作物杂志 Crops 2025（3）：178-184 DOI：10.16035/j.issn.1001-7283.2025.03.024

不同施氮水平对黑土区糯玉米灌浆期碳代谢的影响

侯 楠 吴凤婕 齐翔鲲 王玉凤 杨克军 付 健

（黑龙江八一农垦大学农学院/黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室，163319，黑龙江大庆）

摘 要 为探讨半干旱黑土区糯玉米对不同氮肥施加水平的响应，在黑龙江省大庆市进行玉米盆栽试验。以2个糯玉米品种为主因素，4个氮肥水平为副因素，纯氮施加量分别为0（N0）、150（N1）、225（N2）和300 kg/hm^2（N3），分析糯玉米灌浆期碳水化合物含量、酶活性、生物量和灌浆特性。结果表明，金糯262的淀粉、蔗糖、可溶性糖含量受高施氮水平的抑制效果较为明显，N1处理为最佳施氮水平。京科糯2000对于施氮水平的耐受度略高于金糯262，N2处理为最佳施氮水平，合理提高氮肥施用量对2种糯玉米叶片酶活性均有不同程度提高。金糯262在N1处理下25 d左右达到最高灌浆速率，京科糯2000在N2处理下30 d左右达到最高灌浆速率，同时产量达到最高。综合分析，金糯262和京科糯2000分别在N1和N2处理下效果最佳。

关键词 施氮水平；糯玉米；碳代谢；灌浆期；产量

随着人们的生活水平的提高，对糯玉米等健康粗粮食品的需求也不断增加，香甜软糯、口感好、易加工的糯玉米有较高的培育价值与前景[1]。从农业种植角度看，作物的产量与食用品质是衡量品种优劣的重要指标。灌浆期作物光合器官所产生的营养物质在籽粒中转化为碳水化合物并不断积累。随灌浆进程不断推进，作物的营养成分和食用品质也处于不断变化的过程。灌浆速率和灌浆时间决定着作物籽粒的干物质积累量。对糯玉米来说，把握灌浆特性尤为重要，采收过早产量低，品质差，采收过迟籽粒内含物增加，果皮厚、品质差，以上均决定着糯玉米品种的营养与品质[2-4]。

碳代谢是糯玉米生长最基础的物质代谢过程之一[5-7]，施用适当的氮素可以提高植物的碳源利用效率，加速光合作用产物向蔗糖的转换，从而提高蔗糖的含量。另外，品种的选择对糯玉米的营养与品质也有很大影响，优质品种是提高粮食产量的关键内因。在适宜的种植环境下，优异性状才能在优良品种上得到最大程度发挥[8-9]。

近年来，糯玉米的研究[10-12]多关于作物的产量，而施氮水平如何影响生理指标、常见糯玉米品种间的比较以及不同施氮对玉米碳代谢及相关酶的影响，目前尚不明确。灌浆期是糯玉米干物质积累及碳氮代谢的关键时期，与糯玉米产量形成密切相关。研究不同施氮水平下植物碳代谢产物、相关酶含量和作物的灌浆特性，可以在一定程度上反映植物对外界环境的响应和调控能力，从而实现植物稳产高产。因此，本试验以金糯262和京科糯2000这2个常见糯玉米品种为材料，研究黑土区氮肥不同施用量对糯玉米碳代谢关键生理指标的影响，对灌浆期糯玉米的碳代谢、灌浆特性、生物量等指标展开研究，明确东北黑土区适宜的糯玉米肥料调控管理措施，为东北黑土区糯玉米绿色高效施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与地点

供试玉米品种为金糯262和京科糯2000，金糯262由哈尔滨市金牛种业有限公司选育，京科糯2000由北京市农林科学院玉米研究中心选育。试验地点位于黑龙江省大庆市黑龙江八一农垦大学农学院盆栽场。

1.2 试验设计

试验采用二因素设计，2个糯玉米品种为主因素，4个氮肥水平为副因素，纯氮施加量分别为0（N0）、150（N1）、225（N2）和300 kg/hm^2（N3），

作者简介：侯楠，研究方向为寒地作物全程机械化优质高效生产，E-mail：187449005@qq.com
杨克军为通信作者，主要从事寒地玉米产量、品质生理生态研究，E-mail：byndykj@163.com；付健为共同通信作者，主要从事寒地玉米产量、品质生理生态研究，E-mail：fujian_hl@163.com
基金项目：中国科学院“黑土地保护与利用科技创新工程”专项（XDA28130102）；黑龙江八一农垦大学引进人才科研启动基金（XYB201901）
收稿日期：2024-02-19；修回日期：2024-04-01；网络出版日期：2025-01-13

