

doi:10.3799/dqkx.2014.118

降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响

罗渝^{1,2}, 何思明^{1,2*}, 何尽川³

1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都 610041

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041

3. 中国市政工程西南设计研究总院, 四川成都 610081

摘要: 在降雨与浅层滑坡稳定性关系的研究中, 目前的研究往往忽略了降雨类型的影响. 因此, 选取4种具有代表性的降雨类型: 均匀型、递增型、递减型以及峰值型为对象, 基于Rosso提出的降雨强度与地下水关系模型, 构建考虑降雨类型的浅层滑坡地下水位高度随降雨时间的变化关系, 研究不同降雨类型对浅层滑坡地下水位变化的影响. 进而, 结合无限边坡理论, 建立浅层滑坡的稳定性计算模型, 研究不同降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响. 研究表明: 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响是明显的, 递增型降雨作用下的浅层滑坡安全系数最小, 其次是均匀型降雨, 再次是峰值型降雨, 最大的是递减型降雨; 同时在确定浅层滑坡临界降雨量和进行区域浅层滑坡易发性研究时降雨类型的影响不容忽视.

关键词: 地下水; 浅层滑坡; 降雨类型; 稳定性; 无限边坡; 地质灾害.

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2014)09-1357-07

收稿日期: 2013-12-17

Effect of Rainfall Patterns on Stability of Shallow Landslide

Luo Yu^{1,2}, He Siming^{1,2*}, He Jinchuan³

1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China

3. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China

Abstract: The effect of the rainfall patterns is often ignored in studies of the relationship of rainfall versus shallow stability of landslide. This paper takes four representative rainfall patterns including uniform, delayed, advanced and central ones as the object of study to explore the effect of the rainfall patterns on the height of ground water, based on the hillslope hydrological model proposed by Rosso. And then the infinite slope failure model is applied to establish the stability calculation model for shallow landslide, and the effect of the rainfall patterns on shallow landslide stability is analyzed. Results show that rainfall patterns have strong effect on the stability of shallow landslide, with the delayed rainfall having the lowest safety factor for shallow landslide, followed by uniform rainfall, then central rainfall, and lastly the advanced rainfall. It is found necessary to consider the effect of rainfall patterns for determining of the critical rainfall and analyzing of the susceptibility of shallow landslide in a region.

Key words: underground water; shallow landslide; rainfall patterns; stability; infinite slope; geologic hazard.

我国是世界上滑坡灾害最严重的国家之一. 据统计(李媛等, 2004; 许建聪等, 2005; 刘新喜等, 2007), 在我国已发生的滑坡灾害中, 90%都是由大气降雨直接诱发或与降雨有关的, 可见降雨是诱发滑坡, 特别是浅层滑坡的主要因素. 大量的降雨滑坡

研究事实表明(刘汉东, 1996; 李天斌等, 1999; 郭璇等, 2005; 魏宁等, 2006), 降雨诱发的滑坡灾害, 其滑坡体厚度都不大, 主要以浅层滑坡为主, 同时降雨诱发的浅层滑坡发生大都是顺基岩面发生的. 在对降雨诱发浅层滑坡的诱发机理的认识中, 一般认为是

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41401004, 41272346); 国家科技支撑项目(No. 2011BAK12B03); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室自主基金项目.

作者简介: 罗渝(1981-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事降雨滑坡形成机理及防治研究. E-mail: ly@imde.ac.cn

* 通讯作者: 何思明, E-mail: hsm@imde.ac.cn

由于降雨的入渗,地下水位的上升导致边坡土体饱和,土体的有效强度降低,从而引起浅层滑坡的发生 (Montgomery and Dietrich, 1994; Wilkinson *et al.*, 2002; Casadei *et al.*, 2003; Chang and Chiang, 2009; Rosso *et al.*, 2006; Wu and Slide, 2010).

