植物科学学报　2025，43（1）：102～110
Plant Science Journal　http://www.plantscience.cn

DOI: 10.11913/PSJ. 2095-0837. 24022
CSTR: 32231.14.PSJ.2095-0837.24022
童永尚，张春平，董全民，俞旸，曹铨，杨晓霞，刘文亭，张正社，张振祥. 氮素添加对多年生高寒栽培草地饲草生产性能和营养品质的影响[J]. 植物科学学报，2025，43（1）：102−110
Tong YS, Zhang CP, Dong QM, Yu Y, Cao Q, Yang XX, Liu WT, Zhang ZS, Zhang ZX. Effects of nitrogen addition on forage production performance and nutritional quality of perennial alpine cultivated grassland[J]. *Plant Science Journal*, 2025, 43（1）：102−110

氮素添加对多年生高寒栽培草地饲草生产性能和营养品质的影响

童永尚[1,2,3]，张春平[1,2,3]，董全民[1,2,3*]，俞旸[1,2,3]，曹铨[1,2,3]，杨晓霞[1,2,3]，刘文亭[1,2,3]，张正社[1,2,3]，张振祥[1,2,3]

（1. 青海大学畜牧兽医科学院/青海省畜牧兽医学院，西宁 810016；2. 青海省高寒草地适应性管理重点实验室，西宁 810016；3. 青海大学三江源区高寒草地生态教育部重点实验室，西宁 810016）

摘　要：为明确氮素形态和施氮水平对多年生高寒栽培草地饲草生产性能和营养品质的影响，以 4 年龄栽培草地为研究对象开展了氮添加试验。试验选用尿素（酰胺态氮，U）、硫酸铵（铵态氮，A）和硝酸钙（硝态氮，N）3 种氮肥，设置 4 个施氮水平（0、22.5、45、67.5 kg·hm^{-2}·a^{-1}），测定并分析不同处理下地上生物量、饲草粗蛋白含量和相对饲喂价值等参数。结果显示，施氮水平对群落地上生物量和饲草粗蛋白含量产生极显著影响（P<0.001），对饲草粗脂肪含量产生显著影响（P<0.05）；氮素形态对群落地上生物量影响显著，对饲草粗蛋白含量和粗脂肪含量影响极显著；群落地上生物量、饲草粗蛋白含量和粗脂肪含量随着施氮水平的提高呈递增趋势；同等氮水平下，对地上生物量和饲草粗脂肪含量的促进作用表现为 U>N>A，对饲草粗蛋白含量的促进作用表现为 U>A>N。UT3、AT3 和 NT3 处理下的地上生物量分别较对照提高 43.22%、26.54% 和 33.11%。研究结果表明，酰胺态氮肥、施氮量为 67.5 kg·hm^{-2}·a^{-1} 时，多年生栽培草地的生产性能和营养品质综合表现最优。

关键词：高寒人工草地；生产性能；营养品质；氮素形态；施氮水平
中图分类号：Q945　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2095-0837（2025）01-0102-09

Effects of nitrogen addition on forage production performance and nutritional quality of perennial alpine cultivated grassland

Tong Yongshang[1,2,3], Zhang Chunping[1,2,3], Dong Quanmin[1,2,3*], Yu Yang[1,2,3], Cao Quan[1,2,3], Yang Xiaoxia[1,2,3], Liu Wenting[1,2,3], Zhang Zhengshe[1,2,3], Zhang Zhenxiang[1,2,3]

（1. *Veterinary Medicine and Qinghai Academy of Animal Science*, *Veterinary Medicine and Academy of Animal Science*, *Qinghai University*, Xining 810016, China; 2. *Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland*, Xining 810016, China; 3. *Key Laboratory of the Alpine Grassland Ecology in the Three Rivers Region*, *Ministry of Education Qinghai University*, Xining 810016, China）

Abstract: To investigate the effects of nitrogen form and application rate on forage productivity and nutritional quality of perennial alpine cultivated grassland, a nitrogen addition experiment was carried out in June 2022 using a 4-year-old cultivated grassland. Three types of nitrogen fertilizers, urea (amide nitrogen, U), ammonium sulfate (ammonium nitrogen, A), and calcium nitrate (nitrate nitrogen, N), were used in the experiment, and four nitrogen application levels (0, 22.5, 45, and 67.5 kg·hm^{-2}·a^{-1}) were set. Parameters such as aboveground biomass, forage crude protein content, and relative feeding value were measured and analyzed across

收稿日期：2024-01-23，接受日期：2024-03-01。
基金项目：青海省重点研发与转化计划项目（2022-NK-134）；国家重点研发计划项目（2022YFD1302104）。
作者简介：童永尚（1996−），男，博士研究生，研究方向为草地生态与环境保护（E-mail：tongys2022@126.com）。
* 通信作者（Author for correspondence. E-mail：qmdong@qhmky.com）。

treatments. Results showed that nitrogen application rates had highly significant effects (P<0.001) on community aboveground biomass and forage crude protein content, and significant effects (P<0.05) on forage crude fat content. Nitrogen form significantly influenced aboveground biomass and exhibited highly significant effects on forage crude protein content and crude fat content. Aboveground biomass, forage crude protein, and crude fat content increased with nitrogen application. At the same nitrogen application rate, the promotion effects on aboveground biomass and forage crude fat content followed the order U>N>A, while the promotion effects on forage crude protein content followed U>A>N. Compared to the control (CK) treatment, aboveground biomass under UT3, AT3, and NT3 treatments increased by 43.22%, 26.54%, and 33.11%, respectively. Comprehensive evaluation indicated that the T3 level was optimal for enhancing forage productivity and nutritional quality, with amide nitrogen fertilizer, applied at 67.5 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, showing the best combined performance of production and quality of perennial cultivated grassland.

