

DOI: 10.5846/stxb201403050375

刘福全, 刘静, 姚喜军, 张永亮, 苑淑娟. 根系固土主导力学因素初探与差异性评价. 生态学报, 2015, 35(19): - .

Liu F Q, Liu J, Yao X J, Zhang Y L, Yuan S J. Mechanical factors influencing soil-reinforcement by roots and identifying appropriate plant species for erosion control. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): - .

## 根系固土主导力学因素初探与差异性评价

刘福全<sup>1</sup>, 刘 静<sup>1,\*</sup>, 姚喜军<sup>1</sup>, 张永亮<sup>1</sup>, 苑淑娟<sup>2</sup>

1 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019

2 内蒙古自治区灌溉排水发展中心, 呼和浩特 010019

**摘要:**为了探究影响根系固土的主导力学因素,并为侵蚀区固土抗蚀植物种的筛选提供部分依据。本文以 3—4 年生(4 年生为主)五种内蒙古干旱、半干旱地区常见的水土保持植物:柠条(*Caragana microphylla* Lam.)、沙柳(*Salix psammophila* C.wang et Ch. Y.Yang)、沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)为研究对象,针对春季土壤干旱和夏季暴雨(土壤湿润)两种自然条件,对影响五种植物根系固土的 10 项指标进行主成分分析。结果表明,根系抗拉力学特性是影响植物根系固土的主导力学因素,其次为根-土界面摩擦特性,最后是根-土复合体抗剪特性。在此基础上,从根系力学特性的角度出发,运用层次分析法对两个时期五种植物根系固土能力的差异性进行评价。在评价过程中,为了保证评价数据完整性,减小专家主观因素所带来的误差,使评价结果更具科学性,该文将两个时期主成分分析所得三个力学特性的方差贡献率作为权重。评价结果显示,根系固土指数为:春季土壤干旱时期,柠条(0.763)>沙柳(0.384)>白沙蒿(-0.141)>沙地柏(-0.186)>沙棘(-0.821);夏季暴雨时期分别为,柠条(0.876)>沙地柏(0.218)>沙柳(0.065)>白沙蒿(-0.404)>沙棘(-0.755)。五种植物中,柠条根系的抗拉力学特性显著优于其他植物,可作为干旱、半干旱地区固土抗蚀的重要参考树种。

**关键词:**根系固土;力学特性;主导力学因素;主成分分析;差异性评价;层次分析法

## Mechanical factors influencing soil-reinforcement by roots and identifying appropriate plant species for erosion control

LIU Fuquan<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1,\*</sup>, YAO Xijun<sup>1</sup>, ZHANG Yongliang<sup>1</sup>, YUAN Shujuan<sup>2</sup>

1 College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China

2 Inner Mongolia Autonomous Region of Irrigation and Drainage Development Center, Huhhot 010019, China

**Abstract:** Influenced by the physiological and genetic characteristics of plants, the mechanical properties of roots differ significantly, with the result that species vary in their ability to resist soil erosion. The selection of species to reinforce soil and prevent erosion is the key to improving not only soil and water conservation, but also vegetation and ecological restoration. Research to identify suitable plant species is still in its early stages, and studies addressing many issues are urgently needed. *Caragana microphylla* Lam, *Salix psammophila* C.wang & Ch.Y.Yang, *Sabina vulgaris* Ant, *Artemisia sphaerocephala* Krasch, and *Hippophae rhamnoides* Linn are common plants used in soil and water conservation projects in the arid and semi-arid regions of Inner Mongolia. Rainfall is concentrated in summer with short-duration and high-intensity. The mechanical properties of roots differ significantly with growth period and soil moisture conditions. In order to study the mechanical factors influencing soil-reinforcement by roots and identify suitable anti-erosion plant species for this area, root tensile strength, root-soil surface friction, and root-soil composite shear strength of five plant species were studied. During the spring drought period and summer wet period, ten indicators of efficacy in erosion prevention (root-soil composite

基金项目:国家自然科学基金项目(51064021);内蒙古基金重点项目(2010ZD16)

收稿日期:2014-03-05; 网络出版日期:2014-12-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljing58@126.com

cohesion, root-soil composite equivalent friction angle, root-soil interface shear strength, cumulative surface area, interface friction coefficient, representative root elasticity modulus, representative root constitutive properties, taproot tensile strength, lateral branch root tensile strength, length of cumulative root length) of the five species at the age of 3—4 (mainly 4) years were measured. The data were then analyzed using principal component analysis (PCA) with SAS9.0 software. The PCA results indicate that tensile mechanical strength had the greatest influence on soil reinforcement, followed by root-soil surface friction, and then root-soil composite shear strength. Based on these mechanical factors, the performance of the five species was evaluated. In order to maintain the integrity of the data and reduce uncertainty caused by subjective expert assessments, the variance contribution to the PCA of each of the three mechanical characteristics was used as to weight an analytic hierarchy process (AHP). The results showed the soil-reinforcement indices in the drought period were ranked *Caragana microphylla* Lam (0.763) > *Salix psammophila* C. wang et Ch. Y. Yang (0.384) > *Artemisia sphaerocephala* Krasch (-0.141) > *Sabina vulgaris* Ant (-0.186) > *Hippophae rhamnides* Linn (-0.821), while in the wet period they were ranked *Caragana microphylla* Lam (0.876) > *Sabina vulgaris* Ant (0.218) > *Salix psammophila* C. wang et Ch. Y. Yang (0.065) > *Artemisia sphaerocephala* Krasch (-0.404) > *Hippophae rhamnides* Linn (-0.755). The results suggest that species with better root tensile strength should be chosen reinforce soil and prevent erosion. Of the five species, *Caragana microphylla* Lam is the preferred soil-reinforcement and anti-erosion plant in arid and semi-arid regions due to its high root tensile strength.

