

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.09.015

李敏, 姚亮华, 陈迅, 等. 黄连根茎物理力学特性试验性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 153-161.

黄连根茎物理力学特性试验性研究

李敏¹, 姚亮华¹, 陈迅¹, 谷明先¹,
赵世龙¹, 曾百功^{1,2,3,4}, 谢守勇^{1,3,4}

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆三峡学院 机械工程学院, 重庆 万州 404100;
3. 重庆市农业技术创新方法工程技术中心, 重庆 400715; 4. 丘陵山区农业装备重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 通过实地探访和试验获得了黄连形态结构特征参数, 测定黄连根系约 90% 的质量分布在入土深度为 0~60 mm 的土壤中. 应用万能拉伸试验机对收获期黄连根茎进行了拉伸和剪切特性试验研究, 分析了黄连根茎拉伸和剪切断裂方式, 以及根茎含水率和直径对其力学特性的影响, 结果表明, 黄连根茎的极限拉力随着根径的增大呈现出增大的趋势, 黄连根茎的极限伸长率随着根径的增大呈现出减小的趋势, 但含水率范围不同, 变化幅度不同; 当根茎含水率在 80%~130% 和 130%~180% 时, 黄连根茎的极限剪切力随着根径的增大而大幅增大, 当含水率在 180%~230% 时, 黄连根茎的极限剪切力随着根径的增大而平缓减小. 研究结果可为黄连机械化收获关键部件的拉拔与采挖过程提供基础设计参数.

关键词: 黄连; 根茎; 物理特性; 力学特性

中图分类号: TH122; S23 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2023)09-0153-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Rhizomes of Coptis Chinensis

LI Min¹, YAO Lianghua¹, CHEN Xun¹, GU Mingxian¹,
ZHAO Shilong¹, ZENG Baigong^{1,2,3,4}, XIE Shouyong^{1,3,4}

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. College of Mechanical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Wanzhou Chongqing 404100, China;
3. Chongqing Innovation Engineering Center for Agricultural Technology, Chongqing 400715, China;
4. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment in Hilly Area, Chongqing 400715, China

Abstract: The morphological and structural parameters of Coptis chinensis were obtained through field in-

收稿日期: 2022-03-18

基金项目: 重庆市留学人员回国创业创新支持计划项目(cx2020118); 重庆市人工智能+智能农业学科群开放基金项目(ZNNYKFA201904); 重庆市科技局项目(cstc2018jszx-cydzx0045); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202300208).

作者简介: 李敏, 硕士研究生, 主要从事中药材机械化生产理论与技术研究.

通信作者: 曾百功, 博士, 副教授.

vestigations and tests. It was determined that about 90% of the root system of *Coptis chinensis* distributed in the 0~60 mm depth of soil. The tensile and shear properties of rhizomes of *Coptis chinensis* during harvest period were tested with universal tensile tester, and the tensile and shear fracture modes of rhizomes of *Coptis chinensis* were analyzed, as well as the influence of water content and diameter of rhizomes on their mechanical properties. The results showed that the ultimate tensile force of rhizomes of *Coptis chinensis* increased with the increase of root diameter, while the ultimate elongation of rhizomes of *Coptis chinensis* decreased with the increase of root diameter, but the range of water content was different and variation of the range is different. When the water contents of rhizome were between 80%~130% and 130%~180%, the ultimate shear force of rhizome of *Coptis chinensis* increased greatly with the increase of root diameter. When the water content was between 180%~230%, the ultimate shear force of rhizome of *Coptis chinensis* decreased smoothly with the increase of root diameter. The research results can provide basic parameters for designing the key components of pulling and excavation process in mechanized harvesting of *Coptis chinensis*.

Key words: *Coptis chinensis*; rhizome; physical characteristics; mechanical properties

黄连为毛茛科多年生草本植物,以根茎入药,是常用的重要中药材,其味苦性寒,有清热、燥湿、泻火、解毒等功效^[1]。重庆市石柱县是黄连的原始产区,常年在地黄连约 3 000 hm²,年产量占全国黄连产量的一半以上,产品销往世界各地,被誉为“黄连之乡”^[2-3]。但目前仍依靠人工种植、收获黄连,过程复杂、工序繁多,包括砍树搭棚、播种移栽、采挖抖泥、剪须剪叶、土炕干燥、撞击除杂等,需要大量劳动力,特别是采收季节,农户要在山坡上长时间弯腰低头采挖抖泥、剪须剪叶,环境艰苦且工作效率低、安全系数低。因此,急需开展针对黄连收获农艺过程中采挖抖泥、剪须剪叶等技术的黄连根茎物理力学特性基础研究,为黄连收获机的设计提供理论指导。

