

# 有机肥替代化肥对玉米产量及养分吸收利用的影响

郝军<sup>1,2,3</sup> 张蔚<sup>1,2,3</sup> 白春华<sup>4</sup> 黄利春<sup>4</sup> 尤艳华<sup>4</sup> 卢勇鑫<sup>1,2,3</sup>  
李喆<sup>1,2,3</sup> 连东阳<sup>1,2,3</sup> 武文涛<sup>1,2,3</sup> 陈杨<sup>1,2,3</sup> 张莉<sup>5</sup> 刘红波<sup>5</sup>

<sup>1</sup>内蒙古农业大学资源与环境学院, 010018, 内蒙古呼和浩特; <sup>2</sup>内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 010018, 内蒙古呼和浩特; <sup>3</sup>农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 010018, 内蒙古呼和浩特; <sup>4</sup>兴安盟农牧科学研究所, 137400, 内蒙古乌兰浩特; <sup>5</sup>呼和浩特市农牧技术推广中心, 010018, 内蒙古呼和浩特

**摘要** 针对内蒙古玉米产区化肥管理不合理、肥料利用效率低和环境风险加剧等问题, 于内蒙古东北黑土区和土默川平原 2 个典型产区开展有机肥替代化肥研究, 通过田间试验, 设置不施氮肥 (CK)、100% 化肥 (M0) 及有机肥替代 25% (M25)、50% (M50)、75% (M75) 和 100% 化肥氮 (M100) 6 个处理, 探明不同有机肥替代化肥比例对玉米产量、干物质积累量、肥料利用效率和氮、磷、钾养分吸收的影响。结果表明, M25 处理可显著提高玉米产量, 较其他处理提高了 4.69%~36.80%; M0 处理在玉米生育前期各器官干物质积累量最高, M25 处理从大喇叭口期至成熟期各器官干物质积累量优势明显; M25 处理可促进玉米对氮、磷和钾养分的吸收, 并提升氮、磷和钾肥的利用效率; M25 处理的肥料偏生产力较其他处理提高了 2.77%~50.51%。综上, 土默川平原玉米对有机肥替代的响应优于东北黑土区, 有机肥替代 25% 化肥可实现玉米产量和肥料利用率的协同提升。

**关键词** 玉米; 有机肥; 化肥减量; 东北黑土区; 土默川平原; 产量; 肥料利用率

玉米是我国第一大粮食作物, 在保障国家粮食安全中具有重要战略地位<sup>[1]</sup>。化肥可显著提高粮食产量, 对产量的贡献占 51.78%<sup>[2]</sup>。我国是世界上使用化肥最多的国家, 但由于长期不合理施用化肥, 导致土壤有机质下降、土壤板结、肥料利用效率低和环境风险大等问题。农业农村部于 2015 年和 2022 年相继印发了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》<sup>[3]</sup>与《到 2025 年化肥减量化行动方案》<sup>[4]</sup>, 其中有机无机配施和有机肥替代化肥成为化肥减施的关键技术<sup>[5]</sup>。有机肥是传统农业生产的关键要素, 具有改善土壤理化性状与生物活性、提升土壤肥力和持续稳定均衡供给养分的优势, 兼有提高土壤生产力和改善土壤性状的双重作用。另外, 有机肥富含丰富的有机质, 能够为作物提供生长发育所需的大量营养元素, 促进作物对营养物质的吸收和转化, 从而提升作物产量和品质, 对农业生产具有重要意义<sup>[6]</sup>。

内蒙古地区玉米从东到西均有分布, 由于气

候特征、土壤类型、玉米品种和栽培管理措施的不同, 导致其产量存在一定的差异。本研究选取内蒙古东西部 2 个玉米典型种植区 (土壤肥力较高的东北黑土区和土壤肥力较低的土默川平原) 为试验地。东北黑土区玉米养分管理中存在的普遍问题是重用轻养、过度垦殖以及化肥投入过高, 导致土壤有机质含量显著下降, 黑土地退化明显, 连续耕作 30 年后有机质下降了 6.91~8.00 个百分点<sup>[7]</sup>; 土默川平原区的土壤贫瘠和盐碱化是限制玉米生长的关键因素, 化肥的过量施用一方面加剧了土壤盐碱化, 另一方面还导致土壤养分失衡, 限制了该地区玉米产能提升<sup>[8]</sup>。基于此, 本研究在 2 个主产区开展玉米有机肥替代化肥研究, 设置不同有机肥替代化肥处理, 通过测定、计算和比较不同替代比例下玉米产量、干物质积累量、肥料利用效率和氮、磷、钾养分吸收量的差异, 确定不同地力水平下玉米适宜的有机肥替代化肥比例, 以期实现玉米产量和肥料利用效率的协同提

作者简介: 郝军, 研究方向为玉米养分管理, E-mail: 1377614701@qq.com; 张蔚为共同第一作者, 研究方向为玉米养分管理, E-mail: 1842216874@qq.com

陈杨为通信作者, 研究方向为作物养分管理与土壤培肥, E-mail: chenyy80@126.com

基金项目: 呼和浩特市科技计划项目 (2022-农-重-2-4); 内蒙古自治区科技计划 (2022YFDZ0076); 国家重点研发计划子课题 (2022YFD1500904-4, 2022YFD1500901-03)

收稿日期: 2025-11-26; 修回日期: 2026-01-05; 网络出版日期: 2026-02-10

升，并为生产实践提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

东北黑土区：试验于 2024 年 5-10 月在内蒙古自治区兴安盟科右前旗共赢农牧业专业合作社（46°22' N, 119°49' E）进行，该地为温带大陆性气候，海拔 800.0 m，年均气温 3.3 °C，年均降水量 461.6 mm，无霜期约 114 d。播前土壤基础理化性质为有机质 20.89 g/kg、全氮 1.76 g/kg、有效磷 20.68 mg/kg、速效钾 145.60 mg/kg、pH 6.80。

土默川平原地区：试验于 2023 年 5-10 月在内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔国家农业科技园

区服务中心（40°28' N, 111°46' E）进行，该地为温带大陆性气候，海拔 1055.9 m，年均气温 8.4 °C，年均降水量 379.4 mm，无霜期约 130 d。播前土壤基础理化性质为有机质 13.00 g/kg、全氮 1.13 g/kg、有效磷 6.62 mg/kg、速效钾 100.49 mg/kg、pH 8.13。

### 1.2 试验设计

设置不施氮肥（CK）、100%化肥（M0）及有机肥替代 25%（M25）、50%（M50）、75%（M75）和 100%化肥氮（M100）6 个处理（表 1），3 次重复，采用完全随机设计。有机肥替代原则为替代后氮、磷和钾养分总量与 100%化肥处理相当。供试化肥分别为尿素（N≥46%）、过磷酸钙（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥12%）和氯化钾（K<sub>2</sub>O≥60%），所有肥料于春

