

植物源饲料添加剂调节反刍动物瘤胃发酵、 减少温室气体排放研究进展

刘秋瑾^{1,2}, 白长胜^{1,2}, 尹琚伊^{1,2}, 田秋丰^{1,2}, 王欢^{1,2},
张军^{1,2}, 王岩^{1,2}, 曹禹¹, 苗艳¹, 薛沾枚¹, 金振华¹, 王丽坤¹

(1. 黑龙江省农业科学院畜牧兽医分院, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 2. 黑龙江省饲用中草药发酵工程技术研究中心, 黑龙江 齐齐哈尔 161005)

摘要: 植物源饲料添加剂富含单宁、皂苷、生物碱和精油等次生代谢产物, 对调节反刍动物瘤胃发酵具有积极作用。这类添加剂不仅能有效减少反刍动物的氮排泄和甲烷排放, 还能抑制土壤中微生物呼吸和硝化作用, 从而减少氧化亚氮的排放。除对环境的影响外, 植物生物添加剂还可以改善瘤胃发酵效率。通过系统梳理植物源饲料添加剂在瘤胃发酵过程中的作用及分解代谢机制, 以及对瘤胃发酵过程的影响、减轻反刍动物对环境的影响, 旨在为植物源饲料添加剂在反刍动物中的应用提供参考。

关键词: 植物源饲料添加剂; 反刍动物; 瘤胃发酵; 温室气体

中图分类号: S816.7

文献标识码: C

Research Progress on Phytobiotic Additives Regulating Rumen Fermentation and Reducing Greenhouse Gas Emissions In Ruminants

LIU Qiuji^{1,2}, BAI Changsheng^{1,2}, YIN Junyi^{1,2}, TIAN Qiufeng^{1,2}, WANG Huan^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2},
WANG Yan^{1,2}, CAO Yu¹, MIAO Yan¹, XUE Zhanmei¹, JIN Zhenhua¹, WANG Likun¹

(1. Branch of Animal Husbandry and Veterinary of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar Heilongjiang 161005, China; 2. Heilongjiang Engineering Technology Research Center of Fermented with Chinese Herbs for Feed, Qiqihar Heilongjiang 161005, China)

Abstract: Phytobiotic additives are rich in secondary metabolites such as tannins, saponins, alkaloids, and essential oils, which exert positive effects on regulating rumen fermentation in ruminants. These additives can effectively reduce nitrogen excretion and methane emissions in ruminants, and also inhibit microbial respiration and nitrification in soil, thereby reducing nitrous oxide emissions. In addition to their environmental benefits, phytobiotic additives can also improve rumen fermentation. This paper reviews the roles and catabolic mechanisms of phytobiotic additives in the rumen fermentation process, their effects on rumen fermentation, and their role in reducing the environmental impact of ruminants, to provide a reference for the application of phytobiotic additives in ruminants.

Key words: phytobiotic additives; ruminants; rumen fermentation; greenhouse gases

二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)及含硫气体在大气中持续累积,是导致全球变暖的重要因素。据统计,全球约 14.5%的温

室气体来源于畜牧业,畜牧业中约有 90%以上 CH₄ 和 40%的农业温室气体由肠道发酵过程产生^[1]。目前,通过调控瘤胃发酵可在一定程度上

收稿日期: 2024-09-25

基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZ-KYF2023-1-C005)。

作者简介: 刘秋瑾(1994—),女,助理研究员,主要从事微生态产品制备工作, E-mail: liuqiuji321@163.com。

通信作者: 白长胜(1985—),男,助理研究员,主要从事功能性菌种选育及微生态产品研制工作, E-mail: ningnanren@163.com。

减少温室气体排放,提升饲料利用率和动物生产性能,但仅依赖粗饲料难以有效提高瘤胃发酵效率,需借助饲料添加剂调节瘤胃微生物组成与活性,从而优化瘤胃功能^[2]。植物源饲料添加剂具有抗氧化、驱虫、抗炎和抗菌等多种生物活性,还能促进肠道有益菌的增殖与生长^[3]。鉴于此,本文综述了植物源饲料添加剂对反刍动物瘤胃发酵及温室气体排放的影响,旨在为植物源饲料添加剂在反刍动物中的应用提供参考。

