

· 研究进展 ·

## 草产品加工及利用的生物学基础及研究进展\*

钟瑾<sup>1\*\*</sup> 郭旭生<sup>2</sup> 邵涛<sup>3</sup> 杨富裕<sup>4</sup>

1. 中国科学院微生物研究所, 北京 100101
2. 兰州大学 生命科学学院, 兰州 730000
3. 南京农业大学 草业学院, 南京 210095
4. 中国农业大学 草业科学与技术学院, 北京 100193

**[摘要]** 优质饲草是现代草食畜牧业健康、高质量发展的重要基础保障,也是维持优质、安全畜产品持续稳定生产的重要前提。草产品的精细加工、稳定贮存和高效利用是“饲草”向“畜产品”转化的关键步骤。通过系统解析饲草本底的生物学特性,贮存过程中微生物的组成、演替与代谢规律,功能微生物组调控牧草营养转化路径与利用机制,以及“微生物—发酵饲草料—草食家畜—畜产品”全生物链提质增效与安全调控机理,对于提升草产品品质与安全性、提高饲草利用率与转化率,推动我国饲草产业和草食畜牧业高质量发展,实现草食畜牧业提质增效等方面具有重要意义。

**[关键词]** 草产品;加工;利用;生物学基础;草食畜牧业

### 1 优质草产品精细加工及高效利用的意义

优质饲草是全球现代草食畜牧业健康、高质量发展的重要基础保障,也是草食家畜维持高产与生产优质、安全畜产品的重要前提。就我国而言,优质饲草是实现4亿多牛羊等草食动物健康、高质量发展,实现奶业振兴,支持“粮改饲”政策落地生根和保障国家大粮食安全等国家重大战略需求的有效突破口和主抓手。从发达国家来看,饲草产业是农业中的重要支柱产业,欧美国家的草业经济产值占其农业总产值的60%~70%。美国约有64%的国土面积为农业经营面积,其中2/3为饲草面积,其发达的现代草地畜牧业每年仅奶业总产值约为210亿美元,其中饲草的贡献率高达38%。

近年来,随着我国经济社会发展,居民膳食结构发生了明显改变,主要表现为人们对乳肉等畜产品的需求增加。2013年,任继周等9位院士在给国务院的《我国“耕地农业”应向“粮草兼顾型结构转型”



**钟瑾** 中国科学院微生物研究所研究员,博士生导师。主要从事微生物分子遗传学研究,包括功能微生物高效挖掘及创制,及其在草产品加工、生态养殖、健康等的微生物组功能及机制研究等。国家重点研发计划项目负责人。发表研究论文80余篇,获2020年度中国科学院科技促进发展奖及2021年度“全国巾帼建功标兵”等。

的建议》中指出,我国人均口粮从1986年到2010年降低了28.5%,而动物性食品消耗量一路攀升。据农业农村部统计从2013年到2020年,我国奶类和肉类的消费量分别增长11%和14%,而粮食的消费量呈现负增长(-5%)。从我国粮食消费量来看,2021年我国饲料粮消耗量占比48%,而口粮消费量占33%。因此,我国粮食安全的核心是饲料粮的安全。由此可见,居民膳食结构的改变已拉动畜牧业特别是节粮型草食畜牧业进入快速发展的轨道。为支撑草食畜牧业高质量发展和保障畜产品安全,我

收稿日期:2023-08-10;修回日期:2023-10-13

\* 本文根据第313期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email: zhongj@im.ac.cn

本文受到中国科学院A类战略性先导专项项目(XDA26040201)和国家重点研发计划项目(2022YFA1304200)、国家自然科学基金项目(32201467,31972049)的资助。

国先后出台了“振兴奶业苜蓿发展行动(2012年)”“粮改饲(2015年)”“草牧业试点(2015年)”和“《十四五》全国饲草产业发展规划(2022年)”等政策,并在2015年的中央一号文件中首次提出了加快发展草牧业,支持青贮玉米和苜蓿等饲草料的种植,从而极大地推动了我国草产业和草食畜牧业的发展,并对保障国家粮食安全起到了积极作用。2021年,全国粮改饲2000万亩以上,收储优质饲草5500万吨,牛羊养殖减用玉米和豆粕720万吨,相当于减少2600万亩玉米、大豆种植需求,节约耕地600万亩,实现了“以草代粮”效果。即便如此,我国每年仍需进口苜蓿、燕麦等优质饲草200多万吨,而饲料粮缺口更甚,“粮食饲用”的畸形发展趋势愈发明显,比如,2020年我国进口大豆10033万吨、玉米1130万吨,其中二分之一用于饲料。谯仕彦院士根据我国当前饲料转化率测算:2035年,我国玉米等能量饲料缺口将超过8800万吨,大豆等蛋白饲料缺口将超过1.24亿吨。当前,在新时代“大食物观”的背景下衍生出的“种草就是种粮”的观念逐渐凸显出饲草产业对于我国“大粮食安全”的重要性。

优质草产品可有效链接种草和养畜环节,高效利用饲草资源是保障我国畜产品持续、稳定供应的前提。但目前饲草加工中还存在诸多未明确或未解决的科学问题,如牧草调制过程中微生物组动态变化及其发挥功能的基石菌株和核心菌株不明确;功能微生物组调控牧草营养转化路径与适口性的分子机制不清晰;利用功能微生物、合成微生物群落等调制发酵牧草,精准调控动物饲料转化率等的分子机

