文章编号:1007-2284(2023)12-0248-10

中国农村水利水电

水利工程

# 基于微根管观测的 盐渍农田向日葵根系三维结构模拟

言巍鹏<sup>1</sup>,何良伟<sup>1</sup>,雷国庆<sup>1,2</sup>,曾文治<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学水利水电学院,湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘 要:根系作为作物汲取水分、养分的重要器官,其形态结构量化对于田间水肥管理具有重要意义。然而相比于 地上部分,当前关于根系形态结构的研究十分有限,特别是在盐渍土壤。以内蒙古河套灌区开展的盐渍农田向日葵田间 实验为背景,利用微根管法对不同盐分田块(低盐 S1,高盐 S2)的向日葵根长密度(*RLD*)动态变化进行了观测,并结合 RootBox根系结构模型(RSA)对各田块作物根系三维结构进行模拟。结果显示,RootBox模型能够较好地模拟不同盐分下 大田向日葵的根系形态,其微根管观测点的*RLD*模拟值与实测值接近,*R*<sup>2</sup>超过0.73,*RRMSE*小于0.28,但S2田块*RLD*模拟 精度相对较低,*RMSE*比S1田块的高0.31 cm/cm<sup>3</sup>。并且,S1田块平均*RLD*模拟分布与微根管*RLD*观测值分布接近,而在 S2田块,二者差异较为显著,特别是在60~90 cm 土层。上述结果表明,微根管观测法和根系结构模型可为盐渍农田作物 根系形态结构量化提供工具支持,并且高盐田块作物根系量化效果受土壤盐分影响更为显著。

关键词:盐渍农田;向日葵;根系;微根管;根系结构模型

中图分类号:[TV93] 文献标识码:A DOI:10.12396/znsd.230159

言巍鹏,何良伟,雷国庆,等.基于微根管观测的盐渍农田向日葵根系三维结构模拟[J].中国农村水利水电,2023(12):248-257.DOI:10.12396/znsd.230159.

YAN W P, HE L W, LEI G Q, et al. Three-dimensional structure simulation of sunflower root system in saline farmland based on minirhizotron observation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(12): 248-257. DOI: 10.12396/znsd.230159.

# Three-dimensional Structure Simulation of Sunflower Root System in Saline Farmland Based on Minirhizotron Observation

### YAN Wei-peng<sup>1</sup>, HE Liang-wei<sup>1</sup>, LEI Guo-qing<sup>1,2</sup>, ZENG Wen-zhi<sup>1,2</sup>

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China; 2. State Key

Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China) **Abstract**: As an important organ for crops to absorb water and nutrients, the quantification of root system is of great significance for water and fertilizer management in the field. However, compared with aboveground parts, the current studies on root system architecture are very limited, especially in saline soils. In this paper, the dynamic changes of sunflower root length density (*RLD*) in different salt fields (low saline S1, high saline S2) were observed by using minirhizotron based on the experimental data of saline farmland sunflower in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, and the three–dimensional structure of crop roots in each field was simulated by combining root system architecture model (RSA) RootBox. The results showed that RootBox could well simulate the root system of sunflower under different salinity. The simulated *RLD* values of minirhizotron observation site were close to the measured values,  $R^2$  was more than 0.73 and *RRMSE* was less than

基金项目:黑龙江省重点研发项目(2022ZX01A26);国家自然科学基金项目(52209066)。

作者简介:言巍鹏(1997-),男,硕士研究生,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:2015301580162@whu.edu.cn。

通讯作者:曾文治(1989-),男,副教授,博士,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:zengwenzhi1989@whu.edu.cn。

收稿日期:2023-02-10 接受日期:2023-10-18

249

0.28. However, the *RLD* simulation accuracy of S2 field was relatively lower, and *RMSE* was 0.84 higher than that of S1 field. Moreover, the simulated average *RLD* distribution in S1 field was close to the observed minirhizotron *RLD* distribution, while the difference was significant in S2 field, especially in the 60–90 cm soil layer. These results indicated that the minirhizotron method and root system architecture model could provide support for quantifying the morphological structure of crop roots in saline fields, and the quantitative effect of crop roots in high saline fields was more significantly affected by soil salinity.

Key words: saline farmland; sunflower; root system; minirhizotron; root system architecture model

# 0 引 言

土壤盐渍化是制约土壤肥力、生物活性和农业生产力的重要因素之一<sup>[1]</sup>。我国盐渍土面积广袤,达14.8亿亩,其中可利用面积约5.4亿亩,主要分布在新疆、内蒙和甘肃等西北旱区"丝路经济带"重点发展区域<sup>[2,3]</sup>。根系,作为作物"隐藏"的一半,通过与土壤密切接触,不断从中汲取水分和养分,以保证作物的正常生长。准确描述盐渍农田作物根系结构(Root System Architecture,RSA)对于盐渍土地区水肥管理策略制定和作物抗逆潜力挖掘具有重要意义。

然而,受限于观测手段,相比于地上部分,当前关于RSA的 研究十分有限。在田间尺度根系形态研究中,通常采用破坏性 采样方法,包括土壤取芯、全根系挖掘等来观测作物根系状 态[4]。这些方法往往存在一定局限性,如破坏性采样会对作物 生长产生不利影响,甚至导致其死亡;并且,根系结构庞杂脆 弱,破坏性采样往往很难获取较为完整的根系结构,进而无法 反映根系生长全貌。与破坏性采样方法不同,根窗法、微根管 法(Minirhizotron)通过在作物根区设置透明观测面,原位观测透 明界面处根系形态特征以表征相应区域根系生长状况[5-8]。相 比破坏性采样方法,微根管法能够对单根或者某个根系结构的 动态变化进行原位连续监测,有助于对植物根系生长、死亡和 分解等特征的详细研究<sup>[9-11]</sup>。然而,微根管法也存在一定局限, 如长时序微根管观测以及根系识别工作费时、费力,且微根管 法只能测量微根管周围根系结构的局部信息,在不同土壤环境 下(如不同程度的盐分影响),微根管观测到的根系信息能否准 确反映根系形态结构尚不清楚[12]。

