

DOI: 10.5846/stxb201407171461

于丽, 赵建宁, 王慧, 白龙, 刘红梅, 杨殿林. 养分添加对内蒙古贝加尔针茅草原植物多样性与生产力的影响. 生态学报, 2015, 35(24): - .
Yu L, Zhao J N, Wang H, Bai L, Liu H M, Yang D L. Effects of nutrient addition on plant diversity and productivity in a *Stipa baicalensis* grassland in Inner Mongolia, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

养分添加对内蒙古贝加尔针茅草原植物多样性与生产力的影响

于 丽^{1,2,3}, 赵建宁^{2,3}, 王 慧^{2,3}, 白 龙¹, 刘红梅^{2,3}, 杨殿林^{1,2,3,*}

1 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866

2 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191

3 农业部产地环境质量重点实验室, 天津 300191

摘要: 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, 对退化草地生态系统恢复与重建具有重要的理论和实践意义。本文以内蒙古贝加尔针茅 (*Stipabaicalensis*) 草原为对象, 研究了 N、P、K 养分添加对草地群落植物多样性和生产力的影响。结果表明: 1) 养分添加显著提升草原初级生产力, 其中氮素添加的效果最明显, NPK 复合添加, 草原初级生产力与对照相比提高了 1.31 倍。2) 养分添加使草地群落结构发生改变, N 素添加显著提高了贝加尔针茅和羊草 (*Leymuschinensis*) 为主的禾本科植物功能群在草地群落中所占的比重, 而豆科植物功能群在草地群落中所占的比重则显著降低。3) 养分添加使草原植物多样性不同程度地减少, 其中以 N 素添加的效应较为显著。4) 在养分添加条件下, 植物多样性与草原生产力之间呈负线性相关关系, 植物多样性、物种丰富度和物种均匀度与初级生产力的相关系数分别为 -0.522、-0.391 和 -0.534。

关键词: 贝加尔针茅草原; 草原生产力; K; N; P; 植物多样性

Effects of nutrient addition on plant diversity and productivity in a *Stipa baicalensis* grassland in Inner Mongolia, China

YU Li^{1,2}, ZHAO Jianning^{2,3}, WANG Hui^{2,3}, BAI Long¹, LIU Hongmei^{2,3}, YANG Dianlin^{1,2,3,*}

1 College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2 Agro-environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China

3 Key Laboratory of Original Agro-environment Quality, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China

Abstract: *Stipa baicalensis* grassland is a type of meadow steppe that plays an important role in livestock husbandry in China. In recent years, unsustainable grazing, mowing, and other overuse patterns have heavily affected China's grassland ecosystems, resulting in decreased productivity and losses in biological diversity and ecosystem stability. The restoration and sustainable use of grassland ecosystems has become a concern in grassland ecology. Low levels of soil nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) often become important factors that limit grassland productivity, while arational application of N, P, K and medium trace element fertilizers can obviously promote the productivity and quality of grasslands. Nutrient addition can affect the structure and diversity of grassland plant communities, and studies on the response of grasslands to adding nutrients will have important theoretical and practical significance to the recovery, reconstruction, and scientific management of degraded grassland ecosystems. We studied the effects of added N, P, and K in a *S. baicalensis*

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170435); “十二五” 国家科技计划项目 (2012BAD13B07); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金和农业部产地环境质量重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室开放基金项目资助

收稿日期: 2014-07-17; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangdianlin@caas.cn

grassland to provide a basis for the rational use and protection of grassland resources and the restoration and reconstruction of degraded grassland ecosystems, as well as to lay a foundation for a more general analysis of the relationship between biodiversity and productivity. A randomized block design experiment was conducted with six blocks of eight treatments each: C (control, no nutrient addition), K (K addition only, 100 kg/hm²), P (P addition only, 100 kg/hm²), N (N addition only, 100 kg/hm²), PK (mixed P and K addition, 100 kg/hm² of each element), NK (mixed N and K addition, 100 kg/hm² of each element), NP (mixed N and P addition, 100 kg/hm² of each element), and NPK (mixed N, P, and K addition, 100 kg/hm² of each element). Forty-eight (8 m × 8 m) plots were established with 2 m and 5 m isolation belts between the subplots and main treatment areas, respectively. In 2010, nutrients were applied twice a year with 50% of the treatment amount applied on June 15 and 50% again on July 15 during the grass-growing season. Fieldwork was completed in mid-August during the grass-growing season in 2012. To eliminate edge effects, conditions were measured only in the 6 m × 6 m area in the center of each 8 m × 8 m plot. A 1 m² (1 m × 1 m) quadrat in each 6 m × 6 m plot was used to record various biological and ecological characteristics including plant composition, plant height, percent ground cover, and vegetation density. We evaluated these characteristics to estimate primary productivity and plant diversity. One-way ANOVA was used to calculate the species richness, the Shannon-Wiener and Pielou indices, and to analyze aboveground biomass. The relationships between the diversity indices and aboveground biomass were determined through linear regression. The results showed that all treatments increased primary productivity and reduced plant diversity. N addition, with or without P or K addition, always significantly decreased the Shannon-Wiener and Pielou indices (except for the NP treatment which had no significant effect), but only the NP treatment resulted in a significant decrease in species richness. With the exception of the K treatment, all treatments resulted in significantly increased primary productivity. Among the three nutrients, N was the most effective treatment in increasing plant productivity and diversity; the NPK treatment had the greatest effect, increasing aboveground biomass 1.31 times compared to that of the control. Nutrient addition altered the community structure in that N addition significantly increased the proportion of grasses and reduced that of legumes, but the effects of nutrient addition on the proportion of cyperaceae and forbs were negligible. With fertilization, plant diversity (correlation coefficient, -0.522), species richness (-0.391), and species evenness (-0.534) were all negatively linearly correlated with primary productivity. In conclusion, the NPK combination treatment resulted in maximum grassland productivity while effectively maintaining plant diversity, resulting in improved environmental conditions and achieving sustainable development.

