

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.013.

田愉琴, 王兵, 汪建芳, 等. 黄土丘陵区典型草本根系特征对土壤抗剪特性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 153-159.

Tian Yuqin, Wang Bing, Wang Jianfang, et al. Influence of Typical Herbaceous Root Characteristics on Soil Shear Properties in Loess Hilly Regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 153-159.

# 黄土丘陵区典型草本根系特征对土壤抗剪特性的影响

田愉琴<sup>1,3</sup>, 王兵<sup>1,2,3</sup>, 汪建芳<sup>2</sup>, 白洁<sup>2</sup>

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** [目的]探讨退耕还林(草)工程实施 20 年以来,退耕地植物根系特征对土壤抗剪特性的影响,旨在为新时期黄土高原植被恢复和水土保持效益评估提供参考。[方法]选取黄土高原丘陵沟壑区不同演替阶段 6 个典型草地和 2 个人工草地,采集土壤表层(0—5 cm)土样 120 个,测定土壤抗剪特性、土壤性质和根系特征指标。[结果](1) 各样地土壤容重无显著的差异( $p>0.05$ ),毛细孔隙度、总孔隙度和土壤含水量存在显著差异( $p<0.05$ ),其中人工草地毛细孔隙度和总孔隙度相对较小,白羊草样地土壤含水量最低。(2) 不同演替阶段须根系植物根长密度和表面积密度较大在不同演替阶段均大于直根系植物,须根系植物根体积密度除演替初期外均小于直根系植物,人工草地沙打旺上述根系特征参数均不同程度小于自然撂荒草地。(3) 各样地平均根土复合体抗剪强度相较于素土增加了 22.11%~46.22%,但自然撂荒草地平均抗剪强度差异不显著( $p>0.05$ )。人工草地黏聚力整体低于自然撂荒草地,不同演替阶段内摩擦角均表现为须根系植物大于直根系植物(1.07, 1.25, 1.23 倍)。(4) 黏聚力随总孔隙度( $R^2=0.82$ )或根体积密度( $R^2=0.47$ )的增加呈线性增大,内摩擦角随土壤容重的增加呈线性减少( $R^2=0.39$ )。[结论]在植被恢复过程中,土壤性状、根系特征及根系构型对土壤抗剪特性有一定影响。

**关键词:** 土壤性状; 根系特征; 黏聚力; 内摩擦角

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2024)03-0153-07

## Influence of Typical Herbaceous Root Characteristics on Soil Shear Properties in Loess Hilly Regions

Tian Yuqin<sup>1,3</sup>, Wang Bing<sup>1,2,3</sup>, Wang Jianfang<sup>2</sup>, Bai Jie<sup>2</sup>

(1. Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment,

Ministry of Education, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] The study aims to explore the impact of plant root characteristics on soil shear characteristics in typical abandoned farmland undergoing the ‘Grain for Green’ program over a period of 20 years, and to provide reference for evaluating the soil and water conservation benefits of vegetation restoration in the Loess Plateau during the new era. [Methods] Eight typical grasslands including six different successional stages and two artificial grasslands, were selected in the hilly and gully region of the Loess Plateau. Soil samples from the topsoil (0—5 cm) were collected, and measurements on soil shear characteristics, soil properties, and root characteristics were conducted to explore the influence of vegetation restoration on soil shear characteristics. [Results] (1) There were no significant differences in soil bulk density among the sites ( $p>0.05$ ). However, capillary porosity, total porosity, and soil moisture content exhibited significant differences ( $p<0.05$ ). The artificial grassland had relatively lower capillary porosity and

收稿日期: 2023-02-10

修回日期: 2023-06-15

资助项目: 中国科学院“西部之光”西部青年学者项目(XAB2019A04); 国家自然科学基金重点项目(42130717)

第一作者: 田愉琴(1996—), 女, 贵州铜仁人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 1952862833@qq.com

