雨量)R,可以推断舟曲地区的导水系数 T 大约为 20.32～30.48 m^2/h〔T=3 000(2 000)×q=3 000(2 000)×10/1 000=30.48(20.32)m^2/h)〕。考虑 q 应为有效降水量,因此在计算过程中应加以修正。

根据笔者前期对舟曲县地质灾害降雨临界阈值的研究成果,将诱发舟曲地质灾害的降雨预警级别划分为红(Ⅰ级)、橙(Ⅱ级)、黄(Ⅲ级)、蓝(Ⅳ级)4 个预警级别和 2 个预备预警级别(Ⅴ级和Ⅵ级),并确定了各个预警级别下单位小时降雨量和降雨雨强与降雨历时的函数关系[10]。根据以上舟曲地区导水系数 T 的计算结果,结合不同降雨预警级别下小时降雨量,求解不同预警级别下的 T/R 值,同时进行修正,计算结果如表 3 所示。

3　结果与讨论

3.1　不同降雨特征条件下区域地质灾害危险性区划

本研究针对 1 h 降雨量从 10～56 mm 不同降雨预警级别下舟曲浅层滑坡地质灾害进行了危险性区划。由计算结果可知,舟曲区域稳定性分布规律也存在一定的空间差异。总体来讲,舟曲整体稳定性均较差,危险性级别较高的不稳定区和极不稳定区分布范围非常广,尤其在白龙江左右两岸、舟曲县城周边稳定性最差,危险性级别最高的区域多分布于此,在这些区域,河流侵蚀强烈,坡度大,地势低洼,处于演化的最强烈时期,侵蚀剧烈,滑坡较多,地质灾害隐患相对集中,与野外观测情况一致。特别是白龙江两侧斜坡被水系切割剧烈,为两侧灾害体发育提供了丰富的物源。流域上游地区的稳定性很差,下游地区稍稍好于上游,但总体的稳定性也较差,不稳定和潜在不稳定区域分布非常遍及。稳定性相对较好的区域位于武坪乡周边,分布范围很小,该区段地势较为平坦,坡度较缓,植被覆盖较好,不易发生浅层滑坡,发生地质灾害的可能性相对较小。

表 3　不同降雨预警级别下的 T/R 参数值

降雨频率/%	预警级别	T/(m^2·h^{-1}) 最小	T/(m^2·h^{-1}) 最大	R/mm	(T/R)/m 最小	(T/R)/m 最大
50	Ⅵ级	20.32	30.48	10.16	2 000	3 000
20	Ⅴ级	20.32	30.48	17.00	1 200	1 800
10	Ⅳ级	20.32	30.48	24.00	850	1 280
5	Ⅲ级	20.32	30.48	32.00	640	960
3.33	Ⅱ级	20.32	30.48	40.70	500	750
2	Ⅰ级	20.32	30.48	56.10	360	540

注:Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ为降雨预警级别红、橙、黄、蓝;Ⅴ和Ⅵ为 2 个预备预警级别。下同。

随着降雨量(降雨雨强)的逐渐增加,预警级别的逐渐升高,区域潜在不稳定、不稳定和极不稳定区域的范围增加,危险程度增大;稳定、基本稳定区域分布范围逐渐减小,并且逐渐向潜在不稳定、不稳定和极不稳定区域过渡,危险性逐渐增大。

3.2　不同降雨特征条件下区域地质灾害危险性定量分析

本研究对不同预警级别下的地表稳定性进行了统计分析,统计结果如图 1—4 所示。

从图 1—2 所示可以看出,不同预警级别下,失稳区域、稳定区域的面积所占比例与所占滑坡的比例整体变化趋势一致。随着降雨量逐渐增加,预警级别逐渐提高,整个流域稳定区域的面积所占比例与所占滑坡比例明显降低,区域面积所占比例由 1 h 雨量 10 mm降雨条件下 54.93%减少到 1 h 雨量 56 mm 条件下的 42.67%,所占滑坡的比例由 46.07%减少到 28.65%。相反,所占滑坡的比例与不稳定区域的面积所占比例明显增加,不稳定和极不稳定分区的面积由 11.54%增至 25.47%,所占滑坡比例由 15.73%

增至35.39%。滑与不滑的潜在不稳定区，属于稳定区到不稳定区的过渡区域，该区域比例在不同降雨预警级别下变化不大，面积所占比例在32%～38%之间，所占滑坡比例在36%～41%之间。

