

降雨作用下黄土浅层滑坡的危险性分析

同霄¹, 彭建兵^{1,2}, 朱兴华¹, 马鹏辉¹, 孟振江¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 在不同的降雨条件下, 对黄土浅层滑坡进行危险性分析, 为评价黄土地区浅层滑坡提供有效手段。[方法] 以甘肃省天水市为例, 根据 SHALSTAB 模型, 在 ArcGIS 中进行二次开发, 编写不同降雨量时浅层滑坡危险性分析程序, 计算不同降雨量下浅层黄土滑坡分布预测。[结果] 随着降雨量的增加, 浅层滑坡数量明显增多, 所占面积比例从 5 mm/d 的 0.166% 增加为 320 mm/d 的 3.624%, 上升了 20 倍左右。[结论] 当降雨量较小时, 浅层滑坡分布于雨水集中汇集的区域, 随着降雨的增加, 浅层滑坡沿着黄土沟谷向上游延伸。通过和实际发生滑坡灾害进行对比分析, 证明计算结果准确可信。

关键词: 黄土; 浅层滑坡; SHALSTAB 模型; 危险性分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0109-05

中图分类号: P642.22

文献参数: 同霄, 彭建兵, 朱兴华, 等. 降雨作用下黄土浅层滑坡的危险性分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3):109-113. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.020

Risk Analysis of Loess Shallow Landslides Under Different Rainfall Conditions

TONG Xiao¹, PENG Jianbing^{1,2}, ZHU Xinghua¹, MA Penghui¹, MENG Zhenjiang¹

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University,

Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources

and Geological Engineering of Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] To analyze the risk analysis of loess shallow landslide under different rainfall conditions in order to provide an effective way for the loess shallow landslide hazard analysis and evaluation. [Methods] The paper took Tianshui City of Gansu Province as a case study and wrote a program to analyze the shallow landslide hazard according to SHALSTAB model under ArcGIS platform. Then the distribution of shallow loess landslide was predicted with consideration of different rainfall conditions. [Results] With the increase of rainfall, the shallow landslides increased significantly, and the proportion increased from 0.166% to 3.624% when the rainfall increased from 5 mm/d to 320 mm/d, increased by 20 times. [Conclusion] When the precipitation is low, shallow landslides area main distributed in rainfall concentrated area. When the precipitation increases, shallow landslides extend upward along the loess valley. The comparison with the actual landslide disasters showed that the calculation results are accurate and reliable.

Keywords: loess; shallow landslide; SHALSTAB model; risk analysis

中国黄土分布面积为 $6.40 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占中国陆地面积的 6.3%, 在黄河中游地区, 西起贺兰山, 东到太行山, 北起长城, 南到秦岭几乎全部被黄土覆盖^[1]。黄土滑坡是黄土地区最为严重的地质灾害之一。据统计在陕北发育有 16 616 个黄土滑坡和土崩, 密度超过 5 个/ km^2 。在陇东和陇西, 从 20 世纪的 50 年代末到 1992 年, 共发生 14 109 个黄土滑坡, 密度超过 6 个/ km^2 ^[2]。在中国西北黄土地区, 降雨

季节分布不均, 集中在 7—9 月, 且多暴雨。黄土滑坡发生的时间及分布区域与降雨集中的季节及空间变化密切相关, 降雨是滑坡发育最为活跃的动力因素之一^[3]。1984 年 8 月, 陇南、天水因降大暴雨, 共诱发了 938 处黄土滑坡, 造成了严重的人身伤害和财产损失^[4]。黄土滑坡灾害每年造成大量的损失, 因此在黄土地区进行降雨型滑坡预测显得尤为重要。

近 30 a 来, 降雨型滑坡预测一直是滑坡研究中

收稿日期: 2015-09-08

修回日期: 2015-11-23

资助项目: 国家重点基础研究发展计划“黄土重大灾害及灾害链的发生、演化机制与防控理论”(2014cb744702); 中央高校基本科研业务费资助项目“泾河南岸高速远程滑坡运动机理试验研究”(自然科学类基础研究项目)(310826151046)

第一作者: 同霄(1987—), 男(汉族), 陕西省三原县人, 博士研究生, 研究方向为地质灾害。E-mail: tong@chd.edu.cn.

