

# Hydrus-2D 模拟起垄覆膜处理对夏玉米生育期水量平衡的影响

付玉娟, 李尧, 喻浩洋, 吴佳钰, 张旭东<sup>\*</sup>

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 为探究起垄和覆膜处理对辽西北半干旱区夏玉米生育期水量平衡的影响, 该研究在建平县节水灌溉试验站将田间试验与 Hydrus-2D 模拟相结合, 探究各典型年夏玉米生育期水量平衡的变化规律。结果表明: Hydrus-2D 模型能够有效地对起垄和覆膜处理后夏玉米生育期的下垫面降雨入渗过程进行模拟, 各下垫面实测值与模拟值的  $R^2$  均不小于 0.87, 均方根误差均小于  $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ; 覆膜后各典型年的蒸发量平均减少 52.24 mm, 蒸腾量平均增加 31.84 mm; 覆膜会抑制多日持续降雨期间的深层渗漏速率, 促进单日超过 40 mm 降雨的雨后深层渗漏速率; 覆膜能减少作物生育期的农田耗水量(蒸发量, 蒸腾量和深层渗漏量之和), 使各典型年的平均农田耗水量减少 25.74 mm, 增加覆膜垄作处理的覆膜宽度能够进一步减少作物生育期的农田耗水量。因此, 在辽西北半干旱区进行起垄和覆膜对缓解该地区的农业缺水紧张情势, 丰富农田生育期水分转化结构的相关理论具有重要作用。

**关键词:** 蒸发; 蒸腾; 降雨; 夏玉米; Hydrus-2D; 深层渗漏; 起垄覆膜

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302019

中图分类号: S275.3; S152.7; S271

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)10-0076-12

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302019 <http://www.tcsae.org>

FU Yujuan, LI Yao, YU Haoyang, 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 (Transactions of the CSAE), 2023, 39(10): 76-87. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302019 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

辽西北半干旱地区土壤类型以砂壤土为主, 土壤贮水能力弱, 水分利用效率远低于中国平均水平, 缺水成为限制该地区农业发展和粮食安全的主要因素之一<sup>[1]</sup>。在节水灌溉理论大面积推广应用的背景下, 地膜覆盖和起垄种植相结合的垄作覆膜技术由于其增温保墒、减少蒸发、提高产量等优点在辽西北半干旱区得到了大面积推广<sup>[2]</sup>。但覆膜和起垄改变了农田的自然下垫面, 进而改变了降雨入渗和作物生育期水文循环过程。有研究认为受地区自然环境因素的影响, 起垄和覆膜可能导致降雨后土壤水分入渗不均匀, 影响作物根系吸水, 覆膜还可能导致作物的耗水量增加, 长期覆盖还会造成土壤退化<sup>[3-4]</sup>。在辽西北半干旱地区将地膜覆盖和起垄种植技术相结合能否在不影响作物生长的情况下降低整个生育期的农田耗水量还存在争议。因此在推进农业节水灌溉的过程中, 摸清起垄覆膜后农田下垫面的降雨入渗特征, 探究起垄和覆膜能否提高作物生育期水分的利用效率并减少农田耗水量, 对全面评价节水灌溉技术, 完善节水灌溉理论, 都具有重要的现实意义<sup>[5-7]</sup>。

辽西北半干旱区的年降雨量少、蒸发速率快、土壤透水性强, 极少产生地表径流。作物生育期的水量平衡主要由自然降雨、灌溉、深层渗漏、土壤蒸发以及作物消耗 5 部分组成, 其中作物组织生长的需水量因小于总需水量的 1%, 可忽略不计, 因此作物消耗的水分主要为蒸腾量<sup>[8]</sup>。目前关于作物生育期水量平衡的研究主要基于田间试验, 如 ZHANG 等<sup>[9]</sup>通过滴灌和地膜覆盖相结合的田间试验分析了不同颜色地膜覆盖对中国华东和西北地区马铃薯生长的影响。CHEN 等<sup>[10]</sup>通过测量播种前与收获后的土壤贮水量分析了不同耕作和秸秆还田方式对农田水分利用效率的影响。田间试验的测量方法和精度有限, 对农田水量平衡中的一些组成部分如深层渗漏量、作物实际蒸腾量等难以准确测量<sup>[11]</sup>。此外, 在面对多重因素共同作用时, 田间试验所需的面积大, 投资费用高, 不利于对各种气候条件和耕作方式的农田水量平衡进行多因素、重复性、定量化的研究<sup>[12]</sup>。

随着土壤水分入渗方程的提出不断完善和计算机数值模拟技术的快速发展, Hydrus-2D 模型被广泛应用于农田土壤水分运动模拟研究中。该模型有丰富的初始条件和边界条件可供选择, 能够模拟不同情景下的田间水文循环过程, 对田间试验难以测量的作物实际蒸散量和深层渗漏量等进行辅助计算<sup>[13-15]</sup>。TU 等<sup>[16]</sup>应用 Hydrus 模型模拟了 2010—2015 年中国南方柑橘园土壤水分的动态, 分析了导致柑橘园季节性缺水的原因, 并给出果园水资源管理的合理建议。ER-RAKI 等<sup>[17]</sup>通过对比摩洛哥半干旱地区不同灌溉方式下的田间蒸发蒸腾量以及土壤

收稿日期: 2023-02-05 修订日期: 2023-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609137)

作者简介: 付玉娟, 博士, 副教授, 研究方向为水资源高效利用。Email: [fyj0249@syau.edu.cn](mailto:fyj0249@syau.edu.cn)。

通信作者: 张旭东, 博士, 副教授, 研究方向为节水灌溉与水资源高效利用。Email: [zxddd@syau.edu.cn](mailto:zxddd@syau.edu.cn)。

含水率的动态,证明了 Hydrus 模型的可靠性,并通过该模型对灌溉系统的深层渗漏损失进行了评估。目前已有学者针对不同的降雨量或灌溉制度对作物生育期水量平衡的影响进行分析,而在此基础上同时考虑耕作方式的改变对作物生育期水量平衡影响的研究相对较少。冯浩等<sup>[18]</sup>基于 Hydrus-2D 模型对黄土高原地区起垄覆膜条件下夏玉米的农田耗水过程分析,水量平衡的计算结果显示起垄覆膜可以使田间无效水分的损耗整体减少,增加农田水分利用效率,但文中并未对作物生育期中单次降雨后的土壤含水率分布和水分循环过程进行分析,也未在 Hydrus-2D 模型中改变覆膜宽度进而确定节水效果最佳的覆膜宽度,且黄土高原地区的土壤、作物类型以及气候特征与辽西北半干旱区存在较大差异,有必要针对辽西北半干旱区开展水量平衡规律研究。

为了探究起垄和覆膜处理对辽西北半干旱区夏玉米生育期水量平衡的影响,本文基于 2017 和 2018 年研究区试验站作物生育期土壤含水率的田间实测数据,建立不同起垄和覆膜条件下的 Hydrus-2D 模拟模型;选取典型水文年,模拟并分析夏玉米生育期中单次降雨以及整个生育期下垫面的水文循环过程,同时改变覆膜垄作下垫面的覆膜宽度,分析覆膜宽度对水量平衡各项指标的影响,以期完善地膜覆盖和起垄种植技术对农田水文数据影响的相关理论,为提高辽西北半干旱区水资源利用效率、促进农田生态可持续发展提供理论基础及技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在辽宁省朝阳市建平县节水灌溉试验站(119°18'E, 41°47'N, 海拔 512 m)进行。该站位于建平县中西部,老哈河东岸,属于温带大陆性季风气候。地区多年平均气温 7.1 °C,日照时数 2 868~3 111 h,多年平均降水量为 430~470 mm,主要集中在 6~8 月,多年平均实际蒸散量为 1 800~2 100 mm,主要集中在

4~6 月。当地夏玉米生育期为 4~8 月,生育期多年平均降雨量为 360 mm,实际蒸发量为 670 mm。土壤类型以砂壤土为主,砂粒含量较高,粒间大孔隙数量多,持水性差。田间持水量为 0.21 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,水分蒸发速率快,因此很少形成地表径流。试验站地下水埋深在 3 m 以下,潜水蒸发量可忽略不计。

