

文章编号: 1008 - 2786 - (2020)6 - 894 - 10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000565

## 垂穗披碱草根力学特性统计分析

付江涛<sup>a</sup>, 李晓康<sup>b</sup>

(陕西理工大学 a. 土木工程与建筑学院; b. 数学与计算机科学学院, 陕西 汉中 723000)

**摘 要:** 垂穗披碱草作为一种适应性强、分布广泛的优良水土保持植物, 广泛应用于各类山区生态恢复/修复工程。为合理评估垂穗披碱草在水土保持工程中的力学作用, 本文对生长于青海省河南县的多年野生垂穗披碱草 (*Elymus nutans* Griseb.) 根系进行单根拉伸试验, 测定其单根根径、抗拉力、抗拉强度、拉伸率和拉伸模量等五项力学指标; 通过数理统计模型 (正态分布、瑞利分布、伽马分布和威布尔分布) 对五项力学指标分布特性进行统计分析; 采用卡方检验 ( $\chi^2$  检验) 和柯尔莫哥洛夫 - 斯米洛夫检验 (K - S 检验) 对五项指标在不同分布函数中的显著性进行了检验; 对比了两种检验方法的优劣, 确定各指标的最优分布函数。研究结果表明: 垂穗披碱草根力学五项指标表现出巨大的变异性, 变异系数为 37.01% ~ 76.00%; 四种分布函数均可定性描述根系各指标的分布特征, 但不同指标在不同分布函数下表现出一定程度的差异; 相较于  $\chi^2$  检验, K - S 检验由于其更适用于小样本数据, 其检验结果更具有可信性; 五项指标中, 根径和拉伸率最优分布函数均为伽马分布, 抗拉力和抗拉强度最优分布函数均为威布尔分布, 拉伸模量最优分布函数为正态分布。该研究结果对于深入认识垂穗披碱草根力学特性, 揭示垂穗披碱草在水土保持工程中的力学机制具有重要的理论价值。

**关键词:** 植被护坡; 根力学指标; 分布函数

**中图分类号:** P642.5

**文献标志码:** A

中国日益重视西北地区尤其是青藏高原生态环境保护。在中国西部基础设施建设中, 生态护坡工程或生态修复已经成为常态。受地质、地理和气候等自然条件约束, 生态护坡/恢复工程中采用草灌或草本植物为生态恢复或生态治理的首选。垂穗披碱草 (*E. nutans*) 因具有生长迅速、根系发达、地上生物量高、抗寒、耐瘠薄等优点<sup>[1]</sup>, 已经被广泛应用于中国西北各类生态恢复或治理工程, 如沙化土地治理与恢复<sup>[2]</sup>、高寒地区矿山恢复<sup>[3]</sup>、重金属污染区治理<sup>[4]</sup>、盐渍土恢复治理<sup>[5]</sup>等。与之相关的垂穗披碱草研究主要涉及: 非生物胁迫的生理响应及响应机制<sup>[1, 6-10]</sup>、非生物胁迫的耐受机制和耐受能力评

价<sup>[1, 6-10]</sup>、固土护坡特性<sup>[11]</sup>、种群及群落功能<sup>[12]</sup>、根系结构形态<sup>[13-14]</sup>。上述研究从不同学科、不同背景出发, 研究了垂穗披碱草的两大生态特性, 即环境适应特性和环境治理恢复特性。

草本植物地上部分对降雨的截留作用和溅蚀的遮挡作用, 以及根系对土体颗粒的加筋作用构成了草本植物根系固土护坡研究的主要内容<sup>[15-16]</sup>。目前, 关于披碱草属植物根系固土护坡方面的研究主要涉及降雨条件下, 坡面产沙量和坡面土体强度对植物地上生物学特征的响应<sup>[17-19]</sup>, 以及植物根系抗拉特性等方面<sup>[11, 20]</sup>。根系抗拉特性与根系木质素、纤维素、半纤维素等含量密切相关, 这些含量的变化

收稿日期 (Received date): 2019 - 07 - 14; 改回日期 (Accepted date): 2020 - 11 - 02

基金项目 (Foundation item): 陕西教育厅专项基金 (18JK0141); 陕西理工大学人才启动基金 (SLGQD2017 - 02)。[Special Fund for Shaanxi Education Department (18JK0141); Talent Start-up Fund for Shaanxi University of Technology ((SLGQD2017 - 02)]

作者简介 (Biography): 付江涛 (1981 - ) 男, 陕西汉台人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 环境岩土工程、工程力学。[FU Jiangtao (1981 - ), male, born in Hantai, Shaanxi Province, Ph. D., lecture, specialized in environmental geotechnics, and engineering mechanics] E-mail: fujiangtao865@sina.com

可造成根系强度产生变异性<sup>[21]</sup>,这在一定程度上导致根系强度难以准确度量,从而使得根系固土护坡贡献难以准确评估。因此,借助统计学理论对植物根径、抗拉力、抗拉强度等力学指标的变化性进行分析,明确该指标服从何种统计分布,则对于准确确定上述指标具体数值具有重要的理论意义和研究价值。本研究以生长于青海省河南县的多年野生垂穗披碱草(*E. nutans*)为研究对象,在测定其单根根径( $d_r$ )、单根抗拉力( $R_r$ )、单根抗拉强度( $t_r$ )、单根拉伸率( $\varepsilon$ )及拉伸模量( $E_r$ )等力学指标的基础上,采用正态分布、伽马分布、瑞利分布及威布尔分布等统计模型对上述指标进行统计分析,确定各指标服从何种统计模型。该研究对于深入分析垂穗披碱草根根系力学特性,揭示草本植物根系在水土保持工程中的力学机理具有重要的研究价值。

