

基于 SINMAP 模型的延安市滑坡危险性区划

高波^{1,2}, 王晓勇^{1,2}

(1. 自然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)

摘要: [目的] 对陕西省延安市开展滑坡危险性区划研究, 为延安地区乃至黄土高原区滑坡危险性区划以及监测预警提供科学依据。[方法] 在野外调查的基础上以滑坡触发因素为切入点, 建立了基于 SINMAP 滑坡危险性评价模型, 定量评价了不同降雨级别下滑坡区域面积的迁移与转化规律。[结果] 降雨雨强从 5 mm/h 升至 200 mm/h, 不稳定性区域内比例分别增加 6.48% 和 6.44%, 极稳定区域面积所占比例和所占滑比例均值高达 46.79% 和 51.33%; 同时潜在不稳定区面积所占比例在 5.04%~17.31% 之间浮动, 所占滑坡比例在 5.14%~15.43% 之间浮动。[结论] 斜坡表层土壤水分、湿度区域面积随着降雨量的增大逐渐增加, 区内稳定区域正向失稳区域转化。

关键词: 延安; 滑坡; SINMAP; 危险性区划

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0211-06

中图分类号: P642.22

文献参数: 高波, 王晓勇. 基于 SINMAP 模型的延安市滑坡危险性区划[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 211-216. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.035; Gao Bo, Wang Xiaoyong. Risk zoning of landslide based on SINMAP model in Yan'an City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3):211-216.

Risk Zoning of Landslide Based on SINMAP Model in Yan'an City

Gao Bo^{1,2}, Wang Xiaoyong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, Ministry of Natural Resources of Republic of China, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] Landslide hazard zoning research in Yan'an City of Shaanxi Province was carried out in order to provide a scientific basis for regional landslide prevention and reduction in Yan'an City and the Loess Plateau region. [Methods] Starting with the triggering factors of landslides in Yan'an City, and coupling with field survey, we established regional risk assessment model for shallow landslide using SINMAP model. We analyzed the risk areas of regional landslide, and quantitatively evaluated the migration and transformation of the landslide area under different rainfall conditions. [Results] With the increase of rainfall intensity from 5 mm/h to 200 mm/h, the proportions in the unstable region increased by 6.48% and 6.44% and the proportions in the stable region were always the highest, with an average of 46.79% and 51.33%. Meanwhile, potential unstable region may be transformed into unstable and very unstable region; area proportions varies between 5.04% and 17.31% and landslide proportions varies between 5.14% and 15.43%. [Conclusion] With an increase in rainfall, surface shallow soil moisture and humidity area increased, and extended to the ridge and gentler slopes unit. The transition from stable region to unstable region is taking place in the region.

Keywords: Yan'an City; landslide; SINMAP; risk zoning

陕西省延安市属于地质灾害重灾区^[1-3]。区内曾多次发生滑坡等地质灾害, 降雨是其发生主要触发因素^[4-5]。因此, 开展延安地区降雨触发滑坡危险性区划十分必要。

滑坡危险性区划研究, 前人已做大量工作^[6-7]。

总结归纳为 3 类: ①有针对性的地质灾害详细调查, 评估边坡稳定性, 分析潜在危险区^[8-11]; ②影响地质灾害重要因子的统计归纳; ③基于物理模型的地质灾害演化过程分析。

Pack R T 等发展了 Montgomery 和 Dietrich 物

收稿日期: 2018-11-29

修回日期: 2018-12-30

资助项目: 自然资源部中国地质调查局地质调查项目“陕北榆林荒漠化区综合地质调查与评价”(DD20190504); 自然资源部中国地质调查局地质调查项目“秦岭南部灾害地质调查”(DD20190714); 陕西省自然科学基金基础研究计划“基于淤积信息的流域侵蚀产沙与土地利用变化响应”(2015JQ4099)。