表 1 不同处理养分投入量  
Table 1 Nutrient inputs under different treatments

试验地点 Location	处理 Treatment	有机肥 Organic fertilizer (kg/hm <sup>2</sup> )	化肥用量 Fertilizer application (kg/hm <sup>2</sup> )			替代比例 Substitution ratio (%)		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
土默川平原 Tumochuan Plain	CK	0.00	0.00	120.00	90.00	0.00	0.00	0.00
	M0	0.00	225.00	120.00	90.00	0.00	0.00	0.00
	M25	2446.00	168.75	108.75	63.59	25.00	9.00	26.00
	M50	4891.00	112.50	97.50	37.17	50.00	19.00	53.00
	M75	7337.00	56.25	86.25	10.76	75.00	28.00	79.00
	M100	9783.00	0.00	75.00	0.00	100.00	37.00	100.00
东北黑土区 Black soil region of Northeast China	CK	0.00	0.00	90.00	90.00	0.00	0.00	0.00
	M0	0.00	180.00	90.00	90.00	0.00	0.00	0.00
	M25	2250.00	135.00	68.00	66.30	25.00	25.00	26.00
	M50	4500.00	90.00	44.60	42.30	50.00	50.00	53.00
	M75	6750.00	45.00	21.80	18.50	75.00	75.00	80.00
	M100	9000.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00

耕时一次性施入土壤。

土默川平原供试品种为西蒙 6 号，行距 60 cm，株距 25 cm，种植密度为 66 660 株/hm<sup>2</sup>，小区面积为 50 m<sup>2</sup>；有机肥含 2.30% N、0.46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 1.08% K<sub>2</sub>O；东北黑土区供试品种为辰诺 101，行距 65 cm，株距 24 cm，种植密度为 60 000 株/hm<sup>2</sup>，小区面积为 100 m<sup>2</sup>；有机肥含 2.15% N、1.01% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 1.06% K<sub>2</sub>O。取样时间为玉米拔节期（V6）、大喇叭口期（V12）、乳熟期（R3）和成熟期（R6）。其他管理同当地大田生产。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 干物质积累量 分别于玉米 V6、V12、R3 和 R6 期进行取样，选取各小区有代表性的 3 株玉米，将植株各器官分剪，105 °C 杀青 30 min，75 °C

烘干至恒重，测定玉米茎、叶与籽粒的干物质积累量<sup>[9]</sup>。

1.3.2 产量及其构成因素 于 R6 期在各小区选 5 m 双行进行考种，考种指标包括穗数、穗粒数及百粒重，按 14% 水分折算单位面积产量<sup>[10]</sup>。

1.3.3 养分浓度与吸收量 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮样品，采用凯氏定氮法测定氮含量，采用钒钼黄比色法测定磷含量，采用火焰光度计法测定钾含量。各器官氮（磷、钾）素吸收量（kg/hm<sup>2</sup>）=各器官干物质积累量×各器官氮（磷、钾）含量<sup>[11]</sup>。

1.3.4 肥料利用效率 肥料偏生产力（FPF，kg/kg）=玉米产量/施肥量；氮肥农学效率（AEN，kg/kg）=（施氮处理玉米产量-不施氮处理玉米产量）/施氮量<sup>[12]</sup>。

## 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件处理数据，采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析和显著性检验，采用 OriginPro 2023b 作图。

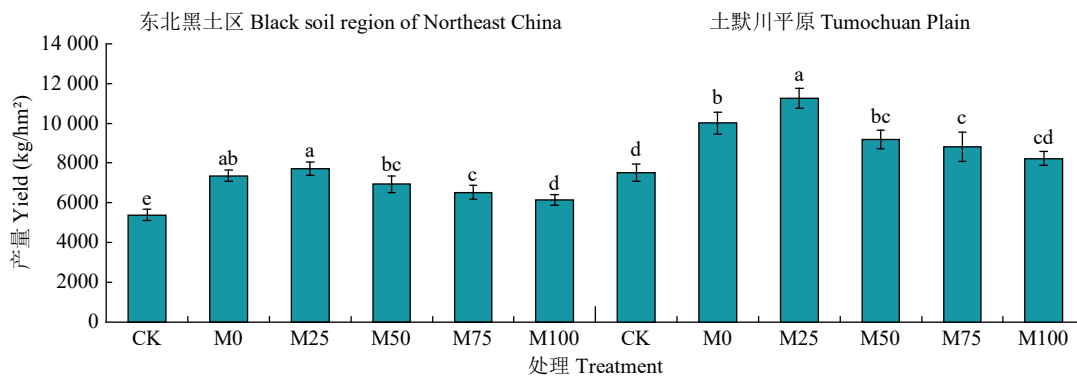
## 2 结果与分析

### 2.1 有机肥替代化肥对玉米产量的影响

东北黑土区有机肥替代化肥对玉米产量的影

响如图1所示，不同处理对玉米产量产生显著影响，玉米产量随有机肥替代比例的增加呈先增后降的趋势，M25 处理产量与 M0 相当，显著高于 M50、M75 和 M100 处理，分别提高了 11.06%、18.08% 和 25.28%。

土默川平原不同处理下，玉米产量随有机肥替代比例增加呈单峰曲线趋势，在 M25 时达到峰值，其产量显著高于 M0、M50、M75 和 M100 处



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ( $P < 0.05$ ), the same below.

图1 东北黑土区和土默川平原不同处理下的玉米产量

Fig.1 Maize yield under different treatments in the black soil region of Northeast China and Tumochuan Plain

理，分别提高了 12.48%、22.68%、27.49% 和 36.84%。

对不同地力水平的 2 个产区进行比较发现，均以 M25 处理产量最高，可见适宜的有机肥替代比例可保障玉米获得高产。进一步分析表明，有机肥替代的效果在土默川平原的优势更为明显，一方面表现为土默川平原 M25 比 M0 处理提高了 12.48%，而东北黑土区 M25 与 M0 处理产量相当；另一方面土默川平原 M25 较 M100 提高了 36.84%，而东北黑土区的增幅仅为 25.28%。2 个产区均随替代比例的进一步增加 ( $>25%$ )，产量逐渐降低。

### 2.2 有机肥替代化肥对玉米干物质积累量的影响

东北黑土区玉米茎的干物质积累量随着生育期推进呈升高趋势，在 R6 期达到峰值；R6 期时，M25 处理玉米茎的干物质积累量显著高于 M50、M75 和 M100 处理，分别提高了 18.14%、32.71% 和 44.10% (图 2a)。叶片干物质积累量随生育期推进呈先升高后降低的趋势，在 V12 期达到峰值；从 R3 至 R6 期，M25 处理显著高于 M75 和 M100 处理，R6 期时，M25 处理较 M75 和 M100 处理分

别提高了 34.95% 和 49.91%。M25 处理籽粒的干物质积累量仍具有显著优势，在 R3 和 R6 期均高于其他处理；R6 期时，M25 处理较 M50、M75 和 M100 处理分别提高了 8.29%、15.73% 和 27.50%。

土默川平原玉米茎的干物质积累量随着生育期推进呈先升高后降低的趋势，在 R3 期达到峰值 (图 2b)；不同处理间，从 R3 期开始直到 R6 期，M25 处理显著高于其他处理，R6 期时，M25 处理较 M0、M50、M75 和 M100 处理分别提高了 34.33%、25.97%、59.63% 和 117.42%。叶片干物质积累量随着生育期的推进其变化趋势与东北黑土区相同，在 V12 期达到峰值；处理间，从 V12 至 R3 期，M25 处理显著高于其他处理，R6 期时，M25 处理较其他处理提高了 15.15%~40.44%。对于籽粒干物质积累量而言，M25 处理的优势仍然较明显，在 R3 和 R6 期均高于其他处理，R6 期时，M25 处理较其他处理提高了 12.45%~36.8%。

