



阿卜杜赛米江·阿不都克里木,季长臻,秦肖莉,伊思蒙,伊敏·图尔荪,曹兵海,苏华维. 营养限制与恢复对西门塔尔公牛补偿生长性能的影响[J]. 中国农业大学学报,2025,30(03):1-12.

ABUDUKELIMU Abudusaimijiang, JI Changzhen, QIN Xiaoli, YI Simeng, TUERSUN Yimin, CAO Binghai, SU Huawei. Effects of feed restriction and subsequent realimentation on the compensatory growth of Simmental bulls[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(03): 1-12.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.03.01

营养限制与恢复对西门塔尔公牛补偿生长性能的影响

阿卜杜赛米江·阿不都克里木 季长臻 秦肖莉 伊思蒙 伊敏·图尔荪
曹兵海 苏华维*

(中国农业大学 动物科学技术学院/畜禽营养与饲养全国重点实验室,北京 100193)

摘要 为分析营养限制与恢复对西门塔尔公牛生长性能、消化代谢、血液理化指标、胴体性能及肉品质的影响,本研究选取15头13月龄左右平均体重为(475±3.8) kg的西门塔尔公牛,根据体重随机分为C(对照组,不限制采食量)、R(轻度限饲组,限制采食量为C组的80%)、S(严重限饲组,限制采食量为C组的60%)3个处理组,每组5头牛。限制饲喂60 d,营养恢复72 d。在营养恢复阶段,各组均不限制采食量。结果表明:1)营养恢复期末限饲组与对照组的体重无显著性差异($P>0.05$);R组在营养恢复阶段粗蛋白的表现消化率极显著高于营养限制阶段($P<0.01$);S组在营养恢复阶段的粗蛋白、粗脂肪、中性洗涤纤维的消化率均显著高于营养限制阶段($P<0.05$),其中粗蛋白的消化率极显著高于营养限制阶段($P<0.01$)。2)限制期末,限饲组血清中游离脂肪酸(NEFA)含量均显著高于对照组($P<0.05$);限饲组血清中 β -羟基丁酸(BHB)含量均显著低于对照组($P<0.05$)。补偿期末,血清中各物质含量在各处理组之间均无显著性差异($P>0.05$)。3)限饲组营养恢复期末主要器官组织重量及肉质与对照组无显著性差异($P>0.05$)。综上,适度的营养限制可以在不影响牛体重、主要器官组织重量和肉质的前提下,提高饲料中粗蛋白和中性洗涤纤维的消化率,优化牛的代谢指标。这为养殖业中饲料管理和牛肉品质提升提供了科学依据,有助于进一步提高养殖效益和资源利用率。

关键词 限饲;补偿生长;西门塔尔;胴体品质;消化代谢

中图分类号 S823.8

文章编号 1007-4333(2025)03-0001-12

文献标志码 A

Effects of feed restriction and subsequent realimentation on the compensatory growth of Simmental bulls

ABUDUKELIMU Abudusaimijiang, JI Changzhen, QIN Xiaoli, YI Simeng, TUERSUN Yimin,
CAO Binghai, SU Huawei*

(College of Animal Science and Technology/State Key Laboratory of Animal Nutrition and Feeding,
China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To analyze the effects of restricted feeding and realimentation on the growth performance, digestive metabolism, blood physicochemical indexes, carcass performance, and meat quality in Simmental bulls. 15 Simmental bulls with an average weight of (475±3.8) kg at about 13 months of age were randomly divided into three treatment groups based on weight: C (control group, ad libitum feeding), R (moderate restriction group, restricted to 80% of the control group), and S (severe restriction group, restricted to 60% of the control group), with five bulls in each group. The feed restriction lasted for 60 days,

收稿日期: 2024-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1602310, 2022YFD1601308);国家现代农业产业技术体系(CARS-37)

第一作者: 阿卜杜赛米江·阿不都克里木(ORCID:0009-0001-3659-6999),博士研究生, E-mail: abudusaimijiang@cau.edu.cn

通讯作者: 苏华维(ORCID:0000-0001-9934-9576),副教授,主要从事动物营养与饲料研究, E-mail: suhuawei@cau.edu.cn

followed by a 72-day recovery period with unrestricted feeding for all groups. During the nutritional recovery phase, there were no restrictions on feed intake for each group. The results showed that: 1) By the end of the realimentation period, there was no significant difference in the weight between the restricted groups and the control group ($P>0.05$). During the realimentation phase, the apparent digestibility of crude protein in the R group was significantly higher than during the restriction phase ($P<0.01$). In the S group, The apparent digestibility of crude protein, crude fat and neutral detergent fiber was significantly higher during the realimentation phase compared to the restriction phase ($P<0.05$), with crude protein digestibility being extremely significant increase ($P<0.01$). 2) By the end of the restriction period, serum free fatty acid (NEFA) levels in the restricted groups were significantly higher than in the control group ($P<0.05$), while serum β -hydroxybutyrate (BHB) levels were significantly lower ($P<0.05$). However, by the end of the realimentation period, there were no significant differences in the levels of these substances among the treatment groups ($P>0.05$). 3) By the end of the realimentation period, there was no significant difference in the weight and meat quality of the main organs and tissues between the restricted feeding group and the control group ($P>0.05$). In conclusion, moderate nutritional restriction can enhance the digestibility of crude protein and neutral detergent fiber without negatively impacting body weight, major organ tissue weight, or meat quality in cattle. These findings provide scientific evidence for optimizing feed management and improving beef quality, contributing to better economic returns and resource efficiency in the livestock industry.

