

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2015.04.062

麦麸非淀粉多糖对烘焙品质的影响
Effects of non-starch polysaccharides in wheat bran
on quality of baking products

王立 杨炜 钱海峰 张晖 齐希光
WANG Li YANG Wei QIAN Hai-feng ZHANG Hui QI Xi-guang
(江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

(School of Food Science and Technology in Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:综述麦麸中非淀粉多糖类成分对烘焙产品的影响。主要介绍麦麸中两种重要的非淀粉多糖(阿拉伯木聚糖和 β -葡聚糖)的分子结构、理化性质和生理功能,并在比较其加工性能的基础上,分析其对面团流变特性、烘焙产品营养/感官品质以及储藏特性等方面的影响,最后对相关作用机理进行分析。

关键词:麦麸;非淀粉多糖;阿拉伯木聚糖; β -葡聚糖;烘焙产品

Abstract: The effects of non-starch polysaccharides in wheat bran, arabinoxylans and β -glucan, on the quality of baking products were summarized. Their structure characteristics, physicochemical properties and physiological functions of the two non-starch polysaccharides were introduced. Their effects on the quality of baking products were also summarized on the base of analyzing their rheological properties, nutrition, sensory quality, and storage. At last, the related mechanisms were discussed.

Keywords: wheat bran; non-starch polysaccharide; arabinoxylans; β -glucan; baking product

麦麸,是小麦、燕麦等制粉工艺的主要副产物,资源丰富,来源广泛,富含非淀粉多糖,其中,小麦和黑麦的麸皮以阿拉伯木聚糖为主,燕麦和大麦的麸皮则含 β -葡聚糖较多^[1],这两类多糖本质上均属于膳食纤维类,近年来备受关注。

随着研究的日益深入,麦麸中非淀粉多糖的种类、性质以及结构更加清晰,相关成分的提取纯化逐渐成熟,降血脂^[2]、降血糖^[3,4]、抗氧化^[5]、增强免疫^[6]以及抗肿瘤^[7]等生理功能不断被证实,同时,烘焙产品、保健食品等领域也得到

广泛应用^[8,9]。文章以阿拉伯木聚糖、 β -葡聚糖为主,介绍了麦麸中非淀粉多糖的分子结构、理化性质和生理功能,并从面团流变学性质、营养/感官品质以及储藏特性等方面阐述了非淀粉多糖对烘焙行业的影响。

1 麦麸中非淀粉多糖的种类及性质

非淀粉多糖^[10],一般是指除淀粉以外的所有碳水化合物的总称,一般可分为三大类:纤维素、半纤维素多糖、果胶多糖,其中,半纤维素多糖有 β -葡聚糖、木聚糖、甘露聚糖等不同种类^[11]。非淀粉多糖多与蛋白质、无机离子等相结合,共同组成植物细胞壁,难以被单胃动物所分泌的消化酶降解。

麸皮是麦粒在制粉过程中研磨下来的皮层及糊粉层部分的总称,由于工艺与精度的问题,麸皮中也会含有一定的胚及胚乳组织,因而,小麦麸皮中含有蛋白质、脂肪、粗纤维等成分,尤其是碳水化合物,含量可达50%(表1)。小麦、黑麦、小黑麦中非淀粉多糖以阿拉伯木聚糖为主,燕麦、大麦中则多为 β -葡聚糖(表2、3),这两种非淀粉多糖均集中于麸皮的细胞壁中。

表1 小麦麸皮营养成分表^[12]

Table 1 The main compositions of the wheat bran %					
水分	灰分	脂肪	蛋白质	粗纤维	碳水化合物
12.2	5.7	3.9	14.1	10.5	53.6

表2 阿拉伯木聚糖、 β -葡聚糖在不同种类谷物中分布及含量^[1,13]

Table 2 The distribution of arabinoxylan and β -glucan in different kinds of grains %		
种类	戊聚糖	β -葡聚糖
小麦	5.5~7.2	0.4~1.4
黑麦	6.9~7.6	1.2~2.9
大麦	4.0~5.4	4.0~7.0
燕麦	2.7~3.5	2.2~7.8

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31471617);国家“十二五”科技攻关项目(编号:2012BAD37B08-3)

作者简介:王立(1978—),男,江南大学教授。
E-mail: wl0519@163.com

收稿日期:2015-06-12

表 3 阿拉伯木聚糖、β-葡聚糖在不同种类谷物中分布及含量(干基)^[14]

Table 3 The distribution of arabinoxyylan and β-glucan in different kinds of brans		g/kg
种类	戊聚糖	β-葡聚糖
小麦麸	264	16
黑麦麸	227	35
燕麦麸	38	95

1.1 阿拉伯木聚糖

阿拉伯木聚糖, 含有较多的五碳糖如阿拉伯糖、木糖等, 又称戊聚糖, 阿拉伯木聚糖在小麦中含量相对较高, 普通小麦籽粒中约 6.7%^[15], 在麸皮中该物质含量则可达到 20%~25%, 约占麸皮中非淀粉多糖的 64%~69%^[16]。

阿拉伯木聚糖的基本构成是 β-D-吡喃木糖(X)分子以 β-1,4糖苷键相连形成主链, α-L-呋喃阿拉伯糖(A)作为侧链, 于木糖残基的 C₂、C₃ 位单取代或双取代, 阿魏酸基团则通过酯键与阿拉伯糖残基 C₅ 位相连^[17]。阿拉伯木聚糖结构上的差异主要表现在聚合度和取代程度(A/X 比)、取代方式及阿魏酸含量的不同。

根据溶解能力的不同, 阿拉伯木聚糖可分为水溶性和水不溶性, 前者由于碱性条件下可以被提取, 又称碱可提阿拉伯木聚糖, 而後者的水不溶性特点源于该组分与其他细胞壁组分如蛋白质、木质素、木酚素等相互作用。这两种阿拉伯木聚糖在结构上非常相似, 双取代木糖含量亦非常接近, 但二者除在水溶性方面差异较大之外, 水不溶性较水溶性阿拉伯木聚糖的平均分子量、A/X 比偏高, 这与水溶性阿拉伯木聚糖的单取代木糖比例较高、非取代木糖比例较低有关^[18]。麸皮中的水溶性、水不溶性阿拉伯木聚糖分别占该类多糖总量的 25%~30%和 70%~75%^[19], 前者仅少许分布于麸皮中, 而後者大部分存在于麸皮中^[1]。

