中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):258-264
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025174

我国油菜秸秆饲料化利用现状及研究进展

孙元丰[1],教子旭[2],黄静[3],代碌碌[1],孙仁华[1],胡潇方[1],梁志伟[1],薛颖昊[1],徐志宇[1*]
(1.农业农村部农业生态与资源保护总站,北京,100125;
2.中国农业大学资源与环境学院,北京,100193;
3.湖北省农业科学院畜牧兽医研究所,湖北 武汉,430064)

摘要:我国秸秆饲料存在巨大缺口,油菜秸秆营养物质含量丰富,其饲料化利用具有很大潜力。依据秸秆资源台账及文献资料,梳理了我国油菜秸秆饲用养分基础、利用现状、饲用加工技术进展、存在的问题,并在此基础上提出发展建议。结果显示,油菜秸秆中粗蛋白含量(5.5%左右)、粗脂肪(2.14%~3.48%)含量高于主要粮食作物秸秆养分水平。2019至2023年,我国油菜秸秆饲料化利用量及比例逐年上升,但总体水平不高,2023年,油菜秸秆饲料化利用占比仅为7.5%。目前,油菜秸秆饲用品质改良主要通过物理、化学、生物及联合处理等方式。空间资源配置失衡、加工处理成本高、技术标准规范缺乏是制约油菜秸秆饲料化利用的主要因素,需从政策支持、技术突破、标准体系构建三个方面共同发力,提升油菜秸秆饲料化利用水平。

关键词:油菜秸秆;饲料化利用;品质改良;高成本;技术突破
中图分类号:S-1;S565.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-9084(2026)04-0258-07

Current status and research progress in the utilization of oilseed rape straw as feed in China

SUN Yuan-feng[1], JIAO Zi-xu[2], HUANG Jing[3], DAI Lu-lu[1], SUN Ren-hua[1], HU Xiao-fang[1], LIANG Zhi-wei[1], XUE Ying-hao[1], XU Zhi-yu[1*]
(1. *Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing* 100125, *China*; 2. *College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*; 3. *Institute of Animal Science and Veterinary Medicine, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan* 430064, *China*)

Abstract: China confronts a substantial disparity in straw feed supply, while oilseed rape straw is rich in nutrients, indicating great potential for its utilization as feed. Based on the national straw resource inventory and literature, this study analyzes the nutritional basis, current utilization status, processing technologies, and existing challenges of rapeseed straw feed in China, and proposes development recommendations. The results show that the crude protein content (approximately 5.5%) and crude fat content (2.14%-3.48%) in oilseed rape straw were higher than those in major grain crop straws. From 2019 to 2023, both the volume and proportion of oilseed rape straw utilized as feed increased annually, though the overall level remains low. In 2023, the utilization of oilseed rape straw for feed accounted for only 7.5%. Currently, the quality improvement of oilseed rape straw as feed primarily relies on physical, chemical, biological, and combined treatment methods. Key constraints to its utilization include spatial resource allocation imbalances, high processing costs, and a lack of technical standards and regulations. To enhance the utilization of oilseed rape straw as feed, efforts are needed in three areas: policy support, technological breakthroughs, and standard system construction.

Key words: oilseed rape straw; feed utilization; improvement of feed quality; high processing costs; technological breakthroughs

收稿日期:2025-08-08
基金项目:国家油菜产业技术体系(CARS-12);"十四五"国家重点研发计划(2023YFD1701505)
作者简介:孙元丰(1993-),女,博士,主要从事农作物秸秆综合利用研究,E-mail: sunyuanfeng2022@126.com
* 通讯作者:徐志宇(1975-),男,博士,正高级农艺师,主要从事农作物秸秆综合利用研究,E-mail: stzzstnyc@163.com

农作物秸秆中含有丰富的木质素和纤维素,对牛羊等反刍动物而言,秸秆饲料可以刺激其反刍和唾液分泌,维持瘤胃pH值的稳定,防止酸中毒,还有利于提升瘤胃微生物丰富度,改善瘤胃发酵功能[1,2]。此外,秸秆中还含有大量粗蛋白等营养物质,可以满足牛羊等草食动物生长发育需要,是良好的粗饲料资源[3]。我国是牛羊等草食动物养殖大国。国家统计局数据显示,2024年,我国牛存栏量超1亿头,羊存栏量超3亿只,对粗饲料需求量大。2022年,我国牲畜饲养数量为肉牛8454.1万头,奶牛1160.1万头、羊32627.3万头、马366.7万头、驴173.5万头、骡48.8万头、骆驼54.1万头,按照相关测算方法[4],我国草食动物秸秆的需求量在3.1亿吨左右,而当前秸秆饲料化利用的总量仅为1.51亿吨,尚存在1.6亿吨的差距。加之近年来进口饲料原料价格节节攀升,大力开发秸秆饲料化利用具有广阔的市场前景和现实意义。

