

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.06.033

# 根区多点微灌水分靶向驱动云南澳洲坚果树幼苗根系形态重塑技术策略

张毅杰<sup>1,2</sup> 钱智勇<sup>1</sup> 宋泽祺<sup>1</sup> 赵永梅<sup>1</sup> 张志涛<sup>1</sup> 孔令琼<sup>3</sup> 杨振杰<sup>1</sup> 杨文彩<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学机电工程学院, 昆明 650201; 2. 云南省作物生产与智慧农业重点实验室, 昆明 650201;  
3. 云南农业大学水利学院, 昆明 650201)

**摘要:** 根区多点微灌(MRMI)技术在浅根型作物和土壤持水性良好的灌溉场景具有潜在优势,尤其适用于精细化水分管理。本文针对原生澳洲坚果树低磷策略下形成的浅根型抗逆性弱难题,基于云南地区红壤持水性强的特性,提出一种空间4点源微灌水分靶向驱动根系形态重塑技术策略,并验证了其对幼苗根系形态差异化再塑的有效性。田间大棚试验结果表明:在时序差异化灌溉制度(日灌水总量:0~4个月为1.08 mm,5~8个月为0.83 mm,9~12个月为0.58 mm)调控下,MRMI根区土壤含水率与地表滴灌(SDI)均呈现土壤水分的垂向梯度分布,但MRMI较SDI的水分梯度变化更为稳定与集中,且在日灌水总量1.08 mm和0.83 mm下的中深层(20~40 cm)均形成适宜土壤含水率区间(0.30~0.35 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),在日灌水总量0.58 mm下的40 cm土层稳定处于适宜含水率区间,可有效形成根系中层水平扩展、深层垂向深扎的水分驱动条件;第12个月的根系样本指标显示,MRMI较SDI浅层和深层各项指标均达到极显著差异( $p < 0.01$ ),中层根长密度(RLD)和根体积(RV)达到显著差异( $p < 0.05$ ),MRMI较SDI的根系样本水平扩展幅度减少17.95%,垂向深度增加23.53%,呈现水平适度扩展,垂向显著深扎的多层级近钟罩形根系演化趋势,有助于提升根系吸收土壤水分和养分的双重潜力。本研究从灌溉技术角度提供了一种突破作物根系形态缺陷的新路径,也为浅根稀植型作物的抗逆培育提供了新思路。

**关键词:** 根区多点微灌; 靶向水分分布; 云南澳洲坚果树幼苗; 根系形态重塑

中图分类号: S275; S314 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)06-0347-09

OSID:



## Strategy for Moisture Targeted Driven Reshaping of Root Morphology in Yunnan Macadamia Seedlings via Multi-point Root-zone Micro-irrigation

ZHANG Yijie<sup>1,2</sup> QIAN Zhiyong<sup>1</sup> SONG Zeqi<sup>1</sup> ZHAO Yongmei<sup>1</sup> ZHANG Zhitao<sup>1</sup>  
KONG Lingqiong<sup>3</sup> YANG Zhenjie<sup>1</sup> YANG Wencai<sup>1</sup>

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China

2. Key Laboratory for Crop Production and Smart Agriculture of Yunnan Province, Kunming 650201, China

3. College of Water Resources and Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** Multi-point root zone micro-irrigation (MRMI) is a promising technology for precision water management, particularly for shallow-rooted crops in soils with high water-holding capacity. Aiming to address the weak stress tolerance of shallow root systems in native macadamia trees, a condition resulting from low-phosphorus strategies. By utilizing the high water-holding capacity of Yunnan red soil, a targeted, 4-point spatial micro-irrigation strategy was proposed and validated to steer and remodel root morphology in seedlings. Field greenhouse experiments indicated that under a time-differentiated irrigation regime (The total daily irrigation amounts were 1.08 mm, 0.83 mm, and 0.58 mm for months of 0~4, 5~8, and 9~12, respectively.), both MRMI and surface drip irrigation (SDI) created vertical soil moisture gradients. However, the gradients under MRMI were more stable and concentrated. At 1.08 mm and 0.83 mm application rates, MRMI established a suitable soil moisture range (0.30~

收稿日期: 2025-05-06 修回日期: 2025-10-14

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32260438, 32160425)、云南省重大科技专项(202502AE090042)、云南省农业基础研究联合专项(202301BD070001-107)和云南省作物生产与智慧农业重点实验室开放基金项目(2024ZHNY06)

**作者简介:** 张毅杰(1975—),男,教授,主要从事农业节水灌溉及植保减药增效研究, E-mail: zhangyijiekg@126.com

**通信作者:** 杨文彩(1973—),女,教授,博士,主要从事农业机械化与智能装备研究, E-mail: yangwencai2005@126.com

0.35 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) in the middle and deep layers (20 ~ 40 cm). At the 0.58 mm rate, the 40 cm soil layer also remained consistently within this range, thereby creating effective moisture-driven conditions for horizontal expansion and deep vertical penetration of the roots. At the 12th month, root sample metrics showed that indicators for MRMI in the shallow and deep layers were significantly different from those for SDI ( $p < 0.01$ ), while root length density (RLD) and root volume (RV) in the middle layer showed significant differences ( $p < 0.05$ ). Compared with SDI, MRMI reduced the horizontal spread of the root system by 17.95% while increasing its vertical penetration depth by 23.53%. This fostered the evolution of a multi-tiered, near-bell-shaped root architecture, characterized by moderate horizontal spread and significant vertical penetration, which enhanced the root system's dual capacity for absorbing both soil water and nutrients. The research presented an innovative irrigation-based strategy to overcome morphological defects in crop roots, offering new insights for cultivating stress tolerance in shallow-rooted, sparsely planted crops.

**Key words:** multi-point root-zone micro-irrigation; moisture targeted distribution; Yunnan macadamia seedling; root morphology reshaping

## 0 引言

云南作为全球最大的澳洲坚果种植区,其种植面积占世界总量 50% 以上<sup>[1-2]</sup>。然而,原生澳洲坚果树因适应低磷环境而形成了独特的根系特征,其根系 70% 集中于 0 ~ 30 cm 浅表土层,侧根发达而主根纤弱,在云南高原山地的季节性干旱和局地强风环境下显得尤为脆弱<sup>[3-5]</sup>。同时,云南广泛采用的地表灌溉方式进一步加剧了根系浅表化,严重影响果树抗旱性和抗风性。因此,针对幼苗根系发育关键期,利用新型节水灌溉技术对根系形态进行早期干预,以突破其对原生生存策略的依赖,可为提升果树抗逆性奠定坚实基础。

