

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.042 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.042

孙嘉璐, 齐智娟, 李茉, 等. 秸秆还田与种植密度对玉米氮素吸收利用与产量的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1):153-164.

SUN Jialu, QI Zhijuan, LI Mo, et al. Effects of straw returning and planting density on nitrogen absorption, utilization, and yield of maize[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):153-164.

秸秆还田与种植密度对玉米氮素吸收利用与产量的影响

孙嘉璐^{1,2}, 齐智娟^{1,2}, 李茉^{1,2}, 宋芳^{1,2}, 徐敬文^{1,2}, 王子文^{1,2}, 罗欣勃^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学
农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: [目的] 为探究秸秆还田配合调控种植密度对玉米氮素利用效率与产量的影响。[方法] 于2023年开展田间试验, 设置秸秆离田(C, 对照)和秸秆全量还田(X)同3种玉米种植密度67 500(D1, 对照)、82 500(D2)、90 000株/hm²(D3)相结合, 共设置6个处理。探究秸秆还田与种植密度对玉米氮素吸收利用和产量的影响。并将试验所得结果与参数修正后的DNDC(denitrification decomposition, DNDC)模型模拟结果进行比较分析, 验证短期试验的可靠性。[结果] 1) 在相同种植密度下, 秸秆还田能提高不同生育时期玉米叶面积指数与净光合速率, 促进植株对氮素的吸收利用, 提高产量。2) 在相同秸秆条件下, 提高种植密度能够有效增加玉米植株干物质与氮素的累积量, 增加叶面积。其中, D2、D3种植密度分别较D1提高21.5%与22.0%的干物质累积量、14.9%与15.2%的氮素累积量及5.7%和11.3%的叶面积指数。但提高种植密度会显著降低植株的光合能力, 对干物质与氮素的转运能力造成影响, 干物质转运较氮素转运对光合的变化更加敏感, 表现为随种植密度增加持续降低, 而氮素转运则表现为先升高后降低。3) 秸秆还田处理下D2种植密度玉米产量最高, 较对照处理CD1产量增加46.4%, 其氮素转运率、对籽粒的贡献率、氮素内在效率和氮肥偏生产力均最高。4) 秸秆还田与不同种植密度下的试验得到的关键指标同DNDC模型模拟值拟合度较高, 其决定系数(R²)均在0.92以上, 归一化均方根误差(nRMSE)均低于13.4%, 验证田间试验结果的可靠性。[结论] 秸秆还田配合82 500株/hm²的种植密度可有效促进生育期内玉米干物质与氮素积累, 显著提高玉米氮素转运率和对籽粒的贡献率, 有效增强玉米氮素吸收利用能力并增加产量。研究结果可为玉米高产高效生产实践提供理论依据与技术支持。

关键词: 秸秆还田; 种植密度; DNDC模型; 氮素利用; 产量

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0153-12

Effects of Straw Returning and Planting Density on Nitrogen Absorption, Utilization, and Yield of Maize

SUN Jialu^{1,2}, QI Zhijuan^{1,2}, LI Mo^{1,2}, SONG Fang^{1,2}, XU Jingwen^{1,2}, WANG Ziwen^{1,2}, LUO Xinbo^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: [Objective] To explore the effects of straw returning combined with regulated planting density on nitrogen use efficiency and yield of maize. [Methods] A field experiment was conducted in 2023, with 6 treatments established by combining straw removal (C, control) and full straw returning (X) with three maize planting densities: 67 500 (D1, control), 82 500 (D2), and 90 000 plants/hm² (D3). The effects of straw returning and planting density on nitrogen absorption, utilization, and yield of maize were investigated. Additionally, the experimental results were compared and analyzed with the simulation results of the parameter-modified Denitrification-Decomposition (DNDC) model to verify the reliability of the short-term experiment.

收稿日期: 2025-09-10

修回日期: 2025-10-23

录用日期: 2025-11-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-21

资助项目: 黑龙江省基金青年项目C类(QC2025E002); 国家重点研发项目(2021YFD1500802); 东农学者计划骨干项目(21XG18)

第一作者: 孙嘉璐(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事保护性耕作研究。E-mail: 18545409225@163.com

通信作者: 齐智娟(1987—), 女, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤水热运移和节水灌溉技术研究。E-mail: zhijuan.qi@neau.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

[**Results**] 1) Under the same planting density, straw returning increased the leaf area index (LAI) and net photosynthetic rate of maize at different growth stages, promoted nitrogen absorption and utilization by plants, and improved yield. 2) Under the same straw management condition, increasing planting density effectively enhanced the accumulation of dry matter and nitrogen in maize plants and increased leaf area. Specifically, compared with D1, the D2 and D3 densities increased dry matter accumulation by 21.5% and 22.0%, nitrogen accumulation by 14.9% and 15.2%, and LAI by 5.7% and 11.3%, respectively. However, increasing planting density significantly reduced the photosynthetic capacity of plants and affected the translocation capacity of dry matter and nitrogen. Notably, dry matter translocation was more sensitive to changes in photosynthesis than nitrogen translocation, showing a continuous decrease with increasing planting density, while nitrogen translocation first increased and then decreased. 3) Under straw-returning treatment, the maize yield at the D2 planting density was the highest, which was 46.4% higher than that of the control treatment (CD1). This treatment also achieved the highest nitrogen translocation rate, grain contribution rate, nitrogen internal efficiency, and partial factor productivity of nitrogen fertilizer. The key indicators obtained from the experiments under different straw returning and planting density treatments showed a high degree of fit with the simulated values from the DNDC model. 4) The coefficients of determination (R^2) for all indicators were above 0.92, and the normalized root mean square errors (nRMSE) were below 13.4%, verifying the reliability of the field experiment results. [**Conclusion**] The combination of straw returning and a planting density of 82 500 plants/hm² can effectively promote the accumulation of dry matter and nitrogen in maize during the growth period, significantly increase the nitrogen translocation rate of maize and its contribution rate to grain, effectively enhance the nitrogen absorption and utilization capacity of maize, and increase yield. The research findings can provide a theoretical basis and technical support for the practice of high-yield and high-efficiency maize production.

Keywords: straw returning; planting density; DNDC model; nitrogen utilization; yield

Received: 2025-09-10

Revised: 2025-10-23

Accepted: 2025-11-10

Online(www.cnki.net): 2025-11-21

东北地区是我国最大的商品粮生产基地,其玉米(*Zeamays L.*)播种面积约占全国粮食作物总播种面积的30%^[1],粮食总产量占全国总产量的20%以上^[2]。在人口持续增长驱动粮食需求不断攀升的背景下,确保东北黑土区玉米稳产、增产是一项重要的研究课题,对实现国家粮食战略安全,确保东北地区玉米产业发展有着重要意义。

东北地区耕地面积虽然逐年增长^[3],但我国总耕地资源有限,且快速城市化、经济增长和不断增长的国内肉类消费等因素导致耕地的占用和碎片化的情况普遍增加^[4],为维持玉米长期供需平衡、保障粮食安全需提高其产量^[5]。氮素是影响玉米产量形成的关键因素,其供应水平直接关系到植株的光合能力、干物质积累及产量形成^[6]。然而,在传统种植模式下,氮肥施用量虽大,利用率却普遍较低,大量氮素通过挥发、淋溶等途径损失,不仅增加生产成本,还带来环境污染风险^[7]。已有研究^[8]表明,提高玉米种植密度可促进植株更有效地吸收和利用氮素,从而提高产量和氮素利用效率;但也有研究^[9]表明,过高的种植密度导致植株竞争加剧,降低光合能力,影响

