

L-苹果酸的生理功能及其在反刍动物生产应用中的研究进展

梁 静, 张文举*, 王 博

(石河子大学动物科技学院, 石河子 832000)

摘 要: L-苹果酸广泛存在于苹果、梨等水果中, 是三羧酸循环的重要成员之一。L-苹果酸口感接近天然苹果的酸味, 具有酸度大、味道柔和、滞留时间长等特点, 目前已广泛应用于高档饮料、食品行业。在畜牧生产中, L-苹果酸常被用作酸化剂和病原微生物的抑制剂, 通过刺激反刍兽新月形单胞菌对乳酸的利用、丙酸产生和 CO₂ 浓度增加, 防止瘤胃酸中毒, 进而提高日粮能量的利用率和动物的生产性能。作者主要从 L-苹果酸的生理功能和其在反刍动物生产应用中的研究进行概括和总结, 以期为 L-苹果酸在反刍动物生产中合理高效应用提供科学的理论依据。

关键词: L-苹果酸; 生理功能; 反刍动物; 生产应用

中图分类号: S816.71

文献标识码: A

文章编号: 1671-7236(2016)07-1916-06

Research Progress on the Physiological Function of L-malic Acid and Its Application in Ruminant Production

LIANG Jing, ZHANG Wen-ju*, WANG Bo

(College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: L-malic acid exists widely in apples, pears and other fruits. It is one of the important members of tricarboxylic acid cycle. Its taste is close to the natural apple's sour, and it has some characteristics such as high acidity, soft, long residence time. L-malic acid has been widely used in some quality beverages, food industry at present. In animal production, L-malic acid is used as acidifier and an inhibitor of pathogenic microorganism. L-malic acid by promoting the utilization of *S. ruminantium* on lactic acid, the production of propionic acid and the concentration of CO₂ to prevent ruminal acidosis, and then to improve the utilization ratio of dietary energy and animal production performance. This article is a summary of the physiological functions of L-malic acid and its application in the production of ruminant in order to provide scientific theoretical basis for the rational and efficient use of L-malic acid in ruminant production.

Key words: L-malic acid; physiological function; ruminant; production application

有机酸作为一种新型的饲料添加剂, 是瘤胃内一类重要的电子受体。因其在反刍动物瘤胃内可阻止亚急性瘤胃酸中毒, 促进乳酸转向为丙酸, 减少甲烷产量等调控潜力, 受到国内外众多学者的关注。

苹果酸(malic acid)又名 2-羟基丁二酸, 有较强吸湿性, 是易溶于水 and 乙醇的酸味白色结晶体或结

晶状粉末^[1]。其在大自然中以 3 种形式存在: D-苹果酸、L-苹果酸和其混合物 DL-苹果酸。天然存在的苹果酸都是 L 型。L-苹果酸(L-malic acid)是生物体糖代谢过程中产生的重要有机酸, 广泛存在于自然界的水果和蔬菜中, 未成熟的苹果中含有 0.5% 左右的有机酸, 其中苹果酸占 97.2% 以上^[2]。

收稿日期: 2015-12-14

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303062)

作者简介: 梁 静(1989-), 女, 陕西华县人, 硕士生, 研究方向: 饲料资源开发与利用, E-mail: liangjingshz@sina.com

* 通信作者: 张文举(1966-), 男, 陕西临潼人, 博士生导师, 研究方向: 饲料资源的开发与利用, E-mail: zhangwj1022@sina.com

