

群体密度与黄腐酸对芸豆籽粒淀粉形成及加工特性的影响

孙光旭¹, 郭伟^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:为探明群体密度与叶面喷施黄腐酸对黑龙江省西北部芸豆籽粒淀粉形成及加工特性的影响,采用二因素裂区设计,主区设3个群体密度:20万株·hm⁻²(D1,稀植处理)、23万株·hm⁻²(D2,当地常规密度)、26万株·hm⁻²(D3,密植处理);副区设5个黄腐酸浓度:清水(C0)、0.37(C1)、0.45(C2)、1.12(C3)、1.50 kg·hm⁻²(C4)。采用碱液浸提法提取成熟后芸豆籽粒淀粉,通过测定淀粉的溶解度、膨胀度、冻融稳定性、糊化特性、透明度、直链淀粉含量以及淀粉的理化性质,研究了芸豆淀粉品质形成的群体效应及叶面肥调控效果。结果表明:芸豆籽粒粗淀粉含量及直链淀粉比例显著影响淀粉的加工特性。2021年、2022年芸豆淀粉含量均随群体密度的增加而增加,分别从45.7%、47.7%增加到59.0%、50.7%;同时,直链淀粉含量均在高密度(26万株·hm⁻²)处理下达到峰值,分别为36.3%和28.4%。叶面喷施黄腐酸促进了芸豆籽粒淀粉的积累,提高了籽粒总淀粉含量,增加了中、低密度群体(20万株·hm⁻²和23万株·hm⁻²)下的籽粒直链淀粉的比例,2021年和2022年的增幅范围分别为8.4%~17.0%、16.4%~35.6%和6.1%~19.3%、8.4%~12.8%,但降低了高密度群体(26万株·hm⁻²)的直链淀粉比例,2021年与2022年降低范围分别为5.7%~13.6%与4.3%~15.0%。综合分析,在黑龙江西北部地区,26万株·hm⁻²的栽培密度有利于籽粒淀粉品质的形成,同时在芸豆开花期喷施1.50 kg·hm⁻²的黄腐酸对淀粉加工品质具有一定提升效应。

关键词:芸豆;籽粒淀粉;群体密度;黄腐酸;淀粉加工品质

中图分类号:S643.1;S35 **文献标志码:**A

Effects of population density and fulvic acid on grain starch formation and processing characteristics of kidney bean

SUN Guangxu¹, GUO Wei^{1,2}

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. Heilongjiang Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation Technology and Crop Germplasm Improvement, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: To investigate the effects of population density and foliar spraying of fulvic acid on starch formation and processing characteristics of kidney bean in northwestern Heilongjiang Province, a two-factor split-zone design was used, with three population densities in the main zone of 200 000 plant·hm⁻²(D1, sparse planting treatment), 230 000 plant·hm⁻²(D2, local conventional density), and 260 000 plant·hm⁻²(D3, dense planting treatment) and five fulvic acid concentrations in the secondary zone of clear water (C0), 0.37 (C1), 0.45 (C2), 1.12 kg·hm⁻²(C3) and 1.50 kg·hm⁻²(C4). The starch of kidney bean seeds after maturity was extracted by alkaline leaching method, and the group effects on the formation of starch quality of kidney bean and the regulation effects of foliar fertilizer were investigated by determining the solubility, expansion, freeze-thaw stability, pasting characteristics, transparency, content of straight-chain amylose, and the physicochemical properties of the starch. The results showed that the crude starch content and the proportion of straight-chain starch in kidney bean kernels

收稿日期:2023-11-06

修回日期:2024-02-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD1001402);黑龙江八一农垦大学“揭榜挂帅”科技攻关项目(JB20220001);黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2022-Y17)

作者简介:孙光旭(1997-),男,黑龙江双城人,硕士研究生,研究方向为作物生理与品质。E-mail:2546254665@qq.com

通信作者:郭伟(1977-),男,黑龙江绥化人,教授,主要从事作物生理生态研究。E-mail:agrigw@163.com

significantly affected the processing characteristics of starch. In 2021 and 2022, the amylose content of kidney bean increased with the increase of population density, from 45.7% and 47.7% to 59.0% and 50.7%, respectively. At the same time, the content of straight-chain amylose all peaked under the high-density ($260\ 000\ \text{plant} \cdot \text{hm}^{-2}$) treatments, at 36.3% and 28.4%, respectively. Foliar spraying of fulvic acid promoted the accumulation of kidney bean grain starch, increased the total grain starch content, and increased the proportion of straight-chain starch in the grains under the medium and low-density populations ($200\ 000$ and $230\ 000\ \text{plant} \cdot \text{hm}^{-2}$), with a range of increases of 8.4% to 17.0%, 16.4% to 35.6%, and 6.1% to 19.3%, 8.4% to 12.8%, in 2021 and 2022, respectively, but reduced the proportion of straight-chain starch in the high-density population ($260\ 000\ \text{plant} \cdot \text{hm}^{-2}$), with a range of 5.7% to 13.6% and 4.3% to 15.0% in 2021 and 2022, respectively. In a comprehensive analysis, the cultivation density of $260\ 000\ \text{plant} \cdot \text{hm}^{-2}$ in northwestern Heilongjiang was favorable to the formation of starch quality of the kernel, while the spraying of fulvic acid at $1.50\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ during the flowering stage of kidney bean had a certain promotional effect on the processing quality of starch.

Keywords: kidney bean; seed starch; population density; fulvic acid; starch processing quality

芸豆(*Phaseolus vulgaris* L.)是人类主要食用豆类之一,其籽粒具有较高的营养价值,含有丰富的蛋白质、碳水化合物、膳食纤维等营养成分,是调节膳食结构的优质食品^[1]。黑龙江省芸豆生产具有明显的区域优势和生态优势,是我国芸豆的主要产区之一^[2],也是芸豆食品加工行业最为理想的原料基地。但由于芸豆籽粒品质参差不齐,在作为食品原料进行加工时仍有一定的局限性。淀粉是芸豆籽粒主要化学成分,其物化特性直接影响芸豆制品的加工特性和食用品质^[3]。因此,研究不同栽培措施对芸豆籽粒淀粉形成和加工特性的影响,对提高芸豆品质具有重要意义。

可溶性糖是淀粉合成底物,种植密度在某种程度上会影响作物的可溶性糖含量,适当的种植密度可以促进灌浆过程中的籽粒同化物供应^[4]。通过调整种植密度,使植株的空间结构发生改变,协调群体生长与个体发育之间的矛盾^[5],将更有利于芸豆籽粒淀粉的积累。黄腐酸是植酸类分子量较小的高分子有机化合物,含有多种活性官能团,易被植物吸收,具有较强的生物活性^[6],能调节淀粉合成酶的活性,使光合作用产生的单糖转化为淀粉,从而提高淀粉含量^[7];也可以通过提高作物多种合成酶活性和叶绿素含量,使光合作用加强,改善作物的品质^[8]。研究表明,施用腐植酸肥料可以显著提高农作物器官中的可溶性糖含量^[9],从而增加淀粉积累量。

近年来豆类淀粉在工业上得到了广泛应用^[10],在生产的过程中,原料的输送、搅拌、混合和能量的损耗等都与淀粉糊的流变学性质有着紧密联系^[11]。一般豆类淀粉中直链淀粉的含量比较高,具有热粘度高、凝胶透明度高、凝胶强度高等优良性能,是制

