

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.022

引用格式:谢馨仪,陈冲,李沁峰,等.氮肥施用对我国草地牧草生长和土壤养分影响的Meta分析[J].草地学报,2026,34(5):1807—1816

XIE Xin-yi, CHEN Chong, LI Qin-feng, et al. Meta-Analysis of Nitrogen Fertilizer Application Effects on Forage Growth and Soil Nutrients in China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1807—1816

氮肥施用对我国草地牧草生长和土壤养分影响的 Meta分析

谢馨仪¹, 陈冲^{1*}, 李沁峰², 白杨², 商建英¹, 王祥¹

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 鄂尔多斯市农牧业投资开发公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要:为探究牧草生长和草地土壤养分对氮肥施用的响应,并促进牧草产量提升与土壤养分平衡,本研究基于筛选出的62篇文献(629组有效数据),采用Meta方法分析了不同气象条件(气候区、年平均降水量和年平均气温)、土壤条件(碱解氮、全氮和有机质含量)以及氮肥施用量(低量、中量和高量)条件下氮肥施用对牧草生长及土壤养分的影响。研究结果表明:氮肥添加促进了牧草生长,增加了土壤养分含量,其中牧草株高和干物质质量分别增加25.7%和58.4%,全氮、碱解氮和有机质含量分别增加21.8%、19.3%和9.0%。在湿润且低温地区施氮肥对牧草的促进效果最佳;在湿润且高温地区施氮肥更有利于增加土壤养分含量。贫瘠草地施氮肥对牧草干物质质量的促进效果更明显,且少量氮素添加就有很好的效果。本研究的结果反映出氮肥添加对牧草和土壤产生了积极效果,并且可以为草地施肥决策提供依据。

关键词:氮肥用量;株高;生物量;土壤养分含量;Meta分析

中图分类号:S283

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1807-10

Meta-Analysis of Nitrogen Fertilizer Application Effects on Forage Growth and Soil Nutrients in China

XIE Xin-yi¹, CHEN Chong^{1*}, LI Qin-feng², BAI Yang², SHANG Jian-ying¹, WANG Xiang¹

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Ordos Agriculture and Animal Husbandry Investment and Development Company Limited, Ordos, Inner Mongolia 017010, China)

Abstract: To investigate the responses of forage growth and grassland soil nutrients to nitrogen fertilizer application, and to promote forage yield enhancement and soil nutrient balance, this study conducted a meta-analysis of 62 selected publications comprising 629 valid data sets. The analysis examined the effects of nitrogen fertilizer application on forage growth and soil nutrients under varying meteorological conditions (climatic zones, mean annual rainfall and mean annual temperature), soil conditions (alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), total nitrogen (TN), and organic matter (OM)), as well as the amount of nitrogen fertilizer applied (low, medium, and high). The results indicated that nitrogen fertilizer application significantly enhanced forage growth and improved soil nutrient status. Specifically, forage height and dry matter yield increased by 25.7% and 58.4%, respectively, while soil TN, AN, and OM contents increased by 21.8%, 19.3%, and 9.0%, respectively. Nitrogen fertilizer application in wet, low-temperature regions most effectively promoted forage growth, whereas nitrogen fertilizer application in wet, high-temperature regions was more conducive to enhancing soil nutrient availability. Nitrogen fertilizer application to nutrient-poor grasslands resulted in a more pronounced

收稿日期:2025-06-09;修回日期:2025-09-21

基金项目:不标注(说明:GG项目成果不进行标注)

作者简介:谢馨仪(2002-),女,汉族,河北邢台人,硕士研究生,主要从事土壤化学过程与养分管理研究, E-mail:xiexinyi0721@163.com;

*通信作者 Author for correspondence author. E-mail:chenchongsxnd@cau.edu.cn

increase in forage dry matter yield, and even low rates of N addition produced substantial benefits. Our results demonstrate that nitrogen fertilizer addition exerts positive effects on both forage productivity and soil fertility, providing a scientific basis for grassland fertilization decision-making.

Key words: Nitrogen fertilizer dosage; Plant height; Biomass; Soil nutrient content; Meta-analysis

近年来,极端气候事件频繁发生,对草地生态系统造成了严重影响^[1]。人类活动,尤其是过度放牧、开垦草地用于农业和城市建设、不合理利用水资源等,都加速了草地生态系统的退化^[2]。这种退化不仅表现为植被覆盖度下降和土壤侵蚀严重,还导致生物多样性丧失,使得草地生产力大幅度降低。这一系列的问题对人类的生存与发展构成巨大挑战,严重威胁着我们的未来^[3-5]。因此,急需采取有效的保护和恢复措施来加强对草地生态系统的管理。

施用氮肥被普遍认为是提高草地生产力和土壤肥力的关键措施。氮肥施用通过直接补充土壤氮素,为牧草合成叶绿素和蛋白质提供必需原料,从而显著增强光合作用、促进分蘖与茎叶生长,快速提高牧草产量与品质^[6];同时,氮输入能激发土壤微生物活性,加速有机质分解与养分循环,促进根系发育并增加有机残留,从而提升土壤综合肥力^[7-8]。这一效应有助于改善草地的植被结构和生态功能,促进草地的恢复与可持续发展^[9]。但有研究显示,随着氮肥用量的增加,草地的地上生物量并不与氮肥施用量呈正相关关系,而是表现出先增加后降低的趋势^[10]。对于土壤来说,氮素的添加可以显著改善草地土壤肥力,提高其养分含量,施氮水平的高低对土壤碱解氮、有机质等含量都会有影响^[7]。

当前研究多聚焦于单一试验尺度下的氮肥效应,但由于地域气候差异、管理措施异质性及观测周期限制,不同研究在氮肥适宜施用阈值和土壤响应机制等关键问题上仍存在明显分歧。整合分析(Meta分析)能够克服单一试验尺度的局限,更全面地综合评价某项管理措施或技术相对于对照处理的整体效应。通过系统收集并整合多个独立研究的结果,Meta分析可得出更具普遍性和可靠性的结论,为政策制定和实践提供科学参考^[11]。基于此,本研究采用Meta分析方法,综合评估不同气象条件、土壤条件及氮肥施用水平下氮肥施用对牧草生长和草地土壤肥力的影响,为草地施肥决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究通过“Web of Science”和“中国知网”等数据库进行数据收集,检索主要关键词:“草地(grasslands)”“氮肥(nitrogen fertilizer)”“牧草(forage)”“土壤肥力(soil fertility)”等。检索到的文献按照以下标准进行筛选:(1)实验必须包含不施肥和施肥处理,实验设计和肥料的施用量是准确的;(2)草地类型为天然草地,作物类型为多年生牧草,且不进行人为灌溉;(3)必须为在中国大陆开展的野外试验,不包含宏观评价类、综述类、室内培养及模型模拟类的论文;(4)实验重复数描述清晰,其中平均值和标准差也均可得(表格类数据直接获取,图形类数据通过 Engauge Digitizer 软件获取,对于未标明标准差的研究,通过用平均值乘以 0.1 来获取标准差^[12])。最后筛选出 62 篇文献,获得 629 组有效数据。