L-苹果酸是国外用量很大的一种酸味剂,1967 年被美国食品和药品管理局登记确认为一种安全、无毒、无害、可食用的有机酸。

1 L-苹果酸的生理功能

1.1 直接参与体内代谢

L-苹果酸是生物体代谢过程中产生的重要有机酸,是三羧酸循环(TCA 循环)及其支路乙醛酸循环代谢过程中的重要中间产物,也是 CO₂ 固定反应的中间产物^[3],其为生物体细胞内存在的一种活性物质,易于吸收,可以迅速通过细胞膜,进入线粒体内直接参与能量代谢;L-苹果酸也是苹果酸一天冬氨酸穿梭的重要组成部分,对细胞液和线粒体之间的还原当量(NADH)的转移起到重要的作用,可以直接作为能量物质被机体利用。在 CO₂ 固定反应中,磷酸烯醇式丙酮酸或丙酮酸固定 CO₂ 生成草酰乙酸后转化成苹果酸,或由丙酮酸经还原羧化作用直接生成 L-苹果酸。在细胞代谢过程中,L-苹果酸对转运 NADH 进入线粒体进行氧化磷酸化及能量物质的产生起关键作用,其在机体代谢过程中不断更新,处于枢纽位置^[4]。吴军林等^[5]研究结果表明,苹果酸一天冬氨酸穿梭对于 ATP 的可持续供给可起到关键性作用。有研究显示,补充 L-苹果酸可显著提高 ATP 生成^[6]。

1.2 影响机体肠道微生物

L-苹果酸是瘤胃代谢的中间产物,当草酰乙酸的数量有限时,可刺激反刍兽新月形单胞菌(*S. ruminantium*)的活性来提高乳酸的利用和丙酸的产生^[7-9],防止瘤胃酸中毒,其中苹果酸促进反刍兽新月形单胞菌对乳酸的利用路线为^[10]:乳酸→丙酮酸→草酰乙酸→苹果酸→延胡索酸→琥珀酸→丙酸。L-苹果酸可提高胃蛋白酶活性同时刺激胰腺分泌,促进前胃蠕动,加快小肠消化吸收。李赞等^[11]研究结果表明,饲料中添加适宜 L-苹果酸可促进吉富罗非鱼肠黏膜上皮细胞的生长增殖,促进前肠和中肠黏膜绒毛的发育,提高肠道消化酶活性,促进营养物质的消化和吸收。Evans 等^[12]研究结果表明,添加苹果酸可增加乳酸的利用及细胞内反刍兽新月形单胞菌合成的糖类和蛋白质的含量;在苹果酸存在时,乳酸的利用率为 77%~80%,而没有苹果酸时仅为 40%~70%,且苹果酸可提高 pH 为 5 时反刍兽新月形单胞菌对高浓度可溶性淀粉和去壳谷物中乳酸的利用,降低乳酸浓度,提高瘤胃 pH。Nisbet 等^[13]研究结果表明,在含 DL-乳酸培养基中添加 10 mmol/L 的 L-天门冬

氨酸、延胡索酸和苹果酸,反刍兽新月形单胞菌生长速度提高 2 倍,在单位菌体蛋白重量的基础上,利用乳酸的能力分别提高 4、4 和 10 倍。

1.3 促进矿物质的吸收

苹果酸钙的可溶性高于碳酸钙,并且其生物活性高,易于动物吸收,是一种良好的钙源。L-苹果酸的添加可降低胃肠道 pH 的同时,还可与饲料中一些不溶性或难溶性盐的矿物质形成一种生物学效价较高的螯合物,从而提高消化道对其的吸收利用。相关研究表明,苹果酸钙生物活性要高于碳酸钙,使用柠檬酸—苹果酸钙比碳酸钙对钙的吸收利用率和存留率更高^[14-15]。

1.4 改善适口性、增加采食量

L-苹果酸因其具有芳香味,添加到饲料中可掩盖某些物质的不良气味,吸引动物采食,同时 L-苹果酸可直接刺激口腔味蕾,使唾液分泌增多从而增强动物的采食欲。Wu 等^[16]研究结果显示,在以精粗比为 1:1 的日粮为发酵底物的试验中,DL-苹果酸能降低乳酸浓度,提高 CO₂ 产出及干物质、有机物、中性洗涤纤维和半纤维素的消化率。

1.5 抗应激、抗氧化作用

L-苹果酸是 TCA 的中间产物,能量形成途径比葡萄糖形成过程短。故在动物在应激状态下时,可直接利用其紧急合成 ATP,起到抗疲劳、迅速恢复体力的作用^[17]。同时已有研究报道显示,L-苹果酸可以通过减少老年机体组织内自由基的产生或加速清除,起到防止自由基损伤机体组织的作用^[18]。

