

砒砂岩区不同灌木根系构型及根系抗拉对比

郭月峰¹, 张志强¹, 祁伟²

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2.内蒙古自治区水利事业发展中心, 呼和浩特 010020)

摘要: 对砒砂岩区各主要灌木树种根系形态进行定量研究, 探究哪种水土保持植物可以有效地抵抗砒砂岩区的复合型侵蚀, 以该区分布较广的灌木树种沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、酸枣(*Ziziphus juba* M.)、连翘(*Forsythia suspensa* V.)、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* B.)、黄刺玫(*Rosaxanthina* L.)和蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica* R.)单株个体为研究对象, 对其根系分布范围、几何形态、拓扑指数、单根力学特性, 降维进行综合分析, 筛选出在砒砂岩地区固土效果较好的灌木植物。结果表明: (1) 文冠果和连翘以倾斜根为主, 沙棘、酸枣、黄刺玫和蒙古扁桃以水平根为主; 细根长文冠果(2 368.54 cm) > 沙棘(1 746.12 cm) > 黄刺玫(1 463.15 cm) > 蒙古扁桃(1 162.81 cm) > 酸枣(928.69 cm) > 连翘(817.45 cm); 文冠果拓扑指数 0.54 且根系呈叉状分支结构; 连翘拓扑指数 0.71 且呈鱼尾型分支结构。(2) 根系平均抗拉强度文冠果(30.45 MPa) > 黄刺玫(18.21 MPa) > 连翘(17.03 MPa) > 蒙古扁桃(16.62 MPa) > 酸枣(16.34 MPa) > 沙棘(15.35 MPa)。基于主成分分析法对不同灌木树种根系固土效应进行对比, 其中, 文冠果的综合主成分指标最高达到 2.28, 则综合固土效果最好。研究结果可为砂岩地区选出适宜的土保持灌木, 同时为灌木林的可持续发展提供理论参考。

关键词: 砒砂岩区; 根系构型; 单根抗拉; 拓扑系数; 固土能力

中图分类号: S728.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0273-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.035

Comparison of Root Structure and Root Tensile Resistance of Different Shrubs in Arsenic Sandstone Area

GUO Yuefeng¹, ZHANG Zhiqiang¹, QI Wei²

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2. Department of Soil and Water Conservation, Inner Mongolia Water Conservancy Development Center, Hohhot 010020)

Abstract: The root morphology of the main shrub species in the arsenic sandstone area was quantitatively studied to explore which soil and water conservation plants could effectively resist the composite erosion of the arsenic sandstone area, and the shrub species *Hippophae rhamnoides* L., *Ziziphus juba* M., *Forsythia suspensa* V., *Xanthoceras sorbifolium* B., *Rosaxanthina* L. and *Amygdalus mongolica* R. was the research object, and the root distribution range, geometric morphology, topological index, mechanical characteristics of a single root, and dimensionality reduction were comprehensively analyzed, and shrub plants with good soil consolidation effect in arsenic sandstone area were screened. The results showed that: (1) Oblique roots were the main ones for *Xanthoceras sorbifolium* B. and *Forsythia suspensa* V., while horizontal roots were dominated by *Hippophae rhamnoides* L., *Ziziphus juba* M., *Rosaxanthina* L. and *Amygdalus mongolica* R.; Thin roots and long roots, *Xanthoceras sorbifolium* B. (2 368.54 cm) > *Hippophae rhamnoides* L. (1 746.12 cm) > *Rosaxanthina* L. (1 463.15 cm) > *Amygdalus mongolica* R. (1 162.81 cm) > *Ziziphus juba* M. (928.69 cm) > *Forsythia suspensa* V. (817.45 cm), longythia topological index of 0.54 and fork-shaped branch structure, forsythia topological index of 0.71 and fishtail-shaped branching structure. (2) Average tensile strength of roots, *Xanthoceras sorbifolium* B. (30.45 MPa) > *Rosaxanthina* L. (18.21 MPa) > *Forsythia suspensa* V. (17.03 MPa) > *Amygdalus mongolica* R. (16.62 MPa) > *Ziziphus juba* M. (16.34

收稿日期: 2022-11-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(31960329); 内蒙古自然科学基金项目(2022MS03029); 内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2021GG0085); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(BR22-15-01); 鄂尔多斯重点研发项目(2021EEDSCXQDFZ011); 鄂尔多斯技术攻关项目(2021YY 社 106-55)

第一作者: 郭月峰(1982—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: guoyuefeng0525@126.com

通信作者: 郭月峰(1982—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: guoyuefeng0525@126.com

MPa) $>$ *Hippophae rhamnoides* L. (15.35 MPa). Based on the principal component analysis method, the root soil consolidation effect of different shrub species was compared, and the comprehensive principal component index of the *Xanthoceras sorbifolium* Bunge. reached 2.28, which was the best comprehensive soil consolidation effect, which could select suitable soil conservation shrubs for sandstone areas and provide theoretical reference for the sustainable development of shrub forests in this area.

