

氮沉降对高寒草甸土壤属性和植物群落影响研究进展

王 琦

辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月19日; 发布日期: 2025年10月27日

摘 要

工业革命以来, 大气氮沉降量持续增加对陆地生态系统服务功能产生深远影响。探究氮沉降对高寒草甸土壤属性与植物群落的影响, 对应对全球氮沉降加剧引发的生态问题及推进草甸生态系统可持续管理具有重要意义。本文基于国内外相关研究, 系统综述了大气氮沉降的现状及其对高寒草甸土壤性质和植物群落的作用。结果表明, 大气氮沉降总体呈上升趋势, 土壤pH随氮沉降量与处理年限增加而降低; 长期氮添加下土壤全氮含量呈先增后降趋势, 适宜施氮浓度仍存争议。土壤无机氮含量变化略滞后于全氮, 组分在不同土层中变化情况较复杂。氮添加促进土壤有机碳积累, 有效磷含量随施氮浓度升高而增加, 但长期实验下可能出现下降。在阈值范围内施氮有助于退化草甸多样性恢复与生产力提升, 超出饱和阈值则易产生负面效应。此外, 氮添加下的植物生产力与物种多样性变化并不同步, 二者关系复杂。未来需加强多因子交互作用及长期生态效应的系统研究。

关键词

高寒草甸, 青藏高原, 氮沉降, 植物群落生产力, 土壤养分

Research Progress on Effects of Nitrogen Deposition on Soil Properties and Plant Communities in Alpine Meadow

Qi Wang

School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: September 22, 2025; accepted: October 19, 2025; published: October 27, 2025

Abstract

Since the Industrial Revolution, the continuous increase in atmospheric nitrogen deposition has

文章引用: 王琦. 氮沉降对高寒草甸土壤属性和植物群落影响研究进展[J]. 土壤科学, 2025, 13(4): 183-195.
DOI: 10.12677/hjss.2025.134022

exerted profound impacts on the functions of terrestrial ecosystems. Investigating the effects of nitrogen deposition on soil properties and plant communities in alpine meadows is crucial for addressing the ecological challenges posed by global nitrogen enrichment and promoting the sustainable management of meadow ecosystems. Based on a comprehensive review of domestic and international research, this study systematically summarizes the current status of atmospheric nitrogen deposition and its effects on soil properties and plant communities in alpine meadows. The results indicate that atmospheric nitrogen deposition generally shows an increasing trend, while soil pH decreases with rising nitrogen deposition levels and prolonged duration. Long-term nitrogen addition leads to an initial increase followed by a decrease in soil total nitrogen content, though the optimal nitrogen application rate remains debated. Changes in soil inorganic nitrogen content slightly lag behind those of total nitrogen, with variations in different nitrogen components across soil layers being complex. Nitrogen addition promotes the accumulation of soil organic carbon, and available phosphorus content increases with higher nitrogen application rates, though it may decline under long-term experimental conditions. Nitrogen application within a certain threshold range facilitates the restoration of biodiversity and enhances productivity in degraded meadows, whereas exceeding the saturation threshold tends to produce negative effects. Moreover, changes in plant productivity and species diversity under nitrogen addition are not synchronous, revealing a complex relationship between the two. Future research should strengthen systematic investigations into the interactions of multiple factors and long-term ecological effects.

Keywords

Alpine Meadow, Qinghai-Tibet Plateau, Nitrogen Deposition, Plant Community Productivity, Soil Nutrient

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青藏高原平均海拔超过 4000 m，被称为世界“第三极”，总体西高东低，边缘起伏不平，地势复杂[1]。青藏高原在复杂地理环境和特殊气候因素共同作用下，孕育出了独特的高寒生态系统。海拔由高到低分布着山地荒漠、高寒荒漠、高寒草原、高寒草甸、高寒灌丛、山地灌丛、山地森林等各类生态系统。高寒草甸是青藏高原等高山地区所发育的独特植被类型，面积达到 $1.28 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，在青藏高原东部及周边山地广泛分布[2]。高寒草甸生态系统发挥着许多生态服务功能，如气候调节、水源涵养、生物多样性维持等，是支撑当地畜牧业健康发展的物质基础，也是青藏高原的重要屏障，具有巨大的社会、经济和生态价值。

工业革命以来煤炭、石油、天然气等矿石燃料以及含氮化肥的大规模使用，向大气排放大量含氮化合物，导致氮沉降量不断增加。青藏高原气候寒冷，自然环境严酷，环境承载力较低，高寒草甸分布广泛，对外界环境变化响应迅速。氮沉降的增加对高寒草甸的生产力、养分循环、稳定性等诸多生态过程产生复杂的影响，这些影响既有积极的一面，如解除氮限制、提高草甸植被生产力，也有消极的一面，如造成土壤酸化、降低物种多样性。研究氮沉降背景下土壤理化性质和植物群落的变化，有助于揭示高寒草甸生态系统对氮沉降的初始响应，对于防治高寒草甸退化，维护生态系统平衡具有重要意义。

2. 青藏高原地区氮沉降特征

大气氮沉降是指大气中的含氮化合物以干沉降和湿沉降的方式进入到陆地和水体的过程。干沉降是

指在非降水条件下，由于重力、颗粒吸附、植物气孔吸收等作用，含氮物质从大气降落到地面的过程， NO_2 、 N_2O 、 NH_3 以及其他含氮化合物，主要以干沉降的方式回到地表[3]。湿沉降是指在降雨条件下氮元素返回陆地和水体的过程， NH_4^+ 和 NO_3^- 以及少量可溶性有机氮通过溶于水的方式进入地表。无机氮在氮沉降总量中占比较大，主要包括 NH_x 和 NO_y 两大类。还原性氮化物 NH_x 主要来源于土壤、肥料和集约畜牧业中动物粪便中含氮物的挥发[4]， NO_y 主要源于工业燃料燃烧和汽车尾气排放等[5]。