1.6 其他作用

外源性 L-苹果酸容易被机体吸收利用,可迅速穿过细胞膜进入线粒体,满足机体特殊条件下能量的需求,显著提高运动能力。Wu 等^[16]研究发现,补充 L-苹果酸能显著延长小鼠游泳至力竭的时间。同时苹果酸还是一个较为理想的谷氨酸脱羧酶抑制剂,可促进肝脏的氨代谢,降低血氨浓度,对肝脏具有保护作用^[19]。周红宇等^[20]研究结果表明,小鼠连续使用 L-苹果酸 5 d 后,可明显改善记忆的获得、巩固和再现。医学临床上,已将 L-苹果酸作为心脏基础液的成分之一,配合 K⁺、Mg²⁺ 以保护心脏的能量代谢^[21]。

2 L-苹果酸在反刍动物生产上的应用效果

2.1 对反刍动物瘤胃发酵的调控

为改善瘤胃发酵体系,提高反刍动物的生产性能,需要对瘤胃进行调控,主要包括日粮调控,添加

离子载体、酶制剂、饲用微生物等方法。其中绿色无公害、无残留、无毒副作用特点的饲料添加剂逐渐成为专家学者们的研究热点。

2.2 L-苹果酸对反刍动物的作用机理

L-苹果酸主要通过两种机制缓冲瘤胃内容物的酸度,即增加反刍兽新月形单胞菌对乳酸的利用和 CO_2 的产生,从而防止瘤胃酸中毒的发生。

2.2.1 L-苹果酸促进乳酸利用 乳酸是瘤胃中重要的中间代谢产物,瘤胃酸中毒的发生与瘤胃内乳酸浓度的关系密切。Linehan等^[22]研究表明,苹果酸可克服生糖过程中的草酰乙酸缺乏,进而刺激反刍兽新月形单胞菌 HD4 系对乳酸的利用。同时,苹果酸可为 H_2 提供电子沉积,从而增加反刍兽新月形单胞菌 HD4 系对乳酸的利用^[13]。

2.2.2 L-苹果酸提高 CO_2 产生 L-苹果酸除刺激反刍兽新月形单胞菌对乳酸的利用外,还能提高瘤胃内 CO_2 的浓度^[23]。 CO_2 是乳酸通过反刍兽新月形单胞菌经琥珀酸—丙酸途径发酵成丙酸的一种终产物^[24]。相关研究表明, CO_2 的浓度并不总是增加,总气体由95% CO_2 和5% CH_4 构成^[23]。在柠檬酸循环中,L-苹果酸对某些瘤胃微生物起关键性作用。主要以两个重要途径影响微生物:微生物的分解能力即酸化作用以及酸通过未离解的微生物细胞壁的能力并参与新陈代谢和DNA在细胞内的合成^[25]。L-苹果酸在反刍动物上的应用已有显著效果,相关研究报道表明,L-苹果酸对提高反刍动物生产性能^[26-28]、瘤胃pH^[25,29-30]、养分消化代谢^[28,31-32]等均有影响。

2.3 L-苹果酸在牛生产上的应用

L-苹果酸有利于维持动物体内适宜内环境,同时促进乳酸利用菌的生长;其是瘤胃琥珀酸—丙酸途径的重要中间产物,可通过苹果酸—草酰乙酸穿梭作用来作为糖异生途径的重要前提物,对动物生产性能的提高具有非常重要的作用。L-苹果酸作为饲料添加剂饲喂反刍动物,可提高其饲料转化率,动物生产性能等。Martin等^[32]在阉公牛饲料中添加苹果酸后肉牛饲料效率明显提高,日增重随苹果酸的增加呈线性增加。Foley等^[33]研究指出,日粮中添加不同水平苹果酸对荷斯坦奶牛的干物质采食量有显著影响。张爱忠等^[34]研究结果指出,添加苹果酸可提高奶牛平均产奶量。李文等^[35]研究结果表明,日粮中添加适宜苹果酸(140 g/d)可显著提高肉牛日增重,同时王聪等^[36]研究结果亦表明,添加苹果酸可明显改善早期泌乳奶牛能量平衡,且苹果酸

