

# 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系

朱海丽<sup>1</sup>, 胡夏嵩<sup>1,2</sup>, 毛小青<sup>3</sup>, 李国荣<sup>1</sup>, 张兴玲<sup>3</sup>, 陈桂琛<sup>2</sup>

(1. 青海大学地质工程系, 西宁 810016; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810007;  
3. 青海大学水电系, 西宁 810016)

**摘要:** 为研究植物单根力学特性与其解剖结构的关系, 以西宁盆地为例, 对青藏高原东北部黄土区 5 种灌木单根抗拉特性、抗剪特性、根系解剖结构进行了一系列试验研究。结果表明: 根系解剖结构中韧皮纤维、木纤维的百分含量、周皮的木质化程度及根系的木质化速度等因素影响根系力学强度, 根系拉伸延长率与根系韧皮纤维含量成正比, 与木纤维含量成反比; 5 种灌木植物中, 柠条锦鸡儿单根横切面上次生韧皮部平均面积比最大, 达到 45%, 表现为单根具有较大延伸率; 四翅滨藜单根横切面上次生木质部平均面积比最大, 达到 50%, 表现为单根具有较强的抗拉和抗剪强度。根据 5 种供试灌木根系力学特性及其解剖结构特征, 四翅滨藜和柠条锦鸡儿根系固土护坡作用较大。

**关键词:** 抗拉强度, 抗剪强度, 力学特性, 韧皮纤维, 木纤维

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.05.008

中图分类号: S157.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-5-0040-07

朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 40-46.

Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(5): 40-46.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

近几十年来, 随着对植被护坡技术的不断推广、应用以及对护坡理论研究的不断深入, 植被在防治土壤侵蚀、稳固坡体等方面的作用已被广泛认可。植物根系主要由纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质和果胶等物质组成, 具有扩张、抗压和抗曲折性能, 起坚固和支持作用<sup>[1]</sup>。近年来, 国内外研究学者先后对多个科、属植物的单根抗拉特性、根-土复合体的抗剪特性及根系固土的力学增强效应做出了大量的研究<sup>[1-14]</sup>, 刘国彬、程洪等多位学者提出植物根系强度、延伸率和弹性模量等特性与其微观结构、化学组分存在相关性<sup>[6-14]</sup>。由于根系材料参与代谢活动, 具有多相、非均匀、各向异性等特点<sup>[7,8]</sup>, 不同植物根系在不同生理状态和不同生长环境下, 根系材料的力学性质差异很大<sup>[8-14]</sup>, 目前对农作物的生物力学特性研究相对较多<sup>[15-19]</sup>, 而对草本、灌木植物根系的潜在能力、生长发育、组成材料性质方面的研究很少<sup>[13,14]</sup>, 且缺乏系统性, 因此需要进一步对根系进行形态解剖观察及纤维素、半纤维素等的定量分析, 以解释不同植物或同一科属植物间根系强度特性, 加强根-土相互作用机理

和根-土复合体增强机理的研究。本文以西宁盆地及周边黄土边坡为例, 对青藏高原东北部黄土区 5 种护坡灌木单根抗拉强度和抗剪强度进行了测定, 并结合灌木根系解剖结构, 研究分析了供试灌木种单根强度特性与其解剖结构的关系, 对筛选优良护坡植物和评价植物种护坡能力提供了选择依据。

## 1 试验区概况

研究区位于青海省西宁市城东区小寨红沟, 地处东经 101°50', 北纬 36°35', 平均海拔高度约 2250 m。该区属高原半干旱大陆性气候, 具有寒长暑短、昼夜温差大、降水量少的特点。据西宁气象站 1954~2001 年观测资料, 西宁盆地及其周边地区年最高月平均气温 17.7℃, 年最低月平均气温-8.6℃, 多年平均降水量 372.1 mm, 区内 80%降水主要集中在每年的 6~9 月份。研究区属典型的山间河谷地貌, 区内及其周边黄土高陡边坡发育, 地质环境脆弱, 通过对市区内 88 处各类地质灾害的调查表明 (2004 年), 地质灾害类型主要为滑坡、崩塌、泥石流 3 种, 其中滑坡 31 处、崩塌 19 处、泥石流沟 38 条<sup>[20]</sup>。由于研究区地质地理条件复杂、人口集中且周边居民经济活动频繁, 每逢夏季暴雨季节, 易诱发滑坡、崩塌等不同规模的地质灾害, 给研究区及其周边居民的生命财产安全构成了一定威胁。试验区面积约 20 m×15 m, 坡度约 40°, 属于人工堆积的黄土边坡, 坡向属半阴半阳, 试验小区面积为 2 m×2 m, 设有 4 次重复, 采用随机排列, 各小区间保护行宽度为 10 cm, 各重复间设 30 cm 廊道, 试验区设置详见图 1 所示。

