

李秀珍, 何思明, 王震宇, 等. 降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型适用性分析[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 34-38. [Li Xiuzhen, He Siming, Wang Zhenyu, et al. Research progress of physical models of slope instability induced by rainfall infiltration[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 34-38.]

降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型适用性分析*

李秀珍^{1,2}, 何思明^{1,2}, 王震宇³, 朱鲜花⁴

(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. 四川交通职业技术学院, 四川 成都 611130; 4. 四川省地矿局四〇四地质队, 四川 西昌 615000)

摘 要: 降雨是诱发斜坡失稳的一个十分重要的触发因素和动力来源。基于降雨入渗诱发斜坡失稳的物理过程建立相应的物理模型是评价降雨型滑坡的有效方法。在查阅大量相关资料的基础上, 按照降雨入渗模型和斜坡稳定性分析方法的不同, 将常用的降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型大致分为三大类: Green-Ampt 入渗模型与无限边坡稳定性方法相结合的模型(I类)、Richard 入渗理论与无限边坡稳定性方法相结合的模型(II类)、其他水文模型与边坡稳定性方法相结合的模型(III类), 并对各种物理模型的假设条件、优缺点和适用性等进行深入分析、归纳和总结, 以期在实践中降雨滑坡评价模型的选择提供理论依据。

关键词: 降雨入渗; 斜坡失稳; 物理模型; 类型; 适用性

中图分类号: P642; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)01-0034-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.008

降雨是诱发斜坡失稳的一个十分重要的触发因素和动力来源。国内外大量统计资料表明^[1-3], 60%~80%的滑坡发生于雨季, 而发生于冬春季的许多大型滑坡往往也与降水或融雪入渗的滞后效应有关(如2013年1月云南镇雄滑坡, 2013年3月西藏墨竹工卡滑坡等)。降雨滑坡在世界上不仅分布广泛, 发生频率高, 而且给人类造成的危害也极为严重。

滑坡与降雨关系密切已是早为人知的事实, 但人们对这种关系的认识和理解仍不充分。目前, 研究降雨诱发滑坡的规律主要有两种途径^[4]: 一是基于统计分析或试验方法寻求降雨与滑坡之间的相关性规律; 二是基于降雨入渗诱发斜坡失稳的物理过程建立相应的物理模型, 再利用这些物理模型进行定量评价。前者因其未考虑斜坡体失稳的物理机制, 仅仅适用于具有相似因子组合的地区或同类斜坡体发生滑坡的可能性评价, 一般无法考虑时间因素。后者以极限平衡法为基础, 考虑降雨入渗及地下水位改变对边坡稳定性的影响, 通过将降雨入渗理论与边坡稳定性分析方法有机耦合, 借以评价特定降雨条件下斜坡体的稳定性。由于物理模型不仅可以分析降雨入渗的饱和、非饱和行为, 也可以考虑降雨持续时间的动态影响, 而且还有利于结合实际降雨资料甚至预

报雨量对降雨条件下斜坡体的稳定性进行预测分析, 因此基于降雨入渗诱发斜坡体失稳的物理过程建立的物理模型已成为目前降雨滑坡的重点研究方向。

目前, 国内外学者已提出了多种降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型^[5-18], 如 Sinmap 模型、Shaltab 模型、Slip 模型、Iverson 模型、Rosso-Rulli-Vannucchi 模型以及 Trigrs 模型等。由于每种物理模型都是在一定的假设条件下提出的, 因此每种模型都有一定的适用条件。为了在实践中有针对性地选择适宜的物理模型对降雨滑坡进行评价, 本文拟在对降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型进行分析的基础上, 对降雨诱发滑坡的物理模型类型、优缺点和适用性等进行深入分析、归纳和探讨。

1 降雨滑坡物理模型的类型及适用性分析

降雨入渗模型与边坡稳定性方法有机结合是分析降雨型滑坡的有效方法。目前国内外研究者已提出了多种降雨入渗诱发滑坡的物理模型。按

* 收稿日期: 2014-05-14 修回日期: 2014-07-07

基金项目: 中科院重点部署项目子课题(KZZD-EW-05-01-02); 国家重点基础研究发展计划(2013CB733205); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室自主组织基金项目

作者简介: 李秀珍(1975-), 女, 内蒙古乌盟人, 博士, 副研究员, 从事地质灾害评价与预测研究. E-mail: lxzljt@sina.com

表 1 降雨入渗诱发滑坡物理模型总结^[5-15]

