云南饲料

YUNNANFEED

（内部资料 免费交流）

双 月

2025 年第 6 期

（总第一百四十四期）

12 月 20 日印刷

地　　址：云南省昆明市五华区红旗路德润中心 B 座 26 楼 2609 室

邮　　编：650201

电　　话：0871—65616557

传　　真：0871—65616557

E — mail：ynslbj@126.com

印　　刷：昆明精妙印务有限公司

（如有质量问题，请与印刷厂联系。0871—63101193）

准印证号：（53）Y2025107

印数：1500 册

发送对象：协会会员单位及行业相关单位

目　录

译文综述

试验研究

行业动态

经验交流

信息快递

单细胞蛋白在动物饲料工业中的应用及展望

王腊梅[1]　王砀砀[2]　芦　晶[2]　姚军虎[2]　吴　信[3]　曹阳春[2]
（1. 西北农林科技大学生命科学学院　杨凌　712100，
2. 西北农林科技大学动物科技学院　杨凌　712100，
3. 中国科学院天津工业生物技术研究所　国家合成生物技术创新中心　天津　300308）

摘 要：随着全球人口的持续增长以及动物性食品消费需求的不断上升，传统蛋白质饲料如豆粕和鱼粉的生产日益受到土地、水资源限制及环境污染等多重压力，难以支撑未来畜牧业的可持续发展。因此，开发可持续的替代蛋白质饲料成为当前研究的热点和关键问题。单细胞蛋白（single cell protein，SCP）是通过微生物发酵产生的优质蛋白质，且富含必需氨基酸、微量营养素及其他功能成分，具有显著的营养优势。SCP可通过微生物利用工业副产物和农业废弃物等廉价原料生产，显著降低对耕地和水资源的依赖，同时有效减少碳排放，体现出良好的环境友好性与资源可持续性。本文系统综述了SCP的营养特性、微生物来源和可再生原料、生产工艺进展及其在畜禽养殖中的应用效果，评估了其对推动绿色畜牧业发展和生态环境保护的潜力，并探讨了其在实际应用中面临的技术瓶颈与发展挑战，旨在为缓解我国蛋白质饲料资源紧张、促进动物生产高质量发展提供理论依据。

关键词：单细胞蛋白；蛋白质饲料；畜牧业；替代；动物营养；饲料可持续性

随着全球人口持续增长、可用土地日益紧张及气候变化加剧，蛋白质资源面临前所未有的挑战。联合国《世界人口展望：2019年修订版》预测，到2050年全球人口将达到97亿[1, 2]。若维持当前消费水平，未来20年全球粮食产量需增加40%，至2050年增长幅度将达70%[3, 4]，动物蛋白年需求增量将达12.5亿吨[5, 6]。这意味着不仅粮食产量需要持续增长，还需显著提升畜禽养殖规模及其饲料供应。

然而，传统农业受土地、水资源、能源及海洋渔业可持续性的多重限制，生产潜力有限。过去60年间，其产量仅提升约10%[7]，进一步加剧了生态环境退化与资源紧张。与此同时，在动物饲养方面，植物蛋白质向肉类蛋白质的转化效率偏低[8]，饲料资源日趋紧张已成为限制畜牧业可持续发展的关键瓶颈。仅中国在2020年蛋白质饲料缺口就高达4800万吨，为缓解资源压力，农业农村部于2021年3月发布《饲料中玉米豆粕减量替代工作方案》[9]，提出开发新型饲料资源、提升饲料转化效率，并探索替代性蛋白质来源。由此，开发可持续、经济高效的蛋白质替代资源已成为当前亟需解决的问题[10]。

SCP作为一种新兴蛋白质资源，因其生产成本低、营养价值高而备受关注。SCP是利用酵母、细菌、丝状真菌或微藻等微生物，在可控发酵条件下生产的高蛋白[6]，其蛋白质含量可达50%~80%，富含必需氨基酸（如赖氨酸和蛋氨酸）、不饱和脂肪酸、核酸、矿物质和多种维生素[11]。与传统蛋白源相比，SCP具有脂肪含量低、氨基酸组成均衡、蛋白与碳水化合物比例高等优势[12]。特别适用于作为反刍动物、家禽及水产养殖饲料中的蛋白替代成分。根据QYResearch（北京恒州博智国际信息咨询有限公司，中国）调研显示，2025年全球单细胞蛋白制品行业市场发展研究及“十五五”规划分析报告，SCP在全球饲料与食品工业

中的应用趋势及区域分布如图1所示。

SCP作为传统蛋白饲料的部分替代，有助于提升动物的生长性能和饲料转化效率[13]。更重要的是，SCP生产可利用多样化碳源，如农业废弃物、食品副产物和工业废水[14,15]，不仅提高资源利用效率，降低生产成本与碳排放，也契合绿色、低碳、可持续发展的发展方向[6,16]。此外，SCP的生产过程不依赖耕地，可实现全年稳定运行，缓解了传统蛋白资源受气候与季节等自然因素影响的供需波动[17~20]。

近年来，随着发酵工程及下游加工技术和合成生物学的迅速发展，SCP产业正逐步实现规模化应用，特别是在动物饲料领域展现出广阔前景。本文系统综述了SCP的微生物种类与原料来源、营养价值、生产工艺进展及其功能特性，进一步探讨其在不同动物生产体系中的应用效果、面临的挑战及未来发展方向，旨在为构建绿色、高效的现代饲料体系提供理论支持和实践指导。

1 SCP

SCP这一术语是在1968年麻省理工学院（MassachusettsInstitute of Technology，MIT）举行的一次会议上被提出的，用以取代原本使用的不太正式的“微生物蛋白”和“石油蛋白”等名称（Mateles和Tannenbaum 1968年，Tannenbaum和Wang 1975年）[21]。SCP用于统称通过培养单细胞微生物（包括细菌、酵母、丝状真菌和微藻）所获得的富含蛋白质的生物质。其研究最早可追溯至第一次世界大战期间，德国首次将酵母（Candida spp.）用于人类食物，如香肠和汤品[22]。此后，在第二次世界大战及战后粮食短缺时期，利用微生物发酵生产蛋白的技术得到进一步探索[21]。20世纪60~70年代，随着石油化工副产物（如甲醇、烃类）及农业废弃物发酵工艺的发展，SCP开始实现工业化生产，并逐步用于动物饲料及部分人类食品。大规模工业化SCP生产的先驱是英国帝国化学工业公司（Imperial Chemical Industries，ICI，Billingham）。该公司以甲烷为原料，通过持续发酵和收获富含蛋白质的甲基营养型细菌成功开发了2000立方米规模的生产系统，克服了许多独特的技术挑战[23]。从1980年以来，随着发酵工程、下游加工技术以及食品安全标准化体系的不断完善，SCP的生产效率和产品安全性显著提升，使其在全球饲料工业中占据了重要地位[5，8]。在20世纪70年代开发的SCP产品Pruteen曾被视为解决未来食品危机的有效方案，但由于从1980年石油危机的到来导致甲醇价格上涨，Pruteen的生产成本急剧增加，因此其生产最终被放弃。值得一提的是Pruteen曾在全球最大的生物反应器中成功生产[24]。当前，联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations，FAO）与世界卫生组织（World Health Organization，WHO）对SCP的科学定义为：来源于微生物的干燥细胞或蛋白提取物，蛋白质含量通常占干重的50%以上，富含必需氨基酸，可作为人类及动物蛋白质营养来源[25，26]。与植物性或动物性蛋白源相比，SCP不仅营养更为全面，且其生产过程更加高效、环保，被认为是当前最具应用前景的动物饲料蛋白替代资源之一。

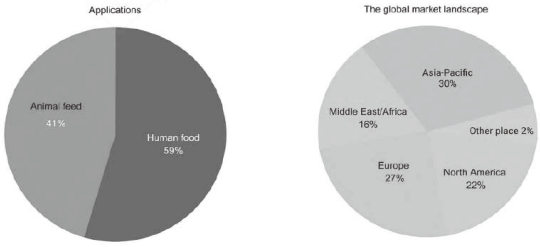


图 1 （网络版彩色）SCP的总体利用与分布情况(图片由BioRender.com绘制)
Figure 1 (Color online) The overall utilization and distribution of SCP (Created with BioRender.com)

2 SCP的微生物来源

SCP可来源于多种微生物，包括酵母、细菌、丝状真菌及微藻，既可通过单一纯培养获得，也可采用混合培养方式制得干燥的微生物细胞或混合蛋白产品。不同微生物来源决定了SCP在营养组成、生产工艺及适用动物类型等方面存在显著差异。通常，细菌中的蛋白质含量最高，能达到72%~83%；真菌次之，为31%~50%；而藻类和酵母则介于47%~63%之间[27]。图2展示了主要微生物来源及其营养构成，常见代表性微生物见表1。

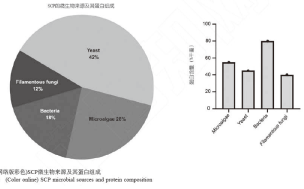


图 2 （网络版彩色）SCP微生物来源及其蛋白组成
Figure 2 (Color online) SCP microbial sources and protein composition

表 1 SCP 生产微生物
Table 1 Microorganisms for the production of SCP

微生物	细菌	微藻	酵母	丝状真菌
拉丁名	Bacillus cereus	Aphanizomenon flosaquae	Candida utilis	Chaetomium celluloliticum
	Methylophilus methylitropous	Anabaena cylindrica	Candida tropicalis	Fusarium graminearum
	Bacillus subtilis	Arthrospira maxima	Candida novellas	Aspergillus flavus
	Bacillus megaterium	Anabaena cylindrica	Candida intermedia	Aspergillus niger
	Cellulomonas spp	Chlorella pyrenoidosa	Saccharomyces cerevisiae	Candida tropicalis
	Cellulomonas species	Chlorella sorokiana	Fusarium moniliforme	Candida utilis
	Cupriavidus necator	Chondrus crispus	Fusarium venenatum	Kluyveromyces marxianus
	Methylococcus capsulatus	Dunaliella primolecta	Paecilomyces variotii	Yarrowia lipolytica
	Rhodopseudomonas blastica	Dunaliella salina	Yarrowia lipolytica	Saccharomyces cerevisiae
	Rhodocyclus gelatinosus	Spirulina platensis	Hanseniaspora guilliermondii	Cephalosporium eichhorniae
	Lactobacillus bulgaricus	Tetraselmis chuii	Issatchenkia orientalis	Penicillium cyclopium

2.1 丝状真菌

真菌类微生物是SCP生产中最重要的微生物资源之一，主要包括丝状真菌和酵母。真菌SCP是通过真菌发酵获得的微生物蛋白，具有生长周期短、营养价值高、安全性好等优势，已被FAO认定为安全可用的蛋白质替代来源，广泛应用于饲料、食品和环境治理等领域[5,17]。

常用的丝状真菌种包括Kluyveromyces、Candida、Saccharomyces、Meyerozyma、Pichia、Galactomyces、Nectaromyces、Rhodotorula、Aspergillus、Fusarium、Aureobasidium、Neurospora和Trichoderma等。这些真菌普遍具有高蛋白质含量（占干重的30%~50%），富含B族维生素、叶酸及多种必需氨基酸（如赖氨酸、苏氨酸），核酸含量适中（7%~10%），是优质的动物蛋白来源。丝状真菌菌丝体积大，便于分离收集，适用于规模化操作[28]。同时，其具备较强的生物转化能力，能高效分解复杂多糖，尤其是在液体发酵体系中展现出良好的木质纤维素降解性能[29]，有助于提高动物的饲料消化率与利用率。特别是厌氧真菌，能够高效产生纤维素酶、木聚糖酶和阿魏酸酯酶，有效分解秸秆等农业副产物中的粗纤维，显著提高饲料的利用率[30]，在农业废弃物资源化利用方面展现出广阔应用前景[31]。

2.2 酵母

除丝状真菌外，酵母也是传统且广泛应用的SCP来源之一。常用的酵母菌种包括Saccharomyces cerevisiae、Candida utilis, Candida jadinii、Blastobotrys deninivorans和Wickerhamomyces anomalus等[32, 33]。酵母可利用多种碳源，在不同底物上均能高效生长，蛋白含量可达干重的45%~55%[34, 35]，且富含赖氨酸和B族维生素，适口性好，常用于高效动物饲料配方[36~38]。其适应性强，可在酸性环境中生长，细胞体积适中，便于分离收集，适合工业化生产[4, 39]。部分酵母（如Candida和Wickerhamomyces）还能合成免疫活性因子，有助于提升动物免疫力[40]。此外，真菌细胞壁中富含β-葡聚糖，具有抗炎、抗氧化、免疫调节、降脂、抗糖尿病和抗肿瘤等多种生物活性功能[40]。目前，真菌来源的β-葡聚糖已被美国、加拿大、芬兰、瑞典、中

国、日本和韩国等多个国家批准用于免疫调节类药物制剂[41]。

尽管与其他微生物相比，酵母生长速度相对较慢，蛋白质及蛋氨酸含量略低，且其细胞壁结构在动物消化道中的可消化性有限，但整体营养价值仍较高[42，43]。针对上述问题，目前可通过遗传工程改良和发酵工艺优化等手段提升其蛋白产量与营养品质。

2.3 细菌

细菌类SCP指由各类细菌通过发酵或自养代谢产生的微生物蛋白质，通常具有生长周期短、繁殖速度快、碳源来源广泛、蛋白积累效率高等优势，广泛应用于饲料工业、食品添加剂及资源循环等领域[28]。细菌SCP的蛋白质含量通常为干重的50%~80%，富含赖氨酸、苏氨酸等必需氨基酸，但核酸含量较高（8%~15%）。相比真菌，细菌生长更快，繁殖周期一般为20~120min，利于实现高效、连续化生产[44]。目前研究较为深入的细菌菌株包括嗜甲基杆菌（Methylophilus methylotrophus）、沼泽红假单胞菌（Rhodopseudomonas palustris）、大肠杆菌（Escherichia coli）及嗜盐古菌属（Haloarcula spp.）。此外，短杆菌属、红假单胞菌属、胶胞菌属与乳杆菌属等也被广泛用于SCP的工业化生产[4]。其中，光合紫色非硫细菌（purple non—sulfur bacteria，PNSB）因蛋白含量高达70%~72%，氨基酸组成接近大豆蛋白，且具备良好的抗逆性和环境适应性，在水产养殖及高蛋白饲料开发中具有广阔应用前景[1，45]。PNSB能够利用废弃物中的氨、铵盐、尿素等多种氮源，有效降低环境氮负荷，兼具资源转化与污染治理功能[46]。碳源多样性是细菌SCP的显著优势。其可利用多种碳源，包括糖类、淀粉、有机废弃物、C1化合物（如甲醇、甲烷和CO_2）及高营养废水等。其中，产乙醇梭菌（Clostridium ljungdahlii）可通过Wood—Ljungdahl途径将CO或CO_2与H_2转化为乙醇和蛋白，是典型的厌氧自养型SCP菌株，具备较强的C1气体资源转化能力[47]。此外，甲基营养型细菌如粉红杆菌（Methylobacterium）和丝状红杆菌（Rhodobacter）等，生产周期短（约2h），可在无糖条件下直接利用甲烷合成蛋白，特别适合于低成本、大规模饲料蛋白生产[48，49]。

2.4 微藻

微藻类SCP是指通过微藻在光自养条件下合成的微生物蛋白资源，具有营养成分丰富、蛋白含量高、碳固定能力强等优势。其富含优质蛋白质、维生素（A、B、C、E）、矿物质以及功能性脂类（如ω—3脂肪酸、类胡萝卜素），且核酸含量较低（3%~8%）[39，50]。其中，小球藻（Chlorella vulgaris）蛋白含量达51%~58%，螺旋藻（Arthrospira platensis）高达60%~71%[17]；此外，舟形藻、海洋绿球藻、盐藻、隐甲藻等品种也具备较高蛋白生产能力[51]。与传统蛋白质来源（如大豆粉、鱼类、禽肉等）相比，微藻蛋白含量更高，且氨基酸组成更趋合理，部分品种接近WHO/FAO定义的理想蛋白标准[52，53]。微藻通过CO_2和光能实现光自养生长，在规模化生产中需精准控制温度、光照、pH和营养盐等环境条件，并依照GAP与GMP标准保障饲用及食用安全[54]。理论上，微藻SCP的年产蛋白效率可达每公顷22~44吨[55]。然而，微藻SCP在动物体内消化利用率仍有限[56]，主要受细胞壁中多糖难以降解的限制，尤其对单胃动物影响更为显著[57]。因此，需借助酶解处理、细胞壁改良或种质优化等手段提升其生物可利用性，这也是实现其大规模应用的关键技术瓶颈。未来，微藻SCP研究将重点聚焦于提升蛋白产量与氨基酸质量、改善消化率、优化培养工艺及系统稳定性，以增强整体产出效率和产业化潜力。

3 SCP的可再生原料

传统SCP主要依赖食用级糖基为底物（如玉米糖浆、蔗糖蜜、水解淀粉）[58]，但该类资源与人类粮食系统存在竞争关系，且成本较高。例如，螺旋藻的单位价格约为进口鱼粉的两倍[59]，限制了其在饲料领域的大规模推广。随着可持续发展需求的不断增长，SCP生产体系正逐步向非粮食、非谷物类原料转型。包括农业废弃物、工业副产物及气体废弃物等非常规资源，因其丰富性、低成本与环境友好特性，成为替代传统碳源的关键选择。此类原料不仅显著降低了SCP的生产成本，还有效缓解了对土地与水资源的依赖，减

少与粮食供应链的资源竞争，提升了系统的可持续性与稳定性（图3）。

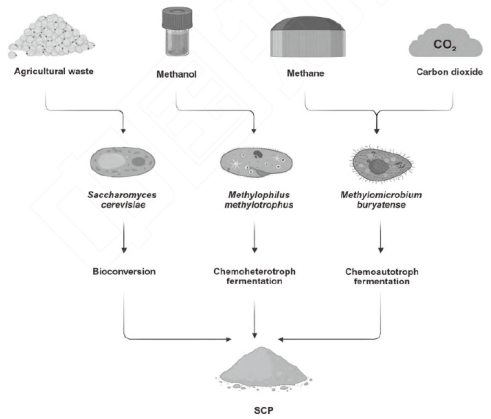


图 3 （网络版彩色)SCP生产原料与发酵路径图. 本图展示了以不同原料为底物的SCP生产途径. 农业废弃物经*Saccharomyces cerevisiae*进行生物转化; 甲醇作为碳源, 经*Methylophilus methylotrophus*进行化能异养发酵; 甲烷和CO_2可分别作为底物, 由*Methylomicrobium buryatense*通过化能自养发酵合成蛋白质. 不同底物经相应地微生物发酵后均可生成SCP (图片由BioRender.com绘制)

Figure 3 (Color online) SCP Feedstock and Fermentation Pathways. This figure illustrates the pathways of SCP production from different raw materials sources. Agricultural waste can be bioconverted by *Saccharomyces cerevisiae*; methanol can be utilized by *Methylophilus methylotrophus* through chemoheterotroph fermentation; methane and carbon dioxide can serve as substrates for *Methylomicrobium buryatense* via chemoautotroph fermentation. These distinct microbial fermentation processes ultimately lead to SCP production (Created with BioRender.com)

