

暴雨条件下灌木对边坡稳定性的影响模拟试验

祁玉超^{1,2}, 兰惠娟^{1,2}, 王道杰¹, 何松膛^{1,2},
方迎潮³, 陈文乐³, 赵鹏^{1,2}, 裴曾莉^{1,2}, 田雨⁴

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.国家管网集团西南管道有限责任公司, 四川 成都 610041; 4.四川省富顺县城关中学, 四川 自贡 643200)

摘要: [目的] 研究暴雨条件下不同灌木种植模式对不同坡度边坡的固坡效应, 探索灌木固坡发挥效用的临界坡度, 为生态工程措施在山地灾害防治中的应用提供科学依据。[方法] 通过制作灌木模型开展室内降雨试验, 探究4种坡度(20°, 35°, 50°, 60°)条件下4种灌木种植模式(稀植、适中种植、密植、裸坡)对边坡稳定性的影响, 并利用考虑灌木自重和根系牵引力影响下的修正公式计算边坡安全系数(F_s)。[结果] ①20°和35°的灌木边坡发生沟蚀破坏, 与种植模式无关; 裸坡、50°灌木边坡和60°稀植、密植灌木边坡发生渐进式破坏; 60°适中种植灌木边坡发生整体滑移式破坏。②在20°和35°边坡上种植灌木能够在降雨过程中有效增强边坡的稳定性, 减少4%~70%坍塌量; 在50°和60°边坡上种植灌木不仅会降低边坡的稳定性, 还会增加10%~33%的坍塌量。[结论] 灌木固坡不能简单归结为有效或者无效, 和坡体的坡度密切相关, 因此要注意不同坡度上种植方式的选择。

关键词: 滑坡治理; 生态措施; 模型试验; 人造根; 灌木种植模式

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0061-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 祁玉超, 兰惠娟, 王道杰, 等. 暴雨条件下灌木对边坡稳定性的影响模拟试验[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 61-68. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.009; Qi Yuchao, Lan Huijuan, Wang Daojie, et al. Simulated experiment on effects of shrub on slope stability under rainstorm condition [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 61-68.

Simulated Experiment on Effects of Shrub on Slope Stability Under Rainstorm Condition

Qi Yuchao^{1,2}, Lan Huijuan^{1,2}, Wang Daojie¹, He Songtang^{1,2},

Fang Yingchao³, Chen Wenle³, Zhao Peng^{1,2}, Pei Zengli^{1,2}, Tian Yu⁴

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain

Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Pipe China Southwest Pipeline Company,

Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. Sichuan Province Fushun Chengguan Middle School, Zigong, Sichuan 643200, China)

Abstract: [Objective] The effects of different shrub planting patterns on slope stability with different slope degrees under rainstorm condition were studied to explore the critical slope degrees for shrubs to stabilize slopes, and to provide a scientific basis for scientific biological engineering to manage mountain disasters. [Methods] Indoor rainfall experiments were carried out by making shrub models to explore the impact of four shrub planting modes (sparse planting, moderate planting, dense planting, bare slope) on slope stability on slopes with different slope degrees (20°, 35°, 50°, 60°). The slope safety factor (F_s) was calculated by using a correction formula considering the influence of shrub weight and root traction. [Results] ① Gully erosion occurred on shrub slopes at 20° and 35°, which was independent of the planting mode; On bare

收稿日期: 2021-03-26

修回日期: 2021-05-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“大规模灾害风险评估及综合调控原理和模式”(41790434); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)“美丽中国”(XDA230090403); 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所青年基金项目(SDS-QN-2108)

第一作者: 祁玉超(1996—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 硕士研究生, 研究方向为山地灾害防治工程。Email: qiyuchao@imde.ac.cn。

通讯作者: 王道杰(1968—), 男(汉族), 四川省成都市人, 博士, 研究员, 主要从事退化山区生态修复与山地灾害生物工程治理等方面的工作。E-mail: wangdj@imde.ac.cn。

slopes, 50° shrub slopes, and 60° sparsely and densely planted shrub slopes, the damage occurred progressively; Overall slipping failure occurred on moderately planted shrub slopes of 60°. ② Planting shrubs on gentle slopes of 20° and 35° could effectively enhance the stability of the slope during rainfall and reduce the amount of collapse by 4% to 70%; Planting shrubs on steep slopes of 50° and 60° could not only decrease the stability of the slope, but also increase the amount of collapse by 10% to 33%. [Conclusion] Slope stabilization by shrubs can not be simply attributed to effective or ineffective, it is closely related to the slope gradient, so attention should be paid to the choice of planting methods on different slopes.