的核心问题,研究的主要内容是探究降雨与滑坡的关系,并且预测未来的滑坡状态。预测的内容包括:时间预测、强度预测和空间预测。时间预测主要是研究滑坡灾害发生的临界降雨强度,解决何时会发生滑坡这一科学问题。强度预测是研究不同降雨条件下滑坡的规模、滑坡发生的频次、滑坡的速度以及滑坡冲程等。空间预测的重点是降雨型滑坡区域性的频发区和易发区划分。随着 GIS 技术的广泛应用,采用半定量、定量方法,编制滑坡敏感性分区图在全世界已非常普遍。如今利用各种概率模型和灾害模型对区域危险性进行评价和划分已成为滑坡空间预测研究的主要趋势^[5-7]。

国内外的众多学者对降雨诱发的滑坡进行了较全面的研究。Dietrich 等^[8]1995 年在假定稳态水文条件的基础上提出了针对浅层滑坡稳定性的 SHALSTAB 模型。Pack 等^[9]1998 年在 SHALSTAB 模型的基础上建立了 SINMAP 模型。Baum 等^[10]2002 年基于 DEM 耦合了降雨入渗导致的瞬态孔隙压力变化模型和无限斜坡稳定性模型,提出了定量评价斜坡失稳的区域地形稳定性的 TRIGRS 模型。兰恒星等^[11]2003 年考虑降雨引起地下水的不同分布所造成的静水压力及地下水渗流产生的动水压力对滑坡稳定性的影响,提出了改进的 SINMAP 模型。

黄土地区浅层滑坡发育非常广泛,由于其具有分布规律性差、前期变形迹象小、分布范围大、面小点多等特征,目前还无法进行有效预测,因此给黄土地区工程安全带来严重威胁^[12]。本文拟根据 SHALSTAB 模型,在 ArcGIS 中进行二次开发,编写出不同降雨量时浅层滑坡危险性分析程序,将分析程序应用到黄土地区,以天水市为例,计算得到不同降雨量下浅层黄土滑坡分布预测,选取由于降雨诱发的潘集寨大桥滑坡,对比计算结果,证明危险性分析结果准确可信,以期为黄土浅层滑坡危险性分析评价提供有效手段。

1 研究区概况

天水市位于甘肃东南部,六盘山以西,秦岭北麓,陇西盆地东南部,天水、秦安、通渭一带。本文研究区域为天水市的秦州区和麦积区,面积 5 300 km²。自古近纪末至新近纪初,天水地区受东昆仑—秦岭断裂系左旋走滑活动控制,形成北西—南东向拉张盆地与隆起山地交错的古地形面貌^[13-14]。第四纪初期陇西盆地随青藏高原及周围山地一起抬升,剥蚀面解体,渭河及其支流下切,沿河两岸形成 6 级阶地,呈现出黄土梁、崩地貌以及山梁、沟壑等地形^[15]。研究区域海拔最高为 2 693 m,最低为 736 m,以山谷沟壑地形为主。东侧地区与南侧地区由于构造运动形成山梁

地貌。局部地区由于东西向的构造带断裂,形成渭河地堑,加上水流冲击与侵蚀堆积,最终出现渭河河谷地带。天水市城区建设、居民生活集中在北部地形平坦处,呈条带状展布,为典型的山间河谷盆地。在城市周边黄土沟谷发育,地形破碎、沟壑纵横,沟谷上游和下游海拔差较大,成 V 字形,切割深度大,斜坡高而且陡,从而使斜坡上部产生临空面,这为产生黄土滑坡、泥石流提供了地形条件。研究区域内岩性自下而上分别为白云岩、大理岩、板岩和片麻岩,其上覆盖了第三纪红色砂砾岩,红色、灰绿、青灰色黏土质泥岩,最上层依次为午城期、离石期和马兰期黄土,土层深厚,土质松软,这为滑坡、泥石流提供了物源条件。在降雨条件下,黄土力学性质降低,每年都会发生多处浅层滑坡灾害,造成道路封闭、沟谷堵塞、植被森林破坏。多期浅层滑坡形成的堆积物强度较低,多孔疏松,在降雨条件下会引发大规模滑坡,甚至转换为泥石流,由沟谷上游向下部平坦地区高速运动,造成严重的人身财产损失。

