

文章编号:1673-9469(2022)04-0086-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.012

边坡植被固土抗冲刷特性及其护坡机理研究

梅红¹, 胡国长², 王禄艺¹, 梅绪哲¹, 刘瑾^{1*}, 徐佳俊¹, 杨欣雅¹, 杨诺¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100; 2. 江苏省山水生态环境建设工程有限公司, 江苏南京 210000)

摘要: 为了研究植物对土体蒸发速率和抗冲刷特性的影响及其变化规律, 选择常用护坡植物黑麦草与紫花苜蓿两类植物进行蒸发试验和抗冲刷试验, 分析了在不同植物种子配比条件下, 试样在植物生长时期的蒸发速率, 结合图像二值化方法得到植物生长 14 d 后的植被覆盖率, 分析不同植物种子配比条件下土体抗冲刷特性。植物生长试样所用混合植物种子设置 5 种配比, 黑麦草与紫花苜蓿的配比分别为 1:0、0.7:0.3、0.5:0.5、0.3:0.7 和 0:1, 植物生长周期设置为 14 d。试验结果表明: 紫花苜蓿在植被生长发育前期对土体蒸发速率影响效果更为显著, 在生长稳定期所有配比的试样蒸发速率趋于一致; 利用图像二值化方法得出黑麦草与紫花苜蓿配比为 3:7 时植被覆盖率最高, 为 80.1%; 混合配比试样的植被覆盖率的提高, 其发育的植物茎叶减少雨水对土体的冲击并减弱径流侵蚀, 不同类型的根系与土体结合, 增大根系影响深度并增强加筋作用, 增强了土体抗冲刷性能。

关键词: 地质灾害治理; 矿山修复; 植被护坡; 抗冲刷特性; 护坡机理

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Study on Erosion Resistance Property of Slope Vegetation Soil Consolidation and Slope Protection Mechanism

MEI Hong¹, HU Guochang², WANG Luyi¹, MEI Xuzhe¹, LIU Jin^{1*},
XU Jiajun¹, YANG Xinya¹, YANG Nuo¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. Jiangsu Shanshui Resources Development Group Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: In order to study the influence of plants on soil evaporation rate and erosion resistance characteristics and the changing rules, two types of plants commonly used for slope protection, ryegrass and alfalfa, were selected for evaporation test and erosion resistance test. The evaporation rate of samples during plant growth period was analyzed under different plant seed proportion conditions, and the vegetation coverage after 14 days of plant growth is obtained by combining image binarization method. The anti erosion characteristics of soil under different plant seed proportion were analyzed. The mixed plant seeds used in the plant growth sample were set with five ratios, the ratios of ryegrass and alfalfa were 1:0, 0.7:0.3, 0.5:0.5, 0.3:0.7 and 0:1 respectively, and the plant growth cycle was set at 14 days. The results shows that alfalfa has a more significant effect on soil evaporation rate in the early stage of vegetation growth and development, and the evaporation rate of all proportions of samples tend to be consistent in the stable growth period; Using the method of image binarization, it is concluded that the highest vegetation coverage is 80.1% when the ratio of ryegrass to alfalfa is 3:7; With the increase of the vegetation coverage of the mixed proportion sample, the developed plant stems and leaves reduce the impact of rainwater on the soil and weaken the runoff erosion. Different types of roots combine with the soil to increase the depth of root influence and enhance the reinforcement effect, and enhance the

收稿日期:2022-05-12

基金项目:江苏省地质矿产勘查局科研项目(2019KY13);国家自然科学基金面上项目(41877212)

作者简介:梅红(1976-),女,吉林永吉人,硕士,高级实验师,主要从事精密工程测量、变形监测与安全监控方面研究。

* 通讯作者:刘瑾(1983-),女,福建漳州人,博士,教授,主要从事环境地质工程方面研究。

anti scouring performance of the soil.

