

三江并流区水库消落带 5 种草本根系形态及抗拉特性

黄广杰¹, 段青松², 李建兴³, 熊寿德¹, 刘武江¹, 保锐琴¹, 张立芸⁴

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201;

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051; 4. 云南农业大学 机电工程学院, 昆明 650201)

摘 要:为揭示三江并流区水库消落带 5 种草本植物在浅层土壤中的根系形态及抗拉力学特性, 筛选消落带优势固土草本, 以澜沧江黄登水库消落带的花叶芦竹(*Arundo donax* var. *versicolor*)、风车草(*Cyperus alternifolius* L.)、美人蕉(*Canna indica* L.)、菖蒲(*Acorus calamus* L.)和芦苇(*Phragmites communis* Trin.)为对象, 分析了根系形态, 并进行室内单根拉伸试验。结果表明: (1) 5 种草本根系都发育良好, 花叶芦竹和风车草根系的所有形态指标都位居前二, 根系较为发达; 5 种草本直径大于 1 mm 的根系长度、表面积和体积在各自总根系中占比最大, 且除芦苇外, 其余 4 种草本直径大于 2 mm 的根系体积占比最大, 达到 58.53%~92.86%。(2) 5 种草本根系的平均抗拉力、抗拉强度以花叶芦竹(33.04 N, 34.33 MPa)最大, 美人蕉(10.26 N, 7.54 MPa)最小, 根系抗拉力、抗拉强度分别随直径增大呈幂函数增大、减小。(3) 5 种草本根系平均极限延伸率以菖蒲(24.28%)最大, 美人蕉(8.20%)最小; 平均杨氏模量以花叶芦竹(313.44 MPa)最大, 菖蒲(70.47 MPa)最小, 根系杨氏模量与直径呈幂函数负相关。综上, 5 种草本都适应了研究区环境, 均可作为黄登水库消落带植被重建的候选物种; 直径大于 1 mm 的根系是 5 种草本根系的主体, 直径大于 2 mm 的根系整体对体积贡献最大; 花叶芦竹不仅根系发达, 且其抵抗拉伸作用的能力最强, 固土能力最强, 是黄登水库消落带水土保持的优势草本。研究结果可适当推广到三江并流区和其他水库消落带。

关键词: 水库消落带; 草本植物; 根系形态; 抗拉特性

中图分类号: S781.25; S728.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)03-0389-07

Root Morphology and Tensile Characteristics of Five Kinds of Herbs in Reservoir Fluctuating Zone of Three Parallel Rivers

HUANG Guangjie¹, DUAN Qingsong², LI Jianxing³, XIONG Shoude¹,
LIU Wujiang¹, BAO Ruiqin¹, ZHANG Liyun⁴

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China; 4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to reveal the root morphology and tensile mechanical properties of five herbaceous plants in the reservoir fluctuating zone of the three parallel rivers, the dominant herbs of soil fixation and erosion resistance were selected. *Arundo donax* var. *versicolor*, *Cyperus alternifolius* L., *Canna indica* L., *Acorus calamus* L. and *Phragmites communis* Trin in the fluctuating zone of Huangdeng Reservoir on the Lancang River were selected as the samples in this study. The root morphology was analyzed and the root tensile property was measured by laboratory tests. The results show that: (1) the roots of the five herbs are well developed, and the root morphological indexes of the *Arundo donax* var. and the *Cyperus alternifolius* L. were in the top two, the roots of the two species are relatively developed; the root length, surface area and volume of the Five Herbs with diameter greater than 1 mm account for the largest proportion in their total roots, and the root volumes of the other four herbs with diameter greater than 2 mm account for the largest proportion, reaching 58.53% ~ 92.86%, except the *Phragmites communis* Trin; (2) the highest average tensile force and tensile strength of the five herbs is the *Arundo donax* var. *versicolor* (33.04 N, 34.33

收稿日期: 2020-04-08

修回日期: 2020-05-15

资助项目: 国家自然科学基金(42167046); 云南澜沧江黄登水电站库周消落带治理试验工程科研合作(H20200133); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y165)