Keywords feed restriction; compensatory growth; Simmental; carcass quality; digestive metabolism

在现代肉牛生产中,饲料成本约占总可变成本的75%,因此制定合理的饲养策略对于提高生产效益和肉质至关重要^[1]。补偿生长是一种在前期限制饲喂后通过恢复营养实现加速生长的能力,不仅可以提升饲料利用效率,还能显著降低生产成本^[2]。在牛的生长过程中,肌肉和脂肪组织的发育速度存在差异,脂肪沉积所需的能量显著高于肌肉(脂肪的能量含量为9.37 Mcal/kg,蛋白质为5.69 Mcal/kg),可达7倍差距^[3-4]。因此,研究补偿生长策略对肉牛能量利用和体成分的优化调控具有实际价值。

补偿生长现象在许多物种中得到验证,且逐渐被纳入牛肉生产系统。研究表明,尽管补偿生长在全球范围内得到应用,但其成功率受到多种因素影响,包括饲养管理方式、饮食限制的强度及限制与恢复阶段的饮食类型。个体因素如年龄、发育阶段、品种成熟速率以及基因型和性别等也会影响补偿生长^[5-9]。育肥牛在3月龄时肌肉增重速度开始加快,并在10月龄时达到峰值,18月龄后增重速度逐渐减缓。与此同时,脂肪组织的增重速度从12月龄起显著增加,并在18月龄时达到最大值,此后持续至23月龄。在限饲恢复营养后,牛会补偿性生长,体内摄入的能量更多以蛋白质形式沉积,用于修复营养限制阶段肝脏、消化道等器官的蛋白质损

失。因此,这一阶段体重增加的主要来源是蛋白质沉积,而蛋白质相较于脂肪,消耗的能量较少,从而促进了体重的快速增长^[10-11]。Keogh等^[12]指出,饮食限制可能会改变动物体成分,不同成熟率的品种可能在这种限制与恢复过程中表现出不同的补偿生长。Robelin等^[13]认为开始限饲时动物的年龄会影响动物的体组成。

尽管国内外对反刍动物补偿性生长的研究较多,但多集中于羊,部分涉及海福特牛^[14],对西门塔尔牛的研究相对较少,尤其是在中国特有的气候和饲料条件下。因此,进一步研究补偿生长在不同品种、不同环境和饲养条件下的适用性和影响因素,有助于优化补偿生长策略,更有效地在生产系统中应用该生长现象。

本研究旨在通过对12~13月龄的西门塔尔公牛进行饮食限制和恢复,系统研究其补偿生长表现,重点探讨在重新营养阶段的补偿生长潜力,为中国肉牛养殖业提供更多理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计及饲养管理

本试验在宁夏夏华肉食品股份有限公司进行。选取15头13月龄左右的健康无病西门塔尔公牛,平均体重为 (475 ± 3.8) kg,采用随机区组试验设计,根

据体重将试验牛分为 3 组，每组 5 头牛。试验共分为 2 个阶段，分别为限制饲喂阶段(60 d)和营养恢复阶段(72 d)。相应的 3 个处理组分别是对照组(C, 全期自由采食)、轻度限饲组(R, 限制饲喂阶段采食量为 C 组的 80%，营养恢复阶段自由采食)、严重限制组(S, 限制饲喂阶段采食量为 C 组的 60%，营养恢复阶段自由采食)。限饲组投喂量以对照组

每连续 2 d 采食量的平均值作为计算基础，按限饲比例投喂。试验全期采用拴系饲养，每天定量投料并在第二天上午 5:00 人工称剩余饲料并做记录。每日定时饲喂 2 次，分别为上午 8:00 和下午 4:00。每日定时给水 2 次，分别为上午 6:00 和下午 1:00，每次给水均足量。试验日粮组成和营养成分见表 1。

表 1 基础日粮组成和营养成分(干物质基础)
Table 1 Composition and nutrient levels of diets (DM Basis)

项目 Item	数值 Value	项目 Item	数值 Value
饲料原料(DM)Feed ingredient		主要营养水平(DM) ^③ Nutrient level	
全株玉米青贮/% Whole corn silage	50.13	有机物/% OM	93.11
玉米/% Corn	25.15	粗蛋白/% CP	12.11
麸皮/% Wheat bran	11.03	粗脂肪/% CF	3.13
浓缩料 ^① / % Concentrate	8.53	中性洗涤纤维/% NDF	30.31
酵母培养物发酵饲料/% Yeast culture fermented feed	4.69	酸性洗涤纤维/% ADF	15.08
复合预混料 ^② / % Premix	0.46	钙/% Ca	0.60
合计 Total	100.00	磷/% P	0.49
		总能/(MJ/Kg, DM)	11.35

注：①浓缩料：粗蛋白≥35.0%，粗灰分≤16.0%，粗纤维≤13.0%，氯化钠 0.5%~0.75%，钙 3.6%~6.8%，总磷≥1.2%，水分≤12.0%。②预混料为每千克日粮提供：维生素 A 5200 IU，维生素 D₃ 400 IU，维生素 E 36 IU；铜 23 mg，铁 55 mg，锰 35 mg，锌 50 mg，钴 0.13 mg，碘 0.15 mg，硒 0.18 mg。③营养成分含量均为实测数据。
Note: ① Crude protein≥35.0%，Crude ash≤16.0%，Crude fiber≤13.0%，Sodium chloride 0.5%~0.75%，Calcium 3.6%~6.8%，Total phosphorus≥1.2%，Moisture≤12.0%。② The premix provided per kilogram of diet: VA 5200 IU, VD₃ 400 IU, Cu 23 mg, Fe 55 mg, Mn 35 mg, Zn 50 mg, Co 0.13 mg, I 0.15 mg, Se 0.18 mg. ③ Nutrient content was a measured value.

