

作物根系生长监测微根管装置设计与试验

黄祺成¹ 杨佳昊¹ 左昊轩² 孟繁佳² 李思恩³ 李莉¹

(1. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要:为实现不同深度下作物根系的实时监测与图像采集,设计开发了作物根系生长监测微根管装置,图像采集后可以通过上位机软件进行实时显示与存储。装置由监测管与控制箱组成,监测管使用亚克力材料制作透明外壳,同时在管内通过丝杠和导杆架设滑动轨道,利用步进电机实现摄像头在导轨上的运动控制;控制箱以STM32单片机为核心控制板,并根据实际需求选取了相应外设模块。以番茄根系为研究对象进行持续98 d的图像采集,借助软件RhizoVision Explore对根系图像进行分析,试验结果表明,前70 d番茄根系整体生长速度较快,后28 d逐渐趋于稳定,在深度6~10 cm处分布较为密集,根长密度在深度10 cm处于第91天达到最大值(1.22 cm/cm³),分析结果与番茄根系生长规律一致,表明本根系生长监测微根管装置能不影响根系持续生长的情况下完成对作物根系的长期在线监测,满足作物根系监测要求。

关键词: 根系; 微根管; 实时监测; 嵌入式系统

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0286-08

Design and Experiment of a Minirhizotron Device for Monitoring Crop Root Growth

HUANG Qicheng¹ YANG Jiahao¹ ZUO Haoxuan² MENG Fanjia² LI Sien³ LI Li¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Smart Agriculture System Integration, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A set of crop root growth monitoring minirhizotron device was designed and developed to achieve real-time monitoring and image collection of crop roots at different depths. The collected images can be displayed and stored in real-time through upper computer software. The device consisted of a monitoring tube and a control box. The monitoring tube used acrylic material to make a transparent shell, and a sliding track was set up inside the tube through screws and guide rods. The motion control of the camera on the track was achieved by using a stepper motor. The control box was based on the STM32 microcontroller as the core control board, and corresponding peripheral modules were selected according to actual needs. The tomato root system was used as the research object for 98 d of image collection, and the root image was analyzed by using the software RhizoVision Explore. The experimental results showed that the overall growth rate of tomato roots was faster in the first 70 d, and gradually stabilized in the last 28 d, and distributed densely at depths of 6~10 cm. The root length density reached its maximum value of 1.22 cm/cm³ in the 91st day at a depth of 10 cm. The analysis results were consistent with the growth pattern of tomato roots, indicating that this root growth monitoring minirhizotron device can complete long-term online monitoring of crop roots without affecting the continuous growth of roots, meeting the requirements of crop root monitoring.

Key words: root system; minirhizotron; real-time monitoring; embedded system

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900801)

作者简介: 黄祺成(2000—),男,硕士生,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: S20223081701@cau.edu.cn

通信作者: 李莉(1978—),女,副教授,博士,主要从事农业信息获取技术和智慧农业系统集成研究,E-mail: lily@cau.edu.cn

0 引言

根是植物的主要器官,在植物整个生命周期中有着不可替代的作用^[1-2]。因此,通过对相关作物的根系进行观测、数据采集及分析,了解作物生长发育现状,对提高作物产量和品质具有重要的意义^[3-6]。

依据对作物的破坏性,常用的根系观测方式主要包括破坏性探测方式与原位探测方式^[7-8]。目前大多数根系研究主要采用挖掘法等破坏性探测方式进行处理与分析,无法实现在作物生长周期内持续性的动态监测^[9-10]。

原位探测方式能够在作物正常生长发育的条件下,实现对根系的实时观测以及数据采集^[11-12]。在一系列原位探测方法中,微根管法能够在不破坏根系的情况下对根系进行长时间的图像监测与记录,同时设备构造简单,且能够保持一定的精度,相较于其它方法更为出色^[13]。目前,国内外学者对微根管的结构设计及性能优化做了大量研究^[14-15],微根管装置的应用场景也更加多元化,在森林^[16]、沼泽^[17]、农田^[18]均有使用。ARNAUD 等^[19]利用 3D 打印技术设计了微根管装置,获取的图像可以实时传输到计算机。但需要人工调整拍摄深度,无法实现全自动观测。ZWETSLOOT 等^[20]利用微根管装置对于干旱条件下森林生态系统的根系动态进行了长期监测,但所用装置尺寸较大不适用于作物根系观测。陈文岭等^[21]以滴灌棉花为研究对象,采用微根管进行持续观测,但是选用的商用微根管价格相对较高,不利于农业应用推广。因此本文设计一款成本较低、能满足农业生产需求的作物根系图像采集设备,应用于作物根系图像采集观测,以期为后续根系研究提供硬件设备支持。

