

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0008

张静, 董世魁, 赵珍珍, 李帅, 韩雨晖, 沙威, 沈豪, 刘世梁, 董全民, 周华坤, 土旦加, 祁星民, 王浩善. 模拟氮沉降对青海湖流域高寒草原植物群落组成及稳定性的影响. 草业科学, 2019, 36(11): 2733-2741.

ZHANG J, DONG S K, ZHAO Z Z, LI S, HAN Y H, SHA W, SHEN H, LIU S L, DONG Q M, ZHOU H K, TUDANJIA, QI X M, WANG H S. Effect of simulated nitrogen deposition on the community composition and stability of alpine grasslands in the Qinghai Lake Area. Pratacultural Science, 2019, 36(11): 2733-2741.



模拟氮沉降对青海湖流域高寒草原植物群落组成及稳定性的影响

张静¹, 董世魁¹, 赵珍珍¹, 李帅¹, 韩雨晖¹, 沙威², 沈豪¹,
刘世梁¹, 董全民³, 周华坤⁴, 土旦加⁵, 祁星民⁵, 王浩善⁵

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 北京大学深圳研究院, 广东 深圳 518000; 3. 青海大学青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁, 810003; 4. 中国科学与西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810003; 5. 青海省铁卜加草原改良试验站, 青海 共和 813000)

摘要: 本研究通过施加 NH_4NO_3 设置氮倍增试验 [0、8、24、40、56、72 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$], 探究氮沉降对高寒草原植物群落组成和稳定性的影响。经过连续两年施氮处理, 结果表明, 不同功能群的重要值对氮添加的响应不同, 禾本科和杂类草的响应较为显著, 莎草科和豆科无明显变化, 在添加 72 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的植物群落中, 禾本科的重要值显著高于低氮 [8 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$] 植物群落, 杂类草重要值则显著降低 ($P < 0.05$), 随施氮量增加植物群落优势种未发生改变, 均为草地早熟禾 (*Poa pratensis*); 与无氮添加的植物群落相比, 添加 72 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的植物群落的 Patrick 丰富度和 Pielou 均匀度有所降低但不显著, 而 Shannon-Wiener 多样性显著降低 ($P < 0.05$), 其他氮添加量对植物群落物种多样性表现出一定的促进作用; 不同施氮处理下高寒草原群落稳定性与 Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度呈显著负相关 ($P < 0.05$)。因此, 短期氮添加会改变高寒草原植物群落物种组成, 其中高倍氮对物种多样性的影响更为明显, 进而影响高寒草原群落稳定性。

关键词: 氮沉降; 物种组成; 物种多样性; 群落稳定性

中图分类号: Q948.15⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)11-2733-09

Effect of simulated nitrogen deposition on the community composition and stability of alpine grasslands in the Qinghai Lake Area

ZHANG Jing¹, DONG Shikui¹, ZHAO Zhenzhen¹, LI Shuai¹, HAN Yuhui¹, SHA Wei², SHEN Hao¹,
LIU Shiliang¹, DONG Quanmin³, ZHOU Huakun⁴, TUDANJIA⁵, QI Xingmin⁵, WANG Haoshan⁵

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Peking University ShenZhen Graduate School, Shenzhen 518000, Guangdong, China; 3. Qinghai University, Qinghai Academy of Animal Husbandry and Veterinary Sciences, Xining 810003, Qinghai, China; 4. Key Laboratory of Restoration Ecology for Cold Regions in Qinghai, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810003, Qinghai, China; 5. Tiebujia Grassland Improvement Experimental Station of Qinghai Province, Gonghe, 813000, Qinghai, China)

收稿日期: 2019-01-05 接受日期: 2019-04-03

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题 (2016YFC0501906); 青海省科技成果转化项目“生态保护提质增效的高寒牧区单元技术研发和模式示范” (2019-SF-145); 青海省重大科技专项项目“青藏高原现代牧场技术研发与模式示范” (2018-NK-A2)

第一作者: 张静 (1995-), 女, 陕西神木人, 在读硕士生, 主要从事生态保护与恢复研究。E-mail: jingz121@163.com

通信作者: 董世魁 (1973-), 男, 甘肃和政人, 教授, 博士, 主要从事草地生态学与生态恢复研究。E-mail: dongshikui@sina.com

<http://cykx.lzu.edu.cn>

Abstract: This study conducted a test that doubled nitrogen contents [0, 8, 24, 40, 56, 72 kg·(hm²·a)⁻¹] by applying NH₄NO₃ to investigate the effects of nitrogen deposition on community composition and the stability of alpine grasslands in the Qinghai Lake Area. After two years of continuous nitrogen application, the results showed that the important values of different functional groups responded differently to nitrogen additions. The responses of the Gramineae and forbs function groups were considerably, but no obvious variation was observed in the important values of the Cyperaceae and Leguminosae function groups. In Gramineae, the 72 kg·(hm²·a)⁻¹ addition has a significantly higher important value than the treatment of 8 kg·(hm²·a)⁻¹, whereas the important value of forbs reduces significantly. With the increase of nitrogen application contents, *Poa pratensis* was the most dominant species within the entire plant community. Compared with the plant communities without nitrogen additions, the Patrick richness and Pielou evenness values of the plant community were decreased but were not significant with the treatment of 72 kg·(hm²·a)⁻¹; the Shannon-Wiener diversity was significantly reduced, and the other treatments can promote the species diversity of the plant community to a certain degree. There was a significant negative correlation between the community stability and the Shannon-Wiener diversity and Pielou evenness under different nitrogen treatments. Therefore, short-term nitrogen additions will change the species compositions of plant communities in alpine grasslands, and the effect of high nitrogen on species diversity is obvious. This dynamic can affect the stability of Qinghai's alpine grassland community.