进一步分析发现，对于玉米地上部茎和叶片的干物质积累量而言，在 V6 期各处理的差异不明显，有机肥替代并没有表现出优势，而纯化肥处理 (M0) 反而具有一定的优势，这在土默川平

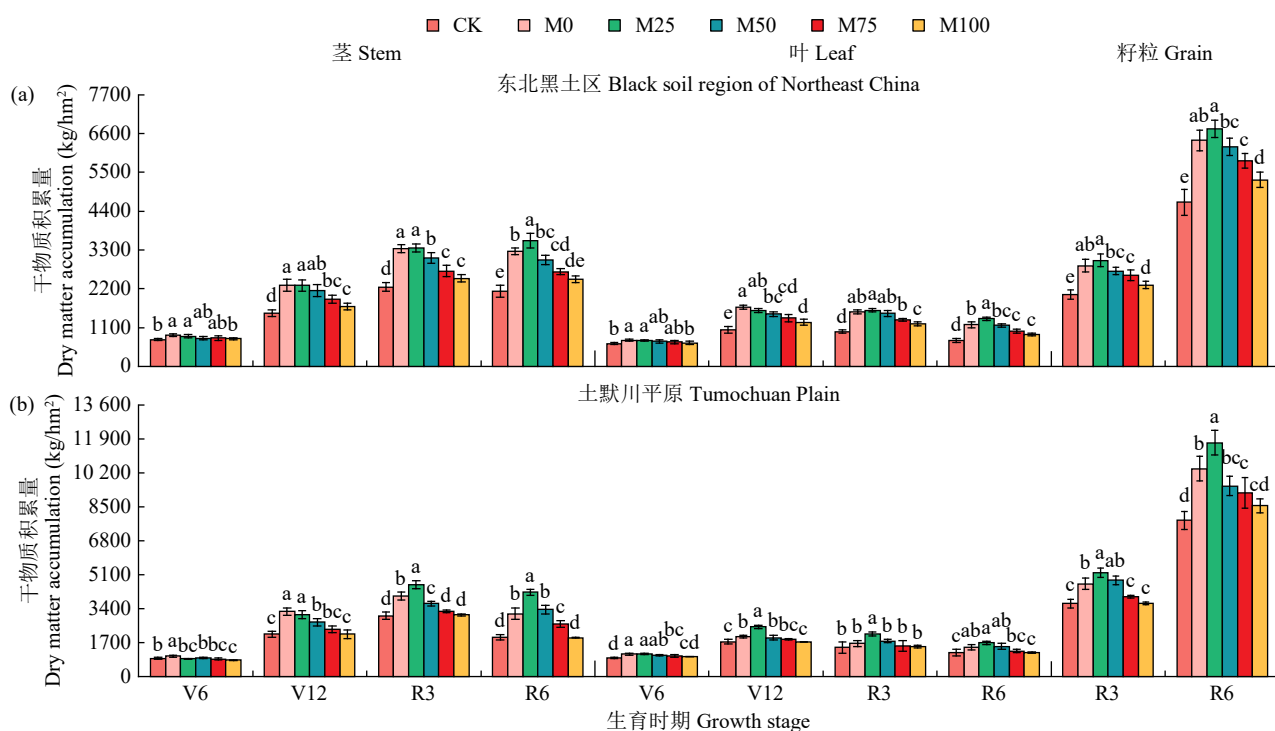


图 2 东北黑土区和土默川平原不同处理下玉米各器官的干物质积累量  
Fig.2 Dry matter accumulation of maize organs under different treatments in the black soil region of Northeast China and Tumochuan Plain

原玉米茎的干物质积累量上表现更为突出，即 V6 期时 M0 处理显著高于其他处理；随着生育期的推进，M25 处理的优势开始表现，至 R6 期时 M25 处理的玉米地上部干物质积累量显著高于其他处理。2 个产区对比发现，东北黑土区玉米茎的干物质积累量从 V6 到 R3 期在 M0 和 M25 处理间均无显著差异，只在 R6 期 M25 处理下表现出一定的优势；土默川平原从 V6 期开始 M25 处理的地上部干物质积累量就显著高于 M0 和其他处理，产生这种差异的原因可能是东北黑土区土壤肥力相对较高，对外源有机物的缓冲能力强、响应差，而

土默川平原土壤肥力较差，而且存在一定的盐碱化，外源有机物的供应一方面为植物提供了缓效养分，一方面可以改善土壤的盐碱程度，为玉米的生长创造了良好条件。

### 2.3 有机肥替代化肥对玉米氮、磷和钾养分吸收的影响

2.3.1 东北黑土区玉米氮、磷和钾养分吸收的差异 从图 3 可以看出，玉米植株茎的氮素吸收量在各时期不同处理间均有显著差异，V6 期差异较小，V12 期后差异较大；R6 期时 M25 处理较其他处理提高了 5.79%~19.65%。对于玉米叶片氮素吸

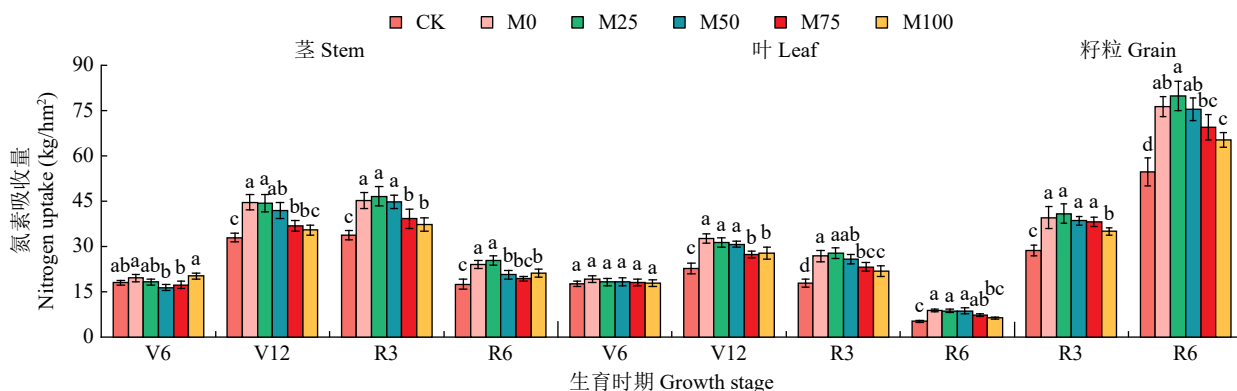


图 3 东北黑土区不同处理玉米各器官的氮素吸收量  
Fig.3 Nitrogen uptake of different maize organs under different treatments in the black soil region of Northeast China

收量而言，V6 期时处理间无显著差异，之后出现显著差异。对于玉米籽粒氮素吸收量而言，R6 期时 M25 处理较 M75 和 M50 处理提高了 14.96%、5.79%。

不同处理对玉米各器官磷素吸收量产生的影响见图 4。对于玉米茎的磷素吸收量，V12 期时，M0 处理显著高于 M100 处理，其他处理间无差异；R3 期时 M0 和 M25 处理显著高于 M75 和 M100 处

理；R6 期时 M25 处理显著高于 M75 和 M100 处理，分别提高了 23.61%和 29.25%。对于玉米叶片的磷素吸收量，V6 期时各处理间无显著差异；V12 期时 M0 处理显著高于 M75 和 M100 处理；R3 至 R6 期时 M25 处理均显著高于 M75 和 M100 处理，R6 期时 M25 处理较 M75 和 M100 处理分别提高了 32.42%和 36.31%。R6 期时 M25 处理玉米籽粒的磷素吸收量显著高于 M75 和 M100 处理。