**Key Words:** Soil-reinforcement by roots; Mechanical property; Dominant mechanical factor; Principal component analysis; Assessment; Analytic hierarchy process

随着生物措施在防治水土流失方面的广泛运用,根系固土已成为当前生态环境领域研究的热点。综合近年来国内外学者对根系固土机理的研究成果<sup>[1-4]</sup>,影响根系固土的力学因素主要集中于根系的抗拉力学特性、根-土界面摩阻特性和根-土复合体抗剪特性<sup>[5-8]</sup>。虽然众多学者已展开了大量的研究,但目前为止,哪种力学特性在根系固土过程中起主导作用尚不明确,有关该方面的研究尚未见报道。

受植物自身生理与遗传特性的影响,根系的力学特性在不同植物间有所区别,从而造成植物根系的固土抗蚀能力也存在着种间差异。而固土抗蚀植物种的选择正确与否不仅是改善水土流失现状的关键,也直接关系到该地区植被重建效果与生态恢复的进程。目前,有关干旱、半干旱地区固土抗蚀植物种筛选的研究尚未见报道,这也成为当前该地区亟待解决的问题。

鄂尔多斯市伊金霍洛旗属于干旱、半干旱地区,该地区春季气候干旱,降水主要集中于夏季,且多为短历时、高强度的暴雨。而在不同生长时期和土壤含水率下,根系的力学特性差异显著<sup>[6]</sup>。基于此,本文针对春季土壤干旱和夏季暴雨两种自然条件,以该地区五种常见水土保持植物为研究对象,探索制约植物根系固土的主导力学因素。并针对根系的三种力学特性,构建根系固土层次结构模型,对五种植物根系固土抗蚀能力的差异性进行评价。以期揭示根系固土的力学机理,并为侵蚀区固土抗蚀植物种的筛选提供部分参考。

## 1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗境内,地处毛乌素沙漠东北缘,内蒙古鄂尔多斯高原东南部,位于亚洲中部草原向荒漠草原过渡的干旱、半干旱地带。地形呈西高东低的走势,属于晋陕黄土高原的北缘水蚀沟壑丘陵区,海拔在 1300—1500 m 之间。地理坐标为, E 109°45′—110°40′, N 38°50′—39°40′。

试验区的地带性土壤主要以风沙土和栗钙土为主,还有黄绵土、草甸土、盐土和沼泽土。由于风成沙在该区主要表现为流动沙和半固定沙,且多为就地搬运起沙,所以土壤机械组成较粗,砂粒含量多,土壤结构疏松,物理性粘粒少,有机质含量低,易遭受风蚀和流水侵蚀。

采用筛析法与密度计法联合测定土样。土壤机械组成如表 1 所示,通过参考中国土壤质地分类标准<sup>[9]</sup>,

将试验区土壤类型定名为砂壤土。

表 1 土壤机械组成

Table 1 Soil mechanical composition

机械组成 Mechanical composition	<0.001 mm	吸湿水 Hygroscopic water	2—0.05 mm	0.05—0.01 mm	0.01— 0.005 mm	0.005— 0.001 mm	<0.001 mm
百分比 Percentage/%	7.59	3.69	46.81	38.80	4.20	2.60	7.59

## 2 研究方法

### 2.1 主成分分析法

主成分分析的基本思想是将多个具有一定相关性的指标,重新组合成一组新的相互无关的综合指标来代替原来的指标。综合指标在所有线性组合中的方差越大,表示其包含的信息越多,对所有指标的综合能力也就越强<sup>[10]</sup>。本文借助 SAS9.0 软件对反映根系数量特征与根系力学特性的 10 个因子进行主成分分析,通过确定各主成分中起支配作用的因子来探讨影响根系固土的主导力学因素。

### 2.2 层次分析法

层次分析法是一种简单实用的多目标决策分析方法。该法的基本原理是将结构复杂、数据量冗杂的问题分解为若干层次和若干元素,通常采用专家咨询法,即由多位经验丰富的专家对同一层次中的多个元素进行两两比较来构造判断矩阵,确定各个元素在该层次中的重要程度,而重要程度通常用 1—9 标度法来表示,由此计算出各元素在其层次中所占的权重,进而得出各个实测数据指标的组合权重<sup>[11]</sup>。