3.1 农业废弃物

SCP生产体系展现出显著的底物多样性和适应性，从简单可发酵糖类（如葡萄糖）到复杂的木质纤维素物质（如秸秆、木屑），再到富含有机物的农业副产物与城市废弃物均可被微生物高效利用[8]。其中，糖类底物如甘蔗、玉米及其副产品，由于易被多种微生物吸收，常用于支持微生物的快速生长与蛋白质合成[60，61]。而木质纤维素类底物需通过物理、化学或生物预处理，将复杂碳源转化为可被微生物利用的可发酵糖，再借助适应性强或经遗传改造的菌株进行高效发酵[28]。此外，培养基的优化亦是提升SCP产率的关键因素[62]。研究表明，不同底物中碳水化合物的含量直接影响蛋白产量。例如，在以碳水化合物含量为82.32%的马铃薯皮为底物时，酿酒酵母（Saccharomyces cerevisiae）的SCP产量显著高于胡萝卜渣（61.86%）、香蕉皮（59.00%）和橙皮（54.17%）等[12]。此外，向底物中添加挥发性脂肪酸可调控碳源组成与代谢通路，进一步促进光合细菌的蛋白质合成[63]。

3.2 液体原料（甲醇）

甲醇作为一种可由CO_2合成的C1碳源，具有可持续、高还原性、易运输等特点，适合作为生物制造的底物，尤其用于SCP生产[64]。几十年前，廉价的化石衍生甲醇被视为一种有吸引力的原料。如今，人们关注的是可再生（如CO_2、废弃物等）而非化石衍生的甲醇，因为其利用不依赖化石资源，更重要的是不会与粮食资源竞争。甲醇可被多种微生物高效利用用于SCP生产，包括天然甲基营养菌（如Pichia pastoris）、工程化大肠杆菌以及Methylotuvimicrobium buryatense 5GB1C等[65]。这些微生物在适当的培养条件下，能够将甲醇高效转化为微生物蛋白，具备良好的工业化潜力。不过，传统甲醇发酵系统存在氧气消耗量大的问题，制约了其规模化应用。近年来，通过引入还原性更低的中间体—多聚甲醛（polyoxymethylene，POM）作为甲醛缓释载体，可有效降低体系中甲醛瞬时浓度，从而减少对氧气的依赖（图4）。POM为一种水不溶性聚合物，可在温度或pH变化条件下缓慢释放出甲醛，供微生物代谢利用。研究表明，三种甲基营养型微生物可有效代谢由POM缓释生成的甲醛。在20h的反应过程中，Methylophilus methylotrophus在搅拌罐式生物反应器中将游离甲醛浓度控制在检测限以下，表现出良好的生物兼容性与过程稳定性[66]。实现以绿色甲醇为原料大规模生产SCP的可能。

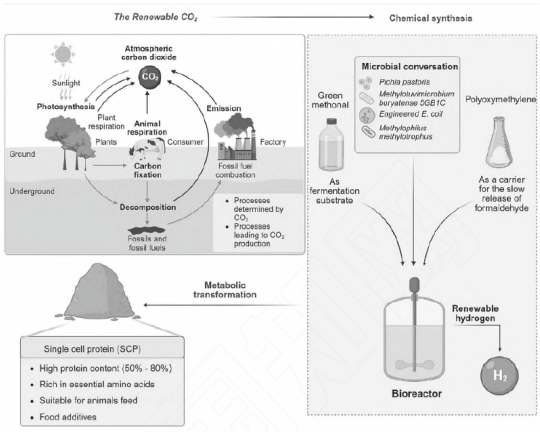


图 4 （网络版彩色)CO_2合成甲醇并用于SCP生产的途径示意图. 以CO_2为原料, 经化学合成转化为绿色甲醇和多聚甲醛, 并作为发酵底物供给微生物(如*Pichia pastoris*、*Methylotuvimicrobium buryatense* 5GB1C、工程化*Escherichia coli*和*Methylophilus methylotrophus*)进行代谢转化, 从而实现SCP的生产. 该途径依赖可再生氢气作为还原力来源, 产物SCP具有高蛋白含量, 富含必需氨基酸, 适用于动物饲料和食品添加剂(图片由BioRender.com制作)

Figure 4 (Color online) Schematic pathway of methanol synthesis from carbon dioxide for SCP production. This figure shows the conversion of CO_2 into green methanol and polyoxymethylene through chemical synthesis. These intermediates serve as fermentation substrates for microorganisms, including *Pichia pastoris*, *Methylotuvimicrobium buryatense* 5GB1C, engineered *Escherichia coli*, and *Methylophilus methylotrophus*, to produce SCP. The process relies on renewable hydrogen (H_2) as a reducing power source. The resulting SCP is characterized by high protein content, richness in essential amino acids, and suitability for use as animal feed and food additives (Created with BioRender.com)

3.3 气态原料（甲烷和CO_2）

甲烷作为一种可再生碳源，可通过厌氧消化获得，具有成本低、可持续性强等优势，优于依赖化石资源或农产品的传统原料[67，68]。厌氧消化过程中

产生的沼气（主要成分为甲烷）在能量回收方面效益有限，而将其转化为SCP不仅可提升其附加值，还能降低储运成本[69]。相较于依赖耕地或光照的真菌和微藻SCP，甲烷基SCP生产对土地依赖更低，资源转化效率更高[70]。常用甲烷氧化菌包括Methylocystis、Methylomonas、Methylophilus、Rurimicrobium、Comamonadaceae、Methylophilales、Methylococcales、Methylococcus capsulatus、Methylomicrobium buryatense、Methylocystis parvus、Methylomonas methanica、Methylomicrobium alcaliphilum等[71]。如Methylocapsa acidiphila能同时利用甲烷和废水中的氮源合成蛋白[72]。此外，含有CH_4和CO_2的工业废气也可作为潜在底物，其中甲烷经氧化菌转化为蛋白质，CO_2则可在H_2或光合微生物作用下进一步利用[73]。甲烷营养细菌将甲烷转化为SCP，其氨基酸组成与鱼粉相近，已获欧盟批准用于鲑鱼饲料，添加比例可达33%[74]。因其不依赖光照，可实现高密度培养，对环境影响小，具备工业化优势。目前，美国与欧盟企业（如Calysta、Unibio）已开展天然气转SCP的商业化生产[75]。El Abbadi等人[75]分析了从污水处理厂、垃圾填埋场和油气设施产生的滞留甲烷中生产甲烷营养微生物蛋白的经济潜力。研究结果表明，仅在美国，以相当于或低于当前鱼粉成本（约每公吨1600美元）的价格，现有技术就可以实现相当于全球鱼粉市场14%的产量。

此外，CO_2资源亦具开发潜力。近年以CO_2为碳源合成SCP的研究迅速成为合成生物学与可持续蛋白研发的热点，主要技术路线为三大类：直接气体发酵（以氢氧化细菌（hydrogen—oxidizing bacteria，HOB）为代表）、电化学/微生物电合成（microbial electro—synthesis，MES）耦合微生物发酵的两段式路线，以及以电力驱动的“电—碳—蛋白（power—to—protein，PtP）”系统。德国马克斯·普朗克研究所的科学家开发了一种名为“THETA循环”的合成CO_2固定途径，能够比自然途径更高效地将CO_2转化为乙酰辅酶A。该途径已成功在大肠杆菌中实现，为CO_2转化为SCP奠定了基础[76]。

直接气体发酵利用HOB（如Cupriavidus necator）在$H_2/O_2/CO_2$条件下可实现高蛋白产量与氨基酸谱，被视为实现规模化CO_2转化为SCP的主力菌株之一[77]。Cupriavidus necator H16可在72h内将甲烷浓度从57.09%提升至98.46%，CO_2最大吸收速率达27ml $L^{-1}h^{-1}$。其产生的SCP蛋白含量达43.75%~70.83%，富含全部8种人体必需氨基酸，其蛋白质消化率校正氨基酸评分与鱼粉相当。适合作为优质饲料或蛋白替代来源。更为重要的是，技术经济评估表明，该生物过程可使厌氧消化系统的净收益提高48.49%，远优于传统基于氢营养甲烷菌的沼气提纯策略（后者反使收益下降57%）[78]。

两段式工艺（先将CO_2电化学或微生物电合成为甲酸/乙酸等可发酵中间体，再由专用异养菌/酵母将中间体转化为SCP）在最近的实验流程和工艺改进研究中获得显著进展，该策略不仅缓解了气—液传质与H_2/O_2混合燃烧的安全问题，还便于分段优化与规模化。近期已有“双反应器”示范研究成果将CO_2利用电力合成中间体，最后产生可食/可饲用高蛋白生物质[79, 80]。该系统实现了25%的碳转化率，所得微生物蛋白质量分数达40%~50%[81]。MES作为一种利用电能将CO_2转化为有机化合物的技术，已被应用于SCP生产。通过优化反应器设计和操作条件，研究人员提高了SCP的产量和蛋白质含量。中国西安交通大学和中国科学院天津工业生物技术研究所的研究团队开发了一种双反应器系统，利用MES将CO_2转化为乙酸盐，再由好氧细菌（如Alcaligenes）将乙酸盐转化为SCP。该反应器的最大细胞干重为17.4 g L^{-1}，平均产率为1.5 g L^{-1} d^{-1}。生物量蛋白质含量达到干重的74%，优于传统的鱼粉和豆粕。此外，集成设计显著减少了废水的产生，减轻了产物抑制，并提高了SCP的生产[79]。

PtP系统是一种将可再生能源与微生物蛋白生产相结合的新型碳资源利用技术，以比利时Avecom公司为代表的PtP原型系统构建了日生产能力约1kg SCP的中试规模反应器，通过优化气液传质与反应器运行参数，提高了氢气与CO_2的转化效率。生命周期评估（Life cycle assessment，LCA）结果显示，PtP系统的

环境可持续性高度依赖所使用电力的碳排放强度，即可再生电力比例越高，生产过程的温室气体排放与整体环境负荷越低。这一发现为PtP技术与绿色电力网络的协同部署提供了定量依据。该技术因其在CO_2资源高值化利用及可持续蛋白生产方面的创新性，获得了“Best CO_2 Utilisation 2022”国际奖项，显示出其在未来工业化和商业化应用中的发展潜力。具体信息如网址https://www.powertoprotein.eu/.

4 SCP生产工艺的进步

随着绿色可持续发展的需求，SCP作为新型蛋白资源，在生产工艺上不断取得突破。SCP生产系统具备高度的工艺灵活性与环境适应性，可通过多种发酵策略将农业与工业副产物高效转化为蛋白产物，不仅降低了原料成本，还有助于缓解资源浪费与环境污染。其生产模式根据碳源与能量来源的不同，可分为光异养、光自养、化学异养和化学自养四种类型[82]。主要发酵形式包括液体、固体及半固体发酵[83]。工艺流程通常包括原料预处理、菌种选择与扩培、发酵培养、后处理与产品制备等核心环节[84]（图5）。

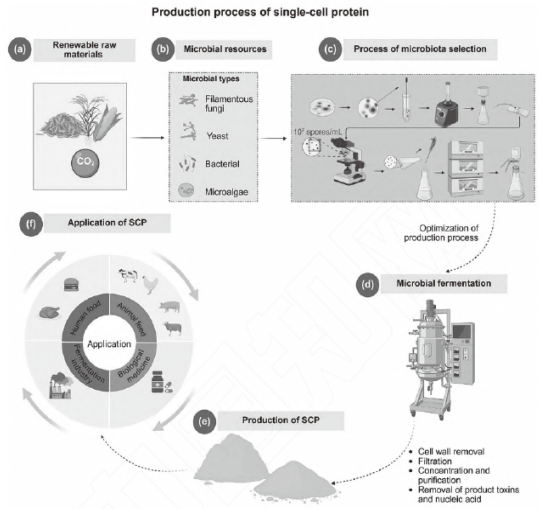


图 5 （网络版彩色)SCP的生产工艺流程图(图片由BioRender.com制作). (a) 可再生原材料作为底物, 为微生物生长提供可持续的碳源和营养来源; (b) 微生物主要包括丝状真菌、酵母、细菌和微藻等, 其选择依据营养价值和培养可行性确定; (c) 通过菌株分离、筛选与工艺优化, 获得高性能微生物; (d) 在生物反应器中实施可控的微生物发酵过程, 通过代谢调控与工艺优化提高蛋白产率, 同时减少不良副产物; (e) SCP的生产需进行下游加工, 包括破碎细胞壁、过滤、浓缩与纯化, 并去除核酸及潜在毒素; (f) 最终产出的SCP应用于人类食品、动物饲料、发酵工业及生物医药等领域

Figure 5 (Color online) The production process of SCP (Created with BioRender.com). (a) Renewable raw materials serve as substrates for microbial growth; (b) microbial resources include filamentous fungi, yeasts, bacteria and microalgae; (c) strain isolation, screening and process optimization enable selection of high-performing microbes; (d) large-scale microbial fermentation is conducted in bioreactors under controlled conditions; (e) downstream processing involves cell wall disruption, filtration, purification and removal of nucleic acids and toxins; (f) the final SCP products are applied in human food, animal feed, the fermentation industry and biomedicine

4.1 先进的原料预处理技术

高效、低成本的预处理技术是SCP可持续生产的基础。针对非粮原料（如农业废弃物、木质纤维素和食品副产物）中结构复杂、降解困难的问题，当前主流方法包括物理（如高压蒸汽爆破）、化学（如碱或氨处理）及酶法水解等[8, 85]。其中，联合预处理策略（如氨—酶协同处理）可显著提升底物的可发酵性，实现纤维素与半纤维素的高效转化[85]。然而，酸碱处理和蒸汽爆破虽能有效除去木质素和半纤维素，但存在成本高、能耗大的问题，且预处理中常伴随生成糠醛、乙酸等发酵抑制物。为此，近年来离子液体（Ionic liquid，ILs）和固定化酶等技术被广泛关注[82]。

ILs是一类由有机阳离子与无机阴离子构成的盐状物，能有效破坏纤维素—木质素之间的糖苷键，降低纤维素结晶度，增强酶的可及性与底物利用率[88]。研究表明，食品级ILs（如[Ch][HSO_4]）结合食品级纤维素酶（Celluclast 1.5L）用于水稻秸秆的糖化处理，可获得42.4%的总糖产率，相比植物蛋白或动物蛋白，SCP具有更低的土地依赖性[89]。利用胆碱类ILs预处理木质纤维素以培养Fusarium venenatum生产真菌蛋白（Mycoprotein），在4万吨/年生产规模下的生命周期分析也显示其具有良好可持续性，尽管仍需进一步提升产率以实现商业化。

固定化酶技术是提升水解过程稳定性与经济性的另一关键手段。游离酶在工业应用中易失活、重复使用性差，而固定化处理（如负载于磁性纳米粒子）显著增强了其热稳定性与抗失活能力，并简化了下游分离流程[90]。据报道，固定化酶可使1000m^3规模下的酶解成本降低17.6%，且在10次循环使用中保持较高活性[91]。目前，固定化纤维素酶已成功应用于3万吨级纤维素的水解与后续发酵，用于生产1，4—丁二醇与丁二酸[92]，此技术具有良好的工业化前景。

4.2 工艺方法的改进

SCP生产的工艺设计需基于底物的理化特性，采用适宜的预处理方式以提高其生物可利用性。常见策略包括物理粉碎、酸碱水解及酶解，旨在破坏底物结构、释放可发酵碳源。例如，对小麦秸秆、斯佩尔特小麦壳和向日葵壳进行蒸汽爆破预处理可显著提升SCP产率[93]。随后，通过筛选高产、代谢效率高的微生物菌株，并进行种子培养与扩增，在控制条件下开展规

模化发酵。发酵过程中的关键参数（如pH、温度、碳氮比、溶氧水平与搅拌速率）需精准调控，以优化产量与蛋白质量[94]。例如，应用田口法对酿酒酵母的培养基组分进行优化，通过调整硫酸铵、硫酸铁、甘氨酸和葡萄糖浓度，可显著提升蛋白产量[58]。

目前，主流发酵体系常使用无机氮源与磷源（如铵盐、尿素、磷酸盐），虽成本低廉，但存在营养利用效率低与环境排放风险。封闭式培养系统，尤其是光生物反应器，在减少污染与资源回收方面具有显著优势[95]。同时，膜生物反应器（membrane biofilm reactor，MBR）在提升低溶解性气体底物（如H_2、CH_4、CO）的传质效率方面具有显著优势。通过微滤或超滤膜扩展气液界面，可有效增强气体溶解速率。例如, 双膜生物膜反应器（dual—membrane biofilm reactor, dMBfR）利用中空纤维膜分别输送CH_4与O_2，避免混合气体爆炸风险，在240d连续运行中实现甲烷100%转化，SCP产率达0.49gg^{-1} CH_4，蛋白含量高达50.2%[96]。在此基础上，进一步开发的气升式—膜耦合反应系统，SCP产率提升至1.36 g g^{-1} CH_4，氮源利用效率达5.05gg^{-1}N，且所产蛋白中必需氨基酸相对丰度超过42%[70]。

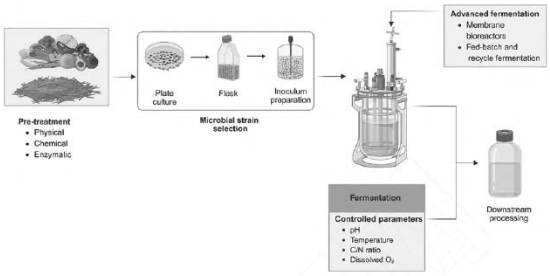


图 6 （网络版彩色)SCP蛋白生产工艺的改进(图片由BioRender.com绘制)
Figure 6 (Color online) Improvements in SCP production procession (Created with BioRender.com)

除设备改良外，先进的操作策略亦显著提升了发酵效率。例如，补料分批发酵与自循环发酵可延长发酵周期，维持微生物活性与系统稳定性，特别适用于甲醇氧化菌等工业菌种的高效利用[97]（图6）。针对底物水解效率不足的问题，提出分步/多级糖化技术显示出良好潜力。该技术利用一次酶解后，将富含未水解纤维素和木质素的残渣分离出来，对其进行进一步处理（如二次回流的预处理、补充新鲜酶液进行二次酶解），然后将其回流到主反应器中。南京林业大学开展了一项针对玉米秸秆糖化残渣高值化利用的研究。该研究通过先行分离糖化残渣中的木质素，再对所得二次残渣进行酶解处理。结果显示，二次酶解的糖得率可达到69.6%，表明该工艺在提升残渣资源化利用效率方面具有潜在应用价值[98]。

综上，SCP生产工艺的优化主要聚焦于底物来源，特别是在非常规原料的利用，膜反应器技术与糖化过程等关键环节的创新，为SCP规模化与绿色可持续生产提供了技术支撑。

4.3 共培养策略

传统纯培养体系因操作简便、代谢路径清晰，在SCP生产中占据主导地位，但在底物适应性、资源利用效率及系统稳定性方面存在明显局限。面对多样化有机废弃物及复杂底物的高效转化需求，纯培养模式难以支撑可持续发展的生产体系。近年来，微生物共培养作为一种新兴策略，凭借其代谢互补与资源协同优势，日益受到关注。

共培养体系模拟自然界中微生物互利共生的生态关系，通过构建合理的菌群组合，实现种间协同、互补代谢与资源优化配置。例如，采用Neurospora crassa、Candida utilis与Phanerochaete chrysosporium共培养发酵农作物秸秆，蛋白产率达8.89%，显著优于单菌株体系[99]。在马铃薯淀粉废水处理中，C. utilis、Geotrichum candidum与C. tropicalis构建的联合体系在上流式厌氧污泥床条件下实现了同步的污染物降解与SCP合成[100]，体现了共培养策略在废弃物处理与资源循环中的巨大潜力。共培养还可提升产物功能性。例如，Kluyveromyces lactis与Rhodotorula graminis联合利用废弃牛奶，在无需外源添加剂的条件下协同产出蛋白和类胡萝卜素，实现绿色可持续发展[101]。将小球藻（Chlorella vulgaris）与甲烷氧化细菌共培养，不仅优化氨基酸组成、提升蛋白品质，还在高浓度沼液（40%，v/v）及Na_2S胁迫下展现出优异的抗逆性和营养稳定性，SCP产量达90.43mg L^{-1}[102]。

