

热处理在小麦储藏与加工中的应用研究进展

刘远晓, 李萌萌, 卞科*, 关二旗, 刘远方

(河南工业大学粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 热处理是小麦储藏与加工中常用的方法, 适当的热处理有利于提升小麦和小麦粉的储藏稳定性, 改善其加工品质、营养品质和食用品质, 对于保障粮食安全和提升小麦品质具有重要意义, 但不当的热处理则可能对其品质产生不利影响。本文介绍了小麦加工中常用的热处理方法, 并对其在杀虫、杀菌脱毒、抑制酶活性和品质改良等方面的应用进行了综述, 分析了热处理对小麦品质的不利影响及其预防措施。笔者认为: 需要通过全面地了解热处理过程中小麦和小麦粉品质的变化, 研究热处理对最终食品品质的影响; 探究热处理过程中小麦和小麦粉品质变化的机理和分子机制, 以有针对性地研究改善热处理工艺; 开发适用于工业化应用的热处理设备, 降低热处理成本; 从而促进热处理技术在小麦储藏与加工应用中不断进步。

关键词: 小麦; 热处理; 杀虫; 杀菌脱毒; 酶活性; 品质改良

Recent Progress in the Application of Heat Treatment in Wheat Storage and Processing

LIU Yuanxiao, LI Mengmeng, BIAN Ke*, GUAN Erqi, LIU Yuanfang

(School of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Heat treatment is commonly used in wheat storage and processing. Proper heat treatments are beneficial to improve the storage stability, and processing, nutritional and eating quality of wheat and flour, which is of great significance for ensuring food safety and improving wheat quality. However, wheat quality may be influenced adversely by improper heat treatment. The heat treatment methods commonly used in wheat processing are summarized in this paper and their applications in killing of insect pests, sterilization, detoxification, enzymatic inactivation and quality improvement are reviewed. Meanwhile, the negative effects of heat treatment on wheat quality and some countermeasures are proposed. Therefore, it is necessary to comprehensively understand the changes in wheat and flour quality during heat treatment and to study the effects of heat treatment on the final product quality. Moreover, the mechanism underlying these changes should be explored in order to improve the heat treatment process in a targeted manner and to develop heat treatment equipment for industrial applications to reduce the cost of heat treatment. It is desired that this review will promote the continuous development of heat treatment technology for applications in wheat storage and processing.

Keywords: wheat; heat treatment; killing of insect pests; sterilization and detoxification; enzymatic activity; quality improvement

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180623-444

中图分类号: TS210.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 13-0326-08

引文格式:

刘远晓, 李萌萌, 卞科, 等. 热处理在小麦储藏与加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 326-333.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180623-444. <http://www.spkx.net.cn>

LIU Yuanxiao, LI Mengmeng, BIAN Ke, et al. Recent progress in the application of heat treatment in wheat storage and processing[J]. Food Science, 2019, 40(13): 326-333. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180623-444.

<http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2018-06-23

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03); 国家自然科学基金-河南省联合基金重点项目(U1604235);

河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2017BS018)

第一作者简介: 刘远晓(1991—)(ORCID: 0000-0002-0170-6430), 男, 博士研究生, 研究方向为粮食加工科学与技术。

E-mail: liuyuanxiao1991@163.com

*通信作者简介: 卞科(1960—)(ORCID: 0000-0003-3308-5461), 男, 教授, 硕士, 研究方向为农产品加工与贮藏工程。

E-mail: kebian@163.com

小麦是面制食品的主要原料，在小麦储藏与加工中，热处理是常用的加工工艺。在传统的小麦储藏与加工工艺中，热处理主要用于小麦干燥。近几十年来，经研究发现，热处理具有一定的杀虫和杀菌作用，可以减少化学熏蒸剂的使用量。相比于食品添加剂和化学熏蒸剂，热处理后的小麦对人体的安全性更高。此外，热处理还可以替代溴酸钾、抗坏血酸、偶氮甲酰胺、亚硫酸钠、L-半胱氨酸和变性淀粉等食品添加剂^[1-2]，用于小麦粉品质改良。因此，近年来，热处理在小麦储藏与加工中的应用得到了越来越广泛的关注。

虽然热处理具有许多优点，但若条件控制不当，则可能对小麦品质造成不利影响，例如使面筋强度和沉降值过度降低、面团品质破坏、淀粉酶活性过度降低、淀粉糊化、产生大量破损淀粉和小麦粉色泽变暗等。这些品质变化最终可能对面筋网络强度、面团流变学特性造成严重影响，从而影响面制食品的品质。因此，选择适当的热处理条件是提升小麦品质的关键。本文介绍了常用的热处理方法，综述热处理在小麦和小麦粉杀虫、杀菌脱毒、酶活性抑制和品质改良中的应用，并分析热处理对小麦品质的不利影响及预防措施，以期为热处理在小麦及其制品加工中的合理应用提供参考。

1 常用热处理方法

小麦储藏与加工中常用的热处理方法包括湿热处理^[3]、热风处理（干热处理）^[4]、喷雾干燥处理^[5]、过热蒸汽处理^[6]、挤压处理^[7]、微波处理^[8-9]和红外热处理^[10]等。湿热处理是指在较高水分体积分数（20%~30%）条件下，在一定温度范围（高于淀粉玻璃化转变温度但低于糊化温度）内处理小麦粉、淀粉等物料的一种热处理方法^[11]。湿热处理的主要作用是对淀粉改性^[12]，对小麦或小麦粉进行湿热处理可以显著提高其中的慢消化淀粉和抗性淀粉含量^[5]。热风处理是最常见的热处理方式，是指采用热空气对物料进行加热，主要用于农产品的干燥。喷雾干燥是指将液体物料或者固体颗粒溶于水形成的溶液或悬浊液在热风中以微粒状态分散，经高温瞬时干燥转变成粉末，具有干燥效率高、产品质量好和环保等优点^[13-14]。过热蒸汽是在恒定压力下对饱和蒸汽进行加热的产物，其温度高于饱和蒸汽，由于水的比热容远大于空气，因此过热蒸汽具有传热效率高的优点^[15]。此外，过热蒸汽还具有安全、无污染等特点^[16]。挤压加工是一种新型的食品热加工技术，是指物料经预处理（粉碎、调湿、混合）后，经机械作用使其通过一个专门设计的孔口（模具），以形成一定形状和组织状态的产品^[17]。挤压技术集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、膨化及成型等为一体^[18]。微波加热是指采用特定波长