近年来,随着根系表型观测技术和计算机科学的发展,学 者们通过对根系角度、单根生长速率和分枝频率等根系微观形 态及生长规则进行量化,提出了三维根系结构模型(threedimensional Root System Architecture Models, 3-D RSAM),尝试 对整个根系系统的三维可视量化。DEANS和FORD<sup>[13]</sup>以根系 分支角、弯曲点等空间坐标以及总根数和根茎比等作为输入变 量,构建了云杉树的RSA。PAGES<sup>[14]</sup>和DIGGLE<sup>[15]</sup>提出基于生 长规则的根系模型,分别描述了玉米与小麦根轴和根尖的伸长 和分支过程,可以用于推测难以测量的根系特征。PAGES等<sup>[16]</sup> 还提出了通用根系模型 RootTyp,实现了对不同根系构型的模 拟。SPEK<sup>[17]</sup>和LYNCH<sup>[18]</sup>则以可视化为研究重点,在考虑根系 的空间异质性和随机性影响的基础上,实现对模拟根系的连续 动态可视化。GARRÉ<sup>[19]</sup>等人在使用 RootTyp 过程中引入微根 管测量图像数据对模型参数化,为校准和验证根系结构模型提 供了更为详细的数据。国内学者也针对根系三维结构模型进 行了大量研究:钟南<sup>[20]</sup>、刘桃菊<sup>[21]</sup>和冀荣华<sup>[22]</sup>等先后基于L-系 统,对大豆、水稻和番茄的根系进行了三维可视化模拟。张吴 平<sup>[23]</sup>等基于 GREENLAB 模型的原理构建了以小麦根系可利用 生物量分配为基础的根系生长发育模型。彭英等<sup>[24]</sup>基于L系 统定义了水稻单根生长与分支规则,构建了水稻根系结构模 型,模拟水稻根系在重力因子及偏转因子影响下的动态生长变 化过程,并实现了水稻三维根系结构可视化。根系三维结构模 型的提出为探索变化环境下植物根系表型的研究提供了工具 支持:LEITNER等<sup>[25]</sup>借助Lindenmayer系统(L系统)分型算法构 建了动态三维根系生长模型RootBox。该模型简化了参数的输 入过程,并实现了根尖向水性、向地性等不同类型趋向的随机 生长过程。RootBox 还具备与各种土壤模型耦合的潜力,便于 揭示在不同土壤环境下根系结构与环境之间的相互影响。 MORAES<sup>[26]</sup>等人就基于RootBox模型,探索了大豆根系伸长与 土壤压强、水分胁迫等土壤物理特性的关系。FANG Y<sup>[27]</sup>等人 基于eSTOMP模型引入根环蒸腾作用,实现土壤-根系系统水分 与养分吸收动态过程的模拟。在盐渍土壤,根系的生长发育过 程会受到盐分的影响,盐分胁迫可能导致主根和侧根的生长受 到抑制作用<sup>[28]</sup>。高粱等对盐敏感的物种为逃离盐分胁迫,会表 现出负向盐性(远离盐分)的根系结构变化<sup>[29]</sup>。然而,盐分对根 系生理过程与根系结构的影响机理复杂,当前盐分胁迫下根系 生长响应与模拟的研究较少。

综上所述,目前根系结构模型研究存在着一定不足,如当 前根系结构多关注于单株植物根系的模拟,缺乏对田间尺度群 体植物根系的模拟;在田间尺度,受作物种植方式影响,如何根 据有限的田间观测(如微根管观测),对三维根系结构模型进行 校验尚需进一步探索;盐分胁迫下根系生长响应与根系形态结 构的变化还不够清楚。针对上述问题,本文以盐渍农田微根管 观测得到的向日葵根长密度(Root Length Density, *RLD*)动态变 化为研究对象,利用 RootBox模型对不同盐渍化水平下的作物 根系结构进行了模拟。基于根系的三维模拟结果,对不同盐渍 化水平下各剖面的根长密度动态变化进行了比较分析。通过 上述分析,本文尝试①基于微根管观测,利用 RootBox 模型对田 间尺度的作物三维根系结构进行模拟;②比较不同盐渍化水平 下根系形态结构及剖面根长密度动态变化;③探究不同盐渍化 水平下微根管局部观测信息与相应土层作物根系平均状态的 差异。

# 1 材料与方法

#### 1.1 实验区概况

实验于内蒙古河套灌区义长灌域永联实验站展开。义长

灌域位于河套灌区东北部,地理位置为东经107°37′~108°51′, 北纬40°45′~41°17′。现有灌溉面积1843.47 km²,耕地面积占 总土地面积的57.3%,是河套灌区最大的灌域。灌域属于中温 带大陆性季风气候,具有日照充足、干燥多风、降雨量少的特 点。年平均气温6.1°C,无霜期117~136 d,年平均太阳辐射总 量642.3 kJ/cm²。年降水量为139~222 mm,且集中在6~8月间, 年蒸发量为2200~2400 mm,蒸降比在10以上。强烈的蒸发使 得成土母质中大量的盐分随着土壤水及地下水不断向上运移, 水分在土壤表面蒸发后,其所携带的盐分在土壤表层聚集,造 成了灌区严重的盐渍化问题<sup>[30]</sup>。