在降雨诱发的浅层滑坡研究中, Montgomery and Dietrich(1994)建立了降雨强度与地下水位高度的关系,进而建立浅层滑坡稳定性计算模型,研究降雨强度对浅层滑坡的稳定性影响; Rosso *et al.* (2006)建立了考虑降雨强度和降雨历时的坡地水文模型,其中包含多种土体特性(如孔隙比、坡体内摩擦角等)的浅层降雨滑坡稳定性计算模型,研究降雨强度和历时下的浅层滑坡稳定性. 上述所建立的降雨与地下水位高度的关系,都反映的是某一降雨强度下(即在整個降雨过程中,降雨强度不发生改变的情况)的降雨与坡体内地下水位高度的关系,然后他们再进行浅层滑坡的稳定性判识. 然而在实际降雨过程中,降雨强度并不是一致的;根据降雨类型的不同,降雨强度在整个降雨历程中是不同的. 现阶段在降雨滑坡的研究中,考虑了降雨类型影响的浅层滑坡稳定性研究几乎没有.

因此,本文以均匀型、递增型、递减型以及峰值型这 4 种具有代表性的降雨类型为对象,基于 Rosso *et al.* (2006)提出的坡地水文模型,构建考虑降雨类型影响的浅层滑坡地下水位高度随降雨时间的变化关系,研究降雨类型对浅层滑坡地下水位变化的影响,进而结合无限边坡理论,建立浅层滑坡的稳定性计算模型,研究降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响.

1 Rosso 坡地水文模型

Rosso 坡地水文模型的建立基于以下假设:滑坡及隔水层埋深较浅;地下水位线与坡面相互平行;坡面流是在坡体物质完全饱和之后产生的,即边坡的地下水位高度大于隔水层埋深则高出的部分为产生的坡面流,同时坡面流是平行于坡面的均匀水流;区域网格由相互垂直的地形等高线和水流流线划分而成.

如图 1b,假设滑坡体厚度为 z (m),地下水位高度为 h (m),坡面与水平面夹角为 θ (°),降雨强度为 p (mm/d),某一网格以上的上游集雨面积为 a (m²) (即雨水将汇集到计算网格单元的所有地形单元的

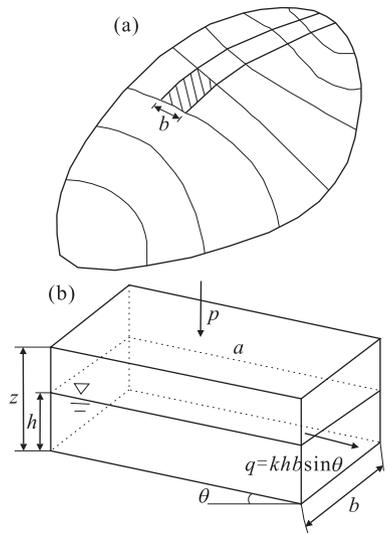


图 1 坡地水文模型

Fig. 1 Hydrological model of shallow slope

a. 单元网格图平面视图; b. 地下水文模型

面积总和,如图 1a,网格宽度为 b (m). 由此,根据水量的平衡关系及达西渗透定理,建立有如下的降雨与地下水位关系式:

$$h = \frac{apz}{Tb \sin \theta} \left[1 - \exp\left(-\frac{1+e}{e-e_s} \frac{Tb \sin \theta}{az} t\right) \right] + h_0 \exp\left(-\frac{1+e}{e-e_s} \frac{Tb \sin \theta}{az} t\right), \frac{ap}{Tb \sin \theta} > 1, \quad (1)$$

式中, h 为地下水的高度(m); h_0 为降雨初始潜水深度(m); s_r 为土体的饱和度(%); e 为土体孔隙比; t 为降雨历时(d); $T = kz$ 为沿边坡铅直深度的饱和渗透系数(m²/d); k 为土体饱和的渗透系数(m/d); 其他符号意义同前.

2 考虑降雨类型影响改进 Rosso 模型

由式(1)可知,Rosso 模型建立的降雨与地下水关系式,反应的是在某一降雨强度下,坡体内地下水位高度随降雨历时的变化. 然而在实际降雨过程中,根据降雨类型的不同,降雨强度在整个降雨历程中是不同的,故为反映降雨类型与地下水位关系,笔者需要对 Rosso 模型进行改进. 根据降雨过程中,降雨强度的变化,将降雨分为均匀型、递增型、递减型以及峰值型降雨 (Ng *et al.*, 2001; Tsai, 2008) (图 2). 因此,基于这 4 种降雨类型,建立降雨与地下水位高度的关系.