1 装置结构与工作流程

1.1 装置总体结构

根系生长微根管监测装置主要由两部分组成:控制箱和埋入栽培介质中的监测管。监测管用于不同深度根系的图像采集;控制箱包括核心控制器、电机驱动模块、无线通信模块以及补光模块,能够进行装置控制及数据传输,总体结构如图 1 所示。

亚克力管内部使用丝杆和导杆设置滑动轨道并在底部进行固定,同时在滑动轨道上安装螺母座作为活动装置搭载微型摄像头,通过电机驱动模块控制亚克力管前端的步进电机转动,从而带动活动装置在亚克力管中的滑动轨道上移动,实现摄像头对不同深度的作物根系进行图像采集。STM32 作为



图 1 装置总体结构图

Fig. 1 Overall structure of device

1. 亚克力管 2. 导轨 3. 摄像头 4. 步进电机 5. 补光模块
6. 核心控制板 7. 通信模块 8. 步进电机驱动器 9. 直流电源

核心控制器模块,分别与图像采集模块、电机驱动模块以及无线数据传输模块连接,控制各模块正常运行。3W LED 灯作为补光模块,保证采集到清晰的图像。

1.2 装置工作流程

根系监测时,给微根管装置上电,打开 LED 灯,启动 PC 端上位机软件,通过无线通信模块连接装置,启动后装置处于自动模式下,摄像头沿滑动轨道周期循环往复移动,每移动 5 cm 对当前深度的作物根系进行拍摄,并将采集到的图像实时发送到上位机界面中进行显示及存储。同时操作者能够通过软件界面手动调整摄像头的拍摄位置,也可查询显示历史图像。

2 微根管结构与控制系统硬件设计

2.1 微根管设计

2.1.1 微根管材料选取

微根管装置主要包括透明外壳、导轨及活动装置,由于微根管需要插入土壤中对根系进行观测,故对外壳的材料有一定要求,需要透明材料透光性好、稳定性强,同时对根系生长影响较小。目前市面上常见的材料主要包括玻璃和塑料。玻璃透光性好,但耐用性较差^[22]。塑料虽然与玻璃相比透光能力较差,但其化学性质较为稳定,自然条件下的温度变化对其产生的影响较小^[23]。其中亚克力材料不仅具有较好的可塑性,而且对于腐蚀的耐受力更强、光透过率更高,与土壤观测环境相适配^[24]。

微根管材料对于根系生长的影响,WITHINGTON 等^[25]比较了玻璃、丙烯酸塑料(亚克力)、丁酸塑料的微根管对根系生长发育的影响。研究结果表明,植物根系生长指数受丙烯酸塑料的影响比丁酸塑料小,3 种材料性能对比如表 1 所示。

表 1 3 种材料性能对比

Tab. 1 Performance comparison of three materials

材料	透光性	稳定性	干扰程度
玻璃	好	易碎	低
丙烯酸塑料(亚克力)	中	稳定	中
丁酸塑料	中	稳定	高

综合各类透明材料的透光性、稳定性和干扰程度,亚克力材料相较其它材料更为优越,目前市面上亚克力材料的成本比其它材料稍高,但微根管装置整体的亚克力材料用量较少,成本并不会过高。故选用亚克力材料制作微根管装置的透明外壳。

2.1.2 微根管结构设计

(1)装置外壳尺寸设计

目前常用微根管装置内径为 50 mm。过大的尺寸会对根系生长造成阻碍,影响植株整体生长发育,故选用 50 mm 作为亚克力透明圆管外壳的内径。同时盆栽作物植株根系大部分分布于 10 ~ 30 cm 的土层中,故将外壳长度设置为 30 cm。

(2)装置内部导轨设计

使用直径 8 mm 丝杆与步进电机相连接,并在丝杆上安装螺母座,同时在螺母座两侧加装直径为 3 mm 导杆用于固定,将丝杆的转动用于带动螺母座完成在管内沿导轨水平直线移动,导杆与丝杆均固定于微根管尾部。步进电机正转,螺母座往远离电机的方向移动;步进电机反转时,螺母座往靠近电机的方向移动。最终设计的根管内部轨道原理如图 2 所示。

