

2-28-2015

Research progress of health functions of wheat bran

DU Zhenya

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

CHEN Fusheng

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

BU Guanhao

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

Follow this and additional works at: <https://www.ifoodmm.cn/journal>



Part of the [Food Science Commons](#)

Recommended Citation

Zhenya, DU; Fusheng, CHEN; and Guanhao, BU (2015) "Research progress of health functions of wheat bran," *Food and Machinery*: Vol. 31: Iss. 1, Article 58.

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2015.01.058

Available at: <https://www.ifoodmm.cn/journal/vol31/iss1/58>

This Advances is brought to you for free and open access by Food and Machinery. It has been accepted for inclusion in Food and Machinery by an authorized editor of Food and Machinery.

小麦麸皮及其保健功能研究进展

Research progress of health functions of wheat bran

杜振亚 陈复生 布冠好

DU Zhen-ya CHEN Fu-sheng BU Guan-hao

(河南工业大学粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

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

摘要: 小麦麸皮作为一种重要的膳食纤维来源, 富含多种活性多糖、酚类化合物等生理活性物质, 对人体健康发挥着重要作用。文章综述麸皮对便秘、结肠癌、糖尿病等疾病的缓解作用, 并展望小麦麸皮保健功能的开发应用前景。

关键词: 小麦; 麸皮; 膳食纤维; 保健功能

Abstract: As one of the important dietary fiber source, wheat bran contains various active polysaccharides, phenolic compounds and others physiologically active substances, which plays an important role in human health. Mainly introduced and prospected the function of wheat bran in relieving constipation, colon cancer, diabetes and other.

Keywords: wheat; wheat bran; dietary fiber; health functions

小麦所具有的营养功能特性主要集中在其皮层和胚芽部分, 即麸皮中^[1]。麸皮是小麦制粉过程中的主要副产物, 常作为动物饲料, 其价值没有得到充分的发挥。小麦麸皮不但富含人体所需的维生素、矿物质、低聚糖、麦麸蛋白等物质, 而且也是一种重要的膳食纤维来源, 对机体保持健康状态发挥着重要的作用^[1-3]。小麦麸皮作为重要的膳食纤维来源, 虽然不能被人体直接消化吸收, 但是其特有的生理保健功能受到人们的重视^[4-7]。文章主要阐述麸皮对便秘、结肠癌、糖尿病等慢性疾病的缓解作用。

1 小麦麸皮中的主要活性成分

小麦麸皮是小麦制粉过程中主要的副产物, 约占小麦籽粒的 20%~22%^[8]。麸皮中含有两大类生理活性物质, 即酚类化合物和活性多糖。活性多糖主要指小麦膳食纤维, 酚类物质主要包括酚酸、类黄酮及木酚素^[1]。麸皮氨基酸组成较平衡, 其中谷物限制性氨基酸赖氨酸含量较高, 小麦籽粒中

的 B 族维生素、维生素 E、矿物质大部分集中在糊粉层和麦胚中, 所以麸皮中含量相对较高^[2]。麸皮中富含纤维素、半纤维素、木质素, 而这些均是构成膳食纤维的成分, 对预防便秘等一些疾病的效果很好。此外, 小麦麸皮还含有部分脂肪、低聚糖、植酸酶等成分。因此, 麸皮可以加工成富有保健功能的麦麸多糖、麦麸低聚糖、麦麸膳食纤维以及抗氧化剂等产品^[1,2,8]。