根据研究区氮肥用量、气象条件和初始土壤条件分为不同的亚组。氮肥用量参照我国常见草地施肥梯度划分为 $<60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (低), $60 \sim 120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (中)和 $>120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (高)。气象条件包括气候区、年平均降水量(降水量和降雪量之和)(Mean annual precipitation, MAP)和年平均气温(Mean annual temperature, MAT)。气候区根据气候分类划分为寒温带和中温带。MAP 根据干旱程度划分为 $<200 \text{ mm}$, $200 \sim 400 \text{ mm}$, $400 \sim 800 \text{ mm}$ 和 $>800 \text{ mm}$ 。MAT 根据温度对生态系统过程的临界控制作用划分为 $<0^\circ\text{C}$, $0 \sim 5^\circ\text{C}$ 和 $>5^\circ\text{C}$ 。初始土壤条件包括碱解氮(Alkali-hydrolyzable nitrogen, AN)含量、全氮(Total nitrogen, TN)含量和有机质(Organic matter, OM)含量。碱解氮含量按养分丰缺划分为 $0 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (缺氮), $20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (适中)和 $>40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (富氮),全氮含量依据草地氮库状态划分为 $0 \sim 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (贫瘠), $1 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (适中)和 $>2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (富集),有机质含量根据草地健康程度划分为 $0 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (低肥力), $20 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (中肥力)和 $>50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (高肥力)。这些划分既考虑了农业实践的通用标准,也结合了土壤学与草地生态系

统的特性。根据不同亚组的划分,分析在不同亚组下氮肥施用对牧草生长指标(株高、干物质量)与土壤养分指标(碱解氮、全氮和有机质含量)的影响。

1.2 Meta分析

利用随机效应模型来确定气候条件和土壤初始条件对牧草生长指标以及土壤肥力指标的影响。响应比的自然对数用来表征效应值:

$$\ln R = \ln \frac{X_T}{X_C} \quad (1)$$

其中, X_T 和 X_C 分别为处理组和对照组的牧草株高、干物质量和土壤肥力相关指标的平均值。

对应效应值 $\ln R$ 的方差(V)根据公式计算:

$$Variance = \frac{SD_T^2}{n_T X_T^2} + \frac{SD_C^2}{n_C X_C^2} \quad (2)$$

其中, SD_T 和 n_T 分别为处理组的标准差和重复数; SD_C 和 n_C 分别为对照组的标准差和重复数。

处理组的整体或综合效应值(或平均效应值) $\ln R_{++}$ 由不同数据对的权重加和得到:

$$\ln R_{++} = \frac{\sum (w_i \times \ln R_i)}{\sum w_i} \quad (3)$$

其中, $\ln R_{++}$ 为加权后的综合效应值; $\ln R_i$ 和 w_i 分别为第 i 对数据对的效应值和权重。

每对数据对的权重为对应效应值方差的倒数,根据公式计算:

$$W = \frac{1}{v} \quad (4)$$

为反映效应值的变异情况,本研究计算了加权综合效应值 $\ln R_{++}$ 的95%置信区间(95%CI):

$$95\%CI = \ln R_{++} \pm 1.96S_{\ln R_{++}} \quad (5)$$

其中, $S_{\ln R_{++}}$ 为加权综合效应值 $\ln R_{++}$ 的标准差,根据公式计算:

$$S_{\ln R_{++}} = \sqrt{\frac{1}{\sum w_i}} \quad (6)$$

Meta分析可以根据95%的置信区间(95%CI)来判断结果的显著性:如果95%CI包含了0值,则说明Meta分析结果不显著,即试验处理组对该指标的处理效应不显著,与对照组不存在显著差异。为了更好地描述试验处理组对某一指标影响的大小,本研究根据公式将该指标的 $\ln R_{++}$ 转换为变化百分数(E):

$$E = [EXP(\ln R_{++}) - 1] \times 100\% \quad (7)$$

1.3 统计分析

本研究采用Microsoft Excel 2023进行数据汇总,并结合SPSS 26.0软件进行统计分析,通过Metawin 2.1软件进行Meta数据分析,最后使用SigmaPlot 14.0软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 牧草株高和干物质量

与不施肥相比,施氮肥可有效提高牧草株高和干物质量,其效应值 $\ln R$ 的频数均呈正态分布(图1)。氮肥施用对牧草株高影响的效应值 $\ln R$ 分布范围为 $-0.152 \sim 0.565$,且 $\ln R_{++}$ 为0.229,即与不施肥相比,施氮肥牧草株高增加25.7%(图1a)。氮肥施用对牧草干物质量影响的效应值 $\ln R$ 分布范围为 $-0.369 \sim 2.130$,且 $\ln R_{++}$ 为0.459,即与不施肥相比,施氮肥牧草干物质量增加58.4%(图1b)。

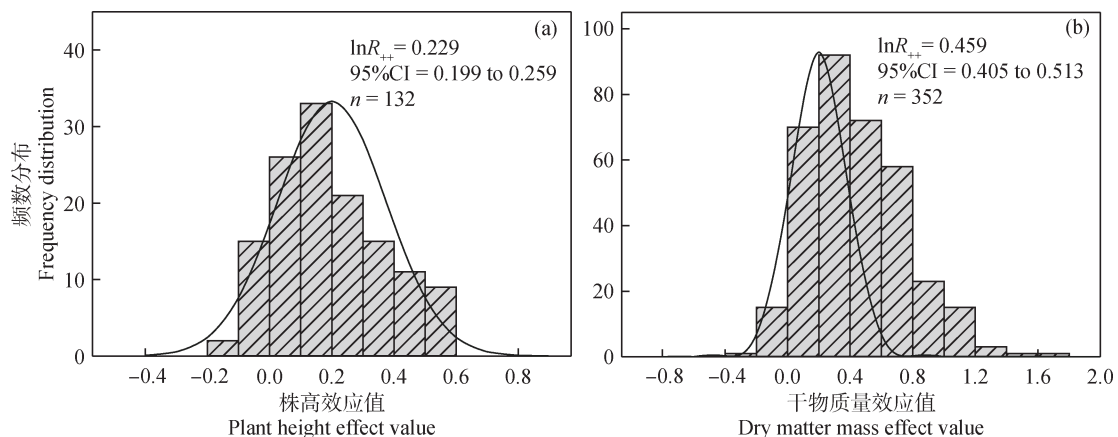


图1 氮肥施用对牧草株高和干物质量的效应值频数分布

Fig. 1 Frequency distribution of effect values of nitrogen fertilizer application on forage plant height and dry matter mass

图2为不同气象条件下施氮肥对牧草株高和干物质量的影响。与不施肥相比,寒温带和中温带地区施氮肥牧草株高分别增加27.6%和11.7%,MAP为200~400 mm和400~800 mm地区施氮肥牧草株高分别增加11.8%和29.2%,MAT<0℃和0~5℃地区施氮肥牧草株高分别增加29.3%和7.7%(图2a)。不同气象条件下氮肥对牧草干物质量的促进效果明显