Keywords: nitrogen deposition; plant community composition; species diversity; community stability

Corresponding author: DONG Shikui E-mail: dongshikui@sina.com

在不断加剧的人类活动以及气候变化的影响下, 全球陆地生态系统的氮输入量持续增加^[1], 使得氮沉降成为近几十年来备受关注的全球变化问题之一。氮是限制植物生长的关键营养元素, 氮沉降可以补充土壤养分, 促进植物生长, 但持续增加的氮沉降会引起土壤酸化、高寒草甸植被和土壤碳氮再分配^[2], 改变植物群落结构及物种多样性^[3-4]。随着人类活动加剧, 青藏高原地区的大气氮沉降十分明显, 1990–2003年氮沉降量在 8.7~13.8 kg·(hm²·a)⁻¹, 并呈逐年增加趋势^[5-6]。氮沉降的持续增加明显改变了陆地生态系统的碳、氮循环, 进而影响整个生态系统的结构、功能及稳定性^[7-8]。群落稳定性是群落各组分受到干扰后保持平衡状态的能力, 关于群落稳定性的研究主要集中在多样性-稳定性关系上, 其关系大致可以分为正相关、不相关和负相关 3 种。有研究表明, 物种多样性高的群落, 其抵抗力强, 群落稳定性高, 但 May 用数学方法推导出群落稳定性与物种多样性负相关, 群落稳定性随物种多样性的增加而降低, 也有学者认为群落稳定性与物种多样性之间不存在简单的相关关系^[9-11]。因此, 明确氮沉降对高寒草地植物群落组成及稳定性的影响对于积极应对全球氮沉降量增加具有极大的现实意义。

目前, 青藏高原高寒草地氮添加试验大多从物

种对可利用氮素增加的响应角度, 研究施肥条件下植物群落结构、植物多样性、草地生产力等的变化, 发现不同功能群的物种对氮添加的响应不同, 施肥显著增加了禾本科植物的盖度、生物量和重要值, 降低了豆科和杂类草的盖度、生物量和重要值, 莎草科植物变化不明显或有所增加, 施肥量增加到一定程度后各功能群的盖度、生物量、重要值和物种多样性均显著降低, 导致群落生物量, 物种组成和物种多样性改变^[12-14]。高寒草地群落的稳定性研究主要集中在围栏封育, 不同修复年限对群落稳定性的影响等方面^[9,15], 关于氮沉降背景下, 高寒草原植物群落的稳定性研究较少。基于此, 提出科学假设“氮沉降会改变高寒草原群落中不同功能群物种的组成, 降低物种多样性, 从而改变群落稳定性”, 为了验证这一科学假设, 选择青海湖高寒草原区为研究样点, 基于青藏高原氮沉降现状模拟氮沉降梯度, 探究青藏高原高寒草原群落组成、物种多样性及生态系统稳定性对氮沉降的响应模式, 为解决未来持续氮沉降带来的生态环境问题提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省海南藏族自治州共和县铁卜加

草原改良试验站(37°02' E, 99°35' N), 海拔 3 270 m。该区属典型高原大陆性气候, 日照时间长, 夏凉冬寒, 年均气温在 0 °C 左右, 年最低温和最高温分别为-11.17 °C 和 11.57 °C, 无绝对无霜期。年降水量为 377 mm, 年蒸发量在 1 484 mm 左右。该区草地类型属高寒草原, 以草地早熟禾 (*Poa pratensis*)、短芒披碱草 (*Elymus breviaristatus*)、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 为主要建群种, 物种数在 17 种左右, 土壤以栗钙土和暗栗钙土为主^[6,16]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及样方调查

2014 年, 在铁卜加草原改良试验站的围封高寒草原上设置了 200 m × 200 m 的样地, 并在样地内划分 18 个 2 m × 5 m 的长方形小区, 为避免不同处理间的干扰, 小区之间设置 1 m 的隔离带。根据 Lu 和 Tian^[6] 文章中所述的青藏高原年平均氮沉降量 [8 kg·(hm²·a)⁻¹] 设置氮倍增试验, 设 CK、N_I、N_{II}、N_{III}、N_{IV} 和 N_V 共 6 个处理, 氮沉降量分别为 0、8、24、40、56 和 72 kg·(hm²·a)⁻¹, 每个处理 3 组重复, 共 18 组, 将其完全随机布设在长方形小区中。综合考虑氮沉降量为累积过程以及野外试验的可行性, 将不同处理所需的氮量折算为需要施加的硝酸铵 (NH₄NO₃) 量, 并将全年氮添加量均分为两次, 2015 年和 2016 年分别在植物生长初期 (5 月中旬) 和生长旺期 (7 月中旬) 的傍晚 (19:00 左右) 采用土施法各施加一次硝酸铵 (NH₄NO₃) 模拟氮沉降。

2016 年 7 月下旬在各小区随机布设一个 1 m × 1 m 的植物样方, 共调查 18 个样方, 并记录每个样方内出现的物种名称以及各物种的频度 (针刺法)、盖度 (目测法)、多度 (样方内各物种的数目) 等。