#### 2.2.1 构建层次结构模型

层次结构模型由目标层、准则层、方案层和指标层四个层次构成。准则层选用春季土壤干旱和夏季暴雨两个时期主成分分析所得三个力学特性的方差贡献率作为权重。方案层和指标层由生态学、植物学、土壤学、水土保持与荒漠化防治方向的专家以及课题组主要成员在内的 10 人进行打分,确定各指标权重。

由于五种植物根系的力学特性在不同生长时期和土壤含水率下的差异显著。从而认为,两种自然条件下,根系的三种力学特性在固土过程中具有不同的重要程度。为了减小专家打分过程中主观因素所带来误差,选用主成分分析结果中各力学特性占全体指标的方差贡献率作为差异性评价的权重。层次结构模型与评价指标权重如表 2 所示。

#### 2.2.2 一致性检验

借助 Excel 软件并运用和积法<sup>[11]</sup>得到各判断矩阵的一致性比率 CR。经计算,层次单排序与层次总排序均具有满意的一致性(CR<0.1)。

#### 2.2.3 根系固土指数

根系固土指数等于所有实测数据的标准化数据值与其对应的组合权重值乘积的累加值。将数据进行标准化处理可消除量纲与变量数值大小的影响,标准化数据值反映与平均值间的偏离程度,正值表示高于平均值,负值表示低于平均值。由于本文的各项评价指标的实测值均表现为数值越大越有利于固土,因此,植物根系固土指数越大,其固土抗蚀能力越强。

公式为:

$$P_i = \sum_{j=1}^n X_{ij} W_j$$

式中, $P_i$ 为根系固土指数; $X_{ij}$ 为第  $i$  种植物第  $j$  项指标标准化值; $W_j$ 为第  $j$  项指标的权重值; $n$  为评价指标个数。

### 2.3 指标选择及其试验方法

#### 2.3.1 根-土复合体抗剪特性

根系数量越多,分布越广,抵抗土体剪切作用的能力越强。累计根长能够反映根系分布与数量特征。因

此,选用代表根根-土复合体抗剪强度和累计根长来反映根-土复合体的抗剪特性。由库伦公式可知,抗剪强度由粘聚力和内摩擦角两个参数决定。为了更加直观地反映根系对土体抗剪强度的增强作用,选择根-土复合体的粘聚力和内摩擦角相对于素土的增长率作为评价根-土复合体抗剪强度的指标。

表 2 根系固土层次结构模型

Table 2 Hierarchical structure model of soil-reinforcement by roots

目标层 Target layer	准则层 Rule layer	权重 Weight		方案层 Scheme layer	权重 Weight	指标层 Index layer	权重 Weight		组合权重 Combination weight								
		春季 Spring	夏季 Summer				春季 Spring	夏季 Summer	春季 Spring	夏季 Summer							
根系固土 Soil-reinforcement by roots A	根-土复合体 抗剪特性 B1	0.1447	0.175	抗剪强度 C1	0.333	粘聚力 D1	0.833	0.833	0.0398	0.0486							
						内摩擦角 D2	0.167	0.167	0.0080	0.0097							
						累计根长 C2	0.667	0.3—1.0 mm D3	0.333	0.539	0.0159	0.0629					
	根-土界面摩阻 特性 B2	0.2782	0.3025	拉拔摩阻特性 C3	0.250	0.3—1.0 mm D6	0.333	0.539	0.0114	0.0408							
						1.0—2.0 mm D7	0.333	0.297	0.0207	0.0225							
						2.0—3.0 mm D8	0.333	0.164	0.0375	0.0124							
						累计根表面积 C4	0.500	0.3—1.0 mm D9	0.333	0.539	0.0228	0.0815					
						1.0—2.0 mm D10	0.333	0.297	0.0413	0.0449							
						2.0—3.0 mm D11	0.333	0.164	0.0750	0.0248							
						界面摩擦系数 C5	0.250			0.0696	0.0756						
						根系抗拉力学 特性 B3	0.4921	0.4546	代表根变形 特性 C6	0.333	弹性模量 D12	0.500	0.500	0.0820	0.0758		
											本构特征 D13	0.500	0.500	0.0820	0.0758		
											直根抗拉强度 C7	0.333	0.3—1.0 mm D14	0.333	0.539	0.0269	0.0817
											1.0—2.0 mm D15	0.333	0.297	0.0487	0.0450		
											2.0—3.0 mm D16	0.333	0.164	0.0884	0.0249		
											侧根分支处抗 拉强度 C8	0.333	0.3—1.0 mm D17	0.333	0.539	0.0269	0.0817
											1.0—2.0 mm D18	0.333	0.297	0.0487	0.0450		
											2.0—3.0 mm D19	0.333	0.164	0.0884	0.0249		