根据这 4 种降雨类型的特点,可以建立降雨强

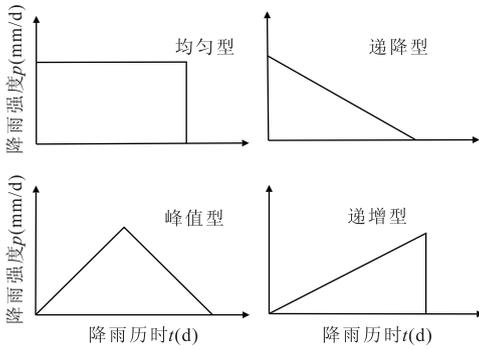


图 2 4 种降雨类型的降雨强度时间

Fig. 2 Rainfall intensity versus time of four rainfall patterns

度与降雨时间的关系式:

$$p = mt + n, t \leq t_n \quad (2)$$

式中, t_n 为降雨历时(d); t 为从降雨开始之后的时间; m 、 n 为常数, 根据实际降雨情况选取. 由(2)式可见, 当 $m=0$ 时, 降雨类型为均匀型; 当 $m>0, n=0$ 时, 降雨类型为递增型; 当 $m<0, n>0$ 时, 降雨类型为递减型; 对于峰值型降雨, 可以将其看成是递增型降雨和递减型降雨的组合, 计算时, 先以递增型降雨进行计算, 然后将递增型降雨结束时的地下水位作为递减型降雨开始时的初始水位, 继续计算.

同理, 根据 Rosso 模型建立的水量的平衡关系及达西渗透定理, 可以得到如下关系式:

$$a(mt + n) - bhk \sin\theta = a \frac{e}{1+e} (1 - s_r) \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

通过式(3), 可求解出, 当降雨初始潜水深为 h_0 , 浅层滑坡内地下水位高度 h 的关系式:

$$h = \frac{az}{Tb \sin\theta} \left[n - \frac{amz(e - es_r)}{Tb \sin\theta(1 + e)} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{1 + e}{e - es_r} \frac{Tb \sin\theta}{az} t\right) \right] + h_0 \exp\left(-\frac{1 + e}{e - es_r} \frac{Tb \sin\theta}{az} t\right) + \frac{azmt}{bT \sin\theta} \quad (4)$$

式中各符号意义同前.

3 基于无限边坡的浅层滑坡稳定性计算模型

对于浅层滑坡而言, 通常认为滑移面与坡面是平行的, 其潜在滑移面的埋深为 z . 一般而言, 其深度 z 较滑坡的长度相比是一个较小的值. 由于滑坡体的厚度较其长度小很多, 故边界作用的影响是可以忽略的, 因此, 可以将其降雨滑坡简化为半无限边坡模型, 其滑坡的稳定性可以通过分析单位宽度、单

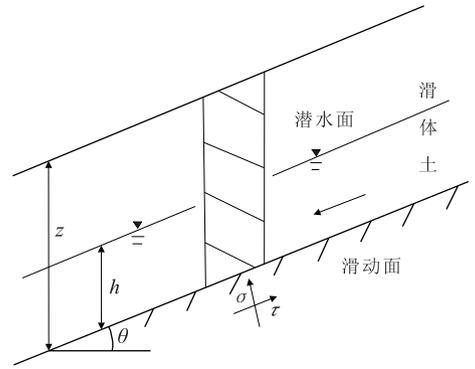


图 3 浅层滑坡稳定性计算模型

Fig. 3 Computation model for stability analysis of shallow landslide

位长度下的单元体稳定性来确定. 如图 3 所示, 假设浅层滑坡体的厚度为 z (m), 地下水与坡面平行高度为 h (m), 浅层滑坡的坡度为 θ (°).

