

肉牛日粮补饲硫酸锌对瘤胃发酵代谢的影响

王峰^{1,2}, 莫放¹, 黄应祥², 王茂荣^{1,2}, 苗朝华^{1,2}, 陈瑶¹

(¹ 中国农业大学动物营养学国家重点实验室, 北京 100094; ² 山西农业大学动物科技学院, 山西太谷, 030801)

摘要: 选用 4 头装有永久性瘤胃瘘管的西门塔尔杂交肉牛, 采用 4×4 拉丁方设计, 研究日粮补饲不同无机锌(源于硫酸锌, 水平为 0、25、50 和 100 mg/kg 干物质(DM))对瘤胃氨氮和挥发性脂肪酸(VFA)浓度的影响。试验结果表明, 日粮补饲锌对瘤胃 VFA 浓度(产生量)有明显影响($P<0.05$), 与对照组相比, 50、100 mg/kg DM 的补饲明显提高乙酸、和总 VFA 的浓度($P<0.05$), 而日粮中锌的补饲对瘤胃氨氮浓度和瘤胃 VFA 摩尔比例没有显著影响($P>0.05$), 每千克日粮补饲 50 和 100 mg/kg DM 无机锌可明显促进瘤胃的发酵。

关键词: 肉牛; 锌; VFA

中图分类号: S815.5 文献标识码: A

Effects of Dietary Zinc Supplementation as Zinc Sulfate on Rumen Fermentation in Steers

Wang Feng^{1,2}, Mo Fang¹, Huang Yingxiang², Wang Maorong^{1,2}, Miao Chaohua^{1,2}, Chen Yao¹

(¹State Key Laboratory of Animal Nutrition, China Agricultural University, Beijing 10094;

²College of Animal Science and Technology, Shanxi Agricultural University, Taigu Shanxi 030801)

Abstract: An experiment was conducted to determine the effect of supplemental Zn (as Zn sulfate) on rumen fermentation in steers. Four ruminally cannulated steers were fed, in a 4×4 Latin square design, 2.8 kg/d concentrate and 4.2 kg/d rice straw as a basic dietary. Treatments consisted of the following: control (no supplemental Zn) and 25 or 50 or 100 mg Zn/kg DM (on DM basis of dietary) from Zn sulfate. Rumen samples were collected at days 22, 23 and 24 of experiment period. There were significant effects of supplementation of Zn on concentrate of acetate, propionate, and total VFA ($P<0.05$). The concentrate of ruminal $\text{NH}_3\text{-N}$ and the VFA molar proportions were not affected by the addition of Zn to diets ($P>0.05$). However, for comparing control (no supplementation), the concentrate of acetate and total VFA were higher with supplementation of 50 or 100 mg/kg DM Zn ($P<0.05$). These results indicated that Zn-supplemented at 50 or 100 mg/kg DM improved rumen fermentation in steers.

Key words: steer, Zn, VFA

众所周知, 当反刍动物日粮矿物质缺乏或搭配不适时常会引起采食量下降, 这其中可能是瘤胃微生物活力减弱^[1], 锌是瘤胃微生物正常生长繁殖所必需的微量元素之一^[2], 锌的缺乏或过量, 影响瘤胃微生物生长和对营养物质的发酵^[3,4]。体外试验表明人工瘤胃补充锌(Zn^{2+})对纤维的消化有抑制作用^[2,4], Zn^{2+} 可抑制体

外尿酶的活力^[5]; 体内试验表明日粮补饲无机锌可明显影响瘤胃微生物的生长, 改变瘤胃液中乙酸、丙酸产生量, 影响营养物质的瘤胃发酵率^[1,4,6-8]; 此外硫酸锌处理的大豆蛋白质可明显降低日粮蛋白质的瘤胃降解率, 提高过瘤胃蛋白质量^[4,6]; 大量硫酸锌的补饲(超过 1000 mg/kg, 千重)降低瘤胃原虫数量^[1], Froetsche 等