收稿日期: 2008-04-03 修订日期: 2009-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40762002); 中国博士后科学基金资助项目 (20060390306); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目 (NCET-04-G983); 青海省重点科技攻关项目 (2003-N-134)

作者简介: 朱海丽 (1977-), 女, 江苏溧阳人, 主要从事生态边坡工程及其应用等方面的研究。西宁 青海大学地质工程系, 810016。

Email: qdzhuhaili@163.com



图1 试验区示意图

Fig.1 Sketch map of test site

## 2 材料与方法

根据研究区气候寒冷、干旱的特点, 选取柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*)、白刺 (*Nitraria tangutorum*)、霸王 (*Zygophyllum xanthoxylon*)、四翅滨藜 (*Atriplex canescens*)、北方枸杞 (*Lycium chinense*) 5 种抗寒、抗旱的护坡植物作为研究对象, 这 5 种多年生、矮丛生灌木植物抗逆性突出, 抗寒、抗旱、耐盐碱、根系强大, 入土深, 能充分利用土壤深层水分, 其中柠条锦鸡儿、白刺和北方枸杞是研究区及其周边地区的建群植物, 霸王和四翅滨藜是研究区及其周边地区水土保持的先锋灌木种。供试种于 2004 年 6 月以种子穴播的方式在试验区内分行种植。灌木根系的采样方法是: 在试验区选取地上生长正常、生长期为 2 a 的灌木种, 保留植株地上部分, 采取挖掘剖面壁法挖取植株根系, 根系周围土壤平均含水率为 9.7%, 挖掘深度在 1.0~1.5 m, 随后植入盆口直径为 36 cm, 盆底直径为 18 cm, 盆高为 40 cm 的试验盆内带回实验室。为了最大限度的保证根系与挖掘前的各种情况一致, 先在盆内放入少量与根系周围土壤平均含水率相等的试验区土壤, 再小心将挖掘出的根系植入盆内, 并同时把挖掘出的平均含水率为 9.7% 的土壤放入盆内, 使根系稳固地立于盆中。将取回的灌木根系从试验盆内取出后, 将每株灌木根系分为两部分分别进行试验。一项试验是选取 5 种灌木根的中部做石蜡切片试验; 另一项试验是将每株灌木根系(根径变化范围介于 1~4 mm 之间) 以 2~10 cm 为测定长度分段, 夹持在室内单根拉伸与剪切实验仪工作台上分别进行拉伸和剪切试验。

### 2.1 单根拉伸、剪切试验

试验根据电子万能试验机的工作原理和基本结构, 研制了试验数据采集装置即室内单根拉伸与剪切试验仪, 室内测定单根的拉伸力与剪切力。仪器主要由数据采集系统和工作系统两部分组成, 工作原理如图 2 所示。试验通过数据采集系统记录单根整个拉伸或剪切过程中, 不同时间、不同拉力或剪力作用下单根位移以及破坏时的最大拉力或最大剪力。

单根拉伸试验的具体步骤是: 以 2~10 cm 为测定长度将供试根段夹持在工作台上的拉伸夹具间, 然后通过转动手轮让夹具向上移动, 使位于夹具间的根段受到拉

伸作用, 直到根段破坏为止。试验中, 为避免单根在受力时出现打滑或在夹具两端处被拉断的现象, 采用在夹具两端粘贴胶皮、缠绕和添加柔性物质等方法以增大根系与夹具间的摩擦; 除此之外, 增加试验次数, 详细记录每次试验过程中根系破坏情况, 挑选灌木植物单根在夹具中间或接近中间处破坏时的试验结果进行分析。

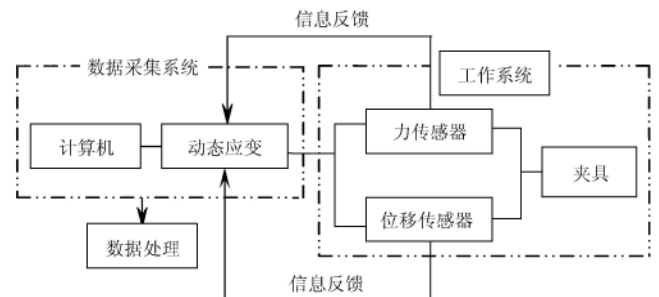


图2 单根拉伸与剪切试验工作原理

Fig.2 Test apparatus principle of single root tensile and shear

根据试验中所得到的相关数据, 如根系直径、抗拉力等, 可计算根段的抗拉强度。

根段的抗拉强度计算公式为:

$$P = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中  $P$ ——根段的抗拉强度, MPa;  $F$ ——最大抗拉力, N;  $D$ ——根段直径, mm。

