

DOI: 10.5846/stxb201809141986

李佳, 贾海霞, 赵云飞, 欧延升, 柳洋, 汪霞. 浅层滑坡多发区典型灌木根系对边坡土体抗剪强度影响研究. 生态学报, 2019, 39(14): - .

Li J, Jia H X, Zhao Y F, Ou Y S, Liu Y, Wang X. Ecological restoration with shrub roots for slope reinforcement in a shallow landslide-prone region. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

浅层滑坡多发区典型灌木根系对边坡土体抗剪强度影响研究

李 佳¹, 贾海霞¹, 赵云飞¹, 欧延升¹, 柳 洋¹, 汪 霞^{1,2,*}

1 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

2 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要:生态建设是“一带一路”可持续发展的基础,甘肃省陇南市位于“一带一路”核心区域,地处浅层滑坡多发区,地质灾害频发。通过单根抗拉试验和重塑土直接剪切试验对该区域四种典型灌木杠柳、胡枝子、酸枣和石榴的土壤及根系进行研究,探讨灌木根系对土壤物理性质和浅层滑坡的改善效应。结果表明,灌木根系能显著提高土壤含水率,改善孔隙结构;抗拉强度与根径间存在显著幂函数关系($p < 0.01$),根径 < 1 mm的毛细根抗拉强度最强,单根抗拉强度依次为胡枝子>石榴>酸枣>杠柳;重塑土抗剪强度随土壤含水率升高而降低,土壤粘聚力(C)和内摩擦角(φ)均随含水率增加而减小,在10%的最优含水率下,抗剪强度依次为石榴>酸枣>杠柳>胡枝子;随根系密度增加,杠柳和胡枝子的根-土复合体抗剪强度减小,酸枣和石榴在1.5倍天然根系密度下对土壤抗剪强度增强效果最强。本研究通过评价浅层滑坡多发区不同灌木护土固坡效应,为“一带一路”沿线开展生态修复提供理论依据。

关键词:浅层滑坡区;植物根系;抗拉强度;抗剪强度;水土保持

Ecological restoration with shrub roots for slope reinforcement in a shallow landslide-prone region

LI Jia¹, JIA Haixia¹, ZHAO Yunfei¹, OU Yansheng¹, LIU Yang¹, WANG Xia^{1,2,*}

1 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou 730000, China

Abstract: Ecological construction is the foundation of sustainable development in “the Belt and Road” region. Longnan, Gansu Province, is an important water conservation region in the core area of “the Belt and Road” region, and frequent natural disasters, such as shallow landslides and debris flows are major geographical features of this area. The soil and root systems of four typical shrubs (*Periploca sepium*, *Lespedeza bicolor*, *Ziziphus jujube* and *Punica granatum*) were studied by single tensile test and direct shear test of remolded soil to explore the improvement of soil physical properties and shallow landslides. The results showed that the root system of these shrubs could significantly improve the soil water content and pore structure of the soil. There was a significant power function relationship between the tensile strength and root diameter ($p < 0.01$), and the tensile strength of the capillary root with diameter < 1 mm was the highest. The tensile strength of a single root was in the order of *L. bicolor* $>$ *P. granatum* $>$ *Z. jujube* $>$ *P. sepium*. The shear strength of remolded soil decreases with an increase in water content, and the soil cohesion (C) and internal friction angle (φ) decreased with an increase in water content. At the optimal moisture content of 10%, the shear strength was in the order of *P. sepium* $>$ *Z. jujube* $>$ *P. sepium* $>$

基金项目:国家自然科学基金(41572332);甘肃省重点研发计划(17YF1FA131);科技基础资源调查专项(2017FY100900)资助

收稿日期:2018-09-14; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxia@lzu.edu.cn

L. bicolor. With increasing root density, the shear strength of root soil composite system of *P. sepium* and *L. bicolor* decreased. The shear strength of *P. sepium* and *Z. jujube* reached the highest while it was under 1.5 times that of the natural root density. This study could provide a theoretical basis for vegetation restoration in “the Belt and Road” region by evaluating the effects of different shrub slopes in shallow landslide-prone areas.

Key Words: shallow-landslides prone; plant root system; tensile strength; shear strength; soil and water conservation

绿色、可持续发展是“一带一路”建设重要组成部分,尽可能减少对原生环境的影响,修复已破坏的生态系统,是“一带一路”建设中的环境基础和生态保障^[1]。甘肃省地处丝绸之路核心地段,是“丝绸之路经济带”重要组成部分^[2]。陇南市位于甘肃省东南部,地处陕甘川三省交界处,也是青藏高原、黄土高原和川西北高原交汇处,该区域地质条件复杂,是我国四大地质灾害多发区之一。

近年来,泥石流、滑坡等自然灾害频发,边坡土体稳定性已引起广泛关注^[3]。自然界中滑坡主要有浅层和深层两种,深层滑坡属大型滑坡,发生频率较小,浅层滑坡虽滑坡体积小,但发生频率大,分布面积广^[4]。研究表明除采用传统的工程措施外,生态工程护坡已广泛运用于防治浅层滑坡、水土流失等问题中,其中植被护坡既能起到固土作用又兼具美化边坡生态景观的效果,具有较高的环境价值^[5]。潘声旺等^[6-7]研究表明重建边坡植被,增强裸露边坡稳定性是一种减少浅层滑坡、水土流失的重要生态固坡技术。Nilaweera 等^[8-9]通过试验得出植物根系可以显著提高土壤抗剪强度,增强边坡稳定性。刘春霞^[10]指出根系提高土壤抗剪强度效果还与土壤物理性质密切相关,根系通过缠绕、固结等作用改善土壤物理性质^[11-13]。