Keywords: arsenic sandstone area; root configuration; single anti-tension; topological coefficients; ability to consolidate soil

内蒙古砒砂岩区是黄土高原乃至世界水土流失最为严重的地区之一,属于我国典型的风水复合侵蚀区,处于全球变化的敏感带。由于砒砂岩具有无水坚硬如石、遇水松软如泥独特性质,加之地区气候干燥,不仅造成黄河下游河道严重泥沙淤积,而且还引发系列的重大生态环境问题^[1]。近年来,关于砒砂岩区环境治理的研究主要集中在生态修复方面^[2],结果不仅改善地区水土流失现状,也对当地的经济发展有促进作用。

从 20 世纪 80 年代至今,对于砒砂岩治理主要以生态修复为主,沙棘和油松在砒砂岩区生态修复出色^[1],也促进当地经济发展。生态修复通过种植水土保持植物达到固持水土作用^[3],用植物根系固持土壤,阻止水土流失、改善土壤环境和改善区域小环境^[4]。植物根系是植物水分和养分传导通道^[5],根系的生长在土壤中受到空间异质性和自身基因的影响^[6],根系构型就是植物根系在土壤中生长情况的直观体现,不仅反映植物根系对土壤环境的生长适应情况而且还体现根系的固土效果,所以,植物根系构型的研究就显得十分重要。植物根构型指根系在生长介质中的形态特征、拓扑结构、几何分布和空间位置。由于根构型特征在很大程度上决定着根系整体在土壤加固中的作用,因此,对根构型特征定量描述是研究者们想要得到解决的问题。为定量描述植物根构型的数量化指标,在对根构型进行研究过程中,目前,能够很好体现根构型特征的指标一般为根系长度、根表面积、根体积、直径、根数、根系分布范围、根系倾斜角度、根重、拓扑指数以及根系结构类型等^[7]。植物根系的固土效果主要以根系的材料力学特性和根—土复合体的力学特性为主,从力学角度出发研究植物抵抗根变形和根—土变形的能力^[8],随着生态修复技术研究的推进,根系构型也成为研究植物综合固土效果的重要内容。

目前,关于砒砂岩区植物固土保水效果的研究报道较少,多集中在固土力学方面,不能较全面反映植物的固土能力,拟将地区分布较广的耐旱灌木树种沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、酸枣(*Ziziphus jujuba* M.)、连翘(*Forsythia suspensa* V.)、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* B.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* L.)和蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica* R.) 6 种

灌木根系构型的形态表征和单根抗拉力学特性进行量化处理,得到根系构型和单根抗拉力学特性的共 18 个指标数据,运用主成分分析法,分析指标数据对根系固土效果影响,并综合分析 6 种植物的根系固土效果,构建植物的综合评价模型,比较耐旱灌木树种的固土效果,研究结果可丰富砒砂岩区灌木林固土保水的内容,选出适宜砒砂岩地区种植的水土保持灌木,为该地区灌木林的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样本选择

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡砒砂岩区水土保持科技示范区(39°42′—39°50′N, 110°25′—110°48′E),该地区属于典型的中温带半干旱大陆性季风气候,四季分明,太阳辐射强烈,日照时间长,平均日照时间为 2 900~3 100 h。年均降水量约 400 mm,年均蒸发量约 2 093 mm,年平均气温为 6.2~8.7 ℃,年总辐射值为 143.4 kCal/m²。区域内春季风力大、持续时间较长,年平均风速 3.2 m/s,最大风速为 32 m/s,年平均大风天数为 10~30 天^[9]。该地区地貌沟壑较多,土壤侵蚀严重,水土流失严重,地带性土壤类型主要是栗钙土,并有少量的为黄绵土和风沙土,区域内分布砒砂岩景观。该地区植被以人工林为主,主要造林树种为沙棘、油松、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* K.)和山杏等。主要草本植物主要为茵陈蒿(*Artemisia capillaris* T.)、藜(*Chenopodium album* L.)、羊草(*Leymus chinensis* T.)、百里香(*Thymus mongolicus* R.)、披碱草(*Elymus dahuricus* T.)等为主。

通过资料查询和实地调研选择砒砂岩区种植的 6 种耐旱灌木树种,分别为沙棘、酸枣、连翘、文冠果、黄刺玫和蒙古扁桃(表 1)。

表 1 植物基本信息

植物名称	科	属	拉丁文
沙棘	胡颓子科	沙棘属	<i>Hippophae rhamnoides</i> .
酸枣	鼠李科	枣属	<i>Ziziphus jujuba</i> Mill.
连翘	木犀科	连翘属	<i>Forsythia suspensa</i> V.
文冠果	无患子科	文冠果属	<i>Xanthoceras sorbifolium</i> Bunge.
黄刺玫	蔷薇科	蔷薇属	<i>Rosa xanthina</i> Lindl.
蒙古扁桃	蔷薇科	桃属	<i>Amygdalus mongolica</i> (Maxim.) Ricker.

1.2 试验根采集与制备

(1)试验根的采集。在砒砂岩区水土保持科技示范区内,选择人工种植的沙棘、酸枣、连翘、文冠果、黄刺玫和蒙古扁桃人工林,6种灌木均在温室培养1年后,将大苗移植在室外,大苗移植时间为2020年7—8月,且移植样地兼顾生长环境、立地条件和管护措施条件基本一致。对6种灌木随机选取的3个16 m×16 m的试验样方,每个样方按照对角线选取3株植物,测量其株高、冠幅、地径。选取每组数据的平均值,确定6种灌木的标准株。表2为标准株调查情况。

表 2 标准株地上调查

标准株	基径/mm	株高/cm	冠幅/cm	枝重/g
沙棘	14.13±1.12	59.50±6.14	42.47±7.65	174.24±10.34
酸枣	9.47±0.45	45.83±3.26	32.08±4.31	142.37±13.21
连翘	13.96±1.34	37.32±5.26	30.84±5.94	134.26±9.64
文冠果	23.16±1.19	46.64±7.98	52.34±10.97	203.19±16.18
黄刺玫	19.78±0.89	32.29±6.34	44.30±8.53	156.96±9.41
蒙古扁桃	9.64±0.74	40.36±9.59	56.12±6.32	176.82±7.52