1.1.1 分子量 阿拉伯木聚糖相对分子质量不仅与谷物品种、谷物生长环境有关^[20,21], 与提取方法及测定方法也有关系。目前, 常用的测定方法有沉降速度、沉降平衡、端基分析、渗透压法、凝胶过滤色谱法等^[19], 但通过超离心法、渗透法测得的分子量范围为 2.2×10⁴~1.7×10⁵, 聚合度为 150~1 500, 而凝胶过滤色谱法测得分子量范围则为 8.0×10⁴~1.0×10⁶。与其他方法相比, 色谱法的分子量分布结果往往偏大, 这是因为阿拉伯木聚糖分子结构具有不对称性, 须经过标准物的矫正^[22]。并且, 面粉中的水不溶性组分较水溶性组分的重均分子质量高^[23]。

1.1.2 水合能力 戊聚糖的吸水/持水能力非常强, 一般可通过测定阿拉伯木聚糖持水能力、膨润率来表示其水合能力, 对于水溶性阿拉伯木聚糖, 多使用 DSC、NMR 方法来衡量其保持结合水能力^[24]。阿拉伯木聚糖吸水能力约为自身

重量的 10 倍, 因此, 虽然阿拉伯木聚糖在面粉中含量少(约 1%~3%), 却仍显著影响着面团吸水能力及水分分布情况, 有研究^[25]表明面团 23%的吸水量与之有关。阿拉伯木聚糖在盐溶液中的吸水能力比水中的吸水能力更高, 碱可提阿拉伯木聚糖的吸水能力稍大于水溶戊聚糖的吸水能力^[26], 经过氧化交联后, 吸水能力更强, 甚至可达自身重量的 100 倍。因此, 阿拉伯木聚糖可作为吸水剂或持水剂应用于食品和化妆品工业。

1.1.3 黏性 阿拉伯木聚糖分枝结构多, 且具有相对刚性的构象, 溶液黏度高。刘秀珍等^[23]认为, 阿拉伯木聚糖在低浓度情况下, 直接与水分子作用而增加黏度; 在浓度相对较高时, 多糖分子将通过分子间作用力, 相互缠结形成网络结构, 溶液黏度将大幅度增加。影响溶液黏度的因素主要有多糖分子自身结构和多糖浓度两方面^[20], 前者包括多糖分子聚合度(DP 值)、阿拉伯糖取代基比例及分布、其他基团如阿魏酰基团的存在等^[24]。水溶戊聚糖、碱可提取戊聚糖二者的黏度有所不同, 且差异明显, 相同浓度下, 碱溶性组分的黏度明显高于水溶性戊聚糖, 甚至高于市售的瓜尔胶产品的黏度^[26]。

1.1.4 氧化凝胶性质 在某些化学氧化剂和氧化酶体系作用下, 阿拉伯木聚糖分子间相互交联使得溶液黏度增加^[27], 并形成凝胶或粘性溶液的三维网络结构。常见氧化剂、氧化酶主要有过氧化氢、过氧化物酶、葡萄糖、葡萄糖氧化酶与过氧化物酶等, 过硫酸氨、高碘酸钠等这类氧化剂可产生游离基, 亦可使阿拉伯木聚糖发生氧化交联反应。郑学玲等^[28]认为, 阿拉伯木聚糖中阿魏酸含量的高低将影响其氧化交联反应的程度, 具体为阿魏酸含量较高, 氧化胶凝反应较明显, 阿魏酸含量较低, 氧化胶凝反应则不太明显。但阿拉伯木聚糖氧化凝胶性质形成机理及影响因素的相关观点尚未统一, 也有研究^[19]表明, 阿魏酸分子的活性双键、苯环、含量、分子量, 以及阿拉伯木聚糖分子中阿拉伯糖、木糖比均会影响。在实际生产中, 常用葡萄糖氧化酶、过氧化物酶等来改良面粉品质, 这一方面可以促进面筋蛋白中二硫键的形成, 同时, 也有利于阿拉伯木聚糖分子间的氧化交联, 从而对面团结构有着重要影响。

1.2 β-葡聚糖

谷物中的 β-葡聚糖, 是阿拉伯木聚糖之外、另一种重要的膳食纤维, 集中于麦粒糊粉层、亚糊粉层及胚乳细胞壁中, 在大麦、燕麦中含量最高, 但该多糖含量高低与谷物品种、栽培条件、生产加工有关。β-葡聚糖在食品工业中得以广泛应用, 这不仅与其耐热、耐酸、耐碱、溶解等特性有关, 也受其乳化特性、流变特性等影响。

β-葡聚糖分子一般由 2、3 个 β-(1-4)糖苷键连接形成纤维二糖基-D-葡萄糖或纤维三糖基-D-葡萄糖的重复单元, 再经过单一的 β-(1-3)糖苷键相连形成聚集体^[29]; 另有学者^[9]指出, 葡聚糖分子链中也存在一定比例、由 β-(1-4)糖苷键连

接而成的长链结构($n \geq 5$)。 β -葡聚糖分为水溶性和水不溶性,其溶解度差异主要在于分子中 β -(1-4)、 β -(1-3)两种糖苷键的比例大小,水溶性和水不溶性 β -葡聚糖中 β -(1-3)、 β -(1-4)糖苷键比分别为1:(2.5~2.6),1:4.2^[30]。

汪海波^[31]通过纸层析、高效液相色谱法以及红外光谱法、紫外光谱法证明了燕麦中的 β -葡聚糖是由单一的 β -D-呋喃葡萄糖环组成,无糖蛋白、核酸组分,核磁共振氢谱、碳谱显示葡聚糖糖基单元通过 β -(1-4)及 β -(1-3)糖苷键相连,两种糖苷键比例约2.1:1。申瑞玲等^[32]则通过原子力显微镜进一步研究发现,燕麦 β -葡聚糖提取物高级结构呈现为复杂的网络状结构,酶解后则为不同链长聚集物。

1.2.1 分子量 β -葡聚糖,作为一种高分子聚合物,其相对分子质量可通过沉淀法、渗透压法、光散射法以及高效体积排阻色谱法等进行测定^[33];其中,高效体积排阻色谱法与光散射检测器、黏度计或者特异性荧光检测器连用,可实现快速测定,自动化程度较高。 β -葡聚糖的相对分子质量高低与其来源、提取工艺、测定方法及预处理方式有关,Wood等^[31]用色谱法测得燕麦、大麦、黑麦中该类多糖的相对分子质量分别约为 3.0×10^6 , $2.0 \sim 2.5 \times 10^6$, 1.0×10^6 ,该结果与Bhatty等^[34]的观点相一致。

