网络出版时间:2026-05-11 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.11.012

施氮量对酿酒高粱品质特征的影响

张志燕,吴镇,赵虹璇,高小丽
(西北农林科技大学 农学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】研究氮肥对红甸子高粱外观品质、营养品质和蒸煮品质的影响,确定西北旱区有效促进红甸子高粱外观品质、营养品质及蒸煮品质协同提升的最佳施氮量,为西北旱区酿酒高粱合理施肥及优质高效种植提供技术支撑。【方法】以红甸子高粱品种为试验材料,在榆林小杂粮试验示范站进行大田种植,研究不施氮(N0)、低氮(150 kg/hm^2,N1)、中氮(225 kg/hm^2,N2)、高氮(300 kg/hm^2,N3)处理对高粱外观品质、营养品质和蒸煮品质的影响。【结果】适量施氮(N1和N2,150~225 kg/hm^2)使高粱米长度、宽度、直径显著增加,粒型最优;施氮量增至225 kg/hm^2(N2)时,产量达峰值;施氮显著降低高粱米全粉总淀粉与直链淀粉含量,提高支链淀粉占比;高粱米全粉蛋白质、谷蛋白、醇溶蛋白及清蛋白含量随施氮量的增加而显著升高,高氮处理(N3)下增幅最为明显;球蛋白对氮素响应不显著,谷醇比随施氮量增加呈先降后升的趋势。高粱米蒸煮吸水率、体积膨胀率、碘蓝值均随施氮量增加呈下降趋势;施氮量显著影响高粱米蒸煮后的质构特性,其硬度、内聚性、胶黏性、咀嚼度与复原力均随施氮量增加呈先升后降趋势,在N2处理出现最大值;施氮通过降低高粱米蒸煮后有机硫化物含量显著影响高粱米蒸煮后的风味特征;不施氮处理(N0)的峰值黏度、崩解度、最终黏度、回生值等参数值最高,施氮后各项糊化指标整体降低,N2处理的黏度参数值最低。【结论】适量施氮(N1和N2,150~225 kg/hm^2)在优化高粱米营养组成及蒸煮后质构特性方面表现较优,且N2处理产量最高,综合考虑投入产出成本及环境效应,在保证一定产量的前提下可考虑适量减氮,在西北旱区红甸子高粱的推荐施肥量为150~225 kg/hm^2。

[关键词] 高粱;施氮量;外观品质;营养品质;蒸煮品质
[中图分类号] S514.062 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)11-0126-09

Effects of nitrogen application rate on the quality characteristics of wine-making sorghum

ZHANG Zhiyan, WU Zhen, ZHAO Hongxuan, GAO Xiaoli
(*College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the effects of nitrogen fertilizer on the appearance, nutritional and cooking qualities of Hongdianzi sorghum, and to determine the optimal nitrogen application rate for synergistically improving these qualities in the arid area of northwest China, thereby providing technical support for rational fertilization and high-quality, efficient cultivation of wine-making sorghum in this region. 【Method】 Using Hongdianzi sorghum as test materials, field experiments were conducted in Yulin Minor Grain Corps Experimental and Demonstration Station to investigate the effects of no nitrogen (N0), low nitrogen (150 kg/hm^2, N1), medium nitrogen (225 kg/hm^2, N2) and high nitrogen (300 kg/hm^2, N3) treatments on the appearance, nutritional and cooking qualities of sorghum. 【Result】 Appropriate nitrogen application (N1 and N2,

[收稿日期] 2026-01-22 [修回日期] 2026-03-09
[基金项目] 陕西省技术创新引导专项"专用酿造高粱新品种选育及配套栽培技术示范"(2022QFY02-04);陕西省重点研发计划项目"主要小宗粮豆丰产增效绿色技术集成与示范"(2023-ZDLNY-06)
[作者简介] 张志燕(2001—),女(回族),青海海东人,在读硕士,主要从事高粱栽培研究。E-mail:zzybjyx@nwafu.edu.cn
[通信作者] 高小丽(1968—),女,陕西宁强人,研究员,博士,硕士生导师,主要从事小杂粮优质抗逆高效栽培与品质生理研究。E-mail:gao2123@nwsuaf.edu.cn

150－225 kg/hm^2) significantly increased the length, width and diameter of sorghum kernels, resulting in the optimal grain morphology. Grain yield peaked at 225 kg/hm^2 (N2). Nitrogen application significantly reduced the total starch and amylose contents in whole sorghum flour, while increasing the proportion of amylopectin. The contents of protein, glutenin, prolamin and albumin in whole sorghum flour increased significantly with increasing nitrogen application rate, with the most pronounced increase under high nitrogen treatment (N3). Globulin showed no significant response to nitrogen application, whereas the glutenin-to-prolamin ratio decreased initially and then increased with increasing nitrogen application rate. The boiling water absorption ratio, volume expansion ratio and iodine blue value of sorghum kernels decreased with increasing nitrogen application rate. Nitrogen application rate significantly affected the textural properties of cooked sorghum kernels, with hardness, cohesiveness, gumminess, chewiness and resilience all initially increasing and then decreasing with increasing nitrogen rate, peaking under the N2 treatment. Nitrogen application significantly affected the flavor characteristics of cooked sorghum kernels by reducing the content of organic sulfide. The peak viscosity, breakdown, final viscosity and retrogradation value were the highest under the N0 (no nitrogen) treatment. Overall, nitrogen application decreased gelatinization parameters, with the lowest viscosity values observed in the N2 treatment. 【Conclusion】 Appropriate nitrogen application (N1 and N2, 150－225 kg/hm^2) effectively optimized the nutritional composition and cooked texture properties of sorghum kernels, with the highest grain yield obtained under the N2 treatment. Considering input-output efficiency and environmental impacts, appropriate nitrogen reduction could be adopted while maintaining adequate yield. For Hongdianzi sorghum in the arid region of Northwest China, the recommended nitrogen application rate is 150－225 kg/hm^2.