## 1 研究区概况

研究区位于青海省河南县启龙牧场( $101^{\circ}50'8''$ E,  $34^{\circ}35'12''$ N),地处青藏高原东北部,平均海拔为3600 m,属高原亚寒带湿润气候区,气候为高原大陆性气候,年均气温为 $9.2^{\circ}\text{C} \sim 14.6^{\circ}\text{C}$ ,降水量为597.1~615.5 mm,蒸发量为1349.700 mm<sup>[22]</sup>,常年风向为西北风,最大风速可达 $23.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,年均风速为 $2.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,日照率为 $57.58\% \sim 58.15\%$ <sup>[22]</sup>。该区水源条件相对较为丰富,黄河主河道距研究区约70 km,此外还有洮河、泽曲河与尕玛日河等河流,年

均径流总量为 $1.39 \times 10^{10}\text{ m}^3$ 。土壤类型以草甸土为主,其中氮、钾含量相对较高,磷含量相对较低,土体平均密度为 $1.03 \sim 1.13\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,平均含水率为 $18.33\% \sim 23.35\%$ ,区内边坡土体为不良级配,土体类型为砂类土<sup>[22]</sup>。区内植被类型以垂穗披碱草(*E. nutans*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea* (C. B. Clarke) C. B. Clarke)、紫花针茅(*Stipa purpurea* Griseb.)、青藏苔草(*Carex moorcroftii* Falc. Ex Boott)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum* L.)、紫菀(*Aster tataricus* L.)及其组合为主<sup>[22]</sup>,如图1所示。

## 2 材料与方法

### 2.1 根系采集及试验

该研究区边坡共分布有六种植物(图1),由坡顶至坡底分别为紫花针茅+高山嵩草组合、高山嵩草、垂穗披碱草、垂穗披碱草+青藏苔草组合、珠芽蓼+垂穗披碱草组合及高山嵩草+紫菀组合。取样前,选取代表六种植物及其组合的点为取样点,每个取样点选取两个具有代表性的位置。取样时,在确定的取样点,选取直径为28 cm的范围,然后用取土铲沿该范围挖取,将该范围以外的土挖掉,仅留该范围以内的土柱,由于植物根系主要分布于地表以下20 cm范围,故用取土铲沿土柱边沿,由上往下削切至地表以下22 cm处,最后将该土柱挖取放入试样盆内,及时密封和编号并带回实验室。在单根拉伸试验开展前,将土柱放置于盛有自来水的容器中浸泡约1 h后

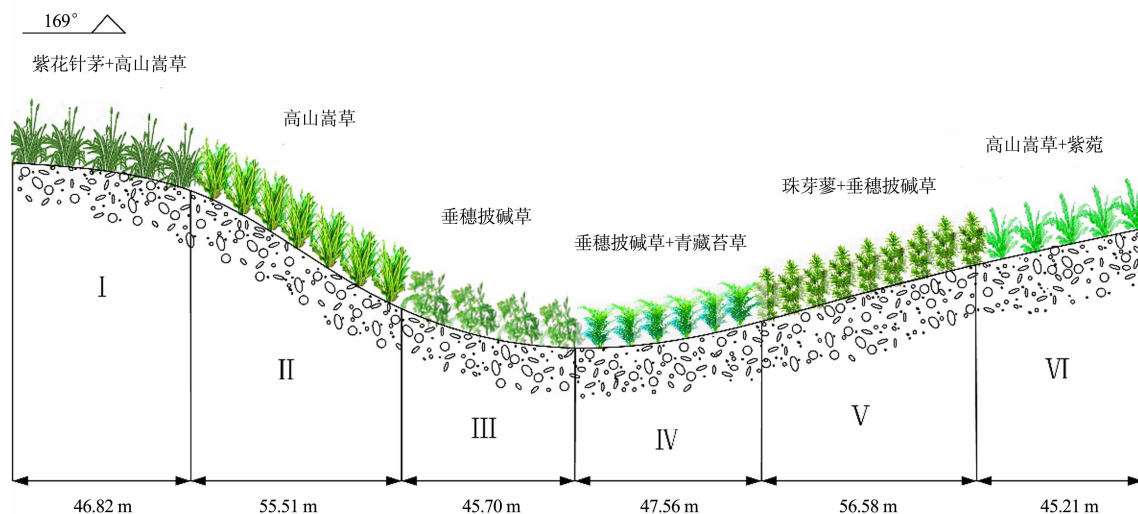


图1 研究区边坡草本植物分布<sup>[22]</sup>

Fig.1 Herb species distribution in the slope of a tested site<sup>[22]</sup>

摇动容器,使植物根系和土体分离,再将泥水滗出,之后将根捞出,再用自来水冲刷根系,确保根系和附着的土粒彻底分离,最后,将根系挑出放入自封袋中待测。上述六种植物及其组合中,垂穗披碱草和高山嵩草为主要植被。相较于高山嵩草,垂穗披碱草已实现人工驯化,且对环境适应性更强,预计在今后相关工程应用中更为广泛,故选取垂穗披碱草为研究对象。

单根拉伸仪器由拉伸系统和数据采集系统组成,其工作原理可参见文献<sup>[11]</sup>。试验展开时,先将植物根段夹持于夹头两端,转动螺母使根段两端被固定于夹头处,待根段固定结束后,开启根系拉伸仪,使根系受到张拉,在根系拉伸过程中,数据采集系统自动收集并记录根系受到的拉力和相应的伸长量,直至整个根段发生断裂,待根断裂后,用游标卡尺测量根断裂处的根径。在试验过程中,根段夹持长度为 100 mm,拉伸速率为 20 mm/min。此外,为确保试验数据具有代表性,从密自封袋中随机挑选 50 条根作为试验对象。

根据测得的单根根径、单根抗拉力,可计算单根抗拉强度为:

$$t_r = \frac{4R_r}{\pi d_r^2} \quad (1)$$

式中, $t_r$  为单根抗拉强度(MPa); $R_r$  为单根断裂时的抗拉力(N); $d_r$  为单根根径(mm)。

单根拉伸率计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \times 100 \quad (2)$$

式中, $\varepsilon$  为单根拉伸率(%); $\Delta l$  为单根在轴向拉力作用下的伸长量(mm); $l$  为根系的夹持长度(mm),即标距长度,本研究中根系标距为 100 mm,故  $l$  值取 100 mm。

