



赵经华,袁莹莹,阿卜杜米提·马木提,等. 地下滴灌玉米根系分布与吸水对灌水量的响应研究[J]. 南京农业大学学报,2026,49(3):541-550.
Zhao J H, Yuan Y Y, Abdumi·Mamuti, et al. Studies on root distribution and water uptake in subsurface drip-irrigated corn in response to irrigation water volume[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2026, 49(3): 541-550.

地下滴灌玉米根系分布与吸水对灌水量的响应研究

赵经华^{1,2*}, 袁莹莹^{1,2}, 阿卜杜米提·马木提³, 杨庭瑞^{1,2}, 马明杰^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 英吉沙县水管总站, 新疆 英吉沙 844500)

摘要: [目的] 本文旨在探究地下滴灌玉米农田土壤水分运移规律和玉米根系分布与吸水对灌水量的响应规律。 [方法] 根据北疆玉米需水量 (ETc) 设置 5 个地下滴灌灌溉水平: 50% ETc (W1)、75% ETc (W2)、100% ETc (W3)、125% ETc (W4)、150% ETc (W5), 利用 Hydrus-2d 软件对土壤水分及根系吸水进行模拟研究, 分析不同灌水量下玉米农田土壤水分运移情况与玉米根系分布情况。 [结果] 随灌水量的增加, 玉米根长密度与根表面积密度整体呈先增加后降低的趋势, 且多在 W3 处理达到最大值, 土壤含水量逐渐升高, 全生育期 W1 至 W5 处理平均土壤含水量分别为 12.5%、16.4%、18.9%、21.1% 和 23.0%。各土层根系吸水速率逐步上升, W1—W5 处理玉米根系吸水速率分别为 0.30、0.33、0.39、0.40 和 0.40 cm·d⁻¹。 [结论] Hydrus-2d 模型模拟值与实测值的 $R^2 > 0.86$, RMSE 为 0.01~0.07, 能够有效模拟北疆地区地下滴灌玉米农田水分运移情况, 100% ETc 灌水处理最适宜玉米根长与根表面积的增加, 玉米根系吸水速率与灌水量呈正相关关系, 且玉米产量在 100% ETc 处理时达到最高, 为 17 882.15 kg·hm⁻²。

关键词: 玉米; 地下滴灌; 灌水量; Hydrus-2d 模型; 根系; 吸水

中图分类号: S275.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-2030(2026)03-0541-10

Studies on root distribution and water uptake in subsurface drip-irrigated corn in response to irrigation water volume

ZHAO Jinghua^{1,2*}, YUAN Yingying^{1,2}, Abdumi·Mamuti³, YANG Tingrui^{1,2}, MA Mingjie^{1,2}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Safety and Water Disaster Prevention and Control, Urumqi 830052, China; 3. Yingjiasha County Water Mains General Station, Yingjiasha 844500, China)

Abstract: [Objectives] The paper aimed to investigate the soil moisture transport pattern of subsurface drip irrigated maize farmland and the response pattern of maize root distribution and water uptake to irrigation water quantity. [Methods] Five levels of subsurface drip irrigation were set up according to the evapotranspiration of corn (ETc) in the northern border: 50% ETc (W1), 75% ETc (W2), 100% ETc (W3), 125% ETc (W4) and 150% ETc (W5), and Hydrus-2d software was used to simulate soil moisture and root water absorption, and analyze soil moisture transport and root distribution in corn farmland under different irrigation water levels. The soil moisture transport and corn root distribution in corn farmland were analyzed under different irrigation amounts. [Results] With the increase of irrigation water, the overall trend of maize root length density and root surface area density was first increasing and then decreasing, and mostly reached the maximum value in W3. The soil water content gradually increased, and the average soil water content of the whole life span W1-W5 was 12.5%, 16.4%, 18.9%, 21.1% and 23.0%, respectively. The root water uptake of each soil layer increased gradually, and the rate of root water uptake was 0.30, 0.33, 0.39, 0.40 and 0.40 cm·d⁻¹, respectively. [Conclusions] The R^2 between the simulated and measured values of the Hydrus-2d model reached more than 0.86, and the RMSE ranged from 0.01 to 0.07, which was able to simulate effectively the water transport situation of sub-surface drip-irrigated maize farmland in the Northern Xinjiang region, and the 100% ETc irrigation treatment was the most suitable for the increase of root length and root surface area, and the proper treatment was the most suitable for the increase of root length and root surface area of maize. The 100% ETc irrigation treatment was the most suitable for the increase of root length and root surface area, the rate of root water uptake was positively correlated with the irrigation water amount, and the maize yield reached the highest of 17 882.15 kg·hm⁻² at 100% ETc.

Keywords: maize; subsurface drip irrigation; irrigation water volume; Hydrus-2d model; root; water uptake

收稿日期: 2025-01-13

基金项目: “天山英才”培养计划“三农”骨干人才项目; 新疆维吾尔自治区“十四五”重大专项项目(2020A01003-4)

*通信作者: 赵经华, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: 105512275@qq.com。

玉米作为重要的粮食、饲料与经济作物,对我国粮食安全及农业生产具有重要意义。2023年新疆玉米产量 1.32×10^7 t,较上年增产 22.3%^[1]。新疆地区始终存在水资源短缺和水资源有效利用率低的情况,其中新疆农业灌溉水有效利用系数仅为 0.579,节水灌溉技术可发展空间巨大。近年来,地下滴灌在新疆玉米种植中起到了重要作用。地下滴灌技术可直接将水分作用于作物根区,有效提高灌溉水利用率^[2]。有研究表明,相较于地表滴灌,地下滴灌玉米的蒸散量减少了 39%,灌溉水生产力提高了 25%^[3],较传统沟灌节水 54%^[4]。玉米根系生长状况受灌水量影响显著,马国荣等^[5]研究发现,0~30 cm 浅层土壤水分对玉米生长至关重要,赵引等^[6]发现,充分灌溉处理下玉米浅层根长密度高于亏水灌溉,深层根长密度低于亏水灌溉,土壤含水率的降低能够促使玉米对深层土壤水的利用。

