

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.01.009

张雅婷, 路梦莉, 余梦奇, 等. 种植密度对沿淮玉米籽粒淀粉粒度分布与糊化特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(1): 66-76.

ZHANG Y T, LU M L, YU M Q, et al. Effects of planting density on starch particle size distribution and pasting properties of maize kernels along huaihe river[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(1): 66-76.

# 种植密度对沿淮玉米籽粒淀粉粒度分布与糊化特性的影响

张雅婷, 路梦莉, 余梦奇, 程嘉慧, 李文阳✉

(安徽科技学院 农学院, 安徽 凤阳 233100)

**摘要:** 分析不同种植密度对沿淮玉米籽粒中淀粉粒度分布与糊化特性的影响。以豫单 132、京科 968 等 13 个玉米杂交品种为材料, 设置 56 250 株/hm<sup>2</sup>、67 500 株/hm<sup>2</sup>、77 250 株/hm<sup>2</sup> 等 3 个种植密度, 分析不同种植密度对玉米籽粒品质、淀粉粒度分布与糊化特性的影响。结果表明, 在种植密度 56 250~77 250 株/hm<sup>2</sup> 范围内, 随着种植密度的增加, 玉米籽粒的蛋白质和脂肪含量呈递减趋势, 淀粉含量呈递增趋势, 即淀粉/蛋白质比率增加。玉米籽粒大型淀粉粒体积和表面积百分比显著增加, 小型淀粉粒却显著降低。增加种植密度后玉米淀粉的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度和稀懈值等黏度参数均呈显著升高。相关分析表明, 玉米籽粒峰值黏度等黏度参数与小、大型淀粉粒体积百分比呈正相关, 与中型淀粉粒体积百分比呈显著或极显著负相关。说明种植密度影响玉米籽粒淀粉粒度分布、淀粉黏度参数和组分含量。

**关键词:** 玉米淀粉; 种植密度; 粒度分布; 糊化特性

中图分类号: TS201.1; S513 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)01-0066-11

## Effects of Planting Density on Starch Particle Size Distribution and Pasting Properties of Maize Kernels along Huaihe River

ZHANG Ya-ting, LU Meng-li, YU Meng-qi, CHENG Jia-hui, LI Wen-yang✉

(College of Agronomy, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China)

**Abstract:** The effects of different planting densities on the particle size distribution and pasting properties of starch granules in maize grains along the Huaihe River were analyzed. Taking 13 maize hybrids such as Yudan 132 and Jingke 968 as materials, three planting densities of 56 250 plants/hm<sup>2</sup>, 67 500 plants/hm<sup>2</sup> and 77 250 plants/hm<sup>2</sup> were set up. The effects of different planting densities on grain quality, starch particle size distribution and gelatinization characteristics of maize in the region along the Huaihe River were analyzed. The results indicated that the protein and fat content of maize grain decreased with the increase of planting density in the range of 56 250 ~ 77 250 plants/hm<sup>2</sup>. The starch content showed an increasing trend, which means, the starch/protein ratio increased. The volume and surface area percentage of large starch granules in

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 安徽高校自然科学研究重大项目 (KJ2020ZD010); 安徽省财政农业科技成果转化应用项目 (2022ZH015)

Supported by: Anhui University Natural Science Research Major Project (No. KJ2020ZD010); Anhui Provincial Financial Agricultural Science and Technology Achievements Transformation and Application Project (No. 2022ZH015)

作者简介: 张雅婷, 女, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为作物高产栽培生理生态。E-mail: 1532537436@qq.com

通讯作者: 李文阳, 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 研究方向为作物优质高产栽培。E-mail: liwy@ahstu.edu.cn

maize grains increased significantly, while the small starch granules decreased significantly. At the same time, it was found that the peak viscosity, trough viscosity, final viscosity and breakdown value of corn starch increased significantly after rising planting density. Relevant analysis showed that the viscosity parameters such as peak viscosity of corn kernels were positively correlated with the volume percentage of small and large starch granules. There was a significant or extremely significant negative correlation with the volume percentage of medium starch granules. It shows that planting density affects the starch particle size distribution starch viscosity parameters and chemical components of corn kernels.

**Key words:** maize starch; plant density; particle size distribution; pasting properties

玉米是世界上重要的粮食、经济和饲料作物之一，具有适应性强、应用范围广等特点。近年来，中国的玉米种植面积不断扩大，粮食总产量呈稳步上升趋势，对确保中国粮食安全起到重要作用<sup>[1-2]</sup>。增加种植密度能使玉米籽粒淀粉合成和积累发生变化，从而对玉米品质产生显著影响<sup>[3]</sup>。淀粉的积累量越多，玉米的淀粉含量就越高，进而影响其营养价值和口感。淀粉是玉米的主要组成部分，大约占整个籽粒的 70%<sup>[4]</sup>。在玉米籽粒胚乳中，淀粉通常呈颗粒状，其中淀粉粒的大小和分布是衡量玉米品质的重要性状之一<sup>[5]</sup>，而且淀粉粒度分布和黏度参数是决定其品质的重要指标。

决定籽粒品质的重要因素是玉米自身基因和外部环境栽培条件。王龙飞等<sup>[6]</sup>研究表明，玉米淀粉的含量、粒径和结构在干旱胁迫条件下的变化显著改变了淀粉品质。短期干旱胁迫有利于增加小麦中大淀粉颗粒的比例，降低糊化温度，增加峰值黏度、最终黏度<sup>[7]</sup>。Liu 等<sup>[8]</sup>研究发现，在限制灌溉的条件下，玉米蛋白质含量增加，淀粉含量降低，从而导致黏度参数显著降低，热焓值呈增加的趋势。适宜的种植密度能形成良好的空间系统，有利于提高玉米光合效能，合理构建群体结构，提高作物产量<sup>[9]</sup>，促进淀粉的积累和品质的提升。因此，研究适合于不同玉米品种的合理密植是保证其高产的关键。

目前，前人多集中于研究种植密度对玉米产量和籽粒品质方面的影响，而关于沿淮地区不同种植密度对玉米籽粒胚乳中淀粉粒度分布和糊化特性的研究则相对薄弱。本实验以 13 个玉米品种为供试材料，设置 3 个密度梯度，在此基础上，利用近红外分析仪测定玉米品质并进行相关性分析，用激光粒度分析仪测定淀粉粒粒度分布情况，

用黏度分析仪测定黏度参数，研究不同种植密度对玉米胚乳中淀粉粒度分布及糊化特性的调控效应，旨在为玉米栽培和品质调控提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验设计

实验于 2021 年 6-10 月在安徽科技学院种植园进行。选用豫单 132(YD132)、京科 968(JK968)、金赛 34(JS34)、甘玉 720(GY720)、隆平 206(LP206)、合联 1589(HL1589)、郑单 958(ZD958)、安科 985(AK985)、京科 999(JK999)、农华 803(NH803)、嘉禧 100(JX100)、裕丰 303(YF303)、奥玉 419(AY419)等 13 个玉米供试材料。

