

秸秆还田与种植密度对黑土区大豆农田 土壤水氮和产量的影响

孙伟丽^{1,2}, 刘继龙^{1,2*}, 曹晓强^{1,2}, 李济桢^{1,2}, 王 昊^{1,2}, 王胤淇^{1,2}, 何语凝^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 农业农村部农业水资源高效利用重点实验室(东北农业大学), 哈尔滨 150030)

摘 要: 为揭示秸秆还田与种植密度对黑土区土壤水氮动态和大豆产量的影响机制, 设置2种秸秆还田方式(秸秆还田、秸秆不还田)和3种植植密度(20万、25万、30万株·hm⁻²), 研究不同处理土壤水分与土壤氮素的时空变化特征, 利用DSSAT模型评估不同秸秆还田与种植密度模式对土壤水氮和大豆产量的影响。结果表明: 模型模拟的归一化均分根误差(NRMSE)为0.29%~13.26%, 一致性指数(d)为0.81~0.99, DSSAT模型具有较高的模拟精度, 可用于黑土区秸秆还田与密植条件下土壤水氮、作物产量动态变化预测。秸秆还田显著提高土壤含水率、铵态氮质量分数及大豆产量, 降低硝态氮质量分数; 增加种植密度可提高铵态氮质量分数和大豆产量, 降低土壤含水率和硝态氮质量分数; 秸秆还田与增加种植密度组合处理可优化水分和氮素利用效率, 组合处理中, 种植密度对土壤水氮和产量的影响更显著。

关键词: DSSAT; 秸秆还田; 种植密度; 大豆产量; 土壤水氮

中图分类号: S152.7; S155.2*7

文献标志码: A

文章编号: 1005-9369(2025)03-0133-13

孙伟丽, 刘继龙, 曹晓强, 等. 秸秆还田与种植密度对黑土区大豆农田土壤水氮和产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2025, 56(3): 133-145. DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2025.03.013.

Sun Weili, Liu Jilong, Cao Xiaoliang, et al. Effects of straw return and planting density on soil water-nitrogen dynamics and soybean yield in black soil region[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2025, 56(3): 133-145. (in Chinese with English abstract) DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2025.03.013.

Effects of straw return and planting density on soil water–nitrogen dynamics and soybean yield in black soil region/SUN Weili^{1,2}, LIU Jilong^{1,2}, CAO Xiaoliang^{1,2}, LI Jizhen^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, WANG Yinqi^{1,2}, HE Yuning^{1,2}(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To investigate the effects of straw return and planting density on soil water-nitrogen dynamics and soybean yield in the black soil region, a field experiment was conducted using two straw management practices (with straw and without straw) and three planting densities (2.0×10⁵, 2.5×10⁵, and 3.0×10⁵ plants·hm⁻²). Soil moisture and nitrogen dynamics were analyzed, and the DSSAT model was employed to evaluate the impacts of different straw return and planting density combinations. The results showed that NRMSE values ranged from 0.29% to 13.26% and d-values was between 0.81 and

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079030); 国家重点研发计划项目子课题(2121YFD1500802-2)。

第一作者简介: 孙伟丽(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为农业水土资源高效利用。E-mail: sunveil@163.com。

*通信作者: 刘继龙, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业水利工程。E-mail: liujilong@neau.edu.cn。

0.99. The DSSAT model provided accurate predictions of soil water-nitrogen dynamics and crop yield under straw return and dense planting conditions in the black soil region. Straw return significantly increased soil moisture content, ammonium nitrogen mass fraction, and soybean yield, while reducing nitrate nitrogen mass fraction. Increased planting density enhanced ammonium nitrogen mass fraction and soybean yield, but decreased soil moisture content and nitrate nitrogen mass fraction. The combination of straw return and higher planting density improved water and nitrogen use efficiencies, with planting density having a greater influence on soil water-nitrogen dynamics and yield.

Key words: DSSAT; straw return; planting density; soybean yield; soil water-nitrogen dynamics

东北黑土区是我国大豆主产区, 占全国总产量56%^[1]。近年来, 黑土退化导致黑土区土壤保水能力降低、对氮素养分的调控能力减弱^[2], 限制大豆产量提升。秸秆还田, 对增强土壤保水能力、提升氮素利用率具有较好效果^[3], 有助于提高粮食产量。适当增加种植密度, 可减少资源浪费, 协调大豆个体生长与群体产量发展^[4-5]。因此, 研究秸秆还田与种植密度对东北黑土区土壤水、氮资源管理具有重要意义。

秸秆还田可通过促进氮的固定与矿化周转, 提高土壤氮素利用效率^[6], 为作物提供必需的营养元素, 有效降低氮损失。此外, 秸秆还田还可提高土壤保水能力, 促进土壤水分渗透, 降低水分蒸发, 适宜的种植密度能够充分利用有限的水资源, 两者均有利于提高作物产量和水分利用效率^[7]。一定范围内, 作物产量伴随种植密度的增加同步提升^[8-9]。大豆产量在一定范围内相对稳定, 最高产量仅在最佳种植密度下实现, 而最佳种植密度受秸秆还田和栽培措施等多因素影响。目前, 秸秆还田对大豆最佳种植密度影响的研究相对较少。因此, 明确秸秆还田与种植密度对大豆产量、水分利用效率和氮素利用效率的影响, 确定秸秆还田条件下适宜的种植密度, 对大豆增产和资源高效利用具有重要意义。

秸秆还田对土壤理化性质的影响具有长期性特征, 且受水分、肥料、土壤质地、气候等多重

因素影响^[10-11]。因此, 有必要通过模拟模型结合田间试验, 为选择秸秆还田与种植密度提供依据。DSSAT v4.8 模型集成多个作物系统模型、土壤碳氮模型、水分模型及一系列作物和土壤管理选项^[12], 可较好模拟长期情景下的土壤水、氮动态。DSSAT 已被成功应用于模拟排水管理对氮损失和作物产量的影响, 评估大豆的水分生产力^[13-14]。基于此, 本研究以黑土区大豆农田为研究对象, 通过设置不同秸秆还田与种植密度组合模式, 探讨黑土区土壤水、氮的时空运移规律和大豆产量的变化特征, 分析 DSSAT 模型对黑土区土壤水、氮变化和大豆产量模拟能力, 为优化研究区秸秆还田与种植密度模式提供支持。

1 试验区概况

试验在东北农业大学实验实习与示范中心阿城基地(地理中心坐标为45°31'N、127°3'E)进行。试验土壤为黑土, 试验地点属于温带大陆性季风气候, 平均海拔高程162 m, 年平均气温3.3℃, 无霜期135~140 d, 年平均日照时间2 550 h, 年平均降水量590 mm。基于耕作层厚度和作物根系分布特点, 将土层深度(h)划分为 $0 < h \leq 10$ cm、 $10 < h \leq 20$ cm、 $20 < h \leq 30$ 和 $30 < h \leq 40$ cm, 4个土层, 确保土壤分层对土壤水、氮动态的适用性和模型模拟的准确性, 土壤物理参数如表1所示。