制有待解析;牧草加工过程中微生物组演替与碳排放关系与规律未知;饲草加工工艺与环境因子等对饲草加工品质的影响机制有待深入研究;草加工与畜养殖有效衔接及协同增效的关键机制研究还未受到足够重视等。上述科学问题的回答,有助于揭示饲草加工过程中发挥作用的功能微生物组,阐明微生物与饲草营养、品质、功能、利用的关系,为建立有效减少干物质损失、提高品质、增加利用率和安全性的饲草加工技术体系提供理论基础,从而实现多元优质草产品(如烘干草、青贮、草颗粒等)的精细加工与高效利用。因此,明晰饲草本底的生物学特性、饲草加工贮存过程中微生物演替规律与微生物组调控的饲草营养转化路径、饲草加工过程中减损提质的限制因子、饲草饲喂动物后的营养吸收与利用特点是草产品精细加工、稳定贮存和高效利用的理论基础(图1),对于提高草产品品质与安全性、提升饲草利用率与转化率,促进畜牧业稳定可持续发展意义深远。

## 2 草产品加工的生物学基础及研究进展

### 2.1 发酵草产品加工的生物学基础及研究进展

#### 2.1.1 全株玉米、苜蓿等大宗饲草青贮研究进展

全株玉米青贮是草食家畜尤其是奶牛饲养体系中不可或缺的基础饲料,但当前全株玉米青贮饲料二次发酵和有氧变质现象频发,给畜牧业生产造成了重大经济损失。研究表明,好氧性细菌(如巴氏醋酸杆菌等)和酵母菌(如毕赤酵母等)是诱发全株玉米青贮有氧变质的关键微生物<sup>[1]</sup>。当酵母菌等好氧

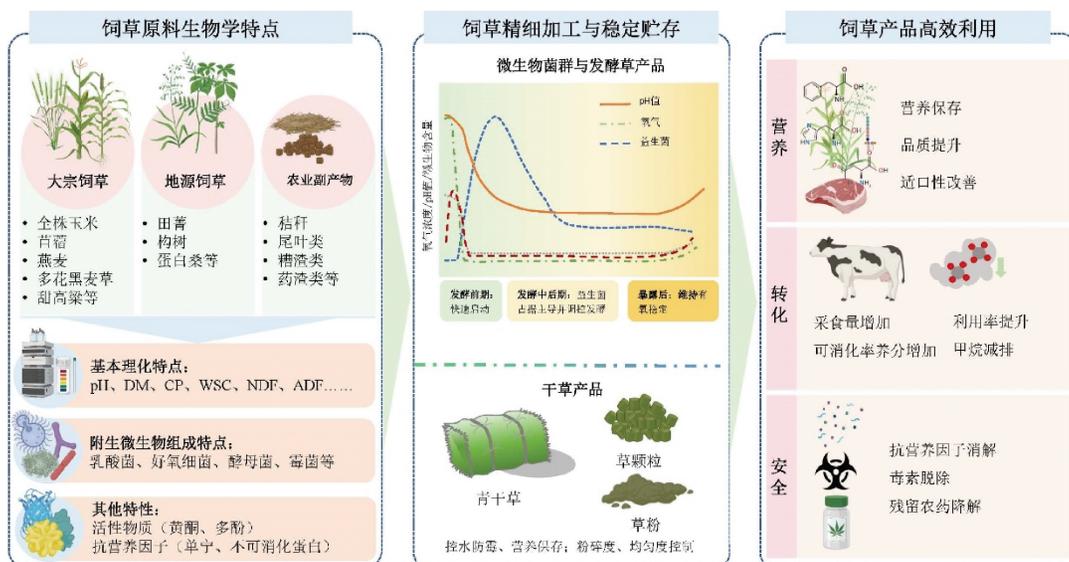


图 1 优质草产品加工、贮存与高效利用的生物学基础

微生物随着青贮 pH 值的升高开始恢复活性至完成青贮饲料腐败的整个过程,会消耗青贮干物质总量的 20%。此外,由于霉菌(如曲霉、镰刀霉等)产生毒素威胁动物健康,所以它们在青贮有氧变质过程中的危害也备受重视。目前,对于全株玉米二次发酵及减少真菌毒素的应对措施主要包括以下四个方面:外源接种异型发酵乳酸菌制剂;添加外源抗菌制剂;适当延长青贮时间;添加脱毒酶制剂。当玉米青贮完全暴露于空气中时添加乙酸和丙酸,可以有效降低玉米青贮饲料的 pH 值,提高乙酸、干物质和粗蛋白质含量,显著延长玉米青贮在有氧环境下保持稳定的时间;接种布氏乳杆菌可显著提高全株玉米的有氧稳定性。与化学添加剂和酶制剂相比,乳酸菌制剂因经济实用使得其前景广阔。因此,挖掘具有高效稳定发酵、抑制腐败微生物以及毒素降解功能的乳酸菌等微生物是今后研究的主流方向。

