微咸水膜下滴灌棉花根系时空分布规律及三维动态生长模拟

张茗惠[1a,2]，张峻华[1b]，盛统民[3]，任卫东[4]，朱棋[1a]，陈文岭[1a*]

1. 中国地质大学（武汉）a. 环境学院；b. 计算机学院，武汉 430078；
2. 河南省地质局地质灾害防治中心，郑州 450014；
3. 新疆水利水电科学研究院，乌鲁木齐 830049；
4. 塔里木河流域巴音郭楞管理局水利科研所，新疆 库尔勒 841000

第一作者，E-mail：mhzhang2021@cug.edu.cn

* 通信作者，E-mail：chenwenling@cug.edu.cn

2024-04-09 收稿；2024-05-22 修回；2024-05-23 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42372290)；国家重点研发计划课题(2022YFC3703702)

中图分类号：S562；S275.6　　文章编号：2096-8523(2026)01-0279-12　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240155

摘　要：新疆地处我国干旱–半干旱区，为节约水资源广泛使用微咸水膜下滴灌技术进行棉花种植，但微咸水利用不当易引起土壤盐渍化，在棉花根系密度较大的区域，根系强烈的吸水作用使土壤水分降低、盐分在区域内过量累积，引起棉花减产。为确保微咸水膜下滴灌棉田土壤生长环境及棉花产量，应充分考虑棉花根系分布对田间水盐运移的影响。本研究基于新疆巴音郭楞管理局水利科研所灌溉试验站棉田开展野外田间试验获取棉花根系生长参数，构建微咸水膜下滴灌棉花根系生长模型，定量刻画棉花根系时空分布规律。研究结果表明：①根系的空间分布受土壤水分和盐分的影响，蕾期至花铃期根系更多地集中在滴灌带与宽行位置，盛铃期至吐絮期根系在深度 50 cm 以上有明显衰退，而在 90～130 cm 土壤中根系有所发育；②棉花根系三维生长模型的预测趋势与实际观测值保持一致，模拟值与实测值对比平均相对误差 *MRE* 在 0.2486～0.5378 之间，均方根误差 *RMSE* 在 2.4127～4.8710 cm/cm^2 之间，符合指数 *d* 在 0.7541～0.9529 之间，模拟结果总体能够描述棉花根长密度 *RLD* 分布；③棉花根系的三维模拟考虑了大田种植环境的生长情况，模拟结果达到了三维动态生长的效果，模型能够较好地模拟根系生长发育进程的形态结构。基于微根管法原位动态监测，利用 CPlantBox 建模框架能够构建微咸水膜下滴灌棉花根系生长模型，研究成果可为探究根系形态时空分布对田间土壤水分迁移及根区水盐分布的影响机制奠定基础，对实现新疆棉花高产稳产具有重要的理论和实践意义。

关键词：微咸水；膜下滴灌；空间分布；棉花根系；根长密度；生长模拟；三维动态生长模型

棉花(*Gossypium hirsutum* L.)是重要的经济作物，主要在我国西北典型干旱区(如：新疆等)种植[1-2]。水资源紧缺和土壤盐渍化是限制新疆棉花可持续生产的 2 个主要因素[3-4]。新疆棉田采用微咸水膜下滴灌可缓解水资源短缺、减少土壤蒸发和深层渗透量、增加根区土壤含水量。作物根系是植株最重要的器官[5]，其中细根又是植株从土壤环境中吸收水分、养分以及物质交换最活跃的部分。根系时空分布影响根系吸收土壤水分、养分、根区水盐分布和盐分聚集[6-7]，而细根的生长参数(如：根长等)关系到棉花地上部生长和产量[8]。在棉田根系密度较大的区域，根系强烈的吸水作用使得土壤水分降低、盐分累积，甚至造

著录信息：张茗惠，张峻华，盛统民，等. 微咸水膜下滴灌棉花根系时空分布规律及三维动态生长模拟 [J]. 地质科技通报，2026，45(1)：279-290.
ZHANG Minghui, ZHANG Junhua, SHENG Tongmin, et al. Spatial-temporal distribution patterns of cotton root system under brackish water mulched drip irrigation and three-dimensional dynamic growth simulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 279-290.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

成土壤盐渍化、棉花减产[7, 9]。因此，为确保微咸水膜下滴灌棉田土壤生长环境及棉花产量，应充分考虑棉花根系分布对田间水盐运移的影响。掌握根系形态分布规律是准确描述和模拟作物根系吸水和田间水盐运移的基础[10-11]。通过建立根系生长模型，能够进一步掌握根系生长动态变化，探究根系发育与土壤生境之间的关系，对提高新疆棉花高产稳产具有重要的理论和实践意义[12-13]。

由于根系埋藏于地下难以精确观测，对根系分布和生长动态的研究比较困难[14]。传统的根系研究方法（如：根钻、挖掘法等）会破坏根系，影响农作物生长，并且采样费时费力，范围有限，很难保证根系的完整性和准确性[15]。近年来，随着根系观测方法不断提高和改进，如：微根窗根系监测系统等原位监测仪器的出现[16]，对土壤中植物根系生长、形态、分布的研究更加方便可靠。通过试验数据对根系的生长发育以及形态结构进行量化模拟得到国内外众多学者的关注[17-19]。GARRÉ等[20] 利用微根管监测大麦根系生长，得到了相关根系生长模型参数并构建了改进的大麦 3D 根系生长动态模型；薛苍松[21] 利用挖掘法和微根管法对葡萄根系的分布规律进行了研究，并建立了三维根系吸水模型。

根系生长模型可分为 3 类：假设根长随深度呈指数或 S 型分布的根深度模型[22-23]；基于密度的根模型[24-26]；以及考虑根系结构动态发展的三维根系结构模型[27-28]。其中“根构型（root architecture）”是根系生长模型的关键内容，指根系形态、总根长、根系分布、根长密度、各级根的出现、根系生长速率、根系生长角度等。根系生长模型中普遍采用根深、根区半径和根长密度 *RLD*（root length density）作为描述根系的参数[29-30]。VRUGT 等[31] 在根系生长模型中同时考虑了根系根深、根区半径和 RLD 分布情况，能够反映出外界环境对根系的影响，根系模型在水分运移模拟中得到广泛应用[31-34]。CRootBox 是基于 C++带有 Python 绑定的开源根构型模型，可以通过共享库包在任何 Python 代码中调用，可以成功地模拟单根系统和田间尺度生长的根系，以及根系与静态和动态土壤环境的相互作用，可以输出根系 VTP、DGF、RSML 和包含根节点坐标的纯文本文件[35-36]。LANDL 等[37] 通过使用 CRootBox 模型表明，利用根系二维图像可以系统有效地用于参数化三维根系结构模型。CPlantBox 是基于根系模型的全植物建模框架[38]，在 CRootBox 模型的基础上发展而来，能够模拟整个植物结构和更复杂的植物功能，提供与外部模型耦合的框架，并且建模框架是开源的。MORANDAGE 等[39] 在研究不同土壤性质对田间根系发育的影响中，利用 CPlantBox 模型模拟了非均质土壤条件下冬小麦和玉米根系的响应。PHALEMPIN 等[40] 在研究中利用 CPlantBox 模型，选取对 *RLD* 分布影响最大的参数进行了玉米根系参数集的优化，使 CPlantBox 模型获取的 *RLD* 与实验测量值相匹配。LANDL 等[41] 开发了一种新的模型方法来三维计算生长根系周围根沉积物的时空分布模式，其中根系统使用根构型模型 CPlantBox 生成的，将根构型模型与根沉积模型相结合，研究了根构型和根沉积特性对生长根系周围根沉积时空分布格局演变的影响。

