

DOI: 10.20103/j.stxb.202302230327

郝亚鹏, 罗登楠, 胡中民, 郭群. 氮磷添加对内蒙古温带草原植物功能群氮含量的影响. 生态学报, 2024, 44(3): 1242-1250.

Hao Y P, Luo D N, Hu Z M, Guo Q. Effects of nitrogen and phosphorus additions on the nitrogen content of different plant functional groups in the Inner Mongolia temperate grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1242-1250.

氮磷添加对内蒙古温带草原植物功能群氮含量的影响

郝亚鹏^{1,2,3}, 罗登楠⁴, 胡中民⁵, 郭 群^{1,2,3,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190

3 国家生态科学数据中心, 北京 100101

4 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631

5 海南大学生态与环境学院, 海口 570228

摘要:植物功能群氮含量既是理解氮沉降对生物多样性影响的关键指标,也是生产力过程模型模拟的重要参数,极易受氮素可利用性的影响和磷元素的限制。基于内蒙古温带草原 4 年氮磷添加试验(N10、N40、P5、P10 及其交互,数字代表添加剂量,单位为 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$),分析氮磷添加对植物群落及三种植物功能群(禾本科、灌木和杂类草)氮含量的影响。结果表明:(1)氮添加显著增加了群落及各功能群的氮含量,同一处理水平下禾本科(N10)和灌木(N10 和 N40)的氮含量显著高于杂类草,同一功能群不同氮添加剂量间无显著差异;(2)磷添加对群落和三种功能群的氮含量无显著影响;(3)与单独氮添加相比,氮磷同时添加显著增加了群落、禾本科和杂类草氮含量,且高剂量氮磷添加的促进作用更大;(4)与单独氮添加相比,氮磷同时添加显著增加群落和三种功能群磷含量而降低氮磷比,相同处理水平下禾本科和杂类草磷含量增加幅度最大。本研究将为草原生态系统管理和应对全球变化提供科学依据。

关键词:植物氮含量;植物功能群;氮磷添加;内蒙古草原

Effects of nitrogen and phosphorus additions on the nitrogen content of different plant functional groups in the Inner Mongolia temperate grasslands

HAO Yapeng^{1,2,3}, LUO Dengnan⁴, HU Zhongmin⁵, GUO Qun^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 National Ecosystem Science Data Center, Beijing 100101, China

4 School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

5 College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: The nitrogen (N) content of plant functional groups (PFGs) is vital to understand the nitrogen-induced biodiversity loss under the context of enhanced N deposition globally, and it is also an important parameter in process models that simulated productivity, e.g., net primary productivity and gross primary productivity in Biome-BGC model. Considering the strong impacts of nitrogen availability and the regulation of phosphorus (P) limitation, we conducted a four-year manipulative experiment to clarify the responses of N content of PFGs to N and P additions (N addition: 10 and 40 $\text{g N m}^{-2} \text{a}^{-1}$, P addition: 5 and 10 $\text{g P m}^{-2} \text{a}^{-1}$) in a temperate steppe of the Inner Mongolia, China. Our results showed that:

基金项目:国家自然科学基金项目(32171555, 31922053, 31961143022)

收稿日期:2023-02-23; **网络出版日期:**2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoq@igsnr.ac.cn

(1) N addition significantly increased the N content of the community and three PFGs. Grasses ($10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) and shrubs (10 and $40 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) had significantly larger increase of N content than that of forbs with the same rate of N addition. There was no significant difference among different rates of N additions for the same PFG or the whole community. (2) No matter what rates of P additions, i.e. 5 or $10 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, there was no significant effects of P addition on N content of the community or the three PFGs. However, the P-induced changes of shrubs (5 and $10 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) and grasses ($10 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) were significantly higher than that of forbs ($10 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). (3) Compared to N addition, the simultaneous additions of N and P significantly increased the N content of communities, grasses, and forbs but not shrubs, and the increase tended to be larger with the increasing rates of N or P additions. (4) Compared to N addition or the control, the simultaneous additions of N and P significantly increased the P content but decreased the N/P ratios of the communities and the three PFGs. The largest increase in P content was observed in grasses and forbs at the same rate of P addition. Notably, the P-induced increase of P content in grasses was inclined to be greater in the treatments with higher rates of P addition, and it was also the grasses got a lower N/P ratio in the treatments with higher rates of N and P additions. Our findings have important implications for grassland management and provide a better understanding of how grassland ecosystems respond to global changes.

Key Words: plant nitrogen content; plant functional group; nitrogen and phosphorus addition; Inner Mongolia grassland

工业革命以来,人类活动导致全球氮沉降大幅增加^[1-2],我国是世界三大氮沉降区之一^[3]。草原生态系统是最重要的陆地生态系统之一,对氮沉降响应迅速^[4-5]。氮沉降通过增加植物叶片氮含量影响光合作用,促进植物生长及生产力^[6]。不同物种或植物功能群氮含量的响应差异可能是氮沉降背景下草原生态系统生物量及物种组成改变的重要原因^[7-8],进而影响草原生态系统牧草数量及质量^[9-10]。因此,在氮沉降日益加剧的背景下研究干旱半干旱区草原生态系统氮含量具有重要意义。

氮添加试验是研究氮沉降对生态系统影响的重要手段。植物地上部分氮含量随着氮添加剂量的增加而增加,全球平均增加 48% ^[11]。生态系统各植物功能群氮含量对氮添加的响应存在差异。全球尺度上,氮添加后杂类草的氮含量增加量显著低于禾本科与灌木^[12],但在内蒙古草原的研究表明氮添加并未显著增加禾本科和杂类草氮含量^[13]。植物功能群氮含量是生产力过程模型模拟中的一个重要参数,但是以往的控制试验大多研究优势种氮含量的响应^[14-16],对群落和功能群水平氮含量的研究不足,无法有效支持模型模拟。因此有必要研究群落和功能群氮含量对氮添加的响应。

