


动物营养与饲料科学 研究进展

(1986—2016年)



© 四川农业大学动物营养研究所

**RESEARCH ADVANCES
IN ANIMAL NUTRITION AND FEED SCIENCE**

 中国农业出版社

动物营养与饲料科学 研究进展

(1986—2016年)

四川农业大学动物营养研究所

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

动物营养与饲料科学研究进展: 1986~2016 年 / 四川农业大学动物营养研究所编. —北京: 中国农业出版社, 2016. 6

ISBN 978 - 7 - 109 - 21731 - 7

I. ①动… II. ①四… III. ①动物营养-文集②动物-饲料-文集 IV. ①S816 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 118754 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 周锦玉

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 18.75

字数: 426 千字

定价: 50.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

总策划 陈代文 吴 德 余 冰 钟邦胜

总负责 周小秋 张克英

执笔人 (按姓氏笔画排序)

丁雪梅 王之盛 王立志 王建萍

车炼强 毛湘冰 方正锋 田 刚

白世平 冯 琳 刘光芒 吴 培

吴彩梅 何 军 陈小玲 林 燕

罗玉衡 罗钧秋 郑 萍 赵 华

姜维丹 贾 刚 徐盛玉 黄志清

彭全辉 曾秋凤 虞 洁 蔡景义

薛 白

前 言

1986年6月，四川省高等教育局批准四川农业大学成立正处级动物营养研究所，至今整整30年。经过30年的建设和发展，动物营养研究所在学科平台条件建设、队伍建设、人才培养和科学研究等方面取得了突出成就。

学科平台条件显著改善。实验室和教学科研基地的建设达到了国际同类实验室水平，动物营养学科先后三次被评为国家重点学科，拥有教育部、农业部、四川省重点实验室和四川省高校重点实验室，已建成国家级实验教学示范中心、教育部工程研究中心、四川2011协同创新中心。

师资队伍数量显著增加，质量显著提高。现有专职教学科研人员57人，其中教授（研究员）15人、副教授（副研究员、高级实验师）20人。队伍中拥有国家级教学名师、教育部长江学者特聘教授、国家“百千万”人才工程人选、享受国务院政府特殊津贴专家等，以及一批在国内有较大影响力的中青年骨干。团队已成为国家级教学团队、科技部重点领域创新团队、教育部创新团队、农业部创新团队、四川省青年科技创新研究团队。

人才培养规模较大、体系健全、管理严格、质量较高。30年来，共培养毕业生938人，其中本科199人、硕士601人、博士138人；现有在校博士生62人，硕士生190人。获“全国优秀博士学位论文”提名论文3篇，省优秀博士学位论文6篇，省优秀硕士论文9篇。毕业生就业率达100%，毕业研究生分布在我国30多个省（直辖市、自治区）和部分发达国家，大多数已经成为当地本领域的领头人或业务骨干。

科学研究方向明确、重点突出、特色鲜明、成效显著。研究方向由早期猪禽营养、饲料营养价值评定拓展到水生动物营养、草食动物营养、饲料加工技术，以及交叉领域如抗病营养、分子营养、营养与微生态学等领域；率先提出并开展动物抗病营养研究，2006年“猪抗病营养分子机制”项目入选教育部创新团队；在母猪系统营养、淡水鱼营养和鸭营养代谢与需要、地方饲料数据库和生物饲料开发利用等方面的研究达到国内领先水平；累计承担科研项目

(1986—2016年)

620 多项, 科研经费 1.83 亿元, 发表论文 1 015 篇, 其中 SCI 论文 424 篇, 获批国家授权专利 28 项, 出版教材、专著 24 部; 获省部级以上科技成果 30 多项, 其中国家科技进步二等奖 4 项, 四川省科技进步一等奖 4 项、二等奖 5 项, 中华农业科技奖二等奖 1 项, 90% 左右的成果得以推广转化, 累计创造经济社会效益近 400 亿元。