表 1 试验区土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties of the experimental area

土壤深度(h)/cm Soil depth	有机碳/% Soil organic carbon	砂粒/% Sand content	粉粒/% Silt content	黏粒/% Clay content	pH	田间持水量/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) Field capacity	饱和含水量/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) Saturated water content
$0 < h \leq 10$	1.86	24.26	43.32	32.42	6.55	0.34	0.47
$10 < h \leq 20$	1.72	23.33	43.12	33.55	6.59	0.33	0.46
$20 < h \leq 30$	1.58	22.39	42.93	34.68	6.64	0.33	0.46
$30 < h \leq 40$	1.46	22.02	41.73	36.25	6.67	0.35	0.45

2 研究方法

2.1 田间管理与试验设计

试验地于 2021—2023 年连续 3a 进行秸秆还田处理，利用 2023 年数据进行模拟验证。试验用大豆品种为“黑农 63”。试验设置秸秆还田和种

植密度 2 个因素。秸秆还田设 2 个水平：秸秆还田(J)和秸秆不还田(C)。种植密度设 3 个水平：M0(20 万株·hm⁻²)、M1(25 万株·hm⁻²)和 M2(30 万株·hm⁻²)，以秸秆不还田 20 万株·hm⁻²处理为对照组。试验共 6 个处理，每个处理 3 次重复，共 18 个试验小区。试验设计如表 2 所示。

表 2 不同秸秆还田与种植密度的试验设计

Table 2 Experimental design of different straw return and planting densities

秸秆还田类型 Types of straw return	种植密度/(万株·hm ⁻²) Planting density	试验处理 Experimental treatment
秸秆还田 With straw	20	JM0: 秸秆还田 + 20 万株·hm ⁻²
	25	JM1: 秸秆还田 + 25 万株·hm ⁻²
	30	JM2: 秸秆还田 + 30 万株·hm ⁻²
秸秆不还田 Without straw	20	CK: 秸秆不还田 + 20 万株·hm ⁻²
	25	CM1: 秸秆不还田 + 25 万株·hm ⁻²
	30	CM2: 秸秆不还田 + 30 万株·hm ⁻²

供试肥料为“撒可富”复合肥(N-P₂O₅-K₂O: 15-23-10)，化肥施用量为 331.57 kg·hm⁻²。秸秆还田处理中，秸秆施用量为 0.65 kg·m⁻²，玉米秸秆在前一年秋收后使用机械粉碎至长度 20 cm^[15]，并以 25 cm 翻耕深度混入土壤中^[16]。大豆播种时间为 5 月 12 日；5 月 26 日进入幼苗期；6 月 13 日进入分枝期；7 月 13 日进入花荚期；8 月 1 日进入鼓粒期；8 月 24 日进入成熟期；9 月 26 日收获。

2.2 土壤样品采集及相关指标的测定

每隔 10 cm 采集 0~40 cm 土层的原状土样，利用环刀法测定土壤饱和含水量；烘干法测量土壤含水率；激光粒度分析仪测定土壤粒径分布；pH 计测量土壤 pH；AA3 连续流动分析仪测量土壤铵态氮与硝态氮质量分数；总有机碳分析仪测量有机碳质量分数；成熟期每个小区选取 3 株大豆，测量大豆产量。

大豆生育期耗水量计算公式如下^[17]：

$$E_T = P + U - R - F + \Delta W \tag{1}$$

式中： E_T 为大豆生育期耗水量(mm)； U 为地下水补给量(mm)； R 为径流量(mm)； P 为降水量(mm)； F 为深层渗透量(mm)； ΔW 为从种植到收获期间土壤剖面储水量变化。

因试验区地下水埋深较大，地下水对土壤水分的补给作用忽略不计。同时，试验区位于平坦的农田区域，采用垄作种植方式，且田间管理措施完善，极少发生地表径流，因此忽略径流量。此

外，因试验区土壤为东北黑土，具有较好的水分保持能力，且试验期间降水量较为均匀，深层渗透量较小，忽略深层渗透。因此，将式(1)简化为：

$$E_T = P + \Delta W \tag{2}$$

大豆生育期水分利用效率(WUE)和氮素利用效率(NUE)分别采用式(3)和(4)计算。

$$WUE = Y/E_T \tag{3}$$

$$NUE = Y/N \tag{4}$$

式中： Y 为产量(kg·hm⁻²)； N 为氮施用量(kg·hm⁻²)。

2.3 DSSAT-CROPGRO-Soybean 模型数据采集

2.3.1 模型参数

DSSAT 所需气象数据包括逐日最高气温(℃)、最低气温(℃)、太阳辐射(MJ·m⁻²)和日降水量(mm)。数据来自国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>)，使用 WeatherMan 进行模型输入。2023 年全生育期每日最高气温、最低气温和降水量如图 1 所示。土壤数据包括田间持水量、饱和含水量、土壤质地、有机碳质量分数及 pH 等(见表 1)。田间管理数据主要包括播种日期、施肥日期、施肥量、种植密度、秸秆还田量等。

利用 DSSAT-GLUE 模块，在输入逐日气象数据、土壤数据和田间管理数据基础上，通过建立试验文件和生育观测数据文件，结合试错法调试作物遗传品种参数。对 GLUE 模块链接 R 语言进行调试和优化，参数运行次数 12 000 次，参数校准数据如表 3 所示。

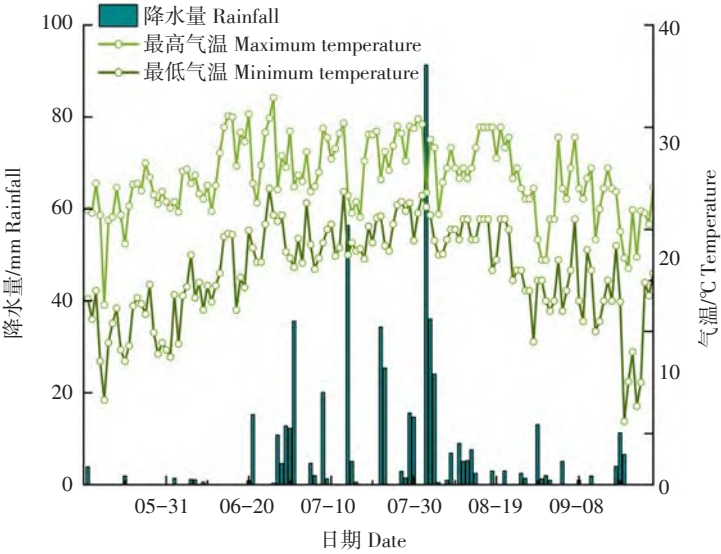


图 1 生育期降水量、最高气温和最低气温

Fig. 1 Rainfall, maximum temperature and minimum temperature during the growth period

