·综述·

麦芽炮制历史沿革、现代研究进展及质量标志物预测分析

苏　印[1],王　鑫[1],钟凌云[1],陆兔林[2],曾金祥[1],祝　婧[1*]
(1 江西中医药大学,南昌 330004; 2 南京中医药大学,南京 210023)

[摘要] 麦芽为大麦发芽干燥制品,具有消食健脾等功效,在中医药及食品工业领域应用广泛。本文通过梳理古籍及文献,对麦芽炮制方法历史沿革与现代研究进展进行归纳总结,应用系统药理学对麦芽的质量标志物(quality marker,Q-marker)进行分析预测,筛选出木犀草素、麦黄酮、飞燕草素、5,7-二羟基-3′,4′,5′-三甲氧基黄酮可作为麦芽的 Q-marker,以期为麦芽不同炮制品种的深入研究与质量标准建立提供理论依据和研究思路。

[关键词] 麦芽;炮制;历史沿革;化学成分;药理作用;质量标志物
[中图分类号] R965　　[文献标志码] A　　[文章编号] 1003－3734(2026)14－1516－11

Historical evolution of malt processing, modern research progress and prediction and analysis of quality markers

SU Yin[1], WANG Xin[1], ZHONG Ling-yun[1], LU Tu-lin[2], ZENG Jin-xiang[1], ZHU Jing[1*]
(1 *Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine*, *Nanchang* 330004, *China*; 2 *Nanjing University of Traditional Chinese Medicine*, *Nanjing* 210023, *China*)

[**Abstract**] Malt is a dried product of barley germination, which is widely used in the fields of traditional Chinese medicine and food industry. By combing ancient books and literature, the historical evolution and modern research progress in malt processing methods were summarized. The quality markers of malt were analyzed and predicted by system pharmacology, and finally luteolin, tricin, delphinidin and 5,7-dihydroxy-3′, 4′, 5′-trimethoxyflavon were screened as the quality markers of malt. This study provided theoretical basis and research ideas for the in-depth study of different processed varieties of malt and the establishment of quality standards.

[**Key words**] malt; processing; historical evolution; chemical constituents; pharmacological effects; quality markers

麦芽为禾本科植物大麦(*Hordeum vulgare* L.)的成熟果实经发芽、干燥所得炮制加工品,首载于《药性论》[1],其药性甘平,归脾经、胃经,具有消食行气、健脾开胃、回乳消胀之功效,临床常用于食积不消、脘腹胀满、乳汁郁积等,为常用消食药。

中药饮片作为中医临床用药的主要形式,其质量优劣直接关系到临床疗效与用药安全。刘昌孝院士提出的“中药质量标志物”理论[2],为中药整体质量评价提供了重要框架,但针对炮制饮片,应建立更具针对性的质量标志物(quality marker,Q-marker)理念。与中药相比,中药饮片 Q-marker 强调炮制过程中的成分动态转化与“生熟异治”的药效关联,区别在于其不仅关注药材的基原性与固有成分,更关注炮制工艺引起的成分变化、新生物质以及成分结

[基金项目] 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3504200);江西省重点研发计划-产业链科技创新联合体揭榜挂帅项目(20224BBG71022);中药炮制传承创新与转化江西省重点实验室资助项目(2024SSY07091);江西中医药大学大学生创新创业训练计划资助项目(202410412188);江西中医药大学中药炮制技术传承创新团队资助项目(CXTD22003)

[作者简介] 苏印,女,硕士研究生,研究方向:中药炮制学。E-mail:2329600095@qq.com。
[通讯作者] *祝婧,女,教授,博士生导师,研究方向:中药、民族药饮片质量标准及炮制机制研究。E-mail:277836041@qq.com。

[DOI]10.20251/j.cnki.1003-3734.2026.14.010

构与活性的特异性变化，是体现炮制理论、工艺特色和饮片功效的专属性指标。当前，中药饮片的质量控制仍面临诸多挑战，主要表现在炮制机制不明确、质量评价指标单一以及炮制过程中物质基础尚未阐释清楚等方面。麦芽生品长于健脾、下乳，炒制后则功偏消食、回乳，但其炮制过程中成分转化规律与药效转变的关联机制尚不明确，现有质量标准亦缺乏与炮制相适应的评价指标。因此，系统梳理麦芽炮制历史沿革与现代研究进展，并基于中药饮片 Q-marker 理论预测其关键成分，对阐明麦芽炮制机制、完善其质量标准、推动炮制理论的现代科学发展具有重要意义。本文通过整合麦芽炮制工艺-化学成分-药理作用等多维研究[3-4]，结合网络药理学方法预测其 Q-marker，以期为麦芽炮制的深入研究与质控提升提供参考，并为其他炮制饮片的 Q-marker 研究提供范式。

1 麦芽炮制历史沿革

1.1 古代炮制方法

大麦发芽始载于《名医别录》[5]，其在历史炮制中以炒制为主要方法并沿用至今，可分为炒黄与炒焦，始载于《肘后备急方》中“熬令黄香”[6]。有少数文献记载麦芽与麸、巴豆共制，但清炒已制麦芽之弊，足以消食之用，麸炒制用有过之功；与巴豆制助消食通便，但巴豆性质猛烈有过之功，可引起相反的作用，因此两者并未成为麦芽的主要炮制方法。经典名方中多用生麦芽与炒麦芽，生麦芽善治食积、痞满等消食之症；炒麦芽（尤其炒黄麦芽）长于产后乳房肿胀、乳汁不畅等症，这也体现了麦芽炮制前后生熟异治的作用。麦芽炮制方法在历代文献中的记载见图 1 与表 1。

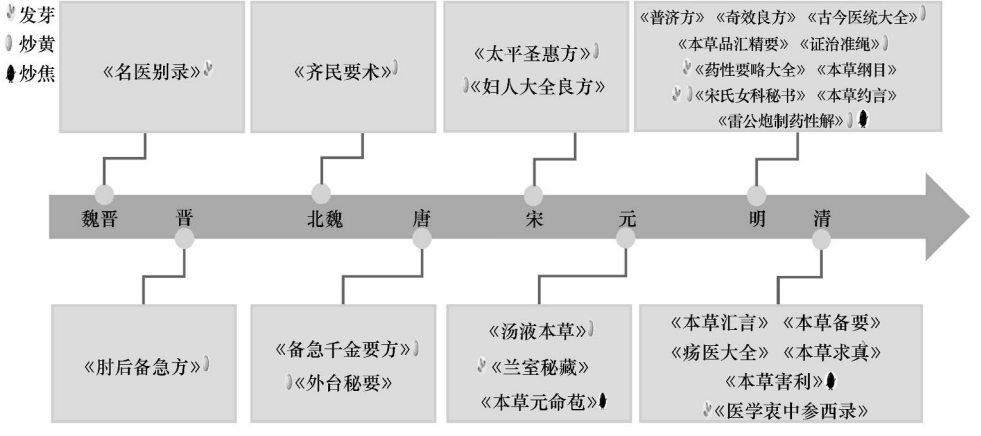


图 1 麦芽炮制历史沿革

表 1 经典名方中麦芽炮制品记载

时期	著作	方剂	炮制品	作用
宋	《妇人大全良方》[7]	麦芽散	炒麦芽	回乳消胀
元	《兰室秘藏》[8]	枳实消痞丸	麦芽	健脾和胃
明	《古今医统大全》[9]	酒积麦芽丸	炒麦芽	心腹胀满、噫酸呕逆
明	《证治准绳》[10]	健脾丸	麦芽	消食和胃
清	《疡医大全》[11]	回乳四物汤	炒麦芽	回乳消胀
清	《医学衷中参西录》[12]	镇肝熄风汤	麦芽	清泄肝热、疏肝理气