以往的研究表明氮添加对生物量的促进存在氮饱和现象^[17-18],即生态系统生物量随着氮添加剂量增加而增加的幅度存在上限。生物量的氮饱和现象很有可能是由植物氮含量的氮饱和所致,但是由于植物氮含量的观测相对费时费力,相对于生物量氮饱和研究,植物氮含量是否存在氮饱和现象的国内外研究较少。部分研究表明内蒙古草原 6 种优势植物中有 5 种存在氮饱和现象^[19],且相对于生物量氮饱和剂量^[20],植物氮含量的氮饱和剂量更高。因此有必要研究植物氮含量对高剂量氮添加的响应。生物量的氮饱和现象可能是氮限制解除后生态系统受到水分^[20]、温度^[21]等生态因子的限制,其中磷限制是生物量氮饱和的重要原因之一^[12]。研究表明,磷添加可以促进土壤氮矿化^[22]、解除磷限制^[23]从而促进植物氮吸收,这可能是磷添加缓解生态系统生物量氮饱和的重要机制。但是,植物氮含量是否存在氮磷交互作用有待进一步验证。

内蒙古温带草原是欧亚大陆草原的重要组成部分^[4],是全球分布面积最广的草原。本研究以内蒙古温带典型草原为研究区域,通过氮磷添加试验,主要回答以下 3 个科学问题:1) 氮添加或磷添加对群落和不同植物功能群氮含量有何影响? 2) 不同氮磷添加剂量对群落和各植物功能群氮含量的影响有何差异? 3) 磷添加如何影响植物氮含量对氮添加的响应?

1 材料与方法

1.1 试验地概况

氮磷添加控制试验样地位于内蒙古自治区锡林郭勒盟中国科学院植物研究所多伦恢复生态学试验站(42.05°N, 116.29°E, 1324 m)。试验站占地面积 450 hm², 2001 年以来围栏禁牧。试验站属中温带半干旱大陆性季风气候区, 年均降水量 385.5 mm, 其中 6—8 月降水量占全年的 67%, 年蒸发量为 1600—1800 mm, 年平均风速 3.6 m/s, 年均气温为 3.5℃, 无霜期 100 d 左右。土壤主要为栗钙土, 土壤厚度约 30 cm, pH 值 7.12, 有机质含量 12.28 g/kg, 容重 1.31 g/cm³, 土壤中氮、磷、有效氮、速效磷^[24] 含量为 1.7、0.28、0.027、0.0015 g/kg, 试验区大气氮沉降量约为 20 kg hm⁻² a⁻¹^[25]。地带性植被为典型草原植被, 优势植物为克氏针茅(*Stipa krylovii*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等。

1.2 试验设计

2012 年, 在围栏内设置样方并进行氮磷添加试验, 共 9 个处理, 包括对照(CK)、2 个剂量的氮添加(10 g m⁻² a⁻¹(N10)和 40 g m⁻² a⁻¹(N40))、2 个剂量的磷添加(5 g m⁻² a⁻¹(P5)和 10 g m⁻² a⁻¹(P10))和 4 个氮磷添加(N10P5、N10P10、N40P5、N40P10)。样方采用随机区组设计, 设置 4 个区组, 每个区组包含上述 9 个处理, 共 36 个样方。每个样方面积 3 m×4 m, 样方间距为 2 m, 区组间距 3 m。氮添加选择以往试验中常用的尿素[CO(NH₂)₂], 磷添加选用磷酸二氢钠[NaH₂PO₄]试剂。每年 5—6 月随自然降水分 2 次撒施氮磷试剂, 避免太阳辐射的影响, 减少试剂在空气中的挥发。

1.3 样品采集与测定

2017—2020 年每年 8 月中旬在样方中用 0.2 m×1 m 样方框分物种剪取植物地上生物量, 65℃烘至恒重并称重(精度 0.01 g)。采用凯氏定氮法和钼锑抗比色法测定植物全氮和全磷含量。

1.4 数据处理

本研究将植物群落组成为禾本科、灌木和杂类草三个功能群。灌木主要包括冷蒿、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)和黄花蒿(*Artemisia annua*)等, 禾本科主要包括针茅、冰草、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)和羊草(*Leymus chinensis*)等, 杂类草主要包括阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)、苔草(*Carex tristachya*)、细叶葱(*Allium tenuissimum*)、地蔷薇(*Chamaerhodos erecta*)、糙苏(*Dontostemon dentatus*)、长梗韭(*Allium neriniflorum*)、糙叶黄耆(*Astragalus scaberrimus*)和扁蓿豆(*Pocockia ruthenia*)等。上述物种基本囊括了样地中出现的所有优势种和常见种, 其氮磷含量均有观测, 但部分年份和处理中由于个别物种生物量较低而未测定(各样方中未测定物种的生物量仅占总生物量 1%左右), 本研究采用相同处理同一物种的多年氮、磷含量平均值代替未测定物种元素含量。为了比较不同处理对群落和三种植物功能群氮、磷含量的影响, 本研究使用 R 语言 FD 包中的函数 dbFD 计算了群落和各功能群的氮、磷含量加权平均值(Weighted Mean, WM)^[26]。计算公式如下^[27]:

$$WM = \frac{\sum_i^S a_i b_i}{\sum_i^S a_i} \quad (1)$$

式中, a_i 是物种 i 的生物量, b_i 是物种 i 的氮含量, S 是样地中的物种总数或不同功能群的物种总数。

为了研究磷添加对氮添加效应的影响, 本研究计算了氮添加、磷添加和氮磷同时添加对群落和三种功能群的氮含量、磷含量和氮磷比的影响。其计算公式如下:

$$\Delta N(P)_i = N(P)_i - CK \quad (2)$$

$$\Delta P_{iN_j} = P_i N_j - N_j \quad (3)$$

式中, N 表示氮添加, P 表示磷添加, CK 表示对照处理, i, j 表示氮或磷的添加剂量。 $\Delta N(P)_i$ 为群落或三种功能群氮含量的氮(磷)添加的处理效应, ΔP_{iN_j} 为群落或三种功能群的氮含量或氮磷比在 N_j 添加背景下的磷处

