

DOI:10.11918/201908166

# 暴雨气候下砂土边坡植被护坡模型试验研究

宋享桦<sup>1,2</sup>, 谭勇<sup>1,2</sup>, 张生杰<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

**摘要:** 为探究植被护坡固土机理, 首先进行“裸露边坡”和“植被边坡”的室内模型暴雨对比试验, 进一步对3种速生草本植物的护坡稳定性进行对比分析, 结果表明: 在植物生长过程中, 生长曲线基本呈“S”型, 根系深度约为植被地面高度的1.7~2.1倍; 在相同降雨条件下植被护坡的持续稳定状态时间是裸露边坡的2倍多, 并且裸露砂土边坡发生整体破坏时具有突发性、直线型的特点; 在3种植物护坡试验中, 根系的几何形态较为重要. 其中, 狗牙根(倒三角形根系)边坡的整体稳定性效果最好, 其次是四季青(均匀型根系)边坡, 高羊茅(锥形根系)边坡的稳定性效果最弱. 植物的根系, 在生长中可以分泌大量黏胶物质将周围细小的砂土颗粒黏接起来, 众多根系相互缠绕形成根网, 并在边坡表面可形成近22 cm厚的根-土复合体保护层结构, 起到了明显的浅层固土加筋作用. 此外, 当降雨导致坑内积水时, 四季青边坡的均匀型根系可以有效防止砂土边坡发生流塑性破坏, 对于探索新型仿生支护工艺具有一定的启发性.

**关键词:** 暴雨气候; 室内降雨试验; 植物边坡; 根系结构; 稳定性机理分析

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)05-0123-11

## Investigation on effects of vegetations on stability of sandy slope by indoor rainfall model test

SONG Xianghua<sup>1,2</sup>, TAN Yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Shengjie<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering(Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To investigate the stability mechanism of vegetations on sandy slope under rainfall, a comparative experiment between “exposed slope” and “vegetated slope” was conducted by indoor rainfall model tests. Then, three kinds of selected fast-growing vegetations (Chinese holly, Bermuda-grass, and festuca arundinacea) were planted on sandy slope to further analyze vegetation slope protection. It was found that the growth curves of the vegetations were nearly S-type during plant growth, and the root depths were about 1.7–2.1 times of the vegetation heights. Under the same rainfall condition, the steady state time of vegetated slope was two times more than that of exposed slope. The global failure of exposed sandy slope had the characteristics of suddenness and linearity. Root architectures of vegetations played an important role in slope stability. The rainfall model test results show that the overall stability of the sandy slope with Bermuda-grass was the best, followed by the Chinese holly, and then the festuca arundinacea, whose root architectures were inverted triangle, uniform, and cone, respectively. Meanwhile, the growing root could bind the surrounding fine sand particles by releasing viscose materials. Consequently, the roots of vegetations were intertwined together to form a root net, and a compacted root-soil composite protective layer structure of 22 cm in thickness was formed on the slope surface. Additionally, Chinese holly with uniform root architecture could effectively prevent the occurrence of the local flow-type failure near the slope toe in the case of ponding water at the slope base, which can help to explore new bionic support technologies.

**Keywords:** rainstorm; indoor rainfall test; vegetated slope; root architecture; stability mechanism analysis

植物边坡, 由于具有固土护坡、水土保持、美化环境、施工简单、性价比高等特点, 在公路、河堤等边坡工程中被广泛运用. 由于植物边坡固土机理复杂,

涉及植物学、水土保持学、工程学、生态学等多个领域, 一直以来许多国内外学者对此进行了重点研究<sup>[1-6]</sup>.

在植物根系的力学特性方面, Hengchaovanic<sup>[7]</sup>认为草本植物单位须根密度的剪切强度增加值是树木根系的2~3倍; Schwarz等<sup>[8]</sup>通过测试发现植被一整棵根系所能承受的最大荷载值要比单根抗拉强度相加之和很小; 李成凯<sup>[9]</sup>得出单根抗拉强度与根径之间呈幂函数或指数函数的关系. 在根与土的

收稿日期: 2019-08-28

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC0800200);  
国家自然科学基金(41877286)

作者简介: 宋享桦(1990—), 男, 博士研究生;  
谭勇(1975—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 谭勇, tanyong21th@tongji.edu.cn

相互作用中,周云艳<sup>[10]</sup>推导了植物根系锚固作用的力学模型,得出了根系极限抗拔力的计算公式;卢海静等<sup>[11]</sup>通过原位剪切试验发现,在寒旱地区中根-土复合体的抗剪强度要比素土高 47.61%~98.24%;宗全利等<sup>[12]</sup>发现根系能提高土体抗剪强度且主要是通过提高黏聚强度来实现的,对内摩擦角影响较小.基于根与边坡的稳定性,彭书生等<sup>[13]</sup>发现地表植被增加使得降雨入渗主要发生在根际区浅层土壤层中,对边坡深层的影响并不明显.此外,Leung 等<sup>[14-17]</sup>对植被根系护坡稳定性进行了数值模拟.

在以上的研究中,多是关于植物根系的抗拉能力、抗剪能力等力学性能,或者根与土之间相互作用的理论分析以及力学模型的推导.将植被护坡技术应用到砂土边坡增强其稳定性的文章却不多见.周翠英等<sup>[18]</sup>采用生态酯类纳米水性黏合剂对砂土边坡进行改良,有效提高了砂土的强度、水稳定性以及坡面的抗冲刷能力,但是在砂土表面形成的“壳体”厚度不一,具有一定的脆性,且耗量较大、造价较高;王晓春等<sup>[19]</sup>采用土工织物与植草相结合的方法对粉砂土岸坡进行护坡,效果较为明显,但是文中仅仅针对单一的植被物种进行试验,缺乏对多种不同植物的护坡性能展开进一步对比分析.韩冰<sup>[20]</sup>对沙漠地区的边坡加固方法进行了探讨,但对植物固坡机理缺乏深入的分析.

近年来,随着厄尔尼诺现象越来越频繁,在中国南方地区(如四川、贵州、湖南、广西等地),暴雨侵

袭导致各种土质边坡工程发生滑塌的事故时有报道<sup>[21-23]</sup>.因此,本文通过栽培预选试验,首先挑选了多种快速生长、固土能力较强的草本植物;然后,在对比分析相同暴雨作用下“裸露边坡”和“植被边坡”不同稳定性的基础上,进一步对 3 种不同植物根系形态的固土机理展开了探究,阐述了根-土复合体保护层的加固机理,其相关研究将有助于加深植被护坡对砂土边坡稳定性的认识和理解.此外,从工程实践的角度,此砂土边坡植被防护技术,适用于“人工填土路基边坡工程”、“放坡开挖的砂土基坑工程(在长时间施工搁置的情况下)”、“加筋填土路基工程<sup>[6]</sup>”以及“天然砂土边坡的固坡治理(如毛乌素沙漠中的沙丘固定绿化治理)”等工程中.同时,相关研究结果对于利用植物根系固土机理尝试开发新型仿生支护工艺具有一定的启发性.

## 1 栽培预选试验

为了挑选一种能够快速生长,固土能力较强的草本植物,首先进行了栽培预选试验.综合考虑植物的地面高度、根的深度、以及生长季节等多种因素,初步确定了高羊茅、狗牙根、果岭草、结缕草、四季青、剪股颖 6 种四季常青的草本植物,具体信息如表 1 所示.然后,在透明的花盆器皿(长 32.5 cm × 宽 17.5 cm × 高 15 cm)中等量均匀播种,并置于室内靠窗的阳台进行种植,室内温度保持在 20 °C 左右,如图 1 所示.

