

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220557

氮添加和封育对华北落叶松人工林生长和草本多样性的影响

黄晴晴¹, 张帅发¹, 徐国巧², 李 校², 许中旗¹, 贾彦龙^{1*}

(1. 河北农业大学林学院, 河北 保定 071000; 2. 河北省木兰围场国有林场, 河北 围场 068450)

摘要: [目的] 为揭示氮沉降背景下放牧对华北落叶松人工林及林下草本植物多样性的影响。[方法] 本研究以河北省木兰围场常年受到放牧影响的华北落叶松人工林为研究对象, 通过设置对照、封育、施肥、施肥 + 封育 4 种处理, 测定样地内乔木胸径、树高、冠幅增长量和林下草本生物量及多样性等指标, 探讨了 2 a 封育和施肥对华北落叶松人工林生长和草本多样性的影响。[结果] 与对照样地相比, 封育、施肥和施肥 + 封育处理均对乔木生长有促进作用, 树高增长分别约 31.7%、17.6% 和 47.5%, 其中, 施肥 + 封育处理与对照差异显著; 封育、施肥和施肥 + 封育处理均促进了草本生物量的增长, 草本地上生物量分别提高 5.3、0.4、4.1 倍, 草本地下生物量分别提高 4.9、0.1、4.3 倍, 总草本生物量分别提高 5.1、0.2、4.2 倍; 封育和施肥处理下, 草本多样性变化不大, 但不同处理使物种优势度发生显著变化。[结论] 本研究表明, 短期氮添加和封育促进了华北落叶松林乔木和草本生长, 但未对草本多样性产生影响, 却显著改变了草本植物的组成。

关键词: 氮添加; 华北落叶松; 封育; 植物生长; 草本多样性

中图分类号: S791.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)04-0149-08

作为植物生长不可缺少的营养元素, 氮素是植物体内蛋白质、磷脂、核酸和某些生长激素的重要组分之一^[1], 对植物生长和生物多样性具有重要意义。半个世纪以来, 人类社会的发展过度依赖化石燃料和自然资源, 导致全球氮沉降加剧^[2]。我国是全球氮沉降的热点地区之一, 在 2011–2015 年, 中国地区的氮沉降平均通量为 $20.4 \pm 2.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[3]。森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 是世界生物多样性的分布中心^[4], 因此, 氮沉降对森林生态系统的影响一直是研究热点。放牧是很多生态系统植被变化的主要驱动力, 对植物分布和多样性产生直接或间接的影响^[5]。因此, 探究氮沉降和放牧对生态系统的综合影响具有重要意义。

近年来, 国内外学者关于氮沉降对森林植物群落可能产生的影响做了大量的研究。刘修元等^[6]通

过氮添加实验发现, 氮输入对落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) 原始林树木的胸径生长有正效应, 尤其是较高的树, 且随施氮年份的增长效应越大。Wang 等^[7]对水曲柳 (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) 幼苗进行了多水平氮添加实验, 发现当氮添加量为 $20 \sim 80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时, 株高随施氮量的增加而更高, 当施氮量超过 $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 后, 株高会受到抑制, 即高氮可能对植物生长不利。在氮沉降对植物多样性的影响方面, 表现为增加^[8]、抑制^[9-10]及无明显影响^[11-12]。一方面不同植物对氮的敏感性及其需求量存在差异^[8], 另一方面氮富集情况下, 植物对光的竞争能力不同^[13]。氮添加通常会提高喜氮植物的竞争力从而降低多样性, 但适量氮添加也可以增加群落的多样性和稳定性^[14]。

收稿日期: 2022-11-19 修回日期: 2023-03-28

基金项目: 河北省高层次人才资助项目 (A202101053); 河北省自然科学基金 (C2018204096)

作者简介: 黄晴晴, 在读硕士, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 13131823810@163.com

* 通讯作者: 贾彦龙, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林生态学教学和研究。E-mail: jy198620@163.com

目前,关于放牧对植物生长和多样性的影响研究多是在草原生态系统,围栏封育会促进草本生物量的增长^[15],而对生物多样性的影响不尽相同。有研究发现,围栏封育促进了生物多样性的增加^[16];还有研究结果显示,围栏封育抑制了生物多样性的增加^[17]。关于氮沉降和封育对生态系统综合影响的研究也主要在草原生态系统^[18-19],而低海拔的森林也会受到氮沉降和放牧的双重影响,由于森林封育措施很少,该方面研究鲜有报道。