Keywords: landslide control; ecological measures; model experimental; artificial roots; shrub planting patterns

在全球气候变化背景下,强降雨等极端天气现象增多,使得地形条件复杂的西南山区滑坡、泥石流等灾害愈发严重^[1]。目前山地灾害的治理措施主要是岩土工程措施和生物工程措施^[2],但由于岩土工程措施存在与环境相容性差、设计要求和费用高以及施工难度大等缺陷^[3],随着国际上基于自然手段方案(nature based solution)的提出^[4],生物工程措施作为预防和缓解山地灾害的重要举措,引起广泛的讨论与实践应用^[5-8]。目前,已经有学者对不同植被泥沙拦截能力^[9]、地表水文效应^[10]、固土护坡机制^[11]以及乔木固坡效应等^[12]问题进行大量研究,取得显著的成果。然而涉及到暴雨条件下灌木固坡效应的研究相对较少^[13],尤其是在地形复杂、气候多变、山地灾害频发的西南地区,灌木是否在任何坡度条件下都能发挥固坡效用,亦或是随着坡度增加需要像乔木一样考虑其自重^[12]对坡体的影响,目前尚不明确。因此研究暴雨条件下灌木对边坡稳定性的影响,对实现生物工程措施科学合理地防灾减灾具有重要理论和实践意义。本文选取都江堰市银洞子实际滑坡堆积体物质,通过开展室内人工降雨试验,利用自行设计的灌木植物模型研究 4 种坡度(20°, 35°, 50°, 65°)和 4 种种植模式(密植、适中种植、稀植和裸坡)组合条件下对暴雨前后边坡稳定性的影响。通过本文系统的研究,以为植被在坡面治理中的稳定性定量化分析提供新思路,同时也为生态工程措施在山地灾害防治中的应用实践提供科学依据,最终为系统性的提升山地灾害防控能力提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验土体 花岗岩的全风化土(completely decomposed granite, CDG)在中国西南地区广泛分布^[14],而花岗岩山地丘陵地区又是我国滑坡灾害频发区,因此研究该土体堆砌边坡的稳定性具有重要意义。研究表明,CDG 土体与人造根配合使用时,能较好地模拟自然界中的“根—土”相互作用^[15]。因此,

将取自四川省都江堰市银洞子滑坡堆积体的野外原状土体进行风干,然后除去 2 mm 以上的土颗粒并掺入 10% 粒径小于 0.01 mm 的黏土,制备出粒径级配和土体强度参数等方面和 CDG 土体极为相似的试验土体。本文试验土体和 CDG 土体物理力学性质参数详见表 1。土体粒径级配累积曲线如图 1 所示。

表 1 试验土体和全风化(CDG)土体物理参数对照

土体物理参数	本文试验用土	CDG 土体	单位
重度 γ_t	18.4	20.0	kN/m ²
质量含水率	15.0	15.1	%
有效黏聚力 c'	15	10	kPa
极限状态摩擦角 φ_c'	37	38	(°)
变形模量 E	28	35	MPa

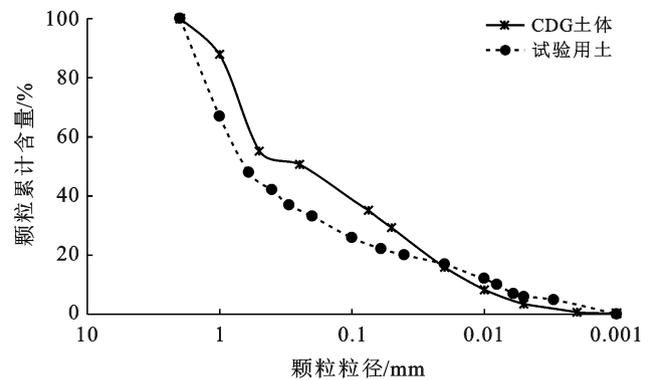


图 1 试验土体和全风化(CDG)土体的粒径级配累积曲线

1.1.2 灌木模型设计 马桑(*Coriaria nepalensis*)作为四川省分布较为广泛的大中型灌木,对土壤条件要求较低,常作为荒山绿化树种^[16]。其典型的横走型根系(图 2)具有较多的水平根和斜出根,在土体中主要发挥侧向拉伸作用,能有效提高坡体稳定性^[11]。因新鲜的马桑根系易腐烂,且个体差异较大。为提高试验可控性与可重现性,本文选择聚氨酯实心橡胶圆棒(长为 50 mm,直径为 3 mm)制作出马桑水平根系相似比为 1:20 的人造根(图 2)。试验表明该种橡胶棒的抗拉强度(20.11 MPa)与真实的马桑根系^[17](18.22 MPa)较为接近。为考虑灌木自重对边坡稳定性的影响,结合野外考察的马桑自重,在每个模型