1.2 样品采集及指标测定

1.2.1 生长性能

试验牛分别在第 60 天限制期末和第 132 天补偿期末进行称重，每次称重均在早晨饲喂及饮水前进行。

1.2.2 消化性能

试验牛每 30 d 进行 1 次 TMR 样品的采集，每次采集连续 3 d 的样品。每天的 TMR 样品分别在早上投料前和下午投料前用四分法采集新鲜 TMR 200 g，共计 400 g，混合均匀，于 65℃烘箱中烘干。待 3 d 采集完成后，将 3 d 的 TMR 样品混合在一起。需要采集的饲料样品包括试验牛所饲 TMR 及对应的剩料。

试验期间采用点收粪法，直肠取粪 2 次，分别在第 60 天限制期末和第 132 天补偿期末。每次采样连续收集 3 d，每天分别在早中晚各收集 1 次，每次收集大约 150 g；3 次的样品分别称取 100 g 粪样，混在一个新的塑封袋中，加入鲜粪样质量 1/4 的 10% 酒石酸溶液，

混合均匀。同时记录粪样鲜重、加酒石酸后重，于烘箱(65℃)中烘干。将 3 d 所收集的样品混合在一起，粉碎过 40 目筛，于阴凉干燥处保存，以备测定。

瘤胃液分别在第 60 天限制期末和第 132 天补偿期末进行采集，每次采集均在早晨饲喂后 2h 进行。采用瘤胃导管收集瘤胃液 250 mL 左右，立即测定瘤胃液 pH 值，剩余的瘤胃液保存于白色塑料瓶中，于-20℃冷冻保存。

测定饲料样品及粪样中水分(依据 GB/T 6435—2014)、粗蛋白(依据 GB/T 6432—1994)、中性洗涤纤维(依据 GB/T 20806—2006)、酸性洗涤纤维(依据 NY/T 1459—2007)、粗灰分(依据 GB/T 6438—2007)、盐酸不溶灰分(依据 GB/T 23742—2009)的含量，并以盐酸不溶灰分作为内源指示物测定饲料养分消化率，所用计算方法如下：

饲料营养物质消化率 = 100% - { (饲料指示剂(%) / 粪指示剂(%)) × (粪营养物质(%) / 饲料营养物质(%)) } × 100%

1.2.3 血液生物化学指标测定

分别在第60天限制期末和第132天补偿期末晨饲前采血,其中10 mL血液采集于含有抗凝剂的2支5 mL真空采血管中、另外10 mL血液采集于不含有抗凝剂的2支5 mL真空采血管中。将采集的含有抗凝剂的真空采血管于3 000 r/min离心15 min后,移取上层血浆于3个1.5 mL离心管中,在-20℃冰箱中冷冻保存;采集的不含有抗凝剂的真空采血管倾斜静置2 h后,在3 000 r/min转速下离心15 min,移取上层血清于3个1.5 mL离心管中,在-20℃冰箱中冷冻保存。

使用全自动生化分析仪(Hitachi 7020; Hitachi Co., Tokyo, Japan)测定血清中:葡萄糖(GLU)、总蛋白(TP)、尿素氮(BUN)、胆固醇(CHO)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白(HDL)、低密度脂蛋白(LDL)、游离脂肪酸(NEFA)、β-羟基丁酸(BHB)、谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、脂肪酶(LPS)的含量,测定所用商业试剂盒均由北京九强生物技术股份有限公司提供。

1.2.4 胴体性能及肉品质

屠宰前禁食禁水24 h,屠宰前记录空腹体重,屠

宰后记录胴体重,然后从11~12肋骨间的背最长肌取约1 kg肉样,备测。计算屠宰率、净肉率、胴体产肉率、肉骨比;记录试验牛的头重、蹄重、皮重、尾重;记录试验牛的心重、肝重、脾重、肺重(依据NY/T2660-2014)。用手持色差仪CR400/410(Minolta, Osaka, Japan),测定亮度(L*)、红度(a*)和黄度(b*)值,重复3次,取平均值。采用手持pH计(Testo205便携式酸度计)插入12~13肋间的眼肉中心进行测量肌肉pH,重复3次,取平均值。利用质构仪测定各组试验牛所取背最长肌的剪切力,测定滴水损失、蒸煮损失、水分。

1.3 统计分析

试验所收集或测定数据首先经Excel初步整理后,利用SAS软件中使用PROC ANOVA模型进行单因素方差分析,对结果有显著性差异的数据采用Duncan多重比较,P<0.01表示差异极显著,P<0.05表示差异显著,0.05<P<0.10表示有提高或降低的趋势。

2 结果与分析

2.1 营养限制与恢复对西门塔尔公牛补偿生长性能的影响

由表2可知,限制期末,C组、R组、S组的平均体

表2 营养限制与恢复对试验牛体重及日增重的影响

Table 2 Effects of nutrient restriction and realimentation on cattle body weight and daily gain kg

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
初始体重 IBW				
—10 d	475.8	475.6	478.8	5.88
限饲期体重 Restriction period BW				
—60 d	609.4a	578.2ab	543.8b	9.41
补偿期体重 Realimentation period BW				
—132 d	731.0	706.3	683.6	9.46
限饲期平均日增重 Restriction priod ADG				
—10~60 d	1.78a	1.37b	0.87c	0.11
补偿期平均日增重 Realimentation period ADG				
—60~132 d	1.70	1.77	1.96	0.06
全期平均日增重 Whole period ADG				
—10~132 d	1.75a	1.56ab	1.40b	0.06

注:同行数据不同字母表示差异显著(P<0.05),相同字母表示差异不显著(P>0.05)。下同。C:对照组,全期自由采食;R:轻度限饲组,限制饲喂阶段采食量为C组的80%;S:严重限制组,限制饲喂阶段采食量为C组的60%。

note: Within the same row, different letters represent significant differences (P<0.05), while the same letters represent no significant differences (P>0.05). The same below. C: control group, ad libitum feeding; R: moderate restriction group, restricted to 80% of the control group; S: severe restriction group, restricted to 60% of the control group.

