[文章编号] 1003－4684(2026)01-0018-05

辣椒穴盘苗钵体及茎秆力学性能试验研究

张淑霞[1]，马志艳[1,2]

(1 湖北工业大学机械学院，湖北 武汉 430068；2 湖北省农机装备智能化工程技术研究中心，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 辣椒穴盘苗力学性能对移栽机的设计至关重要。为系统探究辣椒穴盘苗移栽过程中茎秆与钵体的力学行为，开展了茎秆压缩与弯曲、钵体压缩与跌落损伤等系列试验。试验表明：茎秆夹持位置在 2～10 mm，抗压力范围在 15.61～22.45 N，压缩行程为 0.78～1.06 mm，可有效减少茎秆损伤；近钵体段可承受的弯曲载荷为 3.28±0.47 N，弯曲位移为 3.3±0.79 mm，最大抗弯曲强度为 3.73±0.5 MPa，降低夹苗高度，可有效降低茎秆损伤率。钵体夹持位置在钵体下端 0～15 mm，夹持力的范围在 3～8 N，压缩量为 7～11.5 mm，可以有效减小钵体损伤；200 mm高度跌落，平均损伤率为 12.45%，降低投苗高度，可以降低钵体损伤率。研究结果为全自动移栽机取投苗机构的优化设计提供了理论依据。

[关键词] 辣椒穴盘钵苗；抗压性能；弯曲性能；抗损伤特性

[中图分类号] S223.9 [文献标识码] A

辣椒作为一类重要的蔬菜作物，不仅在人们的日常生活中占据关键地位，更兼具丰富的营养价值与医药价值[1-3]。近年来，随着农业机械化生产技术的持续革新与推广，系统探究辣椒穴盘苗在机械移栽过程中的力学性能，已成为保障移栽质量、提升生产效率的重要前提，其研究价值愈发凸显[4-6]。

以往研究中，Jin 等[7]通过试验发现，取苗角度、取苗速度及夹取力是影响钵苗移栽破损率与取苗成活率的关键因素；童俊华等[8]设计了可调节指针夹持测力平台，实现了苗坨夹紧力的精准测量，并基于试验结果优化了取苗参数；刘姣娣等[9]系统探究了番茄钵体抗压强度、基质破碎压缩量与夹持力之间的内在关联，为夹钵式取苗机构的结构设计提供了重要理论依据；史瑞杰[10]通过胡麻茎秆分段压缩试验，明确其根部附近区域的抗拉能力最优；廖庆喜等[11]构建了油菜基质幼苗动力学模型，成功探明了脱苗临界条件。

目前对穴盘苗力学性能的研究主要集中于单一维度，针对穴盘苗茎秆与钵体协同力学性能的系统研究相对匮乏[12-14]。基于此，本文围绕辣椒穴盘苗移栽过程中的核心力学特性展开深入探究，具体通过四项关键试验明确相关参数：1)茎秆压缩试验，对比茎秆不同部位的抗压能力，以确定茎秆最佳夹持部位和最佳夹持力；2)茎秆弯曲试验，模拟辣椒植株在正常移栽过程中的损伤，从而确定末端执行器的运动位置；3)钵体压缩试验，分析不同部位的抗压能力，以确定最佳夹钵部位和夹持力；4)钵体跌落损伤试验，模拟真实跌落条件下钵体跌落，计算损伤率，为确定最佳投苗高度提供依据。通过上述试验，可深入探究辣椒穴盘苗在产业化移栽过程中存在的问题以及最优解决方案，为优化种植管理、提高辣椒生产的效率与质量提供理论支持和技术指导[20-23]。此研究结果可以为全自动移栽机的取投苗机构优化设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选用培育周期为 25～30 d 的“原起点”薄皮青椒幼苗作为供试材料，其株高范围为 110～160 mm。育苗载体采用 128 孔(16×8 排列)正四棱锥型穴盘，穴盘总高度 45 mm，穴孔上口径 32 mm、下口径 14 mm。育苗基质采用草炭、蛭石与珍珠岩按体积比 2∶2∶1 混合配制，基质含水率控制在 60%±5%(质量分数)，以保障幼苗生长状态一致。试验仪器方面，压缩与弯曲力学性能测试采用美国 Food Technology Corporation(FTC)公司生产的 TMS-Pro 型质构仪。该仪器量程为 0～2000 N，测试距离精度达0.001 mm，测试力精度为