此外，共培养拓展了对新型碳源的利用，尤其在非粮原料的高效转化方面表现出色。以嗜热兼性厌氧菌群（Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum、

Sporolactobacillus spp.和Clostridium sensu stricto）转化结晶纤维素为乳酸、乙酸与乙醇等为发酵底物，再接种Cyberlindnera jadinii、Yarrowia lipolytica与Corynebacterium glutamicum进行SCP生产，最终蛋白含量达42.5%~57.9%，其中必需氨基酸含量为27.8%~43.2%，不饱和脂肪酸比例高达89%，无需添加商业酶，体现出良好的经济性与可持续性[103]。共培养策略在提升SCP产量与营养质量、强化系统稳定性及实现碳氮循环闭环利用方面展现出独特优势。

4.4 合成生物学创新

随着合成生物学、系统生物学与人工智能等前沿技术的发展，SCP生产正迈入精准设计与动态调控的新阶段。借助CRISPR/Cas基因编辑、RNA干扰、全基因组代谢建模及强化学习算法等手段，可实现微生物菌株的定向构建与生产性能的最优化，特别在C1底物（如甲烷、甲醇、CO_2）高效转化为高品质蛋白方面展现出广阔前景。如嗜热甲烷氧化菌Methylococcus capsulatus，其在甲烷转化为SCP方面具有显著优势。但研究发现，在氮源受限条件下，该菌倾向于积累糖原以储存碳源和能量，进而抑制蛋白合成。为解决这一问题，研究者通过基因工程分别敲除糖原合酶基因glgA1与glgA2，构建了单缺失与双缺失突变株。双缺失株（ΔglgA1ΔglgA2）呈糖原缺失型表型，显著增强蛋白合成能力，在分批培养中蛋白含量提升至71%（干重），糖原含量降至10.8mg g^{-1}，明显优于野生型（蛋白含量54%，糖原187.5 mg g^{-1}）。在连续培养条件下，该突变株亦保持优越的SCP产量与品质[104]。

甲醇是生成SCP的成本低廉的C1资源。然而，天然P.pastoris存在甲醇利用率低、耐高温性差、蛋白产量不高等问题，限制了其工业化应用。为提升其性能，研究者采用适应性实验室进化方法，在33° C条件下连续传代约350代，筛选获得了高温耐受且甲醇利用能力增强的突变株HTX—33。RNA—Seq分析显示，HTX—33中与甲醇代谢相关基因（如AOX1、DAS1、Fld1）表达下调，降低甲醛解毒通量与碳损耗。同时，通过基因工程上调细胞壁合成基因CHS1，增强结构稳定性；敲除PAS_chr4_0305（与O—糖基化相关），减薄细胞壁，提高胞内蛋白占比至44.4%（干重），尽管生物量略有下降。进一步将谷氨酰胺合成酶基因过表达株与HTX—33融合构建高效合成菌株，其蛋白产物在含量与必需氨基酸组成方面均优于传统动物蛋白。研究表明，该SCP富含蛋氨酸、赖氨酸及支链氨基酸（缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸），具备作为优质营养补充蛋白的应用潜力[65]。

合成生物学的应用正加速SCP菌株的精准优化与系统性能的突破，尤其在高效利用C1碳源方面，为推动SCP产业绿色转型与功能化升级提供了有力支撑。

4.5 SCP生产工艺的挑战

尽管在底物多样化利用、膜反应器应用及糖化工艺优化等方面，SCP生产技术已取得一定进展，但是SCP的高效、经济化生产仍面临多重挑战。首先，非粮原料（如木质纤维素）预处理过程能耗高且成本显著，同时酸碱处理或蒸汽爆破易产生抑制性副产物，限制底物利用效率[105]。其次，气态碳源（如CH_4、H_2、CO_2）溶解性低，造成发酵传质受限，从而限制微生物代谢速率和蛋白产量[82]。在气体发酵过程中，H_2和CO_2的气液传质效率低，限制了CH_4生成的速率[106]。此外，高核酸含量不仅影响动物饲喂安全性，还增加去核酸处理的复杂性[58, 60]。菌种适应性和产能也仍然不足，尤其在复杂底物的条件下，微生物的蛋白合成能力较为不稳定。研究发现，Bacillus licheniformis在发酵过程中会根据环境变化进行转录组适应，表明菌种在复杂底物条件下的适应性和产能可能不足[107]。最后，产物的分离与下游加工仍然存在较高的成本，特别是在高水分体系中，产物分离与下游加工成本高，影响SCP生产的经济性[108]。

5 SCP在动物饲料中的营养优势

5.1 营养成分分析

在营养组成方面，SCP因其卓越的营养组成，正在成为传统饲料蛋白（如豆粕、鱼粉）的有力替代品。SCP主要由蛋白质、脂类、碳水化合物、灰分、水分及多种矿物质（如磷、钙等）构成[36, 109]，其中蛋白质成分是其最具代表性的营养优势。

SCP的蛋白质含量通常占干重的50%~80%，具体

取决于微生物种类及其培养条件（表2），其蛋白含量明显高于豆粕（约40%）和鱼粉（约60%），此外，经适当加工处理后，SCP的蛋白质消化率显著优于传统蛋白源，更易被动物吸收与利用[110]。

表 2 总结 SCP 的微生物来源和特性

Table 2 Summary of microbial sources and characteristics of SCP

SCP 的微生物来源	特征	代表微生物	挑战	培养基
微藻	光合生长，富含 Omega-3 脂肪酸，能够通过光合作用利用二氧化碳进行生长	Chlorella vulgaris（小球藻）、Desmodesmus sp.（德氏藻）	经济规模扩大，细胞破碎以释放养	合成啤酒废水、乳品废水的液态消化
酵母	使用多种底物（如糖类、农业废弃物等）进行发酵，常用于生产维生素、微量营养素，能够合成丰富的蛋白质	Saccharomyces cerevisiae（酵母菌）、Candida utilis（酵母菌）	提高蛋白质和必需氨基酸（EAA）含量	橙皮、菠萝、酒糟、食品工业废物混合物
细菌	高蛋白质含量，能够在 C1 底物上生长	Methylococcus capsulatus（甲烷营养球菌）、hydrogen oxidizing bacteria（氢氧化细）	口感问题，核酸含量高，商业应用受到高能底物和高 DNA 含量限制	甜菜渣、污水污泥和废弃废水
真菌	能在多种底物上生长，常用于发酵过程，部分真菌能合成丰富的蛋白质和必需氨基酸	Candida（假丝酵母）、Aspergillus niger（黑曲霉）	可能存在毒素，生长速度较慢，蛋白质含量较低，消化率低	黄酒酒糟和泡米废菌：酵母（1：1）、甘薯渣

富含优质氨基酸，在氨基酸组成方面，SCP富含赖氨酸、蛋氨酸和色氨酸等植物蛋白中常见的限制性氨基酸，其氨基酸组成更接近动物蛋白，能够有效提升动物的生长性能和蛋白质合成效率[111]，使其成为平衡饲料配方的重要组成部分。

丰富的维生素与矿物质，SCP还富含B族维生素（如B_1、B_2、B_6、B_{12}）、烟酸、叶酸，以及锌、铁、镁、硒等多种微量元素[1]，在促进反刍动物的生长发育、增强免疫功能方面发挥关键作用[112~114]，并减少对外源添加剂的依赖。微藻类SCP富含不饱和脂肪酸，如二十碳五烯酸（Eicosapentaenoic acid，EPA）和二十二碳六烯酸（docosahexaenoic acid，DHA）[115]。

5.2 营养成分的生理功能

除基本营养供给外，SCP中还富含多种功能性活性物质，在动物生理健康方面发挥积极作用。

（1）免疫调节作用。酵母、真菌等SCP富含β—葡聚糖和甘露寡糖（mannan oligosaccharide，MOS），具有广泛的免疫调节功能。其可通过激活巨噬细胞与自然杀伤细胞，增强机体非特异性免疫反应，从而提升整体抗病能力[116]。研究表明，MOS可增强肉鸡与蛋鸡的细胞、体液及黏膜免疫，进而提高整体抗病能力[117，118]。螺旋藻富含藻蓝蛋白、不饱和脂肪酸及多糖等活性物质，能够改善动物机体健康状况，增强免疫防御功能并促进生长，从而提高生产性能[59]。已有研究表明，将SCP应用于大西洋鲑、鳙鱼和虹鳟等水产动物饲养中，可激活免疫反应、调节肠道菌群结构，调节炎症反应等[113]。螺旋藻作为鱼粉的优质替代蛋白源，在白虾饲料中应用效果显著。它不仅可通过增加颗粒血细胞数量、降低细胞凋亡率来增强免疫力、提高存活率，更能在替代比例升至75%乃至完全替代鱼粉时，仍保持白虾的生长速度、饲料利用效率及蛋白质代谢不受显著影响，证明了其应用的可靠性[119]。

（2）维持肠道健康。还可调节肠道微生物群落结构，强化黏膜屏障功能，维持肠道稳态，提高营养吸收效率与机体健康水平。MOS可改善肠道微生物生态结构，增强饲料中营养成分的消化吸收[120]。此外，MOS通过激活消化酶、增强营养包裹性、吸附并中和病原体毒素，对肠道健康和免疫系统形成良性调控[121]。在动物面临转群、断奶、温度波动等应激环境时，β—葡聚糖有助于维持免疫稳态，提升健康水平[122]。

（3）促进代谢与生长性能。SCP富含锌、铁、硒等必需矿物质以及叶酸、烟酸、泛酸、吡哆醇与B族维生素等关键营养因子[1]。在动物的生长发育、免疫调节

与代谢调控中发挥重要作用[114]。例如，核黄素（维生素B_2）可促进反刍动物瘤胃中纤维降解菌的活性，从而提高纤维与粗蛋白的消化率，增加挥发性脂肪酸的产生，提升生产性能[123]。微藻类SCP的不饱和脂肪酸成分不仅优化动物组织脂肪酸组成，还可提高乳品和肉类的营养价值[115]。同时，不饱和脂肪酸在调节炎症反应、改善心血管健康方面具有积极作用[124]。在奶牛饲料中添加微藻类SCP，不仅有助于提升乳脂质量，还表现出良好的增重效果[125]。

6 SCP在动物饲料中的应用

6.1 在家禽生产中的应用

在家禽饲养过程中，蛋白质作为其生长与健康的关键营养素，通常通过添加植物蛋白（17%~22%）、动物蛋白（1%~2%）以及合成氨基酸（0.2%~0.5%）来满足[126]。在日粮中添加高达5%的甲烷氧化菌产生的SCP，可部分替代豆粕或鱼粉，不仅促进肉鸡生长、提高饲料转化率，还改善肠道结构，且对生长性能无负面影响[127]。此外，利用农业副产物（如香蕉、土豆与豌豆皮）经Aspergillus flavus（NRRL 21882）固态发酵获得的SCP，与豆粕联合使用，能显著提升疫苗抗体滴度，同时保持饲料转化率稳定在1.6，显著增强肉鸡免疫力和健康状况[128]。在蛋禽饲养方面，海蓝褐蛋鸡日粮中添加1.5g kg^{-1}混合啤酒酵母粉，可显著提高产蛋率与总蛋产量，降低肝脏与蛋黄中丙二醛含量，提升蛋黄中超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）活性，改善蛋品质与抗氧化水平[129]。此外，肉鸡日粮中补充面包酵母硒与酪酸梭菌的复合制剂，表现出良好的协同作用，显著降低料肉比，提升血清总抗氧化能力与SOD活性，同时促进益生菌增殖、抑制有害菌定殖，增强肠道健康[129]。这些结果显示，合理应用SCP与功能性益生制剂的组合，有助于提升家禽生产效益。酿酒酵母（Saccharomycescerevisiae）来源的SCP也被证实可改善肉鸡的生长性能、优化血液生化指标，并有效降低血浆胆固醇水平，进一步提升肉品质[130]。

6.2 SCP在养猪业中的应用

在传统养猪生产中，饲料蛋白质主要依赖于豆粕和动物蛋白，尤其在育肥阶段，蛋白质作为关键营养素，对促进生长具有重要作用。近年来，SCP因其高蛋白含量和良好的营养价值，适用于替代传统猪饲料蛋白。在日粮中添加2.1%的谷氨酸棒状杆菌来源SCP替代1.5%的猪血浆蛋白粉，不仅可显著提高仔猪的生长性能，还能有效降低氧化应激水平，且不影响肠道健康及营养物质的消化吸收[131]。此外，使用3%的SCP或蛋白肽替代鱼粉亦能维持断奶仔猪的生长速度和肠道功能，显示出良好的替代可行性[132]。这表明，SCP在不增加饲料成本的前提下，可优化猪的生长效率，从而提高经济效益。

在肠道健康方面，SCP的优势尤为显著。部分研究采用5%酵母SCP等量替代发酵豆粕，结果发现尽管对仔猪的生长性能和腹泻率无显著影响，但肠道结构与功能得到一定改善，如肠绒毛完整性提高，消化酶活性增强[133]。此外，添加1%的藻类SCP可优化空肠绒毛结构、延长绒毛长度，从而提升营养吸收效率[134]。断奶期是仔猪易受免疫应激与肠道紊乱影响的关键阶段。相关研究显示，SCP可有效缓解断奶应激反应，维持肠道微生态平衡，提升仔猪的适应能力。Håkenåsen等人[135]发现，在断奶后前两周饲喂酵母SCP显著提升了胃肠健康和免疫功能，增强了仔猪在过渡期的抗病能力。此外，Newport和Keal[136]开展了一项使用PRUTEEN™的喂养试验，该产品由英国ICI公司生产，来源于甲醇生长细菌Methylophilus methylotrophum。在该研究中，于仔猪断奶后第2天开始饲喂PRUTEEN™ SCP，结果显示，当其替代日粮中40%的蛋白时，仔猪的生长表现与全乳饮食对照组相当，表明SCP具有良好的适口性和营养替代潜力。但当替代比例进一步提高，尤其超过40%时，仔猪的生长表现开始下降。研究推测，这一现象可能与仔猪对SCP酶适应能力有限以及胃肠道蠕动时间缩短有关。此外，对试验结束后的消化物分析表明，SCP的使用促进了胃蛋白酶和胰蛋白酶的分泌，并降低了胃内容物的pH，进一步验证了其对仔猪消化系统具有积极影响。

6.3 SCP在反刍动物饲养中的应用

反刍动物（如牛和羊）主要依赖瘤胃微生物的发酵作用及消化道的吸收功能来获取氨基酸，因此饲料

中的可代谢蛋白含量对其生产性能至关重要[137，138]。与传统植物蛋白（如豆粕）和动物蛋白（如鱼粉）相比，不仅蛋白质含量高，还具有良好的消化利用率与氨基酸组成[139]，已成为反刍动物饲料体系中具有应用潜力的高效蛋白替代来源。

以SCP部分替代传统蛋白原料，可显著改善反刍动物的生长表现与营养代谢。例如，酵母SCP与缓释尿素联合添加于奶牛日粮中，未对产奶量或乳品质量产生负面影响，同时显著提高了奶牛对氮素的利用效率[140]。此外，酵母SCP的适量添加可提高奶牛的产奶量和乳脂率，并有助于维持瘤胃健康。在一项针对荷斯坦奶牛的研究中，以酵母SCP替代67%的豆粕，显著提高了能量校正乳（energy correction milk，ECM）和4%乳脂校正乳（butterfat corrected milk，FCM）的产量及总固形物含量；同时，血浆中β—羟丁酸和葡萄糖浓度升高，反映出其对奶牛代谢状态的改善作用[141]。该研究表明，酵母SCP不仅可有效替代传统蛋白源，还能提升产奶性能与代谢健康水平。在肉牛饲养方面，微藻SCP的应用亦展现出功能性优势。Carvalho等人[115]研究发现，在肉牛饲粮中添加富含DHA的微藻SCP，虽然未显著改变生长速度或胴体性状，但能显著提高牛肉中DHA和n—3脂肪酸的含量，优化n—6/n—3比例，从而显著提升肉品的营养价值。该结果表明，微藻SCP作为功能性饲料补充剂，为在不影响生长性能的前提下改善肉牛产品品质提供了新的思路与方法。

6.4 SCP在水产养殖中的应用

随着全球水产品需求的不断增长，水产养殖业发展迅速，其增长速度远超其他动物蛋白产业。数据显示，过去二十年水产养殖年均增长率达7%，显著高于家禽（4%）和渔业（3%）[142~145]。然而，随着需求的持续增加，鱼粉价格不断上涨，尤其对于如大西洋鲑（Salmo salar）、金目鲈或亚洲海鲈（Lates calcarifer）、黄尾鰤（Seriola lalandi）等对膳食蛋白需求较高的品种，水产养殖面临着原料依赖性强、发展受限等挑战[146]。目前，这些物种的饲料配方仍严重依赖海洋来源的成分，亟需可持续、可替代的高效蛋白源。

SCP通常含有超过70%的高蛋白质，氨基酸谱接近鱼粉，且不含抗营养因子，因此被认为是水产饲料中最具潜力的可持续蛋白来源之一[110]。在近期的一项研究中，以酵母SCP（Cyberlindnera jadinii、Blastobotrys adeninivorans和Wickerhamomyces anomalus）部分替代鱼粉（替代比例为30%和70%）用于三文鱼饲料。结果显示，30%替代组的三文鱼终体重和特定生长率显著优于对照组[147]。其他研究也发现，SCP在鲑鱼、鳟鱼、虾、日本黄尾鰤等水产动物中具有良好的消化率和生长性能[148]。但值得注意的是，SCP在热带肉食性鱼类（如金目鲈）中的应用研究仍较为匮乏[148]。

SCP除促进水产动物生长外，其还具备良好的抗氧化特性。相关研究证实，在金头鲷饲料中使用荚膜微囊藻来源的SCP替代66%的鱼粉后，鱼体的生长性能、抗氧化指标及消化酶活性均未出现显著下降，尤其值得注意的是，鱼肉中对人体有益的多不饱和脂肪酸（如DHA与EPA）含量反而得到显著提升[149]。从自产乙醇梭菌中提取的SCP亦被用于替代幼年剑鱼饲料中的植物蛋白（最高替代量达200g kg^{-1}），结果显示其终体重、增重率、特定生长率、蛋白质保留率和蛋白质效率比均显著提升，且对肝脏和中肠等关键器官无不良影响[150]。同样地，在非洲鲶鱼饲料中使用30%的微生物蛋白替代鱼粉，也获得了良好的生长效果，包括增重率、特定生长率和代谢生长率的显著提高，且鱼体全身蛋白质含量增加了约8%[151]。此外，Alloul等人[152]研究发现，紫色非硫细菌作为虾类饲料的蛋白质来源，不仅在个体体重和饲料转化率方面优于传统饲料，还增强了虾类对氨的耐受能力。研究结果表明，添加SCP蛋白的饲料相比于传统商品饲料，不仅在个体体重、饲料转化率方面有显著提升，还提高了虾对氨的耐受性。

7 SCP的环境与经济效益

在全球可持续发展需求日益增长的背景下，SCP作为动物饲料蛋白的替代来源，在资源效率及生态保护方面展现出显著优势。SCP可利用农业副产物、食品残渣及有机废弃物等作为原料，实现资源的循环利用，不仅大幅减少对耕地和海洋资源的压力。还通过