第一作者: 高波(1981—), 男(汉族), 山西省长治市人, 硕士, 高级工程师, 从事地质灾害防治与风险评价等方面的研究。E-mail: 43617102@qq.com。

通讯作者: 王晓勇(1977—), 男(汉族), 陕西省大荔县人, 高级工程师, 主要从事生态水文地质及水文水资源研究。E-mail: wxiaoyong@cgs.cn。

理机制模型,建立了 SINMAP(Stability INdexMAP-ping)模型:在 ArcGIS 平台下,综合考虑因降雨引起的地下水分布对滑坡的影响,以及地形地貌、地质、土壤、植被等因素,集成了基于 DEM 的水文分析模型与无限斜坡确定性模型,同时解决了水土参数不确定性的途径,使该模型具有一定的通用性^[12-14]。

本文结合水文气象监测、野外详细调查,以延安地区滑坡触发因素为切入点,研究基于 SINMAP 模型在不同降雨级别下区内灾害点分布、危险区分布、变化趋势,为延安地区减灾防灾提供科学依据。

1 研究区概况

延安市位于黄土高原中部,陕西北部,地理位置:北纬 35°21′—37°31′,东经 107°41′—110°31′。总面积 3.70×10⁴ km²。气候四季分明,属内陆干旱半干旱气候,年均降水量 500 mm,年均气温 7.7~10.6℃。

延安地区为黄土高原丘陵沟壑区。地貌以黄土高原、丘陵为主。地势北高南低,平均海拔约 1 200 m。全区地貌上南北略有差异,北部以黄土梁峁为主;南部以黄土塬沟壑为主;全区基岩山地占总面积 9%。滑坡、泥石流等地质灾害发育,特别是近年来滑坡和泥石流地质灾害严重。

2 SINMAP 模型理论

SINMAP 理论原理可见文献^[14]。结合前期开展地质灾害详细调查获取的地形、地质资料,本研究利用 SINMAP 模型进行边坡稳定性评估。无限边坡模式可简化为下式:

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_w g (D - D_w) + (\rho_w g - \rho_w g) D_w] \tan \varphi}{D \rho_w g \sin \theta \cos \theta} \quad (1)$$

式中: C_s ——土壤黏聚力(N/m²); C_r ——植物根系黏聚力(N/m²); θ ——坡度(°); ρ_w ——湿土密度(kg/m³); ρ_w ——水密度(kg/m³); g ——重力加速度(9.81 m/s²); D ——土壤铅直深度(m); φ ——土壤内摩擦角(°); D_w ——距土层等压面的垂直深度(m)。

其无限边坡的安全系数无量纲形式为:

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - \omega_r] \tan \varphi}{\sin \theta} \quad (2)$$

为简化计算,使用垂直边坡的土壤厚度 h 比使用土壤的铅直深度 D 更加简便,两者转化式为 $h = D \cos \theta$; ω (地形湿度指数)表征土体的饱和程度或孔隙水压,数学表达为水位高度与土壤厚度之比值,其表达式为: $\omega = D_w / D = h_w / h$; $r = \rho_w / \rho_w$, 表征为水与土体的相对密度;无量纲土壤黏聚力 $C = (C_r / C_s) / (h \rho_w g)$ 。

经过了适当的假设, SINMAP 模型使用了

TOPMODEL 模型中计算地形湿度指数,该方法已被广泛使用和采纳^[2-6],其表达式为:

$$\omega = \min\left(\frac{R \cdot \alpha}{T \sin \theta}, 1\right) \quad (3)$$

式中: T ——土体导水系数(m²/h); R ——稳定状态时的流量(mm); α ——比集水面积(m²)。将公式(3)带入公式(2),推导出公式(4)

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - \min\left(\frac{R \cdot \alpha}{T \sin \theta}, 1\right) r] \tan \varphi}{\sin \theta} \quad (4)$$

