

## 蔺草底部茎秆解剖构造与力学性能

柴晓娟<sup>1</sup>, 苏燕<sup>1</sup>, 陈慧<sup>1</sup>, 郭玮龙<sup>2</sup>, 金水虎<sup>1</sup>

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江省嵊州市农林局, 浙江 嵊州 312400)

**摘要:** 蔺草 *Juncus effusus* 茎秆是一种优质天然纤维。研究蔺草茎秆解剖构造与力学性能, 为全面了解蔺草及其纤维的开发利用提供理论依据。以 5 份蔺草种质为研究对象, 观测其解剖构造, 运用电子万能力学试验机测试其力学性能, 并分析解剖构造与力学性能之间的关系。结果表明: 蔺草底部茎秆微观结构分为表皮、基本组织、维管束和髓; 蔺草纤维呈纺锤形, 长度为 681.47~712.04  $\mu\text{m}$ , 宽度为 5.58~8.00  $\mu\text{m}$ , 壁腔比范围为 1.194~1.556; 5 份蔺草种质底部茎秆的最大拉力范围为 61.59~72.71 N, XY004 的最大拉力最高, 拉伸强度为 33.28~59.11 MPa, XY003 的拉伸强度最大, 拉伸弹性模量为 1 438.23~2 297.10 MPa; 蔺草底部茎秆拉伸强度、拉伸弹性模量与其维管束总数目呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.818 和 0.724, 与茎壁厚/茎半径也呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.740 和 0.748, 与纤维的壁腔比呈显著正相关, 相关系数分别为 0.584 和 0.663, 与粗纤维质量分数无显著相关性; 蔺草底部茎秆力学性能主要取决于茎秆维管束总数目、基本组织厚度和纤维的壁腔比以及各组织及其各细胞之间的连接形式和连接强度。供试的 5 份蔺草种质中, XY003 和 XY004 底部茎秆具有较高的强度和良好的弹性, 可作为优良蔺草品种选育的种质资源。图 4 表 4 参 33

**关键词:** 材料学; 蔺草茎秆; 解剖构造; 力学性能; 纤维特性

**中图分类号:** S561; TU531.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2016)06-1058-09

## Anatomical structure and mechanical properties from stem bottoms of *Juncus effusus*

CHAI Xiaojuan<sup>1</sup>, SU Yan<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>1</sup>, GUO Weilong<sup>2</sup>, JIN Shuihu<sup>1</sup>

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Shengzhou Municipal Agriculture and Forestry Bureau, Shengzhou 312400, Zhejiang, China)

**Abstract:** To provide guidance for genetic breeding and better utilization of *Juncus effusus*, a high-quality natural fiber material with strength and flexibility, the anatomical structure from stems of five cultivars (XY001, XY002, XY003, XY004, and XY007) was observed under a microscope. Then mechanical properties of rush stems in maturity were measured by an electronic testing machine (CTM 6000), and relationships between anatomical structure and mechanical properties were analyzed with a correlation analysis. Results showed that the microstructure was composed of epidermis, elementary tissue, vascular bundles, and pith. The cell length was 681.47–712.04  $\mu\text{m}$ , the width was 5.58–8.00  $\mu\text{m}$ , and the ratio of the cell wall to the cavity of the fiber was 1.194–1.556. Also, the maximum tensile force was 61.59–72.71 N, the tensile strength was 33.28–59.11 MPa, and Young's modulus of the rush stems was 1 438.23–2 297.10 MPa. The best of the maximum tensile force was cultivar XY004, but XY003 had the best tensile strength and Young's modulus. The correlation analysis showed a highly significant and positive relationship of tensile strength to the total number of vascular bundles ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.818$ ) and the ratio of wall thickness to radius of stems ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.740$ ). Also,

收稿日期: 2015-11-20; 修回日期: 2016-01-14

基金项目: 宁波市科技资助项目(2012C10039)

作者简介: 柴晓娟, 从事植物资源与利用研究。E-mail: fantasy-003@163.com。通信作者: 金水虎, 教授, 从事植物资源研究。E-mail: jsh501@163.com

Young's modulus was highly significant and positive correlated with the total number of vascular bundles ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.724$ ) and the ratio of wall thickness to radius of stems ( $P < 0.01$ ,  $r = 0.748$ ). A significant positive correlation was also found for tensile strength ( $P < 0.05$ ,  $r = 0.584$ ) and Young's modulus ( $P < 0.05$ ,  $r = 0.663$ ) compared to the ratio of the cell wall to the cavity of the fiber. The mechanical properties from stem bottoms of *Juncus effusus* depended on the numbers of vascular bundles, the elementary tissue thickness, the ratio of the cell wall to the cavity of the fiber and the connecting form and strength of each organization. The findings suggested that compared with the other three cultivars, XY003 and XY004 had higher strength and flexibility making them better candidates for genetic breeding. [Ch, 4 fig. 4 tab. 33 ref.]

**Key words:** material science; *Juncus effusus* stem; anatomical structure; mechanical properties; fiber characteristics

