

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2019.06.012

我国全麦食品加工利用 现状及存在问题

张琳, 张超凡

(山东农业大学 食品科学与工程学院, 山东 泰安 271000)

摘要: 目前, 我国的全麦食品产业仍处于发展初期, 市面上的全麦食品种类同质化现象严重, 而且以烘焙类全麦食品为主, 与我国消费者对于面制品的消费习惯并不一致。同时, 由于全麦食品存在耐储藏性较差, 生物活性物质和抗营养因子含量较高, 造成加工难度较大, 食用品质和食用安全性有待提高, 以及相关标准不完善等问题, 消费者并不能完全可买到优质的、可供选择的全麦食品, 影响了我国全麦食品的发展。就我国全麦食品的加工现状和存在问题展开讨论, 以期为我国全麦食品产业的完善和发展提供参考。

关键词: 全麦食品; 加工利用; 现状; 存在问题

中图分类号: TS213.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2019)06-0062-05

Current situation and problems of processing and utilization of whole-wheat food in China

ZHANG Lin, ZHANG Chao-fan

(College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an Shandong 271000)

Abstract: At present, China's whole-wheat food industry is still in its early stage of development. The homogeneity of wholemeal food varieties on the market is serious. It is not consistent with people's consumption habit of flour products with baked whole-wheat food as staple food. Consumers are not entirely able to buy high-quality, alternative whole-wheat foods since the problems such as poor storage stability, high content of biological active substances and antinutritional factors, which make processing more difficult; and edible quality and food safety needs to be improved, so as the relevant standards, which influence the development of whole-wheat food industry in China. The present situation and existing problems of whole-wheat food processing in China are discussed to provide reference for the improvement and development of whole-wheat food industry in China.

Key words: whole-wheat food; processing and utilization; current situation; existing problem

全麦食品是由整麦粒或全麦面粉直接加工而成, 其中全麦面粉是完整的小麦通过研磨、筛选等流程制作而成的, 全麦粉颜色呈黄褐色, 因其在研磨过程中没有去除麸皮且粉粒度无法达到普通面粉的标准, 所以在口感上比较粗糙。全麦粉的加工方法又分为直接研磨法和回添法, 国内全麦粉加工厂商主要以回添法加工全麦粉。目前,

市面上绝大部分全麦食品均是由全麦面粉再加工而成, 且绝大部分所谓的全麦食品均是添加部分全麦粉。我国目前只制定了全麦粉的行业标准^[1], 并没有公布全麦食品及全谷物食品的相关国家标准, 只有中国烘烤食品糖制品工业协会颁布了全谷物食品的团体标准, 中国烘烤食品糖制品工业协会颁布的团体标准中指明了全谷物焙烤食品、全谷物冲调谷物制品和全谷物膨化食品中全谷物的添加量均不能低于 27%^[2-4]。另外, 国际上关于全

收稿日期: 2019-06-18

作者简介: 张琳, 1997 年出生, 男, 在读本科生。

谷物食品也没有统一的标准,美国 FDA 定义产品总重的 51%及以上为全谷物产品^[5],即为全谷物食品。由于现阶段我国并没有建成完整的全麦食品加工标准体系,全麦食品生产商各自为营,造成市面上全麦食品的加工生产标准各不相同,加工出来的产品质量也良莠不齐,从而导致消费者对“全麦”这一概念产生困惑。

1 全麦食品的加工现状

随着人们对健康消费理念的理解不断加深和对全麦食品的深入了解,人们对全麦食品的认可度和关注度也愈来愈高。但我国的全麦食品及全谷物食品的种类多样性和产品数量与国外还存在较大差距,可供消费者选择的全麦食品种类也并不多,主要以焙烤类全麦食品为主。相关数据显示,2016 年全球约有 7 533 种全谷物食品进入市场,但我国在 2016 年新上市的全谷物食品仅有 64 种,大约为全球的 1%^[6]。“全麦”最早出现在焙烤食品和蒸煮食品的加工中,但如今在冲调食品、油炸食品和发酵饮料(酒)中也出现了“全麦”的身影。