当 $FS = 1$, 斜坡处于临界平衡状态,若附加外力作用(降雨、地震),斜坡失稳。当 $FS > 1$, 斜坡稳定。当 $FS < 1$, 斜坡无条件失稳。公式(4)中,参数 a 与 θ 为物理参数可从数字高程模型中提取, $R/T, \tan \varphi, C$ 需要推导出来。但实际情况下,参数取值十分困难。故在此模型中引入滑坡稳定性指标,该指标 SI 根据 FS 所得概率计算而得:

$$SI = \text{prob}(FS > 1) \quad (5)$$

令 $R/T = x, \tan \varphi = t$, 同时定义这 3 个变量平均分布的上、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, FS 最小,此时区域 FS 依然大于 1, 则斜坡无条件稳定。我们定义:

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos \theta [1 - \min(x_2 \frac{a}{\sin \theta}, 1) r] t_1}{\sin \theta} \quad (6)$$

如果 $FS < 1$, 表明斜坡有可能失稳,既滑坡发生,失稳的空间概率由空间变量 C, T 和 $\tan \varphi$ 所致,而失稳的时间概率与湿度指数有关。因而, x 的不确定性同时组合了时间和空间的可能性。定义在参数随机区间内滑坡保持稳定的概率作为滑坡的稳定性指标 SI ^[7-8]。当取 C_2, t_2 和 x_1 时, FS 最大,定义

$$SI = FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos \theta [1 - \min(x_1 \frac{a}{\sin \theta}, 1) r] t_2}{\sin \theta} \quad (7)$$

在这样的条件下,如果 $FS_{\max} < 1$, 则

$$SI = \text{prob}(FS > 1) = 0 \quad (8)$$

则斜坡无条件失,滑坡发生。当 $SI > 1 (FS_{\min} > 1)$, $0 < SI < 1$ 和 $SI = 0 (FS_{\max} < 1)$ 的区域稳定性界限,根据计算结果,进行稳定性级别划分^[7,14](如表 1 所示)。

表 1 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

3 数据来源与参数设置

3.1 数据来源

依据延安市 1 : 50000 地形图,在 ArcGIS 中生成空间分辨率为 25 m 的延安市全区 Grid DEM 数据(图 1),用于延安市全区地质条件遥感解译。

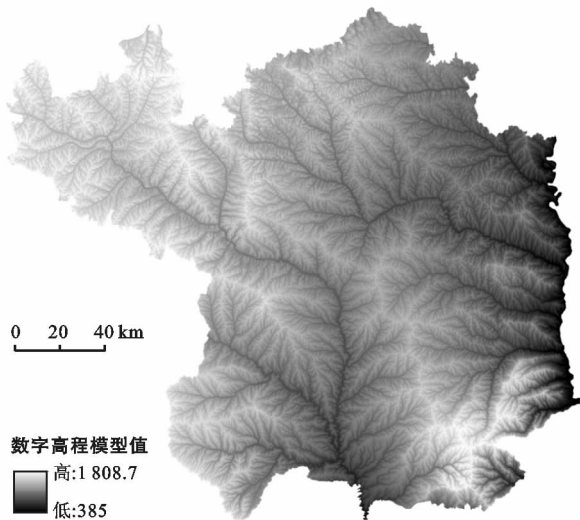


图 1 延安市 DEM 特征

对坡度进行灰度分级显示,低值区域为灰度高,高值区域灰度低。延安市坡度范围在 $0^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间,地势高低起伏。其中,北部延河河谷地带坡度较缓,主要在 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 之间,河边沿岸地势陡峭,坡度多在 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 40° 以上坡鲜有明显分布(图 2)。

