

施氮及不同根系分隔模式对尾叶桉和降香黄檀 幼苗生长及叶片生理特性的影响

许峻模, 潘 婷, 龙佳峰, 汤文艳, 田诗韵, 叶绍明*

(广西大学 林学院, 南宁 530004)

摘 要: 豆科与非豆科树种混交作为一种人工林培育可持续发展模式, 在保证木材产量和维持氮素平衡中发挥了重要作用。该研究通过大盆栽试验, 设计 3 个施氮水平(0、3、6 g·株⁻¹)及 3 种根系分隔方式(不隔、网隔、膜隔), 分析了不同氮素水平及根系分隔模式对尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)与降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)植株幼苗生长、叶片生理特性、根系形态及生物量的影响。结果表明: (1) 随施氮量的增加, 尾叶桉与降香黄檀的苗高、地径均呈递增趋势; 不同根系分隔模式下, 尾叶桉苗高、地径均在不隔模式下生长最好, 降香黄檀则在膜隔模式下生长最好。 (2) 与不施氮处理相比, 施氮 3、6 g·株⁻¹水平下尾叶桉与降香黄檀叶片的超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性及可溶性蛋白含量均显著升高, 而丙二醛(MDA)含量则呈降低趋势。 (3) 尾叶桉与降香黄檀根系的总长度、总表面积、总体积、平均直径、根尖数和比根长均随氮素水平的增加而增加, 且各氮素水平间的差异显著; 同一氮素水平下, 尾叶桉的根系生长总体表现为不隔>网隔>膜隔, 而降香黄檀根系生长则表现为膜隔>不隔>网隔, 且两树种不同分隔模式间差异显著。 (4) 尾叶桉与降香黄檀各器官生物量及总生物量均随施氮量的增加而增加, 并在 6 g·株⁻¹施氮水平下生物量最大; 各器官生物量分配中, 尾叶桉各器官生物量所占比例大小依次为: 茎(40.59%)>叶(32.37%)>根(27.04%), 降香黄檀各器官生物量所占比例大小依次为: 根(47.67%)>茎(40.08%)>叶(12.25%)。研究表明, 尾叶桉与降香黄檀混交一定程度上扩展了根系横向和纵向水平的养分生态位, 扩大了根系吸收土壤养分空间, 同时根系互作提高了降香黄檀的固氮能力, 对土壤有效氮的产生有较大影响。

关键词: 氮素; 根系; 分隔; 尾叶桉; 降香黄檀

中图分类号: Q948.1; Q944.3

文献标志码: A

Effect of Nitrogen Application on the Growth and Leaf Physiological Traits of *Eucalyptus urophylla* and *Dalbergia odorifera* Seedlings under Different Root Partitioning Patterns

XU Junmo, PAN Ting, LONG Jiafeng, TANG Wenyan, TIAN Shiyun, YE Shaoming*

(College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Leguminous and non-legume tree mixed system, as a sustainable development model for artificial forest cultivation, which plays an important role in ensuring timber yield and maintaining nitrogen balance. A pot experiment in greenhouse was conducted to investigate effects of different N fertilizer and root barriers on the seedling growth, leaf physiological, root morphology and biomass of *E. urophylla* and *D.*

收稿日期: 2018-01-03; 修改稿收到日期: 2018-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(31460196)

作者简介: 许峻模(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事用材林培育理论与技术研究。E-mail: 735129328@qq.com

* 通信作者: 叶绍明, 教授, 博士生导师, 主要从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: yshaoming@163.com

odorifera intercropping system. The experimental designs included three nitrogen fertilization levels of 0, 3 and 6 • g N per tree and three root barrier patterns including no barrier, nylon barrier and plastic barrier. The results showed as follows: (1) seedling height and ground diameter of *E. urophylla* and *D. odorifera* presented an increasing trend with the increase of nitrogen application. Under different root barrier patterns, the seedling height of *E. urophylla* and ground diameter were the best without barrier, while *D. odorifera* grew much better under the model of the plastic barrier. (2) When compared to the non N treatment, the content of leaf superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity and soluble protein content for each species relatively increased, but the content of malonaldehyde (MDA) declined. (3) The total root length, total root surface area, total root volume, mean diameter, root tip and specific root length of *E. urophylla* and *D. odorifera* increased by applying nitrogenous fertilizers, and differed from each other significantly. Under the same nitrogen level, the root growth of *E. urophylla* was no barrier > nylon barrier > plastic barrier, while root growth of *D. odorifera* exhibited plastic barrier > no barrier > nylon barrier, and under different root barrier patterns the growth between both species was significant different. (4) The level of nitrogen, was responsible to the biomass of various organs and total biomass of *E. urophylla* and *D. odorifera*. and reached its maximum when the nitrogen level was 6 g N per plant. Among the biomass allocation of various organs, the proportion of biomass of each organ for *E. urophylla* was stem (40.59%) > leaf (32.37%) > root (27.04%), for *D. odorifera* was root (47.67%) > stem (40.08%) > leaf (12.25%). These results showed that *E. urophylla* and *D. odorifera* mixed system expanded the root horizontal and longitudinal level of nutrient ecological niche, and enlarged the space for root absorption of soil nutrients. At the same time, the root interaction enhanced the nitrogen fixation ability of *D. odorifera*, and it had a great impact on the production of soil available nitrogen.