模型类型	模型名称及提出者	模型简述	主要假设	主要优缺点及适用性
I	Xie-Esaki-Cai 模型 ^[13]	将 Green-Ampt 入渗模型与基于饱和土的无限边坡稳定性分析模型有机结合, 得出了降雨诱发浅层滑坡的稳定性计算方法。		入渗模型未考虑坡面倾斜的影响, 只考虑了降雨强度大于土体饱和渗透系数的情形, 假定湿润锋以上土体全饱和与实际有差异。
	李宁模型 ^[5]	采用非饱和土 VG 模型与改进的 Green-Ampt 入渗模型对 Mein-Larson 降雨入渗模型进行改进, 并结合无限边坡提出一个降雨诱发浅层滑坡的简化计算模型。	此类模型假定降雨强度为恒定值; 在降雨入渗过程中湿润锋平行向下推进; 传导区含水率均匀分布; 滑坡的滑面为湿润锋面, 且平行于坡面; 坡体厚度远小于坡长。	考虑了坡面倾斜的影响, 适用于两种降雨条件: 低强度长持续时间和高强度短持续时间的降雨。
	Muntohar-Liao 模型	利用改进的 Green-Ampt 模型结合无限边坡稳定性分析模型提出, 并对非饱和土的特性做了近似处理, 提出了降雨诱发浅层滑坡的稳定性计算方法。		考虑了坡面倾斜的影响, 只适用于高强度短历时降雨条件。
	Cho-Lee 模型	对 Pradel-Raad 模型进行修正, 基于 Mein-Larson 降雨入渗模型提出一种近似计算方法(假定吸力内摩擦角等于有效摩擦角)来估算降雨条件下匀质边坡的浅层稳定性。		考虑了坡面倾斜的影响, 只适用于高强度短历时降雨条件。
II	Iverson 模型 ^[8]	以非饱和土渗流理论的 Richard 方程为基础, 依据短时强降雨和长历时低强度降雨入渗坡体水文过程的差异, 分别建立长期降雨和短期降雨入渗条件下坡体简化的水文模型, 并结合无限边坡稳定性分析理论, 建立暂态孔隙水压力作用下的坡体失稳的理论模型。	①边坡处于饱和或近饱和状态; ②入渗能力等于饱和渗透系数, 高估了入渗率; ③降雨入渗是一维无限向下入渗, 或者考虑降雨入渗量可无限积聚而不向外扩散	优点: 具有很好的理论框架, 考虑了由于降雨的入渗引起的斜坡法向上的瞬时孔隙水压力的重分布。缺点是参数较多, 模型较为复杂。
	Iverson 修正模型 ^[14]	在 Iverson 模型的基础上, 修正了 Iverson 模型中恒定入渗能力的假设, 考虑了更符合实际的降雨入渗过程。斜坡稳定性计算公式同 Iverson 模型一样, 只是计算暂态地下水压力水头的公式有所不同。	在 Iverson 模型①和③假定的基础上, 扩展了降雨入渗过程模型, 考虑了更一般的降雨入渗过程	
	Trigrs 模型	该模型是基于 Iverson 2000 的研究成果发展而来, 以无限边坡为基础, 根据 Iverson 提出的 Richards 方程的解析解, 估算不同时段降雨入渗导致孔隙水压力上升的变化, 进而判断边坡的稳定性。	基本假定与 Iverson 模型相同	
III	陈晓东模型	利用 Mein-Larson 入渗模型结合刚体极限平衡法, 建立了一个降雨型边坡稳定性分析的通用分析模式。	坡面线水平	模型简便、实用, 但未能考虑坡面倾斜的影响, 主要适用于浅层滑坡和已形成滑面的滑坡。
	严绍军模型	利用 Lumb 入渗模型, 结合太沙基一维固结理论建立了边坡在降雨期间的极限稳定性计算方法。	坡面线水平, 孔隙水压偏移正常情况只在滑带或滑带附近一定范围内发生	模型简便、实用, 但未能考虑坡面倾斜的影响, 主要适用于高强度的暴雨条件。
	Yeh-Lee 模型	利用 Philips 入渗模型结合无限边坡提出了降雨条件下非饱和边坡的安全系数的计算过程。	坡面线水平, 坡体厚度远小于坡长	模型简便、实用, 但未能考虑坡面倾斜的影响, 主要适用于高强度的暴雨条件。
	Sinmap 模型	该模型是在 Shalstab 模型的基础上建立了的, 将无限边坡稳定模型与稳定态水文学理论相结合, 建立定量分析模型。	①降雨强度与某特定地下水位间存在平衡关系; ②假定边坡土层参数均为某一恒定值。③地下水面线与地面线平行	综合考虑影响地表稳定性的地形地貌、地质、土壤、植被、水文及气候等因素, 忽略了由于降雨入渗引起的斜坡法向上瞬时孔隙水压力。

