doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.025

# 起垄覆膜条件下夏玉米农田耗水过程分析

冯浩<sup>1,2</sup> 王杰<sup>1,3</sup> 王乃江<sup>1,3</sup> 刘建超<sup>1,3</sup> 褚晓升<sup>1,3</sup> 董勤各<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:起垄覆膜是西北地区常用的一种种植方式,具有显著的增产效应,但是其增产是否导致了过度消耗土壤水分仍然存在争议。为了探究起垄覆膜增产是否具有可持续性,在陕西杨凌开展了连续3年(2014—2016)的夏玉米种 植试验,设置起垄覆膜(RM)和平作不覆盖(NM)两个处理,在试验数据基础上,结合 HYDRUS - 2D 模型分析起垄 覆膜对夏玉米蒸腾、土壤蒸发及深层渗漏等田间耗水过程的影响。结果表明:HYDRUS - 2D 模型率定和验证的 *R*<sup>2</sup> 在 0. 65 ~ 0. 85 之间,RMSE 在 0. 014 7 ~ 0. 021 3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>之间,说明该模型可以较好地模拟土壤水分变化过程。RM 处理下夏玉米 3 年平均蒸腾速率比 NM 处理大 18. 2%,蒸腾量高 15. 6%;蒸发速率比 NM 处理小 33. 3%,土壤蒸发 量低 29. 6%;蒸腾量的增加和蒸发量的减少使 RM 处理蒸发量占总蒸发蒸腾量的比值比 NM 处理小 25. 5%。RM 处理的深层渗漏 3 年分别为 82. 5、46. 0、9. 0 mm,平均是 NM 处理的 1. 3 倍。RM 处理 3 年平均增产 5. 3%,水分利 用效率提高 15. 2%,并且田间耗水量减少了 2. 8%。本研究结果表明起垄覆膜能增大作物蒸腾量,减小土壤蒸发 量,促使无效水转化为生产性用水,因此减小了田间水分消耗,具有节水增产效应,适合在当地推广。 关键词:夏玉米;起垄覆膜;耗水;蒸发蒸腾;深层渗漏;HYDRUS-2D 模型

中图分类号: S513; S152.7<sup>+</sup>5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)09-0205-09

# Analysis of Water Consumption in Summer Maize Field under Planting Pattern of Ridge – Furrow with Plastic Film Mulching

FENG Hao<sup>1,2</sup> WANG Jie<sup>1,3</sup> WANG Naijiang<sup>1,3</sup> LIU Jianchao<sup>1,3</sup> CHU Xiaosheng<sup>1,3</sup> DONG Qin'ge<sup>2</sup> (1. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract**: Ridge – furrow with plastic film mulching planting is commonly used in Northwest China because it can obviously increase yield, but it is still unknown whether the effect of increasing yield is based on consuming more water or not. In order to explore above question, field experiments were conducted in Yangling of Shaanxi Province for three maize seasons with two treatments of ridge – furrow with plastic film mulching planting (RM) and flat field without mulching (NM). The HYDRUS – 2D model combined with field experiment was also used to study soil water movement. The simulated results showed that HYDRUS – 2D model performed well for simulating the movement of soil water, the coefficient of determination  $R^2$  was between 0.65 and 0.85, the root mean square error (RMSE) was between 0.014 7 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> and 0.021 3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, both were in suitable range. Transpiration rate and cumulative transpiration of RM were 18.2% and 15.6% larger than those of NM, respectively. RM decreased evaporation rate and cumulative evaporation by 33.3% and 29.6%, respectively. The value of E/ET (ratio between or RM was 82.5 mm, 46.0 mm and 9.0 mm for three years, which were about 1.3 times as large as that of NM. Summer maize yield and water use efficiency of RM were increased by 5.3% and 15.2%, respectively, and water consumption of field was reduced by 2.8%. The research

收稿日期: 2018-03-01 修回日期: 2018-06-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013 AA102904)

作者简介:冯浩(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: nercwsi@ vip. sina. com

result showed that RM treatment can change the water consumption structure of crop and make soil water to be more available for crop, because it can increase the maize transpiration and decrease the soil evaporation, thus decrease the water consumption of field, so it was profitable in Northwest China. **Key words**: summer maize; ridge – furrow with plastic film mulching; water consumption:

evapotranspiration; leakage of deep water; HYDRUS – 2D model

# 0 引言

我国西北干旱半干旱地区,水资源缺乏并且水 分利用效率不高<sup>[1]</sup>,严重制约了当地农业生产的发 展<sup>[2]</sup>。大力发展节水农业,提高农业用水效率显得 尤为重要<sup>[3]</sup>。地面覆盖是一种应用广泛的节水农 业种植技术,常用的覆盖材料有塑料地膜、秸秆、砂 石等<sup>[4]</sup>。地面覆盖常与耕作技术相结合,如将起垄 种植和地膜覆盖相结合的垄作覆膜技术由于具有显 著的节水增产效果<sup>[5-6]</sup>,应用十分广泛。李玉玲 等<sup>[7]</sup>发现起垄覆膜较传统种植夏玉米增产 39.9%, 水分利用效率提高 33.8%;齐智娟等<sup>[8]</sup>研究结果表 明垄作全覆膜条件下春玉米增产 17.1%;LIU 等<sup>[9]</sup> 发现垄作覆膜条件下春玉米增产 39%~89%。