理效应。

本文采用 LSD 多重比较方法进行方差分析($\alpha = 0.05$),使用 R 语言计算、Origin 绘图。

2 结果与分析

2.1 氮添加对氮含量的影响

4 年氮磷添加试验的总体结果表明,N10 和 N40 处理均显著增加了群落和三种植物功能群的氮含量(图 1, $P < 0.05$),但是群落和各功能群氮含量在两个剂量的氮添加处理之间无显著差异($P > 0.05$),即 10 g 氮添加之后继续增加剂量,群落和各功能群的氮含量均无显著变化。除个别年份外,群落和三种植物功能群的氮处理效应均为正效应,即 N 处理和 CK 之间的氮含量之差(ΔN_{10} 与 ΔN_{40})为正值,且 N40 与 N10 的正效应无显著差异($P > 0.05$)。不同功能群之间,灌木的氮处理效应显著高于杂类草($P < 0.05$),禾本科的 N10 处理效应显著高于杂类草的两种处理效应($P < 0.05$)。

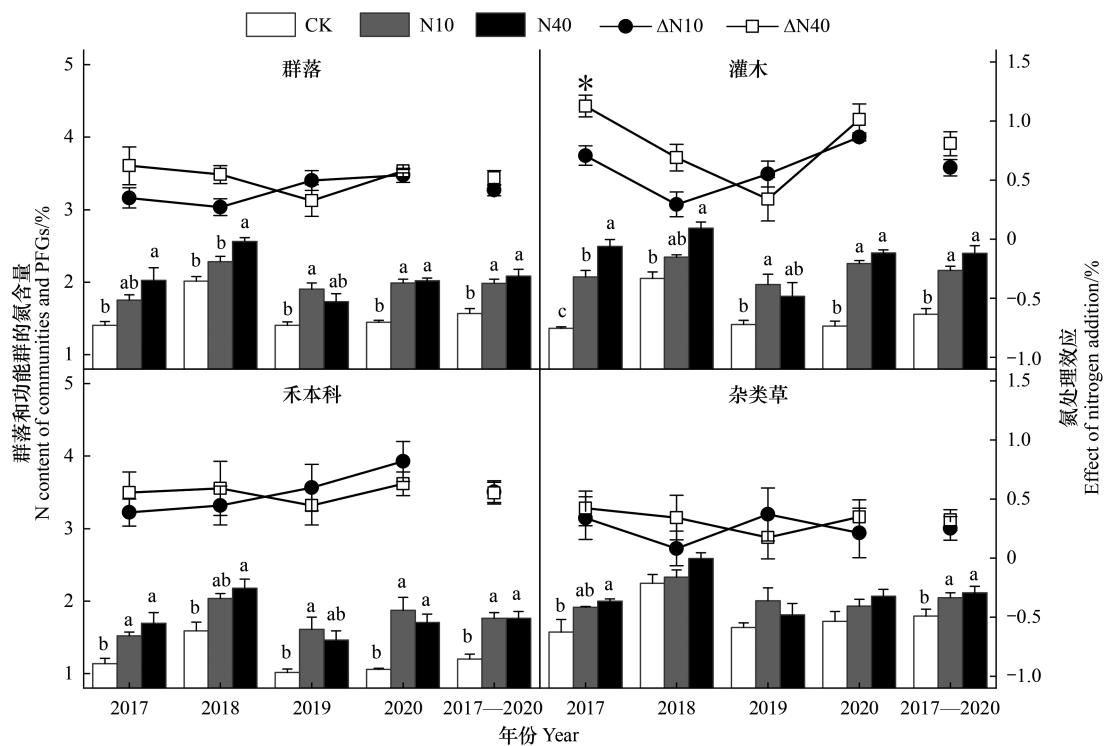


图 1 氮添加对内蒙古温带草原功能群和群落氮含量的影响

Fig.1 Effects of nitrogen addition on the nitrogen content of plant functional groups and communities in the temperate grasslands of Inner Mongolia

CK: 对照, N10: $10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 添加, N40: $40 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 添加, ΔN_{10} : N10 处理效应, ΔN_{40} : N40 处理效应;不同小写字母表示同一年份内不同处理间的差异显著($P < 0.05$), * 表示同一年份内氮处理效应间的差异显著($P < 0.05$),误差为标准误。x 轴中的“4 年总体”表示 4 年平均值

2.2 磷添加对氮含量的影响

总体上,群落和三种植物功能群氮含量在磷添加与对照处理以及两个磷添加处理之间均无显著差异(图 2, $P > 0.05$)。除了 2018 年 P5 处理的群落氮含量显著高于对照之外($P < 0.05$),其余年份的结果与 4 年总体结果保持一致。磷处理效应结果也显示,群落和三种植物功能群的磷处理效应在 0 上下波动,4 年之间相差不大(杂类草的磷处理效应波动相对较大),且 P10 与 P5 的处理效应无显著差异($P > 0.05$, 2020 年群落磷处理效应除外)。不同功能群之间,灌木的两种处理效应和禾本科的 P10 处理效应均显著高于杂类草的 P10 处理效应($P < 0.05$)。