续表 1

模型类型	模型名称及提出者	模型简述	主要假设	主要优缺点及适用性
III	Shalstab 模型 ^[10]	该模型将基于等高线的稳定状态水文模型与无限斜坡稳定性模型耦合, 根据坡度和单位汇水面积确定地表斜坡稳定性分级。	①降雨强度与某特定地下水位间存在平衡关系; ②假定边坡土层参数均为某一恒定值。③地下水位线与坡面线平行	该方法简单、便于应用, 但其未考虑降雨过程、土壤内聚力对地表斜坡稳定性的影响, 仅适用于非粘性土体。
	dSLAM 模型 ^[12]	该模型将稳态水文模型与无限边坡稳定性模型耦合, 并且考虑了土壤内聚力和植物根系对坡体稳定性的影响。	地下水位线与坡面线平行	比 Shalstab 模型提出的模型有所进步, 但形式更为复杂, 对运算要求更高。
	Slip 模型 ^[15]	该模型将坡地水文模型与无限边坡的稳定性分析方法相结合, 建立边坡稳定性系数与降雨深度之间的相关关系。	①坡体厚度远小于坡长; ②土体下覆基岩的透水性远小于上部土体的透水性; ③降雨穿过上层不饱和部分到达不透水层, 在不改变土体饱和度的情况下, 导致地下水位的变化。	模型简单, 可以考虑前期降雨的影响, 主要适用于降雨引起地下水位变化进而引起坡体稳定性变化的情形
	Rosso-Rulli-Vannucchi 模型 ^[11]	该模型将坡地水文模型与无限边坡的稳定性分析方法相结合, 建立边坡稳定性系数与地下水位指标之间的相关关系。	①坡体厚度远小于坡长; ②地下水位线与坡面线平行; ③降雨强度与某特定地下水位间存在平衡关系。	模型简单, 主要适用于降雨引起地下水位变化进而引起坡体稳定性变化的情形

照降雨入渗模型和斜坡稳定性分析方法的不同, 大致可以将降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型分为以下三类: Green-Ampt 入渗模型与无限边坡稳定性方法相结合的模型(Ⅰ类)、Richard 入渗理论与无限边坡稳定性方法相结合的模型(Ⅱ类)、其他水文模型与边坡稳定性方法相结合的模型(Ⅲ类)(表 1)。

1.1 Green-Ampt 入渗模型与无限边坡稳定性方法相结合的模型

Green-Ampt 入渗模型是 1911 年由 Green-Ampt 基于毛管理论提出的入渗模型^[18]。模型研究的是初始干燥土壤在薄层积水时的入渗问题。基本假定是: 入渗时存在着明确的湿润锋面, 将湿润和未湿润的区域分开。该模型形式简单, 且具有一定的物理学基础, 是描述垂直入渗过程中应用最为广泛的入渗模型之一。1973 年 Mein 和 Larson 提出了将 Green-Ampt 模型应用于降雨入渗的研究领域, 并推导出了相应的修正模型。自此 Green-Ampt 模型被广泛应用于降雨入渗、坡面产流等研究领域。

Green-Ampt 模型的基本形式如下^[13,19]:

当降雨强度小于土体饱和渗透系数时, 在任意降雨时间 T , 根据达西定律, 降雨入渗量可以表示为:

$$f = K_s \left(\frac{z_w + \psi_f}{z_w} \right) = \frac{dFF}{dT}, \quad (1)$$

$$FF = z_w \nabla \theta_i = K_s t + \nabla \theta_i \psi_f \ln \left(1 + \frac{FF}{\nabla \theta_i \psi_f} \right). \quad (2)$$

式中: f 为实际入渗率 (m/h); FF 为累计入渗量 (m); ψ_f 为湿润锋处土的吸力参数 (m); K_s 为土的饱和水力传导系数 (m/h); $\nabla \theta_i$ 为土壤水分缺失量 (%); T 为时间间隔 (h); z_w 为湿润锋的深度 (m)。