废物资源化路径，为降低温室气体排放提供了可行的解决方案[20，153~158]。与大豆粕和鱼粉相比，SCP所需土地仅为其约0.4%，对海洋生态干扰不足鱼粉捕捞的0.1%[159]。结合“电力转化食品”（PtF）等技术，SCP有望实现碳负排放，同时缓解水资源紧张和水体富营养化问题[160，161]。

SCP原料来源广泛、成本低廉，可利用农业和工业副产物、植物纤维及有机废弃物，使用有机废弃物可降低35%~75%的生产成本[20，157，158，162]。其较高的消化率与营养价值可减少对外源添加剂的依赖，从而进一步降低饲料成本[6，127]。SCP生产与生物乙醇发酵等产业耦合，可实现协同产出，提高资源利用效率并降低能耗[60，163]。技术经济分析和生命周期评价显示，随着规模化放大，环境影响指标显著下降（60%~96%），反映出明显的规模效益[164]。前沿研究表明，产甲烷菌与微生物电解池结合可实现高SCP产率（13.7mg $L^{-1}h^{-1}$，蛋白质含量60%）[165]；光伏驱动系统（PV—SCP）在蛋白质产量、水耗及土地效率方面亦表现出显著优势[166]。SCP不仅降低环境压力，还具备成本竞争力和商业潜力，是推动蛋白质产业绿色转型的关键方向。

8 挑战与展望

尽管SCP在动物营养和可持续蛋白供应方面展现出广阔前景，但其产业化仍面临多重挑战。首先，在产品应用端，SCP的引入可能对现有饲料加工与配方体系提出新要求，需协调其与不同养殖模式（如反刍、单胃动物、水产等）的适配性，特别是在替代高比例传统蛋白源时，其对动物肠道微生态、免疫调控和生长性能的长期影响仍需系统研究。其次，在产业链环节，SCP的规模化应用要求饲料厂与养殖企业进行工艺与管理模式的协同更新，以实现生产与使用端的无缝衔接。菌种方面，当前多数SCP微生物仍存在蛋白合成能力不稳定、环境适应性差、产物积累效率低等限制。未来需依托合成生物学与代谢工程手段，对菌种进行精准改造与场景适配优化，以增强其在复杂底物体系下的产量、品质和抗应激能力。此外，气态碳源发酵过程中的传质效率、产物分离成本及高核酸含量等问题亦限制了其经济可行性。未来可通过构建代谢互补的共培养体系、发展无酶糖化与循环发酵工艺提升底物利用率与资源回收效率。监管与标准体系方面，亟需建立统一的SCP饲料添加剂标准、品质评价体系及溯源机制，以保障安全性与市场接受度。未来可重点聚焦以下研究方向：多种SCP来源（微藻、酵母、细菌、丝状真菌）与不同生产技术（气态发酵、C1碳源发酵、废弃物转化、光伏驱动系统等）的综合利用，将成为提升整体效率、降低成本和增强生态适应性的关键方向。通过多技术、多底物和多菌种的协同应用，可实现资源优化配置、生产效率最大化以及动物营养性能的综合提升，从而推动SCP产业绿色、可持续发展。

9 结论

综上，SCP作为一种新兴的优质蛋白资源，在缓解我国养殖业蛋白饲料紧缺、推动绿色畜牧业发展中具有重要意义。然而，其全面替代传统蛋白饲料仍需突破多个关键环节：如生产体系的模式转化（从传统饲料加工向适应微生物蛋白的工艺迭代）、产品中的抗营养因子去除与适口性提升、非粮原料的利用，以及菌种性能与底物多样化适应能力的系统优化。未来应进一步聚焦于提升菌种稳定性与转化效率、优化与养殖体系的精准对接机制、建立安全规范的监管体系，并实现从试验室转向规模化、商业化推广的全链条突破。通过产学研协同创新，SCP有望成为我国实现蛋白自给、安全高效养殖与生态环保发展的重要支撑力量。

参考文献略

来源：《中国科学》杂志社

网络首发时间：2025-10-24 08:57:16

网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1784.n.20251023.1108.014

饲料制粒工段中设备影响产能的因素分析

王　成
（希彼埃姆机械（无锡）有限公司　江苏　无锡）

摘 要：随着养殖业的发展，饲料工业对制粒设备有了更高要求。主要围绕饲料制粒工段，梳理了国内外主要品牌，结合设备工作原理，重点分析了影响饲料工段产能的因素，并从物料特性、设备操作、易损件（环模）、蒸汽、调质等几个方面对生产效率、品质和成本的影响展开分析，最后讨论了饲料工业未来发展趋势。

关键词：饲料制粒工段；产能；物料特性；蒸汽；调质

分类号：S817.1

文章编号：2096-8515（2025）08-0225-03

1　饲料设备使用概述

随着养殖业和饲料工业的发展，中大规模饲料制粒生产线逐渐取代小规模生产。饲料制粒工艺已经实现从手动到自动化、从单机到生产链的发展升级，涵盖原料接收、粉碎、配料、混合、制粒、冷却和包装等环节。早期饲料制粒是将原料进行简单的压制，而现代饲料制粒生产线兼具营养、高效、节能、绿色环保等特点。

1.1　饲料制粒设备主流品牌

一是正昌，我国早期涉足环模制粒机的企业，拥有较高的市场占有率和先进的技术，其产品采用高精度齿轮传动技术，具有高效、稳定和智能化等特点。二是丰尚，总部位于我国，在国内外市场上提供多种饲料加工设备和解决方案。三是CPM，美国品牌，全球知名的饲料制粒机制造商，其产品以高品质和先进技术著称。四是Bühler，瑞士品牌，有着全球领先的食品加工技术，提供的饲料制粒设备品质卓越。五是ANDRITZ，奥地利品牌，提供全面的饲料制粒解决方案，其产品在能效和可靠性方面具有优势。

1.2　饲料制粒设备的主要类型

一是环模饲料颗粒机，适用于大型饲料加工厂，通过环状模具和压辊压制物料，生产出硬度高、表面光滑的颗粒饲料。二是平模饲料颗粒机，压轮部件是其核心，可以根据不同物料的特点进行压缩成型，结构简单，适应性强，噪声低，适合农村专业户和中小型饲养场使用。三是膨化制粒机，通过螺杆对物料进行高温压制，并通过模板成型，适应不同物料和颗粒形状需求，常用于水产和宠物饲料生产。当前饲料行业多选用环模饲料颗粒机和膨化制粒机，但具体选择需要考虑养殖规模、饲料种类及成本预算等因素。

2　饲料制粒机配套设备及工作原理

饲料制粒机工段设备主要包括待制粒仓、喂料器、调质器和制粒机4个设备。

一是待制粒仓，用于储存即将制粒的原料，通常采用封闭式设计，以防潮、防污染及防霉变。使用时应注意原料的先进先出原则，避免堵料和搭桥现象，合理的料斗角度是防止“结拱”的关键。

二是喂料器，连接待制粒仓与制粒机，用于控制原料的输送速度，保证制粒过程稳定、均匀。喂料器由一个带有螺旋叶片的轴旋转推动物料前进，通过电磁调速电动机与减速器组合实现变速调节，保证物料以适当的速度进入制粒机，适应下游产量变化。

三是调质器，采用卧式结构，内部设有搅拌叶片，用于原料与蒸汽、油脂等辅料的充分混合，不仅

能提高饲料的品质和产量，还能保证饲料的安全性和卫生性，在饲料制粒过程中十分关键。现代调质器改进为多点进气和底部蒸汽腔进气两种较为先进的进气方式，以满足多样化配方需求。上中层调质器使用双轴DDC调质，也可在中层采用保持器，主要起到熟化和灭菌作用。在高温和蒸汽的作用下，物料中的淀粉和蛋白质发生物理和化学变化，达到熟化和灭菌的目的。下层调质器的主要作用是输出、打散物料。经过调质处理的物料被送出调质器，进入制粒机。调质的关键作用有三点。其一，熟化处理，旨在提升淀粉的糊化度，并使蛋白质受热变性，从而提高饲料的消化利用率；其二，消毒处理，旨在通过高温杀死有害病原体，保障饲料卫生安全；其三，提高颗粒饲料的耐水性，利用蒸汽的水热作用增强颗粒饲料的黏结性和耐水性。

四是制粒机，用于将调质好的原料制成颗粒，是饲料制粒过程中的核心设备。制粒机由电动机通过齿轮箱传动空轴，安装在环模内的压辊则与环模摩擦自转。物料进入压制室后，被布料器分于压辊之间，经钳入和挤压，通过环模模孔连续高强度挤压成型，在外侧形成柱状的颗粒。随后，外侧切刀切割，随着环模的回转，柱状颗粒被固定安装在环模外面的切刀切成所需长度的颗粒饲料。制成的颗粒饲料被排出机外，进行冷却和包装。

3 饲料工段产量的影响因素

3.1 物料特性

一是粒度与成分。物料的粒度与成分对制粒产量的影响约占40%。物料体积质量越大，制粒产量越高，因此，在选用物料时，除了考虑营养需求，还要考虑物料容重和粒度等。较细的物料能够快速吸收蒸汽，利于水分调节，从而提高制粒产量，不过，物料过细会导致颗粒脆性增加，影响颗粒品质；物料过粗会增加压模和压辊的磨损，增大能耗，降低产量。

二是水分。蒸汽含水量过高或蒸汽添加过多，会直接影响制粒的温度，浪费能源，并影响颗粒的产量和品质。同时，物料的水分含量也会过高，造成调质困难且易使物料在环模内壁与压辊之间打滑，导致堵塞。一般要求调质前物料水分含量应在13%以下。调质后物料的水分含量应在 14.0%～16.5%，以手握成团、松手后能散开为宜。

三是蛋白质和淀粉。蛋白质含量高会增加受热后物料的可塑性和黏结性，提高制粒产量。但非蛋白氮含量高时，产量会降低。其二，谷物由于淀粉含量高，在高温、高水分下容易制粒，产量也高。如果淀粉糊化不足，将导致颗粒脆性增加甚至无法成型。若谷物在调质前已经熟化，其制粒产量会降低。

四是油脂。添加少量的油脂（0.5%～1.0%）可以减少机器部件磨损，便于颗粒通过模孔，提高制粒产量。然而，若添加量超过2%，会使颗粒松散，难以成型。因此，在添加高剂量油脂时，宜在调质器处添加总量的30%，在制粒机处喷涂剩余的70%。

五是粗纤维含量。适当的粗纤维含量（3%～5%）有利于物料的黏结，减少粉化率，提高制粒产量。若粗纤维含量超过10%，则会因为黏结性差影响颗粒的硬度和成型率，且加剧机器磨损，降低制粒产量。无机质饲料几乎无黏性，制粒性能差，影响制粒产量。

3.2 设备及操作因素

一是压辊间隙。压辊与环模的间隙对制粒品质的影响较大，一般间隙应在0.3～0.5mm。当间隙大于0.5mm时，物料层会过厚，且分布不均，降低制粒产量；当间隙小于0.1mm时，机器磨损会加剧。新环模在使用前应进行抛光处理，以使模孔内壁光滑，减少摩擦阻力，提高制粒产量。

二是喂料刮板。长期使用的饲料制粒机，其喂料刮板会有磨损，导致喂料不均匀。如果制粒工人未能及时调整，使进入压辊、环模夹角范围的饲料量减少，会降低制粒机的产量，并提高含粉率。喂料刮板安装不当会使物料蹦出环模，造成产量低、粉料多。喂料刮板上部边缘应与环模、环模罩相距2mm。

三是模孔堵塞。模孔堵塞主要由制粒性能差的物料或未抛光的新模引起，也可能是制粒后未用油性物料清理所致。当物料与压辊、环模内表面的摩擦系数过小时，物料易打滑，降低产量；当摩擦系数过大时，物料难以通过模孔，降低产量。影响摩擦系数的

因素有配方、调质、机器自身等。

四是喂料量。喂料量过多或过少都会加大堵塞风险，并扩大电流波动范围，损害下游设备。

五是压辊直径与转速。压辊直径越大，周长越长，单位时间内物料接触压制的次数越多，产量就越高。转速过快会导致物料在模孔内停留时间不足，成型率下降；转速过慢则压制效率低。有条件的情况下可通过变频调速找到最佳平衡点。

六是停机时间。制粒机配备快拆式环模结构，可将环模更换时间缩短至30min，减少停机损失。配套设备设计操作简单可靠，也可以大幅度缩短停机和维修调试时间。

七是颗粒饲料冷却程度。冷却不充分会造成颗粒松散，经提升机提升后粉料增多。粉料筛分后回流制粒，会进一步降低制粒产量。当颗粒料需要破碎时，这一影响尤为突出。

3.3 环模及其他因素

一是环模材质。普通碳钢环模的使用寿命为800～1000t，而采用合金钢或表面渗碳/涂层处理的环模使用寿命可达1500～2000t，可以减少更换频次，提高产量稳定性。

二是长径比。这是指物料受到的压力与物料原始体积之比。合适的长径比可以使物料在制粒过程中形成良好的结构，提高饲料颗粒的强度，增强其稳定性。长径比越大，物料在模孔内摩擦阻力越大，制粒产量越低。

三是减压段。减压段是制粒机中的压力释放区域，有利于物料在制粒过程中的顺利成型。在调质过程中合理控制物料的水分和温度，有助于保证减压段的作用效果。

四是环模孔，其开孔形状对生产影响极大。直形孔环模适合加工配合饲料，但对于粗纤维含量高的低档饲料，建议使用外锥形孔环模以提高产量。较大的环模直径结合较大的压辊直径可减小压制区入口的夹角，降低物料被排挤回去的概率，有利于提高制粒产量。孔径大小也对生产有显著的影响，较大孔径的环模能够提高制粒产量，但也应选择合适的深径比。模孔厚度过大将导致产量低、颗粒硬度高；而模孔厚度不足会使颗粒硬度不够，无法达到质量要求。

五是安装位置。环模位置安装误差会导致不均匀磨损和不均匀制粒，甚至引起环模挪动，降低制粒产量。此外，切刀位置太靠近环模会造成粉料过多，影响制粒产量。

4 调质对生产效率、品质、成本的影响

4.1 调质蒸汽的影响

一是湿热蒸汽，含有液态水，通常由锅炉产生，水分含量较高。水分会降低调质温度，影响淀粉糊化和蛋白质变性，导致物料调质不充分。此外，水分过多会使颗粒变软，硬度不足且易碎，影响成品品质，严重时会导致制粒机“湿”打滑。同时，水滴会加速设备腐蚀损耗，增加维护成本。

二是饱和蒸汽，是温度与压力达到平衡的蒸汽，不含液态水。它能提供稳定的温度和湿度，利于淀粉糊化和蛋白质变性，从而增强调质效果。它调质的颗粒硬度适中，耐久性好，成品品质高。同时，由于它不含液态水，能减缓设备腐蚀，延长使用寿命。

三是过热蒸汽，是温度高于饱和温度的蒸汽，不含液态水。它的温度过高，会导致物料表面过度加热，内部调质不充分，影响均匀性。此外，为保证过热蒸汽进入制粒机前的压力稳定，需要一个减压系统来调节过热蒸汽的压力。

总之，不合格的蒸汽管路会带来巨大的经济损失。蒸汽在锅炉给定压力下以饱和蒸汽进入管道，在输送过程中容易冷凝变为湿热蒸气，对调质造成不利影响。因此，调质前应将冷凝水排出，并通过减压阀将蒸汽变为低压干热蒸汽以增强调质效果，且蒸汽管段不能设置太长。蒸汽经减压后压力≥0.2MPa，温度≥120℃较为适宜。理想的调质蒸汽为饱和蒸汽。采用饱和蒸汽直接注入物料，蒸汽利用率达95%，产能提高8%～10%。此外，采用蒸汽夹套的方式，受热均匀，其寿命也比电夹套长很多。

4.2 调质时间的影响

如果调质时间过短，物料无法充分调质，会导致淀粉糊化和蛋白质变性不足，物料黏性低，制粒时颗粒成型困难，成品硬度低、耐久性差。虽然缩短时间可加快生产节奏，但成品品质会下降，导致返工率增加，实际效率降低。此外，未充分利用蒸汽热量可能需要二次调质或补加热，造成能耗浪费。

过度调质会使物料含水量过高或淀粉过度糊化，导致颗粒过硬或粘连，堵塞模孔，降低制粒产量。延长生产周期会减少单位时间内的产量，并且高温长时间作用可能导致热敏性营养成分降解。

此外，调质器的叶片角度、转速及蒸汽添加量也会直接影响物料熟化程度。若调质不充分加上叶片排布不合理，会导致物料流动性差、制粒阻力大、接团率高，从而降低产能。

总之，调质时间需要与产能平衡，时间过短（＜30s）会导致淀粉糊化率低于20%，物料黏性不足，制粒产量降低，且颗粒含粉率增加；时间过长（＞120s）会导致热敏性营养成分降解，同时高纤维物料吸水膨胀堵塞环模孔，需要频繁停机清理，间接降低产量。因此，调质工艺优化主要集中在蒸汽管路、蒸汽状态及物料蒸汽利用率的优化与平衡。推荐调质条件为：高淀粉物料调质温度80～85℃，时间60s；高纤维物料温度70～75℃，时间120s。此外，还需要进行动态监测，避免过度调质，防止打滑堵机。对于热敏性配方，推荐使用智能分段调质技术。

5 未来展望

随着科技的进步和饲料工业的发展，饲料制粒设备的技术创新呈现出以下趋势：一是饲料制粒设备的自动化、智能化水平持续提高，未来将实现整条生产线的自动运行；二是饲料制粒设备的节能环保将成为技术创新的重要方向，在保证生产效率和质量的同时，降低能耗，减少废弃物排放，实现可持续发展；三是饲料制粒设备的模块化设计和智能大型化生产将成为新领域，对原本设备的安装、升级会成为主流。

参考文献略

来源：2025年5月上半月粮油与饲料科技

红河黑猪的生长发育规律及生长曲线拟合研究

梁丙坤[1] 张 丽[1] 邢惠萍[2] 陈永军[3] 肖红亮[4] 李俄然[3]
余育隗[5] 白马伟[6] 严达伟[1] 董新星[1]
（1. 云南农业大学动物科学技术学院，云南昆明 650201；
2. 开远市畜牧技术推广站，云南开远 661699；
3. 红河州畜牧技术推广站，云南蒙自 661199；
4. 红河州动物卫生监督所，云南蒙自 661199；
5. 屏边县畜牧技术推广站，云南屏边 661299；
6. 蒙自市畜牧兽医服务中心，云南蒙自 661199）

摘 要：本文旨在研究红河黑猪的体尺与体重的关系，揭示其生长发育规律。测定了不同月龄红河黑猪的体重（Y）、体高（X_1）、体长（X_2）、胸围（X_3）、腹围（X_4）和管围（X_5），利用相关分析、通径分析和逐步回归分析计算各体尺指标对体重的影响，使用Logistic、Gompertz 和Von Bertalanffy 模型进行生长曲线拟合。结果表明：红河黑猪在2月龄前生长较慢、2月龄后加快、4月龄时达到生长高峰；成年公猪的体重与体尺呈极显著正相关，成年母猪的体高、体长、胸围、腹围均与体重呈极显著正相关，管围与体重呈显著正相关；体长对公猪直接作用最大， 胸围对母猪直接作用最大，公猪体尺与体重的最优回归方程为：$Y=-78.415+1.112X_2+0.400X_3$，母猪体尺与体重的最优回归方程为：$Y=-101.003+0.778X_2+0.944X_3-0.152X_5$；Logistic模型对红河黑猪体重的拟合效果最好，公猪的拟合方程为：$Wt=73.104/((1+22.127e-0.811t))$，拐点月龄、拐点体重分别为3.818月龄、36.552kg，母猪的拟合方程为：$Wt=71.63/((1+23.635e-0.831t))$，拐点月龄、拐点体重分别为3.806月龄、35.815kg。本研究结果可为红河黑猪的饲养管理和生长发育研究提供参考。