顶部捆绑 50 g 的砝码,以模拟灌木的自重荷载。为更好模拟灌木的横走形根系对土体抗剪强度的增强作用,在堆砌模型边坡(坡面宽 50 cm,长 80 cm,与野

外斜坡原型的相似比约 1:20)时,分层压实,灌木模型垂直于坡面埋设,且呈“十”字形的水平根系与坡面平行。

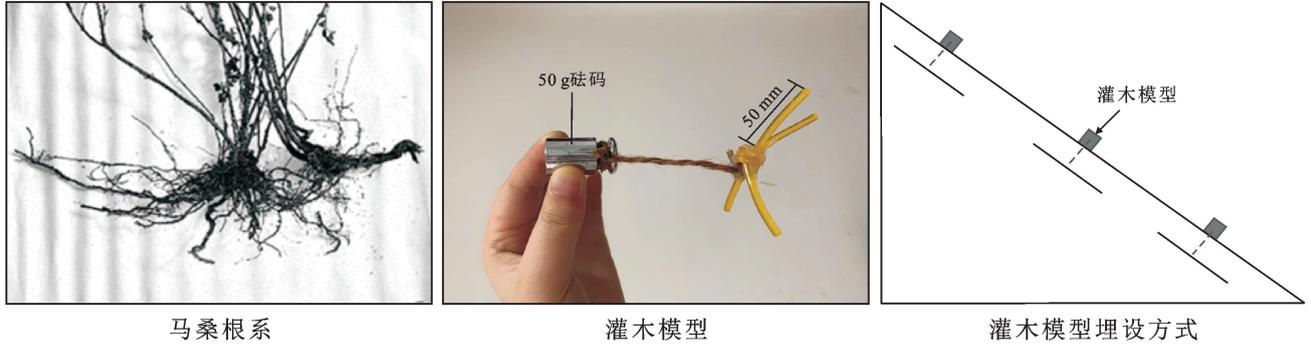


图 2 马桑根系和灌木模型

1.2 试验设计

在常规立地分类系统中,坡度等级可分为 3 类:缓坡或斜坡($0^{\circ}\sim 35^{\circ}$)、陡坡($35^{\circ}\sim 55^{\circ}$)和急坡($55^{\circ}\sim 90^{\circ}$),其中 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 是滑坡发生的优势坡度^[12]。因此,根据研究区概况与试验目的,本文选择 4 种具有代表性坡度($20^{\circ}, 35^{\circ}, 50^{\circ}, 60^{\circ}$)与 4 种植植模式(表 2)组合,共设计 16 组模拟降雨试验。

表 2 灌木模型边坡参数

边坡类型	模型株间距/cm	模型行间距/cm	原型株间距/m	原型行间距/m
密植	10	10	2	2
适中种植	10	20	2	4
稀植	10	30	2	6
裸坡	—	—	—	—

在四川中西部地区,易发生滑坡和泥石流的降雨强度为 $35\sim 100\text{ mm/h}$ ^[18]。为探究暴雨条件下灌木对边坡稳定性的影响,本文选择了 116 mm/h 的降雨强度(特大暴雨),利用人工降雨装置诱导模型边坡破坏,试验装置为 Norton VeeJet 80100 型喷嘴式人工模拟降雨机(包括人工降雨设备、边坡模型槽和参数测量系统),终止试验的时间为土坡不再发生进一步失稳破坏为止(约 30 min)。

1.3 边坡安全系数修正公式

前人^[19]的研究表明,莫尔—库伦强度理论同样适用于植物根系加筋土。与裸坡相比,灌木边坡还应考虑灌木水平根系对土体的侧向拉力引起的土体抗剪强度增量以及因砝码而增加的竖直向下的重力。

根据灌木边坡条块受力情况,结合 Lan 等^[12]在边坡滑动性风险计算中对瑞典条分法计算公式的改

进,得到灌木边坡安全系数修正公式为:

$$F_s = \frac{\sum (c_i l_i + G_i \cos \theta_i \tan \varphi_i)}{\sum (G_i + G_i') \sin \theta_i} \quad (1)$$

式中: F_s 为土体滑动面的边坡安全系数; c_i 为黏聚力(N); l_i 为第 i 条滑块的滑动弧面的长度(m); G_i 为土块 i 所受竖直向下的重力(N); G_i' 为增加的砝码的重力(N); θ_i 为第 i 条滑块与竖直方向的夹角($^{\circ}$); φ_i 为内摩擦角($^{\circ}$); i 为土条的编号(取值范围为 1~16)。

1.4 数据处理

采用 OriginPro, Excel 软件进行试验数据分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同坡度条件下种植模式对边坡破坏模式的影响

2.1.1 沟蚀破坏 20° 和 35° 的灌木边坡,无论种植密度如何,在暴雨情况下均呈现出沟蚀破坏现象。比较典型的是 20° 适中种植灌木边坡(图 3)。在降雨开始 650 s 后坡脚开始出现细沟,随着时间的推移,细沟不断扩大,逐渐向上延伸发展至与附近细沟相连,在 998 s 时形成图 3 所示的冲沟。随后冲沟在雨水的冲刷下不断加深,被雨水冲刷下来的固体物质堆积在坡脚,直至降雨结束。整个过程中灌木仅倒塌、歪斜并没有出现滑落的现象。同时,对比边坡破坏进程发现,各组边坡冲沟出现的位置都大致相同,只是出现时间的前后有差别, 35° 边坡比 20° 边坡首次出现冲沟的时间早 172~242 s。另外,对比同种坡度下不同植物种植模式发现,灌木种植密度对冲沟的出现时间影响不大,但是会影响冲沟的深度和数量。种植越密集冲沟数量越少,冲沟深度越浅。