### 1.2 大田试验与测量项目

于 2017 和 2018 年 4~8 月开展大田小区试验,试验小区 3 m×50 m,四周设保护行。供试的玉米品种为辽单 1 211,生育期阶段划分见表 1。设置不覆膜平作(NL-NM)、不覆膜垄作(L-NM)、覆膜平作(NL-M)和覆膜垄作(L-M)4 种下垫面处理,每种处理各 3 个重复。采取垄上覆膜,膜间种植,种植行距为 40 cm,株距为 30 cm,每 667 m<sup>2</sup> 种植 4 000 株玉米,垄沟和覆膜宽度均为 60 cm,垄沟深度 6 cm,地膜材料为聚乙烯透明塑料薄膜。由于在垂向剖面各作物两侧的降雨入渗过程相同,因此 4 种耕作处理均在作物单侧每隔 20 cm 埋设 1 根 TRIME-TDR 测管,监测 2017 和 2018 年 4 月 27 日~8 月 31 日 0~120 cm 土层深度降雨前 1 d 和降雨后 1、2、3 和 5 d 不同剖面位置的土壤含水率变化,其中雨前 1 d 的监测时刻根据天气情况确定,雨后的含水率监测在每日 08:00 进行。当地施肥情况与农户保持一致,2017 和 2018 年夏玉米生育期降雨总量分别为 426 和 309 mm。各下垫面处理示意图如图 1 所示。

表 1 试验区夏玉米生育期各阶段划分  
Table 1 Division of different stages of summer maize growth period in the experimental area

生育期阶段 Growth stages	播种后天数 Days after sowing/d	日期 Date
苗期 Emergence	0~38	04-27-06-03
拔节期 Jointing	39~64	06-04-06-29
抽雄期 Tasseling	65~80	06-30-07-15
灌浆期 Filling	81~101	07-16-08-05
成熟期 Maturity	102~127	08-06-08-31

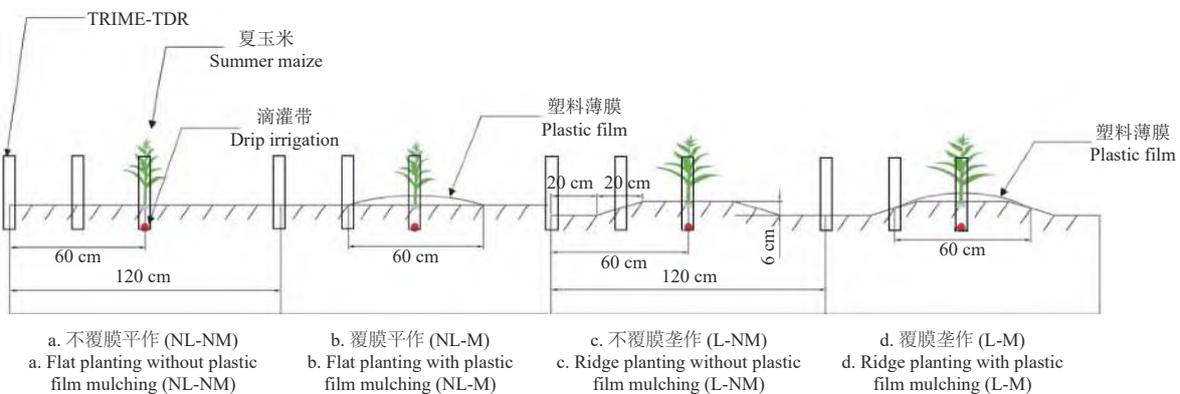


图 1 夏玉米种植示意图

Fig.1 Schematic diagram of summer maize planting

由于试验所在地降雨较少,为保证作物生长的需水量,在生育期内对作物进行补水灌溉,灌溉时间及灌溉量通过式(1)确定。

$$Q = H(\theta_{up} - \theta_{low})p/\eta \quad (1)$$

式中  $Q$  为单次灌溉量, mm;  $H$  为设计土壤灌溉深度, 苗期一抽雄期为 40 cm, 灌溉一成熟期为 60 cm;  $\theta_{up}$  为土壤含水率上限, 即田间持水量的 100%, cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>;  $\theta_{low}$  为土壤含水率下限, 即下降到田间持水量的 70% 后连续

3 d 仍无降雨时的土壤含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $p$  为湿润面积百分比, 本研究取 0.6;  $\eta$  为设备的应用效率 (滴灌始终假定为 95%)。

灌水方式为滴灌, 2017 年 7 月 20 日灌水 20.21 mm, 2018 年 7 月 6 日和 8 月 7 日分别灌水 17.68 和 24.63 mm。采用由新疆天业公司生产的内镶式薄壁滴灌带, 管径 16 mm, 滴头流量 1.38 L/h, 滴头间距 120 cm, 滴头埋深 8 cm 滴头位置如图 1 所示。

### 1.3 Hydrus-2D 建模

#### 1.3.1 模型方程

作为模拟二维饱和-非饱和土壤水、热、溶质运移的数值模拟模型, Hydrus-2D 可模拟降雨渗入土壤剖面的二维水分运动过程<sup>[19-20]</sup>。本文应用 Hydrus-2D 模型模拟田间不同耕作方式夏玉米生育期的每日土壤蒸发、作物蒸腾、土壤含水率以及深层渗漏量。

##### 1) 水流运动控制方程

覆膜起垄条件下的土壤水分运动可视为二维入渗过程, 水流控制方程选用 Richards 方程, 采用 Galerkin 有限元方法求解<sup>[21]</sup>, 计算式如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - S(h) \quad (2)$$

式中  $\theta$  是土壤体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $h$  是压力水头, cm;  $K(h)$  是导水率, cm/d;  $t$  为模拟时间, d;  $x$  和  $z$  是水平和垂直坐标, cm,  $S(h)$  为根系吸水项, 指单位时间单位体积土壤中根系吸水率,  $\text{d}^{-1}$ 。

##### 2) 土壤水分特征曲线模型

土壤水分特征曲线模型采用 van Genuchten 模型<sup>[22]</sup>, 计算式如下:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (4)$$

$$S_e = [\theta(h) - \theta_r] / (\theta_s - \theta_r) \quad (5)$$

式中  $K_s$  为土壤饱和导水率, cm/d;  $\theta_r$  为土壤残余体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_s$  为土壤饱和体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $S_e$  为相对饱和系数;  $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$  均为土壤物理特性有关的拟合参数;  $l$  为孔隙关联度参数, 取 0.5。

##### 3) 根系吸水模型

根系吸水模型选用 Feddes 模型<sup>[23]</sup>, 计算式如下:

$$S(h) = \alpha(h) \cdot b(x, z) \cdot T_p \cdot S_t \quad (6)$$

$$b(x, z) = \frac{b^{(x,z)}}{\int_{\Omega_R} b'(x, z) d\Omega} \quad (7)$$

$$\alpha(h) = \begin{cases} \frac{h_1 - h}{h_1 - h_2} & (h_2 < h \leq h_1) \\ 1 & (h_3 \leq h < h_2) \\ \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} & (h_4 \leq h < h_3) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $S(h)$  为根系吸水速率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\alpha(h)$  为水分胁迫响应函数;  $b(x, z)$  为根系吸水分配密度函数;  $T_p$  为潜在蒸发

速率, cm/d;  $S_t$  为与作物蒸腾过程有关的土壤表面宽度, cm;  $h_1$  是根系吸水厌氧点压力水头, cm;  $h_2$  是根系吸水最适的压力水头, cm;  $h_3$  是根系吸水结束的压力水头, cm;  $h_4$  是根系吸水萎蔫点压力水头, cm。根系吸水参数值参考 WESSELING 等<sup>[24]</sup>, 直接在 Hydrus-2D 中选定。

#### 4) 蒸发蒸腾量计算

Hydrus-2D 模型需要通过输入潜在蒸散量来完成作物-土壤水分的交换运移过程, 并通过运算将潜在蒸散量转化成实际的蒸散量。采用单作物系数法计算潜在蒸散量, 在试验区附近气象站气象数据基础上, 根据 Penman-Monteith 公式计算出参考作物蒸发蒸腾量, 然后根据单作物系数法计算出潜在作物蒸发蒸腾量, 再根据 Beer 定律分离出潜在蒸发量和潜在蒸腾量<sup>[25]</sup>。

参考作物蒸发蒸腾量计算式如下:

$$E_{T0} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \mu_2)} \quad (9)$$

式中  $E_{T0}$  为参考作物蒸发蒸腾量, mm;  $R_n$  为净辐射量,  $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $G$  为土壤热通量,  $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 由于本研究计算为日尺度, 所以取值为 0;  $\mu_2$  为 2 m 高处的风速, m/s;  $e_s$  为饱和水汽压, kPa;  $e_a$  为实际水汽压, kPa;  $\Delta$  为饱和水汽压与温度曲线的斜率,  $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ;  $\gamma$  为干湿表常数,  $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ;  $T$  为海温度,  $^\circ\text{C}$ 。

潜在蒸发蒸腾量计算式如下:

$$E_T = K_C E_{T0} \quad (10)$$

式中  $E_T$  为潜在蒸发蒸腾量, mm;  $K_C$  为综合作物系数, 采用 FAO-56 (联合国粮农组织) 的推荐值。

Beer 定律计算潜在蒸腾量公式:

$$T_p = E_T (1 - e^{-KL}) \quad (11)$$

式中  $T_p$  为潜在蒸腾量, mm;  $K$  为消光系数无量纲, 玉米一般取值 0.4;  $L$  为叶面积指数无量纲。

实际蒸腾量计算式如下:

$$T = \frac{1}{S_t} \int_{\Omega} [\alpha'(w, w_\phi, x, z) b(x, z) S_t T_p] d\Omega \quad (12)$$