豆科饲草可为反刍动物提供优质的蛋白质,作为牧草之王的首蓿对奶牛养殖至关重要。然而,由于我国北方地区首蓿收获时节面临雨热同季现象,导致半干首蓿青贮在晾晒、捡拾过程中容易导致灰分增加,叶片蛋白损失大和淋雨变质等问题,从而使青贮品质不稳定、成本增加。因此,减少翻晒次数和时间的高水分首蓿青贮技术模式是解决上述问题的理想方法。然而,高水分首蓿青贮(水分含量高于 70%)往往会稀释首蓿中可溶性碳水化合物浓度,加之独特的气候条件,饲草表面自然附着的微生物复杂,有害或好氧微生物数量远多于乳酸菌,导致其自然发酵品质极不稳定,青贮不易成功,且面临梭菌发酵的风险。目前,改善高水分首蓿青贮发酵品质主要通过青贮添加剂,如甲酸或者丙酸类等有机酸,虽然效果明显但适口性较差。乳酸菌是认可度较高的添加剂,但由于梭菌厌氧、底物宽泛和产孢等特性,普通乳酸菌不能靶向杀死耐酸梭菌和孢子,同时受限于首蓿的低可溶性糖含量,也不能直接降解多糖(如淀粉和纤维素)产生足够的有机酸提高发酵品质。未来可靶向筛选合成特定活性物质如细菌素等抑制梭菌的菌株,以及可降解淀粉或纤维素的菌株,并依据它们的代谢特性组装具有高效抑菌活性及高效利用碳源的多功能微生物群落,在抑制梭菌的基础上提升发酵品质。此外,在青贮过程中,豆科牧草的部分真蛋白会被降解为非蛋白氮,难以被反刍动

物快速吸收利用<sup>[2,3]</sup>,经瘤胃壁吸收在肝脏中合成尿素最终排出体外,造成蛋白浪费且可能引起环境污染<sup>[4]</sup>。研究表明,红三叶、红豆草等饲草中富含酚类化合物,该类物质可与蛋白酶或者蛋白底物结合,从而抑制蛋白质的水解作用。因此,与其他饲草相比,这类饲草在青贮过程中蛋白质的降解程度较低<sup>[5]</sup>。未来通过外源添加蛋白酶抑制剂或者利用微生物表达植物蛋白酶抑制剂,赋予苜蓿同样的蛋白保护机制,将对优质苜蓿青贮饲料的生产和反刍动物养殖业的发展产生积极影响。

### 2.1.2 乡土饲草发酵调制研究进展

面对我国饲料短缺、饲草自给率低的难题,充分开发利用乡土饲草资源迫在眉睫。我国乡土饲草种类丰富,包括灌木、半灌木和草本植物等资源,它们青绿期长、抗逆性强、产量高,且大部分可种植在盐碱地、山地丘陵等边际土地<sup>[6]</sup>,如蛋白桑、柠条、田菁、沙棘等,可作为蛋白饲料加以利用,不但可扩充饲料来源,解决人畜争地难题,还可改良土壤、保持水土、防风固沙,增加环境与生态效益。然而乡土饲草原料的营养成分、微生物菌群等理化特征不一,将其饲用化利用存在诸多问题,如木质纤维素含量高、抗营养相关次生代谢物含量丰富、本底附生乳酸菌较少等。为解决上述问题,一方面通过加工工艺对原材料进行处理,如适时收获、提高留茬高度、加工时进行揉丝等方式,破坏木质纤维素结构,增加纤维素的可及性,同时降低抗营养因子的含量;另一方面通过添加剂如糖蜜、纤维素酶以及乳酸菌等方式增加发酵底物,促进乳酸菌发酵。以构树为例,其单宁等抗营养因子是限制木本饲料作为基础日粮的主要原因之一,但可通过筛选降解单宁的乳酸菌来达到降低其含量的目的<sup>[7]</sup>。作为一种“绿色蛋白”来源,除构树外,还有蛋白桑、柠条、田菁等非常规高蛋白饲草,因其在替代蛋白饲料和减少饲料粮进口等方面发挥着越来越重要的作用,被诸多专家学者称为“绿色黄金”<sup>[8]</sup>。但是,高蛋白饲草存在缓冲能值高、发酵不充分等问题,极易腐败并产氨态氮、生物胺等物质,严重影响饲草的适口性并危及牲畜安全。以田菁为例,因其水分大、蛋白含量高、次级代谢产物多,青贮发酵较难成功,并往往导致蛋白质降解。通过添加在发酵过程占据主导地位的同型乳酸菌(促进发酵)和异型发酵乳酸菌(提高有氧稳定性),可显著降低青贮发酵后 pH 值和氨态氮含量,减少粗蛋

白损失<sup>[7, 9]</sup>。

未来可针对性的筛选降解纤维或抗营养因子的微生物菌株(群),同时优化乡土饲草青贮加工工艺,深入乡土饲草青贮改善畜产品品质机理研究,强化乡土饲草多功能和全产业链创新。