Key words: Alpine artificial grassland; Production performance; Nutritional quality; Nitrogen forms; Nitrogen application level

高寒草地是青藏高原最主要的生态系统，是维护国家生态安全和改善青藏高原地区农牧民生活质量的重要保障[1]。在过去几十年里，受人类活动和自然因素的影响，高寒草地的生产和生态功能急剧下降，造成大面积土地裸露和草畜不平衡等诸多问题[2]。最近，经过相关领域学者们的不断探索实践，我国高寒草地退化的趋势明显改善，植被覆盖度大幅提升，水土流失和荒漠化基本遏制[3]。然而，青藏高原地区气候寒冷，有机质分解较慢，土壤微生物活性较低[4]，导致退化草地治理周期较长，草畜矛盾仍未能有效解决。因此，在退化草地恢复的同时，建植多年生人工草地便成为满足生产和生态功能需求的重要手段。在实践中发现，多年生高寒栽培草地在建植 2~3 年后地上生物量达到峰值，第 4 年开始其地上生物量逐年下降，且饲草品质普遍较低[5]。究其原因，与青藏高原地区土壤氮限制密切相关[6]。青藏高原地区土壤氮限制极其严重，加之气温较低，严重抑制了与氮有关的功能微生物的活性，导致生产力较低[6]。此外，多年生牧草常年吸收土壤中的营养物质，导致土壤养分贫瘠，进而造成草地减产[7]。综合两方面的原因，氮添加成为提升多年生栽培草地生产功能的直接手段。

氮素形态和施氮水平是草地氮肥管理的两项重要内容，对植物生长发育起着关键调节作用。根据化合物形态可将氮肥分为铵态氮肥（A）、酰胺态氮肥（U）和硝态氮肥（N）等多种类型，不同形态氮肥均能促进植物的生长，但在土壤中的转化机制不同，导致植物的干物质分配和营养积累存在差异[8]。植物可以吸收利用的土壤氮素主要为硝态氮和铵态氮，氮素形态对不同植物生长发育的影响存在差异，氮肥形态是影响肥效的主要因素之一[9]。施用不同形态氮素会影响作物的根系发育及碳氮代谢等生理进程，进而影响植株生物量的积累。同时，氮素形态还会影响糖、激素、维生素和生物碱等各种化学物质的合成，进而影响植物的品质[10]。向雪梅等[11]在高寒区的施氮研究表明，酰胺态氮能保证植物较高的氮素利用率和较低的氮损失率，是提高植物生产力最佳的氮素形态，而 Guo 等[12]研究发现，硝态氮能促进野牛草（*Buchloe dactyloides* (Nutt.) Engelm.）的营养繁殖和品质积累。两种结果不一致的主要原因是不同植物对氮素形态的需求存在差异，故应根据植物类型和生存环境设置合理的氮源。对于青藏高原地区多年生高寒栽培草地而言，哪种氮素形态更有利于生产力和营养品质的积累不得而知。此外，研究施氮水平对植物生产性能的影响并确定合理的氮添加量也是科学添加氮肥的关键[13]。以往研究证实，合理的氮添加量是保证植物生产力和营养品质的关键[14]，但关于具体氮添加量始终没有形成统一的结论，这是因为施氮水平应符合环境状况，不同区域氮素水平的阈值存在显著差异，氮限制比较严重的土壤环境可能需要施加更多的氮肥来满足植物的生长需求[15]。但过量的氮添加不仅造成氮肥利用率下降，也会对生态环境构成威胁。因此，确定最佳施氮量也是维持多年生高寒栽培草地生产力和营养品质的核心目标。

鉴于此，本研究以 4 年龄人工草地为研究对

象，设置 3 个氮素形态和 4 个施氮水平，通过比较不同处理植物的地上生物量和饲草营养品质等参数，探究不同氮素形态和施氮水平对饲草生产性能和营养品质的影响，通过灰色关联度综合分析，进一步筛选出最佳的氮素形态和施氮水平，以期为高寒地区优质饲草的生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于青海省海南藏族自治州共和县巴卡台农牧场（36°17'N，100°55'E），平均海拔 3 300 m，年均降水量为 300 mm，年蒸发量在 2 000~2 400 mm，年平均气温为 4.1 ℃。试验区冬季寒冷漫长，夏季温和短暂，年内干旱少雨且温度偏低，气温垂直分布明显，太阳辐射强，属高原大陆性气候特征。降水季节性分布不均，主要集中在 7-10 月。试验地土壤为高山草甸土和黄绵土[16]。

1.2 试验设计

于 2022 年 6 月，以 2019 年建植的青海草地早熟禾（*Poa pratensis* L. cv. Qinghai）+青海中华羊茅（*Festuca sinensis* L. cv. Qinghai）混播草地为研究对象，两个物种的混播比例为 1∶1，建植面积为 15 m×150 m。设置小区时，为避免边际效应，选取整块地中间较均匀的地段，采用随机区组设计，设置 3 个氮素形态，分别为尿素（酰胺态氮，U）、硫酸铵（铵态氮，A）和硝酸钙（硝态氮，N）；参照中国氮沉降分布格局（青海地区干湿沉降率 7.55 kg·hm^{-2}·yr^{-1}）确定氮素添加剂量，设 4 个施氮梯度，分别为青海省干湿氮沉降的 0、3、6、9 倍，浓度依次为 0（T0，CK）、22.5（T1）、45（T2）、67.5 kg·hm^{-2}·a^{-1}（T3），各处理见表 1。每个处理 3 个重复，共 30 个小区，小区面积为 4 m×4 m，小区之间间隔 5 m。将称好的肥料分为两等份，分别于 6 月上旬和下旬加到 2 L 水中溶解，摇匀后装入喷壶，均匀喷洒在相应的小区内，CK 处理喷洒相同体积的水。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集与处理

