

# 小麦产后加工理论与技术研究

王志和 王绍中 李春喜 主编



中国农业科学技术出版社

# 小麦产后加工理论与 技术研究

王志和 王绍中 李春喜 主编

中国农业科学技术出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

小麦产后加工理论与技术研究/王志和, 王绍中, 李春喜  
主编. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2005.7

ISBN 7-80167-807-9

I. 小… II. ①王…②王…③李… III. 小麦-粮食  
加工-研究 IV. S512.109

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 051580 号

---

责任编辑  
责任校对  
出版发行  
经 销  
印 刷  
开 本  
印 数  
版 次  
定 价

冯凌云  
马丽萍 张京红 贾晓红  
中国农业科学技术出版社 邮编: 100081  
新华书店北京发行所  
北京奥隆印刷厂  
787mm×1092mm 1/16 印张: 22.75  
1~1 550 册 字数: 540 千字  
2005 年 7 月第一版, 2005 年 7 月第一次印刷  
56.00 元

《小麦产后加工理论与技术研究》  
编辑委员会

主任	姚聚川					
副主任	张同立	张广智	孟少辉	王树山	马万杰	戚世钧
	蒋茂森	原文涛	王国华	马世民	徐公民	韦万根
	王凤成					
成员	李洪昭	焦贵安	李清泉	陈发舟	周俊杰	百广安
主编	王志和	王绍中	李春喜			
副主编	刘仲敏	田云峰	郭祯祥	刘万兴	李宝红	董伟才
	武生平	李明智	邹德庆	黄继红	秦中庆	曹维让
	赵淑章	马玉霞	赵虹	胡新	陈长海	张静
成员	白玉贵	陈书广	苏永涛	潘晓东	王浩	齐玉民
	付玉节	戴清杰	屈俊峰	冯振扬	刘仲栋	王海明
	聂国兴	姜丽娜	邵云	陈晓辉	曹明	张志田
	张新举	刘朴	王振民	徐远征	赵荣先	肖成国

# 前 言

小麦是世界上第二大粮食作物，年总产 6 亿 t 左右。随着科学技术的发展和人类生活水平的提高，世界上以小麦为原料的加工工业快速发展，发达国家的小麦产后加工已占到总产量的 90% 以上；用于制作不同食品的专用小麦面粉已达 100 多种；小麦产后加工产品已被广泛用于医药、化工、酒类、饲料等多种行业，促进小麦大幅度增值。我国是产麦大国，年产量约占世界总产的六分之一。由于农村人口比例大，小麦产后加工业与发达国家相比有一定差距，尤其作为我国第一产麦大省的河南省，小麦总产虽居全国第一，但小麦产后加工业与东部发达省份相比仍然相对滞后，在“九五”连续几个高产年份，还造成小麦暂时的、阶段性的积压。面对当时形势，省政府一方面引进投产小麦制作乙醇，生产乙醇汽油和小麦提取谷源粉等项目，同时，加大对小麦产后加工有关行业的科技投入，根据行业发展的需要，着重加强对小麦制作味精、小麦制作啤酒、小麦用作饲料以及小麦专用粉生产中的关键技术难题进行攻关研究，在“十五”开始，设立了河南省历史上第一个粮食产后加工重大科技攻关项目——“小麦产后精深加工技术研究与产业化开发”。河南省科技厅组织有关高校、科研院所以及十几家企业联合攻关。历时 3 年，在有关小麦制作味精、小麦啤酒、小麦抗营养因子和专用小麦粉等行业的关键技术研究和开发应用，获得了突破性进展，解决了一批技术难题，有几项已达到国内领先水平。这些研究成果和产品开发有力的推动了企业的科技进步和效益增长，充分显示出科技在企业生产中的重要作用。

为了把几年来的研究成果加以汇总，并在相关企业推广应用，我们编写了《小麦产后加工理论与技术研究》一书。该书全面展示了以上 4 个方面的最新研究成果，从理论到具体技术都作了比较系统的阐述，是一本理论与技术相结合的著作，可以作为相关企业技术人员在实际生产中具体应用，并可作为大、专院校师生教学的参考资料。我们期望该书的问世将对小麦产后加工业的发展起到一定的推动作用。

由于小麦产后加工是一个十分庞大、复杂的行业，涉及的学科很广，参加研制工作和本书编写人员的水平有限，书中的错漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 理论与技术研究篇

第一章 小麦抗营养因子及其降解技术的研究 .....	( 3 )
第二章 小麦完全替代大麦啤酒酿制技术研究 .....	(66)
第三章 小麦生产味精及副产物综合利用技术新进展 .....	(81)
第四章 现代制粉工艺介绍与分析 .....	(113)
第五章 主食面粉品质评价方法的研究 .....	(122)
第六章 “雪燕”系列食品专用粉的研究与开发 .....	(127)
第七章 东方面条产业现状与技术进展 .....	(138)

## 综 合 篇

小麦产后精深加工技术与产业化开发总体实施方案 .....	(149)
小麦抗营养因子降解技术及小麦配合饲料研究与产业化开发专题实施方案 .....	(157)
小麦制作啤酒关键技术研究及小麦啤酒研制与开发专题实施方案 .....	(161)
小麦专用粉制粉技术、新型面食制品加工技术与开发专题实施方案 .....	(163)
小麦替代玉米生产味精关键技术与产业化开发 .....	(167)
小麦产后精深加工技术与产业化开发项目总结报告 .....	(170)
“小麦啤酒”酿造技术研究专题总结 .....	(182)
河南金星啤酒集团有限公司企业标准 .....	(185)
小麦专用粉制粉技术与开发专题总结 .....	(187)
小麦专用粉制粉技术与产业化开发专题总结 .....	(191)
小麦专用粉制粉技术、新型面食品加工技术研究专题总结 .....	(193)

