

宿衍强,周勇. 荸荠移栽期秧苗茎秆的径向压缩、剪切与弯曲试验[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(2): 276-283.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.028

# 荸荠移栽期秧苗茎秆的径向压缩、剪切与弯曲试验

宿衍强,周勇

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 研究移栽期荸荠茎秆的力学特性可为实现移栽的机械化提供理论基础。以湖北省黄冈市团风县的鄂芥1号和大红袍荸荠茎秆为研究对象,利用TMS-PRO质构仪进行径向压缩、剪切和弯曲试验。结果表明,径向压缩试验时茎秆径向承受力从上往下依次增大,下部均值为4.0~4.1 N;搁置时间越长(4 h内),茎秆含水率越低,径向承受力越小;加载速率对径向承受力的影响不显著。剪切试验结果表明,茎秆下部剪切力最大,均值在120~165 N,剪切强度6 MPa左右。4 h的搁置时长对剪切力的影响不显著。弯曲试验结果表明,茎秆上部的抗弯刚度最小,均值在 $1.4 \times 10^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,中部的弯曲弹性模量最大,均值在290~405 MPa,下部的截面惯性矩最大,均值在 $33 \sim 35 \text{ mm}^4$ ,且受力均明显高于上部和中部,其最大载荷的平均数值小于2 N。

**关键词** 荸荠茎秆; 移栽期; 压缩; 弯曲; 剪切

**中图分类号** S223.99 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0276-08

荸荠(*Eleocharis dulcis* (N. L. Burman) Trin. ex Henschel)又名马蹄,地下茎呈扁圆形,可生食、熟食、药用。荸荠广泛种植于长江流域及以南地区,产值可达7 000元/667 m<sup>2</sup>以上,是我国重要的特色蔬菜品类和经济作物<sup>[1-3]</sup>。目前荸荠种植机械化程度低,劳动用工成本大<sup>[4]</sup>。

荸荠分蘖期茎秆丛生,大多数笔直,结构呈圆管状。荸荠移栽时,需要人工将秧苗从育苗田中拔出并打捆,搬运与修剪,徒手分离秧苗并捏住根部栽植,秧苗多次受径向压缩作用力过大导致破损;茎秆较长且细,搬运过程易使茎秆弯曲受力折断;秧苗栽植前的修剪离不开对剪切力的研究。目前,国内外学者主要对小麦、水稻、油菜、苕麻、牧草、甘蔗等作物的茎秆进行了力学性质研究<sup>[5-11]</sup>,对于移栽期荸荠茎秆的力学特性还处于空白。本研究以湖北省黄冈市团风县的鄂芥1号和大红袍荸荠为研究对象,使用TMS-PRO质构仪等设备进行样本的局部径向压缩、剪切和弯曲试验,从而可以得到茎秆的局部径向破坏力、最大剪切力、剪切强度、最大弯曲试验力、弯曲弹性模量、弯曲强度、惯性矩和抗弯刚度等参数<sup>[12]</sup>,旨在为荸荠秧苗的切割、搬运、移栽等机具<sup>[13]</sup>的设计提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2022年7月14日于湖北省黄冈市团风县方高坪镇荸荠试验基地,选取当地种植时间相近、种植面积最广且长势均匀的鄂芥1号和大红袍荸荠秧苗,每种秧苗各采集15簇,并放入盛有湿润泥土的容器中储存。

1) 试验秧苗茎秆部位的定义。荸荠分蘖能力比较强,在移栽时期生长为簇状,长度能达到1.0 m左右。移栽时,通常会把一簇秧苗分成若干株,且秧苗的长度需要修剪到0.5 m左右,故选择秧苗0.5 m以下的部分进行相关力学特性研究。鉴于秧苗的根部长度不一致,假定根部均为100 mm。取根茎结合处为划分部位基点,如图1所示,将基点上部区域定义为上部、中部、下部3个部分<sup>[14]</sup>。结合观察测量统计,各区间长度取100 mm能够覆盖各部位特征。

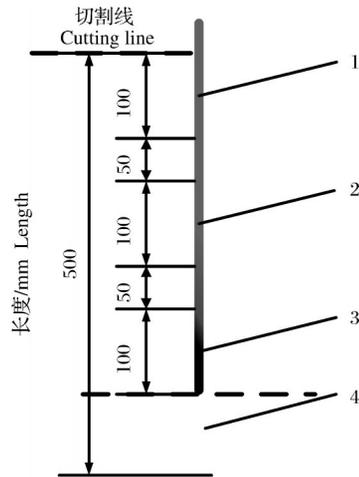
2) 试验材料制备。首先分别随机选取长势均匀且相近的鄂芥1号、大红袍荸荠的上部、中部、下部3个部位各30个样本,共180个,用数显游标卡尺和数显螺旋测微仪量取所有样本的外径和壁厚,并按照相同品种和相同部位的原则,有序地用双面胶固定

收稿日期:2024-01-06

基金项目:国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02)

宿衍强, E-mail: 534183151@qq.com

通信作者:周勇, E-mail: zhyong@mail.hzau.edu.cn



1.上部 Top;2.中部 Middle;3.下部 Bottom;4.根部 Root.