国内外学者对青菜头^[4-5]、甘蓝^[6-7]、玉米根系^[8-10]、小麦茎秆^[11]、萝卜^[12-13]、麻风果种子^[14]、山核桃^[15]、工业大麻^[16]、玉米秸秆^[17]、板蓝根种子^[18]等植物的力学特性已开展大量研究,但对黄连根茎物理力学特性的研究在国内外均未见报道。因此,本文以重庆市石柱县成熟黄连为研究对象,通过田间测试和室内试验研究黄连形态结构特征、土壤环境参数及根茎力学特性,为黄连机械化收获时间、黄连收获机关键工作部件结构参数和工作参数的设计等提供理论依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

2021 年 10 月 23 日和 2021 年 12 月 3 日在重庆市石柱县黄水镇的农田进行了田间试验,并通过五点采样法进行土壤环刀采样,用 S 形采样法进行黄连采样^[19],采样的土壤和黄连放置于密封袋中,于 24 h 内进行试验。试验的黄连品种为味连,采用搭棚栽连的种植模式^[20],种植过程为播种育苗两年后人工移栽生长五年,种植地块坡度一般在 15°~30°。

1.2 试验仪器及其装置

SC-900 型土壤坚实度仪(量程 0~45 cm, 0~7 000 KPa); 202-00 型电热恒温干燥箱(上海光地仪器设备公司); EK813 型电子秤; HG-500 数显推拉力计(量程 0~500 N, 精度 0.1 N); ZQ-990 型万能拉伸试验机; 自制剪切夹具; 环刀、铝盒、密封袋、游标卡尺、钢卷尺、直尺、电脑等仪器设备。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤物理特性参数测量

土壤坚实度通过数字式土壤坚实度仪进行测量; 土壤含水率的测定根据 GB/T5262-2008 的含水率测定方法,用环刀在田间取土样并装入铝盒密封,防止水分蒸发影响测定结果,回实验室称重,精确到

0.01 g, 将铝盒盖打开置于 105 ℃ 的电热恒温干燥箱中烘烤 6 h, 土壤含水率和干密度的计算公式如下:

$$\omega_0 = \left(\frac{m_w}{m_d} - 1 \right) \times 100\%$$

(1)

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V}$$

(2)

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01\omega_0}$$

(3)

式中: ω_0 为土壤含水率, %; m_w 为试样湿质量, g; m_d 试样干质量, g; ρ 为土壤湿密度, g/cm³; ρ_d 为土壤干密度, g/cm³; m_1 为环刀与土的质量, g; m_2 为环刀质量, g; V 为环刀体积, cm³.

1.3.2 黄连形态结构特征参数测量

以重庆市石柱县的味连作为研究对象, 按照均匀分布的采样方法取 50 株样本, 观察黄连植株形态结构, 测量植株尺寸和分布范围; 取 5 株黄连根系样本进行根系质量垂直分布测试, 将根系自根土界面处向下依次分层切割, 层间间距为 30 mm, 从各层中取出黄连根系, 称其质量, 将黄连根系置于 105 ℃ 的电热恒温干燥箱内烘干至质量不变, 然后测其质量.

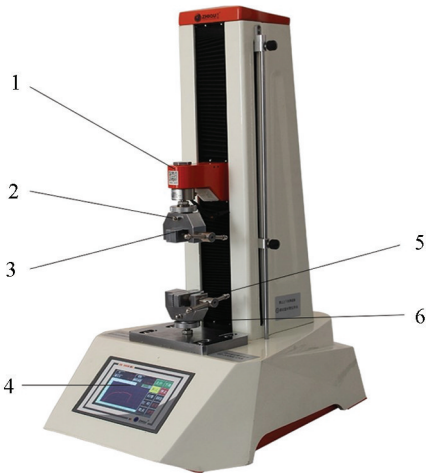
1.3.3 黄连根茎力学特性试验

1) 拉伸特性试验

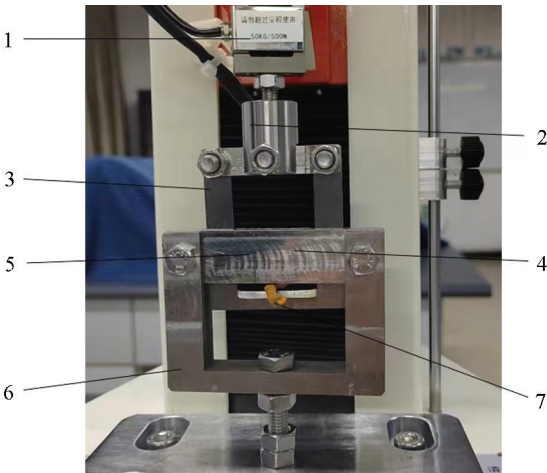
极限拉力和极限伸长率是衡量黄连根茎抗拉能力的主要指标. 采用 ZQ-990 型万能拉伸试验机进行单根拉伸试验, 该仪器能在试验过程中实时显示力和变形的试验曲线, 其结果示意图如图 1 所示. 试验选取了不同直径和不同含水率的根试样, 直径标距取 30 mm, 拉伸速率为 20 mm/min, 进行拉伸试验, 记录数据. 分析当含水率在 80%~130%, 130%~180% 和 180%~230% 时, 根径的变化对极限拉力和极限伸长率的影响; 分析当根径在 1~4 mm, 4~7 mm 和 7~10 mm 时, 不同含水率对极限拉力和极限伸长率的影响.