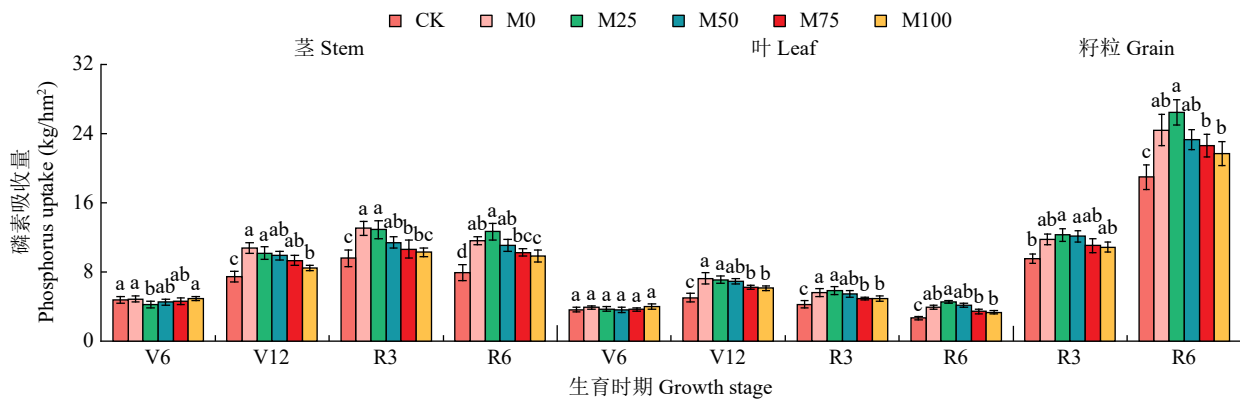


图 4 东北黑土区不同处理玉米各器官的磷素吸收量

Fig.4 Phosphorus uptake of different maize organs under different treatments in the black soil region of Northeast China

不同处理对玉米各器官钾素的吸收也产生了影响，从图 5 可以看出，R6 期时 M25 处理玉米茎的钾素吸收量显著高于 M50、M75 和 M100 处理，分别增长了 20.51%、24.28%和 38.91%。玉米叶片

的钾素吸收量各处理在整个生育期均存在显著差异，V12 和 R6 期时 M0 和 M25 处理显著高于 M100 处理；R3 期时 M25 处理显著高于 M50、M75 和 M100 处理。R6 期时 M0 和 M25 处理玉米籽粒的

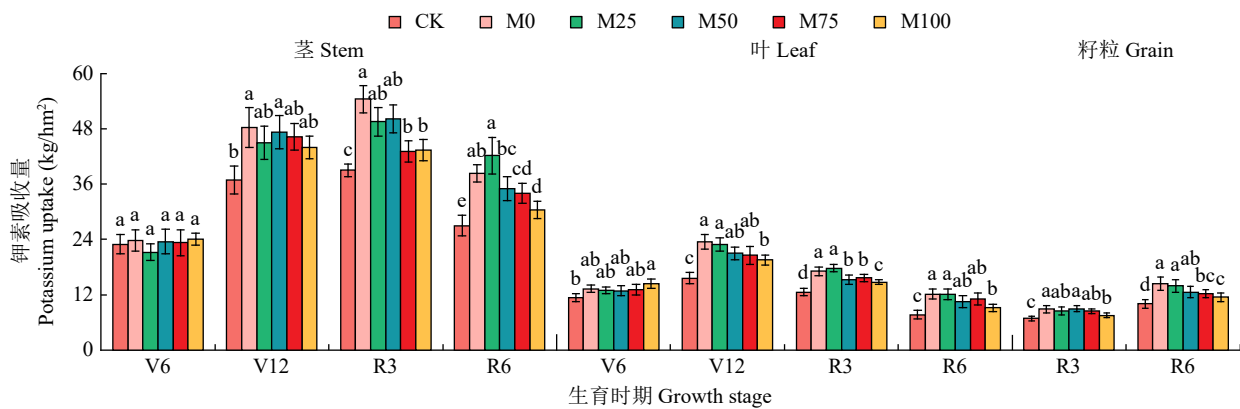


图 5 东北黑土区不同处理玉米各器官的钾素吸收量

Fig.5 Potassium uptake of different maize organs under different treatments in the black soil region of Northeast China

钾素吸收量显著高于 M75 和 M100 处理。

2.3.2 土默川平原玉米氮、磷和钾养分吸收的差异 不同处理对玉米氮素吸收的影响如图 6 所示，从图 6 可以看出，玉米植株茎的氮素吸收量在 V12 期时 M0 和 M25 处理显著高于其他处理，从 R3 到 R6 期 M25 处理显著高于其他处理，R6

期时 M25 处理较 M0、M50、M75 和 M100 处理分别增长 58.61%、38.17%、99.39%和 184.38%。对于叶片的氮素吸收量，V6 期时 M0 和 M25 处理间无显著差异，并显著高于其他处理，从 V12 至 R6 期时 M25 处理显著高于其他处理，R6 期时 M25 处理较 M0、M50、M75 和 M100 处理分别增

长 27.51%、47.17%、71.45%和 116.23%。在 R6 期时 M25 处理玉米籽粒的氮素吸收量显著高于其

他处理。综上，有机肥替代 25%化肥（M25 处理）不仅能满足玉米营养生长阶段的需求，还能保障

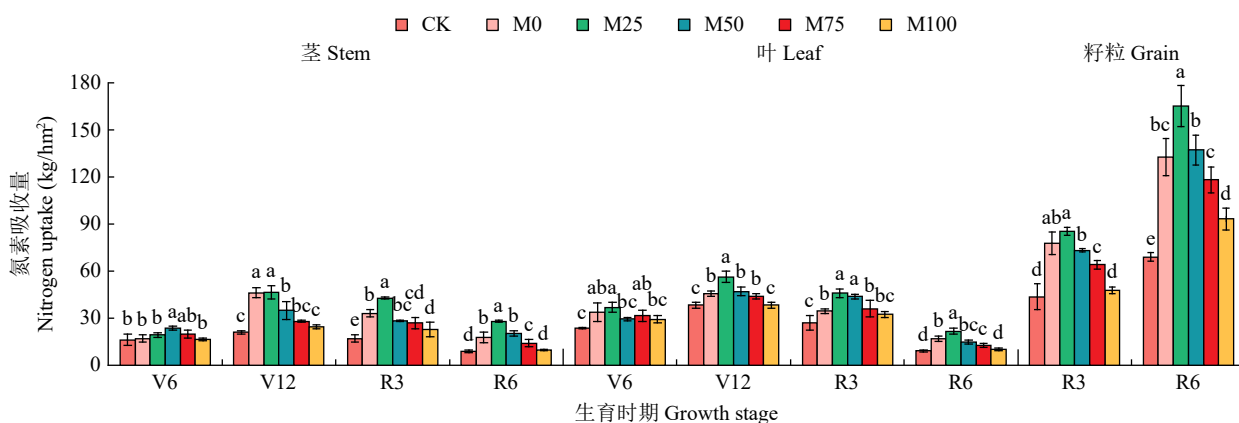


图 6 土默川平原不同处理的玉米氮素吸收量

Fig.6 Nitrogen uptake of maize under different treatments in the Tumochuan Plain

植株生殖生长阶段的氮素供应。

由图 7 可知，不同处理间玉米植株磷素吸收量差异较大。玉米植株茎的磷素吸收量在 V12 和 R3 期时 M0 和 M25 处理显著高于其他处理，R6 期时 M25 处理显著高于其他处理，较其他处理增加了 37.05%~182.09%。对于玉米叶片的磷素吸收量，V6 期各处理差异较小，从 V12 到 R6 期 M25 处理