1.2.2 植物物种重要值

重要值是以综合数值来表示群落中不同物种的相对重要值, 能较充分地显示出不同物种在群落中的优势地位, 重要值 = (相对频度 + 相对盖度 + 相对密度)/3。式中: 相对频度为某一物种的频度占全部物种频度之和的百分比; 相对盖度为某一物种的盖度占全部物种盖度之和的百分比; 相对密度为某一物种的个体数占全部物种个体数目的百分比^[17]。

1.2.3 物种多样性指数

物种多样性分析选取 3 种常用的物种多样性指

数, 即 Patrick 丰富度指数 (R_0)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J) 进行分析^[18], 具体公式如下:

Patrick 丰富度指数: $R_0 = S$;

Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$;

Pielou 均匀度指数: $J = H' / \ln S$ 。

式中: S 为群落内物种总数, P_i 为第 i 个物种的个体数在群落个体总数中的比例。

1.2.4 植物群落稳定性测度方法

根据 Godron 稳定性测定方法^[19], 结合郑元润^[20]对 Godron 稳定性测定改进的数学方法, 计算出各施氮处理下的群落稳定性。首先将研究群落中各物种的频度由大到小排列, 其次将整个群落的物种总数取倒数, 按照植物种类排列的顺序计算总种数倒数的累积百分数, 并将各物种的频度换算为相对频度按照植物种类排列的顺序计算相对频度的累积百分数, 最后对二者做散点图, 建立数学模型得出平滑曲线, 同时做直线 $y = 100 - x$, 其与平滑曲线的交点即稳定性参考点 (x, y)。交点坐标越接近稳定点 (20, 80), 群落越稳定, 反之, 越不稳定。因此, 本研究采用欧式距离来表示群落的稳定性^[21]。

平滑曲线模型为:

$$y = ax^2 + bx + c. \quad (1)$$

直线方程为:

$$y = 100 - x. \quad (2)$$

将方程 (2) 代入方程 (1) 得:

$$ax^2 + (b+1)x + c - 100 = 0. \quad (3)$$

解方程得:

$$x = \frac{-(b+1) \pm \sqrt{(b+1)^2 - 4a(c-100)}}{2a}. \quad (4)$$

求出两个交点坐标后根据研究方法, 只保留 x 值小于 100 的交点坐标, 即为所求的稳定性参考点 (x, y), 继而计算 (x, y) 与 (20, 80) 的欧氏距离来表示群落稳定性。

1.3 数据分析

基础数据进行整理和分析后, 计算物种多样性指数和群落相似性系数, 采用 SPSS19.0 (IBM, Armonk, NY, USA) 数据统计软件对不同实验处理下

的物种多样性指标进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 用 Duncan 检验进行不同氮添加处理间植物群落组成以及 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的多重比较 ($P < 0.05$), 用 Pearson 相关分析不同氮添加处理下植物群落稳定性和物种多样性的关系, 最后利用 Origin 9.4 软件 (Origin Lab Corporation, Northampton, MA, USA) 制图。

2 结果与分析

2.1 不同氮添加处理对高寒草原植物群落物种组成的影响

通过比较不同氮添加处理下功能群和群落优势种的重要值, 发现随着施氮量增加, 群落物种组成发生了改变 (表 1)。在功能群水平上, N_I 、 N_{II} 、 N_{III} 、 N_{IV} 、 N_V 处理下禾本科和杂类草植物的重要值均与 CK 间无显著差异 ($P > 0.05$), 但 N_V 处理下禾本科植物的重要值最高, 占群落总重要值的 79.3%, 显著高于 N_I 、 N_{II} 、 N_{III} 处理。杂类草的重要值则在 N_I 处理下最高, N_V 处理下最低, 少于 CK 重要值的一半 ($P < 0.05$)。不同氮添加处理下莎草科植物的重要值与 CK 相比增加了 113.72%~280.39%, 但与豆科植物相同, 不同处理间的重要

值差异不显著 ($P > 0.05$)。

在物种水平上, 主要分析了重要值较高的物种在不同施氮处理下的重要值变化规律。不同施氮处理下草地早熟禾始终是优势种, 其重要值占群落总重要值的 32.0%~44.5%。 N_{IV} 和 N_V 处理下短芒披碱草的重要值明显增加, 分别是 CK 处理的 1.32 和 2.28 倍。 N_I 、 N_{II} 、 N_{III} 、 N_{IV} 处理下线叶嵩草 (*Kobresia capillifolia*) 的重要值先升高后降低, 甘肃马先蒿 (*Pedicularis kansuensis*) 的重要值呈现随施氮量增加而增加的趋势。除 N_I 处理外, 与 CK 相比各施氮处理下猪毛蒿的重要值均有所降低, 降幅最大为 44.74%, 但均未达显著水平 ($P > 0.05$)。

2.2 不同氮添加处理对高寒草原植物群落物种多样性的影响

不同氮添加处理对高寒草原群落物种多样性的影响如图 1 所示, 少量的氮素添加促进了 N_I 处理的 Patrick 丰富度指数, 最高值为 14.5, 最低值出现在 N_V 处理, 相比于 N_I 处理显著 ($P < 0.05$) 降低了 33.31%, 但各施氮处理均与 CK 处理无显著差异 ($P > 0.05$)。 N_{III} 和 N_{IV} 处理的 Shannon-Wiener 多样性指数高于 CK 处理, 而 N_V 处理的 Shannon-Wiener 多样性指数显著 ($P < 0.05$) 低于 CK 处理, 降幅为 13.47%。不同施氮处理下的 Pielou 均匀度指数的变