1 植物源饲料添加剂调控反刍动物瘤胃发酵机制

反刍动物瘤胃中栖息着多种微生物,它们能将宿主摄取的植物物质分解成生物量与发酵终产物,供宿主吸收利用^[4]。植物源饲料添加可通过调节瘤胃中特定菌群的数量,提高能量和蛋白质利用率。这类添加剂在瘤胃中可发挥类似于抗生素的作用,对革兰氏阳性菌与革兰氏阴性菌均具有很强的广谱抗菌作用^[5]。研究表明,植物源饲料添加剂的抗菌活性与植物营养素的疏水性有关,能够影响微生物细胞表面的电子传递、离子梯度、蛋白质转运及酶依赖反应,导致细菌形态变化,并减少营养物质向细胞内的运输,从而阻碍细菌生长^[6]。

植物源饲料添加剂对瘤胃微生物活性的影响,主要取决于植物中化合物的剂量、类型和化学性质。此外,植物源化合物的分子量也与瘤胃微生物相关,如低分子量的单宁对瘤胃微生物的抑制作用更强^[7]。在缩合单宁(Condensed Tannins, CT)等植物源化合物中,原花青素/原飞燕草素(Proanthocyanidins/Prodelphinidins, PC/PD)的比值、聚合度和顺反异构比是影响其生物活性的重要因素^[8]。如在红豆草中,PC/PD的比值、聚合度和顺反异构比影响CT的生物活性,并与氮溶解度呈负相关^[9]。

植物源化合物中的酚类物质具有抗氧化功能,其中一部分可直接通过瘤胃壁吸收,进入宿主体内循环,另一部分则在瘤胃内被微生物分解代谢。例如,香豆酸、阿魏酸和咖啡酸等羟基肉桂酸在瘤胃液体外培养12 h后即出现下降,在培养72 h后降幅可超过70%^[10]。原因在于瘤胃微生物通过还原、去甲基化、二羟基化或脱羧等

代谢途径,将羟基肉桂酸降解为多种天然产物,这些天然产物是环境友好型的可再生能源^[11]。

黄酮类化合物(如槲皮素、山奈酚、芦丁、柚皮苷)在瘤胃液体外培养过程中,可被瘤胃微生物通过羟基环部分水解为乙酸、丁酸、3,4-二羟基苯乙酸、间苯三酚和4-甲基儿茶酚,可被小肠吸收^[12]。此外,瘤胃中的微生物(如反刍月形单胞菌和链球菌属)可分泌酯酶和单宁酰基水解酶,分解水解单宁(Hydrolyzable Tannins, HT),生成没食子酸和鞣花酸^[13]。在肉牛体内,没食子酸在瘤胃中脱羧生成邻苯三酚,邻苯三酚转化为间苯二酚,并作为尿液代谢物,对降低尿液中 N_2O-N 排放具有抑制作用^[14]。

CT可促进饲草蛋白质在瘤胃中的分解,有助于防止瘤胃膨胀,减轻肠道寄生虫负担,并减少反刍动物的 CH_4 和氨气(NH_3)排放^[15]。在饲料中适当添加CT有利于提高蛋白质利用率,减少其在瘤胃内的降解损失。但应严格控制CT的添加量,确保其在动物食用的安全范围内,避免潜在的毒性影响。目前,CT在瘤胃液中的降解情况尚不清楚。Rira等^[16]研究了热带植物中游离型与结合型CT的体外降解情况,结果表明,游离型CT在培养24 h后完全降解,而与蛋白质结合的CT降解速率为21%~93%。相反,与纤维素结合的CT降解率平均为82%。未来仍需进一步开展研究,以明确瘤胃微生物对CT的降解机制。