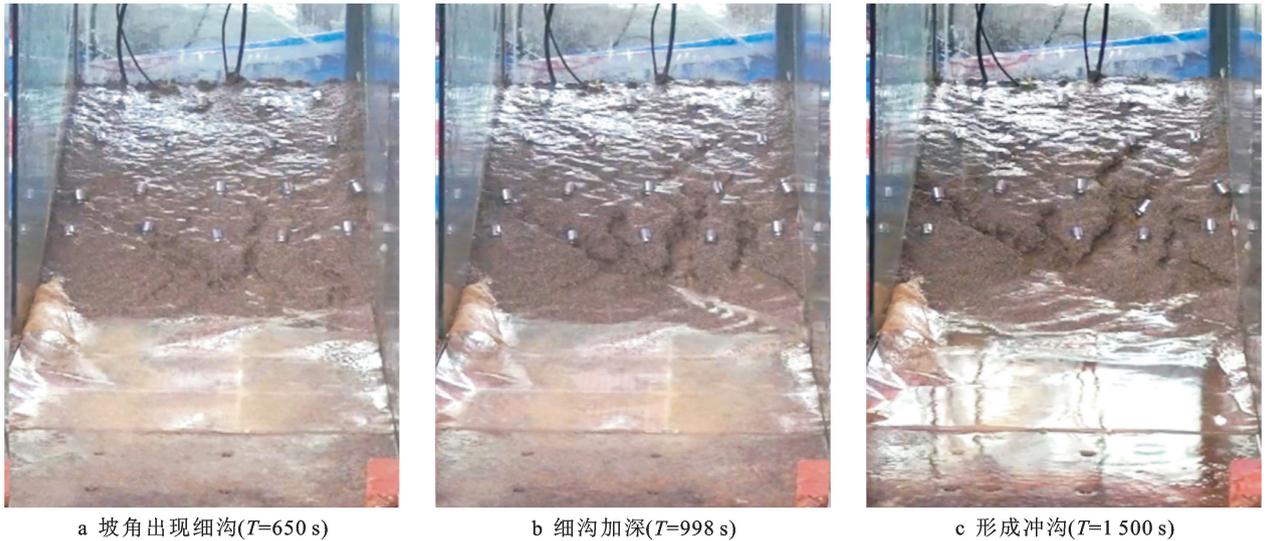


图 3 不同降雨历时(T)沟蚀破坏模式的边坡破坏过程

2.1.2 渐进式破坏 裸坡、 50° 灌木边坡和 60° 稀植、密植灌木边坡呈现出渐进式破坏现象。比较典型的是 50° 裸坡(图 4), 经过一段时间的雨水入渗后, 在 625 s 时坡体前缘出现裂缝, 并且有土块不断滑落。随后裂缝逐渐扩张, 破坏区边缘层层剥落, 导致破坏区域不断扩大, 在 946 s 时坡面上方也开始出现新的裂缝。最终使得破坏面贯通, 产生更大规模的破坏。进一步对比边坡破坏进程发现, 裸坡出现裂缝的时间随坡度的增加而不同程度的加快, 20° 、 35° 、 50° 和 60°

的裸坡上开始出现裂缝的时间分别为 802, 580, 114 和 107 s; 在同种坡度下, 种植灌木的边坡比裸坡出现裂缝的时间晚 124~370 s, 但灌木种植密度对边坡出现裂缝的时间却影响不大。试验结束后, 裸坡的最终破坏面积随着坡度的增加而增大, 20° 、 35° 、 50° 和 60° 裸坡的最终破坏面积分别为 143, 231, 3 802, 4 000 cm^2 。进一步对比灌木边坡和裸坡发现, 种植灌木的边坡比同坡度的裸坡的破坏面积更大, 并且灌木种植越密集最终破坏面积越大。

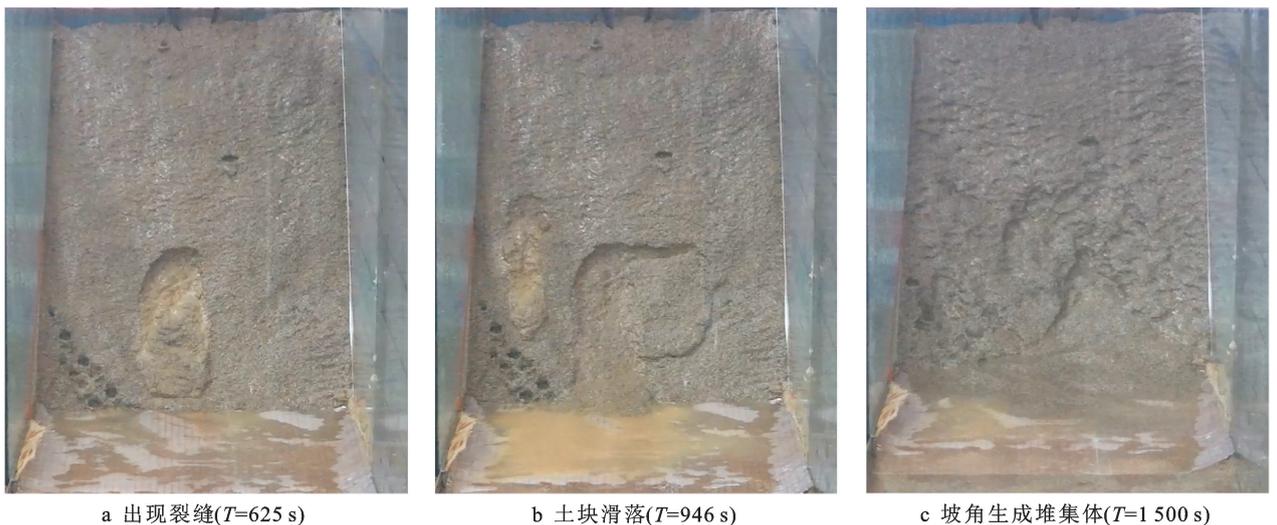


图 4 不同降雨历时(T)渐进式破坏模式的边坡破坏过程

2.1.3 整体滑移式破坏 整体滑移式破坏出现在 60° 适中种植灌木的边坡(图 5)。具体破坏过程为: 在降雨初期, 坡面产生较清澈的径流, 但没有发生任何破坏。随着时间的推移, 在 484 s 时坡面下方开始出现裂缝, 并伴随有土块滑落。土块滑落后, 该位置形成