表 1 不同氮添加处理下群落的物种组成及其重要值
Table 1 Species compositions and importance values of plant communities at different nitrogen levels

类项 Item	CK	N_I	N_{II}	N_{III}	N_{IV}	N_V	
功能群 Functional group	禾本科 Gramineae	62.6 ± 3.4ab	49.4 ± 4.9b	49.9 ± 12.7b	48.4 ± 5.1b	60.2 ± 16.1ab	79.3 ± 8.7a
	莎草科 Cyperaceae	5.1 ± 5.1a	10.9 ± 0.6a	19.4 ± 9.8a	18.2 ± 6.7a	12.8 ± 6.4a	6.4 ± 3.4a
	豆科 Leguminosae	3.6 ± 1.2a	0.6 ± 0.3a	2.4 ± 0.4a	5.2 ± 3.9a	0.7 ± 0.4a	1.0 ± 0.5a
	杂类草 Forbs	28.7 ± 2.8ab	39.1 ± 4.4a	28.4 ± 5.0ab	28.1 ± 2.9ab	26.3 ± 9.4ab	13.4 ± 4.9b
植物种 Plant species	草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	43.3 ± 2.9a	33.2 ± 4.7a	34.7 ± 9.8a	32.0 ± 4.7a	34.6 ± 7.3a	44.5 ± 6.0a
	短芒披碱草 <i>Elymus breviaristatus</i>	9.2 ± 2.8ab	5.3 ± 3.5b	7.4 ± 0.7ab	8.6 ± 3.1ab	12.1 ± 3.8ab	21.0 ± 10.6a
	线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i>	5.1 ± 5.1a	10.9 ± 0.6a	19.4 ± 9.8a	18.2 ± 6.7a	12.8 ± 6.4a	6.4 ± 3.4a
	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	11.4 ± 3.4a	13.9 ± 5.1a	8.7 ± 2.0a	7.5 ± 2.7a	6.3 ± 0.9a	7.4 ± 2.6a
	甘肃马先蒿 <i>Pedicularis kansuensis</i>	7.3 ± 2.3a	8.8 ± 2.8a	9.7 ± 3.5a	10.9 ± 4.1a	14.9 ± 7.5a	2.4 ± 1.8a

同行不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$); 下同。

Different lowercase letters within the same row indicate significant differences between different nitrogen levels at the 0.05 level; CK, N_I , N_{II} , N_{III} , N_{IV} and N_V are 0, 8, 24, 40, 56 and 72 kg·(hm²·a)⁻¹, respectively; similarly for the following figures and tables.

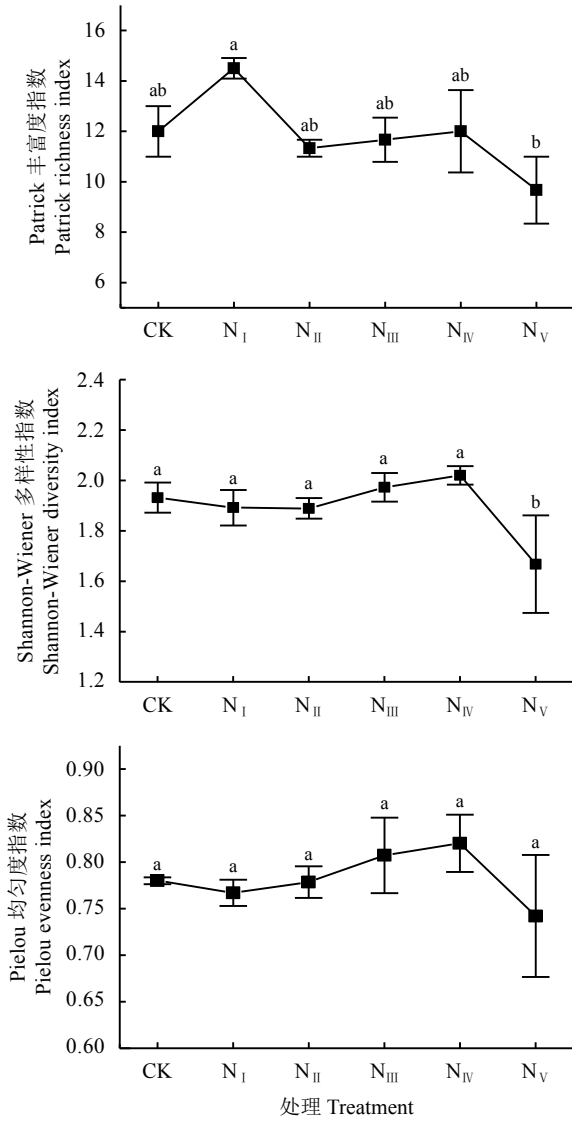


图 1 不同氮添加处理下高寒草原群落物种多样性变化
Figure 1 The change in species diversity index of alpine steppes under different nitrogen levels