[收稿日期] 2024－07－10
[基金项目] 国家重点研发计划(2018YFD0701002-03)；湖北省自然科学基金创新群体项目(2023AFA037)
[第一作者] 张淑霞(1998－)，女，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为农机装备工程。
[通信作者] 马志艳(1976－)，男，湖北武汉人，工学博士，湖北工业大学副教授，研究方向为智能农机装备。

0.0002%；辅以测量精度 0.02 mm 的游标卡尺（用于幼苗形态参数测量）、称重精度 0.01 g 的电子秤（用于基质含水率与幼苗鲜重测量），以及其他试验辅助材料[15]。

1.2　试验方法

1.2.1　茎秆压缩特性试验　为深入研究茎秆夹持位置和夹持力的大小对茎秆抗压能力的影响，从钵体上方 2 mm 处开始取茎秆，并将茎秆分为三段，每段长度均为 8 mm，分别标记为 2～10 mm 段、10～18 mm 段和 18～26 mm 段，进行 3 组不同茎秆范围各 10 次试验。图 1a 所示为茎秆分段；图 1b 所示为茎秆压缩试验。对各组试验结果求平均值[16]。通过绘制抗压力随压缩形变量变化曲线，对比茎秆不同段抗压力，确定最佳夹持段；对比最佳夹持段抗压力，确定具体的抗压力范围和对应的压缩行程。

试验量程设置为 100 N，触发力为 0.1 N，压缩和回程速度均为 50 mm/min。采用直径为 6.5 mm 的圆柱形平板探头，对茎秆的各个段落依次进行压缩，并由计算机系统自动记录数据。茎秆压缩强度

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_0} \tag{1}$$

式中：F_1 为最大压缩力，N；A_0 为茎秆受力面积，mm^2。



(a)茎秆分段　　(b)茎秆压缩

图 1　茎秆压缩试验

1.2.2　茎秆弯曲特性试验　在机械移栽幼苗的过程中，末端执行器按照预先设定的路径进行取苗。由于穴盘苗的生长状态存在差异，无法完全按照预期直立生长，末端执行器可能在工作时施加过大压力于茎秆，导致茎秆受损甚至折断。为了降低茎秆损伤率，进行茎秆弯曲试验，将茎秆均分为近钵体段和远钵体段，使用三点弯曲试验方法分别进行两组各 10 次试验（图 2），通过绘制抗弯曲力随弯曲行程的变化曲线，得出各段茎秆的抗弯曲力和最大承载力[17-19]。

试验中加载速度设定为 20 mm/min，压缩位移为 15 mm，数据由计算机自动记录数据。茎秆弯曲强度

$$\sigma_2 = \frac{F_2 L}{8W} \tag{2}$$

式中：σ_2 为抗弯强度，MPa；F_2 为最大破坏载荷，N；L 为试验茎秆试验跨距（支点间距），mm；W 为截面的抵抗矩，且

$$W = \frac{\pi d^3}{32}$$

其中 d 为茎秆直径，mm。

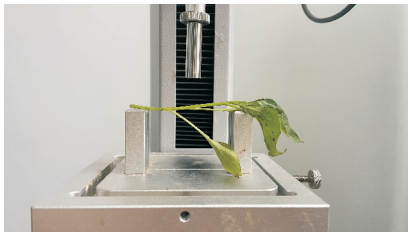

图 2　茎秆弯曲试验

1.2.3　钵体压缩特性试验　在夹钵体取苗过程中需要控制好夹持力，过大的夹持力可能导致钵体基质破裂，进而对幼苗根系造成损伤。为了深入研究夹持钵体的夹持力范围和位置对幼苗的影响，随机选择 10 株辣椒穴盘苗作为研究对象，将每一株穴盘苗钵体平均分为三段，每段长度为 15 mm，分为 0～15 mm 段、15～30 mm 段、30～45 mm 段，每株幼苗进行三组压缩试验，在钵体下方设置梯形台，并采用直径为 6.5 mm 的圆柱形探头进行压缩，如图 3 钵体压缩试验。绘制各组的抗压力-形变曲线，通过对比曲线特征（如屈服点、斜率）确定最佳抗压区段后，进一步分析该区段内多组试验数据，以确定安全有效的夹持力范围。