适宜添加量为140 g/d。添加苹果酸可通过增强乳酸的代谢作用来影响反刍动物的乳酸调控^[25,37]。Sniffen等^[25]研究发现,补饲50 g/d苹果酸可增加产奶量,但对乳脂率、乳蛋白率、乳糖率没有影响,但同时总蛋白、乳糖量比对照组增加而对日粮中干物质、粗蛋白质、酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维、脂肪、淀粉等无显著影响。赵微等^[38]研究结果表明,在添加一定量苹果酸的条件下,精粗料为2:8的比例组相对其他试验组可更好地改善瘤胃发酵性能。Wang等^[26]研究指出,每头荷斯坦奶牛每天分别补充70、140、210 g苹果酸,在早期泌乳的63 d内干物质采食量无显著差异,但可提高产奶量及增加乳脂含量,线性提高饲料的利用率。经过泌乳63 d的研究发现,苹果酸的补饲可提高经产奶牛的血糖和胰岛素,降低血液中非酯化脂肪酸、 β -羟丁酸和尿酮的含量,从而提高能量利用率。金哲勇等^[39]研究结果显示,日粮中添加胡麻油和苹果酸有利于延边黄牛的瘤胃发酵,且同时添加效果更佳。李旦等^[40]研究结果表明,饱和脂肪酸和苹果酸可改善瘤胃发酵模式,但二者对体外 CH_4 抑制作用之间没有直接的联系,并且联合添加对于瘤胃主要功能菌群没有显著影响。研究报道亦表明,在以玉米为基础日粮中添加苹果酸使犊牛的L-乳酸水平比未添加苹果酸的对照组高^[41]。

2.4 L-苹果酸在羊生产上的应用

L-苹果酸在羊生产上的研究也颇多,施玲玲^[42]研究结果表明,苹果酸可提高其对粗料型日粮发酵的活力,同时添加苹果酸可提高绒山羊的日增重及产绒性能,同时还指出,在粗料型日粮条件下,添加苹果酸可改变瘤胃发酵类型,降低乙酸/丙酸值,有利于瘤胃发酵^[43-44]。张之迎^[45]研究结果显示,延胡索酸、苹果酸对延边半细毛羊瘤胃发酵、饲料降解率均具有改善作用。Moharrery等^[46]在羔羊的试验中发现,饲料中添加10 g/kg苹果酸盐和酵母培养物混合物,可提高羔羊的日增重,但采食量、干物质、中性洗涤纤维和粗蛋白质的表观消化率无显著影响。Martínez-González等^[47]研究发现,泌乳母羊摄入不同水平的苹果酸,可提高断奶前哺乳羔羊的日增重,从而提高饲料利用率;在不影响干物质采食量和乳成分含量的条件下,日粮中添加4 g/kg苹果酸可提高乳产量、乳蛋白产量和乳利用率。庞学东等^[48]研究结果指出,日粮中添加苹果酸可显著提高瘤胃pH和丙酸比例,并显著降低氨态氮、乳酸浓度和乙酸/丙酸值。同时他还指出,苹果酸对混合瘤胃

微生物体外发酵动态变化有一定影响,可提高 pH、发酵产气量、丙酸浓度和总挥发性脂肪酸(TVFA)浓度,降低乳酸浓度^[49]。Montano 等^[50]研究表明,在高谷物的基础日粮中补饲苹果酸可提高瘤胃 pH。宋天增等^[51]结果表明,精料中添加半胱胺可提高藏绵羊断奶羔羊瘤胃液 pH。刘亮等^[52]研究表明,添加苹果酸能够改善瘤胃发酵类型,使发酵液氨态氮浓度降低,丙酸产量增加,总挥发酸产量增加。Liu 等^[27]研究表明,随着补饲苹果酸浓度的增加,瘤胃 pH、乙酸/丙酸值、氨态氮浓度、乳酸浓度呈下降趋势,同时总挥发性脂肪酸浓度升高。王子荣等^[53]研究结果显示,公山羊每日摄入半胱胺 15 mg/kg 体重,8 d 后可提高瘤胃微生物蛋白、氨态氮含量和总挥发性脂肪酸浓度。其他学者研究表明,日粮中添加苹果酸,对奶山羊的干物质摄入量^[54]、产奶量和羔羊的总摄食量、生长性能等^[55]均无明显影响。这些不同差异可能与日粮组成的成分或苹果酸含量、苹果酸化学组成等因素有关^[56-57]。