1.2.2 流变特性 β -葡聚糖溶液为剪切变稀假塑性流体,其流动曲线可用 power law 模型($\tau = k\dot{\gamma}^n$)来描述,当质量分数为3%时,溶液体系将具有触变性,但质量分数低于0.2%时,体系则近似为牛顿流体^[35]。在相同浓度条件下, β -葡聚糖较瓜尔胶、CMC、黄原胶等食用胶类黏度更大^[36],影响 β -葡聚糖溶液体系流变学特性的因素主要有相对分子质量、质量分数、温度、剪切速率、剪切时间等。首先,相对分子质量不同的体系流动曲线存在差异,多糖的质量分数增加,体系黏度亦将增加,剪切稀化现象加重^[31];其次,体系黏度随剪切速率提升而减小^[37]。一方面这可能是因为剪切作用使得线状多糖分子沿驱动力方向拉伸、取向、解缠绕,重新排列后“相对滑过”更加容易、体系黏度迅速下降;另一方面,也可能是由于 β -葡聚糖分子中存在亲水性基团,而剪切作用可以破坏多糖与水分子间相互作用,从而导致体系黏度降低;再者,在其他条件一定时,温度升高将会导致体系黏度迅速下降^[38],这可根据 Arrhenius 公式($k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$)来解释。但也有研究^[39]指出,湿热处理 β -葡聚糖,其分子量不受影响、体系黏度反而升高,这可能是因为加热破坏了多糖分子中的氢键而导致 β -葡聚糖分子空间结构或存在形态改变,更加舒展,体系黏度有所增加。

Nicolai Böhm^[40]指出, β -葡聚糖在溶液中可分散为粘弹性流体,或者形成无规则网状结构。形成粘弹性体系时,其粘弹性能不仅与 β -葡聚糖质量分数相关^[35],振荡频率的影响也较为显著,当质量分数有所增加,或者从低频区加速至高频区时,体系则由粘性为主转化为弹性为主^[31,35]。当低分子质量的 β -葡聚糖在溶液中以无规线团形式存在时,则更易

形成凝胶^[41],且葡聚糖的凝胶速率与纤维三糖和纤维四糖的比率成正比,与分子量成反比^[42]。但汪海波^[43]则认为溶液中多糖相对分子量大于 4.49×10^5 、溶质浓度高于5%时,才可能出现凝胶结构。

1.2.3 乳化性 虽然 β -葡聚糖并非表面活性剂,但由于其可增加溶液黏度,阻碍乳化层中油滴聚集,降低界面张力,从而表现出一定的乳化性及乳化稳定性。张晖等^[44]认为,燕麦 β -葡聚糖的乳化性与黄原胶、海藻酸钠、瓜尔胶等相当,而乳化稳定性则与卡拉胶、海藻酸钠相近。申瑞玲^[45]研究发现,在中性或偏碱性条件下提取得到的 β -葡聚糖,乳化性能最佳,增加多糖大分子质量分数、降低温度时,体系黏度亦将提升,乳化性亦将有所改善。但 β -葡聚糖的乳化性能与分子粘性之间的相关性还有待进一步深入研究探讨。

2 麦麸中非淀粉多糖的功能性质

非淀粉多糖如阿拉伯木聚糖和 β -葡聚糖等,一直是近年来的研究热点,虽然其在单胃动物饲料中原料利用率低,且具有一定的抗营养作用,但这两种非淀粉多糖具有多种生理功能,如降血脂、降血糖、抗氧化、增强免疫以及抗肿瘤等。同时,也会影响谷物加工和相关产品制备。

2.1 生理功能

2.1.1 降血糖、降血脂 王金华等^[2]发现,从小麦麸皮中提取的阿拉伯木聚糖可显著降低高血脂小鼠的血清中总胆固醇、低密度脂蛋白水平;降低动脉硬化指标,可有效预防和治疗小鼠高脂血症、动脉硬化。也有研究^[46]表明,麦麸中阿拉伯木聚糖可降低总血浆胆固醇及LDL-胆固醇浓度,具体是通过促进总脂质、胆固醇、胆汁酸排泄,降低3-羟基-3-甲基戊二酸单酰辅酶A还原酶活性,增加肝脏中胆固醇7- α 羟化酶活性,同时,提高短链脂肪酸浓度来实现的。上述结论与韩玉洁^[47]的研究结果相一致,即低聚木糖可有效降低高脂血症小鼠血清总胆固醇(TC)和血清总甘油三脂(TG)含量。 β -葡聚糖具有降低血清胆固醇和调节血糖水平的作用,有利于预防糖尿病和心血管疾病,主要与其粘性相关^[3,48]:①摄入 β -葡聚糖后,消化道中将形成高粘性环境,阻碍胃肠道对胆汁酸、胆固醇、脂肪等的吸收;② β -葡聚糖可能于大肠中被发酵,生成的短链脂肪酸对胆固醇的合成有抑制作用;③动物机体内缺少特异性的水解酶,可显著降低餐后血糖及胰岛素升高的幅度。

2.1.2 抗氧化 Trust Beta等^[5]发现,阿拉伯木聚糖抗氧化活性与阿魏酰基团含量,阿拉伯糖、木糖比以及聚合度有关,而以不同的木聚糖酶处理亦将影响产物的结构,进而影响着多糖抗氧化活性。 β -葡聚糖可显著增加db/db糖尿病小鼠肝脏内超氧化物歧化酶活性,减少丙二醛含量,并且抗氧化效果与 β -葡聚糖分子量正相关,而大麦、小麦、燕麦 β -葡聚糖重均分子量依次递减^[4]。富含 β -葡聚糖的相关提取物如 β -葡聚糖凝胶等,包含一定的多酚类物质如羟基肉桂酸、阿

魏酸、没食子酸等,从而具有一定的抗氧化能力。在试验^[49]条件下,200 mg 富含β-葡聚糖的提取物分散于70%乙醇后,所得体系清除自由基能力与40 μg 的没食子酸、阿魏酸标准液相当,并以不同溶剂处理富含β-葡聚糖的大麦提取物,得到的70%丙酮体系与70%乙醇、70%甲醇、70%酸化乙醇等溶剂体系相比,酚类物质含量高。