1.2 国家标准及各省（市）中药炮制规范收载的麦芽炮制情况

对《中华人民共和国药典》2025 年版[13]、《全国中药炮制规范》[14]及各省（市）炮制规范收载的麦芽炮制情况进行整理可知（见表 2），麦芽炮制主要包括发芽、炒黄和炒焦 3 种工艺，但各省（市）规范在具体操作参数上存在一定差异，例如：发芽工艺中浸泡时间多为 2 ~ 6 h，少数地区（如浙江省）为 1 ~ 2 d；大多要求发芽长度为 2 ~ 5 mm，个别地区（如湖南省）要求 1 ~ 1.5 cm，且温度和湿度控制要求不一；炒制工艺上，炒麦芽多要求文火炒至深黄色或棕黄色，焦麦芽多中火或武火炒至焦黄色或焦褐色，其在火候、终点判定（如颜色）、香气、爆声等方面亦有细微差别；此外，除普遍采用的清炒法外，《河南省中

药材炮制规范》1974 年版收录了麸炒法[15]，但在《河南省中药饮片炮制规范》2005 年版中以“清炒，炒至棕黄色”的炒麦芽替代了此炮制方法。近年，如《中华人民共和国药典》2025 年版简化了工艺描述，侧重成品性状，不同于早期规范对过程进行详细记载。总体而言，各地区规范与《中华人民共和国药典》2025 年版基本一致，但在具体参数、操作细节及版本演进上有所不同。

表 2 国家标准与各省(市)炮制规范收载的麦芽炮制方法

炮制规范	版本	炮制方法
《中华人民共和国药典》[13]	2025 年版	炒麦芽：清炒法炒至棕黄色 焦麦芽：清炒法炒至焦褐色
《全国中药炮制规范》[14]	1988 年版	麦芽：清水浸泡 3 ~ 4 h，置排水的容器内覆盖，每日淋水 2 ~ 3 次至芽长约 2 ~ 3 mm 时，取出晒干 炒麦芽：中火炒至表面深黄色，偶有焦斑 焦麦芽：中火炒至有爆声，表面焦黄色
《安徽省中药饮片炮制规范》[16]	2005 年版	炒麦芽：炒黄法炒至表面深黄色，微有焦斑 焦麦芽：炒焦法至表面焦黄色，有焦香气
《北京中药饮片炮制规范》[17]	2008 年版	炒麦芽：文火炒至表面棕黄色，微鼓起 焦麦芽：文火 90 ~ 120 ℃炒至表面焦褐色
《北京市中药饮片切制规范》[18]	1974 年版下册	麦芽：清水浸泡 4 ~ 6 h，至六七成透，置排水容器盖好，每日淋水 1 次，待芽出时取出晒干 炒麦芽：文火炒至深黄色，鼓起时取出 焦麦芽：武火炒至焦黄色，喷洒清水，灭净火星
《广东省中药饮片炮制规范》[19]	1984 年版	炒麦芽：文火炒至棕黄色，鼓起并有香气 焦麦芽：先文火后中火炒至焦黄色，鼓起并有焦香气
《广西壮族自治区中药饮片炮制规范》[20]	2007 年版	炒麦芽：文火炒至棕黄色有香气为度 焦麦芽：中火炒至外表焦褐色，内部焦黄色为度
《贵州省中药饮片炮制规范》[21]	1986 年版	炒麦芽：小火不断翻炒，至麦芽迸炸呈淡黄棕色并发出香气时取出
《贵州省中药饮片炮制规范》[22]	2005 年版	生麦芽：颗粒饱满的大麦，清水浸 3 ~ 4 h 捞出，置竹箩内，上覆盖湿蒲包，保温约 20 ℃。常淋水并每 4 ~ 8 h 翻动以保持湿润和透气，待芽萌发至 5 mm 时，取出，低温干燥 炒黄、炒焦：清炒法用文火分别炒至棕黄色、焦黄色
《甘肃省中药饮片炮制规范》[23]	1980 年版	麦芽：清水浸 2 ~ 4 h，捞出置排水容器内，湿布盖好，每日淋水 2 ~ 3 次，待全部长出根芽，取出，晒干 炒麦芽：文火炒成黄色 焦麦芽：武火炒至焦黄色
《河南省中药材炮制规范》[15]	1974 年版	发芽：净大麦，水浸至六七成透，捞出，置麻袋或蒲包内，每日淋水 1 ~ 2 次，保持适宜温(湿)度，使其发芽并翻动，至芽长达 3 mm 时，取出，清水洗净，及时晒干或微蒸后晒干 麸炒：麸皮撒于锅内，待麸皮冒烟，倒净麦芽，文火炒至表面呈黄色，除去麸皮，每 500 g 麦芽用麸皮 45 g 炒焦：中火炒至焦黄色
《河南省中药饮片炮制规范》[24]	2005 年版	炒麦芽：清炒法炒至棕黄色 焦麦芽：清炒法炒至焦褐色
《湖南省中药材标准》[25 - 26]	1993 年版、2009 年版	炒麦芽：清炒法炒至棕黄色 焦麦芽：清炒法炒至焦褐色
《湖南省中药材炮制规范》[27 - 28]	1983 年版、1999 年版	麦芽：大麦水浸 2 ~ 4 h，置排水容器中，早晚淋水，保持湿润，待发芽长 1 ~ 1.5 cm，取出晒干 炒麦芽：文火炒至深黄色，有微香气为度
《湖南省中药饮片炮制规范》[29]	2010 年版	炒麦芽：清炒法文火至深黄色 焦麦芽：炒焦法中火至有爆裂声，表面焦黄
《湖北省中药饮片炮制规范》[30]	2009 年版	炒麦芽：文火炒至微香，深黄色，外表略有焦点 焦麦芽：中火炒至焦褐色
《江苏省中药饮片炮制规范》[31]	1980 年版	麦芽：颗粒饱满的种子，置箩内浸泡 3 ~ 4 h，沥去水分，覆盖湿蒲包，保温约 20 ℃进行催芽，发芽时常淋水，每 4 ~ 8 h 翻动 1 次，待芽萌发至约 3 mm 时，干燥 炒麦芽：文火炒至棕黄色，稍有焦斑 焦麦芽：武火炒至焦黄色

