



苗任重. 氮肥后移对玉米灌浆、光合特性与氮效率的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2024(2):15-22.

氮肥后移对玉米灌浆、光合特性与氮效率的影响

苗任重

(驻马店市农业科学院, 河南 驻马店 463000)

摘要:为提高氮肥利用率,以郑单 958 为材料,2021—2022 年在施氮总量 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下,设置 4 个施氮处理,传统施氮(全部基施, N_1)为对照、拔节期后移 30%+灌浆期后移 10%(N_2)、拔节期后移 20%+灌浆期后移 20%(N_3)、拔节期后移 10%+灌浆期后移 30%(N_4),以及不施氮区(N_0),分析不同施氮处理对玉米灌浆、光合特性和氮效率的影响。结果表明,氮肥后移处理可显著促进籽粒灌浆,增加籽粒干物质质量,灌浆高峰提前,延长了灌浆活跃期,平均灌浆速率和最大灌浆速率增加。与常规施氮不后移相比,氮肥后移处理可使玉米维持较高的叶绿素相对含量(SPAD)、净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)。氮肥后移能够显著提高成熟期氮素累积量、氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力。氮肥后移还能够显著增加夏玉米穗粒数和百粒重,使籽粒产量平均提高了 16.32%~34.67%,生物产量平均提高了 12.81%~25.89%。在施氮总量 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的水平下,拔节期后移 20%+灌浆期后移 20% (N_3) 可有效提高河南砂姜黑土区夏玉米氮素供需吻合度,是实现夏玉米增产、增效的有效措施。

关键词:夏玉米;籽粒灌浆;叶绿素相对含量;净光合速率;蒸腾速率;氮肥效率参数

夏玉米是河南重要的粮食作物之一,2022 年河南种植玉米 385.75 万 hm^2 ,总产量 $2\,275.05\text{ 万 t}$ 。夏玉米氮肥耐受性强,对氮敏感性高,具有较强吸肥特性,且需肥量较大^[1]。施氮可显著提高玉米产量及氮肥利用效率^[2-4],目前生产过程中盲目追求玉米高产,投入氮肥量逐步增加,氮肥过渡施用现象普遍,远超玉米正常氮肥需求量^[5]。大量研究证实,我国氮肥利用率只有 30%~35%,显著低于世界发达国家的氮肥利用水平(60%~70%)^[6],因此,我国氮肥利用仍有较大的挖掘空间^[7-8]。河南农业生产中普遍存在一次性基施氮肥的“一炮轰”现象,此法可满足玉米生育前期对氮素的需求^[9],而灌浆期易造成氮素亏缺,影响灌浆与籽粒结实^[10],难以平衡土壤供肥和玉米阶段氮肥需求间的协调关系。在确保玉米高产的基础上合理施用氮肥,既可提供生育前期氮素需求,促进植株形态器官形成与干物质累积,同时又可解决灌浆期氮素匮乏,改善玉米的光合特性,提高光合物质的累积,通过优化施肥来提升氮肥利用效率已成为当前高产高效玉米研究的重点^[11-12]。刘帅等^[13]研究表明氮肥后移可保证玉米生育后期氮素充足供应,显著提高干物质累积量,增加氮肥偏生产力、氮肥农学效率,实现玉米高产。高素玲等^[14]

研究发现相对于氮肥全部基施,氮肥后移可提高叶片叶绿素含量、光合速率,同时增加氮素的利用效率。隋阳辉等^[15]研究表明生育后期玉米氮素吸收累积量约为全生育期 50%,因此将氮肥适量后移可满足玉米生育后期的氮素需求,对玉米稳产、增产具有重要作用。

大量研究表明氮肥后移使玉米氮素供需的吻合度更高,干物质累积、氮肥利用效率与产量方面均有改善^[11],但受试验土壤和生态气候类型差异的影响,具体怎样根据玉米需肥特性提高氮肥利用率,需针对性地筛选相应的施氮技术措施。河南砂姜黑土区在玉米实际生产中仍然存在有施氮侧重前期、忽视后期施肥的现象,严重影响玉米的产量潜力。目前有关氮肥后移对该地区夏玉米籽粒灌浆、光合特性与氮素累积及氮效率参数的影响鲜见报道,本文针对河南特定砂姜黑土特征与气候生态环境,连续 2 年在施氮总量不变的前提下,将部分氮肥后移,以期探索夏玉米氮素供应和同步吸收的最佳施氮方式,有望协调优化籽粒灌浆、光合特性、氮素累积、氮肥利用和产量,提升夏玉米生育氮素需求与施氮模式之间的吻合程度,为夏玉米高产、高效合理施用氮肥提供理论和技术支持。

收稿日期:2023-08-14

基金项目:河南省玉米产业技术体系驻马店综合试验站建设项目(HARS-23-02-Z6)。

作者简介:苗任重(1980—),男,学士,副研究员,从事农业技术推广工作。E-mail: miaorz666@126.com。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2021—2022 年试验安排在驻马店驿城区(驿城区,33°01'N,114°17'E),位于河南南部,该区属北亚热带向暖温带区过渡区域,亚湿润大陆性季风型气候,地下水资源充足,降雨量充沛。研究区

