

DOI: 10.5846/stxb201307141892

李化山, 汪金松, 刘星, 王娜, 赵博, 张春雨, 赵秀海. 模拟 N 沉降对太岳山油松人工林和天然林草本群落的影响. 生态学报, 2015, 35(11): 3910-3721.

Li H S, Wang J S, Liu X, Wang N, Zhao B, Zhang C Y, Zhao X H. Effect of simulation N deposition on herbaceous vegetation community in the plantation and natural forests of *Pinus tabulaeformis* in the Taiyue Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3910-3721.

模拟 N 沉降对太岳山油松人工林和天然林草本群落的影响

李化山¹, 汪金松², 刘 星¹, 王 娜¹, 赵 博¹, 张春雨¹, 赵秀海^{1,*}

1 北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

摘要: 由于人类活动氮沉降呈逐年增加的趋势, 进而增加了陆地生态系统氮的输入, 从而影响陆地生态系统多样性、物种组成和功能。为揭示氮沉降增加对油松林草本群落的影响, 于 2009 年 7 月在太岳山油松人工林和天然林, 设计 4 个施氮水平: 对照 (CK, 0 kg N hm⁻² a⁻¹), 低氮 (LN, 50 kg N hm⁻² a⁻¹), 中氮 (MN, 100 kg N hm⁻² a⁻¹) 和高氮 (HN, 150 kg N hm⁻² a⁻¹), 研究草本群落的生物多样性、生物量以及草本元素含量对模拟 N 沉降的响应。研究结果表明: 模拟 N 沉降未能显著影响人工林草本群落的生物多样性 ($P>0.05$), 而中氮、高氮显著降低了天然林草本群落的生物多样性 ($P<0.05$); 从 Jaccard 指数和 Sorensen 指数分析得出人工林不同氮水平之间草本群落差异性较小, 而天然林不同氮水平之间草本群落差异性较大。模拟 N 沉降没有显著改变人工林草本群落生物量 ($P>0.05$), 而高氮明显促进天然林草本群落生物量的增加 ($P<0.05$)。与对照相比, 模拟 N 沉降提高了人工林和天然林羊胡子苔草叶根中的全 N 含量 ($P<0.05$), 而降低了全 Mg 的含量 ($P<0.05$), 并且根部元素含量变化与土壤养分含量变化较为一致。施氮提高了 N/K、N/Ca、N/Mg ($P<0.05$) 的比值。说明油松林下草本群落对氮沉降的响应因林分土壤 N 饱和程度以及林地利用历史的不同而产生差异, 其中天然林响应最为敏感。

关键词: N 沉降; 草本; 生物多样性; 生物量; 元素含量; 油松

Effect of simulation N deposition on herbaceous vegetation community in the plantation and natural forests of *Pinus tabulaeformis* in the Taiyue Mountain

LI Huashan¹, WANG Jinsong², LIU Xing¹, WANG Na¹, ZHAO Bo¹, ZHANG Chunyu¹, ZHAO Xiuhai^{1,*}

1 Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Human activities have significantly altered global and regional cycles of nitrogen (N) in the last several decades due to combustion of fossil fuels, intensive agriculture and stock breeding. The amount of human-made reactive N which is more than the natural production, released into the atmosphere. Nitrogen (N) deposition has been widely considered as an environmental problem that leads to destruction of ecological balance such as biodiversity loss, base cation loss, soil acidification, but increases net primary productivity of N-limited forest ecosystems. Greater N deposition has a significantly effect on productivity, plant diversity and biomass allocation of forest ecosystem. To determine the influence of N deposition on species diversity, biomass and nutrients of herbaceous vegetation community, for this: 12, 20 m × 20 m plots, respectively, distributed in the plantation and natural forest of *Pinus tabulaeformis* were established in the Taiyue Mountain,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31340022); 国家林业公益性行业科研专项 (201104009)

收稿日期: 2013-07-14; **网络出版日期:** 2014-06-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxh@bjfu.edu.cn

Shanxi Province, since July, 2009. Within each stand, equal numbers of 20 m×20 m plots were treated with four nitrogen fertilization levels: control (CK, 0 kg N hm⁻² a⁻¹), low nitrogen (LN, 50 kg N hm⁻² a⁻¹), moderate nitrogen (MN, 100 kg N hm⁻² a⁻¹) and high nitrogen (HN, 150 kg N hm⁻² a⁻¹), the different levels of N were added at the middle of each month in growing season Since 2009. Herb samples were collected and investigated in August in 2012, and the soil samples were collected in August of 2009 and 2012. The coverage, diversity indices, above-ground biomass, underground biomass, total biomass and element contents of herbaceous vegetation community and soil physical and chemical characteristics of different nitrogen levels were analyzed. Results showed that: Nitrogen additions did not significantly ($P>0.05$) affect diversity indices of herbaceous vegetation community in the plantation forest, however, MN and HN treatments significantly decreased the diversity indices ($P<0.05$) of herbaceous vegetation community in the natural forest. Jaccard and Sorensen index indicated that there were significant differences in community composition of herbaceous vegetation between different nitrogen levels in the natural forest, while that of plantation forest was not significant. The herb biomass showed no significant ($P>0.05$) response to nitrogen deposition in the plantation forest, while HN treatment significantly increased herb biomass ($P<0.05$) in the natural forest. The variations of nutrient in root of *Carex callitrichos* were closely related to soil physical and chemical characteristics. Nitrogen addition increased total N contents ($P<0.05$), but decreased total Mg contents ($P<0.05$) in leaves and roots of *C. callitrichos*, and nitrogen deposition significantly increased the ratio of N/K, N/Ca, N/Mg ($P<0.05$) when compared to the control in the plantation and natural forest of *P. tabulaeformis*. It was suggested that external nitrogen addition would affect the species diversity, productivity and elements uptake of herb community in the *P. tabulaeformis* forests, however, the impact of N enrichment on the herbaceous vegetation community may vary with different soil nitrogen saturation and land-use history, and natural forests may be more sensitive to N deposition.

Key Words: N deposition; herbs; species diversity; biomass; elements content; *Pinus tabulaeformis*

由于人类对自然界的干扰不断增强, N 沉降也呈逐年增加的趋势, 氮沉降的增加将对陆地及水生生态系统的生产力和稳定性、土壤和水体环境、农业和森林生态系统以及生物多样性等方面产生深刻影响^[1-3]。N 沉降的全球化及其持续增加的趋势, 并将对全球碳(C)循环过程、生物过程的效率造成重大影响^[4]。