表 1 不同草本植物的生长特点

Tab. 1 Growth characteristics of different vegetations

名称	拉丁学名	特点	适用范围	适用地区
(蓝标)高羊茅	<i>Festuca arundinacea</i>	四季常青,耐寒,生长高	适用于绿化草坪、球场等,具有护坡固土作用	适用于西部地区,陕西、华南,四川、北京、河北、内蒙古和江西等地方
狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	耐高温,耐踩踏,生长矮	适用于机场景观绿化,堤岸、水库水土保持,道路两侧固土护坡等	广布于温带地区,中国黄河流域以南各地均有野生,新疆的伊犁、喀什、和田也有分布
(美国矮生)四季青	<i>Agrostis stolonifera</i>	四季常青,生长快,根系深,耐寒,耐踩踏	常用于护坡绿化工程、草坪、公园等	适宜于寒冷潮湿和温暖潮湿过渡地带
(日本)结缕草	<i>Zoysia japonica L.</i>	根茎发达,耐寒,耐旱	常用于高尔夫球场、运动场、公共绿地、庭院及护坡草坪;具有水土保持,较强的护坡、护堤作用	适宜中国北至吉林、南到海南及东南亚等广大地区
剪股颖	<i>Agrostis matsumurae</i>	四季常青,低矮,耐寒	适用于庭院、球场等绿化草坪	分布于中国四川东部、云南、贵州及华中、华东等省区
果岭草	<i>C. transadlensis</i>	生长低矮,四季常青	适用于优质草坪	适宜在气候温和、多雨的环境

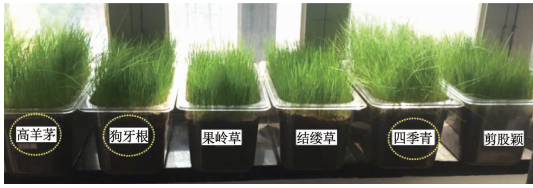


图1 栽培预选试验中草本植物的生长过程

Fig. 1 Growth process of vegetations in pilot test

在预栽培试验过程中,每天实时记录每种草的地面高度、根的深度以及发芽率等数据.其中,发芽率采用开源程序,利用某种颜色在所得照片图中所占比例的原理进行计算.经过18 d的生长周期,6种草本植物的生长状如图6(黑色曲线)所示.可以看出,生长速度依次为:四季青 > 高羊茅 > 狗牙根 > 剪股颖 ≈ 结缕草 ≈ 果岭草.在植被发芽率方面,最高的是四季青,其次是高羊茅和狗牙根;并且草本植物的生长曲线整体上均表现出“慢—快—慢”(S型)的基本规律,如图6(b)所示.

同时,采用数显式峰值拉力计,对每一种草的抗拔力进行测试.多次测量得到的平均值(如图2(a)所示),依次为:四季青(29 N) > 高羊茅(27.97 N) > 结缕草(21.5 N) > 剪股颖(21.33 N) > 狗牙根(20.8 N) > 果岭草(11.5 N).同时,在研究植物根系固土时发现,狗牙根的抗拔能力小于四季青的,但

是其固土能力要强于四季青,如图2(b)所示.由此推断,植被的固土能力不仅与根系的抗拉强度有关,还可能与植物的根系结构、抗剪能力等相关.综上,初步选定生长速度较快,根系较深的高羊茅、四季青和固土能力较强的狗牙根3种草,为进一步开展暴雨条件下浅层植被护坡的稳定性试验做准备.

## 2 暴雨试验设计及方案

室内暴雨植被护坡试验装置,主要由模型箱、降雨控制系统、图像采集系统以及排水系统4部分组成,如图3所示.

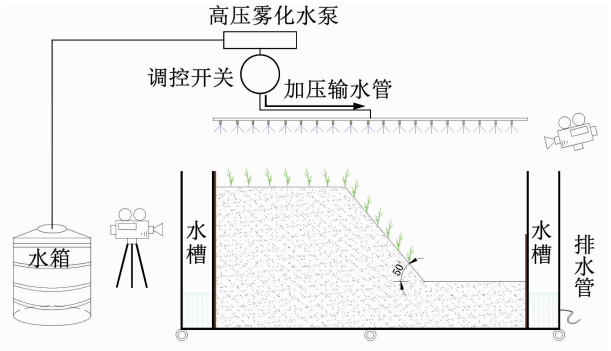


图3 室内降雨植被护坡试验

Fig. 3 Rainfall experiment of vegetated slope

### 2.1 试验设备

#### 2.1.1 模型箱与排水系统

整个模型箱尺寸为2.0 m × 1.2 m × 1 m(长 × 宽 × 高),主要由挡墙、隔板以及钢铁框架组成.为了方便试验观察,挡墙、隔板均采用透明的聚甲基丙烯酸甲酯有机玻璃板(PMMA).中间的两块隔板可以通过导轨和吊装装置实现前后上下自由移动,如图4所示.

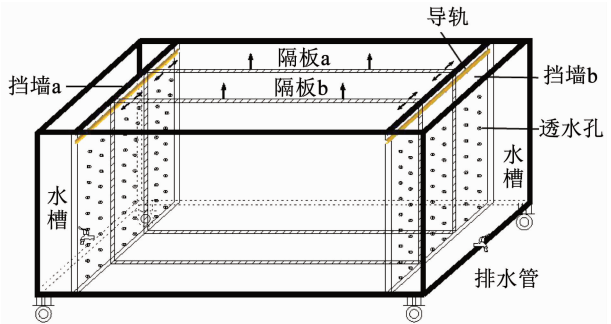
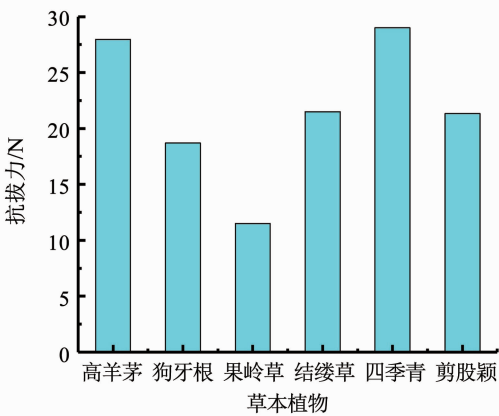


图4 植物护坡模型箱示意

Fig. 4 Model box of vegetated slope

同时,在模型箱的两侧设有20 cm宽的水槽,水流通过中间挡墙预留的孔洞进行流动,可以实时观察边坡内部的水位.为了防止砂土流失,在挡墙内侧放置一层薄薄纱布.此模型箱可以同时模拟3种不同的草本植物,对比分析在同一暴雨强度下的护坡



(a) 抗拔力比较



(b) 固土能力的体现

图2 6种草本植物的抗拔力和固土能力的比较

Fig. 2 Comparison of pullout resistance and soil holding capacity of vegetations

效果.此外,在水槽的底部设置了排水孔,通过调节开关大小实现自由排水.

### 2.1.2 降雨控制系统

降雨控制系统由高压雾化水泵、供水箱、导水管、雾化喷头组成.试验前,经过雨量标定,本降雨装置的降雨强度范围在 0 ~ 132.6 mm/h,所喷出的雨水呈雾化状,可以最大程度将雨水有效均匀地喷洒土体表面,避免水滴状雨水对土体表面造成冲刷.