均高于其他处理，R6 期时 M25 处理较其他处理分别增长 6.92%~65.02%。玉米籽粒的磷素吸收量在 R6 期时，M25 处理显著高于其他处理。可见，有机肥替代 25%化肥（M25 处理）能显著提高玉米各器官的磷素吸收量，该处理能有效协调玉米营养生长与生殖生长阶段的磷素需求，实现磷肥高效利用。

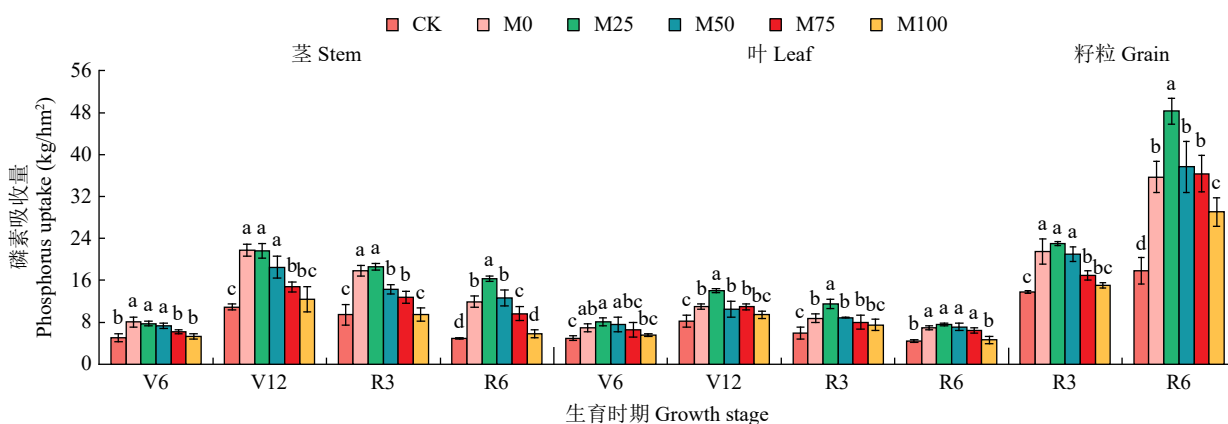


图 7 土默川平原不同处理的玉米磷素吸收量

Fig.7 Phosphorus uptake of maize under different treatments in the Tumochuan Plain

不同处理对玉米植株钾素吸收的影响见图 8，M25 处理的玉米茎的钾素吸收量在 V6 期与 M0 和 M50 处理无显著差异，但显著高于 M75 处理；从 R3 期开始显著高于其他处理，R6 期时 M25 处理较 M0、M50、M75 和 M100 处理分别增长 22.84%、14.08%、53.72%和 109.09%。对于叶片的钾素吸收量，从 V12 至 R6 期时 M25 处理显著高于其他处理，R6 期时，M25 处理较 M0、M50、

M75 和 M100 处理分别增长了 19.64%、41.93%、53.39%和 61.46%。对于籽粒的钾素吸收量，R3 期时 M25 处理显著高于 M0 和 M75 处理，R6 期时优势不明显。

对 2 个产区不同处理玉米养分吸收进行比较发现，东北黑土区 M25 处理与 M0 处理基本没有差异，有机肥替代处理在养分吸收方面并没有表现出优势，而土默川平原 M25 处理显著优于其他处理。

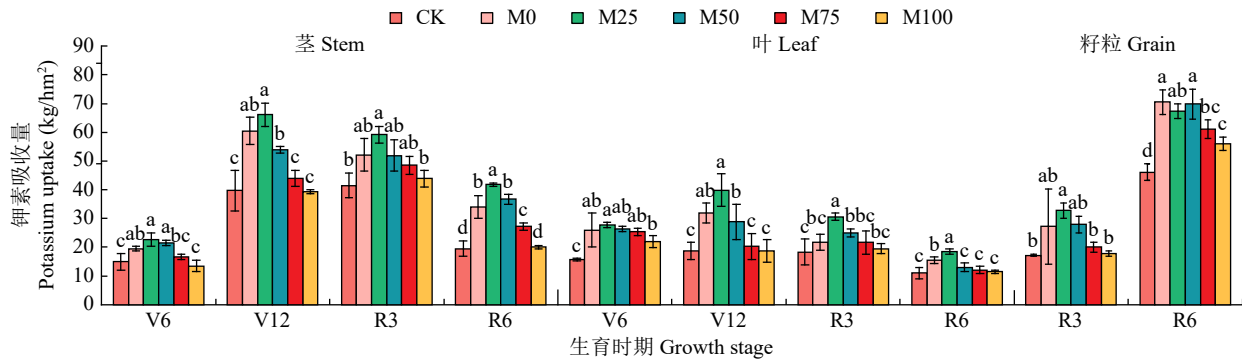


图 8 土默川平原不同处理的玉米钾素吸收量  
Fig.8 Potassium uptake of maize under different treatments in the Tumochuan Plain

2.4 有机肥替代化肥对玉米肥料利用效率的影响

2.4.1 有机肥替代化肥对玉米肥料偏生产力的影响 东北黑土区不同处理下玉米的 PFP 差异较大 (表 2)。M25 处理的 PFP 与 M0 相当, 显著高于其他处理, PFP<sub>N</sub> 较其他处理提高了 2.77%~32.19%, PFP<sub>P</sub> 和 PFP<sub>K</sub> 也显著高于其他处理。

表 2 东北黑土区不同处理下的肥料偏生产力  
Table 2 Fertilizer partial productivity under different treatments in the black soil region of Northeast China kg/kg

处理 Treatment	PFP <sub>N</sub>	PFP <sub>P</sub>	PFP <sub>K</sub>
CK	—	59.75±3.16e	59.75±3.16d
M0	40.87±1.52ab	81.75±3.04ab	81.75±3.04ab
M25	42.00±1.84a	84.95±3.71a	85.58±3.74a
M50	37.14±2.25b	77.06±4.66bc	77.06±4.66bc
M75	34.31±1.89bc	72.47±3.98cd	72.48±3.98c
M100	31.77±1.39c	67.64±2.96d	64.45±2.82d

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ( $P < 0.05$ ), the same below.

