

# 综合农艺管理促进夏玉米氮素吸收、籽粒灌浆和品质提高

于宁宁, 赵子航<sup>†</sup>, 任佰朝, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺\*

(山东农业大学/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

**摘要:**【目的】夏玉米生产中存在种植密度偏低、施肥不合理、玉米收获时间早等问题, 造成产量和品质难以提高, 经济效益偏低。研究适合黄淮海地区的综合农艺管理措施, 以期改善夏玉米籽粒灌浆特性, 提高籽粒品质和氮肥利用效率。【方法】本试验以郑单 958 为试材, 在山东农业大学连续进行了两年田间试验, 综合考虑施肥量、施肥时期、耕作方式、种植密度、收获时间等措施, 设置 4 个处理: 传统种植管理措施 (对照, T1); 高产高效措施 (T2, 降低施肥量, 优化施肥时期和种植密度, 延迟收获); 超高产管理措施 (T3, 在 T2 的基础上增加施肥量和种植密度); 高产高效优化措施 (T4, 在 T3 的基础上适当降低种植密度和施肥量)。T1 处理播前小麦秸秆覆盖和免耕, 其他处理均为小麦秸秆还田和旋耕。从抽雄期至成熟期, 每 5 天取一次样, 测定籽粒干物质质量和水分含量, 计算灌浆和脱水速率, 收获期测产。【结果】与 T1 处理相比, 3 个综合农艺管理措施均能提高夏玉米后期籽粒灌浆速率, 延长籽粒灌浆期, 增加粒重, 提高产量和经济效益, 同时改善籽粒品质。其中, 两年产量均以 T3 处理最高, 较 T1 处理显著增加 46.0%~47.8%, 其次是 T2 和 T4, 较 T1 处理分别显著增加 14.9%~31.6% 和 25.9%~33.6%; 氮肥偏生产力 (PFPN) 以 T2 和 T4 处理较高, 较 T1 处理分别增加 61.1%~84.5% 和 53.6%~62.9%。同时, T2 和 T4 处理从籽粒最大含水量时到收获时的灌浆速率显著增加, 后期籽粒脱水速率增加, 收获时籽粒干重显著提高。优化综合农艺管理措施可改善籽粒品质, 其中以 T4 处理籽粒品质最佳, 2017 年总淀粉含量和支链淀粉含量较 T1 处理分别显著增加 4.5% 和 10.1%, 直链淀粉含量显著下降 7.6%, 支链淀粉/直链淀粉增加 0.4; 可溶性糖和粗蛋白含量分别显著增加 6.2% 和 16.3%; 粗脂肪含量显著降低 8%。综合农艺管理虽然会增加施肥次数, 增加一定的人工投入, 但玉米籽粒产量增加, 最终的经济效益提高。T4 处理经济效益最高, 较 T2 和 T3 处理两年平均增加 613 和 1084 元/hm<sup>2</sup>。【结论】高产高效优化管理措施 (T4) 在超高产管理措施 (T3) 基础上, 适当降低种植密度, 减少化肥用量, 能更有效促进夏玉米籽粒的后期灌浆, 增加灌浆时间, 促进植株干物质向籽粒的转运。虽然高产高效优化管理措施 (T4) 下产量比超高产管理 (T3) 有所降低, 但显著高于常规高产高效管理 (T2), 且可明显提高玉米品质和肥料利用率, 增加净收益。

**关键词:** 夏玉米; 综合农艺管理; 产量; 氮素利用率; 籽粒灌浆特性; 籽粒品质

## Integrated agronomic management practices improve nitrogen absorption, grain filling and nutritional qualities of summer maize

YU Ning-ning, ZHAO Zi-hang<sup>†</sup>, REN Bai-zhao, ZHAO Bin, LIU Peng, ZHANG Ji-wang\*

(Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** 【Objectives】 Summer maize production is generally low in efficiency due to low planting density, unreasonable fertilization and early harvest. In order to improve yield, nitrogen use efficiency and grain quality, we studied an integrated agronomic management practice suitable for Huang-Huai-Hai region. 【Methods】 A summer maize cultivar of Zhengdan 958 was used as experimental material in a field experiment carried in Shandong Agricultural University. Four integrated agronomic practices managements were setup, including T1 (conventional management), T2 (increasing plant density, decreasing fertilizer input, optimizing application period

收稿日期: 2019-09-16 接受日期: 2020-02-24

基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-02-18); 国家重点研发计划课题 (2017YFD0300304-02); 国家自然科学基金面上项目 (31671629); 山东省“双一流”奖补资金 (SYL2017YSTD02)。

联系方式: 于宁宁 E-mail: 1015317619@qq.com; <sup>†</sup> 赵子航为共同第一作者 E-mail: 634971216@qq.com