注:表中数据为平均值±标准差。

6种灌木的根采集于2021年7月,根系的采集主要用于收集根系构型数据和调查根系的分布范围。样方里选择与标准株地上形态部分相似的植株挖掘,每种灌木挖掘3~4株,根系挖掘前2 h对每个样方进行浇水浸湿基质,作用是方便根系挖掘,防止根系取样时断裂。然后利用螺丝刀、镊子、小刷子等工具,将植株的地上部分从基部剪切,以主根为基点,半径30 cm除去表层5—8 cm的土壤和草本植物,从植株主根开始延伸挖掘,由内向外,由浅向深,挖掘时避免损伤根皮和细根,保持根系的完整性,如有根系断裂,拍照标记好位置并将根系放入自封袋中。整根挖掘过程中定时对暴露的根系喷洒水,避免根系因脱水失活,从而影响到根系形态,将挖掘出的整根放置于低温培养箱带回实验室,水流冲洗掉根际土,用于做根系扫描试验。

6种灌木的力学试验根采集时间为2021年8—10月,选择生长状态良好,以地径为中心,从1个方向挖掘,将暴露的根选择根径1~5 mm剪切下来,放置在黑色塑料中,覆上一些根际土,每隔一定时间进行喷水,保持湿润,用低温培养箱保存运输,试验根系在实验室保存于4℃和90%湿度的恒温箱。

(2)试验根的制备。制备试验根之前先去除根皮受损脱落、颜色变化的死根,并将较为平直、根径均匀的根按照试验长度进行剪切,抗拉试验测试的根共需要9 cm,两端夹具各需2 cm的根用于夹持固定,拉伸测试长度为5 cm。统计力学试验根的总数量以及粗根、细根和中根的数量。依据根径选择适合的固定

夹具,由于试验仪器夹具为金属材质,夹紧容易损伤根系,导致根系在夹紧处断裂,夹松试验根易滑落导致数据不准,为提高试验准确率在根系夹持部位缠绕医用胶布增加摩擦力^[10]。由于根系的直径沿根轴向生长存在粗细变化,为减小误差,采用试验根两端和根中3个部位的直径,取平均值作为该段根系的直径^[11]。为确保试验的准确性,只有试验的根系在中间断裂的数据有效。

1.3 根系构型特征的调查

1.3.1 根系基础数据 利用EPSON10000XL根系扫描仪对6种灌木根系进行扫描,通过根系分析软件WinRHIZOProLA2004对植物整根和不同径级的根长、根表面积、根体积等基础数据进行统计。依据根径分类法,0<根径≤2 mm的根为细根,2<根径≤5 mm的根为中根,根径>5 mm为粗根,进行分类统计。

1.3.2 根系的拓扑结构 根系的拓扑结构分为鱼尾型分支和叉状分支2种模式(图1),拓扑指数表达式:

$$TI = \lg A / \lg M \tag{1}$$

式中:A为最长通道(连接最多的通道)的内部连接数;M为外部连接总数;TI为拓扑指数,TI的值越接近1表明A和M是近似相等的,即根系分支较少,根系越近似鱼尾型分支结构,越接近0.5表明根系存在相对更多的外部连接,根系越近似叉状分支结构^[12]。

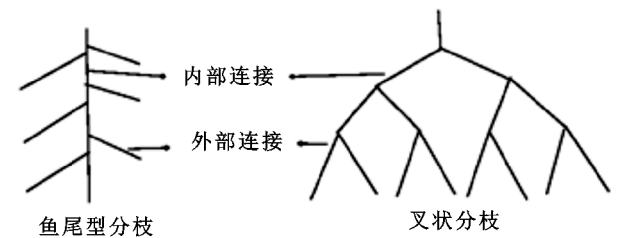


图 1 根系拓扑结构示意图

1.3.3 根系的分布范围 原位挖掘出完整根系后,对根系的最大根幅分布范围和主要根幅分布范围进行原位测量,对根系生长的最大深度和主要生长深度进行测量。

1.4 根系单根抗拉的测定

单根抗拉试验仪器选择江都市天源试验机械有限公司生产的TY8000伺服控制材料试验机,力量传感器检测范围为0.1 N~50 KN(20 t)。力量精度在0.005%。根系抗拉试验为垂直拉伸,将根系自然垂直固定于仪器夹具上,试验根根径范围为1~5 mm,初始拉伸距离设置为5 mm,拉伸类型设置为弹性拉伸,拉伸速率为50 mm/min。共对6种植物共360个单根进行拉伸试验,根系拉伸试验成功共194个,成功率为53.89%。具体根系试验数据如见表3。

单根抗拉强度计算公式为:

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

式中: P 为抗拉强度(MPa); F 为最大抗拉力(N); D 为单根直径(mm)。

表 3 根系抗拉试验成功率 单位:个

植物种	试验有效 根数	中根有效 根数	粗根有效 根数	细根有效 根数
沙棘	33	0	8	25
酸枣	31	3	9	19
连翘	35	2	12	21
文冠果	26	0	8	18
黄刺玫	32	3	8	21
蒙古扁桃	37	1	7	29

1.5 数据分析

试验数据使用 Excel 2017 软件采集统计和制表,使用 Origin 2021 软件制图。将根系构型相关数据和根系材料力学相关数据通过 IBM SPSS Statistics 22.0 软件对数据进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 根系空间分布特征参数

根的空间分布特性指根在水平方向和垂直方向

表 4 不同树种根系空间分布特征

树种	主要根幅/mm	主要根深/mm	根宽深比	水平根	垂直根	倾斜根	总基根数
沙棘	570±16.00Aa	230±11.00Bc	2.48±0.24Da	16±1.52CDb	5±1.00Dbc	3±1.52Dcd	24±4.58Cbc
酸枣	450±13.05Abc	320±4.50Bb	1.41±0.80Db	8±1.52De	6±2.08Db	4±2.00De	18±3.51Ccd
连翘	260±9.00Bd	310±3.90Aa	0.84±0.60Dc	3±1.32CDc	2±1.05De	9±2.06CDb	15±2.46Cd
文冠果	450±15.00Bbc	590±15.00Ab	0.76±0.52Dc	9±1.56De	13±3.08Da	19±4.01Da	41±5.64Ca
黄刺玫	480±14.00Ab	310±9.50Bb	1.55±0.17Db	12±1.23CDb	9±2.86Dab	6±1.03Dcd	27±3.47Cb
蒙古扁桃	420±12.00Ac	300±9.60Bb	1.40±0.20Db	12±1.56CDb	8±2.30CDab	2±0.89Dd	21±4.23Ccd

