杨硕，李萌萌，赵麒凤，等. 电磁波处理对小麦品质影响研究进展 [J]. 食品工业科技，2026, 47(17)：567−574. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080044

YANG Shuo, LI Mengmeng, ZHAO Qifeng, et al. Research Progress on the Effects of Electromagnetic Wave Treatment on Wheat Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 567−574. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080044

· 专题综述 ·

电磁波处理对小麦品质影响研究进展

杨　硕，李萌萌，赵麒凤，王瑞虎，宋云飞，贺　昕，王黎晨，卞　科*

（河南工业大学粮油食品学院，河南郑州 450001）

摘　要：小麦是人类重要的食物原料，小麦加工作为食品生产的重要环节，对食品的安全品质、营养品质以及感官特性产生重要影响。电磁波处理作为一种谷物加工手段，受到越来越多的关注。本文简要介绍电磁波的分类、特点及其在小麦加工中的应用情况；重点阐述电磁波处理对小麦中害虫、微生物及真菌毒素的杀灭/消减作用的研究进展，电磁波处理对小麦蛋白质、淀粉、脂质等主要成分的影响，及其对小麦的流变学特性、糊化特性和质构特性等加工品质的影响，以期为电磁波处理对小麦加工中的应用提供参考。

关键词：电磁波，小麦，安全品质，营养品质，加工品质

中图分类号：TS213.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002−0306(2026)17−0567−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080044　　本文网刊：

Research Progress on the Effects of Electromagnetic Wave Treatment on Wheat Quality

YANG Shuo，LI Mengmeng，ZHAO Qifeng，WANG Ruihu，SONG Yunfei，HE Xin，WANG Lichen，BIAN Ke*

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

Abstract: Wheat is a vital food raw material for humans, and wheat processing constitutes a critical component in food production, exerting a significant impact on the safety quality, nutritional quality, and sensory properties of food products. As a grain processing technology, electromagnetic wave treatment has garnered increasing attention in recent years. This paper first provides a brief overview of the classification and characteristics of electromagnetic waves, as well as their applications in wheat processing. It then focuses on elaborating three core aspects: the research progress regarding the killing or reduction effects of electromagnetic wave treatment on pests, microorganisms, and mycotoxins in wheat; the influences of such treatment on major wheat components including proteins, starches, and lipids; and its impacts on wheat's processing quality, such as rheological properties, gelatinization properties, and textural properties. The aim of this paper is to provide a reference for the application of electromagnetic wave treatment in wheat processing.

Key words: electromagnetic wave; wheat; safety quality; nutritional quality; processing quality

联合国粮食与农业组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）2025 年发布的《粮食展望》[1] 报告中预测 2025 年全球谷物产量高达 29.11 亿吨，其中小麦产量预计约 8 亿吨。小麦富含碳水化合物、蛋白质、脂质、维生素与无机盐等营养物质，其中作为主要营养储备的碳水化合物可为人体生命活动供给能量，蛋白质、脂质、维生素及矿物质能够保障人体各项生理功能正常运转[2]，矿物质中包含铁、锌等人体必需微量元素，可在调节机体免疫、助力生长发育等方面发挥重要作用[3]，但其每年都会遭受微生物、虫害、真菌毒素的污染侵害，致使小麦品质与食用安全受到严重威胁[4]。电磁波辐

收稿日期：2025−08−11

基金项目：河南省科技攻关项目“电磁波改性提升麸皮安全特性及加工品质关键技术研究（242102110107）”；河南省高等学校青年骨干教师培养计划“麦麸热改性机制及品质变化机理研究（2024GGJS057）”；河南省两院院士后备人员培养对象支持经费项目“小麦基特殊医学用途糖尿病全营养配方食品研究与开发（244500510014）”。

作者简介：杨硕（2001−），女，硕士研究生，研究方向：小麦加工理论与应用，E-mail：ys18749753929@163.com。

*** 通信作者：**卞科（1960−），男，博士，教授，研究方向：谷物加工，E-mail：kebian@163.com。

射因其能效高、无残留污染、对营养物质损失小等优点在杀虫灭菌方面应用广泛[5]。电磁波处理小麦能够改变淀粉颗粒形貌与晶体结构，该过程中产生的自由基可引发蛋白质、脂质分子结构变化，同时影响脂质氧化稳定性，进而调控小麦粉的粉质、糊化、流变等加工特性，最终实现对面制品品质的改良或劣变调控[6]。本文主要总结了电磁波处理对小麦的安全品质、营养品质、加工品质三方面的影响及机理，以期为电磁波在小麦加工中的应用提供参考。

1 电磁波概述

1.1 电磁波的定义及分类

电磁波又叫电磁辐射，频率范围极广，依照波长或频率不同，将其排列为一段电磁波谱：γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线、微波及无线电波，如图 1 所示。不同频率的辐射对物质的作用方式和能量传递不同，根据能否引起物质电离将其分为电离辐射和非电离辐射。电离辐射包括 γ 射线、X 射线，能够破坏原子和分子的结构[7]，通过直接破坏细胞成分如碳水化合物、DNA 和脂质或由辐射分解产生的自由基和活性物质（如氢电子、氢原子或羟基自由基）破坏遗传物质及细胞成分导致细胞死亡[8]。非电离辐射是由机器辐射源产生的一种能量形式，包括紫外线、微波、红外和无线电波，主要通过破坏细胞膜及其基因工程物质（DNA 或 RNA）使细胞破裂来杀死真菌或微生物[9−10]。食品辐射的效率受微生物的介质环境、食品水分含量、温度和氧气等多种因素的影响。