\* 通信作者 张吉旺 Tel: 0538-8241485, E-mail: jwzhang@sdau.edu.cn

of NPK fertilizers, and postponing the harvest dates), T3 for super high yield treatment (based on T2, further increasing fertilizer input and planting density), T4 for optimum high yield and high efficiency management (based on T3, reducing planting density and fertilizer input, and applying 30 kg/hm<sup>2</sup> of ZnSO<sub>4</sub>). The dry matter accumulation and water contents of grains were measured at a five-day-interval from initial tasseling to the complete of grain filling stage, the filling and dehydrate rate of grains were calculated, and the yields were weighed at harvest. **【 Results 】** The three integrated managements increased grain filling rate, yield and economic benefits, and improved grain nutritional quality significantly. In the two years, the highest grain yield was in T3, with a significant increase of 46.0%–47.8% compared with that in T1 treatment, and followed by T2 and T4, with a significant increase of 14.9%–31.6% and 25.9%–33.6% respectively compared with that in T1 treatment. The N partial factor productivities (PFPNs) of T2 and T4 treatments were higher than those of T1 by 61.1%–84.5% and 53.6%–62.9%. The grain filling rate from the date reaching maximum grain water content to harvest was significantly increased under T2 and T4, and the dehydration rate and grain dry weight were increased significantly at harvest stage as well. The grain quality was improved through integrated managements. The best processing quality was obtained in T4, in which the contents of amylopectin, protein and soluble sugar were significantly higher than those in T3, and the crude fat content was significantly reduced, and the total starch and amylopectin content was 4.5% and 10.1% higher than those of T1 treatment, and amylose content decreased significantly by 7.6%, and the ratio of amylopectin to amylose increased by 0.4. The economic benefit of T4 treatment was also the highest, which was 613 and 1084 yuan more than those of T2 and T3 treatments in two years. **【 Conclusions 】** Through relatively decreasing plant density and fertilizer rate, the optimized high yield and high efficiency management (T4) can effectively increase the nitrogen fertilizer efficiency, improve grain nutritional quality and the maize production profit compared with the super high yield management (T3), and significantly increase maize yield than the general double-high management (T2).

**Key words:** summer maize; integrated agronomic management practice; yield; nitrogen use efficiency; grain filling characteristics; grain quality

目前,我国大多数地区的玉米生产仍然沿用传统的精耕细作方式,劳动生产率不高,化肥使用不当,且提前收获,导致产量和品质难以提高<sup>[1-2]</sup>。前人进行了很多单因素如种植密度、施肥量或施肥时期等对夏玉米籽粒灌浆、产量和品质影响的研究。大量研究表明,合理的氮肥运筹能提高产量,促进植株氮素的转运,增加籽粒氮素收获指数,籽粒粗蛋白含量增加,籽粒品质得到改善<sup>[3-4]</sup>,但过量施氮,玉米贪青晚熟,籽粒灌浆速率下降,影响后期的籽粒干物质的积累,产量和品质下降<sup>[5]</sup>。随种植密度增加,产量增加,但玉米籽粒灌浆速率下降,籽粒蛋白质含量降低<sup>[6-7]</sup>;种植密度过大,产量降低,品质变劣<sup>[8-10]</sup>。籽粒品质与灌浆速率呈一定的相关性。直链淀粉含量与籽粒灌浆起始势、相对起始势呈显著的正相关<sup>[11]</sup>。但也有研究表明,不同灌浆阶段的灌浆速率、灌浆量及其所占的比例对籽粒主要品质指标的影响程度和趋势不同<sup>[12]</sup>。张吉旺课题组前期研究表明,增施氮肥可显著提高籽粒灌浆速率,延长籽粒灌浆活跃期,提高氮素利用率,但过量施氮

灌浆速率和氮素利用效率均下降<sup>[13]</sup>,说明单一增施氮肥不能持续提高产量和氮素利用效率,但优化综合农艺管理措施可实现产量和氮素利用效率的持续提高<sup>[13-14]</sup>。然而,关于综合农艺管理对夏玉米籽粒灌浆和品质影响的研究还未涉及。因此,在大田条件下设置综合农艺管理试验,研究其对夏玉米籽粒灌浆、籽粒品质的影响,以期为黄淮海夏玉米的优质、高产及高效生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

于2016—2017年,以郑单958为试材,在山东省岱岳区大汶口镇进行田间试验。将耕作方式、种植密度、肥料用量与施用时期及收获时间系统性整合,共设置4个处理:农民习惯管理模式(对照, T1);降低施肥量,优化施肥时期和种植密度,延迟收获的高产高效模式(T2);在T2的基础上增加施肥量和种植密度,播前基施ZnSO<sub>4</sub> 30 kg/hm<sup>2</sup>的超高产

模式 (T3); 在 T3 的基础上适当降低种植密度和施肥量的高产高效优化模式 (T4), 每个处理 4 次重复, 随机区组排列。每个小区面积均为 240 m<sup>2</sup>, 玉米 6 月 15 日播种, 行距 60 cm, T1 处理为秸秆覆盖、免耕, T2、T3 和 T4 处理均进行秸秆还田, 播前旋耕。T1、T2、T3 和 T4 处理的种植密度分别为 6.00、6.75、8.70 和 7.50 万株/hm<sup>2</sup>。T1 处理提前收获 (9 月 21 日), 其他处理均在 10 月 1 日收获。各处理具体管理方式见表 1。

## 1.2 测定项目与方法

1.2.1 有效积温 气象资料由农情实时监测平台 (<http://www.nqssjc.com/>) 提供, 第  $i$  天累积的有效积温为:

$$T = \sum_{i=1}^i [(T_{max} + T_{min})/2 - 10],$$

其中,  $T_{max}$  和  $T_{min}$  为第  $i$  天的最高和最低气温 ( $10^{\circ}\text{C} < T_{min} < T_{max} < 35^{\circ}\text{C}$ )。