2 植物源饲料添加剂对瘤胃发酵的影响

2.1 植物源饲料添加剂对瘤胃pH的影响

瘤胃内pH值受营养因素(如日粮组成、饲喂频率、采食量和唾液分泌)与环境因素(如热应激)等多种因素的影响^[17]。维持适宜的瘤胃pH值对保障瘤胃环境健康、维持最佳微生物活性及反刍动物正常生理功能至关重要。多项研究表明,植物源饲料添加剂在调节瘤胃pH、改善瘤胃发酵方面具有显著效果。例如,植物源生物碱^[18]、 β -谷甾醇^[19]、单宁酸^[8]及酚类植物提取物^[20]等可通过抑制乳酸产生菌生长、促进乳酸利用菌增值,从而提高瘤胃pH、降低乳酸浓度并减少脂多糖积累。此外,植物化合物如精油,因其

气味特性可刺激反刍动物唾液分泌,改善唾液及其蛋白质组的理化组成,进而调节瘤胃功能、宿主代谢与免疫反应^[21]。Ricci等^[22]关于植物精油对唾液影响的研究表明,大蒜精油与生姜精油可增加唾液磷酸盐浓度,而百里香精油则能提高唾液渗透压。

2.2 植物源饲料添加剂对瘤胃挥发性脂肪酸的影响

在植物原料微生物发酵过程中,瘤胃挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acids, VFAs)是大部分反刍动物的主要能量来源。植物源添加剂对VFAs生成量的影响不尽相同,研究结果涵盖无显著变化^[23-24]、含量增加^[25-26]以及生产受到抑制的VFAs^[27]等多种情况。大量研究表明,植物提取物及其活性成分与莫能菌素类似,均能改变VFAs的摩尔比例,具体表现为乙酸减少、丙酸增加^[23,28-29]。植物源添加剂导致丙酸比例增加的原因可能是改变了瘤胃细菌群落结构,如大蒜提取物、柑橘提取物^[23]及青贮葡萄皮渣^[30]可提高琥珀酸弧菌科的丰度。该菌群通过与氢营养型产甲烷菌竞争底物,并经由琥珀酸途径促进丙酸生成,从而提高饲料效率、降低CH₄排放和提升丙酸浓度。另外,研究发现,姜黄素^[25]、沙葱精油^[26]、柑橘黄酮提取物^[31]等植物源添加剂提高了瘤胃乙酸浓度,这与瘤胃中纤维分解菌及其相关酶活性增强密切相关^[26]。

2.3 植物源饲料添加剂对瘤胃氨浓度和微生物蛋白合成的影响

瘤胃是反刍动物生产氨基酸的主要器官,对维持其生产性能具有关键作用。植物源添加剂对瘤胃微生物蛋白合成有积极作用,如减少蛋白质降解为NH₃,从而增加十二指肠蛋白质的逸出量,提高微生物蛋白质合成的效率与细菌氮的逸出量^[32]。

具体而言,植物源添加剂可通过多种机制降低瘤胃中的NH₃浓度并促进微生物蛋白质合成。一方面,单宁可通过氢键与蛋白质形成复合物,并依赖其疏水性避免被瘤胃微生物酶解,从而保护蛋白质免于过度降解^[8];同时,单宁对蛋白水解菌也具有一定抑制作用。另一方面,次生代谢产物如皂苷和单宁可能具有抗原虫特性,通过降低细菌溶酶体活性或增加微生物蛋白质合成中

NH₃-N的利用,进而减少NH₃的生成^[8,25]。

3 植物源饲料添加剂减轻反刍动物对温室气体排放的影响

全球变暖是由于温室气体在大气中的累积造成的,特别是CO₂、CH₄、N₂O以及各类有机气体(如氢氟烃、全氟烃、六氟化硫和三氟化氮)等^[34]。地球表面吸收太阳光后发出的红外辐射是导致海洋和地表温度持续上升的原因,根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次综合评估报告,2011—2020年地球表面平均温度较1850—1900年的平均温度上升了1.1℃,与此同时,大气中温室气体浓度也持续攀升^[35]。