随着化石燃料燃烧、农田大规模施肥等人类活动，导致活性氮排放量急剧增长，不断输入陆地生态系统，引起一系列生态问题。因此，氮沉降量的时空变化特征逐渐引起众多学者关注。目前，氮沉降的系统研究主要依靠观测点长期监测数据[6]，或基于大气化学传输模型与实测数据之间的相关关系，建立实测值与模拟值之间的回归方程[7]。顾峰雪等[8]基于降水、能源消费和施肥数据构建了氮沉降时空变化模型，结果表明 1961~2010 年我国氮沉降呈增加趋势，总体趋势由东南向西北递减，西藏地区的氮沉降水平在 $0.02\sim0.73\text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ，低于我国其他区域氮沉降水平。Lü 等[9]基于野外站点监测数据，估算了我国 1990~2003 年氮沉降浓度变化，青藏高原地区在此期间氮沉降浓度为 $8.7\sim13.8\text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。由于监测网络建设有待完善，青藏高原地区大范围氮沉降系统研究工作开展较少，多依据某些站点观测记录，开展小范围的研究。贾钧彦等[10]依据林芝观测点 2005~2006 雨水收集数据，估算藏东南地区大气湿沉降为 $1.33\sim3.05\text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。祝景彬等[11]在海北高寒草甸 2010~2011 两年大气湿沉降观测实验表明，无机氮平均沉降量为 $3.19\text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 。Zhang 等[12]在祁连山的研究发现，该区域湿沉降量达到 $10.05\text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ，硝态氮(NO_3^- -N)沉积占总无机氮沉积的 73.83%，是当地氮湿性沉积的主要形式。贾、祝和 Zhang 的研究着重于湿沉降的研究，忽略了湿沉降中有机氮及干沉降的氮含量，若考虑上述氮沉降，将更接近实际氮沉降量。

Table 1. Nitrogen deposition data of Qinghai-Tibet Plateau Region
表 1. 青藏高原地区氮沉降数据

地点	监测年份	氮沉降量($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$)	参考文献
西藏	1961~2010	2~7.3	[8]
西藏	1990~2003	8.7~13.8	[9]
林芝	2005~2006	1.33~3.05	[10]
海北	2010~2011	3.19	[11]
林芝	2012~2013	5.74	[13]
西宁	2014~2015	25.6	[14]
长江源区	2016~2018	0~23.43	[17]
祁连山	2022	10.05	[12]

湿沉降无机氮监测数据缺乏客观性，有研究者分别记录了总无机氮和可溶性总氮的沉降量，结果表明林芝地区 2012~2013 年两者平均沉降量分别为 5.74 和 $7.86\text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ [13]。许稳等[14]在西宁等地区的综合研究考虑湿沉降及干沉降量，研究发现在 2014~2015 二者沉降量分别为 11.8 和 $13.8\text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ，干沉降占总沉降量的 48%。通过观测数据可准确呈现氮沉降时空动态，但不利于未来氮沉降趋势预测。有研究表明，到 2050 年青藏高原的氮沉降速率将达到 $40\text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ [15]，达到高寒草甸的饱和阈值

[16]。综上所述,青藏高原地区的氮沉降呈现增加趋势(表 1)。高寒地区对氮沉降量升高较为敏感,过度氮沉降将会威胁到当地生态安全。实地监测数据积累有利于系统掌握氮沉降的整体状况及预测模型构建。目前,我国建设了众多氮沉降监测站点,但监测数据类型尚不统一,且多集中于中东部地区,青藏高原地区的监测系统有待完善,缺乏大范围长期动态连续的资料,不利于整体氮沉降估算与预测。

3. 氮沉降对高寒草甸土壤特性的影响

3.1. 氮沉降对土壤 pH 的影响

pH 值大小是土壤酸碱程度的表征,在土壤肥力形成和质量演变的过程中起重要作用。相关研究表明,氮沉降浓度过高会引起土壤 pH 值降低,土壤质量下降,对物种多样性和生态系统功能产生影响[18][19]。虽然氮沉降会导致土壤酸化,但实验时间与氮添加浓度不同,酸化程度则会产生一定差异。黄瑞玲等[20]在青海湖高寒草原 1 年的氮添加实验发现,氮添加处理下土壤 pH 下降不明显,而刘永万[21]等研究发现,在氮添加处理 3 年后,低氮($5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)与高氮($10 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)处理均造成土壤 pH 显著下降。Fu 等[22]研究表明,氮添加对 pH 的影响与处理时间呈正相关关系,且氮添加诱导的土壤酸化幅度随着氮添加速率的增加而增大。可能是当土壤受到氮限制时,植物能够有效固定外源氮,短时间进入土壤系统的铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转移到地上植物氮库,抵消氮沉降的酸化效应[23]。随着实验时间延长,植物吸收 NH_4^+ 的数量逐渐增多,此时植物体内阴离子和阳离子平衡被破坏,植物为保证细胞正常生长和体内电荷平衡,根系会分泌出 H^+ ,导致根际附近 pH 下降明显[24]。此外,随着氮添加浓度的升高,土壤中 NH_4^+ 增多,取代土壤胶体表面 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基阳离子,土壤缓冲能力减弱, Mn^{2+} 、 Al^{3+} 等酸基离子含量升高,造成土壤酸化明显[25]。土壤初始 pH 值、土壤养分含量、降水、温度等环境因素均影响土壤 pH 值对氮添加的响应,需根据研究区实际情况具体分析。

3.2. 氮沉降对土壤氮含量的影响

土壤全氮是供氮潜力的表征,含量受温度、降水、土壤特性、利用方式以及人类活动等方面的影响。众多研究表明,在氮限制区域土壤全氮含量随施氮浓度增加和时间延长,表现为先增加后减少或无显著变化[26]-[28]。目前,全氮含量降低时的施氮浓度尚不明确。何永贵[29]在玛曲县的实验发现,当氮添加浓度为 $60 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时,土壤氮含量开始呈现下滑趋势。Yang 等[30]在红原县 3 年的氮添加实验表明,土壤氮含量开始下降时的施氮浓度为 $40 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。在未达到氮饱和阈值时,氮添加促进植物生长,凋落物的输入量增多,通过微生物的活动,凋落物中的氮分解转化归还于土壤,促进土壤氮积累[31]。当施氮浓度过高时,土壤易发生酸化,植物生长和微生物活性受到抑制,凋落物输入量和转化速率降低,氮素的积累也会导致反硝化作用增加,造成土壤氮的流失[32]。

土壤无机氮能被植物直接吸收利用,其含量的多少是影响土壤质量和植物生产力的重要因子。多数研究发现,添加下土壤无机氮含量变化趋势稍滞后于全氮,各组分在不同土层中变化情况较复杂[33][34]。Han 等[27]研究发现,氮添加减少了深层(10~20 cm)土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量。主要因为当地植物根系主要分布在深层,植物在施肥的作用下生长加快,消耗了土壤中的无机氮和添加的氮素,导致含量降低。Li 等[35]研究表明,氮和生物碳的联合施用,提高了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量,但随施用时间的增加,0~20 cm 土层中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 增加, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 降低。这种变化原因可能是,适量氮输入导致反硝化细菌数量增加、活性增强,促使土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 还原为 N_2O 或 N_2 重新返回大气,加剧土壤无机氮含量的流失。综上所述(表 2),土壤全氮和无机氮变化趋势复杂多样,不同实验地点、时间和氮源所造成的结果存在较大差异,即使同一研究区,实验时间不同,最适土壤氮积累的施氮浓度也有一定差别。

