

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.03.007

姚亮华, 李敏, 赵世龙, 等. 收获期黄连原位机械拔取力学试验研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(3): 84-91.

收获期黄连原位机械拔取力学试验研究

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

- 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;
- 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: 黄连是一种常见的名贵中药材, 为了研制黄连收获机械, 实现黄连生产过程的机械化, 分析黄连拔取过程的力学特征规律必不可少。通过黄连拔取过程的受力分析, 自主设计黄连原位机械拔取测试装置, 对收获期黄连进行拔取力学试验, 统计试验数据并进行对比分析, 预测拔取速度、拔取方向、坡度及根土复合体表面积与黄连拔取力之间的关系。结果表明: 黄连拔取力主要分布在 10~50 N 之间, 平均拔取力为 27.38 N, 整体呈现正态分布。黄连的拔取力随拔出时根土复合体表面积增大而增大, 二者满足二次多项式函数关系, 决定系数为 0.76, 拔取力随着拔取速度的增大而增大, 但较快的速度会导致黄连根茎或茎秆的断裂, 因此在保证黄连样品完好的前提下, 以 20 mm/s 的速度拔取效果最佳。黄连多种植在坡地上, 相较于铅直方向, 垂直于地面方向拔取力平均降低了 15.5%; 拔取力随着种植坡度的增大而增大, 且坡度增加, 拔取力的增长幅度也随之增加。研究结果可为黄连生产机械化装备研发提供基础理论依据。

关键词: 黄连; 根土复合体; 拔取力; 拔取速度;
拔取方向; 坡度

中图分类号: S233.75

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)03-0084-08

Study and Test of Pulling out Device for Harvesting the *Coptis chinensis*

YAO Lianghua¹, LI Min¹, ZHAO Shilong¹, CHEN Xun¹,
WANG Yue¹, ZENG Baigong^{1,2,3,4}, XIE Shouyong^{1,3,4}

收稿日期: 2023-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601210); 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); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202300208).

作者简介: 姚亮华, 硕士研究生, 主要从事中药材生产机械化研究。

通信作者: 曾百功, 博士, 副教授。

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Collage 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: *Coptis chinensis* is a common and precious Chinese medicinal plant. In order to develop *C. chinensis* harvesting machinery and realize the mechanization of the production process for *C. chinensis*, it is essential to analyze the mechanical characteristics of process of pulling *C. chinensis* out of the ground. The in situ mechanical pull-out test device for *C. chinensis* was independently designed through the force analysis of *C. chinensis* pull-out process, and the mechanical pull-out test for harvesting *C. chinensis* was conducted. The relationship between the pull-out speed, pull-out direction, slope and surface area of root-soil complex and the pull-out force were studied and predicted through analyzing the test results. It was found that the pull-out force was mainly distributed from 10 N and 50 N, with the average pull-out force of 27.38 N, and a normal distribution. The pull-out force increased with the increase of the surface area of root-soil complex, the relationship between the two fit with the quadratic polynomial function, and the coefficient of determination was 0.76. The pull-out force increased with the increase of the pull-out speed, but the faster speed could lead to the break of rhizome or stalk of *C. chinensis* plant. Under the premise of ensuring the integrity of *C. chinensis* plant samples, the pull-out effect was the best at speed of 20 mm/s. Compared with the vertical direction, the pull-out force perpendicular to the ground direction decreased by 15.5% on average. The pull-out force increased with the rise of the ground slope, and the range of increase in pull-out force increased with the increase of the slope. The results could provide basic theoretical basis for the research and development of mechanization equipment for production of *C. chinensis*.

Key words: *Coptis chinensis*; root-soil complex; pull-out force; pull-out speed; pull-out direction; slope

毛茛科植物黄连是我国传统大宗根茎类中药材,其用途广泛,需求量大^[1]。重庆市石柱县是我国重要的黄连产区,主要栽培种类是味连(俗称鸡爪连),生产周期一般为7年(2年育种加5年移植生长)。据统计,重庆石柱黄连年产量在3 000 t左右,年产值约3~5亿元,有“黄连之乡”的美誉^[2-3]。黄连是阴生植物,喜高海拔、寒冷阴湿环境,忌高温干旱、强光直射^[4]。为保证良好的生长效果,黄连一般种植在海拔1 400~1 700 m的阴山坡地上,种植前搭建矮棚以保证阴暗潮湿的环境^[5]。目前,仍采用人工方式收获黄连:用二齿耙将收获期整株黄连挖出,敲落根部附着土壤,然后用黄连剪齐根基部剪去须根,齐芽孢处剪去叶片和茎秆,即得鲜黄连(黄连根茎)。可见,在山坡上收获量大的黄连劳动强度大、工作效率低、生产成本高。