Key words: sorghum; nitrogen application rate; appearance quality; nutritional quality; cooking quality

高粱(*Sorghum bicolor*(L.)Moench)为禾本科黍亚科高粱属一年生草本植物，是全球第五大粮食作物，为亚洲、非洲和拉丁美洲地区近30个国家提供粮食来源，在保障发展中国家口粮供应过程中扮演着关键角色[1-2]。凭借高光效、抗旱性、耐盐碱及耐贫瘠等一系列突出的抗逆生理特性，高粱在我国北方旱作农业生产体系中占据着关键地位。除作为传统口粮外，高粱因籽粒淀粉含量高、蛋白质含量适中，成为茅台、五粮液、汾酒等国内龙头企业酿造优质白酒的核心原料[3]。随着大众消费升级与健康饮食意识增强，高粱所含的抗性淀粉、总酚等功能成分及其降血糖、抗氧化等生理功效日益受到关注[4-5]，推动高粱从传统的酿造与饲用向营养健康食品领域拓展，高粱品质改善研究逐渐进入消费者视野。

施氮是协调作物产量形成与品质改善的重要农艺措施。西北地区干旱、土壤瘠薄、氮素营养供应不足易限制农作物正常的生长发育[6]。然而，我国消耗了全球近三分之一的氮肥，农业生产中普遍存在的氮肥过量施用问题引发土壤酸化、水体污染等环境问题[7-8]。高粱品质是评价其营养价值、商品价值与加工适用性的核心指标，主要包括外观品质、营养品质、蒸煮品质、加工品质和安全品质等，其形成不仅受遗传背景控制，更易受环境因素与栽培措施的影响，其中氮肥施用量是关键栽培影响因素之一。外观品质作为消费者直观评价的首要指标，直接影响商品接受度；营养品质是决定其加工用途的核心基础，主要取决于高粱籽粒中淀粉与蛋白质的含量及组成；蒸煮品质则直接关联酿酒高粱的酿造适用性与食用高粱米的感官体验。当前，随着我国白酒产业与杂粮健康食品市场的快速发展，高支链淀粉占比、优异蒸煮糊化性能的专用酿酒高粱以及适口性好、营养丰富的食用高粱米已成为产业核心刚需[9-10]，但两类用途的高粱品质核心评价指标存在显著差异。在糜子、谷子等杂粮作物中的研究表明，施氮显著影响籽粒淀粉及蛋白质等营养成分的积累，进而调控最终品质[11-12]。在蒸煮与食味品质上，施氮往往带来负面影响，此规律在水稻这一主流禾谷类作物中已被广泛证实，对高粱品质研究具备重要的理论参考价值。氮素主要通过改变籽粒的化学组成，尤其是蛋白质和淀粉的代谢与积累来影响其蒸煮特性。蛋白质以蛋白体形态存在于胚乳中，紧密填充于淀粉颗粒间隙，这种空间分布对淀粉粒在糊化过程中的膨胀产生了物理阻遏作用[13]，因此高蛋白含量通常会导致大米米饭(以下简称“米饭”)黏度降低、硬度增加。蛋白质对

食味品质的影响则因品种而异,适量蛋白质含量可使粳米米饭具有良好的弹性和嚼劲,受到部分消费者青睐;而在籼米中,过高蛋白质含量往往与劣化食味品质相关[14]。研究表明,氮肥会降低米饭的食味值,增加其硬度、内聚性、胶黏性和咀嚼度,同时降低黏性和黏附性,而黏度特性与米饭的黏性和食味品质呈正相关,适度减少氮肥用量可以改善米饭质地[15]。峰值黏度、最终黏度和崩解值的下降,以及回生值的升高等糊化特性指标的改变通常与硬质、黏性差且冷后易变硬的米饭质地相关联[16]。适当增加氮供应可提高1-戊烯-3-酮、己醛、顺-3-己烯醛、反-2-己烯醛、2-甲基-4-戊烯醛及6-甲基-5-庚烯-2-酮等番茄特征风味关键挥发性物质的含量,而过量氮供应则可能导致风味劣变[17]。高粱脱壳加工成高粱米是我国北方旱区传统的杂粮食用方式,蒸煮品质同时决定了高粱的酿酒适用性与食用价值[10],而现有关于氮肥对高粱品质影响的研究多集中于饲用高粱的营养品质提升[18],针对酿酒专用高粱的研究多聚焦于品种筛选[9],但关于施氮量对酿酒高粱蒸煮糊化特性、淀粉组分等核心酿造指标的研究仍较少。目前西北旱区酿酒高粱生产多依赖经验施肥,缺乏科学统一的氮肥管理标准,制约了其产量与品质的协同提升,无法满足白酒酿造要求的优质标准。红甸子高粱是西北农林科技大学选育的酿酒专用高粱品种,适于西北旱区种植,其籽粒外观品质、淀粉组成、蒸煮糊化特性等核心品质直接决定酿酒生产效益,而现有研究尚未明确其品质形成对施氮量的响应规律。因此,本试验以适合西北旱区种植的酿酒专用高粱品种红甸子为研究对象,探讨有效促进红甸子高粱外观品质、营养品质及蒸煮品质等酿酒核心评价指标提升的最佳施氮量,旨在为西北旱区酿酒专用高粱的合理施肥及高品质种植提供技术依据,同时为该品种食用价值开发提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年在陕西榆林小杂粮试验示范站(东经109°44′,北纬38°22′,海拔1 080 m)进行。该地区属于温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温为10 ℃,年平均降水量为400～500 mm,且多集中于7－9月。土壤为砂壤土,0～20 cm土层土壤养分含量为pH值8.64,有机质含量5.48 g/kg,全磷含量0.67 g/kg,全钾含量18.71 g/kg,全氮含量0.38 g/kg,速效磷含量17.65 mg/kg,速效钾含量102 mg/kg,碱解氮含量100 mg/kg,硝态氮含量4.84 mg/kg,铵态氮含量6.38 mg/kg。

