DOI: 10. 11686/cyxb2025483 http://cyxb. magtech. com. cn
马亚玲. 北方天然草地牧草青贮利用研究现状和发展趋势. 草业学报, 2026, 35(11): 227－240.
MA Ya-ling. Research status and industry trends for silage utilization of natural northern grassland forage. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 227－240.

北方天然草地牧草青贮利用研究现状和发展趋势

马亚玲
（甘肃省微生物资源开发与应用重点实验室，甘肃省科学院生物研究所，甘肃 兰州 730000）

摘要：天然草地牧草是我国北方地区重要的饲草资源，兼具一年生与多年生特性，具有种类多样、营养丰富等特点，在青贮饲料领域中呈现出显著的应用潜力与研究价值。青贮技术通过厌氧发酵过程能有效保存牧草养分，成为缓解草原畜牧业草畜供需矛盾、提高资源利用效率的关键途径。然而，北方天然牧草资源利用长期面临营养保存难、季节性短缺、物候不一及发酵特性复杂等问题，导致其发酵品质不稳定、营养损失大、保存难度高。为实现该资源的稳定高效利用，本研究系统解析了天然牧草种类与营养特性的多样性；重点探讨了影响其青贮品质的关键因素；总结了添加剂对发酵过程的调控作用，以及营养互补型青贮在反刍动物生产中的应用效果；最后，针对当前产业化中的技术瓶颈对未来研究方向进行展望。旨在为构建适合北方天然草地牧草特性的高效青贮技术体系提供理论参考，以促进草地农业的可持续发展。

关键词：天然草地；牧草；青贮；营养成分；发酵品质

Research status and industry trends for silage utilization of natural northern grassland forage

MA Ya-ling
Key Laboratory of Microbial Resources Exploitation and Application of Gansu Province, Institute of Biology, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, *China*

Abstract: Natural grassland forage is a vital fodder resource in northern China. Natural grassland comprises a diversity of both annual and perennial species, with generally high nutritive value. With respect to utilization of natural grassland forage, there is significant potential for increased use of silage, and a need for research into this topic. Silage technology, through anaerobic fermentation, effectively preserves forage nutrients, offering an important solution to balancing forage supply and demand in grassland-based animal husbandry while improving resource utilization efficiency. However, silage conservation of natural forage resources in north China has long faced a range of problems, including difficulty in nutrient preservation, seasonal shortages, inconsistent phenology, and complex fermentation characteristics, resulting in unstable fermentation quality and significant nutrient loss in many cases. To achieve stable and efficient utilization of this resource, this study systematically analyzes the diversity of natural grass species and their nutritional characteristics. The key factors affecting the quality of silage are discussed in detail. The regulatory effect of additives on the fermentation process, as well as the inclusion in silage of complementary nutrients to enhance ruminant animal production is summarized. Finally, suggestions are given for future research directions in response to the technological bottlenecks in current industry practice. It is intended this

收稿日期：2025-11-27；改回日期：2026-02-04
基金项目：甘肃省科学院面向企业需求项目（2025QYXQ-01）资助。
作者简介：马亚玲（1984－），女，甘肃定西人，博士。E-mail: mayl18@lzu. edu. cn

study will provide scientific reference information for constructing an efficient ensilage technology system adapted to the characteristics of natural grassland forage in northern China, in order to promote sustainable development of grassland agriculture in this region.

Key words: natural grassland; forage; silage; nutrient composition; fermentation quality

草地作为全球生态系统的重要组成部分[1-3]，覆盖了约1/5的陆地面积[3-4]，不仅为畜牧业提供了优质牧草资源，还在水土保持、碳循环和生物多样性维持中起着关键的支撑作用[5-6]。牧草作为天然草地的主体植被，具有生长旺盛、叶片质地柔软、单位面积生物产量高等多重优势，且再生能力突出，在同一年度内可进行多次刈割。其适口性佳，牲畜喜食，同时富含优质蛋白质，以及促进骨骼发育所需的适宜比例磷、钙元素和多种维生素等。牧草作为畜牧业发展的关键生产资料，其产量和质量是影响畜牧业发展的重要因素。据第三次国土资源调查，我国拥有2.64亿hm^2的天然草地，占国土总面积的27.5%[7-8]，其中，北方草原区占全国约4/5的牧草资源，相比之下，南方则以草山和草坡为主要草地类型，我国北方草原区的牧草资源，相较于南方草山草坡，具有种类繁多、分布广阔、饲料资源更丰富等显著优势，是支撑我国畜牧业发展的核心物质基础[7-9]。近年来，由于过度放牧、无序开垦、滥采滥挖等人类活动，以及草地干旱等自然因素的共同影响，造成天然草地严重退化，生产力下降、土壤沙化加剧的同时，毒草滋生蔓延问题日益突出，不仅挤占了优质牧草的生长空间，导致可食牧草比例大幅降低，更因部分毒草，常引发草食动物中毒死亡，对北方畜牧业的生产安全与可持续发展构成严重威胁[10-12]。因此，减少毒草对优质牧草资源的侵占与危害，平衡天然草地牧草资源的利用差异，发掘北方特有的抗逆性强、营养价值高的优质牧草种质资源，并研发加工保存应用技术显得尤为重要，是实现草原牧区生态保护与高质量畜牧业协同发展的重要途径。

在牧草资源的加工保存技术中，青贮作为一种能够有效延长牧草保存期、保持营养品质的重要方式，对北方天然牧草的可持续利用具有特殊意义。然而，与人工栽培的单一种类牧草相比，天然牧草因其种类组成复杂、物候期、营养成分不一等特性，导致其在青贮发酵过程中较难控制，容易出现发酵品质不稳定、营养损失较大等问题。目前，针对北方天然牧草青贮技术的研究与应用仍相对薄弱，传统青贮方式往往依赖自然发酵，易受植物表面附着的微生物群落影响，若乳酸菌数量不足或有害微生物占优势，将导致青贮饲料霉变、腐败或产生有毒物质，降低饲用安全性。此外，天然牧草中部分物种本身所含的生物碱或次级代谢产物也可能影响发酵进程与产物品质。尽管已有研究尝试通过添加乳酸菌制剂、酶制剂或与其他饲料原料混合青贮等方法来改善天然牧草的青贮效果，但在实际推广中仍面临技术适应性、操作便利性和成本效益等方面的挑战。因此，针对北方天然草地牧草高度异质性的特点，亟需明确何种青贮技术能够有效稳定其发酵过程并最大化保存营养？本研究系统解析北方天然牧草的青贮特性，重点探讨适配多样化草群结构的青贮调制与添加剂应用技术，评估其在动物生产中的应用效果，并展望未来的研究方向。这对破解“生态保护”与“生产发展”的矛盾、推动区域牧草资源优化配置与畜牧业协调发展、实现草原牧区可持续发展目标具有深远的战略意义。

1 天然草地的牧草种类及特性

天然草地牧草的植物学特性和群落结构，从根本上决定了其青贮潜力。理解其高度多样化的物种组成、功能群划分以及毒草侵扰现状，是剖析其青贮发酵复杂性与不可预测性的生态学基础。天然草地牧草是草原生态系统的核心组成部分，根据植物学分类可分为禾本科、豆科、莎草科、菊科和藜科，其中菊科和藜科属于杂草类，主要草种及其特性见表1。其生长性能和饲用价值直接影响畜牧业的生产效率和生态可持续性，依据生长性能、环境调控及管理实践等方面综合分析的结果见表2。同时，天然草地上毒草化面积约占68.3%，严重危害区域占41.7%[16]。基于毒草的分类、毒性功能、生长特性及生态作用的复杂多样性，本研究涉及的主要毒草涵盖12个科的植物，其中以醉马草(*Achnatherum inebrians*)、无叶假木贼(*Anabasis aphylla*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、膜果麻黄(*Ephedra przewal-skii*)、毒芹(*Cicuta virosa*)和曼陀罗(*Datura stramonium*)毒性强度较强，其生态功能及主要分布区域详见表3。综上所述，北方天然草地牧草的多样性，不仅体现在物种组成的丰富性上，更深层地体