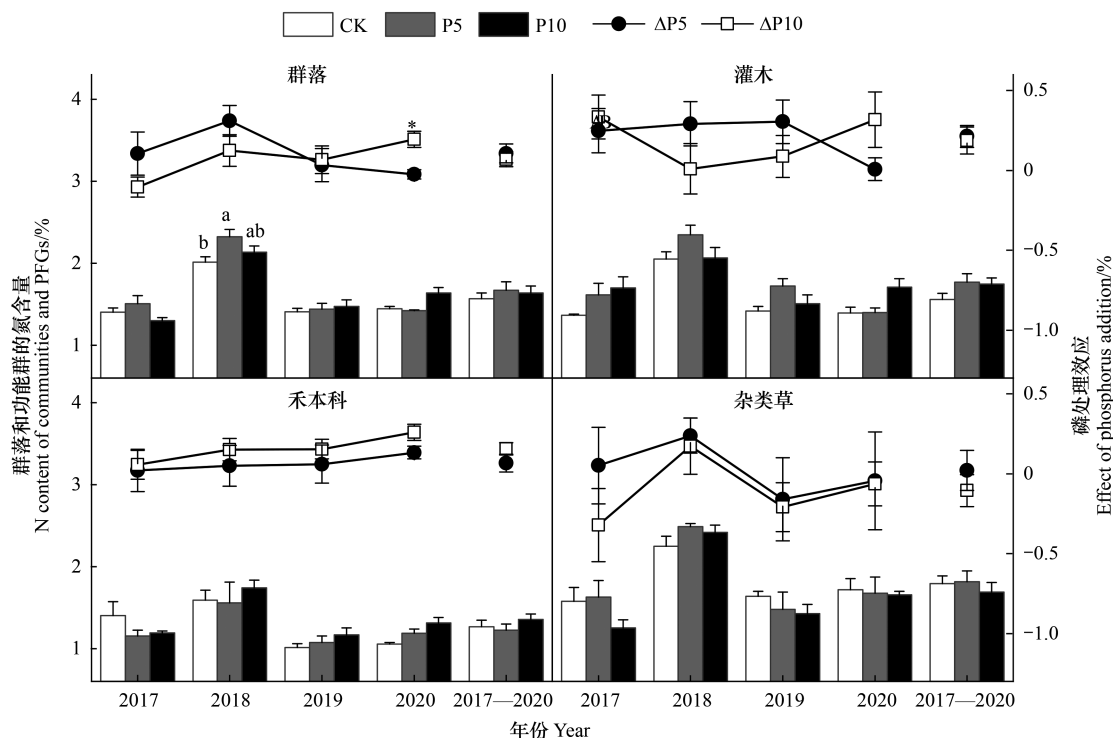


图2 磷添加对内蒙古温带草原功能群和群落氮含量的影响

Fig.2 Effects of phosphorus addition on the nitrogen content of plant functional groups and communities in the temperate grasslands of Inner Mongolia

CK: 对照; P5: $5 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 添加; P10: $10 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 添加; ΔP_5 : P5 处理效应; ΔP_{10} : P10 处理效应; * 表示同一年份内氮处理效应间的差异显著 ($P < 0.05$), 误差为标准误; x 轴中的“4 年总体”表示 4 年平均

2.3 氮磷添加对氮含量的影响

总体上, 4 年氮磷添加 (N10P10、N40P5、N40P10) 与氮添加的群落氮含量差值显著高于 0 (图 3, $P < 0.05$), 即氮添加基础上添加磷促进了群落水平氮的继续吸收。其中, 在 40 g 氮添加基础上添加磷后群落氮含量增加量更高, 且同等氮添加剂量下, P10 的促进作用更大, 2019 年、2020 年与 4 年总体保持一致, 其余两年无显著差异 ($P > 0.05$)。

不同功能群中, 4 年总体与各年结果均表明, 不同剂量氮磷添加与氮添加的灌木氮含量差异不显著 ($P > 0.05$)。总体上, 40 g 氮添加基础上添加磷促进了禾本科和杂类草氮继续吸收。其中, 40 g 氮添加基础上添加磷后两种功能群氮含量增加量显著高于 10 g 氮添加基础上添加磷 ($P < 0.05$), 且同等氮添加剂量下, P10 的促进作用更大。不同年份之间, 杂类草有 3 年、禾本科有 2 年与 4 年总体结果相近。不同功能群之间, 相比于只添加氮, 高剂量氮添加下添加磷 (N40P5、N40P10) 对禾本科和杂类草的氮含量的促进作用显著高于灌木 ($P < 0.05$)。

2.4 氮磷添加对磷含量和氮磷比的影响

与只添加氮或对照处理相比, 氮磷同时添加下, 群落和三种功能群的磷含量均显著增加 (图 4, $P < 0.05$), 但仅群落 (N40 处理除外) 和禾本科磷含量显著地随着磷添加剂量的增大持续增加 ($P < 0.05$)。灌木在 5 g 磷和高剂量氮一起添加 (N40P5) 下, 磷含量显著高于和低剂量氮一起添加 ($P < 0.05$), 与之相反, 群落和杂类草分别在 10 g 和 5 g 磷与低剂量氮一起添加的磷含量相对较高。除此之外, 其余氮磷添加下群落和三种功能群的磷含量无显著差异 ($P > 0.05$)。