2.1.3 增强免疫、抗肿瘤 小鼠试验结果显示,阿拉伯木聚糖可有效抑制移植瘤细胞的生长,调节非特异性、特异性免疫反应,主要影响胸腺、脾脏指数,脾淋巴细胞增值反应,巨噬细胞吞噬作用,白细胞介素产生,迟发型超敏反应等^[50],而酶处理较碱液处理得到的阿拉伯木聚糖样品,免疫活性更高^[6]。β-葡聚糖的调节机体免疫功能^[51],主要是通过调节细胞内cAMP和cGMP水平、激活免疫细胞及补体系统、促进细胞因子与抗体生成等发挥作用的。Murphy等^[7]已发现β-葡聚糖不仅可以抑制肺肿瘤细胞转移、扩散,亦可增强巨噬细胞的抗肿瘤能力。

麦麸中非淀粉多糖除上述生理功能外,阿拉伯木聚糖、β-葡聚糖还具有益生活性^[52,53],润肠通便^[54]等功效。

2.2 加工性能

小麦阿拉伯木聚糖的加工性能主要表现为该物质对小麦磨粉品质、面团流变学性质、面制品品质等的影响。阿拉伯木聚糖之所以会影响小麦磨粉品质,主要是因为该物质在淀粉颗粒、蛋白质间起类似粘结剂的作用,且含量大小与小麦胚乳的硬度存在一定的相关性,进而影响到出粉率、淀粉破损率等。Bettge等^[55]发现阿拉伯木聚糖对硬质小麦硬度的影响明显小于软质小麦。至于麦麸中非淀粉多糖对面团流变学性质、面制品品质的影响,接下来将以烘焙产品及其品质为重点作详细阐述。

3 麦麸中非淀粉多糖对烘焙产品性质的影响

面粉中的蛋白质和淀粉,是影响面制品品质的两大主要因素,面粉粒度及灰分、酶也在一定程度上影响着面条品质。普遍认为,良好的烘焙品质须以一定的蛋白质含量为基础;同时,蛋白质质量,即蛋白质的组成和结构,也是决定产品品质的重要因素^[56];另外,直链/支链/破损淀粉含量以及淀粉糊化/老化/黏度也会影响产品品质^[57]。

与普通面粉相比,全麦粉含有更多的阿拉伯木聚糖、β-葡聚糖等非淀粉多糖,其中,阿拉伯木聚糖含量高出约3~4倍。这部分非淀粉多糖并非简单的惰性纤维基质,其不仅具有独特的理化性质,降血糖、降血脂,抗氧化等功能,并且在谷物、烘焙类等面制品加工方面亦有重要影响^[22]。近年来,随着全麦食品市场不断拓展,资源丰富的麦麸在烘焙制品,尤其是全麦食品或高纤维食品领域已得以广阔应用,如膳食纤维蛋糕^[58]、曲奇饼干^[59]、面包^[60]等,关于麦麸及其中的非淀粉多糖对烘焙产品的影响及作用机理等也一直是研

究的热点。

3.1 面团流变特性

在烘焙制品生产中,一般通过搅拌/捏合来进行面团调制,所得面团品质,尤其是流变学特性、加工性能将会影响最终产品的弹性、硬度、体积、色泽等,而麦麸中的非淀粉多糖对面团品质有着重要的作用。研究表明,阿拉伯木聚糖可以改善面团的流变学性质,主要表现在增加了面团的弹性及抗延伸性^[24],延长了面团的稳定时间^[61],且随着阿拉伯木聚糖添加量的增加,小麦、黑麦面团网络结构的周长及定向粒径均将明显减小,损耗角正切值则显著增加^[60]。L. Garófalo等^[62]也提出,小麦粉中水不溶性非淀粉多糖含量增加时,面团的抗延伸性增加而延伸性降低。面团经过过氧化物酶处理后,硬度增加、粘性下降,与未处理面团相比,酶处理后面团中阿拉伯木聚糖的分子量更高,黏度、阿拉伯糖木糖比、阿魏酸、蛋白含量均有所增加,这说明过氧化物酶促进了阿拉伯木聚糖、蛋白质相互间的交联反应^[63]。

3.2 体积及质地结构

阿拉伯木聚糖对烘焙制品如面包品质的影响尚不一致,一般认为一定量的水溶性阿拉伯木聚糖有利于增加面包体积、改善内部质地结构,而水不溶性成分则对面包品质起破坏作用^[61],这主要与阿拉伯木聚糖与面筋蛋白、蛋白膜间的相互作用相关。调制面团时,全麦体系中的麸皮成分对面筋蛋白具有剪切作用,而阿拉伯木聚糖可氧化成凝胶,不仅与面筋蛋白竞争吸水,还可与面筋蛋白通过阿魏酸交联,将共同阻碍面筋蛋白吸水形成网状结构,导致面包体积偏小^[64]。另外,水溶性组分包裹在蛋白膜表面,增强膜的弹性及延伸性,可保护蛋白膜、提高气孔持气能力、增大面包体积,而水不溶性成分分布在细胞壁气孔上,不利于CO₂气体释放,导致面包内芯气孔不均,产品品质下降^[65]。麦麸用作烘焙制品的原辅料,其对产品的比容、膨胀率等的影响与麦麸的种类、粒径大小等有关。Zhang等^[66]发现白色软质小麦麸皮较红色硬质春小麦麸皮面包品质更佳,与精细组(278 μm)、粗糙组(609 μm)相比,含有中等粒径(415 μm)麸皮的面包比容更大。

3.3 水分及硬度

烘焙产品中的水分或者水分活度可直接反应产品质量,与产品硬度也存在一定关系,水分迁移会导致玻璃态温度改变、产品老化、硬度改变,如:面包芯会因水分减少、玻璃态温度升高而变得干燥、僵硬,表皮部分则会因水分增加、玻璃态温度降低,失去脆性^[67]。且水分含量降低,老化速率将线性增加^[68]。阿拉伯木聚糖的水合能力对食品体系中水分的分配影响显著。Krzysztof Buksa等^[69]研究了全麦黑面包体积、水分含量、硬度分别与戊聚糖、淀粉的含量、比例、理化性质间的关系,发现面包的水分含量、硬度主要由纤维尤其是水溶性戊聚糖来决定,而Bhattacharya等^[70]则发现面筋及淀

