

模拟氮沉降对南亚热带旱冬瓜幼苗生长性状及枝叶构建影响

唐红燕<sup>1</sup>,许丽萍<sup>1</sup>,李帅锋<sup>2</sup>,黄小波<sup>2</sup>,杨利华<sup>1\*</sup>

(1.普洱市林业科学研究所,云南 普洱 665099;2.中国林业科学研究院 资源昆虫研究所,云南 昆明 650224)

**摘 要:**选择云南省南亚热带地区常见的用材树种旱冬瓜幼苗,设置4种模拟氮沉降水平(5、10、15、30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)以及1组对照控制试验,研究模拟氮沉降增加对其生长效应和枝叶的大小与数量关系的影响。结果表明:与对照处理组的旱冬瓜幼苗株高和地径比较,在低氮水平处理(5 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)下极大促进了幼苗的生长,而中氮(15 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)和高氮(30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)水平处理组的旱冬瓜幼苗生长逐渐受到抑制,原因是由于氮输入的增加以及旱冬瓜的根瘤菌具有明显的固氮作用。同时,经过12个月的处理,旱冬瓜幼苗的全株生物量随氮沉降处理水平的提高而降低,而叶重比、根重比和根冠比则呈增加趋势,氮沉降的输入改变了不同器官在全株生物量的分配。模拟氮沉降的不同处理水平影响了旱冬瓜幼苗的枝叶构建特征,表现为茎截面积、总叶面积、枝长度和叶片数也随氮沉降处理的增加而降低,高氮处理下的旱冬瓜在较小的单位茎截面积上会支撑更多的叶面积,在较小的枝长度可以支撑较多的叶片数。

**关键词:**旱冬瓜;氮沉降;生物量;茎截面积;总叶面积;枝长度;叶片数

**中图分类号:**S792.99      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2018)01-0162-05

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on the Growth, Twig and Leaf Traits of *Alnus nepalensis* Seedlings in the Southern Subtropical Region

TANG Hong-yan<sup>1</sup>, XU Li-ping<sup>1</sup>, LI Shuai-feng<sup>2</sup>, HUANG Xiao-bo<sup>2</sup>, YANG Li-hua<sup>1\*</sup>

(1. Forestry Research Institute of Pu'er Municipality, Pu'er, Yunnan 665099, China;

2. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming, Yunnan 650224, China)

**Abstract:** Seedlings of *Alnus nepalensis*, a common tree species for timber production in subtropical area of Yunna were selected as study objects. Four levels of simulated nitrogen deposition (5, 10, 15 and 30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) and a control (0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) were set up to study their effects on the growth, biomass allocation, and the relationship between size and number of twig-leaf. The results showed that compared with the control, lower nitrogen treatment (5 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) promoted the growth of *A. nepalensis* seedlings, while moderate (15 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) and high (30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) levels of nitrogen inhibited the development of the seedlings. Total individual biomass decreased with the increase of nitrogen treatment after 12 month treatment. Leaf weight ratio, branch weight ratio and root crown ratio presented the increase trends. The import of nitrogen dopistion could change biomass allocation and the traits of twigs and leaf in the different organs of the seedlings. Cross-sectional area of twigs, total leaf area, twig length and leaf number decreased with the increase of nitrogen doposition treatment. Small cross-sectional area of twigs could suport more to-tal leaf area and leaf number in the high level of nitrogen treatment.

**Key words:** *Alnus nepalensis*; nitrogen deposition; biomass; cross-sectional area of twigs; total leaf area; twig length; leaf number

