

# 短期氮磷添加对晋北赖草草地植物群落特征的影响

王恒宇<sup>1,2</sup>, 介瑞琪<sup>1,2</sup>, 王子量<sup>1,2</sup>, 桂建华<sup>1,2</sup>, 黄臣<sup>1,2</sup>, 王常慧<sup>1,2</sup>, 董宽虎<sup>1,2</sup>, 赵祥<sup>1,2</sup>

(1. 山西农业大学草业学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西右玉黄土高原草地生态系统定位  
观测研究站, 山西 右玉 037200)

**摘要:**以晋北赖草(*Leymus secalinus*)草地为对象,通过添加氮、磷分析草地群落植物多样性与生产力,研究养分添加对草地群落植物组分、结构和多样性格局的影响。结果表明:短期氮、磷添加对草地群落 Shannon—Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数均无显著影响。单独添加氮、磷对草地群落生产力的影响较小,同时添加氮、磷通过增加杂类草在草地群落中的比例,可增加草地上生物量,显著降低植物群落根冠比。赖草草地群落多样性与生产力之间呈显著正相关关系。

**关键词:**氮添加;磷添加;物种多样性;生产力;根冠比

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)02-0011-07

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cycp.2022.02.002



自然界中的植物在其生长和发育过程中,与植物体内其他营养元素相比,植物对氮元素的需求量更多<sup>[1]</sup>。氮素(N)不仅是植物体内本身所含有的营养元素,而且参与植物中大量有机化合物的形成。磷元素(P)也是植物生长发育所必需的主要元素之一,氮和磷两种元素在植物代谢中存在相辅相成的作用<sup>[2]</sup>,经过氮添加处理植物后,植物体内氮含量增加,植物为了维持其 N/P 的内部元素比例平衡,需要从外界吸收更多的磷<sup>[3]</sup>。

氮素是草地生态系统中限制植物生长的重要因子<sup>[4]</sup>,它通过促进少数植物的生长而增加地上生物量和减少植物多样性<sup>[5-7]</sup>。添加氮会显著增加内蒙古典型草原、高寒禾草草地生态系统的生产力<sup>[8-9]</sup>。磷的作用尽管不如氮突出,但它有时也成为植物生长的限制因子<sup>[10]</sup>,黑龙江西部地区草地添加磷显著提高草地

生产力<sup>[11]</sup>。根、冠作为植物的基本结构对 N、P 的响应各不相同,N 添加可以促进植物的冠部生长,P 添加主要促进植物的根部生长<sup>[12-13]</sup>。随着养分添加量的增加,其作用会相对减弱,即 N、P 添加对生产力的影响存在一个阈值<sup>[7]</sup>。养分添加同时也会减少群落物种数量,降低物种多样性<sup>[14-16]</sup>。然而,草地生态系统的可持续性和生产力的维持在很大程度上依赖于草地植物多样性<sup>[17]</sup>。对于陆地生态系统而言,群落净初级生产力受 N、P 元素共同限制<sup>[18-19]</sup>。氮、磷肥料的合理添加对牧草产量、品质的提高会产生明显的促进作用<sup>[20]</sup>。本试验以晋北赖草草地作为研究对象,研究 N、P 添加对草地植物多样性与生产力的影响。旨在为草地资源的合理利用与科学管理提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地设在山西右玉黄土高原草地生态系统定位观测研究站(E 112°19.660', N 39°59.808'),海拔 1 348 m,年均气温 4.7 °C,最冷月(1 月)均温 -14 °C,最热月(7 月)均温 20.5 °C,≥0 °C 年总积温 2 600~3 600 °C。全年太阳总辐射量 598 KJ/cm<sup>2</sup>,年日照 2 600~2 700 h;年降水量 435 mm,属温带大陆性季风气候。草地类型属温性山地草原类,草地型为赖草(*Leymus secalinus*)—杂类草群丛。土壤为淡栗钙土,土壤 pH 值为 9.2<sup>[21]</sup>。

收稿日期:2021-12-01;修回日期:2021-12-27

基金项目:国家自然科学基金(31870438);山西省优秀  
人才创新项目(201805D211018)