备粉丝、粉皮等的良好原料,例如以绿豆及豌豆为原料制作粉丝,就是利用其直链淀粉凝沉性好的特点^[12]。郭神旺等^[13]对甘肃三角豌豆、白豌豆、小白芸豆、麻豌豆淀粉的理化性质进行分析研究,发现4种杂豆淀粉具有较好的热糊和冷糊稳定性,透明度较高,冻融稳定性差,耐高温,但是不宜用于冷冻食品生产。近年来,在高寒地区农作物生产中,注重产量提升的同时也越来越注重品质的提高。目前对高寒地区农作物加工品质方面的研究,多集中于不同栽培技术对寒地水稻、玉米、小麦籽粒淀粉加工品质影响等方面^[14],关于栽培技术对高寒地区芸豆淀粉加工特性影响的研究较少。本文探究了群体密度与黄腐酸对黑龙江西北部芸豆籽粒淀粉形成及加工特性的影响,旨在探明该地区芸豆适宜的群体密度和黄腐酸施用量,通过栽培技术提高芸豆淀粉加工特性,拓宽芸豆的应用领域,使芸豆淀粉资源的开发及其在食品加工中的应用更加广泛。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试材料

试验于2021—2022年在黑龙江省嫩江市九三科研所科技园区($48^{\circ}51'N$, $125^{\circ}19'E$)进行,试验田地处于温带大陆性季风气候区。试验材料为普通菜豆品种‘奶花芸豆’。试验用化学肥料为尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%, P_2O_5 46%)、硫酸钾(K_2O 50%)和黄腐酸(山东优素化工科技有限公司生产,黄腐酸 65%, $N_3.0\%$, P_2O_5 0.5%, K_2O 10%)。

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计。主区为群体密度:20(D1,稀植处理)、23(D2,当地常规密度)、26万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (D3,密植处理);副区为黄腐酸浓度:清水

(C0)、0.37 (C1)、0.45 (C2)、1.12 (C3)、1.50 kg · hm⁻²(C4)。共 15 个处理,4 次重复。

小区面积 230 m²(35.0 m×6.6 m)。采用 1.1 m 宽大垄双行种植。前茬作物为玉米。化肥春季一次性基施于播种带的侧深 18~20 cm 处,其中,施用尿素 35 kg · hm⁻²,磷酸二铵 95 kg · hm⁻²,硫酸钾 60 kg · hm⁻²。芸豆开花期一次性叶面喷施黄腐酸溶液,液量为 430 L · hm⁻²。其他管理同大田生产。

在芸豆成熟收获时,选择长势均匀、具有代表性的植株取样,每小区连续取 30 株进行考种。小区单独收获、脱粒。收获的籽粒于烘箱内 80℃烘干至恒重保存。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 芸豆淀粉含量的测定 参照 Yoshida 等^[15]方法测定籽粒粗淀粉含量。按照 GB 7648-1987《水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法》测定直链淀粉含量。

1.3.2 芸豆籽粒淀粉的提取 采用碱液浸提法制备淀粉^[16]。

1.3.3 淀粉溶解度与膨胀度的测定 参照于淑艳等^[17]方法测定芸豆淀粉溶解度和膨胀度。

1.3.4 淀粉冻融稳定性的测定 参照 Jayakody 等^[18]方法测定芸豆淀粉冻融稳定性。将淀粉调成质量分数为 6%的淀粉乳,置于沸水浴中加热搅拌 15 min,冷却至 25℃,称取一定量的淀粉糊置于离心管中,然后放于-15℃的冰箱中,24 h 后取出,室温解冻,观察胶冻情况,以 3 000 r · min⁻¹的转速离心 15 min,弃去上清液,称取沉淀物质量,计算析水率。

1.3.5 淀粉透明度的测定 将芸豆淀粉配成质量分数为 1%的淀粉乳,置于沸水浴中加热搅拌 15 min,然后冷却至 25℃,以蒸馏水作参照,用 1 cm 的比色皿在 620 nm 下测定淀粉糊的透光率,即为透明度。

1.3.6 淀粉糊化特性的测定 用德国 Brabender 黏度仪测定淀粉糊的黏度变化曲线,淀粉乳浓度同 1.3.4 节,转子转速 250 r · min⁻¹。测定程序为:从 30℃开始计时,以 7.5 ℃ · min⁻¹的速度程序升温至 93℃,保温 5 min,再以 7.5 ℃ · min⁻¹的速度冷却到 50℃,保温 2 min。黏度单位为 BU。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2013 进行整理、分析;采用 SPSS 24.0 数据分析软件进行方差分析($P<0.05$)。

2 结果分析

2.1 群体密度和黄腐酸对芸豆淀粉含量的影响

由表 1 可知,两年试验中,芸豆淀粉含量随群体密度的增加均呈逐渐升高的变化趋势。其中 2021

年淀粉含量从 45.7%(D1 处理)显著增加到 59.0%(D3 处理),2022 年平均淀粉含量由 47.7%(D1 处理)增长到 50.7%(D3 处理)。黄腐酸处理对两年芸豆籽粒淀粉含量影响均达极显著水平。从图 1 可以看出,2021 年 D1 密度下黄腐酸处理的淀粉含量较对照 C0 处理有不同程度的降低,其中 C1 处理较 C0 处理显著降低 28.7%;D2 密度下黄腐酸处理均高于对照 C0 处理,C4 处理较 C0 处理显著提高 31.2%;D3 密度下黄腐酸处理的淀粉含量变化与 D1 密度相同,均有不同程度降低,C1 和 C4 处理较 C0 处理分别显著降低 13.4%和 12.3%。

2022 年各群体密度下黄腐酸处理均提高了籽粒淀粉积累,D1 密度下 C1 和 C3 处理的淀粉含量较 C0 处理分别显著提高 9.3%和 10.5%;D2 密度下 C1 处理较 C0 处理显著提高 8.6%;D3 密度下 C1 和 C3 处理较 C0 处理分别显著提高 16.1%和 10.8%。总体来看,高密度条件下喷施适宜浓度的黄腐酸对芸豆淀粉含量提升效果更明显。

2.2 群体密度和黄腐酸对芸豆直链淀粉含量的影响

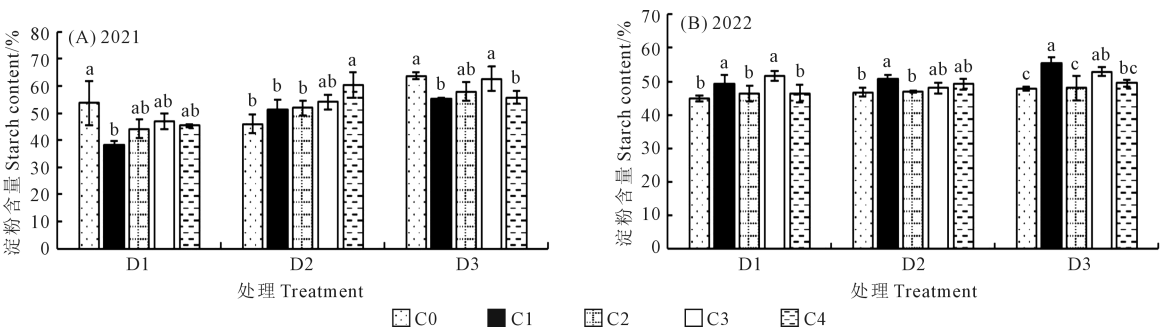
由表 2 可知,群体密度对芸豆直链淀粉含量影响显著,群体密度与黄腐酸的交互作用对直链淀粉含量表现出极显著影响。2021 年与 2022 年均在高密度(D3)下直链淀粉含量达到最大,平均直链淀粉含量分别达到 28.4%和 36.3%。由图 2 可知,黄腐酸处理对两年试验的直链淀粉含量影响规律不同,