续表 2

炮制规范	版本	炮制方法
《江苏省中药饮片炮制规范》[32]	2002 年版	麦芽:颗粒饱满大麦,清水浸泡 3 ~ 4 h,置竹箩内覆盖湿蒲包,保温约 20 ℃进行催芽。常淋水,每 4 ~ 8 h 翻动 1 次,待芽萌发至约 5 mm 时,晒干或低温干燥 炒麦芽:文火炒至表面深黄色,微有焦斑 焦麦芽:文火炒至表面焦黄色
《江西省中药炮制规范》《江西省中药饮片炮制规范》[33 - 34]	1991 年版、2008 年版	炒麦芽:净麦芽,文火炒至棕黄色为度 焦麦芽:净麦芽,武火炒至焦麦芽为度
《吉林省中药炮制标准》[35]	1986 年版	制法:饱满大麦,温水浸泡约 3 ~ 4 h,置适宜容器内,保持适当温(湿)度,每日温水捞 1 次,待芽长至 4 ~ 8 mm 时,取出,晒干 炮制:麦芽,置锅中,用文火炒至微黄色,取出,晾凉
《辽宁省中药炮制规范》[36]	1986 年版	麦芽:净大麦,水泡至六七成透,置排水容器内盖严,早晚淋水各 1 次,保持一定温度,发芽取出,干燥 炒麦芽:麦芽置锅内微火炒至棕黄色
《上海中药饮片炮制规范》[37 - 38]	2008 年版、2018 年版	炒麦芽:生麦芽,照清炒法炒至微具焦斑,放凉,筛灰屑
《山东省中药炮制规范》[39]	1990 年版	麦芽:优质黄亮饱满大麦,无异味。水浸 4 h,再喷淋 6 h,间歇 2 h,手指压裂含水量达 41% ~ 46%,在 8 ~ 16 ℃室温、13 ~ 18 ℃麦温(最高 20 ℃)下铺平发芽,幼芽露 1% ~ 3% 时停发、晒干或浸至六七成透,置容器内淋水,依温(湿)度要求至达标后晒干 炒麦芽:文火炒至泛黄、焦斑、出香 焦麦芽:中火炒至焦黄、出焦香
《山东省中药炮制规范》[40]	2002 年版	炒麦芽:文火炒至表面呈黄色,带焦黄斑点,香气逸出 焦麦芽:中火炒至表面呈焦褐色,焦香气逸出
《陕西省中药饮片标准》第一册[41]	2008 年版	炒麦芽、焦麦芽:饮片麦芽,清炒法分别炒至棕黄色、焦褐色
《四川省中药饮片炮制规范》[42]	1977 年版	清炒法炒至黄色,香气溢出,为炒麦芽;炒至焦黄色,焦香气,为焦麦芽
《四川省中药饮片炮制规范》[43]	2002 年版	炒麦芽:净麦芽,照清炒法炒至深黄色 焦麦芽:净麦芽,照清炒法炒至焦黄色
《天津市中药饮片炮制规范》[44]	2005 年版	麦芽:净大麦,发芽后干燥 炒麦芽:炒至表面深黄色,偶有焦斑 焦麦芽:炒至表面黑褐色,内里焦黄色
《天津市中药饮片炮制规范》[45]	2012 年版	同《中华人民共和国药典》2010 年版一部麦芽饮片项下
《浙江省中药炮制规范》[46]	1986 年版	麦芽:颗粒饱满大麦水浸 1 ~ 2 d,置竹箩内,上盖湿蒲包,每隔 4 h 淋水(夏季水温控制在 20 ℃以下),叶芽萌发至 3 ~ 5 mm 时,取出干燥 炒麦芽:生麦芽炒至表面黄色,微具焦斑
《浙江省中药炮制规范》[47]	2005 年版	炒麦芽:炒至表面深黄色,微具焦斑 焦麦芽:炒至有爆裂声,香气逸出,表面焦黄色

2 麦芽炮制现代研究

2.1 炮制工艺研究

2.1.1 发芽法炮制工艺研究 Rani 等[48]通过控制温度在 15 ~ 20 ℃、湿度 90% ~ 95% 进行制麦,激活酶合成,调节蛋白质与淀粉的降解平衡。何晶等[49]以酶活性、外观、气味为指标,通过正交实验确定了麦芽最佳发芽工艺参数为浸泡 5 h、发芽温度 25 ℃、湿度 70%。张微微等[50]通过单因素、正交实验考察了浸麦时间、外部温度及发芽温度对麦芽中阿魏酸含量的影响,优化得出浸麦 24 h、外部温度 18 ℃、发芽温度 17 ℃,此条件下阿魏酸含量显著提高,为最佳制麦工艺。Almaguer 等[51]实验得出 15 ℃发芽 5 d、50 ℃干燥可保持 α-淀粉酶活性和浸出物含量最高。

2.1.2 炒法炮制工艺研究 邱孟等[52]采用正交设计实验结合综合评价法确定温度 200 ℃、时间 20 min、翻炒频率 12 次·min^{-1}为麦芽最佳炒制工艺参数。此外,研究发现烘法加工的麦芽在酶活性保留和水浸出物方面优于传统炒法,且烘法成品质量显著更优。50 ~ 70 ℃低温烘干可保留酶活性;100 ~ 220 ℃高温烘焙生成的焦麦芽增强风味与色泽,但酶活性丧失。高温干燥(高于 80 ℃)会增加类黑精,增强焦香气。

2.2 炮制对化学成分的影响

2.2.1 酶类 麦芽炮制过程中其酶活性显著降低,炮制后麦芽淀粉酶活力下降 41.73%,蛋白酶活力下降 44.71%。贺倩等[53]研究发现麦芽炮制初期酶

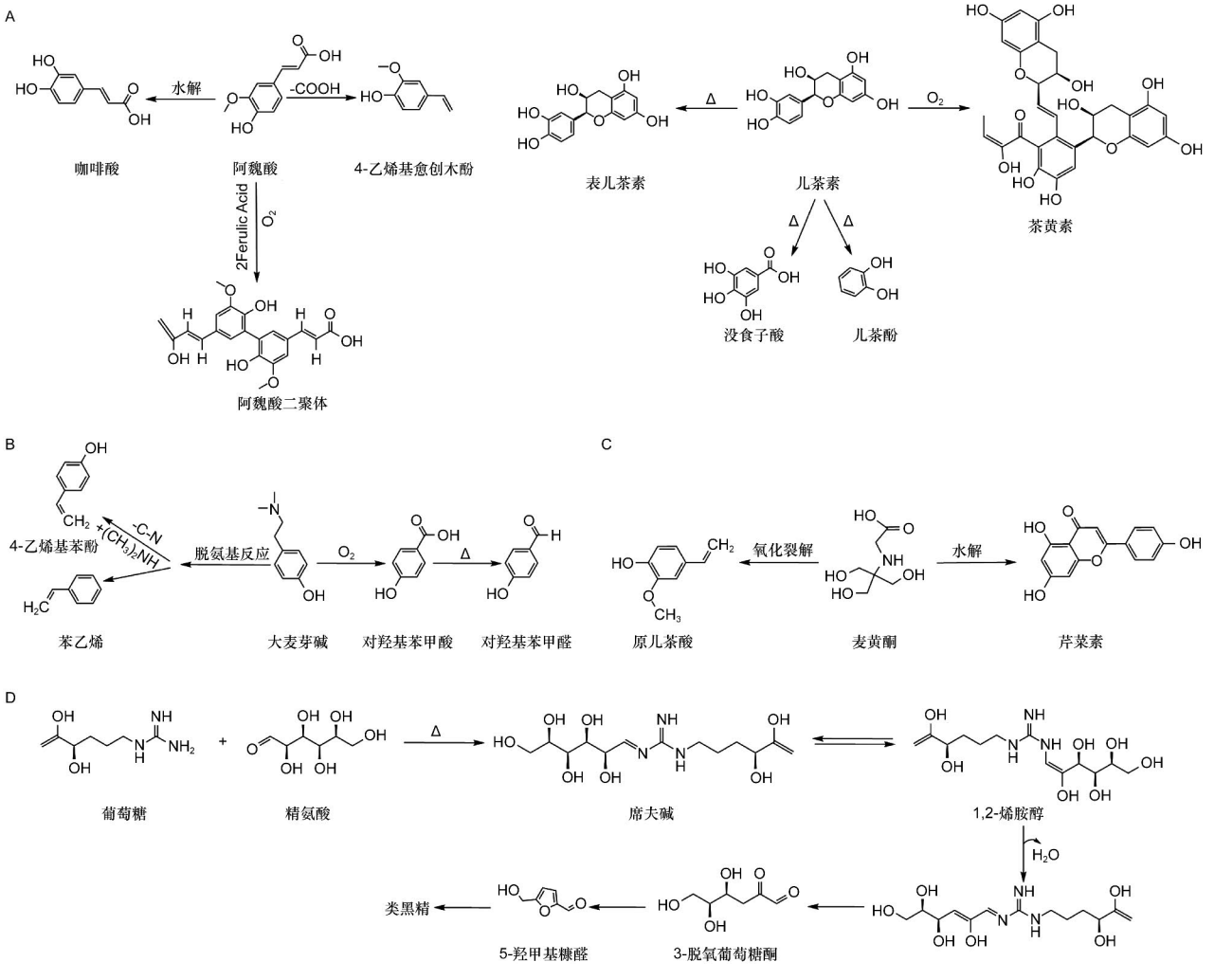
活力达到峰值,随后持续下降。周芸芸等[54]研究发现,浸麦会显著增加蛋白酶含量以及提高酶活力。负建民等[55]对麦芽干燥过程中各种酶的变化影响进行检测,发现干燥初期麦芽中的酶作用最活跃。