1.2 试验材料

供试高粱品种:红甸子高粱,由西北农林科技大学小杂粮科技创新团队提供。供试肥料:尿素(N含量46%),四川泸天化股份有限公司生产。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,采用垄膜沟播集雨种植模式,垄上覆膜,沟中种植,行距为45 cm,株距为15 cm,种植密度15万株/hm^2。施氮量设4个水平:不施氮(N0)、低氮(150 kg/hm^2,N1)、中氮(225 kg/hm^2,N2)、高氮(300 kg/hm^2,N3)。试验所用氮肥为尿素,磷肥为P_2O_5(90 kg/hm^2),钾肥为K_2O(90 kg/hm^2),在播种前作为基肥一次性施入,施肥后深翻,使肥料与土壤混匀后再播种覆膜。每个处理设4次重复,小区面积18 m^2(3.6 m×5 m)。5月上中旬播种,9月底收获,田间管理按照当地大田管理措施进行。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 *样品准备* 在高粱成熟期取样,所有取样均设置3次生物学重复,各处理每次重复取样10穗,自然风干至水分含量12%～14%后手工脱壳,将脱壳后的高粱米分为两部分:一部分整粒高粱米用于评估物理特性、蒸煮品质;另一部分研磨粉碎(A11型研磨机,艾卡仪器设备有限公司),过100目筛(孔径150 μm)获得高粱全粉,用于测定营养品质、糊化特性等。

1.4.2 *籽粒产量、粒型及营养品质的测定* 于高粱成熟期,在每个小区去除1 m进行收获以避免边际效应,选取10个代表性高粱穗,于自然环境中晾晒风干后用全自动数粒仪(DC-3型,郑州德仁电子科技有限公司)随机取1 000粒籽粒,借助分析天平称籽粒千粒质量,结合单穗总质量与千粒质量得出穗粒数。另外,在未取样区域内划定1.8 m^2范围,采用人工方式收获脱粒,经晾晒至恒质量后称质量,进而折算得出产量。

采用SC-G型自动考种分析仪(SC-G型,深圳万深有限公司)对脱壳后的高粱米开展粒型指标测定,具体包括长度、宽度、长宽比、直径及圆度。

采用蒽酮比色法测定高粱米全粉总淀粉含量[19];直链淀粉含量使用Solarbio直链淀粉含量检

测试剂盒（BC4260，北京索莱宝科技技术有限公司）进行测定；支链淀粉含量用总淀粉含量与直链淀粉含量之差表示；支链淀粉占比为支链淀粉占总淀粉的比例。

籽粒蛋白质及其组分含量采用凯氏定氮法测定，定氮系数为 6.25。参考 MAO 等[20]的 Osborne 分级提取法，依次使用蒸馏水、0.5 moL/L NaCl 溶液、体积分数 75% 乙醇和 0.1 mol/L NaOH 溶液提取高粱全粉中的清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白。谷醇比按谷蛋白与醇溶蛋白含量的比值计算。

1.4.3　*蒸煮品质的测定*　参照何诚等[21]的方法测定高粱米蒸煮特性，包括蒸煮吸水率、体积膨胀率和碘蓝值。

通过质构仪（TA. XT. plusC 型，英国 stable micro systems 公司）测定高粱米蒸煮后的质构特性[22]。选用 P/36R 型圆柱形压缩探头，测定参数为：压缩比设置为 75%；测试前速度 1.00 mm/s，测试速度 0.5 mm/s，测试后速度 0.5 mm/s；触发力设置为 5.0 g（0.049 N），数据采集频率 200 Hz（pps）。

高粱米蒸煮后挥发性成分分析参考王逸欢等[23]的方法。电子鼻（PEN3，德国 AIRSENSE）测定条件：采样时间 1 s/组，传感器自清洗时间 100 s，预采样时间 5 s，进样流量 400 mL/min，测量时间 70 s，取稳定后 55～69 s 的数值，每个样品进行 5 次平行试验。

高粱米全粉的糊化特性使用快速黏度仪（RVA 4500，瑞典波通公司，瑞典）测定[24]。

1.5　数据分析

利用 Microsoft Excel 2023 软件进行数据整理，单因素方差分析（ANOVA）采用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行，图表绘制使用 Origin 2022 软件。

2　结果与分析

2.1　施氮量对高粱米粒型及产量的影响

籽粒形态影响食用米的品质和交易价格，通常以粒大、饱满且形状均匀为优，是衡量高粱米外观品质和产量的重要性状[25]。由表 1 可以看出，施氮量显著调控高粱米形态特征（$P<0.05$）。与不施氮处理（N0）相比，适量施氮（N1 和 N2）会使高粱米长度、宽度、直径显著增加（$P<0.05$），其中长度在 N2 处理下达到最大值，宽度在 N1 处理下达到最大值，直径则在 N1 和 N2 处理下均达最大值。高氮处理（N3）则抑制高粱米纵向生长，其长度较 N1 和 N2 处理分别降低 2.31% 和 2.54%，直径较 N1 和 N2 处理均降低 0.75%，圆度在 N3 处理下升至峰值，较 N0 提高 2.27%，长宽比略低于其他处理。综上所述，适量施氮（N1 和 N2）有利于优化高粱米形态，促进高粱米粒大饱满，与之相比，高氮则使高粱米长度减小、圆度增加。

表 1　施氮量对高粱米粒型及产量的影响

Table 1　Effects of nitrogen application rate on grain morphology and yield of sorghum

处理 Treatment	高粱米 Sorghum kernels					千粒质量/g 1 000-grain weight	穗粒数 Kernels per spike	产量/（kg·hm^{-2}） Grain yield
	长度/mm Length	宽度/mm Width	长宽比 Length width ratio	直径/mm Diameter	圆度 Roundness			
N0	4.06±0.02 c	3.51±0.01 b	1.16±0.01 a	3.73±0.01 b	0.88±0.00 c	24.13±0.45 c	2 186±73.9 c	5 803±196.2 d
N1	4.32±0.01 a	3.76±0.02 a	1.15±0.00 b	3.99±0.01 a	0.89±0.00 ab	26.81±0.84 b	2 434±38.2 b	7 177±112.8 b
N2	4.33±0.02 a	3.75±0.02 a	1.16±0.00 a	3.99±0.02 a	0.88±0.01 bc	28.43±0.32 a	2 577±9.7 a	8 060±30.4 a
N3	4.22±0.03 b	3.75±0.03 a	1.14±0.01 b	3.96±0.03 a	0.90±0.01 a	26.93±0.34 b	2 261±45.5 c	6 698±134.9 c

注：N0、N1、N2、N3 分别代表施氮量为 0，150，225 和 300 kg/hm^2；表中数值为 3 次重复的平均值±标准差；同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note：N0，N1，N2 and N3 represent nitrogen application rates of 0，150，225 and 300 kg/hm^2，respectively. Values in the table are presented as the mean±standard deviation of three replicates. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments（$P<0.05$）. The same below.