表 1 群体密度对淀粉含量的影响及其方差分析

Table 1 Effects of population density on starch content and ANOVA			
处理 Treatment	淀粉含量 Starch/%		
	2021	2022	
D1	45.7±4.9b	47.7±2.4a	
D2	52.7±4.6a	48.3±1.5a	
D3	59.0±3.5a	50.7±3.0a	
因素 Factor	F 值 F value		
群体密度(D) Population density	50.283 **	2.459	
黄腐酸浓度(C) Fulvic acid concentration	4.822 **	4.815 **	
D×C	5.770 **	0.849	

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。**表示在 $P<0.01$ 水平差异显著;*表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). ** indicates significance at the $P<0.01$ level, * indicates significances at the $P<0.05$ level. The same below.



注:不同小写字母表示在同一密度下不同黄腐酸处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different fulvic acid treatments at the same density ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同群体密度下黄腐酸处理对芸豆淀粉含量的影响

Fig.1 Effects of fulvic acid treatment on starch content in kidney beans at different population densities

2021 年 D1 密度下高浓度黄腐酸处理增加了直链淀粉含量,其中 C4 处理较 C0 处理显著增加 17.0%; D2 密度下 C1、C2、C3 处理分别显著提高 20.8%、35.6%、16.4%;D3 密度的 C2 处理较 C0 处理显著降低13.6%。2022 年 D1 密度下黄腐酸处理对直链淀粉含量有不同程度的提高,其中 C2 和 C3 处理分别显著提高 18.6%和 19.3%;D2 密度下黄腐酸处理除 C3 处理显著降低,其他黄腐酸处理均显著提高了直链淀粉含量,C1 处理的增加达到 12.8%;D3 密度下黄腐酸处理降低了直链淀粉含量,其中 C2 处理较 C0 处理显著降低了 15.0%。由此可见,黄腐酸对低

表 2 群体密度对直链淀粉含量的影响及方差分析

Table 2 Effects of population density on amylose content and ANOVA

处理 Treatment	直链淀粉含量 Amylose/%	
	2021	2022
D1	25.0±1.9b	35.4±2.4ab
D2	26.9±3.3b	34.9±2.5b
D3	28.4±1.7a	36.3±2.0a
因素 Factor	F 值 F value	
D	12.779 **	5.012 *
C	2.635	2.106
D×C	8.063 **	17.615 **

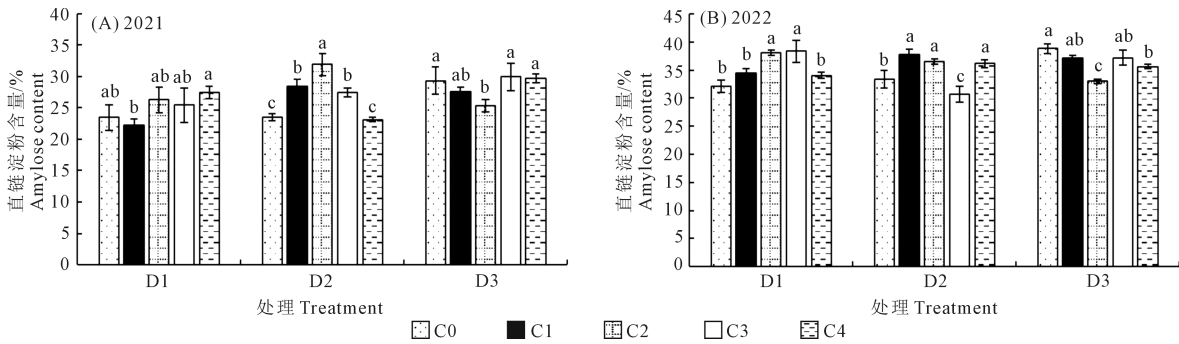


图 2 不同群体密度下黄腐酸处理对芸豆直链淀粉含量的影响

Fig.2 Effects of fulvic acid treatment on the content of amylose in kidney beans at different population densities

密度群体直链淀粉含量的提高效果更加显著,而对高密度群体的直链淀粉含量有一定抑制作用。

2.3 群体密度和黄腐酸对芸豆淀粉溶解度和膨胀度的影响

淀粉的溶解和膨胀与其颗粒形态、直链和支链淀粉的比例以及支链淀粉中、长、短链的比例有关,直接反映淀粉结晶区和无定形区结构比例以及分子间氢键的结合程度^[19],间接反映淀粉制品的蒸煮

特性。群体密度和黄腐酸处理以及二者的交互作用对芸豆淀粉的溶解度影响均达极显著水平(表 3)。2021 年淀粉溶解度随群体密度的增加呈下降趋势,从平均溶解度 14.6%(D1 处理)降到了 10.8%(D3 处理);而 2022 年淀粉溶解度随群体密度的增加呈逐渐升高趋势,D3 密度较 D1 和 D2 密度分别显著增加 27.8%和 16.4%。由图 3 可知,黄腐酸处理间的淀粉溶解度差异较显著,2021 年 D1 密度下

黄腐酸处理均显著高于对照 C0 处理,C1~C4 处理分别显著提高 52.1%、23.6%、47.6%和39.4%;D2 密度下除 C1 处理淀粉溶解度有所降低,其他处理均高于对照处理;D3 密度下 C3 处理较 C0 处理显著提高了 50.0%。2022 年黄腐酸处理与对照 C0 相比,除 D2 密度下的 C1 处理有所降低,其他黄腐酸处理均提高了淀粉溶解度。总体来看,高浓度黄腐酸处理增加淀粉溶解度的效果更为显著。

由表 4 可知,群体密度对芸豆淀粉膨胀度的影响达极显著水平。2021 年 D3 密度的平均淀粉膨胀度较 D1 和 D2 密度分别显著提高了 8.8%和 9.9%,

表 3 群体密度对淀粉溶解度的影响及方差分析
Table 3 Effects of population density on starch solubility and ANOVA

处理 Treatment	淀粉溶解度 Solubility/%	
	2021	2022
D1	14.6±2.1a	8.9±0.9b
D2	11.7±1.4b	9.7±1.5ab
D3	10.8±1.9b	11.3±1.5a
因素 Factor	F 值 F value	
D	21.205 **	30.200 **
C	7.268 **	18.529 **
D×C	3.162 **	3.700 **