注:同行不同大写字母表示同一树种不同径级间差异显著,同列不同小写字母表示同一径级不同树种间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 根系几何形态特征参数

根的长度、表面积、体积等参数通常被用来表示土壤的几何形态,其作用是直接影响根土界面的面积,从而影响植物对水分、养分的吸收效率,以及对土壤的固持性^[14]。由表 5 可知,沙棘、文冠果的总根长比其他灌木都要高;黄刺玫和蒙古杏仁的总根长均比酸枣、连翘高出许多。从粗根根长来看,以酸枣粗根最短,而文冠果的粗根根长最长,明显高于其他灌木;从中根的根长来看,以连翘的根长为最短,而沙棘的中根最长。从细根根长来看,以连翘为最小,而以文冠果为最大,与其他灌木有明显的差异。砒砂岩地区灌木随着根直径的增加,根长呈下降趋势,细根根长约占总根长的 71%~84%,细根根长显著大于中根和粗根,表明细根是根系总长的主要贡献者。

由表 6 可知,文冠果的总根表面积最大,比其他灌木都要高,而连翘的根表面积最低,比其他灌木都要低。结果表明,在相同直径的不同灌木之间,文冠果的粗根、中根和细根的表面积都明显大于其他灌木。除了酸枣的中根表面积比其粗根大,砒砂岩区其他灌木根表面积都随着根直径的增加而减少,其中细根表面积占总根表

上的分布范围以及与土壤表面的倾角,不仅决定植物个体的地下营养空间,还影响到根与剪切面之间的夹角,从而对土壤固土能力产生影响^[13]。由表 4 可知,砒砂岩区各主要灌木主根宽度为 260~570 mm,其中,以沙棘最大,比酸枣、连翘、文冠果、黄刺玫和蒙古杏仁高;根深度为 230~590 mm,以文冠果的根系深度明显高于其他灌木。从根宽深比来看,连翘、文冠果的根宽深比分别为 0.84 和 0.76,均 <1 ,说明在纵向上具有明显的优势;沙棘、酸枣、黄刺玫、蒙古杏仁根宽深比都超过 1,说明在横向上具有明显的优势。

不同灌木每株总根数为 15~41 条,以文冠果的根基总数最大,显著高于沙棘、酸枣、连翘、黄刺玫和蒙古扁桃,其中连翘的根基总数最小。通过对 6 种灌木的水平根、倾斜根、垂直根的数量关系的研究发现,文冠果和连翘的倾斜根数量明显大于其水平根和垂直根的数量,呈现出以倾斜根为主,纵向发展的优势;而沙棘、酸枣、黄刺玫和蒙古扁桃的水平根数量明显大于各自的倾斜根和垂直根的数量,呈现出以水平根为主,横向发展的优势。

面积的 42%~77%,细根表面积明显大于中根和粗根,表明细根是根系总长的主要贡献者。

由表 7 可知,砒砂岩地区主要灌木的总根体积存在显著差异,以文冠果总根体积最大,显著高于其他灌木,连翘的总根体积最小。结果表明,在相同直径的不同灌木之间根体积上,文冠果的粗根、中根和细根体积最大,比其他灌木的根体积都高。在相同灌木的不同径级间根体积上,除酸枣和蒙古扁桃树种内细根体积低于中根体积外,其他灌木根的体积随着根直径的减少而增大;细根体积占总体积的比重为 38%~57%。

2.3 根系拓扑系数

由图 2 可知,6 种植物的根系拓扑指数从大到小依次为酸枣>沙棘>连翘>蒙古扁桃>黄刺玫>文冠果,其中酸枣的拓扑指数最大,均值为 0.82,而文冠果的拓扑指数最小,均值为 0.54。沙棘、酸枣和连翘的植物根系拓扑指数接近 1,表明根系结构比较单一,根系越接近鱼尾型分支。文冠果、黄刺玫和蒙古扁桃的根系拓扑指数均在 0.60,根系分支较多,根系接近叉状分支结构。

表 5 不同树种根系各径级根长

树种	粗根		中根		细根		总根长/cm
	根长/cm	占比/%	根长/cm	占比/%	根长/cm	占比/%	
沙棘	86.17±1.44Dc	4.0	621.47±9.00Ca	25.0	1746.12±22.84Bbc	71.0	2453.76±47.93Ab
酸枣	63.04±1.34Bd	6.0	143.12±2.11Be	13.0	928.69±10.94Ad	82.0	1134.85±67.78Ad
连翘	64.35±1.56Cd	6.0	108.71±2.79Cf	11.0	817.45±18.34Bd	83.0	990.51±28.97Ad
文冠果	165.45±2.81Da	6.0	426.65±3.45Cb	14.0	2368.54±33.54Ba	80.0	2960.64±90.34Aa
黄刺玫	65.16±1.49Dd	4.0	220.47±2.03Cd	13.0	1463.15±9.88Bb	84.0	1748.78±50.76Ac
蒙古扁桃	125.22±2.13Db	8.0	345.45±2.46Cc	21.0	1162.81±6.87Bc	71.0	1633.48±45.31Ac

