



粮油副产物 加工学



主 编 ○ 汪 勇

副主编 ○ 李爱军 欧仕益 仇超颖

LIANGYOU FUCHANWU JIAGONGXUE



暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

粮油副产物 加工学

LIANGYOU FUCHANWU
JIAGONGXUE

主 编 © 汪 勇

副主编 © 李爱军 欧仕益 仇超颖



暨南大学出版社
JINAN UNIVERSITY PRESS

中国·广州

图书在版编目 (CIP) 数据

粮油副产物加工学/汪勇主编;李爱军,欧仕益,仇超颖副主编. —广州:暨南大学出版社, 2019. 1

ISBN 978 - 7 - 5668 - 2096 - 9

I. ①粮… II. ①汪… ②李… ③欧… ④仇… III. ①粮食加工 ②油料加工 IV. ①TS210.4
②TS224

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 251267 号

粮油副产物加工学

LIANGYOU FUCHANWU JIAGONGXUE

主 编: 汪 勇 副主编: 李爱军 欧仕益 仇超颖

出 版 人: 徐义雄

策划编辑: 苏彩桃

责任编辑: 黄 斯

责任校对: 刘雨婷

责任印制: 汤慧君 周一丹

出版发行: 暨南大学出版社 (510630)

电 话: 总编室 (8620) 85221601

营销部 (8620) 85225284 85228291 85228292 (邮购)

传 真: (8620) 85221583 (办公室) 85223774 (营销部)

网 址: <http://www.jnupress.com>

排 版: 广州市天河星辰文化发展部照排中心

印 刷: 湛江日报社印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 12.5

字 数: 300 千

版 次: 2019 年 1 月第 1 版

印 次: 2019 年 1 月第 1 次

定 价: 42.00 元

(暨大版图书如有印装质量问题, 请与出版社总编室联系调换)

序

我国是粮油生产和加工大国。据国家粮油信息中心提供的资料,2017年,我国粮食总产量达61 791万吨,其中小麦产量12 977万吨,稻谷产量20 856万吨,玉米产量21 589万吨;以油菜籽、花生、大豆为代表的八大油料总产量突破了6 000万吨,大豆生产和进口总量超过10 000万吨。

粮油加工过程中会产生大量的副产物,如稻壳、麸皮、油脚等。稻壳占种子质量的20%左右,大豆皮占6%~8%,麦麸、麦胚占14%~25%,玉米皮占6%~7%(在玉米淀粉加工过程中会产生约30%的副产物)。这些副产物产量巨大且相对集中,是优质的可再生资源,实现副产物加工和增值利用符合国民经济持续发展的要求。

稻壳和麸皮类副产物主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,并含有丰富的生物活性成分酚酸,如阿魏酸和对香豆酸等。油脂加工副产物油脚中富含维生素E、植物甾醇和卵磷脂等。近年来,我国在粮油副产物加工和综合利用领域取得了可喜的成绩。科研人员紧密结合产业,利用粮油加工副产物开发了系列功能性食品配料,涌现了一批专业化企业。但遗憾的是,目前还没有一部系统介绍粮油副产物加工和增值利用的著作。

暨南大学科研团队在粮油副产物增值加工领域做了许多卓有成效的工作,令人欣慰的是,他们即将出版《粮油副产物加工学》一书。该书详细介绍了粮油副产物的化学组成、功能成分及其在食品、医药和饲料工业中的应用,以及现代加工制备技术,可作为高校本科生和研究生的教材。同时该书力图从产业化的角度探讨我国粮油副产物的增值加工,对相关从业人士具有重要参考价值。



2018年7月

① 赵谋明,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,华南理工大学食品科学与工程学院教授。

前 言

我国是粮油生产和加工大国。粮油加工过程中产生了大量的副产物，如稻壳、麸皮、油脚等。由于粮油加工企业的加工量大，造成大量副产物堆积，给企业带来较大负担，甚至污染环境；然而副产物产量集中又为开展副产物大规模增值利用提供了得天独厚的条件。

粮油加工副产物富含食品功能因子，如膳食纤维、酚酸、二十八烷醇、植物甾醇、磷脂、维生素等；纤维中的木聚糖还可通过生物技术转化为功能性低聚糖。我们一直致力于粮油加工副产物的综合利用，开发了系列制备技术和产品。经过十多年的工作积累，我们将相关研究成果进行总结，出版《粮油副产物加工学》一书，以飨读者。