光合产物为氮素的转运与同化供能,进而影响氮素的转运和积累。因此,探究东北地区玉米适宜种植密度对促进玉米对氮素的吸收利用,提高玉米产量有着重要意义^[10]。江晗等^[11]通过对试验后土壤养分含量的比较得出,秸秆还田可以优化土壤理化性状,改善土壤生物群落结构;LI等^[12]通过分析玉米干物质积累动态得出,秸秆还田可优化干物质的积累特性,增加玉米产量;张鑫等^[13]通过比较各生育时期玉米氮素累积量认为,秸秆还田会在生育期前期快速腐解,出现微生物与作物争氮现象,降低植株氮积累量和产量;岳杨等^[14]通过对照土壤耕层温度认为,秸秆还田会降低苗期耕层的土壤温度,降低成穗数、穗粒数及百粒重,使产量降低。可见,秸秆还田对植株氮素吸收利用和产量的影响仍存在结论上的不同。

模型作为田间试验的延伸,能对生态系统碳氮循环和作物生长等过程进行定量评价,被世界各地广泛应用。其中, DNDC (denitrification decomposition, DNDC)模型在模拟作物生长与生态系统碳氮循环上有着良好的表现,是各科研人员重点关注的模型之

—^[15-16]。考虑到短期田间试验可能存在一定的偶然性,本研究采用将田间试验结果与DNDC模型相结合的研究方法进行验证。为提升研究结论的普适性,利用参数修正后的DNDC模型进行模拟,验证关键指标精度,以降低短期田间试验偶然性偏差的影响。

本研究基于长期秸秆还田试验,于2023年进一步开展不同种植密度条件下的田间试验,测定不同生育时期植株干物质累积量、氮素累积量、叶面积指数、净光合速率和产量,旨在探究秸秆还田与不同种植密度对东北黑土区玉米生长过程中氮素吸收利用和产量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年5—10月在黑龙江省水利科技试验研究中心(45°43'N,126°36'E)进行。该试验地平均海拔为137 m,属温带大陆性季风气候,四季分明,降水量集中,易发生春旱。试验地多年平均气温-4~5℃,无霜期130~140 d,年平均降水量400~650 mm,7—9月降雨量占年降水量的70%,多年平均蒸发量796 mm。试验区位于东北典型黑土带,耕层土壤为壤土,其0~20 cm土层速效氮(N)、速效磷(P₂O₅)、速效钾(K₂O)质量比分别为154.5、40.1、376.8 mg/kg,有机质25.07 g/kg、体积质量为1.22 g/cm³,pH为7.27。20~40 cm土层土壤速效氮(N)、速效磷(P₂O₅)、速效钾(K₂O)质量分数分别为150.1、36.8、356.3 mg/kg,有机质质量分数为22.37 g/kg、体积质量为1.29 g/cm³,pH为7.25。日尺度气象条件见图1。

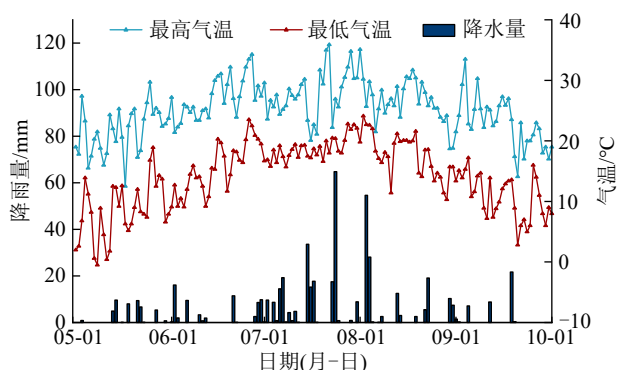


图1 玉米生育期内试验地日气温和降雨量

Fig.1 Daily temperature and rainfall of experimental site during maize growth period

1.2 试验设计

试验采用双因素随机区组设计,以玉米品种“金禾658”为供试品种,设置种植密度和秸秆处理方式进行研究,密度水平分别为67 500(D1,对照)、82 500

(D2)、90 000株/hm²(D3),秸秆处理方式为旋耕秸秆离田(C,对照)和秸秆全量旋耕还田(X)。共计6个处理,每个处理3次重复,共计18个试验小区,每个小区面积为10 m×10 m=100 m²。于5月13日播种,10月1日收获。并采用穴施的方法施加基肥,撒施的方法进行追肥。本试验所施用的氮肥、磷肥、钾肥的品种分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。N、P、K施用量分别设置为250、90、90 kg/hm²,氮肥按照基肥40%、拔节期追肥30%、灌浆期追肥30%进行施用,磷肥和钾肥作为基肥施用。

1.3 测量指标与方法

1.3.1 干物质质量测定 分别于拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期在每个试验小区内随机选取3株长势均匀的玉米,贴地面采集玉米地上部分。将地上部分按不同器官分类后放入干燥箱中,105℃杀青30 min后,60℃干燥至质量恒定。待干燥的样品冷却后,进行称量。植株干物质转运效率计算公式为^[17]:

$$DMTE = (D_P - D_M) / D_P \quad (1)$$

式中:DMTE为干物质转运效率,%;D_M为成熟期各营养器官干物质质量,kg/hm²;D_P为抽雄期各营养器官干物质质量,kg/hm²。

植株干物质转运对籽粒的贡献率计算公式为:

$$CAVG = (D_P - D_M) / D_G \quad (2)$$

式中:CAVG为干物质转运对籽粒的贡献率,%;D_G为成熟期籽粒的总干物质质量,kg/hm²。

1.3.2 植株各器官氮素指标测定 将干燥后的植株样品按不同器官分类后使用球磨机粉碎并过80目筛,将过筛后的样品用H₂SO₄-H₂O₂消煮,取消煮后的清液,定容后采用AutoAnalyzer-Ⅲ型流动分析仪(SEAL Analytical,德国)对植株各器官氮的质量分数进行测定。

植株氮素转运效率计算公式^[18]为:

$$NTE = (N_P - N_M) / N_P \quad (3)$$

式中:NTE为植株氮素转运效率,%;N_M为成熟期各营养器官氮素累积量,kg/hm²;N_P为抽雄期各营养器官氮素累积量,kg/hm²。

植株氮素转运对籽粒的贡献率计算公式为:

$$NTCP = (N_P - N_M) / N_G \quad (4)$$

式中:NTCP为植株氮素转运对籽粒的贡献率,%;N_G为成熟期籽粒氮素累积量,kg/hm²。

氮素内在效率计算公式为:

$$INE = \frac{Y}{N_T} \quad (5)$$

式中:INE为氮素内在效率,kg/kg;Y为籽粒产量,kg/hm²;N_T为植株氮素累积量,kg/hm²。

氮肥偏生产力计算公式为:

$$\text{PFPN} = \frac{Y}{F} \quad (6)$$

式中:PFPN为氮肥偏生产力,kg/kg;F为施氮量,kg/hm²。

1.3.3 净光合速率测定 采用LI-6400 XT便携式光合作用测量系统(LI-COR,美国),于玉米拔节期、抽雄期和灌浆期测定植株最上面的展开叶或穗位叶净光合速率。测定时选择在晴朗无云的天气条件下进行,时间固定在上午9:00—11:00。每个小区选定3株长势均匀的植株,用仪器配套叶片夹夹持叶片完成测定。

1.3.4 叶面积指数测定 选择长势相近的3个植株,分别在不同生育时期逐叶测量植株叶片中脉长度和叶片最宽处宽度。并计算不同生育时期植株叶面积指数。

叶面积指数的计算公式为:

$$\text{LAI} = 0.75\rho \frac{\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n (L_{ij} \times B_{ij})}{3} \quad (7)$$

