

猪饲料效率：生物和应用

John F. Patience 和 Mariana C. Rossoni Serao

美国爱荷华州埃姆斯市爱荷华州立大学动物科学学院, 50011-3150

邮箱：jfp@iastate.edu

国家科研创新竞争性经费资助项目（National Research Initiative Competitive Grant）为本文部分研究提供了科研经费，该项目由美国农业部国家食品农业研究所设立，经费批准号为：2011-68004-30336。

摘要

对于全球养猪业和食品经济学家来说，饲料效率都是非常重要的课题。提高饲料效率不仅能提高猪肉在蛋白市场中的竞争力，同时也能降低对饲料资源的需求。尽管饲料效率与整体饲料成本和盈利情况紧密相关，但是，在商业化条件下，对饲料效率的管理和测量是非常困难。由于饲料效率和能量代谢密切相连，通常认为饲料效率的本质就是能量的代谢和利用。饲料效率通常用饲料与动物生长速度的比率来表示；但是近年来饲料效率的目的性更集中，如表示为能量的转化效率，或饲料转化为胴体增重（而不是总增重）的效率。针对饲料效率改善的选育引起了人们对肉质、免疫应激、环境和社会压力方面的担忧。在多次选育后其对肉质的影响已经很明显了，但是对其他方面的担忧似乎是没必要的。养殖户可以通过多种手段改善饲料效率，包括遗传选育、饲料加工、日粮配方、环境管理和医疗保健。但是，由于改善饲料效率经常存在风险（预期增加净收入，结果却是净收入降低）所以，在改善饲料效率时应当谨慎对待。

关键词：饲料效率，能量效率，剩余采食量，能量，猪

引言

在现代养殖体系下，饲料占猪肉生产总成本中的 60-70%。而在饲料中，仅能量成本一项就可能占 50%，甚至更多 [1]。饲料中的含碳化合物，包括脂肪、碳水化合物和蛋白质，在氧化时释放能量。这些能量将用于蛋白质、骨头和脂类的生物合成，与维持相关的生化过程，主动离子转运、运动等等[2]。

由于能量是维持以及组织生长中非常关键的日粮成分，所以，对能量代谢的理解是理解饲料效率的基础。一般情况下，未成年猪会采食足够的饲料以满足生长过程中的能量需求。然而，在许多情况下，由于社会、生理和环境的限制，采食量的摄入也会受到影响，以至于每日能量摄入达不到最大增重率所需的能量。所以，饲料和能量摄入是非常复杂的问题，尽管研究了几十年，我们的认识还仍然不够[3]。

由于饲料效率与饲料成本密切相关，所以，饲料效率对经济回报影响很大，但是，提高饲料效率所采取的措施也可能会无意中导致经济损失，而非获得经济收益，这是因为只想着改善饲料效率可能会影响企业的其它方面，比如：仅用于提高饲料效率进行的遗传选育可能会降低生长速率[4]。再如：提高日粮能量浓度；虽然这种简单的措施几乎总是能改善饲料效率，但是，实际上也增加了每头猪的饲料成本[5]。

饲料效率作为一个如此重要的课题，经常被曲解。而且，关于实现最佳饲料效率的最佳途径，目前几乎还没有统一的共识。实际上，对于如何测定饲料效率的确也还存在分歧与误区。另外，还需意识到的是，在商业条件下高效测定饲料效率是极其困难的事情。

饲料效率的测定

按照商务惯例，饲料效率通常用每单位增重所消耗饲料的比率来表示。在科学界，则恰好相反，用每单位消耗的饲料所获得的增重来表示。就其本身而言，饲料效率概念非常简单直接。但是，简单表面下存在大量的错误。例如，饲料采食量（动物实际采食量）很少有人去测量，而实际测量的只是饲料消耗量（即料槽中饲料减少量），事实上熟悉料槽设计和调整的人都知道，饲料采食量和消耗量之间的差异在 10%左右，甚至在一些情况下可达 30%[6]。举例来说，有两组猪只 5-125kg 的饲料效率，分别为 2.41 和 2.53。事实上，在生长性能上，第二组与第一组表现一样。但他们多浪费了 5%的饲料。如果饲料效率中的一个点值 0.30 美元，那么，这个保守的饲料消耗数字将意味着每一头出栏猪的成本增加 3.60 美元。因此。我们应该认识到料槽中的饲料消耗量并不一定能准确反映猪只的采食量。