华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr.) 具有生长快、适应性强、经济及生态价值高等特点,是我国华北地区重要的造林树种。本研究以河北省木兰围场国有林场常年受到放牧干扰的华北落叶松人工林为研究对象,通过设置对照、封育、施肥、施肥+封育4种处理,测定样地内乔木胸径、树高、冠幅增长量及林下草本生物多样性及生物量等指标,探讨封育和施肥对华北落叶松人工林生长和草本多样性的影响。研究旨在揭示氮添加和封育管理对华北落叶松人工林的影响,以期为氮沉降背景下的植被恢复和生物多样性保育提供参考依据。

1 研究地区概况

研究区位于承德市围场满族蒙古族自治县木兰围场国有林场,属于燕山山脉西北部 ($41^{\circ}35' \sim 42^{\circ}40' \text{ N}$, $116^{\circ}32' \sim 118^{\circ}14' \text{ E}$),海拔 750~1850 m,地势东南低,西北高;该地区属于半湿润与半干旱的过渡地区,大陆性季风性山地气候,春秋两季多风沙,夏季凉爽无暑热,冬季酷寒干燥,年均降水量 445 mm,年平均气温 3.3°C ,雨热同期。乔木树种主要有华北落叶松,黑桦 (*Betula dahurica* Pall.)、五角槭 (*Acer pictum* subsp. *mono* (Maxim.) H. Ohashi)、白桦 (*Betula*

platyphylla Suk.) 等;优势灌木及草本植物主要是胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.)、绣线菊 (*Spiraea salicifolia* L.)、毛榛 (*Corylus mandshurica* Maxim.)、老鹳草 (*Geranium wilfordii* Maxim.)、种阜草 (*Moehringia trinervia* (L.) Fenzl) 等。

2 研究方法

2.1 试验设计

试验样地位于木兰围场国有林场孟滦分场的大蚂蚁坡,林分类型为华北落叶松人工林,林龄约 30 a,平均树高 10.5 m,平均胸径 15 cm,密度 $1\ 575 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验地常年受到牛、羊放牧干扰,附近养殖的约 100 头牛、羊基本每日进入试验样地所在山头,啃食林下草本,从照片可以直观看出封育与对照样地林下草本现存量的区别 (图 1)。选择具有代表性的地块设置 16 块样地 (样地面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$)。对 16 块样地挂牌编号进行全面调查,之后进行干预处理,其中,4 块样地作为对照组不进行干预,牛羊可照常进入 (对照);4 块样地从 2019 年 8 月用铁丝网进行围封 (高度 1.5 m),围栏网在样地边界基础上向外扩充 5 m (封育);4 块样地从 2019 年 8 月开始用尿素 ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) 施肥,于生长季每月 1 次分施,1 次施肥量为 $40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。将每块样地的肥料溶于 40 L 水中 (约相当于 0.1 mm 降水),用背式喷雾器人工均匀喷洒于样地内 (施肥);4 块样地采取上述围封和施肥操作同时进行 (施肥+封育)。2020 年后受新冠疫情影响,改为 2 月喷施 1 次,年施肥总量不变,其中,无需施肥的样地用等量的水进行喷施。在处理前对所有样地树木、林下草本进行本底调查;2 a 后,于 2021 年 8 月进行复查,期间施肥处理照常进行。



图 1 封育与对照样地林下草本生长情况

Fig. 1 The growth of herbs under the forest in closure and control sample plots

2.2 测定方法

2.2.1 乔木生长量测定方法 测量 16 块样地内每株树的胸径、树高及冠幅, 其中, 树高采用激光测高器测定, 每株树测定 2 次取均值; 冠幅使用钢卷尺测量, 分别测定东、西、南、北 4 个方向, 并记录; 测量胸径并换算得出胸高断面积。所有数据处理前 (2019 年) 测定 1 次, 经过不同处理后 (2021 年) 测定 1 次, 利用其差值代表处理期间树木生长的增量。

2.2.2 草本生物量及多样性测定方法

2.2.2.1 物种多样性 采用 3 点取样法, 选取样地的一条对角线, 在其四分点的中间 3 个点设置 3 个 1 m × 1 m 的样方 (16 块样地, 合计 48 块样方)。识别样方内所有植物种类, 记录每种植物的株数以及低中高 3 个高度, 并估测盖度, 然后计算 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (E)、Margalef 丰富度指数 (M)、Simpson 指数 (D) 和重要值, 各指数的计算公式如下:

Shannon-Wiener 多样性指数 (H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数 (E): $E = H' / \ln S$

Margalef 丰富度指数 (M): $M = (S - 1) / \ln N$

Simpson 指数 (D): $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

式中: S 为物种总数, N 为全部种的个体总数, P_i 表示物种 i 的个体数与所有物种个体总数之比。

重要值 = 相对密度 + 相对频度 + 相对盖度

2.2.2.2 生物量 调查完样方物种多样性后用铁

锹挖取样方内所有植物, 除去附着土壤, 带回室内, 用剪刀将地上、地下部分分开, 称取鲜质量; 取样放入信封, 再放入烘箱内烘干, 先 105 °C 杀青 30 min, 再继续 85 °C 烘干至恒质量, 之后取出称质量, 计算得出各个样方的草本地地上、地下和总生物量。

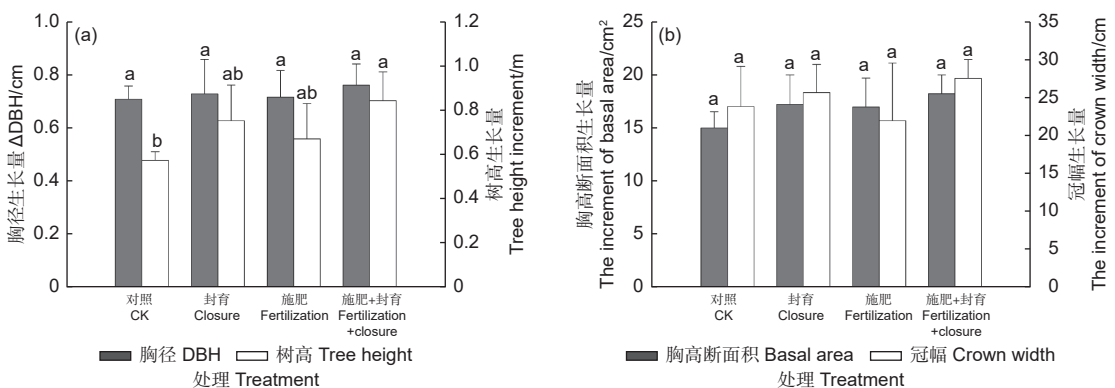
2.3 数据处理

利用 Excel 2010 对数据进行初步计算和整理, SPSS 20.0 软件进行统计分析。对不同处理下的华北落叶松生长量、林下草本植物多样性和生物量进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 采用多重比较 (Duncan's 法) 检验各处理平均值的差异显著性 ($p < 0.05$)。使用 Sigmaplot 14.0 软件作图。

3 结果与分析

3.1 氮添加和封育管理对华北落叶松乔木生长的影响

由图 2 可知: 在不同处理实施 2 a 后, 与对照组相比, 封育、施肥和施肥 + 封育处理均促进了华北落叶松胸径和胸高断面积的生长, 其中, 胸径比对照分别增长约 2.8%、1.4%、7.0%, 胸高断面积比对照分别增长约 14.8%、13.2%、21.6%, 但与对照均差异不显著 ($p > 0.05$)。封育、施肥和施肥 + 封育处理均促进了树高生长, 比对照分别增长约 31.7%、17.6%、47.5%, 其中, 施肥 + 封育处理与对照差异显著 ($p < 0.05$)。封育和施肥 + 封育处理均促进了冠幅生长, 比对照分别增长约 7.7%、15.6%, 但与对照均差异不显著 ($p > 0.05$), 而施肥处理抑制了冠幅生长约 7.8%。



注: 图中不同字母表示同一指标不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

Note: Different letters in the graph indicate significant differences between treatments for the same index ($p < 0.05$). Same as below.