式中  $T_a$  为实际蒸腾量, mm/d;  $\Omega$  为根系分布区面积,  $\text{cm}^2$ ;  $\alpha'$  为水分胁迫因子;  $w$  为土壤水势, cm;  $w_\phi$  为渗压水头, cm;  $b$  为根系分布函数。

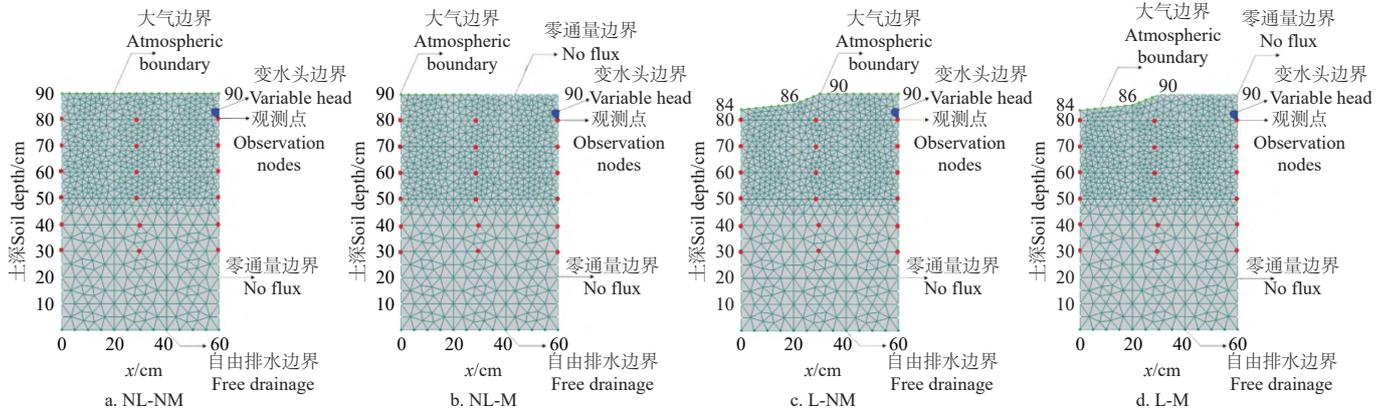
实际蒸发量在表层土壤负压水头下降到临界值之前等于潜在蒸发量, 在表层土壤负压水头达到临界值之后, 上边界变为定水头边界并根据达西公式计算土壤蒸发量<sup>[26]</sup>。

#### 1.3.2 几何区域及边界条件

建立与田间试验相同初始条件的 Hydrus-2D 模型, 如图 2。各模型的垂向边界没有水分的水平运移, 故任何区域两侧设置为零通量边界。土壤表层覆膜部分由于膜的不透水性设置为零通量边界; 未覆膜区域有降雨和蒸发过程, 设置为大气边界。试验站当地地下水埋深常在 3 m 以下且土壤透性强, 所以模型的底部设置为自由排水边界。当对农田进行滴灌时, 滴头处设置为变水头边界。在软件中的可视化窗口可以调整模型的垄沟形状以及覆膜宽度。需要注意的是当改变覆膜宽度时, 膜上降雨会汇集到未覆膜区域, 因此土壤表层大气边界

所对应的降雨量也应增加相应的倍数, 使各下垫面的整体降雨量均相同。模型中 0~40 cm 处由于土壤含水率变化幅度较大, 有限元网格直径为 3 mm, >40~90 cm 土

层土壤含水率变化较小, 有限元网格直径为 5 mm。在各模型竖直方向 10~60 cm 深度每隔 10 cm 设置一行观测点, 水平方向每隔 30 cm 设置一列观测点。



注:  $x$  为水平距离。  
Note:  $x$  is horizontal distance/cm.

图 2 模拟区域及边界条件示意图

Fig.2 Schematic diagram of simulation area and boundary conditions

1.3.3 参数率定及验证

通过剖面法取得原状土样, 用烘干法测得土壤的饱和含水率。利用离心机测定不同含水率所对应的压力水头值, 进而借助 RETC 软件拟合得到各层土壤在 van Genuchten(VG) 模型中的水分特征参数。将实测土壤水分特征参数作为初始值输入到 Hydrus-2D 模型中进行参

数率定, 率定后各层土壤的特征参数见表 2。

根据田间试验监测的各处理不同剖面的土壤含水率数据和模型模拟结果, 利用决定系数 ( $R^2$ ) 以及均方根误差 ( $S_{RMSE}$ ) 对模型的模拟精度进行评价, 计算式见文献 [27]。其中  $S_{RMSE}$  的值越接近 0,  $R^2$  的值越接近 1, 证明模型的模拟精度越高。

表 2 率定后的土壤特征参数

Table 2 Soil characteristic parameters after calibration

土壤深度 Soil depth/ cm	残余含水率 Residual soil moisture/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和含水率 Saturated soil moisture/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	形状参数 Shape parameter $\alpha/\text{cm}^{-1}$	经验参数 Empirical parameter $n$	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )
0~10	0.04	0.4	0.004	1.94	70
>10~20	0.07	0.31	0.06	1.66	200
>20~30	0.07	0.35	0.057	1.66	118
>30~40	0.15	0.27	0.022	1.78	46
>40~50	0.15	0.28	0.022	1.35	200
>50~60	0.1	0.35	0.015	1.69	300
>60~90	0.1	0.28	0.03	1.32	297

1.3.4 模型模拟

根据建平县试验站 2000-2022 年的年降雨量数据, 选择降雨频率为 25%、50% 和 75% 的丰、平、枯 3 个典型年, 分别为 2008、2014 和 2001 年。根据前述 4 种下垫面处理的 Hydrus-2D 模型, 模拟各典型年不同处理的土壤含水率变化过程。其中, 根据模拟计算的 NL-NM 处理生育期计划湿润层的土壤含水率情况, 按式 (1) 确定灌溉日期及灌水量。各典型年的降雨量及灌溉情况见表 3。

表 3 各典型年灌溉方案制定

Table 3 Formulation of irrigation schemes for each typical year

典型年 Typical year	降雨频率/ Rainfall frequency/ %	降雨量 Rainfall/ mm	灌溉日期 Irrigation date	灌溉量 Irrigation amount/mm
2008	25	265.3	06-16	20.94
			07-27	26.59
2014	50	365.5	07-12	18.92
			07-30	28.94
2001	75	421.4	05-21	16.17

在确定灌溉方案后, 建立各典型年全生育期的 Hydrus-2D 模型, 并结合各下垫面处理的节水效果以及当地实际生产情况, 对 L-M 处理设置 50、60、70、80 cm 4 种覆膜宽度, 模拟得到夏玉米在自然降雨条件下的生育期水文循环过程, 绘制夏玉米生育期每日的土壤含水率空间分布图、蒸散量和深层渗漏量, 通过式 (13) 和式 (14) 计算各模型的农田耗水量和农田贮水量。

$$Q_C = T + E_a + D_a \quad (13)$$

$$Q_S = P_r + I - Q_C \quad (14)$$

式中  $Q_C$  为农田耗水量, mm;  $E_a$  为实际蒸发量, mm;  $D_a$  为实际深层渗漏量, mm;  $Q_S$  为农田贮水量增加量, mm;  $P_r$  为降雨量, mm;  $I$  为灌溉量, mm。

1.4 统计分析

大田试验中的测量数据用 3 组重复试验的平均值表示。Hydrus-2D 模型输出的结果均在 Matlab 2021a 中进行处理计算, 数据的统计分析采用 SPSS 22.0 软件。应

用单因素方差分析测试各下垫面处理方式下蒸发、蒸腾、深层渗漏和农田含水率之间的显著性差异,当 $P$ 值小于0.05时,认为非常显著,当 $P$ 值小于0.01时,认为极显著。使用Origin 2018绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

为了验证建立的Hydrus-2D模型可靠性,将2017年实测土壤含水率数据代入模型中进行土壤水分特征参数的率定,用2018年实测土壤含水率数据进行模型的验证,

得出2017和2018年各下垫面处理土壤含水率的模拟值与实测值间的决定系数以及均方根误差,结果见表4。表4中4种下垫面处理实测值和模拟值的 $R^2$ 均在0.87及以上, $S_{RMSE}$ 在 $0.01\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以下,总体拟合效果较好。在各下垫面处理中随机选取了2017年NL-NM和2018年L-M下垫面10、20、40、60 cm土层深度的实测值与模拟值展示动态,如图3所示。图3表明生育期内各土层深度的实测值和模拟值的一致性高,Hydrus-2D模型对各种耕作方式降雨后土壤含水率的动态变化过程模拟效果均较好,可以用来开展本文相关试验的模拟分析。