由表 1 还可以看出，高粱的产量及产量构成因子对施氮量响应呈现阈值效应，施氮量显著影响高粱的产量构成因子及最终产量（$P<0.05$）。整体来看，高粱籽粒的千粒质量、穗粒数和产量随氮肥的增施呈现先上升后下降的趋势。当施氮量增至 225 kg/hm^2（N2）时，各指标达峰值，其中千粒质量和穗粒数较 N0 分别提高 17.82% 和 17.89%，产量显著跃升至 8 060 kg/hm^2，较 N0 增产 38.89%，并显著高于其他处理。过量施氮（N3）则导致穗粒数锐减至 2 261，产量降至 6 698 kg/hm^2，其产量较 N2 显著降低 16.90%。

2.2　施氮量对高粱米全粉淀粉及其组分的影响

由表 2 可以看出，施氮量显著调控高粱米全粉的总淀粉及淀粉组分含量（$P<0.05$）。随施氮量的增

加,总淀粉和直链淀粉含量呈逐渐下降趋势,不施氮处理(N0)的高粱米全粉总淀粉含量为773.83 g/kg,高氮处理(N3)降至746.40 g/kg;直链淀粉含量也由不施氮处理(N0)的151.63 g/kg同步递减至130.23 g/kg(N3);支链淀粉含量稳定在616.17 ~ 623.07 g/kg,各施氮处理间无显著差异。支链淀粉占比则随施氮量的升高而显著升高,在N3处理下出现最高值,为82.55%,较N0处理上升2.67%。

表2 施氮量对高粱米全粉淀粉及其组分的影响

Table 2 Effects of nitrogen application rate on starch and its components in whole sorghum flour

处理 Treatment	总淀粉含量/(g·kg^{-1}) Total starch content	直链淀粉含量/(g·kg^{-1}) Amylose content	支链淀粉含量/(g·kg^{-1}) Amylopectin content	支链淀粉占比/% Amylopectin proportion
N0	773.83±1.77 a	151.63±1.85 a	622.20±2.75 a	80.40±0.25 c
N1	761.56±3.21 b	142.14±0.82 b	619.42±3.52 a	81.34±0.15 b
N2	758.12±4.46 b	135.06±1.20 c	623.07±5.13 a	82.18±0.23 a
N3	746.40±5.00 c	130.23±0.55 d	616.17±5.45 a	82.55±0.18 a

2.3 施氮量对高粱米全粉蛋白质及其组分的影响

高粱米全粉蛋白质主要是由谷蛋白及醇溶蛋白组成,清蛋白和球蛋白含量相对较低。由表3可知,各施氮处理显著提高了高粱米全粉的蛋白质含量及其组分含量($P<0.05$),其中高氮处理(N3)下蛋白质含量为77.99 g/kg,较不施氮处理(N0)增幅36.94%。各蛋白组分中,作为贮藏蛋白的谷蛋白和醇溶蛋白对氮素的响应较为敏感,谷蛋白含量由N0处理的14.15 g/kg激增至N3处理的25.69 g/kg,增幅达81.56%;醇溶蛋白含量为2.33~5.42 g/kg,最大值也出现在N3处理,相比N0处理增幅132.62%;球蛋白含量在N0与N3处理间存在显著差异,而在N1、N2处理与其他处理间差异不显著,其合成受氮素调控影响较小;清蛋白含量随施氮量递增亦显著增加,由N0处理的2.15 g/kg线性增长至N3处理的4.06 g/kg,增幅为88.84%;谷醇比随施氮量的增加呈先下降后上升的非线性变化,最小值出现在N2处理,在N3处理回升,表明适量施氮(N1和N2)优先促进醇溶蛋白合成,而高氮处理(N3)则显著强化谷蛋白积累。

表3 施氮量对高粱米全粉蛋白质及其组分的影响

Table 3 Effects of nitrogen application rate on protein and its components in whole sorghum flour

处理 Treatment	蛋白质含量/(g·kg^{-1}) Protein content	清蛋白含量/(g·kg^{-1}) Albumin content	球蛋白含量/(g·kg^{-1}) Globulin content	谷蛋白含量/(g·kg^{-1}) Glutelin content	醇溶蛋白含量/(g·kg^{-1}) Prolamin content	谷醇比 Glutelin-to-prolamin ratio
N0	56.95±0.21 d	2.15±0.05 d	0.82±0.11 b	14.15±0.41 d	2.33±0.10 c	6.09±0.09 a
N1	68.06±1.22 c	2.49±0.06 c	1.06±0.21 ab	15.96±0.26 c	3.59±0.16 b	4.45±0.14 c
N2	72.03±0.36 b	3.55±0.16 b	0.96±0.06 ab	17.22±0.30 b	5.06±0.32 a	3.41±0.16 d
N3	77.99±0.50 a	4.06±0.16 a	1.13±0.12 a	25.69±0.85 a	5.42±0.11 a	4.74±0.07 b

2.4 施氮量对高粱米蒸煮特性的影响

蒸煮品质是高粱品质体系中的关键属性,指其在蒸煮及食用阶段所呈现的理化特性与感官属性,对高粱蒸煮品质的评价,通常通过测定高粱米蒸煮后的吸水率、膨胀率及碘蓝值等指标来实现[26]。如表4所示,施氮处理显著影响了高粱米的蒸煮特性($P<0.05$)。随施氮量递增,高粱米的吸水率、膨胀率及碘蓝值均呈现显著下降趋势,其中高氮处理(N3)的蒸煮吸水率、体积膨胀率及碘蓝值分别较不施氮处理(N0)降低13.22%,14.74%和42.16%。