目前关于植被护坡的相关研究尚处于理论研究阶段,对于具体运用植被固坡评价较少。陇南地区已针对浅层滑坡开展了大量的植被恢复工作^[14-16],因此本文选取研究区四种典型灌木,杠柳(*Periploca sepium*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、酸枣(*Ziziphus jujube*)和石榴(*Punica granatum*),探讨灌木根系对土壤含水率、孔隙度和大团聚体的改善程度和护坡力学效应,旨在对这一区域灌木生态恢复效应予以评价。

1 研究区概况

陇南市地处甘肃省东南部,域内山地受白龙江长期冲刷,山势陡峭,海拔多在 1000 m 以上,坡度在 25°—45°之间,山地岩土松散软弱,易发生泥石流等自然灾害,是我国泥石流、滑坡多发区之一^[17]。区内年降水量 400—900 mm,年均温 8.4 °C—14.9 °C。据统计地质灾害隐患点三千余处,其中滑坡 1120 处,泥石流 1033 处,崩塌 759 处,地面塌陷、地裂缝等 391 处^[18]。本文选取陇南市武都区两水镇段河坝为研究区,该研究区内主要植被覆盖类型为灌草丛,大部分滑坡体处植被覆盖率不足 30%^[19]。主要土壤类型为黄棕壤,成土母质多为千枚岩、花岗岩、片麻岩及各种沉积岩残积物和坡积物^[20]。

2 研究方法

2.1 样品采集

2018 年 5 月在研究区选取人工恢复十年的杠柳、

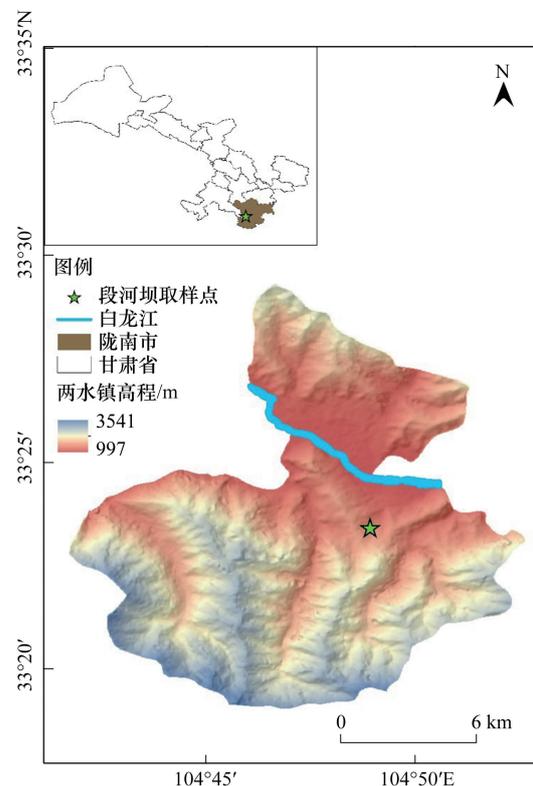


图 1 研究区概况图

Fig.1 Study area map

胡枝子、酸枣和石榴的四个坡度为 25°—30°的坡面,每个坡面各选取 3 株灌木,设置与采样点具有相似立地条件的裸地作为对照。选取距离树基 50 cm 下坡位处,开挖 50 cm×50 cm 见方土壤剖面^[21],采集生长、发育正常根系作为样品,采集过程中尽可能避免机械外力对根系产生影响。

土样采集使用剖面法,在每个灌木采样点垂直剖面上,每 10 cm 分层采取土壤样品,采样深度为 50 cm,在同一土壤深度采用混合采样法,土样用自封袋密封保存。

2.2 实验方法

2.2.1 土壤物理性质

土壤含水率使用烘干法测定。土壤孔隙度在现场通过环刀测量后计算得到。土壤团聚体采用干筛法测定^[22]。

2.2.2 单根抗拉强度

选取根长约 5—10 cm 表皮完好根系,测定其直径后,将所有根系置于水中浸泡一夜^[21,23]。使用电子万能试验机(型号:CSS-4100,长春试验机研究所)测量单根抗拉强度。

2.2.3 重塑土直剪试验

将采集土样烘干研磨后过 1 mm 筛,将筛后土样铺于不吸水铝盘中,喷洒预计加水量。加水量计算公式为^[24]:

$$m_w = \frac{m}{1 + 0.01 w_0} \times 0.01 (w' - w_0)$$

其中, m_w 土样需加水量(g), m 风干含水率下土样质量(g), w_0 风干含水率(%), w' 设计所需含水率(%)。

为使根-土复合体含水率接近自然状态,将其设置为 10%,密封静置一昼夜后,将根系按照设计根系密度拌入土样。不同含水率重塑土按照试验设计加水量配制。采用击实法制取样品。使用应变控制式直剪仪(南京宁曦土壤仪器有限公司)测量抗剪强度,每组样品取四个试样,分别在 100 kPa,200 kPa,300 kPa,400 kPa 四级垂直压力下试验。每组处理重复三次。

2.2.4 数据处理与分析

数据统计分析采用 SPSS 22.0。图表使用 Origin 2016 制作。

3 结果与分析

3.1 土壤物理性质

3.1.1 土壤含水率

土壤含水率排序为:胡枝子>酸枣>杠柳>石榴(图 2),均高于对照组裸地,胡枝子在 10—20 cm 处含水率最高为 14.7%,0—10 cm 处含水率最低为 9.8%;石榴含水率最高处在 0—10 cm 为 5.8%,10—20 cm 处含水率最低为 3.8%。在垂直剖面上,含水率无明显变化规律。