以上成绩的取得, 一是归因于我国政治经济发展的好时代。建所 30 年来, 国家改革开放政策极大地促进了现代畜牧业和饲料工业的兴起和发展, 这也激发了行业对人才和科技的需求; 同时, 各级主管部门长期对本学科的重视和支持, 促进了我所人才培养和科学研究的快速发展。二是归因于学校发展和对本学科的高度重视。学校长期在队伍建设的指标和中青年教师培养方面给予政策倾斜, 并通过国家“211”工程和学科建设专项经费对学科平台和条件改善进行了大量投入。三是归因于校内外的交流合作和社会各界的支持。研究所与国内外 30 多家兄弟院校长期保持交流合作关系, 定期邀请国内外专家来校考察与学术交流, 并多途径派出中青年教师出国留学、访问和合作研究; 同时, 与多家企业共建博士工作站和研究中心, 极大地促进了学科发展。更重要的是归功于全所几代人的艰苦奋斗和艰辛付出。1951 年, 学科创始人杨凤教授放弃在美国即将获得博士学位的机会毅然回国, 与端木道、陈可容教授等几位专家一起开始了动物营养与饲养教学和研究。1986 年成立动物营养研究所之时, 所长杨凤教授庄重表示“要培养一批人才, 争取成为全国重点学科, 在学术上走在国内同行前列。否则, 生则寝不安眠、食不甘味, 死则死不瞑目。”就这样, 他带领 10 多名教职员工和学生们开始了艰苦卓越的学科建设发展之旅。学术队伍建设方面, 重视团队精神文明建设, 注重学科交叉与融合, 人尽其才, 甘于奉献, 给年轻人“开铺子(创造工作条件)、铺路子、搭梯子”; 人才培养强调“先做人、后做事”, 注重培养过程管理和创新能力、实践能力培养; 条件平台建设方面, 从“猪公馆”到“洋猪舍”、屡开先河始终持续不断提高教学科研条件; 科学研究方面, 从中国实际出发, 求实创新, 凝练特色, 开展了大量开创性的工作, 取得了突出成果, 及时将成果进行转化并服务于社会。继任者们一直秉承“奉献、协作、求实、创新”的团队精神, 克服重重困难, 辛勤耕耘, 持续加强学科建设。学科从小渐大、由弱渐强, 整体实力和水平不断提升。

作为专职科研机构，动物营养研究所的主要职能是科学研究和高层次人才培养。按照学科建设的 yêu求，为适应经济建设的需要，我们不断凝练研究方向，拓展研究领域，合理配置资源，明确个人定位，组建研究团队，在猪、家禽、水生动物、草食动物营养和饲料科学共五个方向开展人才培养和科学研究。一方面加强基础和应用基础研究，不断推进理论进步和技术创新；一方面强化成果转化，与养殖业和饲料工业紧密结合，不断创造社会效益，推动行业发展。30年来，取得了一批标志性成果。

为了更好地总结过去，展望未来，促进交流，我们编写了本书，本书包含建所30年来猪、家禽、水生动物、草食动物营养和饲料科学方面的研究进展，特别是不同研究领域的开拓性和突破性进展，不仅对从事该领域的科学工作者有重要的借鉴意义，而且对实际生产也具有重要的实践指导意义。由于时间仓促，加上水平有限，错误在所难免，敬请指正和原谅。

在此，感谢老一辈杨凤、端木道、陈可容、钱文龙、张慎容、左绍群、王康宁、周安国教授对学科建设做出的杰出贡献和奠定的良好基础，特别缅怀杨凤和端木道先生，愿以此书的出版慰藉他们的在天之灵。

