

黑沙蒿根系抗拉特性及其与化学成分的相关性

胡晶华¹, 刘静¹, 李雪松², 白潞翼¹, 张欣³, 王多民⁴

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 河北省水利科学研究所, 河北 石家庄 050051; 3. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010019; 4. 阿拉善盟气象局, 内蒙古 阿拉善盟 750300)

摘要: [目的] 探讨根系抗拉特性与主要化学成分含量的关联性, 以期充实根系固土力学特性研究以及提供矿区生态恢复和植物保护的理论支持。[方法] 以神东矿区广泛分布的多年生灌木黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)为研究对象, 利用 TY8000 伺服式强力机, 研究 1~4 mm 径级直根段、含侧根分支处根段抗拉材料的力学特性并测定各径级的纤维素、半纤维素和木质素, 研究根系材料力学及其与化学成分的关联性。[结果] ①随着根系直径增加, 黑沙蒿直根段、含侧根分支处根段抗拉力增加, 而抗拉强度和杨氏模量减小, 且抗拉力、抗拉强度和杨氏模量都与根系直径呈幂函数关系。②直根段、含侧根分支处根段化学成分含量差异显著($p < 0.05$), 平均化学成分含量为: 半纤维素(31.69%, 32.18%) > 木质素(28.42%, 25.30%) > 纤维素(15.50%, 15.35%)。③随着根系直径增加, 直根段纤维素含量减小, 半纤维素和木质素含量增加, 而含侧根分支处根段纤维素含量减小, 半纤维素和木质素含量无变化。④直根段抗拉强度、杨氏模量与纤维素极显著正相关($p < 0.01$), 与半纤维素、木质素极显著负相关($p < 0.01$)。含侧根分支处根段抗拉强度、杨氏模量与纤维素极显著正相关($p < 0.01$), 与半纤维素、木质素无相关性。[结论] 黑沙蒿根系抗拉特性与化学成分表现出一定的相关性, 且纤维素是影响灌木根系材料力学特性的主要化学组分。

关键词: 直根段; 含侧根分支处根段; 抗拉强度; 杨氏模量; 化学成分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0087-07

中图分类号: Q947.6

文献参数: 胡晶华, 刘静, 李雪松, 等. 黑沙蒿根系抗拉特性及其与化学成分的相关性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 87-93. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20200821.001; Hu Jinghua, Liu Jing, Li Xuesong, et al. Relationship between root tensile properties and its responses to their chemical contents of *Artemisia ordosica* species [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 87-93.

Relationship Between Root Tensile Properties and Its Responses to Their Chemical Contents of *Artemisia Ordosica* Species

Hu Jinghua¹, Liu Jing¹, Li Xuesong², Bai Luyi¹, Zhang Xin³, Wang Duomin⁴

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2. Department of Water Resources of Hebei Province,

Shijiazhuang, Hebei 050051, China; 3. Institute of Water Resources for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 4. Alxa League Meteorological Bureau, Alxa, Inner Mongolia 750300, China)

Abstract: [Objective] The relationship between the root tensile properties and its responses to their chemical contents was discussed in order to enrich the mechanical properties of soil consolidation by root system and provide theoretical support for ecological restoration and plant protection in mining areas. [Methods] The tensile of straight roots and lateral roots of *Artemisia ordosica* in the Shendong coal mine area with diameters from 1~4 mm were measured with TY8000 servo power machine, and measure the contents of cellulose, hemicellulose and lignin of each diameter grade. [Results] ① The anti-tension force of straight roots and lateral roots of *Artemisia ordosica* were positively correlated with the diameter as a power function, the anti-tension strengths and Young modulus were negatively correlated with root diameter as a power function.

收稿日期: 2020-06-27

修回日期: 2020-08-10

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目“几种灌木根系易损荷载类型、及承受可愈合荷载时和自修复后的材料力学特性”(2018MS05004); 内蒙古自治区研究生科研创新项目(B20171012907Z)

第一作者: 胡晶华(1995—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌海市人, 硕士, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email: hujinghua111@163.com。

通讯作者: 刘静(1958—), 女(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email: ljing58@126.com。

② The contents of cellulose hemicellulose and lignin of straight roots and lateral roots present a significant difference, the average chemical content is: hemicellulose (31.69%, 32.18%) > lignin (28.42%, 25.30%) > cellulose (15.50%, 15.35%). ③ The contents of cellulose of straight roots were negatively correlated with the diameter, the hemicellulose content and lignin content of straight roots were positively correlated with the diameter, the contents of cellulose of lateral roots were negatively correlated with the diameter, the hemicellulose content and lignin content was unchanged with the diameter. ④ The anti-tension strengths and Young modulus of straight roots present a positively correlated with the contents of cellulose ($p < 0.01$), but present a negatively correlation with hemicellulose content and lignin content ($p < 0.01$). The anti-tension strengths and Young modulus of lateral roots present a positively correlated with the contents of cellulose ($p < 0.01$), but not with hemicellulose content and lignin content. [Conclusion] The root tensile properties of *Artemisia ordosica* have a certain correlation with the chemical contents, the contents of cellulose is key factors affecting the mechanical properties of the root materials of shrubs.