图 3　钵体压缩试验

试验力的量程为50 N，触发力为 0.1 N，压缩和回程速度均为 50 mm/min，压缩位移为 15 mm。对各段钵体依次进行压缩，由计算机自动记录数据。钵体抗压强度

$$\sigma_3 = \frac{F_j}{A} \tag{3}$$

式中：F_j 为夹持力，N；A 为受力面积，mm^2

1.2.4　跌落损伤试验　在辣椒幼苗移栽过程中，合理的投苗高度对于移栽后辣椒幼苗的成活率至关重要，为了研究机械移栽中投苗的合理高度，进行辣椒幼苗跌落损伤试验。选取 15 株基质组成及生长环

境一致的辣椒穴盘苗，进行自由落体跌落试验，设置投苗高度分别为 200 mm、300 mm 和 400 mm，每个高度重复 5 次(图 4)。使用电子秤记录投苗前后钵体的质量变化，在落地后剪下茎秆，记录茎秆的质量，称量并计算破碎的基质质量并计算出各个高度的跌落损伤率。对同一高度的幼苗跌落损伤率进行横向对比，对不同高度的幼苗跌落损伤率进行纵向对比，以确定钵体跌落损伤率与投苗高度之间的关系。跌落损伤率

$$M = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \tag{4}$$

式中：m_1 为钵体破碎量，g；m_2 为钵体总质量，g。



图 4 跌落损伤试验

2 结果与分析

2.1 茎秆压缩力学性能试验结果分析

图 5 为茎秆压缩力学特性曲线。图中曲线分为三段：OA 段为抗压力初始阶段，抗压力与形变量为近似线性关系，茎秆经历了弹性变形阶段，在卸载力后可以恢复，压缩力不会对茎秆表皮细胞造成伤害，不会破坏穴盘苗生长，A 点为茎秆的生物屈服点；随着形变量的增大，茎秆进入塑性变形阶段，压缩力对茎秆表皮造成破坏，在卸载力后不可以恢复，B 点被定义为破碎点；随着形变量进一步增加，压缩力对茎秆内部细胞组织造成破坏，直至 C 点卸载压缩力，为了保护茎秆不受损伤，应该将压缩力控制在弹性变形阶段。此阶段形变量与抗压力呈近似线性关系。拟合曲线为 $y = 23.955x$，相关性系数 $R^2 = 0.981\ 32$，压缩载荷达到 A 点所对应的最大压缩载荷时茎秆将破碎，A 点对应的载荷为最大压缩力。

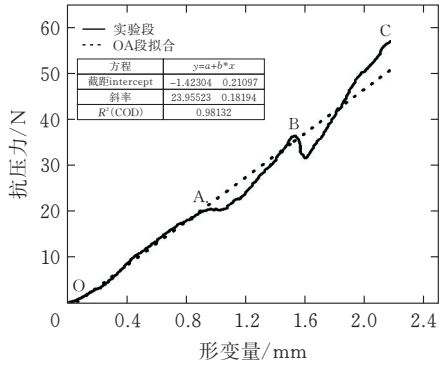

图 5 茎秆压缩力学特性

图 6 为茎秆压缩力学特性对比。图中，相同形变量情况下，0～10 mm 段曲线处于最上方，对应的抗压力最大，而 18～26 mm 段的抗压能力最差。试验结果表明，茎秆越靠近钵体的部位，其抗压能力越强。

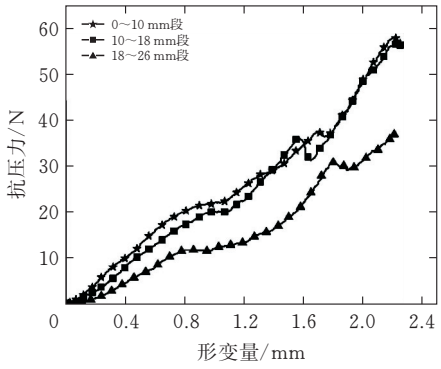

图 6 茎秆压缩力学特性对比

表 1 为茎秆压缩力学特性的试验结果，0～10 mm段茎秆所能承受的最大抗压力最大，压缩行程也更大，此时对应的抗压强度也更大。在取苗时，应该尽可能靠近钵体的上方进行取苗，取苗范围应该在距离钵体上方 2～10 mm 为宜，此时屈服点对应的抗压力范围为 15.61～22.45 N。对应的压缩行程为 0.78～1.06 mm，小于茎秆直径的 40 %。在此阶段内，可有效保护茎秆免受损伤。

