

基于冷暖季变化的不同草原类型牲畜“放牧 - 补饲”模式研究进展

徐 浩, 李柏欧, 吕良康, 熊凤良, 裴世腾, 吴力健, 罗 雄, 杨红建*

(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: 放牧是我国牧区牲畜的主要饲养模式, 但受季节更替与草原类型差异影响, 牧草资源在时空分布上呈现显著异质性, 导致牲畜营养供给不稳定。在实际应用中“放牧 - 补饲”模式面临补饲资源布局不合理、技术标准不足等关键问题, 亟需针对不同草原类型制定差异化补饲策略。科学合理的补饲可显著提升牲畜生产性能、缓解草地退化、减少温室气体排放, 并对实现牧区减畜增效具有重要意义。本文综述了冷暖季变化下不同草原类型的“放牧 - 补饲”模式对牲畜生长效率与生态环境的影响, 旨在为优化牧区补饲模式提供理论依据。

关键词: 草原类型; 季节变化; 放牧 - 补饲; 生长性能; 生态环境

中图分类号: S815

文献标识码: A

DOI 编号: 10.19556/j.0258-7033.20250103-11

我国草原面积为 $349 \times 10^4 \sim 392 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土面积的 41%^[1]。草原是生态系统的重要组成部分, 不仅在水土保持、维持生物多样性方面起着关键作用, 还为畜牧业提供了丰富的牧草资源。根据草地放牧特性和地理条件, 我国草原可分为草甸草原、典型草原、荒漠草原及高寒草原四大类型^[2]。不同类型草原的牧草量、载畜量不同, 且分布在不同草原的各个牧场由于过度放牧程度不同, 所导致的草原退化程度亦有所差异^[3]。此外, 根据季节不同放牧饲养可分为暖季放牧和冷季放牧, 暖季放牧在 5—10 月开展, 此阶段牧草资源丰富且营养成

分含量高可基本满足牲畜的营养需求; 冷季放牧在 10 月到次年 5 月进行的放牧活动, 此期牧草产量极低且营养匮乏难以满足牲畜生长及越冬需要^[4]。因此, 基于冷暖季节变化和不同草原类型采取差异化补饲模式, 对保证牧区高效养殖具有关键意义。

最近, Bretas 等^[5]调研指出, 在欧美放牧管理中精准畜牧业 (Precision Livestock Farming, PLF) 技术实现了对牧草—牲畜—环境系统的精细化调控, 即利用 GPS 项圈和加速度传感器监测采食与运动, 通过无人机或卫星遥感评估牧草生物量, 并结合射频识别技术 (Radio Frequency Identification, RFID) 与电子称重踏闸设备, 适时调整补饲时机与补饲量, 从而提高增重效率并优化碳平衡。相比之下, 我国牧区补饲仍依赖对传统节气判断和经验配方, 补饲时机常与草原返青、生长期不匹配, 配方设计也难以满足牲畜的营养需求, 常导致饲养效率低下和生态承载压力的加剧。基于此, 本

收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-05-26

资助项目: 国家重点研发计划: 草原牧区放牧家畜精准补饲技术与草畜耦合模式示范 (2023YFD1301704)

作者简介: 徐浩 (2002-), 男, 安徽定远人, 硕士研究生, 主要从事反刍动物营养学, E-mail: xuh6610@163.com

* 通信作者: 杨红建, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为动物营养与饲养学, E-mail: yanghongjian331@163.com

potential antibiotic alternatives. Recently, the beneficial effects of HC and its extracts on growth and health of livestock and poultry has been intensively studied. However, the active components composition, the unclear mechanisms of biological function, and potential adoption in animal diets have not been fully revealed. Therefore, this review aims to summarize the biological activities of HC and its extracts, as well as its applications and possible mechanisms in animal diets. This review could provide a theoretical basis and reference for the efficient and rational utilization of HC and its extracts in animal diets.

Keywords: Diet; *Houttuynia cordata*; *Houttuynia cordata* extracts; Biological activities

(责任编辑: 周会会)

文通过整合冷暖季节下不同草原类型的资源特征与牲畜需求，提出季节性补饲技术的优化路径，以实现牲畜生产效益的提升与草原可持续利用的目标。

1 常见补饲饲料的营养特点与饲喂方法

补饲饲料主要包括粗饲料、精饲料和饲料添加剂。各类饲料的营养特点不同，并且不同处理方式会影响动物对饲料的利用效率（表 1）。此外，在不同季节牲畜的维持需要量差异较大。因此，根据饲料特性和牲畜的营养需要特点，对不同类型的补饲饲料进行合理的处理和搭配可以提高饲料利用率。

精饲料主要包括能量饲料和蛋白质饲料^[6]，常用于冷季牧草量不足时饲喂。其中常用于补饲的精饲料有玉米、大豆和饼粕类饲料等。玉米的脂肪、淀粉含量很高，故其能量密度高，因此在冷季的高寒草原进行补饲可以有效缓解牲畜因营养不足所造成体重损失（俗称“掉膘”）。但玉米在短时间大量饲喂，瘤胃酸中毒发病率高达 15%~20%，这可能是由于玉米中淀粉含量较高，进入瘤胃后淀粉快速分解产生挥发性脂肪和大量乳酸，导致瘤胃 pH 快速降低^[7]。有研究指出，对玉米进行压片处理可提高牲畜对补饲玉米的利用率^[8]。这可能是由于玉米经过压片处理后其淀粉特性改变，并提高饲料的利用效率^[9]。在补饲饲料中，大豆和豆粕是蛋白质的主要来源，与玉米搭配饲喂可提高牲畜的育肥效率^[10]，但在生大豆中含有胰蛋白酶抑制剂、植酸和大豆凝集素等抗营养因子，这些物质会干扰蛋白质的消化与吸收。高温处理（如热压、膨化或烘焙）可有效破坏上述抗营养因子，从而降低其负面影响。故补饲熟化大豆可以提高牲畜对大豆中的蛋白质消化率^[11]。综合以上，冷季补饲精饲料（如玉米、大豆及饼粕类饲料）能有效缓解牲畜因牧草不足导致的营养缺乏和体重损失问题，但需根据饲料的特性进行科学配比与加工处理。