土壤为砂姜黑土,地势平整,肥力均匀一致,排水浇灌设施齐全。一年两熟种植制度。气象资料来源于驻马店市气象局,玉米生育期间 6 月—9 月平均气温、降雨量与日照时数见图 1,0~20 cm 表层土壤基础理化特性见表 1。

表 1 供试土壤基础理化性状

年份	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH
2021	1.22	7.92	1.26	92.59	20.41	95.74	6.38
2022	1.18	8.03	1.22	94.80	19.97	97.25	6.40

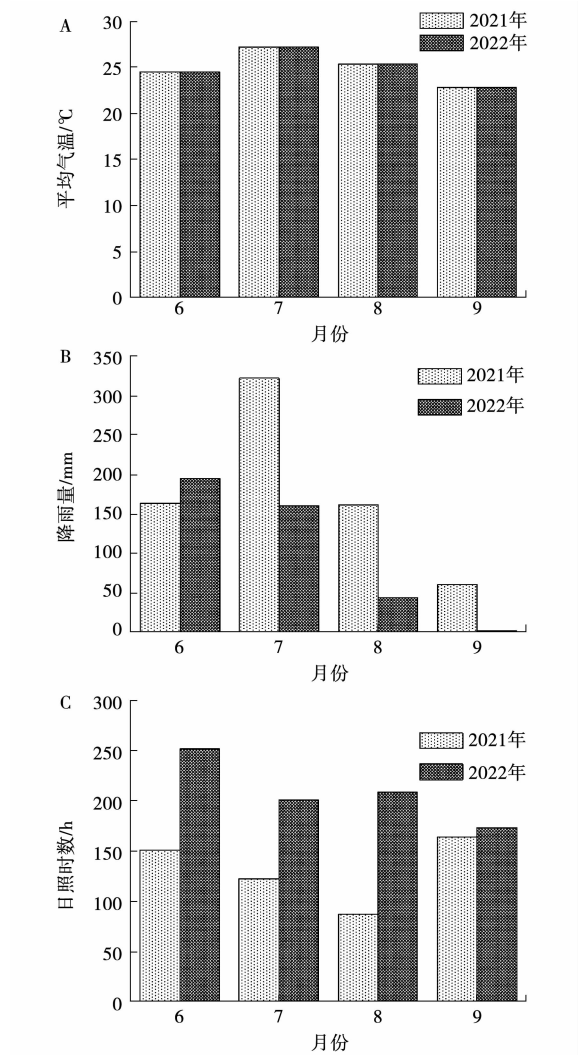


图 1 2021—2022 年 6 月—9 月玉米生育期间平均气温(A)、降雨量(B)和日照时数(C)

1.2 材料

供试玉米品种:郑单 958。
试验肥料:尿素(N 46%,河南骏马化工集团

生产),过磷酸钙(有效 P₂O₅ 12%,水溶性磷 60%,湖北龙祥磷化有限公司生产),硫酸钾(水溶性 K₂O 52%,国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司生产)。

1.3 方法

1.3.1 试验设计 随机区组排列,在施氮总量 250 kg·hm⁻² 条件下设置施氮 4 个水平,传统施氮(氮肥不后移全部基施,N1)作为对照、拔节期后移 30%+灌浆期后移 10%(N2)、拔节期后移 20%+灌浆期后移 20%(N3)、拔节期后移 10%+灌浆期后移 30%(N4),另外设置不施氮区(N0)以计算氮效率参数。试验各处理 3 次重复,共 15 个小区,每小区面积 28.8 m² (6.0 m×4.8 m)。人工开沟条施肥,过磷酸钙 150 kg·hm⁻² 和硫酸钾 120 kg·hm⁻² 于耕前作为基肥一次性底施,以确保各小区磷钾水平一致。留苗密度 7.5 万株·hm⁻²,2021 年 6 月 8 日、2022 年 6 月 11 日播种,于 2021 年 9 月 25 日、2022 年 9 月 28 日收获,其他田间管理和大田生产一致。

1.3.2 测定项目及方法 籽粒灌浆特征测定:吐丝前各小区选择生长基本一致植株 60 株统一挂牌标记,授粉后分别于 15,20,25,30,35,40 和 45 d,选取 3 个标记植株果穗,每果穗脱粒记录籽粒数,105 ℃ 条件下杀青 30 min,再置于 80 ℃ 恒温干燥箱烘干至恒重,测定籽粒干重。参照钱春荣等^[16]的方法采用 Logistic 方程 Slogistic 3 函数拟合籽粒灌浆性状参数。

$$W = \frac{a}{1 + be^{-a}}$$

(1)

式中,W 是授粉后籽粒干重;a 是最大理论籽

粒干重; t 是授粉后日数; e 是自然常数; b 、 c 是性状参数。

再经如下公式中方程一阶导数及二阶导数可推导出灌浆参数,并计算不同灌浆期的灌浆速率和最大灌浆速率。

灌浆高峰开始日期 $T_1 = \frac{\ln b - 1.317}{c}$ (2)

