

滴灌施氮水平下玉米籽粒灌浆过程模拟

付江鹏, 贺 正, 贾 彪*, 刘 志, 李振洲, 刘慧芳, 刘根红

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要: 为了揭示水肥一体化条件下不同施氮水平对玉米籽粒灌浆过程的影响, 2017 ~ 2018 年在宁夏农垦平吉堡农场进行田间试验, 供试品种为“天赐 19”, 在 0、90、180、270、360 和 450 kg/hm² 6 个施氮水平 (分别用 N0、N1、N2、N3、N4 和 N5 表示) 下, 基于 Richards 方程构建和验证了滴灌水肥一体化条件下不同氮素处理中玉米籽粒灌浆过程模型, 并进行灌浆特征参数分析。结果表明, 不同氮素水平下玉米籽粒灌浆规律均符合 Richards 曲线, 模型评价指标均方根误差 RMSE 为 1.03 g/kg, 标准化均方根误差 n-RMSE 为 5.56%, 稳定度较高。籽粒灌浆速率呈先增后减的变化趋势, 将灌浆进程划分为渐增期、速增期和缓增期 3 个阶段。施氮显著增加籽粒干物质积累量, 其原因主要是延长灌浆持续期和增加灌浆速率。施氮 270 kg/hm² 对增加速增期的灌浆天数效果显著, 使速增期对最终籽粒干物质积累量的贡献率达到了 64%, 并且能维持较高的后期灌浆活性。本文基于 Richards 方程构建的籽粒灌浆过程模型将在滴灌玉米灌浆期准确地预测籽粒灌浆特性。

关键词: 水肥一体化; 施氮量; 玉米; Richards 模型; 灌浆

氮素是玉米需求量最大的营养元素, 施氮具有提高作物产量和改善品质的作用^[1], 但施氮过高将会限制作物生长发育导致产量降低, 破坏生态环境。相关研究表明, 玉米籽粒产量和氮素利用效率均随氮素水平的提高表现先增后减的趋势^[2], 而适宜的施氮量有利于调控作物生长发育, 改善光合性能, 实现优质高产^[3]。灌浆是玉米一生中重要的生育阶段, 籽粒灌浆速率和灌浆时间影响籽粒库容的充实程度, 决定了玉米的产量和品质^[4]。因此, 研究滴灌水肥一体化条件下不同氮素处理中玉米籽粒灌浆规律在理论与实际上均具有重要意义。

关于玉米籽粒灌浆过程模型构建的研究, 大量方法是测定籽粒鲜干重和体积变化, 采用数学表达式进行拟合, 并对相关参数进行分析。籽粒干物质增长过程呈“S”型, 目前多使用多项式^[5]、Logistic^[6-7]和 Richards^[8-10]生长方程模拟并分析籽粒灌浆过程。研究表明, Richards 生长模型可塑性强, 拟合度高, 且

能很好地模拟玉米籽粒的灌浆过程^[8-10], 并能够计算出灌浆速率方程对灌浆期进行准确划分^[8-11]。黄振喜等^[12]利用 Richards 方程拟合夏玉米籽粒灌浆过程, 表明灌浆速率快、活跃时间长、积累量大的杂交种更利于获得高的籽粒产量。李向岭等^[13]建立了符合相对群体干物质积累和相对积温关系的 Richards 方程, 可很好地模拟玉米群体干物质积累随积温变化的动态特征。郭春明等^[14]利用 Richards 方程以相对开花后天数、相对活动积温和相对 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为自变量, 相对百粒重为因变量, 分别建立和验证 3 个东北春玉米籽粒灌浆模型, 均能较精确模拟东北春玉米籽粒的灌浆过程。迄今, 诸多学者围绕作物干物质积累与时间、积温和气象条件等的关系进行了大量研究, 但有关水肥一体化施氮水平下玉米籽粒灌浆过程的拟合分析研究报道甚少。

为此, 本研究以滴灌玉米为研究对象, 设置不同氮素水平试验, 应用 Richards 模型对玉米籽粒灌浆动态过程进行拟合分析, 研究水肥一体化施氮对玉米籽粒各灌浆特征参数的调控效应, 揭示不同施氮量对玉米籽粒灌浆过程的影响规律, 为滴灌施氮水平下玉米获得高产提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验 1 于 2017 ~ 2018 年在宁夏农垦平吉堡农场

收稿日期: 2019-07-08; 录用日期: 2019-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31560339); 宁夏自然科学基金项目 (2019AAC03068); 宁夏回族自治区科技重大专项 (2018BBF0200404); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2018BBF02018、2019BBF03009); 西夏区科技局项目 (2018XXKJ01)。

作者简介: 付江鹏 (1995-), 男, 甘肃华亭人, 硕士研究生, 主要从事作物高产优质高效栽培研究。E-mail: fjp951208@126.com。

通讯作者: 贾彪, E-mail: jiabiao2008@163.com。

进行, 位于贺兰山东麓 (E106° 1' 47", N38° 25' 30"), 海拔为 1 100 m。玉米生长季平均气温和日降水量如图 1 所示。试验田耕层 (0 ~ 30 cm) 土壤含