关键词： 红河黑猪；通径分析；逐步回归分析；生长曲线

中图分类号：S828.2

文献标识码：A DOI

编号：10.19556/j.0258-7033.20241202-03

猪种资源是保证猪业安全和可持续发展的重要战略资源[1]。体尺、体重是反映猪只生长状况以及种猪选育的重要指标[2]。体重作为最重要的经济性状之一，是检验饲养管理水平的主要依据[3]，体尺是育种工作的前提和重要依据[4]，对体重与体尺进行相关分析有助于识别与体重增长密切相关的体尺指标，从而指导育种和饲养管理工作[5]。生长曲线拟合是分析畜禽生长发育规律的重要方法，可以动态了解畜禽在不同阶段的生长状态[6]。生长曲线模型作为机体体重和体尺指标在某一时间点或时间段内变化规律的数学模型，可用于预测猪只体重，确定猪只生长所需的营养物质，反映个体和环境的相互作用[7]，准确预测猪的生长曲线可以寻找其生长速率产生变化的大致拐点日龄以及拐点体

重，帮助生产者设计选育方案，提高猪肉生产效率，使机体增重达到理想状态，实现经济效益最大化[8-9]。

红河黑猪（暂订名）因主产于红河州且以黑毛为主而得名，主要分布于云南省红河哈尼族彝族自治州、文山壮族苗族自治州境内彝族、苗族聚居区，具有肌肉大理石纹评分高、滴水损失低、味美多汁等特点。2019—2023年云南农业大学、红河州畜牧技术推广站、开远市畜牧技术推广站等单位组成的联合调查组在资源普查中发现了红河黑猪，经古籍文献查阅、遗址化石判断及全基因组分析，属于未报道过的新猪种资源。本研究通过相关分析、通径分析和逐步回归分析探讨影响红河黑猪体重的主要体尺指标，采用多种模型拟合并筛选其最优回归方程，为红河黑猪的开发利用提供依据。

1 材料及方法

1.1 试验猪群 根据前期遗传资源普查结果，从红河黑猪中心产区农户饲养的断奶仔猪中购买品种特征典型、出生日期及体重相近的红河黑猪断奶仔猪32头（♂16头、♀16头），经免疫和驱虫后在养殖场集中饲养，待母猪发情后进行纯繁配种，仔猪出生后进行体重、体尺测定。

1.2 测定指标 分别在红河黑猪初生、1、2、3、4、5、6月龄和成年时，按《种猪登记技术规范》（NY/T 820-2004）的方法测定体重（Y）、体高（X_1）、体长（X_2）、胸围（X_3）、腹围（X_4）、管围（X_5）。

1.3 数据处理 将原始数据录入Excel进行初步整理；用R 语言对不同性别红河黑猪的体重与体尺指标进行相关性分析，计算Pearson相关系数、通径系数，采用逐步回归分析确定体重与体尺指标的回归方程，利用Logistic模型、Gompertz模型和Von Bertalanffany模型进行拟合（表1），参照廖超等[10]的方法用R^2（拟合度）作为评价模型适用性的依据，计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2}$$

其中：y_i、$\hat{y}_i$、$\bar{y}_i$分别表示实测值、预测值、实测平均值，n表示样本量。

表 1 非线性生长曲线模型

模型	Logistic 模型	Gompertz 模型	Von Bertalanffy 模型
表达式	$Wt = A/(1 + Be^{-kt})$	$Wt = Ae^{-Be^{-kt}}$	$Wt = A/(1 - Be^{-kt})^3$
相对生长速率	$k(1 - y/A)$	$k(\ln(A/y))$	$3k[(A/y)^{1/3} - 1]$
拐点体重	$A/2$	A/e	$8A/27$
拐点月龄	$(\ln B)/k$	$(\ln B)/k$	$(\ln 3B)/k$

注：Wt 为体重；t 为日龄；A、B、k 为模型参数，其中 A 为极限体重，B 为常数尺度，k 为瞬时相对生长率。

2 结果与分析

2.1 不同月龄红河黑猪的体重体尺 由表2可见，相同指标、相同月龄不同性别之间比较，公猪的初生体重极显著大于母猪、体高和体长显著大于母猪，1月龄公猪的体长极显著大于母猪、体高显著大于母猪，2月龄公猪的胸围和管围显著大于母猪，3月龄公猪的体长显著大于母猪，5月龄公猪的腹围显著小于母猪。

从图1可看出，相同性别、相同指标不同月龄间比较，公、母猪的体重及体尺均随月龄增加而增加；性别间比较，3月龄前，公猪的腹围有大于母猪的趋势，3月龄后，母猪的腹围反而大于公猪。4月龄前，公猪的胸围有大于母猪的趋势，4月龄开始，母猪的胸围反而大于公猪；5月龄前，公猪的体高有大于母猪的趋势，5月龄开始，母猪的体高反而大于公猪；成年红河黑猪公猪的体重及体尺指标均高于母猪。

表 2 不同月龄红河黑猪的体重和体尺

月龄	性别	体重，kg	体高，cm	体长，cm	胸围，cm	腹围，cm	管围，cm
0	公	0.84 ± 0.13**	15.81 ± 0.77*	20.94 ± 1.24*	21.81 ± 1.08	23.25 ± 1.40	5.85 ± 0.50
	母	0.70 ± 0.15	14.88 ± 1.39	19.72 ± 1.58	20.92 ± 1.70	22.00 ± 1.82	5.67 ± 0.55
1	公	7.03 ± 0.62	26.62 ± 2.64*	43.08 ± 3.08**	43.58 ± 2.91	46.54 ± 2.28	9.27 ± 1.12
	母	6.19 ± 1.50	24.18 ± 2.46	39.28 ± 3.15	41.43 ± 3.62	44.25 ± 3.81	8.69 ± 1.08
2	公	14.89 ± 0.64	30.34 ± 2.17	58.95 ± 2.54	57.28 ± 3.09*	63.79 ± 3.94	11.14 ± 0.79*
	母	13.89 ± 2.03	28.67 ± 2.53	57.83 ± 1.98	53.40 ± 5.67	62.50 ± 6.62	9.81 ± 1.24
3	公	25.95 ± 2.12	34.20 ± 1.95	67.18 ± 2.63*	65.58 ± 3.86	69.96 ± 3.61	13.78 ± 0.90
	母	25.35 ± 3.99	33.16 ± 3.09	63.76 ± 4.72	63.85 ± 3.94	70.59 ± 3.98	12.42 ± 1.06
4	公	39.43 ± 1.18	38.19 ± 2.82	73.20 ± 3.90	73.56 ± 4.70	77.75 ± 3.42	14.94 ± 0.95
	母	38.89 ± 3.76	38.03 ± 3.08	71.54 ± 5.60	75.99 ± 7.80	79.63 ± 6.12	14.38 ± 1.65
5	公	52.31 ± 5.66	41.92 ± 3.02	82.53 ± 6.77	79.88 ± 4.85	83.01 ± 3.52	15.63 ± 1.03
	母	51.98 ± 3.98	43.14 ± 3.42	82.40 ± 5.30	82.59 ± 4.79	88.33 ± 6.87*	15.33 ± 0.94
6	公	62.88 ± 1.65	45.76 ± 1.61	92.38 ± 4.87	85.91 ± 5.96	92.14 ± 6.28	17.38 ± 0.85
	母	62.05 ± 5.77	47.86 ± 4.38	91.87 ± 5.96	89.50 ± 2.78	92.14 ± 6.82	17.00 ± 0.38
成年	公	122.57 ± 17.81	67.43 ± 5.49	134.79 ± 11.51	127.90 ± 11.27	146.63 ± 12.94	19.69 ± 2.45
	母	100.18 ± 18.50	64.96 ± 6.71	125.90 ± 12.74	112.41 ± 12.46	130.50 ± 12.34	17.77 ± 2.01

注：同月龄同性状不同性别比较，肩标 ** 表示差异极显著（P<0.01），* 表示差异显著（P<0.05）。

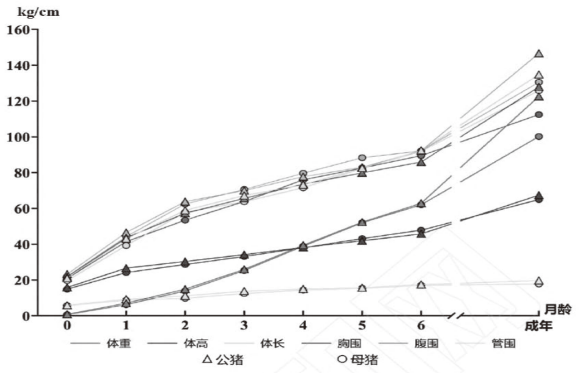


图 1 不同月龄红河黑猪的体重和体尺

2.2 红河黑猪的生长发育规律 从表3可以看出，0～6月龄公猪的累积生长大于同月龄母猪。绝对生长是反映某一时期家畜生长发育的绝对速度，同性别不同月龄间比较，公猪和母猪2月龄之前生长较慢，2月龄之后生长速度开始加快，在4月龄时生长速度达到高峰，之后开始变缓；同一月龄不同性别间比较，3月龄前公猪的生长速度快于母猪；3～5月龄母猪的生长速度快于公猪；6月龄公猪的生猪速度又反超母猪。相对生长表示生长发育强度，从出生到6月龄，红河黑猪的生长强度逐渐下降；同月龄相比，母猪的生长发育强度有大于公猪的趋势。

表 3 红河黑猪不同月龄的体重增长

月龄	累积生长		绝对生长，g/d		相对生长，%	
	公猪	母猪	公猪	母猪	公猪	母猪
0	0.84 ± 0.13	0.70 ± 0.15	–	–	–	–

表 3 红河黑猪不同月龄的体重增长

月龄	累积生长		绝对生长，g/d		相对生长，%	
	公猪	母猪	公猪	母猪	公猪	母猪
1	7.03 ± 0.62	6.19 ± 1.50	206	183	737	784
2	14.89 ± 0.64	13.89 ± 2.03	262	257	112	124
3	25.95 ± 2.12	25.35 ± 3.99	369	382	74	83
4	39.43 ± 1.18	38.89 ± 3.76	449	451	52	53
5	52.31 ± 5.66	51.98 ± 3.98	429	436	33	34
6	62.88 ± 1.65	62.05 ± 5.77	352	336	20	19

2.3 成年红河黑猪体尺与体重间的相关 对成年红河黑猪进行体重与体尺指标进行相关分析（表4），成年红河黑猪公猪的体尺指标均与体重呈极显著正相关，体高与体长、胸围、腹围均呈极显著正相关，体长与胸围、腹围均呈极显著正相关，腹围与胸围、管围均呈极显著正相关；体高、体长、胸围均与管围呈显著正相关。母猪的体高、体长、胸围、腹围均与体重呈极显著正相关，管围与体重呈显著正相关；胸围和腹围均与体高呈极显著正相关，体长与体高呈显著正相关；胸围、腹围均与体长呈极显著正相关，管围与体长呈显著正相关；腹围与胸围呈极显著正相关，管围与胸围呈显著正相关；管围与腹围呈极显著正相关。

表 4 成年红河黑猪体尺指标与体重的相关

指标	体重	体高	体长	胸围	腹围	管围
体重	1	0.5050**	0.8561**	0.6444**	0.7018**	0.4379**
体高	0.5505**	1	0.5320**	0.5280**	0.5710**	0.3487*
体长	0.8401**	0.3606*	1	0.5451**	0.6657**	0.3603*
胸围	0.8660**	0.5841**	0.4619**	1	0.8319**	0.4037*
腹围	0.7280**	0.5692**	0.4507**	0.7908**	1	0.4473**
管围	0.3478*	0.2132	0.3277*	0.3205*	0.3779**	1

注：上三角表示公猪体尺体重的相关系数，下三角表示母猪体尺体重的相关系数；肩标 ** 表示极显著相关（P<0.01），* 表示显著相关（P<0.05）。

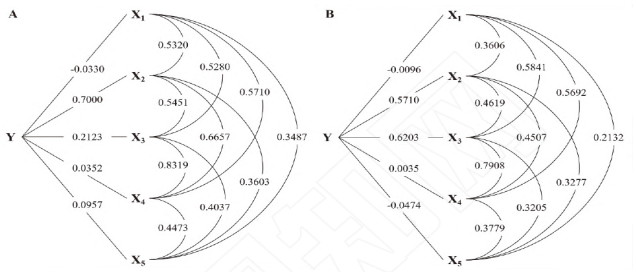
2.4 成年红河黑猪体重与体尺的通径分析 由表5和图2可见，体长对成年红河黑猪公猪体重的直接作用最大，其次是胸围和管围，而体高和胸围对体重的间接作用较大。胸围对成年红河黑猪母猪体重的直接作用最大，其次是体长，而腹围、体高和管围对体重的间接作用较大。

表 5 成年红河黑猪体重与体尺的通径系数

性别	性状	相关系数	直接通径系数	间接通径系数					
				体高	体长	胸围	腹围	管围	总和
公猪	体高	0.5050	–0.0330	–	0.3724	0.1121	0.0201	0.0334	0.5380
	体长	0.8561	0.7000	–0.0176	–	0.1157	0.0234	0.0345	0.1560
	胸围	0.6444	0.2123	–0.0174	0.3816	–	0.0293	0.0386	0.4321

表 5 成年红河黑猪体重与体尺的通径系数

性别	性状	相关系数	直接通径系数	间接通径系数					
				体高	体长	胸围	腹围	管围	总和
公猪	腹围	0.7018	0.0352	–0.0188	0.0466	0.1766	–	0.0428	0.2472
	管围	0.4379	0.0957	–0.0115	0.2522	0.0857	0.0157	–	0.3421
母猪	体高	0.5505	–0.0096	–	0.2059	0.3623	0.0020	–0.0101	0.5601
	体长	0.8401	0.5710	–0.0034	–	0.2865	0.0016	–0.0155	0.2692
	胸围	0.8660	0.6203	–0.0056	0.2637	–	0.0028	–0.0152	0.2457
	腹围	0.7280	0.0035	–0.0055	0.2573	0.4905	–	–0.0179	0.7244
	管围	0.3478	–0.0474	–0.0020	0.1871	0.1988	0.0013	–	0.3852



A：公猪体尺对体重的通径图；B：母猪体尺对体重的通径图。直线箭头表示直接通径，曲线表示间接通径的相关系数。

图 2　红河黑猪体尺对体重的通径图

2.5　成年红河黑猪体重与体尺的逐步回归分析

由相关与通径分析结果可知，红河黑猪公猪和母猪的体尺对体重存在显著回归，故采用逐步回归法将自变量（体尺）逐步引入方程，引入过程中对进入变量做显著性检验并剔除不显著的变量，直至引入结束得到红河黑猪最佳的多元线性回归方程（表6和表7）。

成年红河黑猪公猪拟合到2个回归方程，模型1 以体重（Y）为因变量，体长（X_2）为自变量，回归方程为：$Y=-56.044+1.325X_2$，$R^2=0.733$；模型2以体重（Y）为因变量，体长（X_2）和胸围（X_3）为自变量，回归方程为：$Y=-78.415+1.112X_2+0.400X_3$，$R^2=0.778$，因0.778>0.733，故红河黑猪公猪体重与体尺的最优回归方程为：$Y=-78.415+1.112X_2+0.400X_3$。

成年红河黑猪母猪拟合到3个回归方程，模型1 以体重（Y）为因变量，胸围（X_3）为自变量，回归方程为：$Y=-55.798+1.395X_3$，$R^2=0.833$；模型2以体重（Y）为因变量，体长（X_2）和胸围（X_3）为自变量，回归方程为：$Y=-102.485+0.772X_2+0.939X_3$，$R^2=0.998$；模型3以体重（Y）为因变量，体长（$X_2$）、胸围（$X_3$）和管围（$X_5$）为自变量，回归方程为：$Y=-101.003+0.778X_2+0.944X_3-0.152X_5$，$R^2=0.998$，因0.998>0.833且模型3的估计标准误最小（0.86），故红河黑猪母猪体重与体尺的最优回归方程为：$Y=-101.003+0.778X_2+0.944X_3-0.152X_5$。

表 6 成年红河黑猪体重与体尺的逐步回归模型

性别	模型	R	R^2	调整后 R^2	估计标准误
公猪	1	0.856	0.733	0.725	9.34
	2	0.882	0.778	0.764	8.65
母猪	1	0.913	0.833	0.829	7.71
	2	0.999	0.998	0.998	0.90
	3	0.999	0.998	0.998	0.86

注：R 为体重与体尺的复相关系数，R2 为决定系数。

表 7 成年红河黑猪体重与体尺的逐步回归参数

性别	模型	项目	非标准化系数		标准系数	t	P
			B	标准误差			
公猪	1	（常量）	−56.044	18.834	–	−2.976	0.005
		体长	1.325	0.139	0.856	9.517	<0.001
	2	（胸围）	−78.415	19.533	–	−4.015	<0.001
		体长	1.112	0.154	0.718	7.228	<0.001
		（胸围）	0.400	0.157	0.253	2.545	0.016
母猪	1	（常量）	−55.798	10.601		−5.263	<0.001
		胸围	1.395	0.094	0.913	14.816	<0.001
	2	（常量）	−102.485	1.489		−68.824	<0.001
		胸围	0.939	0.014	0.615	68.857	<0.001
		体长	0.772	0.014	0.504	56.421	<0.001
	3	（常量）	−101.003	1.574		−64.183	<0.001
		胸围	0.944	0.013	0.618	71.309	<0.001
		体长	0.778	0.013	0.507	58.377	<0.001
		管围	−0.152	0.069	−0.016	−2.222	0.032

2.6 红河黑猪生长曲线拟合 利用3种模型对红河黑猪生长曲线进行拟合（表8），Logistic模型拟合的公猪曲线方程为：$Wt=73.104/((1+22.127e^{-0.811t}))$，Gompertz模型拟合的公猪曲线方程为：$Wt=98.424e^{-4.026e^{\wedge(-0.367t)}}$，Von Bertalanffy 模型拟合的公猪曲线方程为：$Wt=134.139(1-0.8e^{-0.214t})^3$。Logistic模型拟合的母猪曲线方程为：$Wt=71.63/((1+23.635e^{-0.831t}))$，Gompertz模型拟合的母猪曲线方程为：$Wt=94.931e^{-4.156e^{\wedge(-0.382t)}}$，Von Bertalanffy模型拟合的母猪曲线方程为：$Wt=126.439(1-0.816e^{-0.227t})^3$。Logistic 模型、Bertalanffy 模型、Gompertz 模型拟合度（R^2）均大于0.99。

表 8 3 种曲线模型参数估计值和拟合度

模型	性别	Logistic 模型	Gompertz 模型	Von Bertalanffy 模型
A	公猪	73.104	98.424	134.139
	母猪	71.630	94.931	126.439
B	公猪	22.127	4.026	0.800
	母猪	23.635	4.156	0.816
k	公猪	0.811	0.367	0.214
	母猪	0.831	0.382	0.227
拐点体重	公猪	36.552	36.208	39.745
	母猪	35.815	34.923	37.463