图1 部位的定义

Fig.1 Definition of part

样本,每10个放入保鲜袋打包。再次选取鄂芥1号中部部位50个样本,每10个直接放入保鲜袋打包。以上所有样本放入冰箱储存,24 h之内使用<sup>[15]</sup>。

不同搁置时长样本的制备。考虑到荸荠秧苗从育苗田到大田移栽需要拔取、修剪和放置等步骤,通过模拟自然条件下秧苗放置时长测定相应含水率的变化和相应的力学参数,可为移栽机提供设计参数。2022年7月19日,天气晴,温度34℃,湿度85%,将若干簇鄂芥1号模拟移栽现场,堆叠放置在地面上进行自然搁置,时间选定当天09:00—13:00。当到达其中某个整刻度(共5个取样时间点)时,一边立刻取样进行含水率的测定,另一边迅速量取、剪切制备20个中部样本,每10个装保鲜袋打包进行径向压缩试验和剪切试验。

3)试验仪器。TMS-PRO质构仪:美国TFC公司,精度±1%,量程为1 000 N;电子数显游标卡尺:JERXUN,精度0.01 mm,量程0~150 mm;SDH-1202快速卤素水分测定仪:浙江赛德仪器设备有限公司,精度为0.002 g,量程在0~120 g;电子数显螺旋测微仪:武汉明海达科技有限公司,精度0.001 mm,量程0~25 mm;米家蓝牙温湿度计2代,精度0.1℃温度,1%相对湿度;米尺;剪刀等。

## 1.2 试验方法

试验假设茎秆结构是规则的空心圆管状,试验部分纤维组织分布均匀,横截面性质相同,材质均匀<sup>[16-17]</sup>。

1)径向局部压缩试验。试验采用TMS-PRO质构仪,位移触发起点力设置为0.2 N,加载速度选择

区间10~50 mm/min。夹取长30 mm、直径5 mm的刚性金属圆柱探头垂直向样本正中间进局部径向压缩试验测试<sup>[14]</sup>。为了获得移栽期荸荠茎秆的局部径向破坏力,茎秆被压缩过程中,计算机也在输出力-位移曲线,待茎秆完全压缩后并保存数据。

2)剪切试验。本试验属于双剪切试验。试验采用TMS-PRO质构仪,位移触发起点力设置为9 N,加载速度选择50 mm/min。试验开始前需要记录相应样本的外径和壁厚,使用自制夹具(图2)水平夹住样本,剪切头下移,得到力-位移曲线,茎秆切断后可停止试验并保存数据。通过计算得到每个样本的剪切强度,求出每个部位的平均剪切强度。

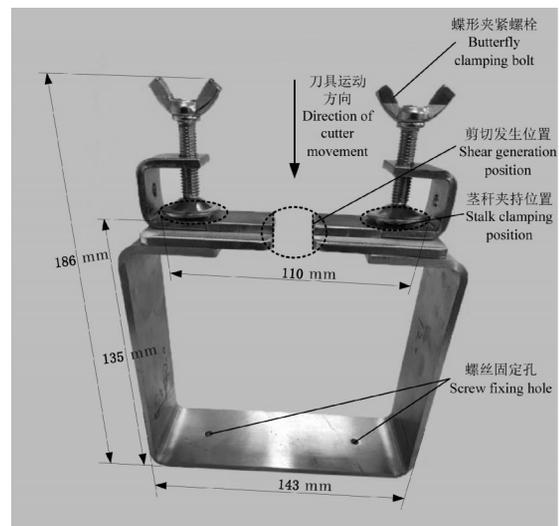


图2 自制剪切试验夹具

Fig. 2 Self-made shear test fixed frame

剪切强度公式<sup>[18]</sup>为:

$$\tau = \frac{P_{\max}}{2A} \quad (1)$$

式(1)中, $\tau$ 为样品剪切强度,MPa; $P_{\max}$ 为样品被剪断的最大载荷,N; $A$ 为样品一端的横截面积, $\text{mm}^2$ 。

3)弯曲试验。试验采用TMS-PRO质构仪,位移触发起点力为0.2 N,加载速度选择10 mm/min<sup>[12]</sup>。试验开始前需要记录相应样本的外径 $D$ 和壁厚 $r$ ,将样本水平地放置在试验架上,记录并保持固定的标距 $l$ ,mm。用自带的压头进行弯曲试验得到力-位移曲线。结合近似满足弹性范围内的曲线可求出弯曲弹性模量、弯曲强度、截面惯性矩和抗弯刚度<sup>[19]</sup>,公式为:

$$E = \frac{l^3}{48I} \times \left( \frac{\Delta P}{\Delta y} \right) \quad (2)$$

