

分类号：
学号：20232013013

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



放牧绵羊生长性能、血液生化指标、瘤胃微生物 及营养盈亏的季节性变化研究

学位申请人

马明宇

指导教师

张文举教授

申请学位门类级别

农学硕士

学科、专业名称

畜牧学

研究方向

动物营养与饲料科学

所在学院

动物科技学院

中国·新疆·石河子

2026年06月

分类号：
学号：20232013013

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



放牧绵羊生长性能、血液生化指标、瘤胃微生物 及营养盈亏的季节性变化研究

学位申请人	马明宇
指导教师	张文举教授
申请学位门类级别	农学硕士
学科、专业名称	畜牧学
研究方向	动物营养与饲料科学
所在学院	动物科技学院

中国·新疆·石河子
2026年06月

**Seasonal Variations in Growth Performance, Blood Biochemical
Parameters, Rumen Microbiota, and Nutritional Status of Grazing
Sheep**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agriculture

By

Ming-Yu Ma

(Animal Nutrition and Feed Science)

Dissertation Supervisor: Prof. Wen-Ju Zhang

June, 2026

Shihezi Xinjiang China

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

马明宇

时间： 2026 年 5 月 20 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

马明宇

时间： 2026 年 5 月 20 日

导师签名：

张红彦

时间： 2026 年 5 月 20 日

摘要

目的: 本研究以自然放牧条件下阿勒泰羊为研究对象,旨在通过监测阿勒泰羊的生长性能、血液生化指标、瘤胃发酵参数及微生物区系随季节更替呈现的动态特征。明确机体营养物质盈亏在不同季节的表现特征,进而为因地制宜的饲养管理提供理论指导。

方法: 每个试验期选择体重、年龄相近及体况良好的放牧阿勒泰育成母羊 18 只 ($35.2 \pm 1.05\text{kg}$, 6 月龄),依据牧草生长周期的阶段性特征,本研究于春季返青期、夏季旺盛期、秋季枯黄期及冬季枯草期分别开展了饱和链烷烃 C_{32} 缓释颗粒的投喂试验,每个试验期 13 天,其中预试期 8 天,正试期 5 天。正试期内,采集牧草、绵羊粪便、血液及瘤胃液样本,进行相关指标测定。试验用羊的饲养管理与牧场一致,期间无任何补饲。

结果: 试验一、放牧绵羊生长性能及营养盈亏的季节性变化研究

(1) 夏季牧草粗蛋白 (CP) 含量显著高于其他季节 ($P < 0.05$)。秋季牧草的粗脂肪 (EE) 含量显著高于春、夏、冬三季 ($P < 0.05$)。冬季牧草中酸性洗涤纤维 (ADF)、中性洗涤纤维 (NDF) 和粗灰分 (Ash) 含量在四季中最高 ($P < 0.05$)。(2) 四个季节放牧绵羊平均日增重 (ADG) 分别为 6.03、161.03、36.9 和 -8.7 g/d,存在显著差异 ($P < 0.05$)。秋季放牧绵羊干物质采食量 (DMI) 显著高于其他季节 ($P < 0.05$),其次为夏季,DMI 最低。在夏季,放牧羊对牧草中 CP、EE、NDF、ADF 和干物质 (DM) 的消化率显著高于冬季 ($P < 0.05$)。(3) 春季和冬季蛋白质摄入量与肉羊营养需要标准相比较,分别低 53.74 g 和 67.95 g;冬季代谢能摄入量比标准低 2.07 MJ。夏季和冬季牧草中铜含量低于春季和秋季;冬季牧草中硒含量较低。放牧羊血清中,锰含量均低于推荐值,春季和冬季血清中硒含量极低。

