

# 营养添加剂在反刍动物甲烷减排中的应用

本文探讨了在应对全球气候变化背景下,具有潜在应用价值的营养添加剂在减少反刍动物甲烷排放中的作用。反刍动物的温室气体排放主要来源于瘤胃微生物发酵产生的甲烷,这已成为畜牧业面临的环境挑战之一。文中讨论了瘤胃甲烷生成的微生物学机制,并综述了植物提取物、脂类、有机酸和益生菌等营养添加剂在甲烷减排方面的研究与应用进展,以期畜牧业提供更具落地潜力的低碳解决方案。

□吴天佑 吴洁 韦子海 张幸怡  
周期 杨志强 苏衍菁

全球气候治理背景下,畜牧业温室气体(GHG)排放已成为不可忽视的环境议题。据联合国粮农组织统计,畜禽养殖的温室气体排放量约占全球总量的14.5%,其中反刍动物养殖占比达64.5%,而牛类单畜种排放强度尤为突出。反刍动物碳排放主要来自胃肠道甲烷(CH<sub>4</sub>)。此途径产生的甲烷折算成CO<sub>2</sub>当量约占全部生产环节GHG排放的58.5%。过多的GHG排放不仅增加了饲料消耗和资本投入,还对环境承载力提出了更高的要求,也反映了畜牧业产能和技术水平的不足。

数十年来,反刍动物营养学研究领域始终致力于通过营养干预策略调控甲烷排放,其中饲料添加剂因其显著的甲烷抑制作用成为该领域的研究焦点。目前具有潜在应用价值的甲烷抑制剂主要包括四大类:植物提取物(单宁、皂苷及植物精油等)、有机酸制剂(苹果酸、延胡索酸等)、脂类添加剂(椰子油、亚麻籽油等)以及益生菌(乳酸菌、芽孢杆菌等)。这些物质通过干扰产甲烷菌代谢活动实现减排,已进入牧场环境管理系统的可行性评估阶段。然而,不同添加剂的作用效果存在显著差异,部分策略甚至呈现矛盾性结果。同时,某些添加剂可能诱发瘤胃发酵模式紊乱、纤维消化率下降等负面效应,且其作用时效性多受限于微生物适应性进化与化合物代谢失活过程。本研究总结了反刍动物瘤胃甲烷生成的微生物学机制,重点评述了饲料添加剂调控甲烷生成的关键靶点与减排效果的研究应用进展,以期畜牧业提供更具落地潜力的低碳解决方案。

## 瘤胃甲烷的生成

甲烷主要来源于瘤胃微生物发酵,与反刍动物特有的消化系统、营养素消化过程有关。

瘤胃甲烷产生主要有三种途径。氢营养型途径:以甲烷短杆菌属为代表的氢营养型产甲烷菌,通过还原CO<sub>2</sub>或甲酸获取电子,在甲基辅酶M还原酶(MCR)催化下生成甲烷,贡献约70%的瘤胃甲烷排放。反应效率与瘤胃溶解氢气浓度呈正相关。氢气主要来源于营养物质代谢生成乙酸和丁酸的过程,而丙酸可与产甲烷菌竞争氢气生成糖。甲基营养型途径:甲烷八叠球菌及甲烷球形菌属等甲基营养型菌,可直接利用甲醇、甲基胺等甲基化合物生成甲烷,不依赖氢气供应,在低氢气环境(<0.1Pa)中具有竞争优势,贡献约25%的甲烷产量。乙酸裂解型途径:尽管甲烷八叠球菌属在瘤胃中占比不足5%,但它可通过

裂解乙酸生成甲烷,该途径受限于瘤胃乙酸浓度及氢分压,生态位较为狭窄。

瘤胃微生物的多层次协同与竞争是甲烷生成的核心。原核微生物中,厚壁菌门和拟杆菌门通过分泌纤维素酶和木聚糖酶降解植物多糖,每生成1摩尔乙酸释放4摩尔还原当量(H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>),为产甲烷菌提供底物。丙酸生成菌通过丙酮酸酯途径与产甲烷菌竞争氢气,而同型产乙酸菌通过乙酰辅酶A途径转化H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>,形成氢气代谢的替代途径。真核微生物中,全毛虫与产甲烷菌的共生体系显著增强种间氢传递,其氢化酶活性较内毛虫高2.3—3.6倍,是甲烷生成的主要原虫。瘤胃真菌(新美鞭菌门)通过分泌木质素过氧化物酶破坏植物细胞壁,释放的还原当量通过氢化酶体形成H<sub>2</sub>-甲酸混合电子供体,进一步驱动甲烷合成。