（1~1 000 mm）的电磁波对固体物料进行加热的热处理方式，具有加热速度快、加热均匀以及安全、卫生、无污染等优点^[19-20]。红外热处理是利用波长介于可见光和微波（0.75~1 000 μm）的红外线对食品进行热处理的方法，在谷物、果蔬等食品的干燥^[21-23]及食品焙烤^[24]中得到了一定应用。以上热处理方法具有不同的优缺点，在小麦储藏与加工中均有一定的应用。

2 热处理在小麦储藏与加工中的应用现状

2.1 热处理的杀虫效应

小麦在收获后常受到害虫的侵害^[25]，不仅造成小麦的直接损失，而且可能通过呼吸产热促使粮堆发热霉变^[26]，降低小麦的营养品质、食用品质和卫生品质^[27]。在小麦的储藏过程中，若温度、空气湿度等储藏条件不适宜，小麦可能受到害虫的侵害。由于我国小麦储备量大、储藏期长，害虫生长会导致其产生巨大损失。小麦粉由于营养物质丰富，在储藏过程中也极易受到害虫侵害。因此，在小麦收获后、储藏过程中和制粉后，杀灭害虫是保障小麦品质、储藏稳定性和小麦粉品质的重要手段。

害虫的最适生长和繁殖温度通常为25~33 °C^[28]，当温度高于33 °C时，害虫生长受到抑制甚至死亡^[29]。因此，在小麦和小麦粉储藏时，可考虑采用热处理法杀灭害虫或抑制害虫的生长和繁殖。但是，热处理对害虫的杀灭效果可能受很多因素的影响，主要包括：1) 害虫对高温的耐受程度和耐受时间；2) 热处理过程中热传递的效率；3) 仓房或包装材料的保温效果。基于此，近年来国内外学者研究了不同热处理方式对小麦和小麦粉储藏中害虫的杀灭效果（表1）。

表1 热处理对小麦和小麦粉储藏中害虫的杀灭效果

Table 1 Application of heat treatment in killing insect pests of wheat and flour

处理目标	害虫类型	处理方法	处理效果	参考文献
小麦	蛀食性害虫（玉米象、米象和谷蠹）和粉食性害虫（锯谷盗、锈赤扁谷盗和赤拟谷盗）	热风处理	55~60 °C处理10~15 min，害虫死亡率达50%以上	[28]
小麦	玉米象	入仓前暴晒	可有效杀灭玉米象的卵和幼虫	[30]
小麦	谷象和螨类	高温短时处理	300~350 °C、6 s内可杀死各虫态的谷象和螨类	[31]
小麦和小麦粉	赤拟谷盗	水浴加热处理	65 °C处理60 s可完全杀死成虫，处理105 s可完全杀死蛹、成虫和幼虫	[32]
小麦粉	小麦粉害虫	提高并维持粉仓温度	45~55 °C保持36~48 h，可杀灭各个生长期的害虫	[33]
小麦粉	赤拟谷盗幼虫	微波处理和水浴热处理	相同温度下，微波处理的杀虫效果优于水浴处理；微波处理幼虫致死温度为60 °C，而水浴处理时幼虫的致死温度为70 °C	[34]
小麦粉	赤拟谷盗	热处理、热处理结合CO ₂ 处理	均可100%杀灭赤拟谷盗，且在19周内赤拟谷盗数量难以恢复到初始水平；杀虫效果优于化学熏蒸剂（磷化氢、溴甲烷等）	[35]
小麦	赤拟谷盗、锈赤扁谷盗、谷象	微波处理	微波功率500 W、处理时间28 s即可杀死全部害虫，且对小麦品质无显著影响；水分含量显著影响杀虫效果	[36]

由以上研究可知,热处理对小麦和小麦粉中的害虫均具有较好的杀灭效果,采用45~70℃的热处理即可对部分害虫起到较好的杀灭效果。对于不同的害虫,需要采用不同的温度和不同的方法进行热处理。热处理主要通过影响害虫代谢平衡、引起害虫体内水分流失和蛋白质凝固、造成害虫体内脂类物质液化等作用杀灭害虫^[37-38]。此外,热处理还可以通过打破水分含量和相对湿度之间的平衡状态来影响昆虫的生理活动,从而抑制害虫的生长^[37]。

2.2 热处理的杀菌脱毒作用

随着生活水平的提高,消费者对小麦粉食用安全品质的要求越来越高。因此,杀菌在小麦制粉中的重要性逐渐提高。小麦在生长期如遇连续阴雨天气,容易受到真菌的感染,产生真菌毒素。此外,在储藏期间,若储藏条件不良,粮堆的局部发热也会导致小麦中滋生微生物。在小麦制粉后,由于小麦粉富含蛋白质、淀粉等营养物质,也容易滋生微生物。这些都对食品安全造成了一定威胁。因此,小麦和小麦粉的杀菌脱毒对于保障粮食安全具有重要意义。利用高温对微生物及其孢子的致死作用可以达到杀灭小麦和小麦粉中微生物的目的,热处理在小麦和小麦粉的杀菌和脱毒中已有一定的研究。