有机质 12.56 g/kg、全氮 0.63 g/kg、全磷 0.51 g/kg、碱解氮 34.00 mg/kg、有效磷 19.37 mg/kg 和速效钾 84.31 mg/kg。

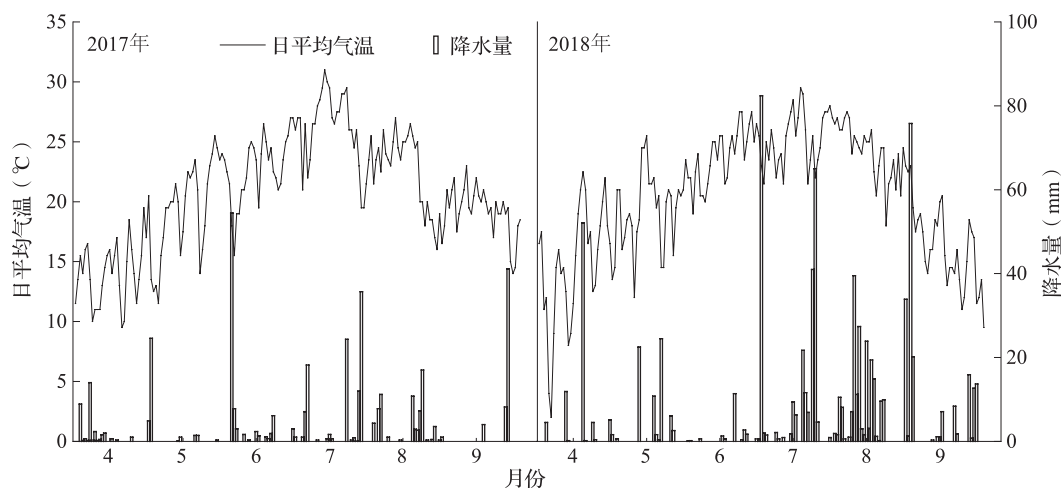


图 1 玉米生育期气象条件

试验 2 于 2018 年在宁夏大学教学试验农场 (38° 13' 3" N, 106° 14' 12" E) 进行, 土壤类型为灌淤土, 土壤肥力中等偏上, 前茬作物为玉米, 年降水量和日平均温度分别为 875.5 mm 和 14℃。试验地耕层 (0 ~ 30 cm) 土壤含有机质 14.83 g/kg、全氮 0.92 g/kg、全磷 0.53 g/kg、碱解氮 39.44 mg/kg、有效磷 20.63 mg/kg 和速效钾 111.25 mg/kg。

1.2 试验设计

试验 1 设 6 个氮素水平, 每公顷施氮 0 kg (N0)、90 kg (N1)、180 kg (N2)、270 kg (N3)、360 kg (N4) 和 450 kg (N5), 小区面积为长 15 m × 宽 4.4 m, 重复 3 次, 随机区组排列。种植密度为 9×10^4 株/hm², 采用宽窄行种植, 宽行 70 cm, 窄行 40 cm。玉米品种为‘天赐 19’, 全生育期采用水肥一体化滴灌施肥技术, 氮肥由施肥罐随水施入, 窄行玉米中间布设 1 条滴灌带, 1 条滴灌带控制 2 行玉米, 滴灌带滴头间距为 30 cm, 滴头流量 2.5 L/h, 滴头工作压力 0.1 MPa。灌水总量为 400 mm, 苗期灌水量为 20 mm (1 次)、拔节期灌水量为 100 mm (2 次)、抽雄期灌水量为 140 mm (2 次)、灌浆期灌水量为 120 mm (3 次) 和成熟期灌水 20 mm (1 次)。整个生育期共施肥 8 次, 分别为苗期 1 次、拔节期 3 次、抽雄期 1 次, 灌浆期 3 次, 每次施肥量占总施肥量的比例分别为苗期 10%、拔节期 45%、抽雄期 20%, 灌浆期 25%。供试氮肥为尿素 (N 46%), 磷肥为磷酸二氢钾 (P₂O₅ 52%, K₂O

34%), 钾肥为硫酸钾 (K₂O 52%), 均为水溶性肥料, 其中磷肥 138 kg/hm² 和钾肥 120 kg/hm² 为常规用量, 作为基肥播前一次性施入。试验 2 处理同试验 1。试验 1 数据用于模型构建, 试验 2 数据用于模型验证。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 籽粒干物质质量测定

籽粒干物质质量参照徐田军等^[15]方法并结合田间实际情况进行测定。于玉米吐丝期开始, 各处理选择同时授粉、长势均匀一致的植株挂牌标记, 以确保取样果穗授粉日期一致。从开花当天算起, 每小区每 10 d 随机选取 3 个果穗, 每穗取中部籽粒 100 粒, 采用烘干法对籽粒进行测定。