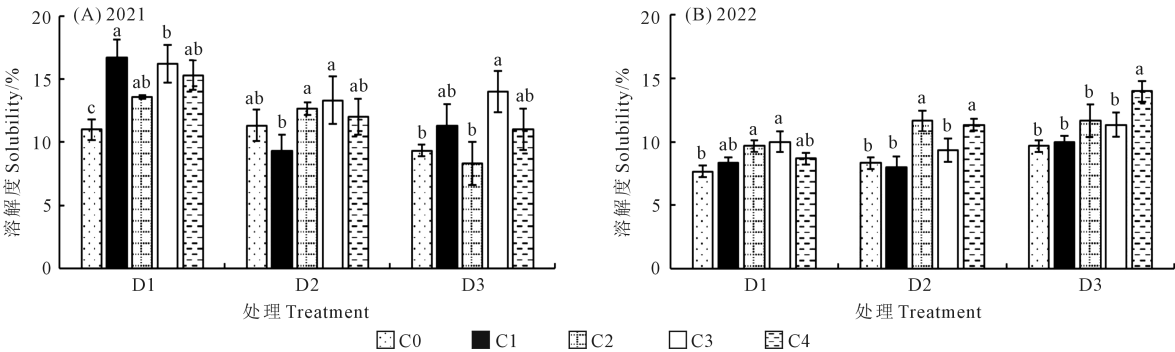


图 3 不同群体密度下黄腐酸处理对芸豆淀粉溶解度的影响

Fig.3 Effects of fulvic acid treatment on the starch solubility in kidney beans at different population densities

D1 与 D2 密度间无显著差异;2022 年随着群体密度的增加,淀粉膨胀度呈缓慢上升趋势,从 9.1% (D1 处理)增长到 9.9%(D3 处理)。由图 4 可知,黄腐酸处理对 2021 年淀粉膨胀度的影响比较显著,D1 密度下的黄腐酸处理均显著高于对照 C0 处理,C1~C4 处理分别显著提高 17.1%、11.9%、17.9%和 20.7%;D3 密度的高浓度黄腐酸处理显著提升了淀粉膨胀度,C3 和 C4 处理较 C0 处理分别显著提高 12.6%和 10.7%。2022 年黄腐酸处理的淀粉膨胀度有不同幅度的变化,但差异不显著。

表 4 群体密度对淀粉膨胀度的影响及方差分析
Table 4 Effects of population density on starch expansion and ANOVA

处理 Treatment	淀粉膨胀度 Expansion/%	
	2021	2022
D1	10.5±0.7b	9.1±0.2b
D2	10.4±0.7b	9.5±0.4a
D3	11.4±0.6a	9.9±0.2a
因素 Factor	F 值 F value	
D	6.996 **	8.606 **
C	5.048 **	0.866
D×C	1.231	0.974

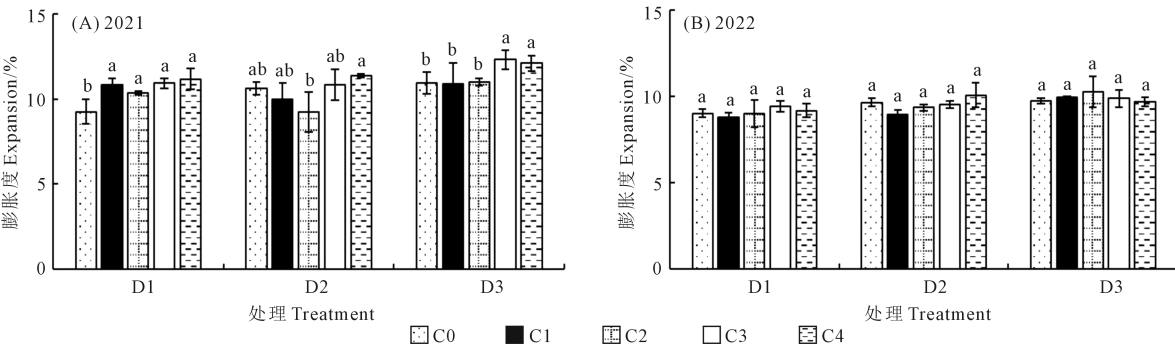


图 4 不同群体密度下黄腐酸处理对芸豆淀粉膨胀度的影响

Fig.4 Effects of fulvic acid treatment on starch expansion in kidney beans at different population densities

2.4 群体密度和黄腐酸对芸豆淀粉冻融稳定性的影响

淀粉的冻融稳定性对食品加工和贮藏特性有一定影响,析水率越低冻融稳定性越好。由表 5 可知,群体密度和黄腐酸对芸豆淀粉的析水率有显著影响。由图 5 可见,两年淀粉析水率变化趋势一致,均随群体密度的增加而降低,2021 年平均淀粉析水率从 58.3%(D1 处理)降到 44.7%(D3 处理),2022 年由 48.6%(D1 处理)降到 41.5%(D3 处理)。黄腐酸处理对 2021 年不同群体密度上淀粉析水率影响规律不同,D1 密度下淀粉析水率除 C3 处理有所增加,其他黄腐酸处理均显著降低,C1、C2、C4 处理较 C0 处理分别显著降低 5.6%、6.9%、5.1%;D2 密度下黄腐酸处理的淀粉析水率有不同程度的降低,其中高浓度 C2、C3、C4 处理较 C0 处理分别显著降低 14.0%、15.1%、10.7%;D3 密度下 C2 处理较对照 C0 处理显著降低 13.5%,但 C4 处理显著提高了 12.5%。2022 年(图 5B)不同群体密度下的黄腐酸处理均降低了淀粉析水率,D1 密度下 C4 处理较 C0 处理显著降低了 11.7%;D2 密度下 C3 和 C4 处理较 C0 处理分别显著降低 5.2%和 8.1%;D3 密度的 C2 处理较 C0 处理显著降低了 22.3%。

综合来看,高密度处理可以降低芸豆淀粉的析水率,提高淀粉冻融稳定性。不同群体密度间比较发现,高密度处理下析水率显著小于低密度,高密度条件下黄腐酸浓度 C2 处理的芸豆可能更适合制作冷冻食品。

2.5 群体密度和黄腐酸对芸豆淀粉透明度的影响

淀粉透明度直接影响产品的外观,决定消费者对产品的可接受性^[20]。由表 6 可知,群体密度与黄腐酸处理显著影响淀粉透明度,且有较强的交互效应。两年试验中淀粉透明度随着群体密度的增加均

表 5 群体密度对冻融稳定性的影响及方差分析

Table 5 Effects of population density on freeze-thaw stability and ANOVA		
处理 Treatment	析水率 Water separation rate/%	
	2021	2022
D1	58.3±1.9a	48.6±1.9a
D2	52.0±3.4b	47.0±1.6a
D3	44.7±3.8c	41.5±3.5b
因素 Factor	F 值 F value	
D	152.929 **	25.587 **
C	11.355 **	4.849 **
D×C	6.797 **	1.752

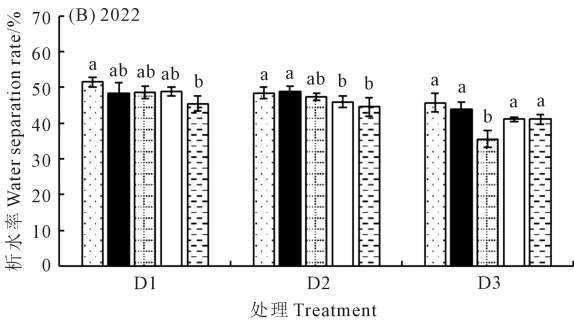
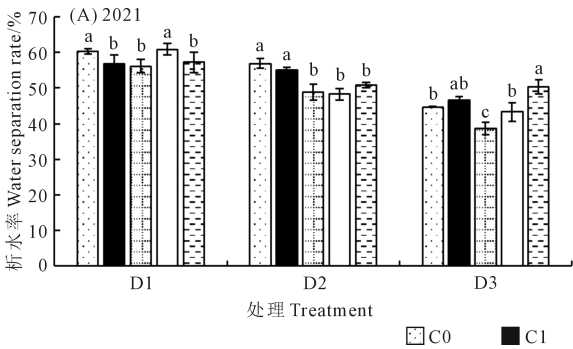


