

# 氮添加对青藏高原色季拉山高寒草地植物的影响

张西哲 陶江 牛紫悠 崔志攀 韩艳英 叶彦辉

(西藏农牧大学 资源与环境学院, 西藏林芝 860000)

**摘要** 经西藏林芝市色季拉山的高寒草地进行长期不同梯度氮添加试验, 以探究高寒草地植物群落对大气氮沉降加剧的响应。系统分析了氮添加对植物功能群、群落生物量、养分含量及化学计量比特征的影响, 并揭示了其变化规律。研究结果表明, 氮添加促进了植物群落生物量和群落根冠比的增加, 但随着氮添加浓度的增加, 禾本科和杂类草的地上生物量出现减少。氮添加显著降低了植物群落中碳(C)的含量, 同时增加了植物氮(N)和磷(P)的含量; 在N15处理下, 群落地上N、P含量分别增加了8.34%和24.20%, 进而改变了植物的化学计量比( $P < 0.05$ )。然而, 高浓度氮添加导致植物中N、P含量减少, 氮磷比(N:P)增加, 从而使植物群落从氮限制状态转变为氮磷共同限制状态。

**关键词** 氮添加; 高寒草地; 生物量; 养分含量; 计量比

中图分类号: S812

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2025) 06-0730-09

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2025.06.006

## Effect of Nitrogen Addition on Plants in Alpine Grassland of Sejila Mount on the Qinghai-Xizang Plateau

ZHANG Xizhe, TAO Jiang, NIU Ziyu, CUI Zhipan, HAN Yanying, YE Yanhui

(Resources & Environment College, Xizang Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China)

**Abstract:** A long-term nitrogen addition experiment with different gradients was conducted in the alpine grassland of Sejila Mountain in Linzhi City, Xizang, to explore the response of alpine grassland plant communities to the intensification of atmospheric nitrogen deposition. The effects and patterns of variation of nitrogen addition on plant functional groups, community biomass, nutrient content, and stoichiometric ratio characteristics were systematically analyzed. The results indicated that nitrogen addition promoted an increase in plant community biomass and root-shoot ratio, but with the increase in nitrogen addition concentration, the aboveground biomass of Poaceae and forbs decreased. Nitrogen addition significantly reduced the carbon (C) content of the plant community, while increasing the nitrogen (N) and phosphorus (P) contents of plants. Under the N15 treatment, the aboveground N content increased by 8.34%, and the P content increased by 24.20%, thereby changing the stoichiometric ratio of plants ( $P < 0.05$ ). However, high-concentration nitrogen addition reduced the N and P contents of plants and increased the nitrogen-to-phosphorus ratio (N:P), causing the plant community to shift from nitrogen-limited to co-limited by nitrogen and phosphorus.

收稿日期: 2025-02-26

作者简介: 张西哲 (2000-), 男, 汉族, 陕西渭南人, 硕士生。研究方向: 主要从事高寒草地氮磷沉降方面的研究。

通信作者: 叶彦辉 (1980-), 男, 汉族, 河南漯河人, 博士, 副教授。研究方向: 主要从事高原氮沉降和经济林培育的研究工作。

基金项目: 西藏农牧大学研究生教育创新计划项目 (YJS2024-26, YJS2024-28, YJS2024-31); 国家自然科学基金项目 (31860141, 31360119); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (2024-02); 西藏林芝苹果科技小院 (XY2024-03) 和西藏农牧大学重点学科建设项目 (XK20245-04), 西藏高原林业生态工程重点实验室资助。

**Key words:** Nitrogen addition; Alpine grassland; Biomass; Nutrient content; Stoichiometric ratio

氮沉降是指大气中的氮化合物通过干、湿沉降的方式从大气转移到地表的过程。氮沉降是全球氮生物地球化学循环的重要组成部分，涉及氧化态氮（如NO<sub>x</sub>）和还原态氮（如NH<sub>x</sub>）的去除和沉降过程<sup>[1-3]</sup>。氮是植物生长主要的营养元素之一，近年来氮沉降呈现上升趋势，主要来源于工业排放的增加、交通运输尾气的排放、农业的发展等<sup>[4,5]</sup>。适量的氮沉降可以促进植物生长和增加生物量，并提高植物叶片和根系的氮含量，进而改善植物的营养状况<sup>[6]</sup>。氮沉降的持续增加会引起氮富集、土壤酸化、植物多样性减少以及植物群落结构改变等问题，导致生态系统的功能衰退。