田间耗水是土壤-植物-大气水分传输系统中重 要的组成部分<sup>[10]</sup>,研究地面覆盖条件下田间耗水规 律对理解其节水增产机理有重要意义。目前关于田 间耗水方面的研究集中在作物耗水即蒸发蒸腾上, 如文冶强等[11]基于双作物系数法分析了覆膜春小 麦耗水规律,认为覆膜春小麦总耗水量比不覆盖少 10.0%~16.0%,蒸腾量占总耗水量的比例比不覆 膜提高了 25.0%~27.0%; 王罕博等<sup>[12]</sup> 通过涡度相 关系统和微型蒸渗仪得到垄作覆膜的农田蒸散量为 376.2 mm,比裸地降低了6.0%,其中土壤蒸发降低 了 57.7%; DING 等<sup>[13]</sup>、 TIAN 等<sup>[14]</sup>、 PEREIRA 等<sup>[15]</sup> 也分别研究了地膜覆盖下玉米、棉花、大麦的耗水规 律,得出覆盖增加作物蒸腾量,减少土壤蒸发量的结 论。但是.目前关于整个田间耗水过程的研究相对 较少,田间耗水除了作物耗水外,还包括深层渗漏以 及其他为创造良好农业生态环境所必须的水量(如 水田泡田、冲洗压盐等)[16]。有研究认为,覆膜高产 是建立在高耗水的基础上[17],长期覆盖还会造成土 壤退化[18],覆膜增产是否具有可持续性还存在争 议。因此,有必要对覆盖条件下整个田间耗水过程 进行研究。由于田间耗水过程难以直接测量,因此, 本文借鉴马欢等<sup>[19]</sup>、FILIPOVIĆ等<sup>[20]</sup>将HYDRUS-2D 模型用于农田水分量化研究的经验,采用二维数 值模型 HYDRUS - 2D.模拟起 差覆 膜条件下农田水 分变化情况,以探究夏玉米生育期土壤蒸发、作物蒸 腾、土壤水分深层渗漏等农田耗水过程的变化规律,

为分析起垄覆膜节水增产原因和其可持续性与否问 题提供依据,并为西北干旱半干旱地区覆膜种植增 产稳产提供理论支撑和技术指导。

# 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于陕西省杨凌区西北农林科技大学旱 区农业水土工程重点实验室灌溉试验站(108°24′E, 34°20′N,海拔521 m),该地属于暖温带半湿润大陆 性季风气候区,四季分明,多年平均气温13~15℃, 多年平均降水量在630 mm 左右,降水量年际分布 不均,主要集中在7—10月。供试土壤为中壤土, 0~1 m 土层的平均田间持水率、凋萎含水率为 23%、8.5%(质量含水率),pH值为8.20,平均容重 为1.37 g/cm<sup>3</sup>。该站地下水埋深在5 m以下,其向 上补给量可忽略不计。研究对象为夏玉米,2014 年 7月4日和2015年6月12日为辅助出苗灌水 30 mm,其余时期不灌水。

### 1.2 试验区布置与测定

试验设置不覆盖平作处理 NM(Flat field without mulching)和起垄覆膜处理 RM(Ridge – furrow with plastic film mulching planting)。起垄覆膜处理在垄上覆膜,沟内种植, 垄宽 60 cm, 垄高 20 cm,所用地 膜为聚乙烯塑料薄膜, 膜厚 0.008 mm, 地膜覆盖度 约为 0.5。每个处理 3 个重复, 共 6 个小区, 小区面 积 10 m<sup>2</sup>(5 m×2 m)(图 1)。播种前, 先进行人工翻 耕、整地、施肥, 不同处理小区施用同一水平肥料: 纯 N 225 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>作为基肥一次施入, 生育期不追肥。供试夏玉米品种为秦龙 11, 东西行种植, 人工穴播, 播种密度 52 000 株/hm<sup>2</sup>, 株距 40 cm, 行距 60 cm。于 2014 年 6 月 19 日播种, 10 月 11 日收获; 2015 年 6 月 11 日播种, 10 月 8 日收获; 2016 年 6 月 9 日播种, 9 月 22 日收获。

生育期中每隔 15 d 左右用直尺测量叶面积和 株高。玉米成熟后,每个小区随机取 12 株,测定穗 粒数、百粒质量、穗行数、穗长、穗粗等性状,人工脱 粒测干质量,干燥后称总质量,然后计算出单位面积 产量。利用时域反射仪 TRIME – TDR 测定土壤体 积含水量,测定深度为 260 cm,100 cm 以上土层以 10 cm 为测量间隔,100 cm 以下土层以 20 cm 为测定