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \quad (3)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} y_{\max}}{I} \quad (4)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max} l/4}{W} \quad (5)$$

$$W = \frac{I}{D/2} \quad (6)$$

式(2)~(6)中, $E$ 为弯曲弹性模量,MPa; $l$ 为试验标距,mm; $P$ 为弯曲力,N; $\Delta P$ 为弹性范围内一段力,N; $\Delta y$ 为对应 $\Delta P$ 的位移,mm; $I$ 为截面惯性矩, $\text{mm}^4$ ; $D$ 为样本外径,mm; $d$ 为样本内径,mm; $\sigma_{\max}$ 为弯曲强度,MPa; $M_{\max}$ 为最大弯矩, $\text{kN}\cdot\text{m}$ ; $y_{\max}$ 为最大弯曲载荷时产生的横向位移,mm; $P_{\max}$ 为最大弯曲载荷,N; $W$ 为截面模量, $\text{mm}^3$ 。

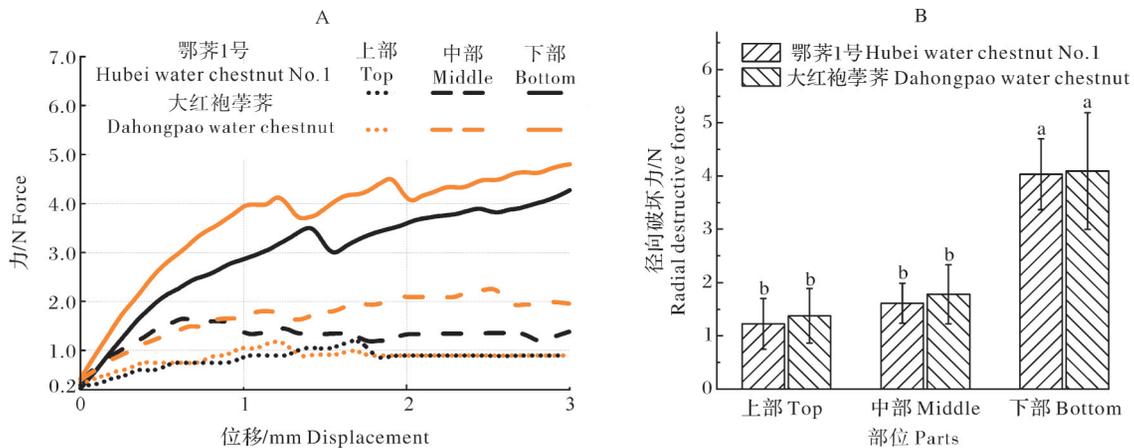
## 2 结果与分析

### 2.1 径向压缩试验

1)2个品种3个部位的局部径向压缩试验。选取鄂芥1号和大红袍荸荠2个品种以及上、中、下部3个部位进行两因素三水平完全析因试验,重复10次。图3A为2个品种的3个部位的局部径向压缩曲线对比。图3A中曲线大体呈现出上升趋势到波浪状。茎秆一开始受力表现出近似线性特征,表现出弹性材料的性质,此时茎秆没有出现损伤,位移增加,力

会线性增加,在到达第1个最高点后出现一个短暂的下降或保持平直,此时受压茎秆已经在微观结构上出现损伤,这时的受力最高点为茎秆临界破坏点,即需要记录的破坏力值。随着压头继续下压茎秆,图3A中曲线呈现出再次增加趋势,等待压力再次到达新的最高点时,曲线再次表现出下降态势,这时的茎秆已经完全被压溃。曲线整体表现出2个品种的荸荠茎秆从上部、中部到下部所能承受的破坏力均表现出递增的趋势,且下部的承受破坏力明显高于其他2个部位。

对试验得到的10次试验数据利用IBM SPSS Statistics 26软件进行两因素不等水平方差分析和SSR法进行多重比较( $\alpha=0.05$ ),整理得到图3B。方差分析显示,鄂芥1号和大红袍荸荠之间的破坏力品种之间差异不显著( $P>0.05$ ),3个部位的破坏力品种差异极显著( $P<0.01$ ),2个品种和3个部位之间的交互作用不显著。多重比较显示,下部和中部、上部之间的差异都显著,而中部和上部之间的差异不显著。原因是,荸荠茎秆下粗上细,结构为中空圆管状。当径向施力时,圆环上表面和下表面会分别表现出一次受力下降的趋势,但由于中上部直径和壁厚比下部更小,茎秆承受力和受力变化较小。另外,茎秆下部有若干片叶鞘,使得该部位的受力更加明显大于其他2个部位。



图中字母表示有无显著性差异( $P<0.05$ ),下同。The letters in the figure indicate significant differences( $P<0.05$ ), the same below. A: 径向局部压缩试验力-位移曲线 Radial local compression test force-displacement curve; B: 2个品种3个部位径向局部压溃力均值及标准差 Mean and standard deviation of radial local crushing force of three parts for two varieties.