根区微灌作为一种高效的地下灌溉技术,以其直接供水至作物根部、减少蒸发损失和提高灌溉效率而备受关注。MA 等<sup>[6]</sup>研究发现,直接根区灌溉(DRZ)可促进葡萄深根生长以及缓解干旱胁迫; MARTÍNEZ 等<sup>[7]</sup>发现,新型地下灌溉技术(A-SDI)在西班牙橄榄树种植中节水 20%; 孙三民等<sup>[8]</sup>发现,间接地下滴灌(ISDI)可使枣树根系由“宽浅型”向“深根型”转变;马振勇等<sup>[9]</sup>在塔里木河流域研究显示,直插式根灌(STRZ)技术可使水分利用效率提高 8.12%。然而,现有研究大多聚焦于单点或线源灌溉<sup>[10-12]</sup>,难以满足作物根系不同功能区的差异化水分需求,而关于多点靶向微灌在调控土壤水分分布和重塑根系形态方面的潜力,尚缺乏深入探究。LYNCH<sup>[13]</sup>研究表明,在低磷土壤中侧根功能以获取土壤浅层磷元素为主,而主根则以吸收土壤深层水分为主,这一功能分工在低磷与干旱等混合逆境中至关重要。云南红壤普遍磷匮乏<sup>[14]</sup>,通过水分驱动侧根在浅层土壤扩展可强化磷元素吸收,同时,通过水分驱动主根深扎可增强作物抗旱与锚固能力;另外,SHEN 等<sup>[15]</sup>研究还表明,土壤水分状况对磷形

态、含量及其有效性有着重要影响。因此,基于根系不同功能区间的差异化需求,以根区多点微灌为关键技术手段的土壤水分靶向驱动根系形态重塑策略,有望提升根系对土壤资源的高效获取,从而为实现根系多重生理需求间的精确平衡提供理论与实践支撑。

基于云南红壤持水特性<sup>[16]</sup>及云南澳洲坚果树根系特点,本文提出一种根区多点(4点)微灌(MRMI)靶向水分调控技术策略,即通过浅层水分靶区引导侧根延展,深层水分靶区引导主根深扎,以实现分层根系形态重塑。通过 300 d 土壤水分分布动态监测,探明 4 点源微灌靶向水分分布规律;同步开展田间大棚 12 个月幼苗根系形态重塑试验,验证 MRMI 技术策略的有效性,为揭示根系在水分异质环境信号激励下的形态响应机制奠定实证基础,也为云南澳洲坚果树科学灌溉以及干旱半干旱地区果树抗逆性的提升提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2024 年 1—12 月在云南农业大学现代农业教育科研基地(25°31'0"N, 103°16'46"E)温室大棚内进行。供试幼苗购于云南省临沧市澳洲坚果育苗基地,数量为 100 株;供试土壤为云南红壤,基本物理性质如表 1 所示。

表 1 试验区云南红壤物理性质

Tab. 1 Physical properties of Yunnan laterite in experimental area

土层深度/ cm	土壤颗粒占比/%			容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )
	黏粒	粉粒	砂粒	
0 ~ 10	19.20	45.88	34.92	1.32
10 ~ 20	19.80	44.67	35.53	1.36
20 ~ 30	17.97	48.37	33.66	1.40
30 ~ 40	17.93	44.89	37.18	1.44

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 试验设计

MRMI 技术策略基本原理如图 1 所示。根据云南澳洲坚果树幼苗根系不同功能区对水分需求的差异,在土壤不同层深分别埋设灌水器(靶点)及布设其方位(靶位),并形成适宜含水率区间。其中,土壤浅层区域内的适宜含水率靶区主要驱动侧根横向扩展,而土壤深层区域内的适宜含水率靶区则主要驱动主根向下深扎。通过分层水分的靶向驱动,实现根系水平与垂直方向的多维精

细化调控,以满足侧根对浅层土壤养分(尤其是磷元素)的充分吸收,以及主根对深层水分的获取。MRMI 4 个灌水器呈空间正交布局,即浅层及深层土壤各设有 2 个相对植株中心对称的灌水器,且 2 层灌水器的水平连线空间相互垂直;适宜含水率区间是依据《澳洲坚果树种植者手册》<sup>[17]</sup>,并结合农艺实践经验判别法,即选取根区“手捏成团、轻拍即散”状态的土壤样本,通过干燥法量化测定得出,其范围为  $0.30 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,以此为水分靶区驱动根系定向生长。

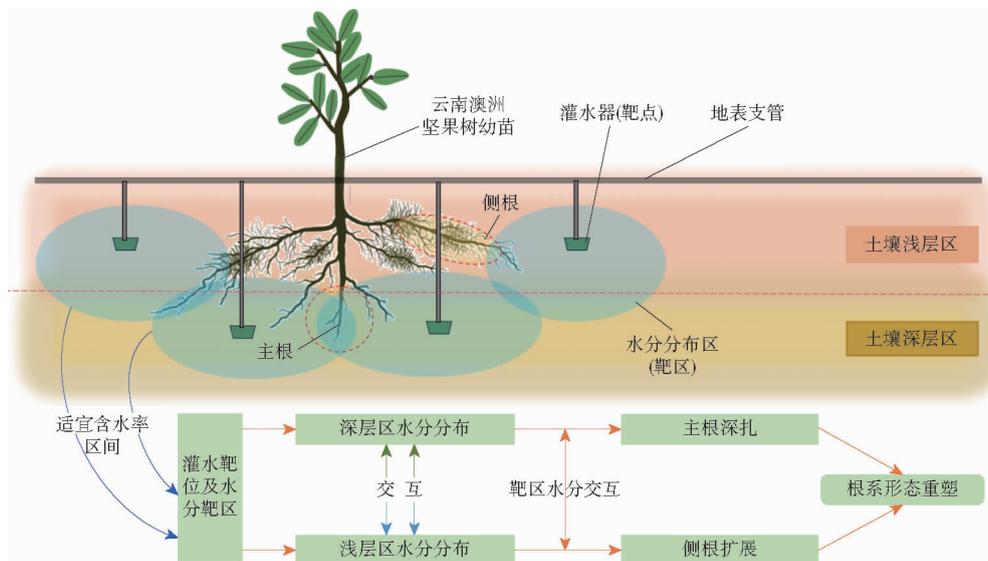


图 1 MRMI 基本原理图

Fig. 1 Basic schematic of MRMI

基于上述试验原理,制定了土壤水分对根系形态影响效应对比试验方案(表 2)。该试验方案以地表滴灌(以下简称 SDI)为对照,在温室大棚开展为期 12 个月的云南澳洲坚果幼苗根系生长试验。参考种植农艺经验值,即每日适宜灌水总量  $0.83 \sim 1.25 \text{ mm}$ ,在整个试验周期内,分 3 个生长阶段依次递进采用 3 种差异化灌溉制度进行水分调控,即日灌水总量分别为  $1.08$ 、 $0.83$ 、 $0.58 \text{ mm}$ (每 4 个月依次调换)。试验全程同步开展根区土壤水分动态监测(以下简称 SMDT)和根系形态观测(以下简称 RSMT),通过对这 2 个试验观测指标的数据获取与对比分析,验证并揭示 MRMI 技术策略下靶向水分分布对根系形态重塑的有效性以及内在驱动机制。

表 2 试验设计方案

Tab. 2 Experimental design plan

试验阶段	时序差异化灌溉制度	
	日灌水总量/mm	灌溉间隔/d
生长初期(0~4个月)	1.08	2
生长中期(5~8个月)	0.83	2
生长后期(9~12个月)	0.58	2