在粮油作物秸秆中,油菜秸秆营养物质含量丰富,其干物质含量可达88%左右[5],粗蛋白、粗脂肪含量均高于小麦、玉米和大豆等作物秸秆,且油菜秸秆中还含有一定的微量元素[6,7]。以往研究表明,油菜秸秆中葡聚糖和木聚糖分别占干重的27.3%和15.0%[8]。然而,油菜秸秆的木质化程度较高,质地坚硬,中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量均较高,还含有芥酸和硫代葡萄糖苷等抗营养因子,直接用作饲料有效能值低、适口性差[9,10]。因此,在生产上需要通过物理加工、化学调制及生物发酵等一系列饲料化加工技术对油菜秸秆进一步处理,增加粗蛋白质含量,降低秸秆中粗纤维和抗营养物质含量,改善秸秆营养价值和适口性,提高采食率、消化率,延长保存时间。

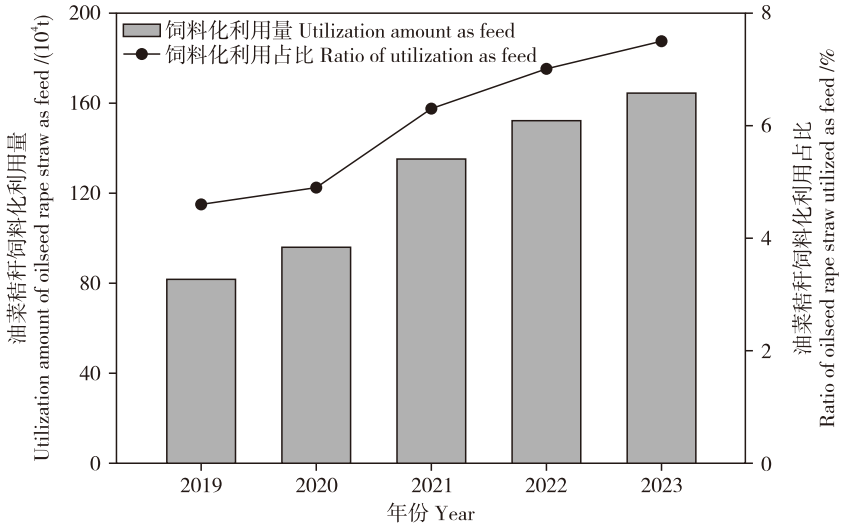
油菜是我国第一大油料作物,秸秆资源丰富,系统研究油菜秸秆饲料化利用现状及研究进展对于准确把握行业发展趋势、延长油菜产业链条、弥补我国秸秆饲料缺口具有重要意义。本研究基于秸秆资源台账数据及已发表文献资料,梳理总结了我国油菜秸秆资源情况、饲料化利用技术及研究进展,并在此基础上提出发展建议。

1 油菜秸秆饲料化利用养分基础

粗蛋白、粗脂肪含量高是油菜秸秆饲料化利用的重要前提。前人对不同地区的油菜、小麦、玉米、大豆等作物的秸秆的养分进行了测定。结果表明,油菜秸秆平均粗蛋白含量为5.5%左右,粗脂肪为2.14%~3.48%。其粗蛋白含量高于禾本科作物玉米、小麦秸秆,也高于大豆秸秆,粗脂肪含量仅略低于大豆秸秆[11-13]。而对于饲用油菜而言,粗蛋白含量甚至高达25.6%。另外,与传统的豆科饲草相比,油菜秸秆具有较高的无氮浸出物和钙含量,也是其转化为优质饲草的重要特点[14]。因此,油菜秸秆具有较好的养分条件,经过适宜的加工处理可考虑将其替代常规粗饲料饲喂反刍动物,降低养殖成本的同时节约饲料资源[15]。

2 我国油菜秸秆饲料化利用现状

农作物秸秆资源台账数据显示,2019至2023



注:饲料化利用占比=饲料化利用量/(肥料化利用量+饲料化利用量+燃料化利用量+基料化利用量+原料化利用量)×100%

Note: Ratio of utilization as feed=Utilization amount as feed/ Total amount of utilization as fertilizers, feed, fuels, base materials, and raw materials×100%