粗饲料包括秸秆、青干草、农作物加工副产品等。通常在牧区，补饲粗饲料的目的主要是提供营养物质和保障瘤胃的正常发酵，以避免酸中毒。但粗饲料粗纤维含量较高的特性使得其消化率较低。因此，在生产中粗饲料在补饲前常进行物理处理、化学处理和生物处理，以提高其消化率。粗饲料的物理处理具有改善饲料适口性、提高消化效率等优点。有研究表明，补饲物理处理后的青干草可以提高犊牛采食量和纤维素的消化效率^[12]。氨化、碱化是针对秸秆饲料的主要化学处理方式，Ghasemi 等^[13]研究发现对大麦秸秆进行氨化和碱化处理均显著提升了秸秆消化率。这可能是因为氨化和碱化处理通过解离木质素-碳水化合物复合体（Lignin-Carbohydrate Complex, LCC），削弱了纤维素微纤维与半纤维素间的氢键连接及疏水作用，降低了细胞壁结构的致密性，从而使纤维素糖苷键和半纤维素支链结构更充分暴露，显著提升了纤维素酶与底物的接触面积。生物发酵是当前处理秸秆类饲料的有效手段之一，Zhao 等^[14]研究表明，在稻草中添加半纤维素酶进行青贮发酵，可将纤维素的转化率提高至 60.69%，并显著降低干物质损失。这主要归因于半纤维素酶对细胞壁结构的破坏，释放了更多可发酵糖，从而促进微生物的高效利用。综合以上，在补饲粗饲料前对其进行适当的预处理可提高饲料营养价值。

饲料添加剂可分为营养性饲料添加剂和非营养性饲料添加剂，具有在饲料中添加量很小但作用显著的特点^[15]。有报道指出，不同牧区的土壤和牧草其矿物质含量差异显著，并且冬季牧草的各类矿物质含量显著下降，难以满足放牧牲畜的需要^[16]。因此，需要根据不同牧区和季节进行相应的补饲以满足牲畜需要。矿物质元素添加剂作为一种营养性饲料添加剂，主要通过盐砖形式进行补饲，给冷季在高寒草原放牧的牦牛犏牛补饲，其平均日增重提高 50 g/d 并提升瘤胃发酵效率^[17]。

表 1 常见补饲饲料的营养特点

饲料类型	处理方式	饲用动物	优点	缺点	参考文献
精饲料	压片玉米	牦牛	适口性好，营养价值均较高	饲喂成本较高，过量饲喂酸中毒发生率高达 15%~20%	[8]
	玉米-豆粕	妊娠母羊			[10]
	熟化大豆	奶牛			[11]
粗饲料	苜蓿干草	肉牛	饲喂成本低，促进胃肠道健康	能量浓度低，牲畜育肥效率低	[12]
	氨化秸秆	奶牛			[13]
饲料添加剂	矿物质盐砖	牦牛犏牛	犏牛平均日增重提升 60.77%，改善瘤胃发酵性能	饲喂成本较高	[17]
	胍基乙酸	肉牛			[18]

此外, 肌基乙酸作为肌酸生成的前体物质, 对促进蛋白质合成, 支持肌肉生长具有重要作用。Li 等^[18]研究表明, 给安格斯牛饲喂 0.9 g/kg 的肌基乙酸可显著改善其生长性能和瘤胃发酵性能。综合以上, 针对放牧牲畜补饲饲料添加剂可促进生产性能、保障牲畜健康。

2 基于冷暖季变化不同草原类型牲畜“放牧 - 补饲”模式的区别

从畜牧业的角度看, 放牧是草地的主要利用形式。放牧季节和草原类型的不同意味着牧草可提供的营养物质总量不同。通常在暖季时, 草原可基本满足家畜营养需要, 仅需补充矿物质元素和维生素即可。但冬季的草场其牧草产量低, 木质化程度高, 难以满足动物的生长需要, 故需适量补饲精、粗饲料^[19]。我国牧区地理分布的异质性形成了独特的草原生态梯度。草甸草原和典型草原, 其优势种羊草和针茅的粗蛋白含量可达 12%~18%, 中性洗涤纤维 (Neutral Detergent Fiber, NDF) 含量低于 55%, 具备较高的营养生物有效性。反观荒漠草原和高寒草原, 其优势植物沙蒿和藏蒿草的粗蛋白含量仅 7%~10%, NDF 高达 65%~70%, 且含有较高水平的次生代谢产物, 显著降低营养物质的消化率^[20]。因此, 放牧牲畜的补饲应根据冷暖季和不同草原的牧草组成情况生长情况采取合理的“放牧 - 补饲”模式以满足不同牲畜营养需要 (图 1)。

暖季是牧草旺盛生长的季节, 此期牧区主要采取放牧饲养可以基本满足牲畜的营养需要。有研究指出, 草甸草原和典型草原暖季“放牧 - 补饲”的重点是以补充矿物质元素和维生素为主^[21-22], 但由于部分草场的草地退化等原因, 暖季放牧还应根据牧草生长情况和牲畜营养需要进行补饲^[23]。尤其对暖季的高寒草原和荒漠草原而言, 由于海拔高、降水少、草稀疏生长期短, 通过放牧饲养难以获得足够营养物质, 因此依赖补饲获取营养物质。Dai 等^[24]研究指出暖季给在高寒草原放牧的牦牛进行补饲精料提高了其厚壁菌门的相对丰度, 进而促进瘤胃发酵, 避免牛只失重。任万平等^[25]研究指出暖季对犏牛进行放牧补饲可保证体尺的正常发育。上述研究说明了在暖季根据牧场的牧草量和牲畜生长阶段采取以除补饲微量元素外, 按需合理补饲能量、蛋白饲料的“放牧 - 补饲”模式对牲畜的健康生长有着积极影响。冷季

