



华中农业大学

HUAZHONG AGRICULTURAL UNIVERSITY

# 硕士学位论文

MASTER'S DEGREE DISSERTATION

调质温度对猪高粱型日粮加工特性和养分消化率的影响

EFFECT OF CONDITIONING TEMPERATURE

ON PROCESSING CHARACTERISTICS AND NUTRIENT

DIGESTIBILITY OF SORGHUM-BASED DIETTS FOR PIGS

研究生：刘霜

CANDIDATE: LIU SHUANG

学号：2015302120225

STUDENT NO.:

专业：农业推广

MAJOR: Master of Agriculture Extension

导师：黄飞若 教授

SUPERVISOR: PROFESSOR HUANG FEIRUO

中国武汉

WUHAN, CHINA

二〇一七年六月

JUNE, 2017

# 华中农业大学硕士学位论文

**调质温度对猪高粱型日粮加工特性和养分消化率的影响**

**Effect of conditioning temperature on processing  
characteristics and nutrient digestibility of sorghum-based  
diets for pigs**

研 究 生：        刘   霜  
学     号：        2015302120225  
指导教师：        黄飞若 教授  
学位类型：        农业推广硕士  
领     域：        养殖

华中农业大学动物科技学院动物医学院  
中国•武汉

**College of Animal Sciences and Technology Huazhong Agricultural University  
Wuhan, China**

# 华中农业大学学位论文独创性声明及使用授权书

学位论文 是否保密	否	如需保密, 解密时间	年 月 日
--------------	---	------------	-------

## 独创性声明

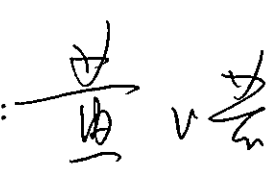
本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知, 除了文中特别加以标注和致谢的地方外, 论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果, 也不包含为获得华中农业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料, 指导教师对此进行了审定。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明, 并表示了谢意。

研究生签名: 刘霜                      时间: 2017 年 6 月 13 日

## 学位论文使用授权书

本人完全了解华中农业大学关于保存、使用学位论文的规定, 即学生必须按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本; 学校有权保留提交论文的印刷版和电子版, 并提供目录检索和阅览服务, 可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人同意华中农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容, 为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递和交换服务, 同时本人保留在其他媒体发表论文的权力。

注: 保密学位论文 (即涉及技术秘密、商业秘密或申请专利等潜在需要提交保密的论文) 在解密后适用于本授权书。

学位论文作者签名: 刘霜                      导师签名: 

签名日期: 2017 年 6 月 13 日                      签名日期: 2017 年 6 月 13 日

## 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT .....	III
缩略语表 .....	V
第一章 文献综述 .....	1
1 前言 .....	1
2 高粱 .....	2
2.1 高粱在我国饲料业中的应用现状 .....	2
2.2 高粱的营养价值 .....	3
2.3 高粱的籽粒结构 .....	3
2.4 高粱的抗营养因子 .....	4
2.4.1 单宁 .....	4
2.4.2 植酸 .....	4
2.4.3 醇溶蛋白 .....	5
2.4.4 麦角生物碱 .....	5
2.5 高粱在畜禽日粮中的研究进展 .....	5
2.5.1 高粱在畜禽日粮中的添加比例 .....	6
2.5.2 高粱加工工艺及参数 .....	8
3 调质 .....	9
3.1 调质的主要影响因素 .....	9
3.1.1 物料性质（组成、粒度、物料水分等） .....	10
3.1.2 蒸汽质量 .....	11
3.1.3 调质参数 .....	11
3.2 调质对营养物质的影响 .....	11
3.2.1 调质对日粮淀粉的影响 .....	11
3.2.2 调质对日粮蛋白质和氨基酸的影响 .....	12
3.2.3 调质对维生素的影响 .....	12
3.3 调质温度 .....	13
3.3.1 调质温度对日粮加工特性的影响 .....	13
3.3.2 调质温度与营养物质消化率 .....	14
3.3.3 调质温度对畜禽生长性能的影响 .....	16

4 高粱型日粮调质温度的研究进展 .....	16
5 本研究的目的是和意义 .....	17
第二章 调质温度对猪高粱型日粮加工特性的影响 .....	18
1 前言 .....	18
2 材料和方法 .....	18
2.1 试验材料 .....	18
2.1.1 高粱原料 .....	18
2.2 样品的生产与采集 .....	20
2.2.1 高粱调质样品的生产、采集及保存 .....	20
2.2.2 日粮的生产及样品采集、保存 .....	20
2.3 主要仪器及试剂 .....	21
2.4 试验指标及检测方法 .....	21
2.4.1 扫描电镜观察 .....	21
2.4.2 淀粉糊化度的测定 .....	22
2.4.3 蛋白溶解度的测定 .....	22
2.4.4 硬度的测定 .....	22
3 结果与分析 .....	23
3.1 扫描电镜观察 .....	23
3.2 调质温度对高粱型日粮加工特性的影响 .....	24
4 讨论 .....	24
4.1 调质温度与蛋白质溶解度 .....	24
4.2 调质温度与淀粉糊化度 .....	25
4.3 调质温度与颗粒硬度 .....	25
5 小结 .....	26
第三章 调质温度对猪高粱型日粮养分消化率的影响 .....	27
1 前言 .....	27
2 材料与方	27
2.1 体外消化试验 .....	27
2.1.1 试验材料 .....	27
2.1.2 仪器和试剂 .....	28
2.1.3 体外消化试验 .....	28
2.1.4 计算公式 .....	28
2.2 体内消化试验 .....	29

2.2.1 试验日粮 .....	29
2.2.2 试验设计 .....	29
2.2.3 试验动物 .....	29
2.2.4 T 型瘘管的安装手术 .....	29
2.2.4 饲养管理 .....	30
2.2.5 食糜及粪样的收集 .....	31
2.2.6 测定指标与测定方法 .....	31
3 结果与分析 .....	33
3.1 瘘管手术结果 .....	33
3.2 二氧化钛标准曲线和回收率的测定 .....	34
3.3 调质温度对高粱体外消化率的影响 .....	34
3.4 调质温度对表观消化率的影响 .....	35
3.5 调质温度对表观回肠消化率的影响 .....	35
4 讨论 .....	36
4.1 调质温度对蛋白质消化率的影响 .....	36
4.2 调质温度对淀粉和能量消化率的影响 .....	36
5 小结 .....	37
第四章 不同调质温度的高粱型日粮对猪生长性能的影响 .....	38
1 前言 .....	38
2 材料和方法 .....	38
2.1 试验设计 .....	38
2.2 试验动物与饲养管理 .....	38
2.3 试验日粮 .....	39
2.4 生长性能的测定 .....	39
2.5 数据统计 .....	39
3 结果与分析 .....	39
4 讨论 .....	40
5 小结 .....	41
第五章 本研究的小结、创新点及尚待解决的问题 .....	42
1 小结 .....	42
2 创新点 .....	42
3 待解决的问题 .....	43

参考文献.....	44
附录 研究生在读期间发表的主要研究论文.....	53
致谢.....	54

## 摘 要

本课题研究调质温度对猪高粱型日粮加工特性和养分消化率的影响。首先研究了调质温度对猪高粱型日粮加工特性的影响，并通过安装简单 T 型痿管评估了调质温度对猪高粱型日粮养分消化率的影响，进一步开展饲养试验研究不同调质温度高粱型日粮对猪生长性能的影响，旨在筛选出适宜的调质温度应用于猪高粱型日粮的生产实践。主要结果如下：

(1) 研究调质温度对猪高粱型日粮加工特性的影响。分别采用 65℃、70℃、75℃、80℃、85℃ 五种调质温度对猪高粱型日粮进行加工，取样检测日粮的加工特性。结果表明：调质温度与猪高粱型日粮成品的淀粉糊化度呈显著的二次曲线相关 ( $P<0.05$ )，且调质温度为 75℃、80℃ 和 85℃ 处理组的淀粉糊化度显著高于其他处理组 ( $P<0.05$ )；随着调质温度的升高，猪高粱型日粮调质后和成品的蛋白质溶解度都线性降低 ( $P<0.05$ )，而颗粒硬度线性升高 ( $P<0.01$ )。

(2) 研究调质温度对猪高粱型日粮养分消化率的影响。选取 5 头安装回肠末端 T 型痿管后恢复较好的猪（平均体重  $21.40 \pm 0.39$  kg）进行试验，采用拉丁方的试验设计，试验共分 5 个周期（每周期 7 天），整个试验期每头生长猪均饲喂到 5 种不同调质温度的日粮，收集粪样和回肠末端食糜样品用于测定养分消化率。结果表明：调质温度与粉表观回肠消化率呈显著二次曲线相关 ( $P<0.05$ )，且调质温度为 70℃、75℃ 和 80℃ 三个处理组的淀粉表观回肠消化率显著高于其他处理组 ( $P<0.05$ )。

(3) 研究不同调质温度高粱型日粮对猪生长性能的影响。选择胎次、日龄接近的健康“杜×长×大”生长育肥猪 300 头（初始平均体重 45.73kg，最终平均体重 70.04kg），按照体重和体况相近的原则随机分为 5 个处理组，每个处理组含有 5 个重复，每个重复 12 头猪。分别饲喂五种调质温度（65℃、70℃、75℃、80℃、85℃）下加工生产的高粱型日粮，试验期为 25 天。结果表明：调质温度与 ADG 呈二次曲线相关 ( $P<0.05$ )，且 85℃ 处理组的 ADG 显著低于其他处理组 ( $P<0.05$ )；调质温度与腹泻率呈二次曲线相关 ( $P<0.05$ )，且调质温度为 75℃ 和 80℃ 处理组腹泻率显著低于 65℃ 和 85℃ 处理组 ( $P<0.05$ )。



综上所述：调质温度为 75°C-80°C 时，猪高粱型日粮的淀粉糊化度和表观回肠消化率较高，饲养试验中能取得较高的日增重和较低的腹泻率。因此，推荐生产实践中使用 75°C-80°C 作为猪高粱型日粮的调质温度。

**关键词：**调质温度；高粱型日粮；猪；消化率；生长性能

## Abstract

The effect of conditioning temperature of sorghum-based diets on processing characteristics and nutrition digestibility in pigs was studied. Firstly, we researched the effect of conditioning temperature on the processing characteristics of sorghum-based diets in pigs. Second, we evaluated the impact of conditioning temperature of sorghum on nutrient digestibility in pigs by installing simple T-type fistula. Then, the effect of different conditioning temperature of sorghum-based diets on growth performance of pigs was studied. With these data, we evaluated and selected the suitable conditioning temperature of sorghum-based diets for pigs. The main results were listed as following:

(1) The effect of the conditioning temperature on processing characteristics of sorghum-based diets for pigs was studied. We evaluated the process characteristics of sorghum-based diets which was processed in the conditioning temperature of 65°C, 70°C, 75°C, 80°C, 85°C. The result of this experiment indicated: The conditioning temperature is related to the degree of starch gelatinization of sorghum-based diets (Quadratic Effect  $P<0.05$ ), and the greatest degree of starch gelatinization was observed when the conditioning temperature was 80°C ( $P<0.05$ ). The protein solubility of sorghum-based diets after steam-conditioning and processed linearly decreased ( $P<0.05$ ), the pellet hardness of diets linearly increased ( $P<0.001$ ), with the conditioning temperature rised from 65°C to 85°C.

(2) A digestive and metabolic experiment was conducted to study the effects of conditioning temperature of sorghum-based diet on digestion and metabolism of nutrients in growing pigs. five castrated barrows after installing simple T-type fistula with an average initial weight of  $(21.40\pm0.39)$  kg was selected for this experiment. According to the Latin square design, the experiment contained five periods (seven days per period) to ensure that each growing pig was fed with different diets which was processed with five different conditioning temperature in whole trial period. We collected the fecal and chyme to determine and analyse nutrient digestibility. The result of this experiment indicated:

The conditioning temperature is related to the apparent ileal digestibility of starch and dry matter of sorghum-based diets (Quadratic Effect  $P<0.05$ ), and the greatest apparent ileal digestibility of starch and dry matter was observed when the conditioning temperature was 75°C. no significant difference occurred among treatments with conditioning temperature of 70°C, 75°C, 80°C in the apparent ileal digestibility of starch and dry matter ( $P>0.05$ ), however difference was significant when they were compared to the rest two treatments ( $P<0.05$ ).

(3) A feeding trial was conducted to determine the effect of different conditioning temperature of sorghum-based diets on growth performance of pigs. 300 pigs (45.73kg initial BW, Duroc×Landrace×Large white) were used in a 25-day feeding trial. Pigs were randomly allocated to five treatments with five replicates, each replicate contained twelve pigs by body weight and body condition. The dietary treatment factor was wheat conditioning temperature. The result of this experiment indicated: The conditioning temperature is related to the average daily gain (ADG) of pigs (Quadratic Effect  $P<0.05$ ), the greatest ADG was observed when the conditioning temperature was 75°C, and the ADG of treatment of conditioning temperature 85°C was significantly lower than other treatments. The conditioning temperature is related to the diarrhea rate of pigs (Quadratic Effect  $P<0.05$ ), and the diarrhea rate of treatments of conditioning temperature 75°C and 80°C were significantly lower than the treatments of conditioning temperature 65°C and 85°C.

Taken together: when the conditioning temperature of sorghum-based diet was 75°C to 80°C, the degree of starch gelatinization and apparent ileal digestibility of starch were greater, the higher ADG and lower diarrhea rate were observed in feeding trial. In conclusion, 75-80°C is recommended as the suitable conditioning temperature of sorghum-based diet for pigs.

**Key words:** Conditioning temperature; Sorghum-based diets; Pig; Digestibility; Growth performance

缩略语表

Abbreviation

序号	缩写	英文名称	中文名称
No.	Abbr.	English name	Chinese name
1	DM	Dry matter	干物质
2	Lys	Lysine	赖氨酸
3	AA	Amino acid	氨基酸
4	CP	Crude protein	粗蛋白
5	GE	Gross energy	总能
6	EE	Ether extract	粗脂肪
7	CF	Crude fiber	粗纤维
8	NFE	Nitrogen free extract	无氮浸出物
9	Ca	Calcium	钙
10	P	Phosphorus	磷
11	PS	Protein solubility	蛋白溶解度
12	PM/PB	Protein matrix/Protein bodies	蛋白质基质/蛋白体
13	SG	Starch ganule	淀粉颗粒
14	BW	Body weight	体重
15	ADG	Average daily gain	平均日增重
16	ADFI	Average daily feed intake	平均日采食量
17	FCR	Feed conversation ratio	饲料转化效率
18	SEM	Standard error of mean	平均数标准误
19	L	Linear Effect	线性相关
20	Q	Quadratic Effect	二次相关

# 第一章 文献综述

## 1 前言

谷物原料由于其较高的淀粉含量，是日粮中的主要能量来源，在配方中所占的比例一般能达到 50-70%，所以谷物原料的价格在一定程度上决定了饲料的成本。我国长期以来采用的都是玉米-豆粕型日粮配方，使得饲料业对玉米有很强的依赖性。2014 年以来玉米价格的波动对饲料行业产生了巨大的冲击，许多饲料企业为了降低饲料成本，提高经济效益，选用高粱作为玉米替代谷物，而我国的饲料用高粱主要来源进口，这就使得高粱的进口量在近几年急剧增加。2012 年，我国高粱的进口量仅为 50 万吨，经过 2013 年和 2014 年的爆发性增长，在 2015 年我国高粱的进口量达到了 1000 万吨。可见高粱在饲料业中的应用量在近年来急剧增加。

高粱作为世界五大粮食作物之一，世界年产量 3600 多万吨，但在动物日粮中的应用量却很少，主要是因为其单宁和醇溶蛋白的含量相对较高，使其蛋白质和淀粉的消化率相对较低，限制了其在单胃动物中的饲喂价值（Selle et al 2010；Liu et al 2013；Khoddami et al 2015）。在近年来，随着高粱在畜禽日粮中的应用量增加，一些饲料企业发现高粱型日粮的硬度过大，也成为了限制高粱应用于畜禽日粮的重要因素。这可能是由于高粱在动物日粮中应用量增加，但高粱型日粮的加工参数却并不明确，大部分饲料企业采用仍然是玉米型日粮的加工参数所导致的，如果能够通过调整加工参数来解决高粱型日粮制粒硬度过大的问题，同时改善高粱的营养物质消化率，将极大的提高高粱在饲料业中的应用价值。

调质是颗粒饲料加工过程中的重要工序，能够促进蛋白质的变性和淀粉的糊化，对于颗粒饲料的质量的提高和营养物质消化率的改善具有重要的作用（李星等 2001；程译锋等 2009）。调质温度是调质的三大要素之一，在调质过程中，是影响淀粉糊化度、蛋白质变性的重要因素。一般而言，随着调质温度的升高，淀粉的糊化度和蛋白质的变性程度越高，由于高粱淀粉的糊化温度高于玉米和小麦，使得高粱所需的调质温度往往要更高，但高粱由于其醇溶蛋白的含量较高，调质温度的过高反而会导致醇溶蛋白的化学交联（形成二硫键），从而降低其营养价值（Selle et al 2010）。同时，调质温度还会影响颗粒饲料的硬度，且随着调质温度的升高，高粱型

日粮的硬度增加,但过高的硬度会造成制粒机堵塞(胡彦茹 2011b),还可能会影响到日粮的饲喂效果。因此,本研究结合实际生产条件设置 65℃、70℃、75℃、80℃、85℃五种调质温度应用于高粱型日粮生产,通过研究不同调质温度下高粱型日粮的加工特性、养分消化率以及猪生长性能的差异,筛选出适宜的调质温度应用于实践生产。