图1 2019–2023年油菜秸秆饲料化利用量及利用比例

Fig. 1 The amount and proportion of oilseed rape straw utilized as feed from 2019 to 2023

年,我国油菜秸秆饲料化利用量逐年上升,2019年仅为81.9万吨,2023年增加至164.4万吨。与此同时,油菜秸秆饲料化利用量占其“五料化”(其他利用方向包括肥料化、燃料化、基料化、原料化)利用总量的比例也在逐年上升,2019年至2023年,从4.6%提高至7.5%(图1)。从绝对数量上看,油菜秸秆饲料化利用量还相对偏低,在比例上,占“五料化”利用总量的比例也较低,至2021年,油菜秸秆饲料化利用量才首次突破100万吨,利用量占比首次突破5%。但从发展趋势上来看,油菜秸秆饲料化利用呈现出良好的发展前景,2019至2023年利用量翻番,且在“五料化”中的占比增加了近3个百分点,说明油菜秸秆的饲料化利用价值在被逐渐发掘,农户和企业主体的利用积极性在提高。

在空间分布上,我国油菜种植主要集中于长江中下游地区和西南地区。2023年,长江中下游区油菜秸秆可收集量1140.6万吨,西南区油菜秸秆可收集量918.1万吨,这两个区域的油菜秸秆可收集量占全国总量的82.3%,基于较大的油菜秸秆资源底数,两大区域2023年度油菜秸秆饲料化利用量分别为37.9万吨和57.4万吨,居全国六大片区的前两位,但与之相反的是较低的“五料化”利用占比,分别为3.7%和6.9%,仅高于华南地区的0.4%。而西北地区油菜秸秆饲料化利用占比居首位,达24.8%(图2),这主要是由于西北地区畜牧业发达,油菜秸秆经过加工后被广泛用作粗饲料,而长江中下游和西南地区农作物复种指数高,稻油轮作茬口紧,油菜秸秆收集离田难度大,农户更倾向于选择就地直接粉碎还田。

3 国内外油菜秸秆饲用品质改良技术进展

油菜秸秆表皮外壁角质化程度高,其木质素及纤维素半纤维素含量较高,且纤维素与木质素之间镶嵌有坚固的酯键结构,导致其质地较为坚硬,直接饲用适口性差[13]。另外,油菜秸秆还含有抗营养因子,具有一定的毒性,直接采食会使动物甲状腺等器官肿大,进而影响其生长代谢[9,16]。因此在生产上需要对油菜秸秆进行一定的加工调制处理以改良饲用品质。目前,油菜秸秆饲用品质改良技术主要分为物理、化学、生物及混合处理几种方式。

3.1 物理加工技术

油菜秸秆的物理加工方式包括切短、粉碎、揉丝、压块与制粒等,但这些加工方式难以去除油菜秸秆中的抗营养因子,对适口性的改善效果有限,直接饲喂仍然有损害家畜健康的风险。近年来,蒸汽爆破逐渐发展成秸秆型粗饲料重要的物理加工方式,在油菜秸秆的饲料化及后续深加工上应用广泛。蒸汽爆破是利用汽爆设备输入高压蒸汽,使设备内部及物料达到一定的温度及压力,高压蒸汽渗入原料纤维内部,保持压力一定时间后瞬间释放,产生的空化力可以破坏生物质细胞壁结构,从而使细胞壁纤维发生机械断裂、结晶度下降,木质化程度降低,进而提高细胞壁结构的消化吸收率和原料