Table 2. Nitrogen application concentration when total nitrogen and inorganic nitrogen reached the maximum under each experimental condition**表 2.** 各实验条件下土壤全氮和无机氮达到最大值时施氮浓度

地点	实验时间	氮源	全氮	铵态氮	硝态氮	参考文献
海晏县	2	硝酸铵	32 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	40 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	32 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	[27]
玛曲县	10	磷酸氢二铵	60 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	120 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	120 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	[29]
红原县	3	氯化铵	40 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	40 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	80 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	[30]
贵南县	2	尿素	15 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	15 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	10 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	[35]
红原县	6	硝酸铵	4 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	32 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	32 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	[43]

3.3. 氮沉降对土壤碳含量的影响

土壤有机碳(soil organic carbon)作为土壤中较活跃的部分,是反映土壤碳库变化的重要指标,深刻影响土壤生产力及全球碳循环。大气氮沉降对土壤有机碳含量变化的研究结论存在较大差异。郭洁芸等[36],对中国陆地生态系统的整合分析表明,氮添加总体上促进了土壤有机碳的积累。也有研究发现,氮添加略微提高了表层(0~20 cm)有机碳含量,但影响并不显著[37]。Fang 等[38]在北海高寒草甸 5 年添加实验同样发现,低氮(10 kg N·ha⁻²·yr⁻¹)添加促使表层(0~10 cm)土壤可溶性有机碳含量提升了 23.5%~35.1%,而亚表层土壤可溶性有机碳显著降低了 10.4%~23.8%。氮添加促进表层土壤有机碳积累的原因可能是,氮素促进植物生长和凋落物积累,增加有机质的输入量[39],抑制土壤微生物和酶活性,降低土壤有机质矿化速度,促进有机碳积累[40]。此外,也有研究发现,氮添加下草地生态系统土壤有机碳库的变化不显著[41] [42],主要是由于氮添加时间较短。杨家明等[43]在红原县高寒草甸连续 6 年以硝酸铵(NH₄N₃)为氮源的添加实验表明,与对照相比有机碳下降了 6%,可能由于长时间、高浓度的氮输入会加速有机质矿化,影响土壤团聚体结构,从而降低团聚体中有机碳的含量。土壤有机碳库储量巨大且其碳循环与周转过程对氮沉降的响应机制复杂,过程缓慢。氮肥添加浓度、种类以及输入时间的变化都可能对最终的结果产生影响。

3.4. 氮沉降对土壤磷含量的影响

土壤是磷元素重要的存储空间,大多数磷以有机态的形式存在,难以被植物吸收。因此,土壤有效磷的含量成为制约植物生长发育的重要因子。有研究以尿素(CO(NH₂)₂)为氮源设置不同添加梯度发现,土壤有机磷含量随氮添加显著降低,而有效磷含量呈现上升趋势[44],而 Cao 等[45]在天祝县高寒草甸同样以 CO(NH₂)₂ 为氮源 2 年的研究发现,土壤中全磷和有效磷含量均降低。以硝酸铵(NH₄NO₃)为氮源的实验也发现了类似的结果,并且有效磷在湿润年份增加更显著[46]。Cui 等[47]指出,氮添加会促进植物对磷的吸收,植物通过分泌磷酸酶和有机酸,促进有机磷的矿化,从而提高磷的有效性,过度氮添加导致植物生长养分失衡,对磷元素的需求加剧,刺激磷酸酶大量分泌,促使土壤中其他稳定形态磷向有效磷转化,加快土壤磷的消耗与流失[48]。有研究发现,全磷,有效磷含量不能很好地解释土壤磷的供应潜力与流失情况[49]。因此,更多研究者依据中性和石灰性土壤中的无机磷分级体系(磷酸铁盐(Fe-P)、磷酸铝盐(Al-P)、闭蓄态磷(O-P)、磷酸二钙(Ca-P)、磷酸八钙(Cas-P)和磷灰石(Ca-P) [50],探究氮添加下各形态无机磷含量变化情况,以求深入反映土壤的供磷潜力。

4. 氮沉降对高寒植物群落的影响

4.1. 氮沉降对高寒草甸物种多样性的影响

物种多样性能够反映出群落的物种组成和功能特性,是维持草甸生态系统可持续发展和生产力提升的关键要素。氮沉降速率增加的情况下,群落物种多样性的变化趋势与内在驱动机制,一直是学者重点关注的问题。多数研究表明,氮添加会导致植物群落多样性丧失以及群落组成改变[51]-[53]。此外,生境条件和土壤养分等要素差异,是氮添加下植物群落多样性动态变化的物质前提。Li 等[54]在海晏县高寒草甸 2 年氮添加实验发现,添加氮使植物物种丰富度降低了 11.2%,且高寒草甸植物群落多样性对土壤性质变化的敏感性要高于高山草原。宗宁[55]等在当雄县不同退化程度高寒草甸的研究表明,高氮处理($100 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$),降低了轻度退化草甸物种多样性,而对重度退化草地多样性无显著影响。造成上述结果的原因可能是,重度退化草甸,氮素添加满足植物生长需求,植株之间对光资源的获取较为一致,因此,物种多样性没有发生显著变化。而郑华平等[56]发现,施加氮肥可显著增加沙化草地 Simpson 指数、Shannon 指数,可能是由于高寒沙化草地土壤有机质含量低,施肥有利于有机质增加,土壤向良性循环方向发展,从而导致群落多样性增加。有研究指出,氮添加导致土壤中速效氮含量增加,物种间由地下对养分的竞争转移到地上对光资源的竞争。群落中氮素利用率较高的植物快速生长,另一些长势较矮的物种处于群落的低层,对光资源的获取能力较弱,长期作用下便会导致植物多样性的减少[57] [58]。Humbert 等[59]研究表明,氮肥的施入,促使植物盖度和凋落物的数量增加,地面水分蒸发减少,土壤温度降低,影响种子的萌发率和新生苗的存活率,也会引起植物群落多样性降低。另外,氮添加过量会引起土壤酸化,也会导致处于竞争劣势的植物减少。群落多样性的变化,不仅与群落物种特性有关,也与施肥时间、浓度、类型有一定联系。因此,需要依据样地实际情况开展长期施肥实验,才能客观预测群落的动态变化。