于播种、拔节期和抽雄期分别施 30%、40%和 30%。共 8 个处理，每个处理 60 盆，共计 480 盆。试验采用盆栽试验，桶直径 30 cm、高 35 cm，每桶装取过筛混匀耕作壤土 20 kg，每桶播种 5 粒，2023 年 6 月 9 日播种，6 月 27 日定苗，每盆留 1 株，株距 30 cm，行距 65 cm。每个处理 3 次重复，每次重复取 1 盆，以磷肥（P_5O_2 150 kg/hm^2）、钾肥（K_2O 120 kg/hm^2）做基肥一次施入，其他管理同田间常规管理。在吐丝期，选取长势一致的植株挂牌标记。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　*取样方法*　在糯玉米灌浆期（吐丝后 15 d），各处理选取长势一致的玉米，取穗位叶，装锡纸袋放入存有液氮的泡沫箱中，带回实验室−80 ℃冰箱保存，用于碳代谢各项生理指标的测定。

1.3.2　*碳代谢关键酶活性及相关代谢物含量*　参考吕静瑶等[13]的方法测定淀粉、可溶性糖和蔗糖含量。参考陈发元等[14]的方法测定蔗糖合成酶和蔗糖磷酸合成酶活性。用 3,5-二硝基水杨酸法测定酸性转化酶和中性转化酶活性。将以上测定的酸性转化酶及中性转化酶相加即为转化酶总活性，单位 mg/(g·h) FM。

1.3.3　*形态指标及生物量*　于糯玉米完全成熟后收获地上部分，自然风干，测定株高、茎粗、节数、茎干重、叶干重和地上部生物量。

1.3.4　*籽粒灌浆特性*　吐丝后，选取吐丝一致植株进行标记，于吐丝后 15 d 开始取样，每个处理选取 3 株，分别剥取果穗中部的籽粒 100 粒，称鲜重，采用排水法测定籽粒体积；于 80 ℃烘箱烘干至恒重，称干重，通过 Logistic 方程 y=a/(1+be–cx)模拟籽粒灌浆过程，式中，a 为终极生长量，b 为初始参数，c 为生长速率参数，对籽粒灌浆过程进行模拟，得到以下灌浆特征参数：

灌浆速率最大时的天数（T_{max}）=lnb/c；

灌浆速率最大时的生长量（W_{max}）=a/2；

最大灌浆速率（G_{max}）=(c×W_{max})/(1–W_{max}/a)；

籽粒灌浆活跃期（P）=6/c。

1.3.5　*产量*　于成熟期各处理选取长势一致的植株收获全部果穗，用 PM8818 水分测定仪测其含水量，折算出实际产量。

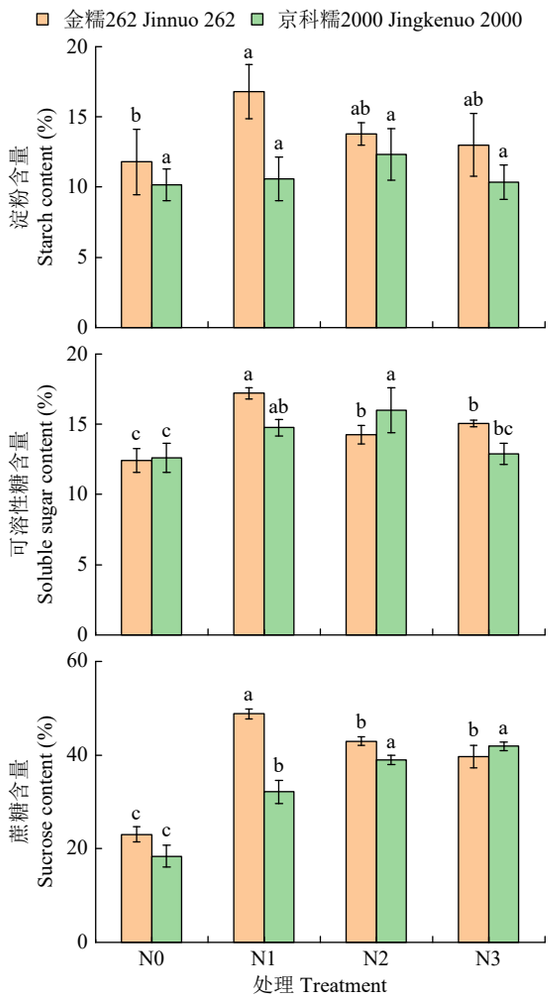
1.4　数据处理

运用 Excel 2019 进行数据处理并计算，运用 GraphPad Prism 9.5 进行图表绘制，运用 SPSS 27.0 进行差异显著性检验、方差分析和相关性分析，用 CurveExpert 1.4 模拟灌浆参数曲线。

2　结果与分析

2.1　不同施氮水平对糯玉米叶片碳水化合物含量的影响

由图 1 可知，随着施氮水平的不断增加，2 种糯玉米叶片中淀粉、可溶性糖、蔗糖的含量整体均呈先增后减的趋势。金糯 262 在 N1 处理中淀粉含量最高，京科糯 2000 在 N2 处理淀粉含量最高，分别为 16.8%和 12.3%，较 N0 分别提高了 42.5%和 21.5%，金糯 262 在 N1 处理下淀粉含量对比 N0 显著提高；可溶性糖含量金糯 262 和京科糯 2000 分别在 N1 和 N2 处理达到最高，与 N0 处理相比，



不同小写字母表示同一品种处理间差异显著（P < 0.05），下同。
The different lowercase letters indicate the significant difference (P < 0.05) among different treatments of the same variety, the same below.