间隔,大约每7d左右测一次,降雨前后加测。

# 1.3 数值模拟

1.3.1 模型方程

HYDRUS - 2D 模型可以用来模拟土壤水分运动、溶质运移、热量传输及根系吸水等过程,该模型能灵活地设置边界条件和不规则的几何区域<sup>[21]</sup>,为模拟复杂的农田环境提供便利。

(1)水流运动控制方程

水流运动控制方程 Richards 方程为

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_{h}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{h}\frac{\partial h}{\partial z}\right) + \frac{\partial K_{h}}{\partial x} - S(h)$$
(1)

式中 x----横坐标, cm

z----纵坐标, cm

h-----土壤水势, cm

K<sub>h</sub>-----非饱和土壤导水率, cm/d

*t*——时间,s

S-----根系吸水项,mm/d

土壤水力函数方程选用 Van Genuchten - Mualem 公式,以下简称 VG 模型。

(2)蒸发蒸腾量计算

HYDRUS - 2D 模型需要将潜在蒸腾量和潜在 蒸发量作为输入项。潜在蒸发蒸腾量采用单作物系 数法计算,其中,参考作物蒸发蒸腾量采用 FAO - 56 推荐的 Penman - Monteith<sup>[22]</sup>公式计算,作物系数 *K*。 取值参考当地的研究结果<sup>[23]</sup>。根据夏玉米生育期 实测叶面积指数将潜在蒸发蒸腾量分割为潜在蒸发 量和潜在蒸腾量<sup>[24]</sup>。

$$ET_{c} = K_{c}ET_{0}$$
(2)  
$$E_{p} = \begin{cases} ET_{c}\exp(-0.4LAI)/1.1 & (LAI > 1.0) \\ ET_{c}(1 - 0.43LAI) & (0 < LAI \le 1.0) \end{cases}$$
(3)

$$T_p = ET_c - E_p \tag{4}$$

式中 
$$ET_0$$
——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d  
 $ET_c$ ——作物潜在蒸发蒸腾量,mm/d  
 $E_p$ ——潜在蒸发量,mm/d  
 $T_p$ ——潜在蒸腾量,mm/d  
 $LAI$ ——叶面积指数,cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>

实际蒸腾量计算为潜在蒸腾量乘以水分胁迫系 数,即

$$S(h, h_{\phi}, x, z) = \alpha'(h, h_{\phi}, x, z) b(x, z) S_{\iota} T_{\rho} \quad (5)$$
  
其中
$$b(x, z) =$$

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{z}{Z_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - \frac{x}{X_m} \end{pmatrix} e^{-\left(\frac{P_z}{Z_m} |z^* - z| + \frac{P_x}{X_m} |x^* - x|\right)} & (6)$$

$$T_a = \frac{1}{S_t} \int_{\Omega} S(h, h_{\phi}, x, z) \, \mathrm{d}\Omega =$$

$$T_p \int_{\Omega} \alpha'(h, h_{\phi}, x, z) \, b(x, z) \, \mathrm{d}\Omega$$

$$(7)$$

S<sub>1</sub>——与蒸腾有关的土壤表面宽度, cm

 $Z_m$ ——z方向的根系达到的最大长度, cm

X<sub>m</sub>——x方向的根系达到的最大长度, cm

 $P_{z}$ 、 $P_{x}$ 、 $z^{*}$ 、 $x^{*}$ ——经验系数,取值参照文

献[25-27]

 $T_a$ ——实际蒸腾速率, mm/d

 $\Omega$ ——根系分布区面积, cm<sup>2</sup>

土壤蒸发量的计算是与蒸腾量计算相独立的过程。蒸发量的大小与输入的气象相关<sup>[28]</sup>,在表层土壤负压水头下降至临界值之前,土壤蒸发一直以潜在蒸发速率进行,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>[29]</sup>。

### 1.3.2 几何区域及边界条件

模型模拟几何区域深度设置为120 cm, NM 处 理宽度设置为30 cm, RM 处理宽度设置为60 cm, 在 10、30、50、100 cm 处设置观测点。通过比较观测点 实测土壤含水量和模拟含水量的差异,可以评价模 型对水分动态变化的模拟效果。NM 及 RM 处理未 覆膜土壤表面为大气边界条件,通过此界面的水分 通量有降雨量、灌溉量、蒸腾量和蒸发量。RM 覆膜 部分因为不透水的地膜切断了水分传输路径,设定 为零通量边界条件。两个处理底部都设置为自由排 水边界。由于试验地地下水位较深(大于5 m),所 以不考虑地下水补给。几何区域两侧均为零通量边 界条件(图2)。