Keywords: straight roots; lateral roots; tensile strength; Young modulus; chemical composition

植物根系防止土体位移和变形的作用已被大量研究证明^[1]。在遭受大风拉拔、暴雨冲刷等外营力破坏时,植物根系主要受力类型是轴向拉力^[2],作为抵御土壤侵蚀的受力材料,根系轴向抗拉力、抗拉强度以及杨氏模量(拉伸弹性模量)是材料力学特征的重要指标。植物根系网由侧根分支处连接直根构成,目前,对于根系抗拉力学特性的研究主要集中于特定植物直根抗拉力和抗拉强度。大部分研究^[3-4]表明,直根抗拉力与根径呈正相关,抗拉强度与根径呈负相关,且抗拉力、抗拉强度与根径呈幂函数关系。对侧根分支处抗拉特性的研究仅有本课题组对柠条(*Caragana korshinskii*)、北沙柳(*Salix psammophila*)等植物侧根分支处与相邻直根抗拉力学差异性的相关报道^[5]。对于根系杨氏模量的研究报道较少,嵇晓雷等^[6]计算了夹竹桃(*Nerium oleander*)的杨氏模量($E_{50} = 789.62 \text{ MPa}$),Abdi等^[7]得出波斯银缕梅(*Parrotia persica*)的杨氏模量与根径呈负相关,Boldrin等^[8]提出锦熟黄杨(*Buxus sempervirens*)等木本植物的杨氏模量与抗拉强度呈显著线性相关。植物根系化学成分含量也是影响其材料力学特性的重要因素^[9],Zhang等^[10]研究表明,随着根径的增加,油松根系抗拉强度降低,根的木质素含量减小,且抗拉强度、木质素含量与根径呈幂函数关系。乔娜等^[11]研究柠条锦鸡儿和霸王根系时,发现2种灌木根系纤维素含量与根径、抗拉强度均表现出一定的相关性。Genet^[12]研究海岸松(*Pinus pinaster*)等5种植物根系时,得出根系抗拉强度随根径的增大而减小主要归因于细根单位干质量的纤维素含量大于粗根。植物种间因遗传特性和生长环境等的不同,材料力学特性的差别较大,因而作为一种生物材料所发挥的固土护坡功能也不尽相同。从根系化学成分的角度明确根系抵抗外力的强度特征和变形特点,并据此筛选抵抗特定侵蚀类型功能更强的植物种,对实现水土流

失精准防控和评价水土保持植物固土抗蚀能力具有重要意义。为此,本文以半干旱矿区常见灌木黑沙蒿为对象,研究1~4 mm根径直根段、含侧根分支处根段的抗拉力、抗拉强度和杨氏模量,以及直根段、含侧根分支处根段的纤维素、半纤维素和木质素含量,探讨根系抗拉特性与主要化学成分含量的关联性,以期充实黑沙蒿根系固土力学特性,为矿区生态恢复和植物保护提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区伊金霍洛旗与陕西省神木市接壤处的采煤塌陷治理区(110°00′—110°24′E, 39°11′—39°29′N,海拔1 000—1 250 m)。属温带半干旱大陆性气候,年平均降水量为396.8 mm。研究区内土壤类型为沙质土,砂砾含量(0.05~1.00 mm)达80%~89%,质地复杂、结构较差、易受水蚀和风蚀,适合种植耐旱抗风沙的水土保持植物。该地区常见植物种有北沙柳、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,黑沙蒿根系粗长,属于深根性轴根型植物,为良好的固沙植物之一,是该地区组成植物群落的优势种。

1.2 供试材料

于2019年7月进行试验,在研究区内选择长势良好的黑沙蒿群落,随机选取30株黑沙蒿测量株高、冠幅、地径,计算各指标的均值(株高:51±10 cm;冠幅:67±17 cm²;地径:1.2±0.2 cm)作为标准株指标,选取与标准株指标相近的植株进行采集。为防止植株死亡,采用部分挖掘法将黑沙蒿部分根系挖出并剪下放入黑塑料袋中,根系采集数量大约为800条,在根系上覆土并不断喷水,避免水分散失。带回试验室后在根际温度(4℃)下保存。