1.2 电磁波的应用

电磁波广泛应用于通信[12]（广播、电视、卫星等）、医疗（核磁成像、放射治疗等）、农业和食品加工中，在农业方面，用特定的电离辐射或非电离辐射处理食品或谷物可以杀灭其携带的病毒、真菌、细菌[11]等有害微生物，目前许多国家已经将电磁波辐射应用于包括谷物、水果、肉类、海鲜等一系列食物的消毒[13]。电磁波除了辐射消毒，还广泛应用于杀灭害虫[14]、毒素降解[15]、诱变育种[16]、谷物品质改性[6]、延长保质期[17] 等方面。辐射不仅可以抑制甚至杀灭微生物和害虫，从而减少在储存期间因粮食变质产生的损失，还能够通过辐射粮食种子或幼苗获得需要的性状或抑制其发芽以延长保质期，本文主要聚焦于电磁波在小麦中的应用。

2 电磁波处理对小麦安全品质的影响

2.1 害虫

小麦生长和储存过程极易感染害虫，例如烟草甲虫、小螟虫和谷蠹等，研究发现，昆虫对辐射处理较为敏感，辐射种类、剂量和剂量率能有效抑制机体功能活性，降低昆虫的生存能力，电磁波处理对小麦中害虫的影响如表 1 所示。与农药相比，电磁波辐

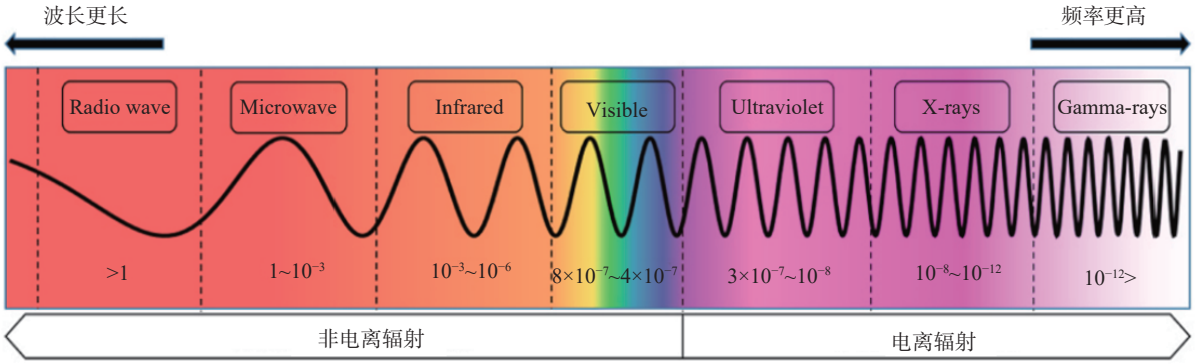


图 1 电磁波谱中的辐射类型：电离辐射与非电离辐射[11]

Fig.1 Types of radiation waves from electromagnetic spectrum, ionizing and non-ionizing radiations[11]

表 1 电磁波处理对小麦中害虫的影响

Table 1 Effects of electromagnetic wave treatment on pests in wheat

辐射种类	处理对象	处理条件	研究结果	参考文献
γ射线	烟草甲虫	剂量：100~900 Gy 剂量率：60、500 Gy/h	昆虫可达100%死亡率，幼虫死亡率达100%所需天数比成虫更长	[18]
	巴格拉达虫	剂量：16、24、32、50、60、80、100、120或140 Gy 剂量率：175.03 Gy/h	受照射的雌性完成产卵的能力随着照射剂量的增加而降低	[23]
紫外	麦蛾卵	功率：20 W 距离：16、17、39 cm	紫外照射25、40 min的孵化率最低，分别为0.63%和0.77%，照射时间短，距离远，杀胚效果较差	[24]
红外	谷象成虫	功率：250 W 时间：45、60、90、150、210 s 距离：13、15、17、19、21 cm	在50 g和100 g粒重下暴露210 s，发现在72 h后死亡成虫数量最多，死亡率分别为45.45%和64.93%	[20]
微波	象鼻虫	温度：60、70、80、90、100 ℃ 时间：30、60 s	处理60 s死亡率约为95%	[21]
	赤拟谷盗、四纹豆象	功率：400 W 时间：5、10、15、20、25 s	处理25 s时赤拟谷盗和四纹豆象的死亡率分别为100%和98.6%	[22]

射灭虫具有不污染环境、辐射产品无农药残留等优点[4]。电磁波辐射对同一种昆虫的杀灭效果受发育阶段和性别、辐射距离、时间、温度的影响。烟甲虫幼虫死亡率达到 100% 需要比成虫更长的时间[18]，可能是因为幼虫的生殖器官没有分化，其外部形态、内部器官以及生活习性等与成虫差异明显。对不同发育阶段谷蠹侵染的小麦籽粒进行红外辐射处理，在籽粒装载量更低、照射距离更近、处理时间更长的条件下，红外辐射对小麦中谷蠹卵、幼虫、蛹及成虫的杀虫效果更为显著[19]。电磁波辐射会影响昆虫的繁殖力和寿命，谷象成虫经红外辐射后其成年后代数量减少[20]，随着微波处理温度的升高、时间的延长，象鼻虫[21]、赤拟谷盗和四纹豆象[22] 死亡率逐渐增大。以上研究表明，电磁波辐射对昆虫生物体功能活动的抑制作用直接取决于辐射剂量，绝对致死量的大小受昆虫种类和虫体发育阶段的影响，用电磁波处理产品以抑制害虫的生存能力或繁殖能力是防治害虫的有效方法，对粮食储藏过程中的昆虫具有一定的杀灭和控制作用。