# 1.3.3 参数率定

由于 HYDRUS-2D 模型不涉及作物生长过程,





因此仅需要对土壤参数进行率定。通过剖面法 采集原状土样,用离心机测定不同含水量对应的 压力水头值,再借助 RETC 拟合得到 VG 模型 6 个土壤水力特性参数初始值:残余含水率 Q、饱 和含水率  $Q_{,}$  拟合参数  $\alpha_{,n}$  ,  $l_{,}$  饱和导水率  $K_{,o}$ 一般  $Q_r, Q_s, K_s$ 以实测值为准, l 取值 0.5, 所以仅 需率定 $\alpha_n$ 值,率定前后土壤水力参数如表1所 示。

1.3.4 模型评价

本文采用均方根误差(Root mean square error, RMSE) 和模型决定系数  $R^2$  (Coefficient of determination)两个统计指标来比较土壤含水率模拟 值和实测值的差异。RMSE 越接近于0,表示模拟值 和实测值的误差越小,模拟效果越好;R<sup>2</sup>越接近于 1.表示模拟值和实测值的变化趋势越一致,模拟效 果越好。

	表1 土壤水力特性参数率定
Tab. 1	Calibrated parameters of soil hydraulic properties

上日沤庄/	0 /	0 /	K /		。		NM 处理		RM 处理	
上层体度/	$Q_{r'}$	$Q_{s'}$	<i>K<sub>s</sub></i> /	l		れの広	α率定值/	n 率	α率定值/	n 率
em	$(\mathrm{cm}^{3}\cdot\mathrm{cm}^{-3})$	$(\mathrm{cm}^{3}\cdot\mathrm{cm}^{-3})$	$(\operatorname{cm} \cdot d^{-1})$		cm ·	炉阻	$\mathrm{cm}^{-1}$	定值	$\mathrm{cm}^{-1}$	定值
$0 \sim 20$	0.078	0.41	63.89	0.5	0.0095	1.2674	0.0044	1.2154	0.0026	1.2700
$20\sim\!40$	0.078	0.41	81.09	0.5	0.0121	1.2395	0.0418	1.2241	0.0510	1.1707
$40\sim\!60$	0.078	0.41	70.67	0.5	0.0167	1.1440	0.0309	1.1625	0.0486	1.1018
$60 \sim 120$	0.078	0.46	15.18	0.5	0.0158	1.2861	0.0180	1. 153 2	0.025 2	1.0989

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2}{N}}$$
(8)

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N} (O_{i} - O_{mean})(P_{i} - P_{mean})\right]^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (O_{i} - O_{mean})^{2} \sum_{i=1}^{N} (P_{i} - P_{mean})^{2}}$$
(9)

式中 P----模拟值 0,----实测值 Pmean——模拟值平均值 ——实测值平均值 O<sub>mean</sub>— N-----观测值数目

#### 结果与分析 2

### 2.1 模型率定与验证结果

本研究以 2014 年的土壤水分数据率定模型, 2015、2016年的土壤水分数据验证模型,模拟时间 段为夏玉米全生育期,3年分别为114、120、103 d。 模拟和实测土壤含水率的1:1线图如图3所示。由 图可知.3 年各个处理模拟土壤含水率与实测土壤 含水率基本分布在1:1线附近。其中在2014年. NM 和 RM 处理的 R<sup>2</sup>分别为 0.80、0.85, RMSE 分别 为0.0213、0.0147 cm3/cm3;2015、2016 年各处理的 R<sup>2</sup>在 0.7 左右, RMSE 最大为 0.018 7 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。模 型率定和验证的  $R^2$ 和 RMSE 均在合理的范围内.由 此表明 HYDURS-2D 模型可以较好地模拟土壤水 分变化,可以进一步开展与水分有关的研究。

### 2.2 蒸发蒸腾量

# 2.2.1 蒸腾速率与蒸发速率

夏玉米生育期降雨和气温分布以及模拟的蒸 腾、蒸发、总蒸发蒸腾速率如图4所示。从图4中降雨 和气温变化情况来看,2014 年降雨量多达 380 mm,主 要集中在生育中后期,且多为连续降雨(图4a)。 2015 年降雨分布比较均匀,总量为283 mm(图4b)。 2016年降雨主要发生在生育前期,出现暴雨的次数 较多,降雨量与2015年相近(图4c)。

夏玉米蒸腾速率在整个生育期呈现先增加后减 少的趋势,最大值在 3.3~4.5 mm/d 之间,出现在 抽雄期左右(图4d~4f)。RM处理下夏玉米的蒸腾 速率在各个时期基本都大于 NM 处理,在降雨较少 的时期表现得更为明显,如 2014 年播后 35~50 d, 2015 年播后 20~50 d 和 2016 年播后 60~80 d。 RM 处理全生育期蒸腾速率平均值为1.3 mm/d,比