根据摩尔库伦定律, 单元体底部产生的抗滑力为:

$$\tau_f = c + [(z - h)\gamma \cos\theta + \gamma' h \cos\theta] \cos\theta \tan\varphi \quad (5)$$

式中, τ_f 为单元体受到的抗滑力(kN); c 为滑体土的粘聚力(kPa); φ 为滑体土的 σ 内摩擦角(°); γ 、 γ' 分别为滑体土的容重和浮容重(kN/m³); 其他符号同前.

作用在单元体上的下滑力为:

$$\tau_s = [(z - h)\gamma + h\gamma_{sat}] \cos\theta \sin\theta \quad (6)$$

式中, τ_s 为单元体受到的下滑力(kN); γ_{sat} 分别为滑体土的饱和容重(kN/m³); 其他符号意义同前.

根据极限平衡原理, 结合式(5)和式(6), 浅层滑坡的安全系数为:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_s} = \frac{c + [(1 - \omega)\gamma + \omega\gamma'] z \cos^2\theta \tan\varphi}{[(1 - \omega)\gamma + \omega\gamma_{sat}] z \sin\theta \cos\theta} \quad (7)$$

式中, F_s 为浅层滑坡的安全系数; $\omega = h/z$, 故 ω 的取值范围为: $0 \leq \omega \leq 1$; 其他符号意义同前.

从(7)式可以看出, 当 $F_s < 1$, 说明浅层滑坡处于不稳定状态; $F_s = 1$, 说明浅层滑坡处于临界状态; $F_s > 1$, 说明浅层滑坡处于稳定状态. 安全系数 F_s 值是反映浅层滑坡稳定性的关键因素. 结合前面对地下水位高度与降雨类型的关系分析, 可以求得在不同类型降雨作用下, 在不同时刻浅层滑坡体内的地下水位高度, 如(4)式, 并将其结果带入(7)式, 就可以推求出不同降雨类型下, 不同降雨时刻浅层滑坡的安全系数, 研究降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响.

4 算例与分析

应用本文提出的理论方法,笔者研究了前面所述的 4 种不同降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响.选取降雨滑坡的流域面积 $a=0.05 \text{ km}^2$, 滑坡厚度 $z=1 \text{ m}$, 坡角 $\theta=35^\circ$, 滑坡体渗透参数 $T=120 \text{ m}^2/\text{d}$, 选取流域面积 a 与网格宽度 b 之比 $a/b=200$, 孔隙比 $e=1$, 饱和度 $s_r=0.5$, 容重为 $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$, 饱和容重 $\gamma_{\text{sat}}=20 \text{ kN/m}^3$, 粘聚力 $c=0.5 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=38^\circ$, 选择降雨量和持续时间分别为 $Q=250 \text{ mm}$ 和 $t_n=10 \text{ h}$.

4.1 降雨类型对地下水位高度的影响

根据假定的降雨量和降雨历时,由(2)式可以得出:均匀型降雨 $m=0, n=0.025$; 递增型降雨 $m=0.005, n=0$; 递减型降雨 $m=-0.005, n=0.05$; 对于峰值型降雨,其降雨持时的中间时刻其降雨强度最大,因此有: $t \leq t_n/2$ 时, $m=0.01, n=0$; $t_n/2 < t \leq t_n$ 时, $m=-0.01, n=0.05$.

将上述不同降雨类型 m, n 值代入(4)式,可以得到不同降雨类型、不同降雨时刻下的浅层滑坡地下水位高度 h (见图 4).

从图 4 可以看出,随着降雨时间的增加,地下水位高度不断升高,然而降雨类型不同其地下水位高度升高的速度不同.在降雨历程的前 5 h 中,递减型降雨使得地下水位上升最快,其次是均匀型降雨,然后是峰值型降雨,递增型降雨最慢;然而在后 5 h 中,地下水位的上升速度变为:递增型降雨最快,均匀型降雨其次,递减型降雨最慢.这是由于不同降雨类型(均匀型降雨除外)其降雨强度随时间的变化不同,如递减型降雨的降雨强度随着降雨时间的增加是由大到小的,故其地下水位的上升速度先快后慢,