通信作者: 王兵(1982—), 男, 陕西武功人, 博士, 研究员, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: bwang@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

total porosity, and the *Bothriochloa ischaemum* (Linnaeus) Keng grassland had the lowest soil moisture content. (2) In different successional stages, the root length density and surface area density of fibrous root systems were generally higher than those of taproot systems. However, the root volume density of fibrous root systems was lower than that of taproot systems, except in the early successional stage. The artificial grassland (*Astragalus adsurgens* Pall.) exhibited lower values for these root characteristics compared to the natural fallow grassland. (3) The average shear strength of the root-soil complex increased by 22.11% to 46.22% compared to the bare soil, but the difference in average shear strength between natural fallow grassland and other grasslands was not significant ( $p > 0.05$ ). The cohesive force of the natural fallow grassland was generally higher than that of the artificial grassland, and the friction angle within different successional stages showed that fibrous root systems had higher values compared to taproot systems (1.07, 1.25, and 1.23 times higher). (4) Cohesive force increased linearly with total porosity ( $R^2 = 0.84$ ) or root volume density ( $R^2 = 0.47$ ), while the friction angle decreased linearly with increasing soil bulk density ( $R^2 = 0.47$ ). [Conclusion] In the process of vegetation restoration, soil properties, root characteristics and root configuration have certain effects on soil shear resistance.

**Keywords:** soil properties; root characteristics; cohesion; internal friction angle

植被是防治水土流失的有效措施之一。土壤具有较强的抗压性但其抗拉性较弱,植物根系通过对土体浅根加筋、深根锚固和侧根牵引等根系力学作用,使得根系抗拉性和土体抗压性结合,导致根土复合土体可承受一定的拉力,从而增大土体抗剪强度和稳定性,增强土壤抗侵蚀性能,减少土壤侵蚀<sup>[1-2]</sup>。因此,研究根土抗剪特性对于深入理解植被抑制土壤侵蚀作用机制具有重要意义。土壤抗剪强度由黏聚力<sup>[3]</sup>和内摩擦角<sup>[4]</sup>两个参数决定与土壤颗粒组成、含水率、有机质、容重等土壤性质和根系长度、表面积、体积等根系特征密切相关<sup>[5-9]</sup>。有研究表明<sup>[10-11]</sup>,土壤容重可显著影响土壤抗剪强度,容重越大土壤结构就愈加密实,导致土壤孔隙度较小,土体抗剪强度增大。土壤含水量对土壤抗剪强度的影响存在一定的阈值,当土壤含水量较低时,土壤抗剪强度随含水量的增加而增大;而当土壤含水量超过该阈值时,土壤抗剪强度随含水量的增大而减少<sup>[6,12]</sup>。根系也可显著影响土壤抗剪特性,受植物物种影响,根系影响土壤抗剪强度也有所差异。研究发现<sup>[8,13]</sup>,黏聚力和内摩擦角与根系特征参数间存在定量关系,随着根长密度和根表面积密度的增加,黏聚力和内摩擦角增大。土壤抗剪强度也与植物根系类型有关,张立芸等<sup>[14]</sup>通过研究须根系和直根系对土壤抗剪强度的影响,表明根系存在能显著提高土体抗剪强度,且须根系对土体的固持能力优于直根系。

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一,自 1999 年开始实施退耕还林(草)工程,植被显著恢复,水土流失得以控制。在此过程中,大量的坡耕地撂荒为草地。退耕 20 a 来,植被恢复驱动的物种

演替使得土壤性质和根系特征发生了显著变化,进而可能影响土壤抗剪特性,需进一步开展相关研究。基于此,本研究以黄土丘陵沟壑区不同演替阶段典型草地为研究对象,选取紫花苜蓿、沙打旺、冰草、黄蒿、长芒草、艾蒿、铁杆蒿和白羊草 8 种典型草本植物,探讨其植被恢复过程中土壤性状和优势物种根系特征变化,明确典型草地根土抗剪强度、黏聚力和内摩擦角特征差异及其影响因素,阐明植被恢复影响根土抗剪特性的作用机制,以期为新时期黄土高原植被恢复水土保持效益评估提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原丘陵沟壑区陕西省延安市安塞区(东经  $108^{\circ}5'44''$ — $109^{\circ}26'18''$ ,北纬  $36^{\circ}30'45''$ — $37^{\circ}19'3''$ ),气候属于暖温带半湿润大陆性气候,其年平均降水量和年平均气温分别为 505 mm 和  $8.8^{\circ}\text{C}$ ,且降水主要集中在 6—9 月份。土壤类型为黄绵土,有机质含量低,土质结构,易受侵蚀。自 1999 年实施“退耕还林(草)工程”以来,草地成为了该区域主要的土地利用类型,其不同演替阶段优势物种有冰草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)、黄蒿(*Artemisia capillaris* Thunb.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、艾蒿(*Artemisia argyi* Levl. Et Vant.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (Linnaeus) Keng)、铁杆蒿(*Artemisia vestita* Wall. ex Bess)等。