表4 施氮量对高粱米蒸煮特性的影响

Table 4 Effects of nitrogen application rate on cooking characteristics of sorghum kernels

处理 Treatment	蒸煮吸水率/% Boiling water absorption rate	体积膨胀率/% Volume expansion ratio	碘蓝值($OD_{660\,nm}$) Iodine blue value
N0	201.27±4.58 a	186.71±3.88 a	1.02±0.08 a
N1	184.83±1.51 b	182.58±2.52 ab	0.67±0.06 b
N2	176.92±6.13 b	180.06±2.09 b	0.65±0.07 b
N3	174.67±7.47 b	159.19±2.10 c	0.59±0.06 c

2.5 施氮量对高粱米蒸煮后质构特性的影响

如表5所示,施氮对高粱米蒸煮后的质构特性有显著影响($P<0.05$)。不施氮处理(N0)下高粱米蒸煮后质构特性综合表现较劣,随着氮肥用量增加,高粱米蒸煮后的硬度、内聚性、胶黏性、咀嚼度及复原力均呈现先升后降的变化特征。上述指标的最大值均出现在中氮处理(N2),较未施氮对照(N0)分别提升79.69%,48.28%,107.57%,

98.78%和58.33%。

黏附性反映蒸煮后高粱米表面的黏着特性，其绝对值越大表明表面黏性越强。与不施氮处理（N0）相比，施氮处理下黏附性绝对值整体呈下降趋势，其中高氮处理（N3）绝对值最低，较N0降低57.95%。弹性在N0、N1、N2处理间无显著差异，但N3处理显著下降。N3处理下仍维持较高的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼度、复原力等，但较N2处理分别降低10.80%，8.08%，4.60%，4.00%和10.53%。

表5　施氮量对高粱米蒸煮后质构特性的影响

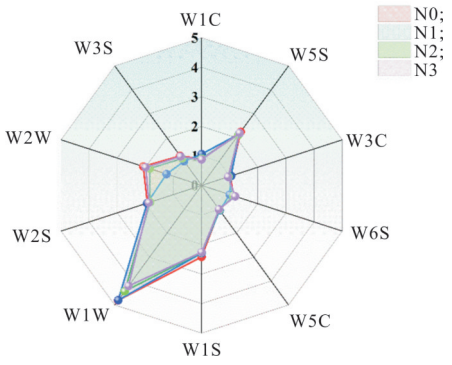
Table 5　Effects of nitrogen application rate on textural properties of cooked sorghum kernels

处理 Treatment	硬度/N Hardness	黏附性/mJ Adhesiveness	弹性 Springiness	内聚性 Cohesiveness	胶黏性/N Gumminess	咀嚼度/N Chewiness	复原力 Resilience
N0	132.28±2.80 d	−89.08±1.86 d	0.98±0.01 a	0.29±0.01 c	39.10±1.72 d	38.53±1.97 d	0.12±0.01 d
N1	175.15±4.64 c	−47.51±0.60 b	0.97±0.02 a	0.36±0.04 b	57.36±0.78 c	55.05±0.46 c	0.15±0.01 c
N2	237.70±3.93 a	−55.61±0.96 c	0.99±0.04 a	0.43±0.01 a	81.16±2.07 a	76.59±1.10 a	0.19±0.01 a
N3	212.03±3.74 b	−37.44±1.55 a	0.91±0.02 b	0.40±0.01 a	77.43±1.23 b	73.53±2.13 b	0.17±0.01 b

2.6　施氮量对高粱米蒸煮后挥发性成分的影响

如图1所示，10个传感器对不同挥发性成分的响应值呈现出显著区别。其中对硫化物灵敏的W1W、对甲基类灵敏的W1S、对氮氧化物高灵敏的W5S及对有机硫化物灵敏的W2W响应特征尤为突出。具体而言，W1W在所有处理中均表现出最高的响应值，说明高粱米在蒸煮过程中产生了大量的硫化物。但W1W的响应值随施氮量增加呈下降趋势，W1S亦下降，说明氮肥施用可能造成硫化物、甲基类物质的合成受到抑制。W2W的响应值在各处理间差异最为明显，N0处理在W5S、W2W的响应值最高，达2.25和2.08，各施氮处理在W2W的响应值较N0处理均呈现不同程度下降，这表明各施氮处理间蒸煮气味的差异主要源于氮氧化合物与有机硫化物等挥发性物质含量的变化。综上所述，施氮可能通过降低高粱米蒸煮后有机硫化物含量显著影响其风味特征。

由图2可以看出，第1主成分（PC1）与第2主成分（PC2）的方差贡献率分别为49.5%与27.5%，累计方差贡献率达77.0%，表明该模型可较好地反映样本大多数挥发性成分的气味信息。载荷图中，PC1主要与芳香苯类、有机硫化物、醇类、醛酮类、甲基类等气味成分相关，PC2则主要关联氮氧化合物与有机硫化物。不同施氮量样本在PCA图中呈现明显分离趋势，其中N0处理的样本全部集中于PC1负向、PC2正向区域；N1处理的样本则全部位于PC1正向、PC2负向区域，与N0处理呈对角分布；N2和N3处理的样本主要分布于PC1负向区域、PC2负向区域，说明其挥发性物质特征相近。各处理样本虽存在个别偏离，但整体无明显交叉，表明不同施氮量高粱米蒸煮后挥发性物质特征得到有效区分。



W1C. 芳香成分，苯类；W5S. 对氮氧化合物高灵敏；W3C. 对芳香成分灵敏，氨类；W6S. 主要对氢化物有选择性；W5C. 短链烷烃芳香成分；W1S. 对甲基类灵敏；W1W. 对硫化物灵敏；W2S. 对醇类、醛酮类灵敏；W2W. 芳香成分，对有机硫化物灵敏；W3S. 对长链烷烃灵敏。下同。

W1C. Aromatic components, benzenes; W5S. Highly sensitive to nitrogen oxides; W3C. Aromatic components sensitive, ammonia; W6S. Mainly selective for hydrides; W5C. Short-chain alkanes and aromatic components; W1S. Sensitive to methyl compounds; W1W. Sensitive to sulfides; W2S. Sensitive to alcohols, aldehydes and ketones; W2W. Aromatic components, sensitive to organic sulfides; W3S. Sensitive to long-chain alkanes. The same below.