草地生态系统是地球上广泛分布的生态系统之一，对维护地球生态平衡和支撑人类生存发展有着不可替代的作用。目前草地退化问题已成为一个主要的生态危机<sup>[7]</sup>。氮添加会对青藏高原高寒草地生态系统产生多种影响，因环境条件和植物种类的不同而有所差异。氮添加通常会影响草地植物多样性，改变植物群落的垂直和水平结构，尤其是对N敏感的物种，会增加草本植物的比例<sup>[8,9]</sup>。氮添加会增加植物生物量，但这也可能导致植物生物量分配策略的变化<sup>[10]</sup>。Zhang<sup>[11]</sup>认为氮添加主要增加了多年生根茎禾草的生物量，而对多年生丛生禾草的生物量没有显著影响。但也有研究发现，氮添加量过高会导致土壤酸化，从而抑制植物生长，降低生物量<sup>[12]</sup>。N添加也会对高寒草地C、N、P的含量以及计量比产生复杂的影响，N添加通常会增加植物生物量，促进植物对P的吸收，从而增加植物体内C、N、P含量<sup>[13,14]</sup>；在呼伦贝尔草原研究中发现，氮添加会显著提高非豆科植物叶片和根系的N含量，降低其C:N<sup>[15]</sup>。Dong<sup>[13]</sup>在研究中发现，氮添加会导致植物体内C:N下降，使植物体内的C:P比下降，增加植物体内的N:P比。

目前大部分研究只是短期氮添加试验，不够深入了解氮添加对高寒草地植物的影响。本研究在色季拉山高寒草地进行长期不同梯度氮添加试验，模拟大气中氮沉降加剧对色季拉山高寒草地植物生物量、C、N、P含量和化学计量比的影响，探究氮添加对植物物种构成改变的内在机制，为高寒草地对大气氮沉降适应性管理提供参考依据，以维护青藏高原高寒草地生态系统的健康。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究是在西藏自治区林芝市色季拉山西坡的高寒草地（北纬29°38'8"、东经94°37'26"）进行，试验样地在海拔4 400 m，属于湿润山地暖温带和半湿润山地温带气候，年平均气温在-0.73 °C，降水量为1 134.1 mm<sup>[21]</sup>。样地土壤是山地棕壤和酸性棕壤，主要植被有禾本科、莎草科及杂类草3种功能群植物。

### 1.2 试验设计

本研究采用野外施加不同浓度氮肥的方法开展，参考林芝市西藏农牧大学生态所（站）所测得的大气氮沉降值2.71~6.04 (kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)<sup>[16]</sup>，鉴于大气氮沉降量随时间逐年递增，故而在此基础之上开展高浓度添加试验。设计了4个处理，施氮浓度分别0、10、15和20 (kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)，并标记为CK、N10、N15和N20，每个处理的样方大小均为3×3 m，样方间设有1 m宽的缓冲带。试验还设置了3个重复区组（区组面积一致），区组间设有5 m的缓冲带，共计12个样方。每年8月初，将不同浓度的尿素[CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]溶于相当于当地2.0 mm降水量的水中，均匀喷洒在各样方内，CK处理喷洒相同水量。

### 1.3 样品采集与室内测定

色季拉山高寒草地植物生长旺期为（2024年8月中旬），在每样方内随机选3个小样方（30×30 cm）。将植物群落按不同功能群齐地刈割，用直径5 cm的土钻随机钻取3次，混合后清理杂质，收集0~20 cm土层的植物根系。取得的植物地上、地下部分置于105℃烘箱中杀青30 min，在80℃下烘干至恒重，称重后得到各功能群的地上和地下生物量。将采集样品使用粉碎机研磨至粉末状，分别通过重铬酸钾法、凯氏定氮法和钼锑抗比色法测定植物有机碳（OC）、全氮（TN）和全磷（TP）的含量。

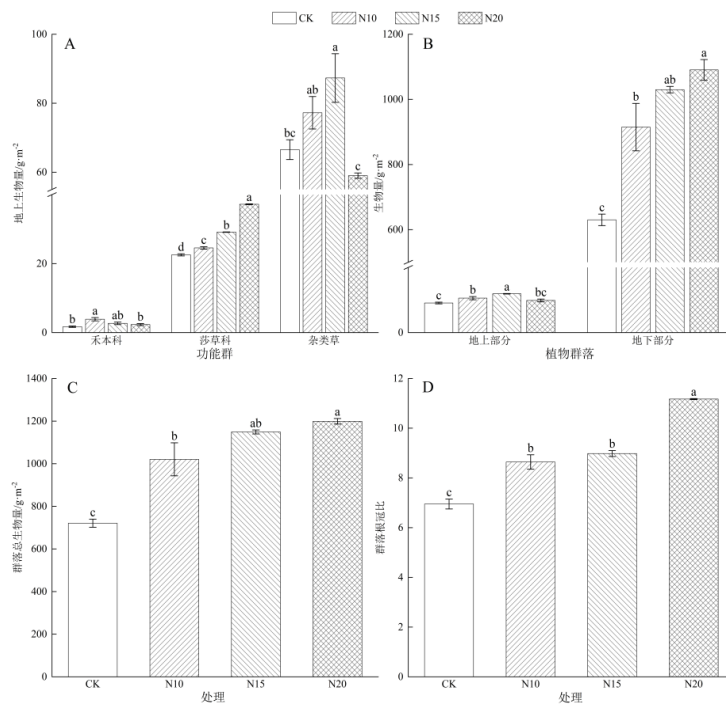
### 1.4 数据分析

本研究借助Microsoft Excel 2019软件进行数据整理，通过IBM SPSS Statistics 20软件对试验数据进行多重比较校正和单因素方差统计分析，以揭示青藏高原色季拉山高寒草地植物对不同梯度氮添加的响应规律，并利用Origin 2021软件进行图表绘制和制作相关性热图。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮添加对植物生物量的影响

