

尖萼金丝桃根系对边坡土体抗剪强度的影响

薛海龙, 唐彪, 张竞元, 沈彦会, 许建新, 王莹

(深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 广东 深圳 518040)

摘要: [目的] 探讨根系单根抗拉拔强度对边坡土体抗剪强度的影响, 定量分析根系对边坡土体抗剪强度的增强作用, 为评价植物根系增强边坡土体抗剪切性能提供依据。[方法] 以 2 a 生尖萼金丝桃根系及其组成的根土复合体为研究对象, 分别进行室内单根拉拔试验和根土复合体剪切试验, 获得根系的抗拉强度及根土复合体试样黏聚力值; 在此基础上分析根系抗拉强度与根土复合体黏聚力值之间的关系。[结果] 尖萼金丝桃根系抗拉强度与根系直径存在负向幂函数关系, 相关性系数均大于 0.92; 根系拉拔位移、抗拉拔力均与根系直径呈正相关关系, 拉拔位移与抗拉拔力之间也表现为显著正相关关系; 抗拉强度与根系直径、拉拔位移、抗拉拔力两两之间均呈负相关关系; 根土复合体的黏聚力相较于无根素土均有不同程度的增长, 增幅达 17.25%~94.76%, 黏聚力、黏聚力增长率均与根土面积比、根土体积比呈正相关关系。[结论] 尖萼金丝桃根系拉拔特征对边坡土体抗剪强度产生显著的影响, 边坡土体抗剪切性能评价指标与根系拉拔特征变化密切相关。

关键词: 尖萼金丝桃; 根土复合体; 抗拉强度; 抗剪强度; 黏聚力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0087-06

中图分类号: S157

文献参数: 薛海龙, 唐彪, 张竞元, 等. 尖萼金丝桃根系对边坡土体抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 87-92. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.015; Xue Hailong, Tang Biao, Zhang Jingyuan, et al. Effects of *Hypericum Perforatum* roots on shear strength of slope soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 87-92.

Effects of *Hypericum Perforatum* Roots on Shear Strength of Slope Soil

Xue Hailong, Tang Biao, Zhang Jingyuan, Shen Yanhui, Xu Jianxin, Wang Ying
(Shenzhen Tech and Ecology & Environment Co, Ltd, Shenzhen, Guangdong 518040, China)

Abstract: [Objective] The effects of single root pulling strength on the shear strength of slope soil were investigated, and the effect of root on the shear strength of slope soil was quantitatively analyzed in order to provide a basis for evaluating the shear strength of slope soil strengthened by plant roots. [Methods] The root-soil complex of 2-year-old *Hypericum acmosepalum* was studied. The indoor single-strand pull test and the root-soil composite shear test were conducted to obtain the tensile strength of the root system. The relationship between the root tensile strength and the cohesion force of the root-soil composite was analyzed. [Results] There was a negative power function relationship between the tensile strength and root diameter of *H. acmosepalum*, and the correlation coefficient was greater than 0.92. The root pullout displacement and tensile force were positively correlated with root diameter, and there was also a significant positive correlation between the pullout displacement and tensile force. The tensile strength was negatively correlated with root diameter, the pullout displacement and the pullout force, and the cohesive force of the root-soil composite increased by 17.25%~94.76%, compared with that of the rootless soil. The cohesion and cohesion growth rates were positively correlated with root-soil area ratio and root-soil volume ratio. [Conclusion] The

收稿日期: 2018-12-03

修回日期: 2019-01-10

资助项目: 国家重点研发计划课题“西南高山亚高山山区工程创面拟自然人工促进植被构建技术”(2017YFC0504904)

第一作者: 薛海龙(1989—), 男(汉), 新疆维吾尔自治区阿克苏市人, 硕士, 工程师, 主要从事边坡生态修复技术与植物应用研究。E-mail: xuehailong@sztechand.com.cn.

通讯作者: 许建新(1982—), 男(汉), 福建省福州市人, 博士, 高级工程师, 主要从事边坡生态修复技术与植物应用研究。E-mail: xujianxin@sztechand.com.cn.

pullout characteristics of the *H. acmosepalum* root have a significant influence on the shear strength of the slope soil, and the evaluation indexes of the shear resistance of the slope soil are closely related to the changes of the root pullout characteristics.