生物可利用性 N 是大多数陆地生态系统主要限制元素, 影响着生态系统的多样性、物种组成和功能^[5-7]。许多模拟试验揭示 N 沉降在 25 kg N hm⁻² a⁻¹ 的水平或更高水平将会减少植物种数, 改变生态系统的组成和功能^[8]。因自然 N 沉降背景值与土壤 N 饱和程度的不同, N 沉降对不同生态系统的生物多样性产生不一致的结果^[9], 主要表现为: 降低生物多样性^[10-13], 无影响^[14-17], 如 Clark 等^[10]在美国明尼苏达州草原所作的研究发现长期低水平的 N 沉降(10 kg N hm⁻² a⁻¹)使植物种数相比对照减少了 17%, Lu 等^[13]在热带老龄林所作研究发现高氮的输入(150 kg N hm⁻² a⁻¹)显著降低了植物多样性, 但是在阿巴拉契亚山脉中部的阔叶林进行 6 年的航空施氮(35 kg N hm⁻² a⁻¹)研究, 发现施氮对植物多样性没有显著影响^[17]。并且氮沉降在一定程度上对地上部分的生长有促进作用, 同时, 根系生长受到抑制, 根部生物量减少^[18]。氮沉降或引起植物含氮量的增加或没有明显变化, 且地上部分和地下部分的氮含量变化并不一致^[19]。目前国内外针对 N 沉降对植物的影响主要集中在草地植物^[6, 20]、乔木和灌木^[21], 对林下草本研究较少, 并且林下草本反映森林生态系统变化的指示者, 其对 N 沉降增加的响应较为敏感^[22], 本实验研究连续施氮 3a 后草本群落的变化为探讨森林生态系统对 N 沉降的响应机制提供理论基础。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是我国特有树种, 其分布广泛, 油松林是我国北方温性针叶林中分布最广的森林群落, 也是暖温带湿润半湿润气候区的地带性植被^[23]。太岳山地区在山西省素称“油松之乡”。目前在全球变化背景下, 该地区大气氮沉降对森林生态系统影响的研究较少, 而油松林下草本生长对大气氮沉降的响应研究还未见报道。于 2009 年 7 月在太岳山油松人工林和天然林, 设计 4 个施氮水平, 旨在探明: (1) 两种

林分各施氮水平的草本生物多样性、地上与地下生物量、元素含量的差异;(2)两种林分不同氮水平处理之间的草本群落相似度;(3)与草本生长密切相关的土壤理化性质在施氮后的变化;(4)羊胡子苔草中全 N 与其他养分元素比值。以期加深草本在氮添加情况下的生理生态过程和氮沉降对油松林下草本群落影响机制的了解,为全球变化背景下油松林生态系统管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地自然概况

研究地位于国家林业局山西太岳山森林生态系统定位研究站,地处东经 112°01′—112°15′,北纬 36°31′—36°43′。林区海拔为 1150—2088 m,平均 1500 m。地貌属大起伏喀斯特侵蚀高中山,岩石主要为石灰岩。土壤主要是褐土和棕壤。该区气候属温带大陆性季风气候,四季分明,雨量集中在夏季,占全年降雨量的 60%以上。年平均降雨量 662 mm。年均温度 6.2℃,日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温 2542℃,年日照 2600 h,无霜期 110—125 d。油松(*P. tabulaeformis*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)是本区最具代表性树种;灌木主要有毛榛(*Corylus mandshurica*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、黄刺梅(*Rosaceae xanthina*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等;草类有羊胡子苔草(*Carex callitrichos*)、龙常草(*Diarrhena manshurica*)、小红菊(*Dendranthema chanelii*)、大火草(*Anemone tomentosa*)等。

1.2 试验材料与试验设计

2009 年 7 月在油松人工林(RF)、天然林(TF)中分别选取未被破坏、有代表性的林地各建立 12 个 20 m×20 m 的固定样地,每林分的 12 个样地选取参照条件为:无人破坏,同一林分起源,同一林龄,相同坡向、坡位,坡度相近,保证物种的均一性。2009 年 8 月对所有样地进行了本底值调查,记录样地内所有胸径 ≥ 1 cm 的全部植物的种名、胸径、树高、冠幅及枝下高,并挂牌标记。在不同处理的样方内取土壤表层(0—20 cm)取 10 个土壤样品进行混合,带回实验室进行分析,测定土壤理化性质,人工林和天然林各处理样地本底值结果如表 1 所示。由于前期人工抚育措施,油松人工成熟纯林内树种结构单一,凋落物分解较慢,林地生产力和土壤中氮含量较低;而天然林由于未受干扰树种结构复杂,林分郁闭度高,凋落物的分解和养分释放都较快,林地生产力和土壤中氮含量高。

表 1 油松人工林和天然林各施氮处理样地的主要林分和立地特征

Table 1 Stand and site characteristics of the nitrogen-loaded plots in the plantation and natural forests of *P. tabulaeformis*

林型 Forest type	处理 Treatment	林分特征 Stand characteristics				立地特征 Site characteristics					
		林龄 Forest age/a	密度 Density/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Average height/m	pH	全氮 Total N/%	速效钾 Available K/ (mg/kg)	速效磷 Available P/ (mg/kg)	有效钙 Available Ca/ (mg/kg)	有效镁 Available Mg/ (mg/kg)
人工林	对照	60	858	17.8	13.1	7.61 Aa	0.1116 Aa	211.47 Aa	5.05 Aa	3098.33 Aa	176.64 Aa
Planted forest	低氮	60	725	21.2	13.8	7.57 Aa	0.1015 Aa	212.09 Aa	5.06 Aa	3013.88 Aa	174.40 Aa
	中氮	60	692	20.2	11.6	7.61 Aa	0.1086 Aa	209.60 Aa	5.09 Aa	3096.73 Aa	173.47 Aa
	高氮	60	658	20.5	12.4	7.64 Aa	0.1014 Aa	210.63 Aa	5.06 Aa	3108.02 Aa	177.47 Aa
天然林	对照	75	1267	23.9	17.7	7.14 Ba	0.1871 Ba	214.21 Ba	5.73 Ba	3120.72 Ba	174.51 Ba
Natural forest	低氮	75	1567	20.6	17.8	7.14 Ba	0.2010 Ba	215.69 Ba	5.77 Ba	3100.96 Ba	178.82 Ba
	中氮	75	1208	23.5	17.4	7.15 Ba	0.1944 Ba	218.44 Ba	5.66 Ba	3095.65 Ba	177.40 Ba
	高氮	75	1225	23.4	19.0	7.15 Ba	0.2010 Ba	215.46 Ba	5.68 Ba	3089.12 Ba	174.40 Ba

模拟氮沉降试验即以人工喷氮的方式对未来的氮沉降趋势进行模拟。通过收集降雨和降尘,测定本地区自然 N 沉降量为 21.2 kg N hm⁻² a⁻¹,依据自然氮沉降背景值设置氮处理的强度和频度:按氮施用量的高低,12 个样地分为 4 个处理组,分别为对照(CK, 0 kg N hm⁻² a⁻¹),低氮(LN, 50 kg N hm⁻² a⁻¹),中氮(MN, 100 kg N hm⁻² a⁻¹)和高氮(HN, 150 kg N hm⁻² a⁻¹),每种处理重复 3 次。使用 CO(NH₂)₂作为氮源,控制实验自 2009 年

9 月开始,在每年生长季内(5—10 月)的每月中旬以溶液的形式给样地喷洒。按照处理水平的要求,将每个样地每次所需要喷施的 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 溶解在 20 L 水中,以背式喷雾器在林地均匀喷洒。对照样方喷施同样量的水以避免外加的水造成的生物地球化学循环的影响。

1.3 数据的采集及样品测定

1.3.1 草本调查与取样

在 2012 年 8 月在每个 20 m×20 m 样方里按梅花形布设 5 个 1 m×1 m 的小样方,测定草本植物的种类、多度、盖度、生长势。草本生物量调查采用全收割法,将小样方里的草本全部挖出取回,将草本的根洗净,在 80℃ 条件下烘干至恒重,再称其重量。计算出不同草本的地上与地下生物量的值。

本实验选取每个样方里数量最多的羊胡子苔草(*C. callitrichos*),将其烘干后的叶部和根部进行粉碎,然后测定叶部和根部全 N、P、K、Ca、Mg。全 N 测定采用凯氏法(意大利 VELP 公司-UDK 142 型全自动凯氏定氮仪),全 P 测定用钼钒黄比色法(美国 PE 公司-Lambda25 型紫外分光光度计),全 K、Ca 和 Mg 的测定采用原子吸收分光光度法(美国 PE 公司-AA700 型)^[24]。

