

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.019.

张珉瑞, 朱少东, 李盼, 等. 干热河谷区典型植被土壤抗剪性能影响因素评价[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 153-162.

Zhang Minrui, Zhu Shaodong, Li Pan, et al. Evaluation of Influencing Factors of Soil Shear Performance of Typical Vegetation in Dry-Hot Valley Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 153-162.

# 干热河谷区典型植被土壤抗剪性能影响因素评价

张珉瑞, 朱少东, 李盼, 段青松, 杨苑君

(云南农业大学 水利学院, 昆明 650201)

**摘要:** [目的] 探讨植被对边坡固土效应的影响, 为金沙江干热河谷区防治土壤侵蚀、减少水土流失提供数据支持。[方法] 以云南省永仁县 4 种典型植被(台湾相思、锥连栎、余甘子、云南松)为研究对象, 开展室内单根拉伸试验和直剪试验, 研究了不同植被类型土壤抗剪性能的差异性及各因素对其的影响程度。[结果] (1) 4 种植物平均单根抗拉力表现为: 锥连栎 > 余甘子 > 云南松 > 台湾相思; 平均单根抗拉强度表现为: 余甘子 > 台湾相思 > 云南松 > 锥连栎; 单根抗拉力与根径呈指数函数关系, 单根抗拉强度与根径呈显著负相关关系。(2) 在 4 种垂压下, 4 种植物根土复合体抗剪强度均大于素土, 且抗剪强度指标随土层深度的变化也各不相同, 云南松植被土壤黏聚力随土层深度变化变幅最大(51.47%), 锥连栎植被土壤内摩擦角随土层深度变化变幅最大(37.96%)。(3) 采用灰色关联法综合分析根系抗拉性能、土壤理化性质与土壤黏聚力和内摩擦角之间的关联度, 其中黏聚力与根系抗拉强度关联度最高, 根系抗拉力次之, 含水率最低; 内摩擦角与土壤容重关联度最高, 有机质次之, 全钾最低。[结论] 植物根系抗拉性能和土壤理化性质能显著影响土壤的抗剪性能, 其中根系抗拉性能对土壤黏聚力的影响较大, 对土壤内摩擦角的影响不显著。

**关键词:** 金沙江干热河谷; 根系抗拉; 抗剪性能; 灰色关联法

中图分类号: S157; S714

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0153-10

## Evaluation of Influencing Factors of Soil Shear Performance of Typical Vegetation in Dry-Hot Valley Area

Zhang Minrui, Zhu Shaodong, Li Pan, Duan Qingsong, Yang Yuanjun

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the influence of vegetation on the soil consolidation effect of slope, and to provide data support for preventing soil erosion and reducing soil erosion in the dry-hot valley of Jinsha River. [Method] Four typical vegetations (*Acacia confusa*, *Quercus franchetii*, *Phyllanthus emblica*, *Pinus yunnanensis*) in Yongren County of Yunnan Province were taken as the research objects. Indoor single root tensile test and direct shear test were carried out to study the difference of soil shear performance of different vegetation types and the influence of various factors on it. [Results] (1) The average single root tensile resistance of the four plants decreased in the order: *Quercus franchetii* > *Phyllanthus emblica* > *Pinus yunnanensis* > *Acacia confusa*. The average tensile strength of single root decreased in the order: *Phyllanthus emblica* > *Acacia confusa* > *Pinus yunnanensis* > *Quercus franchetii*. The tensile resistance of a single root had an exponential function relationship with the root diameter, and the tensile strength of a single root had a significant negative correlation with the root diameter. (2) Under the four vertical pressures, the shear strength of the four vegetation root-soil composites was greater than that of the plain soil, and the shear strength index varied with the depth of the

收稿日期: 2023-08-17

修回日期: 2023-09-14

资助项目: 国家自然科学基金(32060368, 31700635); 云南省应用基础研究计划项目(2018FD045)

第一作者: 张珉瑞(1999—), 男, 四川泸州人, 硕士生, 研究方向为水土保持研究。E-mail: 2585334039@qq.com

通信作者: 杨苑君(1989—), 女, 云南楚雄人, 博士, 讲师, 主要从事水土保持与生态环境工程研究。E-mail: yangyuanjunbj@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

soil layer. The soil cohesion of the *Pinus yunnanensis* vegetation had the largest variation with the depth of the soil layer (51.47%), and the internal friction angle of the *Quercus franchetii* vegetation had the largest variation with the depth of the soil layer (37.96%). (3) The grey correlation method was used to comprehensively analyze the correlation between root tensile properties, soil physical and chemical properties and soil cohesion and internal friction angle. The correlation between cohesion and root tensile strength was the strongest, followed by root tensile resistance, and the water content was the weakest. The correlation between internal friction angle and soil bulk density was the strongest, followed by organic matter, and total potassium was the weakest. [Conclusion] The tensile properties of plant roots and the physical and chemical properties of soil can significantly affect the shear properties of soil, among which the tensile properties of roots have a greater impact on soil cohesion, and have no significant effect on soil internal friction angle.

**Keywords:** Jinsha River dry-hot valley; root tensile; shear performance; grey correlation method

金沙江干热河谷区是我国土壤侵蚀最严重区域之一,2021年金沙江流域水土流失面积8.34万 $\text{km}^2$ <sup>[1]</sup>。由于独特的区域地形和干热的气候条件,造就了该地半干旱区景观,植被稀松,土质疏松,降水集中。又由于人类活动的干扰,大量的水土流失导致生态环境遭到破坏,土壤侵蚀严重,土地生产力降低,植被恢复困难,严重影响当地的工农业发展和人民的生活质量。

近年来,采用植被措施防治水土流失和加强土壤稳定性的研究被国内外学者广泛关注。植物作为生态系统的重要组成部分,在加固边坡、防治土壤侵蚀、减少水土流失、保护生态环境等方面有着重要作用。植物根系不仅能稳固自身,吸收、传输土壤中水分和营养物质,还能固持土体加强土壤抗侵蚀能力<sup>[2-3]</sup>。植物根系固土效能主要由其自身生物力学特性、结构形式、地下分布数量等决定。植物根系含有纤维素、木质素等高聚物化学物质,具有抗拉、抗压等特性,能在一定程度上稳固土壤,加强土壤之间的黏结力<sup>[4-5]</sup>。一方面,植物根系与土壤相互缠绕形成根土复合体,改变土壤之间的结构,加强土壤的抗剪强度。另一方面,根系往土壤深处不断生长,使得深层土壤和浅层土壤更好地联结在一起,加强土壤的稳定性<sup>[6]</sup>。

植物根系抗拉特性受根径、根长、根表面积、含水量等影响。研究表明,根系抗拉强度与根长和含水量呈负相关关系,与根系内部纤维素、根径等呈正相关关系<sup>[7-8]</sup>。根系抗拉性能与土壤抗剪强度存在密切关系,从根系固土机理上看,根土复合体界面所受到的摩擦力与抗拉力存在着动态平衡,根系抗拉力越大、所对应界面的摩擦力就越大,土体的稳定性就越高。当土体受到剪切变形时,土壤具有的强抗压性使得根系与土壤之间因摩擦作用所产生的摩擦力转化为抗拉力,从而增强土体的稳定性<sup>[9-10]</sup>。目前,关于植被根系固土的研究大多是关于单独讨论植被根系的力学特性和根土复合