强于株高(图2)。与不施肥相比,寒温带和中温带地区施氮肥牧草干物质量分别增加75.9%和66.7%,MAP为200~400 mm和400~800 mm地区施氮肥牧草干物质量分别增加52.5%和60.1%,MAT<0℃,0~5℃和>5℃地区施用氮肥牧草干物质量分别增加64.4%,46.2%和54.6%(图2b)。这表明在低温和湿润地区施氮肥对牧草生长的促进效果显著。

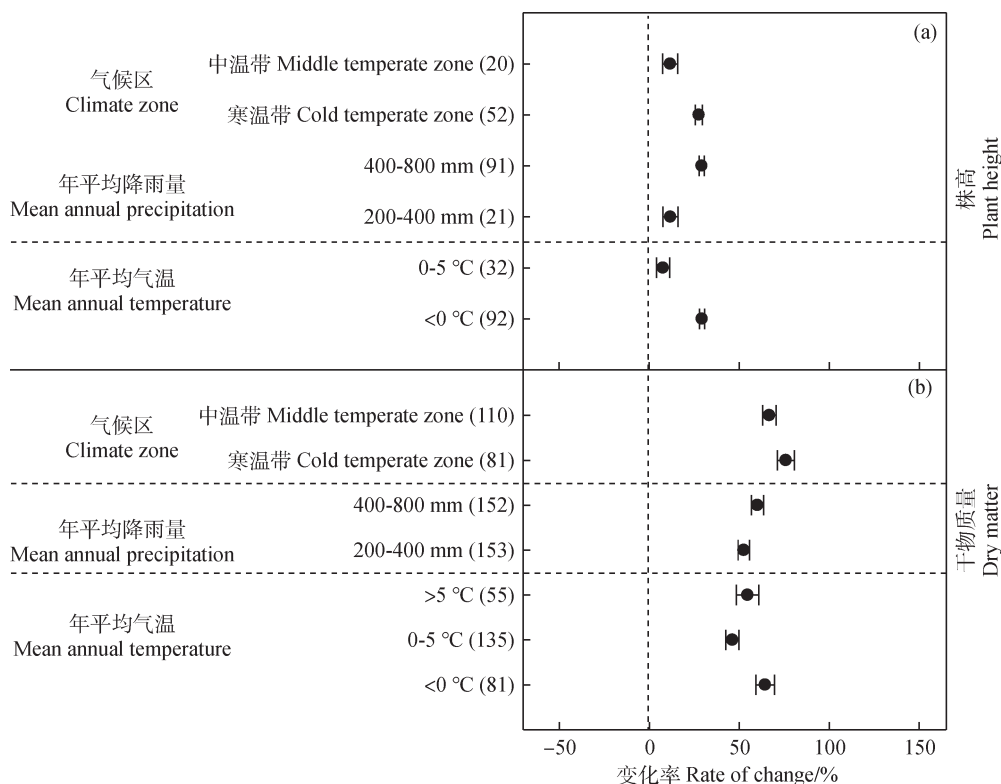


图2 不同气象条件下氮肥施用对牧草株高和干物质量的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen fertilizer application on plant height and dry matter mass of forage under different meteorological conditions

图3是不同气象条件下施氮量对牧草干物质量的影响。与不施肥相比,寒温带地区施用60~120 kg·ha⁻¹氮肥牧草干物质量增加效果最好,提高了108.4%。中温带地区低氮、中氮和高氮处理下牧草干物质量分别增加了45.2%,60.6%和111.4%,这说明随着施氮量的增加,牧草干物质量的增加效果逐渐增强,且当氮肥施用量>60 kg·ha⁻¹时牧草增产已取得较好的效果。与不施肥相比,在MAP为200~400 mm地区,低氮、中氮和高氮处理牧草干物质量分别增加42.5%,55.0%和68.9%,这说明随着施氮量增加,牧草干物质量的增加效果逐渐增强,且施氮量>60 kg·ha⁻¹时牧草增产效果较好。MAP为400~800 mm时,60~120 kg·ha⁻¹氮肥增加牧草干物质量的效果最好,增加了81.1%。与不施肥相

比,MAT<0℃地区低氮、中氮和高氮处理下牧草干物质量分别增加44.9%,121.8%和67.3%,这说明施氮量>60 kg·ha⁻¹时牧草增产效果较好。MAT为0~5℃地区,施氮量超过120 kg·ha⁻¹时增加牧草干物质量效果最好,增加63.9%。MAT>5℃地区低氮、中氮和高氮处理下牧草干物质量分别增加41.5%,81.0%和23.7%,施氮量为60~120 kg·ha⁻¹时效果最好。结果表明,在低温和湿润地区,60~120 kg·ha⁻¹的施氮量对牧草生长的促进效果最佳;而在中温和半干旱地区,>120 kg·ha⁻¹的施氮量效果更好。

图4是不同初始土壤条件下施用氮肥对牧草干物质量的影响。与不施肥相比,碱解氮含量为0~20 mg·kg⁻¹,20~40 mg·kg⁻¹和>40 mg·kg⁻¹的草地

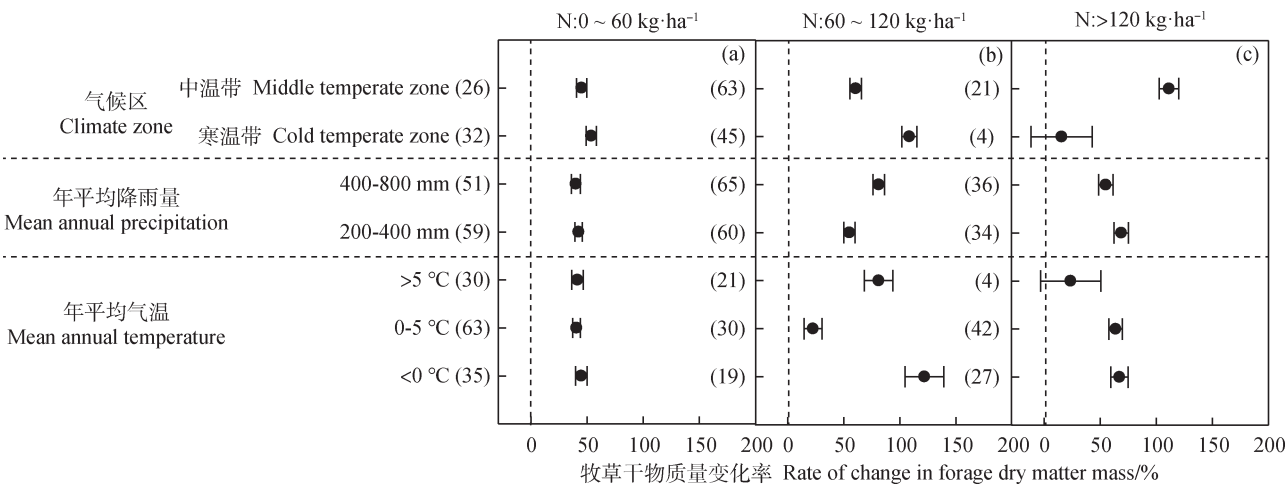


图 3 不同气象条件下施氮量对牧草干物质质量的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen application on the dry matter mass of forage under different meteorological conditions