本试验在色季拉山高寒草地中将植物群落分为禾本科、莎草科和杂类草3种功能群，在添加不同梯度的氮素后，对各功能群的地上生物量均有显著影响（如图1A所示）。禾本科和杂类草功能群的地上生物量随氮添加量的增加呈先增加后减少的趋势（ $P < 0.05$ ），在N10处理下，禾本科的地上生物量增加了126.32%；在N15处理下，杂类草的地上生物量增加了31.20%。莎草科的地上生物量随氮添加量的增加显著增加，在N20处理下达到最大值，与对照相比，增加了65.08%。



注：A：氮添加对不同功能群地上生物量的影响；B：氮添加对群落地上、地下部分生物量的影响；C：氮添加对群落总生物量的影响；

D：氮添加对群落根冠比的影响。不同小写字母表示各梯度氮添加之间差异显著（ $P < 0.05$ ）。

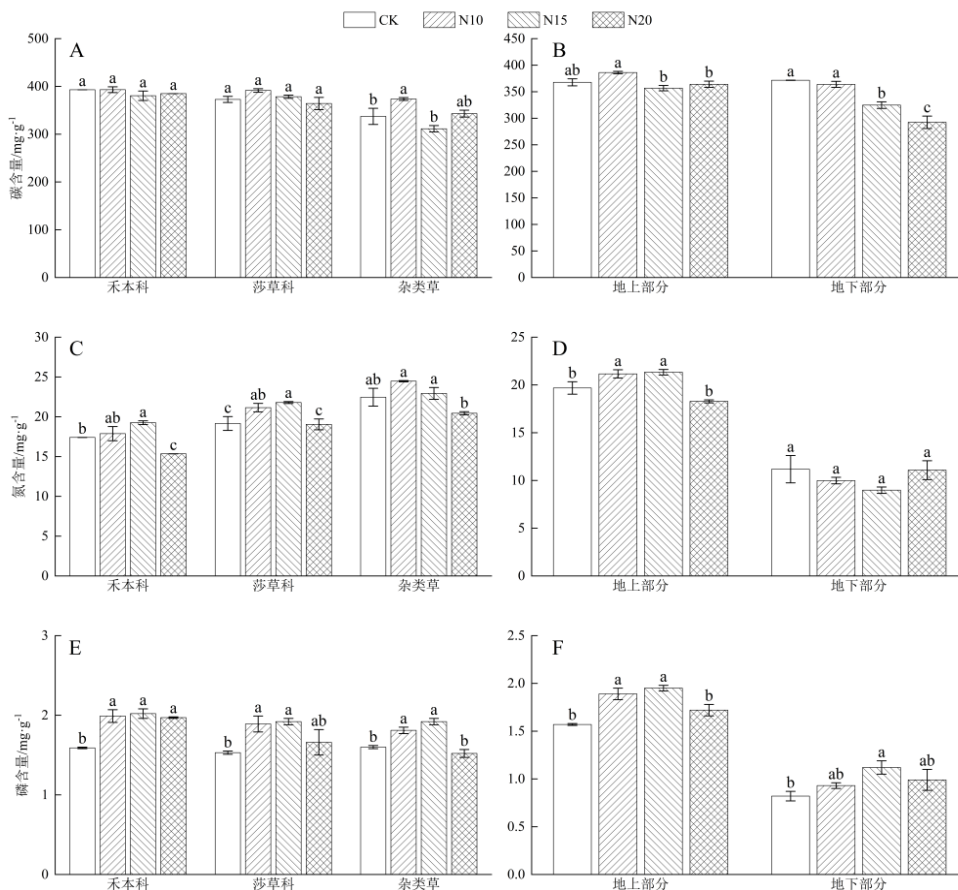
图1 氮添加对植物生物量的影响

Fig.1 The effect of nitrogen addition on plant biomass

氮添加显著增加色季拉山高寒草地群落的生物量以及根冠比（如图1B、1C、1D所示， $P < 0.05$ ），与对照处理相比，N20处理下的植物群落总生物量、地下生物量和根冠比达到最高值，分别增加了66.30%、73.04%和68.34%，在N15处理下，植物群落地上生物量增加了31.18%。

