

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.03.011

段敏, 吴娜娜, 刘昆仑, 等. 过热蒸汽处理对谷物组分性质、食用品质及储藏特性影响研究进展[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 120-130.
DUAN M, WU N N, LIU K L, et al. Research progress on the effects of superheated steam treatment on grain component properties, edible quality and storage characteristics[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(3): 120-130.

过热蒸汽处理对谷物组分性质、食用品质及储藏特性影响研究进展

段 敏^{1,2}, 吴娜娜², 刘昆仑¹, 谭 斌²✉

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001;

2. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油加工研究所, 北京 100037)

摘 要: 本文综述了过热蒸汽处理对谷物组分性质、食用品质及储藏特性影响的研究进展。过热蒸汽处理能够促使蛋白质中的二硫键断裂, 改变其构象, 增加无序性, 强化无规则卷曲结构; 还能使面筋蛋白网络结构变得较为松散, 进而影响面团的弹性和延展性。过热蒸汽处理导致淀粉内部的结晶结构破坏, 促使分子链溶解和膨胀, 引起部分糊化, 从而影响淀粉颗粒的膨胀力和峰值黏度。在处理过程中, 无氧环境的存在有助于减缓氧化反应, 减少生物活性物质的损失。过热蒸汽的高温和高渗透性显著缩短了蒸煮时间, 减少不良气味的产生。本文还探讨了过热蒸汽处理对谷物相关氧化酶灭活及提升谷物储藏品质方面的应用研究, 分析了其在谷物中灭活酶类和杀菌的效果, 旨在为进一步探索过热蒸汽技术在谷物加工领域的应用提供参考。

关键词: 过热蒸汽处理; 谷物; 组分性质; 食用品质; 储藏特性

中图分类号: TS210.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)03-0120-11

网络首发时间: 2025-04-29 14:59:38

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20250429.1313.006>

Research Progress on the Effects of Superheated Steam Treatment on Grain Component Properties, Edible Quality and Storage Characteristics

DUAN Min^{1,2}, WU Na-na², LIU Kun-lun¹, TAN Bin²✉

(1. College of Grain, Oil and Food Science, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Grain and Oils Processing Research Institute, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: Superheated steam, as an emerging thermal treatment technology, has garnered significant attention in the field of grain processing due to its high thermal penetration in an oxygen-free environment.

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-01-15; 录用日期: 2025-01-16

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目“高纤基质全谷物食品加工共性关键技术研究”(2022YFF1100503); 全国粮食行业青年拔尖人才服务行业需求自主选题项目(LQ2018201、RC1801)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 14th Five-year Plan, China “Research on Common Key Technologies for the Processing of High-fiber Matrix Whole Grain Foods” (No. 2022YFF1100503); National Grain Industry Youth Top notch Talents Service Industry Demand Independent Topic Selection Project (No. LQ2018201, RC1801)

第一作者: 段敏, 女, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为健康谷物(全谷物)食品的营养与加工, E-mail: 1945615747@qq.com

通信作者: 谭斌, 男, 1972 年出生, 博士, 研究员, 首席科学家, 研究方向为健康谷物(全谷物)食品的营养与加工, E-mail: tb@ags.ac.cn

This article has reviewed the research progress on the effects of superheated steam treatment on the properties of grain components, edible quality, and storage characteristics. Superheated steam treatment can promote the breaking of disulfide bonds in proteins, altering their conformation, increasing disorder, and enhancing random coil structures. Moreover, the gluten protein network structure can be changed more loose by this treatment, thereby affecting the elasticity and extensibility of the dough. The crystalline structure within starch was also destroyed by superheated steam treatment, promoting the dissolution and swelling of starch molecular chains, causing partial gelatinization of starch, and thus affecting the swelling power and peak viscosity of starch granules. During the treatment process, the presence of an oxygen-free environment helped slow down oxidation reactions and reduce the loss of bioactive substances. The cooking time of grains can be shortened and the production of unpleasant odors can be effectively reduced by superheated steam treatment with high temperature and high permeability. This review also explored the application research of superheated steam technology in inactivating enzyme and grain-related oxidases, and improving the sterilization ability and storage quality of grains. This may provide references for further exploration of the application of superheated steam technology in the field of grain processing in the future.

Key words: superheated steam treatment; cereal; component properties; edible quality; storage characteristics

谷物通常需要加工,以提高其适口性和消化率,随着消费者需求增加、对营养和口感提出更高要求,应深入这两方面的研究并简化加工步骤。传统的谷物热加工方式主要有烘烤、蒸煮、高温流化、微波、挤压膨化等。烘烤虽然能够改善谷物的色泽和风味,但会造成营养成分流失,尤其是一些热敏感的维生素和抗氧化物质。蒸煮操作简便,但产品往往口感不佳,且易导致水溶性维生素损失。高温流化能够提升糙米的烹饪性能,但会引发“爆腰”现象,从而影响谷物的完整性。微波加热能够改善糙米的蒸煮特性和米饭风味,但同样会分解糙米中的一些营养物质。挤压膨化通过改变谷物结构性质,使其质地变软,更容易被消化和吸收,同时增加可溶性膳食纤维含量,但可能会降低一些功能性成分的含量。因此,谷物的性质与所采用的加工技术密切相关,适当的加工技术对于提升谷物产品的口感和感官品质至关重要。

过热蒸汽是一种新型的热加工技术,通过携带大量的潜热实现水分去除^[1]。1908年,HAUSBRAND首次提出将其用于干燥,1920年瑞典工程师KARREN,将其用于煤炭干燥,但设备缺乏、能源危机使其发展受限。直到20世纪80年代,该技术广泛应用于煤、板材等工业用途,