图 2 氮添加和封育管理对华北落叶松乔木生长的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen addition and closure on the growth of *L. principis-rupprechtii*

3.2 氮添加和封育管理对华北落叶松草本生物量的影响

由图3可知：在不同处理实施2a后，与对照组相比，封育、施肥和施肥+封育处理均促进了地上、地下和总草本生物量的生长，其中，地上草本生物量比对照分别增长约534.5%、40.6%、409.1%，地下草本生物量比对照分别增长约485.4%、10.8%、425.5%，总草本生物量比对照分别增长约506.2%、23.5%、418.6%，封育和施肥+封育处理对地上、地下和总草本生物量均有显著影响 ($p < 0.05$)，而施肥处理对其影响不显著 ($p > 0.05$)。封育处理和施肥+封育处理相比，二者对地上、地下和总草本生物量的影响无差异 ($p > 0.05$)。

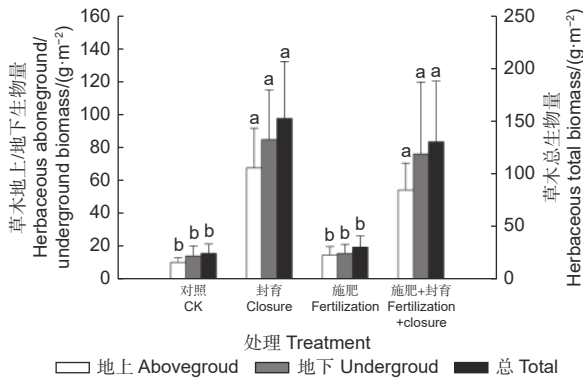


图3 氮添加和封育管理对华北落叶松林下草本生物量的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen addition and closure management on herbaceous biomass under *L. principis-rupprechtii* forest

3.3 氮添加和封育管理对华北落叶松草本多样性的影响

由图4可知：在不同处理实施2a后，封育和施肥处理的草本 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数均低于对照组，施肥+封育处理的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数则高于对照组，但均差异不显著 ($p > 0.05$)。封育处理的 Pielou 均匀度指数低于对照组，施肥处理的 Pielou 均匀度指数与对照组差异不大，施肥+封育处理的 Pielou 均匀度指数高于对照组，均差异不显著 ($p > 0.05$)。封育处理的 Margalef 指数高于对照组，施肥处理的 Margalef 指数低于对照组，施肥+封育处理的 Margalef 指数与对照组差异不大，差异均不显著 ($p > 0.05$)。整体看，2a 的封育和施肥处理未对草本多样性产生明显影响。

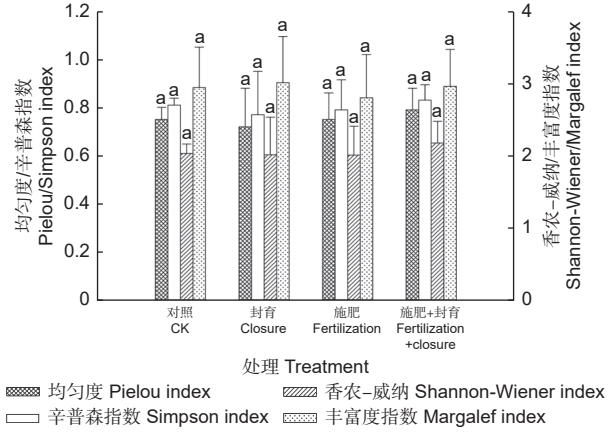


图4 氮添加和封育管理对华北落叶松林下草本多样性的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen addition and closure management on herbaceous diversity under *L. principis-rupprechtii* forest

3.4 氮添加和封育管理对华北落叶松林下草本重要值的影响

由表1、2可知：不同处理后，草本物种的重要值发生了较大变化。与对照组相比，封育处理的样地草本植物重要值排序前10的物种变化了4种，宽叶藁草成为排序较高的物种，而老鹳草的重要值从48.3%降低为14.6%，糙苏、辽藁本、蒲公英和紫斑风铃草的重要值未能进入排序前10，宽叶藁草、细叶藁草、鼬瓣花的重要值分别为43.4%、37.4%、34.2%，进入排序前10；施肥处理的样地草本植物重要值排序前10的物种较对照组的样地变化了3种，老鹳草和种阜草依旧为优势种，细叶藁草和北方拉拉藤的重要值分别从32.8%和27.9%降低为16.2%和17.8%，辽藁本、毛茛、蒲公英的重要值未能进入排序前10，尼泊尔蓼、唐松草、大丁草的重要值分别为29.6%、16.2%、13.8%，进入排序前10；施肥+封育处理的样地草本植物重要值排序前10的物种较对照组的样地变化了4种，宽叶藁草和毛茛的重要值分别为42.4%、34.2%，成为排序较高的物种，而老鹳草的重要值从48.3%降低为15.3%，排序降低，北方拉拉藤、辽藁本、紫斑风铃草、蒲公英的重要值未能进入排序前10，宽叶藁草、唐松草、石生悬钩子、宽叶山萸的重要值分别为42.4%、21.7%、17.9%、14.1%，进入排序前10。