## 2 高粱

高粱又称为蜀黍,是世界继玉米、小麦、水稻、大麦之后的第五大重要的粮食作物(Gualtieri and Rapaccini 2009),具有抗旱、抗涝、耐盐碱等特性,有“作物中的骆驼”之称,在非洲更被誉为“救命之谷”。高粱根据其种皮颜色可以分为红高粱、褐色高粱、白高粱等,而高粱的种皮颜色与其单宁含量相关,一般认为颜色越深,单宁含量越高(唐玉明等 2000; Medugu et al 2012)。高粱根据其胚乳的质地可以分为硬质高粱和软质高粱,胚乳的质地是由淀粉的支直比所决定,支链淀粉含量越高,胚乳的质地越软,如糯质高粱品种中不含直链淀粉,全部为支链淀粉。我国高粱栽培地较广,东北各地较多,但国内高粱由于品种及单宁含量等因素主要用于食用和酿酒,极少应用于畜禽饲料业,应用于畜禽饲料业的高粱主要来源于进口,美国和澳大利亚是我国饲料用高粱的主要进口国。

### 2.1 高粱在我国饲料业中的应用现状

长期以来,我国畜禽日粮采用的是玉米-豆粕型日粮配方,对于玉米具有很大的依赖性。2014 年第三季度,玉米价格的疯狂上涨,就导致饲料企业的成本上涨,部分企业采用小麦、高粱、大麦等原料作为玉米替代原料,其中尤以高粱最为突出(何丽媛 2015)。高粱作为世界五大谷物之一,2015 年世界高粱产量约为 3600 万吨,而我国年产量约 300 万吨,居世界第八位,但我国用于畜禽日粮的高粱绝大部分来源于进口,这也导致了从 2013 年以来,我国的高粱的进口量急剧上涨,2014 年我国高粱的进口量为 578 万吨,相比于 2013 年增加了 436%,2015 年我国高粱的进口量达到了 1070 万吨,随着高粱的大量进口,价格也有所上涨,2016 年我国高粱的进口量为 665 万吨,趋于平缓,可见高粱在畜禽日粮中的应用越来越多。虽然,高粱价格的上涨,玉米临储政策的调整,使得高粱的价格优势已不太明显,但高粱作为玉米替代谷物来缓冲玉米价格的波动对畜禽饲料业的冲击仍然具有重要的意义。

## 2.2 高粱的营养价值

高粱与玉米在营养成分含量上区别不大，高粱中淀粉的含量约为 60-80%，主要分布于胚乳中，一般直链淀粉的含量约占淀粉的 20-30%，高直链的品种直链淀粉的含量可达到 40-70%，其淀粉含量要略高于小麦和玉米，但由于其籽粒结构和抗营养因子的存在，高粱淀粉的消化率相对较低，消化能也低于玉米和小麦，其有效能值大约为玉米的 90%-95%。高粱蛋白的含量约为 9.36%，与玉米中蛋白的含量相近，但高粱中醇溶蛋白的比例（80%）要高于小麦和玉米（50-60%），使得高粱蛋白之间、与淀粉之间的交联较多，蛋白质的消化率较低，同时高粱蛋白质中赖氨酸和色氨酸的含量相对较低，所以在高粱型配方中要注意赖氨酸和色氨酸的额外添加，可以通过发芽、挤压加工等简单的处理来改善蛋白质的品质，提高蛋白质利用率（寇兴凯等 2015）。高粱中的矿物质元素较为丰富，特别是铁元素的含量相对较高。此外高粱脂肪含量略低于玉米，但不饱和脂肪酸的含量较低，所以采用高粱替代玉米能在一定程度上改善动物的肉质品质（刘青春和俞海峰 2015）。

## 2.3 高粱的籽粒结构

高粱的籽粒结构主要分为外皮、贮藏组织（胚乳）以及胚（胚芽），其中营养物质主要分布于胚乳中，而胚乳由外向内又可分为糊粉层、角质胚乳和粉质胚乳，而角质胚乳和粉质胚乳是淀粉和蛋白质的主要分布区域，糊粉层中只含有少量的蛋白质而不含淀粉。在角质胚乳中，淀粉和蛋白质之间有一个连续的分界面，淀粉颗粒呈多角形或表面凹凸多面体，蛋白质陷入膨胀的淀粉粒之间。在粉质胚乳中，淀粉颗粒为球形，不与蛋白质基质相连，存在的蛋白质基质分布并不连续，且由覆盖在淀粉表面的片状结构组成。高粱和玉米的籽粒结构除了大小和形状不同，胚乳周围蛋白质的分布和类型也有所区别。高粱外胚乳所占的比例要比玉米高很多（Rooney and Murty 1982），在外胚乳中淀粉颗粒较小，嵌埋在密实的蛋白质基质里，醇溶蛋白的含量较高，使得高粱中胚乳蛋白质和淀粉的结合更加紧密（Wall and Paulis 1978），这也是导致高粱淀粉和蛋白质消化率的相对较低的主要原因之一（Rooney and Pflugfelder 1986）。

## 2.4 高粱的抗营养因子

### 2.4.1 单宁

单宁又称单宁酸或鞣酸，是酚类化合物的一种，其化学结构含有一个或多个具有一个或多个羟基的苯环。单宁根据其化学结构可分为水解单宁和结合单宁，其中缩合单宁不具有碳水化合物中心，而是以缩合物的形式存在，是高粱中的主要抗营养因子。高粱中多酚（由单宁，类黄素和酚酸组成）的含量为 1.7-102.6 g/kg DM，相比之下小麦和玉米的多酚浓度可以忽略不计，大麦中多酚的含量为 13.5 g/kg。Dicko 等（2002）对 50 个高粱品种进行调查发现，高粱中单宁的含量与酚类化合物的总量呈正相关（ $r = 0.88$ ;  $P < 0.001$ ）。Medugu 等（2012）对高粱单宁含量与其籽粒颜色进行了总结发现，二者具有一定的相关性，白色高粱籽粒的单宁含量约为 0.55%，黄色高粱籽粒的单宁含量为 0.2-2.0%，红色高粱的单宁含量为 1.54-7.44%，大量的研究表明，单宁会降低动物对营养物质的利用率和饲料利用率，主要通过以下几种方式：1 单宁具有苦味，会导致饲料适口性的降低，影响动物的采食量；2 单宁易与消化酶结合，从而降低消化酶的活性，降低营养物质消化率；3 单宁含有多个羟基，易与蛋白质、碳水化合物以及钙、磷等物质结合形成复合物，使其难以被消化吸收（艾庆辉等 2011；裴素俭 2012；袁保京等 2014）。

### 2.4.2 植酸

植酸即肌醇六磷酸，是一种有机磷酸类化合物，它主要存在于植物的种子、根干和茎中，是植物性饲料原料中普遍含有的抗营养因子。植酸的分子式为  $C_6H_{18}O_{24}P_6$ ，化学结构是由 6 个连接有磷酸根的碳原子构成的正六边形，由于带负电的磷酸根基团具有很强的螯合能力，易于镁、钾、钙等矿物质离子结合形成不溶性的复合物，降低矿物质元素的吸收利用率，同时植酸还易与蛋白质结合，影响蛋白质的消化（张福耀等 2016）。Knuckles 等（1985）的研究表明，蛋白质的体外消化率与植物性饲料中植酸的含量呈负相关。随着酶制剂的发展，在配合饲料中添加植酸酶，来提高饲料营养价值，越来越普遍。Selle 等（1999）的研究报道，在肉鸡高粱型日粮中添加 600 FTU/kg 的植酸酶，采食量和日增重分别提高了 25% 和 76%，饲料转化率提高了 47%。



### 2.4.3 醇溶蛋白

谷物中的蛋白质根据其溶解性可以分为：1.溶解于水的白蛋白；2.溶解于盐溶液的球蛋白；3.溶解于乙醇的醇溶蛋白；4.溶解于碱，不溶于酸的谷蛋白（Guo et al 2007），各类蛋白含量因高粱的品种、生长条件以及成熟度等不同而具有一定的差异（Taylor et al 1984）。高粱中醇溶蛋白约占总蛋白的 52.7%，醇溶蛋白富含脯氨酸、天冬氨酸、谷氨酰胺，与谷蛋白构成蛋白体，主要存在与角质胚乳中。醇溶蛋白可以分为  $\alpha$ -醇溶蛋白、 $\beta$ -醇溶蛋白和  $\gamma$ -醇溶蛋白，其中  $\alpha$ -醇溶蛋白在动物体内可以被消化，但却被不易消化的  $\beta$ -醇溶蛋白和  $\gamma$ -醇溶蛋白紧密包裹。研究表明，醇溶蛋白的抗营养作用一方面是组成的蛋白质基质易与淀粉颗粒紧密交联，从而影响蛋白质和淀粉的消化利用；另一方面醇溶蛋白在湿热处理下， $\beta$ -醇溶蛋白和  $\gamma$ -醇溶蛋白中的含硫氨基酸易产生二硫键的交联反应，从而降低了蛋白质的可消化性（Duodu et al 2003），Duodu 等（2002）将粉碎高粱经过 95℃的水中处理后，相比于处理前其蛋白质体外消化率降低了 41.6%。一些研究也报道了，在高粱型日粮中添加外源性的蛋白酶能改善肉鸡的生长性能和营养物质消化率（Barekatain et al 2013；Liu et al 2013；Xu et al 2017）。

### 2.4.4 麦角生物碱

麦角生物碱是由麦角菌所产生的生物碱毒素，主要存在与大麦、小麦以及禾本科植物中，会使人 and 动物中毒，主要对外周围神经和中枢神经产生毒性效应（卢春霞 2010）。高粱在感染麦角菌后，易产生麦角生物碱，从而对饲喂动物产生毒害作用，特别是对母猪的影响尤为明显（袁保京 2014）。Blaney 等（2000）研究报道了，给母猪饲喂含有麦角碱的高粱，会导致采食量下降甚至拒绝采食，仔猪的存活率下降。Kopinski 等（2008）的研究表明，用含有麦角碱的高粱饲料饲喂哺乳母猪，会导致体重的显著降低，且血浆中的促乳素水平相对于对照组也显著下降。

## 2.5 高粱在畜禽日粮中的研究进展

高粱作为饲料原料应用于饲料业的历史并不短，但由于过去高粱品种的单宁含量以及植酸等抗营养物质的含量较高，影响了动物对高粱的利用率。近年来，随着高粱的品种改良以及植酸酶制剂的发展，高粱在饲料业中的应用也越来越多，国内外对于高粱添加量及加工工艺的研究报道也越来越多，但相对于玉米和小麦，高粱

型日粮的应用研究还是相对较少，还需要较为深入地研究解决高粱作为饲料原料的限制因素，提高高粱在饲料中的应用价值。

### 2.5.1 高粱在畜禽日粮中的添加比例

高粱中抗营养因子的存在，特别是单宁的含量，在一定程度上限制了高粱在畜禽日粮中的应用，且高粱的添加比或玉米替代比例会受到高粱的单宁含量、胚乳类型等因素的影响，同时也与饲喂动物种类和生长阶段有关。目前，行业推荐的主要还是以单宁含量作为高粱添加比例的参考，在禽料以及母猪和育肥猪日粮中，高粱的最大使用百分比 $=0.1/\text{单宁含量} \times 100\%$ ，在仔猪日粮中，高粱的最大使用百分比 $=0.05/\text{单宁含量} \times 100\%$ 。

在猪日粮中，早期的研究，特别是国内的研究采用的高粱都是以褐高粱或红高粱为主，单宁的含量高，高粱的添加较多地受到单宁含量地影响。杨久仙和刘建胜（2011）考虑到单宁的苦味会影响日粮的适口性，推荐高粱在日粮中的添加比例应在 20% 以内；王成章和王恬主（2011）指出为了取得较好的饲料效果，高粱替代玉米的比例可以根据其颜色的深浅来确定，深色高粱的替代比例不应高于 25%，浅色高粱替代比例不应高于 50%；顾红娟和田玉民（2010）指出在生长育肥猪中，高粱替代玉米在不超过 50% 时，能取得相似的生长性能，但完全取代玉米则会影响生长性能。而随着近年来高粱品种的改良以及植酸酶等发展，高粱的大量进口用于畜禽日粮，使得高粱的添加比例也有所增加。国外对于高粱使用比例的研究大部分趋向于全部替代玉米，Healy（1994）的研究表明在仔猪断奶前后，用软质和硬质高粱分别替代玉米后，仔猪日增重和采食量下降了 10-15%，且软质高粱的使用效果要优于硬质高粱。Shelton（2004）研究报道了，高粱的使用量达到 70% 以上时，高粱的效果优于玉米，同时比较了蜡质高粱和非蜡质高粱，非蜡质高粱的料肉比相对较低。Bens（2011）研究了玉米和高粱日粮发现，在添加油脂后，高粱的使用效果要优于玉米，且具有更好的背膘脂肪酸比例，肉质更好。高粱在母猪料中应用研究相对较少，Louis 等（1991）研究发现，高粱在哺乳母猪日粮达到 70% 时，会导致母猪采食量和仔猪初生重、断奶重降低，而 Johnston 等（1998）的研究却表明哺乳期 70% 的高粱添加，母猪采食量和仔猪初生重增加，仔猪断奶重有所下降。

表 1-1 日粮中高粱添加量/替代比例对畜禽生长性能的影响

Table 1-1 The effect of sorghum addition/substitution ratio on animal growth performance in livestock and poultry diets

试验动物 Animal	试验动物阶段 Phages of animal	添加量 Addition(%)	日增重 ADG (g/d)	日采食量 ADFI (kg/d)	料重比 F/G	与玉米相比 Compared with corn	参考文献 References
仔猪	0-35d	40%-58% (硬质/软质)	349/367	0.52/0.55	1.48/1.49	ADG ADFI ↓	Healy et al 1994
断奶仔猪	24-104d	71% (非蜡质) /75% (蜡质)	840/860	2.67/2.80	3.18/3.26	F/G ↓	Shelton et al 2004
生长育肥猪	28.18kg/56.77kg	76%/83%	773/881	1.86/2.81	2.41/3.19	-	Reyna et al 2006
育肥猪	54.4kg	72%-80%	1010	2.73	2.70	ADG ↑	Benz et al 2011
母猪	哺乳	69.05%	-	5.31	-	ADFI、仔猪断奶重 ↓	Louis et al 1991
母猪	哺乳 (435kg)	65%	-	13.5	-	ADFI 仔猪初生重 ↑ 仔猪断奶重 ↓	Johnston et al 1998
育肥猪	128kg	80%	2300	6.55	2.85	ADG F/G 胴体性能 NS	Johnston et al 1998
肉鸡	0-21d	56.25%	31.6	0.042	1.39	ADFI ↑ 蛋白质、能量消化率 ↓	Nyachoti et al 1996
肉鸡	40-96d	54%-65%	34.1	0.098	2.76	ADG、F/G NS	Jacob et al 1996
蛋鸡	22-46 weeks	61%-72%	-	-	160.7 (g feed/egg)	鸡蛋产量、F/G ↓	Jacob et al 1996
肉鸡	生长后期	45% (玉米替代比例)	84.2	0.25	3.0	ADG ↑ 生长性能 NS	Mohamed et al 2015
肉鸡	100-121 d	15%(玉米替代比例)	29.7	0.14	4.70	ADG F/G ↓	Masama and Shuro 2015

注：↑表示提高，↓表示降低，NS 表示没有差异。

Note: ↑ means increase, ↓ means decrease, NS means no difference.

在禽日粮中，用高粱替代玉米得到研究结果不尽相同。Torres 等（2013）的研究表明低单宁高粱替代 50% 的玉米时，肉鸡的饲料转化率和日增重没有显著差异（ $P>0.05$ ），而当替代量达到 100% 时，会对肉鸡的生长性能和小肠粘膜产生不利影响。但 Masama 等（2015）研究却表明了，当高粱的替代量高于 5% 时，就会对肉鸡的日增重和饲料转化率产生不利影响。Nyannor 等（2007）的研究报道了，1-21 天雏鸡日粮中采用高单宁高粱与玉米相比，对鸡的生长性能无显著影响，Mohamed 等（2015）研究发现用高粱替代 45% 的玉米，对肉鸡的生长性能没有显著的影响，日增重反而有所增加。这些研究结果的不同可能是高粱单宁含量、生长阶段以及品种等不同导致的。而高粱在蛋鸡中的应用研究相对较少，Jacob 等（1996）就研究了高粱型日粮对蛋鸡的影响，发现高粱的添加导致蛋鸡的产蛋量和饲料转化率降低。

## 2.5.2 高粱加工工艺及参数

### 2.5.2.1 高粱粉碎加工

不同的谷物由于籽粒结构及其营养成分等不同，其在畜禽日粮中的最佳粉碎粒度，有所差别，而高粱由于其外胚乳结构中蛋白质基质与淀粉链接紧密，往往需要较小的粒度才能达到最佳的应用效果。Healy 等（1994）研究了仔猪日粮中玉米、软质高粱和硬质高粱的粉碎粒度，结果表明，在 500-900 $\mu\text{m}$  范围内，随着粉碎粒度的增加，干物质、蛋白质和能量的消化率线性降低，且硬质高粱和软质高粱分别在 300 $\mu\text{m}$  和 500 $\mu\text{m}$  取得最佳消化率。Paulk 等（2015）比较了 724 $\mu\text{m}$ 、573 $\mu\text{m}$  和 319 $\mu\text{m}$  的高粱对育肥猪的影响发现，随着粉碎粒度从 724 $\mu\text{m}$  降低到 319 $\mu\text{m}$ ，育肥猪的日增重提高了 5%，说明了高粱的粉碎粒度每降低 100 $\mu\text{m}$ ，增重效率提高 1.23%。Healy 等（1991）和 Mikkelsen 等（2008）的研究表明，高粱的粉碎粒度对肉鸡生长性能有显著影响，且在 500 $\mu\text{m}$ -700 $\mu\text{m}$  时取得最佳的饲养效果。而 Rodgers 等（2009）研究发现，在肉鸡颗粒饲料中添加整粒高粱与添加粉碎高粱，肉鸡的生长性能无显著变化。Biggs 和 Parsons（2009）研究表明 3 周龄的家禽饲喂含 10% 和 20% 整粒高粱饲料，与饲喂粉碎高粱饲料相比，其生长性能并无显著影响。可能的原因是，整粒或粗颗粒的谷物饲料会影响到家禽肌胃的大小和功能（Gabriel et al 2006; Amerah et al 2007），有助于家禽的健康。