过热蒸汽具有热效率高、传热速率快等优点。研究表明,利用温度为175℃的过热蒸汽在5 min内即可杀灭小麦中90%的微生物孢子,在过热蒸汽处理的1~5 min内,其对孢子的杀灭速度最大^[39]。此外,当温度达到200℃时,过热蒸汽可在80 s内杀灭小麦中99.9%的细菌和全部的真菌(其中芽孢杆菌的杀灭率可达81.8%)^[40]。除了杀菌,也可利用过热蒸汽降解赤霉病小麦中的脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)(一种致病性真菌毒素),当采用160℃以上的过热蒸汽处理赤霉病小麦时,其中的DON含量即可显著降低^[41-42]。

热处理对细菌的杀灭作用主要是由于热对细菌蛋白质的破坏作用和对细菌膜(尤其是细胞质膜)的透性化作用^[43-44]。除此之外,水分活度对杀菌效果也有显著影响。在水分活度较低时,细胞的渗透压会导致细胞中水分的流失和细胞皱缩,从而引起细胞膜增厚,这对细胞起到一定的保护作用^[45]。热处理对DON的降解作用则主要是依靠高温对DON分子结构的破坏。虽然热处理可以杀灭小麦和小麦粉中的微生物并降低真菌毒素含量,但所需热处理温度通常较高,可能对小麦品质产生不利影响。

2.3 热处理对酶活性的抑制作用

小麦中的酶主要包括淀粉酶、蛋白酶、脂类转化酶、过氧化物酶和多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)等,其中某些酶的催化作用会对小麦及其制品的品质产生不利影响。小麦发芽后,其中的 α -淀粉酶活性显著升高,从而导致淀粉发生水解,严重影响小麦粉的营养品质和加工品质^[46]。小麦中的PPO不仅会通过酶促

反应引起面制品的褐变^[47],而且会降低小麦粉中蛋白质的营养价值^[48-50]。此外,麦胚中的脂肪氧化酶可催化不饱和脂肪酸过氧化生成脂氢过氧化物,从而影响小麦及其制品的储藏稳定性,产生不良气味^[51]。因此,在小麦及其制品加工过程中,采取适当方法抑制其中某些酶的活性对于保障小麦制品品质具有重要意义。

不同热处理方式对酶的钝化效果不同,吴艳博等^[52]比较了热风、微波、常压蒸汽和高压蒸汽4种热处理方式对麦胚中脂肪酶的钝化效果,结果表明,蒸汽处理的效果明显优于微波和热风处理,显著提高了麦胚的储藏稳定性。Yadav等^[53]通过对水浴、高压蒸汽和微波3种热处理方式对全麦粉中PPO活性和全麦粉品质的影响,发现尽管热处理对面团品质有一定的不利影响,但可以显著降低PPO活性,3种热处理方式分别可使PPO活力降低38.3%、56.9%和71.2%。Vadlamani等^[54]在100℃条件下对水分体积分数15%的小麦进行8 min的湿热处理,使小麦中PPO活力降低75%,显著改善了面条的色泽,且对面条的蒸煮品质和质构无显著影响。发芽小麦中 α -淀粉酶活性显著升高,严重影响小麦的食用品质和储藏稳定性,因此可采用热处理法钝化 α -淀粉酶。江潇潇等^[55]研究了湿热处理对小麦粉品质的影响,采用温度为80~110℃的湿热法处理由发芽小麦制备小麦粉,结果表明,经湿热处理后,小麦粉降落数值显著升高,说明 α -淀粉酶活性显著降低。微波处理和红外焙烤处理作为新型的热处理方法,在小麦加工中的应用也有许多研究。刘静等^[56]研究表明,微波加热处理可以显著降低发芽小麦中 α -淀粉酶的活性,提高小麦粉的降落数值,改善发芽小麦品质。由于脂肪氧化酶对小麦储藏稳定性有严重的不利影响,因此钝化脂肪氧化酶对于延缓小麦氧化变质、保持清新气味、提高储藏稳定性具有重要意义。Qu Chenling等^[57]研究表明,微波处理可显著抑制脂肪酶和脂肪氧化酶的活性,从而延长全麦粉的货架期。张兰月等^[24]研究发现,相比于干热处理,红外焙烤处理可以更有效地抑制脂肪酶和脂肪氧化酶的活性,从而延缓胚芽油的水解酸败和氧化酸败、提高小麦胚的储藏稳定性。Marti等^[58]采用烘烤法处理麦胚,显著降低了其中的脂肪酶活性,延缓了脂肪酸败,从而显著延长了含麦胚面包的货架期。

由以上研究可知,不同方式的热处理对小麦和小麦粉中脂肪酶、脂肪氧化酶、PPO和 α -淀粉酶等的活性均具有一定的抑制作用,不同热处理方式对酶活性的抑制效果不同。研究表明,微波处理比传统热处理具有更高效的抑制酶活性的效果,这主要是由于微波处理既存在热效应,又存在非热效应^[59]。热处理对酶活性的抑制作用主要是由于高温下蛋白质的变性。因此非酶蛋白质在热处理时也可能发生变性,影响小麦品质。

2.4 热处理对小麦及其制品品质的改良作用及应用

以小麦粉为主要原料的食品种类众多，而以现有小麦制得的小麦粉通常无法很好地满足某些食品加工的要求。因此，经常需要对小麦品质进行改良，以满足食品加工多样化的要求。与传统的氯气处理和添加食品添加剂等方法相比，热处理对食品安全性的影响更小，因此近年来得到了更多的关注。

对小麦品质进行改良的主要目的包括增强面筋筋力、生产专用小麦粉、提高慢消化淀粉和抗性淀粉含量、提高小麦粉营养品质、改变蛋白质特性、改变淀粉特性和促进小麦粉后熟等。在热处理时，由于高温的作用，小麦及其制品中蛋白质发生部分变性，淀粉发生部分糊化， α -淀粉酶活性降低^[60]，淀粉链发生重组，从而导致慢消化淀粉和抗性淀粉含量增加^[61]。在不同的热处理方式下，小麦面筋强度的变化趋势不同。适当的热处理可以增强面筋强度，而温度较高、时间较长的热处理则会弱化面筋强度。在实际应用中，可根据不同的改性目的选择合适的热处理方法和条件。表2列出了近年来热处理在小麦及其制品品质改良中的应用概况。

