doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.202601240001
引用格式:张铁军,赵健军,李彬,等. 东北黑土区有机肥替代化肥对土壤有机碳、氮组分及玉米产量的影响[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2026,51(3):147-159.
Citation:ZHANG Tiejun,ZHAO Jianjun,LI Bin,et al. Impact of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Soil Organic Carbon,Nitrogen Components,and Maize Yield in the Black Soil Region of Northeast China[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science),2026,51(3):147-159.

东北黑土区有机肥替代化肥对土壤有机碳、氮组分及玉米产量的影响

张铁军[1],赵健军[1,2],李 彬[1,2,3,4*],狄彩霞[2],禚旭阳[3],郑 威[5]
(1. 内蒙古科技大学 能源与环境学院,内蒙古 包头 014017;2. 内蒙古自治区农牧业科学院,内蒙古 呼和浩特 010031;3. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018;4. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古自治区工程研究中心,内蒙古 呼和浩特 010018;5. 通辽市农牧业科学院 玉米研究所,内蒙古 通辽 028001)

摘要: 为探明东北黑土区有机肥替代化肥对土壤碳氮耦合关系及玉米生产力的作用规律,以2024—2025 年的定位试验为基础,设置 4 个施肥处理:不施肥空白对照(CK)、常规单施化肥(T0)、25% 有机肥等氮替代化肥(T25)、50% 有机肥等氮替代化肥(T50),系统分析了不同施肥处理条件下土壤碳氮组分的动态变化特征,并进一步探讨这些变化对玉米产量构成要素的影响规律. 试验结果表明,有机肥替代处理对土壤碳氮库的培育效应具有显著的非线性特征. 其中 25% 有机肥替代处理表现出最优的碳氮协同效应,与常规单施化肥处理相比,其土壤总有机碳(*SOC*)、全氮(*TN*)含量分别显著提高 25.56%、21.16%;易氧化有机碳(*ROC*)、微生物生物量碳(*MBC*)等活性碳氮组分较单施化肥处理显著提高 32.39%~104.66%,碳库管理指数(*CPMI*)达到 171.70 的最高值. 50% 有机肥等氮替代处理虽能提高土壤碳氮比,但是由于速效化学氮肥施用量大幅降低,玉米苗期至拔节期土壤速效养分供给不足,因此直接抑制了作物营养生长前期氮素积累过程,最终限制了籽粒产量的形成潜力. 玉米产量及养分利用效率的统计分析结果显示,25% 有机肥替代处理通过匹配土壤供氮动态与玉米需肥规律,两年平均产量较单施化肥处理显著提高了 7.07%,氮素利用效率最高达到 36.22%,实现了籽粒产量与氮素利用效率的同步提升;相反,50% 有机肥替代处理因生育前期供氮不足,玉米产量无显著提高,增幅仅为 0.84%. 综上,本研究明确 25% 有机肥等氮替代化肥的施肥模式有利于优化东北黑土区土壤活性碳氮组分的周转过程,可以缓解土壤微生态系统中碳氮比例,促使区域玉米稳产增效,故其是兼顾黑土培肥与作物高产高效的最优替代比例.

关键词: 有机肥替代;土壤有机碳;土壤有机氮;碳氮比;玉米产量
中图分类号:S513;S513.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1007-855X(2026)03-0147-13

Impact of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Soil Organic Carbon, Nitrogen Components, and Maize Yield in the Black Soil Region of Northeast China

ZHANG Tiejun[1],ZHAO Jianjun[1,2],LI Bin[1,2,3,4*],DI Caixia[2],ZHUO Xuyang[3],ZHENG Wei[5]

收稿日期:2026-01-24. **基金项目**:国家重点研发计划子课题(2023YFD1500202).
作者简介:张铁军(1976-),男,副教授. 主要研究方向:环境污染治理与修复. **E-mail**:1281395298@qq.com
通信作者:李彬(1982-),男,博士,研究员. 主要研究方向:节水灌溉与土壤环境科学. **E-mail**:libin_kim@sina.com

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014017, Inner Mongolia, China;
2. Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Hohhot 010031, China;
3. School of Hydraulic and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
4. Inner Mongolia Engineering Research Center for Efficient Water - Saving Technology Equipment and Soil - Water - Environment Effects, Hohhot 010018, China;
5. Maize Research Institute, Tongliao Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Tongliao 028001, Inner Mongolia, China)

Abstract: To investigate the coupling relationship between soil carbon and nitrogen and the effect of replacing chemical fertilizers with organic fertilizers on maize productivity in the black soil region of Northeast China, a field location experiment was conducted from 2024 to 2025. Four fertilization treatments were set up: no fertilization blank control (CK), conventional single chemical fertilizer application (T0), 25% organic fertilizer replacing chemical fertilizer with equal nitrogen (T25), and 50% organic fertilizer replacing chemical fertilizer with equal nitrogen (T50). The dynamic change characteristics of soil carbon and nitrogen components under different fertilization treatments were systematically analyzed, and the impact of these changes on maize yield components was further explored. The results showed that the cultivation effect of the organic fertilizer substitution treatments on soil carbon and nitrogen pools had significant nonlinear characteristics. Among them, the T25 treatment showed the optimal carbon and nitrogen synergistic effect. Compared with the T0 treatment, its soil total organic carbon (*SOC*) and total nitrogen (*TN*) contents were significantly increased by 25.56% and 21.16%, respectively; the active carbon and nitrogen components, such as easily oxidizable carbon (*ROC*) and microbial biomass carbon (*MBC*), were significantly increased by 32.39% ~ 104.66%, and the carbon pool management index (*CPMI*) reached the highest value of 171.70. Although the T50 treatment could improve the soil carbon - nitrogen ratio, the substantial reduction in the application of available chemical nitrogen fertilizer led to an insufficient supply of soil available nutrients from the seedling stage to the jointing stage of maize. Therefore, it directly inhibited the nitrogen accumulation process in the early stage of crop vegetative growth, ultimately limiting the formation potential of grain yield. The statistical analysis results of maize yield and nutrient utilization efficiency showed that the T25 treatment matched the soil nitrogen supply dynamics with the maize fertilizer requirement law. The two - year average yield was significantly increased by 7.07% compared with the single chemical fertilizer treatment, and the nitrogen utilization efficiency reached a maximum of 36.22%, achieving a simultaneous improvement of grain yield and nitrogen utilization efficiency. On the contrary, the T50 treatment did not significantly increase maize yield due to insufficient nitrogen supply in the early growth stage, with an increase of only 0.84%. In summary, this study clarifies that the fertilization mode of substituting 25% of chemical fertilizers with organic fertilizers under equal nitrogen conditions is beneficial for optimizing the turnover process of soil active carbon and nitrogen components in the black soil region of Northeast China. It can alleviate the carbon and nitrogen ratio in the soil micro - ecosystem, promote stable and efficient maize production in the region, and thus is the optimal substitution ratio that balances black soil fertilization with high crop yield and efficiency.

Keywords: organic fertilizer substitution; soil organic carbon; soil organic nitrogen; carbon nitrogen ratio; maize yield

0 引 言

东北黑土区是我国核心的粮食生产基地,黑土区不仅承担着我国主粮作物稳产增产的核心使命,同时在陆地生态系统碳、养分循环过程中发挥着不可替代的作用,是保障区域生态系统稳定的关键屏障. 但长期高强度、集约化的农业开发,已打破了该系统原本脆弱的微生态平衡[1]. 尤其是区域内长期超量施用化学氮肥,直接导致土壤有机质大幅衰减、团粒结构退化、氮素利用效率持续走低等一系列问题,进一步放大了黑土区农田的生态环境隐患[2-3]. 改良土壤质量、提升肥料利用效率,已成为当前黑土区农业发展中亟

待解决的核心问题. 有机肥含有丰富的有机碳与矿质营养元素,采用适度的有机肥替代化肥策略,可在降低农田对化学肥料依赖的同时,通过优化土壤团聚体微环境形成物理保护,促进土壤碳素的稳定固存,实现土壤基础地力与养分利用效率的协同提升[4]. 有机肥替代化肥的施肥模式,已被公认为阻控黑土退化、提升农田生态系统功能的核心技术路径. 但有机肥本身具有碳氮比偏高、养分释放速率平缓的特性,若单一高量施用,易造成作物生育前期无机养分供应不足,进而制约作物高产潜力的发挥. 因此,筛选确定适宜的有机肥替代比例,是优化黑土区农田施肥管理策略的重要前提.