灌浆高峰结束日期 $T_2 = \frac{\ln b + 1.317}{c}$ (3)

灌浆完成日期 $T_3 = \frac{\ln b + 4.595}{c}$ (4)

快速灌浆期 $T_{2-1} = T_2 - T_1$ (5)

灌浆速率 $V = \frac{W}{t}$ (6)

氮肥利用率(%) = $\frac{\text{施氮区植株氮素累积量} - \text{不施氮区植株氮素累积量}}{\text{氮肥施用量}} \times 100$ (8)

氮肥农学效率(kg·kg⁻¹) = $\frac{\text{施氮区籽粒产量} - \text{不施氮区籽粒产量}}{\text{氮肥施用量}}$ (9)

氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹) = $\frac{\text{施氮区籽粒产量}}{\text{氮肥施用量}}$ (10)

产量及收获指数的测定:成熟时各小区取样 5 穗,室内考种穗粒数、百粒重,实收中间 2 行测定籽粒产量和生物产量,并计算收获指数。

收获指数 = $\frac{\text{籽粒产量}}{\text{生物产量}}$

1.3.3 数据分析 采用 Excel 2003 对试验数据进行整理,SPSS 19.0 进行方差分析、显著性检验,Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 氮肥后移对夏玉米籽粒灌浆 Logistic 拟合及灌浆参数的影响

由图 2 可知,氮肥后移夏玉米籽粒灌浆动态符合“S”型变化曲线,经历渐增期、速增期、缓增期 3 个过程。氮肥后移显著增加了籽粒干物重,改变了籽粒灌浆进程。授粉后 15 d,2021 年处理 N2、N3、N4 比处理 N1 籽粒干物重分别增加了 16.70%、33.39%和 20.55%,2022 年分别增加了 6.16%、16.56%和 11.04%。授粉后 45 d,2021 年处理 N2、N3、N4 比处理 N1 籽粒干物重分别增加了 14.39%、21.47%和 28.56%,2022 年分别增加了 19.07%、29.65%和 17.67%。

最大灌浆速率 $V_{\max} = \frac{ac}{4}$ (7)

光合特性测定:分别于拔节期、大喇叭口期、抽雄期、吐丝期、灌浆期选择长势均一的 5 株植株,选择晴天当日 9:00—11:00 对植株中部叶片叶脉两侧,测定叶绿素相对含量(SPAD 值)(便携式植物养分速测仪 TYS-3N)、净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)(美国思爱迪公司(CID, Inc., CI-340 便携式光合作用测量系统)。

氮效率参数:于成熟期选择具有一定代表性、生长均一、无病虫害的植株 5 株,105 ℃ 条件下杀青 30 min,置于干燥箱 80 ℃ 烘干至质量恒定,粉碎过筛,利用自动凯氏定氮仪测量植株含氮量。并计算氮效率参数^[17]。

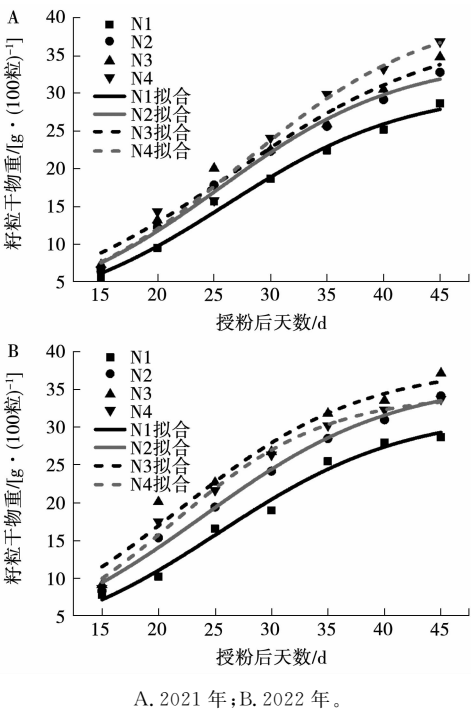


图 2 氮肥后移影响夏玉米籽粒灌浆动态发育拟合

由表 2 可知,氮肥后移提高了籽粒灌浆速率,利用 Logistic 模型量化夏玉米籽粒的灌浆过程,决定系数为 0.965 1~0.992 6,说明 Logistic 模型可反映氮肥后移不同处理籽粒干物质的累积进

程,其拟合方程两年结果基本相同,氮肥后移对夏玉米籽粒灌浆特性影响显著,在施氮总量一致的情况下,籽粒快速灌浆期随灌浆期氮肥后移量提高呈先上升后下降的趋势,两年氮肥后移处理 N3 比过量氮肥后移处理 N4 灌浆高峰开始日期(T_1)早,灌浆高峰结束日期(T_2)晚,灌浆完成期长。

两年灌浆速率随灌浆期氮肥后移量增加呈先上升后下降趋势,处理 N3 灌浆速率最高,而最大灌浆速率随氮肥后移量增加呈逐渐增加趋势。说明玉米灌浆期氮肥适量后移可提高灌浆参数,延长快速灌浆期和灌浆完成期,提高籽粒最大灌浆速率,增加籽粒干物质量。