试验二、放牧绵羊血液生化指标、免疫性能及抗氧化能力季节性变化研究

(1) 夏秋季节,放牧羊血液中总蛋白 (TP) 和白蛋白 (ALB) 含量显著高于冬季 ($P < 0.05$);冬季球蛋白 (GLB) 和甘油三酯 (TG) 含量显著低于其他季节 ($P < 0.05$)。在春季,放牧羊血液中乳酸脱氢酶 (LD) 浓度显著高于秋冬季节 ($P < 0.05$)。(2) 与其他季节相比,春季放牧阿勒泰羊血液中干扰素- γ (IFN- γ)、白细胞介素-1 β (IL-1 β)、白细胞介素-6 (IL-6) 及免疫球蛋白 A (IgA) 的含量均显著升高 ($P < 0.05$);免疫球蛋白 M (IgM) 在春冬季含量显著高于夏季和秋季 ($P < 0.05$)。(3) 与冬季和春季相比,夏季放牧绵羊血液中丙二醛含量显著升高 ($P < 0.05$);与其他季节相比,秋季放牧羊血液中超氧化物歧化酶含量同样处于显著高水平 ($P < 0.05$)。此外,过氧化氢酶 (CAT) 在夏季放牧羊血液含量显著低于其他季节 ($P < 0.05$)。

试验三、放牧绵羊瘤胃发酵参数及瘤胃微生物区系的季节性变化研究

(1) 瘤胃液中氨态氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 浓度在夏秋季节显著高于春冬季 ($P < 0.05$)。春季与夏季放牧羊瘤胃中乙酸、丙酸及挥发性脂肪酸 (TVFA) 含量均显著高于秋、冬两季 ($P < 0.05$);冬季期

间，丁酸、异丁酸及异戊酸浓度亦表现出显著性 ($P<0.05$)。夏季放牧绵羊瘤胃戊酸浓度显著高于其他季节 ($P<0.05$)。(2) 在菌门水平上，秋季拟杆菌门 (*Bacteroidota*) 的相对丰度显著低于其他季节 ($P<0.05$)，而秋季厚壁菌门 (*Bacillota*) 相对丰度最高。在属水平上，冬季理研菌科 RC9 菌群 (*Rikenellaceae_RC9_gut_group*) 的相对丰度最高 ($P<0.05$)。夏季普雷沃氏菌属 (*Xylanibacter*) 的相对丰度显著高于秋季 ($P<0.05$)，春季普雷沃氏菌 UCG-003 属 (*Prevotellaceae_UCG-003*) 相对丰度显著高于其他季节 ($P<0.05$)。秋季 NK4A214 菌群 (*NK4A214_group*) 相对丰度显著高于其他季节 ($P<0.05$)。

结论：夏季和秋季牧草营养丰富，阿勒泰羊采食量高。冬季牧草营养品质较差，放牧羊生长性能受到负面影响。此外，放牧羊血液生化指标、免疫性能和抗氧化能力随放牧季节发生变化。秋季，瘤胃微生物有助于养分吸收和脂肪沉积；冬季，分解纤维的微生物增多，促进纤维降解生成挥发性脂肪酸，以应对营养匮乏。总之，阿勒泰羊的血液特性和瘤胃微生物区系会随着放牧季节的变化而呈现显著差异，这种适应性变化有助于机体应对牧草营养物质和外部环境的季节性波动，从而满足其生存需求。

关键词：放牧；阿勒泰羊；营养盈缺；血液生化指标；瘤胃微生物区系

Abstract

Object: This study aimed to evaluate the seasonal dynamics of nutrient balance and health status in grazing Altay sheep by monitoring changes in growth performance, blood parameters, rumen fermentation parameters, and microbiota across different seasons. The findings are expected to provide a theoretical basis for scientifically sound feeding and management practices in different seasons.

Methods: Eighteen grazing Altay growing ewe lambs (35.2 ± 1.05 kg, 6 months old) with similar body weight, age, and good body condition were selected for the experiment. Saturated alkane C₃₂ slow-release pellets were administered during four periods: the spring green-up period, the summer vigorous growth period, the autumn withering period, and the winter standing withered period. Each experimental period lasted 13 days, consisting of an 8-day adaptation period followed by a 5-day formal trial period. During the formal trial period, samples of forage, feces, blood, and rumen fluid were collected for relevant measurements. The management of the experimental sheep was consistent with the local herding practices, with no supplemental feeding provided. Saturated alkane C₃₂ slow-release pellets were administered each morning before the sheep were taken out to graze.