由表 3 可知, 土默川平原 M25 处理的 PFP 显著高于其他处理, PFP<sub>N</sub> 较其他处理提高了 12.45%~36.81%, PFP<sub>P</sub> 和 PFP<sub>K</sub> 也显著高于其他

处理。

表 3 土默川平原不同处理的肥料偏生产力  
Table 3 Fertilizer partial productivity under different treatments in the Tumochuan Plain kg/kg

处理 Treatment	PFP <sub>N</sub>	PFP <sub>P</sub>	PFP <sub>K</sub>
CK	—	62.70±3.62d	83.60±4.83d
M0	44.49±3.76b	83.42±7.05b	111.23±9.40b
M25	50.03±2.65a	93.81±4.98a	125.07±6.64a
M50	40.79±2.05bc	76.49±3.85bc	101.98±5.13bc
M75	39.25±3.28bc	73.60±6.14c	98.13±8.19c
M100	36.57±1.52c	68.57±2.85cd	91.43±3.80cd

分析 2 个产区的玉米 PFP 发现, 2 个产区均是 M25 处理显著高于其他处理, 并且随着替代比例的增加 PFP 降低, 表明适宜的有机肥替代化肥可满足玉米对养分全生育期的需求, 进而提高玉米的养分利用效率。不同之处在于土默川平原 M25 处理的肥料偏生产力提升效果优于东北黑土区, 与产量分析的原因一致, 即该产区对适宜有机肥投入的响应优于东北黑土区。

2.4.2 有机肥替代化肥对玉米氮肥农学利用率的影响 不同处理玉米的 AEN 如图 9 所示, M25 处

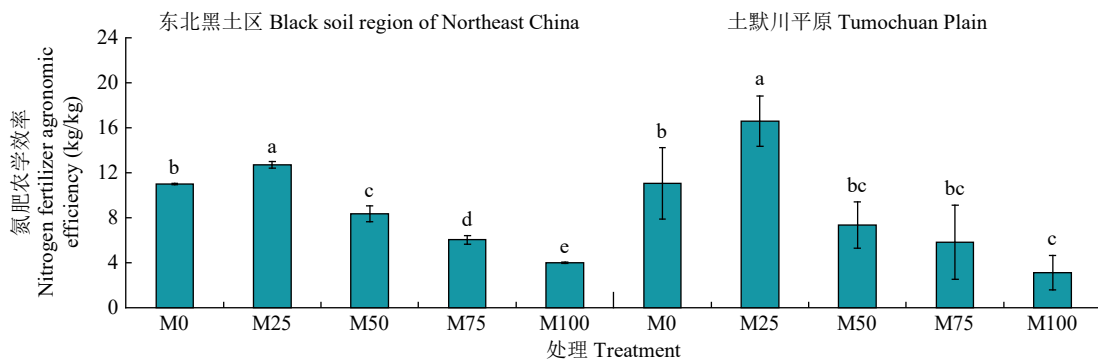


图 9 不同处理下东北黑土区和土默川平原的氮肥农学效率  
Fig.9 Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer under different treatments in the black soil region of Northeast China and Tumochuan Plain

理下东北黑土区的 AEN 显著高于其他处理，较 M0、M50、M75 和 M100 处理分别提高了 15.28%、51.97%、110.47% 和 218.29%。土默川平原 M25 处理的 AEN 高于 M0、M50、M75 和 M100 处理。可见，在等量氮肥施入的情况下，AEN 随有机肥替代比例升高而降低。

### 3 讨论

#### 3.1 有机肥替代化肥适宜比例的影响因素

大量研究<sup>[13-15]</sup>表明，有机肥部分替代化肥可协同土壤质量与生态功能的改善、保障农产品安全与品质、减缓气候变化以及促进农业可持续发展；而替代比例是充分发挥有机肥作用的基础和保障，适宜的替代比例受作物类型、土壤条件和管理措施等多重因素影响，需综合考虑。合理的替代比例在一定程度上可以提高作物叶片的光合速率，为干物质积累提供保障<sup>[16]</sup>，进而可显著提高作物的产量<sup>[17]</sup>。研究<sup>[18-20]</sup>表明，玉米的有机肥替代比例 17.00%~37.50% 可在保障玉米产量的同时，改善土壤理化性质；小麦的有机肥替代比例为 17.26%~30.00%<sup>[21-23]</sup>，水稻的有机肥替代比例为 16.60%~35.30%<sup>[24-26]</sup>，可见不同作物与不同区域有机肥替代比例差异较大。本研究中，东北黑土区有机肥替代的效果不明显，虽然 M25 处理在数值上优于 M0 处理，但是差异未达显著水平，因此该地区 M25 处理在产量和养分吸收利用方面并没有优势，研究团队同期测定了土壤有机质和土壤容重的数据，发现 M25 处理在土壤理化性质方面具有一定的优势，因此在化肥减施和黑土地保护等国家战略背景下，该产区建议实施有机肥替代 25% 的化肥。土默川平原有机肥替代的效果较为明显，M25 处理可显著提高玉米的养分吸收量和干物质累积量，进而提高产量及肥料利用效率，可作为该产区有机肥替代的推荐处理。

#### 3.2 适宜有机肥替代化肥比例增产增效分析

适宜的有机肥替代化肥比例对玉米干物质积累量和产量形成至关重要<sup>[27-29]</sup>。研究<sup>[30]</sup>发现，有机肥替代化肥能够有效提高化肥的利用效率，使作物更易于吸收与利用，提高肥效的持久性。有机肥替代能够在作物营养生长与生殖生长阶段对

其干物质积累进行合理调控，满足作物不同生长阶段的养分需求，优化生长发育过程，最终实现产量提升。研究<sup>[31]</sup>发现，有机肥替代 30% 化肥的处理通过提高净光合速率和叶面积指数改善了玉米冠层的光合生产能力，提高了玉米干物质积累量。研究<sup>[32]</sup>表明，有机肥与化肥配施后可以活化土壤中被固定的养分、改善土壤环境，提高作物对养分的吸收，进而提升养分有效性；并且有机肥替代化肥改善了土壤养分的供应，使土壤养分能够平稳释放，促进了作物养分吸收，从而提高肥料利用率。本研究中，土默川平原 M25 处理在各生育时期均可促进玉米各器官的生长，但随着有机肥替代比例的升高其促进作用有下降趋势，这是由于适量有机肥替代化肥促进了玉米养分吸收，提高了干物质积累量，但过高的替代比例使养分主要以有机形式供给植物，一方面其有效性降低，另一方面与玉米的需求不匹配，进而导致养分供应不足，影响玉米生长，出现缺肥症状，最终减产，这与前人<sup>[33]</sup>的研究结果相似。此外，M25 处理满足了玉米的主要养分需求和关键生育期的养分吸收，同时兼有改善土壤理化性质的作用，为玉米生长创造了良好的环境，进而促进产量提高。再者，M25 处理下玉米植株各器官中的氮、磷和钾养分吸收量也显著高于其他处理，与前人<sup>[34]</sup>研究结果相似，这是因为有机肥与无机肥配施较好地协调了作物生长前期和后期对养分的需求，显著提高了植株总养分吸收量，增加了作物对养分的利用率，减少了养分的损失；但随着替代比例增加，有机肥养分释放速率变慢，导致养分总体供应不足，进而出现养分吸收量降低的情况。M25 处理的 PFP 显著高于其他处理，这是由于适量有机肥替代化肥可促进玉米对养分的吸收，提高了养分吸收量，进而提升了养分利用效率，最终实现肥料利用效率的提升。因此，土默川平原有机肥替代 25% 化肥可保障玉米高产稳产，实现增产和肥料利用率的协同提升。

