

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.013

引用格式:童永尚,董全民,杨俊霞,等.氮素形态对多年生高寒栽培草地植物群落和土壤性质的影响[J].草地学报,2026,34(3):881—890

TONG Yong-shang, DONG Quan-min, YANG Jun-xia, et al. Effects of Nitrogen Forms on Plant Communities and Soil Properties in Perennial Alpine Cultivated Grasslands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):881—890

氮素形态对多年生高寒栽培草地植物群落和土壤性质的影响

童永尚^{1,2}, 董全民^{2,3,4}, 杨俊霞⁵, 曹 铨^{2,3,4}, 俞 旻^{2,3,4}, 张春平^{2,3,4*}

(1. 伊犁师范大学生物科学与技术学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 青海大学畜牧兽医科学院/青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 3. 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016; 4. 青海大学三江源区高寒草地生态教育部重点实验室, 青海 西宁 810016; 5. 青海大学生态环境工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要:为揭示不同形态氮肥对多年生高寒栽培草地植物群落和土壤性质的影响,以2019年在青海大学高原特色农牧业综合试验示范基地建植4龄的多年生混播草地为研究对象,设置对照(CK)、酰胺态氮肥(U)、铵态氮肥(A)和硝态氮肥(N)4个处理,对不同处理下的植物群落结构、土壤理化性质和微生物生物量进行测定和分析。结果表明:施用不同形态氮肥对人工草地的植物生产力、土壤理化性质和微生物生物量产生显著影响,而对植物多样性的影响不显著。不同形态氮肥对植物生产力的促进效果表现为 $U>N>A$,分别较对照组提高了62.60%、53.71%和25.85%。施酰胺态氮肥显著提高了土壤含水量和土壤电导率,显著降低了土壤容重和pH值。施铵态氮肥显著提高了全磷含量,降低了土壤微生物生物量碳氮比。施硝态氮肥显著提高了土壤速效磷、全氮、微生物生物量碳和微生物生物量碳磷比。冗余分析表明,土壤pH值和容重是影响多年生高寒栽培草地植物群落的关键土壤因子。综上所述,建议在制定多年生高寒栽培草地生产力维持和土壤改良的施氮方案时,应优先考虑酰胺态氮肥。

关键词:高寒栽培草地;氮素形态;植物群落;土壤理化性质;微生物生物量

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0881-10

Effects of Nitrogen Forms on Plant Communities and Soil Properties in Perennial Alpine Cultivated Grasslands

TONG Yong-shang^{1,2}, DONG Quan-min^{2,3,4}, YANG Jun-xia⁵, CAO Quan^{2,3,4},
YU Yang^{2,3,4}, ZHANG Chun-ping^{2,3,4*}

(1. College of Biological Science and Technology, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China; 2. Veterinary Medicine and Qinghai Academy of Animal Science, Veterinary Medicine and Academy of Animal Science, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Xining, Qinghai Province 810016, China; 4. Key Laboratory of the Alpine Grassland Ecology in the Three Rivers Region, Ministry of Education Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 5. School of Ecological and Environmental Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: The objective of this study was to reveal the effects of different forms of nitrogen fertilizers on perennial alpine cultivated grassland plant communities and soil properties. A 4-year-old perennial mixed-seeded grassland established in 2019 at Qinghai University's comprehensive experimental demonstration base of plateau specialty agriculture and animal husbandry was used as the research object. Four treatments of control (CK), amide nitrogen fertilizer (U), ammonium nitrogen fertilizer (A) and nitrate nitrogen fertilizer (N) were set up to determine and analyze treatment effects on the plant community structure, soil physicochemical proper-

收稿日期:2025-04-16;修回日期:2025-06-24

基金项目:2024年中央财政林草科技推广示范资金项目(青(2024)TG04);伊犁师范大学高层次人才引进启动基金(2024RCYJ28)资助

作者简介:童永尚(1996-),男,汉族,甘肃金昌人,博士,主要从事草地生态与环境保护研究, E-mail: tongys2022@126.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: zhangchp09@126.com

ties and microbial biomass. The results showed that application of different forms of nitrogen fertilizers significantly affected plant productivity, soil physicochemical properties and microbial biomass of artificial grassland, while the effect on plant diversity was not significant. Different forms of nitrogen fertilizers showed $U > N > A$ in promoting plant productivity, with an increase of 62.60%, 53.71% and 25.85% over control, respectively. Application of amide nitrogen fertilizer significantly increased soil water content and soil conductivity and significantly decreased soil bulk density and pH value. Application of ammonium nitrogen fertilizer significantly increased total phosphorus and decreased soil microbial biological carbon to nitrogen ratio. Application of nitrate nitrogen fertilizer significantly increased soil quick phosphorus, total nitrogen, microbial biochar and microbial biochar-phosphorus ratio. Redundancy analysis showed that soil pH value and bulk weight were key soil factors influencing perennial alpine cultivated grassland plant communities. In summary, it is recommended that amide nitrogen fertilizers should be given priority in the development of nitrogen application programs for perennial alpine cultivated grassland productivity maintenance and soil improvement.

Key words: Alpine cultivated grassland; Nitrogen form; Plant community; Soil physicochemical properties; Microbial biomass

高寒草地是全球生态保护的战略要地,具有防风固沙、储存水源和维护生物多样性等多种功能。近年来,受人类过度放牧和全球气候变化的双重压力,高寒草地面临着严峻的退化挑战,主要表现为草地生产力下降、土地裸露以及草食动物与草地承载力之间的失衡。为解决上述问题,学者们在该区域开展了大量的补播、施肥、围栏封育和草地重建等研究工作,虽取得了一定成效,但草畜矛盾仍比较突出^[1]。高寒地区低温限制,使得退化草地修复周期较长。因此,建植人工草地便成为最直接有效的措施^[2]。建植人工草地不仅能够有效缩短退化草地的恢复时间^[3],而且还可以提高生态系统稳定性和增强生态系统服务功能。因此,在高寒地区建植人工草地对生态保护和经济发展都具有重要意义。