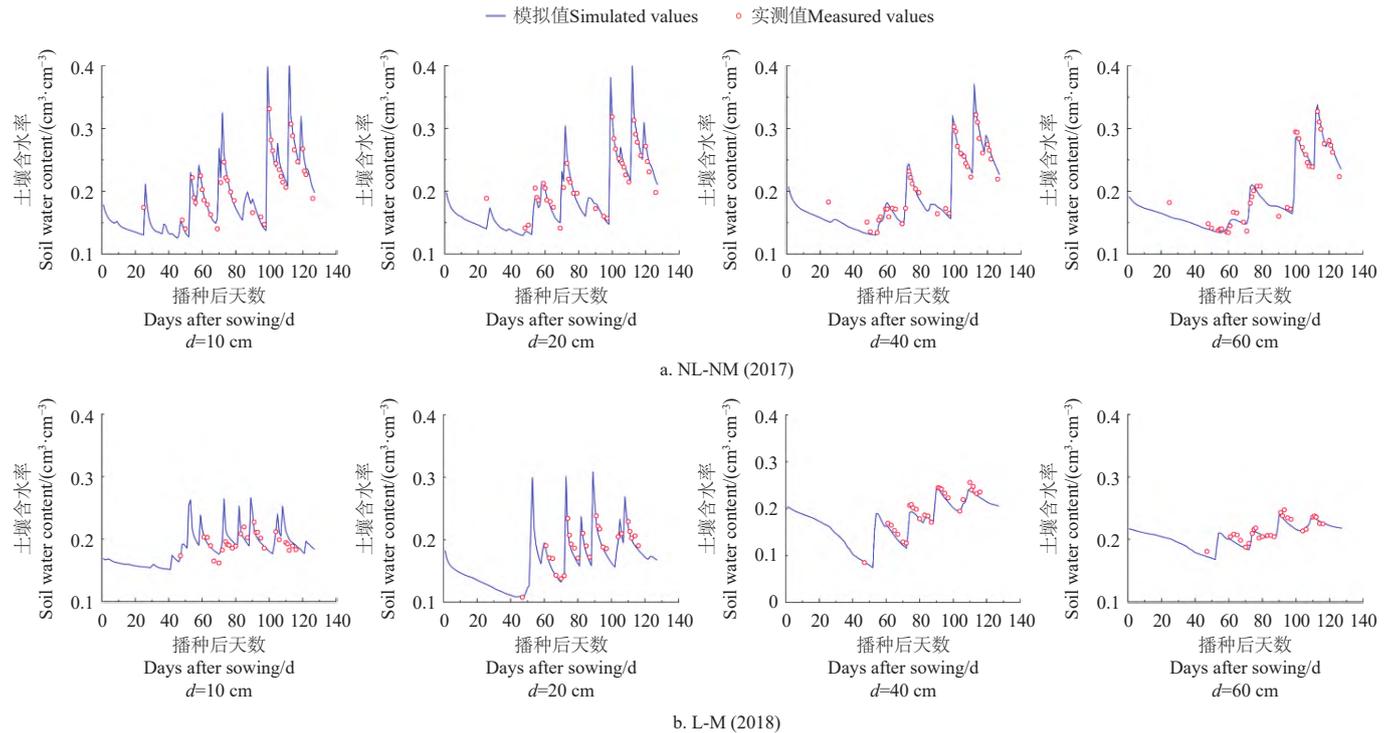


图3 4种耕作方式不同土深( $d$ )处土壤含水率模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison between simulated and measured values of soil water content at different soil depths ( $d$ ) under four tillage methods

表4 2017和2018年各处理实测值与模拟值的决定系数和均方根误差

Table 4 Coefficient of determination ( $R^2$ ) and root mean square error ( $S_{RMSE}$ ) of measured and simulated values for each treatment in 2017 and 2018

处理 Treatments	$R^2$		$S_{RMSE}/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	
	2017	2018	2017	2018
NL-NM	0.96	0.96	0.006	0.004
L-NM	0.96	0.93	0.005	0.006
NL-M	0.92	0.96	0.008	0.006
L-M	0.87	0.96	0.009	0.006

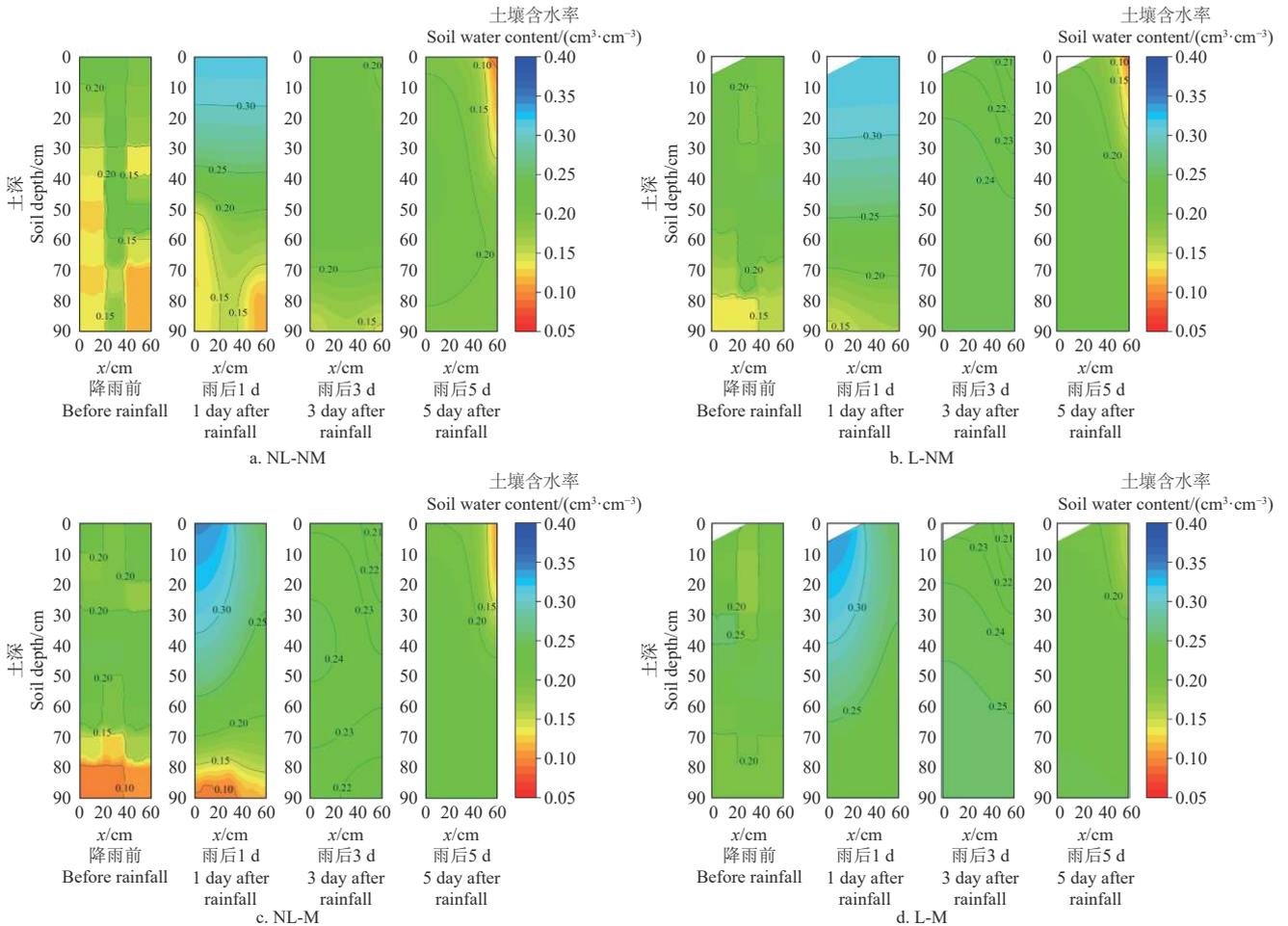
### 2.2 基于Hydrus-2D的模拟结果分析

#### 2.2.1 降雨后土壤含水率空间分布

为了研究起垄和覆膜处理对单次降雨入渗过程的影响,以降雨前、后5 d内均未发生重复降雨的2018年7月8日降雨量45 mm为例,导出Hydrus-2D模型模拟结果中4种下垫面处理雨前和雨后1、3、5 d的有限元网格节点土壤含水率数值,绘制土壤含水率空间分布图,见图4。

由图4可知,起垄或覆膜处理下垫面的土壤含水率

均高于NL-NM处理。与NL-NM处理相比,L-NM处理降雨后1 d的土壤水分增加效果最明显,土壤平均含水率增加2.44%,L-M处理对降雨后3和5 d的土壤水分增加效果最明显,土壤平均含水率分别增加2.23%和2.57%。与NL-NM处理相比,其余3个处理的深层土壤含水率增加更快,其中L-M处理在雨后1 d时深层土壤含水率就已经高于 $0.20\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。对比4种下垫面浅层土壤水平方向上的土壤含水率可知,降雨后1 d,NL-M和L-M处理的膜间水分含量小于NL-NM处理,但由于覆膜处理能减少下垫面的水分蒸发,且起垄和覆膜处理均有较强的集雨能力,使沟中或膜间的表层土壤含水率较高,进而增加浅层土壤中水分在水平方向的运移能力,在降雨3 d后,各下垫面的土壤水分在水平方向上呈均匀分布。在降雨5 d后NL-M和L-M处理的膜间水分含量已经明显高于NL-NM处理。可见起垄和覆膜处理可以增加降雨后土壤中的水分含量以及垂向的入渗速率,并且不会由于地膜的不透水性和下垫面形状的改变造成入渗稳定后土壤中水分分布的不均匀。



注: 水平距离 ( $x$ ) 30~60 cm 处为膜间。

Note: The horizontal distance ( $x$ ) of 30~60 cm is the middle of plastic film.