3 存在问题

中国对于 L-苹果酸方面的研究较少,对于 L-苹果酸的作用机理还需进一步的研究;L-苹果酸的生产成本高,难以在短期内形成产业化;使用富含 L-苹果酸的首蓿青草调节日粮组成来补充苹果酸,节约成本,这在理论上是可行的,但 L-苹果酸效果的发挥受日粮类型、精粗比等多种因素影响,故其在实践中的效果并不理想;影响 L-苹果酸使用效果的原因尚未探明,L-苹果酸的最佳使用剂量、补充的最适时间等问题都需要进一步研究。

4 小结

L-苹果酸是一种重要的有机酸,在化工、食品、医药、畜牧等行业领域具有广泛用途。L-苹果酸作为酸化剂和病原微生物的抑制剂,已应用于反刍动物。同时 L-苹果酸是瘤胃微生物代谢途径的中间产物,可被微生物或其他生化反应代谢利用,无残留,不存在微生物的耐药性、病原体抗药性转移和药物残留等问题,可更好、更有效地预防和控制反刍动物饲喂过程中发生的瘤胃酸中毒。当前,世界生产食用级有机酸的趋势和方向是生产人体及动物体能吸收的有生理功能的左旋体,因此 L-苹果酸是今后发展的必然趋势。但目前在畜牧生产中,L-苹果酸作用于反刍动物机体的具体机制分析的尚不透彻,需更进一步地深入研究。

参考文献:

- [1] Brittain H G. Malic acid[J]. *Analytical Profiles of Drug Substances and Excipients*, 2001, 28: 153-195.
- [2] 陈陶声. 有机酸发酵生产手册[M]. 北京: 中国化学工业出版社, 1991.
- [3] 刘海涛, 张爱忠, 孙海洲, 等. 苹果酸在反刍动物中的应用[J]. 畜牧与饲料科学(奶牛版), 2006, 5: 72-74.
- [4] 庞学东, 唐海翠, 庄 苏, 等. 苹果酸在反刍动物上的研究进展[J]. 中国草食家畜, 2006, 26(5): 53-55.
- [5] 吴军林, 吴清平, 张菊梅. L-苹果酸的生理功能研究进展[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 692-695.
- [6] Bendahan D, Mattei J P, Ghattas B, et al. Citrulline/malate promotes aerobic energy production in human exercising muscle [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2002, 36: 282-289.
- [7] Martin S A, Streeter M N. Effect of malate on *in vitro* mixed ruminal microorganism fermentation[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(7): 2141-2145.
- [8] Caldwell D R, Bryant M P. Medium without rumen fluid for non selective enumeration and isolation of rumen bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1966, 14(5): 794-801.
- [9] Martin S A, Sullivan H M, Evans D J. Effect of sugars and malate on ruminal microorganisms [J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83(11): 2574-2579.
- [10] 杨 威, 刁其玉, 李 辉. 苹果酸在反刍动物饲料中的应用[J]. 今日畜牧兽医, 2007, 1: 54-55.
- [11] 李 赞, 罗 莉, 陈任孝, 等. L-苹果酸对吉富罗非鱼肠道结构功能及肝脏 TCA 循环效率的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(1): 119-126.
- [12] Evans J D, Martin S A. Factors affecting lactate and malate utilization by *Selenomonas ruminantium* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(12): 4853-4858.
- [13] Nisbet D J, Martin S A. Effect of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on lactate utilization by the ruminal bacterium *Selenomonas ruminantium* [J]. *Animal Science*, 1991, 69(1): 4628-4633.
- [14] 杨 军, 祖国栋, 贾丽红, 等. 柠檬酸—苹果酸钙盐在大鼠体内吸收利用的实验研究[J]. 中国公共卫生, 1999, 15(5): 383-384.
- [14] Henry M H, Pesti G M. An investigation of calcium citratemalate as a calcium source for young broiler chicks[J]. *Poultry Science*, 2002, 81(8): 1149-1155.
- [15] Carro M D, Lopez S, Valdes C F, et al. Effect of DL-malate on mixed ruminal microorganism fermentation using the rumen simulation technique [J]. *Animal*