2 麸皮的保健功能

2.1 缓解便秘

研究^[9,10]表明, 便秘患者补充适量的含有麸皮的全谷物, 可以缓解便秘发病症状。Danilo 等^[11]将 24 名非器质性便秘患者随机分成麸皮组和安慰剂组(由蔗糖、可可粉、麦芽糖等制得外形与麸皮相似的物质)两组, 在第 4 周和第 8 周后分别对口服口的转运时间、排便频率、粪便重量进行评价。结果表明, 所用患者在治疗期间平均排便率趋于正常化, 直肠和结肠转运减缓, 但是只有麸皮组患者的肠道总转运时间的平均值是正常的。原因可能是麸皮对患者的结肠蠕动不足、结肠局部蠕动较为强烈的症状有所缓解, 以及麸皮能改善肠道微生物的新陈代谢以及次级代谢产物的吸收等。黄觉非等^[12]研究发现小麦戊聚糖提取物具有良好的润肠通便效果, 并且润肠通便效果与受试物剂量呈一定的剂量效应关系, 随着戊聚糖剂量的增大润肠通便效果变得更为明显。Helga 等^[13]临床试验发现高麸皮含量的饮食对便秘儿童正常排便的恢复效果要好于其负面影响, 并且这种恢复效果对便秘儿童正常的排便非常重要, 究其原因可能是麸皮能够促进肠道中不溶性纤维的平衡。最后得出结论高麸皮含量的饮食对缓解儿童便秘症状是可行的, 然而只有持续的补充麸皮膳食纤维才能起到明显的效果。

Kacmaz 等^[14]将 60 名患有老年骨病的便秘患者均分成试验组和对照组, 以验证麸皮对老年性便秘的效果。其中对照组的日常护理包括正常饮食、泻药以及根据患者实际情况

基金项目: 国家“863”项目(编号: 2013AA102208-5)

作者简介: 杜振亚(1988—), 男, 河南工业大学在读硕士研究生。

E-mail: zhenyadu@163.com

通讯作者: 陈复生

收稿日期: 2014-12-26

配合适当的活动;试验组的日常护理包括制定合适的日常排便计划、至少饮水或者饮料 1 500 mL/d、每天给予一包膳食纤维(麸皮)、2 h 翻身一次。结果表明试验组的排便时间、排便强度、粪便颜色、粪便量都得到了改善,而对照组仅排便时间均得到了改善,这可能由于膳食纤维缩短了排便时间、增加粪便量以及通过增加粪便强度软化了粪便。此外,还可能与每天补充的流体和运动情况有关。

然而,目前研究主要集中在个体或者肠道,还没有深入到细胞内部,并且麸皮各组分的相互作用对便秘的影响还不清楚。因此,对麸皮改善便秘症状的作用机理仍需要进一步的研究和探索。未来的研究热点,可能会配合现代技术分析确定麸皮中具体的有效成分,然后深入到细胞甚至基因水平上研究其具体作用机制。

2.2 抑制结肠癌肿瘤细胞活性

相关研究表明膳食纤维能够减少大部分结肠癌的发生^[15-17],麸皮作为一种重要的膳食纤维对抑制结肠癌的发生具有良好的效果^[18,19]。Bandaru 等^[20]以 5 周龄的雄性小鼠为研究对象将小鼠分为 6 组:饲喂 10% 麸皮(WB)、10% 脱植酸麸皮(WB-P)、10% 脱脂麸皮(WB-F)、10% 脱脂、脱植酸麸皮(WB-PF)、10% WB-PF & 2% 的麸皮脂类物质、10% WB-PF & 0.4% 的植酸。50 周后发现,WB-P 和 WB-F 两组的雄性小鼠的结肠癌的发病率、肿瘤细胞的多样性没有明显的变化;WB-PF 结肠癌的发病率升高、肿瘤细胞的多样性增强以及肿瘤细胞的体积增大;剩余的两组的结肠癌发病率、肿瘤细胞的多样性、体积均得到了明显的改善,而单独补充植酸的效果不佳。这说明麸皮中的脂类在抑制结肠癌的发生方面起着主要作用,究其原因可能是麸皮脂类中的一些抗炎物质通过抑制环氧合酶 2 和一氧化氮酶的活性来实现的,然而由于麸皮脂类中的一种或者几种活性物质的相互作用还不确定。师琪等^[21]研究发现小麦麸皮总黄酮苷可以使 LoVo 结肠癌细胞生长周期阻滞,显著降低 S 期细胞比例,进而抑制人结肠癌细胞株 LoVo 结肠癌细胞增殖,其中浓度为 0.500,0.250 mg/mL,抑制率分别为 78.60% 和 47.52%。