### 2.5.2.2 高粱的蒸汽制粒、挤压膨化加工

在现代饲料加工中,蒸汽制粒(Johnston et al 1998)、挤压膨化(Traylor et al 1997; Hancock et al 1991)等加工方式被证明有利于改善营养物质消化率和饲料利用率,高粱在饲料业的应用量增加,其加工工艺及参数的选择极为重要。Johnston 等(1998)研究报道了,猪高粱型日粮的制粒工艺能显著提高营养物质的消化率和饲料转化率。Selle 等(2012)研究了对红、黄、白三种高粱进行了研究发现,高粱的蒸汽制粒(90℃)加工虽然降低了蛋白质的溶解度,但蛋白质的回肠末端消化率却不受影响,淀粉的回肠末端消化率显著升高。也有学者(Hancock et al 1991; Traylor et al 1998)的研究报道,高粱的挤压膨化加工能在制粒的基础上,进一步提高猪的营养消化率和生长性能。Al-Rabadi 等(2011)研究了挤压膨化温度和粉碎粒度对高粱和小麦的淀粉消化率的影响,发现当高粱的挤压膨化温度在 100℃和 140℃时淀粉的消化率没有显著差异。虽然目前不少学者对高粱的加工进行了研究,但目前高粱的加工参数的研究还相对较少,需要更深入地研究。

## 3 调质

随着饲料业的发展和生产水平的提高,自 20 世纪 70 年以来,颗粒饲料逐渐取代粉料成为饲料行业的常用类型,颗粒饲料的品质也越来越受到饲料企业和养殖者的关注。在现代饲料加工中,特别是畜禽饲料中,颗粒饲料的生产广泛采用的是蒸汽制粒的工艺,而调质是蒸汽制粒工艺中的重要工序,是饲料制粒前处理中的关键步骤,对于改善饲料的颗粒质量和营养价值具有重要的意义。调质就是在调质器内通入适量的蒸汽对物料进行水热处理的过程。物料在调质器内通过蒸汽吸水、吸热,使得蛋白质发生变性、淀粉糊化,从而促使物料熟化和软化,达到易于制粒或膨化、提高营养物质消化率的目的(林巧伟 2014)。

### 3.1 调质的主要影响因素

调质的本质就是对物料的水热处理过程,物料本身的吸水性、粉碎粒度以及含水量等性质会影响到物料的吸水、吸热的速率,蒸汽作为传导热量和水分的介质,其质量以及调质的三大要素(调质温度、调质时间和调质水分)也会影响到物料的

热量和水分的吸收，所以，物料性质、蒸汽质量以及调质参数都对调质效果有着重要的影响。

### 3.1.1 物料性质（组成、粒度、物料水分等）

#### 3.1.1.1 物料组成

不同饲料原料，特别是谷物原料含有较高的淀粉含量，在吸水性、膨胀性、熟化性等方面存在区别，使得调质效果有所区别，为达到最佳的调质效果，就需要根据不同的饲料原料的种类来调整调质参数，使得调质效果最佳化。例如，高粱的淀粉的糊化温度为 72-75℃，要高于玉米（64-72℃）和小麦（58-64℃），并且高粱淀粉糊化所需的热量也是高于玉米和小麦的，这就使得为达到相同糊化程度高粱需要更高的温度和热量，可见不同原料最佳的调质参数是有所区别的。在不同种类的饲料中，饲料原料以及营养物质的比例及来源都有所区别，薛志成（2007）对不同种类饲料的调质参数做了总结，含谷物高的配合饲料、全价奶牛饲料、热灵敏度高的饲料、尿素饲料和含天然蛋白高的浓缩饲料由于其淀粉、蛋白等含量或者热灵敏度等原因导致所需的调质水分、温度以及蒸汽压强等参数具有较大的差别。

#### 3.1.1.2 物料粉碎粒度

在饲料加工过程中，物料需要经过粉碎和混合后才能进入调质器内进行调质加工，粉碎作为饲料加工的第一步，对于后续的加工处理有着重要的影响。粉碎粒度作为粉碎加工的重要指标，是物料调质效果的重要影响因素。粉碎粒度越小，物料的表面积越大，在调质过程中吸收水分和热量越快，对饲料的制粒质量或膨化效果越有利，从而达到更好的调质效果；反之，调质的效果越差。但 Bao 等（2015）的研究表明，过细的粉碎粒度会使得能耗增加，产量减少，并对动物的胃肠道健康有不良影响。所以，在保证物料的调质效果好的同时避免粉碎过细的危害，粉碎粒度的选择至关重要。

#### 3.2.1.3 物料水分

由于原料品质、种类以及配比的差别，物料的水分含量也会有所区别。在不考虑添加水的情况下，物料的水分含量在一定程度上，对调质效果有着显著的影响，且一般来说，物料的含水分越高，越有利于调质（朱炎峰 2011）。左进华和黄圣霞（2008）的研究表明，水分含量的升高能在一定程度上抑制羰氨反应速率，从而使

得有效氨基酸含量增加。所以，在调质过程中一般通过蒸汽或者加水来使得调质水分达到最佳，而物料的水分直接影响到调质蒸汽的添加量以及水分的添加量。

### 3.1.2 蒸汽质量

蒸汽作为调质过程中的传热体和传湿体，对物料吸热和吸水起到决定性作用，所以调质的效果在一定程度上取决于蒸汽的质量（罗斌等 2013）。蒸汽根据其指蒸汽温度和焓值不同，可分为湿蒸汽、干蒸汽（饱和蒸汽）和过热蒸汽。湿蒸汽中含有细微分散的水滴，与干饱和蒸汽的温度都是 100℃，但焓值却低于不含水滴的干饱和蒸汽，且蒸汽的饱和度（含蒸汽的程度，如蒸汽的饱和度=0.8，说明蒸汽的含量为 80%，细微分散的水滴的含量为 20%）越高，焓值越高；当常压下的蒸汽含量达到 100%时，就是干饱和蒸汽；对于干饱和蒸汽继续加热就可以得到过热蒸汽，具有更高的温度和焓值。在制粒调质中由于湿蒸汽和干饱和蒸汽会析出过多的水分，从而影响制粒，所以制粒调质一般采用过热蒸汽，而在膨化调质中，物料需要得到较多的水分和较高的温度，所以膨化制粒中一般采用干饱和蒸汽（王永昌 2005）。

### 3.1.3 调质参数

在调质过程中，调质温度、水分和时间是直接影响调质效果的三大要素，分别反映了物料的热量吸收、水分吸收以及与蒸汽的接触时间。调质时间的延长，调质温度和水分的升高，能促进淀粉的糊化和蛋白质变性，从而提高饲料的营养价值和制粒质量，同时有助于减少饲料中有害微生物（沙门氏菌、大肠杆菌等）的数量，提高饲料的卫生状况；但过长的调质时间，过高的调质温度和水分会导致维生素的降解和酶制剂的失活，对饲料的应用有不利影响。可见，为达到最佳的调质效果，调质温度、水分和时间的选择至关重要。

## 3.2 调质对营养物质的影响

### 3.2.1 调质对日粮淀粉的影响

淀粉是植物中重要的能量储存物质，是动物日粮中的主要能量来源。饲料中的淀粉主要来源于谷物，谷物淀粉主要分布于胚乳中，以颗粒的形式存在。淀粉颗粒是由结晶壳层和无定型壳层交替构成，其中结晶壳层主要是由连续的超分子螺旋结构的支链淀粉，以及螺旋结构缝隙中的直链淀粉构成；而无定型壳层主要是由直链



淀粉构成（段红军 2009）。在调质过程中，淀粉颗粒吸热、吸水膨胀，会发生凝胶化，也称为糊化。由于温度的升高，结晶区的一些化学键变得不稳定，从而断裂，吸收水分从而发生膨胀，由紧密结构变成疏松结构，淀粉颗粒发生破裂，淀粉分子之间相互连结，从而形成网状结构，也就是淀粉糊化过程。但淀粉的糊化程度主要取决于调质的参数以及物料的性质。

### 3.2.2 调质对日粮蛋白质和氨基酸的影响

蛋白质是作为六大营养物质之一，它在日粮中的含量以及氨基酸的比例在一定程度上直接决定了日粮的应用效果。蛋白质结构属于空间结构，但其稳定自由能一般低于 60 kJ/mol，受热容易被破坏。在调质过程中，由于蒸汽的持续供热，蛋白质的双螺旋结构被破坏，成为伸展结构，进一步吸收热量和水分后，多肽结构被破坏，蛋白质发生变性（林巧伟 2014；张现玲 2013）。饲料加工还可能导致美拉德反应，其中许多饲料成分参与（Thomas et al 1998），在热机械处理中使用的高温和低水分含量有利于美拉德反应（Voragen et al 1995）。在水和热的存在下，还原糖（如葡萄糖，乳糖，麦芽糖等）中游离醛基，和来自氨基酸（Amino acid, AA）的游离氨基，特别是赖氨酸（Lysine, Lys）的  $\epsilon$ -氨基，可以形成使产物变暗并且还增加粘度的二聚氰胺（Voragen et al 1995；Thomas et al 1998），这个反应，称为非酶促褐变，也被称为美拉德反应（Camire et al 1990）。美拉德反应的产物难以被消化，会导致饲料中蛋白质和碳水化合物营养价值的降低（Pickford 1992；Hendriks et al 1994；Thomas et al 1998），由于 Lys 是谷类中的第一个限制性 AA，来自这些成分的可利用的 Lys 的损失是主要后果（Abdollahi et al 2013），且在高温加工过程中，会导致耐热性不强的半胱氨酸的显著降解，其次是赖氨酸、精氨酸、苏氨酸和丝氨酸也会有所损失（Papadopoulos 1989）。

### 3.2.3 调质对维生素的影响

维生素是一类维持动物机体健康所必需的有机物质，在动物的生长、发育、代谢过程中发挥着重要的作用。维生素的种类很多，在物理性质的和化学性质上有所区别，大致可以分为水溶性和脂溶性两类，水溶性维生素的热稳定相对较差。在调质的加工过程中，水热的处理会导致维生素的结构和功能遭到破坏，失去活性。刘泽辉等（2015）研究报道了，维生素 A、D<sub>3</sub>、E 在调质过程中的损失率在 3%-5% 左



右，约占整个加工过程中的 40%，且随着调质温度的升高（从 65℃到 85℃），三种维生素的损失率逐渐升高。王红英等（2004）对调质过程中维生素 C 的变化进行了研究，发现调质过程中影响维生素 C 稳定性的主要因素是调质温度和蒸汽压力，且随着调质温度的升高和蒸汽压力的升高，维生素 C 的活性保存率降低。过去配合饲料中往往通过添加过量的维生素以补充加工过程中的损失，导致饲料的成本较高，现代加工工艺中，一些学者（尹兆正等 2002）认为应该继续深入研究维生素的保真技术，也有一些学者（Best 1999）建议采用维生素的后喷涂添加技术。

### 3.3 调质温度

调质温度是指物料经过调质加工后所达到的温度，是调质加工过程中的重要参数。调质温度会影响到物料的调质效果，从而对营养物质的消化率、日粮的加工特性以及畜禽的生长性能都有着重要的影响。

#### 3.3.1 调质温度对日粮加工特性的影响

##### 3.3.1.1 调质温度对颗粒质量的影响

颗粒饲料的质量就是颗粒饲料在机械和空气处理（装袋、储存、运输）中承受磨损，不会破碎成细粉且能达到饲喂要求的比例（Cramer et al 2003; Amerah et al 2007），通常用颗粒耐久度（PDI）和硬度来表示。耐久度以及硬度是颗粒饲料的重要加工指标，对于饲料的储存、运输以及饲喂效果有着重要的影响。调质过程中，调质温度增加，淀粉糊化度会随之增加，使得其粘性增加，在制粒后，其颗粒硬度和耐久度会增加。Abdollahi 等（2010）研究发现随着调质温度的升高（60℃-90℃），玉米型和高粱型肉鸡日粮的硬度增加。唐兴（2015）研究报道了大鸭日粮的硬度随着调质温度的升高（75℃-105℃）显著增加。当调质温度过高时，制粒的硬度过大，可能会影响饲料的消化和吸收，影响动物生长性能，降低饲料的利用率。

##### 3.3.1.2 调质温度对酶制剂活性的影响

酶制剂作为饲料添加剂在饲料业中的发展已经有 40 年的历史，由于其显著的效果，在世界范围内受到的关注度很高。随着颗粒饲料的发展，人们对于饲料的颗粒质量的要求越来越高，这就使得加工过程中的调质温度较高，但调质温度的提高，会导致酶制剂活性的降低。Bedford 和 Classen（1992）研究了肉鸡日粮的调质温度与酶制剂活性的关系发现，随着调质温度从 65℃提高到 105℃，酶制剂的活性呈线

性降低。吴德胜（2001）的研究报道了，植酸酶在调质（80.5℃）后其相对活性降低了 24%。后卫等（2012）的研究也表明，当调质温度达到 80℃以上时，淀粉酶和蛋白酶的活性降低。

### 3.3.1.3 调质温度对饲料卫生的影响

随着我国食品安全问题受到普遍关注，动物饲料卫生情况也越来越受到重视。饲料中的微生物的热敏感性较高，调质温度的提高有利于降低饲料中有害微生物活性，从而提高饲料的卫生程度。谢政军等（2003）报道了，调质对饲料中沙门氏菌的活性影响，发现调质温度越高，杀菌效果越好，当调质温度在 80℃左右，水分大于 15%时，灭菌效果在 98%以上。程译锋（2008）的研究表明，随着调质温度的升高，霉菌、细菌、大肠杆菌含量降低，且在 90℃时，细菌和霉菌的灭活率接近 100%。可见，在饲料生产过程中，提高调质温度有利于饲料卫生，但过高的调质温度也可能影响营养物质消化率，且目前国内的调质设备也在一定程度上限制了调质温度选择。

### 3.3.2 调质温度与营养物质消化率

在饲料的利用过程中，营养物质的消化率往往作为预测饲料利用率和饲喂价值最简单的方法。在调质过程中，淀粉、蛋白质等主要的营养物质会发生变化，而调质温度作为影响调质效果的主要因素之一，对淀粉的糊化、蛋白质的变性、酶制剂的损失等都有着重要的影响，在一定程度上决定了营养物质的消化率。Abdollahi 等（2010；2011；2012）研究了调质温度为 60℃、75℃、90℃的玉米、高粱、小麦型肉鸡日粮的营养物质消化率，调质温度对玉米型日粮的淀粉消化率没有显著影响（ $P < 0.05$ ），高粱型日粮的淀粉消化率随着调质温度的升高而降低，小麦型日粮的淀粉消化率在 60℃时取得最低；随着调质温度的变化，高粱型日粮和玉米型日粮的在氮的消化率有相同的趋势，在 75℃时取得最低的氮消化率，而在小麦中却正好相反，在 60℃和 75℃时取得最佳的氮消化率；随着调质温度的升高，小麦和高粱型日粮的表观代谢能（AME）降低，而在玉米型日粮中，当调质温度为 75℃时，AME 最高。可见不同原料由于其蛋白质和淀粉结构的差异，其最佳的调质温度也会有所差异。调质温度对饲料营养物质消化率的影响见表 1-2。

表 1-2 调质温度对营养物质消化率和动物生长性能的影响

Table 1-2 The effect of increasing conditioning temperature on nutrients digestibility and growth performance of animal

饲料原料	调质温度	动物及生长阶段	营养物质消化率	动物生长性能	参考文献
小麦	60、90°C	肉鸡（1-21d/22-35d）	1-21d AME↓ 22-35d 淀粉、N NS	ADG、ADFI、F/G NS	Abdollahi, 2012
小麦	20、60、75、90°C	肉鸡（1-21d）	AME↓, N 60、75°C最佳 淀粉 60°C最低	20°C时 ADG 最低, 20、 75°C时 ADFI 最低	Abdollahi, 2011
玉米	60、75、90°C	肉鸡（1-21d）	淀粉 NS, 75°C时 AME 最高、N 最低	75°C时 ADG 最低, ADFI、F/G NS	Abdollahi, 2010
高粱	60、75、90°C	肉鸡（1-21d）	AME、淀粉↓, 75°C时 N 最低	75°C时 ADG、ADFI 最低, F/G NS	Abdollahi, 2010
高粱	65、80、95°C	肉鸡（7-28d）	淀粉↑, AME NS, 80°C时 N 最低	FCR、ADG↓	Selle, 2013
玉米	70、85°C	生长猪（30kg）	淀粉糊化度、N（体外）↑	-	于纪宾, 2015
高粱	65、97°C	肉鸡（7-28d）	AME、AMEn↓	FCR↓	Truong, 2015
小麦	47、90°C	仔猪（5.6kg）	DM、N、GE↓	ADG、ADFI、G:F NS	Lundblad, 2011
小麦	47、90°C	肉鸡（0-21d）	DM、N、GE NS	ADG、ADFI↑、G:F NS	Lundblad, 2011
玉米	75、85°C	肉鸡（1-3weeks）	DM、CP NS	ADFI、ADG↑, G:F NS	张现玲, 2015
玉米	65、80°C	仔猪（11kg）	淀粉糊化度、硬度↑	ADG↓, ADFI、G/F NS	李星等 2001

注：↑表示提高，↓表示降低，NS 表示没有差异。

Note: ↑ means increase, ↓ means decrease, NS means no difference.

