

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.012

# 基于 HYDRUS - 2D/3D 的玉米全膜双垄沟水肥运移规律与根系响应

邓欢 戴飞 史瑞杰 王锋 宋学锋 赵武云

(甘肃农业大学机电工程学院,兰州 730070)

**摘要:**为研究西北旱区玉米全膜双垄沟种植模式下土壤水肥运移规律,通过 HYDRUS - 2D/3D 模型对甘肃省定西市玉米全膜双垄沟土壤水肥运移规律及根系响应进行数值模拟,分析全膜双垄沟种植模式下土壤含水率及垄沟内种肥浓度的分布规律,在合理播种处设置观测点以表征土壤含水率及膜下氮、磷、钾水肥互作运移变化规律。模拟结果表明,全膜双垄沟膜下渗水孔与种穴位置处土壤水肥发生环状侧渗现象,其中土壤含水率范围为 15.20% ~ 17.12%,垄沟内氮肥转化浓度趋于 15.38 mg/L,磷肥转化浓度趋于 5.15 mg/L,钾肥转化浓度趋于 12.21 mg/L,水肥主要集中在垄沟位置,保障了苗期水肥需求;通过施加根系吸水和水肥运移模拟表明全膜双垄沟模式下土壤水肥条件满足玉米出苗需求。研究模型与结果将为玉米全膜双垄沟农艺技术的优化提升提供理论依据。

**关键词:**玉米全膜双垄沟; HYDRUS - 2D/3D; 土壤水肥运移

**中图分类号:** S223.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0100-09

## Water and Fertilizer Transport Law and Root Response of Maize in Full-film Double Furrows Based on HYDRUS - 2D/3D

DENG Huan DAI Fei SHI Ruijie WANG Feng SONG Xuefeng ZHAO Wuyun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to study the law of soil water and fertilizer transport under the corn full film double ridge planting mode in northwest arid area, the HYDRUS - 2D/3D model was used to numerically simulate the law of soil water and fertilizer transport and root response of corn full film double ridge planting mode in Dingxi City, Gansu Province, the distribution law of soil water content and seed fertilizer concentration in the ridge under the full film double ridge planting mode was analyzed, and observation points at reasonable sowing depths were set to characterize the interaction law of soil water content, nitrogen phosphorus and migration of potassium, water and fertilizer. The simulation results showed that the circular lateral infiltration of soil water and fertilizer occurred at the infiltration holes and seed holes of full film double ridge and furrow, in which the fluctuation range of soil moisture content was 15.20% ~ 17.12%, the concentration value of nitrogen fertilizer transformation in the ridge and furrow tended to be 15.38 mg/L, the concentration value of phosphorus fertilizer transformation tended to be 5.15 mg/L, and the concentration value of potassium fertilizer transformation tended to be 12.21 mg/L. Water and fertilizer were mainly concentrated in the ridge and furrow, which ensured the water and fertilizer demand at the seedling stage. The simulation of root water uptake and water and fertilizer transport showed that the soil water and fertilizer conditions under the full film double ridge and ditch mode met the needs of maize seedling emergence. The research model and results would provide a theoretical basis for the optimization and improvement of maize full film double ridge and furrow agronomic technology.

**Key words:** corn full film double ridge and ditch; HYDRUS - 2D/3D; soil water and fertilizer transport

收稿日期: 2022-06-02 修回日期: 2022-08-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52065005, 51775115)、甘肃省杰出青年基金项目(20JR10RA560)、中国博士后科学基金项目(2021M700741)和甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA029)

**作者简介:** 邓欢(1997—),男,硕士生,主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究,E-mail: 1755288015@qq.com

**通信作者:** 戴飞(1987—),男,副教授,博士,主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn

## 0 引言

甘肃省位于我国西北地区,是典型的雨养旱作农业区,降雨量少、蒸发量大、时空分布不均现象明显。目前,针对西北旱区作业现状已研究推广全膜双垄沟播抗旱耕作技术<sup>[1]</sup>,研究表明其特殊的垄体结构及表层覆膜具有保墒增温增产等功效,因而可在西北旱区大面积推广应用。适宜的土壤水肥环境对玉米生长发育及产量具有明显的促进作用,研究其在土壤中的互作规律对全膜双垄沟播技术的推广应用、配套农机装备的创制及农机农艺融合具有重要指导意义。

数值模拟计算是研究水肥运移特性的一个重要方法,国内外众多学者借助于 HYDRUS 模型在土壤水盐运移环节进行了大量研究。HIBA 等<sup>[2]</sup>基于 HYDRUS-2D 模型研究地下滴灌条件下不同农田灌溉策略对马铃薯作物的影响;MARIEM 等<sup>[3]</sup>基于 HYDRUS-1D 模拟突尼斯中部凯鲁万平原地区饱和带和非饱和带之间的相互作用;胡文同等<sup>[4]</sup>基于 HYDRUS-2D 研究犁底层容重对微咸水膜下滴灌土壤水盐运移分布的影响;王国帅等<sup>[5]</sup>基于 HYDRUS-1D 模型模拟与评估荒漠绿洲水盐运移;贾浩等<sup>[6]</sup>基于 HYDRUS-1D 模型模拟灌排联合下的水盐运移,通过室内土柱试验控制灌溉水量模拟含水率和含盐率。部分学者利用 HYDRUS 软件模拟试验效果良好,但以往多数研究仅在一维及二维模式下通过土柱试验或滴灌方式对相关理论进行研究,无法直观表达水流溶质整体运移过程,且对甘肃典型的全膜双垄沟播水肥运移动态转换模拟鲜有研究。本文针对甘肃地区典型的玉米全膜双垄沟播种植模式,基于 HYDRUS-2D/3D 模型,通过数值动态模拟非饱和和土壤水肥的迁移规律,揭示全膜双垄沟土壤水和溶质的迁移机制,以为全膜双垄沟膜下追肥技术研究及配套装备优化设计提供参考依据。