作者简介:王恒宇(1996-),男,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研  
究生。

E-mail:wanghengy@126.com

赵祥为通信作者。

E-mail:sxndzhaox@126.com

## 1.2 试验设计

试验平台为全球变化联网试验平台(Global Change Network)的一个观测点,试验处理开始于2018年。试验设CK(不添加氮和磷)、N(氮添加,10 g/m<sup>2</sup>)、P(磷添加,10 g/m<sup>2</sup>)、NP(氮和磷添加,均为10 g/m<sup>2</sup>)4个处理,6次重复,小区面积6 m×6 m。随机区组设计,小区之间设2 m的隔离带。氮添加材料为树脂包膜尿素(纯N含量为46.4%);磷添加材料过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量为12%);每年五月初进行氮磷添加,人工撒匀。

## 1.3 测定方法

于2018、2019年牧草生长旺季的8月中旬随机布设1 m×1 m观测样方,记录各样方内的植物组成及其高度、盖度、密度等;用100 cm×20 cm样方收获并测定地上生物量(Aboveground biomass, AGB);用根钻法测定地下生物量(Belowground biomass, BGB),用直径为7 cm的根钻随机取6钻土,分别取0~10、10~20、20~30和30~40 cm共4层,6钻混合为该小区样品,放入网袋中,用塑料标签写好样方号带回室内,将土中的根系冲洗干净,然后装进信封并标记好样方号,放入65℃烘箱烘至恒重。

植物功能群划分:按植物生活型划分为禾本科、杂类草2个功能群<sup>[22]</sup>。

## 1.4 数据计算

Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数都是度量群落水平反应的综合数量指标,采用下列公式计算:

$$\text{Margalef 丰富度指数: } R = \frac{S-1}{\ln N}$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J_{sw} = \frac{H'}{\ln S}$$

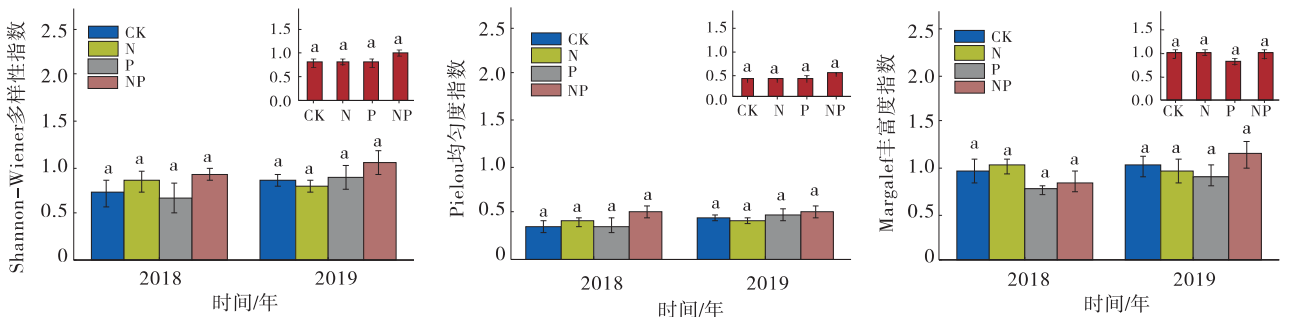


图1 草地的Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数

Fig. 1 Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index and Margalef richness index of grassland

注:不同小写字母代表不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_e P_i$$

式中: $S$ 为物种数目, $N$ 为所有物种的个体数目; $P_i$ 为各物种在群落中所占的比例。

## 1.5 统计分析

数据使用SPSS 17.0进行方差分析和显著性检验,采用Origin进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 短期N、P添加对赖草草地植物多样性的影响

单独添加N、P及两者同时添加对Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数均无显著影响( $P > 0.05$ )(图1)。但N、P同时添加有提高Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数的趋势。2018年对照的多度和盖度都高于其他处理(图2),随着施肥时间的增加,N、NP处理的盖度显著高于其他处理( $P < 0.05$ )。单独N添加可以提高草地多度( $P < 0.05$ )。

