江西农业大学学报　2025,47(1)　　http://xuebao.jxau.edu.cn
Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis　　https://doi.org/10.3724/aauj.2025018

郭宇辉,邓勇杰,胡淑芬,等.黄精须根剪切力学特性试验研究[J].江西农业大学学报,2025,47(1):193-204.
GUO Y H,DENG Y J,HU S F,et al.Experimental study on shear mechanical properties of fibrous roots of *Polygonatum sibiricum*[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(1):193-204.

黄精须根剪切力学特性试验研究

郭宇辉[1,2],邓勇杰[1,2],胡淑芬[1,2*],赖曲芳[1,2],刘木华[1,2],邓　吉[1,2],李长江[3]

(1.江西农业大学 工学院,江西 南昌 330045;2.江西省现代农业装备重点实验室,江西 南昌 330045;3.江西精正农林科技开发有限公司,江西 宜春 336200)

摘要:【目的】针对新鲜黄精须根繁多、韧性大难以去除的问题,提出一种结合干燥工艺去除须根的新方法,通过对黄精进行干燥处理,使黄精须根失水变脆,在剪切作用下,实现黄精须根的去除。通过研究黄精在不同取样部位、不同含水率和加载速率条件下其须根的剪切力学特性,可为黄精须根机械化去除提供数据参考。【方法】以4年生多花黄精为试验对象,根据黄精不同取样部位进行分组,分为上表面须根组和下表面须根组共2个试验组,并测量上、下表面须根的初始直径;再通过干燥获得不同含水率的黄精,对这些黄精的含水率和须根直径进行测量,并设置质构仪的加载速率,对须根进行剪切力学特性试验。【结果】获得黄精须根剪切试验的载荷-位移曲线,该载荷-位移曲线分为4个阶段:剪切力近似线性增长阶段、剪切力振荡波动阶段、剪切力近似指数增长阶段、剪切力急速下降阶段。试验条件下,剪切力范围为1.39~44.37 N,剪切强度范围为0.63~20.41 MPa。黄精须根的剪切强度受取样部位和含水率影响显著($P<0.01$);加载速率对黄精须根剪切强度无显著影响($P>0.05$);各因素对黄精须根剪切强度影响的主次顺序依次为:含水率、取样部位和加载速率。【结论】当黄精须根含水率为(4.08±2)%时,须根的剪切力和剪切强度最小,剪切力均值为3.16 N,剪切强度均值为0.83 MPa,此时最适宜进行黄精须根去除。研究结果可为黄精须根机械化去除和参数选取提供理论和数据支撑,为黄精脱须工艺的优化提供参考。

关键词:黄精;须根;力学特性;剪切试验
中图分类号:S226;S567.23+9　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)01-0193-12

Experimental study on shear mechanical properties of fibrous roots of *Polygonatum sibiricum*

GUO Yuhui[1,2],DENG Yongjie[1,2],HU Shufen[1,2*],LAI Qufang[1,2],
LIU Muhua[1,2],DENG Ji[1,2],LI Changjiang[3]

(1.College of Engineering,Jiangxi Agricultural University,Nanchang 330045,China;2.Jiangxi Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment,Nanchang 330045,China;3.Jiangxi Jingzheng Agricultural and Forestry Technology Development Co.,Ltd.,Yichun,Jiangxi 336200,China)

收稿日期:2024-08-20　　**修回日期:**2024-10-18
基金项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(32360431)
Project supported by National Natural Science Foundation of China Regional Science Fund Program(32360431)
作者简介:郭宇辉,硕士生,orcid.org/0009-0007-6396-3364,3095474492@qq.com;*通信作者:胡淑芬,副教授,主要从事现代农业机械装备研究,orcid.org/0000-0003-0509-3130,812225371@qq.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [**Objective**] In order to solve the problem that it is difficult to remove the fibrous roots of fresh *Polygonatum sibiricum*, a new method of fibrous root removal combined with the drying process is proposed. By drying *Polygonatum sibiricum*, the fibrous roots of *Polygonatum sibiricum* become brittle, then the fibrous roots of *Polygonatum sibiricum* is removed by shearing. Investigating the differences in the shear mechanical properties of *Polygonatum sibiricum* under different sampling sites, different water contents and loading rates can provide data reference for the mechanized removal of *Polygonatum sibiricum*. [**Method**] The 4-year-old *Polygonatum sibiricum* cyrtonema Hua was used as the test object. According to the different sampling parts of *Polygonatum sibiricum* cyrtonema Hua, it was divided into two test groups: the upper surface fibrous root group and the lower surface fibrous root group, and the initial diameters of the whiskers on the upper surface and the lower surface were measured; then *Polygonatum sibiricum*s with different water contents were obtained by heating in an oven, and the whisker diameters and water contents of the whiskers of *Polygonatum sibiricum*s were measured, the loading rates of the texture apparatus were set up, and shear mechanical characteristic tests were conducted on the whiskers. [**Result**] The load-displacement curve of the shear test of *Polygonatum sibiricum* was obtained, which was divided into four phases: shear approximate linear growth phase, shear oscillatory fluctuation phase, shear approximate exponential growth phase, and shear sharp decline phase. Under the test conditions, the range of the shear force was 1.39-40.20 N, and the range of the shear strength was 0.63-20.41 MPa. The shear strength of *Polygonatum sibiricum* was significantly affected by sampling site and water content ($P<0.01$); the loading rate had no significant effect on the shear strength of *Polygonatum sibiricum* ($P>0.05$); and the primary and secondary order of the effect of each factor on the shear strength of *Polygonatum sibiricum* was: water content>sampling site>loading rate. [**Conclusion**] When the water content of *Polygonatum sibiricum* was (4.08±2)%, the mean value of shear force was 3.16 N, and the mean value of shear strength was 0.83 MPa, which was the most suitable for *Polygonatum sibiricum* removal. This study can provide theoretical and data support for the mechanized removal of *Polygonatum sibiricum* and parameter selection, and provide reference for the optimization of *Polygonatum sibiricum* dehiscence process.