本教材共 11 章，分别介绍了酚酸、膳食纤维、低聚木糖、低聚糖阿魏酸酯、木糖醇、谷维素、维生素 E、植物甾醇、磷脂、二十八烷醇、木酚素等的性质、结构、功能和制备技术。本书可作为高校本科生和研究生的教材，也可作为从事粮油加工副产物研究和开发的科研人员、企业技术人员的参考书。

蔡芸、杜木香、刘蔓蔓、万分龙、吴太钢、姚胜文、张振华、赵金利、赵升强（按姓氏拼音排序）等参与了本书的编写，李爱军和仇超颖对全书进行了修改、校正。全书由汪勇、李爱军负责统稿。华南理工大学赵谋明教授对本书的编写给予了悉心指导并拨冗审阅。暨南大学出版社在本书的出版过程中给予了大力支持，使本书得以和读者见面。在此，谨向所有为本书的编写和出版付出辛劳的人们表示衷心的感谢！

由于水平所限，加之时间仓促，难免会出现一些缺点和错误，恳请同仁和读者批评指正。

编 者
2018 年 7 月

目 录

CONTENTS

序	1
前 言	1
绪 论	1
第一章 酚 酸	6
第一节 概 述	6
第二节 农作物中的酚酸	7
第三节 植物细胞壁中酚酸的构成	12
第四节 酚酸的功能	14
第五节 酚酸的应用	16
第六节 酚酸的制备	18
第二章 膳食纤维	25
第一节 膳食纤维的分类	25
第二节 膳食纤维的资源	27
第三节 膳食纤维的组成和结构	29
第四节 膳食纤维的理化特性	33
第五节 膳食纤维的生理功能	35
第六节 膳食纤维的应用	40
第七节 膳食纤维的制备	42
第八节 膳食纤维的检测方法	45
第九节 膳食纤维推荐摄入量	47

第三章 低聚木糖	49
第一节 低聚木糖的结构和理化性质	49
第二节 低聚木糖的生理功能	50
第三节 低聚木糖的应用	52
第四节 低聚木糖的制备	54
第五节 木聚糖酶	61
第四章 低聚糖阿魏酸酯	63
第一节 低聚糖阿魏酸酯的组成与结构	63
第二节 低聚糖阿魏酸酯的吸收与代谢	69
第三节 低聚糖阿魏酸酯的功能	70
第四节 低聚糖阿魏酸酯的制备	72
第五节 低聚糖阿魏酸酯的研究展望	73
第五章 木糖醇	75
第一节 木糖醇的结构和理化性质	75
第二节 木糖醇的功能	76
第三节 木糖醇的应用	77
第四节 木糖醇的制备	78
第六章 谷维素	81
第一节 概 述	81
第二节 植物中的谷维素	81
第三节 谷维素的成分、结构及代谢特点	82
第四节 谷维素的生理功能	83
第五节 谷维素的应用	87
第六节 谷维素的制备	92
第七节 展 望	95
第七章 维生素 E	96
第一节 维生素 E 的种类与结构	96
第二节 自然界中的维生素 E	97
第三节 维生素 E 的生理功能	99
第四节 维生素 E 的应用	103
第五节 维生素 E 的制备	106
第八章 植物甾醇	114
第一节 植物甾醇的种类与结构	114

第二节	自然界中的植物甾醇	116
第三节	植物甾醇的生理功能	119
第四节	植物甾醇的应用	124
第五节	植物甾醇的制备	128
第九章	磷 脂	133
第一节	概 述	133
第二节	磷脂的种类与结构	133
第三节	磷脂的性质	138
第四节	自然界中的磷脂	140
第五节	磷脂的功能及其应用	147
第六节	磷脂的制备	157
第七节	天然磷脂的化学改性	161
第十章	二十八烷醇	166
第一节	二十八烷醇的结构和性质	166
第二节	二十八烷醇的主要来源	167
第三节	二十八烷醇的生理功能	169
第四节	二十八烷醇在食品工业中的应用	171
第五节	二十八烷醇的制备	172
第六节	二十八烷醇的检测方法	175
第七节	展 望	176
第十一章	木酚素	177
第一节	木酚素的结构、性质与分类	177
第二节	木酚素在植物中的分布及其含量	178
第三节	木酚素的生理功能	179
第四节	木酚素的应用	182
第五节	木酚素的制备	184
参考文献		187