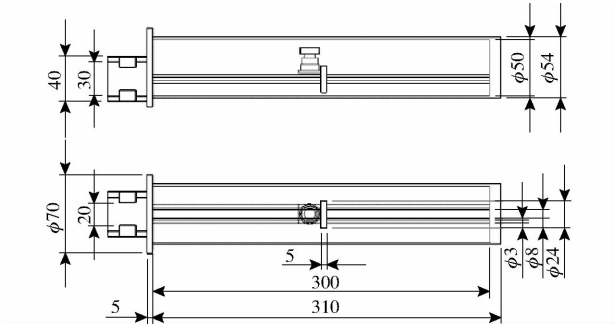


图 2 微根管内部轨道设计原理图

Fig.2 Schematic of minirhizotron internal track design

2.2 控制系统硬件设计

2.2.1 控制系统总体结构设计

总体设计的装置硬件系统的结构框图如图 3 所示。硬件系统以 STM32 单片机作为核心处理器,通过驱动器控制步进电机带动传动丝杆,使得摄像头

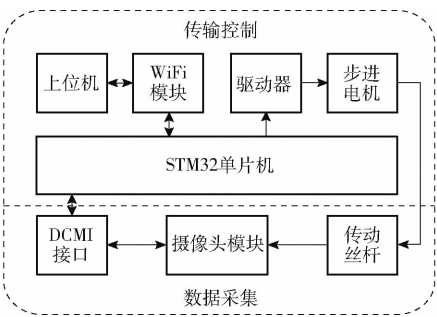


图 3 硬件系统框图

Fig.3 Hardware system frame diagram

模块沿导轨水平往复运动,从而采集不同深度下根系图像。在此基础上,STM32 单片机通过 WiFi 模块将相关图像传输至上位机软件予以实时显示。

控制系统所选电子元器件性能指标如表 2 所示。

表 2 选取器件性能指标

Tab.2 Device selection

器件	型号	参数
控制核心	STM32F407	32 位 Cortex M4 内核
摄像头	OV2640	最高分辨率 1 600 像素×1 200 像素
通信模块	ESP8266	发射功率 11 ~ 18 dBm
电机驱动器	ATK - 2MD5050	输入电压 12 ~ 50 V
电机	HS4401	2 相 4 线

2.2.2 图像采集模块设计

OV2640 型摄像头直接与 STM32 单片机 DCMI 接口连接,DCMI 接口将接收到的摄像头数据存放到单片机内部 DCMI_DR 寄存器中进行传输,选用压缩数据格式,设置摄像头的输出模式为 JPEG 格式,在一帧数据传输完成时选用 DMA2 存储器的第一数据流的第一通道开启 DMA 传输,提高 WiFi 模式传输数据的效率。

2.2.3 无线通信模块设计

采用 ESP8266 模块实现 STM32 单片机与上位机软件的通信,将该模块与单片机的 USART3 串口连接,实现串口与 WiFi 之间的转换。由于 ESP8266 WiFi 模块在站点模式下只能连接 2.4 GHz 网络频段,故将 WiFi 模块配置为热点模式与其它设备连接。为降低数据传输的繁杂性,采取透传模式进行数据传输,因此将 ESP8266 模块设置为 TCP 客户端,将上位机 PC 端设置为 TCP 服务端,二者之间建立 TCP 连接,然后开启透传模式。

2.2.4 电机驱动模块设计

ATK - 2MD 5050 型电机驱动器采用共阴极接法,将 ENA -、DIR -、PUL - 3 个信号线同时接地,将其它 3 个信号线分别连接单片机 I/O 口进行驱动器控制。步进电机为 2 相 4 线式,在无细分的条件下发送 200 个脉冲即可转动一周。根据电机控制的需求,利用单片机中的高级定时器允许在指定数目的计数器周期之后重新开始计数的特性,通过更改自动装载数据改变输出的脉冲频率,从而产生适用于电机控制的脉冲输出,选用 TIM 1 的通道 1 进行管脚复用输出脉冲波。

3 软件设计

3.1 装置控制

基于微根管装置的功能需求,装置控制程序主

要完成对系统的初始化以及对无线通信模块、摄像头、步进电机驱动器的控制,程序流程如图 4 所示。

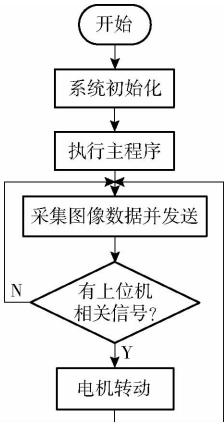


图 4 微根管装置工作流程图

Fig.4 Workflow diagram of minirhizotron device

在各项初始化完成后,微根管装置单片机定时器开启,程序开始进行循环,WiFi 模块工作于 AP 模式下,此时摄像头模块开始进行图像采集,并将 JPEG 图像数据实时发送到上位机。同时单片机对上位机软件发送的信号进行监测,当上位机软件发送相关信号时,下位机将暂停图像传输,进行中断响应,根据相关指令控制电机的具体运动方向,在电机移动完成后返回主循环,继续传输图像数据。

3.2 上位机软件

监测系统软件的开发环境为基于 MFC 的 Visual Studio 软件,采用 C++ 语言进行界面设计。主要实现根系图像实时显示以及手动存储、电机移动控制及观测拍摄实际深度的功能,如图 5 所示。