### 1.2.2 试验装置

试验装置主要由 PE 水箱(容量 3 000 L,常州瑞辉塑料制品有限公司)、集成控制箱(600 mm × 500 mm × 200 mm,上海中发电气股份有限公司)、中央灌溉控制器(CSZP-ISMART 型,成都智棚农业科技有限公司)、叠片式过滤器(AZUD-CS-M100 型,西班牙阿苏德公司)、压力表(CSSD-Φ60-1.6 MPa 型,浙江圣迪仪表有限公司)、电磁阀(TORO-EZP-23-54 型,美国托罗公司)以及压力补偿滴头(PCJ04-4.0L/h 型,工作压力  $0.13 \sim 0.4 \text{ MPa}$ ,以色列耐特菲姆 NETA-FIM)等部件构成。MRMI 和 SDI 试验小区共用一套物联网智能灌溉控制平台(图 2c、2g),试验的水源由水箱储备,通过潜水泵稳定输水,借助物联网(IoT)实时监测和精准调节灌溉时长、频率和水量,同时实时上传土壤水分监测数据至云平台,研究人员通过终端设备进行实时监控。在此灌溉试验中,MRMI 和 SDI 小区各种植 50 株果树幼苗,采用“一管一列式”布设,株行距均为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ (图 2a、2b、2d、2e)。

试验过程中,SMDT 和 RSMT 试验同步进行数据采

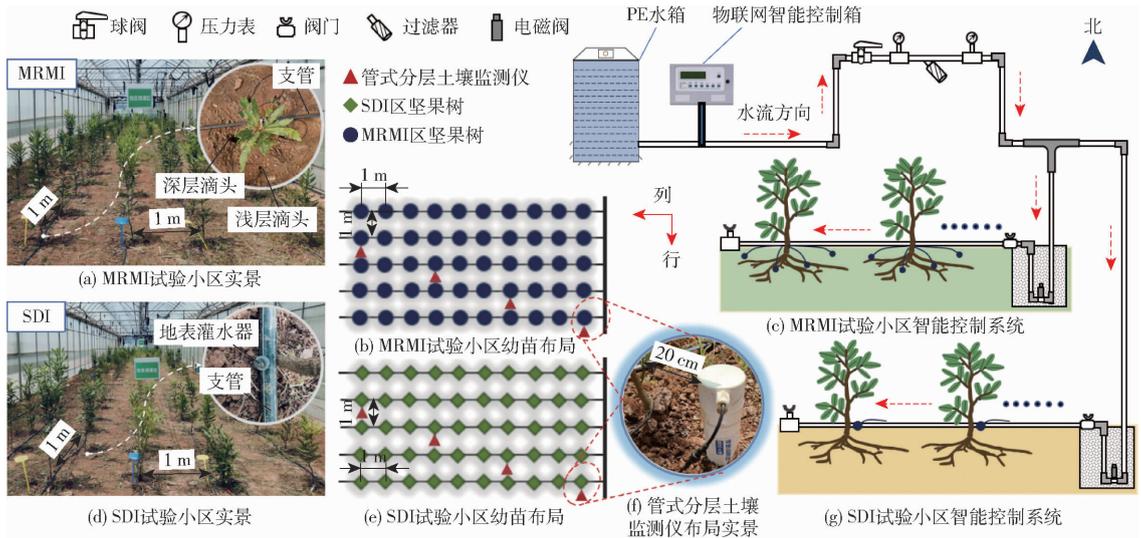


图2 试验装置与设置示意图

Fig. 2 Schematics of experimental apparatus and setup

集。其中, SMDT 使用管式分层土壤监测仪 (PR-3000-TR-6-4S-N01 型, 山东塞恩电子科技有限公司) 动态监测根区土壤含水率变化, 监测仪试验前和试验中期采用干燥法进行数据校正和检验。每个试验小区安装 4 台监测仪, 每台监测仪安装点与对应样株相距 20 cm (图 2f), 且分别位于 4 株样株 4 个不同方位, 4 台监测仪数据均值表征试验小区幼苗根区的总体水分状况。监测仪每 30 min 采集一次根区每 10 cm 厚度 (监测范围 10 ~ 40 cm) 土壤含水率, 采集总时长 300 d (计入维护管理等辅助时间约 12 个月), 且在幼苗生长周期内每 4 个月调整一次灌溉制度 (表 2)。RSMT 使用根系扫描分析仪 (Epson Perfection V850 Pro, 精工爱普生公司) 测定根系样本参数, 试验共进行 3 次 (每 4 个月 1 次) 破坏性采样。采样时, 先从各试验区内选取 5 株生长状况相似幼苗, 挖掘其根系, 再用清水清洗干净且擦干水分; 然后按照距离地面深度细化为浅层 (0 ~ 10 cm)、中层 (10 ~ 20 cm) 和深层 (> 20 cm) 3 个观测区间, 并从中取样 5 处; 再通过扫描仪进行 3 次重复扫描, 获取根系图像; 最后, 运用 WinRHIZO 根系分析软件提取所有样本根长密度、根表面积、根体积和平均直径 4 项根系主要形态参数指标<sup>[18]</sup>。

### 1.2.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2021 和 DPS v19.05 软件统计分析, 采用 Origin 2021 (OriginLab, 美国) 进行绘图与数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 SMDT 试验结果与分析

时序差异化灌溉策略下, 每组灌溉制度运行 100 d (利用管式分层土壤监测仪监测数据), 每 4 个

月调整 1 次灌溉制度 (表 2), 分别获取 MRMI (以 SDI 为对照) 下云南澳洲坚果树幼苗根区土壤含水率动态变化数据 (图 3, 图中浅层 (0 ~ 10 cm)、中层 (10 ~ 20 cm) 与深层 (> 20 cm) 土壤含水率, 分别由 10、20 cm 监测值以及 30、40 cm 监测值平均值近似表征)。通过图 3 中 3 种不同日灌水总量 (1.08、0.83、0.58 mm) 的 MRMI 和 SDI 土壤含水率动态曲线可以看出: 云南红壤条件下, MRMI 与 SDI 各层土壤含水率曲线均形成梯度分化, 但总体上 MRMI 水分分布垂向梯度更加平缓, 且梯度范围更集中于适宜根系生长的含水率区间 (0.30 ~ 0.35 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)。其中, 灌水量 1.08 mm 和 0.83 mm 的 MRMI 各土层含水率波动幅度明显小于 SDI, 且变化趋势基本一致; MRMI 的 20、30、40 cm 土层平均含水率 (1.08 mm 分别为 0.329、0.323、0.311 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, 0.83 mm 分别为 0.315、0.321、0.318 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>), 均处于根系适宜含水率区间范围内; 日灌水总量 0.58 mm MRMI 的 40 cm 土层平均含水率 (0.310 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) 也稳定处于适宜含水率区间; 而 SDI 在 3 种灌水量的各土层含水率均低于适宜含水率区间。以上说明 MRMI 的多点源分层协同水分供给, 能更好地维持根区土壤水分在适宜区间内, 为根系不同功能区间的均衡生长提供了有效的水分支持; 而 SDI 则因为水分主要分布于浅表 (蒸散损耗大), 根区水分获取不足, 而且空间水分分布不稳定, 难以构建有利于根系形态差异化重塑的水分环境。

### 2.2 RSMT 试验结果与分析

RSMT 试验分层测定了 MRMI (以 SDI 为对照) 下的 0 个月 (种植前)、第 4 个月、第 8 个月和第 12 个月 4 个时间点的根系样本。所有采样的根系分别