### 2.1.3 秸秆、尾菜类、糟渣类等农业副产物发酵研究进展

厌氧发酵是农作物秸秆资源饲料化和高效利用的有效途径。鉴于农作物秸秆纤维素含量较高、附生乳酸菌和发酵底物不足的问题,各类添加剂被应用于农作物秸秆青贮饲料生产中,如糖蜜、甲酸、纤维素酶、乳酸菌等,均可改善小麦、水稻等秸秆的发酵品质<sup>[10-13]</sup>。但值得注意的是,添加外源酶制剂存在成本较高、性能不稳定及pH适应范围较狭窄等缺陷,限制了其在青贮中的广泛应用。近年来,兼性厌氧纤维素降解复合菌群由于其活力强、适用范围广等特点,在青贮领域得到了广泛关注。因此,未来研究应聚焦于纤维素降解菌的挖掘和功能研究、多功能复合菌群的组装、开发与应用,以及基因编辑技术改造菌株的酶功能与活性提升,从而提高纤维素降解菌群的广谱性、持续性及高效性。

尾菜类废弃物是继水稻秸秆、玉米秸秆和小麦秸秆之后的第四大农业废弃物。这类副产物营养价值高,适口性好,但水分含量高,单独青贮不易成功。除了通过凋萎和接种乳酸菌调控发酵品质和影响有氧稳定性外,还可与农作物秸秆类副产物混合青贮,发挥材料间的互补特性,调节尾菜水分<sup>[14]</sup>。由于部分尾菜中还富含多糖等抗氧化物质,添加至发酵全混合日粮中可抑制有氧腐败,提高有氧稳定性<sup>[15]</sup>。未来应关注尾菜中微生物菌群及生物活性物质在青贮过程中的动态变化规律和水分、营养等调控技术,从而实现尾菜资源的高效利用。

与尾菜相似,糟渣类饲料同样需要合理开发及饲用化利用。在我国糟渣类主要包括酿造业副产品如白酒糟、啤酒糟、酱油糟等,饮料业的副产品如苹果渣、柑橘皮渣等。虽然糟渣类营养丰富,富含糖类、有机酸、维生素、矿物质、膳食纤维等营养物质及黄酮、多酚、色素类活性物质,但因其存在含水量高、易霉变、无法长距离运输和长期贮存的问题,往往制约着糟渣类饲料资源的规模化利用。将糟渣发酵为青贮饲料可有效减少营养损失,提高适口性,增加贮

存时间,但由于糟渣饲料自身营养不均衡,需将其与其他饲料原料和精料进行配合。采用发酵全混合日粮技术可高效利用糟渣类非常规饲料资源,降低其水分含量,便于商业化运输和长期贮存,实现饲料的全年均衡供应。未来尚需进一步优化以糟渣类饲料为主要原料的全混合日粮的发酵工艺和功能菌种,从而促进多种原材料的利用,均衡营养,减少有毒有害物质。

### 2.1.4 新型、功能型发酵微生物菌种发掘与饲草发酵调控研究进展

乳酸菌作为青贮添加剂在改善青贮饲料发酵品质和防止霉变等方面发挥了重要的作用,但目前对乳酸菌在青贮发酵过程中的作用研究大多停留在功效研究阶段,对它们的具体功能和发挥作用的方式和机制了解较少。近年来,青贮乳酸菌的研究逐渐由常规乳酸菌向新型、功能型青贮乳酸菌转变,以满足食品安全、饲料营养价值、健康效益,甚至动物福利等需求。目前,已有研究开始关注既能提高青贮品质又能对青贮饲料下游产生积极作用的接种剂(功能型接种剂),如提高家畜的青贮采食量和消化率,改善家畜机体健康,提高动物生产性能等。新型、功能型青贮乳酸菌如产阿魏酸酯酶、产 $\alpha$ -淀粉酶、产1,2-丙二醇、产细菌素、高抗氧化活性、降解农药乳酸菌及耐低温乳酸菌等也逐步被深入挖掘与研究。与常规青贮乳酸菌相比,新型、功能型青贮乳酸菌在改善饲草发酵和营养品质基础上,更加关注其对动物的生产性能、健康和畜产品品质的积极影响。此外,青贮饲料代谢组数据表明乳酸菌发酵的青贮饲料中具有益生作用的代谢产物远远不局限于抗菌、抗氧化和抗炎等功能,还有具芳香气味等提高适口性的功能。因此,未来利用微生物组多组学技术进一步挖掘新型、功能型青贮乳酸菌菌种并探讨其在青贮饲料发酵调控及下游应用研究是目前青贮发酵微生物关注的热点和今后研究方向的重点。

## 2.2 青干草、草颗粒、草粉等干草产品加工的生物学基础及研究进展

优质青干草是家畜生长发育及休牧禁牧期间必备的重要粗饲料,也是各种饲草加工企业的主要原料,在青干草的生产实践中,提高其品质调控、防霉及安全贮藏技术水平极其重要。青干草在调制过程中因机械、翻晒、雨淋及加工调制方式等因素会造成

营养物质损失,降低饲草利用率,甚至影响饲草的再生量和草地生态环境。目前,诸多学者关于以上问题开展了相关研究,在加工工艺方面对关键参数进行优化可提高干草品质,如燕麦刈割后在水泥地压扁晾晒至27%~30%含水量再进行打捆效果最佳,晒制厚度为6 cm时,可有效缩短干燥时间,使得燕麦青干草达到一级标准,晒制厚度为13 cm时,压扁晾晒效果最好<sup>[16]</sup>;天然干草打捆密度达到160 kg/m<sup>3</sup>时,可显著改善天然干草的营养品质,减少真菌毒素污染。此外,通过添加化学制剂(如柠檬酸)或植物精油(如芳樟醇、丁香酚、香豆素等)抑制霉菌可显著减少干草霉变。