表 6 不同树种根系各径级根表面积

树种	粗根		中根		细根		总根表 面积/cm ²
	根表面积/cm ²	占比/%	根表面积/cm ²	占比/%	根表面积/cm ²	占比/%	
沙棘	27.45±6.65Dc	5.0	116.39±12.56Cc	19.0	462.56±33.56Bb	76.0	606.40±50.86Ab
酸枣	34.87±5.25Cb	11.0	152.64±13.28Bb	47.0	136.17±15.26Bf	42.0	323.68±20.46Ae
连翘	21.32±2.86Dc	9.0	60.47±10.49Ce	25.0	164.65±9.54Be	67.0	246.44±18.54Af
文冠果	79.65±6.69Da	8.0	387.47±48.65Ca	40.0	502.16±60.58Ba	52.0	969.28±90.57Aa
黄刺玫	32.24±2.46Db	8.0	89.48±23.58Cd	22.0	278.93±20.47Bd	70.0	400.65±21.48Ad
蒙古扁桃	34.73±4.28Db	7.0	81.91±19.84Cd	16.0	386.54±48.51Bc	77.0	503.18±55.46Ac

表 7 不同树种根系各径级根体积

树种	粗根		中根		细根		总根 体积/cm ³
	根体积/cm ³	占比/%	根体积/cm ³	占比/%	根体积/cm ³	占比/%	
沙棘	2.89±0.14Cc	9.0	14.63±4.46Ba	45.0	15.24±4.58Bb	47.0	32.76±7.45Ab
酸枣	2.86±0.23Dc	16.0	8.02±2.24Bb	46.0	6.68±3.47Cd	38.0	17.56±6.85Ac
连翘	2.56±0.45Dc	17.0	5.52±1.56Cc	36.0	7.26±3.56Bd	47.0	15.34±4.87Ad
文冠果	5.95±1.12Da	15.0	15.21±3.98Ca	38.0	18.56±6.01Ba	47.0	39.72±6.04Aa
黄刺玫	2.57±0.56Dc	14.0	5.26±2.76Cc	29.0	10.35±3.14Bc	57.0	18.18±3.32Ac
蒙古扁桃	4.23±0.84Db	14.0	14.42±5.47Ba	48.0	11.21±2.17Cc	38.0	29.86±4.58Ab

2.4 根系抗拉力与抗拉强度

根系抗拉力学特性作为根系固土力学的重要指标^[15]。由图 2 可知,连翘根系平均抗拉力为 44.92 N,文冠果根系平均抗拉力为 124.28 N,黄刺玫根系平均抗拉力为 66.56 N,蒙古扁桃根系平均抗拉力为 71.78 N,沙棘根系平均抗拉力为 63.79 N,酸枣根系平均抗拉力为 65.93 N。文冠果根系平均拉力显著高于其他树种,连翘根系平均抗拉力最小。

根系最大抗拉强度是根在均匀拉伸速率条件下,测量的抵抗最大塑性变形的抗性^[16]。植物根系抗拉强度体现根系自身抵抗外力的能力和根系形成的网格作用对土壤束缚能力^[17]。由图 3 可知,连翘、文冠果、黄刺玫、蒙古扁桃、沙棘、酸枣根系平均抗拉强度为 17.03,30.45,18.21,16.62,15.35,16.34 MPa。文冠果根系平均抗拉强度显著高于其他树种,沙棘根系平均抗拉强度最小。

2.5 基于主成分分析法的植物根系固土效果对比

主成分分析选取根系构型中根系生长的主要根幅、根系生长的主要深度、细根根长、中根根长、粗根根长、细根根体积、中根根体积、粗根根体积、细根根表面积、中根根表面积、粗根根表面积、总基根数、垂直根数、水平根数、倾斜根数、单根平均抗拉力、单根平均抗拉强度、拓扑系数共计 18 个与固土能力呈正向线性相关的指标,设为 $X_i(i=1,2,3,\cdots,18)$,通过主成分分析得到表 8。以初始特征值 >1 为提取标准,第 1 主成分的特征值和方差贡献率分别为 11.278%和 62.657%,第 2 主成分的特征值和方差贡献率分别为 3.834%和 21.300%,第 3 主成分的特征值和方差贡献率分别为 1.533%和 8.514%,前 3 个成分的累计方差贡献率达到 92.471%,已遵循“累计方差贡献率 $\geq 85\%$ ”的标准。因此,选取

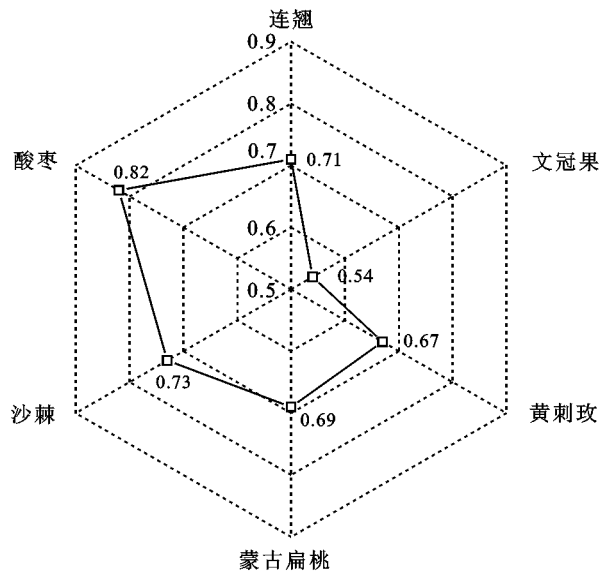
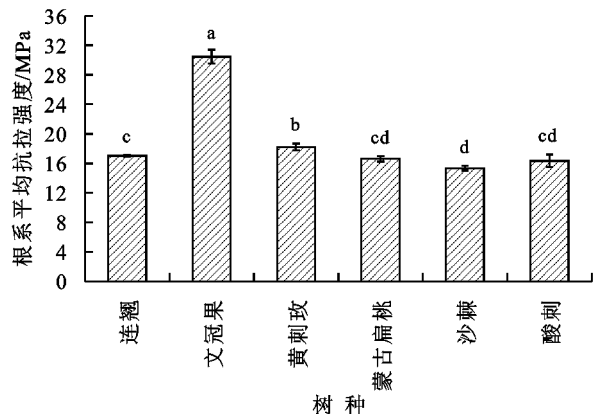