体力学强度等方面,相比之下,关于植被根系抗拉特性、土壤有机质、全氮、全磷、全钾等对根土复合体抗剪性能的影响研究结果尚不充分,尤其是干热河谷地区。因此,本研究样地选择在金沙江流域干热河谷地区云南省永仁县,对该地区4种典型植被根系进行拉伸试验和根土复合体直剪试验,探讨不同植被根系力学特性及土壤理化性质对根土复合体抗剪性能的影响,为金沙江干热河谷地区水土流失、浅层滑坡等灾害现象提供有效的防治理论和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于金沙江干热河谷典型气候区云南省楚雄彝族自治州永仁县(25°51'—26°06'N,101°14'—101°49'E),海拔为1530~1700 m,属于南亚热带季风气候,多年平均气温22.6℃,极端高温43℃,年日照2534~2774 h,多年平均降水量840 mm,年蒸发量3507.2 mm,研究区内地形地貌复杂,沟壑纵横。

### 1.2 试验材料

2022年9月进行野外采样,通过对云南省永仁县干热河谷区典型植物类型、生长情况进行原位调查,选取适宜永仁县研究区气候条件生长的4种典型植物进行研究,即锥连栎(*Quercus franchetii*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)、台湾相思(*Acacia confusa*)、云南松(*Pinus yunnanensis*),4种样地的基本情况见表1。台湾相思属于水土保持的重要树种,余甘子、云南松、锥连栎是云南段金沙江干热河谷区典型植被,有耐寒、耐旱等生物特性。土壤类型为燥红土,土质松软,伴有少量石砾。

### 1.3 试验方法

1.3.1 土样采样 在采样地内选取1 m×1 m取样区域,清除土层表面的腐殖质,根据4种植被根系的分布情况以及挖掘时土层深处石块较多等因素,选择

挖掘 30 cm 的土层剖面,每 10 cm 为一层,每层用环刀取 7 个样,取样完成后,用保鲜膜密封环刀使其保持水分。其中,4 个用于室内直剪试验。3 个用于测量土壤物理性质,试验使用土样共 84 个。采样时间为 2022 年 9 月。

表 1 样地基本情况及不同植被基本特征  
Table 1 Basic situation of sample plots and basic characteristics of different vegetations

样地	海拔/ m	坡度/ (°)	平均 冠幅/m	平均 株高/m	林龄/ a	盖度/ %
台湾相思	1508	23	1.8	3	30	20
锥连栎	1498	25	3	3	10	12
余甘子	1506	24	2	3	12	9
云南松	1486	23	2.1	10	20	11

1.3.2 根系采集 在试验区随机选取长势良好的植被,根据试验所需根系数量,采用人工挖掘的方法,去除周围杂质,挖出完整根系,清除根系上附着的泥土等杂质后放入塑封袋中密封,保持根系原有水分,及时带回实验室低温保存(4 ℃),并在一周内完成试验。

1.3.3 直剪试验 采用 ZJ-4A 型直接剪切装置进行试验,设置 4 个竖向压力 50,100,150,200 kPa,剪切速率 0.8 mm/min,试样剪切位移为 4 mm。试验过程中的具体操作均参照《土工试验方法标准 GB/T50123—2019》<sup>[11]</sup>。计算公式为:

$$\tau=c+\tan\varphi \tag{1}$$

式中: $\tau$  为剪应力(kPa); $c$  为土壤黏聚力(kPa); $\varphi$  为土壤内摩擦角(°)。

1.3.4 单根拉伸试验 试验采用 105D 型微机控制电子万能试验机对根系进行单根拉伸试验,清除根系上的泥土,选取较为完整的根系,截取单根长度为 15 cm,采用十字交叉法分别测量根系两端和中间的直径,并取平均值作为该根段的根径。将根系上端 5 cm 放置上端夹头,下端 5 cm 放置下端夹头,并保证根系不被夹坏,设置拉伸速率 10 mm/min,直至根系被拉伸时停止仪器,根据试验得到的最大抗拉力和根径计算其单根抗拉强度,计算公式为:

$$P=\frac{4F}{\pi D^2} \tag{2}$$

式中: $P$  为抗拉强度(MPa); $F$  为最大抗拉力(kN); $D$  为根系直径(mm)。

1.3.5 土壤理化性质测定 土壤含水率测定采用烘干法;土壤容重测定采用环刀法;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮采用半开微量开氏法测定;土壤全磷采用钼锑抗比色法测定;土壤全钾采用火焰光度法测定<sup>[1]</sup>。以下方法参考《土壤农业化学分析方法》<sup>[12]</sup> 和《土工试验方法标准 GB/T50123—

2019》<sup>[11]</sup> 进行测定。  
1.3.6 数据处理 灰色系统是指一部分信息已知,另一部分信息未知,系统内各因素有不确定的关系。而灰色关联法是对灰色系统中的参考序列和比较序列进行定量分析,并分析这两种序列的密切关系。本研究运用其综合分析不同植被根土复合体抗剪强度指标与土壤理化性质和植物根系抗拉性能的关联程度,具体分析步骤为:

- (1) 选取土壤黏聚力  $c$ , 土壤内摩擦角  $\varphi$  为参考序列  $X_{ik}, k=1,2,3,\cdots,n$ , 将土壤理化性质和根系抗拉指标作为比较序列  $X_{jk}$ ;
- (2) 采用均值法对  $X_{ik}, X_{jk}$  进行无量纲化处理;
- (3) 根据公式  $|\Delta_{ij}(k)|=|X_{ik}-X_{jk}|, k=1,2,3,\cdots,n$ , 分别计算  $X_{ik}, X_{jk}$  各对应点的差序列的绝对值,并找出差序列的最大值  $\Delta_{\max}$  和最小值  $\Delta_{\min}$ ;
- (4) 计算关联系数,分别计算每个比较序列与参考序列对应因素的关联系数:

$$\epsilon_{ij}=\frac{\Delta_{\min}+\rho\Delta_{\max}}{|\Delta_{ij}(k)|+\rho\Delta_{\max}}, \quad k=1,2,3,\cdots,n \tag{3}$$

$$\theta_{ij}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n\epsilon_{ij}(k), \quad k=1,2,3,\cdots,n \tag{4}$$

式中: $\epsilon_{ij}$  为关联系数; $\theta_{ij}$  为关联度; $\rho$  为分辨系数; $\rho\in(0,1)$ , 本文取 0.5。

运用 Excel 2021 软件进行数据分析,SPSS 26 软件进行单因素方差分析和多重比较、Pearson 相关性分析,Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被的抗拉性能

2.1.1 抗拉力与根径之间的关系 由表 2 可知,4 种植被平均根径不存在显著差异( $p>0.05$ ),4 种植被平均根径表现为:锥连栎>余甘子>云南松>台湾相思;4 种植被平均单根抗拉力不存在显著差异( $p>0.05$ ),具体表现为:锥连栎>余甘子>云南松>台湾相思;4 种植被平均单根抗拉强度表现为:余甘子>台湾相思>云南松>锥连栎。其中,余甘子植被根系平均单根抗拉强度显著大于其他 3 种植被( $p<0.05$ ),分别是其他 3 种植被的 1.42,2.13,1.98 倍,而台湾相思植被根系平均单根抗拉强度与锥连栎和云南松存在显著差异( $p<0.05$ )。综上所述,通过对比分析 4 种典型植被平均根径、平均抗拉力、平均抗拉强度结果可知,余甘子根系平均根径(3.127 mm)、平均抗拉力(0.230 kN)、平均抗拉强度(41.457 MPa)均相对较大,表明余甘子植被根系力学强度相对较高,对边坡的固土效果更好。