Key Words: *Stipa baicalensis* grassland; grassland productivity; K; N; P; plant diversity

天然草地是陆地生态系统的主体类型之一,它覆盖地球陆地表面的 1/4—1/3,是陆地—大气之间能量和水分交换的重要生态系统^[1]。贝加尔针茅草原是温性草甸草原的主要代表类型之一,在我国畜牧业生产中占有重要的地位^[2]。然而近 30 年来由于强度放牧、刈割等不合理的利用制度,导致草地生产力下降,草畜矛盾日益尖锐,草原生态系统结构和功能遭到破坏,生物多样性和稳定性下降,生态环境质量恶化,严重威胁着草地畜牧业的可持续发展^[3]。草地生态系统的恢复重建与合理利用已成为草地生态学关注的热点之一。

氮素是草原生态系统中限制植物生长的最主要的因子^[4],它通常会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^[5-7]。磷的作用尽管不如氮突出,但它有时也成为主要的限制因子^[8]。Elser 等^[9]和白雪等^[10]的研究发现,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。除此以外, K 也是植物生长的限制因素之一。尽管 Janssens 等^[11]发现对植物生长来说,钾比磷具有更重要的作用,但在大多数试验中钾的作用还是不很明显。大量的研究表明,氮、磷、钾及中微量元素肥料合理施用对牧草的产量、品质会产生明显的促进作用^[12],但随着施肥量的过量增加,施肥的作用会相对减弱,氮、磷肥混施对生产力的效果存在一个阈值^[13]。养分添加同时也会减少群落物种数量,降低物种多样性^[5-7,14,15,16]。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群落植物多样性^[6,17]。近年来,多样性—生产力关系的研究成为国内外学者关注的焦点,处理好两者的关系就可以稳定提高生态系统生产力,从而达到改善生态环境,实现可持续发展的目的^[17]。

本文以贝加尔针茅草原为研究对象,研究 N、P、K 养分添加对草地植物多样性与生产力的影响,旨在探讨养分添加对草地生态系统结构和功能的影响,以期为草地资源的合理利用与科学管理,以及退化草地生态系统的恢复与重建提供理论依据,并为更一般意义上的生物多样性与生态系统生产力关系的研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验样地设在内蒙古呼伦贝尔市鄂温克旗境内贝加尔针茅草原典型地带(E119°42',N48°30')。土壤为暗栗钙土。海拔高度 760—770 m。该区年均气温-1.6℃,年降水量 328.7 mm,年蒸发量 1478.8 mm,≥0℃年积温 2567.5℃,年均风速 4 m/s,其中 1 年中≥8 m/s 的风速 107.5 d,年大风日数 24.4 d,无霜期 113 d。植被类型为贝加尔针茅(*Stipabaicalensis*)、羊草(*Leymuschinensis*)草甸草原。常见种有羽茅(*Achnatherumsibiricum*)、日荫菅(*Carexpediformis*)、线叶菊(*Filifoliumsibiricum*)、洽草(*Koeleriacristata*)、扁蓿豆(*Pocockiaruthenica*)、草地麻花头(*Serratulayamatsutanna*)、糙隐子草(*Cleistogenessquarrosa*)、多茎野碗豆(*Viciamulticaulis*)、寸草苔(*Carexduriuscula*)和肾叶唐松草(*Thalictrumpetaloideum*)等。共有植物 66 种,分属 21 科 49 属^[3]。试验地自 2010 年开始进行围封禁牧,并进行相应的施肥处理。