### 3.3.3 调质温度对畜禽生长性能的影响

随着蒸汽制粒作为主要的畜禽日粮加工方式，调质温度对畜禽生长性能的研究越来越多，提高调质温度对畜禽日粮生长性能影响见表 1-2。在猪日粮中，Lundblad 等（2011）将小麦型日粮在 47℃和 90℃温度调质后，对仔猪的日增重、日采食量和饲料转化率都没有显著影响。李星等（2001）研究了不同调质温度（65℃和 80℃）对仔猪玉米型日粮的影响，发现随着调质温度的升高，仔猪的日增重显著降低，但对日增重和饲料转化率没有显著影响。在家禽饲养中，日粮调质温度的影响更加明显。张现玲（2015）研究报道了，在肉鸡饲养过程中（1-3 周），将玉米型日粮的调质温度从 75℃升高到 85℃，肉鸡的日增重和采食量显著增加，但对饲料转化率影响不显著。Selle 等（2013）研究了高粱型日粮在 65℃、80℃、95℃三种调质温度下，随着调质温度的升高，肉鸡（7-28d）的日增重和饲料转化率显著降低。另外，调质温度的升高还会使非淀粉类多糖的溶解度增加，在不添加非淀粉多糖酶的条件下，会使家禽肠道内容物的粘度显著增加（Silversides and Bedford 1999），导致家禽的生长性能降低。

## 4 高粱型日粮调质温度的研究进展

随着高粱在畜禽日粮中的应用增加，高粱加工工艺及参数的研究也逐渐成为研究学者的关注重点。高粱相对于玉米和小麦等，主要存在消化率低的问题，所以对影响营养物质消化率和饲料利用率有重要影响的调质温度的确定，就尤为重要了。Taylor 和 Dewar（2001）报道高粱淀粉凝胶化的温度（68-78℃）超过玉米（62-72℃），这意味着高粱型日粮可能需要比玉米型日粮更高的调质温度。Abdollahi 等（2010）对肉鸡（1-21d）高粱型日粮在 60℃、75℃、90℃三种调质温度进行研究，发现随着调质温度的升高，淀粉消化率和表观代谢能降低，在 75℃时，蛋白质消化率最低，肉鸡的日增重和采食量也相对其他处理组较低。Selle 等（2013）采用 65℃、80℃、95℃也做了类似的研究，发现当调质温度为 80℃时，蛋白质消化率最低，有所不同的是，随着调质温度的升高，淀粉的消化率升高。Truong 等（2015）也做了相关的研究，但采用的是 65℃和 97℃，发现随着调质温度的升高，表观代谢能和料肉比都有所下降。可见，目前对于高粱型日粮调质温度的研究报道虽然不少，但温度范围和梯度的选择有所不同，结果也不尽相同甚至相反，这可能是采用的高粱原料的品

种及质量的不同导致的，另一方面，猪高粱型日粮调质温度的研究鲜见报道。所以，高粱型日粮调质温度的选择还需更深入地研究探讨。

## 5 本研究的目的是和意义

调质是颗粒饲料加工过程中的关键工序，是后序的制粒加工的必要步骤，调质参数的选择和确定对于饲料的营养物质消化率、饲料卫生、成品质量等都具有重要意义。近年来，高粱在饲料中的使用量逐渐增加，但高粱型日粮的调质参数还有待进一步研究探讨。由于高粱淀粉糊化温度和醇溶蛋白含量较高，使得高粱调质温度的选择更加重要，目前对于高粱调质温度的研究相对较少，且大多集中在肉鸡日粮中，因此本研究旨在筛选出适宜的调质温度应用于猪高粱型日粮的生产加工。结合实际生产条件和国内调质设备的限制，设定 65℃、70℃、75℃、80℃、85℃五种调质温度，进行梯度试验，对不同调质温度下高粱型日粮的加工特性、营养物质消化率及饲喂猪的生长性能进行评估，综合筛选出适宜的调质温度指导实践生产，有利于提高饲料利用率，减少饲料浪费，提高经济效益。

## 第二章 调质温度对猪高粱型日粮加工特性的影响

### 1 前言

自 20 世纪 70 年代末以来,颗粒饲料在我国的饲料业中的应用已有近 30 年的历史,颗粒饲料越来越受到饲料企业和畜禽、水产养殖业的喜爱,随着饲料业的发展和加工设备的改进,人们对于颗粒饲料的颗粒质量和加工特性提出了的要求也越来越高。现代饲料厂采用的加工工艺大部分是蒸汽制粒工艺,而调质温度是蒸汽制粒工艺中影响调质效果的重要参数,还会影响到后序的制粒加工,从而影响到颗粒的质量。胡彦茹(2011b)的研究表明了,调质温度的升高,会提高日粮的淀粉糊化度、蛋白质营养价值以及颗粒耐久性,但也有学者研究报道了,过高的温度反而会降低蛋白质溶解度(丁丽敏等 1998),影响维生素(王红英等 2004;刘泽辉等 2015)和酶制剂(Bedford and Classen 1992)的活性。且随着近年来高粱应用的增加,一些饲料企业发现高粱型日粮的硬度过大,对饲喂效果产生不利影响。所以选择合适的调质温度对于提高高粱型日粮的加工特性和颗粒质量具有重要意义。本试验旨在研究调质温度对高粱型日粮加工特性和颗粒质量的影响,为高粱型日粮的应用和加工提供指导。结合其他学者的相关研究发现,不同学者的研究结果的差异可能与日粮的配方不同有关,因此,本研究单独以高粱为研究对象,采用扫描电镜研究了不同调质温度下高粱的蛋白质和淀粉结构的差异,以期能为高粱的加工参数的选择提供更多的指导和参考。

### 2 材料和方法

#### 2.1 试验材料

##### 2.1.1 高粱原料

本试验采用的高粱样品由新希望六和集团即墨六和饲料厂采购,高粱样品的水分含量为 12.2%,粗蛋白含量为 9.21%,粗纤维含量为 2.67%,粗脂肪含量为 2.80%。

## 2.1.2 试验日粮

表 2-1 试验日粮组成（%，饲喂基础，计算值）

Table 2-1 Composition of experiment diets（%， as-fed basis, calculated）

原料 Ingredients	调质温度 Conditioning Temperature (°C)				
	65	70	75	80	85
高粱 Sorghum	71.84	71.84	71.84	71.84	71.84
膨化大豆 Extruded soybean	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
豆粕 Soybean meal	14.05	14.05	14.05	14.05	14.05
豆油 Soybean oil	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
面粉 Flour	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
石粉 Limestone	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
磷酸氢钙 Dicalcium phosphate	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
食盐 Salt	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
赖氨酸硫酸盐 Lysine-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
蛋氨酸 Methionine	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
苏氨酸 Threonine	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
色氨酸 Tryptophan	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
植酸酶 Phytase	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
预混剂 <sup>1</sup> premix	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
合计 Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注：1 预混料为每千克日粮提供：锰，35mg；镁，125mg；铁，152.5mg；锌，137.5mg；铜，125mg；碘，0.75mg；VA，11750IU；VD<sub>3</sub>，50IU；VE，50IU；VK，1.75mg；氯化胆碱，750mg；烟酸，38mg；泛酸钙，35.75mg；VB<sub>2</sub>，10mg；VB<sub>1</sub>，1mg；VB<sub>6</sub>，1mg；VB<sub>12</sub>，27.5mg；生物素，100μg；叶酸，0.5mg。

Note:<sup>1</sup> The premix provided per kilogram diet: Mn, 35mg; Mg, 125mg; Fe, 152.5mg; Zn, 137.5mg; Cu, 125mg; I, 0.75mg; VA, 11750IU; VD<sub>3</sub>, 50IU; VE, 50IU; VK, 1.75mg; Choline chloride, 750mg; Niacin, 38mg; calcium pantothenate, 35.75mg; VB<sub>2</sub>, 10mg; VB<sub>1</sub>, 1mg; VB<sub>12</sub>, 27.5mg; Biotin, 100mg; Folic acid, 0.5mg.

表 2-2 试验日粮营养水平（%，实测值）

Table 2-2 Nutrient level of experiment diets（%，detection value）

项目	调质温度 Conditioning Temperature (°C)				
Item	65	70	75	80	85
干物质 DM	87.84	87.86	88.06	87.91	87.95
干物质基础 DM basis					
粗蛋白质 CP	18.72	18.64	18.44	18.61	18.57
总能 GE (MJ kg <sup>-1</sup> )	16.24	16.22	16.31	15.97	16.14
粗脂肪 EE	4.10	4.22	4.32	4.10	4.09
粗纤维 CF	2.23	2.30	2.09	1.98	2.15
无氮浸出物 NFE	57.03	57.00	56.82	57.18	56.89
粗灰分 Ash	6.20	5.80	6.37	5.69	6.15
钙 Ca	0.84	0.82	0.73	0.79	0.78
磷 P	0.53	0.52	0.52	0.52	0.56

## 2.2 样品的生产与采集

### 2.2.1 高粱调质样品的生产、采集及保存

高粱调质样品的生产加工设备、场地由潍坊康地恩生物科技有限公司提供。高粱样品采用 1.5mm 孔径的筛片进行粉碎，然后采用申德 250 小型调制机在 65℃、70℃、75℃、80℃、85℃五种调质温度下进行调制加工，环模孔径为 3.0 mm，压缩比 1:3。每种调质温度重复生产 3 次。在样品加工的粉碎后、调质后、制粒后采集样品。粉碎后样品的采集在粉碎机稳定后，每隔 10min 采集一次，采集 3 次。调质后以及制粒后样品的采集在调质温度稳定后的第 3min、4min、5min 各采集一次，并混合保存。共收集到粉碎后样品 3 份，调质后混合样品 3 份、制粒后混合样品 3 份。采集到的样品保存在 4℃冰箱。

### 2.2.2 日粮的生产及样品采集、保存

将高粱样品在 2.0mm 筛片孔径粉碎，按日粮配方混合后，采用申德 420 调质制粒机在 65℃、70℃、75℃、80℃、85℃ 五种调质温度下进行加工，环模孔径为 3.0mm，压缩比为 1:4。在试验日粮生产加工的混合后、调质后、冷却后采集样品。混合后样品采用四分法取样，每隔 10min 取样一次，共取样 3 次。待调质温度稳定后于调质



后和冷却后取样，每隔 1min 取样一次，取样 4 次并混合保存，其中调质后取得样品立即测定水分含量。其中冷却后取样不少于 5kg，其它各点取样不少于 2kg。取样后用密封袋包装，保存于 4℃冰箱中，用于实验室各项指标检测。

## 2.3 主要仪器及试剂

扫描电镜观察在华中农业大学电镜平台完成，扫描电镜型号为 JSM-6390/LV，生产厂家为日本 NTC，分辨率为 3.0nm/4.0nm，放大倍数为 10-300000 倍，主要的附件有离子溅射仪、零界点干燥仪、真空镀膜仪等。

GWJ-1 型谷物硬度计、数显恒温水浴振荡器（SHZ-82 型，江苏金坛）、电子分析天平（感量，0.0001g，岛津）、高速冷冻离心机（R5804，Eppendorf）、分光光度计（722 岛津）

还原糖测定试剂盒（Solarbio，BC0230）

ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O（国药集团，化学纯）：配制成 10%（W/V）的溶液

NaOH（国药集团，化学纯）：配置成 0.5mol/L 的溶液

铜试剂：将 40g 无水 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>（国药集团，化学纯）溶于大致 400mL 蒸馏水中，加 7.5g 酒石酸（国药集团，化学纯），溶解后加 4.5gCuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O，混合并稀释至 1000mL 配制而成。

磷钼酸试剂：称取 70g 钼酸和 10g 钨酸钠，加入 400mL 10% NaOH 和 400mL 蒸馏水，煮沸 20min-40min 以驱赶 NH<sub>3</sub>，冷却后加蒸馏水至大约 700mL，加 250mL 浓正磷酸（85% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>），用蒸馏水稀释至 1000mL。

## 2.4 试验指标及检测方法

### 2.4.1 扫描电镜观察

用扫描电镜（JSM-6390/LV）观察粉碎后、调质后的高粱样品的淀粉和蛋白质的结构。将粉碎后、调质后的高粱样品经过冷冻干燥后，装台粘胶，进行样品表面镀金膜处理后镜检，每个观察点分别放大 500 倍、1000 倍、1500 倍及 2000 倍进行拍照观察，并选取结构清晰，辨识度高的照片进行比较。

### 2.4.2 淀粉糊化度的测定

淀粉糊化度采用熊易强（2000）的方法，具体如下：准确称取 2 份样品各 0.2g（准确至 0.0002g），分别置于 25mL 刻度试管内，其中 1 份供制备全糊化样品，另一份为测定样品。向样品中加入 15mL 缓冲液，混匀后将试管置于沸水浴中加热 1h（其间摇动 2 次~3 次），即为全糊化样品，用自来水冷却试管，滴加适量蒸馏水使液面恢复到加热前的位置，与测定样品一起进行以下步骤。向测定样品中加入 15mL 缓冲液，分别向全糊化样品与测定样品中加入 1mL 酶溶液。另取一空试管加入 15mL 缓冲液和 1mL 酶溶液，作为空白。在 40℃水浴中保温 1h，起初摇动 1 次，以后每 15min 摇动 1 次。保温达 1h 时，加 2ml 10%  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ，混匀，再加 1mL 0.5 mol/L NaOH。用水稀释至 25mL，混匀，过滤。准确吸取 0.1mL 滤液和 2mL 铜试剂，置于 25mL 刻度试管中。将该试管置沸水浴中 6min，保持沸腾，加 2mL 磷钼酸试剂，继续加热 2min。用自来水将试管冷却，加蒸馏水稀释至 25mL，堵住试管口（可用带手套的拇指或手掌），反复颠倒试管使之混匀，用分光光度计在 420nm 读取吸收值。

$$\text{淀粉糊化度 (\%)} = \frac{\text{测定样品光吸收} - \text{空白样品光吸收}}{\text{全糊化样品光吸收} - \text{空白样品光吸收}} \times 100\%$$

### 2.4.3 蛋白溶解度的测定

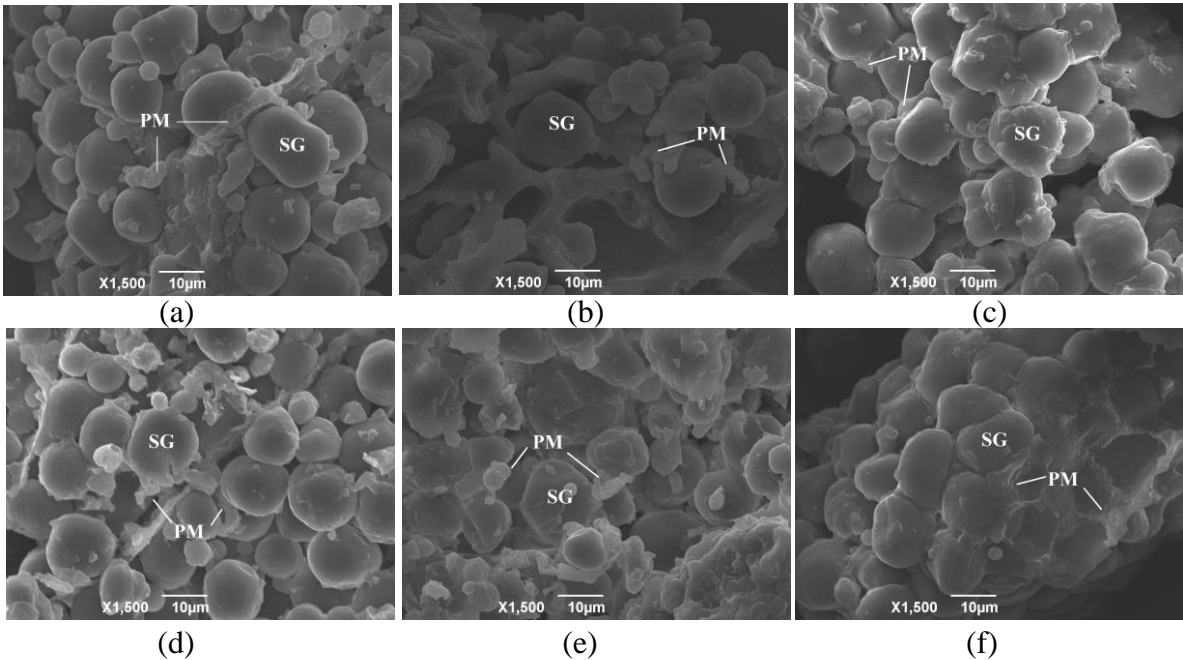
蛋白质溶解度（PS）采用 Dale 等（1987）的方法，具体如下：称取试样 1.5g（准确至 0.0002g）置于 250mL 烧杯中，准确移入 0.2% KOH 溶液 75mL，磁力搅拌 20min，然后将试样转移至离心管中，以 2700r/min 的速度离心 10min。移取上清液 15mL，放入消化管中，按照 GB/T 6432-1994 凯氏定氮法测定试样中可溶性蛋白质的含量。同时，测定试样中粗蛋白质的含量。

### 2.4.4 硬度的测定

颗粒硬度测定参照常碧影等（2008）的方法，具体如下：选取长度适中的颗粒饲料进行测定，将 GWJ-1 型谷物硬度计调零后，用镊子将待测样品固定在仪器工作台上（竖放），旋动手轮使顶杆压头缓缓向下移动，仪表开始指示压力负荷，到样品压碎瞬间的指针指示压力数为最大值，即为饲料的颗粒硬度。每批样品重复测定 15 次。

### 3 结果与分析

#### 3.1 扫描电镜观察



(a)是粉碎后的高粱样品（1500×）；(b)是 65℃调质后的高粱样品（1500×）；(c) 是 65℃调质后的高粱样品（1500×）；(d) 是 65℃调质后的高粱样品（1500×）；(e) 是 65℃调质后的高粱样品（1500×）；(f) 是 65℃调质后的高粱样品（1500×）；PM 蛋白质基质（蛋白体）；SG 淀粉颗粒。

(a) the sorghum after crushed; (b) the sorghum after steam-conditioning in 65℃; (c) the sorghum after steam-conditioning in 70℃; (d) the sorghum after steam-conditioning in 75℃; (e) the sorghum after steam-conditioning in 80℃; (f) the sorghum after steam-conditioning in 85℃. PM protein matrix (protein bodies), SG starch granule.