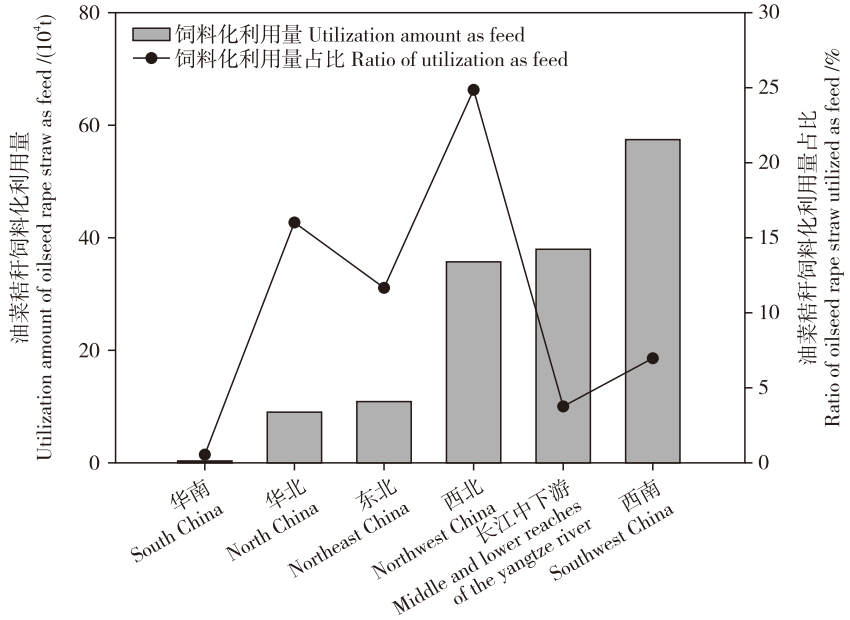


图2 不同区域油菜秸秆饲料化利用量及利用比例

Fig. 2 The amount and proportion of oilseed rape straw utilized as feed in different regions

的饲用价值[17,18]。张春艳等[19]研究表明,油菜秸秆经蒸汽爆破后,表面结构会发生明显变化,出现明显的裂片、孔洞,结构松散,比表面积增大。张琳琳等[20]利用响应面法优化出油菜秸秆汽爆的工艺条件,并表明处理后的油菜秸秆饲用品质较处理前明显提高。相关研究表明,膨化处理油菜秸秆可改善其在肉羊上的饲用价值[21,22]。

3.2 化学加工技术

秸秆的化学加工主要包括利用浓酸、强碱、有机溶剂处理等。考虑到饲喂畜禽安全性及环境友好等因素,现阶段处理油菜秸秆应用较多的化学方法为氨化。氨化是指在密闭条件下,利用液氨、氨水、尿素溶液、碳酸氢铵溶液等对秸秆进行氨解反应,通过破坏木质纤维素结构中的酯键,使木质素和纤维素分离,秸秆质地变软,体积膨胀,增加原料的粗蛋白含量,从而提高反刍动物的瘤胃发酵效率和饲用价值[23]。周娟娟等[24]研究表明,添加4%尿素进行油菜秸秆氨化处理,可改善油菜秸秆的饲用品质。有研究表明,氨化油菜秸秆替代30%粗饲料能提高威宁黄牛日增重,降低料重比,经济效益增加[25]。氨化后的油菜秸秆粗蛋白含量3.5个百分点以上,中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量降低,干物质、蛋白等营养物质的瘤胃降解率提高[26]。张建丽等[27]分别利用15%碳酸氢铵和5%尿素氨化油菜秸秆,结果表明,二者均能显著提高油菜秸秆的粗蛋白含量,降低粗纤维、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量,并大幅度提高油菜秸秆体外消化营养物质降解率。但在实际生产中,因为尿素便宜易得,养殖户认知度较高,所以尿素氨化法在我国养殖行业中应用更为广泛。

3.3 生物加工技术

生物加工处理是指通过微生物的生长代谢活动对秸秆中的木质素、纤维素等进行降解,从而改善秸秆的适口性和营养价值,常见的生物处理技术包括青贮、黄贮、酶解发酵等。

青贮是利用乳酸菌的厌氧发酵及其产生的酸性环境,实现品质改善及长期保存的加工方式[19]。油菜秸秆因可溶性碳水化合物等微生物可快速利用的营养成分含量较低,难以直接青贮,现多采用混合青贮的方式来提升其饲用品质[28,29]。已有研究表明,利用油菜秸秆与苜蓿混合青贮后,青贮料pH值会显著降低,油菜秸秆表面结构破坏明显,提高中性洗涤纤维瘤胃体外发酵降解率,且能够增加呼伦贝尔羊的采食量[30]。除混合青贮外,还可通过添加青贮添加剂的方式获得优质的青贮料,常用的青贮添加剂有乳酸菌、纤维素酶等酶制剂以及能快速提供碳源、氮源的糖蜜、尿素等营养性添加剂[31,32]。Chen等[33]研究表明,在油菜与苜蓿混合青贮(3:7)中添加3%糖蜜和0.3%尿素,在油菜与穗花狐尾藻混合青贮(7:3)中添加3%糖蜜,都能够有效改善混合青贮饲料的营养和发酵品质。何立超等[34]研究表明,向紫花苜蓿与油菜秸秆混合青贮料中添加同型发酵乳酸菌均可改善混合青贮料营养品质、青贮品质和感官品质,且以植物乳杆菌的青贮效果最好。Pu等[35]研究表明,油菜秸秆和全株玉米添加乳酸菌、纤维素酶、糖蜜等添加剂后混合青贮,油菜秸秆的纤维结构被破坏,非结构性碳水化合物含量增加,将瘤胃发酵途径从乙酸生成转向丙酸或丁酸生成,降低甲烷产气强度。