粉膨胀性能会影响面包芯硬度,冷冻面团在融冻、焙烤时,面筋网络结构内水分发生迁移,而淀粉溶胀性能越好,焙烤时截留水分能力越强,面包芯柔软度增加。李雪^[71]则指出,用添加了小麦麸皮水不溶性阿拉伯木聚糖的面粉制作馒头,可使馒头硬度明显下降。与大豆磷脂、硬脂酰乳酸钠等乳化剂相比,以 β -葡聚糖为乳化剂的面包硬度显著降低,保湿率、弹性、黏聚性有所增加,且不会对产品的感官品质造成不良影响^[72]。

3.4 营养及感官品质

麦麸中蛋白质、粗纤维等碳水化合物含量相对较高,且其中非淀粉多糖生理功能多样,以其为原辅料来加工面包等,可提高膳食纤维含量,增强产品的营养价值。已有研究^[73]表明,以燕麦粉为原料经发酵制得的燕麦营养面包中膳食纤维含量为普通白面包的 9.64 倍。摄食富含膳食纤维类成分的面包、饼干可有效降低血糖指数^[74],富含 β -葡聚糖等的面包有利于控制餐后血糖升高,调节胰岛素水平^[75]。

除营养价值外,产品感官品质,也在很大程度上决定着产品的可接受度,而良好的感官品质一般体现在色泽、香味、口感等方面,受加工过程中具体工艺的影响,发酵可产生有机酸、乙醇、羰基类、酯类等风味物质;褐变反应,如美拉德反应及多酚类物质酶促氧化,不仅促进产品表面深颜色物质的生成,亦可产生焦糖气味等风味^[76]。添加小麦麸皮水不溶性阿拉伯木聚糖后的馒头表皮、颜色、光泽与普通白馒头差异非常小,但馒头粘性明显下降、咀嚼性更佳,并且,该结果与多糖的麦麸品种有关^[75];富含 β -葡聚糖的面包较其他配方面包硬度和咀嚼性小,弹性、黏聚性大,食用时口感柔软、劲道、不粘牙^[76]。Gomez 等^[77]认为,面包外皮色泽的加深,是因为膳食纤维会加剧美拉德反应和焦糖褐变反应,与纤维本身性质关系不大,而面包内部颜色则更多取决于纤维本身的特性。

以麦麸中 β -葡聚糖浓缩物来代替蛋糕中的起酥油,制得的低脂蛋糕体积将会减小、硬度增加,表层外壳颜色变浅而内芯色泽加深,当大麦 β -葡聚糖浓缩物添加水平在 20%左右时,蛋糕品质与全脂蛋糕相近^[61]。在制作巧克力曲奇饼的通用粉中添加 30%或 50%的大麦全粉所得产品与市售产品近似,更易被接受^[62]。因此,为了保证烘焙产品的感官品质,须对麦麸或非淀粉多糖类的添加量以及添加方式进行选择和优化。

3.5 储藏特性

烘焙产品如面包,在贮藏过程中会因为淀粉回生、水分迁移而出现老化现象^[71],此外,也受蛋白质及脂质、淀粉间的相互作用影响^[78],上述作用将共同导致产品硬度变大、风味丧失、吸水能力降低、酶对淀粉消化性降低、淀粉结晶程度增加,大大缩短产品的货架期。但麦麸中的阿拉伯木聚糖却能改善由于淀粉老化引起的面包货架期问题^[79],尤其碱溶性阿拉伯木聚糖抑制老化的效果较水溶性更明显^[80],同时,

高分子量阿拉伯木聚糖则优于低分子量组分^[81];一方面是因为阿拉伯木聚糖与淀粉分子间的直接作用,另一方面是阿拉伯木聚糖影响了面包中水分分布。 β -葡聚糖也被证明可增加薄饼吸水能力、延缓淀粉回生、延长产品货架期^[82],可能是因为 β -葡聚糖的强保水能力不利于面团调制过程中的淀粉溶解、肿胀,而削弱老化作用,这与 Puri 等^[83]观点一致,后者也认为小麦粉中添加大麦粉可增加纤维含量,而纤维持水、保水能力强,进而导致淀粉、蛋白质等性质改变,有利于抑制老化现象。魏决^[76]发现 β -葡聚糖也具有一定的防腐作用,与空白面包或者含有苯甲酸钠的面包相比,添加有 β -葡聚糖的面包霉变现象出现得更晚,且霉变速度最慢。

为了降低麦麸中非淀粉多糖,尤其是水不溶性阿拉伯木聚糖的不利影响,可通过木聚糖内切酶作用^[84]或者对麦麸原料进行预处理来进行改善。研究发现,未经过酵母发酵的面包中阿拉伯木聚糖含量将高于经酵母发酵后的^[85],制备燕麦面包时添加漆酶 0.1%、蛋白酶 0.001%或 0.01%时可增加面包体积、降低面包屑硬度及咀嚼度,进而改善面包品质,这与所用酶制剂内含有一定的 β -葡聚糖内切酶有关^[86];采用已水化、湿法热处理或者湿法氧化法预处理了的小麦麸皮为原料,制得面包体积更大、质地更加柔软,面团吸水量增加、潜在可氧化物质含量均降低,这可能是面粉中成分水合条件改善、脂肪氧合酶被激活、冲洗作用增强了面团中二硫键作用导致的^[87]。

4 结论与展望

中国作为小麦生产大国,近年来麸皮年产量已超过 2 400 万 t^[88],是一种亟待开发利用的资源,尤其是在全麦食品市场日益开阔、健康食品越发被重视的社会背景下,更应积极尝试将麦麸的营养价值与相关研究成果相联系,实现麸皮资源有效增值,最大限度地挖掘麦麸中非淀粉多糖的应用领域,创造更显著的经济效益和社会效益。

虽然目前关于麦麸中非淀粉多糖对烘焙产品品质的影响研究较多,但阿拉伯木聚糖和 β -葡聚糖与面筋网络结构的作用机理与调节机制仍存在争议,且研究对象集中于面包、饼干等少数几类烘焙产品上,而对于中国传统面制品如面条、馒头尚缺乏科学研究,相应的全麦类或者高纤维类食品发展更是缓慢。因而,应从作用机理着手,掌握麦麸中非淀粉多糖与蛋白质及其他组分间的相互作用,试图优化出更有效的酶、微生物酶系统,改进产品的加工技术、工艺,具体如原料选择、预处理方式、发酵等,或者对非淀粉多糖进行生物改性来消除不利影响,并进一步发挥其积极作用,促进麸皮在全麦食品中的应用;其次,应结合中国的历史文化与生活习惯,尝试将研究对象进一步扩展,不局限于面包、饼干、蛋糕等产品,全麦馒头也是亟待开发的市场,且前景广阔;再者,对于功能性非淀粉多糖的提取、纯化工艺有待进一步优化,在不改变目标产物结构、性质的同时提高产率。

参考文献

1 Siurek Barttomiej, Rosicka-Kaczmarek Justyna, Nebesny Ewa. Bioactive compounds in cereal grains- occurrence, structure, technological significance and nutritional benefits—a review[J]. Food Science and Technology International, 2011, 18 (6) : 559~568.