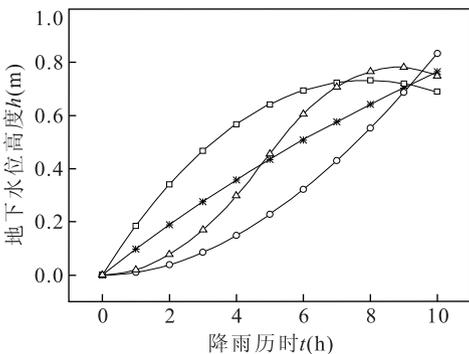


图 4 不同降雨类型下的地下水位与降雨时间关系

Fig. 4 Ground water level versus time for different rainfall patterns

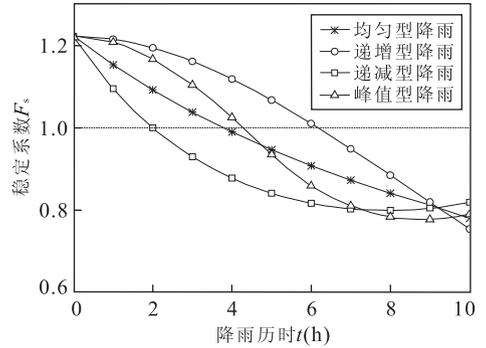


图 5 不同降雨类型下的浅层滑坡稳定性系数与降雨时间关系

Fig. 5 Safety factor of shallow landslide versus time for different rainfall patterns

均匀型降雨由于降雨强度不随降雨时间变化,故其地下水位的上升速度在降雨历程中是一致的.同时在降雨结束时刻,不同降雨类型下的地下水位高度也是不一样的,其中递增型降雨下的地下水位最高,其次是均匀型降雨,再次是峰值型降雨,最后是递减型降雨.可见,在降雨量和降雨历时相同的情况下,降雨类型对浅层滑坡地下水位高度的影响是明显的.

4.2 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响

由前面的理论分析可见,地下水位的上升与浅层滑坡的稳定性是密切联系的,如式(7).因此将不同降雨类型、不同降雨时刻下的浅层滑坡地下水位高度 h , 带入式(7)可以求解出在不同降雨类型,不同降雨时间下浅层滑坡的安全系数,如图 5.

从图 5 可以看出,在降雨历程中,随着降雨时间的增加,安全系数值不断减小;降雨类型不同,浅层滑坡的稳定性系数降低速度不同,这是由于降雨类型不同其降雨强度随时间的变化不同;在降雨量和降雨历时相同的情况下,不同类型降雨作用下的浅层滑坡在降雨结束时刻的稳定性是不同的,递减型降雨最大,其次是峰值型降雨,再次是均匀型降雨,最小的是递增型降雨.

对于稳定性处于临界状态附近的浅层滑坡而言,不同降雨类型导致其发生失稳破坏的临界时刻是不一样的(图 5),如递减型降雨的临界时刻为 $t=2.00 \text{ h}$, 均匀型降雨为 $t=3.77 \text{ h}$, 峰值型降雨为 $t=4.28 \text{ h}$, 而递增型降雨为 $t=6.17 \text{ h}$. 可见,递减型降雨是触发浅层滑坡发生最早的降雨,其次是均匀型降雨,再次是峰值型降雨,递增型降雨最晚.同时,根据不同类型降雨下的浅层滑坡失稳破坏临界时刻,可以得到 4 种降雨类型下浅层滑坡失稳破坏所需要

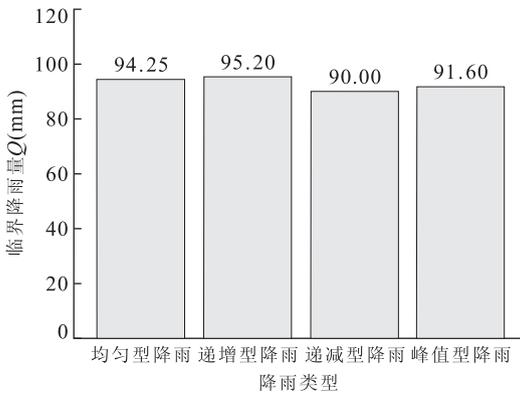


图 6 不同降雨类型下浅层滑坡的临界降雨量值

Fig. 6 The critical rainfall of different rainfall patterns

的临界降雨量,如图 6 所示. 在不同类型降雨的作用下,浅层滑坡失稳破坏所需要的临界降雨量是不同的,其中递减型降雨最小,其次是峰值型降雨,再次是均匀型降雨,递增型降雨最大.