## 2.2 氮添加对植物C、N、P含量和计量比特征的影响

从图2A和2B可以看出，氮添加对色季拉山高寒草地植物群落中禾本科和莎草科的碳（C）含量均无显著影响，群落地上和地下部分的C含量均呈现显著下降趋势（ $P < 0.05$ ）。氮添加对植物群落地上部分以及功能群的氮（N）含量均有显著影响（如图2C、D所示， $P < 0.05$ ），而植物群落地下部分的N含量对氮添加的响应无明显变化。不同梯度氮添加处理下，植物群落地上部分和功能群的N含量均呈现先增加后减少趋势，与对照相比，在N15处理下，群落地上部分N含量增加8.34%；其中禾本科和莎草科的N含量在N15处理下增加10.63%和13.73%，杂类草的N含量在N10处理下增加8.95%。氮添加对植物群落和功能群的磷（P）含量产生了显著影响（如图2E、2F所示， $P < 0.05$ ），均呈现先增加后减少趋势；在N15处理下，与对照相比，植物群落地上部分和地下部分的P含量增加了24.20%和36.59%，3种功能群的P含量分别增加了27.04%、25.49%和20%。



注：A：氮添加对不同功能群C含量的影响；B：氮添加对群落地上、地下部分C含量的影响；

C：氮添加对不同功能群N含量的影响；D：氮添加对群落地上、地下部分N含量的影响；E：氮添加对不同功能群P含量的影响；

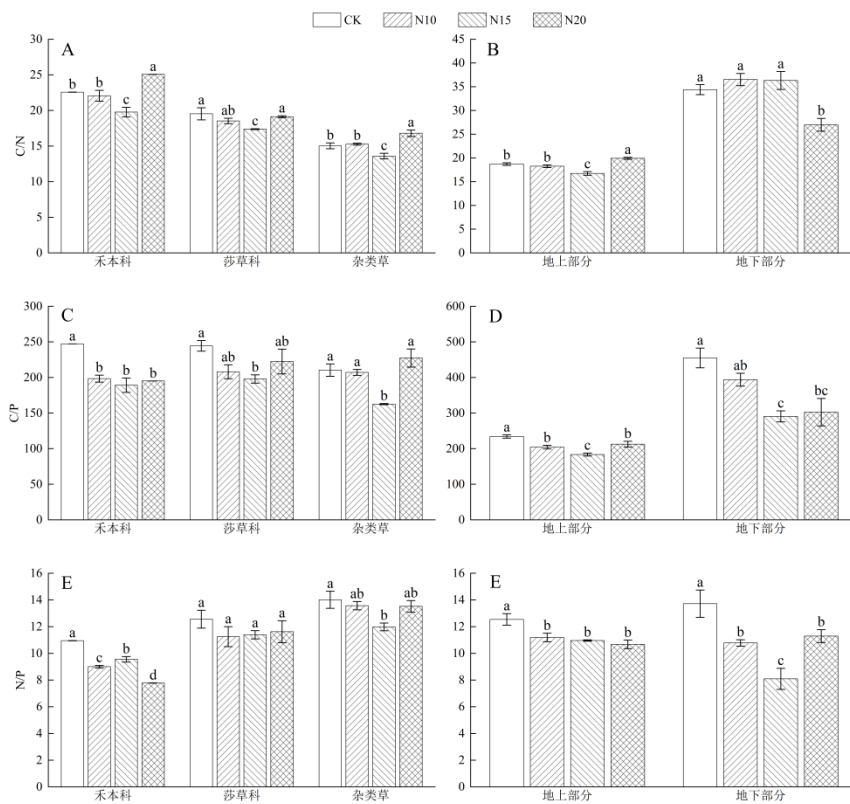
F：氮添加对群落地上、地下部分P含量的影响。不同小写字母表示各梯度氮添加之间差异显著（ $P < 0.05$ ）。

图2 氮添加对植物C、N、P含量的影响

Fig.2 The effect of nitrogen addition on the content of C, N, and P in plants

色季拉山高寒草地植物群落的地上与地下部分的碳氮比 (C:N) 对氮添加均表示出显著响应, 其中, 地上部分的C:N呈现先下降后上升趋势, 地下部分呈现先上升后下降趋势 (如图3B所示,  $P < 0.05$ )。群落碳磷比 (C:P) 呈现先下降后上升趋势, 在N15处理下, 地上与地下部分的C:P达到最低值, 分别较对照处理降低了21.71%和36.07% (如图3D所示,  $P < 0.05$ )。不同梯度氮添加处理下, 群落地上氮磷比 (N:P) 呈现出显著的下趋势 (如图3F所示,  $P < 0.05$ ); 地下部分呈现先下降后上升趋势, 相比对照, 在N15处理下降了41.03%。