收稿日期:2017-04-14    修回日期:2017-07-21

基金项目:云南省科技厅项目(2014BB010);云南省技术创新人才培养项目(2012HB090)。

作者简介:唐红燕,女,高级工程师,硕士,研究方向:森林培育。E-mail:13769956602@126.com

\* 通信作者:杨利华,男,高级工程师,硕士,研究方向:森林培育。E-mail:329654764@qq.com

氮沉降对树木生长的影响是全球变化研究的一个核心问题,树木生长是森林生态系统固碳过程的重要组成部分之一,随着氮沉降的增加,土壤可利用氮水平的提高,越来越多的碳将被分配至植物的地上木质组织中<sup>[1]</sup>。氮沉降在一定程度上可以促进植物地上部分的生长<sup>[2-3]</sup>,但在不同的生态系统中,对植物的根系生长则呈现出 2 个截然不同的相应,一方面研究表明氮沉降可以减少植物幼苗阶段的根冠比<sup>[4]</sup>,对浙江古田山 5 个树种幼苗的施氮试验表明施氮可以显著降低秃瓣杜英(*Elaeocarpus glabripetalus*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、木荷(*Schima superba*)和青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)的根重比和根冠比,同时施氮只增加了马尾松(*Pinus massoniana*)的侧枝和叶片生物量<sup>[5]</sup>;另一方面,在荒漠生态系统中,模拟氮沉降的增加则可以显著增加一年生植物涩芥(*Malcomia africana*)和钩刺雾水藜(*Bassia hyssopifolia*)的根长、根重、叶片数、叶面积、总生物量和冠根比<sup>[6]</sup>。此外,植物枝叶两者的大小和数量的配制决定植物的生活史策略,植物个体可以通过调整构型增强植株的光合效率和种内与种间竞争能力,植物构型构建的提高可以促进植株的生境适应性<sup>[7-9]</sup>,而目前较少有研究其在模拟氮沉降的枝叶大小与数量权衡的影响。

我国已成为世界三大高氮沉降地区,珠江三角洲地区降水氮沉降可达  $38.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[4]</sup>,尽管云南省为低排放、易受周边影响的地区,氮沉降水平要低于全国平均水平,但在局部区域则呈现出较高的趋势,如滇池流域在雨季 5—8 月总氮沉降可达  $19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[10]</sup>,均高于森林在生长季节对氮的需求量(约  $5 \sim 8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。随着云南省工业化的进程,将要面临大气氮沉降增多的趋势,作为林业资源大省,在全球气候变化背景下,氮沉降的增加对林业产业尤其是造林和再造林的影响举足轻重。旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)是云南省热带山地、南亚热带及部分中亚热带地区极具发展前景的乡土阔叶用材树种之一,也是制造胶合板、家具、装修用材的主要用材树种,同时也是良好的固氮绿化树种,是属于少数能固氮的非豆科(*Leguminosae*)树种之一<sup>[11-13]</sup>。本研究通过模拟试验,分析在模拟氮沉降背景下对云南省南亚热带常见造林树种旱冬瓜的幼苗生长效应的响应,分析旱冬瓜幼苗在不同氮沉降梯度下株高、地径、各器官(根、茎、枝和叶)的生物量分配以及枝叶的大小与数量关系的变化,为未来在氮沉降增加背景下提高云南省南亚热带旱冬瓜幼苗阶段的生产力进行科学合理的施肥管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地点位于云南省南部的普洱市林业科学研究所苗圃内( $22^{\circ}47'20''\text{N}$ ,  $100^{\circ}59'04''\text{E}$ ),海拔 1 300 m,属亚热带季风气候,受印度洋暖湿气候影响较大,干湿季分明,11 月至次年 4 月为干季,5—10 月为雨季,年均温度为  $15.3 \sim 20.2^{\circ}\text{C}$ 。最热月(7 月)均温  $23.9^{\circ}\text{C}$ ,最冷月(1 月)均温  $1.9^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温  $38.6^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温  $-3.4^{\circ}\text{C}$ (1974 年 1 月)。年降水量 1 700 mm,年日照时数 1 900~2 200 h。年平均相对湿度为 81%,年蒸发量为 1 036.7 mm,土壤类型为赤红壤,呈酸性,pH 值 4.6~6.3。试验地地势平坦,排水良好。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计与样品采集 本试验采用盆栽方式,选择 3 个月生的旱冬瓜实生苗为研究对象,以普洱市山地红壤林下土作为幼苗的生长基质,幼苗移栽在口径 18 cm、高 25 cm 的花盆中。试验在幼苗移栽成活 1 个月后进行,基质土壤的 pH 值为 5.48,有机质  $24.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮  $0.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全磷  $0.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全钾  $4.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效氮  $40.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $1.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $47.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。参考李德军<sup>[4]</sup>等在南亚热带 3 种乔木幼苗的模拟氮沉降试验的施氮水平,本研究将模拟氮沉降设置 5 个水平处理,即  $\text{N0}(0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ 、 $\text{N1}(5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ 、 $\text{N2}(10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ 、 $\text{N3}(15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ 和  $\text{N4}(30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ (备注:不包括大气沉降的氮含量),其中, $\text{N0}$  为对照处理组, $\text{N1}$  为低氮水平组, $\text{N2}$  和  $\text{N3}$  为中氮处理组, $\text{N4}$  为高氮处理组。每个处理组分成 3 个重复,每个重复旱冬瓜幼苗为 5 株,每个处理组有 15 株幼苗,用 3 行 5 列进行摆放,依据花盆的口径,近似将处理组视为 1 个长 108 cm、宽 54 cm 的长方形,并计算占地  $0.5832 \text{ m}^2$ ,以便进行氮沉降处理的换算,每个处理组之间相隔 1 m,5 个水平处理共有 75 株幼苗。氮肥试验用  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ (含氮量为 35%)将每次的量溶于 10 L(根据幼苗的面积与喷雾器的情况酌情)的水中,充分溶解,每个月末用喷雾器对 4 个处理组的旱冬瓜幼苗地上部分和营养袋土壤表面进行均匀喷洒,同时对照处理也喷洒同样的水量进行对比,共计 12 个月。