综上,降雨类型对于浅层滑坡稳定性的影响是明显的,同时在确定其临界降雨量的时候降雨类型的影响也是不容忽视的.

5 应用研究

5.1 研究区域

深溪沟位于都江堰市区以北约 18 km,为白沙河左岸一支流,属虹口乡深溪村一、二、三社分布区. 深溪沟流域内不良地质现象类型多,除正常风化卸荷外,崩塌、滑坡及泥石流均有分布,不过以滑坡、崩塌为主. 根据成都市国土资源局资料统计,都江堰区内的由于降雨所诱发的滑坡灾害以浅层滑坡为主,同时滑坡体厚度多集中在 1 m 左右. 由此在进行本文所提方法的应用中,取滑坡体厚度为 $z=1$ m,同时不考虑有初始地下水的影响,即 $h_0=0$. 流域内出露主要基岩地层有三叠系上统须家河组 (T_3x)、泥盆系中统养马坝组 (D_2)、震旦系下统 (Za),不考虑土体粘聚力的影响,研究不同类型降雨条件下该研究区域的浅层滑坡稳定性分布. 选择 4 种降雨类型的降雨量 $Q=250$ mm、降雨历时 $t_n=10$ h,其他参数选取见表 1.

5.2 不同降雨类型下的浅层滑坡稳定性分区

基于本文建立的考虑降雨类型的地下水位高度随降雨时间的变化关系以及浅层滑坡的稳定性计算模型,借助 GIS 技术手段,对研究区的每一个栅格 ($25m \times 25m$) 进行计算分析,获得研究区内每一个

表 1 各岩组的物理力学指标参数

Table 1 The physical-mechanical properties of each petro-fabric

岩土类别	天然密度 $P(kN/m^3)$	导水率 $T(m^2/d)$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
三叠系上统须家河组	21.0	70	40
泥盆系中统养马坝组	19.6	95	38
震旦系下统	17.6	75	33

栅格在不同降雨类型下的稳定性,从而获得研究区域在不同降雨类型下的浅层滑坡稳定性分布,如图 7. 图 8 为递增型降雨下深溪沟流域不稳定浅层滑坡分布区与递减型降雨下不稳定浅层滑坡分布区之间的重叠对比图. 同时给出了该流域内不同降雨类型下不稳定区面积占该区域总面积的百分比,如表 2.

从图 7 可以看出,4 种降雨类型下,该流域内的浅层滑坡不稳定区分布基本一致. 从图 8 中可以清楚地看出递增型降雨作用下的不稳地浅层滑坡分布区较递减型降雨作用下的分布明显增多. 表 2 的计算数据结果显示,不同降雨类型下浅层滑坡的不稳定区面积是不同的,递增型降雨作用下的浅层滑坡不稳定区面积最大,其次是均匀型降雨,再次是峰值型降雨,最后是递减型降雨. 由此可以得出:降雨类型对区域浅层滑坡稳定性区分布的影响明显,不同降雨类型下的浅层滑坡不稳定区域分布是不同的. 也就是说在某一区域,由于降雨类型的不同导致该区域浅层滑坡的稳定性是不同的. 因此在进行区域浅层滑坡稳定性判识的时候考虑降雨类型的影响是十分必要的.

6 结论

(1)在降雨量和降雨历时相同的情况下,降雨类型对浅层滑坡内地下水位高度的影响是明显的,在降雨结束时刻的地下水位高度:递增型降雨最高,其次是均匀型降雨,再次是峰值型降雨,最后是递减型降雨.

(2)在降雨量和降雨历时相同的情况下,递增型降雨作用下的浅层滑坡安全系数最小,其次是均匀型降雨,再次是峰值型降雨,最大的是递减型降雨.