1.3.2 籽粒灌浆模型构建

以开花后天数为自变量, 每次所得百粒重为因变量, 利用 Richards 方程进行拟合。

$$W = A / (1 + Be^{-Kt})^{1/N} \quad (1)$$

式中, A 为终极生长量, B 、 K 、 N 分别为初值参数、生长速率参数和形状参数。当 $N=1$ 时, 式 (1) 为 Logistic 方程。对式 (1) 求一阶导数, 得灌浆速率方程:

$$V = AKBe^{-Kt} / [N(1 + Be^{-Kt})^{(1+1/N)}] \quad (2)$$

对式 (2) 求二阶导数得到最大籽粒达到灌浆速率时的时间:

$$T_{\max} = (\ln B - \ln N) / K \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 得最大灌浆速率:

$$V_{\max} = AK(1+N)^{-(1+N)/N} \quad (4)$$

将式(3)代入式(1)得灌浆速率最大时的生长量:

$$W_{\max} = A(1+N)^{-1/N} \quad (5)$$

对式(2)求积分得平均灌浆速率:

$$V_a = AK/[2(N+2)] \quad (6)$$

活跃生长期 D 为生长量最终值 A 除以 V_a , 即

$$D = A/V_a = [2(N+2)]/K \quad (7)$$

灌浆速率方程有 2 个拐点, 令其对 t 的二阶导数为零时, 可得灌浆速率方程两个拐点的灌浆时间 t_1 和 t_2 为:

$$t_1 = -\ln\left(\frac{N^2+3N+N\sqrt{N^2+6N+5}}{2B}\right)/K \quad (8)$$

$$t_2 = -\ln\left(\frac{N^2+3N-N\sqrt{N^2+6N+5}}{2B}\right)/K \quad (9)$$

假设达 99% 时为实际灌浆终期 t_3 , 则:

$$t_3 = -\ln\left(\frac{(100/99)^N - 1}{B}\right)/K \quad (10)$$

据此, 可确定 3 个阶段为: 渐增期 (T_1) 为 $0 \sim t_1$, 快增期 (T_2) 为 $t_1 \sim t_2$, 缓增期 (T_3) 为 $t_2 \sim t_3$ 。设 3 个阶段对应的生长量分别为 W_1 、 W_2 和 W_3 , 则对应的灌浆持续时间分别为: $T_1=t_1$ 、 $T_2=t_2-t_1$ 、 $T_3=t_3-t_2$; 平均灌浆速率分别为: $V_1=W_1/t_1$ 、 $V_2=(W_2-W_1)/(t_2-t_1)$ 、 $V_3=(W_3-W_2)/(t_3-t_2)$; 灌浆贡献率分别为 $P_1=W_1/W_3$ 、 $P_2=(W_2-W_1)/W_3$ 、 $P_3=(W_3-W_2)/W_3$ 。

1.3.3 籽粒灌浆模型验证

模型的验证采用均方根误差 (RMSE) 和标准化均方根误差 (n -RMSE) [16-17] 以及通过模拟值与

实测值之间 1:1 直方图来检测模型的拟合度和可靠性。RMSE 和 n -RMSE 的计算公式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$n\text{-}RMSE = \frac{RMSE}{S} \times 100\% \quad (12)$$

式中, s_i 、 m_i 分别为临界氮测定值和模拟值; n 为样本量; S 为实测数据的平均值。

1.4 数据处理

使用 Excel 2013 进行数据整理, 用 CurveExpert Professional 2.2.0 进行籽粒干物质动态变化的曲线拟合, 用 Origin 2018 软件、SPSS 22.0 软件分别进行作图和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 基于 Richards 模型的籽粒灌浆过程拟合及参数分析

利用 Richards 模型拟合的不同氮素处理中玉米籽粒干物质质量增长动态过程见图 2。由图 2 可知, 不同氮素水平下玉米籽粒干物质增长过程均呈慢-快-慢的“S”形变化趋势, 表现为花后籽粒干物质质量持续增加。在开花后 10~20 d, 籽粒干物质积累缓慢, 主要以籽粒形成为主; 开花后 20~50 d, 籽粒干物质急剧增加, 呈快速上升阶段, 此时是粒重显著增长期; 开花 50 d 后, 粒重增加缓慢至趋于稳定。不同氮素处理籽粒干物质积累量随着施氮量的增加而增加, 达到一定施氮量后不再增加, 而趋于稳定状态, 以施氮 270 kg/hm² 水平下籽粒干物质积累量最大。