于 2022 年 8 月上旬（植物生长旺期）对各试验小区进行调查与样品采集。采用样方法，设置 50 cm×50 cm 的样方，齐地面刈割后带回实验室称取鲜重，后转移至 105 ℃ 烘箱中杀青 30 min，然后在 75 ℃ 烘干至恒重，称取地上生物量。之后将烘干草样用粉碎机粉碎，过 1 mm 筛备用。

表 1 氮素形态和施氮水平设置

Table 1 Nitrogen forms and nitrogen level settings

施肥处理 Fertilization treatment	氮素形态 Nitrogen form	施氮水平 Nitrogen level / kg·hm^{-2}·a^{-1}
T0（CK）	–	0.0
UT1	酰胺态氮	22.5
UT2		45.0
UT3		67.5
AT1	铵态氮	22.5
AT2		45.0
AT3		67.5
NT1	硝态氮	22.5
NT2		45.0
NT3		67.5

1.3.2 牧草品质测定方法

利用元素分析仪测定植物粗蛋白含量[17]，利用索氏抽提法测定粗脂肪含量[18]，使用马弗炉灼烧法测定粗灰分含量[18]，中性洗涤纤维含量和酸性洗涤纤维含量采用范式纤维洗涤法进行测定[19]，并根据童永尚等[19] 的方法计算相对饲喂价值。

1.3.3 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件进行原始数据整理和灰色关联度分析，具体参见童永尚等[19] 的方法。运用 SPSS 27.0 软件进行双因素方差分析和聚类分析。在 Origin 2022 软件中绘图。

2 结果与分析

2.1 氮素形态和施氮水平对饲草生产性能的影响

由表 2 可知，氮素形态对多年生高寒栽培草地的地上生物量影响显著（P<0.05），施氮水平对地上生物量的影响极显著（P<0.001），氮素形态和施氮水平交互作用对地上生物量影响不显著。氮添加整体上提高了群落地上生物量，且随着施氮水平的提高呈递增趋势，UT3、AT3 和 NT3 处理分别较 CK 处理提高 43.22%、26.54% 和 33.11%。同等氮水平相比较，对地上生物量的促进作用表现为 U>N>A（图 1）。

2.2 氮素形态和施氮水平对饲草营养品质的影响

2.2.1 对饲草粗蛋白含量的影响

由表 2 和图 2 可知，氮素形态和施氮水平对饲草粗蛋白含量均具有极显著影响（P<0.001），

表 2　氮素形态和施氮水平的双因素方差分析

Table 2　Two factor analysis of variance for nitrogen forms and nitrogen application levels

影响因素 Influence factor	氮素形态 Nitrogen form (F)		施氮水平 Nitrogen level (L)		氮素形态×施氮水平 F×L	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
地上生物量	5.622	<0.05	14.056	<0.001	0.153	0.959
粗蛋白	18.073	<0.001	38.120	<0.001	1.748	0.184
粗脂肪	39.829	<0.001	5.377	<0.05	1.183	0.351
粗灰分	0.020	0.980	0.576	0.572	1.714	0.191
中性洗涤纤维	1.979	0.167	1.423	0.267	1.422	0.267
酸性洗涤纤维	1.153	0.338	0.718	0.501	1.555	0.229
相对饲喂价值	1.275	0.304	1.284	0.301	1.909	0.153

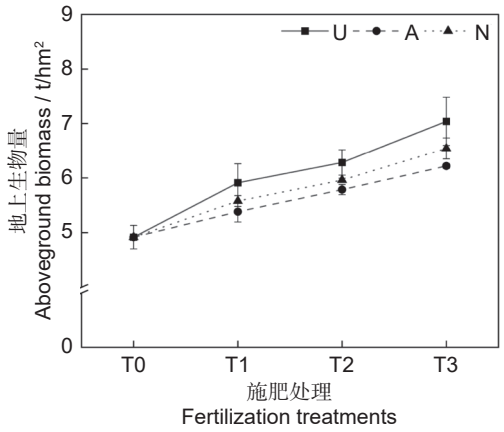

图 1　不同处理下地上生物量

Fig. 1　Aboveground biomass under different treatments

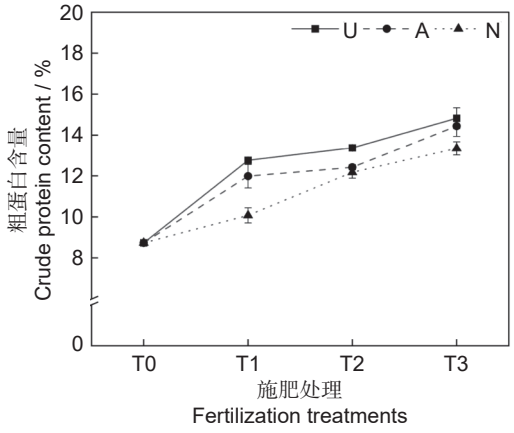

图 2　不同处理下饲草粗蛋白含量

Fig. 2　Crude protein content of forage under different treatments

氮素形态和施氮水平交互作用对饲草粗蛋白含量影响不显著。氮添加整体上提高了植物的粗蛋白含量，且随着施氮水平的提高呈递增趋势，UT3、AT3 和 NT3 处理分别较 CK 处理提高了 69.76%、65.41% 和 52.86%。同等氮水平相比较，对饲草粗蛋白含量的促进作用表现为 U>A>N。