1.2 试验设计

试验设 C(对照,不施肥)、K(单施钾肥,100 kg/hm²)、P(单施磷肥,100 kg/hm²)、N(单施氮肥,100 kg/hm²)、PK(磷、钾肥混施,均为 100 kg/hm²)、NK(氮、钾肥混施,均为 100 kg/hm²)、NP(氮、磷肥混施,均为 100 kg/hm²)、NPK(氮、磷、钾肥混施,均为 100 kg/hm²)8 个处理,6 次重复,随机区组排列。小区面积 8 m×8 m=64 m²,主区与副区间分别设 5 m 和 2 m 隔离带。养分添加试验于 2010 年开始进行,每年分两次进行添加,分别在牧草生长季 6 月 15 日、7 月 15 日进行,每次施入全年添加总量的 50%。N(尿素)、P(重过磷酸钙)、K(K₂SO₄)施肥时均匀手撒;微肥配成溶剂喷施(每个小区需水约 13L),Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu、B、Mo 施肥量分别为 60 kg/hm²、30 kg/hm²、170 kg/hm²、25 kg/hm²、10 kg/hm²、10 kg/hm²、1 kg/hm²、1 kg/hm²,对对照地和不施加微肥的样地,要喷施同样水量。微肥与 K 肥同时添加,N 肥和 P 肥处理中不添加。

1.3 研究方法

1.3.1 测定方法

野外调查工作于 2012 年牧草生长旺季的 8 月中旬进行,调查工作持续 2—3 d。在各个处理小区内侧预留 1 m 的缓冲带,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、密度等生物生态学特性。并用收获法齐地面分种剪下后称其鲜重,再在 65℃ 下烘干并称重,测量草群地上生物量。

植物功能群划分:按植物生活型划分为,禾本科、豆科、菊科、莎草科和其他科杂类草五个功能群。

1.3.2 数据处理

丰富度用物种数 S 来表示;

植物物种多样性指数采用 Shannon-Wiener 指数(H'): $H' = -\sum P_i \ln P_i$;

均匀度指数采用 Pielou 指数(E): $E = H'/\ln(S)$ 。

式中, P_i 是植物的相对生物量。

采用 Excel 和 SPSS17.0 进行制图、方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 养分添加对贝加尔针茅草原植物多样性的影响

用植物丰富度、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数来反映养分添加对草原群落植物多样性的影响(如表

1)。结果表明,草原植物多样性对不同养分添加的响应不同。各养分添加处理的物种丰富度分别比对照减小了 1.75—6.25 种,其中 NP 处理与对照间的差异显著($P<0.05$)。施 N 处理(N、NK、NP、NPK) Shannon-Wiener 指数显著减小($P<0.05$),分别由对照的 2.48 减小为 2.09、1.97、1.98、2.08;而 K、P、PK 处理 Shannon-Wiener 仅呈减小趋势,与对照差异不显著($P>0.05$)。各养分添加处理均使植物 Pielou 指数呈减小趋势,N、NK、NPK 处理与对照间的差异显著($P>0.05$)。

表 1 草地群落植物多样性对养分添加的响应(平均值±标准差)

Table 1 Response of grassland plant diversity to nutrient addition

多样性指数 Diversity index	对照 C	K 添加 K	P 添加 P	PK 添加 PK	N 添加 N	NK 添加 NK	NP 添加 NP	NPK 添加 NPK
丰富度 Species richness	23.00±2.16 a	21.00±2.00 ab	21.25±4.35 ab	21.25±3.59 ab	18.25±2.36 ab	20.75±1.50 ab	16.75±3.30 b	18.50±4.44 ab
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	2.48±0.18 a	2.34±0.17 ab	2.28±0.33 abc	2.28±0.24 abc	2.09±0.16 bc	1.97±0.12 c	1.98±0.22 c	2.08±0.15 bc
Pielou 指数 Pielou index	0.797±0.04 a	0.760±0.05 ab	0.754±0.07 ab	0.751±0.06 ab	0.711±0.03 bc	0.646±0.05 c	0.722±0.08 abc	0.697±0.03 bc

不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 养分添加对贝加尔针茅草原植物群落地上生物量的影响

2.2.1 养分添加对贝加尔针茅草原植物群落地上生物量的影响

各养分添加处理均不同程度地提高草原植物群落的地上生物量(图 1),各养分添加处理草原植物群落地上生物量分别比对照增加了 38.24%—130.55%,其中 NK、NP、NPK 处理与对照相比呈显著差异($P<0.05$)。NPK 复合添加效果最为显著,其地上生物量不仅与对照间存在显著差异,与 N、NK 处理相比差异也显著($P<0.05$)。

2.2.2 养分添加对贝加尔针茅草原群落植物功能群地上生物量的影响

养分添加改变草原群落植物功能群地上生物量及其组成(图 2,3),禾本科功能群的生物量是草原群落地上生物量的主体,占据草原植物群落生物量的 47.32%;其次是菊科和杂类草功能群,分别占草原植物群落的 23.85%和 21.43%。N 素添加显著提高了禾本科植物功能群的地上生物量(图 2, $P<0.05$), N、NK、