与自然晾晒的天然青干草相比,制成草粉或草颗粒不仅能更好的保留饲草的营养物质,提高家畜的消化利用率<sup>[17]</sup>;还可减少在晒制及运输过程中叶片等部位的营养损失,同时改善饲草质地,减少对家畜口腔及消化道的危害,保障家畜健康<sup>[18]</sup>。在草粉和草颗粒加工制作的过程中,原料中的含水量、调制工艺及相关参数等都是影响其质量的关键因素。据测定,用豆科和禾本科饲草压制草颗粒,最佳含水量分别在14%~16%和13%~15%之间用于制粒,有助于提高颗粒的耐储存性。另外,通过模拟并建立草颗粒制作与工艺参数的数学模型获得最优参数组合可为生产优质颗粒饲料提供理论依据。

鉴于青干草及草颗粒对草食家畜健康养殖的重要性,为进一步提高其品质,未来重点关注的研究工作主要包括:深入开展青干草加工机理研究,如快速烘干、叶绿素和胡萝卜素保存原理等;精准分析不同原料及成型颗粒的能耗及生产效率等因素,从产品与设备两方面优化生产工艺,制作稳定优质的饲草产品,助力畜牧业稳定可持续发展。

### 2.3 草产品安全防控的生物学基础及研究进展

在草产品加工贮存过程中,不良微生物(如酵母和霉菌等真菌,梭菌和肠杆菌等细菌)和抗营养因子是影响饲草安全的主要因素。在草产品中,好氧腐败菌的大量繁殖,不仅消耗了可溶性糖和蛋白质,也会产生二氧化碳、氨、氢气等,最终导致蛋白质、干物质和能量损失<sup>[19]</sup>。厌氧腐败梭状芽孢菌在无氧状态下分解糖、有机酸与蛋白,与乳酸菌竞争发酵底物,并且将乳酸和糖转化为丁酸,或将氨基酸转化为氨或胺,导致营养下降及干物质损失。由真菌导致

的腐败更为严重,尤其是产毒素真菌。据统计,全球25%的农作物受到真菌毒素不同程度的污染,约2%的农作物因真菌毒素污染而失去价值<sup>[20]</sup>。我国饲草产品中真菌毒素的污染情况不容小觑,青贮饲料中真菌毒素检出率达70%~100%,饲草原料和干草均受到不同程度的真菌毒素污染<sup>[21]</sup>。黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、玉米赤霉烯酮、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、T-2毒素和伏马毒素是影响草产品质量安全的主要真菌毒素,且多种真菌毒素共存现象普遍<sup>[22, 23]</sup>。真菌毒素通常导致动物的生产性能下降,免疫机能被抑制,使动物患病,影响动物健康,造成经济损失;同时还会通过畜产品进入食品链,从而危害人类健康<sup>[24]</sup>。因此,在未来研究中,解析草产品加工贮存过程中真菌毒素的产生根源、累积特征及抗营养因子消解机制,对提高饲草利用率、保障草产品安全具有重要意义。

此外,青贮饲料中重金属和农药残留等危害因子也极大影响着草产品的高效利用,威胁人类健康。目前关于危害因子的研究主要包括限量标准、形成机制、消解技术、草—畜—产品迁移特征等方面。鉴于危害因子具有极大的危害性并影响畜产品质量安全,研究其形成与累积机制及微生物与酶制剂消解、防控技术研究也将成为青贮饲料研究领域中的重要方向。

## 3 草产品高效利用的生物学基础及研究进展

### 3.1 草产品与家畜生产性能

反刍动物可将人类无法食用的饲草转化为高质量的动物蛋白质。然而,家畜摄入饲草的干物质最终只有14%可供人类食用。因此,增加饲草纤维消化率对家畜生产力、盈利能力和环境都至关重要。青贮饲料是家畜日粮的主要成分,占家畜干物质采食量的50%~70%<sup>[25]</sup>,对草食家畜养殖业健康发展至关重要。在生产实践中保证青贮饲料发酵品质的同时,如何持续提高青贮饲料营养物质的利用效率或饲草转化效率也是目前青贮饲料研究领域重点关注的热点之一。青贮过程中纤维素酶的作用可能仅局限于更易被消化的营养物质,如半纤维素、纤维素、果胶等,对木质纤维素的整体结构(细胞骨架)并未造成实质性的破坏,因瘤胃中缺乏一些酯酶的活性,饲草木质纤维素的复杂结构(如3-甲氧基-4-羟

基肉桂酸,即阿魏酸)不能被瘤胃微生物进一步水解,最终导致干物质和中性洗涤纤维体外消化率变化不明显,甚至下降<sup>[26]</sup>。阿魏酸酯酶可破坏阿魏酸与细胞壁多糖和木质素的交联结构,增强瘤胃微生物对细胞壁的降解。动物饲喂试验表明,接种产阿魏酸酯酶的乳酸菌发酵后,苜蓿青贮饲料的干物质表观消化率提高了 3%。然而,由于阿魏酸酯酶表达量较低,对饲草转化率提升幅度有限。未来,可通过基因编辑手段进一步强化功能乳酸菌的产酶能力,同时联合纤维素酶产生菌以进一步提高纤维素降解性能并保证其持续性及高效性是提高饲草转化效率的重要手段。