如何维持人工草地的生产功能并提高牧草品质,是目前亟待解决的一个关键问题。氮(N)是植物生长和生态系统功能的重要营养元素,在人工草地生态系统中发挥着关键作用^[4-5]。氮的输入和转化直接影响草地的初级生产力、植物群落结构、土壤微生物群落以及生态系统氮循环的效率^[6-8]。在自然条件下,氮素主要以硝态氮、铵态氮、氨基酸和蛋白质等形态存在^[9]。不同形态的氮在土壤中的迁移、转化和吸收效率各异,直接影响草地植物的生长和养分利用效率^[10]。硝态氮易溶于水,迁移性强,易被植物吸收,但也容易发生淋溶损失,而铵态氮吸附于土壤胶体表面,不易流失,但需经过硝化作用才能被部分植物有效利用^[11]。相比之下,有机氮在土壤中分解缓慢,需微生物降解后才能被植物吸收^[12-13]。

近年来,随着草地退化和氮素输入增加引发的生态环境问题日益突出,不同氮素形态对人工草地的影响成为当前的研究热点。氮素输入对人工草地

碳固定能力的影响与氮形态密切相关。适当的氮添加还可促进光合作用,提高碳固定能力,而过量施氮则可能导致碳流失加剧,甚至引发草地生态系统退化^[14]。研究表明,硝态氮和铵态氮的不同输入量会影响植物的生长和生理响应,例如生物量积累、根系分布以及光合速率^[15]。适当提高铵态氮比例有助于提高植物氮利用效率,并促进土壤微生物群落的稳定性^[16]。然而,过量的铵态氮可能会导致土壤酸化,进而影响土壤养分平衡和微生物多样性^[17]。从生态系统角度来看,氮的输入不仅影响人工草地的植物生产力,还会对生态系统碳氮循环、温室气体排放以及土壤微生物群落带来深远影响^[18]。研究发现,不同氮素形态的输入会改变土壤的微生物群落组成和功能,例如增强氨氧化细菌(Ammonia oxidation bacteria, AOB)和古菌(Ammonia oxidation archaea, AOA)的活性,从而影响硝化作用速率^[19]。因此,不同形态氮肥对人工草地群落的植物、土壤和微生物生物量具有显著的调控作用。

在全球气候变化和人为氮输入增加的背景下,探索不同形态氮肥对高寒人工草地植物和土壤的影响,不仅有助于优化草地管理策略,而且对多年生栽培草地的可持续利用具有重要借鉴意义。鉴于此,本研究以生产实践中应用最为广泛的3种氮肥(酰胺态氮、铵态氮、硝态氮)为氮源,通过测定和比较施肥当年的植物群落结构、土壤理化性质和微生物生物量,并分析三者之间的相互关系,阐明人工草地植物生产力、土壤理化性质和微生物生物量对不同氮素形态的响应规律,筛选出维持高寒人工草地生产力最佳的氮肥形态,预期成果可为多年生高寒栽培草地的土壤养分管理和植物生产力提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2022年6月,在青海大学高原特色农牧业综合试验示范基地(100°55'E,36°17'N)开展控制试验。该区域平均海拔3300 m,年均降水量为300 mm,年蒸发量在2000~2400 mm。试验地土壤为高山草甸土和黄绵土。以2019年建植的青海草地早熟禾+青海中华羊茅+青海冷地早熟禾混播草地为研究对象,设置4个施肥处理,分别为CK(不施肥)、U(尿素:酰胺态氮肥)、A(硫酸铵:铵态氮肥)和N(硝酸钙:硝态氮肥)。根据前期研究^[20],将施氮量设为青海省干湿沉降率(7.50 kg·hm⁻²·a⁻¹)的9倍,即纯氮67.5 kg·hm⁻²·a⁻¹。不同处理布设3个小区重复,共计12个处理小区(4 m×4 m)。分两次施肥,分别在6月初期和末期溶水后均匀喷洒在相应的试验小区,对照组喷洒等量的水^[20]。

1.2 样品采集

分别记录每个样方(50 cm×50 cm)中的植物种类和相应的盖度,同时每个小区内分物种选取10株植物用钢卷尺测量其自然高度,盖度和地上生物量分别采用直接目测法和烘干法进行测定。基于物种重要值分别计算出每个处理下的Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数。

物种重要值(P_i)=(RH+RC+RB)/3;

式中:RH为植物种的相对高度;RC为相对盖度;RB为相对生物量。

Shannon-Wiener指数(H)= $-\sum P_i \ln P_i$;

Simpson指数(D)= $1-\sum P_i^2$;

Pielou指数(J)= $-\sum P_i \ln P_i / \ln S$ 。

式中:S为每个样方的物种总数; P_i 为第*i*个物种的相对重要值。

采用五点取样法,用直径3.5 cm的土钻收集0~20 cm(该区域植物根系主要分布在0~20 cm范围内,并且20 cm以下有较大石块,不利于钻取土壤)的土壤样品并混合均匀,过1 mm筛后将其分为2份,1份用于土壤养分含量的测定,另外1份保存在4℃环境下以测定土壤微生物生物量。

1.3 测定指标及方法

采用鲍士旦^[21]的土壤农化分析方法测定土壤理化性质,使用pH计测定土壤pH值(水土比为5:1),电导率仪测定电导率(Electrical conductance,EC);采用重

铬酸钾氧化法测定土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC);采用钼锑抗比色法测定全磷(Soil total phosphorus, TP);采用碱解-扩散法测定速效氮(Available nitrogen, AN)含量;采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定速效磷(Available phosphorus, AP);采用元素分析仪测定土壤全碳(Soil total carbon, TC)和全氮(Soil total nitrogen, TN);采用全自动间断化学分析仪(Clever Chem 380)测定铵态氮(Ammonium nitrogen, NH₄⁺-N)和硝态氮(Nitrate nitrogen, NO₃⁻-N);烘干法测定土壤含水量(Soil water content, SWC),做3个平行。土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、微生物生物量氮(Microbial biomass nitrogen, MBN)和微生物生物量磷(Microbial biomass phosphorus, MBP)含量采用氯仿熏蒸法测定^[22]。

1.4 数据分析

利用Excel 2010对原始数据进行整理,运用SPSS 27.0进行统计分析,对不同处理下的地上生物量、土壤理化性质和微生物生物量及化学计量比进行单因素方差分析。采用RDA和Pearson相关性分析检验不同氮素添加方式下植物生产力、土壤养分和微生物生物量之间的关系。制图均在Origin 2022软件中完成。