Fig. 3 Comparison of simulated and measured soil water contents

NM 处理的 1.1 mm/d 大 18.2%。蒸发速率随时间 的变化趋势与蒸腾速率的变化有很大的差别,在苗 期较大,苗期之后由于冠层覆盖度变大使蒸发速率 减小。NM 处理最大蒸发速率 3 年分别为 5.2 、4.9 、 4.3 mm/d,大于 RM 处理的 2.8 、2.4 、2.5 mm/d。从 全生育期平均蒸发速率来看,NM 处理为 1.2 mm/d, 比 RM 的 0.8 mm/d 大 50%。总蒸发蒸腾速率为蒸 腾速率和蒸发速率之和,NM、RM 处理最大总蒸发 蒸腾速率 3 年分别为 5.3 、6.0 、5.6 mm/d 和 4.4 、 5.4 、4.4 mm/d,全生育期平均总蒸发蒸腾速率分别 为 2.2 、2.7 、2.1 mm/d 和 2.0 、2.4 、2.0 mm/d。可以 看出,RM 处理能增大蒸腾速率,减小蒸发速率,并 且减小了总蒸发蒸腾速率,也就是减小了作物耗水 量。

# 2.2.2 各生育阶段蒸腾量与蒸发量

各生育阶段蒸发量、蒸腾量以及蒸发量占总蒸 发蒸腾量的比例如表 2 所示。各生育阶段蒸发量、 蒸腾量的变化与蒸发速率和蒸腾速率在生育期中的 变化趋势一致,蒸腾量在抽雄-灌浆阶段最大,约占 全生育期蒸腾量的 40%,蒸发量在播种-拔节阶段 最大,占总蒸发量的 60% 以上。RM 处理各生育期 蒸腾量基本都大于 NM 处理,而蒸发量小于 NM 处 理。从全生育期蒸发量的情况来看,RM 处理 3 年 分别比 NM 处理少 25.2%、43.6%、20.1%,平均值 为 29.6%;3 年蒸腾量分别比 NM 处理多 8.7%、 22.9%、15.1%,平均值为 15.6%。由此可以看出, RM 处理增大了蒸腾量,减小了蒸发量,并且减小的 蒸发水量大于增加的蒸腾水量。

蒸发通常被认为是非生产性消耗水,通过蒸发量占蒸发蒸腾量的比例这一指标可以了解作物对水分利用的有效性<sup>[14]</sup>。蒸发量占蒸发蒸腾量的比例在播种至拔节时期最大,NM处理不小于0.72,RM处理在0.53~0.72之间,随着生育期的推移,该值呈现减小趋势,到收获期,又有所增大。同一年份,NM处理各个生育阶段蒸发量占蒸发蒸腾量的比例基本上都大于 RM 处理。NM 处理全生育期蒸发量占蒸发蒸腾量比例平均值为0.51,比 RM 处理的0.38 大34.2%,说明起垄覆膜促使无效水转化为可利用水,改善作物耗水结构。

## 2.3 深层渗漏量

图 5 为通过研究区域底部向深层土壤渗漏水分 的渗漏速率和累计渗漏量。深层渗漏的产生是由于 降雨或灌溉水量超过了土层所能储蓄的最大水量, 因此渗漏的产生与降雨或灌溉事件密切相关。从 图 5 中可以看出,在 2014 年,播后 87 d 水分渗漏速 率迅速增大,在这之前,渗漏速率几乎为零,这是由播 后 80~90 d 共计 174 mm 的连续降雨导致的。NM 和 RM 处理渗漏速率在播后 93、91 d 达到峰值 4.1、



Fig. 4 Precipitation, air temperature, transpiration, evaporation and evapotranspiration rate during summer maize growth stage

表 2 各生育阶段蒸发量、蒸腾量以及蒸发量占总蒸发蒸腾量的比例

Гаb. 2	Cumulative	transpiration	and	evaporation	during	summer	maize	growth	stage	and	ratio	betweer
--------	------------	---------------	-----	-------------	--------	--------	-------	--------	-------	-----	-------	---------

处理	生育时期	2014 年				2015 年		2016 年		
		蒸发量/mm	蒸腾量/mm	比例	蒸发量/mm	蒸腾量/mm	比例	蒸发量/mm	蒸腾量/mm	比例
	播种拔节	65.6	25.9	0.72	105.7	36.2	0.74	66.1	18.2	0.78
	拔节抽雄	12.5	18.3	0.41	7.3	16.1	0.31	22.1	35.0	0.39
NM	抽雄-灌浆	26.3	54.4	0.33	37.5	80.8	0.32	9.3	38.7	0.19
	灌浆收获	17.9	28.5	0.39	14.3	20.8	0.41	9.7	11.3	0.46
	全生育期	122.3	127.1	0.49	164.8	153.9	0.52	107.2	103. 2	0.51
	播种拔节	59.5	34.8	0.63	63.1	55.6	0.53	49.8	19.8	0.72
	拔节-抽雄	6.4	19.7	0.25	4.2	18.2	0.19	11.0	34.4	0.24
RM	抽雄-灌浆	16.0	56.6	0.22	18.7	92.2	0.17	18.0	51.6	0.26
	灌浆收获	9.7	27.0	0.26	6.9	23.1	0.23	6.9	13.0	0.35
	全生育期	91.6	138.1	0.40	92.9	189.1	0.33	85.7	118.8	0.42