2.2.2 糖类 麦芽中糖类与氨基酸结合致麦芽颜色加深,在酶作用下转化为麦芽糖等多种糖类,还原糖和非还原糖与氨基酸发生美拉德反应,糖类成分含量下降。麦芽炒焦时,高温使糖类脱水缩合,形成焦糖色物质,糖类成分随之减少[56]。

2.2.3 黄酮类 凌俊红等[57]采用 HPLC 法检测大麦芽中的麦黄酮发现,从大麦芽制麦到炮制焦麦芽,麦黄酮含量逐渐升高。贺丹霞等[58]通过分析麦芽不同炮制品中黄酮含量,发现发芽后的麦芽杨梅素含量显著增加,山柰酚含量在生麦芽和炒麦芽中较大麦芽中增加,焦麦芽与大麦芽含量基本一致,儿茶素含量在麦芽炮制过程中逐渐下降。

2.2.4 蛋白质和氨基酸 胡晶[59]对麦芽炮制过程中蛋白质的变化进行测定发现,生麦芽中可溶蛋白含量均高于炮制品,焦麦芽中的碱溶、醇溶及盐溶蛋白含量最高。麦芽炒制过程中氨基酸参与美拉德等化学反应,不同炒制温度和时间下,麦芽中的 15 种氨基酸含量随炒制温度升高而降低,蛋氨酸、脯氨酸、精氨酸、组氨酸和 γ-氨基丁酸的变化是炒制温度影响麦芽炮制的主要因素[60]。

2.2.5 生物碱类 Zou 等[61]研究发现生麦芽中生物碱化合物含量高于炮制品。麦芽炮制时,随时间的变化其生物碱含量呈逐渐下降趋势,焦麦芽相比生麦芽与炒麦芽生物碱含量减少较明显,因此生物碱常作为生麦芽与炒麦芽的主要成分进行研究。麦芽炮制过程中部分化学成分热解路径见图 2。



A:酚类(阿魏酸、儿茶素);B:生物碱类(大麦芽碱);C:黄酮类(麦黄酮);D:5-HMF(炮制中间产物)

图 2 麦芽炮制过程中部分化学成分热解路径图

2.3 麦芽炮制对药理作用的影响

2.3.1 健脾消食、化滞作用 生麦芽与其不同炮制品均能增强肠道运动、促进消化、改善肠道环境。生麦芽的消化作用优于炒麦芽和焦麦芽,生麦芽芽长为0.75~1.25 cm,消食效果更佳。生麦芽可调节免疫系统,抑制炎症因子表达,减轻肠道炎症;炒麦芽则能显著改善结肠组织中炎症因子的不良表达[62]。研究表明,焦麦芽与焦山楂、焦神曲组成复方可改善大鼠功能性消化不良(functional dyspepsia,FD)、肠道菌群结构及生物多样性的紊乱[63],通过花生四烯酸、丙酮酸等代谢途径改善异常代谢,发挥消化作用,其机制与调节脑肠肽分泌相关。

2.3.2 降血糖作用 研究发现,生麦芽中粗多糖具有降低小鼠空腹血糖的作用[64];麦芽及炮制品对α-葡萄糖苷酶均具有较好的抑制效果,其中炒麦芽最强、焦麦芽最弱,加热提取后炒麦芽中的多糖在降血糖方面效果更佳。Onwurafor 等[65]研究发现,将麦芽加入面包中喂食动物,其空腹血糖降低25%,显著提升胰岛素敏感性。添加的麦芽通过抑制α-淀粉酶活性和提供抗氧化多酚,显著改善抗糖尿病和降血脂效果。

2.3.3 催乳与回乳作用 麦芽具有双向调节乳汁分泌的作用。麦芽所含生物碱能有效促进产后缺乳母鼠分泌乳汁,促进乳腺发育。生麦芽催乳作用强于炒麦芽,高剂量炒麦芽回乳效果最佳[66]。张玲等[67]根据临床观察得出生麦芽和炒麦芽均具回乳作用,剂量越高疗效越佳。麦芽提取物大麦芽碱可通过抑制NF-κB/MAPK通路,显著减轻脂多糖诱导的乳腺炎症和氧化应激,还可通过调节肠道菌群平衡减少病原菌,增强肠道屏障功能,间接降低乳腺炎风险。

2.3.4 抗肿瘤、抗氧化、抗菌作用 麦芽炮制的中间体产物5-羟甲基糠醛与麦芽酚具有抗肿瘤的作用,二者对化学性肝损伤也表现出保护作用[68]。刘佳国等[69]研究表明富硒麦芽通过"硒+麦芽基质"的双重作用,减少肝癌细胞分泌的胰岛素样生长因子,降低葡萄糖过度摄取,上调肝脏磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶表达,促进糖异生。通过激素调节、肝糖代谢修复等途径改善了肝癌相关低血糖及抑制肿瘤生长。研究发现,麦芽酚预给药可以有效缓解四氯化碳诱导的急性肝损伤[70]。生麦芽较炮制品具有更强的抗氧化能力,从中进行低温提取的多糖组分更有利于保持其抗氧化活性。麦芽在制麦与烘焙过程中形成的类黑精具有强自由基清除能力,可降低氧化应激。

3 基于系统药理学的 Q-marker 预测分析

3.1 基于麦芽传统功效选择疾病模型

消化不良是一种上腹部疼痛或烧灼、餐后饱胀感或早饱感的胃肠系统症状,因多数无法确定结构性病因,故归属于FD范畴。研究发现,FD病因与心理疾病密切关联,其使肠道与大脑之间信息传递紊乱、胃肠动力障碍、胃肠道微生物群失调。麦芽属消食药,常用于脾虚气滞型消化不良,治疗食积不消、脘腹胀满;同时兼具疏肝解郁作用,可缓解因情绪压力导致的胃肠功能紊乱。因此,麦芽与传统中医"消食健脾"理论高度契合,可通过多成分、多靶点针对性改善FD的胃动力障碍及"脑-肠轴"失调等症状。