是牧草生长缓慢、产量低且营养价值低的时期, 无论在何种草原类型上都难以满足放牧牲畜的营养需要。并且牲畜在冷季由于气温较低导致维持消耗增加、冷应激加剧, 故在冷季放牧牲畜失重现象较暖季更为明显^[26]。因此, 在冷季放牧补饲时通过补饲能量密度高的饲料才能满足牲畜越冬需要, 以避免“冬瘦、春死亡”的现象发生^[27]。Cazzuli 等^[28]整理了在肉牛冷季放牧补饲的研究成果, 发现冷季气温较低是导致牧草量不足的重要原因, 故需提高精料比例以降低牛只失重和犏牛死亡的现象。Gao^[29]通过代谢组学揭示了在寒冷季节营养缺乏对放牧牦牛蛋白质和氨基酸代谢的影响大于能量和矿物质; 故在冷季, 放牧牦牛应及时补充必需氨基酸, 以降低放牧牦牛冷应激造成的负面影响。此外, Da 等^[30]研究发现, 冷季放牧肉牛在补饲日粮中饲喂脂肪补充剂可提高采食量并降低冷应激的发生率, 显著提高了牲畜免疫力。Brokaw 等^[31]报道了在补饲日粮中添加占体重 3% 大豆油可以提高饲料的利用率, 节约了能量和蛋白质饲料用量以降低饲养成本。上述研究说明了在冷季“放牧 - 补饲”模式中提高日粮精饲料的占比并加入脂类物质可以缓解冷季牲畜体重流失, 并维持了正常生理活动。此外, 在冷季的不同时期其草地的牧草量差异很大, 导致牲畜受到的营养胁迫不同^[4]。其中在放牧初期 (11 月—1 月中旬) 草地处于枯黄期的初期, 植株较高, 牲畜可通过放牧获得较多营养物质, 仅需少量补饲。在放牧中期 (1 月中旬—4 月中旬) 草地的平均植物储备量仅有初期的 50%, 故需要进行大量补饲以满足牲畜的维持和生长需要。在冷季放牧末期 (4 月中旬—5 月), 草地处于枯草期的末期, 储草量极少, 故在此阶段需要按照牲畜的营养需要进行补饲^[28]。

综合以上, 暖季补饲主要以补饲矿物质元素和维生素以避免缺乏症的出现为主, 但荒漠草原和高寒草原由于地理位置原因导致牲畜通过放牧获得的营养物质难以满足其生长需要, 故需要补饲部分精、粗饲料。与暖季相比, 冷季由于气候寒冷导致牲畜维持需要增加, 且在此期各类草原的牧草量均较低。此外, 在冷季的不同时期牲畜收到营养胁迫不同, 尤其冷季的中期和末期牲畜需要补饲量相对较大, 故补饲模式更偏重于补充高能饲料以使牲畜更好的抵御严寒、维持健康以减少养殖户的损失。

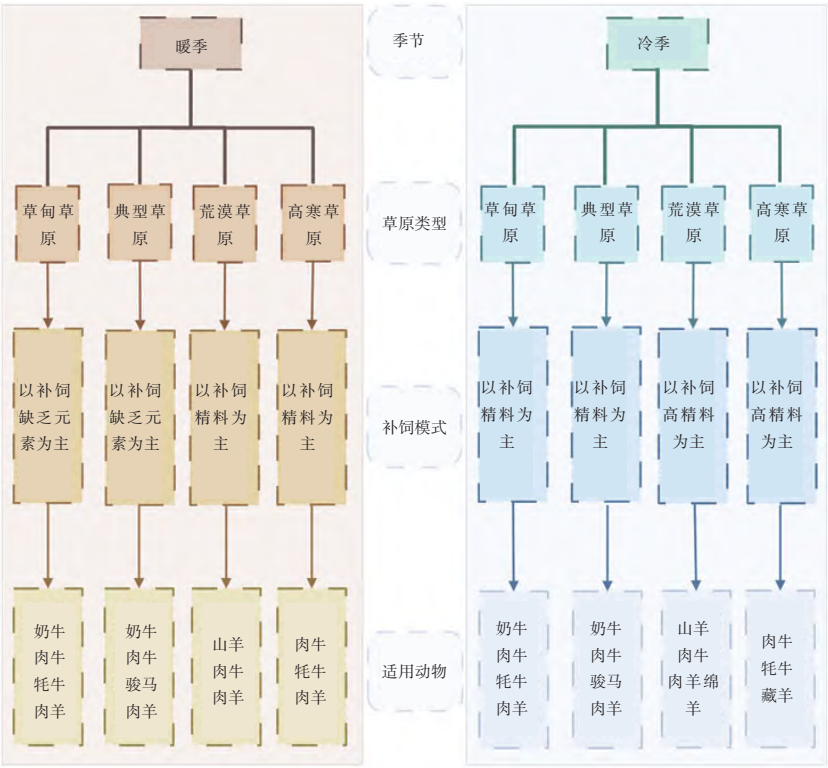


图 1 基于冷暖季变化不同草原类型牲畜“放牧 - 补饲”模式的区别

3 基于冷暖季变化不同草原类型牲畜“放牧 - 补饲”的饲喂效果

根据冷暖季变化和不同草原类型进行针对性的补饲，对提高牲畜的生长效益和改善经济效益有着关键作用（表 2）。此外，白彦霞^[32]调研指出在我国的农区以及半农半牧区多采用农牧互补的饲养模式，且多在牧区修建圈舍以采取就近圈舍补饲的育肥方式以提高生长性能和经济效益。然而，目前针对农牧结合饲养模式的基础研究仍较为薄弱，导致在确定不同草地类型下的补饲量方面存在一定困难。因此，基于季节变化和草地类型开展系统性研究，制定科学合理的补饲标准，已成为亟需解决的关键问题。