图 1　不同施氮水平对糯玉米叶片淀粉、可溶性糖和蔗糖含量的影响

Fig.1　Effects of different nitrogen application levels on contents of starch, soluble sugar and sucrose in leaves of waxy maizes

分别提高了 38.4%和 27.1%。随着施氮水平的增加，N3 处理京科糯 2000 的可溶性糖含量与 N2 相比显著下降；金糯 262 蔗糖含量在 N1 处理达到最大值，与 N0 处理相比显著提高 59.4%，N0、N1、N2 处理下金糯 262 均高于京科糯 2000。金糯 262 与京科糯 2000 的蔗糖含量差值在灌浆期随施氮水平的提高不断减小。随施氮水平的提高，京科糯 2000 的叶片蔗糖含量与 N0 相比不断提高，在 N3 处理中达到最大值，与 N0 相比显著提高了 50.2%。

2.2 不同施氮水平对糯玉米碳代谢相关酶活性的影响

由图 2 可知，金糯 262 和京科糯 2000 蔗糖合成酶活性分别在 N1、N3 处理中最高，与 N0 相比分别显著提高 25.4%和 25.9%。低氮水平对京科糯 2000 的蔗糖合成酶活性表现出抑制作用。不同施氮量处理下 2 种糯玉米叶片转化酶活性存在差异，金糯 262 和京科糯 2000 分别在 N2、N3 处理中转化酶活性较高，表明 N2 和 N3 处理对于糯玉米蔗糖转化的促进程度较高，与 N0 处理相比活性分别提高约 27.3%和 15.48%。2 个品种的蔗糖磷酸合成酶活性变化趋势均为先增后减，金糯 262 和京科糯 2000 分别在 N1 和 N2 处理中达到最大值，对比 N0 分别提高了 51.3%和 55.5%。与 N0 处理相比，金糯 262 在 N1 处理水平下蔗糖磷酸合成酶活性提高显著，京科糯 2000 在 N1、N2、N3 处理与 N0 相比显著提高。

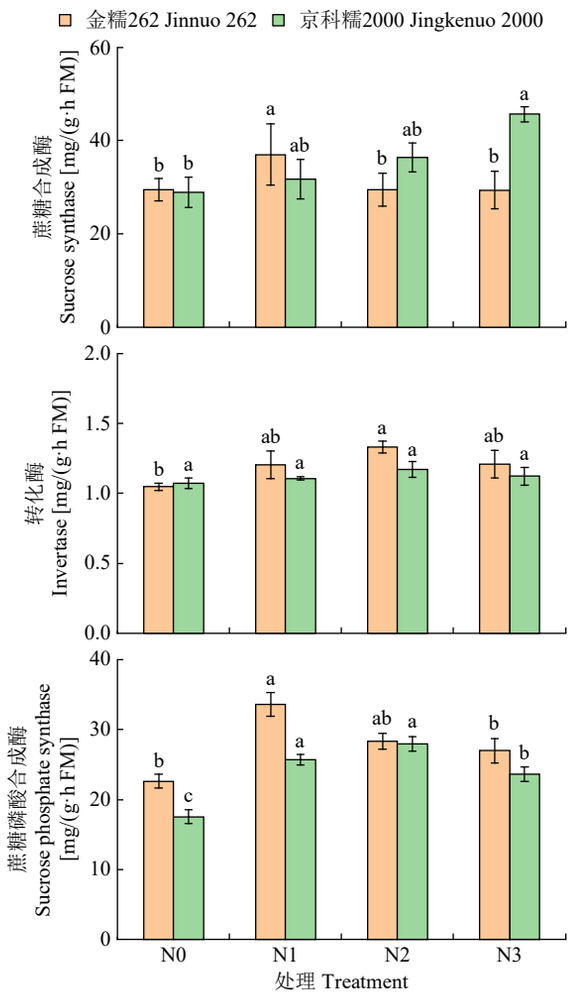


图 2 不同施氮水平对糯玉米叶片蔗糖合成酶、总转化酶和蔗糖磷酸合成酶活性的影响

Fig.2 Effects of different nitrogen application levels on the activities of sucrose synthase, total invertase and sucrose phosphate synthase in leaves of waxy maizes

2.3 不同施氮水平对糯玉米籽粒干重和体积的影响

由图 3 可知，2 种糯玉米百粒干重在灌浆期均呈现快－慢－快的增长趋势。灌浆前期，金糯 262 的百粒干重低于京科糯 2000；灌浆中后期，随着干物质的积累，金糯 262 的百粒干重高于京科糯 2000。在授粉后 40 d 左右，2 种糯玉米的百粒干重均达到最高，金糯 262 高于京科糯 2000。