经过多年生长的成熟黄连具有发达的纤维状根系结构,在土壤中形成了网状须根结构的根系土壤复合体。将整株黄连从土壤中拔出时,由于根系和土壤的紧密结合,黄连根系将裹挟部分土壤呈根系土壤复合体结构被拔出,因此,探究黄连拔取过程的相关因素对拔取力的影响规律之基础研究对黄连生产机械化具有重要意义。

近些年,国内外学者对植物根茎或茎秆的拔取力开展了较多研究,肖海等^[6]在实验室通过单根香根草拉拔试验探究了不同直径香根草根系的抗拉力和抗拉强度;刘强等^[7-8]通过山东农业大学自主研制的“数控式蔬菜拔取力测量试验台”进行了青萝卜和红萝卜的拔取力测试,探究了土壤物理特性对萝卜拔取力的影响,随着土壤含水率的提高、硬度和容重的降低,胡萝卜的机械拔取力值会降低;薛党勤等^[9]使用一种简单的起拔力测量装置研究了起拔角度和前进速度等对棉花秸秆拔取力的影响,结果表明起拔角度对棉花秸秆的起拔力有较大影响;杨闻达等^[10]通过对山矾根系的实验室拉拔试验得到根系拔取力随表面压力的增

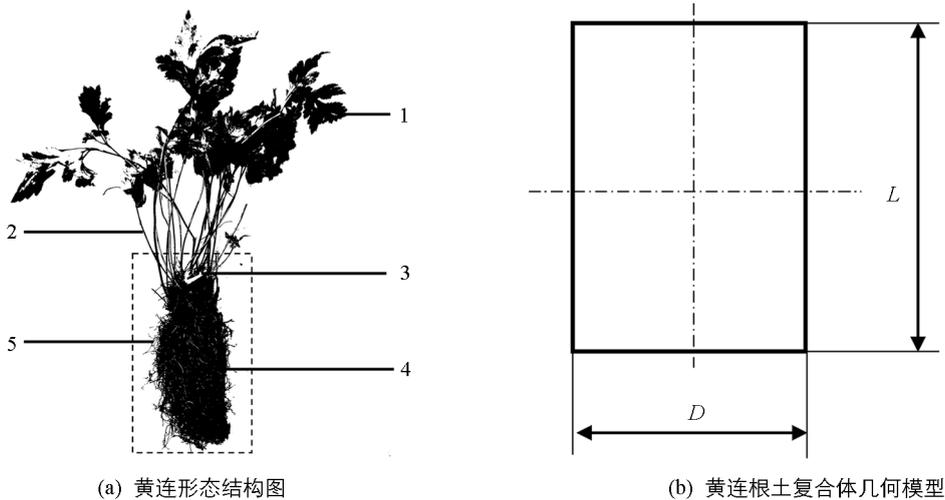
大而增大,而随土壤含水率的增加呈先增大后减小的趋势;Schwarz 等^[11]通过对多种植物根系试验探究了不同含水率不同直径的拔取力大小;Giadrossich 等^[12]研究了麻风树最大拉力随根直径的变化规律;蒲闯等^[13]通过自主搭建的试验台对水稻钵苗进行了拔取试验,探究了苗龄、拔取角度等对秧苗拔取力的影响;辛青青等^[14]通过手持式拉力计探究了成熟期马铃薯秧拔取力及相关影响因素。

针对植物根系开展的拉拔试验研究主要集中在农作物根茎系拔取和护坡固土根系拉拔,而多年生植物黄连根系结构复杂,与土壤结合紧密,本文通过自主设计的黄连原位机械拔取测试装置对收获期黄连进行原位拔取力学试验,分析拔取过程中各因素对拔取力的影响规律,为黄连收获机械的设计与开发提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用重庆市石柱土家族自治县黄水镇(108°41′96″E, 30°22′62″N, 海拔 1 541 m)某黄连种植区收获期在地黄连(味连)为研究对象,其叶片呈锯齿状,茎秆高 15~25 cm,根茎连接处长有芽孢;根茎多分枝,形如鸡爪,多须根,须根向四周生长,通过散布、交叉、缠绕等形式固结周围土壤,搭建了栅栏状的圆柱形框架,由此形成了根系土壤紧密结合体系。在整株黄连从土壤中拔出过程中,根系形态结构及其周围土壤结构将发生变化,由于根系与土壤的相互作用,黄连根系将裹挟部分土壤呈根系土壤复合体结构被拔出。因此,根据土壤中根土复合体的有效长度、直径和质量抽象出黄连根部的几何模型为一个圆柱体,如图 1。