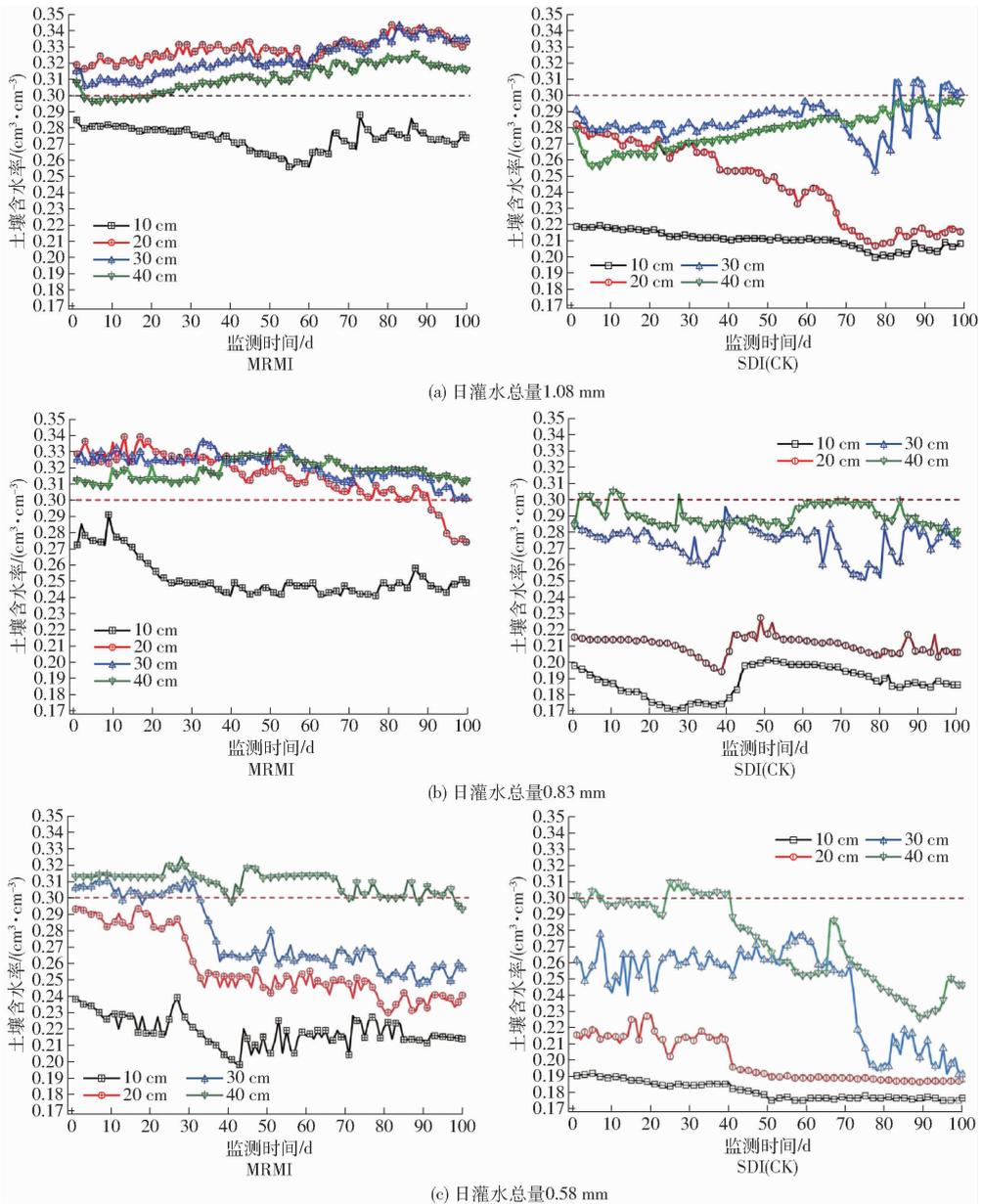


图 3 MRMI 和 SDI 下云南澳洲坚果树幼苗根区土壤含水率动态变化曲线

Fig. 3 Dynamic changes of soil moisture content in root zone of Yunnan macadamia seedlings under MRMI and SDI

按照浅层(0 ~ 10 cm)、中层(10 ~ 20 cm)和深层(>20 cm)进行分区测定,测定的主要根系形态学指标包括根长密度(RLD)、根表面积(RSA)、根体积(RV)和根系平均直径(AD)<sup>[19]</sup>。测量的样本分区数据见表 3。

由表 3 可知,在初始阶段(S1),各土层(浅层、中层和深层)内的根系形态主要指标 RLD、RSA、RV 和 AD 总体上均无显著差异( $p > 0.05$ ),这表明初始根系样本形态大体统一,且无分层差异特征,侧根均匀分布于各个层深。至第 4 个月(S2),MRMI 处理下的浅层根系生长受到抑制,其 RLD、RSA 和 RV 较 SDI 分别降低 11.42%、45.15% 和 43.40%,其中,二者的 RLD 和 RV 差异极显著( $p < 0.01$ ),RSA 差异显著( $p < 0.05$ );MRMI 中层根系各指标与 SDI 均差

异不显著;深层根系各项指标在 MRMI 下全面优于 SDI,其中,RLD、RSA 和 RV 分别增加约 85.33%、45.24% 和 45.71%,差异达到极显著( $p < 0.01$ )。至第 8 个月(S3),MRMI 较 SDI 的浅层 RLD、RSA 和 RV 分别降低 38.88%、57.77% 和 62.50%,3 项指标差异极显著( $p < 0.01$ );中层根系各指标与 SDI 仍无显著差异,说明前 8 个月内二者中层根系发育总体相当;而深层根系在 MRMI 下全面超越 SDI,所有指标差异均达到极显著( $p < 0.01$ ),其 RLD、RSA、RV 和 AD 较 SDI 分别提高 87.19%、102.88%、92.86% 和 14%。最终在第 12 个月(S4),MRMI 较 SDI 的根系形态差异最大化,其中,浅层根系 RLD、RSA、RV 和 AD 分别降低 50.70%、58.52%、66.98% 和 11.67%,深层根系则分别提高 84.16%、

表3 云南澳洲坚果树幼苗根系形态主要指标对比

Tab.3 Comparison of main root system morphological indicators of Yunnan macadamia seedlings