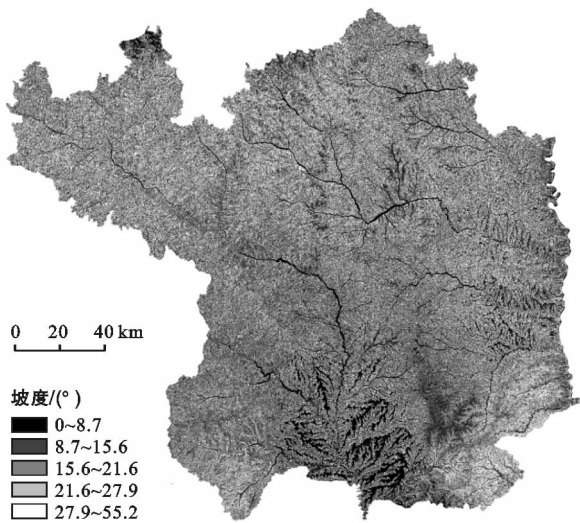


图 2 延安市坡度分布特征

在 ArcGIS 中将坡向进行分级显示。根据坡向显示,可观测到明显的山谷山脉,及山脉的大致分水线、集水线(图 3)。

根据实际调查数据,主要以滑坡、崩塌为主,多分布于河流的源头和人类活动影响较为严重的区域。

最终,根据野外地质灾害调查结果,得到延安市地质灾害分布图(图 4)。

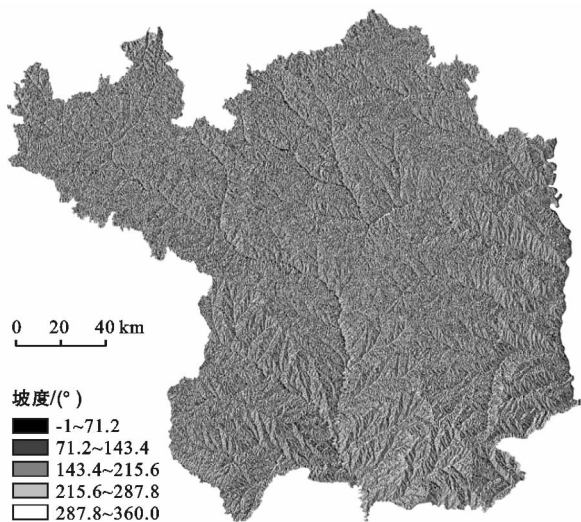


图 3 延安市坡向分布特征

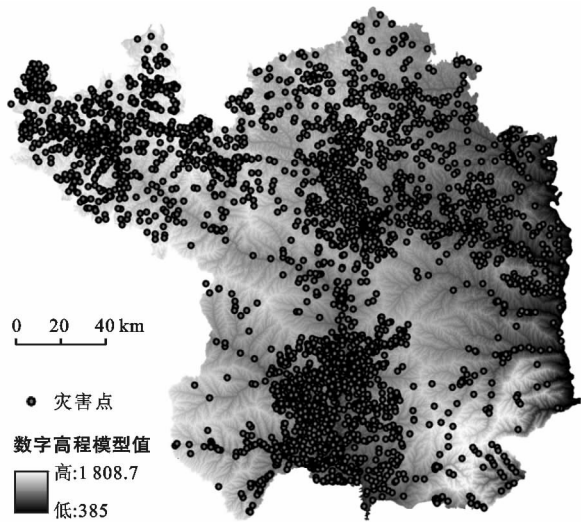


图 4 延安市地质灾害分布特征

3.2 参数设置

研究区内主要以第四纪黄土堆积为主,基本覆盖全流域 85% 以上的面积,仅在河谷地带发育中一新世代基岩地层包括三叠系、侏罗系和第四系。鉴于研究区属于黄土高原丘陵沟壑区,区内情况差异不大,有着相同的工程地质条件,可以将研究区划分为同一校准区。

如前述,该模型计算需要以下多个参数。其中黏聚力(C)、容重(r)、内摩擦角(φ)选根据取原状样土工试验结果,选取表 2 中的数值作为参数值。比集水区面积及坡度可以从数字高程模型 DEM 中导出。