2 结果与分析

2.1 不同形态氮素添加对植物群落结构的影响

对不同施氮处理下的地上生物量进行了分析(图1),不同形态氮添加显著提高了地上生物量($P<0.05$),

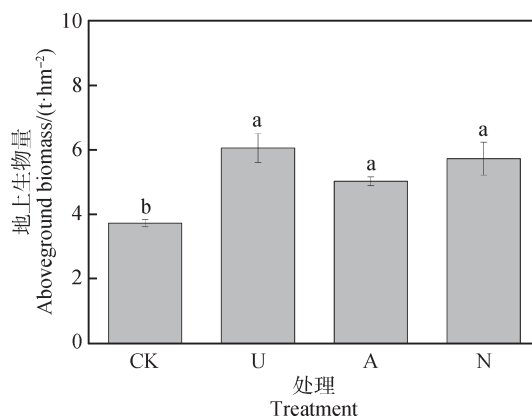


图1 不同形态氮素添加对地上生物量的影响

Fig. 1 Effects of different forms of nitrogen addition on aboveground biomass

注:小写字母表示不同施氮处理间差异显著($P<0.05$),下同
Note: Lower case letters indicate significant differences between different nitrogen application treatments at the 0.05 level, the same as below

但不同形态氮素之间差异不显著;整体而言,对地上生物量的促进效果表现为 $U>N>A$,U、N和A处理分别较CK处理提高了62.60%,53.71%和25.85%。

对不同施氮处理下的植物群落结构进行了分析(图2)。结果表明,不同形态氮添加显著提高了植物盖度($P<0.05$),但不同氮素形态之间差异不

显著,对盖度的促进效果表现为 $N>U>A$,N、U和A处理分别较CK提高了17.46%,17.03%和15.72%(图2A)。不同形态氮添加对植物群落的Shannon-Wiener指数和Simpson指数未产生显著影响(图2B)。与CK处理相比较,U处理和A处理显著提高了植物群落的Pielou均匀度指数(图2C)。

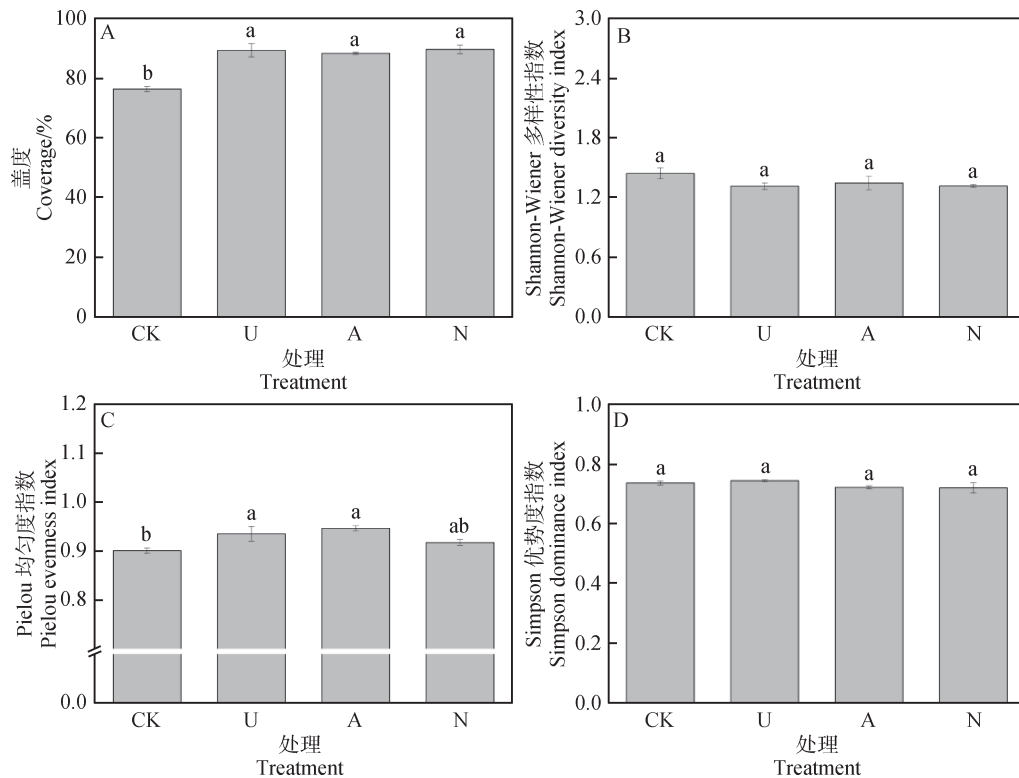


图2 不同形态氮素添加对植物群落结构的影响

Fig. 2 Effects of different forms of nitrogen addition on plant community structure

注:A表示植被盖度,B表示Shannon-Wiener多样性指数,C表示Pielou均匀度指数,D表示Simpson优势度指数

Note: A indicates vegetation cover, B indicates Shannon-Wiener diversity index, C indicates Pielou evenness index, and D indicates Simpson dominance index

2.2 不同形态氮素添加对土壤理化性质的影响

对不同施氮处理下的土壤理化性质进行了分析(表1)。结果表明,不同形态氮添加整体上提高了土

壤养分含量,不同氮素形态对土壤理化性质的影响不同。与CK相比较,U处理显著提高了土壤含水量($P<0.05$)。不同氮素处理间相比较,U处理对土壤

表1 不同形态氮素添加对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different forms of nitrogen addition on soil physical and chemical properties

处理 Treatment	CK	U	A	N
土壤含水量 SWC/%	15.18±0.23 ^b	15.85±0.06 ^a	15.55±0.26 ^{ab}	15.71±0.15 ^{ab}
容重 BD/(g·cm ⁻³)	1.59±0.00 ^a	1.43±0.01 ^c	1.51±0.01 ^b	1.50±0.01 ^b
pH值	9.25±0.04 ^a	8.78±0.04 ^b	8.87±0.02 ^b	8.84±0.05 ^b
电导率 EC/(μS·m ⁻¹)	82.80±3.93 ^d	167.27±5.02 ^a	96.53±2.19 ^c	127.87±3.63 ^b
有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	4.65±0.21 ^b	6.15±0.31 ^a	6.06±0.33 ^a	6.24±0.18 ^a
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	10.04±0.41 ^c	17.88±1.19 ^{ab}	20.73±1.99 ^a	16.15±0.23 ^b
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	9.83±0.32 ^b	12.60±0.12 ^a	12.80±0.21 ^a	12.73±0.23 ^a
速效氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	10.81±0.20 ^b	21.18±2.26 ^a	18.00±2.73 ^a	20.85±0.31 ^a
全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	0.31±0.00 ^d	0.48±0.01 ^b	0.55±0.01 ^a	0.41±0.03 ^c
速效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	2.65±0.19 ^d	4.63±0.19 ^c	5.85±0.08 ^b	7.31±0.42 ^a
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	0.54±0.00 ^c	0.66±0.01 ^b	0.65±0.02 ^b	0.77±0.05 ^a