2014 年 7 月设置试验,此后每个月末对旱冬瓜幼苗用卷尺与游标卡尺进行株高与地径的调查,2015 年 6 月将每盆旱冬瓜整株取回,共计生长期 12 个月,调查其株高与地径,旱冬瓜器官分根、茎、枝、

叶取样,放置 65℃ 烘箱烘干至恒重,分别称重计算各器官及整株生物量。与此同时,选取每株早冬瓜当年生小枝数量为 5 个,测定每个当年生小枝的长度和顶端与末端的直径,测量工具使用卷尺与游标卡尺,记录每个当年生小枝上的叶片数量,并摘除,分别称量完枝条和叶片的鲜质量后,测量每个叶片的叶面积,然后,各样片置于烘箱中烘干称重。

1.2.2 数据分析 根据测定的全株干重、叶重、枝重与根的干重,将叶重比定义为叶干重/全株干重( $g \cdot g^{-1}$ ),枝重比定义为枝干重/全株干重( $g \cdot g^{-1}$ ),根重比定义为为根干重/全株干重( $g \cdot g^{-1}$ ),根冠比定义为根干重、地上部分干重<sup>[14]</sup>。在枝叶性状中,每个当年生小枝上 1 级枝的横截面积为茎截面积,每个当年生小枝上所有叶面积之和为总叶面积,以每个当年生枝长度表示枝大小,并统计每个当年生枝上的叶片数<sup>[7-8]</sup>。对不同氮沉降水平的株高、地径、全株生物量、叶重比、枝重比、根重比、根冠比、茎截面积、总叶面积、枝长度及叶片数进行单因素方差水平,并对其进行两两对比较,利用 LSD(least significant difference)进行比较。对每个当年生枝大小、叶大小和枝长度、叶片数的功能组性状关系分别采用  $y = ax^b$  经线性转换成  $\log(y) = \lg(a) + b\lg(x)$

来表示,其中  $x$  和  $y$  表示 2 个特征参数, $a$  为截距, $b$  为斜率,代表的是异速生长参数或相对生长的指数,当  $|b| = 1$  时表示两者是等速变化关系;当  $|b|$  显著偏离 1 时,为异速变化关系<sup>[7-8]</sup>。数据分析在 R3.3.2 中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 地径与株高的月份变化

株高和地径是衡量苗木生长状况最直观的指标,还可以反映出土壤中养分状况。早冬瓜幼苗的株高和地径在模拟氮沉降处理下随着月份的变化见图 1,不同氮沉降处理的早冬瓜幼苗的株高与地径随着月份的增加而增长。经过 12 个月的氮处理,其中早冬瓜株高以 N1 处理最大,为  $387 \pm 19.19$  cm,是 N4 处理的 1.39 倍,与其他处理差异显著( $P < 0.05$ ),株高最小的氮处理是 N4,随着处理水平增加,早冬瓜的幼苗株高呈降低趋势,而对照则与 4 个处理之间无显著差异;N1 处理的早冬瓜地径最大,为  $31.32 \pm 1.95$  mm,显著高于 N3 处理和 N4 处理,N1 处理的地径是 N3 处理的 1.56 倍,随着处理水平增加,早冬瓜的地径呈先降低而后增加的趋势,而对照则与 4 个处理之间无显著差异。