## 论 文 篇

简论强化分级的制粉新技术 .....	(199)
小麦麸皮的开发与利用 .....	(203)
小麦胚乳结构中蛋白质分布及其对面团流变学特性影响的研究 .....	(208)
酶制剂对面团流变学特性及面食品制作品质的影响 .....	(211)
小麦粉破损淀粉含量与面团流变学特性及降落数值的关系 .....	(216)
小麦淀粉品质的研究 .....	(225)
郑农 16 小麦加工品质研究 .....	(230)
国产面包小麦陕优 225 制粉工艺中各系统粉流品质的研究 .....	(235)
不同种植条件对面包小麦陕优 225 烘焙品质的影响 .....	(243)
全国冬麦区优质小麦品种在郑州地区种植的表现 .....	(248)
纯小麦啤酒的研制 .....	(253)

小麦麦芽酿造啤酒技术及前景展望·····	(262)
河南若干小麦品种籽粒戊聚糖含量的初步研究·····	(271)
不同生态条件下小麦籽粒中戊聚糖含量的研究·····	(277)
小麦灌浆过程中籽粒戊聚糖含量变化规律的初步研究·····	(281)
小麦籽粒中植酸、戊聚糖含量及其与相关性状关系的研究·····	(285)
木聚糖酶产生菌的选育及发酵条件研究·····	(291)
黑曲霉产木聚糖酶稳定性的研究·····	(299)
离子互作对木聚糖酶活性影响的研究·····	(305)
用正交法探讨木聚糖酶活性的最佳测定条件·····	(310)
待测酶液制备方法对饲用木聚糖酶活性测定结果的影响·····	(315)
不同浸提方案对饲用木聚糖酶活性测定结果的影响·····	(320)
新型饲料添加剂的研制与应用效果·····	(325)
底物浓度、DNS 量对木聚糖酶活性测定结果的影响·····	(328)
小麦中的戊聚糖含量及添加木聚糖复酶对鸡表观代谢能值和养分消化率的影响·····	(331)
小麦基础日粮添加木聚糖酶对蛋鸡生产性能的影响·····	(336)
小麦戊聚糖含量及添加木聚糖酶对鸡表观代谢能值和养分消化率的影响·····	(340)
小麦加酶对保育和生长猪生产性能的影响·····	(344)
麦类作物的抗营养因子及其降解酶的研究进展·····	(348)
鱼用谷物饲料中抗营养因子及其降解方法·····	(353)

# 理论与技术研究篇





# 第一章 小麦抗营养因子及其降解技术的研究

## 第一节 小麦抗营养因子的概念及其研究背景

小麦是我国重要的粮食作物。目前我国小麦种植面积和总产量均居世界之首。1998年全国小麦种植面积达到3 005.7万  $\text{hm}^2$ ，占世界小麦种植面积22 437.4万  $\text{hm}^2$  的 13.40%。小麦总产量为12 392万 t，占世界小麦总产量58 884.2万 t 的 21.04%。河南省是我国最主要的小麦产区，常年种植面积均在 480 万  $\text{hm}^2$  以上，2003 年小麦播种面积 480.46 万  $\text{hm}^2$ ，总产 2 292.5 万 t，分别占全国麦播面积的 21.84% 和总产的 26.51%。随着农业高新技术的开发与日臻成熟，小麦产量稳步提高，除了满足人民群众口粮和相关食品工业需要外，如何促进小麦转化、加大小麦产后加工链条、增加附加值是提高小麦市场竞争力、扩大农民收入的重要问题。在这种形势下，一方面要加强小麦产后加工技术和相关工艺的研究和新产品的开发；另一方面可将小麦作为饲料，通过畜牧和水产养殖业将其转化为动物性产品。这对推动我国畜牧业和农产品加工业的发展、改善人民生活具有重要意义。

随着科技的进步，人民的生活水平正在日益提高，膳食结构也发生着重大变化。粮食产品在人们日常生活中所占份额愈来愈小，取而代之的是肉、蛋、奶等营养价值比较高的动物性产品。据联合国粮农组织（FAO）1998 年统计，标志人民生活水平的动物性蛋白质世界人均日摄入量为 24.7g，美国为 70.9g，日本为 46.4g，我国仅为 11.4g。因此，必须大力发展养殖业以改善我国人民的生活水平。但现实状况则因饲料原料的不足，其中能量饲料缺口预测 2000~2020 年将达 0.24 亿~0.83 亿 t，严重制约着我国养殖业的发展。我国长期以来都以玉米作为主要能源饲料，对玉米的依赖性较大，而对其他各种饲料资源的研究开发却不够，造成玉米供应日趋紧张。而且，我国能量饲料的缺口目前来看，仅靠玉米增产显然难以弥补。这一现状不仅满足不了养殖业对饲料的需要，而且饲料品种单一。因此，开发新的饲料原料成为发展养殖业的首要问题。