### 2.1.3 图像采集系统

图像采集系统由高清数码相机、摄像机、电脑以及两台摄影灯光组成,如图 3 所示.在模型箱的正前方放置一台高清数码相机(EOS-800D),斜上方放置一台高速 4K 摄像机(FDR-AK45),可以全程无死角地记录整个试验过程,获得高清图像.

## 2.2 前期种植过程

### 2.2.1 边坡设计

本试验采用福建标准砂,其颗粒粒径范围在 0.08 ~ 2 mm.经过测量,砂土的平均渗透系数为  $7.66 \times 10^{-3}$  cm/s,内摩擦角为  $40.7^\circ$ .同时,采用 SLOPE/W 专业软件,考虑非饱和土基质吸力的作用,得出当边坡高度为 6 m 时,若要保证边坡安全系数为 1.2,放坡角度可达  $50^\circ$ .综合考虑模型箱和边坡模型的边界尺寸效应,最终确定边坡模型的相似比为 1:10,如图 5(c) 所示.

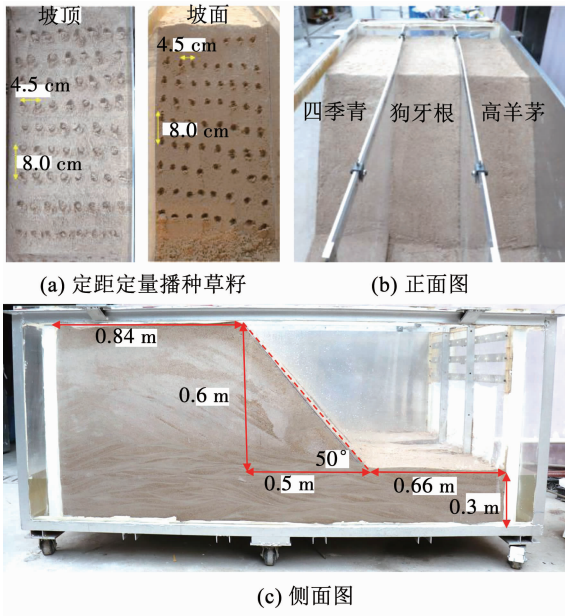


图 5 室内植物护坡模型试验

Fig. 5 Indoor vegetation slope protection model test

### 2.2.2 草籽播种和种植养护

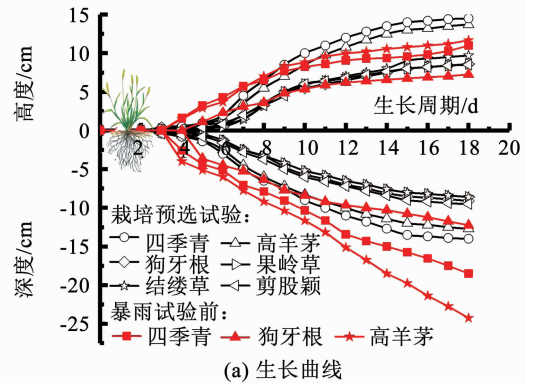
为了增强试验的严谨性,采用定距定量的方式进行播种,如图 5(a) 所示.在边坡表面,横向距离和纵向距离每隔 4.5,8 cm 播种 10 粒草籽.待种植完

毕,将边坡表面抚平,最后 3 种植物(四季青、狗牙根、高羊茅)的护坡模型试验如图 5(b) 所示.

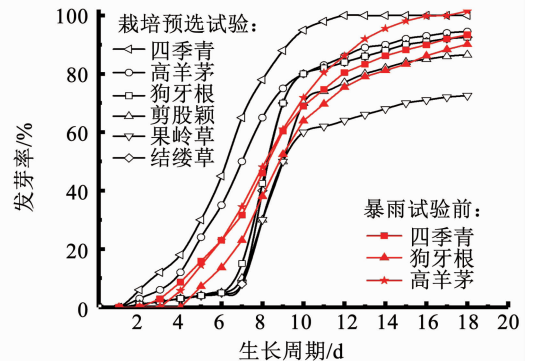
### 2.2.3 生长数据

由于砂土介质渗透系数较大,为了保证植物正常生长,采用雾化降雨方式,每日 8 点、13 点和 18 点定时喷灌(每次喷灌量为 30 L),并采用加入植物通用型营养液的方式(每次 5 mL),及时补充植物生长所需的氮磷钾等营养物质.在草本植物的生长过程中,每日 17 点分别测量 3 种植物高度、根系深度以及发芽率.考虑到边坡含水量分布不均可能会使得植物的生长速度略有差异,在测量时分别选取坡顶、坡肩、坡中、坡脚 4 个部位进行测量,最终取平均值.

图 6 中,红色曲线代表模型箱中正式暴雨试验前期植被的生长状态.可以看出,高羊茅的生长速度最快,在第 3 天便开始发芽,并且根系最深,其次是四季青,狗牙根的生长速度最慢(图 6(a)).与前期透明器皿中的栽培预选试验相比,模型箱中的植物根系更深一些,约为植被地面高度的 1.7 ~ 2.1 倍,这主要是由于模型箱中有足够的生长空间;在发芽率方面,二者均呈现出“慢—快—慢”(S 型)的生长规律.



(a) 生长曲线



(b) 发芽率曲线

图 6 栽培预选试验和暴雨试验前期植被的生长状态

Fig. 6 Growth curves of vegetations during pilot test and rainfall experiment

## 3 暴雨试验设计及方案

本次试验一共分为两组,即裸露边坡和植物护

坡. 根据中国气象局的降雨等级, 24 h 内降雨量在 50.0 ~ 99.9 mm 为暴雨, 100.0 ~ 249.9 mm 为大暴雨. 本次试验选取大暴雨级别, 并简化降雨量为 100 ~ 250 mm/d (即 4.16 ~ 10.42 mm/h), 由于试验相似比为 1:10, 转化后试验中的降雨量为 41.6 ~ 104.2 mm/h. 考虑到近几年厄尔尼诺现象愈发严重, 为了突出对比试验的效果, 最终确定雨强为 120 mm/h. 由于本试验重点探究浅层植被对砂土边坡稳定性的影响, 因而忽略不同雨型以及雨强因素, 统一为均匀雨型. 具体试验方案见表 2.