注:同行不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著

Note: Different lower case letters in the same row indicate significant differences between treatments at the 0.05 level

电导率和速效氮的促进作用最为显著,A处理对土壤铵态氮和全磷的促进效果最显著,N处理对土壤有机碳、速效磷和全氮的促进效果最显著。与CK相比较,U处理显著降低了土壤容重和pH值($P<0.05$)。

2.3 不同形态氮素添加对土壤微生物生物量及化学计量比的影响

对不同施氮处理下的土壤微生物生物量及化学

计量比进行了分析(图3)。结果表明,不同形态氮添加整体上提高了MBC含量、MBN含量、MBC/MBP和MBN/MBP。与CK相比较,N处理显著提高了MBC和MBC/MBP($P<0.05$)。氮添加显著提高了MBN和MBN/MBP($P<0.05$),但施用不同形态氮肥对MBN含量和MBN/MBP的影响差异不显著。与CK相比较,不同形态氮添加对MBP含量无显著影响,A处理显著降低了MBC/MBN($P<0.05$)。

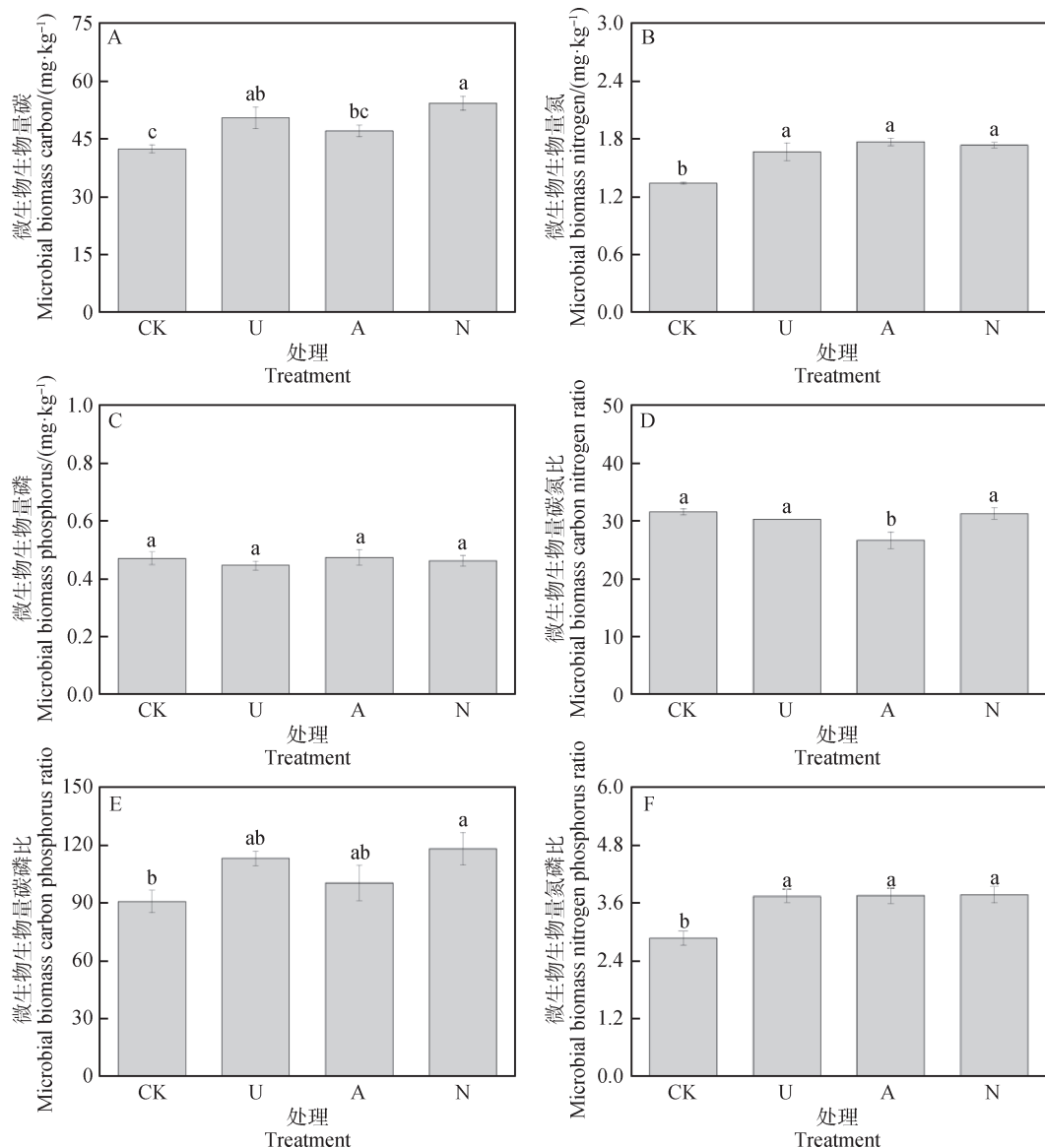


图3 不同形态氮素添加对土壤微生物生物量及化学计量比的影响

Fig. 3 Effects of different forms of nitrogen addition on soil microbial biomass and stoichiometric ratios

注:A表示微生物量碳,B表示微生物量氮,C表示微生物量磷,D表示微生物量碳氮比,E表示微生物量碳磷比,F表示微生物量氮磷比

Note: A indicates microbial biomass carbon, B indicates microbial biomass nitrogen, C indicates microbial biomass phosphorus, D indicates microbial biomass carbon to nitrogen ratio, E indicates microbial biomass carbon to phosphorus ratio, and F indicates microbial biomass nitrogen to phosphorus ratio

2.4 植物群落和土壤特性的相关性分析

对不同施氮处理下的植物特征与土壤特性进行了相关性分析(表2)。结果表明,地上生物量与BD和pH值之间呈极显著负相关($P<0.01$),与EC和 NO_3^- -N之间呈极显著正相关($P<0.01$),与SOC,AN和AP

