

# 泥石流频发区典型乔灌植物根系的固土效应

陈文乐<sup>1,2</sup>, 杜鹃<sup>3</sup>, 方迎潮<sup>4</sup>, 王道杰<sup>1</sup>, 何松膛<sup>1,2</sup>, 兰惠娟<sup>1,2</sup>, 赵鹏<sup>1,2</sup>

(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. 阿坝藏族羌族自治州水务局, 四川 阿坝藏族羌族自治州 624000; 4. 中石油西南管道公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** [目的] 研究泥石流频发区云南省昆明市东川区蒋家沟两种典型生态修复物种新银合欢(*Leucaena leucocephala*)和马桑(*Coriaria sinnica*)的根系固土效应, 为当地生物工程的应用及泥石流治理效益的评价提供理论依据和数据支撑。[方法] 通过根系挖掘法查明根系分布特征, 开展根系拉伸试验分析单根抗拉特征, 运用修正后的 Wu-Waldron 模型(RWM)计算两种植物根系对土壤抗剪强度的增加值。[结果] ①新银合欢和马桑的根面积比 RAR 均随着土壤深度的增加而减小。②新银合欢根系构型为垂直型, 马桑根系构型为横走型。③新银合欢根系的抗拉强度与根径之间无明显规律性, 马桑根系的抗拉强度与根径之间呈递减的对数函数关系。④新银合欢和马桑根系对土体抗剪强度增加值均随着土壤深度的增加而减少, 新银合欢根系固土深度约为 1.4 m, 马桑根系固土深度约为 0.6 m。[结论] 新银合欢和马桑根系均能显著发挥固土作用。由于根系构型、固土深度、固土方式等原因, 二者的固土作用不同, 可将二者结合种植, 不仅有利于边坡的稳定, 也可提高土体的抗冲性。

**关键词:** 泥石流; 蒋家沟; 新银合欢; 马桑; 固土效应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)05-0032-08

中图分类号: X43, S157.2

**文献参数:** 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. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 05. 005; Chen Wenle, Du Juan, Fang Yingchao, et al. Soil reinforcement effect of root systems of typical plants in areas with frequent debris flow[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 32-39.

## Soil Reinforcement Effect of Root Systems of Typical Plants in Areas with Frequent Debris Flow

Chen Wenle<sup>1,2</sup>, Du Juan<sup>3</sup>, Fang Yingchao<sup>4</sup>, Wang Daojie<sup>1</sup>,  
He Songtang<sup>1,2</sup>, Lan Huijuan<sup>1,2</sup>, Zhao Peng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Water Bureau of Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan 624000, China; 4. PetroChina Southwest Pipeline Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** [Objective] The soil reinforcement effect of root systems of *Leucaena leucocephala* and *Coriaria sinnica* was studied in Jiangjia gully, Dongchuan District, Kunming City, Yunnan Province in order to provide a theoretical basis and data support for the application of local biological and engineering methods to utilize the control benefit of debris flow. [Methods] The distribution characteristics of root systems were identified

收稿日期: 2019-03-25

修回日期: 2019-04-25

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)“美丽中国”(XDA23090403); 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); 四川省国土资源厅“8.8”九寨沟地震灾区生态化地质灾害防治重大科技支撑研究课题“生态化泥石流灾害防治技术研究”(KJ-2018-24)

第一作者: 陈文乐(1994—), 男(汉族), 河南省孟州市人, 硕士, 主要从事山地灾害防治工程。E-mail: chenwenle17@mails.ucas.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研究工作。E-mail: wangdj@imde.ac.cn.

using the root digging method, the root tensile characteristics were analyzed with the root tensile test, and the added value of the root systems of the two plant species to the soil shear strength was calculated using the Wu-Waldron model (RWM). [Results] ① The root area ratio of both *L. leucocephala* and *C. sinnica* decreased with an increase in soil depth. ② The root configurations of *L. leucocephala* and *C. sinnica* were vertical type and transverse type, respectively. ③ The relationship between the tensile strength and root diameter of *C. sinnica* roots was a decreasing logarithmic function, whereas there was no obvious regularity between tensile strength and root diameter for *L. leucocephala* roots. ④ The added value of the shearing strength of both *L. leucocephala* and *C. sinnica* roots decreased with an increase in soil depth. The depth of soil reinforcement of *L. leucocephala* and *C. sinnica* roots was approximately 1.4 m and 0.6 m, respectively. [Conclusion] Both root systems of *L. leucocephala* and *C. sinnica* played a significant role in soil fixation. Because the root architecture, soil reinforcement depth, and soil reinforcement technique of these two plants were different, utilizing these two species together can improve slope stability and soil anti-scourability.

