

基于 HYDRUS-1D 的秸秆覆盖条件下 黑土区玉米田土壤水盐运移规律

刘继龙^{1,2}, 吕航^{1,2}, 曹晓强^{1,2}, 李济桢^{1,2}, 张玲玲³, 奥列格^{1,2}

(1.东北农业大学水利与土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150030;2. 农业农村部农业水高效利用重点实验室,
黑龙江 哈尔滨 150030;3.东北农业大学文理学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:为揭示不同秸秆覆盖量对黑土区玉米田农田土壤水盐运移的影响机制,基于田间试验结果,利用 HYDRUS-1D 模型对秸秆覆盖下农田土壤水盐运移过程进行模拟,分析不同秸秆覆盖量对土壤水盐动态的影响规律。结果表明:秸秆覆盖可以增强土壤保水性、抑制土壤盐分积累,随秸秆覆盖量增加,秸秆覆盖对土壤水盐运移的作用效果更加明显,在玉米全生育期内秸秆半量覆盖及全量覆盖较裸地 40 cm 耕层内各土层平均含水率分别提高 3.38%~5.78% 和 5.26%~9.62%、平均电导率分别降低 4.61%~8.93% 和 8.87%~12.41%。基于 HYDRUS-1D 模型模拟结果可知,土壤含水率模拟值与实测值的决定系数介于 0.903~0.940,标准误差介于 0.010~0.014 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,平均相对误差介于 3.46%~4.64%;土壤电导率模拟值与实测值的决定系数介于 0.817~0.853,标准误差介于 0.091~0.111 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,平均相对误差介于 4.06%~5.46%。误差分析表明 HYDRUS-1D 模型模拟精度较高,能够用于模拟研究区秸秆覆盖条件下农田土壤水盐运移过程。

关键词:秸秆覆盖;玉米田;土壤水盐运移;HYDRUS-1D 模型;黑土区

中图分类号:S513;S157 **文献标志码:**A

Transport trends of soil water and salt of corn-field in black soil region under straw mulching based on HYDRUS-1D

LIU Jilong^{1,2}, LV Hang^{1,2}, CAO Xiaoqiang^{1,2}, LI Jizhen^{1,2}, ZHANG Lingling³, Idimesheva Olga^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin,

Heilongjiang 150030, China; 3. Collage of arts and sciences, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: To reveal the influence mechanism of different straw mulch amounts on soil water-salt transport in corn fields of black soil areas, the HYDRUS-1D model was used to simulate the soil water-salt transport process under straw mulching and analyze the influence trends of different straw mulching amounts on soil water-salt dynamics based on the results of field experiments. The results showed that straw mulching enhanced soil water retention and inhibit soil salt accumulation, and the effects of straw mulching on soil water and salt transport were more significant as the amount of straw mulching increased, the average water content of straw half mulch and full mulch increased by 3.38%~5.78% and 5.26%~9.62%, respectively, and the average conductivity decreased by 4.61%~8.93% and 8.87%~12.41%, compared with bare ground 40 cm soil layer during the whole fertility period of maize. Based on the simulation results of the HYDRUS-1D model, it was known that the coefficients of determination between simulated and measured soil water content values ranged from 0.903~0.940, the standard errors ranged from 0.010~0.014 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, and the average relative errors ranged from 3.46%~4.64%. The coefficients of determination between simulated and measured soil electrical conductivity values ranged from 0.817~0.853, the standard errors ranged from 0.091~0.111 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, and the average relative errors ranged from 4.06%~5.46%. The error

analysis showed that the HYDRUS-1D model had high simulation accuracy and should be used to simulate the soil water-salt transport processes in agricultural fields under straw mulching conditions in the study area.

Keywords: straw mulching; corn field; soil water and salt transport; HYDRUS-1D model; black soil region

东北黑土区每年产出约占全国 1/3 的商品粮食,是中国重要的商品粮生产基地^[1],然而由于不合理的人为和自然因素导致黑土区农田土壤蓄水等能力降低,严重威胁了黑土区土壤资源安全^[2]。秸秆覆盖作为一种保护性耕作措施,能显著抑制土壤水分无效蒸发,提高土壤蓄水能力,抑制土壤表层盐分积聚,是保护黑土区土壤资源的有效途径^[3-4]。探究秸秆覆盖下黑土区土壤水盐运移过程,揭示秸秆覆盖对土壤水盐运移机制,对黑土区土壤资源高效可持续利用具有重要意义。