1.2.2 籽粒灌浆特性 玉米吐丝后选取吐丝一致的 50 株进行标记, 开花后每隔 5 天进行取样, 每个处理选取 5 株, 分别剥取玉米果穗中部的籽粒 100 粒, 称鲜重, 排水法测定籽粒体积; 于 80℃ 烘箱烘干至恒重, 称干重。按照万泽花等<sup>[15]</sup>的方法进行计算: 平均灌浆速率 (g/℃) = 生理成熟期百粒干重/灌浆期有效积温; 籽粒最大含水量到收获的灌浆速率 (g/℃) = (收获时百粒干重 - 籽粒绝对含水量最大时的百粒干重)/籽粒绝对含水量最大到收获时的有效积温; 籽粒脱水速率为两次取样籽粒含水量之差除

以相隔天数的积温。

1.2.3 籽粒品质 取成熟期籽粒于 50℃ 烘箱烘干至恒重后粉碎, 采用凯氏定氮法测定粗蛋白含量 (粗蛋白含量 = 籽粒全氮含量 × 6.25)<sup>[16]</sup>; 粗脂肪含量测定用索氏提取法—残余法抽提 12 h<sup>[17]</sup>; 蒽酮—硫酸比色法测定总淀粉及可溶性糖含量; 双波长法测定支链、直链淀粉含量<sup>[18]</sup>。

1.2.4 测产与考种 每小区随机取样, 重复 3 次, 每重复取 30 个果穗, 自然风干, 用于室内考种。

产量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 收获穗数 × 穗粒数 × 千粒重 / 1000 × (1 - 鲜籽粒含水率) / (1 - 14%)

## 1.3 数据分析

采用 SigmaPlot 10.0、CurveExpert 1.3 进行数据处理、作图, 采用 SPSS 17.0 软件进行数据统计和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 产量和经济收益

由图 1 可见, 2016 和 2017 年夏玉米产量为 T3 > T4 > T2 > T1 ( $P < 0.05$ )。与 T1 相比, 两年试验 T3、T2 和 T4 玉米产量分别增加了 46.0%~47.8%、14.9%~31.6% 和 25.9%~33.6%。夏玉米籽粒灌浆期间籽粒干重的变化趋势相同, T1 处理百粒干重最低。以 2017 年为例, T1 处理的百粒干重在灌浆期间

表 1 综合农艺管理试验的施肥管理方式

Table 1 Fertilization managements of different integrated agronomic management practices

处理 Treatment	肥料 Fertilizer	肥料施用时期及施用量 Fertilization period and rate (kg/hm <sup>2</sup> )					Plant density 种植密度 (× 10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )	收获日期 Harvest date (month-day)
		基施 Basal	拔节期 Jointing	抽雄期 Tasseling	抽雄后一周 One week after tasseling	合计 Total		
T1	N		225			225	6.0	09-21
	P		45			45		
	K		75			75		
T2	N	45	115.5			160.5	6.75	10-01
	P	45				45		
	K	45	30			75		
T3	N		135	225	90	450	8.70	10-01
	P	60	90			150		
	K	150	150			300		
T4	N	30	90	64.5		184.5	7.5	10-01
	P	30	25.5			55.5		
	K	30	75.5	30		135.5		

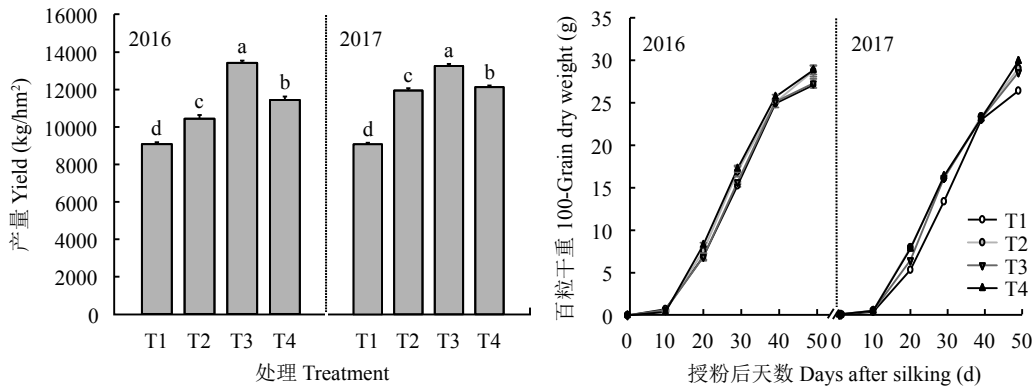


图 1 不同综合农艺管理措施下夏玉米产量和百粒干重

Fig. 1 Grain yield and 100-grain dry weight of summer maize under different integrated agronomic managements

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different small letters above the bars mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ .)

均较其他处理显著降低, 在授粉后 50 天较 T2、T3 和 T4 处理分别降低 9.9%、8.4% 和 12.2%。

各综合农艺管理均可显著提高夏玉米的经济效益, 以 T4 处理效益最高。T4 处理在 2016 和 2017 年较 T1 处理分别增加 42.9% 和 57.4%, 较 T3 增加了 6.4% 和 20.2%, 较 T2 处理在 2016 年增加了 14.7%, 但在 2017 年增加不显著 (表 2)。

## 2.2 氮素收获指数 (NHI) 和氮肥偏生产力 (PFPN)

优化综合农艺管理措施均可显著提高夏玉米籽粒含氮量和氮素收获指数, 整体趋势表现为  $T2 \approx T4 > T3 > T1$  (图 2)。2017 年, T2、T3 和 T4 的氮素收获指数较 T1 处理增加 17.3%、11.5% 和 19.2%。同时, T2 和 T4 处理也显著提高了氮肥偏生产力, 两年分别较 T1 处理高 61.1%~84.5% 和 53.6%~62.9% (图 2)。