表 2 SINMAP 模型选取的基本参数值

$\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi_{\min} / (^{\circ})$	$\varphi_{\max} / (^{\circ})$	C_{\min}	C_{\max}
1 750	20	25	0.35	0.54

根据延安地区近 50 年日降雨数据,假定小时有效降雨量 R 分别为 5 mm(小雨), 10 mm(中雨), 30 mm(大雨), 50 mm(暴雨), 100 mm(大暴雨)和 200 mm(特大暴雨)6 个等级,分别评价在这 6 个降雨等级下边坡的稳定性。按照延安地区不同降雨条件下,求解不同条件下的 T/R 值,同时进行修正,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同降雨条件下 T/R 参数值

降雨级别	$T/(m^2 \cdot h^{-1})$		R/mm	$T/R(m)$	
	min	max		min	max
小雨	5	15	5	1 000	3 000
中雨	5	15	10	500	1 500
大雨	5	15	30	167	500
暴雨	5	15	50	100	300
大暴雨	5	15	100	90	200
特大暴雨	5	15	200	70	150

4 模拟结果

4.1 延安地区滑坡危险性分布

针对单位小时降雨量从 5~200 mm 不同条件下的延安浅层滑坡进行了危险性区划。梁崮顶斜坡失稳需要高强度降雨;靠近沟谷区域,受河流切割、人类

活动等影响,斜坡往往不需要较强的降雨也可能发生失稳。随着单位小时内降雨量的逐渐增加,尤其在大雨至特大暴雨的情况下,不稳定区域分布范围逐渐增大。研究区内滑坡危险性区划结果与野外实际调查结果吻合较好。

4.2 延安地区滑坡危险性定量分析

如表 4 所示,延安地区特大暴雨条件下,不稳定区(含潜在不稳定、极不稳定)的统计面积 8 831.66 km²,占区域总面积的 24.22%;稳定区(含基本稳定、极稳定)的统计面积为 27 631.14 km²,占区域总面积的 75.78%;小雨条件下,不稳定区(含潜在不稳定、极不稳定)的统计面积为 1 996.82 km²,占区域总面积的 5.48%。稳定区(含基本稳定、极稳定)的统计面积为 34 465.98 km²,占区域总面积的 94.52%。由此可见,随单位小时降雨量的减少,潜在不稳定至极不稳定区域面积比例下降 77.39%,危险级别大幅度降低,说明降雨是区内地质灾害触发条件;同时也可以看出,虽然随着降雨量的逐渐减少,潜在不稳定至极不稳定区域面积比例以及滑坡比例大幅度降低,但在每一种降雨条件下,稳定区(含基本稳定、极稳定)面积始终最大,所占比例始终最大,维持在 75.78%至 94.52%,占延安市区面积大部,区域整体稳定性较好。