在研究区样地内,采用整株挖掘法挖出 3 株标准株植物根系,将根系每隔 0.1 mm 进行分级,测量各径级根系的长度,以三株植物的平均值为结果,取与力学特性相对应根径范围的累计根长作为分析数据;根-土复合体抗剪试验采用 ZJ-型数采四联应变控制式电动直剪仪,选取每种植物代表根径范围内的相同直径的根系(1.25 mm)构建根-土复合体试件,每个试样垂直均匀布设 4 条根,每组试验做 4 个荷载(12.5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa),每个荷载 3 个平行。春季土壤干旱时期,采用土壤含水率为 4.34%(试验地春季原状土含水率)的慢剪(土壤孔隙水不承压、0.02 mm/min)指标;夏季暴雨条件采用快剪(土壤孔隙水承压、0.8 mm/min)指标,土壤含水率为 23.6%(吸水饱和含水率)。

### 2.3.2 根-土界面摩阻特性

单根拉拔试验能够模拟土体发生滑动或塌陷时根系从土体中被完全拔出的难易程度,为了消除不同植物单根根表面积不同所带来的误差,选取单根临界滑动拉拔力与其对应根表面积的比值,即拉拔摩阻特性来反映不同植物间单位根表面积所受摩擦力的大小。根-土界面摩擦力与根-土接触面积和根系表面粗糙程度成正比。因此,选用拉拔摩阻特性、累计根表面积及代表根根-土界面直剪摩擦系数相对于素土的增长率作为评价根-土界面摩阻特性的指标。

根-土界面摩阻试验由单根拉拔摩阻试验与直剪摩擦试验构成。单根拉拔摩阻试验用直径 6 cm、长度 8 cm 的 PVC 管装载土样,将长度为 9 cm 的直段根固定在管中部直径为 1 cm 的圆孔中,采用 YG(B)026H-250 型织物强力机(精度为 0.01,拉力量程为 0—2500 N)进行拉拔,每个根径 3 次重复;直剪摩擦试验的仪器

及条件参数设定与根-土复合体抗剪试验相同。但试验中,剪切盒上盒放土样,下盒嵌入表面粘有根系表皮的圆木块,根轴线方向与受剪方向平行,模拟根与土分离时的受力状况,由库仑公式计算根-土界面的摩擦系数;根表面积的测量方法与根系长度大致相同,不做赘述。

### 2.3.3 根系抗拉力学特性

选用春季生长初期和夏季生长旺盛期直根抗拉强度、侧根分支处抗拉强度、代表根变形特性作为评价根系抗拉力学特性的指标。根系的抗拉强度反映根系在单位横截面积上所受拉力的大小,但根系在土体中不仅以直根的形式出现,还存在较多含量的侧根,当土体发生相对移动时,侧根分支处仍会受到力的作用。因此,选择直段根和侧根分支处两种根系形态来反映根系的抗拉强度。变形特性由弹性模量和本构特征构成。弹性模量(根系弹性应力与弹性应变的比值)衡量根系发生弹性形变难易程度;本构特征(根系极限应力与极限应变的比值)反映根系整体抵抗形变的能力。

试验包括直根抗拉试验、侧根分支处抗拉试验和代表根弹塑性试验。根系抗拉试验仪器采用织物强力机,在 500 mm/min 的加载速度下拉伸根系至断裂(在夹口处断裂时,数据无效),每个直径 3 次重复。在进行侧根抗拉试验过程中,将试验根的上级根垂直固定在强力机的上夹具上,两根下级根分别用自制三点固定式夹具夹持,下级根固定时调整夹具的角度以确保每一下级根轴向受力;弹塑性特性试验采用重复加载法,即以 10 mm/min 的速度对代表根进行 15—18 次反复拉伸,绘制  $\sigma - \varepsilon$  曲线,计算弹性模量与本构特征。

### 2.4 试验根的选取

课题组在根系抗拉试验中发现,由于根系材料特性的约束,在夹具设计过程中,始终未能解决由于单根抗拉强度过大而导致根系在夹口处滑脱或夹扁断裂的情况,尚有待于在今后的试验中进一步地研究和改善。同时,通过对 4 年生五种植物代表根<sup>[12]</sup>的研究发现,直径小于 3.0 mm 的根系占据根系总数的主体,在 78.40%—96.84%之间。所以,对直径小于 3.0 mm 根系的力学特性进行研究能够反映植物根系整体的固土能力。并且,直径小于 0.3 mm 的单根力学特性极差,较小的弯曲变形就会发生断裂。为了保证试验结果准确,避免误差,本文选择以根径 0.3—3.0 mm 的根系为研究对象。主成分分析采用该径级范围的累计根表面积、累计根长、平均拉拔摩阻特性、直根平均抗拉强度和侧根分支处平均抗拉强度作为分析指标。但根系的抗拉强度、根表面积和根系长度在不同径级间的差异显著,为了分析根系的力学特性与数量特征在不同径级间的差异,本文将除研究对象为代表根(抗剪强度、界面摩擦系数和变形特性)以外所有指标划分为 0.3—1.0 mm、1.0—2.0 mm、2.0—3.0 mm 三个径级范围。