Keywords: *Hypericum acmosepalum*; root-soil composite systems; tensile strength; shear strength; cohesion force

植物固土主要通过根系的加筋和锚固作用来实现,根土复合体在外力作用下,其变形小于素土^[1]。加筋理论模型认为,植物根系的弹性模量要远远高于土体,植物根系与土体相互作用时,会在根系与土壤接触界而产生摩擦阻力,这不仅限制了根系周围土体的变形,而且使根系周围的土体受到压缩而增大土体的内聚力,提高了土体的强度从而起到固持土体的作用,因此根土界面的摩擦特性是根系固土机制研究的关键之一^[2-3]。根系与土壤的摩擦特性研究,目前常借鉴土壤与其他材料的界面摩擦特性研究方法,如采用直剪试验研究乔木与灌木根系与土体界面摩擦特性,采用拉拔试验模拟加筋材料被拔出的特性^[4]。植物根系的抗拉拔力是表征植物根土摩擦特征的一个重要参数。当土体遭受破坏产生滑动面时,根系将所承受的荷载向土体深层传递及周围扩散,降低根土复合体的应力水平,改善土体变形性能^[5-6]。王帅^[7]研究了狗牙根、百喜草根系特征对边坡抗剪性能影响,胡敏等^[8]研究了沙地柏根系布根方式和根径对其根土复合体抗剪性能影响,周涛等^[9]探讨了狗牙根、三叶草根系数量对根土复合体抗剪强度影响,李为萍等^[10]和苑苑君^[11]研究了白桦等植物根土复合体抗剪性能与根系分布之间的相互作用,蒋必凤^[12]分析了含根率和含水率对土体抗剪强度和有效黏聚力的影响,上述研究均得到了相类似的结论,即根系的加入能够有效增强土体抗剪性能,且与根系的拉拔特性显著相关。

本文拟基于前人研究,应用土力学原理,以 2 年生尖萼金丝桃(*Hypericum acmosepalum*)根系及其组成的根土复合体为研究对象,分别进行单根拉拔试验和根土复合体剪切试验,深入研究根系单根抗拉拔强度对边坡土体抗剪强度的影响,定量分析评价其根系对边坡土体抗剪强度的增强作用以及根系的抗拉强度与黏聚力之间的关系,以期对定量评价植物根系增强边坡土体抗剪强度提供试验数据支撑,为进一步深入探讨植物根系增强边坡土体抗剪强度机理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

尖萼金丝桃(*Hypericum acmosepalum*)为藤黄科直立半常绿灌木,高 0.6~2 m,多生于海拔 900~

3 000 m 的山坡上,路旁、灌丛、林间空地以及荒地上较常见,具有抗寒、耐旱、耐贫瘠、根系发达、适应性强的特点,能固定土壤,增加土体通透性,有效截留降水,防止水土流失,是一种优秀的水土保持及边坡修复植物。

选取贵州省六盘水市水城县自然岩质边坡,在相同边坡环境下,根据五点采样法,选取长势较好、分枝数 4~6 枝,株高 90~110 cm,冠幅 60~80 cm 的 10 株尖萼金丝桃,采取整株挖掘法,保证根系完整,将其挖出后置于静水中洗去根系表面土壤,然后自然晾干,观察根系分布特征可知,表现为主根系(定根)与须根系(不定根)相结合的分模式,根系整体呈现出近“伞状”,根茎范围集中于 0~5.0 mm,根系相互缠绕形成具有一定张力的根系网络,将根际土壤固结为一个整体。根系冠幅大,平均达到 30 cm×30 cm,覆盖面广,固土保水效力好,深扎的主根与四周分散的侧根使其水分和养分的吸收更有利。其中 5 株开展根系拉拔试验,同时采集样地内土壤带回,烘干后粉碎过 2 mm 筛,开展根土复合体剪切试验。

1.2 单根拉拔试验设计

采用游标卡尺测量根系直径,按下述 2 个径级(0~3.0 mm 和 3.0~5.0 mm)分开,每个径级随机选取 5 个根系,每个根系再选取 3 个平行试样,分别截取长为 10 cm 的较直茎段,两端用锚具固定,采用拉力仪器测量拉拔位移及抗拉拔力,根系径级处于 0~3.0 mm 范围内的,采用艾德堡 HP-50N 数显式根系拉拔力计(量程 0~50 N,精度 0.001),径级处于 3.0~5.5 mm 范围内的,采用艾德堡 HP-1KN 指针式根系拉拔力计(量程 0~1 kN,精度 0.01)。