1.3.2 土壤理化性质的测定

于 2009 年 8 月下旬、2012 年 8 月下旬进行采样,在天然林和人工林 12 个样方内,去除表面凋落物层,每个样方各取 5 个 0—20 cm 土钻,去除粗根、石块和其他杂物后过 2 mm 筛备测。测定土壤 pH 值用电位测定法,先用 1 mol/L 氯化钾溶液浸提(水土比为 2.5:1),后用 pH S-3C 型数字型酸度计进行测定,土壤速效钾用醋酸铵-火焰光度计法测定,有效钙、有效镁用原子吸收分光光度法(美国 PE 公司-AA700 型)测定,土壤速效磷用钼锑抗比色法(美国 PE 公司-Lambda25 型紫外分光光度计)测定,土壤全氮量用重铬酸钾-硫酸消化法测定^[25]。

1.4 数据处理与分析

用 R 语言 R 2.12.2(<http://www.R-project.org/>)的 vegan 包计算 α 多样性指数,包括 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Inverse Simpson 指数、物种丰富度 S 、Pielou 均匀度指数。

$$\text{Shannon-Wiener 指数} \quad H' = -\sum P_i \ln P_i$$

式中, $P_i = N_i/N$, N_i 为种 i 的个体数, N 为所在群落的所有物种的个体数之和;

$$\text{Simpson 指数} \quad D = 1 - \sum P_i^2$$

式中, P_i 种的个体数占群落中总个体数的比例;

$$\text{Inverse Simpson 指数} \quad D' = 1 / \sum P_i^2$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} \quad E = H / H_{\max}$$

式中, H 为实际观察的物种多样性指数, $H_{\max}$ 为最大的物种多样性指数, $H_{\max} = \ln S$ (S 为群落中的总物种数)。

β 多样性指数

$$\text{Jaccard 指数:} \quad C_j = c / a + b - c$$

$$\text{Sorensen 指数:} \quad S_1 = 2c / a + b$$

式中, a 和 b 为两个群落的物种数, c 为两个群落共有的物种数。

利用 SPSS 18.0 软件的单因素方差分析(ANOVA)结合 LSD 法分析比较检验不同氮水平草本地地上、地上生物量差异、羊胡子苔草(*C. callitrichos*)叶根元素含量和土壤理化性质的差异。用 Sigmaplot 10.0 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同氮水平的草本群落多样性指数

群落中物种的多样性是生物群落的重要特征。除了高氮显著提高 Inverse Simpson ($P < 0.05$) 指数以外,施氮对人工林其他多样性指数均无显著影响($P > 0.05$) (表 2)。

由表 2 可知,施氮对天然林草本群落生物多样性产生明显影响,Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、

Inverse Simpson 指数、Pielou 均匀度指数、盖度均随氮水平增加均呈现先下降再上升的趋势,中氮显著降低了 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Inverse Simpson 指数、物种丰富度 S ($P < 0.05$),而高氮显著降低了 Shannon-Wiener 指数、Inverse Simpson 指数、物种丰富度 S ($P < 0.05$)。

表 2 人工林和天然林不同氮水平的草本群落多样性指数(平均值 $\pm$ 标准差)

Table 2 The species diversity of herbaceous vegetation community in the plantation and natural forests of *P. tabulaeformis* (mean $\pm$ SD)

林型 Forest type	处理 Treatment	香农-威纳指数 Shannon- Wiener	辛普森指数 Simpson	逆辛普森指数 Inverse Simpson	物种丰富度 Species richness	均匀度指数 Pielou evenness index	盖度 Coverage
人工林 RF	对照	0.98 $\pm$ 0.10 Aa	0.45 $\pm$ 0.04 Aa	1.83 $\pm$ 0.13 Ab	10.67 $\pm$ 1.53 Aa	0.41 $\pm$ 0.03 Aa	0.65 $\pm$ 0.14 Aa
	低氮	1.13 $\pm$ 0.02 Aa	0.50 $\pm$ 0.05 Aa	2.00 $\pm$ 0.19 Ab	11.67 $\pm$ 2.52 Aa	0.47 $\pm$ 0.04 Aa	0.56 $\pm$ 0.08 Aa
	中氮	0.87 $\pm$ 0.08 Aa	0.41 $\pm$ 0.05 Aa	1.71 $\pm$ 0.13 Ab	9.67 $\pm$ 2.31 Aa	0.39 $\pm$ 0.05 Aa	0.57 $\pm$ 0.12 Aa
	高氮	1.13 $\pm$ 0.43 Aa	0.47 $\pm$ 0.11 Aa	2.43 $\pm$ 0.23 Aa	11.33 $\pm$ 0.58 Aa	0.47 $\pm$ 0.18 Aa	0.61 $\pm$ 0.08 Aa
天然林 TF	对照	1.39 $\pm$ 0.16 Ba	0.60 $\pm$ 0.08 Ba	3.17 $\pm$ 0.22 Ba	12.00 $\pm$ 2.00 Ba	0.57 $\pm$ 0.12 Ba	0.44 $\pm$ 0.04 Bb
	低氮	1.19 $\pm$ 0.18 Bab	0.56 $\pm$ 0.08 Bab	2.68 $\pm$ 0.47 Bab	9.67 $\pm$ 0.58 Bb	0.53 $\pm$ 0.02 Ba	0.36 $\pm$ 0.06 Bb
	中氮	0.96 $\pm$ 0.24 Bb	0.48 $\pm$ 0.04 Bb	2.02 $\pm$ 0.53 Bb	8.00 $\pm$ 1.00 Bb	0.46 $\pm$ 0.10 Ba	0.44 $\pm$ 0.06 Bb
	高氮 THN	0.98 $\pm$ 0.04 Bb	0.56 $\pm$ 0.04 Bab	2.27 $\pm$ 0.19 Bb	5.67 $\pm$ 0.58 Bc	0.59 $\pm$ 0.03 Ba	0.59 $\pm$ 0.05 Ba

RF:人工林 Plantation;TF:天然林 Natural forest; 大写字母表示不同林分,A:人工林 Plantation, B:天然林 Natural forest; 不同小写字母表示相同林分的不同氮水平之间差异显著($P < 0.05$); SD:Standard deviation

2.2 不同氮水平之间的草本群落相似度指数

氮沉降改变群落物种组成,使不同氮水平的物种组成产生差异。人工林和天然林不同氮水平之间的草本群落 Jaccard 指数和 Sorensen 指数呈现一致变化。人工林不同氮水平之间的草本群落 Jaccard 指数和 Sorensen 指数没有较大波动,中氮水平与低氮水平之间草本群落相似度最大,对照与低氮水平、高氮水平之间草本群落相似度最小。天然林不同氮水平之间的草本群落 Jaccard 指数和 Sorensen 指数有较大波动,高氮水平与中氮水平之间草本群落相似度最大,各施氮水平与对照之间草本群落相似度均较小,其中对照与低氮水平之间草本群落相似度最小(表 3)。

表 3 人工林和天然林不同氮水平草本 Jaccard 指数和 Sorensen 指数

Table 3 Jaccard index and Sorensen index of herbaceous vegetation community of different nitrogen level in the plantation and natural forests of *P. tabulaeformis*