### 1.2 样地选取与样品采集

依据黄土丘陵沟壑区撂荒草地植被演替特征,选取演替初期的黄蒿和冰草样地、演替中期艾蒿和长芒

草样地以及演替相对稳定的铁杆蒿和白羊草样地,共 6 个典型自然撂荒草地,同时选取沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)和紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)2 个典型人工草地(表 1),两个人工草地采用等行距种植模式;其中,黄蒿、艾蒿、铁杆蒿、紫花苜蓿和沙打旺为直根系,冰草、长芒草和白羊草为须根系。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sample plot					
植被样地	纬度	经度	海拔/ m	坡度/ (°)	主要伴生物种
紫花苜蓿	36°51'00"N	109°19'12"E	1044	25	狗尾草
沙打旺	36°51'36"N	109°19'12"E	1049	25	旱芦苇
冰草	36°44'24"N	109°18'00"E	1236	20	黄蒿
黄蒿	36°44'24"N	109°18'00"E	1236	20	狗尾草
长芒草	36°43'48"N	109°14'24"E	1362	21	冰草
艾蒿	36°45'00"N	109°15'01"E	1211	22	黄蒿
白羊草	36°44'24"N	109°14'24"E	1321	20	狼牙刺
铁杆蒿	36°43'48"N	109°14'24"E	1377	20	胡枝子

对于每个典型草地,依照优势物种相似性原则选取 3 个采样点,去除地上部分,以茎茬为中心点,用环刀取表层 0—5 cm(土柱直径 38 cm)原状土样;之后采用直剪仪 ZJ(ZQB-4)型轻便应变控制式直剪仪)配套的环刀(高 2 cm,截面积 30 cm<sup>2</sup>)绕茎茬周围采集 5 个剪切试样,8 个样地共采集 120 个剪切土样。为最大程度保证每个试样土壤性质及根系特征相近,5 个剪切试样取样时与茎茬距离相等,且间距也相等。同时在每个采样点采集土壤样品用以测定土壤含水量、容重、毛管孔隙度、总孔隙度,具体测定及计算方式参见《土壤物理性质测定法》<sup>[15]</sup>。

1.3 土壤抗剪强度测定

采用南京土壤仪器厂生产的轻便应变控制式直剪仪(ZJ(ZQB-4))测定土壤抗剪强度,垂直荷载分别为 50,100,200,300,400 kPa,剪切速率设定 2.4 r/min。土壤抗剪强度( $\tau_f$  kPa)采用公式(1)计算。

表 2 土壤基本性质

Table 2 Basic soil properties				
植被样地	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	土壤含水率/%
素土	1.17±0.02a	26.26±0.57bc	50.99±0.49ab	11.38±0.18d
紫花苜蓿	1.11±0.09a	28.43±4.96abc	45.95±1.42c	14.47±0.64b
沙打旺	1.15±0.06a	22.50±3.51c	47.37±1.00bc	12.62±0.45c
冰草	1.08±0.09a	32.8±4.96ab	51.07±1.42ab	13.03±0.64c
黄蒿	1.12±0.07a	29.69±6.03ab	51.79±2.67ab	14.93±3.52c
长芒草	1.14±0.07a	27.34±6.03abc	50.63±2.67ab	15.08±3.52ab
艾蒿	1.18±0.07a	30.23±6.02ab	53.97±2.56a	13.26±4.15c
白羊草	1.12±0.06a	33.63±2.07a	52.95±1.85a	9.06±3.75e
铁杆蒿	1.13±0.01a	26.10±1.52bc	49.52±1.47abc	15.76±0.78a

注:不同小写字母表示不同植被样地之间差异显著( $p<0.05$ )。

$$\tau_f = m \cdot R$$

(1)

式中: $m$  为测力环率定系数(kPa/0.01 mm), $m=1.803$  kPa/0.01 mm; $R$  为直剪仪测微表读数。

根据 Mohr-Coulomb 公式计算土壤内摩擦角( $\varphi$ ;°)和土壤黏聚力( $c$ ;kPa)。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$$

(2)

式中: $\sigma$  为垂直荷载(kPa)。

直剪试验结束后,取出环刀内土样,置于 0.25 mm 网筛内进行冲洗并去除根系中的杂质,拭去根系表面水分,测量根系长度和直径,并计算根系长度密度(RLD;cm/cm<sup>3</sup>)、表面积密度(RSAD;cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>)和体积密度(RVD;cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)。计算公式如下:

$$RLD = \frac{RL}{V_s}$$

(3)

$$RSAD = \frac{RSA}{V_s}$$

(4)

$$RVD = \frac{RV}{V_s}$$

(5)