同样饲料效率还需要考虑很多细微的问题。比如：比较两组猪只时，即便生长性能一致，但不同的初始重和末重将导致不同的饲料效率。例如，将两组猪只进行比较，第 1 组的初始重为 25kg，末重为 125kg，而第 2 组的初始重为 28kg，末重为 122kg。那么，可能出现这样的结果：第 1 组的饲料转化率为 2.67，第 2 组的则为 2.72。然而，从生长性能角度上看，结果其实是相同的，因为试验开始时第 2 组猪只就比第 1 组重 3kg，结束时也重 3kg。导致饲料效率不同的唯一

原因就是不同的初始重和末重。如果不考虑整体情况，则很容易想当然地认为两组在饲料成本上存在差别，即每出售一头猪存在 1.5 美元的差异，而事实上，该偏差与饲料效率根本无关，是初始重和末重之间的差异导致的。因此，如果想公正的评判两组或多组猪只的饲料效率，就需要对初始重和末重进行相应的调整[7]。

饲料效率的表示方法

正如前面所提到的，饲料效率历来用饲料/增重比来表示。最近，也出现了一些其他的饲料效率表示方法。具体选择何种表示方法通常是由所在探求的知识以及用于做决策的信息表达方式所决定。例如，一个相对简单的改变是用胴体重代替总增重来计算饲料转化率。这个改变也是随着不断增加高纤维日粮的使用而逐步形成的，因为高纤维日粮的使用影响了屠宰率。由于大部分猪只都是按胴体重出售并支付，屠宰率差异对净利润有重大的影响。例如，Weber 提到在生长肥育日粮中将玉米 DDGS 含量从 30%提高到 60%，屠宰率将从 76.1%下降到 75.2% [8]。这个差别相当于屠宰场的每辆运猪卡车扔掉 1 头猪。

另一种饲料效率表示方法是用耗能代替耗料。这种方法的优势在于更加注重猪只利用日粮能量的效率。反过来说，这也是很有价值的，因为迄今为止日粮成本中占据最大比例的仍然是能量 [2]。然而，该表示方法也有其劣势，最重要的就是日粮能量浓度测量的不精确性。误差的第一层面存在于日粮能值的确定，通常使用的能值是书本上的经验值，并不是实际测定的，未必一定能真正反映日粮成分中的能量含量。误差的第二层面在于使用的日粮能量体系；尽管事实上我们知道区分各能量来源（用于维持和增重的蛋白质、脂肪、纤维和淀粉）的效率偏差导致消化能或代谢能均有误差，尽管我们知道消化能和代谢能体系在表示不同来源（蛋白、脂肪、纤维、淀粉）的能量在转化为维持需要和生长需要的效率存在差异，但世界上许多地方仍然继续使用两者来表示。因此，饲料效率的差异可能只是不同日粮能量体系表述引起的结果，而猪只将能量用于增重的效率并无真正的差异 [9]。

现在人们越来越期望能用经济效益来表示饲料效率，因为从根本上来说养猪的目的是为了最有效地利用饲料资源，其实也就是获得最令人满意的净收入。因此，在经济效益中饲料效率首选的表示方法包括：每头出栏猪的饲料成本、每公斤活增重的饲料成本、每公斤胴体增重的饲料成本以及扣除饲料成本后的收益。

饲料效率的生物学基础

能量学及能量转化为维持和生长的效率

猪只每日能量摄入中很显著的一部分就是用于维持。据估计，一头典型的 70kg 的猪，在自由采食的基础上，每日大约摄入能量中的 34%是用于维持 [2]。因此，任何能降低维持需要和提高能量转化为生长的效率的措施，都将改善饲料效率。这些手段包括减少不必要的群体应激、环境温度维持在猪只适温区、降低疾病对猪只的影响[1]。