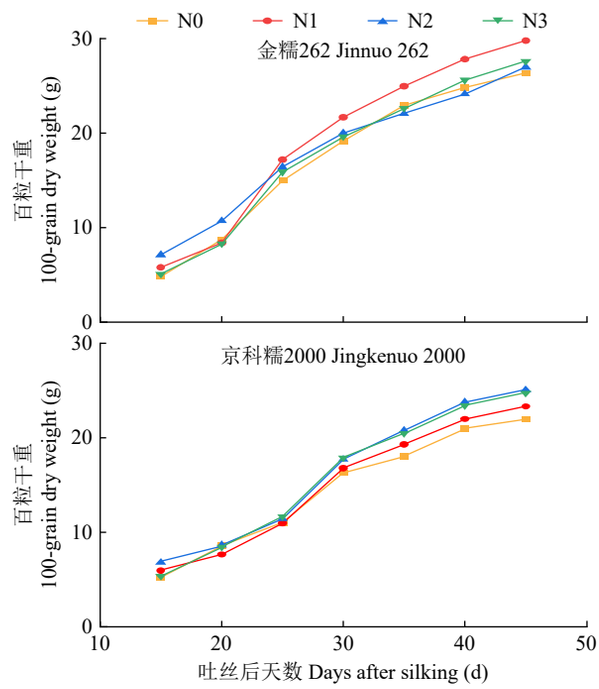


图 3 不同施氮水平 2 种糯玉米籽粒干重变化

Fig.3 Changes in grain dry weight of two waxy maizes at different nitrogen application levels

通过拟合方程对 2 种糯玉米籽粒体积变化分析发现（相关系数大于 0.9），金糯 262、京科糯 2000 的籽粒体积随时间推移都呈现出增长的趋势。施氮后 2 种糯玉米籽粒体积均大于不施氮处理的（表 1）。金糯 262 和科糯 2000 籽粒随着施氮量的增加，

拟合方程求导后的斜率随之增大，金糯 262 籽粒在 N1 处理时体积增长较其他处理具有明显的优势，京科糯 2000 在 N2 处理下籽粒体积增长速率较高。

表 1　不同施氮水平下糯玉米籽粒体积变化拟合方程

Table 1　Fitting equations of volume change of waxy maize grains at different nitrogen application levels

处理 Treatment	金糯 262 Jinnuo 262	京科糯 2000 Jingkenuo 2000
N0	y=0.680x+10.54	y=0.606x+10.44
N1	y=0.768x+13.47	y=0.687x+11.21
N2	y=0.698x+12.58	y=0.890x+11.99
N3	y=0.680x+10.65	y=0.887x+12.58

x 代表吐丝后天数（d），y 代表籽粒体积（cm^3）。
x represents days after silk excretion (d), y represents grain volume (cm^3).

2.4　不同施氮水平对糯玉米灌浆特性的影响

由图 4 可知，不同施氮水平下 2 种糯玉米籽粒的灌浆速率均呈现出先增后减的趋势。在灌浆前期，施氮后的籽粒相对于不施氮组灌浆速率更高，发育更迅速。不同施氮水平玉米籽粒灌浆速率达到峰值的时间也不尽相同，说明玉米籽粒干物质在灌浆期呈持续增长的趋势，而在灌浆期结束之后，灌浆速率达到峰值，干物质积累速率变慢，灌浆速率开始减小，在成熟期灌浆速率达到最小，基本接近于 0。金糯 262 在 4 个施氮处理下均在 25 d 左右达到最高灌浆速率，在达到最高灌浆速率之后下降，但仍高于京科糯 2000。京科糯 2000 在各处理均在 30 d 达到最高灌浆速率，最高灌浆速率时间晚于金糯 262。

通过 CurveExpert 1.4 软件拟合得到了各处理的 Logistic 方程，相关系数（R）达到 0.9904~0.9992（表 2），能够充分反映 2 种糯玉米籽粒干物质积累进程。结果表明 2 个品种灌浆速率最大时的天数（T_{max}）呈现差异，金糯 262 的 T_{max} 较京科糯 2000 提前。金糯 262 的灌浆速率最大时的生长量（W_{max}）随着施氮水平的升高呈先升后降的趋势，N1 处理达到最大；京科糯 2000 呈现逐渐升高的趋势，N2 处理达到最大，与 N0 处理相比，金糯 262 和京科糯 2000 的 W_{max} 和 G_{max} 分别明显提高了 17.2%和 29.4%。