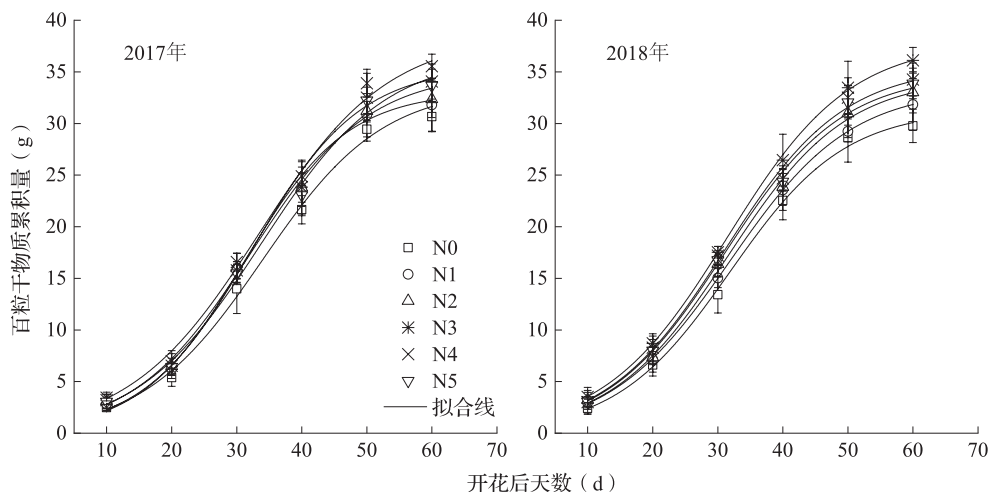


图 2 籽粒干物质积累量动态变化

本研究基于 Richards 模型对不同施氮量下玉米籽粒干物质累积量增长动态过程进行拟合, 所得方程参数 A、B、K、N 及决定系数 R^2 见表 1。由表分析可知, 各氮素水平籽粒灌浆过程拟合方程决定系数均在 0.99 以上, 拟合效果较好, 表明用 Richards 模型能较好地模拟滴灌水肥一体化条件下不同氮素处理中玉米籽粒灌浆动态过程, 拟合结果可用于进一步分析与预测籽粒灌浆特性。

表 1 不同氮素水平下的 Richards 模型参数

年份	施氮处理	A	B	K	N	R^2
2017	N0	32.12	4.56	0.13	1.25	0.994**
	N1	33.10	4.07	0.12	1.11	0.995**
	N2	33.77	4.15	0.12	1.19	0.995**
	N3	37.33	4.66	0.13	1.41	0.994**
	N4	35.73	4.66	0.13	1.38	0.994**
	N5	35.53	4.71	0.13	1.41	0.992**
2018	N0	30.39	6.21	0.16	1.91	0.997**
	N1	33.30	3.55	0.11	1.04	0.999**
	N2	35.14	3.03	0.10	0.88	0.997**
	N3	38.35	3.10	0.10	0.93	0.999**
	N4	37.11	2.36	0.09	0.67	0.995**
	N5	36.43	2.76	0.10	0.80	0.993**

注: A 为终极生长量; B 为初值参数; K 为生长速率参数; N 为形状参数; R^2 为决定系数, ** 表示 0.01 水平显著相关。

2.2 籽粒灌浆过程模型验证

利用独立的试验 2 数据进行玉米籽粒灌浆过程的验证, 根据模型拟合的籽粒干物质积累量和实测籽粒干物质积累量 1:1 直方图如图 3 所示, 模型回代后

模拟值与实测值的评价指标均方根误差 RMSE 为 1.03 g/kg, 标准化均方根误差 n-RMSE 为 5.56%, 稳定性较高, 表明本研究建立的不同氮素水平下玉米籽粒灌浆模型可用于玉米籽粒干物质累积量的计算。

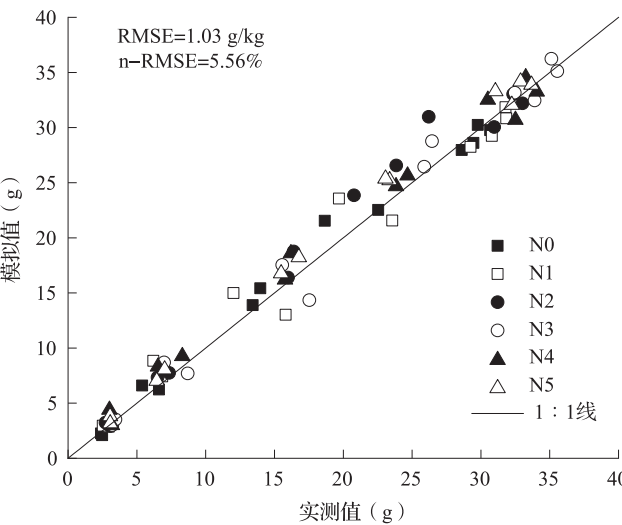


图 3 籽粒灌浆过程模型验证

2.3 籽粒灌浆速率动态变化

如图 4 所示, 不同氮素处理下籽粒灌浆速率均随着灌浆进程的推进而呈现先增后减的变化规律。具体表现为: 开花后 10 ~ 30 d, 籽粒灌浆速率快速上升; 开花后 30 ~ 35 d 左右, 籽粒灌浆速率均达到灌浆期最大值; 开花后 40 ~ 60 d, 籽粒灌浆速率呈下降趋势。从各处理来看, N0、N1 和 N2 处理的籽粒达到最大灌浆速率的时间较 N3、N4、N5 提前, N0、N1 和 N2 处理在开花后 30 d 达到峰值, 而 N3、N4、N5 籽粒灌浆速率达到最大的时间基本一致, 均在开花后 35 d 达到峰值。