4.2. 氮沉降对高寒草甸生产力的影响

植物群落生产力是植物通过光合作用将二氧化碳和水转化为有机物,保存在有机体内,体现植物生长状况。目前,研究者以植物群落地上生物量作为衡量植物群落生产力的标准,通过氮添加实验模拟氮沉降对高寒草甸生产力的影响。多数研究表明,氮添加促使植物群落地上生物量提升[60]-[62]。杨晓霞等[63]研究发现,施氮浓度为 $10 \text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 时,植物群落地上生物量可提升 24%。向雪梅等[64]在称多县高寒草甸的研究表明,氮添加量为 $45 \text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 时植物地上部生物量显著增加了 92.50%,但总生物量却在 $15 \text{ g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 时达到最大值。韩其飞等[65]研究发现,以无水氨为氮源,当施肥量为 $60 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 时,高寒草甸生态系统净初级生产力达到最大值。Yu 等[66]认为,氮添加提高了土壤养分供给的质量,满足植物的生长需求,促进植物细根的生长和养分积累,从而提升了草地的生产力。Xu 等[67]提出,氮素是结构蛋白和酶蛋白合成的重要元素,合理施加氮肥有利于植物组织生成和叶片生长,促进植物生产力提升。

气候条件与植物群落生产力具有一定相关性。Shen 等在[68]在海晏县高寒草甸的研究表明,氮沉降对植物生产力的影响在降水最多的年份最大,2015~2017 年当地平均降雨量呈增加趋势,植物群落地上生物量也显著增加。Souther 等[69]同样发现,氮添加对干旱年地上净初级生产力无显著影响,多雨年的净初级生产力增加。主要是因为生产力的提高增加了蒸腾作用,潜在地加剧了水资源短缺,而降雨量增多则会抵消水资源的制约[70]。试验持续时间同样会影响地上净初级生产力对氮添加的响应。Zong 等[16]在那曲县高寒草甸为期 4 年的氮添加发现,实验第 2~4 年, $10 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ 以上均可提升植物群落地上生物量,但第 4 年高氮处理($80 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$)处理下,地上生物量则呈下降趋势。Han 等[71]同样在

那曲 4 年的氮添加发现, 在实验前 4 年, 7、20、40 kg N·ha⁻²·yr⁻¹ 均可提升植物群落地上生物量, 但到第 5 年任何处理下, 地上生物量均呈下降趋势。综上所述(表 3), 草地生态系统地上生产力对氮添加的响应受氮添加浓度时间、生态系统类型、气候条件、土壤环境等多种因素影响, 需要综合考虑上述因素, 才能科学解释氮添加对草地生态系统的影响[72]。

Table 3. Maximum nitrogen application concentration for plant community productivity under each experimental condition
表 3. 各实验条件下植物群落生产力最大值施氮浓度

地点	实验时间	氮源	施氮浓度	参考文献
海晏县	4	硝酸铵	8 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	60
海北州	4	尿素	10 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	63
称多县	1	尿素	15 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	64
天山北坡	2	无水氨	60 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	65
海晏县	3	硝酸铵	72 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	68
那曲县	5	硝酸铵	40 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	71
当雄县	4	硝酸铵	40 kg N·ha ⁻² ·yr ⁻¹	16
那曲	4	—	5 g N·m ⁻² ·yr ⁻¹	72

4.3. 物种多样性与生产力关系

植物多样性是陆地生态系统生产力维持的基础, 而生产力是陆地生态系统结构和功能的综合体现。阐明物种多样性与生产力之间的关系, 有利于草地群落多样性的维持及科学评价生态系统的功能。国内外研究者对此开展了一系列的研究工作, 由于氮添加下植物生产力与群落物种多样性变化趋势的不同步性, 导致二者呈现出复杂的变化关系。王长庭等[73]在海北高寒草甸的研究表明, 矮生嵩草(*Kobresia humilis*)草甸, 小嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸和金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛群落, 物种多样性与生产力的关系呈线性增加关系。李晓刚等[74]同样在海北高寒草甸的研究表明, 在刈割和施肥处理时, 物种多样性与初级生产力不相关; 而不刈割施肥时, 物种多样性和生产力表现为负相关, 可能与施肥后少数竞争优势物种对群落初级生产力的贡献较大有关。曹丰丰等[75]在亚高山草地的研究支持二者呈现负相关关系。综上所述, 氮沉降对植物群落与生产力关系的影响尚存争议, 主要与研究区域物种组成、土壤性质以及外界干扰程度有关。此外, 生产力与多样性出现各种关系可能是由于草地的生态因子对生产力和多样性关系的影响很复杂, 致使物种多样性和生产力的关系出现多种模式。因此, 需要根据研究区域实际情况, 具体分析各物种生产力与多样性的变化趋势, 才能更深入地了解二者之间的关系。

5. 氮沉降与多因子交互作用对高寒草甸的影响

5.1. 氮沉降梯度的阶段性响应

高寒草甸生态系统对氮沉降的响应并非线性, 而是存在明显的阶段性和阈值效应。如图 1 所示, 氮沉降水平大致可划分为三个关键阶段。在低氮输入阶段(<10 kg N·ha⁻²·yr⁻¹), 氮素为主要限制因子, 适量氮添加可缓解植物氮限制, 促进生长与凋落物输入, 有利于土壤有机碳积累, 并适度提升群落生产力与

多样性, 此时土壤 pH 下降不明显, 系统缓冲能力较强。中度氮输入阶段(>40 kg N·ha⁻²·yr⁻¹), 生态系统趋于氮饱和, 土壤 pH 因硝化作用与盐基离子淋失显著下降, 全氮含量先增后减, 有效磷因生物活化呈现先升后降; 植物竞争由地下养分转向地上光资源, 优势种(如禾草)扩张导致多样性持续下降, 生产力增长趋缓。高氮输入阶段(>40 kg N·ha⁻²·yr⁻¹)超出系统饱和阈值, 土壤酸化加剧并引发铝、锰等离子毒性, 微生物活性受抑, 养分失衡(如 N:P 比失调)与有机质加速矿化共同导致多样性显著丧失、群落结构简化, 最终引起生态系统功能退化。