图 2 6 种植物根系拓扑指数

前 3 个主成分作为评价护坡植物各指标数据分析的



注:不同字母表示不同树种间差异显著($p < 0.05$)。

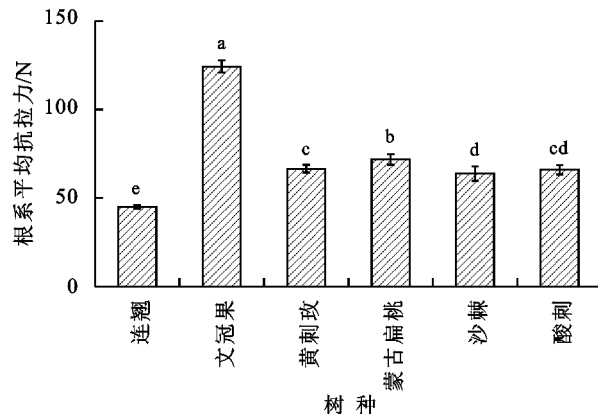
图 3 6 种植物根系平均抗拉强度与抗拉力

在主成分载荷矩阵中,载荷系数绝对值越大,表示主成分的贡献率越大。由表 9 可知,主要根幅、根系生长的主要深度、细根根长、中根根长、粗根根长、细根根体积、中根根体积、粗根根体积、细根根表面积、中根根表面积、总基根数、垂直根数、水平根数、倾斜根数,在第 1 主成分上有较高载荷,说明第 1 主成分基本反映了这些指标的信息;中根根表面积、总基根数、垂直根数、倾斜根数、单根平均抗拉力、单根平均抗拉强度、拓扑系数在第 2 主成分上有较高载荷,说明第 2 主成分基本反映了这些指标的信息;中根根体积、中根根表面积、拓扑系数主要分布范围在第 3 主成分上有较高载荷,说明第 3 主成分基本反映了这些指标的信息。所以提取 3 个主成分是可以基本反映全部指标的信息,即可用 3 个新变量来代替原来的 18 个变量。

表 8 6 种灌木指标的特征值和贡献率

成分	特征值	方差	累积方差
	总计	贡献率/%	贡献率/%
X1	11.278	62.657	62.657
X2	3.834	21.300	83.957
X3	1.533	8.514	92.471
X4	0.799	4.439	96.910
X5	0.556	3.090	100.000
X6	1.423E-15	7.903E-15	100.000
X7	6.734E-16	3.741E-15	100.000
X8	4.453E-16	2.474E-15	100.000
X9	3.259E-16	1.810E-15	100.000
X10	3.044E-16	1.691E-15	100.000
X11	7.859E-17	4.366E-16	100.000
X12	4.400E-17	2.445E-16	100.000
X13	9.374E-18	5.208E-17	100.000
X14	-1.149E-16	-6.381E-16	100.000
X15	-2.246E-16	-1.248E-15	100.000
X16	-4.583E-16	-2.546E-15	100.000
X17	-5.942E-16	-3.301E-15	100.000
X18	-1.295E-15	-7.194E-15	100.000

有效成分,它代表原有 18 个指标变量。



以用 3 个新变量代替原来的 18 个指标对护坡效果进行综合评价,则得出线性组合(其中 ZX1—ZX18 均为标准化的变量)分别为:

$$(1) F_1 = 0.287ZX1 + 0.284ZX2 + 0.279ZX3 + 0.277ZX4 + 0.274ZX5 + 0.272ZX6 + 0.271ZX7 + 0.265ZX8 + 0.256ZX9 + 0.250ZX10 - 0.249ZX11 + 0.242ZX12 + 0.214ZX13 + 0.211ZX14 + 0.087ZX15 + 0.111ZX16 + 0.177ZX17 - 0.010ZX18 \quad (3)$$

$$(2) F_2 = -0.084ZX1 - 0.039ZX2 + 0.073ZX3 - 158ZX4 + 0.143ZX5 - 0.82ZX6 - 0.04ZX7 - 163ZX8 - 0.032ZX9 + 0.244ZX10 + 0.125ZX11 - 0.294ZX12 + 258ZX13 - 0.335ZX14 + 0.446ZX15 + 0.380ZX16 + 0.370ZX17 + 0.258ZX18 \quad (4)$$

$$(3) F_3 = 0.012ZX1 - 0.176ZX2 - 0.241ZX3 + 0.008ZX4 - 0.099ZX5 + 0.290ZX6 + 0.327ZX7 - 0.116ZX8 + 0.015ZX9 + 0.044ZX10 - 0.063ZX11 + 0.026ZX12 + 0.256ZX13 - 0.122ZX14 - 0.145ZX15 - 0.359ZX16 - 0.102ZX17 + 0.670ZX18 \quad (5)$$

权数选取第 1、第 2、第 3 主成分的方差贡献率 $\alpha_1(62.657\%)$ 、 $\alpha_2(21.300\%)$ 、 $\alpha_3(8.514\%)$,构建综合评价模型:

$$F = (0.62657F_1 + 0.213F_2 + 0.08514F_3) / 0.92471 \quad (6)$$

采用主成分分析方法建立的模型与标准化数据相结合,得出 6 种不同类型的固土效应综合指数,并根据总主成分值进行排序(表 10)。综合固土效果评价为:文冠果>蒙古扁桃>沙棘>黄刺玫>酸枣>连翘(图 4),其中,文冠果的综合固土效果主成分最高,则综合固土效果最好,连翘综合排名最差。