衷心感谢全体编写人员，特别感谢总负责人周小秋、张克英教授，主要编写人员徐盛玉、王建萍、何军、车炼强、冯琳、赵华、陈小玲、贾刚、彭全辉等老师付出的辛勤劳动！

动物营养研究所

2016年4月

目 录

前言

| | |
|-----------------------|----|
| 1 猪营养研究进展 | 1 |
| 引言 | 3 |
| 1.1 后备母猪营养研究进展 | 5 |
| 1.1.1 能量 | 5 |
| 1.1.2 蛋白质 | 7 |
| 1.1.3 矿物质和维生素 | 7 |
| 1.1.4 日粮纤维 | 7 |
| 1.1.5 小结 | 8 |
| 参考文献 | 8 |
| 1.2 妊娠母猪营养研究进展 | 10 |
| 1.2.1 营养水平和来源 | 10 |
| 1.2.2 氨基酸 | 12 |
| 1.2.3 矿物质和维生素 | 12 |
| 1.2.4 日粮纤维 | 13 |
| 1.2.5 添加剂 | 13 |
| 1.2.6 小结 | 14 |
| 参考文献 | 15 |
| 1.3 哺乳母猪营养研究进展 | 18 |
| 1.3.1 能量 | 18 |
| 1.3.2 蛋白质和氨基酸 | 18 |
| 1.3.3 脂类营养 | 20 |
| 1.3.4 添加剂 | 22 |
| 1.3.5 小结 | 23 |
| 参考文献 | 23 |
| 1.4 公猪营养研究进展 | 25 |
| 1.4.1 小结 | 26 |
| 参考文献 | 26 |
| 1.5 仔猪营养研究进展 | 27 |
| 1.5.1 营养水平与供应方式 | 27 |

(1986—2016年)