**Keywords:** debris flow; Jiangjia gully; *Leucaena leucocephala*; *Coriaria sinnica*; soil reinforcement effect

中国是山地大国,泥石流问题十分突出,且灾情严重。生物工程措施是防治泥石流的一种重要措施,在生物工程治理泥石流中植物根系发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>。根系在地下盘根错节,能有效增强土体的抗剪强度,减轻土体的重力侵蚀,将泥沙有效稳固在坡面,其对控制泥石流物源,抑制泥石流的启动、发生、发展有着至关重要的作用。根系固土是减少泥石流物源产生、阻止物源进入沟道的有效方式<sup>[2]</sup>。

目前,在根系固土方面,国内外学者已经做了大量的研究,在植物根系固土力学机制<sup>[3]</sup>、根系固土力学模型<sup>[4]</sup>、根系固土护坡数值模拟<sup>[5]</sup>、不同类型植物的根系抗拉特性<sup>[6]</sup>、根—土复合体的剪切特性<sup>[7]</sup>以及根系对土体抗剪强度增强等方面<sup>[8]</sup>,均取得了显著成果,但是涉及到泥石流频发区的根系固土研究较少<sup>[9]</sup>。由于泥石流频发区山体通常较为破碎,产生大量松散物源,且常伴随严重的水土流失现象,生境的差异会造成植物根系的固土护坡能力存在区域差异<sup>[10]</sup>,因此有必要研究泥石流频发区植物根系的固土效应。本文选取泥石流频发区云南省昆明市东川区蒋家沟为研究区域,以当地两种典型植被恢复物种新银合欢(*Leucaena leucocephala*)和马桑(*Coriaria sinnica*)为研究对象,通过根系挖掘研究根系空间分布特征,根系拉伸试验测试根系抗拉特性,最后运用修正后的 Wu-Waldron 模型(简称 RWM 模型),研究两种典型植物根系的固土效应,以期为该泥石流频发区生物工程的应用及其治理效益评价提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市东川区境内的蒋家沟流域,其地理坐标为东经 103°06′—103°13′,北纬

26°13′—26°17′之间,属于中高山地貌。区域内多年平均气温为 20.2℃,最高气温 40.9℃,最低气温 -6.2℃,年活动积温为 7 177℃。年均降雨量为 691.3 mm,年均蒸发量为 3 752.7 mm,空气相对湿度为 54%,属于半干旱气候<sup>[11]</sup>。区域内新构造运动强烈,导致岩层质地软弱、结构松散,再加上人们不合理的开发利用,使该区域泥石流爆发频繁<sup>[12]</sup>。基于生物工程治理泥石流的理念,1986 年开始科研人员对这一地区进行植被恢复。目前该区域的乔木主要有新银合欢(*Leucaena leucocephala*)、赤桉(*Eucalyptus robusta*)、红椿(*Toona sinensis*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)等;灌木主要包括马桑(*Coriaria sinnica*)、苦刺(*Solanum deflexicarpum*)、车桑子(*Dodonaea angustifolia*)等;草本植被主要有剑麻(*Agave americana*)、扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、香茅(*Cymbopogon citratus*)、小叶荩草(*Arthraxon lancifolius*)等。多年观测表明,新银合欢和马桑是该区域植被恢复最成功的乔木和灌木<sup>[13]</sup>。

### 1.2 根系的采集与处理

课题组在研究区内选取典型的、具有代表性的新银合欢和马桑样地开展样方调查,其中新银合欢样方位于中国科学院东川泥石流观测研究站西侧阴坡坡脚处,样方大小为 20 m×20 m,马桑样方位于蒋家沟内阴坡坡中位置,样方大小为 5 m×5 m,记录样方内新银合欢、马桑的胸径、株高、冠幅、株数、生长状况等参数。

在样方调查的基础上,随机选取无病害、长势良好的成龄新银合欢及成龄马桑标准木,进行根系空间分布及其固土效应研究。所选 5 株新银合欢标准木平均株高 12 m,胸径 15 cm;5 株马桑标准木平均株高 1.8 m,基径 7.4 cm。

采用 3 方位(沿坡向上、沿坡向下、沿等高线)分层分段挖掘法获取根样<sup>[14]</sup>。对于新银合欢,以标准木为中心,分别沿着预设的 3 个方向量出 1.4 m,然后在 1.4 m 处朝着树干方向以 0.2 m 为一长度等级开挖剖面,共挖 7 段;剖面在竖直方向以 0.2 m 为一深度等级,共挖 8 层,故剖面深度为 1.6 m;剖面宽为 0.8 m。对于马桑,以标准木为中心,分别沿着预设的 3 个方向量出 1.2 m,然后在 1.2 m 处朝着树干方向开挖剖面,以 0.2 m 为一长度等级,共挖 6 段;剖面在竖直方向以 0.2 m 为一深度等级,共挖 4 层,故剖面深度为 0.8 m;剖面宽为 0.6 m。

挖掘出的根土放入容器内并就近在河水中进行冲洗,冲洗干净的根系用密封袋保存,带回实验室,用游标卡尺测量根系直径。本次试验中,将根的径级分为  $D < 2 \text{ mm}$ ,  $2 \leq D \leq 5 \text{ mm}$ ,  $D > 5 \text{ mm}$  这 3 个等级。测量完根径,将根系放入烘箱内,70 °C 烘干至恒重,分别称取不同剖面位置、不同径级的根系干重,并记录,用于研究根系分布特征。最后,在剖面以外部分挖掘新鲜根系,用于室内拉伸试验。

### 1.3 根系抗拉测定

根系拉伸试验采用爱普手动拉力机和依思达数据采集系统,其中拉力仪主要由动力系统、夹具、拉力传感器、位移传感器及电脑组成,拉力仪最大测试量程为 20 kg。为了避免夹具损伤根系而导致根系在夹具附近断裂,在夹具内侧附加一层橡胶垫。