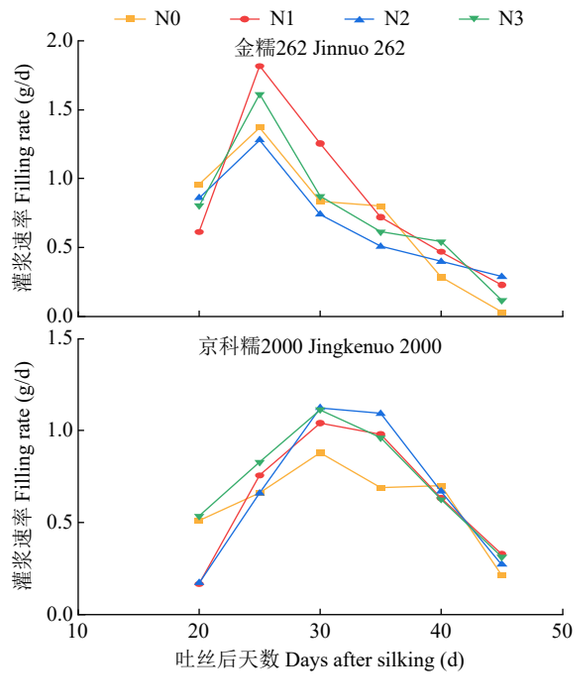


图 4　不同施氮水平 2 种糯玉米籽粒灌浆速率变化

Fig.4　Changes in grain grouting rate of two waxy maizes at different nitrogen application levels

表 2　不同施氮水平对糯玉米籽粒灌浆参数的影响

Table 2　Effects of different nitrogen application levels on grain filling parameters of waxy maize

品种 Variety	处理 Treatment	生长曲线方程 Growth curve parametric equation	T_{max} (d)	W_{max} (g·100-grain)	G_{max} [(g·100-grain)/d]	P (d)	R	产量 Yield (kg/hm²)
金糯 262 Jinnuo 262	N0	y=25.68/(1+75e-0.19t)	22.73	12.84	1.22	31.58	0.9987	8884.1±785.8c
	N1	y=30.09/(1+97e-0.19t)	24.10	15.05	1.43	31.58	0.9967	12 392.8±324.6a
	N2	y=26.18/(1+27e-0.15t)	21.95	13.09	0.98	40.00	0.9988	10 663.6±520.3b
	N3	y=26.39/(1+76e-0.19t)	23.37	13.19	1.22	32.43	0.9973	10 958.4±728.2b
京科糯 2000 Jingkenuo 2000	N0	y=25.82/(1+21e-0.11t)	26.74	12.91	0.73	52.90	0.9988	7412.9±836.0c
	N1	y=28.94/(1+29e-0.12t)	28.29	14.47	0.86	50.58	0.9947	9908.9±135.4b
	N2	y=29.05/(1+38e-0.14t)	26.50	14.53	1.00	43.65	0.9992	11 980.7±917.4a
	N3	y=33.42/(1+22e-0.11t)	29.15	16.71	0.89	56.23	0.9904	9439.1±574.3b

同列不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。
Different small letters in the same column indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ level, the same below.

2.5　不同施氮水平对糯玉米形态指标及生物量的影响

2.5.1　对形态指标的影响　由表 3 可知，在不同的施氮水平下，随着氮肥的浓度升高，金糯 262 与京科糯 2000 株高和茎粗均呈先增加后降低趋势，2 种糯玉米株高和茎粗在 N2 处理达到最大，分别较

N0 提高 7.8%、6.1%和 18.3%、21.4%，合理施加氮肥可有效提高糯玉米的茎粗和节数。金糯 262 与京科糯 2000 的株高、茎粗和节数分别在 N2、N2、N3 处理中达到最大。与 N0 相比，2 个品种的株高和茎粗在 N2 处理水平下差异显著。京科糯 2000 节数在 N3 处理与 N0 相比差异显著。整体来看金糯 262 的 3 种形态指标优于京科糯 2000。

表 3 不同施氮水平对糯玉米形态指标的影响

Table 3 Effects of different nitrogen application levels on morphological indicators of waxy maize

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)		茎粗 Stem thickness (cm)		节数 Section number	
	金糯 262 Jinnuo 262	京科糯 2000 Jingkenuo 2000	金糯 262 Jinnuo 262	京科糯 2000 Jingkenuo 2000	金糯 262 Jinnuo 262	京科糯 2000 Jingkenuo 2000
N0	219.0±12.1b	220.2±5.0b	2.9±0.1b	2.7±0.2b	12.7±0.9a	11.5±0.7b
N1	221.7±11.9a	231.0±6.2a	3.3±0.1a	3.0±0.1ab	13.9±1.2a	12.6±0.8ab
N2	236.1±8.0a	233.7±5.1a	3.4±0.0a	3.3±0.1a	13.7±0.9a	13.5±0.6ab
N3	220.5±11.8b	231.4±4.2a	3.1±0.1ab	2.8±0.1ab	14.1±0.7a	15.0±1.1a