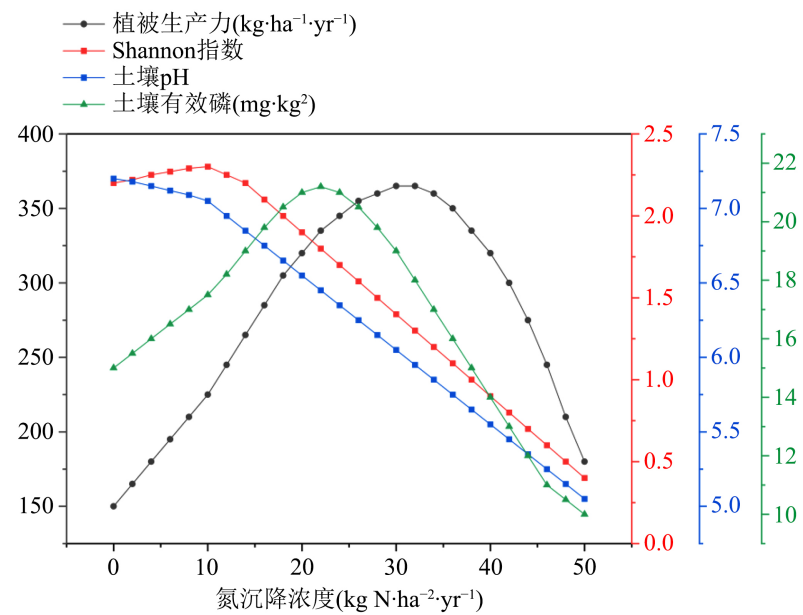


Figure 1. Responses of the alpine meadow ecosystem to a nitrogen deposition gradient
图 1. 高寒草甸生态系统对氮沉降梯度的响应

5.2. 氮沉降与气候变暖的交互作用

氮沉降与气候变暖作为当前全球变化的重要驱动因子, 通过交互作用共同影响陆地生态系统的结构与功能。温度升高直接影响植物生理过程并改变土壤水分状况, 进而调节生物量分配与群落特征; 同时, 增温通过改变土壤温度、微生物活性与物候进程, 调制系统对氮沉降的响应。在青藏高原高寒草甸生态系统中, 增温与氮沉降多表现为协同促进植物生产力。例如, 葛怡情等发现, 增温与氮添加共同处理下群落总生物量显著提高, 但 Simpson 指数与莎草科物种丰富度降低[76]; 向雪梅等指出, 短期增温及氮沉降通过改变土壤性质与酶化学计量影响植物养分获取能力[77]; Xiang 等研究同样发现, 增温与氮添加复合处理对植物地上生物量的促进效应显著高于单一因子, 而 Shannon-Wiener 指数则呈现先升高后降低的趋势[78]。其原因在于增温延长生长季并提高氮素利用效率, 从而放大氮沉降的施肥效应。然而, 该协同效应可能伴随物种多样性的加速丧失, 因为增温促进竞争优势种生长, 与氮沉降叠加会加剧光资源竞争, 导致多样性更快下降[79]。此外, 增温促进土壤有机质矿化, 与氮沉降共同作用可能在短期内提升有效氮供给, 长期则可能引起土壤碳库过度消耗。气候变暖与氮沉降等多重因子的互作可能在生态系统内引发复杂反馈, 影响植物生长、土壤质量及生态功能的长期动态。

5.3. 氮沉降与降水变化的交互作用

氮沉降与降水变化通过水分有效性调控氮素迁移、转化与植物利用效率, 其交互效应在高寒草甸中

尤为显著。研究表明,氮沉降及水氮交互对生产力具有促进作用但存在年际波动,如许庆民等发现氮沉降与增水在处理当年显著提高生物量,而第二年增产效果减弱,增水贡献尤为有限[80],水分改善可能缓解植物水分胁迫并提升氮素利用效率,形成协同促进。然而过度增水会降低土壤氧分压、加剧养分淋溶,从而抑制生产力,周廷等报道氮水交互处理导致地下净初级生产力、根系周转率和生态系统净初级生产力分别下降 26.1%、21.3%和 17.3% [81]。高氮条件下增水可能强化淋溶,加剧氮流失与酸化,引致植物功能群响应分化,Li 等指出在 $5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 氮添加配合增水条件下禾本科生物量显著增加而杂类草降低,当氮添加量升至 $10 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时,豆科生物量显著减少而莎草科生物量增加[82]。氮沉降与降水变化的交互效应依氮水平、水分梯度及时间动态呈现促进或抑制的双重影响,深入调控高寒草甸系统结构与功能演变。

5.4. 氮沉降与放牧管理的交互作用

放牧作为高寒草甸主要人为干扰方式,通过采食、践踏与粪便归还途径影响生态系统结构功能,其与氮沉降的交互作用显著影响系统响应。适度放牧有助于维持草原生产力、群落稳定性和物种多样性,而过度放牧则导致多样性下降[83]。研究表明,低水平氮沉降与适度放牧可能产生促进作用,有利于群落稳定。如邓彤彤等发现中牧条件下地上生物量略增,物种丰富度、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数及 Pielou 均匀度指数均达最大值,重牧则多样性最低[84]。放牧采食可抑制氮沉降助长的优势种扩张,为矮小物种保留生态位,缓解多样性丧失,同时粪便归还有助于调节氮添加下的养分循环[85]。然而,过度放牧与高氮沉降易产生负效应,过度放牧导致植被破坏与土壤退化,高氮沉降则加剧土壤酸化和养分失衡,共同导致草甸发生不可逆退化[86]。张正义等指出,重牧显著抑制植物生长发育,降低群落高度与盖度,其中禾本科牧草生物量减少最为明显[87]。因此,实施围封休牧、划区轮牧等合理放牧措施,是缓解氮沉降负面效应、实现高寒草甸可持续利用的关键途径。

6. 不足与展望

全球变化背景下,青藏高原的大气氮沉降速率逐渐增加,氮添加作为模拟氮沉降的重要手段,在高寒生态系统的研究逐渐推广。本文考虑了氮沉降对高寒草甸植物群落的影响,但碳和磷元素在植物生长发育过程中的作用也不容忽视,应综合分析三者耦合作用对高寒草甸的影响。目前氮添加实验的周期相对较短,高寒草甸植物群落生产力、物种丰富度及土壤养分对氮添加响应不够充分,影响研究结果的客观性。

为深入揭示高寒生态系统变化的机理,应加强青藏高原的长期、系统的实验研究,以期能真实反映外界干扰下(氮沉降、气候变暖、放牧等)高寒生态系统的演变规律,降低研究结果的不确定性。同时,需开展大区域尺度的模拟控制实验,通过对比不同类型草地对氮沉降的响应,明确其氮饱和阈值,系统评估氮沉降对草地结构与功能的影响,为气候变化背景下草地生态系统的适应性管理提供依据。随着研究方法与技术进步的,应加强氮沉降对地下生态过程的研究,深入解析土壤-微生物-植物系统的互馈机制。此外,需融合遥感监测、模型模拟与地面观测数据,构建氮沉降生态效应的多尺度评估与预测平台,为高寒草甸生态安全与可持续管理提供科技支撑。

参考文献

- [1] Zhao, Z., Dong, S., Jiang, X., Liu, S., Ji, H., Li, Y., *et al.* (2017) Effects of Warming and Nitrogen Deposition on CH_4 , CO_2 and N_2O Emissions in Alpine Grassland Ecosystems of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 592, 565-572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.082>
- [2] 张锬锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002(1): 1-8.