- Feed Science and Technology*, 1999, 79(1): 279-288.
- [16] Wu J L, Wu Q P, Huang J M, et al. Effects of L-malate on physical stamina and activities of enzymes related to the malate-aspartate shuttle in liver of mice[J]. *Physiological Research*, 2007, 56(2): 213-220.
- [17] Wu J L, Wu Q P, Yang X F, et al. L-malate reverses oxidative stress and antioxidative defenses in liver and heart of aged rats[J]. *Physiological Research*, 2008, 57(2): 261-268.
- [18] 李孟伟, 叶帮同. 苹果酸对反刍动物生产性能及瘤胃发酵功能影响的研究[J]. 湖南饲料, 2015, 4: 28-31.
- [19] Callis A, Magnan De Bornier B, Serrano J J, et al. Activity of citrulline malate on acid-base balance and blood ammonia and amino acid levels: Study in the animal and in man[J]. *Arzneimittel Forschung*, 1991, 41(6): 660-663.
- [20] 周红宇, 郑国统, 张士善. 谷氨酸脱羧酶抑制剂 L-苹果酸对小鼠学习记忆的影响[J]. 药学学报, 1996, 31(12): 897-900.
- [21] 谭光强, 郑企琨, 谭丽娟, 等. 两种静脉补钾方法的效果比较[J]. 中国医院药学杂志, 1995, 15(8): 348-350.
- [22] Linehan B, Scheifinger C C, Wolin M J. Nutritional requirements of *Selenomonas ruminantium* for growth on lactate, glycerol, or glucose[J]. *Journal of Applied and Environmental Microbiology*, 1978, 35: 317-322.
- [23] Callaway T R, Martin S A. Effects of organic acid and monensin on *in vitro* mixed ruminal microorganism fermentation of cracked corn[J]. *Animal Science*, 1996, 74: 1982-1989.
- [24] Gottschalk G. Bacterial Metabolism[M]. 2nd Ed. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [25] Sniffen C J, Ballard C S, Carter M P, et al. Effects of malic acid on microbial efficiency and metabolism in continuous culture of rumen contents and on performance of mid-lactation dairy cows[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2006, 127(1): 13-31.
- [26] Wang C, Liu Q, Yang W Z, et al. Effects of malic acid on feed intake, milk yield, milk components and metabolites in early lactation Holstein dairy cows[J]. *Livestock Science*, 2009, 124(2): 182-188.
- [27] Liu Q, Wang C, Yang W Z, et al. Effects of malic acid on rumen fermentation, urinary excretion of purine derivatives and feed digestibility in steers[J]. *Animal*, 2008, 3(1): 32-39.
- [28] Khampa S, Wanapat M, Wachirapakorn C, et al. Effects of levels of sodium DL-malate supplementation on ruminal fermentation efficiency of concentrates containing high levels of cassava chip in dairy steers[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Science*, 2006, 19(3): 368-375.
- [29] Foley P A, Kenny D A, Callan J J, et al. Effect of DL-malic acid supplementation on feed intake, methane emission, and rumen fermentation in beef cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 2009, 87(3): 1048-1057.
- [30] Castillo C, Benedito J L, Pereira V, et al. Malic acid supplementation in growing/finishing feed lot bull calves: Influence of chemical form on blood acid-base balance and productive performance[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 135(3-4): 222-235.
- [31] 王 聪, 刘 强, 董 群, 等. 日粮补充苹果酸对牛瘤胃发酵和养分消化代谢的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 224-231.
- [32] Martin S A, Streeter M N, Nisbet D J, et al. Effects of DL-malate on ruminal metabolism and performance of cattle fed high-concentrate diet[J]. *Animal Science Journal*, 1999, 77(4): 1008-1015.
- [33] Foley P A, Kenny D A, Lovett D K, et al. Effect of DL-malic acid supplementation on feed intake, methane emissions, and performance of lactating dairy cows at pasture[J]. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(7): 3258-3264.
- [34] 张爱忠, 姜 宁, 刘海涛, 等. 苹果酸和延胡索酸对奶牛产乳性能和血液生化指标的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2009, 45(19): 43-46.
- [35] 李 文, 王 聪, 董 群. 日粮补充苹果酸对肉牛生产性能和血液指标的影响[J]. 当代畜牧, 2011, 3: 30-32.
- [36] 王 聪, 刘 强, 黄应祥, 等. 苹果酸对泌乳早期奶牛体况和能量平衡的影响[J]. 当代畜牧, 2008, 4: 31-33.
- [37] Hernandez J, Castillo C, Mendez J, et al. The influence of chemical form on the effects of supplementary malate on serum metabolites and enzymes in finishing bull calves[J]. *Livestock Science*, 2011, 137(1): 260-263.
- [38] 赵 微, 李香子, 王 华, 等. 日粮精粗比与苹果酸对体外瘤胃发酵与产甲烷的影响[J]. 饲料研究, 2012, 8: 43-45.
- [39] 金哲勇, 李香子, 刘志刚, 等. 胡麻油和苹果酸对延边黄牛瘤胃发酵特性的影响[J]. 饲料研究, 2012, 1: 51-53.
- [40] 李 旦, 王加启, 刘 亮, 等. 体外法添加苹果酸与不饱和脂肪酸对瘤胃发酵及瘤胃功能菌群的影响[J]. 微生物学通报, 2009, 36(5): 694-699.

