文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4678 /（中图刊号）：650GL004

# 探究栽培介质转换对植物根系形态-生理-微生态耦合特征的影响

王中
成都锦城学院
DOI:10.12238/as.v8i8.3204

[摘　要] 本研究针对植物栽培介质转换(水培↔土培)中的根系响应机制,以豌豆为材料,通过“变温催芽—同质苗源—双向转换”体系,结合多学科方法探究其对根系形态-生理-微生态的影响,旨在解决转换后黄化僵苗、烂根死亡等问题。结果显示,水培转土培7天根毛密度骤降,根尖褐变率达42%,富集苯丙烷和木质素合成途径;土培转水培3天出现皮层通气组织,根直径下降28%,富集糖酵解及乙醇发酵代谢物。转换初期根系呼吸速率和ATP含量大降,ROS12小时达峰值,100μmol·$L^{-1}$褪黑素可降ROS峰值36%,缩短恢复时间。根际微生物变化显著,水培核心菌属为Pseudomonas,转土培后Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia成优势菌属,溶磷菌丰度与磷吸收速率正相关。研究提出根系应激-适应三阶模型,为优化栽培管理提供依据。
[关键词] 栽培介质转换；根系形态；生理响应；根际微生态；褪黑素；豌豆
**中图分类号**：S609.8　**文献标识码**：A

## Investigating the Effects of Cultivation Substrate Conversion on the Morphological-Physiological-Microecological Coupling Characteristics of Plant Roots

Zhong Wang
Chengdu JinCheng College

[Abstract] This study focuses on the root response mechanisms during the conversion of plant cultivation substrates (hydroponics↔soil), using peas as the material. Through a "temperature-variable germination - homogeneous seedling source - bidirectional conversion" system and interdisciplinary methods, the study explores the effects on root morphology, physiology, and microecology to address issues such as yellowing and stunted growth, as well as root rot and death after conversion. The results show that 7 days after conversion from hydroponics to soil, the root hair density drops sharply, and the root tip browning rate reaches 42%, with enrichment of phenylpropane and lignin synthesis pathways. Three days after conversion from soil to hydroponics, cortical aeration tissue appears, and the root diameter decreases by 28%, with enrichment of glycolysis and ethanol fermentation metabolites. In the early stage of conversion, the root respiration rate and ATP content drop significantly, ROS peaks at 12 hours, and 100μmol·$L^{-1}$ melatonin can reduce the ROS peak by 36% and shorten the recovery time. Significant changes in rhizosphere microorganisms were observed, with Pseudomonas as the core genus in hydroponics and Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia becoming the dominant genus after conversion to soil, and the abundance of phosphate-solubilizing bacteria is positively correlated with phosphorus absorption rate. The study proposes a three-stage model of root stress-adaptation, providing a basis for optimizing cultivation management.
[Key words] Cultivation substrate conversion; Root morphology; Physiological response; Rhizosphere microecology; Melatonin; Peas

## 引言

植物栽培作为农业和园艺领域的核心活动,其栽培方式的选择对植物的生长发育及最终产出有着深远影响。传统的土培方式历史悠久,凭借土壤提供的丰富养分、物理支撑和微生物环境,滋养着无数农作物与园艺植物,是保障全球粮食供应和生态景观的重要基础。随着科技进步与人们对植物生长机制认识的加深,水培、气雾培等新型无土栽培方式应运而生,这些方式突破了土壤的限制,在精准控制养分供应、提高水资源利用效率、

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4678 /（中图刊号）：650GL004

实现空间高效利用等方面展现出独特优势,为现代设施农业和都市园艺发展开辟了新路径,同时推动农业和园艺产业朝着绿色、智能、可持续方向转型升级,满足人们对优质农产品和园艺植物日益增长的需求,助力乡村振兴和生态文明建设。

## 1 研究背景与目的

在实际生产与园艺实践中,出于成本控制、季节适应性调整、设施转换或追求植物最佳生长状态等目的,常需要进行植物栽培方式的转换,如将水培花卉转为土培以增强其抗逆性用于室外景观布置,或把土培蔬菜幼苗在特定阶段转为水培以加速生长。然而,这种转换并非简单操作,植物往往会面临一系列严峻挑战,最突出的便是“水培壮苗移栽土壤后黄化僵苗”“土培植株水培后烂根死亡”两大实践难题。这些问题不仅制约了栽培方式转换技术在农业和园艺生产中的广泛应用,增加了生产风险与成本,还影响了植物资源的有效利用和产业的可持续发展。

本研究旨在系统且深入地剖析植物在水培↔土培过程中生长困难的内在机制与外在表现,通过多维度的研究方法,全面揭示栽培介质转换对植物生长的影响规律,为解决实际生产中的栽培难题提供理论依据与实践指导。