3.2 预测麦芽潜在活性成分

通过PuChem、TCMSP数据库获取麦芽13个符合条件的潜在活性化合物,利用SwissTargetPrediction数据库将潜在活性成分SMILES号输入,以"probability>0"为标准预测化合物靶点信息,筛选出候选活性成分对应靶点,共得228个去重靶点。应用Cytoscape 3.10.2软件构建麦芽"成分-靶点"网络图(见图3A)。以"Functional dyspepsia"为关键词,在OMIM与GeneCards数据库中检索下载共得到3 519个靶点,将检索结果去重获得FD相关疾病靶点。应用微生信平台绘制成分与疾病靶点Veen图,得到麦芽与FD相关性交集靶点134个(见图3B),构建"药物-成分-靶点-疾病"网络图(见图3C)。

3.3 蛋白质交互作用(protein-protein interaction,PPI)网络构建与核心靶点筛选

将134个交集靶点导入STRING数据库构建PPI网络,将PPI信息导入Cytoscape 3.10.2中利用CytoNCA插件进行网络可视化及拓扑分析筛选核心靶点,使用"Analyze Network"对所获得的信息进行处理(满足≥DC、EC、BC、CC中位数为标准),筛选出31个关键靶点。根据degree值选取前5位为核心靶点(见图4)。

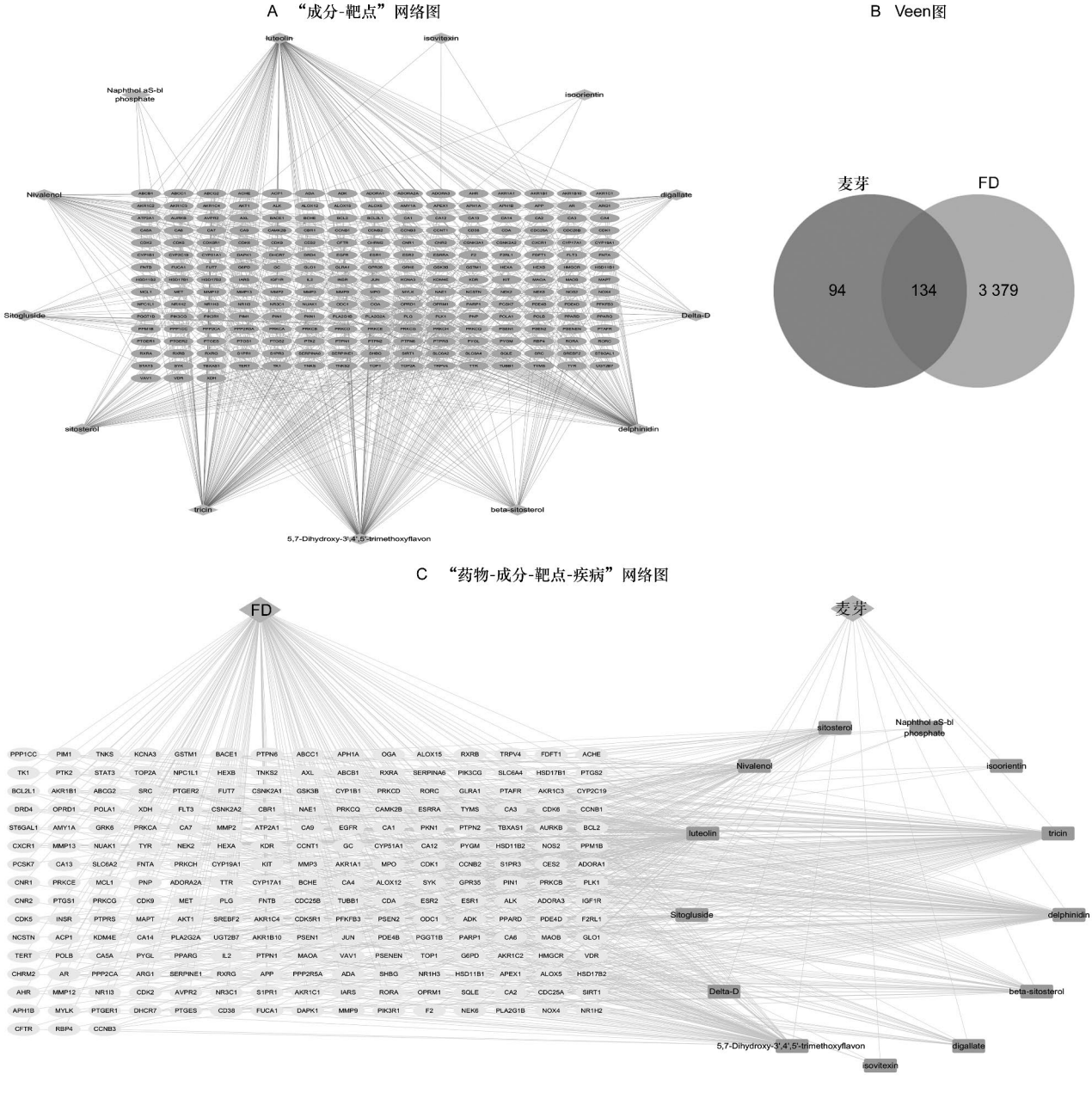


图 3 麦芽潜在活性成分筛选

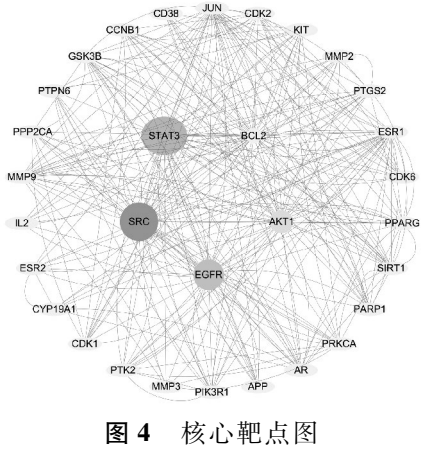


图 4 核心靶点图

3.4 GO 功能富集和 KEGG 通路分析

将 31 个关键靶点运用 Metascape 数据库进行 GO 功能富集分析，获得生物过程（biological process，BP）707 条、细胞组分（cell component，CC）31 条、分子功能（molecular function，MF）69 条。选取前 10 条富集度高的条目进行绘图（见图 5A），结果显示麦芽治疗 FD 相关疾病与蛋白激酶的活性及结合有关。KEGG 通路富集分析共获得 132 条通路，选取 PI3K-Akt、内分泌抵抗、雌激素信号通路等前 10 条信号通路绘制气泡图（见图 5B），结果表明麦芽主要成分通过上述通路作用于 31 个靶点进行调控。