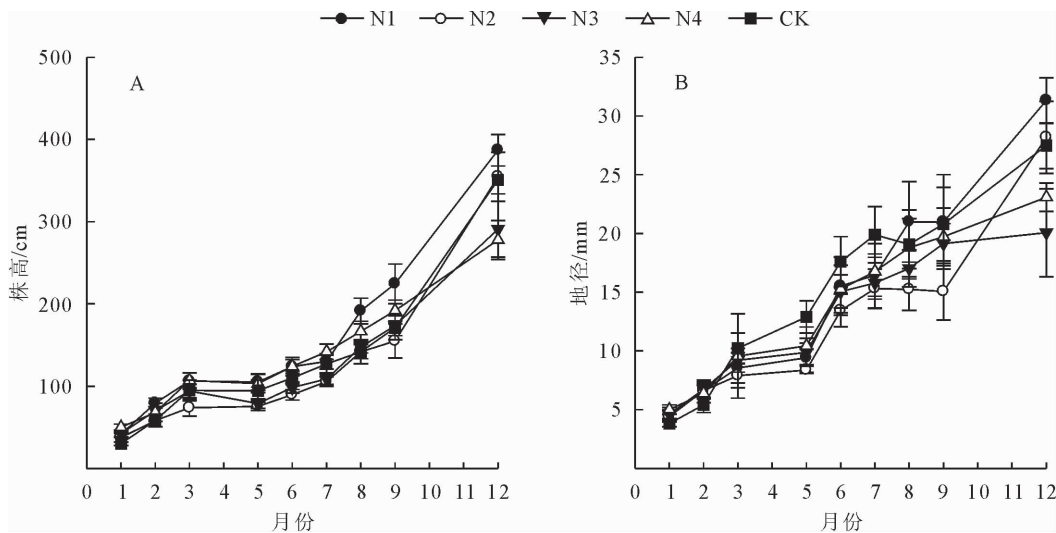


图 1 不同氮沉降施肥后早冬瓜株高与地径的月份变化

Fig. 1 Monthly changes of the height and ground diameter of *Alnus nepalensis* seedlings in different N deposition treatments

### 2.2 生物量分配

早冬瓜幼苗的全株生物量只有 N1 处理>对照处理,其他均<对照处理(表 1),N2 和 N3 处理的全株生物量之间无显著差异,均<其他处理,N1 处理的全株生物量是 N3 处理的 2.54 倍。叶重比、枝重比和根重比反映了生物量在叶、枝和根之间分配比例<sup>[4]</sup>。早冬瓜幼苗叶重比和根冠比最大的是 N3 处理水平,对照的枝重比要>其他处理水平。根冠比

反映了生物量在地上和地下部分之间分配的情况,早冬瓜幼苗的根冠比最大的是 N3 处理水平,最小的是 N2 处理水平。

### 2.3 枝叶性状

植物形成不同冠层结构充分利用空间资源的一种策略主要取决于枝条与叶片的生长关系,通过构型调整有利于植株增强自身的光合效率和竞争力,从而适应不同的生境条件<sup>[7]</sup>。单因素方差分析表