NP、NPK 处理分别使其由对照的 45.42g/m²提高到 101.02g/m²、111.37 g/m²、115.05g/m²、130.20 g/m²。仅 N、NK 处理显著提高了禾本科植物功能群在草地群落中的比重(图 3, $P<0.05$),与对照相比分别提高了 41.42%、44.39%。NK、NP、NPK 显著降低了豆科植物功能群在草地群落中的比重($P<0.05$),但并没有显著降低其地上生物量(图 2,3)。仅 NPK 处理显著增加了菊科植物功能群的地上生物量($P<0.05$),各处理对菊科植物功能群在草地群落中的所占的比重均无显著影响(图 2,3)。NP、NPK 显著增加了莎草科植物功能群地上生物量($P<0.05$),但并未对其在草地群落中的比重产生显著影响(图 2,3)。各养分添加处理禾本科及莎草科植物功能群在草地群落中的比重均有增加趋势,但与对照差异并不显著(图 3, $P>0.05$)。各养分添加处理显著降低了杂类草功能群在草地群落中的比重($P<0.05$),但均未对其地上生物量产生显著影响(图 2,3)。

2.2.3 养分添加对贝加尔针茅草原主要植物地上生物量的影响

选择群落不同类型的 10 种主要植物,分析养分添加对主要植物地上生物量的影响(图 4)。这 10 种植物分别为禾本科的贝加尔针茅、羊草、羽茅、糙隐子草,豆科的扁蓿豆、牧马豆,莎草科的苔草,蔷薇科的,菊科的

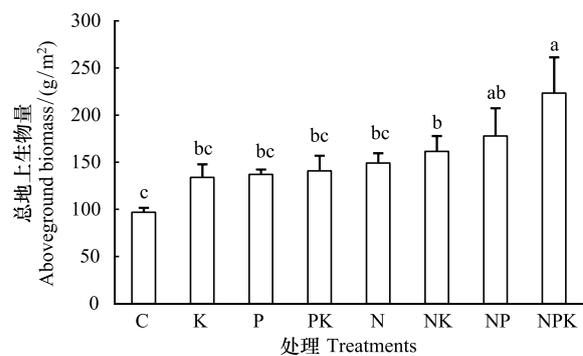


图 1 养分添加对草原地上生物量的影响。不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)

Fig. 1 Effects of nutrient addition on aboveground biomass of a grassland. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level

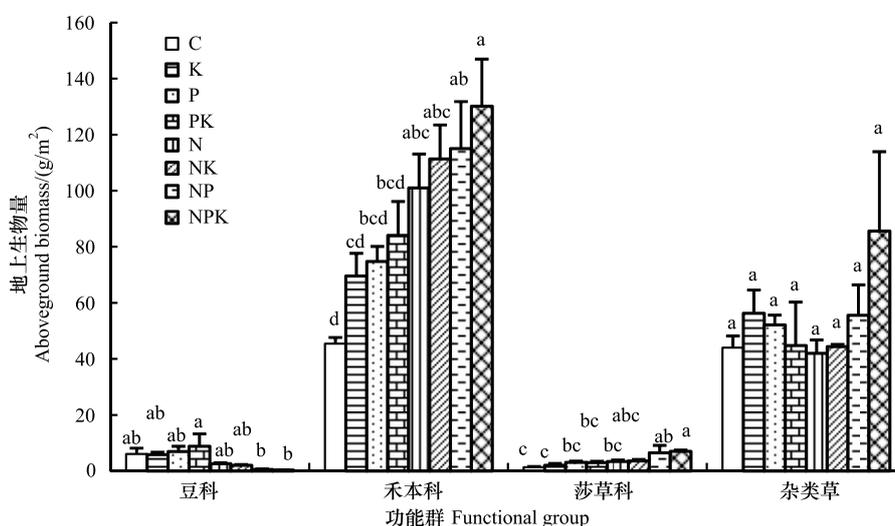


图2 养分添加对草原植物功能群地上生物量的影响。不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 2 Aboveground biomass of functional groups under different nutrient addition regimes. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level