2.2　微生物

电磁波凭借优异的穿透能力实现对小麦中微生物的灭杀作用：一方面可直接损伤微生物 DNA 分子，破坏其双螺旋结构；另一方面能够诱导自由基生成，断裂 DNA 分子内化学键。当辐射强度超过微生物自身的 DNA 修复极限时，会引发大规模 DNA 损伤，阻碍微生物细胞分裂与增殖，最终实现抑制微生物生长或将其灭活的目的。不同辐射条件下的灭菌效果存在一定差异，该现象可从 DNA 损伤程度与微生物自身 DNA 修复能力两个角度加以阐释[25−26]。主要的病毒失活机制被认为是通过放射性裂解或遗传物质的交联直接破坏具有复制能力的核酸，或者通过自由基对核酸的作用间接破坏具有复制能力的核酸，并在较小程度上破坏蛋白质[27]。微生物数量随电磁波处理剂量的增加而受到显著抑制，小麦中好氧细菌、好氧孢子形成菌、产气荚膜梭菌数量随 γ 辐射剂量增加而显著降低，感染了镰刀菌、麦根腐平脐蠕孢菌、链格孢的小麦籽粒使用高剂量率 X 射线照射后，抗病原真菌被全部消灭[28]。γ 射线和 X 射线协同处理对大肠杆菌、鼠伤寒沙门菌和单核细胞增多李斯特菌的杀灭效果更好[29]，因此，采用两种及以上辐射方法协同对小麦进行处理可能会提高辐射对微生物的杀灭效果。特定紫外对小麦籽粒表面的微生物灭菌效果最高能达到 90% 左右[30]。小麦粉经微波处理后，鲜湿面的霉菌和酵母菌显著减少[31]，提高鲜湿面的安全性，延长其保质期。

2.3　真菌毒素

小麦中的真菌毒素是相关丝状真菌所产生的次级代谢物，目前发现的真菌毒素有 400 多种，作为食品检验的主要毒素包括脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)、黄曲霉毒素 B_1(AFB$_1$)、玉米赤霉烯酮(ZEN)、赭曲霉毒素 A(OTA)、伏马毒素(FB)等，被人类或动物摄入会严重危害健康，对其进行辐射处理可以显著降解小麦中的毒素。电离辐射对毒素降解机理包括直接作用和间接作用，直接对样品中毒素进行辐射或辐射溶于水的毒素样品，水产生活跃的自由基与活性分子作用于毒素分子[32]，非电离辐射会破坏真菌的核酸物质以及蛋白质的结构，使其无法进行正常的代谢而死亡[33]。紫外不同波长辐射 DON、AFB$_1$、FB$_1$、OTA、ZEN 五种真菌毒素标准品，发现不同毒素降解效果最高的波长不同，在实际应用中，可根据主要感染毒素选择辐射条件；紫外直接对小麦籽粒和小麦粉进行辐射，DON 降解率显著低于标准品的降解率[34]，可能是因为 DON 在小麦中并非简单以游离态存在，与其它物质结合导致降解效率下降；γ 辐射降解小麦和玉米中的 ZEN，发现小麦中的 ZEN 更容易被 γ 辐射降解[35]。小麦中真菌毒素的降解效果随辐射强度、功率的增大和辐射时间的延长而提高[35]，通常频率越高对真菌毒素的产毒抑制率越好。当毒素降解效果达到一定程度，提高辐射剂量和频率毒素降解效果无显著升高，考虑到过度辐射会对小麦品质产生影响，在实际处理过程中需要确定适当的辐射条件。

3　电磁波处理对小麦营养品质的影响

3.1　蛋白质

由于电磁波技术能效高、无污染残留、对营养物质损失小等优点，其对食品蛋白质结构和功能的改变受到人们的日益关注。电磁波辐射产生能量，蛋白质的极性基团会吸收能量产生自由基，自由基可以破坏蛋白质分子之间的各种相互作用，包括范德华力、静电和疏水相互作用、氢键、二硫键和盐桥，因此可以改变不同水平的蛋白质结构和功能特性(溶解度、乳化性、发泡性、表观粘度和胶凝性)[36]。γ 射线辐照面筋蛋白发现蛋白质二级结构改变，α 螺旋减少，β 折叠增加，二硫键含量下降，面筋蛋白有序结构被破坏，蛋白质结构变得松散[37]。微波处理小麦籽粒后谷蛋白聚合物含量下降，推测可能是因为微波处理诱导巯基和二硫键的修饰，降低面筋蛋白中 S-S、-SH 含量[38]，聚合蛋白移动到更大的不溶性蛋白质聚集体。采用不同剂量的 UV-C 照射小麦粉样品，结果显示，-NH_2 和-C=O 相互作用在紫外线处理下发生了变化，蛋白质二级结构 β 折叠和 β 转角增加，α 螺旋减少，面筋含量下降，可能是蛋白质相互作用被紫外线破坏，蛋白质失去了形成面筋的能力[39]，小麦粉经红外辐射同样表现出面筋含量减少的现象[40]。综上所述，蛋白质受到不同电磁波段适当辐射使蛋白聚集，而过度处理面筋蛋白均表现出蛋白有序结构被破坏、结构松散，二级结构发生重排，α 螺旋减少，β 折叠增加，蛋白质构象的改变会引起功能特性的改变。适度辐射处理可以显著改善蛋白的溶解度、持水性、乳化性能，面筋蛋白有序结构破坏使亲水基团暴露，溶解度和持水性提高，提高了蛋白质分子与油水界面