针对目前黄淮南片玉米种植区生产的种植密度，一般在 4 500 株左右(67 500 株/hm<sup>2</sup>)，为此本实验三个种植密度设置为：D1 生产种植密度偏低水平(56 250 株/hm<sup>2</sup>，株距 29.6 cm)、D2 生产种植密度水平(67 500 株/hm<sup>2</sup>，株距 24.7 cm)、D3 生产种植密度偏高水平(77 250 株/hm<sup>2</sup>，株距 21.6 cm)。每个小区种植 6 行，行长 5 m，行距 0.6 m，沟 0.5 m，实验田四周设保护行 2~3 行。采用随机区组排列，3 次重复。种植和田间管理方式同当地普通生产田。玉米于 2021 年 6 月 22 日播种，9 月 29 日收获，籽粒晒干并保存。

### 1.2 仪器设备与试剂

DA7200 近红外品质分析仪、Supper Master 3 快速黏度分析仪：瑞典波通公司；BT-9300SE 激光粒度分布仪：丹东百特仪器有限公司。

离心机、氯化钠(NaCl)、氢氧化钠(NaOH)、十二烷基硫酸钠(SDS)、丙酮、蒸馏水：安徽科技学院玉米研究中心实验室提供。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 玉米籽粒品质性状测定

用近红外品质分析仪测定玉米籽粒蛋白质、脂肪和淀粉含量等指标<sup>[10]</sup>。

#### 1.3.2 提取玉米淀粉粒

参照 PENG<sup>[11]</sup>等的做法。使用标记好的 50 mL 离心管, 取 10 粒成熟阶段的玉米籽粒放入其中, 加蒸馏水淹没, 浸泡 48 h 以上。待玉米种皮稍软时人工去皮、镊子去胚后, 用研杵研磨成均匀的浆液, 并用 200 目筛纱布过滤掉残渣。在 3 000 r/min 离心 10 min 后, 按顺序依次添加 2 mol/L NaCl、0.2% NaOH、0.2% 十二烷基硫酸钠(SDS), 以去除蛋白质和其他杂质。最后, 使用丙酮进行 3 次清洗, 待自然风干后储存于冰箱中。

#### 1.3.3 分析玉米淀粉粒径

为了准确分析玉米淀粉粒径, 使用激光粒度分布仪测试, 主要分析玉米胚乳中淀粉粒体积、表面积和数目的分布。点击自动测试, 检测光路正常, 根据计算机提示加入玉米淀粉样品, 当样品的遮光率达到 8% 以上即可自动检测。每个样

品重复 3 次。

#### 1.3.4 测定玉米淀粉糊化参数

采用快速黏度分析仪测定淀粉糊化特性。先用粉碎机磨粉, 再准确称取 3 g 玉米淀粉置于铝盒容器内, 加 25 mL 蒸馏水, 盖上透明塑料搅拌器。选定 Std1 程序测定。详细记录玉米样品的各项指标。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 DPS 7.05 作为数据处理工具, 对获得的数据进行二因素方差分析和多重比较, 用 origin 2021 对数据进行相关性分析并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米籽粒的品质性状

从表 1 可以看出, 玉米籽粒中蛋白质、脂肪和淀粉含量与种植密度显著相关。随着种植密度的增加, 蛋白质含量、脂肪含量下降, 淀粉含量显著升高。说明增加种植密度, 淀粉含量增加, 进而提高淀粉积累量。

表 1 种植密度对沿淮玉米籽粒品质性状的影响

Table 1 Effects of planting density on grain quality traits of maize along Huaihe River

品种	密度	蛋白质含量/%	脂肪含量/%	淀粉含量/%	淀粉/蛋白质
YD132	D1	7.66±0.12efghijklm	7.32±0.21defghi	72.99±1.88lmnop	9.54±0.39efghijklm
	D2	7.41±0.45hijklm	6.34±0.31lm	73.52±1.13klmno	9.94±0.69defghi
	D3	7.40±0.30ijklm	6.31±0.34m	75.87±0.24fghijkl	10.26±0.42cdefg
JK968	D1	7.77±0.22efghijk	7.67±0.74cd	72.11±2.58nopq	9.30±0.59hijklm
	D2	7.54±0.03ghijklm	7.62±0.10de	77.47±2.58bcdefghi	10.27±0.30cdefg
	D3	7.50±0.21hijklm	7.40±0.15defghi	78.01±1.85abcdefgh	10.41±0.17bcde
JS34	D1	9.91±1.18a	7.22±0.19defghij	71.29±0.99opqr	7.27±0.98p
	D2	7.71±0.40efghijkl	7.04±0.07efghijk	75.60±2.18ghijklm	9.82±0.73efghij
	D3	7.40±0.66ijklm	6.90±0.46hijklm	76.81±1.73defghij	10.43±0.93abcde
GY720	D1	8.24±0.07bcde	7.43±0.32defghi	75.35±1.74hijklm	9.14±0.20ijklm
	D2	8.22±0.15cdef	6.97±0.78fghijk	76.13±0.70fghijk	9.27±0.23hijklm
	D3	8.22±0.13cdef	6.35±0.43lm	76.53±1.01efghijk	9.31±0.10hijklm
LP206	D1	8.25±0.09bcde	6.96±0.11ghijk	80.03±0.91abc	9.71±0.17efghijk
	D2	8.25±0.06bcde	6.85±0.24ijklm	80.25±2.89ab	9.73±0.30efghijk
	D3	8.15±0.46defg	6.36±0.33lm	80.67±0.26a	9.92±0.55defghi
HL1589	D1	8.88±0.18b	8.87±0.09a	68.11±1.33s	7.67±0.31p
	D2	8.88±0.23b	8.79±0.09ab	68.90±1.08rs	7.76±0.17op
	D3	8.85±0.20bc	8.60±0.22ab	70.08±0.52pqrs	7.92±0.18nop
ZD958	D1	7.15±0.02klm	7.48±0.50defgh	78.81±0.66abcdef	11.02±0.07abc
	D2	7.08±0.04lm	7.48±0.36defgh	79.24±1.66abcde	11.19±0.19ab