蔺草 *Juncus effusus* 属灯心草科 Juncaceae 多年生宿根性草本，俗称席草，原产亚热带，中国、日本、韩国以及东南亚一些国家都有栽培。在中国主要分布于浙江、江苏、安徽、江西、上海及四川等省市。蔺草是一种重要的经济作物，宁波是全国最大的蔺草栽植和草制品加工出口基地，连续数年栽培面积超过 10 000 hm<sup>2</sup>，占全国栽培面积 3/5 以上，一般草茎干质量为 9~12 t·hm<sup>-2</sup>，年出口创汇近 10 亿元<sup>[1]</sup>。目前，蔺草的主要栽培品种有‘冈山 3 号’‘伊索拉米’‘鄞蔺 1 号’‘农林 1 号’‘农林 4 号’‘宁草’‘白头草’和‘长草’等<sup>[2-3]</sup>。蔺草茎秆是一种优质天然纤维，具有表面接触性好，吸湿放湿性优越，保温隔热性能强等特点<sup>[4]</sup>。其茎秆多用于编织榻榻米、草席、草垫、草帽等十大系列百余种日常用品。近年来，中国蔺草种植规模日益扩大，但品种混杂情况严重，极大地影响和限制了蔺草制品的生产需求。因此，培育优质的蔺草品种，对中国蔺草产业的发展极其重要。茎秆的力学性能研究是利用遗传工程改变作物内部结构与机械性能，选育良种的前提<sup>[5]</sup>。关于农作物茎秆力学特性方面，国内学者主要对小麦 *Triticum aestivum*，水稻 *Oryza sativa*，玉米 *Zea mays*，苧麻 *Boehmeria nivea*，工业大麻 *Cannabis sativa*，蓖麻 *Ricinus communis* 等进行了深入的研究工作，并取得较多的成果<sup>[6-11]</sup>，国外学者也开展了大量的相关研究<sup>[12-16]</sup>，但关于蔺草茎秆力学特性的研究还鲜见报道。本研究以 5 份蔺草种质为研究对象，通过对蔺草底部茎秆解剖构造和力学特性进行观测测试，分析有关特性的影响因素及其变化规律，为蔺草机械收割技术参数设计提供理论支持，为进一步选育优良蔺草品种及其开发利用提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

5 份蔺草种质均由新艺蔺草制品公司收集并栽培于“中国蔺草之乡”的浙江省宁波市鄞州区，分别用 XY001, XY002, XY003, XY004 和 XY007 表示。其中，XY001, XY004 和 XY007 来源于日本，XY002 来源于浙江鄞州，XY003 来源于四川眉山。试验选用 2014 年 6 月上旬收割的成熟期蔺草，高度均大于 900 mm，长势良好，无病虫害，并尽量避免对茎秆的机械损伤。试验用样均取自距基部 100 mm 以上部位。

### 1.2 试验方法

1.2.1 解剖构造研究 解剖构造观测：蔺草收割期田间取样后，立即用 FAA[(V(甲醛):V(冰醋酸):V(体积分数为 70%乙醇)=5:5:90)]固定液固定样品。每份蔺草种质随机选取 3 株，选取 3 根·株<sup>-1</sup>，长度为 10~15 mm。采用常规石蜡切片法制作切片，用番红-固绿染色，然后置于显微镜下观察不同种质蔺草底部茎秆的解剖构造，并测量茎秆横切面直径、维管束数量、茎壁厚等相关参数(茎壁厚指茎秆横切面上从表皮到基本组织与髓部相连处的厚度)。纤维形态观测：取长度为 30 mm 的干燥茎秆放入试管中，注水至淹没材料，然后将试管放入水浴锅中加热煮沸，以排除其中的空气。将试管的水倒出，加入体积分数为 30%的硝酸和适量氯酸钾放在水浴锅中煮，待茎秆变成黄白色或白色，并至软化，倒去硝酸。待试管冷却后，用蒸馏水冲洗数次至无酸。注水于试管中，用手指按压试管口用力振荡，至茎秆细胞被分离，加入 1~2 滴番红试剂染色。用毛笔和解剖针挑出少许材料置于载玻片上，加水 1 滴，制成临时切片，置于显微镜下观测。每份蔺草种质至少测量 100 个试样。

1.2.2 粗纤维质量分数测定 将干燥试样粉碎, 45 °C恒温干燥 12 h, 过 40 目筛, 保存。粗纤维质量分数测定依据 GB/T 5009.10-2003《植物类食品中粗纤维的测定》, 含水量测定依据 GB/T 1931-2009《木材含水率测定方法》。主要仪器为 VELP FIWE6 纤维素测定仪。

1.2.3 力学性能测试 试验在浙江农林大学国家木质资源综合利用工程技术研究中心力学实验室进行。利用 CTM 6000 型微机控制电子万能力学试验机, 参考 GB/T 1040-2006《塑料和复合材料拉伸强度、拉伸模量和拉伸应力—应变关系的测定方法》对蔺草茎秆进行力学性能测试。试样长度为 80 mm, 试验标距为 40 mm, 每份蔺草种质制作 10 个试样, 试样含水率为 12%。

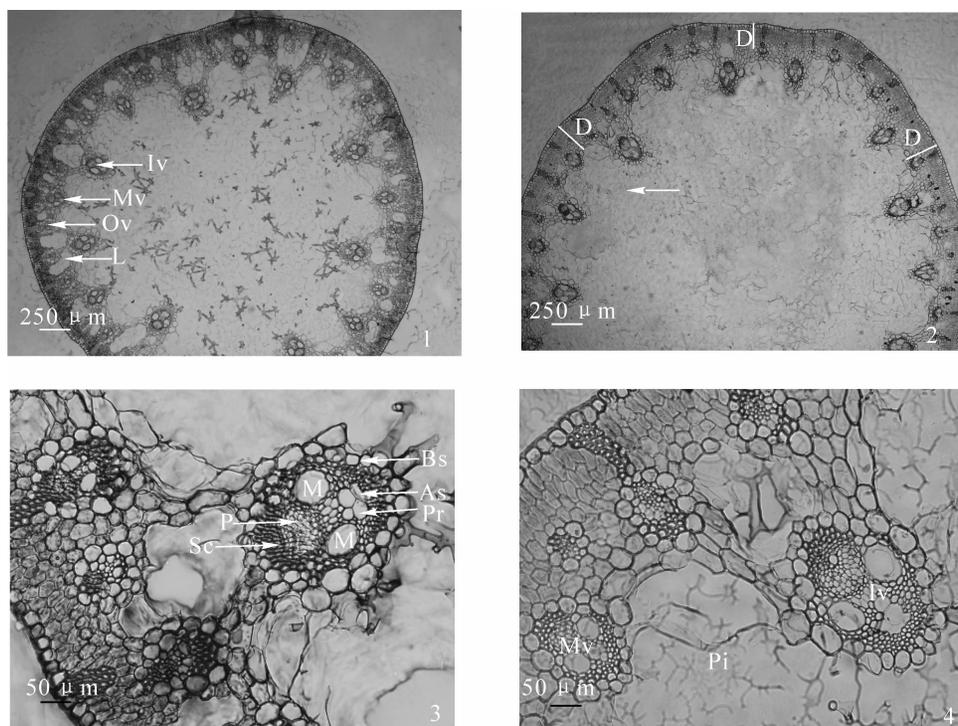
### 1.3 数据处理

采用 Excel 2007 软件对数据进行统计并作图, 利用数据处理系统 SPSS 19.0 软件对相关数据进行统计和方差分析, 方差分析采用 SSR 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 茎秆解剖构造研究