Results: Experiment 1: Study on seasonal variations in growth performance and nutritional gain and loss of grazing sheep.

(1) Among the four seasons, summer forage had the highest crude protein (CP) content, significantly surpassing the others. Autumn forage showed a similarly distinct pattern for ether extract (EE), with values significantly exceeding those of spring, summer, and winter ($P < 0.05$). Winter, on the other hand, exhibited significantly elevated levels of acid detergent fiber (ADF), neutral detergent fiber (NDF), and crude ash (Ash) relative to the remaining seasons ($P < 0.05$). (2) The average daily gain (ADG) of sheep during the four seasons of grazing was 6.03, 161.03, 36.9 and -8.7 grams per day respectively, and there were significant differences ($P < 0.05$). Grazing sheep in autumn had a significantly elevated DMI relative to the other seasons ($P < 0.05$), followed by summer, with the lowest DMI observed in winter. Summer grazing significantly enhanced the apparent digestibility of EE, CP, ADF, NDF, and DM in sheep relative to winter ($P < 0.05$). (3) In spring and winter, protein intake was 53.74 g and 67.95 g lower than the standard, respectively, and metabolizable energy (ME) intake in winter was 2.07 MJ lower than the standard. Forage was deficient in copper during summer and winter, and deficient in selenium during winter. In serum, manganese levels were below the recommended values in all four seasons, and selenium levels in serum were extremely low in spring and winter.

Experiment 2: Seasonal changes in blood biochemical indices, immune function, and antioxidant

capacity of grazing sheep.

(1) Compared to winter, grazing sheep exhibited significantly higher blood levels of total protein (TP) and albumin (ALB) during summer and autumn ($P<0.05$); Compared with the other seasons, winter grazing resulted in significantly lower GLB and TG contents ($P<0.05$). In spring, the blood lactate dehydrogenase (LD) level in grazing sheep was significantly higher than that in autumn and winter ($P<0.05$). (2) In spring, the contents of interferon- γ (IFN- γ), interleukin-1 β (IL-1 β), interleukin-6 (IL-6), and immunoglobulin A (IgA) in the blood of grazing Altay sheep were significantly higher than those in other seasons ($P<0.05$). The contents of immunoglobulin G (IgG) and tumor necrosis factor- α (TNF- α) were highest in spring, significantly higher than in other seasons ($P<0.05$). Compared with summer and autumn, the immunoglobulin M (IgM) content in spring and winter was significantly higher ($P<0.05$). (3) Autumn grazing sheep showed significantly greater blood SOD content than in other seasons ($P<0.05$). Summer grazing Altay sheep exhibited significantly elevated blood malondialdehyde (MDA) levels relative to winter and spring ($P<0.05$). Compared with the other three seasons, the catalase (CAT) content in the blood of grazing sheep during summer was significantly lower ($P<0.05$).

Experiment 3: Seasonal variation in rumen fermentation parameters and microbiota of grazing sheep.

(1) Significantly higher values of rumen fluid ammonia nitrogen (NH₃-N) were observed in summer and autumn relative to spring and winter ($P<0.05$). The contents of acetic acid, propionic acid, the ruminal TVFA levels of grazing sheep were significantly greater in spring and summer compared to autumn and winter ($P<0.05$). In winter, grazing sheep exhibited significantly lower ruminal concentrations of butyric acid, isobutyric acid, and isovaleric acid than in the other seasons ($P<0.05$). The concentration of valeric acid in the rumen of grazing sheep in summer was significantly higher than that in other seasons, and it was lowest in winter ($P<0.05$). The acetate-to-propionate ratio showed a trend of initially decreasing and then increasing from spring to winter. (2) At the phylum level, autumn was characterized by a significantly lower relative abundance of Bacteroidota compared to the other seasons ($P<0.05$). In contrast, the relative abundance of Bacillota was significantly higher during the same period ($P<0.05$). At the genus level, seasonal variations in relative abundance were evident for several taxa. Summer was characterized by significantly higher *Xylanibacter* abundance than autumn ($P<0.05$). Winter saw the highest abundance of *Rikenellaceae_RC9_gut_group* ($P<0.05$). Spring stood out for its elevated *Prevotellaceae_UCG-003* levels, significantly above the other three seasons ($P<0.05$). Autumn, meanwhile, showed a significant enrichment of *NK4A214_group* compared to the remaining seasons ($P<0.05$).