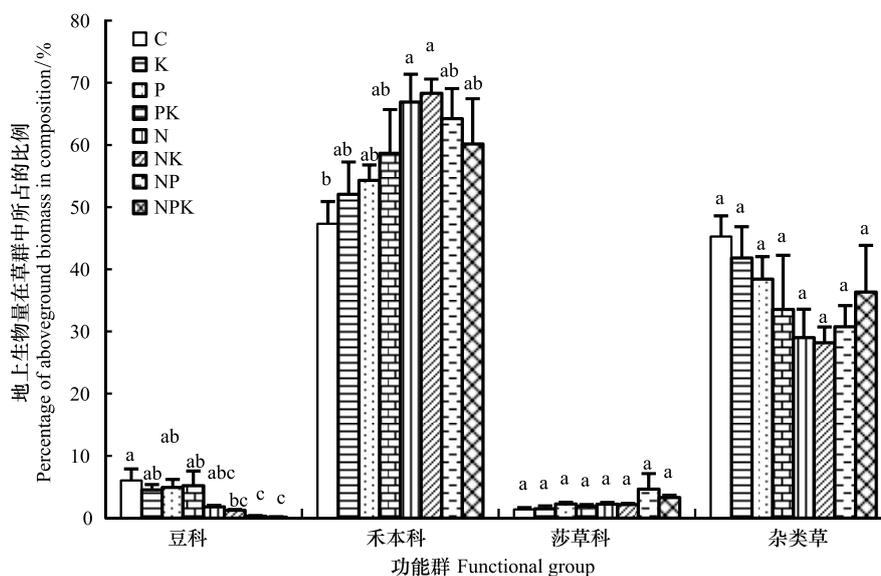


图3 养分添加对草原植物功能群在草群中所占比重的影响。不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 3 Composition of functional groups under different nutrient addition regimes. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level

冷蒿、草地麻花头;它们占群落地上生物量的 64.34%—87.03%,其中星毛委陵菜、冷蒿、草地麻花头为草原退化的指示植物。结果表明,N 素添加的处理(N、NK、NP、NPK)能够显著增加禾本科植物羊草和糙隐子草的地上生物量($P < 0.05$),其中均以 NPK 处理效果最为显著,增幅最高分别为 280.37%和 534.63%;但 N 素添加并未对贝加尔针茅和羽茅(除 NPK 处理)的地上生物量产生显著影响($P > 0.05$)。P、K 的添加对这四种禾本科植物的地上生物量的影响均不显著($P > 0.05$)。N 素添加对豆科植物地上生物量的影响则与禾本科相反,使牧马豆和扁蓿豆的地上生物量均呈降低趋势,其中仅 NP、NPK 处理显著降低了牧马豆的地上生物量,其余处理与对照相比差异并不显著($P > 0.05$);而 K、P 的添加对其地上生物量均有增加趋势,但各处理与对照间的差异也不显著($P > 0.05$)。NP、NPK 处理显著增加了苔草的地上生物量($P < 0.05$),与对照相比分别增加了 265.12%和 262.79%。各养分添加处理对冷蒿的影响与对羽茅的影响一致,仅 NPK 处理能显著提高冷蒿的地