## 2.3 籽粒灌浆特性

2.3.1 籽粒灌浆速率 由表 3 可知, 由于收获时间

早, 2016 年 T1 处理生长季的有效积温比其他 3 个处理低  $102.4^{\circ}\text{C}$ , 2017 年低  $89.4^{\circ}\text{C}$ 。4 个处理相比较, 收获时的百粒干重, T2 和 T4 处理显著高于 T3 和 T1, T2 和 T4 处理及 T3 和 T1 处理差异不显著。各处理籽粒最大含水率时的籽粒干重差异不显著。籽粒最大含水量到收获时灌浆速率, 总体趋势表现为  $T4 > T2 > T3 \approx T1$ 。T4 处理从籽粒最大含水量到收获时的灌浆速率较 T1 处理两年平均增加 5.7%; T2 处理较 T1 处理两年平均增加 4.2%; T3 和 T1 处理无显著性差异。2016 年, T1 处理的平均灌浆速率最高。

2.3.2 籽粒含水量和脱水速率 夏玉米灌浆期间各处理籽粒含水量的变化趋势大体相同 (图 3), 从授粉后 10 天一直下降, 但年际间变化不同: 2016 年, T1 和 T3 处理的籽粒含水量一直较高, 收获时分别较 T2 和 T4 处理高 6.9%、6.9% 和 5.9%、6.0%; 但

表 2 综合农艺管理措施下夏玉米经济收益 (yuan/hm<sup>2</sup>)

Table 2 Net proceeds of maize production in each integrated agronomic management

年份 Year	处理 Treatment	产量收入 Yield income	投入成本 Total input	净收益 Net income
2016	T1	11634	5440	6194 d
	T2	13368	5651	7717 c
	T3	17189	8870	8319 b
	T4	14651	5798	8853 a
2017	T1	11619	5440	6179 c
	T2	15288	5651	9637 a
	T3	16963	8870	8093 b
	T4	15524	5798	9726 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters in a column mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

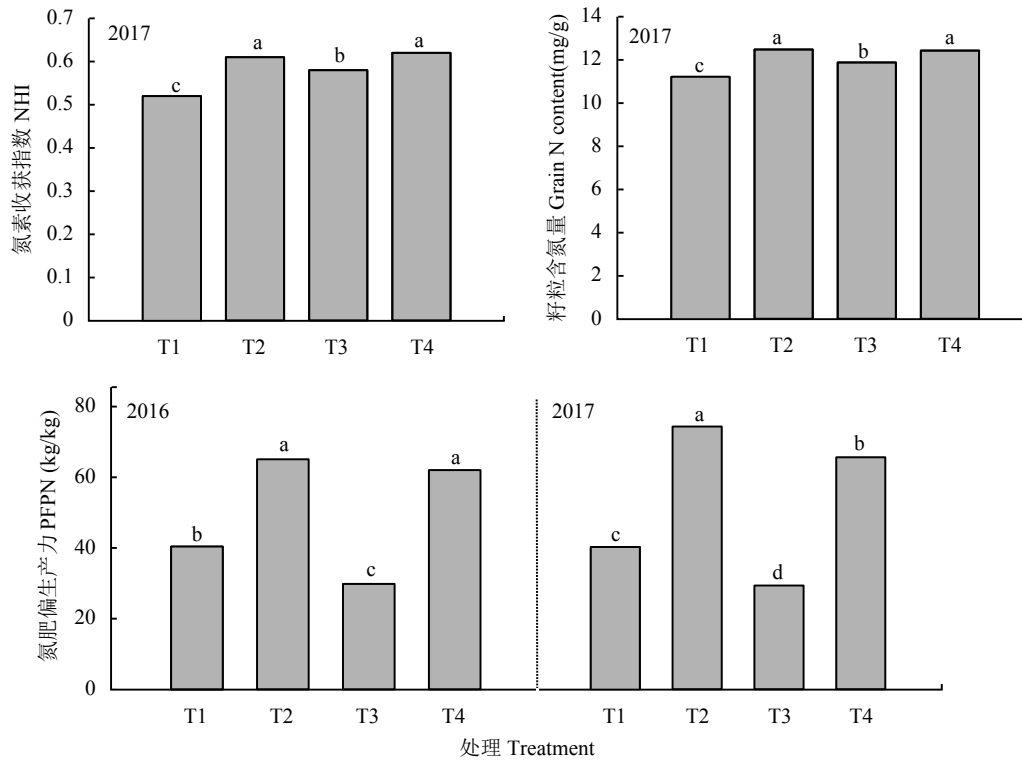


图 2 综合农艺管理措施对夏玉米氮素收获指数、籽粒含氮量和氮肥偏生产力的影响

Fig. 2 Effects of different integrated agronomic management practices on N harvest index (NHI), grain N content and N partial factor productivity (PFPN) of summer maize

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different small letters above the bars mean significant difference among treatments ( $P < 0.05$ .)