3.1 基于冷暖季变化不同草原类型牲畜“放牧 - 补饲”的生长效益 补饲对牲畜生长性能的最直接效益体现在增重和体重维持方面。在“放牧 - 补饲”模式下，牲畜能够通过补充额外的营养，避免因牧草营养不足导致的体重损失。尤其是在育肥期，补饲高精料可以促进牲畜的体重增长，以缩短育肥周期。

近年研究表明，暖季补饲干预对放牧家畜生长性能提升具有显著效应，其作用机制与营养代谢调控及瘤

胃功能优化密切相关。Xue 等^[33]针对高寒草原牦牛开展的研究表明，补饲以脱壳大麦为核心的能量饲料较蛋白饲料（菜籽粕为主）日增重提升 11.9%，这可能是由于能量饲料中富含可快速分解的碳水化合物（如淀粉），其通过三羧酸循环产生的 ATP 生成效率更高，从而更适应在冷季短、生长期有限的高寒生态系统饲养动物的能量分配需求。此外，唐淑珍等^[34]研究发现给暖季在荒漠草原放牧的肉羊补饲沙棘提取物复合添加剂和寡糖 + 益生菌复合添加剂可分别较对照组提升日增重 26.2%、17.6%。Shi 等^[35]研究发现给在暖季典型草原放牧饲养的滩羊饲喂 1 g（10 000 U/g）纤维素酶干粉，显著改善了瘤胃的发酵性能，提高了乙酸和丙酸产量。由此可见在暖季给放牧牲畜补饲营养性饲料添加剂可针对瘤胃内环境进行调控进而同步改善饲料能量利用效率。在冷季草原生态系统中，干预策略的制定需综合考虑环境胁迫、能量代谢特征及饲料资源特性。陈清文^[36]研究指出，在冷季高寒草原海拔高天气寒冷，通过在暖棚饲养并结合补饲的方式饲喂 70 d 的牦牛较无暖棚组的牦牛日增重提升了 14.3%。由此可见暖棚结合补饲的饲喂模式可尽可能的避免冷应激对牲畜的影响以促

表 2 基于冷暖季变化不同草原类型牲畜“放牧 - 补饲”的饲喂效果					
补饲季节	放牧草原	补饲成分	饲用动物	饲喂效果	参考文献
暖季	草甸草原	无壳大麦或菜籽粕	牦牛	饲喂无壳大麦和菜籽粕均能提高其日增重，饲喂无壳大麦可促进葡萄糖代谢	[33]
	荒漠草原	复合型饲料添加剂	阿勒泰羊	提高了饲料转化率和采食量，平均日增重增加	[34]
	荒漠草原	酒糟	肉牛	放牧后期进行补饲，每年可增加收益 32.21 美元 / 头	[40]
	典型草原	纤维素酶干粉	滩羊	改善瘤胃的发酵性能，提高乙酸和丙酸的产量	[35]
	高寒草原	玉米 - 豆粕混合精料	牦牛	每年提高经济效益 355.8 元 / 头	[41]
冷季	草甸草原	燕麦干草、青稞秸秆	牦牛、犏牛	补饲燕麦干草的牦牛体重增加了 32 g/d，而补饲青稞秸秆的牦牛仍体重损失了 56.7 g/d	[39]
	高寒草原	玉米 - 小麦 - 麦麸为主配置的精饲料	牦牛	改善瘤胃发酵、有益菌丰度增加、提高生产性能	[37]
	高寒草原	燕麦青干草	牦牛、藏羊	补饲 102d，牦牛收益增加 103.5 元 / 头，藏羊 154.7 元 / 头	[42]
	高寒草原	燕麦青贮、羊草青贮 + 高精料	牦牛	补饲 100% 羊草青贮的经济效益最好，每头平均增加收益 54.39 元；补饲 35% 燕麦青贮的增重性能最好，补饲 50d 每头平均增重 22.6 kg	[43]

进其生长性能。Yi 等^[37]研究发现在冷季通过给基于体重基数为（204.9±10.65）kg 的高寒草原放牧牦牛补饲 4.5 kg/d 精饲料，100 d 后增重 73.25 kg，而不补饲组则失重 17.16 kg。Xu 等^[38]研究表明给 60 只 3 岁的放牧藏羊在冷季连续 70 d 补饲 150 g/d 的精料，显著提高了藏羊的增重性能，且公羊的增重性能优于母羊。Long 等^[39]研究了在草甸草原冷季放牧的体重基数为（164±27.1）kg 牦牛补饲燕麦干草、青稞秸秆对其增重性能的影响，与对照组相比，补饲燕麦干草的牦牛体重增加了 32 g/d，而补饲青稞秸秆的牦牛体重仍损失了 56.7 g/d。这可能是因为青稞秸秆的粗纤维含量过高，牲畜利用率较低；而燕麦青干草属于优质粗饲料，牲畜可高效利用以改善其生产性能。

综合以上，针对冷暖季的特性应采用相应的补饲策略，暖季补饲应注重能量饲料与微生物制剂的协同作用，通过优化瘤胃发酵效率及免疫调节提升生产性能；冷季应结合环境温度调控与高能量密度日粮供给，以缓解能量负平衡。此外，不同草原类型需差异化匹配补饲策略，高寒和荒漠草原应注重能量 - 蛋白平衡，草甸和典型草原应侧重微量元素精准补充，从而实现全年放牧系统营养供给的适配并使生产效益最大化。

3.2 基于冷暖季变化不同草原类型牲畜“放牧 - 补饲”的经济效益 放牧牲畜补饲的经济效益由牲畜补饲饲料成本和生产产品的价值决定，合理的“放牧 - 补饲”模式可以降低饲喂成本，提升畜产品品质，还可以保持牲畜的健康和草原的可持续利用以保证牧民的长期收益。Wheeler 等^[40]给暖季荒漠草原放牧的 1 周龄肉牛在全