单根剪切试验的具体步骤是: 根据试验仪剪切夹具间的距离, 以 2~5 cm 为测定长度将供试根段夹持在工作台上的剪切夹具间, 然后通过转动手轮让夹具向下移动, 使位于夹具间的根段受到剪切作用, 直到根段破坏为止。试验过程通过数据采集系统记录单根整个受力过程中, 任意时刻的剪力和位移。

根据以上试验中所得到的相关数据, 如根系直径、抗剪力等, 可计算根段的抗剪强度。

根段的抗剪强度计算公式为:

$$\tau_b = \frac{P_b}{2A_0} = \frac{2P_b}{\pi D^2} \quad (2)$$

式中  $\tau_b$ ——根段的抗剪强度, MPa;  $P_b$ ——根段剪断时的最大剪力, N;  $A_0$ ——根段的原始截面积,  $\text{mm}^2$ 。

### 2.2 根系石蜡切片试验

将进行了单根拉伸试验和剪切试验的灌木根段剩余部分, 切取 5~10 mm 的小段根, 标号放置 FAA 固定液中固定, 经氢氟酸软化、酒精系列脱水、浸蜡、包埋、进行灌木根系横切面的常规石蜡制片, 试验采用番红-固绿染色, 番红用 1% 的水溶液, 固绿用 0.5% 的酒精液 (用 95% 的酒精配制), 染色完成后, 用中性树胶封粘切片, 制成永久切片<sup>[21]</sup>。切片制备完毕后, 随后分别采用 OLYMPUS SBX51 显微镜进行显微观察、OLYMPUS DP50 照相机取相, 并通过 Image-Proplus 图样分析系统观测灌木植物根系的解剖结构特征及周皮、次生韧皮部、次生木质部、导管等结构的百分比、厚度或直径。

### 3 结果与分析

#### 3.1 5种灌木植物单根力学特性

##### 3.1.1 单根的抗拉特性

通过对试验区生长 2 a 的 5 种灌木进行单根拉伸试验, 研究发现: 5 种灌木种根系均表现出较强的抗拉能力, 其中以四翅滨藜抗拉力最大。根系抗拉力随根径的增大而增大, 二者之间存在幂函数或指数函数关系。当根径在 1~4 mm 范围内时, 5 种灌木根系平均抗拉强度由大至小的顺序依次是四翅滨藜、柠条锦鸡儿、霸王、白刺、北方枸杞, 结果如表 1 所示, 根系抗拉强度随根径增加而减小, 根系直径越小, 强度越大。

表 1 5 种灌木单根平均抗拉强度和抗剪强度

Table 1 Average single root tensile strength and shear strength of five shrubs

植物名称	平均抗拉强度/MPa	平均抗剪强度/MPa	平均根径/mm	样本数量
四翅滨藜	34.19±6.22	27.88±4.89	2.54±0.45	25
柠条锦鸡儿	23.62±3.97	28.92±4.74	1.77±0.30	24
霸王	18.81±3.87	20.08±3.05	2.02±0.38	22
白刺	13.96±2.69	19.39±2.71	1.73±0.22	29
北方枸杞	11.57±2.61	15.37±1.94	1.69±0.21	21

不同灌木种根系结构组成不同, 根系拉伸的应力-应变特征不同, 同种灌木植物不同植株的同一直径根系, 其拉伸应力-应变特征也不同, 如图 3 所示, 取自不同植株, 根径均为 1.06 mm 的柠条锦鸡儿, 其应力-应变曲线尽管变化趋势相似, 但不尽相同, 说明了同一植物种不同植株的根系解剖结构存在差异, 其力学特性也不完全相同。5 种灌木种应力-应变曲线在根系受力初期表现弹性材料特性, 当荷载超过弹性极限, 拉力继续增加时, 根系表现出高度非线性弹性特征。此外, 根系的最终延伸率随根径增大而降低, 5 种灌木根段在受力初期, 随着应力增加延伸率变化较小, 之后延伸率迅速增加, 表现出很大的弹性, 其中四翅滨藜的最大延伸率较小, 约为 13%, 柠条锦鸡儿、白刺、霸王和北方枸杞这 4 种灌木的最大延伸率较接近, 达到 16% 左右。