化趋势与 Shannon-Wiener 多样性指数相同，在 N_{III} 和 N_{IV} 处理下增加，在 N_V 处理下呈下降趋势，但

各施氮处理之间均无显著差异。

2.3 不同氮添加处理对高寒草原植物群落稳定性的影响

对不同氮添加处理的物种累计百分数和累积相对频度百分数进行曲线拟合 (图 2)，拟合曲线的 $R^2 > 0.9$ ，拟合效果较好 (表 2)。各处理交点坐标与稳定点 (20, 80) 的欧氏距离分别为 12.30、13.32、10.99、15.53、14.23 和 8.97，高寒草原研究区群落稳定性的判定结果为 N_{III}、N_{IV} 处理的稳定性距离明显大于 CK、N_I 和 N_{II} 处理，即 N_{III}、N_{IV} 处理的施氮量会导致群落稳定性降低，但 N_V 处理的植物群落与其他处理相比更加稳定。这与 N_V 处理下优势物种重要值占比增加有关，草地早熟禾和短芒披碱草的重要值总和占群落总重要值的 65.5%，其相对频度累积分别为 47.17% 和 68.77%，决定散点图的前两个点，使得 N_V 处理的拟合曲线高于其他处理下的拟合曲线，稳定性参考点更加接近稳定点

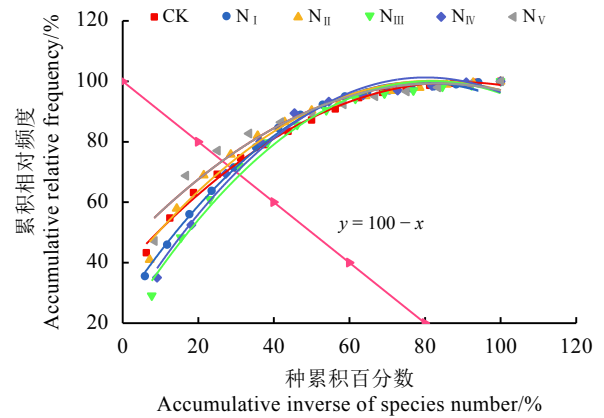


图 2 不同氮添加处理下的稳定性拟合曲线
Figure 2 M. Godron stability simulated curves of different nitrogen levels

表 2 不同氮添加处理下高寒草原群落稳定性分析
Table 2 The stability of alpine steppes under different nitrogen levels

处理 Level	拟合方程 Fitting equation	R^2	交点坐标 Point of intersection	欧氏距离 Euclidean distance
CK	$y = -0.008 9x^2 + 1.510 8x + 35.83$	0.996	(28.69, 71.31)	12.30
N _I	$y = -0.011x^2 + 1.796 8x + 27.232$	0.994	(29.42, 70.58)	13.32
N _{II}	$y = -0.009 5x^2 + 1.558 8x + 36.277$	0.978	(27.77, 72.23)	10.99
N _{III}	$y = -0.012 1x^2 + 1.971 9x + 19.552$	0.986	(30.98, 69.02)	15.53
N _{IV}	$y = -0.012 5x^2 + 2.005 5x + 20.939$	0.984	(30.06, 69.94)	14.23
N _V	$y = -0.007 9x^2 + 1.320 7x + 44.358$	0.949	(26.34, 73.66)	8.97

(20, 80) (图 2)。Pearson 相关分析表明, 不同氮添加处理下植物群落稳定性与 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), 相关系数分别为 -0.872 和 -0.839 , 表明 N_V 处理下群落稳定性较高与群落内 Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度下降有关。

3 讨论

物种组成是生态系统稳定性、生产力、营养动态等功能的重要决定因子, 而物种多样性是群落功能复杂性和稳定性的重要度量指标^[22]。因此, 物种组成和物种多样性的变化是外界环境变化对群落结构和功能的影响的直观体现。本研究中, 不同施氮处理下功能群重要值与 CK 处理相比虽无显著变化, 但与 N_I 处理相比, N_V 处理下的施氮量明显改变了植物群落内功能群的重要值, 主要表现为禾本科植物的重要值增加, 杂类草的重要值降低, 群落内物种数减少, 莎草科和豆科植物重要值无明显变化。这与在贝加尔针茅草甸草原进行的增水增氮研究结果相似, 即在年际变化中增氮对多年生根茎禾草有促进效应, 对多年生杂类草有抑制效应, 群落结构发生改变^[23]。同时, 有学者指出, 不同功能群(禾草类、莎草类、豆科植物和杂类草)对氮沉降的响应呈现出不同的规律, 导致群落物种组成的变化和多样性的降低^[24-25]。在高寒草原植物群落主要物种重要值分析中发现, 随着施氮量的增加, 草地早熟禾始终是高寒草原研究区群落的主要优势种, 在 N_V 处理下短芒披碱草的重要值明显增加, 其他物种的重要值随施氮处理的不同而不同。这可能是因为草地早熟禾和短芒披碱草是氮素这种限制性资源的有力竞争者, 之前的研究发现, 不同施氮处理下铁卜加高寒草原的 $N:P < 14$, 氮素是其主要的限制性营养元素^[26], 施氮量的不断增加使草地早熟禾和短芒披碱草在群落中的丰度增加, 最终成为群落的优势种^[27]。

目前, 关于氮添加对群落物种多样性影响的研究报道很多, 大量草地氮添加试验表明, 增氮显著降低了群落物种多样性^[28-29], 但也有些研究表明, 氮素添加对物种多样性无显著影响^[11]。本研究发现, N_I 、 N_{II} 、 N_{III} 和 N_{IV} 处理对高寒草原的物种多样性影响不显著, 但 N_{III} 和 N_{IV} 处理下的物种多样性高于 CK, N_V 处理显著降低了 Shannon-Wiener