林型 Forest type	指数 Index	处理 Treatment	对照 Control	低氮 Low nitrogen	中氮 Moderate nitrogen	高氮 High nitrogen
人工林 RF	Jaccard	对照	—	—	—	—
		低氮	0.440	—	—	—
		中氮	0.545	0.583	—	—
		高氮	0.440	0.481	0.481	—
天然林 TF	Jaccard	对照	—	—	—	—
		低氮	0.265	—	—	—
		中氮	0.379	0.346	—	—
		高氮	0.286	0.348	0.647	—
人工林 RF	Sorensen	对照	—	—	—	—
		低氮	0.579	—	—	—
		中氮	0.706	0.737	—	—
		高氮	0.579	0.650	0.684	—
天然林 TF	Sorensen	对照	—	—	—	—
		低氮	0.419	—	—	—
		中氮	0.550	0.514	—	—
		高氮	0.444	0.516	0.786	—

2.3 不同氮水平处理的草地上生物量、地下生物量、总生物量

施氮对不同草地植物生物量及其分配产生影响^[26],施氮对人工林的草地上生物量、地下生物量、总生物量均无显著影响($P>0.05$)(图 1)。

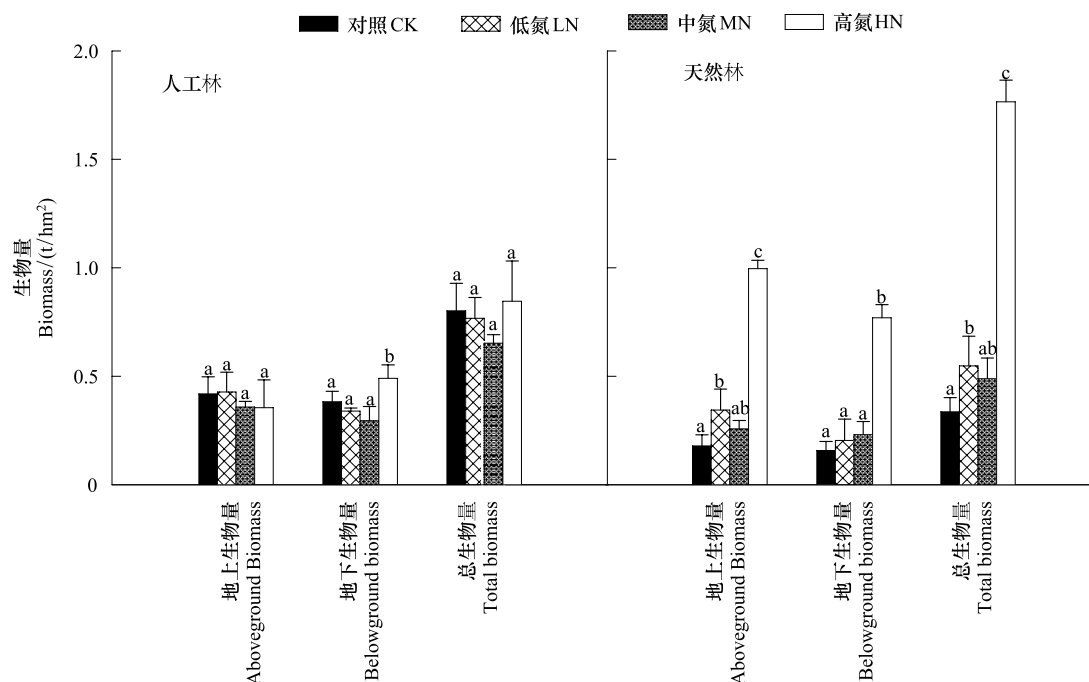


图 1 人工林和天然林不同氮水平的草地上生物量、地下生物量、总生物量 (平均值±标准差)

Fig.1 The above-ground biomass, underground biomass, total biomass of herbaceous vegetation community of different nitrogen levels in the plantation and natural forests of *P. tabulaeformis* (mean ±SD)

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

从图 1 可以看出,天然林高氮水平的草地上生物量显著高于其他氮水平 ($P<0.05$),低氮显著高于对照 ($P<0.05$),中氮与对照、低氮之间均无显著差异 ($P>0.05$),各施氮水平的草地上生物量相比对照分别增加了 92.6%、44.5%、457.6%。草本地下生物量随着氮沉降水平的增加呈升高的趋势,高氮对草本生物量的促进作用最明显 ($P<0.05$),各施氮水平的草本地下生物量相比对照分别增加了 29.2%、46.5%、287.6%。与对照相比,高氮处理下草本总生物量增加了 424.7%,差异显著 ($P<0.05$);低氮处理下草本总生物量增加了 62.9%,差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 施氮后土壤理化性质的变化

相比对照,土壤 pH 值、速效钾、有效钙、有效镁含量基本随着氮沉降量的增加而降低,而全氮含量随着模拟氮沉降量的增加而增加,但是有效磷的含量没有明显的变化。并且相比 2009 年本底值,土壤速效钾、有效钙、有效镁含量均有明显下降,而土壤酸度、全氮含量明显增加(表 4)。

2.5 不同氮水平的羊胡子苔草叶根元素含量

图 2 为氮沉降处理对羊胡子苔草叶根元素含量的影响。全 N 在人工林和天然林羊胡子苔草的叶根中的含量随施氮水平的增加呈现升高趋势,不同氮水平之间显著差异 ($P<0.05$),人工林叶各施氮水平的全 N 含量相比对照分别增加了 23.0%、35.9%、64.1%,天然林叶各施氮水平的全 N 含量相比对照分别增加了 61.1%、83.8%、96.9%,人工林根各施氮水平的全 N 含量相比对照分别增加了 21.8%、21.8%、41.0%,天然林根各施氮水平的全 N 含量相比对照分别增加了 50.6%、56.6%、59.1%。

表 4 人工林和天然林不同氮水平的土壤理化性质 (平均值±标准差)

Table 4 Soil physical and chemical characteristics of different nitrogen levels in the plantation and natural forests of *P.tabulaeformis* (mean ±SD)

林型 Forest type	处理 Treatment	PH	全氮 Total N/%	速效钾 Available K/ (mg/kg)	速效磷 Available P/ (mg/kg)	有效钙 Available Ca/ (mg/kg)	有效镁 Available Mg/ (mg/kg)
人工林 RF	对照	7.21±0.02 Aa	0.1224±0.0023 Ad	219.52±0.10 Aa	5.04±0.10 Ab	3105.88±3.98 Aa	191.66±0.10 Aa
	低氮	6.74±0.05 Ab	0.1312±0.0010 Ac	208.84±0.15 Ab	5.22±0.15 Ab	2660.61±11.58 Ab	176.73±0.15 Ad
	中氮	6.75±0.05 Ab	0.1445±0.0210 Ab	201.77±0.20 Ac	5.23±0.20 Ab	2633.97±0.20 Ac	180.16±0.20 Ac
	高氮	6.61±0.03 Ac	0.1492±0.0010 Aa	195.25±0.12 Ad	5.78±0.12 Aa	2758.44±20.89 Ac	188.17±0.12 Ab
天然林 TF	对照	7.16±0.04 Ba	0.1871±0.0153 Bc	205.22±0.30 Ba	5.66±0.21 Ba	3231.42±0.30 Ba	173.07±0.30 Ba
	低氮	6.47±0.12 Bc	0.2528±0.0010 Bb	190.00±0.21 Bb	5.52±0.21 Ba	2925.22±0.21 Bb	167.02±0.21 Bc
	中氮	6.68±0.10 Bb	0.2628±0.0100 Bb	185.41±0.11 Bc	5.69±0.10 Ba	2825.66±0.11 Bc	168.07±0.11 Bb
	高氮	6.48±0.10 Bc	0.2884±0.0100 Ba	180.78±0.12 Bd	5.72±0.15 Ba	2725.66±0.12 Bd	160.04±0.12 Bd