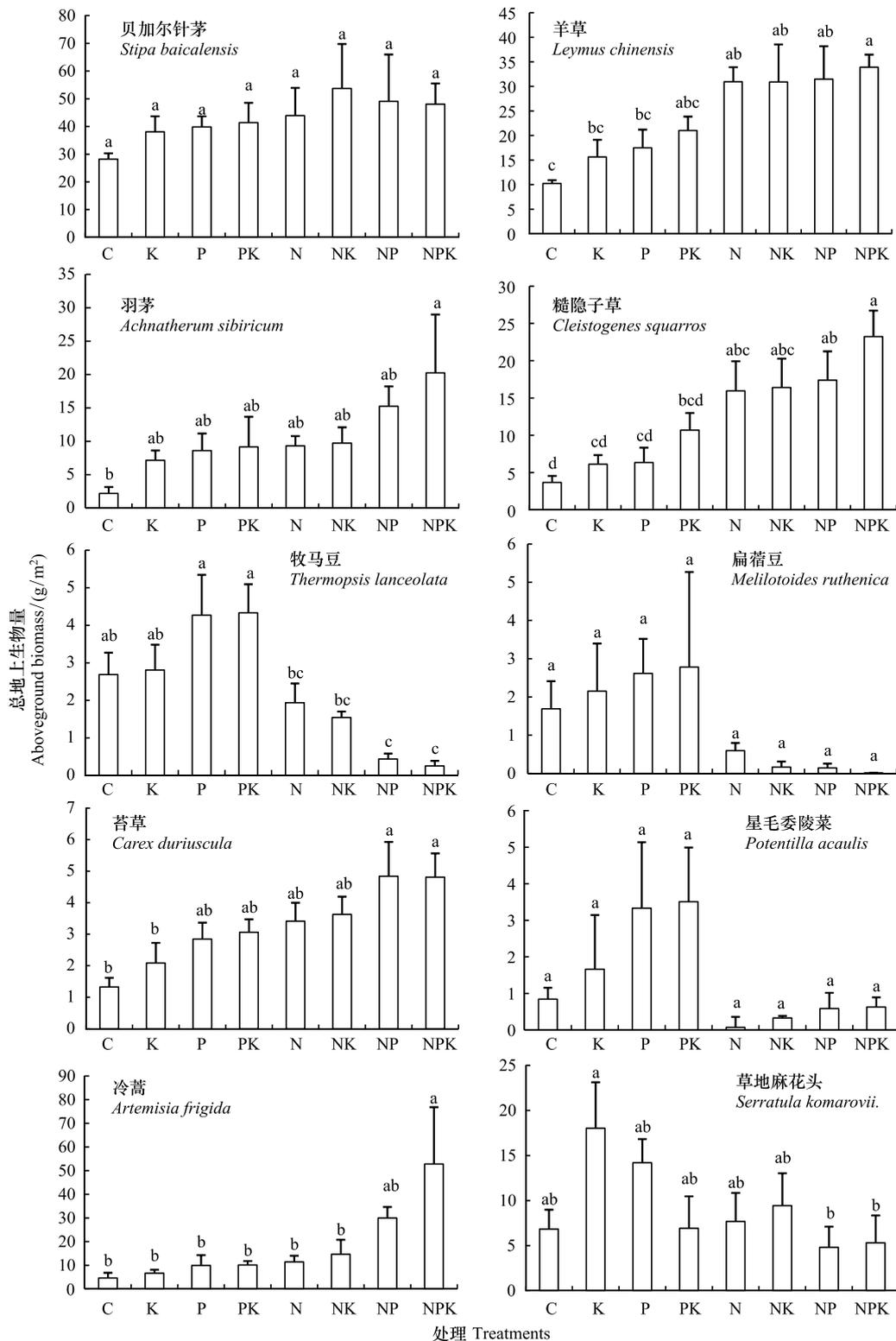


图 4 养分添加对草原植物功能群在草群中所占比重的影响。不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 4 Effects of nutrient addition on the aboveground biomass of representative plants. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level

Note: A. 贝加尔针茅 *Stipa baicalensis*, B. 羊草 *Leymus chinensis*, C. 羽茅 *Achnatherum sibiricum*, D. 糙隐子草 *Cleistogenes squarros*, E. 牧马豆 *Thermopsis lanceolata*, F. 扁蓿豆 *Melilotoides ruthenica*, G. 苔草 *Carex duriuscula*, H. 星毛委陵菜 *Potentilla acaulis*, I. 冷蒿 *Artemisia frigida*, J. 草地麻花头 *Serratula komarovii*.

上生物量 ($P < 0.05$),使其增加到对照的 11.45 倍。而各处理对星毛委陵菜和草地麻花头的地上生物量均未产生显著影响 ($P > 0.05$)。

2.3 贝加尔针茅草原植物多样性与初级生产力的关系

在养分添加条件下,物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数与植物群落初级生产力均呈线性负相关关系(图 5—7),相关系数分别为 -0.391 ($P < 0.05$)、 -0.522 ($P < 0.01$)、 -0.534 ($P < 0.01$),均达显著性水平。

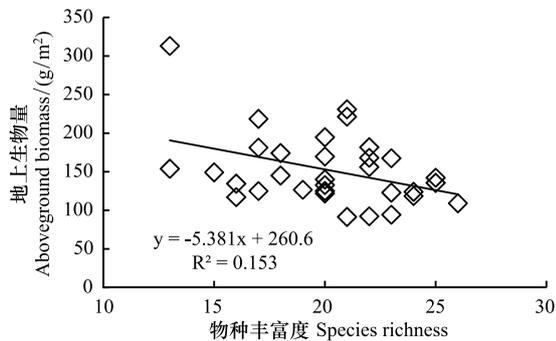


图 5 物种丰富度与初级生产力的关系

Fig. 5 Relationship between species richness and primary productivity

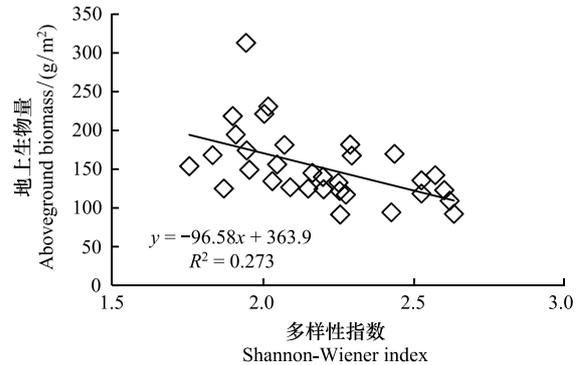


图 6 植物多样性与初级生产力的关系

Fig. 6 Relationship between plant diversity and primary productivity

3 讨论

本研究选择了 N、P、K 等不同养分,将其进行单独或组合添加,探究其对草地植物多样性和生产力的影响。结果表明,N 素添加的处理(N、NK、NP、NPK)明显比其他处理更显著地降低了植物多样性。这一结果与先前的研究结论相一致^[7,18]。分析原因可能是由于氮的增加更有利于喜氮植物(如禾本科植物)的生长,使其在生态系统中处于优势地位,从而排斥其它与之竞争的物种,最终导致植物多样性降低。这符合群落水平的自疏假说^[19]。本研究结果中,N 素添加的处理(N、NK、NP、NPK)显著增加了禾本科植物地上生物量正说明了