式中:RL 为总根长(cm);RSA 为总根表面积(cm<sup>2</sup>);RV 为总根体积(cm<sup>3</sup>); $V_s$  为体积(cm<sup>3</sup>)。

2 结果与分析

2.1 典型草地土壤性质变化特征

各样地土壤容重变化范围为 1.08~1.18 g/cm<sup>3</sup>,无显著的差异( $p>0.05$ ,表 2),其中冰草样地土壤容重最小。冰草、艾蒿和白羊草样地毛管孔隙度显著高于其他样地( $p<0.05$ ),艾蒿和白羊草样地总管孔隙度显著高于其他样地( $p<0.05$ );相对而言,人工草地毛管孔隙度和总孔隙度较小,其中沙打旺样地毛管孔隙度较其他撂荒地减少了 16.00%~49.44%,紫花苜蓿样地总孔隙度较其他撂荒地减少了 7.77%~17.87%。各样地土壤含水量存在显著差异,其中白羊草样地土壤含水量最低,较其他样地减少了 39.23%~73.89%。

## 2.2 典型草地根系变化特征

白羊草具有较长的根长密度和表面积密度(图1),分别是其他撂荒草地的1.77~33.22倍和1.02~11.60倍;不同演替阶段根长密度和表面积密度均表现为须根系植物大于直根系植物,其中须根系植物根长密度分别是其对应演替阶段直根系植物的6.83,6.90,2.27倍,表面积密度分别是其对应演替阶段直根系植物的5.69,3.30,1.20倍。铁杆蒿根系体积密

度最大,分别是其他撂荒草地的1.25~2.78倍;除冰草根体积密度小于黄蒿外,与须根系植物相反,不同演替阶段根体积密度均表现为须根系植物小于直根系植物,分别较其对应演替阶段直根系植物减少了34.49%,35.34%。总体而言,沙打旺人工草地根长密度、表面积密度和体积密度均不同程度小于自然撂荒地,低于自然撂荒地60.68%~2 920.37%,32.64%~1 178.28%和212.27%~769.59%。

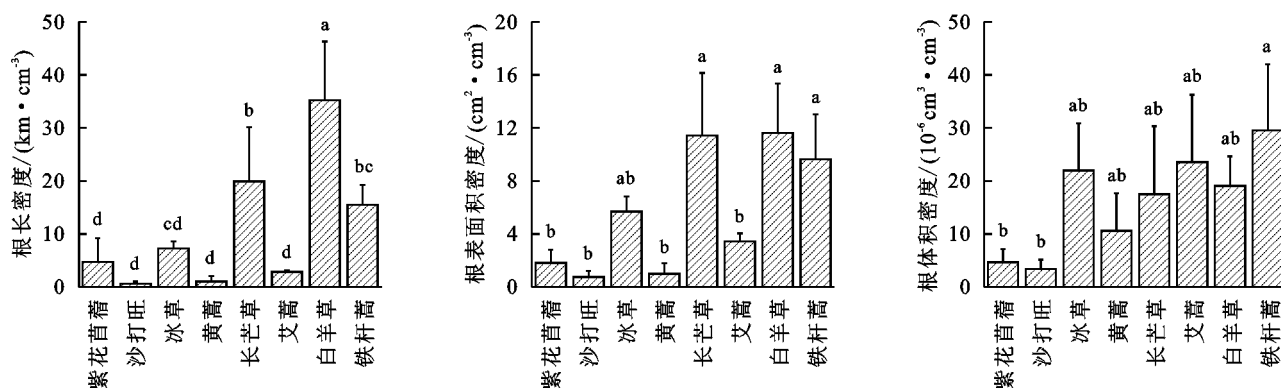


图1 不同植被类型下根系特征

Fig. 1 Root characteristics under different vegetation types

## 2.3 典型草地根土复合抗剪特性

各样地不同垂直载荷下根土抗剪强度变化范围为38.54~46.15 kPa(图2),相较于素土,各样地平均根土复合体抗剪强度增加了22.11%~46.22%。自然撂荒地平均抗剪强度差异不显著,除铁杆蒿稍低于人工草地紫花苜蓿(6.51%)和沙打旺外(2.13%),其他自然撂荒地平均抗剪强度均不同程度高于人工草地,分别是其1.01~1.12倍和1.05~1.17倍。