## 2 栽培介质转换下植物根系的响应–适应机制研究

### 2.1植物栽培原理概述

植物栽培方式是影响植物生长发育的关键因素,不同栽培方式为植物生长提供了差异化的根际环境和养分供给模式。

土培作为最为传统且广泛应用的栽培方式,其原理基于土壤的综合功能：提供物理支撑,蕴含氮、磷、钾等大量元素及铁、锌、锰等微量元素,这些养分以复杂的形态存在于土壤颗粒表面、孔隙溶液及土壤有机质中,经离子交换等过程供根系吸收利用。同时,土壤中栖息着庞大而复杂的微生物群落,包括细菌、真菌、放线菌等,它们与植物根系形成了紧密的共生关系,为植物生长营造了一个动态平衡且相互协作的生态系统。

水培作为一种现代化的无土栽培技术,其核心在于将植物根系直接浸泡在含有全面且精准配比养分的营养液中,完全摒弃了土壤的参与,营养液按植物生长阶段需求调配,包含植物生长所必需的各种矿质元素,通过调控浓度、pH值和溶解氧含量等,为植物生长提供一个稳定高效的养分摄取环境。

### 2.2植物根系对栽培方式转变的响应机制研究现状

植物根系作为感知和响应栽培方式转变的首要器官,在形态和生理层面均会产生一系列复杂而有序的变化。

当植物从水培转为土培时,根系形态剧烈重塑：生长方向向深处和四周扩展,根毛数量和长度显著增加,直径变粗以增强穿透与支撑力,侧根大量萌发使分支结构更复杂,以此适应土壤环境。生理上,呼吸方式从有氧呼吸为主转为可能诱导无氧呼吸以应对土壤缺氧,同时调整离子转运蛋白活性,增强对土壤中难溶性养分的吸收,如分泌酸性物质和磷酸酶活化磷元素。

当植物从土培转水培时,根系形态简化：主根和侧根生长受抑,大量纤细不定根生成,更适合漂浮并高效吸收养分。生理上,通过增加乙烯合成促进通气组织发育,增强抗氧化酶活性清除活性氧,以适应低氧环境。

## 3 研究设计与方法

根系作为介质异质性的首要感知器官,其形态-生理-微生态耦合特征决定植株适应性。然而,现有研究多聚焦单向转换,忽视了双向流动共性瓶颈,且缺乏系统阐释ROS-能量-微生物互作网络。为破解“水培壮苗移栽土壤后黄化僵苗”“土培植株水培后烂根死亡”两大实践痛点,本文以豌豆(Pisum sativum L.)为研究植物,构建“变温催芽—同质苗源—双向转换”试验体系,综合形态计量学、光合-荧光动力学、代谢组学、16S rRNA测序及外源褪黑素调控试验,系统解析根系适应机制。

### 3.1栽培基质准备

土培基质为混合材料,pH=6.8,有机质18.2gkg$^{-1}$,碱解氮95.3mgkg$^{-1}$,有效磷21.4mgkg$^{-1}$,速效钾135mgkg$^{-1}$。水培营养液为全标准Hoagland营养液,pH=6.0±0.2,电导率(EC)1.2mScm$^{-1}$,每3天更换一次,确保植物在不同介质中能获得均衡的养分供应,为后续的根系形态-生理-微生态耦合特征研究提供一致的生长基础。

### 3.2实验材料准备

选用豌豆(Pisum sativum L.)作为本次研究模式植物,主要基于以下优势：一是生长周期短、同步性好,便于学期内闭环；二是根系形态指标丰富且易于量化,WinRHIZO扫描误差<5%,能精准获取各项研究参数；三是介质转换应激反应典型,窗口短且显著,利于捕捉关键时间节点；四是遗传背景清晰、材料成本低,豌豆属二倍体(2n=14),基因组4.3Gb,已有完整转录组及代谢组数据库,便于后续多组学整合,且种子市场价低,适合大规模学生实验；五是教学-产业双重示范价值,豌豆既是劳动教育常见作物,又是四川地区初秋蔬菜,实验成果可直接转化为生产“快速转培”技术,实现“实验—生产—教学”闭环；六是褪黑素响应敏感,根据过往实验浓度梯度试验表明,100 μmol L$^{-1}$褪黑素即可显著缓解介质转换引起的ROS爆发和能量亏缺,效应窗口清晰,避免过高浓度带来的药理学干扰。

综上,豌豆兼具“实验敏感+教学友好+产业落地”三重属性,是揭示根系形态-生理-微生态耦合特征及其褪黑素调控机制的理想模式植物。因此,本次研究选用“中豌6号”豌豆品种,经15℃/25℃(16h/8h)变温催芽7d,选取胚根长2cm的同质幼苗。