绪 论

我国粮油副产物资源丰富，每年在粮食和油脂加工过程中会产生大量的副产物，如稻壳、麸皮、油脚等。稻壳占种子质量的 20% 左右，大豆皮占 6% ~ 8%，麦麸、麦胚占 14% ~ 25%，玉米皮占 6% ~ 7%（在玉米淀粉加工过程中会产生约 30% 的副产物）。由于粮油加工企业的加工量大，造成大量副产物堆积，给企业带来较大负担，甚至污染环境。但副产物产量集中又为开展副产物加工和大规模增值利用提供了得天独厚的条件。开展粮油副产物综合利用，提高粮油副产物加工技术水平，变无用为有用，解决粮油加工过程中的环境污染问题，已成为当今粮油加工业面临的重要课题。

一、粮油加工副产物的概念和种类

粮食、油脂是人类赖以生存的主要农产品，也是主要的食物来源，它们含有人体生长发育所需要的碳水化合物、蛋白质、脂肪及其他多种营养成分。粮油原料的 70% ~ 80% 经过加工提取，成为成品粮油或食品工业的原料，但还有 20% ~ 30% 的成分目前还不能直接或间接地成为人类的食物，如皮壳、纤维等。粮油原料中同时含有碳水化合物、蛋白质、脂肪等营养物质，有时以其中的某一种营养物质为主要提取和加工对象，而其他营养物质和一些功能性成分就可能成为副产物。因此，副产物其实是相对主产物而获得的名称，有时副产物的利用价值并不比主产物小。例如，以花生为原料提取花生油的产业中，花生油是主产物，花生中的蛋白质、碳水化合物及某些功能性成分等都是副产物，这些副产物的利用价值甚至有可能超过主产物。

目前，粮油加工的副产物主要包括：粮食原料籽粒的皮壳经碾磨加工形成的稻壳、米糠、麸皮；油料提取油脂后形成的饼粕；玉米等粮食淀粉加工分离出来的皮渣纤维；油脂精炼形成的油脚、皂脚；粮油精深加工形成的含可溶性成分的废液等。随着粮油原料各级产品的不断深入加工，又有新的副产物被分离出来，如淀粉糖发酵后的醪糟、葡萄糖结晶后的废糖蜜等。

二、粮油加工副产物中的功能成分

粮油加工副产物是巨大的功能性食品配料来源。麸皮类副产物含有丰富的纤维多糖、抗氧化剂、二十八烷醇等，油脂副产物含有丰富的不饱和脂肪酸、磷脂、维生素 E 等。

1. 酚酸

酚酸是植物体内一类具有酚类基团且影响植物生长发育的有机酸。酚酸按其结构分为两类：羟基苯甲酸及其衍生物和羟基肉桂酸及其衍生物。羟基苯甲酸衍生物主要有没食子酸、香草酸、丁香酸及原儿茶酸；羟基肉桂酸衍生物主要有阿魏酸、对香豆酸等。植物细胞壁中存在的主要是羟基肉桂酸衍生物，以阿魏酸和对香豆酸为主。其中阿魏酸在日本可用作食品抗氧化剂和防腐剂，在我国可用于保健食品。这两种酚酸同时也是医药、化妆品的原料。

2. 膳食纤维

膳食纤维是指能抗人体小肠消化吸收，而在人体大肠能部分或全部发酵的可食用的植物性成分、碳水化合物及其相类似物质的总和，包括多糖、寡糖、木质素以及相关的植物物质。根据其理化性质可以分为可溶性和不溶性两类，可溶性膳食纤维主要有豆胶、果胶、树胶、藻胶和植物黏胶等，在豆类、水果、海带中含量较高；不溶性膳食纤维一般包括纤维素、部分半纤维素和木质素等，存在于谷类、豆类的外皮和植物的茎、叶部等。

3. 低聚木糖

低聚木糖具有良好的理化特性，有效用量小，除具有功能性低聚糖的一般特性外，其物化性质十分稳定，对热、酸都具有很高的稳定性，室温下储藏稳定性较好，具有降低水分活度及防止冻结等特点，可以用于多类食品体系。麸皮纤维由纤维素和半纤维素组成，其中阿拉伯木聚糖为半纤维素的主要组成成分，利用阿拉伯木聚糖制备低聚木糖是目前的发展热点。