选择长势均匀的根系进行制备。黑沙蒿根系直径 < 4 mm 范围内的干重占总株的 87.22%，根长为 98.3%，表面积为 92.6%，体积为 84.45%^[13]，因此试验根径级选取为 1~4 mm。试验根总长为 120 mm 试验长度为 60 mm，两端阴影部分为夹具夹持部分。图 1 直根试验段，O 点及距 O 点 10 和 20 mm 标记点根径采用十字交叉法测量，每个标记点需测量两

次，取 5 点平均值作为该试验根的根径，并依此划分为 1~2, 2~3, 3~4 mm 共 3 个径级。图 1 含侧根分支处试验根，O 点根径需每 60° 均匀测量 3 次，距 O 点 10 和 20 mm 处上级根、下级根的根径测量与直根段相同，并依此划分为 1~2, 2~3, 3~4 mm 这 3 个径级。试验根段制备好后一周内完成试验以保证其活性。

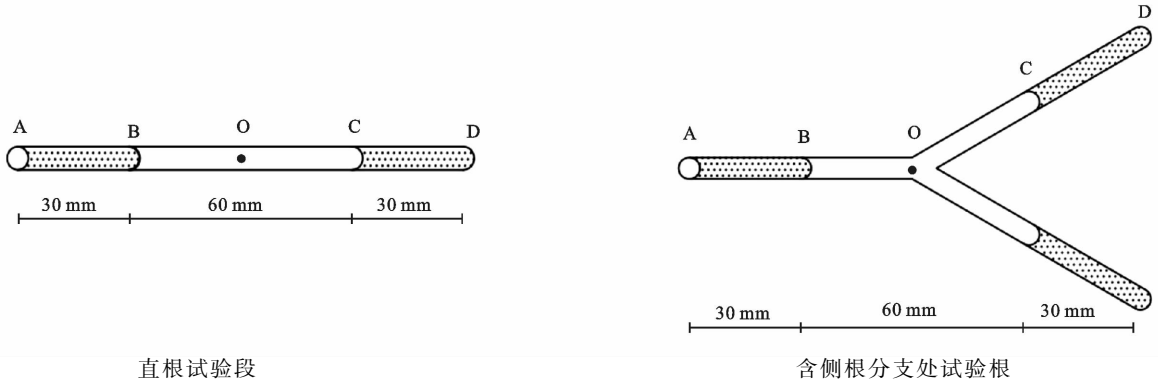


图 1 试验根示意图

1.3 试验设计与方法

1.3.1 试验设计 将根系分 3 组进行试验，A 组进行试验根极限力学特性的测定，直根段、含侧根分支处根段各 3 个径级，各径级重复 30 条试验根，共 180 条试验根（无效数据不计）。B 组进行试验根变形特性的测定，包括根系的应力应变曲线和杨氏模量的计算，径级分组和重复数与极限力学特性试验相同，共 180 条试验根（无效数据不计）。C 组进行根主要化学成分含量的测定，各径级各指标重复测定 3 次，共 54 条试验根。

1.3.2 极限抗拉力的测定 本研究采用 TY8000 伺服控制试验机（试验力测量范围为 0~5 000 N，精度为 0.01 N），自制试验夹具（专利号：ZL201520299176.1）对试验根进行极限抗拉力测定，其加载速度设置为 500 mm/min。将制备好的试验根放入夹具使其处于轴向受拉状态，匀速施加轴向拉力直至根段断裂。设备自动记录试验根在拉伸过程中抗拉力（ F ）和位移（ S ）的变化，断裂点在距试验根中心两端 20 mm 内记为有效数据，断裂点直径取其相邻两侧标记点根径的平均值。极限抗拉强度为破坏处单位横截面积上的极限抗拉力：

$$P = 4F / \pi D^2 \quad (1)$$

式中： P 为极限抗拉强度（MPa）； F 为极限抗拉力（N）； D 为根径（mm）。

1.3.3 杨氏模量的计算 杨氏模量是描述材料抵抗轴向变形能力的物理量，即根系在拉伸过程中，其弹

性阶段应力应变之比〔公式（4）〕。为保证含水量不变的情况下准确反映其应力应变的变化过程，加载速度采用 10 mm/min，通过仪器自动记录的抗拉力和位移，计算试验根的应力、应变〔公式（2）—（3）〕，绘制应力应变曲线图并进行杨氏模量分析。

$$\sigma_r = 4F_r / \pi D^2 \quad (2)$$

$$\epsilon_r = S_r / 60 \times 100\% \quad (3)$$

$$E_r = \sigma_r / \epsilon_r \quad (4)$$

式中： σ_r 为线应力（MPa）； F_r 为抗拉力（N）； D 为根径（mm）； ϵ_r 为线应变（%）； S_r 为试验根受拉发生的位移（mm）； E_r 为杨氏模量（MPa）。