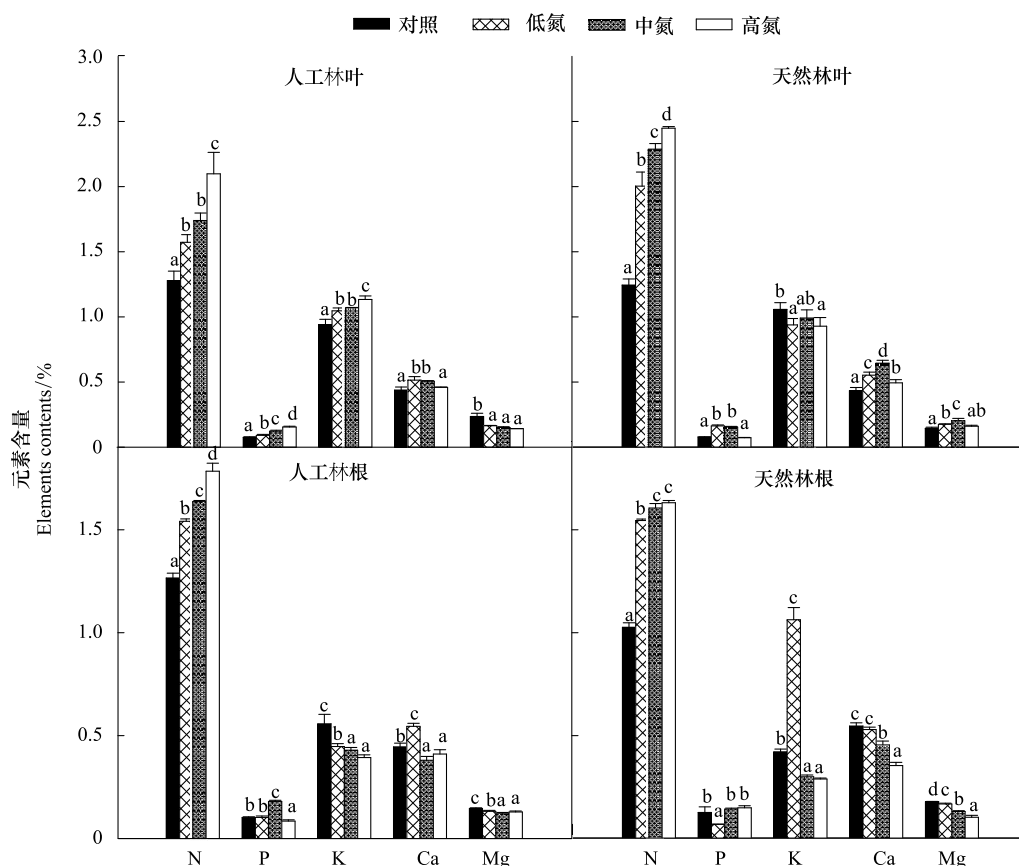


图 2 人工林和天然林不同施氮水平羊胡子苔草叶根元素含量(平均值±标准差)

Fig.2 Element contents in the leaf, root of *C.callitrichos* of different nitrogen levels in the plantation and natural forests of *P. tabulaeformis* (mean ±SD)

P 在人工林叶的含量随施氮水平的增加呈现升高趋势,不同氮水平之间差异显著($P<0.05$),各施氮水平相比对照分别增加了 19.4%、60.6%、102.2%;在天然林叶中 P 含量随施氮水平的增加呈先升高后降低的趋势,中氮、低氮显著高于对照、高氮($P<0.05$);而在人工林根中高氮含量最低,中氮最高,原因可能是氮沉降对土壤中磷的含量没有明显影响,其总量是一定的,叶、根的磷的含量是此消彼长的,而在天然林根中低氮最低,其他氮水平之间无显著差异($P>0.05$)。

K 在人工林叶中的含量随施氮水平的增加呈上升趋势,各施氮水平相比对照分别增加了 11.3%、13.7%、

20.5%,而在人工林根中的含量呈相反趋势,各施氮水平相比对照分别降低了 19.8%、23.0%、29.4%;天然林叶中高氮最低,对照最高,在根中低氮最高,高氮最低。

Ca 在人工林和天然林叶中的含量均随施氮水平的增加呈先升高后降低趋势,均是中氮、低氮显著高于对照、高氮($P<0.05$);而在人工林根中含量随施氮水平的增加呈先升高后降低趋势,低氮显著高于其他氮水平($P<0.05$);在人工林根中,中氮、高氮显著低于对照、低氮($P<0.05$),低氮最高;在天然林根中含量随施氮水平的增加呈下降趋势,中氮、高氮显著低于对照、低氮($P<0.05$),各施氮水平相比对照分别降低了 3.2%、17.0%、35.4%。

全 Mg 在人工林叶、天然林根含量随施氮水平的增加呈下降趋势,施氮各水平均显著低于对照($P<0.05$),人工林叶各施氮水平的全 Mg 含量相比对照分别降低了 30.1%、35.6%、39.8%,天然林根各施氮水平的全 Mg 含量相比对照分别降低了 6.1%、26.8%、42.7%;在天然林叶中,随施氮水平的增加基本呈先上升后下降趋势,中氮、低氮显著高于对照、高氮($P<0.05$),而在人工林根中呈相反结果。