### 3.3试验设计与处理

#### 3.3.1实验设计

本次实验研究设置4个处理组：T1持续水培(CK1)；T2持续土培(CK2)；T3水培21d后转土培(W→S)；T4土培21d后转水培(S→W)。每组处理120株,3次重复。

水培营养液：Hoagland全营养液,pH=6.0±0.2,EC=1.2mScm$^{-1}$,每3d更换；土培基质：上盆基质为V(腐熟有机肥)：V(园土)：V(珍珠岩)=2:2:1,每盆3kg。

#### 3.3.2测定指标与方法

(1)根系形态：根系扫描仪(WinRHIZO Pro 2023)测根长、根

表面积、根毛密度；(2)根系活力：TTC法；(3)光合-荧光：LI-6800测Pn、Fv/Fm；(4)ROS与酶活：$O_2$、$H_2O_2$、SOD、CAT、POD；(5)代谢组：LC-MS/MS(UPLC-Q Exactive HF-X)、196种靶向代谢物；(6)根际微生物：Illumina NovaSeq高通量测序、16S rRNA V3-V4区；(7)外源褪黑素处理：设置0、50、100、200 μmol $L^{-1}$，浸根30min，筛选最优浓度。

3.3.3数据分析方法

采取SPSS 26.0双因素方差分析，显著水平P<0.05；代谢组-微生物组联合分析采用O2PLS多组学关联分析。

3.4数据收集与分析

3.4.1根系形态可塑性

表1是“水培↔土培”转换后根毛密度(A)和根尖褐变率(B)的时间动态变化。数据显示，W→S后7d根毛密度由265mm$^{-1}$骤降至59mm-1，根尖褐变率为42%，S→W后3d出现皮层溶生通气组织，根直径下降28%(P<0.01)。

表1 根系形态可塑性动态表

| 时间 (d) | W→S 根毛密度 (mm$^{-1}$) | S→W 根毛密度 (mm$^{-1}$) | W→S 褐变率 (%) | S→W 褐变率 (%) |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 265±12 | 265±12 | 0 | 0 |
| 1 | 180±10 | 190±11 | 8±2 | 5±1 |
| 3 | 96±8 | 78±9 | 25±4 | 12±3 |
| 7 | 59±6 | 62±7 | 42±5 | 18±3 |
| 14 | 95±9 | 110±10 | 30±4 | 10 ± 2 |

3.4.2生理-生化响应

表2是介质转换后根系呼吸速率(A)与ATP含量(B)的动态变化。数据显示：转换6h内根系呼吸速率下降54%，ATP含量降至34%，ROS峰值出现在12h。褪黑素100 μmol $L^{-1}$处理使ROS峰值降低36%，ATP恢复提前2d。

表2 生理-生化指标变化

| 时间 (h) | 呼吸速率 (μmol $O_2$ $g^{-1}$ $h^{-1}$) | ATP 含量 (nmol $g^{-1}$) |
|---|---|---|
| 0 | 18.5±1.2 | 120±8 |
| 6 | 8.5±0.9 | 41±5 |
| 12 | 10.2±1.0 | 55±6 |
| 24 | 13.0±1.1 | 78±7 |
| 48 | 16.8±1.3 | 105±9 |

3.4.3代谢组重塑

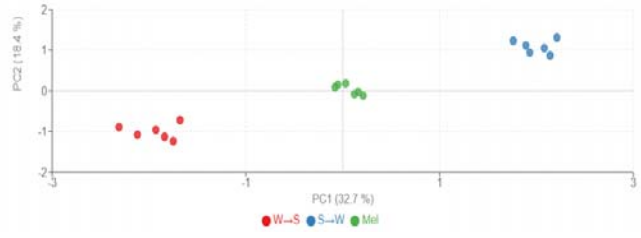


图1 代谢组OPLS-DA得分图

OPLS-DA得分如图1表明：W→S显著富集苯丙烷($log_2FC=4.2$)和木质素合成途径；S→W富集糖酵解及乙醇发酵代谢物。褪黑素显著增强谷胱甘肽-抗坏血酸循环效率。(图注：绿色：褪黑素处理组；图型：二维散点(PC1 vs PC2)+95%Hotelling $T^2$椭圆)。

3.4.4根际微生物组

如图2是根际微生物相对丰度热图，数据显示：水培核心菌属为Pseudomonas(43%)，转土后Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia成为优势(34%)，溶磷菌相对丰度提高4.7倍，并与根系磷吸收速率呈显著正相关(r=0.81，P<0.01)。