# 1.2 实验设计

实验在两个土壤盐分差异比较明显田块S1(低盐)和S2(高盐)进行。各土壤指标均于播种前测定。土壤容重采用环刀法测定,测得0~100 cm剖面土壤容重为1.35~1.51 g/cm<sup>3</sup>。S1和S2 田块作物全生育期的土壤含盐量根据1:5水土比的土壤浸提液结果推算。根据曾文治<sup>[31]</sup>等的实验确定的换算公式:

$$EC_e = 7.4 \times EC_{1.5} \tag{1}$$

将浸提法电导率 EC<sub>1:5</sub>(dS/m)换算得饱和电导率 EC<sub>e</sub>(dS/m)确定土壤含盐量,测得播种前0~100 cm土壤平均饱和电导率 EC<sub>e</sub>分别为1.07~2.84 dS/m和1.05~5.95 dS/m。取土壤浸提液上清液为测得大田土壤 pH约在8~8.3,为碱性土壤。对大田土壤剖面分层取样测定大田实验土壤质地,取样单元在0~40 cm 土壤为10 cm、在40~100 cm土壤为20 cm,通过吸管法和激光粒度仪法测定。根据USDA土壤质地划分标准,大田土壤类型主要为粉土和粉壤土。

覆膜完成后进行充分灌溉,灌溉深度约为30 cm。待土壤 水分达到播种适宜含水量后,于2017年5月27日与周边田块农 民同步播种。实验选取向日葵为供试品种,采用膜上穴播的方 式播种,一穴三粒(出苗后约一周间苗,保留长势较好的1株), 每条地膜播种两行,播种行距和株距为50 cm×50 cm,向日葵种 植区域的空间分布如图1。在向日葵整个生育期内不灌水,其 他除草、杀虫等田间管理措施与当地农民保持一致。向日葵的 收获时间为2017年9月15日。

通过在各实验田块2m范围内布设的地下水位观测井观测 地下水位,观测频率为逐日观测,观测数据如图2所示。







Fig.2 The observed groundwater table of field experimental site during the whole growth period

#### 1.3 数据获取

本研究利用 ROOT-700 微根管根系观测系统对向日葵的根 系生长过程进行观测。根系在成熟期前停止生长,观测时间参 照向日葵苗期开始与花期结束时间节点,以10天为观测间隔按 播种后天数(DAS)为28、38、48、58、68和78对根系进行一次扫 描。在向日葵播种前,预先在各实验小区第二条地膜中轴位置 平行安装4根间距为100 cm,长度为200 cm,内径为7.1 cm透明 微根管,微根管埋入地下约为1.5 m,露出地面0.5 m,露出部分 用黑色胶带和棉布包裹,避免透光。微根管埋设角度为与地面 呈45°夹角,垂直埋深约为100 cm。微根管测定需将长约35 cm 的扫描探头,以20 cm 为一个控制单元逐层伸入微根管内,进行 分层扫描,扫描后将微根管密封,防止水汽进入。将扫描得到 的图像利用导入WinRHIZO软件,利用其自带的颜色识别功能 结合肉眼识别,将具有生物活性的向日葵根系长度进行识别。 为更好描述田间的根系状态,常将平面数据转换成空间数据, 即通过假定一个图层厚度将识别的根系长度转换成根长密度。

#### 1.4 RootBox 模型原理

RootBox 动态三维根系模型基于L系统分型算法编写,简洁 地描述了根系的分支几何图形。算法由字符串编写系统构建, 根系每个特定实体都使用字符表示,并依据具体的生长规则迭 代。生长规则根据模拟需求不同选择,模型选择 ROOSE<sup>[31]</sup>等人 的连续根生长模型用于描述单个根的生长。在不考虑胁迫的 情况下,单根的生长遵循时间为变量的负指数函数,即在达到 预定的最大根系长度 k 之前根系会保持生长过程<sup>[14]</sup>。t时刻的 单根根长 L 为:

$$L(t) = k \left( 1 - e^{-\frac{re}{k}t} \right) \tag{2}$$

式中:L为根长, cm;t为时间, d;k为最大根长, cm;re为初始根系 伸长率, cm/d。

模型在结构上采用了根系自相似结构,将根系分为结构相 似的多级单根,各单根按顺序产生侧根。每个单根分为基区、 分枝区和顶端区,最大根长度k也由3个分区长度组成:基区长 度、根尖顶端区长度,侧枝的间距与数量之积<sup>[33]</sup>。最大长度k表 达式为:

$$k = l_a + l_b + l_n (n_b - 1)$$
(3)

式中:k为最大根长, cm; $l_b$ 为基带长度, cm; $l_a$ 为根尖带长度, cm; $l_a$ 为分支间距; $n_b$ 是侧枝的最大数量。

靠近根的基部的基部区和位于根尖的顶端区不产生分支, 分支区产生连续的新的侧根。分支的空间偏转则由预定义的 轴向分枝角θ和不同类型的趋向性实现(见图3)。



Fig.3 Levels of the root system and description of parameters

### 1.5 作物三维根系模拟

本文尝试基于田间微根管观测得到的向日葵*RLD*指标,利 用 RootBox 模型对田间向日葵根系三维结构进行模拟。首先, 确定单株向日葵根系的模拟区域,以作物种植点为中心,水平 方向距离模拟边界为90 cm,模拟深度为105 cm;根据微根管的 埋设点与作物的相对位置及角度,确定微根管可能观测到的植 株范围为两行5排,共10株作物;根据微根管分层观测位置,将 待测植株对应位置的根长进行叠加,根长累加后除以对应的土 体体积,即获得微根管对应位置处的根长密度模拟结果。在模 拟过程中以1 cm×1 cm为一个模拟单元,如图1所示:以首 株向日葵模拟域顶点为坐标原点,以垂直于地面方向为z轴,向 上为正,水平方向平行与微根管观测面方向设为x轴,垂直与微 根管观测面为y轴。模拟时间为播种开始至播种后第78天。