2.1.1 茎秆微观结构观察 XY001 和 XY003 蔺草底部茎秆的横切面微观结构见图 1, 其余 3 份与这 2 份相似。可以看出: 蔺草底部茎秆的横切面呈圆形或近圆形, 5 份蔺草种质底部茎秆横切面的基本结构大致相同, 分为表皮、基本组织、维管束和髓, 基本组织包括同化组织和纤维 2 部分。最外层为 1 层表皮细胞构成的表皮, 表皮外被角质层。表皮下的 5~7 层是由排列较为紧密的薄壁细胞和在薄壁细胞之间间隔排列的成束纤维构成的基本组织。基本组织内紧靠表皮的 2~3 层细胞紧密排列呈栅状, 细胞内富含叶绿体, 即为同化组织。纤维束沿茎秆切向周围紧靠表皮层与基本组织间隔排列, 在蔺草茎秆的横切面上纤维束成楔形, 狭的一端径向地伸向基本组织, 其大小和伸入的程度不等。大多数纤维束的内侧与外围维管束的外侧相接。维管束分散在基本组织中, 数量多, 大小不一, 大致呈外、中、内 3 层排列。中、外 2 层维管束数量多, 但其横切面面积小; 内层的维管束数量少, 但横切面面积大, 并向内突入髓部较深。髓部由无数多孔疏松的星状细胞组成, 又称海绵组织, 位于基本组织和维管束以内, 居于茎的



1 和 3 表示 XY001, 2 和 4 表示 XY003; 1 和 2 茎秆横截面积放大 40 倍, 3 和 4 茎秆横截面积放大 200 倍; Ov. 外层维管束; Mv. 中层维管束; Iv. 内层维管束; L. 腔隙道; D. 茎壁厚; Bs. 维管束鞘; As. 气腔; Pr. 原生导管; M. 后生导管; P. 韧皮部; Sc. 厚壁组织; E. 表皮; Fs. 纤维束; Pi. 髓。

图 1 蔺草茎秆横切面微观结构图

Figure 1 Micro-structure of cross section of rush stems

中部，占有较大面积。茎秆结构外坚内松，外密内疏，坚韧且富有弹性，吸湿力强。在基本组织的细胞间还存在着与维管束相间排列的数个腔隙道，腔隙道横切面为圆形或椭圆形的空腔。

2.1.2 茎秆微观结构相关参数 5 份蔺草种质底部茎秆横切面直径、茎壁厚、茎壁厚/茎半径，以及维管束数目统计结果见表 1。由表 1 可见：5 份蔺草种质茎秆维管束的总数目为 47~58 个，其多少的排列顺序为 XY004>XY003>XY001>XY002>XY007；横切面直径为 3.78~4.09 mm，大小的排列顺序为 XY001>XY004>XY007>XY002>XY003；茎壁厚 313.20~361.80  $\mu\text{m}$ ，其大小的排列顺序为 XY004>XY003>XY001>XY007>XY002；茎壁厚/茎半径比值为 0.161~0.189，其大小排序为 XY003>XY004>XY001>XY007>XY002。方差分析表明：5 份蔺草种质之间横切面直径无显著性差异；XY002 和 XY007 之间茎壁厚无显著性差异，与其他 3 份之间均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )；XY003 与 XY004 之间茎壁厚/茎半径无显著性差异，与其他 3 份之间均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

表 1 蔺草不同种质茎秆微观结构比较

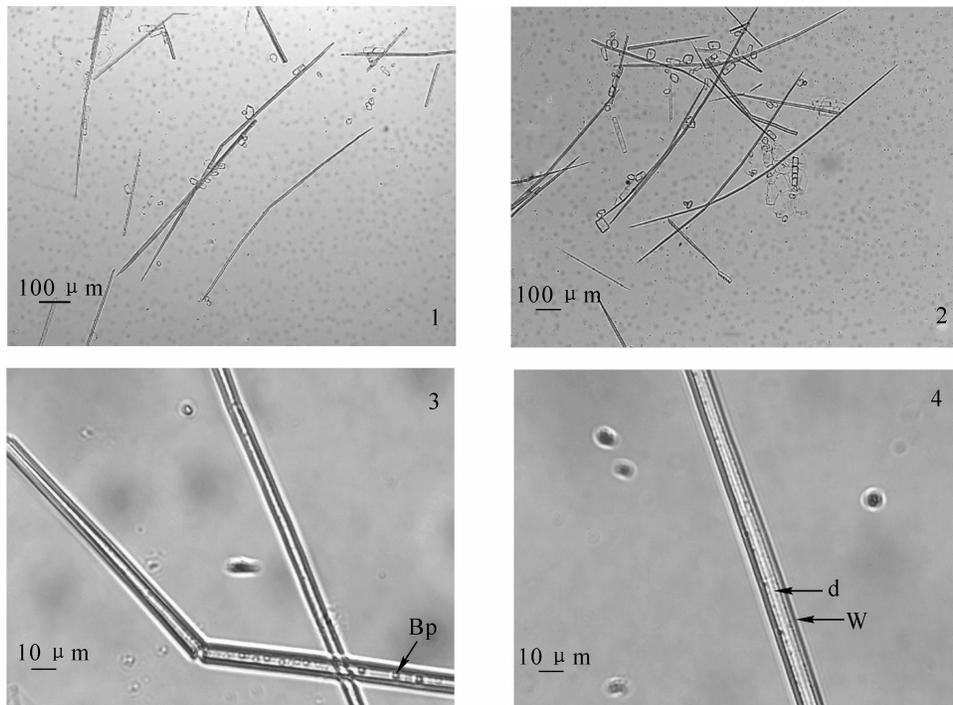
Table 1 Comparison of micro-structure on five rush stems