目前国内外学者已开展了许多关于秸秆覆盖对土壤水盐运移影响的研究,如孙博等^[5]探究了不同秸秆覆盖量下盐渍土壤水盐变化规律;纪文宁等^[6]研究了秸秆带状单双行覆盖和全覆盖下半干旱地区土壤水分分布情况;Peng 等^[7]分析了不同秸秆覆盖时期对土壤水分含量及水分利用效率的影响。秸秆覆盖条件下,秸秆与土壤具有相互作用,而且秸秆覆盖量、覆盖时间和覆盖方式对农田土壤水盐运移过程的影响有所差异,同时作物生长会使土壤水盐运移过程更加复杂。此外研究发现由于农田中土壤水盐动态信息不易连续监测,系统表征土壤水盐随时间变化的连续动态难度较大。采用数值模拟方法是分析土壤水盐连续动态变化的一种有效途径,HYDRUS 模型由于能够综合模拟大气、作物共同作用下的田间土壤水盐运移过程而受到广泛关注^[8-9]。目前国内外已有许多学者利用 HYDRUS 模型对不同条件下土壤水盐运移规律进行了研究,如 Chen 等^[10]利用 HYDRUS 模型研究了不同地膜覆盖下土壤水分运移过程;余根坚等^[11]使用 HYDRUS 模型分析了不同灌水方式对农田土壤水盐运移的影响;Kanzari 等^[12]模拟出不同水质灌溉下土壤盐分累积情况;李亮等^[13]利用 HYDRUS 模型探究了半干旱地区荒地水盐运移机理。尽管国内外学者在这一领域已经取得了许多成果,关于秸秆覆盖措施下作物冠层覆盖与生理耗水作用的农田土壤水盐运移机理还有待深入研究。

本文以东北黑土区玉米地为例,利用 HYDRUS-1D 模型模拟不同秸秆覆盖量与生理耗水复合机制驱动下的农田土壤水盐运移过程,并对模型进行适用性评价,揭示不同秸秆覆盖量对黑土区农田土壤水盐运移的影响机制,以期为黑土区农田土壤水

盐状态监测及土壤资源高效可持续利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 5—9 月在东北农业大学阿城试验基地(127°03'E, 45°31'N)进行,该试验基地位于黑龙江省哈尔滨市阿城区,海拔高程 162 m,平均气温 3.3 ℃,无霜期 135~140 d,平均日照时数 2 550 h,年平均降雨量 580~600 mm。土壤类型为黑土,有机质含量为 18.42 g·kg⁻¹,碱解氮量为 141.6 mg·kg⁻¹,有效磷量为 22.3 mg·kg⁻¹,速效钾量为 146.21 mg·kg⁻¹。作物生育期降雨量与土壤蒸发量由试验区内自动气象站采集,如图 1 所示。

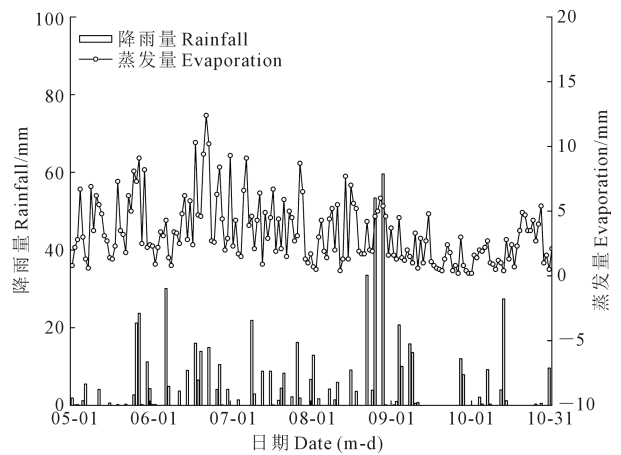


图 1 2022 年玉米生育期降雨量与蒸发量
Fig.1 Rainfall and evaporation during maize growth stages in 2022

1.2 试验设计

试验地种植玉米品种为‘翔禾 88 号’,设置对照(CK,无秸秆覆盖)、秸秆半量覆盖(CM1,0.33 kg·m⁻²)、秸秆全量覆盖(CM2,0.65 kg·m⁻²)3 个处理。所覆盖秸秆的长度约为 20 cm,秸秆全量覆盖量为试验前一年各小区平均秸秆产量。每个处理 3 次重复,共 9 个小区。每个小区面积为 36 m²(6 m×6 m),保护行、隔离带均为 6 m×2 m,种植密度为株距 25 cm、垄距 65 cm,其他种植管理方式与当地常规种植方式一致。

在玉米苗期(6 月 4 日—6 月 20 日)、拔节期(6 月 21 日—7 月 9 日)、抽雄期(7 月 10 日—7 月 31 日)、灌浆期(8 月 1 日—8 月 19 日)、成熟期(8 月 20 日—9 月 11 日)内每隔 7~15 d 分别采集试验小

区 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 土样,使用环刀法测定土壤容重,利用激光粒度分析仪(S3500 & Bluewave,大昌华嘉商业(中国)有限公司)测定土壤粒径分布(采用国际制土壤分类标准),如表 1 所示。土壤含水率用烘干法测定。土壤含盐量采用土壤电导率表征,土壤电导率测定时,将风干土样过 1 mm 筛,以土水比 1:5 配置待测液,提取上清液后采用电导率仪(DDS-307A,上海仪电科学仪器股份有限公司)测定。

2 HYDRUS-1D 模型建立

2.1 基本方程

2.1.1 水分运动基本方程 采用增加汇源项的一维 Richards 方程来描述土壤水分运移过程^[14]。

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

式中, θ 为土壤体积含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); t 为时间(d); z 为垂向空间坐标,向上为正; h 为基质势(cm); $K(\theta)$ 为非饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); $S(z)$ 为汇源项,即单位时间内的根系吸水量($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)。

其中,公式(1)中参数采用 HYDRUS-1D 中的 Van Genuchten 模型拟合^[15]。

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + |ah|^n] - m, \quad h < 0 \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{l/m})^m]^2 \quad (3)$$