表 1　北方天然草地主要牧草的种类及特性

Table 1　Species and characteristics of northern natural rangeland main grasses

科 Family	属类 Genus	代表草种 Representative grass species	生态功能 Ecological function	主要分布区 Main distribution areas	参考文献 Reference
禾本科 Poaceae	黑麦草属 *Lolium*	黑麦草 *Lolium perenne*	防风固沙，冬季保存性好 Windproof and sand fixing, good preservation in winter	温带草原、高寒草甸 Temperate grasslands, alpine meadows	［9－10］
	赖草属 *Leymus*	羊草 *Leymus chinensis*			
	冰草属 *Agropyron*	冰草 *Agropyron cristatum*			
	披碱草属 *Elymus*	披碱草 *Elymus dahuricus*			
	针茅属 *Stipa*	针茅 *Stipa capillata*			
豆科 Leguminous	苜蓿属 *Medicago*	紫花苜蓿 *Medicago sativa*	固氮增肥，提升土壤养分 Nitrogen fixation and fertilization to enhance soil nutrients	半干旱至湿润草原 Semiarid to humid grasslands	［10－11］
		黄花苜蓿 *Medicago falcata*			
	车轴草属 *Trifolium*	白三叶草 *Trifolium repens*			
莎草科 Cyperaceae	苔草属 *Carex*	藏北苔草 *Carex moorcroftii*	高寒草甸建群种，增强水源涵养 Establishing community species in alpine meadows to enhance water conservation	沼泽草甸、高山草甸 Swamp meadow, alpine meadow	［10,12］
	嵩草属 *Kobresia*	矮生嵩草 *Kobresia humilis*			
菊科 Compositae	蒿属 *Artemisia*	艾草 *Artemisia argyi*	荒漠区建群种，延长枯草期饲用 Establishing populations in desert areas and extending the dry season for feeding	荒漠草原、盐碱地 Desert grasslands, saline alkali land	［10－11］
藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜属 *Salsola*	猪毛菜 *Salsola collina*	荒漠区优势种，延长枯草期饲用 Dominant species in desert areas, extending the dry season for feeding	干旱、半干旱的荒漠草原，盐碱地 Arid and semi-arid desert grasslands, saline alkali land	［10,13］
	驼绒藜属 *Ceratoides*	华北驼绒藜 *Ceratoides arborescens*			
十字花科 Brassicaceae	独行菜属 *Lepidium*	独行菜 *Lepidium apetalum*	先锋植物、固定土壤 Pioneer plants, fixed soil	东北华北地区，海拔 400～2000 m 的山坡、山沟 Slopes and ravines at an altitude of 400－2000 meters in the northeast and north China regions	［10,13］
		心叶独行菜 *Lepidium cordatum*	高寒生态系统关键种群、盐碱地改良 Key populations in alpine ecosystems and improvement of saline alkali land	高山草甸、盐碱滩、湖滨 Alpine meadows, saline alkali beaches, lakeshores	［10－11］
石竹科 Caryophyllaceae	石竹属 *Dianthus*	瞿麦 *Dianthus superbus*	水土保持、优质牧草 Soil and water conservation, high-quality forage	湿润、疏松肥沃的土壤 Moist, loose and fertile soil	［10－11］
蔷薇科 Rosaceae	绣线菊属 *Spiraea*	高山绣线菊 *Spiraea alpina*	水土保持、高山灌丛建群种或优势种群 Soil and water conservation, establishment or dominant populations of alpine shrubs	高山阴坡、半阴坡、高寒灌丛草甸带 Alpine shady slope, semi shady slope, alpine shrub meadow belt	［10－11］
百合科 Liliaceae	葱属 *Allium*	北疆韭 *Allium hymenorhizum*	固沙、荒漠化防治、优质牧草 Sand fixation, desertification control, high-quality forage	干旱草原、荒漠、沙地、砾石坡 Arid grasslands, deserts, sandy areas, gravel slopes	［10－11］
唇形科 Labiatae	百里香属 *Thymus*	异株百里香 *Thymus marschallianus*	水土保持、驱避害虫 Soil and water conservation, pest control	典型草原、荒漠草原、山地阳坡、沙质地 Typical grassland, desert grassland, mountainous sunny slope, sandy land	［10－11］
车前科 Plantaginaceae	车前属 *Plantago*	平车前 *Plantago depressa*	改善土壤结构、水土保持 Improving soil structure and soil and water conservation	草甸、河滩、沟谷、山野湿地、田埂、荒地 Meadows, riverbanks, valleys, mountain wetlands, field ridges, and wastelands	［11］

续表 Continued Table

科 Family	属类 Genus	代表草种 Representative grass species	生态功能 Ecological function	主要分布区 Main distribution areas	参考文献 Reference
荨麻科 Urticaceae	荨麻属 *Urtica*	宽叶荨麻 *Urtica laetevirens*	重要的寄主植物、水土保持、优质牧草 Important host plants, soil and water conservation, high-quality forage	喜阴喜湿、林下阴湿处、沟谷、溪流旁 Prefer shade and humidity, shady and humid areas under the forest, valleys, and streams	[11]
报春花科 Primulaceae	海乳草属 *Glaux*	海乳草 *Glaux maritima*	改良和淡化盐渍化土壤、耐盐牧草 Improvement and desalination of saline soil and salt tolerant grass	盐碱沼泽、盐化草甸 Saline alkali marshes, saline alkali meadows	[10－11]
茜草科 Rubiaceae	拉拉藤属 *Galium*	蓬子菜 *Galium verum*	水土保持 Soil and water conservation	山坡草地、草甸、林缘、灌丛中、河滩、沙地 Hillside grasslands, meadows, forest edges, shrubs, riverbanks, sandy areas	[11]

表 2 北方天然草地不同科属牧草生长性能与特性比较

Table 2 Comparison of growth performance and characteristics of northern natural rangeland forages

特征类别 Feature category	禾本科牧草 Poaceae forage	豆科牧草 Leguminosae forage	莎草科牧草 Cyperaceae forage	杂类草 Miscellaneous grasses	参考文献 Reference
生物量占比 Biomass proportion	干草原 Dry grassland 60%～90%，荒漠 Desert 20%～35%	草原 Grassland 10%～15%	高寒湿地为主 Mainly high-altitude wetlands	10%～60%	[14]
适应性 Adaptability	耐刈割、耐践踏 Resistant to cutting and trampling	固氮改良土壤 Nitrogen fixation for soil improvement	耐阴湿 Resistant to dampness and dankness	多样性强 Strong diversity	[15]
生命周期 Life cycle	一年生/多年生 Annual/perennial	一年生/多年生 Annual/perennial	多年生 Perennial	一年生/多年生 Annual/perennial	[14]
消化率变化 Digestibility variation	抽穗期后显著下降 Significant decrease after heading stage	成熟期下降 Maturity period decline	开花后降低 Reduced after flowering	因种类而异 Different by type	[14]
适口性 Palatability	较好 Better	优 Excellent	一般 Moderate	菊科整体较差，其中蒿属一般，藜科较好 Asteraceae is overall relatively poor, among them, *Artemisia* is moderate, and Chenopodiaceae is relatively good	[14]

现在生长特性的显著异质性，以及禾本科、豆科、莎草科及杂类草等功能群之间高度分化的生态位特征。因此，天然牧草青贮的初始条件具有高度的不可预测性，这也从根本上决定了必须采用更具弹性和针对性的复合调控策略。

2 天然草地牧草营养价值

天然草地牧草除种类多样性外，营养成分的动态差异是影响青贮成败的另一关键内在因素，青贮技术的核心目标，是在发酵的过程中，针对这些不平衡的营养特性进行干预与优化，以最大限度地保存其饲用价值。天然草地牧草的营养价值是决定饲草品质和支撑牲畜健康与生产性能的核心要素[14,19]。张新永等[19]详细分析了禾本科、豆科、莎草科和杂类草的营养成分范围(表4)。并通过测定粗蛋白、粗脂肪、中性和酸性洗涤纤维等指标来评价牧草的营养价值[20－21]。当粗蛋白和粗脂肪的含量升高，表明牧草的营养价值更高；而中性和酸性洗涤纤维含量增加，则会影响其饲用价值，造成牧草的适口性和消化率降低[21－25]。在不同种类的牧草中，豆科牧草通常粗蛋白

