

doi: 10.11838/sfsc. 1673-6257.23195

不同氮效率小麦品种的籽粒灌浆特性

宋 晓^{1, 2}, 张珂珂¹, 岳 克¹, 岳艳军³, 张歆玥¹, 黄绍敏^{1*},
郭腾飞¹, 郭斗斗¹, 张水清¹, 李向东⁴, 丁世杰¹, 杨 程⁴

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 2. 河南省农业生态环境重点实验室, 河南 郑州 450002; 3. 河南心连心化学工业集团股份有限公司, 河南 新乡 453000;
4. 河南省农业科学院小麦所, 河南 郑州 450002)

摘 要: 为明确不同氮效率小麦品种的籽粒灌浆特性及其与产量和氮效率的关系, 于 2019—2021 年选取高产氮高效 (HH)、高产氮低效 (HL) 和低产氮低效 (LL) 小麦品种为试验材料, 利用 Logistics 模型在大田生产条件下模拟籽粒灌浆进程, 分析产量构成参数, 探究不同氮效率小麦的籽粒灌浆特性差异及其与氮利用效率的关系。结果表明, 不同类型品种间的籽粒灌浆特性均存在较大差异。不同品种的最大灌浆速率和平均灌浆速率均表现为 HH>HL>LL, 达到最大灌浆速率时的籽粒质量则表现为 HL>HH>LL, HH 与 HL 之间差异不明显。灌浆活跃期和有效灌浆时间均表现为 HH<HL<LL。与 HL 和 LL 相比, HH 表现出灌浆启动早、灌浆速度快和有效灌浆时间缩短等特性, 这可能与品种的氮效率有关。

关键词: 小麦; 高产; 氮高效; 氮低效; 籽粒灌浆

小麦是重要的粮食作物之一, 小麦产业发展直接关系到中国的粮食安全和社会稳定。近年来, 中国小麦连年增产, 但增产的同时伴随着氮肥的过量施用及肥效下降, 从而影响生态环境的健康发展^[1-2]。如何在高产的同时降低氮肥用量、提高氮肥吸收利用效率成为目前研究的热点。筛选或培育氮高效型小麦品种是实现小麦高产高效, 减轻环境污染的关键。籽粒灌浆过程是同时影响产量形成和氮肥利用效率的重要生理过程^[3]。明确籽粒灌浆特性与小麦产量和氮肥吸收利用效率的关系有助于促进小麦产量与氮肥利用效率的协同提升。许多研究表明, 不同作物或同一作物不同品种间的氮效率存在一定差异, 进而影响灌浆特性的不同^[4-6]。吕静瑶等^[7]认为, 不同基因型玉米氮效率不同, 其氮效率的大小因各自的基因属性对氮的需求不尽相同, 影响玉米籽粒发育。杨建昌^[8]明确了水稻籽

粒灌浆特性在不同类型和品种间存在显著差异。李敏等^[9]通过分析不同氮效率水稻品种的强势粒和弱势粒的籽粒灌浆特性及其与产量和氮素利用的关系, 提出水稻高产与氮高效协同提升的重要途径是促进弱势籽粒灌浆充实。前人关于作物灌浆特性的研究较多, 而对不同氮效率小麦品种的灌浆特性研究相对较少。本研究在前期研究的基础上, 筛选出高产氮高效、高产氮低效、低产氮低效 3 种类型的小麦品种, 在大田生产条件下系统比较不同类型小麦品种的籽粒灌浆特性及其与产量和氮效率的关系, 以期为该地区的品种选育和高产减氮栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

根据 2017—2018 年的研究结果^[10], 筛选出高产氮高效品种 (HH)、高产氮低效品种 (HL) 和低产氮低效品种 (LL), 分别是郑麦 1860、丰德存 5 号和郑品麦 8 号。

1.2 试验设计

1.2.1 试验地概况

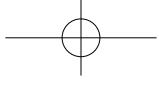
试验设置在全国潮土肥力和肥料效益长期监测试验站 (113°41'E, 35°00'N)。该基地地处黄

收稿日期: 2023-03-30; 录用日期: 2023-06-22

基金项目: 河南省科技研发计划联合基金 (222103810015); 国家重点研发计划课题 (2022YFD2300802, 2021YFD1700900); 河南省小麦产业技术体系 (HARS-22-01-G4)。