根系拉伸试验选取顺直、完整无损、直径相对均一的新鲜根系。首先将根系两端伸入夹具中,将其固定,使根系平行于水平面以确保根系受到轴向匀速荷载的作用。然后用数显游标卡尺在根系的两端及中间处各测一次根系直径,并取算数平均值来计算根系横截面积(假定根系横截面为圆形)。接着,用手匀速摇动拉力仪上的螺旋式手柄,开始测定根系拉力。此过程中数据采集仪自动记录根系拉伸试验的全过程并获取数据,包括拉力、位移等基本性能指标。本试验要求根系必须在中间部位断裂,试验才视为成功,如果根系从两端夹具滑脱或者破坏,均视为失败。

计算每一受测根段试样单根抗拉强度的公式为:

$$P = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中: $P$ ——根段的抗拉强度(MPa); $F$ ——最大抗拉力(N); $D$ ——平均根径(mm)。

### 1.4 根系对土体抗剪强度增加值的计算

为评估根系对土壤抗剪强度的增加,Waldron 和 Wu 基于 Mohr-Coulomb 理论,建立了根系土抗剪强度力学模型<sup>[15]</sup>:

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + C_s + C_r \quad (2)$$

$$C_r = t_r (\sin \beta + \cos \beta \times \tan \varphi) \quad (3)$$

$$t_r = \frac{F}{A} = T_R \times \frac{A_R}{A} \quad (4)$$

式中: $\tau_f$ ——根系土的抗剪强度(kPa); $\sigma$ ——剪切面上的法向应力(kPa); $\varphi$ ——土的内摩擦角(°); $C_s$ ——土体黏聚力(kPa); $C_r$ ——根系对土体抗剪强度的增加值(kPa); $t_r$ ——单位面积土体中根系抗拉强度(kPa); $\beta$ ——根的变形角度(°); $F$ ——根系抗拉力(N); $T_R$ ——根系抗拉强度(kPa); $A_R$ ——根系横截面积( $\text{m}^2$ ); $A$ ——根系作用土体的面积( $\text{m}^2$ ); $A_R/A$ ——根面积比,记作 RAR。

由(3)式和(4)式可得根系对土体抗剪强度增加值  $C_r$  为:

$$C_r = T_R \times \frac{A_R}{A} \times (\sin \beta + \cos \beta \tan \varphi) \quad (5)$$

Wu 等和 Waldron 等经过试验发现  $(\sin \beta + \cos \beta \tan \varphi)$  经常位于 1.0~1.3 之间,大多数研究取 1.2 进行评估,因此:

$$C_r = 1.2 T_R \times \frac{A_R}{A} \quad (6)$$

研究发现,由于 Wu-Waldron 模型假设所有根系都表现出最大抗拉强度且同时断裂,该假设会使得模型高估根系对土体的增强效应值<sup>[3]</sup>,因此,本研究采取修正的 Wu-Waldron 模型,简称 RWM 模型<sup>[16]</sup>,修正系数  $K$  选取 0.4,如(7)式:

$$C_r = K \times 1.2 T_R \times \frac{A_R}{A} \quad (7)$$

### 1.5 根面积比计算

根面积比(root area ratio, RAR)计算采用标准根系法<sup>[14]</sup>。首先选取根长 20 cm,根径  $D$  为 2 mm 的标准根系 10 根,测量各自的生物量,并计算平均值,记作  $m$ 。然后根据采集到的根样,用天平称取不同土层深度的根系生物量,记作  $M_i$  ( $i$  表示土层深度),将不同深度的根系等效为标准根系,并通过公式  $M_i/m$  计算标准根系的数量  $n_i$ ,通过公式  $n_i(\pi D^2)/4$  计算不同深度的根系横截面积,然后比上根系所占土体面积从而获得 RAR 值。

## 2 结果与分析

### 2.1 根系垂直分布特征

2.1.1 根系径级分布 通过分别对新银合欢和马桑两种植物不同径级根系干重在不同深度范围内分布的统计,得出不同径级根系干重随深度变化特征(见图 1),统计结果表明新银合欢和马桑各径级根系的

生物量随深度的变化幅度存在明显差异,其中 >5 mm 径级的根系变化最为明显,<2 mm 变化次之,2~5 mm 随深度的变化最小。

新银合欢 >5 mm 径级的根系在 0—0.2 m 和 0.2—0.4 m 深度范围内的生物量分别为 824.5 g 和 132.2 g,占该径级总生物量的 97.1%,说明该径级根系几乎全部分布在 0.4 m 以上的土层。2~5 mm 径级的根系在 0—1.0 m 深度范围内的生物量占该径级总生物量的 98.1%,说明该径级根系的分布深度主要在 1.0 m 范围内,且该径级的根系在土壤中分布得较为均匀,生物量变化幅度很小,各土层平均生物量约为 28.6 g。<2 mm 径级的根系在 0—1.4 m 深度范围内的生物量占该径级总生物量的 99.5%,表明 <2 mm

径级的根系在土壤中分布深度约为 1.4 m,分布范围最广。综合来看,新银合欢根系分布深度约为 1.4 m。

马桑 >5 mm 径级根系的生物量为 401.9 g,且全部分布在 0—0.4 m 深度范围内。2~5 mm 径级根系在 0—0.4 m 深度范围内的生物量为 58.4 g,占该径级总生物量的 86.6%,说明 2~5 mm 径级根系主要分布在 0.4 m 以上土层,而由图 2 可以看出该径级的最大分布深度可达 0.6 m。<2 mm 径级的根系在 0—0.6 m 深度范围内的生物量为 267 g,占该径级总生物量的 98.7%。综合来看,马桑根系主要分布在 0—0.6 m 深的土层内,此深度范围内的根系生物量占根系总生物量的 99.5%,且各径级根系生物量均随着深度的增加而减小。