2 王金华,张声华,陈雄,等. 麦糟戊聚糖降脂功能研究[J]. 食品科学,2005,26(9):468~70.

3 Mä, Lkki Y,Virtanen E. Gastrointestinal effects of oat bran and oat gum: a review[J]. LWT Food Sci. Technol.,2001,34(6): 337~347.

4 赵琼. 燕麦、小麦、大麦 β -葡聚糖理化特性及对 db/db 糖尿病小鼠的调节作用比较[D]. 西安:西北农林大学,2014.

5 Malunga L N, Beta T. Antioxidant capacity of arabinoxylan oligosaccharide fractions prepared from wheat aleurone using *Trichoderma viride* or *Neocallimastix patriciarum* xylanase[J]. Food Chemistry,2015,167:311~319.

6 Zhou Su-mei, Liu Xiu-zhen, Guo Yan, et al. Comparison of the immunological activities of arabinoxylans from wheat bran with alkali and xylanase-aided extraction[J]. Carbohydrate Polymers 2010,81(4):784~789.

7 Murphy e A,Davis J M,Brown A S. Effects of moderate exercise and oat beta-glucan on lung tumor metastases and macrophage antitumor cytotoxicity [J]. J. Appl Physiol, 2004, 97 (3) : 955~959.

8 AnastasiaKtenioudaki,Eimear Gallagher. Recent advances in the development of high-fibre baked products[J]. Trends in Food Science & Technology,2012,28(1):4~14.

9 Izydorczyk M S,Dexter J E. Barley b-glucans and arabinoxylans: Molecular structure,physicochemical properties,and uses in food products—a review[J]. Food Research International, 2008, 41 (9):850~868.

10 杨人奇,吕于明. 非淀粉多糖的营养生理作用[J]. 中国饲料, 2001,1(1):16~19.

11 MinganChoct. 非淀粉多糖的化学结构和营养特性[J]. 王冉摘,译. 国外畜牧科技,1998,25(6):9~14.

12 王旭峰,何计国,陶纯洁,等. 小麦麸皮的功能成分及加工利用现状[J]. 粮食与食品工业,2006,13(1):19~22.

13 Farhan Saeed,Imran Pasha,Faqir Muhammad Anjum,et al. Arabinoxylans and arabinogalactans:a comprehensive treatise[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2011, 51(5): 467~476.

14 Sirpa Karppinen, Kirsi Liukkonen, Anna-Marja Aura, et al. In vitro fermentation of polysaccharides of rye,wheat and oat brans and inulin by human faecal bacteria[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2000, 80(10):1 469~1 476.

15 Saulnier L,Pierre-Etienne S, Gerard B, et al. Wheat arabinoxylans: Exploiting variation in amount and composition to develop enhanced varieties[J]. Journal of Cereal Science, 2007,46(3): 261~281.

16 Selvendran R R,Robertson JA. The chemistry of dietary fiber an holistic view of the cell wall matrix [M]. Cambridge,UK: Royal Society of Chemistry,1990.

17 Revanappal S B, Nandini C D, Salimath P V. Structural variations of arabinoxylans extracted from different wheat (*Triticum aestivum*) cultivars in relation to chapati-quality [J]. Food Hydrocolloids, 2015(43): 736~742.

18 苏东民,李雪,苏东海,等. 小麦阿拉伯木聚糖及其功能性质研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 85~90.

19 周素梅,向波,王璋,等. 小麦面粉中阿拉伯木聚糖研究进展[J]. 粮油食品科技,2001,9(2):20~22.

20 Ordaz-Ortiz J J, Saulnier L. Structural variability of arabinoxylans from wheat flour. Comparison of water-extractable and xylanase-extractable arabinoxylans[J]. Journal of Cereal Science, 2005,42(1):119~125.

21 Krzysztof Buksa, Anna Nowotna, Rafat Ziobro, et al. Molecular properties of arabinoxylan fractions isolated from rye grain of different quality[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60 (2): 368~373.

22 牟振坤,韩育梅. 小麦面粉阿拉伯木聚糖结构及功能性质的研究[J]. 农产品加工(学刊),2010(8):81~84.

23 刘秀珍,曹丽,彭代银,等. 小麦阿拉伯木聚糖结构性质与生理功能研究进展[J]. 安徽医药,2010,14(6):629~631.

24 周素梅,王强,张晓娜. 小麦中功能性多糖—阿拉伯木聚糖研究进展[J]. 核农学报,2009,23(2):297~301.

25 Deleour J A, Vanhamel S, Hoseney. Physicochemical and functional properties of rye non-Starch polysaccharides II impact of fraction containing water-soluble pentosans and proteins on gluten- starch loaf volumes [J]. Cereal Chem., 1991, 68 (1): 72~76.

26 郑学玲,蒋清民,李秀梅,等. 小麦麸皮戊聚糖理化性质研究 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2006,27(6):15~19.

27 Moore A M,Hoseney R C. Factors affecting the oxidative gelation of wheat water-solubles [J]. Cereal Chem., 1990,67(1): 85~87.

28 郑学玲,刘延奇,范会平,等. 小麦麸皮戊聚糖氧化胶凝性质研究[J]. 郑州工程学院学报,2004,25(4):20~23.

29 Wood P J, Weisz J, Blackwell B A. Molecular characterization of cereal β -D-glucans. Structure analysis of oat β -D-glucans and rapid evaluation of β -D-glucan from different sources by high-performance liquid chromatography of oligosaccharides released by lichenase[J]. Cereal Chemistry,1991,68(1):31~39.

30 柴继宽,胡凯军,赵桂琴. 燕麦 β -葡聚糖研究进展[J]. 草业科学, 2009, 26(11):57~63.

31 汪海波. 燕麦中 β -葡聚糖的化学结构、溶液行为及降血糖作用的机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2004.

32 申瑞玲,董吉林,姚惠源. 燕麦 β -葡聚糖的结构研究[J]. 中国粮油学报,2006,21(2):44~48.