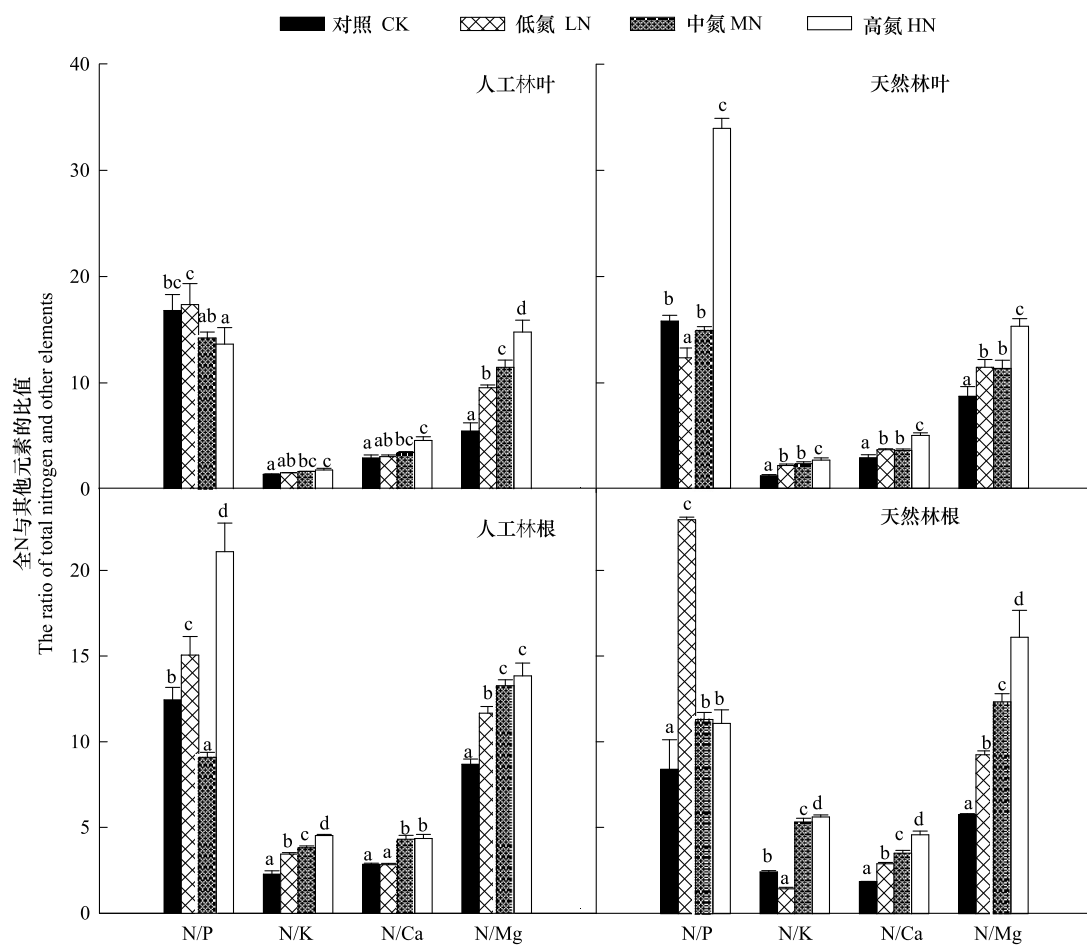


图3 人工林和天然林不同氮水平羊胡子苔草叶根的 N/P, N/K, N/Ca, N/Mg 的值(平均值±标准差)

Fig. 3 N/P, N/K, N/Ca, N/Mg of leaf and root of *C. callitrichos* of different nitrogen levels in the plantation and natural forests of *P. tabulaeformis* (mean ±SD)

2.6 羊胡子苔草叶根中全 N 与其他养分元素的比值

植物的正常生长,其体内元素含量之间的比值需维持在一定范围内。图3为氮沉降处理对羊胡子苔草叶根中全 N 与其他养分元素比值的影响。人工林羊胡子苔草叶的 N/P 值随施氮水平的增加呈先升高后降低的趋势,低氮水平的 N/P 的值显著高于其他氮水平($P<0.05$);而天然林叶的 N/P 值随施氮水平的增加呈先下降后上升的趋势,高氮水平的 N/P 的值显著高于其他氮水平($P<0.05$);在人工林根中,高氮显著提高了 N/P

的值 ($P < 0.05$); 天然林根的 N/P 值随施氮水平的增加呈先上升后下降的趋势, 各施氮水平的值显著高于对照 ($P < 0.05$)。

天然林根的 N/K 值呈先下降后上升的趋势, 中氮、高氮水平的 N/K 的值均显著高于对照 ($P < 0.05$); 在人工林叶、天然林叶、人工林根的 N/K 值随施氮水平的增加呈上升趋势, 其中中氮、高氮水平的 N/K 的值均显著高于对照 ($P < 0.05$)。

施氮明显提高了人工林、天然林叶根的 N/Ca 值, 其中中氮、高氮平的 N/Ca 值均显著高于对照 ($P < 0.05$)。

人工林、天然林叶根的 N/Mg 值随施氮水平的增加呈上升趋势, 各施氮水平均显著高于对照 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 模拟 N 沉降对草本群落生物多样性的影响

目前关于 N 沉降对森林群落物种多样性影响的研究报道较多^[27], 群落物种多样性响应机理较为复杂, 很多研究认为 N 沉降会导致森林群落物种多样性降低^[28-29]。在本实验中, 施氮对人工林草本群落的 α 多样性没有明显的影响; 而施氮降低了天然林草本群落的 α 多样性, 其中中氮、高氮对草本 α 多样性的影响最明显 (表 2)。草本群落组成改变的原因主要与草本物种本身的氮利用特性有关, 过量的氮输入适合氮素营养转换速率较快植物的生存, 而氮素营养转换速率慢的植物逐渐被淘汰, 从而导致草本群落的改变及生物多样性的降低^[9]。Jaccard 指数和 Sorensen 指数为常用的 β 多样性指数, 研究中发现人工林施氮处理与对照处理之间的 Jaccard 指数和 Sorensen 指数较大, 天然林施氮处理与对照处理之间的 Jaccard 指数和 Sorensen 指数较小, 说明施氮对天然林草本群落的组成的改变大于对人工林的改变, 原因是在人工林前期恢复过程中采取过适当的间伐和一定的抚育措施, 树种结构相对单一、郁闭度降低、林地生产力和土壤中氮含量降低, 3 年的连续施氮后人工林土壤 N 养分得到改善在一定程度上促进草本的生长, 而天然林土壤氮趋于饱和, 施氮在一定程度上超过某些草本生长的阈值, 对一些草本的生长产生抑制作用, 并且天然林的 pH 值低于人工林, N 沉降加速其土壤酸化, 更不利草本生长。Lu 等^[30]研究发现, 氮添加没有显著改变受干扰森林植被的丰富度、密度、盖度; 同时恢复林的物种丰富度和密度对氮沉降没有明显的响应, 但是林下植被的盖度明显降低的, 原因认为是受干扰的森林通常遭受人类的干扰 (主要是清理林下植被和凋落物), 这种土地利用类型可能缓和氮添加的影响, 造成林下植被群落没有显著改变; 恢复林在尚未完全恢复到干扰之前的水平, 产生和保持氮缺乏的状态, 木本直到森林完全恢复所需要的氮超过自然可供应的氮, 在氮缺乏的状态下, 氮添加提高了喜氮植物的竞争能力, 使其在最大增长速度下快速生长, 而那些不适应高氮环境的植物被逐渐淘汰。Cleland 等^[31]的研究结果也证实本实验的结论, 其得出施氮使 α 多样性降低, 而对于 β 多样性变化较不一致, 施氮降低了高生产力的样地的 β 多样性, 而提高了低生产力的 β 多样性。生态学对此存在两种机制: 第一, 生态系统对 N 的有一个阈值, 只要 N 沉降量低于生态系统阈值, 对生态几乎不产生影响^[32], 第二, N 是温带系统主要限制因素, 理论上增加 N 可以增加产量和而不降低物种多样性。而本实验与此不一致, 但与 Bai 等^[20]研究结果相似, 其研究得出, N 沉降对天然草地和退化草地群落组成均有一定影响, N 沉降使天然草地物种丰富度大幅下降, 而使退化草地物种丰富度稍下降, 原因可能是植被生长的主要限制性资源由水分转移到养分。苏洁琼等^[12]研究结果也说明了这一点, 其研究得出氮沉降抑制荒漠化草原草本层片的物种多样性, 原因可能是由于限制性养分 (如氮素) 的投加会降低荒漠化草原土壤的空间异质性, 物种间对除养分外的其它限制性资源 (如光照、水分) 的竞争而导致物种多样性降低。很多研究表明少数优势种植物可以适应氮素的增加并正常生长^[20,33], 而大部分物种都在氮素增加的影响下逐渐消失, 进而导致群落结构在短期内发生不可逆的改变。而有些研究则认为 N 沉降对生态系统生物多样性没有产生明显影响^[14-17], 原因是: (1) 当地的大气氮沉降速率本底值较高, 增加氮所起的作用较小; (2) 研究的生态系统土壤已达到氮饱和状态, 氮不再是植物生长的限制元素。所以施加的氮只是增加很少一部分必需元素, 对生态系统影响不大^[9]。