在模型参数校验过程中,本文首先参考了谢军和 VALÉRIE SRRA<sup>[33]</sup>的参数取定初值,并通过敏感性分析确定校 验的参数包括主根、一阶和二阶侧根初始伸长率(Initial Root elongation rate,*r*<sub>e</sub>)、一阶侧根基生区长度(Length of basal zone, *L*<sub>b</sub>)、二阶侧根长度(Length of root)等。然后,利用PEST参数优 化方法,以微根管观测值和*RLD*模拟值的误差平方和最小为优 化目标,对模型参数进行自动优化,优化后参数基础值如表1所 示。最后根据时间与深度的影响系数对模型进行反演,并确定 最终参数。此外,为探究剖面根长密度动态变化和田间尺度根 系平均状态,我们对模拟区域*RLD*分布进行了切分。其中,切 片以10 cm×15 cm 为模拟单元,选取垂直于微根管所在平面的 *YZ* 平面、平行于微根管所在平面的*XZ* 平面和*XY* 水平面3个方 向对模拟域的向日奏根系进行了切分。

# 1.6 数据统计与分析方法

#### 1.6.1 计算机软件

本文关于实验数据、统计指标计算等数据处理工作基于R 语言(version 4.0.4 (2021-02-15))和Rstudio(Version 1.1.463) 编译完成。图像绘制与分析基于R语言基础作图模块和 ggplot2作图完成。RootBox模型对三维根系结构的模拟基于 matlab(9.6.0.1072779(R2019a))编译完成。根系图像识别和特 征指标获取基于WinRHIZO(2015a Pro,版权:1993-2015加拿 大Regent设备有限责任公司)根系分析软件完成。

符号		参数名称	参数值基础值
	r <sub>e</sub>	初始伸长率/(cm·d <sup>-1</sup> )	5.000
	a	根径/cm	0.033
	la	顶生区长度/cm	10.000
	lb	基区长度/cm	1.000
主根	ln	分支间距/cm	0.400
	nb	最大分支数	300.000
	$\sigma$	根尖期望弯曲度/(rad·cm <sup>-1</sup> )	0.250
	type	偏转类型	1.000
	N	偏转强度	3.000
	dx	根系空间分辨率/cm	0.500
	r <sub>e</sub>	初始伸长率/(cm·d <sup>-1</sup> )	4.600
	a	根径/cm	0.033
	la	顶生区长度/cm	5.000
一阶侧根	lb	基区长度/cm	3.000
	ln	分支间距/cm	0.450
	nb	最大分支数	120.000
	$\sigma$	根尖期望弯曲度/(rad·cm <sup>-1</sup> )	0.250
	type	偏转类型	2.000
	N	偏转强度	5.000
	dx	根系空间分辨率/cm	0.500
	$r_{e}$	初始伸长率/(cm·d <sup>-1</sup> )	2.500
	a	根径/cm	0.020
二阶侧根	la	顶生区长度/cm	7.500
	lb	基区长度/cm	0
	ln	分支间距/cm	0
	nb	最大分支数	0
	$\sigma$	根尖期望弯曲度/(rad·cm <sup>-1</sup> )	0.250
	type	偏转类型	2.000
	N	偏转强度	1.000
	dx	根系空间分辨率/cm	0.500

表1 向日葵根系结构参数基础值

Tab.1 Basic value of root architecture parameters of sunflower

#### 1.6.2 PEST 参数估计

PEST(Parameter ESTimation)是一种流行的参数率定程序, 用于校正模型提高模型的预测精度。PEST模型由John.Doherty 研制,于1994年首次提出<sup>[35]</sup>,为解决调参过程繁琐的困难而生, 至今已经发展成为目前最常用的参数率定程序之一。PEST允 许任意模型进行参数估计和数据解释,利用模型的输入输出文 件和外接模型进行数据交换连接,达到不对外接模型做任何修 改就能实现参数优化的目的<sup>[36]</sup>。

PEST软件的核心是求解目标函数的最小值,即实验观测值 与模拟值差值最小,采用Gauss-Marquardt-Levevberg(GML) 算法对目标函数求解<sup>[36]</sup>。在处理多参数大数据参数率定时,借 助PEST模型能够快速有效的完成目标,并减少人工试错的主 观影响。

#### 1.6.2 统计指标

本文采用决定系数(R<sup>2</sup>)、均方根误差(RMSE)、相对均方根 误差(RRMSE)和纳什系数(NSE)指标对模型的模拟精度进行 评价。其中,RMSE和RRMSE越接近于0,R<sup>2</sup>和NSE越接近于1 表示模拟精度越高。具体计算公式如下:

$$R^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{m} Y_{i}^{o} Y_{i}^{s} - \sum_{i=1}^{m} Y_{i}^{o} \sum_{i=1}^{m} Y_{i}^{s} / m}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{m} \left(Y_{i}^{o}\right)^{2} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{m} Y_{i}^{o}\right)^{2}}{m}\right]}\left[\sum_{i=1}^{m} \left(Y_{i}^{s}\right)^{2} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{m} Y_{i}^{s}\right)^{2}}{m}\right]}{(4)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}$$
(5)