之间呈显著正相关($P<0.05$)。盖度与SOC, NO_3^- -N,AN,TP,AP,TN之间呈极显著正相关($P<0.01$)。Shannon-Wiener多样性指数与 NH_4^+ -N之间呈显著负相关($P<0.05$),Pielou均匀度指数与 NH_4^+ -N和TP之间呈极显著正相关($P<0.01$)。

表2 植物特征与土壤特性之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between plant characteristics and soil properties

参数 Parameters	地上生物量 Aboveground biomass	盖度 Coverage	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	Pielou指数 Pielou index	Simpson指数 Simpson index
土壤含水量 SWC	0.499	0.647*	-0.387	0.275	-0.097
容重 BD	-0.838**	-0.746**	0.548	-0.537	-0.104
pH值	-0.834**	-0.972**	0.567	-0.573	-0.136
电导率 EC	0.723**	0.671*	-0.532	0.279	0.361
有机碳 SOC	0.637*	0.891**	-0.430	0.429	-0.223
铵态氮 NH_4^+ -N	0.576	0.701*	-0.587*	0.768**	-0.039
硝态氮 NO_3^- -N	0.760**	0.919**	-0.520	0.698*	-0.033
速效氮 AN	0.661*	0.838**	-0.492	0.498	-0.100
全磷 TP	0.468	0.738**	-0.444	0.776**	-0.016
速效磷 AP	0.640*	0.796**	-0.471	0.357	-0.300
全氮 TN	0.518	0.723**	-0.402	0.169	-0.306

注:*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$ 。下同

Note: * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$. The same as below

对不同施氮处理下的植物特征与土壤微生物生物量化学计量比进行相关性分析(表3)。结果表明,地上生物量与MBC,MBN和MBN/MBP之间呈显著正相关($P<0.05$),盖度与MBC,MBN,

MBN/MBP呈极显著正相关($P<0.01$),Shannon-Wiener多样性指数与MBC,MBC/MBP和MBN/MBP呈显著负相关($P<0.05$),Pielou均匀度指数与MBC/MBN之间呈显著负相关($P<0.05$)。

表3 植物特征与土壤微生物生物量及化学计量比的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between plant characteristics, soil microbial biomass, and stoichiometric ratio

参数 Parameters	地上生物量 AGB	盖度 Coverage	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	Pielou指数 Pielou index	Simpson指数 Simpson index
微生物生物量碳 MBC	0.616*	0.758**	-0.579*	0.022	-0.069
微生物生物量氮 MBN	0.693*	0.896**	-0.457	0.472	-0.108
微生物生物量磷 MBP	0.013	-0.197	0.448	0.027	-0.133
微生物生物量碳氮比 MBC/MBN	-0.214	-0.317	-0.056	-0.648*	0.036
微生物生物量碳磷比 MBC/MBP	0.434	0.664*	-0.653*	0.010	-0.001
微生物生物量氮磷比 MBN/MBP	0.597*	0.909**	-0.653*	0.415	-0.041

将植物特征与土壤理化性质和微生物生物量及化学计量比做了冗余分析(图4)。在植物特征与土壤理化性质的冗余分析中,两个排序轴共解释了69.70%的变异(图4A)。结果表明,BD($R^2=0.7456$, $P=0.001$),pH($R^2=0.9215$, $P=0.002$),AP($R^2=0.7421$, $P=0.003$), NO_3^- -N($R^2=0.8899$, $P=0.005$),SOC($R^2=0.7295$, $P=0.007$), NH_4^+ -N($R^2=0.7054$, $P=0.008$),AN($R^2=0.7041$, $P=0.009$),EC($R^2=0.5856$, $P=0.016$),TN($R^2=$

0.6213, $P=0.016$),TP($R^2=0.5967$, $P=0.024$)是影响植物群落的关键土壤理化因子(图4A)。在植物特征与土壤微生物生物量及化学计量特征的冗余分析中,两个排序轴共解释了56.46%的变异(图4B)。结果表明,MBN/MBP($R^2=0.7389$, $P=0.006$),MBP($R^2=0.7034$, $P=0.007$),MBN($R^2=0.5902$, $P=0.019$),MBC/MBN($R^2=0.5325$, $P=0.04$)是影响植物群落的关键土壤生物学指标(图4B)。

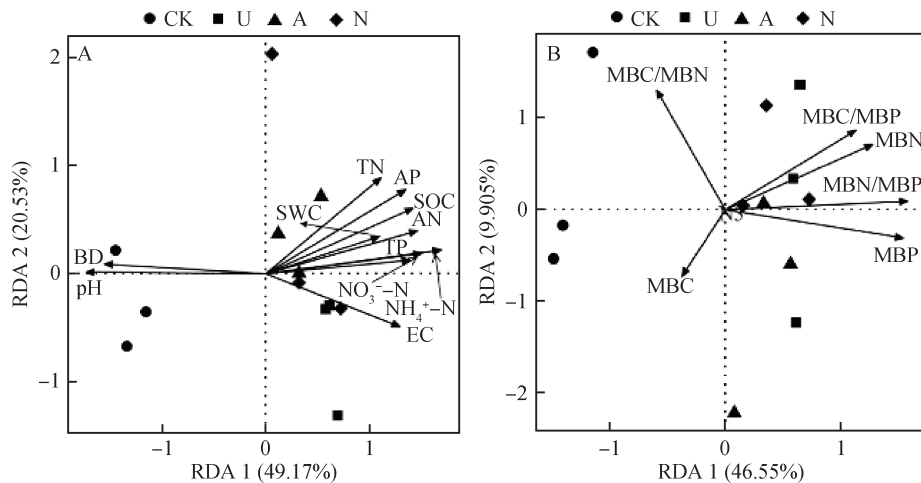


图4 植物特征与土壤理化性质和微生物生物量及化学计量比的RDA分析

Fig. 4 RDA analysis of plant characteristics, soil physicochemical properties, microbial biomass, and stoichiometric ratios

注:图4A表示植物特征与土壤理化性质的RDA分析,图4B表示植物特征与微生物生物量及化学计量比的RDA分析

Note: 4A represents the RDA analysis of plant characteristics with soil physicochemical properties and 4B represents the RDA analysis of plant characteristics with microbial biomass and stoichiometric ratios