图 4 4 种下垫面处理后 1、3、5 d 土壤含水率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil water content after rainfall 1, 3, 5 days for four types of underlying surfaces

## 2.2.2 蒸发蒸腾和深层渗漏

### 1) 蒸发和蒸腾速率

为了探究不同水文年夏玉米生育期的蒸散量以及在起垄和覆膜处理后蒸发和蒸腾速率的变化特征和起垄和覆膜处理对农田耗水结构的影响, 导出了 Hydrus-2D 模型模拟结果中 4 种下垫面处理的边界通量数值, 应用 SPSS 软件对各下垫面的日蒸发、蒸腾速率进行了方差分析, 并分别绘制了各典型年夏玉米生育期每日蒸发和蒸腾速率变化的折线图, 见图 5。

通过分析不同水文年的气象数据可知, 2001 和 2014 年作物生育期的参考作物蒸发蒸腾总量明显高于 2008 年, 其中 2014 年最高, 为 672.05 mm, 2001 和 2008 年分别为 625.63 和 554.76 mm。图 5 中, 作物生育期的蒸发速率呈现首尾高中间低的变化规律, 各水平年不同处理中, 苗期和成熟期的平均蒸发速率分别为 1.42 和 1.15 mm/d, 在拔节期开始至灌浆期结束的平均蒸发速率为 0.62 mm/d。蒸腾速率呈现先增加后减少的变化规律, 在拔节期开始至灌浆期结束的平均蒸腾速率为 3.20 mm/d, 苗期和成熟期的平均蒸腾速率分别为 0.85 和 0.62 mm/d。通过对比相同下垫面处理方式在 3 个典型年日蒸发和蒸腾速率的平均值发现, 起垄后作物的

日蒸发速率和蒸腾速率与不起垄差异不显著 ( $P>0.05$ )。覆膜后作物的日蒸发速率减少 0.39 mm, 日蒸腾速率增加 0.27 mm, 数据变化极其显著 ( $P<0.01$ )。与起垄相比, 覆膜对蒸发、蒸腾速率的影响更为显著。比较覆膜对 3 个典型年蒸发、蒸腾速率的影响可知, 在蒸散量较多的 2001 和 2014 年, 覆膜后日蒸发速率的减少量超过 0.5 mm, 而蒸散量较少的 2008 年, 日蒸发速率的减少量仅为 0.26 mm。覆膜后 2014 年的日均蒸腾速率增加幅度最大, 为 0.30 mm, 2008 年的增加幅度最小, 为 0.26 mm。可见, 蒸散能力越强的年份, 覆膜后蒸散发速率的变化幅度越大。

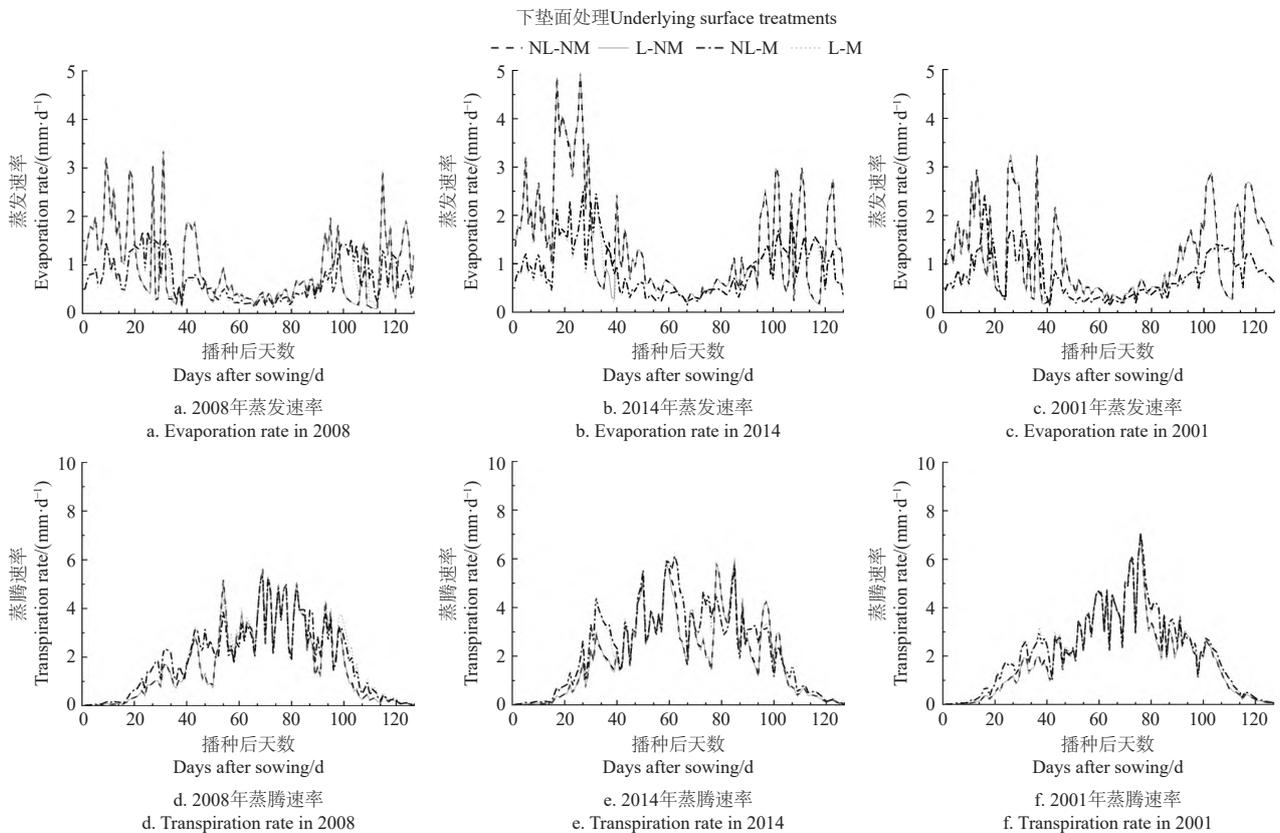
### 2) 深层渗漏速率

为了分析起垄和覆膜处理对夏玉米生育期深层渗漏速率的影响, 各典型年 4 种下垫面深层渗漏速率变化见图 6。

在降雨或灌溉后土壤水分含量超过农田下垫面的最大储水量时, 会发生深层渗漏。本研究中当土壤含水率达到田间持水率则停止灌溉, 因此灌溉不会导致深层渗漏量的明显增加, 降雨成为本研究中影响深层渗漏的主要因素。从图 6 可知, 2001 年的平均日渗漏速率较 2008 年增加 0.13 mm, 降雨量越多的年份作物在生育期

内发生深层渗漏的频率和日深层渗漏速率越高,且起垄和覆膜处理对深层渗漏速率的影响均不显著 ( $P>0.05$ )。通过对比降雨量和深层渗漏速率可知,当发生多日连续

降雨,土壤中含水率持续较高时,覆膜对深层渗漏速率有抑制作用,但当出现单次40 mm以上降雨量的大雨时,覆膜后的深层渗漏速率反而更高。



注: 2008、2014和2001分别为枯、平、丰水文年。NL-NM和L-NM曲线几乎重合;NL-M和L-M曲线几乎重合。

Note: 2008, 2014 and 2001 are respectively dry, flat and abundant hydrological years. Curves of NL-NM and L-NM overlap; Curves of NL-M and L-M overlap.