不完全的纤维消化通过限制摄入量降低了奶牛的利润,从而降低了动物生产力,增加了粪便的排泄。例如,在玉米细胞壁中,木质素被认为是阻碍细胞壁消化的主要因素,且木质素浓度每增加 1 个单位,细胞壁降解率降低 2 个单位<sup>[27]</sup>。中性洗涤纤维消化率每增加 1 个单位,干物质采食量和产奶量分别增加 0.17 千克/天和 0.25 千克/天<sup>[28]</sup>。在多年生黑麦草的饲喂试验过程中,消化率每增加 5%~6%,可使奶牛泌乳性能提高 27%<sup>[29]</sup>。由此可见,饲草细胞壁木质素浓度每增加一个单位都会严重抑制家畜的干物质采食量和产奶量。此外,增加饲草转化率相当于增加纤维饲料的能量供应。目前,提高饲草转化率的方法主要有以下几种:机械加工包括切碎、制粒、蒸汽处理;化学方法如酸碱处理;外源微生物或纤维素酶处理。但考虑到生产和饲喂成本、设备的腐蚀性以及对家畜和人类健康的影响,物理和化学方法使用较少。为降低成本、减少污染及对家畜的危害,未来利用瘤胃及肠道来源功能微生物对原材料进行预消化提高饲草纤维利用率是饲草高效利用的有效途径。

胃肠道甲烷排放是反刍家畜饲养过程中的重要能量损失,占日粮消化能的 2%~12%,占日粮代谢能的 6.5%~18.7%。反刍家畜胃肠道甲烷排放主要来自瘤胃和后肠道,其中瘤胃甲烷占胃肠道甲烷生成总量的 80%以上<sup>[30]</sup>。目前,不同添加剂降低反刍动物甲烷排放的措施在动物实际生产中已取得较好的效果,如硝酸盐、植物精油、莫能菌素和延胡索酸等。未来,可通过在饲草加工过程中添加抑制甲烷产生的特定微生物(如酿酒酵母)达到长期稳定、安全有效的甲烷减排效果,从而保障动物及畜产品

安全,提高我国饲料资源利用以及加速实现“双碳”事业目标。

### 3.2 草产品与家畜健康福利

乳酸菌是一类具有益生功能的细菌,目前已广泛应用于食品、医药、畜牧业等领域。大量试验已证实乳酸菌能够通过菌体本身和代谢产物来有效提高机体免疫力,改善肠道功能,预防炎症性疾病和延缓衰老。通过青贮饲料代谢组学研究发现,青贮饲料中除了乳酸菌发酵产生的有机酸外,还含有抗菌、抗炎、抗氧化、神经递质、必需氨基酸、维生素、寡糖以及风味物质(醇类、酯类、醛类和烷烃类)等大量具有特殊生物学功能的其他代谢产物,但它们如何调控青贮发酵并发挥其生物学功能的机理尚不明晰。利用代谢组学、蛋白组学、宏基因组学等微生物组多组学联合分析手段开展功能菌或核心菌对青贮饲料及其对草食畜胃肠道健康的调控机制研究甚少。目前,通过提升草产品品质调控家畜健康福利(如预防疾病、提升饲草料适口性等)的研究较少。结合人工智能(Artificial intelligence, AI)解析青贮发酵基石菌、核心菌及功能菌与草畜产品品质调控的研究尚存空白。已有研究表明接种产阿魏酸酯酶及具抗氧化能力乳酸菌的优质苜蓿青贮通过提升原料的抗氧化特性改善了奶山羊的抗氧化及免疫性能,下调与奶山羊乳房炎相关的炎症因子的表达水平<sup>[31]</sup>;接种产 1,2-丙二醇布氏乳杆菌的玉米青贮饲料中可能有助于预防奶牛酮病;接种产生特定风味物质(如乙偶姻、芳樟醇)的乳酸菌上调相关风味物质的丰度,进而可能提升饲草的适口性(未发表)。因此,未来可充分利用乳酸菌的益生特性,深入发掘新型、功能型乳酸菌(如抗氧化、抗病、提高适口性等)并以青贮饲料为载体,为家畜提供优质的营养物质和微生态调节剂,促进草食畜胃肠道健康、提高其生产性能、提升畜产品品质、促进健康养殖、提升家畜健康福利,保障生物安全;同时利用 AI 与多组学技术研究“功能微生物—发酵饲草料—草食家畜—畜产品”生物链中迁移与转化规律等重要科学问题也将是未来拟开展研究的工作重点。

### 3.3 草产品与畜产品品质及安全

随着居民生活水平的不断提高,畜产品已成为国民膳食结构的重要组成部分,如何生产更多优质的畜产品以满足国民需求是我们面临的重大挑战。解析草产品关键营养素(如碳水化合物、蛋白和脂