## 营养添加剂

### 在反刍动物甲烷减排上的研究进展

#### 1. 植物提取物

利用植物次生代谢产物作为饲料添加剂减少反刍动物甲烷排放被证明是一种有效措施,其作用机制与效应评估涉及多层次理论体系。单宁作为植物多酚类次生代谢产物可通过多靶点作用抑制反刍动物甲烷生成:直接结合产甲烷菌表面蛋白,抑制氢化酶与甲基辅酶M还原酶活性;调控氢代谢流向,激活产丙酸菌Wood-Ljungdahl途径;选择性抑制古菌等氢营养型产甲烷菌并促进互营菌生长。结构特征分析显示:缩合单宁(CT)通过黄烷醇聚合体使产甲烷菌及原虫丰度降低23%;水解单宁(HT)代谢物(如没食子酸)虽抑制效率显著但存在毒性风险;褐藻多酚(如泡叶藻提取物)在50—500微克/毫升浓度下可实现甲烷减排,但>10微克/毫升即抑制纤维消化率。剂量效应研究表明,CT(如金合欢单宁)在163—326克/天剂量下实现14%—29%甲烷减排,但高剂量导致奶牛产奶量下降。一项涉及15项体内试验的Meta(一种统计学方法)分析显示,饲料中单宁浓度每增加1克/100克,甲烷产量分别减少0.011升/100克干物质采食量或0.012升/100克可消化有机物,但减排效应部分源于有机物消化率下降,特别是纤维。需注意的是,瘤胃微生物可通过解毒代谢、形成荚膜等机制产生抗性,且单宁浓度临界阈值(20克/千克干物质)的精准控制是平衡减排效能与营养代谢的关键。

类黄酮与多酚化合物类似,主要通过三重机制抑制瘤胃甲烷生成:直接抑制产甲烷菌的氢化酶活性及膜蛋白功能;减少纤维原虫丰度(>60%),阻断原虫—产甲烷菌互作;通过激活丙酸生成

菌增殖重构氢代谢途径,降低氢气可利用性。体外研究表明,柚皮苷、槲皮素(200微克/克干物质)可降低甲烷产量4%—11%,并提升丙酸比例,而木犀草素—7—葡萄糖苷(50毫克/克干物质)使甲烷与氨浓度分别减少11%和12%。当前体内试验数据有限,现有研究表明富含类黄酮的芦丁(3毫克/千克)对呼吸室饲养的荷斯坦牛甲烷生成及能量代谢无显著影响,但亟需更多体内试验验证。

植物精油(EOs)抑制瘤胃甲烷生成的机制涉及微生物代谢调控与氢气定向重构。其脂溶性萜类和苯丙烯类化合物可穿透产甲烷菌古菌细胞膜,干扰能量代谢及关键酶活性;同时,EOs通过减少纤维毛虫丰度削弱原虫—古菌氢转移共生环境,并激活丙酸菌增殖,将氢气导向丙酸生成。EOs的体外与体内抗甲烷生成效果存在显著差异。体外研究表明,百里香(百里酚)、牛至(香芹酚)、肉桂(肉桂醛)和大蒜(大蒜素)等精油在抑制甲烷生成方面效果显著,部分试验中甲烷减少率高达90%。Torres和Daning等关于植物精油对反刍动物总体影响的Meta分析也报告了对甲烷排放无影响。这可能归因于体外模拟系统中缺乏挥发性脂肪酸吸收及微生物群落结构差异与适应性进化。

皂苷类物质通过其两亲性分子结构(亲水性糖基—疏水性苷元)与瘤胃原生动物细胞膜固醇发生特异性结合,诱导膜脂质双分子层通透性改变,最终引发细胞裂解(原生动物消除效应)。该作用机制通过阻断原生动物与产甲烷菌的氢转移作用,可实现6%—50%的甲烷减排效应。尽管许多体外研究使用了相对较高的剂量,但某些植物的高浓度皂苷(>5%干物质)和甾体皂苷可能对动物有毒。此外,皂苷的抗原动物作用被认为只是暂时的,当其糖基被瘤胃微生物分解后,剩余部分(皂苷元)会失去活性,导致甲烷减排效果无法持久。