单根拉伸模量可按式计算:

$$E_r = \frac{t_r}{0.01\varepsilon} \quad (3)$$

式中, $E_r$  为单根拉伸模量(MPa)。

## 2.2 研究方法

分别采用正态、伽马、瑞利和威布尔四种统计模型对垂穗披碱草根系五项力学指标进行了拟合,并通过中位秩公式<sup>[23-24]</sup>曲线和经验累积分布曲线与四种分布的累积概率分布曲线进行对比,定性分析各分布对各项指标的拟合优劣性,最后,采用卡方检验法( $\chi^2$  检验)和柯尔莫哥洛夫-斯米洛夫检验法(K-S 检验)对五项力学指标进一步开展了定量检验。

## 3 结果与分析

### 3.1 垂穗披碱草单根抗拉试验结果

由表 1 可知,垂穗披碱草根系各指标变异系数为 37.01%~76.00%。其中,根径变异系数最小,抗拉力和拉伸率次之,抗拉强度再次之,拉伸模量变异系数最大。根径、抗拉力和拉伸率变异系数小于抗拉强度和拉伸模量的原因可能在于根径、抗拉力和拉伸率为直接测量结果,其误差累积量相对较小,拉伸模量变异系数最大的原因可能在于拉伸模量为单根抗拉强度和拉伸率之商,其误差为抗拉强度、抗拉力、根径和拉伸率误差的累积结果<sup>[25]</sup>。

### 3.2 垂穗披碱草根系力学指标的统计参数与模型

#### 3.2.1 垂穗披碱草根系力学指标的分布参数

为确定垂穗披碱草单根根径、抗拉力、抗拉强度、拉伸率和拉伸模量所服从的分布函数,分别采用了正态分布、伽马分布、瑞利分布以及威布尔分布对各力学指标数据进行了处理,分析了在 0.01 置信水平下,各力学指标分布参数及各参数的置信区间,其结果如表 2~表 6 所示。

#### 3.2.2 根系力学指标概率密度曲线

将表 2~表 6 中相关参数代入各分布函数的概率密度函数公式,即可获得垂穗披碱草根系力学指标在不同分布函数下的概率密度曲线(图 2)。根据垂穗披碱草根系五项力学指标概率密度函数曲线的变

表 1 垂穗披碱草单根力学指标统计值

Tab.1 Statistical values of five indices of roots for *E. nutans*

数据类型	根径/mm	抗拉力/N	抗拉强度/MPa	拉伸率/%	拉伸模量/MPa
平均值	0.21	2.38	78.31	10.92	842.08
标准差	0.08	1.16	45.15	5.04	639.95
变异系数	37.01	48.65	57.66	46.18	76.00

表 2 不同分布模型下垂穗披碱草根径分布参数值

Tab.2 Distribution parameters of root diameter for *E. nutans* based on different statistical models

分布类型	参数 1	参数 2	参数 1 置信区间	参数 2 置信区间
正态分布	0.21	0.08	[0.18, 0.24]	[0.06,0.11]
伽马分布	7.21	0.03	[4.36, 11.94]	[0.02,0.05]
瑞利分布	0.16		[0.14, 0.20]	
威布尔分布	0.24	2.88	[0.21, 0.27]	[2.19, 3.78]

注:对于正态分布,参数 1 和参数 2 分别表示期望值和方差;对于伽马分布和威布尔分布,参数 1 和参数 2 分别表示形状参数和尺寸参数;瑞利分布只存在一个参数,参数 1 表示方差,参数 2 不存在。以下同。

表 3 不同分布模型下垂穗披碱草单根抗拉力分布参数值

Tab.3 Distribution parameters of tensile resistance of single root for *E. nutans* based on different statistical models

分布类型	参数 1	参数 2	参数 1 的置信区间	参数 2 置信区间
正态分布	2.38	1.16	[1.94, 2.83]	[0.93, 1.57]
伽马分布	3.87	0.62	[2.36, 6.35]	[0.36, 1.04]
瑞利分布	1.87		[1.58, 2.28]	
威布尔分布	2.69	2.16	[2.25, 3.21]	[1.64, 2.83]

表 4 不同分布模型下垂穗披碱草单根抗拉强度分布参数值

Tab.4 Distribution parameters of tensile strength of single root for *E. nutans* based on different statistical models

分布类型	参数 1	参数 2	参数 1 的置信区间	参数 2 置信区间
正态分布	78.31	45.15	[61.03, 5.60]	[36.10, 61.16]
伽马分布	3.28	23.84	[2.01, 5.37]	[14.02, 40.54]
瑞利分布	63.92		[53.99,77.90]	
威布尔分布	88.84	1.87	[72.25, 109.26]	[1.42, 2.46]

表 5 不同分布模型下垂穗披碱草单根拉伸率分布参数值

Tab.5 Distribution parameters of max extension ratio of single root for *E. nutans* based on different statistical models

分布类型	参数 1	参数 2	参数 1 的置信区间	参数 2 置信区间
正态分布	10.92	5.04	[8.94, 12.89]	[4.01, 6.88]
伽马分布	3.36	3.25	[2.03, 5.55]	[1.89, 5.58]
瑞利分布	8.50		[7.16, 10.41]	
威布尔分布	12.28	2.28	[10.35, 14.57]	[1.68, 3.09]

表 6 不同分布模型下垂穗披碱草单根拉伸模量分布参数值

Tab.6 Distribution parameters of tensile modulus of single root for *E. nutans* based on different statistical models

分布类型	参数 1	参数 2	参数 1 的置信区间	参数 2 置信区间
正态分布	842.08	639.95	[591.49, 1092.67]	[509.57, 873.32]
伽马分布	2.83	297.87	[1.72, 4.65]	[172.76, 513.60]
瑞利分布	747.88		[629.65, 915.50]	
威布尔分布	945.27	1.53	[729.83, 1224.30]	[1.19, 1.96]