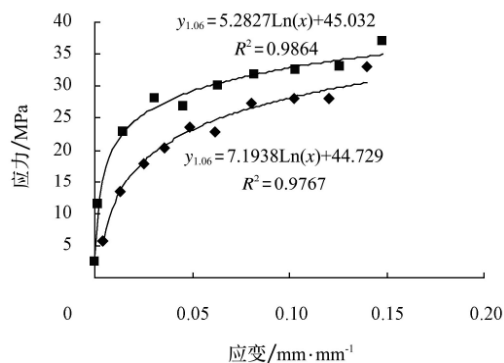


图 3 不同柠条锦鸡儿植株单根拉伸应力-应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curve of different *Caragana korshinskii* single root

##### 3.1.2 单根的抗剪特性

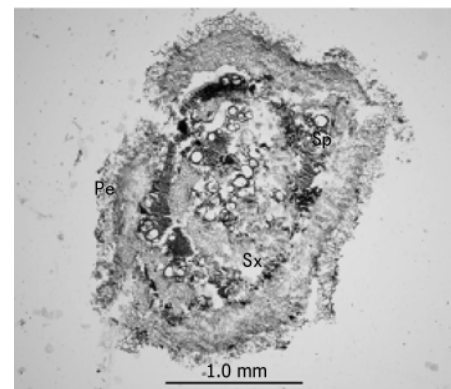
5 种灌木单根剪切试验结果发现, 生长 2 a 且根径在

1~4 mm 之间的供试种, 单根平均抗剪力由大至小依次为: 四翅滨藜、柠条锦鸡儿、霸王、白刺、北方枸杞, 且与生长 2 a 的 5 种灌木单根平均抗拉力表现有一致性变化, 灌木抗剪力大小随着根径增大而增大, 抗剪力与根径间符合幂函数或指数函数关系。5 种供试灌木中, 柠条锦鸡儿和四翅滨藜单根表现出较大的抗剪强度, 其次依次为霸王、白刺、北方枸杞, 如表 1 所示。

#### 3.2 5 种灌木植物根系的次生结构特征

5 种灌木次生结构主要表现为自外向内由周皮、中柱鞘薄壁组织和次生维管组织组成。周皮为数层排列整齐呈长方形的木栓细胞, 其中最外面为木栓层细胞, 内部为木栓形成层和栓内层; 在中柱鞘薄壁组织中有分泌道分布; 次生维管组织包括次生韧皮部、维管形成层和次生木质部。其中, 次生韧皮部由筛管、伴胞及排列整齐的韧皮薄壁细胞组成, 细胞排列整齐, 并有少量分泌道分布; 维管形成层呈环状, 由 3~5 层细胞构成, 其细胞呈砖形, 排列整齐, 细胞质浓厚; 在次生木质部中, 具有大量的木薄壁组织细胞, 导管口径较大, 散生于薄壁组织细胞中, 位于导管两侧的为细胞壁加厚、木质化的长形木纤维, 在木质部中成群分布<sup>[1]</sup>。

四翅滨藜周皮厚约 120  $\mu\text{m}$ , 木栓层细胞壁栓质化; 次生韧皮部约占根横切面积的 35%; 次生木质部约占根横切面积的 50%, 如图 4 所示, 在 5 种灌木中所占比例最大, 其中木薄壁细胞壁较厚, 木纤维成束状分布较多, 导管直径约为 20~80  $\mu\text{m}$ , 且导管壁木化增厚, 平均厚约为 20  $\mu\text{m}$ 。

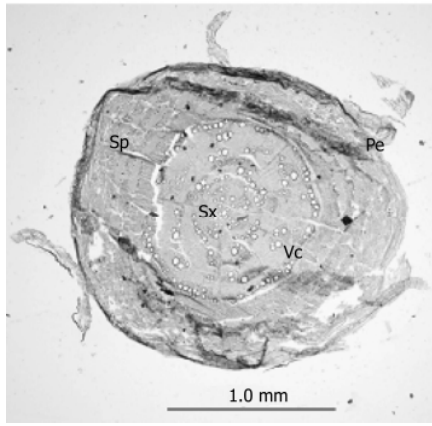


注: Sx—次生木质部; Sp—次生韧皮部; Pe—周皮

图 4 四翅滨藜根系横切面 ( $\times 40$ )

Fig.4 Cross section of *Atriplex canescens* root ( $\times 40$ )

柠条锦鸡儿周皮薄, 厚约 100  $\mu\text{m}$ , 木栓层细胞壁栓质化但较薄、易皱缩、原生质体死亡, 与木栓形成层及栓内层紧密重叠在一起, 难以区分; 次生韧皮部约占根横切面积的 45%, 次生韧皮薄壁内含有颗粒状或块状的储藏物质, 在维管形成层外部有大量束状韧皮纤维存在, 在 5 种灌木中所占比例最大; 木质部约占主根横切面积的 35%, 如图 5 所示, 在接近维管形成层的木质部周围存在着成群的木纤维, 导管直径约为 15~65  $\mu\text{m}$ , 导管壁较薄, 厚约 20  $\mu\text{m}$ , 木射线明显。