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 1.5.2 能量水平和来源 | 28 |
| 1.5.3 蛋白质和氨基酸 | 30 |
| 1.5.4 维生素 | 33 |
| 1.5.5 矿物元素 | 35 |
| 1.5.6 添加剂 | 37 |
| 1.5.7 日粮纤维 | 41 |
| 1.5.8 小结 | 41 |
| 参考文献 | 42 |
| 1.6 生长育肥猪营养研究进展 | 50 |
| 1.6.1 能量 | 50 |
| 1.6.2 蛋白质和氨基酸 | 51 |
| 1.6.3 维生素 | 53 |
| 1.6.4 矿物元素 | 54 |
| 1.6.5 添加剂 | 58 |
| 1.6.6 小结 | 62 |
| 参考文献 | 62 |
| 2 家禽营养研究进展 | 67 |
| 引言 | 69 |
| 2.1 蛋鸡营养研究进展 | 70 |
| 2.1.1 能量代谢与调控 | 70 |
| 2.1.2 小肽和氨基酸 | 72 |
| 2.1.3 矿物元素 | 73 |
| 2.1.4 维生素 | 74 |
| 2.1.5 添加剂 | 75 |
| 2.1.6 缓解轻度热应激的适宜营养水平 | 77 |
| 2.1.7 饲料粉碎粒度 | 77 |
| 2.1.8 饲料安全及鸡蛋安全生产 | 77 |
| 参考文献 | 80 |
| 2.2 肉鸡营养研究进展 | 85 |
| 2.2.1 能量 | 85 |
| 2.2.2 蛋白质、氨基酸、小肽 | 86 |
| 2.2.3 矿物元素 | 88 |
| 2.2.4 维生素 | 92 |
| 2.2.5 添加剂 | 95 |
| 2.2.6 饲料营养价值评定及高效利用技术 | 100 |
| 2.2.7 饲料安全与鸡肉安全生产 | 102 |
| 2.2.8 肉鸡代谢性疾病的营养调控 | 104 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 参考文献 | 106 |
| 2.3 肉鸭营养研究进展 | 112 |
| 2.3.1 肉鸭蛋白质周转代谢和脂肪沉积规律 | 112 |
| 2.3.2 能量 | 114 |
| 2.3.3 蛋白质 | 114 |
| 2.3.4 氨基酸 | 117 |
| 2.3.5 脂肪 | 120 |
| 2.3.6 矿物元素 | 121 |
| 2.3.7 维生素 | 122 |
| 2.3.8 饲料添加剂 | 123 |
| 2.3.9 饲料营养价值数据库 | 124 |
| 2.3.10 饲料高效及安全利用 | 128 |
| 2.3.11 肉鸭营养需要量 | 131 |
| 参考文献 | 133 |
| 2.4 珍禽营养研究进展 | 138 |
| 2.4.1 七彩山鸡 | 138 |
| 2.4.2 丝羽乌骨鸡饲粮适宜能量、蛋白质水平研究 | 139 |
| 参考文献 | 139 |
| 3 水生动物营养研究进展 | 141 |
| 引言 | 143 |
| 3.1 鲤营养和饲料研究进展 | 145 |
| 3.1.1 蛋白质 | 145 |
| 3.1.2 必需氨基酸 | 146 |
| 3.1.3 矿物元素 | 150 |
| 3.1.4 维生素 | 152 |
| 3.1.5 饲料及抗营养因子 | 158 |
| 3.1.6 小结 | 162 |
| 参考文献 | 162 |
| 3.2 草鱼营养和饲料研究进展 | 170 |
| 3.2.1 蛋白质 | 170 |
| 3.2.2 氨基酸 | 173 |
| 3.2.3 脂类 | 179 |
| 3.2.4 矿物元素 | 183 |
| 3.2.5 维生素 | 186 |
| 3.2.6 饲料 | 195 |
| 3.2.7 小结 | 199 |
| 参考文献 | 199 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 4 草食动物营养研究进展 | 207 |
| 引言 | 209 |
| 4.1 牛营养研究进展 | 210 |
| 4.1.1 营养与营养需要 | 210 |
| 4.1.2 饲料营养价值评定 | 218 |
| 4.1.3 饲料资源开发应用 | 220 |
| 4.1.4 其他 | 223 |
| 4.1.5 小结 | 225 |
| 参考文献 | 225 |
| 4.2 羊营养研究进展 | 230 |
| 4.2.1 营养与营养需要 | 230 |
| 4.2.2 饲料资源开发 | 234 |
| 4.2.3 其他 | 234 |
| 4.2.4 小结 | 235 |
| 参考文献 | 235 |
| 4.3 兔营养研究进展 | 239 |
| 4.3.1 营养与营养需要 | 239 |
| 4.3.2 饲料营养价值评定 | 241 |
| 4.3.3 其他 | 242 |
| 4.3.4 小结 | 243 |
| 参考文献 | 243 |
| 5 饲料科学研究进展 | 245 |
| 引言 | 247 |
| 5.1 饲料营养价值评定研究进展 | 248 |
| 5.1.1 能量 | 248 |
| 5.1.2 蛋白质氨基酸营养价值评定 | 256 |
| 5.1.3 饲料原料营养成分近红外化学成分预测模型 | 263 |
| 5.1.4 其他 | 264 |
| 5.1.5 小结 | 266 |
| 参考文献 | 266 |
| 5.2 饲料资源开发研究进展 | 270 |
| 5.2.1 饲料原料开发 | 270 |
| 5.2.2 饲料和添加剂高效利用 | 273 |
| 5.2.3 添加剂开发及应用 | 275 |
| 5.2.4 小结 | 283 |
| 参考文献 | 284 |

[动物营养与饲料科学研究进展]
(1986—2016年)

>>> 1 猪营养研究进展

引 言

猪营养研究室成立于四川农业大学动物营养研究所建立之初,经过30年的发展,目前已形成了一支年龄结构合理、充满活力、团结协作能力强,并具有较好创新能力的猪营养研究团队。研究室现有固定研究人员20名,其中教授7名、副教授8名、科研助理5名,在读硕士和博士研究生120余名。依托“动物营养学”国家重点学科、“动物抗病营养”教育部、农业部和四川省重点实验室等教学科研平台,团队紧紧围绕高效、优质和安全三大目标,以现代营养理论为指导,在母猪、种公猪、仔猪及生长育肥猪营养方面开展了系统研究,研究内容不仅涉及猪营养与饲养关键技术及饲料营养价值评定,而且结合现代分子生物、免疫学等先进技术对猪营养生理代谢规律进行了深入研究。2006年“猪抗病营养分子机制”入选教育部创新团队,2013年猪营养团队入选科技部重点领域创新团队;团队先后获国家科技进步二等奖3项,省部级科技进步一等奖5项、二等奖2项、三等奖4项;获国家发明专利21项。发表科研论文318篇,撰写博士论文46篇、硕士论文130篇。研究成果有力地推动了四川乃至全国养猪生产的发展和行业技术水平的提升。