式中:LAI为叶面积指数; ρ 为种植密度,株/hm²;L_{ij}为第j个植株中第i个叶片叶长,米;B_{ij}为第j个植株中第i个叶片叶宽,米;n为第j株的总叶片数。

1.3.5 产量测定 玉米成熟期在每个小区随机选取3行进行收获,记录穗数。随机选择20个果穗记录每穗的穗行数、穗粒数,风干玉米穗部至质量恒定,进行脱粒、称量,并折算成籽粒含水率为14%的玉米籽粒产量。

1.4 DNDC模型构建

DNDC模型是基于生物化学和地球化学反应机制的描述农田生态系统中碳氮循环的计算机模拟表达,在陆地生态系统中的作物生长和土壤碳氮动态方面有着广泛应用。模型运行需要气象数据、土壤墒情、作物指标及田间管理措施的相关参数。本试验中气象数据通过黑龙江省水利科学试验中心气象站获得,土壤墒情与作物指标根据实测输入。虽然DNDC模型提供不同作物默认的作物指标,但该类默认参数与实际并不完全相符。因此,采用本试验区的历史观测数据并结合供试玉米品种的官方审定农艺性状参数,对作物参数进行修正,并利用修正后的参数对玉米生长过程中的各项指标进行模拟。通过计算决策系数(R²)、均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(nRMSE)评价全生育期内干物质累积量、氮素累积量、叶面积指数和产量的准确程度。根据nRMSE的值,若nRMSE≤10%,则认为模型性能

为“优秀”;若10%<nRMSE≤20%,则认为性能为“良好”;若20%<nRMSE≤30%,则认为性能为“差”^[19-20]。输入模型的作物参数见表1。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \widehat{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n}} \quad (9)$$

$$\text{nRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{\bar{S} \cdot n}} \quad (10)$$

式中:S_i为实测值; \widehat{S}_i 为模拟值; \bar{S} 为样本平均值。

表1 输入DNDC模型的作物参数

Table 1 Crop parameters input into DNDC model

参数	数值
最高生物量/(kg·hm ⁻²)	5 500,6 710,7 315
生物量比例(籽粒、叶、茎、根)	0.54,0.14,0.22,0.10
生物量碳氮比(籽粒、叶、茎、根)	30,35,85,60
总需氮量/(kg·hm ⁻²)	267.41,326.24,355.66
生长积温/℃	2 845
需水量/mm	150
最适温度/℃	30
固氮系数	1

1.5 数据分析

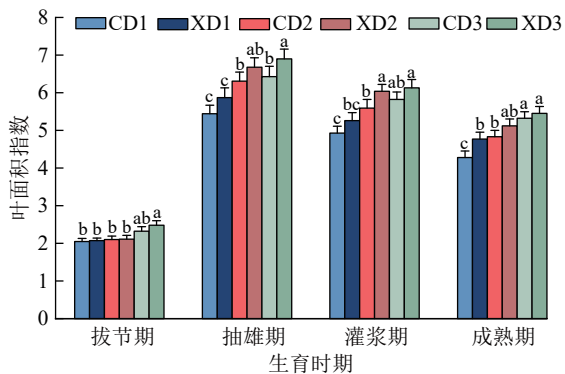
本研究采用Excel 2022软件对数据进行整理、Origin 2022软件进行制图,运用SPSS 27统计分析软件对数据进行方差分析及显著性分析;不同指标间差异采用单因素方差分析,运用最小显著差异法(least significant difference method, LSD)进行多重比较分析($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与种植密度对玉米生长及产量的影响

2.1.1 叶面积指数和净光合速率 由图2可知,各处理的植株叶面积指数均随生育时期的推移而呈先增加后减小趋势,且秸秆还田处理均大于秸秆离田处理,叶面积指数在抽雄期时达到最大值。具体而言,拔节期时秸秆还田与不同种植密度间叶面积指数无显著差异($p > 0.05$)。抽雄期时在相同秸秆还田处理下,叶面积指数均随种植密度增加而增大。其中,秸秆离田处理下D2、D3植株叶面积指数分别较D1植株增加15.99%、18.19%,在秸秆还田处理下D2、D3植株分别较D1植株增加13.79%、17.54%;在相同种植密度下,秸秆还田处理较离田

处理分别增加 7.90%、5.86% 和 7.31%。在成熟期叶面积指数由大到小依次为 XD3>CD3>XD2>CD2>XD1>CD1。



注: 图柱上方不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异达到显著水平 ($p < 0.05$); 误差棒为标准差。下同。

图 2 秸秆还田与不同种植密度下玉米植株不同生育时期叶面积指数

Fig.2 Leaf area index of maize plants at different growth stages under straw returning and different planting densities

由图 3 可知, 植株净光合速率与叶面积指数的趋势相似, 皆随生育时期推移而呈先上升后下降趋势, 在抽雄期均达到最大值。在拔节期种植密度为 D2 的植株净光合速率要高于 D1 和 D3, 是由于在该时期植株处于快速生长阶段, 叶片相对较少, 种植密度较低时叶片间几乎不遮挡, 可充分进行光合作用。在抽雄期时, 相同秸秆还田处理下净光合速率随种植密度增加而下降。其中, 秸秆离田处理下种植密度为 D1 的植株较 D2、D3 的净光合速率分别提高 14.74%、20.50%, 秸秆还田处理下种植密度为 D1 的植株较 D2、D3 的净光合速率分别提高 10.03%、21.82%。在灌浆期时各处理间净光合速率差异显著 ($p < 0.05$), 在秸秆离田处理下种植密度为 D1 的植株相较于 D2、D3 的净光合速率分别提高 8.79%、18.09%, 秸秆还田处理下种植密度为 D1 的植株相较于 D2、D3 的净光合速率分别提高 6.13%、11.69%。不同生育时期秸秆还田均可有效增强植株的光合作用能力。在拔节期时, 秸秆还田处理相较于离田处理的净光合速率提升 20.37%; 抽雄期时提升 7.71%; 灌浆期时提升 20.92%。表明秸秆还田可有效增强植株的光合能力, 促进植株生育期内干物质累积, 对作物产量有着积极影响。

2.1.2 干物质累积及转运 由图 4 可知, 秸秆还田与不同种植密度下植株在生育期内干物质累积过程呈现慢-快-慢的生长模式, 整个生育期内干物质累积量均随生育时期的推移而增大。在相同种植密度下, 不同生育时期秸秆还田处理的干物质累积量均高于

秸秆离田的处理。在秸秆还田与秸秆离田条件下, 干物质累积量均随种植密度的增加而增大。其中, 在不同秸秆处理方式下 D1 处理间除拔节期外干物质累积量均无显著差异 ($p < 0.05$), D2 处理除拔节期外干物质累积量均存在显著差异。在相同秸秆处理下, D2 与 D3 处理间干物质累积量无显著差异而显著高于 D1 处理, 表明提高种植密度可显著促进植株干物质累积, 但其促进作用存在阈值。由表 2 可知, 相同秸秆处理下 DMTE 与 CAVG 均随种植密度增加而降低。相同种植密度下, 秸秆还田处理的 DMTE 与 CAVG 均高于秸秆离田处理。其中, 秸秆离田处理下 D1 的 DMTE 相较 D2、D3 分别提高 41.03%、136.67%, 秸秆还田处理下 D1 的 DMTE 相较 D2、D3 分别提高 25.32%、145.04%; 在秸秆离田处理下 D1 的 CAVG 相较 D2、D3 分别提高 78.47% 和 118.03%, 秸秆还田处理下 D1 的 CAVG 相较 D2、D3 分别提高 56.43% 和 137.04%。而秸秆还田下的 DMTE 较离田处理提高 26.42%, 秸秆还田下的 CAVG 较离田处理提高 20.24%。