总体上, 与单独氮添加相比, 4 年氮磷添加处理下群落和三种功能群的氮磷比显著更低 ($P < 0.05$), 即图 4

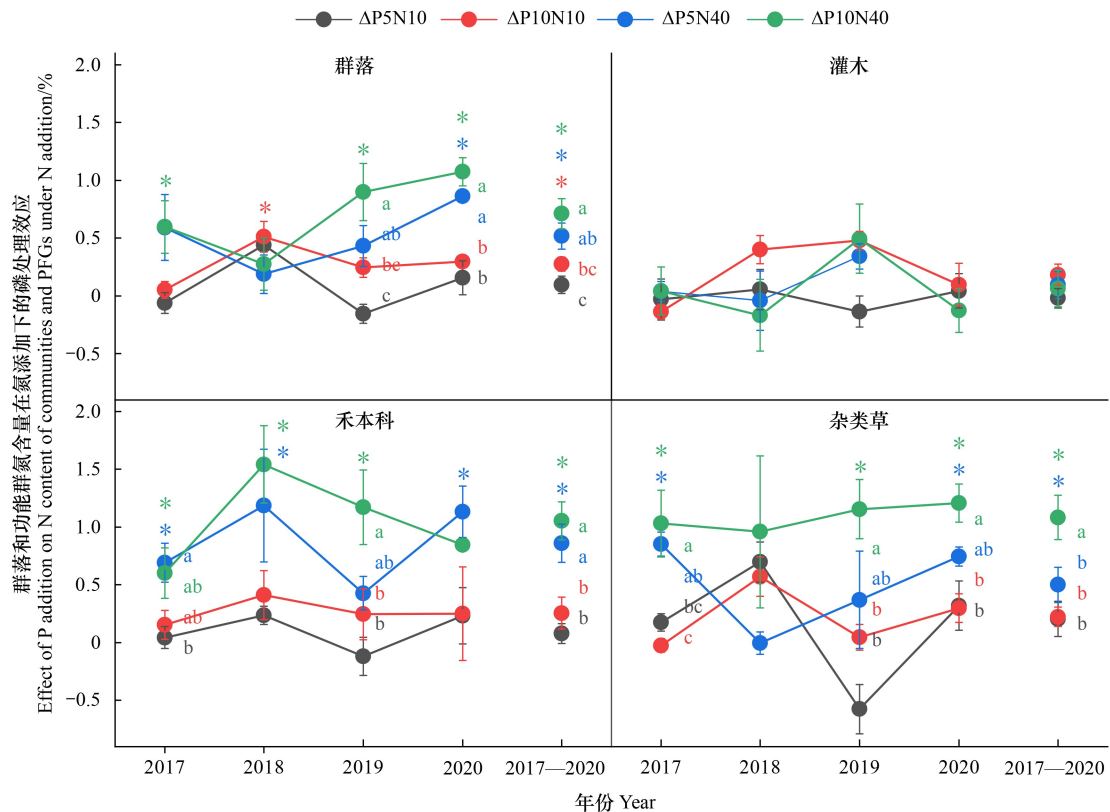


图3 氮磷添加对内蒙古温带草原功能群和群落氮含量的影响

Fig.3 Effects of nitrogen and phosphorus additions on the nitrogen content of plant functional groups and community in the temperate grasslands of Inner Mongolia

ΔP_{5N10} : N10P5 处理与 N10 处理的氮含量差异, ΔP_{10N10} : N10P10 处理与 N10 处理的氮含量差异, ΔP_{5N40} : N10P5 处理与 N40 处理的氮含量差异, ΔP_{10N40} : N40P10 处理与 N40 处理的氮含量差异;不同颜色的 * 表示颜色对应的处理效应与 0 的显著性差异 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一年份内不同处理效应间的差异显著 ($P < 0.05$), 误差为标准误; x 轴中的“4 年总体”表示 4 年平均值

中氮磷处理与氮处理的氮磷比差值显著低于 0 ($P < 0.05$), 各年结果也表现一致 (2018 年灌木和禾本科除外)。与低剂量氮磷添加相比, 禾本科的高剂量氮磷同时添加和单独氮添加的氮磷比之差 (ΔP_{10N40}) 显著更低 ($P < 0.05$), 但对群落、灌木和杂类草来说, 该差值在不同剂量的氮磷添加之间无显著差异 ($P > 0.05$)。

3 讨论

氮添加显著增加了群落整体及不同植物功能群的氮含量, 这与以往的研究结论相一致^[15, 28]。氮添加增加植物氮含量的主要途径包括以下两个方面: 一方面, 氮添加可能通过增加根系生物量, 扩大氮获取面积而提高植物氮含量, 但在同一试验样地研究发现, 氮添加未显著增加地下生物量^[29]。另一方面, 氮添加可以改变土壤理化性质, 同一试验样地研究表明氮添加显著降低土壤 pH^[30], 改变土壤微生物群落结构和酶活性^[31], 导致土壤凋落物分解速率降低^[32], 从而降低凋落物中氮释放, 不利于土壤有效氮的增加。尽管如此, 氮添加尤其是高剂量氮添加, 却显著增加土壤有效氮^[30], 这种效应高于凋落物分解速率降低所带来的负面效应, 最终导致群落和三种功能群氮含量升高。此外, 本研究发现不同氮添加剂量间植物氮含量无显著性差异。一项内蒙古草原的氮添加梯度试验表明, $17.5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 添加下大多数植物氮含量达到饱和^[19]。由于本研究中氮添加剂量均相对较高, 接近或者远高于相近区域植物氮含量的氮饱和剂量, 所以两个剂量氮添加下群落和三种功能群的氮含量差异不显著。本研究还发现, 三种功能群中杂类草的氮添加效应显著低于灌木和禾本科, 这与全球性研究结果一致^[12]。由于本研究样地中杂类草包含的物种较多, 除少数 r 对策物种可以快速吸收