33 管骁,姚惠源,李景军,等. 燕麦 β -葡聚糖研究进展[J]. 食品科学,2009,30(15):231~237.

34 Bhattay R S. Laboratory and pilot plant extraction and purification

- tion of β -glucan from hullless barley and oat brans[J]. Journal of Cereal Science, 1995, 22(2): 163~170.
- 35 申瑞玲, 姚惠源. 裸燕麦麸 β -葡聚糖的流变学特性及凝胶形成[J]. 无锡轻工大学学报, 2005, 24(1): 41~44.
- 36 管骁, 姚惠源. 燕麦 β -葡聚糖流变特性的测定[J]. 中国粮油学报, 2003, 18(3): 28~31.
- 37 张茉莉, 高聚林. 裸燕麦麸皮 β -葡聚糖特性及与食用胶的比较研究[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(8): 44~47.
- 38 刘政. 燕麦主要成分分离及其性质研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
- 39 Zhang D, Doehlert D C, Moore W R. Rheological properties of (1 leads to 3), (1 leads to 4)- β -D-glucans from raw, roasted, and steamed oat groats [J]. Cereal Chem., 1998, 75 (4): 433~438.
- 40 Nicolai Böhm, Werner-Michael Kulicke. Rheological studies of barley (1-3)(1-4)- β -Glucan in concentrated solution: mechanistic and kinetic investigation of the gel formation[J]. Carbohydrate Research, 1999, 315(3): 302 ~311.
- 41 Doublier J L, Wood P J. Rheological properties of aqueous solutions of (1-3)(1-4)- β -D-Glucan from oats (Avena sativa L.) [J]. Cereal Chemistry, 1995, 72(4): 335 ~340.
- 42 乔海龙, 杨启东, 陈健, 等. 大麦 β -葡聚糖的研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(1): 4~7.
- 43 汪海波, 徐群英, 汪海婴, 等. 燕麦 β -葡聚糖的凝胶质构性能研究[J]. 食品科学, 2007, 28(8): 114~119.
- 44 张晖, 蔡秋声. 谷物 β -葡聚糖研究进展[J]. 粮食与油脂, 2010 (5): 3~7.
- 45 申瑞玲, 王章存, 姚惠源. 燕麦 β -葡聚糖的乳化性研究[J]. 食品与机械, 2004, 20(4): 4~5.
- 46 Tong Li-tao, Zhong Kui, Liu Li-ya, et al. Effects of dietary wheat bran arabinoxylans on cholesterol metabolism of hypercholesterolemichamsters[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 112 (4): 1~5.
- 47 韩玉洁, 徐冬, 徐忠, 等. 低聚木糖降脂作用研究[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2006, 22(2): 44~46.
- 48 Peter J Wood. Cereal β -glucans in diet and health[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(3): 230~238.
- 49 Thondre P S, Ryan L, Henry C J K. Barley β -glucan extracts as rich sources of polyphenols and antioxidants[J]. Food Chemistry, 2011, 126(1): 72~77.
- 50 Cao Li, Liu Xiu-zhen, Qian Tian-xiu, et al. Antitumor and immunomodulatory activity of arabinoxylans: A major constituent of wheat bran[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2011, 48(1): 160~164.
- 51 李万坤, 闫鸿斌, 才学鹏, 等. β -葡聚糖的免疫增强作用机理研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2007, 34(5): 151~155.
- 52 申瑞玲. 燕麦 β -葡聚糖的提取纯化及功能特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
- 53 张梅红. 小麦麸皮阿拉伯木聚糖的制备及益生活性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- 54 郑学玲, 李利民, 姚惠源. 小麦麸皮戊聚糖的开发与利用[J]. 面粉通讯, 2003(2): 36~40.
- 55 Bettge A D, Craig F, Morris. Relationships among grain hardness, pentosan fractions, and end-use quality of wheat[J]. Cereal Chem., 2000, 77(2): 241~247.
- 56 付苗苗, 王晓曦. 小麦蛋白质及其各组分与面制品品质的关系[J]. 粮食与饲料工业, 2006(8): 10~12.
- 57 徐荣敏, 王晓曦. 小麦淀粉的理化特性及其与面制品品质的关系[J]. 粮食与饲料工业, 2005(10): 23~24.
- 58 Danusha kalinga, Vijay kumar Mishra. Rheological and physical properties of low fat cakes produced by addition of cereal β -glucan concentrates[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2009, 33(3): 384~400.
- 59 Diana June Frost, Koushik Adhikari, Douglas S Lewis. Effect of barley flour on the physical and sensory characteristics of chocolate chip cookies[J]. J. Food Sci. Technol., 2011, 48(5): 569~576.
- 60 Clemens Döring, Christian Nuber, Florian Stukenborg, et al. Impact of arabinoxylan addition on protein microstructure formation in wheat and rye dough[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 154: 10~16.
- 61 郑学玲, 李利民, 姚惠源, 等. 小麦麸皮及面粉戊聚糖对面团特性及面包烘焙品质影响的比较研究[J]. 中国粮油学报, 2005 (2): 21~25.
- 62 Garófalo L, Vazquez D, Ferreira F, et al. Wheat flour non-starch polysaccharides and their effect on dough rheological properties [J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(2): 1 327~1 331.
- 63 Revanappa S B, Salimath P V, Prasada Rao U J S. Effect of peroxidase on textural quality of dough and arabinoxylan characteristics isolated from whole wheat flour dough[J]. International Journal of Food Properties, 2014, 17(10): 2 131~2 141.
- 64 李娟, 王莉, 李晓萱, 等. 阿拉伯木聚糖对小麦面筋蛋白的作用机理研究[J]. 粮食与饲料工业, 2012(1): 39~41.
- 65 Autio K. Effects of cell wall components on the functionality of wheat gluten [J]. Biotechnology Advances, 2006, 24 (6): 633~635.
- 66 Zhang D, Moore WR. Wheat bran particle size effects on bread baking performance and quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79(6): 805~809.
- 67 魏巍. 酶制剂对国产面粉烘焙品质和面包老化影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- 68 宋贤良, 温其标, 朱利. 面包老化作用的研究进展——老化机理探讨[J]. 粮食与饲料工业, 2002(5): 39~41.
- 69 Krzysztof Buksa, Anna Nowotna, Werner Praznik, et al. The role of pentosans and starch in baking of wholemeal rye bread [J]. Food Research International, 2010, 43(8): 2 045~2 051.
- 70 Bhattacharya M, Langstaffa T M, Berzonsky W A. Effect of frozen storage and freeze-thaw cycles on the rheological and baking properties of frozen doughs[J]. Food Research International, 2003, 36(4): 365~372.
- 71 李雪. 小麦麸皮水不溶性阿拉伯木聚糖对馒头品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.