5.8 mm/d,直到收获时仍保持较大的速率。整个生育期,NM处理累积渗漏量为75.0 mm,比 RM处理

的 82.5 mm 少 7.5 mm。同样, 2015 年播后 12 ~ 19 d, 连续 8 d 共计 81.9 mm 的降雨也导致水分渗漏

的发生,最终,NM处理累积渗漏量为26.3 mm,比 RM 处理少 19.7 mm。在 2016 年,虽然发生了几次 大雨或暴雨事件,但是两个处理的水分渗漏都非常 少,总量不足10mm,可见连续降雨才是造成水分渗 漏的主要原因。从3年总的情况来看,起垄覆膜处 理的深层渗漏量约为平作不覆膜处理的1.3倍。





#### 水量平衡及产量分析 2.4

模拟的水量平衡结果如表3所示。蒸发蒸腾量 约占田间耗水量的87.0%,表明田间耗水以作物蒸 腾耗水和土壤蒸发耗水为主。RM 处理的蒸发蒸腾 量3年平均比NM处理低7.4%,总的田间耗水量平 均比 NM 处理少 2.8%。深层渗漏量约占田间耗水 量的13.0%,但由于水分渗漏与生育期内降雨分布

密切相关,所以其年际变化大,如2014年深层渗漏 较大,占田间耗水量的 25.0% 左右,而 2015 和 2016 年分别占田间耗水量的 11.0%、2.8%。 RM 处理深 层渗漏所占比例平均为14.9%, NM 处理为10.7%。 以上结果表明,起垄覆膜虽然导致了水分渗漏增大, 但是并没有导致田间过度耗水,原因在于其减小的 作物耗水量大于增加的渗漏量。

HYDRUS 模型被广泛应用于土壤水分、盐分和

热运移研究中,如 LIU 等<sup>[26]</sup>运用 HYDRUS - 2D 模

型研究了棉花膜下滴灌土壤水分动态变化特征,郝

远远等<sup>[29]</sup>利用 HYDRUS-1D 模型研究了地下水埋

表 3	夏玉米全生育期水量平衡
-----	-------------

		Tab. 3 Water	balance durin	g summer maize	growth season		mm
年份	处理	降雨量	灌溉量	蒸发蒸腾量	水分渗漏量	贮水量增加	农田耗水量
2014	NM	379.5	30	249.4	75.0	78.7	324.4
2014	RM	379.5	30	229.6	82.5	87.5	312.1
	NM	283.9	30	318.7	26.3	- 32. 7	345.0
2015	RM	283.9	30	282.0	46.0	-47.1	328.0
2016	NM	275.3	0	210. 4	2.3	60.1	212.7
	RM	275.3	0	204. 5	9.0	49.9	213.5

3

讨论

从产量的结果来看(图 6a), RM 与 NM 处理相 比,除2014年减产8.0%外,2015年和2016年分别 增产 6.6%、17.4%、3 年平均增产 5.3%。在水分 利用效率上, RM 处理下夏玉米水分利用效率3年 分别比 NM 高 6.4%、18.4%、20.8% (图 6b),3 年 平均高 15.2%。表明起 垄覆膜处理能增加产量,并 且显著提高水分利用效率。

#### 深和灌溉对土壤水盐和玉米产量的影响,结果都表 7000 水分利用效率/(kg·(hm<sup>2</sup>·mm)<sup>-1</sup>) □NM处理 NM处理 30 RM处理 6000 RM处理 将粒产量/(kg·hm<sup>-2</sup>) 25 5000 4000 20 3000 15 2000 10 2016 2014 2015 2016 2014 2015 年份 年份 (a)产量 (b)水分利用效率



211

Fig. 6 Yield and water use efficiency of summer maize in 2014-2016 明 HYDRUS 模型能较好模拟水热盐变化过程。本研究针对模型率定和验证结果的分析也表明该模型 在模拟土壤水分运动时具有较高的精度,但是该模 型没有作物生长模块,不能模拟作物动态的生长过 程,并且与根系分布有关的参数采用其他文献推荐 值,可能会导致模拟结果存在误差。因此,在以后的 试验中应补充根系的研究。在计算作物潜在蒸发蒸 腾量时,起垄覆膜和对照处理采用了相同的作物系 数,由于在本试验地区未见关于起垄覆膜下作物系 数的报道,因此没有该处理下作物系数参考值,而实 际上起垄覆膜处理下玉米生长情况明显要好于对 照<sup>[30]</sup>,采用相同的作物系数可能会引起误差,所以 加强不同耕作措施下作物系数的研究也是有必要的。