目前国内外对根系生长模型已有大量研究[22-28, 42]，并建立了棉花根系随深度的生长模型[43]，但是尚缺乏适用于干旱区微咸水膜下滴灌棉田的根系生长模型。CHEN 等[44] 采用微根管法监测膜下滴灌棉花根系生长，研究表明微根管法能有效获取棉花根系形态时空分布的足够细节，然而根系生长空间参数随时间的变化特征仍不清楚，迫切需要继续深入研究基于微根管法原位动态监测构建根系生长模型，定量刻画微咸水膜下滴灌棉花根系形态时空分布规律。因此，本研究在利用微根管法测得棉花根系形态分布的基础上，获取棉花根系相关生长参数，利用 CPlantBox 建模框架构建棉花根系三维动态生长模型，采用实测根长密度与模拟值对比识别优化根系生长模型；结合微根管原位动态监测和模型模拟结果定量刻画微咸水膜下滴灌棉花根系生长动态变化规律，为今后建立耦合根系时空生长动态的土壤水盐运移数值模型、进一步探究微咸水膜下滴灌棉田根系分布对土壤水盐运移的影响机制奠定基础。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

2020 年 4 月—9 月在新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局水利科研所灌溉试验站（41°35′N, 86°10′E）进行了微咸水膜下滴灌棉田田间试验，该区地处新疆库尔勒市南部、塔里木盆地东北部边缘孔雀河冲积平原区，地势较为平缓，高程约 895 ~ 903 m，区内气候干旱，降雨稀少，年降雨量为 53.3 ~ 62.7 mm，蒸发作用强烈，光照时间充足，属温带大陆性荒漠气候[16]。试验区棉花生育期（4 月 15 日—9 月 26 日）内总降雨量为 32.4 mm，最大日降雨量为 6.8 mm（图 1）。微咸水取自于区内开采的浅层地下水，水化学类型

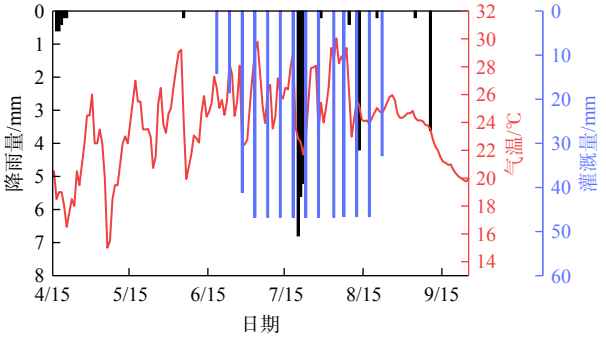


图 1　2020 年棉花生育期内降雨量、气温和灌溉量

Fig. 1　Rainfall, temperature and irrigation amount during the cotton growing season in 2020

为 $HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl$-Na 型水，矿化度为 2.9 g/L，棉田土质较为均一，土壤类型为壤土，干密度为 1.60 g/cm^3 左右，试验田边井中地下水位埋深为 17 m 左右。

1.2　试验材料与设计

供试棉花品种为“创棉”50 号，于 2020 年 4 月 15 日播种，4 月 20 日出苗（5 DAS，DAS 为播种后天数（day after sowing）），研究至生育期 153 DAS。播种前棉田施加底肥定额：磷酸二铵 750 kg/hm^2、复合肥 600 kg/hm^2、复合磷肥 75 kg/hm^2，棉花进入蕾期后处理区开始进行滴灌，每次灌水施肥相隔 5 d，灌水施肥方案按照棉花实际需求量及当地灌溉制度进行设计（表 1）。棉田采用“一膜双管四行”（1 地膜内布设 2 条滴灌带、种植 4 行棉株）的种植模式（图 2），按照棉株种植、滴灌带布设及覆膜位置分为“宽行”、“窄行”、“膜间”3 个区域，宽度分别设置为 70，10，40 cm。

表 1　2020 年棉田试验灌水方案及生育期时间

Table 1　Irrigation scheme and growth stage timing for cotton field experiments in 2020

生育期	灌水次数	日期	DAS/d	灌水量/mm
苗期	1	06/19	65	14.1
	2	06/24	70	18.5
蕾期	3	06/29	75	41.1
	4	07/04	80	46.7
	5	07/09	85	46.7
	6	07/14	90	46.7
	7	07/19	95	46.7
花铃期	8	07/24	100	46.7
	9	07/29	105	46.7
	10	08/03	110	46.7
	11	08/08	115	46.6
盛铃期	12	08/13	120	46.6
	13	08/18	125	46.6
吐絮期	14	08/23	130	32.8

注：DAS为播种后天数；下同

1.3　试验方法

1.3.1　棉花根系生长参数的获取

由于棉花根系在生长发育过程中具有较复杂的动态变化，故选择棉花长势较好的典型区域采用微根管法观测蕾期至吐絮期根系的生长参数研究。本试验沿滴灌带布设方向间隔 20 cm 平行设置 3 个微根管监测剖面，选用 3 种规格根管：短管 90 cm（T1）、中管 130 cm（T2）、长管 180 cm（T3），外径皆为 6.5 cm，

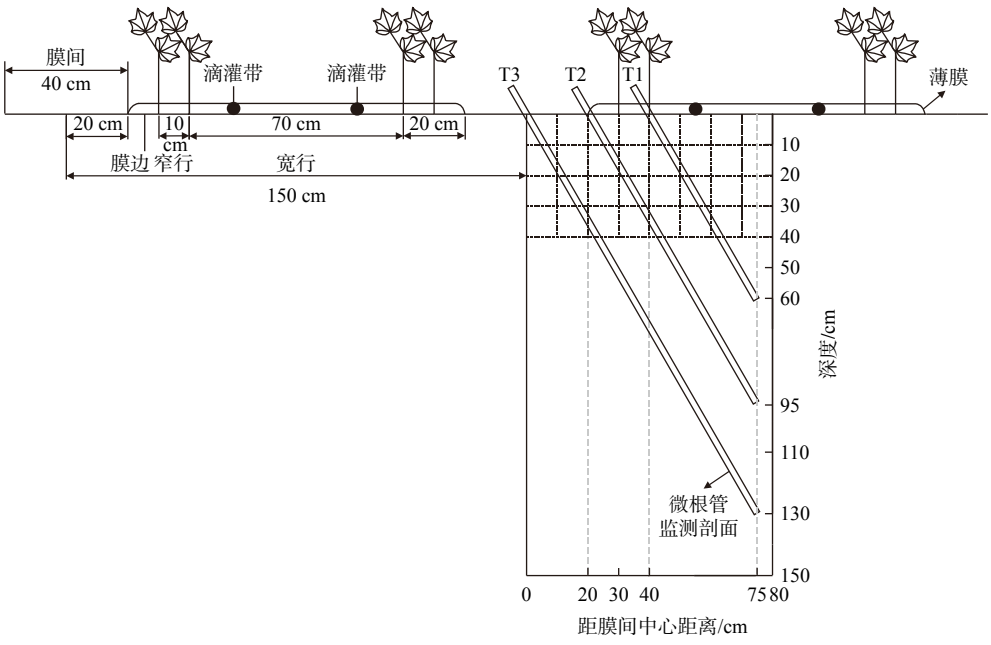


图 2　棉田种植模式及根系取样示意图

Fig. 2　Schematic diagram of cotton field planting pattern and root sampling

按照 JOHNSON 等[45] 建议的根管安装方法与地面倾斜成 60°安装(布置方法如图 2)。微根管法是利用微根管进行定位,并通过 BTC 根系生态监测系统原位监测根系生长状况,利用 WinRHIZOTron MF 2012 根系分析系统测定 1 级侧根和 2 级侧根[46] 的生长速率、根系寿命等生长参数,并获取基于面积的 *RLD*。

对于微根管法不适于根系观测的较浅土层,采用网格法进行根系参数获取。于 9 月 23 日棉花吐絮期采用网格法选取一个尺寸为 80(覆膜宽行中央到膜间中央)×30×40 cm 棉花生长状况较好的区域进行网格法挖土取根,将其划分为 10×10×10 cm 的含根土样(图 2 虚线所示),利用平面扫描仪(Perfection V700 photo)扫描根系图片,利用 WinRHIZOTron Pro 2009 图像分析软件测定根系根长、直径、表面积、体积、侧根夹角等形态参数,并计算获取各网格根长密度。