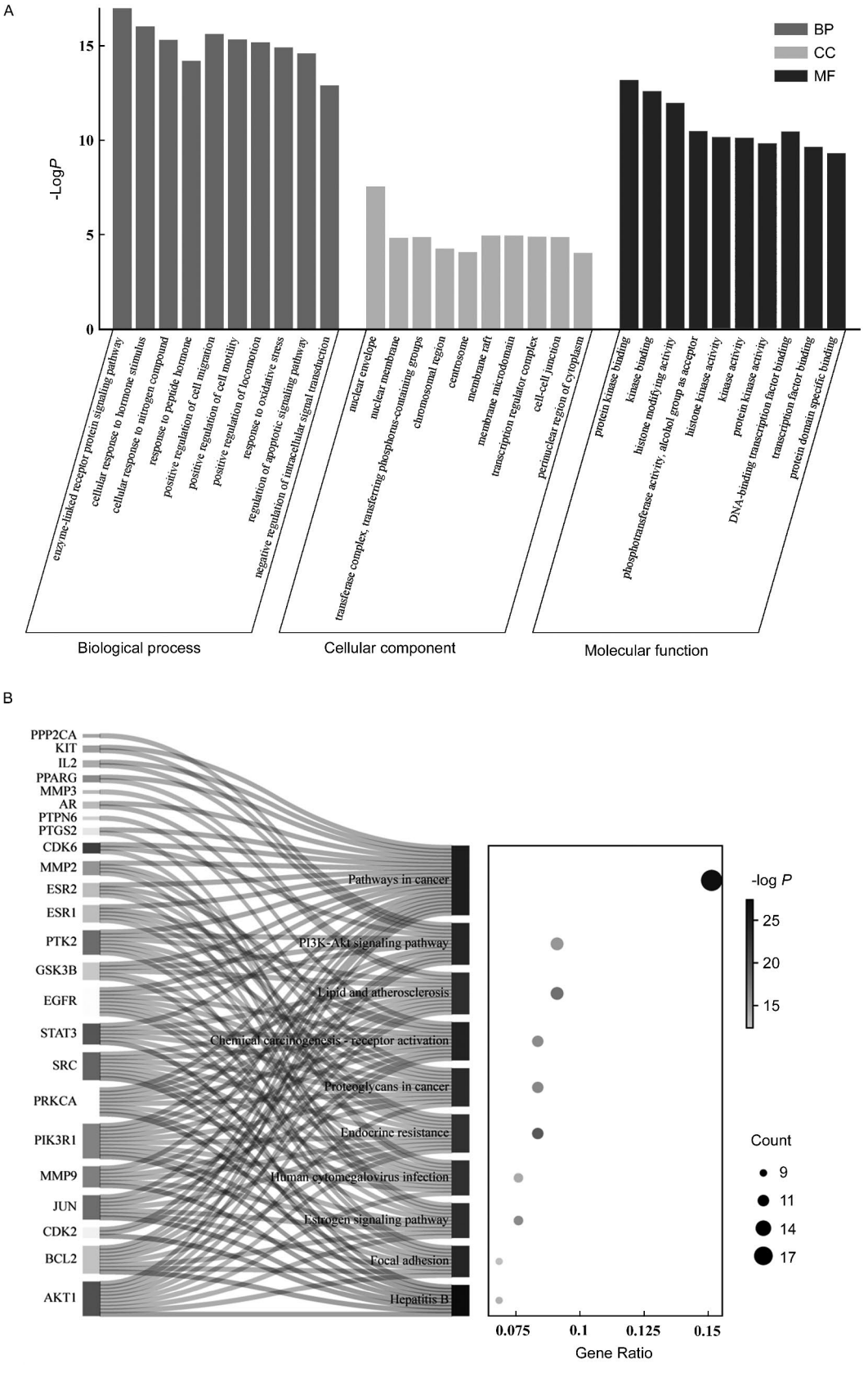


图 5 GO 功能富集(A)和 KEGG 通路分析(B)

3.5 分子对接验证

通过 PDB 数据库寻找核心靶点大分子结构信息，PubChem 获得活性分子 2D 结构，利用 Autodock 软件对其结构优化，完成活性成分与核心靶点对接。结果显示（见表 3），其结合能均 < −5 kcal·mol^{-1}，说明麦芽相关成分与靶点具有稳定的结合活性。黄酮类化合物木犀草素、麦黄酮、飞燕草素、5,7-二羟基-3′,4′,5′-三甲氧基黄酮可作为麦芽 Q-marker。选取 degree 值排名前 4 位的麦芽成分与结合能较高的核心靶点，利用 PyMOL 软件进行可视化（见图 6）。

表 3 关键活性成分与核心蛋白结合能 kcal·mol^{-1}

化合物	AKT1	EGFR	STAT3	BCL2	SRC
木犀草素	−6.3	−6.9	−8.1	−7.2	−5.8
胡萝卜苷	−6.8	−8.0	−8.2	−7.8	−7.3
β-谷甾醇	−7.2	−7.6	−7.3	−8.2	−5.8
谷甾醇	−5.5	−6.1	−6.6	−5.6	−5.9
异荭草素	−7.3	−8.1	−8.1	−7.3	−6.9
间双没食子酸酯	−6.4	−7.3	−8.0	−6.8	−5.9
麦黄酮	−6.0	−6.7	−7.6	−7.4	−5.7
异牧荆素	−6.9	−7.2	−7.7	−7.2	−6.7
飞燕草素	−5.9	−7.0	−7.1	−6.8	−5.8
瓜萎镰菌醇	−6.1	−6.4	−6.8	−6.9	−5.7
delta-D	−6.4	−7.0	−7.9	−7.1	−5.7
5,7-二羟基-3′,4′,5′-三甲氧基黄酮	−5.9	−6.6	−7.7	−7.3	−5.3
萘酚 AS-BL 磷酸酯	−6.0	−7.3	−7.5	−7.4	−6.3

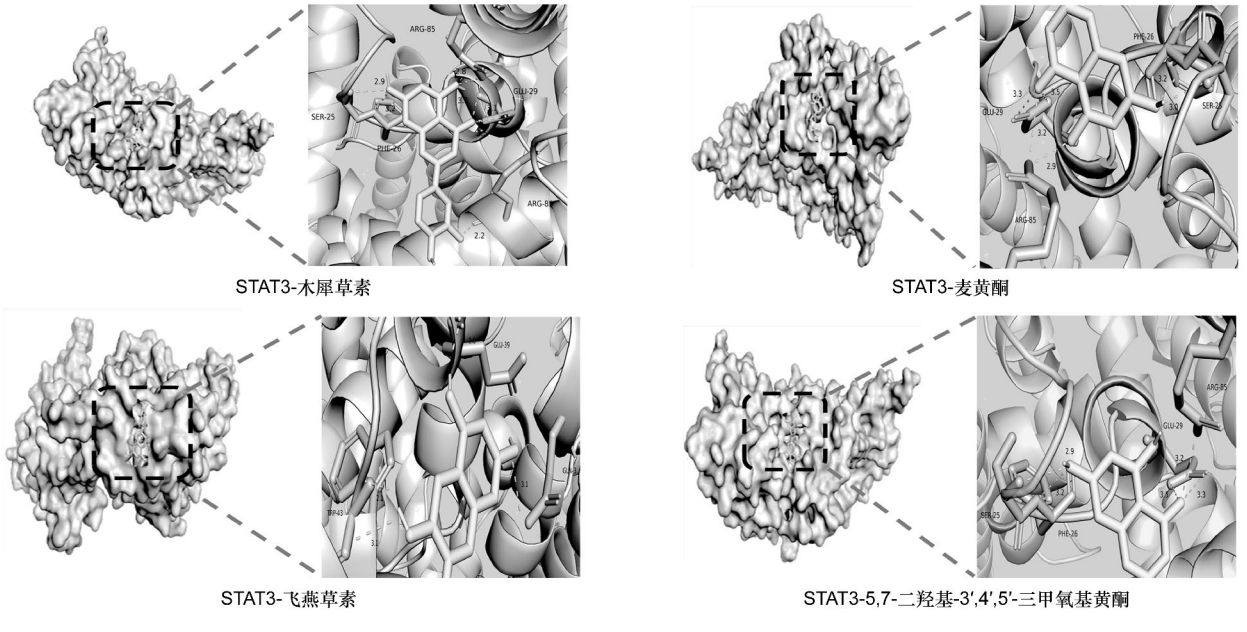


图 6 麦芽成分与核心靶点分子对接可视化图

4 总结与讨论

自《肘后备急方》中首次记载以炒法炮制麦芽以来，其炮制工艺不断丰富，但始终以炒黄、炒焦等为主流。《中华人民共和国药典》2025 年版及地方炮制规范虽收录相关方法，但存在工艺参数描述简略、炮制终点判断缺乏客观量化指标等问题。例如：炒制温度多表述为“文火”“中火”，时间控制仅以“表面焦黄”等主观经验为依据，导致炮制品质量可控性不足。现代研究虽通过单因素或正交设计优化工艺参数，但受研究者选取的考察指标如淀粉酶活