表 1 茎秆压缩力学试验结果

压缩位置/mm	最大抗压力范围/N	最大抗压力/N	压缩行程/mm	抗压强度/MPa
0～10	15.61～22.45	20.25	0.78～1.06	1.69
10～18	12.71～19.85	15.34	0.72～1.02	1.22
18～26	8.4～14.27	10.62	0.51～0.86	0.78

2.2 茎秆弯曲特性试验结果分析

图 7 展示了茎秆弯曲试验特性，近钵体段和远钵体段茎秆随着弯曲行程的增加，抗弯曲能力都呈现先增大后减小的趋势。

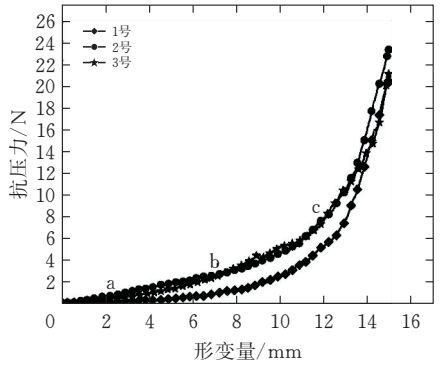

图 7 茎秆弯曲试验特性

E 点和 F 点为趋势突变点，对应的载荷最大，此时茎秆的抗弯曲能力最强。随着弯曲行程的进一步增加，抗压能力逐渐减弱，茎秆被破坏，不再具备抗弯曲能力，直到彻底断裂。对比两段茎秆的弯曲特

性曲线,E 点对应的载荷高于 F 点。这表明,近钵体段的可承载的载荷高于远钵体段,对应的弯曲行程相差不大。

由表 2 可知,近钵体段茎秆最大可承受的弯曲载荷为 3.28±0.47 N,最大弯曲位移为 3.3±0.79 mm,最大抗弯曲强度为 3.73±0.5 MPa;远钵体段茎秆最大可承受的弯曲载荷为 2.2±0.85 N,最大弯曲位移为 2.9±0.86 mm,最大抗弯曲强度为 2.49±0.67 MPa。近钵体段茎秆抗弯曲能力强于远钵体段,因此,在进行取苗时,可以适当降低取苗爪的工作轨迹,靠近钵体端运动,以减少对茎秆的伤害。

表 2　茎秆弯曲试验结果分析

压缩位置	最大载荷/N	弯曲位移/mm	抗弯曲强度/MPa
d 段	3.28±0.47	3.3±0.79	3.73±0.5
e 段	2.2±0.85	2.9±0.86	2.49±0.67

2.3　钵体压缩特性试验结果分析

图 8 为钵体不同区域的抗压特性曲线。观察图 8 发现,压缩钵体的位置不同会导致抗压力有较大的差异,这是由于基质的厚度不一致以及根系的缠绕紧密程度不同所致。不同钵体的压缩试验结果存在差异,主要归因于基质内部的滑移破裂。图 8 中 0～15 mm 段的曲线在 15～30 mm 段和 30～45 mm段之上,说明相同力的作用下,0～15 mm段的抗压能力更强。因此,在夹钵的过程中,应尽量夹取钵体的下端。这样做不仅可以有效夹取钵体,而且能够减少钵体基质破碎量。