表 8 3 种曲线模型参数估计值和拟合度

模型	性别	Logistic 模型	Gompertz 模型	Von Bertalanffy 模型
拐点月龄	公猪	3.818	3.795	4.091
	母猪	3.806	3.729	3.944
R^2	公猪	0.998	0.999	0.999
	母猪	0.998	0.999	0.999

为进一步验证Logistic、Gompertz 和Von Bertalanffy模型的拟合效果，利用拟合出的曲线方程计算了红河黑猪不同月龄的预测体重，计算与实际体重的差值及其平均数（表9），结果显示，Logistic 模型对体重的预测值与实测值最接近。

表 9 红河黑猪体重实测值与 3 种曲线模型预测值比较 kg

性别	月龄	实测体重	Logistic 模型计算体重		Gompertz 模型计算体重		Von Bertalanffy 模型计算体重	
			计算值	差值	计算值	差值	计算值	差值
公猪	0	0.84	3.1610	–2.3210	1.7572	–0.9172	1.0731	–0.2331
	1	7.03	6.7474	0.2826	6.0510	0.9790	5.9561	1.0739
	2	14.89	13.6112	1.2788	14.2523	0.6477	14.6986	0.1914
	3	25.95	24.8430	1.1070	25.8025	0.1475	26.0344	–0.0844
	4	39.43	39.2313	0.1987	38.9277	0.5023	38.5790	0.8510
	5	52.31	52.8306	–0.5206	51.7604	0.5496	51.2366	1.0734
	6	62.88	62.4524	0.4276	63.0562	–0.1762	63.2720	–0.3920
	平均值			0.0647		0.2475		0.3543
母猪	0	0.70	2.9077	–2.2077	1.4882	–0.7882	0.7877	–0.0877
	1	6.19	6.3408	–0.1508	5.5671	0.6229	5.4070	0.7830
	2	13.89	13.0575	0.8325	13.6992	0.1908	14.1365	–0.2465
	3	25.35	24.2467	1.1033	25.3281	0.0219	25.5718	–0.2218
	4	38.89	38.6906	0.1994	38.5277	0.3623	38.1734	0.7166
	5	51.98	52.2506	–0.2706	51.2989	0.6811	50.7575	1.2225
	6	62.05	61.6660	0.3840	62.3692	–0.3192	62.5654	–0.5154
	平均值			–0.0157		0.1102		0.2358

3 讨 论

本研究显示，从出生到6月龄，红河黑猪公、母猪的体重和体尺均随月龄增加而增加，同月龄公猪的体重、体长和管围有大于母猪的趋势；同时期的公猪累积生长量大于母猪，3~4月龄是红河黑猪的生长高峰，与苏紫猪[10]、内江猪[11]、江泉黑猪[12]、金华猪[13]的生长规律基本一致。

据研究，20、60、90日龄深县猪[14]体重与体长及

胸围呈极显著正相关。碧湖猪[15]6月龄体重与体长、体高、后躯高、胸围、腹围、腿臀围和前胸宽均呈极显著正相关，与腿臀宽呈显著正相关。本研究对红河黑猪体重与体尺之间的相关系数进行了分析，红河黑猪公猪的体重与体长、胸围等体尺性状呈极显著正相关，母猪的体尺性状除管围外均与体重呈正相关，与深县猪和碧湖猪的研究结果一致。

通径分析能反映各项体尺指标对体重的直接和间接作用程度[16]。吴买生等[17]的研究发现，对6月龄沙子岭猪体重直接作用最大的是胸围，其次是体长、胸宽和体高。吴其文[18]发现，长大二元母猪6月龄体重不仅受体长的影响，还受到体高、胸围和管围的影响。本研究中，体长对红河黑猪公猪体重的直接作用最大，其次是胸围，母猪胸围对体重的直接作用最大，其次是体长。影响红河黑猪体重的2个主要因素是胸围和体长，且在公猪和母猪中均表现了这一规律，说明红河黑猪胸围和体长与体重密切相关，与上述研究结果基本一致。

本研究通过体重和体尺性状的逐步回归，构建的红河黑猪体重（Y）与体长（X_2）、胸围（X_3）、管围（X_5）的最优回归方程为：Y（公）$=-78.415+1.112X^2+0.400X_3$，Y（母）$=-101.003+0.778X_2+0.944X_3-0.152X_5$。据研究，硒都黑猪[19]体重（Y）与体高（$X_1$）、体长（$X_2$）、胸围（$X_3$）、腹围（$X_4$）、臀长（$X_5$）、臀宽（$X_6$）、臀围（$X_7$）的最优回归方程为：Y（公）$=-179.953+0.627X_2+1.153X_3+1.919X_7$、Y（母）$=-172.412+0.435X_1+0.425X_2+0.91X_3+1.289X_5+1.302X_7$。青海八眉猪[3]体重（Y）与体高（$X_1$）、体长（$X_2$）、胸围（$X_3$）、背高（$X_4$）、胸深（$X_5$）、腹围（$X_6$）、管围（$X_7$）、背膘厚（$X_8$）的最优回归方程为：Y（公）$=-184.02+1.76X_3+0.74X_6$、Y（母）$=-179.46+0.33X_2+0.34X_3+0.8X_5+0.76X_6+3.09X_7+0.49X_8$。本文的研究结果与上述研究基本一致，说明在不同猪种中，体重都受到体长和胸围的影响。在红河黑猪中，体重和体尺指标之间存在不同程度的相关，这些相关会直接作用于体重，体长、胸围对红河黑猪体重的显著正相关导致了它对体重的直接影响，入选回归方程的体长、胸围性状对体重有较大的决定作用，红河黑猪的选育还应注意公猪的体长、胸围及母猪的管围的选育。

为了解不同猪种的生长发育规律，研究者对不同猪种进行了生长曲线拟合。不同地方猪的最佳生长曲线拟合模型因品种、饲养管理及营养水平等的不同存在差异，Logistic模型拟合五指山猪[20]和梅山猪母猪[21]效果最好，梅山猪母猪的拐点月龄为5.55月龄；Go月龄pertz模型拟合内江猪[11]、金华猪[13]和湘村黑猪[22]效果最好，内江猪的拐点月龄为5.225月龄，金华猪公猪和母猪的拐点月龄分别为为3.707月龄和3.668月龄，湘村黑猪的拐点月龄分别为3.258月龄和3.311月龄；Bertalanffy模型拟合凉山猪[23]的效果更好，其拐点月龄为6.444月龄。本研究使用3种不同模型对红河黑猪进行生长曲线拟合，Logistic模型的拟合效果最好，更接近红河黑猪实际生长情况，与五指山猪[20]、梅山猪[21]一致，红河黑猪公猪拐点月龄和拐点体重为3.818月龄和36.552kg，母猪拐点月龄和拐点体重为3.806月龄和35.815kg，此结果同红河黑猪生长发育结果中生长速度的拐点月龄接近，其拐点月龄低于大部分地方猪，表明红河黑猪性成熟较早。

4 结论

红河黑猪绝对生长呈现出先升高后降低的趋势，体长对公猪体重的直接作用最大，胸围对母猪体重的直接作用最大。红河黑猪体尺和体重的最优回归方程为：Y（公）$=-78.415+1.112X_2+0.400X_3$，Y（母）$=-101.003+0.778X_2+0.944X_3-0.152X_5$；红河黑猪最佳拟合模型为Logistic模型，公猪与母猪的拐点月龄、拐点体重分别为3.818月龄、36.552kg和3.806月龄、35.815kg。研究结果有助于对红河黑猪的生长发育和饲养管理进行研究，从而制定红河黑猪的育种方案。

参考文献略

来源：《中国畜牧杂志》

网络首发时间：2025-11-12 09:00:45

网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2083.S.20251111.1628.004

四川新一美：以“硒”为引，拾级而上的科技征途

文 / 赵剑萍

2025年10月，新一美硒代蛋氨酸产品上市十年整！

硒路十年，新一美团队经历了“昨夜硒风凋碧树，独上高楼，望尽天涯路”“衣带渐宽终不悔，为硒消得人憔悴”“众里寻硒千百度，蓦然回首，那硒却在灯火阑珊处”的三重境界。

谨以此文，致敬所有为新一美有机硒事业奉献智慧与青春的奋斗者！

——题记

荀子云：“不积跬步，无以至千里；不积小流，无以成江海。”在中国科技城绵阳，新一美生物，正是以跬步之积，在中国饲料添加剂这片看似寻常的领域，书写了一段聚焦科技、持续创新的非凡篇章。

自2004年肇始，新一美便锚定“一辈子，一件事”的信念，尤其自2008年始，与全球同步投身于硒代蛋氨酸的研发、生产与推广。二十余载寒暑砥砺，终以“科技+创新”的硬核模式，在中国农牧业的激烈角逐中开辟出蓝海，成为全球有机硒生产的“小巨人”。

新一美，以千里之志，破茧于微末，走出了一条独特的发展道路，为当下中国企业的新质发展书写了范式。

奠基——有机铬领域的锋芒初露

2004年6月，新一美（初名绵阳新一美化工有限公司）诞生于绵阳银河化学股份有限公司技术中心内。创业维艰，仅4人团队、300平米租用厂房与两间办公室，却胸怀宏愿：打造中国最专业的有机铬制剂。

上世纪90年代末，中国饲料工业迅猛发展，竞争也无处不在。为了取得竞争优势，突出差异化，各饲料企业都在寻找一些特殊的饲料添加剂作为自己的独门秘籍。当时我国饲料添加剂管理法规还在逐步规范之中，于是有盐酸克伦特罗（俗称瘦肉精）和安定（镇静剂）这两种饲料添加剂被违规使用，以寻求提高瘦肉率、镇静和抗应激的作用。然而食品端接连发生的安全事故促使农业部于1997年发文明令禁止这类产品的使用，并随即于1999年颁布了《饲料添加剂品种目录》，以规范添加剂的应用。吡啶甲酸铬2005年被列入《饲料添加剂品种目录》，作为葡萄糖耐量因子GTF的核心成分，也正好有改善肉质、提高瘦肉率和抗应激的作用。

国内当时尚无专业的吡啶甲酸铬生产企业，某外企在国内推广该产品，售价接近4000元/公斤，致使其添加成本高达约10元/吨饲料。新一美创始人李俊虎先生，凭借深厚的动物营养专业背景与敏锐的商业洞察，毅然入局。他整合资源，专注吡啶甲酸铬合成技术攻坚与应用推广，通过持续技术研发，掌握了前体原料2-吡啶甲酸的合成技术，技术路线的上延，将吡啶甲酸铬产品价格降至1000元/公斤以内，此举不仅大幅降本，更从源头提升了品质可控性。

深刻体悟到“科技是第一生产力”真谛的新一美，由此跃升为全球知名有机铬供应商。然而，吡啶甲酸铬在饲料中添加量极微（0.2ppm），容量不大，产值有限，市场天花板明显，公司亟需开辟更广阔赛道。

抉择——锚定有机硒的战略转型

2008年，在有机铬领域站稳脚跟后，新一美管理层审时度势，寻求新的增长点。选什么呢？此时，公司总经理李俊虎及张伟博士再次展示了他们的专业眼光，决定进军有机硒领域，这是基于当时硒在动物营养中的重要性已成共识，而有机硒相较于无机硒，具有更高的生物学效价和更低的毒性，无疑是未来高效补硒的趋势。

最初，公司探索过纳米硒及植物富硒的路径。但由于相关理论不成熟、效果不确定、经济性不高等原因，经过近两年努力，最终都放弃了。遂转向了富硒酵母方向，并计划收购SZ生物（一家从事酵母硒、酵母制品生产的企业），但在随后的调研中，由于对富硒酵母中主要硒成分结构确定、含量检测方法、产品稳定性、生产过程控制等方面与出售方有不同认识，最终也放弃了收购。既然富硒酵母的核心有效成分是硒代蛋氨酸，而其含量参差不齐，同时又极难检测，那为什么不利用企业自身的化工合成技术优势直接合成纯的硒代蛋氨酸呢？

新的战略方向就此锚定。

攻坚——跨越技术与注册的双重天堑

方向既定，两座“大山”横亘眼前：

合成之难： 硒代蛋氨酸合成工艺复杂，工业化量产极难。实验室级产品价格极高，农牧业难以承受。新一美能否突破合成瓶颈并实现成本可控？要闯合成这一关，就是与世界同步，没有“拿来”的捷径，这注定是一条艰难的路！

法规之困： 全球范围内，硒代蛋氨酸尚未获准作为饲料添加剂使用，在中国申报硒代蛋氨酸作为“新饲料添加剂”，需开展毒理学评价、有效性评价、安全性评价、结构鉴定、标准制定、方法验证、稳定性及环保评估等等工作，耗资巨大，时间跨度长，注册不成功的风险巨大。

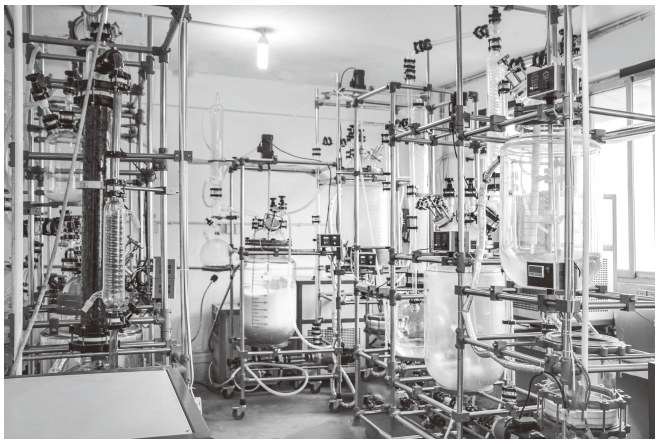
现实迫使新一美必须“双线作战”：合成研发与注册申报同步推进，且均需数百万级的资金投入。产品研发成功，注册失败；或注册成功，研发失败，皆致满盘皆输。更严峻的是，获悉行业某领军企业已投入巨资研发硒代蛋氨酸数年，尚无结果。此时的新一美，陷入深度纠结，如果行业颇具实力的企业都合成不出来，说明这东西实在太难，新一美能合成出来吗？另，该企业是否已经在开展新饲料添加剂注册？如果他们率先注册成功，那新一美所有的投入和工作就是白费。

最终，管理团队以破釜沉舟之志拍板：“易事轮不到我们！唯其难，无人成，方显新一美价值。成，则新一美立身之本；败，亦为行业探路明志！我们帮行业探明硒代蛋氨酸能合成不？有效不？安全不？”

“黄沙百战穿金甲，不破楼兰终不还”。新一美，就这样踏上了漫漫的合成攻坚之路。

经调研，公司决定与掌握一定合成技术的S大学进行联合开发。然校方坦言仅完成实验室克级制备，要真正实现商业化量产，还有许多工作要做，但校方已无资金再投入研发，而具体投入多少，他们也没有具体数目。

新一美公司与S大学达成协议：由新一美公司投资购买所需研发设备，在四川绵阳和S大学分别建立两个合成实验室，在原专利的基础上继续开展工作，后续研发费用全部由新一美支付。



L-硒代蛋氨酸小试设备

项目启动后，双方团队同时开展工作，探索合成技术路线和工艺优化改进，重点解决原有技术中产品收率不高、部分反应原料风险等级高以及反应中三废的处理问题。原计划一年的研发工作，不曾想一干就是四年，直到2015年，尚有众多工作未达预期目标。

这四年间，双方人员两地往返奔波不计其数。

新一美在费用投入上极力满足研发的一切需要，譬如为了验证某种废物是否可以用高温焚化炉处理，毫不犹豫地订购了一台50多万的设备，设备安装后自始至终使用了不到50小时，研发人员痛心地说，“一个小时就一万多啊。”

一边是合成之难，另一边是注册之艰。

2011年10月，新一美启动了新饲料添加剂的注册申报准备工作。彼时，全球尚无任何国家和地区在饲料生产上批准硒代蛋氨酸的使用，这预示着申报工作将极其艰难。2011年12月至2012年11月，公司相继完成了硒代蛋氨酸产品的稳定性实验、结构分析鉴定、动物有效性及耐受性评价实验、动物毒理学安全性评价实验及检测方法验证等申报准备工作，并于2013年2月，正式向农业部提交硒代蛋氨酸新饲料添加剂注册申报资料。几年的时间里，不停地往返于四川绵阳与北京之间，无数次资料提交，无数次被打回整改，无数次整改提交……

2015年10月19日，新一美终于取得农业部新型饲料添加剂注册证书！

在尚未取得注册证前，每提交一次资料，李俊虎和张伟都说：“这么难，一旦申报成功，我们一定要开怀畅饮，好好庆祝一番！”可就在批准公告出来的当天，他俩却出奇地平静，只淡淡地说了句，“终于取证了！”没有激动满怀，没有相拥而泣，没有举杯相庆……也许是，无数次希望与失望的轮回间，两人的内心已麻木，又或许正是这种麻木，才让他们平静地坚持到了最后。

硒代蛋氨酸申报事件时间汇总表（1）

序号	时间	事件
1	2011.3	签订硒代蛋氨酸技术合作及转让协议
2	2011.12	签订动物有效性及耐受性评价试验
3	2012.4	完成 L- 硒代蛋氨酸稳定性试验报告
4	2012.7	完成 L- 硒代蛋氨酸化学结构确定分析测试报告
5	2012.9	签订动物毒理学安全性评价试验
6	2012.11	完成 L- 硒代蛋氨酸含量测试方法验证报告

硒代蛋氨酸申报事件时间汇总表（1）

序号	时间	事件
7	2013.2/3/5	向农业部提交“新饲料添加剂”申报材料第 1/2/3 稿
8	2013.6	申报材料第一次专家评审会
9	2013.10	对第 1 次“新饲料、新饲料添加剂审查意见通知书”整改
10	2014.1/3/8/9/10	对第 2/3/4/5/6 次“新饲料、新饲料添加剂审查意见通知书”整改
11	2014.12	申报材料第二次专家评审会
12	2015.5	向国家饲料质量监督检验中心提交样品及质量标准（草案）
13	2015.7	完成样品检测及产品质量标准（草案）文本审核
14	2015.9	申报材料第三次专家评审会
15	2015.10	获得新饲料添加剂证书（农业部公告第 2309 号）

鏖战——绝境突围攻克环保生死关

注册成功后，按理产品就可以推广销售了，然而此时投资3000多万的合成工厂，却因为工艺设计上的缺陷和新环保政策的出台而处于半停产状态。合作方高校表示太难了，放弃了后续研发工作。新一美是继续还是放弃？放弃，前期投入的近千万研发和注册费用、投资3000多万的工厂就打了水漂，企业发展也就走到了尽头。

这时候，总工程师王斐英毅然站了出来，“我觉得还是不放弃，继续干，总没有造原子弹难嘛，我就不信找不到方法！”这位平时言语不多，从四川轻化工大学、长征制药、联邦制药、中科院成都有机所、福华集团一路走来的化工人，此时却掷地有声。

研发团队通过梳理、总结后发现，现有技术路线和设施装备，生产出合格产品是没有问题的，症结在于关键中间体的收率不高以及生产过程中产生的三废量太大但处理方式和能力不匹配。那就从这几个方面着手，对污染物进行源头减量、过程控制和末端治理：一是从提高产品收率、降低三废产量着手，优化工艺，摸索更优反应条件；二是做好设备的加工精度和密封性，一些与腐蚀原料接触的设备管道换用特殊材料，所有涉及臭气物料的反应釜、分离、干燥等设