表 3 综合农艺管理措施对夏玉米籽粒灌浆的影响

Table 3 Effects of different integrated agronomic management practices on grain filling of summer maize

年份 Year	处理 Treatment	灌浆期有效积温 EATFP ( $^{\circ}\text{C}$ )	收获时百粒干重 100-KDWPM (g)	平均灌浆速率 Average filling rate ( $\text{mg}/^{\circ}\text{C}$ )	籽粒最大含水量 时百粒干重 100-KDWMWC (g)	籽粒最大含水量到 收获时的灌浆速率 FRMWCM ( $\text{mg}/^{\circ}\text{C}$ )
2016	T1	597.3	30.1 b	50.4 a	12.5 a	66.5 b
	T2	699.7	31.3 a	44.7 c	12.8 a	69.8 a
	T3	699.7	30.3 b	43.3 d	12.7 a	66.5 b
	T4	699.7	31.5 a	45.0 b	12.9 a	70.3 a
2017	T1	696.5	31.3 c	45.0 a	11.2 a	52.3 c
	T2	785.9	35.9 a	45.7 a	11.8 a	54.0 b
	T3	785.9	34.5 b	43.9 b	11.2 a	53.0 c
	T4	785.9	35.5 a	45.2 a	11.5 a	55.3 a

注 (Note): EATFP—Effective accumulated temperature during grain filling period; 100-KDWPM—100-Kernel dry weight at harvest; 100-KDWMWC—100-Kernel dry weight at maximum water content; FRMWCM—Grain filling rate from maximum water content to harvest; 同列数据后不同字母表示同一年份不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different small letters mean significant difference among treatments of the same year ( $P < 0.05$ ).

2017 年, T1 处理在吐丝后 40 天内籽粒含水量均较高, 但 40~50 天降低; 吐丝后 50 天, T2 和 T4 处

理籽粒含水量降低, 较 T1 处理降低 2.4%~7.0%。

由图 3 可知, 2016 年, 在授粉后 30~40 天内,

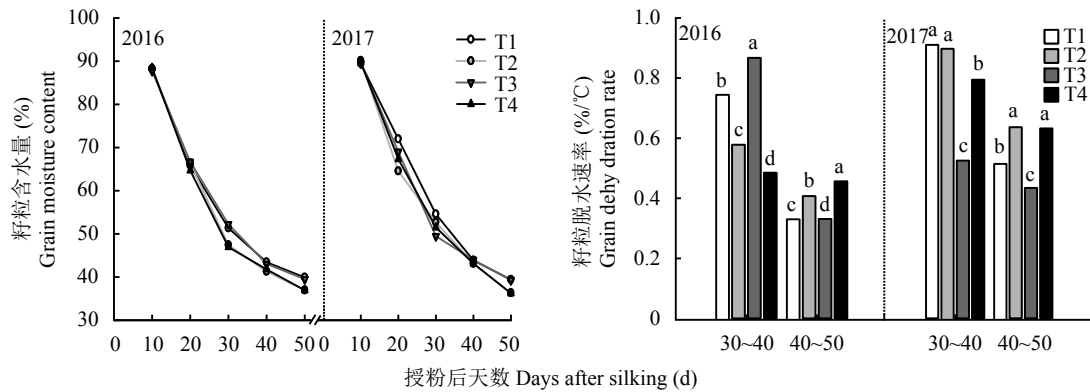


图3 综合农艺管理措施对夏玉米籽粒含水率和脱水速率的影响

Fig. 3 Grain moisture content and dehydration rate of summer maize under different integrated agronomic management practices

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters above the bars indicate significant difference at 0.05 level.]

T1 和 T3 处理的籽粒脱水速率较 T2 和 T3 处理高,但在授粉后 40~50 天内, T1 和 T3 处理的脱水速率显著下降,分别较 T4 处理降低了 27.6% 和 27.4%。2017 年,授粉后 30~40 天,除 T3 处理外,其他处理均保持较高的脱水速率,但在授粉后 40~50 天, T1 处理的籽粒脱水速率下降,较 T4 处理降低了 18.6%。

## 2.4 籽粒品质

2.4.1 淀粉含量及其组分 由表 4 可知,优化综合农艺管理措施可显著提高夏玉米籽粒总淀粉含量,总体趋势表现为  $T4 \approx T2 > T3 > T1$ ,同时可增加支链淀粉含量,降低直链淀粉含量,提高支链/直链淀粉值。T2 和 T4 处理较 T1 处理的总淀粉含量显著增加 3.7% 和 4.5%,支链淀粉含量显著增加 9.8% 和 10.1%,直链淀粉含量显著下降 9.5% 和 7.6%,支链/直链淀粉值增加 0.5 和 0.4。T3 处理较 T1 处理的总淀粉含量显著增加 2.7%,支链淀粉含量显著增加 4.0%。T3 和 T1 处理的直链淀粉含量和支链/直链淀粉值相差不大。

2.4.2 可溶性糖和粗蛋白含量 由图 4 可知,

T2 和 T4 处理的可溶性糖含量显著提高,较 T1 处理显著增加 7.0% 和 6.2%。T3 处理的可溶性糖含量降低,较 T1 处理降低 5.4%。优化综合农艺管理措施可提高夏玉米籽粒粗蛋白含量,总体趋势表现为  $T2 \approx T4 > T3 > T1$ 。T2、T3 和 T4 处理较 T1 处理显著提高 16.8%、11.2% 和 16.3%。

2.4.3 粗脂肪含量 由图 4 可知,优化综合农艺管理措施可降低夏玉米籽粒粗脂肪含量,总体趋势表现为  $T1 > T3 > T2 \approx T4$ 。T2、T3 和 T4 处理较 T1 处理显著降低 10%、6% 和 8%。