蔺草种质	维管束数目/个			横切面直径/mm	茎壁厚/ $\mu\text{m}$	茎壁厚/茎半径
	内层	中、外层	总数			
XY001	12	41	53	$4.09 \pm 0.37$ a	$351.00 \pm 29.69$ a	$0.172 \pm 0.008$ bc
XY002	11	39	50	$3.90 \pm 0.32$ a	$313.20 \pm 19.14$ b	$0.161 \pm 0.009$ c
XY003	15	42	57	$3.78 \pm 0.19$ a	$358.00 \pm 19.90$ a	$0.189 \pm 0.004$ a
XY004	14	44	58	$3.99 \pm 0.11$ a	$361.80 \pm 35.73$ a	$0.181 \pm 0.013$ ab
XY007	10	37	47	$3.91 \pm 0.28$ a	$327.40 \pm 21.36$ ab	$0.168 \pm 0.006$ c

说明：同列数据(平均值 $\pm$ 标准差)后面不同小写字母表示 5%水平显著差异。

2.1.3 纤维形态分析 XY001 和 XY003 茎秆纤维细胞的形态见图 2，其余 3 份与这 2 份相似。可以看出：纤维细胞的长度大小不一，均呈纺锤形，中部较宽，两头较尖。中部粗细均匀，且有较厚的细胞壁，细胞壁上有具缘纹孔。

2.1.4 纤维的长度、宽度、腔径和壁腔比 5 份蔺草种质纤维的长度、宽度、腔径和壁腔比见表 2。由



1 和 3 表示 XY001，2 和 4 表示 XY003；1 和 2 放大 100 倍；3 和 4 放大 1 000 倍；Bp. 具缘纹孔；W. 纤维的壁厚；d. 纤维的腔径；纤维壁腔比= $2W/d$ 。

图 2 蔺草茎秆纤维形态

Figure 2 The morphology of rush fiber

表2可知:5份蔺草种质的纤维长度为681.47~712.04  $\mu\text{m}$ ,宽度为5.58~8.00  $\mu\text{m}$ ,腔径为2.34~3.94  $\mu\text{m}$ ,壁腔比为1.194~1.556。不同种质纤维的长度和宽度不同,长度的大小排列顺序为XY004>XY001>XY002>XY003>XY007,宽度的大小排列顺序为XY007>XY002>XY004>XY003>XY001。不同种质的壁腔比有明显的差别,大小排列顺序为XY003>XY004>XY001>XY002>XY007。方差分析表明:5份蔺草种质之间纤维长度均无显著差异;XY007与其他4份蔺草的纤维宽度之间均存在显著差异( $P<0.05$ );XY003的壁腔比与XY004之间无显著性差异,与其他3份蔺草均存在显著差异( $P<0.05$ )。

表2 蔺草不同种质纤维形态比较

Table 2 Comparison of morphology of the rush fiber

蔺草种质	长度/ $\mu\text{m}$	变异系数	宽度/ $\mu\text{m}$	变异系数	腔径/ $\mu\text{m}$	变异系数	壁腔比	变异系数
XY001	710.59 $\pm$ 126.52 a	0.18	5.58 $\pm$ 1.08 c	0.19	2.48 $\pm$ 0.77 c	0.31	1.373 $\pm$ 0.499 bc	0.36
XY002	704.61 $\pm$ 146.70 a	0.21	6.54 $\pm$ 1.54 b	0.24	3.19 $\pm$ 1.29 b	0.41	1.235 $\pm$ 0.621 cd	0.50
XY003	684.01 $\pm$ 127.55 a	0.19	5.66 $\pm$ 1.16 c	0.21	2.34 $\pm$ 0.76 c	0.33	1.556 $\pm$ 0.583 a	0.38
XY004	712.04 $\pm$ 165.58 a	0.23	6.34 $\pm$ 1.72 b	0.27	2.67 $\pm$ 0.98 c	0.37	1.497 $\pm$ 0.521 ab	0.35
XY007	681.47 $\pm$ 167.39 a	0.25	8.00 $\pm$ 2.59 a	0.32	3.94 $\pm$ 1.82 a	0.46	1.194 $\pm$ 0.528 d	0.44

说明:同列数据(平均值 $\pm$ 标准差)后面不同小写字母表示5%水平显著差异。

2.1.5 纤维长度分布频率 由图3可以看出:5份蔺草种质纤维长度的分布频率有所差异,但整体分布规律基本相同,集中在350~1250  $\mu\text{m}$ ,其中长度在500~800  $\mu\text{m}$ 长的纤维占到了60%以上,小于500  $\mu\text{m}$ 和大于800  $\mu\text{m}$ 的纤维所占比例很小。

## 2.2 粗纤维质量分数

XY001, XY002, XY003, XY004和XY007的平均含水率分别为10.73%, 10.60%, 10.52%, 9.35%, 10.08%,其相应的粗纤维质量分数测定结果见图4。由图4可以看出,5份蔺草种质粗纤维的质量分数为35.04%~36.85%,平均为36.20%,不同蔺草种质粗纤维质量分数的百分比有所不同,其高低排列顺序为XY003>XY001>XY004>XY002>XY007。方差分析表明:5份蔺草种质之间粗纤维质量分数无显著差异性( $P>0.05$ )。