### 2.2 短期N、P添加对赖草草地生物量的影响

2018年的NP添加地上生物量显著高于对照与N添加( $P < 0.05$ );2019年的NP添加地上生物量显著高于其他添加( $P < 0.05$ )(图3),且N、P添加对地上生物量的增加有互作效应(表1)。地下生物量各添加之间无显著差异( $P > 0.05$ )(图3)。2019年的NP添加总生物量显著高于对照( $P < 0.05$ );2018年的各添加之间无显著差异( $P > 0.05$ )(图3)。

NP添加显著增加了杂类草的地上生物量( $P < 0.05$ )(图4),同时增加了杂类草地上生物量所占群落

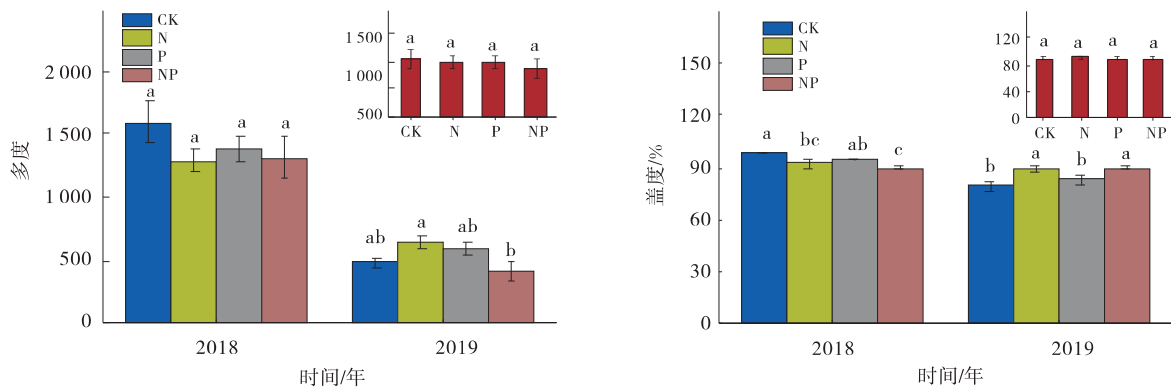


图 2 草地多度和盖度

Fig. 2 Grassland abundance and coverage

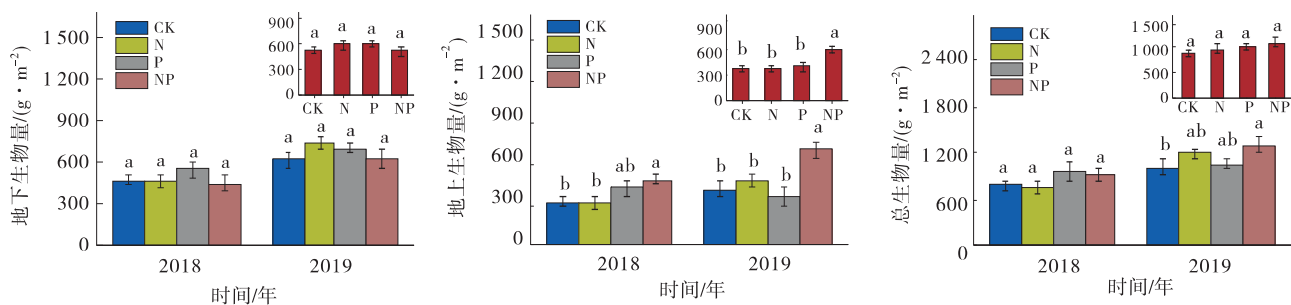


图 3 草地的地下生物量、地上生物量与总生物量

Fig. 3 Underground biomass, underground biomass and total biomass of grassland

地上生物量的比例,减少了禾本科地上生物量所占群落地上生物量的比例(图 5)。禾本科地上生物量占草

地植物群落生物量的 50%~78%,杂类草占草地植物群落的 21%~49%(图 5)。

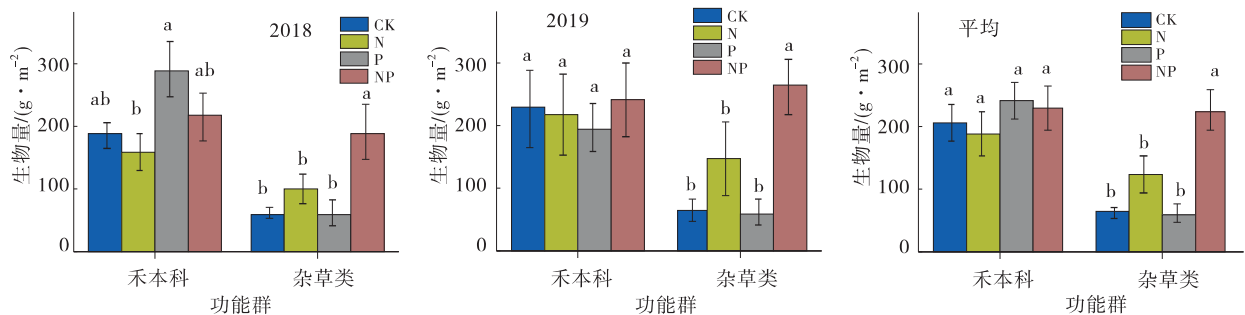


图 4 草地的植物功能群地上生物量