表 3　北方天然草地常见毒草生长性能及特性

Table 3　Growth performance and characteristics of natural northern rangeland common poisonous-weeds

科 Family	属 Genus	种 Species	毒性强度 Toxic intensity	主要危害对象 Main hazardous objects	分布区域 Distribution area	生态特性 Ecological characteristics	参考文献 Reference
禾本科 Poaceae	芨芨草属 *Achnatherum*	醉马草 *A. inebrians*	★★★★★	马、骡、驴、羊 Horses, mules, donkeys, sheep	干旱、高寒草地、退化盐碱草地 Drought, alpine grassland, degraded saline alkali grassland	耐旱、耐寒、耐热、耐盐碱，偏好微碱性砂质土 Drought resistant, cold resistant, heat resistant, salt alkali resistant, preference for slightly alkaline sandy soil	[13,17]
苋科 Amaranthaceae	假木贼属 *Anabasis*	无叶假木贼 *A. aphylla*	★★★★★	羊 Sheep	荒漠山坡及冲积扇地 Desert slopes and alluvial fan areas	偏好微碱性砂质土、盐渍化草甸或戈壁滩，耐旱、耐盐碱 Prefer slightly alkaline sandy soil, saline meadow or gobi desert, drought and salt alkali tolerant	[13]
藜科 Chenopodiaceae	盐角草属 *Salicornia*	盐角草 *Salicornia europaea*	★★★★☆	牛、羊 Cattle, sheep	盐碱地 Saline-alkali land	根蘖发达，耐盐 Developed tillers and salt tolerance	[13]
藜科 Chenopodiaceae	盐生草属 *Halogeton*	盐生草 *Halogeton glomeratus*	★★★★☆	牛、羊 Cattle, sheep	干旱及高寒地，盐碱地、戈壁滩及砾质荒漠 Arid and alpine region, saline alkali land, gobi desert, and gravelly desert	耐盐碱、耐旱、耐瘠薄、耐寒 Salt alkali resistance, drought resistance, barrenness resistance, cold resistance	[13]
毛茛科 Ranunculaceae	乌头属 *Aconitum*	林地乌头 *Aconitum nemorum*	★★★★☆	马、牛、羊、人 Horses, cows, sheep, humans	山地潮湿草地 Wet grassland in mountainous areas	耐寒、适微酸性砂质土、块根分株能力强 Cold resistant, suitable for slightly acidic sandy soil, and strong ability to separate root tubers	[13]
瑞香科 Thymelaeaceae	狼毒属 *Stellera*	狼毒 *S. chamaejasme*	★★★★★	牛、羊、人 Cattle, sheep, humans	温带草原 Temperate grassland	退化指示种，耐旱 Degradation indicator species, drought tolerant	[13,18]
豆科 Leguminosae	棘豆属 *Oxytropis*	小花棘豆 *Oxytropis glabra*	★★★★☆	马、骡、驴 Horses, mules, donkeys	新疆盐碱草甸 Salt alkali grassland in Xinjiang	耐盐碱，超载放牧区蔓延 Salt alkali tolerance and overgrazing spread in overgrazing areas	[13,18]
豆科 Leguminosae	棘豆属 *Oxytropis*	黄花棘豆 *Oxytropis ochrocephala*	★★★★☆	马、牛、羊 Horses, cows, sheep	高山草甸、高寒干旱地及沙化草原 Alpine meadows, arid and alpine region, and desertified grasslands	根系发达 Developed root system	[13,18]
豆科 Leguminosae	苦马豆属 *Sphaerophysa*	苦马豆 *Sphaerophysa salsula*	★★★★☆	羊、牛 Sheep, cattle	盐碱荒地、河滩及戈壁绿洲 Saline alkali wasteland, riverbanks, and gobi oases	耐盐碱、耐旱、耐寒 Salt alkali resistance, drought resistance, and cold resistance	[13,18]
豆科 Leguminosae	苦参属 *Sophora*	苦豆子 *Sophora alopecuroides*	★★★☆☆	各类家畜 Various types of livestock	退化盐碱草地 Degradation of saline alkali grassland	根蘖发达，抗旱 Developed roots and tillers, drought resistant	[13,18]
蒺藜科 Zygophyllaceae	骆驼蓬属 *Peganum*	骆驼蓬 *Peganum harmala*	★★★★☆	马、牛、羊、人 Horses, cows, sheep, humans	荒漠干旱草地、盐渍化沙地、戈壁滩及河谷沙丘 Desert arid grassland, saline desert, gobi desert, and valley sand dunes	抗旱、根系发达 Drought resistant and well-developed root system	[13]
麻黄科 Ephedraceae	麻黄属 *Ephedra*	麻黄 *Ephedra intermedia*	★★★☆☆	牛、羊、人 Cattle, sheep, humans	干旱及半干旱地带 Arid and semi-arid regions	耐旱、耐寒、耐盐碱 Drought resistant, cold resistant, salt alkali tolerant	[13]

续表 Continued Table

科 Family	属 Genus	种 Species	毒性强度 Toxic intensity	主要危害对象 Main hazardous objects	分布区域 Distribution area	生态特性 Ecological characteristics	参考文献 Reference
麻黄科 Ephedraceae	麻黄属 *Ephedra*	膜果麻黄 *E. przewal-skii*	★★★★★	人 Humans	沙丘、戈壁、山前平原、干河床 Dunes, gobi, piedmont plains, dry riverbeds	耐极端干旱，根系发达 Resistant to extreme drought, with well-developed root systems	[13]
玄参科 Scrophulariaceae	马先蒿属 *Pedicularis*	碎米蕨叶马先蒿 *Pedicularis cheilanthifolia*	★★★☆☆	羊、牛 Sheep, cattle	干旱及高寒地区，草甸及沼泽草甸 Arid and alpine region, meadows and swamp meadows	耐寒、喜湿 Cold resistant and wet loving	[13]
玄参科 Scrophulariaceae	马先蒿属 *Pedicularis*	欧式马先蒿 *Pedicularis oederi*	★★☆☆☆	羊、牛 Sheep, cattle	高山草甸、沼泽 Alpine meadows and swamps	耐寒、耐湿润 Cold resistant and moisture resistant	[13]
菊科 Asteraceae	苍耳属 *Xanthium*	苍耳 *Xanthium sibiricum*	★★★★☆	牛、羊、人 Cattle, sheep, humans	温带地区 Temperate region	耐旱、耐瘠薄 Drought and barrenness tolerance	[13]
菊科 Asteraceae	橐吾属 *Ligularia*	大叶橐吾 *Ligularia macrophylla*	★★★☆☆	牛、羊 Cattle, sheep	沼泽地、湿草地 Swamp land, wet grassland	耐阴、繁殖力强 Resistant to shade and strong reproductive ability	[13]
伞形科 Apiaceae	毒芹属 *Cicuta*	毒芹 *C. virosa*	★★★★★	人、家畜 Humans, livestock	沼泽湿地 Swamp wetland	根茎剧毒 Root and stem are highly toxic	[13]
茄科 Solanaceae	曼陀罗属 *Datura*	曼陀罗 *D. stramonium*	★★★★★	人、猫、牛、马 Humans, cats, cattle, horses	热带、亚热带及部分温带地区 Tropical, subtropical, and some temperate regions	喜温暖、湿润、向阳的环境，怕涝 Prefer warm, humid, and sunny environments, afraid of flooding	[13]
茄科 Solanaceae	茄属 *Solanum*	黄花刺茄 *Solanum rostratum*	★★★★☆	人、动物 Humans, animals	农田荒地 Farmland and wasteland	密生尖刺，花果期有毒 Dense thorns, toxic during flowering and fruiting period	[13]

★：有毒性 Toxicity；☆：无毒性 Non toxicity.