2007—2016年,全球约13%的CO₂、44%的CH₄和81%的N₂O排放归因于农业、林业和其他土地利用活动,占所有人为温室气体净排放的23%^[36]。其中,农作物生产与肠道发酵产生是农业温室气体的主要来源,分别占该行业总排放量的45%和39%,而粪便储存和加工畜产品运输分别占10%和6%^[37]。总体来看,畜牧业约占全球温室气体排放总量的14.5%^[38]。

反刍动物是甲烷排放的重要来源。根据Bačėninaite等^[39]报道,反刍家畜每年向大气中排放8000万~9500万tCH₄。CH₄主要由瘤胃中的产甲烷古菌利用H₂、甲酸、乙酸等基质转化生产,其排放不仅加剧温室效应,还会造成反刍动物能量的损失,降低饲料利用效率。

N₂O是一种强大的温室气体,其增温潜势是CO₂的265倍以上^[40]。在畜牧业生产中,70%~80%的日粮蛋白质会在反刍动物瘤胃中水解成NH₃。当瘤胃产生过多NH₃时,它会从瘤胃壁吸收氮,在肝脏中转化为尿素,然后由肾脏通过尿液排出体外,从而导致动物机体氮损失^[41]。

反刍动物肾脏排氮量不仅与日粮蛋白质平衡及能量供给密切相关,也受生长阶段、生产性能、代谢率等多种因素影响。高蛋白日粮会促进氮的排放^[42]。当尿素进入环境后,微生物脲酶会将其转化为NH₃,其中大部分转化为铵(NH₄⁺),剩余的NH₃则会迅速与大气中的硫酸、硝酸等酸性物质发生反应,生成硫酸铵、硫酸氢铵或硝酸铵。这些含氮物质不仅危害人类健康,也会导致

环境污染^[43]。

此外,排泄物和土壤中的 NH_4^+ 在微生物的作用下,通过硝化和脱氮等过程转化为 N_2O ,进一步加剧全球变暖^[41]。

3.1 植物源饲料添加剂对 CH_4 排放的影响

植物源饲料添加剂可作为氮化剂在瘤胃中发挥作用,直接抑制产甲烷菌和产氢微生物的数量,从而降低 CH_4 排放^[44]。以青贮形式的植物源添加剂(如葡萄皮渣)可降低甲烷短杆菌属和解琥珀酸菌的相对丰度^[30],这可能得益于植物源添加剂中的生物活性成分对产甲烷菌的抑制作用。

刘尚等^[45]的研究发现,紫丁香、黄花苜蓿和野豌豆的总皂苷、生物碱含量与体外瘤胃总产气量呈正相关,而与 CH_4 产量呈负相关,表明它们可作为优质的饲料添加剂,用于调控反刍家畜瘤胃的产气特征。除直接抑制产甲烷菌以减少 CH_4 生成外,植物源饲料添加剂还能通过抑制原虫、厌氧真菌和纤维素分解菌,减少 CH_4 合成所需的乙酸和丁酸的生成^[46],例如在苜蓿青贮中添加单宁酸即为此类作用机制^[47]。

此外,植物源饲料添加剂还能提升丙酸菌(如琥珀酸菌属)的相对丰度。丙酸菌可与产甲烷菌竞争利用瘤胃中的 H_2 ,从而进一步降低 CH_4 产量^[30]。

一些研究表明,某些植物源添加剂对 CH_4 生成具有特定的影响。这些添加剂包括多种生物活性成分,例如,类黄酮中的大蒜黄酮、苦橙黄酮、桑叶黄酮、光甘草定、柑橘类黄酮等;植物多酚类中的绿茶多酚、单宁、高酚泡桐叶、低酚泡桐叶等;糖苷中的丝兰皂苷、常春藤皂苷、热带水果皂苷等;植物精油中的牛至精油、生姜精油、百里香精油、广藿香精油等;多糖中的苦瓜多糖、菊粉等;生物碱中的草粉生物碱、黄豆生物碱、胡椒生物碱等;这些成分均被报道可在不同程度上降低反刍动物的 CH_4 产量^[3]。