表 3 大豆品种遗传参数

Table 3 Genetic parameters of soybean varieties

参数名称 Parameter name	参数含义 Parameter description	参数取值范围 Parameter range	参数设定值 Parameter value
CSDL	临界短日长/h	11.78~14.60	13.00
PPSEN	随着时间变化，生长发育对光周期反应的相对斜率/(1·h ⁻¹)	0.13~0.39	0.22
EM-FL	出苗至始花阶段所需热时间/(℃·d)	9.00~28.90	26.26
FL-SH	始花至始荚阶段所需热时间/(℃·d)	5.00~10.00	8.30
FL-SD	始花至鼓粒期所需热时间/(℃·d)	11.00~22.00	12.45
SD-PM	鼓粒期至生理成熟所需热时间/(℃·d)	22.00~37.70	29.38
FL-LF	始花至叶片凋落所需热时间/(℃·d)	18.00~26.00	28.00
LFMAX	最适条件下叶片最大光合速率/(mg·m ⁻² ·s ⁻¹)	1.00~1.40	1.01
SLAVR	标准生长条件下比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹)	300.00~400.00	392.80
SIZLF	最大叶面积(3个叶)/cm ²	137.00~230.00	154.30
XFRT	每日生长中，光合产物分配给种子和外壳的最大比例/%	1.00~1.00	1.00
WTPSD	最大单粒质量/g	0.15~0.19	0.18
SFDUR	标准生长条件下豆荚内籽粒灌浆持续时间/(℃·d)	17.00~25.50	24.44
SDPDV	标准生长条件下各豆荚内平均粒数量/个	1.70~2.44	1.84
PODUR	最佳条件下栽培种植到达灌浆末期所需时间/(℃·d)	10.00~12.00	12.00
THRSH	成熟期的脱粒阈值/%	77.00~78.00	77.00
SDPRO	籽粒中的蛋白质质量比例/%	0.40~0.41	0.41
SDLIP	含油率/%	0.20~0.21	0.21

2.3.2 模型校验评估方法

为评估模型性能，使用归一化均方根误差(NRMSE)和一致性指数(*d*)对模拟与实测的作物产

量、土壤水分含量和土壤氮素质量分数进行对比分析。*NRMSE*表示作物模拟值与实测值的相对误差，*d*表示模拟值与实测值的一致性。

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \times \frac{100\%}{\bar{M}} \tag{5}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S'_i| + |M'_i|)^2} \tag{6}$$

式中： S_i 和 M_i 分别为模拟值和实测值； n 为值的数量； $\bar{M}$ 为实测值的平均值； $S'_i = S_i - \bar{M}$ ， $M'_i = M_i - \bar{M}$ 。 $NRMSE \leq 10\%$ ，表示模拟结果极好； $10\% < NRMSE \leq 20\%$ ，表示模型结果性能较好； $20\% < NRMSE \leq 30\%$ ，表示模拟结果一般； $NRMSE > 30\%$ ，表示模拟结果较差。当 $d \geq 0.9$ 时，表示模拟值和实测值间拟合度非常好；当 $0.8 \leq d < 0.9$ 时，表示模型模拟性能较好；当 $0.7 \leq d < 0.8$ 时，表示模型模拟性能中等； $d < 0.7$ 时，表示模型模拟性能较差^[18]。

3 结果与分析

3.1 模型检验

为评估 DSSAT 模型在土壤含水率、氮素动态及大豆产量模拟中的精度，采用 $NRMSE$ 和 d 对模拟结果与实测数据进行对比分析，相关对比结果如表 4 所示。

结果表明，DSSAT 模型在土壤含水率模拟中的 $NRMSE$ 范围为 0.29%~10.71%， d 为 0.93~0.99。根据评价标准，说明本研究 DSSAT 模型对土壤含水率的模拟精度较高。特别是在常规种植密度

下，秸秆还田处理的模拟精度最高，且在相同种植密度下，秸秆还田处理的模拟精度略高于秸秆不还田处理。在相同秸秆还田条件下，随着种植密度增加，模拟精度逐渐下降，这可能与高种植密度下，土壤水分和养分分布情况复杂、作物根系竞争加剧，导致土壤水、氮变化不均，模型模拟精度下降。DSSAT 模型对土壤氮素的模拟效果也较好。对于铵态氮，模拟值与实测值的 $NRMSE$ 范围为 1.18%~13.26%， d 为 0.96~0.99；硝态氮的 $NRMSE$ 范围为 0.67%~3.78%， d 为 0.97~0.99；表明 DSSAT 模型可较好预测不同处理下土壤氮素变化，特别是在 CK 处理下，模拟精度较高。相比之下，在相同种植密度下秸秆不还田处理的模拟精度较高，这可能是因秸秆不还田的土壤水分和养分分布较为简单，降低了模型的不确定性。在大豆产量模拟方面，DSSAT 模型的模拟精度表现较好， $NRMSE$ 范围为 1.87%~5.98%， d 为 0.81~0.99。在秸秆还田条件下，随着种植密度增加， $NRMSE$ 逐渐增大， d 同步提高。这表明在较高种植密度下，DSSAT 模型对产量变化趋势的拟合能力较强，但模拟误差相应增大，可能是因较高种植密度导致土壤水分和养分分布更为复杂，影响模型预测精度。综上所述，DSSAT 模型在本研究中的应用效果良好，可较为准确地模拟不同处理条件下土壤氮素动态与产量变化。

表 4 模型精度评价

Table 4 Simulation accuracy evaluation

处理 Treatment	土壤含水率 Soil moisture content		土壤铵态氮 Soil ammonium nitrogen		土壤硝态氮 Soil nitrate nitrogen		大豆产量 Soybean yield	
	$NRMSE/\%$	d	$NRMSE/\%$	d	$NRMSE/\%$	d	$NRMSE/\%$	d
JM0	0.29	0.93	2.84	0.99	1.28	0.99	1.87	0.81
JM1	2.43	0.99	4.09	0.99	1.79	0.99	4.43	0.85
JM2	4.65	0.97	13.26	0.99	1.75	0.98	5.98	0.85
CK	3.19	0.98	1.18	0.99	0.67	0.99	4.08	0.83
CM1	6.57	0.96	1.62	0.96	3.78	0.99	3.55	0.85
CM2	10.71	0.95	2.39	0.96	2.97	0.97	3.93	0.99