作者简介: 宋晓 (1980-), 副研究员, 博士研究生, 主要从事小麦栽培和土壤养分演变研究。E-mail: songxiao401@126.com。

通讯作者: 黄绍敏, E-mail: hsm5033@163.com。



淮海平原,是热带向暖温带过渡地带,大陆性季风气候,年平均降水量 645 mm,平均日照时长 12 h,平均气温 14.4℃,无霜期 224 d。供试土壤为潮土,土壤地力均匀,0~30 cm 耕层土壤基础肥力为有机质含量 14.26 g·kg⁻¹、碱解氮含量 81.4 mg·kg⁻¹、有效磷含量 14.1 mg·kg⁻¹、速效钾含量 88.4 mg·kg⁻¹、全氮含量 0.8 g·kg⁻¹。

1.2.2 试验设置

试验于 2019—2021 年进行,每年 10 月中旬播种,次年 6 月收获,播种量为 150 kg·hm⁻²。采用裂区设计,氮肥处理为主区,品种为副区。供氮水平为 2 个:不施氮肥 N0 (N 0 kg·hm⁻²)、正常施氮肥 N1 (N 165 kg·hm⁻²),试验小区为随机排列,每个小区面积为 6 m×9 m=54 m²,行距 20 cm,重复 3 次。所用氮肥为尿素 (N 46%),磷肥为磷酸二氢钙 (P₂O₅ 12%) 687.5 kg·hm⁻²,钾肥为硫酸钾 (K₂O 57%) 144.7 kg·hm⁻²。氮肥基追比为 1:1,追肥于返青期开沟施入,磷肥和钾肥在播前作为基肥一次性施入,其他栽培措施同一般高产田管理。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 群体动态及产量测定

出苗后每小区选择长势均匀一致的 1 m 双行标记,分蘖期和返青期分别统计分蘖情况,成熟期统计穗数和穗粒数,并计算有效穗率。

有效穗率 (%) = 单位面积有效穗数 / 单位面积积分蘖数 × 100;

灌浆速率 (g·1000 粒⁻¹·d⁻¹) = 每次测定千料籽粒干物质增加质量 (g) / 相应的测定间隔天数 (d)。

籽粒产量:成熟期在每小区取 1 m×1 m=1 m² 样方,人工收割脱粒,自然晒干称重,计算每公顷籽粒产量,测定千粒质量。

1.3.2 籽粒灌浆特性测定

每小区选取扬花期一致的 100 穗挂牌标记,在开花结束后第 5 d 开始,每隔 5 d 取 1 次样,共取 7 次,即花后 5、10、15、20、25、30、35 d,每次在各试验小区随机抽取 10 穗具有挂牌标志的小麦,人工剥粒,于 105℃ 杀青 20 min,75℃ 恒温烘至恒重,用万分之一天平称重并折算千粒重。

1.3.3 植株全氮含量

将 1.3.2 中地上部干样粉碎,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法 (水杨酸—锌粉还原法、蒸馏后滴定法) 测定植株全氮含量^[11]。

$$N = (V \times 0.05 \times 14 \times 100) / (1000 \times M)$$

式中, N 为植株氮含量 (%); V 为盐酸体积变量 (mL); M 为样品质量 (g)。

植株氮素积累量 (kg·hm⁻²) = 全氮含量 × 植株地上部生物量

氮素吸收效率 (%) = (施氮区植株氮积累量 - 不施氮区植株氮积累量) / 施氮量 × 100

氮肥生理利用效率 (%) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / (施氮区植株氮积累量 - 不施氮区植株氮积累量) × 100

1.4 数据处理

籽粒灌浆参数计算:以花后天数 t 为自变量,以对应某一时间 t 所测得的千粒重 Y 为因变量,用 Logistic^[12] 方程模拟籽粒生长过程。

$$y = a / (1 + be^{-kt})$$

式中, a 代表生长终值 (灌浆结束时的千粒重), b、k 为模型参数,方程拟合情况用决定系数 R² 表示。对 Logistic 方程求一阶导和二阶导,可得灌浆速率的时间方程 v(t)、千粒最大灌浆速率 (v_{max}) 及其出现时间 (t_{max})、灌浆速率最大时的生长量 (y_{max})、平均灌浆速率 (v_{mean}) 以及渐增期、快增期和缓增期的持续天数 (分别为 t₁、t₂、t₃)^[12]。

$$v_t = abke^{-kt} / (1 + be^{-kt})$$

$$v_{\max} = ak/4$$

$$t_{\max} = (\ln b) / k$$

灌浆速率方程上的两个拐点:

$$t_1 = -\ln [(2 + \sqrt{3}) / b] / k$$

$$t_2 = -\ln [(2 - \sqrt{3}) / b] / k$$

灌浆结束时间:

$$t_3 = -[\ln (100/98 - 1) / b] / k$$

用 Excel 2010 对数据进行整理与分析,用 SPSS 18.0 进行回归分析,用 Origin Pro 8.5 进行方程拟合和制图。

2 结果与分析

2.1 不同类型小麦 Logistic 模型参数分析

通过 Logistics 模型对冬小麦籽粒千粒重动态增长过程进行拟合,拟合方程及决定系数见表 1,籽粒增长过程见图 1。由表 1 和图 1 可知,拟合过程的决定系数 R² 均大于 0.99,达到极显著水平,表明 Logistics 方程能较好地模拟冬小麦籽粒灌浆过程,灌浆过程拟合曲线均呈“慢-快-缓”的增长趋势。