Key words: geological disaster control; mine restoration; vegetation slope protection; erosion resistance property; slope protection mechanism

随着我国经济的飞速发展,矿产资源作为一种不可再生资源,在我国能源结构中发挥了不可替代的作用。但在矿山开采过程中,由于人为剥离表土等采用活动,造成矿区植被覆盖大幅度减少,最终引起落石、滑坡等地质灾害的出现,坡表的植被缺失也对矿山范围内的生态环境,对整个矿山区域的生态环境也产生了较大的危害,严重影响矿区的生态平衡和自然景观^[1-2]。为了实现矿业活动区域的生态恢复,矿山植被的修复无疑是至关重要的一个环节。植被护坡能有效克服工程措施护坡的不足,在发挥固土护坡作用的同时,能充分发挥植被的景观效应和环境效应,达到恢复生态、保护环境、美化景观的作用^[3-6]。采用植被措施或采用植被与工程措施相结合的方式加固边坡,由于生态保护效果显著,实际工程成本低等优势,植被护坡技术成为国内外学界的研究热点课题之一。周云艳等^[7]综合国内外研究现状,探讨根的增强模型并总结了根系护坡机理;张迪等^[8]研究得出不同海拔、根系生物量与根系抗冲能力的关系;宗全利等^[9]通过多次室内直剪试验,得出植被根系护坡的力学效应与根系直径相关;Nomessi Kuma Kokutse 等^[10]针对植被对边坡的稳定性,基于有限元分析方法评估得出不同植被对边坡土壤的加固效果;卜宗举^[11]就植被根系的加筋作用开展研究,通过设计算法分析根系对不同边坡的加筋作用;嵇晓雷等^[12]将数值模拟计算运用到边坡土体位移分析中,研究表明植被护坡能有效减缓边坡浅层土体位移;张俊云^[13]研究得出植被护坡水分运移规律以及土体贮水量要求;安然等^[14]建立有限元边坡模型,计算得到了根系能够增强边坡稳定性的结论;YU^[15]通过室内冲刷试验研究降雨后边坡饱和和土壤的加固作用,分析得出降雨过程中植被加固边坡机理;黄钢等^[16]采用改进模型得出了考虑降雨入渗的边坡稳定性评价标准;曾红艳等^[17]通过开展直剪试验,探究了植被护坡土体抗剪强度的影响因素;廖田婷等^[18]针对不同根系植被的边坡水分运移规律等进行研究,验证了不同根系水分运移规律不同。

针对上述研究并未考虑混种植被根茎叶护坡效应,采用室内试验和图像二值化处理方法,设计模拟室内边坡冲刷试验,对黑麦草与紫花苜蓿按

比例混种、植被根茎叶体系对于边坡植被固土抗冲刷特性影响的内在机理展开研究,揭示边坡植被护坡抗冲刷规律,为相关工程实践提供参考。

1 试验仪器及试验方案

1.1 试验材料

植被培育土样选自江苏省南京市江宁区某裸露土质边坡下蜀土,土壤含杂质较少。下蜀土自然状态下为黄褐色,其结构强度主要由土颗粒胶结提供,土体具有一定的胀缩性,易发生滑坡等地质灾害^[19]。

草种选用黑麦草与紫花苜蓿,黑麦草作为禾本须根系植被,茎叶直立高大,须根发达,固土导水效果较好;紫花苜蓿多分枝较为矮小,主根侧根发达,叶片宽大,能发挥其绿化景观效果。两种植被作为常见草本植被,生长周期短,具有一定的抗旱性,能适应当地环境的变化,在实际工程中易成活,且由于二者生长形态的差异性,在混种时能达到多层次护坡的作用。配置五份草种,每份总质量为5 g,五份草种按照一定比例进行称量配比,分别为100%黑麦草、70%黑麦草与30%紫花苜蓿、50%黑麦草与50%紫花苜蓿、30%黑麦草与70%紫花苜蓿、100%紫花苜蓿,为求简便,按顺序分别将上述草种配比记为R1、R2、R3、R4、R5。

试验所用培育亚克力方形容器的序号质量分别为393.3、394.1、395.4、403.3、394.8 g,按顺序编号为B1—B5号盒,尺寸均为16 cm×16 cm×6 cm。

制备过程如图1所示。试验中采用室内重塑土方法,控制土壤含水率为15%,为植被初期发育提供适量水分。取出五份质量均为1 680 g的重塑土土样装入培育方盒。依照顺序在土样表层均匀播撒各组草种,B1至B5号盒按顺序培养草种R1、R2、R3、R4、R5,各组试样参数如表1所示。

表1 各组试样的基本参数

Tab. 1 Table of basic parameters of each sample

试样 编号	黑麦草 种子/g	紫花苜蓿 种子/g	土壤 /g	土壤厚度 /cm	亚克力 方盒质量/g
R1	5.0	0	1 680	6	393.3
R2	3.5	1.5	1 680	6	394.1
R3	2.5	2.5	1 680	6	395.4
R4	1.5	3.5	1 680	6	403.3
R5	0	5.0	1 680	6	394.8