(3)当浅层滑坡稳定性接近临界状态时,递减型降雨是触发浅层滑坡发生时刻最早的降雨,其次是均匀型降雨,再次是峰值型降雨,递增型降雨最晚;同时浅层滑坡启动所需要的临界降雨量为:递减型降雨最小,峰值型降雨其次,再次是均匀型降雨,递

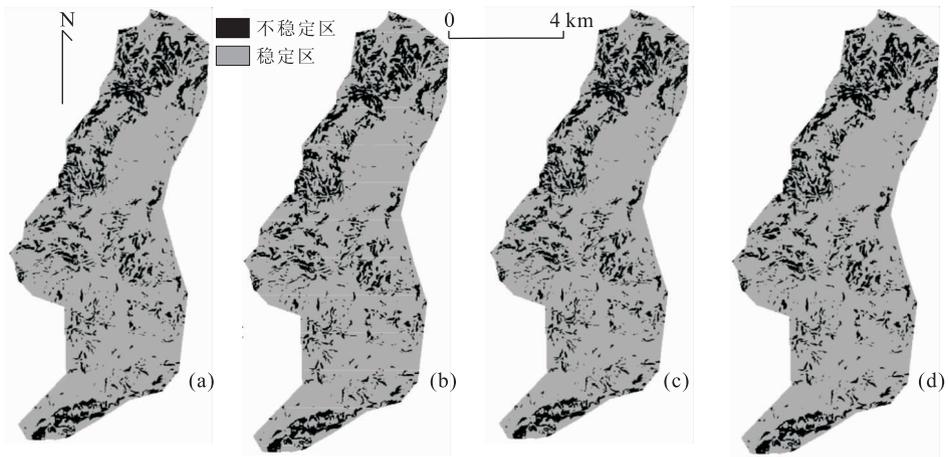


图 7 不同降雨类型下深溪沟流域的不稳定浅层滑坡分布

Fig. 7 The distribution of unstable shallow landslide in Shenxigou watershed under different rain patterns

a. 递增型降雨; b. 均匀型降雨; c. 峰值型降雨; d. 递减型降雨

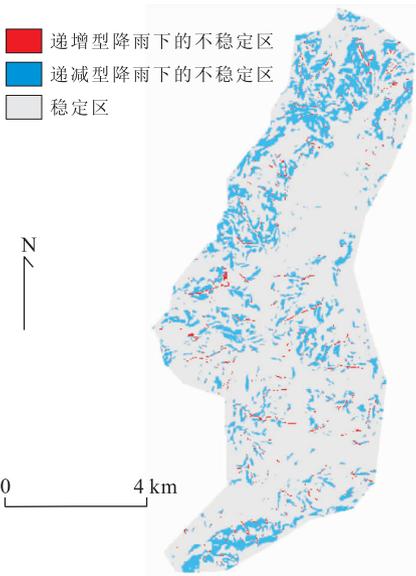


图 8 递增型降雨与递减型降雨作用下的不稳定浅层滑坡分布区重叠对比

Fig. 8 The overlap comparison of the unstable shallow landslide distribution in Shenxigou watershed between rain pattern of delayed and advanced

表 2 不同降雨类型下,浅层滑坡不稳定区的面积比

Table 2 The ratio of the unstable area to the total area under the different rainfall patterns

降雨类型	递减型	递增型	峰值型	均匀型
面积比	0.182 7	0.242 3	0.183 8	0.189 0

增型降雨最大。

(4)通过对深溪沟流域进行浅层滑坡稳定性分区的应用研究,其结果表明降雨类型对不稳定浅层滑坡区域分布的影响明显.不同的降雨类型下浅层

滑坡不稳定区的面积不同,递增型降雨最大,均匀型降雨其次,再次是峰值型降雨,最后是递减型降雨。

(5)研究表明浅层滑坡的稳定性受降雨类型的影响明显,因此在区域浅层滑坡临界降雨量确定以及易发性研究中,考虑降雨类型的影响是十分必要的。

References

Casadei, M., Dietrich, W. E., Miller, N. L., 2003. Testing a Model for Predicting the Timing and Location of Shallow Landslide Initiation in Soil-Mantled Landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(9): 925—950. doi:10.1002/esp.470

Chang, K., Chiang, S., 2009. An Integrated Model for Predicting Rainfall-Induced Landslides. *Geomorphology*, 105(3—4): 366—373. doi:10.1016/j.geomorph.2008.10.012

Guo, X., Zhao, C. G., Yu, W. W., 2005. Stability Analysis of Unsaturated Soil Slope and Its Progress. *China Safety Science Journal*, 15(1): 14—18 (in Chinese with English abstract).