Ying dong 等^[22]研究发现麸皮中的 5-烷基间苯二酚(ARS)是抑制结肠癌肿瘤细胞活性的主要成分,当侧链长度增加时会削弱这一活性,而双键和羰基的存在会使 ARS 抑制结肠癌肿瘤细胞的活性增强。这说明在体外的条件下,ARS 在抑制结肠癌肿瘤细胞起着非常重要的作用,然而具体的作用机理还需要进一步探索。Ferguson 等^[23]研究发现麸皮可以通过直接吸收来消除 2-氨基-3-甲基咪唑并(4,5-F)喹啉对饮食或代谢产物的致突变作用,从而减少肠道细胞的突变和癌症的发生,这可能是由于麸皮能够促进肠道益生菌的生长,肠道微生物可以吸收致癌物,以及肠道微生物活性的增强促进肠道的排毒和致癌物的代谢。此外,还与麸皮能够阻止致癌物质与肠道壁细胞的接触相互作用有关。

麸皮在抑制结肠癌效果良好,这可以用来辅助治疗结肠癌,同时也能为麸皮的深加工指明一个新方向。目前更多的

研究集中在动物试验方面,应用于临床的研究还不多,虽然对麸皮中抑制结肠癌的功能成分已经有了一定的了解,但对其功能性成分抑制结肠癌肿瘤细胞活性的具体作用机理,尚不明确。

2.3 降血糖

目前控制血糖的方法主要靠口服降糖药、注射胰岛素、食疗等几种方法来控制血糖,而食疗又是最安全的方法备受人们的推崇^[24]。研究^[25]表明,膳食纤维含量丰富的饮食有利于血糖的控制,而麸皮作为一种最常见最廉价的膳食纤维,具有良好的降低血糖的效果。

Ahmad 等^[26]将 31 名怀孕 24~28 周的妊娠期糖尿病患者分为低糖饮食对照组(13 人)和低糖饮食 & 麦麸试验组(18 人),来研究麦麸对妊娠期糖尿病患者血糖的影响,其中麸皮摄入量为每餐 15 g。研究结果表明:低血糖饮食可以有效地控制妊娠期糖尿病患者的血糖,如果再添加一定量的麸皮效果更加显著。然而,低血糖饮食不符合患者的饮食习惯以及食物的选择有限,这可能不利于处于妊娠期的妇女保持足够的体重。张恒涛等^[27]研究了麸皮水提液、麦麸去多糖水提液、麦麸去多糖及蛋白水提液对小鼠肝脏细胞中葡萄糖代谢的影响,比较这 3 种小麦麸皮水提液的降糖效果。结果表明,除去多糖的麸皮提取液以及除去多糖及蛋白质的麸皮提取液不如麸皮提取液对小鼠肝脏细胞糖代谢的控制效果好,尤其是除去多糖及蛋白质的麸皮提取液的降糖效果最差。这可能是由于麸皮中的活性蛋白具有良好的降糖效果,如果麦麸中活性多糖与蛋白协同作用效果更好。

Reyes-Perez 等^[28]研究发现添加经过热(60,80,100,120 °C)、粗分级处理的高水分含量麸皮的饼干具有很好降血糖效果。这可能是由于适当的热处理能够使不溶性膳食纤维向可溶性转变,这种转变主要是不溶性膳食纤维的破碎或者分解;粗分级的麸皮可以阻止淀粉与有关的消化酶接触进而达到降低血糖的目的。麸皮具有良好降低血糖的效果,这可能会成为以后开发糖尿病保健食品的研究热点。然而,麸皮真正应用于临床其降血糖效果以及其作用机理仍需要进一步的研究。

2.4 对其他疾病的调节功能

克罗恩病是一种原因不明的肠道炎症性疾病,在胃肠道的很多地方均可发生,目前尚无根本的治愈方法,且术后复发率很高^[29]。研究^[30]发现,麸皮可以改善克罗恩病患者肠胃功能缓解克罗恩病症状的发生。这可能是由于麸皮的摄入能够改善肠道微生物的平衡以及食物通过肠道的时间。然而麸皮是一种复杂的可被微生物发酵的膳食纤维,并且患者饮食受到了干预,所以后续的研究是必要的。