表 2 单根拉伸试验结果

Table 2 Single root tensile test results

植被名称	平均根径/mm	平均单根抗拉力/kN	平均单根抗拉强度/MPa	样本数量/个
台湾相思	2.765±1.18 <sup>a</sup>	0.194±0.184 <sup>a</sup>	29.044±10.543 <sup>b</sup>	40
锥连栎	4.061±1.87 <sup>a</sup>	0.250±0.217 <sup>a</sup>	19.457±13.843 <sup>ce</sup>	40
余甘子	3.127±1.77 <sup>a</sup>	0.230±0.256 <sup>a</sup>	41.457±19.859 <sup>a</sup>	43
云南松	3.087±1.66 <sup>a</sup>	0.206±0.244 <sup>a</sup>	20.922±7.298 <sup>de</sup>	38

注:表中数据为平均值±标准偏差;同一列不同小写字母表示 4 种植物平均单根抗拉力指标之间、平均单根抗拉强度指标之间及平均根径指标之间存在显著差异( $p<0.05$ ),同一小写字母表示无显著差异( $p>0.05$ )。

对研究区 4 种植被单根抗拉力与根径关系进行回归分析(图 1)。由图 1 可知,4 种植被单根抗拉力与根径呈指数函数关系,抗拉力随根径以指数函数方式增长,但增长幅度不同。余甘子和云南松单根抗拉力随根径增加的增长幅度最大。台湾相思、锥连栎、余甘子、云南松单根抗拉力与根径之间的函数关

系式见表 3,4 种植被根系抗拉力与根径的相关系数都较高,均在 0.85 以上,为强相关。其中,台湾相思拟合度最高( $R^2=0.989$ ),余甘子拟合度最低( $R^2=0.8757$ )。对台湾相思,根径在 0.98~5.39 mm,单根抗拉力范围为 0.03~0.84 kN;对锥连栎,根径在 0.69~7.97 mm,单根抗拉力范围为 0.01~0.87 kN;对余甘子,根径在 0.60~8.32 mm,单根抗拉力范围为 0.04~1.27 kN;对云南松,根径在 1.04~7.22 mm,单根抗拉力范围为 0.02~1.09 kN。根据图 1 分析不同植被根径临界值前后抗拉力的变化速率可知:4 种植被根径的临界值分别为:2, 4.99, 2.76, 3.41 mm。以锥连栎为例,由图 1 可以看出锥连栎根径在 4.99~7.97 mm 比 0.69~4.99 mm 时单根抗拉力随根径的增大速率更大,说明植被根系在达到根径临界值之后,单根抗拉力随根径的增加变化速率更大,说明抗拉力随着根径变化更加灵敏。

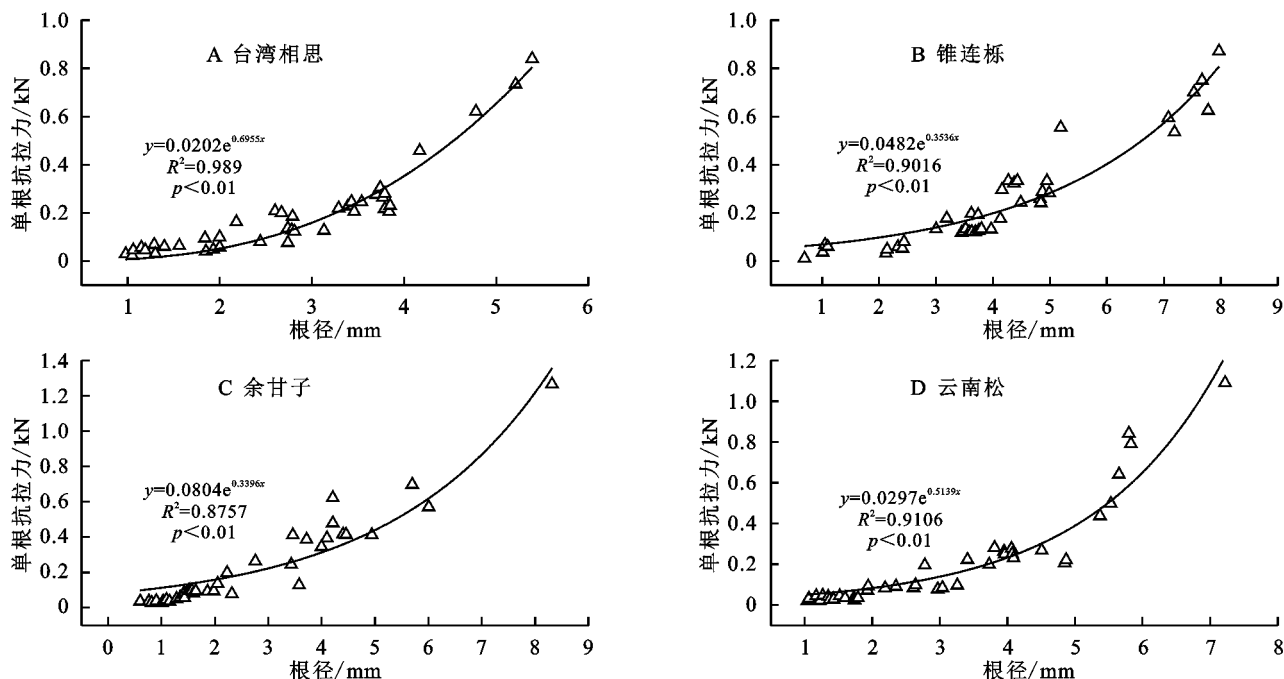


图 1 单根抗拉力与根径之间的关系

Fig. 1 Relationship between tensile strength and root diameter of single root

表 3 根径与抗拉力拟合函数关系式

Table 3 Fitting function relationship between vegetation root diameter and tensile strength

植被类型	单根抗拉力		
	回归方程式	$R^2$	$p$
台湾相思	$y=0.0202e^{0.6955x}$	0.9890 **	$<0.01$
锥连栎	$y=0.0482e^{0.3536x}$	0.9016 **	$<0.01$
余甘子	$y=0.0804e^{0.3396x}$	0.8757 **	$<0.01$
云南松	$y=0.0297e^{0.5139x}$	0.9106 **	$<0.01$

注:\*\*表示  $p<0.01$ 。

2.1.2 抗拉强度与根径之间的关系 抗拉强度是反映植物根系强度的参数,是评价植物固土能力的一

个重要指标,它表示根系断裂时所承受的最大抗拉力和根径的比值。由表 4 可知,台湾相思植被根系抗拉强度为 12.94~54.34 MPa,锥连栎植被根系抗拉强度为 8.87~79.57 MPa,余甘子植被根系抗拉强度为 12.80~128.03 MPa,云南松植被根系抗拉强度为 10.68~41.67 MPa。其中余甘子根系最大抗拉强度显著大于其他 3 种植物( $p<0.05$ ),4 种植被单根抗拉强度与根径呈显著负相关关系( $p<0.05$ ),表现为植物根系的抗拉强度随根径的增大而降低。其中,余甘子根系直径与抗拉强度的相关性最强(0.647),台湾相思根系直径与抗拉强度的相关性最低(0.322)。