2) 剪切特性试验

极限剪切力是衡量黄连根茎抗剪切能力的主要指标. 采用 ZQ-990 型万能拉伸试验机和自行设计的剪切夹具进行测试, 参照 GB/T 6400-2007, 本剪切试验采用单剪方式试验, 为了方便准确地剪切试样, 剪切夹具主要由固定的定刀片和动刀片构成, 剪切试验结构示意图如图 2 所示. 试验选取了不同直径和不同含水率的根试样, 标距取 30 mm, 剪切速率为 20 mm/min, 进行剪切试验, 记录数据. 分析当含水率在 80%~130%, 130%~180% 和 180%~230% 时, 根径的变化对极限剪切力的影响; 分析当根径在 1~4 mm, 4~7 mm 和 7~10 mm 时, 不同含水率对极限剪切力的影响.



1. 传感器; 2. 上夹具连接销; 3. 上夹具; 4. 触摸显示屏; 5. 下夹具; 6. 下夹具连接销.



1. 传感器; 2. 连接头; 3. 动刀片; 4. 定刀片; 5. 剪切刃; 6. 固定件; 7. 黄连根茎.

图 1 ZQ-990 万能拉伸试验机结构示意图

图 2 剪切试验结构示意图

2 结果与分析

2.1 土壤物理特性参数

土壤坚实度测量结果如表 1 所示.

表 1 2021 年 10 月和 12 月不同入土深度的土壤坚实度测量结果

	10 月土壤坚实度/MPa			12 月土壤坚实度/MPa		
	50 mm	100 mm	150 mm	50 mm	100 mm	150 mm
平均值	0.175	0.214	0.368	0.319	0.760	0.997
标准差	0.039	0.031	0.076	0.065	0.131	0.093
变异系数	0.223	0.145	0.207	0.204	0.172	0.093

根据公式计算, 得到土壤含水率和土壤干密度, 如表 2 所示.

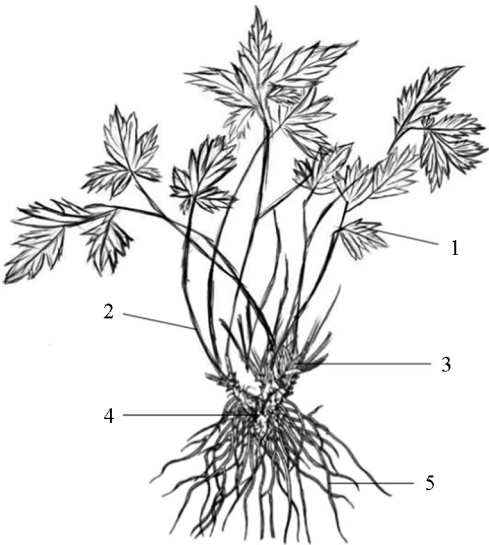
表 2 不同入土深度的土壤含水率和干密度

	含水率/%		干密度/(g·cm ⁻³)	
	0~75 mm	75~150 mm	0~75 mm	75~150 mm
平均值	58.32	46.02	0.892	1.084
标准差	10.49	12.93	0.114	0.144
变异系数	0.18	0.28	0.128	0.133

由表 1 和表 2 数据可以看出, 随着入土深度增加, 土壤坚实度逐渐增大, 并且 12 月的土壤坚实度大于 10 月的土壤坚实度, 主要原因是 12 月雨水减少, 土壤结块变硬; 土壤含水率随着入土深度的增加而逐渐减小, 主要原因是浅层土壤较为松软, 植物根系多, 吸收雨水多, 而深层土壤非常紧实, 干密度大, 空隙小, 所以含水量较浅层土壤小.

2.2 黄连结构形态特征参数测量

黄连形态结构如图 3 所示, 黄连植株主要由根、茎、叶三部分组成^[21], 整株高度为 23~40 cm, 地上部分高度为 15~25 cm, 黄连根系由主根和须根组成, 4~10 个分支根簇拥成鸡爪型^[22], 且长度为 2~6 cm, 直径为 1~10 mm, 根系入土深度为 8~15 cm, 根系幅宽为 11~15 cm.



1. 叶片; 2. 茎秆; 3. 芽苞; 4. 根茎; 5. 须根.

图 3 黄连形态结构示意图

黄连根系垂直质量分布平均百分比如表 3 所示, 由表 3 可以看出, 随着入土深度的增加, 黄连根系质量平均百分比减小, 且根系约 90% 的质量分布在入土深度为 0~60 mm 的土壤中, 约 10% 的质量分布在入土深度为 90~150 mm 的土壤中.