层的结合，乳化活性、乳化稳定性得到改善[41]。过度处理反而会降低以上特性，选用合适的辐射条件，改善蛋白质的功能特性。

3.2 淀粉

淀粉是由 α-D-吡喃葡萄糖单元通过糖苷键聚合形成的天然半结晶多糖，主要由直链淀粉和支链淀粉两类组分构成，二者的空间排列与相互作用决定了淀粉的半结晶结构特征。其中无定形区由直链淀粉分子、支链淀粉的分支链构成，而结晶区是由支链淀粉双螺旋结构形成的微晶束组成。天然淀粉具有黏度高、剪切力小、不溶于水、热稳定性差、易糊化等缺点[42]，一般通过将其进行改性而应用到食品或工业中。经 γ 辐射改性后，小麦淀粉的直链淀粉和支链淀粉解聚成更短的链分子，羟基和碳氢链延伸，糖苷键的强度降低，淀粉结构改变，但淀粉颗粒长程有序程度不受影响，推测是因为淀粉颗粒的结晶度主要受支链淀粉的长链影响，而支链的结构不受 γ 辐射剂量的影响，因此不会引起其结晶相的明显多态性变化[43]。X 射线辐射后，小麦淀粉表面出现凹陷，颗粒表面变得粗糙，淀粉糖苷键被破坏，产生更多短链，可能产生淀粉分子链重排，淀粉出现解聚的现象[44]。小麦淀粉经微波处理后，分子内羟基等极性基团发生高频振动，促使淀粉分子间氢键断裂，支链淀粉从结晶区域解离析出；淀粉链充分舒展并暴露大量亲水基团，大幅提升淀粉与水分子的结合面积，促进淀粉颗粒充分溶胀，最终使得淀粉颗粒更易发生破裂[45]。综上所述，小麦淀粉经电磁波改性可能导致淀粉分子的糖苷键或氢键断裂从而出现更多短链，淀粉结构发生改变，淀粉颗粒表面变得粗糙，淀粉颗粒更容易破裂。

3.3 脂质

脂类是小麦中的一类有机大分子物质，是由脂肪酸和醇作用生成的酯及其衍生物统称，易氧化酸败从而损害小麦的品质[46]，辐射可以对其进行改性。研究发现 γ 辐射可以降低脂氧化酶活性，增加自由基清除活性、过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性达到抗氧化作用[47]，紫外对小麦幼苗脂质的氧化抑制作用与之相似[48]。微波辐射可有效抑制小麦贮藏期间游离脂肪酸的生成，显著降低脂肪酸值与 TBA 值[49]；该处理能够破坏硫胺素结构，同时使脂肪酶、脂氧合酶失活，从酶促反应层面抑制脂质氧化[50]。经射频处理的全麦粉[51] 及麦胚[52] 的氧化酶活性下降，在储藏过程中脂肪酸值增速受到显著抑制。综上所述，电磁波辐射主要通过抑制脂肪酶活性降低游离脂肪酸含量及脂氧化酶活性，直接抑制氧化来改善小麦的储藏稳定性和抗氧化性能。

3.4 酚类物质

小麦麸皮富含酚类物质、膳食纤维等多种天然活性组分，其中酚类物质因具备良好的生物抗氧化活性而备受研究关注。膳食摄入酚类化合物能够降低肥胖、心血管疾病、糖尿病及癌症等慢性疾病的发病风险。γ 辐射小麦[47]、UV-B 辐射小麦幼苗[48] 后小麦中酚类物质含量升高，可能是因为酚类物质合成的关键酶苯丙氨酸解氨酶被激活，促进小麦中酚类物质的合成，或者是由木质素的诱导引起的，在木质素化过程中，一些中间代谢物如酚酸开始积累并与细胞壁的结构成分交联，使结合酚含量增加。随着微波处理温度的升高，可能使植物细胞壁破裂，促进酚酸的释放，高温处理下多酚氧化酶（PPO）、过氧化物酶活性的降低也可能阻止酚酸的氧化损失[53]。综上所述，电磁波处理后通过促进酚类物质与蛋白、淀粉结合、破裂细胞壁促进游离酚释放及抑制多酚氧化酶活性提高小麦中酚类物质，酚类物质的提高对抑制脂肪氧化有促进作用。

4 电磁波处理对小麦加工品质的影响

4.1 流变学特性

小麦粉面团（糊）的流变学特性决定加工产品的最终品质，受蛋白质和淀粉的种类、淀粉颗粒尺寸、淀粉结构和分子相互作用的影响，反映了淀粉糊化和回生过程中随温度变化的动态黏弹性特性，如表 2 所示。小麦粉经电磁波处理后面筋蛋白被破坏，蛋白质分子的疏水区域暴露，二硫键重新排列，蛋白质变性聚集包裹淀粉，直链淀粉-支链淀粉和直链淀粉-脂复合物之间的相互作用增强，改变小麦的流变学特性[54]。经 γ 辐射小麦粉面团[47] 和糊状物[55] 的储能模量（G′）和损耗模量（G″）均降低，黏弹性整体减弱，面团弹性行为占主导地位，可能原因是高剂量辐照后淀粉分子的降解和面筋蛋白的解聚，与前文中的解释一致。随微波处理时间和功率增大，小麦粉面团的 G′和 G″先增大后减小，即低剂量时淀粉受热适度膨胀，蛋白网络结构更加紧密，面团更加柔软，黏弹性增强；辐射强度增大，淀粉和蛋白结构被破坏，黏弹性减弱[38]。小麦淀粉经远红外（FIR）处理，分子间相互作用减弱，小麦淀粉凝胶的抗流变能力降低[56]。不管是面团还是淀粉糊的流变学特性与淀粉分子链的缠绕、破碎和蛋白网络结构的紧密、疏松等性质密切相关。