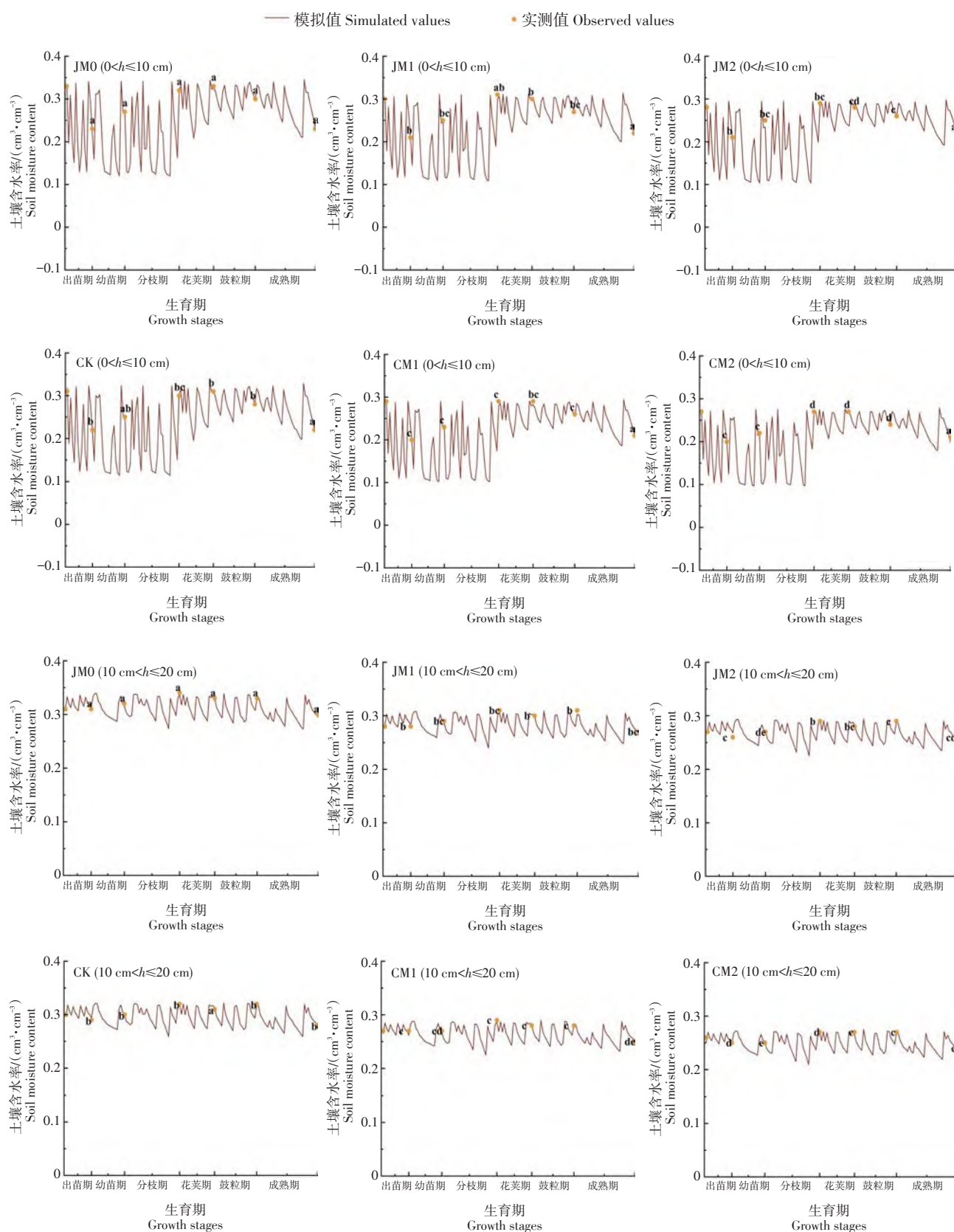
3.2 不同秸秆还田与种植密度对土壤含水率的影响

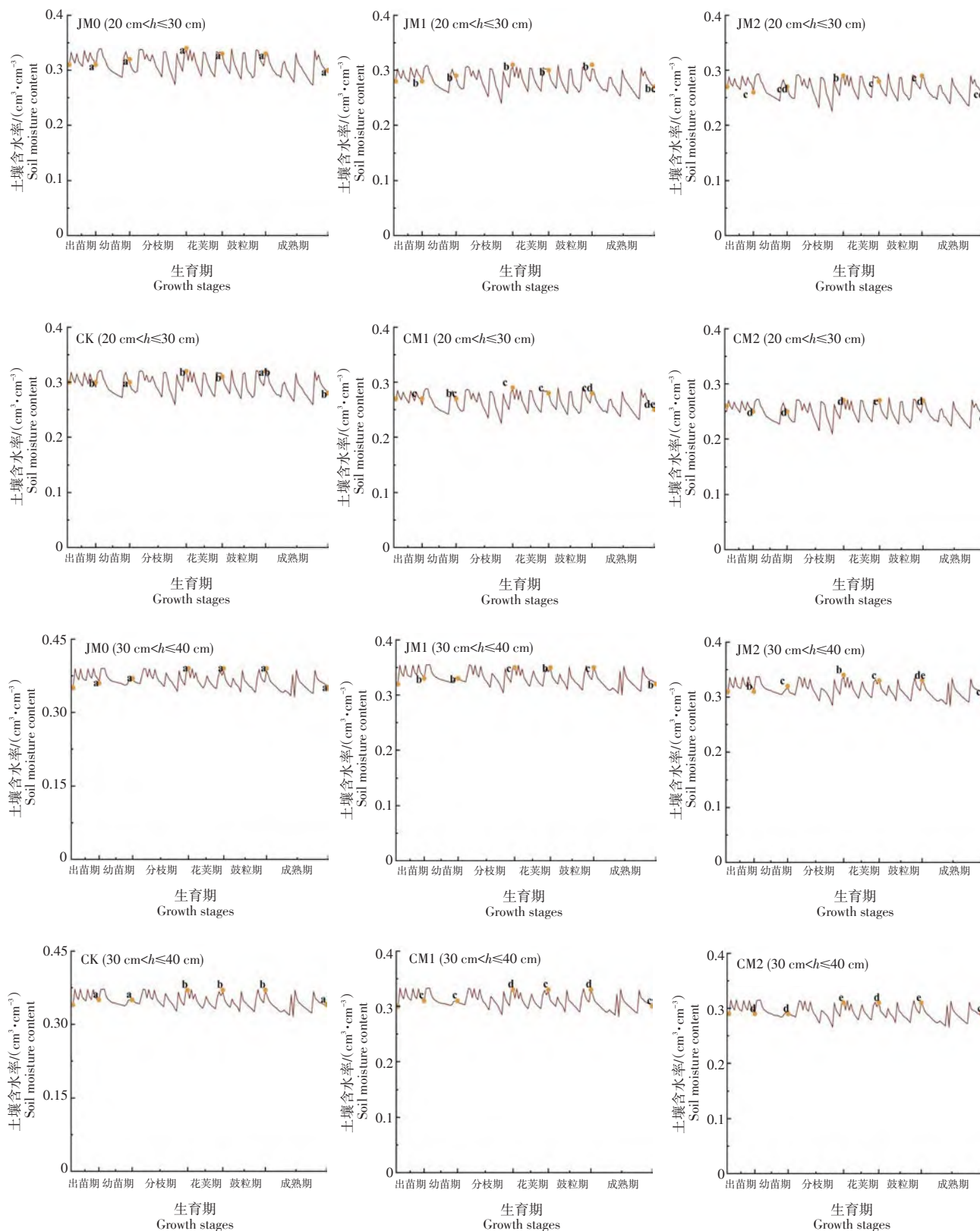
如图 2 所示，不同秸秆还田与种植密度条件下，不同土层土壤含水率的模拟值和实测值。试验期间降水主要集中在分枝期和花荚期，其中 5 月降水量为 7.3 mm、6 月份降水量为 100.2 mm、7 月

份降水量为 332.1 mm、8 月份降水量为 69.8 mm、9 月份降水量为 24.8 mm。不同处理在各土层和生育期土壤含水率差异显著 ($P < 0.05$)。JM0 处理较 CK 处理土壤含水率提升 3.70%~9.22%，秸秆还田显著提高土壤含水率；CM1 和 CM2 处理与 CK 处

理相比, 土壤含水率下降幅度分别为 7.63%~10.63% 和 12.60%~15.63%, 种植密度增加导致土壤含水率降低; JM1 和 JM2 处理与 CK 处理相比,

在不同生育期土壤含水率分别下降 0.01%~4.27% 和 5.37%~10.24%, 秸秆还田与增加种植密度处理下, 种植密度对土壤含水率影响较大。





不同小写字母表示不同处理在相同土层相同生育时期差异显著($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments within the same soil layer and growth stage.