2.2.2　对饲草粗脂肪含量的影响

氮素形态对饲草粗脂肪含量具有极显著影响（*P*<0.001），施氮水平对饲草粗脂肪含量具有显著影响（*P*<0.05），氮素形态和施氮水平对饲草粗脂肪含量没有明显的交互作用（表 2）。氮添加整体上提高了植物的粗脂肪含量，不同施氮水平对饲草粗脂肪含量的促进作用因氮素形态不同而有所差异。饲草粗脂肪含量随着酰胺态氮施肥水平的提高而增加，铵态氮施肥水平的增加对植物粗脂肪含量的影响较小。3 种氮素形态下，饲草的粗脂肪含量均在 T3 水平时达到峰值，UT3、AT3 和 NT3 处理分别较 CK 提高了 53.30%、11.34% 和 28.86%。同等氮水平相比较，对地上生物量的促进作用表现为 U>N>A（图 3：A）。

2.2.3　对饲草粗灰分含量的影响

由表 2 可知，氮素形态、施氮水平及二者交互作用对饲草粗灰分含量的影响均不显著。氮添加整体上提高了植物的粗灰分含量（*P*<0.05），AT2 处理下植物的粗灰分含量最高，为 4.46%。同一氮素形态下不同施氮水平相比较，A 和 N 处理均在 T1 水平时达到最大粗灰分含量，分别为 4.31% 和 4.26%（图 3：B）。

2.2.4　对饲草中性洗涤纤维含量的影响

本研究发现，氮素形态、施氮水平及二者交互作用对饲草中性洗涤纤维含量均未产生显著影响（表 2）。氮添加整体上降低了植物的中性洗涤纤维含量（*P*<0.05）。随着硝态氮施肥水平的提高，植物中性洗涤纤维含量逐渐降低（图 4：A）。3 种氮肥在 T3 水平时的中性洗涤纤维含量趋于一

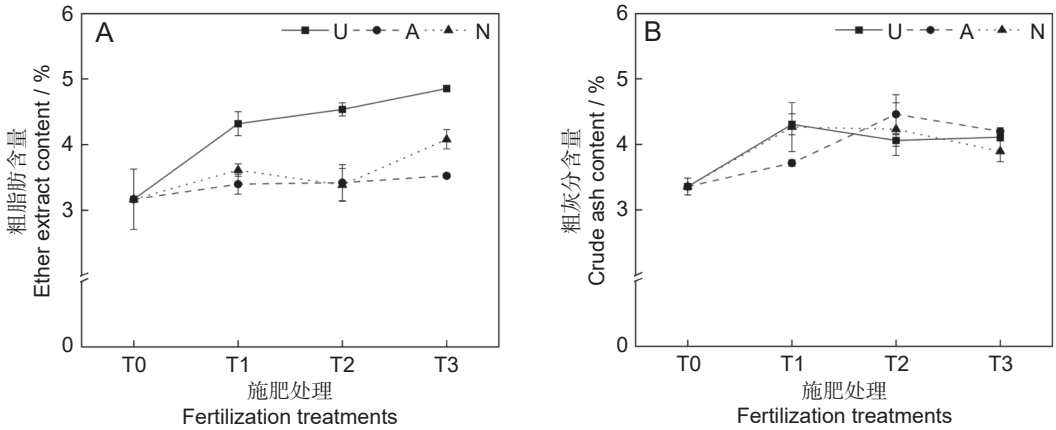

图 3　不同处理下饲草粗脂肪（A）和粗灰分（B）含量

Fig. 3　Ether extract (A) and crude ash (B) content of forage under different treatments

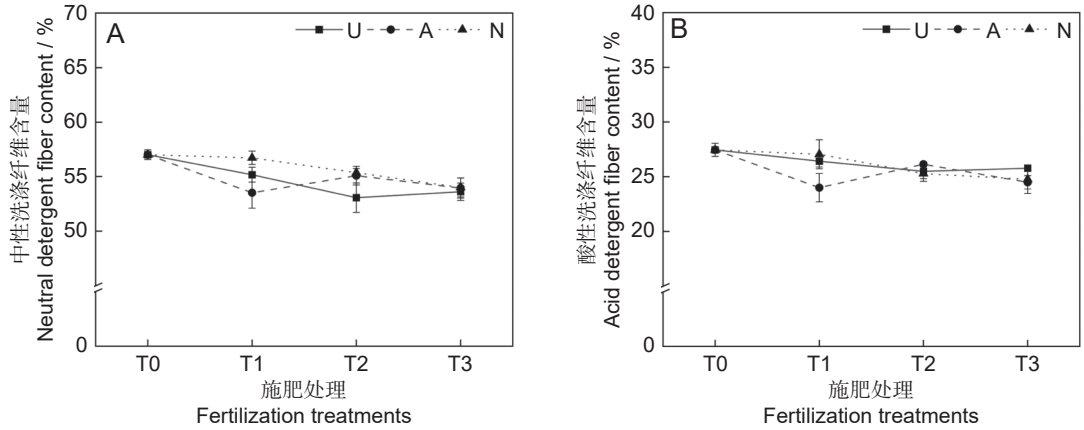

图 4　不同处理下饲草中性洗涤纤维（A）和酸性纤维（B）含量

Fig. 4　Neutral detergent fiber (A) and acid detergent fiber (B) content of forage under different treatments