小麦是我国人民的主食，极少作饲料使用，但欧洲北部国家的能量饲料主要是麦类，其中小麦的用量较大。随着小麦生产水平的提高和产后加工转化的发展，以及人民生活膳食结构的改变，小麦在饲料工业中的应用量将会增加。据统计，我国每年可开发利用的小麦胚芽量高达 400 万 t，小麦麸皮则可达 2 000 万 t 以上。从经济效益和社会效益看，在小麦主产区用小麦作饲料原料有减少运输、降低加工成本、利于储藏等优点，日益为饲料界所关注。小麦作为饲料有很多优点，一是小麦营养价值比玉米高，我国小麦粗纤维含量和玉米相当，粗脂肪含量低于玉米，但蛋白质含量高于玉米，是谷类籽实中蛋白质含量较高者，小麦的能量也较高，仅次于玉米，在能量饲料中属高档配合饲料原料，且其含维生素 B 族和维生素 E 较多；二是小麦的磷含量较玉米高，小麦中磷的可利用率也高于玉米；三是小麦的含水量较低，便于储藏，以小麦为主的饲料较少霉变等等，总之对各种动物小麦都具有较高的饲喂价值。杜宝忠（1999）认为小麦与玉米相比，作饲料有很多优点，可作为肥育猪的主要饲料。吴灵英等（1999）通过小麦与玉米对肉鸡增重效果的比较研究，也得出小麦可作为肉鸡主要饲料的结论。曾亚文（1992）认为大麦最主要的用途是饲用，占其消费总量的 70% 以上。但是小麦等作物中存在抗营养因子（anti-nutritional factors, ANFs），主要指阿拉伯木聚糖即木聚

糖、 $\beta$ -葡聚糖和植酸，限制了小麦在动物饲料中的广泛应用。ANFs 通过干扰养殖动物体内的消化过程起到抗营养作用，主要表现在以下几个方面：降低饲料蛋白质消化利用率；降低微量元素的溶解度；增加维生素的需要量。如何降解麦类作物中的 ANFs，改善饲料的营养价值，是亟待解决的一个重要课题。

### 1.1 抗营养因子概述

抗营养因子普遍存在于植物界 (Liener, 1980; Cheeke 和 Shull, 1985; Huisman, 1989)，是自然界长期选择的结果。抗营养因子作为一种“生物农药”，可以保护植物植株及其籽粒免受霉菌、细菌、病毒、昆虫和鸟类的侵害 (Sequerira, 1978; Liener 和 Kakade, 1980; Broadway, 1986)，但对畜禽却是有害的。如果饲料中的抗营养因子含量超过畜禽的耐受水平，将对畜禽的生产性能和健康均产生不利影响。

一种植物可以含有多种抗营养因子，如大豆中含有蛋白酶抑制因子、植物凝集素、脲酶等多种抗营养因子，小麦中含有木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖以及植酸等抗营养因子；同一种抗营养因子也可以存在多种植物中，如单宁存在于高粱、油菜、稻子、豆类等植物中，而木聚糖主要存在于小麦、黑麦等禾谷类作物中。

随着人们对抗营养因子认识的加深，对抗营养因子的定义也不断更新。Gontzea 和 Sutzescu (1968) 将抗营养因子定义为：植物产生的并以不同机制对动物产生抗营养作用的物质。Huisman 等 (1991) 指出，抗营养因子的抗营养作用主要表现为降低饲料中营养物质的利用率、动物的生长速度和动物的健康水平，把具有抗营养作用的这些物质称为抗营养因子。现在，把对饲料中营养物质的消化、吸收和利用产生不利影响的物质以及影响畜禽健康和生产能力的物质，统称为抗营养因子。

Liener (1980)、Cheeke 和 Shull (1985) 从抗营养因子的不同抗营养作用出发，将饲料中的抗营养因子分为：①抑制蛋白质消化和利用的物质：如蛋白酶抑制剂 (protease inhibitor, PIs)，植物凝集素 (phytohemagglutinins, PHA)，多酚类物质 (单宁和酚酸)；②降低能量利用率的物质：主要指非淀粉多糖 (non-starch polysaccharides, NSP) 等；③降低矿物质和微量元素利用率的物质：如植酸即肌醇六磷酸；④颌颌维生素、增加其需要量的物质：如双香豆素、抗维生素 B<sub>1</sub> 酶等以及其他具有抗营养作用的物质等。

按抗营养因子的来源不同，可把抗营养因子分为：植物中的抗营养因子和动物副产品中的抗营养因子，其中谷类作物 (小麦、大麦、燕麦等) 中的抗营养因子主要是非淀粉多糖。

### 1.2 小麦抗营养因子的种类

小麦籽粒中含有多种 ANFs，非淀粉多糖 (NSP) 是最重要的一类。NSP 根据其是否溶于水可分为水溶性非淀粉多糖 (soluble non-starch polysaccharides, SNSP) 和不溶性非淀粉多糖 (insoluble non-starch polysaccharides, INSP)。小麦中的 NSP 主要是木聚糖和  $\beta$ -葡聚糖，其中以木聚糖为主。小麦中还存在其他 ANFs，如植酸及其盐类，既是难消化利用的磷源，又是一种抗营养因子。

**1.2.1 木聚糖 (xylan)** 小麦籽粒中的木聚糖是一类由 D-木糖单位为主干 (由  $\beta$ -1,4-吡喃木糖残基组成) 和 L-阿拉伯糖分支 (带有  $\alpha$ -1,2 和  $\alpha$ -1,3 阿拉伯呋喃残基) 所组成的具分支结构的聚合物，具体结构如图 1-1 所示。由于它是由阿拉伯糖和木糖两种单糖组成，故也叫阿拉伯木聚糖 (arabinoxylans) 或戊聚糖 (pentosan)。根据其在水中溶解性能的差异，可分为两