残余采食量

如前文所述，通常饲料效率测定用饲料增重比来表示。1963年，Koch等发现这种方法存在一个问题。尽管他当时的研究对象是牛，但他的研究结论同样适用于猪。传统的饲料效率测定措施对待具有不同增长率和平均体重一样的动物并不区别对待，所以，这根本就毫无意义，尤其是从遗传选育的角度上看[10]。因此，Koch等根据增重率和中间体重调整耗料，这将有助于排除上述变量；这种新方法逐步用于衡量猪的生长速率以及身体成分，后来被称为剩余采食量（RFI）。RFI较低的动物，效率更高，而RFI较高的动物，效率更低。RFI的计算方法是实际采食量与用于动物生长速率和背膘所需要的预测采食量之差[10,11]。

营养利用率和效率

用于RFI双向选择的猪在胴体组成和采食量方面始终表现出差异。RFI低的猪与RFI高的猪相比，胴体脂肪和耗料均降低，但增长率却一样或略有降低[11-13]。在爱荷华州立大学猪群中，七代的选育导致平均日采食量降低了0.6 kg/d，而生长速率只是轻微下降，这相当于饲料效率增长了35%[13]。Harris等认为RFI双向选择改变了营养利用率和能量消化率，也导致氮和磷的平衡发生了变化[14]。

在RFI低的猪只中，蛋白质降解途径减少，其中包括肌肉内钙蛋白酶和的泛素蛋白酶体系统通路[15]。有趣的是，这些蛋白质降解的变化是因为氧化应激以及线粒体活性氧的生成水平的提高[16]。因此，蛋白质降解率和氧化应激水平的降低是低RFI的猪只饲料效率的改善的部分原因。

胴体和肉质

为了提高饲料效率，对猪只进行精心选育，有人担心这样可能会产生低质量的猪肉。相较于随机对照组，为低RFI选育的动物胴体背膘较少[12,17,18]或有这方面的倾向[13,19]。法国国家农业研究院（INRA）数据显示，低RFI选育的动物屠宰后pH值下降，导致肉品质量稍差[20]。法国研究人员报告中还提到低RFI选育的猪只保水能力有所降低[17]，感官品质也受损[18]。这些数据与美国爱荷华州立大学的研究人员发表的数据存在差异[19]。Smith等人发现低RFI猪肉与对照组中的猪肉在汁液流失率、汁液损失、最低颜色变化方面并无差异。然而，他们还称道肌内脂肪减少和屠宰后肌原纤维蛋白（比如：肌间线蛋白）水解降低相关的感官性状与RFI选育具有相关性。

免疫应激易感性

众所周知，接触病原体的猪只采食量将减少，从而影响生长速率[21]。动物接触病原体将使其代谢重点转移为适当的免疫反应。不过，有关评估提高饲料效率进行猪只选育对于疾病易感性和免疫反应的影响，数据极少。但是从理论上来说，为了提高饲料效率进行猪只选育可能使猪只更容易感染疾病。

Rakhshandeh等评估了反复的脂多糖（LPS）刺激对高RFI和低RFI猪只的影响[22]。他们发现营养成分的表观回肠消化率无明显差异，但是，在该免疫应激模型下，发现表观总肠道消化率有所提高，另外，对肠道营养运输和屏障功能没有产生任何影响。为低RFI进行的双向选择提高了营养成分的表观总肠道消化率，但对营养物质的表观回肠消化率没有影响。然而，免疫系统

刺激均会影响猪只日粮营养的表观回肠消化率(AID)和表观粪便消化率 (AFD)，并可能是导致粪能 (FE) 变化的主要原因。总之，在免疫系统刺激下，为低 RFI 进行的遗传选育会降低生长猪的总肠道消化能力。

改善饲料转化效率的实用措施

日粮能量浓度

众所周知，在日粮中提高能量浓度几乎总是可以改善饲料效率[表 1; 23,24]。如果未改善，那就意味着某种营养缺乏导致猪只无法吸收能量，或者是饲料成分能量值不正确。

尽管提高日粮能量几乎能保证饲料效率的改善，但是，如果是在不同的牧场、不同的试验中或在完全不同的日粮条件下测量的话，日粮的能量浓度和饲料效率的关联性将非常差[25]。原因在于影响饲料效率的因素多种多样，在商业条件下测量饲料效率也不准确，另外，即使在实验条件，日粮能量浓度也存在不精确性。