注：Vc—维管形成层

图 5 柠条锦鸡儿根系横切图 (×40)

Fig.5 Cross section of *Caragana korshinskii* root(×40)

霸王周皮较厚，约为 210 μm，木栓层细胞壁肉质，原生质体含水较多，如图 6 所示，次生韧皮部约占根横切面积的 35%，次生韧皮部内次生韧皮薄壁细胞发达，细胞内含有众多颗粒状或块状的储藏物质，韧皮纤维含量相对较少，次生木质部约占主根横切面积的 25%，木纤维含量较少；导管直径约为 25~60 μm，导管壁较薄，厚约 4 μm。

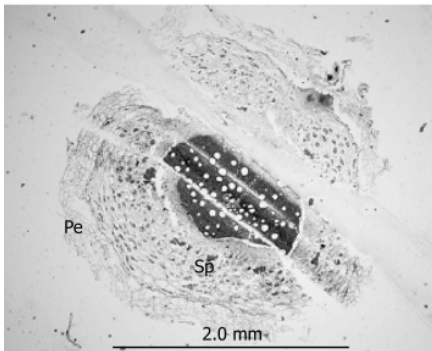


图 6 霸王根系横切图 (×40)

Fig.6 Cross section of *Zygophyllum xanthoxylon* root(×40)

白刺周皮较厚，约为 210 μm，木栓层细胞壁栓质化，含水较少，次生韧皮部约占根横切面积的 30%，次生木质部约占主根横切面积的 30%，如图 7 所示；导管直径较大，约为 20~100 μm，导管壁厚约 5 μm。

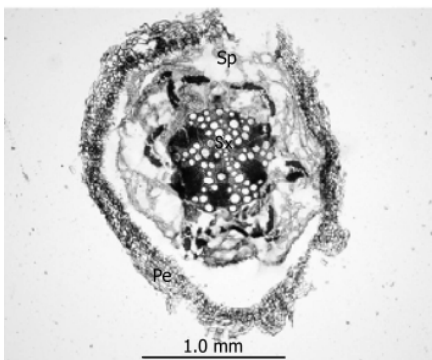


图 7 白刺根系横切图 (×40)

Fig.7 Cross section of *Nitraria tangutorum* root(×40)

北方枸杞周皮较薄，厚约 110 μm，木栓层细胞壁较薄，栓质化；次生韧皮部约占根横切面积的 35%，次生木质部约占主根横切面积的 25%，木纤维含量少，如图 8 所示；导管直径约为 20~70 μm，导管壁厚约 4 μm。

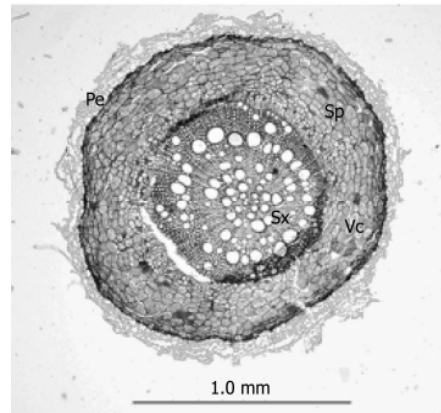


图 8 北方枸杞根系横切图 (×40)

Fig.8 Cross section of *Lycium chinense* root(×40)