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

式中, $\theta(h)$ 为基质势 h 处的土壤体积含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); S_e 为有效饱和度($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_s 为饱和含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_r 为残余含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); K_s 为饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); a, m, n, l 为经验系数。

2.1.2 根系吸水方程 根系吸水方程即汇源项 $S(z)$,可用 Fedds 模型进行计算^[16]。

$$S(z) = \alpha(h) \cdot R(c) \cdot \beta(z) \cdot T_p \quad (5)$$

式中, $\alpha(h)$ 为水分胁迫反应函数,无量纲; $R(c)$ 为盐分胁迫反应函数,无量纲; $\beta(z)$ 为标准化的根系吸水分布函数,无量纲; T_p 为作物潜在蒸腾速率($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)。本文玉米根系吸水参数选用 HYDRUS-1D 软件提供的玉米根系吸水参数如表 2 所示。

2.1.3 溶质运移基本方程 采用对流-弥散方程来描述土壤溶质的运移过程^[17]。

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (q_z C) \quad (6)$$

式中, C 为溶质浓度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); D 为水动力弥散系数($\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$); q_z 为水流通量($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

表 1 土壤容重与粒径分布

土层深度 Soil depth /cm	粒径分布 Particle size distribution/%			土壤容重 Soil bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02 mm	
0~10	34.23	41.22	24.55	1.29
10~20	37.55	40.06	22.39	1.34
20~30	39.38	38.74	21.88	1.38
30~40	41.07	38.42	20.51	1.41

表 2 玉米根系吸水参数

Table 2 Water absorption parameters of maize root system						
P_0/cm	$P_{0\text{pt}}/\text{cm}$	$P_{2\text{H}}/\text{cm}$	$P_{2\text{L}}/\text{cm}$	P_3/cm	$r_{2\text{H}}$	$r_{2\text{L}}$
-15	-30	-325	-600	-8000	0.5	0.1

注: P_0 为根系能够开始吸水时的水势上限; $P_{0\text{pt}}$ 为根系吸水速率最大时的水势上限; $P_{2\text{H}}$ 为高蒸发下根系吸水速率最大时的水势下限; $P_{2\text{L}}$ 为低蒸发下根系吸水速率最大时的水势下限; P_3 为根系能够开始吸水时的水势上限; $r_{2\text{H}}$ 为大气蒸腾速率上限; $r_{2\text{L}}$ 为大气蒸腾速率下限。

Note: P_0 is the upper limit of water potential at which the root system can start to take up water; $P_{0\text{pt}}$ is the upper limit of water potential at the maximum rate of water uptake by the root system; $P_{2\text{H}}$ is the lower limit of water potential at the maximum rate of root water uptake under high evaporation; $P_{2\text{L}}$ is the lower limit of water potential at the maximum rate of root water uptake under low evaporation; P_3 is the upper limit of water potential when the root system can start to absorb water; $r_{2\text{H}}$ is the upper limit of the atmospheric transpiration rate; $r_{2\text{L}}$ is the lower limit of atmospheric transpiration rate.

2.2 初始条件与边界条件

2.2.1 土壤水分运动的初始条件与边界条件 土壤水分运动的初始条件、上边界和下边界条件分别如式(7)~(9)所示^[18]:

$$h(z, t) = h_0(z, 0) \quad (7)$$

$$-K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = q_0(0, t) \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

式中, h_0 为初始土壤剖面压力水头(cm); q_0 为初始土壤剖面水流通量($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)。土壤水分运动初始条件基于土壤实测含水率设定。上边界设为可随时间变化的大气边界条件,需添加模拟时期内逐日降雨量及蒸散量;由于试验区平均地下水埋深大于 8 m^[19],不考虑下边界水流通量,故设为自由排水边界。

2.2.2 土壤盐分运动的初始条件与边界条件 土壤盐分运动的初始条件、上边界和下边界条件分别如式(10)~(12)所示^[18]:

$$C(z, t) = C_0(z, 0) \quad (10)$$

$$qC - \theta D \frac{\partial C}{\partial z} = q_0 C_0 \quad (11)$$

$$\theta D \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

式中, C_0 为初始土壤溶质浓度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。土壤盐分运动采用土壤溶液电导率表征,其初始条件基于土壤实测电导率设定,上边界为浓度通量边界,下边界为零浓度梯度边界。

2.3 单元划分

模拟区域设为农田 0~40 cm 土层,划分为 4 层,分别于 10、20、30、40 cm 深度处设置观测点。时间离散单位为 d,模拟时间从 6 月 4 日—9 月 11 日,共 100 d。设定初始时间步长、最小时间步长、最大时间步长分别为 0.001、0.001、1 d。

2.4 模型参数

土壤水力参数与溶质运移参数是土壤水盐模拟的重要参数,土壤水力参数包括饱和导水率(K_s)、残余含水率(θ_r)、饱和含水率(θ_s)、形状参数(α)、经验参数(n)、孔隙连续度(l),根据实测土壤容重及粒径分布使用 Rosetta 模型初步确定,土壤中溶质运移主要与水动力弥散系数(D)有关,其值基于文献初步确定^[20–21],并根据试验实测数据对模型参数初值进行校准优化,结果如表 3 所示。