大类：水溶性阿拉伯木聚糖（water extractable arabinoxylans, WEAX）或称水溶性戊聚糖（water soluble pentosan）和水不溶性阿拉伯木聚糖（water unextractable arabinoxylans, WUAX）或称水不溶性戊聚糖（water insoluble pentosan）。

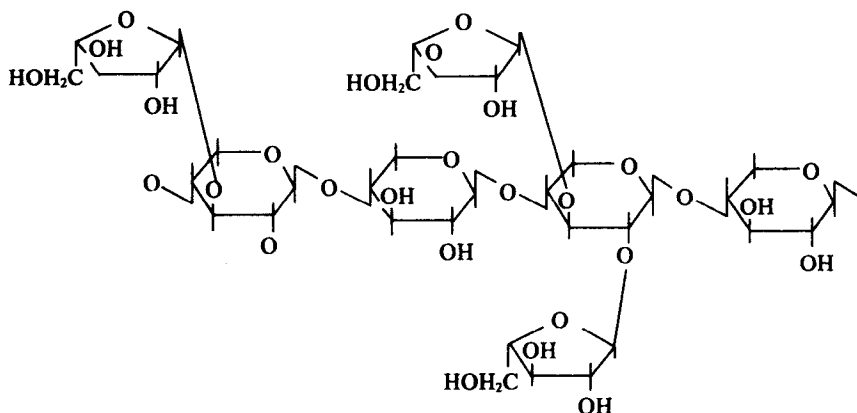


图 1-1  $\alpha$ -(1→2,3)-L-阿拉伯糖基-(1→4)-D-木聚糖

**1.2.1.1 水溶性木聚糖 (WEAX)** 从化学组成上看, WEAX 主要成分为木糖和阿拉伯糖, 且 WEAX 聚合体还含有少量半乳糖和蛋白质。对于 WEAX 的化学结构, Perlin (1951) 最早研究了小麦面粉中获得的主要水溶性木聚糖结构, 发现它由 L-阿拉伯糖和 D-木糖组成, 其主链是以 $\beta$ -1,4 糖苷键结合的 D-吡喃木糖组成, 在 2 号或 3 号碳位上具有一个脱水 L-呋喃阿拉伯糖残基。Ewald 等 (1959) 进一步指出, 阿拉伯糖分支主要存在于单独的木糖残基或两个连续的木糖残基上, 通常很少出现在 3 种相邻的残基, 而不出现在 4 种或更多相邻的残基上。近年来, 应用核磁共振光谱分析 WEAX 中阿拉伯糖在木糖上的取代情况发现, 阿拉伯木糖链上的双取代残基, 既有单独存在, 又有配对存在, 同时发现不同分子量大小水溶性阿拉伯木聚糖在结构上相差甚微。从水溶性小麦粉 WEAX 的结构来推断, WEAX 的溶解性主要是由侧链造成的, 因为除去该阿拉伯糖侧链后, 得到的将是不溶性的木聚糖多聚体。

**1.2.1.2 水不溶性木聚糖 (WUAX)** WUAX 在小麦胚乳中占 2.4%。Mechan 等研究发现, WUAX 结构与 WEAX 相似, 但分支较多。主链一般是以 $\beta$ -1,4 链结合的 D-吡喃木糖组成, 具有 L-呋喃阿拉伯糖侧链。侧链很特殊, 仅有一个单糖残基的长度, 如果是单取代, 侧链一般接在木糖残基的 3 号碳位上, 也可同时在 2、3 号碳位上发生取代。在他所研究的 WUAX 中, 约有 60% 的木糖残基是支链, 而且大约 30% 的分支同时发生在 2、3 号碳位上。

水不溶性木聚糖的单糖组成为 D-木糖占 53%, L-阿拉伯糖占 41%, 还有 6% 的 D-葡萄糖, 阿拉伯糖与木糖的比例为 0.77, 每 5 个 D-木糖单位中差不多有 4 个 L-阿拉伯糖, 分支程度较高。但不同品种小麦之间存在着一定的差异。Goldschmid 等 (1963) 用木聚糖内切酶来降解阿拉伯木聚糖, 发现其分支与相同类型的样品有很大偏差, 因此推测可能有更多的取代形式。Medcal J. 和 D. Appdonia 曾分别对小麦麸皮的木聚糖作过研究, 结果表明, 同胚乳中的木聚糖相比其分子分支程度更高、分子量也更大, 结构与水溶性木聚糖相似。

通常人们把水不溶性木聚糖称为半纤维素。其实半纤维素组成复杂, 除含木聚糖外, 还含有其他多糖。自然界中的木聚糖主要是由木糖通过 $\beta$ -1,4 糖苷键连接而成链状结构, 这种链状木聚糖还含有乙酰基、阿拉伯糖残基、葡萄糖醛酸残基等多种侧链, 在多数情况下己糖或己糖醛酸含量很少, 含有这两种成分的木聚糖称杂聚木糖。通常, 这种吡喃糖基主链与一