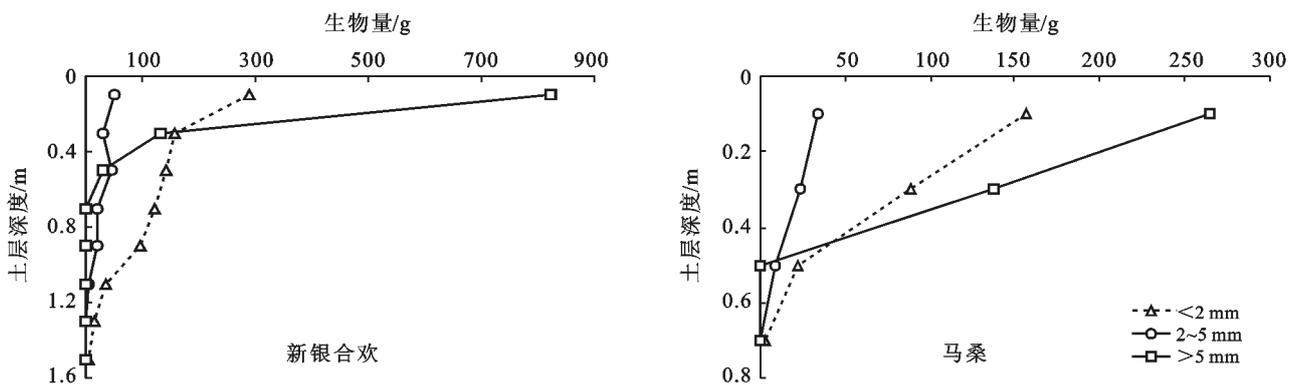


图 1 新银合欢、马桑各径级根系干重随深度变化

通过计算各径级根系的生物量发现,新银合欢 3 种径级生物量总和约为马桑的两倍,但新银合欢和马桑各径级根系的生物量占总生物量的比例相似(图 2),其中新银合欢 <2 mm, 2~5 mm 和 >5 mm

径级的根系生物量分别占总生物量的 42.7%, 8.5% 和 48.8%; 马桑 <2 mm, 2~5 mm 和 >5 mm 径级的根系生物量分别占总生物量的 36.6%, 9.1% 和 54.3%。

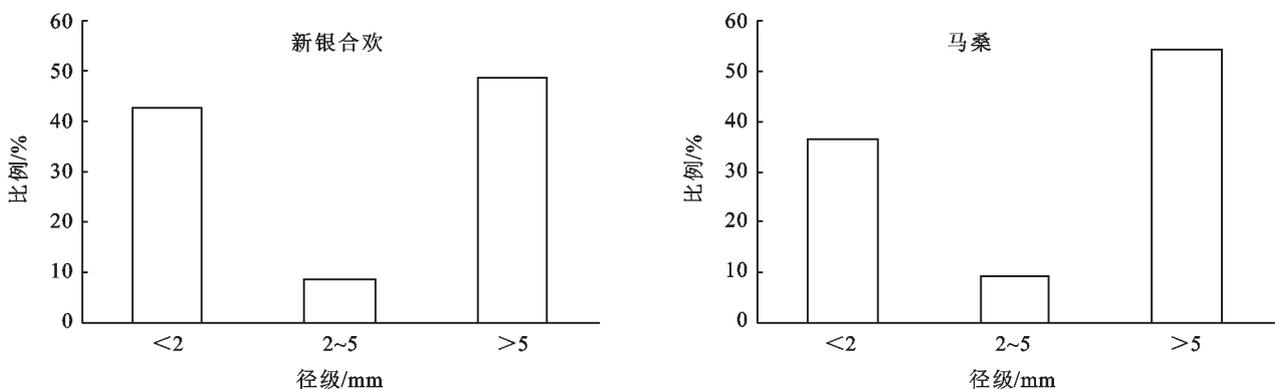


图 2 新银合欢、马桑根系不同径级比例

2.1.2 RAR 随土壤深度的变化特征 新银合欢和马桑的 RAR 值均随着土壤深度的增加而逐渐减小(见图 3),二者的 RAR 最大值均出现在土壤表层(0—0.2 m),其中新银合欢 RAR<sub>max</sub> 为 0.002 4,马桑

RAR<sub>max</sub> 为 0.002 9。在 0—0.4 m 范围内马桑的 RAR 值大于新银合欢,在 0.4 m 深度以下,新银合欢的 RAR 值大于马桑。新银合欢和马桑的 RAR 值分别在 1.4—1.6 m 和 0.6—0.8 m 土层范围内达到最小,几乎为 0。

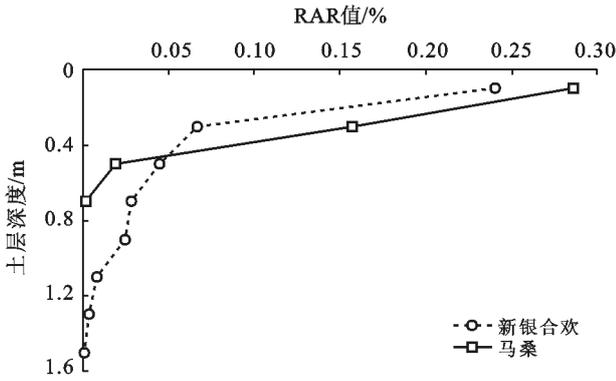


图 3 新银合欢、马桑根系横截面积比 RAR 随深度变化

通过拟合发现,新银合欢 RAR 数值随深度的变化趋势符合指数函数形式,而马桑 RAR 数值随深度的变化趋势符合多项式函数形式(见表 1)。其中  $x$  为土壤深度, $y$  为 RAR 值。