续表 1

品种	密度	蛋白质含量/%	脂肪含量/%	淀粉含量/%	淀粉/蛋白质
AK985	D3	7.05±0.27m	7.46±0.39defgh	79.62±2.58abcd	11.32±0.82a
	D1	8.01±0.11defghi	8.70±0.70ab	69.84±2.52qrs	8.72±0.42lmn
	D2	7.92±0.14defghij	8.36±0.37ab	71.06±2.31opqrs	8.97±0.19jklm
JK999	D3	7.75±0.48efghijk	8.26±0.30bc	72.60±1.11mnopq	9.39±0.47ghijklm
	D1	8.28±0.10bcde	7.39±0.04defghi	73.85±0.99jklmno	8.92±0.21jklm
	D2	7.54±0.46ghijklm	7.23±0.65defghij	77.01±2.21cdefghi	10.23±0.44cdefg
NH803	D3	7.34±1.09jklm	7.21±0.34defghij	77.70±1.66abcdefgh	10.75±1.66abcd
	D1	7.96±0.40defghij	7.28±0.25defghij	76.60±2.01defghij	9.65±0.72efghijk
	D2	7.72±0.33efghijkl	6.91±0.26hijkl	77.68±3.46abcdefgh	10.07±0.40defgh
JX100	D3	7.59±0.16fghijklm	6.31±0.23lm	78.27±2.24abcdefgh	10.31±0.12bcdef
	D1	8.04±0.30defghi	7.48±0.31defgh	75.68±3.12ghijkl	9.42±0.63fghijklm
	D2	8.00±0.51defghi	7.18±0.47defghij	77.93±3.09abcdefgh	9.78±0.92efghijk
YF303	D3	7.83±0.82defghij	6.45±0.25klm	78.41±1.30abcdefg	10.09±1.07defgh
	D1	8.44±0.26bcd	7.74±0.57cd	72.87±3.16lmnopq	8.64±0.37mno
	D2	8.25±0.25bcde	7.57±0.38def	73.50±1.94klmno	8.92±0.24klm
AY419	D3	8.22±0.08cdef	7.52±0.21defg	74.53±0.55ijklmn	9.07±0.15ijklm
	D1	8.16±0.18defg	7.20±0.17defghij	75.34±1.55hijklm	9.23±0.13hijklm
	D2	8.15±0.14defg	6.97±0.17ghijk	75.54±1.47ghijklm	9.27±0.33hijklm
F 值	D3	8.05±0.18defgh	6.71±0.24jklm	77.27±1.69bcdefghi	9.60±0.04efghijkl
	D	11.50**	20.57**	19.00**	21.23**
	C	11.63**	27.75**	24.31**	18.23**
D×C	2.58**	1.00	0.85	1.98*	

注：表中数据为平均值±标准差；D：密度；C：品种；D×C：密度×品种；同列数据后的小写字母表示处理间差异显著性（ $P<0.05$ ）。F 值中\*和\*\*分别表示处理间在 0.05 和 0.01 水平差异显著。测试取 3 次平均值。下表同。

Note: The data in the table are mean ± standard deviation; D: Density; C: Cultivars; D×C: Density×Cultivars The lowercase letters after the same column data indicate the significance of the difference between the treatments ( $P<0.05$ ). In the F value, \* and \*\* indicate that the treatments are significantly different at the 0.05 and 0.01 level respectively. The test took three averages. The following table is the same.

## 2.2 玉米籽粒淀粉粒体积分布

本实验以淀粉粒的体积分布为依据，将淀粉粒分为小型（ $<3\ \mu\text{m}$ ）、中型（ $3\sim 18\ \mu\text{m}$ ）和大型（ $>18\ \mu\text{m}$ ）三个类型，并分别对其进行分析和比较。

由表 2 可以看出，不同种植密度条件下淀粉粒平均粒径在  $15.33\sim 19.59\ \mu\text{m}$ 。玉米小型、中型和大型淀粉粒的体积所占比例分别为  $4.57\%\sim$

$7.84\%$ 、 $43.39\%\sim 57.44\%$ 和  $35.65\%\sim 49.54\%$ ，其中小型、中型和大型淀粉粒体积分布数目最多的分别是金赛 34、豫单 132 和京科 999。研究表明，在玉米淀粉粒体积分布中，按其贡献率大小的排序为中型淀粉粒>大型淀粉粒>小型淀粉粒。随着种植密度的增加，小型和中型淀粉粒的体积百分比明显下降，而大型淀粉粒的体积百分比和淀粉

表 2 种植密度对沿淮玉米籽粒淀粉粒体积分布的影响

Table 2 Effects of planting density on volume distribution of starch granules in maize kernels along Huaihe River

品种	密度	淀粉粒粒径/%			体积加权平均粒径/ $\mu\text{m}$
		$<3\ \mu\text{m}$	$3\sim 18\ \mu\text{m}$	$>18\ \mu\text{m}$	
YD132	D1	6.91±0.11cdefghij	57.44±0.76a	35.65±0.82s	16.28±0.17opq
	D2	6.84±0.04defghijkl	56.87±0.41ab	36.29±0.43qrs	16.37±0.44opq
	D3	6.78±0.19fghijklm	56.10±0.88abc	37.12±0.84pqr	16.62±0.13lmnopq
JK968	D1	4.86±0.07q	53.46±1.68defghijk	41.68±1.75efgh	17.10±0.31ijkl
	D2	4.75±0.20q	53.43±2.25defghijk	41.82±2.43defg	17.13±0.42ijkl
	D3	4.68±0.11q	52.73±2.21fghijk	42.59±2.27cdef	17.37±0.36ghi