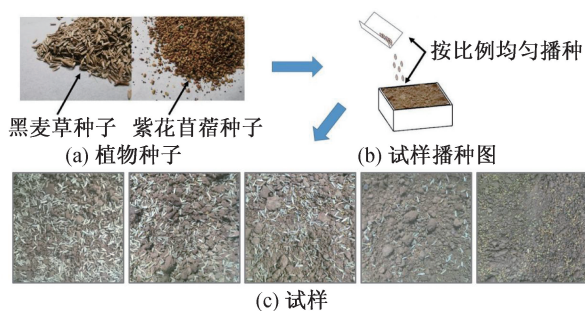


图1 试样制备过程

Fig. 1 Process of sample pretreatment

1.2 试验装置

为研究降雨条件下边坡植被固土抗冲刷特性以及植被护坡机理,设计如下所示边坡冲刷试验装置,示意图见图2。边坡装置尺寸为长60 cm,宽30 cm,高20 cm,中心处留有一个放置培育方盒的凹槽,上方为人工降雨装置,由流量计和阀门控制降雨强度。整个装置可由装置下方的支架控制边坡倾斜角度。径流通过下方土收集盒汇入量杯,最大量程为1 000 mL。

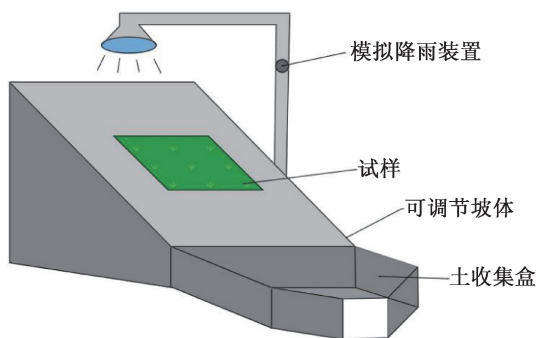


图2 边坡冲刷试验装置

Fig. 2 The test device of slope erosion

1.3 试验方案

对试验植被在室内环境进行培育,种子萌发后每24 h称量带盒质量,计算得到各时段植被蒸发速率。14 d后在试样上方垂直拍照并通过图像二值化系统测定各组的植被覆盖率。对试样进行冲刷试验,调整自制冲刷模型倾斜角度为 35° ^[20],冲刷水流流量为0.3 L/min,试验装置下方通过量杯收集冲刷径流。每5 min收集一次量杯中的泥沙,冲刷量以烘干后的泥沙质量为准。每组测量五次,并记录每次冲刷后土体表面的侵蚀状况。

2 试验结果

2.1 试样蒸发速率

各组试样种子萌发后的试样蒸发速率如图3

所示,试样根据植被配比大概可以分为两种类型,单一型(R1、R5)和混种型(R2、R3、R4),又根据试样蒸发速率增长率正负将生长天数分为植被发育期、植被生长期和植被稳定期。在植被发育期内,各组试样蒸发速率保持正值且都随生长天数的增加而增长,前24 h内,单一型试样R1、R5蒸发速率同为0.031 g/min,混种型试样R2、R3、R4对应的蒸发速率分别为0.026、0.022、0.027 g/min。可见单一型试样前24 h内蒸发速率都高于混种型试样,这是由于混种型在植被萌发期内植被茎叶发育较快,能避免阳光直射而使浅层土体水分大量蒸发。植被生长期各组试样蒸发速率达到峰值,R1—R4试样蒸发速率在第9~11 d分别达到峰值0.055、0.051、0.049、0.046 g/min,而R5蒸发速率在第5 d已达到峰值0.035 g/min,并且发现随着紫花苜蓿配比逐渐增加试样蒸发速率峰值随之减小,这是因为植被生长期内紫花苜蓿叶面生长较快,叶面宽大既能避免阳光直射土体表面,又能有效拦截蒸发的水蒸气,从而降低试样蒸发速率。在植被稳定期内,各组试样蒸发速率逐渐减小,R1—R4试样蒸发速率处于负值且随生长天数的增加而急剧减小,达到峰值后增长率骤然减小,而R5蒸发速率增长率减小相对较小,最终在第14 d时各组试样蒸发速率都在0.025~0.028 g/min范围内保持稳定,此时各组试样植被均生长至稳定,植被大面积覆盖在土体表面发挥涵养边坡作用。整个生长过程中,5组试样蒸发速率随生长时间的变化都大致呈单峰型,R1—R5蒸发速率标准差分别为0.008 7、0.007 8、0.008 6、0.006 5、0.003 3 g/min,可见随黑麦草配比减少,整体蒸发速率更为稳定,这是由于黑麦草生长时间较长,紫花苜蓿生长迅速而较早进入稳定状态,故此整体蒸发速率更为稳定。