假定开始积水后, 整个降雨时间内坡面都处于积水状态, 则有:

$$z_p = \frac{K_s \psi_f}{(i - K_s)}, \quad (3)$$

$$F_p = z_p \nabla \theta_i = \frac{K_s \psi_f \theta_i}{(i - K_s)}, \quad (4)$$

$$T_p = \frac{F_p}{i} = \frac{K_s \psi_f \nabla \theta_i}{i(i - K_s)}. \quad (5)$$

式中: z_p 为在积水初期的湿润锋深度 (m); F_p 为在积水初期累计入渗量 (m); T_p 为开始积水的时间 (h); i 为降雨强度 (m/h); T_p 为开始积水的时间 (h), 即从开始降雨到雨水开始在坡面积水的时间。

当降雨强度大于土体饱和渗透系数时, 在任意时间 T 的入渗率、入渗量以及湿润锋的相应深度可以根据下列公式进行计算:

$$FF = F_p + K_s(T - T_p) + \nabla \theta_i \psi_f \ln \left(\frac{FF + \nabla \theta_i \psi_f}{F_p + \nabla \theta_i \psi_f} \right), \quad (6)$$

$$f = K_s \left(1 + \frac{\psi_f \nabla \theta_i}{FF} \right), \quad (7)$$

$$z_w = \frac{FF}{\nabla \theta_i}. \quad (8)$$

无限边坡分析方法是山区平面滑动型边坡常用的稳定性分析方法。当斜坡体潜在滑动面的深度与斜坡体长度之比很小时 (一般深长比小于 0.1 时), 就可以把该斜坡体当作一个无限边坡进行分

析。饱和无限边坡的稳定性计算公式如下:

$$F_s = \frac{c' + (\gamma_{\text{sat}} z_w \cos^2 \beta - u_w) \tan \phi'}{\gamma_{\text{sat}} z_w \sin \beta \cos \beta}, \quad (9)$$

式中: β 为坡度($^\circ$); c' 为土体有效内聚力(kPa); ϕ' 为土体有效内摩擦角($^\circ$); γ_{sat} 为土体的饱和容重(kN/m^3)。

Green-Ampt 入渗模型与无限边坡稳定性方法相结合的模型,就是将 Green-Ampt 入渗模型及其修正模型(如 Mein-Larson 模型等)与饱和土或非饱和土无限边坡稳定性分析方法相结合,也就是将入渗模型中得出的随降雨时间变化的入渗深度代入无限边坡稳定性分析方法,并分别考虑低强度长历时降雨和高强度短历时降雨条件,就可以得出不同降雨条件下斜坡的稳定性系数随降雨时间的变化情况。

此类模型主要假定在降雨入渗过程中湿润锋平行向坡体内部推进,潜在滑面平行于坡面,且为湿润锋面,坡体厚度远小于坡体长度。这类模型计算简单,多适用于恒定降雨强度下浅层滑坡的稳定性评价。代表性的模型主要有:Xie-Esaki-Cai 模型、李宁模型、Muntohar-Liao 模型、Xie-Esaki-Cai 模型以及 Cho-Lee 模型等。

1.2 Richard 渗流理论与无限边坡稳定性方法相结合模型

一般认为,适用于饱和水流动的达西定律在很多情况下也适用于非饱和土壤水分的流动。Richards 提出,达西定律仍可用于描述非饱和土中水的运动,但此时渗透系数不是常数,而是与体积含水量有关的函数。根据质量守恒原理以及广义达西定律,各向异性多孔介质中饱和-非饱和渗流的 Richard 控制方程为^[8]:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} \frac{\partial \theta}{\partial \Psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_L(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_L(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right]. \quad (10)$$

式中: ψ 为地下水压力水头(m); θ 为土壤体积含水量(%); t 为时间(h); α 为坡角($^\circ$), $0 \leq \alpha < 90^\circ$; K 为导水率(m/h),是土壤含水量的函数,也可表示为基质势的函数。

Iverson 依据不同类型降雨(短时强降雨和长历时低强度降雨)入渗坡体水文过程的差异,提出的 Richard 方程的解析解,估算不同时段降雨入渗导致孔隙水压力上升的变化^[8]。图 1 是考虑暂态孔隙水压力作用下,降雨入渗引起斜坡水文响应的模型建立过程示意图。