样本(S)	灌溉方式	根系分层	RLD/( $\text{cm} \cdot \text{m}^{-3}$ )	RSA/ $\text{cm}^2$	RV/ $\text{cm}^3$	AD/mm
初始根系(S1)		浅层	(102.81 ± 12.18) <sup>aa</sup>	(14.19 ± 1.28) <sup>abA</sup>	(0.14 ± 0.04) <sup>aA</sup>	(0.44 ± 0.02) <sup>aA</sup>
		中层	(98.12 ± 16.92) <sup>aa</sup>	(18.81 ± 5.70) <sup>aA</sup>	(0.16 ± 0.03) <sup>aA</sup>	(0.44 ± 0.04) <sup>aA</sup>
		深层	(82.42 ± 16.42) <sup>aa</sup>	(12.46 ± 2.74) <sup>bA</sup>	(0.12 ± 0.02) <sup>aA</sup>	(0.41 ± 0.04) <sup>aA</sup>
生长4个月根系(S2)	SDI	浅层	(226.36 ± 48.82) <sup>aa</sup>	(49.86 ± 7.48) <sup>aA</sup>	(0.53 ± 0.10) <sup>aA</sup>	(0.54 ± 0.05) <sup>aA</sup>
		中层	(198.43 ± 28.54) <sup>abAB</sup>	(51.01 ± 5.18) <sup>aA</sup>	(0.54 ± 0.04) <sup>aA</sup>	(0.53 ± 0.05) <sup>aA</sup>
		深层	(154.15 ± 21.66) <sup>bb</sup>	(27.52 ± 3.59) <sup>bb</sup>	(0.35 ± 0.06) <sup>bb</sup>	(0.49 ± 0.03) <sup>aA</sup>
	MRMI	浅层	(200.52 ± 51.60) <sup>bb</sup>	(27.35 ± 6.40) <sup>bb</sup>	(0.30 ± 0.05) <sup>bb</sup>	(0.51 ± 0.06) <sup>aA</sup>
		中层	(234.30 ± 22.18) <sup>abAB</sup>	(41.49 ± 9.31) <sup>aA</sup>	(0.50 ± 0.05) <sup>aA</sup>	(0.54 ± 0.08) <sup>aA</sup>
		深层	(285.68 ± 32.73) <sup>aa</sup>	(39.97 ± 9.14) <sup>aA</sup>	(0.51 ± 0.07) <sup>aA</sup>	(0.52 ± 0.07) <sup>aA</sup>
生长8个月根系(S3)	SDI	浅层	(348.90 ± 26.08) <sup>aa</sup>	(73.19 ± 4.20) <sup>aA</sup>	(0.88 ± 0.12) <sup>aA</sup>	(0.58 ± 0.05) <sup>aAB</sup>
		中层	(355.91 ± 27.04) <sup>aa</sup>	(67.03 ± 5.60) <sup>aA</sup>	(0.90 ± 0.14) <sup>aA</sup>	(0.59 ± 0.04) <sup>aA</sup>
		深层	(201.53 ± 27.78) <sup>bb</sup>	(29.83 ± 5.39) <sup>bb</sup>	(0.42 ± 0.05) <sup>bb</sup>	(0.50 ± 0.03) <sup>bb</sup>
	MRMI	浅层	(213.25 ± 14.85) <sup>bb</sup>	(30.91 ± 2.64) <sup>bb</sup>	(0.33 ± 0.04) <sup>bb</sup>	(0.52 ± 0.05) <sup>aA</sup>
		中层	(334.11 ± 14.86) <sup>aa</sup>	(55.38 ± 5.37) <sup>aA</sup>	(0.78 ± 0.03) <sup>aA</sup>	(0.58 ± 0.05) <sup>aA</sup>
		深层	(377.24 ± 50.82) <sup>aa</sup>	(60.52 ± 4.06) <sup>aA</sup>	(0.81 ± 0.11) <sup>aA</sup>	(0.57 ± 0.06) <sup>aA</sup>
生长12个月根系(S4)	SDI	浅层	(459.99 ± 72.28) <sup>aa</sup>	(74.88 ± 10.15) <sup>aA</sup>	(1.06 ± 0.07) <sup>aA</sup>	(0.60 ± 0.01) <sup>aA</sup>
		中层	(368.13 ± 39.50) <sup>ba</sup>	(73.83 ± 5.25) <sup>aA</sup>	(0.96 ± 0.04) <sup>ba</sup>	(0.62 ± 0.02) <sup>aA</sup>
		深层	(211.48 ± 22.13) <sup>cb</sup>	(31.63 ± 4.82) <sup>bb</sup>	(0.48 ± 0.04) <sup>cb</sup>	(0.51 ± 0.02) <sup>bb</sup>
	MRMI	浅层	(226.75 ± 24.83) <sup>bb</sup>	(31.06 ± 1.45) <sup>bb</sup>	(0.35 ± 0.02) <sup>bb</sup>	(0.53 ± 0.02) <sup>bb</sup>
		中层	(361.33 ± 53.56) <sup>aa</sup>	(57.35 ± 6.88) <sup>aA</sup>	(0.80 ± 0.12) <sup>aA</sup>	(0.59 ± 0.01) <sup>aA</sup>
		深层	(389.46 ± 11.25) <sup>aa</sup>	(62.55 ± 10.67) <sup>aA</sup>	(0.93 ± 0.25) <sup>aA</sup>	(0.59 ± 0.03) <sup>aA</sup>

注:根系形态主要指标为5次重复的平均值 ± 标准差。各样本中同列不同小写字母表示同一生长时段不同根层间差异显著( $p < 0.05$ );同列不同大写字母表示同一生长时段不同根层间差异极显著( $p < 0.01$ )。

97.76%、93.75%和15.69%,浅层和深层所有指标差异均极显著( $p < 0.01$ );中层根系MRMI较SDI,RSA和AD差异依旧不显著,仅RLD和RV有所下降,分别降低1.85%和16.67%。以上说明,MRMI相较于SDI,根系生长总体呈现浅层抑制、中层稳定、深层增强的形态演变规律。

### 2.3 MRMI下靶向水分分布对根系形态的调控作用

进一步综合图3和表3,MRMI水分调控(即水量递减频次增加灌溉制度)策略下根系形态主要指标呈现以下不同的响应特征:①种植初期(0~4个月),浅层土壤含水率维持在较低水平(均值 $0.274 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ),低于适宜土壤含水率下限 $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ;而中层和深层土壤含水率均值分别为 $0.329$ 、 $0.317 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,均位于适宜含水率区间( $0.30 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ );与之对应,样本S2较S1,中层与深层根系指标平均增长率(RLD 192.70%、RSA 170.68%、RV 268.75%和AD 24.78%)均大幅高于浅层(RLD 95.04%、RSA 92.74%、RV 114.29%和AD 15.91%),表明在幼苗关键需水初期,采用日灌水总量 $1.08 \text{ mm}$ 分6次灌溉,MRMI可实现水分的浅层抑制与中深层诱导,将根系生长优势向土壤深处驱动,从而快速构建起根系差异化基础形态。②生长中期(5~8个月),浅层土壤含水率

进一步降低至 $0.252 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,而中层和深层土壤含水率均值为 $0.315$ 、 $0.320 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,依然稳定维持在适宜含水率区间内;相应地,样本S3较S2,浅层根系指标增长率(RLD 6.35%、RSA 13.02%、RV 10.00%和AD 1.96%)整体较低;而中层、深层根系指标平均增长率(RLD 37.33%、RSA 42.45%、RV 57.41%和AD 8.51%)保持相对较高水平,表明经过此阶段的水量调控(日灌水总量 $0.83 \text{ mm}$ 分7次灌溉),浅层根系生长继续受限,而中、深层根系继续在适宜水分驱动下稳定拓展。③生长后期(9~12个月),日灌水总量继续下调至 $0.58 \text{ mm}$ (分8次灌溉),浅、中、深层含水率均值( $0.218$ 、 $0.257$ 、 $0.293 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )均低于适宜区间下限,在适度水分胁迫下,根系增长整体放缓;样本S4较S3,浅层与中层根系的增长幅度维持在较低水平,即二者增幅均值分别为RLD 7.24%、RSA 2.02%、RV 4.31%和AD 1.82%,而深层根系的RV和AD指标则维持了相对较高的增长率(分别为RV 14.81%和AD 3.51%),其明显高于浅层(6.06%和1.92%)及中层(2.56%和1.72%),反映出根系形态向有利于提升深层水分汲取和输导能力(主要由RV和AD指标体现)的方向适应性调整,这说明在前期水分驱动形成的根系基础形态支撑下,尽管受到水分胁迫