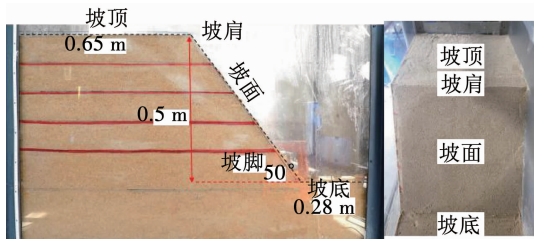
表 2 室内暴雨气候边坡试验

Tab.2 Indoor slope stability test under rainstorm

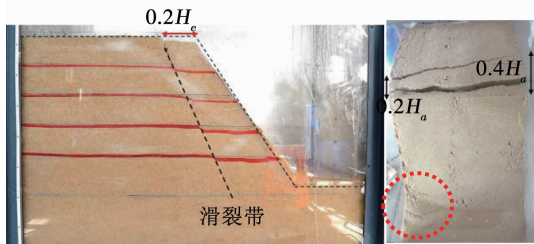
组别	砂土密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	降雨强度/ ( $mm \cdot h^{-1}$ )	渗透系数/ ( $10^{-3} cm \cdot s^{-1}$ )	边坡角度/ ( $^{\circ}$ )	坡面
裸露边坡	1.729	120	7.66	50	无
植物边坡	1.712	120	7.66	50	有植被

### 3.1 暴雨作用下裸露坡试验

暴雨作用下裸露边坡的前期稳定阶段如图 7(a) 所示; 当降雨至 1 800 s 时, 整个边坡直接突然发生整体直线型转移破坏, 并在坡顶区域引发塌陷, 产生了 2 条横向发展的裂缝, 如图 7(b). 在坡顶区域中, 裂缝左侧距离坡肩  $0.2H_a$  ( $H_a$  为裸露边坡高度), 裂缝右侧距离坡肩  $0.4H_a$ . 此外, 坡脚左侧在雨水渗流的作用下出现轻微的流滑鼓肚变形. 整体上, 在 120 mm/h 的暴雨作用下, 裸露边坡并没有发生太多的局部破坏, 而是直接突然发生整体性破坏, 时间仅用了 30 min.



(a) 前期稳定阶段



(b) 降雨至 1 800 s 时, 突然发生整体破坏

图 7 暴雨作用下裸露砂土边坡试验过程

Fig. 7 Experiment of exposed sandy slope under rainfall

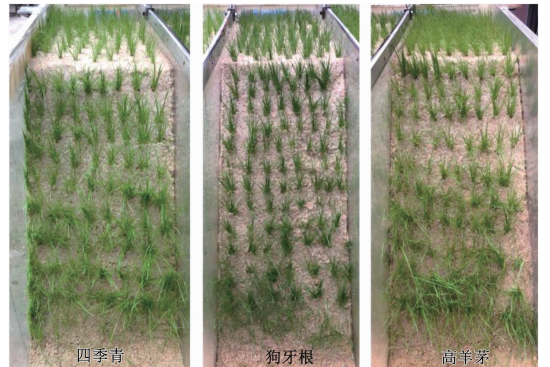
### 3.2 暴雨作用下植物护坡试验

为了探究植被的固土护坡机理, 在进行裸露边坡降雨试验的同时, 进行了同等降雨强度下植被护坡试验. 两个试验在土壤介质、边坡角度以及降雨强

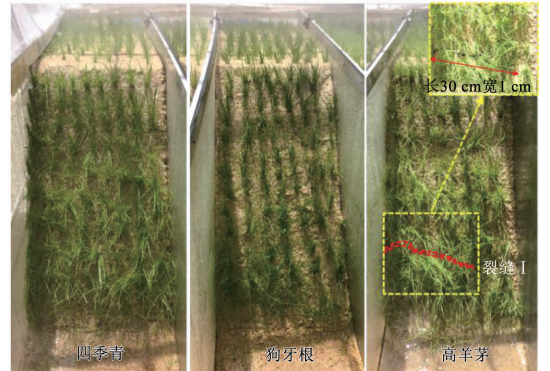
度等方面均保持了一致性.

#### 3.2.1 从初始状态至稳定渗流阶段

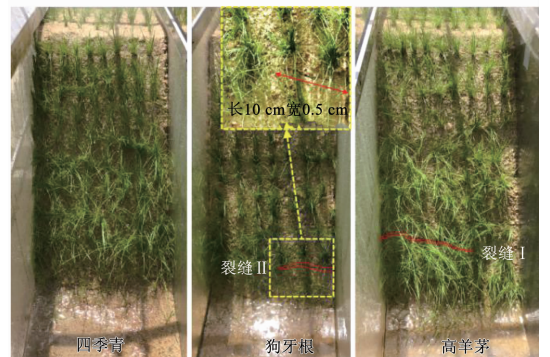
为了突出渗流场的变化路径, 仅在降雨阶段加入有色颜料, 颜料对植物根系不会产生影响. 暴雨作用下整个植被护坡试验过程, 如图 8, 9 所示.



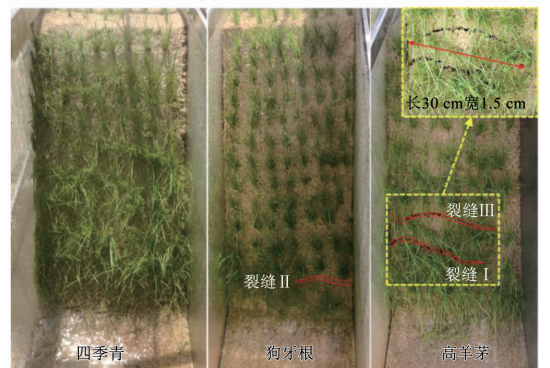
(a) 初始状态



(b) 降雨至 61 min 43 s



(c) 降雨至 70 min



(d) 降雨至 80 min 30 s

图 8 暴雨作用下植物护坡试验正面图

Fig. 8 Front views of vegetated slope under rainfall

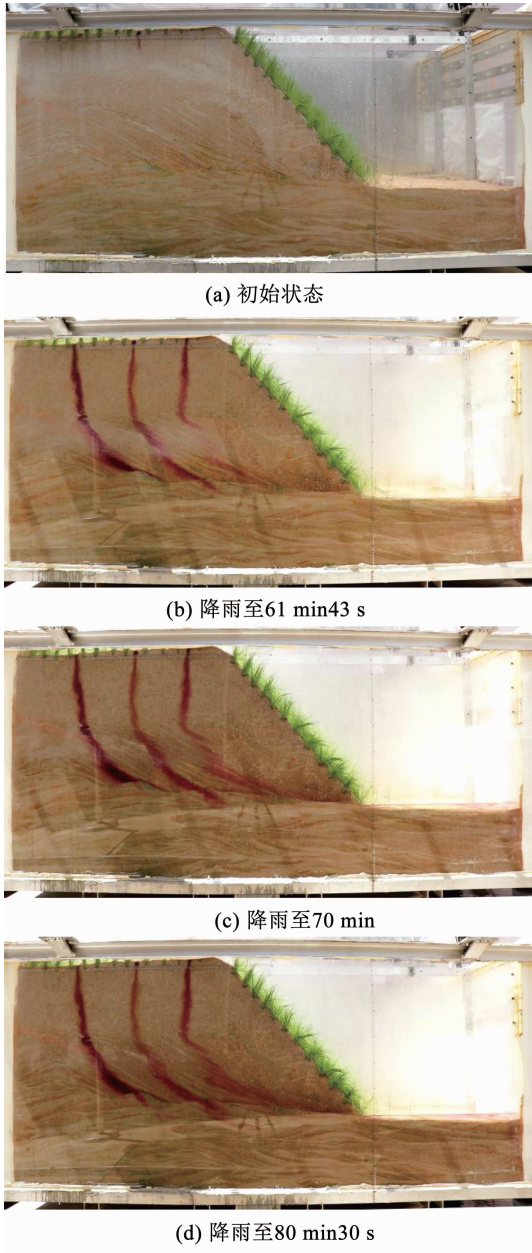


图 9 暴雨作用下植物护坡试验侧面图

Fig. 9 Side views of vegetated slope under rainfall

在暴雨作用下,雨水从坡顶入渗,逐渐流向坡脚,整个边坡的渗流线如图 9 所示. 当降雨至 61 min 43 s 时,红色的渗流线已达到坡底,此时高羊茅边坡出现第一条“裂缝 I”(图 8(b)),裂缝的初始位置垂直距离坑底为  $0.3 H_b$  ( $H_b$  为植物边坡高度, 60 cm);当降雨至 70 min 时,位于中间位置的狗牙根边坡开始出现“裂缝 II”(图 8(c)),裂缝垂直距离坑底为  $0.13 H_b$ ;当降雨至 80 min 30 s 时,在高羊茅边坡“裂缝 I”的基础上,垂直距离坑底为  $0.38 H_b$  的边坡部位出现“裂缝 III”(图 8(d)). 此后,降雨又进行了 61 min,由于水位线一直控制在坑底以下 10 cm 左右,3 条裂缝均一直保持原有状态,未发生较大变化. 可见此时整个边坡已经达到了稳定渗流阶段.