土壤有机碳库与氮库是表征土壤肥力水平的核心指标,氮素作为限制作物生长发育的重要营养元素,其在作物当季吸收总量中,超过 50% 来源于土壤自身的供给. 由于土壤有机氮在全氮库中的占比通常可达 90% 以上,因此有机氮库的容量大小及其存在形态,直接决定了土壤能够持续供应无机氮的能力[5-6]. 已有研究表明,有机无机配施的施肥模式在提升土壤肥力、促进作物养分吸收方面具备不可替代的优势,其可显著提高作物氮素利用效率、降低氮素盈余所引发的农业面源污染风险[7-8]. 同时,外源有机物料的输入从根本上是扩增土壤有机碳库的最直接且有效的手段. Song 等[9] 与王俊姣等[10] 的研究结果均表明,化肥配施不同类型有机物料相较单施化肥处理,能显著增加土壤总有机碳(SOC)及多种高活性碳组分的储量[11]. 这些高活性碳组分是驱动土壤微生态物质代谢的核心动力,可以直接调控着土壤有机养分的矿化分解及释放进程. 在陆地生态系统中,土壤有机碳的动态变化特征通常采用碳库管理指数进行综合量化评价.

尽管国内外学者已围绕有机肥替代化肥这一技术开展了大量研究工作,但现有研究大多将土壤碳组分与氮组分的演变过程分开进行独立分析,针对二者之间耦合关系的系统性探讨仍然相对不足. 农田土壤是一个高度复杂的生态系统,仅通过测定单一碳氮组分的含量变化,难以准确反映长期不同有机肥替代比例对耕地土壤质量产生的综合效应. 在实际农业生产过程中,有机物料固有的矿化迟滞特性决定了高比例有机肥替代容易造成作物生育早期速效养分供应亏缺,导致有机养分矿化释放速率与作物营养生长初期的养分需求难以匹配. 因此对于半干旱黑土区滴灌种植模式,如何确定合理的有机肥替代阈值,使其在优化土壤活性碳、氮组分周转的同时有效缓解生育前期供肥迟滞的问题,最终实现养分释放与作物吸收的动态匹配十分重要,但目前仍缺乏系统的定量研究与科学评估. 鉴于此,本研究依托连续 2 年(2024—2025)的田间定位试验,系统分析不同有机肥替代比例下黑土耕层土壤有机碳、氮组分的累积特征及敏感性演变规律,解析土壤活性碳氮组分间的内在耦合关系及其对玉米生产力的驱动效应,旨在明确兼顾土壤碳库质量提升与氮素高效利用的最优替代比例,为东北黑土区农田的绿色转型与产能协同提升提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　试验区概况

本研究田间试验于 2024 年 5 月在内蒙古自治区通辽市农牧业科学院试验基地进行,试验基地位于东北黑土区,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候区. 试验基地地处东经 122.2°、北纬 43.6°,海拔 176.6 m,该区域光热资源丰富,日照数 3 113 h,年平均无霜期 150 d,年平均气温 6.6 ℃,年平均风速 3.6 m/s,年平均降水量 385.1 mm,春秋降水量占年降水量的 13%~16%,具有光照充足、昼夜温差大等气候特点.

供试土壤属于东北典型的灰色草甸土,具有土层深厚、结构良好及保水保肥能力强的特点,土壤容重为 1 410 kg/m^3,孔隙度为 46.79%,土壤基本农化性质(见表 1). 试验地块为长期玉米连作农田,耕作历史悠久. 该区域主要种植作物为玉米,生育期集中在 5 月至 10 月,与夏季雨季重叠. 作为内蒙古东部典型的节水农业示范区,该地广泛采用了滴灌与水肥一体化技术,为研究不同有机肥替代比例下作物生产力及资源利用效率提供了具有代表性的田间试验条件.

1.2　试验材料

供试玉米为 TK601(通辽市农牧业科学院培育);供试化肥为尿素(乌兰)、过磷酸钙(丰乐肥业)和硫酸钾(山东联盟);供试有机肥为附近三合肥业有限公司以动植物废弃物为原料加工而成的“蒙农肥”.

表1 土壤基本农化性质

Tab. 1 Basic agronomic properties of soil

指标	有机质/(g·kg^{-1})	含水量/%	全氮/(g·kg^{-1})	碱解氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	速效钾/(g·kg^{-1})	酸碱度
数值	15.91 ±0.45	46.1 ±1.12	0.53 ±0.05	0.088 ±0.002	0.81 ±0.07	0.139 ±0.005	8.16 ±0.18

1.3 试验设计

本试验设置4种施肥处理:CK(不施肥,对照);T0(仅施化学肥料);T25(有机肥等量替代化学氮肥总量25%);T50(有机肥等量替代化学氮肥总量50%). 种植前,除对照组外,各处理所需的全部磷肥、钾肥作为基肥一次性施入,播种前向有机肥替代处理组施入有机肥,各施氮处理中所用氮肥在苗期、拔节期、抽雄期和灌浆期分次追施. 所用化学肥料为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P_2O_5 18%)和硫酸钾(含K_2O 52%). 有机肥选用"蒙农肥",含氮(N)4%、五氧化二磷(P_2O_5)2%、氧化钾(K_2O)2%、有机质>30%. 该肥料的各项质量指标(重金属限量及卫生学指标)均严格符合中华人民共和国农业行业标准(NY/T 525—2021)《有机肥料》的要求[12],确保无重金属污染及病原体风险. 试验设计遵循等养分投入原则,在T25和T50处理中分别用有机氮肥替代了25%和50%的化学氮肥. 为确保各处理间氮、磷和钾总投入量一致,本研究通过计算有机肥带入的养分量,向T0和T25处理中补充相应的化学磷肥和钾肥(见表2),实现各处理间严格的养分平衡.

本试验灌溉水平参考内蒙古自治区地方标准《玉米膜下滴灌水肥管理技术规程》[13],并结合当地实际条件确定灌水量为240 mm,属于中等灌溉水平. 灌溉制度采用关键期亏缺补灌模式,分别在苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期和灌浆期进行滴灌,共灌水5次,各时期灌水量分别为300、450、450、900和300 m^3/hm^2. 设置1条滴灌带控制2行作物,布置在行距40 cm的2行玉米中间,滴灌带间距110 cm. 试验地块随机布置,每种处理重复3次,每个地块面积为80 m^2(长为10 m,宽为8 m),中间铺设1 m宽过道,四周设置2 m保护耕作行. 播种时间分别为2024年5月10日和2025年5月16日,播种密度为7.5万株/hm^2.

表2 施肥方案

Tab. 2 Fertilization plan

kg/hm^2

项目	有机肥养分投入量			化肥养分投入量			补加养分量			总养分量		
	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T0	0.00	0.00	0.00	240.0	92.0	50.0	0.00	60.0	60.0	240.0	152.0	110.0
T25	60.0	30.0	30.0	180.0	92.0	50.0	0.00	30.0	30.0	240.0	152.0	110.0
T50	120.0	60.0	60.0	120.0	92.0	50.0	0.00	0.00	0.00	240.0	152.0	110.0

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤样品采集与理化性质测定

分别于2024年和2025年玉米的抽雄期(VT),从每个样地随机采集5个土壤样本,充分混合后过滤去除卵石、根系等杂质. 采用四分法将混合样本分割成约500 g的块状,一部分新鲜土样过2 mm筛后立即置于4 ℃冰箱保存,用于测定活性组分;另一部分置于阴凉通风处自然风干,研磨后备用.