个或多个 $\alpha$ -左旋阿拉伯呋喃糖基在2位或3位取代而成,这称之为阿拉伯木聚糖。这种带侧链的木聚糖以氢键与纤维素结合共存于植物中或种子中。

**1.2.2  $\beta$ -葡聚糖 (glucan)** 与木聚糖相比,在小麦中 $\beta$ -葡聚糖含量居其次地位,而在大麦中则含量较高。 $\beta$ -葡聚糖是由右旋葡萄糖以 $\beta$ -构型连接的多聚物,往往通过 $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3),(1 $\rightarrow$ 4)糖苷键线性连接而成,这两种糖苷键线性连接形成 $\beta$ -葡聚糖聚合物,即通常所说的混合链 $\beta$ -葡聚糖。1977年,Fleming等阐述了 $\beta$ -葡聚糖的化学结构,认为 $\beta$ -吡喃葡萄糖是 $\beta$ -葡聚糖的基本结构,其结构如图1-2所示。 $\beta$ -葡聚糖也可分为水溶性和非水溶性两种,但水溶性占大多数。 $\beta$ -葡聚糖的溶解性受其结构中的(1,3)- $\beta$ 糖苷键的含量和聚合度的影响。水溶性 $\beta$ -葡聚糖中(1,3)糖苷键和(1,4)糖苷键含量之比为1:(2.5~2.6),而非水溶的 $\beta$ -葡聚糖中的相应糖苷键含量之比为1:4.2。水溶性 $\beta$ -葡聚糖约90%由(1,3)- $\beta$ 糖苷键随机连接起来的纤维三糖和纤维四糖构成,剩余的10%由(1,3)- $\beta$ 糖苷键连接的10个或10个以上(1,4)- $\beta$ 糖苷键组成的部分构成。在40 $^{\circ}$ C或65 $^{\circ}$ C条件下提取的水溶性 $\beta$ -葡聚糖分子量和黏度都较高,但二者在精细结构上却存在差异,65 $^{\circ}$ C条件下提取物分子中由纤维三糖或纤维四糖连接构成的部分较少,分子量也比40 $^{\circ}$ C条件下的提取物要低一些。

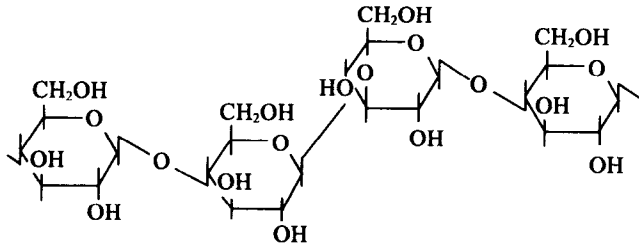


图 1-2  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3),(1 $\rightarrow$ 4)葡聚糖

**1.2.3 植酸 (phytic acid)** 植酸广泛存在于植物体中,是植物籽实中磷和肌醇的主要存在形式,在禾谷类作物的籽粒中含量丰富。植酸又名肌环己六醇-6-磷酸酯,属于维生素B族,分子式为 $C_6H_{18}O_{24}P_6$ ,分子量为660.08D,其结构如图1-3所示。

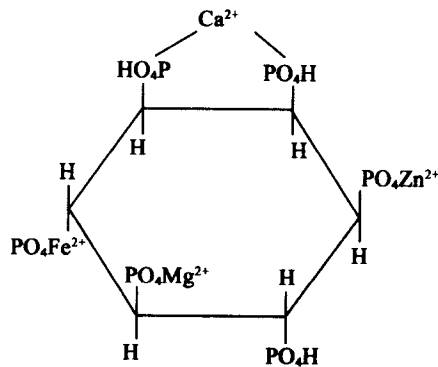


图 1-3 植酸(盐)结构图

植酸在植物体中一般不以游离的形式存在,而是与钙、镁、钾、钠、铁等金属离子结合,以复合盐类(与若干金属离子)或单盐(与一个金属离子)的形式存在,称为植酸盐。植酸盐在多数植物中是以植酸钙、镁复盐或称菲丁(phytin)的形式存在,但在大麦中主要是植酸钾、镁盐的形式。植酸也大量存在于各种饼粕中,在棉籽饼中植酸以钙镁盐或钾钙镁

盐的形式存在。邹宗柏等人研究发现,植酸与钙、镁的络合程度在很大程度上受 pH 值的影响。随着 pH 值的降低,络合程度降低,当  $\text{pH} = 7$  时,所有的植酸几乎都能与镁、钙反应,生成白色沉淀,而当  $\text{pH} < 4.5$  时,基本不络合。植酸也常与蛋白质络合,植酸常作为桥梁而将蛋白质与钙、镁等金属离子联合起来。植酸的复合盐类大多不溶于水,植酸与钾、钠、铁形成的单盐通常呈水溶性。植酸盐浓度最高期是在植物的成熟时期,在大多数植物原料中 60% ~ 80% 的磷以植酸磷形式存在。

### 1.3 麦类抗营养因子的含量及其影响因素

#### 1.3.1 麦类木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖的含量及其影响因素

1.3.1.1 麦类木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖的含量及分布 因品种、生长环境、生长阶段、加工储存条件等因素的影响,麦类作物中木聚糖与  $\beta$ -葡聚糖的含量差异较大,水溶性木聚糖、水溶性  $\beta$ -葡聚糖以及总木聚糖和  $\beta$ -葡聚糖的比值均有不同(见表 1-1)。

表 1-1 麦类作物中主要抗营养因子含量 (%)