### 3.2.2 坑内积水阶段

在暴雨天气下,如果雨量较大,一旦排水不及时往往容易造成积水现象. 因而,在前期试验的基础上,将排水管关闭,模拟积水状态下的植物护坡稳定性试验,如图 10,11 所示.

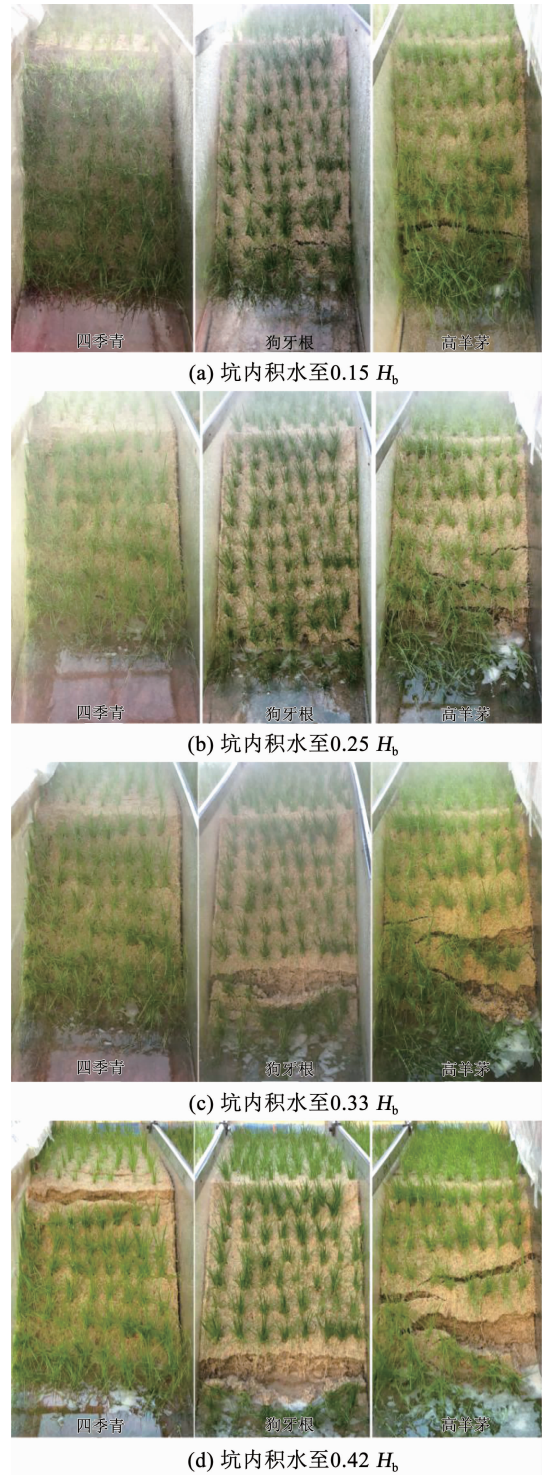


图 10 植物护坡“坑内积水”试验正面图

Fig. 10 Front views of vegetated slope with ponding water at slope base

从图 10(a)可以看出:当坑内积水为  $0.15 H_b$  时,高羊茅边坡的“裂缝 III”逐渐开始变宽加深,并

且由于坑底遭到浸泡, 整个边坡坡脚处的土体逐渐向坑底滑移; 狗牙根边坡中“裂缝 II”也开始逐渐变宽加深; 四季青边坡依旧保持整体的完整性, 未出现任何裂缝等局部破坏。

当坑内积水为  $0.25 H_0$  时, 随着水位的不断上涨, 在高羊茅边坡上部出现更多的横向裂缝; 狗牙根边坡暂时未出现较大的裂缝变化; 同时, 四季青边坡仍旧保持边坡的完整性(图 10(b)), 即使坡脚砂土处于饱和状态中却未发生流塑性滑移破坏(图 11(b))。由此可见, 草本植物的根系结构对边坡的稳定性起到了明显作用。

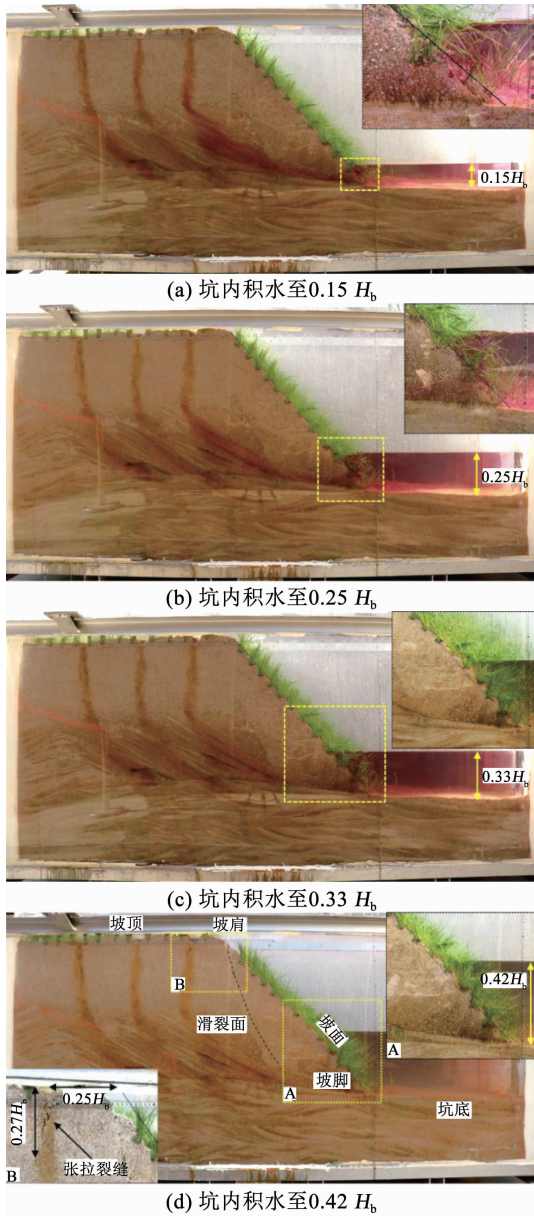


图 11 植物护坡“坑内积水”试验侧面图(四季青边坡)

Fig. 11 Side views of vegetated slope with ponding water at slope base (Chinese holly)

随着水位越来越高, 当坑内积水达  $0.33 H_0$  时, 之前发生较多的局部裂缝破坏, 最终导致高羊茅边

坡突然发生整体坍塌破坏; 狗牙根边坡, 在原有坡面裂缝的基础上出现了整齐的横截式断裂, 暴露出的根系清晰可见; 四季青边坡, 依旧保持了边坡的完整性, 仍未发现有裂缝出现。同时, 从边坡的侧面图中也可以看到(图 11(c))。