此外,植物源添加剂对 CH_4 产量的影响存在差异,如日粮及饲草组成(牧草的种类、化学成分和成熟度),青贮过程中植物源添加剂的发酵质量,饲粮中植物源化合物的种类与浓度,试验动物种类^[48]。

3.2 植物源饲料添加剂对 N_2O 排放的影响

粪便中的氮主要以有机氮形式存在,不易挥

发,而尿液中的氮则主要为易降解的尿素,可在环境中经硝化和反硝化作用转化为 N_2O 。因此,减少尿氮排泄是降低反刍动物 N_2O 生成的重要途径^[49]。

植物源添加剂富含单宁、花青素、桃叶珊瑚苷、硫代葡萄糖苷等活性成分,能够有效减少氮排放,从而减少 N_2O 的释放^[50]。Gardiner 等^[51]的研究表明,将车前草叶提取物与桃叶珊瑚苷溶液用于反刍动物尿液斑块,可显著降低尿液中 N_2O 的排放量。Gao 等^[41]在牛日粮中添加 4 种不同含量(0、2.7%、5.4%和 8.0%DM)的高硫甘蓝籽饼,发现随着添加量增加,粪氮与尿氮比值上升,尿中尿囊素及总嘌呤衍生物排泄量呈线性增加,而尿素氮占尿氮的比例则有所下降。Ushona 等^[52]发现,在羔羊饲料中添加黑荆树叶粉至 100 g/kg DM 可增加粪氮,降低尿氮。

此外,源自水解单宁(HT)的单宁酸可提高马尿酸氮在尿氮中的比例,从而减少尿源 N_2O 的排放。马尿酸作为土壤硝化过程的抑制剂,能够直接抑制 N_2O 的形成。反刍动物消化道中的微生物酶将植物次生代谢产物水解为生物活性产物可有助于抑制尿液 N_2O 的排放。例如,饲喂高硫甘蓝籽饼肉牛,其血浆和尿液中硫苷代谢产物硫氰酸盐含量较高,该物质对土壤微生物呼吸及硝化过程具有抑制作用,进而减少 N_2O 的生成^[41]。

4 小结与展望

植物源饲料添加剂作为动物饲料中有效的抗生素替代品,在减少反刍动物氮排泄和 CH_4 排放方面表现出显著潜力。这类添加剂通常富含多种生物活性化合物,但在实际应用中需严格控制其用量。

适量添加低浓度的单宁、皂苷、生物碱、糖苷等成分,对反刍动物的健康具有积极促进作用,并能有效降低温室气体排放。然而,过量摄入这些活性物质可能对动物健康构成不利影响。此外,植物源饲料添加剂在生产或储存过程中受到污染,其使用不仅会损害动物健康,还可能间接影响动物产品的安全性。

因此,在推广与应用植物源饲料添加剂时,应基于科学证据,并严格遵循既定的推荐剂量标

准,以确保其应用效果最大化及潜在风险最小化。总之,合理使用植物源饲料添加剂,不仅有助于提升畜牧业的可持续性,也为实现环境保护与温室气体减排目标提供可行路径。

参考文献:

- [1] TUBIELLO F N, SALVATORE M, ROSSI S, et al. The FAOSTAT Database of Greenhouse Gas Emissions from Agriculture [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1): 015009.
- [2] 耿阳, 张博, 卢宇来, 等. 植物提取物调控反刍动物甲烷排放的研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2024, 60(7): 13-17.
- [3] 肖莉, 刘子豪, 南雪梅, 等. 植物提取物抑制反刍动物瘤胃甲烷排放研究进展[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(5): 2752-2760.
- [4] OWENS F N, BASALAN M. *Ruminal Fermentation* [M]// *Rumenology*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 63-102.
- [5] DIAS P C G Jr, DOS SANTOS I J, DA SILVA A L A, et al. Essential Oil from Arnica Montana on Feedlot Performance, Ingestive Behavior, Carcass Characteristics, Rumen Morphometrics Characteristics and Meat Fatty Acids Profile of Lambs[J]. *Small Ruminant Research*, 2023, 220: 106920.
- [6] SMITH A H, ZOETENDAL E, MACKIE R I. Bacterial Mechanisms to Overcome Inhibitory Effects of Dietary Tannins[J]. *Microbial Ecology*, 2005, 50(2): 197-205.
- [7] PATRA A K, SAXENA J. Exploitation of Dietary Tannins to Improve Rumen Metabolism and Ruminant Nutrition[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(1): 24-37.
- [8] 张家轩, 葛振影, 刘汝杰, 等. 单宁种类和剂量效应在反刍动物生产中的应用[J]. *草地学报*, 2024, 32(8): 2337-2345.
- [9] LAGRANGE S P, MACADAM J W, VILLALBA J J, et al. The Use of Temperate Tannin Containing Forage Legumes to Improve Sustainability in Forage - Livestock Production[J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2264.
- [10] KIM D, KUPPUSAMY P, JUNG J S, et al. Microbial Dynamics and in Vitro Degradation of Plant Secondary Metabolites in Hanwoo Steer Rumen Fluids [J]. *Animals*, 2021, 11(8): 2350.
- [11] WANG Y L, WANG W K, WU Q C, et al. The Release and Catabolism of Ferulic Acid in Plant Cell Wall by Rumen Microbes: a Review[J]. *Animal Nutrition*, 2022, 9: 335-344.
- [12] BERGER L M, BLANK R, ZORN F, et al. Ruminal Degradation of Quercetin and Its Influence on Fermentation in Ruminants[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(8): 5688-5698.
- [13] GOEL G, PUNIYA A K, SINGH K. Tannic Acid Resistance in Ruminal Streptococcal Isolates[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2005, 45(3): 243-245.
- [14] ZHOU K, BAO Y, ZHAO G Y. Effects of Dietary Crude Protein and Tannic Acid on Nitrogen Excretion, Urinary Nitrogenous Composition and Urine Nitrous Oxide Emissions in Beef Cattle[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2019, 103(6): 1675-1683.
- [15] ZELLER W E. Activity, Purification, and Analysis of Condensed Tannins: Current State of Affairs and Future Endeavors [J]. *Crop Science*, 2019, 59(3): 886-904.
- [16] RIRA M, MORGAVI D P, POPOVA M, et al. Microbial Colonisation of Tannin-Rich Tropical Plants: Interplay between Degradability, Methane Production and Tannin Disappearance in the Rumen[J]. *animal*, 2022, 16(8): 100589.
- [17] CORREIA SALES G F, CARVALHO B F, SCHWAN R F, et al. Heat Stress Influence the Microbiota and Organic Acids Concentration in Beef Cattle Rumen[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2021, 97: 102897.
- [18] MICKDAM E, KHIAOSA-ARD R, METZLER-ZEBELI B U, et al. Rumen Microbial Abundance and Fermentation Profile during Severe Subacute Ruminal Acidosis and Its Modulation by Plant Derived Alkaloids in Vitro[J]. *Anaerobe*, 2016, 39: 4-13.
- [19] 孙劼. β -谷甾醇对亚急性瘤胃酸中毒羊瘤胃微生物区系和免疫性能的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [20] AHMED M G, AL-SAGHEER A A, EL-ZARKOUNY S Z, et al. Potential of Selected Plant Extracts to Control Severe Subacute Ruminal Acidosis in Vitro as Compared with Monensin [J]. *BMC Veterinary Research*, 2022, 18(1): 356.
- [21] CASTILLO-LOPEZ E, PACÍFICO C, SENER-AYDEMIR A, et al. Diet and Phytogetic Supplementation Substantially Modulate the Salivary Proteome in Dairy Cows[J]. *Journal of Proteomics*, 2023, 273: 104795.
- [22] RICCI S, RIVERA-CHACON R, PETRI R M, et al. Supplementation with Phytogetic Compounds Modulates Salivation and Salivary Physico-Chemical Composition in Cattle Fed a High-Concentrate Diet[J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 645529.