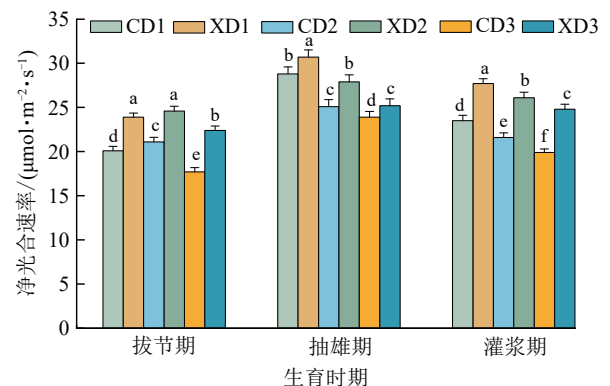


图 3 秸秆还田与不同种植密度下玉米植株不同生育时期净光合速率

Fig.3 Net photosynthetic rate of maize plants at different growth stages under straw returning and different planting densities

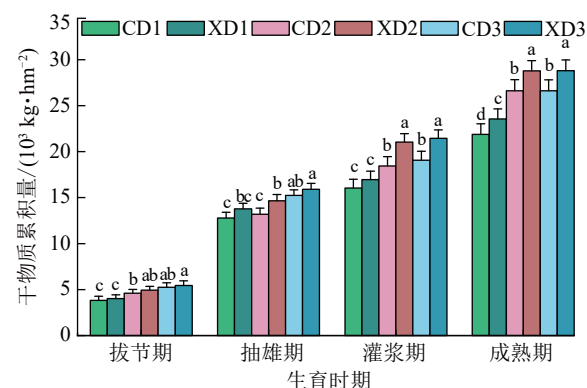


图 4 不同生育时期玉米植株干物质累积量

Fig.4 Dry matter accumulation of maize plants at different growth stages

表 2 秸秆还田与不同种植密度下玉米干物质转运效率及干物质转运对籽粒的贡献率

Table 2 Dry matter translocation efficiency and contribution rate of dry matter translocation to grain of maize under straw returning and different planting densities %

处理	DMTE			CAVG		
	叶	茎	总	叶	茎	总
CD1	23.85±1.13a	15.27±0.84c	18.39±0.91b	9.71±0.71a	10.84±0.94b	20.56±1.21b
CD2	15.73±1.26b	11.49±0.78d	13.04±0.94c	5.07±0.52c	6.44±0.53c	11.52±0.88d
CD3	9.14±0.41c	6.97±0.33f	7.77±0.37e	4.10±0.37d	5.34±0.41d	9.43±0.67e
XD1	21.87±1.71a	22.80±1.84a	22.47±1.81a	8.18±0.63b	15.88±1.38a	24.06±1.49a
XD2	16.76±0.94b	18.53±1.17b	17.93±1.06b	5.01±0.49c	10.69±0.98b	15.70±1.05c
XD3	9.14±0.63c	9.18±0.68e	9.17±0.65d	3.72±0.32d	6.42±0.51c	10.15±0.75de

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.1.3 秸秆还田与不同种植密度对产量及其构成的影响 由表 3 可知,在秸秆还田与秸秆离田条件下,产量均随种植密度的增加而呈先增加后减小趋势,且在种植密度增加条件下,秸秆还田处理的增产效果高于秸秆离田处理。其中, XD3 处理的植株穗行数和穗粒数均为最小,分别较其他处理降低 4.04%~15.60% 和 1.37%~15.11%。秸秆离田处理下各种种植密度百粒重无显著差异,相同种植密度下秸秆还田处理相较秸秆离田处理百粒重显著提高 3.25%、6.73% 和 7.07%。秸秆还田与不同种植密度产量由大到小依次是 XD2>CD2>XD3>CD3>XD1>CD1。在秸秆离田处理下 D2、D3 的产量相较于 D1 分别增加 30.53%、9.83%;在秸秆还田处理下 D2、D3 的产量相较于 D1 分别增加 30.12%、6.97%。秸秆还田处理较离田处理产量提高 11.41%,其中,产量最高的处理为 XD2,较常规处理 CD1 产量提高 46.37%。

表 3 秸秆还田与不同种植密度下玉米产量及构成

Table 3 Maize yield and composition under straw returning and different planting densities

处理	穗行数	穗粒数	百粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
CD1	20.0±0.7a	754.2±9.1a	36.9±0.4b	11 438.7±984.1c
CD2	18.7±0.8b	724.3±6.3b	37.1±0.3b	14 931.6±1 077.4b
CD3	18.0±0.9b	664.7±5.2c	36.8±0.5b	12 563.0±921.2c
XD1	18.7±0.8b	749.6±9.1ab	38.1±0.6ab	12 867.3±855.5c
XD2	18.0±0.9b	738.5±9.2ab	39.6±0.7a	16 743.2±1 058.7a
XD3	17.3±0.8c	655.9±5.6c	39.4±0.5a	13 764.3±1 030.4bc

2.2 秸秆还田与种植密度对玉米氮素吸收利用的影响

2.2.1 氮素累积量 由图 5 可知,秸秆还田与不同种植密度的植株氮素累积量均随生育时期的推移而增大。在相同种植密度下,不同生育时期秸秆还田处理的氮素累积量均高于秸秆离田处理。在秸秆还田与秸秆离田条件下,氮素累积量均随种

植密度的增加而增大。其中,在不同秸秆还田方式下 D1 处理除灌浆期外氮素累积量均无显著差异, D2 处理除成熟期外氮素累积量均无显著差异。除拔节期外 D2 与 D3 处理在相同秸秆处理方式下均无显著差异,而二者均显著高于 D1 处理。说明植株氮素累积量随种植密度提高而显著增加,但二者呈非线性关系,累积量在达到峰值后趋于稳定。

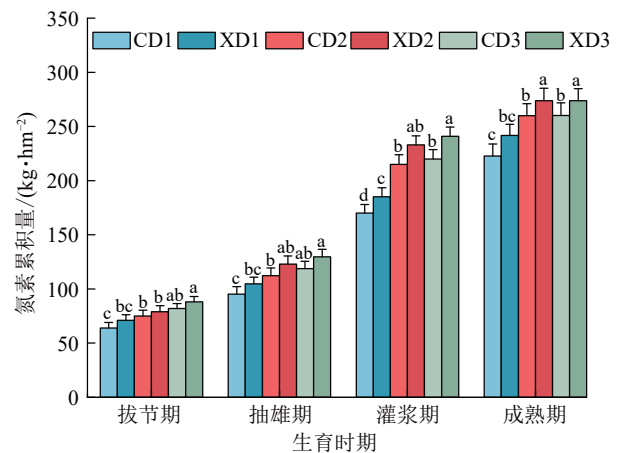


图 5 秸秆还田与不同种植密度下玉米植株不同生育时期氮素累积量

Fig.5 Nitrogen accumulation of maize plants at different growth stages under straw returning and different planting densities

2.2.2 氮素转运率与对籽粒的贡献率 由表 4 可知,各处理间的茎与叶 NTE 和 NTCP 差异显著。总体而言,在秸秆还田与秸秆离田条件下, NTE 与 NTCP 均随种植密度的增加而呈先增加后减小趋势。相同秸秆处理方式下, NTE 与 NTCP 均在 D2 种植密度下最大;相同种植密度下,秸秆还田处理的 NTE 与 NTCP 均高于秸秆离田处理。具体而言,在秸秆离田处理下 D2 的 NTE 相较 D1、D3 分别提高 11.24% 和 25.58%, 秸秆还田处理下 D2 的 NTE 相较 D1、D3 分别提高 11.43% 和 27.43%。在秸秆离田处理下 D2 的 NTCP 相较 D1、