4.2 糊化特性

不同电磁波处理改变淀粉、蛋白质结构及其相互作用影响淀粉糊化特性，进而影响产品加工、贮存、食用品质，如表 2 所示。淀粉糊的黏度依赖于长链淀粉分子相互缠绕形成的致密稳定的网络结构，由前文可知小麦淀粉经 γ 射线、X 射线、微波等处理后，淀粉链中的糖苷键断裂，淀粉解聚成短链。一方面淀粉链长变短后淀粉分子的相互缠绕能力下降，形成的网络结构松散，黏度下降；另一方面短链淀粉的羟基数量减少，与相邻分子形成氢键减少，分子间结合力减弱，黏度下降。小麦粉经 γ 射线[57]、红外[58] 处理后，淀粉的峰值黏度、最终黏度、回生值和崩解值降低，崩解敏感性下降，黏度变化与前面分析一致。红外[54] 与紫外[59] 协同水热处理小麦粉对黏度影响略有差异，黏度表现为先升高后降低趋势，可能是因

表 2　电磁波处理对小麦加工品质的影响

Table 2　Effects of electromagnetic wave treatment on wheat processing quality

处理对象	处理方式	处理条件	品质变化	参考文献
全麦粉	^{60}Co-γ射线	剂量：0、2.5、5 kGy 剂量率：83 Gy/min	G'和G"降低， 弹性行为占主导地位	[47]
小麦粉	微波	时间：0、1、2、3、4 min 功率：100、300、500、800 W	随时间和功率增大，G'和G"先降低后增大，最后又降低	[38]
小麦淀粉凝胶	远红外线	远红外线烘箱 50 ℃、12 h	抗流变能力降低	[56]
小麦粉	^{60}Co-γ射线	0.5、1、2.5、5、10 kGy	峰值黏度、最终黏度、回生值和崩解值降低	[57]
小麦粉	红外辅助水热	功率：600、700、800、900、1000 W 时间：30、32、35、38、48 min	糊化温度升高， 峰值黏度、最终黏度先升高后降低	[54]
小麦粉	微波辅助水热	功率：800 W 水分：20%、25%、30%、35%	糊化温度升高， 峰值黏度、最终黏度先升高后降低	[59]
小麦种子	^{60}Co-γ射线	剂量：0、35、50、75、90、120、150、200、300、400 Gy 剂量率：6.25 Gy/min	馒头的硬度和咀嚼性降低， 颜色变黄	[61]
小麦粉	^{60}Co-γ射线	剂量：0、5和10 kGy 剂量率：10 Gy/h	面条硬度、黏性、凝聚性、咀嚼性均降低，颜色变黄	[62]
小麦粉	红外	功率：600、700、800、900和1000 W 时间：30、32、35、38、48 min	储藏蛋糕硬度增速变缓	[64]

为协同处理导致淀粉分子内部重排，结晶区域增加，黏度上升；而淀粉和脂质形成复合物或者过高的水分不再促进网络结构形成，削弱淀粉体系的内摩擦阻力，导致黏度下降。黄美琳[60]发现蛋白质的二级结构与小麦粉糊化特性高度相关，-SH 和 α 螺旋对探究小麦粉糊化特性有重要意义。不同辐射条件对小麦糊化特性产生的影响还需进一步研究。

4.3　质构特性

质构特性是衡量面制品品质的重要指标，主要包括硬度、弹性、凝聚性、胶黏性、回复性和咀嚼性。小麦经辐射处理后淀粉、蛋白质微观结构及组成的改变影响着其制品的品质，通过对面制品的质构特性进行测定可以反映面制品的组织结构特性、加工品质及感官品质，如表 2 所示。小麦粉经^{60}Co-γ 射线处理后制作馒头和面条，馒头的硬度和咀嚼性降低[61]，面条硬度、黏性、凝聚性、咀嚼性均降低[62]，微波处理后制作的面条[63]，硬度先升高后降低，这种变化与前文中所述的蛋白质和淀粉的变化密切相关，适当处理使面筋网络更加致密，过度处理面团的面筋网络结构直接或间接被弱化、破坏，面筋网络强度减弱，使得面团结构变得疏松，因此产品的硬度、咀嚼性、凝聚性降低，脆性增加。电磁波对于储藏产品的口感有改善作用，蛋糕在储藏过程中易发生老化，淀粉分子发生重排，结晶度升高，硬度增加，导致口感下降，通过红外处理小麦粉后，淀粉分子结晶区被破坏，抑制双螺旋结构的生成，减缓了蛋糕硬度的增加速度[64]。综上所述，电磁波处理可用于改善面制品的口感以及抑制储藏期的品质劣化。