2 SHALSTAB 模型

SHALSTAB 模型是由美国伯克利大学的 Dietrich 和华盛顿大学的 Montgomery 在 1995 年提出并完善的。该模型主要是针对降雨诱发的浅层滑坡进行危险性分析。

SHALSTAB 模型以摩尔库伦破坏准则为基础:

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ ——土壤的抗剪强度 (Pa); c ——黏聚力 (Pa); σ ——正应力 (Pa); u ——孔隙水压力 (Pa); φ ——内摩擦角 (°)。下同。

如图 1 所示,基于无限边坡模型,假设地表、地下水位线、滑动面三者是平行的,将(1)式变换为:

$$\rho_s Z \cos \theta \sin \theta = c + (\rho_s Z \cos^2 \theta - \rho_w h \cos^2 \theta) \tan \varphi \quad (2)$$

$$\frac{h}{Z} = \frac{c}{\rho_w Z \cos^2 \theta \tan \varphi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} (1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi}) \quad (3)$$

式中: ρ_s ——土的密度 (kg/m³); ρ_w ——水的密度 (kg/m³); Z ——土壤厚度 (m); θ ——坡角 (°); h ——地下水位线高度 (m)。下同。

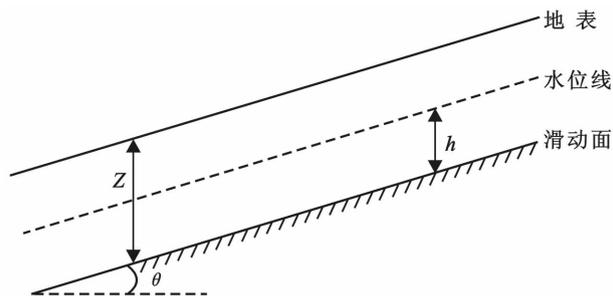


图 1 SHALSTAB 模型示意图

在考虑有效降雨量,即降雨量减去蒸发量,以及地形水文参数,结合 TOPOG 模型将达西定律方程转换为:

$$qa = bkh \cos \theta \sin \theta \quad (4)$$

式中: q ——降雨量(mm/d); a ——汇水面积(m^2); b ——排水宽度(m); k ——渗透系数(m/day); 下同。

将渗透系数用土壤导水系数和土壤深度来表示,(4)式可整理为:

$$Tb \sin \theta = bkZ \cos \theta \sin \theta \quad (5)$$

式中: T ——土壤导水系数(m^2/d)。下同。

综合(4)和(5)式得到:

$$\frac{h}{Z} = \frac{q}{T} \frac{a}{b \sin \theta} \quad (6)$$

(3) 式为无限边坡稳定性模型,(6)式为水文模型,将二者结合可以得到新的计算模型:

$$\frac{a}{b} = \frac{T}{q} \sin \theta = \frac{c}{\rho_w Z \cos^2 \theta \tan \varphi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi}\right) \quad (7)$$

式中: T/q ——降雨指标,当 $q > T$ 时,表明降雨量大于土体下渗能力,即在地表形成径流,当 $q < T$ 时,表明所有的降雨均下渗至土体内部,如果 q 比 T 大很多时,表明土层越容易饱和,斜坡越容易变的不稳定。

对于滑坡是否稳定,本文将 SHALSTAB 模型简化为(8)式中的两种类型:稳定或是不稳定。在 ArcGIS 中输入不同的降雨量,通过计算便可以得到每个栅格是否稳定。

$$\begin{cases} \frac{a}{b} \geq \frac{T}{q} \sin \theta \left[\frac{c}{\rho_w Z \cos^2 \theta \tan \varphi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi}\right) \right] & (\text{不稳定}) \\ \frac{a}{b} < \frac{T}{q} \sin \theta \left[\frac{c}{\rho_w Z \cos^2 \theta \tan \varphi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi}\right) \right] & (\text{稳定}) \end{cases} \quad (8)$$