表 3 黄连根系垂直质量分布平均百分比

深度/mm	0~30	30~60	60~90	90~120	120~150
湿重平均值/%	42.89	45.11	5.92	4.78	1.30
干重平均值/%	41.63	49.87	4.12	3.17	1.21

2.3 黄连根茎力学特性试验

2.3.1 拉伸特性试验

根据拉伸曲线的变化, 可以看出黄连根茎为韧性材料, 拉伸过程可大致分为 3 类, 3 种类型的根茎拉伸断裂图以及其对应的拉伸曲线如图 4 所示.

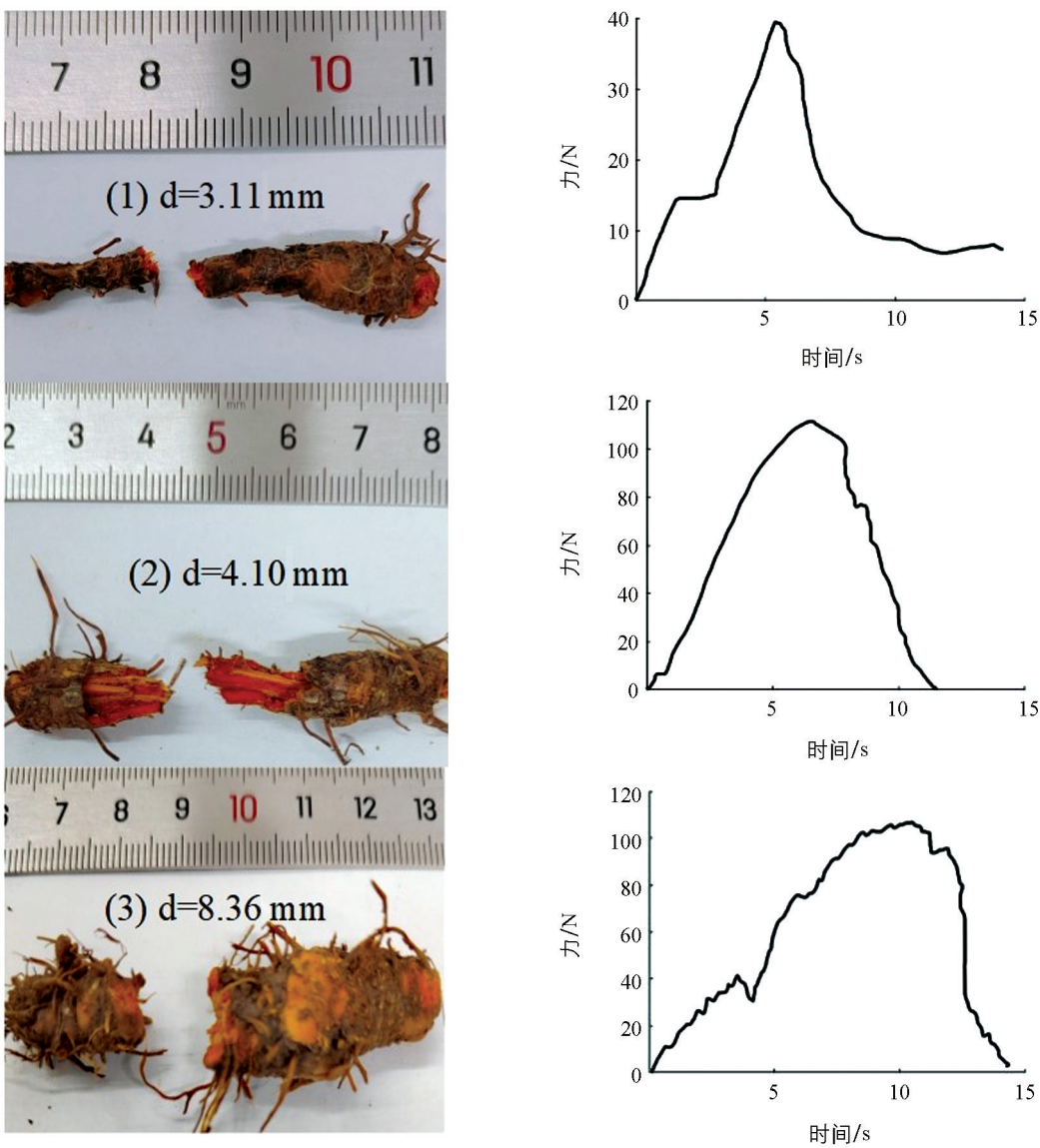


图 4 三种拉伸断裂方式

由图 4 可以看出, 第一种拉伸过程中有明显峰值, 屈服阶段较长, 根韧性较大, 拉力线性增加, 断口整齐. 第二种拉伸过程平缓, 拉伸开始短时间内进入屈服阶段后, 拉力逐渐增大, 根外层先于内层断裂. 第三种拉伸过程中有多个微小峰值, 整个过程拉力非线性增加, 由于根皮较硬, 断口参差不齐.