约束,但深层根系仍具有良好的生长韧性,展现出一定的抗逆潜力。

## 2.4 MRMI 下幼苗根系样本形貌特征

为进一步观测 MRMI 下靶向水分驱动根系形态

重塑的有效性,对试验周期(12个月)结束后的根系样本进行外观形貌对比分析(图4)。

由根系样本观测可知,灌溉前根系初始形态(图4a中初始根系)大体呈圆柱形,上下根系形态

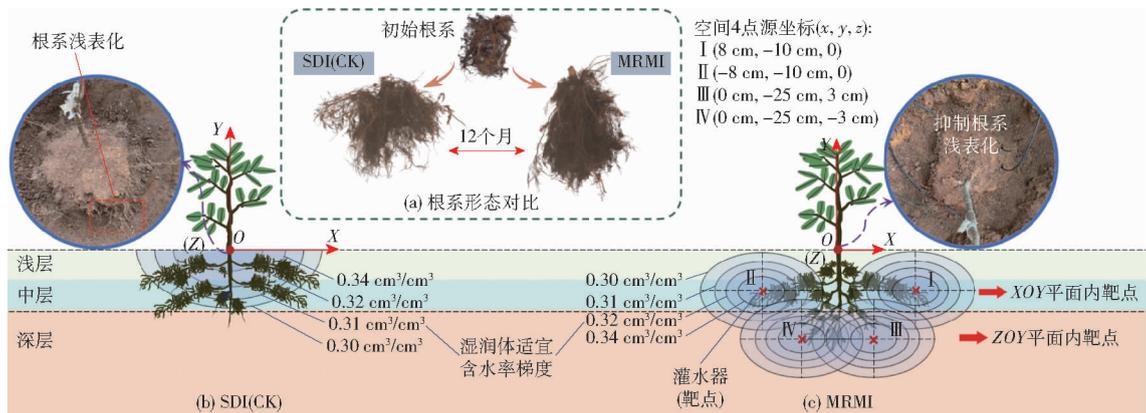


图4 MRMI 靶向水分分布对云南澳洲坚果树幼苗根系形态重塑效果

Fig. 4 MRMI targets water distribution to remodel root morphology in Yunnan macadamia seedlings

均匀无明显分层特征,所有测量样本平均水平(垂直)宽幅(深度)约为 11(15) cm。经过 12 个月的灌溉策略干预,SDI 由于适宜含水率区间(0.30 ~ 0.35 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)主要分布在浅表土壤 0 ~ 20 cm(图 4b),驱动其根系形态演变为盘状形,且浅表化特征明显,主体根量密集于土壤浅层且呈离散不均分布特征(图 4a 中 SDI),样本平均水平(垂直)宽幅(深度)为 39(34) cm,是初始根系的 3.55(2.27)倍;MRMI 围绕各点源中心形成了适宜含水率水分梯度(图 4c),有效驱动根系向近钟罩形构型(图 4a 中 MRMI)有序发展,其样本平均水平扩展幅度约为 32 cm,垂直下扎深度达约 42 cm,分别是初始根系样本的 2.91 倍和 2.80 倍;较 SDI 样本,其水平扩展小幅减少 17.95%,但垂直深度增加 23.53%,呈现出水平适度扩展,垂直显著深扎的根型演化态势。以上结果表明,MRMI 下形成的近钟罩形根系形态具有双重生态适应潜力,一方面适度的中浅层水平扩展有利于根系获取富集浅表土壤不易移动的养分(如磷)<sup>[20]</sup>,另一方面根系更强的深扎能力使作物获取深层水分的潜能增强,表现出更良好的抗旱性<sup>[21]</sup>。MRMI 下的根系形态重塑策略,兼顾了浅层养分吸收与深层水分利用,展现出较 SDI 更优的资源精准获取能力。

## 3 讨论

### 3.1 MRMI 对澳洲坚果树幼苗独特根系形态的影响

研究显示根系形态呈现十分突出的种间差异性<sup>[22]</sup>,并且和土壤类型紧密相关,最优根系构型一般表现为发达的水平分布根系网络以及适度的深层锚固能力。本研究以云南红壤为土壤基质,其特性

有利于水分在灌水器指向的根区附近集中分布<sup>[16]</sup>,为 MRMI 下靶向水分驱动根系生长提供适宜土壤条件。以澳洲坚果树幼苗为研究对象,该树种具有独特的浅根构型,在主根的特定部位可形成多层次的侧根群落,在磷素缺乏的胁迫条件下,侧根末端会形成簇状山龙眼根结构,这种适应性形态的主要作用是增大根系与土壤的接触面积,提高对浅层土壤中磷素的吸收效率<sup>[3-4,23]</sup>。本试验发现,根系形态的可塑性主要集中在侧根群(图 4a),表现为大量侧根从主根侧向和垂向分生,而主根形态则保持相对稳定。因此,本试验以侧根群为主要样本来源(表 3),将主根垂向分生的侧根视为根系向下扩展的主要体现。另外,本研究聚焦水分单一因子对根系形态的直接影响,忽略水分变化对浅层土壤磷素迁移带来的间接影响,鉴于磷素对澳洲坚果树独特浅层侧根群的形态发育有着重要影响<sup>[24]</sup>,未来将进一步探索 MRMI 技术下水分分布、磷素迁移与根系形态三者的交互作用,以深入揭示影响澳洲坚果树根系形态变化的多因子协同机制。

### 3.2 MRMI 与其他新型地下灌溉差异及其适用性

MRMI 与涌泉根灌<sup>[25]</sup>、直接根区灌溉<sup>[6]</sup>以及间接地下滴灌<sup>[8]</sup>等新型地下微灌技术相似,均旨在优化根区水分环境。然而,以上新型技术在应用特点上存在一定差异,适宜场景也各有侧重。其中,涌泉根灌主要是借助底部渗透的方式降低地表蒸发量,比较适合透水性良好的黄绵土以及沙壤土,且以种植红枣和苹果等深根型果树的灌溉场景为主;直接根区灌溉依靠深层集中供水抑制浅层根系生长,适用于葡萄等木本作物,主要应用在透水性中等、结构较为密实的壤土和轻黏土;间接地下滴灌可凭借专