土壤SOC含量采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定[14];微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸K_2SO_4浸提法测定[15];颗粒有机碳(POC)和颗粒有机氮(PON)用5 g/L六偏磷酸钠浸提震荡后测定[16];易氧化有机碳(ROC)采用333 mmol/L高锰酸钾氧化法测定[17];溶解性有机碳(DOC)与溶解性有机氮(DON)采用去离子水浸提法测定[18].

1.4.2 植株样品采集、产量与养分利用效率测定

在玉米成熟期,每个处理的3个重复小区内各随机选取长势一致的代表性植株10株. 自茎基部剪取地上部后,将样品按茎、叶、苞叶和穗部分离,经105 ℃杀青60 min,置于80 ℃烘箱烘干至恒重. 称取玉米

各部分干物质量(GY),并将测定完干物质量的植株样品粉碎过筛(孔径为 0.25 mm 的分样筛),称取 0.1 g 样品,采用凯氏定氮法测定各器官 TN 含量,并根据干物质积累量计算植株氮素积累总量. 各小区单独收获,自然风干后测定籽粒产量.

氮素利用效率(*NUE*)是作物吸收的氮素占施入土壤中氮肥总量的百分比,是衡量氮肥在农业生产中有效性的核心指标,计算方法如下[19]:

$$NUE = (U_N - U_0)/F_N \times 100\% \quad (1)$$

式中:*NUE* 为氮素利用效率,%;U_N 为施氮区植株吸收氮量,kg/hm^2;U_0 为不施氮区植株吸氮量,kg/hm^2;F_N 为氮素施用量,kg/hm^2.

氮肥偏生产力(*PFP*)是指施用氮肥下的作物产量与施肥量的比值,它是反映当地土壤基础养分水平和肥料施用量综合效应的重要指标,其计算方法如下:

$$PFP = Y/F \quad (2)$$

式中:*PFP* 为氮肥偏生产力,kg/kg;*Y* 为作物的产量,kg/hm^2;*F* 为氮肥的投入量,kg/hm^2.

1.4.3 碳库管理指标及管理指数测定

碳库活度(*CA*)是反映土壤中碳转化速率及矿化能力、评价土壤活性的重要指标,通过 *ROC* 和 *SOC* 之间的比值可揭示土壤碳矿化速率. 碳库管理指数(*CPMI*)整合了碳库指数(*CPI*)和碳库活度指数(*CAI*),能够全面评估土壤管理措施对碳储量及碳活性的改善效果. 本试验以 *CK* 为参考土壤计算 *CPMI*[20],计算公式如下:

$$CA = ROC/(SOC - ROC) \quad (3)$$

$$CAI = CA_{sample}/CA_{reference} \quad (4)$$

$$CPI = SOC_{sample}/SOC_{reference} \quad (5)$$

$$CPMI = CPI \times CAI \times 100 \quad (6)$$

式中:CA_{sample}为样品土壤的碳库活度;$CA_{reference}$为对照组土壤的碳库活度;SOC_{sample}为样品土壤的 *SOC* 含量,g/kg;$SOC_{reference}$为对照组土壤的 *SOC* 含量,g/kg.

1.5 数据处理

土壤的物理、化学和生物特性采用单因素方差分析(One - way ANOVA)进行分析,使用 SPSS 20.0 软件进行均值分离,并采用多重比较检验. 采用不同小写字母标记差异的显著性,显著性水平设为 $P < 0.05$. 数据可视化使用 OriginPro 9.1 完成.

2 结果与分析

2.1 有机肥替代化肥对土壤有机碳组分及土壤碳库管理指数的影响

2.1.1 土壤有机碳组分含量变化

由表 3 可知,不同施肥处理下,*SOC*、*ROC*、*MBC*、*DOC* 和 *POC* 含量变化趋势一致,即各有机肥替代处理总体均明显高于 CK,其中以 T25 处理效果最好. 通过两年数据平均值计算可知,与 CK 相比,T25 的 *SOC*、*ROC*、*MBC*、*DOC* 和 *POC* 含量分别增加了 39.65%、62.58%、54.43%、101.41% 和 162.44%,在两年试验中均呈现显著性差异;与 T0 相比,T25 处理 *SOC*、*ROC*、*MBC*、*DOC* 和 *POC* 含量分别增加了 25.56%、36.58%、41.67%、32.41% 和 104.66%,两年试验中均呈显著性差异;与 T50 相比,T25 处理 *SOC*、*ROC*、*MBC*、*DOC* 和 *POC* 含量分别增加了 9.84%、10.90%、17.72%、14.71% 和 24.94%,其中 *SOC* 和 *MBC* 两年均呈显著性差异,而 *ROC* 连续两年均无显著性差异.

与 CK 相比,T50 处理 *SOC*、*ROC*、*MBC*、*DOC* 和 *POC* 含量分别增加了 27.14%、46.61%、31.18%、75.59% 和 110.05%,在两年试验中均呈显著性差异;T0 处理则分别增加了 11.23%、19.04%、9.01%、52.11% 和 28.23%. 总体表明,两年有机肥替代处理可更有效提升 *SOC* 及其活性组分碳库水平,且以 T25 综合增效最为突出. 本试验中,有机肥替代对 *SOC* 及其活性组分的积累影响并不是替代比例越高效果越好,各活性组分的变化方向基本一致. *DOC* 和 *POC* 对有机物料输入的响应最为敏感,其增量大幅超过 *SOC*;T25 能最大化激发土壤微生态活性并饱和高活性有机碳库的容量,过度增加有机肥比例反而会导致整体碳库增效的相对回落.

表3 土壤有机碳组分的含量

Tab. 3 The content of soil organic carbon fractions

年份	项目	*SOC*/(g·kg^{-1})	*DOC*/(g·kg^{-1})	*MBC*/(mg·kg^{-1})	*POC*(g·kg^{-1})	*ROC*/(g·kg^{-1})
2024年	CK	9.75±0.42^{c}	0.105±0.005^{c}	237.1±11.2^{c}	2.03±0.15^{c}	2.22±0.18^{b}
	T0	10.54±0.51^{c}	0.161±0.007^{c}	252.3±10.3^{c}	2.71±0.22^{b}	2.69±0.25^{b}
	T25	13.18±0.65^{a}	0.206±0.010^{a}	362.8±16.6^{a}	5.12±0.45^{a}	3.68±0.31^{a}
	T50	12.02±0.58^{b}	0.184±0.009^{b}	306.0±14.3^{b}	4.63±0.38^{a}	3.25±0.28^{a}
2025年	CK	9.67±0.48^{d}	0.108±0.005^{d}	240.4±12.8^{d}	2.15±0.18^{c}	2.35±0.21^{b}
	T0	11.06±0.53^{c}	0.163±0.008^{c}	268.2±11.0^{c}	2.65±0.25^{c}	2.75±0.24^{b}
	T25	13.94±0.72^{a}	0.223±0.009^{a}	374.6±18.5^{a}	5.85±0.55^{a}	3.75±0.35^{a}
	T50	12.67±0.60^{b}	0.190±0.009^{b}	320.4±15.9^{b}	4.15±0.35^{b}	3.45±0.30^{a}
平均	CK	9.71±0.41^{d}	0.106 5±0.004 8^{d}	238.8±10.9^{d}	2.09±0.16^{d}	2.29±0.19^{d}
	T0	10.80±0.55^{c}	0.162 0±0.006 8^{c}	260.3±12.9^{c}	2.68±0.21^{c}	2.72±0.22^{c}
	T25	13.56±0.56^{a}	0.214 5±0.012 6^{a}	368.7±17.0^{a}	5.49±0.60^{a}	3.72±0.30^{a}
	T50	12.35±0.57^{b}	0.187 0±0.008 7^{b}	313.2±15.7^{b}	4.39±0.42^{b}	3.35±0.28^{b}

注:同一测定指标下,数据后不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著($P<0.05$),下同.