D3 分别提高 19.31% 和 32.68%, 秸秆还田处理下 D2 的 NTCP 相较 D1、D3 分别提高 16.21% 和 21.08%。

总体而言, 秸秆还田处理的 NTE 较离田处理要高出的 9.85%, NTCP 较离田处理要高出 12.33%。

表 4 秸秆还田与不同种植密度下玉米氮素转运效率及氮素转运对籽粒贡献率

Table 4 Nitrogen translocation efficiency and contribution rate of nitrogen translocation to grain of maize under straw returning and different planting densities %

处理	NTE			NTCP		
	叶	茎	总	叶	茎	总
CD1	27.47±1.52b	32.00±1.88b	29.08±1.63b	10.87±0.68c	6.96±0.42ab	17.83±1.05c
CD2	31.82±2.11a	33.33±1.98b	32.35±2.05a	12.56±0.75b	7.17±0.45a	19.73±1.18b
CD3	24.42±1.32c	28.26±1.59c	25.76±1.42c	10.99±0.63c	6.81±0.39b	17.80±1.02c
XD1	29.00±1.83ab	34.55±2.04ab	30.97±1.78b	11.55±0.71bc	7.57±0.48a	19.92±1.23b
XD2	36.61±2.37a	37.61±2.25a	36.95±2.21a	15.08±0.92a	8.06±0.51a	23.15±1.41a
XD3	27.90±1.61b	27.78±1.53c	27.85±1.56bc	13.02±0.83b	6.90±0.43ab	19.12±1.12b

2.2.3 氮素内在效率与氮肥偏生产力 由图 6 可知, 在相同种植密度下, 秸秆还田处理的氮素内在效率与氮肥偏生产力均高于秸秆离田处理。在相同秸秆还田处理下氮素内在效率由大到小依次是 D2>D1>D3, 而氮肥偏生产力的顺序均为 D2>D3>D1。表明 D3 种植密度下每单位吸收氮量转化的产量较 D1、D2 都有所下降, 但通过其较高的总产量, 仍在整体上维持较高的氮肥生产效率。

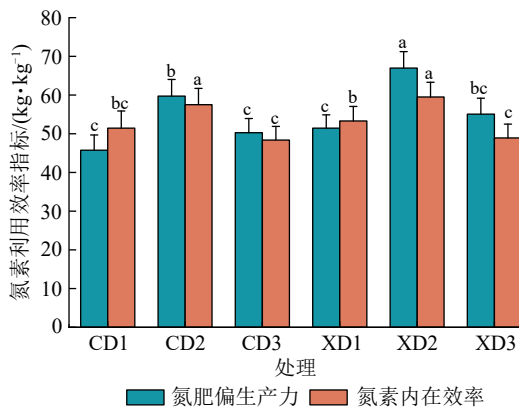


图 6 秸秆还田与不同种植密度下的氮素内在效率和氮肥偏生产力

Fig.6 Nitrogen internal efficiency and partial factor productivity of nitrogen fertilizer under straw returning and different planting densities

2.3 DNDC 模型模拟

2.3.1 干物质与产量 由图 7 可知, 模型可较好地表现出生育期内秸秆还田与不同种植密度干物质与产量变化情况。其中, 干物质的实际观测数据与模型模拟结果为良好 (9.72%≤nRMSE≤13.34%), 产量的实际观测数据与模型模拟结果为优秀 (nRMSE=6.10%)。具体而言, 模型再现田间试验中生育期内干物质的变化趋势; 同时, 也准确模拟出 D2 处理玉米产量最高, 而 D3 处理产量反而下降, 表现出二者干物质质量差异较小的规律特征。模型普遍低估干物质积累量但对产量预测较好, 可能是因

为模型高估高密度下植株的根系竞争和水分与养分的胁迫, 从而出现模拟与实际的偏差。总体而言, 模型具备模拟秸秆还田条件下不同种植密度下干物质与产量的能力。

2.3.2 氮素积累量和叶面积 由图 8 可知, 模型可较好地表现出生育期内秸秆还田与不同种植密度氮素积累量和叶面积指数变化情况。其中, 氮素积累量的实际观测数据与模型模拟结果为良好 (8.30%≤nRMSE≤11.40%), 叶面积指数的实际观测数据与模型模拟结果为优秀 (4.85%≤nRMSE≤7.27%)。模拟结果与观测结果比较表明, 参数调整后的模型能准确模拟秸秆还田条件下不同种植密度的氮素积累量和叶面积指数。

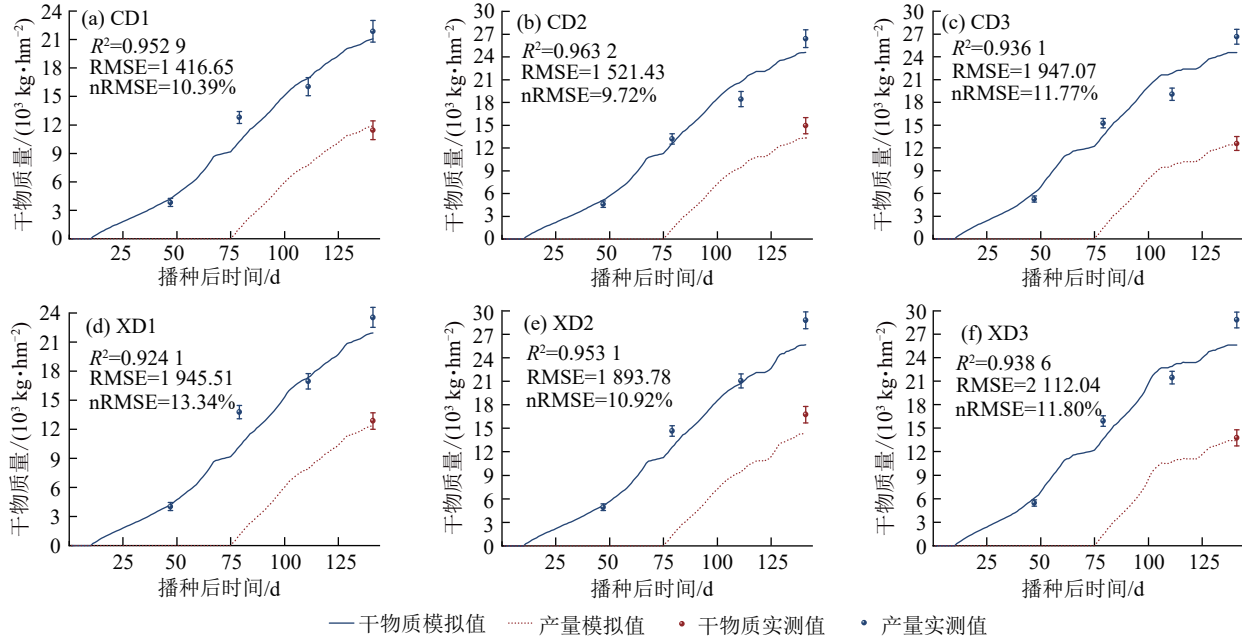
3 讨论

3.1 秸秆还田对玉米氮素吸收利用与产量的促进效应

秸秆还田是一种重要的农艺措施。在本研究中, 与秸秆离田处理相比较, 秸秆还田能显著提高植株对氮素的吸收利用能力, 优化干物质向籽粒的转运效率。其中, 氮素转运效率和氮素转运对籽粒贡献率分别提高 9.85% 和 12.33%, 氮素内在效率与氮肥偏生产力分别提高 4.71% 和 11.41%。干物质转运效率和干物质转运对籽粒贡献率分别提高 26.42% 和 20.24%, 表明秸秆还田可以优化玉米对氮素的吸收与利用过程, 并有效促进同化物向籽粒的转运, 提高作物产量^[19]。秸秆还田对转运效率的提升与其对植株光合性能的改善密切相关。已有研究^[20-21]进一步发现, 在不同种植密度下, 不同生育时期的叶面积指数与净光合速率均因秸秆还田处理而得到显著提高。可能是由于秸秆还田过程中减少地表水分蒸发, 增强土壤的持水能力并稳定生育期内的土壤温度, 为微生物活动和作物根系生长提供更适宜的温度环境^[22]。秸秆还田还有助于形成稳定的土壤团聚