图3 径向压缩试验结果

Fig.3 Radial compression test result graph

2)不同搁置时长对径向压缩试验的影响。对搁置了不同时长鄂芥1号中部样本进行含水率检测的同时进行局部径向压缩试验-单因素试验,重复10次。试验同时取样测含水率,每次测试5组。得到5

组样本的含水率均值分别为82.11%、79.75%、77.67%、73.58%、72.83%。0~4 h时长内相应节点测得的压缩力的均值依次为1.660、1.560、1.245、1.178、1.108 N。由结果可知,从0~4 h时长的自然

搁置, 茎秆含水率呈现一直下降趋势, 茎秆的径向破坏力也在不断下降。4 h 的时间, 含水率变化在 10% 左右, 破坏力变化在 0.5 N 左右。单因素方差分析结

果(表 1)表明, 0~4 h 的自然搁置对茎秆的径向承受压力的差异极显著。

表 1 0~4 h 的搁置对茎秆破坏力的方差分析

Table 1 Analysis of variance for the effects of 0-4 h of delay on stem damage force

差异来源 Variance factor	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
组间 Between-test	2.625	4	0.656	4.477	0.004**
组内 Within-test	6.597	45	0.147		
总计 Total	9.223	49			

注:\*\*表示差异极显著( $P < 0.01$ ), 下同。 \*\* indicates a highly significant difference( $P < 0.01$ ), the same below.

3) 加载速率对径向压缩试验的影响。选取 10、20、30、40、50 mm/min 共 5 个加载速率, 对鄂芥 1 号中部样本进行局部径向压缩试验-单因素试验。每组试验重复 10 次。10~50 mm/min 的 5 种加载速率得到的力的均值分别为 2.272、1.693、2.121、1.793、1.909 N。所得均值始终接近图 3B 中鄂芥 1 号茎秆中部的破坏力数值。经过单因素方差分析(表 2)可知, 从 10~50 mm/min 的 5 种加载速率对茎秆中部的破坏力差异不显著。

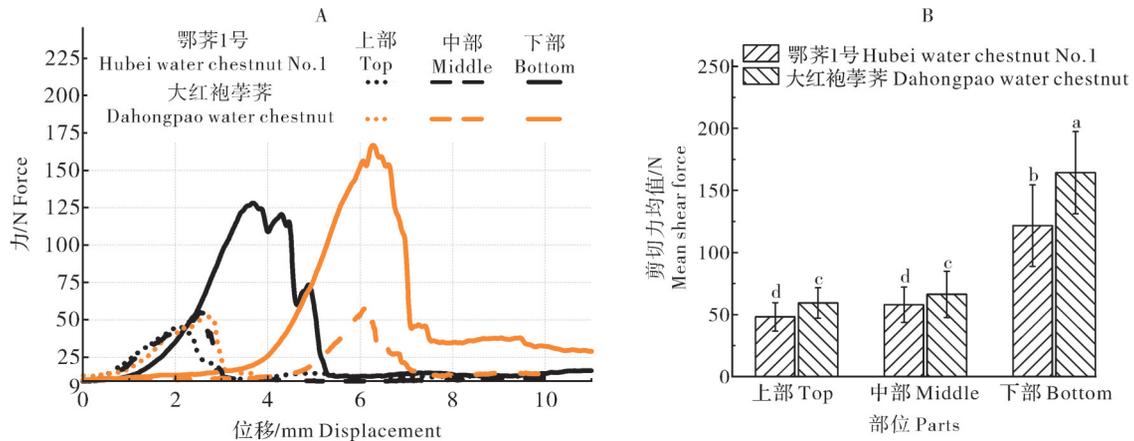
表 2 不同加载速度对茎秆的破坏力方差分析

Table 2 Variance analysis of destructive power of stalk with different loading speed

差异来源 Variance factor	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
组间 Between-test	2.250	4	0.562	1.092	0.372
组内 Within-test	23.176	45	0.515		
总计 Total	25.425	49			