表 4 延安地表稳定性统计

降雨类型	参数	极稳定	稳定	基本稳定	潜在不稳定	不稳定	极不稳定	合计
特大暴雨	区域面积/km ²	15 295.23	4 866.18	7 469.73	6 313.35	2 363.09	155.22	36 462.80
	所占比例/%	41.95	13.35	20.49	17.31	6.48	0.43	100
	所占滑坡的比例/%	47.27	10.55	17.84	15.43	6.31	0.74	98.14
	滑坡密度/(个·km ⁻²)	0.0489	0.0109	0.0185	0.016 0	0.006 5	0.000 8	0.101 5
大暴雨	区域面积/km ²	15 295.23	4 866.18	7 470.18	6 816.83	1 929.43	84.94	36 462.80
	所占比例/%	41.95	13.35	20.49	18.70	5.29	0.23	100
	所占滑坡的比例/%	47.27	10.55	17.87	16.76	5.33	0.37	98.14
	滑坡密度/(个·km ⁻²)	0.048 9	0.0109	0.018 5	0.017 3	0.005 5	0.000 4	0.101 5
暴雨	区域面积/km ²	15 295.23	4 866.18	7 470.44	7 276.76	1 522.16	32.03	36 462.80
	所占比例/%	41.95	13.35	20.49	19.96	4.17	0.09	100
	所占滑坡的比例/%	47.27	10.55	17.87	17.95	4.37	0.13	98.14
	滑坡密度/(个·km ⁻²)	0.048 9	0.010 9	0.018 5	0.018 6	0.004 5	0.000 1	0.101 5
大雨	区域面积/km ²	15 295.23	5 496.85	8 754.10	6 103.95	800.25	12.42	36 462.80
	所占比例/%	41.95	15.08	24.01	16.74	2.19	0.03	100
	所占滑坡的比例/%	47.27	11.93	20.78	16.09	2.04	0.03	98.14
	滑坡密度/(个·km ⁻²)	0.048 9	0.0123	0.021 5	0.016 6	0.002 1	0.000 0	0.101 5
中雨	区域面积/km ²	19 358.69	7 017.03	7 177.55	2 680.43	224.35	4.75	36 462.80
	所占比例/%	53.09	19.24	19.68	7.35	0.62	0.01	100
	所占滑坡的比例/%	56.50	16.22	17.44	7.10	0.87	0.00	98.14
	滑坡密度/(个·km ⁻²)	0.058 4	0.016 8	0.0180	0.007 4	0.000 9	0.000 0	0.1015
小雨	区域面积/km ²	21 816.07	6 720.22	5 929.68	1 838.55	154.58	3.69	36 462.80
	所占比例/%	59.83	18.43	16.26	5.04	0.42	0.01	100
	所占滑坡的比例/%	62.41	15.16	14.82	5.14	0.61	0.00	98.14
	滑坡密度/(个·km ⁻²)	0.064 6	0.015 7	0.015 3	0.005 3	0.000 6	0.000 0	0.101 5

根据表 4 可知,在不同降雨条件下,统计不同稳定性区域面积所占比例和所占滑坡比例(所占滑坡比例表示不同分区中滑坡所占比例),结果如图 5—6 所示:稳定区域的面积所占比例与所占滑坡比例变化与单位小时内降雨量变化呈负相关关系。随着降雨量的增加,区域面积所占比例由 5 mm/h 降雨条件下的 94.52%减少到 200 mm/d 条件下的 75.78%,所占滑坡的比例由 5 mm/h 降雨条件下的 92.39%减少到 200 mm/d 条件下的 75.66%;与此相反,不稳定区域面积占比与所占滑坡的比例增加明显,不稳定分区和极不稳定分区的面积由 5 mm/h 条件下的 0.43%增至 200 mm/h 条件下的 6.91%,所占滑坡比例由 5 mm/h 条件下的 0.61%增至 200 mm/h 条件下的 7.05%。而潜在不稳定区,属于从稳定区到不稳定区的过渡区域,该区域比例变化也较显著,面积所占比例在 5.04%~17.31%之间浮动,所占滑坡比例在 5.14%~15.43%之间浮动,有可能转化为不稳定和极不稳定状态。