Keywords: *Polygonatum sibiricum*; fibrous roots; mechanical properties; shear test

【研究意义】黄精(*Polygonatum sibiricum* Delar. ex Redoute)为百合科黄精属植物,大多生长于林下、灌丛或山坡阴面疏松肥沃的土壤处[1],广泛分布于我国东北、华北南部、华东、西南等地[2]。黄精作为我国传统药食同源的林下经济作物,其含有多糖、皂苷、黄酮、生物碱等有效成分[3-5],具有补气养阴、健脾、润肺、益肾的功效[6],具有降低血糖和血脂、抗肿瘤、抗衰老、调节免疫力、改善记忆力、抗菌抗炎等药理作用[7-12]。同时,黄精还具有较高的食用保健价值,可做成各种食品食用,有助力提高人体免疫力[9]。因此,黄精具有较高的经济价值,有助于增加农民收益,有利于促进乡村振兴[13],为此,近些年黄精种植得到了极大的发展[14]。黄精由根茎和须根组成,2015版《中国药典》规定黄精药用品种为黄精、多花黄精(*Polygonatum cyrtonema* Hua)、滇黄精(*Polygonatum kingianum* Collett & Hemsl.)的干燥根茎[15]。黄精根茎上的须根营养价值低且灰分含量不符合药典标准[16],而且影响黄精口感,因此,需要对黄精进行除须处理。但新鲜黄精须根繁多、韧性大,除须难度高,且黄精根茎通常呈连珠状、鸡头状或结节成块[17],人工去除黄精根须不仅工作效率低、生产成本高,而且难以去除彻底。随着黄精产业的不断发展,迫切需要实现机械化除须。本研究通过探究不同取样部位、不同含水率与加载速率条件下黄精须根的剪切力学特性,可为黄精脱须设备的研制提供理论支持。【前人研究进展】目前,农业物料剪切力学特性已有大量研究[18-24],但主要是针对作物茎秆、种子类等物料的剪切力学特性研究。任子超等[25]研究不同直径和含水率的沙棘枝杆剪切力学特性,发现沙棘枝杆的剪切强度随枝杆直径增大而增大,并随含水率增大呈现先增大后减小的规律;王琪等[26]通过茶叶茎秆剪切力学特性试验研究发现,不同节间茎秆的抗剪强度和单位面积对剪切性能影响显著;沈中华等[27]研究表明取样高度和剪切方向对蔗芽的剪切破坏力有极为显著的影响,加载速度无显著影响;贾会杰等[28]通过油莎豆剪切试验发现,油莎豆的含水率、加载速率、加

载方位和粒径等均对其剪切力学特性有显著影响;李玲等[29]通过高良姜须根剪切力学特性试验研究发现,含水率是影响高良姜剪切特性的主要因素,并确定了高良姜剪切去须的适宜条件。

【本研究切入点】目前,对于黄精须根物料性能和须根剪切力学特性的研究极少。本研究参考沙棘枝杆[25]、茶叶茎秆[26]、蔗芽[27]、油莎豆[28]、高良姜须根[29]等剪切力学特性分析方法,以4年生多花黄精须根为试验对象,通过分析黄精须根受力时横切面显微结构,以剪切力和剪切强度为评价指标,探究不同取样部位、含水率和加载速率对黄精须根剪切力学特性的影响。【拟解决的关键问题】通过分析不同取样部位、含水率和加载速率等因素对黄精须根剪切力学特性的影响,确定黄精脱须适宜的技术参数,为黄精脱须设备的研发和脱须工艺的优化提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验材料选用江西省宜春市铜鼓县种植基地(28.55°N,114.37°E)的多花黄精,采样于2024年1月19日。选取成熟、生长良好、无病虫害的多花黄精(以下简称黄精),如图1所示。清除黄精须根表面上的泥沙和杂质,手动切下黄精须根,截取完整的黄精须根作为试验材料(图2)。



1:须根;2:圆盘茎基;3:根茎;4:上表面;5:下表面。

1:fibrous roots;2:disk stem base;3:rhizome;4:upper surface;5:lower surface.

图1　多花黄精结构

Fig.1　Structure of *Polygonatum sibiricum* Delar. ex Redoute



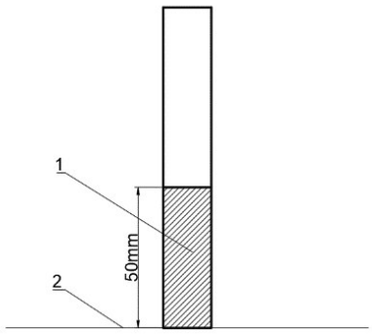
图2　黄精须根

Fig.2　Fibrous roots of *Polygonatum sibiricum*

从图1多花黄精结构图可知,黄精须根主要分布在黄精的上表面和下表面,其中上表面是圆盘茎基所在的位置[30]。考虑到黄精须根的力学特性因须根生长位置不同可能存在差异,因此,将黄精须根按生长部位进行分组取样,分为上表面须根组和下表面须根组,并从须根与根茎连接处向上截取50 mm,作为须根试样,须根取样示意图如图3所示。

1.2　试验仪器

TMS-Pro质构仪(美国FTC公司,精度±1%,量程0~1 000 N);恒温干燥箱(上虞市上仪仪器制造有限公司,101-2A型);尼康Eclipse E100光学显微镜(日本尼康);电子天平(苏州恒锦机电科技有限公司,WT20002型,精度0.01 g);游标卡尺(苏州宝睿丰精密量仪有限公司,精度0.02 mm)。



1:须根样本;2:根茎与须根连接处。

1:sample of fibrous roots;2:rootstock-fibrous root junction.