黄贮与青贮类似,不同点在于原材料的选择,黄贮多选用收获籽粒后的秸秆作为发酵原料,此时秸秆基本都发干变黄。与青贮饲料相比,黄贮饲料的品质稍差,但是对于油菜秸秆而言,因其成熟收获籽粒时基本已经半黄,所以在实践中一般多采用黄贮处理[9]。

生物发酵是利用微生物的代谢活动,将秸秆中的有机物质分解转化为稳定产物的过程。油菜秸秆发酵的核心目标是降解纤维素、半纤维素和木质素,打破其复杂的细胞壁结构,释放可溶性糖和有机酸,从而提高其饲用价值[36-38]。周闯[39]优化出油菜秸秆的最佳发酵条件,并表明发酵能显著提高油菜秸秆粗蛋白、粗脂肪含量,并降低中性和酸性洗涤纤维含量。白腐真菌是目前已知最有效的木质素降解菌,其通过酶促机制改变木质纤维素结构从而提升饲料的营养价值,在油菜秸秆生物发酵方面有较多探索研究[40]。Zhao等[41]研究了4种白腐真菌发酵降解油菜秸秆对其化学成分及体外瘤胃发酵特性的影响,结果表明,香菇和黄孢原毛平革菌对油菜秸秆的木质素降解能力较强,发酵30天,可降解约45%木质素,可增加中性洗涤纤维的瘤胃可降解组分并改善瘤胃发酵,但同时也损失了约55%的纤维素,造成了原料的大量损失。因此,白腐真菌在油菜秸秆饲用品质改良上的应用还需进一步探索。

3.4 联合加工处理技术

基于油菜秸秆的复杂结构,生产上常采用物理、化学及生物多种加工方式联合处理。Škapa等[42]利用蒸汽爆破预处理油菜秸秆,再进一步使用包括

内切葡聚糖酶、木聚糖酶等的复合酶制剂进行分步水解,从而有效将油菜秸秆木质纤维素分解为易消化的有机物,通过该方法处理的油菜秸秆相对饲料价值达到苜蓿干草水平。杨代毅等[43]研究表明,分别利用膨化和微生物处理油菜秸秆,均能降低其中性和酸性洗涤纤维含量,提高粗蛋白含量,降低抗营养因子硫代葡萄糖苷含量;而先将油菜秸秆膨化后再进行微生物发酵,能进一步改善各项指标,明显提升油菜秸秆饲用价值。

4 油菜秸秆饲料化利用存在的主要问题

4.1 油菜秸秆资源空间配置失衡

在供应端,油菜秸秆资源主要集中于长江中下游和西南地区,这些地区多采取稻油轮作或稻稻油轮作等一年两熟及三熟种植模式,复种指数高,茬口紧,油菜收获后需要尽快整地准备下茬水稻的种植。为节约农时,农户往往采取就地直接还田的方式处理油菜秸秆,且云贵川油菜产区多山地丘陵,土地碎片化程度高,加之雨热同季、气候潮湿,油菜秸秆收储运较为困难。另外,长江中下游和西南片区牛羊等草食动物养殖业并不发达,对油菜秸秆粗饲料的消耗能力有限。在需求端,我国草食畜牧业发达地区主要集中在内蒙古、宁夏、新疆、西藏、青海、甘肃等地,据测算,2022年,长城沿线内蒙古高原半干旱温凉作物一熟区因草场退化等原因,全年秸秆饲喂需求量在5600万吨,但主要作物秸秆饲料化利用量仅为3600万吨,尚存2000万吨的差距。可以说,在西北牧区开发油菜秸秆饲料化利用具有较大潜力,但秸秆资源量不足。总体来看,我国油菜秸秆主产区和饲料化利用消纳区存在空间上的严重错位。