随后用于谷物、挂面等食品干燥。过热蒸汽的温度范围定义为100~400℃,通过加热使蒸汽从饱和状态到过热状态转变,其温度显著高于与其压力相对应的饱和温度。蒸汽发生器产生的饱和蒸汽通过蒸汽过热器加热,产生过热蒸汽,将其转移到过热蒸汽样品室中处理样品。在过热蒸汽处理的初始阶段,部分过热蒸汽在谷物的表面冷却凝结,随着谷物的温度增加,冷凝水蒸发,谷物水分含量降低^[2],在该过程中发生传质和传热。过热蒸汽特有的热物理性质以及干燥过程中液流压力差引起的体积流动,使得传质过程几乎没有阻力,水分迁移速率快,从而实现更高的干燥速率^[3]。此外,过热蒸汽能够均匀地与食品表面接触,使食品受热更加均匀,避免了传统加热方式可能出现的局部过热或加热不足的问题,过热蒸汽处理环境为无氧环境,可以有效减少食品在加工过程中因氧化反应而导致的品质下降,处理后的过热蒸汽可以重复利用(蒸发潜热),从而节约能源、降低生产成本,且在加工过程中产生的废气较少,减少对环境的污染。

近年来,国内外研究者对过热蒸汽处理在谷物及谷物制品的干燥、钝酶、杀菌脱毒等方面的应用进行了广泛研究。过热蒸汽处理对谷物淀粉的微观结构、膨胀势、糊化、消化特性有显著影

响,进而改善谷物品质,尽管目前该领域的研究主要集中在实验室阶段,但未来有望实现产业化应用。此外,过热蒸汽处理对谷物的理化、营养及蒸煮特性有不同的影响,可以保留谷物理想外观,显著缩短蒸煮时间。同时,其对谷物中的脂肪酶、脂肪氧化酶等活性具有显著的抑制作用,可以防止谷物籽粒的酸败变质,有效延长谷物的贮藏期。过热蒸汽杀菌的限制性因素较多,如产品品质高度依赖过热蒸汽处理的温度与时间,仅适合短时表面杀菌,如何提高杀菌效率和范围是未来需要考虑的问题。在过热蒸汽的实际应用中,通过精确优化过热蒸汽的温度和压力参数,不仅能够显著降低能耗,还能有效减少排放,实现更加环保的生产过程。随着技术的不断进步,过热蒸汽设备的设计和操作也在持续改进,新型材料的应用和智能化控制系统的引入,进一步提升了该技术的效率和可靠性,使其在各行业的应用前景更加广阔。本文对过热蒸汽对谷物的组分性质、食用品质及储藏特性进行总结,以期为进一步拓宽和深入研究过热蒸汽技术在谷物加工中的应用提供参考。

1 过热蒸汽处理对谷物组分性质的影响

过热蒸汽处理对谷物组分性质的影响是多方面的,包括对蛋白质、淀粉结构和功能特性的改变,以及该处理过程中谷物的脂质、维生素和矿物质等含量的变化(见表1)。

1.1 蛋白质

过热蒸汽处理对蛋白质的影响尤为显著,蛋白质作为食品的主要和多功能成分,其在加热过程中的理化和行为特性对食品的最终质量起着决定性作用。

过热蒸汽处理对蛋白质的组成和消化具有显著影响,瘤胃不可降解蛋白(Rumen undegradable protein, RUP)是瘤胃中没有被微生物降解的饲料蛋白质,这部分蛋白质能够直接进入真胃和小肠被分解吸收,避免蛋白质在瘤胃中被微生物降解和合成过程中的营养损失,从而提高了蛋白质的利用效率。与未经处理的样品相比,过热蒸汽处理后的玉米和小麦可溶性蛋白分别降低约

41%、77%,而大麦则降低约 93%,蛋白质组分的变化使 3 种谷物的 RUP 显著增加,同时提高谷物 RUP 的肠道消化率,表明过热蒸汽处理能够有效提高蛋白质利用率^[4]。

此外,热蒸汽处理能促使蛋白质结构改变,从而影响其溶解性和乳化性。研究显示,过热蒸汽处理的温度较高,会破坏蛋白质的螺旋区域和随后氨基酸基团之间的二硫键,从而显著降低蛋白质溶解度^[5]。LIU 等^[6]发现,短时间的过热蒸汽处理增强了小麦蛋白的 α -螺旋、 β -折叠、无规卷曲结构和疏水性能,进而提高了蛋白质的乳化性能和发泡能力。然而,长时间的过热蒸汽处理(如在 165 °C 和 190 °C 下)会导致蛋白质过度聚集,从而削弱其发泡能力和乳化性能。

蛋白质的热变性也应用在食品加工中,过热蒸汽处理后,导致面筋蛋白形成较为松散的网络结构,同时保留气泡,赋予海绵蛋糕多孔、柔软且富有弹性的质地。HU 等^[7]的研究也观察到相似的结果:小麦籽粒在 200 °C 的过热蒸汽中加热 3 min 得到的面粉无法形成面团,这主要是因为面粉中的面筋蛋白在该处理过程中发生了热变性,丧失形成强韧面筋网络的能力,从而形成较为松散的面筋结构。

综上所述,过热蒸汽处理可以改变谷物蛋白质组成和结构的变化,从而影响其功能特性。

1.2 淀粉

淀粉是谷物籽粒中主要的碳水化合物,占谷物干重的 60%以上,其特性的变化对谷物产品的品质有显著影响。过热蒸汽处理能够显著改变谷物淀粉的微观结构,进而影响淀粉的糊化、消化以及流变特性,这些变化直接影响谷物产品的整体质量。

过热蒸汽处理影响淀粉粒径和形态,高温破坏淀粉氢键,引起部分糊化和蛋白质变性,促使淀粉聚集体形成,使粒径分布从双峰变为单峰,粒度增大。此外,因氢键破坏导致颗粒熔化,且被变性和糊化淀粉包围,造成团聚,淀粉颗粒表面变形、粗糙^[8]。