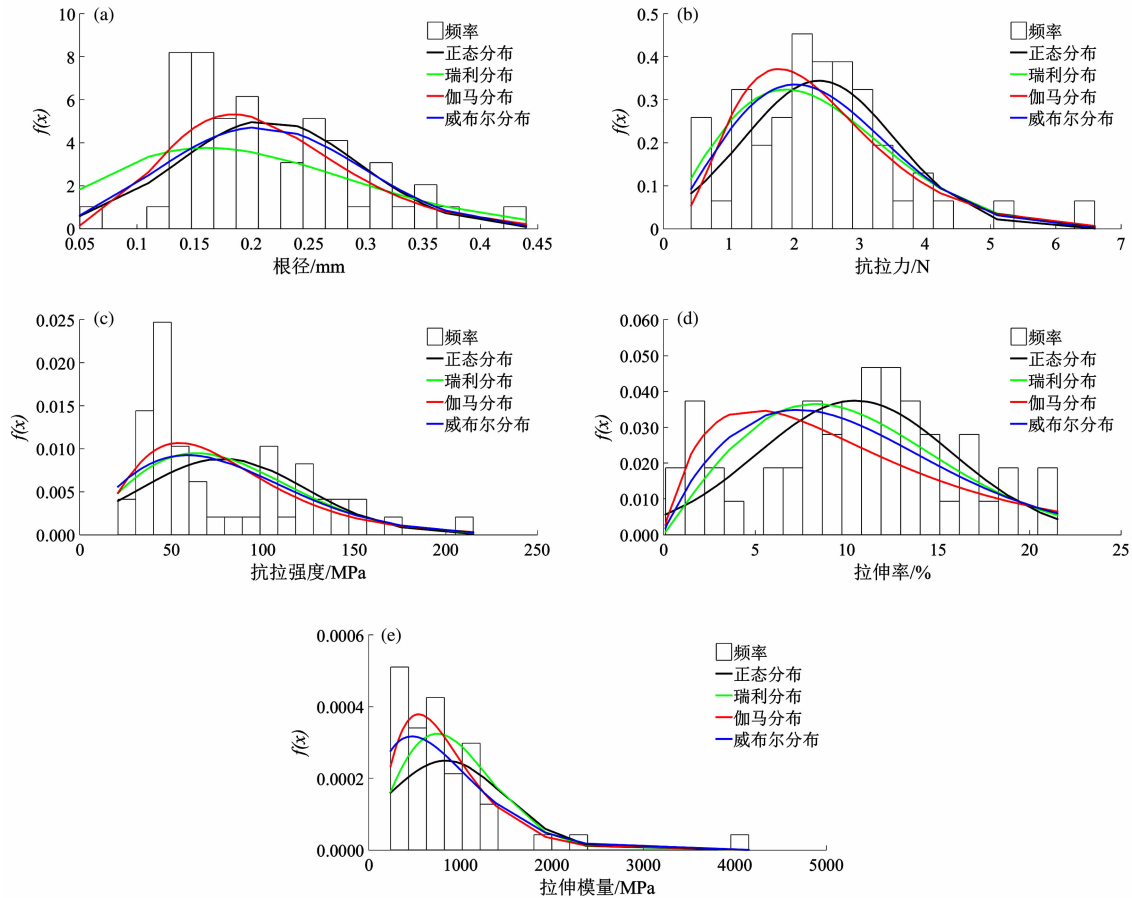


图 2 垂穗披碱草五项指标概率密度曲线

Fig. 2 Probability density distribution of five mechanical indices for *E. nutans*

化特征,可将五项指标分为两类。其中,第一类为根径、抗拉力、抗拉强度和拉伸率四项指标,这类指标概率密度的变化特征为随指标值逐渐增加表现出先增加后减小的变化特征,该变化规律与其相应指标的频率直方图变化规律一致,这说明四种分布函数可较好地描述根径、抗拉力、抗拉强度和拉伸率四项分布的变化特征(图 2a ~ 图 2d)。四项指标概率密度函数最大值所对应的指标值即为该指标的主要组成值,如四种分布条件下,垂穗披碱草根径概率密度取得最大值时,其相应的根径为 0.1 ~ 0.3 mm,这表明垂穗披碱草根系主要由根径为 0.1 ~ 0.3 mm 的根构成(图 2a)。第二类为单根拉伸模量,该指标的概率密度变化规律为其概率密度在四种分布条件下均随拉伸模量增加表现出“急剧增加—急剧减小—缓慢降低”的变化特征,该特征与其频率直方图一致,表明四种分布对垂穗披碱草单根拉伸模量分布规律描述性亦较好。此外,拉伸模量概率密度最大值为 500 ~ 1000 MPa,说明垂穗披碱草单根拉伸模量主要位于

该范围内(图 2e)。

### 3.2.3 根系力学指标累积概率曲线

将表 2 ~ 表 6 所示的分布参数代入各分布相应的累积分布函数,即可获得垂穗披碱草根系五项力学指标在各分布函数中的累积概率曲线。此外,为对比四种分布函数对各指标分布描述的优劣性,进一步分析了四种分布的累积函数曲线与中位秩和经验累积分布函数曲线之间关系:即若某种分布的累积函数曲线与中位秩或经验累积分布函数曲线愈接近,则表明该分布对该指标的描述性愈好。

图 3 表明,四种分布条件下,垂穗披碱草根系五项力学指标累积概率曲线形态基本相似,相差不明显,且与其相应的中位秩和经验累积分布曲线基本一致,该结果说明四种分布函数可较好地描述垂穗披碱草根系五项力学指标的分布规律。