## 1 试验方法与设计

### 1.1 试验区概况

定西市安定区位于甘肃省中部,耕地面积  $1.19 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,降雨量少,蒸发严重。降雨主要集中在 7—9 月,年降雨量约 420 mm,蒸发量 1 526 mm,年平均气温  $6.3^\circ\text{C}$ ,水资源匮乏,为典型的旱作雨养农业区。土壤以松散的黄绵土为主,试验参考土壤理化性质参数见表 1<sup>[7-8]</sup>。

### 1.2 全膜双垄沟农艺技术与试验设计

试验以玉米出苗期为模拟时间点进行土壤模型

表 1 土壤理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of soil

参数	数值
粉粒质量分数/%	26.82
黏粒质量分数/%	59.25
沙粒质量分数/%	13.93
容重/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.08

设置,全膜双垄沟农艺技术<sup>[9]</sup>示意图如图 1 所示,其中大垄宽度 700 mm,高 150 mm,小垄宽度 400 mm,高 200 mm,垄沟内穴播,行距 40 mm,株距 240 mm 土壤深度 200 mm,垄沟相邻渗水孔间距为 225 mm,渗水孔直径为 10 mm。以此农艺技术参数构建 Fe-Mesh 有限元网格耕作模式,以模拟土壤水肥热运移规律。

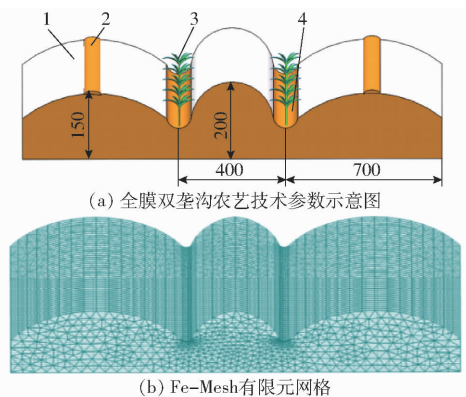


图 1 玉米全膜双垄沟农艺技术示意图

Fig. 1 Schematics of agronomic technology of corn full film double ridge and ditch

1. 大垄垄体 2. 覆土带 3. 玉米植株 4. 垄沟覆土

## 2 HYDRUS-2D/3D 模型

### 2.1 控制方程

#### 2.1.1 水流控制方程

假设模拟种床土壤各向同性,采用 Richards 方程<sup>[10-13]</sup>计算土壤水分运移,考虑玉米作物垄沟内的根系吸水,忽略温度空气以及土壤水分滞后效应影响,其表达式为

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

式中  $\theta$ ——土壤体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$t$ ——入渗时间, min

$h$ ——压力水头

$K(\theta)$ ——土壤非饱和导水率,  $\text{cm}/\text{min}$

$x, y, z$ ——坐标距离

$S(x, y, z, \theta)$ ——玉米根系吸水速率,  $\text{cm}/\text{d}$

HYDRUS-2D/3D 中土壤水力模型采用孔隙度

进行描述<sup>[14-16]</sup>, 计算式为

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

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

其中 
$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

式中  $\theta_s$ ——土壤饱和含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$\theta_r$ ——土壤残余含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$\theta(h)$ ——土壤相对饱和度,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$K_s$ ——土壤饱和导水率,  $\text{cm}^3/\text{h}$

$S_e$ ——土壤有效含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$l, \alpha, m, n$ ——经验参数

## 2.1.2 根系吸水方程

采用 HYDRUS - 2D/3D 中 Feddes 模型<sup>[17]</sup>, 水分胁迫响应函数参考软件数据库中的参数, 其中根系分布最大深度为 20 mm, 计算式为<sup>[18]</sup>

$$S(x, y, z, h) = \alpha(x, y, z, h) b(x, y, z) T_p L_T \quad (5)$$

式中  $\alpha(x, y, z, h)$ ——水分胁迫响应函数

$b(x, z)$ ——标准化根系吸水分配密度函数,  $1/d$

$T_p$ ——作物潜在蒸腾量, 即潜在蒸散量与土壤潜在蒸发量之差,  $\text{cm}/d$

$L_T$ ——蒸腾作用过程中土壤表面宽度,  $\text{cm}$

在玉米苗期进行水分胁迫函数参数设置, 水分胁迫响应函数参数如表 2 所示。

表 2 水分胁迫函数参数

Tab. 2 Water stress function parameters

参数	数值
提取水分压头 $P_0/\text{mm}$	-100
提取水分压力水头最大速率 $P_{0p}/\text{mm}$	-250
极限压头 $P_{2H}, P_{2L}/\text{mm}$	-5 000
凋萎点压头 $P_3/\text{mm}$	-80 000
潜在蒸腾速率 $r_{2H}/(\text{cm} \cdot d^{-1})$	0.5
潜在蒸腾速率 $r_{2L}/(\text{cm} \cdot d^{-1})$	0.1

全膜双垄沟播玉米播种深度一般为 30 ~ 50 mm, 仿真中玉米根系深度设置为垄沟内膜下 40 mm, 蒸腾作用相关表面积设置为 200  $\text{mm}^2$ , 其他参数根据软件默认值进行微小调整, 如图 2 所示。

## 2.1.3 溶质运移方程

溶质在土壤中的运移受对流扩散与弥散(水动力弥散)的影响, 忽略植物根系对溶质的吸收, 采用对流-弥散方程<sup>[19-20]</sup>计算溶质运移变化, 表达式为