模拟结果表明,起垄覆膜种植方式较传统平作 不覆膜能减少约 29.6% 的土壤蒸发量,增加 15.6% 的作物蒸腾量,表明该种植方式能促进无效水向有 效水转化,改善作物耗水结构,与文治强等[11]得到 的结论相似。起垄覆膜能减少土壤蒸发是因为地膜 的不透水性阻碍了水汽向大气的扩散,能增加作物 蒸腾是因为起垄覆膜处理改善了作物水热环境,使 植株生长旺盛,并且地膜的覆盖还能反射太阳辐射, 使冠层底部的光照条件得到改善<sup>[31]</sup>。在降雨较少 的情形下,起垄覆膜明显能提高夏玉米蒸腾速率,可 能在于起垄覆膜保墒的特性使得土壤水分的供应能 力高于对照处理,这对于易旱地区粮食稳产有积极 的意义。文献[16-17.32]指出,地膜覆盖增加作 物耗水量,长期使用会导致土壤退化,具有不可持续 性,在本研究的3年试验中,起垄覆膜的种植方式较 传统种植方式减少了田间耗水量,增加了产量,说明 在本试验条件和研究期限下,对土壤水分而言,并未 出现上述研究提到的水分过度消耗现象,至于对土 壤理化性质的影响,需要进一步的研究。

一般情况下,土壤水分的深层渗漏量很小,几乎 可以忽略不计,但是在出现连续降雨情况下,容易产 生深层渗漏量,如2014年总渗漏量达75.0~82.5 mm, 在此情况下忽略深层渗漏量,在计算玉米根区水量 平衡时可能会造成误差。起垄覆膜处理深层渗漏量 大于平作不覆膜处理,是因为垄的集雨效应使得垄 沟内降雨强度更大,水分入渗更深,韩清芳等<sup>[33]</sup>的 研究结果证明了此结论,并且其研究还得出在沟垄 宽度比例一定时,垄越宽,降雨后水分垂直入渗深度 越大的结论,说明垄的型式也会影响深层渗漏量。 因此,下一步研究中,可以在模型中设置不同垄的参 数(宽度、沟垄比),以便优选渗漏量较少、保水效果 更好的垄型,更好地指导农业生产。

# 4 结束语

在大田试验的基础上结合 HYDRUS - 2D 模型, 分析了起垄覆膜与传统平作不覆膜处理在蒸腾、蒸 发、水分渗漏等农田耗水过程的差异。HYDRUS -2D 模型能较好地模拟土壤水分的动态变化,适用于 西北干旱半干旱地区田间耗水的研究。起垄覆膜处 理下夏玉米蒸腾量、蒸发量、总的蒸发蒸腾量分别比 对照大 15.6%、-29.6%、7.4%,表明起垄覆膜种 植能增大蒸腾量,减小蒸发量,改善作物的耗水结 构。起垄覆膜促进水分入渗,导致深层渗漏增加。 起垄覆膜处理 3 年平均增产 5.3%,水分利用效率 提高 15.2%,并且未出现过度消耗土壤水分的情 况,表明起垄覆膜具有节水增产效应,因此该种植方 式适合在本地区采用。

- 参考文献
- 吴普特,孙世坤,王玉宝,等.作物生产水足迹量化方法与评价研究[J].水利学报,2017,48(6):651-660.
   WU Pute, SUN Shikun, WANG Yubao, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017,48(6):651-660. (in Chinese)
- Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651-660. (in Chinese) 2 韩琦,姜纪沂,李瑛,等.西北干旱半干旱区水资源承载力研究现状与发展趋势[J].节水灌溉, 2017(6): 59-62. HAN Qi, JIANG Jiyi, LI Ying, et al. Current status of research and perspective of water resources carrying capacity in arid and semi-arid regions of Northwest China[J]. Water Saving Irrigation, 2017(6): 59-62. (in Chinese)
- 3 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880-885. KANG Shaozhong. Towards water and food security in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 880-885. (in Chinese)
- 4 周昌明.不同覆盖处理对夏玉米生长生理及产量的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2013. ZHOU Changming. The effects of different mulching on physiological growth and yield of winter wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 5 DONG W, ZHANG L, DUAN Y, et al. Ridge and furrow systems with film cover increase maize yields and mitigate climate risks of cold and drought stress in continental climates [J]. Field Crops Research, 2017, 207: 71-78.
- 6 张天乐. 沟 室覆盖集雨种植对夏玉米生长发育和土壤环境的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016. ZHANG Tianle. Effects of rainwater harvesting planting of ridge and furrow mulching on summer maize growth and soil environment [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- 7 李玉玲, 张鹏, 张艳, 等. 旱区集雨种植方式对土壤水分、温度的时空变化及春玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1084-1096.