过热蒸汽处理后,淀粉结构的变化引起其糊化性质发生相应改变。过热蒸汽处理会促使淀粉

颗粒共价氢键的断裂, 增加淀粉的糊化程度^[9]。对于含水量为 32% 的稻谷, 此处理能显著提高淀粉糊化程度, 该过程有助于粘合稻米内部的裂缝, 并且使淀粉分子变得可溶、可塑和具有粘性。糊化程度改变的同时, 会影响淀粉的膨胀势, 进而影响淀粉的糊化特性。MA 等^[10]发现过热蒸汽处理显著改变小麦粉的糊化特性, 提高其黏度值和糊化温度。峰值黏度和谷值黏度的增加是由于变性蛋白质与淀粉颗粒的相互作用, 增强淀粉颗粒对剪切力的抵抗力, 但高温和长时间处理会破坏淀粉分子间的氢键, 导致糊化度增加, 峰值黏度降低。过热蒸汽处理还会使变性蛋白包裹在淀粉颗粒周围, 抑制淀粉颗粒的再糊化、淀粉颗粒内直链淀粉与支链淀粉之间以及直链淀粉与脂质之间的复合物形成, 提高淀粉的热稳定性, 导致糊化温度升高。

淀粉的消化特性与淀粉颗粒的形态和分子结构紧密相关, 过热蒸汽处理对淀粉的类型比例产生显著影响, 如快速消化淀粉 (Rapidly digestible starch, RDS)、缓慢消化淀粉 (Slowly digestible starch, SDS) 以及抗性淀粉 (Resistant starch, RS) 的比例, 从而间接调控其消化性能。在 150 °C 的过热蒸汽处理下, 持续 4 min, 小麦粉的 SDS 和 RS 的含量分别从 21.5% 和 3.4% 增加到 34.7% 和 6.3%, 而 RDS 含量则从 75.1% 下降到 59.2%^[11]。过热蒸汽处理引发的变性蛋白质与淀粉颗粒表面的紧密半结晶结构的葡聚糖链形成屏障, 会进一步限制淀粉酶的接触, 从而使 SDS 和 RS 含量增加, 此外淀粉颗粒部分冷却糊化后, 也会促进 SDS 和 RS 的形成^[10]。高凡^[12]利用过热蒸汽研究其对沙米粉的消化影响, 发现温度不超过 165 °C 时, RS 含量出现不同程度的增加。随着温度的升高, 晶体结构破坏, 降低其片层结构的电子密度和短程有序结构的致密度, 使淀粉颗粒暴露, 降低 RS 含量。在稳定化处理中, 过热蒸汽处理的黑米, RDS 的含量增加, RS 的含量降低, 且相比于微波和辐射处理, 过热蒸汽处理使淀粉重排, 形成更多 V 型结晶, 使淀粉水解率增加最少^[13]。此外, 过热蒸汽联合柠檬酸盐也可影响淀粉的消化性, 并且随着柠檬酸含量的增加, 产生的 RS 比例更高^[14]。

过热蒸汽处理对谷物的理化特性和流变学性质也有显著影响。生庆海等^[15]探究热处理对谷物粉理化性质的影响, 发现过热蒸汽处理后谷物粉颗粒发生黏结, 产生团聚作用, 且显著改变燕麦粉的膨胀势和吸水性指数。MA 等^[16]探究过热蒸汽对小麦淀粉的流变学性质的影响, 发现处理后小麦淀粉的分子量和流变学性质发生显著变化, 其具有更弱的假塑性特性, 但能够增加凝胶体系的可变形性和流动性。

综上所述, 过热蒸汽处理通过改变谷物淀粉的结构、糊化特性、消化特性、理化特性和流变学性质, 显著影响食品的整体品质, 这些变化为改善谷物加工产品品质提供理论依据。

1.3 脂质

尽管谷物中的脂质含量不及蛋白质和淀粉, 但其降解速度较快, 是导致谷物品质下降的关键因素。脂质的降解主要通过氧化酸败和水解酸败两种方式进行, 过热蒸汽处理对于延缓该过程、保持谷物的品质发挥着重要作用。

氧化酸败通常是高温加热并且接触氧气造成的, 过氧化值是其早期检测指标。研究发现, 经过热蒸汽处理后的全麦过氧化值没有明显变化, 而热空气处理后, 全麦的过氧化值显著增加, 在该过程中, 过热蒸汽加工避免氢过氧化物的产生和全麦的氧化酸败, 证明无氧稳定处理可以抑制全麦质量劣化^[17]。过热蒸汽也能够抑制水解酸败, 保持谷物脂质营养。WANG 等^[18]研究发现荞麦在过热蒸汽处理后, 抑制荞麦中不饱和脂肪酸的氧化, 延缓储存过程中饱和脂肪酸的增加。脂质组学分析结果显示, 过热蒸汽加工可以延缓储存期间特定脂质磺基奎诺糖基二酰基甘油、磷脂酰乙醇胺、磷脂酰丝氨酸和溶血磷脂酸的水解和氧化, 这有助于保持谷物中的脂质营养, 防止酸败变质, 延长谷物的保质期。同时调节半乳糖脂的含量, 半乳糖脂在谷物中具有重要的结构和功能作用, 可以改善谷物的微观结构, 增强其稳定性。

这些研究表明, 过热蒸汽处理能有效抑制脂质的降解以及不饱和脂肪酸的氧化, 并且改变甘油酯和甘油磷脂亚类代谢, 这些作用共同延缓谷物在储存过程中的水解酸败现象, 减少脂质营养

成分的流失,从而有助于维持谷物的品质。

1.4 维生素和矿物质

维生素与碳水化合物、蛋白质和脂肪三大营养物质不同,在天然食物中占极少比例,但为人体所必需。在新陈代谢、生长、发育和身体健康方面发挥着重要作用^[19]。目前,谷物干燥方式主要包括微波、太阳能、远红外线等,这些干燥方式会损失维生素,与传统干燥方法相比,过热蒸汽处理通过无氧环境减少维生素的氧化损失,从而有效提高的谷物维生素保留率。