图5 不同水文年夏玉米生育期蒸发和蒸腾速率

Fig.5 Evaporation and transpiration rate of summer maize during growth period in different hydrological years

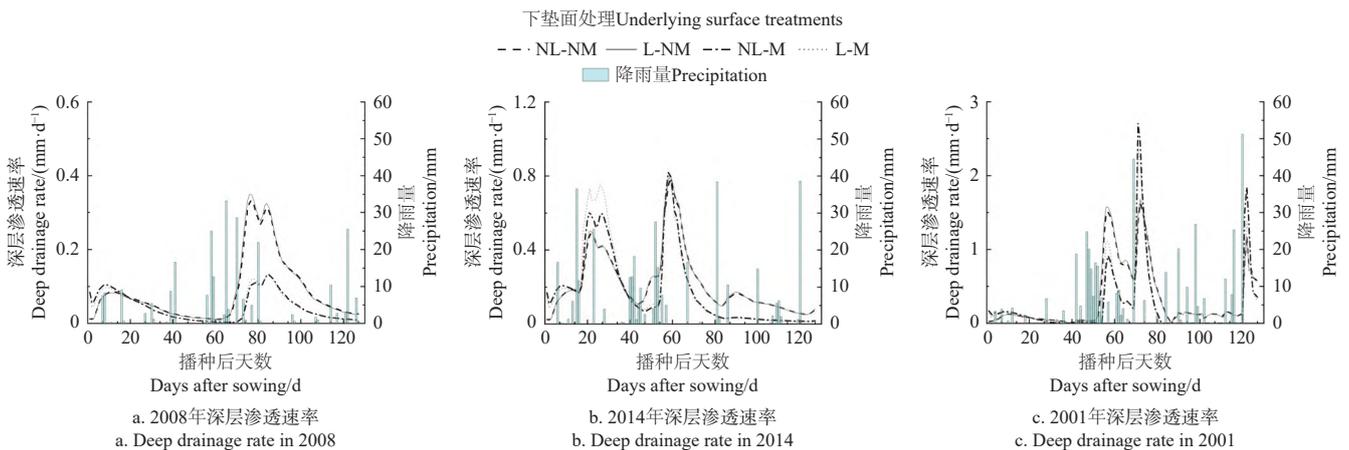


图6 不同水文年夏玉米生育期深层渗漏速率

Fig.6 Deep drainage rate of summer maize during growth period in different hydrological years

### 2.3 作物生育期水量平衡

各典型年4种下垫面作物生育期的水量平衡结果如表5所示。对比各下垫面的累积蒸发和蒸腾量可知,起垄处理对作物生育期累积蒸发量和蒸腾量的影响较小;覆膜处理能够大幅减少作物生育期的蒸发量并增加蒸腾量。对比各下垫面处理方式3个典型年的各项水量平衡数

据平均值可知,覆膜后的下垫面累积蒸发量减少52.24 mm,累积蒸腾量增加31.84 mm,此外,覆膜处理对2001和2014年累积蒸发量的减少效果更明显,对2014年累积蒸腾量的增加效果更明显。生育期的累积深层渗漏量的变化主要受降雨的影响,降雨量越充足的年份累积深层渗漏量越多。覆膜处理能够使各典型年下垫面的深层渗

漏量平均减少 5.35 mm, 而起垄处理对深层渗漏量基本没有影响。综上, 覆膜能够减少作物生育期的蒸发量和深层渗漏量, 增加蒸腾量 (减少的蒸发量大于增加的蒸腾量) 进而减少作物生育期的农田耗水量, 使覆膜后各

典型年的平均农田耗水量减少 25.74 mm, 是改变各典型年作物生育期耗水量的最主要因素。此外, 在覆膜的同时进行起垄处理, 能够进一步减少 8.16 mm 的农田耗水量。

表 5 不同水文年夏玉米生育期水量平衡

Table 5 Water balance in summer maize growth period in different hydrological years

年份 Year	处理 Treatment	降雨量 Rainfall	灌溉量 Irrigation	蒸发量 Evaporation	蒸腾量 Transpiration	深层渗漏量 Deep drainage	农田耗水量 Water consumption	农田贮水量 Water storage
2008	NL-NM	265.3	47.52	117.73	204.25	12.50	334.47	-21.65
	L-NM			117.79	203.62	12.69	334.10	-21.28
	NL-M			80.07	230.79	6.08	316.94	-4.12
	L-M			71.22	233.60	5.89	310.70	2.12
2014	NL-NM	365.5	47.86	174.42	241.90	25.02	441.34	-27.98
	L-NM			172.19	240.99	25.57	438.76	-25.40
	NL-M			114.07	280.45	23.50	418.02	-4.66
	L-M			106.51	277.62	23.26	407.39	5.97
2001	NL-NM	421.4	16.17	145.26	242.31	34.22	421.79	15.78
	L-NM			144.86	241.41	35.19	421.46	16.11
	NL-M			96.15	272.14	17.72	386.01	51.56
	L-M			90.79	270.94	16.67	378.40	59.17

与起垄相比, 覆膜处理对作物生育期水量平衡各指标的影响更为明显。为了分析覆膜宽度对各水量平衡项的影响, 根据 4 种下垫面处理的节水效果以及当地的种

植习惯, 依据所建立的 Hydrus-2D 模型, 模拟分析各典型年 L-M 处理在覆膜宽度分别为 50、60、70、80 cm 条件下的夏玉米生育期水量平衡情况, 结果见表 6。

表 6 不同覆膜宽度 L-M 下垫面夏玉米生育期农田水量平衡

Table 6 Water balance in field of L-M underlying surface in summer maize growth period under different plastic width

年份 Year	覆膜宽度 Plastic width/cm	降雨量 Rainfall/mm	灌溉量 Irrigation/mm	蒸发量 Evaporation/mm	蒸腾量 Transpiration/mm	深层渗漏量 Deep drainage/mm	农田耗水量 Water consumption/mm	贮水量 Water storage/mm
2008	50	265.3	47.52	79.96	227.21	6.59	313.76	-0.94
	60			71.22	233.60	5.89	310.70	2.12
	70			65.12	235.45	7.80	308.38	4.44
	80			54.51	236.93	9.22	300.66	12.16
2014	50	365.5	47.86	124.97	268.46	21.64	415.07	-1.71
	60			106.51	277.62	23.26	407.39	5.97
	70			96.97	274.60	33.57	405.13	8.23
	80			82.74	274.75	39.11	396.60	16.76
2001	50	421.4	16.17	112.20	267.54	23.74	403.47	34.10
	60			90.79	270.94	26.67	388.40	49.17
	70			84.51	272.63	28.64	385.78	51.79
	80			70.80	274.89	34.62	380.31	57.26

由表 6 可知, 随着覆膜宽度的增加, 各典型年的蒸发量均逐渐下降, 各典型年的覆膜宽度每增加 10 cm, 蒸发量平均下降 12.12 mm, 其中 2014 年蒸发量在覆膜宽度为 50 和 80 cm 时相差 42.23 mm, 下降幅度最大。对于蒸腾量, 随着覆膜宽度的增加, 2008 和 2001 年的蒸腾量均逐渐增加, 但不同覆膜宽度间蒸腾量的差异并不大。对于深层渗漏, 当 2008 枯水年的覆膜宽度从 50 cm 增加到 60 cm 时, 深层渗漏量减少 0.70 mm, 之后随着覆膜宽度的增加逐渐上升, 平水年和丰水年的渗漏量均随覆膜宽度的增加而上升。综上, 各典型年中随着覆膜宽度的增加, 作物生育期减少的蒸发量均大于增加的蒸腾量和耗水量, 农田耗水量逐渐减少, 其中枯水年减少 13.11 mm, 平水年减少 18.47 mm, 丰水年减少 23.17 mm。除平水年和枯水年膜宽 50 cm 的下垫面农田贮水量为负值以外, L-M 下垫面的其他模拟方案农田贮水量均为正值, 不会造成作物生育期土壤水分的流失。

### 3 讨论

#### 3.1 模型有效性

Hydrus 模型作为一种结合土壤水分、溶质和热运移

计算的数学模型, 被广泛应用于节水灌溉的研究领域。降雨后的部分水分会被作物截流, 截流的水量也会随着作物的生长而变化, 但目前模型中暂无作物截流与作物生长模块, 因此可能会使模拟的结果产生误差。起垄覆膜能够减小土壤表面蒸发、提高土壤温度、控制微生物活性进而为作物提供适宜的水热条件, 加速作物生长, 因此本文在计算作物的潜在蒸发蒸腾量时对 4 种农田下垫面均采用相同的作物系数可能会使结果存在误差, 在实际生产中起垄和覆膜后的下垫面在拔节期开始一灌浆期结束的日蒸腾速率可能均大于与之对照的裸地平作处理。本文模型中的模拟值与实测值的  $R^2$  均在 0.87 以上,  $S_{RMSE}$  在  $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  以下, 证明了本文建立的 Hydrus-2D 模型对 4 种下垫面生育期水分的动态变化拟合效果较好, 但在今后的研究中还应考虑覆膜和起垄对作物生长的促进作用, 增加对不同耕作方式下作物系数的研究, 进一步提高模型的模拟精度。