表 4 抗拉强度与根径相关关系

Table 4 Correlation between root tensile strength and root system

参数类型	台湾相思	锥连栎	余甘子	云南松
抗拉强度/MPa	12.94~54.3	8.87~79.57	12.80~128.03	10.68~41.67
Pearson 相关系数	-0.322*	-0.439**	-0.647**	-0.484**
显著性(Sig.)	0.043	0.005	0.000	0.001

注: \* 表示显著相关( $p<0.05$ ), \*\* 表示极显著相关( $p<0.01$ )。

2.2 不同植被类型土壤抗剪强度变化特征

2.2.1 不同土层深度根土复合体抗剪强度变化特征

研究区内 4 种植被土壤和裸地土壤抗剪强度与垂直压力的关系见图 2。由图 2 可知,土壤抗剪强度随垂直压力的增大而增大,符合摩尔-库伦理论。总体上,4 种植被土壤的抗剪强度曲线均位于素土上方,说明在 50,100,150,200 kPa 垂压下,4 种植被土壤

抗剪强度显著高于素土。在 0—10 cm 土层,台湾相思、锥连栎、余甘子、云南松植被土壤平均抗剪强度为 56.72,80.72,74.57,84.94 kPa;在 10—20 cm 土层处,4 种植被土壤均抗剪强度为 59.39,82.59,74.85,84.90 kPa;在 20—30 cm 土层处,4 种植被土壤抗剪强度为 74.13,53.67,103.39,84.76 kPa。结合上述数据分析可得,在 0—20 cm 土层处,台湾相思土壤抗剪强度显著低于其他 3 种植被,在 20—30 cm 土层处,锥连栎土壤抗剪强度显著低于其他 3 种植被,台湾相思和余甘子土壤平均抗剪强度均随土层深度的加深而增大,增长幅度分别为 30.69%,38.65%;锥连栎土壤平均抗剪强度随土层的增大而减小,减小幅度为 35.01%;云南松土壤平均抗剪强度随土层深度的变化较小。

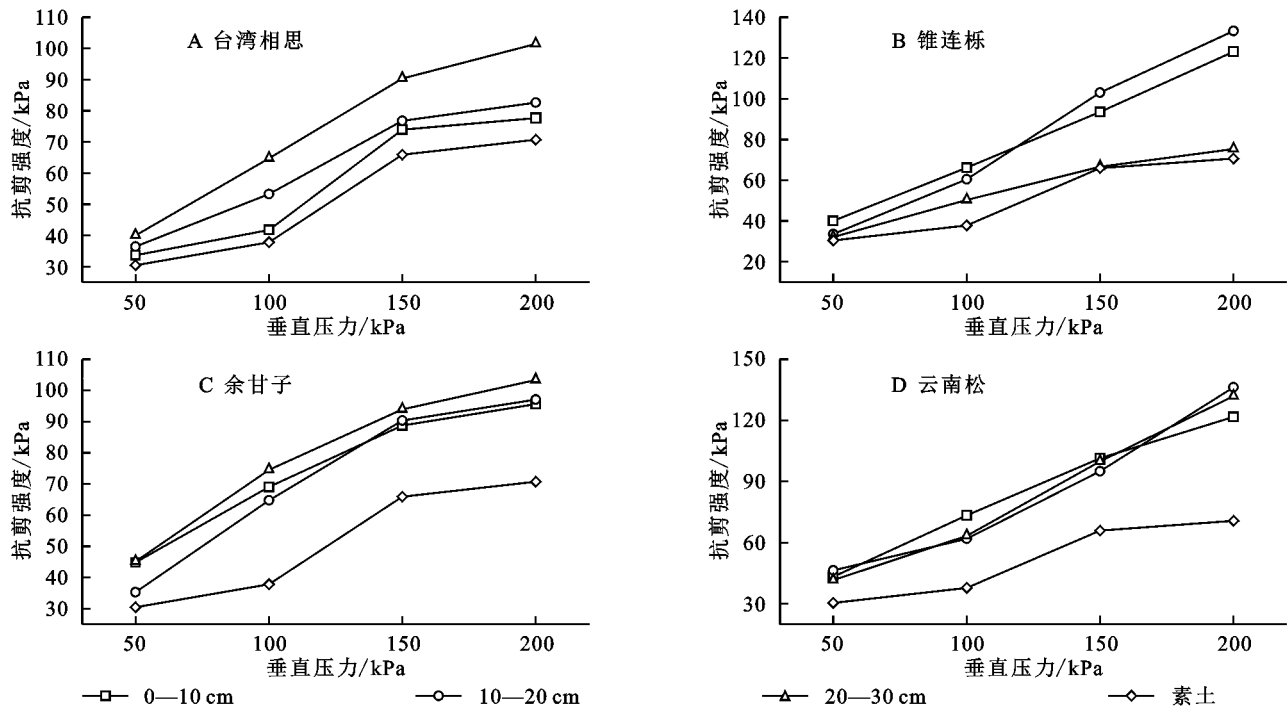


图 2 土壤抗剪强度与垂直压力关系

Fig. 2 Relationship between soil shear strength and vertical pressure

研究区内 4 种典型植被土壤和素土试样抗剪强度指标与土层深度关系见图 3。

由图 3 可知,台湾相思、锥连栎、余甘子、云南松植被土壤抗剪强度指标在 0—10,10—20,20—30 cm 处均大于裸地,4 种植被土壤黏聚力  $c$  变化范围分别为: 17.45~21.66, 9.91~12.17, 25.65~31.52, 9.24~19.04 kPa;土壤内摩擦角  $\varphi$  变化范围分别为: 17.41°~22.7°, 19.30°~31.11°, 19.00°~21.24°, 27.8°~31.19°。在 0—10, 10—20, 20—30 cm 土层处,以上 4 种植物土壤与素土相比,黏聚力  $c$  增幅分别为: 91.34%~137.5%, 8.6%~33.44%, 181.25%~245.61%, 1.31%~108.77%;内摩擦角  $\varphi$  增幅分别为: 0.11%~30.53%, 9.89%~78.89%,

9.26%~22.14%, 59.86%~79.36%。4 种植被土壤抗剪强度随土层深度变化不相同,对台湾相思而言,总体上土壤黏聚力  $c$  随土层深度的增大而增加,土壤内摩擦角  $\varphi$  随土层深度的增大而增大,增加幅度分别为 21.42%, 30.38%;对锥连栎,总体上土壤黏聚力  $c$  随土层的增加而减少,土壤内摩擦角  $\varphi$  随土层深度的增加而减小,减小幅度分别为 18.57%, 37.96%;对余甘子,土壤黏聚力  $c$  随土层的增加而减少,土壤内摩擦角  $\varphi$  随土层深度的增加而增大,变化幅度分别为 18.62%, 11.79%;对云南松,土壤黏聚力  $c$  随土层的增加而减少,土壤内摩擦角  $\varphi$  随土层深度的增加而增大,变化幅度分别为 51.47%, 12.19%。

