果 树 学 报 2026,43(8):2085-2099
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20260078

出苗期移栽对柑橘枳砧生长发育及成本效益的影响

林 炘[1,2],赵和国[1,2],郝晨星[3],符红艳[4],曹运琳[1,2],马先锋[1,2],朱亦赤[1,2*]

([1]湖南农业大学园艺学院·园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心·国家柑橘改良中心长沙分中心,长沙 410128;[2]岳麓山实验室,长沙 410128;[3]湖南大学生物学院,长沙 410082;[4]湖南省农业科学院园艺研究所,长沙 410125)

摘 要:【目的】构建一种节约材料、减少人工、降低成本的健壮柑橘枳砧培育新方法。**【方法】**以秋季播种嫩籽于育苗基质,翌年3月下旬至4月上旬移栽的常规柑橘枳砧培育方法为对照(CK);以秋季播种嫩籽于蛭石,出苗后直接移栽的柑橘枳砧培育方法为处理。比较两种方法在出苗、株高、茎粗、分枝数、叶片数、叶形、叶面积、根系形态、生物量、根系活力、PS Ⅱ实际光化学效率($\Phi_{PS\,II}$)、光下最大光化学效率(F_v'/F_m')、非光化学淬灭系数(NPQ)等参数的变化及成本主要差异。**【结果】**采用出苗期移栽方法培育的柑橘枳砧,出苗更加整齐,出苗率更高。播种390 d,株高、茎粗、分枝数、叶片数、地上部分鲜质量显著提高;叶宽、叶面积极显著增大;叶长、总根长、根表面积、根尖数、地下部分鲜质量、地上部分干质量、地下部分干质量、总鲜质量、总干质量、根系活力均提高,根平均直径减小,但均无显著差异;根冠比相同。在09:00—11:00,处理组$\Phi_{PS\,II}$、F_v'/F_m'高于CK,NPQ低于CK。培育30万株枳砧,可节约直接成本8.31万元。出苗期移栽方法培育的柑橘枳砧表现出更优的生长发育特征,更强的生理活力,更高的产出效益。**【结论】**在苗圃面积允许的前提下,宜优先选择出苗期移栽培育枳幼苗的方法。

关键词:枳;砧木繁育;植物生理;成本效益分析;苗圃管理

中图分类号:S666 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)08-2085-15

Effects of transplanting at the seedling emergence stage on the growth and cost-benefit of *Poncirus trifoliata*

Lin Xin[1,2], Zhao Heguo[1,2], Hao Chenxing[3], Fu Hongyan[4], Cao Yunlin[1,2], Ma Xianfeng[1,2], Zhu Yichi[1,2*]

([1]College of Horticulture, Hunan Agricultural University/Engineering Research Center of Horticultural Crop Germplasm Innovation and New Variety Breeding, Ministry of Education/National Center for Citrus Improvement-Changsha, Changsha 410128, Hunan, China; [2]Yuelu Mountain Laboratory, Changsha 410128, Hunan, China; [3]College of Biology, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; [4]Hunan Horticultural Research Institute, Hunan Academy of Agricultural Science, Changsha 410125, Hunan, China)

Abstract:【Objective】The citrus industry, a vital component of global horticulture, faces persistent challenges in rootstock production. *Poncirus trifoliata*, the most widely utilized citrus rootstock, conventionally undergoes high-density sowing in autumn, with transplanting delayed until the following spring. This prolonged high-density growth phase often leads to suboptimal seedling development, particularly inadequate stem diameter, which reduces grafting success. This study aimed to evaluate an innovative cultivation protocol—transplanting at the seedling emergence stage—as a viable alternative. The primary objective was to conduct a holistic comparison against the conventional method, evaluate its effects on morphological development, physiological vitality, and economic viability, to establish an evidence-based protocol for producing high-quality rootstocks.【Methods】The control group (CK) followed standard nursery practices: seeds were sown in beds filled with a commercial nursery substrate. For the experimental treatment, seeds were sown in seedling trays filled with vermiculite. The key dif-

收稿日期:2026-02-03 **接受日期:**2026-04-07

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目C类(32502608);岳麓山实验室联合引进人才项目一类(2024RC2007);湖南省芙蓉计划科技领军人才项目(2025RC1054)

作者简介:林炘,男,在读硕士研究生,研究方向为果树生理生态。E-mail:552458028@qq.com

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:1015349693@qq.com

ference between treatments was the timing of transplanting seedlings into their final nursery pots. CK seedlings underwent this process 240 days after sowing, in late March to early April, which aligns with common commercial production practices. In contrast, the treated seedlings were transplanted immediately after emergence, once they reached approximately 3 cm in height, and this entire process was completed within a few weeks of sowing in August. Both groups were subsequently maintained under identical, optimal growth conditions, including following a standardized fertigation schedule. A comprehensive dataset was collected periodically until 390 days after sowing. This dataset included quantitative metrics for emergence, growth (height, stem diameter and branching), leaf development (number, size and area), and root system architecture, all of which were analyzed through digital scanning. We assessed plant vitality by measuring biomass partitioning (the fresh and dry weights of shoots and roots), as well as key physiological indicators such as root activity and in situ chlorophyll fluorescence ($\Phi_{PS\,II}$, F_v'/F_m', NPQ). A detailed activity-based cost analysis was performed, considering material inputs (substrate and vermiculite) and labor time for sowing and transplanting operations, with all data normalized to the cost of producing 10 000 viable seedlings.【Results】This treatment method demonstrated clear superiority across multiple dimensions, with significant improvements observed during the seedling emergence phase. The treatment group initiated emergence 1−2 days earlier and achieved a final stand establishment rate of 76.75%, which was substantially higher than the control's 63.25%. This suggests that the vermiculite medium would provide a more favorable germination microenvironment. Morphologically, the advantages were profound and sustained. From the initial measurement at 90 days until the study concluded at 390 days, treatment seedlings consistently exhibited greater plant height, stem diameter (critical for grafting at both 1.5 cm and 10 cm heights), and branch number. This consistent lead indicated a powerful early start that was maintained over time. Leaf development followed suit, with the treatment producing significantly more, larger leaves. This is evidenced by the significantly greater leaf width and area measured in mature functional leaves at 390 days. The treatment group showed an early advantage in terms of root growth, with significantly greater total root length, surface area, and number of root tips at 90 and 240 days. Although the CK seedlings exhibited compensatory root growth after delayed transplanting, which narrowed the gap by 390 days, the initial advantage of the treatment group in root architecture likely contributed to its sustained aboveground vigor. Biomass accumulation mirrored these trends, with the treatment producing significantly more total biomass (in terms of both fresh and dry weight) at the early and mid-growth stages. By the end of the trial, the treatment group maintained a significant advantage in aboveground fresh mass, while other biomass metrics showed a positive, though not statistically significant, trend. Physiological assessments provided further evidence of enhanced vitality. Root activity was higher in the treatment group. More importantly, chlorophyll fluorescence kinetics measured during the peak photoperiod (09:00—11:00 am) revealed that treated seedlings operated with higher photochemical efficiency ($\Phi_{PS\,II}$, F_v'/F_m') while dissipating less excess energy as heat (lower NPQ). This indicates a more efficient, less stressed photosynthetic apparatus that is capable of utilizing light more effectively for growth, rather than for photoprotection. Our economic analysis provided a compelling case for adoption. Using vermiculite for sowing and transplanting tiny, easy-to-handle seedlings dramatically simplified the process and resulted in substantial labor savings. The largest cost savings came from the transplanting operation itself: handling young seedlings reduced labor time by 37.85% (saving 26.8 seconds per plant). Overall, it was calculated that producing 10 000 seedlings with the tested treatment cost 18 780 yuan, compared with 21 550 yuan for the CK, representing a direct cost saving of 2770 yuan.【Conclusion】This study provides conclusive evidence that trans-

planting *Poncirus trifoliata* at the seedling emergence stage is a far more effective cultivation strategy than the conventional delayed transplanting method. By circumventing the debilitating phase of high-density competition early in the life cycle, the treatment protocol promotes the development of superior morphology, enhanced physiology and greater economic viability in the rootstocks. The resulting seedlings have thicker stems, a critical quality trait for grafting, and exhibit enhanced overall vitality. Combined with a significant reduction in production costs, this method makes a compelling case for transforming citrus nursery practices.