## 3 讨论

我国如果在肥料利用效率没有提高的前提下,继续加大氮肥的投入,会对农业生产力和粮食安全造成威胁<sup>[9]</sup>。是否能实现产量和效率的同步提升?张吉旺课题组前期(2009 年至今)研究表明,单一增加氮肥用量不仅不能使产量和氮素利用效率进一步增加,过量施氮反而使产量和氮素利用效率下降<sup>[13-14]</sup>。而综合农艺管理试验系统性整合耕作方式、种植密

表 4 综合农艺管理措施对夏玉米籽粒淀粉含量的影响 (2017)

Table 4 Effects of different integrated agronomic management practices on grain starch content of summer maize

处理 Treatment	总淀粉 (%) Total starch	支链淀粉 (%) Amylopectin	直链淀粉 (%) Amylose	支链/直链淀粉 Amylopectin to amylose ratio
T1	65.7 c	44.7 c	21.0 a	2.1
T2	68.1 a	49.1 a	19.0 b	2.6
T3	67.5 b	46.5 b	21.0 a	2.2
T4	68.6 a	49.2 a	19.4 b	2.5

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters indicate significant difference among treatments ( $P < 0.05$ ).

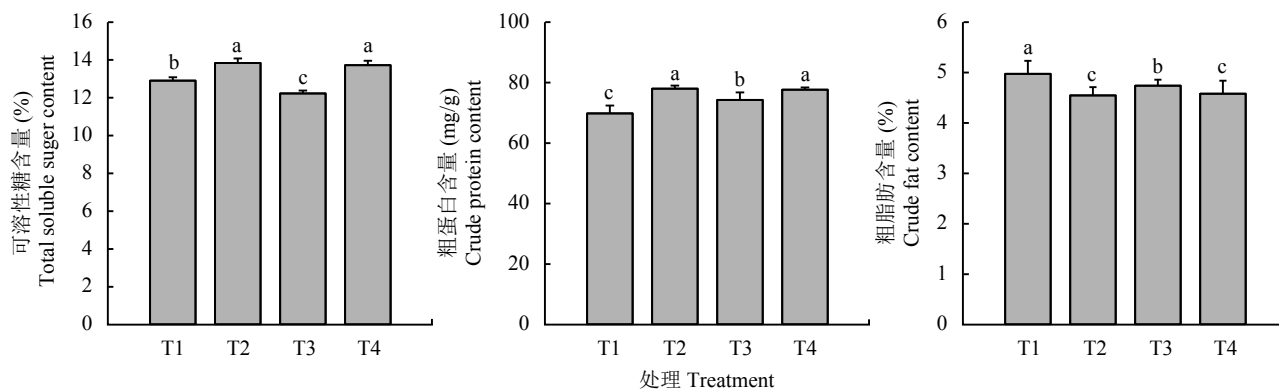


图 4 综合农艺管理措施对夏玉米籽粒品质的影响 (2017)

Fig. 4 Grain quality of summer maize under different integrated agronomic management practices

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters above the bars indicate significant difference at 0.05 level.]

度、施肥量、施肥时期和收获时间等, 实现了产量和效率的同步提升<sup>[19-21]</sup>。本研究表明, 综合农艺管理在提高产量的同时, 可提高籽粒氮素含量和氮素收获指数, 以及氮肥偏生产力, 这与之前的研究结果一致。目前, 农业生产在要求产量进一步提高的同时, 越来越注重品质的优化, 但目前关于综合农艺管理对籽粒品质影响的研究较少, 故研究综合农艺管理对玉米籽粒品质的影响尤为重要。

籽粒灌浆是形成玉米籽粒产量的关键生理过程。灌浆速率和灌浆持续期与千粒重显著相关, 是决定粒重的关键因素, 而种植密度、施肥量和施肥时期等均对籽粒灌浆产生显著影响<sup>[22-23]</sup>。提高开花期氮积累量和花后营养器官贮存氮素向籽粒的运转是提高籽粒蛋白质含量和调控品质的重要途径<sup>[24]</sup>。随着种植密度的提高, 籽粒灌浆速率显著下降, 粒重减轻, 产量的形成受到影响<sup>[25-26]</sup>。适宜增加施氮量和种植密度可改善籽粒品质; 籽粒蛋白质含量随种植密度的增加呈先降低后上升的趋势<sup>[27]</sup>。但也有研究认为随密度的增加脂肪含量呈现出不同程度的降低<sup>[28]</sup>。施氮可提高玉米籽粒的最大灌浆速率以及灌浆的持续时间, 增加籽粒干物质的积累<sup>[29]</sup>。于籽粒灌浆期施适量氮磷肥, 可促进干物质的积累和转运, 有利于提高粒重, 过量供应则会引起植株贪青晚熟, 不利于籽粒产量的提高<sup>[30]</sup>。籽粒中蛋白质含量随施氮量的增加而增加<sup>[30-32]</sup>, 拔节期追氮可显著增加强筋小麦的蛋白质和淀粉含量<sup>[33]</sup>。但也有研究表明, 籽粒蛋白质含量受遗传因素控制, 与施氮量相关性不大<sup>[35]</sup>。籽粒品质与籽粒脱水速率显著相关<sup>[34-35]</sup>。本研究表明, 农民习惯处理种植密度低, 肥料于播种时一次性施入, 导致后期脱肥, 籽粒灌浆期间平均灌浆速率虽