3.1.2 土壤孔隙度

垂直剖面上土壤总孔隙度变化范围介于 43%—55.2%(图 3),杠柳>石榴>酸枣>胡枝子,与裸地相比土壤孔隙度均得到改善。杠柳土壤孔隙度在表层 0—10 cm 处达最大值 55.2%,在 40—50 cm 处有最小值:50.1%。土壤孔隙度均呈现出表层高,底层低的变化趋势。植被对表层土壤孔隙结构改善较明显。

3.1.3 土壤大团聚体

四种灌木土壤团聚体含量差异显著,垂直剖面上变化趋势一致,均为表层土壤大团聚体含量较高,底层较低(图 4)。裸地大团聚体含量变化范围为 43.1%—39.2%,相比裸地,灌木的土壤大团聚体含量明显提高,依次为:胡枝子>酸枣>杠柳>石榴。胡枝子大团聚体含量变化范围为 70.1%—74.2%,酸枣为 39.3%—64.8%,杠柳为 55.6%—61.9%,石榴为 54.3%—57.2%。其中尤以大于 7 mm 大团聚体含量增加显著。

3.2 根系抗拉强度

选取直径小于 10 mm 的根系 300 根进行试验,成功 160 根,成功率达 53%。四种灌木根系均有较强的抗

拉强度,根系抗拉强度与根径之间有明显的幂函数关系(图5),随根径增大,抗拉强度减小。抗拉强度范围分别为:杠柳 4.31 MPa—86.6 MPa,胡枝子 25.8 MPa—158 MPa,酸枣 6.74 MPa—48.6 MPa,石榴 17.5 MPa—89.9 MPa,胡枝子抗拉强度较高,酸枣最低。当根径小于 1 mm 时,抗拉强度递减速率最快,四种灌木抗拉强度均较高,其中胡枝子毛根抗拉强度约为酸枣和杠柳的 2 倍。在 1 mm—4 mm 根径范围内,根系抗拉强度随根径变化平缓,胡枝子根系抗拉强度约为石榴 2 倍、酸枣和杠柳的 3 倍。四种灌木中胡枝子根系抗拉强度最好,根径小于 1 mm 的毛根抗拉强度较好。