Hydrus 作为一款模拟变量饱和度情况下多孔介质中的水分和溶质运移的软件,在模拟非饱和带土壤水分运动状况及作物根系水系方面应用广泛^[7]。Khashaei 等^[8]利用 Hydrus-2d 模型评估了地下滴灌下玉米根区的水分及养分运移情况。Patra 等^[9]利用 Hydrus-2d 模型模拟了南亚地下滴灌玉米 5 年后的土壤水分及根系吸水情况。付玉娟等^[10]利用 Hydrus-2d 模型探究了辽西北干旱区夏玉米生育期水量平衡的变化规律。然而,利用 Hydrus-2d 模型针对新疆地区地下滴灌春玉米根区水分运移以及玉米根系吸水情况的研究鲜有报道。本研究设置不同地下滴灌制度,利用 Hydrus-2d 对玉米农田土壤水分分布情况以及根系吸水差异进行研究,探索各深度土层中水分运移及根系吸水对灌溉制度的响应,确定北疆地区适宜的玉米种植灌水量,完善地下滴灌水分运移理论。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2023 年 4—10 月在新疆克拉玛依市东南部农业综合开发区(85°01'E,45°46'N,海拔 270.00 m)开展,试验区属于典型的大陆性干旱荒漠气候,年平均气温 8.1 °C,年辐射总量 5 430~6 670 MJ·cm⁻²。年平均风速 3.7 m·s⁻¹,年平均降水量 101.1 mm,年平均蒸发量 3 545.2 mm,全年日照时数 2 600~3 400 h,无霜期 197~268 d,试验区土壤平均干容重 1.47 g·cm⁻³,田间持水率(体积)36.07%,地下水位 2~4 m。

1.2 试验设计

本试验以春玉米‘新农 008’为试材,该品种品质优良,兼具丰产、稳产、多抗、早熟等优点,是高淀粉玉米品种的代表。生育期划分为苗期(2023-05-11—05-18)、三叶期(2023-05-19—06-18)、拔节期(2023-06-19—07-25)、抽雄期(2023-07-26—08-9)、灌浆期(2023-08-10—09-02)。采用宽窄行种植,种子埋深 7 cm,宽行间隔 70 cm,窄行间隔 40 cm,株距 20 cm,采用甘肃省大禹节水公司的地理内镶贴片式滴灌带。地下滴灌带间距 110 cm,滴头间距 30 cm,毛管埋深 35 cm,滴头流量 2.8 L·h⁻¹。

以灌水量为变量因素,使用水表测量控制,依据当地灌水经验以及李菊等^[11]试验结果设置 5 个地下滴灌灌溉水平(表 1):50% ETc(294 mm)、75% ETc(387 mm)、100% ETc(477 mm)、125% ETc(603 mm)、150% ETc(684 mm),每水平 3 个重复,共 15 个小区,小区面积 6 m×8 m=42 m²,灌水周期 7 d。其中,ETc 为玉米需水量。灌溉及施肥制度:全生育期内施入尿素(N)500 kg·hm⁻²、磷酸二氢钾(P)180 kg·hm⁻²、硫酸钾(K)135 kg·hm⁻²,肥料随地下滴灌灌水施入。根据春玉米生长对肥料的需求,不同生育期施肥量有不同,氮肥、磷肥、钾肥在苗期(1 次)、拔节期(3 次)、抽雄期(3 次)、灌浆期(3 次)的施肥量分别为总施肥量的 10%、(12%、5%、5%)、(12%、15%、15%)、(6%、10%、10%)。

表 1 各处理全生育期灌水情况

Table 1 Irrigation throughout the reproductive life of each treatment

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	三叶期 Three-leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Stamen pumping period	灌浆期 Grouting period
W1	50% ETc	50% ETc	50% ETc	50% ETc	50% ETc
W2	75% ETc	75% ETc	75% ETc	75% ETc	75% ETc
W3	100% ETc	100% ETc	100% ETc	100% ETc	100% ETc
W4	125% ETc	125% ETc	125% ETc	125% ETc	125% ETc
W5	150% ETc	150% ETc	150% ETc	150% ETc	150% ETc

注:ETc:玉米需水量 Evapotranspiration of corn.

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤含水量的测定 在播种前、三叶期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期分别取样。每小区定点埋

设3处100 cm的土壤含水率 Divnner 管,利用 Divnner 2000 土壤水分探测仪分别测定10、20、30、40、50、60、70、80、90和100 cm土壤含水量。

1.3.2 玉米产量及产量构成因素的测定 人工选取各小区中间有代表性的3株玉米,共45株,在烘箱60℃烘干至恒重后使用精度为0.01 g的电子天平称重,对每小区得到的数据取平均值。

1.3.3 玉米根系指标的测定 在各个小区采用剖面挖掘法进行玉米根系原位取样,以玉米株干为中心,由玉米根部取水平方向上距主茎0~20 cm土层及距地面0~100 cm土层中的全部根系,以20 cm为1层进行分层土壤取样。根系取样主要以根径小于2 mm的吸水须根为主,去除死根及粗大的输导根,依次编号装入自封袋。用水冲洗土样,分离、筛选出吸水根后采用扫描仪进行吸水根扫描,运用万深 LA-S 植物根系分析系统对扫描结果进行分析,得到不同位置、不同径级吸水根的根长。

1.3.4 气候参数的测定 气候参数由试验地配备的小型气象站提供,主要包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日平均湿度、日最高湿度、日最低湿度、平均风速、平均太阳辐射、降雨量等数据。通过 Penman-Montieth 公式计算参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)。气象数据见图1。