明,不同氮沉降处理的旱冬瓜幼苗枝与叶性状均存在显著性差异( $P<0.05$ ) (表 2),随着氮沉降处理水平的增加,旱冬瓜幼苗的茎截面积、总叶面积、枝长

度与叶片数呈现减少后增加趋势。旱冬瓜幼苗的茎截面积、总叶面积和叶片数最大的是 N1 处理水平,最小的是 N3 处理水平。

表 1 模拟氮沉降对旱冬瓜幼苗生物量及其分配的影响

Table 1 Effects of N deposition on biomass as well as its allocation among leaves,stem and branches and root of <i>A. nepalensis</i>					
处理编号	全株生物量 /g	叶重比 <i>LWR</i> /(g·g <sup>-1</sup> )	枝重比 <i>BWR</i> /(g·g <sup>-1</sup> )	根重比 <i>RWR</i> /(g·g <sup>-1</sup> )	根冠比
N1	495.09±57.43a	0.14±0.02b	0.09±0.02ab	0.27±0.03bc	0.37±0.05bc
N2	230.36±86.5c	0.13±0.04b	0.06±0.02b	0.21±0.02c	0.27±0.03c
N3	195.44±30.32c	0.22±0.02a	0.08±0.02ab	0.35±0.04a	0.58±0.1a
N4	313±44.51b	0.16±0.02ab	0.07±0.01ab	0.28±0.02abc	0.4±0.03abc
CK	452.65±67.99ab	0.11±0.07b	0.11±0.01a	0.32±0.02ab	0.47±0.06ab

注:表中同列数据中相同字母的数据差异不显著,单因素方差分析  $P=0.05$ 。下表同。

表 2 不同处理旱冬瓜枝与叶性状

Table 2 Twig and leaf traits of <i>A. nepalensis</i> in different N depositions				
处理	茎截面积/mm <sup>2</sup>	总叶面积/cm <sup>2</sup>	枝长度/cm	叶片数
N1	45.59±5.92a	737.07±75.99a	66.22±3.52a	10.52±0.62a
N2	23.86±4.89c	272.78±49.24c	42.64±4.42b	6.18±0.67b
N3	22.78±2.42c	244.26±32.65c	45.67±2.44b	5.5±0.54b
N4	28.77±4.53bc	727.77±56.21a	58.95±6.05a	10.13±0.88a
CK	44.99±6.73ab	534.35±65.36b	66.4±5.47a	7.87±0.74ab

2.4 不同氮沉降处理旱冬瓜茎截面积 - 总叶面积关系

不同氮沉降处理下旱冬瓜幼苗的茎截面积和总叶面积关系见(表 3),结果显示,旱冬瓜幼苗小枝茎截面积和总叶面积均呈显著正相关,回归斜率显著 $<1$  ( $P<0.05$ )。N4 处理的旱冬瓜幼苗的枝茎截面积和总叶面积回归方程的截距要高于 N3 处理,N1 和 N2 处理的旱冬瓜幼苗小枝的茎截面积和总叶面积回归方程的截距之间较为接近,N4 处理下的旱冬瓜幼苗的枝在单位茎截面积上会支撑更多的叶面积,N3 处理的旱冬瓜幼苗枝的茎截面积与总叶面积接近于等速生长关系。

表 3 不同氮沉降旱冬瓜茎截面积-总叶面积的关系  
Table 3 Relationship between the cross-sectional area of twigs and total leaf area in *A. nepalensis* in different N depositions

处理	参数估计值		<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>
	lg( <i>a</i> )	<i>b</i>		
N1	4.649	0.499	0.371	0.002
N2	4.366	0.348	0.368	0.003
N3	2.573	0.877	0.271	0.019
N4	5.717	0.266	0.492	0.004

2.5 不同氮沉降处理旱冬瓜枝长度 - 叶片数关系

不同氮沉降处理旱冬瓜枝长度和叶片数关系如表 4 所示,在不同氮沉降处理上,所有氮沉降处理的旱冬瓜枝长度和叶片数间呈显著正相关,回归斜率显著 $<1$ 。N2 处理的旱冬瓜幼苗的枝长度和叶片数相关性斜率最大,截距最小,N1 和 N4 处理的旱冬瓜幼苗枝长度和叶片数回归方程的截距之间较为接

近。N3 处理的旱冬瓜幼苗比其他处理具有较小的枝长度和较大的叶片数,枝长度与叶片数之间接近于等速生长关系。

表 4 不同氮沉降旱冬瓜枝长度与叶片数的关系  
Table 4 Relationship between twig length and leaf number in *A. nepalensis* in different N depositions

处理	参数估计值		<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>
	lg( <i>a</i> )	<i>b</i>		
N1	-0.327	0.632	0.271	0.008
N2	0.285	0.393	0.216	0.029
N3	-2.039	0.988	0.275	0.012
N4	-0.243	0.625	0.488	0.004