两个年度间, HH 籽粒终极生长量 a 值均高于 LL 籽粒生长量, 不同类型小麦品种的终极生长量趋势 2019—2020 年表现为 HH>HL>LL (表 1, 参数 a), 2020—2021 年表现为 HL>HH>LL。2019—2020 年度, HH 理论千粒重比 HL 和 LL 分别增加 2.1 和 3.1 g ($P<0.05$); 2020—2021 年度, HH 与 HL 差异不明显, 分别比 LL 增加 2.5 和 2.7 g ($P<0.05$)。说明 HH 的增产潜力较大, 丰

产性较好, 适合高肥高水等生长条件良好的田块种植。

初始参数 b 表示受精后子房生长潜力, b 值越大, 胚乳细胞分裂越快, 分裂周期越短, 籽粒初始生长速率越快。HH 的 b 值 (53.225 ~ 56.159) 均明显大于 HL 和 LL (45.245 ~ 52.607)。灌浆速率参数 k 也均表现为 HH>HL>LL, 且各品种之间差异显著。

表 1 不同处理下的 Logistics 模型参数

年度	品种	a (g)	b	k	$y=a/(1+be^{-kt})$	实际 a (g)	R^2
2019—2020	高产氮高效	51.426a	53.225a	0.229a	$Y=53.225/1+53.225e^{(-0.229t)}$	49.810a	0.997
	高产氮中效	49.373b	50.048b	0.202b	$Y=49.373/1+50.048e^{(-0.202t)}$	46.882b	0.997
	低产氮低效	48.362c	46.227c	0.186c	$Y=48.362/1+46.227e^{(-0.186t)}$	44.570c	0.999
2020—2021	高产氮高效	50.014a	56.159a	0.231a	$Y=50.014/1+56.159e^{(-0.231t)}$	48.921a	0.995
	高产氮中效	50.294a	52.607b	0.201b	$Y=50.294/1+49.897e^{(-0.201t)}$	47.043b	0.997
	低产氮低效	47.542b	45.245c	0.182c	$Y=47.542/1+45.245e^{(-0.182t)}$	43.538c	0.998