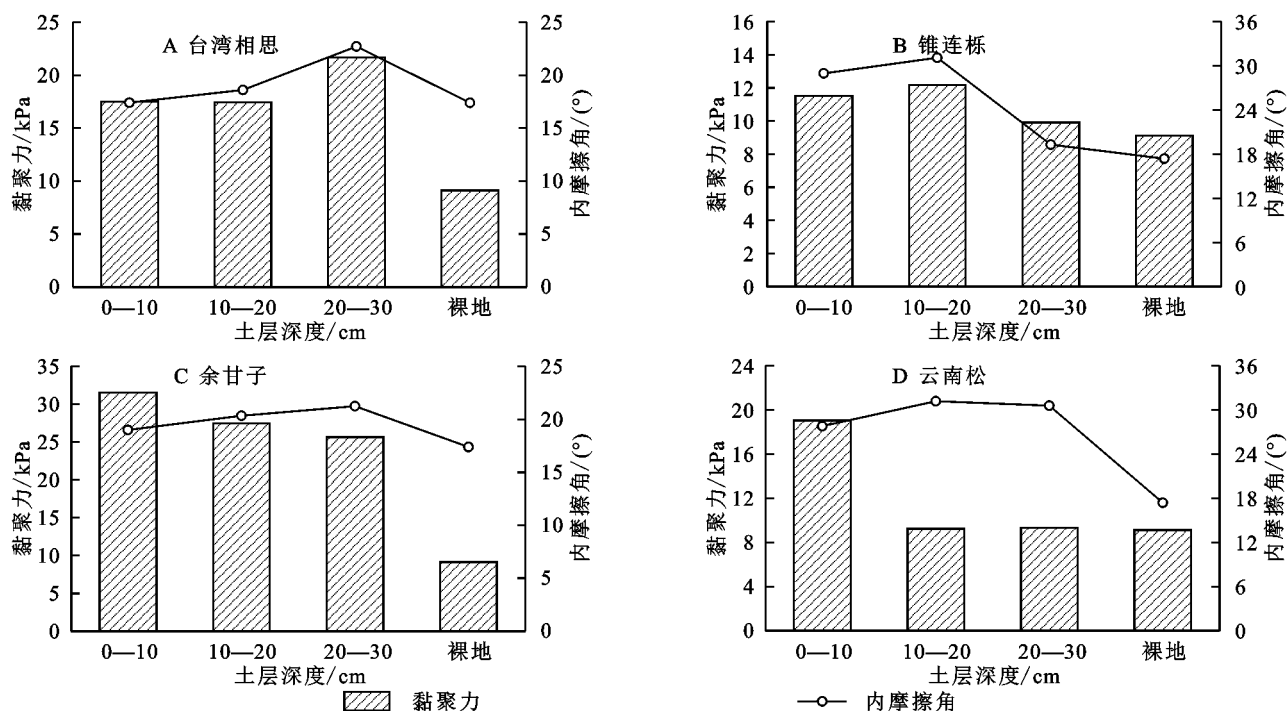


图3 土壤抗剪强度指标与裸地关系

Fig. 3 Relationship between soil shear strength index and bare land

## 2.2.2 相同土层深度根土复合体抗剪强度变化特征

研究区内4种植被土壤在相同土层处抗剪强度指标比较结果如图4所示。由图4可知,在0—10 cm处,4种植被土壤黏聚力 $c$ 范围为11.51~31.52 kPa,土壤内摩擦角 $\varphi$ 为 $17.41^\circ \sim 28.97^\circ$ ,黏聚力 $c$ 具体表现为:余甘子(31.52 kPa)>云南松(19.04 kPa)>台湾相思(17.52 kPa)>锥连栎(11.51 kPa),内摩擦角 $\varphi$ 表现为:锥连栎最大( $28.97^\circ$ ),其次是云南松( $27.80^\circ$ )<sup>[1]</sup>,台湾相思最小( $17.41^\circ$ );在10—20 cm土层处,4种植被土壤黏聚力 $c$ 范围为9.24~27.5 kPa,土壤内摩擦角 $\varphi$ 为: $18.6^\circ \sim 31.19^\circ$ ,土壤黏聚力 $c$ 具体表现为:余甘子(27.5 kPa)>台湾相思(17.45 kPa)>锥连栎(12.17 kPa)>云南松(9.24 kPa),土壤内摩擦角 $\varphi$ 表现为:云南松最大( $31.19^\circ$ ),其次是锥连栎( $31.11^\circ$ ),台湾相思最小( $18.6^\circ$ )<sup>[1]</sup>;在20—30 cm处,4种植被根土复合体土壤黏聚力 $c$ 范围为:9.33~25.65 kPa,土壤内摩擦角 $\varphi$ 为: $19.30^\circ \sim 30.58^\circ$ ,土壤黏聚力 $c$ 具体表现为:余甘子(25.65 kPa)>台湾相思(21.66 kPa)>锥连栎(9.91 kPa)>云南松(9.33 kPa),土壤内摩擦角 $\varphi$ 表现为:云南松最大( $30.58^\circ$ ),其次是台湾相思( $22.7^\circ$ ),锥连栎最小( $19.30^\circ$ )<sup>[1]</sup>。结合上述结果分析可知,在研究土层深度,余甘子土壤黏聚力 $c$ 显著大于其他3种植被土壤( $p < 0.05$ ),在0—20 cm土层处,锥连栎和云南松土壤内摩擦角 $\varphi$ 显著大于其他2种植被土壤( $p < 0.05$ );在20—30 cm土层处,云南松和台湾相思土壤内摩擦角 $\varphi$ 显著大于其他2种植被土壤( $p <$

0.05)。结合图2的结果,抗剪强度的大小为:云南松>锥连栎>余甘子>台湾相思。其中,余甘子根系对土壤抗剪强度的提高主要通过影响土壤颗粒间的黏结力,云南松和锥连栎根系则主要通过增大土壤内摩擦角来影响土壤的稳定性。

## 2.3 各因素对根土复合体抗剪强度的影响程度

根土复合体的抗剪强度表征土壤土力学特性与根系之间相互作用的关系,反映了其抵抗剪切变形的能力。本研究采用灰色关联法从根系不同径级平均抗拉力、平均抗拉强度和土壤基本理化性质综合分析各因素对根土复合体抗剪强度指标的影响。

对表5数据采用均值法进行无量纲化处理,得到黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\varphi$ 与上述影响因素的初始化结果,无量纲化处理公式如下:

参考序列:

$$\frac{X_{ik}}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{ik}}, \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (5)$$

比较序列:

$$\frac{X_{jk}}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{jk}}, \quad k=1,2,3,\dots,n \quad (6)$$

式中: $X_{ik}$ 为参考序列; $X_{jk}$ 为比较序列。

以黏聚力为参考序列 $X_{ik}$ , $k=1,2,3,\dots,n$ ,各因素指标为比较序列 $X_{jk}$ , $k=1,2,3,\dots,n$ ,计算 $|\Delta_{ij}(k)| = |X_{ik} - X_{jk}|$ ,并找出 $|\Delta_{ij}(k)|$ 中的最大