Key words: *Poncirus trifoliata*; Rootstock propagation; Plant physiology; Cost-benefit analysis; Nursery management

柑橘产业是我国及全球最大的水果产业，是我国南方农村经济的重要支柱产业，也是我国脱贫攻坚、巩固脱贫攻坚成果同乡村振兴有效衔接的依托产业之一。2023年，我国柑橘种植面积306.1万hm^2，产量6 443.8万t[1]。由于新建、重建和补种等需求，我国每年对柑橘种苗的需求量巨大[2]。柑橘无病毒容器苗具有成活率高、长势好、根系发达、不携带病毒、抗病能力强、投产早和果实品质优良等优点[3]，是目前柑橘用苗的主流选择。枳（*Poncirus trifoliata*）具有适应性广、抗性强等优点，是应用最广泛的优良柑橘砧木。在实际生产中，秋季高密度撒播、翌年3—4月移栽是常用的枳砧培育方法。一定比例的一年生枳茎粗未达到嫁接标准是普遍存在的问题[3]。

种植密度是影响植物群体光、水、养分资源利用效率的关键农艺措施[4-5]，能够调控农艺性状形成、干物质积累及营养品质分配[6]。当种植密度过高时，植株间的竞争加剧，导致单株植物的生长受到抑制[7]。前人在紫花苜蓿[6]、中棉113[8]等植物上的研究表明，降低种植密度可有效提高茎粗；但种植密度对柑橘砧木生长的影响还缺乏系统研究。本研究以洞口枳为材料，在出苗期直接将枳幼苗移栽到育苗钵，旨在为培育健壮枳砧提供技术支撑。

1　材料和方法

1.1　材料

在湖南农业大学长安基地（28° 09′ N，113° 13′ E）开展试验，供试枳源于湖南洞口。2024年8月3日，从果实中取出种子，选取800颗饱满种子，用清水清洗后，于0.1 mol·L^{-1} NaOH中浸泡2 min，反复搓洗去除果胶，再用1%次氯酸钠消毒10 min，无菌水冲洗5次，随机平均分为2份，每份400颗，一份按照常规方法[9]播种于苗床，另一份播种于育苗盘。苗床规格为长100 cm、宽40 cm、深20 cm，位于塑料大棚内；育苗盘规格为长53 cm、宽27 cm、深6 cm，底部有细孔。移栽所用的育苗钵为PE塑料材质，方形，上口径10 cm、下口径7.5 cm、高28 cm；蛭石（60元•包$^{-1}$）粒径2~4 mm；育苗基质（70 L•包$^{-1}$）购自湖南省湘晖农业技术开发有限公司。

1.2　试验设计

以常规枳砧育苗方法[9]作为对照（CK），以播种于蛭石、出苗期移栽的方法为处理组。2024年8月3日，CK组种子播种于苗床，处理组种子播种于育苗盆。播种240 d，将CK植株从苗床移栽至育苗钵；2024年8月15日—9月5日，处理组出苗后，株高约3 cm时直接移栽至育苗钵（图1），通过水肥一体化系统进行水肥管理。播种30~390 d，每15 d浇施一次0.1%复合肥（20-20-20+TE，金正大集团），以浇透为止。

1.3　试验方法

1.3.1　播种　CK组种子播种于苗床：将基质填充至苗床，厚度约18 cm；将种子均匀撒播于基质表面，覆盖约2 cm厚基质，经大棚内喷灌系统浇透基质。处理组种子播种于育苗盆：用纱布垫于育苗盘底部，以防蛭石漏失；将蛭石平铺于育苗盘内，深度约5 cm；将装有蛭石的育苗盆放入含适量水的配套托盘中，使蛭石从托盘中吸收水分至充分湿润；将种子撒播于蛭石表层（图1），再覆盖蛭石以盖没种子为宜；最后，将育苗盆从托盘中取出，置于大棚内邻近CK的过道。CK和处理组均通过水肥一体化系统适时补水，保持基质和蛭石湿润，以适宜种子萌发。

1.3.2　出芽率统计　从有芽冒出开始，每2天统计新增的芽数量，统计至播种30 d。

1.3.3　移栽　CK移栽：播种240 d进行移栽；先在育

苗钵中填充1/3高度的育苗基质；取出砧苗，把枳幼苗固定在营养钵口中央位置，再往育苗钵内填充育苗基质，边填充边摇动，待基质装满后提苗，使根系舒展、子叶着生处与基质面基本平齐；最后轻轻压实基质，浇足定根水[10]，共移栽253株。处理移栽：在出苗期分批移栽；先在育苗钵中填满育苗基质，轻轻压实，用竹签在基质中央钻取约5 cm深的孔；取出砧苗后直接插入孔中，使枳幼苗子叶着生处与基质面基本平齐，最后用竹签将孔旁基质拨拢，浇足定根水，共移栽307株（图1）。

A. CK 播种；B. 处理播种；C. CK 移栽；D. 处理移栽。

A. CK sowing; B. Treatment sowing; C. CK transplanting; D. Treatment transplanting.

图1 不同播种和移栽方式

Fig. 1 Different methods of sowing and transplanting

1.3.4 株高、茎粗测定 播种90、240、270、300、330、360、390 d，分别从CK和处理组中随机选择10株（n=10）枳幼苗测定株高、茎粗。株高采用直尺测定，每株测定2次，取平均值；茎粗采用游标卡尺测定距离土面1.5 cm处主茎的粗度，每株测定2次，取平均值；播种390 d，分别测定距离土面1.5 cm处茎粗和距离土面10 cm处茎粗。完成第一次株高、茎粗测定后，将植株旋转90°，进行第二次测定。

1.3.5 叶片数、分枝数和叶片形态测定 播种90、240、390 d，分别从CK和处理组中随机选择5株（n=5）枳幼苗测定分枝数和叶片数；各随机选择10株（n=10）枳幼苗，在每株枳幼苗的中上部摘取1枚功能叶，采用图像处理软件ImageJ（FIJI）测定叶长、叶宽和叶面积。

1.3.6 根系测定 播种90、240、390 d，分别从CK和处理组中随机选择5株（n=5）枳幼苗，采用GYX-A植物根系分析仪（浙江托普云农科技股份有限公司）分析根系扫描图片，获得总根长、根尖数、根表面积、根平均直径。

1.3.7 生物量测定 播种90、240、390 d，分别从CK和处理组中随机选取4株（n=4）枳幼苗，采用电子天平分别测定地上部分、地下部分的鲜质量和干质量；根冠比即为地下部分干质量与地上部分干质量的比值。

1.3.8　根系活力测定　播种390 d，分别从CK和处理组中随机选取4株（n=4），采用苏州格锐思生物科技有限公司的植物根系活力试剂盒（货号：G0124W，微板法，96样）测定根系活力。

1.3.9　叶绿素荧光测定　播种390、393、399 d（均为晴朗天气）的09:00、10:00、11:00，分别从CK和处理组中随机选取4株（n=4）枳幼苗，每株选取1枚植株中上部2025年萌生的叶片，采用MultispeQ V2多功能植物测量仪（美国 Photosynthesis Innovation Center）测定PSⅡ实际光化学效率（Φ_{PSII}）、光下最大光化学效率（F_v'/F_m'）、非光化学淬灭系数（NPQ）。每枚叶片夹取后稳定2 min，连续记录3个读数，取其平均值作为该叶片在该时间点的测定值。最终以3 d测定数据的平均值进行统计分析，以减小日间环境波动带来的误差。

1.3.10　成本比较分析　采用实证研究法，统计分析CK和处理组各播种400粒种子、移栽50株幼苗的用料、用工成本差异。用料成本统计基质、蛭石的费用；播种用工成本：CK统计填充基质、撒种、覆盖基质的时间，处理组统计铺垫纱布、填铺蛭石、浸水、撒种、覆盖蛭石的时间；播种成本按播种30 d的出苗数量分摊。移栽用工成本：CK统计取苗、拌土、装填营养钵、移苗的时间，处理组统计装填营养钵、移苗的时间。

1.4　数据分析

使用Microsoft Excel 2019 v.16.0.10372.20060（Microsoft Corporation，美国）软件进行数据整理、初步统计和独立样本T检验。使用R语言v.4.2.1（R Foundation for Statistical Computing，奥地利）及ggplot2 v.3.3.6包绘图。

2　结果与分析

2.1　出苗比较

CK于播种13~14 d开始出苗，处理组于播种12 d开始出苗，早于CK 1~2 d。处理组播种14、16、18、30 d的出苗数低于CK，其余观测时间点均高于CK；播种16、18、20 d，处理组累计出苗数低于CK；其余观测时间点均高于CK。播种30 d，CK出苗总数为253株，出苗率为63.25%；处理组出苗总数为307株，出苗率为76.75%（表1）。综上，处理组的出苗效果优于CK。

2.2　形态比较

2.2.1　株高　播种90~390 d（2024年11月1日至2025年8月28日），处理组株高始终高于CK。其中，播种90~360 d（2024年11月1日至2025年7月29日），处理组株高极显著高于CK；播种390 d，处理