- [23] KHURANA R, BRAND T, TAPIO I, et al. Effect of a Garlic and Citrus Extract Supplement on Performance, Rumen Fermentation, Methane Production, and Rumen Microbiome of Dairy Cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(7): 4608-4621.
- [24] 陈圣先, 徐立, 黄晓东, 等. 复方植物精油促进肉牛瘤胃发酵及生长性能探索[J]. *畜牧兽医杂志*, 2023, 42(1): 1-4.
- [25] TIAN G Y, ZHANG X Z, HAO X Y, et al. Effects of Curcumin on Growth Performance, Ruminant Fermentation, Rumen Microbial Protein Synthesis, and Serum Antioxidant Capacity in Housed Growing Lambs [J]. *Animals*, 2023, 13(9): 1439.
- [26] 赵亚星, 白晨, 敖长金, 等. 沙葱精油对肉羊体外瘤胃发酵和底物干物质降解率的影响[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(8): 4740-4747.
- [27] DELLA ROSA M M, SANDOVAL E, LUO D, et al. Effect of Feeding Fresh Forage Plantain (*Plantago lanceolata*) or Ryegrass-Based Pasture on Methane Emissions, Total-Tract Digestibility, and Rumen Fermentation of Nonlactating Dairy Cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(8): 6628-6638.
- [28] 吴万成, 马涛, 李文娟, 等. 白藜芦醇对不同类型底物体外产气和发酵参数的影响及其代谢产物的研究[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(1): 321-333.
- [29] ORZUNA-ORZUNA J F, DORANTES-ITURBIDE G, LARA-BUENO A, et al. A Meta-Analysis of Essential Oils Use for Beef Cattle Feed: Rumen Fermentation, Blood Metabolites, Meat Quality, Performance And, Environmental and Economic Impact [J]. *Fermentation*, 2022, 8(6): 254.
- [30] ZHANG X, KE W C, DING Z T, et al. Microbial Mechanisms of Using Feruloyl Esterase-Producing *Lactobacillus Plantarum* A1 and Grape Pomace to Improve Fermentation Quality and Mitigate Ruminant Methane Emission of Ensiled Alfalfa for Cleaner Animal Production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 308: 114637.
- [31] ZHAO Y CH, YU SH Q, LI L X, et al. Feeding Citrus Flavonoid Extracts Decreases Bacterial Endotoxin and Systemic Inflammation and Improves Immunometabolic Status by Modulating Hindgut Microbiome and Metabolome in Lactating Dairy Cows [J]. *Animal Nutrition*, 2023, 13: 386-400.
- [32] ABD'QUADRI-ABOJUKORO A N, NSAHLAI I V, ABD'QUADRI-ABOJUKORO A N, et al. Evaluating the Effects of Some Selected Medicinal Plant Extracts on Feed Degradability, Microbial Protein Yield, and Total Gas Production in Vitro [J]. *Animals*, 2023, 13(4): 702.
- [33] MUELLER-HARVEY I, BEE G, DOHME-MEIER F, et al. Benefits of Condensed Tannins in Forage Legumes Fed to Ruminants: Importance of Structure, Concentration, and Diet Composition [J]. *Crop Science*, 2019, 59(3): 861-885.
- [34] ZANDALINAS S I, FRITSCHI F B, MITTLER R. Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster [J]. *Trends in Plant Science*, 2021, 26(6): 588-599.
- [35] 水煮花生. 联合国政府间气候变化专门委员会第六次综合评估报告发布 [J]. *科学*, 2023, 75(3): 10.
- [36] IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems* [EB/OL]. (2019) [2024-07-19]. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>.
- [37] GERBER P J, STEINFELD H, HENDERSON B, et al. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities [M]. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 2013.
- [38] KRISTIANSEN S, PAINTER J, SHEA M. *Animal Agriculture and Climate Change in the US and UK Elite Media: Volume, Responsibilities, Causes and Solutions* [J]. *Environmental Communication*, 2021, 15(2): 153-172.
- [39] BACÉNINAITÉ D, DŽERMEIKAITÉ K, ANTANAITIS R. Global Warming and Dairy Cattle: How to Control and Reduce Methane Emission [J]. *Animals*, 2022, 12(19): 2687.
- [40] IPCC. Technical summary. *Climate change 2013: the physical science basis* [M]. New York: Cambridge University Press, 2013: 1585.
- [41] GAO J, ZHAO G Y. Potentials of Using Dietary Plant Secondary Metabolites to Mitigate Nitrous Oxide Emissions from Excreta of Cattle: Impacts, Mechanisms and Perspectives [J]. *Animal Nutrition*, 2022, 9: 327-334.
- [42] CHADWICK D R, CARDENAS L M, DHANOA M S, et al. The Contribution of Cattle Urine and Dung to Nitrous Oxide Emissions: Quantification of Country Specific Emission Factors and Implications for Na-