表 2 热处理在小麦及其制品品质改良中的应用

Table 2 Application of heat treatment in quality improvement of wheat and wheat products

处理对象	热处理方式及条件	改性目的	改性效果	参考文献
小麦粉和小麦淀粉	120 °C湿热处理24 h	降低淀粉消化率，增强淀粉抗性	慢消化淀粉和抗性淀粉含量显著增加	[3]
小麦粉	湿热处理、喷雾干燥、挤压处理	提高抗性淀粉含量，生产特需面制食品	3种热处理方式均可以显著提高抗性淀粉含量，但对小麦粉加工品质有一定的不利影响	[5]
小麦淀粉	高压热处理-酶法、微波-酶法	生产抗性淀粉	微波-酶法所生产抗性淀粉的得率最高	[62]
小麦粉	湿热处理(水分体积分数15%、25%、35%，温度120 °C，时间24 h)	改性小麦淀粉	峰值黏度降低，糊化温度升高，抗性淀粉和慢消化淀粉含量显著升高	[3]
糕点用小麦粉	挤压处理	提高产品中抗性淀粉含量	挤压处理可以显著提高抗性淀粉(再生淀粉)含量，用于生产具有功能特性的糕点类食品	[63]
小麦	热风处理，薄层热处理，温度80~90 °C	改善面团演变学特性和烘焙品质	淀粉酶活性降低，面团品质和烘焙品质得到改善	[64]
面包用小麦粉	50~130 °C热空气处理5~8 s	提高面团强度	烘焙品质得到改善，减少了化学氧化剂和盐的添加	[65]
小麦粉	过热蒸汽处理，温度140、170 °C，时间1、2、4 min	改善小麦粉的面团演变学特性	面团吸水率显著升高，形成时间、稳定时间显著延长，弱化度显著降低	[66]
小麦次粉	110~120 °C蒸汽喷淋60 s，120 °C滚筒干燥6 min	制备煎炸食品裹料专用粉	得到了品质较好的裹料专用粉	[67]
小麦	浸泡小麦使其发芽，120~140 °C热风处理发芽小麦30 s	提高小麦中γ-氨基丁酸的含量	γ-氨基丁酸的含量由11.8 mg/kg提高至474 mg/kg	[68]
小麦面筋蛋白	水浴热处理，温度50~90 °C，时间15 min~24 h	增强其黏结特性	90 °C热处理可增强小麦蛋白胶黏剂的黏结强度和耐水性，但仍需进一步优化	[69]
小麦	微波处理，功率700 W，时间20 s	改善食品加工特性	所得馒头硬度降低，品质更好	[57]
小麦粉	挤压	改善小麦粉的功能性质	乳化性增强，游离糖含量增加，抗性淀粉含量降低	[70]
小麦	微波处理	干燥小麦并改善其加工品质	微波处理后小麦研磨时能耗显著降低	[71]

续表2

处理对象	热处理方式及条件	改性目的	改性效果	参考文献
小麦粉	湿热处理(温度120 °C，时间1 h，干基水分体积分数27.5%)	生产功能性小麦粉	小麦粉的糊化温度、溶胀势和亮度显著提高	[72]
小麦	微波处理	促进小麦后熟	经微波处理后，所制得面包、蛋糕等制品的品质显著改善；淀粉部分糊化，蛋白质部分变性	[73]
小麦	湿热处理(水分体积分数14%、温度63 °C或水分体积分数19%、温度55 °C)	改善小麦的烘焙(面包)品质	在以上条件下热处理可使面包体积显著增大，温度过高则会减小面包体积	[74]
小麦粉	干热处理	改善小麦粉的烘焙(面包)品质	干热处理引起二硫键的重新分布，增强面筋网络强度，改善面团品质，从而改善烘焙品质	[75]
小麦粉	微波辐照(625 W, 480 s)	改善小麦粉烘焙特性	面包体积等品质特性得到显著改善	[76]

除了以上应用外，热处理也在蛋糕用小麦粉的品质改良中得到了广泛应用。氯气处理是传统的改善蛋糕用小麦粉品质的方法，由于其可能对环境和人体健康产生影响，逐渐被热处理法所取代^[77]。在欧盟氯气处理法已被禁用。Russo等^[78]于20世纪70年代首先研究了热处理在改善蛋糕用小麦粉品质中的应用，经热处理后，小麦粉沉降值减小、蛋白质溶解度降低、淀粉糊化时黏度升高，蛋糕的质构和风味得到显著改善。在此之后，相关研究者根据实际生产状况对热处理工艺进行了改进，并对热处理改善小麦粉品质的机理进行了研究。van Steertegem等^[79]通过小麦粉经热处理后溶剂保持力的变化来研究热处理对小麦粉功能特性的影响，结果表明，经100 °C热处理后，小麦粉的水溶剂和蔗糖溶剂保持力显著升高，碳酸钠溶剂保持力无显著变化，乳酸溶剂保持力显著降低。热处理后小麦粉溶剂保持力的变化与经氯气处理后小麦粉溶剂保持力的变化趋势类似。Neill^[77]和Chesterton^[80]等均对蛋糕用小麦粉的热处理工艺进行了优化，最优工艺分别为120~130 °C处理30 min和130 °C处理15 min，最优工艺存在的差别主要是由所用热处理设备的差异造成的。Bean等^[81]对小麦粉的热处理工艺进行改进，在71 °C下对小麦粉进行4~5 d的热处理，该工艺不仅可以显著改善蛋糕的质构、色泽、感官等品质，而且未使用和产生对人体有害的物质。Nakamura等^[82]采用干热法在120 °C下处理软麦粉，其在制作日本海绵蛋糕时蛋糕糊的气泡稳定性显著增强，使蛋糕体积显著增大。