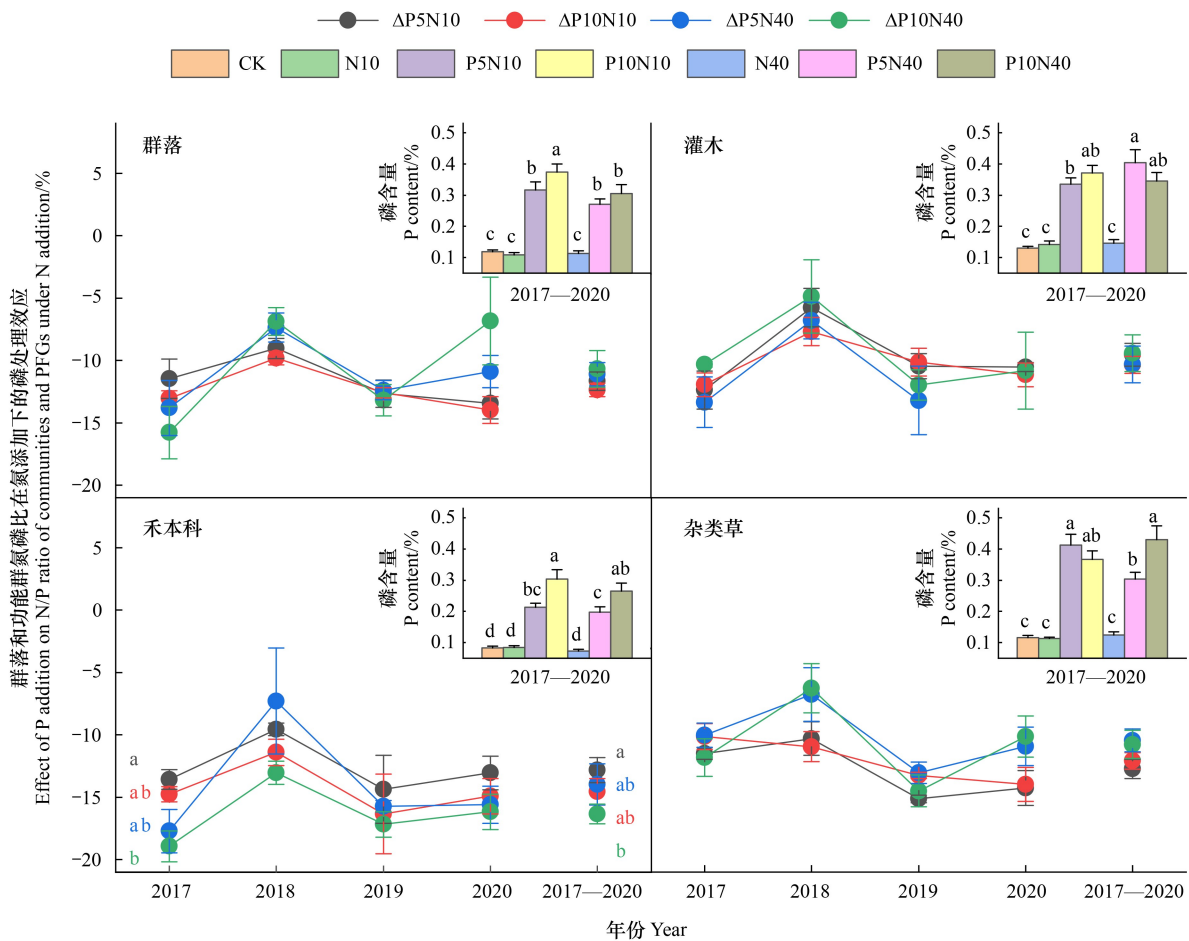


图4 氮磷添加对内蒙古温带草原功能群和群落磷含量及氮磷比的影响

Fig.4 Effects of nitrogen and phosphorus additions on the P content and N/P ratio of plant functional groups and communities in the temperate grasslands of Inner Mongolia

CK: 对照, N10: $10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 添加, N40: $40 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 添加, P5N10: $10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $5 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 同时添加, P10N10: $10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $10 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 同时添加, P5N40: $40 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $5 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 同时添加, P10N40: $40 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $10 \text{ g P m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 同时添加, ΔP_{5N10} : N10P5 处理与 N10 处理的氮磷比差异, ΔP_{10N10} : N10P10 处理与 N10 处理的氮磷比差异, ΔP_{5N40} : N10P5 处理与 N40 处理的氮磷比差异, ΔP_{10N40} : N40P10 处理与 N40 处理的氮磷比差异; 不同小写字母表示同一年份不同处理或处理效应间的差异显著 ($P < 0.05$), 误差为标准误; x 轴中的“4 年总体”表示 4 年平均值

氮以外, 大部分物种氮含量增加较少, 导致在功能群水平上杂类草氮含量增加幅度较灌木和禾本科氮含量增加幅度低。

单独添加磷对群落和三种功能群的氮含量无显著影响, 但是在氮添加后添加磷增加了群落、禾本科和杂类草的氮含量。磷添加影响植物氮吸收的主要途径有三个: (1) 磷添加改变土壤可利用氮^[33-34]。施加磷肥可能提高土壤微生物量和土壤氮矿化率, 从而增加土壤可利用氮和植物氮含量。内蒙古草原的研究表明, 施加磷使土壤微生物量先增加后减小, 施加 $6 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 磷的土壤微生物量最大^[35], 施加 $12.5 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 磷显著提高固氮微生物丰度^[36]。因此, 磷添加可能通过增加土壤微生物总量^[37] 及固氮微生物丰度^[38] 促进土壤氮矿化^[22], 增加土壤可利用氮, 从而提高植物氮含量。另外, 磷添加还会降低土壤 pH^[39], 土壤酸化可能会改变土壤微生物群落结构和降低酶活性^[31], 从而减缓凋落物分解速率, 导致土壤可利用氮及植物氮含量降低。本研究磷添加剂量为 $5 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $10 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 从机理上而言, 磷添加可能增加或降低土壤可利用氮, 这可能是以往研究中磷添加影响土壤可利用氮较弱的原因^[40], 因而单独添加磷未改变群落和三种功能群的氮含量, 与前