图2 大豆生育期土壤含水率变化过程及模拟情况

Fig. 2 Soil moisture content dynamics and simulation during the soybean growth period

随生育期推进,不同处理土壤含水率呈先增后减变化趋势。相同秸秆还田条件下,不同生育期不同处理随种植密度增加土壤含水率逐渐降低;相同种植密度条件下,不同生育期秸秆还田JM0处理比秸秆不还田CK处理土壤含水率提升幅度分别为4.49%、5.88%、6.22%、5.50%、5.41%和4.97%,呈先增后减趋势。不同处理土壤含水率随土层深度增加而逐渐增大,在0~10 cm土层波动范围最大,表层土壤含水率受降雨、蒸发和秸秆还田等外界因素影响更显著。相同种植密度下,不同土层秸秆还田土壤含水率显著高于秸秆不还田处理;相同秸秆还田条件下,在 $0 < h \leq 10$ cm、 $10 \text{ cm} < h \leq 20$ cm、 $20 \text{ cm} < h \leq 30$ cm和 $30 \text{ cm} < h \leq 40$ cm土层, JM1、JM2较CK土壤含水率降低幅度分别为0.01%~5.37%、4.10%~10.24%、3.38%~8.78%、4.27%~9.12%; CM1、CM2较CK土壤含水率降幅分别为6.61%~11.98%、8.19%~15.02%、9.12%~14.19%、9.40%~14.53%。种植密度增加导致土壤含水率降低,种植密度越高降幅越明显。不同土层秸秆不还田处理,在相同种植密度下土壤含水率降幅大于秸秆还田处理。

3.3 不同秸秆还田与种植密度对土壤氮素的影响

如图3所示,不同秸秆还田与种植密度条件下不同土层土壤铵态氮和硝态氮质量分数随时间的变化特征。不同处理在各生育时期和土层差异显著($P < 0.05$)。JM0、JM1、JM2、CM1和CM2较CK处理,土壤铵态氮质量分数增幅分别为9.93%~41.21%、23.65%~56.91%、32.45%~67.71%、13.81%~17.72%、22.32%~26.14%;硝态氮质量分数降幅分别为15.21%~37.06%、28.40%~41.15%、32.72%~43.91%、10.09%~19.43%、10.69%~25.41%。秸秆还田和增加种植密度均显著提高铵态氮质量分数,并降低硝态氮质量分数,两者组合处理进一步增强这一趋势。

相同种植密度条件下,随生育期推进,秸秆还田处理,不同土层土壤铵态氮和硝态氮质量分数较秸秆不还田处理未呈现统一规律。随着土层深度增加, JM0处理较CK处理,铵态氮质量分数逐渐增加,而硝态氮质量分数呈先增后减趋势;在 $0 < h \leq 10$ cm、 $10 \text{ cm} < h \leq 20$ cm、 $20 \text{ cm} < h \leq 30$ cm和 $30 \text{ cm} < h \leq 40$ cm土层土壤铵态氮质量分数分别增加41.21%、40.46%、28.03%和9.93%,硝态氮质量

分数分别降低14.55%、15.21%、25.33%和37.06%。相同秸秆还田条件下,随土层深度增加,不同生育期不同处理随种植密度增加铵态氮和硝态氮质量分数逐渐增加。随生育期推进, CM1和CM2较CK在不同生育期铵态氮分别增加7.45%和11.11%、7.16%和11.03%、10.89%和16.03%、15.98%和17.60%、13.45%和22.17%、10.60%和19.33%; JM1和JM2较CK在不同生育期铵态氮分别增加13.78%和18.56%、19.17%和21.34%、52.84%和58.74%、80.77%和89.76%、72.96%和87.41%、41.07%和56.11%;铵态氮质量分数随种植密度增加而升高,秸秆还田与种植密度组合处理时增加更为明显。CM1和CM2较CK在不同生育期硝态氮分别减少10.26%和20.31%、3.51%和4.66%、27.72%和28.39%、5.79%和12.21%、9.80%和12.26%、4.22%和5.06%, JM1和JM2较CK在不同生育期硝态氮分别减少45.82%和45.94%、43.43%和43.69%、25.54%和27.10%、11.21%和22.03%、12.54%和13.04%、24.05%和28.60%。分析认为,硝态氮质量分数随种植密度增加而降低,秸秆还田与种植密度组合处理时硝态氮消耗更明显。