限饲与饲料效率

某些国家地区限制采食量以实现两个目标：一是通过减少脂肪含量提高胴体品质，二是提高饲料效率。通过减少体内脂肪，这种做法的确能提高饲料效率。体内蛋白沉积的能量消耗约为 10.03 kcal ME/kg，而脂肪的消耗为 11.65 Mcal ME/kg [2]。按此计算，每单位增重中脂肪沉积需要的能量比蛋白沉积多 16%。然而，在瘦肉增重中，蛋白沉积伴有水沉积，比例约 4 : 1，所以，与脂肪沉积相比，瘦肉沉积的实际优势大于 4 : 1[26]。在大多数主要的猪肉生产地区，限制采食量并不可行，因为会降低畜棚吞吐量，而畜棚吞吐量是整体牧场盈利能力的关键指标。

限饲或许也可以通过减少饲料浪费来提高饲料效率。的确有这种情况出现，因为饲料供应充足时，猪只就更可能浪费饲料。限制饲料供给通常会减少饲料浪费，从而提高饲料利用率。

但是，也可能会出现这种情况，限制采食量实际上损害了饲料利用率。当过于严重地限制采食量导致增长率严重降低，则需推迟出栏以达到上市体重，这同时还将增加在栏中饲养的天数。所以，通过提高增重效率和提高脂质增重和蛋白比率所获得的收益，完全被推迟出栏而增加的能量成本所抵消[表 2; 27]。

饲料加工

饲料加工管理能大大影响饲料转化效率。许多研究证明颗粒粒度和饲料效率之间存在近似线性关系近[28-30]。有研究认为每降低 100 微米粒径，料重比就会改善 0.04，至少玉米一定是这样的[31]。另外，也有研究认为降低粒度的标准偏差也能提高日粮的消化性。毋庸置疑，对于这个研究尚浅的课题，还有很多需要去研究 [表 3 和 4 ; 32]。

在用精细研磨的饲料最大限度提高饲料效率的同时，必须平衡各方面的因素，比如：额外加工的成本、日粮流动性的潜在困难以及对动物健康的可能产生的影响，特别是胃溃疡[28]。有评论认为，易患溃疡有遗传的因素，但是，通常粒径小于约 500 微米时，会加重胃溃疡问题。

当粒径小于 600 微米时，日粮将出现流动性问题，从而影响生产、运输和交货。又恰逢自 2009 年以来饲料价格异乎寻常的高，因此，与过去相比，许多猪肉生产商和饲料企业都采用了更多的制粒日粮。此前，制粒主要是用于仔猪早期阶段的教槽料，但是，一旦猪只达到 15kg 左右，占主导地位的就是全粉料，尤其是在美国玉米种植带。

就饲料效率而言，制粒优势非常明显，但制粒的真正优势被粒径所混淆。其实很好理解，当粒径较大时，制粒的优势最大，优势随着粒径变小而下降[33]。此外，当细粉最少时，制粒的价值就最大，不过，保持颗粒质量稳定具有很大的挑战性[34]。Stark[35]提出影响最终颗粒质量的因素很多，约 40%与日粮配方有关，其它相关性分别为调质 20%，粒径 20%，压模规格 15%以及冷却 5%。

畜舍温度

就像所有的哺乳动物，猪也是恒温动物，这意味着在环境温度下猪可以在相对大的范围内保持 - 事实上必须保持恒定的体内核心温度。这主要是通过调整热损失和热产生达到平衡来实现。在适温区内，猪的维持活动产热占了热产生总额的 70-72 % [36]。日粮能量的利用效率取决于底物；脂肪和淀粉的能量利用率比蛋白质和纤维更高。在炎热的夏季利用较高纤维和蛋白质的日粮是大忌，因为在代谢过程中这些日粮成分会产生更多的热量。如果猪只体内产生余热，通常会降低采食量，以试图降低热产生以减少散热导致的代谢损失。另一方面，如果猪只处于较冷环境，较高蛋白质和纤维的日粮便比较合适，因为饲料产热效应更大。