4.2 饲料化加工处理成本较高

目前阶段,精细化的油菜秸秆饲用品质改良技术,如汽爆、氨化、碱化、酶解发酵等,对专业机械设备依赖度高,成本较高,还存在环境污染风险,推广应用难度较大[44]。如笔者研究团队开展的相关加工试制试验表明,油菜秸秆汽爆加工成本大约为每吨300元,再加上设备购置、维护等费用,使得油菜秸秆饲料化加工处理成本居高不下。

4.3 相关技术标准规范较为缺乏

当前,油菜秸秆饲料化利用在收储、加工、饲喂等环节相关的技术标准规范相对缺乏,可能影响油菜秸秆饲料产品的质量控制和饲喂安全性,如未经标准化处理的油菜秸秆粗纤维含量高,消化率低易导致营养不良,硫代葡萄糖苷等抗营养因子去除不彻底、贮藏不当导致黄曲霉毒素超标等也易引发家畜中毒,这些潜在的风险可能间接导致相关产品市场接受度不高。另外,相关标准规范的缺乏还会影响技术推广,导致油菜秸秆饲料产业化发展受限。

5 油菜秸秆饲料化利用发展建议

加大政策扶持与信息交流。针对长江中下游及西南等油菜秸秆资源较丰富的区域,建议在用好现有中央及地方财政秸秆综合利用资金的基础上,加大秸秆收储加工用地用电、秸秆运输“绿色通道”、企业税费优惠、金融信贷支持等政策的支持力度,提升企业主体利用油菜秸秆的积极性。相关部门要积极搭建秸秆产业化发展信息交流平台,鼓励油菜秸秆资源供应端和需求端区县积极对接,推进油菜秸秆资源在空间上合理转运调配。针对油菜秸秆饲料化利用水平较高的区域,如河西走廊等地区,打造油菜秸秆饲料化利用示范区县,充分发挥引领带动作用。

加强技术突破降低处理成本。推动建设油菜秸秆饲料化利用高效处理体系,并降低处理成本。优化粉碎、揉丝、膨化、汽爆、青(黄)贮、菌酶复合处理等技术工艺,充分发挥物—化—菌—酶联合处理技术优势,有效去除芥酸及硫代葡萄糖苷等抗营养因子,提升油菜秸秆饲料的适口性、采食率、有效能值和吸收转化效率;探索推行油菜秸秆与其他饲料原料科学配方,提升饲喂效果。如笔者研究团队在甘肃省部分区域调研时发现,已经有部分企业主体探索将酒糟渣、土豆渣与油菜秸秆等按比例混合进行协同发酵处理,实现优质混合型黄贮饲料产业化发展。

加快构建相关标准体系。针对油菜秸秆饲料化利用标准化程度低、存在安全风险等问题,加快构建油菜秸秆饲料生产与利用相关标准体系。推动高校及科研院所相关专家团队制定涵盖原料收储、加工工艺、产品质量、储存运输及精准饲喂等全链条各环节的标准规范,提升油菜秸秆饲料质量安全水平,为油菜秸秆饲料化利用产业发展打下基础。

参考文献:

[1] 孙展英, 高健, 郭孟娇, 等. 生物发酵农作物秸秆及其在反刍动物饲料中的应用[J]. 饲料工业, 2024, 45(1): 10-16, 33. DOI:10.13302/j.cnki.fi.2024.01.002.

[2] 刘婷婷, 赵慧秋, 赵博伟, 等. 河北地区农作物秸秆营

养价值评定与饲料化利用的研究[J]. 饲料研究, 2025, 48(1): 170-174. DOI: 10.13557/j. cnki. issn1002-2813.2025.01.029.

[3] 马帅. 浅析玉米秸秆发酵饲料的优缺点和发展前景[J]. 品牌与标准化, 2025(1): 191-193. DOI:10.3969/j.issn.1674-4977.2025.01.060.

[4] 孙仁华, 胡潇方, 李晓阳, 等. 基于需求导向的秸秆饲料化利用潜力分析与讨论[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(12): 85-93. DOI:10.7621/cjarrp.1005-9121.20241208.

[5] 孙元丰, 李晓阳, 胡潇方, 等. 我国油菜秸秆资源情况、利用现状及发展建议[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(1): 1-8. DOI:10.19802/j.issn.1007-9084.2023266.

[6] 龚剑明. 白腐菌提高油菜秸秆饲用价值的研究及其漆酶基因的异源表达[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.