1.3.2　棉花根系三维动态生长模型的建立

(1)棉花根系类型的确定。在 CPlantBox 模型中,将棉花根系自上而下分为主根(tap root: 从种子中长出的第 1 个根,在模型中设定为 subType=1),1 级侧根(1st order lateral root: 任何从主根、基根分枝出来的根,在模型中设定为 subType=2)和 2 级侧根(2nd order lateral root: 1 级侧根的分支,在模型中设定为 subType=3),3 种类型根系赋予不同生长参数值。主根具有明显向重力性,侧根具有向水性和向外生长的特征。当根系生长至设定的最大根长 l_{max} 时,生长速率变为 0。将不同类型根的最大根长设置 10% 的偏差(dev=10%l_{max})并结合根系生长率和时间参数来模拟根系生长的随机性,同时避免了各级分支根的长度相同。

(2)各种类型的根都包括基区、分支区和根尖区,在模拟中,基区和根尖区发育后,侧根开始出现,最大根长 l_{max} 为:

$$l_{max} = l_a + l_b + (nob - 1)l_n, \tag{1}$$

式中: l_a 为根尖区长度; l_b 为基区长度; l_n 为分枝间距离; nob 为根所能发育的最大侧边数。

(3)侧根生长方向的确定。侧根的起始方向由 2 个角度决定: 侧根在其母根上的插入角 θ 由用户定义的平均值和标准差的正态分布中随机绘制;侧根在母根周围的径向角是从 0 到 2π 之间的均匀分布中随机绘制。根尖生长方向每隔一段距离就会发生变化(根的轴向分辨率 dx),根尖方向随机变化角度由平均值为零,标准差为零的正态分布 σ 表示,由根段 dx 的长度缩放,从而生成的根系轨迹与沿根轴的空间分辨率无关,有效标准差变为:

$$\sigma_{dx} = \sqrt{dx} \cdot \sigma, \tag{2}$$

式中: σ 为根长度在每单位(cm)生长方向的变化。

CPlantBox 模拟根系的优点: 能够设置障碍(根管)以及土壤条件来模拟对根系发育的影响[47]。本研究依据野外田间试验情况,模拟长×宽×深度为 120 ×120 ×150 cm 的地块内棉花根系的生长。

1.4　模型验证与评价

采用平均相对误差(mean relative error, 简称 *MRE*)、均方根误差(root mean square error, 简称 *RMSE*)和符合指数(the index of agreement, 简称 d)评价模型模拟精度[48-49]。

MRE 是相对误差(误差相对于真实值的比例)绝对值的平均值,可以反映相对误差的大小。*RMSE* 可以反映模拟值误差的分布情况。d 可以评价模型与实测值的一致性程度。

$$MRE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{x_i - y_i}{x_i}\right|, \tag{3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2}, \tag{4}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2}, \tag{5}$$

式中: y_i, x_i 分别为模拟值和实测值; $\bar{x}$ 为实测值的平均值; N 为比较数据的对数。*RMSE* 和 *MRE* 越接近 0, d 越接近 1,模型模拟结果的可靠性越高[50]。

2　结果与分析

2.1　微咸水膜下滴灌条件下棉花根系生长分布变化规律

试验于棉花蕾期(72 DAS)、花铃前期(99 DAS)、盛铃期(122 DAS)、铃后期到吐絮期(139 DAS)和吐絮期(148, 153 DAS),利用微根管法获取微咸水灌溉区域棉花 *RLD*,图 3 显示了 T2(中管)与 T3(长管)不同天数棉花 *RLD* 随深度的分布,T2 与 T3 相较于 T1(短管)监测深度较大、水平方向跨度较大,更具有代表性。棉花蕾期时 *RLD* 在深度 50 ~ 75 cm 范围内存在最大峰值,深度 25 ~ 45 cm 内波动式变化,20 ~ 35 cm 存在第二峰值,80 cm 以下深度 *RLD* 较小(图 3a);花铃期与盛铃期时 *RLD* 在 40 cm 以下有增大趋势,尤其位于 80 cm 以下较深层部分,*RLD* 明

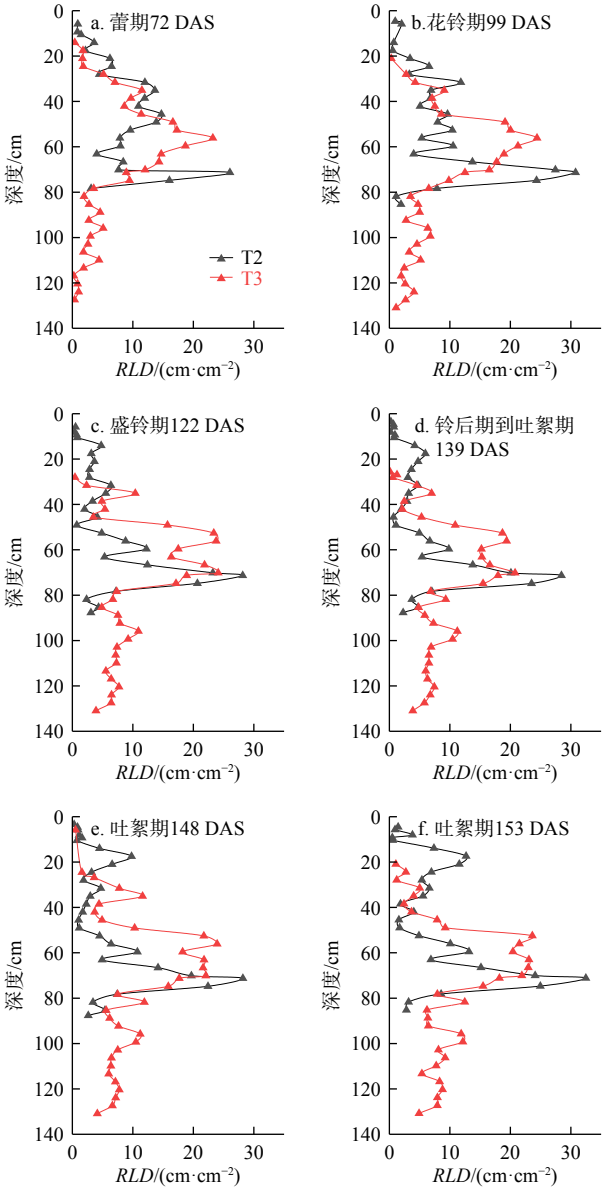


图 3　微根管 T2 与 T3 监测不同天数所得棉花根长密度 (*RLD*) 与位置深度关系图

Fig. 3　Relationship between cotton root length density (*RLD*) and position depth obtained from monitoring different days for minirhizotron tubes T2 and T3

显增加，根系扎根深度也增加(图 3b ~ c)；棉花吐絮期时，40 cm 以上浅层土壤中棉花 *RLD* 呈下降趋势，而深部土层中 *RLD* 持续增加(图 3d ~ f)。

在棉花不同生长阶段，T2 与 T3 测得 *RLD* 最高值均出现在深度 50 ~ 75 cm 土层，各时期最大 *RLD* 分别为 26.05(72 DAS)，30.82(99 DAS)，28.17(122 DAS)，28.48(139 DAS)，28.19(148 DAS)，32.52 cm/cm^2 (153 DAS)，随着时间的推移，观测到的最大根长密度增加，到花铃期根长密度较大，之后进入铃后期与吐絮期根长密度出现下降，与前人[51]研究结果一致；而在监测最后 1 d(153 DAS)微根管法获取的根长密度增大，这与 CHEN 等[44]研究发现棉花细根在吐絮后期减少的结果有所不同，这是因为微根管研究中棉花细根的状态根据其颜色来判断，在不同阶段(新根、活根、老根至死亡)颜色由白色转变为浅棕色、深棕色至黑色[52-53]，本研究没有着重区分棉花细根的状态，通常情况下灌水停止后根系的衰退速率较新根生长的速率更快，但在深部土壤中会产生新根[54]，这可能导致吐絮期 *RLD* 略有增加。