重分别为609.4、578.2和543.8 kg,各处理组之间均表现出极显著差异($P<0.01$)。与C组相比,R组、S组分别降低了5.1%和10.8%。与R组相比,S组降低了5.9%。补偿与限制饲喂同等时间后,C组、R组、S组的平均体重分别为731.0、706.25和683.6 kg,各处理组之间虽无显著性差异,S组相较于C组仍有降低趋势,且从数值上看,由C组到R组再到S组表现为递减。与C组相比,R组、S组分别降低了3.4%和6.5%;与R组相比,S组降低了3.2%。

限制饲喂阶段各处理组之间平均日增重均表现出极显著性差异($P<0.01$),与C组相比,R组、S组分

别降低了23.0%和51.1%;与R组相比,S组降低了36.5%。补偿期各处理组平均日增重之间差异不显著。全面分析试验期,S组与C组之间存在显著性差异($P<0.05$),且从数值上看,由C组到R组再到S组是递减的。与C组相比,R组、S组分别降低了10.9%和20.0%;与R组相比,S组降低了10.3%。

由表3可知,限饲期各处理组之间的干物质采食量均存在极显著差异($P<0.01$);补偿期各处理组之间干物质采食量均差异不显著。

由表4可知,在营养限制阶段和恢复阶段,料重比在各处理组之间差异不显著。

表3 营养限制与恢复对试验牛干物质采食量的影响

Table 3 Effects of nutrient restriction and realimentation on dry matter intake

kg/d

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
限饲期 DMI Restriction period DMI 0~60 d	12.16a	9.72b	7.30c	0.54
补偿期 DMI Realimentation period DMI 60~96 d	12.23a	12.34a	11.42b	0.18
96~132 d	12.78	12.98	12.34	0.26
60~132 d	12.47	12.62	11.82	0.20
全期 DMI Whole period DMI 0~132 d	12.33a	11.30b	9.77c	0.32

表4 营养限制与恢复对试验牛料重比(FCR, DMI/ADG)的影响

Table 4 Effects of nutrient restriction and realimentation on feed conversion ratio (FCR, DMI/ADG)

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
限饲期 FCR Restriction period FCR 0~60 d	6.95	7.26	8.74	0.40
补偿期 FCR Realimentation period FCR 60~132 d	7.34	7.20	6.18	0.26
全期 FCR Whole period FCR 0~132 d	7.10	7.28	7.11	0.21

2.2 营养限制与恢复对西门塔尔公牛消化性能的影响

由表5可知,在营养限制阶段,S组的中性洗涤纤维消化率显著高于C组($P<0.05$),而粗蛋白、粗脂肪的消化率在各处理组之间并没显著差异。在营养恢复阶段,粗蛋白、粗脂肪、中性洗涤纤维的消化率在各处理组之间差异不显著。

由表6可知,从育肥时间的流向和营养控制阶段变化角度,比较各个处理组内前后两阶段各营养物质表观消化率的差异情况,C组在育肥后期粗蛋白、粗脂肪、中性洗涤纤维的表观消化率均极显著高于育肥前期($P<0.01$)。R组在营养恢复阶段粗蛋白的表观消化率极显著高于营养限制阶段($P<0.01$),而粗脂肪消化率并没有显著性差异。

表5 营养限制与恢复对试验牛营养物质表观消化率的影响
Table 5 Effects of nutritional restriction and realimentation on apparent digestibility %

项 目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
限饲期 Restriction period				
CP	54.81	57.41	54.80	0.89
EE	65.10	68.88	68.23	1.45
NDF	44.52b	49.47ab	50.94a	1.16
补偿期 Realimentation period				
CP	69.40	67.81	67.22	1.07
EE	78.24	77.54	75.08	1.30
NDF	57.72	56.34	56.36	1.35

中性洗涤纤维的消化率虽然并未表现出显著性差异,但从营养限制阶段到营养恢复阶段有提高的趋势($P<0.10$)。S组在营养恢复阶段的粗蛋白、粗脂肪、中性洗涤纤维的消化率均显著高于营养限制阶段($P<0.05$),其中粗蛋白的消化率极显著高于营养限制阶段($P<0.01$)。

表6 营养限制与恢复对试验2个阶段营养物质表观消化率的影响
Table 6 Effects of nutritional restriction and realimentation on apparent digestibility of nutrients in two phases %

项目 Item	时期 Period		SEM
	限制期末 End of restriction	补偿期末 End of realimentation	
C组 Group C			
CP	54. 81b	69. 40a	2. 73
EE	65. 10b	78. 24a	2. 68
NDF	44. 52b	57. 72a	2. 63
R组 Group R			
CP	57. 41b	67. 81a	2. 25
EE	68. 88	75. 08	1. 99
NDF	49. 47	56. 34	2. 03
S组 Group S			
CP	54. 80b	67. 22a	2. 19
EE	68. 23b	77. 54a	2. 29
NDF	50. 94b	56. 36a	1. 41

2.3 营养限制与恢复对西门塔尔公牛血液理化指标的影响

由表7~9可知,限制期末,R组与S组血清中游离脂肪酸(NEFA)含量均显著高于C组($P<0.05$)。R组与S组血清中 β -羟基丁酸(BHB)含量均显著低

于C组($P<0.05$)。补偿期末,血清中各物质含量在各处理组之间均未表现出显著性差异。S组血清中甘油三酯(TG)较C组表现出降低的趋势($P<0.10$);S组血清中 β -羟基丁酸(BHB)较C组和R组表现出降低的趋势($P<0.10$)。

表 7 营养限制与恢复对试验牛血清能量代谢指标的影响

Table 7 Effects of nutritional restriction and realimentation on serum energy metabolism indices mmol/L

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
限饲期 Restriction period				
葡萄糖 Glucose	2.46	2.46	2.45	0.14
游离脂肪酸 Free fatty acids	0.19b	0.26a	0.27a	0.01
β-羟基丁酸 β-Hydroxybutyrate	0.22a	0.12b	0.13b	0.02
补偿期 Realimentation period				
葡萄糖 Glucose	3.54	3.79	3.75	0.13
游离脂肪酸 Free fatty acids	0.20	0.23	0.22	0.01
β-羟基丁酸 β-Hydroxybutyrate	0.23	0.24	0.17	0.01