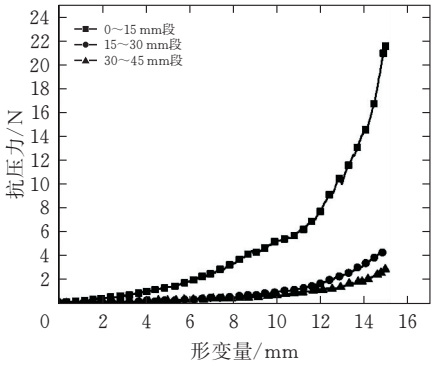

图 8　钵体压缩试验

在钵体压缩试验初始阶段,由于钵体基质表面质地较粗糙,与探头为多点接触,因此抗压力与形变量的关系近似直线关系,随着形变量的增加,抗压力缓慢增加,直到 G 点,曲线斜率突变,探头与钵体为面接触,钵体形变量增大,抗压力随形变量的增大而增大,定义 H 点为生物屈服点,随着形变量的进一步增大,抗压力与形变量呈近似直线关系,钵体表现为一定的屈服服软特性,基质容易松散而不利于夹持。随着形变量的进一步增大,直到破碎点 I,抗压力迅速上升,不再呈近似直线关系,钵体无法恢复至自然状态。此阶段钵体表现为一定的生物压实硬化特性,基质稳定,利于夹取,因此需要将抗压力控制在生物屈服点到破碎点之间。

图 9 所示为 0～15 mm 段随机试验数据,标记为 1、2、3 号。图中三株幼苗 0～15 mm 段钵体压缩特性曲线变化趋势基本一致,a 到 b 段基本呈现线性变化,b 到 c 段变化趋势较大,为了确保移栽成活率,需要将夹持力设置在 b 点到 c 点之间,夹持钵体取苗时,最佳夹持段为 0～15 mm 段,最佳抗压力为 3～8 N 之间,屈服点的压缩量为 7 mm,破碎点的压缩量为 11.5 mm,有利于夹取钵体。

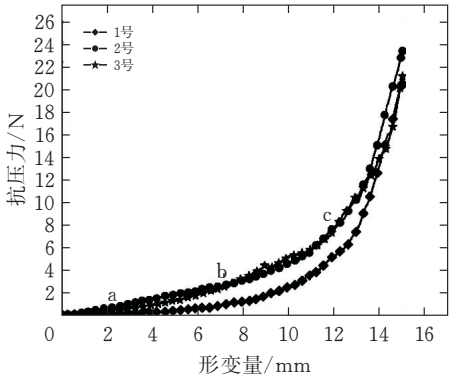

图 9　钵体压缩试验对比

2.4　跌落损伤试验结果分析

钵体损伤主要由其与地面的碰撞冲击引起。由图 10 损伤率对比可知,200 mm 跌落高度对应的钵体平均损伤率最低(12.45 %),对基质破坏最小;随跌落高度增加,钵体触地瞬时速度增大(200、300、400 mm 高度对应速度分别为 1.98、2.42、2.80 m/s),碰撞更剧烈,损伤率显著上升。因此,为保障移栽成活率,需尽量降低投苗高度。

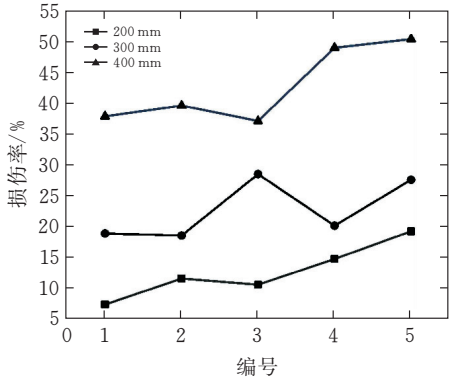

图 10　不同跌落高度下钵体损伤率对比

3　结论

1)茎秆压缩特性试验表明,近钵体端 2～10 mm段茎秆抗压缩能力最强。为降低茎秆损伤,移栽机末端执行器夹持茎秆取苗时,应靠近钵体端

2～10 mm 段取苗为宜，此时屈服点对应的抗压力范围为 15.61～22.45 N。对应的压缩行程为 0.78～1.06 mm，小于茎秆直径的 40 %。

2)茎秆弯曲特性试验结果表明近钵体段茎秆抗弯曲能力强于远钵体段，近钵体段茎秆最大可承受的弯曲载荷为 3.28±0.47 N，最大弯曲位移为 3.3±0.79 mm，最大抗弯曲强度为 3.73±0.5 MPa；在进行取苗时，可以适当降低取苗爪的工作轨迹，靠近钵体端运动，以减少对茎秆的伤害。

3)钵体压缩试验表明，为确保移栽成活率，需要将夹持力设置在屈服点到破碎点之间。不同钵体压缩位置试验结果表明：压缩位置不同，抗压能力有较大的区别，最下端的钵体抗压能力最强，在夹钵过程中应该尽可能夹取钵体下端，这样不仅能够有效夹取钵体，而且破碎量较小。