3.2 模拟 N 沉降对草本群落生物量的影响

两种林分草本群落的生物多样性指数对氮沉降响应不一致,而两种林分的草本群落的生物量对氮沉降响应是否也不一致呢?草本群落的生物多样性发生改变,其生物量也相应发生改变。许多研究表明:施氮可使植物的地上生物量和地下生物量增加,生物量分配比例发生改变^[34-35]。本实验施氮对人工林草本生物量没有明显影响,总生物量从平均值来看高氮提高了草本生物量,而天然林的施氮提高了草本地上生物量、地下生物量、总生物量(图 1),原因可能是:群落物种的改变原因主要与物种本身的氮利用特性有关,根据进化论当物种面临新环境适者生存,不适者将被淘汰。在缺氮的生境中,厌氮植物占优势地位;而在富氮的生境中,喜氮植物占优势地位^[9]。而且大多数氮沉降试验都表明只有少数物种能成功生存下来,并且成为群落的优势种。目前来看,大多研究关于群落优势种改变的机理假说主要有两个:(1)物种自身的生理特性,即随着施氮的增加,氮素转化速率快的速生型的物种将在生态系统占据优势地位(2)过量的氮沉降降低了土壤氮素过程的异质化程度,提高了环境的同质化程度,加剧了物种之间的竞争^[9,36]。经过 3 年的施氮试验,改变群落的物种组成,使那些喜氮植物在群落中占优势地位,并经过计算人工林对照、低氮、中氮占总生物量前两位的分别是羊胡子苔草、龙常草,而高氮是羊胡子苔草、柳叶风毛菊,而天然林对照占总生物量前两位的分别是羊胡子苔草、龙常草,低氮是羊胡子苔草、类叶升麻,中氮是羊胡子苔草、大火草,高氮是大火草、羊胡子苔草,从中可以看出生物量高于对照处理的都有体积相对大的草本,是因为这些草本的氮阈值较高,对氮有较强的吸收能力,施氮对其生长有明显的促进作用,并且这些草本在总生物量里所占比例较大,影响着生物量的变化。Bobbink 等^[5]同样认为在高氮环境下,生态系统过量的氮被喜氮植物用于生物量的增加。施氮在一定程度上促进了草本生物量增加,不同草本对氮沉降响应不同,这与蒋琦清等^[37]研究结果相似,其对杂草生长进行的施氮($40 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)试验,发现施氮增加了杂草的生物量(总生物量、地上部分生物量、根生物量),但不同功能类群对氮增加的响应明显不同。说明过高的氮输入,促进了喜氮植物的生长,使其在群落中占优势地位,而草本的生物量也相应的发生改变。

3.3 模拟 N 沉降对羊胡子苔草叶根元素含量的影响

试验中所用氮肥为尿素,虽然不能直接提高 NO_3^- 和 NH_4^+ ,会对草本直接影响减弱,但是尿素有机态氮肥,经过土壤中的脲酶作用转化成碳酸氢铵,然后又会分解为 NH_3 、 CO_2 , NH_3 水解成 NH_4^+ 后能被植物吸收, NH_3 并可以经硝化细菌转化成 NO_3^- ,被植物吸收,所以研究结果与其他施用 NH_4NO_3 的研究^[13,30] 应该趋于一致。研究中施氮明显提高了土壤中全氮的含量,这和很多研究结果一致^[38-40],原因可能是由于树木在生长期对土壤中的氮进行明显的吸收^[41],异养菌对有效氮也进行激烈的竞争,导致氮的净固定;外加氮输入的增强将增强这种固定需求。后期并测定施氮后的第 4 年(2013 年 8 月中)的土壤全氮含量,经统计分析发现人工林和天然林的各施氮水平的土壤全氮含量相比 2012 年均有一定下降,下降幅度较小,这是由于当森林生态系统达到“氮饱和”时,进一步的氮输入将导致生态系统富氮,过剩的 NH_4^+ 将可能发生硝化作用,从而造成氮的淋溶损失^[42],并且 Dise 等^[43] 研究发现氮沉降输入条件下不同氮本底值的森林的氮淋溶损失情况不一致,本底值为 $10 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 无明显氮淋溶现象, $10-25 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 部分森林出现氮淋溶情况,大于 $25 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 有明显的氮淋溶现象。过量的 N 沉降会引起植物体内元素失衡,引起植物叶片 N 含量的增加, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 及 P 和 B 含量下降^[21],进而影响植物的正常生长。在 N 沉降的处理下,人工林、天然林叶根中的全 N 含量都升高,而全 Mg 的含下降(图 2);并且根部元素含量变化与土壤养分含量变化较为一致,原因可能是根为植物吸收养分的直接器官,其元素含量受土壤养分含量直接的影响,也对土壤养分含量变化较为敏感^[18],同时也说明过量的氮输入改变了土壤中的养分含量,影响了草本对元素的吸收,这与很多研究结果一致^[26,44-47]。生物多样性的改变是否与草本元素比例失衡有关呢?施氮提高了 N/K、N/Ca、N/Mg 的值(图 3),原因可能是施氮使土壤中有效氮含量增加,满足了羊胡子苔草生长对 N 素的需求,羊胡子苔草对 N 素的吸收率也相应增加,而过量的氮沉降造成土壤中多余的氮以 NO_3^- 形式流失,而作为 NO_3^- 的电荷平衡离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 也从土壤中流失,引起土壤库盐基离子量减少^[48],文中表 4 也验证了这一点。并且研究发现植物体

内,尤其是叶中的 N 的含量与其他元素之间的比值是在一定的范围之内,如 $N/P = 6-12$, $N/K = 1-3$, $N/Mg = 8-12$ ^[49],超出这个范围植物正常生长就会受到影响,本试验中施氮水平的 N/P 、 N/K 、 N/Mg 的值均高于 Huttel 认为的最佳比例范围,过量的氮输入引起 N 与其他元素的比值失衡,影响草本的正常生长,改变油松林了草本群落的生物多样性,草本生物量也相应的发生改变。

4 结论

草本群落对氮沉降的响应包括草本群落生物多样性、生物量、元素含量的变化。在草本群落生物多样性方面,氮沉降对人工林草本群落的生物多样性没有明显的影响,而中氮、高氮降低了天然林草本群落的生物多样性,氮沉降对天然林草本群落的组成的改变大于对人工林的改变。在生物量方面,氮沉降对人工林草本生物量没有显著影响($P>0.05$),而天然林中高氮明显促进了草本生物量的增加($P<0.05$)。氮沉降提高了人工林、天然林叶根中的全 N 含量,而降低了全 Mg 的含量,并且根部元素含量变化与土壤养分含量变化较为一致;氮沉降提高了 N/K 、 N/Ca 、 N/Mg 的值。说明氮沉降主要通过改变土壤养分引起草本叶根中 N 与其他元素的比值失衡,影响草本正常生长,进而改变了油松林下草本群落的生物多样性和草本生物量,但氮沉降对林下草本群落的影响因土壤 N 饱和程度以及林地利用历史的不同而产生差异。

参考文献 (References):