1.3.4 化学成分的测定 纤维素含量测定采用硝酸—乙醇法，根系木素被硝化并部分被氧化后产生的硝化木素和氧化木素以及大量半纤维素均溶于乙醇溶液，所得残渣为纤维素含量（GB/T2677.6-1994）；半纤维素含量测定采用间接法，即综纤维素含量减去纤维素含量即为半纤维素含量，棕纤维素测定含量采用亚氯酸钠法，利用亚氯酸钠溶液加热后的分解产物二氧化氯将木质素脱除（GB/T2677.8-1994）；木质素含量测定采用 72% 硫酸水解法，硫酸水解经苯醇混合液抽提，其水解残余物的质量为木质素含量（GB/T2677.8-1994）。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计处理，使用最小显著极差法（LSD）对黑沙蒿根段化学成分含量进行差异性检验，使用 Pearson 检验对

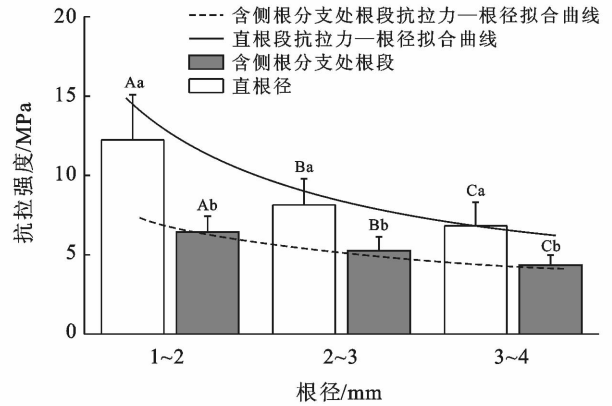
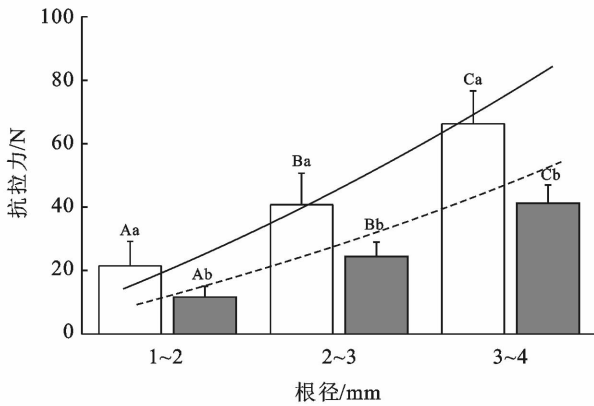
根段抗拉强度、杨氏模量与化学成分含量进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 黑沙蒿根段极限强度特征

由图 2 可知,直根段、含侧根分支处根段抗拉力随根径的增加而增大,且抗拉力与根径呈幂函数关系($y_{直}=11.497x^{1.3656}$, $R^2=0.8637$, $p<0.001$; $y_{侧}=6.1881x^{1.5111}$, $R^2=0.9348$, $p<0.001$),抗拉强度随根径的增大而减小,与根径呈幂函数关系($y_{直}=15.207x^{-0.67}$, $R^2=0.6122$, $p<0.001$; $y_{侧}=7.879x^{-0.489}$, $R^2=0.6001$, $p<0.001$)。直根段抗拉力、抗拉强度均大于相同根径含侧根分支处根段。在

1~4 mm 根径范围内,直根段根径由 1.07 mm 增至 3.92 mm,抗拉力由 10.35 N 增至 99.41 N,抗拉强度由 19.10 MPa 降至 4.26 MPa;3~4 mm 直根平均抗拉力、抗拉强度分别是 1~2 mm 直根的 3.2 和 0.6 倍。含侧根分支处根段根径由 1.16 mm 增至 3.97 mm,抗拉力由 7.65 N 增至 50.12 N,抗拉强度由 8.28 MPa 降至 3.46 MPa;3~4 mm 含侧根分支处根段平均抗拉力、抗拉强度分别是 1~2 mm 含侧根分支处根段的 3.5 和 0.7 倍。粗根由于生长时间较长,木质化程度高,因此在拉伸破坏中表现出更强的抵抗力,但细根的抗拉强度即单位面积上的抗拉力优于较粗根,能够有效增强土体对侵蚀营力的抵御。