3 讨论

3.1 不同形态氮素添加对植物群落结构的影响

植物在各个生育阶段都需要大量的氮元素,因此氮元素是植物从外界吸收最多的营养元素^[23]。研究表明,氮素输入能够直接增加土壤中有效氮的含量供植物生长发育,进而提高草地生产力^[24]。本研究中,不同形态氮素添加均显著提高了群落地上生物量,说明氮素是限制高寒区植物生长的关键因素。然而,不同形态氮素与对照组相比较,植物生产力的增幅无显著差异,这与胡喜巧等^[25]对红花苗菜的研究结果不同,这主要是因为植物物种和生长环境均有所差异,高寒牧草可能同时有效地吸收和利用多种氮素形态,这使得即使施用不同形态的氮素,它们对产草量的影响也不会显著^[26-27]。王伟等^[28]研究得出了不同的结论,高寒草甸在施用铵态氮肥后的地上生物量最高,这可能与区域土壤环境和取样时间不同有关。有研究表明,外源氮添加可以改变植物群落的结构和功能^[29-30]。本研究中不同形态氮素添加对植物多样性未产生显著影响,这是因为氮添加的短期效应可能主要表现在促进了某些对氮反应较强的物种生长,而不会立刻改变物种之间的相对丰度和群落结构。因此,群落多样性的变化可能需要较长时间的氮添加或其他环境因素的变化^[31]。综上所述,从提升植物生产力的角度而言,在生产实践中应优先选用产草量增幅较高而市面价格较低的酰胺态氮肥尿素。

3.2 不同形态氮素添加对土壤理化性质的影响

土壤理化性质是影响土壤肥力的因素之一,氮添加会影响土壤微生物对有机质的分解速率,进而引起土壤理化性质的改变,进而改变生态系统的物质循环^[32-33]。本研究发现,不同形态氮添加均降低了土壤pH值,这与刘红梅等^[34]和苏洁琼等^[35]的研究结果相似,可能是由于氮添加通过化学作用向土壤中释放更多的氢离子,从而降低了土壤的pH值。氮添加后土壤硝态氮、铵态氮和全氮含量显著提高,这与霍利霞等^[36]研究结果相似,这主要是因为外源氮添加直接补充各种形态氮含量,在氮充足的条件下,氮转化速率增强,促进铵态氮和硝态氮生成。同时,当氮输入量超过植物、微生物吸收及淋溶、气态损失的总和时,各形态氮在土壤中积累,最终体现为土壤全氮及无机氮含量显著升高。在氮源丰富的环境下,植物通过根系大量吸收氮,进一步影响土壤中的氮形态分布^[37]。再者,氮添加会激活土壤中的微生物群落,尤其是与氮循环相关的微生物,从而加速氮的转化过程。这种转化过程使得土壤中氮的总含量和不同形态的氮含量都有所增加^[38]。综上所述,不同形态氮素对土壤理化性质的改良效果有所不同,若短期提升土壤电导率和速效氮时应考虑施用酰胺态氮肥,提升土壤铵态氮和全磷时应优先选用铵态氮肥,提升土壤速效磷和全氮时应优先考虑硝态氮肥。

3.3 不同形态氮素添加对土壤微生物生物量及化学计量比的影响

在土壤评价体系中,土壤微生物不仅扮演着关

键角色,更是驱动土壤有机质与养分循环转化的核心力量^[39]。土壤微生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷含量(MBP)参与土壤养分动态转化过程,表征土壤中物质代谢强度^[40]。本研究发现,外源施加不同形态氮素均显著提高了MBC和MBN含量($P < 0.05$),这与陈晓光等^[41]研究结果相似,短期氮添加会刺激植物根系分泌更多可溶性有机物,为土壤微生物提供额外的碳源,进而提高MBC和MBN。本研究中,不同形态氮添加整体上降低了微生物生物量碳氮比(MBC/MBN),这与游惠明等^[42]研究结果相似,其原因可能是施氮添加下土壤微生物生物量碳氮含量的增加具有不平衡性,导致土壤微生物生物量碳氮比降低。此外,本研究中三种氮形态对微生物生物量碳磷比的促进效果表现为 $N > U > A$,对微生物生物量氮磷比的促进效果表现为 $N > A > U$,对微生物生物量碳氮比的降低效果表现为 $A > U > N$ 。不同形态氮肥对土壤微生物生物量的作用差异,是氮素可利用性、土壤微环境改变及微生物群落偏好共同作用的结果,这些差异也会受土壤类型、施肥量和环境条件的调节,进一步加剧作用的复杂性。综上所述,不同形态氮素对土壤微生物生物量的改良效果亦有所不同,若短期内降低土壤微生物生物量碳氮比,可优先选用铵态氮肥。

3.4 植物群落和土壤特性的相关性分析

植物和土壤作为草地生态系统的重要组成部分,植物-土壤相互作用对维持植物群落的结构和功能具有重要意义^[43]。土壤微生物在参与土壤系统元素转化和能量循环等过程的同时,改变了土壤的理化性质,从而导致植物群落发生改变^[44]。不同形态的氮肥通过影响植物吸收机制、根际微环境、土壤微生物活动及养分循环,介导植物与土壤之间的复杂互作。文旻等^[45]研究结果表明,地上生物量与 NO_3^- -N之间呈极显著正相关,这与本文研究结果一致。本研究通过相关性分析表明,地上生物量与容重和pH值之间呈极显著负相关,与电导率和硝态氮之间呈极显著正相关。 NO_3^- 和 NH_4^+ 是植物吸收和利用土壤氮主要的两种方式, NO_3^- -N含量越高植物生产力越高^[46]。地上生物量与MBC和MBN呈显著正相关,这是由于MBC和MBN参与土壤营养元素的循环,对土壤的结构和质地具有改善作用,能够促进植物的生长。氮添加增加了MBC和MBN含量,从而提高了地上生物量^[47]。本研究通过冗余分析发

现,土壤BD和pH值是影响高寒地区植物群落结构及生产力的关键土壤理化因子。这说明高寒地区植物生产力的维持不仅受氮素限制,同时也受土壤板结程度和盐碱化程度的影响。因此,在退化高寒草地治理过程中,不仅要考虑养分添加,还要采取适当的划破草皮或者盐碱地改良等措施。氮素添加对植物的群落结构和土壤特性产生了显著的调控效应,氮素在土壤中的转化过程和植物的选择性吸收存在一定的复杂性,因此在考虑植物和土壤相互作用的基础上选择适宜的氮肥对于多年生人工草地生产力的维持具有至关重要的作用。