- [1] Maskell L C, Smart S M, Bullock J M, Thompson K, Stevens C J. Nitrogen deposition causes widespread loss of species richness in British habitats. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 671-679.
- [2] Liu X J, Duan L, M J M, Du E Z, Shen J L, Lu X K, Zhang Y, Zhou X B, He C, Zhang F S. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.
- [3] Verma P, Verma P, Sagar R. Variations in N mineralization and herbaceous species diversity due to sites, seasons, and N treatments in a seasonally dry tropical environment of India. *Forest Ecology and Management*, 2013, 297(1): 15-26.
- [4] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 2002, 31(2): 64-71.
- [5] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erisman J W, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, de Vries W. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [6] Zeng D H, Li L J, Fahey T J, Yu Z Y, Fan Z P, Chen F S. Effects of nitrogen addition on vegetation and ecosystem carbon in a semi-arid grassland. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 185-193.
- [7] Zhang X, Wang Q, Gilliam F S, Bai W, Han X, Li L. Effect of nitrogen fertilization on net nitrogen mineralization in a grassland soil, northern China. *Grass and Forage Science*, 2012, 67(2): 219-230.
- [8] Suding K N. Functional-and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences, of the United States of America*, 2005, 102(12): 4387-4392.
- [9] 鲁显楷, 莫江明, 董少峰. 氮沉降对森林生物多样性的影响. *生态学报*, 2008, 28(11): 5532-5548.
- [10] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*, 2008, 451(7179): 712-715.
- [11] Talhelm A F, Burton A J, Pregitzer K S, Campione M A. Chronic nitrogen deposition reduces the abundance of dominant forest understory and groundcover species. *Forest Ecology and Management*, 2013, 293(1): 39-48.
- [12] 苏洁琼, 李新荣, 回嵘, 赵洋, 刘艳梅. 氮沉降对荒漠化草原草本植物物种多样性和群落组成的影响. *西北植物学报*, 2012, 32(4): 795-801.
- [13] Lu X K, Mo J M, Gilliam F S, Zhou G Y, Fang Y T. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in an old-growth tropical forest. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2688-2700.
- [14] Gilliam F S, Turrill N L, Aulick S D, Evans D K, Adams M B. Herbaceous layer and soil response to experimental acidification in a central Appalachian hardwood forest. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(4): 835-844.
- [15] 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.
- [16] Concilio A L, Loik M E. Elevated nitrogen effects on *Bromus tectorum* dominance and native plant diversity in an arid montane ecosystem. *Applied Vegetation Science*, 2013, 16(4): 598-609.
- [17] Gilliam F S, Hockenberry A W, Adams M B. Effects of atmospheric nitrogen deposition on the herbaceous layer of a central Appalachian hardwood forest. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2006, 133(2): 240-254.
- [18] Persson H, Ahlstrom K, Clemensson L A. Nitrogen addition and removal at Gårdsjön-effects on fine-root growth and fine-root chemistry. *Forest*

- Ecology and Management, 1998, 101(1/3): 199-205.
- [19] Power SA, Ashmore M R, Cousins D A. Impacts and fate of experimentally enhanced nitrogen deposition on a British lowland heath. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1): 27-34.
- [20] Bai Y, 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] 李德军, 莫江明, 方运霆, 彭少麟. 氮沉降对森林植物的影响. *生态学报*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [22] Pardo L H, Fenn M E, Goodale C L, Geiser L H, Driscoll C T, Allen E B, Baron J S, Bobbink R, Bowman W D, Clark C M, Emmett B, Gilliam F S, Greaver T L, Hall S J, Lilleskov E A, Liu L L, Lynch J A, Nadelhoffer K J, Perakis S S, Robin-Abbott M J, Stoddard J L, Weathers K C, Dennis R L. Effects of nitrogen deposition and empirical nitrogen critical loads for ecoregions of the United States. *Ecological Applications*, 2011, 21(8): 3049-3082.
- [23] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征. *植物生态学报*, 2002, 26(3): 339-345.
- [24] 柏方敏, 田大伦, 方晰, 闫文德, 梁小翠. 洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征. *生态学报*, 2010, 30(21): 5832-5842.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [26] 祁瑜, 黄永梅, 王艳, 赵杰, 张景慧. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响. *生态学报*, 2011, 31(18): 5121-5129.
- [27] Tilman D. Secondary succession and the pattern of plant dominance along experimental nitrogen gradients. *Ecological Monographs*, 1987, 57(3): 189-214.
- [28] Rajaniemi T K. Why does fertilization reduce plant species diversity? Testing three competition-based hypotheses. *Journal of Ecology*, 2002, 90(2): 316-324.
- [29] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 艾桂艳, 杨丹, 毛璐. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1838-1844.
- [30] Lu X K, Mo J M, Gilliam F S, Yu G R, Zhang W, Fang Y T, Huang J. Effects of experimental nitrogen additions on plant diversity in tropical forests of contrasting disturbance regimes in southern China. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2228-2235.
- [31] Cleland E E, Harpole W S. Nitrogen enrichment and plant communities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1195(1): 46-61.
- [32] Bobbink R, Ashmore M, Braun S, Flückiger W, Van den Wyngaert I J J. Empirical nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems: 2002 update // Achermann B, Bobbink R eds. *Empirical critical loads for nitrogen*. Berne: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape SAEFL, 2003: 43-170.
- [33] Hooper D U, Johnson L. Nitrogen limitation in dryland ecosystems: Responses to geographical and temporal variation in precipitation. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1/3): 247-293.
- [34] Fichtner K, Schulze E D. The effect of nitrogen nutrition on growth and biomass partitioning of annual plants originating from habitats of different nitrogen availability. *Oecologia*, 1992, 92(2): 236-241.
- [35] Loiseau P J F, Soussana J F. Elevated CO₂, temperature increase and N supply effects on the turnover of below-ground carbon in a temperate grassland ecosystem. *Plant and Soil*, 1999, 210(2): 233-247.
- [36] Gilliam F S. Response of the herbaceous layer of forest ecosystems to excess nitrogen deposition. *Journal of Ecology*, 2006, 94(6): 1176-1191.
- [37] 蒋琦清, 唐建军, 陈欣, 陈静, 杨如意, Hu S. 模拟氮沉降对杂草生长和氮吸收的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 951-955.
- [38] 方运霆, 莫江明, 周国逸, Gundersen P, 李德军, 江远清. 南亚热带森林土壤有效氮含量及其对模拟氮沉降增加的初期响应. *生态学报*, 2004, 24(11): 2353-2359.
- [39] 方运霆, 莫江明, Gundersen P, 周国逸, 李德军. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [40] 袁颖红, 樊后保, 李燕燕, 刘文飞, 廖迎春, 沈芳芳, 黄荣珍. 模拟氮沉降对土壤酸化和土壤盐基离子含量的影响. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(4): 461-466.
- [41] Johnson D W. Nitrogen retention in forest soils. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21(1): 1-121.
- [42] Van Miegroet H, Cole D W, Johnson D W. Soil nitrification as affected by N fertility and changes in forest floor C/N ratio in four forest soils. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20(7): 1012-1019.
- [43] Dise N B, Wright R F. Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management*, 1995, 71(1/2): 153-161.
- [44] Matson P, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems. *Ambio*, 2002, 31(2): 113-119.
- [45] 李德军, 莫江明, 彭少麟, 方运霆. 南亚热带森林两种优势树种幼苗的元素含量对模拟氮沉降增加的响应. *生态学报*, 2005, 25(9): 2165-2172.
- [46] 刘文飞, 樊后保, 张子文, 杨跃霖, 王启其, 徐雷. 杉木人工林针叶养分含量对模拟氮沉降增加的响应. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(3): 319-323.
- [47] 刘文飞, 樊后保. 杉木人工林凋落物 C, N, P 归还量对氮沉降的响应. *林业科学*, 2011, 47(3): 89-95.
- [48] Nakaji T, Takenaga S, Kuroha M, Izuta T. Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedlings to high nitrogen load. *Environmental Science*, 2002, 9(4): 269-282.
- [49] Huttel R F. Nutrient supply and fertilizer experiments in view of N saturation. *Plant and Soil*, 1990, 128(1): 45-58.