[7] 张玉雯, 匡崇义, 黄必志, 等. 油菜的饲用价值和利用展望[J]. 草学, 2019(2): 7-11. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3971.2019.02.002.

[8] Petersson A, Thomsen M H, Hauggaard-Nielsen H, et al. Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean[J]. Biomass Bioenergy, 2007, 31(11/12): 812-819. DOI:10.1016/j.biombioe.2007.06.001.

[9] 王亦闻, 伍玉鹏, 王砚, 等. 油菜秸秆饲料化潜力及展望[J]. 农学学报, 2020, 10(5): 77-83.

[10] 瞿明仁. 南方经济作物副产物生产、饲料化利用之现状与问题[J]. 饲料工业, 2013, 34(23): 1-6.

[11] 黎力之, 潘珂, 袁安, 等. 几种油菜秸秆营养成分的测定[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2014(5): 28-29. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2342.2014.05.012.

[12] 乌兰, 马伟杰, 义如格勒图, 等. 油菜秸秆饲用价值分析及其开发利用[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(S1): 421-422. DOI: 10.16003/j. cnki. issn1672-5190.2010.z1.123.

[13] 李浪, 张晋源, 涂瑞, 等. 发酵油菜秸秆对育肥肉牛生产性能及养分消化率的影响[J]. 四川畜牧兽医, 2017, 44(9): 22-24.

[14] 王洪超, 刘大森, 刘春龙, 等. 饲料油菜及其饲用价值研究进展[J]. 土壤与作物, 2016, 5(1): 60-64. DOI:10.11689/j.issn.2095-2961.2016.01.009.

[15] 马永霞. 酶-菌制剂对厌氧发酵油菜秸秆饲用价值影响的研究[D]. 成都: 西南民族大学, 2023. DOI: 10.27417/d.cnki.gxnmc.2023.000326.

[16] López-Linares J C, Ballesteros I, Tourán J, et al. Optimization of uncatalyzed steam explosion pretreatment of rapeseed straw for biofuel production[J]. Bioresour Technol, 2015, 190: 97-105. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.066.

[17] 孟春花, 张建丽, 钱勇, 等. 油菜秸秆饲料化利用的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(16): 26-31. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.16.005.

[18] Jacquet N, Maniet G, Vanderghem C, et al. Application of steam explosion as pretreatment on lignocellulosic material: a review[J]. Ind Eng Chem Res, 2015, 54(10): 2593-2598. DOI:10.1021/ie503151g.

[19] 张春艳, 谭兴和, 熊兴耀, 等. 蒸汽爆破对油菜秸秆降解产物的影响[J]. 激光生物学报, 2017, 26(1): 78-84. DOI:10.3969/j.issn.1007-7146.2017.01.012.

[20] 张琳琳, 夏洪泽, 崔占鸿, 等. 响应面法优化油菜秸秆蒸汽爆破的工艺条件[J]. 饲料研究, 2020, 43(10): 78-83. DOI: 10.13557/j. cnki. issn1002-2813.2020.10.020.

[21] Yuan H R, Zhang Y T, Li X J, et al. Effects of ammoniation pretreatment at low moisture content on anaerobic digestion performance of rice straw[J]. BioResources, 2014, 9(4): 6707-6718. DOI: 10.15376/biores.9.4.6707-6718

[22] 杨代毅. 膨化处理对油菜秸秆营养价值的影响及在肉羊生产中的应用[D]. 太谷: 山西农业大学, 2024. DOI:10.27285/d.cnki.gsxnu.2024.001104.

[23] Yang D Y, Sun T Y, Zheng Y J, et al. Effect of replacing peanut vine with extruded rape straw on growth, nutrient digestibility, energy metabolism, microbial crude protein synthesis, meat amino acid and fatty acid profiles of finishing lambs[J]. Transl Anim Sci, 2025, 9: txaf044. DOI:10.1093/tas/txaf044.

[24] 周娟娟, 吴丹, 刘洋, 等. 微贮和氨化处理对西藏主要农作物秸秆饲用品质的影响[J]. 中国饲料, 2023(8): 126-129. DOI: 10.15906/j. cnki. cn11-2975/s.20230831.

[25] 吴道义, 金深逊, 周礼杨, 等. 氨化油菜秸秆对威宁黄牛饲养效果的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2015(2): 26-27. DOI:10.13881/j.cnki.hljxmsy.2015.0090.

[26] 孟春花, 乔永浩, 钱勇, 等. 氨化对油菜秸秆营养成分及山羊瘤胃降解特性的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(6): 1796-1803. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-267x.2016.06.022.