2.5.2 对生物量的影响 随着施氮水平的不断增加，2 种糯玉米的茎干重、叶干重和鞘干重分别呈现出不同的变化趋势（表 4）。京科糯 2000 的茎干重在 N3 处理中达到最大值，与 N0 相比提高了 2.0%。金糯 262 N1 处理的茎干重与 N0 相比显著提高了 50.8%。京科糯 2000 叶干重在 N3 处理中达到最大值（38.8 g），与 N0 相比显著提高了 51.6%；金糯 262 在 N2 处理中达到最大值（33.5 g），与 N0 相比显著提高了 26.89%。同时 2 个品种在 N2 处理的鞘干重也达到最大值。

表 4 不同施氮水平对糯玉米生物量的影响

Table 4 Effects of different nitrogen application levels on the biomass of waxy maize g

处理 Treatment	茎干重 Stem dry weight		叶干重 Leaf dry weight		鞘干重 Sheath dry weight	
	金糯 262 Jinnuo 262	京科糯 2000 Jingkenuo 2000	金糯 262 Jinnuo 262	京科糯 2000 Jingkenuo 2000	金糯 262 Jinnuo 262	京科糯 2000 Jingkenuo 2000
N0	53.3±1.7b	89.0±3.0a	26.4±2.7b	25.6±2.5b	22.8±3.6b	21.4±2.8b
N1	80.4±3.5a	90.1±1.2a	31.7±3.5a	37.2±2.6a	27.9±1.8a	26.6±2.6a
N2	66.8±2.4ab	89.5±3.6a	33.5±4.8a	36.5±1.8a	31.7±2.6a	30.8±2.5a
N3	51.8±3.5b	90.9±2.8a	32.5±1.8a	38.8±2.0a	29.1±3.0a	27.8±1.5a

2.6 籽粒碳代谢相关酶活性、灌浆参数与产量的相关性分析

2 种糯玉米碳代谢酶活性、灌浆参数与产量的相关性分析（表 5）表明，金糯 262 产量与蔗糖磷酸合成酶、蔗糖转化酶活性呈显著正相关，蔗糖合成酶活性与灌浆期生长量呈显著相关性。京科糯 2000 的相关性结果与金糯 262 略有不同，蔗糖磷酸合成酶活性、最大灌浆速率与产量之间呈显著正相关。

表 5 籽粒碳代谢相关酶活性、灌浆参数与产量的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of enzyme activity related to grain carbon metabolism, grain filling parameters, and yield

品种 Variety	指标 Index	蔗糖合成酶 Sucrose synthase	蔗糖磷酸合成酶 Sucrose phosphate synthase	蔗糖转化酶 Sucrose invertase	产量 Yield
金糯 262 Jinnuo 262	T_{max}	NS	NS	NS	NS
	W_{max}	*	NS	NS	NS
	G_{max}	NS	NS	NS	NS
	P	**	NS	NS	NS
	产量	NS	*	**	NS
京科糯 2000 Jingkenuo 2000	T_{max}	NS	NS	NS	NS
	W_{max}	NS	NS	NS	NS
	G_{max}	NS	NS	NS	*
	P	NS	NS	NS	NS
	产量	NS	*	NS	NS

NS 表示 $P \geqslant 0.05$ 的显著性水平，*表示 $P < 0.05$ 的显著性水平，**表示 $P < 0.01$ 的显著性水平。下同。

NS means significance levels at $P \geqslant 0.05$, * means significance levels at $P < 0.05$, ** means significance levels at $P < 0.01$. The same below.

3　讨论

3.1　不同施氮水平对糯玉米碳水化合物的影响

不同施氮水平对玉米籽粒营养品质有显著作用，而玉米籽粒营养品质主要通过总可溶性糖、蔗糖和淀粉的积累体现出来。玉米籽粒随授粉后时间的推移，可溶性糖含量一直增加。吕静瑶等[13]研究中认为，蔗糖含量在灌浆期随施氮水平的增加先增加后减小，呈单峰曲线变化。本研究中碳水化合物的试验结果表明，金糯 262 的淀粉、蔗糖、可溶性糖含量受高施氮水平的抑制效果较为明显，在 N1 处理下为最佳施氮水平，京科糯 2000 对于施氮水平的耐受度略高于金糯 262。金糯 262 和京科糯 2000 分别在 150 和 225 kg/hm^2 的施氮水平下更有利于可溶性糖和淀粉的积累，叶片蔗糖含量分别在 150 和 225 kg/hm^2 达到最大值。施氮量通过影响糯玉米叶片中叶绿素含量对碳水化合物的合成造成影响。施氮量过低会破坏光合作用主要器官叶绿体的结构，造成叶绿素含量降低，过高的施氮量对糯玉米碳代谢具有一定的胁迫作用，碳代谢减慢，植株生长受到抑制，与赵泽群[15]研究结果相似。