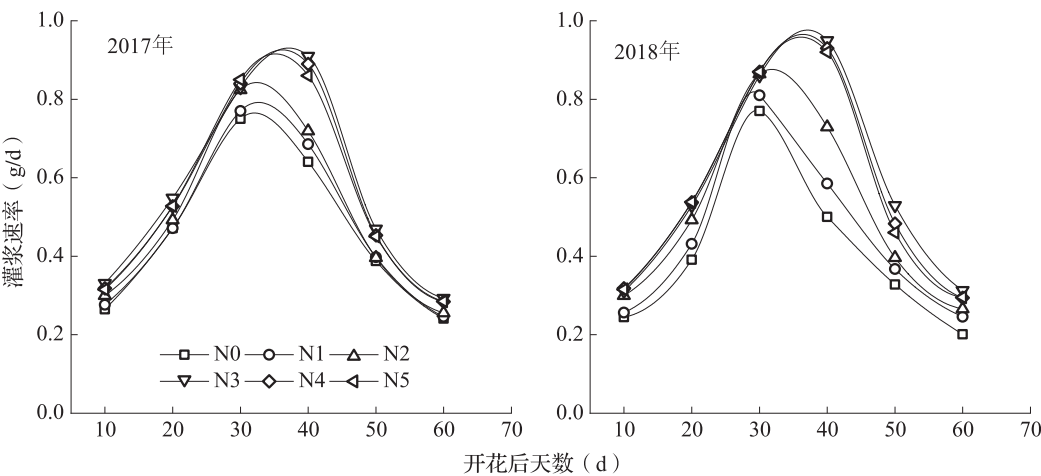


图 4 籽粒灌浆速率动态变化

2.4 不同施氮水平对籽粒灌浆参数的影响

2.4.1 灌浆特征参数

由表 2 可见,不同氮素处理下各灌浆特征参数间存在差异。施氮降低籽粒的平均灌浆速率;籽粒最大灌浆速率、灌浆速率最大时的干物质积累量、活跃生长期和实际灌浆终期均随氮素水平的提高呈先增加后降低的趋势。从施氮水平上看,N3

处理达到最大灌浆速率的时间最早,最大灌浆速率、灌浆速率达到最大时的干物质积累量和活跃灌浆期均最大,实际灌浆终期最长,两年平均分别为 30.34 d、1.006 g/d、19.07 g、56.91 d、76 d。表明施氮 270 kg/hm² 水平下有利于缩短达到最大灌浆速率的时间,延长籽粒灌浆期,但降低籽粒的平均灌浆速率。

表 2 不同施氮水平对籽粒灌浆特征参数的影响

年份	氮素水平	T _{max} (d)	V _{max} (g/d)	V _a (g/d)	W _{max} (g)	D (d)	t ₃ (d)
2017	N0	35.05	0.942	0.68	16.25	50.34	70.68
	N1	33.75	0.970	0.66	16.63	51.38	71.23
	N2	33.10	0.994	0.65	17.03	52.43	73.85
	N3	30.01	1.022	0.64	19.05	55.94	75.91
	N4	32.11	0.991	0.65	18.21	55.14	75.54
	N5	32.52	0.970	0.65	18.15	55.12	75.40
2018	N0	33.69	0.902	0.66	15.70	51.58	71.50
	N1	32.89	0.913	0.63	16.69	55.50	74.39
	N2	32.82	0.925	0.62	17.44	56.56	75.14
	N3	30.67	0.990	0.60	19.09	57.87	76.09
	N4	31.75	0.952	0.63	18.16	57.20	75.71
	N5	31.86	0.942	0.62	17.98	57.26	75.46

注: T_{max} 为最大灌浆速率出现的时间; V_{max} 为最大灌浆速率; V_a 为平均灌浆速率; W_{max} 为灌浆速率最大时的干物质积累量; D 为活跃生长期; t₃ 为实际灌浆终期。

2.4.2 灌浆时期划分

依据 Richards 模型拟合计算出的玉米籽粒灌浆各阶段特征参数如表 3 所示。由表 3 可以看出,不同氮素水平下玉米各灌浆阶段的灌浆持续期均表现为缓增期>速增期>渐增期,灌浆速率表现为速增期>渐增期>缓增期,籽粒干物质积累贡献率同样表现为速增期>渐增期>缓增期。在渐增期,随着氮素水平的提高籽粒贡献率均表现为下降的趋势,说明增施氮肥降低了渐增期对灌浆的贡献率,平均灌浆速率差异不明显,施氮是通过减少渐增期持续天数而降低了对灌浆的贡献率。在速增期,随着氮素水平的提高灌浆天数呈现先增加后减少的趋势,灌浆速率呈减小的趋势,但灌浆天数的增加弥