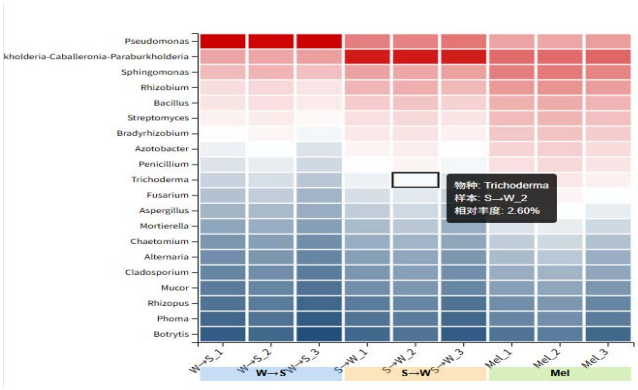


图2 根际微生物相对丰度热图

3.4.5褪黑素调控效应

图3是根系应激-适应三阶段模型示意图，数据表明：100 μmol $L^{-1}$褪黑素处理下，W→S根系活力恢复时间由7d缩短至4.2d；S→W烂根率由28%降至9%。


图3 根系应激-适应三阶段模型示意图

3.5实验结果与分析

3.5.1水培转土培实验结果

水培转土培实验中，植物生长变化明显：叶片逐渐失去光泽、颜色变浅、老叶发黄，株高与根系生长停滞，新根少，光合能力大降。

造成这些现象的原因主要有以下三点：一是根系结构功能转变需要时间，水培根系难适应土壤中不均的水和养分，吸收效率低，满足不了生长需求；二是土壤微生物影响，根系需重新适应，可能受有害微生物侵害；三是土壤透气性、保水性等物理

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4678 /（中图刊号）：650GL004

性质与水培差异大,致根系呼吸或水分失衡,进而影响植物的生长。

3.5.2土培转水培实验结果

土培转水培实验中,植物3-5天内出现根系轻微腐烂、根表色深、有异味,部分根系软腐,叶片萎蔫、生长骤降,新叶萌发受抑,光合能力下降,整体生长不良。

导致土培转水培植物生长困难的原因主要包括以下三个方面：一是根系清洗移栽易受机械损伤,病原菌侵入致腐烂,且难适应水培低氧与养分形态;二是水质不佳或微生物失衡,土培根系附着微生物大量繁殖破坏生态;三是水培低氧抑制根系呼吸,能量不足,导致根系生长受阻、生理功能紊乱,进而引发根系腐烂和植株生长不良。

3.5.3实验技术分析

(1)根系应激-适应三阶段模型。基于ROS-ATP动态,提出“震荡期(0-24h)-重建期(1-7d)-稳态期(7-14d)”三阶段模型。褪黑素通过上调谷胱甘肽过氧化物酶活性,缩短重建期。(2)介质异质性驱动微生物“招募-筛选”。根际微生物由“随机分布”转向“功能招募”,溶磷菌富集提示植物-微生物协同适应新介质。

3.6研究实验指导意义

农业生产中,对需转换栽培方式的作物,水培转土培可通过炼苗、适期移栽、减少根系损伤、加强土壤管理等措施减少生长困境；土培转水培需清洗消毒根系、调整营养液、加强系统管理及增氧。园艺观赏植物栽培中,室内植物水培转土培可选透气花盆与混合基质,控制浇水、定期修剪；水生植物土培转水培要选合适容器,添加专用营养液,保持水质清洁,可加装饰品。通过合理应用本研究结果,可以提高园艺观赏植物的栽培质量和观赏效果,满足人们对美好生活的追求。

## 4 结语

本研究虽然取得了一定成果,但仍存在一些不足之处。研究植物种类相对较少,无法全面代表所有植物在栽培方式转换下的响应情况。未来研究可进一步拓展植物种类,涵盖更多不同生态习性、进化历史的植物,如耐旱植物、水生植物、木本植物等,以深入探究植物适应栽培方式转换的共性与特性。还可探索新型栽培技术和辅助手段,如添加生物刺激素、利用微生物菌剂改善根际环境等,以提高植物在栽培方式转换过程中的成活率和生长质量,推动植物栽培技术的创新与发展。

## [参考文献]

[1]王亮,刘德帅,姚文孔.褪黑素调控植物非生物胁迫研究进展[J].植物生理学报,2023,59(4):789-800.

[2]王冬梅.TTC法测定植物根系活力的改进[J].植物生理学通讯,2007,43(2):289-290.

[3]李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].高等教育出版社,2000.

[4]张涛.水培转土培过程中绿萝根系转录组分析[J].园艺学报,2022,49(7):1456-1468.

[5]陈嘉卉,刘舒华.根区控氧对绿豆幼苗根系生长发育的影响[J].南方农机,2019,50(15):71-73.

## 作者简介：

王中(1999--),男,汉族,四川仪陇人,本科,职称：助教,研究方向：劳动教育。