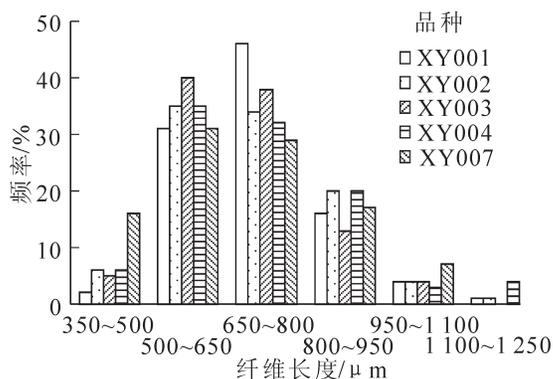


图3 蔺草不同种质纤维长度分布频率

Figure 3 The frequency of length distribution of five rush genetic resources

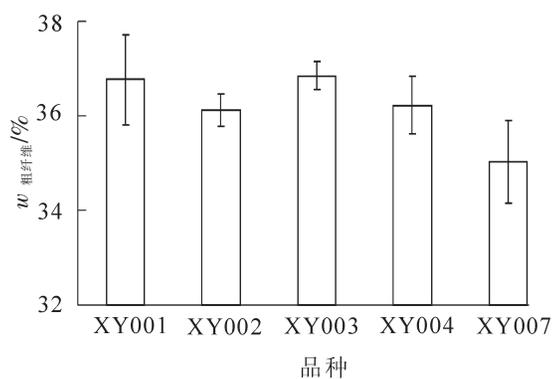


图4 蔺草不同种质粗纤维质量分数

Figure 4 The crude fiber content of five rush genetic resources

## 2.3 茎秆力学性能研究

反应茎秆力学性能的指标有拉伸强度、剪切强度、弹性模量、刚性模量以及茎秆的压缩特性等。对5份不同种质蔺草底部茎秆进行抗拉测试,其力学性能指标测试结果见表3。

## 2.4 茎秆解剖构造与力学性能的关系

对蔺草茎秆力学性能与微观结构、纤维的壁腔比及粗纤维素含量进行相关性分析,结果如表3所示。由表3可以看出:5份蔺草种质底部茎秆的横截面积为1.17~2.24  $\text{mm}^2$ ,最大拉力为61.59~72.71 N,拉伸强度为33.28~59.11 MPa,拉伸变形量为0.93~1.05 mm,拉伸弹性模量为1438.23~2297.10 MPa。

表 3 蔺草不同种质茎秆力学性能

蔺草种质	面积/mm <sup>2</sup>	最大拉力/N	拉伸强度/MPa	拉伸变形量/mm	拉伸弹性模量/MPa
XY001	1.80 ± 0.32 b	72.67 ± 9.80 a	41.09 ± 6.37 b	1.04 ± 0.30 a	1 679.66 ± 472.65 bc
XY002	1.68 ± 0.33 bc	61.59 ± 7.29 b	38.13 ± 10.23 b	0.94 ± 0.19 a	1 640.58 ± 313.30 bc
XY003	1.17 ± 0.11 d	69.06 ± 10.62 ab	59.11 ± 9.48 a	1.04 ± 0.13 a	2 297.10 ± 320.15 a
XY004	1.47 ± 0.28 c	72.71 ± 11.06 a	51.52 ± 14.80 a	1.05 ± 0.19 a	1 998.21 ± 611.47 ab
XY007	2.24 ± 0.49 a	71.89 ± 12.60 a	33.28 ± 8.44 b	0.93 ± 0.20 a	1 438.23 ± 251.74 c

说明：同列数据(平均值±标准差)后面不同小写字母表示 5%水平显著差异。

不同蔺草种质底部茎秆的横截面积有所不同，茎秆横截面积大小的排列为 XY007>XY001>XY002>XY004>XY003，XY007 的横截面积与其他 4 份之间均有显著的差异性；不同种质的拉伸强度、拉伸弹性模量有明显差别：拉伸强度的大小排列顺序为 XY003>XY004>XY001>XY002>XY007，XY003 的拉伸强度与 XY001，XY002 和 XY007 之间均有显著性差异，与 XY004 之间无明显差异；拉伸弹性模量大小排序与拉伸强度相同，XY003 的拉伸弹性模量与 XY001，XY002 和 XY007 之间均有显著性差异 ( $P<0.05$ )。由表 4 可以看出：蔺草茎秆拉伸强度与维管束总数、茎壁厚/茎半径之间均具有极显著正相关关系，与纤维壁腔比呈显著正相关；拉伸弹性模量与维管束总数、茎壁厚/茎半径之间均呈极显著正相关，与纤维壁腔比呈显著正相关；拉伸强度和拉伸弹性模量与粗纤维质量分数之间均呈正相关，但不显著。

表 4 解剖构造与力学性能的相关性分析

	维管束总数	茎壁厚/茎半径	纤维壁腔比	粗纤维质量分数
拉伸强度	0.818**	0.740**	0.584*	0.258
拉伸弹性模量	0.724**	0.748**	0.663*	0.398