表 1 RAR 和土壤深度的拟合关系

树种	拟合关系式	相关性
新银合欢	$y=0.3081e^{-3.536x}$	$R^2=0.9535$
马桑	$y=0.696x^2-1.052x+0.39$	$R^2=0.9838$

### 2.2 根系抗拉性能

当土体发生滑动时,根土接触面上的摩擦力会将

土体中的剪应力转化为对根系的拉力,从而实现增强土体的抗剪强度,所以根的抗拉力和抗拉强度是根系固土的重要指标。本试验共测试新银合欢根系样本 152 个,成功样品为 64 个,试验成功率为 42.1%;测试马桑根系样本 110 个,成功样品为 57 个,试验成功率为 51.8%。新银合欢和马桑根系样品直径范围均为  $<2\text{ mm}$ 。

如图 4 所示,新银合欢根系抗拉力的最小值为 0.5 N,最大值为 37.1 N,平均抗拉力为  $14.2\pm 1.3\text{ N}$ 。马桑根系抗拉力的最小值为 0.3 N,最大值为 22.3 N,平均抗拉力为  $4.7\pm 0.6\text{ N}$ 。试验发现,新银合欢和马桑根系的抗拉力均随着直径的增加而增大,但两者的关系并非呈现完全线性的比例关系,而是有明显的幂函数关系: $I=\alpha D^\beta$ , $\alpha,\beta$  为经验系数且  $\alpha,\beta>0$ 。

如图 5 所示,新银合欢根系样品抗拉强度的范围从 3.93 MPa 到 37.33 MPa,平均抗拉强度为  $12.69\pm 0.79\text{ MPa}$ ,抗拉强度与根径之间的相关系数仅为  $-0.114(p=0.37)$ ,相关性并不强。马桑根系样品抗拉强度的范围从 4.12 MPa 到 58.81 MPa,平均抗拉强度为  $19.51\pm 1.45\text{ MPa}$ ,马桑根系的抗拉强度与根径之间的相关系数为  $-0.535(p<0.01)$ ,抗拉强度随根径的增加呈现递减的对数函数规律。

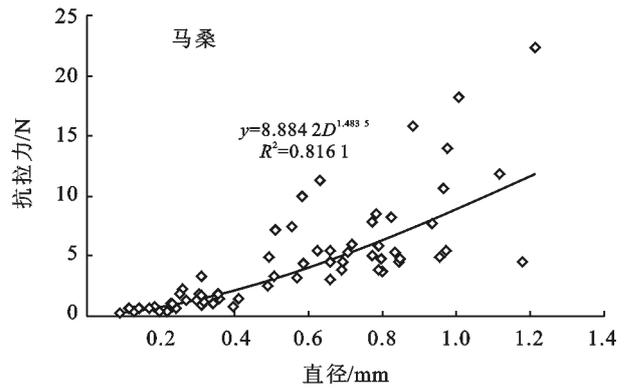
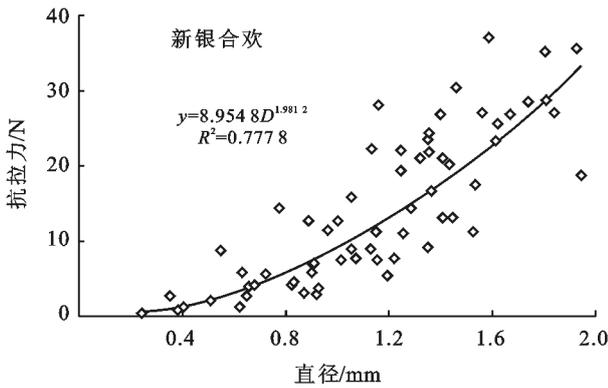


图 4 新银合欢、马桑根系抗拉力与直径关系

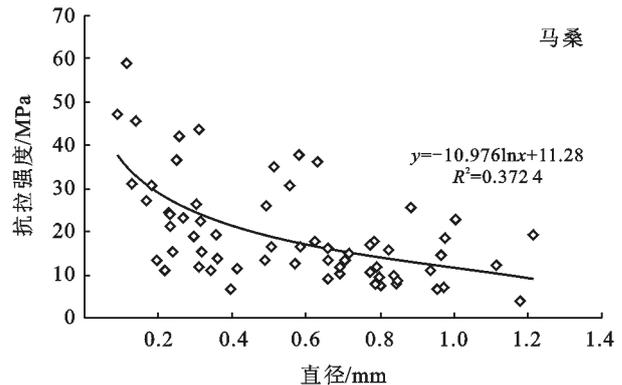
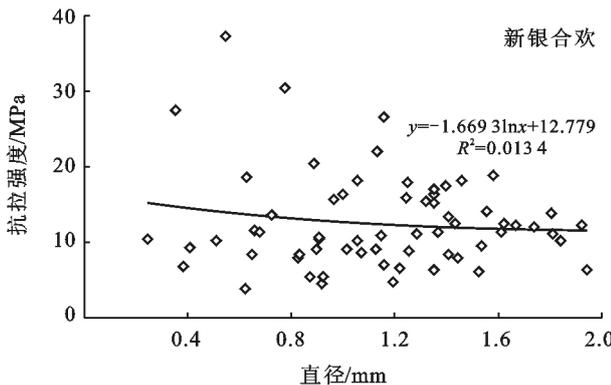