环境对猪的生长性能具有重大影响。例如，如果猪舍内温度低于猪的最低临界温度，每降一度，采食量将提高 1.5% [37]。对于体重 25kg 的猪只，最低临界温度估计在 23 - 24 °C，随着体重增加下降到 100kg 时的 15°C左右[38]。这个临界温度，特别是体重较大猪只的临界温度，对于猪舍工作人员来说可能会冷。然而与人类不同的是，猪只总是能吃多少就吃多少，这会产生大量的热量。因此，在猪舍工作人员感觉较冷的温度下，猪只也会感觉较舒适。

这些最低临界温度成立的条件是猪只健康、地板干燥、且无通风、猪舍隔热良好。如果这些条件有些不具备，最低临界温度需要提高大约 2~ 3°C，以适应湿气，通风等制冷的影响。同样，如果猪只不健康 - 并且采食量没有达到其最大值- 他们的最低临界温度会提高很多；这就是为什么我们看到猪圈中生病的猪总是挤作一团。即便对于相邻猪圈中健康猪只非常适宜的温度，对不健康的猪只来说都是会出现冷应激。

现有有限的的数据表明饲料转化率受猪舍高温的影响较小。在猪只出现热应激时，在温度高于最高临界值后每提高一度，采食量将下降约 1%（生长猪）和 2%（肥猪） [33]。采食量的下降主要表现在生长缓慢上，因此，饲料效率的变化非常小 [39]。

健康

在大多数情况下，疾病对猪群盈利的影响可能被低估了。猪肉生产商很少有机会对引入高健康猪只前后的生长性能进行比较。而那些进行过清群-复群前后对比的养猪生产商对于清群-复群前后生长性能、药品成本以及猪只死亡率降低等方面的差异都感到非常惊讶。通常情况下，如果一个

牧场不存在任何常见疾病，人们都认为很快就会感染相关的疾病，所以，猪肉生产商几乎都是持这种宿命态度。因此，接种疫苗已成为现代养猪生产的基本特征。虽然在大多数牧场疫苗发挥着重要的，甚至是至关重要的作用，但是，多关注生物安全也将带来大量的经济回报。例如，最近的一项调查确定猪繁殖和呼吸障碍综合征（PRRS）病毒阴性猪群与阳性猪群相比，每头有 4.71 美元的经济优势 [40]。

其它管理挑战

饲喂过程对饲料效率也具有重大的影响。不合适的料槽，再加上料槽管理不善，会导致很大的饲料浪费和较差的饲料转化效率，并且降低采食量。料槽调整得太紧会严重降低采食量和减少猪只采食的时间，结果降低料槽的容量[41]。料槽的设计将决定调紧料槽是能提高饲料效率，还是只能降低采食量和动物的生长。

料槽空间不足也可能导致较差的饲料转化率[8]。Weber 等表示在猪生长到出销售前的最后阶段之前，给料槽空间对饲料效率均没有影响。鉴于影响不是很大，且持续时间短，所以，不见得有必要在猪舍中安装新的给料槽，但是，在新建猪舍时，可以考虑安装新的给料槽，扩大空间。

在育肥猪阶段进行分类或分组，都是浪费时间。不仅不能提高猪的生长性能，实际上反而可能会导致生长放缓和较差的饲料效率。分栏唯一的理由是把非常小的动物或健康受损动物进行合理的安置，在隔开的猪圈中，幼小和健康受损的动物可以饲喂特殊的日粮，并获得更多的照顾。否则，不鼓励分栏，因为分栏将增加劳动量，但对猪只的生长性能却无任何益处 [42]。