施氮肥牧草干物质质量分别增加 42.5%, 100.7% 和 25.8%, 全氮含量为 0~1 g·kg⁻¹ 和 1~2 g·kg⁻¹ 的草地施氮肥牧草干物质质量分别增加 120.2% 和 48.0%, 有机质含量为 0~20 g·kg⁻¹, 20~50 g·kg⁻¹ 和 >50 g·kg⁻¹ 的草地中施氮肥牧草干物质质量分别增加 56.7%, 48.3% 和 51.9%。这说明在养分贫瘠的草地中施氮肥对牧草干物质质量的促进效果更明显。

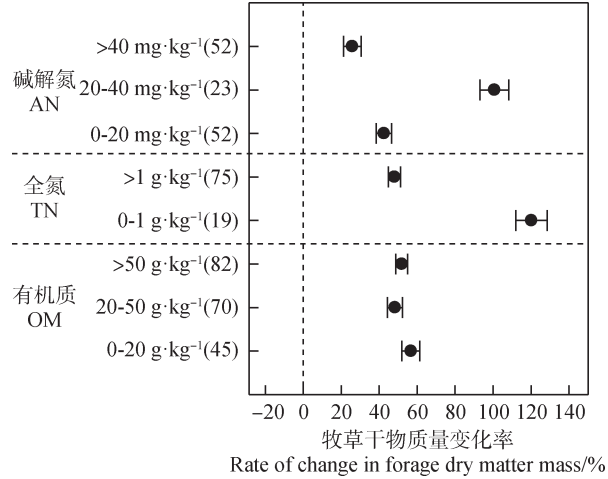


图 4 不同土壤条件下氮肥施用对牧草干物质质量的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen fertilizer application on dry matter mass of forage under different soil conditions

图 5 是不同初始土壤条件下氮肥施用量对牧草干物质质量的影响。与不施肥相比,在碱解氮含量 0~20 mg·kg⁻¹ 的草地,低氮、中氮和高氮处理的牧草干物质质量分别增加 26.6%, 44.5% 和 52.1%。在碱解氮含量为 20~40 mg·kg⁻¹ 的草地,低氮、中氮和高氮处理的牧草干物质质量分别增加 76.9%, 78.1% 和 140.9%。在碱解氮含量 >40 mg·kg⁻¹ 的草地,施用低量和高量氮肥对牧草干物质质量增加的促进

效果相差不大,分别增加了 35.4% 和 30.7%。这说明在碱解氮含量为 0~40 mg·kg⁻¹ 的草地上,随着施氮量的增加牧草干物质质量的增加效果逐渐增强,且施氮量 >120 kg·ha⁻¹ 时效果最好。碱解氮含量 >40 mg·kg⁻¹ 的草地推荐施氮量 <60 kg·ha⁻¹。与不施肥相比,在全氮含量为 0~1 g·kg⁻¹ 的草地,低氮、中氮和高氮处理的牧草干物质质量分别增加 75.4%, 162.6% 和 130.4%。在全氮含量为 1~2 g·kg⁻¹ 的草地,低氮、中氮和高氮处理的牧草干物质质量分别增加 37.6%, 32.9% 和 76.8%。因此,全氮含量为 0~1 g·kg⁻¹ 的草地推荐施用氮肥 >60 kg·ha⁻¹, 而在全氮含量为 1~2 g·kg⁻¹ 的草地则需施用过量氮肥才能表现较好的增产效果。与不施肥相比,在有机质含量为 0~20 g·kg⁻¹ 的草地,低氮、中氮和高氮处理下牧草干物质质量分别增加 45.6%, 45.3% 和 135.4%。在有机质含量为 20~50 g·kg⁻¹ 的草地,低氮、中氮和高氮处理的牧草干物质质量分别增加 61.6%, 32.0% 和 36.5%。在有机质含量 >50 g·kg⁻¹ 的草地,低氮、中氮和高氮处理的牧草干物质质量分别增加 35.7%, 46.4% 和 69.8%。这表明,在有机质含量较高或较低的草地中,随施氮量增加,牧草干物质产量的提升效应更为明显;而对于土壤有机质含量为 20~50 g·kg⁻¹ 的草地,更适宜的施氮量应控制在 60 kg·ha⁻¹ 以下。

2.2 草地土壤养分

图 6 为不同初始土壤条件及气象条件下施用氮肥对土壤碱解氮含量的影响。与不施肥相比,施氮肥使土壤碱解氮含量总效应值增加 19.3% (图 6a)。与不施肥相比,碱解氮含量为 0~20 mg·kg⁻¹, 20~

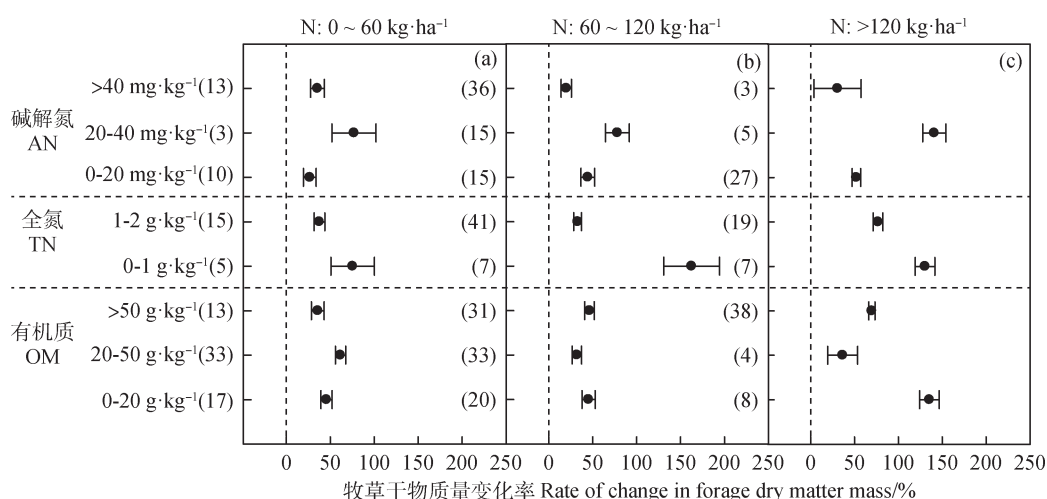


图5 不同土壤条件下施氮量对牧草干物质量的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen application on dry matter mass of forage under different soil conditions