曹向宇等^[31]应用 D-半乳糖建立亚急性衰老小鼠模型,结果表明麦麸多肽能促进小鼠血清超氧化物歧化酶和谷胱甘肽氧化物酶的活性,降低肝脏中丙二醛含量,进而有效地清除活性氧和自由基,并且与剂量有一定的关系,其中 600

mg/kg比 300 mg/kg 剂量抗氧化效果明显要强。Napolitano 等^[32]研究发现硬质小麦膳食纤维经酶解后,相对于没有酶解的,在体外模拟人肠道试验表明酶解能促进双歧杆菌和乳酸杆菌的活性,原因是小麦膳食纤维在肠道中流动和吸收较慢,以及小麦膳食纤维释放的阿魏酸具有较强的抗氧化性。

李博等^[33]建立小鼠营养肥胖模型和高血脂模型设普通对照组、营养对照组和 3 个试验组,进行小鼠血清总胆固醇、甘油三酯、高密度脂蛋白、生殖器周围脂肪质量的对比分析研究了添加麸皮对玉米醋减肥和降血脂作用的影响。结果表明,添加麸皮能提高发酵玉米醋的减肥作用、降低血清总胆固醇、甘油三酯以及高密度脂蛋白、提高动物抗动脉硬化症的能力。Harding 等^[34]选取 45 只健康雄性仓鼠饲喂容易诱发高胆固醇血症和肥胖的膳食,随机均分成为空白对照、10%的麸皮以及 10%采用高温改性的麸皮 3 组,进行为期 28 d 的试验。结果表明,饲喂 10%改性麸皮组的仓鼠的瘦体重高、耗氧量大、血浆葡萄糖浓度以及脂肪含量较低。这可能由于改性的麸皮改善了小麦麸皮中纤维和酚类物质的活性、食物通过肠道的时间、肠道内黏度以及肠道微生物的多样性。

3 问题与展望

随着食品科技的不断进步,人们逐渐认识到麸皮具有的各种保健功能,为麸皮的开发利用提供了更多途径。但是就目前而言,麸皮主要应用于饲料行业,原因是:① 小麦麸皮中保健功能成分提取困难、提取成本过高;② 麸皮应用于食品在人们的意识里接受较慢;③ 限于中国开发设备的落后以及资金投入过少。虽然市场上已经出现全麦饼干、全麦面包等比较成熟的产品,但是种类缺乏多样不仅不能满足特殊人群的需要,而且像倍受人们喜爱的虾条、方便面、薯片等小食品的应用更少。因此,中国应加大麸皮的开发力度,力求开发出满足不同人群需要的各种食品。

未来麸皮产业的发展方向主要有以下几个:① 应用于饲料行业,应该还是未来的主要方向;② 将麸皮或者经过改性后作为食品配料,应用于面制品、肉制品、固体饮料、油炸食品等大众性食品中;③ 开发用于辅助治疗癌症、便秘、糖尿病、高血压等疾病的功能性食品;④ 提取维生素 E、B 族维生素、麦麸蛋白、麸皮多糖等活性物质成分,用于辅助治疗某一种或一类疾病的中成药物的重要功能成分等。此外,还可以用来开发绿色包装材料应用于食品、医疗、化工等行业。

参考文献

- 1 王俊国,杨玉民. 粮油副产品加工技术[M]. 北京:科学出版社, 2012: 53~63.
- 2 刘亚伟. 小麦精深加工——分离·重组·转化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005: 263~280.
- 3 李梦琴,王跃,赵杨,等. 小麦麸皮超高压处理条件优化及其微观结构观察[J]. 食品与机械,2011,27(4):10~14.
- 4 焦霞,陈静,欧仕益,等. 麦麸酶解产物对糖尿病大鼠氧化应激损

伤的保护作用[J]. 食品与机械, 2006,22(2):27~29.