续表 2

品种	密度	淀粉粒粒径/%			体积加权平均粒径/ $\mu\text{m}$
		<3 $\mu\text{m}$	3~18 $\mu\text{m}$	>18 $\mu\text{m}$	
JS34	D1	7.84±0.06a	56.00±1.60abcd	36.17±1.64rs	18.05±0.24def
	D2	7.57±0.37ab	54.95±1.59abcdefg	37.49±1.96opqrs	18.54±0.11cd
	D3	7.22±0.36bc	54.33±2.46bcdefgh	38.45±2.69jklmnopqr	18.69±0.23bc
GY720	D1	7.04±0.37cdefgh	52.10±0.70hijk	40.86±0.97fghijk	19.19±0.23ab
	D2	6.70±0.09ghijklmn	51.91±0.41hijk	41.39±0.44efghi	19.28±0.36a
	D3	6.49±0.09lmno	51.71±1.23ijk	41.80±1.16efgh	19.59±0.32a
LP206	D1	6.87±0.45cdefghijk	52.86±1.52efghijk	40.28±1.96fghijklmn	17.16±0.38ijkl
	D2	6.83±0.24defghijkl	52.58±2.29fghijk	40.59±2.50fghijklm	17.26±0.39hij
	D3	6.68±0.09hijklmno	51.72±1.44ijk	41.59±1.40efgh	17.51±0.45fghi
HL1589	D1	7.07±0.21cdefg	48.13±0.04l	44.81±0.19bc	15.33±0.31s
	D2	7.05±0.15cdefgh	47.80±0.96l	45.15±1.11bc	15.65±0.12rs
	D3	6.98±0.09cdefghi	47.14±1.41l	45.88±1.47b	15.69±0.27rs
ZD958	D1	6.90±0.08cdefghij	55.37±0.67abcde	37.73±0.74nopqrs	16.12±0.58qr
	D2	6.80±0.02efghijkl	55.15±0.59abcdef	38.06±0.59mnopqrs	16.26±0.42pq
	D3	6.76±0.04fghijklm	54.85±0.79abcdefg	38.39±0.83klmnopqr	16.49±0.59nopq
AK985	D1	5.24±0.56p	54.01±1.18cdefghi	40.75±1.74fghijklm	16.26±0.47pq
	D2	4.82±0.16q	51.19±1.49jk	43.98±1.64bcde	16.51±0.35mnopq
	D3	4.57±0.19q	50.93±1.98k	44.50±2.16bcd	16.81±0.26jklmno
JK999	D1	7.09±0.08cdef	54.77±1.81bcdefg	38.14±1.78lmnopqrs	17.05±0.09ijklm
	D2	7.09±0.28cdef	52.12±2.11hijk	40.79±2.35fghijkl	17.33±0.23ghij
	D3	7.07±0.12cdefg	43.39±1.72m	49.54±1.62a	17.49±0.13ghi
NH803	D1	7.19±0.15cd	54.14±1.08cdefghi	38.67±1.03jklmnopqr	16.54±0.34mnopq
	D2	7.16±0.12cde	53.72±3.45cdefghij	39.12±3.41hijklmnop	16.69±0.39klmnop
	D3	7.07±0.05cdefg	51.21±0.95jk	41.72±0.92efgh	16.98±0.06ijklmn
JX100	D1	6.52±0.44klmno	56.28±0.64abc	37.20±0.41pqrs	18.19±0.23cde
	D2	5.41±0.45p	55.41±0.74abcde	39.17±0.93ghijklmnop	18.44±0.31cd
	D3	4.86±0.07q	52.46±0.88ghijk	42.68±0.83cdef	18.59±0.52cd
YF303	D1	6.64±0.03ijklmno	54.47±0.19bcdefgh	38.89±0.17ijklmnopq	17.19±0.27hijk
	D2	6.53±0.28jklmno	53.46±1.68defghijk	40.01±1.96fghijklmno	17.26±0.24hij
	D3	6.32±0.26o	52.58±3.34fghijk	41.10±3.19fghij	17.32±0.48ghij
AY419	D1	6.49±0.41lmno	54.10±1.65cdefghi	39.42±1.51ghijklmnop	17.48±0.23ghi
	D2	6.41±0.35mno	53.43±2.25defghijk	40.16±1.93fghijklmno	17.73±0.27efgh
	D3	6.35±0.22no	51.00±1.43k	42.65±1.39cdef	17.81±0.24efg
F 值	D	24.94**	25.40**	30.62**	12.87**
	C	124.84**	19.33**	19.74**	83.42**
	D×C	2.88**	2.82**	2.66**	0.18

粒的平均粒径则有明显增加的趋势。

### 2.3 玉米籽粒淀粉粒表面积分布

由表 3 可以看出,不同密度与品种间大、中、小淀粉粒表面积分布呈极显著性差异。不同种植密度条件下淀粉粒表面积平均粒径在 8.17~10.41  $\mu\text{m}$ 。玉米小型、中型和大型淀粉粒表面积百分比分别

占 39.95%~51.70%、33.08%~43.49%和 11.85%~18.11%。因此,在淀粉粒表面积分布中,小型淀粉粒的贡献率最高,而大型淀粉粒的贡献率最低。中型和小型淀粉粒所占比例没有明显差异。随着种植密度的增加,13 个品种的玉米籽粒中型淀粉粒表面积百分比呈先增加后下降的趋势;

表 3 种植密度对沿淮玉米籽粒淀粉粒表面积分布的影响

Table 3 Effects of planting density on starch granule surface area distribution of maize grain along Huaihe River

品种	密度	淀粉粒粒径/%			表面积加权平均粒径/ $\mu\text{m}$
		<3 $\mu\text{m}$	3~18 $\mu\text{m}$	>18 $\mu\text{m}$	
YD132	D1	43.90±2.55efghijkl	41.85±2.43abcde	14.25±0.12ghijkl	8.47±0.06ghij
	D2	44.83±0.33efghijk	40.79±0.19abcdef	14.38±0.18ghijk	8.50±0.13ghij
	D3	44.50±1.01efghijkl	40.76±0.41abcdef	14.75±0.67fghi	9.67±0.91abcdef
JK968	D1	40.05±0.41mn	42.57±0.84ab	17.38±0.45abc	9.88±0.87abcde
	D2	39.95±2.53n	42.06±1.93abcd	17.99±0.63ab	10.20±0.14abc
	D3	42.05±3.72jklmn	39.84±2.85bcdefg	18.11±0.93a	10.41±0.20a
JS34	D1	43.17±2.09hijklmn	42.60±2.00ab	14.23±0.08ghijkl	8.17±0.21j
	D2	43.92±1.69efghijkl	41.57±1.90abcdef	14.52±0.62ghij	9.14±0.91defghij
	D3	50.56±4.97ab	34.84±5.05ij	14.60±0.32ghij	9.63±1.01abcdef
GY720	D1	44.18±1.61efghijkl	39.18±2.06defgh	16.63±0.46cd	8.66±0.33fghij
	D2	45.92±1.29defgh	37.41±1.27ghi	16.68±0.76cd	9.33±0.85bcdefgh
	D3	50.10±3.81abc	33.08±3.10j	16.82±0.72cd	10.30±1.09ab
LP206	D1	45.23±3.78defghij	40.96±3.22abcdef	13.81±0.68ijklm	8.67±0.32fghij
	D2	45.42±2.41defghi	40.39±2.74bcdefg	14.20±0.35ghijkl	9.09±0.86defghij
	D3	48.30±3.71bcd	36.62±4.10hi	15.08±0.63efg	9.81±0.97abcde
HL1589	D1	45.12±0.28defghijk	41.78±0.94abcde	13.10±1.07mn	8.34±0.16hij
	D2	45.40±0.34defghi	40.67±0.51abcdef	13.92±0.59hijklm	8.44±0.26hij
	D3	45.20±0.64defghij	40.57±1.78abcdef	14.23±1.27ghijkl	8.46±0.10hij
ZD958	D1	43.24±0.74hijklm	43.49±1.85a	13.27±1.34lmn	8.97±0.98efghij
	D2	43.62±1.02ghijkl	43.06±1.36a	13.32±0.43klmn	9.20±0.82cdefghi
	D3	44.92±2.97efghijk	41.50±2.78abcdef	13.58±0.64jklmn	9.64±0.91abcdef
AK985	D1	44.99±1.80efghijk	43.15±1.65a	11.85±0.27p	9.48±0.88abcdefg
	D2	45.50±0.87defghi	42.52±0.86ab	11.98±0.25op	9.93±0.78abcde
	D3	46.82±2.75defg	41.20±3.03bcdef	11.99±0.29op	10.21±0.23ab
JK999	D1	51.64±1.65a	35.38±1.26ij	12.98±0.39mno	8.45±0.19hij
	D2	51.70±1.71a	35.02±1.31ij	13.28±0.50lmn	8.50±0.12ghij
	D3	51.45±1.77ab	34.72±1.11ij	13.83±0.68ijklm	8.57±0.22ghij
NH803	D1	45.75±1.33defgh	39.63±0.74bcdefgh	14.63±0.59ghij	8.49±0.21ghij
	D2	46.14±1.63defgh	38.94±1.59efgh	14.92±0.12efgh	8.75±0.85fghij
	D3	44.77±1.03efghijk	38.61±0.39fgh	16.62±1.08cd	9.06±0.51defghij
JX100	D1	47.01±1.08cde	40.44±0.82abcdefg	12.56±0.34nop	8.57±0.28ghij
	D2	46.89±0.64cdef	39.68±0.39bcdefgh	13.43±0.44klmn	8.70±0.53fghij
	D3	46.75±0.29defg	39.27±0.51cdefgh	13.98±0.30hijklm	8.78±0.77fghij
YF303	D1	41.89±0.66klmn	42.31±0.41abc	15.80±0.70def	8.29±0.38ij
	D2	42.35±0.40ijklmn	41.81±0.45abcde	15.84±0.19de	8.79±0.31fghij
	D3	41.36±1.38lmn	41.68±0.57abcdef	16.96±1.34bc	9.15±0.86defghij
AY419	D1	44.12±0.42efghijkl	42.55±0.76ab	13.33±0.36klmn	9.88±0.40abcde
	D2	43.68±0.98fghijkl	42.04±0.38abcde	14.28±0.61ghijkl	10.07±0.32abcd
	D3	44.06±0.44efghijkl	41.55±0.29abcdef	14.38±0.69ghijk	10.31±0.06ab
F 值	D	6.60**	16.47**	16.55**	14.18**
	C	15.60**	12.77**	53.70**	7.98**
	D×C	1.50	1.30	0.76	0.57