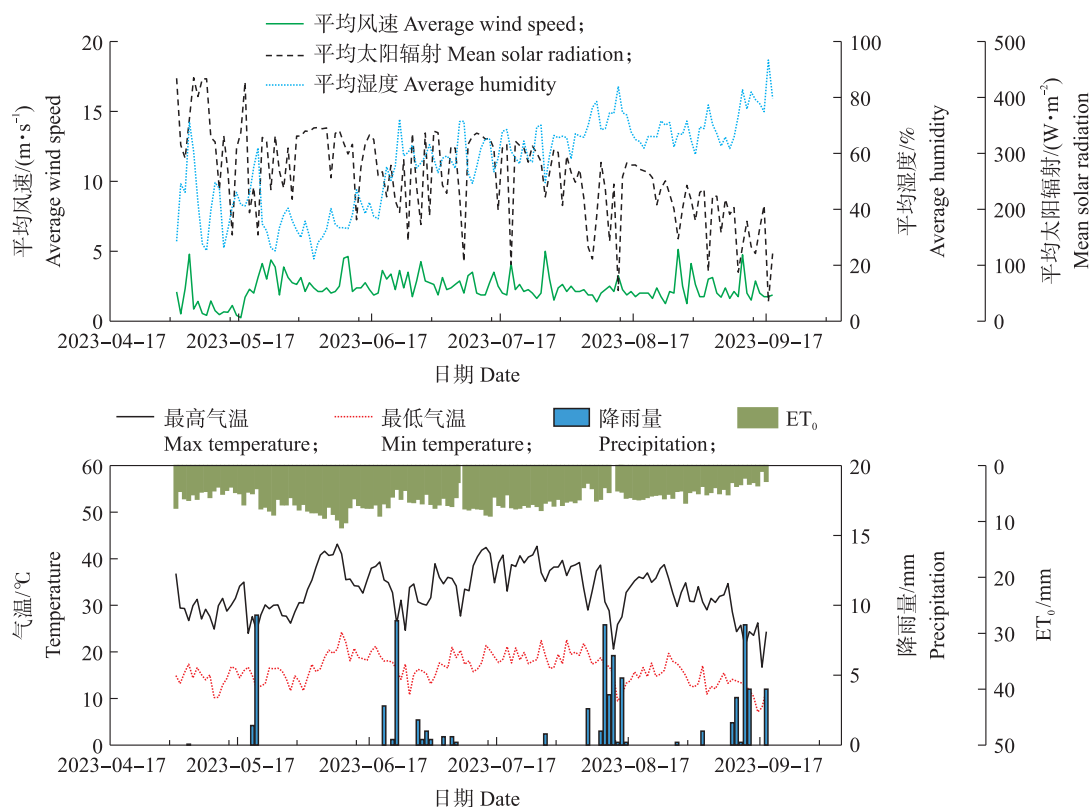


图1 全生育期气象变化

Fig. 1 Meteorological changes throughout the reproductive period

1.4 Hydrus-2d 模型

1.4.1 水流控制方程 选用 Richards 方程^[12]作为水流控制方程,以 Galerkin 有限元方法求解,不考虑滞后效应,公式如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h) \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为压力水头(cm); $K(h)$ 为导水率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); t 为模拟时间(d); x 和 z 为水平与垂直坐标(cm); S 为吸水项,即单位时间土壤中根系吸水率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

土壤水力函数选用 van Genuchten 模型^[13],公式如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \alpha |h|^n)^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中: θ_s 为饱和土壤含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_r 为残余土壤含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); n 、 m 、 α 为形状参数; S_e 为相对饱和度; K_s 为饱和导水率 ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); l 为孔隙关联参数, $l=0.5$ 。

1.4.2 根系吸水方程 根系吸水模型选用 Feddes 模型^[14], 吸水参数在 Hydrus-2d 数据库中选定玉米作物, 公式如下:

$$S(h) = \alpha(h) \cdot b(x, z) \cdot T_p \cdot S_i \quad (5)$$

式中: $\alpha(h)$ 为水分和渗透胁迫函数; $b(x, z)$ 为归一化的根系吸水空间分布函数; T_p 为潜在蒸腾速率 ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); S_i 为根区分布最大土壤表面宽度。

1.4.3 模型设置 土壤剖面 x 轴范围设置为 $(-40, 40)$, z 轴范围设置为 $(0, -100)$, 时间设置以天 (d) 为单位, 模拟 0~130 d 内水分运移及根系吸水情况, 每 1 d 为 1 个输出步长输出。按照试验前期实测土壤水分编辑初始条件, 设置上边界为大气边界, 滴灌带为可变通量边界, 左右边界为零通量边界, 下边界为自由排水边界, 每隔 10 cm 深度设置 3 个观测点, 每组处理 3×10 个观测点。

1.5 统计与分析

利用 Excel 2019 软件对试验数据与 Hydrus-2d 导出数据进行整理, 用 Origin 2021 软件绘图, 采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析, 数据采用平均值 $\pm$ 标准误 ($\bar{x} \pm SE$) 表示。不同处理之间数据的差异显著性检验采用 Duncan's 多重比较。模型模拟精度利用决定系数 (R^2) 与均方根误差 (RMSE) 对模拟结果进行评价, R^2 越接近于 1, RMSE 越接近于 0, 说明模型拟合效果越好。

2 结果与分析

2.1 不同灌水量对玉米根系分布的影响

由图 2 可知: 玉米生育前期根系主要分布在 0~40 cm 土层, 随着生育期的推进, 玉米逐渐向 40~100 cm 处扎根; 拔节期玉米根长密度在 0~40 cm 处差异显著 ($P < 0.05$), 根长密度随灌水量的增加呈先增大后减小的变化趋势, 且均在 W3 处理达到最大值; 抽穗期 0~20 cm 土层 W3 处理玉米根长密度最大, 20~40 cm 土层足水与高水处理下 (W3 至 W5 处理) 玉米根长密度显著大于其他处理 ($P < 0.05$), 40~60 cm 土层 W2 处理玉米根长密度最大, W1 处理最小; 灌浆期 0~20 cm 土层玉米根长密度随灌水量的增加而增加, 20~60 cm 土层 W2 处理玉米根长密度显著大于其他处理, 60~80 cm 土层玉米根长密度的处理从大到小依次表现为 W3、(W2、W4、W5)、W1, 更深处根长密度无显著性差异。玉米成熟期 0~20 cm 土层根长密度 W3、W4、W5 处理显著大于 W1、W2 处理。

拔节期 0~20 cm 土层玉米根表面积密度在 W3 处理达到最大, W4、W5 处理根表面积密度逐渐降低。20~40 cm 土层玉米根表面积密度无显著性差异, 40~60 cm 土层玉米根表面积密度在 W5 处理达到最大。抽穗期 0~60 cm 土层玉米根表面积密度随灌水量的增加呈先增大后减小的趋势, 且均在 W3 处理达到最大, W1 处理最小。灌浆期 60 cm 以上土层玉米根表面积密度的处理从大到小依次为 W3、W4、W5、W2、W1。60~80 cm 土层 W3 处理玉米根表面积密度最大, W5 处理最小, 80~100 cm 土层玉米根表面积密度在各处理间无显著差异。成熟期 0~60 cm 土层 W1 处理根表面积密度显著低于其他处理, 60~100 cm 土层根表面积密度均在 W3 处理达到最大。