4. 低聚糖阿魏酸酯

低聚糖阿魏酸酯是一种新资源功能性食品，是阿魏酸的羧基与低聚糖中不同位置的糖羟基酯化而形成的一类化合物，又称阿魏酰低聚糖。由于它同时含有低聚糖和具有多种功能特性的阿魏酸，在结肠中被微生物释放后兼具阿魏酸和低聚糖的功能，是一类很有开发潜力的功能性食品配料。2010年，从麦麸制备的低聚糖阿魏酸酯获得美国FDA认可。

5. 木糖醇

木糖醇，也称戊五醇，白色结晶或结晶性粉末，微甜，极易溶于水，微溶于乙醇和甲醇，熔点 $92^{\circ}\text{C} \sim 96^{\circ}\text{C}$ ，沸点 216°C ，热值 $16.72\text{J}/(\text{g} \cdot \text{k})$ 。木糖醇是一种天然、健康的甜味剂，在自然界中广泛存在于各种水果、蔬菜、谷类之中，但含量很低。

6. 谷维素

谷维素是由环木菠萝醇类和甾醇类阿魏酸酯所组成的一类天然结合脂，主要存在于米糠油、稻谷胚芽油、玉米胚芽油、小麦胚芽油和菜籽油等植物油料中，其成分随稻谷种植的气候条件、稻谷品种及植物油提取的工艺条件不同而略有差异。谷维素无臭无味，在常温下为白色或类白色粉末，难溶于水，可溶于甲醇、乙醇、丙酮、乙醚、冰醋酸等有机溶剂。谷维素作为一种结合脂，其结晶形式与溶剂的种类、温度、pH值等密切相关。谷维素在甲醇或甲醇丙酮混合溶剂中的结晶形状为针状晶体，在酸性甲醇溶剂中的晶体为粗粒状，在丙酮的单一溶剂中的结晶形态为板状晶体。

7. 维生素E

维生素E，又名抗不育维生素或生育酚，一般为淡黄色油状液体，属于脂溶性维生

素,是人类和动物必需的一种微量营养素。维生素 E 主要存在于植物油中,尤其是在谷物种子的胚芽油和大豆油等油脂中含量比较丰富。维生素 E 是苯并二氢呋喃的衍生物,通常是生育酚类化合物的总称。目前已知的维生素 E 有八种同分异构体,分别是 α 、 β 、 γ 、 δ 生育酚及其相应的生育三烯酚。其中常见的有四种,它们的化学结构式因苯环上接的基团 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 不同而稍有差异,相应分成 α 、 β 、 γ 和 δ 等同系物。

8. 植物甾醇

甾醇是一种广泛存在于植物细胞与组织膜结构中的天然活性物质,也是多种激素、维生素 D 及甾族化合物合成的前体物质。天然植物甾醇种类繁多,主要有 β -谷甾醇、豆甾醇、菜油甾醇和菜籽甾醇等,其中以 β -谷甾醇为主,占总植物甾醇的 60%~90%,其次为豆甾醇及菜油甾醇。某些植物中还含有芸薹甾醇、燕麦甾醇、菠菜甾醇、钝叶大戟甾醇、芦竹甾醇、环木菠萝烯醇和 24-亚甲基环木菠萝醇等。植物甾烷醇是植物甾醇的饱和形式,在植物中的分布相当有限,存在于油料籽和木浆替代品中,其结构与胆固醇和植物甾醇不同,环上碳-碳双键被氢化成为完全饱和的环结构,可通过氢化植物甾醇得到。

9. 磷脂

磷脂,也称磷脂类、磷脂质,是一类含磷酸根脂类的总称。磷脂是动植物中细胞膜、核膜、质体膜的基本组成成分。磷脂按来源分为植物磷脂和动物磷脂,植物磷脂源主要为大豆,而动物磷脂源主要是蛋黄。目前的商品“卵磷脂”一般是由大豆提取的多种磷脂的混合物。磷脂具有重要的营养和医用价值,被科学家和营养学家称为“健脑的黄金,养心的极品”“本世纪最伟大的保健食品”“头脑补助食品”和“天然之精神安定剂”等。

10. 二十八烷醇

二十八烷醇是天然存在的一元高级醇,主要以蜡酯的形式存在于许多植物的叶、茎、果实或表皮,其中蔗渣(蔗泥)、麦麸和米糠等副产物中都含有二十八烷醇。二十八烷醇具有增强体力、精力和耐力,提高应激能力、反应灵敏性、机体代谢率,改善心肌营养、机体氧利用率,降低血清胆固醇、甘油三酯含量及收缩期血压等功能。