Fig. 4 Effect of nitrogen and phosphorus addition on aboveground biomass of grassland plant functional group

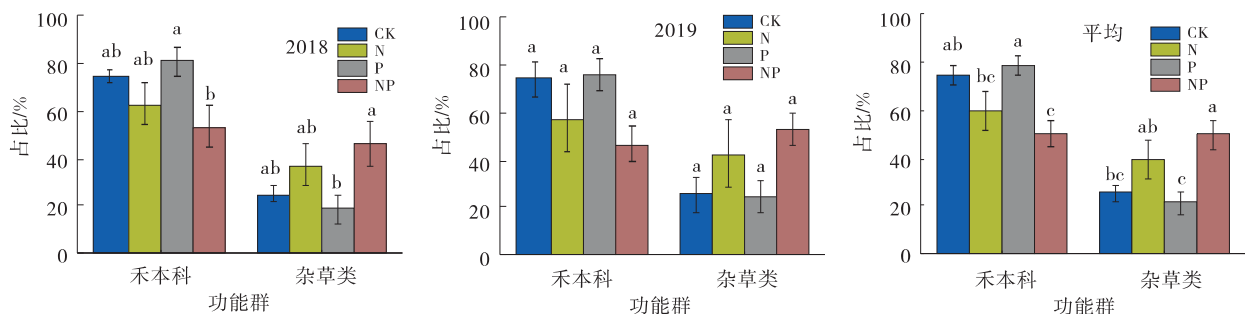


图 5 草地的植物功能群在草地中所占比重

Fig. 5 Effect of N and P addition on the proportion of grassland plant functional groups in grass masses

## 2.3 短期 N、P 添加对赖草草地群落地上、地下生物量分配的影响

NP 添加显著增加了地上生物量的比例,降低了地下生物量的比例( $P < 0.05$ )(图 6);单独的 N、P 添

加与对照相比无显著差异( $P > 0.05$ )。根据方差分析的结果(表 1),N、P 的互作效应增加影响了地上地下生物量的分配。

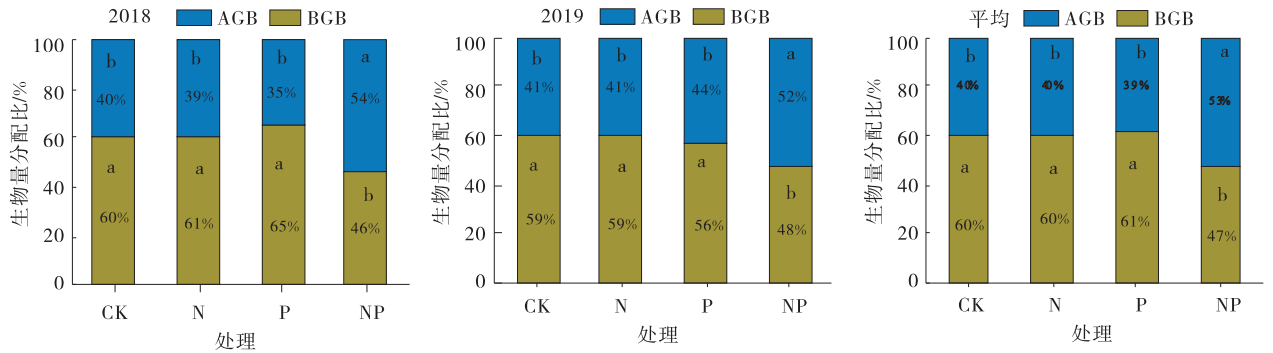


图 6 草地地上和地下生物量分配比

Fig. 6 Aboveground and underground biomass allocation ratio of grassland

表 1 N、P 添加对植物群落特征影响的三因素方差分析

Table 1 Three-factor ANOVA of the effect of N and P addition on plant community characteristics