研究发现,在 120~160 °C 的温度范围内进行干燥时,经过热蒸汽处理的稻谷所制成的大米,其维生素 E、B1、B2 的含量高于直接使用稻谷制成的大米。这可能是因为米糠中富含维生素 E、B1 和 B2,这些维生素在过热蒸汽处理过程中能够从米糠扩散至胚乳,从而增加了大米中的含量^[9]。此外,干燥方法对维生素 E 的含量有显著影响,DUECK 等^[20]研究发现由过热蒸汽干燥谷物制备的碾碎小麦中维生素 E 的浓度最高为 88%,而由烤箱干燥谷物制备的碾碎小麦中维生素 E 的浓度最低为 52%,这是因为维生素 E 对氧敏感,在加热过程中容易被破坏,而过热蒸汽可以隔绝氧气,避免其受到氧化而损失活性。然而,过热蒸汽处理也会导致某些维生素的损失,高温处理会导致维生素 C、类胡萝卜素和花青素的降解,且随着时间的延长和温度的升高,这些化合物的保留率会再度下降。

矿物质是构成人体组织和维持正常生理功能所必需的元素,通过与酶结合促进代谢,是新陈代谢过程中不可或缺的成分。传统的加热方法,如蒸煮,会将大量矿物质溶解到水中,导致产品矿物质营养流失。相比之下,过热蒸汽加工在无水情况下,可减少水溶性矿物质的损失。例如,在 170 °C 下经过热蒸汽处理 20 min 的全麦的矿物质含量与天然全麦相似,表明过热蒸汽处理可以保持全麦中的矿物质含量^[17]。然而,矿物质的含量与食品原料、加热温度和时间密切相关,过度的加热处理也可能导致矿物质含量的减少。

总之,过热蒸汽技术在谷物加工中对维生素

和矿物质的含量影响具有双重性,既有利于提高食品的营养价值,也有可能導致营养成分的损失。因此,在实际应用中需要根据谷物样品进行处理条件的优化。

1.5 酚类物质

谷物中存在的酚类物质大多是与细胞壁共价结合的酚酸,通过酯或醚键与细胞壁多糖结合,形成网络结构^[21]。据报道,全谷物中酚类物质的含量与许多新鲜水果和蔬菜中的酚类物质相当,甚至更高^[22]。过热蒸汽处理对谷物酚类物质的影响主要为其含量和分布情况的变化。

相较于热风干燥,过热蒸汽加工显著提高轻碾米的总酚含量和抗氧化活性,归因于结合酚类物质的释放^[23]。此外,过热蒸汽通过改变谷物的结构完整性,削弱结合多酚与细胞壁组分(如纤维素、半纤维素、木质素等)之间的醚键或酯键,从而提高结合酚提取率^[24]。吴晓江等^[25]研究发现,过热蒸汽处理可以改变苦荞粉中酚类物质的分布,处理后显著增加苦荞粉中可溶性共轭多酚和结合多酚的含量,显著降低游离多酚和总酚含量。另外,过热蒸汽处理也会导致酚的化学键断裂,特别是酚羟基上的氢(O—H)键,这种化学键的断裂,可能促进酚的热降解,导致酚的含量降低^[26]。

总体而言,过热蒸汽处理可以促进酚类化合物的氧化降解和可提取性,以及影响酚的羟基官能团和化学键的断裂,进一步影响酚的含量,这些变化受过热蒸汽处理的温度和时间影响。

1.6 其他生物活性物质

单宁和植酸是两种常见的抗营养因子,两者与蛋白质和二价阳离子形成络合物,从而降低蛋白质的消化率和矿物质的利用率^[27]。研究显示,减少单宁和植酸盐的含量可以提高矿物质的可用性、生物可及性以及蛋白质和碳水化合物的消化率^[28]。

研究表明,过热蒸汽处理可以有效降低单宁和植酸的含量,这种降低可能归因于单宁的热降解以及单宁向低分子量化合物的转化。然而,较长的过热蒸汽处理可能会导致不溶性复合物分解为可溶性复合物,从而增加单宁含量。在该条件

表 1 过热蒸汽对谷物组分性质的影响
Table 1 Effect of superheated steam on properties of grain components

影响类型	物料	处理条件	产生结果	参考文献
蛋白质	小麦、玉米、大麦	90 °C处理 30 min	谷物的瘤胃不可降解蛋白含量增加，谷物肠道消化率提高	[4]
	小麦	165、190 °C处理 1、2、3、4、5 min	白蛋白、球蛋白含量降低，谷蛋白含量增加，蛋白质聚集	[5]
	小麦	110、140、170、200 °C处理 1、2、3 min	二硫键含量升高，200 °C处理 2 min 面筋蛋白变性	[6]
淀粉	稻谷	120、140、160 °C干燥 6 h	糊化度升高、最终黏度降低、回生值降低	[11]
	小麦粉	150 °C处理 4 min	糊化度升高、部分氢键断裂、SDS 和 RS 含量增加、RDS 含量降低	[10]
	沙米粉	155 °C处理 5、10 s	RDS 和 RS 含量增加，SDS 含量降低	[12]
	黑米	160 °C处理 240、480、720、960 s	糊化粘度升高，糊化焓几乎没有变化，RDS 含量降低，RS 含量增加	[13]
	大米淀粉	150 °C处理 30 min	RS 含量增加	[14]
	燕麦	200 °C处理 2 min	与蒸汽 100 °C处理 20 min 相比，吸水率升高、溶胀率升高、淀粉结构完整	[15]
	小麦粉	130、150、170 °C处理 1 min，然后再进行 4 min	淀粉颗粒的部分糊化，凝胶系统的变形性和流动性升高	[16]
脂质	全麦	170 °C处理 1~20 min	与热风干燥相比，全麦的游离脂肪酸值没有显著变化，过氧化值降低	[17]
	荞麦	170 °C 5 min	延缓磺基喹啉酰二酰基甘油、磷脂酰乙醇胺、磷脂酰丝氨酸和溶血磷脂酸含量增加	[18]
维生素与矿物质	稻谷	120、140、160 °C干燥 6 h	维生素 E、B1、B2 含量增加	[9]
	大麦	110 °C 60 min	与微波干燥、热风干燥相比，维生素 E 保留率更高	[20]
	全麦	170 °C处理 1~20 min	可以保持未处理全麦的矿物质含量	[17]
酚类物质	轻碾米	120 °C处理 2.5 min	与热风干燥相比，可溶性酚类含量增加、不溶性酚类无显著影响	[23]
	小麦麸皮	160、190、220、250、280 °C处理 90 s	结合酚含量随着蒸汽温度的增加先降低后增加，280 °C结合酚含量最高，160 °C时游离酚含量最高	[24]
	苦荞粉	110、130、150 °C处理 10 min	可溶性共轭多酚和结合多酚的含量增加，游离多酚和总酚含量降低	[25]