40 mg·kg⁻¹和>40 mg·kg⁻¹草地施氮肥土壤碱解氮含量分别增加28.2%,13.5%和11.1%,全氮含量为0~1 g·kg⁻¹,1~2 g·kg⁻¹和>2 g·kg⁻¹草地施氮肥土壤碱解氮含量分别增加25.6%,18.4%和8.8%,在有机质含量为0~20 g·kg⁻¹草地施氮肥土壤碱解氮含量增加26.7%,但向高有机质含量草地施氮肥会导致土壤碱解氮含量出现负增长(图6b)。这说明随着土壤氮素以及有机质含量的增加,施氮

肥对土壤碱解氮增加效果减弱。与不施肥相比,寒温带和中温带地区施氮肥土壤碱解氮含量分别增加4.9%和22.9%,MAP为200~400 mm和400~800 mm地区施氮肥土壤碱解氮分别增加13.1%和18.5%,MAT<0℃,0~5℃和>5℃地区施氮肥土壤碱解氮含量分别增加5.7%,17.6%和26.4%(图6c)。这说明在湿润及高温地区施氮肥对土壤碱解氮的增加效果更好。

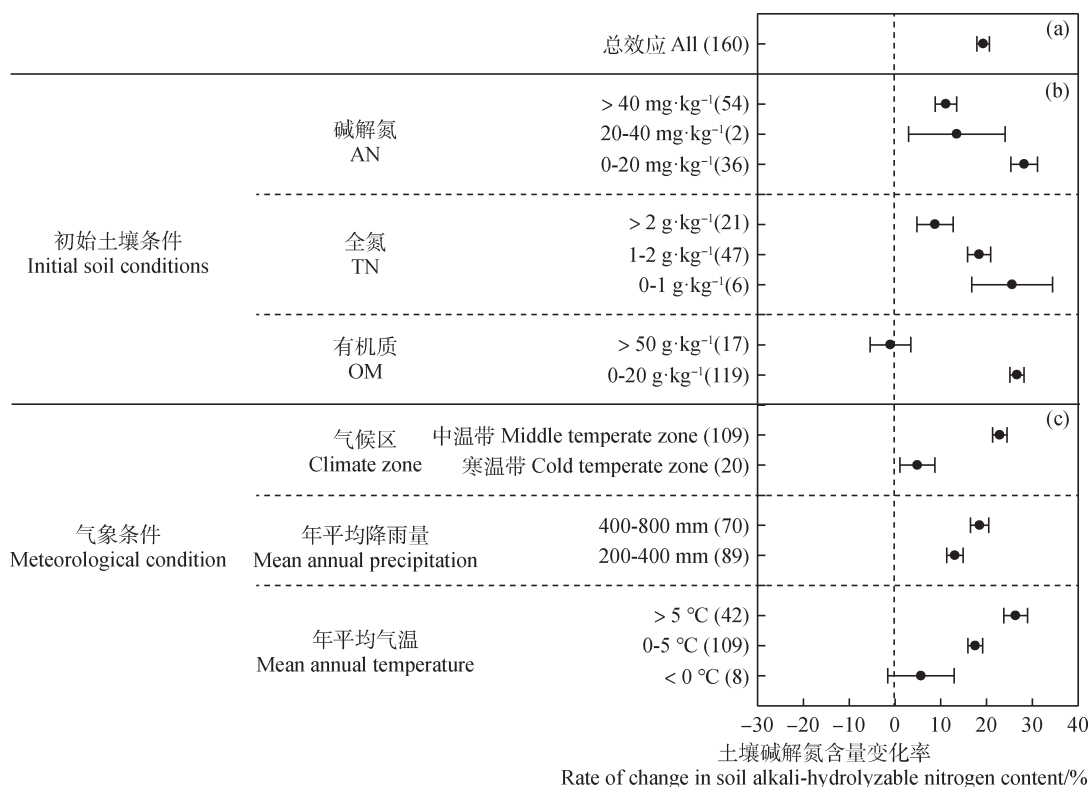


图6 不同土壤条件和气象条件下氮肥施用对土壤碱解氮含量的影响

Fig. 6 Effects of nitrogen fertilizer application on soil alkali-hydrolyzable nitrogen content under different soil conditions and meteorological conditions

图 7 为不同初始土壤条件和气象条件下施用氮肥对土壤全氮含量的影响。与不施肥相比,施氮肥使土壤全氮含量总效应值增加 21.8%(图 7a)。与不施肥相比,在碱解氮含量为 0~20 mg·kg⁻¹的草地施氮肥土壤全氮含量增加 33.1%,在碱解氮含量>40 mg·kg⁻¹的草地施氮肥土壤全氮含量降低,在全氮含量为 0~1 g·kg⁻¹,1~2 g·kg⁻¹和>2 g·kg⁻¹的草地施氮肥土壤全氮含量分别增加 33.0%,17.1%和 13.1%,有机质含量为 0~20 g·kg⁻¹,20~50 g·kg⁻¹和>50 g·kg⁻¹草地施氮肥土壤全氮含量分别增加 3.0%,24.2%和 24.8%(图 7b)。这说明随着土壤碱

解氮以及全氮含量的增加,施氮肥对土壤全氮含量的增加效果减弱,在土壤氮素含量较低和有机质含量较高的地区施氮肥对土壤全氮的增加效果明显。与不施肥相比,寒温带和中温带地区施氮肥土壤全氮含量分别增加 19.1%和 11.7%,MAP<200 mm,200~400 mm,400~800 mm 和>800 mm 地区施氮肥土壤全氮含量分别增加 8.9%,14.0%,21.9%和 37.1%,MAT<0℃,0~5℃和>5℃地区施氮肥土壤全氮含量分别增加 23.8%,21.2%和 44.4%(图 7c)。这说明随着降水量增加,施氮肥对提升土壤全氮的效果增强,在湿润以及高温地区施氮肥对土壤全氮的增加效果更明显。