3 结论与讨论

本试验表明,对南亚热带的旱冬瓜幼苗来说,N1 (5 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)属于低氮输入,可以有效促进旱冬瓜幼苗的生长,N2(10 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)属于中氮输入,中氮水平并没有超过植物对氮素的需求<sup>[5]</sup>,但是高氮水平已经对旱冬瓜幼苗的生长产生抑制作用。在模拟氮沉降的不同处理水平中,低氮水平可以显著地增加旱冬瓜幼苗的株高、地径与生物量,当氮输入量继续增加后,幼苗生长反而受到抑制,而旱冬瓜幼苗对模拟氮沉降响应差异的主要原因可能与旱冬瓜的生物学特性及氮代谢过程改变等因素有关<sup>[4]</sup>。先前的研究表明适当的氮沉降处理可以增加植物的生产力水平,当输入的氮沉降的水平超过植物和微生物对氮的需求时,氮沉降反而会降低植物的生产力水平,这一现象在温带森林和南亚热带森林植物都有发现<sup>[4]</sup>。

氮肥对植物生长的影响因植物物种组成和氮输入量不同而产生较大差异,当植物生长受限制时,适当的氮输入可以增加植物的生产力;当森林生态系统处在氮饱和状态时,氮肥的输入对植物的生长无影响,甚至产生抑制作用<sup>[5]</sup>。具体到旱冬瓜幼苗对模拟氮沉降生长效应的差异,则是由于该树种是一种速生的乔木树种,其根具有固氮菌,对土壤要求不高,中性和酸性均能生长,比起非固氮树种,可以很好地利用空气中的氮气进行土壤改良,从而增加土壤肥力<sup>[15]</sup>,而旱冬瓜幼苗的施肥试验表明,在育苗期阶段则不需要补充氮肥,而应适当补充磷肥和其他微量元素,施氮水平的增加以及根瘤固氮作用有可能增大了氮磷比例,改变了营养水平<sup>[11-12]</sup>,在 N、P 供给失衡时,造成旱冬瓜幼苗的生长效应受到抑制,尤其表现在其单株总生物量显著下降。

在模拟氮沉降对旱冬瓜幼苗生物量的试验发现,随着氮处理水平的增加,生物量分配更趋向于在叶和根这 2 个功能器官之间的分配。叶重比、枝重比和根重比反映了生物量在叶、枝和根 3 种器官之间分配的比例,常被作为衡量植物生长状态特别是植株对土壤养分状态反应的重要指标。本研究中,随着氮沉降处理水平的增加,旱冬瓜的叶重比和根重比随之增加,这是因为旱冬瓜幼苗的叶片作为植物的光合作用器官,是植物获取地上资源的主要构件,氮沉降处理水平的增加,有利于促进植株个体光合产物的转化,随之也增加生物量在叶片中的分配,从而使得叶重比增加;大量研究表明氮添加对植物根系生长有显著的影响<sup>[16]</sup>,同时旱冬瓜具有根瘤菌产生固氮作用,氮沉降的增加使得试验过程中的土壤有效氮较为充足,因而旱冬瓜幼苗的根系能够分配足够多的光合作用产物,导致根重比的增加。根冠比的增加则是由于地下生物量的增加高于地上生物量,说明在土壤养分条件较好的情况下,植物将更多的生物量分配到获得外部资源的构建中,这样有利于植物的繁衍和扩张<sup>[5]</sup>。

植物适应异质环境的重要特征是形态可塑性,使植物能够把资源最佳地分配到不同器官,以避免或降低相邻植物的竞争<sup>[7,17]</sup>,枝和叶的形态和生理关联性表明一定大小的叶面积必须要与一定的枝保持大小匹配,从而来支撑更多的叶面积<sup>[8]</sup>。由于氮沉降处理水平的增加改变了生物量在不同器官之间的分配,势必影响到旱冬瓜幼苗的枝叶构建,茎截面积越大,为满足叶片对水分的需求,其支撑的总叶面积也就越大,植株将尽可能地使生物量分配到叶片中。为了使叶片间互相拥挤的程度降低,利于光资源的充分利用,出叶强度最大的是中氮(N2)处理水