图3 黄精须根取样示意

Fig.3 Sketch of sampling of fibrous roots of *Polygonatum sibiricum*

1.3 试验方法

1.3.1 黄精须根含水率测定

将黄精须根按取样部位分为上表面须根组和下表面须根组,并通过101-2A恒温干燥箱进行干燥。根据黄精生产实际设定干燥温度为80 ℃[31],干燥时间为12 h。黄精须根含水率按下式(1)计算:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{1}$$

式(1)中:H为不同干燥时间下须根的含水率,%;m_1为干燥前黄精须根初始质量,g;m_2为干燥结束时黄精须根质量,g。

1.3.2 试样处理

采用烘箱干燥方式对黄精须根进行含水率控制,干燥温度为80 ℃,制备含水率分别为(81.96±2.00)%、(56.01±2.00)%、(32.16±2.00)%、(14.45±2.00)%和(4.08±2.00)%的黄精须根试样。

1.3.3 须根剪切力和剪切强度测定

在须根含水率相同条件下,随机选取上表面和下表面须根试样各15根,用游标卡尺测量须根试样中间位置的直径。再通过质构仪(图4)测定须根的剪切力和剪切强度,设置测试模式为剪切模式,5组不同的测试速度,测后速度为60 mm/min,初始力为0.5 N,剪切距离为10 mm。测试速度设置为10,20,30,40,50 mm/min不同水平,每组试验重复测量3次。

剪切试验时,剪切面为双剪切面,黄精须根的剪切强度根据式(2)计算:

$$\tau = \frac{F_{max}}{2A} \tag{2}$$

式(2)中:τ为剪切强度,MPa;F_{max}为最大剪切力,N;A为黄精须根剪切横截面积,mm^2。

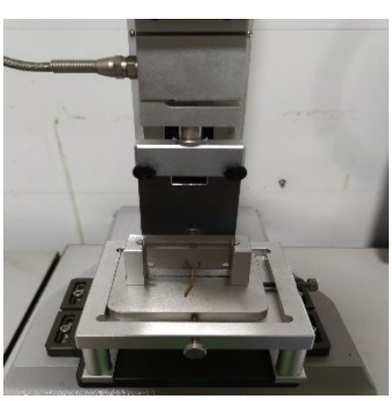
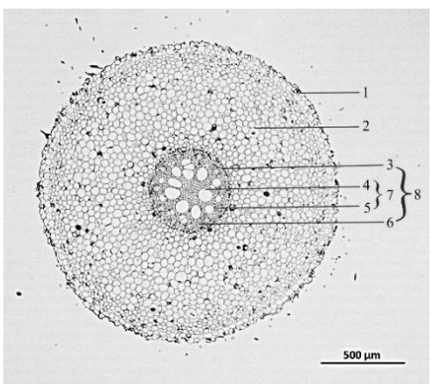


图4 须根样品剪切平台

Fig.4 Platform for shear test of fibrous roots

1.3.4　黄精须根显微结构观察

采用尼康 Eclipse E100 光学显微镜,观察新鲜黄精须根横切面的显微结构,以分析须根剪切过程中须根组织细胞的损伤机理。黄精须根横切面显微结构如图 5 所示,黄精须根组织结构由表皮、皮层和维管柱组成;其中,维管柱包含中柱鞘、维管束和薄壁细胞[32],维管束包含木质部和韧皮部。



1:表皮 2:皮层 3:中柱鞘 4:木质部 5:韧皮部 6:薄壁细胞 7:维管束 8:维管柱。

1:epidermis;2:cortex;3:mesocarp sheath;4:xylem;5:phloem;6:thin-walled cells;7:vascular bundles;8:vascular columns.

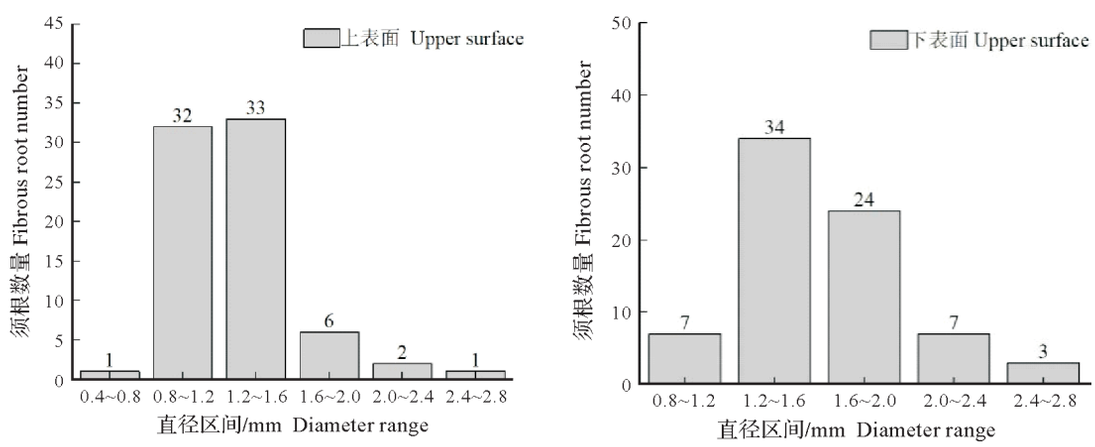
图 5　黄精须根横切面显微结构

Fig.5　Cross-sectional microstructure for fibrous roots of *Polygonatum sibiricum*

2　结果与分析

2.1　黄精须根直径统计与分析

在黄精根茎上、下表面分别截取 75 根新鲜须根。通过对 150 根新鲜须根的中段直径进行统计学分析发现,上表面须根直径主要集中在 0.80~1.60 mm,约占比 87%(图 6a);下表面须根直径主要集中在 1.20~2.00 mm 处,约占比 77%(图 6b)。这主要是因为黄精下表面须根扎根土壤更深,从土壤中汲取了更多的水分和养分,生长更旺盛。



a. 上表面根须直径分布

a. Root distribution curve of the upper surface

b. 下表面根须直径分布

b. Root distribution curve of the lower surface

图 6　黄精上、下表面须根直径分布

Fig.6　Distribution of fibrous root diameters on the upper and lower surfaces of *Polygonatum sibiricum*

2.2　黄精须根剪切试验

通过质构仪对黄精须根进行剪切试验,获得剪切力-位移曲线,如图 7 所示。黄精须根的剪切过程可分为 4 个阶段:第 1 阶段为剪切力近似线性增长阶段。当刀具接触黄精须根表皮,由表皮往皮层切入过程中,此时表皮尚未切破,随着刀具切入深度的增加,剪切力不断增大,剪切力呈现近似线性增大;当剪切力超过须根表皮的剪切极限时,此时剪切力达到最大,刀具切破须根表皮。第 2 阶段为剪切力振荡