- [3] 吴玉凤, 高霄鹏, 桂东伟, 等. 大气氮沉降监测方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3605-3614.
- [4] Levy II, H. and Moxim, W.J. (1987) Fate of US and Canadian Combustion Nitrogen Emissions. *Nature*, **328**, 414-416. <https://doi.org/10.1038/328414a0>
- [5] Paulot, F., Jacob, D.J. and Henze, D.K. (2013) Sources and Processes Contributing to Nitrogen Deposition: An Adjoint Model Analysis Applied to Biodiversity Hotspots Worldwide. *Environmental Science & Technology*, **47**, 3226-3233. <https://doi.org/10.1021/es3027727>
- [6] Jia, Y., Yu, G., He, N., Zhan, X., Fang, H., Sheng, W., *et al.* (2014) Spatial and Decadal Variations in Inorganic Nitrogen Wet Deposition in China Induced by Human Activity. *Scientific Reports*, **4**, Article No. 3763. <https://doi.org/10.1038/srep03763>
- [7] Lu, C., Tian, H., Liu, M., Ren, W., Xu, X., Chen, G., *et al.* (2012) Effect of Nitrogen Deposition on China's Terrestrial Carbon Uptake in the Context of Multifactor Environmental Changes. *Ecological Applications*, **22**, 53-75. <https://doi.org/10.1890/10-1685.1>
- [8] 顾峰雪, 黄玫, 张远东, 等. 1961-2010 年中国区域氮沉降时空格局模拟研究[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3591-3600.
- [9] Lü, C. and Tian, H. (2007) Spatial and Temporal Patterns of Nitrogen Deposition in China: Synthesis of Observational Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **112**, D22S05. <https://doi.org/10.1029/2006jd007990>
- [10] 贾钧彦, 张颖, 蔡晓布, 等. 藏东南大气氮湿沉降动态变化——以林芝观测点为例[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1907-1913.
- [11] 祝景彬, 李红琴, 贺慧丹, 等. 祁连山海北高寒草甸生态系统大气氮湿沉降动态变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 127-132.
- [12] Baijuan, Z., Zongxing, L., Qi, F., Juan, G., Yue, Z. and Baiting, Z. (2022) Environmental Significance of Atmospheric Nitrogen Deposition in the Transition Zone between the Tibetan Plateau and Arid Region. *Chemosphere*, **307**, Article ID: 136096. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136096>
- [13] 韩琳, 王鸽. 氮沉降增加对青藏高原林地氮淋溶通量的影响[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(3): 86-93.
- [14] 许稳, 金鑫, 罗少辉, 等. 西宁近郊大气氮干湿沉降研究[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1279-1288.
- [15] Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., *et al.* (2004) Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, **70**, 153-226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>
- [16] Zong, N., Shi, P., Song, M., Zhang, X., Jiang, J. and Chai, X. (2015) Nitrogen Critical Loads for an Alpine Meadow Ecosystem on the Tibetan Plateau. *Environmental Management*, **57**, 531-542. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0626-6>
- [17] 赵越, 李宗省, 李中平, 等. 长江源区大气氮湿沉降时空变化特征[J]. 地球科学, 2023, 48(3): 1179-1194.
- [18] Lu, X., Gilliam, F.S., Guo, J., Hou, E. and Kuang, Y. (2021) Decrease in Soil Ph Has Greater Effects than Increase in Above-ground Carbon Inputs on Soil Organic Carbon in Terrestrial Ecosystems of China under Nitrogen Enrichment. *Journal of Applied Ecology*, **59**, 768-778. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14091>
- [19] 陈继辉, 李炎朋, 熊雪, 等. 氮磷添加对草地土壤酸度和化学计量学特征的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(5): 943-949.
- [20] 黄瑞灵, 王西文, 马国虎, 等. 模拟氮沉降对高寒湿地土壤理化性质和酶活性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(6): 1343-1349.
- [21] 刘永万, 白炜, 尹鹏松, 等. 外源氮素添加对长江源区高寒沼泽草甸土壤养分及植物群落生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 483-491.
- [22] Fu, G. and Shen, Z. (2017) Response of Alpine Soils to Nitrogen Addition on the Tibetan Plateau: A Meta-Analysis. *Applied Soil Ecology*, **114**, 99-104. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.008>
- [23] Huang, J., Xu, Y., Yu, H., Zhu, W., Wang, P., Wang, B., *et al.* (2020) Soil Prokaryotic Community Shows No Response to 2 Years of Simulated Nitrogen Deposition in an Arid Ecosystem in Northwestern China. *Environmental Microbiology*, **23**, 1222-1237. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15364>
- [24] Guo, J.H., Liu, X.J., Zhang, Y., Shen, J.L., Han, W.X., Zhang, W.F., *et al.* (2010) Significant Acidification in Major Chinese Croplands. *Science*, **327**, 1008-1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
- [25] Wang, R., Dungait, J.A.J., Buss, H.L., Yang, S., Zhang, Y., Xu, Z., *et al.* (2017) Base Cations and Micronutrients in Soil Aggregates as Affected by Enhanced Nitrogen and Water Inputs in a Semi-Arid Steppe Grassland. *Science of the Total Environment*, **575**, 564-572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.018>
- [26] 郭剑波, 赵国强, 贾书刚, 等. 施肥对高寒草原草地质量指数及土壤性质影响的综合评价[J]. 草业学报, 2020, 29(9): 85-93.