图 5 新银合欢、马桑根系抗拉强度与直径关系

### 2.3 根系增强土体抗剪强度效应

利用新银合欢和马桑根系抗拉力与根径拟合曲线(见图4),分别计算出新银合欢和马桑标准根系( $D=2\text{ mm}$ )的抗拉力(35.4 N, 24.8 N),将其换算为抗拉强度值(11.3 MPa, 7.9 MPa),然后用RWM模型来计算不同土层深度根系对土体抗剪强度的增加值。由表2可知,新银合欢和马桑的最大固土效应均出现在土壤表层(0—0.2 m),其中新银合欢为12.97 kPa,马桑为10.86 kPa,随着土壤深度的增加,新银合欢和马桑根系对土体抗剪强度增加值均逐渐减小。在1.4—1.6 m深度范围内,新银合欢根系对土体抗剪强度增加值最小,为0.05 kPa,固土效应几乎为0,所以新银合欢的固土深度约为1.4 m。在0.6—0.8 m深度范围内,马桑根系对土体抗剪强度增加值最小,为0.08 kPa,固土效应也几乎为0,所以马桑的固土深度约为0.6 m。

表2 根系对土壤抗剪强度的增加值

土壤深度/m	抗剪强度增加值/kPa	
	新银合欢	马桑
0—0.2	12.97	10.86
0.2—0.4	3.6	5.98
0.4—0.6	2.43	0.73
0.6—0.8	1.54	0.08
0.8—1.0	1.33	—
1.0—1.2	0.42	—
1.2—1.4	0.18	—
1.4—1.6	0.05	—

## 3 讨论

### 3.1 根系抗拉特性与根径之间的关系

植物根系通过发挥自身的抗拉特性以增强土体的抗剪强度,因此根系的抗拉性能是增强边坡稳定性的重要因素<sup>[3]</sup>,也是根系固土的重要指标。影响根系抗拉特性的因素有很多,根径是主要影响因素之一<sup>[17]</sup>,诸多学者开展了根系抗拉与根径关系的研究。研究表明,根系的抗拉力随根径的增大而增大,且大多呈幂函数递增关系<sup>[10]</sup>,本文中,新银合欢和马桑的根系抗拉力与根径之间的关系均为幂函数递增( $R^2$ 分别为0.777 8和0.816 1),与大多数学者的研究结果一致。而根系抗拉强度与根径之间尚未得出统一的结论,目前关于根系抗拉强度与根径之间关系的结论主要有6类:①幂函数递减<sup>[14,18]</sup>;②指数函数递减<sup>[6]</sup>;③对数函数递减<sup>[10]</sup>;④逆函数递减<sup>[19]</sup>;⑤线性相关<sup>[20]</sup>;⑥无明显相关性<sup>[21]</sup>。本文中,新银合欢的根系抗拉强度与根径之间无明显相关性(相关系数 $R=$

$-0.114$ ),马桑根系抗拉强度与根径之间的关系为对数函数递减( $R^2=0.372 4$ )。笔者认为,各研究中抗拉强度—根径关系不一致,是由多方面因素造成的,可主要分为植物自身因素、外部环境因素以及试验设置因素。植物自身因素方面,植物种类不同,内在遗传特性可能不同,从而导致不同植物根系在根径相同的情况下,内在的组织结构和组成成分不同,而根系的组织结构和组成成分又直接影响到根系的抗拉强度,导致不同种类植物在根径相同的情况下根系抗拉强度不同,从而可能导致不同的抗拉强度—根径关系。同时,张超波等<sup>[22]</sup>人的研究表明,不同根系含水量仅改变了抗拉强度的大小,并未改变抗拉强度—根径关系类别。外部环境方面,J. J. Ni<sup>[23]</sup>和 Mahanopkul<sup>[24]</sup>分别研究了植株间距和土壤吸力对根系抗拉强度的影响,结果表明植株间距和土壤吸力均会影响根系抗拉强度的大小,但不会改变抗拉强度—根径关系的类别。至于土壤质地、土壤含水量、土壤养分等外部环境因素对抗拉强度—根径关系的影响,目前研究尚不多见,是未来值得人们深入研究的内容。试验设置方面,李宁等<sup>[17]</sup>的研究表明,诸如根系标距、拉伸速率、根系保存时间等试验设置因素仅改变抗拉强度的大小,并不改变抗拉强度—根径关系类别。而李可等<sup>[6]</sup>的研究表明,随着标距和拉伸速率的增大,抗拉强度—根径关系类别可由幂函数关系变为指数函数关系。综上所述,笔者认为,在植物自身因素、外部环境因素以及试验设置因素综合作用下,可导致根系抗拉强度与根径之间关系复杂多变。