黏聚力变化范围为1.42~13.21 kPa(图3),相较于素土,各样地黏聚力增加了22.06%~1 034.11%。自然撂荒地黏聚力整体高于人工草地,分别是紫花苜蓿草地和沙打旺草地的3.54~7.52倍和4.38~9.29倍。内摩擦角变化范围为7.79°~11.69°(图3),除沙打旺(0.40%)和艾蒿(8.48%)略低于素土外,其他样地内摩擦角均高于素土,是其1.11~1.19倍。不同演替阶段内摩擦角均表现为须根系植物大于直根系植物,其中须根系植物内摩擦角是其对应演替阶段直根系植物的1.08,1.24,1.23倍。

## 2.4 典型根土复合体抗剪强度影响因素分析

为明确植被恢复过程中根系生长发育对土壤抗剪特性的影响,采用Pearson线性相关分析法得到了土壤性质和根系特征与黏聚力和内摩擦角的相关系数,结果表明(表3):黏聚力与总孔隙度和根系体积密度显著正相关( $p < 0.01$ );与土壤含水量负相关,与容重、毛管孔隙、根长密度和根表面积密度正相关,但

均不显著( $p > 0.05$ );内摩擦角与土壤容重呈显著负相关( $p < 0.05$ );与毛管孔隙度、总孔隙度、根长密度、根表面积密度和根体积密度正相关,与土壤含水量负相关,但均不显著( $p > 0.05$ )。主成分分析结果表明(图4),容重、土壤含水量与内摩擦角关系密切,总孔隙度、根体积密度可显著影响黏聚力。

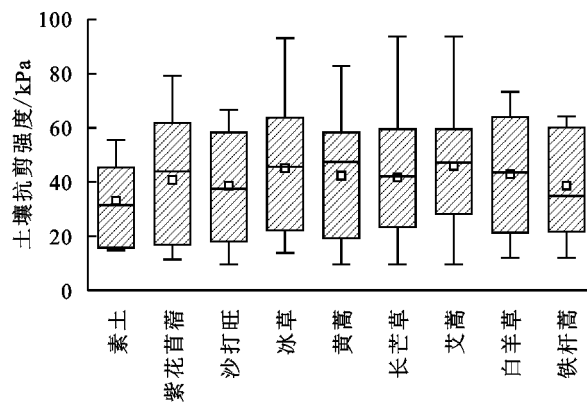


图2 不同植被类型下土壤抗剪强度变化情况

Fig. 2 Changes in soil shear strength under different vegetation types

进一步对土壤抗剪特性与土壤性状和根系特征参数进行回归分析发现(图5),黏聚力可表征为总孔隙度( $R^2 = 0.82$ )或根体积密度( $R^2 = 0.47$ )的线性或幂函数,随总孔隙度或根体积密度的增加而增大;内摩擦角可表征为土壤容重的线性函数( $R^2 = 0.39$ ),随土壤容重的增加而减少。



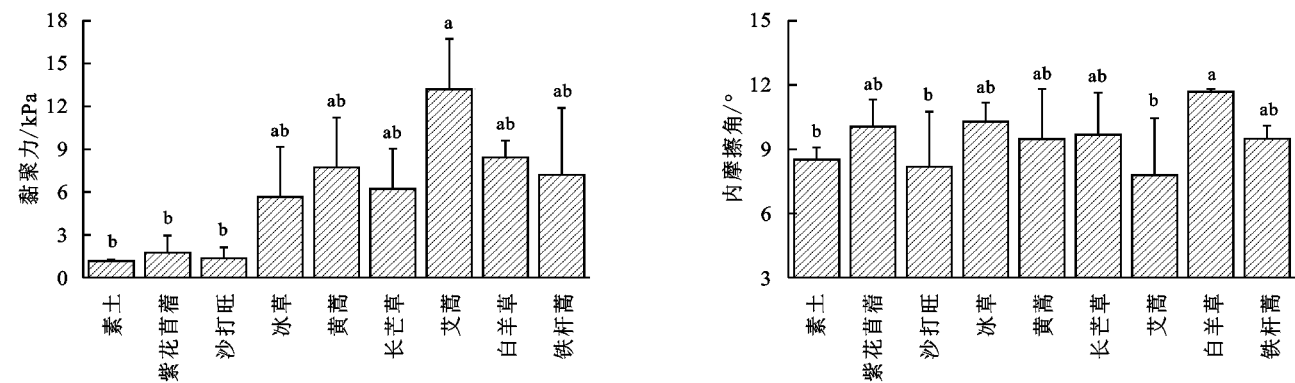


图 3 不同植被类型下土壤抗剪强度指标变化情况

Fig. 3 Changes in soil shear strength indicators under different vegetation types