和粗脂肪含量较高，营养价值更具优势，适口性和消化率也更好，常被视作优质的牲畜饲草，而禾本科牧草尽管产量较高，但其纤维素含量也相对较高，导致其适口性和消化率相对较低[26-27]。生态环境对天然草地牧草的产量和营养品质产生明显影响，气候和土壤是主要因素[28]，导致畜产品品质有所差异[29]。禾本科牧草作为重要的能量饲料来源，虽蛋白质含量偏低，但碳水化合物丰富，还具有产量高、再生力强、耐牧性好、适口性佳等优点，且纤维消化率较高[29-31]。豆科牧草（如苜蓿）通常具有较高的蛋白质含量，能更好地满足家畜对蛋白质的营养需求，其不仅富含优质蛋白，氨基酸组成较为均衡，且含有多种必需氨基酸，其中赖氨酸与色氨酸等限制性氨基酸的含量尤为突出，被誉为“牧草之王”[14,32-33]。菊科和莎草科牧草的蛋白质含量介于豆科和禾本科之间，但菊科牧草多具特异气味，牛通常不喜采食[13,33-34]。李静等[32]研究发现，牧草中纤维含量随海拔升高而降低，粗蛋白含量相反。以上研究表明，天然草地牧草能为放牧家畜提供优质的粗饲料，但不能长期有效地保存天然牧草的营养价值，也不能有效地缓解家畜在秋冬季节采食青鲜饲草的问题，因此，青贮能使天然牧草长期保持青绿饲料的鲜嫩多汁、提升适口性，对缓解冬春季节饲草短缺问题具有重要意义。在青贮发酵过程中，这些营养成分并不是静止不变的，而是经历复杂的动态变化，即蛋白质会在酶的作用下发生降解，从而生成非蛋白氮，其降解程度直接取决于发酵速率和最终pH，过度降解会导致营养价值下降；而纤维物质虽总量相对稳定，但其结构可能在微生物及酶作用下发生改变，进而影响饲喂后的消化率。故青贮技术的核心目标是通过调控发酵微生物群落和生化进程，最大限度地保留蛋白质、减少能量损失，并优化纤维结构。上述营养特性的高度变异与不平衡性，给青贮发酵的稳定控制带来严峻挑战，下文将重点探讨如何通过添加剂使用和营养互补等关键技术，调控动态变化规律。

表 4　北方天然草地主要牧草营养成分范围(干物质基础)[19]

Table 4　Nutrient composition range of main forages in northern natural grasslands (based on % dry matter)[19]

营养成分 Nutritional information	禾本科牧草 Poaceae forage	豆科牧草 Leguminosae forage	莎草科牧草 Cyperaceae forage	杂类草 Miscellaneous grasses
粗蛋白 Crude protein	8.55～9.05	7.84～14.73	7.35～9.43	7.54～14.20
粗脂肪 Crude fat	1.57～2.98	1.46～2.36	1.00～2.00	1.00～4.00
粗灰分 Crude ash	8.20～11.38	12.36～14.58	10.38～18.04	7.80～18.22
木质纤维 Wood fiber	2.06～3.27	1.48～4.93	1.10～3.02	1.79～8.18
纤维素 Cellulose	19.67～20.86	14.48～22.76	8.85～20.04	5.90～25.05
粗纤维 Crude fiber	15.66～23.42	11.48～19.57	10.54～16.77	4.35～24.85
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	44.36～53.77	23.49～45.07	20.45～50.82	19.64～52.18
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	20.15～23.34	15.96～25.30	13.33～22.03	9.83～26.07

3　天然草地牧草青贮方式

针对上述天然草地牧草资源特性带来的挑战,当前的青贮技术主要围绕如何“主动干预”和“系统优化”发酵进程展开。本研究将比较评估常规青贮、添加剂青贮与营养互补型青贮3类,重点剖析它们各自在应对多样性挑战、稳定发酵品质方面的原理、成效与局限性。

3.1　常规青贮

常规青贮是一种依赖于自然发酵的基础性青贮技术,是指不添加任何外源发酵剂或化学添加剂,直接利用原料表面附着的天然微生物和植物自身糖类进行的自然发酵过程,该方法的主要优点是操作简便、成本低廉,主要局限是对环境条件敏感,过度依赖原料自身条件,易受不良微生物活动影响,品质一般,只适用于小型养殖场或资源受限的地区[8]。天然草地牧草青贮国内研究最早见于吴进发等[35]的研究,其通过对小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)牧草进行青贮后,与饲喂干草相比,营养价值升高,家畜喜食,且营养损失减少,消化率提高[36]。吴玉虎[37]对青海地区天然草地牧草茁壮早熟禾(*Poa imperialis*)、赖草(*Leymus secalinus*)及西伯利亚蓼(*Knorringia sibirica*)进行整株青贮后发现,其发酵品质较好,同时也进一步证实了天然草地牧草是可以青贮的。白春生等[38]研究发现大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)青贮后,可直接饲喂。刘兴波[39]研究发现,天然草地牧草(锡林浩特典型草原)直接青贮后pH在4.20以上,青贮品质一般。宋十妹[40]研究发现,天然草地牧草(河北坝上)青贮时,水分含量保持在65%～70%,切割长度为5～8 cm,青贮密度450～500 kg·m^{-3},其营养品质最佳。虽然天然草地牧草中的禾本科牧草可以常规青贮,但青贮后营养价值较低,而相应的豆科牧草因其缓冲能值高,若常规青贮则难以发酵[41]。由此可见,天然草地牧草在自然青贮过程中,由于其固有的牧草特性,以及发酵过程控制难度大,因此,需要添加剂来改善其发酵效果。

3.2　添加剂青贮

青贮添加剂是调控青贮发酵过程、提升青贮品质的关键物质,根据其功能和作用机理,主要分为微生物制剂、营养添加剂、酶制剂和化学添加剂4大类[42]。分子生态学研究表明,成功的青贮依赖于特定乳酸菌种群快速建立种群优势[43],Zhang等[44]在青贮过程中添加植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)和布氏迟缓乳杆菌(*Lentilactobacillus buchneri*),不仅能够有效保存饲料中的主要营养物质,还能显著抑制有害微生物的生长与繁殖,而天然牧草青贮的失败案例常与肠杆菌科细菌或梭菌的早期增殖相关,它们不仅争夺底物,还产生氨态氮、丁酸,降低品质,对发酵机理的深入理解,是选择与优化后续技术路径的基础。乳酸菌添加剂是微生物制剂中最常用的添加剂,其在发酵初期通过快速增殖,为青贮料提供大量优势乳酸菌群,促进有机酸的大量生成,迅速降低pH,能够显著抑制梭菌等腐败性及病原微生物的生长与增殖,减少青贮过程中的干物质和营养物质损失[45]。赵牧其尔等[46]研究发现在天然草地牧草青贮时添加不同乳酸菌添加剂,对其青贮营养和发酵品质以及菌群多样性