11. 木酚素

木酚素又叫开环异落叶松酚二葡萄糖苷,黄褐色粉末,沸点 $99^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$,是与人体雌激素十分相似的植物雌激素。亚麻木酚素主要存在于亚麻籽中,其含量取决于亚麻品种、气候和生态条件,一般约占籽重量的 0.9%~1.5%,比其他已知含木酚素的 66 种食品高 75~800 倍。油料作物种子、谷物、蔬菜和水果中都含有木酚素。

除以上功能性食品配料外,还可利用粮油加工副产物开发制备植酸、肌醇、色素(如玉米黄色素)、生物能源等。

三、粮油加工副产物综合利用技术

1. 超临界流体萃取技术

超临界流体(Super Critical Fluid,简称 SCF)是指物质处于其临界温度(T_c)和临界压力(P_c)以上的一种物质状态。流体在临界点附近的物理、化学性质与在非临界状态有很大区别,其密度、介电常数、扩散系数、黏度和溶解度都有显著变化。

超临界流体萃取技术是利用溶剂在超临界状态时既具有液体的溶解能力,又具有气体般的传质能力来进行萃取分离的一种单元操作。在进行超临界萃取操作时,通过改变体系的温度和压力,从而改变流体密度,进而改变萃取物在流体中的溶解度以达到萃取、分离的目的。

在各种可作为超临界流体的物质中,CO₂最适于作为天然活性物质的萃取剂;同时,还可根据目标产物的特性,加入其他有机溶剂如乙醇、丙酮等改善其对物质的提取分离能力。

2. 膜分离技术

膜分离技术是利用具有选择透过性的薄膜,以压力差、浓度差或电位差为推动力,对双组分或多组分体系进行分离、分级、提纯或富集的新型分离技术。其中以压力差为推动力的膜分离过程分为微滤、超滤、纳滤与反渗透,四者组成了一个从固态微粒到离子的四级分离过程。如我们采用超滤和纳滤相结合的方法成功实现了从玉米皮中分离制备阿魏酸。

3. 分子蒸馏技术

分子蒸馏是一种特殊的液液分离技术,它依据不同物质分子运动平均自由程的差别实现分离。当液体混合物沿加热板流动并被加热,轻、重分子会逸出液面而进入气相,由于轻、重分子的自由程不同,因此,不同物质的分子从液面逸出后移动距离不同,若能恰当地设置一块冷凝板,则轻分子达到冷凝板被冷凝排出,而重分子达不到冷凝板沿混合液排出,从而达到物质分离的目的。

分子蒸馏分离技术具有以下优点:①操作温度较低(远低于沸点)、受热时间短、分离效率高,特别适宜于沸点高、热敏和易氧化物质的分离;②其分离过程为物理分离过程,可很好地保护被分离物质不被污染,且无污染物排放;③分离程度高于传统蒸馏及普通的薄膜蒸发器。

4. 超细粉体技术

粉体颗粒大小为0.1~10 μm为超细粉。超细粉体技术又称超微粉碎技术、细胞级微粉碎技术,指制备与使用超细粉体及其相关的技术,主要包括超细粉碎和精细分级等技术。目前的超细粉碎设备主要有气流磨、机械冲击式超细磨机、搅拌球磨机、振动球磨机、旋转筒式球磨机、塔式磨、旋风自磨机、离心磨、高压射流粉碎机等。其中气流磨、机械冲击式超细磨机、旋风自磨机等为干式超细粉碎设备;高压射流粉碎机、搅拌球磨机、振动球磨机、旋转筒式球磨机、塔式磨等既可以用于干式也可以用于湿式超细粉碎。精细分级可分为干式分级和湿式分级技术。

超细粉体技术主要用于中药制剂以提高药物的生物利用率和药效,也可用于制备高活性膳食纤维。

5. 微胶囊技术

微胶囊技术是将微量物质包裹在聚合物薄膜中的技术,是一种储存固体、液体、气体的微型包装技术。它将某一目的物(芯材)用各种天然的或合成的高分子化合物连续薄膜(壁材)完全包覆起来,依靠囊壁的屏蔽作用起到保护芯材的作用。微胶囊的直径一般为1~500 μm,壁的厚度为0.5~150 μm。微胶囊技术可以有效减少外界环境因素对活性物