第一作者: 黄广杰(1996—), 男, 云南迪庆人, 硕士研究生, 主要从事土地生态化整治与利用研究。E-mail: 1587409529@qq.com

通信作者: 张立芸(1981—), 女, 云南昆明人, 讲师, 博士在读, 研究方向为农业水利工程。E-mail: 37545459@qq.com

MPa), and the lowest is the *Canna indica* L. (10.26 N, 7.54 MPa); with the increase of root diameter, the root tensile force and the root tensile strength of five herbs significantly increase, decrease; these relationships can both be well fitted by power function; (3) the maximum single root limit extensile rate of five herbs was the *Acorus calamus* L. (24.28%) and the lowest was the *Arundo donax* var. *versicolor* (8.20%), the maximum average Young's modulus is the *Arundo donax* var. *versicolor* (313.44 MPa), and the smallest is the *Acorus calamus* L. (70.47 MPa). There is a negative correlation between Young's modulus and root diameter. To sum up, the five herbaceous plants are well adapted to the environment of the study area, and can be used as candidate species for vegetation restoration of the fluctuating zone of the Huangdeng reservoir. The morphological indexes of the root system of the *Arundo donax* var. *versicolor* and the *Cyperus alternifolius* L. are significantly higher than those of the other three herbs, and the root system is relatively developed. The ability of the *Arundo donax* var. to resist the tensile action of the outer boundary is the strongest, and its soil fixation ability is the strongest, the results showed that the dominant herb for water and soil conservation in the fluctuating zone of the Huangdeng reservoir is the *Arundo donax* var. These results can be appropriately extended to the three parallel rivers area and other reservoir fluctuation zones.

Keywords: reservoir fluctuating zone; herbaceous plants; root morphology; tensile characteristics

三江并流区位于青藏高原东南部,横断山脉纵谷地带,是我国最大的世界自然遗产地,也是世界生物多样性和民族文化多元性最丰富的地区之一。三江并流区是我国西南生态屏障的重要部分和核心区域,区内怒江、澜沧江、金沙江3条大河并行而流170 km,从海拔6 740 m的梅里雪山最高峰到700 m左右的怒江河谷,地形高差悬殊巨大^[1];该区处于地壳运动活跃区和地壳构造板块碰撞点,岩质松软、岩层节理发育、岩石破碎,成土母质易于风化,滑坡、泥石流、崩塌等灾害频发^[2],是我国水土流失高发地区之一^[1]。在国家大力兴建水利设施的大背景下,丰富的水能资源使三江流域深受国家水能水电资源开发的青睐,三江干流规划建设的大型以上的水电站达23座^[3],各电站大坝的运行将使“三江”水位既受自然节律调控,也更多受人为调控,在三江沿岸形成许多大面积消落带,在反复的江水、径流、重力等多重营力作用下,消落带成为了土壤侵蚀的重灾区,不仅对水库的安全运行造成一定影响,更是频繁影响沿岸人民的交通出行,甚至威胁人民生命财产安全。

黄登水电站地处云南省怒江州兰坪县营盘镇境内,是澜沧江上游规划河段的第六级水电站,于2019年6月工程完建,电站装机容量1 900 MW,电站水库贯穿兰坪和维西两县,总库容 $1.67 \times 10^9 \text{ m}^3$,属I等大(1)型,丰水期最高水位1 619 m,枯水期最低水位1 586 m^[4-5],水库调度运行在最低与最高水位线间形成了水位高差33 m的消落带。库区地势陡峭、河谷深切、基岩风化度高、生态敏感性脆弱性强,水土流失严重,沿江88 km长度范围的库岸发育了近60处活动性滑坡^[3],超过了怒江、澜沧江和金沙江干流

流域滑坡总数的10%,是三江并流区沿江滑坡发育最频繁、最密集的区段,黄登水库在该区水库中具有较强的代表性。

消落带是连接水陆生态系统的交错、过渡区域,兼具水域和陆地两重属性;也是生态环境比较脆弱的敏感地带和易污染地带,其生态修复是一个世界性难题^[6-7]。严重的土壤侵蚀已成为消落带主要的生态环境问题^[7],消落带生态治理主要以植被恢复为主,筛选固土抗蚀的优势植物是消落带治理的前提和基础。植物具有良好的固土抗蚀的能力,由地上部分和地下根系共同体现,一方面植物通过其地上部分拦挡降雨、径流、波浪,发挥缓冲作用,从而弱化侵蚀强度;另一方面,植物根系穿插缠绕在土体中,通过网络、护挡、牵拉作用抵抗外来侵蚀营力从而固持土壤,提高土壤抗侵蚀性能^[8]。植物根系在土壤侵蚀防治中起主导作用,其固土抗蚀效应远远高于地上部分^[9],且利用草本植物在消落带进行植被重建较为经济、高效^[10]。

近年来,学者越来越关注消落带植物根系及其固土抗蚀性的研究。徐少君等^[11]、李建兴等^[12]分别通过含根土体静水崩解、直剪试验研究表明根系可显著增强土体的抗水蚀特性和抗剪强度,钟荣华等^[13-14]、徐文秀等^[15]通过单根拉伸试验研究了5种草本根系的抗拉性能并预估了固土能力,指出草本根系具有良好的固土能力。但以上研究多以三峡库区消落带的狗牙根(*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.)等草本为主,有关三江并流区水库消落带的植物研究还未见报道。研究植物根系形态特征可洞察植物对生长环境的适应能力以及抗逆性^[16],土体中的植物根系可将土体承受的剪力转变为自身所受拉应力而增强土体