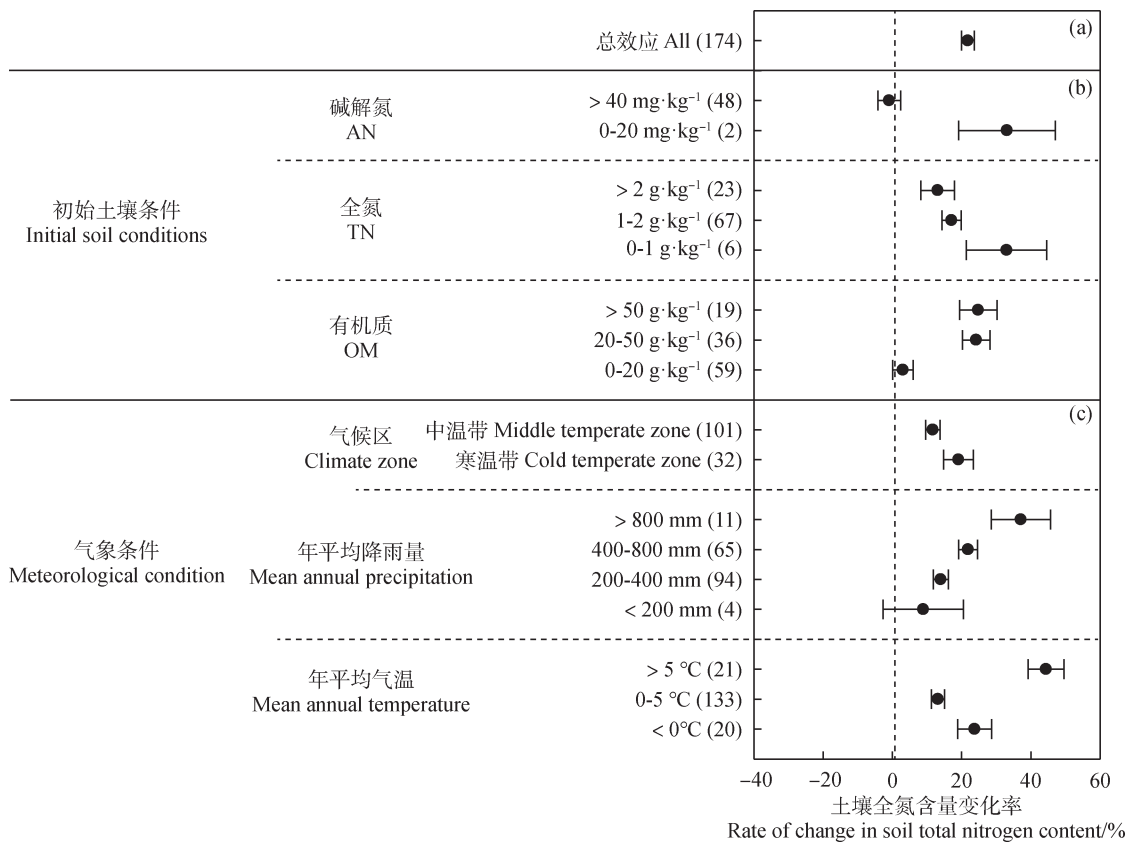


图 7 不同土壤条件和气象条件下氮肥施用对土壤全氮含量的影响

Fig. 7 Effects of nitrogen fertilizer application on soil total nitrogen content under different soil conditions and meteorological conditions

图 8 为不同初始土壤条件和气象条件下施氮肥对土壤有机质含量的影响。与不施肥相比,施氮肥增加土壤有机质含量总效应值为 9.0%(图 8a)。与不施肥相比,碱解氮含量为 0~20 mg·kg⁻¹,20~40 mg·kg⁻¹和>40 mg·kg⁻¹草地施氮肥土壤有机质含量分别增加 30.5%,5.6%和 5.1%,全氮含量为 0~1 g·kg⁻¹,1~2 g·kg⁻¹和>2 g·kg⁻¹草地施氮肥土壤有机质含量分别增加 23.6%,4.9%和 12.4%,有机质含量为 0~20 g·kg⁻¹,20~50 g·kg⁻¹和>50 g·kg⁻¹草地施氮肥土壤有机质含量分别增加

7.4%,14.5%和 13.8%(图 8b)。这表明,在氮素供应不足的草地施用氮肥,可显著促进土壤有机质的累积。与不施肥相比,寒温带和中温带地区施氮肥土壤有机质分别增加 10.2%和 4.2%,MAP 为 200~400 mm,400~800 mm 和>800 mm 地区施氮肥土壤有机质分别增加 6.3%,12.0%和 36.1%,MAT<0℃,0~5℃和>5℃地区施氮肥土壤有机质分别增加 12.4%,5.9%和 27.5%(图 8c)。这说明在湿润以及高温地区施氮肥对土壤有机质的增加效果更明显。

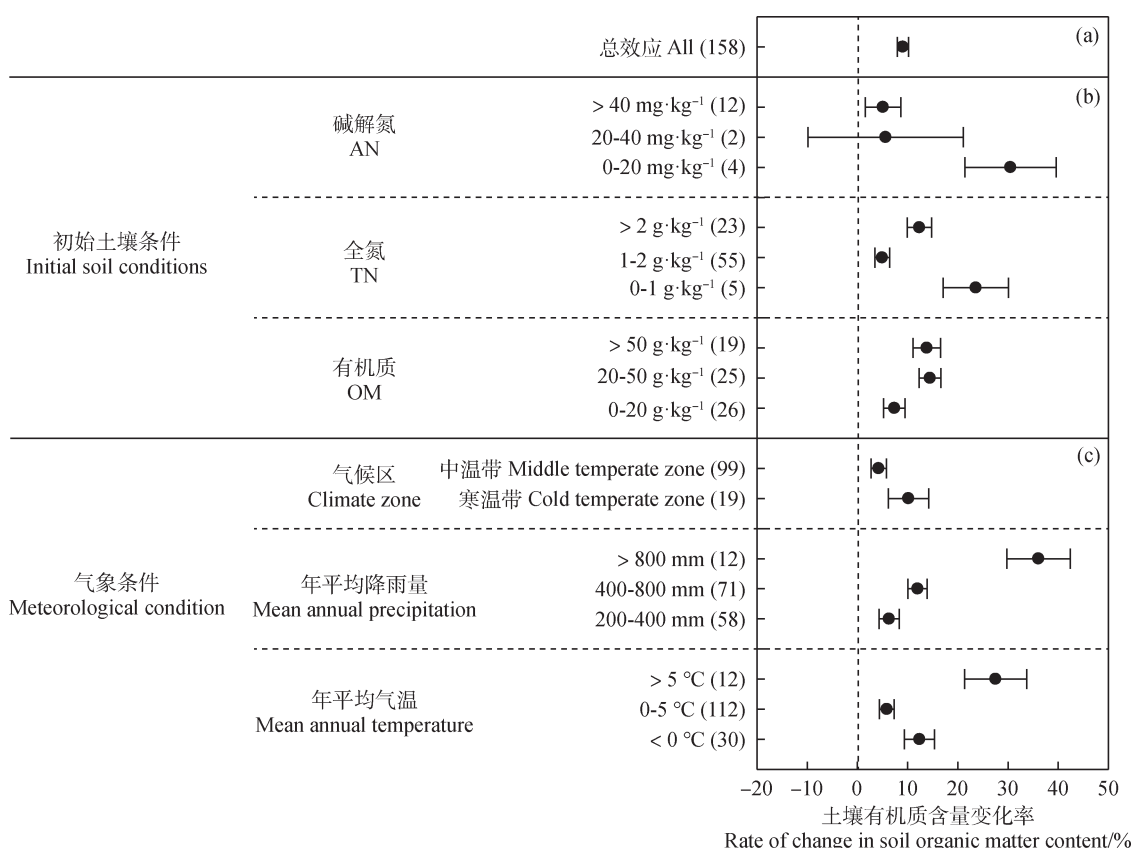


图 8 不同土壤条件和气象条件下氮肥施用对土壤有机质含量的影响

Fig. 8 Effect of nitrogen fertilizer application on soil organic matter content under different soil conditions and meteorological conditions