在热处理过程中，淀粉的部分糊化^[83]和蛋白质的部分变性^[84]导致小麦粉品质发生变化，从而改善蛋糕品质。其中，热处理所导致的淀粉黏度变化是引起蛋糕体积变化的最关键因素^[85]，而淀粉黏度的变化则是由淀粉颗粒表面蛋白质疏水性的变化^[86]、淀粉糊化^[77]和淀粉破损等因素引起的。此外，热处理后小麦粉的水分体积分数也是影响蛋糕品质的重要因素，热处理后小麦粉水分体积分数低于8%且接近4%时，所制得蛋糕的品质最佳，因此水分体积分数的变化可以作为控制热处理条件的依据。

3 热处理对小麦品质的不利影响及预防措施

热处理虽然在小麦储藏与加工中得到了广泛应用,但条件控制不当时容易对小麦品质产生不利影响。这主要是由于小麦中的蛋白质、淀粉、酶等大分子物质对热较为敏感,容易受到热处理的影响。对于某些高水分含量的小麦,需要采用热风对其进行干燥以保障其储藏品质,但在干燥时若温度过高,则会导致所制得小麦粉的面团品质劣变、烘焙品质变差^[64]。董召荣等^[87]研究发现,在适当条件下,对发芽小麦进行热处理可以降低 α -淀粉酶活性,改善发芽小麦品质。但在90 ℃下处理发芽小麦则会加速小麦品质的劣变,主要表现为面筋强度显著降低和沉降值降低。Vázquez等^[88]研究了小麦热风干燥和流化床干燥过程中工艺品质的变化,结果表明,相比于硬质小麦,软质小麦在热处理时品质更容易受到影响,这可能与其蛋白质含量的不同有关。而在水分体积分数为17%时,采用40 ℃或60 ℃流化床干燥小麦,对小麦的烘焙品质有改善作用。Mann等^[89]研究发现,热处理可能导致面筋蛋白的聚集,从而降低蛋白质的溶解度、减弱面筋网络强度。

综上可知,热处理对小麦品质的不利影响主要包括淀粉酶钝化、面团品质变差、烘焙品质变差等,而小麦品质与面制食品的品质直接相关。为了减少或避免热处理对小麦品质的不利影响,需要对小麦品质变化的机理进行研究,并在此基础上采取预防措施。在热处理过程中,温度、时间和物料水分含量是影响小麦品质的最主要因素,因此可以通过优化这3个工艺参数减少热处理对小麦品质的影响。采用500 W微波处理小麦时,28 s内即可杀灭全部害虫^[36]。在使用过热蒸汽杀灭小麦中微生物时,其杀菌作用主要发生在过热蒸汽处理开始后的10~40 s,继续延长处理时间时,杀菌效率显著降低^[40]。因此,在进行小麦热处理时,可在保障食品安全的前提下适当缩短热处理时间,以减少其对小麦品质的影响。针对不同的目标,在热处理时使用的温度不同。当采用热处理法进行杀虫时,所需温度相对较低;而当进行杀菌脱毒和抑制酶活性时,所需温度则相对较高。因此应根据热处理目的选择温度。同时,在满足处理目的的前提下,应尽可能选择较低温度。在热处理时,水分直接参与淀粉的糊化和蛋白质的变性过程,因此水分含量对热处理过程中小麦品质的变化有显著影响。通常来说,水分含量较低时,小麦品质受热处理的影响较小^[88]。此外,在热处理过程中,温度、时间和物料水分含量之间通常具有交互作用。例如,在使用热处理法进行杀菌、杀虫、酶钝化等的过程中,提高温度或缩短时间可以达到相似的处理效果。因此可以采用正交试验设计法或响应面法优化热处理工艺参数,以减少对小麦品质的影

响。除了以上工艺条件,小麦自身特性(如硬度指数)也对热处理时小麦品质的变化有一定影响。由于软质小麦的品质更容易受到热处理的影响^[88],因此在处理软质小麦时,应适当降低处理温度或缩短处理时间。

4 结语

热处理具有安全、无污染等优点,可以有效替代部分化学熏蒸剂和食品添加剂用于小麦和小麦粉的杀虫、杀菌脱毒、酶钝化和品质改良,并可用于改善蛋糕用小麦粉的品质。但热处理同时也可能对小麦和小麦粉品质造成不良影响,这是阻碍其在小麦加工中规模化应用的主要原因。近年来,国内外研究人员对热处理时小麦和小麦粉品质变化研究不断深入,了解了许多品质变化的原因,并找到了一些解决方法,但仍存在许多有待解决的问题。鉴于此,笔者认为,未来对小麦和小麦粉热处理技术的研究应考虑以下要点:1)更加全面地了解热处理过程中小麦和小麦粉品质的变化,并研究热处理对最终食品品质的影响;2)深入研究热处理过程中小麦和小麦粉品质变化的机理和分子机制,以有针对性地改善热处理工艺;3)开发适用于工业化应用的热处理设备,降低热处理成本。随着研究的不断深入,热处理必将在小麦储藏与加工中得到更合理的应用。

参考文献:

- [1] 王子霞,海热古力,樊哲儒,等.食品添加剂对面包小麦品种新春9号烘焙品质的影响[J].麦类作物学报,2005,25(2): 81-84. DOI:10.3969/j.issn.1009-1041.2005.02.018.
- [2] 赵秋红,赵娟,陆龙.浅述小麦粉添加剂的功能及合理应用[J].面粉通讯,2004(3): 44-46.
- [3] CHEN X, HE X W, FU X, et al. *In vitro* digestion and physicochemical properties of wheat starch/flour modified by heat-moisture treatment[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 63: 109-115. DOI:10.1016/j.jcs.2015.03.003.
- [4] GHALY T F, TAYLOR P A. Quality effects of heat treatment of two wheat varieties[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(3): 227-234. DOI:10.1016/0021-8634(82)90064-6.
- [5] 李明菲.不同热处理方式对小麦粉特性影响研究[D].郑州:河南工业大学,2016: 40-52.
- [6] 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): e13238. DOI:10.1111/jfpp.13238.
- [7] MARTINEZ M, OLIETE B, GOMEZ M. Effect of the addition of extruded wheat flours on dough rheology and bread quality[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(3): 424-429. DOI:10.1016/j.jcs.2013.01.007.
- [8] LAMACCHIA C, LANDRISCINA L, DAGNELLO P. Changes in wheat kernel proteins induced by microwave treatment[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 634-640. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.11.016.