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\overline{O}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}}{\overline{O}}$$
(6)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2}$$
(7)

# 2 结果与分析

# 2.1 根系三维模拟效果

RootBox模拟得到向日葵三维根系及微根管观测处的模拟

值与观测值比较如图4~6所示。可以看出,低盐田块的模拟结 果优于高盐田块。其中,S1田块的决定系数R<sup>2</sup>和纳什系数NSE 分别比高盐田块高 0.05 和 0.03, 而均方根误差 RMSE 和相对均 方根误差 RRMSE 分别比高盐田块降低 0.31 cm/cm3和 0.20,这也 与图3(b)中曲线所变现出模拟值与实际值存在较大差距的情 况所吻合。在不同深度,S1田块RLD模拟值与微根管观测值差 距均不超过0.5 cm/cm3;S2田块在45 cm以下土层中开始出现模 拟效果较差的情况,特别在75~90 cm 土层内 RLD 模拟值与微根 管观测值差距最大接近1.5 cm/cm3。从图5和图6可以看出,与 数值比较结果类似,同一深度S2田块相较S1田块根系三维分 布更密集,特别是DAS 38天45~75 cm的图像更为显著。在不 同时段,S1田块向日葵RLD的模拟效果均较好,仅DAS 68~78 天地下15~60 cm 土层根系密度模拟差别较大,在 DAS 78 天 60 cm 处存在最大误差 0.5 cm/cm3; 而 S2 田块在前期模拟偏差较 大,DAS 28天45 cm 土层、DAS 38天75 cm 土层和 DAS 48~58天 90 cm 土层偏差均超过 1.0 cm/cm3。相较 S1 田块, S2 田块前期 (DAS 28、38 和48)三维根系分布变化较快,根系密集程度增加 迅速。



图4 低盐和高盐田块向日葵不同土层深度RLD实测值与模拟值动态变化

#### Fig.4 Dynamic changes of measured and simulated RLD values at different soil depths in low salt and high salt fields of sunflower

表2 不同盐分田块*RLD* 模拟统计指标

#### Tab.2 Statistical indexes of simulated *RLD* in different salinity field

# 2.2 根系剖面分析

向日葵根系模拟区域 DAS 28、48 和 68 的 YOZ、XOZ 切面和 不同深度的水平切面的根长密度分布如图 7~9 所示。

如 YOZ 切面所示, DAS 28 天之前两田块根系下扎速度相同, 在 DAS 28 天均生长到 75 cm 深, 且根系空间中分布范围相同。但是 RLD 差距却比较明显, S2 田块在 45~60 cm 深度土层

				v
评价指标	$R^2$	RMSE	RRMSE	NSE
低盐田块	0.78	0.14	0.28	0.75
高盐田块	0.73	0.45	0.48	0.72



图 6 模拟高盐田块向日葵根系三维空间分布图 Fig.6 Simulated three-dimensional spatial distribution of sunflower roots in high salinity farmland

中*RLD*接近2 cm/cm<sup>3</sup>,这说明S2 田块从苗期开始根系伸长率高 于S1 田块。DAS 48 天S1 田块系下扎速度相对S2 田块更快一 点,90~105 cm 土层内*RLD*存在大于1 cm/cm<sup>3</sup>的网格。然而S2 田块侧根增长速度较则远超S1 田块,其中最大网格内*RLD*接近 3 cm/cm<sup>3</sup>,并且超过2 cm/cm<sup>3</sup>的网格比S1 田块更多。DAS 48~68 天,S2 田块根系分布变化不大,75~90 cm 土层内*RLD*有一定增 加,根系密集区域从45~60 cm 延伸到75~90 cm 土层。S1 田块 0~30 cm 土层根系已经衰亡,而深层的*RLD*仍有一定增加,根系 保持着各深度均匀的生长。

观察 XOZ 切面整体分布不难发现,S1 低盐田块内并排的两 株根系侧根密度相对 S2 高盐田块更小且大于1 cm/cm<sup>3</sup>的网格 分布更少,在S2 高盐田块两株根系之间的网格具有较高的 RLD 值。不同生育期内 S2 田块根系分布状态变化非常明显,在蕾期 至花期密集分布区域出现在种植点与株间。

结合 XOZ 切面、YOZ 切面与水平切面可以更好说明,在不同深度与生育期内根系分布状态并不相同。在 YOZ 切面可以



图 9 不同盐分田块(S1、S2)向日葵水平面*RLD*模拟值切片图 Fig.9 Slices of *RLD* simulated values in *YOZ* plane of Sunflowers with different salt fields (S1, S2)

(f) S2 68 d

(e) S2 48 d

(d) S2 28 d

观察到,在S1田块60~90 cm 土层具有更为均匀分布的根系, *RLD*大小在1 cm/cm<sup>3</sup>。尽管在DAS68天有*RLD*接近2 cm/cm<sup>3</sup>的 网格,不同生育期内S1田块根系的分布相对是均匀的。S2田 块在DAS28天时45~75 cm 土层内根系属于均匀分布,到DAS48 时60~75 cm 土层出现较多*RLD*在2 cm/cm<sup>3</sup>的网格分布在主根 附近,在DAS68天主根附近RLD与株间分布*RLD*有明显差距。