图 2-1 高粱调质样品的扫描电镜观察

Figure 2-1 Scanning electron microscopic observation of sorghum after steam-conditioning in different temperature

高粱调质样品的扫描电镜的结果见图 2-1。由图 2-1 可以看出，(a) 粉碎后高粱的蛋白质基质和淀粉颗粒的交联较为紧密；(b) 在 65℃下调质后高粱的蛋白质基质呈疏松多孔的网状，淀粉颗粒散布其中，且相对于调质加工前更加疏松；由 (b) → (f) 可以看出，随着调质温度由 65℃逐渐升高到 85℃，蛋白质之间的交联更加紧密，对淀粉颗粒的包裹程度逐渐增加，且在 85℃下调质后高粱的蛋白质基质的交联性以及对淀粉颗粒的包裹程度都高于调质加工前。通过画图软件，比较各种调质温度下高粱的淀粉颗粒的形态和直径，发现淀粉颗粒的形态结构和直径并无显著的差异。

### 3.2 调质温度对高粱型日粮加工特性的影响

表 2-3 调质温度对日粮加工特性和成品质量的影响

Table 2-3 The effect of conditioning temperature on processing characteristics and pellet quality of dices

项目	调质温度 Conditioning temperature, °C					SEM	相关性, Contrast <sup>1</sup>	
Item	65	70	75	80	85		L	Q
调质后								
淀粉糊化度(%)	8.21	8.41	8.77	9.22	10.10	0.628	0.320	0.600
蛋白溶解度(%)	75.88	75.13	74.37	72.85	67.66	0.885	0.001	0.039
日粮成品								
淀粉糊化度(%)	14.51	15.89	16.50	16.95	16.43	0.250	0.001	0.027
蛋白溶解度(%)	73.74	72.40	69.50	65.30	59.71	1.477	0.001	0.110
硬度(kg)	1.36	1.64	1.78	1.92	2.21	0.076	0.0003	0.0013

注: <sup>1</sup> 相关性: L 指调质温度线性相关, Q 指调质温度二次相关。

Note: <sup>1</sup> Contrast: L Conditioning temperature linear, Q Conditioning temperature quadratic.

调质温度对日粮加工特性和成品质量的影响见表 2-3。由表可知, 调质温度与调质后淀粉糊化度没有显著相关性 ( $P>0.05$ ), 但日粮成品的淀粉糊化度与调质温度呈显著的二次相关 (Quadratic Effect  $P<0.05$ ), 且在调质温度为 80°C 时取得最大值, 调质温度为 75°C、80°C 和 85°C 处理组, 差异不显著, 但却显著高于其他处理组; 随着调质温度的升高, 调质后和日粮成品的蛋白质溶解度都线性降低 (Linear Effect  $P<0.05$ ); 随着调质温度的升高, 日粮的颗粒硬度线性升高 (Linear Effect  $P<0.001$ ), 且在 85°C 取得最大值。

## 4 讨论

### 4.1 调质温度与蛋白质溶解度

日粮蛋白是动物生长发育所需蛋白质、氨基酸的主要来源, 其品质和消化率对动物的生长性能有着重要的影响。在日粮的加工生产中, 调质温度会影响到蛋白质的变性 (胡彦茹, 2011a) 以及美拉德反应的发生速率 (Thomas, 1998), 会影响到蛋白质的品质和消化率。蛋白质溶解度 (PS) 在一定程度上能反应蛋白质, 张现玲 (2013) 的研究表明, 调质温度的升高会导致蛋白质的变性, 利于蛋白质的消化, 然而丁丽敏等 (1998) 的研究表明, 过高的调质温度反而会降低蛋白质的溶解度,

贾旭等（2010）的研究报道了，调质会使蛋白质分子内的疏水性的氨基酸残基暴露出来，从而导致蛋白质的溶解度的降低，同时，随着调质温度的升高，氨基酸与糖类发生美拉德反应的速率也会增加，温度每升高 10℃，反应速率增加 3-5 倍（Keith, 2005），生成不易消化的褐色物质，从而影响蛋白质的质量。另一方面，高粱蛋白质中醇溶蛋白的含量较高，使得高粱蛋白质在水热加工过程中易产生二硫键，从而影响蛋白质的溶解度。

在本研究中，随着调质温度的升高，无论在调质后或制粒后，随着调质温度的升高，蛋白质的溶解度线性降低（Linear Effect  $P<0.05$ ），与贾旭等（2010）的结果相同。随着调质温度的升高，蛋白质的变性使得疏水性的残基暴露出来，降低了蛋白质的溶解度，美拉德反应的发生速率增加，使得游离性氨基酸与糖类结合，导致氮溶指数（NSI）的降低，另外，从高粱调质样品的电镜结果可以看出，随着调质温度的升高，高粱蛋白质的交联性增加，可能原因是高粱中醇溶蛋白在高温条件下，易形成二硫键（Duodu, 2003），导致了蛋白质的溶解性降低。

## 4.2 调质温度与淀粉糊化度

谷物淀粉是动物日粮中主要的能量来源，主要以淀粉颗粒的形式存在。淀粉颗粒在湿热处理过程中，易吸水膨胀，最终破裂，从而发生糊化（凝胶化）。淀粉的糊化，其与淀粉消化酶的接触面积增加，同时淀粉键的暴露出来，有利于淀粉的消化。淀粉的糊化在吸水的过程中还需要吸收热量，所以温度也是影响淀粉糊化度的限制性因素。在调质加工过程中，调质温度的升高有利于淀粉糊化度的提高。在本研究中，调质后的淀粉糊化度随着调质温度的升高而增加，但制粒后的淀粉糊化随着调质温度的升高先升高后降低，这与张现玲（2013）、胡彦茹（2011a）在玉米型肉鸡日粮中的结果不尽相同。随着调质温度的增加，其在调质过程中吸收的热量增加，在一定程度上，促进淀粉颗粒中化学键的断裂，使得淀粉的糊化度增加，而在高粱中，当调质温度过高时，高粱淀粉与蛋白质之间的交联增加，且由电镜图片可以看出，调质温度较高时，随着调质温度的升高，高粱的淀粉颗粒被蛋白质基质的包裹程度增加，可能会限制高粱淀粉的糊化，从而导致高粱淀粉的糊化度反而降低。

## 4.3 调质温度与颗粒硬度

耐久度以及硬度是颗粒饲料的重要加工指标，对于饲料的储存、运输以及饲喂效果有着重要的影响。影响颗粒饲料硬度和耐久度的因素有很多，而调质是除日粮配方（40%）和粉碎粒度（20%）外，最主要的影响因素（20%）。调质过程中，调质温度增加，淀粉糊化度会随之增加，使得其粘性增加，在制粒后，其颗粒硬度和耐久度会增加。Abdollahi 等（2010）研究发现随着调质温度的升高（60℃-90℃），

玉米型和高粱型肉鸡日粮的硬度增加。唐兴（2015）研究报道了大鸭日粮的硬度随着调质温度的升高（75°C-105°C）显著增加。当然，饲料颗粒硬度也不是越高越好，一方面，饲料的颗粒硬度过大，可能会导致制粒机的堵塞，另一方面，饲料的颗粒硬度过大，可能对动物的饲养产生不利影响。

本研究中日粮的颗粒硬度随着调质温度的升高而线性增加（Linear Effect  $P<0.001$ ），与 Abdollahi 等（2010）在肉鸡高粱型日粮中的研究结果类似。在实际的生产中，饲料企业期望的猪日粮颗粒硬度在 1-2 kg 之间较为适宜，过低的硬度不利于饲料的储存和运输，易造成饲料浪费，而过高的硬度可能对制粒机的环模等设备造成磨损，同时也可能影响饲喂效果。结合实际生产需要，高粱型日粮的调质温度在 75-80°C 时，具有较高的硬度，同时不会超过饲料企业的期望值。

## 5 小结

随着调质温度的升高，猪高粱型日粮的蛋白质溶解度线性降低，颗粒硬度线性升高，且当调质温度为 75°C、80°C 和 85°C 时，猪高粱型日粮的淀粉糊化度高于其他处理组。

## 第三章 调质温度对猪高粱型日粮养分消化率的影响

### 1 前言

在调质加工过程中，饲料通过蒸汽吸水吸热，使得蛋白质变性和淀粉糊化等，从而达到良好的调质效果，其中温度是影响蛋白质变性和淀粉糊化的关键因素之一，所以调质温度对蛋白质的变性和淀粉的糊化程度有着重要的影响。一般而言，调质温度的提高能增加蛋白质变性和淀粉的糊化程度，从而使得蛋白溶解度增加，淀粉与酶的接触表面积增加，提高蛋白质和淀粉的消化率。但对于高粱而言，醇溶蛋白在水热处理过程中随着温度的升高，其交联性增加，会影响到蛋白质和淀粉的消化率。一些学者也对调质温度和日粮养分消化率进行了研究（见表 1-3），但这些研究主要集中在以小麦或玉米为基础的肉鸡日粮中，在猪高粱型日粮上的研究鲜见报道，且在不同的饲料原料和不同的动物中的研究结果不尽相同，甚至相反。所以研究调质温度对高粱型日粮的养分消化率就具有重要的意义。

在近年来的试验研究中，通过体内法研究日粮干物质和蛋白质消化率以及表观代谢能主要采用全收粪法（Bao et al 2015）或着指示剂法（Paraskeuas et al 2017），而对于淀粉消化率的研究，由于淀粉的主要消化部位是小肠，且淀粉在大肠的利用效率很低，所以为排除大肠微生物对淀粉消化率的影响，体内法研究淀粉的消化率时，在猪上的研究都是采用在回肠末端安装简单 T 型瘘管（张遨然，2010；Jezierny et al 2017），在家禽上的研究一般采用屠宰法（Svihus et al 2001；Liu et al 2016）。所以本试验以猪为试验动物，安装简单 T 型瘘管，收集回肠食糜和粪样，研究调质温度对高粱型日粮养分消化率的影响，以期能筛选出一种或几种调质温度使得高粱型日粮的消化率最佳。

### 2 材料与方法

#### 2.1 体外消化试验

##### 2.1.1 试验材料

试验材料为试验一中采集到的调质后的高粱样品

## 2.1.2 仪器和试剂

仪器：数显恒温水浴振荡器（SHZ-82 型，江苏金坛），数显恒温振荡器（SHZ-82 型，江苏金坛），制冰机（LQP-B-4 型，上海），电子分析天平（感量，0.0001g，岛津），透析袋（ET9400，12000-14000）等。

试剂：胃蛋白酶（P7000，Sigma，USA），胰蛋白酶（P1750，Sigma，USA），PBS（磷酸盐缓冲液），HCl/NaCl 溶液（PH=2.0）等。

## 2.1.3 体外消化试验

本试验采用胃蛋白酶-胰酶两步法（彭健 1999），以不同粉碎粒度的小麦为底物，测定不同粉碎粒度小麦的干物质、蛋白质体外消化率。具体方法如下。

称取 5g（精确到 0.0001g）待测样品于 100 ml 三角烧瓶中，加入 500mg 胃蛋白酶（pepsin）（P7000，Sigma），50ml 0.1 mol HCl/54 mmol NaCl 溶液，在 40℃ 恒温振荡器中保温 1h。胃蛋白酶消化后，用 2.0 mol/L 的 NaOH 调节 pH 到大约 7.0，加入 20ml 的磷酸盐缓冲液（含 0.05% 的叠氮钠，0.1 mol/L）使 pH 稳定。预先浸泡好分子量拦截量为 12000-14000 的透析管（ET9004，12000-14000，U.S.A），把三角烧瓶中的内容物转移到透析管中。加入含有 50mg 胰蛋白酶（pancreatin）（P1750，Sigma）的缓冲液 1ml，扎好透析管，并留一定的空气于管内，以利于管内物质的混匀与透析。

为了模拟小肠环境，并使消化终产物的抑制作用降低到最小，样品的胰蛋白酶处理过程在 1 个消化/透析装置内进行。该装置是由数显恒温水浴振荡器的长方形锅合金方框，带动固定在方框内的 9 根透析管以 20r/min 的转速在 40℃ 水浴中回旋转动。每根透析管内装有 1 个待测样。样品经胰蛋白酶消化 6h 后，用冰水替代缓冲液以终止酶的作用。为保证所有水解终产物都被移出，透析管的内容物需在冰水中转动透析 72h。每 24h 换水 2 次。透析结束后，把残余物转入 100mL 塑料杯中，冷冻干燥后称干物质的重量，并用凯氏定氮法测定粗蛋白质的含量，每个样品至少重复 3 次。

## 2.1.4 计算公式

DM 的消化率（%）=（样品的 DM 重—残渣中的 DM 重）×100/样品中的 DM 重

CP 的消化率（%）=（样品的 CP 重—残渣中的 CP 重）×100/样品中的 CP 重



2.2 体内消化试验

2.2.1 试验日粮

试验日粮采用试验一中的日粮，经过粉碎机粉碎后，采用混合机拌入 0.3% 的二氧化钛指示剂制备而成。

2.2.2 试验设计

本试验设计按照 5 中调质温度共分为 5 个处理组，选择 5 头体况较好的安装了回肠末端简单 T 型瘘管的生长猪（20kg 左右）按 5×5 拉丁方试验安排试验日粮，试验总共分为 5 个周期进行，每周期 7 天，保证整个试验期每头仔猪均饲喂到 5 种处理日粮，日粮饲喂安排见表 5-1。

表 3-1 日粮饲喂安排

Table 3-1 Desgin of diets for pigs

试验期 Trial period	猪只编号 Pig number				
	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5
第 1 周 First week	D	C	E	B	A
第 2 周 Second week	E	D	A	C	B
第 3 周 Third week	A	E	B	D	C
第 4 周 Fourth week	B	A	C	E	D
第 5 周 Fifth week	C	B	D	A	E

注：A、B、C、D、E 分别表示在 65℃、70℃、75℃、80℃、85℃这五种调质温度下制备的高粱型日粮

Note: A, B, C, D, E means the sorghum-based diet in conditioning temperature of 65℃, 70℃, 75℃, 80, 85℃.

2.2.3 试验动物

选择有相同遗传背景的 7 头杜×长×大三元生长猪（约 20 kg），在环境温度为 21℃~25℃的代谢室内采用代谢笼单栏饲养，栏内有独立的饮水器和料槽，待试验猪只适应代谢室环境后进行手术。

2.2.4 T 型瘘管的安装手术

T 型瘘管安装手术参考黄瑞林等(2003)提供方法：本试验中 T 型瘘管采购自中国农业科学院北京畜牧研究所，为硅胶材质。具体手术过程如下：

（1）手术前处理：试验猪只手术前禁食 12h，禁水 6h。手术前 20min，注射抗生素（180 万单位青霉素）、镇定剂（阿托品注射液，8mL）、止血剂（止血敏，2mL）。

(2) 诱导麻醉：手术前，按照 10-25mg/kg 体重注射含 3% 戊巴比妥钠生理盐水的溶液，以诱导试验猪只麻醉。在手术过程中，注意观察试验猪只的呼吸情况，可适当补加注射麻醉剂，也可以采用利多卡因注射液进行局部麻醉。

(3) 备皮及保定：用肥皂水清洗手术部位，并刮毛，用清水洗净，再用碘伏消毒，用 75% 酒精脱碘，并将猪只左侧卧保定于手术台上，盖好创布，用巾钳固定。

(4) 开创：在试验猪腹部离最后肋缘 2~3cm 处皮肤，用手术刀作长度约 5cm 的斜向切口，依次钝性分离腹外斜肌、横直肌及腹内斜肌，直到底腹膜层，并在腹膜开 1cm 小口。在开创过程中，尽可能减少阻止损伤，避免损伤大的血管和神经，出血时视情况轻重用纱布压迫止血或用止血钳止血。

(5) 瘘管缝合及固定：在腹腔内寻找回盲韧带，找出回肠末端，在回肠末端开一段小口，将瘘管的 T 型端缝合进去。在最后肋骨处后最后两肋之间，开一个与瘘管相同大小的创口，将瘘管的导出管从其中穿出，以固定。注意，尽量不要改变肠道的走向，以免影响肠道的蠕动。

(6) 创口缝合：将腹部的创口缝合，连续缝合腹膜、结节缝合肌肉各层、最后外翻结节缝合皮肤。

(7) 术后护理：手术完毕后，将尚处于麻醉状态未清醒的猪小心放入试验代谢笼中，室内用保温灯控制温度  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 65%~70%，精心护理。术后 12h 禁水，48h 内禁食并注射葡萄糖氯化钠溶液，注意观察猪只的体温、饮水、排尿、排粪等状况。在术后恢复期内定时注射青霉素消炎，并用碘伏消毒。

## 2.2.4 饲养管理

试验猪术后恢复期内(约 10d)饲喂商品料，详细记录室温及仔猪健康采食情况，直至正式期，筛选出五头健康的仔猪，入试体重(Body weight, BW)为  $21.40 \pm 0.39 \text{ kg}$ ，按照试验设计分别饲喂五种试验日粮。每个试验期的第一天早上 7:00 仔猪空腹称重，并记录。按体内试验设计的要求，每天 8:00 和 19:00，给六头仔猪准确投喂对应的试验日粮，饲喂量以仔猪每周入试体重的 4.5% 计算，保证仔猪自由饮水。

## 2.2.5 食糜及粪样的收集

### 2.2.5.1 食糜的收集、保存及制样

食糜收集方法主要有塑料袋收集(Baker and Stein, 2009), 软管(Nyachoti et al 2005)和气球收集(Jacela et al 2007)。塑料袋法收集食糜, 简单方便, 不会影响仔猪正常的生理活动。因此, 本试验采用塑料袋法进行食糜收集, 仔猪经过 4d 的试验日粮适应和排空后, 在第每个试验周期的第 5d 早上收集新鲜粪样, 在第 6、7d 的 8:30-18:30 期间, 连续 10h 的食糜收集(Jacela et al 2007)。收集食糜之前, 将新洁尔灭浸泡过的 1.5L 塑料瓶, 用蒸馏水冲洗干净, 盛装食糜备用; 在收集气球中添加数滴浓度为 4.6g/L 甲酸, 以防止微生物对食糜的降解。每个阶段第一天收集到的食糜保存在冰水环境中, 待第二天收完食糜, 将两天的食糜在 1.5L 的容器中混匀, 置于-20℃冰箱保存。将食糜冷冻干燥(Weurding et al 2001b), 冷冻干燥后将食糜粉碎, 通过 60 目筛网(0.3mm 孔径), 盛于塑料样品袋, 4℃条件下保存待分析。