- [9] LIU C Q, MA X J. Study on the mechanism of microwave modified wheat protein fiber to improve its mechanical properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 99-107. DOI:10.1016/j.jcs.2016.05.018.
- [10] ISMAILOGLU S O, BASMAN A. Physicochemical properties of infrared heat-moisture treated wheat starch[J]. *Starch-Stärke*, 2016, 68(1/2): 67-75. DOI:10.1002/star.201500160.
- [11] SAIR L. Heat-moisture treatment of starch[J]. *Cereal Chemistry*, 1967, 44(1): 8-26.
- [12] SUI Z Q, YAO T M, ZHAO Y, et al. Effects of heat-moisture treatment reaction conditions on the physicochemical and structural properties of maize starch: moisture and length of heating[J]. *Food Chemistry*, 2015, 173: 1125-1132. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.11.021.
- [13] 黄立新, 周瑞君, MUJUMDAR A S. 喷雾干燥的研究进展[J]. 干燥技术与设备, 2009, 7(5): 195-198; 213. DOI:10.3969/j.issn.0528-9017.2011.04.043.
- [14] MUJUMDAR A S, HUANG L X, CHEN X D. An overview of the recent advances in spray-drying[J]. *Dairy Science & Technology*, 2010, 90(2/3): 211-224. DOI:10.1051/dst/2010015.
- [15] SEHRAWAT R, NEMA P K, KAUR B P. Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 34: 285-301. DOI:10.1016/j.ifset.2016.02.003.
- [16] KAZMERSKI L. Renewable and sustainable energy reviews[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 38: 834-847.
- [17] LOPES-DA-SILVA M D F, SANTOS L, CHOUPINA A. The extrusion in food technology: types, advantages and equipments[J]. *Revista de Ciencias Agrarias*, 2015, 38(1): 3-10.
- [18] 张金闯, 刘丽, 刘红芝, 等. 食品挤压技术装备及工艺机理研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 275-283. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.037.
- [19] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing: a review[J]. *Food Research International*, 2013, 52(1): 243-261. DOI:10.1016/j.foodres.2013.02.033.
- [20] OSEPCHEUK J M. A history of microwave heating applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques*, 1984, 32(9): 1200-1224. DOI:10.1109/TMTT.1984.1132831.
- [21] AFZAL T M, ABE T. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 26(2): 137-145. DOI:10.1016/s0168-1699(00)00067-3.
- [22] THANIT S, SAKAMON D, POOMJAI S A, et al. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 92(1): 100-106. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2008.10.030.
- [23] MONGPRANEET S, ABE T, TSURUSAKI T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(2): 147-156. DOI:10.1016/s0260-8774(02)00058-4.
- [24] 张兰月, 李文浩, 罗勤贵, 等. 红外烘烤处理对小麦胚贮藏稳定性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(16): 321-325. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201316066.
- [25] 张来林, 刘志雄. 储粮害虫的防治[J]. 粮食科技与经济, 2006, 31(2): 43-45. DOI:10.3969/j.issn.1007-1458.2006.02.019.
- [26] 悅燕飞, 王若兰, 渠琛玲. 小麦储藏过程中发热霉变研究进展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(7): 18-20. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2018.07.007.
- [27] 白旭光, 王殿轩. 储藏物害虫与防治[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 2-4.
- [28] 王世伟. 储藏小麦闪热处理杀虫技术研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014: 9-31.
- [29] FIELDS P G. The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures[J]. *Journal of Stored Products Research*, 1992, 28(2): 89-118. DOI:10.1016/0022-474X(92)90018-L.
- [30] 田琳, 贺培欢, 齐艳梅, 等. 小麦热入仓防治玉米象效果研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(5): 106-109. DOI:10.3969/j.issn.1007-7561.2015.05.023.
- [31] MOURIER H, POULSEN K P. Control of insects and mites in grain using a high temperature/short time (HTST) technique[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2000, 36(3): 309-318. DOI:10.1016/S0022-474X(99)00054-5.
- [32] 吕建华, 钟建军, 史雅, 等. 热处理对赤拟谷盗的致死作用[C]// 华中三省(河南、湖北、湖南)昆虫学会2011年学术年会. 新乡: 中国昆虫学会, 河南省昆虫学会, 2011: 93-96.
- [33] PORTO S M C, VALENTI F, CASCONE G, et al. Thermal insulation of a flour mill to improve effectiveness of the heat treatment for insect pest control[J]. *Agricultural Engineering International: The CIGR E-Journal*, 2015, 2015: 94-104.
- [34] 徐君, 周继成, 丁静, 等. 热处理对赤拟谷盗幼虫的影响[J]. 粮油仓储科技通讯, 2009, 25(5): 37-39.
- [35] FIELDS P G. Novel fumigants and heat treatments for flour mills[C]// International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products. Antalya: ARBER Professional Congress Services, 2012: 333-344.
- [36] VADIVAMBAL R, JAYAS D S, WHITE N D G. Wheat disinfestation using microwave energy[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43(4): 508-514. DOI:10.13031/2013.19554.
- [37] PIXTON S W. The effect of heat treatment on the moisture content/relative humidity equilibrium relationship of Manitoba wheat[J]. *Journal of Stored Products Research*, 1968, 4(3): 267-270. DOI:10.1016/0022-474x(68)90019-2.
- [38] 钟建军, 吕建华. 小麦粉储藏及害虫防治研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2011, 36(1): 17-19; 38. DOI:10.3969/j.issn.1007-1458.2011.01.006.
- [39] CENKOWSKI S, PRONYK C, ZMIDZINSKA D, et al. Decontamination of food products with superheated steam[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(1): 68-75. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2006.12.002.
- [40] 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. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.11.001.
- [41] PRONYK C, CENKOWSKI S, ABRAMSON D. Superheated steam reduction of deoxynivalenol in naturally contaminated wheat kernels[J]. *Food Control*, 2006, 17(10): 789-796. DOI:10.1016/j.foodcont.2005.05.004.
- [42] 刘远晓, 关二旗, 卞科, 等. 过热蒸汽处理对赤霉病小麦中DON的降解效果[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 57-63.
- [43] PIPER P W. Molecular events associated with acquisition of heat tolerance by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1993, 11(4): 339-355. DOI:10.1016/0168-6445(93)90005-t.
- [44] WEITZELI G, PILATUS U, RENSING L. The cytoplasmic pH, ATP content and total protein synthesis rate during heat-shock protein inducing treatments in yeast[J]. *Experimental Cell Research*, 1987, 170(1): 64-79. DOI:10.1016/0014-4827(87)90117-0.
- [45] ARONSSON K, RÖNNER U. Influence of pH, water activity and temperature on the inactivation of *Escherichia coli*, and *Saccharomyces cerevisiae*, by pulsed electric fields[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2001, 2(2): 105-112. DOI:10.1016/s1466-8564(01)00030-3.