1 为叶片, 2 为茎秆, 3 为芽孢, 4 为根部(根土复合体), 5 为须根; D 为根土复合体最大直径(mm), L 为根土复合体长度(mm)。

图 1 黄连形态结构及其根土复合体几何模型

黄连根部即根土复合体的体积和表面积分别用如下公式表示:

$$V = \frac{1}{4}\pi LD^2 \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{2}\pi D^2 + \pi DL \quad (2)$$

式中, V 为根土复合体体积(mm^3), S 为根土复合体表面积(mm^2)。

测得试验田浅层土壤(0~7.5 cm)的平均坚实度为 0.319 Mpa, 平均含水率为 58.32%; 深层土壤(7.6~15.0 cm)的平均坚实度为 0.760 Mpa, 平均含水率为 46.02%, 试验田地坡度为 4°~28°。

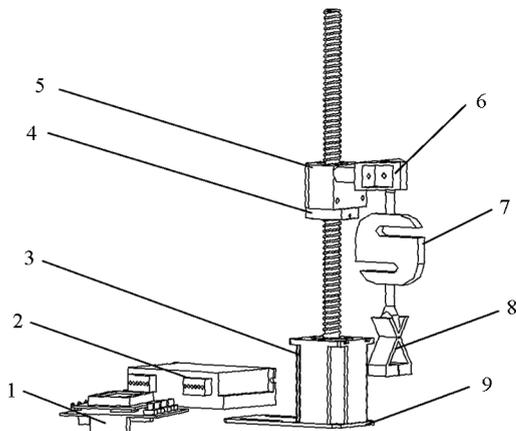
1.2 试验装置

通过对黄连生长形态和拔取过程的分析,设计一种黄连原位机械拔取测试装置。主要由 1605 滚珠丝杠步进电机、连接支架、HG-500 数显推拉力计(量程 0~500 N, 精度 0.1)、夹紧机构和控制系统组

成,如图2.连接支架一端通过滚珠螺母与步进电机丝杠连接,另一端与拉力传感器相连,通过控制系统调节步进电机的转速和方向来改变连接支架移动的速度和方向,进而实现拔取速度的调节;夹紧机构中夹持黄连部位粘贴一层海绵,既增大了夹持作用的摩擦力,又降低了夹持对植株的损伤.工作时,首先将夹紧机构夹持黄连根部,然后通过控制系统驱动步进电机转动,使得与滚珠螺母相连的连接支架匀速向上移动,进而带动夹紧机构将黄连从土壤中匀速拔出.在拔取黄连的过程中,数显拉力计能够实时显示拔取力的大小,并可绘制拔取力随时间变化的曲线图.

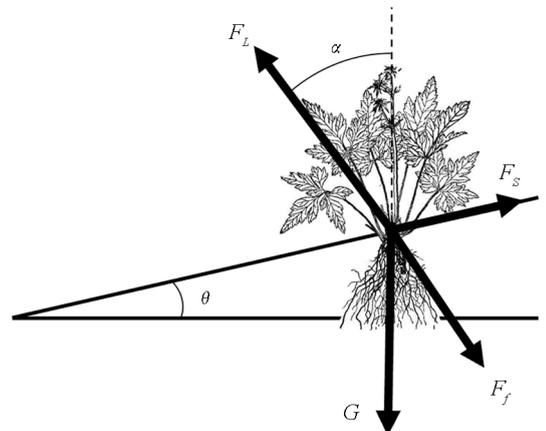
1.3 试验方法

拔取力是将整株黄连完整地土壤中拔出所需的作用力,它是黄连收获机械的一个重要技术参数,也是评价黄连收获机械的一个重要指标.加筋理论是在土体内部或表面添加各种适量的加强筋构件,目的是改善土体的抗拉强度、抗弯强度等^[15].黄连根系具有大量的须根,是天然的柔性加筋材料,根系复合土是天然的加筋土,由此形成了根系土壤复合体结构.当整株黄连从土壤中拔出时,黄连根系将裹挟部分土壤呈根土复合体结构被拔出,因此,拔取阻力主要表现为根土复合体重力、土壤之间及根系与土壤之间的摩擦力等.当拔取过程匀速进行时,不同角度拔取黄连的受力分析示意图如图3.



1 为控制器,2 为驱动器,3 为步进电机,4 为螺母支座,5 为滚珠螺母,6 为连接支架,7 为拉力传感器,8 为夹紧机构,9 为固定板.