等指标均有显著影响,其中以添加植物乳杆菌时青贮品质最好。余俊洋等[47]研究发现,粪肠球菌(*Enterococcus faecium*)和植物乳杆菌可改善青贮饲料的发酵品质,降低pH,增加乳酸含量。Li等[48]研究表明,赤峰市典型草原天然草地牧草青贮时添加乳酸菌剂后,有效降低了青贮饲料的pH和氨态氮含量,提高了乳酸含量,整体改善青贮饲料的发酵品质。营养添加剂的作用在于弥补青贮原料中特定营养成分的缺失或不足,一方面,它能减少青贮过程中粗蛋白的降解与脱氨损失,维持饲料的蛋白营养价值;另一方面,可通过调节营养环境间接抑制有害微生物的生长活动,最终达到改善青贮饲料的发酵品质、延长储存期的目的[48]。冯骁骋[49]研究发现,天然牧草青贮时添加蔗糖、糖蜜,可有效改善其青贮品质,降低pH,显著增加乳酸含量,且能有效抑制有害微生物的生长繁殖。李海萍等[50]研究表明,在燕麦(*Avena sativa*)青贮时添加麦麸可显著提高其营养成分,还可改善青贮过程中的有氧稳定性。酶制剂能通过有效组分进行专一性催化,破坏植物细胞壁中纤维素、果胶等结构性多糖的物质结构,通过水解作用将这些复杂多糖分解为乳酸菌可利用的单糖,作为碳源底物供给乳酸菌促进其发酵,从而促进乳酸生成,加快发酵进程,减少纤维含量,改善青贮饲料的消化性能,同时,通过酸性环境及代谢产物协同抑制梭菌等有害细菌的生长繁殖,从而优化青贮品质[51-52]。化学添加剂根据作用方式可分为两类:一类是发酵抑制剂,如甲酸、硫酸、盐酸等,它们能快速降低pH,显著减弱植物体的呼吸强度,并有效遏制多种有害微生物的代谢活性,从而最大限度地保存营养物质,尤其适用于蛋白质含量较高或含水量过大的原料;另一类是好气性腐败抑制剂,如苯甲酸、山梨酸、丙酸和乙酸等,它们主要作用于好氧腐败菌,通过遏制好氧微生物的活性来提高其稳定性,这既能预防开窖前因密封不严引发的二次发酵,也能有效延缓开窖饲用后的好氧变质进程[53-54]。上述研究表明,各类添加剂虽均能改善品质,但其作用靶点与适用场景存在本质区别。微生物制剂的核心是微生物竞争,适用于天然菌群活力不足的原料;营养添加剂的核心是底物调控,适用于可溶性糖匮乏的原料;酶制剂的核心是底物创造,适用于纤维降解瓶颈突出的原料;化学添加剂的核心是环境胁迫,适用于需要快速抑制腐败的原料。然而,针对成分复杂的天然牧草,单一添加剂往往难以应对所有短板。虽然添加剂能精准调控,但成本较高。可从天然草地牧草本身出发,通过设计更优的“发酵内环境”来降低成本并提升稳定性。因此,根据天然牧草的营养成分含量,科学选用不同牧草进行营养互补,是成功青贮的关键。

3.3 营养互补型青贮

为克服单一牧草青贮在营养与发酵方面的局限性,营养互补型青贮技术通过对不同牧草进行配比优化,利用其营养与发酵特性的互补性,创造出一种优于单一原料的青贮化学和微生物环境,以此来实现发酵过程的优化以及营养损失的最小化,最终提升饲料品质。天然草地不同种类牧草可以进行营养互补型青贮,不仅能提升青贮饲料的营养价值,还可提高其适口性和消化率[8]。吴羽晨等[55]研究发现,将苜蓿与黑麦草混合青贮后,能改善单一青贮时发酵品质和营养价值低的问题。李龙兴等[56]研究发现杂交狼尾草(*Pennisetum glaucum*×*P. purpureum*)与不同比例薏苡(*Coix lacryma-jobi*)秸秆混贮可降低pH及中性洗涤纤维,提高乳酸含量,改善青贮品质。Yang等[57]研究发现无芒雀麦(*Bromus inermis*)与桑(*Morus alba*)叶2∶8混合后青贮,其品质最佳。Si等[58]研究发现,羊草与苜蓿混合青贮后,pH降低,乳酸菌属丰度增加,霉菌丰度降低。徐艳霞等[59]将紫花苜蓿与高丹草(*Sorghum bicolor*×*S. sudanense*)混合青贮后,显著降低了其氨态氮的含量。Lai等[60]的研究发现3种禾本科牧草分别与4种饲用豆科植物混合青贮后,禾本科牧草与任意一种豆科牧草混合青贮,均可改善其发酵品质。上述研究表明,营养互补型青贮通过将不同营养特性的牧草进行科学配比,能够有效实现营养成分的互补和发酵特性的协同优化,这一过程不仅改善了青贮饲料的发酵品质,还增强了营养物质的保存效率,从而全面提升青贮饲料的综合品质与饲用价值。该技术是一种通过科学配比不同牧草资源,利用其营养与发酵特性的互补优势,以提升青贮饲料综合品质的有效技术手段,合理的牧草组合(如豆科与禾本科混合)能够显著优化发酵进程,提高乳酸产量,快速降低pH,并有效减少氨态氮的生成,从而增强蛋白质保存率与饲料适口性,然而,其成功实施依赖于对原料比例、含水量、发酵条件及微生物活动的精准调控,此外,通过添加乳酸菌制剂或甲酸等添加剂,可进一步强化厌氧发酵效果,抑制杂菌繁殖,提升青贮稳定性,通过科学配比与精细管理,营养互补型青贮不仅能为反刍动物提供营养价值高、易消化的饲料,还能减少营养流失,提高养殖效益,成为现代畜牧业节本增效的重要技术途径[61-62],更是应对

天然草地牧草复杂性的必然策略。

综上所述，常规青贮、添加剂青贮与营养互补型青贮在核心原理、成本效益及应用场景上各有不同。从操作成本比较，常规青贮最低，添加剂青贮最高，营养互补型青贮居中。从品质可控性比较，营养互补型青贮最优，添加剂青贮次之，常规青贮最不稳定。针对天然草地牧草的复杂性，营养互补型青贮在资源适配性上最具优势，而添加剂青贮在精准调控上不可或缺。3种青贮方式技术路径呈现递进与互补关系，常规青贮是基础，但受限于自然发酵的不可控性；添加剂青贮通过外源干预实现了对发酵过程的精准调控，是提升和稳定青贮品质的关键技术，但其应用成本较高；营养互补型青贮则从系统角度出发，通过原料组合设计创造更优的发酵内环境，是一种经济有效的策略，尤其适用于资源多样化的场景。因此，在实际生产中，可根据生产目标、资源条件和成本预算，单一或组合应用上述技术。对于物种组成复杂的天然草地牧草，将“营养互补型青贮”作为基础框架，再针对性地辅以“添加剂青贮”进行优化，可能是实现其高效、稳定青贮的可行路径。未来研究需进一步量化不同天然牧草组合的发酵协同效应，并开发与之匹配的低成本、高效专用添加剂配方。

4　天然草地牧草青贮饲料在动物生产中的应用

青贮技术的价值最终需通过动物生产性能来验证，基于北方天然牧草复杂体系所调制的青贮饲料，其品质的改进能否以及如何转化为反刍动物生产效益的提升，是当前应用研究的核心问题。现有研究表明天然草地牧草虽然纤维含量较高，但通过青贮技术，可在微生物发酵作用下实现营养成分的高效转化与保存，这一过程的核心机理在于，在发酵初期，乳酸菌等优势微生物利用可溶性碳水化合物快速增殖，迅速降低pH，抑制蛋白水解酶和有害微生物的活性，从而减少蛋白质降解为氨态氮的损失；同时，在低pH和微生物酶的协同作用下，植物细胞壁中的纤维素与半纤维素被部分降解为可发酵糖或短链脂肪酸，这不仅提高了纤维组分的可消化性，也生成了更多容易被瘤胃吸收的有机酸，从而改善饲料的适口性，提高其营养价值，此外，青贮饲料不仅能减少营养流失，还能保留青绿饲料中的多种矿物元素与维生素，其酸香、质地柔软的特性，可有效提升家畜的采食欲望及养分利用率，并且已成为家畜常年优质粗饲料的重要来源[8]。目前，直接以天然草地牧草为原料的青贮饲料在动物生产中的应用研究尚不系统，在少数相关研究中，鲜秀梅等[63]将高寒阴湿地区天然草地的牧草混合物进行青贮后饲喂肉羊，发现其适口性、采食量和生产性能与常见的玉米(*Zea mays*)秸秆青贮效果相当，表明天然草地牧草青贮具有替代部分常规粗饲料的潜力。然而，当前大多数关于“牧草”青贮的研究仍集中在少数几种高产、优质的人工栽培牧草(如苜蓿、黑麦草)或其组合上。例如，郝智强等[64]通过黑麦草青贮替代25%苜蓿饲喂给泌乳奶牛，结果发现采食量、产奶量及乳脂肪/乳糖无显著变化，但乳蛋白含量提升3.43%。Ravari等[65]利用苜蓿与仙人掌(*Opuntia stricta*)的混合青贮饲料饲喂奶山羊，改善了乳品质。这类研究虽具有重要的技术参考价值，但其原料与天然草地植物群落在物种组成、营养结构和发酵特性上存在差异，其结论不能直接等同于天然草地牧草青贮的应用效果。在反刍动物营养中，瘤胃微生物扮演着核心角色，它们不仅主导纤维素的分解、蛋白质的合成，还直接影响饲料的能量利用效率与宿主健康[66]。因此，青贮饲料的品质最终需要通过产生，以及其对瘤胃微生物及宿主的影响来评价。然而，目前关于天然草地牧草青贮中，牧草组合如何影响瘤胃微生物群落结构、功能活性及互作机制的影响研究仍相对有限，尤其是天然草地牧草种类多样，在青贮发酵过程中可能形成独特的微生物环境，进而对瘤胃发酵产生不同影响，其机理尚待深入探索[67]。总体而言，在反刍动物营养中，瘤胃微生物是养分转化的核心执行者，因此，青贮饲料的最终价值需通过其对瘤胃微生态及宿主健康的影响来综合评价，在反刍动物日粮中添加天然草地牧草混合青贮饲料，不仅不会对其生产性能产生负面影响，还能显著降低养殖成本并提高经济效益。这种混合青贮饲料通过乳酸菌发酵，保留了牧草的营养成分，同时提高了纤维的可消化性，有助于维持反刍动物消化系统的健康，促进瘤胃内微生物的平衡。然而，天然草地牧草青贮展现出良好的资源化利用潜力，尤其在降低饲养成本和维持生产性能方面具有实证支持，但现有研究大多停留在现象描述层面，主要集中在禾本科与豆科的混合青贮上，对于其他天然草地牧草(如禾本科与杂类草、豆科与非豆科牧草的混合)的青贮技术及其在动物生产中的应用研究仍较为缺乏。此外，天然草地牧草混合青贮的最优比例尚未明确，天然牧草青贮中可能存在的条件性致病微生物或真菌毒素风险，在现有应用研究中常被忽视，构成潜在的生产安全与健康争议。同时，对于采用多组学