2.1.2 土壤活性有机碳组分的分配比例

活性有机碳组分在 *SOC* 中的分配比例,是衡量土壤碳库质量与周转活跃度的重要标尺. 不同碳组分在 *SOC* 中所占比例存在差异. 由表4可知,各施肥处理普遍提高了活性有机碳组分(*ROC*、*POC*、*MBC*、*DOC*)占 *SOC* 的比例,其中 *POC* 是主要的活性有机碳组分,在各施肥处理中占比最高. 其中T25提高 *POC* 占比的效果最为显著,平均占比达40.40%且显著高于T0(25.29%)和CK(21.53%);T50处理下 *POC/SOC* 在2024年与T25无显著差异,但2025年显著低于T25处理,表明高比例有机替代对该组分的提升效果有所降低. *ROC/SOC* 两年平均值介于23.54%~27.41%. 各施肥处理均提高了 *DOC* 的分配比例,其中T25与T50处理的两年平均占比分别为1.59%和1.52%,二者在2024年均显著高于CK.

表4 土壤活性有机碳与总有机碳的比值

Tab. 4 Soil labile organic carbon to SOC ratio %

年份	项目	*DOC/SOC*	*MBC/SOC*	*POC/SOC*	*ROC/SOC*
2024年	CK	1.08±0.09^{b}	2.43±0.15^{a}	20.82±1.85^{c}	22.77±1.20^{b}
	T0	1.53±0.12^{a}	2.39±0.18^{a}	25.70±2.10^{b}	25.52±1.45^{a}
	T25	1.57±0.11^{a}	2.76±0.22^{a}	38.84±3.10^{a}	27.92±1.55^{a}
	T50	1.53±0.14^{a}	2.55±0.20^{a}	38.54±2.95^{a}	27.05±1.60^{a}
2025年	CK	1.12±0.08^{b}	2.48±0.14^{a}	22.23±1.50^{c}	24.30±1.30^{b}
	T0	1.47±0.15^{a}	2.43±0.16^{a}	23.96±1.90^{c}	24.86±1.40^{ab}
	T25	1.60±0.10^{a}	2.69±0.21^{a}	41.96±3.50^{a}	26.90±1.50^{ab}
	T50	1.50±0.13^{a}	2.53±0.19^{a}	32.75±2.40^{b}	27.22±1.65^{a}
平均	CK	1.10±0.08^{b}	2.46±0.13^{b}	21.53±1.69^{d}	23.54±1.40^{c}
	T0	1.51±0.12^{a}	2.46±0.17^{a}	24.83±1.85^{c}	25.19±1.29^{b}
	T25	1.59±0.10^{a}	2.73±0.20^{a}	40.40±3.42^{a}	27.41±1.47^{a}
	T50	1.52±0.12^{a}	2.54±0.17^{ab}	35.65±3.98^{b}	27.14±1.46^{ab}

2024年数据显示,各施肥处理的 *ROC/SOC* 均显著高于CK;而2025年仅T50显著高于CK,T0和T25与CK之间均无显著差异,且T0与T25之间也无显著差异. *MBC* 和 *DOC* 在 *SOC* 中所占的比重较低,分别处于2.39%~2.76%和1.08%~1.60%的范围. *MBC/SOC* 各处理组间均无显著性差异,但T25与T50在两年中均高于CK与T0;*DOC/SOC* 在各施肥处理之间无显著差异,但连续两年均显著高于对照组CK,表明施肥可显著增加溶解性有机碳的分配比例.

2.1.3 土壤碳库管理指数变化特征

由图 1 可见不同施肥处理下土壤碳库指数的变化情况. 图 1(a)和图 1(b)分别展示了 2024 年和 2025 年不同施肥组 *CPI*、*CA*、*CAI* 的变化,图 1(c)和图 1(d)分别展示了 2024 年和 2025 年不同施肥组 *CPMI* 变化. 综合两年试验结果可以看出,与 T0 和 CK 相比,采用有机肥替代化肥的 T25 和 T50 处理,在各项碳库管理指标上均表现出更为显著的提升作用,且不同处理间呈现显著的差异性($P<0.05$). 从 *CPI* 来看,有机肥替代处理显著提高了碳库指数,T25 与 T50 的两年平均值分别为 1.40 和 1.27,显著高于 T0 与 CK 处理组. 与 T0 相比,T25 与 T50 对 *CPI* 的提升幅度分别为 25.68% 和 14.41%,其中 T25 处理显著高于其他各处理组,处于最高水平. 在 *CA* 与 *CAI* 方面,T25 处理同样表现出显著优势. T25 的 *CAI* 两年平均指数达 1.23,相较于 T0,T25 对 *CAI* 的提升幅度达 12.33%,呈显著性差异. 说明低比例有机肥替代更能有效激活土壤碳库活性.

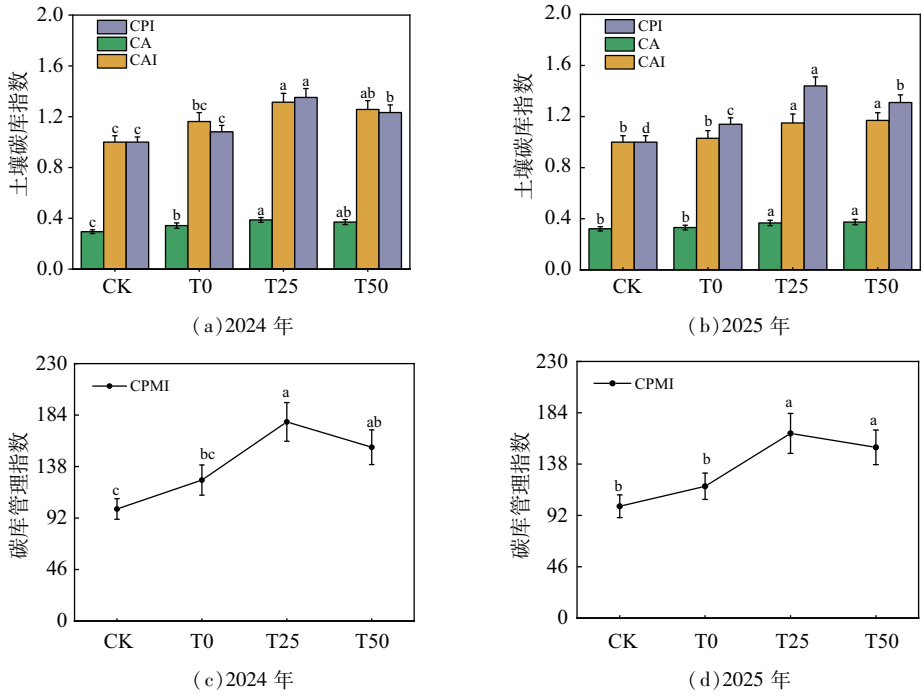


图 1　土壤碳库指数与碳库管理指数

Fig. 1　Soil carbon pool index and carbon management index

CPMI 是评价土壤碳库管理水平及土壤质量的综合指标,各处理间 *CPMI* 差异显著,呈现 T25 > T50 > T0 > CK 的变化规律. T25 处理下 *CPMI* 最高,两年平均值为 171.70,T50 次之,为 154.10. 与 T0 相比,T25 与 T50 使 *CPMI* 分别提高了 40.74% 和 26.31%. 数值的显著差异表明,T25 显著优于单施化肥处理,在 T50 处理中各项指数增幅回落,故 T25 是最有利于提升土壤碳库管理水平、改善土壤质量的施肥策略.