季节和放牧后期补饲 1.6 kg 的酒糟，发现了暖季全程补饲酒糟的单位收益（14.96 美元 / 头）远低于放牧后期集中补饲（32.21 美元 / 头）。Song 等^[41]研究发现给暖季基于高寒草原放牧的牦牛补饲玉米 - 豆粕混合精料 100 d，每头牲畜可提高经济效益 355.8 元。由此可见，合理选择补饲时机和饲料类型是提高放牧牲畜经济效益的重要途径，短期集中补饲策略在暖季具有显著的经济优势。徐田伟等^[42]研究发现冷季给在高寒草原放牧饲养的牦牛和藏羊补饲燕麦干草 102 d，可使其冷季养殖的净收益增加 103.5 元 / 头牦牛，154.7 元 / 头藏羊；而不补饲组则牦牛藏羊由于冷季失重而分别亏损 347.2、125 元 / 头。Dong 等^[43]针对在冷季基于高寒草原放牧的牦牛进行 50 d 的补饲，其粗饲料组成为 35% 燕麦青贮、65% 燕麦青贮、40% 羊草青贮、60% 羊草青贮、100% 羊草青贮的配合饲料，发现 100% 补饲羊草青贮组的经济效益最好，每头平均增加收益 54.39 元；但补饲 35% 燕麦青贮组的增重性能最好，每头平均增重 22.6 kg。由此可见，在高寒草原冷季补饲使用价格较为低廉的燕麦干草和青贮饲料去代替价格较高的精饲料可提高经济效益。

综合以上，为提高“放牧 - 补饲”的经济效益，可通过在暖季采取放牧后期对牲畜进行集中补饲的饲养策略达到提高“放牧 - 补饲”经济效益的目的。而在冷季，在保证牲畜健康和生长的基础上，通过采用优质粗饲料或青贮饲料代替精饲料的补饲策略，可节约饲料成本，提高经济效益。

4 “放牧 - 补饲”对温室气体排放与草场土壤环境的影响

放牧对环境的影响主要体现在以甲烷（CH₄）、二氧化碳（CO₂）和氧化亚氮（N₂O）为代表的温室气体的排放，以及对土壤中营养组分的影响。目前，有研究指出单纯放牧饲养一方面难以满足牲畜的营养需要，另外会使放牧压力过大而导致草原的退化^[44]。此外，大量的研究表明，“放牧 - 补饲”的饲养模式可以降低牲畜的甲烷排放量并利于土壤中养分积累，可以有效的阻止草原退化，提高草地利用率（图 2）。

4.1 “放牧 - 补饲”对温室气体减排的影响 根据联合国的调查数据，全球畜牧业占所有人为温室气体排放量的 14.5%^[45]。而在畜牧业活动中，放牧活动是温室气体产生的主要来源之一，故针对反刍动物的 CH₄ 减排展开研究对缓解全球变暖有实际意义^[46]。有研究发现在冬季典型草原放牧滩羊的补饲饲料中通过添加饲料分解酶，降低了单位 DMI 的 CH₄ 的排放量^[47]。Jiao 等^[48]研究表明补饲不同水平精料对奶牛甲烷排放效率具有显著影响。随着精料补饲量从 2.0 kg/d 增加至 8.0 kg/d，单位产奶甲烷排放量（CH₄/milk yield）由 15.4 g/kg 显著下降至 10.8 g/kg。这说明了随着精料水平的增加，每千克产奶量的甲烷排放量显著减少，这可能是因为精料为主的饲料发酵更倾向于促进丙酸的产生，丙酸会降

低单位发酵有机物产生的甲烷量。此外，以精料为主的饲料通常发酵更快，导致瘤胃 pH 值下降，从而抑制甲烷菌和原生动物的生长。崔占鸿^[49]研究指出冷季给牦牛补饲精饲料可以显著提高杆菌门、厚壁菌门和软壁菌门等有益菌的丰度，降低 CH₄ 的排放量。综上所述，给放牧牲畜补饲精饲料可以影响瘤胃微生物组成和发酵过程，显著降低了生产单位畜产品的 CH₄ 排放量。

补饲除了影响牲畜本身的温室气体排放外，还会显著影响草地生态系统的温室气体排放。刘忠宽等^[50]指出放牧牲畜食入的营养物质中有 60%~90% 的养分会通过粪、尿的形式排出体外，且粪、尿中的 30%~65% 氮通过淋溶挥发的形式在草场排放并诱导草原生态系统产生 N₂O。由此可以推测，通过在补饲饲料中添加饲料分解酶或者促消化物质，可以降低粪尿中养分含量，并进一步降低草原生态系统中的 N₂O 的排放。万运帆等^[51]研究发现在草地生态系统中，温室气体排放以 CO₂ 为主，而 CH₄、N₂O 的温室气体排放仅约占 1%，并且在高放牧强度，适度补饲的情况下草地系统的 CO₂ 排放量最低。Schönbach 等^[52]研究指出在草地质量较高的牧场进行高强度的放牧并少量的补饲干草可以降低草原生态系统的 CO₂ 和 N₂O 的排放。综合以上，对牲畜进行放牧饲养并适当补饲可有效降低草原生态系统的温室气体排放。