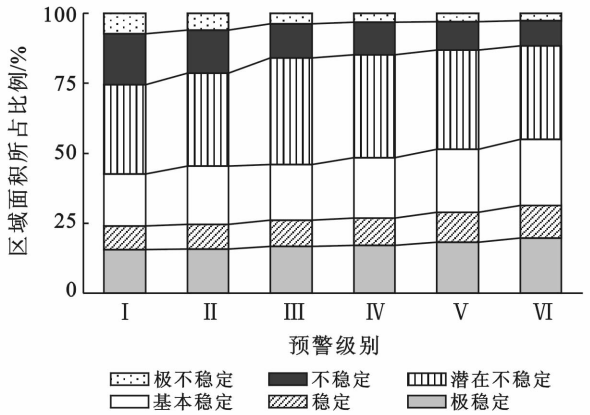


图1 舟曲县不同预警级别下区域面积所占比例变化

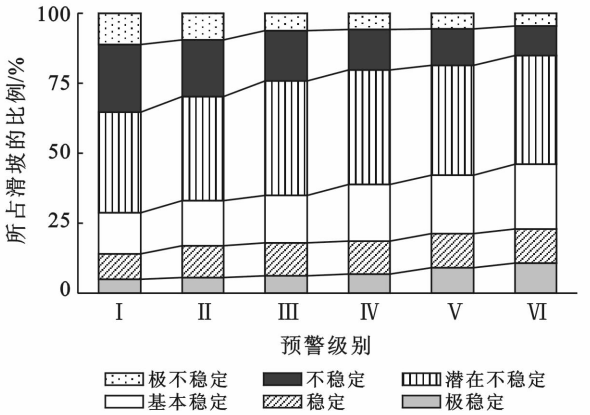


图2 舟曲县不同预警级别下所占滑坡比例变化

如图1—2所示，极稳定、稳定和基本稳定区中，区域面积所占比例均值为48%，所占滑坡比例均值为37%，分界线右侧区中，滑坡所占的比例均值达到63%，区域面积所占比例均值为52%，进一步证实了舟曲整体稳定性较差这一结论。在不同预警级别下，所占滑坡比例和潜在不稳定区域面积所占比例始终最高，均值达38.58%和34.83%，说明舟曲区域整体稳定性一般，如遇强的降雨、地震条等外力因素，向不稳定和极不稳定区域迁移与过渡的可能性很大。

图1—2中稳定区域内，基本上都是随着预警级别的逐渐升高，区域面积所占比例和所占滑坡比例逐渐减低，稳定区域逐渐向不稳定区域迁移和过渡。这是由于降雨引发斜坡中水的瞬时入渗和土中含水量的重新分布，土中含水量改变或入渗过程对土的容重和稳定系数具有双重影响，会造成土的强度或有效应力发生改变，当稳定入渗率达到斜坡材料的饱和渗透系数时，地下水位以上土层发生破坏。虽然有些情况下，降雨入渗引起的土的容重增大可能小幅度降低斜坡的稳定系数，但是，在特定的条件下可能足以诱发滑坡。潜在稳定区至极不稳定区，以潜在稳定区和不稳定区为主，区域面积所占比例均值为34.83%和12.76%，所占滑坡比例均值为38.58%和17.04%，极不稳定区内，区域面积所占比例均值为4.3%，滑坡所占比例均值为7.21%。稳定区域内，基本上都是随着预警级别的逐渐升高，所占滑坡比例逐渐升高，发生灾害的趋势进一步加大，舟曲区域危险性逐渐加剧。

舟曲县不同预警级别下，稳定性分区、潜在不稳定分区、失稳分区和潜在与失稳总和分区中，各个比例趋势变化曲线如图3—4所示。可以看出，各自分区曲线整体变化趋势一致，即随着预警级别的逐渐升高，失稳分区与潜在不稳定总和分区、失稳分区中的两项比例曲线均逐渐增加；与之相反，稳定分区的2项比例曲线逐渐下降，说明随着预警级别的逐渐升高，降雨量的逐渐增加，舟曲县地质灾害危险性逐渐加剧。