说明：\* 表示显著相关 ( $P<0.05$ )，\*\* 表示极显著相关 ( $P<0.01$ )。

### 3 结论与讨论

拉伸强度指材料产生最大均匀塑性变形的应力。在拉伸试验中，试样到断裂为止所承受的最大拉伸应力就是拉伸强度。拉伸变形量是用来反映拉伸前后材料纤维变形程度的参量，拉伸变形量小，说明材料纤维的韧性好。拉伸弹性模量指在弹性范围内拉伸应力与相应拉伸应变之比，主要反应的是抗弹性变形的能力，弹性模量越大，刚性越强，变形越小，不易被拉断，在构件的理论分析和设计计算时，拉伸弹性模量是经常被用到的一个重要力学性能指标<sup>[9-10,17]</sup>。抗拉测试中，蔺草底部茎秆横截面积最大的是 XY007，最小的是 XY003，不同种质之间最大拉力和拉伸变形量相差不大，拉伸强度和拉伸弹性模量最大的都是 XY003，最小的是 XY007，结果与上述描述相符合。5 份蔺草种质底部茎秆的最大拉力范围为 61.59~72.71 N，拉伸强度为 33.28~59.11 MPa，拉伸弹性模量为 1 438.23~2 297.10 MPa。与其他 3 份种质相比，XY003 和 XY004 底部茎秆具有较高的强度和良好的弹性。郭维俊等<sup>[9,18]</sup>对小麦茎秆力学性能进行测试，得出小麦成熟期茎秆的最大拉力为 182.38~242.74 N，抗拉强度为 30.36~52.65 MPa，弹性模量为 1 143.44~1 985.86 MPa；段传人等<sup>[10]</sup>研究显示：水稻茎秆拉伸强度极限 8.70~14.21 MPa，拉伸弹性模量 1 640~2 670 MPa；高梦祥等<sup>[19]</sup>对玉米秸秆的力学特性进行测试，得出茎叶连接力为 0.7~16.0 N，叶鞘抗拉力为 3.0~21.0 N，叶鞘抗冲击能量为 0.5~3.8 J，茎秆抗冲击能量为 23.0~42.8 J。O' DOUGHERTY 等<sup>[20]</sup>研究表明：小麦秸秆拉伸强度 2 112~3 112 MPa，剪切强度 4 191~7 126 MPa，杨氏模量 4 176~6 158 GPa，刚性模量 267~547 MPa，秸秆成熟度、含水率等对以上参数都有影响。国外学者所测小麦力学性能与国内有所不同，这可能与不同种源、栽培条件、测试处理方法等有关<sup>[6]</sup>。将蔺草底部茎秆力学性能与国内研究的小麦和水稻进行相比，可以看出小麦茎秆的最大拉力约是蔺草的 3 倍，拉伸强度相差不大，拉伸弹性模量比蔺草的小；水稻茎秆的拉伸强度极限小于蔺草底部茎秆，拉伸弹性模量两者相差不大。可见蔺草底部茎秆具有较高的强度和良好的弹性，有利于蔺草生长和抗倒伏。

有关茎秆力学性能与其微观结构关系的研究已有很多报道。王芬娥等<sup>[9]</sup>认为小麦茎秆具有较高的强度和良好的弹性,其承载能力取决于机械组织的厚度、维管束的数量以及各组织及其细胞之间的连接形式和连接强度;段传人等<sup>[10]</sup>指出,水稻茎秆的力学性能主要由茎粗、茎壁厚、大小维管束数目所决定;赵春花等<sup>[21]</sup>发现牧草茎秆力学性能主要取决于机械组织厚度和维管束组织数量,以及各组织及其各细胞之间的连接形式和连接强度。张西良等<sup>[22]</sup>认为,黄瓜 *Cucumis sativus* 藤秆强度主要由表皮、机械组织和维管束承担,薄壁组织起连接和传递载荷的作用。日本蔺草不同品种的坚韧性和弹性与其内部的组织形态特征密切相关<sup>[23-24]</sup>。江浙地区蔺草品种解剖结构与茎秆光洁度、坚韧性和弹性密切相关<sup>[2-3,25]</sup>。本研究发现:蔺草茎秆力学性能与其维管束总数目、茎壁厚/茎半径均呈极显著正相关,结果与前人研究结论相一致。此外,角质层的加厚方式及表皮细胞壁加厚程度是影响蔺草坚韧性的因素之一。蔺草茎的横切面呈圆形或椭圆形,由表皮、基本组织、维管束和髓组成。表皮细胞排列致密,且外面覆盖有较厚而硬的角质层,对表皮有加固和保护的作用。基本组织内纤维的存在形式有2种:一是形成纤维束,一是形成维管束。纤维束近似楔形,向内延伸与外层维管束相连接,与茎内外2层维管束以间隔排列的形式贯穿于基本组织中。这种排列方式以及众多的数量使得蔺草茎秆具有很强的坚韧性。

5份蔺草种质纤维细胞大多呈纺锤形,中部粗细均匀,有较厚的细胞壁,细胞壁上有具缘纹孔。对苧麻属野生植物研究发现<sup>[26]</sup>,离析纤维细胞形态多样,有的单纤维一端较尖细,另一端较钝圆,个别呈螺旋状扭曲;部分单纤维细胞壁较厚,均匀光滑,有的细胞壁有孔洞存在;存在分布不均匀的外突型、内陷型、平滑型结节。张艳<sup>[27]</sup>发现:龙须草 *Eulaiopsis binata* 纤维较细,表面有明显纵纹,无扭转,无明显横结。俞春华等<sup>[28]</sup>发现,香蕉 *Musa nana* 等5种植物纤维大多纵向平直、具有横节、无天然扭曲。蔺焘等<sup>[29]</sup>测得棉 *Gossypium* spp. 秆皮部纤维的平均长度为 $(1\ 484.43 \pm 753.78)\ \mu\text{m}$ ,宽度为 $(18.90 \pm 6.61)\ \mu\text{m}$ ;潘明珠等<sup>[30]</sup>测得蓖麻纤维的长度分布范围为0.95~1.38 mm,宽度范围为21.80~30.11 mm,平均壁腔比范围为0.13~0.22。根据国际木材解剖学会(1937年)公布的纤维长度分级标准:纤维长度大于1.6 mm为长纤维,在0.9~1.6 mm为中等纤维,小于0.9 mm为短纤维<sup>[31]</sup>,故蔺草纤维属于短纤维。稻草纤维的长度为920.0  $\mu\text{m}$ ,宽度为8.1  $\mu\text{m}$ ;玉米秆的纤维长度为990.0  $\mu\text{m}$ ,宽度为13.2  $\mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>。将蔺草纤维形态与上述研究结果相比,蔺草纤维的长度和宽度都比较小,壁腔比较大。纤维的壁腔比是胞壁厚度与胞腔直径之比,蒋坤云等<sup>[32]</sup>对乔木单根抗拉性能与微观结构和纤维的关系进行研究,发现纤维单根抗拉特性与木纤维的壁腔比成正相关,纤维的胞壁厚,胞腔小,材料密实,表现的强度大。试验发现,蔺草茎秆纤维的壁腔比与茎秆拉伸强度和拉伸弹性模量呈显著正相关,5份蔺草种质纤维壁腔比的大小排列顺序为XY003>XY004>XY001>XY002>XY007,拉伸强度和拉伸弹性模量的大小排列顺序为XY003>XY004>XY001>XY002>XY007。这些结果与前人研究结果相符合。说明蔺草茎秆纤维的壁腔比与拉伸强度、拉伸弹性模量密切相关,细胞壁越厚,细胞腔越小,纤维的拉伸强度和拉伸弹性模量越大。