表1　不同播种方式出苗动态比较

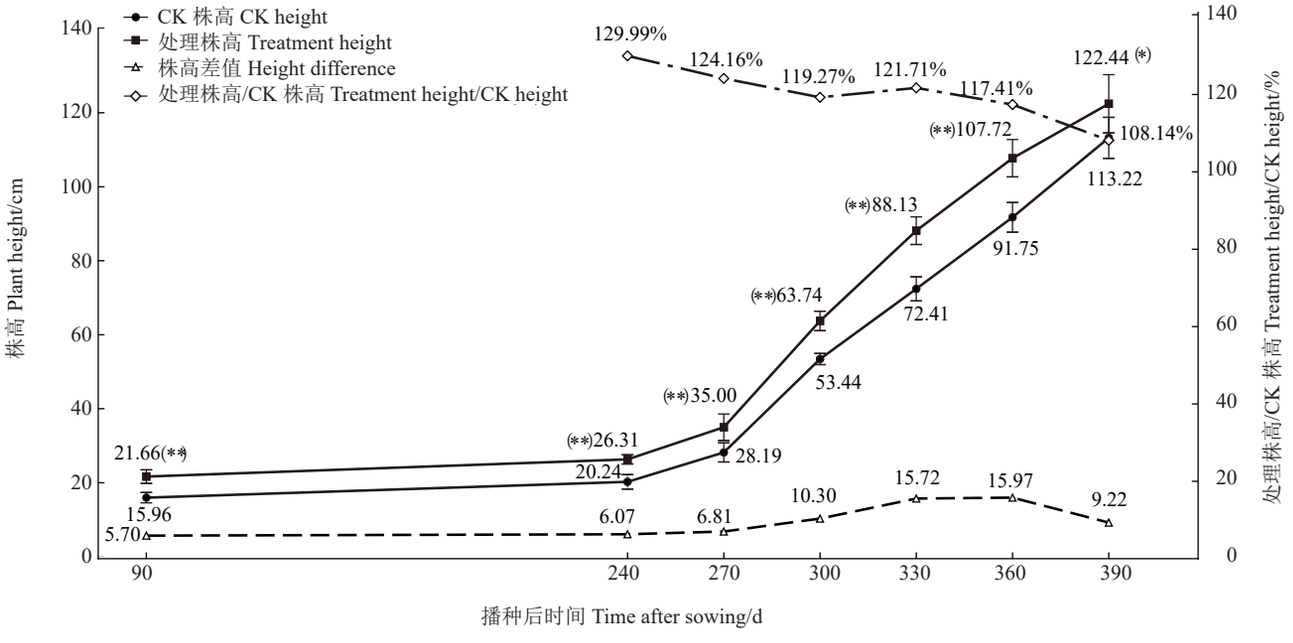
Table 1　Comparison of emergence dynamics under different sowing methods

播种后时间 Time after sowing/d	出苗数 Number of seedlings emerged		出苗总数 Total number Of seedlings emerged		出苗率 Emergence rate/%	
	CK Control	处理 Treatment	CK Control	处理 Treatment	CK Control	处理 Treatment
12	0	5	0	5	0.00	1.25
14	22	17	22	22	5.50	5.50
16	31	22	53	44	13.25	11.00
18	59	44	112	88	28.00	22.00
20	34	55	146	143	36.50	35.75
22	32	61	178	204	44.50	51.00
24	35	39	213	243	53.25	60.75
26	13	30	226	273	56.50	68.25
28	16	27	242	300	60.50	75.00
30	11	7	253	307	63.25	76.75

注：出苗数是指较前一次统计新增的出土幼苗数；出苗总数是指当天统计的出土幼苗总数；出苗率是指出土幼苗总数与种子数（即400颗）的百分比。

Note: Additional seedlings emerged “refers to the number of newly emerged seedlings since the previous observation; Cumulative seedlings emerged” refers to the total number of emerged seedlings recorded on that day; and “Emergence rate” represents the percentage of the total number of emerged seedlings relative to the total number of seeds sown (i.e., 400).

组株高显著高于CK。播种90~240 d(2024年11月1日至2025年3月31日),处于秋冬及初春季节,株高增长比较缓慢;播种270~390 d(2025年4月30日至2025年8月28日),主要处于夏季,株高增长较快。播种90~390 d,CK与处理组的株高差值先增大后减小,峰值出现在播种360 d;播种240~390 d(2025年3月31日至8月28日),处理组与CK株高比值趋于减小,即CK与处理组的株高差异逐渐缩小(图2)。可



株高差值为处理株高与 CK 株高的差值(n=10)。*表示在 0.05 水平上差异显著,**表示在 0.01 水平上差异显著;n.s. 表示无显著差异。下同。

Height difference refers to the difference between the plant height of the treatment and that of the control. (n=10). * indicates a significant difference at the 0.05 level, and ** indicates a significant difference at the 0.01 level; n.s. indicates no significant difference. The same below.

图 2 枳幼苗株高、株高差值及比值

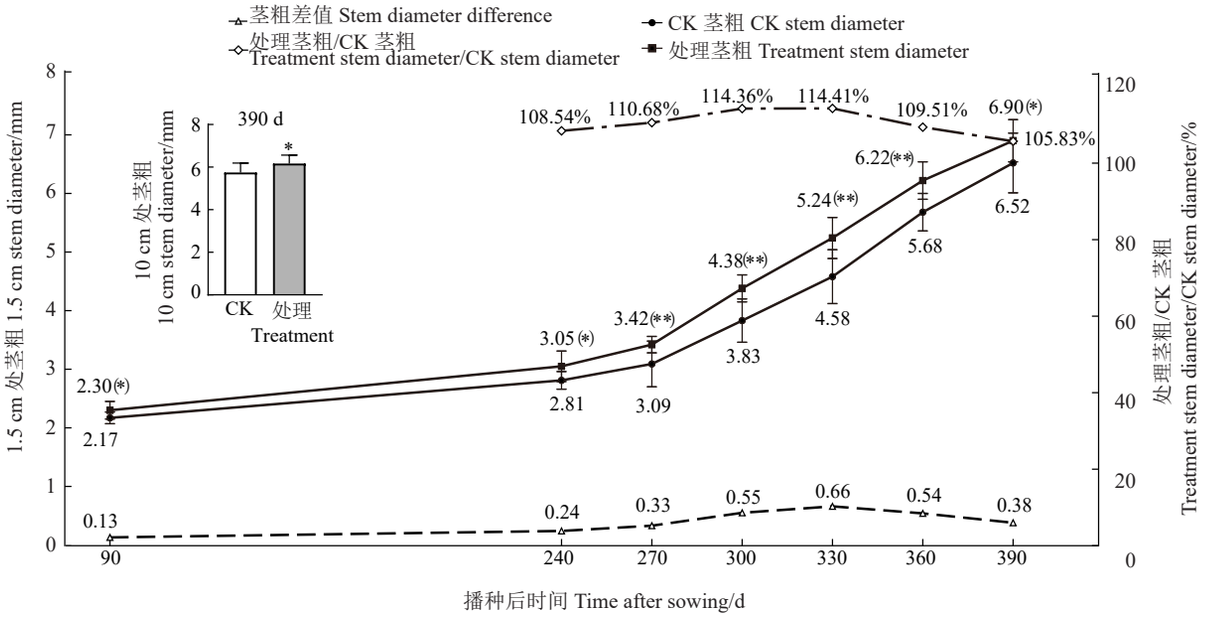
Fig. 2 Plant height, plant height difference and ratio in *Poncirus trifoliata* seedlings

见,处理促进了枳砧株高的增长。

2.2.2 茎粗 播种90~390 d,处理组茎粗均高于CK。其中,播种90、240 d,处理组茎粗显著高于CK;播种270~360 d(2025年4月30日至7月29日),处理组茎粗极显著高于CK;播种390 d,处理组距离土面1.5 cm处和10 cm处茎粗均显著高于CK。播种90~240 d,茎粗增长较缓慢;播种270~390 d,茎粗增长较快。播种90~390 d,处理组与CK茎粗差值及处理组与CK茎粗比值均呈先增大后减小趋势,峰值均出现在播种330 d。播种330~390 d(2025年6月29日至8月28日),由处理组与CK的茎粗比值可知,两者茎粗趋于一致(图3)。可见,处理促进了枳砧茎粗的增长。

2.2.3 分枝数、叶片数和叶片形态 分别于播种90 d(即将入冬)、240 d(翌年入春后CK移栽时)、390 d(嫁接前),测定枳幼苗的分枝数、叶片数和叶片形态。播种90 d,处理组和CK均无分枝;播种240 d,处理组分枝数极显著高于CK;播种390 d,处理组分枝数显著高于CK(图4-A~B)。播种90、240 d,处理组叶片数均极显著高于CK;播种390 d,处理组叶片数显著高于CK(图4-C)。播种240 d,处理组往年生叶片数(2024年萌生)显著少于CK,表明处理加速了往年生叶片在冬季脱落(图4-D)。播种90 d(2024年萌生的叶,下同),处理组叶长极显著大于CK;播种240 d和390 d(2025年萌生的叶,下同),处理组虽大于CK,但无显著差异。播种90 d和390 d,处理组叶宽、叶面积极显著大于CK;播种240 d,处理组虽大于CK,但无显著差异;CK和处理组2025年萌生的成熟功能叶的叶长、叶宽、叶面积均极显著大于2024年萌生的成熟功能叶(图4-E)。

2.2.4 根系形态 处理组的总根长、根尖数、根表面



茎粗差值为处理茎粗与 CK 茎粗的差值（n=10）。

Stem diameter refers to the difference between the stem diameter of the treatment and that of the control (n=10).