- tional Inventories[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 607-617.
- [43] STACKHOUSE-LAWSON K R, ROTZ C A, OLTJEN J W, et al. Carbon Footprint and Ammonia Emissions of California Beef Production Systems[J]. *Journal of Animal Science*, 2012, 90(12): 4641-4655.
- [44] ALAYÓN-GAMBOA J A, ALBORES-MORENO S, JIMÉNEZ-FERRER G, et al. Tropical Tree Foliage Supplementation in Ruminants Improves Rumen Fermentation and the Bacterial Profile and Decreases Methane Production[J]. *Animal Biotechnology*, 2023, 34(9): 4510-4522.
- [45] 刘尚, 王占义, 李琪, 等. 不同植物对体外瘤胃发酵产气量和甲烷产量的影响[J]. *饲料研究*, 2024, 47(10): 93-98.
- [46] ABARGHUEI M J, SALEM A Z M. Sustainable Impact of Pulp and Leaves of *Glycyrrhiza Glabra* to Enhance Ruminal Biofermentability, Protozoa Population, and Biogas Production in Sheep[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(25): 33371-33381.
- [47] 谢小来, 马逢春, 焦培鑫, 等. 添加单宁酸对紫花苜蓿青贮品质及瘤胃体外产气量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(8): 48-56.
- [48] AHMED M G, ELWAKEEL E A, EL-ZARKOUNY S Z, et al. Environmental Impact of Phytobiotic Additives on Greenhouse Gas Emission Reduction, Rumen Fermentation Manipulation, and Performance in Ruminants: an Updated Review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(26): 37943-37962.
- [49] 王莹, 李留学, 赵玉超, 等. 植物单宁调控反刍动物温室气体排放的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(3): 1413-1425.
- [50] LAZZARI G, MÜNGER A, HEIMO D, et al. Effects of Tanniferous Sainfoin and Acacia Mearnsii Extract on Urinary N Excretion and Ammonia Volatilization from the Slurry of Dairy Cows[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2023, 297: 115577.
- [51] GARDINER C A, CLOUGH T J, CAMERON K C, et al. Potential Inhibition of Urine Patch Nitrous Oxide Emissions by *Plantago Lanceolata* and Its Metabolite Aucubin[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2018, 61(4): 495-503.
- [52] UUSHONA T, CHIKWANHA O C, KATIYATIYA C L F, et al. Substitution Effects of Acacia Mearnsii Leaf-Meal for Triticum Aestivum Bran on Nutrient Digestibility, Rumen Fermentation and Nitrogen Retention in Lambs[J]. *Small Ruminant Research*, 2023, 221: 106948.