图1　施氮量对高粱米蒸煮后挥发性成分影响的电子鼻雷达图

Fig. 1　Electronic nose radar chart showing effects of nitrogen application rate on volatile components of cooked sorghum kernels

2.7　施氮量对高粱米全粉糊化特性的影响

糊化特性是评价蒸煮品质的关键参数之一。各氮肥处理下高粱米全粉的糊化特性差异如表6所示。由表6可知，施氮量显著改变了高粱米全粉的糊化特性（$P<0.05$）。峰值黏度、崩解度、最终黏度随施氮量增加呈现先降低后升高的变化趋势，不施氮处理（N0）呈现高黏度特征，中氮处理（N2）达谷

值,N1、N2和N3处理分别较N0下降21.22%,27.85%和19.51%。与不施氮处理(N0)相比,施氮处理的回生值显著降低,但施氮处理间差异不显著($P<0.05$)。随施氮量增加,高粱米全粉的起糊温度从76.20 ℃显著升至78.45 ℃。综上所述,氮肥可以使高粱全粉的峰值黏度、崩解度、最终黏度、回生值降低,而起糊温度升高。

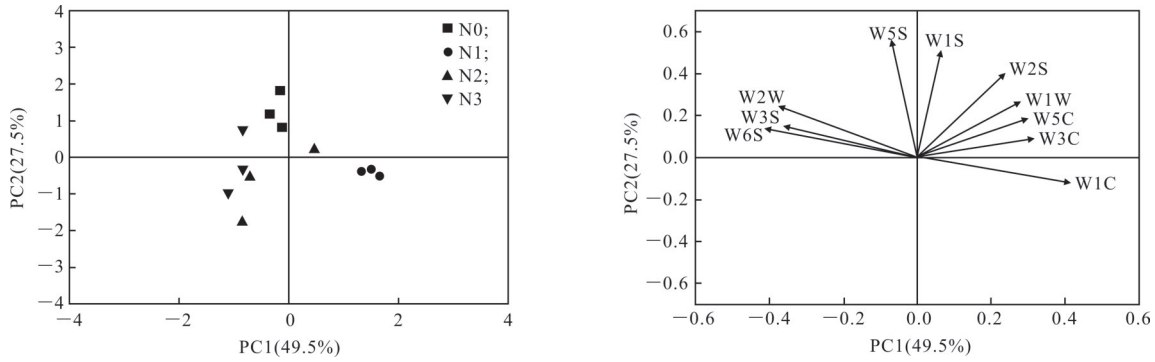


图2 施氮量对高粱米蒸煮后挥发性成分影响的主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of the effects of nitrogen application rate on volatile components in cooked sorghum kernels

表6 施氮量对高粱米全粉糊化特性的影响

Table 6 Effects of nitrogen application rate on pasting properties of whole sorghum flour

处理 Treatment	峰值黏度/cP PV	崩解度/cP BD	最终黏度/cP FV	回生值/cP SB	起糊温度/℃ PTM
N0	2 275.00±21.79 a	919.33±60.53 a	2 543.67±47.90 a	1 188.00±47.62 a	76.20±0.56 c
N1	1 828.67±14.64 c	703.00±4.58 b	2 102.33±8.96 bc	976.67±3.79 b	77.00±0.74 bc
N2	1 792.33±4.93 d	663.33±7.77 b	2 047.33±14.57 c	918.33±17.56 b	77.50±0.05 ab
N3	1 928.00±17.06 b	706.33±30.89 b	2 144.67±42.25 b	923.00±56.24 b	78.45±0.85 a

3 讨 论

3.1 施氮对高粱产量及高粱米全粉营养品质的影响

氮肥通过调控作物体内碳氮代谢同化物的分配影响籽粒产量和营养品质。细长形状常被认为表征优良的水稻籽粒外观[27]。本研究结果表明,适量施氮(N1和N2,150~225 kg/hm^2)显著增加高粱米长度、宽度、直径、圆度,这与糜子上的研究结果施氮处理普遍优化粒型,导致籽粒长度、宽度增加[12]类似。WANG等[28]研究表明,在适宜的施氮范围内,施氮量与高粱产量呈显著正相关。在本试验中,随施氮量的增加高粱产量得到显著提升,与前人研究结果[28]一致。随施氮量增加,高粱米全粉总淀粉与直链淀粉含量显著下降,而蛋白质及各组分含量(尤其是谷蛋白与醇溶蛋白)则显著上升,这与糜子[12]和水稻[29]中的研究结论一致。BUTLER等[30]研究表明,单宁优先与分子量大、结构松散、富含脯氨酸的醇溶蛋白结合形成难溶性复合物,干扰其在75%乙醇中的有效溶出,导致醇溶蛋白测定值偏低;同时,部分与单宁结合的蛋白质可能在后续碱溶步骤中被归入谷蛋白组分,这为本研究中醇溶蛋白含量低于预期、谷蛋白含量相对较高的现象提供了合理解释。GUO等[27]指出,增施氮肥协同提高了籽粒中碳代谢关键酶和氮代谢关键酶的活性,同时抑制了颗粒结合型淀粉合成酶(granule-bound starch synthase,GBSS)和淀粉脱支酶(starch debranching enzyme,DBE)的活性,这一系列酶活性的变化导致直链淀粉含量随施氮量增加而降低,支链淀粉和蛋白质含量则随之升高,这为本研究结果提供了理论支持。蛋白质增加导致淀粉含量降低的消长关系是碳氮代谢竞争的直接体现,高氮供应驱使碳氮代谢中ATP和碳骨架等关键光合产物优先流向蛋白质合成,从而导致淀粉积累减少[12]。较低的直链淀粉和较高的支链淀粉比例通常被认为有利于高粱米蒸煮糊化和酿造[9]。值得注意的是,本研究中高粱米全粉支链淀粉占比随施氮量升高而增加,这可能意味着氮素对直链淀粉合成有一定抑制作用,具体影响机理有待进一步探讨。