### 3.3 分布检验

卡方检验是检验样本的实际观测值与理论推断值之间的偏离程度,实际观测值与理论推断值之间

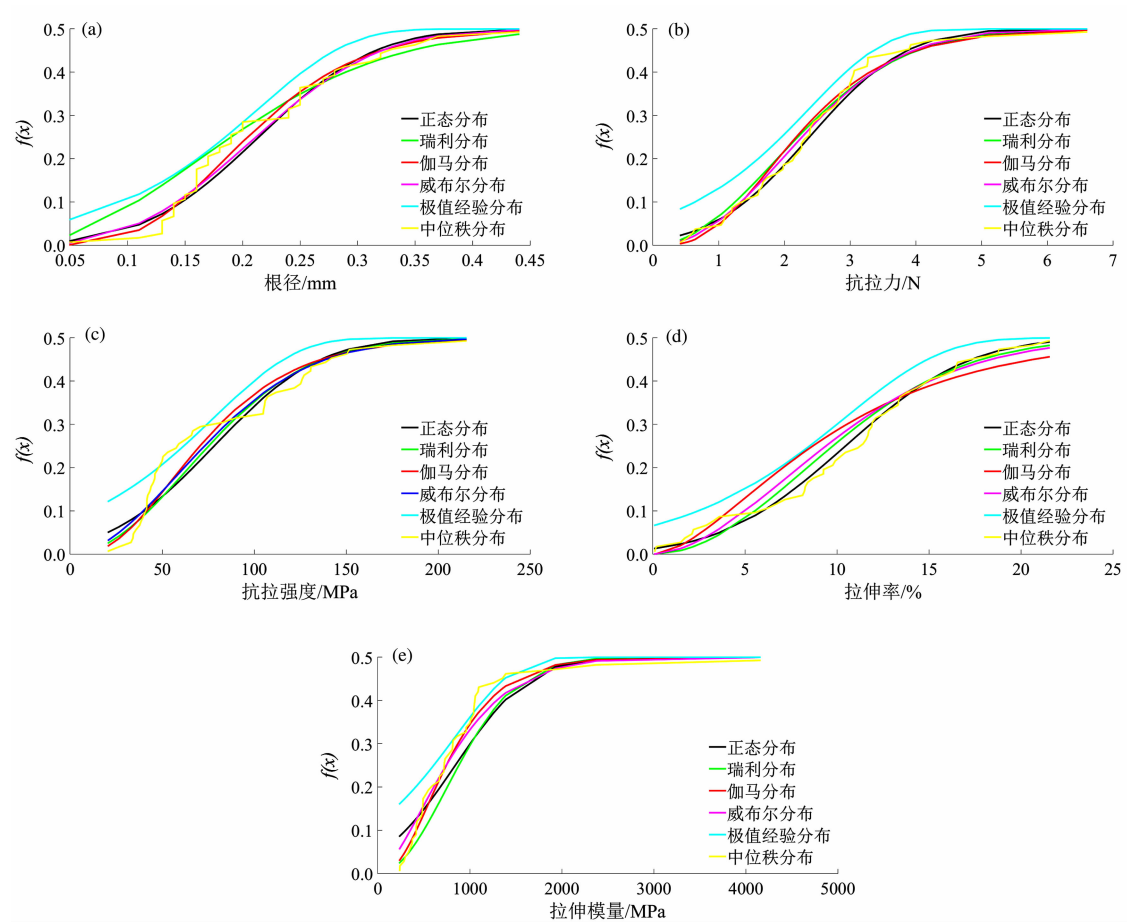


图 3 垂穗披碱草五项指标的累积概率分布

Fig. 3 Probability cumulative distribution of the five mechanical indexes for *E. nutans*

的偏离程度就决定卡方值的大小,如果卡方值越大,二者偏差程度越大;反之,二者偏差越小;若两个值完全相等时,卡方值就为 0,表明理论值完全符合。由表 7 可知,除根径外,垂穗披碱草根系其余四项指标几乎均服从正态分布、伽马分布、瑞利分布和威布尔分布,但不同指标在不同分布下显著性概率值( $P$  值)存在差异。抗拉力  $P$  值最大值(0.6808)出现在正态分布条件下,说明抗拉力最优分布为正态分布;抗拉强度和拉伸模量在伽马分布下的  $P$  值最高,说明抗拉强度和拉伸模量的最优分布为伽马分布;拉伸率在正态分布下的  $P$  值最高为 0.9656,说明拉伸率的最优分布函数为正态分布。

由表 8 可知,垂穗披碱草根系五项力学指标均服从四种分布函数。根径和拉伸率最优分布函数均为伽马分布,抗拉力和抗拉强度最优分布函数均为威布尔分布,拉伸模量最优分布函数为正态分布。此外,对比两种检验结果可知,除根径检验结果一致外,剩余四项指标的检验结果在不同的拟合检验方

表 7 垂穗披碱草根系力学五项指标分布拟合卡方检验结果 ( $\alpha = 0.001$ )

Tab. 7  $\chi^2$  tests for mechanical indexes of *E. nutans* ( $\alpha = 0.001$ )

指标	正态分布	伽马分布	瑞利分布	威布尔分布
根径	<0.001	0.0034	<0.001	<0.001
抗拉力	0.6808	0.4606	0.5189	0.5961
抗拉强度	<0.001	0.0032	0.0027	0.0015
拉伸率	0.9656	0.3530	0.8430	0.9186
拉伸模量	0.0195	0.1565	0.0642	0.0524

法中均不同,产生该差异的原因可能与样本数量相关,即  $\chi^2$  检验适用于样本数大于等于 50 的样本, K-S 检验则适用于样本数大于 20 的样本。本研究中供试植物根系样本数为 50 个,恰好满足  $\chi^2$  检验的临界值,却远大于 K-S 检验所规定的样本数量,因此本研究中 K-S 检验结果优于  $\chi^2$  检验结果,故选取 K-S 检验结果。



表 8 垂穗披碱草根系力学五项指标分布拟合  
K-S 检验结果 ( $\alpha=0.001$ )

Tab. 8 K-S tests for mechanical indexes of *E. nutans* ( $\alpha=0.001$ )

指标	正态分布	伽马分布	瑞利分布	威布尔分布
根径	0.1934	0.6415	0.0059	0.3004
抗拉力	0.6139	0.6744	0.6881	0.6886
抗拉强度	0.0452	0.1011	0.0430	0.1116
拉伸率	0.0148	0.3640	0.0190	0.1531
拉伸模量	0.8572	0.2789	0.3547	0.5383