图 3　枳幼苗茎粗、茎粗差值及比值

Fig. 3　Stem diameter，stem diameter difference and ratio in *Poncirus trifoliata* seedlings

积在播种90 d和240 d极显著大于CK；在播种390 d大于CK，但无显著差异。而处理组的根平均直径在播种90、240、390 d与CK均无显著差异（图5）。可见，处理早期促进了枳砧根系的生长，但在处理末期两者并无显著差异。

2.3　生物量和根系活力比较

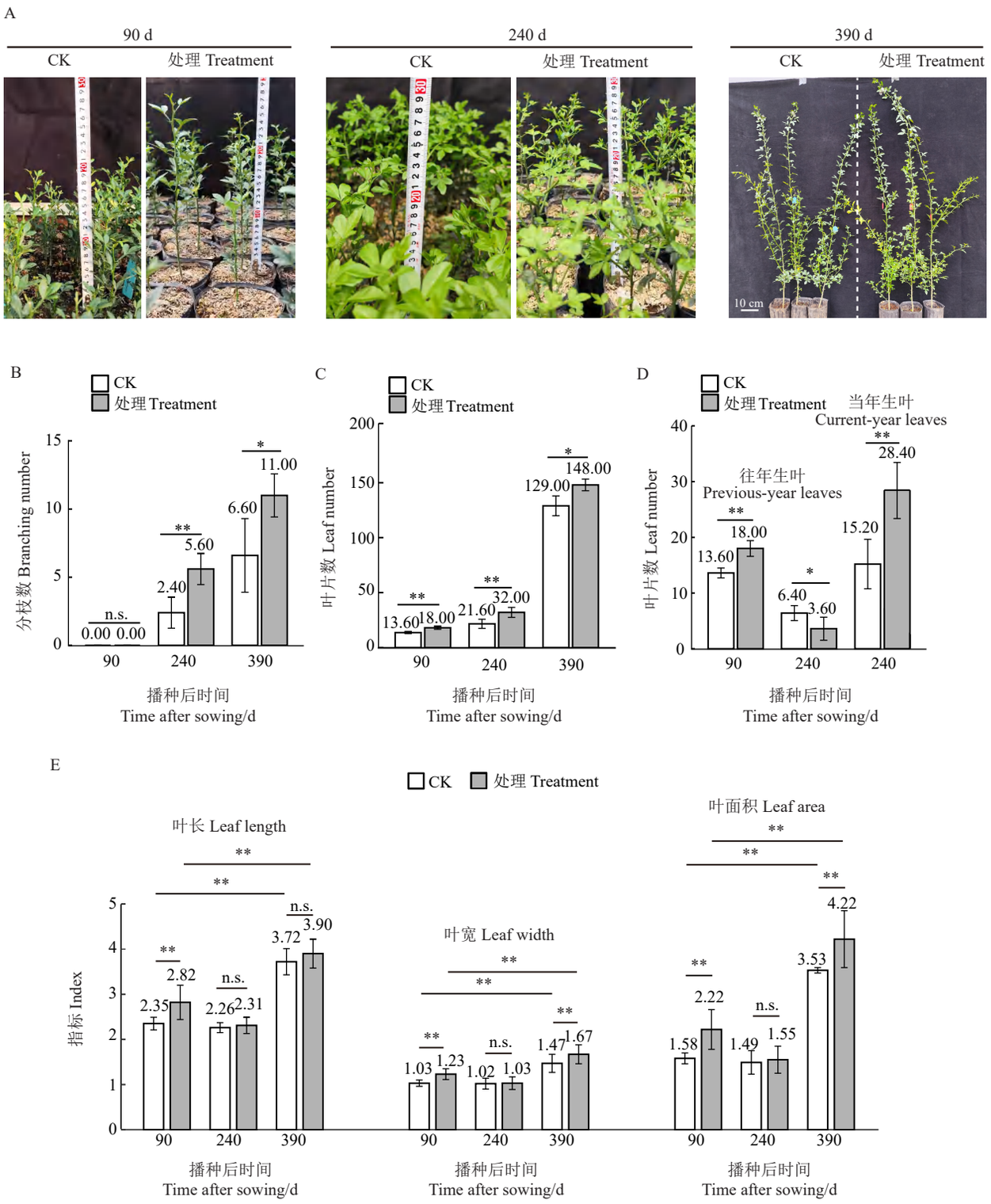
处理组地上部分鲜质量在播种90 d和240 d极显著大于CK，在播种390 d显著大于CK。处理组地下部分鲜质量、地上部分干质量、地下部分干质量、总鲜质量、总干质量在播种90 d和240 d极显著大于CK；在播种390 d大于CK，但无显著差异。处理组根冠比在播种90、240、390 d与CK均无显著差异；其中，播种390 d，两者的根冠比相同。播种390 d，处理组根系活力高于CK，但无显著差异（图6）。可见，处理促进了枳砧生物量的积累和根系活力的增强。

2.4　叶绿素荧光参数比较

植物叶绿素荧光参数是研究植物光合作用的有效探针[11]。$\Phi_{PS\,II}$是光系统Ⅱ的有效光化学量子产量，代表光合反应中心PSⅡ的光合效率，反映了光合反应中心在部分关闭情况下的实际捕获能量的传递效率[12-13]；F_v'/F_m'反映了开放的PSⅡ反应中心的光能捕获效率[14]；非光化学淬灭系数（NPQ）反映PSⅡ天线色素吸收的不能用于光合电子传递而以热形式耗散的光能[12, 15]，是代表光保护的重要指标[16]。在09:00—11:00，CK和处理组的$\Phi_{PS\,II}$、F_v'/F_m'逐渐降低，NPQ逐渐升高，处理组$\Phi_{PS\,II}$高于CK，但无显著差异；在09:00时，处理组F_v'/F_m'显著高于CK，而NPQ显著低于CK；在10:00—11:00时，处理组F_v'/F_m'高于CK，而NPQ低于CK，均无显著差异（图7）。上述表明植株受到的强光、高温胁迫逐渐增强时，光能转化效率则逐渐下降，需要增强NPQ以强化光保护能力；同时也表明CK通过增强非光化学淬灭耗散过剩光能，但导致光能利用效率下降[17-19]。

2.5　成本差异分析

CK和处理组培育枳砧的农事操作只在CK移栽前存在差异。这期间导致培育成本差异的主要环节是播种、移栽和施肥。在播种环节，处理组相比CK节约了大量基质和用工成本，每成功培育1株苗，可节约成本0.167元。在移栽环节，两者的基质用量相同，成本差异由用工量决定。由于蛭石松软，处理组可徒手轻松取苗；处理组可先将基质填满育苗钵，通过大棚内喷灌系统浇透基质，省去拌土工序；处理组移苗时根系短，侧根极少，移苗效率更高。上述三方面因素使得处理组每移栽1株苗较CK缩短26.8 s，省工37.85%，用工成本降低0.186

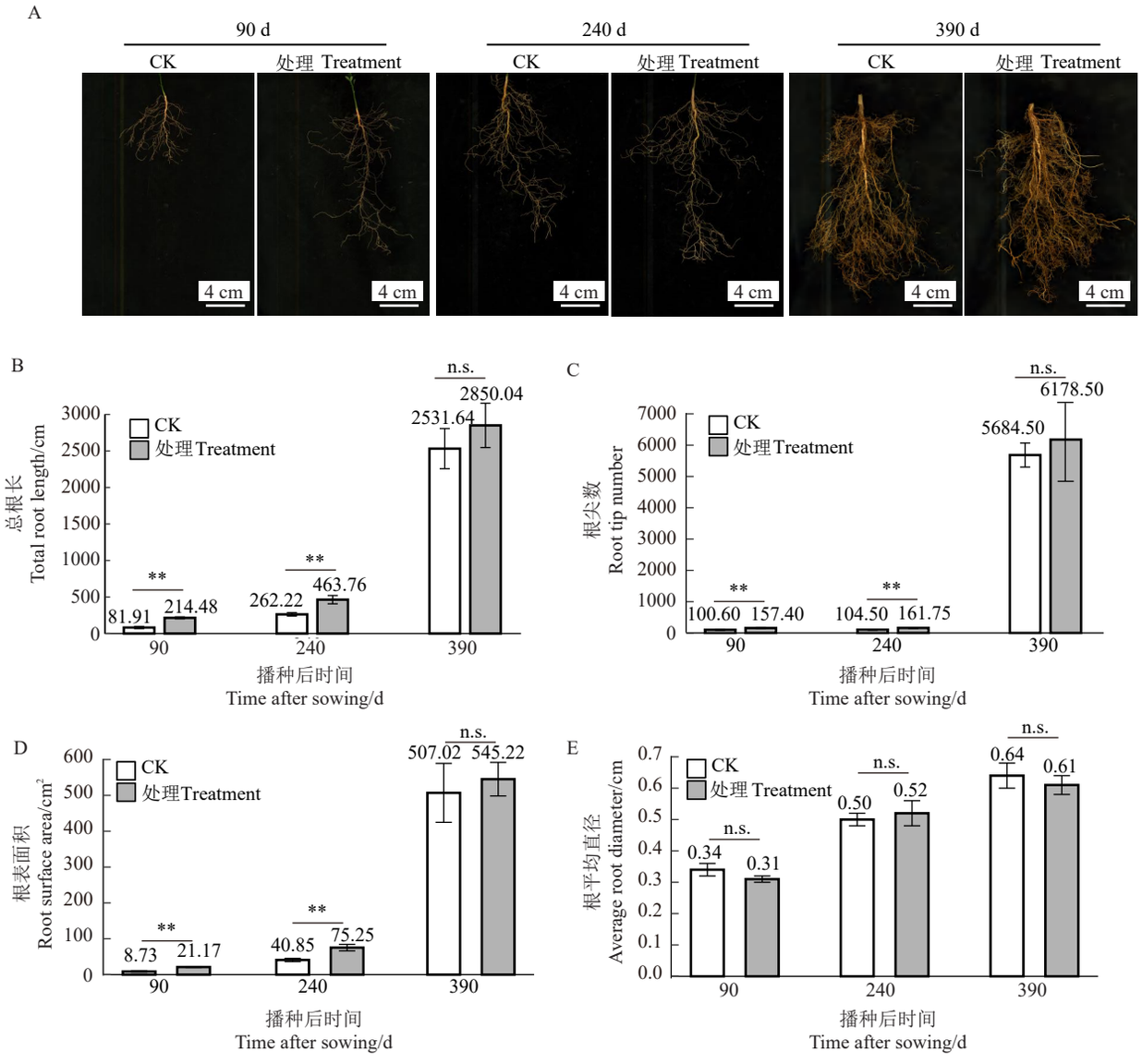


A. 植株分枝对比；B. 分枝数（n=5）；C. 叶片数（n=5）；D. 往年生叶和当年生叶片数（n=5）；E. 叶长（cm）、叶宽（cm）和叶面积（cm²）（n=10）。往年生叶指 2024 年萌生叶片，当年生叶指 2025 年萌生叶片。

A. Comparison of plant branching; B. Number of branches (n=5); C. Number of leaves (n=5); D. Number of previous-year leaves and current-year leaves (n=5); E. Leaf length (cm), leaf width (cm), and leaf area (cm²) (n=10). Previous-year leaves refers to the leaf grown in 2024，and Current-year leaves refers to the leaf grown in 2025.