3 危险性分析

3.1 计算结果

本文根据 SHALSTAB 模型,在 ArcGIS 软件中进行了二次开发,编写得到不同降雨量时浅层滑坡危险性分析程序,导入研究区域的 DEM 数据,输入土体的密度、黏聚力、内摩擦角、导水系数、土壤厚度和降雨量。参数输入后,ArcGIS 自动进行计算,计算完成后得到浅层滑坡危险性分析图。本文采用的天水地区 DEM 数据分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,计算参数如表 1 所示。降雨量选取考虑小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨这 6 种不同情况,具体取值如表 2 所示。

表 1 危险性分析计算参数

参数	黏聚力/ Pa	内摩擦角/ (°)	土壤深度/ m	导水系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	水的密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	土的密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
取值	45 000	27	2	65	1 000	1 700

表 2 降雨等级划分

降雨等级	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
24 h 降雨量	<10	10~25	25~50	50~100	100~200	>200
计算取值	5	20	40	80	160	320

提取 6 种不同降雨等级时降雨诱发的浅层滑坡数量,绘制得到图 2。从图 2 中可以看出,在降雨等级从小雨上升至特大暴雨的过程中,降雨诱发的浅层滑坡数量也随之变大,从最初的 10 747 个上升为 234 393 个,特大暴雨时诱发的浅层滑坡数目是小雨时的 20 多倍。

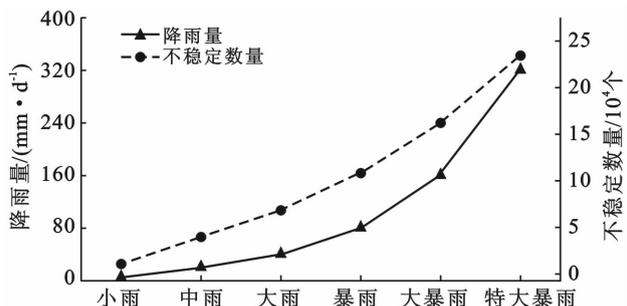


图 2 不同降雨等级时诱发的黄土浅层滑坡数量

将不同降雨等级时不稳定土体数量、计算得到不稳定百分比,以及统计得到由降雨诱发的滑坡数量等,整理如表 3 所示。可以看出当降雨等级为小雨时,降雨诱发的浅层滑坡面积占整个研究区域面积的 0.166%,当降雨等级上升至特大暴雨时,该数值上升为 3.624%。

本文 DEM 数据分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,计算中选取的浅层滑坡深度为 2 m,通过计算可以得到不稳定浅层滑坡的方量。当降雨等级为小雨时,不稳定的滑坡方量为 $1.90 \times 10^7 \text{ m}^3$,相当于 2 个特大型滑坡灾害,而当降雨等级变为特大暴雨时,不稳定的滑坡方量为 $4.15 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于发生了 40 个特大型滑坡灾害。经过统计,小雨时,共诱发滑坡 381 处,每处滑坡平均方量为 $5.00 \times 10^4 \text{ m}^3$;特大暴雨时,共诱发滑坡 420 处,每处滑坡的平均方量为 $9.88 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

表 3 黄土浅层滑坡危险性分析结果

降雨等级	降雨量/ (mm · d ⁻¹)	不稳定数量/ 个	不稳定滑坡方 量/10 ⁴ m ³	不稳定百分比	滑坡数量/处	滑坡平均方 量/10 ⁴ m ³
小雨	5	10 747	1 903.82	0.166	381	5.00
中雨	20	39 705	7 033.69	0.614	894	7.87
大雨	40	68 343	12 106.88	1.057	585	20.70
暴雨	80d	108 214	19 169.98	1.673	553	34.64
大暴雨	160	162 177	28 729.46	2.507	434	66.14
特大暴雨	320	234 393	41 522.43	3.624	420	98.79