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划“反刍动物配合饲料生产技术集成与示范研究”(2006BAD12B08-03); 农业公益性行业科研专项“西部高档肉牛产业化配套技术及产业化机制研究”(nyhyzx07-035)。

第一作者简介:王峰, 男, 1978 年出生, 山西人, 博士, 研究方向为反刍动物营养。

通讯作者:莫放, 男, 1963 年出生, 研究方向为反刍动物营养。通信地址: 100094 北京市海淀区圆明园 2 号中国农业大学动物科技学院, Tel: 010-62731267,

E-mail: mofang@cau.edu.cn。

收稿日期: 2008-08-14, 修回日期: 2008-09-20。

在肉牛日粮中每天一次饲喂硫酸锌比多次饲喂显著降低瘤胃的纤毛虫数量^[6]。补饲锌没有影响日粮干物质的消化率^[4,9],并对平均总VFA的浓度没有影响^[7]。

硫酸锌是反刍动物可广泛使用的锌源,硫酸锌的补饲影响瘤胃消化代谢,由于补饲剂量和日粮的不同使已有报道资料有不同结果,如Arelovich等表明在投喂氯化锌2h后瘤胃pH明显低,同时瘤胃氨浓度下降,其他时间不明显^[4];Froetschel等表明在50%精料日粮中每隔2h补充硫酸锌(1142 mg/kg)可增加丙酸摩尔浓度,降低乙酸/丙酸比例^[6];Bateman等则指出硫酸锌的补饲降低饲喂后乙酸比例,并影响瘤胃液外流速度^[7]。国内有关硫酸锌对肉牛瘤胃发酵的影响资料比较少,为此笔者用瘰管肉牛研究日粮补饲硫酸锌对瘤胃发酵终产物的影响,评价无机锌补饲对瘤胃发酵代谢的影响。

1 材料与方法

1.1 试验动物,试验设计和动物饲养管理

4头带瘤胃瘰管体重为(505±10)kg西门塔尔杂交

肉用公牛,采用4×4拉丁方设计饲喂4种不同日粮,试验动物的日粮按1.3倍维持需要配合,由精粗饲料组成,粗料为稻草4.2kg,基础精料为2.8kg,基础精料的配方组成为玉米60%,麸皮20%,豆粕18%,食盐1%,磷酸氢钙1%,其粗蛋白(CP)、中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)分别为15.7%、23.1%、15.4%;试验中稻草直接饲喂,其CP、NDF和ADF分别为5.3%、81.6%、62.8%,不同试验处理组的饲料进食和营养进食见表1。试验处理是在每千克基础日粮中补饲(额外添加)0mg,25mg,50mg,100mg锌(锌来源为1水硫酸锌,ZnSO₄·H₂O)、其中25mg/kg、50mg/kg、100mg/kg为处理组,根据ZnSO₄·H₂O中锌含量和补饲水平,计算ZnSO₄·H₂O在日粮的添加量,研碎,多次稀释,混合到基础日粮中组成测定日粮,见表1。试验动物拴系饲养,每天分别在8:00和16:00等量饲喂,自由饮水(未检测出锌)。试验期30天,试验预饲期22天,试验期8天。

表1 日粮组成及营养水平*

| 日粮饲料进食 (DM)/g | 补饲锌添加水平千重/(mg/kg) | | | |
|------------------|-------------------|------|------|------|
| | 0 | 25 | 50 | 100 |
| 稻草 | 4200 | 4200 | 4200 | 4200 |
| 玉米 | 1680 | 1680 | 1680 | 1680 |
| 麸皮 | 560 | 560 | 560 | 560 |
| 豆粕 | 504 | 504 | 504 | 504 |
| 磷酸氢钙 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| 食盐 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| 进食干物质/g | 6507 | 6507 | 6507 | 6507 |
| 进食有机物/g | 6170 | 6170 | 6170 | 6170 |
| 进食粗蛋白/g | 661 | 661 | 661 | 661 |
| 进食NDF/g | 4073 | 4073 | 4073 | 4073 |
| 进食ADF/g | 3070 | 3070 | 3070 | 3070 |
| 硫酸锌/mg | 0 | 448 | 896 | 1792 |