处理下，植酸含量的减少最多可达 53.1%，这种减少可能归因于肌醇六磷酸的降解和转化为五磷酸^[29]。

综上所述，过热蒸汽处理能够通过降低抗营养因子的含量，提高谷物的生物利用度和可消化性。这种处理方法对于改善食品的营养价值和促进健康饮食具有重要意义。

2 过热蒸汽处理对谷物食用品质的影响

过热蒸汽处理对谷物食用品质有显著影响，可以改善谷物及其加工制品的功能特性，如气味、色泽和外观，以及质地品质（见表 2）。

2.1 气味

谷物及其制品主要的风味一方面来源于原料

本身，另一方面，加工方式尤其是热处理对谷物风味的形成有较大影响。此外，气味是影响消费者购买欲的关键因素。

过热蒸汽处理能够有效减少不良气味的产生，例如，该处理能更好地保留大麦籽粒的结构，使其在蒸馏过程中减少大麦中的醋酸和 3-甲基丁酸等酸的含量，并且释放的气味量少于普通煮熟的大麦释放的气味量，使得其风味评分高于普通蒸煮的产品^[30]。此外，过热蒸汽处理过程中也会生成风味物质，如在藜麦中，过热蒸汽处理会产生反,反-2,4-壬二烯醛关键风味物质^[31]。然而，高温也会产生的不良气味，在米糠粉的加工中，使用的温度超过 130 °C，会造成硫磺气味^[32]。

综上所述，适度的过热蒸汽处理会增加特征

表 2 过热蒸汽对谷物蒸煮食用品质的影响
 Table 2 Effect of superheated steam on cooking and eating quality of grain

影响类型	物料	处理条件	产生结果	参考文献
气味	大麦	125 °C 处理 21 min	醋酸、3-甲基丁酸含量降低	[30]
	藜麦	100 °C 处理 20 min	醛类物质、反,反-2,4-壬二烯醛含量升高	[32]
色泽、外观	黑糯米	250、300 °C 分别处理 0~100 s	<i>a</i> 、 <i>b</i> 值增加, 黄度、红度增加	[33]
	黑米、红米、糙米	120、140 °C 处理 3、6 min	黑米、红米总色差保持不变, 糙米 <i>L</i> * 值增加	[34]
	轻碾米	110、120 °C 处理 10 min	产生裂纹	[35]
蒸煮品质	大米	155 °C 处理 5、10、15、20 s, 170、185 °C 处理 5 s	吸水率、体积膨胀率和碘色值升高	[36]
	黑米、红米、糙米	120、140 °C 处理 3、6 min	蒸煮时间缩短、硬度降低	[37]

风味的生成和释放, 过高的温度处理会降解风味物质和生成一些难闻的气味。

2.2 色泽和外观

谷物外观是消费者用来评估其质量的第一印象。谷物颜色的变化, 很大程度上是非酶褐变-美拉德反应的结果, 另外, 在热加工过程中, 色素的减少也会影响色泽的改变。

CHINNATAT 等^[33]用过热蒸汽处理黑糯米后, 观察到其黄度显著增加, 推测可能是因为热处理导致花青素的降解。随着温度的升高, 红度随之升高, 这是因为高温处理增强美拉德反应, 此外, 色素迁移对黑糯米颜色的改变也有一定影响。糙米在过热蒸汽处理后 *L** 值显著增加, 糙米亮度的增加可归因于过热蒸汽处理诱导的干燥效应, 导致水分含量降低并改变光折射, 且在该条件处理后米粒表面没有裂纹的产生^[34]。相比之下, 一些研究表明, 过热蒸汽处理可以显著影响稻米籽粒表面形态, 在 110 °C 和 120 °C, 处理 10 min 会出现明显的裂纹, 在较高温度下效果更明显, 该结果表明处理时间和温度在保持籽粒结构完整性方面具有重要影响^[35]。

综上, 过热蒸汽处理通过改变谷物色素的降解和美拉德反应, 间接影响谷物及其加工食品的颜色和外观。适当的过热蒸汽处理可以改善谷物的品质和加工性能, 但过度处理可能会导致形成不良的品质变化。

2.3 蒸煮品质及质地

蒸煮品质是决定谷物感官质量与消费者接受度的核心因素。热加工导致的淀粉部分糊化和蛋

白质变性, 是谷物品质改善的主要原因。

过热蒸汽处理被证明可以增强谷物的多孔结构, 从而提升其吸水性并减少烹饪时间。处理后的稻米, 有利于水分渗透到稻米核心, 使其吸水率增加。水分吸收率的提高会使米粒膨胀和拉伸, 从而使米饭体积膨胀率增加^[36]。同时, 直链淀粉溶解度显著高于未处理的稻米。过热蒸汽的应用可以改善米饭的糊化性能和质地, 这是因为蛋白质和淀粉含量的变化。过量的蛋白质通过粘附在谷物颗粒的表面来阻止水渗入内部淀粉颗粒, 在烹饪过程中阻碍大米的完全糊化, 最终导致煮熟的米饭质地变差, 过热蒸汽处理后样品中蛋白质含量的降低, 致使食味值升高^[37]。此外, 过热蒸汽处理使谷物半纤维素部分水解和木质素软化, 这些变化直接影响谷物的硬度值、黏度值和弹性, 从而改善蒸煮品质^[34]。

过热蒸汽技术通过缩短蒸煮时间、改善谷物的口感和质地, 显著提升谷物蒸煮品质。为避免不利影响, 其处理条件需严格控制。通过优化过热蒸汽处理参数, 可以提升谷物产品的市场竞争力, 以满足消费者对高品质谷物食品的需求。