体,优化土壤结构,增加土壤孔隙度,使得根系可在疏松、通气的土壤中能够更自由地伸展^[23],改善的根系增强了植株对养分和氮素的吸收与利用效率^[24]。生长环境的优化与养分供应的增强能促进叶片的生

长发育,表现为叶面积指数的增加和净光合速率的提高^[25-26],叶片的光合效能得到提升。生育期内叶面积指数的增加和净光合速率的提高为植株积累更充足的同化物,为生育后期同化物的转运奠定基础。



注:图中误差棒为标准误差棒。下同。

图 7 DNDC 模型对干物质量与产量的模拟值和实测值的比较

Fig.7 Comparison between simulated and measured values of dry matter mass and yield using DNDC model

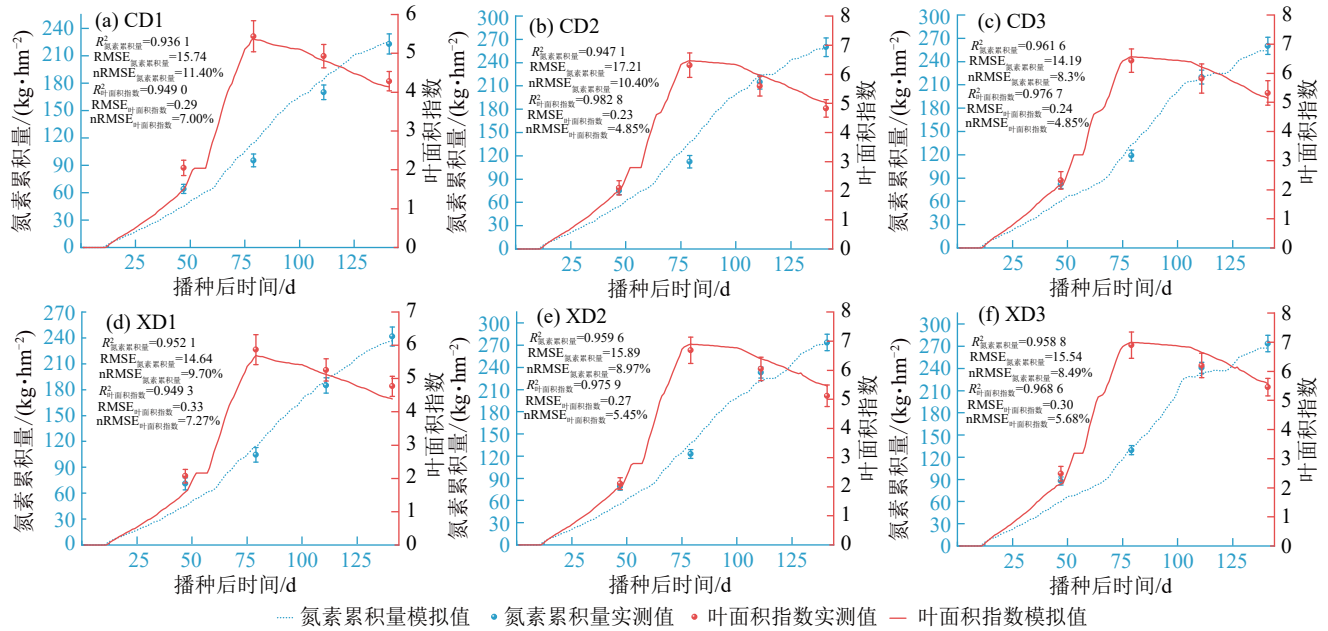


图 8 DNDC 模型对氮素累积量和叶面积指数的模拟值和实测值的比较

Fig.8 Comparison between simulated and measured values of nitrogen accumulation and leaf area index using DNDC model

3.2 种植密度对玉米氮素吸收利用与产量的调控效应

本研究中,秸秆还田与秸秆离田条件下 D2 和 D3 处理的干物质量、氮素累积量和产量均显著高于 D1 处理。在相同秸秆处理方式下,较高的种植密度使 D2 和 D3 处理在整个生育期内吸收更多的土壤养分

和氮素,从而显著促进光合产物的形成与积累,最终获得高于 D1 处理的产量。然而,干物质量与氮素累积量在 D2 与 D3 密度间差异并不显著 ($p < 0.05$),且 D3 处理的产量较 D2 不仅未提升反而下降。此现象与高密度下植株同化器官规模、净光合产物积累效率及同化物向籽粒转运过程密切相关^[27-29]。叶面积

指数与净光合速率分别是衡量植株同化器官规模与净光合产物积累效率的重要指标^[30-31],二者在全生育期的变化趋势一致,均呈先增加后减小趋势。其中,叶面积指数随种植密度增加而持续增大,而净光合速率除拔节期外,均随种植密度增加而降低。拔节期时,D1与D2处理间的叶面积无显著差异,但二者均显著低于D3处理。此时,D2处理的净光合速率显著高于D1和D3处理。可能是由于在生育初期,D2较高的种植密度能改善植株的小气候环境^[32],提升植株的光合能力。而D3处理因密度过高,在拔节期已出现叶片相互遮蔽导致的光合受限现象。抽雄期,各处理叶面积指数与净光合速率均达到峰值。此时植株进一步发育,D2种植密度也出现叶片相互遮蔽的现象,有效光合作用面积降低,同时,植株个体氮素含量较低,二者共同严重制约叶片的光合能力,致使高密度群体的净光合速率降低^[33-34]。

茎叶中储存的光合同化物向籽粒转运过程是产量形成的关键^[35],该过程主要体现为干物质与氮素向籽粒的转运^[36-37]。本试验发现,随着种植密度增加,干物质转运与氮素转运表现出不同的响应趋势,即干物质转运率与对籽粒的贡献率随密度增加而下降,氮素转运率与对籽粒的贡献率则呈先升后降趋势,该响应差异可能与二者对光合产物供应的依赖程度不同有关。干物质转运主要依赖于抽雄后期与灌浆期新形成的光合产物直接向籽粒的供应^[38],导致其对光合产物供应的依赖程度更高。种植密度增加导致叶片相互遮蔽更加严重,群体净光合速率降低,致使可用于籽粒灌浆的光合产物总量减少,干物质转运率与对籽粒的贡献率也因此随密度增加而下降。而氮素转运与之不同,光合产物主要用于转运中提供能量^[39],在适度增加种植密度时,植株群体在生育期内积累更多氮素,此时叶片遮蔽程度较轻,生成的光合产物足以提供支持氮素转运过程的能量。因此,氮素转运率显著提高。但当种植密度过高时,叶片相互遮蔽较为严重,生成的光合产物严重不足,限制氮素转运所需的能量供应,致使氮素转运能力下降。干物质转运与氮素转运间不同的响应趋势证明产量形成与氮素利用效率二者间存在效率差异,也导致不同处理间氮素内在效率和氮肥偏生产力的大小关系出现不同。其中,氮素内在效率表现为 $D2 > D1 > D3$,而氮肥偏生产力表现为 $D2 > D3 > D1$ 。二者的差异主要体现在D3处理的氮素内在效率低于D1处理,但其氮肥的偏生产力高于D1处理,是由于D3密度下单位吸收氮量所转化的产量有所下降,通过其较高的总体产