技术，系统解析青贮过程中微生物与代谢产物的动态规律及其对瘤胃功能的调控机制；加强植物多样性（特别是杂类草的可控利用）与发酵品质、安全性的关联研究，建立基于生态位互补的配比优化模型；饲养试验，综合评价其对动物免疫、代谢及产品品质的影响，亟待深入探究，只有通过机理层面的深入探索，才能真正实现从“资源替代”到“营养调控”的跨越，发挥天然草地牧草青贮在绿色畜牧业中的独特价值。

5 展望

为使北方天然草地牧草资源通过青贮方式获得稳定高效的利用，在未来的研究和生产实践中，应进一步探索多种天然草地牧草的组合效应，优化青贮工艺参数，提高青贮饲料的利用效率，并通过在动物生产中的应用，揭示其对反刍动物瘤胃微生物的影响机制，促进该技术在畜牧业中的广泛应用。具体应围绕以下4个层面重点突破：一是研发适配区域草地植物群落的专用复合菌剂与酶制剂，实现从“通用配方”到“以草定菌”的精准调控；二是系统解析杂草与毒草中有害成分在发酵中的转化规律与安全性，并挖掘其特殊次生代谢物对发酵微生态的调控潜力，变“被动剔除”为“主动利用”；三是利用多组学技术阐明天然牧草青贮通过瘤胃微生物影响宿主代谢与生产性能的机制，建立“青贮品质—瘤胃功能—生产产出”的预测模型；四是在全产业链视角下，开展从调制工艺优化到饲喂的“草畜系统耦合”研究，并综合评价其在降低饲料成本、提升动物健康及维护草地生态方面的综合效益，为实现天然草地牧草资源的高效、安全与可持续利用提供系统性解决方案。通过上述研究，最终将形成针对天然草地牧草多样性的高效稳定青贮利用理论与技术体系。

6 小结

综上所述，北方天然草地牧草研究正从基础描述向机制解析和应用研发的方向纵深推进，并在草地生态系统中扮演着重要角色。本研究围绕利用北方天然草地牧草的多样性以实现其稳定高效青贮这一核心问题，系统阐述了其种类复杂、物候期不一。导致常规青贮发酵品质不稳定的痛点，论证了通过添加剂青贮和营养互补型青贮能有效优化发酵进程，显著提升青贮饲料品质，从而实现营养成分更好保存与纤维结构的优化，并通过动物生产应用证实，优质青贮饲料能改善家畜的生产性能、瘤胃发酵及畜产品品质，并降低养殖成本。未来该领域研究需向精细化、系统化发展，重点开发适应区域特点的专用复合添加剂与营养互补型青贮技术，探索杂类草的安全资源化途径，并利用多组学技术深入揭示青贮饲料通过调控瘤胃微生物影响宿主健康的机理，最终通过草畜一体化管理，推动北方天然草地牧草资源的高效利用，为草地畜牧业可持续发展和生态环境保护提供科技支撑。

参考文献 References：

[1] Dixon A P, Faber-langendoen D, Josse C, *et al*. Distribution mapping of world grassland types. Journal of Biogeography, 2014, 41(11): 2003－2019.

[2] Zhou W, Yang H, Huang L, *et al*. Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010. Ecological Indicators, 2017, 83: 303－313.

[3] Wei Y H. Research on the forage supply-demand balance of grassland animal husbandry in China. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.
魏逸衡. 中国草地畜牧业饲草供需平衡研究. 杭州：浙江大学, 2024.

[4] Squires V R, Dengler J, Feng H Y, *et al*. Grasslands of the world: diversity, management and conservation. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.

[5] Gibson D J, Newman J A. Grasslands and climate change. New York: Cambridge University Press, 2019.

[6] Zhao Y Y, Liu Z F, Wu J G. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. Landscape Ecology, 2020, 35(4): 793－814.

[7] Hua R, Baodaerhan, Dong R, *et al*. Monitoring of rodent damage areas in grassland using unmanned aerial vehicle remote sensing technology. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(5): 71－82.
花蕊, 包达尔罕, 董瑞, 等. 基于无人机遥感的天然草原鼠害发生面积调查方法研究. 草业学报, 2023, 32(5): 71－82.

[8] The Third National Land Survey Leading Group of the State Council, Ministry of Natural Resources, National Bureau of Statistics. A bulletin on the main data results of the third national land survey. People's Daily, 2021-08-27(017).

国务院第三次全国国土调查领导小组办公室，自然资源部，国家统计局．第三次全国国土调查主要数据公报．人民日报，2021-08-27(017)．

[9] Chen Z W，Huang X Y，Huang X S，*et al*. Research progress，application status and development prospects of *Pennisetum* grasses silage feed. Chinese Journal of Animal Nutrition，2025，37(6)：3606－3617.
陈兆伟，黄小云，黄秀声，等．狼尾草属牧草青贮饲料的研究进展、应用现状及发展前景．动物营养学报，2025，37(6)：3606－3617.

[10] Zhu J Z. The types and quantity characteristics of natural grassland grass resources in Xinjiang. Journal of Xinjiang Agricultural University，1992，15(3)：9－14.
朱进忠．新疆天然草地牧草资源种类与数量特征．新疆农业大学学报，1992，15(3)：9－14.

[11] Lu X X，Chen T C，Yu J F，*et al*. Nutritional value of forages and their impact factors across different grassland types in Yili，Xinjiang. Pratacultural Science，2025，42(2)：3182－3196.
鲁星鑫，陈天赐，尉剑飞，等．新疆伊犁不同草地类型牧草营养价值及其影响因素．草业科学，2025，42(2)：3182－3196.

[12] Fan Y，Chen J，Xu Y D，*et al*. Comprehensive evaluation of nutritional value of twenty wild Cyperaceae forage resources. South China Agriculture，2022，16(17)：11－15.
范彦，陈静，徐远东，等．二十份野生莎草科牧草资源营养价值综合评价．南方农业，2022，16(17)：11－15.

[13] Yan D J，Ni Y F，Wumaier·Wushou，*et al*. Investigation on harm and distributions of toxic weeds on natural grasslands in Akesu of Xinjiang. Progress in Veterinary Medicine，2016，37(12)：39－46.
严杜建，倪亦非，吾买尔·吾守，等．新疆阿克苏地区天然草地毒草分布及危害状况调查．动物医学进展，2016，37(12)：39－46.