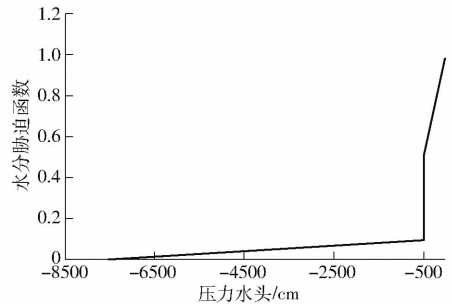


图 2 水分胁迫响应函数

Fig. 2 Response function of water stress

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ij}^w \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ij}^w \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ij}^w \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial (q_i c)}{\partial z} \quad (6)$$

式中  $c$ ——土壤溶液质量浓度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

$q_i$ ——水流量,  $\text{cm}/d$

$D_{ij}^w$ ——弥散系数,  $\text{cm}^2/d$

$\theta_c$ ——土壤体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

等式右边前 3 项为弥散作用引起的溶质通量变化, 第 4 项为对流作用引起的溶质通量变化。

## 2.2 初始条件和边界条件

模型中, 土壤含水率按初始含水率设置, 土壤初始含水率根据实测值设置, 土壤初始浓度设置为 0, 初始条件表达为

$$\begin{cases} \theta(x, z, t) = \theta_0(x, z, 0) \\ \theta(x, y, t) = \theta_0(x, y, z, 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} c(x, z, t) = c_0(x, z, 0) \\ c(x, y, z, t) = c_0(x, y, z, 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\theta_0$ ——初始含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$c_0$ ——初始质量浓度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

对降雨条件下土壤水肥迁移转化以及主要变化规律进行模拟计算。模型中上下边界分别位于模型地表 0 mm 处和农田土壤深度 200 mm 处。上边界设定为大气边界, 边界条件每日随时间变化, 模型土壤表层地膜覆盖水分蒸发量较小故忽略水分蒸发因素, 在试验模拟期输入相应的日气象数据, 旱区地下水埋深较大且模拟土层相对较浅因此将土壤模型下边界设置为自由排水边界, 其余覆膜部分和未覆膜部分边界均设置为零通量边界

$$\begin{cases} -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) = R(t) \\ -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (t > 0) \\ \theta = \theta_0 \end{cases} \quad (9)$$

溶质传导边界条件和水分运动边界条件相对应, 为第 3 类边界条件, 假设初始含水率水平分布均

匀,根据实测数值进行纵向土壤含水率设置。

### 2.3 模型参数

#### 2.3.1 基本参数

模拟对象为地表深度 0~200 mm 的土壤,模拟时间为 2018 年 4 月 1 日—5 月 31 日共计 61 d, HYDRUS 中采用变步长时间算法,根据模型迭代次数与模型收敛情况调整计算时间,缩短了模型运算所需时间,初始时间步长为 0.01 d,最小时间步长为  $1 \times 10^{-5}$  d,最大时间步长为 5 d,不考虑滞后效应,利用 Fe-Mesh 非结构化有限元网格生成全膜双垄沟模型,有限元网格尺寸为 48 mm,同时在垄沟曲面位置进行网格细化。Van Genuchten 所需土壤水力特征参数通过 HYDRUS 模型中的 Rosetta 神经网络预测系统确定,将试验区非饱和土壤理化性质参数代入得到相应的预测值,拟合后土壤水力特征参数见表 3,仿真所需溶质运移参数参照文献[7,11,21]并对各参数进行率定,溶质运移参数见表 4。

表 3 土壤水力特征参数

Tab.3 Soil hydraulic characteristic parameters

参数	数值
土层深度/mm	0~200
残余含水率 $\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.063 9
饱和含水率 $\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.464
经验参数 $\alpha / \text{cm}^{-1}$	0.004
经验参数 $n$	1.736 3
饱和导水率 $K_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	4.375
经验参数 $l$	0.5

#### 2.3.2 气象条件

降雨量取自定西安定区气象站(站号 52996)实测数据。2018 年定西安定区降雨量约 533 mm,降雨主要集中在 7—9 月,玉米种植时间多为每年 4 月中下旬,玉米苗期关键时间点集中在 4—5 月,因此

表 4 溶质运移参数

Tab.4 Solute transport parameters

参数	数值
种类	1
横向弥散度/cm	5
纵向弥散度/cm	1
自由水中分子扩散系数/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	30(横向)、25(纵向)
土壤空气中分子扩散系数/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	20(横向)、0(纵向)

将模拟时间点确定为 4—5 月,2018 年安定区 52996 号观测点有效降雨量如图 3 所示。

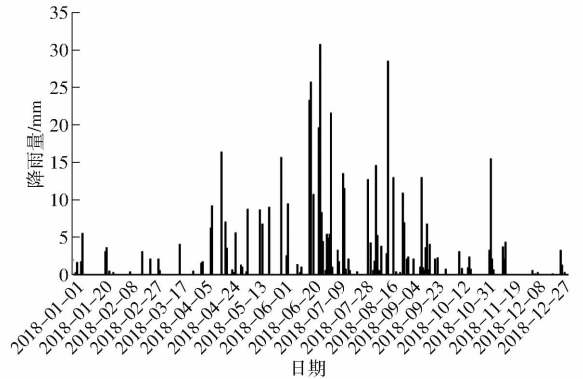


图 3 2018 年安定区 52996 号观测点有效降雨量

Fig.3 Effective rainfall at observation point 52996 in Anding district in 2018

## 3 模拟试验结果分析

### 3.1 土壤含水率分布

土壤表层地膜覆盖抑制土壤蒸发,膜孔面积较小蒸发量微小故忽略土壤水气交换,降雨条件下自由水经渗水孔与玉米种植域入渗,垄沟土壤含水率分布如图 4 所示,由图 4 可知,由膜孔进入土壤含水率横向分布均匀,在纵向产生明显的分层现象,在降雨时刻垄沟内雨水富集含水率明显高于其他部位,在未降雨时间段土壤含水率因重力土壤吸力等因素