2.2　微咸水膜下滴灌条件下棉花 *RLD* 空间分布规律

图 4 显示了微根管测得不同天数棉花平均根长密度(*RLD*)的水平和垂直方向分布情况。水平方向上，各时期最高平均 *RLD* 出现在棉株正下方的窄行位置(除 99 DAS 出现在宽行区)，未覆膜的膜间位置平均 *RLD* 最低(图 4a)，同时宽行区域 72 DAS 与 99 DAS 测得 *RLD* 差距最大。蕾期与花铃期(72, 99 DAS)在膜间与膜边(薄膜边缘)区域平均 *RLD* 略高于其他时期，这表明该区域的根系水平随着时间的推移逐渐退化。在不同时期，平均 *RLD* 随不同深度土层的变化规律大致为：随深度的增加先增大后

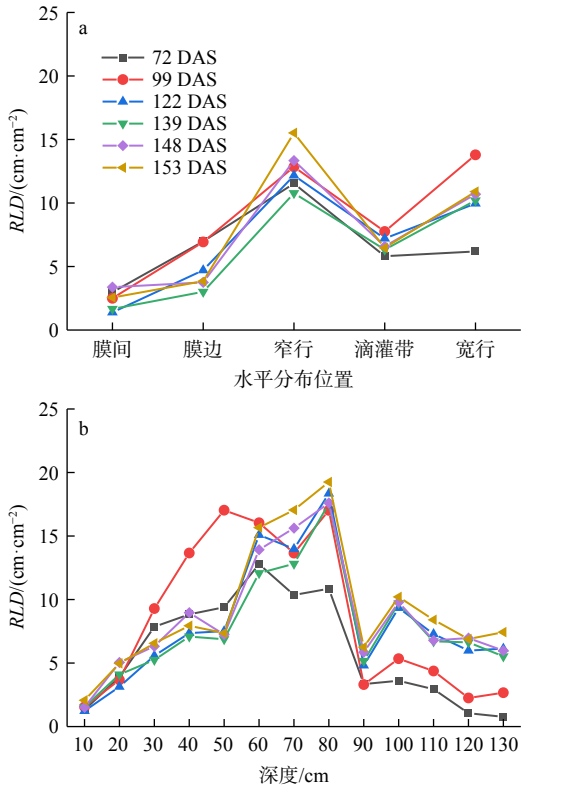


图 4　微根管监测不同天数棉花 *RLD* 水平 (a) 和垂直方向 (b) 分布（图中数据为 T1 ~ T3 微根管监测的 *RLD* 平均值）

Fig. 4　Horizontal (a) and vertical (b) distribution of cotton root length density (*RLD*) levels in using minirhizotron monitoring over different days

减少, 在 50 ~ 80 cm 土层中较大(图 4b)。蕾期(72 DAS)至花铃期(99 DAS)在深度 80 cm 以上 *RLD* 增长最明显, 棉花根系处于快速发育阶段。在生长后期(122 ~ 153 DAS), 90 ~ 100 cm 深度之间也能够观察到 *RLD* 峰值, 同时相较于生长前期(72, 99 DAS)棉花根系数量有增大趋势。NING 等[18] 通过研究膜下滴灌棉花细根的空间分布, 发现棉花根系在开花期生长在 90 cm 以下深层土壤中, 生长后期根系甚至达到 105 cm, 与本研究结果较一致。值得注意的是棉花在生长前期(蕾期至花铃期)根系更多地集中在滴灌带与宽行位置, 生长后期(盛铃期至吐絮期)根系在深度 50 cm 以上有明显衰退, 而在 90 ~ 130 cm 土壤中根系有所发育, 从而促进后期根系吸收深层土壤水分和养分[44, 55]。

在棉花不同生长阶段(77, 99, 122, 153 DAS)分别选取同时测量的 3 个平行剖面, 然后运用克里金(Kriging)插值法[56] 对微根管法测得 *RLD* 进行三维插值处理, 获得棉花根系空间分布动态变化如图 5 所示。观察到棉花 *RLD* 从蕾期(图 5a)到开花期(图 5b)逐渐增加, 根系逐渐发育; 盛铃期(图 5c) *RLD* 呈下降趋势, 吐絮期(图 5d)平均 *RLD* 最高, 根系总量水平最大; 随棉花生育期的推移, 100 cm 深度以下土层中棉花根系缓慢发育。在棉花不同生长阶段, 最高 *RLD* 出现在 50 ~ 80 cm 深度, 并且根系扎根深度逐步升高, 空间上最高 *RLD* 位于窄行与宽行下方, 吐絮期窄行位置 *RLD* 峰值最明显。未覆膜的膜间区域及膜边区域浅层土壤中, 观察到 *RLD* 最低, 该位置棉花根系生长在下方较深的土层中。

2.3　膜下滴灌棉花根系三维动态生长模型的验证

为了验证根系三维动态生长模型的效果, 本研究按照实际位置, 将三维模型中棉花以 10×10 cm 种植 4 株的方式分布, 在棉花生根后设置 3 根根管作为障碍物, 同时模拟微根管观测法获取拍摄范围内的根长, 并计算根长密度, 其中微根管摄像头拍摄范围 2 ~ 3 mm[57]。分别对不同时期微根管 T2 和 T3 模拟值(图 6a, c)与实测值(图 6b, d)*RLD* 进行对比: T2 模拟值逐渐升高至 70 ~ 80 cm 深度出现最大 *RLD*, T3 模拟值在 50 ~ 60 cm 深度达到最大 *RLD*, 80 cm 以后 *RLD* 逐渐下降。模拟值随深度变化的总体趋势与实测值相同。除此之外, 根系模型在 72 DAS 与 99 DAS 模拟值有较明显变化, 模拟根系处于生长发育时期, 在 122 ~ 153 DAS 模拟值差别较小, 模拟