多样性指数, Patrick 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数虽有所下降但不显著, 这表明适量的氮素添加有利于物种多样性的增加, 但高倍氮的施加会影响植物的正常生长, 降低物种多样性, 这一结果与高海燕等^[30]的研究结果相似, 即在自然降水条件下物种多样性随着施氮量增加, 整体呈现先上升后下降的趋势。导致这一研究结果的原因除了氮素作为植物生长的关键因子, 适量添加可以增加土壤养分, 促进植物生长, 但过量则会引起土壤酸化, 改变土壤碳氮分配, 影响植物的正常生长外, 还可能与草地早熟禾等高大禾草在群落中的优势度增加导致的光竞争有关, 从而降低了群落内物种多样性^[23]。

青藏高原高寒草原的稳定性受到种间竞争、气候变化等因素的影响, 本研究采用改进的 M. Godron 稳定性测定方法计算高寒草原植物群落稳定性, 结果表明, N_{III} 、 N_{IV} 处理的稳定性距离较大, 群落稳定性较低, 而 N_V 处理的稳定性距离最小, 群落更加趋于稳定, 但 CK、 N_I 和 N_{II} 处理的稳定性无明显规律。研究表明, 青海湖流域草本植物群落多样性与稳定性呈负相关关系^[10], 本研究也得出了相似结论, 即群落多样性和均匀度越低, 群落稳定性越高, 这与 May 通过数学推导认为生态系统的稳定性随物种多样性的增加而下降相一致^[11]。根据质量效应, 群落稳定性主要受优势种的影响, 禾本科作为优势功能群其稳定性大于杂类草的稳定性^[31-32], 植物群落受到氮沉降的影响时, 禾本科作为优势功能群其高度和生物量会有显著的增加, 杂类草作为从属功能群其高度和生物量显著低于禾本科植物, 将会受到优势功能群光竞争的抑制, 优势种的重要值增加, 稳定性参考点更加接近 (20, 80), 导致植物群落整体稳定性增加。因此, 利用改进的 M. Godron 稳定性测定方法得出的稳定性结果受到物种多样性和优势物种重要值占比的影响。另外, 稳定性本身具有复杂多层次性的特点, 后续研究中应该结合生产力稳定性和土壤肥力等指标综合评估高寒草原在持续氮沉降现状下的群落稳定性。

4 结论

氮添加改变了高寒草原植物群落功能群和物种组成, 首先莎草科植物的重要值随着施氮量的增

加而增加, 当施氮量增加到一定程度后禾本科植物的重要值开始增加, 杂类草的重要值明显降低, 豆科植物重要值无明显变化规律, 但草地早熟禾作为群落中的主要优势种始终未发生改变。氮添加对高寒草原 Patrick 丰富度无显著影响, 但与 N_1 处理相比, N_V 处理下群落内物种数显著降低, Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度随施氮量增加总体呈现先增加后降低的趋势。通过 Pearson 相关分析得出不同施氮处理下群落稳定性

与 Shannon-Wiener 多样性和 Pielou 均匀度呈显著负相关关系。综上所述, 经过连续两年施氮处理, 本研究发现, $8\sim 72\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 氮倍增试验对高寒草原植物群落组成和物种多样性有一定的促进作用, 但 $72\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 处理下的施氮量开始对此表现出了一定的抑制作用, 进而对群落稳定性产生影响, 这一结论可以为氮沉降背景下青藏高原高寒草地的适应性管理提供科学基础, 具有重要理论和实践意义。

参考文献 References:

- [1] ZHONG X L, LI J T, LI X J, YE Y C, LIU S S, HMLLETT P D, OGDEN M R, NAVEED M. Physical protection by soil aggregates stabilizes soil organic carbon under simulated N deposition in a subtropical forest of China. *Geoderma*, 2017, 285: 323-332.
- [2] 杨振安. 青藏高原高寒草甸植被土壤系统对放牧和氮添加的响应研究. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2017.
YANG Z A. A study on the responses of vegetation-soil system to grazing and nitrogen addition in an alpine meadow of Qinghai Tibetan Plateau, China. PhD Thesis. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017.
- [3] NIU D C, YUAN X B, ARIANNE J C, WEN H Y, ZHANG C P, FU H, JAMES J E. The impact of nitrogen enrichment on grassland ecosystem stability depends on nitrogen addition level. *Science of The Total Environment*, 2018, 618: 1529-1538.
- [4] YANG H J, WU M Y, LIU W X, ZHANG Z, ZHMNG N L, WAN S Q. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2015, 17(1): 452-465.
- [5] LYU C, TIAN H. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D22S05.
- [6] ZHAO Z Z, DONG S K, JIANG X M, LIU S L, JI H Z, LI Y, HAN Y H, SHA W. 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*, 2017, 592: 565-572.
- [7] 梁艳, 干珠扎布, 曹旭娟, 张伟娜, 张勇, 栗文瀚, 高清竹, 万运帆, 李玉娥, 旦久罗布, 何世丞. 模拟氮沉降对藏北高寒草甸温室气体排放的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 485-494.
LIANG Y, Hasbagan-Ganjurjav, CAO X J, ZHANG W N, ZHANG Y, LI W H, GAO Q Z, WAN Y F, LI Y E, Danjiuluobu, HE S C. Effects of simulated nitrogen deposition on greenhouse gas emissions from alpine meadows in northern Tibet. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 485-494.
- [8] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 郑娇娇, 李英年. 青藏高原高寒草甸土壤 CO_2 排放对模拟氮沉降的早期响应. *生态学报*, 2011, 31(10): 2687-2696.
ZHU T H, CHENG S L, FANG H J, YU G R, ZHENG J J, LI Y N. Early responses of soil CO_2 emission to simulating atmospheric nitrogen deposition in an alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [9] 李璠, 周国英, 杨路存, 徐文华, 钟泽兵, 宋文珠. 围栏封育对青海湖流域主要植物群落多样性与稳定性的影响. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 135-140.
LI F, ZHOU G Y, YANG L C, XU W H, ZHONG Z B, SONG W Z. effect of fence on biodiversity and sability of the main plant communities in the Qinghai Lake Area. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(4): 135-140.
- [10] MAY R M. Will a large complex system be stable. *Nature*, 1972, 238: 413-414.
- [11] HUBERTY L E, GROSS K L, MILLER C J. Effects of nitrogen addition on successional dynamics and species diversity in Michigan old-fields. *Journal of Ecology*, 1998, 86: 794-803.
- [12] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 王启兰. 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响. *生态学报*, 2013, 33(10): 3103-3113.
WANG C T, WANG G X, LIU W, WANG Q L. Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10): 3103-3113.
- [13] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 贺金生. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 159-166.