4 结论

施酰胺态氮肥显著提高了土壤含水量和土壤电导率,显著降低了土壤容重和pH值。施铵态氮肥显著提高了土壤铵态氮和全磷含量,降低了土壤微生物生物量碳氮比。施硝态氮肥显著提高了土壤速效磷、全氮、微生物生物量碳和微生物生物量碳磷比。土壤pH值和容重是影响多年生高寒栽培草地植物群落的关键土壤因子。在维持多年生高寒栽培草地植物生产力时应优先选用酰胺态氮肥。

参考文献

- [1] 张自和,郭正刚,吴素琴. 西部高寒地区草业面临的问题与可持续发展[J]. 草业学报,2002,11(3):29-33
ZHANG Z H, GUO Z G, WU S Q. Problems facing to prataculture in western alpine region and its sustainable development[J]. Acta Pratacultural Science, 2002, 11(3): 29-33
- [2] 王文颖,李文全,周华坤,等. 高寒人工草地土壤可溶性有机氮库和无机氮库动态变化[J]. 生态环境学报,2016,25(1):30-35
WANG W Y, LI W Q, ZHOU H K, et al. Dynamics of soil dissolved organic nitrogen and inorganic nitrogen pool in alpine artificial grasslands [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 30-35
- [3] 方精云,潘庆民,高树琴,等. “以小保大”原理:用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复[J]. 草业科学,2016,33(10):1913-1916
FANG J Y, PAN Q M, GAO S Q, et al. “Small vs. Large Area” Principle: protecting and restoring a large area of natural grassland by establishing a small area of cultivated pasture[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(10): 1913-1916
- [4] 刘国一,尼玛扎西,宋国英,等. 西藏一江两河地区青稞生产土壤养分限制因子分析[J]. 中国农业气象,2014,35(3):276-280
LIU G Y, NIMAZHAXI, SONG G Y, et al. Analysis of soil nutrients limiting factors for barley production in centre Tibet[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(3): 276-280
- [5] 景美玲,马玉寿,李世雄,等. 氮肥对大通河上游退化草地的影响[J]. 草地学报,2016,24(3):518-523

- JING M L, MA Y S, LI S X, et al. The influences of different nitrogen rates on degraded alpine meadow in the upstream of Datong River[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(3):518-523
- [6] VITOUSEK P M, ABER J D, HOWARTH R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3):737-750
- [7] 胡冬雪, 王建丽, 潘多锋, 等. 施氮肥对羊草栽培草地生产性能及品质的影响[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(1):35-41
- HU D X, WANG J L, PAN D F, et al. Effects of fertilization on yield and quality of *Leymus chinensis* cultivated grassland[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(1):35-41
- [8] REN B H, MA X W, LI D Y, et al. Nitrogen-cycling microbial communities respond differently to nitrogen addition under two contrasting grassland soil types[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15:1290248
- [9] JIANG L L, WANG S P, PANG Z, et al. Grazing modifies inorganic and organic nitrogen uptake by coexisting plant species in alpine grassland[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(2):211-221
- [10] LIU M, XU X L, WANEK W, et al. Nitrogen availability in soil controls uptake of different nitrogen forms by plants[J]. *New Phytologist*, 2025, 245(4):1450-1467
- [11] WANG J, WU L, XIAO Q, et al. Long-term manuring enhances soil gross nitrogen mineralization and ammonium immobilization in subtropical area[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 348:108439
- [12] CHEN S D, ELRYS A S, YANG W Y, et al. Soil recalcitrant but not labile organic nitrogen mineralization contributes to microbial nitrogen immobilization and plant nitrogen uptake[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(4):e17290
- [13] ZHANG Y Q, REN Z R, LU H N, et al. Autumn nitrogen enrichment destabilizes ecosystem biomass production in a semi-arid grassland[J]. *Fundamental Research*, 2023, 3(2):170-178
- [14] WANG B, GONG J R, ZHANG Z H, et al. Nitrogen addition alters photosynthetic carbon fixation, allocation of photoassimilates, and carbon partitioning of *Leymus chinensis* in a temperate grassland of Inner Mongolia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 279:107743
- [15] REN Z R, ZHANG Y Q, ZHANG Y H. Nitrogen deposition magnifies the positive response of plant community production to precipitation: ammonium to nitrate ratio matters[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 276:116659
- [16] ZHANG H Q, ZHAO X Q, SHI Y, et al. Changes in soil bacterial communities with increasing distance from maize roots affected by ammonium and nitrate additions[J]. *Geoderma*, 2021, 398:115102
- [17] HU Z K, DELGADO-BAQUERIZO M, FANIN N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships[J]. *Nature Communications*, 2024, 15:2858
- [18] ZONG N, HOU G, SHI P L, et al. Different responses of community temporal stability to nitrogen and phosphorus addition in a non-degraded alpine grassland[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143:109310
- [19] FU Q L, XI R Z, ZHU J, et al. The relative contribution of ammonia oxidizing bacteria and Archaea to N_2O emission from two paddy soils with different fertilizer N sources: A microcosm study[J]. *Geoderma*, 2020, 375:114486
- [20] 童永尚, 张春平, 董全民, 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 Y S, ZHANG C P, DONG Q M, 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
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社, 2000:30-34
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:30-34
- [22] 张艳, 李勋, 宋思梦, 等. 马尾松与乡土阔叶树种凋落叶混合分解过程中微生物生物量特征[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(4):681-690
- ZHANG Y, LI X, SONG S M, et al. Characteristics of microbial biomass during the decomposition of mixed foliage litter from *Pinus massoniana* and broadleaved tree species[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(4):681-690
- [23] 芦光新, 李欣, 党宁, 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 G X, LI X, DANG N, 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] LEBAUER D S, TRESEDER K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. *Ecology*, 2008, 89(2):371-379
- [25] 胡喜巧, 杨文平, 黄玲, 等. 氮素形态及对比对红花苗菜产量和品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(7):1041-1049
- HU X Q, YANG W P, HUANG L, et al. Effects of nitrogen forms and proportion on yield and quality of safflower seedling[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(7):1041-1049
- [26] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. *作物杂志*, 2019(5):89-96
- MA F F, XING S L, GAN M Q, et al. Effects of organic fertilizer substituting for chemical fertilizer on rice yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss in farmland[J]. *Crops*, 2019(5):89-96
- [27] 任科宇, 段英华, 徐明岗, 等. 施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(17):2983-2996
- REN K Y, DUAN Y H, XU M G, et al. Effect of manure application on nitrogen use efficiency of crops in China: a meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(17):2983-2996
- [28] 王伟, 德科加. 不同形态氮素对比对高寒草甸生物量及养分的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015(15):136-139
- WANG W, DE K J. Effects of the mixing ratios for different forms of nitrogen on biomass and nutrients in alpine meadow[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2015(15):136-139
- [29] 谭一波, 付孜, 田红灯, 等. 猫儿山不同海拔森林群落草本植物高度的影响因素[J]. *广西林业科学*, 2019, 48(4):472-478
- TAN Y B, FU Z, TIAN H D, et al. Factors influencing herbaceous plant height in forest communities at different altitudes in mao'er mountain[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2019, 48(4):472-478