5　结论与展望

电磁波的实施效率高、成本低，可以在食品安全方面发挥重要作用。采用电磁波处理小麦，从食用安全方面来说，能够抑制昆虫生物体功能活性杀灭害虫，破坏 DNA 分子造成 DNA 分子损伤或破坏具有复制能力的核酸达到微生物灭菌作用，抑制真菌产毒、降解毒素。电磁波也会对小麦中蛋白质、淀粉的结构产生影响，蛋白质极性基团吸收电磁波辐射的能量产生自由基破坏蛋白质分子间的相互作用，影响蛋白质巯基、二硫键及面筋蛋白二级结构等，蛋白质有序结构趋于无序，结构松散，进而影响乳化性、起泡性等功能特性；经不同电磁波辐射淀粉表面结构变得粗糙，淀粉链的糖苷键或氢键被破坏，淀粉链解聚成短链小分子。电磁波辐射后，可以灭活脂肪酶和脂氧化酶，抑制脂肪氧化，提高产品品质；天然活性物质酚类物质的含量也会受到电磁波辐射的影响。蛋白质、淀粉结构和功能的变化进而影响小麦粉的流变学特性、糊化特性及质构特性，通过改变面团黏弹性、峰值黏度、回生值等特性，进一步影响面制品的硬度、凝聚性、咀嚼性等特性。目前电磁波对小麦品质的研究多聚焦于单一干热技术，未来可着重于电磁波与热风、超高压等其它技术或两种电磁波的协同效应，拓宽电磁波处理在小麦中的应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] Food Outlook-Biannual report on global food markets[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025: 1-152.

[2] 苏晓梅. 谷物食品的种类及其营养价值[J]. 食品安全导刊, 2022(11): 148−150. [SU Xiaomei. Types of grain foods and their nutritional value[J]. China Food Safety Magazine, 2022(11): 148−150.]

[3] 刘宇, 王彩霞, 宋国鑫, 等. 电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)法测定陕西省谷物中矿物质元素及其营养评价[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(12): 2070−2078. [LIU Yu, WANG

Caixia, SONG Guoxin, et al. Determination of mineral elements in grains from Shaanxi Province by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) and its nutritional evaluation[J]. Chinese Jorunal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(12): 2070−2078.]

[4] LOY N N, SANZHAROVA N I, GULINA S N. Assessment of the efficiency of application of ionising radiation for grain disinfestation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 487(1): 012030.

[5] 耿建暖. 食品辐照技术及其在食品中的应用[J]. 江苏调味副食品, 2013(2): 29−32. [GENG Jiannuan. Food irradiation and its application in food processing[J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2013(2): 29−32.]

[6] LIAN Fengli, SUN Dawen, CHENG Junhu, et al. Improving modification of structures and functionalities of food macromolecules by novel thermal technologies[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 327−338.

[7] CHO G L, HA J W. Application of X-ray for inactivation of foodborne pathogens in ready-to-eat sliced ham and mechanism of the bactericidal action[J]. Food Control, 2019, 96: 343−350.

[8] PILLAI S D, SHAYANFAR S. Electron beam technology and other irradiation technology applications in the food industry[J]. Topics in Current Chemistry, 2017, 375: 6.

[9] BISHT B, BHATNAGAR P, GURURANI P, et al. Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables-a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 372−385.

[10] ADEBO O A, MOLELEKOA T, MAKHUVELE R, et al. A review on novel non-thermal food processing techniques for mycotoxin reduction[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(1): 13−27.

[11] SANAEI N S, ZARE L, TAHMOUZI S, et al. Effect of irradiation treatment on microbial, nutritional and technological characteristics of cereals: A comprehensive review[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2023, 212: 111124.

[12] 田云泽. 电波赋能发展 法治护航安全[N]. 安徽经济报, 2025-09-06(002). [TIAN Yunze. Empowering development with radio waves, safeguarding security through the rule of law[N]. Anhui Economic Newspaper, 2025-09-06(002).]

[13] FARKAS J, MOHÁCSI-FARKAS C. History and future of food irradiation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(2−3): 121−126.

[14] STATHAS I G, SAKELLARIDIS A C, PAPADELLI M, et al. The effects of insect infestation on stored agricultural products and the quality of food[J]. Foods, 2023, 12(10): 2046.

[15] AKHILA P P, SUNOOJ K V, AALIYA B, et al. Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 399−409.

[16] 王文杰. ^{60}Co-γ 辐射诱变小偃麦后代的抗白粉病、耐盐性及品质分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024. [WANG Wenjie. Analysis of powdery mildew resistance, salt tolerance and quality of *Trititrigia progenies* induced by ^{60}Co-γ radiation[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.]

[17] DUAN Ruibing, HUANG Zhenfu, CHEN Xianqiang, et al. Development and irradiation preservation technology study on fresh wet noodles incorporating *Lotus rhizome* residue[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2025, 19(3): 2007−2018.

[18] DORN Y, LOY N, PAVLOV A, et al. The effect of gamma irradiation on insect pests of grain stocks[M]. Cham: Springer, 2023: 429−436.

[19] KHAMIS M, SUBRAMANYAM B, FLINN P W, et al. Susceptibility of various life stages of *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) to flameless catalytic infrared radiation[J]. Journal of Economic Entomology, 2010, 103(4): 1508−1516.

[20] KESZTHELYI S, LUKÁCS H, PÁL-FÁM F. Effects of different infra-red irradiations on the survival of granary weevil *Sitophilus granarius*: Bioefficacy and sustainability[J]. Insects, 2021, 12(2): 102.