质的影响,减少芯材向环境的扩散和蒸发,掩蔽芯材的异味,并对芯材起缓释作用。

微胶囊技术广泛应用于食品添加剂、乳品、糖果和饮料等。

6. 离子交换技术

离子交换技术是指利用离子交换树脂实现物质分离纯化的一种技术。离子交换树脂是一类带有功能基的网状结构的高分子化合物。按骨架结构不同,可分为凝胶型树脂和大孔型树脂;按所带功能基的不同,可分为阳离子交换树脂和阴离子交换树脂。离子交换技术广泛用于食品的脱盐、脱色,从而实现活性成分的分离纯化。如果待分离成分具有离子特性,也可采用离子交换技术直接分离。如制备酚酸时,碱解液中酚酸含量很低,可采用阴离子大孔树脂将酚酸吸附富集,而后采用醇酸洗脱液洗脱、浓缩而实现酚酸直接结晶。

7. 酶工程技术

酶工程技术主要指利用酶制剂处理副产品的技术。如可采用木聚糖酶、阿魏酸酯酶处理麸皮制备低聚糖、阿魏酸等功能性食品配料,采用脂肪酶改性磷脂,采用纤维素酶水解纤维素制备燃料乙醇等。利用纤维素酶、木聚糖酶处理纤维质促进纤维质的综合利用是国内外的发展趋势,目前发达国家和一些国际知名酶制剂公司都在该领域加大投入。

本书将重点讨论利用现代加工技术从粮油加工副产物中开发酚酸、膳食纤维、低聚木糖、低聚糖阿魏酸酯、木糖醇、谷维素、维生素E、植物甾醇、磷脂、二十八烷醇和木酚素等。

【思考题】

1. 粮油加工过程中产生哪些副产物?
2. 粮油加工副产物中包含哪些功能成分?

第一章 酚 酸

第一节 概 述

酚酸是植物体内一类具有酚类基团且影响植物生长发育的有机酸。其分布广泛，在水果、蔬菜以及谷物中均有发现，为植物自身生长过程产生的次级代谢产物。植物体内酚酸的种类和含量与其不同生长阶段和生长环境密切相关。

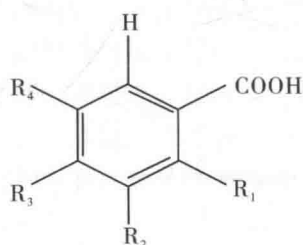


图 1-1 羟基苯甲酸及其衍生物

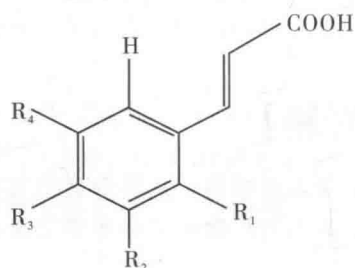


图 1-2 羟基肉桂酸及其衍生物

酚酸按其结构可分为两大类：羟基苯甲酸及其衍生物（见表 1-1）和羟基肉桂酸及其衍生物（见表 1-2）。羟基苯甲酸衍生物主要有香草酸、丁香酸、没食子酸及原儿茶酸等；羟基肉桂酸衍生物主要有咖啡酸、对香豆酸及阿魏酸等。在植物细胞壁中以羟基肉桂酸衍生物居多。

表 1-1 羟基苯甲酸及其衍生物

名称	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
苯甲酸	H	H	H	H
对羟基苯甲酸	H	H	OH	H
香草酸	H	OCH ₃	OH	H
没食子酸	H	OH	OH	OH
原儿茶酸	H	OH	OH	H

(续上表)

名称	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
丁香酸	H	OCH ₃	OH	OCH ₃
龙胆酸	OH	H	H	OH
藜芦酸	H	OCH ₃	OCH ₃	H
水杨酸	OH	H	H	H

表 1-2 羟基肉桂酸及其衍生物

名称	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
肉桂酸	H	H	H	H
邻香豆酸	OH	H	H	H
间香豆酸	H	OH	H	H
对香豆酸	H	H	OH	H
阿魏酸	H	OCH ₃	OH	H
芥子酸	H	OCH ₃	OH	OCH ₃
咖啡酸	H	OH	OH	H