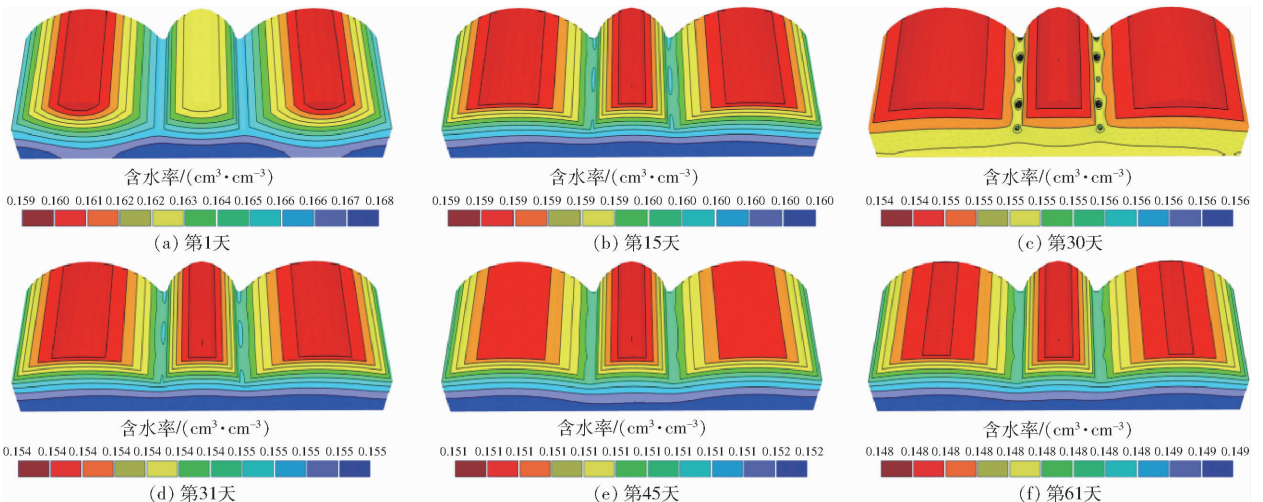


图 4 垄沟土壤含水率分布云图

Fig.4 Cloud maps of soil moisture content distribution in ridges and furrows

向下渗漏但全膜双垄沟特殊的垄体结构使得水分横向运动减缓了土壤水下渗的程度,同时水分向垄体部分迁移最终趋于稳态,使得垄沟土壤含水率始终保持在一个较为适宜的状态;土壤表面地膜覆盖蒸发量设置受到局限,土壤水分不能因辐射热传递到表层,而在降雨时间段模型表层不会受到热辐射因素影响,能够真实反映土壤内部水流迁移规律,受限于试验旱区微量降雨以及模型初始条件设置微小偏差全膜双垄沟纵向分布含水率层状分布,4月底垄沟内含水率稳定在15%,5月底垄沟内含水率稳定在14.8%。

### 3.2 垄沟内土壤含水率变化

全膜双垄沟内土壤含水率变化曲线见图5。全膜双垄沟膜下40 mm处土壤含水率随时间呈缓慢下降趋势,土壤初始含水率由 $0.1712 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 趋近于 $0.152 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,变化幅度较小,据相关研究表明全膜双垄沟播技术的蓄水保墒功效,能提高浅层土壤的含水率,提供玉米生长所需的水分<sup>[15]</sup>。此模拟研究表明全膜双垄沟土壤含水率变化规律与魏万成等<sup>[22]</sup>结论一致。

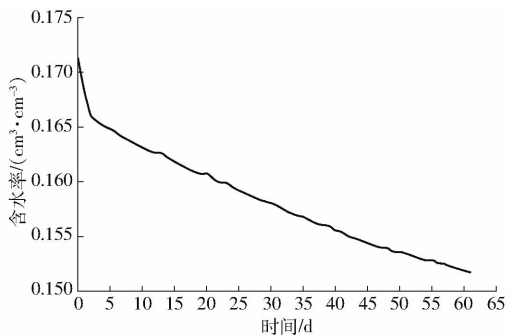


图5 土壤含水率变化曲线

Fig.5 Variation curve of soil moisture content

### 3.3 土壤溶质运移分布

全膜双垄沟具有“一膜两年用或者多年用”农艺技术,作物生长各阶段膜上追肥成为该项技术的难点<sup>[23]</sup>,本文借助HYDRUS可视化角度模拟玉米所需的氮、磷、钾3种溶质随降雨由覆膜种床垄沟入渗到土壤中的迁移过程,揭示根系附近肥料运移为后续的机械化追肥研究提供理论依据。

“一膜两年用”二茬玉米播种前适宜追肥量为 $75 \sim 150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,玉米施加的氮肥质量浓度一般控制在2%~3%,氮、磷、钾施肥比例为10:3:5,参考对玉米追肥量与追肥方式已有的研究结论设置模型膜上初始氮肥质量浓度为 $142.7 \text{ mg}/\text{L}$ ,磷肥质量浓度为 $44.26 \text{ mg}/\text{L}$ ,钾肥质量浓度为 $80.79 \text{ mg}/\text{L}$ ,研究氮、磷、钾肥随入渗迁移的土壤变化规律如图6所示。