表 8 营养限制与恢复对试验牛血清蛋白质代谢指标的影响

Table 8 Effects of nutritional restriction and realimentation on serum protein metabolism indices

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
限饲期 Restriction period				
总蛋白/(μmol/L) Total protein	55.56		60.48	2.53
血清尿素氮/(mmol/L) Serum urea nitrogen	2.14	2.30	2.06	0.16
补偿期 Realimentation period				
总蛋白/(μmol/L) Total protein	63.10	63.52	61.44	2.11
血清尿素氮/(mmol/L) Serum urea nitrogen	2.63	2.75	2.90	0.22

表 9 营养限制与恢复对试验牛血清脂质代谢和酶类指标的影响

Table 9 Effects of nutritional restriction and realimentation on serum lipid metabolism and enzyme indices

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
限饲期 Restriction period				
甘油三脂/(mmol/L) Triglycerides	0.20	0.18	0.16	0.01
总胆固醇/(mmol/L) Total cholesterol	2.25	2.60	2.32	0.12
高密度脂蛋白/(mmol/L) HDL	0.97	0.96	0.88	0.05
低密度脂蛋白/(mmol/L) LDL	0.57	0.69	0.63	0.03
脂肪酶/(U/L) Lipase	10.08	10.70	10.48	0.33
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	22.60	20.40	16.00	1.38
谷草转氨酶/(U/L) AST	50.40	54.00	55.60	3.15
补偿期 Realimentation period				
甘油三脂/(mmol/L) Triglycerides	0.26	0.25	0.22	0.01
总胆固醇/(mmol/L) Total cholesterol	2.75	3.26	2.72	0.16
高密度脂蛋白/(mmol/L) HDL	1.05	1.11	1.10	0.05
低密度脂蛋白/(mmol/L) LDL	0.70	0.82	0.65	0.04
脂肪酶/(U/L) Lipase	11.40	11.32	11.54	0.39
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	26.00	24.40	24.20	1.02
谷草转氨酶(U/L) AST	55.80	55.40	60.40	2.66

2.4 营养限制与恢复对西门塔尔公牛胴体性能及肉品质的影响

由表 10 可知,C 组、R 组、S 组的平均净肉重分别为 398.9、380.0 和 364.0 kg,S 组相比 C 组显著降低了 8.7%($P<0.05$)。C 组、R 组、S 组的平均净肉率分别为 54.56%、54.51% 和 53.25%,S 组相比 C 组显著降低了 2.4%($P<0.05$),S 组相比 R 组显著

降低了 2.3%($P<0.05$)。各个处理组胴体产肉率、肉骨比的变化规律同屠宰体重和胴体重一样,随着营养水平限制程度的增加而递减,且 S 组与 C 组相比有降低的趋势。

由表 11 可知,经历 72 d 的补偿期后,各处理组主要内脏、器官、及组织的重量,包括心、肝、脾、肺和头、蹄、皮、尾,均未表现出显著性差异。

表 10 营养限制与恢复对试验牛胴体品质的影响

Table 10 Effects of nutritional retriCTION and realimentation on carcass quality

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
屠宰体重/kg Slaughter weight	731.0	697.0	683.6	9.35
胴体重/kg Carcass weight	462.3	442.9	428.1	6.18
屠宰率/% Dressing	63.24	63.56	62.62	0.21
净肉重/kg Net meat	398.9a	380.0ab	364.0b	5.89
净肉率/% Net meat rate	54.56a	54.51a	53.25b	0.25
胴体产肉率/% Carcass meat yield	86.28	85.77	85.03	0.22
骨重/kg Bone weight	63.46	62.86	64.11	0.91
肉骨比 Meat-to-bone ratio	6.29	6.06	5.69	0.11

表 11 营养限制与恢复对试验牛主要器官及组织的影响

Table 11 Effects of nutritional restriction and realimentation on organs and tissues

kg

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
内脏器官重 Organ weight				
心 Heart	2.78	2.46	2.62	0.06
肝 Liver	7.44	7.01	7.10	0.16
脾 Spleen	1.33	1.07	1.20	0.05
肺 Lung	7.04	6.56	6.75	0.18
头、蹄、皮、尾重 Head, hooves, skin, tail weight				
头 Head	31.03	30.36	31.20	0.82
蹄 Hooves	12.58	12.74	12.77	0.93
皮 Skin	52.13	51.90	53.75	0.63
尾 Tail	1.91	1.95	1.86	0.72

由表 12 可知,在经历 72 d 补偿期后,各处理组在肉品质方面,包括 pH、滴水损失、蒸煮损失、剪切力、肉中的水分及肉色的红度和黄度值,均未表现出显著性差异,肉色亮度值 R 组显著高于其他两组($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 营养限制与恢复对西门塔尔公牛补偿生长性能的影响

试验牛在限制饲喂开始时体重较大,在经过 72 d

表 12 营养限制与恢复对试验牛肉品质的影响
Table 12 Effects of nutritional restriction and realimentation on meat quality

项目 Item	组别 Group			SEM
	C	R	S	
滴水损失/ Drip loss	18.39	13.75	11.52	1.33
蒸煮损失/% Cooling loss	34.47	30.30	32.85	1.58
剪切力/N Shear force	12.49	10.07	12.59	0.78
水分/% Moisture	74.15	74.58	74.42	0.16
宰后 30 min pH pH at 30 minutes post-slaughter	6.36	6.04	6.29	0.07
宰后 30 min 肉色 Meat color at 30 minutes post-slaughter				
<i>L</i> *	30.49b	33.30a	30.76b	0.52
<i>a</i> *	15.47	17.18	15.48	0.47
<i>b</i> *	2.81	3.30	2.43	0.28

的补偿期后,各组体重差异仍然较大。虽然未显示显著统计差异,S组的体重相比C组有下降趋势。Bezerra等^[15]的研究结果与本试验一致,说明对于体重较大的西门塔尔公牛,72 d的补偿期不足以使S组体重恢复至对照组水平。在补偿期内,各组的平均日增重没有显著差异,C组的前后期日增重分别为 1.78 和 1.70 kg/d,显示试验牛在该体重阶段的生长性能稳定。