- 5 欧仕益,张璟. 麦麸酶解产品抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2005,21(6):17~19.
- 6 Clare S, Mash H, Katherine F, et al. A review of dietary Influences on cardiovascular health; part 1: the role of dietary Nutrients [J]. Cardiovascular & Haematological Disorders-Drug Targets, 2013(13):208~230.
- 7 Francesc M G, Mauro Y, Arantza Go'mez de S U, et al. Administration of loperamide and addition of wheat bran to the diets of weaner pigs decrease the incidence of diarrhoea and enhance their gut maturation[J]. British Journal of Nutrition,2010(103):879~885.
- 8 何粉霞,刘国琴,李琳. 小麦麸皮和大豆皮的综合开发利用[J]. 农产品加工·学刊,2009(3):53~61.
- 9 Maria L S, Natalia M S. Dietary treatments for childhood constipation; efficacy of dietary fiber and whole grains[J]. Nutrition Reviews, 2013,71(2):98~109.
- 10 Yang Jing, Wang Hai-Peng, Zhou Li, et al. Effect of dietary fiber on constipation; A meta analysis[J]. World of Gastroenterology, 2012,18(48):7 378~7 383.
- 11 Danilo B MD, Enrico C MD, Fortunée I H MD, et al. Effect of wheat bran in treatment of chronic nonorganic constipation a double-blind controlled trial[J]. Digestive Diseases and Sciences, 1995,40(2):349~356.
- 12 黄觉非. 小麦戊聚糖提取物抗便秘、抗氧化作用的实验研究[D]. 南宁:广西医科大学,2012.
- 13 Helga V L M, Andréa P V. Prospective evaluation of dietary treatment in childhood constipation; high dietary fiber and wheat bran intake are associated with constipation amelioration [J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition, 2011, 52(1):55~59.
- 14 Kaamaz Z, Kasikci M. Effectiveness of bran supplement in older orthopaedic patients with constipation[J]. Journal of Clinical Nursing, 2007,16(5):928~936.
- 15 Genevieve M F, Komal R, Ajay K, et al. Rice varietal differences in bioactive bran components for inhibition of colorectal cancer cell growth[J]. Food Chemistry, 2013,141(2):1 545~1 552.
- 16 Isabel D, Emily S, Bo G, et al. Plasma alkylresorcinol metabolites as biomarkers for whole-grain intake and their association with prostate cancer; a swedish nested case - control study[J]. Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention,2014,23(1):73~83.
- 17 伍雯,秦环龙. 膳食结构改变与结肠癌风险相关性的研究进展[J]. 肠外与肠内营养,2014,21(1):55~59.
- 18 Compher C W, Frankel W L, Tazelaar J, et al. Wheat bran decreases aberrant crypt foci, preserves normal proliferation, and increases intraluminal butyrate levels in experimental colon cancer[J]. Journal of Parenteral and Enteral Nutrition,1999,23