图 5 根系监测用户界面

Fig.5 Monitoring interface

所开发的系统支持自动观测模式与手动观测模式。系统登陆后可根据实际需求选择进行串口连接或无线连接,并对相关通信参数进行设置。连接成功后系统将显示当前摄像头拍摄的根系图像,分辨率为 320 像素 × 240 像素。在显示图像的同时,通过选择对应功能可以将窗口当前显示的图像存储到本地,也可在左下方窗口查询显示已保存的历史图像,便于对根系发育进行跟踪监测与后续分析。同时该界面能够显示摄像头当前的拍摄深度,并手动

控制摄像头的移动方向与距离。

4 试验与结果分析

4.1 试验条件

为验证微根管装置用于作物根系观测的可行性,在中国农业大学信息与电气工程学院小型日光温室开展盆栽试验,温室环境如图 6 所示,试验时间为 2022 年 3—5 月,选取盆栽番茄为研究对象,栽培基质为泥炭、蛭石、珍珠岩,按体积比 3:1:1 均匀混合而成。



图 6 温室盆栽试验

Fig.6 Greenhouse test environment

4.2 试验方法

在番茄幼苗定植前进行亚克力观察管的安装,微根管与水平方向呈 45° 夹角进行安装,固定好观察管用基质对管周围缝隙进行填补^[26-27]。实际安装效果如图 7 所示。



图 7 微根管装置安装图

Fig.7 Installation of minirhizotron equipment

在完成微根管装置的安装后,给主控板以及步进电机上电,打开 LED 灯,同时在上位机端启动应用界面,设定相关通信参数连接微根管装置,通过步进电机控制摄像头沿导杆循环往复运动,对深度 5 ~ 20 cm 的根系图像进行持续采集,每移动 5 cm 拍摄 1 幅当前深度的根系图像并传输到上位机软件进行存储,采集间隔为 1 h。同时每 7 d 使用土钻法在未安装微根管的盆栽内以 5 cm 深度为间隔进行 1 次分层取样,每次均选择温室内未经土钻法取样的原始盆栽。最后共采集 56 个根系样品,将样品进行清洗获得番茄根系。

4.3 结果与分析

4.3.1 根系生长状况

通过微根管装置对深度 5 ~ 20 cm 的根系进行 98 d 的持续观测,种植 42 d 后的根系图像如图 8 所示。

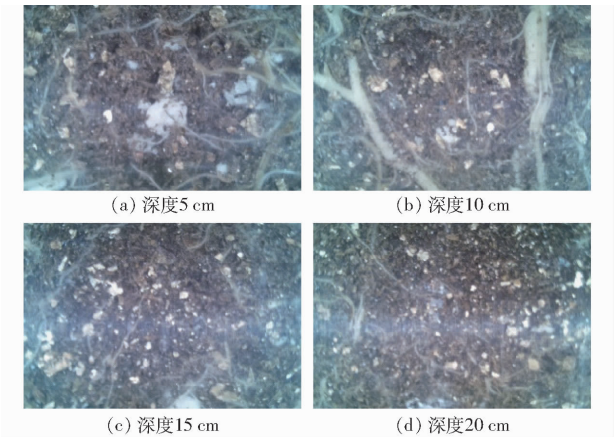


图 8 不同深度根系图

Fig. 8 Root at different depths

由于摄像头靠近监测管壁,因此拍摄范围相应较小,此时圆形管的图像采集区域可近似视为光滑平面,对拍摄产生的畸变影响可忽略不计。从图 8 中可看出,虽然栽培基质环境中的蛭石与珍珠岩干扰较大,但通过微根管装置摄像头采集的图像仍然能够较为清晰地观测到当前番茄根系的生长状况,不同深度下根系的根长、根长密度以及根径等相关参数均存在差异。

总体而言,随着深度不断增加,根长密度逐渐降低,同时根径也逐渐减小,总体来看没有明显的主根与从根的差别,绝大部分根系主要分布在 5 ~ 10 cm 的土层中,并且在同一深度水平分布区域较广、组织密度较大。少部分根系向下生长,分布区域、组织密度均随深度的增加而呈现降低的趋势,符合番茄须根系植物的特点^[28-29]。同时,此时图中大部分根系呈白色,均为处于生长发育阶段的活根,且活根的占比远高于衰老与死亡根系的占比,表明了番茄植株此时正处于生长期。