3 结果与分析

3.1 模型检验

根据农田实测土壤含水率与电导率对模拟结果进行验证,采用决定系数(R^2)、标准误差($RMSE$)和平均相对误差(MRE)评价模型模拟精度^[21]。 R^2 、 $RMSE$ 和 MRE 阈值在 0~1 之间,其中 R^2 值越大、 $RMSE$ 和 MRE 值越小,表明模拟精度越高。模拟精度如表 4 所示,土壤含水率实测值与模拟值的 R^2 介于 0.903~0.940, $RMSE$ 介于 0.010~0.014 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, MRE 介于 3.46%~4.64%;土壤电导率实测值与模拟值的 R^2 介于 0.817~0.853, $RMSE$ 介于 0.091~0.111 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, MRE 介于 4.06%~5.46%。模拟的模拟值与实测值吻合程度较高,模型模拟结果能较好地反映各处理土壤水盐动态变化特征。其中,各处理土壤水分模拟精度均高于土壤盐分模拟精度,究其原因是盐分对流-弥散过程不易刻画,造成其模拟误差较大。而随秸秆覆盖量的增加模拟精度随之降低,这是由于秸秆覆盖减少了表层土壤与大气的接触面积,使其边界条件更为复杂,致使模拟精度降低。

3.2 不同秸秆覆盖量下土壤水盐动态

3.2.1 不同秸秆覆盖量下土壤水分动态 不同秸秆覆盖量下玉米生育期各土层土壤水分动态变化如图 2 所示,同一土层各处理土壤含水率随时间的

表 3 土壤水力参数与溶质运移参数

Table 3 Soil hydraulic parameters and solute transport parameters

土层深度 Soil depth /cm	K_s /($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	θ_r /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_s /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α	n	l	D /cm
0~10	17.53	0.0883	0.4728	0.0104	1.4710	0.5	15
10~20	13.3	0.0905	0.4676	0.0114	1.4345	0.5	20
20~30	10.78	0.0908	0.4602	0.0121	1.4103	0.5	24
30~40	9.16	0.0912	0.4553	0.0125	1.3914	0.5	28

表 4 模拟精度评价

Table 4 Simulation accuracy evaluation

处理 Treatment	土壤含水率 Soil water content			土壤电导率 Soil electrical conductivity		
	R^2	$RMSE$ /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	MRE /%	R^2	$RMSE$ /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	MRE /%
CK	0.940	0.010	3.46	0.853	0.091	4.06
CM1	0.912	0.012	4.15	0.841	0.103	4.84
CM2	0.903	0.014	4.64	0.817	0.111	5.46

波动趋势基本一致,波动幅度随土层深度增加而降低,这是因为大气降雨与土壤蒸发优先作用于上层土壤。玉米各生育时期不同处理 0~40 cm 土层平均含水率如表 5 所示,各处理土壤平均含水率在成熟期达到最大值,原因是在此期间降雨较为丰富,玉米生长、叶面积增大较快,降低了土壤蒸发^[22]。在玉米不同生育期内 CM1 和 CM2 处理土壤平均含水率均显著高于 CK 处理。与 CK 处理相比,苗期 CM1 和 CM2 处理土壤平均含水率分别增加 7.11%和 12.26%;拔节期 CM1 和 CM2 处理土壤平均含水率分别增加 5.34%和 8.68%;抽雄期 CM1 和 CM2 处理土壤平均含水率分别增加 4.49%和 7.16%;灌浆期 CM1 和 CM2 处理土壤平均含水率分别增加 4.10%和 6.36%;成熟期 CM1 和 CM2 处理土壤平均含水率分别增加 3.51%和 5.48%。

相同土层深度下,土壤水分含量随秸秆覆盖量增加而增加。在玉米全生育期内,CM1 和 CM2 处理 0~10 cm 土层平均含水率较 CK 处理分别增加 5.78%和 9.62%,10~20 cm 土层平均含水率较 CK 处理分别增加 5.19%和 8.87%,20~30 cm 土层平均含水率较 CK 处理分别增加 4.83%和 7.43%,30~40 cm 土层平均含水率较 CK 处理分别增加 3.38%和 5.26%。这是由于秸秆覆盖阻断了农田土壤与大气的直接接触,有效降低大气直接辐射到土壤表层,抑制了土壤水分蒸发,提高了土壤含水率^[23]。随土层深度增大,CM1 和 CM2 处理较 CK 处理土壤含水率增幅降低,这是因为浅层土壤受地面环境因素影响较大,使得秸秆覆盖对浅土壤的影响效应更加明显。