丰硕的研究成果是猪营养团队30年坚持不懈、勇于进取的结果。团队一直秉承“奉献、协作、求实、创新”的团队精神,在杨凤等老一辈动物营养与饲料科学开拓者的带领下,研究条件由早期的“猪公馆”到“猪洋公馆”发展至目前的现代猪营养代谢试验系统;研究方向也由猪传统营养学向分子营养、营养与免疫等多学科交叉领域拓展。20世纪50—60年代,杨凤等老一辈学者对四川内江、成华、荣昌地方猪种的生长发育规律及其营养需要进行了较系统的研究,在全国率先提出以消化能代替苏联燕麦饲料单位的饲料能值评定体系;在“六五”和“七五”期间,主持了“四川猪饲养标准”“南方猪饲养标准”“畜禽硒、锌等微量元素需要及其缺乏症防治的研究”,与许振英教授等国内专家共同主持了“中国猪饲养标准”“全国饲料硒含量及其分布的研究”“中国饲料样样价值的评定研究”等国家、农业部及省的重点攻关项目。其研究成果已直接或间接应用于养殖业和饲料工业。其中,研究成果“四川猪的营养需要”获1983年四川省重大科技进步一等奖。

改革开放后,随着外种猪的大量引入,地方猪饲养标准已不能满足外种猪营养需要。杨凤教授等在云南丽江、思茅等地区推广杂交猪种并开展了大量营养需要量研究。20世纪90年代中期,团队成员参与完成了国家“九五”重点科技攻关计划项目“四川瘦肉型猪规模化养殖及产业化技术与开发”。该项目的实施全面推动了现代集约化养殖模式在四川省的发展。同一时期,在动物营养国家重点学科平台的支撑下,猪营养团队系统研

(1986—2016年)

究了外种猪不同生长阶段(仔猪、生长猪和育肥猪)的营养需要及代谢规律,在仔猪蛋白质营养与肠道健康、生长育肥猪肉质营养调控等领域取得了突破性成果。其中,陈代文教授主持的“猪禽蛋白营养代谢规律及其调控”和“仔猪动态营养调控及应用新技术”均获得四川省科技进步三等奖,王康宁教授参与的“猪、鸡营养参数及配方新技术研究”获1997年国家科技进步二等奖。

母猪是生猪生产的源头,其繁殖性能和泌乳性能低下一直是制约中国养猪生产的关键因素。研究室从20世纪90年代初开始,围绕如何提高母猪早期胚胎存活和泌乳性能两大基本目标,系统研究了能量、蛋白质氨基酸、纤维和维生素等营养水平对母猪繁殖性能的影响,揭示了能量水平影响母猪情期启动和卵巢发育的机制,探明了营养来源(能量、纤维)影响母猪繁殖性能的可能途径;在此基础上,提出了适合我国国情的母猪的适宜营养需要参数,为提高我国母猪繁殖性能提供了重要参考。2010年,陈代文和吴德教授等主持的“母猪系统营养技术与应用”获国家科技进步二等奖。进入21世纪以后,随着生猪集约化养殖规模增大和市场需求的改变,生猪产业开始暴露出料重比过高、疫病频发等一系列问题。团队围绕生猪健康、安全、优质、高效生产为目标开展了系列研究,期间形成了“猪抗病营养分子机制”教育部创新团队。研究室围绕仔猪主要养分需要量和来源开展了系列研究,揭示了在多种应激(氧化和免疫应激)和病理条件下仔猪营养代谢的变化规律,提出了在上述条件下仔猪的营养需要参数,突破了传统仅以生产性能作为唯一标识的营养需要标准,建立了提高仔猪抗病力和保障仔猪肠道健康的系统营养技术,为提高仔猪存活率、保障仔猪健康奠定了理论与应用基础。2013年,陈代文教授主持的“猪抗病营养理论与技术”获四川省科技进步一等奖。