3 讨论

在全球气候变化加剧与土壤退化背景下,施氮肥是促进牧草生长的重要措施^[6, 13-14],在草地生态系统中添加氮素已经成为改善其生态环境的有效措施^[15-18]。氮肥施用对牧草生长和土壤肥力的影响并非孤立存在,而是与气候条件(温度、降水)和土壤条件(有机质、氮含量)形成复杂的协同与拮抗关系。但是气象条件、土壤条件以及氮肥施用量的不同也会导致氮肥对牧草生长以及土壤肥力的影响有所差异^[19]。其差异主要由以下几个方面反映:

一、温度通过调控微生物活性与植物生理过程影响氮肥肥效

当年均温 $<0^{\circ}\text{C}$ 时,牧草生长主要受低温与养分共同限制。低温显著抑制土壤微生物(如氨化细菌和硝化细菌)的活性,导致土壤有机质分解和氮矿化过程减缓,有效氮供应严重不足。虽然施氮可直接补充氮源,但低温同样延缓肥料氮的转化与释放,使其难以被植物及时利用^[20]。然而,由于此时植物处于基础代谢水平,对养分的需求阈值较低,少量氮素补充即可显著缓解氮限制,表现出较高的养分利用

效率^[21]。当年均温 $>5^{\circ}\text{C}$ 时,土壤微生物活性增强,有机质分解和氮转化速率加快。施氮可进一步优化土壤碳氮比,激发微生物群落功能,促进养分循环。然而,温度升高也导致植物呼吸作用增强,消耗更多光合产物^[22];同时,水分和光照逐渐取代氮素成为主要限制因子。因此,尽管土壤有效氮含量增加,但外源氮对牧草生长的促进作用相对减弱,氮肥利用率呈现下降趋势。白春华^[23]在内蒙古草原上的研究也显示,施氮肥增温处理可以显著增加土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质等土壤养分的含量。

二、降水通过水分有效性和氮转化途径调控氮肥肥效

年降水量对草地生态系统具有重要的影响^[24-26],其对牧草生长的影响具有累积性^[27-28]。当年降水量低于 200 mm 时,水分为主要限制因子。干旱条件下,植物根系吸收能力下降,体内氮代谢过程受阻,难以将吸收的氮转化为生物量;同时,土壤微生物活性受限,氮矿化速率降低,外源氮难以转化为有效形态,甚至以原形态滞留于土壤中。因此,低降水条件下施氮的增产与改土效应均不显著。当降水量为 400~800 mm 时,水分条件适宜,硝化细菌活性升

高,铵态氮向硝态氮的转化加速,有效氮供应充足。水分亦促进植物光合作用和组织建成,提高氮素利用效率。然而,过量施氮在此环境下易引发负面效应:硝态氮淋失风险加大,淹水条件下反硝化作用导致氮气挥发,均会降低氮肥利用率,并可能带来环境风险^[29-30]。程欢^[31]发现草地生物量随着降水量的增加呈线性增加的趋势。才璐等^[32]的研究表明,在半湿润区和半干旱区,施氮肥可使苜蓿产量分别提高28.7%和6.6%。本研究也发现,年降水量高的地区施氮肥对牧草生长以及土壤肥力的促进效果更好。

三、土壤基础肥力通过养分平衡与微生物-植物反馈调节氮肥肥效

低养分土壤中,氮素是牧草生长的首要限制因子。施氮可直接缓解氮缺乏,提高养分的释放速度和有效性^[33-34],并促进牧草生物量积累。增加的生物量又通过凋落物和根系分泌物返还土壤,提升有机质含量,形成“植物-土壤”正向反馈循环,同步提高土壤肥力和系统生产力^[35]。而在高养分土壤中,氮素与其他养分(如磷、钾)形成协同限制,单独施氮会破坏养分平衡。此时土壤微生物倾向于固定外源氮以维持自身碳氮平衡,而非立即释放供植物利用;加之氮挥发、淋溶等途径的损失增加,导致氮肥的利用效率显著下降。若要继续推动产量增长,往往需投入更大剂量的氮肥,但同时也加剧了环境污染的风险。

4 结论

本研究通过Meta分析系统评估了氮肥施用对牧草生长及土壤肥力的影响。在低温湿润区(年均温 $<0^{\circ}\text{C}$,年均降水400~800 mm)施氮肥可显著提升牧草株高和干物质量,且 $60\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 的施氮量有增产效果。低肥力草地(碱解氮含量 $<40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $<1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质含量 $<20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)对氮肥的响应更敏感,少量氮素即可显著增加牧草干物质积累,而高养分土壤则需超过 $120\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 的施氮量才能实现增产。同时,向低氮土壤中施氮能显著提升土壤全氮、碱解氮及有机质含量,该效应在湿润高温地区更明显。本研究结果表明氮肥增效与气候-土壤协同作用密切相关。

参考文献

- [1] 陆建涛,彭建,李刚勇,等. 干旱对中亚草地总初级生产力时滞和累积效应的影响评估[J]. 生态学报,2023,43(23):9745-9757
- LU J T, PENG J, LI G Y, et al. Assessment of time-lag and

- cumulative effects of drought on gross primary productivity of grassland in Central Asia from 1982 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23):9745-9757
- [2] LIU Y Y, WANG Q, ZHANG Z Y, et al. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 690:27-39
- [3] GUO Z G, LIANG T G, LIU X Y, et al. A new approach to grassland management for the arid Aletai region in Northern China[J]. *The Rangeland Journal*, 2006, 28(2):97
- [4] KAMPMANN D, HERZOG F, JEANNERET P, et al. Mountain grassland biodiversity: impact of site conditions versus management type[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2008, 16(1):12-25
- [5] ZOU C J, WANG K Y, WANG T H, et al. Overgrazing and soil carbon dynamics in eastern Inner Mongolia of China[J]. *Ecological Research*, 2007, 22(1):135-142
- [6] 何亚灵,韦潇,曾泰儒,等. 氮肥水平对豆禾混播草地产量和营养品质的影响[J]. 四川农业大学学报,2022,40(5):721-727,745
- HE Y L, WEI X, ZENG T R, et al. Effects of nitrogen fertilizer levels on yield and quality of legume-grass mixtures[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(5):721-727, 745
- [7] 高浩诚,牧仁,焦婷,等. 施氮对高寒垂穗披碱草草地根际、非根际土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(6):276-282
- GAO H C, MU R, JIAO T, et al. Effects of nitrogen application on rhizosphere and non-rhizosphere soil fertility of alpine *Elymus nutans* grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6):276-282
- [8] 盛基峰,李焱,于美佳,等. 氮磷添加对高寒草地土壤养分和相关酶活性的影响[J]. 生态环境学报,2022,31(12):2302-2309
- SHENG J F, LI Y, YU M J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus an addition on soil nutrients and activity of related enzymes in alpine grassland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(12):2302-2309
- [9] 李泽藩,张振豪,董书明,等. 施肥对退化草地植被生产力和群落结构特征的影响[J]. 草地学报,2024,32(9):2973-2981
- LI Z F, ZHANG Z H, DONG S M, et al. Effects of fertilization on productivity and community structure of degraded grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(9):2973-2981
- [10] 陈鑫,焦婷,马淑敏,等. 高寒人工草地垂穗披碱草营养品质及其地上、地下生物量对氮素添加的响应[J]. 草原与草坪, 2023, 43(4):20-26
- CHEN X, JIAO T, MA S M, et al. Response of nutrient quality, aboveground biomass and underground biomass of *Elymus nutans* to nitrogen addition in alpine artificial grassland[J]. *Grassland and Turf*, 2023, 43(4):20-26
- [11] 王少博. 有机肥替代化肥对土壤基本性质和氮素淋失的影响及其优化施肥[D]. 北京:中国农业大学,2023:7-13
- WANG S B. Effects of organic fertilizer substitution for chemical fertilizers on soil properties and nitrogen leaching, and optimization of fertilizer application[D]. Beijing: China Agricultural University, 2023:7-13
- [12] LI M F, WANG J, GUO D, et al. Effect of land management practices on the concentration of dissolved organic matter in soil: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2019, 344:74-81
- [13] 土旦加,周学丽. 不同供氮水平对豆禾混播草地草产量及品质的影响[J]. 青海草业,2022,31(2):7-12
- TU D J, ZHOU X L. Effects of different N levels on productivity and quality of legume-grass mixtures[J]. *Qinghai Pratacul-*