## 2.2 剪切试验

1) 2 个品种 3 个部位的剪切力试验。试验开始前需要对应好每个样本的外径和厚度, 然后选取鄂芥 1 号和大红袍荸荠 2 个品种以及上、中、下部 3 个部位进行两因素三水平完全析因试验, 每组试验重复 10 次。图 4A 是得到的关于剪切力的力-位移曲线。曲线大体可以分为 3 个阶段。第一阶段, 曲线急剧上升近似线性关系, 表示茎秆在受力后产生了近似弹性形变, 此时随着位移的增加力也随之增加, 茎秆未发生损伤; 第二阶段, 曲线到达最高点并且在周围产生锯齿状波动, 这种现象的出现可能是因为材料内部的纤维结构、叶鞘等作用导致, 在这个阶段, 茎秆已经产生不可逆损伤; 第三阶段, 曲线产生急剧下降的趋势, 茎秆迅速被剪断, 这个阶段已经超过了茎秆的剪切强度, 无法承受更大的剪切外力。此外, 2 个品种的下部最大剪切力明显高于上部和中部, 上部和中部的最大剪切力差异较小, 大红袍荸荠的 3 个部位的最大剪切力整体高于鄂芥 1 号。



A: 剪切试验力-位移曲线 Force-displacement curve of shear test; B: 2 个品种 3 个部位剪切力均值及标准差 Mean value and standard deviation of shear force of two varieties and three parts.

图 4 剪切试验结果

Fig.4 Shear test results picture

由方差分析可知,2个品种之间的最大剪切力差异极显著( $P<0.01$ ),3个部位之间的最大剪切力差异极显著,品种和部位的交互项差异显著( $P<0.05$ )。结合图4B,对部位进行SSR法多重比较,结果显示,下部对上部和中部之间的差异均显著,上部和中部之间差异不显著( $P>0.05$ )。大红袍荸荠剪切力均值整体大于鄂芥1号,上部之间和中部之间差值较小,均在48~70 N,下部之差较大,差值大于40 N。作物茎秆一般是黏弹性材料<sup>[20-21]</sup>,其组织结构、纤维方向和密度、细胞壁的厚度不完全一致,这会导致剪切曲线一开始呈现弹性材料的特点,断裂的时候会有一些粘连,导致在曲线最高点时会产生波浪状;茎秆下部更接近根部,需要吸收养分和水分来支撑整个植株,另外,顶部往往向外延伸优先发育,从而导致越往上的茎秆直径越细,力学性能相比下部更差一些。

2)剪切强度。结合每个样本的外径、壁厚以及试验得到的相应的最大剪切力,可计算出每个样本的剪切强度,从而计算出每个部位剪切强度的平均值。鄂芥1号和大红袍荸荠的上、中、下3个部位剪切强度均值分别为7.041、7.007、6.007 MPa,6.001、5.570、6.297 MPa。2个品种的3个部位的剪切强度整体变化趋势不大,鄂芥1号和大红袍荸荠品种之间的差异不大,最大差值在1.5 MPa之内。

3)不同搁置时长对剪切试验的影响。使用上述5个时刻的10个鄂芥1号中部样本为1组,共50个,进行剪切力单因素试验,试验重复10次。0~4 h时

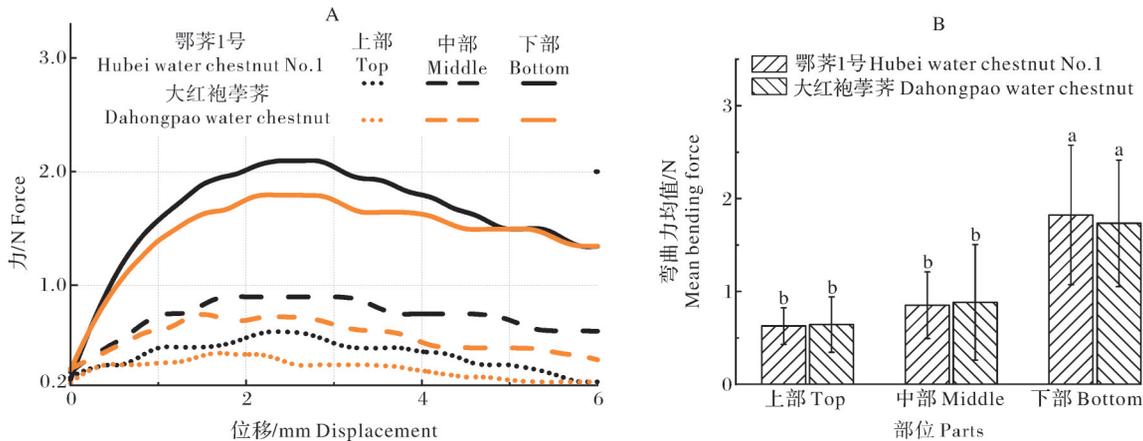
长内相应节点测得的最大剪切力的均值依次为43.472、49.315、53.496、67.732、53.811 N。从0~3 h的搁置过程中,最大剪切力是不断增加的,但在第3小时到第4小时出现了下降趋势。但总体上是处于鄂芥1号中部剪切力的范围之内(图4B)。单因素方差分析(表3)结果显示,0~4 h的自然搁置,对茎秆的最大剪切力的影响不显著( $P>0.05$ )。