在补偿期的前 36 d,S组的干物质采食量显著低于C组,但在补偿期的后 36 d,两者之间的显著差异消失,表明限饲组的采食量经过一定时间的补偿能够赶上对照组。R组的干物质采食量在补偿期的前 36 d与对照组C组之间无显著性差异,且数值高于对照组。试验全期各个处理组出现的极显著差异,通过各阶段采食量的划分,可以看出R组是由于限饲期的控制而得到的节约。这种节约具体表现为:与C组相比,R组降低了 16.7 %;S组降低则不仅在限饲期实现了节约,在恢复补偿的前期同样也实现了节约,具体表现为与C组相比,S组降低了 16.8 %。与R组相比,S组降低了 16.8 %。

3.2 营养限制与恢复对西门塔尔公牛消化性能的影响

表观消化率受到动物消化能力和饲料可消化性的共同影响。本试验所用日粮为 TMR,精粗比例约 5:5。在这种情况下,粗饲料的容重较轻,占据较大的瘤胃容积,食糜通过瘤胃的速率对饲料中营养物质的消化率具有显著影响^[16]。较高的采食量通常加快食糜通过瘤胃的速率,从而降低营养物质

的消化率^[17-19]。限饲组的粗蛋白和粗脂肪表观消化率未显著提高,可能与限制饲喂的时间、限制程度及试验牛体重较大有关。研究者发现,虽然采食量增加加快了食糜通过瘤胃的速度,但随着饲喂时间的延长,谷物类饲料可能在后肠道得到补偿性消化,使全肠道的消化率保持稳定^[20]。采食量与消化率之间的关系并不绝对,还需考虑饲料组成比例、氮摄入量、动物品种等因素。本研究仅探讨了限制饲喂条件下消化率差异的主要因素。Coleman等^[21]发现,对于月龄较小的牛,限饲阶段限饲组与对照组的干物质采食量无显著差异,但限饲组的营养物质代谢能摄入量和粗蛋白摄入量显著低于对照组,而NDF消化率显著高于对照组。这可能是由于月龄较小的牛在生长阶段对日粮中蛋白质水平更为敏感。相反,陈军强等^[22]发现,小尾寒羊在干物质采食量减少时,限饲组的NDF消化率显著降低,可能是由于限制饲喂导致N摄入量减少,瘤胃微生物合成受影响,从而影响NDF的消化率。

在营养恢复阶段,补偿和限饲期相同时间后,各处理组的干物质采食量差异消失,各营养物质的表观消化率差异也随之消失。

3.3 营养限制与恢复对西门塔尔公牛血液理化指标的影响

在限制期末,血清中甘油三酯(TG)未显著变化,但在补偿期末,严重限饲组(S组)的TG水平相较于对照组(C组)有下降趋势。这一现象可能是由于在补偿期末,S组的采食量增加,能量需求得到满

足,因此不再需要动员脂肪来提供额外的能量,从而减少了TG的积累。这一结果与Keogh等^[23]的研究结果一致。游离脂肪酸(NEFA)是脂肪酸水解的产物。在限制期末,R组和S组的血清NEFA水平显著高于C组,这可能是因为限制期内,限饲组的能量供应不足,机体通过动员脂肪以释放更多的脂肪酸,从而导致血清中NEFA水平升高。在补偿期末,当能量需求得到满足后,各处理组之间的NEFA水平差异消失。这与Keady等^[24]、Hornick等^[25-26]和Ding等^[27]和魏国萍^[28]的研究结果一致。 β -羟基丁酸(BHB)是脂肪酸在肝脏中代谢的中间产物,因肝脏组织无法利用,需随血液输送至其他组织进行氧化分解。Keogh等^[23]发现BHB水平与脂肪沉积增加呈负相关。在脂肪动员和脂肪沉积减少的情况下,BHB水平倾向于增加;而当能量需求得到满足,脂肪沉积增加时,BHB水平显著降低。在补偿期末,S组的BHB水平较C组和R组有下降趋势,这可能是由于体内脂肪大量沉积所致。而在限制期末,R组和S组的BHB水平显著低于对照组C组,这与Keogh等^[23]和Blum等^[29]的研究结果相反。对此机制的解释仍需进一步研究。

3.4 营养限制与恢复对西门塔尔公牛胴体性能及肉品质的影响

从出栏重量、胴体重、屠宰率、胴体产肉率和肉骨比来看,本研究的变化规律与熊勇等^[30]的研究结果相似。S组的净肉重相比于C组显著降低了8.7%,并且随着营养水平限制程度的增加,净肉重、屠宰体重和胴体重呈递减趋势。具体而言,与C组相比,R组的净肉重降低了4.7%;与R组相比,S组的净肉重降低了4.2%。S组的净肉率相比于C组显著降低了2.4%。这表明,在本研究条件下,限饲组在经过72 d的补偿期后,其补偿效果可能仍然不足,出栏重仍然是影响胴体性能的主要因素。因此,可能需要增加限饲程度或延长补偿时间,以实现更好的补偿效果,从而提高生产效益。Lopes等^[31]研究表明,补偿生长可作为降低饲养成本的一种策略,可能不会影响屠宰年龄。但是90 d的饲养限制后经历了150 d的补偿生长,试验牛的补偿生长仍未能达到未受限制牛的水平。超过90 d的饲料限制因可能会延长育肥周期抵消补偿生长带来的成本节约,这种风险还与饲料补充剂的使用和精加工工艺有关。限饲旨在利用肉牛补偿生长的生

理特点以实现机体生产性能的优化,同时提高饲料利用效率和肉品产出水平。因此,进一步研究适宜的饲养时机,以及通过调整粗饲料与浓缩饲料的比例以改变饮食的能量密度,以实现不同程度生长受限的完全补偿,显得尤为重要。本次研究从各处理组的心、肝、脾、肺的重量来看,各组之间没有显著性差异。这表明经过72 d的补偿期后,限饲阶段对主要内脏器官(心、肝、脾、肺)的重量未产生显著影响,或者说限饲阶段的影响在补偿期后已得到充分恢复。