## 4 讨论

植物根径是大量的相互独立因素(生长年限、土壤理化性质、水热等)随机综合作用所形成的结果,其最优分布函数应为正态分布,但本文垂穗披碱草根径除同时服从威布尔分布和正态分布外,最优分布为伽马分布,该结论与正态分布的假设不一致,原因可能与垂穗披碱草生长区气温有关,即研究区为高海拔区域,气温较低,一年中可供植物生长的时间相对较短,故植物生长缓慢,多数根较细,粗细较为均一(图 2a),变异系数相对较小(37.01%),而生长于低海拔地区的多年生垂穗披碱草根径变异系数可达 600%<sup>[11]</sup>,由此可见,低温是上述大量相互独立因素中的主导因素,由低温导致的垂穗披碱草生长缓慢、根径粗细相差不大可能是造成垂穗披碱草根径最优分布服从伽马分布的重要原因。

本研究发现垂穗披碱草根径同时服从威布尔分布和正态分布,这与 Diamantopoulou et al.<sup>[26]</sup>、胡远满等<sup>[27]</sup>、胡可等<sup>[28]</sup>研究结果一致。但需指出的是本研究与上述学者<sup>[26-28]</sup>的研究方法存在较大不同,如上述学者采用的分布函数较为单一,分别为威布尔分布和正态分布,并未采用伽马分布和瑞利分布,也没有进一步比较不同分布函数对植物生长指标描述的优劣性,而本文研究了垂穗披碱草根径在不同分布下的分布特征,对比了各分布的优劣性,并指出了垂穗披碱草根径所服从的最优分布。

本研究中垂穗披碱草根系抗拉强度同时满足多个分布函数,但其最优分布函数为威布尔分布,这与张继周等学者<sup>[30-33]</sup>结论一致。尽管本文研究对象为植物根系,而张继周等学者<sup>[30-34]</sup>研究对象为岩土

体或陶瓷材料,但从力学角度来看,无论是植物根系这种生物材料,还是岩土体这种天然材料,亦或是陶瓷这种人工材料,其强度服从威布尔分布律的现象均可由威布尔理论予以解释,即材料破坏服从威布尔分布的原因是由其表面或内部存在的、大量的、数量分布服从威布尔分布的瑕疵和裂纹所决定的<sup>[32-35]</sup>。

本研究中垂穗披碱草根系抗拉强度和拉伸率的最优分布分别为威布尔分布和伽马分布,其  $P$  值分别为 0.116 和 0.3640,仍然相对较小,采用更合适的分布函数对这两项指标开展进一步的拟合研究可能会得到更好的拟合效果。对图 2c 和 2d 进一步分析可知,这二项指标频率直方图表现出双峰特征,即随指标增加,其概率密度曲线表现出先增加后减小,再增加的变化特征,故采用具有双峰特征的分布函数可能更适用于描述垂穗披碱草根系的抗拉强度和拉伸率分布特征。

## 5 不足与展望

根系作为一种弹塑性材料,其变形包括弹性变形和塑性变形,故拉伸模量应采用割线模量(在公式(3)的基础上,乘以 0.4~0.7 的折减系数以考虑根系的塑性变形)较为合适,这也是王萍花等<sup>[37]</sup>、张云伟等<sup>[38]</sup>多数学者所采用的计算方法,但本研究并未采用割线模量,而是采用弹性模量的计算公式(公式 3)作为垂穗披碱草根系拉伸模量的计算公式,其原因在于本研究所采用的根系为草本植物根系,其根径及抗拉强度与如王萍花等<sup>[37]</sup>、张云伟等<sup>[38]</sup>学者所研究的植物类型相差甚远,故上述学者采用的折减值(0.4~0.7)可能并不适用于垂穗披碱草。因此,在今后的相关研究中,应关注草本植物根系拉伸模量,确定合适的强度折减系数,这无疑对于提高草本植物根系力学特性认识,深入了解垂穗披碱草在水土保持、生态修复工程中的力学作用具有重要的实际应用价值。

## 6 结论

本研究对垂穗披碱草开展单根拉伸试验,获得其根径、抗拉力、抗拉强度、拉伸率和拉伸模量等指标,并借助统计理论对上述指标的分布进行了系统

的分析和研究,获得以下结论:

(1) 四项指标变异系数为 37.01% ~ 76.00%。其中,根径变异系数最小,单根抗拉力和拉伸率次之,单根抗拉强度则再次之,拉伸模量变异系数最大;

(2) 正态、伽马、瑞利和威布尔分布均可定性描述垂穗披碱草根系五项力学指标分布规律,且不同分布函数下各指标分布规律表现出一定程度的差异性;