为避免根系在夹具处滑脱,试验时根系在夹具处增加橡皮垫以增大摩擦。根系拉断后用游标卡尺测量根断裂处直径 D 。用公式(1)计算根系的抗拉强度 P :

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

式中: P ——抗拉强度(MPa); T ——抗拉拔力(N); D ——断裂面根系直径(mm)。

1.3 根土复合体剪切试验设计

依据采样区边坡土层含水率(15.5%)为模拟根系采挖区当时测得的土壤自然含水率,在已筛分土壤中加入适量水,模拟实际湿度环境;根据采挖根系自

然生长冠幅(表 1),利用木板制作长宽均为 30 cm,高 20 cm(边坡生长的尖萼金丝桃根系,自然土层较薄,根系多分布于 0—20 cm 土层中)的无盖木盒 5 个,把处理后的 5 株尖萼金丝桃根系分别垂直放入木盒中,尽量保证根系原始形态不变,再分 4 层(间隔 5 cm)分别加入规定质量的土壤并锤击(力度均匀,锤击 10 次,保证 5 cm 厚度即可),制备根土复合体试样,同时制备无根素土的空白对照组样块。

表 1 金丝梅根系冠幅 cm×cm

分类	根 1	根 2	根 3	根 4	根 5
冠幅	35×25	20×30	35×30	30×30	30×30

试验设备采用自制的室外直剪仪,设备由上下剪切盒、水平加载系统、液压系统、控制系统、数据传感器以及显示屏 6 部分组成。上剪切盒与下剪切盒尺寸相同,内部尺寸均为 30 cm×30 cm×10 cm(长×宽×高),壁厚均为 1.0 cm。此尺寸远大于一般的直剪仪(横断面面积只有 30 cm²,高度只有 2 cm),更适合于根土复合体的直剪。水平剪切由特定测量系统,包括水平位移测量与加载剪切力测量,水平位移通过电子游标卡尺测量,量程为 150 mm,精度为 0.01

表 2 不同根径、根长根系数量变化

样本	根 1	根 2	根 3	根 4	根 5
根径/mm	0~3.0,3.0~5.0	0~3.0,3.0~5.0	0~3.0,3.0~5.0	0~3.0,3.0~5.0	0~3.0,3.0~5.0
根长/cm	5~20,10~15	10~20,19~28	10~19,21~24	8~23,15~25	8~25,10~17
根数	32,8	54,8	50,7	53,6	43,3
根数比率/%	0.80,0.20	0.87,0.13	0.88,0.12	0.90,0.10	0.93,0.07

2.1.2 尖萼金丝桃根系抗拉强度指标随直径的变化
试验根系($D < 3.0$ mm)相对脆弱,在拉拔过程中易在夹具处发生断裂。在对试验所得结果进行处理时,若根系在试验过程中发生滑动或夹断等情况,则视为数据无效,应剔除。试验共对 30 个尖萼金丝桃根系样本进行了单根拉拔测试,所测得的抗拉试验结果如表 3 所示(剔除 10 个无效数据)。根系的拉伸破坏过程为最初根皮裂开一条缝,随着力的增加,根皮裂开第二条缝、第三条缝……最后根纤维被拉断,根系的直径对其抗拉位移、抗拉拔力、抗拉强度均产生较大影响。

灌木尖萼金丝桃室内单根拉拔试验结果如图 1 所示,表中根系断裂处直径、拉拔位移、抗拉拔力、抗拉强度等数据均取平均值,随着根系直径的增大,根系拉拔位移和抗拉拔力均整体呈现出直线增长的趋势,拉拔位移曲线方程: $S=13.141D-4.0496$ ($R^2=$

mm;剪切力通过传感器测量,结果直接显示在数显式拉力计上。水平剪切速率为 0.02~3 mm/min,剪切时间设定为 15 min,测力范围为 0~10 kN。

以剪切强度为纵坐标,对应的剪切应力为横坐标,绘出 $\tau-\sigma$ 关系图,作出线性回归线,由摩尔-库仑定律知直线在纵坐标的截距为根土复合体的黏聚力 C ,直线的倾角为根土复合体的内摩擦角 φ 。摩尔-库仑定律,其表达式为公式(2):