抗剪强度,因此根系的抗拉性能指标抗拉强度、极限延伸率、杨氏模量等是反映根系固土抗蚀能力的重要参数^[15,17]。本研究选取澜沧江黄登水库消落带的5种适生草本,对比分析根系形态及抗拉特性,以期为三江并流区水库消落带生态治理,尤其是消落带土壤侵蚀防治的草本植物物种选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于维西县维登乡黄登水库库尾左岸平缓开阔的消落带(27°6′56″N,99°10′29″E),该区域地处横断山脉纵谷地带碧罗雪山山系尾部,属“三江并流”核心地带,年均气温 14.9℃,年均降雨量 938.6 mm。黄登水库蓄水前,区内有狗牙根、青蒿(*Artemisia annua* L.)、马鞭草(*Verbena officinalis* L.)、白茅草(*Imperata cylindrica* L.)等原生草本,水库运行后,仅有狗牙根零星分布。2019年5月1日—15日,为重建消落带植被,在区内浅水位(水位高程 1 618~1 619 m)进行了植被配置,栽植了菖蒲(*Acorus calamus* L.)、狗牙根两种乡土物种和香根草(*Vetiver zizanioides*)、凤仙花(*Impatiens balsamina* L.)、美人蕉(*Canna indica* L.)、风车草(*Cyperus alternifolius* L.)、花叶芦竹(*Arundo donax* var. *versicolor*)、芦苇(*Phragmites communis* Trin.)等共 16 种草本植物,一年的淹水落干后,狗牙根、香根草、花叶芦竹、风车草、美人蕉、菖蒲、芦苇等植物长势较好,其余植物未存活。

1.2 样地选择及采样

2020年11月下旬,黄登水库消落带退水后,挖取花叶芦竹、风车草、美人蕉、菖蒲和芦苇的根系。现场挖掘发现5种草本根系主要分布在地下50 cm以内,故每种草本选取5株健壮植株,以植株为中心,在长、宽、深均为50 cm的范围挖取根系,挖掘时尽量避免对根系的机械损伤,挖出的根系做好保鲜处理尽快带回实验室。

1.3 根系分析

待测根系用水洗净后吸干水分,置于洁净的高透扫描盘中,用毛刷轻轻拨开根系,使根系最大限度延展在盘中,用Epson 12000 XL扫描仪中在400 dpi下进行灰度扫描,用WinRhizo根系分析系统分析根系形态指标。花叶芦竹、美人蕉、菖蒲、芦苇为根茎型植物^[18-19],都有粗壮的地下茎,从地下茎长出的较细根系与须根型风车草根^[19]类似。大量研究表明植物发挥固土护坡的作用的主要是细根^[12,13-15,17],为便于对比,本研究根系相关参数的统计均未计入根茎型

植物的地下茎。

1.4 单根拉伸试验

本试验以50 mm标距,对每种草本100根顺直、无损伤的根系进行拉伸试验。用电子数显游标卡尺测量根系中间处的直径作为单根直径,用山度牌SN100数显拉力试验机(量程100 N、精度为0.05 N)测定单根最大抗拉力,用百分表(量程为0~25 mm,精度为0.01 mm)测定单根伸长量。试验前,在试验机夹具两端缠绕软布胶带以增加根系与夹具间的摩擦力,把上下夹具的间距调为50 mm,夹紧根系,用手匀速转动试验机旋钮开始试验,拉伸速率参照钟荣华等^[13]控制在10~15 mm/min。试验中,根系只有在根中间1/3段发生断裂时测得的数据有效。根系力学指标及计算方法^[15,20]如下:

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

$$\epsilon = \Delta \frac{L}{50} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_r = \frac{200F}{\pi D^2} \Delta L \quad (3)$$

式中: T_r 为根系抗拉强度(MPa); F 为根系最大抗拉力(N); D 为根系直径(mm); ϵ 为根系纵向应变,即极限延伸率(%); ΔL 为根系拉断时的伸长量(mm);50为拉伸根系原长,即标距(mm); E_r 为杨氏模量(MPa)。

1.5 数据统计与分析

采用Microsoft Excel软件进行数据整理和回归分析,用SPSS 21.0软件Duncan氏新复极差法进行差异显著性分析,用Origin 2019软件绘图。