含沙量较大的径流, 坡脚开始出现泥沙堆积。在 544 s 时整个坡体开始缓慢的向下滑移, 并全程伴有土块滑落。边坡在 962 s 后停止滑移, 但仍有部分土块跟着灌木一起滑落直至降雨结束, 试验结束后测得该边坡坡度由 60° 降为 $31.9^\circ\sim 37.2^\circ$ 。出现这一现象的原

因是在灌木较密集的横走型根系对浅层土体产生横向拉力,两者结合形成一个具有更强的抗拉裂能力的整体,因此在降雨入渗过程中坡面并没有出现大面积破坏。但灌木的根系较浅,随着雨水继续入渗,土体含水量的增加导致土壤被软化,土体抗剪强度不断降

低^[20],在陡坡深处形成了新的不稳定滑动面^[21],进而发生整体滑移式破坏。当土体下滑到土颗粒天然休止角($33^{\circ}\sim 37^{\circ}$)时,达到新的稳定状态,但坡面在雨水和径流的冲刷下仍会继续破坏,表现为土块滑落、形成冲沟等,该过程会持续至降雨结束。

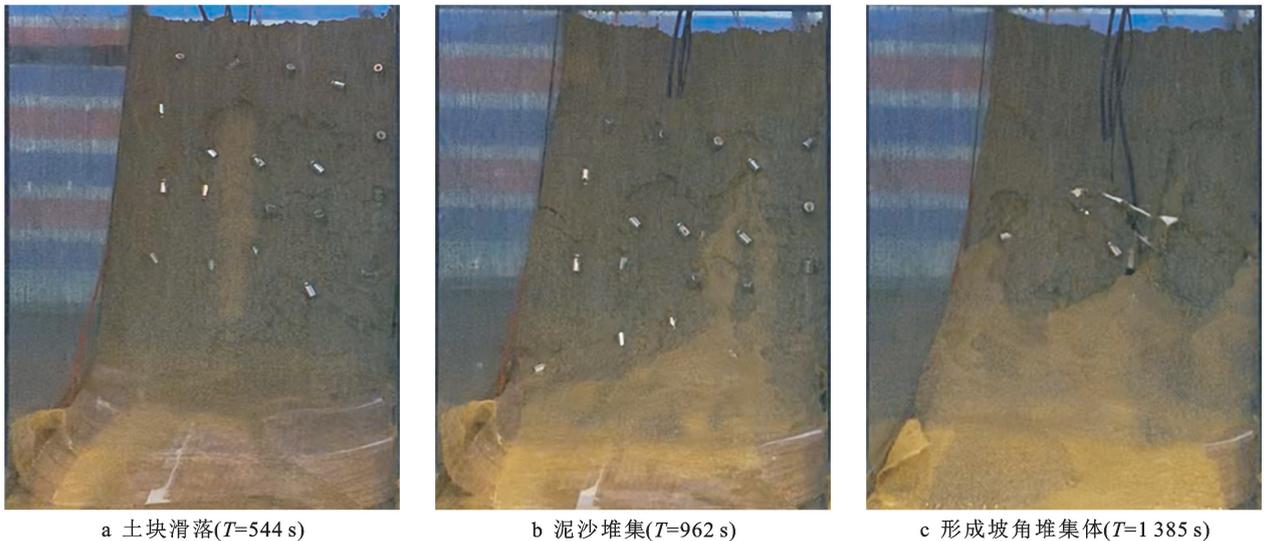


图 5 不同降雨历时(T)整体滑移式的破坏模式破坏过程

2.2 不同种植模式对边坡坍塌量的影响

坍塌量是衡量滑坡事故危害程度的重要参数,试验发现不同条件下(坡度和种植模式)的边坡坍塌量具有显著差异。降雨结束后,根据模型槽上的刻度尺、网格纸等计算出各边坡的坍塌量,结果详见表 3。由表 3 分析可知,坡度对各边坡坍塌量的影响最为显著,大坡度边坡的坍塌量总是大于小坡度边坡的坍塌量。而在同种坡度下,灌木的种植与否对边坡坍塌量的影响具有显著差异。 20° 和 35° 灌木边坡比同坡度裸坡的坍塌量少 $4\%\sim 70\%$,平均减少 19.96% , 50° 和 60° 灌木边坡比同坡度裸坡的坍塌量多 $10\%\sim 33\%$,平均增加 22.17% 。这表明在缓坡上种植灌木不但能够提高表层土壤的抗剪强度^[22-23],并且能够增强缓坡的抗侵蚀能力,减少坍塌量,而在陡坡上种植灌木反而会增大坍塌量。其原因可能是花岗岩全风化土有显著的遇水软化效应^[24],特别是暴雨条件下加速了土体被软化的过程,导致灌木根系对土体的加固作用难以发挥。同时灌木自重产生的附加滑动力会随着坡度的增加而变大,当灌木根系对边坡的加固效应不足以抵消灌木自重产生的附加滑动力时,灌木边坡容易发生更大规模的滑坡、崩塌等灾害^[25]。进一步分析发现,同坡度下稀植的灌木边坡坍塌量低于适中种植和密植的灌木边坡。其原因可能有 3 点: ①由前文分析可知,灌木自重存在对边坡稳定的负效应。灌