[14] Fu X Q，Yu Z，Liang H，*et al*. Preliminary plan for the economic classification of forage plants in natural grasslands in northern China. Journal Grasslands and Forage in China，1984，1(2)：9－17.
富象乾，于卓，梁海，等．中国北部天然草场饲用植物经济类群划分的初步方案．中国草原与牧草，1984，1(2)：9－17.

[15] Barnes R，Miller D A，Nelson C J，*et al*. The science of grassland agriculture. Chichester，West Sussex：Iowa State University Press，1995.

[16] Huang M，Shang Z H. Research progress on poisonous weeds treatment technology in Qinghai-Tibet Plateau. Acta Agrestia Sinica，2019，27(5)：1107－1116.
黄梅，尚占环．青藏高原毒草型退化草地治理技术研究进展．草地学报，2019，27(5)：1107－1116.

[17] Ma Y L，Wang H C，Li C J. Response of sheep rumen fermentation and microbial communities to feed infected with the endophyte *Epichloë gansuensis* as evaluated with rumen-simulating technology. Journal of Microbiology，2021，59(8)：719－728.

[18] Zhao B Y，Liu Z Y，Wan X P，*et al*. Damage and control of poisonous-weeds in Chinese western grassland. Scientia Agricultura Sinica，2008，41(10)：3094－3103.
赵宝玉，刘忠艳，万学攀，等．中国西部草地毒草危害及治理对策．中国农业科学，2008，41(10)：3094－3103.

[19] Zhang X Y，Li S W，Liu Z H，*et al*. Nutritional quality of common forage species and their influences across natural alpine rangelands，Northern Tibetan Plateau. Acta Agrestia Sinica，2024，32(12)：3797－3806.
张新永，李少伟，刘增辉，等．藏北高寒天然草地常见牧草营养品质影响因素分析．草地学报，2024，32(12)：3797－3806.

[20] Mark A. A global comparison of the nutritive values of forage plants grown in contrasting environments. Journal of Plant Research，2018，131(4)：641－654.

[21] Pavlu V，Hejcman M，Pavlu L. Effect of continuous grazing on forage quality，quantity and animal performance. Agriculture，Ecosystems and Environment，2006，113(1/2/3/4)：349－355.

[22] Chen D W. Animal nutrition and feed science (Second Edition). Beijing：China Agricultural Publishing House，2015.
陈代文．动物营养与饲料学(第二版)．北京：中国农业出版社，2015.

[23] Shi Y，Ma Y L，Ma W H，*et al*. Large scale patterns of forage yield and quality across Chinese grasslands. Chinese Science Bulletin，2013，58(3)：226－239.
石岳，马殷雷，马文红，等．中国草地的产草量和牧草品质：格局及其与环境因子之间的关系．科学通报，2013，58(3)：226－239.

[24] Ma W W，Ma B Y. Dynamic analysis of forage nutrient three county in Sanjiangyuan region. Qinghai Prataculture，2019，28(2)：45－47.
马文文，马秉云．三江源区三县优势牧草养分动态分析．青海草业，2019，28(2)：45－47.

[25] French K E. Species composition determines forage quality and medicinal value of high diversity grasslands in lowland England. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 241(4): 193－204.

[26] Chen D D, Zhao L, He F Q, *et al*. Analysis of nutritional components of common edible forages from different area of Sanjiangyuan alpine grassland. Grassland and Turf, 2021, 41(4): 134－142.
陈懂懂, 赵亮, 贺福全, 等. 三江源高寒草地常见可食牧草在不同分布区的营养成分分析. 草原与草坪, 2021, 41(4): 134－142.

[27] Valkama E, Virkajarvi P, Uuitalo R, *et al*. Meta-analysis of grass ley response to phosphorus fertilization in Finland. Grass and Forage Science, 2016, 71(1): 36－53.

[28] Li Y Y, Gegentu, Jiang X W, *et al*. Effect of different terrains on the yield and nutritional quality of natural grassland. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 49－53.
李宇宇, 格根图, 降晓伟, 等. 不同地势对天然草地牧草产量和营养品质的影响. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 49－53.

[29] Zhang M, Wang X L, Ma Y S, *et al*. Analysis of nutritional components of six forages in Shigatse natural grassland. Journal of Qinghai University, 2021, 39(6): 1－9.
张敏, 王晓丽, 马玉寿, 等. 日喀则天然草地6种牧草营养成分分析. 青海大学学报, 2021, 39(6): 1－9.

[30] Bao J, Wang Z J, Zhaomuqier, *et al*. Study on quality characteristics of natural pastures in different steppe types. Feed Research, 2022, 20(4): 75－78.
包健, 王志军, 赵牧其尔, 等. 不同草原类型天然牧草的产量和品质特性研究. 饲料研究, 2022, 20(4): 75－78.

[31] Liu A X, Zhang N N, Liu Y, *et al*. Comprehensive evaluation of grass yield and nutritional value of five gramineous forages in alpine region of Qinghai Province. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(2): 1388－1400.
刘爱鑫, 张楠楠, 刘毅, 等. 青海省高寒地区5种禾本科牧草产草量和营养价值综合评价. 动物营养学报, 2025, 37(2): 1388－1400.

[32] Li J, Liu J M, Fan T W, *et al*. Evaluation of nutritional value of natural herbage of different grassland types in Xinjiang. China Feed, 2021(13): 92－97.
李静, 刘建明, 范天文, 等. 新疆不同草地类型天然牧草营养价值评定. 中国饲料, 2021(13): 92－97.

[33] Guo Y, Lan J, Li C Z, *et al*. Analysis and evaluation of nutritional value of Motuo wild forage resources. Feed Research, 2025, 48(3): 153－159.
郭禹, 蓝俊, 李承臻, 等. 墨脱野生牧草资源营养价值分析与评价. 饲料研究, 2025, 48(3): 153－159.

[34] Gegentu. Feeding study on roughage forages of caragana, salsola and poplar leaves. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005.
格根图. 非常规粗饲料柠条、猪毛菜、杨树叶的饲用研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.

[35] Wu J F, Yang S L, Ding J, *et al*. Silage experiment of *Deyeuxia angustifolia* forage. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 1984(9): 12－18.
吴进发, 杨树良, 丁军, 等. 小叶章牧草青贮试验. 黑龙江畜牧兽医, 1984(9): 12－18.

[36] Chai F J, Guo B H, Yin Y H, *et al*. Ground silage experiment of *Deyeuxia angustifolia* forage. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 1993(6): 15－16.
柴凤久, 郭宝华, 殷元虎, 等. 小叶章牧草地面青贮试验. 黑龙江畜牧兽医, 1993(6): 15－16.

[37] Wu Y H. Trial report on whole-plant silage of forage in alpine pastoral areas. Qinghai Prataculture, 1998, 7(2): 14－17.
吴玉虎. 高寒牧区牧草整株青贮试验报告. 青海草业, 1998, 7(2): 14－17.

[38] Bai C S, Yu Z, Xue Y L, *et al*. Study on making sievers wormwood silage. Chinese Journal of Grassland, 2007, 29(1): 77－81.
白春生, 玉柱, 薛艳林, 等. 大籽蒿青贮方法的初步研究. 中国草地学报, 2007, 29(1): 77－81.

[39] Liu X B. A study on response of natural grass nutrients to utilization intensity and processing methods. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015.
刘兴波. 天然牧草养分对草地利用强度与加工方式的响应. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.

[40] Song S M. Study on modulation technology of forage grass silage in natural grassland in Hebei Province. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019.
宋十妹. 河北坝上天然草地牧草青贮调制技术研究. 保定: 河北农业大学, 2019.

[41] Wu T T, Zhou J X, Huang H Z, *et al*. Forage grass mixed silage technology and its application in animal production. China

Feed, 2024(15): 150－154.
吴婷婷, 周嘉欣, 黄浩展, 等. 牧草混合青贮技术及其在动物生产中的应用. 中国饲料, 2024(15): 150－154.