图 9 展示了不同时期下深度 5 cm 下根系的生长状况,番茄根系根长、根长密度及根径等参数均呈随时间增长态势。

4.3.2 根系参数变化规律

为从根系图像中精确获取根系信息,试验利用 Labelme 对图像进行标注,基于 RhizoVision Explore 根系分析软件对标注后的图像进行分析,包括根长、根径等根系参数。其中,根长密度能够较好地反映根系的生长状况,其计算公式为^[30]

$$\rho_{RLD} = L / (A L_{DOF}) \tag{1}$$

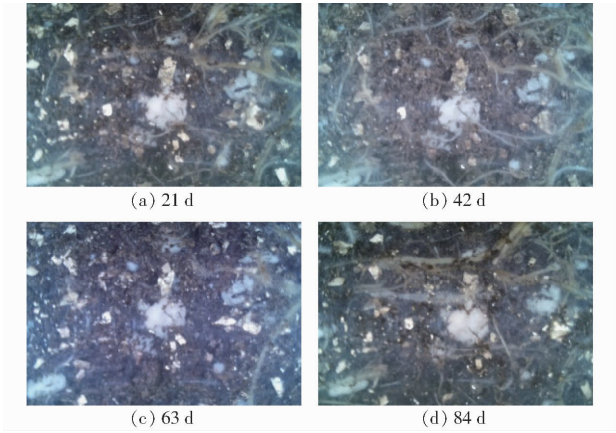


图 9 不同时期根系图

Fig. 9 Root at different stages

式中 ρ_{RLD} ——根长密度, cm/cm^3
 L ——微根管中观察到的根长, cm
 A ——微根管内的观察面积, cm^2
 L_{DOF} ——微根管壁到周围土壤距离, cm

图 10 为番茄定植 56 d 后基质深度 5 cm 处的根系原始图像及处理后的图像。在此基础上,从微根管装置采集的番茄根系图像中选取 14 组图像进行根系参数分析,每组共有 4 幅图像,各组图像采集间隔为 7 d。

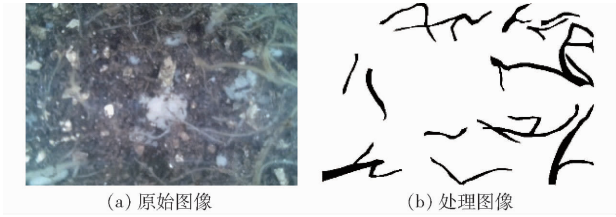


图 10 图像处理效果图

Fig. 10 Image processing effects

对于土钻法获取的根系样品,利用根系扫描仪 WinRHIZO 进行扫描生成 jpg 格式图像文件,并使用该扫描仪配备的根系分析软件对扫描获得的图像进行参数提取,通过样品体积和根长计算对应样品的根长密度。

图 11 为微根管法与土钻法获得的番茄根长密度数据比较,其中用于对比的 56 个样本在趋势线两侧分布较为均匀,决定系数 R^2 为 0.886 2,表明 2 种方法具有较高的相关性。因此,微根管装置能够应用于根系生长监测。

经过计算,微根管装置采集的番茄 98 d 根长密度变化如图 12 所示。由图 12 可知,不同时期、不同深度下的番茄根长密度均有差异。各深度的根长密度随时间均呈现逐渐上升的趋势,7 ~ 14 d 时深度 15 cm 及 20 cm 处的根长密度均为 0;深度 10 cm 处的根长密度除第 84 天略低于深度 5 cm 外其它时间均高于其它监测点;各深度的根长密度在前 70 d 增

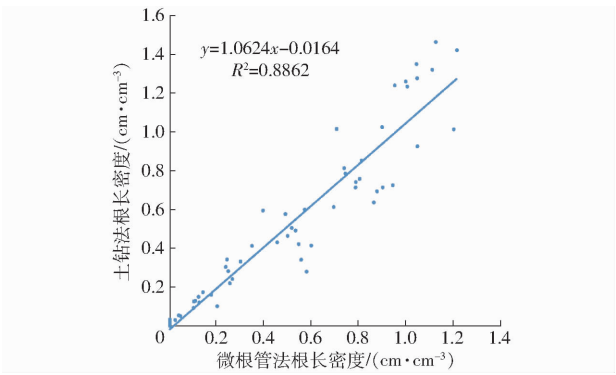
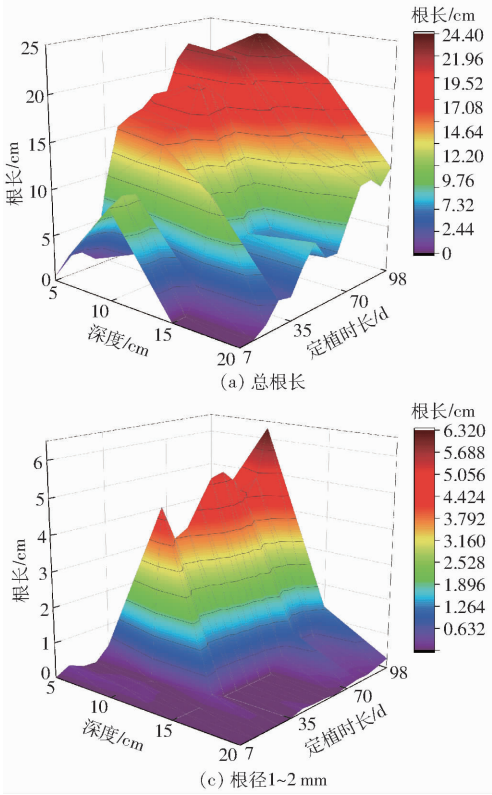