表 2 氮肥后移对夏玉米籽粒灌浆参数的影响

年份	氮肥处理	拟合方程	R^2	灌浆时期				灌浆速率/[$\text{g}\cdot(100\text{粒})^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$]			
				T_1	T_2	T_3	T_{2-1}	V_1	V_2	V_3	V_{\max}
2021	N1	$W = \frac{30.54}{1+25.46e^{-0.1239t}}$	0.9905	16.28	33.79	60.57	17.51	0.08	0.04	0.02	0.99
	N2	$W = \frac{34.69}{1+23.09e^{-0.1236t}}$	0.9913	16.24	34.56	62.58	18.32	0.10	0.05	0.03	1.07
	N3	$W = \frac{38.67}{1+16.24e^{-0.1049t}}$	0.9792	15.78	37.36	70.38	21.58	0.17	0.07	0.04	1.01
	N4	$W = \frac{41.22}{1+26.23e^{-0.1191t}}$	0.9858	17.93	36.93	66.01	19.00	0.10	0.05	0.03	1.23
2022	N1	$W = \frac{31.98}{1+21.43e^{-0.1210t}}$	0.9863	15.98	34.68	63.30	18.70	0.11	0.05	0.03	0.97
	N2	$W = \frac{36.26}{1+16.79e^{-0.1181t}}$	0.9926	14.30	33.47	62.79	19.17	0.17	0.07	0.04	1.07
	N3	$W = \frac{38.08}{1+14.69e^{-0.1232t}}$	0.9651	12.63	31.00	59.11	18.37	0.23	0.09	0.05	1.17
	N4	$W = \frac{34.34}{1+21.94e^{-0.1460t}}$	0.9890	13.40	28.90	52.63	15.50	0.13	0.06	0.03	1.25

注: R^2 为决定系数; T_1 、 T_2 、 T_3 分别为灌浆渐增期、速增期、缓增期的结束时期; T_{2-1} 为快速灌浆期; V_1 、 V_2 、 V_3 分别为渐增期、速增期、缓增期的灌浆速率, V_{\max} 为最大灌浆速率。

2.2 氮肥后移对夏玉米中部叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)的影响

由图 3 可知,氮肥后移均可提高夏玉米 SPAD 值,并随灌浆期氮肥后移量的增加呈现先增后降的趋势,通过两年的试验,SPAD 值整体上表现出 $N3>N2>N4>N1$,灌浆期氮肥后移量到达一定量后,氮肥过量后移 SPAD 值略有下降,生育前期处理间 SPAD 值差异未达显著水平,灌浆期差异显著。各处理拔节至灌浆期 SPAD 值在不同生育时期均呈现先升高后降低的抛物线型单峰曲线,抽雄期最大。拔节期 N3 处理具有一定的优势,两年平均 SPAD 值高于其他处理。2021 年氮肥后移的 N2、N3 和 N4 处理比 N1 处理分别增加了 4.55%、6.15%和 2.41%,2022 年分别增加了 4.85%、4.31%和 1.35%;2021 年灌浆期 SPAD 值 N2、N3、N4 处理比 N1 处理分别增加了 6.60%、10.76%和 3.67%,2022 年分别增加了 5.71%、9.68%和 3.47%。抽雄期后 SPAD 值开始降低,至灌浆期 N3 处理下降幅度明显小于 N1、N2 和 N4。

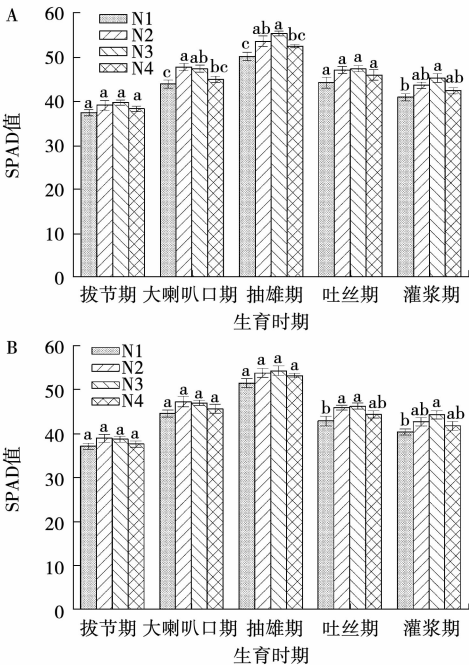
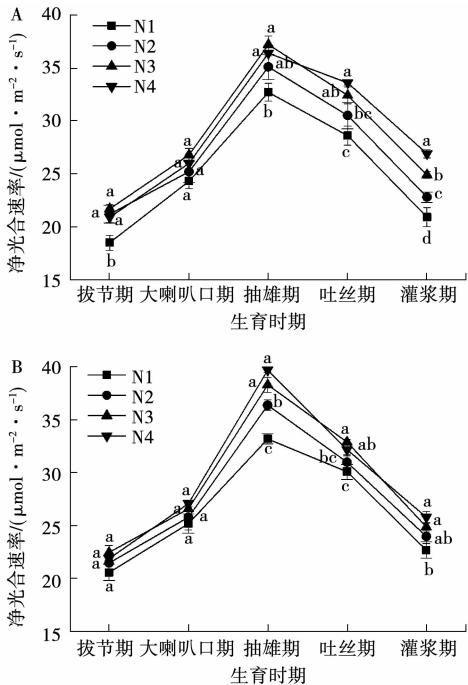