注: 同列不同小写字母表示同一年份不同各品种间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

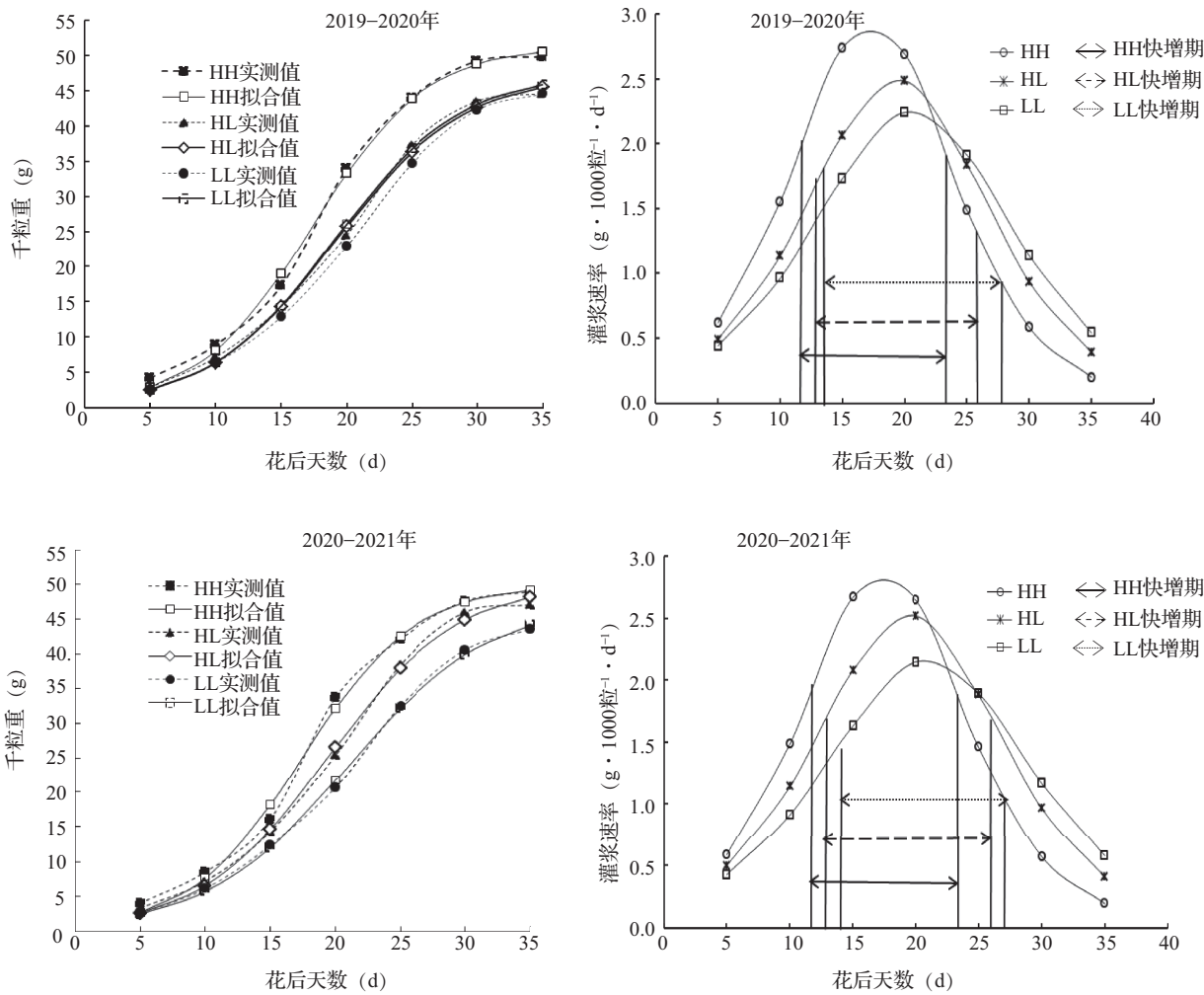
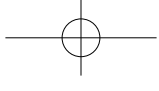


图 1 不同处理下籽粒灌浆 Logistics 拟合曲线和灌浆速率 - 时间变化



2.2 不同类型小麦籽粒灌浆特征参数

从表 2 可知, 根据 Logistics 模型计算的供试品种的籽粒灌浆特性有明显差异。HH 籽粒灌浆持续平均时间为 34.318 d, 较 HL 品种平均缩短 4.408 d, 较 LL 品种缩短 7.613 d。活跃灌浆期也较 HL 和 LL 分别缩短了 2.460 和 4.350 d。两个年度的籽粒灌浆速率趋势相同, 先升高后降低, 曲线顶点与表 2

的 $v_{\max}$ 和 $t_{\max}$ 值相对应 (图 1), 花后 35 d 内 HH 的平均灌浆速率为 $0.739 \text{ g} \cdot 1000 \text{ 粒}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 分别显著高于 HL 和 LL 0.095 和 $0.167 \text{ g} \cdot 1000 \text{ 粒}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 两个年度 HH 的最大灌浆速率分别出现在花后 17.356 和 17.438 d, 较 HL 和 LL 平均分别提前 2.015 和 3.382 d。HH 的灌浆活跃期也比 HL 和 LL 明显提前 2.460 ~ 4.350 d。

表 2 不同处理下冬小麦籽粒灌浆特征参数

年度	品种	t (d)	$v_{\max}$ ($\text{g} \cdot 1000 \text{ 粒}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	$t_{\max}$ (d)	$y_{\max}$ (g)	v ($\text{g} \cdot 1000 \text{ 粒}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	灌浆活跃期
2019—2020	高产氮高效	34.351c	2.944a	17.356b	25.708a	0.748a	17.467c
	高产氮中效	38.638b	2.493b	19.371a	24.681b	0.639b	19.802b
	低产氮低效	41.534a	2.249b	20.611a	24.177c	0.582c	21.505a
2020—2021	高产氮高效	34.286c	2.888a	17.438b	25.002a	0.729a	17.316c
	高产氮中效	38.815b	2.527b	19.453a	25.142a	0.648b	19.900b
	低产氮低效	42.329a	2.163c	20.946a	23.767b	0.561c	21.978a

注: T 为籽粒灌浆持续时间, $V_{\max}$ 为最大灌浆速率, $T_{\max}$ 为最大灌浆速率出现的时间, $Y_{\max}$ 为达到最大灌浆速率时籽粒干重, V 为平均灌浆速率。下同。