1) 极限拉力和极限伸长率与根径的关系

用 MATLAB 软件画出在不同含水率的情况下, 极限拉力和极限伸长率与根径关系的拟合曲线, 如图 5 和图 6 所示.

由图 5 可以看出, 当根茎含水率在 80%~130% 时, 极限拉力增大得较为缓慢, 最大极限拉力为 97.36 N, 最小极限拉力为 46.66 N, 平均极限拉力为 70.60 N; 当根茎含水率在 130%~230% 时, 极限拉力变化趋势明显, 极限拉力随着根径增大而增加得较快, 当根茎含水率在 130%~180% 时, 最大极限拉力

为 142.34 N, 最小极限拉力为 36.78 N, 平均极限拉力为 80.93 N; 当根茎含水率在 180%~230% 时, 最大极限拉力为 135.82 N, 最小极限拉力为 34.05 N, 平均极限拉力为 86.89 N. 黄连根茎的极限拉力随着根径的增大呈现出增大的趋势, 黄连根茎的极限拉伸应力随着根径的增大呈现出减小的趋势, 但含水率范围不同, 变化幅度有所不同.

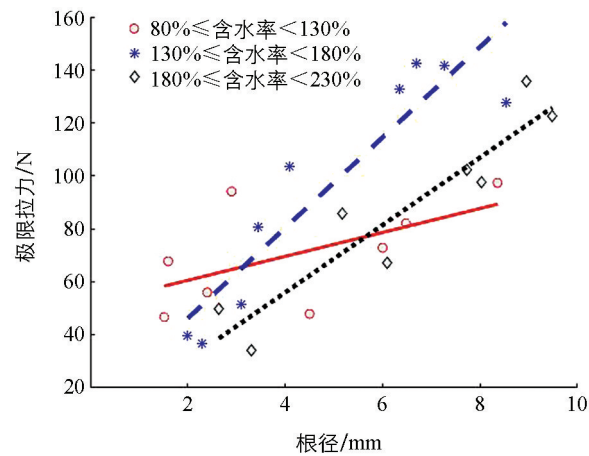


图 5 极限拉力与根径关系的拟合曲线

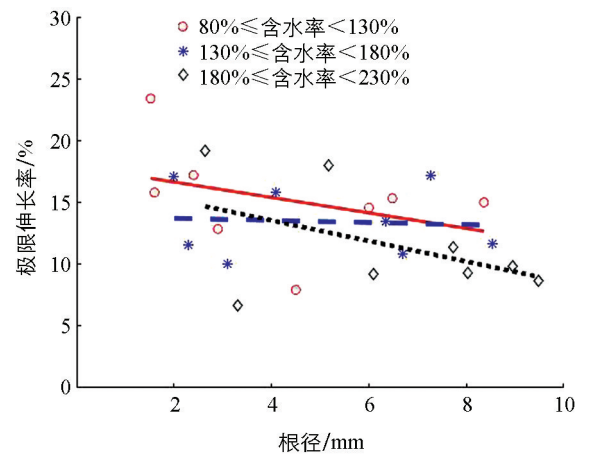


图 6 极限伸长率与根径关系的拟合曲线

由图 6 可以看出, 当根茎含水率在 80%~130% 和 180%~230% 时, 极限伸长率变化趋势较明显, 变化幅度大致相同; 当根茎含水率在 80%~130% 时, 最大极限伸长率为 23.40%, 最小极限伸长率为 7.92%, 平均极限伸长率为 15.26%; 当根茎含水率在 130%~180% 时, 最大极限伸长率为 17.20%, 最小极限伸长率为 10.00%, 平均极限伸长率为 13.45%; 当根茎含水率在 180%~230% 时, 最大极限伸长率为 19.20%, 最小极限伸长率为 6.67%, 平均极限伸长率为 11.52%. 可见, 黄连根茎的极限伸长率随着根径的增大呈现出减小的趋势, 但含水率范围不同, 变化幅度也有所不同.

2) 含水率对极限拉力和极限伸长率的影响

在一定的根径范围内, 分析含水率对极限拉力和极限伸长率的影响, 并用 MATLAB 软件画图, 结果如图 7 和图 8 所示.