注:*基础日粮实测含锌量为15.8mg/kg。

1.2 瘤胃液采样

在每试验期的第22、23、24天,于上午饲喂前(8:00)、喂后2h(10:00)、4h(12:00)、6h(14:00)、8h(16:00)采集瘤胃液,快速用4层纱布过滤,测定瘤胃液pH。测定pH后制样(4000r/min离心15min取上清液),样品在-20℃保存以备分析。

1.3 试验分析方法

饲料的常规指标干物质(DM)、粗蛋白质(CP)、有机物(OM)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)根据杨胜(1993)描述的方法测定^[10]。氨态氮(NH₃-N)的测定采用氧化镁直接蒸馏法,pH测定用

HJ-90B型pH计测定。挥发性脂肪酸(VFA)用气相色谱法测定,采用SQ-206型气相色谱仪(北京分析仪器厂生产)。色谱柱为直径4mm(外)×2M玻璃柱,色谱柱单体为3%PEG-20M,Chromsorb WAADMCS。柱温150℃,气化室温度为230℃,氮气载气流量为60ml/min,空气流量为360ml/min,进样量为0.6μl。

1.4 试验数据计算与统计分析

试验数据统计分析用SPSS11.0统计软件进行单因子方差分析(ANOVA),差异显著则进行邓肯氏多重比较。

2 结果与分析

2.1 日粮营养成分含量

该试验的实验动物采用限制(固定)采食量,试验动物不同日粮的 DM、OM、CP、NDF、ADF 的进食量见表 1, 全部日粮处理都含有相同的 CP、NDF 和 ADF, 试验日粮每天补饲硫酸锌的锌量分别为 448 mg、898 mg 和 1792 mg, 相当于每千克日粮干物质补饲锌量为 25 mg、50 mg 和 100 mg, 日粮锌含量的变化梯度达 25 mg/kg DM 以上, 因此, 试验的结果反应了日粮补饲锌量(水平)对瘤胃消化代谢的影响。

2.2 日粮锌水平对瘤胃液 pH 和氨浓度的影响

各处理组试验肉牛的瘤胃液 pH 均处于正常瘤胃

pH 范围内 6.1~6.8 之间, 无论日粮中锌的补饲水平如何, 肉牛瘤胃液 pH 随着时间点的不同表现相似的变化规律, 见表 2, 饲喂前较高, 饲喂后逐渐降低, 到饲喂后 4 h 降到最低, 然后又开始回升。但不同处理平均瘤胃液 pH 没有显著差异($P>0.05$)。

日粮补饲锌的处理对饲喂后瘤胃氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)释放模式和产量没有明显影响($P>0.05$), 全部处理的瘤胃液氨氮浓度有相似的变化规律, 饲喂后增加, 并随饲喂后时间而下降, 同一时间点不同处理间没有差异。在全部采样时间瘤胃氨氮浓度的变化范围为 0.073~0.13 mg/ml, 见表 3。

表 2 日粮补饲锌水平对瘤胃 pH 的影响

| 处理 | 饲喂前 | 饲喂后 2h | 饲喂后 4h | 饲喂后 6h | 饲喂后 8h | 平均 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 对照 | 6.75±0.23 | 6.38±0.52 | 6.30±0.32 | 6.47±0.41 | 6.54±0.09 | 6.49±0.17 |
| 25mg/kg | 6.68±0.56 | 6.25±0.21 | 6.21±0.19 | 6.32±0.26 | 6.71±0.42 | 6.43±0.24 |
| 50mg/kg | 6.42±0.57 | 6.19±0.61 | 6.12±0.25 | 6.14±0.46 | 6.38±0.41 | 6.25±0.14 |
| 100mg/kg | 6.38±0.23 | 6.15±0.48 | 6.09±0.38 | 6.24±0.45 | 6.31±0.79 | 6.23±0.12 |