	N	P	Year	N × P	N × Year	P × Year	N × P × Year
多样性	2.23	1.13	1.66	1.15	0.79	0.71	0.07
均匀度	1.92	2.77	2.03	1.04	1.16	0.04	0.01
丰富度	1.28	0.90	2.26	1.00	0.01	2.00	0.70
多度	1.69	1.17	136.19***	0.10	1.47	0.03	3.96
盖度	1.59	0.09	47.86***	0.2	31.62***	3.51	0.98
地下生物量	0.22	0.00	24.72***	3.68	0.88	0.49	0.60
地上生物量	9.26**	9.88**	7.88**	5.18	5.47*	0.38	1.91
总生物量	2.57	4.01	24.04***	0.04	4.23*	0.69	0.14
禾本科生物量	0.19	1.25	0.06	0.01	1.06	1.55	0.60
杂类草生物量	21.81**	4.42*	1.75	4.84*	1.36	0.04	0.09
地上生物量占比	9.49**	7.19*	1.51	10.23*	1.27	0.62	1.69
地下生物量占比	9.49**	7.19*	1.51	10.23*	1.27	0.62	1.69

注: \* , $P < 0.05$ ; \*\*, $P < 0.01$ ; \*\*\*, $P < 0.001$

## 2.4 N、P 添加下草地群落多样性与生物量之间的相关性

地上生物量与 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数之间有着显著正相关关系( $P < 0.05$ )。且总生物量与 Pielou 均匀度指数之间显著正相关( $P < 0.05$ )(图 7)。

## 3 讨论

### 3.1 N、P 添加对赖草草地植物群落特征的影响

本研究单独或者组合添加 N、P 两种养分,结果表

明短期添加 N 对草地群落多样性没有显著影响,这与常继方等<sup>[23]</sup>在额尔古纳和马涛等<sup>[24]</sup>在青藏高原所得出的 N 添加会导致物种多样性降低的结果不同,可能是禾本科对资源的获取能力未使其侵占其他物种的上层空间,植物上下层之间对光资源的获取较为一致,物种多样性没有发生显著变化<sup>[25]</sup>;而单独添加 P 对群落多样性的影响不显著,这与有关的研究结果相类似<sup>[26-27]</sup>,其原因可能是添加 P 元素对草地植物多样性的影响主要是通过改变植物资源竞争造成的,在此过程中,多种因素一起作用甚至是元素间的配合来影响