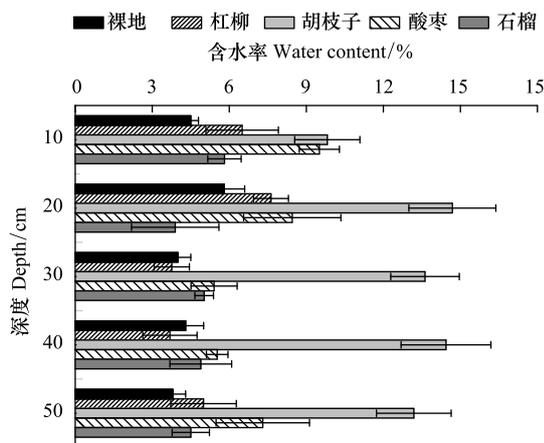


图2 不同灌木垂直剖面土壤含水率

Fig.2 Soil moisture content of different shrub vertical sections

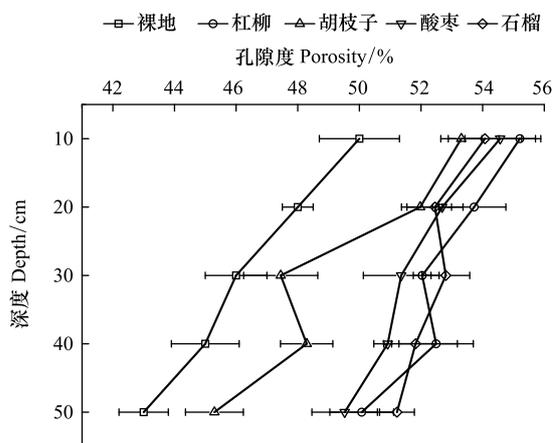


图3 不同灌木垂直剖面土壤孔隙度

Fig.3 Soil porosity of different shrubs vertical sections

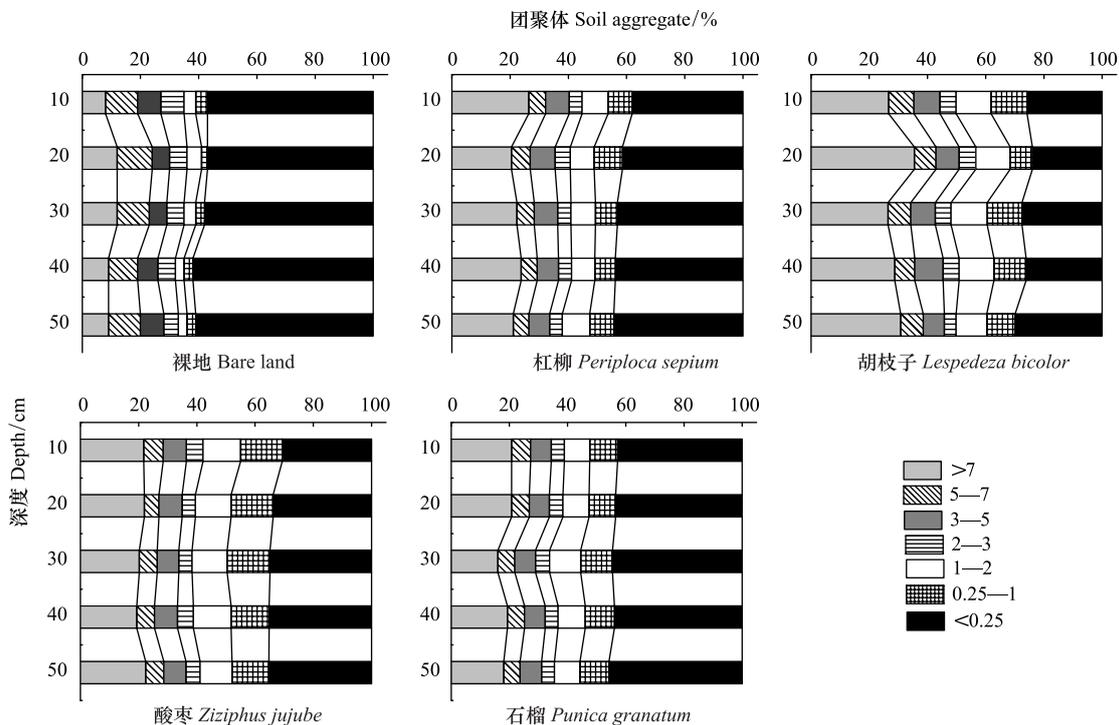


图4 土壤团聚体含量

Fig.4 Soil aggregate content

(a) 裸地 Bare land; (b) 杠柳 *Periploca sepium*; (c) 胡枝子 *Lespedeza bicolor*; (d) 酸枣 *Ziziphus jujube*; (e) 石榴 *Punica granatum*

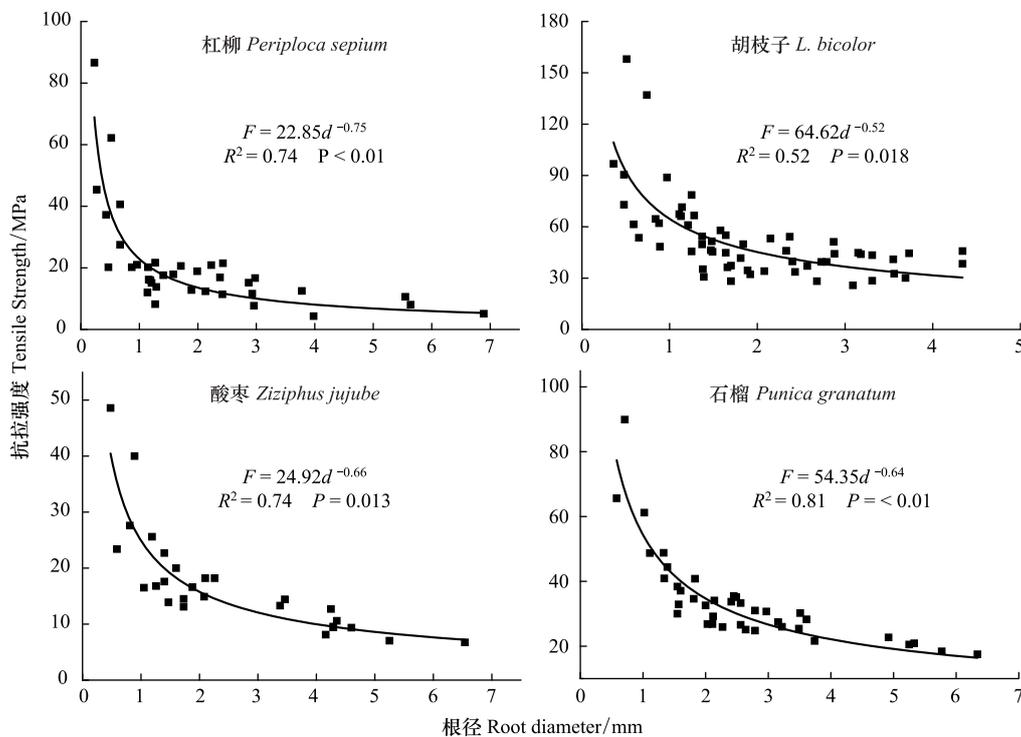


图5 四种灌木根系抗拉强度和根径的关系图及拟合曲线

Fig.5 Relationship between tensile strength and root diameter and fitting curve of four shrub roots

(a)杠柳 *Periploca sepium*; (b)胡枝子 *L. bicolor*; (c)酸枣 *Ziziphus jujube*; (d)石榴 *Punica granatum*

3.3 重塑土抗剪强度

3.3.1 土壤含水率对抗剪强度的影响

土壤抗剪强度随垂直正压力的增加呈线性增长,满足摩尔-库伦强度理论 $\tau = C + \delta \tan \varphi$ (图6)。在设定含水率范围10%—30%内,土壤抗剪强度均随含水率增加呈递减趋势,在10%的含水率条件下最高,抗剪强度依次为石榴>酸枣>杠柳>胡枝子。

依据摩尔-库伦强度理论,得到不同灌木在不同含水率下土壤粘聚力(C)和内摩擦角(φ)值如表1所示。四种灌木土壤粘聚力(C)和内摩擦角(φ)均随含水率增加而减小,粘聚力(C)减小幅度最大为杠柳,从22.46 kPa减小至4.35 kPa。内摩擦角(φ)减小幅度最大为酸枣,从32.62°减小到18.26°。胡枝子和石榴土壤粘聚力(C)和内摩擦角(φ)随含水率变化平缓。植物根系通过增加土壤含水率来增加粘聚力(C)和内摩擦角(φ)以增强土壤抗剪强度。

3.3.2 根系密度对土壤抗剪强度的影响

结合四种灌木天然根系密度,杠柳0.5 g/100 g土,胡枝子1.2 g/100 g土,酸枣0.85 g/100 g土,石榴0.52 g/100 g土,设置了三个根系密度梯度:天然根系密度、1.5倍天然根系密度和2.0倍天然根系密度。杠柳和胡枝子土壤抗剪强度随根系密度增加而减小(图7),石榴和酸枣根-土复合体抗剪强度为1.5倍天然根系密度>2.0倍天然根系密度>天然根系密度,根-土复合体抗剪强度依次为:酸枣>石榴>杠柳>胡枝子。