[21] PARIYAR H B, DHUNGANA S, PAUDEL D R. Controlling pests in post-harvested wheat using microwave heating[J]. Himalayan Physics, 2023: 86-92.

[22] AHMADY A, MOUSA M A, ZAITOUN A A. Effect of microwave radiation on *Tribolium confusum* Jaquelin du Val (Coleoptera: Tenebrionidae) and *Callosobruchus maculatus* (F.) (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchidae)[J]. Journal of Entomology and Zoology Studies, 2016, 4(4): 1257−1263.

[23] CRISTOFARO M, SFORZA R F H, ROSELLI G, et al. Effects of gamma irradiation on the fecundity, fertility, and longevity of the invasive stink bug pest *Bagrada hilaris* (Burmeister) (Hemiptera: Pentatomidae)[J]. Insects, 2022, 13(9): 787.

[24] 杜会玲, 吕兵, 翟一凡, 等. 紫外灯对麦蛾卵的杀胚效果[J]. 应用昆虫学报, 2022, 59(1): 186−192. [DU Huiling, LÜ Bing, ZHAI Yifan, et al. Effectiveness of using ultraviolet light to kill Angoumois grain moth eggs[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2022, 59(1): 186−192.]

[25] KOBAYASHI Y. Food irradiation: Radiation-based sterilization, insecticidal, and inhibition of sprouting technologies for foods and agricultural produce[M]. Singapore: Springer, 2018: 217−253.

[26] HARRELL C R, DJONOV V, FELLABAUM C, et al. Risks of using sterilization by gamma radiation: The other side of the coin[J]. International Journal of Medical Sciences, 2018, 15(3): 274−279.

[27] FELDMANN F, SHUPERT W L, HADDOCK E, et al. Gamma irradiation as an effective method for inactivation of emerging viral pathogens[J]. The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 2019, 100(5): 1275−1277.

[28] ISEMBERLINOVA A A, EGOROV I S, NUZHNYH S A, et al. The pulsed X-ray treatment of wheat against pathogenic fungi[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2021, 503: 75−78.

[29] BEGUM T, FOLLETT P A, HOSSAIN F, et al. Microbicidal effectiveness of irradiation from Gamma and X-ray sources at different dose rates against the foodborne illness pathogens *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* in rice[J]. LWT, 2020, 132: 109841.

[30] 冉旭东, 李萌萌, 关二旗, 等. 特定波长紫外线对小麦籽粒表面微生物灭菌效果研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(4): 51−55. [RAN Xudong, LI Mengmeng, GUAN Erqi, et al. Study on sterilization effect of specific wavelength ultraviolet on wheat grain surface microorganism[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(4): 51−55.]

[31] 杨婧蓉, 陈科涵, 刘伯业, 等. 微波处理对小麦粉理化特性及保鲜湿面品质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(10): 178−185. [YANG Jingrong, CHEN Kehan, LIU Boye, et al. Effects of microwave treatment on physicochemical properties of wheat flour and noodle quality[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(10): 178−185.]