- [27] Han, Y., Dong, S., Zhao, Z., Sha, W., Li, S., Shen, H., *et al.* (2019) Response of Soil Nutrients and Stoichiometry to Elevated Nitrogen Deposition in Alpine Grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Geoderma*, **343**, 263-268. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.050>
- [28] Silver, W.L., Thompson, A.W., Reich, A., Ewel, J.J. and Firestone, M.K. (2005) Nitrogen Cycling in Tropical Plantation Forests: Potential Controls on Nitrogen Retention. *Ecological Applications*, **15**, 1604-1614. <https://doi.org/10.1890/04-1322>
- [29] 何贵永. 青藏高原东缘不同施肥量及放牧模式对土壤理化性质的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [30] Yang, Z., Zhan, W., Jiang, L. and Chen, H. (2021) Effect of Short-Term Low-Nitrogen Addition on Carbon, Nitrogen and Phosphorus of Vegetation-Soil in Alpine Meadow. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article 10998. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010998>
- [31] Zhang, Z., Jiao, Y., Zhang, S. and Tang, J. (2024) Litter Application Increases Soil Multinutrient Cycling in Alpine Meadow Ecosystems on the Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, **202**, Article ID: 105566. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105566>
- [32] Liu, X. and Zhang, S. (2019) Nitrogen Addition Shapes Soil Enzyme Activity Patterns by Changing Ph Rather than the Composition of the Plant and Microbial Communities in an Alpine Meadow Soil. *Plant and Soil*, **440**, 11-24. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04054-5>
- [33] Mi, W., Luo, F., Liu, W., Qin, Y., Zhang, Y., Liu, K., *et al.* (2024) Nitrogen Addition Enhances Seed Yield by Improving Soil Enzyme Activity and Nutrients. *PeerJ*, **12**, e16791. <https://doi.org/10.7717/peerj.16791>
- [34] Simpson, A.C., Zabowski, D., Rochefort, R.M. and Edmonds, R.L. (2019) Increased Microbial Uptake and Plant Nitrogen Availability in Response to Simulated Nitrogen Deposition in Alpine Meadows. *Geoderma*, **336**, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.029>
- [35] Li, J., Shao, X., Huang, D., Shang, J., Liu, K., Zhang, Q., *et al.* (2020) The Addition of Organic Carbon and Nitrogen Accelerates the Restoration of Soil System of Degraded Alpine Grassland in Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, **158**, Article ID: 106084. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106084>
- [36] 郭洁芸, 王雅歆, 李建龙. 氮添加对中国陆地生态系统植物-土壤碳动态的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4823-4833.
- [37] Chen, J., Xiao, W., Zheng, C. and Zhu, B. (2020) Nitrogen Addition Has Contrasting Effects on Particulate and Mineral-Associated Soil Organic Carbon in a Subtropical Forest. *Soil Biology and Biochemistry*, **142**, Article ID: 107708. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107708>
- [38] Fang, H., Cheng, S., Yu, G., Xu, M., Wang, Y., Li, L., *et al.* (2014) Experimental Nitrogen Deposition Alters the Quantity and Quality of Soil Dissolved Organic Carbon in an Alpine Meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Applied Soil Ecology*, **81**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.04.007>
- [39] Pregitzer, K.S., Burton, A.J., Zak, D.R. and Talhelm, A.F. (2007) Simulated Chronic Nitrogen Deposition Increases Carbon Storage in Northern Temperate Forests. *Global Change Biology*, **14**, 142-153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01465.x>
- [40] Berg, B. and Matzner, E. (1997) Effect of N Deposition on Decomposition of Plant Litter and Soil Organic Matter in Forest Systems. *Environmental Reviews*, **5**, 1-25. <https://doi.org/10.1139/a96-017>
- [41] 祁瑜, Mulder, J., 段雷, 等. 模拟氮沉降对克氏针茅草原土壤有机碳的短期影响[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1104-1113.
- [42] Silveira, M.L., Liu, K., Sollenberger, L.E., Follett, R.F. and Vendramini, J.M.B. (2013) Short-term Effects of Grazing Intensity and Nitrogen Fertilization on Soil Organic Carbon Pools under Perennial Grass Pastures in the Southeastern Usa. *Soil Biology and Biochemistry*, **58**, 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.003>
- [43] 杨家明, 胡健, 潘军晓, 等. 氮添加对高寒草甸土壤团聚体分布及其碳氮含量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(12): 102-110.
- [44] Fang, Y., Zhu, W., Gundersen, P., Mo, J., Zhou, G. and Yoh, M. (2008) Large Loss of Dissolved Organic Nitrogen from Nitrogen-Saturated Forests in Subtropical China. *Ecosystems*, **12**, 33-45. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9203-7>
- [45] Cao, W.X., Li, W., Li, X.L., *et al.* (2015) Effects of Nitrogen Fertilization on Plant Community Structure and Soilnutrient in Alpine Meadow-Steppe. *Journal of Desert Research*, **35**, 658-666.
- [46] Ren, H., Kang, J., Yuan, Z., Xu, Z. and Han, G. (2018) Responses of Nutrient Resorption to Warming and Nitrogen Fertilization in Contrasting Wet and Dry Years in a Desert Grassland. *Plant and Soil*, **432**, 65-73. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3775-6>
- [47] Cui, H., Sun, W., Delgado-Baquerizo, M., Song, W., Ma, J., Wang, K., *et al.* (2021) Cascading Effects of N Fertilization Activate Biologically Driven Mechanisms Promoting P Availability in a Semi-Arid Grassland Ecosystem. *Functional Ecology*, **35**, 1001-1011. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13773>