#### 2. 油脂

日粮中添加油脂被认为是瘤胃甲烷减排的有效策略之一,油脂可通过降低干物质采食量和纤维消化率来减少甲烷排放。此外饱和中链脂肪酸具有抑制原虫和甲烷菌生长的双重作用;而不饱和脂肪酸还可改变瘤胃的发酵模式,降低乙/丙酸比值,并作为氢气的受体,改变氢气还原CO<sub>2</sub>的代谢通路。研究表明日粮中脂肪含量每增加1%,甲烷排放量可降低3.5%—5.6%。当日粮油脂添加量为1%—3%时,可实现甲烷减排10%—40%;但当脂肪添加量使得日粮脂肪含量达到6%—7%时,甲烷产量降低的同时干物质采食量也会降低。而Patra的一项Meta分析结果则表明与日粮2%的脂肪含量相比,6%的脂肪含量可增加产奶量,并使甲烷产量降低15%。

纵观数十年来对日粮油脂抑制动物甲烷排放的研究,目前普遍认为中链脂肪酸(MCFA)显示出更强的甲烷抑制效果。通过Meta分析也证实中链脂肪酸(1%椰子油)对甲烷抑制效果优于添加亚油酸(1%大豆油)、亚麻酸(1%亚麻油)、不饱和脂肪酸(1%菜籽油)和饱和脂肪酸(1%牛脂)。不同来源的中链脂肪酸对甲烷排放的抑制效果存在着明显差异。Yanza等则通过分析20篇文献里的154组处理,发现对甲烷的抑制效果为:椰子油>月桂酸>肉豆蔻酸>混合月桂酸和肉豆蔻酸>棕榈油>富含月桂酸的菜籽油>阿拉伯油。



资料图片

值得注意的是,膳食脂肪对反刍动物甲烷排放的抑制效果与日粮营养结构存在显著交互。非纤维性碳水化合物(NFC)可协同增强月桂酸(C12:0)和单不饱和脂肪酸(MUFA)的减排作用,而中性洗涤剂(NDF)对其影响较弱。精饲料日粮中,脂肪通过调控瘤胃发酵抑制纤维降解,优化氢代谢途径,实现21%—28%的甲烷减排;但粗饲料日粮中,油脂包裹纤维表面反而加剧能量损失。最近的Meta分析表明,维持日粮淀粉(NDF)比<0.63且脂肪添加量2.89%—4.69%,可在保证奶牛泌乳性能的同时降低甲烷排放。

不同系统中甲烷减排效果也存在显著差异。Belanche等研究表明集约化系统中脂肪补充可使奶牛和肉牛甲烷排放分别降低19.01%和22.28%,而放牧系统未见显著效果,这可能与日粮纤维—脂肪复合物形成及代谢途径异质性相关。此外,油脂形式亦影响效果:精炼油生物利用度高但成本高,油脂因物理屏障削弱活性。尽管现有证实脂肪添加能通过多途径调控瘤胃微生物,但其剂量效应与组合策略仍需结合微生物代谢进一步优化。

#### 3. 有机酸

有机酸是一种有望实现更清洁生态系统的甲烷减排添加剂。延胡索酸(FA)和苹果酸(MA)是目前研究较多的有机酸类物质。作为琥珀酸—丙酸途径的关键前体,FA和MA通过竞争性捕获氢气驱动代谢途径转向丙酸合成,从而减少产甲烷菌的底物供给。体外研究显示,FA可使甲烷排放降低17%—42%,而MA的减排效率略低(13%—33%),这可能与替代途径中氢气捕获效率的差异相关。Ungerfeld等指出,仅48%的FA完全转化为丙酸,20%通过苹果酸—丙酮酸途径生成乙酸并重新释放氢气,这种代谢分流导致减排潜力低于预期。日粮结构对此具有关键调控作用,高精料日粮通过调控乙/丙酸比值强化减排效果,例如肉牛精料中添加7.5%MA可使单位干物质采食量(DMI)甲烷排放减少9%,而同剂量MA在粗饲料为主的放牧奶牛日粮中则无显著效果。此外,有机酸的减排效果在动物种属和生理阶段间存在显著差异。荷斯坦公牛和泌乳奶牛日粮中添加2%FA可分别实现23%和20.7%的甲烷减排,但相同策略在安格斯小母牛中未显效。这种差异可能与瘤胃微生物群落结构及代谢适应能力有关——FA在转化过程中需要富甲酸还原菌的参与,而不同动物种属的微生物组可能存在功能分化。