3种功能群的C:N和C:P随着氮添加量的增加均呈现先下降后上升趋势, 在N15处理下最低 (如图3A、C所示,  $P < 0.05$ )。对其的N:P而言, 氮添加可以显著降低了3个功能群的N:P, 但莎草科和杂类草的N:P随施氮肥水平升高呈现先下降后上升趋势。



注: A: 氮添加对不同功能群C:N的影响; B: 氮添加对群落地上、地下部分C:N的影响; C: 氮添加对不同功能群C:P的影响; D: 氮添加对群落地上、地下部分C:P的影响; E: 氮添加对不同功能群N:P的影响; F: 氮添加对群落地上、地下部分N:P的影响。

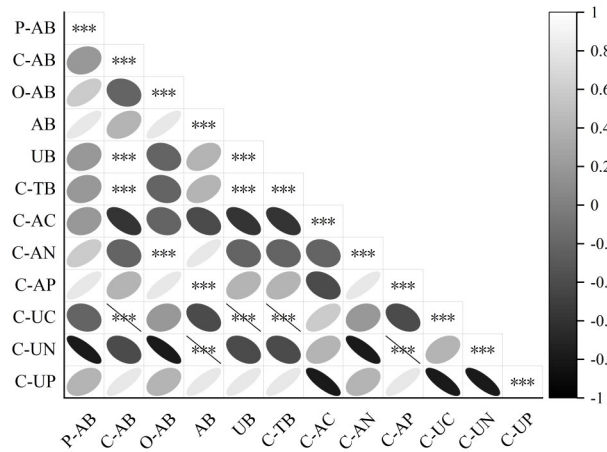
不同小写字母表示各梯度氮添加之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图3 氮添加对植物计量比特征的影响

Fig. 3 The effect of nitrogen addition on the stoichiometric characteristics of plants

### 2.3 植物生物量与群落C、N、P含量的相关性分析

不同梯度氮添加, 对色季拉山高寒植物生物量与群落C、N、P含量进行斯皮尔曼相关性分析 (见图4)。结果表明, 莎草科地上生物量与群落地下生物量、群落总生物量呈现极显著正相关; 杂类草地上生物量与群落地上部分N含量极显著呈现正相关; 群落地下部分C含量与莎草科地上生物量、群落地下生物量、群落总生物量呈现极显著负相关; 群落地下部分N含量与群落地上生物量、群落地上部分P含量呈现极显著负相关。



注：P-AB：禾本科地上生物量；C-AB：莎草科地上生物量；O-AB：杂类草地上生物量；AB：群落地上部分生物量；UB：群落地下部分生物量；C-TB：群落总生物量；C-AC：群落地上部分C含量；C-AN：群落地上部分N含量；C-AP：群落地上部分P含量；C-UC：群落地下部分C含量；C-UN：群落地下部分N含量；C-UP：群落地下部分P含量。\*、\*\*和\*\*\*分别表示在0.05、0.01和0.001水平上的显著相关性。

图4 植物生物量与群落C、N、P含量斯皮尔曼相关性热图

Fig.4 Spearman correlation heatmap between plant biomass and community C, N, and P content

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

植物生物量在草地生态系统中发挥着多方面的作用，它不仅影响土壤健康和生态系统功能，还对维持和增强生态系统服务至关重要<sup>[17]</sup>。Xia<sup>[18]</sup>在植物对氮添加的全球响应meta分析中发现，氮添加对不同生态系统中植物总生物量的影响存在差异，但总体上表现出促进作用，尤其是草本植物的生物量增加要明显大于木本植物。在本研究中，植物群落地上、地下生物量和总生物量对氮添加均产生显著促进响应，其中地下生物量的促进响应最显著，氮添加为植物提供了必需的氮元素，增强了植物的生长能力，进而提高了植物群落的生物量<sup>[19]</sup>，这一发现与李春丽等<sup>[20]</sup>在青藏高原环青海湖地区的高寒草原的研究结果一致。当氮添加量达到  $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  时，群落地上生物量出现减少趋势。这表明过量的氮输入可能导致土壤环境发生变化，如土壤pH值下降<sup>[21]</sup>，进而影响土壤微生物的群落结构和功能，最终对植物的生长产生负面影响，导致群落地上生物量减少。这与他人研究结果一致，例如，Li<sup>[22]</sup>在典型草原研究表明过量的氮输入对土壤细菌多样性有负面影响，宗宁等<sup>[23]</sup>在高寒草甸研究中发现过量的氮输入会抑制植物生长。还观察到植物群落的根冠比随氮添加量增加呈现显著增加趋势，这与田沐雨<sup>[24]</sup>等利用整合分析方法研究出的结果一致，氮添加促进了微生物对土壤有机质的分解，增加了土壤有效养分，有利于植物根系吸收，显著增加了植物群落地下生物量，从而增加了植物群落的根冠比。