在模拟周期内,3种溶质呈现相似的变化趋势,

溶质随着土壤水分的整体运动在垄沟内迁移变化,初始时刻垄沟内膜上的溶质随时间变化呈横向扩散趋势,随着模拟时间增加小垄垄体内的溶质浓度高于大垄,云图显示模拟结束时刻小垄氮肥质量浓度平均值为 $11.89 \text{ mg}/\text{L}$ ,其中小垄顶部氮肥质量浓度平均值为 $10.76 \text{ mg}/\text{L}$ ,垄沟氮肥质量浓度平均值为 $15.6 \text{ mg}/\text{L}$ ,大垄位置随着横向分布质量浓度由 $13.07 \text{ mg}/\text{L}$ 逐步递减趋势;垄沟磷肥质量浓度平均值为 $5 \text{ mg}/\text{L}$ ,小垄磷肥质量浓度平均值为 $3.47 \text{ mg}/\text{L}$ ,大垄磷肥质量浓度最大值为 $4.4 \text{ mg}/\text{L}$ ;垄沟钾肥质量浓度平均值为 $12.58 \text{ mg}/\text{L}$ ,小垄钾肥质量浓度平均值为 $6.77 \text{ mg}/\text{L}$ ,大垄钾肥质量浓度由 $9.36 \text{ mg}/\text{L}$ 衰减至 $1.24 \text{ mg}/\text{L}$ 。数值模拟结果表明垄沟内溶质浓度最大,这一结论与全膜双垄沟特殊垄体结构密不可分,同时与3种溶质浓度初始浓度设置以及复杂的土壤结构相关联。

### 3.4 垄沟内土壤种肥质量浓度

HYDRUS模型中假设全膜双垄沟“一膜两年用”模式二茬作物前土壤氮磷钾浓度均为零,模拟结果表明初始情况下膜上施加肥料后肥料遇水形成溶液进入膜下土壤,肥料浓度明显升高,随着时间增加浓度逐渐下降,其中部分肥料溶液被玉米植株吸收用于种子正常出苗,其余部分随着水分变化使得浓度下降,最后氮肥质量浓度趋于 $15.38 \text{ mg}/\text{L}$ ,磷肥质量浓度趋于 $5.15 \text{ mg}/\text{L}$ ,钾肥质量浓度趋于 $12.21 \text{ mg}/\text{L}$ ,满足种子的正常出苗所需质量浓度,如图7所示。

### 3.5 根系吸水变化

植物主要依靠根系从土壤中吸收水分,供给植物生长发育,研究表明植物根系存在两种吸水机制,一种是在蒸腾作用较弱的情况下由离子主动吸收和根内外的水势差作用下的主动吸水,另一种是由于蒸腾作用产生的水势差而使根系被动吸水。本研究模拟土壤表层全覆膜下玉米苗期种子根系吸水变化,忽略种子的微小蒸腾作用,模拟研究玉米苗期实际根系吸水,探究以时间为变量下的根系吸水通量变化,全膜双垄沟根系分布设置见图8a。由图8b可知,实际根系吸水通量呈下降趋势由 $0.343 \text{ cm}/\text{d}$ 变化为 $0.317 \text{ cm}/\text{d}$ ,说明苗期种子在土壤中以 $0.3 \text{ cm}/\text{d}$ 通量进行吸水,表明玉米全膜双垄沟播模式满足玉米苗期对土壤水分的需求,可以保证种子正常出苗<sup>[24]</sup>。