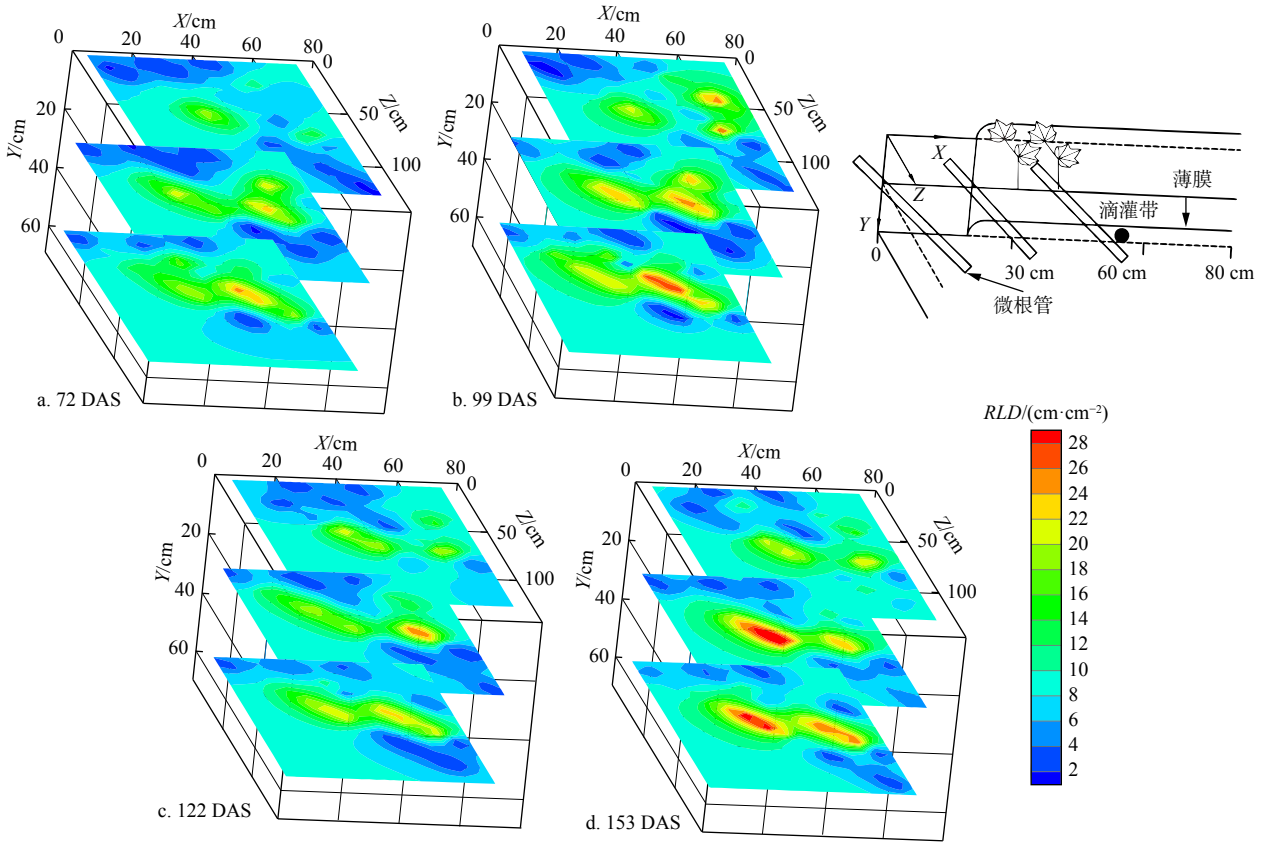


图 5　微根管监测不同天数棉花根长密度 (*RLD*) 的三维分布情况

Fig. 5　Three-dimensional distribution of cotton root length density (*RLD*) monitored using minirhizotron monitoring at different days

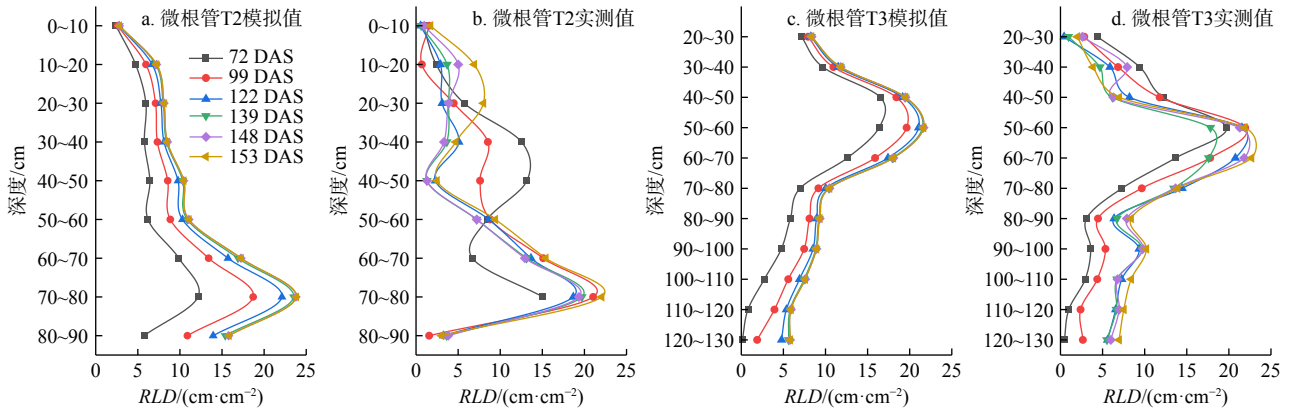


图 6　根系生长模型模拟不同天数根长密度 (*RLD*) 分布 (a, c) 与微根管实测根长密度 (*RLD*) 分 布 (b, d)

Fig. 6　Root growth model simulation of root length density (*RLD*) distribution over different days (a, c) compared to the measured root length density (*RLD*) distribution from minirhizotron monitoring (b, d)

的根系生长逐渐达到稳定。模拟根管测得的 *RLD* 曲线形状与模拟网格所测 *RLD* 不同，产生这些差异的原因是根管的观察范围有限，并且受到安装位置和方式的影响可能也将导致根系监测结果存在一定偏差[58]。

不同时期的实测值分别与模拟值对比，计算平均相对误差（*MRE*）、均方根误差（*RMSE*）和符合指数（*d*）（表 2）。其中 99 DAS 实测值与模拟值之间 *MRE* 为 0.2746，*RMSE* 为 2.4127 cm/cm^2 相对较低，*d* 为 0.9529，模型在该时间点模拟效果较好。总体来看，*MRE* 在 0.2486 ~ 0.5378 之间，*RMSE* 在 2.4127 ~ 4.8710 cm/cm^2 之间，除 72 DAS 的 *d* 值为 0.7541 外，其余模拟天数 *d* 值均在 0.87 之上，尽管在某些时间点上模型的模拟结果存在一定的误差，但整体上模型的预测趋势与实际观测值保持一致，所建立的根系三维动态生长模型能较好地模拟棉花根系三维空间动态分布[48]。微根管法受限于埋设方式的局限性，对于棉花生长区域浅部土壤（深度小于 20 cm）的根系监测效果并不理想[44]，增加根系样本数能够提高模型的精度。

表 2　根系生长模型不同模拟天数根长密度 (*RLD*) 验证结果

Table 2　Validation results of root length density (*RLD*) for different days using the root growth model simulation

模拟时间/DAS	样本数/个	*MRE*	*RMSE*/(cm·cm^{-2})	*d*
72	150	0.5378	3.9098	0.7541
99	150	0.2746	2.4127	0.9529
122	150	0.4450	3.0403	0.9020
139	150	0.4933	4.2273	0.8787
148	150	0.4694	4.8710	0.8702
153	150	0.2486	3.3358	0.9353

注：*MRE*. 平均相对误差；*RMSE*. 均方根误差；*d*. 符合指数

2.4　膜下滴灌棉花根系三维动态生长模拟

根据微根管法与网格法实验数据及文献资料[16, 44]，膜下滴灌棉花根系三维动态生长模型设定的参数包括主根（级数记为 0）、1 级侧根和 2 级侧根的初始增长率、分支角度等根构型参数，其中部分重要的根系参数如表 3 所示，标准偏差参考实际测量中多组数据平均值。

表 3　用于棉花根系模拟的根构型关键参数

Table 3　Key parameters of root architecture for cotton root system simulation

序号	代码	参数名称/单位	根系级数	数值（标准偏差）
1	a0	根部半径/cm	0	0.672
2	lmax0	最大根长度/cm	0	140 (14)
3	ln0	横向距离/cm	0	1 (0.2)
4	r0	初始增长率/(cm·d^{-1})	0	3
5	theta0	根与母根夹角/rad	0	0
6	a1	根部半径/cm	1	0.148 (0.042)
7	lmax1	最大根长度/cm	1	65 (6.5)
8	ln1	横向距离/cm	1	0.7 (0.1)
9	r1	初始增长率/(cm·d^{-1})	1	0.5 (0.1)
10	theta1	根与母根夹角/rad	1	1.326 (0.087)
11	a2	根部半径/cm	2	0.08 (0.01)
12	lmax2	最大根长度/cm	2	10 (1)
13	ln2	横向距离/cm	2	0.4 (0.1)
14	r2	初始增长率/(cm·d^{-1})	2	1 (0.2)
15	theta2	根与母根夹角/rad	2	1.221 (0.262)

图 7 显示了棉花根系生长模型在网格法研究区域（水平方向：宽行中央至膜间，垂直方向至 150 cm 深度）内输出的 *RLD* 随深度的变化，虚线显示了通过设置偏差模拟根系生长随机性的范围。*RLD* 在