4 结 论

综上,限饲组的干物质采食量(DMI)在一定时间的恢复后,能够达到对照组的水平。采食量限制可以提高饲料中粗蛋白(CP)和中性洗涤纤维(NDF)的表观消化率。随着限饲程度的增加,游离脂肪酸含量也随之增加,而由于限饲组的出栏重量较对照组更小,因此胴体重呈现降低趋势。限饲组在补偿期末的主要器官组织重量及肉质与对照组无显著差异。对于严重限饲组,建议进一步延长补偿时间,以深入探究其恢复机制。本研究表明,适度的营养限制可以在不影响牛体重、主要器官组织重量和肉质的前提下,提高饲料中粗蛋白和中性洗涤纤维的消化率,优化牛的代谢指标。这为养殖业中饲料管理和牛肉品质提升提供了科学依据,有助于进一步提高养殖效益和资源利用率。

参考文献 References

- [1] Kenny D A, Fitzsimons C, Waters S M, McGee M. Invited review: Improving feed efficiency of beef cattle-the current state of the art and future challenges [J]. *Animal: an International Journal of Animal Bioscience*, 2018, 12(9): 1815-1826
- [2] Ashfield, Wallace, McGee, Crosson. Bioeconomic modelling of compensatory growth for grass-based dairy calf-to-beef production systems[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152(5): 805-816
- [3] 沈楷祖, 滚双宝. 肉牛生长发育规律及常规生理指标研究综述[J]. *甘肃畜牧兽医*, 2017, 47(9): 102-103
Shen K Z, Gun S B. Review of growth and development law and routine physiological indexes of beef cattle [J]. *Gansu Animal Husbandry and Veterinary*, 2017, 47(9): 102-103 (in Chinese)
- [4] Nguyen D V, Nguyen O C, Malau-Aduli A E O. Main regulatory factors of marbling level in beef cattle [J]. *Veterinary and Animal Science*, 2021, 14: 100219
- [5] Everitt G C, Jury K E. Growth of cattle in relation to nutrition in early