这一点。同时植物竞争机制^[20]表明施肥提高了土壤中可利用资源的含量,使植物之间由地下部分对矿质资源的竞争转化为地上部分对光的竞争。Hautier 等^[21]和 Ren 等^[22]认为,物种之间对群落下层光的竞争是资源添加导致物种多样性降低的主要原因之一。另外,有些研究认为养分添加会引起植物多样性的增加^[12],也有研究认为养分添加并不能引起草地群落植物多样性的明显变化^[23]。这可能与草地类型和其所处的演替阶段有关。

各养分添加处理都使草地植物群落地上生物量有所提高,其中 NK、NP、NPK 处理显著地提高草地植物群落地上生物量。P、K 的添加对主要限制因素 N 的添加效应具有放大作用,能够更好的促进植物的生长。这与 Elser 等^[9]的研究结果基本一致。至于其内在机理,还需进一步探讨。进一步分析发现,草地植物群落地上生物量的提高主要集中在禾本科植物的增加,尤其是 N 素添加的处理增产效果极为显著,增幅达 122.41%—186.64%。各养分添加处理对豆科植物地上生物量虽均没有显著影响,但 NK、NP、NPK 处理显著地降低了豆科植物在草群中所占的比例。这与 Zavaleta 等^[24]和 Henry 等^[25]的研究结果一致。分析原因,可能是因为禾本科植物具有较高的氮素利用率,对水分、营养元素和光辐射的竞争在群落中处于优势地位,氮、

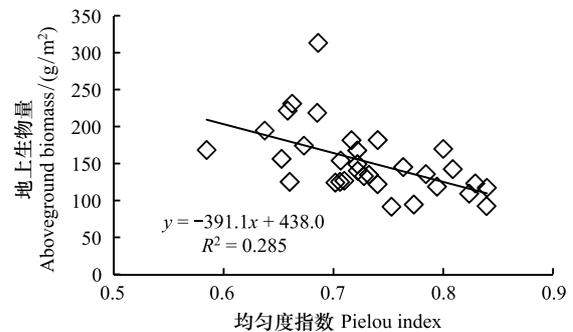


图 7 植物均匀度和初级生产力的关系

Fig. 7 Relationship between species evenness and primary productivity

磷的添加缓解了养分对禾本科植物生长的限制,其地上部分迅速生长,抑制了多年生杂类草和豆科植物的生长^[26]。这与 Silvertown 和 Law^[27]的研究结果一致,当氮添加足够充分时,禾本科植物对氮的竞争优于豆科对磷竞争,禾本科植物在草地植物群落中占据主导地位;白永飞等^[14]的研究也说明,在退化的草地,施氮提升了多年生根茎禾草的生产力和主导地位。本研究中,各养分添加处理对杂类草的地上生物量和其在草地群落中所占的比例均无显著影响。但也有研究表明^[28],N、P 添加改变了植物功能群组成,使禾草的多度增加,杂类草的多度降低。

目前,对于植物多样性和生产力关系的研究有着不同的结论。Waide 等^[29]对近 200 例物种多样性与生产力关系的调查发现,30%呈单峰曲线关系,26%是正线性关系,12%为负线性关系,32%无显著相关关系。Fridley^[15]认为,不同的资源供给率会导致不同的多样性与生产力的关系。Tilman D 等^[30]和王长庭等^[31]对自然生态系统的研究发现,植物多样性和初级生产力呈正相关关系^[32]。还有研究表明,植物多样性和生产力之间的关系呈单峰曲线^[33]。本研究的结果表明,养分添加在提高植物群落初级生产力的同时,降低了植物多样性,使植物多样性和生产力呈线性负相关关系。这与很多研究^[14,22,34]的结果一致。可能是由于养分的添加改变了植物群落生存的环境,从而影响了植物多样性和生产力之间的关系,并且观测时间的不同也会导致其关系发生变化,这些生物或非生物条件的变化是导致植物多样性和生产力的关系呈现多种不同模式的主要原因^[35]。另外,植物多样性与生产力之间的关系还依赖于尺度的大小,空间尺度比时间尺度对物种丰富度与生产力的关系造成的影响更为显著^[36]。Guo 和 Berry^[35]对包含 5 种微生境的 Chihuahuan 沙漠取样结果的分析,表明空间尺度会对物种丰富度与生产力的关系产生影响外,还说明这种影响的大小依赖于沿着群落参数被测量的环境梯度的变化幅度。

4 结论

(1) 养分添加能有效提高草地植物群落初级生产力,以 N 素添加效果最为显著,尤其是 NPK 组合添加,使地上生物量增加了 1.31 倍。

(2) 养分添加改变草原植物群落组成,提升了以优势种贝加尔针茅和羊草为主的禾本科植物功能群的优势地位。

(3) 养分添加会不同程度地降低草原群落的植物多样性,使草地植物群落初级生产力与植物多样性之间呈负线性相关关系。

参考文献 (References):

- [1] 王明君, 韩国栋, 崔国文, 赵萌莉. 放牧强度对草甸草原生产力和多样性的影响. 生态学杂志, 2010, 29(5): 862-868.
- [2] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] 杨殿林, 韩国栋, 胡跃高, 乌云格日勒. 放牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和生产力的影响. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1470-1475.
- [4] Mooney H A, Vitousek P M, Matson P A. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *Science*, 1987, 238(4829): 926-932.
- [5] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, Gowing D J. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [6] Wedin D A, Tilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands. *Science*, 1996, 274(5293): 1720-1723.
- [7] Gough L, Osenberg C W, Gross K L, Collins S L. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities. *Oikos*, 2000, 89(3): 428-439.
- [8] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 423-447.
- [9] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10:

1135-1142.