致，介于 63.6%~64.0%。

2.2.5　对饲草酸性洗涤纤维含量的影响

由表 2 可知，氮素形态、施氮水平、氮素形态和施氮水平交互作用对饲草酸性洗涤纤维含量的影响均不显著。氮添加整体上降低了植物的酸性洗涤纤维含量（图 4：B）。T2 水平时，3 种氮肥对植物酸性洗涤纤维含量的影响不明显。总体来看，T1 水平时，施用铵态氮肥对植物酸性洗涤纤维含量的降低效果最为明显。

2.2.6　对饲草相对饲喂价值的影响

由表 2 可知，氮素形态、施氮水平及二者交互作用对饲草相对饲喂价值均未产生显著影响。如图 5 所示，氮添加整体上提高了饲草的相对饲喂价值，不同氮素形态和施氮水平对饲草相对饲喂价值的影响较大。随着硝态氮肥施氮水平的提高，饲草的相对饲喂价值逐渐提高。T3 水平时，3 种氮肥对饲草相对饲喂价值的提升效果接近。不同氮肥形态相比较，T1 水平时，施用铵态氮肥的饲草其相对饲喂价值最高，为 113.08；T2 水平时，

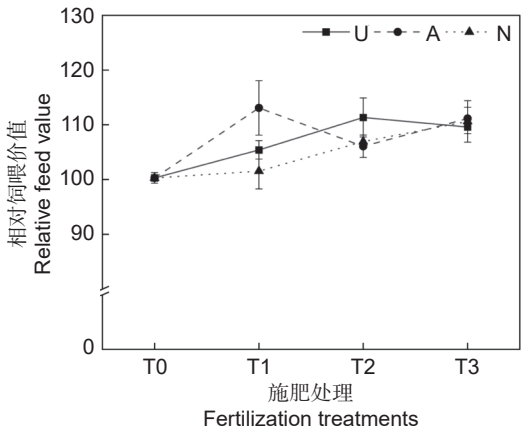

图 5　不同处理下饲草相对饲喂价值

Fig. 5　Relative feeding value of forage under different treatments

施用酰胺态氮肥时饲草的相对饲喂价值最高，为113.34。

2.3　灰色关联度评价和聚类分析

将植物地上生物量、粗蛋白含量和中性洗涤纤维含量等 7 个指标纳入评价体系，对不同氮素形态和施肥水平共 10 个处理进行灰色关联度综合评价。由表 3 可知，CK 处理排序第 9，说明氮添加普遍提高了饲草的综合性能。综合排名前 4 位的处理分别是 UT3、UT2、NT3 和 AT3。不同酰胺态氮肥处理的综合排名依次为 UT3>UT2>UT1，不同铵态氮肥处理的综合排名依次为 AT3>AT1>AT2，不同硝态氮肥处理的综合排名依次为 NT3>NT2>NT1。

本试验将 10 个处理的地上生物量和营养品质进行了聚类分析，运用 SPSS 27.0 软件构建树形图（图 6），在欧式距离为 9 处，可将其分为 4 大类。第Ⅰ类仅包括 CK 处理，其产量和营养品质均表现最差；第Ⅱ类只有 AT1 处理，其地上生物量略高于 CK 处理；第Ⅲ类包括 UT2、UT3、AT3 和 NT3 处理，其产量和营养品质均表现最好；第Ⅳ类包括 UT1、NT1、NT2 和 AT2 处理，其产量和营养品质仅次于第Ⅲ类。

表 3　不同处理的灰色关联度综合评价

Table 3　Comprehensive evaluation of gray correlation degree for different treatments

施肥处理 Fertilization treatment	等权关联度 Gray correlative	排序 Rank	权重系数 Weight coefficient	加权关联度 Weighted gray correlative	加权关联度排序 Rank of weighted gray correlative
UT3	0.871 4	1	0.126 3	0.110 0	1
UT2	0.763 3	2	0.110 6	0.084 4	2
NT3	0.753 6	3	0.109 2	0.082 3	3
AT3	0.746 1	4	0.108 1	0.080 7	4
AT1	0.718 6	5	0.104 1	0.074 8	5
UT1	0.654 1	6	0.094 8	0.062 0	6
NT2	0.633 7	7	0.091 8	0.058 2	7
AT2	0.613 0	8	0.088 8	0.054 5	8
CK	0.589 1	9	0.085 4	0.050 3	9
NT1	0.557 0	10	0.080 7	0.045 0	10

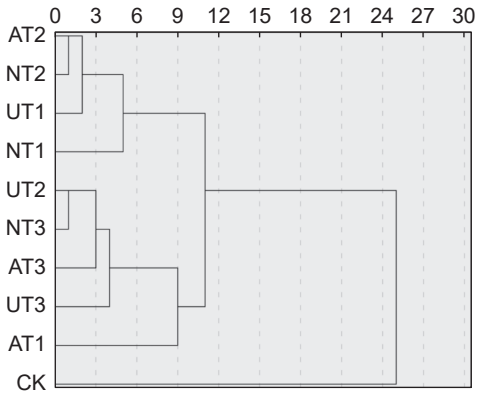

图 6　不同处理的聚类分析

Fig. 6　Cluster analysis with different treatments

3　讨论

3.1　氮素形态和施氮水平对饲草生产性能的影响

众所周知，氮添加可以提高植物的生产力，但不同环境的氮添加量应有所差异[20]。施氮量较低时，土壤养分仍然不能满足植物生长，施氮量过多又会导致土壤中产生有毒的亚硝酸盐[21]，进而阻碍植物生长，因此栽培草地施氮量应根据土壤氮素含量来确定。在以往的研究中，关于氮添加水平对植物地上生物量的调节作用有两种结论，第 1 种是地上生物量随施氮量增加而增加[22]；第 2 种是地上生物量随施氮量的增加会出现一个峰值，然后逐渐降低[15]，这是因为氮添加量有一定的环境阈值，存在一个最适施氮量，以最适施氮量为对称轴，植物的地上生物量随施氮量增加呈抛物线变化。本研究中，施氮水平对地上生物量具有极显著影响，氮添加显著提高了群落地上生物量，且随着施氮水平的提高呈递增趋势，在施氮量为 67.5 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 时达到峰值，说明本研究中设置的施氮量可能过低，在后期的试验中需要加大施氮梯度。此外，氮素形态对植物的地上生物量也产生显著影响，对地上生物量的促进作用表现为