门的导水装置实现水分的均匀渗透,引导根系形态从“宽浅型”朝着“深根型”转变,主要适用于保水性较低的砂壤土和沙土,所面向的作物大多为干旱地区的红枣和核桃等。然而,上述技术尚未从根系形态差异化需求角度剖析多点分层靶向微灌技术特征,本文 MRMI 依据云南红壤黏重持水性良好的特性,面向云南澳洲坚果树根系抗逆性提升的需求,基于云南澳洲坚果树种植农艺与前期研究基础,将适宜含水率区间( $0.30 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ )作为根系形态重塑的理想水分驱动条件<sup>[17,26-27]</sup>。这一技术尤为适用于干旱半干旱气候及黏重土壤条件下,稀植型浅根作物的早期壮苗与抗逆培育,其有着良好的应用前景。然而,靶位合理设置是 MRMI 技术有效应用的关键难点之一,本文 MRMI 的 4 个靶点定位策略(图 4c),主要聚焦在根尖前区适宜含水率区间的有效构建上,其本质上是基于单一水分因子的“形态重塑”调控视角,具有一定局限性。鉴于根系的生长是一个受多重因素协同调控的复杂生命过程,未来可充分利用 MRMI 的精准、灵活技术优势,在根尖周围更精准地营造一个多维因子(例如水、养、气等)耦合驱动的理想微域环境,实现靶点定位策略从“形态重塑”到“根系功能最优”的理论与技术突破。

### 3.3 MRMI 下差异化灌溉制度对根系形态的调控

MRMI 技术策略的有效性,除靶位外,灌溉制度同样关键,二者协同调控共同决定了根系形态的重塑效果。本试验探索了一种时序差异化灌溉制度,即在 12 个月的生长周期里,每 4 个月调整一次“水量递减及频次递增”方案(表 2),以兼顾节水增效与根系生长。其中,生长初期,采用高水量少频次(日灌水总量  $1.08 \text{ mm}$ ,分 6 次灌溉)的灌溉制度,可快速形成水分梯度,MIYAZAKI 等<sup>[28]</sup>已证实,灌溉初期建立的水分梯度对后期根系分布格局有决定性影响。生长中期,在减少总水量及增加灌溉频次(日灌水总量  $0.83 \text{ mm}$ ,分 7 次灌溉)的调控下,有利于维持中层水分的相对稳定,且有益于提升根区水分利用效率潜力<sup>[29-30]</sup>。生长后期,更低的灌水量及更高的灌溉频次(日灌水总量  $0.58 \text{ mm}$ ,分 8 次灌溉),会引发适度水分胁迫,虽然胁迫减缓了根系整体生长,但可能有利于激发深层根系的延伸和发育潜能,

以提高根系探索和利用深层土壤资源的能力<sup>[31]</sup>。从图 4 还可观察到,相较于 SDI 凌乱无序的根系非对称性分布,MRMI 下的根系非对称性程度降低、层次性更优,这也说明基于空间对称布局的 4 点源微灌,有潜力构建一个更趋均匀与对称的三维水分环境,从而更充分驱动根系围绕根茎基部  $360^\circ$  均匀辐射生长。综上,MRMI 下的差异化灌溉制度能有效构建土壤水分空间梯度分布模式,从而定向调控不同层深根系构型(图 4),形成“浅层控水、中层调水和深层蓄水”的水分框架,引导根系呈现“上层抑制、中下层拓展型”的空间形态特征,并促使根系分布更趋于均衡对称。未来为进一步提升 MRMI 调控精度,可开展土壤水分实时感知与自适应控制算法集成技术研究,以实现灌溉参数动态优化;设计与开发集防堵塞与灌水靶点柔性调节等多功能一体的多点源微灌末端装置,构建基于根系三维构型响应的物联网智能微灌系统,为更好发挥 MRMI 技术效能奠定基础。

## 4 结论

(1) MRMI 技术策略下中、深层( $20 \sim 40 \text{ cm}$ )土壤含水率能有效维持在根系生长适宜含水率区间( $0.30 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ),有效抑制表层( $0 \sim 10 \text{ cm}$ )土壤的水分损耗。与 SDI 相比,MRMI 水分波动幅度小、垂向梯度分布平缓,构建出有利于根系拓展与深扎的靶向水分驱动条件。

(2) 在 MRMI 靶向水分驱动条件下,幼苗根系形态总体呈现浅层抑制、中层稳定以及深层增强的动态响应规律。与 SDI 相比,第 12 个月样本的浅层根系 RLD、RSA、RV 和 AD 分别降低 50.70%、58.52%、66.98% 和 11.67%;深层根系则分别提高 84.16%、97.76%、93.75% 和 15.69%;根系水平扩展幅度减少 17.95%,垂向深度增加 23.53%。

(3) MRMI 技术策略通过构建浅层控水、中层调水和深层蓄水的调控模式,驱动根系呈现倒钟罩形多层次垂直拓展态势,有助于提升根系综合探索土壤资源的潜力。本研究为差异化重塑云南澳洲坚果树幼苗根系形态提供了新的技术路径,也为解决干旱半干旱地区浅根型作物的抗逆性难题提供了新思路。

## 参 考 文 献

- [1] MAYER D G, STEPHENSON R A, JONES K H, et al. Annual forecasting of the Australian macadamia crop - integrating tree census data with statistical climate-adjustment models[J]. *Agricultural Systems*, 2006, 91(3): 159 - 170.
  - [2] 张海清,郭刚军,叶廷红,等. 云南澳洲坚果青皮资源堆肥化开发利用现状与对策[J]. *中国果业信息*, 2024, 53(4): 259 - 264.
- ZHANG Haiqing, GUO Gangjun, YE Tinghong, et al. Current status and countermeasures for composting and utilization of green