小型和大型淀粉粒的表面积百分比增加；淀粉粒的平均粒径也明显增加。

#### 2.4 玉米籽粒淀粉粒数目分布

由表 4 可以看出，不同种植密度与品种间淀粉

粒数目分布呈显著或极显著性差异。淀粉粒大体都是由小型淀粉粒构成，占总数目的 98.00%~98.62%；中型淀粉粒组和大型淀粉粒组所占的比例较小，分别为 1.31%~1.88%、0.04%~0.15%，

表 4 种植密度对沿淮玉米籽粒淀粉粒数目分布的影响

Table 4 Effects of planting density on starch granule number distribution of maize grain along Huaihe River

品种	密度	淀粉粒粒径/%		
		<3 μm	3~18 μm	>18 μm
YD132	D1	98.48±0.04bcdefg	1.44±0.04efghij	0.08±0.00fghijklm
	D2	98.47±0.06cdefg	1.44±0.06efghij	0.09±0.01fghijkl
	D3	98.49±0.04bcdefg	1.41±0.02efghijk	0.10±0.03defghij
JK968	D1	98.42±0.09defg	1.45±0.06efghi	0.13±0.04abcd
	D2	98.41±0.04efgh	1.44±0.04efghij	0.14±0.01ab
	D3	98.42±0.08defg	1.43±0.08efghij	0.15±0.01a
JS34	D1	98.52±0.03abcdef	1.43±0.02efghij	0.05±0.02mn
	D2	98.48±0.08bcdefg	1.42±0.08efghijk	0.10±0.03defgh
	D3	98.47±0.09cdefg	1.40±0.07efghijk	0.12±0.04abcde
GY720	D1	98.43±0.07defg	1.48±0.08efgh	0.10±0.01defghij
	D2	98.43±0.03defg	1.47±0.02efgh	0.10±0.01defghij
	D3	98.47±0.04cdefg	1.39±0.08hijk	0.15±0.04a
LP206	D1	98.50±0.11abcdef	1.42±0.09efghijk	0.08±0.03fghijklm
	D2	98.52±0.19abcdef	1.38±0.15hijk	0.10±0.04defghi
	D3	98.55±0.05abcd	1.35±0.03ijk	0.10±0.03defghij
HL1589	D1	98.48±0.09bcdefg	1.45±0.09efghi	0.07±0.01ghijklmn
	D2	98.49±0.03abcdefg	1.43±0.03efghij	0.07±0.01ghijklmn
	D3	98.54±0.03abcde	1.38±0.03hijk	0.08±0.00fghijklm
ZD958	D1	98.19±0.13i	1.71±0.11bc	0.10±0.03defghi
	D2	98.20±0.11i	1.69±0.09c	0.11±0.03bcdef
	D3	98.29±0.11hi	1.61±0.09cd	0.11±0.03cdefg
AK985	D1	98.00±0.17j	1.88±0.14a	0.12±0.03abcde
	D2	98.04±0.07j	1.82±0.07ab	0.14±0.01ab
	D3	98.19±0.20i	1.67±0.18c	0.14±0.03abc
JK999	D1	98.39±0.02fgh	1.52±0.04de	0.09±0.02efghijk
	D2	98.39±0.05gh	1.51±0.03def	0.10±0.04defghi
	D3	98.42±0.02efgh	1.47±0.03efgh	0.11±0.03bcdef
NH803	D1	98.46±0.06defg	1.48±0.06efgh	0.06±0.01klmn
	D2	98.55±0.03abcd	1.39±0.04hijk	0.06±0.01jklmn
	D3	98.62±0.03a	1.31±0.03k	0.07±0.00hijklmn
JX100	D1	98.55±0.07abcd	1.40±0.07fghijk	0.05±0.01lmn
	D2	98.54±0.05abcde	1.40±0.06efghijk	0.06±0.01klmn
	D3	98.52±0.08abcdefg	1.39±0.08ghijk	0.09±0.01efghijk
YF303	D1	98.51±0.07abcdefg	1.44±0.08efghij	0.05±0.01mn
	D2	98.60±0.06abc	1.35±0.06ijk	0.05±0.01lmn
	D3	98.61±0.05ab	1.33±0.06jk	0.07±0.02ijklmn
AY419	D1	98.45±0.01defg	1.51±0.03defg	0.04±0.02n

续表 4

品种	密度	淀粉粒粒径/%		
		<3 μm	3~18 μm	>18 μm
F 值	D2	98.49±0.05bcdefg	1.47±0.05efgh	0.04±0.00n
	D3	98.46±0.03defg	1.48±0.03efgh	0.05±0.01lmn
	D	4.07*	10.52**	11.22**
	C	26.34**	25.09**	15.53**
	D×C	0.65	0.63	0.82

其中小型、中型和大型淀粉粒分别以金赛 34、安科 985 和农华 803 最高。可见，在成熟阶段的玉米籽粒胚乳中绝大多数是由小型淀粉粒构成，而种植密度对 13 个玉米品种的淀粉粒数目分布与种植密度关系不大。

### 2.5 淀粉的糊化特性

由表 5 可以看出，不同品种间玉米籽粒淀粉

的黏度参数存在极显著差异。玉米淀粉的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度和回升值等黏度参数是随着种植密度的增加而增加。结果表明，种植密度的增加对淀粉峰值黏度等黏度参数的影响较大，这一方面有利于提高淀粉糊化的稳定性，另一方面也会影响到淀粉糊化的最终质量。因此，在实际种植过程中，应合理控制种植密度，以确