表 9 主成分的载荷系数以及特征向量

成分	载荷系数			特征向量		
	成分 1	成分 2	成分 3	成分 1	成分 2	成分 3
X1	0.963	-0.165	0.015	0.287	-0.084	0.012
X2	0.955	-0.077	-0.218	0.284	-0.039	-0.176
X3	0.936	0.142	-0.298	0.279	0.073	-0.241
X4	0.929	-0.310	0.010	0.277	-0.158	0.008
X5	0.921	0.280	-0.123	0.274	0.143	-0.099
X6	0.912	-0.160	0.359	0.272	-0.082	0.290
X7	0.911	-0.008	0.405	0.271	-0.004	0.327
X8	0.890	-0.319	-0.144	0.265	-0.163	-0.116
X9	0.861	-0.062	0.018	0.256	-0.032	0.015
X10	0.838	0.478	0.055	0.250	0.244	0.044
X11	-0.835	0.245	-0.078	-0.249	0.125	-0.063
X12	0.812	-0.575	0.032	0.242	-0.294	0.026
X13	0.720	0.506	0.317	0.214	0.258	0.256
X14	0.708	-0.656	-0.151	0.211	-0.335	-0.122
X15	0.291	0.913	-0.180	0.087	0.466	-0.145
X16	0.373	0.744	-0.444	0.111	0.380	-0.359
X17	0.596	0.725	-0.126	0.177	0.370	-0.102
X18	0.034	0.506	0.829	0.010	0.258	0.670

表 10 6 种灌木固土效果综合评价指标

植物种	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	综合主成分
沙棘	0.42205	-0.47882	0.34693	0.19
酸枣	-1.76161	0.00058	0.58889	-1.05
连翘	-2.98701	-0.41413	0.45721	-1.92
文冠果	4.55080	0.38224	-1.36786	2.82
黄刺玫	-0.24772	-0.59948	-0.11648	-0.29
蒙古扁桃	0.02349	1.10962	0.09131	0.26

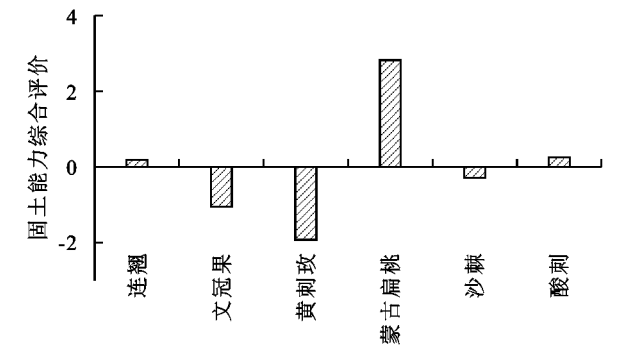


图 4 6 种灌木固土能力综合评价

3 讨论

3.1 不同树种根系构型特征的差异

本研究发现,文冠果和连翘以倾斜根为主,相对于其他灌木有较好的剪切作用,在根系纵向分布上占优,有利于深层土壤的加固;根系中的水平根通常分布在土壤的地表附近,水平根通常的作用是吸收水分和营养物质,水平根数量越多,对于资源的吸收效率就越高,对于可利用资源的范围越大。沙棘、黄刺玫、酸枣、蒙古扁桃以水平根为主,说明 4 种灌木的耐旱

性较好,在根系横向分布上占优,有利于浅层土壤的加固,适宜在砒砂岩区种植。

根长度、表面积、根体积等特征参数能够较好地反映根系在土壤中的形态与作用,是定量描述根系结构的一个重要指标^[14,18]。同时,不同灌木细根根长、根表面积占比最大,是总根长、总根表面积的主要贡献者,与朱广龙等^[19]研究结果一致。从固土的抗蚀性观点来看,细根在固持土中是加筋作用,而粗根则是锚固作用^[20]。由于文冠果的细根数量多,其根长、根表面积大,对土壤的加筋效果明显;连翘中的细根数量少、根长、根表面积都很小,对土壤的加筋效果不明显;沙棘、酸枣、黄刺玫、蒙古杏仁介于二者之间。

拓扑指数反映不同植物根系的分支模式,拓扑指数接近 1 时,根系分支为鱼尾型分支模式,若拓扑指数接近 0.5 时,根系越接近叉状分支模式。叉状分根方式在收集养分,运输效率上较高,较为适应低养环境,根系通常生长范围广,根系单根抗拉强度高,在力的传导中距离更远,表现为较强的固土能力。相反鱼尾型长期适应于高养环境,根系分布较小,养分运输效率低。文冠果、黄刺玫和蒙古扁桃 3 种灌木根系拓扑指数分别为 0.54,0.67,0.69 接近 0.5,由于根系分支较多,更容易细根之间形成网格加筋作用,固土保水能力较强,对于干旱和贫瘠的土壤环境有较强的适应能力。酸枣、沙棘和连翘 3 种灌木的根系拓扑指数分别为 0.82,0.73,0.71 靠近 1,其中酸枣的拓扑指数最接近 1,根系分布较小,养分运输效率低。

3.2 植物根系构型对固土能力的影响

植物的单根抗拉力是在植物固土力学中最常见的研究方法,是植物固土力学中最具有代表性的指标之一。平均抗拉强度是反映整根材料强度的重要指标,平均抗拉强度的大小反映抵抗根系变形和对土壤的束缚作用能力的强弱^[21]。在砒砂岩地区文冠果的根系平均抗拉力和抗拉强度显著大于其他 5 种植物。单根极限抗拉力与根径间存在明显的尺寸效应,是由于随着植物根径的增大,导致根的横截面积增加,根系韧皮部面积变化,根系木质化程度加深,以及纤维素、半纤维素和综纤维素含量的变化,使得根系根径越大抵抗坡体变形能力越强,因此,抗拉力逐渐增加,粗根具有较大的抗拉力,其单根固土的作用更为明显,在土体中主要起到锚固的作用。通过主成分分析法将植物根系构型参数与根系平均抗拉力和抗拉强度进行植物固土综合评价。其中,文冠果的综合固土效果主成分最高,则综合固土效果最好,连翘综合排名最差,由于根系的不发达影响其固土能力。