Conclusion: Forage was nutrient-rich in summer and autumn, resulting in high feed intake for Altay sheep. In winter, forage nutritional quality was poor, which negatively affected the feed intake of grazing sheep, leading to lower apparent nutrient digestibility and impaired growth performance. Furthermore, the

blood biochemical parameters, immunity, and antioxidant capacity of grazing sheep varied with the grazing season. During autumn, the rumen microbiota of grazing Altay sheep helped the host acquire more nutrients to promote fat deposition. In winter, fiber-degrading microorganisms were enriched, facilitating fiber breakdown and the production of volatile fatty acids, thereby helping the sheep cope with nutritional deficiency and meet their survival needs. In conclusion, the blood characteristics and rumen microbiota of Altay sheep exhibit significant differences across grazing seasons. These adaptive changes assist the animals in coping with seasonal fluctuations in forage nutrients and the external environment, thereby fulfilling their survival requirements.

Key words: Grazing; Altay sheep; Nutritional balance; Blood biochemical parameters; Rumen microbiota

缩写词

英文缩写	英文名称	中文名称
ADF	Acid detergent fiber	酸性洗涤纤维
ADG	Average daily gain	平均日增重
AIA	Acid insoluble ash	酸不溶灰分
ALB	Albumin	白蛋白
ALP	Alkaline phosphatase	碱性磷酸酶
ALT	Alanine aminotransferase	谷丙转氨酶
Ash	Crude ash	粗灰分
CAT	Catalase	过氧化氢酶
CP	Crude protein	粗蛋白
DM	Dry matter	干物质
DMI	Dry matter intake	干物质采食量
EE	Ether extract	粗脂肪
GH	Growth hormone	生长激素
GSH-Px	Glutathione peroxidase	谷胱甘肽过氧化物酶
IFN- γ	Interferon- γ	干扰素- γ
IgA	Immunoglobulin A	免疫球蛋白 A
IGF-1	Insulin-like growth factor-1	胰岛素样生长因子-1
IgG	Immunoglobulin G	免疫球蛋白 G
IgM	Immunoglobulin M	免疫球蛋白 M
IL-1 β	Interleukin-1 β	白细胞介素-1 β
IL-6	Interleukin-6	白细胞介素-6
IL-10	Interleukin-10	白细胞介素-10
LD	Lactate dehydrogenase	乳酸脱氢酶
MDA	Malondialdehyde	丙二醛
NDF	Neutral detergent fiber	中性洗涤纤维
NH ₃ -N	Ammonia nitrogen	氨态氮
SOD	Superoxide dismutase	超氧化物歧化酶
T3	Triiodothyronine	三碘甲状腺原氨酸
T4	Thyroxine	甲状腺素
TNF- α	Tumor necrosis factor- α	肿瘤坏死因子- α
TVFA	Total volatile fatty acids	总挥发性脂肪酸