表 3 土壤性质和根系特征与黏聚力和内摩擦角间的相关系数

参数	BD	CP	TP	SWC	RLD	RSAD	RVD
c	0.161	0.621	0.923**	−0.089	0.478	0.637	0.910**
φ	−0.716*	0.587	0.034	−0.42	0.664	0.438	0.156

注:BD 表示土壤容重;CP 表示毛管孔隙度;TP 表示总孔隙度;SWC 表示土壤含水量;\*表示  $p<0.05$ ; \*\*表示  $p<0.01$ 。

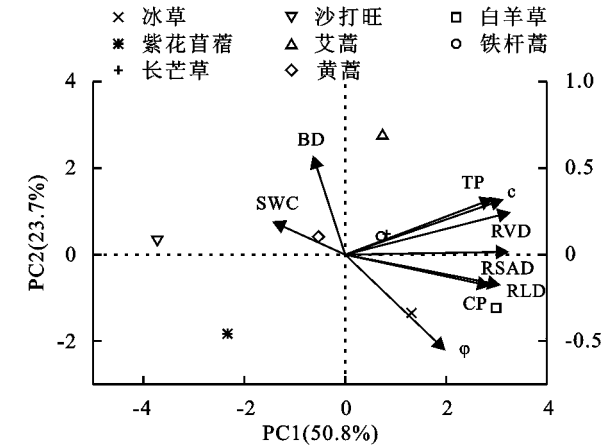


图 4 土壤性状与根系特征的主成分分析

Fig. 4 Principal Component Analysis of Soil Characteristics and Root Characteristics

3 讨论

植被恢复过程中物种差异可显著影响土壤抗剪特

性。对于本研究中所选样地,其平均根土复合体抗剪强度较素土增加了 22.11%~46.22%,表明植物根系可有效增强土壤抗剪强度。受植物物种的影响,各样地土壤黏聚力存在较大差异,其中艾蒿土壤黏聚力最大。尽管自然撂荒草地黏聚力在统计学上表现出差异不显著 ( $p>0.05$ ),但均显著高于紫花苜蓿和沙打旺人工草地,一定程度上表明自然演替草地土壤颗粒胶结程度更高,有助于增强土壤抗剪特性。根系构型也可影响土壤抗剪特性,内摩擦角在每个演替阶段总体表现为须根系大于直根系,尤其是演替中后期,须根系对于土壤抗剪特性的提升有所增强,表现为演替中后期须根系植物内摩擦角相对直根系更大。这与李建兴等<sup>[8]</sup>,张立芸等<sup>[14]</sup>研究结果一致,这主要是因为直根系根土复合体在剪切过程中以拉拔为主,须根系主要以拉断为主,而根系拉拔的力小于根系拉断的力。此外,须根系直径较小且根系发达,其根—土接触面积较大,增加了土壤内摩擦阻力进而增加了土壤抗剪特性<sup>[16]</sup>。

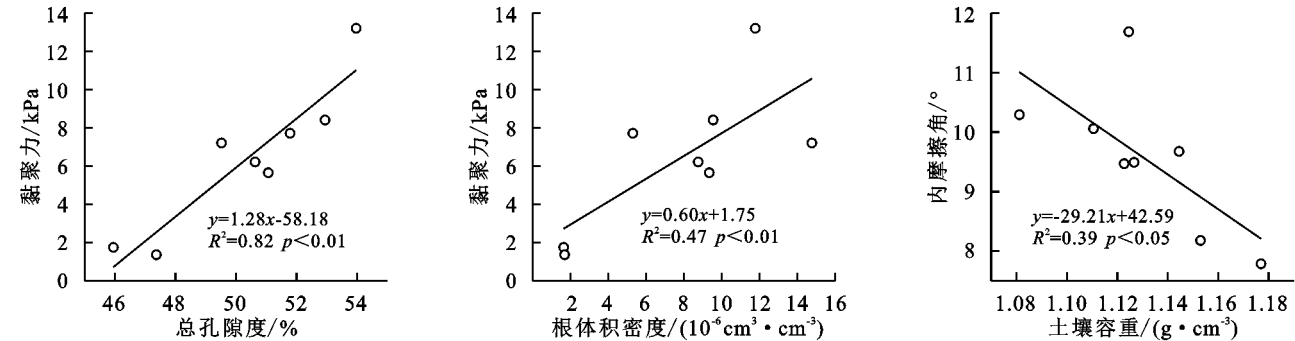


图 5 土壤性状、根系特征与抗剪强度指标回归分析

Fig. 5 Regression analysis of soil properties, root characteristics, and shear strength indicators