2.2 有机肥替代化肥对土壤有机氮组分及碳氮比的影响

2.2.1 土壤有机氮组分含量变化

由表 5 可知,不同施肥处理下,*TN*、*DON*、*PON* 和 *MBN* 含量变化趋势一致,各施肥组总体均高于 CK 组,其中以 T25 处理效果最好. 通过两年数据平均值可知,与 CK 相比,T25 的 *TN*、*DON*、*PON* 和 *MBN* 含量分别增加 29.26%、92.47%、60.20% 和 100.84%,两年均呈现显著性差异;与 T0 相比,T25 处理 *TN*、*DON*、*PON* 和 *MBN* 含量分别增加 21.16%、57.42%、26.17% 和 71.12%,连续两年均呈显著性差异;与 T50 相比,T25 处理 *TN*、*DON*、*PON* 和 *MBN* 含量分别增加 7.14%、23.25%、7.86% 和 18.67%,其中 *PON* 和 *TN* 的增幅相对较小,在两年间均无显著性差异,说明高比例替代未能持续显著扩大高活性氮组分的库容.

与 CK 相比,T50 处理的 *TN*、*DON*、*PON* 和 *MBN* 指标均增加 20.64%、56.16%、48.53% 和 69.25%,呈显著性差异;T0 处理两年平均分别增加了 6.68%、22.26%、26.97% 和 17.36%,但 T0 与 CK 之间部分指标并无显著性差异. 总体表明,有机肥替代处理可更持续地提升土壤氮库水平,其中 T25 综合增效最突出.

DON 和 MBN 等活性组分对有机物料的输入较为敏感.

2.2.2 土壤有机氮组分的分配比例

不同氮组分在 TN 中所占比例均存在差异(见表 6),有机肥替代普遍提高了活性氮组分占全氮的比例. 所有处理中 *PON* 与 *DON* 占比较高. *DON/TN* 两年平均值介于 1.86% ~ 2.77%,其中有机肥替代处理显著提升了该比例,T25 平均最高为 27.65%,两年均显著高于 CK 及 T0. *DON/TN* 在两年内均呈现 T25 > T50 > T0 > CK 的变化规律,且两年试验中各处理间均达显著水平,表明 25% 是优化该高活性组分分配的最佳阈值. *PON/TN* 两年平均值介于 20.70% ~ 25.70%,整体表现为 T0、T25 和 T50 均高于 CK. 此外,连续两年间 T0、T25 与 T50 处理在 *PON/TN* 占比上均无显著性差异,表明常规化肥与有机肥配施在扩充颗粒有机氮比例方面的效果相当. *MBN/TN* 两年平均值介于 3.05% ~ 4.70%,T25 处理表现出较好的稳定性,两年平均占比最高达 4.70%. 2024 年 T25 处理的 *MBN/TN* 显著高于单施化肥,2025 年 T25 处理仍保持最高水平,且显著高于 CK 及 T0 处理. 这证实适量有机肥替代有利于克服外界环境波动,持续维持微生物氮库在全氮中较高的分配比例.

表 5 土壤有机氮组分的含量

Tab. 5 Content of soil organic nitrogen components mg/kg

年份	项目	*TN*	*DON*	*PON*	*MBN*
2024 年	CK	790.6 ± 42.1^{c}	14.9 ± 1.3^{c}	165.4 ± 14.2^{c}	24.7 ± 2.5^{c}
	T0	830.3 ± 45.3^{bc}	17.5 ± 1.6^{c}	204.9 ± 18.6^{b}	27.6 ± 3.1^{c}
	T25	980.1 ± 64.8^{a}	26.6 ± 2.2^{a}	256.1 ± 25.8^{a}	43.4 ± 4.1^{a}
	T50	910.2 ± 51.9^{ab}	21.6 ± 2.0^{b}	235.2 ± 22.4^{ab}	35.1 ± 3.9^{b}
2025 年	CK	780.5 ± 38.2^{b}	14.3 ± 1.1^{d}	160.2 ± 13.8^{c}	23.1 ± 2.2^{b}
	T0	845.8 ± 47.5^{b}	18.2 ± 1.7^{c}	208.5 ± 19.5^{b}	28.5 ± 2.8^{b}
	T25	1050.7 ± 72.0^{a}	29.6 ± 2.7^{a}	265.5 ± 29.5^{a}	52.6 ± 5.5^{a}
	T50	985.2 ± 55.4^{a}	24.0 ± 2.1^{b}	248.4 ± 26.2^{ab}	45.8 ± 4.6^{a}
平均	CK	785.55 ± 36.38^{c}	14.60 ± 1.13^{d}	162.80 ± 12.84^{c}	23.90 ± 2.28^{c}
	T0	838.05 ± 42.37^{c}	17.85 ± 1.53^{c}	206.70 ± 17.16^{b}	28.05 ± 2.69^{c}
	T25	1 015.40 ± 72.45^{a}	28.10 ± 2.75^{a}	260.80 ± 25.32^{a}	48.00 ± 6.65^{a}
	T50	947.70 ± 63.19^{b}	22.80 ± 2.26^{b}	241.80 ± 22.97^{a}	40.45 ± 6.99^{b}

表 6 土壤有机氮与全氮的比值

Tab. 6 Soil organic nitrogen to TN ratio

年份	项目	*DON/TN*	*PON/TN*	*MBN/TN*
2024 年	CK	0.019 ± 0.001^{d}	0.209 ± 0.015^{b}	0.031 ± 0.003^{b}
	T0	0.021 ± 0.001^{c}	0.247 ± 0.016^{a}	0.033 ± 0.003^{b}
	T25	0.027 ± 0.001^{a}	0.261 ± 0.014^{a}	0.044 ± 0.004^{a}
	T50	0.024 ± 0.001^{b}	0.258 ± 0.015^{a}	0.039 ± 0.003^{ab}
2025 年	CK	0.018 ± 0.011^{d}	0.205 ± 0.013^{b}	0.030 ± 0.002^{b}
	T0	0.022 ± 0.001^{c}	0.247 ± 0.014^{a}	0.034 ± 0.003^{b}
	T25	0.028 ± 0.001^{a}	0.253 ± 0.012^{a}	0.050 ± 0.004^{a}
	T50	0.024 ± 0.001^{b}	0.252 ± 0.014^{a}	0.046 ± 0.003^{a}
平均	CK	0.019 ± 0.001^{d}	0.207 0 ± 0.012 7^{b}	0.030 5 ± 0.002 3^{b}
	T0	0.021 ± 0.001^{c}	0.247 0 ± 0.013 4^{a}	0.033 5 ± 0.002 7^{b}
	T25	0.028 ± 0.001^{a}	0.257 0 ± 0.012 5^{a}	0.047 0 ± 0.004 9^{a}
	T50	0.024 ± 0.001^{b}	0.255 0 ± 0.013 4^{a}	0.042 5 ± 0.004 7^{a}

2.2.3 土壤有机碳氮比的变化特征

土壤碳氮比(*C/N*)是反映微生态系统养分周转与化学计量平衡的核心参数. 表 7 结果表明,不同施肥处理对 *C/N* 的影响总体表现为随有机肥替代比例增加先升后降. 各施肥处理的两年平均 *C/N* 整体高于 CK. 具体而言,T25 处理的 *C/N* 提升最为显著,两年平均值为 13.36,显著高于 T0 和 CK,与 T50 无显著差

异. T50 处理的两年平均 *C/N* 为 13. 03,与 T25 及 T0 均无显著差异,表明较高比例替代下 *C/N* 提升效应可能出现相对回落. 年际变化分析表明,2024 年各处理间呈 T25 > T50 > T0 > CK 的规律特征.