木种植密度越大,单位面积上灌木自重产生的附加滑动力就越大,从而更容易造成大规模的坍塌; ②灌木根系对土体的吸力影响范围随着灌木种植间距的增大而加深^[15],过度密植的灌木并不利于边坡的加固; ③过度密集的灌木横走型根系会增加土壤水分入渗,提高土壤含水量,降低土体强度,加快坡体坍塌速度,增大坍塌量^[26]。

表 3 不同种植模式各坡度边坡坍塌量 10^{-3} m^3

坡度	裸坡	稀植	适中种植	密植
20°	0.76	0.23	0.62	0.68
35°	4.08	3.71	3.76	3.91
50°	12.44	14.68	16.48	15.68
60°	25.21	28.58	33.62	27.67

2.3 不同种植模式对边坡安全系数的影响

通过对土体参数的测量和分析,利用修正的边坡稳定性系数公式计算了不同坡度条件下的坡体稳定性(图 6)。对初始安全系数数值进行分析发现,不论何种配置模式,坡度越大的边坡安全系数越低。同种坡度下,裸坡的初始安全系数高于灌木边坡,即在不考虑植被对土壤团聚体结构的影响和对根土环境的改变^[27],仅从力学角度分析,灌木自重产生的附加滑力大于其根系对边坡产生的加固作用。初始状态下各

边坡安全系数均大于 1, 根据边坡稳定性的分类^[28], 属于稳定边坡。随着时间的推移, 边坡安全系数基本遵循降雨初期不断下降且在降雨中后期趋于稳定的规律^[29-30]。对于 20° 的边坡, 裸坡、稀植和适中种植的边坡的安全系数近乎在同一时间分别下降了 50%, 62% 和 39%, 而密植的边坡的安全系数开始出现下降趋势晚了 70 s, 并且仅仅下降了 4%, 这表明 20° 边坡中密植灌木边坡的稳定性表现最好。原因可能是灌木较密集的种植在 20° 边坡上时, 其横走型根系会与土体结合形成抗拉裂能力和持水能力均更好的整体, 延缓边坡破坏时间的同时增强边坡稳定性, 所以边坡安全系数变化较小。35° 和 50° 的植被边坡安全系数开始下降的时间比裸坡提前 50 s 到 70 s。该时间表示破坏从坡面延伸到内部的速度, 这也进一步说

明了灌木的横走型根系会加快土壤水分入渗, 降低土体强度。但是在降雨过程中, 35° 的裸坡安全系数下降幅度(61%) 比灌木边坡(分别为 35%, 41%, 30%) 大, 而 50° 的裸坡安全系数下降幅度(27%) 比灌木边坡(分别为 41%, 36%, 37%) 小。这表明灌木的固坡效应也存在 Riestenberg 等^[31] 提出的坡度阈值, 即只有当坡体的坡度在灌木起固坡作用的范围区间内, 才能达到固坡效果, 否则会增加滑坡灾害发生的几率。60° 边坡在初始就处于极易失稳状态, 在降雨开始后, 四组边坡的安全系数很快降至临界安全系数之下, 即发生了失稳^[28]。另外由于 60° 适中种植灌木的边坡发生了整体滑移式破坏, 预先埋设的传感器在降雨后期被冲出土体, 因此安全系数变化曲线出现异常波动, 属正常现象。