(3) 根径和拉伸率最优分布函数均为伽马分布,抗拉力和抗拉强度最优分布函数均为威布尔分布,拉伸模量最优分布函数为正态分布。

## 参考文献 (References)

- [1] 王平,王沛,孙万斌,等. 8 份披碱草属牧草苗期抗旱性综合评价[J]. 草地学报, 2020, **28**(2): 397 - 404. [WANG Ping, WANG Pei, SUN Wanbin, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of eight *Elymus Germplasm*s at seedling stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, **28**(2): 397 - 404]
- [2] 唐子钦,陈有军,胡健,等. 川西北沙化草地 7 种牧草根系构型及根鞘特征分析[J]. 中国草地学报, 2020, **42**(2): 22 - 31. [TANG Ziqing, CHEN Youjun, HU Jian, et al. Analysis of root architecture and rhizosheath characteristics of seven forage species in desertified grassland of northwest Sichuan [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, **42**(2): 22 - 31]
- [3] 杨鑫光,李希来,张静,等. 高寒煤矿区 3 种人工栽培种对自然降温的生理响应[J]. 中国草地学报, 2019, **41**(6): 72 - 79. [YANG Xinguang, LI Xilai, ZHANG Jing, et al. Physiological response of three cultivar grasses to natural cooling in alpine coal mine area [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, **41**(6): 72 - 79]
- [4] 张治平. 藏中拉屋铜矿区生态恢复研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 75 - 81. [ZHANG Fuping. Effect of heavy metal pollution on ecological environment on Lawu Mine in central Tibet [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 75 - 81]
- [5] 李淑霞. 寒旱环境西宁盆地植物耐盐特性及其降盐效应试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2018: 34 - 80. [LI Shuxia. Study on salt tolerance and salt reduction effect of plants in cold and arid environment in Xining Basin [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Salt Lake Research Institute), 2018: 34 - 80]
- [6] LI Mingqun, YANG Jian, WANG Xin, et al. Transcriptome profiles identify the common responsive genes to drought stress in two *Elymus* species [J]. Journal of Plant Physiology, 2020, **250**: 153183.
- [7] FU Juanjuan, SUN Pengyue, LUO Yilan, et al. Brassinosteroids enhance cold tolerance in *Elymus nutans* via mediating redox homeostasis and proline biosynthesis [J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, **167**: 103831.
- [8] MAO Zhuxin, LINGHU Yuwei, YU Gang. Fatty acid and amino acid contents of *Elymus nutans* Griseb. (*Poaceae: Triticeae*) in different regions on Qinghai - Tibetan Plateau [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2019, **85**: 31 - 34.
- [9] 梁坤伦,王明艳,孙金豪,等. 外源多胺对 2 种牧草耐旱性生理指标的影响[J]. 分子植物育种, 2020, **18**(11): 3751 - 3758. [LIANG Kunlun, WANG Mingyan, SUN Jinhao, et al. Effects of exogenous polyamines on drought tolerance physiological indexes of two pasture grasses [J]. Molecular Plant Breeding, 2020, **18**(11): 3751 - 3758]
- [10] 刘艳君,祁娟,柳茜,等. 垂穗披碱草种子萌发的耐盐性研究[J]. 草原与草坪, 2014, **34**(4): 61 - 65. [LIU Yanjun, QI Juan, LIU Qian, et al. Study on salt tolerance of three *Elymus nutans* seeds in germination period [J]. Grassland and Turf, 2014, **34**(4): 61 - 65]
- [11] 刘亚斌,李淑霞,余冬梅,等. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(15): 157 - 166. [LIU Yabin, LI Shuxia, YU Dongmei, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(15): 157 - 166]
- [12] 赵燕,杜文华. 青藏高原东缘垂穗披碱草草地群落组成及生产力[J]. 草业科学, 2018, **35**(12): 2978 - 2987. [ZHAO Yan, DU Wenhua. Community composition and productivity of *Elymus nutans* in the eastern margin of Qinghai - Tibet Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, **35**(12): 2978 - 2987]
- [13] 陈有军,苟小林,孙建,等. 青藏高原东南缘沙地 3 种治沙草本根系形态格局特征[J]. 草业科学, 2019, **36**(4): 1137 - 1147 + 928. [CHEN Youjun, GOU Xiaolin, SUN Jian, et al. Root morphology patterns of three grasses used to restore the desert on the Southeast Tibetan Plateau [J]. Pratacultural Science, 2019, **36**(4): 1137 - 1147 + 928]
- [14] 李雪萍,赵成章,任悦,等. 杂海湿地不同密度条件下垂穗披碱草根系分形结构[J]. 生态学报, 2018, **38**(4): 1176 - 1182. [LI Xueping, ZHAO Chengzhang, REN Yue, et al. Fractal root systems of *Elymus nutans* under different density conditions in Gahai Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(4): 1176 - 1182]
- [15] 洪苗苗,汪霞,赵云飞,等. 浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系对土壤抗剪强度影响[J]. 山地学报, 2018, **36**(1): 107 - 115. [HONG Miaomiao, WANG Xia, ZHAO Yunfei, et al. Effect of ecological restoration plants root on slope reinforcement in shallow landslide prone region [J]. Mountain Research, 2018, **36**(1): 107 - 115]
- [16] 刘昌义,胡夏嵩,李希来,等. 黄河源区高寒草地根-土复合体抗剪强度与土壤营养元素分布关系[J]. 山地学报, 2020, **38**(3): 349 - 360. [LIU Changyi, HU Xiasong, LI Xilai, et al. Relationship between shear strength of root soil composite systems