值 $\Delta_{\max}=0.988$ ,最小值 $\Delta_{\min}=0.005$ 。求得参考序列黏聚力 $c$ 与各因素比较序列的关联度如图 5 所示。由图 5 可知,各因素与黏聚力 $c$ 之间的灰色关联度表现为:抗拉力(0.722)>抗拉强度(0.701)>全钾(0.678)>容重(0.645)>全磷(0.638)>有机质(0.635)>全氮(0.631)>含水率(0.613)。

同理以内摩擦角 $\varphi$ 为参考序列 $X_{ik},k=1,2,3,\cdots,n$ ,各因素指标为比较序列 $X_{jk},k=1,2,3,\cdots,n$ ,计算 $|\Delta_{ij}(k)|=|X_{ik}-X_{jk}|$ ,并找出 $|\Delta_{ij}(k)|$ 中的最大值 $\Delta_{\max}=0.998$ ,最小值 $\Delta_{\min}=0.001$ 。求得参考序列内摩擦角 $\varphi$ 与各因素比较序列的关联度如图 6 所示。由图 6 可知,各因素与内摩擦角 $\varphi$ 之间的灰色关联度表现为:容重(0.758)>有机质(0.757)>全氮(0.725)>含水率(0.691)>抗拉力(0.681)>全磷(0.652)>抗拉强度(0.580)>全钾(0.515)。

其中灰色关联系数越大,表明比较序列对参考序列的影响程度较大,彼此之间关系更密切。而一般认为灰色关联度 $>0.3$ ,则表明相关关系显著<sup>[13]</sup>。从上述数据分析可以看出,各影响因子对土壤抗剪强度指标的灰色关联度均较大( $>0.5$ ),说明各因素对土壤抗剪强度指标的影响较大。其中,根系抗拉特性与土壤黏聚力 $c$ 的关联程度较强,土壤容重和有机质与土壤内摩擦角 $\varphi$ 的关联程度较强。

3 讨论

根系抗拉特性是衡量根系固土效应的重要指标之一,由于每种植被生长特性不同,因此不同植被根系力学特性存在差异,根系直径是影响根系抗拉性能的主要因素之一<sup>[14]</sup>。这是因为植物根系抗拉强度主要由根系内部的纤维素含量和木质素含量决定,随着根径的增大,根系内部的纤维素、半纤维素、综纤维素含量降低,

木质素含量增大,造成木纤比增大,从而表现出根系的抗拉强度随根径的增大而降低的趋势<sup>[15]</sup>。

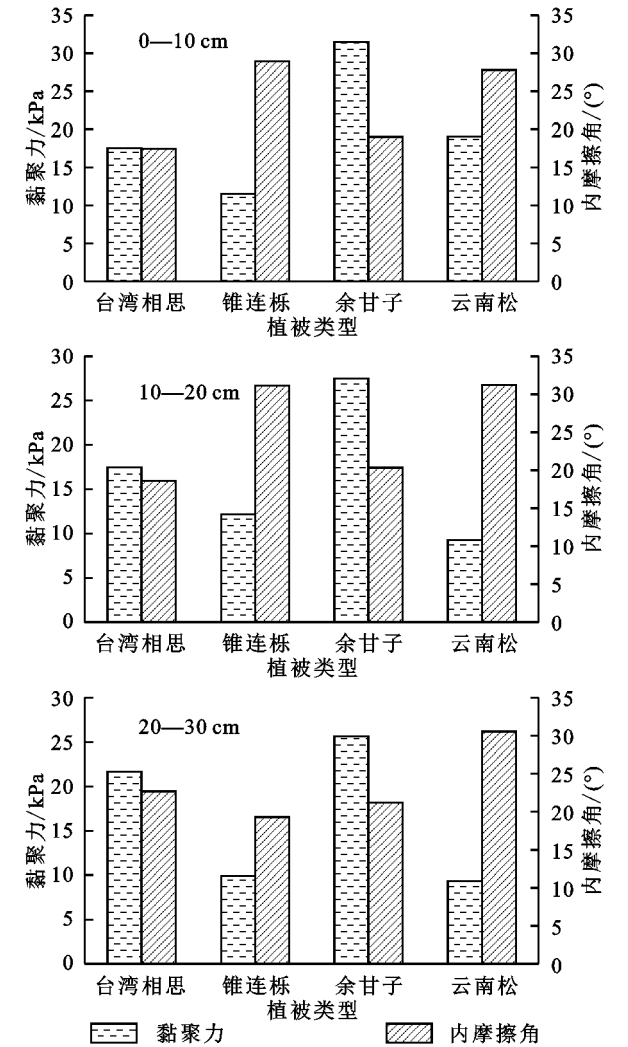


图 4 相同土层深度不同植被土壤抗剪强度指标的关系  
Fig. 4 Relationship between soil shear strength indexes of different vegetations at the same soil depth

表 5 影响土壤抗剪强度的主要因子

Table 5 Main factors affecting soil shear strength

植被类型	取样深度/cm	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	平均抗拉力/kN	平均抗拉强度/MPa	含水率/%	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	全磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	全钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )
台湾相思	0—10	17.52	17.41	0.29	32.43	18.51	1.53	186.00	11800.00	674.00	14.10
	10—20	17.45	18.60			18.34	1.50	191.00	17100.00	534.00	13.90
	20—30	21.66	22.77			15.83	1.74	184.00	7070.00	501.00	13.60
锥连栎	0—10	11.51	28.97	0.25	25.61	16.58	1.46	150.00	6410.00	385.00	11.40
	10—20	12.17	31.11			16.42	1.55	172.00	7000.00	488.00	12.30
	20—30	9.91	19.30			16.18	1.62	182.00	9470.00	501.00	11.70
余甘子	0—10	31.52	19.00	0.44	36.81	18.28	1.41	182.00	14200.00	439.00	15.50
	10—20	27.50	20.34			17.34	1.39	193.00	13200.00	579.00	15.70
	20—30	25.65	21.24			16.95	1.57	155.00	11300.00	543.00	14.50
云南松	0—10	19.04	27.80	0.36	19.51	16.51	1.56	158.00	6300.00	511.00	20.60
	10—20	9.24	31.19			15.80	1.69	137.00	6010.00	673.00	20.80
	20—30	9.33	30.58			15.05	1.72	138.00	5940.00	539.00	23.70

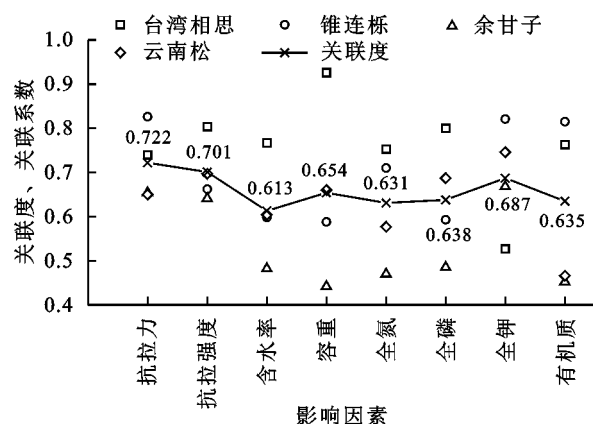


图5 各因素与黏聚力的灰色关联度和关联系数

Fig. 5 Grey correlation degree and correlation coefficient between each factor and cohesion