表 3 日粮补饲锌水平对瘤胃氨氮浓度变化的影响

(0.01mg/ml)

| 处理 | 饲喂前 | 饲喂后 2h | 饲喂后 4h | 饲喂后 6h | 饲喂后 8h | 平均 |
|----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 对照 | 9.44±0.57 | 12.22±1.87 | 11.77±2.78 | 8.98±1.08 | 8.32±1.02 | 9.74±1.71 |
| 25mg/kg | 8.53±0.73 | 11.56±0.39 | 12.31±0.38 | 8.19±0.82 | 7.37±0.57 | 9.59±2.20 |
| 50mg/kg | 9.26±0.84 | 12.65±2.42 | 10.43±2.90 | 8.59±1.39 | 7.76±1.02 | 9.74±1.90 |
| 100mg/kg | 9.23±0.99 | 13.02±1.47 | 11.73±1.43 | 7.63±1.67 | 7.87±1.43 | 9.90±2.39 |

2.3 日粮锌水平对瘤胃 VFA 浓度变化和摩尔比例的影响

随着日粮补饲锌水平的提高, 肉牛瘤胃液中乙酸、丙酸、总 VFA 浓度明显增加($P<0.05$), 而丁酸浓度不同处理间没有明显差异($P>0.05$), 见表 4。不同日粮处理间瘤胃内乙、丙、丁酸和总 VFA (TVFA) 的浓度随时间点的不同表现出相似的变化规律, 饲喂前较低, 喂后逐渐增加, 6 h 达到峰值, 然后又开始下降。日粮补饲 50、100 mg/kg 的锌使饲喂前和饲喂后 8 h 的瘤胃液中乙酸、丙酸、总 VFA 的浓度显著高于对照组的乙酸、丙酸、总 VFA 的浓度($P<0.05$), 见表 4。

同时, 表 4 还表明, 瘤胃液中乙、丙、丁酸占 TVFA 摩尔百分比的变化规律与其浓度的变化规律相似, 日粮补饲没有影响瘤胃液中乙酸、丙酸、丁酸摩尔比例及乙酸/丙酸比值($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 日粮补饲锌(源于硫酸锌)对瘤胃 pH 和氨氮浓度的影响

pH 是瘤胃生态的一个重要指标, 该试验各处理的 pH 均在 6.1~6.8 之间, 有利于纤维性物质的降解, 日粮

补饲锌没有影响正常瘤胃缓冲体系和瘤胃的微生态平衡。Froetsche 等以瘦管肉牛补饲硫酸锌的试验也表明对瘤胃 pH 没有明显影响, 瘤胃 pH 在 6.4~6.7 的范围^[6], Bateman 等的奶牛试验也表明日粮补饲硫酸锌对瘤胃 pH 没有影响^[7]; 但 Arelovich 等用体外人工瘤胃研究表明锌补饲水平影响培养液的 pH, 范围均在 6.5 以上^[4]。

试验全部处理的瘤胃液氨氮有相似的释放模式, 且处理间的瘤胃氨氮浓度没有差异, 全部采样时间点的瘤胃氨氮浓度在 0.07 mg/ml 以上, 这都在已报道的适宜瘤胃发酵的最小浓度之上 (0.06~0.3 mg/ml)^[11], 因此瘤胃不可能因为缺乏可利用氮而降低瘤胃发酵, 但 Arelovich 等体外人工瘤胃加锌后使尿素氮的释放延迟, 加锌后的 2h 瘤胃氨浓度明显下降^[4]; Bateman 等在日粮中补饲硫酸锌则对瘤胃氨氮浓度没有影响^[7]。硫酸锌对瘤胃氨氮浓度变化的影响主要是表现在对瘤胃中蛋白质或氨基酸分解的抑制与否, 已有报道因日粮不同结果是不一致的, 如 Bateman 等指出随着日粮中锌的增加瘤胃尼龙袋中豆饼蛋白质的消失速率增加^[7]; 而 Froetschel 等的报道指出补饲锌降低瘤胃氨基酸的发酵^[6], 这些差异可能是与基础日粮和补饲水平有关^[12]。