在水平切面可以观察到,S1田块*RLD*的峰值出现在种植点 附近,峰值大小为2 cm/cm<sup>3</sup>。在各时期内S1田块水平面的*RLD* 差距不大,根系分布相对均匀;S2田块*RLD*的峰值出现在向日 葵行列间中部区域,峰值大小超过了3 cm/cm<sup>3</sup>。各时期S2田块 平面上*RLD*分布为DAS28天*RLD*较小且分布均匀、DAS48天根 系生*RLD*在种植点与株间区域出现密集点且*RLD*差距已经较 大、DAS68天出现明显的以株间为主的密集区域且*RLD*差距达 到最大。

综合上述结果可以得出,微根管观测所得结果在一定条件下能够反映根系在该区域内不同时间与深度中的分布状态。 然而,田间尺度下根系不一定为均匀分布,在盐分胁迫下 S2 高 盐田块的 *RLD* 显著大于 S1 低盐田块,在各切面根系存在分布不 均匀的情况,而微根管正位于密集区域内。因此微根管观测值 能否正确反应根系在田间尺度下平均状态还需要进一步研究。

#### 2.3 田间根长密度分布

不同盐分田块两行作物之间不同切面的模拟RLD分布、微 根管观测 RLD 分布和田块平均 RLD 分布如图 10 所示。可以看 到,不同田块的RLD模拟值纵向上变化趋势接近:S1田块呈现 为双峰分布,两峰值分别位于30 cm 与60 cm 处;S2 田块呈现为 弧线分布,最大值位于60~75 cm处。比较不同切面的RLD模拟 结果发现,微根管所在平面RLD模拟值均为最大,左侧和右侧 相邻切面 RLD 模拟值接近且均大于左侧第二切面 RLD 模拟值。 而相比于各切面 RLD模拟值,整个田块平均 RLD模拟值相对较 小,例如S1田块中最大值不超过0.4 cm/cm<sup>3</sup>,而其他切面均值均 大于0.5 cm/cm3。在不同盐分田块,微根管实测得到的RLD整 体均大于 RLD 的模拟值以及平均状态,例如在 S2 田块中 DAS 78各深度实测值与模拟值差距均接近1 cm/cm3。在S1 田块中, 微根管 RLD 实测结果与模拟值平均值在纵向上的变化趋势接 近,但在S2田块中,RLD模拟值则与实测值在纵向上变化趋势 差异较大,尤其表现为在深层土壤(60~90 cm)中实测值远大于 RLD模拟值,差值最大超过2.5 cm/cm3。



Fig.10 The variation of sunflower RLD simulated values along depth in low salt and high salt fields

#### 3 讨 论

本研究RootBox模型模拟效果较好,微根管观测处向日葵 RLD的模拟值与实测值接近。这表明结合田间微根管观测和 RootBox模型,可更精确地表征盐渍农田根系三维形态结构<sup>[19]</sup>。 值得注意的是,不同盐分田块的模拟结果仍有差别,S1田块模 拟精度较高,*RLD*模拟值偏小;S2田块模拟精度较低,*RLD*模拟 值偏大。目前,根系结构模型对土壤环境影响下的三维根系生 长量化还不够理想。MORANDAGE<sup>[37]</sup>等使用RootBox模型模拟 不同类型土壤冬小麦和玉米的RSA,发现模拟精度有限,作者 认为田间根系采样数据误差可能是造成模拟效果不佳因素之 一。例如,人工识别微根管法图像时难以区分的死根与垂死 根、露水、泥土的积聚以及大气隙等都可能导致数据的误差<sup>[38]</sup>。 因此,RSA模型应在模拟根系生长过程中引入对环境因素影响 的考量,对现有根系线型或指数生长函数进行调整,这对模拟 精度提高有着重要意义<sup>[39]</sup>。研究表明仅受到盐分胁迫而没有 水分胁迫的情况下,耐盐作物侧根的生长可能受到促进作用来 补偿主根生长受到的抑制作用<sup>[40, 41]</sup>。KUMAR S<sup>[42]</sup>等人对向日 葵耐盐性的研究结果也表明在5 dS/m 的盐度处理下,特别是 DAS 60~90天内向日葵所有的生长参数均比无盐处理有增加。 SHILA A<sup>[43]</sup>等人使用不同盐度对向日葵幼苗生长影响的研究 中,在NaCl浓度为40~50 mmol/L(对应电导率为4.20~5.24 dS/ m)时侧根根长达到最大值。本研究中2017年地下水位埋深较 浅(0.8~1.8 m),S2田块根系在较高的地下水位条件下,受到盐 分胁迫的影响可能产生了补偿生长现象,RLD相比S1田块更 大。因此,通过对盐分胁迫影响的量化对模型模拟精度可能有 较好的提升。在剖面分析中我们注意到,田间尺度下微根管实 测值均大于模拟值,且S2高盐田块差距更大。这一现象表明微 根管法在田间尺度下可能无法准确反映田间根系分布状态。 微根管法获取数据时记录到更细小的细根可能会导致实测值 更大[44], RootBox 模型目前仅考虑到二级侧根,因此可能存在没 有考虑低阶细根而产生误差。与此同时,在局部土壤,微根管 与土壤间存在一定空隙,根系可能优先沿着微根管管壁生 长<sup>[45]</sup>,从而导致微根管观测到的RLD大于田间平均状态。

# 4 结 论

本研究以盐渍农田向日葵为研究对象,基于微根管测量获 取的作物根长密度动态变化,利用RootBox三维根系结构模型 对田间向日葵根系的动态生长过程进行模拟。通过分析不同 盐分田块根系的三维及不同剖面动态变化,以及与不同盐分田 块微根管测量结果进行比较,得到以下结论。