图2 黄连原位机械拔取测试装置



F_L 为拔取力(N), F_S 为土地对黄连的支撑力(N), F_f 为摩擦阻力(N), α 为拔取力与铅直方向的夹角($^\circ$), θ 为黄连生长地面坡度($^\circ$), G 为根土复合体重力(N).

图3 黄连拔取受力分析示意图

由黄连拔取受力分析示意图可得黄连在拔取方向受力平衡方程:

$$\begin{cases} F_L \cos(\alpha - \theta) = F_f \cos(\alpha - \theta) + G \cos \theta \\ G \sin \theta + F_L \sin(\alpha - \theta) = F_f \sin(\alpha - \theta) + F_S \end{cases} \quad (3)$$

由此可得:

$$F_L = F_f + G \cos \theta / \cos(\alpha - \theta) \quad (4)$$

由公式(4)可知,黄连的拔取力大小不仅与摩擦阻力和根土复合体的重力有关,还与其生长的坡度和拔取方向有关,且土壤对黄连的支撑力也与坡度和拔取方向有关.摩擦阻力主要由土壤黏结及黄连须根拉伸作用产生,其大小由黄连根系形态结构和周围土壤物理特性决定,所以在地黄连拔取过程的摩擦阻力基本保持不变.本研究以收获期黄连作为研究对象,通过基础试验分析相关因素对于黄连拔取过程中拔取力的影响,采用自主搭建的黄连原位机械拔取测试装置,选取拔取速度、拔取方向、坡度及根土复合体表面积作为研究因素,黄连拔取力为主要指标开展试验研究,具体的参数设置如下:

- 1) 拔取速度(v): 从 10~30 mm/s 之间均匀设置 5 个档位,即 10, 15, 20, 25, 30 mm/s;
- 2) 拔取方向(α): 拔取设置为铅直方向和垂直于地面的方向,即 $\alpha=0$ 和 $\alpha=\theta$;
- 3) 坡度(θ): 根据实测地点,选择从缓坡到陡坡的 3 处地点作为测试点,数值根据角度测量仪实测获得.

采用单因素试验法,先选取地势较为平坦的测量点,以不同的拔取速度垂直于地面拔取黄连,然后在同一坡度以 15 mm/s 速度拔取 30 株黄连,使用游标卡尺测量根土复合体的直径和长度;再分别选取坡度不同的 3 个测试点,每个测试点以不同的拔取方向试验 3 组,拔取速度均设置为 15 mm/s. 每组试验重复 5 次,拔取完成后使用电子称测量拔取样品的质量. 测试现场照片如图 4.

为了进一步减少质量对测试结果的影响,剔除质量差异较大的样品,对剩余样品的拔取力作归一化处理,归一化公式:

$$F = \frac{F_i}{m_i} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N m_k \quad (5)$$

式中, F_i 为拔取力试验值(N); m 为根土复合体质量(kg); N 为试验样品数量(株).



图 4 黄连原位机械拔取测试现场

2 结果与分析

2.1 拔取力统计分析

将田间试验测得的金黄连拔取力数据采用 Origin 软件进行数据分析,得到拔取力频率分布图. 由图 5 可知,大部分黄连的拔取力主要分布在 10~50 N 之间,占样本总数的 87.4%. 样本数据的平均值为 27.38 N, 标准差为 14.16, 根据夏皮洛-威尔克^[16] 检验方法,将样本数据作正态分布密度曲线,得到数据显著性大于 0.05,属于正态分布.

2.2 根土复合体表面积对拔取力的影响

将整株黄连从土壤中拔出时,黄连根土复合体与周围土壤接触面积对拔取力有较大影响. 本研究去除根茎断裂等拉拔失败的样品,测得试验成功黄连的根土复合体的表面积范围在 $0.376 \times 10^3 \sim 18.286 \times 10^3 \text{ mm}^2$ 之间,拔取力范围在 9.2~62.8 N 之间,且拔取力随着根土复合体表面积的增大而增大. 对其进行线性拟合、多项式拟合及幂函数拟合,结果如图 6,其中二次多项式拟合结果最优,决定系数为 0.76,拟合程度良好,拟合关系式:

$$F_i = -0.024 59 S_i^2 + 2.742 15 S_i + 12.868 16 \quad (6)$$

式中, F_i 为黄连拔取力试验值(N), S_i 为根土复合体表面积($\times 10^3 \text{ mm}^2$).