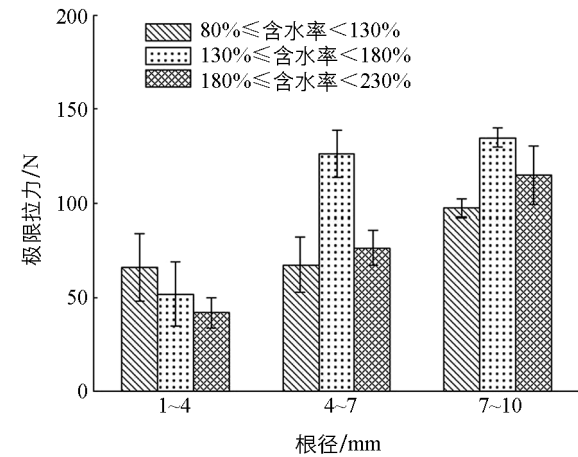


图 7 含水率对极限拉力的影响

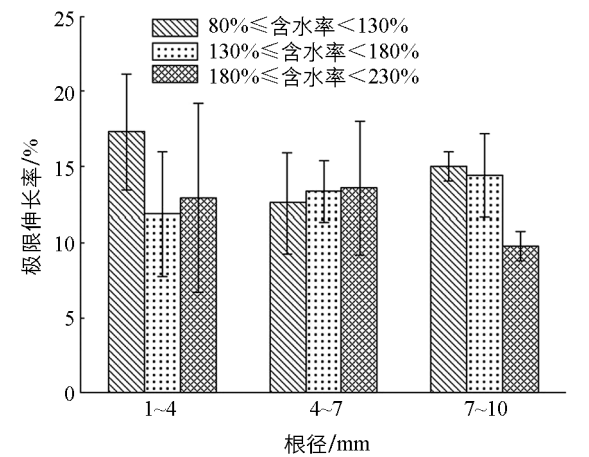


图 8 含水率对极限伸长率的影响

由图 7 可知, 当黄连根径在 1~4 mm 时, 极限拉力随着含水率的增大呈现出减小的趋势, 且极限拉力普遍较小, 当黄连根径在 4~10 mm 时, 根茎含水率在 130%~180% 的黄连根茎极限拉力最大; 随着含水

率区间的增大, 黄连根茎的极限拉伸应力随着根径的增大而减小的变化速率逐渐变小. 可见, 黄连根茎的含水率对极限拉力和拉伸应力的影响显著.

如图 8 所示, 当黄连根径在 4~7 mm 时, 极限伸长率随着含水率的增大呈现出增大的趋势, 但增加缓慢, 当黄连根径在 1~4 mm 和 7~10 mm 时, 根茎含水率在 80%~130% 的黄连根茎极限伸长率最大, 可见, 黄连根茎的含水率对极限伸长率的影响显著.

2.3.2 剪切特性试验

根据剪切曲线的变化, 将剪切过程大致分为 3 类, 3 种类型的根茎拉伸断裂图以及其对应的拉伸曲线如图 9 所示.