目录

摘要	I
Abstract	III
缩写词	VI
第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 天然牧草营养品质与矿物质盈亏的动态变化	2
1.2.2 牧草营养动态对放牧反刍动物机体代谢及健康的影响	3
1.2.3 放牧家畜采食量测定方法	5
1.3 研究内容与技术路线	7
1.3.1 研究内容	7
1.3.2 技术路线	8
第 2 章 试验研究	9
试验一 放牧绵羊生长性能与营养盈亏的季节性变化研究	9
2.1 材料与方法	10
2.1.1 试验设计与饲养管理	10
2.1.2 样品的采集与处理	10
2.2 结果与分析	13
2.2.1 不同季节牧草营养成分含量比较分析	13
2.2.2 不同季节对放牧绵羊平均日增重的影响	13
2.2.3 不同季节对放牧绵羊表观消化率的影响	14
2.3 讨论	17
2.3.1 不同季节牧草营养成分含量比较分析	17
2.3.2 不同季节对放牧绵羊生长性能的影响分析	18
2.3.3 不同季节对放牧绵羊营养物质表观消化率的影响分析	18
2.3.4 不同季节对放牧绵羊代谢能及蛋白质进食量的影响分析	19
2.3.5 不同季节牧草矿物元素含量比较分析	20
2.4 小结	21
试验二 放牧绵羊血液生化指标、免疫性能及抗氧化能力季节性变化研究	22

2.5 材料与amp;方法	22
2.5.1 试验设计与饲养管理	22
2.5.2 样品的采集与amp;处理	22
2.5.3 指标测定与amp;方法	22
2.5.4 数据处理与amp;分析	23
2.6 结果与amp;分析	23
2.6.1 不同季节对放牧绵羊血液生化指标的影响	23
2.6.2 不同季节对放牧绵羊血液炎症因子及免疫性能的影响	24
2.6.3 不同季节对放牧绵羊抗氧化能力的影响	24
2.7 讨论	25
2.7.1 不同季节对放牧绵羊血液生化指标的影响分析	25
2.7.2 不同季节对放牧绵羊血液炎症因子及免疫性能的影响分析	26
2.7.3 不同季节对放牧绵羊抗氧化能力的影响分析	27
2.8 小结	28
试验三 放牧绵羊瘤胃发酵及瘤胃微生物区系的季节性变化研究	29
2.9 材料与amp;方法	29
2.9.1 试验设计与饲养管理	29
2.9.2 样品的采集与amp;处理	29
2.9.3 指标测定与amp;方法	29
2.9.4 数据处理与amp;分析	30
2.10 结果与amp;分析	31
2.10.1 不同季节对放牧绵羊瘤胃发酵参数的影响	31
2.10.2 不同季节对放牧绵羊瘤胃微生物区系的影响	31
2.11 讨论	37
2.11.1 不同季节对放牧绵羊瘤胃发酵参数的影响分析	37
2.11.2 不同季节对放牧绵羊瘤胃微生物区系的影响分析	38
2.12 小结	39
第3章 结论	40
第4章 创新点	41
参考文献	42
致谢	54
作者简历	55
导师评阅表	56

第1章 绪论

1.1 研究目的及意义

畜牧业是新疆传统优势产业，也是最具有特色的基础产业。近年来，畜牧业作为农业供给侧结构性改革的重要组成部分，既是农业发展的重要支撑，也对农村经济发展和农民收入增加起着重要作用。养羊业是畜牧业的重要组成部分。2025年末新疆羊存栏3828.88万只，出栏3406.12万只，羊肉产量达到62.81万吨（大畜牧网），新疆羊肉产量全国第一，存栏出栏位居前列，是西北地区畜牧业经济和居民肉类消费的核心支柱^[1]。

草地是具有多功能属性的自然资源，丰饶的草地资源既提供畜牧生产的养料，又兼具水源、土壤、固碳等生态服务功能^[2]。新疆草地资源丰富，全区草地总面积达77978.97万亩，其中天然牧草地面积为59397.13万亩。以天然草场为基础的放牧饲养，是现代畜牧业中的重要组成部分。尽管当前畜牧业已普遍迈向现代化的养殖道路，放牧方式依然未被淘汰，始终保持着其独特的价值。