同时笔者发现,相较于抗拉力—根径关系,抗拉强度与根径之间的规律性并不强,在李可等<sup>[6]</sup>、田佳等<sup>[10]</sup>、曹云生等<sup>[21]</sup>的研究中均发现了这一点,笔者认为原因主要有两方面:第一,由于抗拉强度除了受根径的影响以外,还会受到其他因素的影响,如植物种类、根系年龄、根系生长速率、土壤水分含量、土壤质地、营养状况等,即使对于同种根系同种根径,由于周围生长环境的差异,也可能产生不同的抗拉强度,从而产生根系抗拉强度与根径之间规律性不明显的现象。第二,抗拉强度是材料的固有属性,对于均质材料,抗拉强度不随材料尺寸(如直径)的变化而变化。尽管大多数根系具有多相、非均匀和各向异性等生命特征,使得抗拉强度会受到根径的影响,但其受尺寸效应的影响要比抗拉力更小。而且有研究表明,抗拉强度作为反映材料平均受力情况的指标在一定程度上不受根径影响<sup>[21]</sup>。综上所述,可知有时抗拉强度与根径之间规律性不强。

### 3.2 对当地生物工程应用的启示

通过根系挖掘,笔者发现新银合欢和马桑两者的根系形态截然不同。从颜正平<sup>[25]</sup>对根系形态的分类角度分析,新银合欢根系构型为垂直型,具有直而深的主根,侧根较少。而马桑根系构型为横走型,具有较多的水平根和斜出根,分布形态大致平行于地表面。这两种不同形态的根系在土层中发挥不同的固土效应。垂直型的新银合欢根系固土深度较深,约为 1.4 m,而本研究区内由于长期的水土流失现象,导致土层厚度较薄,部分新银合欢根系可以穿透土层伸入下部基岩,发挥类似锚杆的作用,将上部松散土层锚固于基岩之上,但新银合欢侧根较少,导致根系网络固土作用不强。横走型的马桑根系固土深度较浅,约为 0.6 m,但其具有较多的水平根和斜出根,易与土壤中的其他根系形成网络固土作用。蒋定生等<sup>[26]</sup>指出,植物根群在土体中呈网络状,可使土体抗冲性明显提高。所以若将新银合欢与马桑结合起来,不仅可以发挥根系的锚固作用,增强边坡土体稳定性,而且可通过根系网络固土,增强土体的抗冲性。前人的研究表明,新银合欢—马桑种植模式对减少坡面水土流失作用良好<sup>[11-12]</sup>。然而,笔者通过野外考察发现,当地新银合欢纯林较多,鲜有新银合欢与马桑或其他物种的混交林,原因可能是随着新银合欢林龄的增长,乔木层盖度不断增加,导致林下光照减少,不利于草灌层植物生长发育,从而逐渐形成了新银合欢纯林。陈爱民等<sup>[27]</sup>的研究表明,新银合欢纯林对改良土壤、提高土壤质量的效果较差,且随着林龄的增长,新银合欢纯林中土壤结构稳定性会变差,土壤抗蚀性减弱,不利于水土流失的防治。因此,笔者建议,对于当地的新银合欢纯林,可以通过人工干预,适当地采伐部分林木,增加林下光照及林下空间,并引种马桑等灌木和草本植物,增强植物根系网络固土作用,不仅有利于提高边坡稳定性,而且可改善土壤质量,提高土壤抗蚀性。

## 4 结论

(1) 新银合欢和马桑不同径级根系的主要分布范围不同,其中新银合欢 $>5\text{mm}$ , $2\sim 5\text{mm}$ , $<2\text{mm}$ 径级的根系分别分布在 $0\sim 0.4$ , $0\sim 1.0$ , $0\sim 1.4\text{m}$ 深度范围内;马桑 $>5\text{mm}$ 和 $2\sim 5\text{mm}$ 径级的根系主要分布在 $0\sim 0.4\text{m}$ 深度范围内, $<2\text{mm}$ 径级的根系分布在 $0\sim 0.6\text{m}$ 深度范围内。新银合欢 3 种径级生物量总和是马桑的近两倍,新银合欢和马桑各径级根系的生物量占总生物量的比例相似。

(2) 新银合欢和马桑的 RAR 均随着土壤深度的

增加而逐渐减少,其中,新银合欢的 RAR 值随深度的变化趋势符合指数函数形式,而马桑的 RAR 值随深度的变化趋势符合多项式函数形式。

(3) 新银合欢和马桑的根系抗拉力均随着直径的增加而增大,均呈现出明显的幂函数递增关系。新银合欢抗拉强度与根径之间无明显规律性,马桑根系的抗拉强度与根径之间呈现递减的对数函数规律,但规律性不强。新银合欢的平均抗拉强度( $12.69\pm 0.79\text{MPa}$ )小于马桑的平均抗拉强度( $19.51\pm 1.45\text{MPa}$ )。

(4) 新银合欢和马桑根系的固土效应最大值均出现在土壤表层( $0\sim 0.2\text{m}$ ),其中新银合欢为 12.97 kPa,马桑为 10.86 kPa。随着土壤深度的增加,新银合欢和马桑根系对土体抗剪强度增加值均逐渐减小。新银合欢根系固土深度较深,约为 1.4 m,马桑根系固土深度较浅,约为 0.6 m。