[42] Xin Y F, Chen C, Zeng T R, *et al*. Research progress in the effects of additives to silage on microbial diversity. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(9): 24－30.
辛亚芬, 陈晨, 曾泰儒, 等. 青贮添加剂对微生物多样性影响的研究进展. 生物技术通报, 2021, 37(9): 24－30.

[43] Muck R E. Silage microbiology and its control through additives. Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science, 2010, 39(1): 183－191.

[44] Zhang J W, Liu Y C, Wang Z J, *et al*. Effects of different types of LAB on dynamic fermentation quality and microbial community of native grass silage during anaerobic fermentation and aerobic exposure. Microorganisms, 2023, 11(2): 513.

[45] Wu B Y L, Hu Z F, Wei M L, *et al*. Effects of inoculation of *Lactiplantibacillus plantarum* and *Lentilactobacillus buchneri* on fermentation quality, aerobic stability, and microbial community dynamics of wilted *Leymus chinensis* silage. Frontiers in Microbiology, 2022, 13(7): 928731.

[46] Zhaomuqier, Bao J, Wang Z J, *et al*. Effects of different lactic acid bacteria additives on silage quality of natural pasture grass silage. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(5): 3352－3362.
赵牧其尔, 包健, 王志军, 等. 不同乳酸菌添加剂对天然草地牧草青贮饲料青贮品质的影响. 动物营养学报, 2024, 36(5): 3352－3362.

[47] Yu J Y, Zhang Y L, Wang X Z, *et al*. Effects of *Lactiplantibacillus plantarum* and *Enterococcus faecium* on fermentation quality and bacterial community of hybrid *Broussonetia papyrifera* silage. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(8): 5617－5630.
余俊洋, 张玉琳, 王旭哲, 等. 植物乳杆菌和屎肠球菌对杂交构树青贮发酵品质及细菌群落的影响. 动物营养学报, 2025, 37(8): 5617－5630.

[48] Li Y Y, Du S, Sun L, *et al*. Effects of lactic acid bacteria and molasses additives on dynamic fermentation quality and microbial community of native grass silage. Frontiers in Microbiology, 2022, 13(3): 830121.

[49] Feng X C. Study on mechanism and quality control of natural grassland forage silage. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
冯骁骋. 天然草地牧草青贮机理及品质调控研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.

[50] Li H P, Guan H, Jia Z F, *et al*. Effects of wheat bran and lactic acid bacteria on baled oat silage quality and aerobic stability in the alpine region of Northwest Sichuan. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 302－310.
李海萍, 关皓, 贾志锋, 等. 添加麦麸和乳酸菌对川西北高寒地区燕麦裹包青贮品质和有氧稳定性的影响. 草地学报, 2023, 31(1): 302－310.

[51] Sun Y, Yang Y Y, Wu C H, *et al*. Effect of *Bacillus subtilis* and complex enzyme preparations on quality of alfalfa silage. Feed Research, 2023, 46(9): 109－113.
孙宇, 杨燕燕, 吴春会, 等. 枯草芽孢杆菌和复合酶制剂对紫花苜蓿青贮品质的影响. 饲料研究, 2023, 46(9): 109－113.

[52] Li Y Y, Mu Y X, Zhang S, *et al*. Silage-specific compound enzyme regulate alfalfa silage quality and nutrient components. Pratacultural Science, 2021, 38(7): 1402－1410.
李玉玉, 牟怡晓, 张硕, 等. 青贮专用复合酶制剂调控苜蓿发酵品质及营养成分. 草业科学, 2021, 38(7): 1402－1410.

[53] Muck R E, Nadeau E M G, Mcallister T A, *et al*. Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 3980－4000.

[54] Zhang J W, Jia Y S, Gegentu, *et al*. Effects of different propionic acid concentration on the quality and aerobic stability of natural forage silage. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(9): 2522－2528.
张佳伟, 贾玉山, 格根图, 等. 不同丙酸浓度对天然牧草青贮品质及有氧稳定性的影响. 草地学报, 2022, 30(9): 2522－2528.

[55] Wu Y C, Lin F. Effects of mixed silage in different proportions of *Lolium perenne* L. and *Medicago sativa* L. on fermentation quality and nutrient composition. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2022, 650(14): 107－111.
吴羽晨, 蔺芳. 不同比例多年生黑麦草与紫花苜蓿混合青贮对发酵品质和营养成分的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2022, 650(14): 107－111.

[56] Li L X, Gong Z F, Zhou J J, *et al*. Study on the quality of mixed silage of *Coix* straw and hybrid *Pennisetum*. China Feed, 2022, 697(5): 143－146.
李龙兴, 龚正发, 周佳佳, 等. 薏苡秸秆与杂交狼尾草混合青贮品质的研究. 中国饲料, 2022, 697(5): 143－146.

[57] Yang W H, Yang F Y, Feng C S, *et al*. Fermentation properties and bacterial community composition of mixed silage of mulberry leaves and smooth bromegrass with and without *Lactobacillus plantarum* inoculation. Fermentation, 2023, 9(3): 279.

[58] Si Q, Wang Z J, Liu W, *et al*. Influence of cellulase or *Lactiplantibacillus plantarum* on the ensiling performance and bacterial community in mixed silage of alfalfa and *Leymus chinensis*. Microorganisms, 2023, 11(2): 426.

[59] Xu Y X, Yang Z, Sun F, *et al*. Study on the suitable proportion of mixed silage of Sorghum－sudangrass Hybrid and alfalfa in cold region of northeast. China Feed, 2014, 23(2): 117－124.
徐艳霞, 杨婴, 孙芳, 等. 东北寒区高丹草与紫花苜蓿混合青贮适宜比例研究. 中国饲料, 2014, 23(2): 117－124.

[60] Lai X J, Wang H Y, Yan J F, *et al*. Exploring the differences between sole silages of gramineous forages and mixed silages with forage legumes using 16S/ITS full-length sequencing. Frontiers in Microbiology, 2023, 14(3): 1120027.

[61] Wang L, Gao R, Bao J Z, *et al*. Research progress on oat silage technology and application in ruminant production. Chinese Journal of Animal Science, 2022, 58(9): 63－68.
王磊, 高润, 包锦泽, 等. 燕麦青贮技术及其在反刍动物生产中的应用研究进展. 中国畜牧杂志, 2022, 58(9): 63－68.

[62] Shen Y. Effect of mixed silage of *Caragana korshinskii* and oat grass on quality and rumen fermentation performance. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024.
申瑶. 柠条与燕麦草混合青贮对青贮品质及瘤胃发酵性能的影响. 北京: 中国农业科学院, 2024.

[63] Xian X M, Ma W T. Preliminary exploration of silage technology for natural pasture in high, cold, shady, and humid areas. Contemporary Livestock, 2005(1): 39－41.
鲜秀梅, 马文涛. 高寒阴湿地区天然牧草青贮技术初探. 当代畜牧, 2005(1): 39－41.

[64] Hao Z Q, Hao J, Zhang C X, *et al*. Effects of feeding *Lolium* spp. silage on production performance, digestion performance and economic benefits of lactating cows. Feed Research, 2022, 45(14): 15－18.
郝智强, 郝健, 张彩霞, 等. 饲喂黑麦草青贮对泌乳奶牛生产性能、消化性能及经济效益的影响. 饲料研究, 2022, 45(14): 15－18.

[65] Ravari F N, Tahmasbi R, Dayani O, *et al*. Cactus-alfalfa blend silage as an alternative feedstuff for Saanen dairy goats: effect on feed intake, milk yield and components, blood and rumen parameters. Small Ruminant Research, 2022, 216(11): 106811.

[66] Wu D L. Mechanistic study on the influence of estrus synchronization and whole cottonseed on reproductive functions in grazing Simmental cows through digestive tract microbiota and lipid metabolism based on multi-omics analysis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
吴东霖. 基于多组学研究同期发情和全棉籽通过消化道微生物和脂质代谢影响放牧西门塔尔母牛繁殖机能的机制. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.

[67] Dong L. Effects of mixed silage under forage intercropping on silage quality and microbial diversity. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.
董霖. 豆禾牧草间作下混贮对青贮品质及微生物多样性的影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.