4)跌落损伤试验表明，200 mm 高度跌落时，钵体平均损伤率较低，对钵体基质的破坏最小；钵体损伤率随着跌落高度的增加而增大，高度越高，损伤率越大。为了降低穴盘苗钵体基质的损伤率，应该尽可能降低投苗高度。

4 讨论

本文通过茎秆压缩与弯曲、钵体压缩及跌落损伤试验，系统探究辣椒穴盘苗关键力学性能，明确移栽过程中茎秆最佳夹持区域、适配夹持力与压缩行程及取苗爪最优运动轨迹等核心参数，为辣椒穴盘苗移栽机的结构设计、参数优化及性能改进提供坚实理论支撑与试验依据。

受限于试验样本的单一性，本研究仅针对“原起点”薄皮青椒这一特定品种、特定培育周期的穴盘苗开展试验。而不同辣椒品种、培育条件及生长状态的穴盘苗，其物理特性差异显著，可能会影响移栽机取投苗稳定性与损伤率控制。因此，后续研究建议扩大试验样本覆盖范围，针对多样化辣椒穴盘苗开展物理特性与力学性能系统研究。

[参 考 文 献]

[1] WANG Y, CHEN J, WU J, et al. Mechanics property experiment of broccoli seedling oriented to mechanized planting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 1-10.

[2] WANG M, SONG J, LIU C, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 49-57.

[3] YANG Y, TING, K C, et al. Factors affecting performance of sliding needles gripper during robotic transplanting of seedlings[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 7(04): 493-498.

[4] 文永双，张俊雄，袁挺，等.蔬菜穴盘苗移栽自动取苗技术现状与分析[J].中国农业大学学报，2021，26(04)：128-142.

[5] 张妮，张国忠，付建伟，等.顶钵-夹茎组合式取苗装置设计与试验[J].农业工程报，2024，40(03)：50-61.

[6] 马晓晓，李华，葛云，等.番茄钵苗茎秆力学特性试验研究[J].农机化研究，2020，42(08)：161-167.

[7] JIN Xin, DU Xinwu, JI Jiangtao, et al. Physical characteristics of plug seedling transplanted by the return～blank type transplanter[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2015, 24(04): 1-10.

[8] 童俊华，蒋焕煜，蒋卓华，等.钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J].农业工程学报，2014，30(16)：8-16.

[9] 刘姣娣，曹卫彬，田东洋，等.基于苗钵力学特性的自动移栽机执行机构参数优化试验[J].农业工程学报，2016，32(16)：32-39.

[10] 史瑞杰，戴飞，赵武云，等.胡麻茎秆生物力学特性试验[J].中国农机化学报，2018，39(11)：45-50.

[11] 廖庆喜，王洋，胡乔磊，等.油菜基质块苗移栽机取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(11)：93-102.

[12] 邱硕，于博，计东，等.辣椒苗夹茎式双排自动取投苗装置设计与试验[J].农业机械学报，2024，55(03)：115-121.

[13] 叶大鹏，青家兴，林志强，等.“绿洲一号”穴盘苗茎秆力学特性试验[J].中国农机化学报，2023，44(10)：1-7.

[14] 赵晨阳，郭俊先，刘娜，等.辣椒穴盘苗力学特性及穴盘拔秧性能的试验研究[J].农机化研究，2021，43(06)：172-178.

[15] 杨丽，曹森鹏，薛亚许，等.茄子穴盘苗形态及力学特性试验研究[J].农机化研究，2023，45(06)：165-170.

[16] 胡双燕，胡敏娟，王佳.辣椒穴盘苗机械化移栽研究进展[J].中国农机化学报，2021，42(08)：24-31.

[17] 胡静，韩绿化，温贻芳，等.与自动移栽相关的不同蔬菜穴盘苗力学特性[J].农机化研究，2018，40(05)：132-136.

[18] 董欣，邵菲，杨波，等.北方烟草钵苗的物理及剪切力学特性研究[J].农机化研究，2017，39(05)：181-186.

[19] 张学东，崔巍，刘云强，等.穴盘苗移栽自动取投苗技术研究现状与展望[J].中国农机化学报，2023，44(12)：17-24.

(下转第 31 页)