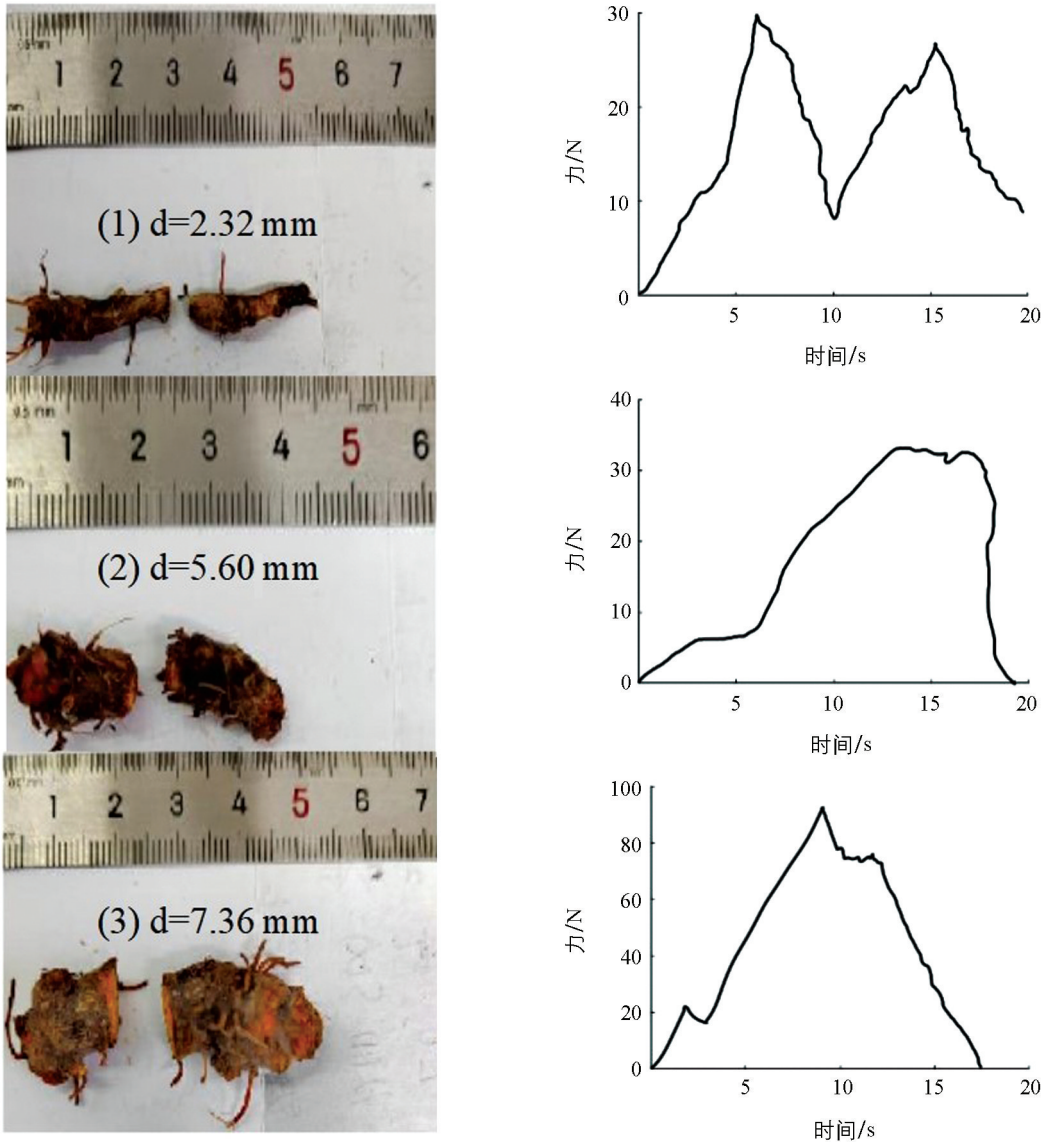


图 9 3 种剪切断裂方式

由图 9 可以看出, 第一种剪切过程有两个明显峰值, 剪切过程中的剪切力达到峰值后逐渐减小, 减小至最低点后又逐渐增大, 然后又逐渐减小, 主要原因是根表皮较硬, 中间部分较软. 第二种剪切过程无明显峰值, 剪切过程中的剪切力平缓增加, 达到峰值后持续一段时间, 然后迅速减小, 较大剪切力持续期间有多个微小峰值, 断口较整齐. 第三种剪切过程有一个明显峰值, 剪切过程中的剪切力有阶段性线性增大的趋势, 达到峰值后逐渐减小, 断口整齐.

1) 极限剪切力与根径的关系

用 MATLAB 软件画出在不同含水率的情况下, 极限剪切力与根径关系的拟合曲线, 如图 10 所示.

由图 10 可以得出, 当根茎含水率在 80%~130%和 130%~180%时, 随着根径的增大, 黄连根茎极限剪切力随之增大, 特别是当根茎含水率在 80%~130%时, 这种变化趋势更为明显, 其最大极限剪切力为 133.67 N, 最小极限剪切力为 40.48 N, 平均极限剪切力为 82.50 N; 当根茎含水率在 130%~180%时, 最大极限剪切力为 111.75 N, 最小极限剪切力为 30.65 N, 平均极限剪切力为 67.37 N; 当根茎含水率在 180%~230%时, 随着根径的增大, 黄连根茎的极限剪切力反而减小, 且变化趋势较为平缓, 其最大极限剪切力为 100.37 N, 最小极限剪切力为 43.25 N, 平均极限剪切力为 69.74 N. 黄连根茎的极限剪切应力随着根径的增大呈现出减小的趋势, 但含水率范围不同, 变化幅度有所不同.

2) 含水率对极限剪切力的影响

在一定的根径范围内, 分析不同含水率对极限剪切力的影响, 并用 MATLAB 软件画图, 见图 11.