人的研究结果一致^[41]。(2)磷添加可能通过增加生物量进而增加根系生物量,扩大氮获取面积而提高植物氮含量。多种元素的添加由于缓解了土壤养分限制,根据最优分配理论植物将降低根系生物量的分配,所以同一试验样地研究发现磷添加或氮磷添加对植物地下生物量无显著影响,甚至部分年份氮磷添加反而降低植物地下生物量^[29]。(3)磷添加缓解植物的磷限制^[23]。植物生长发育同时需要氮磷元素,磷的吸收需要相应的氮进行化能合成,所以氮限制情况下磷添加无法显著增加植物氮含量。以往的研究表明,内蒙古草原主要受到氮限制^[20],所以单独添加磷不增加植物的氮含量。如前所述,17.5 g m⁻² a⁻¹氮添加是大多数植物氮含量饱和的剂量^[19],所以本研究中 N10 和 N40 处理下氮限制将得到大幅缓解甚至解除,此时生态系统转为磷限制^[42-43]。本研究也发现磷添加后群落及三种功能群的磷含量显著增加,且 P10 处理比 P5 处理增加幅度更大,即氮添加后生态系统确实受到磷限制,且添加磷后得以缓解,因此氮磷同时添加增加植物氮含量。

氮磷同时添加促进群落氮的持续吸收主要出现在禾本科和杂类草,而不是灌木,且氮磷添加的剂量越高促进作用越大。一方面,如前所述,氮磷添加促进植物氮持续吸收主要取决于磷限制的缓解或解除。内蒙古草原^[16]氮磷添加试验表明,相比于其他植物,禾本科和杂类草同时受氮磷限制的可能性更大,因而氮磷同时添加促进了其氮含量的持续增加。另一方面,灌木适应贫瘠的土壤环境,对资源如氮和磷的利用相对保守,禾本科^[44-45]和杂类草^[46]更适应于资源丰富的环境,氮磷添加后可以快速利用,因而其氮含量会持续增加。本研究也发现,与对照和氮添加相比,氮磷同时添加下禾本科和杂类草磷含量上升幅度比灌木大,且磷添加的剂量越大磷含量上升越大,因而禾本科和杂类草磷限制得到更大程度的缓解,尤其是在高剂量氮磷添加下,所以氮磷同时添加促进群落氮的持续吸收主要表现在禾本科和杂类草。

4 结论

本研究基于内蒙古草原 4 年氮磷添加试验,分析氮磷添加对群落和三种植物功能群氮含量的影响,得出以下结论:1)氮添加显著增加了群落及不同功能群的氮含量,且增加幅度在不同氮添加剂量间无显著差异。2)磷添加对群落及不同功能群的氮含量无显著影响。3)磷添加促进群落氮的继续吸收,主要表现在禾本科和杂类草,而不是灌木,且氮磷添加的剂量越高促进作用越大。本研究结果为氮磷添加对群落物种组成改变、养分循环提供机理解释,同时氮磷含量是牧草质量的重要指标,也为草原生态系统管理提供依据。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University Press: IPCC WGII sixth assessment report, 2022.
- [2] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [3] Richter A, Burrows J P, Nüß H, Granier C, Niemeier U. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space. *Nature*, 2005, 437(7055): 129-132.
- [4] Kang L, Han X G, Zhang Z B, Sun O J. Grassland ecosystems in China: review of current knowledge and research advancement. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [5] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 2001, 291(5503): 481-484.
- [6] Evans J R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants. *Oecologia*, 1989, 78(1): 9-19.
- [7] Wang S P, Wilkes A, Zhang Z C, Chang X F, Lang R, Wang Y F, Niu H S. Management and land use change effects on soil carbon in Northern China's grasslands: a synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4): 329-340.
- [8] De Deyn G B, Shiel R S, Ostle N J, McNamara N P, Oakley S, Young I, Freeman C, Fenner N, Quirk H, Bardgett R D. Additional carbon sequestration benefits of grassland diversity restoration. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(3): 600-608.
- [9] Hooper D U, Vitousek P M. The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277(5330): 1302-1305.
- [10] Shen H, Dong S K, DiTommaso A, Xiao J N, Lu W, Zhi Y L. 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*, 2022, 13: 811970.
- [11] Lu M, Yang Y H, Luo Y Q, Fang C M, Zhou X H, Chen J K, Yang X, Li B. Responses of ecosystem nitrogen cycle to nitrogen addition: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2011, 189(4): 1040-1050.
- [12] Xia J Y, Wan S Q. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition. *New Phytologist*, 2008, 179(2): 428-439.
- [13] Gong X Y, Chen Q, Lin S, Brueck H, Dittert K, Taube F, Schnyder H. Tradeoffs between nitrogen- and water-use efficiency in dominant species of the semiarid steppe of Inner Mongolia. *Plant and Soil*, 2011, 340(1): 227-238.