波动阶段。随着刀具切破须根表皮，刀具切入须根皮层。由于皮层细胞组织较多，皮层细胞组织排列较疏松，剪切力略有下降，并呈现振动变化的趋势。第3阶段为剪切力近似指数增长阶段。随着刀具剪切位移的深入，刀具切入到须根中间的维管柱。由于维管柱细胞组织致密，强度、韧性高，刀具所受阻力增大，剪切力急剧上升；当剪切力达到维管柱的剪切极限时，剪切力达到最大，维管柱被切断。第4阶段为剪切力急剧下降阶段，维管柱切断后，须根断裂，刀具无阻力，剪切力急剧下降。

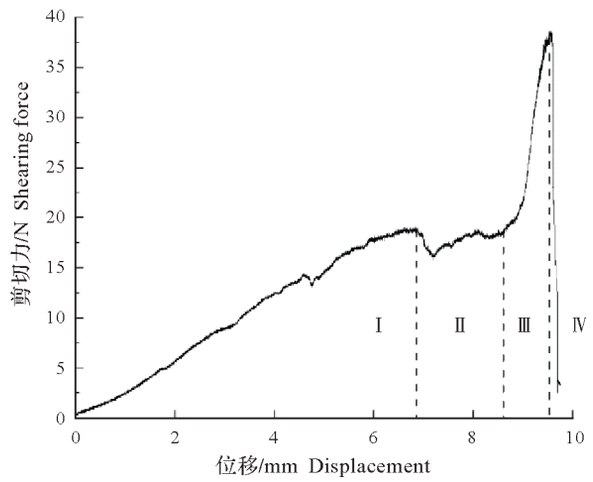


图7 须根剪切力与位移曲线

Fig.7 Shearing force versus diaplacement curve of fibrous roots

由此可见，黄精须根中的维管柱是影响须根剪切力的主要因素[33]，是黄精须根抵抗剪切变形的内在原因。维管柱密度越高，则维管束、中柱鞘组织越发达，构成维管束鞘的纤维细胞壁也越厚，须根的剪切强度就越高，剪切力则越大。

2.3 黄精须根剪切力分析

试验测定了不同含水率和加载速度条件下黄精不同表面须根断裂的最大剪切力，求出剪切力均值和标准差，获得剪切力平均值±标准差（$\bar{x} \pm s$），如表1所示。

表1 不同条件下须根剪切力结果

Tab.1 Results of whisker root shear under different conditions

取样部位 Sampling area	含水率/% Water content	加载速率/(mm·min^{-1}) Loading rate				
		10	20	30	40	50
上表面 Upper surface	81.96±2.00	40.20±7.87	18.45±1.65	32.41±2.97	12.08±2.26	21.03±5.86
	56.01±2.00	26.33±3.81	38.32±10.5	26.79±6.16	31.81±11.45	35.43±24.87
	32.16±2.00	6.86±4.23	16.81±2.19	4.48±1.96	9.20±5.10	3.28±0.74
	14.45±2.00	3.08±0.79	2.34±0.67	1.94±0.37	2.29±0.91	3.53±2.25
	4.08±2.00	2.34±1.73	1.39±0.14	1.84±0.49	2.83±1.65	1.49±0.00
下表面 Lower surface	81.96±2.00	34.24±5.76	32.11±10.02	22.77±4.10	23.07±2.47	32.21±3.98
	56.01±2.00	31.02±7.54	27.19±7.44	36.58±1.79	37.67±14.72	43.18±3.64
	32.16±2.00	20.78±3.93	22.51±4.68	33.79±13.47	44.37±13.99	29.92±9.22
	14.45±2.00	10.34±0.83	9.10±4.97	8.30±6.27	5.62±3.10	3.68±0.37
	4.08±2.00	8.35±2.01	3.68±1.06	3.73±1.27	3.98±1.49	1.99±0.39

通过对表1的分析可知，黄精上表面须根最大剪切力为1.39~40.20 N，黄精下表面须根最大剪切力为1.99~44.37 N。在相同试验条件下，上表面和下表面须根的最大脱须剪切力随着含水率的降低呈现先增大后减小的趋势。当含水率为(32.16±2.00)%~(81.96±2.00)%时，同组黄精须根试样的脱须剪切力标准差较大，这可能是因为黄精须根直径差异大，则黄精须根的维管柱密度差异也大，从而导致须根剪切

力标准差较大。分析表1,获得不同含水率下黄精须根剪切力变化图(图8)。黄精上表面和下表面须根的平均剪切力随着含水率降低呈现先增大后降低的趋势。其中,当含水率为(56.01±2.00)%时,黄精须根的平均剪切力最大,为30 N以上;含水率在(4.08±2.00)%时,黄精须根平均剪切力最小,均在5 N以下;且黄精下表面须根的平均剪切力整体上均大于上表面的平均剪切力,这主要是因为下表面须根汲取的养分大于上表面须根,下表面须根生长更粗壮,须根组织细胞更致密,剪切力就更大。

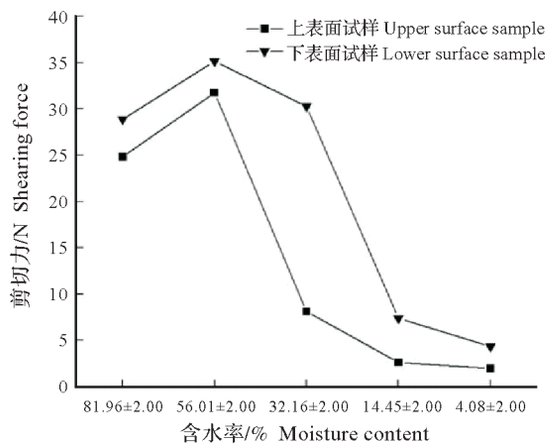


图8　不同含水率下黄精须根剪切力变化

Fig.8　Shearing force of *Polygonatum sibiricum* fibrous roots under different drying time