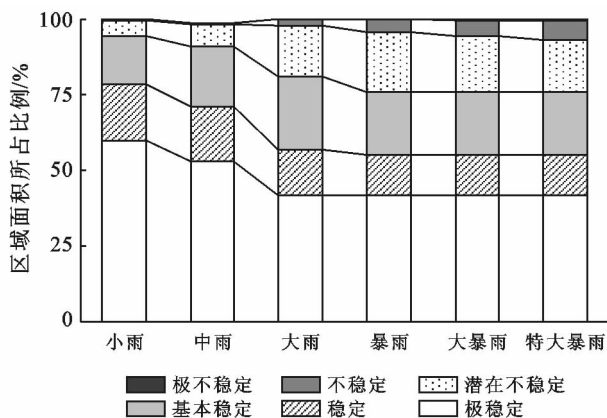


图 5 延安市不同降雨条件下失稳面积变化

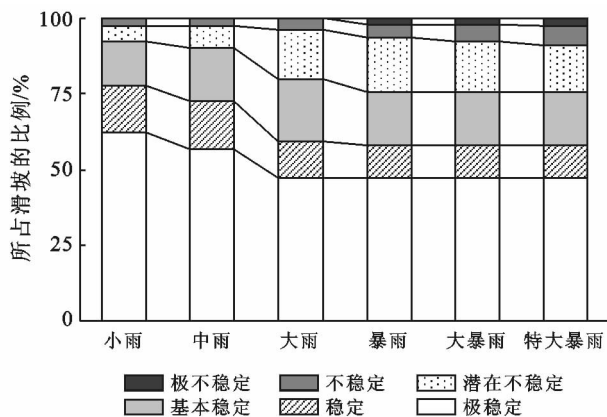


图 6 延安市不同降雨条件下滑坡变化

根据表 4 的统计结果,比较不同稳定性分级下,不同降雨条件下的所占滑坡比例、区域面积所占比

例,结果如图 7—8 所示:基本稳定、稳定和极稳定区中,区域面积占比达到 82.49%,所占滑坡比例达到 81.60%,极不稳定、潜在不稳定和不稳定区中,区域面积占比为 24.22%,所占滑坡的比例为 16.55%。

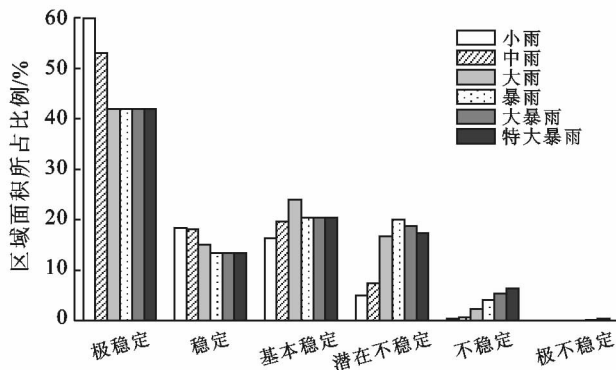


图 7 延安市不同稳定性级别下区域面积变化

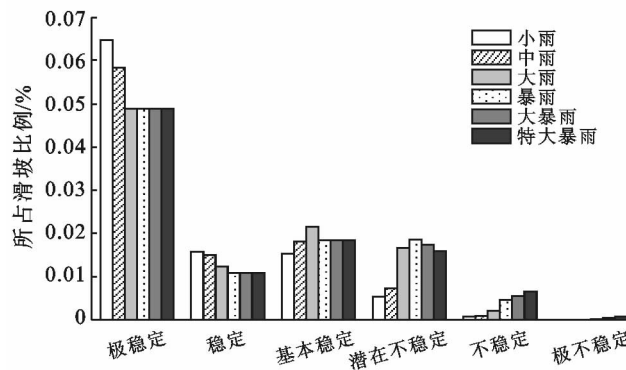


图 8 延安市不同稳定性级别下滑坡变化

根据表 4 的统计结果,绘制了延安地区不同降雨条件下,各个分区面积所占比例和所占滑坡比例趋势变化特征(如图 9—10 所示)。随着降雨量的增加,在失稳分区和失稳分区与潜在不稳定总和分区中的区域面积所占比例和所占滑坡比例均有不断增加的趋势,说明延安地区地质灾害危险性随着降雨量的逐增加而加剧。