3.4 不同秸秆还田与种植密度对产量和水、氮利用效率的影响

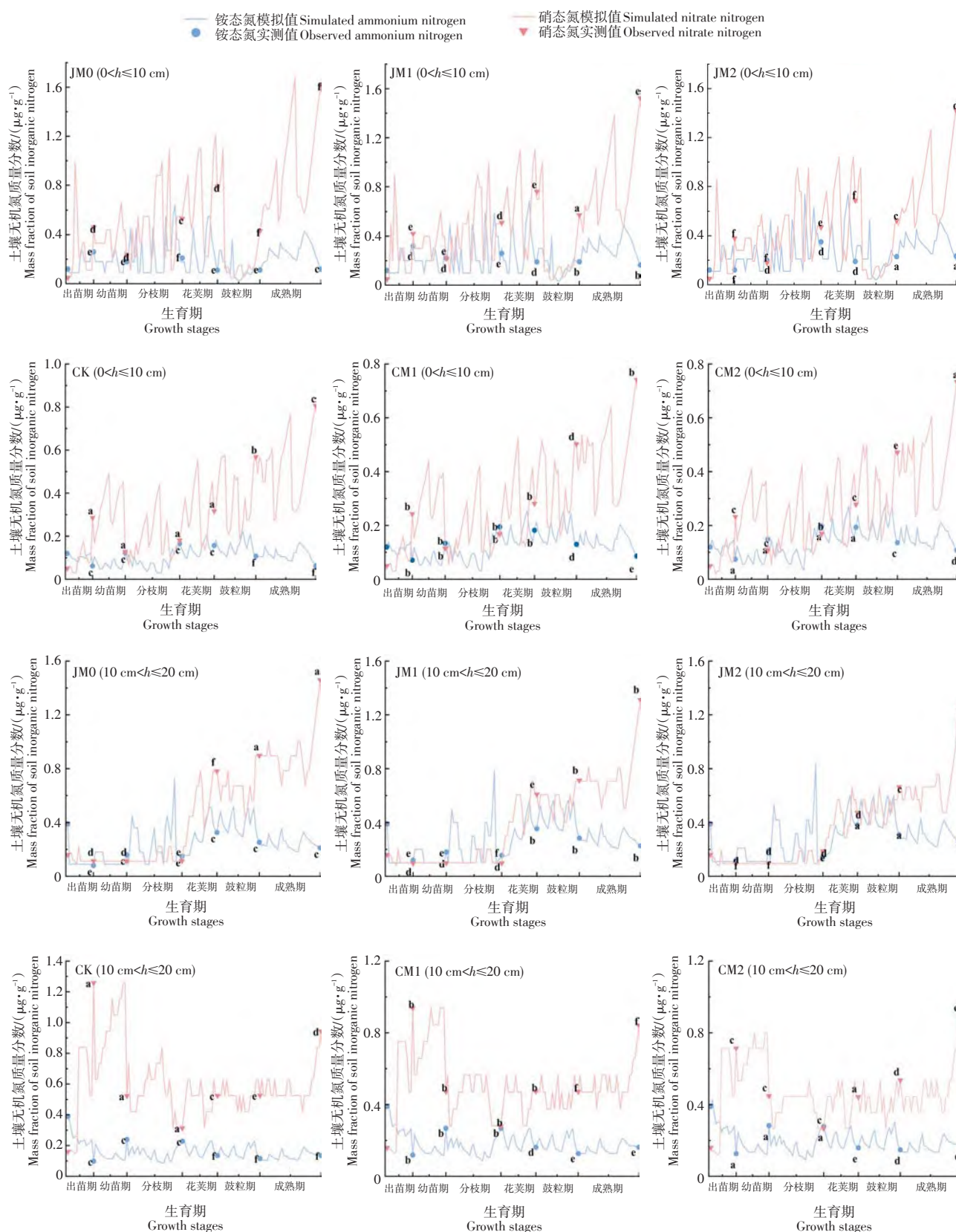
不同秸秆还田和种植密度对大豆产量实测值与模拟值的关系如图4所示,不同秸秆还田和种植密度对大豆产量影响显著($P < 0.05$)。秸秆还田和种植密度组合处理下, JM0、JM1、JM2、CM1和CM2处理较CK处理产量分别提升4.56%、14.21%、21.60%、9.50%和15.93%,所有处理中JM2处理较CK处理产量增幅最高。相同种植密度条件下,秸秆还田处理增加作物产量,增幅为4.30%~4.93%。

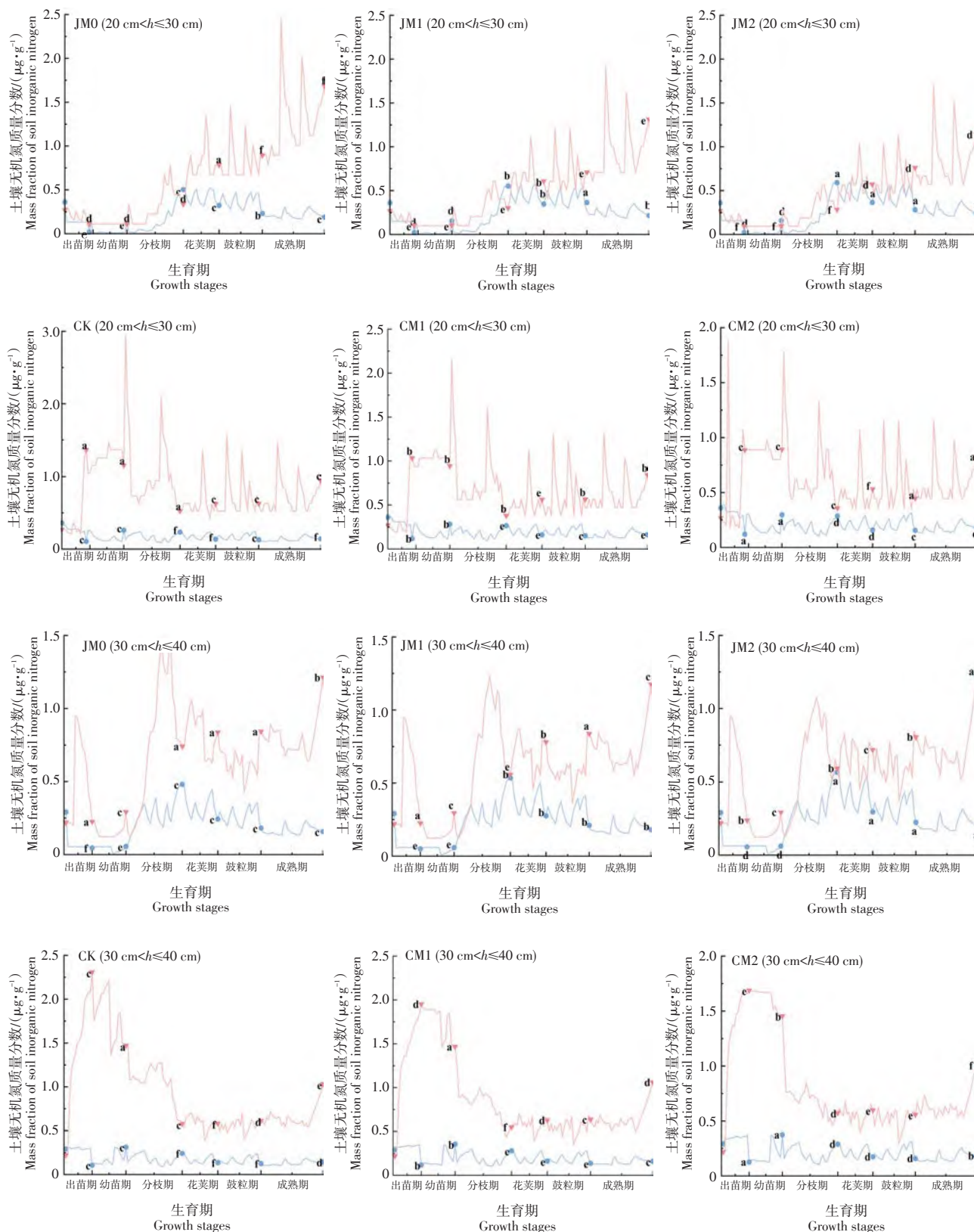
不同秸秆还田与种植密度处理对水分利用效率和氮素利用效率的影响如图5所示。JM0、JM1、JM2、CM1和CM2处理较CK处理,水分利用效率分别提高4.56%、13.00%、19.26%、7.17%和13.18%;氮素利用效率分别提高4.56%、14.21%、21.64%、9.50%和15.93%。秸秆还田与增加种植密度条件下,单独处理时水分利用效率和氮素利用效率均显著提高,秸秆还田与种植密度组合处理时提升更明显。