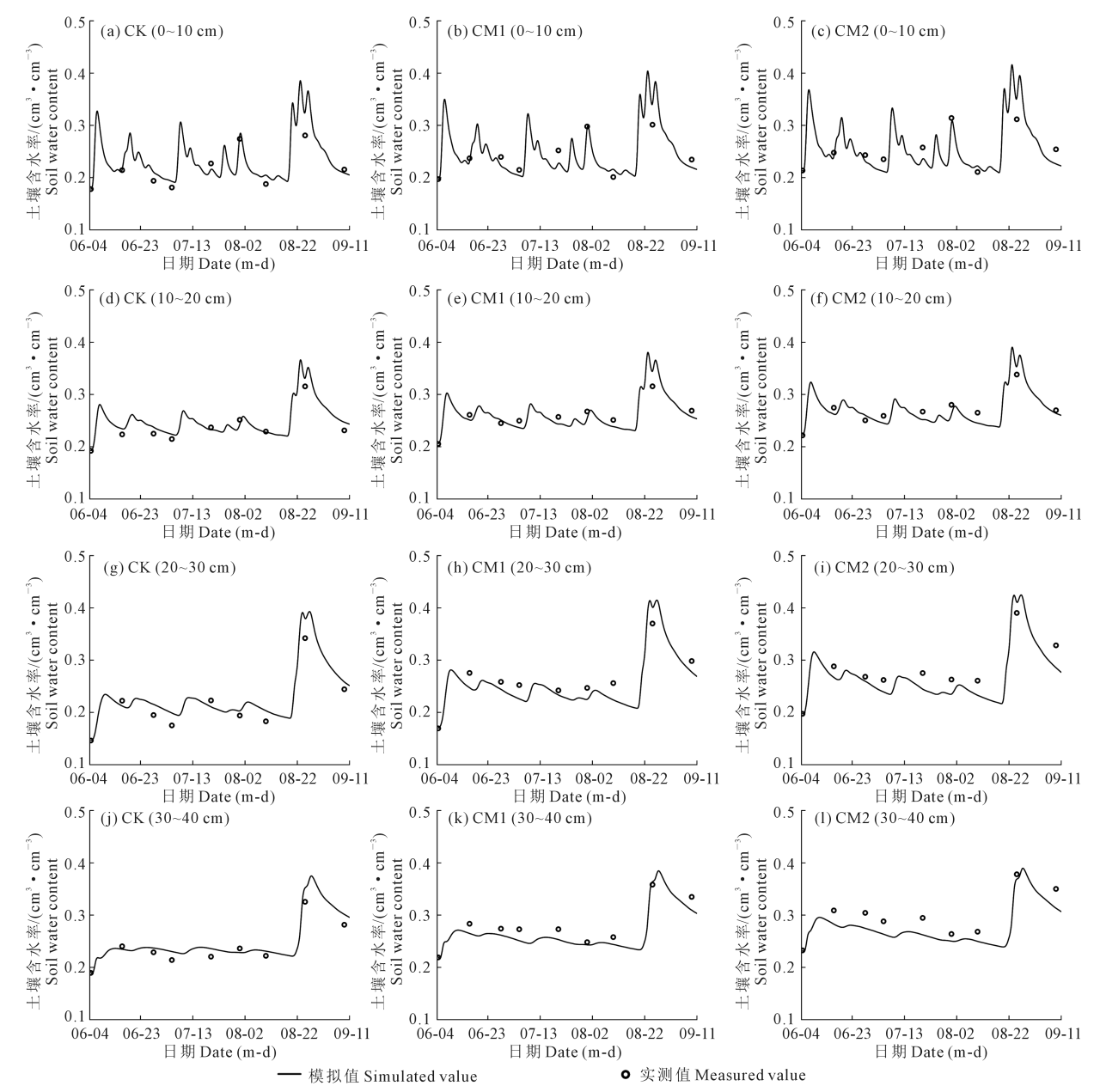


图 2 玉米生育期间土壤含水率变化过程及模拟情况

Fig.2 Change process and simulation of soil water content during maize growth

表 5 各处理不同生育期 0~40 cm 土层平均含水率 / (cm³ · cm⁻³)

处理 Treatment	苗期 Seeding stage	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Grouting stage	成熟期 Maturity
CK	0.2504±0.0047c	0.2454±0.0017b	0.2471±0.0030b	0.2389±0.0031b	0.2936±0.0024b
CM1	0.2682±0.0053b	0.2585±0.0073a	0.2582±0.0055a	0.2487±0.0011a	0.3039±0.0002a
CM2	0.2811±0.0062a	0.2667±0.0004a	0.2648±0.0053a	0.2541±0.0039a	0.3097±0.0055a

注:表中数据为“均值±标准差”,同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note:Data in the table are “mean±standard deviation”, different letters after the data in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the same below.

3.2.2 不同秸秆覆盖量下土壤盐分动态 图 3 反映了玉米生育期内不同土层各处理土壤盐分动态变化情况,由图 3 可知,同一土层各处理土壤电导率随时间的波动趋势相似,波动幅度随土层深度增加

而降低。不同秸秆覆盖量下玉米各生育时期 0~40 cm 土层平均电导率如表 6 所示,在玉米不同生育期内 CM1 和 CM2 处理土壤平均电导率均显著低于 CK 处理。与 CK 处理土壤平均电导率相比,苗期 CM1 和 CM2 处理分别降低 7.76% 和 12.94%,拔节期 CM1 和 CM2 处理分别降低 7.21% 和 11.77%,抽雄期 CM1 和 CM2 处理分别降低 6.64% 和 10.51%,灌浆期 CM1 和 CM2 处理分别降低 6.19% 和 9.53%,成熟期 CM1 和 CM2 处理分别降低 5.42% 和 7.82%。