结果分析可知,试样蒸发速率曲线呈现出有规律的变化趋势,其中混种型(R2、R3、R4)更适于实际边坡工程应用。黑麦草与紫花苜蓿茎叶分布在边坡表面不同高度,能充分避免阳光直射土体表面,且较于R1,混种型蒸发速率增长更为稳定且整体较低,能稳定地涵养边坡土体,减少前期边坡植被种植过程中人工浇水用量,从而降低养护成本。

2.2 试样植被覆盖率

通过图像二值化处理系统统计试样的植被覆盖率,以参数86A313、C6C295、95B526、BFD449、

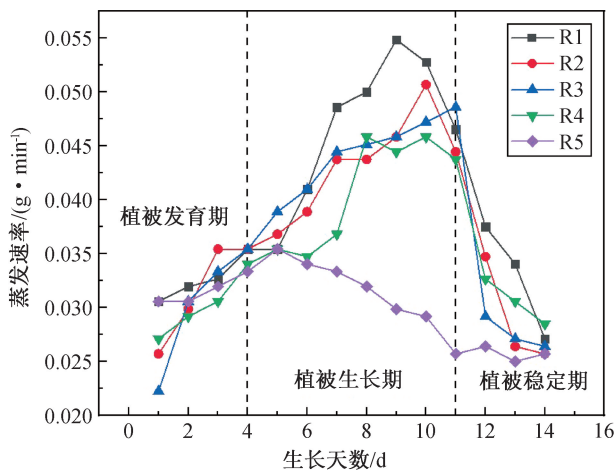


图 3 种子萌发后各组试样蒸发速率

Fig. 3 The evaporation rate of each sample after seed germination

DDBB95、97BB3F、8AA313、AABF32、E7D6C2、8C6A3C 共 10 种颜色作为有效颜色选样,颜色容差为 30,有效颜色选样像素与总像素的比值即为对应试样的植被覆盖率。图 4(a)为各组试样原始照片,图 4(b)为处理后各组试样的二值图。图 4 表明,单一型植被覆盖率都保持在较低的水平,空隙大且分布集中,而混种型植被覆盖率都维持在一个相对较高的水平,空隙小且均匀分散分布。其中黑麦草茎叶呈网状交织覆盖在土体表面,而紫花苜蓿大多呈团状平卧覆盖在土体表面。表 2 为试样植被覆盖率,各组植被覆盖率保持在 71.4%~80.1% 范围内,R4 植被覆盖率最高,相对 R1、R2、R3、R5 试样,植被覆盖率分别提高了 6.2%、1.3%、9.1%、12.2%,这表明 30% 黑麦草与 70% 紫花苜蓿配比对覆盖率提高效果最显著,而当黑麦草配比大于等于紫花苜蓿时其对覆盖率提高效果会降低,单一型对覆盖率提高效果最差。这是由于黑麦草茎叶直立且纤细,但在生长过程中易倾斜使其覆盖面积增大。紫花苜蓿的茎支撑强度弱以至生长近乎平卧,但枝叶茂盛宽大为羽状三出复叶,更易覆盖坡面,二者不同形态的茎叶在生长过程中互相竞争坡面上方的空间,茎叶穿插生长相互遮盖坡面上方的空隙,有效提高了坡面植被覆盖率。可见黑麦草与紫花苜蓿混种对植被覆盖率有提高效果,且 30% 黑麦草与 70% 紫花苜蓿配比效果较好。