3.2 施氮对高粱米蒸煮品质的影响

本研究结果表明,施氮量显著影响高粱米的蒸煮品质,随施氮量增加,高粱米的蒸煮吸水率、体积

膨胀率、碘蓝值呈下降趋势，这与水稻中氮肥对蒸煮品质的影响趋势一致。前人研究表明，氮肥施用虽可提高作物产量，但往往会降低其蒸煮品质[16, 31]。施氮后籽粒蛋白质含量上升，淀粉与直链淀粉含量下降[29, 31]，直链淀粉含量降低直接关联碘蓝值下降，而蛋白质尤其是外层蛋白质不仅与淀粉竞争水分，其空间结构也会阻碍水分进入籽粒内部，进而导致蒸煮过程中吸水率与体积膨胀率下降[13]。本研究结果表明，在糊化特性方面，施氮后高粱米全粉的峰值黏度、崩解度、最终黏度等均降低，这与 WEI 等[32]在水稻中高氮条件下更多的蛋白质体附着在淀粉粒表面形成的“蜂窝状结构”，进一步抑制淀粉糊化的研究结果一致。SHI 等[13]研究表明，施氮导致的热稳定性提升与籽粒微观结构有序性的增强密切相关。高氮处理下蛋白质中 β-折叠结构增加，这种疏水性更强的二级结构能更有效地阻止水分破坏淀粉的短程有序结构，最终增强籽粒微观结构的有序性。LI 等[33]认为，烹饪后米饭的硬度与直链淀粉的特性密切相关，较高的直链淀粉含量可能导致适口性下降，其机理在于直链淀粉分子易与支链淀粉链在结晶区域内发生相互缠结或形成共结晶结构，这种作用抑制了淀粉颗粒在糊化过程中的充分膨胀，进而促使米饭形成更硬的质地。米饭的黏性则主要取决于烹饪过程中溶出的支链淀粉，其数量、分子大小以及短链比例的增加，会通过提供更多的分子间作用位点而提高黏性。XIONG 等[34]研究表明，支链淀粉链长分布的改变直接影响米饭的质构特性，fa 和 fb1 与米饭硬度呈正相关，与黏性呈负相关；fb2 和 fb3 则相反，这为解析本研究中高粱米蒸煮后质构特性的变化提供了新视角。WANG 等[35]在糜子中的研究指出，氮肥主要调控酯类、萜类和醛类 3 类关键风味物质，其中醛类主要来源于脂质的氧化分解，对整体风味贡献最为显著，氨基酸作为脂质抗氧化剂在减少挥发性醛类形成中发挥重要作用[36]。施氮可能通过改变脂肪含量及脂肪酸组成影响脂质氧化途径，从而改变了醛类等风味前体物质的生成及含硫氨基酸代谢，最终导致电子鼻传感器有机硫化物等挥发性成分响应值的差异。

4　结　论

本研究结果表明，适量施氮（N1 和 N2，150～225 kg/hm^2）在优化高粱米营养组成及蒸煮后质构特性方面表现较优，其中施氮量 225 kg/hm^2 处理（N2）的产量最高，而过量施氮（N3，300 kg/hm^2）虽能提升蛋白质含量，但会抑制淀粉积累，对糊化特性等关键蒸煮指标产生负面影响，实际生产中需控制施氮量以平衡高粱营养品质及蒸煮品质。综合考虑投入产出成本及环境效应，在保证一定产量的前提下可考虑适量减氮，在西北旱区红甸子高粱的推荐施肥量为 150～225 kg/hm^2。

[参考文献]

[1] MUTISYA J, SUN C X, ROSENQUIST S, et al. Diurnal oscillation of SBE expression in sorghum endosperm[J]. Journal of Plant Physiology, 2009, 166(4): 428-434.

[2] PALMER G H. Sorghum: food, beverage and brewing potentials[J]. Process Biochemistry, 1992, 27(3): 145-153.

[3] 李顺国，刘猛，刘斐，等. 中国高粱产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学，2021，54(3)：471-482.
LI S G, LIU M, LIU F, et al. Current status and future prospective of sorghum production and seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 471-482.

[4] CHUNG I M, KIM E H, YEO M A, et al. Antidiabetic effects of three Korean sorghum phenolic extracts in normal and streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Food Research International, 2011, 44(1): 127-132.

[5] XIONG Y, ZHANG P Z, LUO J Q, et al. Effect of processing on the phenolic contents, antioxidant activity and volatile compounds of sorghum grain tea[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 85: 6-14.

[6] 孙志梅，武志杰，陈利军，等. 农业生产中的氮肥施用现状及其环境效应研究进展[J]. 土壤通报，2006，37(4)：782-786.
SUN Z M, WU Z J, CHEN L J, et al. Research advances in nitrogen fertilization and its environmental effects[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(4): 782-786.

[7] REN K, XU M G, LI R, et al. Optimizing nitrogen fertilizer use for more grain and less pollution[J]. Journal of cleaner production, 2022, 360: 132180.

[8] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. PNAS, 2013, 110(21): 8375-8380.

[9] 叶封志，吕高奇，杨磊，等. 优质酿酒高粱品种筛选研究[J]. 中国酿造，2023，42(5)：139-144.
YE F Z, LÜ G Q, YANG L, et al. Screening of high-quality liquor-making sorghum varieties[J]. China Brewing, 2023, 42(5): 139-144.

[10] TANWAR R, PANGHAL A, CHAUDHARY G, et al. Nutritional, phytochemical and functional potential of sorghum: a review[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 100501.