类)消化、吸收、转运途径及分配等如何调控乳肉产品的品质与功能是研究草产品对畜产品品质调控的基石。例如,饲喂非纤维性碳水化合物与中性洗涤纤维比值为 4.05 的高精料饲粮可提高肉牛肌肉风味氨基酸的含量,改善肌肉风味,激活肌肉 mTOR 通路,促进肌肉蛋白质合成,提高蛋白质的利用率<sup>[32]</sup>。目前,通过日粮调控方法改善草食家畜乳肉产品中磷脂、肌氨酸和肉毒碱等重要功能成分的研究较少,基于其在草食家畜乳肉产品和人类营养中的重要性,需要加强针对这些重要功能成分的靶向日粮配制技术和功能型饲料产品研发,提高畜产品品质、保障畜产品安全。

#### 4 未来研究方向

草产品精细加工与高效利用的生物学基础研究是提高草产品品质、保障草产品安全、促进其高效利用的基石,对于推动我国饲草产业和草食畜牧业高质量发展,实现草食畜牧业提质增效,保障畜产品品质与安全、降低草食畜牧业碳排放、保障国家粮食安全等具有重要意义。

今后,为推动我国草食畜牧业健康养殖,实现草畜产业与生态环境高效协同发展,在草产品加工方面可重点开展以下工作(图 2):(1) 重点解析牧草调

制过程中微生物组动态变化及其发挥功能的基石菌株及核心菌株、功能微生物组调控牧草营养转化路径的分子机制、活性代谢产物形成机制、功能微生物调控发酵饲草适口性分子机制、饲草加工工艺(收获时期、水分、添加剂等)与环境因子(氧气、温湿度)等对饲草加工品质的影响机制、牧草加工过程中微生物组演替与碳排放关系与规律等;(2) 解析“微生物—发酵饲草料—草食家畜—畜产品”整个生物链提质增效与安全调控的生物学基础;(3) 充分挖掘不同类型、不同来源乳酸菌的益生功能,如抗氧化、抗病、提高适口性等;(4) 开展草加工与畜养殖有效衔接及协同增效的关键机制研究。

在草产品高效利用方面可重点开展以下工作(图 2):(1) 利用功能微生物、合成微生物群落等调制发酵牧草,精准调控动物生长发育和免疫抗病等的分子机制;(2) 利用 AI+BT(人工智能与生物技术:Artificial intelligence and biotechnology)、多组学联合分析等新技术及合成多功能微生物组等分子生物学手段,开展功能微生物发酵饲草调控草食家畜生产与健康、发酵饲草调控畜产品品质与安全的作用机制等方面的研究;(3) 利用发酵草产品精准调控动物胃肠道微生物组从而提高动物饲料转化率及生产性能、减少饲草“收—加—贮—用”过程碳排放等。