2 结果与分析

2.1 草本植物根系形态指标比较

图1为5种草本根系的图像,5种草本的新根均为白色,老根颜色同中有异,5种草本根系均发育良好,无病虫害。5种草本根系形态指标见表1,根系平均直径、根系体积都以花叶芦竹最大,风车草次之,芦苇最小,花叶芦竹和芦苇间差异极显著;根系长度、根系表面积都以风车草最大,花叶芦竹次之,芦苇最小,且风车草和芦苇间差异极显著。美人蕉和菖蒲根系的所有形态指标都排在第三或第四位,且两种间各指标均无显著差异。5种草本根系平均直径和根系长度、表面积、体积的最大差异分别为1.69倍,2.10倍,2.97倍,4.97倍。

草本植物根系直径的分级目前还未形成统一标准,参照以往消落带草本植物的研究^[12-15]以及段青松等^[21]对草本植物根系直径的分级,本研究分7个径

级对根系的长度、表面积、体积进行详细分析,见表 2。由表 2 可知,5 种草本直径大于 1 mm 的根系长度、表面积、体积的占比分别在 59.91%~63.70%, 74.14%~91.41%, 88.39%~98.36% 之间,大于 1 mm 的根系为 5 种草本根系的主体。且 5 种草本根

系的长度、表面积表现为:花叶芦竹和风车草在直径大于 2 mm 的径级占比最大,其余 3 种在 1~2 mm 的径级占比最大;根系体积表现为:芦苇在 1~2 mm 的径级占比最大,其余 4 种均在直径大于 2 mm 的径级占比最大。

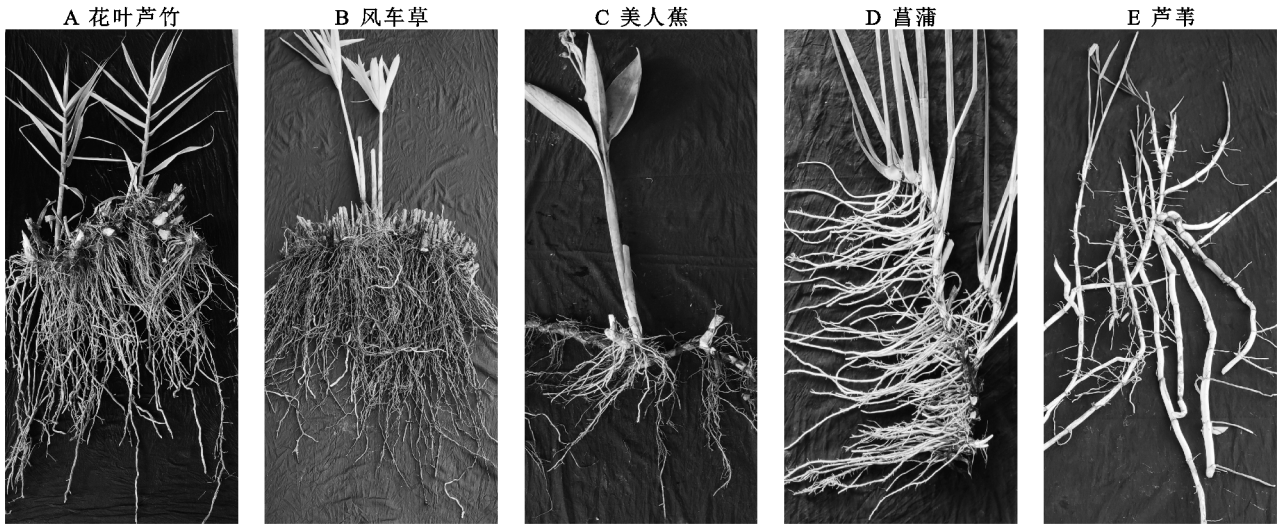


图 1 5 种草本植物根系
表 1 5 种草本根系形态指标

| 草本植物 | 平均直径/mm | 长度/cm | 表面积/cm ² | 体积/cm ³ |
|------|-------------|------------------|---------------------|--------------------|
| 花叶芦竹 | 2.03±0.42A | 6821.35±984.84B | 4362.59±1019.42AB | 237.08±68.68A |
| 风车草 | 1.61±0.27AB | 9131.07±1294.80A | 4768.81±1436.78A | 204.32±37.05A |
| 美人蕉 | 1.28±0.14B | 5000.23±315.16BC | 1993.10±490.87BC | 63.45±13.66B |
| 菖蒲 | 1.32±0.13B | 4889.17±665.39BC | 2201.17±614.86BC | 80.18±17.94B |
| 芦苇 | 1.20±0.12B | 4341.36±289.27C | 1604.53±452.50C | 47.67±11.96B |

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母、大写字母分别表示指标间差异显著、极显著($p<0.05$, $p<0.01$)。