注:不同大写字母表示同一根段不同径级间抗拉力、抗拉强度差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一径级不同根段抗拉力、抗拉强度差异显著($p<0.05$)。

图 2 黑沙蒿根段抗拉力、抗拉强度的比较

2.2 黑沙蒿根段变形特征

在每个根径范围内选取与极限应力均值最接近的应力应变曲线作为该径级组的代表曲线(图 3)。由图 3 可知,直根段、含侧根分支处根段承受轴向拉力后均表现出明显的弹塑性特征。随着应变的增大,应力先呈线性增大趋势,此阶段主要发生弹性变形;到达拐点后,应力随应变的增大呈现出缓慢的非线性增长趋势,斜率变小,应力应变曲线由线型改为上凸型,此阶段主要发生塑性变形。

如图 4 所示,直根段、含侧根分支处根段杨氏模量与根径呈负相关,直根段的杨氏模量均大于相同根径下含侧根分支处根段。直根段杨氏模量范围为 72~341 MPa,1~2 mm 直根平均杨氏模量是 3~4 mm 直根的 1.9 倍;含侧根分支处根段杨氏模量范围为 18~469 MPa,1~2 mm 含侧根分支处根段的平均杨氏模量是 3~4 mm 含侧根分支处根段的 3.6 倍。相较于粗根而言,黑沙蒿细根具有更高的杨氏模量,说

明细根具有较强的韧性,抵抗弹性变形能力强,不易发生断裂,表现出更好的弹性性能。

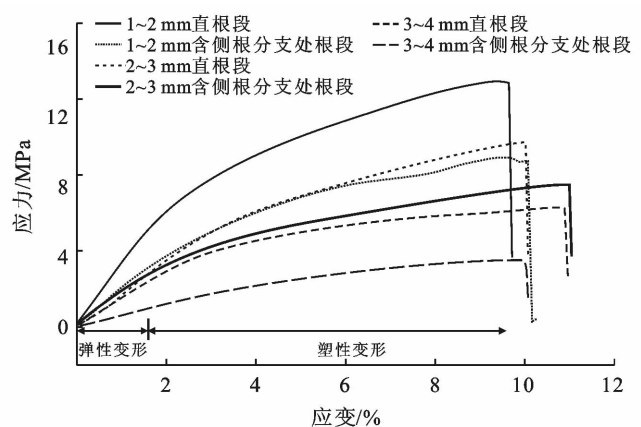
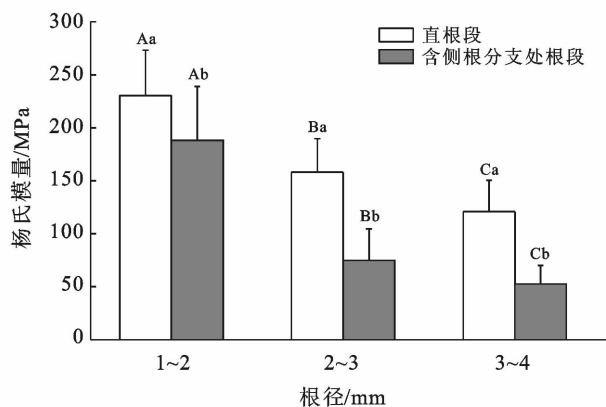


图 3 各径级应力应变代表曲线

2.3 黑沙蒿根段主要化学成分含量

黑沙蒿直根段、含侧根分支处根段各化学成分含

量在不同径级下差异性显著($p < 0.05$),纤维素、半纤维素和木质素含量之和达到总化学成分含量的 70% 以上,直根段、含侧根分支处根段的平均化学成分含量表现为:半纤维素(31.69%, 32.18%) > 木质素(28.42%, 25.31%) > 纤维素(15.50%, 15.35%)(表 1)。在 1~4 mm 根径范围内,直根段中纤维素含量范围为 14.92%~16.22%,半纤维素为 28.92%~35.22%、木质素为 27.13%~29.51%,纤维素含量与根径呈负相关关系,半纤维素、木质素含量与根径均呈正相关关系。含侧根分支处根段中纤维素含量范围为 14.61%~15.97%,半纤维素含量为 30.25%~35.57%,木质素含量为 24.11%~26.92%,纤维素含量随根径的增大而减小,半纤维素、木质素含量与根径无明显关系。



注:不同大写字母表示同一根段不同径级间杨氏模量差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一径级不同根段杨氏模量差异显著($p < 0.05$)。