2.2 不同灌水量对土壤水分分布的影响

利用 Hydrus-2d 模拟土壤水分运移, 图 3 反映了 Hydrus-2d 软件模拟各处理不同层深土壤水分分布情况, 研究发现软件模拟精度较高, 各处理各土层 R^2 均在 0.86 以上, RMSE 为 0.01~0.07。随着灌水量的增加, 土壤含水量整体上呈逐渐升高的趋势, 全生育期内 W1、W2、W3、W4、W5 处理平均土壤含水量分别为 12.5%、16.4%、18.9%、21.1%、23.0%, W5 处理土壤含水量较 W4、W3、W2、W1 处理分别增加了 9.0%、21.7%、40.2%、84.0%。

各土层土壤含水量变化规律较为一致, 10~20 cm 土层土壤含水量最低, 每次灌水后土壤含水量自 20 cm 深开始增加, 至 30~40 cm 土层到最大值, 灌水结束 1 d 内落回平均水平, 自 40~60 cm 土层土壤含水量整体呈下降趋势。玉米播后 80 d 内 (拔节期至抽穗期) 60~100 cm 土层土壤含水量较上层土壤略有升高, 播后 80 d (灌浆期) 30~70 cm 土层含水量降低。

各处理土壤水分运移情况略有差异, W1 处理 10~20 cm 土层土壤含水量极低, 不随灌水的起止变化, 生育前期灌水事件只能使 20~40 cm 土层土壤含水量产生波动, 灌浆期后由于灌水量的增加波动范围延

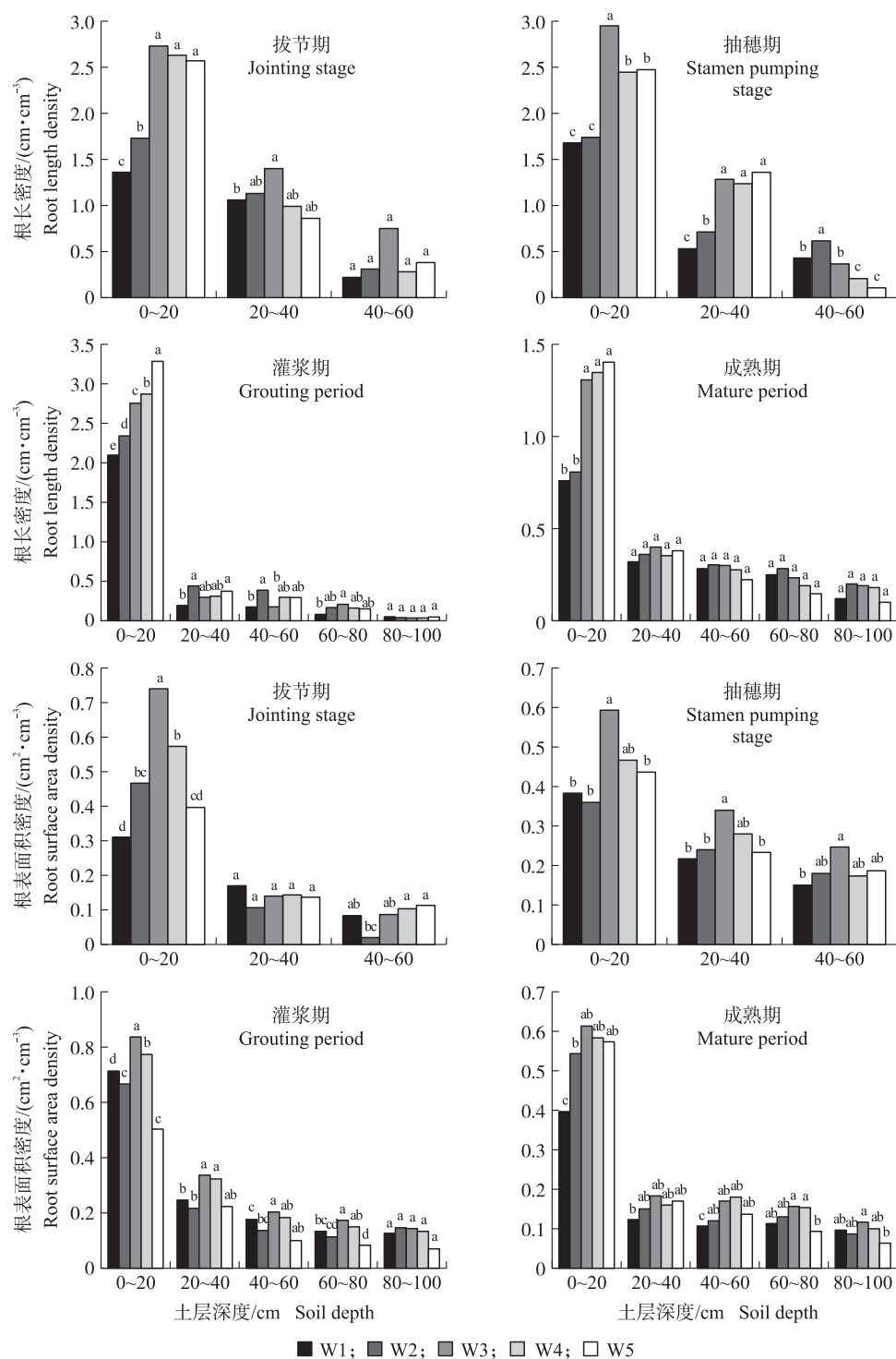


图2 不同灌水量下各处理根系分布

Fig. 2 Root distribution of treatments under different irrigation rates

W1—W5 分别表示处理 1—处理 5;不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。W1 to W5 indicate Treatment 1 to Treatment 5, respectively; different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