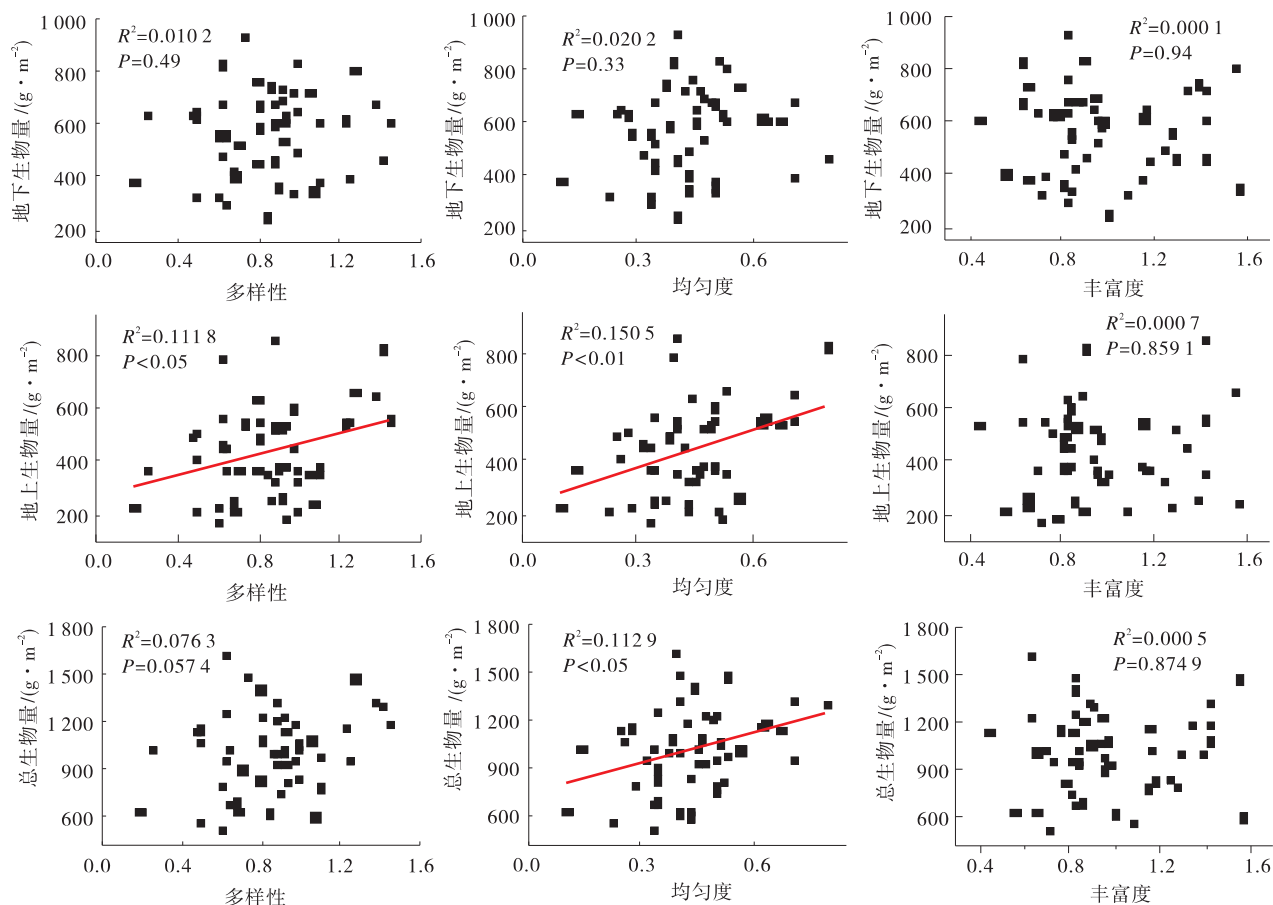


图 7 草地多样性与生产力的相关性

Fig. 7 Correlation between grassland diversity and productivity

草地植物群落物种多样性<sup>[28]</sup>。

### 3.2 群落物种多样性与生产力的关系

本研究中单独添加 N、P 对地上生物量的增长并不显著,仅 N、P 共同处理显著提高草地的地上生物量,表明 N、P 添加具有互作效应,同时施加时可以更好地提高草地群落地上生物量,在充足的养分供应条件下,物种的快速生长为其获得竞争优势<sup>[29]</sup>。陈志飞等<sup>[30]</sup>在黄土丘陵的研究发现当地 N 添加量为 50 与 100 kg/hm<sup>2</sup> 与 P 配施下群落生产力大幅增加。这可能是各地区土壤 N 含量不同所导致的。本研究发现草地群落地上生物量的提高主要集中在杂类草的生物量增加,并且降低了禾本科植物在草地群落中所占的比例,但未改变禾本科在群落中的优势地位,其原因可能是 N、P 添加有利于杂类草的生长,而只添加 N 素时,禾本科植物对 N 的竞争优于其他功能群的植物,禾本科植物在草地群落中占主导地位<sup>[6]</sup>。

单独添加 N、P 对根冠的生长没有明显的促进作用,而 N、P 共同处理显著增加地上生物量,根冠比显

著降低,这一结果与陈慧敏等<sup>[31]</sup>的研究类似,辛小娟<sup>[32]</sup>的研究也发现当土壤肥力增加时,冠部相比根部将得到更多的生物量。这是因为 N、P 添加使得土壤的养分供应得到补充,植物不受养分胁迫,而受光胁迫,使养分限制转为光限制,植物通过增加光合产物向冠部的分配来增强对光的截获,减小植物受遮阴的影响,促进光合作用,使植物得到最快生长,同时结合最优生活史对策原理,养分充足,那么就不需浪费更多的能量在根系上<sup>[33]</sup>。