图 4 直根段与含侧根分支处根段杨氏模量的比较

表 1 黑沙蒿根段主要化学成分含量

根型	根径/mm	纤维素/%	半纤维素/%	木质素/%
直根段	1~2	15.87±0.20 ^{Aa}	29.56±0.40 ^{Ba}	27.58±0.31 ^{Ca}
	2~3	15.48±0.13 ^{Ab}	31.37±0.79 ^{Bb}	28.43±0.33 ^{Cb}
	3~4	15.14±0.13 ^{Ac}	34.13±0.98 ^{Bc}	29.26±0.17 ^{Cc}
含侧根分支处根段	1~2	15.73±0.18 ^{Aa}	32.07±0.44 ^{Ba}	24.91±0.26 ^{Ca}
	2~3	15.33±0.10 ^{Ab}	30.77±0.33 ^{Bb}	26.26±0.55 ^{Cb}
	3~4	14.99±0.19 ^{Ac}	33.69±1.27 ^{Bc}	24.76±0.58 ^{Ca}

注:同行不同大写字母表示黑沙蒿根段相同径级不同化学成分差异显著($p < 0.05$); 同列不同小写字母表示不同径级同一化学成分差异显著($p < 0.05$)。

2.4 黑沙蒿根段抗拉强度、杨氏模量与化学成分的相关性

回归分析表明(表 2),黑沙蒿直根段抗拉强度、杨氏模量与 3 种主要化学成分拟合曲线均为线性函数($p < 0.001$),含侧根分支处根段抗拉强度、杨氏模量与纤维素拟合为线性函数,与半纤维素、木质素无明显关系。Pearson 检验后发现,直根段抗拉强度、杨氏模量与纤维素呈极显著正相关($p < 0.01$),与半纤维素、木质素呈极显著负相关($p < 0.01$)。含侧根分支处根段抗拉强度、杨氏模量与纤维素呈极显著正相关($p < 0.01$),与半纤维素、木质素无相关性。采用多元逐步回归进一步分析黑沙蒿根系各化学成分对抗拉特性的贡献,结果得出纤维素均与黑沙蒿根段抗拉强度、杨氏模量存在极显著预测函数关系(直根段: $y_{强} = -94.320 + 6.661x$, $y_{杨} = -1903.072 + 133.401x$;含侧根分支处根段: $y_{强} = -37.343 + 2.778x$, $y_{杨} = -1756.876 + 120.329x$)($p < 0.01$),表明纤维素对黑沙蒿根段抗拉强度、杨氏模量的影响最大,并且为正相关。

表 2 抗拉特性(y)与主要化学成分(x)的相关性

根型	化学成分	抗拉强度			杨氏模量		
		a	b	R	a	b	R
直根段	纤维素	6.660 7	-94.320	0.939**	133.400	-1903.10	0.937**
	半纤维素	-1.055 7	42.355	-0.898**	-21.092	832.65	-0.894**
	木质素	-3.087 5	96.659	-0.958**	-61.819	1921.4	-0.956**
含侧根分支处根段	纤维素	2.774 7	-37.297	0.930**	120.33	-1756.9	0.896**
	半纤维素	—	—	-0.300	—	—	-0.371
	木质素	—	—	0.175	—	—	0.102

注:①回归方程: $y = ax + b$; ②**表示在显著水平 $\alpha = 0.01$ 级别下,相关性显著。

3 讨论

黑沙蒿直根段、含侧根分支处根段的抗拉力与根径呈幂函数正相关,抗拉强度与根径呈幂函数负相关。这与柠条锦鸡儿、霸王、白刺等灌木根系抗拉力

学特性规律一致^[14],也与其他乔木、草本植物的相关研究结论相符,即白桦、短柄草、细茎针茅等直根抗拉强度与根径为幂函数负相关^[15-16];柠条、沙柳、沙棘等含侧根分支处抗拉力与根径呈幂函数正相关,抗拉强度与根径呈幂函数负相关^[5]。而化学成分含量的研