## 3 结果与分析

### 3.1 影响根系固土的主导力学因素

借助 SAS9.0 软件对春季土壤干旱与夏季暴雨条件下影响根系固土的 10 个指标进行主成分分析,各指标的原始数据见表 3。

表 4 为春夏两时期前三个主成分各指标影响系数,由表 4 看出,春季土壤干旱与夏季暴雨两种自然条件的第一主成分均由代表根弹性模量、代表根本构特征、直根抗拉强度、侧根分支处抗拉强度 4 项指标构成,反映根系的抗拉力学特性;第二主成分中,单根拉拔摩阻特性、累计根表面积、根-土界面摩擦系数的影响系数最大,表现为根-土界面的摩阻特性;春季土壤干旱时的第三主成分由累计根长和根-土复合体粘聚力组成,夏季暴雨时则由根-土复合体粘聚力和内摩擦角构成,均反映根-土复合体抗剪特性。

由此得出,春季土壤干旱和夏季暴雨时期,影响五种植物根系固土的主导力学因素首先是根系的抗拉力学特性,其次是根-土界面摩阻特性,最后为根-土复合体抗剪特性。

### 3.2 五种植物根系固土差异性评价

由植物根系的固土机理可知,根系对土体强度的加强作用可分为深粗根锚固作用和浅细根的加筋作用,二者在固持土体的过程中均发挥着重要作用。但在暴雨条件下,细根的固土作用更为明显。尤其是直径小于

表 3 春季土壤干旱与夏季暴雨条件下主成分分析原始数据

指标 Indicator	春季干旱土壤 Spring soil drought				夏季湿润土壤 Summer soil wet				
	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	柠条 <i>Caragana microphylla</i>	白沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	沙柳 <i>Salix psammophila</i>	沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	柠条 <i>Caragana microphylla</i>	白沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	沙柳 <i>Salix psammophila</i>
D1	33.12	28.37	25.09	45.39	40.16	16.65	16.34	14.76	21.50
D2	-0.57	-7.16	2.01	-9.16	0.74	-4.90	-0.75	-2.68	5.16
C2	4320	17457	4562	9336	24710	4320	17457	4562	9336
C3	20.12	48.31	48.88	45.61	45.67	20.12	48.31	48.88	45.61
C4	20438	43257	77385	41930	59976	20438	43257	77385	41930
C5	0.47	3.13	4.57	1.96	0.78	-47.74	-32.25	-17.27	-41.84
D12	0.58	1.29	0.21	0.80	0.55	0.58	1.29	0.21	0.80
D13	1.27	3.09	1.07	2.94	1.59	1.46	2.35	0.88	1.63
C7	8.30	46.70	13.63	27.11	22.96	13.07	49.86	6.17	23.21
C8	6.08	36.39	9.19	19.64	11.26	8.79	33.21	7.69	15.78

各指标名称采用层次结构模型中的标号表示

表 4 两个时期前三个主成分各指标影响系数

时期 Period	主成分 Principal component	贡献率 Contribution ratio/%	各指标影响系数 Influence coefficient of each indicator									
			D1	D2	C2	C3	C4	C5	D12	D13	C7	C8
春季干旱土壤	F1	49.21	0.097	-0.388	0.217	0.216	-0.082	0.051	0.416	0.437	0.434	0.431
Spring soil drought	F2	27.82	-0.348	0.165	0.036	0.467	0.545	0.534	-0.142	-0.072	0.12	0.105
	F3	14.47	0.499	0.160	0.632	0.282	0.293	-0.333	-0.149	-0.053	0.022	-0.157
夏季湿润土壤	F1	45.46	0.176	0.206	0.213	0.097	-0.208	-0.171	0.464	0.442	0.448	0.433
Summer soil wet	F2	30.25	-0.006	0.236	0.346	0.531	0.497	0.508	-0.037	-0.124	0.097	0.107
	F3	17.50	0.696	0.591	0.002	0.04	-0.081	-0.189	-0.098	-0.153	-0.185	-0.235

各指标名称采用层次结构模型中的标号表示 F1 为第一主成分; F2 为第二主成分; F3 为第三主成分

1.0 mm 的根系在提高土壤的水力学效应方面的贡献最大<sup>[13]</sup>。其分泌的有机物可作为促进土粒团聚的胶结剂,增强土壤抗分散、悬浮的能力,须根还能有效地增强土壤渗透性,减少径流,降低水流对土壤的冲刷,提高土壤抗冲性和抗蚀性<sup>[14-16]</sup>。

综合上述分析,本文将春季土壤干旱时期三个径级范围的根系赋予同等权重;夏季暴雨时期,各径级根系在固土抗蚀过程中的重要性为 0.3—1.0 mm>1.0—2.0 mm>2.0—3.0 mm。

春季土壤干旱条件下各指标实测值与综合指数值如表 5 所示。由下表看出,该时期五种植物根系固土指数分别为:柠条(0.834)>沙柳(0.303)>沙地柏(-0.066)>白沙蒿(-0.206)>沙棘(-0.864)。