不同灌木不同根系密度根-土复合体抗剪强度随垂直正压力增加呈线性增加,符合摩尔-库伦强度理论($\tau = C + \delta \tan \varphi$)。结合表2,每种灌木的土壤粘聚力(C)在加入根系后均有提高,增幅由大到小为:胡枝子12.06%—127.15%,石榴9.40%—65.62%,酸枣7.39%—47.59%,杠柳2.98%—29.70%,胡枝子根系对土壤抗剪强度增强效果最强固。土壤内摩擦角(φ)未表现出较强规律性。植物根系主要通过增加土壤粘聚力(C)来增强土壤抗剪强度以实现固土护坡效应。

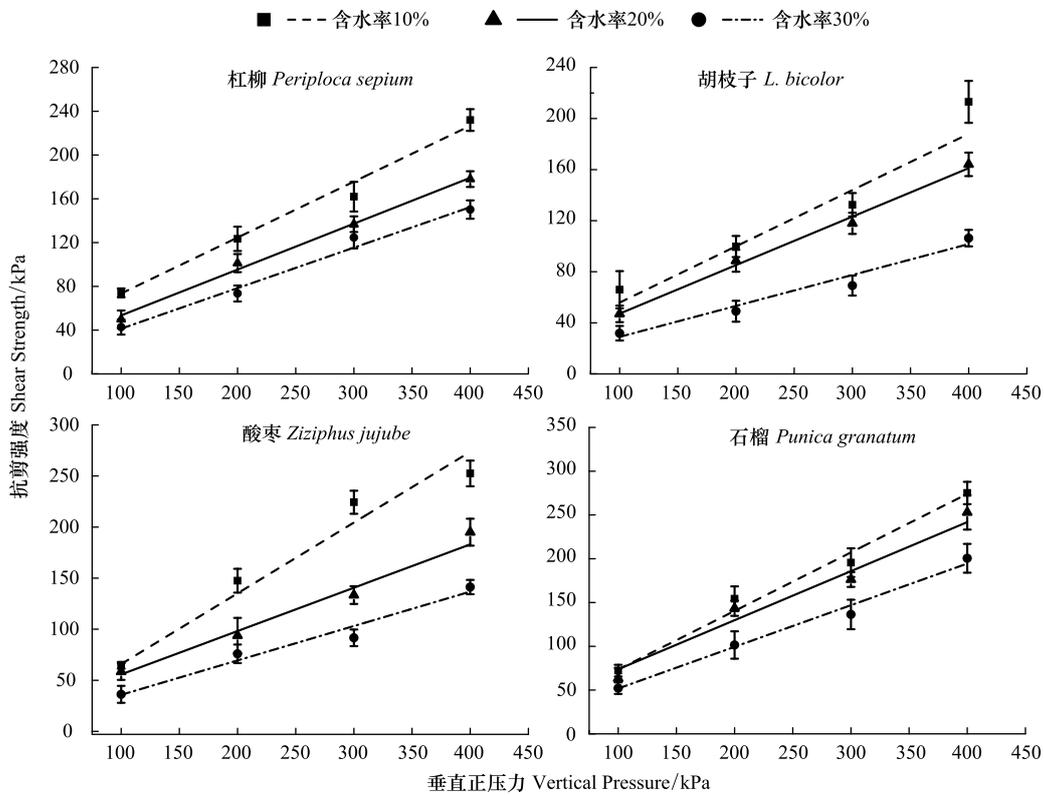


图6 不同含水率土壤抗剪强度与垂直压力的关系

Fig.6 Relationship between shear strength and vertical pressure of soil with different water content

(a) 杠柳 *Periploca sepium*; (b) 胡枝子 *Lespedeza bicolor*; (c) 酸枣 *Ziziphus jujube*; (d) 石榴 *Punica granatum*

表1 不同含水率下土壤直接剪切试验结果

Table 1 Results of direct shear test of soil under different water content

植物类型 Plant type	重塑土含水率 Remolding soil water content /%	抗剪强度与正压力拟合关系 Relationship between shear strength and positive pressure	粘聚力 <i>C</i> Root cohesion/ kPa	内摩擦角 φ Internal friction angle/(°)	R^2
杠柳 <i>P. sepium</i>	10	$y = 22.46 + 0.51x$	22.46	27.02	0.96
	20	$y = 11.51 + 0.42x$	11.51	22.78	0.99
	30	$y = -4.35 + 0.37x$	4.35	20.30	0.98
胡枝子 <i>L. bicolor</i>	10	$y = 11.86 + 0.44x$	11.86	23.75	0.92
	20	$y = 9.27 + 0.37x$	9.27	20.30	0.99
	30	$y = 4.78 + 0.24x$	4.78	13.50	0.95
酸枣 <i>Z. jujube</i>	10	$y = 12.18 + 0.64x$	12.18	32.62	0.96
	20	$y = 7.83 + 0.45x$	7.83	24.23	0.98
	30	$y = 3.57 + 0.33x$	3.57	18.26	0.96
石榴 <i>P. granatum</i>	10	$y = 11.81 + 0.65x$	11.81	33.02	0.98
	20	$y = 8.47 + 0.60x$	8.47	30.96	0.94
	30	$y = 2.62 + 0.48x$	2.62	25.64	0.98