LI Yuling, ZHANG Peng, ZHANG Yan, et al. Effects of rainfall haversting planting on temporal and spatial changing of soil water and temperature and yield of spring maize (*Zea mays* L.) in simi-arid areas [J]. Scientia Agriculture Sinica, 2016, 49(6): 1084 – 1096. (in Chinese)

- 3 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 覆膜耕作方式对河套灌区土壤水热效应及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 108-113.
- QI Zhijuan, FENG Hao, ZHANG Tibin, et al. Effects of mulch and tillage methods on soil water and temperature as well as corn yield in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 108-113. (in Chinese)
- 9 LIU J L, ZHU L, LUO S S, et al. Response of nitrous oxide emission to soil mulching and nitrogen fertilization in semi-arid farmland [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2014, 188(5): 20 28.
- 10 冯禹,崔宁博,龚道枝,等. 基于极限学习机的参考作物蒸散量预测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 153-160. FENG Yu, CUI Ningbo, GONG Daozhi, et al. Prediction model of reference crop evapotranspiration based on extreme learning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1): 153-160. (in Chinese)
- 11 文冶强,杨健,尚松浩.基于双作物系数法的干旱区覆膜农田耗水及水量平衡分析[J].农业工程学报,2017,33(1): 138-147.

WEN Yeqiang, YANG Jian, SHANG Songhao. Analysis on evapotranspiration and water balance of cropland with plastic mulch in arid region using dual crop coefficient approach [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 138-147. (in Chinese)

- 12 王罕博, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 88-94. WNAG Hanbo, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 88-94. (in Chinese)
- 13 DING R, KANG S, ZHANG Y, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching [J]. Agricultural Water Management, 2013, 127: 85-96.
- 14 TIAN F, YANG P, HU H, et al. Partitioning of cotton field evapotranspiration under mulched drip irrigation based on a dual crop coefficient model[J]. Water, 2016, 8(3): 72.
- 15 PEREIRA L S, PAREDES P, RODRIGUES G C, et al. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models[J]. Agricultural Water Management, 2015, 159: 239-254.
- 16 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25.
- 17 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. Influences 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)

- 18 STEINMETZ Z, WOLLMANN C, SCHAEFER M, 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.
- 19 马欢,杨大文, 雷慧闽, 等. Hydrus 1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 6-12.

MA Huan, YANG Dawen, LEI Huimin, et al. Application and improvement of Hydrus -1D model for analyzing water cycle in an agricultural field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 6-12. (in Chinese)

- 20 FILIPOVIC V, ROMIC D, ROMIC M, et al. Plastic mulch and nitrogen fertigation in growing vegetables modify soil temperature, water and nitrate dynamics; experimental results and a modeling study [J]. Agricultural Water Management, 2016, 176; 100 – 110.
- 21 ŠIMŮNEK J, VAN G M, ŠEJNA M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(9): 587 – 600.
- 22 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998: 15-86.
- 23 梁文清,蔡焕杰,王健. 陕西关中地区夏玉米作物系数试验研究[J]. 节水灌溉, 2011(12): 1-4. LIANG Wenqing, CAI Huanjie, WANG Jian. Experiment study on crop coefficient of maize in Guanzhong region of Shaanxi province[J]. Water Saving Irrigation, 2011(12): 1-4. (in Chinese)
- 24 JONES C A, KINIRY J R, DYKE P T. CERES Maize: a simulation model of maize growth and development[M]. Texas: Texas A and M University, 1986.
- 25 HAN M, ZHAO C, 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.
- 26 LIU M X, YANG J A, LI X M, et al. Numerical simulation of soil water dynamics in a drip irrigated cotton field under plastic mulch[J]. Pedosphere, 2013, 23(5): 620-635.
- 27 VRUGT J A, WIJK M T, HOPMANS J W, et al. One-, two-, and three dimensional root water uptake functions for transient modeling[J]. Water Resources Research, 2001, 37(10): 2457-2470.
- 28 ŠIMŮNEK J, VAN G M, ŠEJNA M. The HYDRUS 1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media [R]. University of California-Riverside Research Report, 2005.
- 29 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 128-136. HAO Yuanyuan, XU Xu, HUANG Quanzhong, et al. Modeling soil water-salt dynamics and maize yield responses to groundwater depths and irrigations[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 128-136. (in Chinese)
- 30 冯浩, 刘匣, 余坤, 等. 不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 192-202. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? file\_no = 20161224&flag = 1. DOI: 10.6041/j. issn. 1000-1298.2016.12.024.
- FENG Hao, LIU Xia, YU Kun, et al. Effects of different mulching patterns on soil moisture, soil temperature and summer maize growth [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 192 202. (in chinese)
- 31 ZHOU L M, LI F M, JIN S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41-47.
- 32 谢军红, 柴强, 李玲玲, 等. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8):1558-1568.
- XIE Junhong, CHAI Qiang, LI Lingling, et al. The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi-arid region of Loess Plateau of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(8): 1558 1568. (in Chinese)
- 33 韩清芳,李向拓,王俊鹏,等. 微集水种植技术的农田水分调控效果模拟研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2):78-82. HAN Qingfang, LI Xiangtuo, WANG Junpeng, et al. Simulated study on soil moisture of field under water micro-collecting farming conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2):78-82. (in Chinese)