- [10] 白雪, 程军回, 郑淑霞, 詹书侠, 白永飞. 典型草原建群种羊草对氮磷添加的生理生态响应. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 103-115.
- [11] Janssens F. Relationship between soil chemical factors and grassland diversity. *Plant and Soil*, 1998, 202(1): 69-78.
- [12] 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 牛俊义. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响. *草业学报*, 2007, 16(5): 34-39.
- [13] 邱波, 罗燕江, 杜国祯. 施肥梯度对甘南高寒草甸植被特征的影响. *草业学报*, 2004, 13(6): 65-68.
- [14] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Naem S, Pan Q M, Huang J H, Zhang L X, Han X G. 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.
- [15] Fridley J D. Resource availability dominates and alters the relationship between species diversity and ecosystem productivity in experimental plant communities. *Oecologia*, 2002, 132(2): 271-277.
- [16] Alhamad M N, Alrababah M A, Gharaibeh M A. Impact of burning and fertilization on dry Mediterranean grassland productivity and diversity. *Acta Oecologica*, 2012, 40: 19-26.
- [17] 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. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 589-593.
- [18] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 涂文霞, 张青青. 植物养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 167-177.
- [19] Stevens M H H, Carson W P. Plant density determines species richness along an experimental fertility gradient. *Ecology*, 1999, 80(2): 455-465.
- [20] Newman E I. Competition and diversity in herbaceous vegetation. *Nature*, 1973, 244(5414): 310-311.
- [21] Hautier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. *Science*, 2009, 324(5927): 636-638.
- [22] Ren Z W, Li Q, Chu C J, Zhao L Q, Zhang J Q, Ai D X C, Yang Y B, Wang G. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 3(1): 25-31.
- [23] 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(5): 794-803.
- [24] Zavaleta E S, Shaw M R, Chiariello N R, Thomas B D, Cleland E E, Field C B, Mooney H A. Grassland responses to three years of elevated temperature, CO₂, precipitation, and N deposition. *Ecological Monographs*, 2003, 73(4): 585-604.
- [25] Henry H A, Chiariello N R, Vitousek P M, Mooney H A, Field C B. Interactive effects of fire, elevated carbon dioxide, nitrogen deposition, and precipitation on a California annual grassland. *Ecosystems*, 2006, 9(7): 1066-1075.
- [26] 邱波, 罗燕江. 不同施肥梯度对甘南退化高寒草甸生产力和物种多样性的影响. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2004, 40(3): 56-59.
- [27] Silvertown J, Law R. Do plants need niches? Some recent developments in plant community ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 1987, 2(1): 24-26.
- [28] 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.
- [29] Waide R B, Willing M R, Steiner C F, Mittelbach G, Gough L, Dodson S I, Juday G P, Parmenter R. The relationship between productivity and species richness. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1999, 30(1): 257-300.
- [30] Tilman D, Reich P B, Knops J, Wedin D, Mielke T, Lehman C. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 2001, 294(5534): 843-845.
- [31] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 景增春, 丁路明. 高寒草甸不同草地群落物种多样性与生产力关系研究. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 483-487.
- [32] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379(6567): 718-720.
- [33] Kassen R, Buckling A, Bell G, Rainey P B. Diversity peaks at intermediate productivity in a laboratory microcosm. *Nature*, 2000, 406(6795): 508-511.
- [34] De Bello F, Lepš J, Sebastià M T. Variations in species and functional plant diversity along climatic and grazing gradients. *Ecography*, 2006, 29(6): 801-810.
- [35] Guo Q F, Berry W L. Species richness and biomass: dissection of the hump-shaped relationships. *Ecology*, 1998, 79(7): 2555-2559.
- [36] Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, Caldeira M C, Diemer M, Dimitrakopoulos P G, Finn J A, Freitas H, Giller P S, Good J, Harris R, Höglberg P, Huss Danell K, Joshi J, Jumpponen A, Körner C, Leadley P W, Loreau M, Minns A, Mulder C P H, O'Donovan G, Otway S J, Pereira J S, Prinz A, Read D J, Scherer-Lorenzen M, Schulze E D, Siamantziouras A S D, Spehn E M, Terry A C, Troumbis A Y, Woodward F I, Yachi S, Lawton J H. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, 1999, 286(5442): 1123-1127.