2.3 不同类型小麦籽粒灌浆各阶段分布特征

利用 Logistics 方程把小麦籽粒灌浆过程划分为灌浆前期 (渐增期)、灌浆中期 (快增期)、灌浆后期 (缓慢期)。由图 1 可见, 整个生育期内的籽粒灌浆特征在不同类型品种间表现趋势相同。最大灌浆速率前, 3 个品种的灌浆速率曲线以 HH 位于最上方、

HL 居中、LL 居最下方; 达到最大灌浆速率后, 灌浆速率曲线从上到下依次为 LL、HL 和 HH。但是, 在慢增期、快增期和缓增期, 灌浆速率平均值均表现为 $\text{HH} > \text{HL} > \text{LL}$ 。由于品种不同, 灌浆时间有差异, LL 的快增期持续时间分别比 HL 和 HH 平均延长了 2.024 和 0.819 d、缓增期延长了 2.800 和 1.217 d (表 3)。

表 3 籽粒灌浆 3 个时期的特征

年度	品种	渐增期		快增期		缓增期	
		t_1 (d)	平均灌浆速率 ($\text{g} \cdot 1000 \text{ 粒}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	t_2 (d)	平均灌浆速率 ($\text{g} \cdot 1000 \text{ 粒}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	t_3 (d)	平均灌浆速率 ($\text{g} \cdot 1000 \text{ 粒}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
2019—2020	高产氮高效	11.605c	0.936a	11.501c	2.581a	11.245c	0.875a
	高产氮中效	12.852b	0.812b	13.038b	2.186b	12.748b	0.741b
	低产氮低效	13.530a	0.755c	14.160a	1.972c	13.844a	0.669c
2020—2021	高产氮高效	11.737c	0.900a	11.401c	2.532a	11.147c	0.859a
	高产氮中效	12.901b	0.824b	13.103b	2.216b	12.811b	0.752b
	低产氮低效	13.860a	0.725c	14.471a	1.897c	14.149a	0.643c

2.4 不同类型小麦品种的产量及氮利用效率

2019—2020 和 2020—2021 年不同类型小麦品种的产量及利用效率结果变化趋势相同 (表 4), 以 2019—2020 年结果为例, HH 和 HL 的产量较 LL 分别显著提高 29.26% 和 15.85%; 氮生理利用效率分别显著提高 20.40% 和 7.65%; 氮吸收效率分别显著提高 45.85% 和 9.45%; 同为高产类型品种, HH 的产量、氮生理利用效率和氮吸收效率均分别显著高于 HL 11.58%、11.85% 和 33.26%。

2.5 不同类型小麦品种的产量构成因素

不同小麦品种的产量构成因素结果有一定差异 (表 5)。2019—2020 年, 与 LL 相比, HH 的每穗粒数和有效穗数分别显著增加了 9.64% 和 7.25%, HL 增加不明显; HH 和 LL 的有效穗率分别比 HL 显著提高 21.56% 和 10.45%; HH 的千粒重分别比 LL 和 HL 显著提高 11.66% 和 6.18%, 但 HL 与 LL 差异不明显; 2020—2021 年不同品种间产量构成因素结果趋势一致。

表 4 不同类型小麦品种的产量及氮利用效率

年度	品种	产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮生理利用效率 (%)	氮吸收效率 (%)
2019—2020	高产氮高效	$10.6 \pm 0.2\text{a}$	$47.2 \pm 0.2\text{a}$	$63.3 \pm 0.3\text{a}$
	高产氮中效	$9.5 \pm 0.1\text{b}$	$42.2 \pm 0.2\text{b}$	$47.5 \pm 0.3\text{b}$
	低产氮低效	$8.2 \pm 0.1\text{c}$	$39.2 \pm 0.2\text{c}$	$43.4 \pm 0.2\text{c}$
2020—2021	高产氮高效	$10.7 \pm 0.1\text{a}$	$44.7 \pm 0.2\text{a}$	$58.5 \pm 0.3\text{a}$
	高产氮中效	$9.1 \pm 0.1\text{b}$	$41.4 \pm 0.2\text{b}$	$47.5 \pm 0.3\text{b}$
	低产氮低效	$7.9 \pm 0.1\text{c}$	$38.5 \pm 0.2\text{c}$	$42.4 \pm 0.3\text{c}$