实际应用中,长期高剂量补充有机酸还可能引起瘤胃pH下降及饲料适口性问题。包埋技术可通过调控有机酸的缓释特性,部分突破应用限制。研究显示,包埋FA(EFA)在绵羊体内可实现19%—76%的甲烷抑制,同时维持瘤胃pH稳定并提升饲料转化率。现有研究表明,2%FA添加量在减排与产奶量提升间取得最佳平衡,而更高剂量可能触发代谢负反馈机制。

#### 4. 益生菌

利用益生菌调控瘤胃生态系统,也是降低瘤胃甲烷产量的有效途径之一。益生菌可以在瘤胃内有效定植或者短期停留,从而改变瘤胃内代谢效率和酶活性,其作用机制主要围绕氢代谢竞争与微生物互作。乳酸菌和丙酸菌主要通过丙酸途径分流氢气,产乙酸菌则利用氢

气合成乙酸;枯草芽孢杆菌主要通过抑制纤维素分解菌或直接抗菌作用干预甲烷生成,而地衣芽孢杆菌则被证实通过分泌抗菌物质破坏产甲烷菌细胞膜完整性,降低甲烷菌丰度。

益生菌对甲烷排放的影响效果因菌株类型、剂量及环境互作而异。乳酸杆菌中,戊糖乳杆菌D31通过强化丙酸生成途径,在绵羊试验中实现甲烷排放降低13%,而保加利亚乳杆菌可能因改变挥发性脂肪酸组成(如提高乙酸盐比例)促进甲烷生成。值得注意的是,戊糖乳杆菌D31在初产泌乳奶牛的试验中未能展现对甲烷排放的影响。丙酸菌虽可通过琥珀酸途径竞争氢气,但单菌补充效果有限,甚至可能增加16%的甲烷产生,但与植物乳杆菌联用可减少甲烷产生33.1%。芽孢杆菌中,地衣芽孢杆菌通过分泌抗菌物质直接抑制产甲烷菌活性,在0.75×10<sup>7</sup>CFU/mL剂量下使绵羊甲烷排放降低6%,并提高纤维消化率。而枯草芽孢杆菌效果不稳定,多数研究认为没有效果或增加甲烷总产量。Efstathios,Sarmikasoglou等通过体外试验评估了枯草芽孢杆菌对不同阶段奶牛的影响,发现其可降低泌乳中期奶牛总甲烷产量,但会促进泌乳早期奶牛甲烷生成,对干奶牛则无显著影响。酵母菌(如酿酒酵母)通过减少原生动物数量(达45%)降低甲烷50%,但体内效果受日粮类型和宿主生理状态影响,部分研究显示无显著影响。Darabighane等的Meta分析结果也显示酿酒酵母在降低奶牛和肉牛甲烷排放方面没有效果。

剂量与干预时长是影响益生菌减排效果的核心因素。长期补充(>8周)多菌株组合可通过微生物群落重构实现稳定减排,而短期干预因瘤胃菌群抵抗难以实现益生菌的有效定植。Meta分析显示,活体试验合并效应量未达显著性,亚组分析进一步表明,多种细菌组合甲烷排放和甲烷强度的效应量(SMD=-0.59)显著降低,说明使用包含多种细菌的益生菌配方可能促进瘤胃中更高的微生物多样性,从而改善消化并意味着减少甲烷输出。Pitaluga等认为,补充多菌株益生菌后瘤胃甲烷排放的减少可能归因于更有效的瘤胃发酵和饲料效率的提高。宿主遗传与日粮结构亦起关键作用,杂交牛因瘤胃微生物多样性高,对干预更敏感(SMD=-0.48);高精料日粮通过提高氢气消耗速率强化丙酸菌竞争优势,而高淀粉日粮(38%)可能抑制菌株活性。总体而言,益生菌的甲烷减排潜力受多因素调控,其产业化应用需基于宿主微生物组特征和动态环境适配策略。现有研究表明,相较于其他甲烷减排策略,益生菌添加剂的减排潜力与皂苷类似,但总体效果相对有限。