- [46] LUKOW O M, BUSHUK W. Influence of germination on wheat quality. I. functional (breadmaking) and biochemical properties[J]. *Cereal Chemistry*, 1984, 61(4): 336-339.
- [47] FUERST P E, ANDERSON V J, MORRIS F C. Delineating the role of polyphenol oxidase in the darkening of alkaline wheat noodles[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(6): 2378-2384. DOI:10.1021/f0526386.
- [48] PARK W J, SHELTON D R, PETERSON C J, et al. Variation in polyphenol oxidase activity and quality characteristics among hard white wheat and hard red winter wheat samples 1[J]. *Cereal Chemistry*, 1997, 74(1): 7-11. DOI:10.1094/cchem.1997.74.1.7.
- [49] HIDALGO A, BRUSCO M, PLIZZARI L, et al. Polyphenol oxidase, alpha-amylase and beta-amylase activities of *Triticum monococcum*, *Triticum turgidum*, and *Triticum aestivum*: a two-year study[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 58(1): 51-58. DOI:10.1016/j.jcs.2013.04.004.
- [50] BEECHER B, SKINNER D Z. Molecular cloning and expression analysis of multiple polyphenol oxidase genes in developing wheat (*Triticum aestivum*) kernels[J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 53(3): 371-378. DOI:10.1016/j.jcs.2011.01.015.
- [51] 卞科, 郑学玲. 谷物化学[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 260-262.
- [52] 吴艳博, 董英, 徐斌. 麦胚稳定化处理方法的比较研究[J]. 食品工业科技, 2008(6): 154-157. DOI:10.3969/j.issn.1003-6202.2008.03.007.
- [53] YADAV D N, PATKI P E, SRIHARI S P, et al. Studies on polyphenol oxidase activity of heat stabilized whole wheat flour and its chapatti making quality[J]. *International Journal of Food Properties*, 2010, 13(1): 142-154. DOI:10.1080/10942910802256156.
- [54] VADLAMANI K R, SEIB P A. Reduced browning in raw oriental noodles by heat and moisture treatment of wheat[J]. *Cereal Chemistry*, 1996, 73(1): 88-95.
- [55] 江潇潇, 刘翀, 郑学玲. 湿热处理对发芽小麦粉品质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5): 60-65.
- [56] 刘静, 任国宝, 朱晓月, 等. 微波辐照对发芽小麦理化特性影响的初步研究[J]. 粮食与饲料工业, 2013, 12(7): 7-11. DOI:10.7633/j.issn.1003-6202.2013.07.003.
- [57] QU Chenling, WANG Hongliang, LIU Shengqiang, et al. Effects of microwave heating of wheat on its functional properties and accelerated storage[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2017, 54(11): 3699-3706. DOI:10.1007/s13197-017-2834-y.
- [58] MARTI A, TORRI L, CASIRAGHI M C, et al. Wheat germ stabilization by heat-treatment or sourdough fermentation: effects on dough rheology and bread properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(2): 1100-1106. DOI:10.1016/j.lwt.2014.06.039.
- [59] KERMASHA S, BISAKOWSKI B, RAMASWAMY H, et al. Comparison of microwave, conventional and combination heat treatments on wheat germ lipase activity[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2007, 28(6): 617-623. DOI:10.1111/j.1365-2621.1993.tb01313.x.
- [60] KHAMIS M. Characterization and evaluation of heat treated wheat flours[D]. Manhattan: Kansas State University, 2014: 40-55.
- [61] 洪静. 热处理对小麦损伤淀粉的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014: 9-26.
- [62] 孙建全, 王剑非, 邵秀芝, 等. 不同热处理方式对小麦抗性淀粉形成的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(6): 421-423. DOI:10.3969/j.issn.1002-1302.2010.06.167.
- [63] KIM J H, TANHEHCO E J, NG P K W. Effect of extrusion conditions on resistant starch formation from pastry wheat flour[J]. *Food Chemistry*, 2006, 99(4): 718-723. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.08.054.
- [64] 汲言山, 赵友梅. 加热处理小麦食用品质的变化[J]. 中国粮油学报, 1996(1): 5-11.
- [65] WOLT M, CHIGURUPATI S R, PULVERENTI J. Method for heat treating a bread baking wheat flour and resulting flour and dough: US5433966 A[P]. 1995-07-18[2018-06-23]. <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetacgi%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=5433966.PN.&OS=PN/5433966&RS=PN/5433966.>
- [66] HU Y M, WANG L J, LI Z G. Modification of protein structure and dough rheological properties of wheat flour through superheated steam treatment[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 76: 222-228. DOI:10.1016/j.jcs.2017.06.013.
- [67] 李东森, 杜衡, 刘钰, 等. 热处理小麦粉制备煎炸食品裹糊专用粉工艺条件的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 46-50; 63.
- [68] YOUN Y S, PARK J K, JANG H D, et al. Sequential hydration with anaerobic and heat treatment increases GABA (γ -aminobutyric acid) content in wheat[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(4): 1631-1635. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.06.020.
- [69] NORDQVIST P, LAWATHER M, MALMSTROM E, et al. Adhesive properties of wheat gluten after enzymatic hydrolysis or heat treatment: a comparative study[J]. *Industrial Crops & Products*, 2012, 38(3): 139-145. DOI:10.1016/j.indcrop.2012.01.021.
- [70] MARTINEZ M M, ROSELL C M, GOMEZ M. Modification of wheat flour functionality and digestibility through different extrusion conditions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 143(6): 74-79. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.06.035.
- [71] WALDE S G, BALASWAMY K, VELU V, et al. Microwave drying and grinding characteristics of wheat (*Triticum aestivum*)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(3): 271-276. DOI:10.1016/S0260-8774(02)00101-2.
- [72] YOUSOUUF K K, SEVERIN K K T, PAUL M, et al. Production of functional wheat flour by heat moisture treatment using optimization by response surface methodology[J]. *International Journal of Industrial Engineering*, 2017, 4(6): 17-25. DOI:10.14445/23499362/ijie-v4i6p102.
- [73] WEI Q. Effects of microwave heating on baking quality of wheat[D]. Quebec: McGill University, 2013: 57-75.
- [74] CETINER B, ACAR O, KAHRAMAN K, et al. An investigation on the effect of heat-moisture treatment on baking quality of wheat by using response surface methodology[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 74: 103-111. DOI:10.1016/j.jcs.2017.01.002.
- [75] BUCSELLA B, ÁGNES T, VIZER V, et al. Comparison of the effects of different heat treatment processes on rheological properties of cake and bread wheat flours[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 990-996. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.06.073.
- [76] MACARTHUR L A, D'APPOLONIA B L. Effects of microwave radiation and storage on hard red spring wheat flour[J]. *Cereal Chemistry*, 1981, 58(1): 53-56.
- [77] NEILL G, AL-MUHTASEB A H, MAGEE T R A. Optimisation of time/temperature treatment, for heat treated soft wheat flour[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(3): 422-426. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2012.06.019.