作物种类	总木聚糖	$\beta$ -葡聚糖	总木聚糖/ $\beta$ -葡聚糖	水溶性木聚糖	水溶性 $\beta$ -葡聚糖
大麦	5.69	4.36	1.31	0.72	2.89
燕麦	7.65	3.37	2.27	0.51	2.13
小麦	6.63	0.65	10.2	1.04	0.67
黑麦	8.49	1.89	4.61	2.45	0.68
小黑麦	7.06	0.65	10.9	1.30	0.52

由表 1-1 可见,黑麦中的木聚糖含量最高,大麦和燕麦中的  $\beta$ -葡聚糖含量较高。从总木聚糖与  $\beta$ -葡聚糖的比值看,大麦和燕麦中的 NSP 以  $\beta$ -葡聚糖为主,小麦和小黑麦中则以木聚糖为主。从水溶性木聚糖看,小麦、黑麦、小黑麦中含量高,而大麦和燕麦中的水溶性  $\beta$ -葡聚糖较高。总之, $\beta$ -葡聚糖是大麦和燕麦的主要抗营养因子,木聚糖是小麦、黑麦和小黑麦的主要抗营养因子。

Jan A. Delcour 通过将小麦籽粒按颗粒大小分为 19 个部分,分别测其总木聚糖和水溶性木聚糖含量,发现总木聚糖和水溶性木聚糖在小麦籽粒内各个部位的含量分别为其干重的 1.44% ~ 30.66% 与 0.48% ~ 1.7%,其中麸皮 (bran) 内总木聚糖含量最高,而细麸粉 (shorts) 内水溶性木聚糖含量最高。同时对各部分测量灰分,发现在灰分含量低于 0.6% 时,总木聚糖、水溶性木聚糖含量与灰分之间均无相关性,而在灰分含量大于 0.6% 时,总木聚糖、水溶性木聚糖含量均随灰分含量升高而升高。一般籽粒外部灰分含量较高,可以得知籽粒内胚乳部分到外部麸皮部分木聚糖特别是总木聚糖含量有依次增加的趋势,并且木聚糖在谷物籽粒各个部位的结构是不均一的,分子内阿拉伯糖和木糖的比值 (A/X) 可表示其分子分支程度的高低。Jan A. Delcour 测定小麦籽粒 19 个不同部分 A/X 比值以及对 WEAX 的分离结果显示,外部麸皮比内部胚乳部分的木聚糖、水溶性木聚糖的阿拉伯糖取代基少,即 A/X 比值小。Ciaccio 和 D' Appolonia 对硬粒红色春麦面粉的研究得出一致的结论。

$\beta$ -葡聚糖存在于麦类饲料胚乳和糊粉细胞壁中,它并不是独立的物质,而是与其他组分紧密地结合在一起。麦类细胞壁是一种双向结构,其纤维素的微纤丝形成坚硬的骨架,并嵌入到类似凝胶的基质中,而基质则是由  $\beta$ -葡聚糖为主的多糖和糖蛋白组成,构成细胞壁的  $\beta$ -葡聚糖在其完整的细胞壁中是不溶于水的,但提取后则可变成可溶的亲水分子,说明聚合

物间一定存在相当多的交联结构。对于部分真菌,包括许多重要植物病原菌, $\beta$ -葡聚糖是其细胞壁的主要组分,它同几丁质一起构成了真菌细胞壁的网状骨架结构。离体试验表明, $\beta$ -1,3-葡聚糖酶能够有效抑制病原菌菌丝的顶端生长。

**1.3.1.2 麦类木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖的基因型和环境变异** 谷物饲料中的木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖含量变化范围较大,这种变化不仅出现在不同的谷物种类,而且同一谷物之不同品种也是如此。另外,环境条件等因素也影响木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖含量。L.Saulnier等(1992)研究了法国不同地点22个小麦品种木聚糖含量及其相应提取液黏度的变异情况。结果表明,不同品种间籽粒水溶性木聚糖、总木聚糖含量及其相应提取液黏度均存在显著变异。L.Saulnier等认为基因型比环境条件对木聚糖含量的影响要强烈,其所测的22个小麦品种水溶性木聚糖含量、总木聚糖含量分别为0.36%~0.83%与5.53%~7.79%。M.Wootton等研究了北美12个小麦品种和澳大利亚19个小麦品种共5个不同地区的木聚糖含量的变化,结果澳大利亚南部小麦木聚糖含量变动于5.9%~7.2%,平均为6.7%,显著高于其他各地区的木聚糖含量,但其他各地区之间木聚糖含量差异不显著。S.Hashimoto选用4个木聚糖含量高低不同的小麦品种以及市售普通小麦麸分别对整粒、面粉及面粉副产品(麸皮)测其水溶性木聚糖、酸溶性木聚糖及总木聚糖含量,其含量差异均达显著水平,结果为整粒小麦水溶性木聚糖、酸溶性木聚糖及总木聚糖含量分别为0.90%、2.45%和8.95%,面粉分别为0.70%~0.83%、1.66%~1.86%和1.50%~2.12%,麸皮分别为1.29%~1.68%、2.14%~4.45%和9.90%~28.39%。Anderson等所测定的大麦 $\beta$ -葡聚糖含量变化范围为3.64%~6.11%;郑祥建对产于江苏、浙江的几个大麦品种的 $\beta$ -葡聚糖含量进行了测定,结果为2.97%~10.61%;汪军妹等测定了89个大麦基因型的 $\beta$ -葡聚糖含量,其范围在1.57%~6.52%之间;M.D.Fleurg测定了大麦中的水溶性、酸溶性和总木聚糖含量,结果发现无壳大麦、六棱大麦和二棱大麦水溶性木聚糖含量分别为0.58%、0.634%和0.513%,酸溶性木聚糖含量分别为0.38%、0.525%和0.353%,总木聚糖含量分别为4.07%、6.12%和5.61%。