伸至 50 cm 处。其中 30 cm 土层土壤含水量在灌水后可达到最高 (24.4%)。自灌浆期起 40~70 cm 土层含水量降至 $(11.6 \pm 0.5)\%$ 。W2 处理各土层土壤含水量与 W1 处理变化趋势一致,但较 W1 处理各土层略有升高,生育前期 20~40 cm 土层土壤含水量受灌水事件影响较大,至播后 90 d (灌浆中期), 10~60 cm 土层含水量均随灌水产生波动,其中 30 cm 土层土壤含水量最高可达 25.5%,灌浆期 40~70 cm 土层含水量降至 $(13 \pm 2)\%$ 。W3 处理较 W2 处理各土层含水量进一步增加,30 cm 土层土壤含水量最高可达 30.9%。播后 65 d, 50 cm 土层土壤含水量随灌水产生变化,播后 80 d 灌水影响范围延伸至 60 cm 土层;自播后 90 d 起, 10~90 cm 土层土壤含水量均处于较高水平,灌浆期 40~70 cm 土层含水量为 $(17 \pm 2)\%$ 。

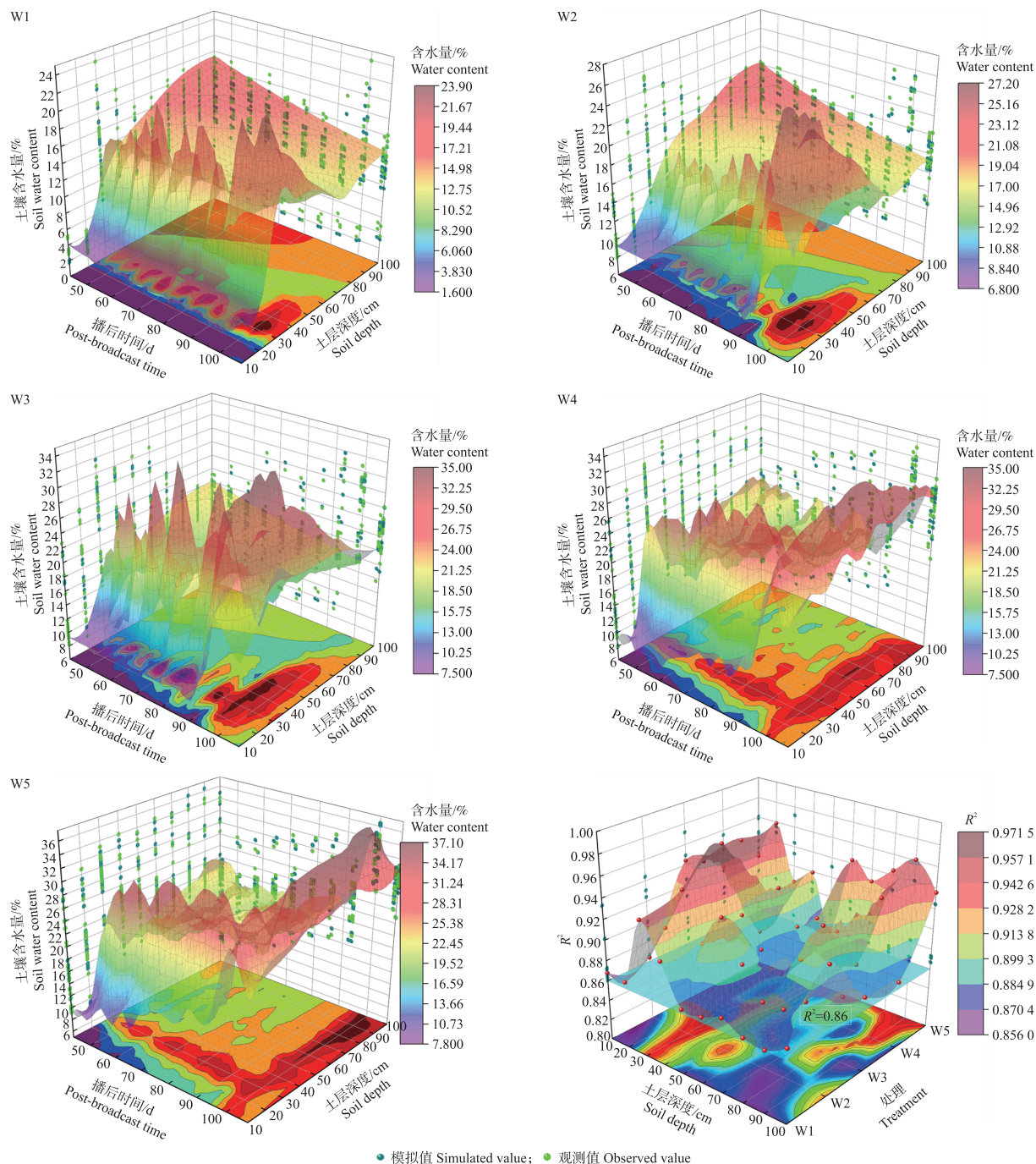


图3 不同灌水量下土壤水分分布

Fig. 3 Soil moisture distribution under different irrigation amounts

由于灌水量的增加,W4、W5 处理各土层土壤含水量均处于较高水平。W4 处理 30 cm 土层土壤含水量最高可达 31.2%,W5 处理土壤含水量最高可达 33%。W4 处理在播后 100 d,60 cm 土层含水量达到最大(31.5%),W5 处理在播后 100 d,90 cm 土层含水量达到最大(34.7%)。灌浆期 W4 处理 40~70 cm 土层含水量为(21±1)%,W5 处理为(22.6±1)%。

2.3 不同灌水量对玉米根系吸水速率的影响

从图 4 可知:随灌水量的增加,各土层根系吸水速率逐渐升高后趋于平稳,各处理玉米根系吸水速率随时间的推移呈上升趋势,直至播后 100 d 根系吸水速率达到最大值,W1 至 W5 处理玉米根系吸水速率分别为 0.30、0.33、0.39、0.40、0.40 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$;播后 70~90 d 内,W3 与 W4 处理较前一灌水水平根系吸水速率增幅较高,W2 处理较 W1 处理根系吸水速率增加了 10%,W3 处理较 W2 处理根系吸水速率增加了 18%,W4 处理较 W3 处理根系吸水速率增加了 2.5%,可见灌水量增大到 100%ET_c 时对玉米根系吸水促进效果最大。