春季生长初期柠条代表根变形特性、直根抗拉强度和侧根分支处抗拉强度均大于其他四种植物,表现出较好的抗拉力学特性,根系固土指数在五种植物中最高,推测原因可能与柠条根系内部的纤维组成有关;沙柳根-土复合体粘聚力明显高于其他植物,具有较强的根-土复合体抗剪特性,虽然抗拉力学特性的各项指标明显小于柠条,但却高于沙地柏、白沙蒿和沙棘,同样表现出较好的抗拉力学特性,使得沙柳根系的固土指数仅次于柠条;沙地柏累计根表面积和累计根长均大于其他四种植物,原因可能与其根系数量有关。课题组研究发现,沙地柏 0.3—3.0 mm 的根系数量最多,分别较柠条、沙柳、白沙蒿、沙棘多出 8.24%、40.46%、44.88%、75.24%。尽管如此,较差的根系抗拉力学特性仍使得沙地柏根系固土指数小于沙柳;五种植物中,白沙蒿单根拉拔摩阻特性最高,具有较好的根-土界面摩阻特性,推测原因可能与白沙蒿根系表面的粗糙程度有关。但白沙蒿根-土复合体抗剪特性和代表根变形特性在五种植物中最差。研究发现,白沙蒿根系的材料特性与脆性材料相似,较小的形变就极易发生断裂,导致白沙蒿根系的固土能力较弱;五种植物中,沙棘 0.3—3.0 mm 的根系数量最少,造成沙棘的累计根长和累计根表面积最小。较为光滑的根系表面可能是其单根拉拔摩阻特性和根-土界面摩擦系数最小的主要原因。

夏季暴雨条件下各指标实测值与综合指数值见表 6,可以看出,五种植物根系固土指数分别为:柠条(0.876)>沙地柏(0.218)>沙柳(0.065)>白沙蒿(-0.404)>沙棘(-0.755)。

与春季土壤干旱条件下的评价结果大致相同,根系固土指数仍为柠条最高,白沙蒿与沙棘最小。但该时期沙地柏根系固土指数却高于沙柳,这是因为暴雨条件下,细根具有较强的抗冲性与抗蚀性,固土作用明显优于粗根,而五种植物中,沙地柏须根最为发达,直径小于 1.0 mm 的根量占根系总数 69.47%,远高于其他四种植物,但较差的抗拉力学特性仍使其固土指数次于柠条;由表 5 和表 6 可以看出,两时期各指标的实测值也有所差异。其中,暴雨时期沙地柏根-土界面摩擦系数高于白沙蒿,在五种植物中最大,推测原因可能与沙地柏根系表面的亲水特性有关;生长初期沙棘根系的抗拉强度在五种植物中最小,但生长旺盛期白沙蒿根系抗拉强度普遍小于沙棘,推测原因可能与白沙蒿根系在生长旺盛期的含水率较高有关。但是这些推测还有待于在今后的试验中进一步验证。

#### 4 结论与讨论

一些学者提出,当土体出现滑动或裂缝时,根系与土体发生相对移动,由于植物根系的材料特性,根系在土体中受摩擦与拉伸作用较多而受剪切作用较少。因此,与根系的抗拉力学特性和根-土界面摩阻特性相比,根-土复合体抗剪特性在根系固持土体过程中所发挥的作用并不明显<sup>[17]</sup>。由于生物材料的柔韧性,根系在受力后的变形拉直会由浅层根系传递至深层根系,使不稳定的土壤表层与未遭到破坏影响并依然具有较高承载能力的深层土体形成整体,进而对土体的滑动过程形成缓冲,限制土体发生进一步移动<sup>[18]</sup>。由此认为,根系只有在能够承受较大程度变形的同时还具有较高的抗拉强度,才能保证根系在土体中受拉而不发生断裂,使根-土界面的摩阻特性得以充分发挥。本文的实测数据表明,白沙蒿根-土界面摩阻特性普遍优于其他四种植物,但根-土复合体抗剪特性与抗拉力学特性较差,较小的弯曲变形就会使根系发生断裂,表现出脆性的材料特性。在此,为了更加客观地评价植物根系的固土抗蚀能力,在不刻意突出根系各力学特性重要性的前提下,赋予三种力学特性同等重要的权重,并对五种植物根系固土抗蚀的差异性进行评价。结果表明,春季土壤干



表 6 夏季暴雨条件下各指标实测值与综合指数值  
Table 6 Measured data and composite index of each indicator under wet soil in summer