### 2.2.5.2 粪样的收集、保存及制样

在每个试验期的第 5 天早上开始收集新鲜粪样, 用样品袋盛装收集的新鲜粪样, 按粪样和盐酸比例 10:1, 添加浓度 10% 的盐酸。将收集到的粪样混匀后, 代表性的取约 300g 粪样于塑料袋, 置于-20℃冰箱保存。分析前, 将粪样在 65℃下风干、粉碎, 通过 60 目筛网(0.3mm 孔径), 盛于塑料样品袋, 4℃条件下保存待分析。

### 2.2.5.3 粪样中指示剂回收率的测定

在正式试验结束最后 2 天, 通过全收粪法收集仔猪的粪样, 准确记录仔猪的采食量, 根据 2 天内仔猪饲料的摄入量, 粪样排出量, 饲料中指示剂含量和粪样中指示剂含量计算二氧化钛指示剂的回收率。

## 2.2.6 测定指标与测定方法

### 2.2.6.1 主要试剂及仪器

二氧化钛标准液: 准确称量 250mg 的二氧化钛于大烧杯内, 加入 100mL 的浓硫酸。加热大烧杯, 并用垫的石棉网来调整温度, 保证硫酸不沸腾, 加热至全部溶解。将烧杯内溶液转移至 500mL 的容量瓶内, 再加入 200mL 蒸馏水和 100mL 浓硫酸, 用蒸馏水定容, 配置成 0.5mg/mL 溶液。

硫酸工作液：将 400mL 的浓硫酸混入 400mL 蒸馏水，倒入 1L 容量瓶，定容配置成 7.4mol/L 的溶液

双氧水（国药集团，化学纯）

氧弹式量热计（Parr6300，长沙）

分光光度计（722，岛津）

### 2.2.6.2 二氧化钛含量测定

二氧化钛含量的测定参考 Short（1996）的方法，具体如下：首先用吸管吸取 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10mL 的钛标准液于 100mL 的容量瓶内，依次加入 10mL 的硫酸工作液，20mL 双氧水，蒸馏水定容至 100mL，0mL 的样品处理作为空白背景，然后在 410nm 下测定吸光值，绘制标准曲线。称取 0.1g（准确至 0.0002g）样品于 50mL 坩埚中，在马弗炉中 580℃ 条件下灰化 13h，待降温至温热后，加入 10mL 硫酸工作液，煮沸约 60min，直至全部溶解，冷却后，转移至装有 25mL 蒸馏水的小烧杯内，洗涤坩埚并合并溶液，过滤后将滤液转移至 100mL 容量瓶，加入 20mL 双氧水，蒸馏水定容，并作空白对照，在 410nm 波长下测定吸光值，带入标准曲线中计算二氧化钛含量。

### 2.2.6.3 总能的测定

参考彭健(2008)，简要步骤如下，准确称取样品 0.5-1.0g，压样后放入坩埚内。取一段已知质量和热值的点火丝，分别接在氧弹两个电极柱子，调节点火丝与样品至合适距离。向氧弹加入 10mL 蒸馏水，将氧弹头小心拧好。接上氧气导管充入氧气至气压 2.5MPa。向氧弹内筒加入一定量蒸馏水，保持每次试验内筒水量与标定热容量时内筒水量一致。连接好电路，盖好桶盖。开启搅拌器，3min 后开始计时，读取内筒温度为初始温度。点火后，温度升至稳定再次读取温度。完毕后，取出氧弹，取出未燃烧的点火丝称量，计算燃烧热。

### 2.2.6.4 食糜中淀粉含量的测定

参考 Sehrijver(1999)方法，准确称取 100mg 的食糜样品于 100mL 的离心管内，加入 1mL 的蒸馏水，搅拌均匀。再加入浓度 2mol/L 的氢氧化钠溶液，40℃ 水浴剧烈的振荡 60min，直到食糜中淀粉分散彻底。用盐酸溶液和 0.4mol/L 的醋酸钠缓冲溶液调节离心管内溶液 pH 至 4.75，并加入蒸馏水定容至 100mL，取 10mL 溶液于

锥形瓶内, 再加入活性单位 200U 的淀粉葡萄糖苷酶将锥形瓶置于振荡恒温水浴 3h, 移至 100mL 容量瓶定容后取 200 $\mu$ L 溶液, 测定葡萄糖含量并推算食糜中淀粉的含量。

### 2.2.6.5 计算公式

$$\text{营养成分消化率 (\%)} = 1 - \frac{\text{食糜 (粪样) 中营养成分含量}}{\text{食糜 (粪样) 中指示剂含量}} \times \frac{\text{饲料中指示剂含量}}{\text{饲料营养成分含量}} \times 100\%$$

## 2.3 数据分析

在 Excel 表格中将数据进行初步整理, 用 SAS8.1 中 ANOVA 程序分析实验日粮处理的主效应, 而猪只个体与试验周期作为随机效应, 差异不显著为  $P>0.05$ , 显著水平为  $P<0.05$ , 然后用 SAS8.1 中 REG Procedure 对数据进行分析, 以一次 (L) 或二次 (Q) 相关的显著性呈现数据结果,。

## 3 结果与分析

### 3.1 瘘管手术结果

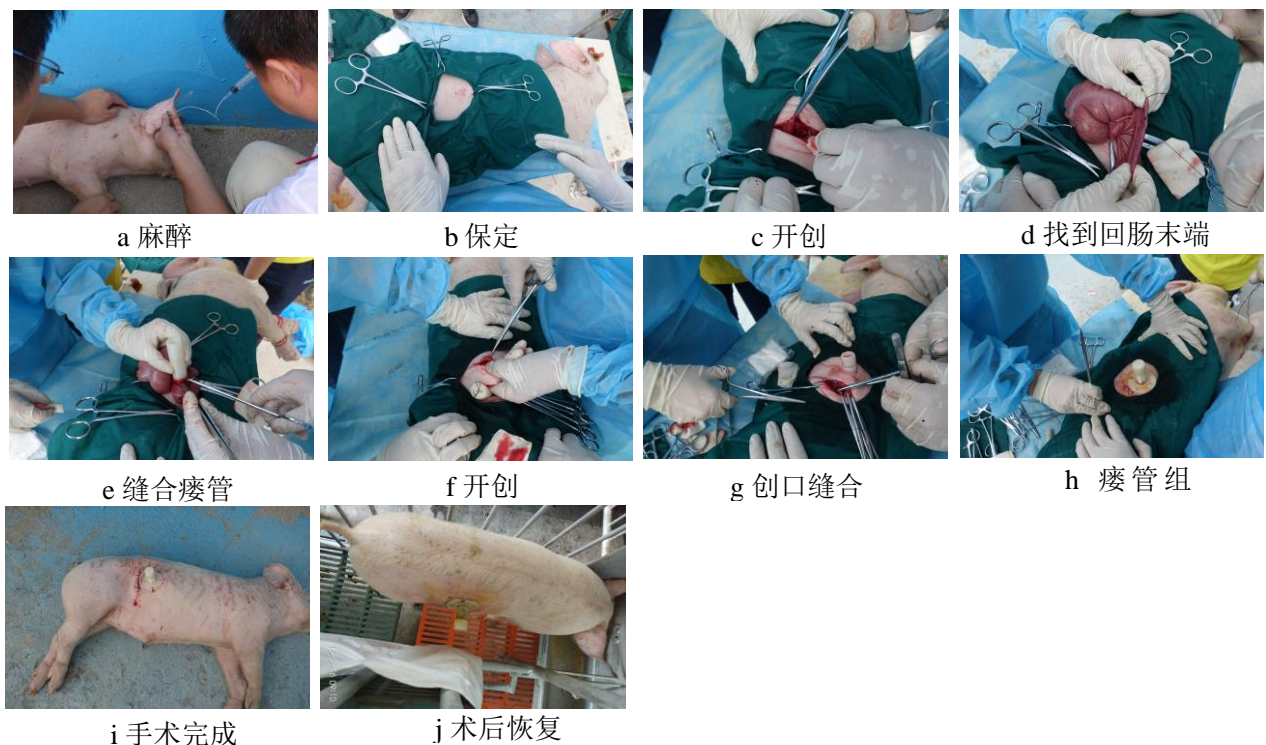


图 3-1 猪回肠末端 T 型瘘管安装手术

Fig 3-1 The T-type fistula insallation technique of ileal in pigs

整个试验安装简单 T 型瘘管的猪只共 7 头，在手术恢复期内，1 头出现腹泻，其它猪只在恢复期（约 10 天），采食量恢复到手术前水平，可成功用于消化试验的研究。且在正式试验期内，瘘管无堵塞，手术创口无感染，食糜易收集。

3.2 二氧化钛标准曲线和回收率的测定

使用分光光度计（722，岛津）在测定波长 410nm，绘制标准曲线如图 5-2，标准曲线方程： $y=9.0582x+0.0056$ ， $R^2=0.9992$ ，线性相关性良好，可以作为测定食糜和粪样中二氧化钛含量的标准曲线。

指示剂的回收率决定了消化代谢试验结果的可信度，本试验中二氧化钛的回收率为 95.46%，回收效果理想，可以作为消化试验的指示剂。

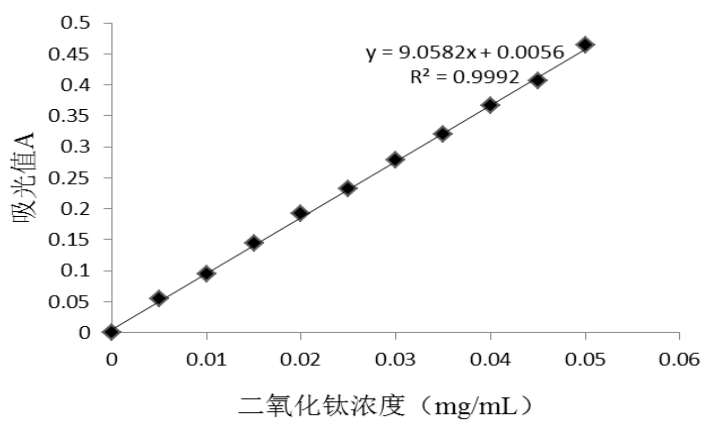


图 3-2 二氧化钛标准曲线  
Figure 3-2 The standard curve for titanium dioxide

3.3 调质温度对高粱体外消化率的影响

表 3-2 调质温度对高粱 DM 和 CP 体外消化率的影响（%）

Table3-1 The effect of conditioning temperature on digestibility of DM and CP of sorghum in vitro (%)								
项目 Item	调质温度, Conditioning temperature, °C					SEM	相关性 Contrast <sup>1</sup>	
	65	70	75	80	85		L	Q
干物质 DM	23.34	24.61	20.58	18.15	16.01	0.876	0.001	0.030
粗蛋白 CP	54.14	56.02	53.50	49.00	44.82	1.209	0.001	0.024

注：<sup>1</sup>相关性：L 指调质温度线性相关，Q 指调质温度二次相关。  
Note: <sup>1</sup> Contrast: L Conditioning temperature linear, Q Conditioning temperature quadratic.

调质后高粱的蛋白质体外消化率与调质温度呈显著二次相关（Quadratic Effect  $P<0.05$ ），且在调质温度为 70℃时取得最大消化率，调质温度为 65、70、75℃的处

理组之间的差异不显著，但显著高于其它处理组；调质后高粱干物质的体外消化率与调质温度呈显著二次相关（Quadratic Effect  $P<0.05$ ），且在调质温度为 70℃ 时取得最大消化率。

### 3.4 调质温度对表观消化率的影响

表 3-3 调质温度对高粱型日粮表观消化率的影响（%）

Table 3-3 The effect of conditioning temperature on nutrition apparent digestibility of sorghum-based diets in pigs (%)

项目 Item	调质温度, Conditioning temperature, °C					SEM	相关性 Contrast <sup>1</sup>	
	65	70	75	80	85		L	Q
干物质 DM	88.90	88.98	89.52	89.39	88.40	0.237	0.720	0.361
粗蛋白 CP	86.54	86.98	86.56	86.34	86.06	0.421	0.601	0.825
能量 Energy	89.00	89.02	90.30	89.20	88.50	0.244	0.640	0.156

注：<sup>1</sup> 相关性：L 指调质温度线性相关，Q 指调质温度二次相关。

Note: <sup>1</sup> Contrast: L Conditioning temperature linear, Q Conditioning temperature quadratic.

调质温度对高粱型日粮表观消化率的影响见表 3-3。由表可知，调质温度与干物质、蛋白质以及能量的表观消化率无显著相关性（ $P>0.05$ ），且调质温度为 75℃ 处理组的表观消化能显著高于 85℃ 处理组（ $P<0.05$ ）。

### 3.5 调质温度对表观回肠消化率的影响

表 3-4 调质温度对高粱型日粮表观回肠消化率的影响（%）

Table 3-4 The effect of conditioning temperature on nutrition coefficient of ileal apparent digestibility of sorghum-based diets in pigs (%)

项目 Item	调质温度, Conditioning temperature, °C					SEM	相关性 Contrast <sup>1</sup>	
	65	70	75	80	85		L	Q
干物质 DM	86.95	87.49	88.36	88.07	87.38	0.310	0.577	0.036
粗蛋白 CP	85.33	86.72	86.94	85.95	85.01	0.410	0.640	0.212
能量 Energy	86.44	86.39	87.97	86.75	85.66	0.289	0.564	0.108
淀粉 Starch	90.41	91.29	92.26	91.58	89.96	0.240	0.729	0.0011

注：<sup>1</sup> 相关性：L 指调质温度线性相关，Q 指调质温度二次相关。

Note: <sup>1</sup> Contrast: L Conditioning temperature linear, Q Conditioning temperature quadratic.

调质温度对高粱型日粮表观回肠消化率的影响见表 3-4。由表可知，调质温度与蛋白质和能量的表观回肠消化率无显著相关性（ $P>0.05$ ）；调质温度与干物质和淀粉的表观回肠消化率呈显著二次相关（Quadratic Effect  $P<0.05$ ），且在调质温度为 75℃

时，淀粉和干物质的表观回肠消化率最大，且调质温度为 70℃、75℃和 80℃三个处理组之间的淀粉消化率差异不显著 ( $P>0.05$ )，但显著高于其他处理组 ( $P<0.05$ )。

## 4 讨论

### 4.1 调质温度对蛋白质消化率的影响

动物日粮中的蛋白质提供了动物生长发育所需的必需氨基酸，其蛋白质的质量和消化率在一定程度上决定了日粮的饲喂价值。在饲料的生产加工过程中，蛋白质由于受热、挤压等原因发生变性，其双螺旋结构被破坏，分子间的化学键发生断裂，从而形成不规则的疏松结构。程译锋等（2009）研究报道，调质能使饲料蛋白质体外消化率增加 9%-12%，这可能是由于蛋白质的变性导致分子结构伸展开来，使得消化酶更易进入蛋白质内部，与消化酶的接触面积增加，从而使得蛋白质消化率的提高（Lacassag et al 1988）。在饲料加工过程中，特别是高温低水分的条件下，氨基酸还易于糖类发生美拉德反应，生成不易消化的褐色物质（Thomas et al 1998；Voragen et al 1995），降低蛋白质的消化利用率。

在本研究中，高粱型日粮的蛋白质的表观消化率、表观回肠消化率和调质温度均无显著相关性 ( $P>0.05$ )。有趣的是，高粱的蛋白质体外消化率与呈显著二次相关 ( $P<0.05$ )，且在调质温度为 70℃时取得最大消化率。调质温度对高粱和高粱型日粮的蛋白质的影响的差异性，可能是高粱型日粮中蛋白的来源不仅仅是高粱原料，还来源于膨化大豆和豆粕，由于高粱蛋白中醇溶蛋白的含量较高的，使得高粱蛋白质相对于高粱型日粮蛋白质中醇溶蛋白的比例较高，对调质温度的敏感性更高。

### 4.2 调质温度对淀粉和能量消化率的影响

淀粉在动物日粮中所占的比例通常在 40%以上，是日粮中主要的能量来源，淀粉的消化率在一定程度上决定了日粮的能量利用率。淀粉在动物消化道内基本都能被消化，但其消化利用率却有所区别。淀粉的消化主要场所在小肠，淀粉在酶作用下降解为葡萄糖，其能值为 17.57 kJ/g，不能消化的淀粉进入大肠被微生物用于发酵产生挥发性脂肪酸，其有效能值仅为 8.37 kJ/g (Liversey, 1990)，所以淀粉回肠消化率的升高，将有效提高动物的能量消化率。



在本研究中，随着调质温度的升高，猪高粱型日粮淀粉回肠消化率先升高后降低，且在调质温度为 75℃ 时取得最大消化率。随着调质温度的升高，淀粉的糊化度增加，使得淀粉的消化率增加；当调质温度过高时，由于蛋白质基质与淀粉的交联增加，淀粉颗粒被蛋白质所包埋，从而影响淀粉的消化率；调质温度过高时，会导致酶制剂（植酸酶）的活性降低（吴德胜，2001），从而影响到淀粉的消化；另一方面，Abdollahi 等（2010）的研究表明，随着调质温度的升高，抗性淀粉的含量增加，会降低淀粉的消化率。但本研究中实验结果与 Selle 等（2013）在肉鸡中的研究结果有所区别，这可能是日粮配方的差异以及猪与禽的消化道差异所导致。

在本研究中，猪高粱型日粮能量的回肠表观消化率和全肠表观消化率与调质温度均没有显著的相关性（ $P>0.05$ ），但调质温度为 75℃ 的处理组表观回肠能量消化率，与 80℃ 处理组无显著差异，但显著高于其它处理组，其表观能量消化率显著高于其他处理组。表观能量消化率主要受淀粉回肠消化率的影响，在趋势上与淀粉的回肠消化率具有一定的相关性。这与 Selle 等（2013）在肉鸡的研究结果类似，但与 Abdollahi 等（2010）的研究结果有所区别，可能产生的原因是，高粱的品种不同，导致高粱的醇溶蛋白含量、单宁含量等有所区别。