图 4 枳幼苗分枝数、叶片数和叶形比较

Fig. 4 Comparison of branch number, leaf number and leaf shape in *Poncirus trifoliata* seedlings



A. 根系扫描图；B. 总根长（*n*=5）；C. 根尖数（*n*=5）；D. 根表面积（*n*=5）；E. 根平均直径（*n*=5）。

A. Root system scan; B. Total root length (*n*=5); C. Root tip number (*n*=5); D. Root surface area (*n*=5); E. Average root diameter (*n*=5).

图 5　枳幼苗根系形态比较

Fig. 5　Comparison of root system morphology in *Poncirus trifoliata* seedlings

元。在施肥环节，播种30~240 d，处理组较CK增加肥料成本0.076元。计算培育1万株枳砧在上述3个环节中的育苗基质和用工成本，CK为2.155万元，处理组为1.878万元，处理组较CK节约成本0.277万元（表2）。据此推算，具备30万株育苗能力的企业，采用出苗期移栽方法培育枳砧，每年可节约成本8.31万元。

3　讨　论

3.1　出苗期移栽时机选择

研究结果表明，播种于蛭石的种子发育而成的枳幼苗，其株高低于3 cm时，根系直挺、须根极少；而株高超过4 cm后，根系因受育苗盘深度限制而发生弯折。另外，蛭石是一种天然、无机、无毒的矿物质，具有高度的持水能力，通气性好，是种子发芽的理想介质[20]；但养分含量较低，不能为植株后期生长提供足够营养。因此，播种于蛭石的种子发育成幼苗后，宜在株高接近3 cm时移栽。

3.2　对形态构建的影响

播种240 d，CK与处理组的农艺措施差异主要为种植密度，CK平均种植密度约为1株•16 cm^{-2}，处理组种植密度约为1株•100 cm^{-2}。前人研究结果表

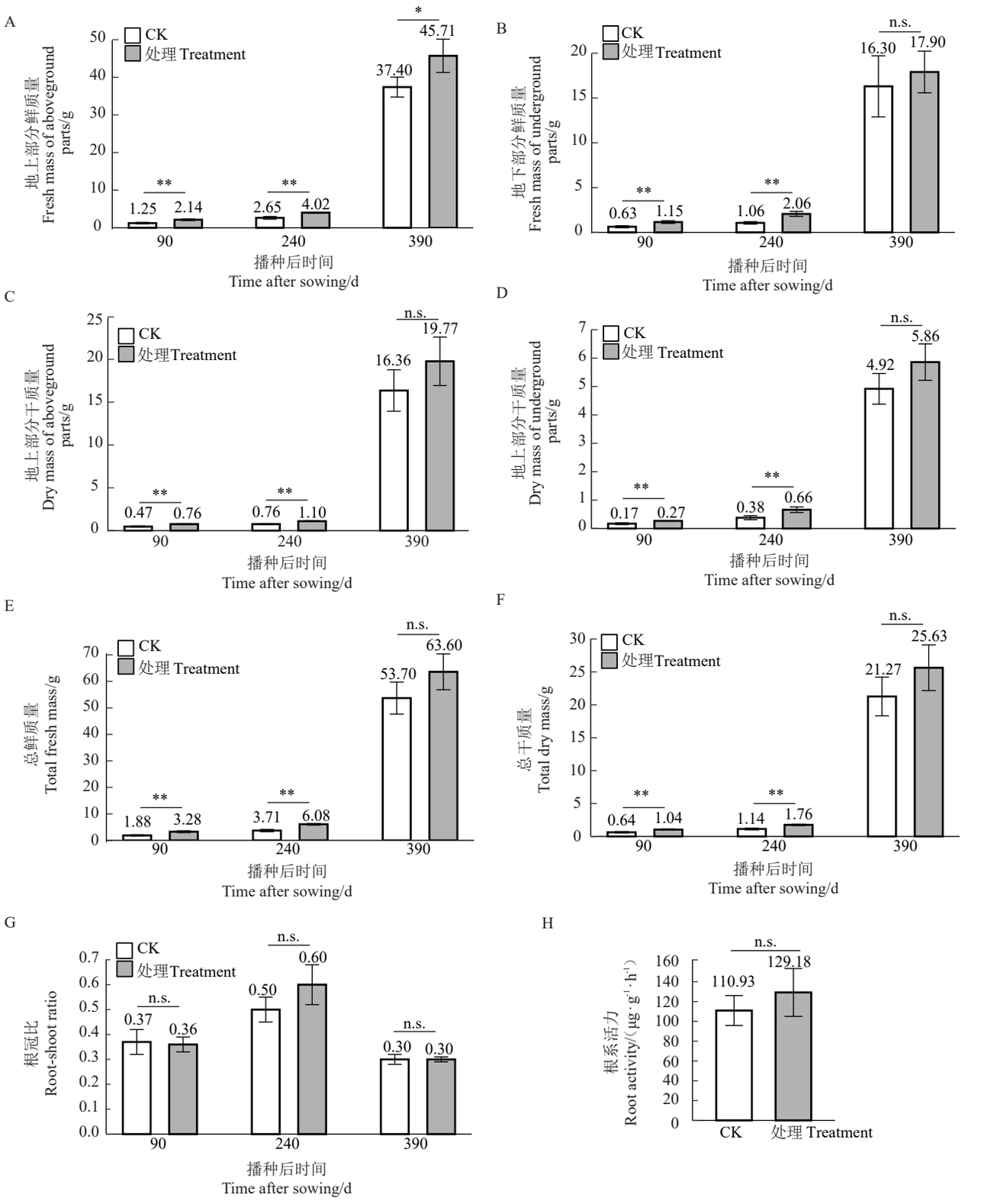


图 6 枳幼苗生物量和根系活力比较

Fig. 6 Comparison of biomass and root activity in *Poncirus trifoliata* seedlings

明，随着种植密度的增加或低密度种植相较高密度种植，紫花苜蓿[6]、中棉113[8]的株高、茎粗，紫花苜蓿[6]、大豆[21]的分枝数，睡莲[22]、杂交构树[23]的叶片数，林下草珊瑚[24]的叶长、叶宽、叶面积，水稻秧苗[25]的叶面积、总根长、根表面积、根平均直径，辣椒品种DU01[26]盛果期后的叶面积，南麦618[27]的单茎绿叶

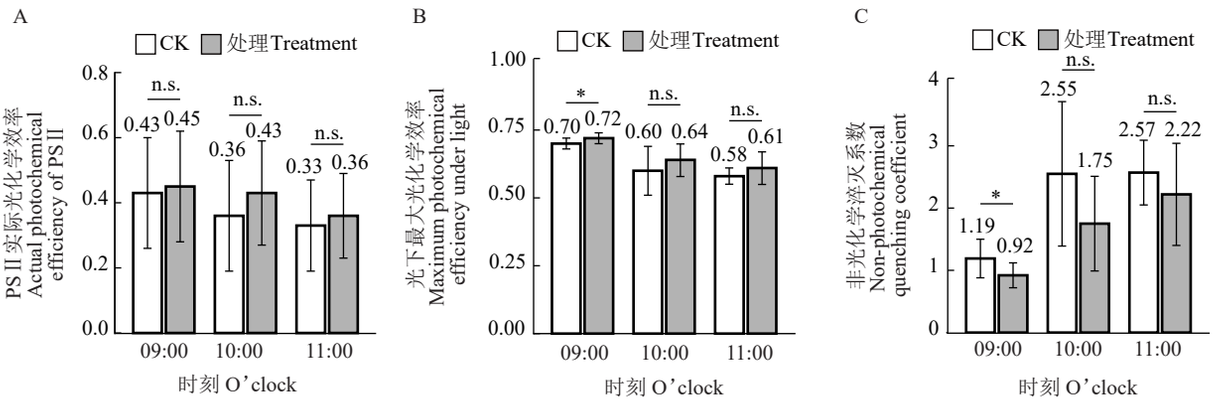


图 7　枳幼苗叶绿素荧光参数比较

Fig. 7　Comparison of chlorophyll fluorescence parameters in *Poncirus trifoliata* seedlings

表 2　不同移栽方式育苗成本主要差异

Table 2　Main differences in seedling raising cost under different transplanting methods