4 讨论

研究表明，温带森林普遍受到氮限制^[20]，氮的

表 1 封育管理对华北落叶松林下草本重要值的影响

Table 1 Effect of closure management on the important value of herbs under *L. principis-rupprechtii* forest

排序 Ranking of important values	对照 CK		封育 Closure	
	植物名称 Name of species	重要值 Important value/%	植物名称 Name of species	重要值 Important value/%
1	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i> Maxim.	48.3	宽叶薹草 <i>Carex siderosticta</i> Hance	43.4
2	种阜草 <i>Moehringia lateriflora</i> (L.) Fenzl	35.5	细叶薹草 <i>Carex duriuscula</i> subsp. <i>Stenophylloides</i> (V. I. Kreczetowicz) S. Y. Liang & Y. C. Tang	37.4
3	细叶薹草 <i>Carex duriuscula</i> subsp. <i>Stenophylloides</i> (V. I. Kreczetowicz) S. Y. Liang & Y. C. Tang	32.8	鼬瓣花 <i>Galeopsis bifida</i> Boenn.	34.2
4	北方拉拉藤 <i>Galium boreale</i> L.	27.9	种阜草 <i>Moehringia lateriflora</i> (L.) Fenzl	30.4
5	辽囊本 <i>Conioselinum smithii</i> (H. Wolff) Pimenov & Kljuykov	24.9	北方拉拉藤 <i>Galium boreale</i> L.	21.1
6	圆叶堇菜 <i>Viola striatella</i> H. Boissieu	20.0	唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i> var. <i>Sibiricum</i> Linnaeus	17.4
7	紫斑风铃草 <i>Campanula punctata</i> Lamarck	18.3	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i> Maxim.	14.6
8	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i> Thunb.	15.3	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i> Thunb.	13.4
9	糙苏 <i>Phlomis umbrosa</i> (Turcz.) Kamelin & Makhm.	13.9	圆叶堇菜 <i>Viola striatella</i> H. Boissieu	10.7
10	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz.	10.6	林问荆 <i>Equisetum sylvaticum</i> L.	9.9

表 2 封育和施肥 + 封育处理对华北落叶松林下草本重要值的影响

Table 2 Effects of closure and fertilization + closure on the important value of herbs under *L. principis-rupprechtii* forest

排序 Ranking of important values	施肥 Fertilization		施肥 + 封育 Fertilization + closure	
	植物名称 Name of species	重要值 Important value/%	植物名称 Name of species	重要值 Important value/%
1	种阜草 <i>Moehringia lateriflora</i> (L.) Fenzl	56.6	宽叶薹草 <i>Carex siderosticta</i> Hance	42.4
2	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i> Maxim.	48.3	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i> Thunb.	34.2
3	尼泊尔蓼 <i>Persicaria nepalensis</i> (Meisn.) H. Gross	29.6	细叶薹草 <i>Carex duriuscula</i> subsp. <i>Stenophylloides</i> (V. I. Kreczetowicz) S. Y. Liang & Y. C. Tang	24.1
4	圆叶堇菜 <i>Viola striatella</i> H. Boissieu	23.4	唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i> var. <i>Sibiricum</i> Linnaeus	21.7
5	紫斑风铃草 <i>Campanula punctata</i> Lamarck	19.9	种阜草 <i>Moehringia lateriflora</i> (L.) Fenzl	19.5
6	北方拉拉藤 <i>Galium boreale</i> L.	17.8	圆叶堇菜 <i>Viola striatella</i> H. Boissieu	19.1
7	细叶薹草 <i>Carex duriuscula</i> subsp. <i>Stenophylloides</i> (V. I. Kreczetowicz) S. Y. Liang & Y. C. Tang	16.2	石生悬钩子 <i>Rubus saxatilis</i> L.	17.9
8	唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i> var. <i>Sibiricum</i> Linnaeus	16.2	糙苏 <i>Phlomis umbrosa</i> (Turcz.) Kamelin & Makhm.	15.7
9	糙苏 <i>Phlomis umbrosa</i> (Turcz.) Kamelin & Makhm.	16.0	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i> Maxim.	15.3
10	大丁草 <i>Leibnitzia anandria</i> (Linnaeus) Turczaninow	13.8	宽叶山蒿 <i>Artemisia stolonifera</i> (Maxim.) Komar.	14.1