植被恢复过程中物种差异驱动 也可显著影响土壤抗剪特性。植物生长过程中根系

穿插、缠绕、挤压土体可增加土壤孔隙度,降低土壤容重,影响土壤结构和稳定性,进而影响土壤抗剪特性。本研究中,土壤黏聚力不仅包括土粒与土粒间的库仑力、范德华力、胶结作用力等各种物理化学作用力,还包括土壤与颗粒之间的凝聚力,以及由土粒的剪应力传递给根系进而引起的根系抗剪力和锚固力<sup>[9]</sup>。一般而言,土壤孔隙度越大,土壤颗粒间的距离越大,颗粒间的范德华力和静电离减小,更容易发生剪切破坏,致使土壤黏聚力减小<sup>[7,17]</sup>。土壤容重是表征土壤紧实度的重要指标之一,土壤容重越大土壤越紧实,土壤抗剪性能越强。本研究中,黏聚力随土壤孔隙度呈线性减小,内摩擦角也随土壤容重线性减小,这主要是因为根系生长过程中虽然增加了土壤孔隙度和降低了土壤容重,一定程度上降低土壤抗剪性能,但相对于土壤性质对土壤抗剪特性的影响,根系本身对土壤抗剪特性的影响更强。尽管有研究表明土壤含水量超过一定阈值时会削弱土壤抗剪性能,本研究中土壤含水量仅与土壤黏聚力和内摩擦角呈负相关,但并不显著,这主要是由于在一定土壤含水量范围内,土壤黏聚力会因土壤含水量的增加而增强。

根体积密度能很好地解释根系的固土机理,可作为表征土壤抗剪强度的重要参数<sup>[18]</sup>。本研究发现黏聚力随根体积密度的增大而增大,这与张立芸等<sup>[14]</sup>研究结果一致。同时,较大的根长、根表面积和根体积也在一定程度上表明较强的根系分泌物有机胶结作用,土壤颗粒间的结合强度有所增强,根系对土壤颗粒的黏结和串联拉结作用愈加显著,加筋效应增强。Tsige等<sup>[19]</sup>研究结果也表明,植物根系通过传递剪切应力来增强土体的抗剪强度,即土体在外力作用下发生剪切破坏时,内部的剪应力会调动根系的抗拉强度来增大土壤抗剪强度。

## 4 结论

(1) 植被恢复可显著提高土壤抗剪性能,8个典型样地草地平均根土复合抗剪强度均显著增强,较素土增加了22.11%~46.22%;自然演替草地土壤颗粒胶结程度更高,其土壤黏聚力高于人工草地,根系构型也可影响土壤抗剪特性,内摩擦角在每个演替阶段总体表现为须根系大于直根系,尤其是演替中后期提升效应更强。

(2) 土壤性质虽与抗剪关系密切,但根系影响更强和明显尽管黏聚力随土壤孔隙度呈线性增加,内摩擦角随土壤容重线性减小,一定程度上降低土壤抗剪性能;但相对于土壤性质对土壤抗剪特性的影响,根系本身对土壤抗剪特性的影响更强。

(3) 土壤性状和根系特征参数与抗剪特性的函数关系植物根系的加筋效应可增强土壤颗粒的黏结和串联拉结作用,根体积密度是影响土壤抗剪特性的主要参数,黏聚力随总孔隙度或根体积密度的增加呈线性增大( $R^2 \geq 0.47$ ),内摩擦角随土壤容重的增加而线性减少( $R^2 = 0.39$ )。