图 11 微根管法与土钻法对比

Fig. 11 Comparison between minirhizotron method and soil drilling method

长较快,后 28 d 增长趋于稳定,在深度 10 cm 处于第 91 天达到最大值(1.22 cm/cm³)。

图 13 展示了番茄根系在不同时间、不同深度下



(a) 总根长

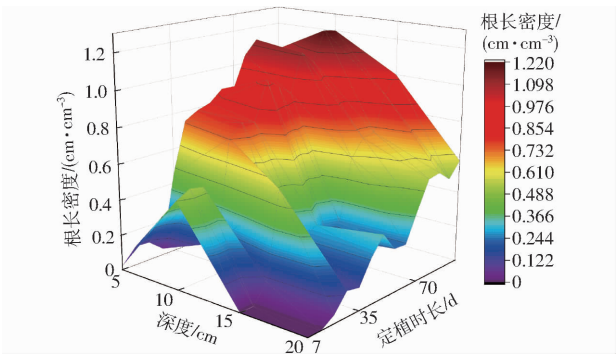
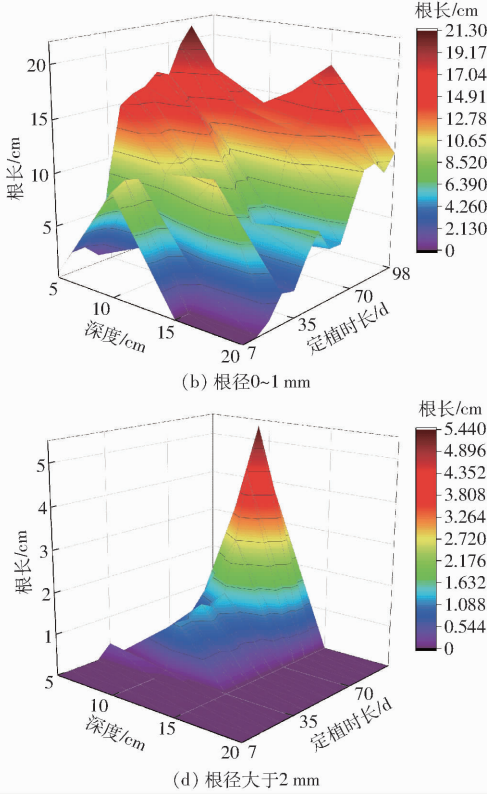


图 12 根长密度变化图

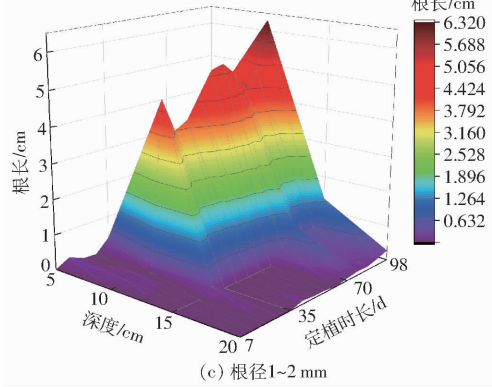
Fig. 12 Change in root length density

总根长及不同直径根长的变化情况。

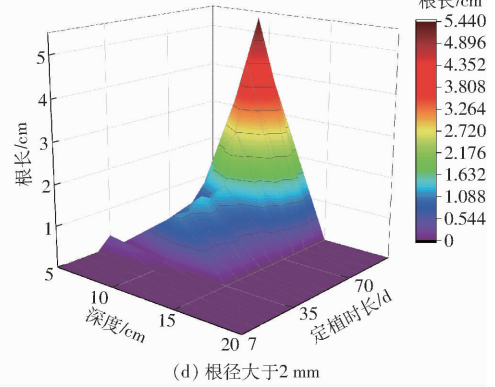
由于根长密度与总根长呈线性关系,图 13 中总根长变化与根长密度具有相似的变化趋势。随着根径增大,观测到的根长随之减小。在根径 0 ~ 1 mm



(b) 根径0~1 mm



(c) 根径1~2 mm



(d) 根径大于2 mm

图 13 不同根径根长变化图

Fig. 13 Changes in root length with different root diameters

范围内,深度 5 cm 的根长普遍大于其它深度。在根径 1 ~ 2 mm 的范围内,深度 10 cm 的根长均大于其它位置,在第 98 天时达到最大值 6.32 cm。根径大于 2 mm 的仅在深度 5 cm 和 10 cm 出现,并主要集中于深度 10 cm。