#### 3.3 土壤肥力对玉米有机肥替代比例的影响

土壤基础地力水平直接影响有机肥替代化肥的适宜比例与效果，是决定替代可行性的重要基础条件，肥沃的土壤能更好地协调水、肥、气和

热等条件,增强对养分的保蓄与释放能力,使自身养分储备充足;而贫瘠的土壤可能因承载力不足,限制土壤养分的有效供给。如前文所述,玉米有机肥替代的比例差异较大,这可能是原因之一。姚敏娜<sup>[35]</sup>在我国北方农牧交错带地区研究发现,有机肥替代20%可显著提高玉米产量、品质及土壤有效养分;刘秉鑫等<sup>[36]</sup>在甘肃定西研究表明,37.5%有机肥替代可提高旱作玉米灌浆期的叶面积指数和光合关键酶活性,保证稳产且提升氮肥利用效率;费聪<sup>[37]</sup>研究了有机肥替代对晋西南旱区玉米的影响表明,有机肥替代30%化学氮肥不仅可以改善土壤的贮水能力,还可通过提高根系生长和生理活性促进水肥吸收利用,提高籽粒产量和品质;谢军<sup>[38]</sup>在石灰性、中性和酸性紫色土上的研究表明,有机肥替代50%的化肥使玉米籽粒增产2.2%~51.1%,AEN增加3.4%~76.6%。可见同一作物由于土壤基础地力的差异及不同的管理措施,其替代比例差异较大。

本研究中,有机肥替代比例同样因土壤肥力的差异而表现出不同,东北黑土区基础地力较高,而土默川平原基础地力相对较低,2个产区对有机肥的承载能力不同,因此表现出不一样的替代效果。另外,东北黑土区由于土壤较肥沃,化肥推荐用量相对较低(180 kg N/hm<sup>2</sup>、90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/hm<sup>2</sup>、90 kg K<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>),M25处理下有机肥实际替代了45.00 kg 氮肥、22.00 kg 磷肥和23.70 kg 钾肥;而土默川平原土壤较贫瘠,化肥推荐用量相对较高(225 kg N/hm<sup>2</sup>、120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/hm<sup>2</sup>、90 kg K<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>),M25处理下实际替代了56.25 kg 氮肥、11.25 kg 磷肥以及26.41 kg 钾肥,土默川平原有机肥的绝对用量高于东北黑土区,这可能也是2个产区对有机肥响应程度不一致的原因。再者,土默川平原M25较M0处理玉米产量增加了12.48%,较M100处理增加了36.84%;而东北黑土区M25与M0处理产量无显著差异,较M100处理增加了25.28%,可能是东北黑土区土壤有机质含量高,土壤缓冲性较强,对外界有机物料投入的响应相对较低,因此增产效果弱于土默川平原。一般认为基础地力较低的土壤对有机质的容纳和需求更高,需要较高的替代比例来快速培肥地力<sup>[39]</sup>,本

研究结果与其相似。相反,对于本身较高肥力的黑土,研究<sup>[40]</sup>表明也需要较高的替代比例,其目的并不是快速改良土壤,而是为了维持和提升土壤质量。本研究从玉米产量及养分吸收利用效率确立了替代比例,发现肥沃的土壤(东北黑土区)有机肥替代的效果不明显,贫瘠的土壤(土默川平原)适宜的有机肥替代可实现玉米产量与肥料利用效率的协同提升。未来将结合土壤理化性状指标,以进一步明确产区适宜的有机肥替代比例。

本研究在土壤特征和气候条件完全不同的2个玉米主产区开展的有机肥替代化肥研究,其目的是明确有机肥替代在不同产区的效果及差异,为后续该技术的推广应用提供理论依据和技术支撑。相关文献<sup>[41-45]</sup>也基本佐证了结论的可靠性。在后续研究中,已继续开展为期3年的连续试验,将其长期效应进行验证。

## 4 结论

土默川平原有机肥替代25%化肥处理能够显著提高玉米产量及各器官干物质积累量;并促进玉米对氮、磷和钾养分的吸收,提高肥料利用效率,是产区玉米种植适宜的有机肥替代化肥比例,可实现玉米产量和肥料利用率的协同提升。东北黑土区有机肥替代25%化肥处理与纯化肥相比,对玉米产量、干物质累积量及养分吸收利用效率的影响较小,但综合考虑其可能改善土壤理化性质,因此该产区同样推荐有机肥替代25%的化肥。有机肥替代效果在土默川平原表现更优。

### 参考文献

- [1] 王富贵,于晓芳,高聚林,等.土默川平原灌区春玉米机械收获品种的评价与筛选.北方农业学报,2021,49(4):13-19.
- [2] Qian C R, Yu Y, Gong X J, et al. Response of grain yield to plant density and nitrogen rate in spring maize hybrids released from 1970 to 2010 in Northeast China. The Crop Journal, 2016, 4(6): 459-467.
- [3] 农业部种植业管理司.农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知.(2015-03-18)[2025-11-26]. [https://zzys.moa.gov.cn/gzdt/201503/t20150318\\_6309945.htm](https://zzys.moa.gov.cn/gzdt/201503/t20150318_6309945.htm).
- [4] 种植业管理司.农业农村部关于印发《到2025年化肥减量化行动方案》和《到2025年化学农药减量化行动方案》的通知.(2022-11-18)[2025-11-26]. [https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201\\_6416398.htm](https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201_6416398.htm).
- [5] 张田野.化肥零增长行动实施效果及问题研究.北京:中国农业科学院,2020.