### 3.3 5 种灌木根系解剖结构与其单根力学特性相关性

#### 3.3.1 灌木根系解剖结构与单根抗拉力和抗剪力关系

通过对试验区生长 2 a 的 5 种灌木的单根拉伸试验和单根剪切试验结果分析可知，单根的抗拉力与抗剪力均随根系直径增大而增大，它们之间存在幂函数或指数函数关系，这一力学特性与根系的解剖结构变化有关。研究表明，根系在生长初期，微细纤维已排列紧密，构成纤维细胞壁的网状骨架，随着根系的不断生长和木质化，木质素不断积存于微细纤维之间，以化学或物理方式使纤维之间黏结和加固，增加根系的机械强度<sup>[22,23]</sup>。试验区生长 2 a 的灌木根系与生长一年的灌木根系相比，变化最大的是次生木质部，其所含的木纤维明显增加，且在横切面上连接成一个圆环。随着根系直径的不断增大，纤维素和木质素在径向和轴向都明显增加，从而表现为根系的抗拉力与抗剪力均随根系直径增大而增大。因此对于同一种植物，其根系抗拉力和抗剪力的变化与根系中纤维素和木质素在径向和轴向的变化密切相关。对于不同种植物根系间抗拉力和抗剪力的差异与植物根系的增粗生长速度是相关的，根系增粗生长越快，根径越大，因此其抗拉力和抗剪力也越大。试验区 5 种供试灌木中，四翅滨藜和霸王主根随时间增粗生长较快，结果如表 1 所示，生长 2 a 的主根平均根径超过 2 mm，柠条锦鸡儿次之，白刺和北方枸杞主根根径随时间增粗较慢。结合拉伸试验和剪切试验可知，5 种供试灌木中，四翅滨藜的抗拉力最大，根径为 2 mm 的单根抗拉力达到 120 MPa，是生长期相同的其余四种灌木抗拉力的 2~3 倍，霸王主根根径随时间增粗生长较快，但其根系木化程度较低，且由于其周皮较厚，约为 210 μm，原生质体含水较多，如图 6 所示，当其单根受到拉伸作用时，原生质体受力而破坏失水，由此拉伸作用易产生打滑现象，因此表现为霸王主根的抗拉力和抗剪力相对较小。

### 3.3.2 灌木根系解剖结构与单根抗拉强度和抗剪强度关系

对于不同属种的植物,其抗拉强度和抗剪强度与植物根系的增粗生长、根系中纤维素、木质素含量及周皮的特性都存在密切相关性。从试验区5种灌木根系解剖结构来看:四翅滨藜和柠条锦鸡儿次生韧皮部和次生木质部分别占其单根横切面积的85%和80%,而其余3种灌木次生韧皮部和次生木质部的面积比仅为60%左右,且柠条锦鸡儿木栓层细胞壁薄而栓质化,受力时不易产生打滑;四翅滨藜根的木薄壁细胞壁较厚,木纤维成束状分布较多,且导管壁木化增厚,是其余4种灌木的4~5倍,约为20 $\mu\text{m}$ ,表明四翅滨藜和柠条锦鸡儿根系机械组织发达,纤维素和木质素含量多,因此具有较大的抗拉强度和抗剪强度;霸王周皮较厚,细胞多含汁液,次生韧皮部内次生韧皮薄壁细胞内含有众多颗粒状或块状的储藏物质,韧皮纤维含量相对较少,因此其单根抗拉强度和抗拉强度较小;结合白刺和北方枸杞根系解剖结构可知,二者次生韧皮部和次生木质部在根横切面中所占比例较小,具有机械强度的纤维和木质所占比例小,因此在其力学特性中相应表现为单根的抗拉强度和抗剪强度都较小。综上可知,生长2a的5种灌木单根抗拉强度与抗剪强度由大至小依次为:四翅滨藜、柠条锦鸡儿、霸王、白刺、北方枸杞。

### 3.3.3 灌木根系解剖结构与单根拉伸应力-应变特征的关系

不同灌木种根系解剖结构组成不同,表现为其单根拉伸的应力-应变特征也不同。单根受到拉伸作用时,随着拉力不断增加,根系的拉伸破坏根据各组分的机械强度,破坏首先从根系最外部强度较低的周皮开始,依次由外到内,从次生韧皮部到次生木质部。存在于韧皮部中的韧皮纤维,通称为软质纤维,韧皮纤维细胞较长,约为1~2mm,细胞壁富含纤维素,故坚韧而有弹性,韧皮部所占面积较大的植物根系在受到拉伸作用时,常表现有较大的延伸率;存在于木质部中的木纤维,其细胞较韧皮纤维稍短,一般长约1mm,细胞腔狭长,木纤维壁厚而坚硬且高度木质化,木质部所占面积较大的植物根系具有较强的机械巩固作用,但韧性降低,脆而易断,且根系在受到拉伸作用时,延伸率较小。因此当根系受拉伸作用时,周皮和次生韧皮部细胞首先受力,韧皮纤维随着力的增大不断伸长,表现弹性材料特性;当拉力继续增加时,韧皮纤维被拉断,次生韧皮部破坏,次生木质部受拉力作用,木质部中木纤维韧性降低,脆而易断,根系表现出非线性弹性特征。植物根系的延伸率与根系中纤维素、半纤维素、木质素等的含量有关,当根系直径增粗,木质化程度增强,木质素含量增加时,根系韧性降低,强度增大。5种灌木中四翅滨藜次生木质部约占根横切面积的50%,根系木化程度较高,硬度较大,因此韧性较差,表现为在单根拉伸试验中,具有较小的延伸率,约为13%;当四翅滨藜根系受到拉力作用时,初期表现为弹性材料特征,应力-应变基本呈现线性关系,当荷载超过弹性极限时,根系表现出塑性变形特