U>N>A。说明在短期内，酰胺态氮对植物生物量的促进效果更为明显，而硝态氮和铵态氮的效果相对较差，这与向雪梅等[11]和芦光新等[23]在高寒草地中的研究结论相似。尽管施加铵态氮肥补充了土壤养分，一定程度上促进了植物生长，但铵态氮肥抑制了植物对 K^+和 Ca^{2+}的吸收，导致 NH_4^+的积累并产生氨害，从而限制了植物的生长[12, 24]。硝态氮肥的促产作用介于酰胺态和铵态氮肥之间。硝态氮同样也会对植物的生长产生不利影响，在还原过程中，硝态氮会消耗较多的能量。另外，在弱光条件下，植物对硝态氮的吸收也有可能会受到抑制，从而导致氮素供应不足。相比铵态氮肥和硝态氮肥，含氮量较高的酰胺态氮肥为土壤补充了充足的养分[16]，更能满足植物的生长需求。由于氮素形态和氮素水平的设置还与牧草栽培方式、施氮时间和气候条件等因素相关，后期还应针对以上干扰因素设置控制试验，进行深入研究。

3.2 氮素形态和施氮水平对饲草营养品质的影响

在高寒地区，老龄人工草地牧草的营养品质较差是一个普遍现象。究其原因，土壤中营养元素含量较低，导致植物对氮、磷等元素的吸收利用效率较低。研究表明，氮素添加可迅速补充植物中的全氮含量，满足植物对营养元素的需求，进而恢复草地生产力，改善草地群落结构和植物的营养品质[25]。粗蛋白和粗脂肪含量是评价牧草营养价值的重要指标，其含量高则表明牧草营养品质较高，而粗纤维和粗灰分含量越高，则表明牧草可消化养分低，品质下降[26]。宋建超等[27]在高寒区的研究表明，氮添加显著提高了垂穗披碱草（*Elymus nutans* Griseb.）的粗蛋白和粗脂肪含量，与本研究结论一致。本研究中，所有施氮处理均显著提高了饲草的粗蛋白和粗脂肪含量。此外，我们还发现不同氮素形态和施氮水平对饲草的粗蛋白和粗脂肪含量具有显著影响，施用酰胺态氮肥更有利于粗蛋白和粗脂肪的积累，且高氮水平的促进作用更加明显。该现象一方面说明了高寒区氮限制非常严重，改善牧草的营养品质可能需要投入更多的氮肥；另一方面，由于不同的植物或生育期对氮肥的需求量和氮素形态具有明显差异，所以应根据实际情况选择适宜的氮素形态和施氮量。适宜的氮素形态是提高氮素利用率以及植物蛋白质含量的重要途径之一[28]。本研究中，酰胺态氮对植物粗蛋白和粗脂肪的促进效果明显高于铵态氮和硝态氮，这可能与植物的选择吸收能力以及不同氮肥的供氮能力等因素有关[29]。此外，本研究中的 3 种氮肥均不同程度地提高了饲草的粗灰分含量，降低了饲草的中性洗涤纤维及酸性洗涤纤维含量，与前人研究结论相似[30]。聚类分析将 10 个处理分为 4 大类，通过对比试验数据发现，这 4 大类可划分饲草生产性能和营养品质的优劣，基本对应了不施氮、低氮、中氮和高氮 4 种属性，因此，施氮水平对饲草生产性能和营养品质的影响是显而易见的。最后，本研究通过灰色关联度分析得出，选用酰胺态氮肥，施氮量为 67.5 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 时，多年生栽培草地饲草的生产性能和营养品质综合表现最优，研究结果可为青藏高原环青海湖地区人工草地生产力及营养品质的提高提供参考。

4 结论

氮素形态和施氮水平对多年生高寒栽培草地饲草的生产性能和营养品质具有显著影响。选择酰胺态氮肥，施氮量为 67.5 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 时，多年生栽培草地饲草的生产性能和营养品质综合表现最优，说明适宜的氮肥管理制度对提高研究区饲草生产性能和营养价值具有促进作用。

参考文献：

[1] 杨晓霞，赵新全，董全民，俞旸，刘文亭，等. 青藏高原高寒草地适应性管理释义：概念及实现途径 [J]. 科学通报，2023，68（19）：2526-2536.
Yang XX, Zhao XQ, Dong QM, Yu Y, Liu WT, *et al*. The perception of the alpine grassland adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau: the concept and its implementation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68（19）：2526-2536.

[2] 童永尚，张春平，杨增增，俞旸，曹铨，等. 基于 CiteSpace 的 2012-2021 年国内外草地施肥研究文献计量分析 [J]. 中国草地学报，2023，45（9）：130-142.
Tong YS, Zhang CP, Yang ZZ, Yu Y, Cao Q, *et al*. Research of domestic and international grassland fertilization in the 2012-2021 based on CiteSpace bibliometric analysis[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45（9）：130-142.

[3] Freitag M, Klaus VH, Bolliger R, Hamer U, Kleinebecker T, *et al*. Restoration of plant diversity in permanent grassland

by seeding: assessing the limiting factors along land-use gradients[J]. *J Appl Ecol*, 2021, 58（8）: 1681−1692.