[11] LIU H Y, LIU B B, ZHOU H L, et al. Nitrogen fertilizer affects the cooking quality and starch properties of proso millet (*Panicum miliaceum* L.)[J]. Food Science & Nutrition,

2024,12(1):602-614.

[12] WANG H L,LI D M,MA Q,et al. Nitrogen fertilizer affects starch synthesis to define non-waxy and waxy proso millet quality[J]. Carbohydrate Polymers,2023,302:120423.

[13] SHI S J,ZHANG G Y,CHEN L L,et al. Different nitrogen fertilizer application in the field affects the morphology and structure of protein and starch in rice during cooking[J]. Food Research International,2023,163:112193.

[14] YIN X T,CHEN X Y,HU J L,et al. Effects of distribution,structure and interactions of starch,protein and cell walls on textural formation of cooked rice:a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2023,253:127403.

[15] LI Y M,LIANG C,LIU J F,et al. Moderate reduction in nitrogen fertilizer results in improved rice quality by affecting starch properties without causing yield loss[J]. Foods,2023,12(13):2601.

[16] ZHOU C C,HUANG Y C,JIA B Y,et al. Effects of cultivar,nitrogen rate,and planting density on rice-grain quality[J]. Agronomy,2018,8(11):246.

[17] WANG Y T,HUANG S W,LIU R L,et al. Effects of nitrogen application on flavor compounds of cherry tomato fruits[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2007,170(4):461-468.

[18] 张华英,李佳悦,姜超,等. 16个高丹草及饲用高粱品种(系)生产性能及营养品质的比较分析[J]. 饲料研究,2025,48(11):139-144.
ZHANG H Y,LI J Y,JIANG C,et al. Comparative analysis of performance and nutritional quality of 16 varieties(lines) of sorghum-sudan grass and forage sorghum[J]. Feed Research,2025,48(11):139-144.

[19] QIAO M M,XIA G Y,CUI T,et al. Effect of moisture,protein,starch,soluble sugar contents and microstructure on mechanical properties of maize kernels[J]. Food Chemistry,2022,379:132147.

[20] MAO X Y,HUA Y F,CHEN G G. Amino acid composition,molecular weight distribution and gel electrophoresis of walnut (*Juglans regia* L.) proteins and protein fractionations[J]. International Journal of Molecular Sciences,2014,15(2):2003-2014.

[21] 何诚,丁海龙,杨平,等. 南北酿酒高粱蒸煮品质研究[J]. 酿酒科技,2012(8):68-70.
HE C,DING H L,YANG P,et al. Investigation on steaming and cooking properties of six varieties of sorghum[J]. Liquor-Making Science & Technology,2012(8):68-70.

[22] 龚艳玲,李晶,苏莹,等. 2种电饭煲烹饪米饭质构测试方法比较研究[J]. 实验室检测,2023,1(1):23-29.
GONG Y L,LI J,SU Y,et al. Comparative study on 2 kinds of methods for testing the texture of rice cooked in electric rice cookers[J]. Laboratory Testing,2023,1(1):23-29.

[23] 王逸欢,夏书芹,张晓鸣,等. 电饭煲吸水阶段浸泡参数对陈粳米饭气味改良作用的影响[J]. 食品与发酵工业,2021,47(24):156-163.
WANG Y H,XIA S Q,ZHANG X M,et al. Effect of soaking parameters in water absorption stage of electric cooker on odor improvement of aged Japonica rice[J]. Food and Fermentation Industries,2021,47(24):156-163.

[24] ZHANG W L,YANG Q H,XIA M J,et al. Effects of nitrogen level on the physicochemical properties of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.) starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2019,129:799-808.

[25] REN D Y,DING C Q,QIAN Q. Molecular bases of rice grain size and quality for optimized productivity[J]. Science Bulletin,2023,68(3):314-350.

[26] NI C L,ZHANG S,ZHANG G P,et al. Evaluation of edible quality of sorghum based on principal component analysis[J]. Journal of Chemistry,2019,2019(1):2013109.

[27] GUO C C,ZHANG L,JIANG P,et al. Grain chalkiness is decreased by balancing the synthesis of protein and starch in hybrid indica rice grains under nitrogen fertilization[J]. Foods,2024,13(6):855.

[28] WANG Q Y,HUANG J,ZHANG Y Q,et al. Long-term excess nitrogen fertilizer reduces sorghum yield by affecting soil bacterial community[J]. Plants,2026,15(1):25.

[29] SINGH N,PAL N,MAHAJAN G,et al. Rice grain and starch properties:effects of nitrogen fertilizer application[J]. Carbohydrate Polymers,2011,86(1):219-225.

[30] BUTLER L G,RIEDL D J,LEBRYK D G,et al. Interaction of proteins with sorghum tannin:mechanism,specificity and significance[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society,1984,61(5):916-920.

[31] JIANG Y,CHEN Y,ZHAO C,et al. The starch physicochemical properties between superior and inferior grains of Japonica rice under panicle nitrogen fertilizer determine the difference in eating quality[J]. Foods,2022,11(16):2489.

[32] WEI X D,ZHAO Q Y,ZHAO C F,et al. Moderate nitrogen application synergistically improved yield and quality of Nanjing series Japonica rice varieties with good taste[J]. Plants,2025,14(6):940.

[33] LI H Y,GILBERT R G. Starch molecular structure:the basis for an improved understanding of cooked rice texture[J]. Carbohydrate Polymers,2018,195:9-17.

[34] XIONG R Y,TAN X M,YANG T T,et al. Relation of cooked rice texture to starch structure and physicochemical properties under different nitrogen managements[J]. Carbohydrate Polymers,2022,295:119882.

[35] WANG H L,XIONG Y H,ZHANG Y N,et al. Analysis of microstructure,starch properties,and volatilomicse reveals the effect of nitrogen fertilizer on cooking quality of proso millet[J]. Food Chemistry:X,2025,32:103381.

[36] HUANG J H,ZHAO N Y,WANG L J,et al. Effect of amino acids on the formation and distribution of volatile aldehydes in high oleic sunflower oil during frying[J]. Food Research International,2024,192:114749.

(责任编辑:屈李纯)