- macadamia nut shells in Yunnan[J]. China Fruit News, 2024, 53(4):259-264. (in Chinese)
- [3] 陆超忠, 李仍然, 张汉周, 等. 澳洲坚果根系在土壤中生长/分布调查[J]. 云南热作科技, 1997(2): 12-16.  
LU Chaozhong, LI Rengran, ZHANG Hanzhou, et al. Investigation on growth and distribution of macadamia root system in soil [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 1997(2): 12-16. (in Chinese)
- [4] 宫丽丹, 倪书邦, 贺熙勇, 等. 澳洲坚果耗水规律及灌溉制度研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 99-102.  
GONG Lidan, NI Shubang, HE Xiyong, et al. Study on water consumption law and irrigation system of macadamia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(36): 99-102. (in Chinese)
- [5] 于璐. 云南地区季节性干旱特征分析[J]. 农业与技术, 2018, 38(7):149-150.
- [6] MA X, SANGUINET K A, JACOBY P W. Direct root-zone irrigation outperforms surface drip irrigation for grape yield and crop water use efficiency while restricting root growth[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 105993.
- [7] MARTÍNEZ J, RECA J. Water use efficiency of surface drip irrigation versus an alternative subsurface drip irrigation method [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 140(10): 04014030.
- [8] 孙三民, 安巧霞, 杨培岭, 等. 间接地下滴灌灌溉深度对枣树根系和水分的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 81-90.  
SUN Sanmin, AN Qiaoxia, YANG Peiling, et al. Effect of irrigation depth on root distribution and water use efficiency of jujube under indirect subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 81-90. (in Chinese)
- [9] 马振勇, 杜虎林, 刘荣国, 等. 直插式根灌的土壤水分时空分布与节水效率[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 95-102,192.  
MA Zhenyong, DU Hulin, LIU Rongguo, et al. Soil water temporal and spatial distribution and water-saving efficiency of straight tube root irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 95-102,192. (in Chinese)
- [10] 池宝亮, 黄学芳, 张冬梅, 等. 点源地下滴灌土壤水分运动数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 56-59.  
CHI Baoliang, HUANG Xuefang, ZHANG Dongmei, et al. Numerical simulation and validation of soil water movement under subsurface drip irrigation with point-source emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 56-59. (in Chinese)
- [11] 裴青宝, 刘伟佳, 张建丰, 等. 多点源滴灌条件下红壤水分溶质运移试验与数值模拟[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 255-262.  
PEI Qingbao, LIU Weijia, ZHANG Jianfeng, et al. Movement and numerical simulation of soil water solute migration under multipoint drip irrigation in red soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 255-262. (in Chinese)
- [12] 张林, 吴普特, 范兴科. 多点源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):40-45.  
ZHANG Lin, WU Pute, FAN Xingke. Numerical simulation of soil water movement with drip irrigation of multiple point source [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 40-45. (in Chinese)
- [13] LYNCH J P. Roots of the second green revolution[J]. Australian Journal of Botany, 2007, 55(5): 493-512.
- [14] 杨济达, 张志明, 沈泽昊, 等. 云南干热河谷植被与环境研究进展[J]. 生物多样性, 2016,24(4):462-474.  
YANG Jida, ZHANG Zhiming, SHEN Zehao, et al. Review of research on the vegetation and environment of dry-hot valleys in Yunnan[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(4): 462-474. (in Chinese)
- [15] SHEN J, YUAN L, ZHANG J, et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant[J]. Plant Physiology, 2011, 156(3):997-1005.
- [16] 余杨, 杨振杰, 张建生, 等. 不同根部微灌水器对云南红壤和黄沙土水分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 84-90,315.  
YU Yang, YANG Zhenjie, ZHANG Jiansheng, et al. Impacts of different root microirrigation emitters on water distribution of red loam and yellow sand soils in Yunnan[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(19):84-90,315. (in Chinese)
- [17] 邹明宏, 杜丽清. 澳洲坚果种植者手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [18] 宋娟娟. 地表和地下滴灌苹果园生态系统服务对比研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.  
SONG Juanjuan. Comparative study on ecosystem services of surface and subsurface drip irrigation in apple orchards [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)
- [19] 刘允熙, 罗佳佳, 雷健, 等. 柱花草磷高效种质筛选及根系形态对低磷胁迫的响应分析[J]. 草地学报, 2021, 29(5): 876-883.  
LIU Yunxi, LUO Jiajia, LEI Jian, et al. Screening of phosphorus efficiency germplasm and analysis of root morphology responding to phosphorus deficiency in *Stylosanthes guianensis* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(5): 876-883. (in Chinese)
- [20] GIEHL R F H, VON WIRÉN N. Root nutrient foraging[J]. Plant Physiology, 2014, 166(2): 509-517.
- [21] LI B, ZHANG X, MORITA S, et al. Are crop deep roots always beneficial for combating drought: a review of root structure and function, regulation and phenotyping[J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107781.
- [22] FITTER A. Characteristics and functions of root systems[M]//WAISEL Y, ESHEL A, KAFKAFI U. Plant roots: the hidden half. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2002: 15-32.

- LIN Huapu, ZHANG Kai, LI Hao, et al. Detecting herd pigs using multi-scale fusion attention mechanism[J]. Transactions of the CASE, 2023, 39(21): 188 – 195. (in Chinese)
- [35] 林家豪, 张元泽, 梁千月, 等. 基于视触觉与深度学习的猕猴桃无损硬度检测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 390 – 398.
- LIN Jiahao, ZHANG Yuanze, LIANG Qianyue, et al. Non-destructive firmness testing of kiwifruit based on vision-based tactile sensor and fusion learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 390 – 398. (in Chinese)
- [36] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[J]. arXiv preprint arXiv: 1412.6980, 2014.
- [37] 韩翔, 李玉强, 高昂, 等. 基于改进生成对抗网络的甜樱桃数据增强方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 252 – 262.
- HAN Xiang, LI Yuqiang, GAO Ang, et al. Data augmentation method for sweet cherries based on improved generative adversarial network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 252 – 262. (in Chinese)
- [38] HAN X Y, PAPPAN V, DONOHO D. Neural collapse under MSE Loss: proximity to and dynamics on the central path[J]. arXiv preprint arXiv: 2106.02073. 2021.
- [39] BENELLI A, CEVOLI C, FABBRI A, et al. Ripeness evaluation of kiwifruit by hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering, 2022, 223: 42 – 52.
- [40] CHAI J, LI J, LIU Q, et al. Differential changes in respiratory metabolism and energy status in the outer pericarp and core tissues affect the ripening of ‘Xuxiang’ kiwifruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 212: 112876.
- [41] 何兴兴, 洪伟荣, 陈爱强, 等. 不同包装对猕猴桃经运输跌落后货架品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(7): 1 – 8.
- HE Xingxing, HONG Weirong, CHEN Aiqiang, et al. Impact of diverse packaging on shelf quality of kiwifruit after falling during transportation[J]. Storage and Process, 2024, 24(7): 1 – 8. (in Chinese)

(上接第 355 页)

- [23] 兰成锋, 林静怡, 蔡志全, 等. 澳洲坚果根系研究[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(2): 44 – 47.
- [24] 唐涛, 文思捷, 柴佳琪, 等. 澳洲坚果根际土壤养分活化与磷素营养规律研究进展[J]. 中国南方果树, 2024, 53(6): 276 – 281.
- TANG Tao, WEN Sijie, CHAI Jiaqi, et al. Research progress on regularity of nutrition activation and phosphorus nutrition in macadamia rhizosphere soil[J]. China Southern Fruits, 2024, 53(6): 276 – 281. (in Chinese)
- [25] 何振嘉, 范玉涛, 杜宜春, 等. 涌泉根灌节水灌溉技术特点、应用及展望[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 287 – 298.
- HE Zhenjia, FAN Wangtao, DU Yichun, et al. Characteristics, application and prospects of bubbled-root irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(8): 287 – 298. (in Chinese)
- [26] 岳海, 何双凌, 耿建建, 等. 水分胁迫下丛枝菌根真菌对澳洲坚果幼苗磷利用效率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(2): 285 – 291.
- YUE Hai, HE Shuangling, GENG Jianjian, et al. Effect of colonization with arbuscular mycorrhizal fungi on phosphorus utilization of macadamia seedlings under water stress[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(2): 285 – 291. (in Chinese)
- [27] 陆超忠, 肖邦森, 孙光明, 等. 澳洲坚果优质高效栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] MIYAZAKI A, ARITA N. Deep rooting development and growth in upland rice NERICA induced by subsurface irrigation[J]. Plant Production Science, 2020, 23(2): 211 – 219.
- [29] JIA Y, YANG B, HAN Y, et al. Enhanced cotton yield and fiber quality by optimizing irrigation amount and frequency in arid areas of northwest China[J]. Agronomy, 2024, 14(2): 266.
- [30] WANG L, WU W, XIAO J, et al. Effects of different drip irrigation modes on water use efficiency of pear trees in northern China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106660.
- [31] KOU X, HAN W, KANG J. Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: a Meta-analysis of trials under controlled conditions[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:1085409.