References 参考文献

1. Gutierrez NA, Patience JF: The metabolic basis of feed-energy efficiency in swine. In *Proc AI Leman Conference*. St. Paul, MN; 2012:19-26.
2. Patience JF: The influence of dietary energy on feed efficiency in grow-finish swine. In *Feed Efficiency in Swine*. Edited by Patience JF. Wageningen: Wageningen Academic Press; 2012:101-129.
3. Nyachoti, C.M., R.T. Zijlstra, C.F.M. de Lange and J.F. Patience. 2004. Voluntary feed intake in swine: A review of the main determining factors and potential approaches for accurate predictions. *Can. J. Anim. Sci.* 84:549-566.
4. Young JM, Dekkers JCM: The genetic and biological basis of residual feed intake as a measure of feed efficiency. In *Feed Efficiency in Swine*. Edited by Patience JF. Wageningen: Wageningen Academic Press; 2012:153-166.
5. Patience JF: Feed, caloric and financial efficiency. In *Proc. London Swine Conference*. 2013:95-103.
6. Baxter MR: The Design of the Feeding Environment for the Pig. *PhD Thesis*. University of Aberdeen; 1986.
7. Gaines AM, Peterson BA, Mendoza OF: Herd management factors that influence whole herd feed efficiency. In *Feed Efficiency in Swine*. Edited by Patience JF. Wageningen: Wageningen Academic Press; 2012:15-39.
8. Weber, E: Feeder Space Availability and Dried Distillers Grains With Solubles Inclusion Rate Effects On Nursery and Finishing Pig Performance and Total Tract Digestibility in a Commercial Setting. *MS Thesis*. Iowa State University, Department of Animal Science; 2012.
9. Noblet J, Fortune H, Dupire C, Dubois S: Digestible, metabolisable and net energy values of 13 feedstuffs for growing pigs: effect of energy system. *Livestock Prod Sci* 1993, 42:131-149.

10. Koch RM, Gregory KE, Chambers D, Swiger LA: Efficiency of feed use in beef cattle. *J Anim Sci* 1963, 22:486-494.
11. Kennedy BW, Vanderwerf JHJ, Meuwissen THE: Genetic and statistical properties of residual feed-intake. *J Anim Sci* 1993, 71:3239-3250.
12. Cai W, Casey DS, Dekkers JCM: Selection response and genetic parameters for residual feed intake in Yorkshire swine. *J Anim Sci* 2008, 86:287-298.
13. Boddicker N, Gabler NK, Spurlock ME, Nettleton D, Dekkers JCM: Effects of ad libitum and restricted feed intake on growth performance and body composition of Yorkshire pigs selected for reduced residual feed intake. *J Anim Sci* 2011, 89:40-51.
14. Harris AJ, Patience JF, Lonergan SM, Dekkers JM, Gabler NK: Improved nutrient digestibility and retention partially explains feed efficiency gains in pigs selected for low residual feed intake. *J Anim Sci* 2012, 90:164-166.
15. Cruzen, SM, Harris A, Hollinger JK, Punt RM, Grubbs JK, Selsby JT, Dekkers JCM, Gabler NK, Lonergan SM, Huff-Lonergan E: Evidence of decreased muscle protein turnover in gilts selected for low residual feed intake. *J Anim Sci* 2013, 91:4007-4016.
16. Grubbs, JK, Fritchen AN, Huff-Lonergan E, Dekkers JCM, Gabler NK, Lonergan SM: Divergent genetic selection for residual feed intake impacts mitochondria reactive oxygen species production in pigs. *J Anim Sci* 2013, 91:2133-2140.
17. Lefaucheur L, Lebert B, Ecolan P, Louveau I, Damon M, Prunier A, Billon Y, Sellier P, Gilbert H: Muscle characteristics and meat quality traits are affected by divergent selection on residual feed intake in pigs. *J Anim Sci* 2011, 89:996-1010.
18. Faure J, Lefaucheur L, Bonhomme N, Ecolan P, Meteau K, Coustard KM, Gilbert H, Lebret B: Consequences of divergent selection for residual feed intake in pigs on muscle energy metabolism and meat quality. *Meat Sci* 2013, 93:37-45.
19. Smith RM, Gabler NK, Young JM, Cai W, Boddicker NJ, Anderson MJ, Huff-Lonergan E, Dekkers JCM, Lonergan SM: Effect of selection for decrease residual feed intake on composition and quality of fresh pork. *J Anim Sci* 2011, 89:192-200.
20. Gilbert H, Bidanel JP, Gruand J, Caritez JC, Billon Y, Guillouet P, Lagant H, Noblet J, Sellier P: Genetic parameters for residual feed intake in growing pigs, with emphasis on genetic relationships with carcass and meat quality traits. *J Anim Sci* 2007, 85:3182-3188.
21. Johnson RW: Fueling the immune response: what's the cost. In *Feed Efficiency in Swine*. Edited by Patience JF. Wageningen: Wageningen Academic Press; 2012:211-224.
22. Rakhshandeh A, Dekkers JCM, Kerr BJ, Weber TE, English J, Gabler NK: Effect of immune system stimulation and divergent selection for residual feed intake on digestive capacity of the small intestine in growing pigs. *J Anim Sci* 2012, 90:233-235.
23. Beaulieu AD, Williams NH, Patience JF: Response to dietary digestible energy concentration in growing pigs fed cereal-grain based diets. *J Anim Sci* 2009, 87:965-976.
24. De la Llata M, Dritz SS, Tokach MD, Goodband RD, Nelssen JL: Effects of dietary fat on growth performance and carcass characteristics of growing-finishing pigs reared in a commercial environment. *J Anim Sci* 2001, 79:2643-2650.
25. Oresanya TF, Beaulieu AD, Patience JF: Investigations of energy metabolism in weanling barrows: The interaction of dietary energy concentration and daily feed (energy) intake. *J Anim Sci* 2008, 86:348-363.
26. Whittemore C, Kyriazakis I: Growth and body composition changes in pigs. In *Whittemore's Science and Practice of Pig Production*. Edited by Kyriazakis I, Whittemore CT. Oxford: Blackwell Publishing; 2006:65-103.
27. Patience JF, Beaulieu AD, Zijlstra RT, Nyachoti M, Gillis DA, Boyd RD, Usry J: Performance and body compositional responses to changes in dietary energy intake by offspring of line 65 sires. Saskatoon: Monograph 02-09, Prairie Swine Centre 2002:85.