补了灌浆速率的减小,对籽粒灌浆的贡献总体上表现为增加的趋势。在缓增期,灌浆天数及对灌浆的贡献,随着氮素水平的提高均呈现先升高后降低的趋势,N3 处理表现最优,说明施氮量为 270 kg/hm² 时,能维持较高的后期灌浆活性。

2.4.3 灌浆参数与籽粒干物质积累量间的相关性分析

由表 4 可以看出,百粒干物质积累量与各阶段籽粒灌浆速率均呈显著正相关 ($P<0.01$),其中与速增期灌浆速率的相关程度最密切 ($r=0.93$),与平均灌浆速率的相关程度次之 ($r=0.87$)。百粒干物质积累量与各时期籽粒贡献率均呈显著正相关 ($P<0.01$),与灌浆持续时间参数相关均不显著。

表 3 不同氮素水平下灌浆各阶段持续时间、平均灌浆速率及贡献率

年份	氮素水平	渐增期			速增期			缓增期		
		T ₁ (d)	V ₁ (g/d)	P ₁ (%)	T ₂ (d)	V ₂ (g/d)	P ₂ (%)	T ₃ (d)	V ₃ (g/d)	P ₃ (%)
2017	N0	21.78	0.306	22.77	22.71	1.057	60.21	27.53	0.141	8.77
	N1	20.39	0.332	20.54	22.82	1.049	62.01	28.27	0.119	10.25
	N2	20.19	0.351	19.22	23.02	1.019	65.16	28.65	0.13	11.43
	N3	20.09	0.375	18.80	25.26	1.011	69.15	30.57	0.173	15.04
	N4	20.00	0.336	18.78	24.21	1.007	68.56	30.13	0.165	13.66
	N5	19.80	0.327	18.41	24.04	1.000	67.66	30.26	0.171	13.93
2018	N0	22.67	0.302	19.86	22.64	0.964	58.21	28.18	0.122	9.13
	N1	19.71	0.321	17.68	24.36	0.960	60.55	30.32	0.135	11.35
	N2	19.41	0.343	16.45	24.83	0.943	63.34	30.9	0.142	12.48
	N3	19.07	0.356	16.35	25.47	0.927	66.77	31.62	0.157	14.84
	N4	19.09	0.333	15.36	25.11	0.923	65.65	31.25	0.147	12.78
	N5	19.12	0.317	15.41	25.14	0.924	65.12	31.28	0.148	12.82

注：T₁、T₂、T₃ 为渐增期、速增期和缓增期持续时间；V₁、V₂、V₃ 为渐增期、速增期和缓增期平均灌浆速率；P₁、P₂、P₃ 为渐增期、速增期和缓增期籽粒干物质贡献率。

表 4 相关性分析

参数	T _{max}	V _{max}	V _a	T ₁	V ₁	P ₁	T ₂	V ₂	P ₂	T ₃	V ₃	P ₃
HGW	0.44	0.88**	0.87**	0.46	0.86**	0.92**	0.23	0.93**	0.89**	-0.31	0.87**	0.96**

注：HGW 为百粒干物质积累量，其他缩写同表 2 和表 3。 ** 表示在 P<0.01 水平显著相关；* 表示在 P<0.05 水平显著相关。

3 讨论

本文建立了宁夏引黄灌区水肥一体化施氮水平下玉米籽粒灌浆过程模型（表 1），各处理籽粒灌浆过程模型在形式上与方恒等^[10]针对陕西地区建立的玉米籽粒灌浆过程模型一致，其采样时间（开花后 10 d）与方恒等^[10]（开花授粉 6 d）的采样时间大致一样，这说明籽粒灌浆过程模型的建立与玉米的生育期无明显的关系；所得模型的 A 值（30.39 ~ 38.35）与方恒等^[10]构建的模型 A 值（20.79 ~ 30.994）差异较大，说明宁夏引黄灌区滴灌玉米的氮吸收能力比陕西地区玉米氮吸收能力强。其原因：（1）宁夏引黄灌区采用滴灌水肥一体化方式，肥随水施入，在玉米整个灌浆期会分 3 次施入其所需的氮肥，这与方恒等^[10]将氮肥作基肥一次性施入不同，说明施肥方式对玉米籽粒干物质的积累有一定的影响。（2）近年来宁夏引黄灌区推广“水肥一体化密植高产的”栽培方式，其密度（9 万株/hm²）高于方恒等^[10]研究的种植密度（6.7 万株/hm²），使得其在同一生育期的百粒干物质积累量（图 2）高于陕西地区。