平,单叶面积则最小,这样有利于植株本身的光拦截能力和光合碳获取能力的最大化。

研究表明,模拟氮沉降过程种,随着氮水平的增加对旱冬瓜幼苗的生长并未产生积极的影响,反而随着氮输入的增加会对幼苗的生长性状产生抑制作用,说明在全球气候变化背景下,随着氮沉降的加剧,将在一定程度上对旱冬瓜的幼苗生长产生负面作用。同时,本研究仅针对模拟氮沉降对旱冬瓜幼苗生长效应的影响,并未对其造林后的中小径级的个体进行模拟试验,因而未来应进一步进行该方面的试验,以全面和深入了解模拟氮沉降对旱冬瓜的影响。

参考文献:

[1] LITTON C M, RAICH J W, RYAN M G. Carbon allocation in forest ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 2089-2109.

[2] CIAIS P, SCHELHAAS M J, ZAEHLE S, *et al.* Carbon accumulation in European forests[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 425-429.

[3] 刘修元,杜恩在,徐龙超,等. 落叶松原始林树种生长对氮添加的响应[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(5): 433-441.

LIU X Y, DU E Z, XU L C, *et al.* Response of tree growth to nitrogen addition in a *Larix gmelinii* primitive forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(5): 433-441. (in Chinese)

[4] 李德军,莫江明,方运霆,等. 模拟氮沉降对三种南亚热带树苗生长和光合作用的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(5): 876-882.

LI D J, MO J M, FANG Y T, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthesis of *Schima supera*, *Castanopsis chinensis* and *Cryptocarya concinna* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 876-882. (in Chinese)

[5] 吴茜,丁佳,闫慧,等. 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山 5 个树种幼苗生长和生物量的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(3): 256-267.

WU Q, DING J, YAN H, *et al.* Effects of simulated precipitation and nitrogen addition on seedling growth and biomass in five tree species in Gutian mountain, Zhejiang Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(3): 256-267. (in Chinese)

[6] 周晓兵,张元明,王莎莎,等. 模拟氮沉降和干旱对准格尔盆地两种一年生植物生长和光合生理的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 34(12): 1394-1403.

ZHOU X B, ZHANG Y M, WANG S S, *et al.* Combined effects of simulated nitrogen deposition and drought stress on growth and photosynthetic physiological responses of two annual desert plants in Junggar Basin, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 34(12): 1394-1403. (in Chinese)

[7] 李钰,赵成章,董小刚,等. 高寒草地狼毒枝-叶性状的坡度差异性. *植物生态学报*, 2013, 3(8): 709-717.

LI Y, ZHAO C Z, DONG X G, *et al.* Twig and leaf trait differences in *stelleria chamaejasme* with slope in alpine grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 3(8): 709-717. (in Chinese)

phosphoproteomics of the ataxia telangiectasia-mutated (ATM) and ataxia telangiectasia-mutated and rad3-related (ATR) dependent DNA damage response in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Molecular & Cellular Proteomics* Mcp, 2015, 14 (3):556-571.

[27] CHEN S, SOMERVILLE C R. Mutations of cellulose synthase (CESA1) phosphorylation sites modulate anisotropic cell expansion and bidirectional mobility of cellulose synthase [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(40):17188-93.

[28] CHEN S, JIA H, ZHAO H, *et al.* Anisotropic cell expansion is affected through the bidirectional mobility of cellulose synthase complexes and phosphorylation at two critical residues on CESA3 [J]. *Plant Physiology*, 2016, 171(1):242-250.

[29] BISCHOFF V, DESPREZ T, MOUILLE G, *et al.* Phytochrome regulation of cellulose synthesis in [J]. *Current Biology* Cb, 2011, 21(21):1822-1827.

[30] EDGAR R C. Muscle; multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput [J]. *Nucleic Acids Research*, 2004, 32(5):1792-1797.

[31] LETUNIC I, BORK P. Interactive tree of life v2; online annotation and display of phylogenetic trees made easy [J]. *Nucleic Acids Research*, 2011, 39:475-478.

[32] TAMURA K, STECHER G, PETERSON D, *et al.* Mega6; molecular evolutionary genetics analysis version 6.0 [J]. *Molecular Biology & Evolution*, 2013, 30(12):2725-2729.

[33] DENG W, WANG Y, LIU Z, *et al.* HemI; a toolkit for illustrating heatmaps [J]. *Plos One*, 2013, 9(11):111988.