#### 不同营养添加剂

在反刍动物甲烷减排上的应用效果比较

尽管Meta分析表明,大型藻类(如绿海藻)与3-NOP(3-硝基氧基丙醇)是目前甲烷减排效能最高的策略(分别实现平均51%和30.6%的减排效果),但其应用受限于藻类规模化生产瓶颈、碘残留风险以及3-NOP的高成本与法规壁垒,故未纳入本研究体系。早期试验中,植物油类添加剂已展现出明确优势:McGinn等发现向日葵油(400克/天,占干物质采食量5%)显著降低生长肉牛甲烷排放22%(P=0.001),而莫能菌素、蛋白酶、酵母及延胡索酸均未显效;Beauchemin

等进一步证实菜籽油(4.6%干物质)可显著减少小母牛甲烷排放(P=0.009),但精油与延胡索酸无显著作用。

近期Meta分析系统量化了各类策略的减排效果:油脂类(如椰子油、向日葵籽)凭借中链或不饱和脂肪酸的直接抑制作用,实现15%—39%的甲烷日均减排,但同时伴随着纤维消化率下降(下降4%—8%)、采食量降低(-6%)及生长动物增重抑制(油籽组-13%)等副作用。单宁类添加剂独立应用时甲烷减排12%(7%—16%),与含羞草素或皂苷协同后可提升至29.6%,但会伴随纤维消化率损失(7%)及适口性下降。相比之下,植物精油因微生物适应性及代谢失活效应,甲烷减排效果微弱(<10%),而有机酸与益生菌的效能仍存争议,Meta分析显示其整体未达显著差异。

当前证据表明,中链脂肪酸(如椰子油)的甲烷抑制效果显著优于单宁及植物精油,但其实际应用需结合日粮结构与经济性优化,例如利用油籽副产品降低成本,或通过精准调控添加量(如油脂>20克/天)平衡减排与生产性能。未来研究需进一步验证不同植物源抗甲烷化合物的浓度异质性及其时效效应稳定性,并探索多策略协同增效路径,以构建兼具高效性与实用性的低碳养殖技术体系。

## 结论与展望

反刍动物甲烷减排是应对畜牧业气候挑战的关键途径。通过营养干预策略调控瘤胃微生物代谢与氢能流向,已取得显著进展。植物提取物(如单宁、皂苷、植物精油)通过抑制产甲烷菌活性、调控氢代谢通路及阻断原虫—古菌共生关系实现减排,但其效果受剂量、微生物适应性及对纤维消化的负面影响制约。油脂添加剂(尤其是中链脂肪酸)凭借直接抑制产甲烷菌与优化氢代谢的双重机制,展现出15%—39%的减排潜力,但需平衡高添加量导致的采食量下降与纤维消化率损失。有机酸(如延胡索酸)通过竞争性捕获氢气驱动丙酸合成路径而减少产甲烷菌的底物供给,但减排效果受日粮结构与动物种属差异影响,且长期应用易引发瘤胃酸化。益生菌虽可通过调控微生物群落与代谢途径减少甲烷排放,但其效果不稳定,其效果依赖于菌株组合、宿主遗传背景及日粮适配性。Meta分析表明,当前中链脂肪酸与单宁协同策略的减排效能较为突出,而植物精油、益生菌等仍需进一步优化。

未来研究可聚焦以下几个方面:首先,探索植物提取物、油脂与益生菌的协同机制,例如单宁与中链脂肪酸联用以强化抑制作用,或采用有机酸结合包埋技术缓解酸化风险;其次,开发基于瘤胃微生物组与宿主遗传特征的精准调控技术,例如利用宏基因组筛选敏感标记物实现剂量优化;同时,挖掘新型天然化合物(如大型藻类次级代谢物)及合成材料(如缓释纳米载体)的潜力,结合基因编辑技术定向调控产甲烷菌功能。此外,可通过长期田间试验验证规模化应用效果,评估微生物适应性进化风险,并开发低成本缓释剂以突破时效性限制。

(作者单位:光明牧业有限公司/农业农村部南方奶牛遗传改良重点实验室)



资料图片