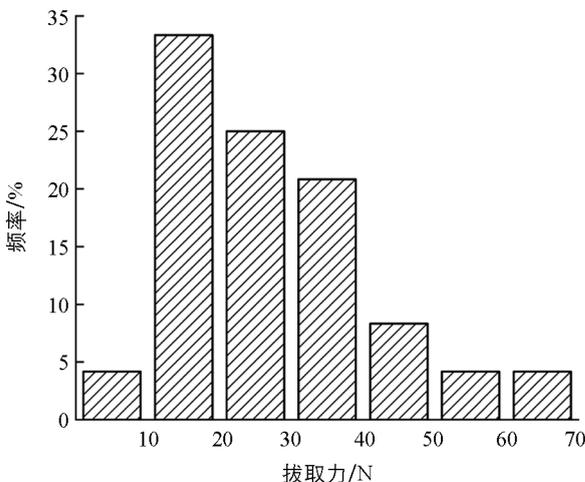


图 5 黄连拔取力频率分布图

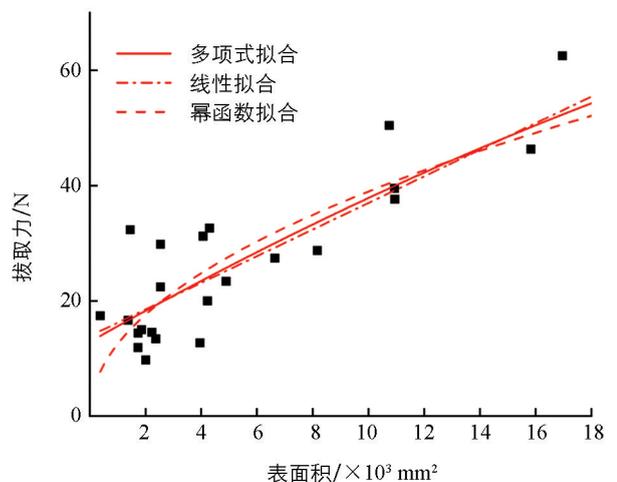


图 6 根土复合体表面积与黄连拔取力关系

2.3 拔取速度对拔取力的影响

拔取速度是黄连拔取过程的关键因素,直接影响拔取质量和作业效率.将拔取速度作为试验因素,黄连拔取力为试验指标,在地面坡度接近平地(实际测量值为 2.29°)的田块上进行黄连原位拔取力学试验,拔取方向垂直于地面,研究拔取速度对拔取力的影响.将田间试验结果归一化处理,得到不同拔取速度下黄连的拔取力,表1显示黄连的平均拔取力总体上随着拔取速度的增大而增大,但黄连拔取力的增长率并不均匀.当拔取速度从 10 mm/s 增长至 15 mm/s 时,平均拔取力增长了 6.53 N ;从 20 mm/s 增长至 25 mm/s 时,平均拔取力增长了 4.7 N ;但从 15 mm/s 增长至 20 mm/s 时,平均拔取力增长较小,仅为 0.59 N .拔取时间随着拔取速度的增大而减小,提高拔取速度可以增大拔取效率,但是较大的拔取速度会影响黄连收获的完整性和成功率.当拔取速度达到 25 mm/s 时,开始出现黄连根茎断裂现象,拔取速度增加到 30 mm/s 时,大部分黄连都发生断裂,故未在表中列出,因此最佳拔取速度为 20 mm/s .

表1 不同拔取速度黄连拔取力试验结果

拔取速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大值/N	最小值/N	平均值/N	标准差	变异系数	拔取时间/s
10	37.60	9.89	27.05	9.34	0.34	17.60
15	49.19	26.36	33.58	8.10	0.24	13.60
20	46.30	17.49	34.17	9.69	0.28	11.20
25	68.09	7.60	38.87	21.75	0.56	9.00

黄连在不同拔取速度下的拔取力曲线如图7,在拔取过程中拔取力可分为急速上升、波动下降和趋于平稳3个阶段.当拔取力刚刚施加到黄连上时,作用力会从夹持黄连部位通过黄连传递到黄连根部,由于土壤的约束和拔取力的相互作用,将导致黄连根部产生微小的形变,在逐渐增大的拔取力持续作用下,黄连根土复合体与周围土壤接触界面将产生相互滑动的趋势,两者连接处土壤的完整性被破坏,部分较长的须根拉至紧绷状态后产生回缩的弹力,此时黄连的拔取力急速增大达到峰值;其后,黄连根土复合体与周围土壤界面之间产生相对滑动,根土复合体逐渐被拔出,与周围土壤的接触面积逐渐减少,导致摩擦力减小,拔取力也随之减小.图7中拔取力下降阶段呈现不规则的下降趋势,主要原因为黄连根土复合体呈现