第二节 农作物中的酚酸

谷物如小麦、荞麦、玉米和大米等或高淀粉含量的果蔬如马铃薯、甘薯和芋艿等是人类的主要能量和营养来源，其中，大米、小麦和玉米占世界食物来源的 50%，大米是亚太地区 17 个国家、南北美洲 9 个国家以及非洲 8 个国家的主食。随着世界人口数量的增加，农业发展将越来越迅速，2017 年，世界范围内玉米、小麦和大米的产量已分别达到了 10.3 亿、7.5 亿、5.0 亿万吨。这些农产品除了提供人们所需的碳水化合物、蛋白质和脂肪外，还提供了维生素、矿物质以及酚酸化合物。随着农产品的消耗，将会产生越来越多的副产物如麸皮等，这将成为酚酸的重要来源。

酚酸广泛存在于植物的根茎叶等部位，在植物组织中大部分以结合态形式存在。不同作物中酚酸构成如表 1-3 所示。

表 1-3 不同作物中酚酸的构成

农作物	酚酸含量 (%)	
	游离态	结合态
玉米	15	85
小麦	25	75
燕麦	25	75
大米	38	62

一、大米中的酚酸

大米主要由胚乳、胚芽和麸皮构成，胚乳约占总重量的 80%，胚芽和麸皮因品种和产地而异，通常约占 10%。大米中含有大量的苯甲酸和肉桂酸类衍生物，主要是阿魏酸及其二聚体（见表 1-4），还含有单宁类物质。植物中酚酸化合物多存在于麸皮层，因而粗大米的抗氧化活性要高于精制大米。此外，有色大米抗氧化和清除自由基活性要高于白色大米，黑米因其高含量的酚酸而被认为是最有营养的大米。碾磨、烹饪以及浸泡等加工过程会造成酚酸的损失，且加工越精细，损失越严重。

表 1-4 大米中的酚酸化合物

	酚酸化合物含量（mg/g）	已鉴定酚酸种类
米糠	总酚酸：5.0	原儿茶酸 对羟基苯甲酸 对香豆酸 丁香酸
黄米糠	总酚酸：3.1~3.8	香草酸
紫米糠	总酚酸：8.6~45.4	咖啡酸 没食子酸 阿魏酸 香草醛
有色大米 棕米 红米	游离态酚酸：0.022 6~0.227 5 结合态酚酸：0.017 7~0.259	原儿茶酸 丁香酸 没食子酸 阿魏酸 对香豆酸 愈创木酚 对甲酚
黑米	总酚酸：3.453 7	邻甲酚 3,5-二甲苯酚 对羟基苯甲酸 香草酸 咖啡酸 芥子酸

(续上表)

	酚酸化合物含量 (mg/g)	已鉴定酚酸种类
白大米	游离态酚酸: 0.017 0 ~ 0.018 9 结合态酚酸: 0.003 3 ~ 0.027 2	原儿茶酸 丁香酸 没食子酸 阿魏酸 对香豆酸 愈创木酚 对甲酚 邻甲酚 3, 5 - 二甲苯酚

二、小麦中的酚酸

小麦是世界主要谷物之一,用于制作面条、面包、饼干等。小麦胚乳、麸皮及胚芽分别占总重量的 81% ~ 84%、14% ~ 16%、2% ~ 3%。麸皮中的酚酸对人类营养和健康有重要影响。酚酸在小麦中以游离态、结合态或化合态的方式存在(见表 1-5),但游离态含量很少,多与细胞壁多糖紧密相连。小麦种类不同,所含的酚酸种类也不一样,但发现的酚酸多为阿魏酸、对香豆酸和香草酸,只有少量的丁香酸和原儿茶酸。

表 1-5 小麦中的酚酸化合物

	酚酸化合物含量 (mg/g)	已鉴定酚酸种类
全麦粉	游离态酚酸: 0.196 6 ~ 0.260 2 结合态酚酸: 0.514 6 ~ 0.680 4	阿魏酸 对香豆酸
糯麦粉	游离态阿魏酸: 1.01 结合态阿魏酸: 2.40	香草酸 丁香酸
白面粉	游离态酚酸: 0.28 结合态酚酸: 0.34	原儿茶酸
红麦麸	游离态酚酸: 0.570 ~ 0.633 结合态酚酸: 3.201 ~ 3.396	对羟基苯甲酸 香草酸 咖啡酸 丁香酸 对香豆酸 阿魏酸 水杨酸