3 过热蒸汽处理对谷物储藏特性的影响

过热蒸汽处理通过抑制酶活性、杀菌处理等方式, 对谷物的储藏特性产生积极影响, 有助于延长谷物的储藏期 (见表 3)。

3.1 过热蒸汽处理对谷物脂肪降解有关酶的影响作用

脂肪酶、脂肪氧合酶、多酚氧化酶和过氧化物酶活性影响谷物的氧化酸败, 从而影响谷物储

表 3 过热蒸汽对谷物储藏性能的影响
Table 3 Effects of superheated steam on grain storage performance

影响类型	物料	处理条件	产生结果	参考文献
酶活性	荞麦	110、140、170、200 °C 处理 7 min	脂肪酶活性下降 26.24%、28.98%、55.53%、62.70%	[16]
	轻碾米	120、140、160 °C 处理 2、4、6、8 min	120 °C 处理 2、4、6、8 min 脂肪酶活性下降 43.6%、58.9%、70.5%、71.7%，140、160 °C 处理脂肪酶活性下降到 77.1%、81.8%	[41]
	小麦	90 s	脂肪酶、脂氧合酶、多酚氧化酶活性分别降低 81%、63%、22%	[42]
	全麦面粉	155、160、170、180、190 °C 分别处理 3、5、7、10 s	190 °C 过热蒸汽处理 10 s 后，脂肪酶、脂氧合酶和多酚氧化酶活性分别下降 100%、99% 和 83%	[43]
	轻碾米	120 °C 处理 2、4、6、8 min	过氧化物酶活性分别降低 46.7%、51.7%、61.8% 和 66.0%，脂氧合酶下降 81.3%	[41]
	沙米粉	155、160、165、170、180 和 190 °C 处理 5 s	165 °C 脂肪酶活性下降 100%、过氧化物酶活性下降 98.33%，170、180 和 190 °C 处理后过氧化物酶活性下降 98.59%、99.29%、100%	[45]
杀菌	小麦	200 °C 处理 80 s	灭活 99.90% 细菌、81.82% 芽孢杆菌、100% 霉菌	[47]
	大麦	200 °C 处理 180 s	灭活 99.98% 的细菌和 95.21% 的芽孢杆菌	[48]

存稳定性和品质。因此，有效抑制这些酶的活性对于改善谷物产品的货架期至关重要。

过热蒸汽处理对谷物中的脂肪酶、脂氧合酶和多酚氧化酶活性有显著影响。在 140 °C 的过热蒸汽处理 5 min 后，荞麦籽粒中的脂肪酶活性降低约 30%^[18]。而在类似的处理条件下，轻碾米的脂肪酶活性大约降低 70%^[38]。POUDEL 和 ROSE^[39]用蒸汽处理小麦籽粒 90 s，脂肪酶、脂氧合酶、多酚氧化酶活性分别降低 81%、63%、22%。GUO 等^[40]用过热蒸汽处理全麦面粉，在 155~190 °C 处理 7 s 后趋于稳定，继续升高温度和延长处理时间，190 °C 过热蒸汽处理 10 s 后，脂肪酶、脂氧合酶和多酚氧化酶活性分别下降 100%、99% 和 83%。过氧化物酶可以催化脂肪酸，产生过氧化氢或羟基酸，从而对谷物质量产生负面影响。过氧化物酶具有优异的热稳定性，使其成为确定酶失活所需的最佳热处理的常用基准^[41]。在 160 °C 下处理轻碾米 8 min 时，过氧化物酶活性显著降低 86.7%^[38]，165 °C 处理 5 s 使沙米粉中脂肪酶完全失活，并使过氧化物酶活性 98% 失活^[42]。

综上所述，过热蒸汽处理在抑制酶活性方面表现出显著效果，它能够有效延缓谷物的氧化酸败，进而延长谷物的保质期。

3.2 过热蒸汽处理对谷物产品的杀菌作用

谷物中的细菌和霉菌对食品的质量和安

全构成了严重威胁。为了保障食品的储存和加工过程，谷物及其制品的灭菌处理变得至关重要。通常，在处理过程中，蒸汽在谷物表面冷凝并释放大量热量，并迅速提高温度。高温导致细胞膜损伤、核糖体聚集、DNA 链断裂、酶失活和蛋白质凝固，从而导致微生物细胞死亡^[43]。

过热蒸汽处理能有效去除小麦籽粒中的有害微生物，包括细菌、霉菌及其孢子。研究表明，在 200 °C 的过热蒸汽处理下，仅需 80 s 就能完全去除霉菌，对细菌总数和芽孢杆菌的杀灭率分别为 99.9% 和 81.8%^[44]。然而，不同谷物对过热蒸汽处理的敏感性存在差异。例如，大麦的微生物灭活效果就低于小麦，在 140 °C 处理 20 s 和 110 °C 处理 30 s 的过热蒸汽条件下，可以使小麦的霉菌失活，但大麦仍有一些霉菌残留物，这表明大麦上的微生物相对难以灭活^[45]。此外，大麦和小麦的形态结构不同，大麦表面的深沟为微生物提供了更多的附着点，使得微生物更容易在大麦表面生长和繁殖。相比之下，小麦表面的光滑结构不利于微生物的附着和生长，这可能是大麦上微生物难以消除的原因之一。但继续升高温度至 200 °C，处理时间为 180 s 且保持水分在 20% 左右，可以灭活大麦细菌 99.98% 和芽孢杆菌属 95.21%。