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

式中: τ_f ——根土复合体抗剪强度(MPa); C ——根土复合体的黏聚力(kPa); σ ——剪切面上的正应力(N); φ ——根土复合体的内摩擦角(°)。

2 结果与分析

2.1 尖萼金丝桃根系分布特征研究

2.1.1 尖萼金丝桃根系数量随根径根长的变化
对比 5 株根系样本不同根径、根长根系的数量变化可知(表 2),尖萼金丝桃根系以直径 0~3.0 mm 为主,根长 5~25 cm 不等,根数比率均在 80%以上,直径 3.0~5.0 mm 根系分布较少,根长 10~30 cm 不等,根数比率 20%以下。

0.892 6),抗拉拔力曲线方程: $T=6.8238D+8.3827$ ($R^2=0.9117$);抗拉强度随着根系直径的增大呈现出负向幂函数减小趋势,曲线方程: $P=28.548D^{-1.519}$ ($R^2=0.8905$)。

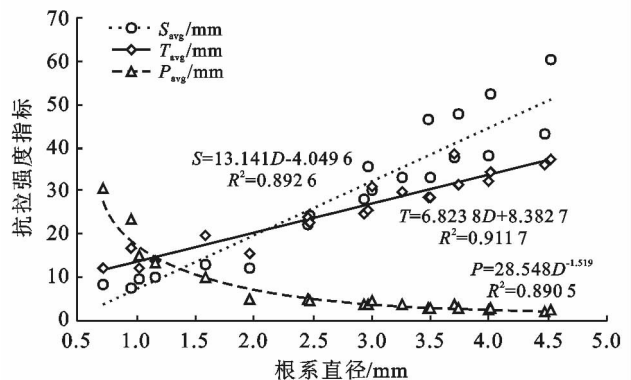


图 1 尖萼金丝桃单根拉拔试验结果

表 3 根系抗拉强度指标随直径的变化

样本	直径 D_{avg}/mm	拉拔位移 S_{avg}/mm	抗拉拔力 T_{avg}/N	抗拉强度 $P_{\text{avg}}/\text{MPa}$
1	0.72	8.40	12.308 6	30.402 9
2	0.95	7.72	16.671 7	23.532 2
3	1.02	9.65	12.345 7	15.027 8
4	1.15	10.26	13.901 2	13.346 1
5	1.59	12.97	19.647 6	9.954 6
6	1.97	12.12	15.493 8	5.085 8
7	2.46	22.40	23.781 4	5.006 1
8	2.48	24.22	22.623 5	4.685 8
9	2.94	28.10	24.657 7	3.634 0
10	2.97	35.47	25.599 4	3.697 0
11	3.00	30.13	31.192 0	4.415 0
12	3.26	32.99	29.845 7	3.570 9
13	3.48	46.72	28.575 3	3.005 8
14	3.50	33.16	28.392 5	2.952 6
15	3.71	37.86	38.602 6	3.572 7
16	3.74	47.97	31.551 2	2.878 1
17	3.99	38.22	32.127 2	2.570 7
18	4.01	52.22	34.527 1	2.735 3
19	4.47	43.28	35.862 0	2.282 3
20	4.52	60.47	37.503 0	2.338 4

通过拉拔试验得到尖萼金丝桃根系单根抗拉强度与根系直径的关系式(3)~(4),直径范围 $0\text{ mm} < D < 3.0\text{ mm}$ 时,关系式为 $P = 17.902D^{-1.451}$ ($R^2 = 0.9676$);直径范围 $3.0\text{ mm} < D < 5.0\text{ mm}$ 时,关系式为 $P = 15.317D^{-1.253}$ ($R^2 = 0.9585$),由关系式可知,根系抗拉强度与根系直径存在一定程度上的负向幂函数关系,相关性系数均大于 0.95,最高达到了 0.9676。根系在直径范围 $0\text{ mm} < D < 3.0\text{ mm}$ 的抗拉强度均大于直径范围 $3.0\text{ mm} < D < 5.0\text{ mm}$,但抗拉强度减小幅度直径范围 $3.0\text{ mm} < D < 5.0\text{ mm}$ 的根系相较于直径范围 $0\text{ mm} < D < 3.0\text{ mm}$ 的根系小。