- [6] 胡建民, 苗俊艳, 许秀成. 科学认识和辨别有机肥. 肥料与健康, 2022, 49(1): 11-15.
- [7] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341-1358.
- [8] Li W B, Qu J W, Gao J L, et al. Long-term nitrogen management strategies based on straw return improve soil carbon and nitrogen fractions and nitrogen use efficiency of maize in the Tumochuan Plain Irrigation District. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1620311.
- [9] 杨绣娟, 孙继颖, 高聚林, 等. 不同生态条件下氮肥对玉米干物质积累、氮素分配及产量的影响. 华北农学报, 2023, 38(3): 108-120.
- [10] 李慧, 王旭敏, 刘朋召, 等. 耦合效应弥补水氮减量对夏玉米养分吸收和利用的不利影响. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1283-1296.
- [11] 刘道, 刘梦洁, 梁飞, 等. 滴施不同水溶性磷肥对石灰性土壤磷分布及玉米磷素吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(9): 1720-1733.
- [12] 王艺霖, 张水梅, 袁静超, 等. 不同栽培方式下春玉米养分累积与转运特征. 中国土壤与肥料, 2022(7): 153-161.
- [13] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响. 生态学报, 2014, 34(21): 6137-6146.
- [14] 万连杰, 李俊杰, 张绩, 等. 有机肥替代化肥技术研究进展. 北方园艺, 2021(11): 133-142.
- [15] 刘中良, 高俊杰, 谷端银, 等. 有机肥替代化肥对土壤环境和番茄品质的影响. 南方农业学报, 2020, 51(2): 357-363.
- [16] 王嘉男, 谢军红, 李玲玲, 等. 有机肥替代化肥对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(4): 29-36, 42.
- [17] 陈萍, 李惠霞, 马玲芳, 等. 宁夏潮土区有机肥替代化学氮肥对玉米产量及氮素利用效率的影响. 中国土壤与肥料, 2023(9): 136-142.
- [18] 陈梦茹, 邢英英, 解霞霞, 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. 水土保持学报, 2024, 38(3): 369-381.
- [19] Xie L H, Li L L, Xie J H, et al. A suitable organic fertilizer substitution ratio stabilizes rainfed maize yields and reduces gaseous nitrogen loss in the Loess Plateau, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2025, 24(6): 2138-2154.
- [20] 马纪龙, 姬丽, 马琨, 等. 有机肥等氮量替代化肥对玉米氮素吸收利用及土壤氮素淋失的影响. 中国生态农业学报, 2025, 33(2): 286-300.
- [21] 鲁伟丹, 李俊华, 罗彤, 等. 连续三年不同有机肥替代率对小麦产量及土壤养分的影响. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1330-1338.
- [22] 丁晓娟, 顾进初, 徐素霞, 等. 有机肥部分替代化学磷肥对小麦生长及土壤性状的影响. 安徽农业科学, 2023, 51(18): 149-151.
- [23] 吕丽华, 姚海坡, 曹志敏, 等. 有机肥替代化肥对小麦产量、品质及氮素效率的影响. 华北农学报, 2022, 37(6): 166-172.
- [24] 胡时友, 张舒, 马朝红. 水稻施用不同质量的有机肥替代化肥用量比例的研究进展. 农村经济与科技, 2021, 32(9): 71-72.
- [25] 陈伟龙, 沈文英, 肖佳丽, 等. 不同比例有机氮肥替代无机氮肥对双季稻生长和土壤供氮能力的影响. 浙江农业科学, 2024, 65(10): 2368-2372.
- [26] 叶鑫, 隋世江, 陈玥, 等. 有机肥氮替代化肥氮比例对单季稻产量、土壤养分及氮素吸收的影响. 辽宁农业科学, 2022(6): 24-28.
- [27] 刘艳, 李波, 孙文涛, 等. 生物有机肥对盐碱地春玉米生理特性及产量的影响. 作物杂志, 2017(2): 98-103.
- [28] 胡新元, 柳永强, 谢奎忠, 等. 旱区有机肥替代氮肥对多年连作土壤理化性质和马铃薯品质的影响. 作物杂志, 2023(4): 159-164.
- [29] 高飞, 汪志鹏, 赵贺, 等. 低地力条件下有机肥部分替代化肥对作物产量和土壤性状的影响. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 83-91.
- [30] 陈杨, 秦永林, 于静, 等. 内蒙古灌溉马铃薯氮肥减施依据及措施. 作物杂志, 2019(6): 90-93.
- [31] 杜伟, 赵秉强, 林治安, 等. 有机无机复混肥优化化肥养分利用的效应与机理研究II. 有机物料与磷肥复混对玉米产量及肥料养分吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 825-831.
- [32] 胡国智, 闫淼, 熊韬, 等. 适宜有机肥氮替代化肥氮比例提高甜瓜养分吸收、产量和品质. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 260-268.
- [33] Xie G M, Zhang X, Duan X R, et al. Effects of tillage and substitution of chemical fertilizers with organic fertilizers on leaf physiological characteristics and yield of maize. *International Journal of Plant Production*, 2025, 19(3): 1-19.
- [34] 田昌, 彭建伟, 宋海星, 等. 有机化肥肥配施对冬油菜养分吸收、籽粒产量和品质的影响. 中国土壤与肥料, 2012(4): 70-74.
- [35] 姚敏娜. 有机肥与化肥短期配施对玉米生产、土壤理化性质及微生物类群的影响. 中国土壤与肥料, 2025(7): 11-20.
- [36] 刘秉鑫, 孟浩峰, 李玲玲, 等. 有机肥替代基施化肥氮对旱作玉米叶片光合性能、产量及氮肥利用效率的影响. 玉米科学, 2024, 32(9): 96-107.
- [37] 费聪. 有机肥替代部分化肥氮对晋西南旱区玉米根系生长及其生理活性的影响. 中国土壤与肥料, 2024(9): 94-103.
- [38] 谢军. 有机肥替代化肥对不同 pH 值紫色土上玉米-蔬菜轮作体系生产力与温室气体排放的影响研究. 重庆: 西南大学, 2023.
- [39] Wu G, Huang M H, Jia B B, et al. Partial organic substitution increases soil quality and crop yields but promotes global warming potential in a wheat-maize rotation system in China. *Soil & Tillage Research*, 2024, 244: 106274.
- [40] 王周, 李强, 彭畅, 等. 有机肥氮替代 50% 化肥氮有效改善吉林省中部地区黑土团聚体性状. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(12): 2247-2257.
- [41] Feng W, Rodríguez S R A, Bilyera N, et al. Mechanisms of biochar-based organic fertilizers enhancing maize yield on a Chinese Chernozem: Root traits, soil quality and soil microorganisms. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, 36: 103756.
- [42] 杨忠赞. 有机肥替代氮肥对黑土理化性状及玉米产量的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [43] Zhou H, Shi H B, Guo J W, et al. Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on N<sub>2</sub>O emissions from saline soil. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3811-3821.
- [44] 杨吻, 郝水源, 赖黎明. 有机肥氮替代化肥对春玉米土壤养分、酶活性及产量的影响. 内蒙古农业大学学报, 2021, 42(4): 20-26.
- [45] 李梦婷. 有机无机肥配施对土默川平原盐碱化耕地改良效果研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.

## Effects of Organic Fertilizer Substitution on Maize Yield and Nutrient Utilization

Hao Jun<sup>1,2,3</sup>, Zhang Wei<sup>1,2,3</sup>, Bai Chunhua<sup>4</sup>, Huang Lichun<sup>4</sup>, You Yanhua<sup>4</sup>, Lu Yongxin<sup>1,2,3</sup>,  
Li Zhe<sup>1,2,3</sup>, Lian Dongyang<sup>1,2,3</sup>, Wu Wentao<sup>1,2,3</sup>, Chen Yang<sup>1,2,3</sup>, Zhang Li<sup>5</sup>, Liu Hongbo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;

<sup>2</sup>Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China;

<sup>3</sup>Inner Mongolia Autonomous Region Higher Education Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; <sup>4</sup>Hinggan League Institute of

Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Ulanhot 137400, Inner Mongolia, China;

<sup>5</sup>Hohhot Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

**Abstract** To address the issues of unreasonable chemical fertilizer management, low fertilizer use efficiency, and escalating environmental risks in the maize production areas of Inner Mongolia, field plot experiments were conducted in two typical production areas, namely the black soil region of Northeast China and the Tumochuan Plain. Six treatments were established: no nitrogen control (CK), 100% chemical fertilizer (M0), and organic fertilizer replacing 25% (M25), 50% (M50), 75% (M75), and 100% (M100) of chemical nitrogen, to clarify the effects of different substitution ratios on maize yield, dry matter accumulation, fertilizer use efficiency, and nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) nutrient uptake. The results showed that the M25 treatment significantly increased maize yield, with an increase of 4.69%-36.80% compared with other treatments. The M0 treatment exhibited the highest dry matter accumulation of various organs during the early growth stages of maize; however, the M25 treatment showed a distinct advantage from the large bell-mouth stage to maturity. The M25 treatment promoted the uptake of N, P, and K nutrients and enhanced their utilization efficiency; the partial productivity of fertilizer in M25 was 2.77%-50.51% higher than those of other treatments. In conclusion, the response of maize to organic fertilizer substitution in the Tumochuan Plain was superior to that in the Black Soil Region of Northeast China, and replacing 25% of chemical nitrogen with organic fertilizer can achieve a synergistic improvement in maize yield and fertilizer use efficiency.

**Key words** Maize; Organic fertilizer; Chemical fertilizer reduction; Black soil region of Northeast China; Tumochuan Plain; Yield; Fertilizer use efficiency