28. Healy BJ, Hancock JD, Kennedy GA, Bramel-Cox PJ, Behnke KC, Hines RH: Optimum particle size of corn and soft sorghum for nursery pigs. *J Anim Sci* 1994, 72:2227-2236.
29. Wondra KJ, Hancock JD, Behnke KC, Hines RH, Stark CR: Effect of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility and stomach morphology. *J Anim Sci* 1995, 73:757-763.
30. Mavromichalis I, Hanck JD, Senne BW, Ggugle TL, Kennedy GA, Hines RH, Wyatt CL: Enzyme supplementation and particle size of wheat in diets for finishing pigs. *J Anim Sci* 2000, 78:3086-3095.
31. Goodband RD, Tokach MD, Nelssen JL: The effects of particle size on animal performance. *Kansas State University Extension Bulletin MF 2050*, 2002.
32. Patience JF, Chipman A, Jones CK, Scheer T: Varying corn particle size distribution affects the digestibility of energy for the growing pig [abstract]. *J Anim Sci* 2011, 89(E-Suppl. 2):127.
33. Patience JF, Thacker PA, de Lange CFM: *Swine Nutrition Guide* 2nd ed. Saskatoon: Prairie Swine Centre; 1995.
34. Myers AJ, Goodband RD, Tokach MD, Dritz SS, DeRouchey JM, Nelssen JL: The effects of diet form and feeder design on the growth performance of finishing pigs. *J Anim Sci* 2013, 91:3420-3428.
35. Stark CR: Pellet Quality I. Pellet Quality and Its Effects on Swine Performance. *PhD Thesis*. Kansas State University, Grain Sciences Department; 1994.
36. Noblet J, Karege C, Dubois S, van Milgen J: Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in growing pigs: Effects of sex and genotype. *J Anim Sci* 1999, 77:1208-1216.
37. NRC. *Nutrient Requirements of Swine*. Washington, DC: Nat'l Acad Press; 2012.
38. Renaudeau D, Gilbert H, Noblet J: Effect of climatic environment on feed efficiency in swine. In *Feed Efficiency in Swine*. Edited by Patience JF. Wageningen: Wageningen Academic Press; 2012:183-210.
39. Renaudeau D, Gourdiere JL, St-Pierre NR: A meta-analysis of the effects of high ambient temperature on growth performance of growing-finishing pigs. *J Anim Sci* 2011, 89:2220-2230.
40. Dritz S: Influence of health on feed efficiency. In *Feed Efficiency in Swine*. Edited by Patience JF. Wageningen: Wageningen Academic Press; 2012:183-210.
41. Smith, LF, Patience, JF, Gonyou HW, Beaulieu AD, Boyd RD: The impact of feeder adjustment and group size/floor space allowance on the performance of nursery pigs. *J. Swine Health Prod.* 2004, 12:111-118.
42. Gonyou HW: Sorting and mixing of grower/finisher pigs. In *Proc. AI Leman Conf*, St. Paul, MN. University of Minnesota 1998:126-128.