20 cm 深度处最高，此后随深度逐渐下降，在 60 ~ 80 cm 深度 *RLD* 存在一处峰值；同一时期标准误差的范围随时间推移逐渐变大，其中 120 DAS（盛铃期）深度 10 ~ 110 cm 标准误差较大，新根生长量较大；30 DAS（苗期）之前 *RLD* 较小，棉花根系未完全发育，根系生长主要集中土壤浅部；30 ~ 90 DAS（苗期至花铃期）变化较大，此时棉花根系发育迅速，与前人[9, 16, 44]研究结果相符。

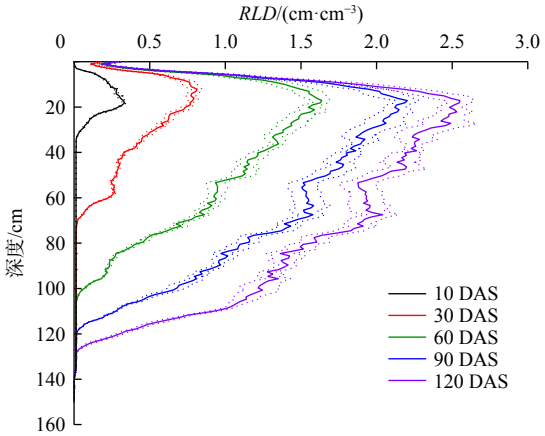


图 7　根系模型模拟 50 次 *RLD* 均值（实线）及标准误差（虚线）

Fig. 7　Mean (solid line) and standard error (dashed line) of root length density (*RLD*) from 50 simulations by root system model

CPlantBox 模拟的三维根系模型保存为 VTP 文件，使用 ParaView 将结果可视化[59]，利用 Python 脚本将棉花根系生长区域与微根管的几何图形可视化，可以在指定 DAS 输出根系三维空间分布（图 8），其中棉花以 10×10 cm 种植 4 株的方式分布，依照实际情况在棉花生根后设置 3 根根管作为障碍物，从左至右依次为短管、中管、长管。由第 30, 72, 99, 122, 139, 153 DAS 棉花根系的三维根系形态模拟结果，可以发现根系数量在蕾期至开花期增长最快，根系前期（苗期至花铃期）具有明显的水平和竖直方向生长趋势；花铃期至吐絮期根系在深部缓慢生长，浅部变化较小；根系到达深度最大为 130 cm 左右，且在深部土层中由花铃期至吐絮期根系有较明显生长趋势，膜间与膜边位置 0 ~ 20 cm 深度根系较少。该模型设定了恒定的根系三维分布范围，在模拟周期内可在给定任意时刻输出包含根节点坐标的根系空间分布数据。利用创建的膜下滴灌棉花根系生长模型生成逐日变化的根系根长密度空间分布数据，可将其换算成逐日根系生长参数空间分布。在后续的研究中，可进一步利用 Python 语言编程，通过外部程序调用根系分布数据文件供土壤水盐运移数值模拟模型（如：HYDRUS-3D）读取，实现根系生长模型与

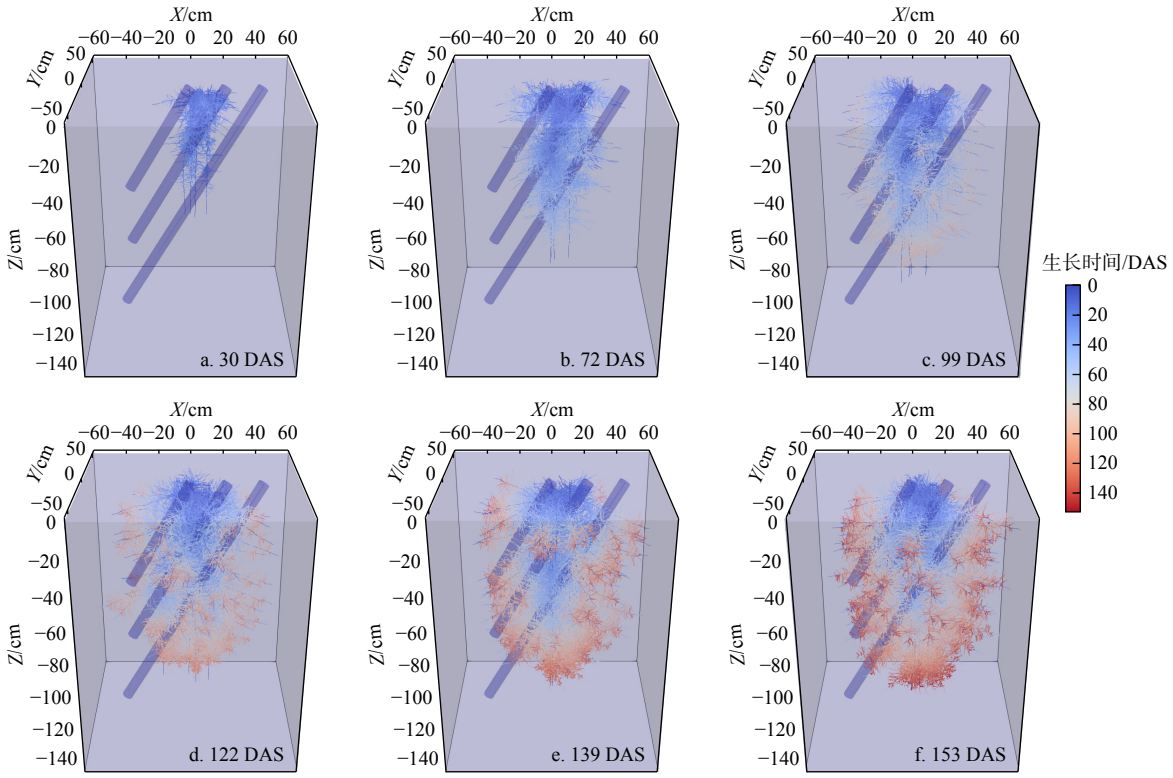


图 8　虚拟田间样地模拟棉花根系在 30 ~ 153 DAS 的生长及微根管布设

Fig. 8　Virtual field plot simulation of cotton root system growth and minirhizotron tubes deployment from 30 to 153 DAS

土壤水盐运移数值模型的耦合[60]，从而为探究根系空间分布动态变化影响下的膜下滴灌棉田水盐运移机制奠定基础。此外，棉花根系三维生长模型可充分利用于探索根系与土壤环境之间动态反馈的研究中，如：在根系生长不同时期，考虑土壤结构、土壤性质对根系发育的影响，利用根系模型对生长机制进行描述[39]；在根系尺度上，建立根系−土壤−水分−养分运移模型，对根区水分和养分运输以及根系养分吸收进行描述[61]。

3 结 论

（1）膜下滴灌棉花根系主要生长在覆膜区域，在窄行到宽行之间生长状态最佳，并且水平方向上根系的生长趋向于靠近宽行位置。膜边与无膜覆盖的膜间区域，棉花根系由蕾期至吐絮期呈老化趋势，根系在 20 cm 以下深度生长。在蕾期与花期，根系生长发育较快，宽行下方 50 ~ 80 cm 深度根系生长最密集，吐絮期棉花根系在窄行下方 50 ~ 80 cm 深度最密集。

（2）利用 CPlantBox 模型创建的根系模型模拟了棉花在田间环境下的根系生长情况，能够通过模拟田间采样方法（如：微根管法、网格法）获取根长密度，同时可以实现重复模拟与指定时间输出，提高了研究效率。棉花根系三维生长模型的预测趋势与实际观测值保持一致，不同时期微根管监测剖面 T2 和 T3 模拟值分别在 70 ~ 80 cm 深度和 50 ~ 60 cm 深度达到最大 *RLD*，与实测值对比 *MRE* 在 0.248 6 ~ 0.537 8 之间，*RMSE* 在 2.412 7 ~ 4.871 0 cm/cm^2 之间，*d* 在 0.754 1 ~ 0.952 9 之间，模拟结果总体能够描述棉花 *RLD* 分布。

（3）棉花根系的三维形态模拟结果展示了棉花根系的三维生长动态和完整形状，并考虑了棉花大田种植环境生长情况，微根管在一定程度上阻碍了根系的生长，根管附近的细根在管壁外侧生长，这与田间实际情况相同，并且模拟的根系生长具有随机效果且更加直观逼真。

本研究基于微根管法原位动态监测，验证了利用 CPlantBox 构建微咸水膜下滴灌棉花根系生长模型的可靠性。为提高棉花根系三维生长模型的精确度，还需在棉花生育全期更精细捕捉根系生长与衰亡过程，构建更具普适性的棉花根系三维生长模型。未来研究可进一步通过 Python 语言编程，以外部调用的方式对土壤水盐运移模型根系生长模块进行赋值，将高时空分辨率的根系生长模型与土壤水盐运移模型耦合，精细刻画根系时空分布与动态变化对水盐运移的影响，为揭示干旱区微咸水膜下滴灌根系形态时空分布控制下的棉田水盐运移机制奠定基础。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] WANG J T, DU G F, TIAN J S, et al. Effect of irrigation methods on root growth, root-shoot ratio and yield components of cotton by regulating the growth redundancy of root and shoot[J]. Agricultural Water Management, 2020, 234: 106120.