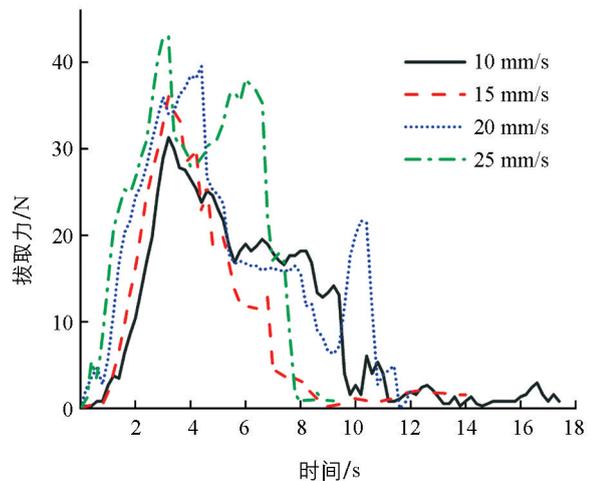


图7 不同拔取速度黄连拔取力曲线图

不规则形状,与周围土壤接触面积时时刻刻发生变化,且黄连须根较多,随着根土复合体逐渐被拔出,部分须根开始断裂,使得拔取力出现较大范围的波动;最后黄连根土复合体被完整地拔出地表,由于黄连与地面有接触,故黄连的拔取力接近于零,同时也受到拔取装置自身的结构及自然环境等的影响,所以数显推拉力计显示数值会出现小幅波动.

2.4 拔取方向对拔取力的影响

不同拔取方向下黄连最大拔取力的平均值如图8,相较于铅直方向,垂直于地面方向拔取黄连时拔取力平均降低了 15.5% .在具有一定坡度的田间地块中拔取黄连时,垂直方向作业会减小根土复合体与周围土壤的界面长度,导致两者之间的相互作用力减小,即摩擦阻力减小,摩擦阻力主要取决于土壤之间的黏结力及黄连须根的阻力.当在平缓地面上作业时,铅直方向与垂直于地面方向将会重合,垂直拔取和铅直拔取对于拔取力的影响较小,但是总体上垂直拔取时拔取力更小.

2.5 坡度对拔取力的影响

黄连生长在阴山坡地上,所以坡度也是影响黄连原位拔取力的重要因素.为了研究坡度对拔取力的影响,在田间选择3个差异较大的坡度,拔取方向为垂直拔取进行试验.在坡度为 4.89° , 13.72° , 27.38° 的测试点测得黄连的平均拔取力分别为 19.97 N , 31.90 N 和 108.06 N ,随着坡度的增大,黄连的平均拔取力也在不断增大,且增长幅度随之变大.坡度从 4.89° 增至 13.72° ,黄连的平均拔取力增大了 59.8% ;坡度

从 13.72°增至 27.38°, 平均拔取力增大了 2.4 倍, 变化幅度较大, 如图 9. 由此可见, 拔取生长在较低坡度的黄连所需的拔取力更小.