表 5 种植密度对沿淮玉米籽粒淀粉糊化特性的影响

Table 5 Effects of planting density on pasting properties of starch granules in maize grain along Huaihe River

品种	密度	峰值黏度/cP	低谷黏度/cP	最终黏度/cP	稀懈值/cP	回生值/cP
YD132	D1	921.33±18.82qr	559.00±16.46w	1 200.67±30.01s	362.33±35.28cde	641.67±15.18r
	D2	925.00±35.37qr	596.00±11.36v	2 004.67±59.52n	329.00±26.89cdef	1 408.67±49.08i
	D3	1 036.33±17.47mno	668.67±12.22tu	2 104.00±47.03lm	367.67±16.04bcd	1 435.33±35.23i
JK968	D1	889.67±13.50r	707.33±8.14rs	1 794.33±21.36o	182.33±6.66ijklmno	1 087.00±13.75lm
	D2	895.33±21.96r	730.00±3.61qr	1 837.67±26.58o	165.33±25.4lmno	1 107.67±23.18l
	D3	927±15.87qr	732.33±52.78qr	1 982.00±24.27n	194.67±63.32ghijklmno	1 249.67±65.16jk
JS34	D1	1 047.67±45.08lmn	843.67±23.12klmn	1 625.67±53.15p	204.00±30.79ghijklmno	782.00±34.04q
	D2	1 136.00±82.44hijk	893.33±39.55hij	2 174.67±87.83kl	242.67±43.68fghijklmno	1 281.33±50.64jk
	D3	1 139.00±76.50hijk	930.33±34.96defg	2 240.00±99.69jk	208.67±107.80ghijklmno	1 309.67±134.66j
GY720	D1	1 220.33±5.13fg	861.67±53.59jkl	2 624.00±19.16efg	358.67±58.62cdef	1 762.33±65.59de
	D2	1 239.33±48.23ef	905.00±9.64ghi	2 668.67±52.78def	334.33±57.74cdef	1 763.67±43.15de
	D3	1 270.33±16.04def	930.33±43.47defg	2 683.33±88.29de	340.00±42.33cdef	1 753.00±87.61de
LP206	D1	962.00±43.30pq	651.33±6.66u	1 379.67±16.44r	310.67±49.94cdefg	728.33±12.66q
	D2	976.67±17.24opq	675.33±5.03stu	1 437.33±26.31r	301.33±14.05cdefgh	762.00±21.93q
	D3	998.33±11.85nop	700.00±1.00rst	1 646.33±8.08p	298.33±11.93cdefghi	946.33±7.77op
HL1589	D1	1 296.67±46.58cde	938.67±25.54cdefg	2 248.00±55.38jk	358.00±31.19cdef	1 309.33±33.53j
	D2	1 336.00±17.69bcd	943.00±1.73cdef	2 789.67±9.61bc	393.00±18.03bc	1 846.67±10.02bc
	D3	1 341.67±26.73bc	970.67±12.50c	2 893.33±91.90a	371.00±31.00bcd	1 922.67±91.31a
ZD958	D1	1 147.67±38.76hij	857.33±16.01jklm	1 842.33±8.14o	290.33±51.38cdefghijk	985.00±17.32no
	D2	1 149.00±49.57hi	876.00±11.53hijk	2 407.67±11.50i	273.00±53.23defghijkl	1 531.67±3.21h
	D3	1 414.00±9.64a	889.67±5.77hij	2 525.00±28.58h	524.33±349.53a	1 635.33±34.36fg
AK985	D1	983.67±9.87nopq	733.67±10.02qr	1 791.33±24.50o	250.00±3.00efghijklmn	1 057.67±15.28lmn
	D2	1 166.33±33.98gh	884.33±9.50hij	2 096.00±17.58m	282.00±24.76cdefghijkl	1 211.67±9.45k
	D3	1 167.67±20.53gh	871.00±10.39ijk	2 122.67±61.46lm	296.67±11.02cdefghij	1 251.67±53.53jk
JK999	D1	1 105.67±8.50hijkl	831.33±8.62lmn	2 404.67±29.54i	274.33±1.53defghijkl	1 573.33±33.17gh
	D2	1 139.67±87.21hijk	858.33±18.15jkl	2 559.67±50.80gh	281.33±103.64cdefghijkl	1 701.33±32.65ef
	D3	1 392.67±9.81ab	909.33±2.52efgh	2 563.00±20.78gh	483.33±7.57ab	1 653.67±18.82f



续表 5

品种	密度	峰值黏度/cP	低谷黏度/cP	最终黏度/cP	稀懈值/cP	回生值/cP
NH803	D1	1 329.33±4.04bcd	1 135.67±23.80b	2 161.00±43.92lm	193.67±27.61hijklmno	1 025.33±59.20mn
	D2	1 337.00±15.13bc	1 156.33±55.95ab	2 692.33±17.04de	180.67±65.55jklmno	1 536.00±43.31h
	D3	1 440.67±38.94a	1 182.00±7.00a	2 737.33±32.75cd	258.67±34.08defghijkl	1 555.33±27.54h
JX100	D1	1 074.67±49.94klm	818.67±14.19no	1 945.67±48.00n	256.00±58.03defghijklm	1 127.00±36.76l
	D2	1 166.67±82.95gh	821.33±10.02mn	2 600.33±25.54fgh	345.33±75.92cdef	1 779.00±21.93cd
	D3	1 292.00±21.63cde	944.00±16.52cde	2 842.00±8.72ab	348.00±6.24cdef	1 898.00±14.11ab
YF303	D1	955.67±19.40pqr	753.33±17.93pq	1 542.67±41.79q	202.33±1.53ghijklmno	789.33±25.70q
	D2	984.33±28.36nopq	783.33±27.54op	1 658.33±64.73p	201.00±1.00ghijklmno	875.00±37.24p
	D3	1 082.67±59.53ijklm	954.67±17.62cd	2 259.00±36.35j	128.00±45.90o	1 304.33±20.55j
AY419	D1	1 007.67±24.11nop	873.33±13.65hijk	2 294.67±52.01j	134.33±33.56no	1 421.33±61.65i
	D2	1 082.33±26.39jklm	906.33±6.66fghi	2 547.67±52.29h	176.00±23.90klmno	1 641.33±45.76fg
	D3	1 084.67±82.57ijklm	944.33±9.29cde	2 711.33±66.64d	140.33±91.52mno	1 767.00±59.56de
F 值	D	96.13**	127.42**	1 163.88**	4.20*	886.55**
	C	113.46**	319.99**	616.62**	11.23**	390.06**
	D×C	5.55**	6.32**	39.18**	1.73*	38.15**