表 2 试样植被覆盖率表

Tab. 2 Table of vegetation coverage of each sample

编号	R1	R2	R3	R4	R5
植被覆盖率	75.4%	79.1%	73.4%	80.1%	71.4%

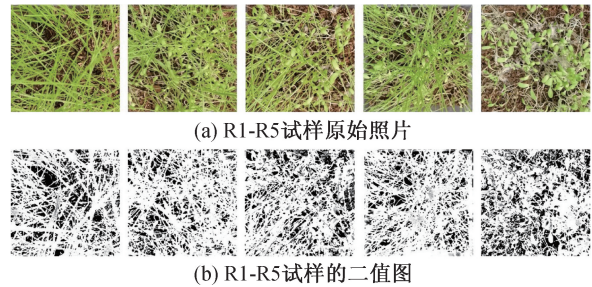


图 4 14 d 后植被覆盖状况

Fig. 4 The vegetation coverage condition for 14 days

2.3 冲刷结果

图 5 为各组试样在不同冲刷时段的冲刷量,冲刷过程中各组试样冲刷量不断增加,其中 R5 冲刷量始终高于 R1—R4 冲刷量,且 R1—R4 与 R5 冲刷量随冲刷时间的关系变化出现差异,R1—R4 冲刷量随时间增长而逐渐增加,R5 冲刷量呈现出先增加后减小的变化。在试样开始冲刷的前 5 min 内,R1—R4 冲刷量都保持在 10~25 g 范围内,而 R5 冲刷量已达到了 39.65 g,后 5 min 内 R5 冲刷量增大 1.06 倍,在 10 min 时达到峰值 81.70 g,此时坡面出现大量冲沟,紫花苜蓿几乎全部倒伏,之后随冲刷时间增长 R5 冲刷量逐渐减少并趋于稳定,最终冲刷量稳定在 40~50 g 范围内。这是由于 R5 植被覆盖率较低,茎叶截留雨水能力较弱,因此 R5 冲刷量高于 R1—R4,且在茎叶倒伏后主要由土体与根系抵抗冲刷,冲刷量逐渐减少至稳定范围内。R1—R4 在冲刷试验过程中,前 10 min 内冲刷量相对于 R5 增长速率较慢,且相较于 R5 冲刷量明显减少,之后试样冲刷量趋于稳定,这是因为 R1—R4 植被覆盖率较高,茎叶形态未出现明显破坏,根系和土体组成的根土复合体与植被茎叶共同抵抗雨水侵蚀与径流冲刷。但在最后 5 min 内,R1、R2、R3、R4 出现差异性变化,其中 R1、R2 冲刷量分别增长 13.0%、25.6%,R3 冲刷量减小 3.7%,而 R4 冲刷量出现明显减少,冲刷量减少 23.9%,这是由于 R3、R4 紫花苜蓿配比较高,紫花苜蓿在冲刷后期倒伏于坡体表面,部分茎叶与坡面紧密贴合,能减少部分雨水的下渗侵蚀并使雨水沿茎叶倒伏方向形成径流避免径流与坡面直接接触。在冲刷过程中,R5 抗冲刷能力弱于 R1 和混种型,且 R4 抗冲刷效果最佳,R1 次之,R2、R3 相差不大,R5 效果很差。这是因为在冲刷过程中黑麦草茎叶截留雨水能力较强,紫花苜蓿根系固土效果较好,少量配比的黑麦草即可抵抗雨水溅蚀作用

在土体表面,从而大量配比的紫花苜蓿能更好发挥根系固土作用,减少径流对土体表面的破坏。种植不同配比的植被后,植被根茎叶在降雨过程中共同发挥抗冲刷作用,其中根系能增强土体强度,而茎叶能够减少雨水与土体直接接触,并且截留部分冲刷径流,从而提高边坡的抗冲刷能力。