- (5):269~277.
- 19 Debra L Z, Nancy D T, Stella S T, et al. Wheat bran diet reduces tumor incidence in a rat model of colon cancer independent of effects on distal luminal butyrate concentrations[J]. *Nutrient Metabolism*, 1997, 127(11): 2 217~2 225.
- 20 Bandaru S R, Yoshinobu H, Leonard A C, et al. Preventive potential of wheat bran fractions against experimental colon carcinogenesis; implications for human colon cancer prevention[J]. *Cancer research*, 2000, 60(17): 4 792~4 797.
- 21 师琪,管福琴,孙浩,等. 小麦麸皮总黄酮苷抗肿瘤作用及初步的机制研究[J]. *食品科技*, 2013, 38(6): 220~226.
- 22 Yingdong Z, Dawn R Conklin, Huadong C, et al. 5-Alk(en)yl-resorcinols as the major active components in wheat bran inhibit human colon cancer cell growth[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2011, 19(13): 3 973~3 982.
- 23 Ferguson L R, Harris P J, Kestell P, et al. Comparative effects in rats of intact wheat bran and two wheat bran fractions on the disposition of the mutagen 2-amin 3-methylimidazo[4,5-f]quinoline[J]. *Mutation Research / Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2011, 716(1~2): 59~65.
- 24 陈建玲. 饮食干预对 2 型糖尿病患者的影响[J]. *社区医学杂志*, 2014, 12(2): 76~77.
- 25 Susan S C, Lu Q, George C F J, et al. Consumption of cereal fiber, mixtures of whole grains and bran, and whole grains and risk reduction in type 2 diabetes, obesity, and cardiovascular disease[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2013, 98(2): 594~619.
- 26 Ahmad A, Laleh G, Amir Z. Effect of low glycemic load diet with and without wheat bran on glucose control in gestational diabetes mellitus: A randomized trial[J]. *Indian Journal of Endocrinology and Metabolism*, 2013, 17(4): 689~692.
- 27 张恒涛,常铮,套纯洁,等. 小麦麸皮对小鼠糖代谢的影响[J]. *粮食与食品工业*, 2006, 13(4): 28~30.
- 28 Reyes-Perez F, Guadalupe S G M, Lourdes R B A, et al. Estimated glycemic index and dietary fiber content of cookies elaborated with extruded wheat bran[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2013, 68(1): 52~56.
- 29 王赏. 肠病安汤治疗克罗恩病脾胃阳虚证的临床疗效观察[D]. 长沙:湖南中医药大学, 2014.
- 30 Brotherton C S, Taylor A G, Bourguignon C, et al. A High-Fiber diet may improve bowel function and health-related quality of life in patients with crohn disease[J]. *Gastroenterology Nursing*, 2014, 37(3): 206~216.
- 31 曹向宇,刘剑利,卢秀丽,等. 麦麸多肽对小鼠抗氧化损伤作用[J]. *中国公共卫生*, 2010, 26(8): 1 050~1 051.
- 32 Napolitano A, Costabile A, Martin-Pelaez S, et al. Potential prebiotic activity of oligosaccharides obtained by enzymatic conversion of durum wheat insoluble dietary fibre into soluble dietary fibre[J]. *Nutrition, Metabolism & Cardiovascular Diseases*, 2009, 19(4): 283~290.
- 33 李博,李志西,魏瑛,等. 麸皮及黑曲对玉米醋减肥降血脂作用的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(2): 194~198.
- 34 Harding S V, Sapirstein H D, Rideout T C, et al. Consumption of wheat bran modified by autoclaving reduces fat mass in hamsters[J]. *European Journal of Nutrition*, 2014, 53(3): 793~802.

(上接第 248 页)

- 40 Liao Xiang-jun, Raghavan G S V, Dai Jian-ming, et al. Dielectric properties of α -D-glucose aqueous solutions at 2 450 MHz[J]. *Food Research International*, 2003, 36(5): 485~490.
- 41 Noboru S, Mao Wei-jie, Yukiko K, et al. A method for developing model food system in microwave heating studies[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 66(4): 525~531.
- 42 邓业胜,郭文川,王婧,等. 绿豆介电特性的研究[J]. *农机化研究*, 2011, 33(10): 102~106.
- 43 王瑞利,范贵生. 干酪介电特性研究进展[J]. *农产品加工·学刊(下)*, 2013(10): 46~47, 51.
- 44 冯呈艳,余志,陈玉琼,等. 茶鲜叶介电特性的初步研究[J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(2): 111~115.
- 45 段续. 海参微波—冻干联合干燥工艺与机理研究[D]. 无锡:江南大学, 2009.
- 46 ASTM D2520-90. Test methods for complex permittivity (Dielectric Constant) of solid, electrical insulating materials at microwave frequencies and temperatures to 1 650 °C [M]. Philadelphia, PA: American Society for Testing Materials, 1990.
- 47 Wang Yi-fen, Wig T D, Tang Ju-ming, et al. Dielectric properties of foods relevant to RF and microwave pasteurization and sterilization[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 57(3): 257~268.
- 48 Sharma G P, Prasad S. Dielectric properties of garlic (*Allium sativum* L.) at 2 450 MHz as function of temperature and moisture content[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(4): 343~348.
- 49 Wu Hong-wei, Tao Zhi, Chen Guo-hua, et al. Conjugate heat and mass transfer process within porous media with dielectric cores in microwave freeze drying[J]. *Chemical Engineering and Science*, 2004, 59(14): 2 921~2 928.
- 50 Tao Zhi, Wu Hong-wei, Chen Guo-hua, et al. Numerical simulation of conjugate heat and mass transfer process within cylindrical porous media with cylindrical dielectric cores in microwave freeze-drying[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(3~4): 561~572.