表3 搁置时长对剪切力影响的方差分析  
Table 3 Analysis of shear force variance at 5 moments of the day

差异来源 Variance factor	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
组间 Between-test	3 207.146	4	801.786	2.393	0.065
组内 Within-test	15 080.61	45	335.125		
总计 Total	18 287.75	49			

2.3 弯曲试验

1)2个品种3个部位的弯曲试验。选取鄂芥1号和大红袍荸荠2个品种以及上、中、下部3个部位进行两因素三水平完全析因试验-三点弯曲试验。试验前需要对应好每个样本的尺寸,测得固定标距 $l=56.32$  mm。试验重复10次。图5A是2个品种和3个部位弯曲试验力-位移曲线,由图5A可知,曲线可以大致分为3个阶段,第一个阶段曲线近似线性,呈现弹性材料的性质,第二个阶段在到达最高点后近似水平直线,在这个阶段茎秆到达屈服极限,内部组织结构开始出现永久损伤,第三个阶段曲线缓慢下降,最终彻底弯折。此外,所有茎秆部位受力均在0~3 N,2个品种的下部受力均明显高于上部和中部,中



A: 弯曲试验力-位移曲线 Bending test force-displacement curve; B: 2个品种3个部位弯曲力均值及标准差 Mean value and standard deviation of bending force in three parts of two varieties.

图5 弯曲试验结果

Fig.5 Bending test results picture

部的受力均略高于上部。鄂芥1号的3个部位的最大承受力整体略大于大红袍荸荠。由图5B可知,2个品种的最大承受力从上往下是逐渐增大的,且无论是鄂芥1号还是大红袍荸荠,茎秆的上部和中部的最大承受力均值都小于1 N,下部均值都小于2 N。

方差分析可知,2个品种之间的最大承受力差异不显著( $P>0.05$ ),3个部位之间的最大承受力差异极显著,品种和部位的交互项差异不显著( $P>0.05$ )。对部位进行SSR法多重比较,结果显示,下部与上部和中部之间的最大承受力差异均显著( $P<0.05$ ),上部和中部之间最大承受力差异不显著( $P>0.05$ )。

2)其他弯曲性质。根据已有数据(表4)和公式计算得出2个品种的3个部位的弯曲弹性模量、弯曲强度、惯性矩和抗弯刚度。

①茎秆弯曲弹性模量。2个品种的中部弹性模量均明显大于上部和下部,上部均略高于下部。鄂芥1号中部弹性模量在300 MPa左右,而大红袍荸荠已经大于400 MPa,两者中部和下部数值都在100~200 MPa。

②茎秆弯曲强度。鄂芥1号弯曲强度均值在2.0~2.5 MPa,大红袍荸荠弯曲强度均值在1.9~3.2 MPa。大红袍荸荠中部弯曲强度数值上略高于其他部位,2个品种整体差异不大。

③茎秆截面惯性矩。2个品种截面惯性矩趋势基本保持一致,下部的截面惯性矩明显高于上部和中部,数值在35 mm<sup>4</sup>左右,而上部和中部数值相近,在8~13 mm<sup>4</sup>。

④茎秆抗弯刚度。2个品种对应3个部位的抗弯强度整体趋势较为一致,茎秆上、中、下部抗弯强度是递增趋势。上部和中部差别较大,中部和下部差别较小。所有部位的数值都低于0.005 N·m<sup>2</sup>,整体抗弯刚度较低。

表4 3个部位的其他弯曲性质数值均值

Table 4 Table of mean values of other bending properties for the three sites

弯曲性质 Bending properties	上部 Top	中部 Middle	下部 Bottom
弹性模量/Mpa Modulus of elasticity	170.476a	348.473b	134.649a
弯曲强度/Mpa Bending strength	2.334a	2.831a	2.059a
惯性矩/mm <sup>4</sup> Moment of inertia	9.619a	11.329a	33.965b
抗弯刚度/(N·m <sup>2</sup> ) Flexural stiffness	0.001 52a	0.003 73b	0.004 04b

### 3 讨论

本研究将符合栽植要求(即切割后50 cm长)的荸荠秧苗茎秆分为上部、中部和下部3个部分,对鄂芥1号和大红袍荸荠茎秆进行径向压缩试验、剪切试验和弯曲试验。径向压缩试验表明,2个品种的茎秆部位径向承受力从上往下依次增大,且因为内部结构、纤维排列等原因,下部破坏力均值都在4 N左右,而上部和中部均值则在1~2 N,大红袍荸荠3个部位破坏力均略高于鄂芥1号。0~4 h不等时长的搁置,会导致茎秆含水率的下降以及径向承受力的减弱。5组加载速率(10~50 mm/min)对茎秆径向承受力的影响不显著( $P>0.05$ )。综上,若需要夹持茎秆时,夹持部位尽可能地靠近茎秆根部可减小对秧苗的破坏程度;从育苗田到大田移栽过程中,秧苗放置的时间越长,茎秆能承受的夹持力越小,移栽时尽量保持秧苗的水分有利于径向受力。