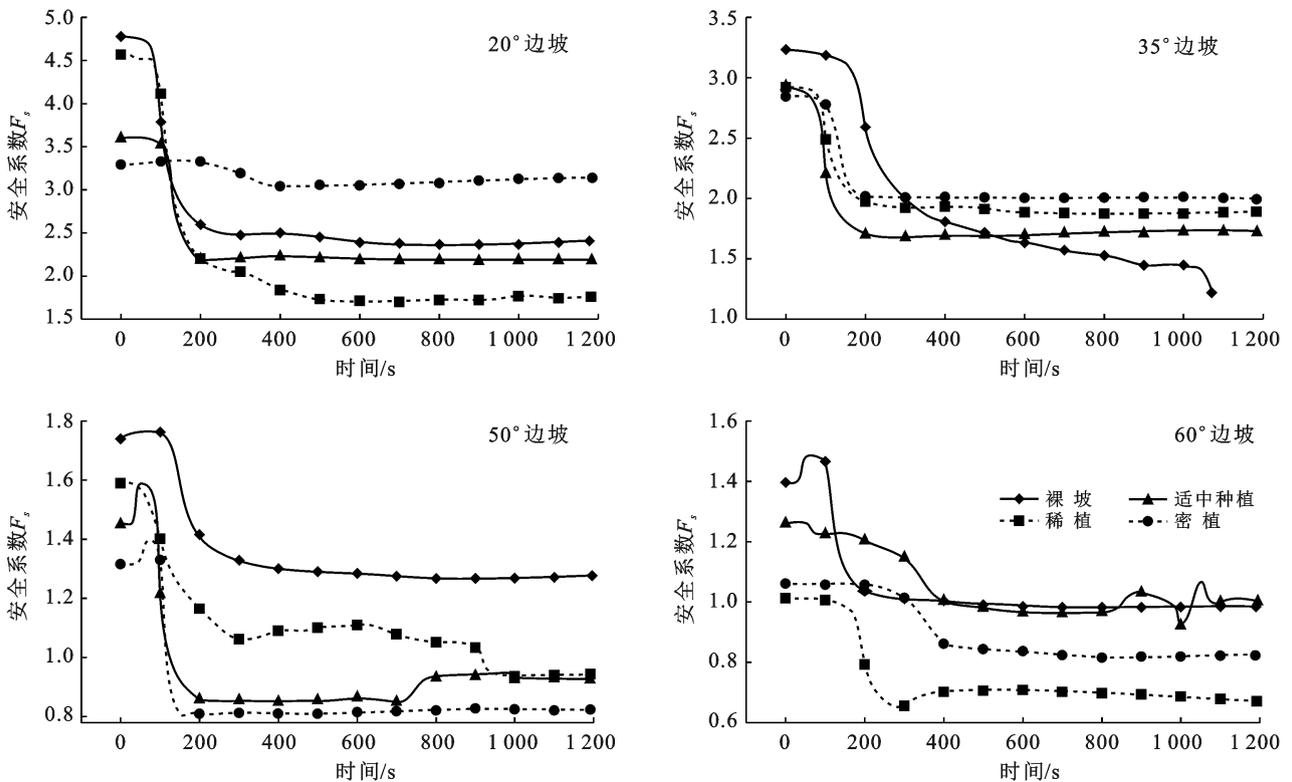


图 6 不同坡度边坡安全系数随时间变化曲线

3 讨论

本文通过 16 组室内模型边坡上的人工降雨试验, 研究了不同灌木种植模式对边坡稳定性的影响, 得出灌木对边坡的稳定性影响主要体现在如下几个方面: 首先, 灌木根系能够通过根—土间的摩擦力将土体剪应力转化对根系的拉力, 从而提高坡体的抗剪强度^[11]。同时灌木自重平行坡面方向的分力会产生一个“加滑力”, 坡度越大, 自重产生的附加滑动力的

越大。另外, 灌木对边坡的水力特性(土体持水能力以及渗透系数)影响也是不可忽视的^[15]。花岗岩全风化土是一种非饱和土, 具有良好的持水能力^[32], 因此滑坡的发生往往滞后于降雨, 种植灌木能够有效加强这一特性, 试验中种植有灌木的边坡产生细沟和裂缝的时间均晚于裸坡。同时灌木的根系扩大的土壤孔隙能够提高雨水的入渗能力^[33], 因此灌木的种植密度并不是越大越好。总之, 在讨论灌木的固坡效应时, 应重点关注坡度的大小, 不可将不同坡度的边坡

一概而论;同时也应考虑灌木对边坡水土保持效益的整体作用,根据实际需求布置灌木种植密度。

在治理山地灾害的实际过程中,灌木通常不是单独种植的,而是与乔木、草本植物等搭配种植。对比灌木和乔木^[12]的固坡机制,灌木的横走型根系主要对土体产生牵引作用而乔木的垂直型根系主要发挥机械锚固作用。尽管灌木和乔木的根系形态和固坡机制不同,但对缓坡均具有良好的水土保持功效^[11],且两者的固坡效应均存在固坡阈值。但由于试验的局限性和现实差异,只能推测坡度阈值的范围,无法得到坡度阈值的确切值。

综上所述,在35°以下的边坡上,建议将乔木和灌木合理搭配种植,可以起到促进泥沙拦截、防止泥沙迁移的水土保持功效。但并不是种植的越密越好,在实际工程中,缓坡上可根据美学价值、经济价值和其他指标灵活配置种植密度。在50°以上的边坡上不推荐种植乔木和灌木,但在景观要求较高的区域,可以采取有效措施通过减轻植被重量来保持边坡的稳定性,例如使用播撒草种来代替种植灌木^[34]。另外,可以将植被措施与岩土措施搭配使用,更加有效的预防和控制陡坡失稳^[35]。

当前,绿色减灾受到越来越多的关注,如何科学合理的利用生态工程治理滑坡等山地灾害成为保障山区可持续发展、生态系统服务价值和生态安全屏障建设的重要议题。但由于试验条件的局限性,采用的人造根模型在构型、根表面粗糙度等方面与真实根存在一定差别^[36],而且本次试验中并没有考虑真实植被在降雨过程中树冠保留雨水,减轻降雨强度的作用^[37-38],无法准确还原真实植被在边坡上生长对局地水循环和生物地球化学循环的过程^[5]。因此在今后的研究中应进一步创新研究方法及改进试验器材,优化试验方案,以期获得更加全面的边坡稳定性综合评价。

4 结论

(1) 灌木边坡在暴雨条件下的破坏模式可大致分为3种:20°和35°灌木边坡发生沟蚀破坏,且与种植密度无关;裸坡、50°灌木边坡和60°稀植、密植灌木边坡发生渐进式破坏;60°灌木适中种植的边坡发生整体滑移式破坏。

(2) 在35°以下的边坡上种植灌木能够增强抗侵蚀能力,减少坍塌量;在50°以上边坡上种植灌木则会增大坍塌量。

(3) 综上所述,对于易发生滑坡的花岗岩山地丘陵地区,在35°以下的边坡可根据实际需求将乔木、灌

木搭配种植;不建议在50°以上的边坡以种植高密度灌木的方式加固边坡。

[参 考 文 献]