性、黄酮含量等差异影响，所得最优工艺参数存在差异，难以形成普适性生产指导标准。因此，建立基于多维度指标的炮制工艺评价体系是推进麦芽饮片质量标准化与产业化的关键。

麦芽炮制前后化学成分变化与药理活性联系密切（见图 7），生麦芽富含淀粉酶、麦黄酮等成分，凸显消食健胃功效；炒制过程中热敏性酶蛋白失活，但美拉德反应生成 5-羟甲基糠醛等物质，赋予其温中行气之性；炒焦品中酚酸类物质含量提升，与回乳功效增强密切相关。但现有研究多局限于麦芽成分含量测定与药效学验证，对“成分-靶点-通路”的调控机制解析不足，关键活性成分与消化调节、内分泌调控等功效的关联机制尚未明确，制约了麦芽临床应用价值的深度挖掘。

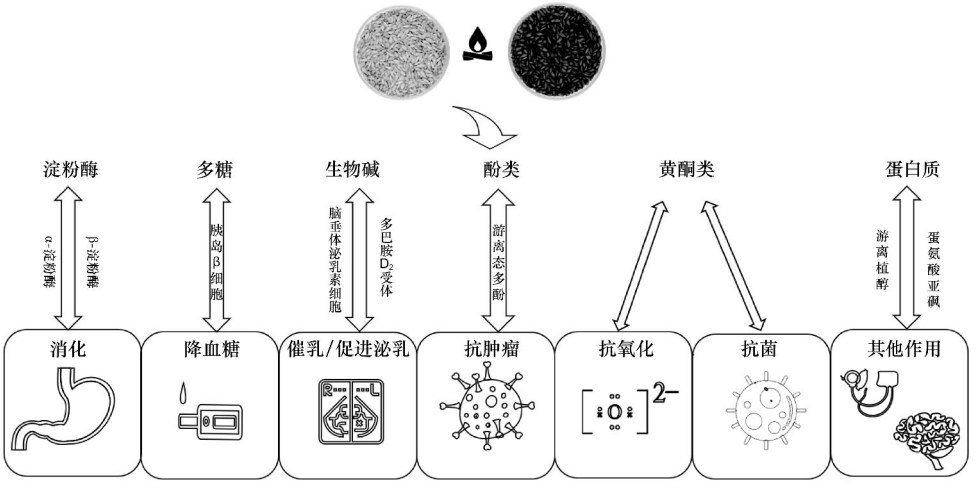


图 7 麦芽化学成分与药理作用

基于系统药理学 Q-marker 预测，麦芽的消化调节作用涉及 β-葡聚糖与 AMY1A、LPL 等消化酶靶点结合以及麦黄酮调控 PPARγ/NF-κB 通路等物质；其回乳功效可能与 β-谷甾醇激活 CYP19A1 促进雌激素合成、木犀草素通过 STAT3 信号通路抑制催乳素分泌等相关。值得关注的是，PI3K-Akt 通路可能介导麦芽对乳腺组织的双向调节，麦芽低剂量促进上皮细胞修复，高剂量诱导细胞周期阻滞，为拓展其在乳腺增生、产后缺乳等疾病中的应用提供了理论依据。

麦芽的炮制过程实质是通过热力学作用调控“药效物质群”的动态转化，进而实现药性趋向与生物效应的定向调控。生品主“消食和胃”之功，符合性平味甘之质；炒黄后次生代谢物占比升高，主“温中行气”；炒焦后碳化结构形成及苦味物质累积，增加了“消胀化滞”之效。通过“热力学调控”改变物质组成进而调控药性与功效，揭示了中药“物质基础-药性表达-功效发挥”三位一体理论。基于此，可利用 GC-MS、HPLC-MS 及电子鼻等技术，以麦芽不同炮制品的外形与内在物质基础的变化为差异对麦芽炮制展开更深入研究，有助于阐明麦芽炮制原理，推动麦芽研究从单一成分分析衍生探索多种成分协同作用、生物效应与麦芽机制系统性研究新阶段。

[参 考 文 献]

[1] 甄权著. 尚志钧辑佚. 药性论·药性趋向分类论（合刊本）[M]. 合肥：安徽科学技术出版社，2006.
[2] 刘昌孝，陈士林，肖小河，等. 中药质量标志物（Q-Marker）：中药产品质量控制的新概念[J]. 中草药，2016，47(9)：1443－1457.
[3] 刘纹纹，孔娜，刘双，等. 麦芽的化学成分及功能活性研究进展[J]. 食品与药品，2023，25(4)：384－390.
[4] 孙华，梁杰，张梦琪，等. 麦芽炮制历史沿革及现代研究[J]. 广东药科大学学报，2018，34(2)：254－257.
[5] 陶弘景. 名医别录[M]. 北京：中国中医药出版社，2013.
[6] 葛洪. 肘后备急方[M]. 天津：天津科学技术出版社，2011.
[7] 陈自明. 妇人大全良方[M]. 北京：人民卫生出版社，1985.
[8] 李杲撰. 兰室秘藏[M]. 北京：中医古籍出版社，1986.
[9] 徐春甫. 古今医统大全[M]. 北京：人民卫生出版社，1991.
[10] 王肯堂. 证治准绳[M]. 北京：中国中医药出版社，1997.
[11] 顾世澄. 疡医大全[M]. 北京：人民卫生出版社，1987.
[12] 张锡纯. 医学衷中参西录[M]. 太原：山西科学技术出版社，2009.
[13] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[S]. 2025 年版. 一部. 北京：中国医药科技出版社，2025.
[14] 原药政管理局. 全国中药炮制规范[S]. 北京：人民卫生出版社，1988.
[15] 原河南省革命委员会卫生局. 河南省中药材炮制规范[S]. 郑州：河南人民出版社，1974.
[16] 原安徽省食品药品监督管理局. 安徽省中药饮片炮制规范[S]. 合肥：安徽科学技术出版社，2005.
[17] 北京市药品监督管理局. 北京市中药饮片炮制规范[S]. 北京：化学工业出版社，2023.
[18] 原北京市卫生局. 北京市中药饮片切制规范下册[S]. 北京：