72

魏决,罗雯. β -葡聚糖对改善面包品质的研究[J]. 食品科技, 2010,35(11):174~178.

73

翟爱华,安宇,姜倩. 燕麦营养面包的研制[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2006,18(6):67~70.

74

Franca Marangoni, Andrea Poli. The glycemic index of bread and biscuits is markedly reduced by the addition of a proprietary fiber mixture to the ingredients[J]. Nutrition, Metabolism & Cardiovascular Diseases,2008, 18(9):602~605.

75

Cavallero A,Empilli S,Brighenti F,et al. High (1-3,1-4)-glucan barley fractions in bread making and their effects on human gly-cemic response [J]. Journal of Cereal Science, 2002, 36 (1): 59~66.

76

夏延斌. 食品风味化学[M]. 北京:化学工业出版社,2008.

77

Gomez M,Ronda F,Blanco C A,et al. Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality [J]. European Food Research and Technology,2003, 216(1):51~56.

78

刘海燕,尚珊,黄卫宁,等. 糯麦粉对冷冻面团发酵流变特性和面包烘焙特性的影响[J]. 食品科学,2012,33(3):77~81.

79

Goesaert H,Brijs K,Veraverbeke W S,et al. Wheat flour con-stituents:how they impact bread quality,and how to impact their functionality[J]. Trends in Food Science & Technology,2005, 16(1~3):12~30.

80

Maeda T,Morita N. Flour quality and pentosan prepared by pol-ishing wheat grain on breadmaking[J]. Food research interna-tional,2003,36(6):603~610.

81

Costas G Biliaderis,Marta S,Onkar Rattan. Effect of arabinoxy-lans on bread-making quality of wheat flours[J]. Food chemis-try, 1995, 53(2):165~171.

82

Paras Sharma,Hardeep Singh Gujral. Anti-staling effects of β -glucan and barley flour in wheat flour chapatti[J]. Food Chem-istry,2014, 145:102~108.

83

Purhagen J K,Sjoo M E,Eliasson A C. The use of normal and heat treated barley flour and waxy barley starch as anti-staling agents in laboratory and industrial baking processes[J]. Journal of Food Engineering,2011,104(3):414~421.

84

Courtin C M, Delcour J A. Arabinoxylans and endoxylanases in wheat flour bread-making[J]. Journal of Cereal Science,2002, 35(3):225~243.

85

Marija Knez,Cathy Abbott,James C R,et al. Changes in the content of fructans and arabinoxylans during baking processes of leavened and unleavened breads[J]. Eur Food Res Technol, 2014, 239(5):803~811.

86

S Renzetti,C M Courtin,J A Delcour,et al. Oxidative and prote-olytic enzyme preparations as promising improvers for oat bread formulations:rheological,biochemical and microstructural back-ground [J]. Food Chemistry,2010, 119(4):1 465~1 473.

87

Elizabeth M Nelles,Philip G Randall,John R N Taylor. Im-provement of brown bread quality by prehydration treatment and cultivar selection of bran [J]. Cereal Chem. , 1998, 75 (4): 536~540.

88

何粉霞. 小麦麸皮中阿魏酸的提取、结构修饰及生物活性的研究[D]. 郑州:河南工业大学,2011.

(上接第 113 页)

4 结论

烘干炉是茶叶加工过程中的必要设备,烘干效果在很大程度上影响着茶叶有机物质的合成速度和品质,对茶叶色、香、味等品质有着很重要的影响。传统的烘干炉多为人工控制,不仅浪费人力,烘干效果也不是很理想。本研究以烘干机燃煤热风炉为研究对象,以建立恒温控制为目标,把模糊PID应用到热风炉的烟机控制系统上,采用变频技术自动控制引烟机的转速和频率,使热风温度能在很小的范围内变化,从而获得很好的烘干效果;在提高茶叶品质的同时,降低燃煤损耗,减少有害气体排放。

参考文献

1

吴泽球,陶中南. 茶叶烘干机械的技术现状及研究进展[J]. 食品与机械,2014,30(1): 263~265.

2

张春龙,刘国海,黄兆春. 多路温度自适应控制系统的研究[J]. 计算机测量与控制,2002(4):56~58.

3

张喜梅,吴雪辉,李昌宝,等. 油菜籽的热风干燥特性及数学描述[J]. 华南理工大学学报,2010,38(8): 116~118.

4

Wang J, Xi Y S. Drying characteristics and drying quality of car-rot using a two-stage microwave process[J]. Journal of Food En-gineering, 2005,68(4):505~511.

5

胡景川,蔡亚军. 热风炉温度的可调控性能[J]. 茶叶机械杂志, 2002(2):11~14.

6

刑一丁,温治,刘训良,等. 高炉热风炉高效送风策略的研究进展及发展趋势[J], 工业炉, 2008(5):10~13.

7

张德炎,李国军. 外燃式热风炉的自动控制[J]. 机械与电子, 2010(15):89~91.

8

Feng Yan-ling, Huang Xin. Design of constant temperature con-trol system based on fuzzy control[J]. Modern Electronics Tech-nique, 2010(19):135~138.

9

Fudholi A, Sopian K, Ruslan M H, et al. Review of solar dryers for agricultural and marine products[J]. Renewable and Suatain-able Eeergy Reviews, 2010,14(1):1~30.

10

S J Temple, A J B van Boxtel. Control of fluid bed tea dryers: controller design and tuning[J]. Computers and Electronics in Agricultere,2000,26(2):159~170.

11

张秦权,文怀兴,袁越锦. 远红外联合低温真空干燥设备研究与设计[J]. 食品与机械,2013,29(1):157~150.

12

赵永洁,黄云战,周红杰,等. 普洱茶发酵车间测控系统的设计与实现[J]. 食品与机械,2012, 28(2):98~101.

13

吴绍帅,李亚莉,黄云战,等. 普洱茶发酵自动化生产专利技术的研发[J]. 食品与机械,2011, 27(6):183~185.

14

李界家,付平,片锦香,等. 参数自调整模糊控制在炉温控制中的应用[J]. 控制工程,2004,11(1):14~16.