新疆是我国养羊业五大主产区之一，大部分地区绵羊多为放牧饲养，终年靠采食天然牧草作为获取营养的主要途径。受季节的影响，牧草的生物量与养分含量水平均会出现极大的季节性差异，这也直接导致了草地畜牧业中草畜供需季节性不平衡的现象尤为凸显。尤其在北方草原地区，由于受西伯利亚气流的影响，气候鲜明，主要表现为“寒冷、干燥、冬季漫长、温差大”，冬春季节枯草期长达7~8个月，多数天然草地存在植被盖度偏低、牧草品质退化的现状，放牧绵羊的日常采食量中，高纤维、低营养价值的劣质牧草占比高^[3]，直接造成放牧绵羊出现“夏肥、秋壮、冬瘦、春乏”周期性生产困境^[4]。牧草的物种类型、种群分布、营养品质及所处生长期的差异，直接决定了放牧系统中可利用饲草的供给规模、品质等级与整体营养供给水平^[5]，对放牧羊的采食行为、生长发育都有直接的影响。

综上所述，探究放牧绵羊四季的营养状况，对精准补饲方案的制定具有重要意义。因此，本研究以自然放牧条件下阿勒泰羊为研究对象，分析其在不同季节的生长性能、营养物质表观消化率、血液生化指标的变化规律，评估其各季节营养盈亏状况与健康水平，旨在为放牧绵羊科学化、精细化的饲养管理方案制定提供理论依据。同时，利用微生物组学对放牧阿勒泰羊瘤胃微生物区系进行分析，以揭示其对季节放牧环境的适应机制。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 天然牧草营养品质与矿物质盈亏的动态变化

天然草地是全球范围内分布最广的陆地自然资源类型之一，也是现代草食畜牧业发展不可或缺的物质基础与核心前提。系统掌握牧草的营养动态规律与饲用品质状况，对推动草地放牧产业的科学化、可持续发展具有至关重要的理论与实践指导意义^[6]。牧草的饲用品质，在极大程度上决定了放牧家畜营养摄入的科学性与供给合理性。文献报道，同一种牧草在不同的草原类型中，其营养成分粗蛋白、粗脂肪、无氮浸出物等存在差异，草甸草原天然牧草的粗蛋白（CP）含量整体处于较低水平，而荒漠草原牧草的无氮浸出物（NFE）含量则呈现显著偏低的特征^[7]。就草地类型而言，典型草地和草甸草地最为丰富，高寒草地次之，荒漠草地资源量最低^[8]。张桂杰等对豆科牧草不同生育期的研究表明，开花期的 CP 含量显著高于结实期，而中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）与半纤维素的含量则随生育期推进呈现出完全相反的变化规律，以结实期为高^[9]。通过对主要豆科牧草进行分析，李志勇发现其开花期粗蛋白含量均在 15% 以上。豆科牧草不仅 CP 含量丰富，其 EE 含量同样处于较高水平^[10]。与其他草类相比，禾本科牧草营养价值相对较低，但其碳水化合物含量丰富，且可食率较高^[11]。张桂杰分析了 6 种禾本科牧草的营养成分，结果显示，除无芒雀麦外，其他牧草开花期的粗蛋白均显著高于结实期，而中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量则随着生长进程呈上升趋势^[9]。藜科牧草在全球主要分布在干旱、半干旱地区以及盐碱化严重的区域，在特定条件下具有较高的营养价值。在相同生长期内，藜科牧草的粗蛋白含量普遍高出禾本科牧草 5%-10%，粗灰分（Ash）含量比禾草高 3 倍以上^[12]。牧草的养分积累与含量水平，不仅由其自身的生理发育特性与物种遗传属性所决定，同时还显著受生长区域的立地环境条件调控^[13,14]。张宝成对青海湖周围自然草地的主要牧草和气候条件进行了观察，发现牧草的营养物质与 4 月的平均气温呈负相关性^[15]。张军探究气候条件对草地优势物种生物量的影响，研究结果表明，大针茅的生物量对气候因子变化的响应最为敏感、受气候条件的影响程度最大，羊草与冷蒿受气候因子的影响程度则依次递减^[16]。