- [48] 韩冰, 耿依仪, 邓艳芳, 等. 氮添加对青藏高原高寒草甸土壤磷组分的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2721-2728.
- [49] 胡洋, 丛孟菲, 陈末, 等. 氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤无机磷形态的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 252-258.
- [50] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990(2): 101-102, 110.
- [51] 陈丽, 田新民, 任正炜, 等. 养分添加对天山高寒草地植物多样性和地上生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3): 280-289.
- [52] 秦瑞敏, 程思佳, 马丽, 等. 围封和施肥对高寒草甸群落特征和植被碳氮库的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(4): 1-11.
- [53] Yang, H., Jiang, L., Li, L., Li, A., Wu, M. and Wan, S. (2012) Diversity-Dependent Stability under Mowing and Nutrient Addition: Evidence from a 7-Year Grassland Experiment. *Ecology Letters*, **15**, 619-626. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01778.x>
- [54] Li, S., Dong, S., Shen, H., Han, Y., Zhang, J., Xu, Y., *et al.* (2019) Different Responses of Multifaceted Plant Diversities of Alpine Meadow and Alpine Steppe to Nitrogen Addition Gradients on Qinghai-Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, **688**, 1405-1412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.211>
- [55] 宗宁, 石培礼, 牛犇, 等. 氮磷施肥对藏北退化高寒草甸群落结构和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3458-3468.
- [56] 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 等. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J]. 草业学报, 2007(5): 34-39.
- [57] 周娟娟, 刘云飞, 王敬龙, 等. 短期养分添加对西藏沼泽化高寒草甸地上生物量、植物多样性和功能性状的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(11): 17-29.
- [58] Hautier, Y., Niklaus, P.A. and Hector, A. (2009) Competition for Light Causes Plant Biodiversity Loss after Eutrophication. *Science*, **324**, 636-638. <https://doi.org/10.1126/science.1169640>
- [59] Humbert, J., Dwyer, J.M., Andrey, A. and Arlettaz, R. (2015) Impacts of Nitrogen Addition on Plant Biodiversity in Mountain Grasslands Depend on Dose, Application Duration and Climate: A Systematic Review. *Global Change Biology*, **22**, 110-120. <https://doi.org/10.1111/gcb.12986>
- [60] Shen, H., Dong, S., Li, S., Xiao, J., Han, Y., Yang, M., *et al.* (2019) Effects of Simulated N Deposition on Photosynthesis and Productivity of Key Plants from Different Functional Groups of Alpine Meadow on Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Pollution*, **251**, 731-737. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.045>
- [61] 石正海, 刘文辉, 张永超, 等. 季节性氮磷施肥提升环湖寒生羊茅生产性能[J]. 草业学报, 2024, 33(1): 149-158.
- [62] Phoenix, G.K., Booth, R.E., Leake, J.R., Read, D.J., Grime, J.P. and Lee, J.A. (2003) Effects of Enhanced Nitrogen Deposition and Phosphorus Limitation on Nitrogen Budgets of Semi-Natural Grasslands. *Global Change Biology*, **9**, 1309-1321. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00660.x>
- [63] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 159-166.
- [64] 向雪梅, 德科加, 张琳, 等. 氮素添加下短期内高寒草甸生物量与养分间的关系[J]. 中国草地学报, 2023, 45(1): 53-61.
- [65] 韩其飞, 尹龙, 李超凡, 等. 天山北坡典型草地施肥阈值及不确定性分析[J]. 草业学报, 2024, 33(1): 19-32.
- [66] Yu, L., Song, X., Zhao, J., Wang, H., Bai, L. and Yang, D. (2015) Responses of Plant Diversity and Primary Productivity to Nutrient Addition in a *Stipa Baicalensis* Grassland, China. *Journal of Integrative Agriculture*, **14**, 2099-2108. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(14\)61001-7](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(14)61001-7)
- [67] Xu, Z., Li, M., Zimmermann, N.E., Li, S., Li, H., Ren, H., *et al.* (2018) Plant Functional Diversity Modulates Global Environmental Change Effects on Grassland Productivity. *Journal of Ecology*, **106**, 1941-1951. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12951>
- [68] Shen, H., Dong, S., DiTommaso, A., Xiao, J., Lu, W. and Zhi, Y. (2022) Nitrogen Deposition Shifts Grassland Communities through Directly Increasing Dominance of Graminoids: A 3-Year Case Study from the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Plant Science*, **13**, Article 811970. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.811970>
- [69] Souther, S., Loeser, M., Crews, T.E. and Sisk, T. (2020) Drought Exacerbates Negative Consequences of High-intensity Cattle Grazing in a Semiarid Grassland. *Ecological Applications*, **30**, Article ID: 02048. <https://doi.org/10.1002/eap.2048>
- [70] Harpole, W.S., Potts, D.L. and Suding, K.N. (2007) Ecosystem Responses to Water and Nitrogen Amendment in a California Grassland. *Global Change Biology*, **13**, 2341-2348. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01447.x>

- [71] Han, L., Ganjurjav, H., Hu, G., Wu, J., Yan, Y., Danjiu, L., *et al.* (2022) Nitrogen Addition Affects Ecosystem Carbon Exchange by Regulating Plant Community Assembly and Altering Soil Properties in an Alpine Meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Plant Science*, **13**, Article 900722. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.900722>
- [72] Shen, R., Zhang, Y., Zhu, J., Chen, N., Chen, Y., Zhao, G., *et al.* (2021) The Interactive Effects of Nitrogen Addition and Increased Precipitation on Gross Ecosystem Productivity in an Alpine Meadow. *Journal of Plant Ecology*, **15**, 168-179. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtab081>
- [73] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 等. 高寒草甸不同草地群落物种多样性与生产力关系研究[J]. 生态学杂志, 2005(5): 483-487.
- [74] 李晓刚, 朱志红, 周晓松, 等. 刈割、施肥和浇水对高寒草甸物种多样性、功能多样性与初级生产力关系的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(11): 11362-1147.
- [75] 曹丰丰, 刘瑞雪, 黄国柱, 等. 短期氮添加对祁连山亚高山草地生产力及植物多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5034-5044.
- [76] 葛怡情, 王学霞, 闫玉龙, 等. 增温和增氮及其交互作用对藏北高寒草甸植物群落结构与物种多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2185-2191.
- [77] 向雪梅, 德科加, 张琳, 等. 增温及氮沉降对青藏高原高寒草甸植物-土壤-酶生态化学计量特征的影响[J]. 中国草地学报, 2025, 47(5): 21-33.
- [78] Xiang, X., De, K., Lin, W., Feng, T., Li, F. and Wei, X. (2025) Effects of Warming and Nitrogen Deposition on Species and Functional Diversity of Plant Communities in the Alpine Meadow of Qinghai-Tibet Plateau. *PLOS ONE*, **20**, e0319581. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319581>
- [79] Kwaku, E.A., Dong, S., Shen, H., Li, W., Sha, W., Su, X., *et al.* (2021) Biomass and Species Diversity of Different Alpine Plant Communities Respond Differently to Nitrogen Deposition and Experimental Warming. *Plants*, **10**, Article 2719. <https://doi.org/10.3390/plants10122719>
- [80] 许庆民, 周赓, 郭小伟, 等. 青藏高原高寒草甸群落特征对氮沉降和增水的响应[J]. 草原与草坪, 2017, 37(5): 8-13.
- [81] 周廷, 罗少辉, 张法伟, 等. 青藏高原高寒草甸植物生产力对氮添加和降水改变的响应[J]. 生态学报, 2025(24): 1-11.
- [82] Li, J., Yang, C., Zhou, H. and Shao, X. (2020) Responses of Plant Diversity and Soil Microorganism Diversity to Water and Nitrogen Additions in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, **22**, e01003. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01003>
- [83] 张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 等. 放牧对草地生态系统影响的研究进展[J]. 植物生态学报, 2020, 44(5): 553-564.
- [84] 邓彤彤, 李长斌, 李希来, 等. 不同放牧强度对青藏高原高寒草甸物种多样性和生物量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 10(3): 1-14.
- [85] Li, L., He, X.Z., Sun, Y., Xiao, T., Liu, Y. and Hou, F. (2025) Legacy Effects of Grazing and Nitrogen Fertilization on Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus in an Alpine Meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *European Journal of Soil Biology*, **124**, Article ID: 103704. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103704>
- [86] Dong, S., Shang, Z., Gao, J. and Boone, R.B. (2020) Enhancing Sustainability of Grassland Ecosystems through Ecological Restoration and Grazing Management in an Era of Climate Change on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **287**, Article ID: 106684. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106684>
- [87] 张正义, 胡逸, 张振豪, 等. 高寒草甸功能群组成及营养品质对不同放牧强度的响应[J]. 草业科学, 2024, 41(1): 151-162.