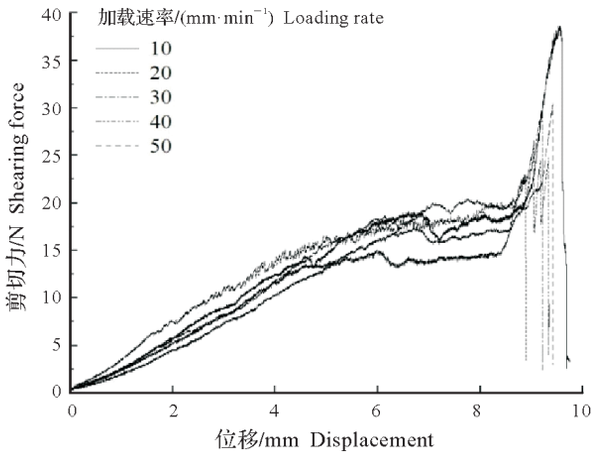


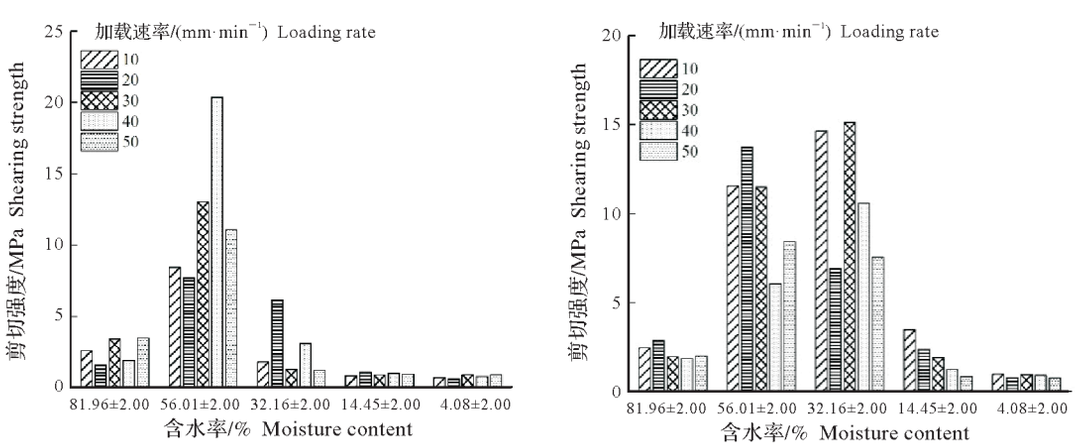
图9　不同加载速率下黄精须根剪切力与位移曲线

Fig.9　Shear force and displacement curves of *Polygonatum sibiricum* under different loading rates

分析表1,获得不同加载速率下黄精须根剪切力与位移曲线变化图(图9)。在不同加载速率条件下,黄精须根的剪切力变化并不明显。

2.4　黄精须根剪切强度分析

根据试验测定的黄精须根最大剪切力,由式(2)得到不同取样部位须根的剪切强度(图10),并求出剪切强度均值和标准差,以平均值±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,如表2所示。表2中A代表取样部位,B代表含水率,C代表加载速率。通过分析表2,获得不同含水率下黄精须根剪切强度变化图(图11)。通过统计学软件SPSS分析各因素对黄精须根剪切强度的影响,发现各因素对黄精须根剪切强度影响的主次顺序依次为:含水率B、取样部位A和加载速率C。其中,取样部位A和含水率B对须根剪切强度有显著影响(P<0.01),而加载速率C对须根剪切强度影响不显著(P>0.05)。



a. 上表面试样

a. Upper surface sample

b. 下表面试样

b. Lower surface sample

图10　不同取样部位黄精须根剪切强度变化

Fig.10　Comparison of the shearing strength of *Polygonatum sibiricum* fibrous roots at different sampling sites

通过分析3个影响因素之间的交互作用，获得表3黄精须根剪切试验方差分析表。由表3可知，取样部位A和含水率B之间的交互作用（A×B）、取样部位A与含水率B以及加载速率C之间的交互作用（A×B×C）对剪切强度影响极为显著（$P<0.01$），而取样部位A和加载速率C之间的交互作用（A×C）、含水率B和加载速率C之间的交互作用（B×C）对剪切强度无显著影响（$P>0.05$）。

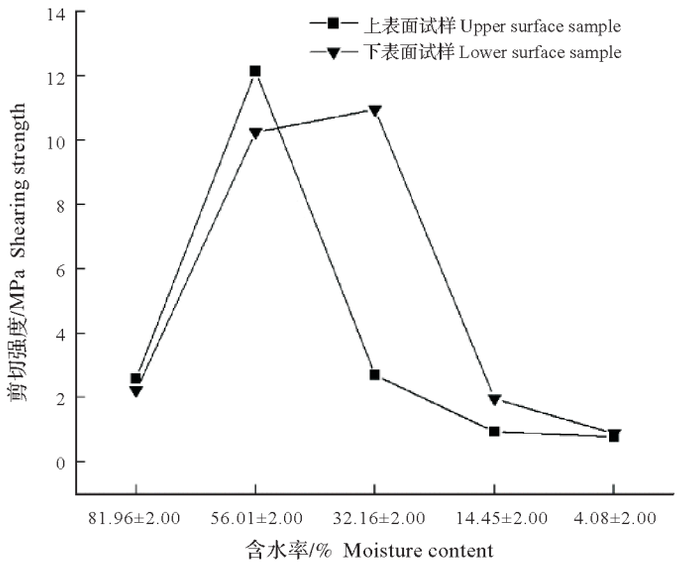


图11 不同含水率下黄精须根剪切强度变化

Fig.11 Shearing strength of *Polygonatum sibiricum* fibrous roots under different drying time