先前很多研究中均表明氮添加显著增加了草地植物功能群的地上生物量<sup>[25-27]</sup>，其中刘学敏等<sup>[26]</sup>在氮添加对不同退化程度高寒草地生态系统的影响研究中发现，禾本科和莎草科功能群生物量在氮添加下显著增加，表明氮添加可以显著提高高寒草地生态系统中植被生产力，这与本研究结果一致。在本研究中，禾本科、莎草科和杂类草功能群生物量均在氮添加下显著增加，氮添加可以提高土壤中的氮素含量<sup>[28]</sup>，利于植物的生长，尤其是对于氮素需求较高的禾本科植物来说，氮添加可以显著提高其生物量；其次，氮添加还可以提高土壤中的磷、硫等元素的有效性<sup>[12]</sup>，这些元素也是植物生长所必需的，因此氮添加可以

提高这些元素的有效性,进而提高植物生物量;此外,氮添加还可以提高土壤微生物的多样性<sup>[29]</sup>,微生物可以为植物提供养分和生长因子,从而利于植物的生长。其中特别的是,随氮添加的浓度增大,禾本科和杂类草生物量呈现先增加后减少趋势,在氮添加量为 $20 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时,禾本科和杂类草生物量同最高生物量处理时下降了40.05%和32.43%,这与曹丰丰<sup>[30]</sup>在祁连山亚高山草地的研究结果一致,过量的氮素会对植物产生毒害作用,影响植物的生长和代谢,土壤中的氮素会超过植物的需求,抑制丛生型禾草(披碱草、冷地早熟禾等)的生长<sup>[29]</sup>。

C、N、P元素影响着植物的生长和繁殖,同时也影响着土壤微生物的多样性和活性,进而影响土壤肥力和碳循环<sup>[31]</sup>。在本研究中,植物群落地上以及3种功能群的C含量在低浓度氮添加下显著增加,这与前人研究结果一致<sup>[32,33]</sup>。植物群落地上、地下部分的C含量在高浓度氮添加下显著减少,其原因是群落3种功能群生物量C含量均呈现下降趋势,这与Zhong<sup>[34]</sup>在内蒙古高原的半干旱草原研究结果一致,氮添加会抑制种子萌发和幼苗密度,降低植物物种丰富度<sup>[35]</sup>,使得植物群落C输入下降,导致植物群落C含量下降。Dong<sup>[13]</sup>在高寒草甸氮磷添加试验中发现,随着氮添加水平的增加,植物生物量和养分含量呈现线性趋势增加,特别是优势功能群。这与本研究结果相似,本研究发现植物N、P含量随氮添加水平增加显著增加,氮添加提高了土壤中的氮素供应,植物通过根系吸收更多的氮素,从而增加了植物体内的N含量,促进植物生长,扩大根系和叶面积来增强植物对土壤中磷的吸收能力<sup>[13]</sup>,使得植物体内P含量增加。

植物体内的元素化学计量比是生态系统功能的重要决定因素,它影响着植物的生长、养分吸收和生态系统的生产力,计量比的动态变化反映了植物对环境条件(如水分、温度和养分供应)的适应策略<sup>[36]</sup>。金月等<sup>[15]</sup>和Xu<sup>[37]</sup>的研究中发现,氮添加通常会降低植物的C:N和C:P,氮可以促进植物生长,增加植物体内的氮含量,促进了植物对磷的吸收和利用,从而使植物C:N和C:P降低,这与本研究结果一致。本研究还发现在高浓度氮添加下,植物的C:N和C:P相比低浓度氮添加处理有上升趋势,这可能是因为高浓度氮添加下,植物可能会面临磷的限制,因为土壤中磷的可用性无法满足植物对氮的吸收速率,导致植物无法充分利用氮,从而使得植物的C:N和C:P上升。在本试验中,草地植物的N:P在氮添加下较对照显著下降,这与向雪梅等<sup>[38]</sup>在高寒草甸的研究结果不一致,其原因可能是氮添加会改变土壤微生物的群落结构和功能,影响微生物对养分的获取策略,减少对氮的获取,而增加对磷的获取,以适应氮丰富的环境<sup>[39]</sup>;随着氮添加浓度增加,N:P有上升趋势,植物对磷的需求量也随之增加,土壤中磷的供应不足,无法维持正常的氮磷比,从而减少植物的N:P,植物群落从氮限制转变为氮磷共同限制。这是因为氮添加导致土壤酸化,促进了土壤中磷的溶解,但长期来看会耗尽土壤磷库<sup>[12,24]</sup>。