表 5 不同类型小麦品种的产量构成因素

年度	品种	每穗粒数	有效穗数 ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	有效穗率 (%)	千粒重 (g)
2019—2020	高产氮高效	$42.1 \pm 1.3\text{a}$	$633.5 \pm 8.9\text{a}$	$73.3 \pm 2.4\text{a}$	$49.8 \pm 2.4\text{a}$
	高产氮中效	$39.1 \pm 1.3\text{b}$	$616.8 \pm 8.4\text{a}$	$60.3 \pm 2.0\text{c}$	$46.9 \pm 2.3\text{b}$
	低产氮低效	$38.4 \pm 1.3\text{b}$	$590.7 \pm 9.1\text{b}$	$66.6 \pm 2.2\text{b}$	$44.6 \pm 3.0\text{b}$
2020—2021	高产氮高效	$42.3 \pm 1.4\text{a}$	$646.7 \pm 7.3\text{a}$	$72.1 \pm 2.1\text{a}$	$48.9 \pm 2.9\text{a}$
	高产氮中效	$39.2 \pm 1.3\text{b}$	$619.7 \pm 8.2\text{a}$	$61.3 \pm 2.4\text{c}$	$45.0 \pm 2.4\text{b}$
	低产氮低效	$37.0 \pm 1.4\text{c}$	$603.3 \pm 9.1\text{b}$	$65.6 \pm 1.9\text{b}$	$43.5 \pm 2.2\text{b}$

2.6 不同类型小麦品种的籽粒灌浆特性与产量、氮利用效率的相关关系

综合不同类型小麦品种的产量、氮利用效率与籽粒灌浆特性相关分析结果 (表 6) 表明, 产量和氮生理利用效率与籽粒灌浆特性参数达到显著或极

显著相关, 与 $v_{\max}$ 和 v_{mean} 分别达到极显著正相关, 与 $y_{\max}$ 达到显著正相关, 与 $t(\text{d})$ 和 $t_{\max}$ 达到极显著负相关; 氮吸收效率与 $v_{\max}$ 和 $y_{\max}$ 均达到显著正相关, 与 v_{mean} 达到极显著正相关, 与 $t(\text{d})$ 和 $t_{\max}$ 达到极显著负相关。

表 6 籽粒灌浆特性与产量、氮吸收效率和氮肥生理利用效率的相关性

指标	$t(\text{d})$	$v_{\max}$	$t_{\max}$	$y_{\max}$	v_{mean}
产量	-0.995^{**}	0.988^{**}	-0.993^{**}	0.863^*	0.985^{**}
氮生理利用效率	-0.967^{**}	0.976^{**}	-0.973^{**}	0.909^*	0.980^{**}
氮吸收效率	-0.918^*	0.931^*	-0.927^*	0.814^*	0.933^{**}

注: * 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平相关性具有统计学意义。

3 讨论

3.1 籽粒灌浆特性与小麦产量形成

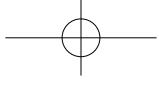
小麦产量由穗数、穗粒数、千粒重构成, 本研究分析了不同类型小麦品种的产量及三要素, 发现在单位面积穗数、穗粒数一定时, 小麦高产的关键是千粒质量, 这与杨金宇等^[13]、王丽娜等^[14]的研究结果类似。

籽粒灌浆期是小麦增加粒重、提高产量的关键生育时期^[15-16]。产量受灌浆期间籽粒干物质积累影响较大^[17]。本试验中, 参试的不同类型品种的花后干物质量随灌浆时间的推进均呈“S”形曲线增长, 籽粒灌浆进程采用 Logistics 方程均拟合程度好, 真实反映了小麦籽粒灌浆进程, 这与杨金宇

等^[13]的研究结果一致。品种基因型不同, 籽粒灌浆特性也有差异^[5]。前人研究认为, 不同类型小麦的产量和灌浆特性与品种的基因型和栽培环境有关^[18-19]; 郭艳艳等^[20]认为, 小麦粒重主要决定于最大灌浆速率; 李紫燕等^[21]则认为, 粒重主要与灌浆持续时间有关。由于品种、气候和栽培条件的不同, 各位学者的结论不一致。本研究通过对高产氮高效、高产氮低效、低产氮低效小麦品种的研究发现, 高产氮高效小麦品种的灌浆开始时间早、灌浆迅速, 最终籽粒生长量最大, 这进一步验证了李敏等^[9]的研究结果。