征,随着应变的增加,应力增幅很快。柠条锦鸡儿次生韧皮部约占根横切面积的45%,韧皮纤维含量较多,因此其具有较强的弹塑性,从力学试验结果证实其在抗拉实验中具有最大的延伸率,约为16%。

## 4 结 论

1) 5种灌木植物的单根抗拉力和抗剪力随根径增大而增大,生长2a的5种灌木植物抗拉力与抗剪力由大至小依次为:四翅滨藜、柠条锦鸡儿、霸王、白刺、北方枸杞;单根抗拉强度随根径增大而减小;5种灌木种单根拉伸应力-应变特性均表现出在根系受拉后的初期阶段,应力-应变呈直线关系,当荷载超过弹性极限,拉力继续增加时,应力与应变关系反映出高度非线性弹性特征,延伸率可达13%以上,且根系最大延伸率随根径增大而降低。

2) 生长2a的灌木根系与生长一年的灌木根系相比,变化最大的是次生木质部,其所含的木纤维明显增加,且在横切面上连接成一个圆环,根系抗拉力和抗剪力的变化与根系中纤维素和木质素在径向和轴向的变化密切相关。不同种植物根系间抗拉力和抗剪力的差异与植物根系的增粗生长速度相关,四翅滨藜和霸王主根随时间增粗生长较快,因此其抗拉力和抗剪力较大。

3) 根系韧皮纤维坚韧而有弹性,其含量与根系拉伸延长率成正比,相反木纤维脆而易断,其含量与根系拉伸延长率成反比。5种灌木植物根系中,柠条锦鸡儿单根横切面上次生韧皮部面积比最大,达到45%,表现为具有较大单根延伸率,四翅滨藜、霸王、北方枸杞均为35%,白刺为30%;四翅滨藜单根横切面上次生木质部面积比最大达到50%,表现为单根具有较强的抗拉和抗剪特性,柠条锦鸡儿为35%,白刺为30%,霸王和北方枸杞均为25%。

4) 通过分析试验区5种灌木根系解剖结构,影响根系力学特性的主要因子包括根系中韧皮纤维的百分含量(即韧皮部所占根横切面的百分比)、木纤维的百分含量(即木质部所占根横切面的百分比)、周皮的木质化程度及根系的木质化速度等。

结合5种灌木植物单根力学特性及其根系解剖结构特征,四翅滨藜和柠条锦鸡儿单根具有较强的抗拉应力、抗剪切力和抗变形能力,且根系发达,具有抗寒、抗旱的特性,因此这两种灌木植物对研究区及其周边寒旱地区的边坡防护具有一定贡献。

致谢:文中单根拉伸剪切试验所采用的室内单根拉伸剪切实验仪在设计、加工和制作过程中得到了清华大学力学系胡德贵高级工程师和杨璞博士生的大力帮助,同时文中5种灌木根系的石蜡切片试验得到了青海大学农牧学院张勤文老师和青海大学生物科学系魏青老师的大力协助,在此一并表示衷心感谢!

### [参 考 文 献]

- [1] 肖东升. 植被增加边坡抗剪强度的量化理论[J]. 地基基础, 2004, 24(1): 63-65.