量,仍在整体上维持较高的氮肥偏生产力,但通过产量积累对利用效率下降的补偿具有局限性。D3处理较低的光合速率严重抑制同化物的合成与转运能力,导致干物质与氮素向籽粒的分配效率大幅降低^[40],更大比例的光合产物和氮素滞留于营养器官,产量潜力无法充分发挥^[41],最终导致其产量显著低于D2处理。

3.3 秸秆还田与种植密度互作对玉米氮素吸收利用和产量的影响

秸秆还田与种植密度的互作效应对玉米氮素吸收利用和产量形成具有重要调控作用。二者的互作效果优于单一措施,对实现氮素高效利用与产量的同步提升有着重要影响。从作用机制来看,秸秆还田主要通过3个层面与种植密度产生互作效应。在土壤层面,秸秆还田改善土壤结构和水热条件,为密植条件下的根系生长创造更为有利的环境,缓解高密度种植导致的土壤压实问题。在植株群体层面,秸秆还田通过促进根系对养分和氮素的吸收,部分补偿高密度群体中单株植株氮素竞争加剧带来的发育不良,同时,通过维持叶片光合功能,缓解密度增加引起的光合速率下降。在物质转运层面,秸秆还田提供的持续氮素供应支持籽粒灌浆期的氮素再转运过程,特别是在D2密度下,该效应与适宜的光合产物积累相结合,实现氮素高效利用与产量提升的协同。但当密度为D3时,尽管秸秆还田仍能通过提高氮肥偏生产力而部分补偿产量损失,但受限于严重的光合抑制和物质转运效率下降,其增产效应被显著削弱。表明二者的互作效果存在一定的阈值,在实际生产中需要根据当地基础生态条件,对秸秆还田与种植密度采取相应的调控措施。

3.4 DNDC模型对试验可靠性的验证

DNDC模型作为一种模拟生物地球化学循环的成熟工具,已被证明在不同种植密度和秸秆还田条件下能有效模拟作物生长及土壤碳氮动态^[42-43]。JIANG等^[44]利用东北地区农田管理数据对DNDC模型进行校正,并基于玉米产量、生物量和氮吸收数据进行验证。表明该模型能较精确地模拟该区域玉米生长及土壤碳氮循环特征,因此,适用于东北地区的相关预测与评估。本研究利用DNDC模型模拟玉米干物质质量、氮素累积量和叶面积指数,并得到相似结论。模型验证结果显示,模拟结果与实测数据的拟合优度均很高,干物质质量、氮素累积量和叶面积指数决定系数 R^2 平均值分别为0.944 7、0.952 6、0.952 2。该模型性能表明,模型对关键生理生态过程的模拟是合理的,显著增强本研究结果的稳健性。利用经

过良好验证的模型进行分析,验证短期田间试验结论的可靠性,从而为研究结论在相似农田环境下的适用性提供重要的支撑。

4 结论

1) 秸秆还田对增加玉米产量与增强氮素吸收利用具有显著影响。秸秆还田后植株叶面积指数与光合能力得到显著提高,玉米生育期内的干物质与氮素累积增加,且二者的转运能力及向籽粒的贡献率也得到提升。

2) 在相同秸秆处理方式下,提高种植密度均对玉米生育期内干物质与氮素累积、叶面积指数提升及最终产量增加均呈显著的正效应。然而,该效应呈非线性特征,在达到峰值后趋于稳定。秸秆还田条件下种植密度为82 500株/hm²是实现高产的最优处理组合,其产量16 743.2 kg/hm²,较对照处理CD1显著提高46.37%。

3) 本研究中实测值与DNDC模型模拟值拟合度良好,干物质累积量、氮素累积量、叶面积指数和产量其R²均在0.92以上。有效验证田间试验中秸秆还田与种植密度对玉米氮素吸收利用及产量结论的可靠性,增强研究结论的科学性与普适性,为类似生态区玉米生产的农艺措施优化提供可靠的量化依据与决策支持。

参考文献:

- [1] 韩冬荟,赵金媛,胡琦,等.东北地区粮食作物产量变化特征及其对气象干旱的响应研究[J].中国农业大学学报,2021,26(3):188-200.
- HAN D H, ZHAO J Y, HU Q, et al. Analysis of crop yield variation characteristics in northeast China and the response to meteorological drought [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(3): 188-200.
- [2] 谢孟,何厅厅,范胜龙,等.2000—2020年东北三省耕地资源与产能时空演化特征分析[J].土壤通报,2024,55(5):1205-1214.
- XIE M, HE T T, FAN S H L, et al. Characteristics of the spatial and temporal evolution of arable land resources and production capacity in three northeastern provinces from 2000 to 2020[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5): 1205-1214.
- [3] ZHANG P P, XIA L H, SUN Z H, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving forces of arable land in the Weibei dry plateau region in China[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): e20618.
- [4] 郭瑶,柴强,殷文,等.玉米密植光合生理机制及应用途径研究进展[J].作物学报,2022,48(8):1871-1883.
- GUO Y, CHAI Q, YIN W, et al. Research progress of photosynthetic physiological mechanism and approaches to application in dense planting maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(8): 1871-1883.
- [5] TIAN J G, WANG C L, CHEN F Y, et al. Maize smart-canopy architecture enhances yield at high densities [J]. Nature, 2024, 632(8025): 576-584.
- [6] 郭喜军,谢军红,李玲玲,等.氮肥用量及有机无机肥配比对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(5):806-816.
- GUO X J, XIE J H, LI L L, et al. Appropriate nitrogen fertilizer rate and organic N ratio for satisfactory photosynthesis and yield of maize in dry farming area of Longzhong, Gansu Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(5): 806-816.
- [7] WANG Z Y, SUI P X, LIAN H L, et al. Tillage with straw incorporation reduces the optimal nitrogen rate for maize production by affecting crop uptake, utility efficiency, and the soil balance of nitrogen [J]. Land Degradation and Development, 2023, 34(10): 2825-2837.
- [8] WANG X K, WANG G, TURNER N C, et al. Determining optimal mulching, planting density, and nitrogen application to increase maize grain yield and nitrogen translocation efficiency in northwest China [J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): e282.
- [9] CAO Y J, WANG L C, GU W R, et al. Increasing photosynthetic performance and post-silking N uptake by moderate decreasing leaf source of maize under high planting density [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(2): 494-510.
- [10] DUAN F Y, WEI Z, SOU ALIOU S, et al. Nitrogen partitioning in maize organs and underlined mechanisms from different plant density levels and N application rate in China [J]. Field Crops Research, 2023, 294: e108874.
- [11] 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氨挥发的影响[J].植物营养与肥料学报,2025,31(2):213-225.
- WANG H, WANG L, LU Y L, et al. Effects of long-term straw return on crop yield and ammonia volatilization of winter wheat-summer maize rotation system in typical fluvo-aquic soil region [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(2): 213-225.
- [12] LI Z W, KHAN K, YANG L, et al. Continuous straw returning combined with nitrogen application improve soil properties and yield of double cropping maize in subtropical regions [J]. Sustainability, 2024, 16(12): e5265.
- [13] 张鑫,周卫,艾超,等.秸秆还田下氮肥运筹对夏玉米