同时,团队以四川现代生猪产业链关键技术与示范等项目协作为基础,探索了高校和科研院所的协同创新组织管理模式,先后与四川铁骑力士实业有限公司、广西商大科技股份有限公司等20余家大中型企业以共建博士工作站、研究中心和专家大院等方式,构建了以合作共赢为目标的协同创业模式,为生猪产业发展和稳定市场供给做出了重要贡献。

1.1 后备母猪营养研究进展



现代规模化猪场为保证胎龄结构的合理化，母猪群均保持一定比例的年更新率（30%~40%），以降低生产成本、提高生产效率。后备母猪是保证种猪群维持生产的必需力量，后备母猪培育的主要目标包括骨骼的健康发育、适时的情期启动、良好的卵泡发育和适宜的初配体况。健康的骨骼系统可为母猪的繁殖打下良好基础并影响其一生的繁殖成绩；适时的情期启动可有效减少后备培育期的生产成本，提高母猪的发情率；良好的卵泡发育可保证高排卵率及良好的卵母细胞质量，从而为早期胚胎的存活、产仔数及仔猪生后健康奠定基础；而适宜的初配体况不仅影响第一胎的繁殖成绩和泌乳力，同时对母猪的繁殖年限及终生繁殖性能皆有影响。因后备母猪的特殊重要性，20世纪90年代四川农业大学动物营养研究所便开始了对后备母猪营养的研究，而直到近年才受到更多重视。本部分内容主要从能量、蛋白质、矿物质、维生素和日粮纤维5个方面综述营养对后备母猪繁殖性能的影响及其可能机制。

1.1.1 能量

能量是维持动物一切活动的基础，也是饲料的重要组成部分。饲料能量浓度起着决定动物采食量的重要作用。营养所早期对雅南后备母猪的研究发现，随着消化能水平的提高，后备母猪初情体重呈线性增加；消化能摄入量和日增重呈正相关。根据饲料利用率、配种体重及繁殖性能指标证实，在当时条件下四川后备母猪饲养标准科学可靠；同时提出，在当时的饲养条件下及指标考核上低能量水平的饲养方案可行，如后续试验证实后备期低水平饲养对母猪随后的繁殖性能无影响，那么降低饲养标准可行（周小秋等，1994）。

近年以长白×大白杂交（LY）后备母猪为研究对象，发现饲粮能量水平和能量来源影响母猪的初情启动、发情率和卵母细胞质量（Zhou等，2010；石晓琳等，2013a）。高能水平（60~80 kg，40.03 MJ/d；80 kg至初情，45.83 MJ/d）日粮可提高后备母猪发情率，使大卵泡数目显著增加，饲粮添加脂肪有利于后备母猪情期启动。对后备母猪体成分分析发现，高能水平日粮可增加背膘厚、体脂含量、瘦肉含量和脂肪/瘦肉比值（周平等，2009）。高能水平日粮可促进血液中胰岛素（Insulin）、类胰岛素生长因子-I（IGF-I）和瘦素（Leptin）的分泌，促黄体激素（LH）脉冲分泌频率增加，同时可提高卵泡液中IGF-I和雌二醇（E₂）的浓度（周东胜等，2009）。体外卵母细胞成熟培养发现，提高饲

(1986—2016年)

粮淀粉含量有利于卵母细胞体外成熟；高能水平日粮可提高卵母细胞促黄体激素受体 (*LHR*) 和促卵泡激素受体 (*FSHR*) 基因 mRNA 的表达，而饲料添加淀粉可上调卵母细胞生长分化因子-9 (*GDF-9*) 和 *LHR* 基因 mRNA 的表达 (王延忠等, 2008; Zhou 等, 2010)。因此，在后备母猪培育期，供给高能水平并同时添加脂肪 (保证饲料中脂肪与淀粉的比例为 1:4) 的饲料有利于小母猪情期启动，提高发情率和排卵率并改善卵母细胞质量。