#### 3.2 水量平衡

作物根系的密度以及根系周围的土壤含水率是影响作物根系吸水进而影响蒸腾作用的主要因素, 而由于覆膜和起垄的集雨作用会改变农田下垫面的降雨入渗过程,

因此了解 4 种下垫面处理在降雨后 1~5 d 的土壤含水率动态对于摸清各农田下垫面降雨后的水分入渗过程以及水分分布情况非常重要。模拟结果显示,起垄和覆膜都有集雨的作用,能够显著增加降雨后膜间或垄沟内的土壤含水率,并加速水分的垂向入渗速率<sup>[28]</sup>。由于地膜覆盖阻断了土壤和大气间的水量交换,因此雨后 1 d 的 NL-M 和 L-M 处理膜间水分含量小于 NL-NM 处理,但地膜的不透水性能够减少蒸发,在降雨 5 d 后 NL-M 和 L-M 处理的膜间水分含量已经明显高于 NL-NM 处理,并不会由于起垄和覆膜导致土层中水分分布不均匀进而减少作物根系周围的水分分布。

摸清作物生育期的农田蒸散发量是研究作物需水变化以及农田水转化的关键,但该过程并不单纯与降雨量相关,同时还受作物特征、气象环境以及农田管理措施等多因素的影响<sup>[29]</sup>。本研究中平水年的作物生育期参考作物蒸发蒸腾量最多,枯水年最少。与覆膜相比,起垄处理对土壤蒸发和作物蒸腾的影响并不明显。前人在甘肃石羊河试验站的砂壤土下垫面进行作物生育期水量平衡研究时发现,覆膜处理能够减少蒸发量,增加蒸腾量,使作物生育期内累积蒸发蒸腾量之和减少 10%~16%<sup>[30]</sup>,这与本研究中覆膜处理能够减少作物生育期 52.24 mm 蒸发量并增加 31.84 mm 蒸腾量的结果类似。此外,本研究还发现蒸散能力最强的 2014 年在覆膜后蒸散量的变化幅度均最大,并且随着覆膜宽度的增加,蒸散量的变化幅度也最大。LI 等<sup>[31]</sup>研究覆膜处理对陕西合阳试验站的粉壤土下垫面玉米生育期耗水量影响时得出覆膜处理反而会增加蒸发蒸腾量的结论。可见覆膜处理对蒸发和蒸腾的影响还与试验区的气候以及当地的土壤类型等因素均有关,当试验区为孔隙度大透水性强的砂壤土时,覆膜处理能够大幅降低下垫面的蒸发能力,使减小的蒸发量大于增加的蒸腾量,进而减少作物对水分的消耗,但当试验区为孔隙度小透水性较差的粉壤土时,土壤持水能力较强,水分不易被蒸发,覆膜处理降低蒸发的效果减弱,反而会造成累积蒸发蒸腾量的增加。

农田下垫面深层渗漏量受降雨和灌溉的影响最为显著<sup>[32]</sup>。由于本研究制定的灌溉方案仅能够使浅层土壤达到田间持水率,并不会造成深层渗漏速率的快速增加,因此降雨成为发生深层渗漏的主要来源。HE 等<sup>[33]</sup>在研究中发现,当单次降雨量较大的降雨时更容易发生深层渗漏,LAI 等<sup>[34]</sup>通过 CART 分析得出降雨前期土壤含水率对深层渗漏的贡献度最大,当土壤初始含水率较高时雨后的深层渗漏量较大,而多日连续降雨是造成土壤含水率变高的最主要原因。本研究发现作物生育期深层渗漏的发生时机与上述两学者的研究类似,均由单次强降雨或多日连续降雨导致。此外,由于覆膜和起垄均有集雨作用,砂壤土的空隙大,入渗能力强,在遇到单次强降雨时水分不能及时在水平方向入渗均匀,因此起垄和覆膜会增加单次强降雨后农田下垫面的深层渗漏速率;但在遇到多日连续降雨时,水分能够入渗均匀且覆膜能够提高作物的根系吸水能力,覆膜反而能降低农田下垫

面的深层渗漏速率。由于试验区各典型年在作物生育期中发生强降雨的频率均不高,因此覆膜能够减少作物生育期深层渗漏量,且覆膜越宽减少的深层渗漏量越多。

冯浩等<sup>[18]</sup>通过对比裸地平作和起垄覆膜夏玉米生育期的耗水量,发现起垄覆膜种植在 2014 和 2015 年能明显减少农田耗水量,提高农田对水分的利用效率。这与本研究中覆膜能够使各典型年平均农田耗水量减少 25.74 mm,在覆膜的同时进行起垄处理,能进一步减少 8.16 mm 农田耗水量的结果基本一致。本试验区具有降雨量少且土壤保水能力差的特点,在降雨不充沛的平水年和枯水年会使得作物生育期农田贮水量下降,导致土壤中水分含量不足。起垄覆膜处理能够增加土壤中水分含量,覆膜宽度不小于 60 cm 的 L-M 处理农田贮水量均为正值,且在平水年和枯水年中,覆膜越宽 L-M 处理的农田耗水量越少,贮水量越多,农田贮水量的增加有利于作物根系对肥料的吸收,加速土壤中有机的分解以及养分的转化,进而在研究区形成节水高产的良性循环。

LIAO 等<sup>[35]</sup>还在研究中发现当降雨强度较大时,由于雨滴的撞击造成土壤压实,容易增加表层土壤的容重并减少土壤的孔隙度,削弱土壤的水分入渗能力,在覆盖秸秆或园艺织物后,可以在土壤表面形成一层保护膜,减少雨滴的影响。因此,在今后的研究中还应考虑覆膜后对于研究区砂壤土表层容重和孔隙度的影响,对不同下垫面处理生育期前后的土壤容重和孔隙度进行测量和对比。此外,ZHANG 等<sup>[9]</sup>在研究中发现不同地膜颜色也会通过影响浅层土壤的温度进而影响下垫面的水分的利用效率,同时覆膜还有促进作物生长以及增加产量的作用。因此在今后的研究中,还应考虑适合本研究区的地膜颜色以及覆膜后对作物生长和产量的影响,进而得到既能减少农田耗水量,又能促进作物生长、提高产量的起垄覆膜种植方式。

## 4 结 论

本文在大田试验的基础上应用 Hydrus-2D 模型,分析了起垄和覆膜处理对降雨后土壤含水率的空间分布以及丰、平、枯 3 个典型年作物生育期农田水量平衡的影响。得出的主要结论如下:

1) 经过率定后的 Hydrus-2D 模型模拟值与实测值的  $R^2$  均在 0.87 及以上,均方根误差在  $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  以下,能够有效地对起垄和覆膜处理后夏玉米生育期的下垫面降雨入渗过程进行模拟。

2) 在降雨后,起垄和覆膜处理可以增加土壤中的水分含量以及垂向的入渗速率,并且不会由于地膜的不透水性 and 下垫面形状的改变造成入渗稳定后土壤中水分分布的不均匀。