图 3 氮肥后移对夏玉米叶绿素相对含量 (SPAD 值) 的影响

注:图中不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 氮肥后移对夏玉米净光合速率(P_n)的影响

由图 4 可知,两年试验趋势基本相同,N1 处理 P_n 显著低于氮肥后移处理,且不同处理的 P_n 随生育进程推进呈先升高后下降的趋势,抽雄期达到峰值之后开始下降,拔节期至大喇叭口期氮肥后移处理间 P_n 差异未达显著水平,抽雄期后氮肥后移处理间 P_n 开始呈现显著差异。2021 年抽雄期 P_n 表现为处理 N2、N3、N4 比处理 N1 分别增加了 7.34%、13.76%和 11.31%,2022 年分别增加了 9.64%、15.36%和 19.58%;2021 年灌浆期 P_n 表现为处理 N2、N3、N4 比处理 N1 分别显著增加了 9.09%、19.14%和 28.71%,2022 年分别增加了 5.73%、9.69%和 13.6%,处理 N1 灌浆期 P_n 下降更显著,氮肥后移处理 N2、N3、N4 有效延缓灌浆期夏玉米 P_n 的降低。两年试验结果表明,氮肥后移处理夏玉米生育后期获得氮素充足供应,氮营养状况获得一定改善,光合速率显著提升,可显著促进夏玉米叶片 P_n 的增加,提高叶片光合物质的生产性能,为夏玉米籽粒灌浆确保充足的物质供应。



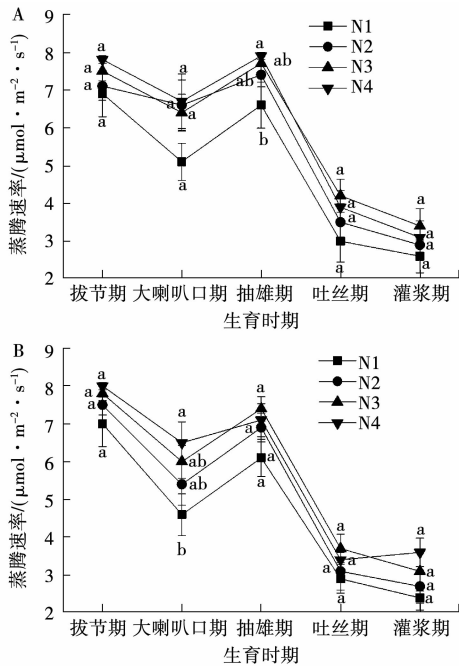
A. 2021 年;B. 2022 年。

图 4 氮肥后移对夏玉米净光合速率(P_n)的影响

2.4 氮肥后移对夏玉米蒸腾速率(Tr)的影响

由图 5 可知,氮肥后移显著提高了夏玉米 Tr ,在同一施氮条件下,随灌浆期氮肥后移量的增加,拔节至抽雄期 Tr 基本呈现先降后升的趋

势,吐丝至灌浆期 Tr 基本呈下降的趋势。2021 年拔节期 Tr 处理 N2、N3、N4 比处理 N1 分别增加了 2.90%、8.70%和 13.04%,2022 年分别增加了 7.14%、11.43%和 14.29%;2021 年灌浆期 Tr 处理 N2、N3、N4 比处理 N1 2021 年分别增加了 11.54%、30.77%和 19.23%,2022 年分别增加了 12.50%、29.17%和 50.00%。



A. 2021 年;B. 2022 年。

图 5 氮肥后移对夏玉米蒸腾速率(Tr)的影响

灌浆期氮肥后移量越大 Tr 效应越强,氮肥后移处理 N2、N3、N4 可以减缓灌浆期夏玉米 Tr 的下降。两年试验结果表明,氮肥后移夏玉米 Tr 变化趋势一致,氮肥后移处理夏玉米可以协调生育后期对氮素的需求,蒸腾速率加强,有利于光合作用的进行和同化产物的累积。

2.5 氮肥后移对夏玉米氮肥效率参数的影响

由表 3 可知,氮肥后移可显著增加夏玉米的氮素累积量、氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力,且不同处理间差异显著。随氮肥后移量的增加氮素累积量、氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力均呈现出先增加后下降的变化趋势,氮肥过量后移不利于氮素累积和氮肥效率参数的提高。与对照 N1 比较,氮肥后移处理植株的氮素累积量增加显著,2021 年处理 N2、N3、N4 比处理 N1 氮素累积量分别增加了 2.80%、16.34%和 12.38%,2022 年分别增加了 11.08%、14.42%和 12.95%,灌浆期氮肥过度后移植株氮素累积量

有所降低,处理 N4 比 N3 氮素累积量 2021 年、2022 年分别下降了 3.40%和 1.28%,两年氮素累积量均表现为 N3>N4>N2>N1,N3 处理可以维持相对较高的氮素累积量。与氮肥全部基施处理 N1 相比,氮肥后移处理 N2、N3、N4 氮肥利用效率