1.1 焙烤类全麦食品

目前,焙烤类全麦食品是“全麦”的主要加工和研究方向,包括全麦饼干和全麦面包等。全麦面包和全麦饼干均是以全麦粉为主料,并加入其他辅料,经发酵、烘烤制得。由于全麦面包和全麦饼干中含有较多的麸皮组分,使其在颜色上略深于普通面包,口感上也比较粗糙;但因全麦面包和全麦饼干保留了小麦的全部组分,特别是麸皮和胚芽中的风味物质损失较少,在焙烤后麦香味更加浓郁。因此相较于其它全麦食品,全麦面包和全麦饼干更受人们的喜爱。相关研究结果还表明,如果持续吃两个月的全麦面包,不但能降低血压,还会使心脏病风险降低 30%^[7]。张秀凤等^[8]以小麦麸皮、黑豆粉和高筋粉为主料,研究得到黑豆全麦面包的最佳配方:黑豆粉 9%、小麦麸皮 6%、水 37%,以及最佳生产工艺:发酵时间 40 min、焙烤温度(上火 185 °C、下火 165 °C)、焙烤时间 13 min。朱海霞等^[9]利用二次发酵法,以添加一定比例的全麦粉的面包粉为主料,并添加 15%木糖醇代替蔗糖和 1.5%酵母,制得的木糖醇

全麦面包不仅在营养价值上有所提高,在感官品质方面也有很大改善。赵敏^[10]以高筋粉和全麦粉为主料,辅以葡萄干、黑白芝麻、瓜子仁等辅料,制作出口感香脆、味道香甜、麦香浓郁的全麦法棍。郑丽娜等^[11]以全麦面粉为主料,加入抹茶粉、糖、油脂等配料,通过单因素实验和正交实验得到抹茶全麦饼干的最佳配方为大豆油 16%、白砂糖 32%、水 44%、抹茶粉 2.4%、小苏打 1.16%、食盐 0.4%,制得的抹茶全麦饼干感官品质良好。

1.2 蒸煮类全麦食品

近年来,蒸煮类全麦食品的加工研究主要集中在传统中式面食,包括全麦馒头和全麦挂面等。全麦馒头和全麦挂面均是由全麦粉和高筋面粉混合加工而成,无法完全以全麦粉为主料加工馒头和挂面。相较于普通面粉,全麦粉中灰分增加、面筋蛋白百分比降低,使得面团的成团性降低、韧性和拉伸性变差,从而导致感官品质和理化性质下降,口感粗糙硬实、咀嚼性较差,外观色泽呈黄褐色,在一定程度上能促进食欲。汪丽萍等^[12]采用一次发酵法,研究了全麦粉含量为 51%的全麦馒头制作工艺,最终确定在加水量 105~110 mL,和面时间 2~2.5 min、发酵时间 45~60 min、醒发时间 15~20 min 时,全麦馒头有较好的感官品质。传统挂面对面团延展性的要求比馒头更高,使得全麦挂面的加工难度更大,因此在全麦面条的加工中通常会使用麸皮酶对全麦面团进行预处理。同时,加工工艺的选择对麸皮酶处理全麦挂面的效果有显著影响^[13]。经麸皮酶处理后的全麦挂面,其蒸煮增重率略微降低,干物质损失率略微升高,质构特性变化不大,营养品质显著提高^[14],有利于机体对营养成分的吸收和利用。

1.3 冲调类全麦食品

冲调类全麦食品除了人们所知晓的全麦麦片,还出现了全麦冲调粥粉。全麦麦片是以整麦粒为主料,经气蒸熟化、压片和干燥等主要步骤加工而成。另外,也可以全麦粉为主料,添加蛋白、粉末油脂和其他营养强化剂混合调配后,压制得到营养型全麦麦片。若食用整麦粒加工而成的麦片,在冲调吸水后依然会有较强的粗糙感,此类麦片可用全脂牛奶代替热水进行热冲泡食用,能