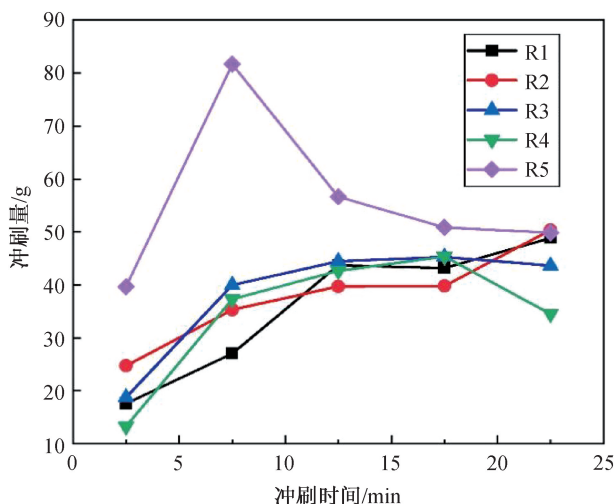


图 5 冲刷量与冲刷时间的关系

Fig. 5 The relationship between erosion quantity and erosion time

图 6 为冲刷后各组试样土体表面的破坏情况。图 6 表明,在经历 25 min 流量为 0.3 L/min 的冲刷后,各组植被都出现不同程度沿径流方向的倾伏,坡面上方无植被处砂土被径流冲走并出现明显的凹陷破坏。R1 坡面上部形成一条长 11 cm,宽 2 cm 的冲沟,坡面整体较为完好。R2 坡面右侧形成一条冲沟,冲沟长 6 cm,宽 2 cm。R3 坡面上部形成一条长 13 cm,宽 2 cm 的冲沟,左侧右侧各有一处冲沟,且左侧冲蚀程度高于右侧。R4 坡面整体完好,仅右侧有一处微小冲沟,长 4 cm,宽 1 cm。R5 坡面破坏程度最严重,坡面整体向下凹陷,植被生长形态被严重破坏。

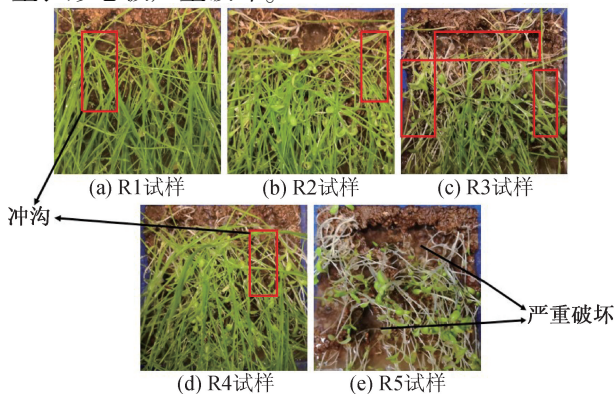


图 6 冲刷 25 min 后坡面的破坏情况

Fig. 6 The failure of slope surface after scouring for 25 minutes

3 机理分析

试样蒸发速率能反映边坡土体含水率的变化情况,植被在生长过程中能通过茎叶拦截坡面蒸发的水蒸气,与此同时植被的覆盖能阻挡阳光直射坡面,防止水分过多蒸发,使边坡土体含水率维持在合理范围内,提高土体的抗剪强度,有效减少冲刷时土体的剪切位移,从而提高边坡的抗冲刷能力。紫花苜蓿叶片面积较大,能有效防止土体水分蒸发,保持土颗粒胶结,发挥其结构强度,从而提高抗冲刷能力。

在冲刷过程中,植被茎叶发挥截留降雨作用,减少雨水与坡面的直接接触,同时减缓雨水下落速度,有效地减少水流对土体冲击力并减弱水流侵蚀作用,实现护坡效果;植被根茎阻拦雨水在坡面上形成的径流,同时根系与土体牢固结合,形成根土复合体能更好地起到减弱水流冲刷强度与固结土壤的作用。图 7 为黑麦草与紫花苜蓿抗冲刷的机理示意图,由图 7 可见,黑麦草茎叶密集,降雨时茎叶向径流方向倾伏,增大了投影植被覆盖面积,进而发挥降雨截流的作用。紫花苜蓿茎叶分散,植被覆盖率低,未能充分发挥缓冲雨水对坡体表面冲击的作用,但紫花苜蓿羽状叶片面积大,与黑麦草混合种植时能弥补黑麦草线形叶片覆盖率低的缺点,且黑麦草生长高度普遍高于紫花苜蓿,高低混种能多次缓冲雨水的冲击力,降低甚至避免坡体表面的溅蚀作用。不同形态与长短的植被根系与土体结合,既能增大根系影响深度,又能增强植被根系的加筋作用。经过黑麦草与紫花苜蓿的混种,边坡抗冲刷能力得到提高。

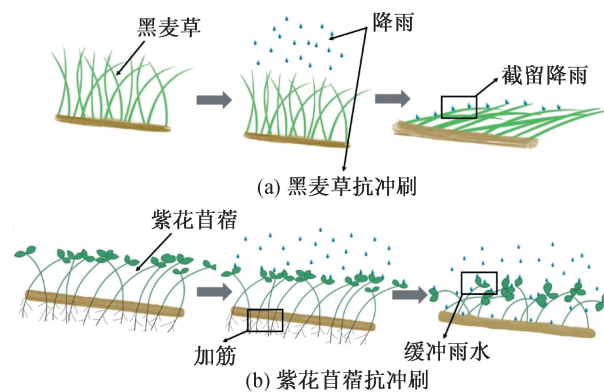


图 7 植被护坡示意图

Fig. 7 The diagram of biological slope protection

4 结论

1)在不同植物种子配比条件下,黑麦草与紫花苜蓿配比为1:0的试样蒸发速率最高,配比为0:1的试样蒸发速率最低,其余混合配比试样蒸发速率峰值介于0.035~0.055 g/min之间,标准差保持在0.006 5~0.008 6 g/min范围内,在生长稳定期所有配比的试样蒸发速率趋于一致。