小麦籽粒木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖含量虽然很大程度上受品种特性即遗传因素的控制,但环境因素对它也有很明显的影 响。迄今研究较多的是干旱、水分条件、施氮水平及不同生态环境条件对木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖含量的影响。G.D.Coles在连续两年的试验中研究了不同干旱水平以及充足水分不同施氮处理条件下小麦籽粒木聚糖含量,结果发现,干旱对木聚糖含量有较大影响,在不同干旱条件下,木聚糖含量变动于5.7%~7.0%之间,木聚糖含量与土壤水分亏缺程度呈显著的正相关,特别是开花以后干旱对饲用小麦品质影响极大。G.D.Coles通过对不同施氮水平下木聚糖含量进行测定,结果表明,不同的氮素施用水平以及不同施氮时期对木聚糖含量影响不大。但是干旱胁迫与氮素处理同时进行,灌溉与后期施氮之间的交互作用比较复杂,水分充足时后期施氮,可以延长功能叶片的光合作用时期,使同化物积累增多和籽粒较大,从而引起籽粒内木聚糖含量升高。Marketta Saastamoinen等的研究认为生长时间与木聚糖含量成显著的正相关,但他认为降雨量可提高木聚糖含量,而丰收年生长期间高温却降低木聚糖含量。干旱地区生长的大麦和燕麦与潮湿地区的大麦和燕麦相比,前者的木聚糖含量高于后者。黑麦中 $\beta$ -葡聚糖在65℃水中几乎不溶,而在100℃时有一部分 $\beta$ -葡聚糖会溶解。另外,加工贮存也影响 $\beta$ -葡聚糖含量。脱壳燕麦的 $\beta$ -葡聚糖含量(每千克干物质含49.8g)比带壳燕麦的含量(每千克干物质含37.5g)明显上升,原因是壳含 $\beta$ -葡聚糖较低。还有高水分的大麦,在湿度大的仓库中贮存, $\beta$ -葡聚糖含量降低,这个过程类似于水处理大麦,它使大麦内源 $\beta$ -葡聚糖酶的活性增加,从而降低 $\beta$ -葡聚糖的含量。

**1.3.1.3 小麦木聚糖与其他相关性状之间的关系** 关于小麦木聚糖含量的基因型差异,国外已有不少报道。通过对不同品种小麦、不同处理条件下木聚糖含量与其相关性状之间关系的研究, G.D.Coles 认为木聚糖含量与淀粉含量呈负相关,同时认为不同的施氮水平不影响木聚糖和淀粉之间的相互关系,而且水分亏缺和氮素处理均与木聚糖分子内 A/X 比值无明显的相关性。L.Saulnier 通过对法国 22 个小麦品种木聚糖含量研究认为,水溶性木聚糖含量与其相应提取液黏性之间不存在明显的相关性,且水溶性木聚糖含量与总木聚糖含量之间也无明显的相关性。L.Saulnier 同时认为,木聚糖含量不能单独地用于预测其相应水提取液的黏度,且木聚糖的平均分子量显示出较大的独立的变异,分析其原因是成熟籽粒内含有降解木聚糖的内源酶,此酶降低了提取液的黏性,而此酶能被热处理灭活。

**1.3.2 麦类植酸的含量及分布** 植酸几乎存在于所有植物中,且禾谷类和油料作物种子中含量丰富。据文献报道,谷类作物籽粒中植酸含量为 0.50%~1.89%;豆类作物通常为 0.40%~2.06%;油料作物为 2.00%~5.20%。各类谷物类型的植酸含量差异不大,平均在 0.96%~1.17%之间,它们按由低到高方向排序为玉米、水稻、高粱、谷子、小麦、大麦。蓼科的燕麦植酸含量平均为 1.57%,是这类饲料中植酸含量最高的。在所有作物籽粒中,芝麻植酸含量最高,可达 5.18% (Reddy, 1982)。表 1-2 中列出几种麦类作物及其加工产品中的植酸磷含量。

表 1-2 麦类作物及加工产品中植酸磷含量 (%)

作物种类	小麦	大麦	燕麦	粗小麦粉	小麦麸
总磷	0.36	0.34	0.36	0.47	1.37
植酸磷	0.24	0.19	0.20	0.35	0.96
植酸磷比例	67	56	56	74	70

在小麦、稻谷和大麦等种子中,植酸集中存在于籽粒的糊粉层与外壳,在小麦和稻谷的胚芽中几乎没有植酸的存在,如:稻谷中 80% 以上的植酸存在于稻壳中。玉米与其他谷物不同,其中 90% 的植酸存在于胚芽部分。豆类籽实中的植酸分布于整个种子的蛋白质络合物中。在双子叶植物种子中,植酸分布于籽粒的亚细胞内容物中(O'Dell)。因此,在谷物加工副产品和油料加工副产品饼粕中植酸含量也很高,如米糠中植酸含量为 5.1%、麦麸为 3.4%、芝麻粕为 3.6%、棉籽粕为 3.3%、大豆粕为 1.4%。另外,植酸作为磷的主要贮存形式,谷类籽粒中植酸磷含量占总磷含量的 44%~64%,豆类籽粒植酸磷含量稍低,饼粕中占 56%~70%,小麦麸中占 74% 左右,而在米糠中可高达 93%。