添加会刺激温带地区树木的生长^[21-22],提高森林净初级生产力,增加碳固存^[23-24]。氮是叶绿素的重要组成成分,植物的光合能力与氮含量存在相关性^[25],氮添加会促进叶绿素的合成^[26],提高树木的光合速率^[27],进而促进树木生长,这与本研究中氮添加促进了华北落叶松的生长结果一致。封育试验多在草原生态系统中进行,关于封育对乔木生长的影响研究很少。封育可以显著提高土壤养分,如在内蒙古草原的试验中发现,封育提高了土壤有机碳和总氮含量^[28]以及土壤团聚体稳定性^[29],在沙质荒漠草原中,封育提高了土壤全磷及全钾含量^[30],因此,会提高植物生产力。本研究发现,封育同样促进了华北落叶松的生长,特别是树高生长,其主要原因可能也是封育提高了土壤养分含量,进而促进了华北落叶松的生长。

本研究中,封育和施肥均促进了草本生物量的增长,且封育与对照差异显著。施氮直接增加了土壤养分含量,所以,氮添加对草本生长具有正效应,这与大多数研究结果一致^[31]。封育杜绝了牛羊的啃食和踩踏,草本植物未受到干扰,生长良好,与对照差异显著,同许多研究结果一致^[15,32-34];而在施肥+封育的双重处理下,草本生物量比只封育处理的低,比只施肥处理的高,猜测原因是受到样地内华北落叶松乔木的影响。研究表明,林下层光资源的可利用性减少会抑制林下植物的生长^[35-36]。本研究发现,施肥+封育对华北落叶松的生长促进作用最大,相对于封育处理,其乔木层拦截了更多的光照。所以,施肥+封育处理下的草本生物量低于封育处理。

大多数研究认为,氮沉降会降低物种多样性^[9,37-38];但氮沉降的生态效应会因气候、本底、氮肥类型及时间等因素而产生不同的影响^[39],如在天山高寒草地氮添加1 a后,植物多样性与对照差异不显著^[40]。一般认为,封育隔绝牲畜干扰,物种间竞争加剧,优势种逐渐占据主要位置,物种多样性降低^[33,41]。本研究中,施肥和封育对林下草本多样性均无显著影响,主要原因可能是处理时间较短。本试验物种多样性没有发生明显变化,但不同处理下物种的重要值发生了显著改变,这说明林下草本群落的优势种在发生改变。施肥会影响土壤的理化性质,如有机碳、有效氮、有效磷含量和pH值等^[31,42],不同物种对环境改变的敏感性及其适应性差异较大,部分物种可能因无法适应环境变化

而消失^[43];而且氮添加后植物可利用的养分增多^[44],物种间竞争加剧,喜氮物种会占据优势^[9],从而抑制其它物种的生长。封育对物种重要值的改变主要与牲畜的取食喜好有关,如宽叶薹草为牛羊喜吃的一种植物,当封育后,重要值由对照未进前10跃至第1位,成为优势种,适口性好的草本比差的在封育条件下有更高的种间竞争能力,同姚喜喜等^[45]的研究一致。

5 结论

本研究对封育、施肥、施肥+封育处理2 a后,华北落叶松人工林生长和林下草本多样性的变化进行研究分析,得出以下结论:

(1) 与对照相比,施肥+封育处理显著促进了华北落叶松树高的生长,封育、施肥和施肥+封育处理均增加了其胸径和胸高断面面积的生长量,但差异不显著。

(2) 封育、施肥和施肥+封育处理均增加了林下草本生物量,其中,封育和施肥+封育处理均与对照差异显著,且封育处理优于施肥+封育处理。

(3) 3种处理对林下草本多样性无显著影响,但均使物种重要值发生了较大变化。

参考文献:

- [1] 陆景陵,胡鹰堂.植物营养学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [2] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, *et al.* Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [3] YU G R, JIA Y L, HE N P, *et al.* Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(6): 424-429.
- [4] WILSON E O. The current state of biological diversity[M]. Washington D C: National Academy Press, 1988: 3-18.
- [5] ZHANG C P, DONG Q M, CHU H, *et al.* Grassland community composition response to grazing intensity under different grazing regimes[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2018, 71(2): 196-204.
- [6] 刘修元,杜恩在,徐龙超,等.落叶松原始林树木生长对氮添加的响应[J].植物生态学报,2015,39(5): 433-441.
- [7] WANG A Y, WANG M, YANG D, *et al.* Responses of hydraulics at the whole-plant level to simulated nitrogen deposition of different levels in *Fraxinus mandshurica*[J]. *Tree Physiology*, 2016, 36(8): 1045-1055.
- [8] 徐伟洲,赖帅彬,史雷,等.黄土丘陵区草地群落多样性和优势种养分对氮添加的响应[J].草地学报,2022,30(10): 2753-