3.2 基于籽粒灌浆特性解析小麦高产与氮高效的协同形成

研究发现, 同为高产品种, 基因型不同, 其氮



效率也存在显著差异^[19, 22]。氮效率多指氮素吸收和氮素利用效率两个方面,氮吸收利用效率的差异不仅存在于不同物种间,而且存在于同一物种不同品种间^[1-2, 23]。本研究两个年度的结果(表4)表明,在相同高产栽培措施下,氮高效品种的产量明显高于氮低效品种,氮吸收利用效率与产量显著相关。较多研究表明,籽粒灌浆同时影响产量形成和氮肥吸收利用,它既是光合产物向籽粒运输、同化、积累的过程,也是氮素向籽粒分配、转运和再重组的过程^[11]。氮高效基因型作物通常同时具有较高的氮素吸收和利用能力,即较强的氮素运输和再转运能力^[7]。该试验中的氮高效品种 HH 的灌浆充实特性(平均灌浆速率和最大灌浆速率)均高于氮低效品种;HH 的最终生长量分别比 HL 和 LL 平均提高 1.78% 和 5.77%。因此,灌浆充实性可能是限制氮肥吸收利用率进一步提高的重要原因,进而影响小麦产量。

灌浆充实差的主要原因是品种的库容量大,灌浆充实物不足^[23-25]。例如,同为高产小麦品种 HH 和 HL,由于 HL 氮效率较低,其生育后期根系吸氮能力和光合生产能力均会降低^[11],光合生产物质难以满足大库容充实需要,导致籽粒灌浆时间滞后、灌浆速率降低,有效穗率和粒重降低。而高产氮高效品种在生育中后期根系活力较高,氮素积累量较大^[26],光合物质生产能力较强^[11],从而形成了光合物质和氮素营养协同并进的高效利用平衡体系,这不仅促进了籽粒灌浆充实,也促进了氮素的高效吸收利用,本文研究结果也证实了这一点。

河南省小麦灌浆期易受干旱、干热风等气候条件的影响,导致籽粒灌浆速率下降、有效灌浆时间缩短和千粒重降低。因此,在选择品种时应考虑灌浆起点早、灌浆速度快的高产氮高效小麦品种。

4 结论

(1) 不同氮效率小麦的千粒重动态增长过程均符合 Logistics 模型,但籽粒终极生长量、籽粒初始生长速率等模型参数不同,品种间灌浆速率差异显著。高产氮高效小麦品种的灌浆开始时间早、灌浆速率快,千粒重高。

(2) 高产氮高效小麦品种的产量、氮生理利用效率和氮吸收效率均显著高于高产氮低效和低产氮低效小麦品种。产量和氮生理利用效率与籽粒灌浆特性参数呈显著或极显著相关;其中氮吸收效率与

最大灌浆速率和达到最大灌浆速率时的千粒重呈显著正相关,与灌浆持续时间呈显著负相关。

参考文献:

- [1] Bodirsky B L, Popp A, Lotze-Campen H. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 38-58.
- [2] Hofmeier M, Roelcke M, Han Y. Nitrogen management in a rice-wheat system in the Taihu Region: Recommendations based on field experiments and surveys [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 209: 60-73.
- [3] Jia Q M, Sun L F, Mou H Y. Effects of planting patterns and sowing densities on grain-filling, radiation use efficiency and yield of maize (*Zea mays* L.) in semi-arid regions [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 287-298.
- [4] Yu T, Li G, Liu P. Proteomics analysis of maize (*Zea mays* L.) grain based on iTRAQ reveals molecular mechanisms of poor grain filling in inferior grains [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 115: 83-96.
- [5] Li Q, Du L J, Feng D J. Grain-filling characteristics and yield differences of maize cultivars with contrasting nitrogen efficiencies [J]. *The Crop Journal*, 2020, 8 (6): 990-1001.
- [6] Shen L X, Huang Y K, Li T. College of water conservancy and engineering, taiyuan university of technology. top-grain filling characteristics at an early stage of maize (*Zea mays* L.) with different nitrogen use efficiencies [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16 (3): 626-639.
- [7] 吕静瑶, 申丽霞, 晁晓乐. 不同氮效率玉米品种籽粒灌浆特性研究 [J]. *河南农业科学*, 2017, 46 (1): 7-12.
- [8] 杨建昌. 水稻弱势粒灌浆机理与调控途径 [J]. *作物学报*, 2010, 36 (12): 2011-2019.
- [9] 李敏, 罗德强, 江学海, 等. 高产氮高效型水稻品种的籽粒灌浆特性 [J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22 (9): 22-30.
- [10] 宋晓, 张珂珂, 黄晨晨, 等. 基于主成分分析的氮高效小麦品种的筛选 [J]. *河南农业科学*, 2020, 49 (12): 10-16.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 42-44.
- [12] 刘庆芳, 李小康, 刘保华, 等. 冬小麦籽粒灌浆特性和旗叶光合特性对产量的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50 (19): 61-67.
- [13] 杨金字, 李援农, 王凯瑜, 等. 控释氮肥与普通尿素配施比例和方法对冬小麦灌浆特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (3): 442-452.
- [14] 王丽娜, 韩玉林, 邹少奎, 等. 不同小麦品种粒重与籽粒灌浆特性探究 [J]. *山东农业科学*, 2019, 51 (10): 40-44.
- [15] Goodrich J P, Wall A M, Campbell D I. Improved gap filling approach and uncertainty estimation for eddy covariance N₂O fluxes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 297: 108280.
- [16] Kong M S, Qiao Q, Ma X L. Isolation and functional analysis of