当暴雨入渗导致坑内积水达  $0.42 H_0$  时, 之前完整的四季青边坡突然发生整体式滑移破坏, 滑裂面几乎呈直线型, 边坡整体滑移导致坡顶区域出现张拉裂缝, 其纵向深度为  $0.27 H_0$ , 距离坡肩  $0.25 H_0$ , 如图 11(d) 所示; 而在狗牙根边坡中, 在渗流场和重力场的作用下, 整齐的横截面裂缝破坏形态进一步加剧, 但未发生整体性滑移破坏。而高羊茅边坡, 前一阶段已经发生整体破坏。

### 3.3 对比分析

#### 3.3.1 植被护坡与裸露边坡

相同暴雨强度下, 裸露边坡的稳定时间仅维持了 30 min, 而植被边坡持续了 61 min 43 s(截止到高羊茅边坡发生“裂缝 I”), 时间是同等条件下“裸露边坡”的 2 倍多, 可见植物边坡具有明显的护坡作用。在破坏形式上, 裸露边坡容易突然发生整体滑移破坏, 而植被边坡更倾向于先出现较多的局部坡面裂缝破坏, 当累积到一定程度时, 最终引发整体破坏。

#### 3.3.2 3 种植被护坡对比分析

如图 12 所示, 在稳定渗流阶段时, 高羊茅边坡和狗牙根边坡先后发生了局部的坡面裂缝破坏, 而四季青边坡保持了完整性; 在模拟坑内积水阶段, 四季青边坡和高羊茅边坡先后发生整体破坏, 而狗牙根边坡却未发生。结合之前的根系生长曲线(图 6), 根系最长(24.25 cm)的高羊茅边坡首先发生了局部破坏, 根系较长(18.5 cm)的四季青边坡首先发生了整体破坏, 根系最短(12.25 cm)的狗牙根边坡根系深度虽然发生了局部破坏, 却未发生整体性破坏。由此推断, 在植物边坡的稳定性中, 除了根系深度, 很可能还有其他因素起着十分重要的作用。因此, 针对植物根系展开了进一步探究。

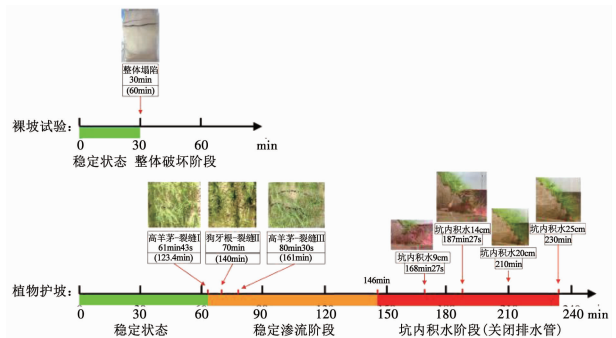


图 12 “裸露边坡”与“植被护坡”对比分析

Fig. 12 Comparative analysis of “exposed slope” and “vegetated slope”

### 4 植物根系与固土机理分析

#### 4.1 根系形态与边坡稳定性

为了保证植物根系在土壤中的原有形态,将 3 种植物的根系进行原位取出,如图 13(a)所示,从左向右依次为四季青、狗牙根、高羊茅.从根系附土形态的角度可以看出:四季青的根系整体上下比较均匀;狗牙根的根系,上端附土量较多,下端较少,整体上呈倒立的三角形;高羊茅的根系,从上往下逐渐减少,呈现出平滑的锥形结构.为了进一步探究,在尽量保证根系原位形态的基础上,将其附土慢慢清洗,得到干净的根系结构,如图 13(b)所示,可以看出:四季青根系结构整体上呈均匀型;狗牙根的根系呈倒立的三角形;高羊茅根系的根系结构基本上呈锥形形态.

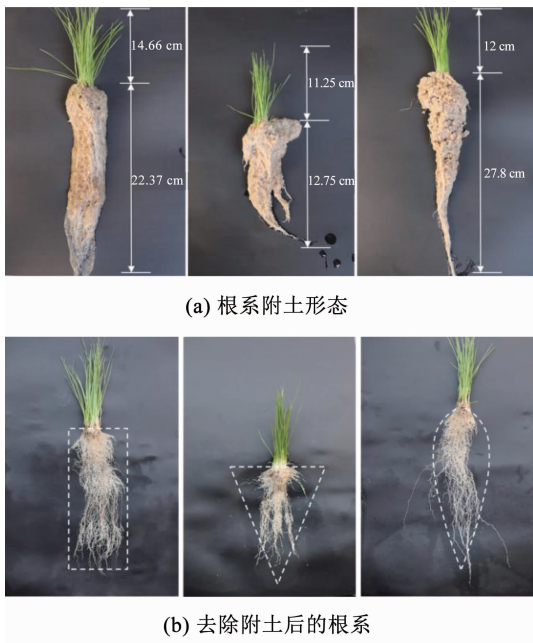


图 13 根系结构形态

Fig. 13 Root architectures of different vegetations

暴雨作用下植被护坡的破坏形态如图 14 所示.首先,在重力的作用下,四季青边坡的根系竖向发展,根系较深,并且呈均匀形态,表现出浅层竖向加筋作用,明显提高了边坡浅层土体的抗剪强度.从而,在坑内积水达到  $0.42 H_0$  之前,使得边坡一直保持着较好的完整性.

对于狗牙根边坡,起初由于根系较浅,根系固土的抗剪能力未能充分体现,在试验前期发生“裂缝 II”;由于其根系呈倒立的三角形,从俯视图中可以看到根系的上半部分直径较大 ( $W_2$ ),植株之间有重叠部分,从而在水平方向上有明显的相互交织连接作用,所以,在后期当坑内积水达到  $0.33 H_0$  时,发生了整齐的横截面裂缝破坏(图 10(c));同时,在暴雨试验相同时间内,狗牙根边坡未发生整体性破坏,由此推断根系呈倒立三角形形态的狗牙根植被整体稳定性效果最好.

对于高羊茅边坡,虽然根系深度较长,但是根系形态整体上呈锥形,在根系的末端,无法提供较强的抗剪能力;同时从俯视图可以看到,每一株高羊茅的根系影响范围相互之间没有交集,无法相互交织连接,从而未能形成一个整体,因此,发生了较多的坡面局部裂缝破坏,并最终导致边坡发生整体破坏.

此外,考虑到狗牙根植被生长速度较慢,18 d 的短期培养未必能充分体现其护坡效果.因此,从边坡的稳定性出发,综上所述可以得出:根系结构呈倒三角形形态的狗牙根植被护坡效果最好,其次是呈均匀型态的四季青植被,最后是呈锥形结构的高羊茅植被.