表 4 日粮补饲锌水平对瘤胃 VFA 浓度变化和摩尔比例的影响

| 处理 | VFA | 采样时间 | | | | | 均值 | |
|----------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 饲喂前 | 饲喂后2h | 饲喂后4h | 饲喂后6h | 饲喂后8h | | |
| 浓度/(mmol·L ⁻¹) | 对照组 | 乙酸 | 52.29±3.15 | 56.05±5.86 | 61.31±5.70 | 61.67±4.96 | 57.23±2.91 | 57.71±3.90a |
| | | 丙酸 | 11.63±0.69 | 12.74±1.33 | 14.11±1.29 | 14.16±1.16 | 12.77±0.65 | 13.08±1.07 |
| | | 丁酸 | 7.06±0.43 | 7.53±0.79 | 8.33±0.76 | 8.29±0.68 | 7.02±0.36 | 7.65±0.64 |
| | | TVFA | 70.97±4.50 | 76.32±11.05 | 83.75±12.08 | 84.12±6.80 | 77.02±3.92 | 78.43±4.12 |
| | 25mg/kg | 乙酸 | 54.21±4.40 | 55.52±2.34 | 59.86±6.37 | 59.42±2.91 | 54.96±3.37 | 56.79±2.64 |
| | | 丙酸 | 12.11±0.98 | 13.11±0.55 | 13.52±1.42 | 14.10±0.69 | 12.67±0.78 | 13.10±0.77 |
| | | 丁酸 | 7.40±0.60 | 8.08±0.34 | 8.45±0.89 | 9.05±0.44 | 7.82±0.48 | 8.16±0.63 |
| | | TVFA | 73.72±8.74 | 76.71±10.91 | 81.82±8.57 | 82.57±10.14 | 75.45±9.65 | 78.05±3.94 |
| | 50 mg/kg | 乙酸 | 59.34±2.27* | 63.67±4.94 | 66.55±6.01 | 65.60±3.66 | 63.99±3.01* | 63.83±2.77* |
| | | 丙酸 | 13.10±0.51* | 15.87±1.23* | 15.28±1.36 | 15.33±0.84 | 14.00±0.67* | 14.72±1.13 |
| | | 丁酸 | 6.93±0.27 | 8.15±0.63 | 8.78±0.78 | 8.89±0.49 | 7.34±0.35 | 8.02±0.87 |
| | | TVFA | 79.38±3.05* | 87.69±6.80 | 90.62±8.15 | 89.82±4.99 | 85.34±4.02* | 86.59±3.25* |
| 100 mg/kg | 乙酸 | 60.12±3.5* | 63.29±1.95 | 67.76±5.52 | 66.19±6.02 | 63.17±3.05* | 64.11±2.96* | |
| | 丙酸 | 13.25±0.77* | 13.86±0.43 | 14.86±1.15 | 11.83±1.08 | 14.24±0.69* | 13.61±1.15 | |
| | 丁酸 | 7.25±0.42 | 7.17±0.22 | 8.35±0.64 | 6.96±0.63 | 7.25±0.35 | 7.04±0.55 | |