## 5 小结

高粱型日粮的蛋白质表观消化率、表观回肠消化率与调质温度均无显著相关性，且当调质温度为 75℃ 和 80℃ 时，高粱型日粮的淀粉表观回肠消化率和能量表观回肠消化率高于其他处理组。

## 第四章 不同调质温度的高粱型日粮对猪生长性能的影响

### 1 前言

调质温度对日粮的加工质量以及营养物质消化率都有重要的影响，从而影响到日粮的饲喂效果。一般而言，随着调质温度的升高，蛋白质变性和淀粉的糊化程度提高，在一定程度上提高了蛋白质和淀粉的消化率和日粮的加工质量，从而提高日粮的饲喂效果。但调质温度并不是越高越好，过高的调质温度会促使氨基酸发生美拉德反应（Voragen et al 1995），同时降低维生素和酶制剂的活性，从而导致营养物质利用率降低，饲喂动物的生长性能降低。Creswell 等（2006）研究了调质温度（65-105℃）对肉鸡生长性能的影响，发现过高的调质温度会降低肉鸡的日增重和饲料转化率，也有一些学者，得出了完全相反的结果。Selle 等（2013）研究了肉鸡高粱型日粮的调质温度对生长性能的影响，随着调质温度（65℃，80℃，95℃）的升高，肉鸡（7-28d）的日增重和料肉比显著降低。所以研究高粱型日粮的调质温度对动物生长性能的影响具有重要的意义。体外消化和体内消化试验虽然在一定程度上能反映日粮营养物质的利用率，但日粮的饲喂效果以及饲料转化率还需要通过动物饲养试验进行验证。所以，本试验通过动物饲养试验研究高粱型日粮的调质温度对猪采食量、平均日增重、饲料转化率的影响，筛选出一种或几种饲喂效果最好的调质温度应用于生产实践。

### 2 材料和方法

#### 2.1 试验设计

采用单因素试验设计，设 5 个处理，每个处理 5 个重复，每个重复 12 头猪。

#### 2.2 试验动物与饲养管理

选择胎次接近，平均 100 日龄的健康“杜×长×大”生长育肥猪 300 头（初始平均体重 45.73kg，最终平均体重 70.04kg），按照体重和体况相近的原则随机分为 5

个处理组，每个处理组 5 个重复，每个重复 12 头猪。饲养舍为密闭型育肥舍，正式试验期间保证猪只的自由饮水和采食，试验期为 25 天。

## 2.3 试验日粮

同试验三

## 2.4 生长性能的测定

试验开始和结束当天上午 8:00 以重复为单位对猪只进行称重，并记录。在试验期内的第 6 天、11 天、16 天、21 天、26 天对余料进行称重，每 5 天记录一次耗料量，观察猪只的采食量变化趋势。计算平均日增重（ADG）、平均日采食量（ADFI）以及料肉比（FCR）。每天观察记录猪只的采食和腹泻情况，对腹泻程度以 5 分制进行评分，以重复为单位计算腹泻率和腹泻指数。

## 2.5 数据统计

试验数据采用 Excel 进行初步的统计整理，并计算 SEM，然后采用 SAS8.1 中的 REG Procedure 对数据进行分析，以一次（Linear）和二次（Quadratic）相关的显著性呈现结果，并采用 SAS8.1 中的 GLM Procedure 分析单项指标组间差异的显著性， $P < 0.05$  表示差异显著， $P > 0.05$  表示差异不显著。

## 3 结果与分析

调质温度对猪生长性能的影响见表 4-1。由表可知，调质温度对平均日采食量（ADFI）和饲料转化效率（FCR）没有显著影响（ $P > 0.05$ ）；调质温度与平均日增重（ADG）呈二次相关（ $P < 0.05$ ），当调质温度为 75℃时取得最大值；调质温度与腹泻率（DR）呈二次相关（ $P < 0.05$ ），当调质温度为 80℃时取得最小值。从结果中还可以看到：调质温度为 85℃的处理组平均日增重显著低于其他处理组（ $P < 0.05$ ），但其他处理组之间差异不显著（ $P > 0.05$ ）。调质温度为 75℃和 80℃处理组腹泻率显著低于 65℃和 85℃处理组（ $P < 0.05$ ），但与 70℃处理组差异不显著（ $P > 0.05$ ）。

表 4-1 不同处理日粮对猪生长性能的影响

Table 4-1 The effect of diets on growth performance in pig

项目 Item	调质温度 Conditioning temperature, °C					SEM	相关性 Contrast <sup>1</sup>	
	65	70	75	80	85		L	Q
ADFI, kg/d	2.238	2.152	2.269	2.268	2.216	0.0216	NS <sup>2</sup>	NS
ADG, kg/d	0.971	0.974	0.988	0.985	0.899	0.0111	0.086	0.017
FCR, kg/kg	2.317	2.208	2.296	2.305	0.368	0.0270	NS	NS
腹泻 Diarrhea ratio, %	0.581	0.460	0.241	0.237	0.707	0.0570	NS	0.007

注: <sup>1</sup> 相关性: L 指调质温度线性相关, Q 指调质温度二次相关, <sup>2</sup>NS 表示  $P>0.05$ 。

Note: <sup>1</sup> Contrast: L Conditioning temperature linear, Q Conditioning temperature quadratic, <sup>2</sup>NS indicates  $P>0.05$ .

## 4 讨论

调质加工已经被证明能提高动物的生长性能 (Nir et al 1995; Svihus et al 2004; Abdollahi et al 2011), 也有许多学者研究了日粮调质温度对饲喂动物生长性能的影响, 但结果却不尽相同。一些研究表明, 随着调质温度的升高, 饲喂动物的生长性能提高。张现玲 (2015) 的研究也表明, 玉米型日粮的调质温度从 75°C 升高到 85°C, 肉鸡 (1-3 周龄) 的采食量和日增重显著升高, 料肉比无显著影响。但 selle 等 (2013) 研究了高粱型日粮的调质温度却等到了相反的结论, 随着调质温度 (65°C, 80°C, 95°C) 的升高, 肉鸡 (7-28d) 的日增重和料肉比显著降低, 这可能与饲料原料的营养成分和结构差异有关。在日粮原料相同的条件下, 饲喂动物的不同也可能导致研究结果有所区别。Lundblad 等 (2011) 研究了调质温度对小麦型日粮饲喂效果的影响, 发现随着调质温度从 47°C 升高到 90°C, 肉鸡 (0-21d) 采食量和日增重显著提高, 但在仔猪日粮中, 调质温度的升高却对仔猪 (5.6kg) 生长性能没有显著影响。

在本试验中, 高粱型日粮的调质温度对猪的采食量和饲料转化率影响不显著 ( $P>0.05$ ), 调质温度与猪的日增重呈显著二次相关 ( $P<0.05$ ), 且当调质温度为 75°C 时, 日增重取得最大值但与 65°C、70°C、80°C 处理组的差异不显著 ( $P>0.05$ )。说明高粱型日粮的调质温度并不是越高越好, 适当的调质温度可以提高猪的生长性能, 过高的调质温度反而会导致猪生长性能的降低, 出现这种现象的原因可能是: 调质温度的升高使得氨基酸与还原糖之间发生美拉德反应速率升高, 降低了氨基酸消化率, 从而导致生长性能降低; 另一方面, 调质温度过高可能导致维生素和酶制剂活

性的降低,从而影响到营养物质的利用率,从而导致生长性能的降低。这与 Abdollahi 等(2010)在肉鸡日粮中得出的结果有较大差异,他们的研究表明,但高粱型日粮调质温度为 75℃时,鸡的采食量和日增重最低,这可能是猪与禽的肠道消化特点的不同以及日粮配方的差异所导致的。此外,在本实验中,随着调质温度的升高,猪的腹泻率先降低后升高,产生这种现象的原因可能是,随着调质温度的升高,饲料中有害微生物的活性降低,饲料卫生程度提高,腹泻率降低,而调质温度过高时,一方面,高粱型日粮的硬度增加,可能对肠道的产生刺激,从而导致腹泻率升高;另一方面,高粱蛋白质之间及与淀粉颗粒间的交联型增加,食糜的粘性增加,从而影响到肠道的菌群导致腹泻率的升高。

## 5 小结

高粱型日粮的调质温度与 ADG 呈二次相关,且调质温度为 85℃处理组的 ADG 低于其他组;高粱型日粮的调质温度与腹泻率呈二次相关,且调质温度为 75℃和 80℃处理组的腹泻率显著低于其他处理组。

## 第五章 本研究的小结、创新点及尚待解决的问题

### 1 小结

(1) 随着调质温度的升高,猪高粱型日粮的蛋白质溶解度线性降低,颗粒硬度线性升高,且当调质温度为 75℃、80℃和 85℃的处理组的淀粉糊化度显著高于其他处理组。

(2) 高粱型日粮的蛋白质表观消化率、表观回肠消化率与调质温度均无显著相关性,且当调质温度为 75℃和 80℃时,高粱型日粮的淀粉表观回肠消化率和能量表观回肠消化率显著高于其他处理组。

(3) 高粱型日粮的调质温度与 ADG 呈二次相关,且调质温度为 85℃处理组的 ADG 显著低于处理组;高粱型日粮的调质温度与腹泻率呈二次相关,且调质温度为 75℃和 80℃处理组的腹泻率显著低于其他处理组。

本研究结论:调质温度为 75℃-80℃时,猪高粱型日粮的淀粉糊化度和表观回肠消化率较高,饲养试验中能取得较高的日增重和较低的腹泻率。因此,推荐生产实践中使用 75℃-80℃作为猪高粱型日粮的调质温度。

### 2 创新点

本课题主要对高粱型日粮的调质温度进行了研究。根据生产实践的需要和生产设备的限制,设置 65℃、70℃、75℃、80℃、85℃五种调质温度进行梯度试验,将饲料加工工艺与动物营养研究方法相结合,系统地研究了高粱型日粮的调质温度对加工质量、养分消化率和猪生长性能的影响,并通过扫描电镜直接反映了高粱淀粉和蛋白质在不同调质温度下的结构变化,筛选出适宜的调质温度应用于生产实践,使得饲料利用率和动物生长性能最佳,为高粱在猪日粮中的应用和加工提供指导。

### 3 待解决的问题

- （1）本课题主要研究了调质温度对高粱型日粮干物质、蛋白质、淀粉、能量的消化率的影响，调质温度对各种氨基酸的消化率的影响还需要进一步研究；
- （2）高粱粉碎粒度对调质温度选择的影响以及二者间的互作效应还需要进一步研究。

## 参考文献

1. 艾庆辉, 苗又青, 麦康森. 单宁的抗营养作用与去除方法的研究进展. 中国海洋大学学报自然科学版. 2011, 41(1): 33-40.
2. 常碧影, 张萍. 饲料质量与安全检测技术. 化学工业出版社, 2008.
3. 程译锋. 加工工艺对鲤鱼饲料营养和卫生的影响[硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2008.
4. 程译锋, 袁信华, 过世东. 加工对饲料蛋白质体外消化率和糊化度的影响. 中国粮油学报. 2009, 24(2): 125-128.
5. 丁丽敏, 沈慧乐, 计成, 戎易. 豆粕蛋白溶解度与肉仔鸡生产性能关系的研究. 动物营养学报. 1998, 10(2): 53-59.
6. 段红军, 淀粉颗粒的结晶结构. 科技风. 2009(15): 114.
7. 顾洪娟, 田玉民. 动物营养与饲料. 北京: 中国农业出版社, 2010.
8. 何丽媛. 2014年中国玉米市场回顾及2015年展望. 中国畜牧杂志. 2015, 51(2): 62-66.
9. 胡彦茹. 不同调质温度对颗粒饲料质量和肉鸡生产性能的影响[硕士学位论文]. 南昌: 江西农业大学, 2011a.
10. 胡彦茹, 何余湧, 陆伟, 程宗佳. 不同调质温度对肉鸡颗粒饲料加工质量的影响. 饲料工业. 2011b, 32(23): 34-36.
11. 寇兴凯, 徐同成, 宗爱珍, 刘丽娜, 陶海腾, 邱斌, 刘玮, 李文香, 杜方岭. 高粱的营养价值以及应用现状. 安徽农业科学. 2015(21): 271-273.
12. 李星, 冯尚连, 谷建勇. 原料粒度、入模温度对仔猪生长性能和消化的影响. 粮食与饲料工业. 2001(1): 38-39.
13. 林巧伟. 筛片孔径和调质后水分对膨化大豆生产能耗及应用效果的影响[硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
14. 刘青春, 俞海峰. 高粱在猪料中的应用研究进展. 见: 王军军, 刘作华, 吴德, 杨飞云, 杨凤娟, 黄金秀, 曾祥芳, 谯仕彦编, 第七届中国猪营养学术研讨会论文集. 第七届中国猪营养学术研讨会, 重庆, 2015, 重庆: 中国畜牧兽医学会动物营养学分会, 2015, 98-103.



15. 刘泽辉, 杨海锋, 黄志英, 雷胡龙, 赵志辉. 不同制粒工艺对饲料脂溶性维生素稳定性的影响规律研究. 粮食与饲料工业. 2015, 12(4): 45-47.
16. 卢春霞, 王洪新. 麦角生物碱的研究进展. 食品科学. 2010, 31(11): 282-288.
17. 罗斌, 王进红, 梁卫. 浅谈颗粒饲料生产当中的调质. 江西饲料. 2013(6): 20-21.
18. 裴素俭. 单宁酸对肉鸡生产性能、营养物质利用率及相关理化指标的影响[硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2012.
19. 彭健. 饲料分析与检测技术. 北京: 科学出版社, 2008.
20. 彭健. 中国双低油菜饼粕品质评价和品质改进研究[博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2000.
21. 唐兴. 调质温度、冷却时间对饲料硬度的影响. 农业开发与装备. 2015(3): 72.
22. 唐玉明. 高粱籽粒的酿酒品质研究. 酿酒. 2000(4): 45-47.
23. 王成章, 王恬. 饲料学(动物科学专业用). 北京: 中国农业出版社, 2003.
24. 王红英, 翟洪玲, 徐英英. 维生素营养成分在配合饲料加工过程中的变化规律研究. 粮食与饲料工业. 2004(12): 31-33.
25. 王永昌. 饲料调质工艺与设备的讨论. 饲料工业. 2005, 26(15): 1-6.
26. 吴德胜. 液体喷涂技术. 饲料广角. 2001(9): 22-23.
27. 谢正军, 金征宇. 饲料调质与卫生. 粮食与饲料工业. 2003(12): 45-47.
28. 熊易强. 饲料淀粉糊化度(熟化度)的测定. 饲料工业. 2000, 21(3): 30-31.
29. 薛志成. 饲料加工工艺中的调质问题. 江西饲料. 2007(4): 25-26.
30. 杨久仙, 宁金友. 动物营养与饲料加工. 中国农业出版社, 2006.
31. 尹兆正, 余东游, 祝春雷. 维生素预混料质量控制的几个关键环节. 饲料工业. 2000, 21(4): 28-29.
32. 袁保京, 王若瑾, 姜洁凌, 金立志. 高粱的营养价值及其在猪、鸡饲料与养殖生产中的应用研究进展. 中国畜牧杂志. 2014, 50(18): 70-75.
33. 张遨然. 玉米中淀粉支/直比及膨化加工对淀粉和能量消化率影响的研究[硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
34. 张福耀, 吴树彪, 柳青山. 影响高粱饲用价值主要内在因素及其对策. 动物营养学报. 2016(1): 1-8.
35. 张现玲. 调质温度、粉碎粒度对肉鸡颗粒饲料质量及利用率的影响研究[硕士毕业论文]. 北京: 中国农业科学院, 2013.