#### 4.2 根-土复合体保护层(固土机理)

在分析完植物根系与边坡稳定性的基础上,进一步探究根系与边坡土颗粒之间的相互关系.如图 15 所示,从边坡的侧面图可以看到黄线外围的土层颜色较深,而黄线以内的土层颜色较浅.这主要是

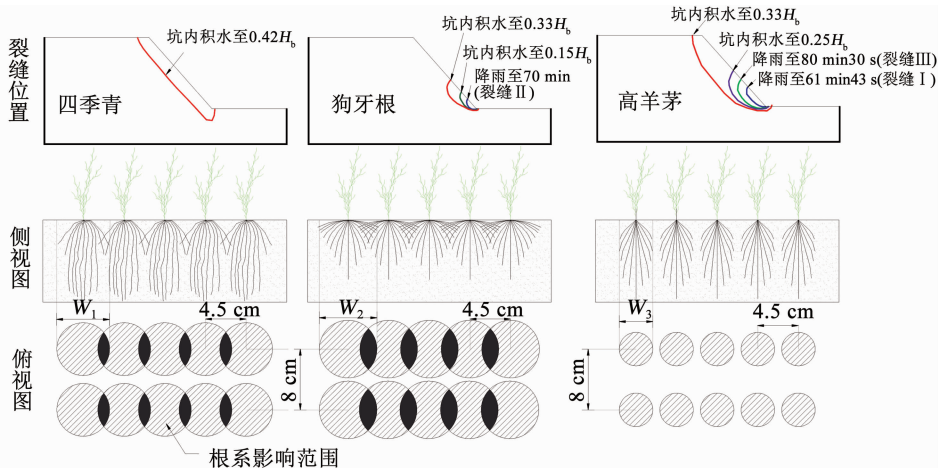


图 14 3 种植物边坡不同的根系形态和破坏形式对比分析

Fig. 14 Comparative analysis of root architectures and failure models of three vegetation slopes

因为植被的根部具有水土保持的功能, 长时间作用下导致根系区土壤含有较高的含水量, 从而使坡体内部的含水量分布出现变化. 黄色曲线在一定程度上代表着土壤水分分界线, 浅层土壤颜色越深, 表明水分越高, 反之亦然.

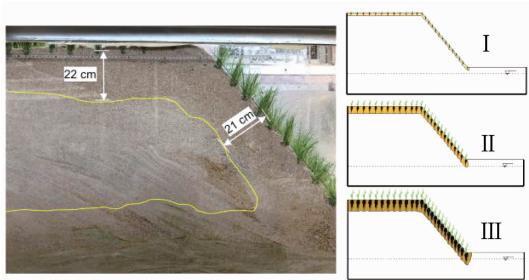


图 15 植物根-土复合体及发展过程示意

Fig. 15 Root-soil composite layer structure and its development process

在植物生长初期, 不断生长的根系将周围的砂土颗粒黏接起来, 使得边坡表面能够抵抗风雨的冲刷, 起到了明显的固土抗冲蚀效果. 同时, 每次雾化降雨形成的渗流作用不断将土体中的细小颗粒涌向大颗粒之间, 土层变得更加密实(图 16 中,  $H_2 < H_1$ ).

随着植物的不断生长, 根系不断加深扩展, 众多根系相互连接形成根网, 将周围越来越多的土颗粒紧紧套箍在一起, 抗冲蚀性能进一步加强; 同时, 植物的蒸腾作用, 通过根系不断吸水, 在根系周围产生负孔隙水压力<sup>[24]</sup>, 砂土颗粒进一步变得密实(图 16 中,  $H_3 < H_2$ ).

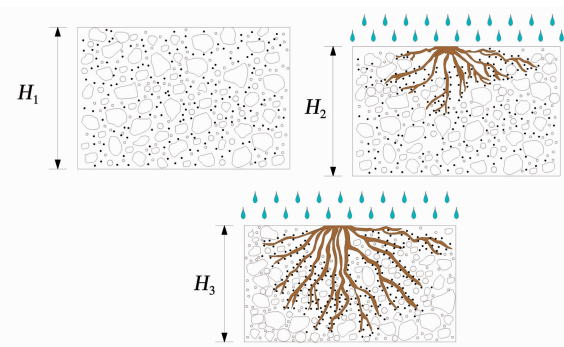


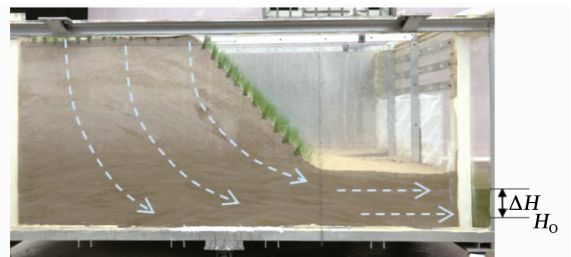
图 16 根-土复合体加固土体机理

Fig. 16 Mechanism of root-soil composite protective layer structure

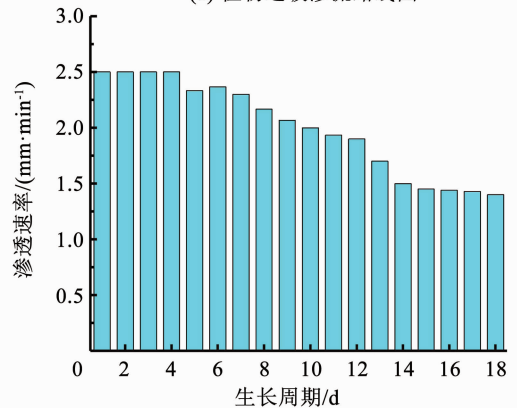
因此, 在长时间作用下, 边坡浅层的“根-土复合体”逐渐变得密实, 而土体内部(浅层之外)的土颗粒之间相对疏松, 从而形成了外密内疏的双层结构. 在“根-土复合体”结构中, 根与土相互缠绕, 起

到加筋作用, 具备较强的抗剪强度和一定的整体性, 而且又覆盖在边坡表面, 减少了砂土颗粒的流失, 提高了土壤抗冲蚀能力, 大大增强了边坡的稳定性, 起到了非常重要的保护层作用.

此外, “根-土复合体”保护层还可以降低砂土的渗透性, 抵抗暴雨的冲刷, 对于水土保持起到了积极作用. 如图 17(a) 所示, 在前期培育过程中, 根据渗流路径, 在每次雾化降雨喷洒前, 首先记录水槽内的初始高度 ( $H_0$ ); 当降雨喷洒开始时, 开始记录水槽内 30 min 后水位上升的变化高度 ( $\Delta H$ ), 从而得到渗流速率, 如图 17(b). 可以看出, 在草本植物的整个生长周期中, 随着植物的不断生长, 根-土复合保护层逐渐生成, 渗流速度逐渐降低, 由此可见, 植被边坡可以降低砂土的渗透性, 具有一定的水土保持功能.



(a) 植物边坡渗流路线图



(b) 植物边坡渗流速度变化

图 17 植物边坡渗流变化

Fig. 17 Changes in infiltration rate of vegetated slope

与此同时, 进一步对植被根系展开微观观察时, 可以看到每一根须根周围均附着满了细小的砂土颗粒(图 18). 究其原因, 主要是在植物根系生长发育过程中, 能够分泌大量黏胶物质和多糖类物质<sup>[10]</sup>, 这些物质能将周围的土粒黏接起来, 进一步提高了土壤的黏聚力和整体性, 在一定程度上起到了明显的固土作用.