表 2 不同径级根系各结构指标占总量的比例 %

| 根系结构 指标 | 草本植物 | 根系径级 D | | | | | | |
|------------|------|---------|------------|------------|------------|----------|--------|-------|
| | | ≤0.1 mm | 0.1~0.2 mm | 0.2~0.3 mm | 0.3~0.5 mm | 0.5~1 mm | 1~2 mm | >2 mm |
| 长度 | 花叶芦竹 | 1.68 | 5.24 | 6.94 | 7.98 | 15.09 | 15.22 | 47.85 |
| | 风车草 | 0.77 | 5.47 | 9.62 | 7.42 | 14.96 | 26.58 | 35.18 |
| | 美人蕉 | 0.83 | 5.7 | 10.29 | 10.54 | 20.21 | 34.85 | 17.58 |
| | 菖蒲 | 1.32 | 6.05 | 8.09 | 4.22 | 15.22 | 45.79 | 19.31 |
| | 芦苇 | 0.36 | 3.21 | 7.55 | 8.67 | 29.25 | 40.55 | 10.41 |
| 表面积 | 花叶芦竹 | 0.08 | 0.44 | 0.91 | 1.63 | 5.53 | 11.48 | 79.93 |
| | 风车草 | 0.04 | 0.59 | 1.5 | 1.87 | 7.12 | 26.63 | 62.25 |
| | 美人蕉 | 0.06 | 0.78 | 2.07 | 3.38 | 12.58 | 43.15 | 37.98 |
| | 菖蒲 | 0.08 | 0.67 | 1.4 | 1.17 | 8.67 | 49.72 | 38.29 |
| | 芦苇 | 0.03 | 0.34 | 1.64 | 3.02 | 20.83 | 51.19 | 22.95 |
| 体积 | 花叶芦竹 | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.21 | 1.32 | 5.50 | 92.86 |
| | 风车草 | 0.01 | 0.04 | 0.16 | 0.32 | 2.37 | 18.62 | 78.48 |
| | 美人蕉 | 0.01 | 0.07 | 0.27 | 0.73 | 5.34 | 36.36 | 57.22 |
| | 菖蒲 | 0.01 | 0.05 | 0.16 | 0.22 | 3.44 | 37.59 | 58.53 |
| | 芦苇 | 0.01 | 0.05 | 0.26 | 0.76 | 10.53 | 50.04 | 38.35 |

注:表中 0.1~0.2 表示 $0.1<D\leq0.2$,后续写法含义相同。

2.2 草本植物根系抗拉力和抗拉强度比较

5 种草本根系拉伸试验总共测试成功 266 根,平

均成功率为 53.2%,测试成功的直径范围为 0.35~3.06 mm,测得根系抗拉力范围为 3.59~64.53 N,平

均抗拉力依次为花叶芦竹(33.04 N)>风车草(18.44 N)>菖蒲(18.35 N)>芦苇(11.16 N)>美人蕉(10.26 N)。根系抗拉强度范围为 2.31~73.70 MPa,平均抗拉强度依次为花叶芦竹(34.33 MPa)>菖蒲(16.45 MPa)>风车草(14.85 MPa)>芦苇(12.81

MPa)>美人蕉(7.54 MPa)。

不同植物根系的抗拉力、抗拉强度随直径的变化幅度不同^[15],但 5 种植物的抗拉力、抗拉强度均随直径增大而增大、减小(图 2),且都与直径间存在幂函数关系(表 3)。