[34] VAN WIJK K J, FRISO G, WALTHER D, *et al.* Meta-analysis of *arabidopsis thaliana* phospho-proteomics data reveals compartmentalization of phosphorylation motifs [J]. *Plant Cell*, 2014, 26(6):2367-2389.

[35] WANG D, QIN Y, FANG J, *et al.* A Missense mutation in the zinc finger domain of OsCESA7 deleteriously affects cellulose biosynthesis and plant growth in rice [J]. *Plos One*, 2016, 11 (4):153993.

[36] Timmers J, Vernhettes S, Desprez T, *et al.* Interactions between membrane-bound cellulose synthases involved in the synthesis of the secondary cell wall [J]. *Febs Letters*, 2009, 583(6):978-982.

[37] VANDAVASI V G, PUTNAM D K, ZHANG Q, *et al.* A structural study of CESA1 catalytic domain of *Arabidopsis* cellulose synthesis complex; evidence for CESA trimers [J]. *Plant Physiology*, 2015, 170(1):123-135

[38] SETHAPHONG L, HAIGLER C H, KUBICKI J D, *et al.* Tertiary model of a plant cellulose synthase [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(18):7512-17.

(上接第 166 页)

[8] 史元春, 赵成章, 宋清华, 等. 兰州北山刺槐叶性状的坡向差异性[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(4):362-370.

SHI Y C, ZHAO C Z, SONG Q H, *et al.* Slope-related variations in twig and leaf traits of *Robinia pseudoacacia* in the northern mountains of Lanzhou[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(4):362-370. (in Chinese)

[9] 许强, 杨自辉, 郭树江, 等. 梭梭不同生长阶段的枝系构型特征[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(4):50-54.

XU Q, YANG Z H, GUO S J, *et al.* Branch system configuration features of *Haloxylon ammodendron* in different growth stages[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28 (4):50-54. (in Chinese)

[10] 李欠欠, 汤利. 大气氮沉降的研究进展[J]. *云南农业大学学报*, 2010, 25(6):889-895.

LI Q Q, TANG L. A mini-review on atmospheric nitrogen deposition[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2010, 25(6):889-895. (in Chinese)

[11] 付玉嫔, 徐亮, 白尚斌, 等. 氮磷营养对旱冬瓜幼苗生长的影响[J]. *浙江林学院学报*, 2008, 25(5):553-558.

FU Y B, XU L, BAI S B, *et al.* *Alnus nepalensis* seedling growth with N and P treatments[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(5):553-558. (in Chinese)

[12] 付玉嫔, 徐亮, 孟广涛, 等. 施用氮、磷肥对旱冬瓜苗木生长的影响[J]. *西部林业科学*, 2008, 37(2):25-28.

FU Y B, XI L, MENG G T, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on seedling growth of *Alnus nepalensis*[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2008, 37(2):25-28. (in Chinese)

[13] 和丽萍, 孟广涛, 李贵祥, 等. 旱冬瓜体内 7 种矿质元素含量与立地土壤的相关性[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(2):24-27.

HE L P, MENG G T, LI G X, *et al.* Mineral elements distribution and correlation in *Alnus nepalensis* and the soil[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(2):24-27. (in Chinese)

[14] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 模拟氮沉降对南亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(4):543-549.

LI D J, MO J M, FANG Y T, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on biomass production and allocation in *Schima superb* and *Cryptocarya concinna* seedlings in subtropical China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(4):543-549. (in Chinese)

[15] 李大伟, 陈宏伟, 史富强, 等. 云南旱冬瓜的生物学、生态学特性及地理分布[J]. *林业调查规划*, 2008, 33(5):25-29.

LI D W, CHEN H W, SHI F Q, *et al.* Biological and ecological characteristics and geographical distribution of *Alnus nepalensis yunnanensis*[J]. *Forest Inventory and Planning*, 2008, 33 (5):25-29. (in Chinese)

[16] PERSSON H, AHLSTROM K, CLEMENSSON L A. Nitrogen addition and removal at garden-effects on fine-root growth and fine-root chemistry[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101:199-206.

[17] WESTOBY M, FALSTER D S, MOLES A T, *et al.* Plant ecological strategies; some leading dimensions of variation between species[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33:125-159.