粗纤维是植物细胞壁的主要成分,在硫酸的作用下,试样中的糖、淀粉、果胶质和半纤维素经水解除去后,再用碱处理,除去蛋白质及脂肪酸,剩余的残渣为粗纤维。5份蔺草种质粗纤维的质量分数为35.04%~36.85%,平均为36.20%,XY003的最高。林燕萍等<sup>[33]</sup>研究认为,茶树嫩梢的力学特性与粗纤维质量分数关系密切,最大应力、断裂应力与弹性模量随着粗纤维质量分数的增加而增大,最大力点应变与断裂应变随着纤维素质量分数的增加而减小。蔺草茎秆拉伸强度、拉伸弹性模量与粗纤维素质量分数之间有一定的相关性,XY003粗纤维的质量分数最高,其拉伸强度和拉伸弹性模量也最大,研究结果与林燕萍等<sup>[33]</sup>的结论较一致,说明蔺草茎秆的拉伸力学性能和粗纤维质量分数有一定的关系。关于蔺草不同部位的解剖构造与力学性能差别还有待进一步研究。

#### 4 参考文献

- [1] 徐方娇,李礼君,顾朱益,等.蔺草基因组DNA提取条件的优化研究[J].科技通报,2010,26(4):523-530.  
XU Fangjiao, LI Lijun, GU Zhuyi, et al. Optimization study of extraction method of genomic DNA from mat rush [J]. *Bull Sci Technol*, 2010, 26(4): 523 - 530.
- [2] 陈庆翔,施国新.席草品种茎解剖结构与经济性状的相关性[J].植物资源与环境,1997,6(4):25-30.

- CHEN Qingxiang, SHI Guoxin. The relation between anatomical structure of stem and economic character of common cultivated *Juncus effusus* L. var. *decipiens* Buchen [J]. *J Plant Resour Environ*, 1997, **6**(4): 25 – 30.
- [3] 陈庆翔, 施国新, 解凯彬, 等. 江浙地区席草品种结构的扫描电镜观察[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 1998, **21**(1): 81 – 85.
- CHEN Qingxiang, SHI Guoxin, XIE Kaibin, *et al.* SEM of common cultivated *Juncus effusus* L. var. *decipiens* Buchen in Jiangsu and Zhejiang Provinces [J]. *J Nanjing Norm Univ Nat Sci*, 1998, **21**(1): 81 – 85.
- [4] 陈运能, 翁毅, 杜群, 等. 蔺草纤维长度指标及其测试与分析[J]. 浙江纺织服装职业技术学院学报, 2009, **8**(4): 8 – 11.
- CHEN Yunneng, WENG Yi, DU Qun, *et al.* On length index of rush fiber, its testing and analysis [J]. *J Zhejiang Text Fash Vocat Coll*, 2009, **8**(4): 8 – 11.
- [5] 刘健辉. 农作物材料的力学分析[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 215 – 222.
- [6] 方会敏, 姬长英, 张庆怡, 等. 小麦茎秆力学性能的国内外研究[J]. 中国农机化学报, 2014, **35**(6): 304 – 308.
- FANG Huimin, JI Changying, ZHANG Qingyi, *et al.* Research on mechanical properties of wheat straw at home and abroad [J]. *J Chin Agric Mech*, 2014, **35**(6): 304 – 308.
- [7] 李小城. 收获期小麦茎秆力学特性参数的试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012: 21 – 30.
- LI Xiaocheng. *Experimental Research on the Mechanical Physical Parameters of Wheat Stalks in Harvesting Period* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 21 – 30.
- [8] 崔海岩, 靳立斌, 李波, 等. 遮阴对夏玉米茎秆形态结构和倒伏的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(17): 3497 – 3505.
- CUI Haiyan, JIN Libin, LI Bo, *et al.* Effects of shading on stalks morphology, structure and lodging of summer maize in field [J]. *Sci Agric Sin*, 2012, **45**(17): 3497 – 3505.
- [9] 王芬娥, 黄高宝, 郭维俊, 等. 小麦茎秆力学性能与微观结构研究[J]. 农业机械学报, 2009, **40**(5): 92 – 95.
- WANG Fen'e, HUANG Gaobao, GUO Weijun, *et al.* Mechanical properties and micro-structure of wheat stems [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2009, **40**(5): 92 – 95.
- [10] 段传人, 王伯初, 王凭青. 水稻茎秆的结构及其性能的相关性[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, **26**(11): 38 – 40.
- DUAN Chuanren, WANG Bachu, WANG Pingqing. The relationship between the structure and the property of rice stem [J]. *J Chongqing Univ Nat Sci Ed*, 2003, **26**(11): 38 – 40.
- [11] 吴宁, 肖瑞, 徐艳萍, 等. 生长期和植株性别对工业大麻秆“三大素”的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(5): 776 – 782.
- WU Ning, XIAO Rui, XU Yanping, *et al.* Growth stage and plant sex with chemical compounds of industrial hemp stalks [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, **32**(5): 776 – 782.
- [12] MAZLAN D, AWAL A A. *Mechanical Properties of Cement Composites Incorporating Oil Palm Stem Fiber* [M]. Singapore: Springer, 2014: 51 – 60.
- [13] YU Manlu, CANNAYEN I, HENDRICKSON J, *et al.* Mechanical shear and tensile properties of selected biomass stems [J]. *Trans ASABE*, 2014, **57**(4): 1231 – 1242.
- [14] DAUDA S M, AHMAD D, KHALINA A, *et al.* Physical and mechanical properties of kenaf stems at varying moisture contents [J]. *Agric Agric Sci Procedia*, 2014, **2**(2): 370 – 374.
- [15] NIKLAS K J. Modes of mechanical failure of hollow, septa stems [J]. *Ann Bot*, 1998, **81**(1): 11 – 21.
- [16] SHEN Qing, LIU Diansen, GAO Yuan, *et al.* Surface properties of bamboo fiber and a comparison with cotton linter fibers[J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2004, **35**(3/4): 193 – 195.
- [17] 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 Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, *et al.* Study progress on mechanics properties of crop stalks [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2007, **38**(7): 172 – 176.
- [18] 郭维俊, 王芬娥, 黄高宝, 等. 小麦茎秆力学性能与化学组分试验[J]. 农业机械学报, 2009, **40**(2): 110 – 114.
- GUO Weijun, WANG Fen'e, HUANG Gaobao, *et al.* Experiment on mechanical properties and chemical compositions of wheat stems [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2009, **40**(2): 110 – 114.