## 4 水肥运移

### 4.1 土壤含水率

文献[25-26]研究表明,定西旱作农业区玉米



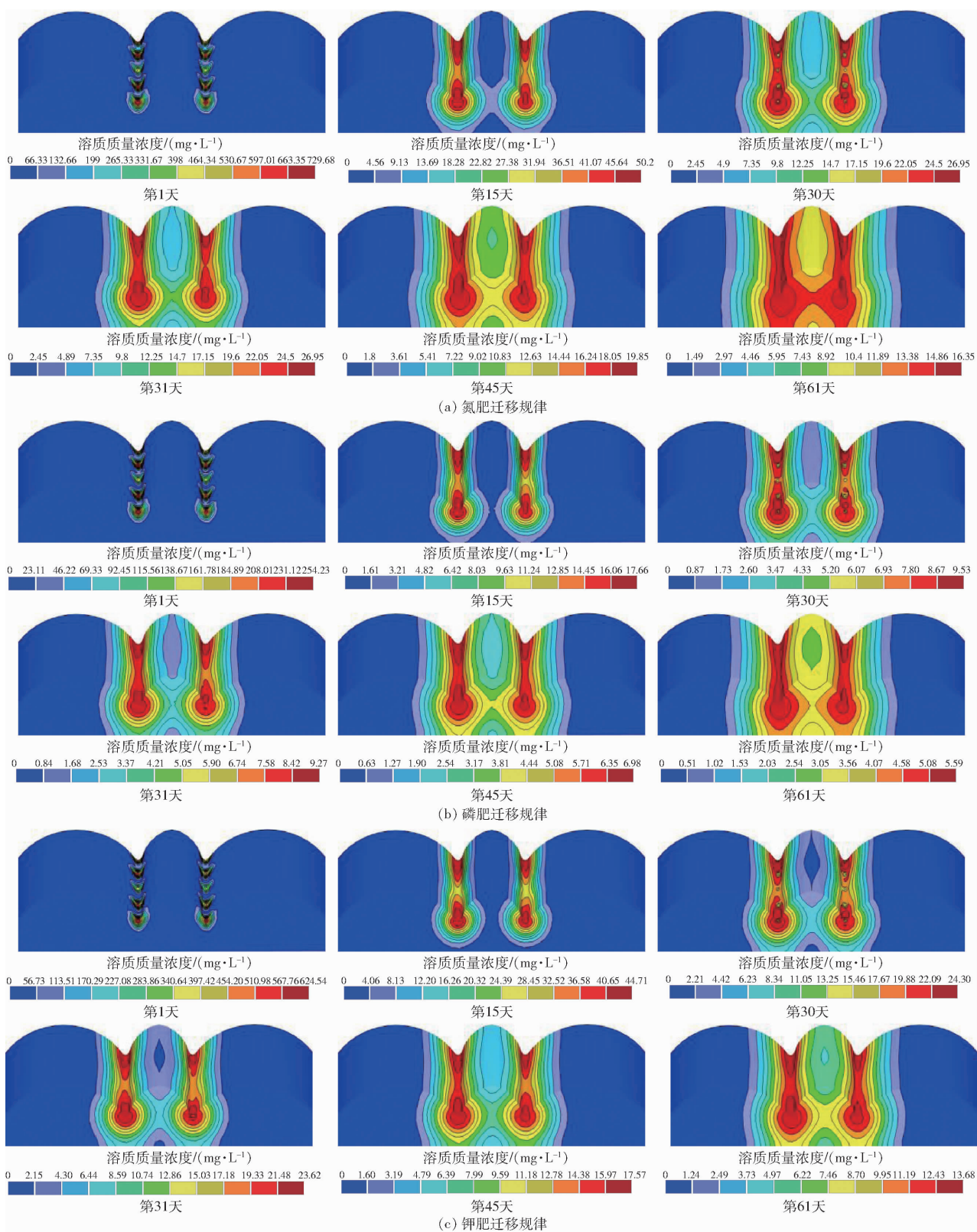


图 6 垄体三维土壤种肥质量浓度分布

Fig. 6 Three-dimensional distributions of soil seed fertilizer mass concentration in ridge

全膜双垄沟种植最佳时间段多为每年 4 月中下旬，本文从三维可视化角度对土壤水肥运移展开研究，并从二维局部解析水肥运移状况，了解土壤水肥互作的状况，于 2018 年 4 月 24—25 日进行模拟研究，降雨时膜下水流变化如图 9a、9c 所示，雨后膜下水

流变化规律如图 9b、9d 所示。由图 9 可知，雨水由膜孔进入土壤后，有效降水沿垄沟在纵横向运移，垄沟内土壤层状分布明显，雨后膜下土壤水分呈稳态状，垄沟内土壤含水率保持在  $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  左右，且在短时间内保持稳定，垄沟内土壤水分充足。

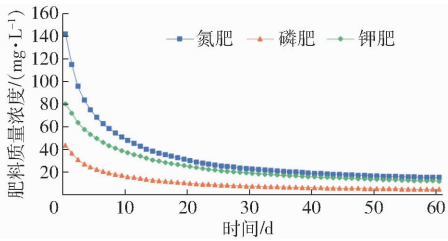
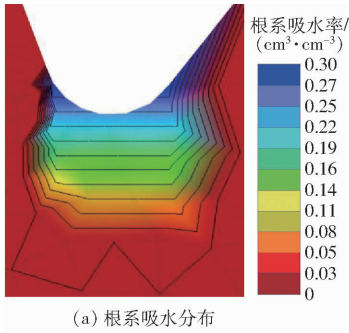
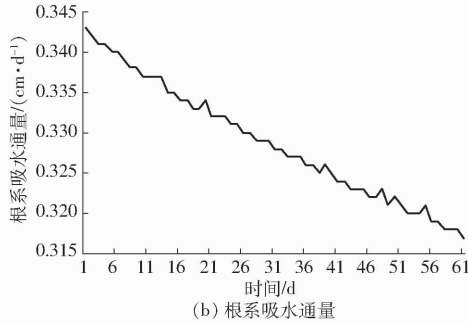


图7 肥料质量浓度变化曲线

Fig.7 Variation curves of fertilizer mass concentration



(a) 根系吸水分布



(b) 根系吸水通量

图8 根系吸水

Fig.8 Root water uptake

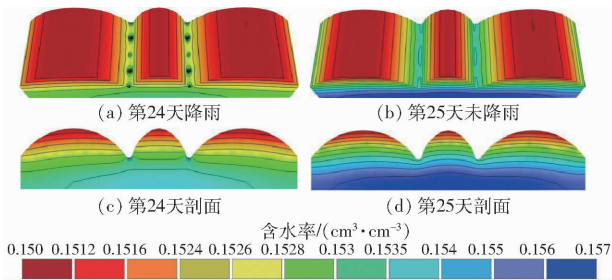


图9 降雨及雨后示意图变化

Fig.9 Changes of rainfall and schematic after rain

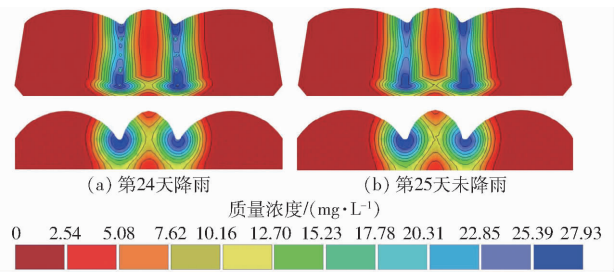


图10 降雨及雨后种肥运移变化示意图

Fig.10 Schematics of rainfall and seed fertilizer movement after rain

随水分进入土壤,主要集中于种床位置,如图10所示。通过三维整体与二维局部剖析,垄沟位置的种肥浓度为玉米种子提供所需的营养环境,垄沟的凹面保证种肥集中在垄沟种床位置,使得垄沟种肥质量浓度保持在 27.93 mg/L,表明全膜双垄沟种植模式在保持水肥上具有一定的优势。由图10可知,肥料从入渗开始以环状向四周扩散,中间浓度最大,提高了肥料利用率,从而实现作物高产。

### 4.3 垄沟渗流速度

模拟计算后得到模型内雨水渗流速度矢量变化如图11所示。由图11可知,在大气边界条件下,可观察到随着雨水入渗垄体内渗流速度大小和方向均发生改变,垄沟处渗流速度最大,为 0.055 cm/d,侧渗速度由 0.017 cm/d 减为 0.006 cm/d,降雨时侧渗与下渗同步,未降雨时侧渗效果不明显,垄沟周围