相同土层深度下,土壤电导率随秸秆覆盖量增

加而降低。在玉米全生育期内,CM1 和 CM2 处理 0~10 cm 土层平均电导率较 CK 处理分别降低8.93% 和 12.41%,10~20 cm 土层平均电导率较 CK 处理分别降低 7.08% 和 10.50%,20~30 cm 土层平均电导率较 CK 处理分别降低 5.53% 和 9.29%,30~40 cm 土层平均电导率较 CK 处理分别降低 4.61% 和 8.87%。分析认为是秸秆覆盖通过降低光照对土壤的辐射作用,减少土壤水分蒸发,延长水分在土层停滞时间,使土壤中可溶性盐加快溶解速率,从而提高土壤的抑盐效果^[24]。

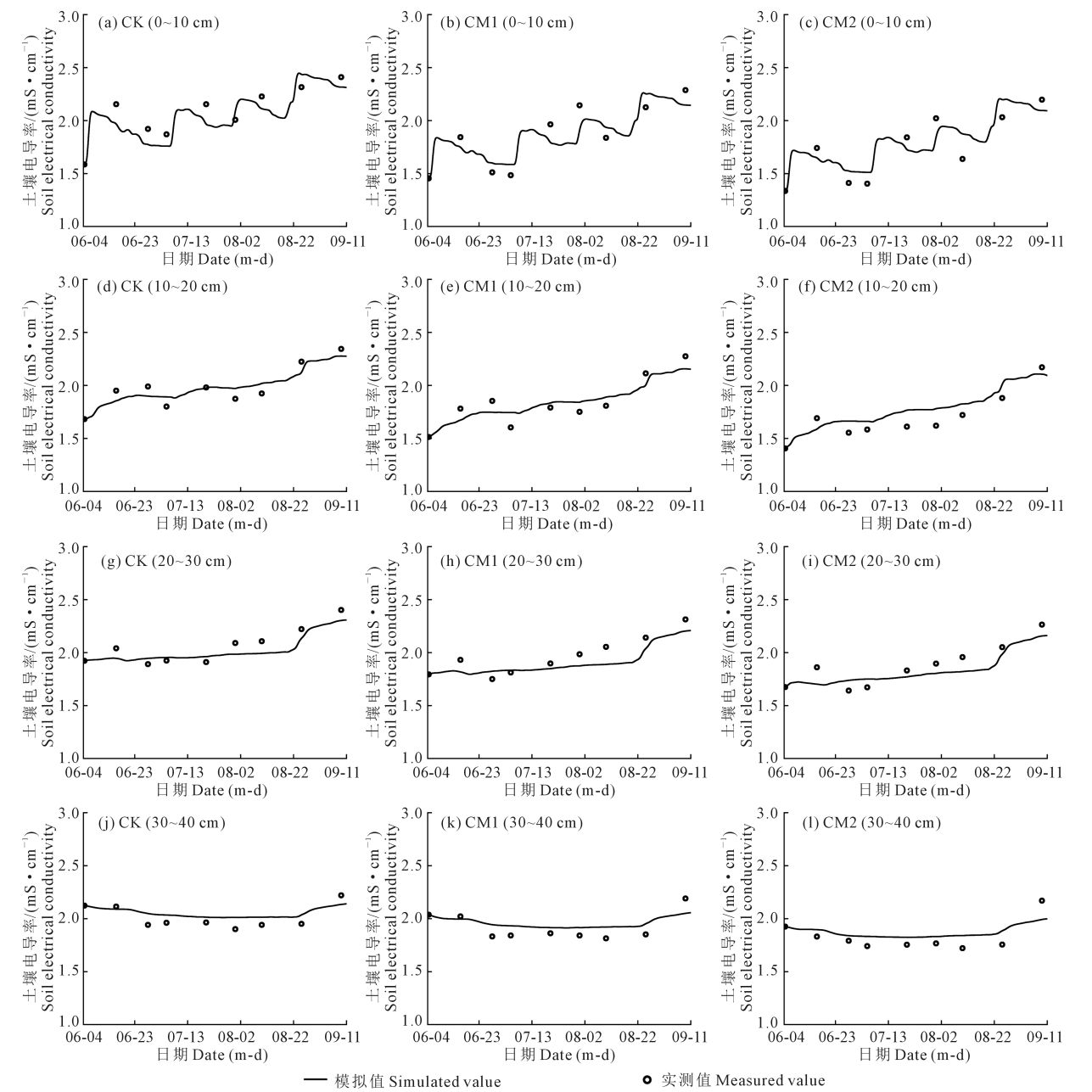


图 3 玉米生育期间土壤电导率变化过程及模拟情况

Fig.3 Change process and simulation of soil electrical conductivity during maize growth

表 6 各处理不同生育期 0~40 cm 土层平均电导率/(mS·m⁻¹)

Table 6 Average soil electrical conductivity of 0~40 cm soil layer in different growth stages of each treatment

处理 Treatment	苗期 Seeding stage	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Grouting stage	成熟期 Maturity
CK	1.947±0.026a	1.929±0.061a	1.988±0.033a	2.035±0.036a	2.212±0.021a
CM1	1.796±0.025b	1.790±0.045b	1.856±0.009b	1.909±0.062b	2.092±0.043b
CM2	1.695±0.043c	1.702±0.019b	1.779±0.042c	1.841±0.037b	2.039±0.009b