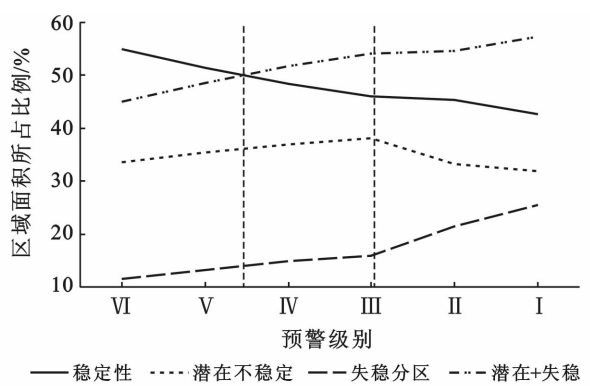


图3 舟曲县不同预警级别下区域面积所占比例变化

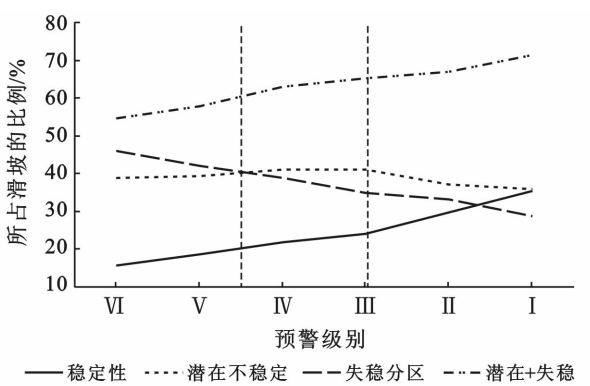


图4 舟曲县不同预警级别下所占滑坡比例变化

值得注意的是 2 条分界线,一是从Ⅴ预备预警到蓝色Ⅳ级预警级别的分界线。从图 3—4 可以看出,从Ⅴ预备预警级别向蓝色Ⅳ级过渡的过程中,稳定性分区比例线均与潜在不稳定分区或潜在与失稳总和分区比例线有所交叉,交叉之后,过渡到分界线右侧,稳定性分区比例线开始逐渐低于不稳定比例线,说明不稳定分区面积所占比例和所占灾害点比例逐渐超出稳定性分区比例,地质灾害已被触发,危险性开始加剧,这也证明了蓝色Ⅳ级预警级别以及临界降雨阈值设置的合理性。另一条则是黄色Ⅲ级预警级别处的分界线,从图 3—4 可以看出,潜在不稳定分区中的区域面积比例线和所占滑坡比例线,在经过黄色Ⅲ级预警级别线(分界线)后突然下降,而失稳分区中的区域面积比例线和所占滑坡比例线突然上升,说明在预警级别超过Ⅲ级之后,当遇重现期大于 20 a 一遇洪水时,地质灾害危险程度由量变产生质变,发生地质灾害的程度显著增大。

通过将模型应用于舟曲县的滑坡地质灾害的危险性分析,可以有效地确定舟曲地质灾害危险性与降雨、地形坡度、汇水区面积等影响因素的定量关系,分析和预测随不同预警级别的变化,地质灾害变形失稳区域的扩展趋势及空间分布规律,为流域的地质灾害防治研究、工程决策等提供了快速、高效、可视化的分析手段。

4　结 论

(1) 舟曲县的高山峡谷地形地貌和工程地质条件,为地质灾害提供了丰富的物源补给和易于发生破坏的条件,导致舟曲总体稳定性较差,同时舟曲地质灾害危险性存在地域性差别。地势低洼地区往往与地形湿度较高区域、滑坡灾害点分布规律一致。

(2) 随着降雨预警级别的逐渐升高,地表浅层土壤水分逐渐增加,土壤湿度区域面积逐渐增加,不稳定区的分布区域快速增长,逐渐扩展到山脊和坡度较缓的斜坡单元。随着降雨量逐渐增大,区域稳定区域面积由 54.93%减少到 42.67%,所占滑坡的比例由 46.07%减少到 28.65%;而极不稳定区域和不稳定区域面积由 11.54%增至 25.47%,所占滑坡比例由 15.73%增至 35.39%。潜在不稳定区,区域面积所占比例在 32%～38%浮动,所占滑坡比例在 36%～41%浮动,变化不甚明显,但在各稳定级别中比例始终最高,均值高达 35%和 39%。表明舟曲县整体危险性较大,基本稳定区、潜在不稳定区正逐渐向不稳定区及极不稳定区迁移与过渡。

(3) 舟曲县地质灾害存在 2 条分界线(临界线),一条是从Ⅴ预备预警级别升至蓝色Ⅳ级预警级别,降雨频率从 5 年一遇升至 10 年一遇,1 h 雨量从 17 mm 增至 24 mm,此时滑坡被触发,开始发生地质灾害;另外是黄色Ⅲ级预警线,升至该预警级别后,降雨规模大于 20 年一遇暴雨,1 h雨量超过 32 mm,此时潜在不稳定区域面积所占比例和所占滑坡比例迅速下降,向不稳定区区域急速转化,危害程度由量引起质变,地质灾害危险程度显著加剧。

[参 考 文 献]

[1] Yu Bin, Yang Yonghong, Su Yongchao, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7, 2010[J]. Journal of Engineering Geology, 2010,18(4):437-444.

[2] Wang Genlong. Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China[J]. Natural Hazards, 2013, 69(3): 1835-1847.

[3] Wilkinson P L, Anderson M G, Lloyd D M. An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002,27(12):1285-1297.

[4] Claessens L, Heuvelink G B M, Schoorl J M, et al. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modeling[J]. Earth Surface Process and Landforms, 2005,30(4):461-478.

[5] Begueria S. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management[J]. Natural Hazards, 2006,37(3):315-329.

[6] Montgomery D R, Dietrich W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding [J]. Water Resources Research, 1994, 30(4): 1153-1171.

[7] Montgomery D R, Sullivan K, Greenberg H M. Regional test of a model for shallow land sliding[J]. Hydrological Processes, 1998,12(6):943-955.

[8] Pack R T, Tarboton D G, Goodwin C N(1999) GIS-based landslide susceptibility mapping with SINMAP[C]//Bay J A. Proceedings of the 34th symposium on engineering geology and geotechnical engineering, 1999 (34):219-231.

[9] 赵成,贾贵义.甘肃省白龙江流域主要城镇环境工程地质勘查可行性研究[R].兰州:甘肃省地质环境监测院,2010.

[10] Guo Qiangyu, Mao Sheng, Zhang Kaicong, et al. Critical rainfall thresholds for debris flows in Sanyanyu, Zhouqu County, Gansu Province, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2015,48(3/4):224-233.