适当降低其粗糙感。吕少伟等^[15]研究了膨化对黑小麦麦片溶解性的影响,在含水量 13.5%、温度 170 ℃、时间 4 min 的条件下得到最佳膨化效果,得到香味纯正、口感松散的全黑小麦麦片。全麦冲调粥粉属于新兴的全麦冲调食品,孙彩翼等^[16]以紫糯小麦全麦粉为主原料,以红枣粉、枸杞粉等为辅料,通过单因素实验和正交实验确定出最佳配方:以紫糯全麦粉为基数,红枣粉 5%,枸杞粉 3%,黄芪-当归(质量比为 5:1)混合粉 0.9%,制得的红枣枸杞紫糯小麦养生粥粉,铁含量较高,营养成分丰富。

1.4 油炸类全麦食品

油炸类全麦食品也是以全麦粉和高筋面粉的混合粉为主料,再经醒发、揉捏、成型、油炸等工艺加工而成,如全麦油条、全麦方便面和全麦沙琪玛等。相关研究表明,全麦的加入能使油炸食品的抗氧化能力、营养价值、风味品质得到一定程度的改善,在加工过程中对油脂的吸收和水分的损失也会受到抑制^[17-19],让人们在享受美味的同时减少对油脂的过度摄入,在一定程度上能降低心脑血管疾病的患病率。

1.5 全麦发酵饮料(酒)

全麦发酵饮料(酒)是以整小麦为主料,通过粉碎、糊化、酶解和发酵等流程加工而成的口感醇厚、麦香浓郁的谷物饮料。在生产过程中利用酶制剂将麸皮中的营养物质水解成小分子物质,有利于人体的吸收利用。陈旭^[20]以全麦面包渣为原料,接种酵母菌和乳酸菌发酵,并加以红枣汁进行调配制作复合饮料,色泽光亮、酸甜适宜、口感爽滑,兼具红枣、小麦发酵和乳酸菌发酵的独特风味。邵淋淋等^[21]以整麦和麦仁为主料,对传统麦仁酒酿进行改进,所得全麦酒酿抗性淀粉含量增加,降低了淀粉的消化性,风味和口感独特。另外,相关企业和研究人员充分利用我国的小麦资源优势,将全麦用于全小麦啤酒的研制和生产^[22-23],降低了啤酒生产成本。

1.6 其他全麦食品

除上述全麦食品外,还有一些较为特殊的全麦食品。冯健^[24]以高糊化度全麦粉为原料,研制出营养方便早餐食品,并确定了谷物早餐压制成型

及烘烤实验的最佳工艺参数:保压时间 3 min、麦麸含水量 55%、麦麸添加量 30%、烘烤温度 150 ℃、烘烤时间 18 min。孙元琳等^[25]以黑小麦、荞麦、燕麦为主料,辅以大豆蛋白、大豆卵磷脂及蔗糖,通过挤压膨化技术研制出复合全谷物挤压膨化产品,并通过单因素实验和正交实验确定最佳配方为:大豆蛋白 3.3%、大豆卵磷脂 0.4%、蔗糖 8.3%,制得的复合全谷物挤压膨化产品口感酥脆、粗糙度适中、风味浓郁。

2 全麦食品存在的问题

2.1 全麦食品耐储藏性较差

全麦食品保质期的长短主要受小麦胚芽和小麦麸皮中的活性物质、不饱和脂肪酸、高活性酶、内源性酶,以及麸皮表面所携带的外源性微生物的影响。小麦胚芽富含不饱和脂肪酸及高活性的酶(脂肪氧化酶、内源性脂肪酶等),在全麦食品加工、储存及流通过程中这些不饱和脂肪酸和高活性酶十分容易发生氧化反应,从而引起食品品质下降甚至变质,如褐变、酸败、产气等。参与小麦胚芽组中不饱和脂肪酸氧化分解的酶主要为内源性脂肪酶和脂肪氧化酶。另外,微生物的污染也会加速油脂的酸败变质以及其他营养素的代谢消耗,导致食品的品质保持期大幅度缩短。