- Xiao Dongsheng. Theory of improving slope shear strength by vegetation[J]. Basis of Foundation, 2004, 1(2): 63—65. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王可钧, 李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687—691.  
Wang Kejun, Lee C F. Brief mechanics analysis on bioengineering techniques for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687—691. (in Chinese with English abstract)
- [3] Wu T H, Macomber R M, Erb R T, et al. Study of soil-root interaction[J]. Geotechnical Engineering, 1988, 114(12): 1351—1357.
- [4] 朱海丽, 毛小青, 倪三川, 等. 植被护坡研究进展与展望[J]. 中国水土保持, 2007, 4: 26—29.  
Zhu Haili, Mao Xiaoqing, Ni Sanchuan, et al. Progress of study on slope protection by vegetation and its expectation[J]. Soil And Water Conservation in China, 2007, 4: 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [5] Watson A, Phillips C, Marden M. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability[J]. Plant and Soil, 1999, 217: 39—47.
- [6] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 坡面岩体—基质—根系互作的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1407—1410.  
Li Shaocai, Sun Hailong, Yang Zhirong, et al. Interactional mechanical characteristics of rock-substrate-root system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1407—1410. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥, 等. 土壤—植物根系复合体本构关系的理论研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2): 35—38.  
Guo Weijun, Huang Gaobao, Wang Fen'e, et al. Study on constitutive relation of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(2): 35—38. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21—28.  
Liu Guobin, Jiang Dingsheng, Zhu xianmo. Study on grasses root biomechanics in loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 2(3): 21—28. (in Chinese with English abstract)
- [9] 朱清科, 陈丽华, 张东升, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 64—67.  
Zhu Qingke, Chen Lihua, Zhang Dongsheng, et al. Mechanical of soil-reinforcement by roots in forest ecological systems in Gongga Mountain[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(2): 64—67. (in Chinese with English abstract)
- [10] 史敏华, 王 棣, 李任敏. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技, 1994, 1: 17—19.
- [11] Waldron L J, akessin S D. Soil Reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science, 1981, 132(6): 427—435.
- [12] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 2): 3445—3452.  
Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. Studies on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan plateau[J]. Chinese Journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(supp.2): 3445—3452. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 7—12.  
Zhao Libing, Zhang Baogui. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of Medicago sativa and Digitaria sanguinalis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(9): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [14] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant soil, 2005, 278: 1—9.
- [15] 王 健, 朱锦懋, 林青青, 等. 小麦茎秆结构和细胞壁化学成分对抗压强度的影响[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 679—685.  
Wang Jian, Zhu Jinmao, Ling Qingqing, et al. Impacts of structure and cell wall of wheat stem on its compressive strength[J]. Chinese Bulletin of Science, 2006, 51(6): 679—685. (in Chinese with English abstract)
- [16] Li Y H, Qian Q, Zhou Y H, et al. *Brittle Culm1*, which encodes a COBRA-like protein, affects the mechanical properties of rice plants[J]. Plant Cell, 2003, 15: 2021—2031.
- [17] 郭玉明, 袁红梅, 阴 妍, 等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 14—18.  
Guo Yuming, Yuan Hongmei, Yin Yan, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 14—18. (in Chinese with English abstract)
- [18] Duan C R, Wang B C, Wang P Q. Relationship between the minute structure and the lodging resistance of rice stems[J]. Colloids Surfaces, 2004, 35: 155—158.
- [19] Kokubo A, Kuraishi S, Sakurai N. Culm strength of barley: Correlation among maximum bending stress, cell wall dimensions, and cellulose content[J]. Plant Physiol, 1989, 91: 876—882.
- [20] 任永胜. 西宁市地质灾害及其防治对策[J]. 青海国土经略, 2004, (3): 31—33.
- [21] 李正理. 植物制片技术[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 138—148.
- [22] 谭玲玲, 蔡 霞, 胡正海. 北柴胡根的发育解剖学研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(11): 2198—2203.  
Tan Lingling, Cai Xia, Hu Zhenghai. Anatomical study of *Bupleurum chinense* DC. roots[J]. Acta Bot Boreal—Occident Sin, 2005, 25(11): 2198—2203. (in Chinese with English abstract)
- [23] 艾素云, 黄玉源, 伍映辉. 贵州苏铁根的解剖学研究[J]. 云南植物研究, 2006, 28(2): 149—156.  
Ai Suyun, Huang Yuyuan, Wu Yinghui. Study on anatomy of the root of *cycas guizhouensis*(cycadaceae)[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2006, 28(2): 149—156. (in Chinese with English abstract)

## Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root

Zhu Haili<sup>1</sup>, Hu Xiasong<sup>1,2\*</sup>, Mao Xiaoqing<sup>3</sup>, Li Guorong<sup>1</sup>, Zhang Xingling<sup>3</sup>, Chen Guicheng<sup>2</sup>

(1. Qinghai University of Geological Engineering Department, Qinghai 810016, China;

2. Northwest Plateau Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences, Qinghai 810007, China;

3. Qinghai University of Hydraulic and Electric Power Engineering Department, Qinghai 810016, China)

**Abstract:** Taking Xining basin as example, the single root tensile tests, shear tests and roots anatomical tests of five species of shrub were carried out to study the relationship between mechanical characteristics of shrub roots and roots anatomical structures in the loess area of northeast Qinghai-Tibet plateau. The results showed that the main factors affected tensile and shear strength of single root including the percentage of phloem fibers and wood fibers, the degree and speed of periderm lignification. The shrubs single root elongation rate varied directly as the area percentage of secondary phloem, varied inversely as the area percentage of xylem. For five species of shrub, the largest area percentage of secondary phloem is *Caragana korshinskii* and reached 45% showing great single root elongation rate; the largest area percentage of xylem is *Atriplex canescens* and reached 50% reflecting the better mechanical characteristics. According to the root mechanical characteristics and root anatomical features, *Atriplex canescens* and *Caragana korshinskii* have a significant function in slope protection in Qinghai-Tibet plateau loess area.

**Key words:** tensile strength, shear strength, mechanical characteristics, phloem fibers, wood fibers