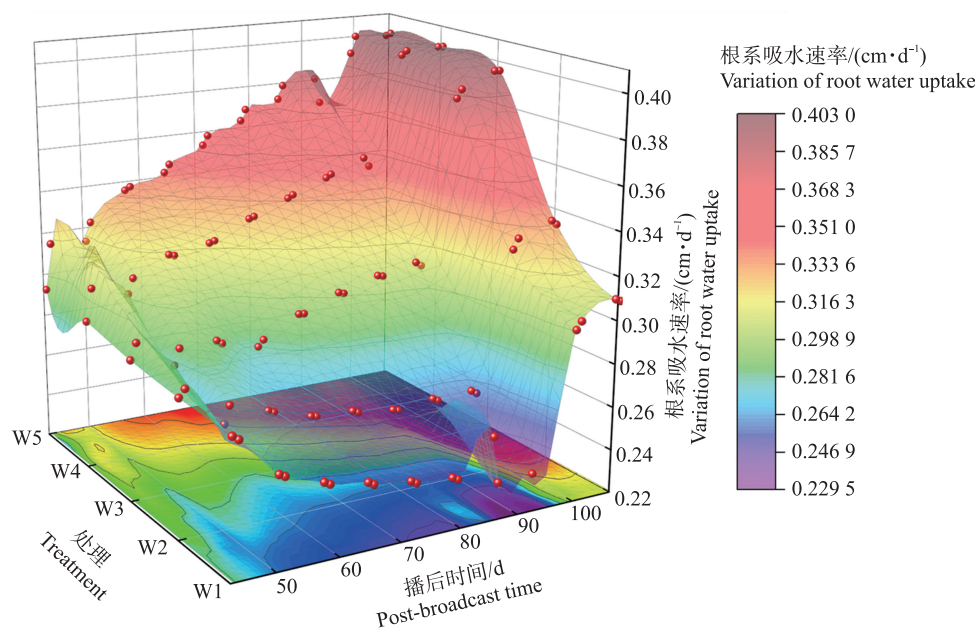


图 4 不同灌水量下玉米根系吸水速率

Fig. 4 Variation of root water uptake under different irrigation rates

2.4 不同灌水量对玉米产量及水分利用效率的影响

从表 2 可知:W3 处理玉米棒长达到最大,棒长为 20.84 cm,显著高于 W2、W4、W5 处理;W1 处理棒长最短,显著低于其他处理,为 17.65 cm。W1 处理春玉米秃尖长达到最大,为 26.70 mm,与 W2、W4 处理无显著差异;W5 处理秃尖最短,为 1.51 mm。百粒重随灌水量的增加呈逐渐上升的趋势,W4 与 W5 处理无显著性差异,W1 处理百粒重最小,其中 W5 处理较 W4、W3、W2、W1 处理分别高出 1.85%、4.02%、6.86%、9.97%。穗粒数随灌水量的增加呈先逐渐增加后略微降低的单峰变化趋势,其中 W3 处理穗粒数最大,为 648,较 W5、W4、W2、W1 处理分别增加了 3.53%、5.14%、15.05%、32.56%。不同处理产量显著性从高到低依次为 W3(17 882.15 kg·hm⁻²)、W4(17 807.65 kg·hm⁻²)、W5(17 632.27 kg·hm⁻²)、W2(15 159.18 kg·hm⁻²)、W1(12 709.41 kg·hm⁻²),其中以 W3 处理产量最优,分别是 W1、W2、W4、W5 处理的 1.407、1.180、1.004、1.014 倍。地下滴灌春玉米水分利用效率随灌水量的增加呈现出显著降低的变化趋势,不同处理从高到低依次为 W1、W2、W3、W4、W5。其中:W1 处理水分利用效率最高,为 4.17 kg·m⁻³;W5 由于灌水量过高,产量增幅与灌水量的增加不相匹配,W5 水分利用效率显著低于其他处理,为 2.67 kg·m⁻³;W2 至 W5 处理水分利用效率分别较上一梯度降低了 6.40%、4.62%、26.97%、10.54%。增大灌水量虽促进了玉米根系吸水,但过高的灌水量却抑制了玉米籽粒产量的累积与水分利用效率的升高。

表 2 不同处理春玉米产量构成及水分利用效率(WUE)

Table 2 Spring corn yield and water use efficiency(WUE)for different treatments

处理 Treatment	棒长/cm Ear length	秃尖长/cm Barren tip length	穗粒数 Kernel number per ear	百粒重/g Hundred-grain weight	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	WUE/ (kg·m ⁻³)
W1	17.65±0.60 ^c	1.78±0.51 ^a	488.66±17.2 ^c	28.01±0.43 ^b	12 715.13±813.62 ^c	4.17±0.13 ^a
W2	18.94±0.74 ^b	2.66±1.55 ^a	563.06±31.5 ^b	27.22±1.47 ^{ab}	15 166.00±713.44 ^b	3.92±0.10 ^b
W3	20.84±0.40 ^a	1.20±0.67 ^b	647.80±26.3 ^a	28.78±1.49 ^{ab}	17 890.20±926.31 ^a	3.75±0.04 ^c
W4	19.31±0.54 ^b	1.36±0.21 ^{ab}	616.13±16.6 ^a	29.39±1.08 ^a	17 815.66±2 208.40 ^a	2.95±0.05 ^d
W5	19.27±0.36 ^b	0.15±0.01 ^c	625.73±40.0 ^a	29.94±0.34 ^a	17 640.20±915.57 ^a	2.67±0.09 ^e

注:数据采用平均值±标准误表示,同一行数据肩标的不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。
Note: All data in the table are expressed as mean±standard error, and different lowercase letters in the shoulder of the same row indicate significant difference(P<0.05).