## 参考文献(References):

- [1] 甘凤玲,韦杰,李沙沙.紫色土埂坎典型草本根系摩阻特性对土壤含水率的响应[J].草业学报,2022,31(7):28-37.  
Gan F L, Wei J, Li S S. Response of root-soil friction characteristics of three common grasses to soil water content in purple soil bunds[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022,31(7):28-37.
- [2] Kok H, McCool D K. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength[J]. Transactions of the Asae, 1990,33(2):501-0506.
- [3] Moayedi H, Tien B D, Dounis A, et al. Novel nature-inspired hybrids of neural computing for estimating soil shear strength[J]. Applied Sciences, 2019,9(21):4643.
- [4] Barbhuiya G H, Hasan S D. Effect of nano-silica on physio-mechanical properties and microstructure of soil: A comprehensive review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021,44:217-221.
- [5] 张爱国,李锐,杨勤科.中国水蚀土壤抗剪强度研究[J].水土保持通报,2001,21(3):5-9.  
Zhang A G, Li R, Yang Q K. Study on soil anti shear-intensity of water erosion in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(3):5-9.
- [6] 陈红星,李法虎,郝仕玲,等.土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):21-25.  
Chen H X, Li F H, Hao S L, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(2):21-25.
- [7] 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.  
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.
- [8] 李建兴,何丙辉,谌芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.  
Li J X, He B H, Chen Y, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(10):144-152.

- [9] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等.土壤—草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J].中国农业大学学报,1996,1(2):31-38.  
Yang Y C, Mo Y J, Wang Z F, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 1996,1(2):31-38.
- [10] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等.玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J].农业机械学报,2014,45(5):125-130.  
Zheng Z C, Zhang X Z, Li T X, et al. Change Characteristics and Influencing Factors of Soil Shear Strength during Maize Growing Period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(5):125-130.
- [11] 陈晓安,杨洁,熊永,等.红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J].水利学报,2013,44(10):1175-1181.  
Chen X A, Yang J, Xiong Y, et al. Research on the soil characteristics and factors of collapsing erosion in the red soil zone[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(10):1175-1181.
- [12] 格日乐,张成福,蒙仲举,等.3种植物根—土复合体抗剪特性对比分析[J].水土保持学报,2014,28(2):85-90.  
Ge R L, Zhang C F, Meng Z J, et al. The shear property comparison of three roots-soil composites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(2):85-90.
- [13] 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.  
Deng J. The research of biomechanical erosion resistance mechanism for the common herbal roots-soil composite in southern red soil region[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [14] 张立芸,段青松,范茂攀,等.玉米和大豆根系对滇中地区坡耕地红黏土抗剪强度的影响[J].土壤学报,2022,59(6):1527-1539.  
Zhang L Y, Duan Q S, Fan M P, et al. Effects of maize and soybean roots on topsoil shear strength of red clay on sloping farmland in central Yunnan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022,59(6):1527-1539.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理实验室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.  
Institute of Soil Physics, Nanjing Soil Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Physical properties of soil[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1978.
- [16] Martel S J. Mechanics of landslide initiation as a shear fracture phenomenon[J]. Marine Geology, 2004,203(3):319-339.
- [17] Wei J, Shi B, Li J, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena, 2018,166:124-133.
- [18] 唐菡,湛芸,刘泉宏,等.喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根—土复合体力学特性[J].生态学报,2019,39(16):6114-6125.  
Tang H, Chen Y, Liu X H, et al. Study on the mechanic features of root and root-soil matrix of Dolichos lablab L. hedgerows on the slopes of the karst area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(16):6114-6125.
- [19] Tsige D, Senadheera S, Talema A. Stability analysis of plant-root-reinforced shallow slopes along mountainous road corridors based on numerical modeling[J]. Geosciences, 2019,10(1):19.

~~~~~  
(上接第152页)

- [25] Lv J R, Luo H, Xie Y S, et al. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events [J]. Catena, 2019,172:179-189.
- [26] 聂慧莹,王文龙,郭明明,等.降雨条件下两种土壤类型工程堆积体坡面水沙关系与侵蚀动力特征[J].应用生态学报,2020,31(9):3141-3153.  
Nie H Y, Wang W L, Guo M M, et al. Runoff-sediment relationship and erosion dynamic characteristics for two types of engineering deposits under rainfall condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(9):3141-3153.
- [27] 戎玉博,王森,白玉洁,等.含砾石锥状工程堆积体侵蚀水动力学特性和细沟形态特征[J].水土保持学报,2018,32(2):134-141.  
Rong Y B, Wang S, Bai Y J, et al. Characteristics of hydrodynamics and rill morphology of tapered engineering piles with gravel[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):134-141.
- [28] 朱元骏,邵明安.不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J].农业工程学报,2006,22(2):64-67.  
Zhu Y J, Shao M A. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006,22(2):64-67.