- YANG X X, REN F, ZHOU H K, HE J S. Responses of plant community biomass to nitrogen and phosphorus additions in an alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 159-166.
- [14] 杨月娟, 周华坤, 叶鑫, 姚步青, 王文颖, 赵新全, 张灏. 青藏高原高寒草甸植物群落结构和功能对氮、磷、钾添加的短期响应. *西北植物学报*, 2014, 34(11): 2317-2323.
- YANG Y J, ZHOU H K, YE X, YAO B Q, WANG W Y, ZHAO X Q, ZHANG H. Short-term responses of plant community structure and function to nitrogen, phosphorus and potassium additions in an alpine meadow of Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(11): 2317-2323.
- [15] 屈兴乐, 方江平. 不同休复年限退化草地植物群落的物种多样性和稳定性. *高原农业*, 2018(3): 220-229.
- QU X L, FANG J P. Biodiversity and stability of degraded grassland plant communities in different restored years. *Journal of Plateau Agriculture*, 2018(3): 220-229.
- [16] 祁百元, 杨明岳, 窦声云, 仁钦端治, 董世魁. 不同播种因素对扁穗冰草生产性能的影响. *草原与草坪*, 2018, 38(3): 62-66.
- QI B Y, YANG M Y, DOU S Y, Renqinduanzhi, DONG S K. Effects of different sowing factors on growth and development of *Agropyron cristatum*. *Grassland and Ture*, 2018, 38(3): 62-66.
- [17] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 娄安如. 基础生态学. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- SONG R Y, LI Q F, NIU C J, LOU A R. *Foundations in Ecology*. BeiJing: Higher Education Press, 2002.
- [18] 董世魁, 汤琳, 张相锋, 刘世梁, 刘全儒, 苏旭坤, 张勇, 武晓宇, 赵珍珍, 李钰, 沙威. 高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系. *生态学报*, 2017, 37(5): 1472-1483.
- DONG S K, TANG L, ZHANG X F, LIU S L, LIU Q R, SU X K, ZHANG Y, WU X Y, ZHAO Z Z, LI Y, SHA W. Relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1472-1483.
- [19] GODRON M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of cantal. *Statistical Ecology*, 1972(3): 397-415.
- [20] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探. *林业科学*, 2000, 36(5): 28-32.
- ZHENG Y R. Comparison of methods for studying stability of forest community. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(5): 28-32.
- [21] 李海涛, 刘小丹, 张克斌, 苗静, 西拉杰·马默. 宁夏盐池南海子湿地交错带判定及植被稳定性分析. *草业科学*, 2016, 33(12): 2544-2550.
- LI H T, LIU X D, ZHANG K B, MIAO J, SIRAJ M. Definition of wetland-dry grassland ecotone and vegetation stability in the Nanhaizi wetland in Yanchi, Ningxia. *Pratacultural Science*, 2016, 33(12): 2544-2550.
- [22] 郝建锋, 王德艺, 李艳, 姚小兰, 张逸博, 詹美春, 齐锦秋. 人为干扰对川西金凤山楠木次生林群落结构和物种多样性的影响. *生态学报*, 2014, 34(23): 6930-6942.
- HAO J F, WANG D Y, LI Y, YAO X L, ZHANG Y B, ZHAN M C, QI J Q. Effects of human disturbance on species diversity of *Phoebe zhenan* communitis in Jinfengshan Mountain in western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(23): 6930-6942.
- [23] 白珍建. 增水增氮对草甸草原植物群落结构组成和功能的影响. 吉林: 东北师范大学博士学位论文, 2017.
- BAI Z J. Effects of water and nitrogen addition on plant community structure, composition and function in meadow steppe. PhD Thesis. Jilin: Northeast Normal University, 2017.
- [24] 沈振西, 陈佐忠, 周兴民, 周华坤. 高施氮量对高寒矮嵩草甸主要类群和多样性及质量的影响. *草地学报*, 2002, 10(1): 7-17.
- SHEN Z X, CHEN Z Z, ZHOU X M, ZHOU H K. Responses of plant groups, diversity and meadow quality to high-rate nitrogen fertilization on alpine *Kobresia humilis* community. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10(1): 7-17.
- [25] 张杰琦, 李奇, 任正炜, 杨雪, 王刚. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落物种丰富度及其与地上生产力关系的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(10): 1125-1131.
- ZHANG J Q, LI Q, REN Z W, YANG X, WANG G. Effects of nitrogen addition on species richness and relationship between species richness and aboveground productivity of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2010, 34(10): 1125-1131.
- [26] HAN Y H, DONG S K, ZHAO Z Z, SHA W, LI S, SHEN H, XIAO J N, ZHANG J, WU X Y, JIANG X M, ZHAO J B, LIU S L, DONG Q M, ZHOU H K, JANE C Y. Response of soil nutrients and stoichiometry to elevated nitrogen deposition in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2019, 343: 263-268.
- [27] QUENTIN D R, JEREMIAH A H, AIMEE T C, NATHMN J S. Aboveground resilience to species loss but belowground resistance to nitrogen addition in a montane plant community. *Journal of Plant Ecology*, 2018, 11(3): 351-363.
- [28] CLARK C M, TILMAN D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*, 2008,