- [41] Castillo C, Benedito J L, Pereira V, et al. Effects of malate supplementation on acid-base balance and productive performance in growing/finishing bull calves fed a high-grain diet[J]. *Archives of Animal Nutrition*, 2008, 62(1): 70-81.
- [42] 施玲玲. 苹果酸对内蒙古白绒山羊瘤胃发酵功能及生产性能影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [43] 施玲玲, 孙海洲, 高义彪. 粗料日粮下添加苹果酸对内蒙古白绒山羊瘤胃 TVFA 浓度的影响[J]. *畜牧与饲料科学*, 2010, 31(6-7): 444-448.
- [44] 施玲玲, 孙海洲. 苹果酸对内蒙古白绒山羊消化道内营养物质流通量及生产性能的影响[A]. 中国畜牧兽医学动物营养学分会第十次学术研讨会论文集[C]. 2008.
- [45] 张之迎. 不同有机酸及其添加量对延边半细毛羊瘤胃发酵的影响[D]. 延吉: 延边大学, 2010.
- [46] Moharrery A, Asadi E. Effect of supplementing malate and yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on the rumen enzyme profile and growth performance of lambs[J]. *Journal of Animal and Feed Science*, 2009, 18(1): 283-295.
- [47] Martínez-González S, Escalera-Valente F, Gómez-Danés A A, et al. Influence of levels of DL-malic acid supplementation on milk production and composition in lactating Pelibuey ewes and pre-weaning weight gain of their suckling kids[J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2015, 43(1): 92-96.
- [48] 庞学东, 唐海翠, 庄 苏, 等. 苹果酸对山羊瘤胃发酵的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2006, 37(11): 1236-1240.
- [49] 庞学东. 苹果酸对瘤胃微生物体外发酵及山羊瘤胃代谢的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [50] Montano M F, Chai W, Zinn-Ware T E, et al. Influence of malic acid supplementation on ruminal pH, lactic acid utilization, and digestive function in steers fed high-concentrate finishing diets[J]. *Science of Animal*, 1999, 77(1): 780-784.
- [51] 宋天增, 冯 静, 夏晨阳, 等. 半胱胺对藏绵羊断奶羔羊瘤胃 pH 值、总脱氢酶及 TVFA 的影响[J]. *畜牧与饲料科学*, 2014, 35(2): 4-5.
- [52] 刘 亮. 体外法研究苹果酸和十八碳脂肪酸对瘤胃脂肪酸代谢及甲烷产量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [53] 王子荣, 胥清富, 任明强, 等. 半胱胺对山羊瘤胃代谢的影响[J]. *草食家畜*, 2002, 4: 42-44.
- [54] Salama A A K, Caja G, Carin D, et al. Effects of adding amixture of malate and yeast culture (*Saccharomyces cerevisiae*) on milk production of Murciano-Granadina dairy goats[J]. *Animal Research*, 2002, 51(4): 295-303.
- [55] Carro M D, Ranilla M J, Giralderz F J, et al. Effects of malate on diet digestibility, microbial protein synthesis, plasma metabolites, and performance of growing lambs fed a high-concentrate diet[J]. *Journal of Animal Science*, 2006, 84(2): 405-410.
- [56] Callaway T R, Martin S A, Wampler J L, et al. Malate content of forage varieties commonly fed to cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 1997, 80(8): 1651-1655.
- [57] Castillo C, Benedito J L, Mendez J, et al. Organic acids as a substitute for monensin in diets for beef cattle[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2004, 115(1-2): 101-116.

(责任编辑 姚倩倩)