观察危险性分析结果,当降雨量较小时,浅层滑坡数量很小,只有零星一些,随着降雨量的增加,浅层滑坡数量变多。初始阶段,浅层滑坡分布在沟谷下游处,因为 SHALSTAB 模型是基于地形因素计算得到栅格的汇水比和降雨入渗能力之间的关系,以此来判断栅格是否稳定的,所以在沟谷下游局部地区为雨水汇集的区域,出现浅层滑坡可能性较大。随着降雨量的增大,浅层滑坡数量也随之增加,多分布在发育在黄土沟谷中,且向着沟谷上游不断延伸,这说明当沟谷下部土体发生浅层滑坡后,随着降雨量的增加,沟谷上部的土体发生失稳滑坡的可能性变大。当降雨量进一步增大时,大量沟谷中浅层滑坡贯通出现,这表明沟谷内易发生大面积的浅层滑坡,堵塞沟壑,对下游造成破坏。

3.2 实例分析

天水市是中国滑坡、泥石流等地质灾害多发的城

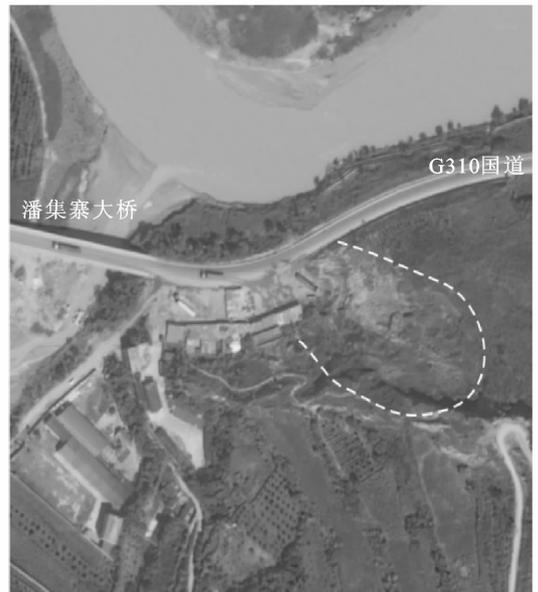
市之一,史料记载的较大滑坡灾害达 300 余次^[16]。根据统计,天水市全年降水量一般在 400~700 mm 之间,但是年内降水分配不均,降雨多集中在夏、秋两季,占年总降水量 77.4%^[17]。

本文选取在 2011 年 9 月 12 日 17 时,由于降雨诱发的潘集寨大桥滑坡灾害,通过对比 SHALSTAB 危险性分析结果和实际灾害情况,以此验证危险性分析结果的准确性。

由于阴雨天气影响,在 2011 年 9 月 12 日 17 时左右,G310 国道甘肃省天水市麦积区境内,潘集寨大桥东侧约 100 m 处的牛北公路发生了山体滑坡。所幸事发当时没有车辆经过,此次滑坡灾害没有造成人员伤亡。滑坡堆积物掩埋了 G310 国道,阻碍了交通,很大程度上影响了民众的生产生活。图 3a 为滑坡堆积体掩埋公路和滑坡后壁的照片。图 3b 为滑坡处的卫星影像。