组别 Groups	播种费用组成 Composition of sowing costs	移栽费用组成 Composition of transplanting costs	肥料费用组成 Composition of fertilizer costs	万株费用 Cost per 10 000 seedlings / 10 000 yuan
CK	播种400粒种子，出苗253株。基质用量2包；1人工作300 s。 每株成本为：(22×2+300÷3600÷8×200)÷253=0.182元。 Sowing 400 seeds, resulting in 253 seedlings grown. Nutrient soil used: 2 bags; labor input: 1 person working for 300 s. Cost per seedling: (22 × 2 + 300 ÷ 3600 ÷ 8 × 200) ÷ 253 = 0.182 yuan.	每包基质可装满15个育苗钵。1人移栽50株，取苗用时4 min，拌土、装袋、移苗用时55 min，每移栽1株用时70.8 s。 每株成本为：22÷15+70.8÷3600÷8×200=1.958元。 Each bag of soil can fill 15 seedling bags. One person transplants 50 seedlings, with seedling removal taking 4 min, and soil mixing, bag filling, and transplanting taking 55 min, resulting in a total time of 70.8 s per transplanted seedling. Cost per seedling: 22 ÷ 15 + 70.8 ÷ 3600 ÷ 8 × 200 = 1.958 yuan.	播种30~240 d，CK种植面积4000 cm²，处理组种植面积30 000 cm²。每次喷施肥料150 L，浓度为0.1%，肥料费用为2.25元，共喷施14次。肥料费用先按种植面积分摊到CK和处理组，再根据两者幼苗数量计算每株成本。 CK每株成本为：2.25×4000÷34000×14÷253=0.015元。 处理组每株成本为：2.25×30000÷34000×14÷307=0.091元 From 30 to 240 days after sowing, the cultivation areas for CK and the treatment group were 4000 cm² and 30 000 cm², respectively. Fertilizer was applied 14 times, with each application consisting of 150 L at a concentration of 0.1%, costing 2.25 yuan. The fertilizer cost was first allocated proportionally between the CK and treatment groups based on their respective cultivation areas, and then further allocated per seedling based on the number of plants in each group (253 plants in CK). The cost per seedling was calculated as follows: CK group: 2.25 × (4000 ÷ 34 000) × 14 ÷ 253 = 0.015 yuan. Treatment group: 2.25 × (30 000 ÷ 34 000) × 14 ÷ 307 = 0.091 yuan.	2.155
处理 Treatment	播种400粒种子，出苗307株。蛭石用量0.1包，1人工作150 s。每株播种成本为：(35×0.1+150÷3600÷8×200)÷307=0.015元。 Sowing 400 seeds, resulting in 307 seedlings grown. Vermiculite used: 0.1 bag; labor input: 1 person working for 150 s. Cost per seedling: (35 × 0.1 + 150 ÷ 3600 ÷ 8 × 200) ÷ 307 = 0.015 yuan.	每包基质可装满15个育苗钵。1人移栽50株，装袋用时30 min，移苗用时400 s，每移栽1株用时44 s。 每株移栽成本为：22÷15+44÷3600÷8×200=1.772元。 Each bag of vermiculite can fill 15 seedling bags. One person transplants 50 seedlings, with bag filling taking 30 min and transplanting taking 400 s, resulting in a total time of 44 s per transplanted seedling. Cost per seedling for transplanting: 22 ÷ 15 + 44 ÷ 3600 ÷ 8 × 200 = 1.772 yuan.		1.878

注：蛭石：35 元•包$^{-1}$；基质：22 元•包$^{-1}$；肥料：75 元•包$^{-1}$（每包 5 kg）；工价：200 元•d^{-1}，每天工作时间 8 h。

Note: Vermiculite: 35 yuan per bag; Growing medium, 22 yuan per bag; Fertilizer: 75 yuan per bag (5 kg per bag); Labor, 200 yuan per day, with a standard working day of 8 hours.

面积以及大豆[28]的根表面积均降低，本研究结果与前人研究相似，处理组整体表现出更优的生长发育态势。然而，这并非普遍规律，如青贮玉米株高和茎粗随种植密度的增加而呈抛物线变化趋势[29]；不同行距棉花株高在打顶后则表现为随种植密度增加而增高。该结果差异可能源于植物种类、品种或试验处理的不同。

补偿性生长是生物在进化过程中为适应环境和营养变化经过自然选择的结果[30]。Bohman[31]于1955年首次报道了肉牛的补偿性生长，而植物补偿

性生长早期研究主要聚焦于被采食后的生长[32-33]。近年来，前人就旱后复水[34]、不同遮阴条件[35]等对植物补偿性生长展开了深入研究。本研究中，播种240 d，CK可能因高密度种植而引发一定的种内竞争；由前述试验结果可知，相较处理组，CK表现出生长受抑制的胁迫状态。播种240 d，移栽解除了这一胁迫因素，CK植株从胁迫生存状态转向适宜生长状态。播种390 d相较播种240 d，处理组与CK在株高、茎粗、分枝数、叶片数上的差异减小，这可能是CK从高密度种植环境转向低密度种植环境后发生补偿性生长的结果。

3.3 对生理活力的影响

生物量的积累是植物生长状况的综合体现。本研究发现，播种240 d，处理组的地上、地下及总生物量均极显著高于CK。这可能是因为CK在此阶段处于高密度种植状态，植株间对光、水、养分等资源的激烈竞争抑制了个体生长[36-38]。播种390 d，尽管CK在移栽后可能发生补偿性生长，使其生物量指标与处理组的差距缩小，但处理组的生物量指标仍保持优势。这表明出苗期移栽所赋予的早期生长优势具有持续性，是处理组植株维持更高生理活力的物质基础。

根系活力是衡量根系吸收功能的关键指标。本研究结果显示，处理组根系活力在播种390 d高于CK，这与生物量的变化趋势相吻合。前人研究表明，高种植密度会加速作物根系的衰老，降低根系活力[39-40]。本研究中，CK在移栽前长期处于高密度胁迫下，其根系功能可能受到一定程度抑制，即便后期移栽，其根系活力也未能完全达到处理组水平，这表明出苗期移栽有利于维持枳砧在生长后期具有更强的养分与水分吸收潜力。

叶绿素荧光参数是评价植物光合机构功能和光能利用效率的重要探针[11]。在09:00—11:00，随着光照和温度的升高，CK和处理组植株的$\Phi_{PS\,II}$、F_v'/F_m'均逐渐降低，NPQ逐渐升高，这是植物在强光、高温胁迫下，通过下调光能转化效率、增强热耗散以避免光损伤的典型生理响应，与前人研究结果基本一致[12-13, 41-42]。本研究进一步发现，处理组$\Phi_{PS\,II}$、F_v'/F_m'高于CK，NPQ低于CK，这表明与CK相比，处理组植株的光合反应中心具有更高的光能转化效率，且仅需较低水平的热耗散即可实现光保护与光化学效率的平衡[17]。这一优势可能源于处理组植株更健壮，从而对强光、高温胁迫环境的适应性更强。

3.4 育苗方法的选择

选择枳砧育苗方法时，主要考虑砧木质量、经济效益、苗圃大小三方面因素。

枳砧嫁接高度和粗度是衡量其质量的重要指标。提高枳砧嫁接高度，可增强植株的抗寒性、抗脚腐病能力，促进植株提前结果，发挥丰产性能，树冠相较同龄低砧植株明显矮小[43]。在实际生产中，嫁接口高度一般为10 cm[43]。重庆市地方标准《柑橘容器苗繁育技术规程》[44]规定，当砧木离土面15 cm以上部位的直径达0.5 cm时，即可嫁接。四川省地方标准《柑橘容器育苗技术规程》[45]明确，砧木苗离地面10~15 cm高处的直径达到0.4~0.6 cm时，即可嫁接。金方伦等[46]以枳作为砧木嫁接的1年生纽荷尔脐橙苗为试材，研究了不同直径砧木对柑橘苗生长发育的影响，建议优先选用直径为6.0~8.0 mm的砧木，其次选用直径5.0~6.0 mm和8.0~9.0 mm的砧木。在本研究中，播种390 d，测定离土面10 cm处的枳茎粗，处理组平均茎粗为6.16 mm，CK为5.74 mm。其中，处理组符合金方伦等提出的首选标准，CK符合次选标准；处理组茎粗高于CK，表明处理组砧木质量高于CK。

经测算，培育1万株枳砧时，处理组较CK节约成本2770元。对于具备30万株育苗能力的企业，采用此处理方法培育枳砧，每年可节约成本8.31万元，经济效益显著。

以培育1年生嫁接苗（自嫁接之日起计算）为例，若苗圃面积相对充足，或嫁接苗能在嫁接翌年7月前全部出圃，为8月枳幼苗的出苗期移栽腾出场地，则宜采用出苗期移栽方法；若嫁接苗需在嫁接次年8月以后出圃，且苗圃满负荷运行，则只能采用常规育苗方法。

4 结 论

采用出苗期移栽方法培育的柑橘枳砧整体表现出更优的生长发育态势、更强的生理活力，尤其是茎粗显著增加，更适宜嫁接。出苗期移栽方法较常规培育方法节约材料、减少人工、降低成本。具备30万株育苗能力的企业，采用出苗期移栽方法培育枳砧，每年可节约成本8.31万元。在苗圃面积允许时，建议优先采用该方法。

参考文献 References：

[1] 国家统计局农村社会经济调查司 . 中国农村统计年鉴-2024[M]. 北京：中国统计出版社，2024.
Department of Rural Socioeconomic Survey，National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook-2024[M]. Beijing：China Statistics Press，2024.