3 讨论

本研究结合大田试验与 Hydrus-2d 模型,分析了地下滴灌玉米农田土壤水分分布、玉米根系分布及吸水、玉米产量及构成对灌水量的响应规律,发现 100%ETc 灌水处理最适宜玉米根长与根表面积的增加,超

过 100%ETc 灌水虽提高了玉米水分利用效率,却影响了根系深扎;Hydrus-2d 模型模拟北疆春玉米农田水分运移时 R^2 达 0.86 以上, $RMSE$ 为 0.01~0.07,精度较高,其得到的玉米根系吸水速率随灌水量的增加边际递减;玉米产量在 W3(100%ETc)处理时达到最高,为 7 882.15 kg·hm⁻²,表明 100%ETc 为北疆春玉米种植最适宜灌水量。

在作物种植方案设定过程中,灌水量的确定尤为重要,水直接或间接影响着作物生长发育过程中各个环节。本研究发现抽雄期至灌浆期 20~40 cm 土层根长密度随灌水量的增加而增加,与文献[15-16]的研究结果一致。40~60 cm 土层玉米根长密度随灌水量的增加呈先升高后降低的趋势,且均在 W2 达到最高,这是因为缺水会在一定程度上促进根系深扎以使作物获得更深层的土壤水分,增强植株的抗倒伏性^[6]。各生育期 W4 与 W5 处理各土层玉米根长密度无显著差异,可知灌水量的增加能在一定程度上促进玉米根系生长,但其促进作用会随灌水量的持续增加逐渐减小。对玉米根表面积密度的研究发现,灌水量的增加使各土层根表面积密度均呈现先升高后降低的变化趋势,持续增加灌水对玉米根表面积的增加无益,这与 Kondo 等^[17]的研究发现一致。另外,此次研究发现适当亏缺灌溉(75%ETc)可促进玉米向 60 cm 以下土层扎根,这是因为亏缺灌溉导致玉米根区水分不能满足植株生长需要,使得玉米向更深处扎根以吸收水分,能够促进根系生长,提高植株抗倒伏性。不同生育时期玉米对水分的敏感性不一样,对产量的影响也差异巨大。许多研究进一步揭示:春玉米拔节期干旱与抽雄期或吐丝期复水可延长灌浆期并推迟乳熟期^[18];玉米拔节期叶片 P_n 对干旱后复水的补偿作用强于抽雄期^[19];乳熟期干旱会导致玉米果穗长、百粒重、产量及籽粒粗蛋白含量降低,且随着干旱程度的增加,玉米产量及籽粒品质受影响程度普遍呈增加趋势^[20]。

前人研究发现土壤含水量随深度的增加呈先增后降趋势,随时间推进呈“先增后减再增”趋势,随灌水量的增加呈不断升高趋势,且土壤含水量在每次灌溉后会出现较大波动^[21-23],本研究结果与其一致。本研究中 W1 处理由于灌水量最小,水分无法运移至 10~20 cm 土层,该土层含水量始终处于较低水平,当灌水量增加至 W4 与 W5 处理时,灌水后充足的土壤水分向上层移动,10~20 cm 土层含水量出现波动,田间试验中发现高灌水处理灌水后土壤表层可见一定湿润范围也可佐证这一观点。本研究发现 20~60 cm 土层土壤含水量波动明显,一方面是因为滴灌带埋深在 35 cm 处,每次灌水都会直接影响该土层土壤含水量,另一方面是因为玉米根系主要分布在这一范围内,根系吸水等生物机制也会影响土壤水分运移。60~100 cm 土层土壤含水量变化幅度较小,这与余静等^[24]和袁江杰等^[25]的结果一致。何锐等^[26]发现高、中、低水处理最大湿润深度分别在 80~100 cm、60~80 cm、20~50 cm,本文结果与其相符。对比 Hydrus-2d 软件模拟土壤含水量与实测土壤含水量可知,软件对土壤水分运移情况的模拟精度高^[9]。Patra 等^[9]的研究结果也证实了 Hydrus-2d 用于模拟的可靠性。根据 Hydrus-2d 模拟得到的各处理根系吸水速率,本研究发现灌水量的增加对根系吸水速率有促进作用,随着灌水量的不断增加,其对根系吸水的促进作用逐渐减弱,与 Eltarabily 等^[27]和杨明达等^[28]的研究结果一致。玉米产量在 W3 处理达到峰值,即持续增大灌水不会持续增产,与前人的研究结果^[29-30]一致。

参考文献 References:

- [1] 李星星,欧欢,陈娟,等. 新疆南疆春播玉米穗部性状及产量对不同种植密度的响应[J]. 中国农学通报,2024,40(29):8-13.
Li X X, Ou H, Chen J, et al. Response of ear traits and yield of spring sown maize to different planting densities in southern Xinjiang[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(29): 8-13.
- [2] 沈彦俊,齐永青,罗建美,等. 地理学视角的农业节水理论框架与水资源可持续利用[J]. 地理学报,2023,78(7):1718-1730.
Shen Y J, Qi Y Q, Luo J M, et al. The combined pathway to sustainable agricultural water saving and water resources management: an integrated geographical perspective[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1718-1730 (in Chinese with English abstract).
- [3] 贾明磊,魏巍,刘帆,等. 土壤质地和滴头流量对地下滴灌土壤水分运移特征的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2025,33(4):749-758.
Jia M L, Wei S, Liu F, et al. Influence of soil texture and drip head flow rate on soil water transport characteristics of subsurface drip irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(4): 749-758 (in Chinese with English abstract).
- [4] Patra K, Parihar C M, Nayak H S, et al. Appraisal of complementarity of subsurface drip fertigation and conservation agriculture for physiological performance and water economy of maize[J]. Agricultural Water Management, 2023, 283: 108308.
- [5] 马国荣,庄漠然,许德浩,等. 青铜峡引黄灌区农田灌溉水入渗与玉米分层吸水规律研究[J]. 干旱区地理,2024,47(11):1899-1914.
Ma G R, Zhuang H R, Xu D H, et al. Water infiltration and maize root water uptake patterns in the Qingtongxia Yellow River irrigation district