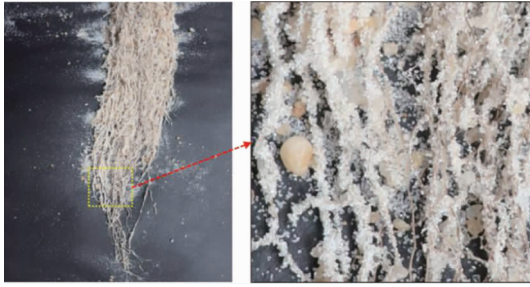


图 18 植物须根附着细小颗粒

Fig. 18 Vegetation fibrous roots attached with fine sand particles

## 5 结 论

1) 在暴雨试验前期植被养护过程中,植物的生长速度和根系深度均为:高羊茅 > 四季青 > 狗牙根;并且,草本植物的生长曲线呈现出“慢—快—慢”(S型)的基本规律,根系深度为植被地面高度的 1.7~2.1 倍。

2) 在相同暴雨强度作用下,裸露边坡在第 30 分钟时便突然发生整体破坏,而植被边坡在 61 min 43 s 时才开始发生局部裂缝破坏。在时间上,后者是前者的 2 倍多,可见对于增强边坡的稳定性具有明显效果。此外,裸露的砂土边坡发生整体破坏时,具有突发性、直线型的特点。

3) 在暴雨作用下植被护坡试验过程中,从降雨开始至稳定渗流阶段,四季青边坡的均匀型根系有效防止了砂土边坡发生流塑变形,这对于探索新型仿生支护工艺并应用于沙漠边坡中,具有一定的启发性。总体而言,狗牙根(倒三角型根系)边坡的整体稳定性效果最好,其次是四季青(均匀型根系)边坡,高羊茅(锥形根系)边坡的稳定性效果最弱。

4) 在生长过程中,植物根系通过分泌大量黏胶物质将周围细小的砂土颗粒黏接起来,并且众多根系互相连接形成根网,形成了紧密的根-土复合体加筋保护层结构(厚度可达 22 cm),具有明显的加筋作用和抗冲蚀性能,同时,降低了砂土的渗透性,具有一定的水土保持功效。

5) 鉴于文章篇幅,本文主要体现了暴雨过程中浅层植被护坡与边坡稳定性之间的联系。此外,还应进行根土复合体的抗剪试验,对不同根系形态的力学机理、边坡的几何形态展开更深层次的机理分析,并进行理论公式的推导,从而成为一个较为完善的研究体系。

## 参 考 文 献

[1] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2):

3445

ZHU Haili, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3445. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.z2.021

[2] 程洪, 谢涛, 唐春, 等. 植物根系力学与固土作用机理研究综述[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 97

CHENG Hong, XIE Tao, TANG Chun, et al. Overview of mechanism of plant roots improving soil reinforcement and slope stabilization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(1): 97. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2006.01.023

[3] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2051

LI Shaocai, SUN Hailong, YANG Zhirong, et al. Mechanical characteristics of interaction between root system of plants and rock for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2051. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.10.016

[4] 王可钧, 李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687

WANG Kejun, LEE C F. Brief mechanics analysis on bioengineering techniques for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687

[5] ROERING J J, SCHMIDT K M, STOCK J D, et al. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 237. DOI: 10.1139/t02-113

[6] HAN Jie, GUO Jun. Geosynthetics used to stabilize vegetated surfaces for environmental sustainability in civil engineering[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2017, 11(1): 56. DOI: 10.1007/s11709-016-0380-8

[7] HENGCHAOVANICH D. VGT: A bioengineering and phytoremediation option for the New Millennium[C]//Proceedings of Second International Vetiver Conference. Bangkok: [s.n.], 2000: 23

[8] SCHWARZ M, COHEN D, OR D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2011, 116(F2): 2011. DOI: 10.1029/2010JF001753

[9] 李成凯. 青藏高原黄土区四种草本植物单根抗拉特性研究[J]. 中国水土保持, 2008(5): 33

LI Chengkai. Tensile characteristics of single root of 4-type herbs grown in loess region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(5): 33. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2008.05.025

[10] 周云艳. 植物根系固土机理与护坡技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010

ZHOU Yunyan. Study on mechanism of soil reinforcement by roots and slope protection technology[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010

[11] 卢海静, 胡夏嵩, 付江涛, 等. 寒旱环境植物根系增强边坡土体抗剪强度的原位剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1712

LU Haijing, HU Xiasong, FU Jiangtao, et al. In-situ shearing test on the shear strength of soil slope reinforced by plant roots in cold and arid environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2016, 35(8): 1712. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1172
- [12] 宗全利, 冯博, 蔡杭兵, 等. 塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1  
ZONG Quanli, FENG Bo, CAI Hangbing, et al. Mechanism of riverbank protection by desert riparian vegetation roots in Tarim River basin [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1371
- [13] 彭书生, 王永波, 盛谦, 等. 植被增加边坡降雨入渗对边坡稳定性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(7): 1274  
PENG Shusheng, WANG Yongbo, SHENG Qian, et al. Study on enhancement of precipitation infiltration by vegetation and its effect on slope stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(7): 1274. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2007.zl.020
- [14] LEUNG A K, KAMCHOOM V, NG C W W. Influences of root-induced soil suction and root geometry on slope stability: A centrifuge study[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(3). DOI: 10.1139/cgj-2015-0263
- [15] SWITALEA B M, WU W. Numerical modelling of rainfall-induced instability of vegetated slopes[J]. Géotechnique, 2018, 68(6): 481. DOI: 10.1680/jgeot.16.P.176
- [16] 安然, 柴军瑞, 覃源, 等. 植被根系形态对边坡稳定性的影响分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(3): 150  
AN Ran, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Analysis on effect of vegetation root-system morphology on slope stability [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(3): 150. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.03.022
- [17] 肖本林, 罗寿龙, 陈军, 等. 根系生态护坡的有限元分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1881  
XIAO Benlin, LUO Shoulong, CHEN Jun, et al. Finite element analysis of eco-protection slope through roots [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1881. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.06.046
- [18] 周翠英, 赵珊珊, 杨旭, 等. 生态酯类材料砂土改良及工程护坡应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4828  
ZHOU Cuiying, ZHAO Shanshan, YANG Xu, et al. Improvement of eco-ester materials on sandy soils and engineering slope protection [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4828. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1991
- [19] 王晓春, 王远明, 张桂荣, 等. 粉砂土岸坡三维加筋生态护坡结构力学效应研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 91  
WANG Xiaochun, WANG Yuanming, ZHANG Guirong, et al. Mechanical effect of three-dimensional reinforced eco-structure on silty sand slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 91. DOI: 10.11779/CJGE2018S2019
- [20] 韩冰. 浅析沙漠地区边坡的加固方法[J]. 城市建设, 2010(9): 377  
HAN Bing. Analysis of slope reinforcement in desert area[J]. City Construction, 2010(9): 377
- [21] 刘鸿. 受特大暴雨袭击赤水河谷旅游公路多处中断[EB/OL]. 贵州都市报(2016-05-19)[2019-09-21]. <http://gz.sina.com.cn/news/ms/2016-05-19/detail-ifsxktkr5734979.shtml?from>
- [22] 熊运福. 众志成城战洪魔——湖南省通平高速公路抢险救灾纪实[EB/OL]. (2011-06-29)[2019-09-21]. <http://www.mzyfz.com/html/1380/2011-06-29/content-90787.html>
- [23] 周睿. 广西累计10条普通公路因强对流天气交通中断(图)[EB/OL]. (2014-05-12)[2019-09-21]. <http://www.gxnews.com.cn/staticpages/20140512/newgx5370cd00-10279658.shtml?pcview=1>
- [24] LIU H W, FENG S, NG C W W. Analytical analysis of hydraulic effect of vegetation on shallow slope stability with different root architectures [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 80: 115. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.06.006

(编辑 刘彤)