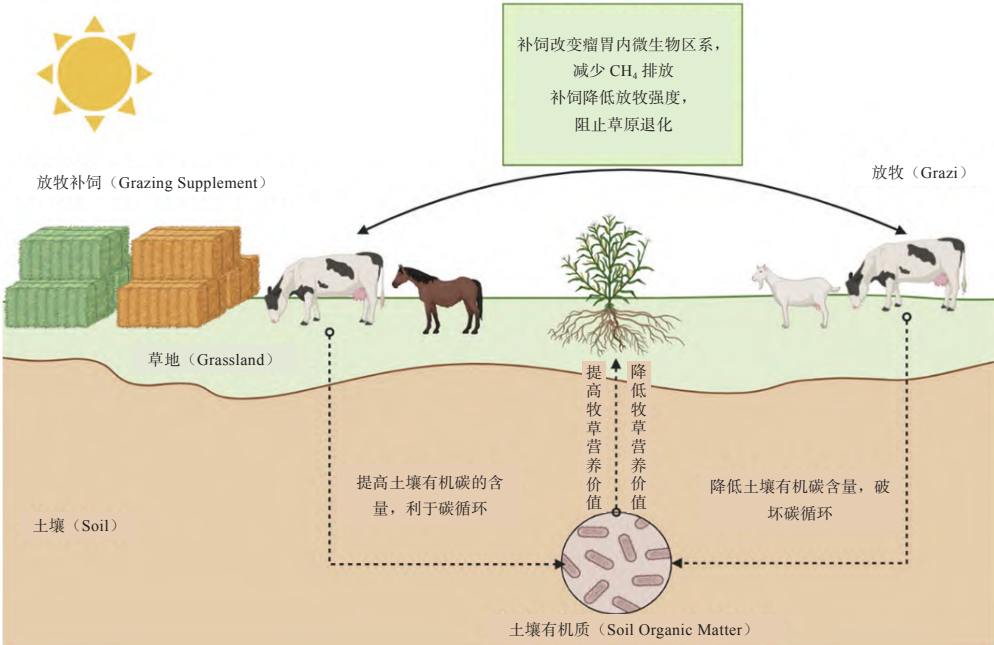


图 2 放牧补饲对生态环境的影响

4.2 “放牧 - 补饲”对土壤环境的影响 牲畜通过放牧获得营养物质,而单纯放牧常会为了满足牲畜的营养需要而导致放牧强度过大,进而影响土壤理化性质和草地的植被生长情况^[53]。Tessema 等^[54]研究发现,轻度放牧区域的土壤有机碳、磷和交换性盐基含量较高,这说明轻度放牧区域的土壤养分状况较重度放牧区域有所改善。Su 等^[55]研究发现短期休牧和降低放牧强度均有助于增加土壤碳的储存。上述研究表明,降低放牧强度可以改善土壤质量。但这常会导致牲畜通过放牧的营养物质获取不足,可通过补饲向牲畜提供营养,从而减少对天然牧草资源的过度依赖。Yang 等^[56]在冷季给每头牦牛补饲燕麦干草 1.5 kg/d,研究发现,在不影响牲畜生长性能的基础上,降低了土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 17% 的损失速率,可以缓解草场退化,促进草场的可持续利用。综上所述,补饲可在保证牲畜生长的前提下,降低草地的放牧压力,增加土壤中的有机质含量,有助于实现草场系统健康和畜牧业可持续发展的双赢目标。

5 小结与展望

基于冷暖季变化不同草原类型牲畜“放牧 - 补饲”模式就是根据季节的变化和不同草原类型,确定放牧强度和补饲模式。大量研究表明,暖季牧草丰富时应以放牧为主,冷季则需加强补饲以维持牲畜生长性能和草地可持续利用。然而,目前的研究多聚焦于补饲对牲畜生产效益与对环境的影响,针对不同草原类型、牲畜品种及其生长阶段的规范化补饲标准尚未建立。因此,未来研究应结合不同类型草原的牧草量动态、营养成分的变化及季节性变化特征,评估代表性牲畜在不同生长阶段的能量、蛋白质及结构性碳水化合物营养需要,明确日粮组成、补饲强度、时间频率及营养供给比例等关键参数,从而提出具有区域适应性和推广价值的标准化补饲技术方案。

未来,智能化补饲技术的应用对规范化补饲标准的建立与实施具有重要意义,如近红外光谱 (Near Infrared Spectrum Instrument, NIRS) 进行快速饲料成分检测、物联网环境与行为监测、自动化投喂系统等技术的应用,可实现日粮成分的实时评估、采食行为的动态监控以及营养供给的精准调控,从而提高补饲效率与响应性。此外,未来可进一步引入遥感、边缘计算与大

数据分析等现代信息技术,以实时关注补饲措施对草地生态系统的影响,并评估其对土壤健康、碳氮循环、瘤胃 - 粪便 - 土壤微生物群落结构与功能的作用,为制定生态友好型补饲技术体系提供理论基础与数据支撑。

参考文献:

- [1] 方精云,耿晓庆,赵霞,等.我国草地面积有多大?[J].科学通报,2018,63(17):1731-1739.
- [2] 草原标准化技术委员会 (NFCA/TC 2). 草原术语及分类: LY/T 3370—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [3] Costa C M, Difante G S, Costa A, *et al.* Grazing intensity as a management strategy in tropical grasses for beef cattle production: a meta-analysis[J]. *Animal*, 2021, 15(4): 100192.
- [4] 王佳雪,陶慧,王振龙,等.放牧家畜冷季补饲研究进展[J].中国畜牧杂志,2024,60(4):9-16.
- [5] Bretas I L, Dubeux Jr J C B, Cruz P J R, *et al.* Precision livestock farming applied to grazingland monitoring and management—A review[J]. *Agron J*, 2024, 116(3): 1164-1186.
- [6] Lahart B, Prendiville R, Buckley F, *et al.* The repeatability of feed intake and feed efficiency in beef cattle offered high-concentrate, grass silage and pasture-based diets[J]. *Animal*, 2020, 14(11): 2288-2297.
- [7] Hu Y, He Y, Gao S, *et al.* The effect of a diet based on rice straw co-fermented with probiotics and enzymes versus a fresh corn Stover-based diet on the rumen bacterial community and metabolites of beef cattle[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 10721.
- [8] 毛红霞,雷俊杰,赵光平,等.蒸汽压片玉米对牦牛冷季补饲保膘的影响[J].中国牛业学,2016,42(6):25-27.
- [9] Savari M, Khorvash M, Amanlou H, *et al.* Effects of rumen-degradable protein:rumen-undegradable protein ratio and corn processing on production performance,nitrogen efficiency,and feeding behavior of Holstein dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 2018, 101(2): 1111-1122.
- [10] Yoder R A, Hudgens R E, Perry T W, *et al.* Growth and reproductive performance of ewe lambs fed corn or soybean meal while grazing pasture[J]. *J Anim Sci*, 1990, 68(1): 21-27.
- [11] Vieyra-Alberto R, Zetina-Martínez R E, Olivares-pérez J, *et al.* Effect of soybean grain (*Glycine max* L.) supplementation on the production and fatty acid profile in milk of grazing cows in the dry tropics of Mexico[J]. *Trop Anim Health Prod*, 2022, 54(1): 52.
- [12] Montoro C, Miller-Cushon E K, Devries T J, *et al.* Effect of physical form of forage on performance, feeding behavior, and digestibility of Holstein calves[J]. *J Dairy Sci*, 2013, 96(2): 1117-1124.
- [13] Ghasemi E, Khorvash M, Ghorbani G R, *et al.* Effects of straw treatment and nitrogen supplementation on digestibility,intake and physiological responses of water intake as well as urine and faecal characteristics[J]. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)*, 2014, 98(1): 100-106.
- [14] Zhao J, Dong Z, Li J, *et al.* Ensiling as pretreatment of rice straw: The effect of hemicellulase and *Lactobacillus plantarum*