[4] 任佐华, 张于光, 李迪强, 肖启明, 蔡重阳. 三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量 [J]. 生态学报, 2011, 31（11）: 3232−3238.
Ren ZH, Zhang YG, Li DQ, Xiao QM, Cai CY. The soil microbial activities and microbial biomass in Sanjiangyuan alpine glassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31（11）: 3232−3238.

[5] Chen X, Li Q, Chen DD, He FQ, Huo LL, *et al*. Reasonable management of perennial planting grassland contributes to positive succession of soil microbial community in Sanjiangyuan of Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *J Plant Ecol*, 2022, 15（2）: 359−371.

[6] Wang WY, Ma YG, Xu J, Wang HC, Zhu JF, Zhou HK. The uptake diversity of soil nitrogen nutrients by main plant species in *Kobresia humilis* alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55（10）: 1688−1695.

[7] 罗敏, 章文伟, 徐广, 罗川, 卢胜鄂, 等. 覆盖对连作半夏根际土壤微生物多样性的影响 [J]. 中国野生植物资源, 2023, 42（9）: 25−30.
Luo M, Zhang WW, Xu G, Luo C, Lu SE, *et al*. Effects of mulching on soil microbial diversity in continuous cropping of *Pinellia ternata*[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2023, 42（9）: 25−30.

[8] 齐欣, 司玉坤, 赵亚南, 黄玉芳, 闫军营, 等. 不同氮肥在不同土壤中对小麦氮素利用及产量的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2021, 23（7）: 172−181.
Qi X, Si YK, Zhao YN, Huang YF, Yan JY, *et al*. Impacts of nitrogen forms on nitrogen utilization and yield of wheat in different types of soil[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23（7）: 172−181.

[9] 付帅, 王艳群, 刘晓明, 付鑫, 门明新, 等. 不同形态氮肥对玉米干物质、氮素积累及土壤氮素的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023（4）: 122−129.
Fu S, Wang YQ, Liu XM, Fu X, Men MX, *et al*. Dry matter, nitrogen accumulation of maize and soil nitrogen in response to different forms of nitrogen fertilizers[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023（4）: 122−129.

[10] 李玉静, 冯雨晴, 赵园园, 史宏志. 不同形态氮素吸收利用及其对植物生理代谢影响的综述 [J]. 中国农业科技导报, 2023, 25（2）: 128−139.
Li YJ, Feng YQ, Zhao YY, Shi HZ. Review of absorption and utilization of different nitrogen forms and their effects on plant physiological metabolism[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25（2）: 128−139.

[11] 向雪梅, 德科加, 冯廷旭, 魏希杰, 王伟, 徐成体. 三江源区高寒草甸草场植被和土壤对外源氮素输入的响应 [J]. 草地学报, 2021, 29（9）: 2010−2016.
Xiang XM, De KJ, Feng TX, Wei XJ, Wang W, Xu CT. Response of vegetation and soil to exogenous nitrogen inputs in the alpine meadow of Sanjiangyuan Region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29（9）: 2010−2016.

[12] Guo LZ, Meng HZ, Teng K, Fan XF, Zhang H, *et al*. Effects of nitrogen forms on the growth and nitrogen accumulation in *Buchloe dactyloides* seedlings[J]. *Plants*, 2022, 11（16）: 2086.

[13] 高玮, 受娜, 蒋丛泽, 马仁诗, 沈禹颖, 杨宪龙. 施氮量对饲用高粱干物质积累、分配及水分利用效率的影响 [J]. 草业学报, 2022, 31（9）: 26−35.
Gao W, Shou N, Jiang CZ, Ma RS, Shen YY, Yang XL. Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, allocation and water use efficiency of forage sorghum[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31（9）: 26−35.

[14] 王红林, 左艳春, 严旭, 周晓康, 寇晶, 等. 刈割高度与施氮量对饲料桑全株产量及营养品质的影响 [J]. 草业学报, 2021, 30（11）: 203−211.
Wang HL, Zuo YC, Yan X, Zhou XK, Kou J, *et al*. Effect of cutting height and nitrogen fertilizer rate on yield and nutritive value of whole-plant mulberry（*Morus alba*）[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30（11）: 203−211.

[15] 杨倩, 王娓, 曾辉. 氮添加对内蒙古退化草地植物群落多样性和生物量的影响 [J]. 植物生态学报, 2018, 42（4）: 430−441.
Yang Q, Wang W, Zeng H. Effects of nitrogen addition on the plant diversity and biomass of degraded grasslands of Nei Mongol, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42（4）: 430−441.

[16] 童永尚, 张春平, 董全民, 杨增增, 张小芳, 等. 不同形态氮添加对多年生高寒栽培草地土壤理化性质和微生物群落结构的影响 [J]. 环境科学, 2024, 45（6）: 3595−3604.
Tong YS, Zhang CP, Dong QM, Yang ZZ, Zhang XF, *et al*. Effects of different forms of nitrogen addition on soil physical and chemical properties and microbial community structure of perennial alpine cultivated grassland[J]. *Environmental Science*, 2024, 45（6）: 3595−3604.

[17] 林豪, 陈奕彤, 褚璟怡, 杨国锋, 赵怡然, 等. 内蒙古温性草原不同径级芨芨草生物量与营养特征分析 [J]. 中国草地学报, 2023, 45（1）: 62−67.
Lin H, Chen YT, Chu JY, Yang GF, Zhao YR, *et al*. Biomass and nutritional characteristics of *Achnatherum splendens* with different diameters in Inner Mongolian temperate steppe[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45（1）: 62−67.