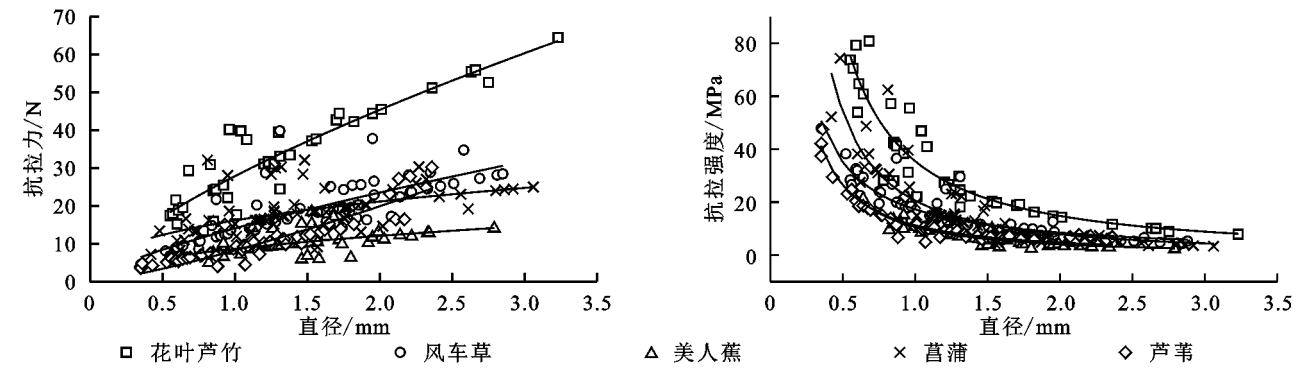


图 2 5 种草本根系抗拉力、抗拉强度随直径的变化特征

表 3 5 种草本根系抗拉力、抗拉强度与直径间的回归方程

| 草本植物 | 抗拉力/N | | | 抗拉强度/MPa | | |
|------|----------------------|-------|---------|----------------------|-------|---------|
| | 拟合方程 | R^2 | p | 拟合方程 | R^2 | p |
| 花叶芦竹 | $y=27.173x^{0.7363}$ | 0.77 | <0.01 | $y=34.615x^{-1.264}$ | 0.91 | <0.01 |
| 风车草 | $y=13.135x^{0.8415}$ | 0.77 | <0.01 | $y=16.732x^{-1.158}$ | 0.86 | <0.01 |
| 美人蕉 | $y=8.288x^{0.5178}$ | 0.52 | <0.01 | $y=10.558x^{-1.482}$ | 0.80 | <0.01 |
| 菖蒲 | $y=15.247x^{0.442}$ | 0.61 | <0.01 | $y=19.423x^{-1.558}$ | 0.85 | <0.01 |
| 芦苇 | $y=8.9851x^{0.943}$ | 0.82 | <0.01 | $y=11.446x^{-1.057}$ | 0.85 | <0.01 |

2.3 草本植物根系极限延伸率和杨氏模量比较

由表 4 可知,本研究测试成功的 5 种草本根系的直径间无显著差异。

5 种草本根系的平均极限延伸率菖蒲(24.28%)>风车草(19.45%)>芦苇(17.43%)>花叶芦竹(12.66)>美人蕉(8.20%),且两两间差异达极显著

水平。5 种草本根系的杨氏模量范围为 20.43~1 178.68 MPa,以花叶芦竹(313.44 MPa)最大,菖蒲(70.47 MPa)最小,花叶芦竹与其余草本差异极显著,最大差异高达 4.45 倍。5 种草本根系的杨氏模量同抗拉强度一致,随根系直径的增大呈幂函数减小($p<0.01$),但不同草本的变化幅度不同(图 3)。

表 4 5 种草本根系极限延伸率与杨氏模量参数

| 草本植物 | 平均直径/mm | 极限延伸率/% | | 杨氏模量/MPa | |
|------|------------|-------------|-------------|---------------|----------------|
| | | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 花叶芦竹 | 1.32±0.69a | 6.46~17.76 | 12.66±2.81D | 51.30~1178.68 | 313.44±273.67A |
| 风车草 | 1.48±0.68a | 11.90~28.64 | 19.45±4.06B | 21.20~327.19 | 79.57±58.24B |
| 美人蕉 | 1.46±0.48a | 3.50~12.74 | 8.20±2.36E | 22.53~372.27 | 110.72±90.87B |
| 菖蒲 | 1.46±0.61a | 16.50~30.50 | 24.28±3.74A | 11.89~322.53 | 70.47±64.30B |
| 芦苇 | 1.22±0.56a | 11.46~26.60 | 17.43±3.71C | 20.43~304.31 | 78.49±67.57B |

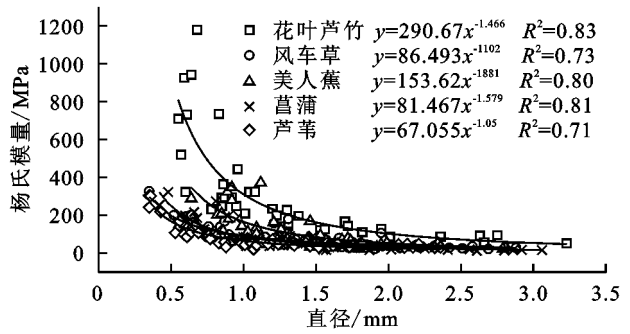


图 3 5 种草本根系杨氏模量随直径的变化特征

3 讨论

3.1 根系形态及其影响因素

植物根系的形态与分布首先由植物本身的遗传特性所决定^[16],环境变化对植物根系也有重要影响^[22],根系表面积、体积越大,根系越长,越有利于植物吸收土壤水分和养分,从而更好地适应生长环境^[23]。本研究中 5 种草本植物生长在同样的环境中,受相同土壤水分和养分影响,根系形态指标的差