[2] WEI K, ZHANG J H, WANG Q J, et al. Irrigation with ionized brackish water affects cotton yield and water use efficiency[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 175: 114244.

[3] LI X W, JIN M G, HUANG J O, et al. The soil-water flow system beneath a cotton field in arid North-West China, serviced by mulched drip irrigation using brackish water[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(1): 35-46.

[4] WANG Z, FAN B, GUO L. Soil salinization after long-term mulched drip irrigation poses a potential risk to agricultural sustainability[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(1): 20-24.

[5] JACKSON R B, CALDWELL M M. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants[J]. The Journal of Ecology, 1993, 81(4): 683.

[6] 雷志栋，杨诗秀，谢森传. 土壤水动力学 [M]. 北京：清华大学出版社，1988.
LEI Z D, YANG S X, XIE S C. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.（in Chinese）

[7] HULUGALLE N R, BROUGHTON K J, TAN D K Y. Fine root production and mortality in irrigated cotton, maize and sorghum sown in vertisols of northern New South Wales, Australia[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 313-322.

[8] CRAINE J M. Competition for nutrients and optimal root allocation[J]. Plant and Soil, 2006, 285(1): 171-185.

[9] CHEN W L, JIN M G, FERRÉ T P A, et al. Spatial distribution of soil moisture, soil salinity, and root density beneath a cotton field under mulched drip irrigation with brackish and fresh water[J]. Field Crops Research, 2018, 215: 207-221.

[10] 宁松瑞. 长期膜下滴灌棉田根系层盐分累积效应模拟 [D]. 北京：中国农业大学，2015.
NING S R. Simulation of salt accumulation effect in root layer of cotton field under long-term drip irrigation under plastic film[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.（in Chinese with English abstract）

[11] CAI G C, VANDERBORGHT J, LANGENSIEPEN M, et al. Root growth, water uptake, and sap flow of winter wheat in response to different soil water conditions[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(4): 2449-2470.

[12] SMETHURST P J, COMERFORD N B. Simulating nutrient uptake by single or competing and contrasting root systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(5): 1361-1367.

[13] 杨猛，肖成. 与环境交互的根系动态生长可视化算法 [J]. 农业机

械学报, 2022, 53(7): 275-281.
YANG M, XIAO C. Visualization of growing dynamically of root system interacting with environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 275-281. (in Chinese with English abstract)

[14] PIERRET A, MORAN C J, DOUSSAN C. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots[J]. New Phytologist, 2005, 166(3): 967-980.

[15] 廖荣伟, 刘晶淼. 作物根系形态观测方法研究进展讨论 [J]. 气象科技, 2008, 36(4): 429-435.
LIAO R W, LIU J M. Progresses in methods for observing crop root pattern system[J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 36(4): 429-435. (in Chinese with English abstract)

[16] 陈文岭. 微咸水膜下滴灌棉花根系-水-盐-微量元素相互作用研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
CHEN W L. Study on the interactions of cotton root-soil moisture-salinity-trace element under mulched drip irrigation with brackish water[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018. (in Chinese with English abstract)

[17] 陈绍民. 基于土壤水分分布的滴灌棉花根系构型模拟方法研究 [D]. 新疆 石河子: 石河子大学, 2015.
CHEN S M. Study on the method of drip irrigation cotton root architecture simulation based on soil water distribution[D]. Shihezi Xinjiang: Shihezi University, 2015. (in Chinese with English abstract)

[18] NING S R, SHI J C, ZUO Q, et al. Generalization of the root length density distribution of cotton under film mulched drip irrigation[J]. Field Crops Research, 2015, 177: 125-136.

[19] JHA S K, GAO Y, LIU H, et al. Root development and water uptake in winter wheat under different irrigation methods and scheduling for North China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 182: 139-150.

[20] 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): vzj2011.0179.

[21] 薛苍松. 新疆哈密深层坑渗灌葡萄根系分布特征及吸水模型研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
XUE C S. Study on distribution of root and water uptake model of grape tree at deep-pit irrigation condition in Xinjiang Hami region[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)

[22] RAATS P A C. Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots[J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(5): 717-722.

[23] RASMUSSEN V P, HANKS R J. Spring wheat yield model for limited moisture conditions[J]. Agronomy Journal, 1978, 70(6): 940-944.

[24] ROOSE T, FOWLER A C, DARRAH P R. A mathematical model of plant nutrient uptake[J]. Journal of Mathematical Biology, 2001, 42(4): 347-360.

[25] DUPUY L, GREGORY P J, BENGOUGH A G. Root growth models: Towards a new generation of continuous approaches[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(8): 2131-2143.

[26] KALOGIROS D I, ADU M O, WHITE P J, et al. Analysis of root growth from a phenotyping data set using a density-based model[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(4): 1045-1058.

[27] LEITNER D, KLEPSCH S, BODNER G, et al. A dynamic root system growth model based on L-Systems[J]. Plant and Soil, 2010, 332(1): 177-192.

[28] POSTMA J A, KUPPE C, OWEN M R, et al. OpenSimRoot: Widening the scope and application of root architectural models[J]. New Phytologist, 2017, 215(3): 1274-1286.

[29] BESHARAT S, NAZEMI A H, SADRADDINI A A. Parametric modeling of root length density and root water uptake in unsaturated soil[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2010, 34(5): 439-449.

[30] BUSSCHER W. Simulation of field water use and crop yield[J]. Soil Science, 1980, 129(3): 193.

[31] VRUGT J A, HOPMANS J W, ŠIMUNEK J. Calibration of a two-dimensional root water uptake model[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(4): 1027-1037.

[32] HAN M, ZHAO C Y, FENG G, et al. Evaluating the effects of mulch and irrigation amount on soil water distribution and root zone water balance using HYDRUS-2D[J]. Water, 2015, 7(6): 2622-2640.

[33] PHOGAT V, MAHADEVAN M, SKEWES M, et al. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design[J]. Irrigation Science, 2012, 30(4): 315-333.

[34] RAVIKUMAR V, VIJAYAKUMAR G, ŠIMŮNEK J, et al. Evaluation of fertigation scheduling for sugarcane using a vadose zone flow and transport model[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(9): 1431-1440.

[35] SCHNEPF A, LEITNER D, LANDL M, et al. CRootBox: A structural-functional modelling framework for root systems[J]. Annals of Botany, 2018, 121(5): 1033-1053.

[36] SCHNEPF A, HUBER K, LANDL M, et al. Statistical characterization of the root system architecture model CRootBox[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 170212.

[37] LANDL M, SCHNEPF A, VANDERBORGHT J, et al. Measuring root system traits of wheat in 2D images to parameterize 3D root architecture models[J]. Plant and Soil, 2018, 425(1): 457-477.