3.2　不同施氮水平对糯玉米碳代谢相关酶活性的影响

叶片光合产物向籽粒转化的形式主要是蔗糖，而蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶、蔗糖转化酶 3 种酶关系到蔗糖的合成与降解，与碳代谢关系密切[16]。本研究结果表明，合理提高氮肥施用量对 2 种糯玉米叶片酶含量均有不同程度提高，金糯 262 蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶与蔗糖转化酶活性均优于京科糯 2000。本研究中适量施氮肥可以增加糯玉米叶片蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶和蔗糖转化酶活性，施氮不足或过量均会引起叶片酶活性降低。这与前人[16-18]在玉米、花生、烤烟等作物上的研究结果相似，即合理施氮提高了玉米穗位叶蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶和蔗糖转化酶含量，增强光合产物的积累与运输，原因可能是施氮量会对作物转录因子的表达造成影响，通过与靶基因的相互作用来调节特定基因表达，进而影响植物的碳代谢相关酶活性。相关性分析表明，蔗糖磷酸合成酶对糯玉米的产量有较大影响，蔗糖磷酸合成酶是蔗糖生物合成的关键限速酶，提高玉米叶片蔗糖磷酸合成酶含量是增加叶片光合同化物供应能力和促进产量性状形成的重要途径。维持灌浆期糯玉米叶片较高的蔗糖磷酸合成酶和总转化酶含量可优化籽粒灌浆特性，进而显著提高糯玉米产量。

3.3　不同施氮水平对糯玉米灌浆特性的影响

灌浆期是玉米干物质积累及碳氮代谢的关键时期，与玉米产量的形成密切相关[19-21]。本研究表明，不同施氮水平下 2 种糯玉米籽粒的灌浆速率均呈现出先增后减的趋势。灌浆前期施氮后的籽粒相对于不施氮的灌浆速率更高，发育更为迅速。金糯 262 在 N1 处理下 25 d 左右达到最高灌浆速率，京科糯 2000 灌浆速率高峰较金糯 262 较晚，N3 和 N2 处理均在 30 d 达到最高灌浆速率，说明玉米籽粒干物质在灌浆期呈持续增长的趋势，而在灌浆期结束之后，灌浆速率达到峰值，干物质积累速率变慢。随着灌浆进程逐渐推进，金糯 262 在灌浆中后期随着干物质的积累，金糯 262 的籽粒干重高于京科糯 2000。在授粉后 40 d 左右，2 种糯玉米的百粒干重均达到最高。合理施用氮肥可以促进显著提高籽粒灌浆速率和灌浆速率最大时的生长量，延长灌浆活跃期，进而增加穗粒数，提高玉米产量。相关性结果表明灌浆速率与产量间呈显著正相关，糯玉米培育过程中需保证较高的灌浆速率。

3.4　不同施氮水平对糯玉米形态指标及生物量的影响

植物体内碳代谢能力增强，能够促进植物对物质和能量的利用，从而促进植物的生长，提高地上部分的生物量。研究[22]表明，施用适当氮肥可以调节土壤中的微生物种群和相关酶活，从而改变土壤和化肥的养分形态而满足植物生长对养分的需求。本研究的糯玉米植株干物质积累在氮素的作用下呈现不同趋势。合理的氮肥施用可提高糯玉米的形态指标，施氮量增加使糯玉米地上部生物量显著升高，这是因为施氮提高了蔗糖积累和糖代谢相关酶活。施氮量过高使玉米地上部生物量显著降低，这可能是由于施氮量过高抑制了糯玉米蔗糖合成和相关酶活性，致使植株向籽粒中转运的氮素相对较低，不利于生物量的积累。在低氮水平下，氮素向籽粒中过量转运，造成玉米植株灌浆期叶片早衰。

4　结论

本研究结果表明，金糯 262 和京科糯 2000 蔗糖磷酸合成酶活性和叶片可溶性糖、淀粉含量在 N1 和 N2 处理下最高。京科糯 2000 的蔗糖含量在 N3 处理最高。对于施氮水平的耐受度略高于金糯

262，京科糯 2000 灌浆速率高峰较金糯 262 推迟 5 d 左右，在授粉后 40 d，2 种糯玉米的百粒干重均达到最高。综合考虑 2 个品种在不同施氮处理下的表现，金糯 262 和京科糯 2000 最适宜的施氮量分别为 150 和 225 kg/hm^2，在适宜施氮量下糯玉米的产量和碳代谢表现更优。

参考文献

[1] 谢媛圆. 温度胁迫对鲜食玉米生长生理及产量的影响研究. 武汉：华中农业大学，2023.

[2] 郭强，于玲玲，赵贵元. 不同采收期对糯玉米子粒品质的影响. 作物杂志，2017(2)：126-129.

[3] 王祥宇，魏珊珊，董树亭，等. 氮素对灌浆期夏玉米叶片蛋白质表达的调控. 中国农业科学，2015，48(9)：1727-1736.

[4] Rodrigues V A，Crusciol C A C，Bossolani J W，et al. Magnesium foliar supplementation increases grain yield of soybean and maize by improving photosynthetic carbon metabolism and antioxidant metabolism. Plants，2021，10(4)：797.

[5] 张新钵. 不同氮效率小麦碳氮代谢关键酶含量与基因表达差异及氮肥响应. 扬州：扬州大学，2022.