| | TVFA | 80.63±4.69* | 84.31±2.60 | 90.96±7.01 | 84.98±8.18 | 84.66±4.09* | 85.11±2.17* | |
| 摩尔百分比/TVFA | 对照处理组 | 乙酸 | 73.68±7.16 | 73.44±7.68 | 72.34±6.73 | 71.19±5.97 | 74.31±3.78 | 72.99±1.23 |
| | | 丙酸 | 16.39±1.59 | 16.69±1.74 | 17.72±1.52 | 17.94±1.40 | 16.58±0.84 | 17.06±0.70 |
| | | 丁酸 | 9.95±0.97 | 9.87±1.04 | 9.93±0.90 | 10.87±0.82 | 9.11±0.47 | 9.94±0.63 |
| | | C2/c3 | 4.50±0.44 | 4.40±0.46 | 4.42±0.40 | 4.28±0.35 | 4.48±0.23 | 4.42±0.08 |
| | 25 mg/kg | 乙酸 | 73.53±5.97 | 72.38±3.05 | 73.16±7.79 | 71.96±3.52 | 72.84±4.47 | 72.78±0.62 |
| | | 丙酸 | 16.43±1.33 | 17.09±0.72 | 16.52±1.74 | 17.08±0.84 | 16.79±1.03 | 16.78±0.31 |
| | | 丁酸 | 10.04±0.81 | 10.53±0.44 | 10.33±1.09 | 10.96±0.53 | 10.36±0.64 | 10.44±0.34 |
| | | C2/c3 | 4.48±0.36 | 4.23±0.18 | 4.43±0.47 | 4.21±0.21 | 4.34±0.27 | 4.34±0.12 |
| | 50 mg/kg | 乙酸 | 75.71±2.90 | 72.61±5.63 | 72.64±6.56 | 72.23±4.03 | 75.87±3.57 | 73.81±1.81 |
| | | 丙酸 | 16.08±0.65 | 18.10±1.40 | 17.48±1.48 | 17.98±0.92 | 15.50±0.79 | 17.03±1.17 |
| | | 丁酸 | 8.21±0.34 | 9.29±0.72 | 9.88±0.85 | 9.79±0.54 | 8.64±0.41 | 9.16±0.73 |
| | | C2/c3 | 4.45±0.17 | 4.01±0.31 | 4.42±0.39 | 4.34±0.24 | 4.50±0.22 | 4.35±0.20 |
| 100 mg/kg | 乙酸 | 74.56±4.34 | 75.07±2.31 | 74.49±6.07 | 73.70±6.70 | 74.62±3.60 | 74.49±0.49 | |
| | 丙酸 | 16.43±0.95 | 16.44±0.51 | 16.34±1.26 | 13.17±1.20 | 16.82±0.82 | 15.84±1.50 | |
| | 丁酸 | 8.99±0.52 | 8.50±0.26 | 9.18±0.70 | 7.75±0.70 | 8.56±0.41 | 8.60±0.55 | |
| | C2/c3 | 4.54±0.26 | 4.57±0.14 | 4.56±0.36 | 5.60±0.51 | 4.44±0.21 | 4.74±0.48 | |