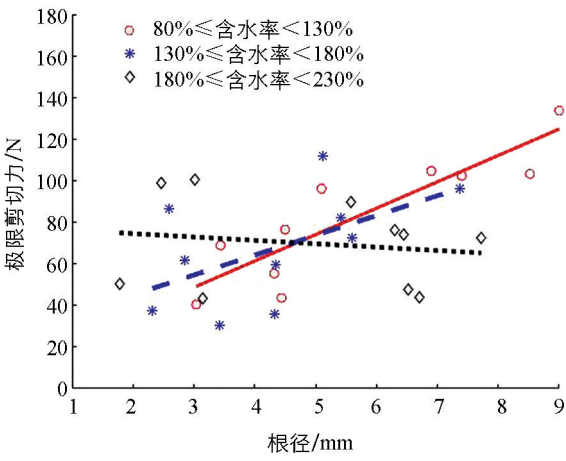


图 10 极限剪切力与根径关系的拟合曲线

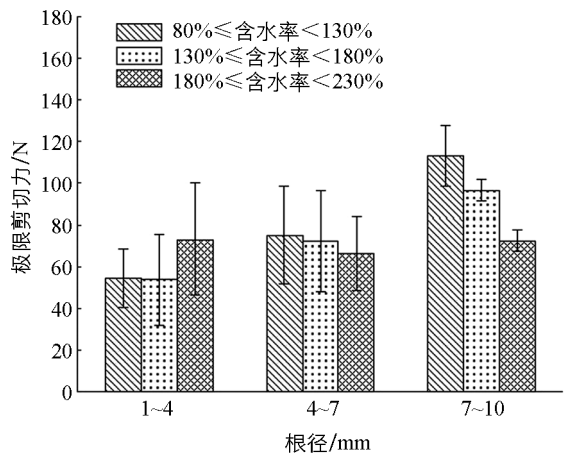


图 11 含水率对极限剪切力的影响

由图 11 可以得出, 当黄连根径在 1~4 mm 时, 根茎含水率在 180%~230%的黄连根茎剪切力最大, 当根径在 4~10 mm 时, 随着根茎的含水率的增大, 极限剪切力有所减小, 且当根径在 7~10 mm 时, 这种变化趋势更为明显; 随着含水率区间的增大, 黄连根茎的极限剪切应力随着根径的增大而减小的变化速率逐渐增加. 可见, 黄连根茎的含水率对极限剪切力和剪切应力的影响显著.

3 结论

1) 重庆市石柱县黄连试验田 10 月份所测样点的土壤坚实度为 0.112~0.462 MPa, 12 月份所测样点的土壤坚实度为 0.210~1.062 MPa, 12 月份的土壤坚实度相对于 10 月份的普遍较大; 随着入土深度增加, 土壤坚实度增大, 土壤干密度也增大. 因此, 收获黄连应选择土壤坚实度较小的 10 月份, 且尽量减小挖掘黄连时的入土深度, 以降低黄连的挖掘阻力和能耗, 减少土壤的扰动量.

2) 黄连根系约 90%的质量分布在入土深度为 0~60 mm 的土壤中, 约 10%的质量分布在入土深度为 90~150 mm 的土壤中. 为了减少收获黄连过程中的挖掘阻力和能耗, 且不损伤黄连根茎, 挖掘部件入土深度可在 60~90 mm.

3) 在不同的含水率区间内, 黄连根茎平均极限拉力为 70.60~86.89 N, 平均极限伸长率为 11.52%~15.26%, 平均极限剪切力为 67.37~82.50 N. 当黄连根茎含水率较低时, 其极限伸长率和极限剪切力普遍较大, 且根径的变化对极限拉力的影响较小, 可见, 收获低含水率的黄连可在一定程度上减少根茎被拉断或挖断的情况, 降低其损伤率, 进而提高黄连的收获质量.

参考文献:

[1] 任秀娟. 黄连种植对土壤侵蚀及土壤肥力的影响研究 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.

[2] 王小宁. 川黄连栽培技术及产地加工方法对其药材品质的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[3] 叶小利, 李学刚, 袁吕江, 等. 黄连综合开发利用 [Z]. 重庆: 西南大学, 2016-01-01.

[4] 薛元鹏, 陈俊杰, 叶进, 等. 青菜头物理力学特性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 147-152.

[5] 郝林杰, 叶进, 岳高峰, 等. 青菜头缩短茎物理力学特性的试验研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(12): 30-36.

[6] 周成, 陈海涛, 李丽霞. 结球甘蓝物理力学特性研究 [J]. 农机化研究, 2013, 35(6): 134-138.

[7] 周成. 甘蓝收获关键技术及装备研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.

[8] 袁志华, 苏宗伟, 李祥付, 等. 玉米根系的拉伸特性研究 [J]. 河南农业科学, 2009, 38(10): 51-52.

[9] 刘晶淼, 安顺清, 廖荣伟, 等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 517-521.

[10] 曾百功. 玉米根茬收集装置研制及关键机构机理分析 [D]. 吉林大学, 2013.

[11] 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.

[12] 李凯锋, 杨炳南, 杨德秋, 等. 胡萝卜物理力学特性的试验研究 [J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 169-175, 180.

[13] 陈海涛, 任珂珂, 余嘉. 北方垄作萝卜物理力学特性 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 163-169.

[14] 马志远, 张黎骅, 夏磊. 麻风果种子力学特性的试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 131-137.

[15] 赵超. 山核桃破壳力学分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(9): 123-127.

[16] 陈达, 赵建秋, 宋江, 等. “龙麻 3 号”茎秆径向压缩力学特性试验 [J]. 农机化研究, 2022, 44(9): 229-235.

[17] 刘禹辰, 张锋伟, 宋学锋, 等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究 [J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(1): 45-54.

[18] 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.

[19] 孙剑. 玉米根茬结构和力学特征及与土壤的摩擦学性能 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.

[20] 陈震, 王淑芳. 黄连丰产栽培技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.

[21] 瞿显友, 李隆云. 黄连生产加工适宜技术 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2018.

[22] 张含藻, 张晓波. 西南特色药材规范化生产技术 [M]. 北京: 金盾出版社, 2012.

责任编辑 孙文静