2. 3 有机肥替代化肥对玉米产量及利用效率的影响

2. 3. 1 玉米氮素积累量及地上干物质积累量动态变化

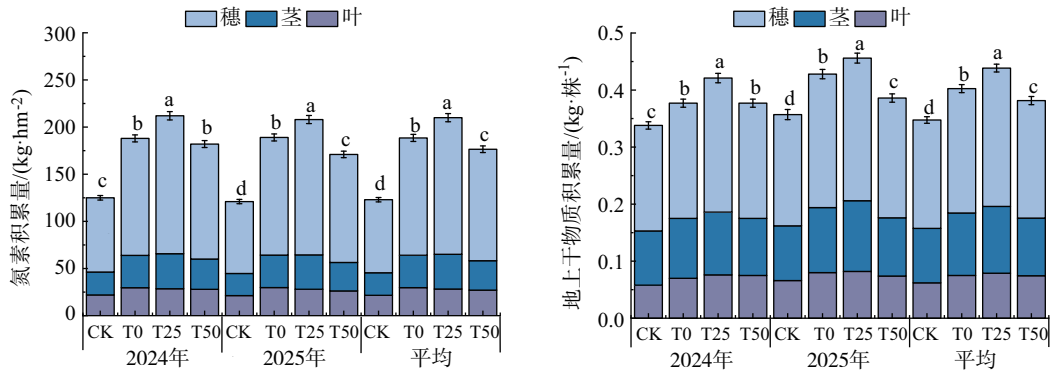
氮素积累量(NA)可反映不同处理下作物氮素同化与沉积情况,数值越高通常意味着植株吸氮能力越强、干物质转化潜力越大,见图 2(a). 从各施肥处理的氮素积累量看,总体呈现 T25 > T0 > T50 > CK 的趋势,T25 较 CK、T0 和 T50 的增幅分别达 69. 60%、12. 77% 和 16. 48%. 2025 年该趋势得以保持,T25 分别高出 71. 90%、10. 05% 和 21. 64%. 两年试验结果一致表明,*NA* 的最大值稳定出现在 T25,即 211. 79 kg/hm^2 和 207. 84 kg/hm^2.

表 7　土壤有机碳氮比

Tab. 7　Soil organic carbon nitrogen ratio

项目	2024 年	2025 年	平均
CK	12. 33 ± 0. 23^{b}	12. 39 ± 0. 22^{b}	12. 36 ± 0. 22^{c}
T0	12. 70 ± 0. 12^{b}	13. 08 ± 0. 16^{a}	12. 89 ± 0. 14^{bc}
T25	13. 45 ± 0. 33^{a}	13. 27 ± 0. 27^{a}	13. 36 ± 0. 30^{a}
T50	13. 20 ± 0. 24^{a}	12. 86 ± 0. 23^{a}	13. 03 ± 0. 23^{ab}

地上干物质积累量(AGDM)能够表征不同处理下作物群体的生长旺盛度与光能利用效率,数值越高意味着源库容量越充足、产量转化潜力越大,见图 2(b). 根据叶、茎、穗等干物质数据可知,不同施肥组的总体表现均为 T25 > T50 > T0 > CK. 2025 年 T25 组的值最高,达到 0. 456 kg/株,显著高于其他处理.



(a)玉米氮素积累量　　(b)玉米地上干物质积累量

图 2　玉米氮素积累量及地上干物质积累量

Fig. 2　Accumulation of dry matter and nitrogen in maize

2. 3. 2 玉米产量及氮素利用效率的响应

表 8 结果表明,各施肥组较 CK 均显著提升玉米产量. 两年平均数据显示,各施肥组中 T25 的增产效果最为突出,两年平均产量最高,较 CK 增产 28. 07%;而 T50 和 T0 较 CK 的增产幅度相近,分别为 20. 63% 和 19. 62%. 2024 年各组产量呈 T25 > T50 > T0 > CK 的变化规律特征;2025 年各施肥组均显著高于 CK,T25 产量仍为最高,但 T50 与 T0 之间的产量无显著差异. 由此表明,对于该区域黑土地 T25 最能保障持续且显著的高产,T50 相较于 T0 并未带来稳定的增产收益.

在氮素利用方面,由于 CK 未施入氮肥,重点比对各施肥模式对 NUE 和 PFP 的调控作用. 表 8 数据显示,T25 连续两年均实现了 *NUE* 与 *PFP* 达到最大值,两年均显著高于 T0 与 T50. 值得注意的是,T50 *PFP* 在 2025 年与 T0 无显著差异,*NUE* 显著低于 T0. 以上结果表明,在等氮量投入前提下,仅 T25 能有效促进作物对氮素的截获与吸收,实现减肥增效;而 T50 未能进一步改善氮素的转化利用效率.

2. 4 土壤碳氮库与产量组分间相关性分析

相关性热图分析可表明土壤碳氮组分与玉米生产力之间的内在耦合关系(见图 3). 结果显示,土壤全量养分(*TN*、*SOC*)与活性组分(*ROC*、*MBC*、*DOC*、*PON*、*MBN*)之间均呈显著正相关关系($P < 0. 05$),证实有机无机配施在提高土壤碳氮库容量及活性方面存在协同效应. 此外,玉米产量(Yield)及 *PFP* 与 *MBC*、*ROC*、*MBN* 均呈正相关性,其相关系数普遍高于 *TN* 和 *SOC*,说明相较于土壤养分的静态累积,活性组分的周转活跃度及碳库的综合质量是驱动作物高产、氮素高效利用的根本因子. 结合活性组分对产量的直接驱

动作用,进一步印证了 T25 通过优化活性碳、氮组分供应、缓解微生物与作物的养分竞争,从而实现土壤肥力提升与资源高效利用的协同发展.

表 8 有机肥替代对玉米产量和氮素利用的影响

Tab. 8 Effects of organic fertilizer substitution on maize yield and nitrogen utilization

项目	2024 年			2025 年			平均		
	产量/(kg·hm^{-2})	*NUE*/%	*PFP*/(kg·kg^{-1})	产量/(kg·hm^{-2})	*NUE*/%	*PFP*/(kg·kg^{-1})	产量/(kg·hm^{-2})	*NUE*/%	*PFP*/(kg·kg^{-1})
CK	8 462.1 ± 160.7^{d}	–	–	9 268.4 ± 17.1^{c}	–	–	8 865.3 ± 46.3^{c}	–	–
T0	10 318.7 ± 108.3^{c}	26.22 ± 0.98^{b}	42.99 ± 0.45^{c}	10 890.8 ± 24.1^{b}	28.31 ± 0.99^{b}	45.38 ± 0.10^{b}	10 647.5 ± 32.7^{b}	27.27 ± 1.44^{b}	44.19 ± 1.34^{b}
T25	10 872.3 ± 53.4^{a}	36.21 ± 1.30^{a}	45.30 ± 0.22^{a}	11 835.5 ± 26.7^{a}	36.22 ± 1.65^{a}	49.31 ± 0.11^{a}	11 353.9 ± 53.4^{a}	36.22 ± 1.33^{a}	47.31 ± 2.20^{a}
T50	10 503.9 ± 72.3^{b}	23.73 ± 1.68^{b}	43.77 ± 0.30^{b}	10 883.8 ± 29.0^{b}	20.81 ± 1.03^{c}	45.35 ± 0.12^{b}	10 693.85 ± 21.5^{b}	22.27 ± 2.03^{c}	44.56 ± 0.89^{b}

3 讨 论

SOC 与 TN 是评判土壤肥力高低的核心指标,更是驱动陆地生态系统碳氮循环过程的关键因子[21]. 本研究发现,适度的有机肥替代化肥,可明显推动东北黑土区农田土壤碳氮组分的协同积累. 相较于常规单施化肥的对照处理,有机肥替代模式下土壤 SOC 含量提升幅度达 27.14% ~ 39.65%,TN 含量提高了 20.64% ~ 29.26%,二者均达到显著差异水平. 究其原因,有机肥所含的碳基质进入土壤后,可刺激作物根系分泌有机代谢物,为土壤微生物生长繁殖提供可利用碳源,从而使土壤微生态系统的整体活性显著提高[22]. 此外,对土壤碳氮组分的细化分析结果明确了有机肥替代处理均能不同程度提高土壤中活性有机碳、氮库的储量,且其变化规律与梁尧等[23]的研究结论一致. 这是因为有机物料输入对 MBC 和 MBN 的提升效果优于单施化肥的处理模式,迁移能力较强的 DOC 可直接高效地为土壤微生态系统补充可利用碳源,驱动土壤氮素向 MBN 及 DON 这类高活性氮组分转化并持续富集[24-25]. 因此,土壤活性碳、氮库的充实实质上为黑土区土壤无机氮的持续矿化释放储备了充足的潜在养分,其分解所产生的代谢产物还能与区域内的土壤矿物颗粒紧密结合,形成稳定的物理保护机制,促进 ROC 等组分的逐步积累,最终在微观层面实现土壤养分库容与供肥潜力的同步提升[26-27].