小麦麸皮富含多种生理活性物质,如亚油酸、维生素 E、多糖、植酸和酚类化合物等,其中主要的活性物质是酚类化合物和多糖^[26]。麸皮的加入不仅赋予了全麦食品更多营养成分和生理活性物质,同时也使全麦食品中微生物的数量、氧化酶类活性及其底物含量大大增加,从而导致全麦食品稳定性差,更易产生变质、变色等现象,特别是麸皮中含量丰富的酚类化合物以及内源性 β -木糖苷酶。酚类化合物被氧化后生成相应的醌类物质,使食品产生色变。内源性 β -木糖苷酶将阿拉伯木聚糖降解为低聚木糖和木糖单元^[27]。相关研究发现,酶法降解的阿拉伯木聚糖对乳酸杆菌和双歧杆菌有较好的增值效果,且降解程度越高,益生活性越好^[28],食品品质变化速度越快,耐储藏性也就越差。

2.2 全麦食品加工难度较大

全麦食品中的小麦麸皮组分富含粗纤维,韧

性较强,不易破碎,加工时对设备要求更高^[40],且生产能耗大,生产成本和投资成本较高。因此许多面粉厂家无法达到相应的设备条件,导致了这些生产厂家生产的全麦粉粉粒度达不到全麦粉细度的要求,生产的全麦粉只能算作粗全麦粉,大部分只能用于面包制作^[29],不适合用于面条、馒头等蒸煮类全麦食品的制作。同时,由于麸皮的加入,在破碎过程中会产生的热量也会远高于普通面粉加工的产热量,对生产设备的散热性能要求更高,若设备散热性能不佳会造成全麦粉的营养成分大量损失。此外,麸皮对面筋蛋白基质存在一定的稀释作用,而麸皮中含有的木聚糖凝胶在和面过程中会与面筋蛋白产生竞争性吸水现象,破坏面团的面筋网络结构,从而导致全麦粉的流变学特性受到劣化影响^[30-32],食品制作特性明显下降^[33]。

2.3 全麦食品食用品质有待提高

目前,我国全麦食品还存在口感粗糙、发涩、硬实、色泽暗、风味杂等食用品质问题。麸皮中较高含量的膳食纤维使得全麦面团在加工过程中的稳定性、延展性及发酵流变特性降低,也使得产品的口感更加硬实粗糙和发涩。同时,随着麸皮和胚芽的加入,全麦食品及全麦粉的色泽变暗,呈黄褐色。在全麦粉及麸皮粉的制粉过程中易因摩擦升温而发生美拉德反应,造成所得全麦粉或麸皮粉色泽呈焦褐色,以及小分子醇类、醛类和呋喃类等挥发性物质含量增加,从而产生特殊的气味。此外,麸皮中的挥发性物质阿魏酸,在烘烤时可与美拉德反应产物进一步发生反应,影响面包风味的形成^[34]。

2.4 全麦食品食用安全性有待提高

随着我国自然环境的恶化,作为全麦食品加工的原料——小麦所面临的质量安全问题也越来越繁杂。小麦从种植到加工成食品这一系列环节均有可能受到各种污染,从污染物的性质可分为本底污染、生物污染和化学污染^[35]。小麦所受到的本底污染物主要是水、土、空气中的重金属;生物污染物主要是致病性细菌、病毒、真菌及毒素物质;化学污染物主要是化学药剂残留^[36]。小麦籽粒有较深的腹沟,其中易残留农药、虫卵、重

金属离子和致病菌及其毒素,且Cr在小麦籽粒中主要分布在种皮和糊粉层^[37]。由于全麦食品是以整麦为原料加工而成,因此全麦食品的质量安全较普通面制品存在更高的风险性。此外,现有的行业标准中对全麦食品中致病芽孢杆菌的检测未明确规定,在加工过程中也无法将此类微生物菌落有效去除,甚至经过高温烘焙也无法完全去除芽孢杆菌,最终导致成品全麦食品中致病芽孢杆菌带来的安全隐患^[38]。