表2 不同条件下须根剪切强度结果

Tab.2 Results of whisker root shear strength under different conditions

取样部位A Sampling area A	含水率B/% Water content B	加载速率C/(mm·min^{-1}) Loading rate C				
		10	20	30	40	50
上表面 Upper surface	81.96±2.00	2.61±0.40	1.57±0.41	3.41±0.63	1.89±0.39	3.49±1.09
	56.01±2.00	8.46±2.03	7.76±4.02	13.06±5.71	20.41±9.95	11.11±5.01
	32.16±2.00	1.80±1.05	6.16±2.61	1.28±0.41	3.09±2.62	1.19±0.11
	14.45±2.00	0.80±0.09	1.08±0.22	0.89±0.09	0.98±0.30	0.94±0.19
	4.08±2.00	0.68±0.41	0.63±0.17	0.90±0.39	0.79±0.36	0.91±0.09
下表面 Lower surface	81.96±2.00	2.46±0.24	2.86±0.42	1.96±0.34	1.84±0.49	2.01±0.68
	56.01±2.00	11.55±7.29	13.75±5.73	11.49±3.23	6.04±1.24	8.45±1.42
	32.16±2.00	14.64±7.24	6.92±1.91	15.11±6.14	10.57±2.02	7.56±0.84
	14.45±2.00	3.47±1.68	2.38±0.75	1.90±1.15	1.24±0.37	0.86±0.08
	4.08±2.00	0.97±0.06	0.79±0.23	0.96±0.19	0.91±0.28	0.77±0.15

2.4.1 取样部位对剪切强度的影响

由表3可知，取样部位对剪切强度有显著影响（$P<0.05$）。黄精须根的剪切强度为0.63~20.41 MPa，其中，上表面须根最大剪切强度为20.41 MPa，标准差为9.95 MPa，下表面须根最大剪切强度为15.11 MPa，标准差为7.24 MPa。由图11可知，在含水率为（4.08±2.00）%和（81.96±2.00）%时，上、下表面剪切强度相近；而在含水率为（56.01±2.00）%和（14.45±2.00）%时，上表面须根剪切强度大于下表面，但剪切强度差异不大；当含水率为（32.16±2.00）%时，下表面须根剪切强度明显大于上表面，上、下表面须根平均剪切强度差异比较大，这可能是因为不同直径的黄精须根在干燥过程失水速率不同导致的。

2.4.2 含水率对剪切强度的影响

由表3可知，黄精须根含水率对须根剪切强度有极显著影响（$P<0.01$）。随着黄精须根含水率的降

低,须根的剪切强度呈现先上升后下降的趋势。由图11可知,当含水率大于等于(56.01±2.00)%时,上表面须根剪切强度大于下表面,且剪切强度随含水率降低而增加;当含水率小于(56.01±2.00)%时,上表面须根剪切强度均小于下表面,且剪切强度随含水率降低而降低;当含水率为(4.08±2.00)%时,上、下表面须根平均剪切强度最小,均在1 MPa以下。由此可知:随着黄精须根含水率的降低,须根细胞因失水而收缩,导致细胞密度增加,剪切强度逐渐增大;随着须根含水率进一步降低,须根表皮和维管柱细胞失水严重,须根组织变脆,剪切强度降低。

2.4.3　加载速率对剪切强度的影响

由表3可知,当加载速率在10~50 mm/min时,加载速率对黄精须根剪切强度影响不显著(P>0.05),即不同加载速率下的须根剪切强度变化不大。由图10可知,当须根含水率在(81.96±2.00)%、(14.45±2.00)%和(4.08±2.00)%时,不同加载速率条件下的剪切强度基本一致,且上、下表面须根平均剪切强度均较小;当须根含水率在(56.01±2.00)%、(32.16±2.00)%时,不同加载速率条件下的剪切强度存在一定差异,且上、下表面须根平均剪切强度均较大。

表3　黄精须根剪切试验结果方差分析

Tab.3　Variance analysis for shearing test results on fibrous roots of *Polygonatum sibiricum*

方差来源 Source of variation	自由度 Df	平方和 Square sum	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value	显著性 Significance
A	75.905	1	75.905	6.338	0.013 409	*
B	2 326.007	4	581.502	48.552	1.26×10^{-22}	**
C	32.762	4	8.190	0.684	0.604 772	
A×B	471.673	4	117.918	9.845	9.32×10^{-7}	**
A×C	112.891	4	28.223	2.356	0.058 733	
B×C	89.343	16	5.584	0.466	0.957 618	
A×B×C	435.661	16	27.229	2.273	0.007 149	**
误差 Error	1 197.697	100	11.977			
总计 Total	7 842.673	150				

R^2 = 0.747(调整后R^2 = 0.624)。

R^2 = 0.747(adjusted R^2 = 0.624).

3　结论与讨论

本研究通过对黄精须根的剪切性能试验,分析黄精须根剪切力、剪切强度随取样部位、含水率和加载速率等因素的变化规律。

黄精须根剪切载荷-位移特征:黄精须根剪切载荷—位移曲线主要分为4个阶段:剪切力近似线性增长阶段、剪切力振荡波动阶段、剪切力近似指数增长阶段和剪切力急剧下降阶段。通过分析黄精须根横切面微观组织结构发现,这4个阶段剪切载荷变化与须根组织细胞的大小和密度有关,须根组织细胞越大、密度越高,剪切力也越大。

黄精须根剪切力:黄精上表面须根的平均剪切力整体上均小于下表面须根。这主要是因为上、下表面须根生长条件不同,下表面须根吸收养分更多,须根组织细胞密度更大,因此剪切力更大。在相同试验条件下,黄精上表面须根和下表面须根的最大剪切力随着含水率的降低呈现先增大后减小的趋势。在相同试验条件下,加载速率对剪切力影响不显著。

黄精须根剪切强度:当须根含水率为(4.08±2.00)%和(81.96±2.00)%时,黄精上、下表面须根平均剪切强度相差不大;而当须根含水率为(56.01±2.00)%、(32.16±2.00)%和(14.45±2.00)%时,黄精上、下表面须根的平均剪切强度存在一定差异;当须根含水率为(4.08±2.00)%时,黄精上表面和下表面须根