究有助于从微观层面解释根系的力学特性。本研究表明,黑沙蒿直根段、含侧根分支处根段抗拉特性与纤维素有着良好的相关性,且纤维素影响抗拉特性的作用大于其他化学成分,其关系为:抗拉强度、杨氏模量与纤维素呈极显著正相关,这与草本植物香根草、百喜草、狗牙根^[17],灌木柠条、沙棘、沙柳^[18]以及乔木白桦、蒙古栎^[19]等植物根系抗拉强度与纤维素相关性的研究结果一致,这是因为纤维素是植物细胞壁中主要的骨架成分,而细胞壁是支撑植物机械性能的主要结构^[17]。同时,纤维微纤丝是抵抗张力破坏的最佳结构,即纤维素的增加可以增强根系的抗拉强度^[25]。除纤维素外,木质素、半纤维素与抗拉特性也存在一定的关联性,半纤维素、木质素作为基质填充在微纤丝中,其含量会直接影响到植物机械组织的发达程度。对于黑沙蒿直根段,半纤维素、木质素含量随着根径的减小而减少,半纤维素、木质素含量减少可以促进相邻纤维微纤丝的聚集,微纤丝之间紧密相连,增大接触面积,使纤维抵抗外力的强度显著提高^[26],从而导致直根段抗拉强度、杨氏模量随根径的减小而增大,表现出直根段抗拉强度、杨氏模量与半纤维素、木质素呈极显著负相关,叶超^[17]研究狗尾草等 5 种草本植物根系抗拉强度与木质素关系时得出相似结论。但含侧根分支处根段由于根系形态发生变化使半纤维素、木质素含量保持在一个相对稳定的水平,只起到了黏结加固作用,对植物根系的抗拉强度没有产生显著影响^[12,27]。由此表明,化学成分含量是影响植物根系抗拉力学特性的重要因素,且纤维素的作用明显大于其他化学成分。不同植物种间化学成分存在差异,导致植物根系材料力学特性种间差异大,黑沙蒿根系的纤维素含量范围在 14.61%~16.22%,除了与沙棘根系的纤维素含量接近外,均低于上述其他植物根系的纤维素含量,相应的黑沙蒿根系抗拉强度也低于上述植物(表 3)。但不同植物种根径的分布有较大的区别,杨氏模量无法排除根径对其的影响,故不同物种间根系纤维素含量与杨氏模量的关联性不显著。

4 结论

(1) 在 1~4 mm 根径范围内,黑沙蒿直根段与含侧根分支处根段的抗拉力随根径的增加而增大,抗拉强度随根径的增大而减小,抗拉力、抗拉强度与根径均呈幂函数关系。直根段、含侧根分支处根段均表现出弹性特征,且杨氏模量均随根径的增大而减小,直根段杨氏模量大于相同根径下含侧根分支处根段的杨氏模量。直根段、含侧根分支处根段的平均抗拉

强度为 9.1 和 5.2 MPa,平均杨氏模量为 169.3 和 104.1 MPa。

表 3 几种植物种根系抗拉特性与纤维素含量

植物种	生活型	纤维素含量/%	抗拉强度/MPa	相关性	杨氏模量/MPa
香根草	草本	29.71	50.55	0.91**	—
百喜草	草本	28.10	31.97	0.84**	—
狗牙根	草本	26.65	25.48	0.86**	1 664
柠条	灌木	35.92	17.16	0.887**	500
沙柳	灌木	20.59	12.35	0.876**	190
沙棘	灌木	15.15	7.74	0.598**	380
白桦	乔木	48.55	24.46	—	190
蒙古栎	乔木	45.23	21.22	—	480
黑沙蒿	半灌木	15.42	7.15	0.93**	137

注: ** 表示在显著水平 $\alpha=0.01$ 级别下,相关性显著。抗拉强度数据来源文献^[17-19],杨氏模量数据来源文献^[20-24]。

(2) 黑沙蒿直根段、含侧根分支处根段各化学成分含量差异显著($p<0.05$),纤维素、半纤维素与木质素含量之和达到总化学成分含量的 70% 以上。直根段、含侧根分支处根段的平均化学成分含量表现为:半纤维素(31.69%, 32.18%)>木质素(28.42%, 25.30%)>纤维素(15.50%, 15.35%)。随着根径增加,直根段纤维素含量减小,半纤维素和木质素含量增加,而含侧根分支处根段纤维素含量减小,半纤维素和木质素含量无变化。

(3) 直根段抗拉强度、杨氏模量与纤维素含量呈极显著正相关($p<0.01$),与半纤维素、木质素含量呈极显著负相关($p<0.01$)。含侧根分支处根段抗拉强度、杨氏模量与纤维素含量呈极显著正相关($p<0.01$),与半纤维素、木质素含量无相关性。

(4) 纤维素含量是影响植物根系抗拉强度的重要因素,对于同种植物而言,细根单位质量的纤维素含量显著大于粗根,导致细根的抗拉强度大于粗根。而不同植物之间,纤维素含量高的植物,其抗拉强度高于纤维素含量低的植物。

[参 考 文 献]