[2] 周铮荣，赵和国，苏翰英，罗旭钊，孙紫青，马先锋，朱亦赤 . 不同 LED 红蓝光质处理对枳幼苗生长的影响[J]. 果树学报，2024，41(12)：2498-2511.
Zhou Zhengrong，Zhao Heguo，Su Hanying，Luo Xuzhao，Sun Ziqing，Ma Xianfeng，Zhu Yichi. Effects of different LED red and blue light quality treatments on the growth of *Poncirus trifoliata* seedlings[J]. Journal of Fruit Science，2024，41(12)：2498-2511.

[3] 周铮荣，赵和国，罗旭钊，盛玲，马先锋，朱亦赤 . 秋季补光对枳幼苗生长的影响[J]. 中国南方果树，2025，54(4)：12-16.
Zhou Zhengrong，Zhao Heguo，Luo Xuzhao，Sheng Ling，Ma Xianfeng，Zhu Yichi. Effects of supplementary light in autumn on growth of *Poncirus trifoliata* seedlings[J]. South China Fruits，2025，54(4)：12-16.

[4] 崔栋，王同超，杨松林，任佰朝，高英波，于宁宁，张吉旺 . 灌溉方式和种植密度优化协同提高夏玉米产量和水分利用效率[J]. 作物学报，2025，51(11)：3026-3037.
Cui Dong，Wang Tongchao，Yang Songlin，Ren Baizhao，Gao Yingbo，Yu Ningning，Zhang Jiwang. Optimization of irrigation methods and planting density synergistically increases yield and water use efficiency in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica，2025，51(11)：3026-3037.

[5] Hou P，Liu Y E，Liu W M，Liu G Z，Xie R Z，Wang K R，Ming B，Wang Y H，Zhao R L，Zhang W J，Wang Y J，Bian S F，Ren H，Zhao X Y，Liu P，Chang J Z，Zhang G H，Liu J Y，Yuan L Z，Zhao H Y，Shi L，Zhang L L，Yu L，Gao J L，Yu X F，Shen L G，Yang S Z，Zhang Z D，Xue J Q，Ma X F，Wang X Q，Lu T Q，Dong B C，Li G，Ma B X，Li J Q，Deng X F，Liu Y H，Yang Q，Fu H，Liu X Z，Chen X P，Huang C L，Li S K. How to increase maize production without extra nitrogen input[J]. Resources，Conservation and Recycling，2020，160：104913.

[6] 张恩天，于铁峰，郝凤，高凯 . 种植密度和施肥量对紫花苜蓿生长特性的影响[J]. 草原与草坪，2024，44(6)：217-225.
Zhang Entian，Yu Tiefeng，Hao Feng，Gao Kai. Effects of planting density and fertilization on growth characteristics of alfalfa[J]. Grassland and Turf，2024，44(6)：217-225.

[7] 康晨，谭燕，罗峰，孙守钧 . 种植密度对饲用高粱农艺性状、生物产量和品质的影响[J]. 天津农学院学报，2023，30(1)：22-26.
Kang Chen，Tan Yan，Luo Feng，Sun Shoujun. Effect of planting density on agronomic characters，biological yield and quality of forage sorghum[J]. Journal of Tianjin Agricultural University，2023，30(1)：22-26.

[8] 董祯林，万素梅，熊世武，马云珍，毛廷勇，杨北方，骆磊，刘超群，陈国栋，李亚兵 . 不同种植密度对中棉 113 农艺性状及产量的影响[J]. 新疆农业科学，2024，61(5)：1102-1111.
Dong Zhenlin，Wan Sumei，Xiong Shiwu，Ma Yunzhen，Mao Tingyong，Yang Beifang，Luo Lei，Liu Chaoqun，Chen Guodong，Li Yabing. Effects of different planting densities on agronomic traits and yield of Zhongmian 113[J]. Xinjiang Agricultural Sciences，2024，61(5)：1102-1111.

[9] 谭志友 . 柑橘育苗新技术[M]. 重庆：重庆出版社，2007.
Tan Zhiyou. New citrus seedling cultivation technology[M]. Chongqing：Chongqing Press，2007.

[10] 沈兆敏 . 柑橘无病毒容器苗的培育[J]. 科学种养，2007(5)：44-45.
Shen Zhaomin. Cultivation of virus- free containerized citrus seedlings[J]. Scientific Cultivation，2007(5)：44-45.

[11] Baker N R. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis[J]. Physiologia Plantarum，1991，81(4)：563-570.

[12] 王碧莹，盛连喜，郭静，高英志，何春光 . 不同施氮处理下短梗五加与花楸叶绿素荧光参数日变化的比较研究[J]. 东北师大学报(自然科学版)，2019，51(3)：107-114.
Wang Biying，Sheng Lianxi，Guo Jing，Gao Yingzhi，He Chunguang. Comparative study on diurnal changes of chlorophyll fluorescence parameters of *Acanthopanax sessiliflorus* Seem. and *Sorbus pohuashanensis* Hedl. under different nitrogen fertilizer treatments[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)，2019，51(3)：107-114.

[13] Bilger W，Björkman O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light- induced absorbance changes，fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*[J]. Photosynthesis Research，1990，25(3)：173-185.

[14] 黄苏豫，刘佳微，刘筱，杨丽丽，黄安林，吴明开 . 夏季光温耦合对白及驯化苗生长发育及多糖含量影响[J]. 华中农业大学学报，2023，42(1)：60-65.
Huang Suyu，Liu Jiawei，Liu Xiao，Yang Lili，Huang Anlin，Wu Mingkai. Effects of light- temperature coupling in summer on growth and development and polysaccharide content of domesticated *Bletilla striata* seedlings[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2023，42(1)：60-65.

[15] 张守仁 . 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报，1999，34(4)：444-448.
Zhang Shouren. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. Chinese Bulletin of Botany，1999，34(4)：444-448.

[16] 许斌，吴静逸，吴键枫，苏新宇，赵君茹，朱周俊，李建新 . 不同锥栗农家品种幼树生长、光合和叶绿素荧光特性比较[J]. 果树学报，2025，42(8)：1786-1796.
Xu Bin，Wu Jingyi，Wu Jianfeng，Su Xinyu，Zhao Junru，Zhu Zhoujun，Li Jianxin. Comparison of growth，photosynthetic，and chlorophyll fluorescence characteristics of different native culti-

vars in *Castanea henryi*[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(8)：1786-1796.

[17] 邢乃林，严蕾艳，王迎儿，黄芸萍，王毓洪 . 本砧嫁接对西瓜苗期高温耐性的影响[J]. 果树学报，2025，42(10)：2373-2381.
Xing Nailin，Yan Leiyan，Wang Yinger，Huang Yunping，Wang Yuhong. Effect of wild watermelon rootstock grafting on high temperature tolerance of watermelon seedlings[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(10)：2373-2381.

[18] Gilmore A M. Mechanistic aspects of xanthophyll cycle-dependent photoprotection in higher plant chloroplasts and leaves[J]. Physiologia Plantarum，1997，99(1)：197-209.

[19] Johnson M P，Ruban A V. Restoration of rapidly reversible photoprotective energy dissipation in the absence of PsbS protein by enhanced ∆pH[J]. Journal of Biological Chemistry，2011，286(22)：19973-19981.

[20] 姚旭，赵海涛，颜志俊，陈刚，李天鹏，赵雷明，李宗宇，张苏波 . 在菇渣育苗基质中添加蛭石对培育番茄幼苗的影响[J]. 江西农业学报，2016，28(4)：23-27.
Yao Xu，Zhao Haitao，Yan Zhijun，Chen Gang，Li Tianpeng，Zhao Leiming，Li Zongyu，Zhang Subo. Effects of adding vermiculite into mushroom residue substrate on cultivation of tomato seedlings[J]. Acta Agriculturae Jiangxi，2016，28(4)：23-27.

[21] 张娜，蔡丽君，刘婧琦，杨旭，郑伟，唐晓东，王智达，盖志佳 . 不同栽培方式和种植密度对大豆抗倒伏性能及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报，2025，56(5)：26-35.
Zhang Na，Cai Lijun，Liu Jingqi，Yang Xu，Zheng Wei，Tang Xiaodong，Wang Zhida，Gai Zhijia. Effects of different cultivation methods and planting density on lodging resistance and yield of soybean[J]. Journal of Shenyang Agricultural University，2025，56(5)：26-35.

[22] 孙春青，戴忠良，潘跃平 . 不同种植密度对睡莲切花品质的影响[J]. 北方园艺，2014(6)：70-71.
Sun Chunqing，Dai Zhongliang，Pan Yueping. Effect of different planting density on quality of cut flower of *Nymphaea* spp.[J]. Northern Horticulture，2014(6)：70-71.

[23] 曹力凡，高正龙，陈谭星，颜慧萍，孟庆法，魏攀鹏，魏悦，王品胜 . 种植密度对杂交构树生长和营养成分的影响[J]. 饲料研究，2021，44(7)：133-137.
Cao Lifan，Gao Zhenglong，Chen Tanxing，Yan Huiping，Meng Qingfa，Wei Panpeng，Wei Yue，Wang Pinsheng. Effect of different planting densities on growth and nutrient composition of hybrid *Broussonetia papyrifera*[J]. Feed Research，2021，44(7)：133-137.