图 5 不同群体密度下黄腐酸处理对芸豆淀粉冻融稳定性的影响

Fig.5 Effects of fulvic acid treatment on starch freeze-thaw stability in kidney beans at different population densities

表现为先降低后升高的趋势,2021 年与 2022 年 D1 和 D3 密度的平均淀粉透明度较 D2 密度分别显著提高了 7.7%、12.2%和 19.7%、21.3%。黄腐酸处理对两年淀粉透明度影响不同(图 6),2021 年 D1 密度下黄腐酸处理显著提高了淀粉透明度,D2 密度下黄腐酸处理间淀粉透明度差异不显著,D3 密度下 C2 处理较 C0 处理淀粉透明度显著降低 12.9%。2022 年 D1 密度下 C4 处理淀粉透明度较 C0 处理显著提高 21.0%,D2 与 D3 密度下黄腐酸处理的淀粉透明度仅 D3 密度的 C2 处理降低显著,其他处理间无显著差异。

表 6 群体密度对淀粉透明度的影响及方差分析

Table 6 Effects of population density on starch transparency and ANOVA		
处理 Treatment	透明度 Transparency/%	
	2021	2022
D1	41.7±3.6ab	44.3±3.6a
D2	38.7±0.6b	37.0±3.0b
D3	43.4±2.2a	44.9±4.5a
因素 Factor	F 值 F value	
D	17.116 **	26.734 **
C	5.806 **	5.333 **
D×C	4.033 **	4.613 **

2.6 群体密度和黄腐酸对芸豆淀粉糊化特性的影响

糊化特性是淀粉类食品的重要加工特性之一,直接影响最终产品的品质^[21]。由表 7 可知,2021 年群体密度与黄腐酸处理对淀粉糊化特性指标影响均达显著水平,且两者有较强的交互效应。除回生值,其他糊化指标均随群体密度的增加而增加,其中,D3 密度的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度较 D1 和 D2 密度提高显著,稀懈值、崩解值、糊化温度在不同密度间增幅较小。各密度下的淀粉峰值黏度、低谷黏度、稀懈值、最终黏度的最大值均出现在同一黄腐酸处理,D1 与 D2 密度的淀粉峰值黏度、低谷黏度、稀懈值、最终黏度的最大值分别出现在 C4 和 C2 处理;而 D3 密度下对照 C0 处理最高,黄腐酸处理降低了淀粉峰值黏度、低谷黏度、稀懈值和最终黏度。糊化温度在 D1 密度下 C3 处理最高,D2 和 D3 处理均在 C0 处理最高。D1 和 D2 密度下回

生值的最大值分别出现在 C4 处理和 C2 处理,而 D3 密度的回生值在 C3 处理达到最高。崩解值表征淀粉的剪切性能,在 D1、D2、D3 密度下,崩解值的最大值分别出现在 C4、C3 和 C0 处理,表明低密度下高浓度黄腐酸处理可以增加淀粉的剪切性,高密度下黄腐酸处理降低淀粉剪切性。

如表 8 所示,2022 年峰值黏度、低谷黏度和最终黏度均随群体密度的增加呈先升高再降低的趋势。稀懈值、回生值和崩解值与峰值黏度的变化趋势一致,而糊化温度随着群体密度的增加而增加,不同群体密度间糊化温度有一定的差异。黄腐酸对不同群体密度下的芸豆淀粉糊化特性影响不同。D1 和 D2 密度下的峰值黏度、低谷黏度和最终黏度均在 C3 处理达到最大值,且显著高于同密度下的对照 C0 处理;而高密度(D3)处理下,黄腐酸处理的峰值黏度、低谷黏度和最终黏度均小于对照 C0 处理。在 D1 和 D2 密度下,黄腐酸 C2 和 C3 处理的稀

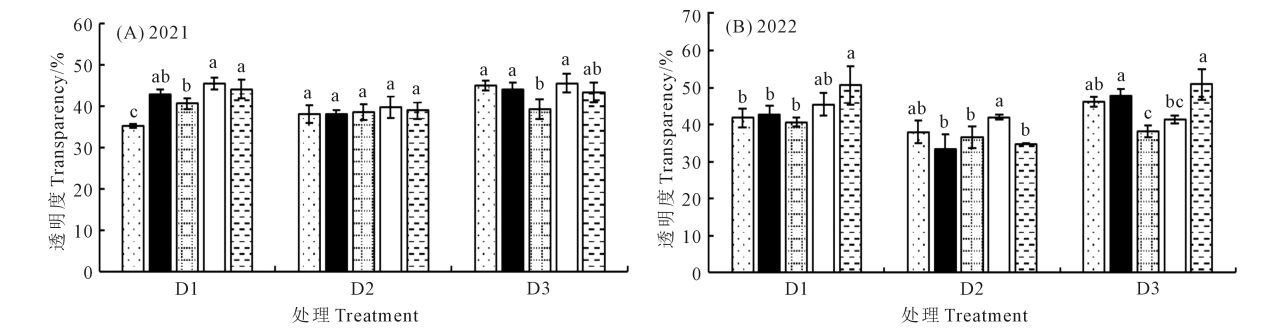


图 6 不同群体密度下黄腐酸处理对芸豆淀粉透明度的影响

Fig.6 Effects of fulvic acid treatment on starch transparency in kidney beans at different population densities

表 7 2021 年芸豆淀粉糊化特性

Table 7 Pasting characteristics of kidney bean starch in 2021

处理 Treatment	峰值黏度/BU Peak viscosity	低谷黏度/BU Trough viscosity	稀懈值/BU Slack value	最终黏度/BU Final viscosity	回生值/BU Regeneration value	崩解值/BU Disintegration value	糊化温度/℃ Pasting temperature
C0	193.0±7.1f	30.3±1.7d	162.7±6.2b	287.7±6.1d	105.0±9.2b	10.3±2.9b	76.2±1.0b
C1	210.7±4.9d	48.3±0.9c	162.3±4.9b	311.3±5.2c	118.0±4.2ab	17.3±4.8ab	76.7±1.4ab
D1 C2	258.3±5.6b	77.7±1.2b	180.7±4.5a	339.3±7.8b	106.3±5.6b	25.3±9.0ab	77.2±1.4a
C3	240.7±4.5c	74.3±3.1b	166.3±1.9b	340.7±4.9b	126.3±2.4a	26.3±9.1ab	77.3±2.0a
C4	295.7±9.8a	112.7±4.0a	183.0±7.1a	398.0±6.4a	131.7±10.1a	29.3±6.9a	76.9±1.5ab
C0	246.0±5.0d	75.7±2.5d	170.3±6.1b	334.0±5.7b	100.3±7.7b	12.3±3.4c	78.7±0.2a
C1	257.3±6.6d	76.3±2.9d	181.0±3.7b	342.7±9.5b	97.3±6.1b	12.0±3.7c	78.5±1.1a
D2 C2	327.7±2.9a	128.0±2.4a	199.7±2.5a	432.0±7.3a	137.0±4.3a	32.7±9.0b	76.5±1.5c
C3	308.3±5.4b	112.3±4.5b	196.0±2.8a	381.7±4.1a	125.7±8.7a	52.3±9.9a	77.4±1.6b
C4	272.3±6.9c	97.3±4.0c	175.0±9.4b	340.0±2.9b	104.7±5.3b	37.0±5.7b	77.6±1.8b
C0	354.0±7.0a	150.7±3.9a	203.3±5.2a	428.7±4.9a	126.7±9.2ab	52.0±11.0a	81.5±1.7a
C1	307.0±5.4b	139.3±5.8b	167.7±0.5c	402.0±2.9b	128.3±4.0ab	33.3±7.8ab	79.0±1.8bc
D3 C2	278.7±5.7c	78.3±3.4e	200.3±2.5a	360.0±2.2c	113.0±5.0c	31.7±7.3ab	78.4±2.7c
C3	300.3±9.8b	102.7±4.9d	197.7±4.9a	400.7±5.7b	133.0±1.4a	32.7±14.3ab	79.5±1.4b
C4	315.3±5.8b	126.7±6.1c	188.7±1.2b	422.7±3.4a	119.3±5.7bc	12.0±3.6b	77.1±1.9d
因素 Factor	F 值 F value						
D	313.720 **	466.031 **	46.340 **	360.366 **	7.489 **	4.783 *	112.315 **
C	35.516 **	46.794 **	19.276 **	50.121 **	6.276 **	3.621 *	21.705 **
D×C	69.281 **	114.642 **	10.631 **	106.002 **	9.017 **	7.157 **	21.239 **