4 讨论

4.1 土壤物理性质

植物根系通过吸收、引流等作用影响土壤含水率,土壤含水率也会反作用于植物生长^[25]。余冬立^[20]在

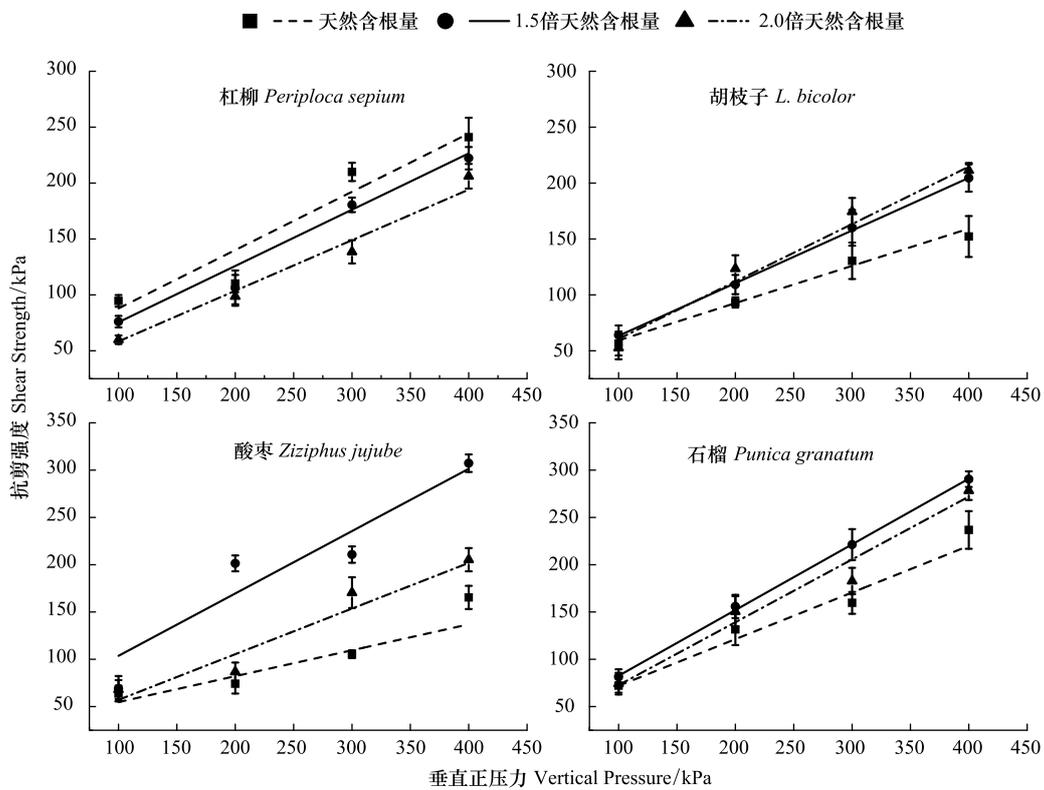


图 7 根—土复合体的抗剪强度与垂直压力的关系

Fig.7 Relationship between shear strength and vertical pressure of root-soil composite

(a) 杠柳 *Periploca sepium*; (b) 胡枝子 *Lespedeza bicolor*; (c) 酸枣 *Ziziphus jujube*; (d) 石榴 *Punica granatum*

表 2 不同含根密度下根—土复合体直接剪切试验结果

Table 2 Results of direct shear test of root-soil composite under different root densities

植物类型 Plant type	根系密度 Root density/ (g (100 g 土) ⁻¹)	抗剪强度与 正压力拟合关系 Relationship between shear strength and positive pressure	粘聚力 C Root cohesion/kPa	内摩擦角 φ Internal friction angle/(°)	粘聚力 C 值 增长幅度 Cohesion growth rate/%	R ²
杠柳 <i>P. sepium</i>	0	$y = 22.46 + 0.51x$	22.46	27.02	-	0.96
	0.50	$y = 29.13 + 0.54x$	29.13	28.37	29.70	0.83
	0.75	$y = 25.43 + 0.48x$	25.43	25.64	13.22	0.97
	1.00	$y = 23.13 + 0.40x$	23.13	21.80	2.98	0.97
胡枝子 <i>L. bicolor</i>	0	$y = 11.86 + 0.44x$	11.86	23.75	-	0.92
	1.20	$y = 26.94 + 0.32x$	26.94	17.74	127.15	0.98
	1.80	$y = 16.30 + 0.50x$	16.30	26.57	37.44	0.95
酸枣 <i>Z. jujube</i>	0	$y = 12.18 + 0.64x$	12.18	32.62	-	0.96
	0.85	$y = 18.22 + 0.34x$	18.22	18.78	49.59	0.77
	1.28	$y = 16.03 + 0.72x$	16.03	35.75	31.61	0.79
石榴 <i>P. granatum</i>	0	$y = 11.81 + 0.65x$	11.81	33.02	-	0.98
	0.52	$y = 19.56 + 0.52x$	19.56	27.47	65.62	0.97
	0.78	$y = 14.29 + 0.69x$	14.29	34.61	21.00	0.99
	1.04	$y = 12.92 + 0.64x$	12.92	32.62	9.40	0.96

研究土地利用方式对土壤理化性质影响时发现,植物根系能在垂直方向改善土壤理化性质。本研究中种植灌木后土壤含水率、孔隙度和大团聚体含量均显著提高,因根系穿插在浅层坡体中能改变土壤孔隙结构,土壤孔隙结构对调节土壤水分、影响边坡稳定性具有重要的生态意义^[26]。胡枝子对土壤含水率和大团聚体含量改善最明显,相对于裸地含水率提高了约2—4倍,大团聚体含量提高了约2倍。杠柳对土壤孔隙度改善最明显,相比于裸地土壤孔隙度增加了5%—10%。土壤孔隙度和大团聚体含量均呈现表层高、底层低的特点。表明灌木根系对表层土壤孔隙结构改善效果较好^[27],植物根系分泌物能通过增加土壤有机质含量改善土壤结构、改变土壤孔隙度^[28]。