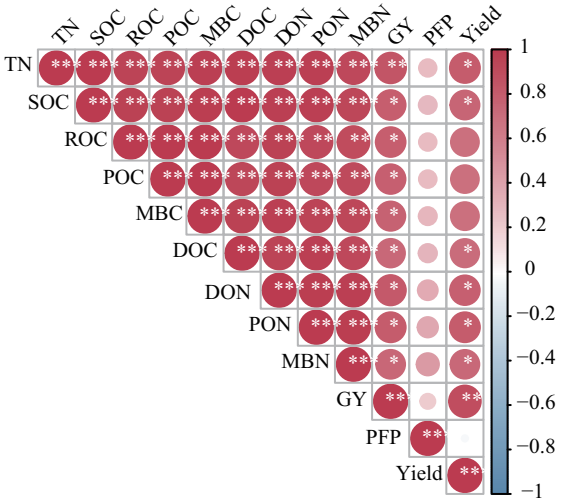


图 3 土壤碳氮组分与玉米产量的相关性热图

Fig. 3 Correlation heatmap between soil carbon and nitrogen components and maize yield

然而,本研究结果表明,土壤碳氮活性组分及玉米产能对有机肥替代比例的响应并非简单的线性关系,而是呈先升后降的单峰趋势. 这一现象表明,有机肥养分释放过程与作物生长期实际需肥动态存在阶段性差异. 陈梦茹等[28]在陕北旱区的研究已确定 30% 为有机肥替代效益的一个关键阈值,超过该比例会导致玉米增产及氮素吸收受阻. 本结果与上述结论相似,即 50% 有机肥替代比例下玉米产量和氮肥偏生产力较 25% 替代处理均有所回落[29]. 这种较高有机肥替代比下产量的下降,主要归因于早期速效氮供应的不足与作物需氮规律的阶段性错位. 当有机肥替代比达到 50% 时,化学氮肥投入量的削减直接导致土壤前期无机氮基础供应量下降[30-31];另一方面,有机物料本身具有高碳氮比的特性,其矿化过程缓慢,故早期养分释放速率滞后. 尤其在东北黑土区,春季地温回升较慢,进一步抑制了有机养分的矿化进程[32]. 这种化学氮肥施用量降低与有机养分释放的缓效性相结合,导致前期土壤速效养分供应难以匹配玉米营养生长初期的需氮高峰,植株前期干物质积累受阻、养分吸收受限,最终限制了玉米产量的进一步提升.

相较之下,25% 有机肥替代的碳、氮组分含量及产量达到峰值. 这是由于通过合理的碳氮投入配比,有效

缓解微生态与作物间的碳氮竞争,实现了养分释放与根系吸收的同步. 25% 有机肥替代保留的化学氮肥有效弥补了有机物料前期矿化缓慢导致的无机氮不足,保障了作物发育早期的营养需求;而有机养分的缓效释放则为作物中后期的生长提供了持续的养分供应,二者优势互补,形成了相对平稳的动态供需平衡[33]. 从养分生物有效性的角度来看,适配的有机肥替代比例能够有效激发土壤碳氮协同效应,借助有机碳的吸附固持作用与微生物的适度同化过程,大幅降低土壤速效氮的淋溶流失风险[34]. 这种长效的养分持留机制,能够让耕层土壤的供氮规律与玉米根系的养分吸收动态高度契合,进而显著提升玉米植株对氮素的吸收利用效率,这一研究结果与 Li 等[35]在东北平原完成的相关研究结论类似. 综上来看,适配比例的有机肥替代化肥,不仅能在宏观层面保障玉米的高产稳产,还可通过优化土壤活性碳氮组分结构、调控养分的时空供应规律,从微观作用机制层面,为东北黑土区农业实现减肥增效与产能协同提升,提供坚实的理论支撑.

4 结 论

本研究以东北典型黑土区连续 2 年田间定位试验为基础,系统研究了有机肥不同等氮替代化肥梯度对农田土壤理化性状、碳氮库组分特征及玉米产量的调控效应. 研究以黑土退化阻控与作物高产稳产的矛盾为出发点,系统解析了土壤活性碳氮组分的周转规律及动态变化特征,揭示了黑土健康保育与玉米生产力提升的内在耦合机制. 以下为主要结论:

1)采用有机肥等氮替代化肥的施肥方式,可有效提升东北黑土区农田土壤的总有机碳与全氮含量. 在各有机肥替代处理中,25% 有机肥替代处理对 ROC 和 MBC 等活性碳氮组分表现出较强的激发效应,该处理下 *CPMI* 两年平均值达到 171. 70,是本试验条件下提升黑土农田碳氮库质量的最优施肥方案.

2)当有机肥替代比例提高至 50% 时,生育前期化学氮肥的大幅削减与高量外源碳的输入,无法及时转化为作物生长早期所需的速效养分,导致玉米生育前期土壤无机氮供应出现阶段性亏缺,这也成为制约玉米最终产量进一步提升的关键因素.

3)综合黑土退化阻控与农业可持续发展的双重需求,25% 有机肥替代化肥是该区域滴灌玉米生产体系的最优管理方案. 该模式可精准契合滴灌玉米全生育期的养分需求规律,相较于常规单施化肥处理,不仅使玉米产量提升 7. 07% ,*NUE* 达到 36. 22% ,还能有效规避氮素供需错位的潜在风险,完成了从单一土壤培肥向土壤健康保育与作物高产高效协同发展的科学转变. 基于此,25% 比例有机肥替代化肥模式,可作为具有潜力的东北黑土区可持续集约化农业的关键技术进行推广应用.

参考文献:

[1] 胡春胜,张玉铭,秦树平,等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报,2018,26(10):1501 – 1514.
HU C S,ZHANG Y M,QIN S P,et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro – ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture,2018,26(10):1501 – 1514.

[2] 杜国明,梁常安,张树文,等. 黑土地保护的对象特性、面临形势与应对策略[J]. 资源科学,2023,45(5):887 – 899.
DU G M,LIANG C A,ZHANG S W,et al. The object characteristics,facing situations and countermeasures of black soil protection[J]. Resources Science,2023,45(5):887 – 899.

[3] 刘兴土,阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持,2009,(1):17 – 19.

[4] LU X F,HOU E Q,GUO J Y,et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China:A meta – analysis[J]. Global Change Biology,2021,27(12):2780 – 2792.

[5] 吴艳,宋惠洁,胡丹丹,等. 等碳量不同有机物料添加对红壤团聚体组分分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 生态与农村环境学报,2024,40(4):556 – 564.
WU Y,SONG H J,HU D D,et al. Effects of equal carbon input conditions of different organic materials on the distribution of aggregates and their content of organic carbon and nitrogen in red soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2024,40(4):556 – 564.