4 结 论

HYDRUS-1D 模型能够模拟研究区不同秸秆覆盖量条件下玉米生育期间农田生态系统的土壤水盐运移过程,模拟结果较好地反映出了土壤水盐动态分布和随生育阶段的变化规律。土壤水分模拟精度高于土壤盐分模拟精度,且随秸秆覆盖量的增加土壤水盐模拟精度稍有降低。秸秆覆盖可提高土壤水分含量,抑制土壤盐分积累。随秸秆覆盖量增加,秸秆覆盖对土壤水盐运移的作用效果更加明显。作物生育期内土壤含水率与电导率的波动幅度随土层深度增加而降低。0~40 cm 土层中,秸秆半量覆盖较裸地作物生育期土壤平均含水率提高 3.38%~5.78%,土壤平均电导率降低 4.61%~8.93%;秸秆全量覆盖较裸地作物生育期土壤平均含水率提高 5.26%~9.62%,平均电导率降低 8.87%~12.41%。

参 考 文 献:

[1] 贾洪雷,马成林,李慧珍,等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 28-34.
JIA H L, MA C L, LI H Z, et al. Tillage soil protection of black soil zone in Northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 28-34.

[2] 隋虹均,宋戈,高佳. 东北黑土区典型地域耕地生态退化时空分异——以富锦市为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2277-2291.
SUI H J, SONG G, GAO J. Spatio-temporal differentiation of cultivated land ecological degradation in typical black soil regions of Northeast China: a case study of Fujincity[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(9): 2277-2291.

[3] WANG S C, ZHAO Y W, WANG J Z, et al. The efficiency of long-term straw return to sequester organic carbon in Northeast China's cropland[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(2): 436-448.

[4] 陈桂平,郑德阳,郭瑶,等. 绿洲灌区地膜秸秆交替覆盖玉米农田土壤水分利用特征[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 54-63.
CHEN G P, ZHENG D Y, GUO Y, et al. Soil water use characteristics of maize field alternatively mulched with straw and plastic film in oasis irrigation area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 54-63.

[5] 孙博,解建仓,汪妮,等. 不同秸秆覆盖量对盐渍土蒸发、水盐变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 246-250.
SUN B, XIE J C, WANG N, et al. Effect of straw mulching on change

of evaporation and water-salt in the saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 246-250.

[6] 纪文宁,程宏波,李亚伟,等. 覆盖方式对旱地马铃薯阶段耗水量特征和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 228-235.
JI W N, CHENG H B, LI Y W, et al. Effects of mulching methods on water consumption and yield of potato in dryland farming[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 228-235.

[7] PENG Z, TING W, HAIXIA W, et al. Effects of straw mulch on soil water and winter wheat production in dryland farming[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10725.

[8] 潘延鑫,罗钊,贾忠华,等. 基于 HYDRUS 模型的盐碱地土壤水盐运移模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 135-142.
PAN Y X, LUO W, JIA Z H, et al. The simulation of water and salt transportation by HYDRUS model in Lubotan of Shaanxi, China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 135-142.

[9] 李亮,李美艳,张军军,等. 基于 HYDRUS-2D 模型模拟耕荒地水盐运移规律[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 66-71.
LI L, LI M Y, ZHANG J J, et al. The moving rule of salt and water in cultivated land and saline wasteland based on HYDRUS-2D model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 66-71.

[10] CHEN N, LI X Y, ŠIMUNEK J, et al. Evaluating the effects of biodegradable film mulching on soil water dynamics in a drip-irrigated field[J]. Agricultural Water Management, 2019, 226: 105788.

[11] 余根坚,黄介生,高占义. 基于 HYDRUS 模型不同灌水模式下土壤水盐运移模拟[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 826-834.
YU G J, HUANG J S, GAO Z Y. Study on water and salt transportation of different irrigation modes by the simulation of HYDRUS model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 826-834.

[12] KANZARI S, BEN NOUNA B, BEN MARIEM S, et al. HYDRUS-1D model calibration and validation in various field conditions for simulating water flow and salts transport in a semi-arid region of Tunisia[J]. Sustainable Environment Research, 2018, 28(6): 350-356.

[13] 李亮,史海滨,贾锦凤,等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31-35.
LI L, SHI H B, JIA J F, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 31-35.

[14] TAFTEH A, SEPASKHAH A R. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields[J]. Agricultural Water Management, 2012, 113: 19-29.

[15] DAHIYA R, INGWERSEN J, STRECK T. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: experimental findings and modeling[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2): 52-63.

[16] ZENG WZ, LEI G Q, ZHA YY, et al. Sensitivity and uncertainty analysis of the HYDRUS-1D model for root water uptake in saline soils[J]. Crop and Pasture Science, 2018, 69(2): 163-173.

[17] MONTEIRO A L N, DE A MONTENEGRO AA, MONTENEGROS M G, et al. Partial salt leaching evaluation in an irrigated fluvissoil through computational modeling[J]. Engenharia Agrícola, 2009, 29(2): 207-220.

[18] 何康康, 杨艳敏, 杨永辉. 基于 HYDRUS-1D 模型的华北低平原区不同微咸水利用模式下土壤水盐运移的模拟[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1059-1070.