[18] 苏富源, 牛育华, 郝明德. 腐殖酸肥对人工羊草地产草量和品质的影响 [J]. 草原与草业, 2023, 35（2）: 21−27.
Su FY, Niu YH, Hao MD. Effects of humic acid fertilizer on yield and quality of aritificial *Leymus chinensis* grassland[J].

Grassland and Prataculture, 2023, 35（2）: 21−27.

［19］ 童永尚, 王彦龙, 汪鹏斌, 宋建超, 贺有龙, 等. 青海甘德县高寒区播期对7个燕麦品种产量和品质的影响 [J]. 草原与草坪, 2021, 41（5）: 52−62.
Tong YS, Wang YL, Wang PB, Song JC, He YL, *et al*. Effects of sowing date on yield and quality of seven oat varieties in the high-cold area of Gande County, Qinghai Province[J]. *Grassland and Turf*, 2021, 41（5）: 52−62.

［20］ 韩小雨, 郭宁, 李冬冬, 谢明阳, 焦峰. 氮添加对内蒙古不同草原生物量及土壤碳氮变化特征的影响 [J]. 草业学报, 2022, 31（1）: 13−25.
Han XY, Guo N, Li DD, Xie MY, Jiao F. Effects of nitrogen addition on soil carbon and nitrogen and biomass change in different grassland types in Inner Mongolia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31（1）: 13−25.

［21］ 朱忆雯, 尹丹, 胡敏, 杜衍红, 洪泽彬, 等. 稻田土壤氮循环与砷形态转化耦合的研究进展 [J]. 生态环境学报, 2023, 32（7）: 1344−1354.
Zhu YW, Yin D, Hu M, Du YH, Hong ZB, *et al*. Research progress on coupling of nitrogen cycle and arsenic speciation transformation in paddy soil[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2023, 32（7）: 1344−1354.

［22］ 徐伟洲, 赖帅彬, 史雷, 张艳珍, 亢福仁, 徐炳成. 黄土丘陵区草地群落多样性和优势种养分对氮添加的响应 [J]. 草地学报, 2022, 30（10）: 2753−2763.
Xu WZ, Lai SB, Shi L, Zhang YZ, Kang FR, Xu BC. Community diversity and dominant species nutrient content of grassland in response to nitrogen addition in Loess-Hilly Region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30（10）: 2753−2763.

［23］ 芦光新, 李欣, 党宁, 姚世庭, 李宗仁, 等. 不同形态及配比的氮素对高寒草甸植物生长高度和生物量的影响 [J]. 草地学报, 2018, 26（1）: 210−215.
Lu GX, Li X, Dang N, Yao ST, Li ZR, *et al*. Effects of different forms and proportions of nitrogen on plant height and biomass in alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26（1）: 210−215.

［24］ 王子杰, 朱玲, 刘文涛, 赵仪, 刘大泉, 孙盛楠. 添加硝态氮、铵态氮对紫花苜蓿苗期饲用品质的影响 [J]. 草学, 2021（6）: 28−34.
Wang ZJ, Zhu L, Liu WT, Zhao Y, Liu DQ, Sun SN. Effects of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen additions on forage quality of alfalfa at seedling stage[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2021（6）: 28−34.

［25］ 王红静, 马金宝, 丛百明, 周立业. 氮添加对科尔沁沙地羊草产量及氮肥利用效率的影响 [J]. 草原与草坪, 2021, 41（2）: 47−52.
Wang HJ, Ma JB, Cong BM, Zhou LY. Effects of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of *Leymus chinensis* in Horqin sandy land[J]. *Grassland and Turf*, 2021, 41（2）: 47−52.

［26］ 童永尚, 刘耀峰, 徐长林, 张选明, 鱼小军. 播期对半干旱区7个燕麦品种产量和品质的影响 [J]. 草业科学, 2021, 38（11）: 2221−2236.
Tong YS, Liu YF, Xu CL, Zhang XM, Yu XJ. Effect of the sowing period on the yield and quality of seven oat varieties grown in the semi-arid region of Longxi[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38（11）: 2221−2236.

［27］ 宋建超, 鱼小军, 魏孔涛, 汪鹏斌, 童永尚, 等. 施氮对高寒区垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质的影响 [J]. 草地学报, 2021, 29（7）: 1555−1564.
Song JC, Yu XJ, Wei KT, Wang PB, Tong YS, *et al*. Effects of nitrogen application on production performance and nutritional quality of *Elymus nutans* in alpine region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29（7）: 1555−1564.

［28］ 付帅, 刘晓明, 马阳, 李皓, 甄怡铭, 等. 氮素形态对强筋和中筋小麦产量和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28（1）: 83−93.
Fu S, Liu XM, Ma Y, Li H, Zhen YM, *et al*. Effects of nitrogen supply forms on the quality and yield of strong and medium gluten wheat cultivars[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28（1）: 83−93.

［29］ 杜英东, 袁相洋, 冯兆忠. 不同形态氮对杨树光合特性及生长的影响 [J]. 植物生态学报, 2023, 47（3）: 348−360.
Du YD, Yuan XY, Feng ZZ. Effects of different nitrogen forms on photosynthesis characteristics and growth of poplar[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47（3）: 348−360.

［30］ 王玉琴, 宋梅玲, 王宏生, 尹亚丽, 马玉寿. 添加氮素对退化高寒草地植被及营养品质的影响 [J]. 草地学报, 2021, 29（12）: 2742−2751.
Wang YQ, Song ML, Wang HS, Yin YL, Ma YS. Effects of nitrogen addition on vegetation and forage nutritional quality of degraded alpine grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29（12）: 2742−2751.

（责任编辑：李惠英）