然没有显著降低, 但从籽粒含水量最大到收获时的灌浆速率显著降低, 后期籽粒脱水速率下降, 且生长季的有效积温减少, 影响干物质向籽粒的转运, 导致籽粒中总淀粉、可溶性糖和粗蛋白的含量均较优化综合农艺管理处理 (T4) 显著降低, 粗脂肪含量增加, 品质下降, 产量降低。适当增加种植密度, 降低施肥量和优化施肥时期, 可以满足玉米全生育期的营养需求, T2 和 T4 处理夏玉米籽粒含水量最大到收获时的灌浆速率显著提高, 且推迟收获, 增加生长季的有效积温和籽粒灌浆期, 促进干物质的转运从而增加粒重, 显著增加总淀粉、可溶性糖和粗蛋白含量, 降低粗脂肪含量, 改善籽粒品质, 提高产量。但 T3 处理种植密度过大, 籽粒脱水较慢, 较 T4 处理粗蛋白和可溶性糖含量降低, 品质下降。

## 4 结论

优化综合农艺管理措施 T4 处理, 通过适当提高种植密度、施肥量和优化施肥时期, 推迟收获期 10 天, 可延长夏玉米籽粒灌浆期, 提高籽粒平均灌浆速率和籽粒最大含水量到收获时的灌浆速率, 促进脱水, 降低收获时的籽粒含水量, 增加粒重, 提高产量, 增加经济收益。同时可增加籽粒中粗蛋白、可溶性糖含量, 增加总淀粉含量及其支链/直链淀粉比值, 降低粗脂肪含量, 改善营养品质, 提高籽粒氮素含量和氮肥偏生产力, 可实现夏玉米的高产高效。

## 参考文献:

- [1] 尹昌斌, 程磊磊, 杨晓梅, 等. 生态文明型的农业可持续发展路径选择[J]. *中国农业资源与区划*, 2015, 36(1): 15-21.  
Yin C B, Cheng L L, Yang X M, et al. Path decision of agriculture

- sustainable development based on eco-civilization[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2015, 36(1): 15–21.
- [2] Jin L B, Cui H Y, Li B, *et al.* Effects of integrated agronomic management practices on yield and nitrogen efficiency of summer maize in North China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 134: 30–35.
- [3] 聂卫滔. 氮肥运筹对不同小麦品种产量及品质的影响[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2018.  
Nie W T. Effects of nitrogen management on grain yield and quality of different wheat varieties[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2018.
- [4] 张礼军, 张耀辉, 鲁清林, 等. 耕作方式和氮肥水平对旱地冬小麦籽粒品质的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(8): 1567–1575.  
Zhang L J, Zhang Y H, Lu Q L, *et al.* Effect of tillage model and nitrogen rate on grain quality of dryland winter wheat[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8): 1567–1575.
- [5] 徐凤娇, 赵广才, 田奇卓, 等. 施氮量对不同品质类型小麦产量和加工品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 300–306.  
Xu F J, Zhao G C, Tian Q Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on grain yield and processing quality of different wheat genotypes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(2): 300–306.
- [6] 李筠, 王龙, 任立凯, 等. 播期、密度和氮肥运筹对冬小麦连麦 2 号产量与品质的调控[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(2): 303–308.  
Li J, Wang L, Ren L K, *et al.* Effect of sowing date, density and nitrogen management on grain yield and quality of winter wheat Lianmai-2[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 303–308.
- [7] 岳海旺, 卜俊周, 魏建伟, 等. 黄淮海北部不同熟期夏玉米品种灌浆和脱水特性研究[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(12): 2659–2666.  
Yue H W, Pu J Z, Wei J W, *et al.* Study on grain filling and dehydration characteristics of summer maize varieties differing in maturities in North of Huang-Huai-Hai region[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(12): 2659–2666.
- [8] 任伟, 赵鑫, 黄收兵, 等. 不同密度下增施有机肥对夏玉米物质生产及产量构成的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(10): 1146–1155.  
Ren W, Zhao X, Huang S B, *et al.* Effects of application of organic fertilizer under different planting densities on dry matter production and yield formation of summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(10): 1146–1155.
- [9] 王竞绍, 董召荣, 张健, 等. 密度、氮肥基追比例对不同穗型小麦产量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(1): 14–19.  
Wang J S, Dong Z R, Zhang J, *et al.* Effects of different densities and ratios of base and top-dressing nitrogen fertilizer on grain yield of two wheat varieties with different spike types[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38(1): 14–19.
- [10] Lloveras J, Manent J, Viudas J, *et al.* Seeding rate influence on yield and yield components of irrigated winter wheat in a Mediterranean climate[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(5): 1258–1265.
- [11] 韩勇, 姜秀英, 刘军, 等. 稻粳品质性状与籽粒灌浆特性的相关分析[J]. *辽宁农业科学*, 2007, (3): 13–15.  
Han Y, Jiang X Y, Liu J, *et al.* Correlation between quality characters and grain-filling characteristics of japonica rice[J]. *Liaoning Agriculture Science*, 2007, (3): 13–15.
- [12] 袁继超, 丁志勇, 蔡光泽, 等. 攀西地区稻米淀粉 RVA 谱的影响因子及其垂直变化特点[J]. *作物学报*, 2005, 31(12): 1611–1619.  
Yuan J C, Ding Z Y, Cai G Z, *et al.* The factors influencing RVA profile of rice starch and their changes with altitudes in Panxi region[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(12): 1611–1619.
- [13] 靳立斌, 崔海岩, 李波, 等. 综合农艺管理对夏玉米氮效率和土壤硝态氮的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(11): 2009–2015.  
Jin L B, Cui H Y, Li B, *et al.* Effects of integrated agronomic practices on nitrogen efficiency and soil nitrate nitrogen of summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(11): 2009–2015.
- [14] Liu Z, Gao J, Gao F, *et al.* Integrated agronomic practices management improve yield and nitrogen balance in double cropping of winter wheat-summer maize[J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 196–206.
- [15] 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.  
Wan Z H, Ren B Z, Zhao B, *et al.* Grain filling and dehydration characteristics of summer maize hybrids differing in maturities and effect of plant density[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(10): 1517–1526.
- [16] 何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985. 290–294.  
He Z F. Analysis technique for grain of cereals and oils[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1985. 290–294.
- [17] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 127–132.  
Zhang Z L, Qu W J. Experimental manual on plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 127–132.
- [18] 林美娟, 宋江峰, 李大靖, 等. 用双波长分光光度法测定鲜食玉米中直链淀粉和支链淀粉含量[J]. *江西农业学报*, 2010, 22(12): 117–119.  
Lin M J, Song J F, Li D J, *et al.* Determination of amylose and amylopectin content in fresh corn by dual-wavelength spectrophotometry[J]. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2010, 22(12): 117–119.
- [19] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(26): 12052–12057.
- [20] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486–489.
- [21] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, *et al.* Integrated soil-crop system management for food security[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(16): 6399–6404.
- [22] 刘宗华, 张战辉. 玉米籽粒灌浆速率研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2010, 11: 148–153.  
Liu Z H, Zhang Z H. Research progress on grain filling rate in maize[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 11: 148–153.
- [23] Sadras V O, Egli D B. Seed size variation in grain crops: allometric relationships between rate and duration of seed growth[J]. *Crop Science*, 2008, 48(2): 408–416.