懈值和崩解值易获得最大值;而高密度(D3)处理下,对照C0处理的稀懈值和崩解值达到最大值。D1和D3密度下,回生值分别在C2和C4处理数值达到最低;而D2密度下C3处理的回生值最高。黄腐酸处理对峰值黏度、低谷黏度、稀懈值、最终黏度、回生值和崩解值均表现出较强作用,但对糊化温度影响不显著。

2.7 芸豆淀粉功能性质与理化性质间的相关性分析

由表 9 可以看出,芸豆籽粒淀粉含量、冻融稳定性、直链淀粉含量与淀粉糊化指标间存在较强的相关性。其中,冻融稳定性与淀粉糊化的各项指标均达显著负相关,而淀粉含量与直链淀粉含量均对峰值黏度和低谷黏度有较强的影响,除此之外,淀粉含量还对崩解值有较强的影响,直链淀粉与最终黏

度呈极显著正相关关系。芸豆淀粉溶解度、膨胀度和透明度对淀粉糊化指标的影响相对较弱。可见,芸豆淀粉含量和直链淀粉含量是改善淀粉品质的关键因素。

3 讨 论

3.1 群体密度与叶施黄腐酸对芸豆淀粉含量及组分的影响

芸豆是作为粮豆配合开发新营养主食品种的主要原料之一^[22]。淀粉是芸豆籽粒的主要碳水化合物,其性质直接影响着籽粒的品质。淀粉的含量对籽粒产量和品质有重要影响,其直链淀粉、支链淀粉含量及淀粉糊化特性对食品品质及加工性能均有一定影响^[23]。本试验结果表明,2021 年芸豆群体密度与黄腐酸处理对芸豆淀粉含量有较强的影

表 8 2022 年芸豆淀粉糊化特性
Table 8 Pasting characteristics of kidney bean starch in 2022

处理 Treatment	峰值黏度/BU Peak viscosity	低谷黏度/BU Trough viscosity	稀懈值/BU Slack value	最终黏度/BU Final viscosity	回生值/BU Regeneration value	崩解值/BU Disintegration value	糊化温度/℃ Pasting temperature
D1	C0	203.3±10.9c	171.3±13.0b	317.7±7.8c	126.0±1.6a	11.7±2.1b	73.4±2.3b
	C1	210.3±9.0c	173.0±7.1b	326.0±5.4bc	129.3±8.5a	6.0±1.6c	77.0±1.8a
	C2	244.7±8.6b	193.3±8.1a	326.7±8.7bc	87.0±0.8b	5.0±0.8c	74.4±2.5ab
	C3	292.3±14.9a	189.3±13.4ab	394.7±10.6a	125.7±6.9a	23.3±2.5a	75.1±3.8ab
	C4	233.3±13.7bc	163.0±18.7b	345.7±7.8b	126.7±3.8a	14.3±2.5b	78.5±2.4a
D2	C0	302.0±7.5c	204.0±13.4b	382.3±4.1c	109.0±8.0c	28.7±3.3ab	79.1±0.7a
	C1	356.3±7.8ab	221.3±14.3ab	438.0±9.3b	113.7±4.8ab	32.0±2.9a	75.8±3.4b
	C2	366.7±8.7a	236.0±5.0a	452.3±7.4b	122.0±3.7b	36.3±2.9a	77.3±2.8ab
	C3	376.7±9.0a	237.0±17.6a	488.3±9.8a	146.0±4.5a	34.3±3.7a	77.6±2.6ab
	C4	342.0±6.5b	210.0±7.0ab	443.0±5.9b	123.3±2.1b	22.3±2.5b	77.3±2.4ab
D3	C0	403.0±3.6a	236.7±5.8a	477.7±5.0a	123.3±4.5a	48.7±2.9a	84.8±2.7a
	C1	326.7±9.4b	194.0±0.8d	418.7±6.1c	121.3±0.5a	29.3±3.3bc	81.7±1.3ab
	C2	338.0±5.7b	216.0±4.2b	442.7±7.1b	129.0±3.6a	24.3±2.1c	82.1±2.7ab
	C3	343.0±4.3b	136.3±6.3b	206.7±2.1c	429.3±10.0bc	121.3±8.2a	77.3±4.8b
	C4	254.3±7.8c	56.0±7.1c	198.3±4.2cd	352.3±8.2d	105.3±3.3b	81.1±1.0ab
因素 Factor	F 值 F value						
D	454.103 **	379.857 **	46.539 **	460.479 **	1.579	156.264 **	11.877 **
C	37.763 **	33.253 **	5.659 **	47.099 **	10.658 **	38.359 **	0.799
D×C	41.782 **	55.348 **	3.281 **	51.211 **	18.717 **	27.017 **	1.389

表 9 芸豆淀粉功能性质与理化性质的相关性
Table 9 Correlation between functional and physicochemical properties of kidney bean starch

指标 Index	峰值黏度 Peak viscosity	低谷黏度 Trough viscosity	稀懈值 Slack value	最终黏度 Final viscosity	回生值 Regeneration value	崩解值 Disintegration value	糊化温度 Pasting temperature
淀粉含量 Starch content	0.223 *	0.293 **	0.054	0.172	0.058	0.298 **	0.147
直链淀粉含量 Amylose content	0.435 **	0.325 **	0.507 **	0.478 **	0.104	-0.002	0.081
溶解度 Solubility	-0.125	-0.057	-0.204	-0.118	0.071	0.046	-0.042
膨胀度 Expansion	0.056	0.179	-0.158	0.031	0.081	0.201	0.152
冻融稳定性 Freeze-thaw stability	-0.498 **	-0.417 **	-0.508 **	-0.520 **	-0.254 *	-0.250 *	-0.369 **
透明度 Transparency	-0.092	-0.027	-0.175	-0.024	0.232 *	-0.050	0.258 *