- [19] 高梦祥, 郭康权, 杨中平, 等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报, 2003, **34**(4): 47 – 49, 52.  
GAO Mengxiang, GUO Kangquan, YANG Zhongping, *et al.* Study on mechanical properties of cornstalk [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2003, **34**(4): 47 – 49, 52.
- [20] O'DOUGHERTY M J, HUBER J A, DYSON J, *et al.* A study of the physical and mechanical-properties of wheat straw [J]. *J Agric Eng Res*, 1995, **62**(2): 133 – 142.
- [21] 赵春花, 韩正晟, 师尚礼, 等. 新育牧草茎秆收获期力学特性与显微结构[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(8): 179 – 183.  
ZHAO Chunhua, HAN Zhengsheng, SHI Shangli, *et al.* Mechanical properties and microstructure of new species forage stems in harvesting period [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2011, **27**(8): 179 – 183.
- [22] 张西良, 孙晓佳, 徐云峰, 等. 黄瓜藤秸秆力学特性与显微结构研究[J]. 农机化研究, 2014(4): 156 – 159.  
ZHANG Xiliang, SUN Xiaojia, XU Yunfeng, *et al.* Mechanical characteristics and microstructure of cucumber vine straw [J]. *J Agric Mech Res*, 2014(4): 156 – 159.
- [23] 常福辰, 施国新, 杨启银, 等. 引进日本席草品种的比较解剖与质量分析[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 1994, **17**(1): 57 – 63.  
CHANG Fuchen, SHI Guoxin, YANG Qiyin, *et al.* A study on the comparative anatomy and qualitative analysis of two mat straw strains introduced from Japan [J]. *J Nanjing Norm Univ Nat Sci*, 1994, **17**(1): 57 – 63.
- [24] 沈伟其, 朱丽英. 日本蔺草不同品种草茎组织形态的比较研究[J]. 浙江万里学院学报, 1999, **12**(1): 31 – 34.  
SHEN Weiqi, ZHU Liying. Comparative study on stem anatomic structure of different varieties in common rush [J]. *J Zhejiang Wanli Univ*, 1999, **12**(1): 31 – 34.
- [25] 陈庆翔, 施国新, 解凯彬, 等. 江浙地区席草品种比较解剖与质量分析[J]. 西北植物学报, 1998, **18**(3): 62 – 68.  
CHEN Qingxiang, SHI Guoxin, XIE Kaibin, *et al.* Comparative anatomy and qualitative analysis of common cultivated *Juncus effusus* L. var. *decipiens* Buchen in Jiangsu and Zhejiang Provinces [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 1998 (3): 62 – 68.
- [26] 孟桂元, 伍波, 周静, 等. 苧麻属野生植物纤维细胞形态结构与其经济性状和物理性能的关系[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(4): 712 – 719.  
MENG Guiyuan, WU Bo, ZHOU Jing, *et al.* Fiber cell morphology and its relationship with economic traits and physical properties of ramie wild plant [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2013, **33**(4): 712 – 719.
- [27] 张艳. 龙须草纤维的性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2008.  
ZHANG Yan. *Properties of Eulaliopsis binata Fiber* [D]. Qingdao: Qingdao University, 2008.
- [28] 俞春华, 乔鹏娟, 宋伟华, 等. 5种植物纤维的形态与性能[J]. 上海纺织科技, 2014, **42**(9): 48 – 49.  
YU Chunhua, QIAO Pengjuan, SONG Weihua, *et al.* Morphology and property of five vegetable fibres [J]. *Shanghai Text Sci Technol*, 2014, **42**(9): 48 – 49.
- [29] 蔺焘, 郭文静, 方露, 等. 棉秆单根皮部纤维的形态及性能研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, **35**(1): 109 – 113.  
LIN Dao, GUO Wenjing, FANG Lou, *et al.* Morphology and properties of bast fiber of single cotton stalk [J]. *J Beijing For Univ*, 2013, **35**(1): 109 – 113.
- [30] 潘明珠, 周定国. 蓖麻秆化学组成及纤维形态研究[J]. 纤维素科学与技术, 2007, **15**(4): 39 – 42.  
PAN Mingzhu, ZHOU Dingguo. Research on chemical component and morphology of castor [J]. *J Cellul Sci Technol*, 2007, **15**(4): 39 – 42.
- [31] 夏勋载, 范思齐. 常用非木材纤维碱法制浆实用手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1993.
- [32] 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.  
JIANG Kunyun, CHEN Lihua, GE Xiaogang, *et al.* Relationship between tensile properties and microstructures of three different broadleaf tree roots in North China [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, **29**(3): 115 – 123.
- [33] 林燕萍, 金心怡, 郝志龙, 等. 茶树嫩梢力学特性与粗纤维试验[J]. 茶叶科学, 2013, **33**(4): 364 – 369.  
LIN Yanping, JIN Xinyi, HAO Zhilong, *et al.* Experiment on mechanical properties and crude fiber of tea leaf [J]. *J Tea Sci*, 2013, **33**(4): 364 – 369.