备均设置惰性气体密封系统，以确保没有任何气体外泄；三是寻找新的、高效的、低成本的三废处理技术，对反应溶剂尽量回收、循环利用。

工艺路线论证会议

接下来的近两年时间里，研发团队以实验室为家，反复实验。有的设备选型需要在设备厂现场做实验，反应中间物又不能邮寄，于是研发人员就开着公司的商务车拉着反应中间体多次去山东、江苏、浙江。大家轮流开车，人停车不停。商务车登记的联系人是总经理李俊虎，李总多次收到高速交警提醒：您的小型汽车川BGB560，已连续行驶多少小时，必须停车休息。本来这台别克GL8商务车是公司的接待用车，因为经常拉项目反应中间体，车上气味太大，无法清除，已无法再作为接待用车了。长期泡在车间、实验室，身上气味太大，王斐英笑谈：“在食堂就餐，研发部的员工只好自觉地单独坐在食堂角落就餐，回家也常被家人赶出房门。”期间因压力过大，导致免疫力下降，身体硬朗的李俊虎也弄得一身的白癜风。每每谈及此事，李俊虎自我解嘲说：“婚都结了，又不找对象，脸上有点花纹，没事。”

功夫不负有心人。终于在2017年，从蛋氨酸到氨基丁内酯中间体，从硒粉到甲硒醇钠，九步化学反应、十步分离纯化，再到三废的资源化处置和利用，重新梳理、优化工艺，通过装置升级，一条具有完全自主知识产权，中国唯一具备规模化量产能力的硒代蛋氨酸生产线在新一美诞生！

新一美建成国内首条L-硒代蛋氨酸生产线

L-硒代蛋氨酸生产线一隅

以此技术为基础，公司相继被认定为“国家级专精特新小巨人”“四川省瞪羚企业”及“省级企业技术中心”。

引领——“硒”望无垠，未来已来

2017年6月，新一美“朝花硒拾——硒代蛋氨酸研讨暨新品发布会”在成都雅居乐豪生大酒店如期举行，开启了有机硒应用新纪元。凭借成分明确、检测便捷、效果确切的核心优势，硒代蛋氨酸迅速获得市场认可。公司持续举办推广会、技术讲座超百场，独立或合作完成涵盖猪、禽、水产、反刍动物等上百项饲养试验，积累海量数据，制定精准补硒方案，构建应用评估体系。同时，积极推动法规拓展，继2015年首次获批后，新一美不懈努力，农业部相继批准硒代蛋氨酸用于肉鸡、猪、蛋鸡、水产及反刍动物。历经

了同样过程的多次评审与整改，新一美展现出了极强的专业韧性与应对能力。

硒代蛋氨酸申报事件时间汇总表（2）

序号	时间	事件
1	2017.4/2019.12	完成 L- 硒代蛋氨酸对断奶仔猪 / 蛋鸡的有效性及耐受性评价
2	2021.5	提交 L- 硒代蛋氨酸扩大适用动物范围申报材料
3	2021.11/12	L- 硒代蛋氨酸扩大适用动物范围申报材料第一次专家评审会 / 对第一次专家评审会意见的整改
4	2022.1/2022.2	L- 硒代蛋氨酸扩大适用动物范围申报材料第二次专家评审会 / 对第二次专家评审会意见的整改
5	2022.3/2022.4	L- 硒代蛋氨酸扩大适用动物范围申报材料第三次专家评审会 / 对第三次专家评审会意见的整改
6	2022.8	完成申报材料的全部整改并提交
7	2022.11	获得扩大适用动物范围批准（农业农村部公告第 614 号）
8	2022.10/2024.1	完成 L- 硒代蛋氨酸对淡水鱼 / 奶牛的有效性及耐受性评价
9	2024.5	提交 L- 硒代蛋氨酸扩大适用动物范围申报材料
10	2024.8/2024.9	L- 硒代蛋氨酸扩大适用动物范围申报材料第一次专家评审会 / 对第一次专家评审会意见的整改
11	2025.1/2025.2	L- 硒代蛋氨酸扩大适用动物范围申报材料第二次专家评审会 / 对第二次专家评审会意见的整改
12	2025.6	获得扩大适用动物范围批准（农业农村部公告第 921 号）

如今，新一美已成为全球有机硒研发、生产与应用推广的重要力量，产品远销欧美、东南亚等数十国。

屈指算来，从2008年新一美决定做有机硒，到今年已是17年，从2015年农业部批准硒代蛋氨酸作为新饲料添加剂，至今也已经是第10个年头！这段“硒”路历程，李俊虎感慨万千，“一辈子，一件事，太难了”！犹记出发时，团队成员还是30来岁年富力强的小李、小张，今天已成老李、老张，小王也早生华发。当年那群年轻的小伙子、小姑娘，今天已是技艺藏于身的廖工、张工、刘工、陈工……更有越来越多的年轻研发人员正在加入新一美技术团队，开辟新一美硒产业的新篇章。2025年，新一美投资数亿元，拟建全球最大的有机硒原料生产基地，打造全球有机硒的绝对竞争优势。步履不停，未来可期！

硒引未来，拾级而上。祝愿新一美以硒的力量，在生命微量元素的广阔画卷上，持续书写中国智造的华章。

行业要闻

1　农业农村部批准那西肽预混剂用于蛋鸡生产

近日，农业农村部第 957号公告显示：浙江汇能生物那西肽预混剂（商品名“梭立康”）获批用于蛋鸡生产，10月10日生效，设3年监测期。这是该产品2023年获批肉鸡应用后，首次拓展至蛋鸡领域。该药针对性解决蛋鸡产气荚膜梭菌病难题，且自带“零弃蛋期”优势，蛋鸡用药期间产蛋可正常上市，避免养殖户损失。此次获批为蛋鸡养殖业降本增效提供支撑。

2　国家发改委公布2026年粮食进口关税配额总量

10月9日，国家发改委发布2026年粮食进口关税配

如何规范标示饲料标签卫生指标？

饲料的卫生情况是养殖产业链安全的核心点，直接决定养殖动物的健康状况和生产性能。因此，饲料标签中的卫生指标是衡量产品安全性的核心依据，是养殖者规避风险、企业保障产品合规性的关键。为此，GB 10648《饲料标签》对如何准确标示产品卫生指标有明确要求。

一、GB 10648《饲料标签》对卫生指标的要求

按照 GB 10648《饲料标签》中“5.1 卫生要求”的描述：饲料、饲料添加剂和饲料原料应符合相应卫生要求。饲料和饲料原料应标有“本产品符合饲料卫生标准”字样，以明示产品符合GB 13078《饲料卫生标准》的规定。对于饲料添加剂产品，GB 10648《饲料标签》中“5.3 产品成分分析保证值”明确要求，执行企业标准的饲料添加剂产品和进口饲料添加剂产品，其产品成分分析保证值项目还应标示卫生指标。

二、GB 13078《饲料卫生标准》的适用范围

根据GB 13078《饲料卫生标准》的规定，该强制性标准明确规定了饲料原料及饲料产品中含有的有毒有害物质和微生物的限量标准，并列出了相应的检测方法。该卫生标准仅适用于该标准表1中所列的饲料原料和饲料产品。GB 13078《饲料卫生标准》不适用于宠物饲料产品和饲料添加剂产品。因此，宠物饲料产品和饲料添加剂产品不需要标识“本产品符合饲料卫生标准”字样。

三、宠物饲料及饲料添加剂的卫生指标标识方法

针对直接食用的宠物饲料产品，按照《宠物饲料标签规定》第四条，宠物饲料产品标签应当在醒目位置标示“本产品符合宠物饲料卫生规定”字样，并以粘贴或者印刷等形式附具产品质量检验合格证。针对执行企业标准的饲料添加剂类产品，卫生指标项目可参考相应类型的产品标准通则制定；没有通则参照的，可以根据本产品的具体情况由企业自行制定卫生项目，标签标示的卫生项目应当与企业标准一一对应。

（注：编辑部根据饲料相关标准整理）

《广东饲料》2025 年 10 期

额申请和分配细则。2026年粮食进口关税配额总量为小麦963.6万吨（90%国营贸易配额）、玉米720万吨（60%国营贸易配额）、大米532万吨（50%国营贸易配额，长粒米和中短粒米各266万吨）。

3　2026年中国饲料工业展览会将于明年4月在南昌举办

2026年中国饲料工业展览会将于明年4月15日至20日在南昌绿地国际博览中心举办，本届展会亮点十足：首设“宠物食品经济”专题展区，解锁千亿市场；独家举办养殖与饲料企业对接活动，助力降本增效；设省市招商推介区，推动地域品牌与乡村振兴；国际交流区邀使馆、外企等深化合作；“新技术发布会”展示前沿成果。参展报名已全面启动，活动详情可关注中国饲料工业协会官网及官微。

4　《GB 19081-2025 饲料加工系统粉尘防爆安全规范》即将实施

《GB 19081-2025 饲料加工系统粉尘防爆安全规范》将于2026年2月1日实施，该标准在粉尘防爆区域划分、防静电措施、作业安全管理等方面提出了一系列新要求，为饲料企业提供了明确的技术升级指引。

5　气势如虹，再创新高！双胞胎饲料产销量突破2000万吨

11月28日，双胞胎集团传来重磅捷报：截至当日，2025年双胞胎饲料再创新高，产销量一举突破2000万吨！这一里程碑式的跨越，在当前饲料行业复杂多变的发展格局下，更显千钧之重、熠熠生辉。

磷酸氢钙上涨！骨质氢钙替代磷酸氢钙的应用技术指南。

2025年下半年，饲料级磷酸氢钙市场价格从2800元/吨攀升至4000元/吨，涨幅超30%，导致万羽规模蛋鸡场月均钙磷补充成本增加。在此背景下，骨质氢钙作为磷酸氢钙的替代原料受到养殖行业广泛关注，但养殖主体对其定义界定、标准体系及应用风险仍存在认知盲区。基于多省份蛋鸡养殖企业调研数据及畜牧营养领域专家意见，本文系统梳理骨质氢钙的应用价值与实践路径，为科学替代提供理论与技术支撑。

本文围绕骨质氢钙的定义属性、标准规范、与磷酸氢钙的差异性及替代风险等核心问题，结合实证数据进行系统解析，为蛋鸡养殖中钙磷补充剂的科学选用提供参考。

基于上述研究背景与行业需求，整合调研数据及专家共识，形成《骨质氢钙替代磷酸氢钙的应用技术指南》。

1 骨质氢钙的基础认知与属性界定

骨质氢钙是符合国家饲料原料标准的成熟钙磷补充剂，此前因磷酸氢钙价格稳定而未得到规模化应用。对其科学认知需从定义内涵、生产工艺及营养成分三个维度展开。

1.1 概念界定：精制钙磷补充剂的属性辨析

依据农业行业标准NY/T 3315-2018《饲料原料骨质氢钙》定义：骨质氢钙以健康哺乳动物新鲜骨骼为原料，经清洗、蒸煮、酸解、中和等精制工艺加工制成，归类为饲料级磷酸氢钙范畴。

核心差异：传统骨粉采用直接粉碎工艺，钙磷总纯度仅50%左右，氟含量常超过1500mg/kg；而骨质氢钙经精制处理后，钙磷总纯度≥85%，氟含量控制在≤1000mg/kg，显著提升了产品安全性与营养利用率。

1.2 生产工艺：六步精制法对产品品质的决定性作用

骨质氢钙的产品品质由生产工艺决定，正规生产企业需严格遵循"六步精制法"，各环节关键技术参数如下：

原料预处理：新鲜骨骼经120℃、0.15MPa条件下高压蒸煮2-3小时，实现≥85%的脱脂率，同时将菌落总数控制在≤1000CFU/g。

粉碎酸解：将骨骼粉碎至80目细度，加入15%-20%盐酸溶液，在60-70℃条件下反应4-6小时，确保酸解率≥98%。

中和除氟：添加氢氧化钙调节体系pH值至5.5-6.0，使氟离子形成难溶性沉淀，实时监控氟含量指标。

沉淀分离：采用0.1μm精度压滤机进行固液分离，洗涤至滤液氯含量≤0.5%。

干燥灭菌：通过180-200℃喷雾干燥技术处理，控制产品水分≤3%，并实现沙门氏菌的完全杀灭。

粉碎包装：二次粉碎至100目通过率≥95%，采用双层密封包装防止吸潮变质。

精细化的生产工艺使骨质氢钙达到饲料级钙磷补充剂标准，为其替代磷酸氢钙提供了物质基础。

1.3 营养特性：钙磷配比适配性与成本优势分析

骨质氢钙的营养特性与蛋鸡生理需求高度适配，可概括为以下四个方面：

钙磷含量稳定：钙含量范围20%-21%，磷含量范围16%-18%，有效磷占总磷比例达90%-95%，显著高于传统骨粉。

钙磷配比合理：自然钙磷比约为1.2:1，契合蛋鸡1.2:1–2:1的最佳钙磷吸收比例，无需额外添加调节剂。

吸收利用率高：中国农业科学院畜牧研究所研究数据显示，骨质氢钙钙吸收率为68%–72%，磷吸收率为62%–65%，均高于磷酸氢钙的吸收效率。

2 骨质氢钙在蛋鸡饲料中的应用标准体系

骨质氢钙的合规应用需遵循“原料准入–产品质量–营养需求”三重标准体系，为养殖生产提供安全保障。

2.1 原料准入标准：《饲料原料目录》的强制性规范

骨质氢钙的原料选用必须符合《饲料原料目录（2013版）》规定，核心要求包括：

原料来源合法：仅限健康哺乳动物新鲜骨骼，严禁使用药残动物骨骼及反刍动物骨骼，需提供完整的原料溯源证明。

生产工艺合规：必须经过脱脂、酸解、除氟等精制工艺处理，NY/T 3315–2018明确禁止以普通骨粉冒充骨质氢钙。

2.2 产品质量标准：两大标准的指标对比分析

骨质氢钙的质量控制需同时满足轻工行业标准QB/T 2355–2005与农业行业标准NY/T 3315–2018，其中NY/T 3315–2018为专属标准，指标更贴合饲料应用需求，因此在实际应用中应优先采用。

两大标准的核心质量指标对比如下：

指标类别	指标名称	QB/T 2355–2005 要求	NY/T 3315–2018 要求	技术说明
主成分	钙含量	≥ 21.0%	20.0%–21.0%	骨质氢钙钙含量略低，属生物源性原料正常波动范围
	磷含量	≥ 16.0%	16.0%–18.0%	磷含量区间更明确，有效磷占比≥ 90%
有害杂质	氟含量	≤ 1000mg/kg	≤ 1000mg/kg	关键安全指标，超标易引发蛋鸡氟中毒
	砷含量	≤ 20mg/kg	≤ 20mg/kg	重金属污染指标，影响蛋品安全
	铅含量	≤ 30mg/kg	≤ 30mg/kg	同上
	镉含量	≤ 5mg/kg	≤ 5mg/kg	同上
物理及微生物指标	水分	≤ 3.0%	≤ 3.0%	过高易导致产品结块霉变
	细度（100目通过率）	≥ 95%	≥ 95%	保障饲料混合均匀度
	沙门氏菌	不得检出	不得检出	关键卫生安全指标

采购建议：重点核查氟含量、沙门氏菌及钙磷含量指标，优先选择氟含量≤800mg/kg的高标准产品，降低养殖风险。

2.3 添加规范：基于营养需求的动态调整原则

骨质氢钙尚无专属添加比例标准，需依据NY/T 33–2022《鸡饲养标准》，结合饲料中其他钙磷来源的实际含量进行综合核算。

NY/T 33–2022中规定的蛋鸡不同生长阶段钙磷需求标准如下：

蛋鸡生长阶段	钙需求（%）	有效磷需求（%）	适宜钙磷比范围
雏鸡期（0–6 周）	0.90–1.00	0.45–0.50	1.8:1–2.2:1
育成期（7–17 周）	0.80–0.90	0.35–0.40	2.0:1–2.6:1
产蛋初期（18–22 周）	3.20–3.50	0.38–0.42	7.6:1–9.2:1
产蛋高峰期（23–45 周）	3.50–4.00	0.35–0.40	8.8:1–11.4:1
产蛋后期（46 周以后）	3.40–3.80	0.32–0.36	9.4:1–11.9:1

核算逻辑：首先计算饲料中有效磷的差额，确定骨质氢钙的添加量，再通过石粉补充钙元素差额，确保最终饲料钙磷指标符合对应阶段蛋鸡的营养需求。

实例演算：25周龄蛋鸡（产蛋高峰期）饲料中有效磷需求为0.40%，基础原料已提供0.15%有效磷，选用有效磷含量17%的骨质氢钙进行补充：

骨质氢钙添加量=有效磷差额÷骨质氢钙有效磷含量=（0.40%–0.15%）÷17%≈1.47%

该添加量可提供钙元素0.29%（1.47%×20%），需补充石粉（钙含量36%）的量为：（3.8%–0.29%）÷36%≈9.75%。

3 磷酸氢钙的属性特征与应用标准

明确磷酸氢钙的属性特征与应用标准，是评估骨质氢钙替代价值的重要前提。磷酸氢钙作为传统饲料级钙磷补充剂，具有成熟的标准体系与应用基础。

3.1 物质属性：化工合成钙磷补充剂的特征

磷酸氢钙（化学分子式：$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$）通过磷酸与氢氧化钙或碳酸钙反应合成，蛋鸡饲料中专用饲料级产品，其核心特性包括：

核心特性如下：

成分稳定：钙≥21%、磷≥16%、有效磷≥15%，

批次差异小，便于配方设计。

钙磷比固定：2.1:1的比例需搭配石粉调整，才能适配蛋鸡需求。

价格波动大：依赖磷矿与硫磺，2024年因磷矿减产、硫磺涨价，价格暴涨50%。

3.2 产品质量标准：强制国标GB 22549-2017

磷酸氢钙需符合强制国标GB 22549-2017，核心指标与检测方法如下：

指标类别	指标名称	GB 22549-2017 强制要求	检测方法
主成分	钙含量	≥ 21.0%	GB/T 6436（EDTA 滴定法）
	磷含量	≥ 16.0%	GB/T 6437（钼黄分光光度法）
有害杂质	氟含量	≤ 1000mg/kg	GB/T 13083（离子选择电极法）
	砷含量	≤ 20mg/kg	GB/T 13081（原子荧光光谱法）
	铅含量	≤ 30mg/kg	GB/T 13080（原子吸收光谱法）
	镉含量	≤ 5mg/kg	GB/T 13082（原子吸收光谱法）
	汞含量	≤ 0.1mg/kg	GB/T 13081（原子荧光光谱法）
物理指标	水分	≤ 3.0%	GB/T 6435（直接干燥法）
	细度（80 目通过率）	≥ 95%	GB/T 5917.1（筛分法）

GB 22549-2017为强制标准，违规使用将被农业农村部门查处。

3.3 添加标准：分阶段明确，遵循NY/T 33-2022

磷酸氢钙添加量按NY/T 33-2022分阶段规定，需匹配蛋鸡钙磷需求变化：

蛋鸡阶段	磷酸氢钙建议添加量（%）	对应有效磷供给（%）	搭配石粉添加量（%）
雏鸡期（0-6 周）	1.2-1.5	0.18-0.225	0.5-0.8
育成期（7-17 周）	1.0-1.3	0.15-0.195	0.3-0.6
产蛋初期（18-22 周）	1.6-1.8	0.24-0.27	8.0-9.0
产蛋高峰期（23-45 周）	1.5-2.0	0.225-0.3	8.5-10.0
产蛋后期（46 周以后）	1.3-1.6	0.195-0.24	8.2-9.5