初始孔隙水压力分布 + (降雨 \times 响应函数) = 暂态孔隙水压力分布

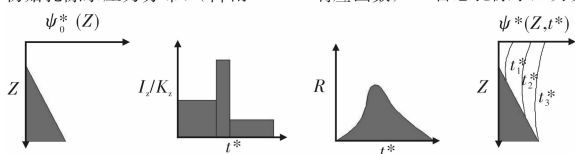


图 1 降雨入渗下斜坡水文响应模型建立过程示意图
(引自文献[8])

将 Richard 方程的解析解与无限边坡稳定性分析方法相结合,即可计算出坡体内某一深度 Z 处在任意降雨时间 t 的稳定性系数 F_s , 公式如下:

$$F_s(Z, t) = \frac{tg \phi'}{tg \beta} + \frac{c'}{\gamma_s Z \sin \beta \cos \beta} + \frac{-\Psi(Z, t) \gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \beta \cos \beta}. \quad (11)$$

式中: β 为坡度($^\circ$); c' 为土体有效内聚力(kPa); ϕ' 为土体有效内摩擦角($^\circ$); γ_w 为水的容重(kN/m^3); γ_s 为土的容重(kN/m^3); $\psi(Z, t)$ 为压力水头(m)。

此类模型以非饱和土渗流理论(Richard 方程)为基础,依据不同类型降雨(短历时高强度降雨和长历时低强度降雨)入渗坡体水文过程的差异,研究不同类型降雨入渗条件下斜坡的水文响应过程和响应行为,并通过合理逼近的方法建立长期降雨和短期降雨入渗条件下坡体简化的水文模型,最终建立在不同坡体深度、不同降雨时刻的斜坡水力响应模型,然后再结合无限边坡稳定性分析方法,建立考虑暂态孔隙水压力作用下坡体失稳的理论模型。

这类模型假定边坡处于饱和或近饱和状态;假定降雨入渗是一维无限向下入渗,或者考虑降雨入渗量可无限积聚而不向外扩散;边坡潜在滑坡深度远小于边坡长度。此类模型考虑了暂态孔隙水压力的影响,具有很好的理论框架。但由于该类模型是基于入渗方程的解析解构建的,分析结果对边界条件较为敏感,尤其是初始地下水位、渗透系数和水力扩散率等参数对结果影响很大;而且参数较多,模型较为复杂。此类模型适合于近饱和的浅层滑坡的稳定性评价。因其具有较好的理论框架,目前已成为国际上降雨入渗诱发斜坡失稳物理模型的重点研究方向。代表型的模型有:Iverson 模型、Iverson 修正模型以及 Trigs 模型等。

1.3 其他水文模型与边坡稳定性方法相结合模型

此类模型是其他水文模型(如 Philips 入渗模型、Lumb 入渗模型、稳态水文模型等)与边坡稳定性分析方法(如极限平衡等方法)相结合,建立边坡稳定性与降雨参数及地下水位等参数之间的相关关系。代表性的模型主要有:严绍军模型、Yeh-Lee 模型、Sinmap 模型、Shalstab 模型、Slip 模型、Rosso-Rulli-Vannucchi 模型以及 dSLAM 模型等。这些模型的适用性主要取决于所采用的水文模型及边坡稳定性分析方法的适用性。

其中, Sinmap 模型、Shalstab 等模型因未考虑降雨过程对边坡稳定性的影响,因此,不能预测降雨条件边坡发生破坏的时间。此外, Slip 模型和 Rosso-Rulli-Vannucchi 等模型,主要考虑了降雨入渗引起坡体内地下水位的变化而引起边坡稳定性变化的情形,这些模型认为降雨入渗量主要用来改变坡体内的地下水位,并基于无限边坡稳定性分析方法,建立了边坡稳定性系数与降雨深度或地下水位等指标之间的相关关系。

2 结论

降雨是诱发斜坡失稳的一个十分重要的触发因素和动力来源。基于降雨入渗诱发斜坡失稳的物理过程建立相应的物理模型是评价降雨型滑坡的有效方法。目前,国内外学者已提出了多种降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型,但由于每种物理模型都是在一定的假设条件下提出的,因此每种物理模型都有一定的适用条件。