2)不同植物种子配比条件下,混合配比试样植被覆盖率均大于单一配比试样,其中黑麦草与紫花苜蓿配比为0.3:0.7的试样植被覆盖率最大为80.1%。黑麦草与紫花苜蓿的配比分别为1:0、0.7:0.3、0.5:0.5、0.3:0.7和0:1试样的覆盖率分别为75.4%、79.1%、73.4%、80.1%和71.4%。

3)混合配比试样的植被覆盖率的提高,其发育的植物茎叶减少雨水对土体的冲击并减弱径流侵蚀,同时不同类型的根系与土体结合,增大根系影响深度并增强加筋作用,增强了土体抗冲刷性能。黑麦草与紫花苜蓿的配比分别为1:0、0.7:0.3、0.5:0.5、0.3:0.7和0:1试样冲刷量大小分别为0:1>5:5>0.7:0.3>1:0>0.3:0.7,配比为0.3:0.7的试样提高土体抗冲刷特性最为显著。

参考文献:

- [1] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011,32(5):1437-1451+1472.
- [2] 郝岩松,王国兵,万福绪.我国高速公路生态边坡的建设及生态评价[J].水土保持研究,2007(4):257-262.
- [3] 廖乾旭,李阿根,徐礼根,等.高速公路边坡生态恢复的问题与对策[J].中国水土保持科学,2006(S1):100-102.
- [4] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等.工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J].水利水电技术,2017,48(2):130-137.
- [5] 张家明,陈积普,杨继清,等.中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J].水土保持学报,2019,33(5):1-7.
- [6] MASI E B, SEGONI S, TOFANI V. Root Reinforcement in Slope Stability Models: A Review[J]. Geosciences, 2021,11(5):212.
- [7] 周云艳,陈建平,王晓梅.植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J].生态环境学报,2012,21(6):1171-1177.
- [8] 张迪,戴方喜.狗牙根群落土壤—根系系统的结构及其抗冲刷与抗侵蚀性能的空间变化[J].水土保持通报,2015,35(1):34-36.
- [9] 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):1290-1300.
- [10] KOKUTSE N K, TEMGOUA A G T, KAVAZOVIĆ Z. Slope Stability and Vegetation: Conceptual and Numerical Investigation of Mechanical Effects[J]. Ecological Engineering, 2016,86:146-153.
- [11] 卜宗举.植被根系浅层加筋作用对边坡稳定性的影响[J].北京交通大学学报,2016,40(3):55-60.
- [12] 嵇晓雷,杨平.不同降雨强度下植被护坡对边坡位移的影响[J].林业工程学报,2020,5(5):152-156.
- [13] 张俊云.岩石边坡植被护坡系统的水分平衡及控制[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1729-1735.
- [14] 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):150-156.
- [15] YU Xiaojuan. Storm Water Scouring Simulation Analysis on Vegetated Slope[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017,35(1):293-301.
- [16] 黄钢,郑明新,王庆,等.考虑降雨入渗条件的植被边坡稳定性评价[J].长江科学院院报,2020,37(4):160-167.
- [17] 曾红艳,吴美苏,周成,等.根系与植筋带固土护坡的力学机理试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(S2):151-156.
- [18] 廖田婷,蒋关鲁,张崇磊,等.考虑水文效应的不同植被根系护坡效果数值分析[J/OL].长江科学院院报:1-8[2022-05-11].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20211012.1309.006.html>.
- [19] 施威,魏继红,宋京雷,等.含水率对下蜀土抗剪强度的影响[J].西华大学学报:自然科学版,2016,35(3):97-101.
- [20] DER G L, BOR S H, SHIN H L. 3-D Numerical Investigations into the Shear Strength of the Soil-Root System of Makino Bamboo and Its Effect on Slope Stability[J]. Ecological Engineering, 2010,36:992-1006.

(责任编辑 周雪梅)