$$P = 17.902D^{-1.451} \quad (0\text{ mm} < D < 3.0\text{ mm})$$

$$R^2 = 0.9676 \quad (3)$$

$$P = 15.317D^{-1.253} \quad (3.0\text{ mm} < D < 5.0\text{ mm})$$

$$R^2 = 0.9585 \quad (4)$$

由表 4 中 Pearson 相关性分析可得,根系拉拔位移、抗拉拔力均与根系直径存在正相关关系,其中拉拔位移与根系直径显著正相关(0.584*);抗拉拔力与根系直径存在极显著正相关关系(0.795**),抗拉强度与根系直径存在极显著负相关关系(-0.810**);拉拔位移与抗拉拔力呈现极显著正相关关系(0.730**),与抗拉强度呈现极显著负相关关系(-0.862**);抗拉拔力与抗拉强度呈现极显著负相关关系(-0.839**).

表 4 根系直径与拉拔位移、抗拉拔力、抗拉强度 Pearson 相关性

指标	直径 D/mm	拉拔位移 S/mm	抗拉拔力 T/N	抗拉强度 P/MPa
D/mm	1			
S/mm	0.584*	1		
T/N	0.795**	0.730**	1	
P/MPa	-0.810**	-0.862**	-0.839**	1

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.2 根系抗拉强度与根土复合体黏聚力 C 值之间的关系

不同根径根系组合的抗拉强度表现出较大差异,对比剪切试验结果(表 5),抗拉强度越大的根系组合组成的根土复合体黏聚力越大,其较于无根素土的增长率也相对越大,故可以认为根土复合体试样的黏聚力值与植物根系总的抗拉强度呈正相关关系。综上所述可知,植物根系总抗拉强度对根土复合体试样黏聚力值存在较大程度的影响,即主要表现在根土复合体黏聚力值随植物根系总抗拉强度的增大总体上呈现不断增大的趋势,对比根系直径分布特征也可得到,小根径根系越多,总抗拉强度相对越大,而且比具有同样根面积比率的粗根系具有较大的表面积,与土体的摩擦力较大,抵抗拉脱的能力强,而根系提高土体黏聚力通过增大根土接触面摩擦力实现。

表 5 根系抗拉强度与根土复合体黏聚力 C 值之间的关系

样本	土体密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	总抗拉强 度 P/MPa	黏聚力 C/kPa	黏聚力 增长率/%	
根 土 复 合 体	1	1.67	15.5	74.05	53.7	17.25
	2	1.67	15.5	117.12	67.1	46.51
	3	1.67	15.5	295.57	74.7	63.10
	4	1.67	15.5	454.14	89.2	94.76
	5	1.67	15.5	80.66	66.0	44.11
无根素土	1.67	15.5	—	45.8	—	

注:总抗拉强度=单根平均抗拉强度×根系数量;黏聚力增长率=(根土复合体黏聚力值-无根素土黏聚力值)/无根素土黏聚力值;表中“—”表示不存在相关试验数据。

2.3 无根素土与根土复合体黏聚力 C 值之间的关系

通过对无根素土和根土复合体剪切试验,结果如表 6 所示。保证土体密度(1.67 g/cm^3)以及含水率(15.5%)不变的情况下,5 组根土复合体的黏聚力依次为 53.7,67.1,74.7,89.2,66.0 kPa,相对于无根素土黏聚力(45.8 kPa)均有不同程度的增长,增长率分别达到了 17.25%,46.51%,63.10%,94.76%,44.11%,表明根系的加入增加了土壤颗粒间的连结

强度,对边坡土体黏聚力 C 值起到显著的增强作用,在一定程度上提高了边坡土体的稳定性。

对于 5 组根土复合体黏聚力差异,根 1,根 2 以及根 3,根 4 两两的根土面积比差异较小,但黏聚力差异较明显,表明黏聚力除了受到根土面积比的影响,还与根系的分布有关,复合体试样中根系的分布形式不同、单根与剪切面的夹角不同也较大程度上对黏聚力

产生影响,对比 5 组根土复合体的黏聚力可得,黏聚力、黏聚力增长率均与根土面积比、根土体积比均存在正相关关系,直径较小($0\sim 3.0\text{ mm}$)的根系越多,其黏聚力越大,与土体夹角趋近于 90° 的根系越多,黏聚力越大。根土复合体内摩擦角相对于无根素土也表现出一定程度的增大,但变化幅度较于黏聚力均不显著。