(1)基于微根管测量构建的 RootBox 模型可较好地模拟大田向日葵根系状态,其微根管观测点 *RLD* 模拟值与实测值接近,*R*<sup>2</sup>和 *NSE* 分别超过 0.73 和 0.72, *RRMSE* 小于 0.28;但 Root-Box 模型在不同盐分田块的表现不同,其对高盐 S2 田块 *RLD* 模拟精度相对较低, *RMSE* 比 S1 田块高 0.84, 平均误差差距比 S1 田块高接近 1.5 cm/cm<sup>3</sup>。

(2)不同盐分田块田间尺度下的微根管观测效果存在差 异:低盐S1田块观测效果较好,平均*RLD*模拟分布与微根管观 测分布基本一致,差距在0.5 cm/cm<sup>3</sup>以内;而高盐S2田块二者差 异较为显著,特别是在60~90 cm深度,误差接近2.5 cm/cm<sup>3</sup>。

(3)剖面分析较好地展现了不同盐分田块向日葵根系分布 情况:田块根系均集中分布于45~60 cm 土层中,而 RLD 峰值分 布区域有所不同,S1 田块集中于种植点附近,S2 田块集中于微 根管观测点附近。因此,为更好地反映不同盐分条件下向日葵 田间根系的分布,低盐分条件时微根管需在株间布置;而高盐 分条件时应在较低密度的区域(如作物种植区两侧)增加微根 管观察。

#### 参考文献:

- [1] HASSANI A, AZAPAGIC A, SHOKRI N. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020(52):33 017-33 027.
- [2] 杨 真, 王宝山.中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J].山东农业科学, 2015(4):125-130.
   YANG Z, WANG B S. Present Status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015(4):125-130.
- [3] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.防止土壤盐渍化,提高土壤生产力
  [J].科学,2021,73(6):30-34.
  YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Halt soil salinization, boost soil productivity[J]. Science, 201,73(6):30-34.
- [4] JOHNSON M G, TINGEY D T, et al. Advancing fine root research with minirhizotrons-ScienceDirect [J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 45(3):263-289.
- [5] BATES G H. A device for the observation of root growth in the soil[J]. Nature, 1937, 139(3 527):966-967.
- [6] SHI J, SHUIQIANG Y U, LIZHONG Y U, et al. Application of minirhizotron in fine root studies [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(4):715-719.
- [7] LIEDGENS M, RICHNER W. Minirhizotron observations of the spatial distribution of the maize root system [J]. Agronomy Journal, 2001,93(5):1097-1104.
- [8] 周本智,张守攻,傅懋毅.植物根系研究新技术 Minirhizotron 的起源,发展和应用[J].生态学杂志,2007,26(2):253-260. ZHOU B Z, ZHANG S G, FU F Y. Minirhizotron, a new technique for plant root system research: its invention, development and application.[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,26(2):253-260.
- [9] AMATO M, LUPO F, BITELLA G, et al. A high quality low-cost digital microscope minirhizotron system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012,80:50-53.
- [10] BOX J E, RAMSUER E L. Minirhizotron wheat root data: comparisons to soil core root data [J]. Agronomy Journal, 1962, 85 (5): 1058-1060.
- [11] GRAY S B, STRELLNER R S, Puthuval K K, et al. Minirhizotron imaging reveals that nodulation of field-grown soybean is enhanced by free-air CO<sub>2</sub> enrichment only when combined with drought stress
   [J]. Functional Plant Biology, 2013,40(2):137-147.
- [12] 吴盼盼,唐子宗,杨 乐,等.水稻根系三维建模及可视化方法研究进展[J].福建农业学报,2021,36(8):972-980.
  WU P P, TANG Z S, YANG L, et al. Visualization of Rice Root System by 3D Modeling: A Review[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021,36(8):972-980.
- [13] DEANS J D, FORD E D. Modelling root structure and stability [J]. Tree Root Systems and Their Mycorrhizas, 1983:189–195.
- [14] PAGÈS L, JORDAN M O, Picard D. A simulation model of the three-dimensional architecture of the maize root system [J]. Plant and Soil, 1989,119(1):147-154.
- [15] DIGGLE A J. ROOTMAP—a model in three-dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems [J]. Plant and Soil, 1988, 105:169-178.
- [16] PAGÈS L, VERCAMBRE G, DROUET J L, et al. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture[J]. Plant and Soil, 2004,258(1):103-119.