在维持动物机体营养代谢稳态的生理过程中，微量元素发挥着不可替代的关键作用，牧草是家畜动物获取微量元素的核心传递载体。我国放牧羊养殖过程中普遍存在矿物质营养代谢障碍问题，随养殖区域、季节更替及牧草生育期的推进呈现出显著的动态差异^[17]。王楠等^[18]研究表明，禾本科、藜科、豆科牧草的微量元素累积特性存在显著科间差异；禾本科显著富集锌、铜，铁积累能力偏弱；藜科铁、锰含量较高，锌、铜含量偏低；豆科牧草微量元素含量多呈中间型分布。艾丹等^[19]针对四川阿坝县天然草地牧草的矿物质元素含量开展了系统测定与分析，结果表明，秋季牧草中锌元素的含量无显著

差异，而铁、铜、镁、锰、硒的含量则存在显著差异，该地秋季牧草中的锌、硒含量无法满足反刍家畜的正常生理营养需求，需通过额外补饲。孟子琪等^[20]在探究放牧羊在不同季节的变化规律时，发现当地放牧绵羊存在 Mg、Zn 不足，枯草期还出现 P 缺乏；此外，Fe 和 Mn 含量过高，进而导致 Co、Se 处于临界缺乏状态。综上所述，放牧绵羊机体的矿物质营养盈亏与供给水平，对其健康状况与生产性能具有至关重要的影响，需重点关注天然牧草中的矿物质含量动态，以及放牧羊摄入的矿物质总量与体内实际营养水平。

1.2.2 牧草营养动态对放牧反刍动物机体代谢及健康的影响

1.2.2.1 营养供给水平对放牧反刍动物生长性能的影响

生长性能是反刍动物生产系统的最终经济体现，其核心决定因素是营养物质的摄入与利用效率。在放牧体系中，牧草作为唯一或主要的营养来源，其动态变化直接驱动了绵羊生长性能呈现显著的季节性波动规律^[21]。天然草场牧草营养成分随物候变化呈现先升后降的趋势：天然牧草的生物量与营养水平从返青期到青草期呈逐步升高的趋势，进入枯黄期后持续下降，这一季节性动态变化直接造成冬春季节牧草的产量与养分供给均无法满足放牧家畜的生长需求，进而引发家畜体重下降的现象。张凯凯等^[22]研究发现，蛋白水平在最高水平时，羔羊的日增重也处于最高状态，也有研究表明，饲喂低蛋白日粮会显著抑制湖羊羔羊的体重增长，甚至引发体重下降^[23]。Panadi 等^[24]对杜泊羊饲喂五种不同蛋白质水平的日粮，结果发现随着日粮中蛋白水平的提高，杜泊羊的采食量和平均日增重（ADG）随之上升。提高日粮能量水平对动物氮代谢、糖代谢及脂肪代谢具有显著的促进作用^[25]。当日粮中蛋白质、能量等关键营养物质供给不足时，会直接抑制犊牛瘤胃的发育进程，使其发育速度显著减缓。Brosh 等^[26]通过设置高、中、低三个梯度的蛋白水平日粮开展犊牛饲喂试验，结果表明，高蛋白日粮组犊牛的日增重得到显著提升。牧草中可消化有机物质（DOM）的含量是决定其代谢能供给量的关键指标。DOM 含量高的牧草（如青贮、豆科牧草）通常可提供更多的代谢能，促进绵羊等反刍动物的生长性能^[27]。进入夏末秋季，牧草 CP 含量下降，且蛋白质的可降解比例发生变化，可能限制微生物蛋白的合成效率^[28]。生长性能不只受单一营养素的影响，更取决于能量与蛋白质的平衡、矿物质的充足性以及维生素的协同作用。尤其在季节性牧草中，这种营养平衡的失调会显著抑制绵羊的生长潜力^[29]。当草地生物量低于某一临界阈值（通常为 1 500-2 000 kg DM/ha）时，绵羊难以获取足量牧草，即使牧草本身营养品质良好，实际摄入的能量和蛋白质仍无法满足需求，进而表现为生长受阻甚至体重下降^[30]。