在本研究中,我们发现莎草科地上生物量与群落地下生物量、总生物量极显著正相关,这与一些高海拔草地生态系统的研究结果相似。例如,在青藏高原高寒草甸研究表明,莎草科植物作为高寒草地的优势物种,其地上生长状况往往反映了整个群落的生物量积累情况,因为它们在资源利用和群落结构构建中占据重要地位<sup>[40]</sup>。杂类草地上生物量与群落地上部分N含量极显著正相关。有研究指出,杂类草对氮素较为敏感,在氮添加条件下,能更有效地吸收利用氮元素,从而促进自身地上部分生长<sup>[41]</sup>。这也暗示了在色季拉山高寒生态系统中,氮素可能是影响杂类草生长的关键限制因子之一。我们观察到群落地下部分C含量与莎草科地上生物量、群落地下生物量、群落总生物量呈现极显著负相关。由于地上植被通过光合作用固定的碳大量分配到地上部分,且根系周转相对较快,导致地下C积累减少<sup>[42]</sup>。同时,群

落地下部分N含量与群落地上生物量、群落地上部分P含量呈现极显著负相关。这可能是氮添加促进了植物地上部分的生长，而地下部分的氮积累未能同步增加，从而导致这种负相关现象。

### 3.2 结论

在色季拉山高寒草地连续五年实施的不同梯度氮添加试验的深入分析中，得出了以下核心结论：适量的氮添加显著促进了禾本科与杂类草的生长，而高浓度的氮添加却导致其生态系统功能衰退；从群落整体层面来看，氮添加显著增加了青藏高原色季拉山高寒草地植物生物量和群落根冠比。此外，氮添加还深刻改变了植物体内的元素组成，具体表现为N、P含量的显著提升，植物群落C含量减少，以及植物化学计量比显著减少，但是过量的氮添加会导致植物N、P含量的减少，植物化学计量比上升，使植物群落从氮限制状态转为氮磷共同限制状态。

本研究揭示了氮添加对色季拉山高寒草地植物的诸多影响，在未来可开展多元素交互添加试验，探究氮与其他元素共同作用下植物的响应机制。结合微生物组学、代谢组学等技术，从微观层面深入剖析植物与土壤微生物在氮添加下的互作关系。为高寒草地生态系统的精准管理和可持续发展提供有力的理论支撑。

### 参考文献：

- [1] 肖文贤,宋娅丽,王克勤,等. 氮添加对滇中高原森林凋落物养分残留及其持水性的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(03): 319-329.
- [2] 陶晓,邵曦媛,钟环环,等. 氮沉降对城市森林凋落物养分元素含量及其耦合性的影响[J]. 安徽农业大学学报,2024,51(03): 368-375.
- [3] Wu F Y, Gao P X, Gui W D, et al. Research progress on the monitoring methods of atmospheric nitrogen deposition[J]. Chinese journal of applied ecology, 2019, 30(10): 3605-3614.
- [4] 李晓东,苏连波,王克勤,等. 模拟氮沉降对云南中部亚高山华山松林土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报,2024,44(05): 38-47.
- [5] 常婕,居新,伊李凯,等. 不同水平氮添加下华北盐渍化草地根际土壤阴阳离子特征[J]. 应用生态学报,2024,35(01):212-218.
- [6] Xue R L, Jin H W, Zhu G H, et al. Effects of nitrogen addition on tree root traits[J]. The Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1735-1742.
- [7] 魏寒冰. 草原文化研究特点及其新趋向[J]. 文化创新比较研究,2023,7(36):176-182.
- [8] Manuel J P, Laura Y, Tomas C D, et al. Nitrous oxide emissions decrease with plant diversity but increase with grassland primary productivity[J]. Oecologia, 2019, 190(2): 497-507.
- [9] Peng L, Tianxiang H, Xin L, et al. Ambient nitrogen deposition drives plant-diversity decline by nitrogen accumulation in a closed grassland ecosystem[J]. Journal of Applied Ecology, 2021, 58(9): 1888-1898.
- [10] Huili F, Jiahuan G, Changhui P, et al. Nitrogen Addition Promotes Terrestrial Plants to Allocate More Biomass to Aboveground Organs: A Global Meta-Analysis[J]. Global Change Biology, 2023, 29(14): 3970-3989.
- [11] Xiaolin Z, Muqier H, Ang L, et al. Nitrogen addition amplified water effects on species composition shift and productivity increase[J]. Journal of Plant Ecology, 2021, 14(5): 816-828.
- [12] 姜勇,徐柱文,王汝振,等. 长期施肥和增水对半干旱草地土壤性质和植物性状的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(07):2470-2480.
- [13] Junfu D, Xiaoyong C, Haishan N, et al. Effects of Nitrogen Addition on Plant Properties and Microbiomes Under High Phosphorus Addition Level in the Alpine Steppe[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13 894365-894365.
- [14] Weibin L, Xiaoling G, Yuan J, et al. Nitrogen effects on grassland biomass production and biodiversity are stronger than those of phosphorus[J]. Environmental Pollution, 2022, 309 119720-119720.