- [17] SPEK L Y. Generation and visualization of root-like structures in a three-dimensional space[J]. Plant and Soil, 1997, 197(1):9-18.
- [18] LYNCH J P, Nielsen K L, DAVIS R D, et al. SimRoot: modelling and visualization of root systems.[J]. Plant and Soil, 1997, 188(1): 139-151.
- [19] GARRÉ S, PAGÈS L, LALOY E, et al. Parameterizing a dynamic architectural model of the root system of spring barley from minirhizotron data[J]. Vadose Zone Journal, 2012,11(4):1 325-1 339.
- [20] 钟 南,罗锡文,秦 琴.基于生长函数的大豆根系生长的三维 可视化模拟[J].农业工程学报,2008,24(7):151-154.
   ZHONG N, LUO X W, QING Q. Modeling and visualization of three-dimensional soybean root system growth based on growth functions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(7):151-154.
- [21] 刘桃菊, 唐建军, 威昌瀚.水稻形态的分形特征及其可视化模拟 研究[J]. 江西农业大学学报, 2002, 24(5):583-586.
   LIUT J, TANG J J, QI C H. A study on the fractal characters and the visual simulation of rice morphology [J]. Acta Agricultural Universitatis Jiangxiensis, 2002, 24(5):583-586.
- [22] 冀荣华,李 想,祁力钧,等.[J].排灌机械工程学报, 2014, 32
  (9):795-801.
  JI R H, LI X, QI L J, et al. Construction and implementation of three-dimensional root growth model of potted tomato [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32 (9): 795-801.
- [23] 张吴平,郭 焱,李保国.小麦苗期根系三维生长动态模型的建立与应用[J].中国农业科学,2006,39(11):2261-2269.
  ZHANG W P, GUO Y, LI B G. Development and application of three-dimensional growth model of root system in wheat seedling
  [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006,39(11):2261-2269.
- [24] 彭 英,张素兰.基于L系统的水稻根系建模与可视化[J].计算机系统应用,2020,29(6):22-28.
   PENG Y, ZHANG S L. L-System-Based modeling and visualization of rice root system [J]. Computer Systems & Applications, 2020,29(6):22-28.
- [25] LEITNER D, KLEPSCH S, BODNER G, et al. A dynamic root system growth model based on L-Systems[J]. Plant and Soil, 2010, 332:177-192.
- [26] DE MORAES M T, BENGOUGH A G, DEBIASI H, et al. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil[J]. Plant and Soil, 2018,428:67–92.
- [27] FANG Y, YABUSAKI S B, AHKAMI A H, et al. An efficient three-dimensional rhizosphere modeling capability to study the effect of root system architecture on soil water and reactive transport [J]. Plant and Soil, 2019,441:33-48.
- [28] JULKOWSKA M M, HOEFSLOOT H C J, MOL S, et al. Capturing Arabidopsis root architecture dynamics with ROOT-FIT reveals diversity in responses to salinity [J]. Plant Physiology, 2014, 166 (3):1 387-1 402.
- [29] ARLOVA R, BOER D, HAYES S, et al. Root plasticity under abiotic stress[J]. Plant Physiology, 2021, 187(3):1057-1070.
- [30] 马 韬.河套灌区向日葵-盐-氮响应机制及生长模拟研究[D]. 湖北武汉:武汉大学, 2019.
   MA T. Study on the response mechanism and growth simulation of

sunflowers in Hetao Irrigation area [D]. Hubei Wuhan: Wuhan University, 2019.

[31] 曾文治.向日葵水,氮,盐耦合效应及其模拟[D].湖北武汉:武 汉大学,2015.

zeng W Z. Research and simulation for the coupling effects of water, nitrogen, and salt on sunflower[D]. Hubei Wuhan: Wuhan University, 2015.

- [32] ROOSE T, FOWLER A C, DARRAH P R. A mathematical model of plant nutrient uptake[J]. Journal of Mathematical Biology, 2001, 42:347-360.
- [33] LEITNER D, MEUNIER F, BODNER G, et al. Impact of contrasted maize root traits at flowering on water stress tolerance: A simulation study[J]. Field Crops Research, 2014, 165:125-137.
- [34] PAGÈS L, JUN X. Potential and actual root growth variations in root systems: modeling them with a two-step stochastic approach [J]. Plant and Soil, 2013,373:723-735.
- [35] 程晓光,张 静,宫辉力.基于PEST自动校正的HSPF水文模拟 研究[J].人民黄河,2013(12):33-36.
  CHENG X G,ZHANG J,GONG H L. Research on the HSPF Hydrologic Simulation based the PEST Automatic Calibration-Case Study: Guishui River Basin,Beijing[J]. Yellow River,2013(12):33-36.
- [36] 舒晓娟,陈洋波,黄锋华.PEST在WetSpa分布式水文模型参数 率定中的应用[J].水文,2009,29(5):45-49.
  SHU X J, CHEN Y B, HUANG F H, et al. Application of PEST in the parameter calibration of wetspa distributed hydrological model
  [J]. Journal of China Hydrology,2009,29(5):45-49.
- [37] MORANDAGE S. Characterization of root system architectures from field root sampling methods [D]. Bonn: Universitäts-und Landesbibliothek, 2020.
- [38] SVANE S F, DAM E B, CARSTENSEN J M, et al. A multispectral camera system for automated minirhizotron image analysis [J]. Plant and Soil, 2019,441:657–672.
- [39] MORANDAGE S, LALOY E, SCHNEPF A, et al. Bayesian inference of root architectural model parameters from synthetic field data [J]. Plant and soil, 2021,467:67-89.
- [40] ZOU Y, ZHANG Y, TESTERINK C. Root dynamic growth strategies in response to salinity[J]. Plant, Cell and Environment, 2022, 45(3):695-704.
- [41] ZOLLA G, HEIMER Y M, BARAK S. Mild salinity stimulates a stress-induced morphogenic response in Arabidopsis thaliana roots [J]. Journal of experimental botany, 2010,61(1):211-224.
- KUMAR S, AHMAD A, RAO V, et al. Effect of salinity on growth and leaf area of sunflower (Helianthus annuus L.) cv. Suntech-85
   [J]. Afr. J. Agric. Res, 2014,9(15):1144-1150.
- [43] SHILA A, HAQUE M A, AHMED R, et al. Effect of different levels of salinity on germination and early seedling growth of sunflower
   [J]. World Research Journal of Agricultural Sciences, 2016, 3(1): 48–53.
- [44] GUO D, LI H, MITCHELL R J, et al. Fine root heterogeneity by branch order: exploring the discrepancy in root turnover estimates between minirhizotron and carbon isotopic met-hods [J]. New Phytologist, 2010,177(2):443-456.
- [45] RUIJTER F J, VEEN B W, OIJEN M. A comparison of soil core sampling and minirhizotrons to quantify root development of fieldgrown potatoes[J]. Plant and Soil, 1996, 182(2):301-312.