本文在查阅大量相关资料的基础上,按照降雨入渗模型和斜坡稳定性分析方法的不同,将降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型分为三类:Green-Ampt 入渗模型与无限边坡稳定性方法相结合的模型(Ⅰ类)、Richard 入渗理论与无限边坡稳定性方法相结合的模型(Ⅱ类)、其他入渗模型与边坡稳定性方法相结合的模型(Ⅲ类),并对各种物理模型的假设条件、优缺点和适用性等进行了深入分析、归纳和总结,以期在实践中降雨滑坡物理评价模型的选择提供基础和理论依据。

参考文献:

- [1] Polemio M and Petrucci O. Rainfall as a landslide triggering factor: An overview of recent international research[J]. Landslides, 2000, 3: 1219-1226.
- [2] 戚国庆. 降雨诱发滑坡机理及其评价方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
- [3] 刘翔宇, 张锡涛, 谢谟文, 等. 基于 GIS 的降雨滑坡渗流-稳定实时评价方法研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1627-1635.
- [4] 马崇武, 刘忠玉. 降雨入渗时无限边坡的水平位移与稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(Supp. 1): 563-568.
- [5] 李宁, 许建聪, 钦亚洲. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 23(5): 1485-1490.
- [6] 兰恒星, 周成虎. 瞬时孔隙水压力作用下的降雨滑坡稳定性响应分析: 以香港天然降雨滑坡为例[J]. 中国科学 E 辑, 2003, 33(Supp. 1): 119-136.
- [7] 孙金山, 陈明, 左昌群, 等. 降雨型浅层滑坡危险性预测模型[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2): 117-121.
- [8] Iverson R M. Landslide triggering by rain infiltration[J]. Water Resources Research, 2000, 36(7): 1897-1910.
- [9] Lee S, Ryu J H, Won J S, et al. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network[J]. Engineering Geology, 2004, 71(3): 289-302.
- [10] Montgomery D R, Dietrich W E, Torres R., et al. Hydrologic response of a steep unchanneled valley to natural and applied rainfall[J]. Water Resour Res, 1997, 33: 91-109.
- [11] Rosso R, Rulli M C, Vannucchi G. A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding[J]. Water Resources Research, 2006, 42(6): 1-16.
- [12] Wu W, Sidle R C. A distributed slope stability model for steep forested basins[J]. Water Resour Res, 1995, 31: 2097-2110.
- [13] Xie M, Esaki T, Cai M. A time-space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard[J]. Environmental Geology, 2004, 46(6): 840-850.
- [14] Tsai T L, Yang J C. Modeling of rainfall-triggered shallow landslide[J]. Environmental Geology, 2006, 50(4): 525-534.
- [15] Montrasio L, Valentino R. A model for triggering mechanisms of shallow landslides[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2008, 8(5): 1149-1159.
- [16] 李德心, 何思明, 朱兴华, 等. 前期有效降雨对滑坡启动影响分析[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 41-45.
- [17] 王志恒, 胡卓玮, 赵文吉, 等. 基于确定性系数概率模型的降雨型滑坡孕灾环境因子敏感性分析[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 109-115.
- [18] 张光辉, 邵明安. 用土壤物理特性推求 Green-Ampt 入渗模型中吸力参数 S_r^* [J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 553-557.
- [19] 胡立雄, 白会人. 降雨入渗的边坡稳定评价方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 235-237.

Applicability Analysis on Physical Models of Slope Instability Induced by Rainfall Infiltration

Li Xiuzhen^{1,2}, He Siming^{1,2}, Wang Zhenyu³ and Zhu Xianhua⁴

- (1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
3. Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu 611130, China; 4. No. 404 Geological Brigade of Bureau of Geology and Mining of Sichuan Province, Xichang 615000, China)

Abstract: Rainfall is a very important factor and power source to induce slope instability. It is an effective method to evaluate rainfall-induced landslides based on the physical process of rainfall infiltration inducing slope instability to establish the corresponding physical models. On the basis of referring to a lot of relevant information, the physical models are classified into three categories: models of combining Green-Ampt infiltration models and infinite slope stability methods (Ⅰ), models of combining Richard infiltration theories and infinite slope stability methods (Ⅱ) and models of combining other infiltration theories and slope stability methods (Ⅲ), according to different rainfall infiltration models and slope stability models used. Assumptions, advantages, disadvantages and application of the models are analyzed and summarized in hope to provide a theoretical basis for the selection of physical evaluation models of rainfall-induced landslides in the practice.

Key words: rainfall infiltration; slope instability; physical models; types; applicability