方差分析结果表明,秸秆还田、种植密度及其交互作用,对大豆产量、水分利用效率和氮素利用效率均产生极显著影响($P < 0.01$,见表5)。其

中, 各因素对产量的 F 值显著高于对资源利用效率的影响, 表明产量受种植密度与秸秆还田处理的影响更敏感。

总体看, 三项指标均受密度和秸秆管理变化的影响, 说明通过优化种植密度与秸秆还田措施可协同提升作物产量和资源利用效率。



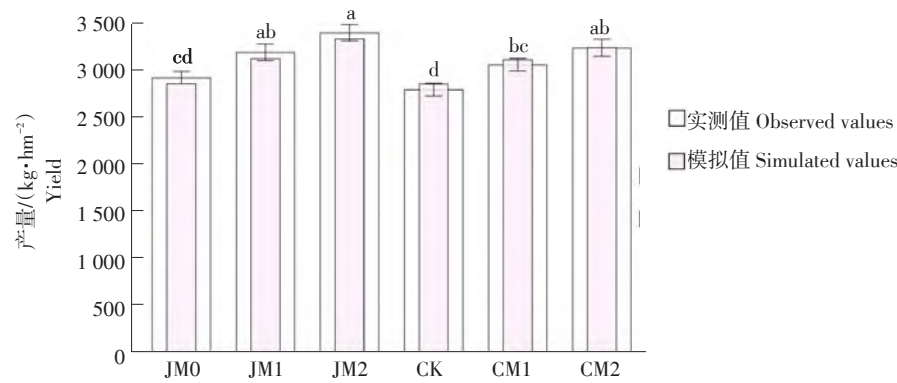


不同小写字母表示不同处理在相同土层相同生育时期差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments within the same soil layer and growth stage.

图3 生育期土壤铵态氮与硝态氮变化过程及模拟情况

Fig. 3 Dynamics and simulation of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen during the growth period



不同小写字母表示不同处理在相同土层相同生育时期差异显著($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among treatments within the same soil layer and growth stage.

图4 大豆产量实测值与模拟值比较结果

Fig. 4 Results of comparison of observed and simulated soybean yield

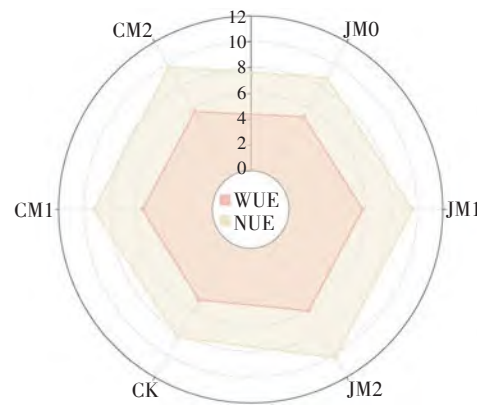


图5 不同秸秆还田与种植密度的水分利用效率和氮素利用效率

Fig. 5 Water use efficiency (WUE) and nitrogen use efficiency (NUE) under different straw return and planting densities

表5 不同秸秆还田与种植密度下大豆产量、水分利用效率和氮素利用效率的方差分析与平均值

Table 5 Analysis of variance and average of soybean yield, WUE and NUE under different straw return and planting density treatments

处理 Treatment	产量 Yield		水分利用效率 WUE		氮素利用效率 NUE	
	F 值	平均值/(kg·hm ⁻²) Average	F 值	平均值/(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²) Average	F 值	平均值/(kg·kg ⁻¹) Average
秸秆还田 Straw return	80 000.00**	2 826.00	6.78**	5.30	2.25**	8.81
种植密度 Planting density	139 356.50**	2 908.50	1.47**	5.59	8.26**	9.50
秸秆还田×种植密度 Straw return×Planting density	3 573.50**	3 028.50	4.98**	5.89	1.18**	9.94

注：**表示差异极显著($P<0.01$)，平均值为各主效应与交互作用下的处理均值。
Note: ** indicates extremely significance difference ($P<0.01$), means correspond to the average values under each main effect and interaction.

4 讨 论

秸秆还田与种植密度处理显著影响土壤水分、铵态氮和硝态氮时空分布特征。秸秆还田有助于提高土壤含水率，这可能是由于其增加土壤

孔隙度、改善结构并提升保水能力所致^[19]。相比之下，增加种植密度显著降低土壤含水率，可能是因高密度条件下作物根系竞争和群体蒸腾作用增强，加快水分消耗^[20]。随土层深度增加，秸秆不还田处理土壤含水率降幅大于秸秆还田处理，其原

因可能是表层蒸发增强,导致深层水分上移补偿,加剧水分损耗^[21]。在氮素形态方面,秸秆还田和增加种植密度均显著提高铵态氮质量分数并降低硝态氮质量分数,两者组合处理进一步增强这一趋势。秸秆还田可能通过增加有机物质供给,提高微生物对固氮能力,并因 $w(C):w(N)$ 升高,抑制硝化作用,促进铵态氮累积、减少硝态氮生成^[22-23];增加种植密度增强作物对硝态氮的竞争性吸收,并通过改变根际氧化还原环境,进一步抑制硝化作用,协同促进铵态氮的积累^[24],两者叠加效应显著增强对铵态氮增加和硝态氮降低的作用效果。不同土层中铵态氮质量分数增加,可能与秸秆分解释放的铵态氮纵向迁移及其在土壤颗粒上吸附固定有关,深层积累则因迁移能力和吸附饱和度下降而逐渐减弱^[25];硝态氮质量分数下降可能与其易于淋溶的特性及深层氧气不足抑制硝化反应,并促进反硝化作用所致^[26]。在产量表现方面,秸秆还田与高密度组合处理(JM2)较CK处理产量增幅最为显著,这可能归因于秸秆还田改善土壤水分与养分环境,增加种植密度,增强群体对光能的利用效率和生长竞争力^[27]。在相同秸秆还田条件下,大豆产量随种植密度增加而上升,但增幅逐渐减小,可能因资源竞争加剧导致群体效益趋于饱和^[28]。

程少雨等通过密度与灌溉定额互作试验表明,种植密度增加显著增加土壤上层含水率,使水分整体分布均匀性升高^[29]。与本研究随种植密度增加,土壤含水率逐渐降低的研究结果不同,可能是因为表层土壤含水率相对较低,受作物群体冠层增大带来的遮蔽效果影响较大;而本研究随土层深度增加土壤含水率逐渐降低,表层土壤含水率较高,遮蔽效果对土壤含水率影响小于群体增大导致耗水量增加的影响。江晗等通过常规施肥加秸秆还田试验发现,秸秆还田可通过自身氮素分解固氮,增加外源氮素的固定量,提高土壤硝态氮的质量分数^[30]。该试验地区夏季气温较高,有利于秸秆分解和氮素的矿化与硝化过程,增加土壤中硝态氮的积累。本研究与江晗等研究结果不同,在秸秆还田处理下土壤硝态氮质量分数逐渐降低,可能是因试验地位于东北寒区,限制秸秆中有机氮的矿化速率和硝化作用,导致土壤硝态氮质量分数逐渐降低。