[38] ZHOU X R, SCHNEPF A, VANDERBORGHT J, et al. CPlantBox, a whole-plant modelling framework for the simulation of water- and carbon-related processes[J]. In Silico Plants, 2020, 2(1): diaa001.

[39] MORANDAGE S, VANDERBORGHT J, ZÖRNER M, et al. Root architecture development in stony soils[J]. Vadose Zone Journal, 2021, 20(4): e20133.

[40] PHALEMPIN M, LANDL M, WU G M, et al. Maize root-induced biopores do not influence root growth of subsequently grown maize plants in well aerated, fertilized and repacked soil columns[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 221: 105398.

[41] LANDL M, HAUPENTHAL A, LEITNER D, et al. Simulating rhizodeposition patterns around growing and exuding root

systems[J]. In Silico Plants, 2021, 3(2): diab028.

[42] ZHONG N, LUO X W, QIN Q. Modeling and visualization of three-dimensional soybean root system growth based on growth functions[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 151-154.

[43] COELHO M B, VILLALOBOS F J, MATEOS L. Modeling root growth and the soil-plant-atmosphere continuum of cotton crops[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2): 99-118.

[44] CHEN W L, CHEN F F, LAI S X, et al. Spatial distribution and dynamics of cotton fine root under film-mulched drip irrigation[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 179: 114693.

[45] JOHNSON M G, TINGEY D T, PHILLIPS D L, et al. Advancing fine root research with minirhizotrons[J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 45(3): 263-289.

[46] GREGORY P J. Plant roots: Growth, activity and interaction with soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.

[47] MORANDAGE S, SCHNEPF A, LEITNER D, et al. Parameter sensitivity analysis of a root system architecture model based on virtual field sampling[J]. Plant and Soil, 2019, 438(1): 101-126.

[48] 李萌. 南疆膜下滴灌棉花灌溉和施肥调控效应及生长模拟研究 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
LI M. Study on effect of irrigation and fertilization regulation and simulation of cotton growth under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang[D]. Yangling Shaanxi: Northwest A & F University, 2020. (in Chinese with English abstract)

[49] 卢婷, 王萍, 王涛, 等. 基于钻孔成像和孔内流速流向试验的裂隙介质渗透系数计算方法 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(3): 334-343.
LU T, WANG P, WANG T, et al. Calculation method of permeability coefficient of fractured media based on borehole imaging and in-borehole flow velocity and direction tests[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 334-343. (in Chinese with English abstract)

[50] WILLMOTT C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, 63(11): 1309-1313.

[51] 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 W L, JIN M G, LIU Y F, et al. Monitoring cotton root growth dynamics under mulched drip irrigation using monirhizotron technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 87-93. (in Chinese with English abstract)

[52] SANDERS J L, BROWN D A. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions[J]. Agronomy Journal, 1978, 70(6): 1073-1076.

[53] SODA N, EPHRATH J E, DAG A, et al. Root growth dynamics of olive (*Olea europaea* L.) affected by irrigation induced salinity[J]. Plant and Soil, 2017, 411(1): 305-318.

[54] BALL R A, OOSTERHUIS D M, MAUROMOUSTAKOS A. Growth dynamics of the cotton plant during water-deficit stress[J]. Agronomy Journal, 1994, 86(5): 788-795.

[55] MAEGHT J L, REWALD B, PIERRET A. How to study deep roots-and why it matters[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 299.

[56] 汪泉娟, 孙敬锋, 杨英杰, 等. 克里金方法与深度学习方法用于浅层地下水位估计的对比研究: 以深汕特别合作区为例 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 291-301.
WANG Q J, SUN J F, YANG Y J, et al. A comparative study of Kriging and deep learning methods for shallow groundwater level estimation: A case study of the Shenzhen-Shanwei Special Cooperation Zone[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 291-301. (in Chinese with English abstract)

[57] 李俊英, 王孟本, 史建伟. 应用微根管法测定细根指标方法评述 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1842-1848.
LI J Y, WANG M B, SHI J W. Minirhizotron technique in measuring fine root indices: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(11): 1842-1848. (in Chinese with English abstract)

[58] RYTTER R M, RYTTER L. Quantitative estimates of root densities at minirhizotrons differ from those in the bulk soil[J]. Plant and Soil, 2012, 350(1): 205-220.

[59] AYACHIT U. The paraview guide: A parallel visualization application[M]. California, USA: Kitware Inc, 2015.

[60] 马韬. 河套灌区向日葵−盐−氮响应机制及生长模拟研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
MA T. Study on response mechanism and growth simulation of sunflower-salt-nitrogen in Hetao irrigation area[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese with English abstract)

[61] MAI T H, SCHNEPF A, VEREECKEN H, et al. Continuum multiscale model of root water and nutrient uptake from soil with explicit consideration of the 3D root architecture and the rhizosphere gradients[J]. Plant and Soil, 2019, 439(1): 273-292.

Summary for “微咸水膜下滴灌棉花根系时空分布规律及三维动态生长模拟”

Spatial-temporal distribution patterns of cotton root system under brackish water mulched drip irrigation and three-dimensional dynamic growth simulation

ZHANG Minghui[1a,2], ZHANG Junhua[1b], SHENG Tongmin[3], REN Weidong[4], ZHU Qi[1a], CHEN Wenling[1a*]

1a. School of Environmental Studies; 1b. School of Computer Science, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China;

2. Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450014, China;

3. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China;

4. Institute of Water Conservancy, Bayingolin Administration, Tarim River Basin, Korla Xinjiang 841000, China

First author, E-mail: mhzhang2021@cug.edu.cn

* Corresponding author, E-mail: chenwenling@cug.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Xinjiang is located in the arid to semi-arid region of China, where water resource conservation is critical. Brackish water mulched drip irrigation technology is widely used for cotton cultivation in Xinjiang. However, improper use of brackish water may lead to soil salinization. Regions with high cotton root density (*RLD*) may experience strong water absorption, resulting in soil moisture reduction and excessive salt accumulation, and subsequent declines in cotton yield. To ensure the soil habitat and cotton yield under brackish water mulched drip irrigation, the influence of cotton root distribution on field water and salt transport should be fully considered. [**Methods**] Based on the field experiments conducted at the cotton fields of the Irrigation Experiment Station of Water Conservancy Research Institute, Bayingolin Administration Bureau in Xinjiang, this study obtained cotton root growth parameters to construct a growth model for cotton roots under brackish water mulched drip irrigation, which quantitatively characterized the spatiotemporal distribution patterns of cotton roots. [**Results**] The results indicated that the spatial distribution of roots was influenced by soil moisture and salinity. During the budding to flowering stage, roots are more concentrated in the drip irrigation belt and inter-row positions. From the peak flowering to boll-opening stage, roots showed obvious decline beyond a depth of 50 cm, but developed in the soil depths of 90-130 cm. The predicted trend of the three-dimensional growth model of cotton roots was consistent with the actual observations, with *MRE* (the mean relative error) ranging from 0.248 6 to 0.537 8, *RMSE* (the root mean square error) from 2.412 7 to 4.871 0 cm/cm^2, and *d* (the index of agreement) from 0.754 1 to 0.952 9. The simulation results effectively described the distribution of cotton *RLD*. The three-dimensional simulation of cotton root system incorporates actual field planting conditions, achieving a dynamic three-dimensional growth effect. The model could effectively simulate the morphological structure and developmental processes of the root system. [**Conclusion**] Based on in-situ dynamic monitoring by minirhizotron technique, CPlantBox can be used to construct the cotton root growth model under brackish water film drip irrigation. The research results lay the foundation for exploring the impact mechanism of spatial-temporal distribution of root morphology on field soil water migration and root zone water and salt distribution, which has important theoretical and practical implications for improving high and stable cotton yield in Xinjiang.

Key words: brackish water; mulched drip irrigation; spatial distribution; cotton root system; root length density; growth simulation; three-dimensional dynamic growth model

Received: 2024-04-09; Revised: 2024-05-22; Accepted: 2024-05-23

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240155