群落的生产力随着植物多样性的增加而提高<sup>[34]</sup>,物种多样性的减少导致生产力降低,其表现为正相关、单峰格局、对数关系等<sup>[35-36]</sup>。Waidn 等<sup>[37]</sup>对近 200 例物种多样性与生物量关系的调查发现,30%呈单峰曲线关系,26%呈正线性关系,12%为负线性关系,32%无显著相关关系。本研究的结果表明,养分添加在提高植物群落生产力的同时,提高了草地群落多样性,使生产力与多样性之间呈正相关关系,由于 N、P 添加改变了植物群落的生存环境,从而影响了植物多样性与

生产力的关系,这些生物或非生物条件的变化是导致植物多样性与生产力关系呈现多种不同模式的主要原因<sup>[16]</sup>。

## 4 结论

单独添加 N、P 对赖草草地植物群落地上生物量与多样性指数均无显著影响,同时添加 N、P 通过增加群落中杂类草的比例而显著增加植物地上生物总量,对地下生物量及群落多样性指数无显著影响,降低了群落根冠比。赖草草地植物群落多样性与生产力之间呈显著正相关关系。

### 参考文献:

- [1] Cruz J L, Mosquim P R, Pelacani C R, *et al.* Photosynthesis impairment in cassava leaves in response to nitrogen deficiency[J]. *Plant and Soil*, 2003, 257(2): 417-423.
- [2] Hartshorn A S, Coetsee C, Chadwick O A. Pyromineralization of soil phosphorus in a South African savanna[J]. *Chemical Geology*, 2009, 267(1): 24-31.
- [3] Resende Jcf, Markewitz D, Klink C A, *et al.* Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequent burning[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 105(1/3): 105-118.
- [4] 罗杨, 陈志飞, 周俊杰, 等. 黄土丘陵区白羊草群落光谱特征对氮磷添加的响应[J]. *草地学报*, 2021, 29(6): 1158-1165.
- [5] Stevens C J, Dise N B, Mountford J Q, *et al.* Impact of Nitrogen Deposition on the Species Richness of Grasslands[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [6] 王玉冰, 孙毅寒, 丁威, 等. 长期氮添加对典型草原植物多样性与初级生产力的影响及途径[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(1): 22-32.
- [7] Gough L, Osenberg C W, Gross K L, *et al.* Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities[J]. *Oikos*, 2000, 89(3): 428-439.
- [8] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 等. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 311-317.
- [9] 张学洲, 李学森, 顾祥, 等. 氮、磷、钾不同施肥配比效应对人工混播草地产量与品质的影响[J]. *新疆农业科学*, 2010, 47(11): 2277-2282.
- [10] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource [J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 423-447.
- [11] 戴建军, 石发庆, 张海军, 等. 黑龙江省西部草地土壤磷素状况及调控[J]. *中国草地*, 2001, 23(3): 45-48, 54.
- [12] 王晓薇, 牛萌楠, 张丽薇, 等. 不同施氮水平对温带典型草原植物地上-地下生物量分配模式的影响[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 39-46.
- [13] 文旻, 胡启武, 阳文静, 等. 氮、磷添加对鄱阳湖典型苔草湿地土壤养分和植物生物量的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1669-1676.
- [14] 杜忠毓, 安慧, 王波, 等. 养分添加和降水变化对荒漠草原植物群落物种多样性和生物量的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(4): 1100-1110.
- [15] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, *et al.* Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from inner Mongolia Grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 358-372.
- [16] 李文晶. 养分添加对羊草草地地上生产力、群落组成和功能性状影响的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2021.
- [17] Alhamad M N, Alrababah M A, Gharaibeh M A. Impact of burning and fertilization on dry Mediterranean grassland productivity and diversity [J]. *Acta Oecologica*, 2012, 40(3): 19-26.
- [18] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [19] 白雪, 程军回, 郑淑霞, 等. 典型草原建群种羊草对氮磷添加的生理生态响应[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 103-115.
- [20] 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, 15(5): 34-39.
- [21] 介瑞琪, 邢鹏飞, 张宾宾, 等. 晋北赖草草地演替过程中土壤理化性质的变化[J]. *草原与草坪*, 2020, 40(6): 10-15.
- [22] 扎西文毛, 赵建中, 严振英, 等. 围栏封育对退化草地群落功能群的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(14): 8650-8652.
- [23] 常继方. 氮磷添加对呼伦贝尔草地植物群落物种多样性与稳定性的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [24] 杨倩, 王妮, 曾辉. 氮添加对内蒙古退化草地植物群落多样性和生物量的影响[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(4): 430-441.