保淀粉糊化的稳定性。

## 2.6 相关性分析

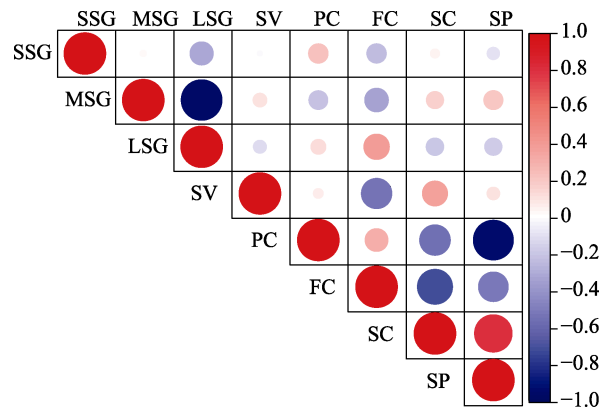
相关分析表明，玉米籽粒中脂肪含量与大型淀粉粒体积百分比和蛋白质含量之间呈显著正相关，而与淀粉体积平均粒径呈极显著负相关。因此，玉米籽粒中脂肪含量和蛋白质含量对大型淀粉粒的影响较大，对淀粉体积平均粒径的影响较小。淀粉平均粒径与淀粉含量呈显著正相关。淀粉含量与蛋白质和脂肪含量呈极显著负相关。结果表明，与小型、中型淀粉粒体积分布相比，玉米籽粒大型淀粉粒的脂肪含量较高（图 1）。

玉米籽粒峰值、低谷和最终黏度以及稀懈值都与小型淀粉粒体积百分比呈正相关，与中型淀粉粒体积百分比呈显著或极显著负相关。玉米籽粒大型淀粉粒体积百分比与峰值黏度、最终黏度和回升值呈显著或极显著正相关，与低谷黏度、稀懈值呈正相关。玉米籽粒淀粉粒体积平均粒径与峰值黏度、稀懈值呈负相关，与低谷黏度、最终黏度和回升值呈正相关。结果表明，与大型、小型淀粉粒体积分布相比，玉米籽粒中型淀粉粒的峰值黏度等糊化参数较高（图 2）。

## 3 讨论

### 3.1 种植密度对沿淮玉米籽粒产量与品质的影响

淀粉、蛋白质和粗脂肪都是评价玉米品质的



注：SSG，小型淀粉粒体积百分比；MSG，中型淀粉粒体积百分比；LSG，大型淀粉粒体积百分比；SV，淀粉体积平均粒径；PC，蛋白质含量；FC，脂肪含量；SC，淀粉含量；SP，淀粉/蛋白质比值；PV，峰值黏度；HV，低谷黏度；FV，最终黏度；BV，稀懈值，下同。

Note: SSG, The volume percentage of small starch granules; MSG, The volume percentage of medium starch granules; LSG, The volume percentage of large starch granules; SV, Starch volume; PC, Protein content; FC, Fat content; SC, Starch content; SP, Starch / protein ratio; PV, Peak viscosity; HV, Hold viscosity; FV, Final viscosity; BV, Breakdown viscosity. Same as below.

图 1 淀粉粒体积分布与玉米品质之间的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis between starch granule volume distribution and maize quality

重要指标。种植密度是影响作物生长和营养品质的主要栽培措施之一。有相关研究发现，在高、中、低三种不同的种植密度下，高种植密度下的群体数量大，个体间的竞争相当激烈，严重影响作物的生长发育，使得合成的淀粉减少；低种植密度下，个体生长空间竞争小。由于群体数量少，干物质量较少，最终合成的淀粉较少<sup>[12]</sup>。本研究

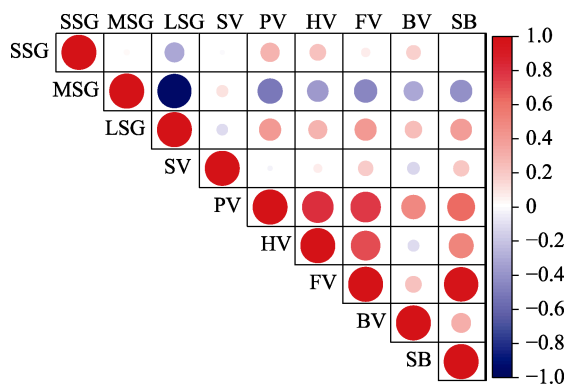


图 2 淀粉粒体积分布与黏度参数之间的相关性分析  
 Fig.2 Correlation analysis between starch granule volume distribution and viscosity parameters

结果表明, 在一定的种植密度范围内, 玉米粒的蛋白质和脂肪含量趋于减少, 而淀粉含量趋于增加, 与杨耿斌等<sup>[13]</sup>研究一致。董伟欣等<sup>[14]</sup>研究表明, 蛋白质、脂肪和淀粉的含量在不同种植密度条件下没有达到显著水平, 而且不同品种之间的质量特性呈下降趋势。这与前人的研究结果不同, 可能受种植密度、气候、基因等因素的影响。

### 3.2 种植密度对沿淮玉米籽粒淀粉粒粒度分布的影响

淀粉是以淀粉颗粒的形态存在的, 其形成过程包括谷类作物个体体积的增加和数量的增多<sup>[15]</sup>, 由此来实现淀粉的积累。在对玉米淀粉粒的粒度分布特征的研究中, 张丽等<sup>[15]</sup>以 2  $\mu\text{m}$  和 15  $\mu\text{m}$  为分界点, 将玉米淀粉粒划分为小、中、大三类。根据体积分布特性角度出发, 本实验以 3  $\mu\text{m}$  的低谷值和 18  $\mu\text{m}$  的峰值作为淀粉粒体积分布的界限, 将玉米淀粉粒分为小型 (<3  $\mu\text{m}$ )、中型 (3~18  $\mu\text{m}$ ) 和大型 (>18  $\mu\text{m}$ ) 三种类型。这与以前关于玉米粒径划分的结果存在分歧, 其原因可能在于采用不同的离心转速或离心时间来分离淀粉, 以及采用不同的过滤介质等<sup>[16]</sup>。

Li 等<sup>[17]</sup>研究认为, 当施氮水平从 130  $\text{kg}/\text{hm}^2$  开始增加到 270  $\text{kg}/\text{hm}^2$  时, 玉米籽粒小型淀粉粒体积百分比增加, 说明氮肥能促进小型淀粉粒的产生。王瑾等<sup>[18]</sup>研究发现, 在 57 000~78 000 株/ $\text{hm}^2$  范围内, 大型玉米淀粉粒的体积和表面积百分比随种植密度的显著增加, 而中型淀粉粒的比例明显下降。因此, 较高的玉米种植密度可能会影响中、小型淀粉粒的形成, 从而影响到玉米产量和