北京市药材公司印刷所, 1974.
[19] 原广东省卫生厅. 广东省中药饮片炮制规范[S]. 广州: 广东科技出版社, 1984.
[20] 原广西壮族自治区食品药品监督管理局. 广西壮族自治区中药饮片炮制规范[S]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2007.
[21] 原贵州省卫生厅. 贵州省中药饮片炮制规范[S]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1988.
[22] 原贵州省食品药品监督管理局. 贵州省中药饮片炮制规范[S]. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 2005.
[23] 原甘肃省食品药品监督管理局. 甘肃省中药饮片炮制规范[S]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1980.
[24] 原河南省食品药品监督管理局. 河南省中药饮片炮制规范[S]. 郑州: 河南人民出版社, 2005.
[25] 原湖南省食品药品监督管理局. 湖南省中药材标准[S]. 长沙: 湖南科技出版社, 2009.
[26] 原湖南省卫生厅. 湖南省中药材质量标准[S]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1993.
[27] 原湖南省卫生厅. 湖南省中药材炮制规范[S]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.
[28] 原湖南省卫生厅. 湖南省中药材炮制规范[S]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1983.
[29] 原湖南省食品药品监督管理局. 湖南省中药饮片炮制规范[S]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2010.
[30] 原湖北省食品药品监督管理局. 湖北省中药饮片炮制规范[S]. 武汉: 湖北科技出版社, 2009.
[31] 原江苏省卫生局. 江苏省中药饮片炮制规范[S]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1980.
[32] 江苏省药品监督管理局. 江苏省中药饮片炮制规范[S]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2002.
[33] 原江西省食品药品监督管理局. 江西省中药饮片炮制规范[S]. 上海: 上海科学技术出版社, 2008.
[34] 原江西省卫生厅药政管理局. 江西省中药炮制规范[S]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
[35] 原吉林省卫生厅. 吉林省中药炮制标准[S]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1987.
[36] 原辽宁省卫生局. 辽宁省中药炮制规范[S]. 长春: 吉林人民出版社, 1975.
[37] 原上海市卫生局. 上海市中药饮片炮制规范[S]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
[38] 原上海市食品药品监督管理局. 上海市中药饮片炮制规范[S]. 上海: 上海科学技术出版社, 2008.
[39] 原山东省卫生厅. 山东省中药炮制规范[S]. 济南: 山东科学技术出版社, 1990.
[40] 山东省药品监督管理局. 山东省中药炮制规范[S]. 济南: 山东友谊出版社, 2003.
[41] 原陕西省食品药品监督管理局. 陕西省中药饮片标准[S]. 第一册. 西安: 陕西科学技术出版社, 2008.
[42] 原四川省卫生局. 四川中药饮片炮制规范[S]. 成都: 四川人民出版社, 1977.
[43] 原四川省食品药品监督管理局. 四川省中药饮片炮制规范[S]. 成都: 四川人民出版社, 2002.
[44] 原天津市食品药品监督管理局. 天津市中药饮片炮制规范[S]. 天津: 天津市食品药品监督管理局, 2005.
[45] 原浙江省食品药品监督管理局. 浙江省中药炮制规范[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2005.
[46] 原浙江省卫生厅. 浙江省中药炮制规范[S]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1986.
[47] 原浙江省食品药品监督管理局. 浙江省中药炮制规范[S]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2005.
[48] RANI H, BHARDWAJ RD. Quality attributes for barley malt: "the backbone of beer"[J]. *J Food Sci*, 2021, 86(8): 3322 – 3340.
[49] 何晶, 陈敏, 陈永刚, 等. 麦芽发芽过程中 HPLC 指纹图谱及生物碱含量变化规律[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(23): 46 – 51.
[50] 张微微, 董艺凝, 柴新义, 等. 制麦工艺对麦芽阿魏酸含量的影响[J]. 饲料研究, 2020, 43(5): 55 – 57.
[51] ALMAGUER C, KOLLMANNSBERGER H, GASTL M, *et al*. Influence of the malting conditions on the modification and variation in the physicochemical properties and volatile composition of barley (*Hordeum vulgare* L.), rye (*Secale cereale* L.), and quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) malts[J]. *Food Res Int*, 2024, 196: 114965.
[52] 邱孟, 刘庆. 综合评分法优化麦芽炮制工艺[J]. 中药材, 2007(7): 778 – 780.
[53] 贺倩, 刘翠, 李新欣, 等. 麦芽炒制过程中消化酶活力的研究[J]. 化学工程师, 2020, 34(8): 56, 73 – 76.
[54] 周芸芸, 陈爽, 王国华, 等. 制麦过程中蛋白酶酶活力变化和蛋白质溶解情况的研究[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2017(23): 42 – 51.
[55] 负建民, 韩鹏, 吴洪斌. 麦芽干燥过程中酶活力变化动态研究[J]. 食品科学, 2009, 30(11): 166 – 169.
[56] 吴璐, 吴维刚, 谭丽霞, 等. 麦芽炒制过程中炒制温度和时间对糖类成分的影响[J]. 中草药, 2017, 48(7): 1334 – 1339.
[57] 凌俊红, 王楠, 任玉珍, 等. HPLC 法测定大麦芽中麦黄酮[J]. 中草药, 2005(11): 1632 – 1634.
[58] 贺丹霞, 荣亮, 秦民坚, 等. 大麦籽粒、生麦芽、炒麦芽和焦麦芽中黄酮类化合物的含量分析[J]. 中药材, 2012, 35(11): 1747 – 1751.
[59] 胡晶. 炒制对大麦芽蛋白-多酚复合物抗氧化活性、抗增殖活性的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2021.
[60] 吴璐, 杨华生, 吴维刚, 等. 从药性物质的角度研究麦芽"炒香"过程中氨基酸的含量变化规律[J]. 中华中医药学刊, 2018, 36(5): 1084 – 1088.
[61] ZOU JL, WU SR, SHENG B, *et al*. UPLC-Q-TOF-MS/MS analysis on the chemical composition of malts under different germination cycles and prepared with different processing methods[J]. *Fitoterapia*, 2023, 165: 105313.
[62] 孔娜, 潘少斌, 李长庚, 等. 不同提取方式对炒麦芽多糖抗氧化及降血糖活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(16): 122 – 129.
[63] LIU Y, LIAO WT, LIU XR, *et al*. Digestive promoting effect and mechanism of Jiao Sanxian in rats[J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 278: 114334.
[64] 杨延超, 徐德平. 大麦芽多糖的降血糖活性及结构解析[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(10): 1087 – 1092.
[65] ONWURAFOR E, UZODINMA E, ARONU C, *et al*. Proximate composition, antidiabetic and hypolipidemic activity of bread produced from wheat-sorghum base supplemented with mung bean malt and carrot flour[J]. *J Med Food*, 2022, 25(8): 863 – 868.
[66] 周威. 大麦芽提取物治疗实验性高泌乳素血症的研究[D]. 武汉: 湖北中医学院, 2009.
[67] 张玲, 邢丽, 孙国珍, 等. 不同炮制规格的麦芽回乳作用量效关系研究[J]. 天津医科大学学报, 2018, 24(6): 521 – 523.
[68] 贾蓓, 姜苗, 张馨予, 等. 消食药在肿瘤治疗中的运用规律[J]. 世界中医药, 2024, 19(17): 2704 – 2708.
[69] LIU JG, ZHAO HJ, LIU YJ, *et al*. Effect of selenium-enriched malt on hypoglycemia and regulatory hormones in diethylnitrosamine-induced hepatocarcinoma SD rats[J]. *Res Vet Sci*, 2009, 87(3): 438 – 444.
[70] 苏晓敏. 麦芽酚对化学性肝损伤的保护作用及其抗肿瘤活性[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.

编辑:姚佳敏/接受日期:2025 – 09 – 22