- of alpine grassland and distribution of soil nutrient elements in the source region of the Yellow River, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(3): 349–360]
- [17] 李华坦, 李国荣, 赵玉娇, 等. 模拟自然降雨条件下植物根系增强边坡土体抗剪强度特征[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(4): 142–149. [LI Huatan, LI Guorong, ZHAO Yujiao, et al. Characteristics of slope soil shear strength reinforced by vegetation roots under artificially simulated rainfall condition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(4): 142–149]
- [18] 李华坦, 赵玉娇, 李国荣, 等. 寒旱环境黄土区植物护坡原位模拟降雨试验研究[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(6): 304–311. [LI Huatan, ZHAO Yujiao, LI Guorong, et al. Experimental research on slope protection with vegetation under situ rainfall simulation in cold and arid environments of loess area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, **21**(6): 304–311]
- [19] 窦增宁, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 模拟降雨条件下黄土区边坡植物护坡效应[J]. 人民黄河, 2018, **40**(3): 83–87. [DOU Zengning, HU Xiasong, LIU Changyi, et al. Hydrological effects of vegetations in slope protection in loess area under simulated rainfall conditions [J]. Yellow River, 2018, **40**(3): 83–87]
- [20] 李淑霞, 刘亚斌, 余冬梅, 等. 寒旱环境盐胁迫条件下两种草本植物的根系力学特性研究[J]. 盐湖研究, 2019, **27**(1): 116–131. [LI Shuxia, LIU Yabin, YU Dongmei, et al. Research on mechanical characteristics of two herbaceous roots under salt stress in cold and arid environment [J]. Journal of Salt Lake Research, 2019, **27**(1): 116–131]
- [21] 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.
- [22] 刘昌义, 窦增宁, 胡夏嵩, 等. 黄河源区高寒草地植物组合对根-土复合体抗剪强度的影响[J]. 草地学报, 2019, **27**(1): 43–52. [LIU Changyi, DOU Zengning, HU Xiasong, et al. Research on the effect of plant combination on types on the shear strength of the root-soil composite system of alpine grass land in the Source Region on the Yellow River [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, **27**(1): 43–52]
- [23] NARESH K, SHANKAR K, VELMURUGAN R. Reliability analysis of tensile strengths using Weibull distribution in glass/epoxy and carbon/epoxy composites [J]. Composites Part B, 2018, **133**: 129–144.
- [24] 陈敬海, 吴勇, 单长伟, 等. 两种分布函数在曲轴扭转疲劳寿命分析中的应用[J]. 理化检验-物理分册, 2016, **52**(11): 781–785. [CHEN Jinhai, WU Yong, SHAN Changwei, et al. Application of two distribution functions on the torsion fatigue life analysis of crankshafts [J]. Physical Testing & Chemical Analysis, 2016, **52**(11): 781–785]
- [25] SCHEIBLECKER M. Between cointegration and multicointegration: Modelling time series dynamics by cumulative error correction models [J]. Economic Modelling, 2013, **31**: 511–517.
- [26] DIAMANTOPOULOU M J, ÖZÇELİK R, CRECENTE-CAMPO F, et al. Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods [J]. Biosystems Engineering, 2015, **133**: 33–45.
- [27] 胡远满, 徐文铎, 郑元润. 长白松自然同龄种群分布格局的研究[J]. 应用生态学报, 1996, **7**(2): 113–116. [HU Yuanman, XU Wenduo, ZHENG Yuanrun. Spatial distribution pattern of natural *Pinus sylvestris* ormis population with same age [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, **7**(2): 113–116]
- [28] 吴可, 殷鸣放, 周永斌, 等. 白石砬子自然保护区林木直径分布及其动态变化[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(5): 20–23. [WU Ke, YIN Mingfang, ZHOU Yongbin, et al. Diameter distribution and dynamic changes of trees in Baishilazi National Nature Reserve [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, **38**(5): 20–23]
- [29] TENG X, MAE H, BAI Y. Probability characterization of tensile strength of an aluminum casting [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, **527**: 4169–4176
- [30] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增2): 3526–532. [ZHANG Jizhou, MIAO Linchang. Types and selection criteria of probability distribution of rock and soil parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(Supp. 2): 3526–3532]
- [31] 付江涛, 余冬梅, 李晓康, 等. 柴达木盆地盐湖区盐生植物根-土复合体物理力学性质指标概率统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(8): 1696–1709. [FU Jiangtao, YU Dogmei, LI Xiaokang, et al. Statistical probability analysis of the physical index of rooted soil in Qiadam basin [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(8): 1696–1709]
- [32] GUO M, ZHANG T H, CHEN B W, et al. Tensile strength analysis of palm leaf sheath fiber with Weibull distribution [J]. Composites: Part A, 2014, **62**: 45–51.
- [33] DENG Bin, JIANG Danyu, GONG Jianghong. Is a three-parameter Weibull function really necessary for the characterization of the statistical variation of the strength of brittle ceramics? [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, **38**(4): 2234–2242.
- [34] MONTEIRO S N, MARGEM F M, BRAGA F O, et al. Weibull analysis of the tensile strength dependence with fiber diameter of giant bamboo [J]. Journal of Material Research and Technology, 2017, **6**(4): 317–322.
- [35] LEI Weisheng, ZHANG Peilei, YU Zhishui, et al. Statistics of ceramic strength: use ordinary Weibull distribution function or Weibull statistical fracture theory? [J]. Ceramics International,

- 2020, **46**: 20751 – 20768.
- [36] GARY D H, ANDREW T L. Biotechnical slope protection and erosion control[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982: 37 – 54.
- [37] 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. [WANG Pinghua, CHEN Lihua, JI Xiaodong, et al. Analysis of stress-strain curves for four common arbor root systems [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, **32**(3): 17 – 22]
- [38] 张云伟, 惠尚, 卜晓磊, 等. 3 种散生竹的单根抗拉力学特性[J]. 林业科学, 2013, **49**(7): 183 – 187. [ZHANG Yunwei, HUI Shang, BU Xiaolei, et al. Mechanical characteristics of tensile strength for three monopodial bamboo single roots [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, **49**(7): 183 – 187]

## Statistical Analysis on Mechanical Characteristics of Roots of *Elymus nutans*

FU Jiangtao<sup>a</sup>, LI Xiaokang<sup>b</sup>

( a. School of Civil Engineering and Architecture; b. School of Mathematic and Computer Science,  
Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, Shaanxi, China)

**Abstract:** Due to the extensive adaptability in water and soil conservation, *Elymus nutans* Griseb. has been introduced extensively and successfully into ecological recovery and re-establishment engineering for deserted land reclamation and ecosystem restoration for the past decades. To sufficiently understand mechanical performance and properly assess the role of *E. nutans* roots in soil and water conservation application, roots of uncultivated perennial *E. nutans* sampled at field sites of Henan county, Qinghai Province, China were taken as targeted objects. The mechanical property indexes (diameter, tensile resistance, tensile strength, tensile strain and tensile modulus) were determined using indoor tension tests. Built on these mechanical property indexes, four statistical functions, i. e., Normal distribution, Rayleigh distribution, Gamma distribution, and Weibull distribution, were adapted to describe the distribution of these mechanical indexes of *E. nutans*. Subsequently Chi-square test ( $X^2$  test) and Kolmogorov-Smirnov test (K – S test) were applied to test the goodness of fitting of these distribution functions to the five mechanical indexes. Based on the goodness of fitting, the optimal distribution functions of the mechanical indexes was determined. The results showed that great variability in root mechanical indexes was discovered. And nearly all the distribution functions could be used to describe the distribution of root mechanical indexes. In contrast to  $X^2$  test, the testing results based on K – S test were more reliable due to its advantages in testing small sample. Of the five mechanical indexes, the optimal distribution functions for diameter and tensile strain were Gama distribution, tensile strength/resistance's optimal functions were Weibull distribution, and tensile modulus' optimal distribution was Normal distribution. The findings improve our understandings on the mechanical properties of herbaceous root and could be useful for slope protection using herbaceous roots.

**Key words:** slope protection by vegetation; root tensile mechanical index; distribution function