- [30] 张海芳,刘红梅,赵建宁,等. 贝加尔针茅草原土壤真菌群落结构对氮素和水分添加的响应[J]. 生态学报,2018,38(1):195-205
ZHANG H F, LIU H M, ZHAO J N, et al. Response of soil fungal community structure to nitrogen and water addition in *Stipa baicalensis* steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1):195-205
- [31] 邓彤彤,周国英,肖元明,等. 长期降水变化和氮添加对青藏高原高寒草原物种多样性和生产力的影响[J]. 草地学报, 2024,32(5):1448-1458
DENG T T, ZHOU G Y, XIAO Y M, et al. Effects of long-term precipitation changes and nitrogen addition on species diversity and productivity of alpine grasslands in the Qinghai Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(5):1448-1458
- [32] 莫凌梓,彭彬,王嘉珊,等. 氮沉降对城市绿地植物及土壤养分的影响初探——以果岭草(*Cynodon dactylon*)为例[J]. 生态环境学报,2018,27(3):459-468
MO L Z, PENG B, WANG J S, et al. Effects of nitrogen deposition on plants and soil in urban green space—a case study on *Cynodon dactylon*[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(3):459-468
- [33] 樊后保,袁颖红,王强,等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳和全氮的影响[J]. 福建林学院学报,2007,27(1):1-6
FAN H B, YUAN Y H, WANG Q, et al. Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen beneath Chinese fir plantations[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2007, 27(1):1-6
- [34] 刘红梅,周广帆,李洁,等. 氮沉降对贝加尔针茅草原土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报,2018,27(8):1387-1394
LIU H M, ZHOU G F, LI J, et al. Effects of nitrogen deposition on soil enzyme activities of *Stipa baicalensis* steppe[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(8):1387-1394
- [35] 苏洁琼,李新荣,鲍婧婷. 施氮对荒漠化草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(3):664-670
SU J Q, LI X R, BAO J T. Effects of nitrogen addition on soil physico-chemical properties and enzyme activities in desertified steppe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3):664-670
- [36] 霍利霞,红梅,赵巴音那木拉,等. 氮素和水分添加对荒漠草原土壤理化性质及微生物量碳氮的影响[J]. 北方农业学报, 2018,46(3):54-59
HUO L X, HONG M, ZHAO B, et al. Effects of nitrogen and water addition on the physical and chemical properties of soil and microbial biomass carbon and nitrogen in desert grassland[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46(3):54-59
- [37] 闫小莉,胡文佳,马远帆,等. 异质性供氮环境下杉木、马尾松、木荷氮素吸收偏好及其根系觅氮策略[J]. 林业科学, 2020,56(2):1-11
YAN X L, HU W J, MA Y F, et al. Nitrogen uptake preference of *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus massoniana*, and *Schima superba* under heterogeneous nitrogen supply environment and their root foraging strategies[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 46(3):54-59
- [38] 陆皎云,张鹤山,田宏,等. 氮沉降影响草地生态系统土壤氮循环过程的研究进展[J]. 草业学报,2022,31(6):221-234
LU J Y, ZHANG H S, TIAN H, et al. Research progress on effects of nitrogen deposition on soil nitrogen cycling in grassland ecosystems. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(6): 221-234
- [39] 张燕,强薇,罗如熠,等. 氮磷添加对土壤微生物生长、周转及碳利用效率的影响研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2):526-534
ZHANG Y, QIANG W, LUO R Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial growth, turnover, and carbon use efficiency: a review[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(2):526-534
- [40] 李春越,郝亚辉,薛英龙,等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8):1783-1791
LI C Y, HAO Y H, XUE Y L, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in the farmland of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(8):1783-1791
- [41] 陈晓光,李洪民,张爱君,等. 氮素形态对甘薯土壤微生物及酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(3):619-623
CHEN X G, LI H M, ZHANG A J, et al. Effect of nitrogen forms on soil microbes and soil enzyme activities in sweet potato yield[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(3):619-623
- [42] 游惠明. 氮添加对秋茄植物-土壤-微生物碳氮化学计量学及其稳态特征的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(10):1909-1915
YOU H M. Effects of nitrogen addition on carbon and nitrogen stoichiometry and homeostasis characteristics of *Kandelia obovata* plants-soil-microbial system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(10):1909-1915
- [43] 王振兴. 国内生态化学计量学研究进展[J]. 绿色科技, 2011, 13(7):195-196
WANG Z X. Research advances and prospect of ecological stoichiometry in China[J]. Journal of Green Science and Technology, 2011, 13(7):195-196
- [44] PHILIPPOT L, CHENU C, KAPPLER A, et al. The interplay between microbial communities and soil properties[J]. Nature Reviews Microbiology, 2024, 22(4):226-239
- [45] 文旻,胡启武,阳文静,等. 氮、磷添加对鄱阳湖典型苔草湿地土壤养分和植物生物量的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(6):1669-1676
WEN M, HU Q W, YANG W J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil nutrients and plant biomass in a typical Poyang Lake marshland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6):1669-1676
- [46] 于铁峰,刘晓静,郝凤,等. NO_3^- -N/ NH_4^+ -N配比对紫花苜蓿营养品质及饲用价值的影响研究[J]. 草业学报, 2016, 25(12):102-110
YU T F, LIU X J, HAO F, et al. Effects of NO_3^- -N/ NH_4^+ -N ratio on the nutritional quality and feeding values of alfalfa[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(12):102-110
- [47] 庄静静,鲜靖苹,王晓冰,等. 华北低丘陵山区人工林土壤微生物生物量碳氮变化及其影响因素[J]. 福建农业学报, 2023, 38(12):1459-1465
ZHUANG J J, XIAN J P, WANG X B, et al. Microbial biomass carbon and nitrogen at man-made forests in northern China hilly areas[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2023, 38(12):1459-1465

(责任编辑 刘婷婷)