- [15] 金月,梁存柱,崔利剑.不同养分添加对草地群落优势植物叶片化学计量特征的影响[J].北方农业学报,2019,47(02):59-65.
- [16] 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(04):1907-1913.
- [17] 吴红宝,水宏伟,胡国铮,等.海拔对藏北高寒草地物种多样性和生物量的影响[J].生态环境学报,2019,28(06):1071-1079.
- [18] Jianyang X, Shiqiang W. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition[J]. *The New phytologist*, 2008, 179(2): 428-39.
- [19] 陆啸飞,郭洁芸,王斌,等.氮添加对中国陆地植被地上-地下生物量分配的影响[J].生态学报,2024,44(04):1313-1323.
- [20] 李春丽,李奇,赵亮,等.环青海湖地区天然草地和退耕恢复草地植物群落生物量对氮磷添加的响应[J].植物生态学报,2016,40(10):1015-1027.
- [21] 盛基峰,李垚,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.
- [22] Lan L, Zhao X H, Mengyuan W, et al. Grazing-driven shifts in soil bacterial community structure and function in a typical steppe are mediated by additional N inputs[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 912 169488-169488.
- [23] 宗宁,段呈,耿守保,等.增温施氮对高寒草甸生产力及生物量分配的影响[J].应用生态学报,2018,29(01):59-67.
- [24] 田沐雨,于春甲,汪景宽,等.氮添加对草地生态系统土壤pH,磷含量和磷酸酶活性的影响[J].应用生态学报,2020,31(09):2985-2992.
- [25] 宁岩.氮添加和降水增加对内蒙古半干旱草地土壤呼吸的影响[D].保定:河北大学,2024.
- [26] 刘学敏,罗久富,邓东周,等.氮添加对不同退化程度高寒草地生态系统的影响[J].草业科学,2018,35(12):2773-2783.
- [27] 陈继辉.氮沉降对草甸草原温室气体排放的影响及机制[D].南京:南京农业大学,2020.
- [28] Xiaoyu L, Cheng L, Wenhui G, et al. Impact of biochar amendment on the abundance and structure of diazotrophic community in an alkaline soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 688 944-951.
- [29] Liao L, Wang X, Wang J, et al. Nitrogen fertilization increases fungal diversity and abundance of saprotrophs while reducing nitrogen fixation potential in a semiarid grassland[J]. *Plant and Soil*, 2021, 465(1-2): 1-18.
- [30] 曹丰丰.氮添加对祁连山亚高山草地植物物种多样性和生物量稳定性的影响[D].兰州:兰州大学,2022.
- [31] 肖向前,张海阔,冯娅斯,等.植物残体对青藏高原高寒草甸土壤,微生物和胞外酶C:N:P化学计量特征的影响[J].应用生态学报,2023,34(01):58-66.
- [32] 肖红,戎郁萍,李鹏珍,等.呼伦贝尔草甸草原主要功能群植物碳,氮,磷化学计量特征对氮磷添加的响应[J].中国草地学报,2023,45(10):1-11.
- [33] 姜岩.氮添加对川西北高寒沙化草地植物-土壤中,微量元素及化学计量的影响[D].雅安:四川农业大学,2023.
- [34] Mingxing Z, Yuan M, Shijie H, et al. Nitrogen Addition Decreases Seed Germination in a Temperate Steppe[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(15): 8441-8449.
- [35] Yang S, Liu W, Qiao C, et al. The decline in plant biodiversity slows down soil carbon turnover under increasing nitrogen deposition in a temperate steppe[J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(7): 1362-1372.
- [36] 王佳豪,何克燕,鲍根生,等.磷添加对青海扁茎早熟禾各器官生物量及生态化学计量特征的影响[J].中国草地学报,2024,46(01):37-46.
- [37] Hongwei X, Qing Q, Guanwen L, et al. Impact of Nitrogen Addition on Plant-Soil-enzyme C-N-P Stoichiometry and Microbial Nutrient Limitation[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2022, 170: 108714-108714.
- [38] 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(01):53-61.
- [39] Xudong W, Jiguang F, Gukailin A, et al. Globally nitrogen addition alters soil microbial community structure, but has minor effects on soil microbial diversity and richness[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 179.
- [40] 杨军,刘秋蓉,王向涛.青藏高原高山蒿草高寒草甸不同退化阶段植物群落与土壤养分[J].应用生态学报,2020,31(12):4067-4072.
- [41] Zhe P, Lili J, Shiping W, et al. Differential Response to Warming of the Uptake of Nitrogen by Plant Species in Non-Degraded and Degraded Alpine Grasslands[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2212-2221.
- [42] Brooke A E, Mary B A, Edward R B, et al. Altered Plant Carbon Partitioning Enhanced Forest Ecosystem Carbon Storage after 25 Years of Nitrogen Additions[J]. *New Phytologist*, 2021, 230(4): 1435-1448.