[6] 王飞，范斌，张启鑫，等. 施肥模式对花生碳氮代谢产物的影响. 耕作与栽培，2022，42(4)：34-38.

[7] 李明，李迎春，牛晓光，等. 大气 CO_2 浓度升高与氮肥互作对玉米花后碳氮代谢及产量的影响. 中国农业科学，2021，54(17)：3647-3665.

[8] 卢柏山，徐丽，赵久然，等. 京科糯 2000 等系列鲜食糯玉米品种选育及应用. 玉米科学，2019，27(5)：1-4.

[9] 李宏杰. 施氮水平对不同氮效率玉米品种氮素吸收利用的影响及生理机制. 郑州：河南农业大学，2022.

[10] Ren B，Zhang J，Dong S，et al. Responses of carbon metabolism and antioxidant system of summer maize to waterlogging at different stages. Journal of Agronomy and Crop Science，2018，204(5)：505-514.

[11] 王金凤，王壮壮，谷丰序，等. 氮密调控对两个冬小麦品种碳氮代谢及产量的影响. 中国农业科学，2021，54(19)：4070-4083.

[12] 苌建峰，董朋飞，王秀玲，等. 氮肥运筹对不同夏玉米品种碳氮代谢协调性的影响. 中国农业科学，2017，50(12)：2282-2293.

[13] 吕静瑶，申丽霞，晁晓乐. 施氮对不同氮效率玉米籽粒碳代谢的影响. 江苏农业科学，2017，45(16)：64-68.

[14] 陈发元，胡锦，周俊成，等. 施氮量及基追比对烤烟碳代谢产物及关键酶的影响. 西南农业学报，2022，35(6)：1310-1317.

[15] 赵泽群. 不同施氮量对糯玉米主要农艺性状及籽粒营养品质的影响研究. 晋中：山西农业大学，2020.

[16] Yesbergenova-Cuny Z，Dinant S，Martin-Magniette M L，et al. Genetic variability of the phloem sap metabolite content of maize (*Zea mays* L.) during the kernel-filling period. Plant Science，2016，252：347-357.

[17] 赵跃，吕永超，陈小姝，等. 不同施氮水平对黑钙土花生碳氮代谢相关酶活性、产量和品质的影响. 中国油料作物学报，2024，46(1)：122-128.

[18] 王菲，雷波，谢伶俐，等. 氮素水平对烟草幼苗生长发育及碳氮代谢关键酶含量的影响. 安徽农学通报，2019，25(22)：14-18.

[19] 王晓慧，张磊，刘双利，等. 不同熟期春玉米品种的籽粒灌浆特性. 中国农业科学，2014，47(18)：3557-3565.

[20] Zhang S，Ghatak A，Bazargani M M，et al. Spatial distribution of proteins and metabolites in developing wheat grain and their differential regulatory response during the grain filling process. The Plant Journal，2021，107(3)：669-687.

[21] 张巽，郝建平，王璞，等. 灌浆期低温对离体培养玉米强弱势粒发育的影响. 中国农业科学，2018，51(12)：2263-2273.

[22] 于浩东，初振宇，汪顺源，等. 不同控释氮素比例对夏玉米叶片衰老和籽粒灌浆特性的影响. 中国农业科学，2023，56(18)：3511-3529.

Effects of Different Nitrogen Application Levels on Carbon Metabolism of Waxy Maize during Filling Period in Black Soil Area

Hou Nan, Wu Fengjie, Qi Xiangkun, Wang Yufeng, Yang Kejun, Fu Jian

(College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University / Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement of Heilongjiang Province, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

Abstract In order to explore the response of waxy maize to different nitrogen fertilizer application levels in semi-arid black soil areas, this study conducted a corn pot experiment in Daqing, Heilongjiang. Taking two waxy maize varieties as the main factors and four nitrogen fertilizer levels as secondary factors, the nitrogen application amounts were 0 (N0), 150 (N1), 225 (N2) and 300 kg/ha (N3). The carbohydrate content, enzyme activity, biomass and filling characteristics of waxy maize during filling period were analyzed. The results showed that the starch, sucrose and soluble sugar contents of Jinnuo 262 were significantly inhibited by high nitrogen application levels, and N1 treatment was the optimal nitrogen application level. The tolerance of Jingkenuo 2000 to nitrogen fertilization levels was slightly higher than that of Jinnuo 262. The best level of nitrogen fertilizer was the N2 treatment. The enzyme activity of two waxy maize leaves increased when the amount of nitrogen fertilizer applied was increased proportionately. The highest filling rates were achieved by Jinnuo 262 at around 25 days under N1 treatment and by Jingkenuo 2000 at around 30 days under N2 treatment. At the same time, the highest yield was obtained. A thorough analysis revealed that Jinnuo 262 and Jingkenuo 2000 performed best when treated with N1 and N2 in this study, respectively.

Key words Nitrogen fertilization level; Waxy maize; Carbon metabolism; Filling period; Yield