5 结束语

通过对微根管外壳材料、尺寸设计和嵌入式控

制系统的开发,设计了一种作物根系生长监测微根管装置。该装置能够全自动周期持续获取根系图像,保证了根系观测的连续性。观测结果表明番茄根系主要分布于深度为 5 ~ 10 cm 的基质中,该深度下的根长及根长密度均高于其它深度。根系整体前 70 d 生长速度较快,后 28 d 逐渐趋于稳定,符合番茄根系的生长发育规律,表明本装置能够对作物根系生长过程进行持续监测。

参 考 文 献

- [1] 雷宏军,金翠翠,潘红卫,等. 水气互作对辣椒根系形态、产量和品质的影响效应[J]. 农业机械学报,2022,53(12):344–352.
LEI Hongjun, JIN Cuicui, PAN Hongwei, et al. Integrative effects of irrigation and aeration on root morphology, yield, and quality of pepper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(12):344–352. (in Chinese)
- [2] 张作合,张忠学,李铁成,等. 水炭运筹下水稻根系对氮素吸收利用的¹⁵N示踪分析[J]. 农业机械学报,2021,52(6):295–304.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. ¹⁵N tracer analysis of nitrogen uptake and utilization by rice roots under water and biochar management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):295–304. (in Chinese)
- [3] 邓欢,戴飞,史瑞杰,等. 基于 HYDRUS-2D/3D 的玉米全膜双垄沟水肥运移规律与根系响应[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊2):100–108.
DENG Huan, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Water and fertilizer transport law and root response of maize in full-film furrows based on HYDRUS-2D/3D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp.2):100–108. (in Chinese)
- [4] 朱惠斌,赵浩然,左玉坤,等. 深松方式对山地烟根系形态与烤烟性状的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊2):60–68.
ZHU Huibin, ZHAO Haoran, ZUO Yukun, et al. Effects of subsoiling methods on root morphology and flue-cured tobacco traits of mountainous tobacco[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp.2):60–68 (in Chinese)
- [5] YI K, LI X, CHEN D, et al. Shallower root spatial distribution induced by phosphorus deficiency contributes to topsoil foraging and low phosphorus adaption in sugarcane[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12:797635.
- [6] YAN S Y, WENG B S, JING L S, et al. Adaptive pathway of summer maize under drought stress: transformation of root morphology and water absorption law[J]. Front. Earth Sci., 2022, 10:1020553.
- [7] 夏桂敏,王宇佳,王淑君,等. 灌溉方式与生物炭对花生根系、磷素利用及产量的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(2):316–326.
XIA Guimin, WANG Yujia, WANG Shujun, et al. Effects of irrigation methods and biochar on peanut root, phosphorus utilization and yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(2):316–326 (in Chinese)
- [8] 肖爽,刘连涛,张永江,等. 植物微根系原位观测方法研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(2):370–385.
XIAO Shuang, LIU Liantao, ZHANG Yongjiang, et al. Review on new methods of in situ observation of plant micro-roots and interpretation of root images[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020,26(2):370–385. (in Chinese)
- [9] DASSOU O, NODICHAO L, AHOLOUKPÈ H, et al. Improving the methodology for root biomass estimation in monocotyledonous tree plantations: case of oil palm (*Elaeis guineensis*. Jacq) in west Africa[J]. Plant and Soil, 2021, 465(1):593–611.
- [10] 温维亮,郭新宇,赵春江,等. 作物根系构型三维探测与重建方法研究进展[J]. 中国农业科学,2015,48(3):436–448.
WEN Weiliang, GUO Xinyu, ZHAO Chunjiang, et al. Crop roots configuration and visualization: a review[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015,48(3):436–448. (in Chinese)
- [11] ZHANG Z, ZHU L, LI D, et al. Root phenotypes of cotton seedlings under phosphorus stress revealed through RhizoPot[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12:716691.
- [12] KIKUCHI S, HORIUCHI A, NISHIMOTO Y, et al. Different effects of gellan gum and agar on change in root elongation in *Arabidopsis thaliana* by polyploidization: the key role of aluminum[J]. Journal of Plant Research, 2023, 136(2):253–263.
- [13] 刘凯,李文彬,赵玥,等. 基于微根管图像的根系形态特征快速提取技术[J]. 中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):129–136.
LIU Kai, LI Wenbin, ZHAO Yue, et al. Rapid extraction technology of the root morphological characteristics via minirhizotron image[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(4):129–136. (in Chinese)
- [14] RAHMAN G, SOHAG H, CHOWDHURY R, et al. SoilCam: a fully automated minirhizotron using multispectral imaging for root activity monitoring[J]. Sensors, 2020, 20(3):787.
- [15] MAXIMILIAN F B, LENA L, SHEHAN M, et al. Development and validation of a deep learning based automated minirhizotron image analysis pipeline[J]. Plant Phenomics, 2022, 2022:9758532.
- [16] ZHU L, LIN C, HUANG C, et al. Root estimation accuracy and sampling representativeness in relation to sample size in a subtropical evergreen broad-leaved forest: comparison between soil core and minirhizotron method[J]. New Forests, 2021, 53(4):1–18.
- [17] DEFRENNE C E, CHILDS J, FERNANDEZ C W, et al. High-resolution minirhizotrons advance our understanding of root-fungal dynamics in an experimentally warmed peatland[J]. Plants People Planet, 2021, 3(5):640–652.
- [18] 廖荣伟,刘晶淼,安顺清,等. 基于微根管技术的玉米根系生长监测[J]. 农业工程学报,2010,26(10):156–161.
LIAO Rongwei, LIU Jingmiao, AN Shunqing, et al. Monitor of corn root growth in soil based on minirhizotron technique[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10):156–161. (in Chinese)
- [19] ARNAUD M, BAIRD A J, MORRIS P J, et al. EnRoot: a narrow-diameter, inexpensive and partially 3D-printable