## 1.4 小麦抗营养因子的理化特性及在饲料中的抗营养作用

### 1.4.1 木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖的理化特性及在饲料中的抗营养作用

**1.4.1.1 小麦木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖的理化特性** 木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖是非淀粉多糖的一种,在提取后成为可溶的亲水性分子,在溶液中呈现许多独特的物理化学特性,这些特性与其抗营养性质有关,影响畜禽的消化过程。

(1) 黏度 具多糖性质的木聚糖和  $\beta$ -葡聚糖在水中溶解后,都变成有黏性的溶液。随浓度的增加,溶液黏度会大增。用肉用仔鸡研究表明,采食小麦阿拉伯木聚糖和  $\beta$ -葡聚糖,增加了消化物的黏度。Annison (1991) 和 Marquardt (1995) 的研究认为, $\beta$ -葡聚糖的黏稠性是它的主要抗营养特性。



(2) 表面活性 木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖的表面具电荷,在溶液中趋于与其他物质表面结合。饲料消化时,可与肠道中饲料颗粒、脂类、蛋白质表面相结合。

(3) 持水性 无论是可溶性的还是不溶性的木聚糖,都具有持水活性。不溶性的,具有海绵一样的功能,而可溶性的则通过网状结构形成吸收分子,这种能力称为系水力。浓度较高时,该种特性表现尤为显著,因为此时可以形成凝胶。这些效应能从根本上改变消化物的物理特性,从而改变肠道的生理活性(即增强对肠蠕动的抵抗力)。

(4) 其他效应 以上所述木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖的特性都可能影响动物的消化过程。对此,Annisson(1993)已作了综述。应注意的是,木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖在复杂的混合物(即消化物)中才具有活性,其他成分可能调节着它的作用方式(G. Annisson 和 M. Choct, 1992)。

**1.4.1.2 小麦籽粒木聚糖、 $\beta$ -葡聚糖的抗营养作用** 近些年来,有关小麦阿拉伯木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖在饲料中的抗营养作用已见报道。抗营养作用的机理主要表现为:

(1) 对消化道黏度的影响 小麦含有的木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖为大分子物质,它可吸收大量水分,或溶于水后产生黏性溶液,增加消化道内容物的黏稠度(Philp 等, 1995)。小肠内容物黏稠度增加后,会显著增加食糜在肠道的停留时间。一方面,造成肠黏膜上不动水层加厚,内源氮排除增加;另一方面,引起营养物质在肠道内积累,降低单位时间内养分的同化作用,使饲料脂肪、蛋白质和碳水化合物的消化作用降低,导致畜禽的生产性能下降。

(2) 对饲料表观代谢能的影响 木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖含量的多少,直接影响到饲料中的表观代谢能(apparent metabolization energy, AME)。小麦中的木聚糖是组成 NSP 的主要成分。Chot 等(1990)检测了 NSP 含量和 AME 的关系,当小麦阿拉伯木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖添加到饲料中时,它的 AME 呈线性降低,这是木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖引起淀粉回肠率(ISD)、蛋白回肠消化率(IPD)、脂类消化率(ILD)降低而直接导致的。

(3) 对脂肪和维生素 D 消化吸收的影响 木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖能使脂肪消化吸收降低,特别是引起饱和长链脂肪酸吸收不良,这种影响在大麦、燕麦、黑麦日粮中均有发现(Campbell 等, 1983, 1986)。由于木聚糖能相互结成网状物,降低饲料的扩散率,阻止脂肪形成脂肪微粒,导致胆汁酸盐降低而影响脂肪消化,同时也阻止了内源酶与肠道内容物接触,并伴随产生有毒、有害物质。

(4) 对消化道酶活性影响 小麦中的木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖能直接结合消化道中胰蛋白酶、脂肪酶等消化酶,使其活性降低。由于代谢补偿作用,从而显著增加蛋白质、脂类和电解质等内源物质的分泌,降低了它们在体内的贮备(Irish 等, 1993)。

(5) 对肠道微生物的影响 用木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖含量较高的小麦喂小鸡,其肠内的微生物明显增加,其中用黑麦饲喂小鸡,微生物量更高(Day 和 Jhoms, 1980)。由于木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖能使食糜在消化道内的停留时间延长,Patel 等在 1980 年的研究中发现,它将更有利于微生物的增殖,微生物的增殖使动物消化吸收养分减少。家禽饲喂小麦日粮比饲喂玉米日粮(可溶性 NSP 低),更容易感染球虫和发生坏死性肠炎。

(6) 其他影响 由木聚糖和 $\beta$ -葡聚糖所引起的消化道黏度的增加对脂肪消化的影响要比淀粉和蛋白质(氨基酸)大。此外,高黏度也影响家禽日粮中添加脂肪的消化,从而影响整个日粮的消化,对产蛋鸡而言,还会产生脏蛋(Henry L. Classen, 1998)。

**1.4.2 植酸的理化特性及在饲料中的抗营养作用** 植酸为淡黄色或淡褐色的浆状液体,易溶于水、甲醇、乙醇、丙酮等极性溶剂,但几乎不溶于无水乙醚、苯、乙烷和氯仿等。由于其分子结构的环状对称性,具有 12 个可解离的酸性氢离子,因此,植酸呈强酸性,而且植