[6] 占奥丽,黄敏,尹龙,等. 土壤碳循环微生物作用研究进展[J]. 华中农业大学学报,2024,43(4):70 – 81.
ZHAN A L,HUANG M,YIN L,et al. Roles of microorganisms in carbon cycling in soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural

University,2024,43(4):70 - 81.

[7] 罗雪梅,陈明媛,王宁宁,等. 减氮及有机替代对新疆棉田土壤氮素有效性和利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(2):289 - 306.
LUO X M,CHEN M Y,WANG N N,et al. Effects of nitrogen reduction and organic substitution on soil nitrogen availability and utilization efficiency in Xinjiang cotton field[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2024,30(2):289 - 306.

[8] 冯继广,张秋芳,袁霞,等. 氮磷添加对土壤有机碳的影响:进展与展望[J]. 植物生态学报,2022,46(8):855 - 870.
FENG J G,ZHANG Q F,YUAN X,et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic carbon:Review and prospects[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2022,46(8):855 - 870.

[9] SONG D L,DAI X L,GUO T F,et al. Organic amendment regulates soil microbial biomass and activity in wheat - maize and wheat - soybean rotation systems[J]. Agriculture,Ecosystems & Environment,2022,333:107974.

[10] 王俊姣,黄小敏,范长华,等. 化肥与有机物料配施对砖红壤有机碳矿化的影响及其驱动因素[J]. 环境科学,2025,46(10):6539 - 6548.
WANG J J,HUANG X M,FAN C H,et al. Effects of combined application of chemical fertilizer and organic materials on organic carbon mineralization in latosol and associated driving factors[J]. Environmental Science,2025,46(10):6539 - 6548.

[11] 李雨欣,曾希柏,文炯,等. 有机替代下土壤有机碳组分差异及其对细菌群落的影响[J]. 生态学杂志,2025,44(6):1953 - 1962.
LI Y X,ZENG X B,WEN J,et al. Differences of soil organic carbon components under organic fertilizer substitution and its influence on bacterial community[J]. Chinese Journal of Ecology,2025,44(6):1953 - 1962.

[12] 李景,李国鹏,汪滨. 国内外有机肥料相关标准比对研究[J]. 中国土壤与肥料,2023,(4):230 - 237.
LI J,LI G P,WANG B. Comparative study on relevant standards of organic fertilizer in China and foreign countries[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2023,(4):230 - 237.

[13] 内蒙古自治区质量技术监督局. 玉米膜下滴灌水肥管理技术规程:DB15/T 683 - 2014[S]. 呼和浩特:内蒙古自治区质量技术监督局,2014.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析— 3 版[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[15] 张英英,蔡立群,武均,等. 不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳组分及其与酶活性间的关系[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(1):1 - 7.
ZHANG Y Y,CAI L Q,WU J,et al. The relationship between soil labile organic carbon fractions and the enzyme activities under different tillage measures in the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2017,35(1):1 - 7.

[16] CAMBARDELLA C A,ELLIOTT E T. Particulate soil organic - matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(3):777 - 783.

[17] BLAIR G J,LEFROY R,LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation,and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research,1995,46(7):1459 - 1466.

[18] HAYNES R J,FRANCIS G S. Changes in microbial biomass C,soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions[J]. Journal of Soil Science,1993,44(4):665 - 675.

[19] 郭亚军,邱慧珍,张玉娇,等. 不同施肥方式对马铃薯农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报,2021,52(4):912 - 919.
GUO Y J,QIU H Z,ZHANG Y J,et al. Effects of four fertilization regimes on soil organic carbon fractions and carbon pool management index of potato farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science,2021,52(4):912 - 919.

[20] 徐明岗,于荣,孙小凤,等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(4):459 - 465.
XU M G,YU R,SUN X F,et al. Effects of long - term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2006,12(4):459 - 465.

[21] 范如芹,梁爱珍,杨学明,等. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响[J]. 土壤学报,2011,48(4):788 - 796.
FAN R Q,LIANG A Z,YANG X M,et al. Effects of tillage and rotation on soil organic carbon and total nitrogen stocks of a black soil[J]. Acta Pedologica Sinica,2011,48(4):788 - 796.

[22] WANG J Y,QIN H L,ZHANG L Y,et al. Synergistic effects of rhizosphere effect and combined organic and chemical fertiliz-

ers application on soil bacterial diversity and community structure in oilseed rape cultivation [J]. Frontiers in Microbiology, 2024,15:1374199.

[23] 梁尧,苑亚茹,韩晓增,等. 化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(6):1586 - 1594.
LIANG Y,YUAN Y R,HAN X Z,et al. Distribution of organic carbon and humic acids in aggregates of Mollisol as affected by amendments with different rates of organic manure plus mineral fertilizer[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2016,22(6):1586 - 1594.

[24] 杨雨,卢宗云,张珍明. 有机物料替代化肥对土壤有机碳固存与微生物群落特征的影响研究进展[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2026,44(2):44 - 54.
YANG Y,LU Z Y,ZHANG Z M. Research progress on effects of partial substitution of chemical fertilizers with organic materials on soil organic carbon sequestration and microbial communities[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences),2026,44(2):44 - 54.

[25] LAL R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems[J]. Global Change Biology,2018,24(8):3285 - 3301.

[26] DIGNAC M F,DERRIEN D,BARRÉ P,et al. Increasing soil carbon storage:Mechanisms,effects of agricultural practices and proxies. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development,2017,37(2):14.

[27] LIU H W,DU X F,LI Y B,et al. Organic substitutions improve soil quality and maize yield through increasing soil microbial diversity[J]. Journal of Cleaner Production,2022,347:131323.

[28] 陈梦茹,邢英英,解云霞,等. 有机肥等氮替代化肥对春玉米生长、产量和水肥利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2024,38(3):369 - 381.
CHEN M R,XING Y Y,XIE Y X,et al. Effects of organic manure and other nitrogen substitutes on spring maize growth, yield,and water and fertilizer utilization efficiency[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):369 - 381.

[29] SHEN J B,CUI Z L,MIAO Y X,et al. Transforming agriculture in China:From solely high yield to both high yield and high resource use efficiency[J]. Global Food Security,2013,2(1):1 - 8.

[30] 赵吉霞,禹妍彤,周芸,等. 有机肥等氮替代化肥对玉米产量和氮素吸收利用效率的影响[J]. 水土保持研究,2022,29(5):374 - 381.
ZHAO J X,YU Y T,ZHOU Y,et al. Effect of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer on main yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. Research of Soil and Water Conservation,2022,29(5):374 - 381.

[31] 丁文成,何萍,周卫. 我国新型肥料产业发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(2):201 - 219.
DING W C,HE P,ZHOU W. Development strategies of the new - type fertilizer industry in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2023,29(2):201 - 219.

[32] QIN W K,ZHANG Q F,GU - KAI - LIN A O,et al. Responses and mechanisms of soil organic carbon dynamics to warming: A review[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2024,48(4):403 - 415.

[33] 孔丽丽,张宇航,侯云鹏,等. 东北薄层黑土区实现玉米高产高效的有机肥替代化肥氮阈值[J]. 植物营养与肥料学报,2026,32(1):24 - 36.
KONG L L,ZHANG Y H,HOU Y P,et al. Threshold of organic fertilizer replacing chemical fertilizer nitrogen for achieving high yield and efficiency of maize production in thin layer black soil region of Northeast China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2026,32(1):24 - 36.

[34] 周慧,史海滨,徐昭,等. 化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响[J]. 农业环境科学学报,2019,38(7):1649 - 1656.
ZHOU H,SHI H B,XU Z,et al. Effects of combined application of chemical and organic fertilizers on ammonia volatilization and maize yield in salinized soil[J]. Journal of Agro - Environment Science,2019,38(7):1649 - 1656.

[35] LI H,FENG W T,HE X H,et al. Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon (SOC) when SOC reaches a threshold in the Northeast China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture,2017,16(4):937 - 946.

(编　辑:李　媛)