过热蒸汽其高热传递效率可以消除霉菌和芽

孢杆菌属,从而延长谷物保质期。这些研究结果为谷物加工中微生物控制提供了重要的参考依据。

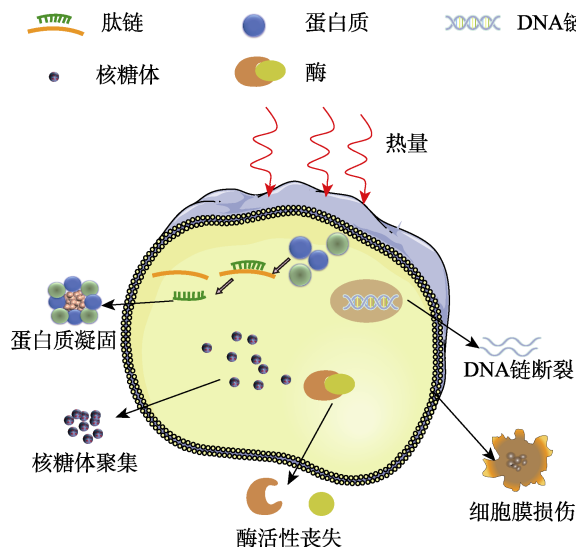


图 1 过热蒸汽处理使微生物失活原理图

Fig.1 Schematic diagram of microbial inactivation caused by superheated steam treatment

4 结论

过热蒸汽技术在谷物产品加工领域的应用显著提升了谷物产品的品质 and 安全性,同时保持其营养价值。这种处理方式导致蛋白质二硫键断裂,从而改变蛋白质的构象,使其溶解性和乳化性发生改变,另外,过热蒸汽处理使谷物中的面筋蛋白发生变性(变得松散),影响面团的弹性和延展性,进而影响面包等食品的质地和口感。过热蒸汽处理还会引起谷物淀粉颗粒微观结构的变化,如表面粗糙化、凹陷和黏连,能够显著改变谷物淀粉的理化特性,并增强蛋白质和淀粉之间的相互作用,阻止可溶性分子的溶出。相较于传统的加热方式,过热蒸汽处理能够产生更丰富的风味,并保持谷物的色泽和外观,有效减少蒸煮所需时间,改善食用品质质地。此外,过热蒸汽高渗透力可有效灭活对脂质降解有关酶和霉菌,延长谷物的保存期。

在未来的研究中,可以重点关注以下几个方面,以进一步拓展和优化过热蒸汽技术在食品加工领域的应用:(1)结合食品特性,拓展过热蒸汽技术在食品加工领域的应用范围,探索其在果蔬保鲜、面制食品烘焙等方面的应用可能;(2)将

其与其他技术相结合,如过热蒸汽-微波联合技术、过热蒸汽-超声波联合技术等,充分发挥各技术的优势,克服单一技术的局限性,提高食品加工的效果和质量;(3)智能和自适应控制技术的开发,这些技术的引入,旨在精确调节温度和压力,确保最佳的加工条件,从而提高生产效率、产品质量和系统稳定性;(4)结合食品不同应用领域,开发高效先进多功能的过热蒸汽处理设备,完善尾气循环利用环节,加强能耗基础研究,充分发挥过热蒸汽的节能环保优势。

参考文献:

- [1] 邹加富. 污泥过热蒸汽搅拌干燥试验与双轴桨叶搅拌干燥机设计[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
ZOU J F. Sludge superheated steam stirring drying test and design of double shaft paddle stirring dryer[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [2] 楚倩倩, 任广跃, 段续, 等. 过热蒸汽和热风干燥在食品领域中的应用对比[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(16): 297-304.
CHU Q Q, REN G Y, DUAN X, et al. Application comparison of superheated steam and hot air drying in food field[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(16): 297-304.
- [3] 魏思凡, 朱堃华, 皮东楷, 等. 过热蒸汽技术在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(4): 335-344.
WEI S F, ZHU K H, PI D K, et al. Research progress on application of superheated steam technology in food processing [J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(4): 335-344.
- [4] CHRENKOVA M, FORMELOVA Z, CERESNAKOVA Z, et al. Rumen undegradable protein (RUP) and its intestinal digestibility after steam flaking of cereal grains[J]. Czech Journal of Animal Science, 2018, 63160-63166.
- [5] CHONG W K, MAH S Y, EASA A M, et al. Thermal inactivation of lipoxygenase in soya bean using superheated steam to produce low beany flavour soya milk[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(9): 4371-4379.
- [6] LIU Y X, LI M M, GUAN E Q, et al. Modification of soft wheat protein for improving cake quality by superheated steam treatment of wheat grain[J]. Foods, 2023, 12(16): 2992.
- [7] HU Y M, WANG L J, ZHU H, et al. Superheated steam treatment improved flour qualities of wheat in suitable conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(6): 13238.
- [8] MA Y, XU D, SANG S, et al. Effect of superheated steam treatment on the structural and digestible properties of wheat flour[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112106362.
- [9] JITTANIT W, ANGKAEW K. Effect of superheated-steam drying compared to conventional parboiling on chalkiness, head