1.2.2.2 营养变化对放牧反刍动物血液生化指标的影响

血液是动物体内一种至关重要的液态结缔组织，构成了循环系统的核心。血液生化指标可作为监测动物临床状况与营养饲喂缺乏情况的手段之一^[31]。程光民等^[32]研究表明，在不同饲喂条件下，杜寒杂交羊血清中的总蛋白（TP）含量在高精料饲粮组显著高于低精料饲粮组。刘宏金等^[33]研究发现，与青草期相比，放牧藏羊血清中的 TP 含量在枯草期呈现显著下降趋势，藏系绵羊因天然牧草营养水平大幅下降、饲草供给严重不足，导致机体蛋白质摄入不足，最终造成放牧藏羊机体的免疫屏障功能减弱。杨宇为等^[34]研究发现，提高日粮中精料供给水平，可有效改善母牛的肝脏蛋白合成能力。

血清中葡萄糖（GLU）含量反映了糖异生功能与前体供应的平衡状态，成年反刍动物的血糖几乎全部来源于糖异生。当日粮能量供应不足时，血液葡萄糖浓度会随之降低。刘莹莹^[35]研究发现，与高精料组相比，低精料组日粮中的血糖含量较低。刘宏金^[33]研究表明，不同物候期藏羊血清 GLU 含量存在显著差异，青草期高于返青期和枯草期，牧草品质提升可使瘤胃发酵偏向丙酸模式，高含量的饲草蛋白会加速糖氨基异生作用，而引起血清 GLU 含量升高。

血清尿素氮（BUN）反映的是日粮能氮平衡、肾脏排泄功能以及机体蛋白质代谢状态的综合结果^[36]。牧草中粗蛋白含量高，瘤胃微生物分泌的蛋白酶、肽酶会将饲料中的真蛋白逐步降解为肽、游离氨基酸，再经脱氨基作用生成 $\text{NH}_3\text{-N}$ ，大部分的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在肝脏中合成 BUN，最终导致血清中 BUN 含量上升^[37]。谷丙转氨酶（ALT）和谷草转氨酶（AST）是评估肝细胞损伤和肌肉损伤最常用的两个血清酶指标^[38]。赵进韬研究发现，ALT 和 AST 与精料水平呈正相关^[39]。生长激素（GH）由脑垂体前叶分泌，其主要作用并非直接促进生长，而是通过重新分配养分，其分泌受营养状态的调控。不同类型牧草通过改变动物的代谢状态，间接影响 GH 的分泌水平^[40]。刘宏金通过对成年放牧藏系绵羊血清中 GH 含量进行研究，发现尽管不同物候期牧草营养成分发生显著变化，但 GH 含量相对稳定^[33]。日粮营养水平是影响动物总胆固醇与甘油三酯的关键因素，营养供给过剩时甘油三酯含量增加，营养不足时则减少，代谢功能随之受到抑制^[41]。

1.2.2.3 营养摄入对放牧反刍动物瘤胃内环境的影响

瘤胃是动物机体内迄今已知的，能够对纤维物质产生降解能力最强的天然存在的发酵罐^[42]，瘤胃发酵对动物的消化和吸收至关重要。瘤胃 pH 值直接反映了瘤胃内环境的稳定性和微生物的活性，其正常范围一般在 5.5 至 7.5 之间^[43]。饲粮精粗比、采食行为、瘤胃中的挥发性脂肪酸的吸收是影响其数值变化的主要因素。过低的瘤胃 pH 值会导致瘤胃微生物区系失衡，纤维消化率降低；甚至引起反刍动物间歇性腹泻，酸中毒休克，不利于生产性能的提高。瘤胃 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是反刍动物瘤胃内蛋白质降解的重要中间产物，