- on hemicellulose degradation and cellulose conversion[J]. *Bioresour Technol*, 2018, 266: 158-165.
- [15] Kholif A E, Anele A, Anele U Y. Microbial feed additives in ruminant feeding[J]. *AIMS Microbiol*, 2024, 10(3): 542-571.
- [16] Fan Q, Wang Z, Chang S, *et al*. Relationship of mineral elements in sheep grazing in the highland agro-ecosystem[J]. *Asian-Australas J Anim Sci*, 2020, 33(1): 44-52.
- [17] 黄文植, 张晓卫, 夏洪泽, 等. 冷季补饲矿物质盐砖对放牧牦牛犊牛体增重、瘤胃发酵和血清矿物元素含量的影响[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(11): 6300-6308.
- [18] Li S Y, Wang C, Wu Z Z, *et al*. Effects of guanidinoacetic acid supplementation on growth performance, nutrient digestion, rumen fermentation and blood metabolites in Angus bulls[J]. *Animal*, 2020, 14(12): 2535-2542.
- [19] 车陇杰, 魏立明, 薛瑞林, 等. 补饲对冷季放牧娟犏牛瘤胃菌群结构的影响[J]. *中国草食动物科学*, 2024, 44(4): 45-54.
- [20] Petermann J S, Buzhdygan O Y. Grassland biodiversity[J]. *Curr Biol*, 2021, 31(19): R1195-R1201.
- [21] Harmon D D, Hancock D W, Stewart R J, *et al*. Warm-season annual forages in forage-finishing beef systems: I. Forage yield and quality[J]. *Transl Anim Sci*, 2019, 3(2): 911-926.
- [22] Ritz K E, Heins B J, Moon R D, *et al*. Milk production, body weight, body condition score, activity, and rumination of organic dairy cattle grazing two different pasture systems incorporating cool- and warm-season forages[J]. *Animals (Basel)*, 2021, 11(2): 264.
- [23] 侯钰荣, 李超, 杨淑君, 等. 利用方式对山地草甸植物多样性的影响[J]. *草食家畜*, 2018(6): 45-51.
- [24] Dai D, Pang K, Liu S, *et al*. Effects of concentrate supplementation on growth performance, rumen fermentation, and bacterial community composition in grazing yaks during the warm season[J]. *Animals (Basel)*, 2022, 12(11): 1398.
- [25] 任万平, 居来提, 张浩, 等. 暖季草场放牧补饲新疆褐牛公犊血清钙、磷水平对其生长的影响[J]. *新疆农业科学*, 2013, 50(4): 759-765.
- [26] 薛白, 赵新全, 张耀生. 青藏高原天然草场放牧牦牛体重和体成分变化动态[J]. *动物营养学报*, 2005(2): 54-57.
- [27] Zhou J, Yue S, Peng Q, *et al*. Metabonomic responses of grazing yak to different concentrate supplementations in cold season[J]. *Animals (Basel)*, 2020, 10(9): 1595.
- [28] Cazzuli F, Sánchez J, Hirigoyen A, *et al*. Supplement feed efficiency of growing beef cattle grazing native Campos grasslands during winter: a collated analysis[J]. *Transl Anim Sci*, 2023, 7(1): 1-14.
- [29] Gao J, Yang D, Sun Z, *et al*. Changes in blood metabolic profiles reveal the dietary deficiencies of specific nutrients and physiological status of grazing yaks during the cold season in qinghai province of China[J]. *Metabolites*, 2022, 12(8): 738.
- [30] Da F L, Zervoudakis J T, Paula N F, *et al*. Different fat sources in supplements for beef cattle at pasture[J]. *Trop Anim Health Prod*, 2022, 54(3): 163.
- [31] Brokaw L, Hess B W, Rule D C. Supplemental soybean oil or corn for beef heifers grazing summer pasture: effects on forage intake, ruminal fermentation, and site and extent of digestion[J]. *J Anim Sci*, 2001, 79(10): 2704-2712.
- [32] 白彦霞. 甘南州农牧互补促进草产业可持续发展现状及对策[J]. *畜牧兽医杂志*, 2015, 34(3): 82-83.
- [33] Xue B C, Zhang J X, Wang Z S, *et al*. Metabolism response of grazing yak to dietary concentrate supplementation in warm season[J]. *Animal*, 2021, 15(3): 100175.
- [34] 唐淑珍, 刘艳丰, 张俊瑜, 等. 在夏季天然草场放牧加补饲对阿勒泰羊生产性能和血清生化指标的影响[J]. *饲料博览*, 2014(4): 1-4.
- [35] Shi H, Guo P, Wang Z, *et al*. Cellulase enhancing rumen microbiome of Tan sheep indicates plastic responses to seasonal variations of diet in the typical steppe[J]. *BMC Microbiol*, 2025, 25(1): 154.
- [36] 陈清文. 放牧牦牛暖棚补饲效果观察[J]. *青海畜牧兽医杂志*, 2012, 42(4): 22-23.
- [37] Yi S, Wu H, Liu Y, *et al*. Concentrate supplementation improves cold-season environmental fitness of grazing yaks: responsive changes in the rumen microbiota and metabolome[J]. *Front Microbiol*, 2023, 14: 1247251.
- [38] Xu T, Ji H, Liu H, *et al*. Effect of concentrate supplementing after grazing on growth performance of tibetan sheep in alpine pastoral area during cold season[J]. *Acat Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2016, 25(8): 1132-1136.
- [39] Long R J, Dong S K, Wei X H, *et al*. The effect of supplementary feeds on the bodyweight of yaks in cold season[J]. *Livest Prod Sci*, 2005, 93(3): 197-204.
- [40] Wheeler K E, Most M S, Dustin D T, *et al*. Effects of strategic supplementation of distillers grains on gains and economic return of yearling cattle grazing cool-season pastures in the summer[J]. *Appl Anim Sci*, 2023, 39(6): 494-501.
- [41] Song H J, Wang C X, Jiang F, *et al*. Effects of supplementary feeding concentrate in warm season on growth performance, serum biochemical indexes and economic benefits of yaks[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2023, 4: 117-120.
- [42] 徐田伟, 胡林勇, 赵娜, 等. 补饲燕麦青干草对牦牛和藏系绵羊冷季生长性能的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(1): 205-208.
- [43] Dong Q M, Zhao X Q, Ma Y S, *et al*. Live-weight gain, apparent digestibility, and economic benefits of yaks fed different diets during winter on the Tibetan plateau[J]. *Livest Sci*, 2006, 101(1-3): 199-207.
- [44] Romero-Ruiz A, Rivero M J, Milne A, *et al*. Grazing livestock move by Lévy walks: Implications for soil health and environment[J]. *J Environ Manage*, 2023, 345: 118835.
- [45] Venturini T, De Pryck K, Ackland R. Bridging in network organisations. The case of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[J]. *Social Networks*, 2023, 75: 137-147.
- [46] Lima P, Paim T, Mcallister T. Editorial: Greenhouse gases mitigation strategies in grazing ruminants[J]. *Front Vet Sci*, 2024, 11: 1360276.