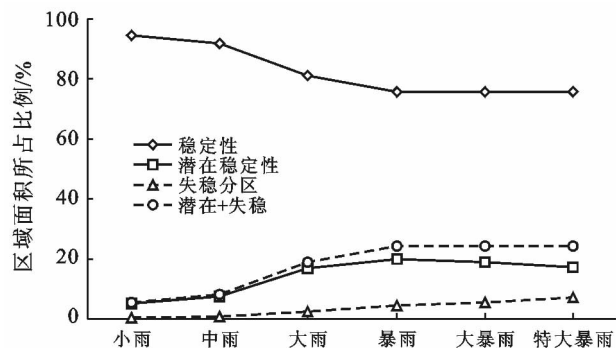


图 9 延安市区域不同降雨条件下区域面积所占比例变化

另外有两条分界点值得注意,一是降雨为中雨的分界点。从图 9—10 可以看出,从中雨向暴雨增加的过程中,稳定性分区两条比例线迅速下降,说明已经超过了触发地质灾害的临界降雨阈值,危险性迅速加剧。另外一处则是暴雨的分界线,降雨量超过暴雨雨量时,4 条比例线的变化趋势都较为平缓,说明此时地质灾害的加剧趋势不明显,破坏趋于稳定。

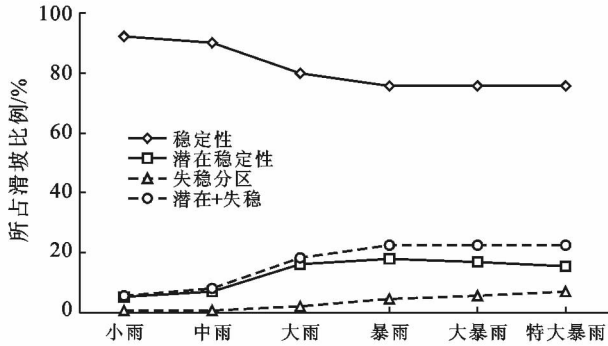


图 10 延安市区域不同降雨条件下所占的滑坡比例变化

5 结论

(1) 延安独特的地形地貌,加之强降雨条件和不合理的人类工程活动,为延安地区滑坡的发生创造了条件。但由于延安地区整体地形地貌较缓,地形起伏度较小,相对高差较小,坡度较缓,在降雨条件从暴雨至特大暴雨的变化过程中,不稳定区域面积比例和所占滑坡比例的增加或减小趋势都较为平缓,变化不甚明显,甚至没有发生变化;处于极稳定状态下的区域,区域所占面积占有相当大的比例,均已达到 70% 以上。

(2) 延安地区滑坡危险性表现出一定空间差异性。随着降雨量增大,地势低洼、坡度较大区域不稳定区逐渐扩大由低到高逐渐扩展到梁峁坡和黄土梁峁顶等坡度较小的斜坡。此外,随着降雨量的逐渐增大,失稳分区中的区域面积所占比例和所占滑坡比例逐渐增加,稳定区域面积占比和所占滑坡比例逐渐降低,说明区内稳定区域正向失稳区域转化。

[参 考 文 献]

- [1] 王志荣,王念秦. 黄土滑坡研究现状综述[J]. 中国水土保持, 2004(11):16-18.
- [2] 王念秦,张俦元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州:兰州大学出版社, 2005.
- [3] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7):1297-1312.
- [4] 许领,戴福初,闵弘. 黄土滑坡研究现状与设想[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3):236-242.
- [5] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4):530-540.
- [6] 康超,谌文武,张帆宇. 基于 DEM 的分布式斜坡稳定性模型在黄土沟壑区浅层滑坡中的应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010, 41(5):1987-1992.
- [7] 武利. 基于 SINMAP 模型的区域滑坡危险性定量评估及模型验证[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(2):35-39.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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, 30:461-477.
- [11] Begueria S, Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management[J]. Natural Hazards, 2006, 37:315-329.
- [12] Montgomery D R, Sullivan K, Greenberg H M. Regional test of a model for shallow landsliding[J]. Hydrological Processes, 1998(12):943-955.
- [13] Pack R T, Tarboton D G, Goodwin, C N. SINMAP User's Manual (Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00) [M]. Tarhoton: Utah State University, 2001.
- [14] Pack R T, Tarboton D G, Goodwin C N. SINMAP User's Manual[M]. Tarhoton: Utah State University, 1999.