［32］ 范林霞, 朱延光, 李学先, 等. 电子束、γ 射线辐照降解玉米赤霉烯酮的研究进展[J]. 粮食储藏, 2024, 53(4): 23−28,39. ［FAN Linxia, ZHU Yanguang, LI Xuexian, et al. Research progress on degradation effect of zearalenone irradiated by electron beam, γ-ray[J]. Grain Storage, 2024, 53(4): 23−28,39. ］
［33］ 金瑞, 李萌萌, 万小乐, 等. 谷物中脱氧雪腐镰刀菌烯醇物理降解研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 331−339. ［JIN Rui, LI Mengmeng, WAN Xiaole, et al. Advances in physical degradation of deoxynivalenol in cereals[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 331−339. ］
［34］ 冉旭东. 紫外线辐照对小麦籽粒表面微生物抑制及真菌毒素降解效果研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. ［RAN Xudong. Effects of UV irradiation on microbial inhibition and mycotoxin degradation on wheat grain surface[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023. ］
［35］ SEBAEI A S, SOBHY H M, FOUZY A S M, et al. Occurrence of zearalenone in grains and its reduction by gamma radiation[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2022, 102(11): 2503−2511.
［36］ HAN Zhong, CAI Mengjie, CHENG Junhu, et al. Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 1−9.
［37］ 程丽萍, 席俊, 崔龙, 等. ^{60}Co-γ 射线辐照对面筋蛋白结构及加工性能的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 149−157. ［CHENG Liping, XI Jun, CUI Long, et al. Effects of ^{60}Co-γ ray irradiation on the structure and processing properties of gluten proteins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 149−157. ］
［38］ 刘海波, 廖超, 郑万琴, 等. 微波处理小麦面粉对淀粉及蛋白性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 91−97. ［LIU Haibo, LIAO Chao, ZHENG Wanqin, et al. Effect of microwave-treated wheat flour on starch and protein properties[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 91−97. ］
［39］ KUMAR A, RANI P, PUROHIT S R, et al. Effect of ultraviolet irradiation on wheat (*Triticum aestivum*) flour: Study on protein modification and changes in quality attributes[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 96: 103094.
［40］ KORKMAZ F, BARIŞ T N, KOCABIYIK H. The effect of infrared radiation on gluten aggregation and pasting properties of wheat flours with different protein content[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103365.
［41］ 申慧珊, 张捷, 张艳艳, 等. γ 射线辐照对小麦粉面筋蛋白结构及功能特性的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 76−83. ［SHEN Huishan, ZHANG Jie, ZHANG Yanyan, et al. Effect of γ-irradiation on functional properties and structure of wheat gluten protein[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 76−83. ］
［42］ NAWAZ H, AKBAR A, ANDALEEB H, et al. Microwave-induced modification in physical and functional characteristics and antioxidant potential of *Nelumbo nucifera* rhizome starch[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2020, 28(11): 2965−2976.
［43］ ATROUS H, BENBETTAIEB N, HOSNI F, et al. Effect of γ-radiation on free radicals formation, structural changes and functional properties of wheat starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 80: 64−76.
［44］ LUO Haiyu, LIANG Danyang, LIU Qing, et al. Investigation of the role of sodium chloride on wheat starch multi-structure, physicochemical and digestibility properties during X-ray irradiation[J]. Food Chemistry, 2024, 447: 139012.
［45］ 郭卫芸, 张珂珂, 李光辉, 等. 微波条件下小麦淀粉-绿原酸复合物的理化及结构特性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 60−66. ［GUO Weiyun, ZHANG Keke, LI Guanghui, et al. Physicochemical and structural properties of wheat starch-chlorogenic acid complex under microwave irradiation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 60−66. ］
［46］ 吴远宁, 周坚, 沈汪洋, 等. 全麦粉储藏稳定性的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(7): 8−10,23. ［WU Yuanning, ZHOU Jian, SHEN Wangyang, et al. Research progress on storage stability of whole wheat flour[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(7): 8−10,23. ］
［47］ AHMAD B N, WANI I A, HAMDANI A M, et al. Effect of gamma-irradiation on the thermal, rheological and antioxidant properties of three wheat cultivars grown in temperate Indian climate[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 176: 108953.
［48］ CHEN Zhijie, MA Yan, WENG Yan, et al. Effects of UV-B radiation on phenolic accumulation, antioxidant activity and physiological changes in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings[J]. Food Bioscience, 2019, 30: 100409.
［49］ 钟杨, 张歌兴, 张方芹, 等. 热风及微波组合热风干燥对小麦胚芽品质的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(1): 21−27. ［ZHONG Yang, ZHANG Gexing, ZHANG Fangqin, et al. Effect of combination of hot air drying and microwave drying on quality of wheat germ[J]. China Condiment, 2025, 50(1): 21−27. ］
［50］ 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 and Technology, 2017, 54(11): 3699−3706.
［51］ 李大辉. 射频处理对全麦粉储藏稳定性及加工性能的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2024. ［LI Dahui. Effect of radio frequency treatment on the storage stability and processing properties of whole wheat flour[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024. ］
［52］ 邵子晗, 龚勋, 宋玉, 等. 不同处理方式对小麦胚芽贮藏稳定性及风味特征的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 231−239. ［SHAO Zihan, GONG Xun, SONG Yu, et al. Effects of different treatments on storage stability and flavor characteristics of wheat germ[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 231−239. ］
［53］ CUI R B, YEON YOO M J, ZHU F. Comparison of microwave and conventional heating on physicochemical properties and phenolic profiles of purple sweetpotato and wheat flours[J]. Food Bioscience, 2022, 46: 101602.
［54］ KORKMAZ F, TUNCEL N B. The effect of infrared-assisted hydrothermal treatment on rheological and functional properties of different types of wheat flour[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(8): 1810−1820.
［55］ BASHIR K, JAN K, AGGARWAL M. Thermo-rheological and functional properties of gamma-irradiated wholewheat flour[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(4): 927−935.
［56］ GUO Baozhong, WU Jianyong, HU Xiuting, et al. Effects of controlled far-infrared treatment on granular swelling and rheological properties of crop starches[J]. Starch - Stärke, 2020, 72(3−4): 1900251.
［57］ BASHIR K, SWER T L, PRAKASH K S, et al. Physicochemical and functional properties of gamma irradiated whole wheat flour and starch[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 76: 131−139.
［58］ SEMWAL J, MEERA M S. Infrared radiation: Impact on

physicochemical and functional characteristics of grain starch[J]. Starch - Stärke, 2021, 73(3-4): 2000112.
[59] TOK Ö, TUNCEL N B. The effect of microwave-assisted hydrothermal treatment on physicochemical and functional properties of wheat, barley, and rye flours[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 117: 103925.
[60] 黄美琳. 小麦粉在加工过程中受热对其品质的影响及机理研究[J]. 郑州: 河南工业大学, 2020. [HUANG Meiling. Study on the effects and mechanism of heat on wheat flour quality during processing[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.]
[61] 王小洁, 蒿宝珍, 谢艺可, 等. ^{60}Co-γ 辐照对小麦加工品质及终产品质构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 74−82. [WANG Xiaojie, HAO Baozhen, XIE Yike, et al. Effects of ^{60}Co-gamma irradiation on wheat processing quality and final product texture properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 74−82.]
[62] LEE N Y, KANG C S, KIM H S. Effects of γ-irradiation on the quality changes of fresh noodles prepared from wheat cultivated with N-fertilization treatments[J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(1): 135−142.
[63] ZHANG Jian, LI Xuejie, REN Xiujuan, et al. Changes in physicochemical characteristics of wheat flour and quality of fresh wet noodles induced by microwave treatment[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2024, 7(3): 177−185.
[64] KORKMAZ F, TUNCEL N B, TOK Ö. The effects of accelerated storage on quality of cake prepared using hydrothermally infrared treated flours[J]. Journal of Stored Products Research, 2023, 103: 102132.