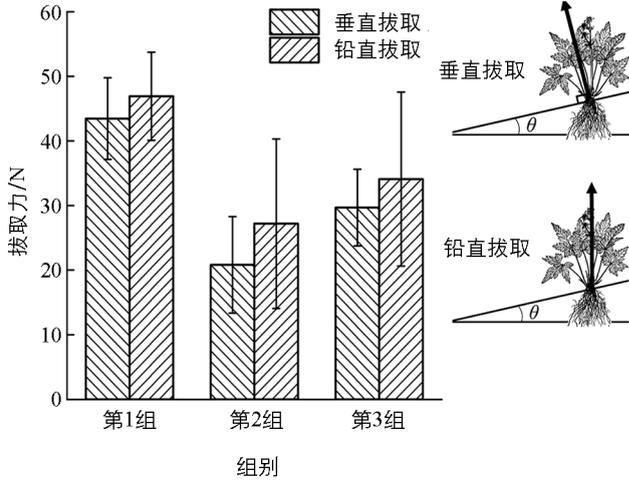


图 8 不同拔取方向黄连拔取力直方图

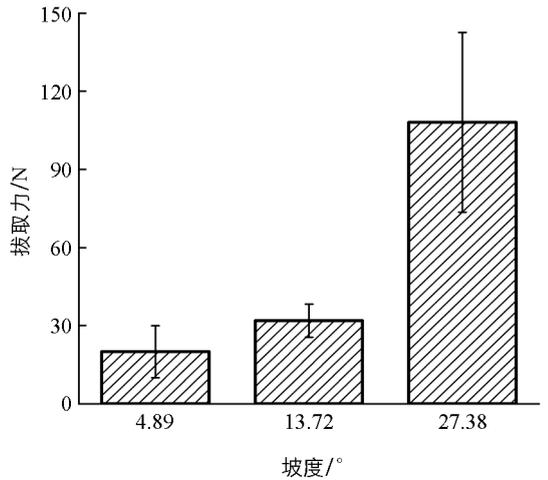


图 9 不同坡度黄连拔取力直方图

3 讨论

收获期黄连的原位拔取力总体呈正态分布, 这与学者们针对其它植物进行土壤结构未经破坏的原位拉拔试验结果一致, 但是土壤结构破坏之后, 并不遵循这个规律, 如李凯锋等^[17]为了更好地保护胡萝卜根部的完整性, 在拉拔之前进行松土, 使得拔取力均匀分布. 本试验对黄连进行原位拔取, 未对植株周围土壤进行夯实或松动作业, 保证了试验样品的原生状态.

黄连的拔取力随根土复合体表面积增大而增大, 二者拟合曲线为二次多项式. 黄连拔取过程中的根土复合体与周围土壤接触面积随着根土复合体表面积增大而增大, 摩擦阻力也越大, 这与国内外的研究^[18-25]基本一致. 肖海等^[6]研究植物根系拉拔力随直径呈现幂函数关系. 收获期在地黄连主根系为鸡爪形, 主根系上密集分布大量细长的须根, 拔取力的大小主要由土壤之间的摩擦力和须根的锚固作用确定, 故根土复合体表面积与拔取力关系拟合时相较于线性函数和幂函数, 二次多项式拟合程度更好.

拔取速度对黄连拔取力的影响对于后续开展黄连的工程研究有极大的指导意义, 随着拔取速度的增大, 黄连的拔取力也随之增大. 拔取过程伴随着土壤结构的破坏^[26-27], 较大的拔取速度使得黄连根系与周围土壤组成的结构体发生破坏的时间大大减少, 导致破坏这一结构体需要的作用力更大. 黄连是多年生草本植物, 其生长环境地表结构稳定, 长期生长在阴湿环境中, 黄连的茎秆也较为纤细脆弱, 这使得拔取过程中较大的拉拔力易造成茎秆断裂, 从而导致拔取失败. 相较于其它植物, 黄连的可允许拔取力更小.

针对黄连的拔取方向, 本研究只探讨了铅直方向拔取和垂直于地面方向拔取, 试验结果表明: 垂直于地面方向拔取相较于铅直方向拔取有更小的拔取力. 铅直拔取和垂直拔取的区别与黄连生长的坡度有关, 故探究了坡度对黄连拔取力的影响. 随着坡度的增加, 黄连根系固土能力更强, 导致黄连拔取力随之增加. 在其余条件不变的情况下, 相应的地理环境会直接或间接影响到黄连根系的生理生态特征^[28-30]. 不同坡度的光照等也会影响黄连内部纤维素等化学成分的占比, 间接导致根系抗拉强度的变化^[31-33]. 黄连根系为多须根, 根系抗拉强度的变化对黄连拉拔力影响较大.

4 结论

本文以收获期在地黄连作为研究对象, 以拔取速度、拔取方向、坡度和根土复合体表面积为研究因素, 黄连拔取力为主要指标, 对黄连进行原位机械拔取力学试验, 主要结论如下:

- 1) 黄连在自然状态下拔取力主要分布在 10~50 N 之间, 平均拔取力为 27.38 N, 根据拔取力的频率密度分布曲线, 其整体呈正态分布.
- 2) 黄连的拔取速度对黄连的收获质量和收获效率影响较大, 在保证黄连不会发生断裂及工作效率的