- [J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(11): 1899–1914 (in Chinese with English abstract).
- [6] 赵引, 李国安, 夏江宝, 等. 覆膜和灌水量对制种玉米根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 104–114.
Zhao Y, Li G A, Xia J B, et al. Effects of film mulching and irrigation amount on the root distribution and yield of seed-maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(15): 104–114 (in Chinese with English abstract).
- [7] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 利用 HYDRUS-2D 模拟膜下滴灌玉米农田深层土壤水分动态与根系吸水[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(3): 23–32.
Ding Y T, Cheng Y, Zhang T B, et al. Modeling of dynamics of deep soil water and root uptake of maize with mulched drip irrigations using HYDRUS-2D[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(3): 23–32 (in Chinese with English abstract).
- [8] Khashaei F, Behmanesh J, Rezaverdinejad V, et al. Field evaluation and numerical simulation of water and nitrate transport in subsurface drip irrigation of corn using HYDRUS-2D[J]. *Irrigation Science*, 2024, 42(2): 327–352.
- [9] Patra K, Parihar C M, Nayak H S, et al. Water budgeting in conservation agriculture-based sub-surface drip irrigation in tropical maize using HYDRUS-2D in South Asia[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 16770.
- [10] 付玉娟, 李尧, 喻浩洋, 等. Hydrus-2D 模拟起垄覆膜处理对夏玉米生育期水量平衡的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(10): 76–87.
Fu Y J, Li Y, Yu H Y, et al. Effects of ridging and plastic film mulching on the water balance of summer maize during its growth period[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(10): 76–87 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李菊, 张富仓, 王艳丽, 等. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(10): 8–20.
Li J, Zhang F C, Wang Y L, et al. Effects of irrigation amount and drip irrigation frequency on spring maize growth and water use in Hexi area of Gansu Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(10): 8–20 (in Chinese with English abstract).
- [12] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1(5): 318–333.
- [13] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892–898.
- [14] Milthorpe F L. Simulation of field water use and crop yield[J]. *Field Crops Research*, 1980, 3: 95–96.
- [15] Cai Q, Zhang Y L, Sun Z X, et al. Morphological plasticity of root growth under mild water stress increases water use efficiency without reducing yield in maize[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(16): 3851–3858.
- [16] 段伟娜. 亏缺灌溉夏玉米根冠生长对土壤水分的动态响应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Duan W N. Dynamic response of root-shoot growth of summer maize to soil moisture under deficit irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [17] Kondo M, Murty M V R, Aragonés D V. Characteristics of root growth and water uptake from soil in upland rice and maize under water stress[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(3): 721–732.
- [18] 胡明新, 周广胜. 拔节期干旱和复水对春玉米物候的影响及其生理生态机制[J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 274–283.
Hu M X, Zhou G S. Phenological change and its ecophysiological mechanism of spring maize responding to drought at jointing stage and rewatering[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(1): 274–283 (in Chinese with English abstract).
- [19] 蔡福, 米娜, 纪瑞鹏, 等. 关键发育期干旱及复水过程对春玉米主要生理参数的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3643–3652.
Cai F, Mi N, Ji R P, et al. Effects of drought stress and subsequent rewatering on major physiological parameters of spring maize during the key growth periods[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11): 3643–3652 (in Chinese with English abstract).
- [20] 陈妮娜, 纪瑞鹏, 贾庆宇, 等. 关键发育期干旱对春玉米产量及籽粒品质的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1687–1694.
Chen N N, Ji R P, Jia Q Y, et al. Effects of drought stress at key growth stages on yield and grain quality of spring maize[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6): 1687–1694 (in Chinese with English abstract).
- [21] 邹洪涛, 贺荣涛, 张一峰, 等. 不同灌溉方式对设施土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2025, 56(4): 1–12.
Zou H T, He R T, Zhang Y F, et al. The effect of different irrigation methods on the stability of soil aggregates and organic carbon content in greenhouse soil[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2025, 56(4): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张健利, 王振华, 刘茹华, 等. 水肥互作对滴灌红枣耗水及产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(6): 597–604, 613.
Zhang J L, Wang Z H, Liu R H, et al. Effects of water and fertilizer interaction on water consumption and yield of jujube under drip irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(6): 597–604, 613 (in Chinese with English abstract).
- [23] 向凌潇, 张俊威, 李建明. 灌溉量与灌溉频率对番茄根系生长、产量和营养元素吸收的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(5): 80–92, 123.
Xiang L X, Zhang J W, Li J M. Effects of irrigation amount and frequency on root growth, yield and nutrient element absorption of tomato[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(5): 80–92, 123 (in Chinese with English abstract).
- [24] 余静, 庞桂斌, 于浩洋, 等. 冬小麦测墒补灌下土壤氮素迁移特征模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(1): 28–34.
Yu J, Pang G B, Yu H Y, et al. Characteristics of soil nitrogen transport under moisture measurement and supplemental irrigation in winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(1): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- [25] 袁江杰, 李光永, 袁子程. 地下滴灌带类型对玉米根系生长和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(12): 14–18.
Yuan J J, Li G Y, Yuan Z C. Effects of subsurface drip tape types on maize growth and yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015,

- 34(12):14–18(in Chinese with English abstract).
- [26] 何锐,佟长福,王军,等. 水氮调控对向日葵生长、水肥利用效率和土壤水盐分布的影响[J]. 灌溉排水学报,2023,42(12):73–81.
He R,Tong C F,Wang J,et al. Effects of water and nitrogen regulation on growth,water-fertilizer use efficiency and soil water-salt distribution in sunflower[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(12):73–81(in Chinese with English abstract).
- [27] Eltarabily M G,Bali K M,Negm A M,et al. Evaluation of root water uptake and urea fertigation distribution under subsurface drip irrigation[J]. Water,2019,11(7):1487.
- [28] 杨明达,张素瑜,杨慎骄,等. 地下滴灌对冬小麦-夏玉米根系吸水特征的影响[J]. 生态学杂志,2024,43(2):469–479.
Yang M D,Zhang S Y,Yang S J,et al. Effects of subsurface drip irrigation on root water uptake of winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Ecology,2024,43(2):469–479(in Chinese with English abstract).
- [29] 吴梅,张金珠,王振华,等. 水气互动对膜下滴灌玉米生理生长及产量的影响[J]. 中国农业科技导报,2024,26(8):189–200.
Wu M,Zhang J Z,Wang Z H,et al. Effects of water and air interaction on physiological growth and yield of maize under mulched drip irrigation [J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2024,26(8):189–200(in Chinese with English abstract).
- [30] 曲俊杉,洪明,常浩,等. 水氮供应对北疆春玉米产量、水氮利用及品质的影响[J]. 玉米科学,2023,31(2):125–135.
Qu J S,Hong M,Chang H,et al. Effects of water and nitrogen supply on yield,water-nitrogen utilization and quality of spring maize in northern Xinjiang[J]. Journal of Maize Sciences,2023,31(2):125–135(in Chinese with English abstract).

责任编辑:刘怡辰