(a) 滑坡照片



(b) 滑坡卫星影像

图 3 天水市麦积区 G310 潘集寨大桥滑坡

图 4 为危险性分析计算结果。选取阴雨天气,降雨量为 20 mm/d 进行计算。计算结果表明,在该降雨条件下,潘集寨大桥东侧约 100 m 处有不稳定的滑

坡点。对比 SHALSTAB 危险性计算结果和卫星影像,可以看出危险性计算结果和现实中的实际情况能较好的吻合。

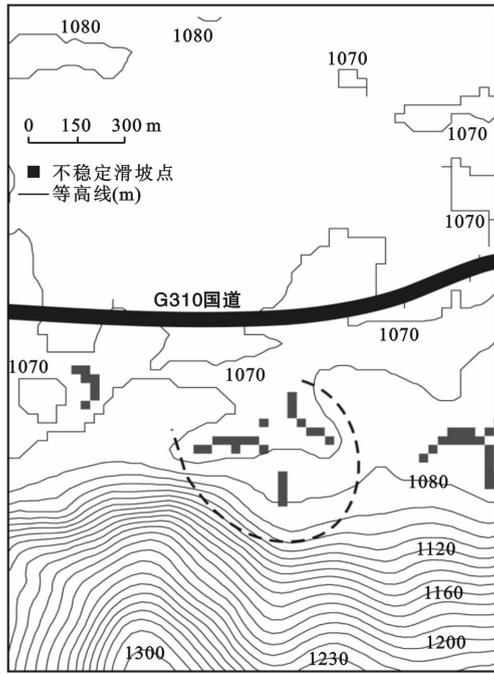


图4 SHALSTAB危险性计算结果

黄土地区浅层滑坡发育广泛,预测难度大,本文通过 ArcGIS 二次开发后,编写得到了不同降雨量下的浅层滑坡危险性分析程序,在输入实际降雨量后便可以进行实际预报分析。程序所需参数简单,只需输入具有代表性的土体物理参数即可进行浅层滑坡危险性分析。通过和实际灾害点的对比,可以看出危险性分析结果准确可信,这为黄土地区浅层滑坡评价提供了有效手段。该方法依然有很多需要改进的地方,比如土壤厚度 Z 值的确定以及如何考虑根系强度等等,并且为了能更加精确的进行危险性分析,需要获取高精度的 DEM 数据。这些都需要进一步研究,将计算结果和实际情况更好的吻合。

4 结论

(1) 随着降雨量的增加,浅层滑坡数量明显增多,所占面积比例从 5 mm/d 的 0.166% 增加为 320 mm/d 的 3.624%,上升 20 倍左右。

(2) 当降雨量较小时,浅层滑坡分布于雨水集中汇集的区域,随着降雨的增加浅层滑坡沿着黄土沟谷向上游延伸直至整个沟谷内整体贯通。

(3) 通过和实际发生的由降雨诱发的滑坡灾害进行对比分析,证明计算结果准确可信,该危险性分析程序为黄土地区浅层滑坡评价提供了有效手段。

[参考文献]

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [2] 雷祥义. 黄土高原地质灾害与人类活动[M]. 北京:地质出版社,2001.
- [3] 吴玮江,王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州:兰州大学出版社,2006.
- [4] 王念秦,张俤元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州:兰州大学出版社,2005.
- [5] 王兰民,袁中夏,石玉成,等. 黄土地震灾害区划指标与方法研究[J]. 自然灾害学报,1999(3):87-92.
- [6] 苏强. 基于 DEM 的黄土滑坡危险性评价研究[D]. 北京:中国地质大学,2006.
- [7] 邵铁全,彭建兵,刘云焕,等. 滑坡灾害超前预判技术研究[J]. 工程地质学报,2007,15(4):564-568.
- [8] Dietrich W E, Reiss R, Hsu M L, et al. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data[J]. Hydrological Processes, 1995,9(3/4):383-400.
- [9] Pack R T, Tarboton D G, Goodwin C N. The SINMAP approach to terrain stability mapping[C]//8th congress of the international association of engineering geology, Vancouver, British Columbia, Canada, 1998(21):25.
- [10] Baum R L, Savage W Z, Godt J W, et al. TRIGRS: A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis[R]. Colorado: US Department of the Interior and US Geological Survey, 2002.
- [11] 兰恒星,伍法权,周成虎,等. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测[J]. 科学通报,2003,48(5):507-512.
- [12] 庄建琦,彭建兵,张利勇. 不同降雨条件下黄土高原浅层滑坡危险性预测评价[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2013,43(3):867-876.
- [13] 张岳桥,马寅生,杨农,等. 西秦岭地区东昆仑—秦岭断裂系晚新生代左旋走滑历史及其向东扩展[J]. 地球学报,2005,26(1):1-8.
- [14] 袁宝印,郭正堂,郝青振,等. 天水—秦安一带中新世黄土堆积区沉积—地貌演化[J]. 第四纪研究,2007,27(2):161-171.
- [15] 李同录,刘超,李萍. 甘肃天水地区黄土极限状态边坡的统计分析[J]. 地球科学与环境学报,2013,35(2):107-114.
- [16] 吴玮江. 天水市滑坡泥石流灾害[J]. 水文地质工程地质,2003,30(5):75-78.
- [17] 朱文忠. 天水市地质灾害现状与防治对策[J]. 甘肃科技,2004,20(6):12-13.