- life[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 1977, 20(2): 129-137
- [6] Clariget J M, Kelly A K, Banchero G, Keogh K, Kenny D A, Crosson P. Profitability, greenhouse gas emissions and feed-food competition of strategies to exploit compensatory growth in Uruguayan weanling-to-beef systems[J]. *Livestock Science*, 2024, 288: 105553
- [7] Wilson P N, Osbourn D F. Compensatory growth after undernutrition in mammals and birds [J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 1960, 35: 324-363
- [8] 祁东风, 杨苏亮, 李海静, 夏梦芳, 王婷, 黄艳群, 陈文. 动物补偿生长研究进展[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(6): 1655-1660
- Qi D F, Yang S L, Li H J, Xia M F, Wang T, Huang Y Q, Chen W. Research progress on compensatory growth in animals [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(6): 1655-1660 (in Chinese)
- [9] Hornick J L, Van Eenaeme C, Gérard O, Dufrasne I, Istasse L. Mechanisms of reduced and compensatory growth[J]. *Domestic Animal Endocrinology*, 2000, 19(2): 121-132
- [10] 刘亚倩, 丁维芹, 孙永刚, 韩银仓. 牦牛脂肪沉积的影响因素及研究进展[J]. *饲料工业*, 2024, 45(3): 60-66
- Liu Y Q, Ding W Q, Sun Y G, Han Y C. Influencing factors and research progress of yak fat deposition[J]. *Feed Industry*, 2024, 45(3): 60-66 (in Chinese)
- [11] (日)独立行政法人 农业·食品产业技术综合研究机构. 日本饲养标准·肉用牛[M]. 曹兵海译. 北京: 中国农业出版社, 2008
- (Japan) Agricultural and Food Industry Technology Research Institute. *Japanese Feeding Standards for Beef Cattle*[M]. Cao B H translated. Beijing: China Agricultural University Press, 2008 (in Chinese)
- [12] Keogh K, Waters S M, Kelly A K, Kenny D A. Feed restriction and subsequent realimentation in Holstein Friesian bulls: I. Effect on animal performance; muscle, fat, and linear body measurements; and slaughter characteristics[J]. *Journal of Animal Science*, 2015, 93(7): 3578-3589
- [13] Robelin J, Geay Y. Body composition of cattle as affected by physiological status, breed, sex and diet[J]. *Herbivore Nutrition in the Subtropics & Tropics*, 1984: 525-548
- [14] Yambayamba E S K, Price M A, Jones S D M. Compensatory growth of carcass tissues and visceral organs in beef heifers [J]. *Livestock Production Science*, 1996, 46(1): 19-32
- [15] Bezerra L R, Neto S G, de Medeiros A N, de Albuquerque Mariz T M, Oliveira R L, Cândido E P, de Azevedo Silva A M. Feed restriction followed by realimentation in prepubescent Zebu females [J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2013, 45(5): 1161-1169
- [16] Ali O, Junges L, Gomes E N O, Batistoti J O, Candido A R, de Kássia Gomes F, de Oliveira Lima R, da Silva A P, da Cruz Siqueira J, Ítavo L C V, Coelho E M, dos Santos Difante G, Dias A M. Ruminal kinetics and nutritive value of Zuri grass silage harvested at different ages and added with powder molasses [J]. *Tropical Animal Health and Production*, 2022, 54(4): 231
- [17] Lechner-Doll M, Kaske M, Engelhardt W V. Factors affecting the mean retention time of particles in the forestomach of ruminants and camels[M]. In: Tsuda T, Sasaki Y, Kawashima R. *Physiological Aspects of Digestion and Metabolism in Ruminants*. Amsterdam: Elsevier, 1991: 455-482
- [18] Ojha B K, Dutta N, Pattanaik A. Effect of feed restriction on nutrient utilization, growth and metabolic profile in crossbred calves [J]. *The Indian Journal of Animal Sciences*, 2018, 88(1): 94-99
- [19] 岳红艳. 饲养水平对肉用绵羊妊娠期消化代谢的影响[J]. *中国畜禽种业*, 2020, 16(9): 99
- Yue H Y. Effect of feeding level on digestion and metabolism of meat sheep during pregnancy [J]. *The Chinese Livestock and Poultry Breeding*, 2020, 16(9): 99 (in Chinese)
- [20] Ribeiro P R, Gindri M, Macedo Junior G L, Herbster C J L, Pereira E S, Biagioli B, Teixeira I A M A. Modeling gastrointestinal tract wet pool size in small ruminants[J]. *Animals*, 2023, 13(18): 2909
- [21] Coleman S W, Evans B C. Effect of nutrition, age and size on compensatory growth in two breeds of steers [J]. *Journal of Animal Science*, 1986, 63(6): 1968-1982
- [22] 陈军强, 丁路明, 高强, 龙瑞军, 安吾, 刘培培, 张丽莉. 限饲与营养补偿对小尾寒羊生长性能、消化代谢和瘤胃液纤维素酶活性的影响[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(7): 2085-2093
- Chen J Q, Ding L M, Gao Q, Long R J, An W, Liu P P, Zhang L L. Effects of dietary restriction and realimentation on growth performance, digestion, metabolism and cellulase activity in ruminal fluid of small tail Han sheep[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(7): 2085-2093 (in Chinese)
- [23] Keogh K, Waters S M, Kelly A K, Wylie A R, Sauerwein H, Sweeney T, Kenny D A. Feed restriction and subsequent realimentation in Holstein-Friesian bulls; II. Effect on blood pressure and systemic concentrations of metabolites and metabolic hormones[J]. *Journal of Animal Science*, 2015, 93(7): 3590-3601
- [24] Keady S M, Keane M G, Waters S M, Wylie A R, O'Riordan E G, Keogh K, Kenny D A. Effect of dietary restriction and compensatory growth on performance, carcass characteristics, and metabolic hormone concentrations in Angus and Belgian Blue steers[J]. *Animal*, 2021, 15(6): 100215
- [25] Hornick J L, Van Eenaeme C, Diez M, Minet V, Istasse L. Different periods of feed restriction before compensatory growth in Belgian Blue bulls: II. Plasma metabolites and hormones [J]. *Journal of Animal Science*, 1998, 76(1): 260-271
- [26] Hornick J L, Van Eenaeme C, Gérard O, Dufrasne I, Istasse L. Mechanisms of reduced and compensatory growth[J]. *Domestic Animal Endocrinology*, 2000, 19(2): 121-132
- [27] Ding L M, Chen J Q, Degen A A, Qiu Q, Liu P P, Dong Q M, Shang Z H, Zhang J J, Liu S J. Growth performance and hormonal status during feed restriction and compensatory growth of Small-Tail Han sheep in China[J]. *Small Ruminant Research*, 2016, 144: 191-196
- [28] 魏国萍. 日粮组成对育成肉牛营养代谢状况的影响分析[J]. *中国动物保健*, 2024, 26(1): 95-96
- Wei G P. Analysis of the effects of diet composition on the nutritional metabolism status of growing beef cattle [J]. *China Animal Health*, 2024, 26(1): 95-96 (in Chinese)
- [29] Blum J W, Schnyder W, Kunz P L, Blom A K, Bickel H, Schürch A. Reduced and compensatory growth: Endocrine and metabolic changes during food restriction and refeeding in steers [J]. *The Journal of Nutrition*, 1985, 115(4): 417-424

[30] 熊勇,陈勇,李洪英,陈康林,刘国龙.不同育肥模式对肉牛增重与产肉性能的影响[J]. 畜禽业, 2024, 35(1): 13-16

Xiong Y, Chen Y, Li H Y, Chen K L, Liu G L. Effects of different fattening models on weight gain and meat performance of beef cattle [J].

Livestock and Poultry Industry, 2024, 35(1): 13-16 (in Chinese)

[31] Lopes R B, Canozzi M E, Canellas L C, Gonzalez F A, Correa R F, Pereira P R, Barcellos J O. Bioeconomic simulation of compensatory growth in beef cattle production systems. *Livestock Science*, 2018, 216: 165-173

责任编辑: 秦梅



第一作者简介: 阿卜杜赛米江·阿不都克里木, 博士研究生, 目前就读于中国农业大学动物科技学院动物营养与饲料专业。硕士期间获得中国农业大学硕士二等奖学金两次, 动科安尼优奖学金, 被评为中国农业大学优秀共产党员, 北京市优秀退役大学士兵。参与蛋氨酸对肉牛前脂肪细胞增殖与分化的调控作用及其机制研究项目。



通讯作者简介: 苏华维, 博士, 中国农业大学副教授, 博士生导师, 国家肉牛牦牛产业技术体系岗位科学家兼办公室主任, “一带一路”国际肉牛产科技创新与战略研究院执行院长, 入选高层次人才支持计划。主要研究方向集中在肉牛营养与牛肉品质的研究, 教授本科生课程《牛生产学》和研究生课程《饲料营养与畜禽产品品质》、《农牧经营管理》和 Seminar C。主持国家级课题 5 项、省部级课题 8 项、国际合作和横向课题 10 余项, 参与制定国家及地方标准 4 项, 获得授权国家专利 5 项。已发表学术论文 90 余篇, 其中 SCI 收录 40 余篇。著作有《国外肉牛产业研究》《奶牛营养学》。荣获“安徽省技术领军人才”“云南省昭通市兴昭人才”称号及多项教学、科研奖励, 包括神农中华农业科技奖优秀创新团队奖、北京市教师育人案例一等奖、中国农业大学动物科技学院青年教师育人奖等。