的剪切力和剪切强度最小，均值在 5 N 以下，此时最适宜进行黄精脱须。黄精须根剪切强度受取样部位和含水率影响显著（$P<0.01$），黄精须根剪切强度随着含水率的降低，呈现先增大后降低的变化趋势，当含水率为（4.08±2.00）%时，剪切强度均值在 1 MPa 以下，此时最适宜进行黄精脱须。不同加载速率对黄精须根剪切强度影响不显著（$P>0.05$），因此，黄精须根脱须生产可根据实际生产效率需要，合理选择适宜的剪切速率。综上所述，黄精须根剪切强度影响因素的主次顺序依次为：含水率 B、取样部位 A 和加载速率 C。

本研究中黄精须根剪切力学参数可为黄精脱须技术研究、脱须装置结构设计和参数选取提供数据支撑，可为黄精须根脱须工艺参数的优化提供理论依据。

未来将此基础上，探究黄精生长年限和生长环境对须根剪切性能的影响，进一步探索不同干燥方式对黄精有效成分和质量的影响。

致谢：江西省林业局林业科技创新专项（创新专项〔2022〕21 号）和江西省林业局林业创新专项（〔2023〕10 号）同时对本研究给予了资助，谨致谢意！

参考文献 References：

[1] 崔阔澍，肖特，李慧萍，等. 我国黄精种质资源研究进展[J]. 江苏农业科学，2021，49（11）：35-39.
CUI K S，XIAO T，LI H P，et al. Research progress of China's *Polygonatum* germplasm resources[J]. Jiangsu agricultural sciences，2021，49（11）：35-39.

[2] 杨兴鑫，穆健康，顾雯，等. 滇黄精资源的开发应用进展及前景分析[J]. 生物资源，2019，41（2）：138-142.
YANG X X，MU J K，GU W，et al. Advances and prospect analysis on development and application of *Polygonatum kingianum*[J]. Biotic resources，2019，41（2）：138-142.

[3] 宋添力，张钰，肖强，等. 黄精化学成分以及药用价值的研究进展[J]. 中华中医药学刊，2024，42（11）：119-126.
SONG T L，ZHANG Y，XIAO Q，et al. Research progress on chemical composition and medicinal value of huangjing（*Polygonatum sibiricum*）[J]. Chinese archives of traditional Chinese medicine，2024，42（11）：119-126.

[4] 李亚霖，周芳，曾婷，等. 药用黄精化学成分与活性研究进展[J]. 中医药导报，2019，25（5）：86-89.
LI Y L，ZHOU F，ZENG T，et al. Research progress on chemical components and activties of huangjing（*Polygonatum sibiricum* red）[J]. Guiding journal of traditional Chinese medicine and pharmacy，2019，25（5）：86-89.

[5] 袁怡菁，王秋红. 黄精化学成分、药理作用研究进展及质量标志物预测分析[J]. 中医药信息，2024，41（2）：72-80.
YUAN Y J，WANG Q H. Research progress on the chemical components and pharmacological effects of polygonati rhizoma and prediction analysis of its quality markers[J]. Information on traditional Chinese medicine，2024，41（2）：72-80.

[6] 王雨婷，刘婉滢，沈舶宁，等. 黄精的本草考证[J]. 中医药学报，2019，47（3）：81-86.
WANG Y T，LIU W Y，SHEN B N，et al. Textual research of *Polygonatum sibiricum*[J]. Acta Chinese medicine and pharmacology，2019，47（3）：81-86.

[7] 何沛煜，张军银，赵永艳，等. 黄精药用价值及保健食品应用研究进展[J]. 海峡药学，2021，33（12）：31-35.
HE P Y，ZHANG J Y，ZHAO Y Y，et al. Advances of medicinal value and health food application of *Polygonatum*[J]. Strait pharmaceutical journal，2021，33（12）：31-35.

[8] 李东洋，管贺，袁志鹰. 黄精药理作用及其复方在中医临床中的应用[J]. 亚太传统医药，2021，17（7）：197-200.
LI D Y，GUAN H，YUAN Z Y. The pharmacological effects of polygonati rhizoma and its compound prescription in clinical application of traditional Chinese medicine[J]. Asia-pacific traditional medicine，2021，17（7）：197-200.

[9] 于纯淼，刘宁，宫铭海，等. 黄精药理作用研究进展及在保健食品领域的应用开发[J]. 黑龙江科学，2019，10（18）：66-68.
YU C M，LIU N，GONG M H，et al. Research progress and application development status of pharmacology of *Polygonatum sibiricum*[J]. Heilongjiang science，2019，10（18）：66-68.

[10] ZHANG N，ZHANG C，ZHANG Y，et al. Distinct prebiotic effects of polysaccharide fractions from *Polygonatum kingianum*

on gut microbiota[J].International journal of biological macromolecules,2024,279(4):135568.

[11] KUANG S D,LIU Z W,LIU L M,et al.*Polygonatum sibiricum* polysaccharides protect against knee osteoarthritis by inhibiting the TLR2/NF-κB signaling pathway in vivo and in vitro[J].International journal of biological macromolecules,2024,274(1):133137.

[12] ZHANG N X,ZHANG B C,CHEN X J,et al.Effects and mechanisms of *Polygonati rhizom*a polysaccharide on potassium oxonate and hypoxanthine-induced hyperuricemia in mice[J].International journal of biological macromolecules,2024,280(1):135550.

[13] 杨丽萍.乡村振兴战略下黄精产业发展现状与对策[J].新农业,2023(5):83-84.
YANG L P.The current status and countermeasures of *Polygonatum* industry development under the rural revitalization strategy[J].New agriculture,2023(5):83-84.

[14] 赵君,孙乐明,章启东.黄精产地加工与炮制一体化初步研究[J].亚太传统医药,2020,16(9):61-63.
ZHAO J,SUN L M,ZHANG Q D.Preliminary study on the integration of processing and origin processing of *Polygonatum sibiricum*[J].Asia-pacific traditional medicine,2020,16(9):61-63.

[15] 国家药典委员会.中华人民共和国药典[M].北京:中国医药科技出版社,2015:306-307.
Chinese Pharmacopoeia Commission.Pharmacopoeia of the People's Republic of China[M].Beijing:China Medical Science Press,2015:306-307.