5 结 论

DSSAT模型对土壤水、氮动态和作物产量的模拟精度较高, $NRMSE$ 和 d 分别为0.29%~13.26%和0.81~0.99,可较好地用于黑土区农田不同种植模式下水、氮动态及产量的预测。秸秆还田可显著提升土壤含水率和铵态氮质量分数,增幅分别为3.70%~9.22%和9.93%~41.21%,降低硝态氮质量分数,减幅为15.21%~37.06%。随种植密度增加,铵态氮质量分数显著增加,增幅为13.81%~26.14%,土壤含水率和硝态氮质量分数显著降低,降幅分别为7.63%~15.63%和10.09%~25.41%。秸秆还田与增加种植密度组合处理,可提高土壤铵态氮质量分数、作物产量、水分利用效率和氮素利用效率,增幅分别为23.65%~67.71%、4.56%~21.60%;4.56%~19.26%和4.56%~21.64%;降低土壤含水率和硝态氮质量分数,降幅分别为0.01%~10.24%和28.40%~43.91%。与秸秆还田处理相比,增加种植密度对土壤水、氮动态和产量影响更大。

[参 考 文 献]

- [1] 齐鹏,孙佳歆,章光新,等.东北黑土区水土资源配置及其空间格局优化[J].科学通报,2024,69(27):4063-4078.
- [2] Cao X Q, Liu J L, Wu Y, et al. Effects of biochar application on rice physiological growth and water use efficiency under dry direct-seeded mode[J]. Irrigation and Drainage, 2024, 73: 526-537. DOI: 10.1002/ird.2885.
- [3] 刘继龙,曹冉,曹晓强,等.黑土区免耕条件下减施氮肥对大豆光合特性和光合氮利用效率的影响[J].东北农业大学学报,2024,55(3):1-9.
- [4] Ma R, Tian Z Y, Zhao Y, et al. Response of soil quality degradation to cultivation and soil erosion: A case study in a Mollisol region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 242. DOI: 10.1016/j.still.2024.106159.
- [5] Shi W J, Wang M L, Liu Y T. Crop yield and production responses to climate disasters in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141147.
- [6] 孟维山,朱芳妮,张博文,等.玉米秸秆及其生物炭还田对黑土理化性质及玉米产量的影响[J].吉林农业大学学报,2024,46(5):721-730.
- [7] Zhang S T, Ren T, Yang X K et al. Biochar return in the rice sea-

- son and straw mulching in the oilseed rape season achieve high nitrogen fertilizer use efficiency and low greenhouse gas emissions in paddy-upland rotations[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 148. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126869.
- [8] Wang S P, Zhai L M, Guo S F, et al. Returned straw reduces nitrogen runoff loss by influencing nitrification process through modulating soil C:N of different paddy systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 354. DOI: 10.1016/j.agee.2023.108438.
- [9] Cao Y J, Wang L C, Gu W R, et al. Increasing photosynthetic performance and post-silking nitrogen uptake by moderate decreasing leaf source of maize under high planting density[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20: 494–510. DOI: 10.1016/S2095-3119(20)63378-0.
- [10] 戚迎龙, 宁小莉, 孙贯芳, 等. 水氮耦合对滴灌玉米光合特性及产量的调控效应[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(3): 10–20.
- [11] Jyolsna T, Vashisht B B, Yadav M, et al. Field and simulation studies on yield, water and nitrogen dynamics and use efficiency in rice-wheat crops in sequence[J]. *Field Crops Research*, 2024, 311. DOI: 10.1016/j.fcr.2024.109366.
- [12] Liu H L, Yang J Y, Tan C S, et al. Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98: 1105–1111. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.01.017.
- [13] Negm L M, Youssef M A, Jaynes D B, et al. Evaluation of DRAINMOD- DSSAT simulated effects of controlled drainage on crop yield, water balance, and water quality for a corn-soybean cropping system in central Iowa[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187: 57–68. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.03.010.
- [14] Silva E F, Hoogenboom G, Boote K J, et al. Predicting soybean evapotranspiration and crop water productivity for a tropical environment using the CSM-CROPGRO-soybean model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 323. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109075.
- [15] 吕航. 基于HYDRUS模型的不同秸秆覆盖与耕作措施条件下黑土区农田土壤水盐运移规律研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [16] 李良刚. 东北玉米秸秆直接还田存在的问题和解决措施[J]. *农机使用与维修*, 2023(2): 86–88.
- [17] Zhang P Y, Liu Z J, Wang M D, et al. Effects of irrigation and fertilization with biochar on the growth, yield, and water/nitrogen use of maize on the Guanzhong Plain, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 295. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108786.
- [18] Jamieson P D, Porter J R, Wilson D R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand[J]. *Field Crops Research*, 1991, 27: 337–350. DOI: 10.1016/0378-4290(91)90040-3.
- [19] 段正宇, 朱成立, 车子刚, 等. 秸秆还田下土壤孔隙演化及其对溶质穿透特征的影响机理分析[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4): 312–326.
- [20] 彭丹丹, 徐开未, 刘圆圆, 等. 播期和种植密度对玉米茎秆性状及抗倒力学特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(10): 35–45, 58.
- [21] 张慧, 胡娟, 周道玮. 大量添加秸秆对松嫩平原盐碱地改良及玉米生长的影响[J]. *土壤与作物*, 2024, 13(4): 415–427.
- [22] Latifmanesh H, Deng A X, Li L, et al. How incorporation depth of corn straw affects straw decomposition rate and C&N release in the wheat-corn cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 300. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107000.
- [23] 张旭屹, 彭仕乐, 谢慧, 等. 固氮与秸秆降解复合菌剂构建及其在秸秆还田中的应用[J]. *河南农业大学学报*, 2025, 59(2): 306–315.
- [24] Liang Z M, Li J Y, Cao X D, et al. Responses of wheat nitrogen uptake and utilization, rhizosphere bacterial composition and nitrogen-cycling functional genes to nitrogen application rate, planting density and their interactions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 193. DOI: 10.1016/j.apsoil.2023.105143.
- [25] 马林杰, 张诚信, 覃宝利, 等. 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(9): 1623–1632.
- [26] 杨陆暘. 秸秆覆盖对红壤坡耕地近地表水文及土壤侵蚀的影响研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2024.
- [27] 李越, 李根东, 陈志君, 等. 基于氮收支平衡的河套灌区春小麦农田灌溉和施氮策略[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(17): 61–72.
- [28] 郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 等. 秸秆与有机无机肥配施对不同质地潮土土壤质量和小麦产量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(5): 1360–1373.
- [29] 程少雨, 林涛, 吴凤全, 等. 密度和灌溉定额互作对76 cm等行距机采棉田水分分布及利用的影响[J]. *新疆农业科学*, 2022, 59(10): 2341–2351.
- [30] 江晗, 王磊, 卢艳丽, 等. 长期秸秆还田对典型潮土区冬小麦-夏玉米轮作体系产量及氮挥发的影响[J]. *植物营养与肥料科学学报*, 2025, 31(2): 213–225.