- [25] 马涛,童云峰,刘锦霞,等. 不同施肥处理高寒草甸植物群落物种多样性与生产力的关系[J]. 草原与草坪, 2008,28(4):34—38.
- [26] 康树文. 氮磷添加对内蒙古典型草原植物群落结构和季节动态的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2019.
- [27] Demalach N, Kadmon R. Light competition explains diversity decline better than niche dimensionality [J]. *Functional Ecology*, 2017, 31(9): 1834—1838.
- [28] 尚占环,姚爱兴,龙瑞军. 干旱区山地植物群落物种多样性与生产力关系分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 74—78.
- [29] Gonzalez Paleo L, Ravetta D A. Relationship between photosynthetic rate, water use and leaf structure in desert annual and perennial forbs differing in their growth [J]. *Photosynthetica*, 2018, 56(4): 1177—1187.
- [30] 陈志飞. 黄土丘陵区典型草地群落及其优势种对氮磷添加的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [31] 陈慧敏,石福习,杨桂生,等. 养分添加对三江平原沼泽化草甸植物群落组成和地上生物量的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1440—1446.
- [32] 辛小娟. 氮、磷添加对亚高山草甸地上/地下生物量分配及植物功能群组成的影响[D]. 兰州:兰州大学,2011.
- [33] 杨利民,周广胜,李建东. 松嫩平原草地群落物种多样性与生产力关系的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 589—593.
- [34] Sandau Nadine, Naisbit Russell E, Fabian Yvonne, *et al.* Understanding negative biodiversity—ecosystem functioning relationship in semi—natural wildflower strips. [J]. *Oecologia*, 2019, 189(1): 185—197.
- [35] Fraser L H, Pither J, Jentsch A, *et al.* Worldwide evidence of a unimodal relationship between productivity and plant species richness[J]. *Science*, 2015, 349(6245): 302—305.
- [36] 刁云飞,韩丽冬,张苏,等. 生物多样性与生产力的关系及其对环境因素的响应[J]. 中国林副特产, 2021(4): 108—110.
- [37] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems [J]. *Nature*, 1996, 379(6567): 718—720.

## Effects of short-term N and P addition on plant community characteristics of *Leymus secalinus* grassland in northern Shanxi Province

WANG Heng-yu<sup>1,2</sup>, JIE Rui-qi<sup>1,2</sup>, WANG Zi-liang<sup>1,2</sup>, GUI Jian-hua<sup>1,2</sup>, HUANG Chen<sup>1,2</sup>, WANG Chang-hui<sup>1,2</sup>, DONG kuan-hu<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiang<sup>1,2</sup>

(1. College of grassland industry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. Shanxi Youyu Loess Plateau grassland ecosystem positioning observation and research station, Youyu 037200, China)

**Abstract:** In order to study the effects of nutrient addition on plant composition, structure and diversity pattern of *Leymus Secalinus* grassland in northern Shanxi Province, the plant diversity and productivity of grassland community were analyzed by adding nitrogen and phosphorus. The results showed that the Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index and Margalef richness index were not significantly affected by short-term N and P addition. The results also implied that the effects of addition of N and P alone on grassland productivity were insignificant, whereas, addition of N and P at the same time increased the aboveground biomass, and significantly reduced the root shoot ratio of plant community by increasing the proportion of forb in grassland community. There was a significant positive correlation between community diversity and productivity of *Leymus Secalinus* grassland.

**Key words:** nitrogen addition; phosphorus addition; species diversity; productivity; root—shoot ratio