注:*表示与对照组相比差异显著(p<0.05),TVFA=总VFA,c2/c3=乙酸/丙酸。

3.2 日粮补饲锌(源于硫酸锌)对瘤胃 VFA 产生量的影响

瘤胃消化主要取决于微生物的活力和饲料颗粒的外流速度,当反刍动物采食易发酵的饲料时,瘤胃微生物活动增加,从而 VFA 浓度增加^[11,13]。该试验全部日粮处理都含有相同的 CP、NDF 和 ADF,表 4 的结果表明,日粮补饲 50 和 100 mg/kg DM 的锌比对照组有明显高的 VFA 浓度,因此日粮补饲 50 和 100 mg/kg DM 锌(源于硫酸锌)可以明显促进瘤胃微生物对饲料的发酵,日粮补充锌可能改变瘤胃微生物种群的数量,改变不同 VFA 产生的速率^[9]。

关于日粮补饲硫酸锌对瘤胃 VFA 产生量的影响资料较少,但从报道结果来看因基础日粮和补饲水平不同有明显不一致的结果,Arelovich 等在矮管育成牛日粮中投喂氯化锌(250 mg/kg DM)后,瘤胃液的丙酸明显增加,乙酸摩尔下降^[4];Froetschel 等在 50%精料日粮中(肉牛)每隔 2 h 补饲硫酸锌(1142 mg/kg)可增加丙酸摩尔浓度,降低乙酸/丙酸比例^[6];Bateman 等在日粮中补饲锌(500 mg/kg,源于硫酸锌)则表明对平均总 VFA 的浓度没有影响,也没影响饲喂后不同时间的瘤胃液 VFA 浓度,但日粮增加锌结果使饲喂后瘤胃液中乙酸比例下降、丙酸比例明显增加^[7]。该试验表明,日

粮补饲 50 mg/kg、100 mg/kg 的锌使饲喂前和饲喂后 8h 的瘤胃液中乙酸、丙酸、总 VFA 的浓度显著高于对照组的乙酸、丙酸、总 VFA 的浓度 ($P<0.05$), 而对乙酸、丙酸的摩尔比例没有影响。

4 结论

该试验所选日粮无机锌补饲水平对肉牛瘤胃代谢有影响, 锌 50 mg/kg 和 100 mg/kg 的日粮无机锌补饲可提高瘤胃挥发性脂肪酸的产量。

参考文献

- [1] Durand M, Kawashima R. Influence of minerals in rumen microbial digestion. *England Digestive Physiology and Metabolism in Ruminants*, 1980:375-408.
- [2] Hubbert F Jr, Cheng E, Burroughs W. Mineral requirement of rumen microorganisms for cellulose digestion in vitro. *Journal of Animal Science*, 1958, 17:559-568.
- [3] Miller W J, Powell G W, Hiers Jr J M. Influence of zinc deficiency on dry matter digestibility in ruminants *Journal of Dairy Science*, 1966, 49:1012-1013.
- [4] Arelovich H M, Owens F N, Horn G W, et al. Effects of supplemental zinc and manganese on ruminal fermentation, forage intake, and digestion by cattle fed prairie hay and urea. *Journal of Animal Science*, 2000, 78:2972-2979.
- [5] Spears J W, Hatfield E E. Nickel for ruminants. I. Influence of dietary nickel on ruminal urease activity. *Journal of Animal Science*, 1978, 47:1345-1350.
- [6] Froetsche MA, Martin A C, Amos H E, et al. Effects of zinc sulfate concentration, feeding frequency on ruminal protozoal numbers, fermentation patterns and amino acid passage in steers. *Journal of Animal Science*, 1990, 68:2874-2884.
- [7] Bateman H G, Williams C C, Gantt D T, et al. Effects of zinc and sodium monensin on ruminal degradation of lysine-hcl and liquid 2-hydroxy-4-methylthiobutanoic acid. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87:2571-2577.
- [8] Oltjen R R, Sirny R J, Tillman A D. Effects of B vitamins and mineral mixtures upon growth and rumen function of ruminants fed purified diets. *Journal of Nutrition*, 1962, 77:269-277
- [9] Ivan M, Grieve C M. Effects of zinc, copper, and manganese supplementation of high-concentrate ration on digestibility, growth, and tissue content of holstein calves. *Journal of Dairy Science*, 1975, 58: 410-415.
- [10] 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京:北京农业大学出版社, 1991:17-28.
- [11] 冯仰廉, 反刍动物营养学. 北京:科学出版社, 2004:241, 337.
- [12] Bateman H G, Williams C C, Chung Y H. Effects of supplemental zinc in high quality diets on ruminal fermentation and degradation of urea in vitro and in vivo. *Professional Animal Scientist*, 2002, 18: 363-367.
- [13] 韩继福, 冯仰廉, 张晓明, 等. 日粮类型和羊草细度对肉牛瘤胃挥发性脂肪酸比例及能量转化效率的影响. *畜牧兽医学报*, 1998, 29(2): 97-104.