- 2763.
- [9] 范慧珠, 金光泽. 氮添加对红松人工林草本层植物多样性的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9747-9760.
- [10] STEVENS C J, DISE N B, MOUNTFORD J O, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1876-1879.
- [11] 董六文, 任正炜, 张蕊, 等. 功能多样性比物种多样性更好解释氮添加对高寒草地生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2022, 46(8): 871-881.
- [12] DU E Z. Integrating species composition and leaf nitrogen content to indicate effects of nitrogen deposition[J]. *Environment Pollution*, 2017, 221: 392-397.
- [13] DEMALACH N, ZAADY E, KADMON R. Light asymmetry explains the effect of nutrient enrichment on grassland diversity[J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(1): 60-69.
- [14] 张馨文, 安慧, 刘小平, 等. 短期氮添加对荒漠草原植物群落组成及稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2400-2409.
- [15] 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.
- [16] 于潇, 刘金银, 于应文. 封育对兰州北部荒漠化草原植被构成及物种多样性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(4): 672-678.
- [17] 朱新萍, 贾宏涛, 蒋平安, 等. 长期围栏封育对中天山草地植物群落特征及多样性的影响[J]. 草业科学, 2012, 29(6): 989-992.
- [18] 徐锰瑶, 李雪华, 刘思洋, 等. 围封和水氮添加对重度退化草地植物多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1730-1737.
- [19] 刘思洋, 李雪华, 骆永明, 等. 围封和放牧草地植物多样性对氮添加的响应差异[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3635-3641.
- [20] MATSON P, KATHLEEN A L, SHARON J H. The globalization of nitrogen deposition: Consequences for terrestrial ecosystems[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 113-119.
- [21] TIAN D, DU E Z, JIANG L, *et al.* Responses of forest ecosystem to increasing N deposition in China: a critical review[J]. *Environment Pollution*, 2018, 243(Part A): 75-86.
- [22] 王建宇, 胡海清, 邢亚娟, 等. 大兴安岭兴安落叶松林树木生物量对氮沉降的响应[J]. 林业科学研究, 2018, 31(3): 88-94.
- [23] YAN G Y, XING Y J, WANG J Y, *et al.* Sequestration of atmospheric CO₂ in boreal forest carbon pools in northeastern China: Effects of nitrogen deposition[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248(15): 70-81.
- [24] SCHULTE-UEBBING L, DE VRIES W. Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical, temperate, and boreal forests: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 416-431.
- [25] REICH P B, ELLSWORTH D S, WALTERS M B. Leaf structure (specific leaf area) modulates photosynthesis-nitrogen relations: evidence from within and across species and functional groups[J]. *Function Ecology*, 1998, 12(6): 948-958.
- [26] 万一, 雷蕾, 徐瑾, 等. 不同磷环境下马尾松光和特性对氮添加的响应[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(4): 346-353.
- [27] 王芳, 张军辉, 谷越, 等. 氮添加对树木光合速率影响的meta分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1539-1547.
- [28] WU X, LI Z S, FU B J, *et al.* Effects of grazing exclusion on soil carbon and nitrogen storage in semi-arid grassland in Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(4): 479-487.
- [29] DONG L, ZHENG Y, MARTINSEN V, *et al.* Effect of grazing exclusion and rotational grazing on soil aggregate stability in typical grasslands in Inner Mongolia, China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 844151.
- [30] 杨静, 孙宗玖, 巴德木其其格, 等. 封育对草地植被功能多样性及土壤养分特征的影响[J]. 中国草地学报, 2018, 40(4): 102-110.
- [31] 曹文侠, 李文, 李小龙, 等. 施氮对高寒草甸草原植物群落和土壤养分的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 658-666.
- [32] 赵盼盼, 邵文山, 靳长青, 等. 围封对荒漠草原沙芦草种群构件生物量分配特性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2024-2029.
- [33] 姚喜喜, 才华, 李长慧. 封育和放牧对高寒草甸植被群落特征和土壤特性的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(S1): 128-136.
- [34] 赵中华, 白登忠, 惠刚盈, 等. 小陇山不同经营措施下次生锐齿栎天然林物种多样性研究[J]. 林业科学研究, 2013, 26(3): 326-331.
- [35] KUMAR P, CHEN H Y H, THOMAS S C, *et al.* Linking resource availability and heterogeneity to understorey species diversity through succession in boreal forest of Canada[J]. *Journal of Ecology*, 2018, 106(3): 1266-1276.
- [36] MATSUO T, MARTINEZ-RAMOS M, BONGERS F, *et al.* Forest structure drives changes in light heterogeneity during tropical secondary forest succession[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 109(8): 2871-2884.
- [37] 张世虎, 张悦, 马晓玉, 等. 大气氮沉降影响草地植物物种多样性机制研究综述[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1252-1261.
- [38] 王玉冰, 孙毅寒, 丁威, 等. 长期氮添加对典型草原多样性与初级生产力的影响及途径[J]. 植物生态学报, 2022, 44(1): 22-32.
- [39] 曹丰丰, 刘瑞雪, 黄国柱, 等. 短期氮添加对祁连山高山草地生产力及植物多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5034-5044.
- [40] 陈丽, 田新民, 任正炜, 等. 养分添加对天山高寒草地植物多样性和地上生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3): 280-289.
- [41] 余轩, 王兴, 吴婷, 等. 围封对荒漠草原物种多样性和功能多样性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 243-250.
- [42] 刘春华, 吴冬梅, 刘雨晖, 等. 氮沉降对米赭天然林土壤有机碳及微生物群落结构的影响[J]. 林业科学研究, 2021, 34(2): 42-49.
- [43] 曲恬甜, 闫涛, 张文, 等. 落叶松人工林草本植物群落特征和生物量对氮添加的响应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 587-596.