- [78] RUSSO J V, DOE C A. Heat treatment of flour as an alternative to chlorination[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2007, 5(4): 363-374. DOI:10.1111/j.1365-2621.1970.tb01580.x.
- [79] VAN STEERTEGEM B, PAREYT B, BRIJS K, et al. Impact of heat treatment on wheat flour solvent retention capacity (SRC) profiles[J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(6): 608-610. DOI:10.1094/CCHEM-04-13-0069-N.
- [80] CHESTERTON A K S, WILSON D I, SADD P A, et al. A novel laboratory scale method for studying heat treatment of cake flour[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144: 36-44. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.07.011.
- [81] BEAN M M, HANAMOTO M M. Process for improving baking properties of unbleached cake flour: US4157406[P]. 1979-06-05[2018-06-23]. <a href="http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Se ct2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetacgi%2FPTO%2Fsrchn um.htm&r=1&f=G&l=50&s1=4157406.PN.&OS=PN/4157406&RS=PN/4157406.
- [82] NAKAMURA C, KOSHIKAWA Y, SEGUCHI M. Increased volume of Kasutera cake (Japanese sponge cake) by dry heating of wheat flour[J]. Food Science & Technology Research, 2008, 14(5): 431-436. DOI:10.3136/fstr.14.431.
- [83] KIM W, CHOI S G, KERR W L, et al. Effect of heating temperature on particle size distribution in hard and soft wheat flour[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 40(1): 9-16. DOI:10.1016/j.jcs.2004.04.005.
- [84] SLADE L, LEVINE H. Glass transitions and water-food structure interactions[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 1995, 38: 103-269. DOI:10.1016/s1043-4526(08)60084-4.
- [85] JOHNSON A C, HOSENEY R C, GHAISI K. Chlorine treatment of cake flours. V. oxidation of starch[J]. Cereal Chemistry, 1980, 57(2): 94-96.
- [86] BARLOW K K, BUTTROSE M S, SIMMONDS D H, et al. Nature of the starch-protein interface in wheat endosperm[J]. Cereal Chemistry, 1973, 50: 443-454.
- [87] 董召荣, 徐风, 马传喜. 热处理对发芽小麦主要加工品质性状的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2000, 27(4): 321-324. DOI:10.3969/j.issn.1672-352X.2000.04.002.
- [88] VÁZQUEZ L, VIZCARRA M, SALAZAR A, et al. Effect of heat treatment on the industrial quality of two varieties of Mexican wheat[J]. International Journal of Food Properties, 2001, 4(3): 419-430. DOI:10.1081/JFP-100108645.
- [89] MANN J, SCHIEDT B, BAUMANN A, et al. Effect of heat treatment on wheat dough rheology and wheat protein solubility[J]. Food Science and Technology International, 2014, 20(5): 341-351. DOI:10.1177/1082013213488381.