两年年均大于 N1,差异达显著水平,以处理 N3 最高。两年试验结果变化趋势一致,氮肥后移可显著提高夏玉米植株氮素累积量,增加氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力,以处理 N3 增加幅度最大。

表 3 氮肥后移对夏玉米氮效率参数的影响

年份	处理	氮素累积量/(kg·hm ⁻²)	氮肥利用率/%	氮肥农学效率/(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力/(kg·kg ⁻¹)
2021	N1	216.75±0.83 d	18.89±1.75 b	3.50±0.32 c	28.26±1.30 b
	N2	222.82±1.34 c	21.32±2.08 b	8.48±0.72 b	33.24±1.76 ab
	N3	252.16±1.26 a	33.05±2.42 a	14.15±1.18 a	38.91±2.40 a
	N4	243.59±1.63 b	29.62±2.88 a	13.72±0.73 a	38.48±1.42 a
2022	N1	219.71±2.71 c	18.07±0.62 b	4.23±0.49 c	29.86±1.43 b
	N2	244.06±2.41 b	27.81±1.38 a	8.71±0.76 b	34.34±1.74 ab
	N3	251.39±1.46 a	30.74±1.71 a	13.69±1.10 a	39.31±2.06 a
	N4	248.17±1.14 ab	29.45±1.61 a	12.83±1.12 a	38.45±1.12 a

注:表中同列不同字母表示不同处理间在 P<0.05 水平差异显著。下同。

2.6 氮肥后移对夏玉米产量性状的影响及主成分分析

由表 4 可知,氮肥后移可显著增加夏玉米穗粒数、百粒重、籽粒产量、生物产量和收获指数,不同处理间穗粒数 2021 年差异不显著,2022 年差异显著,百粒重、籽粒产量、生物产量和收获指数两年不同处理间差异均达显著水平,随灌浆期氮肥后移量的增加穗粒数、百粒重、籽粒产量、生物产量均呈现出先增加后下降的变化趋势,而收获指数

呈现逐渐增加的趋势,氮肥过量后移不利于产量及其构成因素的提高。两年穗粒数、百粒重、籽粒产量和生物产量均以处理 N3 最高,表现为 N3>N4>N2>N1,收获指数以处理 N4 最大,表现为 N4>N3>N2>N1。表明氮肥后移显著提高了夏玉米穗粒数、百粒重,籽粒产量和生物产量,通过穗粒数和百粒重的提高实现增产,氮肥后移也是通过优化穗粒数、百粒重主要产量构成因子调控产量,氮肥后移显著提高了夏玉米的收获指数。

表 4 氮肥后移对夏玉米产量及产量性状的影响

年份	处理	穗粒数/粒	百粒重/g	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	生物产量/(kg·hm ⁻²)	收获指数
2021	N1	483.6±17.03 a	30.6±0.49 b	7065.1±57.10 c	17073.7 ±199.21 d	0.41±0.01 c
	N2	496.3±10.69 a	31.7±0.61 b	8309.8±66.38 b	19511.2 ±170.03 c	0.43±0.00 c
	N3	522.1±13.00 a	35.5±0.67 a	9726.4±84.97 a	21580.7 ±238.73 b	0.45±0.00 b
	N4	513.4±10.12 a	32.2±0.49 b	9619.0±113.19 a	20500.9 ±215.06 a	0.47±0.00 a
2022	N1	493.8±14.73 b	30.8±0.61 b	7464.3±55.20 d	17700.5 ±243.35 d	0.42±0.00 c
	N2	520.7±6.66 ab	32.2±0.72 b	8584.9±61.89 c	19708.2 ±205.83 c	0.44±0.00 b
	N3	536.4±8.39 a	36.7±0.61 a	9828.2±64.61 a	22190.6 ±160.79 a	0.44±0.00 b
	N4	529.6±6.45 a	34.9±0.49 a	9613.6±47.00 b	20393.7 ±194.46 b	0.47±0.01 a

3 讨论

已有研究表明,玉米籽粒灌浆对产量构建起决定性作用,氮肥的施入显著影响籽粒灌浆特性,合理施氮可以增加籽粒灌浆速率、最大灌浆速率时生长量,延长快速灌浆期,提高百粒重^[18]。武文明等^[19]利用 Logistic 方程分析了不同氮肥处理玉米籽粒的灌浆过程,发现氮肥后移提高了平均灌浆速率,延长了籽粒灌浆持续时期,增加了籽粒最大潜力值,延缓了最大灌浆速率出现的时期,

弥补了籽粒平均灌浆速率(Va)和灌浆持续天数(T)产生的降低趋势。本研究认为籽粒干物质渐增期增长缓慢,速增期快速增加,缓增期增加变缓,适量氮肥后显著增加了籽粒干物质重,而氮肥后移不足或者后移过量情况下,籽粒干物质重又显著降低,利用 Logistic 模型量化了夏玉米籽粒的灌浆过程,氮肥适量后移可提高灌浆参数,延长快速灌浆期和灌浆完成期,提高籽粒的最大灌浆速率,增加籽粒干物质重,这与裴文东等^[10]结果一致。