[27] 张建丽, 孟春花, 桂红兵, 等. 不同铵源氨化油菜秸秆营养品质及湖羊瘤胃降解率的比较[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 182-186. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2022.19.027.

[28] 张燕芳. 浅谈油菜秸秆饲料化利用的研究进展[J]. 中国畜牧业, 2023(17): 46-47.

[29] 刘战霞, 李斌斌, 郭慧静, 等. 益生菌发酵油菜秸秆饲料工艺优化及品质分析[J]. 现代畜牧科技, 2023(5): 5-10. DOI:10.19369/j.cnki.2095-9737.2023.05.002.

[30] Liu Q H, Li X Y, Desta S T, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* and fibrolytic enzyme on the fermentation

quality and *in vitro* digestibility of total mixed rations silage including rape straw[J]. J Integr Agric, 2016, 15(9): 2087-2096. DOI: 10.1016/S2095-3119(15)61233-3.

[31] Guo X S, Xu D M, Li F H, et al. Current approaches on the roles of lactic acid bacteria in crop silage[J]. Microb Biotechnol, 2023, 16(1): 67-87. DOI: 10.1111/1751-7915.14184.

[32] 张敏. 混合青贮提升油菜秸秆纤维降解的机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023. DOI: 10.27034/d.cnki.ggxiu.2023.001501.

[33] Chen S W, Wan C, Ma Y J, et al. Study on the quality of mixed silage of rapeseed with alfalfa or *Myriophyllum*[J]. Int J Environ Res Public Health, 2023, 20(5): 3884. DOI: 10.3390/ijerph20053884.

[34] 何立超, 唐佳新, 卢娜, 等. 添加剂对紫花苜蓿和油菜秸秆混合青贮品质及维生素含量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(1): 234-242. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2023231.

[35] Pu X X, Zhang X M, Yi S Y, et al. Mixed ensiling plus nitrate destroy fiber structure of rape straw, increase degradation, and reduce methanogenesis through *in vitro* ruminal fermentation[J]. J Sci Food Agric, 2024, 104(6): 3428-3436. DOI: 10.1002/jsfa.13228.

[36] 伍玉鹏, 刘恒恒, 胡荣桂, 等. 不同预处理方式对油菜秸秆微贮饲料品质的影响[J]. 中国饲料, 2022(19): 134-139. DOI: 10.15906/j. cnki. cn11-2975/s.20221922.

[37] 王森林. 微生物发酵油菜秸秆对肉牛生长性能、营养物质表观消化率及血液生化指标的影响[J]. 饲料研究, 2021, 44(6): 17-20. DOI: 10.13557/j. cnki. issn1002-2813.2021.06.004.

[38] 肖海翔, 刘文昌, 李付强, 等. 油菜副产品的营养特征、脱毒技术及其在反刍动物上的应用研究进展[J]. 中国饲料, 2025(17): 155-160. DOI: 10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.2024080005-08.

[39] 周闯. 油菜秸秆发酵条件优化及对山羊生长性能、瘤胃发酵的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019. DOI: 10.27244/d.cnki.gnjnu.2019.001675.

[40] Tripathi M K, Mishra A S, Misra A K, et al. Selection of white-rot basidiomycetes for bioconversion of mustard (*Brassica* compestris) straw under solid-state fermentation into energy substrate for rumen micro-organism[J]. Lett Appl Microbiol, 2008, 46(3): 364-370. DOI: 10.1111/j.1472-765X.2008.02320.x.

[41] Zhao X H, Gong J M, Zhou S, et al. Effect of fungal treatments of rape straw on chemical composition and *in vitro* rumen fermentation characteristics[J]. BioResources, 2014, 10(1): 622-637. DOI: 10.15376/biores.10.1.622-637

[42] Škapa S, Vochozka M. Waste energy recovery improves price competitiveness of artificial forage from rapeseed straw[J]. Clean Technol Environ Policy, 2019, 21(5): 1165-1171. DOI: 10.1007/s10098-019-01697-x.

[43] 杨代毅, 樊杨, 屠焰, 等. 不同处理对油菜秸秆养分、纤维结构和硫苷含量的影响[J]. 生物技术通报, 2024, 40(6): 172-179. DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2024-0077.

[44] 张晓强. 西藏油菜秸秆饲料化利用现状及展望[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(24): 20-22, 47.

(责任编辑:胡志勇)