表 6 无根素土与根土复合体黏聚力变化结果

样本	土体密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	根土面积 比/%	根土体积 比/‰	黏聚力 C/kPa	黏聚力增长 率/%	内摩擦角 φ / ($^\circ$)	黏聚力 标准误	
根 土 复 合 体	1	1.67	15.5	0.31	0.49	53.7	17.25	24.1	0.37
	2	1.67	15.5	0.34	0.76	67.1	46.51	22.6	0.30
	3	1.67	15.5	0.41	0.81	74.7	63.10	20.8	0.32
	4	1.67	15.5	0.44	0.99	89.2	94.76	27.5	0.27
	5	1.67	15.5	0.38	0.73	66.0	44.11	23.9	0.14
无根素土	1.67	15.5	—	—	45.8	—	20.5	0.59	

注:根土面积比=根系在剪切面处的面积/剪切面面积;根土体积比=根系总体积/根土复合体总体积。

3 讨论

3.1 根系直径对根系抗拉强度指标的影响

灌木尖萼金丝桃室内单根拉拔试验结果表明,随着根系直径的增大,根系拉拔位移和抗拉拔力均整体呈现出直线增长的趋势,抗拉强度随着根系直径的增大呈现出负向幂函数减小趋势,原因是随着植物根系的生长,根径增大,根表面积增大,木质部越来越发达,大量木质素积累,使得根系质地则越坚硬,抗拉拔力不断增长,但随着根径的增大,根系质地的改变,其弹性形变性能减弱,抗拉强度越来越小,容易被拉断;万娟^[13]对狗牙根和多花木蓝根系开展单根拉拔试验,结果表明多花木蓝根系平均拉拔位移和抗拉拔力均大于狗牙根,但抗拉强度狗牙根相对较大;Murielle G^[14]对蓖麻和麻风树根系进行拉拔试验,结果表明根系直径大,抗拉拔力就大,但容易拉断,抗拉强度小。类似的还有赵玉娇等^[15],张翔宇等^[16]对植物根系拉拔试验的研究,结论基本一致。

3.2 根系抗拉强度与根土复合体黏聚力的关系

不同根径根系组合的抗拉强度表现出较大差异,对比剪切试验结果,抗拉强度越大的根系组合组成的根土复合体黏聚力越大,其较于无根素土的增长率也相对越大,格日乐等^[17]研究中也有相同结论,其中对柠条、扬柴、草木犀等灌木根系进行单根拉拔试验,并对其组成的根土复合体进行剪切试验,结果表明随着根系极限抗拉强度的减小,根土复合体黏聚力增长率也降低。邓佳^[18]对香草根、百喜草、狗牙根 3 种草本根系也开展了单根拉拔及根土复合体剪切试验,结果

为平均抗拉强度大的根系组成的根土复合体黏聚力大。类似的研究还表现在:刘福全^[19]对沙柳、沙地柏、白沙嵩 3 种灌木根系及根土复合体研究,李云鹏等^[20]对马尾松和四川大头茶的研究,结果都表明了抗拉强度越大,相对的根土复合体黏聚力越大,抗剪强度越大。综上可知,植物根系抗拉强度对根土复合体试样黏聚力值存在较大程度的影响,即主要表现在根土复合体黏聚力值随植物根系抗拉强度的增大总体上呈现增大的趋势。

4 结论

(1) 灌木尖萼金丝桃室内单根拉拔试验结果表明,随着根系直径的增大,根系拉拔位移和抗拉拔力均整体呈现出直线增长的趋势,拉拔位移和抗拉拔力曲线方程 R^2 均高于 0.89;抗拉强度随着根系直径的增大呈现出负向幂函数减小趋势,曲线方程 R^2 高于 0.89,根系在直径范围 $0\text{ mm}<D<3.0\text{ mm}$ 的抗拉强度均大于直径范围 $3.0<D<5.0\text{ mm}$,但抗拉强度减小幅度直径范围 $3.0<D<5.0\text{ mm}$ 的各根系相较于直径范围 $0\text{ mm}<D<3.0\text{ mm}$ 的根系小。

(2) 根系拉拔位移、抗拉拔力均与根系直径存在正相关关系,抗拉强度与根系直径存在极显著负相关关系;拉拔位移与抗拉拔力呈现极显著正相关关系,与抗拉强度呈现极显著负相关关系;抗拉拔力与抗拉强度呈现极显著负相关关系。