(5) 新银合欢根系构型为垂直型,马桑根系构型属于横走型,可将二者结合起来,不仅有利于边坡稳定,而且可提高土体抗蚀性。

### [参 考 文 献]

- [1] 王道杰,陈吕容,周麟,等.山地灾害治理中生物工程存在的问题[J].山地学报,2004,22(4):461-466.
- [2] Wang Siyuan, Meng Xingmin, Chen Guan, et al. Effects of vegetation on debris flow mitigation: A case study from Gansu province, China[J]. Geomorphology, 2017, 282: 64-73.
- [3] 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.
- [4] 陆桂红,杨顺,王钧,等.植物根系固土力学机理的研究进展[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(2): 151-156.
- [5] Mao Zhun, Yang Ming, Bourrier F, et al. Evaluation of root reinforcement models using numerical modelling approaches[J]. Plant and Soil, 2014, 381(1/2):249-270.
- [6] 李可,朱海丽,宋路,等.青藏高原两种典型植物根系抗拉特性与其微观结构的关系[J].水土保持研究,2018, 25(2):240-249.
- [7] 胡夏嵩,李国荣,朱海丽,等.寒旱环境灌木植物根—土相互作用及其护坡力学效应[J].岩石力学与工程学报, 2009,28(3):613-620.
- [8] Zhang Chaobo, Chen Lihua, Liu Yaping, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength[J]. Ecological Engineering, 2010,36(1):19-26.
- [9] 矫震,王道杰,谢洪,等.云南省东川银合欢林区重塑土三轴抗剪强度实验研究[J].水土保持通报,2012,32(6): 93-97.

- [10] 田佳,卞莹莹,于江珊,等. 贺兰山3种乔木单根及根土复合体力学特性[J]. 水土保持学报,2018,32(6):123-129.
- [11] 崔鹏,王道杰,韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应:以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. 中国水土保持科学,2005,3(3):60-64.
- [12] 王道杰,崔鹏,朱波,等. 金沙江干热河谷植被恢复技术及生态效应:以云南小江流域为例[J]. 水土保持学报,2004,18(5):95-98.
- [13] 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.
- [14] 郭灵辉,王道杰,陈东,等. 蒋家沟泥石流区新银合欢细根固土效应[J]. 水土保持通报,2011,31(5):85-89.
- [15] Waldron L J. The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil[J]. Journal of the Soil Science Society of America,1977,41(5):843-849.
- [16] 洪苗苗,汪霞,赵云飞,等. 浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系对土壤抗剪强度影响[J]. 山地学报,2018,36(1):107-115.
- [17] 李宁,陈丽华,杨苑君. 油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J]. 北京林业大学学报,2015,37(12):77-84.
- [18] 周萍,文安邦,严冬春,等. 三峡库区紫色土坡耕地草本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J]. 水土保持通报,2017,37(3):1-6.
- [19] 李晓凤,陈丽华,王萍花. 华北落叶松根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学,2012,10(1):82-87.
- [20] 田佳,刘耀辉. 华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究[J]. 中国水土保持,2007(10):34-36.
- [21] 曹云生,陈丽华,盖小刚,等. 油松根系的固土力学机制[J]. 水土保持通报,2014,34(5):6-10,14.
- [22] Zhang Chaobo, Zhou Xia, Jiang Jing, et al. Root moisture content influence on root tensile tests of herbaceous plants[J]. Catena, 2019,172:140-147.
- [23] Ni Junjun, Leung A K, Ng C W W. Influence of plant spacing on root tensile strength of Schefflera arboricola and soil shear strength[J]. Landscape and Ecological Engineering,2019,15(2):223-230.
- [24] Krairoj M, Apiniti J. Influence of root suction on tensile strength of Chrysopogon zizanioides roots and its implication on bioslope stabilization [J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(2):275-284.
- [25] 颜正平. 植物根系分布生态学理论与体系模式之研究[J]. 水土保持学报,2005,12(5):1-6.
- [26] 蒋定生,范兴科. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. 水土保持学报,1995,9(2):1-8.
- [27] 陈爱民,严思维,林勇明,等. 泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价[J]. 北京林业大学学报,2016,38(9):62-70.

(上接第15页)

- [24] 侯彩霞,周立华,文岩,等. 社会—生态系统视角下农户对禁牧政策的适应性:以宁夏盐池县为例[J]. 中国沙漠,2018,38(4):872-880.
- [25] 夏翠珍,廖杰,郭建军,等. 1983—2017年宁夏盐池县生态治理政策的类型与变化:基于政策工具视角[J]. 中国沙漠,2019,39(3):107-116.
- [26] Zhang Ke, Kimball J S, Nemani R R, et al. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration [J]. Scientific Reports, 2015,5:15956.
- [27] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, et al. Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: towards a global synthesis [J]. Ecology Letters, 2011,14(7):709-722.
- [28] Howard K S C, Eldridge D J, Soliveres S. Positive effects of shrubs on plant species diversity do not change along a gradient in grazing pressure in an arid shrubland [J]. Basic and Applied Ecology, 2012,13(2):159-168.
- [29] 王雅舒,李小雁,石芳忠,等. 退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发[J]. 科学通报,2019,64(5):588-599.
- [30] Wilcox B P. Shrub control and streamflow on rangelands: A process based viewpoint [J]. Journal of Range Management, 2002,55(4):318.
- [31] Liu Qiang, Yang Zhifeng. Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2010,395(3/4):226-234.
- [32] Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India) [J]. Agricultural Water Management, 2004,69(1):1-11.
- [33] Sun Yan, Piao Shilong, Huang Mengtian, et al. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models [J]. Global Ecology and Biogeography, 2016,25(3):311-323.