Li, T. B., Chen, M. D., Wang, L. S., 1999. Real-Time Tracing Prediction of Landslides. Chengdu University of Science & Technology Press, Chengdu (in Chinese).

Li, Y., Meng, H., Dong, Y., et al., 2004. Main Types and Characteristics of Geo-Hazard in China—Based on the Results of Geo-Hazard Survey in 290 Counties. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 15(2): 29—34 (in Chinese with English abstract).

Liu, H. D., 1996. Theory and Method of Forecasting Occurrence of Slope Failure. The Yellow River Water Con-

servancy Press, Zhengzhou (in Chinese).

- Liu, X. X., Xia, Y. Y., Cai, J. J., et al., 2007. Study on Stability of High-Filled Embankment Slope of Highly Weathered Soft Rock under Rainfall Infiltration. *Rock and Soil Mechanics*, 28(8): 1705—1709 (in Chinese with English abstract).
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., 1994. A Physically Based Model for Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water Resources Research*, 30(4): 1153—1171. doi:10.1029/93WR02979
- Ng, C. W. W., Wang, B., Tung, Y. K., 2001. Three-Dimensional Numerical Investigations of Groundwater Responses in an Unsaturated Slope Subjected to Various Rainfall Patterns. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5): 1049—1062. doi:10.1139/cgj-38-5-1049
- Rosso, R., Rulli, M. C., Vannucchi, G., 2006. A Physically Based Model for the Hydrologic Control on Shallow Landsliding. *Water Resources Research*, 42(6): w06410—1—16. doi:10.1029/2005WR004369
- Tsai, T. L., 2008. The Influence of Rainstorm Pattern on Shallow Landslide. *Environmental Geology*, 53(7): 1563—1569. doi:10.1007/s00254-007-0767-x
- Wei, N., Qian, P. Y., Fu, X. D., 2006. Effects of Rainfall Infiltration and Evaporation on Soil Slope Stability. *Rock and Soil Mechanics*, 27(5): 778—781, 786 (in Chinese with English abstract).
- Wilkinson, P. L., Anderson, M. G., Lloyd, D. M., et al., 2002. Landslide Hazard and Bioengineering: Towards Providing Improved Decision Support through Integrated Numerical Model Development. *Environmental Modelling and Software*, 17(4): 333—344. doi:10.1016/S1364-8152(01)00078-0
- Wu W., Slide, R. C., 2010. A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins. *Water Resources Research*, 31(8): 2097—2110. doi:10.1029/95WR01136
- Xu, J. C., Shang Y. Q., Chen K. F., et al., 2005. Analysis of Shallow Landslide Stability under Intensive Rainfall. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(18): 3246—3251 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郭璇, 赵成刚, 于威威, 2005. 非饱和土边坡稳定的安全分析及进展. *中国安全科学学报*, 15(1): 14—18.
- 李天斌, 陈明东, 王兰生, 1999. 滑坡实时跟踪预报. 成都: 成都科技大学出版社.
- 李媛, 孟晖, 董颖, 等, 2004. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析. *中国地质灾害与防治学报*, 15(2): 29—34.
- 刘汉东, 1996. 边坡失稳定时预报理论与方法. 郑州: 黄河水利出版社.
- 刘新喜, 夏元友, 蔡俊杰, 等, 2007. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究. *岩土力学*, 28(8): 1705—1709.
- 魏宁, 茜平一, 傅旭东, 2006. 降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响. *岩土力学*, 27(5): 778—781, 786.
- 许建聪, 尚岳全, 陈侃福, 等, 2005. 强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析. *岩石力学与工程学报*, 24(18): 3246—3251.