[16] 陈怡,姚云生,陈松树,等.多花黄精不同龄须根药材质量研究[J].山地农业生物学报,2019,38(6):61-63.
CHEN Y,YAO Y S,CHEN S S,et al.Study on the quality of radix in different ages of *Polygonatum cyrtonema* Hua[J].Journal of mountain agricultural biology,2019,38(6):61-63.

[17] 施大文,王志伟,李自力,等.中药黄精的性状和显微鉴别[J].上海医科大学学报,1993(3):213-219.
SHI D W,WANG Z W,LI Z L,et al.Macroscopical and macroscopical identification of the Chinese traditional medicine,huang-jing(Rhizoma Polygonati)[J].Fudan university journal of medical sciences,1993(3):213-219.

[18] 史诺,郭康权,范宇杰,等.棉秆挤压剥皮剪切力学特性试验[J].农业工程学报,2017,33(18):51-58.
SHI N,GUO K Q,FAN Y J,et al.Peeling and shearing mechanical performance test of cotton stalks inextrusion state[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2017,33(18):51-58.

[19] 陈健,王新忠,吴又新,等.温室生菜根茎的剪切力学特性研究[J].农机化研究,2020,42(11):173-178.
CHEN J,WANG X Z,WU Y X,et al.Study on shear mechanical properties of greenhouse lettuce root[J].Journal of agricultural mechanization research,2020,42(11):173-178.

[20] 丁龙朋,陈永成,葛云,等.棉秆剪切力学特性的研究[J].中国农机化学报,2016,37(2):116-118.
DING L P,CHEN Y C,GE Y,et al.Research on the shear mechanical property of cotton stalks[J].Journal of Chinese agricultural mechanization,2016,37(2):116-118.

[21] 李宁,丁龙朋,王贤斐,等.枣树枝条剪切力学性能试验与分析[J].农机化研究,2023,45(9):136-142.
LI N,DING L P,WANG X F,et al.Experiment and analysis on shear mechanical properties of jujube branches[J]Journal of agricultural mechanization research,2023,45(9):136-142.

[22] 邱述金,李霖霖,崔清亮,等.裸燕麦籽粒剪切特性研究[J].中国农机化学报,2021,42(6):67-71.
QIU S J,LI L L,CUI Q L,et al.Research of shearing characteristics of bare oat grains[J].Journal of Chinese agricultural mechanization,2021,42(6):67-71.

[23] 李心平,孙臣臣,王升升.大蒜蒜皮分离力学特性试验研究[J].现代农业装备,2023,44(3):2-10.
LI X P,SUN C C,WANG S S.Experimental study on mechanical properties of garlic peel separation[J].Modern agricultural equipment,2023,44(3):2-10.

[24] 包宇恒,衣淑娟,陶桂香,等.板蓝根种子物料特性试验研究[J].农机化研究,2022,44(9):202-208+216.
BAO Y H,YI S J,TAO G X,et al.Experimental study on the material properties and mechanical properties of *Isatis indigotica* seeds[J].Journal of agricultural mechanization research,2022,44(9):202-208+216.

[25] 任子超,雷金,彭霞,等.沙棘枝杆力学特性试验研究[J].农机化研究,2024,46(7):146-151.
REN Z C,LEI J,PENG X,et al.Experimental study on mechanical properties of seabuckthorn twigs[J].Journal of agricultural mechanization research,2024,46(7):146-151.

[26] 王琪,林恒矗,廖鹏,等.茶叶茎秆剪切力特性[J].福建农林大学学报(自然科学版),2022,51(3):428-432.
WANG Q,LIN H C,LIAO P,et al.Shearing mechanical properties of tea stem[J].Journal of Fujian agriculture and forestry university(natural science edition),2022,51(3):428-432.

[27] 沈中华,董志康,陈万委,等.蔗芽剪切力学特性试验研究[J].农机化研究,2024,46(4):145-152.
SHEN Z H,DONG Z K,CHEN W W,et al.Study of shearing properties of sugarcane buds[J]Journal of agricultural mechanization research,2024,46(4):145-152.

[28] 贾会杰,李晓丹,王文丹,等.油莎豆的剪切力学特性[J].中国油脂,2023,48(2):133-137.
JIA H J,LI X D,WANG W D,et al.Shearing mechanical properties of *Cyperus esculentus*[J].China oils and fats,2023,48(2):133-137.

[29] 李玲,邓干然,李国杰,等.高良姜须根剪切力学特性试验研究[J].中国农机化学报,2020,41(8):116-120.
LI L,DANG G R,LI G J,et al.Test and analysis on shearing mechanical properties of fibrous roots of galangal[J].Journal of Chinese agricultural mechanization,2020,41(8):116-120.

[30] 杨得毅,黄红英,刘海兰,等.轮叶黄精性状及显微鉴定研究[J].时珍国医国药,2020,31(6):1381-1382.
YANG D Y,HUANG H Y,LIU H L,et al.Traits and microscopic characterization of *Polygonatum verticillatum*(L.)All[J].Lishizhen medicine and materia medica research,2020,31(6):1381-1382.

[31] 马志欢,娄永,张欣怡,等.黄精九蒸九晒过程中性状及显微特征变化研究[J].轻工科技,2024,40(4):25-28.
MA Z H,LOU Y,ZHANG X Y,et al.Study on the changes in neutral and microscopic characteristics during the steaming and drying process of *Polygonatum*[J].Light industry science and technology,2024,40(4):25-28.

[32] 宋思情,马英姿,宋荣,等.11种黄精属植物根和根状茎显微结构的比较[J].经济林研究,2023,41(2):214-222.
SONG S Q,MA Y Z,SONG R,et al.Microstructure comparison of roots and rhizomes of 11 species of *Polygonatum*[J].Non-wood forest researc,2023,41(2):214-222.

[33] 陈杰,张黎骅,谭涛.大豆秸秆剪切力学特性的研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2017,43(1):98-102.
CHEN J,ZHANG L H,TAN T.Study on shearing properties of soybean straw[J].Journal of Hunan agricultural university(natural sciences),2017,43(1):98-102.