品质。

### 3.3 种植密度对沿淮玉米籽粒糊化特性的影响

淀粉的品质受糊化特性的影响, 淀粉糊化温度和峰值黏度会影响玉米淀粉进一步加工品质生产链的发展。马冬云等<sup>[19]</sup>研究发现, 小麦的糊化特性易受外界环境的影响, 不同种植密度条件下, 增密能够显著影响小麦淀粉糊化参数。崔丽娜等<sup>[20]</sup>研究发现, 在 0~310.5  $\text{kg}/\text{hm}^2$  氮肥用量范围内, 玉米淀粉的糊化温度和峰值时间呈现先降后升的规律。许倍铭等<sup>[21]</sup>研究发现, 淀粉的峰值黏度、低谷黏度和最终黏度随着密度的增加而增加, 此研究结果与本实验结果相符合。


本研究结果表明, 玉米淀粉峰值黏度、低谷黏度和最终黏度以及回生值随着种植密度的增加而增加。相关性分析显示, 玉米籽粒中的脂肪含量与大型淀粉粒体积所占比例呈显著正相关, 淀粉平均粒径与淀粉含量呈显著正相关。玉米籽粒峰值黏度等糊化参数与小型淀粉粒体积百分比呈正相关, 与中型淀粉粒体积百分比呈显著或极显著负相关, 与大型淀粉粒体积百分比呈正相关。与大型、小型淀粉粒体积分布相比, 玉米籽粒中型淀粉粒的峰值黏度等糊化参数较高。

## 4 结论

玉米的产量和品质与品种自身特性以及种植密度相关。在一定范围内, 增加种植密度可以改变玉米籽粒淀粉粒粒度分布特性, 提高淀粉黏度参数, 从而影响理化特性。种植密度的合理增加对玉米糊化特性将产生有利影响, 可改善玉米加工品质。

### 参考文献:

- [1] PUNIA S. Barley starch: Structure, properties and in vitro digestibility-A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 868-875.
- [2] 张明达, 张国强, 王克如, 等. 种植密度和灌溉量对西辽河平原春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(1): 116-125.
- ZHANG M D, ZHANG G Q, WANG K R, et al. Effects of planting density and irrigation amount on yield and water use efficiency of spring maize in the west liaoh plain[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(1): 116-125.

- [3] LI W Y, WU P J, YAN S H. Effects of phosphorus fertilizer on starch granule size distribution in corn kernels[J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2019, 42(2): 201-207.
- [4] 王锐璞, 董振营, 高悦欣, 等. 玉米籽粒淀粉含量全基因组关联分析和候选基因预测[J]. *作物学报*, 2023, 49(1): 140-155.  
WANG R P, DONG Z Y, GAO Y X, et al. Genome-wide association study and candidate gene prediction of kernel starch content in maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(1): 140-155.
- [5] CUI L N, DONG S T, ZHANG J W, et al. Starch granule size distribution and morphogenesis in maize (*Zea mays* L.) grains with different endosperm types[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2014, 8(11): 1560-1565.
- [6] 王龙飞, 杨倩, 李广浩, 等. 吐丝后不同阶段干旱胁迫对糯玉米子粒产量和淀粉品质的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29(1): 69-76.  
WANG L F, YANG Q, LI G H, et al. Effect of drought stress at different post-silking stages on grain yield and starch quality of waxy maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(1): 69-76.
- [7] SINGH S, SINGH G, SINGH P, et al. Effect of water stress at different stages of grain development on the characteristics of starch and protein of different wheat varieties[J]. *Food Chemistry*, 2008, 108(1): 130-139.
- [8] LIU L M, KLOCKE N, YAN S P, et al. Impact of deficit irrigation on maize physical and chemical properties and ethanol yield[J]. *Cereal Chemistry*, 2013, 90(5): 453-462.
- [9] VALKAMA E, SALO T, ESALA M, et al. Nitrogen balances and yields of spring cereals as affected by nitrogen fertilization in northern conditions: A meta-analysis[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2013, 164: 1-13.
- [10] 高居荣, 韩秀兰, 孙彩玲, 等. DA7200 近红外仪在小麦品质分析中的应用研究[J]. *实验室科学*, 2009, 1(1): 173-176.  
GAO J R, HAN X L, SUN C L, et al. Application of DA7200 near infrared apparatus in analyzing the quality of wheats[J]. *Laboratory Science*, 2009, 1(1): 173-176.
- [11] PENG M, GAO M, ESM A A. Separation and characterization of A- and B-type starch granules in wheat endosperm[J]. *Cereal Chemistry*, 2007, 76(3): 375-379.
- [12] 王明泉. 不同种植密度对玉米生理性状、产量和品质影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(24): 6-10.  
WANG M Q. Research progress of the effects of different density on the physiological characteristics, yield and quality of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(24): 6-10.
- [13] 杨耿斌, 谭福忠, 王新江, 等. 不同密度对青贮玉米产量与品质的影响[J]. *玉米科学*, 2006(5): 115-117.  
YANG G B, TAN F Z, WANG X J, et al. Impacts of different densities on yield and quality of silage maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006(5): 115-117.
- [14] 董伟欣, 韩立杰, 张月辰. 种植方式对玉米生长发育、产量和籽粒品质的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2020, 55(6): 48-57.  
DONG W X, HAN L J, ZHANG Y C. Effects of planting patterns on growth, yield and grain quality of maize[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(6): 48-57.
- [15] ZHENG B, GUO X B, TANG Y K, et al. Development changes in multi-scale structure and functional properties of waxy corn starch at different stages of kernel growth[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 191: 335-343.
- [16] 张丽, 张吉旺, 刘鹏, 等. 不同淀粉含量玉米籽粒淀粉粒度的分布特性[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1596-1602.  
ZHANG L, ZHANG J W, LIU P, et al. Starch granule size distribution in grains of maize with different starch contents[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1596-1602.
- [17] LI W Y, TAN Z, LI R, et al. Starch accumulation, size distribution and related enzyme activity in superior and inferior kernels of maize under different nitrogen rates[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2021, 53(1): 105-111.
- [18] 王瑾, 王长进, 武德功, 等. 种植密度对玉米籽粒淀粉粒分布及相关酶活性的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(5): 456-460.  
WANG J, WANG C J, WU D G, et al. Effects of planting density on starch granule size distribution and related enzyme activities in maize kernel[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2019, 45(5): 456-460.
- [19] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 不同筋力小麦品种在不同生态环境下籽粒淀粉糊化特性分析[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(5): 798-802.  
MA D Y, GUO T C, WANG C Y, et al. Study on starch pasting properties of three gluten wheat cultivars in different environments[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(5): 798-802.
- [20] 崔丽娜, 李庆方, 董树亭. 追氮对夏玉米淀粉含量及其糊化特性的影响[J]. *中国粮油学报*. 2018, 33(3): 43-47.  
CUI L N, LI Q F, DONG S T. The Effects of nitrogen fertilize topdressing on starch content and starch pasting properties in summer maize[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(3): 43-47.
- [21] 许倍铭, 冯健超, 郝紫瑞, 等. 种植密度对不同小麦品种籽粒淀粉含量及其特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(9): 1109-1116.  
XU B M, FENG J C, HAO Z R, et al. Effect of planting density on starch content and characteristics of wheat grains[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(9): 1109-1116. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。