响。这是由于 2021 年降雨量较大,芸豆生长的条件较差,使群体密度与黄腐酸处理对芸豆淀粉积累的调控作用更加明显。正常年份下(2022 年)群体密度对芸豆淀粉含量影响不显著,但黄腐酸处理使芸豆淀粉含量均出现不同程度的提高,由此可见,黄腐酸可以促进芸豆淀粉的合成与积累,是提高芸豆淀粉含量的重要手段。合理的种植密度可以形成合理的空间结构,提高光能利用率,促进植株生长发育,并可以协调个体与群体之间的矛盾,进而促进籽粒淀粉含量的积累。黄腐酸可以促进作物对养分的吸收,为光合作用提供充足的合成原料,并可以刺激糖代谢过程中关键酶的活性^[24],使籽粒可溶性糖积累量增加,最终转化为淀粉的含量也有所增加。

直链淀粉含量是淀粉糊化和流变性质的主要决定因素^[25],含量的高低直接影响淀粉的凝胶质构特性^[26],从而影响芸豆产品的加工品质。有研究表明,随着种植密度的增加,小麦籽粒直链淀粉含量呈上升趋势^[27],支链淀粉含量及支/直比呈下降趋势。本试验结果表明,群体密度显著影响芸豆直链淀粉含量,两年直链淀粉含量均在高密度下达到最大值。因此,适当增加芸豆的群体密度可以提高直链淀粉含量。黄腐酸可以提高中、低群体密度下芸豆直链淀粉含量,但高密度下的直链淀粉含量整体降低,可能是由于高密度下群体竞争压力大,黄腐酸对直链淀粉合成的调节作用有所减弱。

3.2 群体密度与叶施黄腐酸对芸豆淀粉功能性质的影响

淀粉溶解及膨胀的发生主要是由于淀粉中直链、支链淀粉的溶出及扩散,也反映着淀粉颗粒之间的相互作用大小^[28]。本试验中,群体密度与黄腐酸处理对芸豆淀粉溶解度有较强的影响,但两年的影响趋势不一致,可能是由于外界因素不同造成的。试验表明,淀粉膨胀度随着群体密度的增加缓慢上升,与直链淀粉含量呈正相关关系。2021 年黄腐酸处理的膨胀度间差异显著,高浓度处理显著提高了淀粉膨胀度,而 2022 年黄腐酸处理间差异不显著。推测黄腐酸在逆境条件下对芸豆淀粉膨胀度的调控作用更加明显,有利于提高芸豆淀粉的品质。

冻融稳定性是反映淀粉特性的关键指标,用来确定结构强度及抵抗冻融过程中发生的不良温度冲击的能力。本研究发现,随着群体密度的增加,淀粉析水率呈降低趋势,高密度下的淀粉冻融稳定

性更好,而黄腐酸 C2 处理显著降低了芸豆淀粉析水率,使水分子不易从中析出,提高了淀粉的冻融稳定性。

淀粉透明度不仅反映了淀粉与水结合能力的强弱,还直接影响淀粉类食品外观。研究表明,透明度较大的淀粉,其加工的食品就会有较好的色泽与质地^[29]。Singh 等^[30]报道,直链淀粉和支链淀粉的逸出影响着淀粉颗粒的大小、链长和链间交联,进而影响淀粉的透明度。本试验中,D2 密度下淀粉透明度低于其他密度,可能是受外界环境的影响,造成淀粉的颗粒较小,淀粉粒的排列结构不均匀,导致淀粉透明度降低。此外,直链淀粉含量高也可能使淀粉糊内部产生较大的空间位阻,分子之间很难形成平行的取向,容易老化回生,而回生过程产生的凝胶束容易对光线产生反射和折射,从而对透明度造成不利的影响^[31]。

3.3 群体密度与叶施黄腐酸对芸豆淀粉理化性质的影响

淀粉糊化特征是反映淀粉品质的重要指标,对淀粉的应用及其加工品质有重要影响。本试验通过调整种植密度和叶施黄腐酸处理,发现芸豆淀粉的含量与理化性质有所提高,对改善芸豆淀粉加工品质有明显的效果。在豆类淀粉的糊化过程中,直链淀粉含量越高,淀粉的稳定性和抗剪切能力越强或凝胶程度越强^[32]。本试验中,高密度处理获得较高的淀粉含量及直链淀粉含量,同时峰值黏度与最终黏度提升。峰值黏度反映了淀粉与水的结合能力,说明高密度芸豆淀粉与水结合能力相对较强。杨传铭等^[33]研究发现,直链淀粉含量直接影响淀粉类制品淀粉糊化效果和加工制品性质。本试验结果表明,直链淀粉与糊化特性的相关性显著,淀粉黏度随直链淀粉含量的增加而增加,受直链淀粉含量的影响较大。有研究发现,糊化温度越高的淀粉,其糊化过程中的黏度(包括峰值黏度、谷值黏度、最终黏度)越低^[34]。本研究中,淀粉峰值黏度、低谷黏度、最终黏度却随糊化温度的升高而升高,这与李旭等^[35]研究结果相似,推测淀粉黏度没有降低,可能是 B 型小淀粉粒含量高所导致的^[36]。

4 结 论

芸豆淀粉含量随群体密度的增加而增加,高密度条件下可以获得较多的直链淀粉,从而提高淀粉

的膨胀度和透明度,改善淀粉糊化特性,显著降低淀粉的析水率。同时,叶面喷施黄腐酸也提高了芸豆淀粉的溶解度、膨胀度和透明度,使淀粉特性更符合加工需求,扩大了芸豆淀粉在食品加工行业的应用范围。

综合分析,在试验区域建立 $26 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的群体密度,并于芸豆开花期喷施 $1.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的黄腐酸溶液 $430 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$,可显著提升籽粒淀粉含量及直链淀粉占比,同时获得具有较低析水率、较高淀粉溶解度、膨胀度、透明度,糊化性能优良的芸豆籽粒,其淀粉性质更适合食品加工领域。

参考文献:

- [1] BROUGHTON W J, HERNÁNDEZ G, BLAIR M, et al. Beans (*Phaseolus* spp.)-model food legumes[J]. Plant and soil, 2003, 252(1): 55-128.
- [2] 王强, 张亚芝, 魏淑红, 等. 黑龙江省芸豆生产现状与产业化发展[J]. 中国种业, 2008,(4): 11-12.
- WANG Q, ZHANG Y Z, WEI S H, et al. Current status and industrialisation of kidney bean production in Heilongjiang Province[J]. China Seed Industry, 2008,(4): 11-12.
- [3] 曹亚楠, 向月, 杨斯惠, 等. 杂粮芽苗菜的营养与功能研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 433-446.
- CAO Y N, XIANG Y, YANG S H, et al. Research progress on nutrition and function of coarse grain sprouts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 433-446.
- [4] 张晓艳, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 密度对大豆群体碳氮代谢相关指标及产量、品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 128-132.
- ZHANG X Y, ZHENG D F, FENG N J, et al. Effect of plant density on soybean carbon and nitrogen metabolism, yield and quality[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(3): 128-132.
- [5] 蒋桂英, 刘建国, 李英贤, 等. 奶花芸豆群体冠层结构特征及产量性状研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 211-214.
- JIANG G Y, LIU J G, LI Y X, et al. Study on canopy structure of population and yield of *phaseolus vulgaris*[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(4): 211-214.
- [6] 韩文革, 于晓春. 叶面肥对芸豆的增产效应分析[J]. 北方园艺, 2002,(3): 46-47.
- HAN W G, YU X C. The effect of increasing kidney bean yield by fertilizer on the surface of leaves[J]. Northern Horticulture, 2002,(3): 46-47.
- [7] 赵永峰, 吴林科, 周皓蕾, 等. 黄腐酸在马铃薯上的应用效果初报[J]. 甘肃农业科技, 2002, 33(5): 41-42.
- ZHAO Y F, WU L K, ZHOU H L, et al. Applied effect of humic acid on potato[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2002, 33(5): 41-42.
- [8] 李洁, 张小宁, 晋凡生, 等. 干旱年景下芸豆生长及产量对其密度的响应[J]. 作物杂志, 2021,(2): 140-146.
- LI J, ZHANG X N, JIN F S, et al. Response of kidney bean growth and yield to planting density in the dry year[J]. Crops, 2021,(2): 140-146.
- [9] 柳洪鹏, 李作梅, 史春余, 等. 腐植酸提高食用型甘薯块根可溶性糖含量的生理基础[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 711-716.
- LIU H J, LI Z M, SHI C Y, et al. Physiological basis of improving soluble sugar content in sweetpotato for table use by humic acid application[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(4): 711-716.
- [10] 翟云龙, 章建新, 倪丽, 等. 不同群体条件下奶花芸豆的生长及产量研究[J]. 杂粮作物, 2005, 25(2): 94-95.
- ZHAI Y L, ZHANG J X, NI L, et al. Study on the yield and growth in *Phaseolus coccineus* L. of different populations[J]. Rain Fed Crops, 2005, 25(2): 94-95.
- [11] 杜双奎, 于修烛, 杨雯雯, 等. 扁豆淀粉理化特性分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 82-86.
- DU S K, YU X Z, YANG W W, et al. Physical and chemical properties of haricot starch[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 82-86.
- [12] 郝小燕, 麻浩. 豆类淀粉研究综述[J]. 粮油食品科技, 2007, 15(3): 11-14.
- HAO X Y, MA H. Study on legume starch[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2007, 15(3): 11-14.
- [13] 郭神旺, 王充, 单玉琳, 等. 甘肃主要杂豆淀粉理化特性分析[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 127-132.
- GUO S W, WANG C, SHAN Y L, et al. Physical and chemical properties of starch from major legume species in Gansu[J]. Food Science, 2012, 33(15): 127-132.
- [14] 吴东明, 韩雅楠, 马宏亮, 等. 氮肥后移对中、弱筋小麦籽粒淀粉合成及其糊化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 186-197.
- WU D M, HAN Y N, MA H L, et al. Effects of postponing nitrogen fertilizer application on starch formation of medium and weak gluten wheat grains and its impacts on gelatinization characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(5): 186-197.
- [15] YOSHIDA S, FORNO D A, COCK J H, et al. Determination of sugar and starch in plant tissue[J]. Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice, 1976, 8(2): 46-49.
- [16] NWOKOCHA L M, NWOKOCHA K E, WILLIAMS P A. Physicochemical properties of starch isolated from *Antiaris africana* seeds in comparison with maize starch[J]. Starch, 2012, 64(3): 246-254.
- [17] 于淑艳, 吴琼, 陈星, 等. 油莎豆淀粉理化性质的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(3): 245-248.
- YU S Y, WU Q, CHEN X, et al. Physical and chemical properties of *cyperus esculentus* starch[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(3): 245-248.
- [18] JAYAKODY L, HOOVER R, LIU Q, et al. Studies on tuber starches. II. Molecular structure, composition and physicochemical properties of yam (*Dioscorea* sp.) starches grown in Sri Lanka[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 69(1): 148-163.

[19] 吴小婷. 不同方法制备的莲子抗性淀粉性质及其体外益生元作用的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.

WU X T. Properties and prebiotics effects in vitro of lotus seed resistant starch prepared by different methods[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.

[20] 杜先锋, 许时婴, 王璋. 淀粉糊的透明度及其影响因素的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 129-131.

DU X F, XU S Y, WANG Z. Starch paste clarity and its influence factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(1): 129-131.

[21] 钟葵, 佟立涛, 刘丽娅, 等. 绿豆淀粉性质和糊化特性研究[J]. 作物杂志, 2013, (2): 134-138.

ZHONG K, TONG L T, LIU L Y, et al. Starch quality and pasting property analysis of different mung bean cultivars[J]. Crops, 2013, (2): 134-138.

[22] CARLSSON-KANYAMA A. Climate change and dietary choices-how can emissions of greenhouse gases from food consumption be reduced? [J]. Food Policy, 1998, 23(3/4): 277-293.

[23] 宋健民, 刘爱峰, 李豪圣, 等. 小麦籽粒淀粉理化特性与面条品质关系研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 272-279.

SONG J M, LIU A F, LI H S, et al. Relationship between starch physiochemical properties of wheat grain and noodle quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 272-279.

[24] 张昭会, 李放, 朱琳, 等. 矿源黄腐酸钾施用方法对大豆产量的影响[J]. 腐植酸, 2020, (3): 53.

ZHANG Z H, LI F, ZHU L, et al. Effects of application methods of potassium fulvic acid from mineral sources on soybean yield[J]. Humic Acid, 2020, (3): 53.

[25] WANI I A, SOGI D, WANI A A, et al. Physico-chemical properties of starches from Indian kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45 (10): 2176-2185.

[26] FREDRIKSSON H, SILVERIO J, ANDERSSON R, et al. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches[J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 35(3/4): 119-134.

[27] 许倍铭. 播期和种植密度对不同强筋小麦品种产量及品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.

XU B M. Effects of sowing date and planting density on yield and quality of wheat varieties with strong gluten[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.

[28] STONE L A, LORENZ K. The starch of amaranthus-physico-chemical properties and functional characteristics[J]. Starch, 1984, 36(7): 232-237.

[29] 刘惠娟, 赵春燕, 龚加顺. 蕉芋淀粉和玉米淀粉理化特性对比分析[J]. 食品科技, 2022, 47(3): 271-277.

LIU H J, ZHAO C Y, GONG J S. Comparative analysis of starch physicochemical properties between *Canna edulis* ker starch and corn starch[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(3): 271-277.

[30] SINGH M, ADEDEJI A, SANTRA D. Physico-chemical and functional properties of nine proso millet cultivars[J]. Transactions of the Asabe, 2018, 61(3): 1165-1174.

[31] 曾绍校. 莲子淀粉品质特性的研究与应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2007.

ZENG S J. Studies on qualitative characteristics of lotus-seed (*Nelumbo nucifera* Gaertn) starch and its application[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007.

[32] HOOVER R, HUGHES T, CHUNG H J, et al. Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: a review [J]. Food Research International, 2010, 43(2): 399-413.

[33] 杨传铭, 胡聪聪, 孙显龙, 等. 结实期不同时段低温对寒地粳稻品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 96-103.

YANG C M, HU C C, SUN X L, et al. Effects of low temperature on quality of japonica rice at different periods of grain filling stage in cold regions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41 (3): 96-103.

[34] CAI J J, CHAO C, NIU B, et al. New insight into the interactions among starch, lipid and protein in model systems with different starches[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106323.

[35] 李旭, 王弘, 王鼎, 等. 不同直链淀粉含量小麦淀粉理化性质与消化特性研究[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(4): 470-476.

LI X, WANG H, WANG D, et al. Digestibility and physicochemical properties of wheat starch differing in amylose content[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(4): 470-476.

[36] LIU X W, CAI R G, LI Y, et al. Starch component characteristics and physicochemical properties in wheat grains with different amylose contents in relation to low light after anthesis[J]. Starch, 2018, 70 (1/2): 1700050.