3) 覆膜能够减少作物生育期 52.24 mm 蒸发量并增加 31.84 mm 蒸腾量,因此可以考虑在实际生产中进行地膜覆盖处理,促进无效水向有效水的转化。

4) 覆膜能够使各典型年平均农田耗水量减少 25.74 mm,在覆膜的同时进行起垄处理,农田耗水量会进一步减少

8.16 mm, 当垄作覆膜处理覆膜宽度不小于 60 cm 时, 各典型年作物生育期的农田贮水量均为正值, 在实际生产中不会造成作物生育期土壤水分的流失。

#### [参 考 文 献]

- [1] LI D, HUAN C Y, YANG J, et al. Temporal and spatial distribution changes, driving force analysis and simulation prediction of ecological vulnerability in Liaoning Province, China[J]. *Land*, 2022, 11(7): 1-25.
- [2] CHEN T T, XIA G M, LIU T G, et al. Assessment of drought impact on main cereal crops using a standardized precipitation evapotranspiration index in Liaoning Province, China[J]. *Sustainability*, 2016, 8(10): 1-16.
- [3] 杨长刚, 柴守玺, 常磊. 半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(8): 2676-2685.
- YANG Changgang, CHAI Shouxi, CHANG Lei. Influence of different plastic film mulches on soil water use and yield of winter wheat in semiarid rain-fed region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(8): 2676-2685. (in Chinese with English abstract)
- [4] ZACHARIAS S, CLAUDIA W, MIRIAM S, et al. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 550: 690-705.
- [5] LI N, WANG H. Analysis on the evaluation of sustainable utilization of water resources by extension evaluation method[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(16): 133-148.
- [6] 李尧, 付玉娟, 张旭东, 等. 基于 Hydrus-2D 分析农田覆膜对降雨入渗的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(11): 134-143.
- LI Yao, FU Yujuan, ZHANG Xudong, et al. Effects of farmland plastic mulching on rainfall infiltration using Hydrus-2D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(11): 134-143. (in Chinese with English abstract)
- [7] KANG S Z, HAO X M, DU T S, et al. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China underchanging environment: from research to practice[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 5-17.
- [8] OBREZA T A, PITTS D J. Effective rainfall in poorly drained microirrigated citrus orchards[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(1): 212-221.
- [9] ZHANG Y L, FENG R, NIE W, et al. Plastic film mulch performed better in improving heat conditions and drip irrigated potato growth in Northwest China than in Eastern China[J]. *Water*, 2020, 12(10): 2906.
- [10] CHEN S Y, ZHANG X Y, PEI D, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain[J]. *Annals of Applied Biology*, 2010, 150(3): 261-268.
- [11] GUNAWARDENA T A, MCGARRY D, ROBINSON J B, et al. Deep drainage through Vertosols in irrigated fields measured with drainage lysimeters[J]. *Soil Research*, 2011, 49(4): 343-354.
- [12] WALKER G R, ZHANG L, ELLIS T W, et al. Estimating impacts of changed land use on recharge: Review of modelling and other approaches appropriate for management of dryland salinity[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 68-90.
- [13] 冯壮壮, 史海滨, 苗庆丰, 等. 基于 HYDRUS-1D 模型的河套灌区典型夹砂层耕地水分利用分析[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 90-99.
- FENG Zhuangzhuang, SHI Haibin, MIAO Qingfeng, et al. Water use analysis of cultivated land with typical sand layers in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia using HYDRUS-1D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(18): 90-99. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(8): 87-98. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘洪光, 白振涛, 李开明. 基于 HYDRUS-2D 模型的膜下滴灌暗管排水棉田土壤盐分变化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(2): 130-141.
- LIU Hongguang, BAI Zhentao, LI Kaiming. Soil salinity changes in cotton field under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage using HYDRUS-2D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(2): 130-141. (in Chinese with English abstract)
- [16] TU A G, XIE S H, MO M H, et al. Water budget components estimation for a mature citrus orchard of southern China based on HYDRUS-1D model[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106426.
- [17] ER-RAKI S, EZZAHAR J, MERLIN O, et al. Performance of the HYDRUS-1D model for water balance components assessment of irrigated winter wheat under different water managements in semi-arid region of Morocco[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: 106546.
- [18] 冯浩, 王杰, 王乃江, 等. 起垄覆膜条件下夏玉米农田耗水过程分析[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 205-213.
- FENG Hao, WANG Jie, WANG Naijiang, et al. Analysis of water consumption in summer maize field under planting

- pattern of ridge-furrow with plastic film mulching[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 205-213. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨广, 李万精, 任富天, 等. 不同矿化度咸水膜下滴灌棉花土壤盐分累积规律及其数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 73-83.  
YANG Guang, LI Wanjing, REN Futian, et al. Soil salinity accumulation and model simulation of cotton under mulch drip irrigation with different salinity level water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 73-83. (in Chinese with English abstract)
- [20] NAZARI E, BESHARAT S, ZEINALZADEH K, et al. Measurement and simulation of the water flow and root uptake in soil under subsurface drip irrigation of apple tree[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255(4): 106972.
- [21] RICHARDS L. Capillary conduction of liquids in soil through porous media[J]. *Physics*, 1931, 1: 318-333.
- [22] Genuchten V T M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America*, 1980, 44(5): 892-898.
- [23] 李仙岳, 陈宁, 史海滨, 等. 膜下滴灌玉米番茄间作农田土壤水分分布特征模拟[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 50-59.  
LI Xianyue, CHEN Ning, SHI Haibin, et al. Soil moisture distribution characteristics simulation of maize-tomato intercropping field with drip-irrigated under plastic mulch[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(10): 50-59.
- [24] WESSELING J G, BRANDYK T. Introduction of the Occurrence of High Groundwater Levels and Surface Water Storage in Computer Program Swater[M]. Wageningen, The Netherlands: Institute for Land and Water Management Research (ICW): 1985.
- [25] MONTEITH, JOHN L. Principles of environmental physics[J]. *Plant Growth Regulation*, 1991, 10(2): 177-178.
- [26] SIMUNEK J, van Genuchten M, MARTINUS T, et al. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 72(9): 587-600.
- [27] NASH J E, SUTCLIFFE J V. Riverflow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [28] COSTA J M, MF O, CHAVES M M. Deficit irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2010, 49(10): 1421-1434.
- [29] 付玉娟, 祝陈梦媛, 张旭东, 等. 农田下垫面处理对降雨入渗的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 74-79.  
FU Yujuan, ZHU Chenmengyuan, ZHANG Xudong, et al. Rainfall infiltration characteristics of farmland underlying surfaces treated with different practices[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 74-79. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘海军, 康跃虎, 刘士平. 喷灌对冬小麦生长环境的调节及其对水分利用效率影响的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 46-51.  
LIU Haijun, KANG Yuehu, LIU Shiping. Regulation of filed environmental condition by sprinkler irrigation and its effect on water use efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(6): 46-51. (in Chinese with English abstract)
- [31] LI R, HOU X Q, JIA Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116(1): 101-109.
- [32] OCHOA, FERNALD A G, GULDAN S J, et al. Deep percolation and its effects on shallow groundwater level rise following flood irrigation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(1): 73-81.
- [33] HE Z B, ZHAO W Z, LIU H, et al. The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: A case study in northwestern China's Qilian Mountains[J]. *Journal of Hydrology*, 2012: 183-190.
- [34] LAI X M, LIAO K H, FENG H H, et al. Responses of soil water percolation to dynamic interactions among rainfall, antecedent moisture and season in a forest site[J]. *Journal of Hydrology*, 2016: 565-573.
- [35] LIAO Y, CAO H X, LIU X, et al. By increasing infiltration and reducing evaporation, mulching can improve the soil water environment and apple yield of orchards in semiarid areas[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 253: 106936.

## Effects of ridging and plastic film mulching on the water balance of summer maize during its growth period

FU Yujuan, LI Yao, YU Haoyang, WU Jiayu, ZHANG Xudong<sup>\*</sup>

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** Under the background that the water-saving irrigation theory is widely promoted and applied, ridging and mulching as a common planting method are widely used in various regions. However, whether the water-saving effect of ridging and mulching is suitable for corn production in the semi-arid region of the northwest of Liaoning is still controversial. In this paper, a field experiment was carried out at the water-saving irrigation experimental station in Jianping County. Four types of underlying surface treatments were set up, including flat planting without plastic film mulching (NL-NM), ridge planting without plastic film mulching (L-NM), flat planting with plastic film mulching (NL-M), and ridge planting with plastic film mulching (L-M). The three typical years of wet (2001), general (2014), and dry (2008) were selected from 2000 to 2022, and the change law of water balance during the growth period of summer maize in different typical years was explored by combining with the Hydrus-2D model. The effects of ridging and mulching on rainfall infiltration of underlying surface and water balance of farmland during growth period were analyzed. The results showed that the  $R^2$  of the simulated values and the measured values of the four underlying surface treatments of the field test by the Hydrus-2D model were above 0.87, and the RMSE was within 0.01. It can be seen that the simulation effect of the Hydrus-2D software on the dynamic change process of soil moisture content after rainfall in various tillage methods was good, and it can be used to explore the change law of water balance in the growth period of summer corn in different typical years; Ridge and film mulching can increase the water content in the soil and the vertical infiltration rate after rainfall, and will not cause the uneven distribution of water in the soil after infiltration stabilization due to the impermeability of the film and the change of the shape of the underlying surface; Plastic film mulching can significantly increase the transpiration rate and reduce the evaporation rate of crops during the growth period. After plastic film mulching, the cumulative evaporation in each typical year decreases by 52.24 mm on average, and the cumulative transpiration increases by 31.84 mm on average; The film mulching will inhibit the deep leakage rate during the continuous rainfall for many days, and promote the deep leakage rate after the rainfall of more than 40 mm in a single day; Film mulching can reduce the evaporation and deep leakage during the growth period of crops, increase the transpiration, and then reduce the water consumption of farmland during the growth period of crops, so that the average water consumption of farmland in each typical year can be reduced by 25.74 mm. At the same time, ridging treatment can further reduce the water consumption of farmland by 8.16 mm; In each typical year, with the increase of the width of film mulching on the underlying surface of ridging and film mulching, the cumulative reduced evaporation during the crop growth period is greater than the increased transpiration and water consumption, and the water consumption of farmland is gradually reduced, with a total decrease of 13.11 mm in the dry year, 18.47 mm in the normal year, and 23.17 mm in the wet year, except that the water storage of farmland with a film width of 50 cm in the normal year and the dry year is negative, Other simulation schemes of L-M underlying surface have positive farmland water storage, which will not cause soil water loss during crop growth.

**Keywords:** evaporation; transpiration; precipitation; summer maize; Hydrus-2D; leakage of deep water; ridge-furrow with film