准则层 Rule layer	方案层 Scheme layer	指标层 Index layer	各指标实测值 Measured data of each indicator										各指标综合指数值 Composite index of each indicator															
			沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	柠条 <i>Caragana microphylla</i>	白沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	沙柳 <i>Salix psammophila</i>	沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	柠条 <i>Caragana microphylla</i>	白沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	沙柳 <i>Salix psammophila</i>	沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	柠条 <i>Caragana microphylla</i>	白沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	沙柳 <i>Salix psammophila</i>	沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>											
B1	C1	D1	16.73	16.34	15.02	20.09	18.40	-0.019	-0.025	-0.059	0.084	0.018	16.73	16.34	15.02	20.09	18.40	-0.019	-0.025	-0.059	0.084	0.018						
		D2	-6.02	-0.75	-0.29	1.57	0.45	-0.013	-0.001	-0.006	0.016	0.003	-6.02	-0.75	-0.29	1.57	0.45	-0.013	-0.001	-0.006	0.016	0.003						
		D3	1790	13475	1095	3300	19399	-0.052	0.049	-0.058	-0.039	0.100	1790	13475	1095	3300	19399	-0.052	0.049	-0.058	-0.039	0.100						
		D4	1140	2962	1849	4117	4504	-0.048	0.001	-0.029	0.032	0.043	1140	2962	1849	4117	4504	-0.048	0.001	-0.029	0.032	0.043						
		D5	1390	1020	1572	1919	807	0.002	-0.016	0.011	0.028	-0.026	1390	1020	1572	1919	807	0.002	-0.016	0.011	0.028	-0.026						
B2	C2	D6	30.36	56.09	58.55	53.76	53.36	-0.080	0.023	0.032	0.013	0.012	30.36	56.09	58.55	53.76	53.36	-0.080	0.023	0.032	0.013	0.012						
		D7	18.37	46.10	46.27	42.94	43.69	-0.045	0.014	0.014	0.007	0.009	18.37	46.10	46.27	42.94	43.69	-0.045	0.014	0.014	0.007	0.009						
		D8	11.63	42.74	41.81	40.13	39.97	-0.025	0.008	0.007	0.005	0.005	11.63	42.74	41.81	40.13	39.97	-0.025	0.008	0.007	0.005	0.005						
		D9	4804	22813	12817	8220	34014	-0.090	0.048	-0.028	-0.064	0.134	4804	22813	12817	8220	34014	-0.090	0.048	-0.028	-0.064	0.134						
		D10	4236	12549	30053	19072	19916	-0.068	-0.024	0.068	0.010	0.014	4236	12549	30053	19072	19916	-0.068	-0.024	0.068	0.010	0.014						
B3	C3	D11	11398	7895	34515	14638	6047	-0.008	-0.017	0.048	-0.001	-0.021	11398	7895	34515	14638	6047	-0.008	-0.017	0.048	-0.001	-0.021						
		D12	0.58	1.29	0.21	0.80	0.55	-0.099	-0.007	0.083	-0.064	0.087	0.58	1.29	0.21	0.80	0.55	-0.099	-0.007	0.083	-0.064	0.087						
		D13	1.46	2.35	0.88	1.63	1.09	-0.003	0.129	-0.101	0.024	-0.029	1.46	2.35	0.88	1.63	1.09	-0.003	0.129	-0.101	0.024	-0.029						
		D14	20.06	52.66	8.68	22.80	22.09	-0.029	0.153	-0.093	0.022	-0.058	20.06	52.66	8.68	22.80	22.09	-0.029	0.153	-0.093	0.022	-0.058						
		D15	11.13	51.19	4.94	23.25	21.20	-0.032	0.082	-0.049	0.003	-0.003	11.13	51.19	4.94	23.25	21.20	-0.032	0.082	-0.049	0.003	-0.003						
B3	C4	D16	8.01	45.73	4.88	23.59	20.91	-0.022	0.043	-0.027	0.005	0.000	8.01	45.73	4.88	23.59	20.91	-0.022	0.043	-0.027	0.005	0.000						
		D17	13.77	43.82	9.34	17.04	14.93	-0.040	0.160	-0.069	-0.018	-0.032	13.77	43.82	9.34	17.04	14.93	-0.040	0.160	-0.069	-0.018	-0.032						
		D18	6.78	31.25	7.53	15.89	13.44	-0.042	0.083	-0.038	0.005	-0.008	6.78	31.25	7.53	15.89	13.44	-0.042	0.083	-0.038	0.005	-0.008						
		D19	5.83	24.57	6.21	14.41	8.70	-0.022	0.045	-0.020	0.009	-0.011	5.83	24.57	6.21	14.41	8.70	-0.022	0.045	-0.020	0.009	-0.011						
			固土指数													固土指数												

各指标名称采用层次结构模型中的标号表示

旱和夏季暴雨时期,柠条根系固土指数最高,分别为 0.529 和 0.669;白沙蒿仅高于沙棘,但仍低于平均水平,分别为-0.113 和-0.378。从而说明,仅有较好的界面摩阻特性并不能显著提高植物根系的固土能力,尽管本质上讲,根系所受的剪切力和抗拉力是由根系粗糙表面与土粒之间镶嵌作用产生的摩擦力提供的<sup>[19]</sup>,但抗拉力学特性才是保证植物根系具有较强固土抗蚀能力的前提条件,若根系的抗拉力学特性较差,微小的拉伸变形就使根系发生断裂,即便根系表面具有较高的粗糙程度,也无法显著提高土体对滑移的抵抗力,仍会降低土体的力学强度,造成浅层软弱、松动、不稳定土体的离层滑落。结合上述分析与本文的研究结果,最终得出:根系的抗拉力学特性是制约植物根系固土的主导力学因素,其次是根-土界面摩阻特性,最后为根-土复合体抗剪特性。