籽粒灌浆是同化产物由源向库运输的结果，百粒干物质积累量是反映籽粒灌浆积累的指示性状^[16]，是构成作物产量的重要因素之一^[16-18]，在灌浆进程中，籽粒灌浆前期形成大库容，灌浆中期向库容中调运库容物质是保证籽粒质量和产量的基础^[19]。籽粒生长所需的 80% ~ 90% 的碳水化合物都是来自开花后的同化产物，只有 10% ~ 20% 来自原有储备^[19-20]，因此了解灌浆速率、灌浆持续期能更好地掌握作物的生长状态。本研究利用 Richards 模型对滴灌水肥一体化条件下不同氮素处理中玉米籽粒灌浆进程的拟合结果表明，各处理籽粒灌浆过程均符合 Richards 生长曲线（图 2），各处理参数 A（最大灌浆籽粒干物质积累量）随施氮量的增加表现为先增后减的变化规律（表 1），以施氮 270 kg/hm² 水平下籽粒干物质积累量达到最大，而施氮水平在 360 和 450 kg/hm² 时百粒干物质积累量均随之降低，进而影响了产量的提升。这一方面可能由于氮肥施用量过多，植株中下部通风不良，群体结构恶化，光合速率下降，呼吸强度增加所致；二是氮素过量供应，叶片碳氮比下降，氮代谢旺盛，光合产物的输出量下降，对光合器官又产生了反馈抑制作

用^[21-22]。因此通过适宜的氮肥运筹,协调花前花后物质积累,保持源库畅通,促进物质向籽粒中快速转移,对于提高作物产量具有重要意义。

籽粒干物质积累量是影响玉米产量高产稳产与否的重要因素,而灌浆期则是最终决定籽粒质量的关键期^[23]。前人研究表明适宜的施氮量不仅可以提高有效穗数和穗粒数,而且可以增加百粒干物质积累量,但施氮量过高又会降低百粒质量^[24]。王贺正等^[25]认为,提高籽粒质量的关键是提高速增期的灌浆速率,防止灌浆末期植株早衰,提高缓增期的灌浆速率,从而使源器官制造的光合产物快速运往籽粒。本研究发现,不同施氮处理对玉米籽粒的灌浆速率的影响有差异(图4),随着氮素水平的提高,籽粒达到最大灌浆速率的时间提前,各处理玉米籽粒灌浆速率均在花后30~35 d达到最大,以施氮270 kg/hm²最高(表2),说明在一定范围内增施氮肥可推迟籽粒灌浆启动的时间,但能够提高最大灌浆速率且使达到最大灌浆速率的时间提前,这与吴清丽等^[26]的研究结论一致。施氮缩短达到最大灌浆速率的时间,使灌浆快速进入速增期,减少渐增期的时间,但延长速增期及缓增期时间,最终延长籽粒灌浆持续期,这对最终籽粒干物质的形成极为有利(表3)。综上所述,适宜施氮通过优化灌浆速率、灌浆期及灌浆期3阶段比例,最终可达到提高籽粒干物质积累量和籽粒产量的效果。

籽粒灌浆速率和灌浆过程持续天数均与百粒干物质积累量密切相关^[15]。张丽等^[27]研究表明,在灌浆16~28 d影响籽粒的灌浆会导致籽粒干物质积累量的降低,从而影响最终的籽粒容重。钱春荣等^[28]研究认为,增加籽粒灌浆速增期和缓增期的持续时间,缩短渐增期库容建成时间可提高玉米产量。本研究表明滴灌玉米的百粒干物质积累量与各时期籽粒灌浆速率均呈显著正相关,其中与速增期灌浆速率相关最密切,且百粒干物质积累量与各时期灌浆贡献率均呈显著正相关,与灌浆持续时间各参数相关不显著(表4)。渐增期、速增期和缓增期的籽粒贡献率则分别约占18.30%、64.37%和12.21%,进一步表明速增期籽粒贡献对干物质积累影响较大。由此可见,速增期灌浆速率对百粒干物质的形成具有重要贡献。

4 结论

滴灌水肥一体化条件下,不同氮素处理中玉米

籽粒灌浆过程均可用Richards模型拟合分析。施氮270 kg/hm²缩短了籽粒达到最大灌浆速率的时间,但提高最大灌浆速率,延长灌浆持续期,最终可达到提高籽粒干物质积累量的效果。

参考文献:

- [1] Liu C, Li F, Zhou L, et al. Effects of water management with plastic film in a semi-arid agricultural system on available soil carbon fractions [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 57 (7): 9-12.
- [2] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (5): 1099-1107.
- [3] 李潮海, 刘奎, 周苏玫, 等. 不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应 [J]. *作物学报*, 2002, 28 (2): 265-269.
- [4] 范仲学, 王璞, Boening-Zilkens M, 等. 育苗移栽夏玉米灌浆特性研究 [J]. *玉米科学*, 2001, 9 (2): 47-49.
- [5] 马新明, 张娟娟, 熊淑萍, 等. 氮肥用量对不同品质类型小麦品种籽粒灌浆特征和产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2005, (6): 72-77.
- [6] 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 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (18): 3557-3565.
- [7] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 等. 玉米生产上3个主推品种光合特性、干物质积累转运及灌浆特性 [J]. *作物学报*, 2018, 44 (3): 414-422.
- [8] 雷万钧, 赵宏伟, 辛柳, 等. 钾肥施用量对寒地粳稻不同穗位籽粒灌浆过程和产量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (5): 37-43.
- [9] 王振峰, 王小明, 朱云集, 等. 不同施氮量对冬小麦籽粒灌浆特性的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (5): 40-45.
- [10] 方恒, 李援农, 谷晓博, 等. 覆膜与施氮组合下夏玉米籽粒灌浆过程拟合分析 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49 (8): 245-252.
- [11] Brye K R, Norman J M, Gower S T. Methodological limitations and N-budget differences among a restored tallgrass prairie and maize agroecosystems [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2003, 97 (1-3): 181-198.
- [12] 黄振喜, 王永军, 王空军, 等. 产量15000 kg·hm⁻²以上夏玉米灌浆期间的光合特性 [J]. *中国农业科学*, 2007, (9): 1898-1906.
- [13] 李向岭, 赵明, 李从锋, 等. 播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立 [J]. *作物学报*, 2010, 36 (12): 2143-2153.
- [14] 郭春明, 任景全, 曲思邈, 等. 东北春玉米郑单958籽粒灌浆过程的模拟 [J]. *中国农业气象*, 2015, 36 (3): 323-330.
- [15] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 等. 玉米籽粒灌浆特性对播期的

- 响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2513-2519.
- [16] 董茜, 雍太文, 刘小明, 等. 施氮方式对玉米-大豆套作体系中作物产量及玉米籽粒灌浆特性的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(11): 2028-2039.
- [17] 万泽花, 任佰朝, 赵斌, 等. 不同熟期夏玉米品种籽粒灌浆与脱水特性及其密度效应[J]. 作物学报, 2018, 44(10): 1517-1526.
- [18] 张富仓, 严富来, 范兴科, 等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 111-120.
- [19] 李朝苏, 汤永禄, 吴春, 等. 施氮量对四川盆地小麦生长及灌浆的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 873-883.
- [20] 杨明达, 关小康, 刘影, 等. 滴灌模式和水分调控对夏玉米干物质和氮素积累与分配及水分利用的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(3): 443-459.
- [21] 李婷, 李世清, 占爱, 等. 地膜覆盖、氮肥与密度及其互作对黄土旱塬春玉米氮素吸收、转运及生产效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(8): 1504-1517.
- [22] 岳克, 马雪, 宋晓, 等. 新型氮肥及施氮量对玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (4): 75-81.
- [23] 史建国, 崔海岩, 赵斌, 等. 花粒期光照对夏玉米产量和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4427-4434.
- [24] 曹彩云, 李科江, 崔彦宏, 等. 长期定位施肥对夏玉米籽粒灌浆影响的模拟研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, (1): 48-53.
- [25] 王贺正, 徐国伟, 吴金芝, 等. 不同氮素水平对豫麦 49-198 籽粒灌浆及淀粉合成相关酶活性的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 288-296.
- [26] 吴清丽, 高茂盛, 廖允成, 等. 氮素对冬小麦光合物质贮运及籽粒灌浆进程的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 120-124, 137.
- [27] 张丽, 张吉旺, 樊昕, 等. 玉米籽粒比重与灌浆特性的关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2327-2334.
- [28] 钱春荣, 王荣焕, 赵久然, 等. 玉米果穗不同位势籽粒灌浆特性分析[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 80-86.

Simulation of maize grain filling process under nitrogen drip irrigation

FU Jiang-peng, HE Zheng, JIA Biao*, LIU Zhi, LI Zhen-zhou, LIU Hui-fang, LIU Gen-hong (School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021)

Abstract: In order to reveal the effects of different nitrogen application levels on maize grain filling process under water and fertilizer integration conditions, field trials were conducted in Ningxia Farming Pingjibao Farm from 2017 to 2018. The test variety was "Tianci19" at 0, 90, 180, 270, 360 and 450 kg/hm² nitrogen levels (represented by N0, N1, N2, N3, N4 and N5 respectively). Based on Richards equation, the model of grain filling process under different nitrogen treatments fertilization with drip irrigation and was constructed and verified, and the filling parameters were analyzed. The results showed that the filling rules of maize grain at different nitrogen levels were consistent with Richards curve, the model evaluation index RMSE was 1.03 g/kg, and the standardized root mean square error (n-RMSE) was 5.56%. The grain-filling rate increased first and then decreased, and the grain-filling process was divided into three stages: gradual increasing stage, rapid increasing stage and slow increasing stage. Nitrogen application significantly increased dry matter accumulation in grains, mainly due to the extension of grout duration and the increase of grout rate. Nitrogen application of 270 kg/hm² had a significant effect on the number of days of grain-filling during the accelerated growth period, which resulting in 64% of contribution rate for the rapid growth period to the final dry matter accumulation of grains, and maintaining a high activity of grain-filling in the later period. In this paper, the grain filling process model based on Richards equation will accurately predict the grain filling characteristics during the filling period of drip irrigation maize.

Key words: water and fertilizer integration; nitrogen application rate; maize; Richards model; grouting