图 2 草畜产品的提质增效与安全调控

## 参 考 文 献

- [1] Spoelstra SF, Courtin MG, Van Beers JAC. Acetic acid bacteria can initiate aerobic deterioration of whole crop maize silage. *The Journal of Agricultural Science*, 1988, 111(1): 127—132.
- [2] Makoni NF, Shelford JA, Nakai S, et al. Characterization of protein fractions in fresh, wilted, and ensiled Alfalfa<sup>1</sup>. *Journal of Dairy Science*, 1993, 76(7): 1934—1944.
- [3] 郭旭生, 周禾, 玉柱. 提高反刍家畜对苜蓿青贮蛋白利用率的研究进展. *草食家畜*, 2006(1): 34—37.
- [4] Sullivan ML, and Foster JL. Perennial peanut (*Arachis glabrata* Benth.) contains polyphenol oxidase (PPO) and PPO substrates that can reduce post-harvest proteolysis. *Journal of Science Food Agricultural*, 2013, 93(10): 2421—2428.
- [5] Lee MRF. Forage polyphenol oxidase and ruminant livestock nutrition. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 694.
- [6] 杨富裕. 树立“饲草就是粮食”理念, 大力发展饲草产业. *草地学报*, 2023, 31(2): 311—313.
- [7] Wang NW, Xiong Y, Wang XK, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* on fermentation quality and anti-nutritional factors of paper mulberry silage. *Fermentation*, 2022, 8(4): 144.
- [8] 武海雯, 陈军华, 吴亚琦, 等. 我国盐生饲料植物资源与营养价值分析. *中国饲料*, 2022(19): 104—115.
- [9] 刘晓婧, 张颖超, 杨富裕. 乳酸菌添加剂对3种典型木本饲料青贮效果的影响. *饲料工业*, 2019, 40(2): 16—21.
- [10] Zhao JE, Dong ZH, Li JF, et al. Effects of sugar sources and doses on fermentation dynamics, carbohydrates changes, *in vitro* digestibility and gas production of rice straw silage. *Italian Journal of Animal Science*, 2019, 18(1): 1345—1355.
- [11] Zhao J, Wang SR, Dong ZH, et al. Effect of storage time and the level of formic acid on fermentation characteristics, epiphytic microflora, carbohydrate components and *in vitro* digestibility of rice straw silage. *Animal Bioscience*, 2021, 34(6): 1038—1048.
- [12] Zhao J, Dong ZH, Li JF, et al. Ensiling as pretreatment of rice straw: the effect of hemicellulase and *Lactobacillus plantarum* on hemicellulose degradation and cellulose conversion. *Bioresource Technology*, 2018, 266: 158—165.
- [13] Ni KK, Wang YP, Pang HL, et al. Effect of cellulase and lactic acid bacteria on fermentation quality and chemical composition of wheat straw silage. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5(13): 1877—1884.
- [14] 王坚. 水稻、玉米秸秆与农副产品混合青贮研究. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [15] Zhao J, Dong ZH, Chen L, et al. The replacement of whole-plant corn with bamboo shoot shell on the fermentation quality, chemical composition, aerobic stability and *in vitro* digestibility of total mixed ration silage. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 259: 114348.
- [16] 侯建杰. 高寒牧区燕麦青干草品质的影响因素研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [17] 徐生阳, 玉柱. 天然牧草不同草产品形式之间营养性差异研究. *饲料工业*, 2020, 41(15): 34—38.
- [18] 刘逸超, 王志军, 司强, 等. 天然青干草调制与贮藏技术研究进展. *饲料研究*, 2023, 46(18): 135—139.
- [19] Dunière L, Sindou J, Chaucheyras-Durand F, et al. Silage processing and strategies to prevent persistence of undesirable microorganisms. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, 182: 1—15.
- [20] 庞淑婷, 刘颖. 中外谷物及其制品中污染物限量要求分析. *标准科学*, 2021(3): 70—76.
- [21] 李宇宇, 贾玉山, 格根图, 等. 饲用草产品主要真菌毒素污染检测、风险评估与控制研究进展. *草业学报*, 2021, 30(4): 191—204.
- [22] Shimshoni JA, Cuneah O, Sulyok M, et al. Mycotoxins in corn and wheat silage in Israel. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2013, 30(9): 1614—1625.
- [23] Alonso VA, Pereyra CM, Keller LAM, et al. Fungi and mycotoxins in silage: an overview. *Journal of Applied Microbiology*, 2013, 115(3): 637—643.
- [24] Zhang DW, Zhao LS, Chen YK, et al. Mycotoxins in maize silage from China in 2019. *Toxins*, 2022, 14(4): 241.
- [25] Rodríguez-Blanco M, Ramos AJ, Sanchis V, et al. Mycotoxins occurrence and fungal populations in different types of silages for dairy cows in Spain. *Fungal Biology*, 2021, 125(2): 103—114.
- [26] Adesogan AT, Arriola KG, Jiang Y, et al. Symposium review: technologies for improving fiber utilization. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(6): 5726—5755.
- [27] Grabber JH. How do lignin composition, structure, and cross-linking affect degradability? A review of cell wall model studies. *Crop Science*, 2005, 45(3): 820—831.
- [28] Fay JP, Guaita MS, Danelón JL, et al. Evaluation of two procedures to determine acid and neutral detergent fibers in ruminant feeds of the temperate region of Argentina. *Journal of Aoac International*, 2005, 88(4): 995—997.

- [29] Smith KF, Simpson RJ, Oram RN, et al. Seasonal variation in the herbage yield and nutritive value of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivars with high or normal herbage water-soluble carbohydrate concentrations grown in three contrasting Australian dairy environments. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1998, 38(8): 821.
- [30] 张秀敏, 王荣, 马志远, 等. 反刍家畜胃肠道甲烷排放与减排策略. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 732—742.
- [31] Li FH, Zhang BB, Zhang YX, et al. Probiotic effect of ferulic acid esterase-producing *Lactobacillus plantarum* inoculated alfalfa silage on digestion, antioxidant, and immunity status of lactating dairy goats. *Animal Nutrition*, 2022, 11: 38—47.
- [32] 朱晋佳, 吴祎程, 吕小康, 等. 饲料中 NFC 与 NDF 比例影响肉牛肌肉氨基酸和蛋白质代谢. *中国兽医学报*, 2022, 42(12): 2471—2478.

## Biological Basis and Research Progress of Forage Grass Products Processing and Utilization

Jin Zhong<sup>1\*</sup> Xusheng Guo<sup>2</sup> Tao Shao<sup>3</sup> Fuyu Yang<sup>4</sup>

1. *Institutes of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

2. *School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000*

3. *College of Agro-grassland Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095*

4. *College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193*

**Abstract** High-quality forage is a vital foundational guarantee for the healthy and high-quality development of modern herbivorous livestock husbandry. It also serves as a crucial prerequisite for maintaining stable production of premium and safe animal products. The refined processing, stable storage, and efficient utilization of forage products are pivotal stages in the transformation from “forage” to “animal products.” Systematically clarifying the biological characteristics of forage substrates, microbial composition, dynamic succession and metabolic patterns during the fermentation and storage, as well as understanding the nutritional transformation and utilization pathways regulated by functional microbial communities, are of paramount importance. Additionally, comprehending the enhancement and safety mechanisms of the entire chain involving “microbe-fermented forage-herbivorous livestock-animal products” is also very crucial. These efforts will contribute to improving the quality and safety of forage products, enhancing utilization and conversion rates of forage, promoting high-quality development in China’s forage industry and herbivorous livestock farming, and achieving advancements in the quality and efficiency of herbivorous livestock husbandry.

**Keywords** forage grass products; forage processing; forage utilization; biological basis; herbivorous livestock

(责任编辑 刘敏 张强)

\* Corresponding Author, Email: zhongj@im.ac.cn