(3) 不同根径根系组合的抗拉强度表现出较大差异,对比剪切试验结果,抗拉强度越大的根系组合组成的根土复合体黏聚力越大,其较于无根素土的增

长率也相对越大,根土复合体试样的黏聚力值与植物根系总的抗拉强度呈正相关关系,根土复合体黏聚力、黏聚力增长率均与根土面积积比、根土体积比均存在正相关关系。其相较于无根素土黏聚力均有不同程度的增长,增长率达到了 17.25%~94.76%,根系的加入对边坡土体内摩擦角的影响不显著,对黏聚力 C 值起到显著增强作用,在一定程度上提高了边坡土体的稳定性。

[参 考 文 献]

- [1] 余芹芹,胡夏嵩,李国荣,等.寒旱环境灌木植物根土复合体强度模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):1020-1031.
- [2] 杨悦舒,夏振尧,肖海,等.多花木蓝根土复合体抗剪强度试验研究[J].长江科学院院报,2014,31(4):72-76.
- [3] 惠尚,张云伟,刘晶,等.丛生竹根系抗拉拔力学特性[J].山地学报,2013,31(1):65-70.
- [4] 赵亮.根土复合体抗剪强度试验研究[D].长沙:中南林业科技大学,2014.
- [5] 李华坦,李国荣,赵玉娇,等.模拟自然降雨条件下植物根系增强边坡土体抗剪强度特征[J].农业工程学报,2016,32(4):142-149.
- [6] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区灌木植物根系护坡效应的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1877-1884.
- [7] 王帅.不同配比深、浅根系植物对边坡抗冲、抗剪性能影响试验[J].公路交通科技,2013,30(12):39-43.
- [8] 胡敏,李为萍,史海滨,等.布根方式及根系径级对根土复合体抗剪性能的影响[J].水土保持通报,2012,32(1):42-44.
- [9] 周涛,刘泉宏,谌芸,等.狗牙根和三叶草的根系特征及对荒漠紫色土抗剪性能的影响[J].草业科学,2018,35(3):463-471.
- [10] 李为萍,胡敏,史海滨.沙地柏根系径级对根土复合体抗剪强度的影响[J].土壤通报,2012,43(4):935-937.
- [11] 杨苑君.华北典型乔木根系抗拉及土壤抗剪性能研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- [12] 蒋必凤.牛筋草根土复合体抗剪性能研究[J].山西建筑,2016,35(1):63-65.
- [13] 万娟.草灌生态护坡力学性能研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [14] Ghestem M, Veylon G, Bernard A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J]. Plant and Soil, 2014,377(1):43-61.
- [15] 赵玉娇,胡夏嵩,李华坦,等.寒旱环境灌木根系增强边坡土体抗剪强度特征[J].农业工程学报,2016,32(11):174-180.
- [16] 张翔宇,杨平,王磊,等.植被根系对土体抗剪强度影响的试验研究[J].武汉理工大学学报,2012,34(4):113-117.
- [17] 格日乐,刘艳琦,左志严,等.根系固土主要力学因子的主成分分析[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2015,36(6):39-47.
- [18] 邓佳.南方红壤区常见草本根土复合体生物力学抗蚀机理研究[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [19] 刘福全.植物枝叶与根系固土抗蚀差异性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [20] 李云鹏,张会兰,王玉杰,等.针叶与阔叶树根系对土壤抗剪强度及坡体稳定性的影响[J].水土保持通报,2014,34(1):40-45.
- [28] Conesa M R, de la Rosa J M, Artes-Hernandez F, et al. Long-term impact of deficit irrigation on the physical quality of berries in "Crimson Seedless" table grapes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015,95(12):2510-2520.
- [29] Conesa M R, Falagan N, de la Rosa J M, et al. Post-veraison deficit irrigation regimes enhance berry coloration and health-promoting bioactive compounds in "Crimson Seedless" table grapes [J]. Agriculture Water Management, 2016,163:9-18.
- [30] 刘静霞,张芮,成自勇,等.不同生育期水分亏缺对酿酒葡萄产量及品质的效应研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):78-83.
- [31] Marinho L B, Rodrigues J J V, Soares J M. et al. Production and quality of "Superior Seedless" grapes under irrigation restrictions during berry maturation [J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2009, 44:1682-1691.
- [32] Serman F V, Liotta M, Parera C. Effects of irrigation deficit on table grape cv. superior seedless production [J]. Acta Horticulturae, 2004(646):183-186.

(上接第 86 页)