[24] 林熙，于耀泓，盘李进，李晓垠，莫彦逊，邱权，苏艳，何茜 . 种植密度和施肥量对林下草珊瑚产量及品质的影响[J]. 植物资源与环境学报，2025，34(2)：52-61.
Lin Xi，Yu Yaohong，Pan Lijin，Li Xiaoyin，Mo Yanxun，Qiu Quan，Su Yan，He Qian. Effects of planting density and fertilization amount on yield and quality of understory *Sarcandra glabra*[J]. Journal of Plant Resources and Environment，2025，34(2)：52-61.

[25] 潘圣刚，闻祥成，田华，陈益培，莫钊文，段美洋，唐湘如 . 播种密度和壮秧剂对水稻秧苗生理特性的影响[J]. 华南农业大学学报，2015，36(3)：32-36.
Pan Shenggang，Wen Xiangcheng，Tian Hua，Chen Yipei，Mo Zhaowen，Duan Meiyang，Tang Xiangru. Effects of broadcasting density and seedling strengthen agent on physiological characteristics of rice seedling[J]. Journal of South China Agricultural University，2015，36(3)：32-36.

[26] 苏丹，胡明文，蓬桂华，朱文超，廖芳芳，宋拉拉 . 种植密度对辣椒 DU01 光合特性及产量的影响[J]. 中国瓜菜，2022，35(2)：67-71.
Su Dan，Hu Mingwen，Peng Guihua，Zhu Wenchao，Liao Fangfang，Song Lala. Effects of plant density on photosynthetic characteristics and yield of pepper cultivar DU01[J]. China Cucurbits and Vegetables，2022，35(2)：67-71.

[27] 蒋进，王淑荣，张连全，冯晓，左娟，刘利 . 种植密度和施肥量对南麦 618 农艺性状、叶绿素含量及产量的影响[J]. 南方农业学报，2017，48(3)：416-421.
Jiang Jin，Wang Shurong，Zhang Lianquan，Feng Xiao，Zuo Juan，Liu Li. Effects of planting density and fertilizer application rate on agronomic traits，chlorophyll content，leaf area and yield of wheat Nanmai 618[J]. Journal of Southern Agriculture，2017，48(3)：416-421.

[28] 马兆惠，车仁君，王海英，张惠君，谢甫绨 . 种植密度和种植方式对超高产大豆根系形态和活力的影响[J]. 中国农业科学，2015，48(6)：1084-1094.
Ma Zhaohui，Che Renjun，Wang Haiying，Zhang Huijun，Xie Futi. Effect of different seeding rates and planting patterns on root morphological traits and root vigor of super-high-yield soybean cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica，2015，48(6)：1084-1094.

[29] 柴尔政，马佳丽，张红娟，宋淑珍，张真荣，李平，李浩霖 . 不同种植密度对引大灌区青贮玉米产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2024，43(9)：33-38.
Chai Erzheng，Ma Jiali，Zhang Hongjuan，Song Shuzhen，Zhang Zhenrong，Li Ping，Li Haolin. Influence of planting density on yield and quality of forage maize in the Yinda Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2024，43(9)：33-38.

[30] 王佳琪，程龙，赵广永，李蒙蒙 . 肉牛补偿生长的作用机制及研究进展[J]. 动物营养学报，2024，36(12)：7544-7552.
Wang Jiaqi，Cheng Long，Zhao Guangyong，Li Mengmeng. Advances and mechanism of compensatory growth in beef cattle[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition，2024，36(12)：7544-7552.

[31] Bohman V R. Compensatory growth of beef cattle：The effect of hay maturity[J]. Journal of Animal Science，1955，14(1)：249-255.

[32] Belsky A J. Does herbivory benefit plants? A review of the evidence[J]. The American Naturalist，1986，127(6)：870-892.

[33] Painter E L，Belsky A J. Application of herbivore optimization theory to rangelands of the western United States[J]. Ecological Applications，1993，3(1)：2-9.

[34] 熊翔英，王海红，王晓凌，司振强，吴迪 . 接种氨氧化细菌对玉米旱后复水补偿性生长的影响[J]. 南京农业大学学报，2023，46(6)：1031-1039.
Xiong Xiangying，Wang Haihong，Wang Xiaoling，Si Zhenqiang，Wu Di. Effect of inoculation of ammonia oxidizing bacteria on compensatory growth of corn after drought[J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2023，46(6)：1031-1039.

[35] 赵威，王征宏，侯小改，刘改秀，马松 . 不同遮阴条件下牡丹的补偿性生长特性研究[J]. 北方园艺，2009(2)：190-193.
Zhao Wei，Wang Zhenghong，Hou Xiaogai，Liu Gaixiu，Ma Song. Compensatory growth characteristics of the peony under different shading conditions[J]. Northern Horticulture，2009(2)：190-193.

[36] 李津，张建甫，鲍佳雪，徐宁伟，徐兴友，白志英 . 种植密度对不同居群豆茶决明生长、光合特性及产量的影响[J]. 山东农业科学，2025，57(10)：95-100.
Li Jin，Zhang Jianfu，Bao Jiaxue，Xu Ningwei，Xu Xingyou，Bai Zhiying. Effects of planting density on growth，photosynthetic characteristics and grain weight of different populations of *Cassia nomame*[J]. Shandong Agricultural Sciences，2025，57(10)：95-100.

[37] 戎逸忠，高俊杰，程澍时，张震，张莉 . 不同种植密度和施肥处理下优势杂草对小麦生长特征的影响[J]. 浙江农林大学学报，2024，41(6)：1252-1260.
Rong Yizhong，Gao Junjie，Cheng Shushi，Zhang Zhen，Zhang Li. Effect of dominant weeds on wheat growth characteristics under different planting densities and fertilization treatments[J]. Journal of Zhejiang A&F University，2024，41(6)：1252-1260.

[38] 王润润，郑旭，郝冬梅，张凤华，李鲁华，程志博，王家平 . 种植密度和化学调控对绿洲农田油莎豆农艺性状及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版)，2022，40(6)：705-712.
Wang Runrun，Zheng Xu，Hao Dongmei，Zhang Fenghua，Li Luhua，Cheng Zhibo，Wang Jiaping. Effects of planting density and chemical regulation on agronomic traits and yield of *Cyperus esculentus* L.[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science)，2022，40(6)：705-712.

[39] 王丹，张永清，张萌，梁萍，合佳敏，严翻翻，王慧娟 . 根土空间与种植密度互作对藜麦根系分布及产量的影响[J]. 江苏农业科学，2023，51(21)：79-86.
Wang Dan，Zhang Yongqing，Zhang Meng，Liang Ping，He Jiamin，Yan Fanfan，Wang Huijuan. Influences of interaction between soil root-growing space and planting density on root distribution and yield of quinoa[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2023，51(21)：79-86.

[40] 王海燕，高聚林，王志刚，孙继颖，于晓芳，高英波，贾宁，叶君，吕佳雯 . 高密度对超高产春玉米花粒期叶片衰老与根系活力的影响[J]. 玉米科学，2012，20(2)：75-81.
Wang Haiyan，Gao Julin，Wang Zhigang，Sun Jiying，Yu Xiaofang，Gao Yingbo，Jia Ning，Ye Jun，Lü Jiawen. Effects of high planting density on super high-yielding spring maize leaf senescence and root activity at anthesis and kernel stage[J]. Journal of Maize Sciences，2012，20(2)：75-81.

[41] 郭雅文，薛婧，宋光永，苏学德，杨克箐，周龙 . 和田设施温室6个葡萄品种光合和叶绿素荧光日变化特征[J]. 西北植物学报，2024，44(8)：1208-1217.
Guo Yawen，Xue Jing，Song Guangyong，Su Xuede，Yang Keqing，Zhou Long. Diurnal variation characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of six grape varieties in greenhouse in Hotan area[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2024，44(8)：1208-1217.

[42] 凌丽俐，朱春钊，彭良志，付行政，淳长品，江才伦，曹立 . 镁胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光日变化特性的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2014，36(6)：67-73.
Ling Lili，Zhu Chunzhao，Peng Liangzhi，Fu Xingzheng，Chun Changpin，Jiang Cailun，Cao Li. Influence of magnesium stress on the diurnal variation in chlorophyll fluorescence characteristics of Newhall Navel Orange[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2014，36(6)：67-73.

[43] 陈洪明，戴胜根，李太盛 . 优质柑橘无病毒嫁接苗的质量要求[J]. 福建农业科技，2007，38(3)：90-92.
Chen Hongming，Dai Shenggen，Li Taisheng. Quality requirements for virus-free grafted seedlings of high-quality citrus[J]. Fujian Agricultural Science and Technology，2007，38(3)：90-92.

[44] DB50/T 486—2012 柑橘容器苗繁育技术规程[S].
DB50/T 486—2012 Citrus container seedling breeding technical regulations[S].

[45] DB51/T 1361—2011 柑橘容器育苗技术规程[S].
DB51/T 1361—2011 Citrus container seedling cultivation technical regulations[S].

[46] 金方伦，周光萍，黎明，张发维，韩成敏 . 不同直径砧木对柑橘嫁接苗生长发育的影响[J]. 北方园艺，2013(22)：18-22.
Jin Fanglun，Zhou Guangping，Li Ming，Zhang Fawei，Han Chengmin. Effect of different diameters of root stock on growth and development of citrus grafting seedling[J]. Northern Horticulture，2013(22)：18-22.