以上研究表明，能量储备是动物进行繁殖活动的基础，营养不良及负能量平衡状态抑制生殖轴，可能推迟初情启动。存在于下丘脑的 *KISS1/GPR54* 信号系统在灵长类动物、啮齿动物及其他哺乳动物初情启动中发挥了至关重要的作用，*KISS1/GPR54* 信号系统直接作用于促性腺激素释放激素 (*GnRH*) 神经元，向其传递机体营养状况信息，由此构建了能量与动物初情启动之间的桥梁。李方方 (2012) 研究发现，不同能量来源中，油脂来源组大鼠初情启动早于标准日粮和淀粉组，且提高了血液 *Leptin*、*Insulin*、*GnRH*、*LH*、*E₂* 水平。饲料中添加油脂可上调大鼠下丘脑弓状核 (*ARC*) *KISS* 基因表达，提高下丘脑-垂体-性腺 (*HPG*) 轴上初情期 *KISS1* 基因表达及垂体 *LHR*、*FSHR* 基因表达。细胞水平研究发现，代谢激素 *Leptin* 通过 *JAK2/STAT-3* 信号途径调控 *kisspeptin* 蛋白的表达，调控 *GnRH* 激素的分泌，从而影响初情启动 (李方方, 2012)。在 *LY* 后备母猪上的研究也得到类似结果。研究发现，限饲导致后备母猪发情期停止、繁殖器官损伤、血液激素水平下降、下丘脑 *KISS1/GPR54* 信号系统表达下调 (Zhou 等, 2013)，垂体转录水平上大量基因差异表达。生物信息学分析发现，差异基因主要富集在“神经活性配体-受体互作”和“*GnRH* 信号通路”等 (Xu 等, 2015a)。可见，后备母猪下丘脑 *KISS1/GPR54* 系统介导饲料能量水平影响母猪情期启动和卵巢发育，而下丘脑 *KISS1/GPR54* 系统相关基因的表达则受机体代谢和繁殖生理状况调节 (Zhou 等, 2013; Zhuo 等, 2014; Xu 等, 2015a)。

上述研究表明，能量水平通过调控 *E₂*、孕酮等激素水平影响后备母猪繁殖性能。在转录水平或翻译水平上调控 *E₂* 合成的限速酶——芳香化酶及孕酮受体 (*PGR*) 对 *E₂* 的合成分泌和孕酮功能的发挥具有重要作用。*Micro-RNAs* (*miRNAs*) 是一种 21~25 nt 长度的单链小分子 RNA，在基因表达的转录后水平调控发挥着重要功能。研究发现，*miR-378* 在后备母猪卵巢上的表达受营养水平影响，限制营养水平下 *miR-378* 的表达高于正常营养水平 (徐盛玉, 2012)。体外原代培养猪颗粒细胞研究发现，过表达 *miR-378* 抑制芳香化酶合成，进而抑制颗粒细胞雌二醇分泌。分子机制研究表明，*miR-378* 通过靶定结合芳香化酶 mRNA 的 3' UTR+1589~+1609 和 +1607~+1627 位点在转录后水平发挥调控作用 (Xu 等, 2011)。过表达 *miR-378-3p* 抑制 *PGR* 蛋白表达，导致与卵泡重塑和成熟相关的酶类在转录水平表达降低。分子机制研究表明，*miR-378-3p* 通过靶定结合 *PGR*+4062~+4082 位点在转录后水平发挥调控作用 (Xu 等, 2015b)。由此阐明了能量影响卵巢 *miR-378* 的表达是实现能量调控繁殖内分泌的途径之一。

众所周知，母猪的卵巢早在胎儿时期就已形成并发育，大约克猪的繁殖力是外种猪中较强的一种，经产 10 头以上，而这与我国的地方猪种梅山猪平均每胎产崽 16 头仍有着非