- [47] Shi H, Guo P, Zhou J, *et al.* Exogenous fibrolytic enzymes promoted energy and nitrogen utilization and decreased CH₄ emission per unit dry matter intake of tan sheep grazed a typical steppe by enhancing nutrient digestibility on China loess plateau[J]. *J Anim Sci*, 2023, 101: 1-10.
- [48] Jiao H P, Dale A J, Carson A F, *et al.* Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 2014, 97(11): 7043-7053.
- [49] 崔占鸿. 补饲精料对冷季放牧牦牛瘤胃细菌区系特征的影响[J]. *青海畜牧兽医杂志*, 2022, 52(4): 9-14.
- [50] 刘忠宽, 汪诗平, 韩建国, 等. 放牧家畜排泄物 N 转化研究进展[J]. *生态学报*, 2004(4): 775-783.
- [51] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 夏季放牧强度对藏北草原温室气体排放的影响[J]. *草业科学*, 2010, 27(11): 1-6.
- [52] Schönbach P, Wolf B, Dickhöfer U, *et al.* Grazing effects on the greenhouse gas balance of a temperate steppe ecosystem[J]. *Nutr Cycl Agroecos*, 2012, 93(3): 357-371.
- [53] Jarque-Bascuñana L, Calleja J A, Ibañez M, *et al.* Grazing influences biomass production and protein content of alpine meadows[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 818: 151771.
- [54] Tessema Z K, De Boer W F, Baars R M T, *et al.* Changes in soil nutrients, vegetation structure and herbaceous biomass in response to grazing in a semi-arid savanna of Ethiopia[J]. *J Arid Environ*, 2011, 75(7): 662-670.
- [55] Sun Y, He X Z, Hou F, *et al.* Grazing increases litter decomposition rate but decreases nitrogen release rate in an alpine meadow[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(13): 4233-4243.
- [56] Yang C, Hou F, Sun Y, *et al.* Oats hay supplementation to yak grazing alpine meadow improves carbon return to the soil of grassland ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Glob Ecol And Conser*, 2020, 23: e01158.

Research Progress on Seasonal “Grazing-Supplementation” Models for Livestock across Different Grassland Types

XU Hao, LI Baiou, LYU Liangkang, XIONG Fengliang, PEI Shiteng, WU Lijian, LUO Xiong, YANG Hongjian*

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

Abstract: Grazing is the primary livestock management system in pastoral regions of China; however, due to seasonal shifts and differences among grassland types, forage resources exhibit pronounced spatial and temporal heterogeneity, resulting in unstable nutrient supply for livestock. In practical applications, the “grazing-supplementation” system faces key challenges, including suboptimal allocation of supplementary feeding resources and insufficient standardization of technical practices. Therefore, it is urgent to develop differentiated supplementation strategies tailored to various grassland types. Scientifically designed supplementation can significantly enhance livestock production performance, mitigate grassland degradation, reduce greenhouse gas emissions, and play an important role in achieving livestock reduction and efficiency improvement in pastoral areas. This review summarizes the effects of the “grazing-supplementation” model across different grassland types under cold-warm seasonal transitions on livestock growth efficiency and the ecological environment, aiming to provide a theoretical basis for optimizing supplementation strategies in pastoral regions.

Keywords: Grassland type; Seasonal variation; Grazing-supplementation; Growth performance; Ecological environment

(责任编辑: 周会会)