- [1] 郭月峰,王娟,祁伟,等. 风沙土区黄柳根系及其碳储量分布特征[J]. 干旱区研究,2017,34(2):344-349.
- [2] 潘东江,张农,赵一鸣,等. 西部矿区植被根系采动损伤特征及细观力学机制[J]. 煤炭学报,2017,42(2):373-380.
- [3] Comino E, Marengo P. Root tensile strength of three shrub species: *Rosa canina*, *Cotoneaster dammeri* and *Juniperus horizontalis*: Soil reinforcement estimation by laboratory tests [J]. Catena, 2010,82(3):227-235.
- [4] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the

- roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France) [J]. *Catena*, 2011,84(1/2):70-78.
- [5] 李有芳,刘静,张欣,等. 4种植物生长旺盛期根系易受损的外力类型研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 339-344.
- [6] 嵇晓雷,杨平,夏光辉. 夹竹桃根系力学性能的实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018,18(27):110-115.
- [7] Abdi E, Azhdari F, Abdulkhani A, et al. Tensile strength and cellulose content of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) roots as bioengineering material [J]. *Journal of Forest Science*, 2014, 60(10):425-430.
- [8] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Root biomechanical properties during establishment of woody perennials [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 109(11): 196-206.
- [9] Hales T C, Ford C R, Hwang T, et al. Topographic and ecologic controls on root reinforcement [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009,114(F3):F03013.
- [10] Zhang Chaobo, Chen Lihua, Jiang Jing. Why fine tree roots are stronger than thicker roots; The role of cellulose and lignin in relation to slope stability [J]. *Geomorphology*, 2014,206:196-202.
- [11] 乔娜,余芹芹,卢海静,等. 寒旱环境植物护坡力学效应与根系化学成分响应[J]. *水土保持研究*, 2012,19(3): 108-113.
- [12] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. *Plant and Soil*, 2005,278(1/2):1-9.
- [13] 李雪松. 黑沙蒿根系材料力学特性研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学, 2018.
- [14] 刘昌义,胡夏嵩,赵玉娇,等. 寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1):1-10.
- [15] Yang Yuanjun, Chen Lihua, Li Ning. How gauge length and loading rate influence the root tensile strength of *Betula platyphylla* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,71(6):460-466.
- [16] Baets S D, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength [J]. *Plant and Soil*, 2008,305(1/2):207-226.
- [17] 叶超,郭忠录,蔡崇法,等. 5种草本植物根系理化特性及其相关性[J]. *草业科学*, 2017,34(3):598-606.
- [18] 武艺儒,刘静,张欣,等. 3种灌木直根抗剪特性及其与化学成分的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2019,33(4): 129-133.
- [19] 李宁. 四种乔木根系抗拉特性的影响因素研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [20] 嵇晓雷,杨平,王磊. 狗牙根根系抗拉强度试验[J]. *湖北农业科学*, 2015,54(23):5941-5942,5948.
- [21] 苑淑娟. 4种植物单根抗拉力学特性的研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.
- [22] 田佳,曹兵,金楠,等. 防风固沙灌木花棒沙柳根系生物学特性[J]. *农业工程学报*, 2014,30(23):192-198.
- [23] 马艺坤. 砭砂岩区沙棘根系固坡效应及其机理研究[D]. 陕西西安:西北大学, 2018.
- [24] 王萍花,陈丽华,冀晓东,等. 4种常见乔木单根拉伸的应力应变曲线分析[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 17-22.
- [25] Genet M, Li M, Luo T, et al. Linking carbon supply to root cell-wall chemistry and mechanics at high altitudes in *Abies georgei* [J]. *Annals of Botany*, 2011,107(2):311-320.
- [26] 张双燕,费本华,余雁,等. 木质素含量对木材单根纤维拉伸性能的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(1): 131-134.
- [27] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,等. 根系主要成分含量对根系固土效能的影响[J]. *水土保持通报*, 2014,34(03):166-170,177.
- [28] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004,304(5677):1623.
- [29] 黄玥,黄志霖,肖文发,等. 基于 Mann-Kendall 法的三峡库区区长江干流入出库断面水质变化趋势分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019,28(4):950-961.
- [30] 徐金鑫,丁文峰,林庆明. 丹江流域水沙变化特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019,28(8):1956-1964.
- [31] 熊云. 江西省新型城镇化驱动因素研究[D]. 江西南昌:江西财经大学, 2017.
- [32] 冯珊珊,樊风雷. 2006—2016年粤港澳大湾区城市不透水面时空变化与驱动力分析[J]. *热带地理*, 2018,38(4):536-545.

(上接第86页)