36. 张现玲, 段海涛, 倪海球, 秦玉昌, 李军国. 调质温度和粉碎粒度对肉鸡生长性能及养分表观利用率的影响. *动物营养学报*. 2015, 27(7): 2052-2059.
37. 朱炎峰. 影响调质器调质效果的主要因素. *广东饲料*. 2011(8): 111-112.
38. 左进华, 黄圣霞. 挤压膨化对大豆粕营养品质影响研究. *粮食与油脂*. 2008(3): 24-27.
39. Abdollahi MR, Ravindran V, Svihus B. Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. *Anim Feed Sci Tech*. 2013, 179:1-23.
40. Abdollahi MR, Ravindran V, Wester TJ, Ravindran G, Thomas DV. Influence of feed form and conditioning temperature on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broiler starters fed wheat-based diet. *Anim Feed Sci Tech*. 2011, 168(1): 88-99.
41. Abdollahi MR, Ravindran V, Wester TJ, Ravindran G, Thomas DV. Effect of improved pellet quality from the addition of a pellet binder and/or moisture to a wheat-based diet conditioned at two different temperatures on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broilers. *Anim Feed Sci Tech*. 2012, 175(3-4): 150-157.
42. Al-Rabadi GJ, Torley PJ, Williams BA, Bryden WL, Gidley MJ. Effect of extrusion temperature and pre-extrusion particle size on starch digestion kinetics in barley and sorghum grain extrudates. *Anim Feed Sci Tech*. 2011, 168(3): 267-279.
43. Bao Z, Li Y, Zhang J, Li L, Zhang P, Huang FR. Effect of particle size of wheat on nutrient digestibility, growth performance, and gut microbiota in growing pigs. *Livest Sci*. 2015, 183: 33-39.
44. Barekattain MR, Antipatis C, Choct M, Iji PA. Interaction between protease and xylanase in broiler chicken diets containing sorghum distillers' dried grains with solubles. *Anim Feed Sci Tech*. 2013, 182(1-4): 71-81.
45. Bedford MR, Classen HL. Reduction of intestinal viscosity through manipulation of dietary rye and pentosanase concentration is effected through changes in the carbohydrate composition of the intestinal aqueous phase and results in improved growth rate and food conversion efficien. *J nutr*. 1992, 122(3): 560.
46. Benz JM, Tokach MD, Dritz SS, Nelssen JL, Derouchey JM, Sulabo RC, Goodband RD. Effects of increasing choice white grease in corn- and sorghum-based diets on

- growth performance, carcass characteristics, and fat quality characteristics of finishing pigs. *J Anim Sci.* 2011, 89(3): 773-782.
47. Biggs P, Parsons CM. The effects of whole grains on nutrient digestibilities, growth performance, and cecal short-chain fatty acid concentrations in young chicks fed ground corn-soybean meal diets. *Poultry Sci.* 2009, 88(9): 1893-1905.
48. Blaney BJ, Mckenzie RA, Walters JR, Taylor LF, Bewg WS, Ryley MJ, Maryam R. Sorghum ergot (*Claviceps africana*) associated with agalactia and feed refusal in pigs and dairy cattle. *Aust Vet J.* 2000, 78(2): 102-107.
49. Camire ME, Camire A, Krumhar K. Chemical and nutritional changes in food during extrusion. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 1990, 29:35-57.
50. Cramer KR, Wilson KJ, Moritz JS, Beyer RS. Effect of Sorghum-Based diets subjected to various manufacturing procedures on broiler performance. *J Appl Poultry Res.* 2003, 12(12): 404-410.
51. Creswell D, Bedford M, Scott TA. High pelleting temperatures reduce broiler performance. Proceedings of the 18th Australian Poultry Science Symposium, 2006, Sydney, New South Wales, Australia.
52. Dale NM, Araba M, Whittle E. Protein solubility as an indicator of optimum processing of soybean meal. Proceedings of 1987 Georgia Nutrition Conference for the Feed Industry. Atlanta, Georgia: Georgia Nutrition Society, 1987: 88-95.
53. Dicko MH, Hilhorst R, Gruppen H, Traore AS, Laane C, Van-Berkel WJ, Voragen AG. Comparison of content in phenolic compounds, polyphenol oxidase, and peroxidase in grains of fifty sorghum varieties from burkina faso. *J Agr Food Chem.* 2002, 50(13): 3780.
54. Duodu KG, Jrn T, Belton PS, Hamaker BR. Factors affecting sorghum protein digestibility. *J Cereal Sci.* 2003, 38(2): 117-131.
55. Duodu KG, Nunes A, Delgadillo I, Parker ML, Enc M, Belton PS, Jrn T. Effect of Grain Structure and Cooking on Sorghum and Maize in vitro Protein Digestibility. *J Cereal Sci.* 2002, 35(2): 161-174.
56. Gabriel I, Mallet S, Leconte M, Fort G, Naciri M. Effects of whole wheat feeding on the development of coccidial infection in broiler chickens until market-age. *Anim Feed Sci Tech.* 2006, 129(3-4): 279-303.
57. Guo X, Yao H, Chen Z. Effect of heat, rutin and disulfide bond reduction on in vitro pepsin digestibility of Chinese tartary buckwheat protein fractions. *Food Chem.* 2007, 102(1): 118-122.

58. Hancock JD, Hines RH, Gugle TL, Goodband B, Tokach M. Extrusion of sorghum, soybean meal, and whole soybeans improves growth performance and nutrient digestibility in finishing pigs. *Kansas State Univ Swine Day 1991 Rep Prog* 641, 1991: 107-109.
59. Healy BJ, Hancock JD, Bramelcox PJ, Behnke KC, Kennedy GA, Goodband B, Tokach M. Optimum particle size of corn and hard and soft sorghum grain for nursery pigs and broiler chicks. *Kansas State Univ Swine Day 1991*, 1991: 56-62.
60. Healy BJ, Hancock JD, Kennedy GA, Bramel-Cox PJ, Behnke KC, Hines RH. Optimum particle size of corn and hard and soft sorghum for nursery pigs. *J Anim Sci*. 1994, 72(9): 2227.
61. Jacob JP, Mitaru BN, Mbugua PN, Blair R. The feeding value of Kenyan sorghum, sunflower seed cake and sesame seed cake for broilers and layers. *Anim Feed Sci Tech*. 1996, 61(1-4): 41-56.
62. Jezierny D, Mosenthin R, Sauer N, Schwadorf K, Rosenfelder-Kuon P. Methodological impact of starch determination on starch content and ileal digestibility of starch in grain legumes for growing pigs. *J Anim Sci Biotechnol*. 2017, 8(1): 4-11.
63. Johnston SL, Hancock JD, Hines RH, Behnke KC, Kennedy GA, Maloney CA, Traylor SL, Sorrell SP, Goodband B, Tokach M. Effects of expander conditioning of corn- and sorghum-based diets on pellet quality and performance in finishing pigs and lactating sows. *Kansas State Univ Swine Day Rep Prog*. 1998, 12(4): 565-572.
64. Khoddami A, Truong HH, Liu SY, Roberts TH, Selle PH. Concentrations of specific phenolic compounds in six red sorghums influence nutrient utilisation in broiler chickens. *Anim Feed Sci Tech*. 2015, 210: 190-199.
65. Knuckles BE, Kuzmicky DD, Betschart AA. Effect of phytate and partially hydrolyzed phytate on in vitro protein digestibility. *J Food Sci*. 1985, 50(4): 1080-1082.
66. Kopinski JS, Blaney BJ, Murray SA, Downing JA. Effect of feeding sorghum ergot (*Claviceps africana*) to sows during mid-lactation on plasma prolactin and litter performance. *J Anim Physiol Anim Nutr*. 2008, 92(5): 554-561.
67. Lewis LL, Stark CR, Fahrenholz AC, Bergstrom JR, Jones CK. Evaluation of conditioning time and temperature on gelatinized starch and vitamin retention in a pelleted swine diet. *J Anim Sci*. 2015, 93(2): 615-619.

68. Liu SY, Cowieson AJ, Selle PH. The influence of meat-and-bone meal and exogenous phytase on growth performance, bone mineralisation and digestibility coefficients of protein (N), amino acids and starch in broiler chickens. *Anim Nutr.* 2016, 2(2): 86-92.
69. Louis GF, Lewis AJ, Jr PE. Feeding value of grain sorghum for the lactating sow. *J Anim Sci.* 1991, 69(1): 223-229.
70. Lundblad KK, Issa S, Hancock JD, Behnke KC, McKinney LJ, Alavi S, Prestløkken E, Fledderus J, Sørensen M. Effects of steam conditioning at low and high temperature, expander conditioning and extruder processing prior to pelleting on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs and broiler chickens. *Anim Feed Sci Tech.* 2011, 169(3-4): 208-217.
71. Masama E, Shuro T. Effect of Replacement of Maize with Sorghum Brewer's Grains on Performance of Finishing Broilers. *Int J Innov Res Dev.* 2015, 4(1):85-89.
72. Medugu CI, Saleh B, Igwebuikue JU, Ndirmbita RL. Strategies to improve the utilization of tannin-rich feed materials by poultry. *Int J Poultry Sci.* 2012, 11(6):417-423.
73. Mikkelsen LL, Yan S, Goopy JP, Iji PA. Effect of grain type and particle size on growth performance and intestinal microbial populations in broiler chickens. *Proceedings of the XXIII World's Poultry Congress.* 2008: 126.
74. Mohamed A, Urge M, Gebeyew K. Effects of replacing maize with sorghum on growth and feed efficiency of commercial broiler chicken. *J Vet Med Sci.* 2015, 04(1):85-89.
75. Nir I, Hillel R, Ptichi I, Shefet G. Effect of Particle Size on Performance.3. Grinding Pelleting Interactions. *Poultry Sci.* 1995, 74(5): 771.
76. Nyannor EK, Adedokun SA, Hamaker BR, Ejeta G, Adeola O. Nutritional evaluation of high-digestible sorghum for pigs and broiler chicks. *J Anim Sci.* 2007, 85(1): 196-203.
77. Nyachoti CM, Atkinson JL, Leeson S. Response of Broiler Chicks Fed a High-Tannin Sorghum Diet. *J Appl Poultry Res.* 1996, 5(3):239-245.
78. Nyachoti C M, House J D, Slominski B A, et al. Energy and nutrient digestibilities in wheat dried distillers' grains with solubles fed to growing pigs. *J Sci food Agr.* 2005, 85(15):2581–2586.
79. Papadopoulos MC. Effect of processing on high-protein feedstuffs: A review. *Biol. Wastes.* 1989, 29:123–138.

80. Paraskeuas V, Fegeros K, Palamidi I, Hunger C, Mountzouris KC. Growth performance, nutrient digestibility, antioxidant capacity, blood biochemical biomarkers and cytokines expression in broiler chickens fed different phytogetic levels. *Anim Nutr*. 2017.
81. Paulk CB, Hancock JD, Fahrenholz AC, Wilson JM, Mckinny LJ, Behnke KC. Effects of sorghum particle size on milling characteristics and growth performance in finishing pigs. *Anim Feed Sci Tech*. 2015, 202: 75-80.
82. Pickford JR. Effects of processing on the stability of heat labile nutrients in animal feeds. In: Garnsworthy PC, Haresign W, Cole DJA(Eds.). Recent Advances in Animal Nutrition. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 1992:177–192.
83. Reyna L, Figueroa JL, Zamora V, Cordero JL, Sancheztorres MT. Addition of protease to standard diet or low protein, amino acid-supplemented, sorghum-soybean meal diets for growing-finishing pigs. *J Anim Vet Adv*, 2006, 12: 1202-1208.
84. Rodgers N, Iji PA, Mikkelsen LL, Svihus B, Hetland H, Choct M. Effect of grain particle size and milling method on broiler performance and apparent metabolisable energy. Proceedings of the 20th Australian Poultry Science Symposium, 2009, Sydney, New South Wales, Australia, 9-11th February 2009. Poultry Research Foundation. 2009: 133-136.
85. Rooney LW, Murty DS. Evaluation of sorghum food quality. *Sorghum*. 1982, 571-588.
86. Rooney LW, Pflugfelder RL. Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. *J Anim Sci*. 1986, 63(5): 1607.
87. Gualtieri M, Rapaccini S. Sorghum grain in poultry feeding. *World Poultry Sci J*. 1990, 46(3): 246-254.
88. Selle PH, Ravindran V, Pittolo PH, Bryden WL. An evaluation of microbial phytase in sorghum-based broiler diets. *Proc Aust Poult Sci Sym*. 1999, 11: 97-100.
89. Selle PH, Cadogan DJ, Li X, Bryden WL. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Anim Feed Sci Tech*. 2010, 156(3-4): 57-74.
90. Selle PH, Liu SY, Cai J, Cowieson AJ. Steam-pelleting and feed form of broiler diets based on three coarsely ground sorghums influences growth performance, nutrient utilisation, starch and nitrogen digestibility. *Anim Prod Sci*. 2012, 52(9): 842.
91. Selle PH, Liu SY, Cai J, Cowieson AJ. Steam-pelleting temperatures, grain variety, feed form and protease supplementation of mediumly ground, sorghum-based

- broiler diets: Influences on growth performance, relative gizzard weights, nutrient utilisation, starch and nitrogen digestibility. *Anim Prod Sci.* 2013, 53(5): 378.
92. Shelton JL, Matthews JO, Southern LL, Higbie AD, Bidner TD, Fernandez JM, Pontif JE. Effect of nonwaxy and waxy sorghum on growth, carcass traits, and glucose and insulin kinetics of growing-finishing barrows and gilts. *J Anim Sci.* 2004, 82(6): 1699-1706.
93. Silversides FG, Bedford MR. Effect of pelleting temperature on the recovery and efficacy of a xylanase enzyme in wheat-based diets. *Poultry Sci.* 1999, 78(8): 1184-1190.
94. Soest PJV. Nutritional ecology of the ruminant. *Cornell Univ P.* 1994, 44(11): 2552-2561.
95. Svihus B, Hetland H. Ileal starch digestibility in growing broiler chickens fed on a wheat-based diet is improved by mash feeding, dilution with cellulose or whole wheat inclusion. *Brit Poultry Sci.* 2001, 42(5): 633-637.
96. Svihus B, Klovstad KH, Perez V, Zimonja O, Sahlstrom S, Schuller RB, Jeksrud WK, Prestlokken E. Physical and nutritional effects of pelleting of broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill. *Anim Feed Sci Tech.* 2004, 117(3): 281-293.
97. Taylor JR, Dewar J. Developments in sorghum food technologies. *Adv Food Nutr Res.* 2001, 43(43): 217-264.
98. Taylor JRN, Schüssler L, Liebenberg NVDW. Protein body formation in the starchy endosperm of developing *Sorghum bicolor*(L.) Moench seeds. *S Afr J Bot.* 1985, 51(1): 35-40.
99. Thomas M, Van Vliet T, Van der Poel AFB. Physical quality of pelleted animal feed 3. Contribution of feedstuff components. *Anim Feed Sci Tech.* 1998, 70(1-2): 59-78.
100. Torres KAA, Pizauro JM, Soares CP, Silva TGA, Nogueira WCL, Campos DMB, Furlan RL, Macari M. Effects of corn replacement by sorghum in broiler diets on performance and intestinal mucosa integrity. *Poultry Sci.* 2013, 92(6): 1564-1571.
101. Traylor SL, Hancock JD, Behnke KC, Hines RH, Lee DJ, Johnston SL, Sorrell P, Goodband B, Tokach M, Dritz S. Expander processing conditions affect nutrient digestibility in finishing pigs fed corn-, sorghum-, wheat-, and wheat midds-based diets. *Kansas State Univ Swine Day Rep Prog.* 1998: 228-232.
102. Truong HH, Neilson KA, Mcinerney BV, Khoddami A, Roberts TH, Liu SY, Selle PH. Performance of broiler chickens offered nutritionally-equivalent diets based on

- two red grain sorghums with quantified kafirin concentrations as intact pellets or re-ground mash following steam-pelleting at 65 or 97 °C conditioning temperatures. *Anim Nutr.* 2015, 1(3): 220-228.
103. Voragen AGJ, Gruppen H, Marsman GJP, Mul AJ. Effect of some manufacturing technologies on chemical, physical and nutritional properties of feed. In: Garnsworthy, PC, Cole, DJA (Eds.), *Recent Advances in Animal Nutrition*. University of Nottingham Feed Manufacturers Conference, Nottingham, 1995, Nottingham: Nottingham University Press, 1995: 93–126.
104. Wall JS, Paulis JW. Corn and sorghum grain proteins. *Adv Cereal Sci Tech.* 1978, 2: 135-219.
105. Xu X, Wang HL, Pan L, Ma XK, Tian QY, Xu YT, Long SF, Zhang ZH, Piao XS. Effects of coated proteases on the performance, nutrient retention, gut morphology and carcass traits of broilers fed corn or sorghum based diets supplemented with soybean meal. *Anim Feed Sci Tech.* 2017, 223: 119-127.



## 附录 研究生在读期间发表的主要研究论文

1. Li L, Zhang P, Bao Z, Wang T, **Liu S**, Huang F. PGC-1 $\alpha$  Promotes Ureagenesis in Mouse Periportal Hepatocytes through SIRT3 and SIRT5 in Response to Glucagon. Scientific Reports, 2016, 6:24156.
2. **刘霜**, 罗杰, 张萍, 包正喜, 李鲁鲁, 黄飞若. 不同谷物原料的粉碎粒度在畜禽日粮中的应用研究. 饲料广角, 2016, 7: 22-26.
3. 周秋格, **刘霜**, 张文劲, 刘畅, 赖金伦, 黄飞若, 胡长敏. 猪回肠末端“T”形回肠瘘管安装手术. 养殖与饲料, 2016(11): 4-5.
4. 包正喜, 李鲁鲁, 王同心, **刘霜**, 张萍, 黄飞若. 门静脉血氨对猪肝尿素循环和糖异生的影响. 畜牧兽医学报, 2016, 48(1): 91-98.

## 致谢

本论文是在导师黄飞若教授的悉心指导下完成。从课题的选题、试验方案的确定、试验的开展、数据统计与分析到毕业论文的撰写、修改、定稿整个过程中，黄老师给予了大量的指导和建议。导师严谨的治学态度、精益求精的工作作风深深地感染着我，给我以后的工作和生活树立了良好的榜样。在此谨向黄老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意，感谢您在学习和生活中给予的关心和帮助！

本论文的完成离不开新希望六和股份有限公司李勇博士的指导和帮助，从论文的选题、试验方案的确定到实施，李博士都提出了大量的指导性意见和建议，同时为本试验的顺利进行提供了设备和场地。感谢您在整个试验实施过程中所提供的关心、帮助和支持！

衷心感谢动物营养与饲料科学系的彭健教授、齐德生教授、晏向华教授、马立保副教授、齐智利副教授、王艳青副教授、魏宏逵副教授、孙铝辉副教授、周忠新副教授和张妮娅副教授在我研究生期间的教导和帮助！衷心感谢高思老师在试验过程中给予我的帮助和支持！

衷心感谢新希望六和集团的邢伟刚先生、杜海涛先生、刘佳先生、曾光旭先生、卢晓峰先生、于树龙先生、张绣竹女士以及潍坊康地恩生物科技有限公司的朱克华先生在我整个试验过程中给予的鼓励和帮助！

衷心感谢所有的研究生兄弟姐妹们！感谢李季师弟协助我完成动物饲养试验！感谢张建松师兄、包正喜师兄、李鲁鲁师兄、张萍师姐在我试验过程中提出的宝贵意见和建议，以及对我生活和学习上的鼓励和帮助！感谢周颖、郭亮、王同心、秦廷洋、李蓉、姚卫磊、杨洪明、张轶凤、夏茂、朱洛毅等在我生活和学习中给予的热心帮助和鼓励！愿你们前程似锦！

感谢我的家人、朋友在这两年的学习生活中给予的支持、鼓励和信任！你们的支持和鼓励是我最大的动力

最后，再次感谢所有关心、支持和帮助我的老师、亲人、朋友！感谢华中农业大学对我的培养！愿华中农业大学的明天更加辉煌，动物营养与科学系的明天更加美好！

刘 霜

2017 年 6 月