4.2 根系抗拉强度及其影响因素

植物根系主要通过加筋、锚固两个作用实现防治浅层滑坡^[29-30]。毛须根主要起加筋作用,根径较大的粗根主要起锚固作用,根系抗拉强度是衡量根系锚固作用的指标^[31],抗拉强度越大,根系对土壤锚固作用越强。朱海丽等^[32]对青藏高原黄土区四种灌木研究表明其抗拉强度范围为26 MPa—40 MPa,抗剪强度和根径关系主要为幂函数或指数函数,本研究中四种灌木根系抗拉强度与根径间为显著幂函数关系,根系抗拉强度随根径增加减小,其函数关系主要受植物种类影响^[33]。王剑敏等^[34]对三种中亚热带灌木研究发现,檵木和鹿角杜鹃单根抗拉强度与根径呈递减的幂函数关系,而香港黄檀未表现出明显相关性,本文中不同灌木根径和抗拉强度变化趋势也各不相同,胡枝子根系抗拉强度最高,土壤锚固作用较好,其次为石榴、酸枣、杠柳,主要原因是它们根系化学组成和内部结构不同^[21,35]。

4.3 根系对土壤抗剪强度的影响

土壤抗剪强度是土体边坡稳定性一个重要指标^[36],本质是土粒间粘聚力和土粒间摩擦产生的内摩擦角共同作用,服从摩尔-库伦强度理论。在同一地区、同类土壤、相同条件下原状土与重塑土主要区别在于,原状土中的植物根系通过挤压和缠绕作用可以提高土壤团粒数量^[37],故可通过调节土壤含水率、添加根系等方式使重塑土状态尽可能接近原状土^[38-39]。蔡建^[40]认为试验中重塑土试验条件与原状土差别较小时,可在一定程度上模拟实际情况下土壤的抗剪强度。当坡面土体发生滑移时,土壤产生的剪切力一部分转移到植物根系,根系的存在会改变土壤粘聚力和内摩擦角,影响土壤抗剪强度。倪九派等^[41]研究得西南丘陵山地地区土壤粘聚力随着土壤含水率升高呈增大趋势,在10%含水率处土壤粘聚力有最大值,这与本研究结果一致。在本试验设计含水率范围内,含水率升高抗剪强度降低、土壤粘聚力和内摩擦角均减小。含水率增加使土粒粘聚力降低,粘聚力减小土粒间摩擦减小,内摩擦角也减小,故土壤抗剪强度减弱^[42]。石榴根系对土壤抗剪强度增强效果明显;杠柳粘聚力降幅最大,含水率从10%增加到30%时粘聚力约减小4倍;酸枣内摩擦角降幅最大,含水率从10%增加到30%时内摩擦角约减小1倍。

胡夏嵩等^[43]研究了4种灌木根-土复合体抗剪强度,发现抗剪强度与垂直正压力之间呈线性正相关,符合摩尔-库伦定律,其根-土复合体粘聚力显著大于素土,内摩擦角无明显变化规律,这与本文研究结果相同,格日乐等^[44]研究显示,植物种类不同,抗剪强度和粘聚力最优值对应根系密度和含水率各不相同,本研究设定的3个根系密度梯度,杠柳和胡枝子根-土复合体抗剪强度随根系密度增加而减小,石榴和酸枣在1.5倍天然根系密度下根-土复合体抗剪强度最高,均高于杠柳和胡枝子;Ghestem^[45]认为根-土复合体抗剪强度受根系密度影响,在一定范围内正相关。本研究中根-土复合体粘聚力增值在2.98%—127.15%之间变化,均大于素土。不同植物抗剪强度最佳根系密度对应的含水率不同,当含水率或根系密度超出最优范围,根系对土壤抗剪强度增强效果会减小乃至消失,甚至对边坡稳定起到反作用。

5 结论

植物根系能改善土壤孔隙结构,相比裸地植物根系能显著改善土壤孔隙度和团聚体含量。杠柳对土壤孔隙结构改善效果明显,胡枝子对土壤含水率提高效果最好。

植物根系依靠自身抗拉强度分担土壤滑移时产生的剪切力,能通过增强土壤抗剪强度提高边坡稳定性。

单根抗拉强度依次为胡枝子>石榴>酸枣>杠柳,根系抗拉强度随着根径增大以幂函数关系减小,根径<1 mm的毛根抗拉强度最大。当含水率减小时,土壤粘聚力和内摩擦角均增大,故土壤抗剪强度增强。在设定含水率范围内,10%土壤含水率下土壤抗剪强度最强。胡枝子和杠柳随着根系密度增加土壤抗剪强度增大,酸枣和胡枝子在1.5倍根系密度下对土壤抗剪强度增强最大,随着根系密度增加土壤粘聚力增长最快为胡枝子,故其对土壤抗剪强度增强效果明显。

参考文献 (References):