砒砂岩地区灌木随着根直径的增加,根长呈下降趋势,根表面积呈下降趋势,根体积呈上升趋势。符

合张扬等^[22]、黄广杰等^[23]研究。有研究^[24]发现,根长、根表面积越大,根际间的摩擦力也越大,根系越能稳固土体。由此可知,文冠果在总根长和总根表面积方面具有较大的优势,从而使其根土之间产生较大的摩擦并拥有更好的固土能力。嵇晓雷等^[13]认为,当植物主侧根夹角为 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,根系固土效果更好;李云鹏等^[25]研究发现,植物根系的横向倾斜角度越接近于 60° ,其根系承受的剪切破坏力越大,土体稳定性越强。本研究中,文冠果倾斜根数量明显大于其他灌木,因此,文冠果根系承受土体的剪切破坏能力和固土能力更强。

4 结论

砒砂岩区各灌木的根系结构特点不同,其根系固土能力也各不相同。从根系的空间分布来看,文冠果、连翘的根系通过拥有大量的倾斜根在垂直空间上具有明显的优势;沙棘、酸枣、黄刺玫和蒙古扁桃通过拥有较多的水平根使其根系在水平空间分布上具有明显优势。从根系几何形态和分形特征上看,文冠果细根数量较大,且根系分支复杂,总根长、总根表面积高,拓朴指数最小接近 0.5,根系成叉状分支结构;连翘的细根数量相对较少,根系分支较简单,总根长、总根表面积最低,拓朴指数接近 1,成鱼尾型分支结构,其他灌木介于以上二者之间。

文冠果根系平均抗拉力和抗拉强度分别为 124.28 N 和 30.45 MPa,显著高于其他树种,而连翘根系平均抗拉力最小为 44.92 N,沙棘的平均抗拉强度最小为 15.35 MPa。表明文冠果的根系具有较强的固土能力。基于主成分分析法对不同树种根系固土效果进行对比,文冠果的综合主成分指标最高达到 2.28,综合固土效果最好。

参考文献:

- [1] 辛军伟,尚振坤,王俊鹏,等.砒砂岩区典型坡面土壤水分空间分布特征[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):52-59.
- [2] 姚文艺,李长明,张攀,等.砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J].人民黄河,2018,40(6):1-7,65.
- [3] 聂呈荣,骆世明,章家恩,等.现代集约农业下基塘系统的退化与生态恢复[J].生态学报,2003,23(9):1851-1860.
- [4] 钟荣华,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡水库消落带 4 种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J].水土保持学报,2015,29(4):188-194.
- [5] 吴微镒.苏联植物学研究概况[J].Journal of Integrative Plant Biology,1953(4):476-523.
- [6] 薛建辉,王智,吕祥生.林木根系与土壤环境相互作用研究综述[J].南京林业大学学报(自然科学版),2002,26(3):79-84.
- [7] 伍红燕.模拟边坡条件下不同植物根构型及其单根抗拉特性研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [8] 田佳,卞莹莹,于江珊,等.贺兰山 3 种乔木单根及根土复合体力学特性[J].水土保持学报,2018,32(6):123-129.
- [9] 吴美苏,周成,王林,等.根系和裂隙对土体水力和力学特性影响数值模拟[J].岩土力学,2019,40(增刊 1):519-526,534.
- [10] 肖本林,罗寿龙,陈军,等.根系生态护坡的有限元分析[J].岩土力学,2011,32(6):1881-1885.
- [11] Tardio G, Gonzalez-Ollauri A. A non-invasive preferential root distribution analysis methodology from a slope stability approach [J]. Ecological Engineering, 2016,97:46-57.
- [12] 李长暄.林木单根力学性能及其影响因素研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [13] 嵇晓雷,杨平.夹竹桃根系分枝角度对边坡稳定性影响[J].生态环境学报,2012,21(12):1966-1970.
- [14] 嵇晓雷,杨平.夹竹桃根系形态参数及其对边坡稳定的影响[J].东北林业大学学报,2013,41(4):71-75.
- [15] 李贺鹏,岳春雷,陈友吾,等.浙南山区 6 种优势乔木植物根系的力学特性研究[J].浙江林业科技,2010b,30(3):6-11.
- [16] 朱锦奇,苏伯儒,王云琦,等.荆条根系的固土功能随土壤含水率的变化[J].林业科学,2020,56(6):202-208.
- [17] 奚灵智,王龙威,王颖,等.植被根系固土抗剪强度试验研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(4):84-89.
- [18] 伍红燕,赵倩,宋桂龙,等.平地与边坡条件下野生胡枝子根构型特征研究[J].草业科学,2019,36(7):1725-1733.
- [19] 朱广龙,邓荣华,魏学智.酸枣根系空间分布特征对自然干旱梯度生境的适应[J].生态学报,2016,36(6):1539-1546.
- [20] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. Plant and Soil, 2005, 278: 11-22.
- [21] 李姜瑶,缪晓星,王延秀,等.西宁盆地黄土区不同草本植物和坡形条件下坡面产流产沙特征[J].盐湖研究,2022,30(1):33-45.
- [22] 张扬,李程远,韩少杰,等.典型黑土区主要树种根系构型特征及其对固土能力的影响[J].应用生态学报,2021,32(5):1726-1734.
- [23] 黄广杰,段青松,李建兴,等.三江并流区水库消落带 5 种草本根系形态及抗拉特性[J].水土保持研究,2022,29(3):389-395.
- [24] 刘亚斌,余冬梅,付江涛,等.黄土区灌木柠条锦鸡儿根-土间摩擦力学机制试验研究[J].农业工程学报,2017,33(10):198-205.
- [25] 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.