2.5 全麦食品中生物活性物质的最大限度保留问题

全麦食品中的活性物质主要由胚芽和麸皮提供,主要包括黄酮类、酚类、多糖类、维生素E、不饱和脂肪酸等。其中大部分生物活性物质均具有抗氧化、消除自由基、防止动脉粥样硬化和预防心脑血管疾病等生理学功能。但又正是因为这些特性,这些活性物质在全麦食品的加工过程中化学性质十分不稳定,极易发生氧化、水解反应,不仅使之丧失了原有的生理学功能,还会加速食品的品质恶化和变质。另一方面,这些生理活性物质都带有特殊基团,阈值较低,且对食品的感官品质和理化性质均有不同程度的影响。因此,在全麦食品加工前如何进行适当预处理,即对这些生物活性物质的稳定处理和最大限度保留处理,将成为全麦食品加工的重点关注问题。

2.6 全麦食品中抗营养因子的处理问题

目前,国内全麦食品的研究重点一直处在全麦粉及全麦食品的初级加工上,对于全麦食品中的抗营养因子研究较少,且大部分全麦食品及全麦粉加工生产企业并没有重视这个问题。全麦食品中的抗营养因子主要是木聚糖和植酸盐。木聚糖属于非淀粉性多糖,在机体肠胃中会产生粘性,不利于食物与消化液和肠胃的接触,从而影响机体对食物中营养素的吸收。全麦食品中的植酸盐主要是通过麸皮引入的,植酸盐不仅会影响机体对蛋白质、淀粉和脂肪的利用,还会严重抑制矿物质元素如钙、铁、锌等的吸收,是造成和加剧机体钙铁锌缺乏症的重要原因之一^[39]。

3 全麦食品的前景和展望

全麦食品是一种营养成分丰富的健康食品,因其较高的营养价值也受到国内外消费者的密切关

注。但由于国内全麦食品的品种较为单一、同质化现象严重,主要为全麦面包和全麦饼干等西式焙烤类食品,不符合国内面制品主流消费者的饮食习惯,因此在国内市场占有率和消费者的购买欲并不高。针对我国全麦食品的加工,不能单单只参照国外相关产品的成熟加工技术,还需要开发加工出适合我国消费者的特色全麦食品。在产品加工工艺和产品配料上还需创新,增加我国全麦食品的种类多样性,从而给消费者更大的选择空间。同时,针对不同的消费人群(如婴幼儿、孕妇、青少年、老年人等),可采用定制化的生产方式,推出不同类型的全麦食品。

由于我国全麦食品发展起步较晚,相较于国外成熟的全谷物食品加工生产体系,国内全麦食品产业仍有较大的发展空间。我国全麦食品的未来发展建设重点将是在提高产品储存性、改善产品食用品质、增加产品种类及健全相关法律、法规和标准等方面,完善全麦食品产业体系将加快我国全麦食品的发展进程,使之早日在我国居民膳食结构中占据重要地位。

参考文献:

- [1] 全麦粉: LS/T 3244-2015 [S].
- [2] 全谷物焙烤食品: T/CABCI 02-2018 [S].
- [3] 全谷物冲调谷物制品: T/CABCI 04-2018 [S].
- [4] 全谷物膨化食品: T/CABCI 03-2018 [S].
- [5] ALAM S, SHAH HU, SALEEMULLAH, RIAZ A .Comparative studies on storage stability of ferrous iron in whole wheat flour and flat bread (naan) [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition.2007, 58(1): 54-62.
- [6] 董笑晨. 全谷物食品市场及产品初探[EB/OL]. http://www.360doc.cn/article/29955225_648122988.html, 2017-04-24.
- [7] 徐祥丽. 全麦面包降低心脏病患病风险[EB/OL]. <http://world.people.com.cn/GB/n1/2016/1026/c1002-28810331.html>, 2016-10-26.
- [8] 张秀凤, 申晓琳, 李玉婷. 黑豆全麦面包的研制[J]. 现代牧业, 2018(3): 21-25.
- [9] 朱海霞, 程丽丽. 木糖醇全麦面包工艺[J]. 农业工程, 2013(5): 92-95.
- [10] 赵敏. 全麦法棍的制作工艺[J]. 现代食品, 2017(24): 126-128.
- [11] 郑丽娜, 刘龙. 抹茶全麦饼干的研制[J]. 现代食品科技, 2013, 29(6): 1362-1364.
- [12] 汪丽萍, 刘艳香, 田晓红, 等. 全麦馒头制作工艺研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(5): 12-15+22.
- [13] 汪丽萍, 刘娇, 刘艳香, 等. 加工工艺对麸皮酶处理全麦挂面品质影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(5), 8-13.
- [14] 刘娇, 汪丽萍, 吴卫国, 等. 麦麸木糖醇处理条件对全麦挂面品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3), 79-85.
- [15] 吕少伟, 王晓波, 冯建岳. 全黑小麦麦片的开发研究[J]. 中国食物与营养, 2013, 19(2): 38-40.
- [16] 孙彩翼, 位思清, 李宁阳, 等. 红枣枸杞紫糯小麦养生粥粉的开发[J]. 食品工业, 2019, 40(2): 1-4.
- [17] 邓璐璐. 全麦粉对沙琪玛品质及含油率的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [18] 李玲, 王立, 钱海峰, 等. 全麦粉对油条面团和油条质量的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 242-248.
- [19] 曹新蕾. 全麦粉对油炸方便面品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [20] 陈旭. 红枣全麦面包渣发酵液复合饮料的加工工艺研究[J]. 现代农业科技, 2017(15): 250-252+257.
- [21] 邵淋淋, 曾诗雨, 李秀娟, 等. 全麦酒酿关键加工工艺对淀粉的理化性质及体外消化性的影响[J]. 食品与发酵工业. 2019(15): 59-65.
- [22] 张祥强. 全小麦啤酒的成功推出[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2017(15): 37-42.
- [23] 谢玉峰, 葛英亮, 郑茂波. 龙麦 26 全小麦芒果啤酒的研制[J]. 酿酒科技, 2014(8): 71-72+75.
- [24] 冯健. 一种新型谷物营养方便早餐食品的加工工艺优化研究[D]. 北京: 中国农业机械科学研究院, 2011.
- [25] 孙元琳, 仪鑫, 李云龙, 等. 复合全谷物挤压膨化产品的配方优化研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(11): 47-52.
- [26] 江生. 小麦麸皮不同提取物的分析和抗氧化活性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [27] 苏东海, 白瑞, 苏东民, 等. 小麦麸皮内源性 -木糖苷酶的酶学特性[J]. 粮食与饲料工业, 2014(14): 10-14.
- [28] 刘丽娅, 赵梦丽, 钟葵, 等. 小麦麸皮阿拉伯木聚糖体外益生活性研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 1-5+30.
- [29] HEINI R L, NOORT M W J, KATINA K, et al . Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods-Areview[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016(47): 25-38.
- [30] KALNINA S, RAKCEJEVA T, KUNKULERGA D, et al . Rheological properties of whole wheat and whole triticale flour blends for pasta production[J]. Agronomy Research, 2015, 13(4): 948-955.
- [31] LI J, HOU G G, CHEN Z, et al . Studying the effects of whole-wheat flour on the rheological properties and the quality attributes of whole-wheat saltine cracker using SRC, alveograph, rheometer, and NMR technique[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(1): 43-50.
- [32] BAE W, LEE B, HOU G G, et al . Physicochemical characterization of whole-grain wheat flour in a frozen dough system for bake off technology[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 520-525.
- [33] GAN Z, GALLIARD T, ELLIS PR, et al . Effect of the outer bran layers on the loaf volume of wheat bread[J]. Journal of Cereal Science, 1992, 15(2): 151-163.
- [34] 张义茹, 刘龙龙, 李红英, 等. 禾谷加工、蒸煮过程中挥发性物质研究进展[J]. 山西农业大学(自然科学版), 2016, 36(12): 897-904.
- [35] 尚艳娥. 小麦及其制品质量安全风险及控制[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(4): 7-11.
- [36] 张喜春. 粮食种植环节存在的质量安全问题与对策[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(4): 8-10 .
- [37] 夏瑞雪. 区域小麦籽粒重金属含量分布调查及低残留制粉工艺研究[D]. 密山: 黑龙江八一农垦大学, 2016.
- [38] 秦泓, 符丽媛, 陶平. 面粉及面制品中的芽孢杆菌[J]. 面粉通讯, 2006(1): 38-39.
- [39] 郭嘉. 降低麦麸中植酸盐含量的途径及机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. ☉