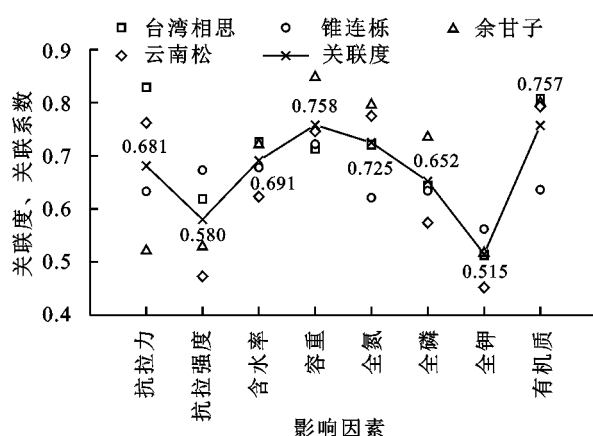


图6 各因素与内摩擦角的灰色关联度和关联系数

Fig. 6 Grey correlation degree and correlation coefficient between each factor and internal friction angle

大量研究表明,根系抗拉力随根径的增大而增大,且大多数呈指、幂函数关系<sup>[5,7]</sup>,本研究4种植被根系抗拉力与根径之间的关系均为指数函数关系,相关系数均大于0.85,与大多数学者研究结果一致。而根系抗拉强度与植被根径之间呈负相关关系,但是二者的拟合关系目前尚未得出统一结论,李可等<sup>[16]</sup>研究发现植被根系抗拉强度与根系直径呈幂函数或指数函数关系,田佳等<sup>[17]</sup>研究发现根系抗拉强度与根系直径呈线性关系,而李宁等<sup>[14]</sup>研究发现植被根系抗拉强度与根系直径没有相关关系。影响根系抗拉强度的因素众多,大致可分为植物自身因素和外部因素。自身因素表现为不同植物自身生长发育和遗传等影响,导致植被根系在根径相同时,内部的结构形式和组成成分存在差异,而根系内部的纤维素、木质素、半纤维素对根系抗拉强度有显著影响,从而表现出同种植物相同根径出现不同的抗拉强度<sup>[18-19]</sup>。而外部因素包括加载速率、标距等因素存在不同,研究表明,根系抗拉力与根系直径呈显著正相关关系,与标距和拉伸速率呈显著负相关关系;根系抗拉强度与

标距和拉伸速率呈显著负相关关系<sup>[14]</sup>。本研究所研究4种植被根系抗拉强度与根径之间的关系为显著负相关关系( $p < 0.05$ ),即表现为根系的抗拉强度随根径的增大而减小。

土壤抗剪强度是指土体抵抗外力剪切变形的能力,通常用来评价边坡的稳定性。在土壤发生剪切作用时,植被根系使剪切面周围的塑性土体逐渐向根系集中,对根系周围土体产生应力集中承担主要荷载,从而提高土壤抗剪强度<sup>[20]</sup>。本研究发现,4种植被类型土壤抗剪性能存在显著差异( $p < 0.05$ ),且均大于裸地。其中台湾相思和余甘子植被土壤在深层处土黏聚力 $c$ 较大,云南松和锥连栎植被土壤在浅层处土壤内摩擦角 $\varphi$ 显著高于其余两种植被。影响根土复合体抗剪强度特性的影响因素众多,土壤理化性质、根系特征等对土壤抗剪强度特性有显著影响<sup>[21-22]</sup>。本研究利用灰色关联法综合分析不同植被根系抗拉特性和根土复合体基本理化性质对土壤抗剪强度指标的影响。结果表明,8种因素对土壤抗剪强度指标的影响各不相同,其中根系抗拉特性(抗拉强度和抗拉强度)对土壤黏聚力 $c$ 的影响最大,其次是土壤全钾。已有研究表明,根土复合体的黏聚力 $c$ 与植物根系的抗拉强度呈正相关关系,即表现为根系抗拉强度越大,相对应的根土复合体的黏聚力就越大,抗剪性能就越好<sup>[23]</sup>。土壤全钾的含量对土壤黏聚力 $c$ 的影响仅次于根系抗拉特性,土壤中钾通常以钾盐的形式存在,通常以 $K^+$ 的形式被植物根系所吸收,钾元素对根系的生长发育具有促进作用<sup>[24]</sup>,而植物根系具有锚固土体的能力,能加强土壤之间的内聚力,提高土壤的黏聚力 $c$ ;土壤内摩擦角 $\varphi$ 受土壤结构、密度、含水率等的影响,反映了土壤颗粒与颗粒之间的摩擦性能(包括滑动摩擦力和咬合力)<sup>[25]</sup>,在本研究中容重对内摩擦角 $\varphi$ 的影响最大,其次是土壤有机质。容重反映了土壤的紧实程度,土壤容重变化改变会使土壤之间颗粒进行重新排列,改变土壤颗粒之间的滑动摩擦力和咬合力<sup>[26]</sup>,从而对土壤内摩擦角 $\varphi$ 产生较大影响。土壤有机质对内摩擦角 $\varphi$ 的影响仅次于土壤容重,土壤有机质的含量有利于增强土壤结构的稳定,能有效地提高土壤的抗侵蚀性能<sup>[27]</sup>,植被根系分泌物能增加土壤中有机质的含量,土壤有机质作为土壤微生物的能量来源,对土壤微生物活动有促进作用,加快土壤微生物的代谢,而微生物在土壤中的活动和代谢物质会改变土壤内部的结构,能促进土壤中的粉粒和黏粒形成微团聚体,增加土壤大团聚体的含量,使土体更加稳定<sup>[28]</sup>,从而改变土壤颗粒之间的摩擦性能,进而影响土壤的内摩擦角 $\varphi$ 。



## 4 结论

(1) 4种植被根系平均单根抗拉力由大到小依次为:锥连栎、余甘子、云南松、台湾相思,4种植被根系平均单根抗拉力不存在显著差异( $p > 0.05$ ),根系单根抗拉力随直径的增大而增大,与根系直径符合指数函数关系;4种植被平均单根抗拉强度由大到小依次为:余甘子>台湾相思>云南松>锥连栎,余甘子植被平均单根抗拉强度显著大于其他3种植被( $p < 0.05$ ),4种植被根系单根抗拉强度与根系直径呈显著负相关关系( $p < 0.05$ )。

(2) 4种典型植被土壤抗剪性能在不同垂压和不同土层深度下均大于素土。其中,余甘子根系对土壤黏聚力  $c$  的增幅最大,增幅范围为:181.25%~245.61%,台湾相思根系对土壤内摩擦角  $\varphi$  的增幅最大,增幅范围为:59.86%~79.36%。4种植物根土复合体土壤抗剪强度指标随土层深度的变化也各不相同,且随土层深度的变化抗剪强度指标变化幅度分别为:21.42%和30.38%,18.57%和37.96%,18.62%和11.79%,51.47%和12.19%,云南松土壤黏聚力  $c$  随土层深度变化增幅最大、锥连栎土壤内摩擦角  $\varphi$  随土层深度变化增幅最大。