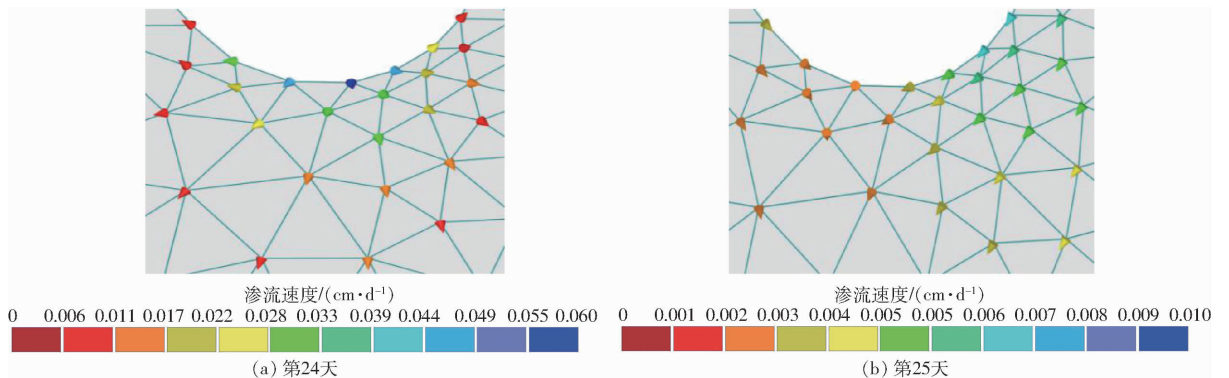


图11 垄体雨水入渗速度矢量变化

Fig.11 Vector variations of rainwater infiltration velocity in ridge

土壤渗流速度明显大于其他位置,经过垄沟时产生了明显侧渗现象,总体呈下渗态,原因为地膜覆盖入渗边界受到限制导致雨水仅能通过膜孔入渗<sup>[27]</sup>以及全膜双垄沟垄体的集雨效应使得垄沟处雨水叠加,当雨水渗入到一定深度时,侧渗现象停止,土壤水分呈稳态微小的速度下渗。

## 5 结论

(1)全膜双垄沟垄体结构直接影响了垄体内土壤的水分运移状况和含水率分布,通过数值模拟可以直观地观察到水流环状侧渗现象,全膜双垄沟膜下 40 mm 处土壤含水率随时间的延长呈缓慢下降趋势,土壤初始含水率由  $0.1712 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  稳定于  $0.1520 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

(2)全膜双垄沟“一膜两年用”模式下膜下肥料运移与水流入渗具有密切关联度,通过对水肥的运移规律研究揭示垄沟“保水保肥”效应,肥料浓度集中在垄沟种床附近且随时间变化稳定,模拟结束时氮肥质量浓度趋于  $15.38 \text{ mg/L}$ ,磷肥质量浓度趋于  $5.15 \text{ mg/L}$ ,钾肥质量浓度趋于  $12.21 \text{ mg/L}$ 。

(3)选择模拟时间段内的 2 d 水肥运移变化进行对比研究,从三维角度分析垄沟内水肥的整体状况后,以二维视角研究全膜双垄沟垄体截面内含水量、浓度以及垄沟内渗流速度变化,模拟显示垄沟含水率为  $0.1560 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,溶质质量浓度保持在  $27.93 \text{ mg/L}$ ,垄沟渗流速度最大值为  $0.055 \text{ cm/d}$ ,结果表明垄沟水肥环境可为玉米作物提供良好的生长环境条件。

## 参 考 文 献

- [1] 戴飞, 赵武云, 张锋伟, 等. 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):1-16.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Research progress analysis of furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges technology and machine in northwest rainfed area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):1-16. (in Chinese)
- [2] GHAZOUANI H, RALLO G, MGUIDICHE A, et al. Assessing Hydrus-2D model to investigate the effects of different on-farm irrigation strategies on potato crop under subsurface drip irrigation[J]. Water, 2019, 11:540.
- [3] SAADI M, ZGHIBI A, KANZARI S. Modeling interactions between saturated and un-saturated zones by Hydrus-1D in semi-arid regions (plain of Kairouan, Central Tunisia)[J]. Environ Monit Assess, 2018, 190:170.
- [4] 胡文同, 栗现文, 江思珉. 犁底层容重对微咸水膜下滴灌土壤水盐运移分布的影响[J]. 节水灌溉, 2021(6):1-8.  
HU Wentong, LI Xianwen, JIANG Simin. Effect of bulk density of plow pan on soil water and salt transport and distribution under mulched drip irrigation with brackish water[J]. Water Saving Irrigation, 2021(6):1-8. (in Chinese)
- [5] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 基于 HYDRUS-1D 模型的荒漠绿洲水盐运移模拟与评估[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8):87-98.  
WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xianyue, et al. Simulation and evaluation of soil water and salt transport in desert oases of Hetao Irrigation District using HYDRUS-1D model[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8):87-98. (in Chinese)
- [6] 贾浩, 李宝珠, 李文昊. 基于 HYDRUS-1D 模型的灌排联合下的水盐运移模拟[J]. 节水灌溉, 2021(1):27-32.  
JIA Hao, LI Baozhu, LI Wenhao. Water and salt transport simulation under irrigation and drainage combination based on HYDRUS-1D model[J]. Water Saving Irrigation, 2021(1):27-32. (in Chinese)
- [7] 黎会仙, 王文娥, 胡笑涛. 滴灌施肥条件下土壤水氮运移数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2):10-17.  
LI Huixian, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Numerical simulation of soil water and nitrogen distribution under the integration of drip irrigation and fertilization[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2):10-17. (in Chinese)
- [8] 刘小宁, 隆瑞红, 罗珠珠, 等. 甘肃省典型土壤持水特性及影响因素研究[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1):143-151.  
LIU Xiaoning, LONG Ruihong, LUO Zhuzhu, et al. Research on water-holding capacity and related factors in typical soils of Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1):143-151. (in Chinese)
- [9] 张仕林, 赵武云, 戴飞, 等. 全膜双垄沟起垄覆膜机镇压作业过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1):20-30.  
ZHANG Shilin, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation analysis and test on suppression operation process of ridging and film covering machine with full-film double-furrow[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1):20-30. (in Chinese)
- [10] 张泽龙, 何建伟, 张彬, 等. 基于 HYDRUS 的深施作业液肥水分入渗数值模拟[J]. 现代计算机, 2021(10):4-9.  
ZHANG Zelong, HE Jianwei, ZHANG Bin, et al. Numerical simulation of water infiltration of liquid fertilizer in deep application based on HYDRUS[J]. Modern Computer, 2021(10):4-9. (in Chinese)
- [11] 胡钜鑫, 虎胆·吐马尔白, 李卓然, 等. 基于 HYDRUS-2D 模型膜下滴灌棉田不同上口宽排盐浅沟下土壤水盐运移模拟[J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(5):1-9.  
HU Juxin, HUDAN·Tumarbay, LI Zhuoran, et al. Simulation of soil water and salt transport in different upper wide shallow ditch in drip irrigation cotton field in HYDRUS-2D model[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2019, 2(5):1-9. (in Chinese)
- [12] 代智光. 基于 Hydrus-2D 的红壤区涌泉根灌自由入渗土壤水分运移数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4):27-31.  
DAI Zhiguang. Numerical simulation of soil water movement in free infiltration under surge-root irrigation in red soil region based on Hydrus-2D[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4):27-31. (in Chinese)