目前,有关干旱、半干旱地区固土抗蚀植物种筛选的研究尚处于探索阶段,如何对植物的固土抗蚀能力进行评价缺乏系统和完整的方法。基于此,本文针对春季土壤干旱与夏季暴雨两种自然条件,从根系力学特性的角度出发,将主成分分析法与层次分析法相结合,对五种植物根系固土能力的差异性进行评价。结果显示,根系固土指数在春季土壤干旱时期为:柠条(0.763)>沙柳(0.384)>白沙蒿(-0.141)>沙地柏(-0.186)>沙棘(-0.821);夏季暴雨时期分别为:柠条(0.876)>沙地柏(0.218)>沙柳(0.065)>白沙蒿(-0.404)>沙棘(-0.755)。因此,对于地表扰动大、地下水破坏严重且土壤水分亏缺的采煤塌陷区来说,柠条和沙柳可作为重要的水土保持参考树种;对受水力侵蚀较为严重的地区而言,柠条和沙地柏是抗冲、抗蚀的理想植物种。

综上所述,抗拉力学特性是制约植物根系固土的主导力学因素,侵蚀区在筛选固土抗蚀植物种时,应尽量选择根系抗拉力学特性较好的植物。五种内蒙古干旱、半干旱地区常见的水土保持植物中,柠条根系的抗拉力学特性明显优于其他植物,可作为侵蚀区首选的固土抗蚀植物。

**致谢:**由衷的感激导师刘静教授在论文撰写过程中的指导与启发,感激同门的支持与帮助。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Bourrier F, Kneib F, Chareyre B, Fourcaud T. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 646-657.
- [ 2 ] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *CATENA*, 2011, 84(1/2): 70-78.
- [ 3 ] 陆桂红, 杨顺, 王钧, 欧国强. 植物根系固土力学机理的研究进展. *南京林业大学学报*, 2014, 38(2): 151-156.
- [ 4 ] 钟贞明, 桂勇, 罗嗣海, 邓通发, 周军平. 植物护坡对边坡稳定性作用机理研究综述. *路基工程*, 2013, (6): 1-7.
- [ 5 ] 吕春娟, 陈丽华. 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 69-78.
- [ 6 ] 苑淑娟, 牛国权, 刘静, 张欣, 邢会文, 姚喜军. 瞬时拉力下两个生长期 4 种植物单根抗拉力与抗拉强度的研究. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 21-25.
- [ 7 ] 廖晶晶, 罗绪强, 罗光杰, 魏华炜. 三种护坡植物根-土复合体抗剪强度比较. *水土保持通报*, 2013, 33(5): 118-122.
- [ 8 ] 邢会文, 刘静, 王林和, 姚喜军, 王成龙, 张永亮, 周丹丹. 柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性. *摩擦学学报*, 2010, 30(1): 87-91.
- [ 9 ] 孙向阳. *土壤学*. 北京: 中国林业出版社, 2005: 118-121.
- [ 10 ] 于秀林, 任雪松. *多元统计分析*. 北京: 中国统计出版社, 1999: 154-156.
- [ 11 ] 王珠娜, 史玉虎, 潘磊, 陈磊夫, 高新涛. 层次分析法在退耕还林生态效益评价指标体系建立中的应用. *湖北林业科技*, 2007, (3): 1-4.
- [ 12 ] 邢会文, 姚喜军, 刘静, 王林和, 耿威. 4 种植物代表根的研究. *内蒙古农业大学学报*, 2008, 29(4): 22-25.
- [ 13 ] 王庠. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响. *土壤与环境*, 2001, 10(3): 250-252.
- [ 14 ] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性. *生态学报*, 2006, 26(10): 3270-3275.
- [ 15 ] 张颖, 牛健植, 谢宝元, 余新晓, 朱建刚, 李维. 森林植被对坡面土壤水蚀作用的动力学机理. *生态学报*, 2008, 28(10): 5084-5094.
- [ 16 ] 杜钦, 杨淑慧, 任文玲, 仲启铨, 王开运. 植物根系固岸抗蚀作用研究进展. *生态学杂志*, 2010, 29(5): 1014-1020.
- [ 17 ] 王萍花, 陈丽华, 冀晓东, 周朔, 吕春娟, 蒋坤云. 白桦根系力学特性的定量研究. *水土保持通报*, 2011, 31(4): 154-158.
- [ 18 ] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 宋恒川, 盖小刚, 冀晓东, 张心平. 油松根系固土的基本力学特性. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 17-20, 25-25.
- [ 19 ] 黄晓乐, 许文年, 夏振尧. 植被混凝土基材 2 种草本植物根-土复合体直剪试验研究. *水土保持研究*, 2010, 17(4): 158-161, 165-165.