前提下,拔取速度设定在 20 mm/s 左右。

3) 试验田坡度约为 $4^{\circ}\sim 28^{\circ}$,当坡度大于零时,垂直于地面拔取与铅直拔取相比,拔取力的数值更小;拔取力随着坡度的增加而增大,且坡度越陡峭,拔取力增长幅值越大。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 叶小利,李学刚,袁吕江,等. 黄连综合开发利用 [D]. 重庆:西南大学,2016.
- [3] 唐鑫培,李韵萍,濮社班. 石柱黄连史话 [J]. 中药研究与信息,2002,4(11): 39-40.
- [4] 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.
- [5] 陈震,王淑芳. 黄连丰产栽培技术 [M]. 北京:中国农业出版社,2002.
- [6] 肖海,张千恒,夏振尧,等. 拉拔作用下上坡植物香根草根系的力学性能 [J]. 农业工程学报,2022,38(11): 91-97.
- [7] 刘强,田冲,许令峰,等. 土壤物理特性对胡萝卜机械拔取过程的影响 [J]. 农业工程,2019,9(1): 63-66.
- [8] 刘强,许令峰,刘贤喜,等. 基于离散元的胡萝卜机械拔取动态行为研究 [J]. 中国农机化学报,2018,39(6): 61-65.
- [9] 薛党勤,张佳喜,刘雄,等. 棉秆拔取力测试装置正交优化分析研究 [J]. 农机化研究,2021,43(10): 115-120.
- [10] 杨闻达,王桂尧,常婧美,等. 主直根系拉拔力的室内试验研究 [J]. 中国水土保持科学,2017,15(4): 111-116.
- [11] SCHWARZ M, COHEN D, OR D. Root-Soil Mechanical Interactions during Pullout and Failure of Root Bundles [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F4): F04035.
- [12] GIADROSSICH F, COHEN D, SCHWARZ M, et al. Modeling Bio-Engineering Traits of *Jatropha curcas* L. [J]. Ecological Engineering, 2016, 89: 40-48.
- [13] 蒲闯,周重军,刘木华,等. 水稻钵苗拔取特性研究及试验 [J]. 江西农业大学学报,2019,41(2): 219-225.
- [14] 辛青青,吕钊钦,张万枝,等. 成熟期马铃薯秧拔取力及影响因素研究 [J]. 农机化研究,2020,42(2): 173-176.
- [15] 杨果林,王永和. 加筋土筋材拉拔试验研究 [J]. 煤炭学报,2000,25(1): 51-54.
- [16] 张纪泉. 总体分布的正态性检验——介绍夏皮罗-威尔克的 W 检验法 [J]. 中国纤检,1982(5): 34-40.
- [17] 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.
- [18] 洪德伟. 晋西黄土区油松根系与土壤的摩擦力学特性研究 [D]. 北京:北京林业大学,2019.
- [19] FTY L, WM Y, BCH H, et al. Mechanical Pull-out Capacity and Root Reinforcement of Four Native Tree and Shrub Species on Ecological Rehabilitation of Roadside Slopes in Hong Kong [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2018, 30(1): 25-38.
- [20] 郑力文,刘小光,余新晓,等. 油松根系直径对根——土界面摩擦性能的影响 [J]. 北京林业大学学报,2014,36(3): 90-94.
- [21] HALES T C, MINIAT C F. Soil Moisture Causes Dynamic Adjustments to Root Reinforcement that Reduce Slope Stability [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(5): 803-813.
- [22] 管世烽,夏振尧,张伦,等. 水平荷载作用下多花木蓝根系拉拔试验研究 [J]. 长江科学院院报,2016,33(6): 24-28.
- [23] 冯国建,朱维伟,杜俊,等. 竖向荷载作用下黄茅根系抗拔承载力试验分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版),2018,40(8): 154-161.
- [24] 余焱,刘思思,李某明,等. 红黏土边坡香根草根土复合体的强度特性 [J]. 水土保持通报,2021,41(1): 97-102.
- [25] 白璐翼,刘静,李雪松,等. 黑沙蒿单根变形特性研究 [J]. 西北农业学报,2021,30(4): 591-598.
- [26] 蒋明镜,朱云刚. 重塑黄土与植物根系界面摩擦离散元分析 [J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2): 210-215, 221.
- [27] 韩凤,陈海涛,任珂珂,等. 北方胡萝卜的物理力学特性研究 [J]. 东北农业大学学报,2012,43(5): 36-41.
- [28] BHANDARI J, ZHANG Y J. Effect of Altitude and Soil Properties on Biomass and Plant Richness in the Grasslands of Tibet, China, and Manang District, Nepal [J]. Ecosphere, 2019, 10(11): e02915.
- [29] NG C W, LEUNG A, NI J. Plant-soil Slope Interaction [M]. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [30] 张婉婷,王鹤宇,史良,等. 水分、温度和光照对几种常见作物种子萌发的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版),2022,44(6): 49-54.
- [31] GENET M, LI M C, LUO T X, et al. Linking Carbon Supply to Root Cell-Wall Chemistry and Mechanics at High Altitudes in *Abies Georgei* [J]. Annals of Botany, 2011, 107(2): 311-320.
- [32] SAIFUDDIN M, OSMAN N. Evaluation of Hydro-mechanical Properties and Root Architecture of Plants for Soil Reinforcement [J]. Current Science, 2014, 107(5): 845-852.
- [33] 赵东晖,冀晓东,张晓,等. 冀西北地区白桦根系-土壤界面摩擦性能 [J]. 农业工程学报,2021,37(3): 124-131.