the zmARM4 locus in a novel maize (*Zea mays* L.) grain-filling mutant [J]. *Plant Breeding*, 2020, 139 (3): 1–10.

[17] 常程, 刘晶, 徐亮, 等. 氮素供应对不同玉米品种籽粒灌浆特性的影响 [J]. *辽宁农业科学*, 2017 (1): 1–6.

[18] 孙金英, 曹宏鑫, 焦玉光, 等. 9 个品种 (系) 冬小麦籽粒灌浆特性分析 [J]. *大麦与谷类科学*, 2016, 33 (4): 19–22.

[19] 苗永杰, 阎俊, 赵德辉, 等. 黄淮麦区小麦主栽品种粒重与籽粒灌浆特性的关系 [J]. *作物学报*, 2018, 44 (2): 260–267.

[20] 郭艳艳, 段巍巍. 不同冬小麦品种籽粒胚乳增殖和灌浆对粒重的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2018, 38 (1): 84–89.

[21] 李紫燕, 李世清, 伍维模, 等. 氮肥对半湿润区不同基因型冬小麦籽粒灌浆特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (1): 75–79.

[22] 程旺大, 赵国平, 张国平, 等. 水稻和陆稻籽粒灌浆特性的比较 [J]. *中国水稻科学*, 2002, 16 (4): 335–340.

[23] 刘梅, 吴广俊, 路笃旭, 等. 不同年代玉米品种氮素利用效率与其根系特征的关系 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (1): 71–82.

[24] 李旭毅, 池忠志, 姜心禄, 等. 成都平原两熟区籼粳稻品种籽粒灌浆特性 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (16): 3256–3264.

[25] 王嘉宇, 范淑秀, 徐正进, 等. 几个不同穗型水稻品种籽粒灌浆特性的研究 [J]. *作物学报*, 2007, 33 (8): 1366–1371.

[26] 胡雨欣, 王桂阳, 梁修仁, 等. 水分和施氮量对亚热带一年两作玉米灌浆及产量的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48 (15): 99–105.

Grain filling characteristics of wheat cultivar with different nitrogen efficiency

SONG Xiao^{1, 2}, ZHANG Ke-ke¹, YUE Ke¹, YUE Yan-jun³, ZHANG Xin-yue¹, HUANG Shao-min^{1*}, GUO Teng-fei¹, GUO Dou-dou¹, ZHANG Shui-qing¹, LI Xiang-dong⁴, DING Shi-jie¹, YANG Cheng⁴ (1. Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002; 2. Henan Provincial Key Laboratory of Agricultural Ecological Environment, Zhengzhou Henan 450002; 3. Henan Heart to Heart Chemical Industry Group Co. LTD, Xinxiang Henan 453000; 4. Institute of Wheat, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002)

Abstract: In order to clarify the grain filling characteristics of wheat varieties with different nitrogen efficiency and their relationships with yield and nitrogen efficiency, wheat varieties with high yield and high nitrogen efficiency (HH), high yield and low nitrogen efficiency (HL) and low yield and low nitrogen efficiency (LL) were selected as experimental materials from 2019 to 2021. Logistics model was used to simulate the grain filling process under field production conditions, and the yield component parameters were analyzed. The relationship between grain filling characteristics and nitrogen use efficiency of wheat with different nitrogen efficiency was investigated. The results showed that there were significant differences in grain filling characteristics among different varieties. The maximum and average grain filling rate of different varieties were all ranked as HH>HL>LL, and the grain quality at the maximum grain filling rate was ranked as HL>HH>LL, and the difference between HH and HL was not obvious. The active grain filling period and effective filling time were all performed as HH<HL<LL. Compared with the low nitrogen efficiency varieties of HL and LL, the variety of HH showed the characteristics of early filling start, fast filling speed and shorter effective filling time, which may be related to the nitrogen efficiency of the varieties.

Key words: wheat; high yield; high nitrogen efficiency; low nitrogen efficiency; grain filling