表 1：降低日粮能量浓度对每日能量摄入量和生长速度的影响

日粮代谢能， Mcal/kg	2.95	3.05	3.15	3.25	3.35
初始重，kg	31.2	31.1	31.5	31.2	31.1
末重，kg	115.1	115.3	115.1	115.0	115.5
日增重，kg/d	1.00	1.01	1.03	1.03	1.03
每日采食量，kg ¹	2.80	2.66	2.64	2.61	2.47
饲料转化率 ¹	2.78	2.63	2.56	2.56	2.38
代谢能摄入量，Mcal/d	8.21	8.20	8.38	8.45	8.38

¹ 日粮代谢能明显，P < 0.05；来源：[23]

表 2：限饲减少能量摄入对 25-120kg 的阉猪和初产母猪性能的影响

项目	自由采食百分比					SEM	P 值		
	100	93	86	79	72		Treatment 处理	Linear 线性	Quadratic 二次
初始重, kg	24.7	24.7	24.7	24.7	24.7				
末重, kg	120.0	118.9	118.7	119.0	119.6	0.2	0.320	0.107	0.001
日增重, kg/d	1.00	0.92	0.76	0.78	0.66	0.01	0.001	0.001	0.952
	2.64	2.44	2.25	2.06	1.87	0.02	0.001	0.001	0.829
每日采食量, kg/d									
饲料转化率	0.40	0.40	0.40	0.41	0.38	0.01	0.046	0.169	0.033
里脊, mm	61.6	55.6	55.3	57.1	57.1	0.6	0.047	0.824	0.409
背膘, mm	16.7	14.8	13.5	12.7	12.3	0.3	0.001	0.001	0.832
每日消化能摄入量, Mcal/d	8.67	8.01	7.41	6.77	6.15				
蛋白沉积, g/d	145.6	135.8	140.8	131.8	112.9	6.3	0.014	0.012	0.184
脂质堆积, g/d	294.8	246.6	213.6	183.3	144.2	9.7	0.001	0.001	0.874
灰分沉积, g/d	27.1	26.7	28.6	23.2	19.3	1.8	0.010	0.005	0.085
脂质/蛋白质比	2.05	1.89	1.57	1.43	1.30	0.12	0.001	0.001	0.746
灰分/蛋白比	0.10	0.11	0.14	0.13	0.14	0.01	0.086	0.002	0.737

来源：[27]

表 3：粒度标准差对试验日粮消化率的影响

粒度平均值, μm	545	551	564	599	545	SEM	P value P 值	
	1.88	2.11	2.33	2.51	2.73		Linear 线性	Quadratic 二次
粒度标准差, μm								
(DM) 总能, kcal/g (干基)								
-日粮	4.43	4.43	4.42	4.45	4.42			
-排泄物	4.55	4.70	4.61	4.63	4.68	0.02	0.0008	0.88
表观消化率, %								
-能量	85.79	84.18	81.12	83.37	84.96	0.63	0.31	<0.0001
-干基	85.31	84.10	81.12	82.96	84.49	0.67	0.34	<0.0001

来源: [32]

表 4: 粒度标准差对日粮总能的影响以及玉米消化能和代谢能的影响 (干基)

	粒度标准差					SEM	P 值	
	1.88	2.11	2.33	2.51	2.73			
干基, %	95.62	95.53	95.35	95.59	95.57	0.18	0.83	0.24
总能, Mcal/kg	4.43	4.43	4.42	4.45	4.42			
消化能, Mcal/kg	3.80	3.73	3.59	3.71	3.76	0.03	0.23	<0.0001
代谢能, Mcal/kg ¹	3.74	3.68	3.53	3.66	3.70	0.03	0.23	<0.0001

¹使用 Noblet 和 Perez (1993)公式从消化能计算. 来源: [32]