HE K K, YANG Y M, YANG Y H. HYDRUS-1D model simulation of soil water and salt movement under various brackish water use schemes in the North China Lowplain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1059-1070.

[19] 伊大巍. 基于阿城区地下水资源的可持续发展[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(8): 199-200.

YI D W. Sustainable development of groundwater resources in Acheng District[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2012, 40(8): 199-200.

[20] 张俊鹏. 咸水灌溉覆膜棉田水盐运移规律及耦合模拟[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.

ZHANG J P. Coupling simulation of soil water-salt movement in plastic film mulched cotton field under saline water irrigation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.

(上接第 31 页)

[37] 黄绢, 陈存, 张伟溪, 等. 干旱胁迫对转 JERF36 银中杨苗木叶片解剖结构及光合特性的影响[J]. 林业科学, 2017, 53(5): 8-15.

HUANG J, CHEN C, ZHANG W X, et al. Effects of drought stress on anatomical structure and photosynthetic characteristics of transgenic JERF36 *Populus alba* × *P. berolinensis* seedling leaves[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(5): 8-15.

[38] 常英俏, 徐文远, 穆立蔷, 等. 干旱胁迫对 3 种观赏灌木叶片解剖结构的影响及抗旱性分析[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(3): 36-40.

CHANG Y Q, XU W Y, MU L Q, et al. Effects of drought stress on anatomical structure of leaves of three species of shrubs and their drought resistances [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(3): 36-40.

[39] 崔大练, 马玉心, 王俊. 干旱胁迫下紫穗槐叶片解剖特征的变化[J]. 广西植物, 2011, 31(3): 332-337.

CUI D L, MA Y X, WANG J. Changes on the anatomical characteristics of *Amorpha fruticosa* leaves under different drought stress gradient[J]. Guihaia, 2011, 31(3): 332-337.

[40] 喻菊芳, 朱连成, 魏天军, 等. 灵武长枣品种特性及规范化栽培技术研究与示范[J]. 宁夏农林科技, 2007(2): 1-4.

YU J F, ZHU L C, WEI T J, et al. Research and demonstration of varieties characteristics and standardized cultivation techniques of *Ziziphus jujuba* Mill cv. Lingwuchangzao[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2007(2): 1-4.

[41] MARERI L, ROMI M, CAI G. Arabinogalactan proteins: actors or spectators during abiotic and biotic stress in plants? [J]. Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology, 2019, 153(1): 173-185.

[21] 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 G S, SHI H B, LI X Y, 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, 2021, 37(8): 87-98.

[22] 丁超明, 吴鹏年, 岳玲, 等. 基于 HYDRUS-1D 模拟耕作方式对夏玉米农田水分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(12): 24-31.

DING C M, WU P N, YUE L, et al. Modelling the effect of tillage on soil water dynamics in corn field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(12): 24-31.

[23] TAO Z Q, LI C F, LI J J, et al. Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in Northern Huang-Huai-Hai Valley[J]. The Crop Journal, 2015, 3(5): 445-450.

[24] 范雷雷, 史海滨, 李瑞平, 等. 秸秆覆盖对沟灌水盐迁移与玉米水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 283-293, 319.

FAN L L, SHI H B, LI R P, et al. Effects of straw mulching on soil water-salt transportation and water use efficiency of maize under furrow irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 283-293, 319.

[42] LESZCZUK A, SZCZUKA E, ZDUNEK A. Arabinogalactan proteins: distribution during the development of male and female gametophytes [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 135: 9-18.

[43] DOMON J M, BALDWIN L, ACKET S, et al. Cell wall compositional modifications of *Miscanthus* ecotypes in response to cold acclimation[J]. Phytochemistry, 2013, 85: 51-61.

[44] 邵畅畅, 罗仙英, 丁贵杰, 等. 干旱对马尾松茎叶水力特征及解剖特性的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(5): 937-945.

SHAO C C, LUO X Y, DING G J, et al. Effects of drought on hydraulic and anatomical characteristics of stem and leaf in *Pinus massoniana*[J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(5): 937-945.

[45] 徐春香, 陈杰忠, 梁立峰. 低温对香蕉叶片中甘油等物质含量的影响[J]. 果树科学, 2000, 17(2): 105-109.

XU C X, CHEN J Z, LIANG L F. Effects of low temperature on the contents of glycerol, starch and sugars in banana leaves[J]. Journal of Fruit Science, 2000, 17(2): 105-109.

[46] 秦源, 陈丹, 赵洁. 烟草柱头和花柱中阿拉伯半乳糖蛋白的定位[J]. 植物生理与分子生物学报, 2006, 32(3): 307-314.

QIN Y, CHEN D, ZHAO J. The localization of arabinogalactan-proteins in stigma and style of *Nicotiana tabacum* L.[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006, 32(3): 307-314.

[47] ELLIS M, EGELUND J, SCHULTZ C J, et al. Arabinogalactan-proteins: key regulators at the cell surface? [J]. Plant Physiology, 2010, 153(2): 403-419.

[48] MOTOSE H, SUGIYAMA M, FUKUDA H. A proteoglycan mediates inductive interaction during plant vascular development[J]. Nature, 2004, 429(6994): 873-878.