剪切试验表明,2个品种的下部剪切力均明显大于上部和中部,剪切力均值在120~165 N,而上部和中部的剪切力均值在48~60 N。2个品种在3个部位的剪切强度变化趋势整体不大,上部和中部在5~8 MPa,下部在6 MPa左右。同样对搁置了0~4 h不等时长的茎秆进行剪切试验,所得剪切力始终在正常的数值之内,试验不显著( $P>0.05$ )。剪切试验可为秧苗移栽过程的修剪工作提供参数支持。

弯曲试验表明,上部的抗弯刚度明显小于中部和下部,均值在 $1.4\times 10^{-3}\sim 1.6\times 10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}^2$ ;中部的弯曲弹性模量明显高于上部和下部,均值在290~405 MPa,大红袍荸荠中部弯曲强度略大于鄂芥1号,数值为3.2 MPa;下部的截面惯性矩明显大于上部和中部,均值在33~35 mm<sup>4</sup>,且受力均明显高于上部和中部,其最大载荷的平均数值小于2 N。综上,大红袍荸荠在抗倒伏方面优于鄂芥1号<sup>[22]</sup>,2种荸荠茎秆整体均易受力弯曲导致破坏,且上部最容易弯曲折断,因此在搬运和移栽过程中,应尽量减小茎秆的弯曲受力。

本研究移栽期的相关力学数据,有助于对机械移栽方式的选择,或者使用机械夹持装置的施力部位选择和施力范围控制,秧苗切割刀的类型和功率选择,搁置时长对秧苗相关力学性能的影响,机械装置对不同荸荠品种的适用情况等,为实现荸荠秧苗的大田移栽机械化提供基础参数。

## 参考文献 References

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第11卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 48-49. Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora reipublicae popularis sinicae [M]. Beijing: Science Press, 2004: 48-49 (in Chinese).
- [2] 李成平, 张志军, 薛帅, 等. 荸荠机械化采收装置设计[J]. 农业工程, 2022, 12(12): 104-108. LI C P, ZHANG Z J, XUE S, et al. Design of mechanical device for water chestnut harvesting [J]. Agricultural engineering, 2022, 12(12): 104-108 (in Chinese with English abstract).
- [3] 徐映萍, 王征鸿, 何水平, 等. 浙江荸荠优质高效规范化栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2019(1): 100-102. XU Y P, WANG Z H, HE S P, et al. Zhejiang water chestnut high quality and efficient standardized cultivation technology [J]. China vegetables, 2019(1): 100-102 (in Chinese).
- [4] 杨建国, 汪端华, 李倩, 等. 湖南省水生蔬菜产业现状与发展建议[J]. 湖南农业科学, 2022(11): 88-91. YANG J G, WANG D H, LI Q, et al. Status quo and development suggestions of Hunan aquatic vegetable industry [J]. Hunan agricultural sciences, 2022(11): 88-91 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 172-176. LIU Q T, OU Y G, QING S L, et al. Study progress on mechanics properties of crop stalks [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 38(7): 172-176 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李耀明, 秦同娣, 陈进, 等. 玉米茎秆往复切割力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 160-164. LI Y M, QIN T D, CHEN J, et al. Experiments and analysis on mechanical property of corn stalk reciprocating cutting [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 160-164 (in Chinese with English abstract).
- [7] 郭翠花, 高志强, 苗果园. 不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 151-155. GUO C H, GAO Z Q, MIAO G Y. Relationship between lodging and mechanical characteristics of winter wheat stem under different yield levels [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 151-155 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵春花, 张锋伟, 曹致中. 豆禾牧草茎秆的力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 122-126. ZHAO C H, ZHANG F W, CAO Z Z. Experiment on stalk mechanical properties of legume forage and grasses [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 122-126 (in Chinese with English abstract).
- [9] 汪清焰. 水稻茎秆成分与其力学性能关系的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019. WANG Q Y. Study on the relationship between components and mechanical properties of rice stem [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李宝军. 栽培因素对油菜茎秆力学特性影响及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021. LI B J. Effects of cultivation factors on mechanical characteristics of rapeseed stalk and its mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [11] 尹政, 袁建宁, 李显旺, 等. 红麻茎秆力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(12): 166-173. YIN Z, YUAN J N, LI X W, et al. Experimental study on mechanical properties of kenaf stalk [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2021, 43(12): 166-173 (in Chinese with English abstract).
- [12] 梁莉, 郭玉明. 不同生长期小麦茎秆力学性质与形态特性的相关性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 131-134. LIANG L, GUO Y M. Relationship between stalk biomechanical properties and morphological traits of wheat at different growth stages [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 131-134 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李心志, 廖庆喜, 袁华, 等. 油菜基质块移栽机苗床带整备装置设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(2): 215-226. LI X Z, LIAO Q X, YUAN H, et al. Design and test of seedbed belt preparation device for rapeseed substrate block transplanter [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(2): 215-226 (in Chinese with English abstract).
- [14] 魏俊逸, 宗望远, 詹广超. 油菜茎秆径向压缩特性试验研究[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 198-205. WEI J Y, ZONG W Y, ZHAN G C. An experimental study of the radial compression characteristics of rape stalks [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(1): 198-205 (in Chinese with English abstract).
- [15] 吴敏, 潘虹宇, 赵东林, 等. 燕麦茎秆理化组分分析与动态力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 447-455. WU M, PAN H Y, ZHAO D L, et al. Analysis of physicochemical composition and dynamic mechanical properties of *Avena sativa* stalk [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(S1): 447-455 (in Chinese with English abstract).
- [16] 徐鑫, 郭克君, 谭新建, 等. 苧麻茎秆的力学性能研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(4): 447-452. XU X, GUO K J, TAN X J, et al. Research on mechanical properties of ramie stalk [J]. Journal of Hunan Agricultural University (natural sciences), 2018, 44(4): 447-452 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张李嫻. 玉米秸秆力学特性的离散元建模方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. ZHANG L X. Research on the discrete element modeling method of corn stalk's mechanical characteristics [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [18] 武翠卿, 李楠, 张帅, 等. 谷子秸秆生物力学性质试验研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(5): 377-380. WU C Q, LI N, ZHANG S, et al. Experimental study on the biomechanical properties of millet stem [J]. Journal of Shanxi Agri-