实际添加需结合配方微调，如用高磷菜粕时需减量；且禁与高氟原料、四环素类抗生素同用。

同时，磷酸氢钙有明确的使用禁忌：不得与高氟原料（如某些劣质磷酸盐）同时使用，以免氟含量超标；

4 核心关切：骨质氢钙替代有风险吗？如何科学替代？

替代需规避氟中毒、重金属超标等风险，核心是“选对原料、算准比例、做好监测”，即可安全降本。

4.1 替代的四大核心风险及规避方案

替代风险分原料质量与操作技术两类，共四大风险点，配套规避方案如下：

风险1：原料劣质，氟超标致蛋鸡中毒

劣质原料氟超标致中毒。小作坊骨粉氟达1500-3000mg/kg，蛋鸡采食后会出现采食量降、关节肿大、产蛋率骤降等症状。

规避方案：

源头把控：选正规企业，索证并核查氟含量。

抽样复检：批量采购前送第三方测氟，费用约定厂家承担。

控制摄入：确保蛋鸡日氟摄入≤3.5mg（依NY/T 33-2022）。

风险2：重金属超标，影响鸡蛋安全

重金属超标影响蛋品安全。污染原料或劣质辅料会致铅、砷超标，违反GB 2749-2015，面临下架罚款风险。

规避方案：

核查溯源：索原料证明，优先选规模化养殖企业骨骼为原料的产品。

监测蛋品：使用1个月后，送检鸡蛋重金属含量。

选高标准品：优先符合地方或企业高标准的产品。

风险3：微生物污染，引发鸡群肠道疾病

微生物污染引发肠道病。生产中灭菌不到位会残留沙门氏菌，导致蛋鸡腹泻、采食量降、产蛋率低。

规避方案：

核查微生指标：索证确保沙门氏菌未检出。

储消规范：干燥通风储存，工具每次用后紫外线消毒30分钟。

小范围试用：100–200只鸡试喂3–5天，无异常再推广。

风险4：钙磷比例失衡，影响生产性能

钙磷失衡影响生产。两者钙磷比差异大（1.2:1 vs 2.1:1），直接重量替代会致钙不足或磷过量。

钙不足：蛋壳破损率超10%、蛋鸡骨质疏松、产蛋率降5%–15%；

磷过量：加重肾负担，致肾肿大、白糊粪，严重时肾衰竭死亡。

规避核心："以磷定比，以钙补平"，五步法计算替代比例：

定基准：以有效磷等量为核心，保证替代后含量不变。

算添加量：骨质氢钙添加量=磷酸氢钙添加量×其有效磷含量÷骨质氢钙有效磷含量。示例：1.5%×17%÷16%≈1.59%。

钙差额=磷酸氢钙供钙–骨质氢钙供钙。

例：1.5%×22%–1.59%×20%=0.012%。调石粉量：石粉添加量=钙差额÷石粉钙含量。示例：0.012%÷36%≈0.033%。

验比例：确保总钙磷符合蛋鸡阶段需求。

4.2 科学替代的完整操作流程（附工具表）

结合风险规避措施，整理出四步替代流程及计算表，便于直接套用：

步骤1：前期准备（1–2天）

明确当前磷酸氢钙的添加量、钙磷含量。

采购合规骨质氢钙并核查报告。

准备石粉及第三方检测机构信息。

步骤2：比例计算（0.5天）

用以下计算表快速得出参数：

参数名称	参数说明	示例值	你的实际值
磷酸氢钙添加量（A）	当前饲料中磷酸氢钙比例	1.5%	_____
磷酸氢钙有效磷含量（B）	磷酸氢钙产品标注值	17%	_____
磷酸氢钙钙含量（C）	磷酸氢钙产品标注值	22%	_____
骨质氢钙有效磷含量（D）	骨质氢钙产品标注值	16%	_____
骨质氢钙钙含量（E）	骨质氢钙产品标注值	20%	_____
石粉钙含量（F）	所用石粉产品标注值	36%	_____
骨质氢钙添加量（G）	G=A×B÷D	1.59%	_____
钙差额（H）	H=A×C－G×E	0.012%	_____
石粉调整量（I）	I=H÷F（正增负减）	+0.033%	_____

步骤3：小范围试用（3–5天）

选100–200只蛋鸡试喂，每日监测三项指标：异常停喂排查，无异常全面推广。

步骤4：全面替代与持续监测（长期）

全面替代后建立每周监测制度。关注以下几点？

采食粪便：采食量稳定，粪便成型无异常。

产蛋性能：产蛋率、破损率与对照组差异≤1%。

鸡群健康：无关节肿大等异常。

生产指标：蛋壳破损率＞5%或产蛋率降＞3%需排查。

原料质量：每批次索证，每3个月复检氟与重金属。

蛋品安全：每1–2个月送检鸡蛋指标。

5 总结：替代不是"凑数"，而是"科学降本"

骨质氢钙是优质替代选择，但需科学认知、规范使用，而非单纯"低价凑数"。

回顾全文，核心要点可总结为"三个明确"：

明确定义：精制健康骨制品，钙磷比优、吸收率高、成本可控。

明确标准：遵循三重标准，优先选NY/T 3315–2018产品，按蛋鸡阶段算添加量。

明确风险：规避原料与比例问题，通过选料、算比、监测实现安全降本。

"降本先保安全，替代核心是科学"。蛋鸡养殖利润承压时，成本节省需建立在技术与标准之上。

（本文数据来源：中国农科院畜牧研究所、NY/T 33–2022《鸡饲养标准》、NY/T 3315–2018《饲料原料骨质氢钙》、36家蛋鸡场实证调研）

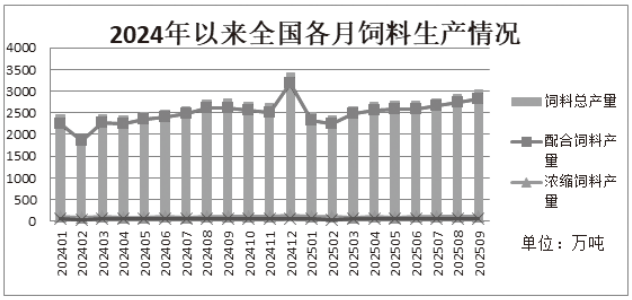
来源：妙饲新天地

2025年1–9月全国饲料生产情况

一、总体生产情况

1–9月在生猪产能、家禽存栏高位、养殖持续盈利等多重利好驱动下，全国饲料工业总产量达2.47亿万吨，同比增长6.6%。工业饲料产量整体结构为“猪禽稳增，反刍下降”。

工业饲料产量			
		2025 年 1–9 月（万吨）	同比（%）
总产量		24652.7	6.6
其中	猪	11543.6	11.6
	蛋禽	2448.9	2.5
	肉禽	7464.2	3.6
	水产	1887.5	4.5
	反刍	1021.3	–4.8
	宠物	133.9	17.7
	其他	153.4	–20.6



二、各地产量情况

从不同地去看，除福建、吉林、北京、宁夏和上海等5个地区饲料总产量下降外（受反刍料下降影响），其他地区均增长。

2025 年 1–9 月各省饲料总产量及同比

序号	地区	总产量（万吨）	同比（%）
1	山东	3626.4	7.2
2	广东	2948.8	9.7
3	广西	1913.4	9.0
4	辽宁	1436.3	8.1
5	河南	1351.3	12.4
6	江苏	1319.7	8.3
7	四川	1238.0	15.3
8	湖北	1215.5	15.9
9	湖南	1140.9	13.2
10	安徽	1050.9	9.9
11	河北	1035.2	1.2
12	江西	959.5	17.0
13	福建	885.4	–2.9
14	云南	547.8	2.3
15	吉林	462.0	–0.2
16	内蒙古	460.0	3.2
17	浙江	422.8	8.2
18	山西	421.2	20.0

2025 年 1–9 月各省饲料总产量及同比

序号	地区	总产量（万吨）	同比（%）
19	贵州	387.6	8.7
20	重庆	386.4	20.8
21	黑龙江	366.8	–8.6
22	陕西	344.3	7.0
23	海南	275.0	0.5
24	新疆	210.3	14.2
25	甘肃	201.1	8.0

2025 年 1–9 月各省饲料总产量及同比

序号	地区	总产量（万吨）	同比（%）
26	天津	145.0	13.1
27	新疆兵团	99.6	4.1
28	北京	86.2	–3.6
29	宁夏	83.8	–4.2
30	上海	63.6	–9.4
31	青海	4.2	8.9

来源：中国饲料工业协会

前三季度，全国畜牧业生产稳定发展，生猪存出栏继续增长

前三季度，全国猪牛羊禽肉产量7312万吨，同比增加268万吨，增长3.8%。其中，猪肉、牛肉、禽肉产量分别增长3.0%、3.3%、7.2%，羊肉产量下降4.3%。

生猪存出栏继续增长。前三季度，全国生猪出栏52992万头，同比增加962万头，增长1.8%，增速较上半年提高1.2个百分点，连续3个季度保持增长。猪肉产量4368万吨，同比增加128万吨，增长3.0%。三季度末，全国生猪存栏43680万头，同比增加986万头，增长2.3%，环比增加1233万头，增长2.9%。其中，能繁母猪存栏4035万头，同比减少28万头，下降0.7%，环比减少9万头，略降0.2%。

牛羊生产基本稳定。前三季度，全国肉牛出栏3564万头，同比增加71万头，增长2.0%；牛肉产量550万吨，同比增加18万吨，增长3.3%；牛奶产量2921万吨，同比增加19万吨，增长0.7%。羊出栏21155万只，同比减少1271万只，下降5.7%；羊肉产量341万吨，同比减少15万吨，下降4.3%。三季度末，全国牛存栏9932万头，同比下降2.4%，环比下降0.6%；全国羊存栏28977万只，同比下降6.9%，环比下降3.7%。

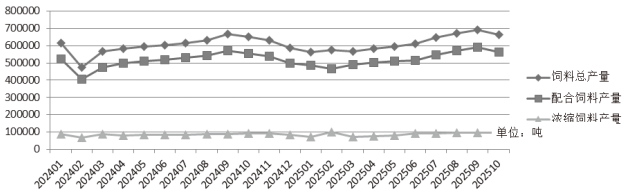
禽肉禽蛋产量增加。前三季度，全国家禽出栏132.7亿只，同比增加8.0亿只，增长6.4%；禽肉产量2053万吨，同比增加137万吨，增长7.2%；禽蛋产量2646万吨，同比增加4万吨，略增0.2%。三季度末，全国家禽存栏64.0亿只，同比增长0.3%，环比增长1.0%。

（来源：国家统计局）

2025年1–10月云南省饲料生产形势

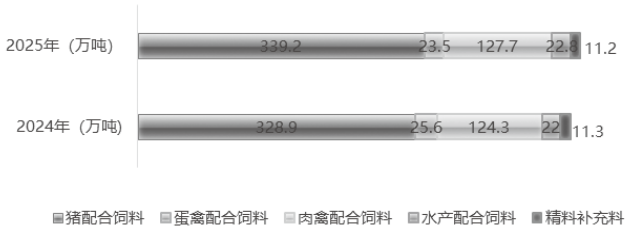
云南省饲料工业协会　张燕鸣

一、云南饲料生产基本情况

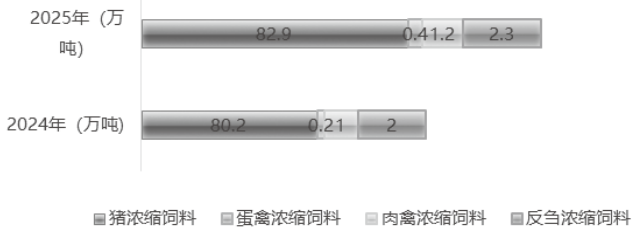


自2024年1月以来我省各月饲料总产量走势图

截止到2025年11月24日我省饲料企业生产数据上报汇总，1–10月份我省饲料总产量616.5万吨，同比增长2.7%，其中配合饲料、浓缩饲料、添加剂预混合饲料产量分别为524.5、86.7、5.3万吨，同比分别增长2.4%、4.0%、9.4%。

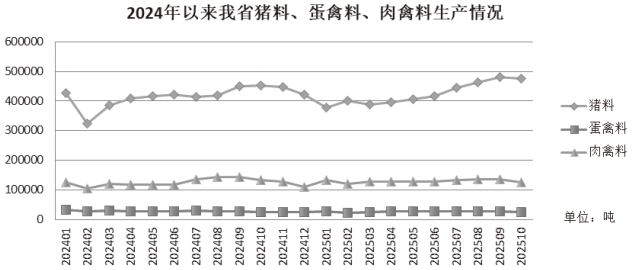


与去年同期相比，1–10月蛋禽配合饲料、精料补充料分别下8.2%、0.8%，猪配合饲料、肉禽配合饲料、水产饲料分别增长3.1%、2.7%、3.8%。



与去年同期相比，1–10月猪浓缩饲料、蛋禽浓缩饲料、肉禽浓缩饲料、反刍浓缩饲料产量均增长，分别为3.3%、66.5%、24.9、15.3%。

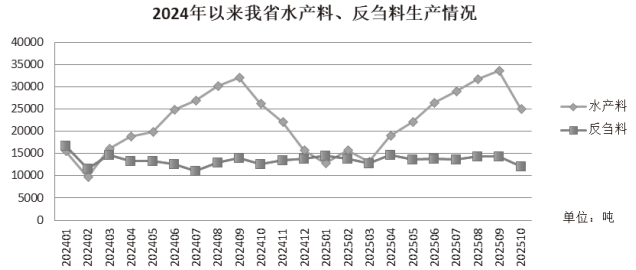
分品种看



1–10月，我省猪饲料产量424.7万吨，同比增长3.2%；

蛋禽料产量25.9万吨，同比下降6.5%；

肉禽料产量129.3万吨，同比增长2.8%；



1–10月，我省水产料产量22.8万吨，同比增长3.7%；

反刍料产量13.8万吨，同比增长3.5%；

1–10 月细分品种饲料产量生产情况表

项目	仔猪饲料	母猪饲料	生长育肥猪饲料	蛋鸡饲料	蛋鸭饲料	肉鸡饲料	肉鸭饲料
2025年1–10月产量（万吨）	125.6	44.5	233.2	19.1	5.7	116.3	11.8
同比（%）	15.3	15.3	–5.0	–5.7	–13.1	3.3	–7.6

1–10 月细分品种配合饲料产量生产情况表

项目	仔猪配合饲料	母猪配合饲料	生长育肥猪配合饲料	蛋鸡配合饲料	肉鸡配合饲料
2025 年 1–10 月产量(万吨)	74.4	42.2	208.8	17.0	115.1
同比（%）	11.1	22.9	–3.7	–7.0	3.2

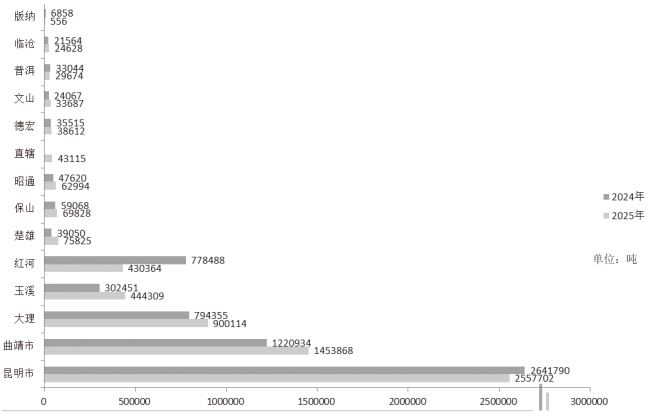
1–10 月细分品种浓缩饲料产量生产情况表

项目	仔猪浓缩饲料	母猪浓缩饲料	生长育肥猪浓缩饲料	蛋鸡浓缩饲料	肉鸡浓缩饲料
2025 年 1–10 月产量(万吨)	49.9	2.0	23.3	0.4	1.0
同比（%）	21.4	10.3	–14.0	83.9	12.9

分地区看

1–10月份我省各州市饲料产量排前5的分别是昆明、曲靖、大理、玉溪、红河，产量在全省总量中的占比分别为：41.5%、23.6%、14.6%、7.2%、7.0%。

与去年同期相比，1–10月昆明、红河、普洱、版纳四个地区的饲料产量下降分别为3.2%、44.7%、10.2%、91.9%。曲靖、大理、玉溪、保山、昭通、楚雄、德宏、文山、临沧九个地区的饲料产量增长分别为19.1%、13.3%、46.9%、18.2%、32.3%、94.2%、8.7%、40.0%、14.2%。



从规模上看看

1–10月份饲料产量在1万吨以上的企业有96家，产量占全省总量的95.8%，2024年有97家，产量占全省总量的94.8%；

饲料产量2万吨以上企业有70家，产量占全省总量的89.8%，2024年有66家，产量占全省总量的87.4%；

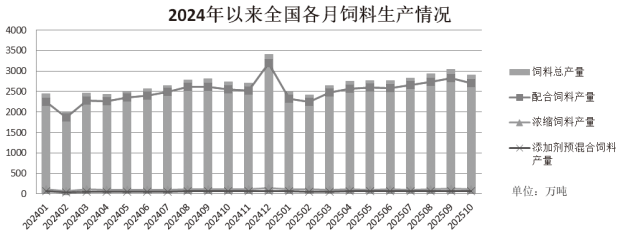
饲料产量5万吨以上企业有37家，产量占全省总量的72.2%，2024年有36家，产量占全省总量的71.4%；

饲料产量10万吨以上企业有19家，产量占全省总量的50.4%；2024年有17家，产量占全省总量的49.1%。

1–10 月份饲料添加剂生产情况

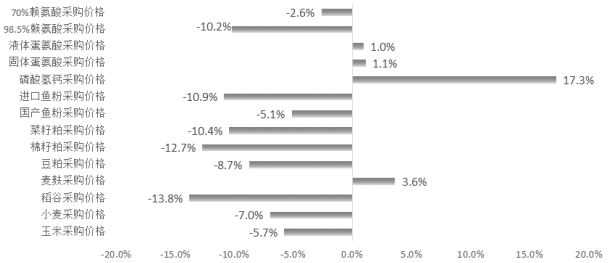
项目	饲料添加剂总产量	维生素及类维生素	酶制剂	微生物	着色剂	矿物元素及其络（螯）合物	其中：磷酸氢钙
产量（吨）	2041103	1363	2197	1167	3632	2032580	1987821
同比（%）	3.1	–6.5	18.7	47.9	15.1	3.0	2.7

二、全国饲料生产情况



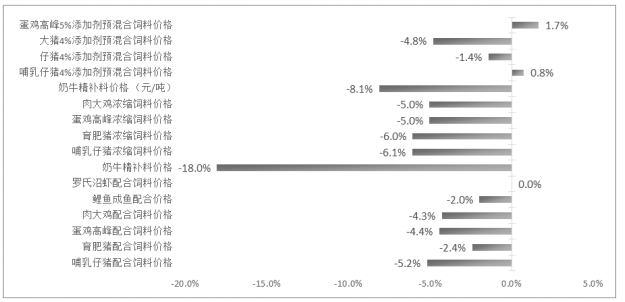
根据中国饲料工业协会公布数据汇总，1–10月全国工业饲料产量27560万吨，同比增长8.6%，其中配合饲料、浓缩饲料、添加剂预混合饲料产量分别为25739、1070、597万吨，同比分别增长8.8%、3.2%、4.4%。

三、饲料原料采购价格情况



1-10月饲料原料采购价格与同期采购价格对比

四、饲料产品价格情况



1-10月份饲料产品价格与同期饲料价格对比