- [1] 崔鹏.中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J].地理科学进展,2014,33(2):145-152.
- [2] 崔鹏.我国泥石流防治进展[J].中国水土保持科学,2009,7(5):7-13,31.
- [3] 崔鹏,陈晓清,柳素清,等.风景区泥石流防治特点与技术[J].地学前缘,2007,14(6):172-180.
- [4] Faivre N, Fritz M, Freitas T, et al. Nature-based solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges [J]. Environmental Research, 2017,159:509-518.
- [5] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability [J]. Bioscience, 2011,61(11):869-879.
- [6] Khan Y A, Lateh H. Plant root reinforcement against local failure mechanism of natural slope [M]// Engineering Geology for Society and Territory (Volume 2). Springer, Cham, 2015: 1275-1280.
- [7] Stokes A, Douglas G B, Fourcaud T, et al. Ecological mitigation of hillslope instability: Ten key issues facing researchers and practitioners [J]. Plant and Soil, 2014, 377(1): 1-23.
- [8] 魏丽,陈双溪,边小庚.暴雨型滑坡灾害因素分析及预测试验研究[J].应用气象学报,2007,18(5):682-689.
- [9] 吴建召,陈爱民,崔羽,等.干热河谷常见植物地表形态特征与泥沙拦截的关系[J].应用与环境生物学报,2018,24(6):1236-1246.
- [10] Keim R F, Skaugset A E. Modelling effects of forest canopies on slope stability [J]. Hydrological Processes, 2003,17(7):1457-1467.
- [11] 陈文乐,杜鹃,方迎潮,等.泥石流频发区典型乔灌植物根系的固土效应[J].水土保持通报,2019,39(5):32-39.
- [12] Lan Huijuan, Wang Daojie, He Songtang, et al. Experimental study on the effects of tree planting on slope stability [J]. Landslides, 2020,17(4):1021-1035.
- [13] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous slopes (Southern Alps, France) [J]. Catena, 2011,84(1/2):70-78.
- [14] 何群.客运专线全风化花岗岩改良土隧—隧过渡段动力特性及稳定性研究[D].湖南长沙:中南大学,2007.
- [15] 吴宏伟.大气—植被—土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.
- [16] 沈有信,张彦东,刘文耀.泥石流多发干旱河谷区植被恢复研究[J].山地学报,2002,20(2):188-193.
- [17] 苑淑娟.4种植物单根抗拉力学特性的研究[D].内蒙古

- 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [18] 陈晓清,崔鹏,韦方强.良好植被区泥石流防治初探[J].山地学报,2006,24(3):333-339.
- [19] 吴景海,王德群,陈环.土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(2):199-204.
- [20] Shi Xuguo, Yang Chao, L. Zhang, et al. Mapping and characterizing displacements of active loess slopes along the upstream Yellow River with multi-temporal InSAR datasets [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674:200-210.
- [21] Cammeraat E, van Beek R, Kooijman A. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain [J]. *Plant and Soil*, 2005, 278(1): 135-147.
- [22] Kim D, Im S, Lee C, et al. Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61:658-668.
- [23] Su Lijun, Hu Bingli, Xie Qiquan, et al. Experimental and theoretical study of mechanical properties of root-soil interface for slope protection [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(11): 2784-2795.
- [24] 颜波,汤连生,胡辉,等.花岗岩风化土崩岗破坏机理分析[J].水文地质工程地质,2009,36(6):68-71,84.
- [25] Collison A J C, Anderson M G. Using a combined slope hydrology/stability model to identify suitable conditions for landslide prevention by vegetation in the humid tropics [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996,21(8):737-747.
- [26] 徐则民,黄润秋,唐正光,等.植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J].岩石力学与工程学报,2005(3):438-450.
- [27] Watson A, Phillips C, Marden M. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability [J]. *Plant and Soil*, 1999, 217(1): 39-47.
- [28] 李广信.关于《建筑边坡工程技术规范 GB50330-2013》的讨论[J].岩土工程学报,2016,38(12):2322-2326.
- [29] Loaiciga H A, Johnson J M. Infiltration on sloping terrain and its role on runoff generation and slope stability [J]. *Journal of Hydrology*, 2018,561:584-597.
- [30] 杨宗佑,蔡焕,雷小芹,等.非饱和地震滑坡堆积体降雨破坏水-力耦合行为试验[J].岩土力学,2019,40(5):1869-1880.
- [31] Riestenberg M M, Sovonick-Dunford S. The role of woody vegetation in stabilizing slopes in the Cincinnati area, Ohio [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94(4): 506-518.
- [32] 卢有谦,韦昌富,蔡国庆,等.风化花岗岩土的持水特性研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):96-100.
- [33] Gao Hang, Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu, et al. How effective is vegetation in reducing gravity erosion on loess gully sidewall under intense rainfalls? [J]. *Land Degradation & Development*, 2020,31(17):2605-2619.
- [34] Wang Zhijie, Jiao Juying, Rayburg S, et al. Soil erosion resistance of "Grain for Green" vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2016, 141: 109-116.
- [35] Xu Xiangzhou, Guo Wenzhao, Liu Yakun, et al. Landslides on the Loess Plateau of China: A latest statistics together with a close look [J]. *Natural Hazards*, 2017, 86(3): 1393-1403.
- [36] Ennos A R. The anchorage of leek seedlings-the effect of root length and soil strength [J]. *Annals of Botany*, 1990,65(4):409-416.
- [37] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity [J]. *Advances in Water Resources*, 2006,29(7):974-986.
- [38] Wang Xinping, Zhang Yafeng, Hu Rui, et al. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454: 152-159.