[44] 刘彩霞, 焦如珍, 董玉红, 等. 杉木林土壤微生物区系对短期模拟氮沉降的响应[J]. 林业科学研究, 2015, 28 (2): 271-276.

[45] 姚喜喜, 肖 锋, 祁守忠, 等. 高寒草甸植被群落特征及其营养品质对围栏封育的响应[J]. 草地学报, 2021, 29 (S1): 208-217.

Effects of Nitrogen Addition and Closure on Growth and Herbaceous Diversity of *Larix principis-rupprechtii* Plantation

HUANG Qing-qing¹, ZHANG Shuai-fa¹, XU Guo-qiao², LI Xiao², XU Zhong-qi¹, JIA Yan-long¹

(1. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China; 2. Mulanweichang National Forestry Administration of Hebei Province, Weichang 068450, Hebei, China)

Abstract: [Objective] The study aimed to reveal the effects of grazing on the diversity of herbaceous plants in *Larix principis-rupprechtii* plantation and undergrowth under the background of nitrogen deposition. [Method] Based on the perennial grazing affected *Larix principis-rupprechtii* plantation in Mulan paddock in Hebei Province, four treatments of control, closure, fertilization, fertilization + closure were set up. The DBH, tree height, crown width growth and herbaceous biomass and diversity of trees in the sample plot were measured, and the effects of 2-year enclosure and fertilization on the growth and herbaceous diversity of *Larix principis-rupprechtii* plantation were discussed. [Result] Compared with the control plot, closure, fertilization and fertilization + closure treatments promoted the growth of trees. The tree height increased by about 31.7%, 17.6% and 47.5%, respectively. Among them, there was significant difference between fertilization + closure treatment and control. Closure, fertilization and fertilization + closure all promoted the increase of herbaceous biomass. The local aboveground biomass increased by 5.3, 0.4 and 4.1 times, the underground biomass increased by 4.9, 0.1 and 4.3 times, and the total herbaceous biomass increased by 5.1, 0.2 and 4.2 times, respectively. Herb diversity changed little under closure and fertilization treatments, but species dominance changed significantly under different treatments. [Conclusion] This study shows that short-term nitrogen addition and closure promote the growth of trees and herbs in *Larix principis-rupprechtii* forest, have no effects on herbaceous diversity, but significantly change the composition of herbaceous plants.

Keywords: nitrogen addition; *Larix principis-rupprechtii*; closure; plant growth; herbaceous diversity

(责任编辑: 徐玉秀)