- [1] 姜晔, 耿建忠. “一带一路”建设农业生态环境合作现状与前景分析. 世界农业, 2015, (10): 1-4. 6-6
- [2] 徐黎丽, 王悦. “一带一路”建设中甘肃“黄金段”作用的发挥. 西北师大学报: 社会科学版, 2015, 52(6): 22-28.
- [3] 解明曙. 乔灌木根系固坡力学强度的有效范围与最佳组构方式. 水土保持学报, 1990, 4(1): 17-24.
- [4] 方海燕, 蔡强国, 李秋艳, 孙莉英, 和继军. 甘肃舟曲“8·7”特大山洪泥石流灾害原因及防治对策. 中国水土保持科学, 2010, 8(06): 14-18+23.
- [5] 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. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 77-84.
- [6] 潘声旺, 袁馨, 雷志华, 胡明成. 乡土植物生活型构成对川渝地区边坡植被水土保持效益的影响. 生态学报, 2016, 36(15): 4654-4663.
- [7] Lee S G, Hencher S R. Recent extreme rainfall-Induced landslides and government countermeasures in Korea // Sassa K, Canuti P, Yin Y P, eds. Landslide science for a safer geoenvironment. Cham: Springer, 2014: 357-361.
- [8] Nilaweera N S, Nulalaya P. Role of tree roots in slope stabilisation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, 57(4): 337-342.
- [9] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, Ma W, Foulonneau M, Nespoulous J, Le Bissonnais Y, Stokes A. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. Catena, 2011, 87(1): 60-69.
- [10] 刘春霞, 韩烈保. 高速公路边坡植被恢复研究进展. 生态学报, 2007, 27(5): 2090-2098.
- [11] Gray D H, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(3): 335-353.
- [12] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 刘敏英. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征. 生态学报, 2014, 34(21): 6326-6336.
- [13] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties. Soil Science, 1981, 132(6): 427-435.
- [14] Wu T H, Beal P E, Lan C C. In-situ shear test of soil-root systems. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(12): 1376-1394.
- [15] 洪苗苗, 汪霞, 赵云飞, 欧延升, 黄政. 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. 山地学报, 2018, 36(1): 107-115.
- [16] Wang S Y, Meng X M, Chen G, Guo P, Xiong M Q, Zeng R Q. Effects of vegetation on debris flow mitigation: A case study from Gansu province, China. Geomorphology, 2017, 282: 64-73.
- [17] 田黎明, 孙爽, 王刚, 张鹏, 马金珠. 白龙江流域不同降雨侵蚀力模型对比研究. 水文, 2015, 35(1): 55-60, 6-6.
- [18] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 熊木齐, Wasowski J. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(4): 1-15.
- [19] 张继强, 孟少童, 薛睿, 赵亚萍, 张亚军, 王子婷, 孟秋菊. 白龙江流域滑坡体生态修复技术研究——以陇南市武都区段河坝流域为例. 中国水土保持, 2014, (3): 27-29.
- [20] 余冬立. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域植被恢复的水土环境效应研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2009.
- [21] Ji J N, Kokutse N, Genet M, Fourcaud T, Zhang Z Q. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China. Catena, 2012, 92: 139-154.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] Genet M, Kokutse N, Stokes A, Fourcaud T, Cai X H, Ji J N, Mickovski S. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. Forest Ecology and Management, 2008, 256(8): 1517-1526.
- [24] 南京水利科学研究所. SL237—1999 土工试验规程. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [25] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. 生态学报, 1983, 3(2): 91-101.
- [26] Boyle M, Frankenberger W T Jr, Stolzy L H. The influence of organic matter on soil aggregation and water infiltration. Journal of Production Agriculture, 1989, 2(4): 290-299.
- [27] Gonzalez-Ollauri A, Mickovski S B. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes. Geoderma, 2017, 285: 141-150.
- [28] 郑力文. 林木根系对土壤性质的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [29] Anderson C J, Coutts M P, Ritchie R M, Campbell D J. Root extraction force measurements for Sitka Spruce. Forestry, 1989, 62(2): 127-137.
- [30] Clarke M F, Williams M A J, Stokes T. Soil creep: problems raised by a 23 year study in Australia. Earth Surface Processes and Landforms, 1999,

- 24(2):151-175.
- [31] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, Speziali B, Vitali B, Vullo P, Zocco A. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*, 2005, 278 (1/2):11-22.
- [32] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 李国荣, 盛海彦, 陈桂琛. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27 (s2):3445-3452.
- [33] Abdi E. Effect of Oriental beech root reinforcement on slope stability (Hyrcanian Forest, Iran). *Journal of Forest Science*, 2014, 60(4) 166-173.
- [34] 王剑敏, 沈烈英, 赵广琦. 中亚热带优势灌木根系对土壤抗剪切力的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(2): 47-50.
- [35] Genet M, Stokes A, Salin F, Mickovski S B, Fourcaud T, Dumail J F, van Beek R. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots // Stokes A, Spanos I, Norris J E, Cammeraat E, eds. *Eco-and ground bio-engineering: The use of vegetation to improve slope stability*. Dordrecht: Springer, 2007: 3-11.
- [36] 王甜甜, 付登高, 阎凯, 曹晶潇, 张龙, 张岩, 张亚杰, 段昌群. 滇池流域山地富磷区常见植物的水土保持功能比较. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 67-71.
- [37] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34-37, 117-117.
- [38] 曹荣国, 范建华, 马中骏, 吕江峰. 原状粉质黏土抗剪强度的恢复试验研究. *路基工程*, 2016, (4):143-145, 151-151.
- [39] 张晓明, 王玉杰, 夏一平, 吴云, 陈林. 重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 6-9.
- [40] 蔡建. 原状土的抗剪强度研究. *岩土力学*, 2012, 33(7): 1965-1971.
- [41] 倪九派, 高明, 魏朝富, 谢德体. 土壤含水率对浅层滑坡体不同层次土壤抗剪强度的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(06): 48-50.
- [42] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学. 陈仲颐, 译. 北京. 中国建筑工业出版社, 1997.
- [43] 余芹芹, 胡夏嵩, 李国荣, 乔娜, 卢海静, 付江涛, 李华坦. 寒旱环境灌木植物根-土复合体强度模型试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(5): 1020-1031.
- [44] 格日乐, 张成福, 蒙仲举, 斯琴, 吴映东. 3种植物根-土复合体抗剪特性对比分析. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 85-90.
- [45] Ghestem M, Veylon G, Bernard A, Vanel Q, Stokes A. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. *Plant and Soil*, 2014, 377(1/2): 43-61.