- cultural University(natural science edition), 2016, 36(5): 377-380(in Chinese with English abstract).
- [19] 袁红梅. 小麦茎秆生物力学性能试验与抗倒伏力学评价分析[D]. 太谷:山西农业大学, 2005. YUAN H M. Test of biomechanics properties on wheat stalk and mechanics evaluation of wheat lodging resistance properties[D]. Taiyu; Shanxi Agricultural University, 2005(in Chinese with English abstract).
- [20] 梁莉, 郭玉明. 作物茎秆生物力学性质与形态特性相关性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 1-6. LIANG L, GUO Y M. Correlation study of biomechanical properties and morphological characteristics of crop stalks [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 1-6(in Chinese with English abstract).
- [21] 马瑞峻, 萧金庆, 郑普峰, 等. 穴盘水稻秧苗茎秆蠕变与应力松弛特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 43-53. MA R J, XIAO J Q, ZHENG P F, et al. Experimental study on characteristics of creep and stress relaxation for rice seedling stem raised in cell tray[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 43-53(in Chinese with English abstract).
- [22] 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 Y M, YUAN H M, YIN Y, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 14-18(in Chinese with English abstract).

## Experiments of radial compression, shearing, and bending on stalks of water chestnut seedlings at stage of transplanting

SU Yanqiang, ZHOU Yong

*College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Mid-Lower Reaches of the Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

**Abstract** The mechanical properties of stalks of water chestnut at the stage of transplanting were studied to provide a theoretical basis for the mechanization of transplanting. Experiments of radial compression, shearing, and bending on the stalks of Hubei water chestnut No.1 and Dahongpao water chestnut from Tuanfeng County, Huanggang City, Hubei Province, China, were carried out with TMS-PRO textrometer. The results showed that the capacity of radial bearing in the stalks increased from the top to the bottom, with the average value of the lower part ranged from 4.0 N to 4.1 N. The longer the shelving time (within 4 hours), the lower the content of moisture in the stalks and the smaller the capacity of radial bearing. The effect of loading rate on the capacity of radial bearing was not significant. The lower part of the stalks had the highest force of shearing, with an average of 120 N to 165 N and a strength of shearing about 6 MPa. The effect of a 4-hour resting time on force of shearing was not significant. The upper part of the stalk had the smallest stiffness of bending, with an average between  $1.4 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^2$  and  $1.6 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ , the middle part had the largest bending modulus of elasticity, with an average between 290 MPa and 405 MPa, and the lower part had the largest cross-sectional moment of inertia, with an average between  $33 \text{ mm}^4$  and  $35 \text{ mm}^4$ , and the force of the lower part was significantly higher than that of the upper and middle parts, with an average of the maximum load less than 2 N. It will provide a basis for the design of the machine tools for cutting, handling and transplanting of seedlings.

**Keywords** stalks of water chestnut; the stage of transplanting; compression; bending; shearing

(责任编辑:陆文昌)