- ture, 2022, 31(2): 7-12
- [14] 肖祥铭. 利用方式和施氮对多年生牧草产量、品质及氮肥利用的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2022: 5-17
XIAO X M. Effects of utilization modes and nitrogen applications on the yield, quality and nitrogen utilization of perennial forage[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022: 5-17
- [15] WEDIN D, TILMAN D. Competition among grasses along a nitrogen gradient: initial conditions and mechanisms of competition[J]. Ecological Monographs, 1993, 63(2): 199-229
- [16] 卜冬冬, 李昂, 王银柳, 等. 氮素和植物生长促进剂对羊草生长及竞争力的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2667-2674
BU D D, LI A, WANG Y L, et al. Effects of nitrogen and plant growth promoter addition on the growth and competitiveness of *Leymus chinensis* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(8): 2667-2674
- [17] 张仁懿, 徐当会, 袁建立, 等. 叶重比及株高质量比解释亚高寒草甸禾本科对氮素添加的积极响应[J]. 草业科学, 2019, 36(10): 2631-2638
ZHANG R Y, XU D H, YUAN J L, et al. Using leaf mass fractions and height/mass ratios to explain the positive response of Gramineae to nitrogen addition on a sub-alpine meadow [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(10): 2631-2638
- [18] 段媛媛, 王淳忆, 张曹莉, 等. 植株密度和氮素互作对垂穗披碱草生物量分配的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9815-9823
DUAN Y Y, WANG C Y, ZHANG C L, et al. Effects of interaction between plant density and nitrogen application rate on allocation of above/underground biomass of *Elymus nutans* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9815-9823
- [19] MCCULLEY R L, BURKE I C, NELSON J A, et al. Regional patterns in carbon cycling across the great Plains of North America[J]. Ecosystems, 2005, 8(1): 106-121
- [20] AGEHARA S, WARNCKE D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(6): 1844-1855
- [21] 陈鑫. 外源氮添加对高寒区垂穗披碱草生长和生理特性及氮素吸收分配的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023: 4-20
CHEN X. Effects of exogenous nitrogen addition on the growth, physiological characteristics, nitrogen absorption and distribution of *Elymus nutans* in alpine regions[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023: 4-20
- [22] UEHARA N, SASAKI H, AOKI N, et al. Effects of the temperature lowered in the daytime and night-time on sugar accumulation in sugarcane[J]. Plant Production Science, 2009, 12(4): 420-427
- [23] 白春华. 控制性增温和施氮肥对土壤性质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011: 14-30
BAI C H. The effects of experimental warming and nitrogen addition on soil properties[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011: 14-30
- [24] 赵学勇, 刘良旭, 王玮, 等. 降水波动对荒漠草原生产力的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1486-1495
ZHAO X Y, LIU L X, WANG W, et al. Impacts of precipitation change on desert-grassland vegetation productivity [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1486-1495
- [25] 张彬, 朱建军, 刘华民, 等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018
ZHANG B, ZHU J J, LIU H M, et al. Effects of extreme rainfall and drought events on grassland ecosystems [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(9): 1008-1018
- [26] EASTERLING D R, MEEHL G A, PARMESAN C, et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts [J]. Science, 2000, 289(5487): 2068-2074
- [27] 张蕊, 赵学勇, 左小安, 等. 荒漠草原沙生针茅(*Stipa glareosa*)群落物种多样性和地上生物量对降雨量的响应[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 45-52
ZHANG R, ZHAO X Y, ZUO X A, et al. Responses of the *Stipa glareosa* community species diversity and above-ground biomass to precipitation in the desert-steppe region in northern China [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 45-52
- [28] 张腊梅, 刘新平, 赵学勇, 等. 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2737-2745
ZHANG L M, LIU X P, ZHAO X Y, et al. Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2737-2745
- [29] 杜国强, 陈秀琴, 牟守国, 等. 模拟降雨条件下氮素在土壤中的迁移转化对比研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 436-439
DU G Q, CHEN X Q, MOU S G, et al. Comparative study on nitrogen migration and transformation in soil under simulated rainfall conditions [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(12): 436-439
- [30] 李佳韵, 童菊秀, 夏传安, 等. 降雨条件下农田氮素地表径流失特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 8-15
LI J Y, TONG J X, XIA C A, et al. Experiments study on farmland nitrogen loss to surface runoff under rainfall condition [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(7): 8-15
- [31] 程欢. 降雨变化对荒漠草原植物群落结构、功能性状及地上生物量的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022: 61-66
CHENG H. Effects of precipitation changes on the community structure, functional trait and aboveground biomass of plant communities in desert steppe [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2022: 61-66
- [32] 才璐, 王林林, 罗珠珠, 等. 中国苜蓿施肥产量效应的Meta分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 838-848
CAI L, WANG L L, LUO Z Z, et al. Meta-analysis of yield effects of fertilization on alfalfa in China [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 838-848
- [33] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 长期施肥对东北黑土酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 551-556
WANG S Q, HAN X Z, QIAO Y F, et al. Effects of long-term fertilization on enzyme activities in black soil of Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(3): 551-556
- [34] 王新修. 长期有机无机肥料配施对土壤性状及烤烟生长的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023: 12-24
WANG X X. Effects of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on soil properties and flue-cured tobacco growth [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023: 12-24
- [35] 刘泽宇, 刘罡, 张玉霞, 等. 氮肥和混播比例对科尔沁沙地麦豆混播草地饲草生产性能和土壤养分的影响[J]. 草业科学, 2025, 42(11): 2767-2780
LIU Z Y, LIU G, ZHANG Y X, et al. Effects of nitrogen fertilizer and mixed sowing ratio of oat-pea mixed planting grassland on forage production performance and soil nutrients in Horqin Sandy Land [J]. Pratacultural Science, 2025, 42(11): 2767-2780