451: 712-715.

- [29] BAI Y, WU J, CLARK C M, NAEEM S, PAN Q M, HUANG J H, ZHMNG L X, XING G H. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: Evidence from inner Mongolia grasslands. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 358-372.
- [30] 高海燕, 红梅, 霍利霞, 刘鹏飞, 常菲. 水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响. *草业科学*, 2018, 35(1): 36-45.
GAO H Y, HONG M, HUO L X, LIU P F, CHANG F. Effect of water and nitrogen interaction on plant species diversity and biomass in a desert grassland. *Pratacultural Science*, 2018, 35(1): 36-45.
- [31] KARDOL P, CAMPANY C E, SOUZA L, NORBY R J, WELTZIN J, CLASSEN A T. Climate change effects on plant biomass alter dominance patterns and community evenness in an experimental old-field ecosystem. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2676-2687.
- [32] LIU H Y, MI Z R, LIN L, WANG Y H, ZHANG Z H, ZHANG F W, WANG H, LIU L L, ZHU B, CAO G M, ZHAO X Q, SANDERS N J, CLASSEN A T, REICH P B, HE J S. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production. *PNAS*, 2018, 115(16): 4051-4056.

(责任编辑 王芳)

2019 年 10 月国际市场主要畜产品与饲料价格分析

10 月国际饲料价格除棉籽饼和苜蓿粉外, 其他饲料价格出现上涨; 畜产品市场价格除鸡肉和猪肉外, 其他畜产品价格持续上涨。

一、国际饲料市场除棉籽饼和苜蓿粉外, 其他饲料价格出现上涨。

10 月份棉籽饼市场价格分别为 267.98 USD·t⁻¹, 环比下跌 0.65%。苜蓿粉价格为 296.00 USD·t⁻¹, 保持不变。玉米、大豆、高粱、豆粕、菜籽和豆粉市场平均价格分别为 153.56、339.87、148.00、335.55、350.71 和 293.86 USD·t⁻¹, 环比分别上涨 6.71%、5.29%、0.07%、4.08%、2.09% 和 0.92%。

二、畜产品市场价格除鸡肉和猪肉外, 其他畜产品价格持续上涨。

10 月份欧盟猪肉市场价格为 1.39 USD·kg⁻¹, 环比下跌 12.48%。鸡肉市场价格为 1.85 USD·kg⁻¹, 与 9 月持平。其他畜产品, 瘦肉猪、育肥牛、牛奶、牛肉、新西兰羊肉和羊羔肉市场价格分别为 1.44、3.18、0.32、5.20、5.51 和 7.81 USD·kg⁻¹, 环比分别上涨 2.88%、4.55%、0.42%、5.03%、6.96% 和 2.09%。

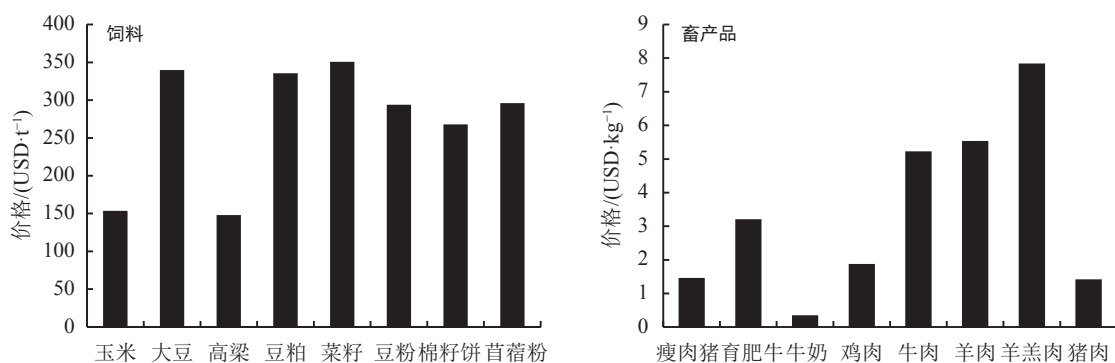


图 1 2019 年 10 月国际市场主要饲料与畜产品价格

数据来源: 国际市场商品价格网 <http://price.mofcom.gov.cn/>; 中国农业信息 <http://www.agri.gov.cn/>; 鸡肉 <http://www.indexmundi.com/>; 羊肉 <http://interest.co.nz/rural>; 牛肉 <http://www.thebeefsite.com/>; 猪肉 <http://www.thepigsite.com/>; 货币汇率 <http://qq.ip138.com/hl.asp>。

(兰州大学草地农业科技学院 杨春涛 整理)