- [24] 戴廷波, 孙传范, 荆奇, 等. 不同施氮水平和基追比对小麦籽粒品质形成的调控[J]. *作物学报*, 2005, 31(2): 248–253.  
Dai T B, Sun C F, Jing Q, *et al.* Regulation of nitrogen rates and dressing ratios on grain quality in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(2): 248–253.
- [25] 孙全平, 刘国一, 唐亚伟, 等. 密度、播期和施肥对西藏不同青稞品种籽粒灌浆特性影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(21): 67–74.  
Sun Q P, Liu G Y, Tang Y W, *et al.* Effects of planting density, sowing date and fertilizer application on grain-filling characteristics of different highland barley varieties in Tibet[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(21): 67–74.
- [26] 张定一, 张永清, 闫翠萍, 等. 基因型、播期和密度对不同成穗型小麦籽粒产量和灌浆特性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(1): 28–34.  
Zhang D Y, Zhang Y Q, Yan C P, *et al.* Effects of genotype, sowing date and planting density on grain filling and yield of wheat varieties with different ears forming characteristics[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(1): 28–34.
- [27] 蔡金华, 陈爱大, 温明星, 等. 施氮量和种植密度对镇麦 168 子粒产量与品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1312–1320.  
Cai J H, Chen A D, Wen M X, *et al.* Effect of nitrogen application rate and planting density on grain yield and quality of wheat cultivar Zhenmai 168[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1312–1320.
- [28] 杨克军. 栽培方式对玉米产量及品质影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2001.  
Yang K J. The study on effects of yield and quality in maize under different cultivation methods[D]. Harbin: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2001.
- [29] 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.  
Lü P, Zhang J W, Liu W, *et al.* Effects of nitrogen application dates on yield and nitrogen use efficiency of summer maize in super-high yield conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(5): 1099–1107.
- [30] 李世清, 邵明安, 李紫燕, 等. 小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J]. *西北植物学报*, 2003, (11): 2030–2038.  
Li S Q, Shao M A, Li Z Y, *et al.* Review of characteristics of wheat grain fill and factors to influence it[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, (11): 2030–2038.
- [31] 张文静, 江东国, 黄正来, 等. 氮肥施用对稻茬小麦冠层结构及产量、品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2018, 38(2): 164–174.  
Zhang W J, Jiang D G, Huang Z L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application on canopy structure traits, grain yield and quality of wheat after rice[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(2): 164–174.
- [32] 张耀兰, 张礼军, 杜世州, 等. 施氮水平对不同类型小麦产量和品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(4): 652–657.  
Zhang Y L, Zhang L J, Du S Z, *et al.* Effect of nitrogen on yield and quality of different types of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(4): 652–657.
- [33] 代新俊, 夏清, 杨珍平, 等. 氮肥后移对强筋小麦氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 289–294.  
Dai X J, Xia Q, Yang Z P, *et al.* Effects of postponing nitrogen application on accumulation and transport of nitrogen and yield and quality of grain in strong-gluten wheat[J]. *Wheat Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 289–294.
- [34] 周颖, 张立国, 顾万荣, 等. 黑龙江省不同熟期玉米品种灌浆脱水及产量品质特性[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(8): 1173–1182.  
Zhou Y, Zhang L G, Gu W R, *et al.* Characteristics of grain filling, dehydration, yield and quality in different maturing-type maize in Heilongjiang Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2017, 26(8): 1173–1182.
- [35] 张立国, 张林, 管春云, 等. 玉米生理成熟后籽粒脱水速率与品质性状的相关分析[J]. *东北农业大学学报*, 2007, 38(5): 582–585.  
Zhang L G, Zhang L, Guan C Y, *et al.* Correlation analysis on dry-down rate and quality traits in corn after physiological maturity[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(5): 582–585.