(3) 利用灰色关联法分析根系抗拉特性(抗拉力、抗拉强度)和土壤基本理化性质(容重、含水率、全氮、全磷、全钾、有机质)对根土复合体土壤抗剪强度指标的影响。结果表明:这8种因素中根系抗拉特性对土壤黏聚力  $c$  的影响最大,土壤全钾次之、含水率最低;土壤容重对土壤内摩擦角  $\varphi$  的影响最大,土壤有机质次之、全钾最低。

### 参考文献(References):

- [1] 张珉瑞,朱少东,李盼,等.干热河谷区4种典型植被土壤抗剪性能影响因素探究[J].江西农业大学学报,2023,45(5):1285-1296.  
Zhang M R, Zhu S D, Li P, et al. Influencing factors of soil shear performance of four typical vegetations in dry-hot valley area[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023,45(5):1285-1296.
- [2] Capilleri P P, Motta E, Raciti E. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization[J]. Procedia Engineering, 2016,158:116-121.
- [3] Xu W, Wang X, Zhang Y, et al. A comparison among root soil-conservation effects for nine herbs at the cold region highway in north-eastern China[J]. Eurasian Soil Science, 2014,47(12):1274-1282.
- [4] 李怡帆,张国涛,雷鸣宇,等.西南山区云南松根土复合体力学特性及其对浅层坡体稳定性的影响[J].水土保持通报,2022,42(6):88-96.  
Li Y F, Zhang G T, Lei M Y, et al. Mechanical proper-
- ties of Yunnan pine root-soil system and its influence on shallow slope stability in southwestern mountainous region of China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):88-96.
- [5] Sluiter J B, Ruiz R O, Scarlata C J, et al. Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks: 1. Review and description of methods[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010,58(16):9043-9053.
- [6] 杨路,杜峰,秦晶晶,等.黄土区3种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J].水土保持研究,2022,29(1):295-300.  
Yang L, Du F, Qin J J, et al. Research on shear strengths of root-soil complexes of three dominant shrubs in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(1):295-300.
- [7] 张春涛,马建刚,丁明净,等.蔓竹单根抗拉及根-土复合体抗剪特性[J].四川农业大学学报,2022,40(6):883-892.  
Zhang C T, Ma J G, Ding M J, et al. Tensile properties of single root and shear properties of root-soil complex of *Bashania qiaojiaensis* yi et J. Y. Shi[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022,40(6):883-892.
- [8] 何伟鹏,胡夏嵩,刘昌义,等.黄河源区不同禁牧年限对垂穗披碱草单根及其根-土复合体力学强度特征的影响[J].草业学报,2023,32(5):106-117.  
He W P, Hu X S, Liu C Y, et al. Impact of the different duration years of grazing prohibition on the mechanical strength characteristics of *Elymus nutans* roots and its composite systems in the Yellow River source region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(5):106-117.
- [9] Li J, Wang X, Jia H X, et al. Effect of herbaceous plant root density on slope stability in a shallow landslide-prone area[J]. Natural Hazards, 2022,112(3):2337-2360.
- [10] 谢祥荣,陈正发,朱贞彦,等.根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望[J/OL].水土保持学报. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1362.TV.20230721.0845.004.html>.  
Xie X R, Chen Z F, Zhu Z Y, et al. Research progress and prospect of mechanical effects and model construction of root-soil complex[J/OL]. Journal of Soil and Water Conservation. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1362.TV.20230721.0845.004.html>.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for Geotechnical Testing Method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [12] 张万辱,许本彤.森林土壤定位研究方法[M].北京:中国林业出版社,1989.  
Zhang W R, Xu B T. Research Methods of Forest Soil Location[M]. Beijing: China Forestry Press, 1989.
- [13] 张晓明,王玉杰,夏一平,等.重庆缙云山典型植被原状土抗剪强度的灰色关联度分析与评价[J].水土保持研

- 究, 2007, 14(2): 145-147, 151.
- Zhang X M, Wang Y J, Xia Y P, et al. Grey relational analysis and evaluation on anti-shear strength of the undisturbed soil of typical vegetations in Jinyun Mountain in Chongqing City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2): 145-147, 151.
- [14] 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.
- Li N, Chen L H, Yang Y J. Factors influencing root tensile properties of *Pinus tabulaeformis* and *Larix principis-rupprechtii*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(12): 77-84.
- [15] 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.
- Yang Y J. Study on the Root Tensile Properties and the Soil Shear Properties of Typical Tree Species in North China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [16] 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.
- Li K, Zhu H L, Song L, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of two typical plant roots in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 240-249.
- [17] 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.
- Tian J, Liu Y H. Study on root mechanical characteristics of several commonly used slope greening plants in North China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(10): 34-36.
- [18] 陈文乐, 杜鹃, 方迎潮, 等. 泥石流频发区典型乔灌木植物根系的固土效应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 32-39.
- Chen W L, Du J, Fang Y C, 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.
- [19] 孙庆敏, 葛永刚, 陈攀, 等. 汶川典型植物根-土复合体抗剪强度影响因素评价[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 58-65.
- Sun Q M, Ge Y G, Chen P, et al. Evaluation of factors affecting the shear strength of root-soil composite of typical plants in Wenchuan County[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 58-65.
- [20] 祁兆鑫, 余冬梅, 刘亚斌, 等. 寒旱环境盐生植物根-土复合体抗剪强度影响因素试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1438-1448.
- Qi Z X, Yu D M, Liu Y B, et al. Experimental research on factors affecting shear strength of halophyte root-soil composite systems in cold and arid environments[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1438-1448.
- [21] Mahannopkul K, Jotisankasa A. 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.
- [22] 余冬梅, 祁兆鑫, 刘亚斌, 等. 青海柴达木盆地盐湖区 5 种盐生植物根-土复合体抗剪强度影响因素及评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 157-165.
- Yu D M, Qi Z X, Liu Y B, et al. Factors affecting shear strength and contribution evaluation of root-soil composite systems of five halophytes in the salt lake region of north-west Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 157-165.
- [23] 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.
- Xue H L, Tang B, Zhang J Y, 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.
- [24] Wang Y I, Wu W H. Plant sensing and signaling in response to K<sup>+</sup>-deficiency[J]. Molecular Plant, 2010, 3(2): 280-287.
- [25] 李想, 王瑄, 盛思远, 等. 坡面不同土地利用类型土壤抗剪强度影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 80-84, 90.
- Li X, Wang X, Sheng S Y, et al. Analysis of influence factors on soil shear strength in slope under different land use types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 80-84, 90.
- [26] 张健乐, 史东梅, 刘义, 等. 土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 162-167, 174.
- Zhang J L, Shi D M, Liu Y, et al. Effects of soil bulk density and water content on shear strength of cultivated-layer in purple soil sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 162-167, 174.
- [27] 何停, 范弢, 徐宗恒, 等. 滇东石漠化坡地浅层裂隙漏失土壤的抗剪强度及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 31-39, 49.
- He T, Fan T, Xu Z H, et al. Loss soil shear strength and its influencing factors in shallow fractures of rocky desertification slopes in eastern Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 31-39, 49.
- [28] 刘武江, 赵赓柯, 段青松, 等. 不同播种方式草本植物土壤团聚体特征及对根系固土力的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 25-31, 38.
- Liu W J, Zhao Y K, Duan Q S, et al. Effects of different sowing patterns of herbs on soil aggregates characteristics and consolidating soil ability of roots[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 25-31, 38.