Smeal 等^[20] 研究指出玉米 4 叶生长初期 SPAD 值与叶片氮含量相关性未达显著水平, 生长发育中后期两者达极显著相关水平, 生长发育后期相对 SPAD 值与相对籽粒产量间比值接近 1:1。许东恒等^[21] 研究了春玉米雨养环境下 SPAD 值全生育期的变化, 氮肥全部底施生育前期 SPAD 值较氮肥后移具有一定的优势, 生育中后期显著低于氮肥后移处理, 氮肥后移量越高 SPAD 值越大, 氮肥后移玉米叶片氮营养供应状况比较好, 光能利用效率也高, 最终决定了产量的提高, 而氮肥全部底施致使生育后期 SPAD 值比较低, 导致叶片缺氮而其衰老失绿, 产量降低, 这与本研究结论基本吻合。本研究发现 P_n 表现为氮肥全部基施处理 N1 显著低于氮肥后移处理 N2、N3、N4, 且不同处理的 P_n 随生育进程推进呈逐渐升高趋势, 抽雄期达到峰值, 之后开始下降, 拔节期至大喇叭口期氮肥后移处理间 P_n 差异未达显著水平, 抽雄期后氮肥后移处理间 P_n 差异显著。可能是因为氮肥后移处理夏玉米生育后期获得氮素充足供应, 氮营养状况获得一定改善, 光合速率显著提升, 可显著促进夏玉米叶片 P_n 的增加, 提高叶片光合物质的生产性能, 这与徐珂等^[12] 结论相同。徐珂等^[12] 认为氮肥后移对玉米叶片蒸腾速率的提高具有一定的促进作用, 本研究也发现氮肥后移显著提高了夏玉米 Tr , 在同一施氮条件下, 随灌浆期氮肥后移量的增加, 拔节至抽雄期 Tr 基本呈现逐步提高的趋势, 吐丝至灌浆期 Tr 基本呈现先上升后下降的趋势, 灌浆期氮肥后移量越大 Tr 效应越强, 有益于 CO_2 吸收与同化, 氮肥后移处理 N2、N3、N4 可以减缓灌浆期夏玉米 Tr 的下降, 氮肥后移可以保持较高 Tr 效应。

本研究表明氮肥后移处理植株的氮素累积量增加显著, 氮肥过度后移会使氮素累积量有所降低, 苟志文等^[6] 也进一步印证了相关结论。本研究也发现氮肥后移可显著增加氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力, 但随灌浆期氮肥后移量的增加氮素累积量、氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力均呈现出先增加后下降的变化趋势, 氮肥过量后移不利于氮素累积和氮效率参数的提高, 这与王宜伦等^[17] 结果基本一致。

王佳慧等^[22] 研究表明氮肥相对全部一次性基施, 氮肥后移可提高玉米的穗粒数, 但品种间存在一定差异, 可能由于对氮肥供给的敏感性差异

所致。本研究表明, 氮肥后移可显著增加夏玉米穗粒数、百粒重、籽粒产量、生物产量和收获指数, 而收获指数呈现逐渐增加的趋势, 氮肥过量后移不利于产量及其构成因素的提高, 这与魏延邦等^[11]、苟志文等^[5] 结果相近, 由此可见, 氮肥后移籽粒产量和生物产量通过穗粒数和百粒重实现增产, 氮肥后移也是通过优化穗粒数、百粒重主要产量构成因子调控产量, 显著提高了夏玉米的收获指数, 究其原因氮肥后移使玉米生育中后期光合物质的合成性能相对旺盛, 促进叶片生长, 从而能够制造更多的同化物质。

4 结论

氮肥后移可显著促进籽粒灌浆, 使灌浆高峰提前, 增加籽粒干物质重, 延长了灌浆活跃期, 增加平均灌浆速率和最大灌浆速率。与常规施氮(氮不后移)相比, 氮肥后移处理可维持较高的叶绿素相对含量(SPAD)、净光合速率(P_n)和蒸腾速率(Tr); 显著提高成熟期氮素累积量、氮肥利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力, 提高夏玉米产量极其构成因子。在施氮总量为 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水平下, 拔节期后移 20% + 灌浆期后移 20% (N3) 可有效提高河南砂姜黑土区夏玉米氮素供需吻合度, 是实现夏玉米增产与提高氮肥利用效率的一项有效措施。

参考文献:

- [1] WANG Y L, WANG Q, HAN D, et al. Effects of postponing N application on metabolism, absorption and utilization of nitrogen of summer maize in super high yield region[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(1): 131-134, 185.
- [2] 郑雨, 姬景红, 马星竹, 等. 控释氮肥对寒地黑土玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2023(5): 28-34.
- [3] 徐妍, 王宇先, 赵蕾, 等. 黑龙江省半干旱区秸秆还田与氮肥配施对玉米产量及经济效益的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2023(4): 5-8.
- [4] 徐莹莹, 王宇先, 杨慧莹, 等. 秸秆还田下基肥减氮对玉米产量及氮肥偏生产力的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2022(8): 101-105.
- [5] 苟志文, 胡发龙, 赵财, 等. 氮肥后移满足绿洲灌区全膜覆盖玉米的氮素需求[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 888-895.
- [6] 赵家乾. 氮肥后移减量对玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2022, 34(4): 35-38.
- [7] 李波, 陈喜昌, 朴琳, 等. 氮肥一次性供给量对寒地春玉米氮素利用及物质积累的调控效应[J]. 黑龙江农业科学, 2022(6): 31-38.