- [14] 王雪, 雒文涛, 庾强, 闫彩凤, 徐柱文, 李迈和, 姜勇. 半干旱典型草原养分添加对优势物种叶片氮磷及非结构性碳水化合物含量的影响. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1795-1802.
- [15] 高贝, 胡艳宇, 张志委, 丁聪, 杨雁茹, 吕晓涛. 氮素添加对呼伦贝尔草甸草原植物氮钾元素含量和计量比的影响. 应用生态学报, 2022, 33(4): 981-987.
- [16] 高宗宝, 王洪义, 吕晓涛, 王正文. 氮磷添加对呼伦贝尔草甸草原 4 种优势植物根系和叶片 C:N:P 化学计量特征的影响. 生态学杂志, 2017, 36(1): 80-88.
- [17] 何利元, 胡中民, 郭群, 李胜功, 白文明, 李凌浩. 氮磷添加对内蒙古温带草地上生物量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2291-2297.
- [18] Fang Y, Xun F, Bai W M, Zhang W H, Li L H. Long-term nitrogen addition leads to loss of species richness due to litter accumulation and soil acidification in a temperate steppe. PLoS One, 2012, 7(10): e47369.
- [19] 万宏伟, 杨阳, 白世勤, 徐云虎, 白永飞. 羊草草原群落 6 种植物叶片功能特性对氮素添加的响应. 植物生态学报, 2008, 32(3): 611-621.
- [20] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Naeem 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.
- [21] Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L, Fernandez I. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. BioScience, 1998, 48(11): 921-934.
- [22] Wang C H, Zhu F, Zhao X, Dong K H. The effects of N and P additions on microbial N transformations and biomass on saline-alkaline grassland of Loess Plateau of Northern China. Geoderma, 2014, 213: 419-425.
- [23] 莫江明, 彭少麟, 方运霆, 郁梦德, 孔国辉, 张佑昌. 鼎湖山马尾松针阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究. 生态学报, 2001, 21(3): 492-497.
- [24] 刘碧荣, 王常慧, 张丽华, 董宽虎. 氮素添加和刘割对内蒙古弃耕草地土壤氮矿化的影响. 生态学报, 2015, 35(19): 6335-6343.
- [25] Zhang Y, Zheng L X, Liu X J, Jickells T, Neil Cape J, Goulding K, Fangmeier A, Zhang F S. Evidence for organic N deposition and its anthropogenic sources in China. Atmospheric Environment, 2008, 42(5): 1035-1041.
- [26] Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. Ecology, 2010, 91(1): 299-305.
- [27] Garnier E, Cortez J, Billès G, Navas M L, Roumet C, Debussche M, Laurent G, Blanchard A, Aubry D, Bellmann A, Neill C, Toussaint J P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. Ecology, 2004, 85(9): 2630-2637.
- [28] Sardans J, Grau O, Chen H Y H, Janssens I A, Ciais P, Piao S L, Peñuelas J. Changes in nutrient concentrations of leaves and roots in response to global change factors. Global Change Biology, 2017, 23(9): 3849-3856.
- [29] 郭旋, 胡中民, 李胜功, 郭群. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原地下生物量的影响. 生态学杂志, 2021, 40(4): 929-939.
- [30] 郭群. 氮添加对内蒙古温带典型草原土壤的酸化效应及水分的影响. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3285-3291.
- [31] Chen D M, Lan Z C, Hu S J, Bai Y F. Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 89: 99-108.
- [32] 杨丽丽, 龚吉蕊, 刘敏, 杨波, 张子荷, 罗亲普, 翟占伟, 潘琰. 氮沉降对草地凋落物分解的影响研究进展. 植物生态学报, 2017, 41(8): 894-913.
- [33] Eisele K A, Schimel D S, Kapustka L A, Parton W J. Effects of available P and N: P ratios on non-symbiotic dinitrogen fixation in tallgrass prairie soils. Oecologia, 1989, 79(4): 471-474.
- [34] Crews T E, Farrington H, Vitousek P M. Changes in asymbiotic, heterotrophic nitrogen fixation on leaf litter of *Metrosideros polymorpha* with long-term ecosystem development in Hawaii. Ecosystems, 2000, 3(4): 386-395.
- [35] 李寻, 梅帅, 张宇乐, 程艺凡, 吴梦莉, 王菲, 黄文文. 磷添加对呼伦贝尔草原土壤微生物的影响. 河南科技学院学报: 自然科学版, 2020, 48(4): 8-13.
- [36] 罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 宝音陶格涛, 王忆慧, 翟占伟, 潘琰, 刘敏, 杨丽丽. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响. 植物生态学报, 2016, 40(5): 480-492.
- [37] Huang J S, Hu B, Qi K B, Chen W J, Pang X Y, Bao W K, Tian G L. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in a subalpine spruce plantation. European Journal of Soil Biology, 2016, 72: 35-41.
- [38] 秦燕. 半干旱羊草草原土壤氮素转化与关键微生物特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [39] 杜艺, 翟鹏辉, 贾镇宁, 王一昊, 王子量, 赵祥. 天然草地土壤化学性质对氮磷添加响应的 Meta 分析. 草原与草坪, 2021, 41(1): 76-82.
- [40] 王奇, 王金枝, 姜丽丽, 周阳, 李博文, 崔树娟, 孟凡栋, 汪诗平. 氮和磷添加对草原群落特征及有关生态过程的影响. 草地学报, 2017, 25(5): 914-920.
- [41] 宾振钧, 王静静, 张文鹏, 徐当会, 程雪寒, 李柯杰, 曹德昊. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸 6 个群落优势种生态化学计量学特征的影响. 植物生态学报, 2014, 38(3): 231-237.
- [42] Menge D N L, Field C B. Simulated global changes alter phosphorus demand in annual grassland. Global Change Biology, 2007, 13(12): 2582-2591.
- [43] 苏波, 韩兴国, 渠春梅, 李贵才. 森林土壤氮素可利用性的影响因素研究综述. 生态学杂志, 2002, 21(2): 40-46.
- [44] Grman E, Lau J A, Schoolmaster Jr D R, Gross K L. Mechanisms contributing to stability in ecosystem function depend on the environmental context. Ecology Letters, 2010, 13(11): 1400-1410.
- [45] Song M H, Yu F H. Reduced compensatory effects explain the nitrogen-mediated reduction in stability of an alpine meadow on the Tibetan Plateau. New Phytologist, 2015, 207(1): 70-77.
- [46] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.