- rice yield and quality of chalky rice kernels[J]. Journal of Stored Products Research, 2020, 87: 101627.
- [10] MA Y S, SANG S Y, XU D, et al. The contribution of superheated steam treatment of wheat flour to the cake quality [J]. LWT, 2021, 141: 110958.
- [11] WANG S J, WANG S K, LIU L, et al. Structural orders of wheat starch do not determine the *in vitro* enzymatic digestibility[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(8): 1697-1706.
- [12] 高凡. 过热蒸汽处理对沙米粉结构和性质的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- GAO F. Study on the effect of superheated steam treatment on the structure and properties of sand rice noodles[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.
- [13] 张娅琪. 稳定化黑米及其固态发酵产品的开发和品质研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- ZAHNG Y Q. Development and quality research of stabilized black rice and its solid-state fermentation products[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [14] ZHONG C P, XIONG Y, LU H X, et al. Preparation and characterization of rice starch citrates by superheated steam: a new strategy of producing resistant starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112890.
- [15] 生庆海, 龙金利, 李朋亮, 等. 热处理对谷物粉物化性质及淀粉体外消化性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 170-177.
- SHENG Q H, LONG J L, LI P L, et al. The effect of heat treatment on the physicochemical properties of grain flour and the *in vitro* digestibility of starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 170-177.
- [16] MA Y S, ZHANG H, JIN Y M, et al. Impact of superheated steam on the moisture transfer, structural characteristics and rheological properties of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107089.
- [17] HU Y M, WANG L J, LI Z G. Superheated steam treatment on wheat bran: enzymes inactivation and nutritional attributes retention[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 446-452.
- [18] WANG L J, WANG L B, QIU J, et al. Effects of superheated steam processing on common buckwheat grains: lipase inactivation and its association with lipidomics profile during storage[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103057.
- [19] DUAN H, PAN J N, GUO M, et al. Dietary strategies with anti-aging potential: dietary patterns and supplements[J]. Food Research International, 2022, 158: 111501.
- [20] DUECK C, CENKOWSKI S, IZYDORCZYK M S. Effects of drying methods (hot air, microwave, and superheated steam) on physicochemical and nutritional properties of bulgur prepared from high-amylose and waxy hull-less barley[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(2): 483-495.
- [21] JABIR K, ZAHOOR M K, YULIN M, et al. Overview of the composition of whole grains' phenolic acids and dietary fibre and their effect on chronic non-communicable diseases[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(5): 3042-3042.
- [22] MILLER H E, RILHOF F, MARART L, et al. Antioxidant content of whole grain breakfast cereals, fruits and vegetables[J]. Journal of the American College of Nutrition, 2000, 19(3 Suppl): 312S-319S.
- [23] WU J Y, MCCLEMENTS D J, CHEN J, et al. Improvement in nutritional attributes of rice using superheated steam processing [J]. Journal of Functional Foods, 2016, 24: 338-350.
- [24] 叶国栋, 汪丽萍, 沈汪洋, 等. 过热蒸汽处理对麸皮酚类物质及抗氧化活性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(9): 3598-3605.
- YE G D, WANG L P, SHEN W Y, et al. Effects of superheated steam treatment on phenolics and antioxidant activity of bran[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(9): 3598-3605.
- [25] 吴晓江, 范浩伟, 付桂明, 等. 过热蒸汽处理对苦荞粉理化性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(11): 89-97.
- WU X J, FAN H W, FU G M, et al. The effect of superheated steam treatment on the physicochemical properties of tartary buckwheat flour[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(11): 89-97.
- [26] WAN F C, FENG C F, LUO K Y, et al. Effect of steam explosion on phenolics and antioxidant activity in plants: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 13-24.
- [27] DAS G, SHARMA A, SARKAR P K. Conventional and emerging processing techniques for the post-harvest reduction of antinutrients in edible legumes[J]. Applied Food Research, 2022, 2(1): 100112.
- [28] 郭孝平, 曾善荣, 王玉财. 谷物和豆类初级加工对其营养品质的影响[J]. 生物化工, 2020, 6(2): 147-151+160.
- GUO X P, ZENG S R, WANG Y C. Effects of primary processing of cereals and beans on their nutritional quality[J]. Biological Chemical Engineering, 2020, 6(2): 147-151+160.
- [29] MANIKPURI S, KHETO A, SEHRAWAT R, et al. How superheated steam treatment modifies the physicochemical, functional, nutritional, and anti-nutritional attributes: a case study on guar bean flour[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2023, 88: 103422.
- [30] HATSUHO T, MIDORI A, YOSHIHIRO S, et al. Reducing the undesirable odor of barley by cooking with superheated steam[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(10): 4732-4741.
- [31] 周洋, 李璐, 吕莹. 烘烤、蒸汽热处理和挤压膨化对藜麦风味和苦味的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 263-269.
- ZHOU Y, LI L, LV Y. The effects of baking, steam heat treatment, and extrusion puffing on the flavor and bitterness of quinoa[J]. Food Science, 2020, 41(20): 263-269.
- [32] CAO X H, ISLAM M N, NING X, et al. Effects of superheated

steam processing on the physicochemical properties of sea rice bran[J]. Food Science and Technology International = Cienciay Tecnologia De Los Alimentos Internacional, 2021, 29(2): 10820132211062711.

- [33] CHINNATAT P, NANTAWAN T, WANNASAWAT R. Effect of precooking and superheated steam treatment on quality of black glutinous rice[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1-9.
- [34] HU Y Q, TANG Q Y, SUN Y, et al. Comparative study on physicochemical, nutritional and cooking properties of different pigmented dehusked rice varieties influenced by superheated steam treatment[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 117: 103934.
- [35] WU J Y, MCCLEMENTS D J, CHEN J, et al. Improvement in storage stability of lightly milled rice using superheated steam processing[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 71: 130-137.
- [36] ZHANG X R, ZUO Z Y, ZHANG X X, et al. Pre-gelatinization phenomenon and protein structural changes in rice quality modification by superheated steam treatment[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 103989.
- [37] SHI S J, WANG E T, LI C X, et al. Use of protein content, amylose content, and RVA parameters to evaluate the taste quality of rice[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 8.
- [38] ZHOU C G, LI B, YANG W L, et al. A comprehensive study on the influence of superheated steam treatment on lipolytic enzymes, physicochemical characteristics, and volatile composition of lightly milled rice[J]. Foods, 2024, 13(2): 240.
- [39] POUDEL R, ROSE D J. Changes in enzymatic activities and functionality of whole wheat flour due to steaming of wheat kernels[J]. Food Chemistry, 2018, 263: 315-320.
- [40] GUO X N, WU S H, ZHU K X. Effect of superheated steam treatment on quality characteristics of whole wheat flour and storage stability of semi-dried whole wheat noodle[J]. Food Chemistry, 2020, 322(C): 126738.
- [41] WU J Y, CHEN J, LIU W, et al. Selective peroxidase inactivation of lightly milled rice by superheated steam[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 623-630.
- [42] WU C, GAO F, JIA J, et al. Effect of superheated steam treatment on enzyme inactivation, morphostructural, physicochemical and digestion properties of sand rice (*Agriophyllum squarrosum*) flour[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139336.
- [43] DENG L Z, SUTAR P P, MUJUMDAR A S, et al. Thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2020, 12: 287-305.
- [44] HU Y M, NIE W, HU X Z, et al. Microbial decontamination of wheat grain with superheated steam[J]. Food Control, 2016, 62: 264-269.
- [45] WANG H R, WANG L L, TONG L T, et al. Effect of superheated steam inactivation on naturally existent microorganisms and enzymes of highland barley[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(8): 2570-2577. 

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。