- 不同时期土壤酶活性及细菌群落结构的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(2): 295-306.
- ZHANG X, ZHOU W, AI C, et al. Effects of nitrogen management on soil enzyme activities and bacterial community structure in summer maize growing stages under straw incorporation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2): 295-306.
- [14] 岳杨, 孙盼盼, 张艳辉, 等. 秸秆还田方式对土壤物理性状及春玉米产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(11): 35-38.
- YUE Y, SUN P P, ZHANG Y H, et al. Effects of returning methods of straw on soil physical property and spring maize yield[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(11): 35-38.
- [15] JIANG L L, HE W T, JIANG R, et al. Using DNDC and WHCNS_Veg to optimize management strategies for improving potato yield and nitrogen use efficiency in northwest China[J]. *Agronomy*, 2021, 11(9): e1858.
- [16] SHAUKAT M, HOSHIDE A K, MUHAMMAD S, et al. Predicting soil carbon sequestration and harvestable C-biomass of rice and wheat by DNDC model[J]. *Crops*, 2023, 3(3): 220-240.
- [17] 王佳旭, 王宏伟, 姜文野, 等. 不同种植方式对玉米干物质积累、分配和产量的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(5): 128-136.
- WANG J X, WANG H W, JIANG W Y, et al. Effects of different planting patterns on dry matter accumulation, distribution and yield of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(5): 128-136.
- [18] 张盼盼, 朱玉平, 黄璐, 等. 氮肥减施对夏玉米花后生理特性的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(4): 137-145.
- ZHANG P P, ZHU Y P, HUANG L, et al. Effects of reducing nitrogen applications on the physiological characteristics after anthesis of summer maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(4): 137-145.
- [19] 李翔宇, 季欣杰, 王雪莲, 等. 秸秆还田配施氮肥对春玉米产量和籽粒品质的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(3): 696-712.
- LI X Y, JI X J, WANG X L, et al. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on yield and grain quality of spring maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(3): 696-712.
- [20] 武陵彬, 王林林, 王江文, 等. 不同增碳方式对黄土高原旱地玉米产量、品质及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58(14): 2751-2765.
- WU L B, WANG L L, WANG J W, et al. Effects of different carbon returning methods on grain yield, quality and water use efficiency of maize in dryland of the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(14): 2751-2765.
- [21] 钱锐. 秸秆循环利用对旱地覆膜春玉米生产和多级利用效益的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- QIAN R. Effects of straw recycling on dryland mulched spring maize production and multilevel utilization benefits[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.
- [22] SONG F, LIU M, ZHANG Z X, et al. No-tillage with straw mulching increased maize yield and nitrogen fertilizer recovery rate in northeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 292: e108687.
- [23] YANG L, MUHAMMAD I, CHI Y X, et al. Straw return and nitrogen fertilization to maize regulate soil properties, microbial community, and enzyme activities under a dual cropping system[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: e823963.
- [24] HUANG T T, YANG N, LU C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: e105171.
- [25] 胡卫丛, 王蓓, 吴旭东, 等. 秸秆还田对下茬玉米生长、产量和品质的影响[J]. 土壤, 2025, 57(3): 524-529.
- HU W C, WANG B, WU X D, et al. Effects of maize straw returning to field on growth, yield and quality of next maize[J]. *Soils*, 2025, 57(3): 524-529.
- [26] 杨励华. 秸秆及有机粪肥对覆膜春玉米生长发育和氮素吸收与利用的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- YANG L H. Effects of straw and organic manure on growth nitrogen uptake and utilization of mulched spring maize[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [27] 吴昊楠. 大豆-玉米复合间作模式对玉米光合特征及产量形成的影响[D]. 新疆 石河子: 石河子大学, 2024.
- WU H N. Effects of soybean-corn composite intercropping pattern on photosynthetic characteristics and yield formation of maize[D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2024.
- [28] 陈飞. 不同类型肥料配施对旱地土壤性质、春玉米生长及其生产力的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- CHEN F. Effects of combined fertilization with different fertilizer types on soil properties, growth, and productivity of spring maize in dryland agriculture[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.
- [29] 丁潮, 杜常亮, 谢军红, 等. 氮肥运筹提高旱作玉米籽粒产量和品质的光合生理机制[J]. 作物学报, 2025, 51(11): 3080-3095.
- DING C, DU CH L, XIE J H, et al. Photosynthetic physiological mechanisms underlying improved grain yield and quality in dryland maize through nitrogen man-

- agement [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(11): 3080-3095.
- [30] 苏继霞. 氮肥运筹对滴灌甜菜氮效率和碳氮代谢的调控机理研究[D]. 新疆 石河子: 石河子大学, 2024.
SU J X. Study on the regulation mechanism of nitrogen fertilizer management on the nitrogen efficiency and carbon and nitrogen metabolism of drip-irrigated sugar beet [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2024.
- [31] SUHARTO Y B, SUHARDIYANTO H, SUSILA A D, et al. Artificial neural networks model for photosynthetic rate prediction of leaf vegetable crops under normal and nutrient-stressed in greenhouse [J]. *HAYATI Journal of Biosciences*, 2025, 32(2): 300-309.
- [32] PENG Y X, ZHANG F X, HAN W, et al. Modeling long-term nitrogen utilization under alfalfa-corn rotation in northeast China [J]. *Field Crops Research*, 2024, 309: e109313.
- [33] 侯全明. 渭北旱塬春玉米大豆间作模式下玉米增密对光资源利用及增产效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
HOU Q M. A Study on the Effect of increasing maize density on light resource utilization and yield increase under the intercropping model of spring maize and soybean in the Weibei arid plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [34] MENG C T, WANG Z Y, CAI Y, et al. Effects of planting density and nitrogen (N) application rate on light energy utilization and yield of maize [J]. *Sustainability*, 2022, 14(24): e16707.
- [35] 任红. 氮肥和密度对春玉米籽粒灌浆和碳氮代谢的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
REN H. Effect of nitrogen application and plant density on grain filling and carbon nitrogen metabolism of spring maize [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.
- [36] YAN Y Y, DUAN F Y, LI X, et al. Photosynthetic capacity and assimilate transport of the lower canopy influence maize yield under high planting density [J]. *Plant Physiology*, 2024, 195(4): 2652-2667.
- [37] 夏镇卿. 土壤增温条件下氮肥运筹对玉米植株衰老与氮素利用的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
XIA Z Q. Effects of nitrogen fertilizer application on senescence and nitrogen utilization of maize plants under soil warming conditions [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2025.
- [38] WU X Y, TONG L, KANG S Z, et al. Combination of suitable planting density and nitrogen rate for high yield maize and their source-sink relationship in north-west China [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(11): 5300-5311.
- [39] GAO H X, ZHANG C C, VAN DER WERF W, et al. Intercropping modulates the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in maize and peanut [J]. *Field Crops Research*, 2022, 284: e108561.
- [40] ZHANG D S, SUN Z X, FENG L S, et al. Maize plant density affects yield, growth and source-sink relationship of crops in maize/peanut intercropping [J]. *Field Crops Research*, 2020, 257: e107926.
- [41] WU L Q, ZHANG G Q, YAN Z H, et al. Optimizing maize yield and resource efficiency using surface drip fertilization in Huang-Huai-Hai: Impact of increased planting density and reduced nitrogen application rate [J]. *Agronomy*, 2024, 14(5): e944.
- [42] 吕宏菲. 基于DNDC模型对秸秆还田下土壤有机碳和作物产量的模拟研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
LÜ H F. Simulation study on soil organic carbon and crop yield under straw returning based on DNDC model [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [43] ZHANG J Y, FU Z P, ZHANG K, et al. Optimizing rice in-season nitrogen topdressing by coupling experimental and modeling data with machine learning algorithms [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 209: e107858.
- [44] JIANG R, HE W T, ZHOU W, et al. Exploring management strategies to improve maize yield and nitrogen use efficiency in northeast China using the DNDC and DSSAT models [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 166: e104988.