minirhizotron for imaging fine root production[J]. *Plant Methods*, 2019,15(1): 1–9.

[20] ZWETSLOOT M J B T L. Repetitive seasonal drought causes substantial species-specific shifts in fine-root longevity and spatio-temporal production patterns in mature temperate forest trees[J]. *The New Phytologist*, 2021, 231(3): 974–986.

[21] 陈文岭,靳孟贵,刘延锋,等. 微根管法监测膜下滴灌棉花根系生长动态[J]. *农业工程学报*,2017,33(2):87–93.
CHEN Wenling, JIN Menggui, LIU Yanfeng, et al. Monitoring cotton root growth dynamics under mulched drip irrigation using minirhizotron technique[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(2): 87–93. (in Chinese)

[22] 胡敏,郭强,习向东,等. 玻璃钢管材新型无损检测研究进展[J/OL]. *材料导报*:1–13[2023–08–21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230801.1447.002.html>.
HU Min, GUO Qiang, XI Xiangdong, et al. Research progress of new nondestructive testing of GFRP pipes[J/OL]. *Materials Reports*: 1–13[2023–08–21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230801.1447.002.html>. (in Chinese)

[23] 韩石磊,张付申. 废弃生物可降解塑料的处理方法与发展趋势[J/OL]. *中国环境科学*:1–19[2023–08–21]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230815.006>.
HAN Shilei, ZHANG Fushen. Disposal and development tendencies of waste biodegradable plastics [J/OL]. *Chinese Environmental Science*: 1–19[2023–08–21]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230815.006>. (in Chinese)

[24] 吴元昊,孙旻,洪泽群. 人工冻土水热侵蚀问题室内试验研究[J]. *岩土工程学报*,2022,44(增刊2):173–178.
WU Yuanhao, SUN Min, HONG Zequn. Laboratory tests on fluvial-thermal erosion of artificial frozen soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022,44(Supp.2): 173–178. (in Chinese)

[25] WITHINGTON J M, ELKIN A D, BOLAJ B, et al. The impact of material used for minirhizotron tubes for root research[J]. *New Phytologist*, 2003, 160(3):533–544.

[26] CSERESNYÉS I, KELEMEN B, TAKÁCS T, et al. Electrical capacitance versus minirhizotron technique: a study of root dynamics in wheat-pea intercrops[J]. *Plants*, 2021, 10(10): 1991.

[27] WINDISCH S H, SOMMERMAN L, BABIN D,et al. Impact of long-term organic and mineral fertilization on rhizosphere metabolites, root-microbial interactions and plant health of lettuce[J/OL].*Frontiers in Microbiology*, 11:597745[2023–08–21]. DOI:10.3389/fmicb.2020.597745.

[28] 苗宇,蒋舒蕊,赵凯,等. 不同植物生长调节剂对番茄种子萌发和根系生长的影响[J]. *现代园艺*,2023,46(17):56–58.

[29] 赵文举,马锋,曹伟,等. 水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J]. *农业工程学报*,2022,38(2):95–101.
ZHAO Wenju, MA Feng, CAO Wei, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of tomatoes[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(2): 95–101. (in Chinese)

[30] 李燕丽,王昌昆,卢碧林,等. 基于微根管技术的盐胁迫下小麦根系生长原位监测方法[J]. *土壤学报*,2021,58(3):599–609.
LI Yanli,WANG Changkun,LU Bilin,et al. In-situ monitoring method of wheat root growth under salt stress using minirhizotron technique[J]. *Acta Pedologica Sinica*,2021,58(3):599–609. (in Chinese)