异很大程度上反映了各草本本身的特性以及适应研究区环境的能力,花叶芦竹和风车草根系的所有形态指标都位居前二,说明二者根系发达。根系长度主要由根系数量以及单根长度决定,根系表面积和体积则由根系直径、数量、长度共同决定,花叶芦竹、风车草根系相比于其余3种草本直径更大、长度更长,故根系表面积和体积也更大。5种草本直径大于1 mm的根系长度、表面积和体积占比大,这与5种草本根系本身的直径有关^[16],直径大于1 mm的根系占多数。整体上直径大于2 mm的根系体积占总体积的比例最大,是因为根系形状整体上接近于圆柱体,故直径大的根系对体积贡献更大。

3.2 根系抗拉性能及其影响因素

直径是对根系抗拉性能影响最显著的因子之一^[13-15,17],5种植物根系的抗拉力和抗拉强度分别随直径的变大而增大和减小,且与直径均呈幂函数相关,这与国内外大量草本、灌木、乔木根系的研究结果^[13-15,17,24-30]一致。5种植物根系的杨氏模量随直径增大呈幂函数减小,这与田佳等^[28]对花棒(*Hedysarum scoparium*)和沙柳(*Salix psammophila*)以及周林虎等^[29]对柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、中宁枸杞(*Lycium Chinese*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)和霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)的研究结论一致。花叶芦竹是芦竹的变种,但在相同径级条件下,本研究中花叶芦竹的抗拉力和抗拉强度都高于冯国建等^[31]对芦竹的研究结果,其原因可能是两种植物具有种间差异,植物根系抗拉性能受根系微观结构^[26]、化学组分^[27]、水分^[30]影响,不同生长期植物根系抗拉性能亦所差异^[32]。因此进一步对不同淹水梯度、不同生长时期消落带植物根系抗拉特性进行研究具有一定的价值和意义。

3.3 在黄登水库消落带中的应用

从根系形态看,5种草本根系均发育良好,都适应了研究区环境,均可作为黄登水库消落植被恢复的候选物种。

以固土抗蚀的角度分析,当发生滑坡等灾害,土体受外力作用时,生长在土壤中的根系可将土体承受的剪力转变为自身所受的拉应力来增强土体抗剪强度,发挥固土作用^[15,17]。5种草本根系平均抗拉力花叶芦竹(33.04 N)>风车草(18.44 N)>菖蒲(18.35 N)>芦苇(11.16 N)>美人蕉(10.26 N),抗拉强度花叶芦竹(34.33 MPa)>菖蒲(16.45 MPa)>风车草(14.85 MPa)>芦苇(12.81 MPa)>美人蕉(7.54 MPa)。5种植物根系都

能抵抗一定的拉应力,发挥固土作用,花叶芦竹根系抗拉力和抗拉强度都最大,其抗拉强度相当于Ⅰ级钢筋^[33](235 MPa)的14.6%,在土体中有明显的加筋作用,所能承受的极限拉应力最大,美人蕉则最小。植物根系具有弹塑性材料的特点^[17],根系极限延伸率、杨氏模量是衡量其变形能力的重要指标,极限延伸率越大,抵抗塑性变形的能力越强,杨氏模量越大,抵抗弹性变形的能力越强^[15,20]。5种草本根系极限延伸率菖蒲(24.28%)>风车草(19.45%)>芦苇(17.43%)>花叶芦竹(12.66%)>美人蕉(8.20%),杨氏模量花叶芦竹(313.44 MPa)>美人蕉(110.72 MPa)>风车草(79.57 MPa)>芦苇(78.49 MPa)>菖蒲(70.47 MPa)。由此可得菖蒲抵抗塑性变形的能力最强,滑坡发生时在一定的弹性形变范围内对下滑土体的有较弱的缓冲作用,花叶芦竹根系的存在则使得土体抵抗弹性变形的能力明显变强^[15]。美人蕉虽杨氏模量排在第二位,但其所能承受的拉应力、应变均最小,展现出一定脆性。根系发达,抗拉强度大的植物固土作用更强^[12-14,22],由此可得花叶芦竹固土作用最强,是黄登水库消落带优势固土植物。

4 结论

(1) 5种草本中,花叶芦竹和风车草的根系形态指标均高于其余3种草本,根系较为发达;直径大于1 mm的根系为5种草本根系的主体,直径大于2 mm的根系整体上对体积贡献最大。

(2) 5种草本根系的抗拉力、抗拉强度和杨氏模量与直径之间都为幂函数关系。

(3) 5种草本根系均可抵抗一定拉应力,花叶芦竹根系抗拉力、抗拉强度、杨氏模量均最大,其抵抗拉伸作用的能力最强,固土力最强,美人蕉最弱。

总体而言,5种草本根系都发育良好,均可作为黄登水库消落带植被重建的候选物种,花叶芦竹是优势固土草本。研究结果可推广运用到三江并流区和其他条件类似的水库消落带。

参考文献:

- [1] 万晔,司徒群,李子海.滇西北地理环境特征与区域水土流失相互作用机制研究[J].水土保持通报,2003,23(5):1-5.
- [2] 何忠俊,王立东,郭琳娜,等.三江并流区土壤发生特性与系统分类[J].土壤学报,2011,48(1):10-20.
- [3] 姚鑫,邓建辉,刘星洪,等.青藏高原泛三江并流区活动性滑坡 InSAR 初步识别与发育规律分析[J].工程科学与技术,2020,52(5):16-37.
- [4] 陈晓舒,赵同谦,李聪,等.基于不同利益相关者的水电能源基地建设经济损益研究:以澜沧江干流为例[J].生

- 态学报,2017,7(13):4495-4504.
- [5] 赵云川,李琦,陈江,等.孔径变形法测试地应力弹性模量参数选取分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):2143-2147.
- [6] Bao Y, Tang Q, He X, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Hydrology Research*, 2015,46(2):212-221.
- [7] 周紫璇,陆颖,钟荣华,等.大坝运行对水库消落带土壤环境影响研究进展[J].水文,2019,39(1):15-19.
- [8] Angela G. Plants as river system engineers[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014,39(1):4-25.
- [9] 钟荣华,贺秀斌,鲍玉海,等.狗牙根和牛鞭草的消浪减蚀作用[J].农业工程学报,2015,31(2):133-140.
- [10] 贺秀斌,鲍玉海.三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J].中国水土保持科学,2019,17(4):160-168.
- [11] 徐少君,曾波,类淑桐,等.三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应[J].土壤学报,2011,48(1):160-167.
- [12] 李建兴,何丙辉,湛芸,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.
- [13] 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黏聚力[J].水土保持学报,2015,29(4):188-194.
- [14] Zhong R, He X, Bao Y, et al. Estimation of soil reinforcement by the roots of four post-dam prevailing grass species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016,13(3):508-521.
- [15] 徐文秀,杨玲,鲍玉海,等.大型水库消落带2种典型耐淹草本植物单根抗拉力学特性[J].水土保持研究,2020,27(5):259-264,272.
- [16] 王月海,许景伟,韩友吉,等.黄河三角洲5个耐盐树种苗木根系形态结构特征[J].水土保持研究,2014,21(1):261-266.
- [17] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等.林木根系固土力学机制[M].北京:科学出版社,2008.
- [18] 林剑华,杨扬,李丽,等.8种湿地植物的生长状况及泌氧能力[J].湖泊科学,2015,27(6):1042-1048.
- [19] 陈文音,陈章和,何其凡,等.两种不同根系类型湿地植物的根系生长[J].生态学报,2007,27(2):450-458.
- [20] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Effects of root dehydration on biomechanical properties of woody roots of *Ulex europaeus*[J]. *Plant and Soil*, 2018,431(1):347-369.
- [21] 段青松,王金霞,杨旻,等.金沙江干热河谷乡土草本植物根系提高土体抗剪强度及其模型预测[J].中国水土保持科学,2017,15(4):87-95.
- [22] 宋香静,李胜男,郭嘉,等.环境变化对湿地植物根系的影响研究[J].水生态学杂志,2017,38(2):1-9.
- [23] Huang B, Xin J, Dai H, et al. Root morphological responses of three hot pepper cultivars to Cd exposure and their correlations with Cd accumulation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015,22(2):1151-1159.
- [24] De Baets S, 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):207-226.
- [25] Comino E, Marengo P, Rolli V. Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010,110(1):60-68.
- [26] 蒋坤云,陈丽华,盖小刚,等.华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系[J].农业工程学报,2013,29(3):115-123.
- [27] 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[J].农业工程学报,2013,29(23):69-78.
- [28] 田佳,曹兵,及金楠,等.防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J].农业工程学报,2014,30(23):192-198.
- [29] 周林虎,胡夏嵩,刘昌义,等.青藏高原东北部4种灌木主根和侧根抗拉力学特性比较[J].水土保持通报,2019,39(3):93-100.
- [30] Yang Y, Chen L, Li N, et al. Effect of root moisture content and diameter on root tensile properties[J]. *Plos One*, 2016,11(3):doi.org/10.1371/journal.pone.0151791.
- [31] 冯国建,沈凡,王世通.护坡植物根系分布特征及抗拉强度研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2013,30(2):115-118.
- [32] 郑明新,黄钢,彭晶.不同生长期多花木兰根系抗拉拔特性及其根系边坡的稳定性[J].农业工程学报,2018,34(20):175-182.
- [33] 吕春娟,陈丽华,周硕,等.不同乔木根系的抗拉力学特性[J].农业工程学报,2011,27(S1):329-335.