- [13] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, MARTINUS. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2):782-797.
- [14] 李耀刚, 王文娥, 胡笑涛. 基于 HYDRUS-3D 的涌泉根灌土壤入渗数值模拟[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(6):546-552.  
LI Yaogang, WANG Wen'e, HU Xiaotao. Numerical simulation of soil water infiltration under bubbled root irrigation based on HYDRUS-3D[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(6):546-552. (in Chinese)
- [15] 范严伟, 赵彤, 白贵林, 等. 水平微润灌溉湿润体 HYDRUS-2D 模拟及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4):115-124.  
FAN Yanwei, ZHAO Tong, BAI Guilin, et al. HYDRUS-2D simulation of soil wetting pattern with horizontal moistube-irrigation and analysis of its influencing factors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(4):115-124. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] FEDDES R A. Simulation of field water use and crop yield[J]. *Soil Science*, 1978, 129(3):193.
- [18] 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 Yuntao, CHENG Yu, ZHANG Tibin, 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)
- [19] 徐存东, 程慧, 王燕, 等. 基于 HYDRUS-3D 不同沟灌方式下水盐运移模拟[J]. *节水灌溉*, 2017(10):9-14.  
XU Cundong, CHENG Hui, WANG Yan, et al. Simulation of water-salt transportation under various furrow irrigation patterns based on HYDRUS-3D model[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(10):9-14. (in Chinese)
- [20] 刘璐瑶, 张金龙, 张凯, 等. 基于 HYDRUS-2D 模拟排水暗管布设参数对土壤水盐运移的影响[J]. *人民珠江*, 2021, 42(4):70-77.  
LIU Luyao, ZHANG Jinlong, ZHANG Kai, et al. Effect of the subsurface drain parameters on water-salt transport based on HYDRUS-2D [J]. *Pearl River*, 2021, 42(4):70-77. (in Chinese)
- [21] 马波, 周青云, 张宝忠, 等. 基于 HYDRUS-2D 的滨海地区膜下滴灌土壤水盐运移模拟研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(5):182-191.  
MA Bo, ZHOU Qingyun, ZHANG Baozhong, et al. Simulation of soil water and salt transport under mulched drip irrigation based on HYDRUS Model in coastal areap [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(5):182-191. (in Chinese)
- [22] 魏万成, 戴飞, 张锋伟, 等. 西北旱区玉米不同覆膜方式下土壤水热效应数值模拟研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1):13-21.  
WEI Wancheng, DAI Fei, ZHANG Fengwei, et al. Numerical simulation on soil water-thermal effect under different film mulching methods of maize in the arid of Northwest China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1):13-21. (in Chinese)
- [23] 戴飞, 赵武云, 孙步功, 等. “一膜两年用”玉米全膜双垄沟扎穴施肥装置设计[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(1):274-280.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Bugong, et al. Design of picking hole fertilize mechanism with “one film used for two years” pattern of corn whole plastic-film on double ridges [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(1):274-280. (in Chinese)
- [24] 徐润邑, 杜守宇, 杨发, 等. 宁夏旱作农业区应用全膜双垄沟播技术的效应分析[J]. *宁夏农林科技*, 2013, 54(6):12-15.  
XU Runyi, DU Shouyu, YANG Fa, et al. An analysis of effect of double ridge whole-mulching furrow sowing technology in dry farming area in Ningxia [J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2013, 54(6):12-15. (in Chinese)
- [25] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5):917-926.  
WANG Hongli, ZHANG Xucheng, SONG Shangyou, et al. Regulation of whole field surface plastic mulching and double ridge-furrow planting on seasonal soil water loss and maize yield in rain-fed area of northwest Loess Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5):917-926. (in Chinese)
- [26] 张平良, 郭天文, 刘晓伟, 等. 密度和施氮量互作对全膜双垄沟播玉米产量、氮素和水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4):579-590.  
ZHANG Pingliang, GUO Tianwen, LIU Xiaowei, et al. Effect of plant density and nitrogen application rate on yield, nitrogen and water use efficiencies of spring maize under whole plastic-film mulching and double-furrow sowing [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4):579-590. (in Chinese)
- [27] 魏万成, 戴飞, 张锋伟, 等. 基于水热效应数值模拟的旱地玉米全膜双垄沟农艺优化[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(1):19-28.  
WEI Wancheng, DAI Fei, ZHANG Fengwei, et al. Agronomic optimization of maize whole plastic-film mulching on double ridges of maize in arid land based on numerical simulation study on moisture and thermal effect [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1):19-28. (in Chinese)