- [8] 马延华,孙德全,李绥艳,等.施氮量和种植密度对玉米品种龙育 828 产量及氮利用特性的影响[J].黑龙江农业科学,2019(11):33-38.
- [9] 刘志鹏,杨梦雅,陈曦,等.氮肥分配方式对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用特性的调控效应[J].河北农业大学学报,2018,41(2):21-27,35.
- [10] 裴文东,王国兴,王转丽,等.氮肥后移对春玉米子粒灌浆特性及内源激素的影响[J].玉米科学,2022,30(4):114-120.
- [11] 魏廷邦,胡发龙,赵财,等.氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J].中国农业科学,2017,50(15):2916-2927.
- [12] 徐珂,樊志龙,殷文,等.氮肥后移及间作对玉米光合特性的耦合效应[J].中国农业科学,2022,55(21):4131-4143.
- [13] 刘帅,徐宇凡,贾靖,等.施氮量及追氮时期对滴灌夏玉米干物质积累及氮素利用的影响[J].干旱地区农业研究,2023,41(2):122-129.
- [14] 高素玲,刘松涛,杨青华,等.氮肥减量后移对玉米冠层生理性状和产量的影响[J].中国农学通报,2013,29(24):114-118.
- [15] 隋阳辉,王大为,王延波.氮肥后移条件下减量对春玉米产量及氮素吸收利用的影响[J].辽宁农业科学,2021(5):32-35.
- [16] 钱春荣,于洋,郝玉波,等.不同供氮水平下玉米生产力的杂种优势特征[J].玉米科学,2022,30(5):108-115.
- [17] 王宜伦,李潮海,谭金芳,等.氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J].作物学报,2011,37(2):339-347.
- [18] YU N N, REN B Z, ZHAO B, et al. Leaf-nitrogen status affects grain yield formation through modification of spike differentiation in maize[J]. Field Crops Research, 2021, 271: 108238.
- [19] 武文明,王世济,陈洪俭,等.氮肥运筹对苗期受渍夏玉米子粒灌浆特性和产量的影响[J].玉米科学,2016,24(6):120-125.
- [20] SMEAL D, ZHANG H. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1994, 25(9/10): 1495-1503.
- [21] 许东恒,石玉海,孙宁,等.氮肥运筹对玉米叶片光合速率、比叶重和 SPAD 值的影响[J].玉米科学,2010,18(6):102-106,110.
- [22] 王佳慧,高震,曲令华,等.氮肥后移对滴灌夏玉米源库特性及产量形成的影响[J].中国农业大学学报,2017,22(8):1-8.

Effects of Nitrogen Fertilizer Postponing Application on Grain Filling, Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Efficiency Parameters of Summer Maize

MIAO Renzhong

(Zhumadian Academy of Agricultural Science, Zhumadian 463000, China)

Abstract: In order to improve nitrogen fertilizer utilization efficiency, Zhengdan 958 was used as the material, all the treatment received the same amount of total nitrogen of $250 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, four nitrogen (N) fertilization treatments were set with application of different N amounts postponed from jointing N to grain filling N. N-fertilizer basally applied 100% at sowing (N1), 30% at jointing stage and 10% at grain filling stage (N2), 20% at jointing stage and 20% at grain filling stage (N3), 10% at jointing stage and 30% at grain filling stage (N4) from 2021 to 2022, the treatment without N application was setup to calculate nitrogen fertilizer efficiency parameters. The results showed that nitrogen fertilizer postponing application could significantly promote grain filling and increased grain dry matter weight, the date grain filling peak occurred advanced, extended the active period of grain filling, increased average grain filling rate and maximum grain filling rate. The nitrogen fertilizer postponing application could maintain high relative chlorophyll content (SPAD), net photosynthetic rate (P_n), and transpiration rate (Tr), compared with traditional N management practices. The nitrogen fertilizer postponing application significantly increased the nitrogen accumulation, nitrogen fertilizer use rate, nitrogen agricultural efficiency and nitrogen partial productivity at mature stage. The nitrogen fertilizer postponing application significantly increased the grain per ear, 100-grain weight, the average grain yield increased by 16.32%—34.67%, and the average biomass yield by 12.81%—25.89%. The total N input of $250 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, nitrogen fertilizer postponing application 20% at jointing stage and 20% at grain filling stage (N3) could effectively matching the supply and demand of summer maize to nitrogen in the black soil area of sand ginger in Hena. Therefore, the postponing application ratio should be considered as a effective measure to enhance grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize.

Keywords: summer maize; grain filling; chlorophyll relative content; net photosynthetic rate; transpiration rate; nitrogen efficiency parameter