Key words: nitrogen; root; separation; *Eucalyptus urophylla*; *Dalbergia odorifera*

氮素作为植物需求量最大的矿质元素,参与植物体内蛋白质和核酸的合成代谢,是植物正常生长必需的基本元素之一^[1-2],影响着植物的光合作用^[3-4]、水分吸收利用^[5]、抗氧化系统^[6]、内源激素^[7]以及土壤微生物代谢^[8]等。在生产实践中,为了提高人工林产量,施用氮肥是常采用的营林措施之一。但随着氮肥施用量的增加,经常出现氮肥使用过量的现象,造成地下水污染及江河湖泊的富营养化等一系列问题^[9]。固氮微生物能将大气中游离的氮素转变成含氮化合物,为植物提供氮素来源,从而可减少氮肥的使用^[10]。因此,如何通过有效的方式将生物固氮机制引入非豆科植物尤其是速生树种中,进而建立起非豆科植物的固氮新体系,成为现代林业科学研究中迫切需要又富有挑战性的研究课题。

桉树因其速生丰产、抗逆性强、经济效益高等优点,已成为华南地区的主要商品林之一,为国民经济的发展做出了突出贡献^[11-12]。但由于长期以来过分追求短期生产力与经济利益,大面积桉树纯林多代连栽造成的土壤质量退化、生物多样性下降及林分稳定性差等一系列生态环境问题,成为了实现桉树可持续发展的最大障碍^[13-14]。为解决人工纯林带来的生态问题,南方地区逐步营造了人工混交林,

其构成的混交生态系统优势突显,有效提高了林地土壤肥力和林地生产力。而在优良的混交林生态系统中,具有固氮能力的豆科植物起到了关键性的作用。一些试验指出将桉树与部分固氮树种混交可提高桉树人工林稳定性和可持续性,种间关系协调的混交林不仅可以改善林地生产力,减少水土流失,还可以防止地力衰退,增加单位面积林产品和副产品的产量^[15]。目前,树种之间的生物固氮效应已广泛应用于桉树混交林的研究。

降香黄檀为国家二级重点保护濒危树种,因其根部有固氮根瘤菌,常作为改良桉树人工林土壤理化性质的主要混交树种^[16],但目前国内外对桉树与降香黄檀混交的研究仅限于桉树与降香黄檀混交的生长特性^[17]、土壤呼吸^[18]、土壤微生物^[19]等方面。且桉树/降香黄檀混交林生态系统只是最近几年时间才引起广泛关注,针对其根系互作对养分吸收利用规律的认识还十分有限,尤其是混交过程中根系互作对氮素吸收的影响研究鲜见报道,而混交系统优势往往又体现在其地下部的根系作用。为此,本文通过盆栽可控试验分析根系分隔和不同施氮水平对尾叶桉和降香黄檀幼苗生长及叶片生理特性的影响,为探讨尾叶桉/降香黄檀混交群体氮素竞争互补

关系、利用效率及根系互作机制提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

实验于 2016 年 2 月到 8 月在广西大学试验大棚(22°13′~23°32′ N, 107°45′~108°51′ E)中进行。该区域属于湿润的亚热带季风气候,年平均气温在 21.6℃左右,年均降雨量达 1 304.2 mm,平均相对湿度为 79%。供试苗木为 3 月生的广林 9 号尾叶桉与 1 年生的降香黄檀,育苗土壤为南宁市郊区马尾松成熟林下 0~40 cm 土层土壤,其质地为粘壤土,典型的偏酸性赤红壤。将实验用土经风干、敲碎、过筛后与珍珠岩按 8:2 的比例混匀待用。本次试验所施氮肥为尿素, N¹⁵ 的丰度为 10.3%。

1.2 试验设计

本试验采用双因素完全随机设计,因素 A 为不同施氮水平:不施肥(对照)、3 g N/株、6 g N/株;因素 B 为不同根系间隔模式:不隔(盆钵中间的根系不分隔,种间根系竞争作用和促进作用同时存在)、网隔(盆钵中间采用 30 μm 孔径的尼龙网分隔,消除种间根系竞争作用)、膜隔(盆钵中间采用塑料膜隔开并保证密封性,消除种间根系相互作用)。试验共组成 9 个处理组合(表 1),每个处理组合 4 次重复。

采用盆栽试验方式,采用高 60 cm 直径 40 cm 的无纺布育苗袋为种植容器,装入适量土壤,使得土层表面离容器上缘 5 cm 左右。选取生长良好、长势均匀的尾叶桉与降香黄檀幼苗各 1 株种植于每个育苗袋中。分别于苗木种植后 1 个月、3 个月各施肥 1 次,即在 2 棵植株根系周围挖穴,将肥料溶于纯水均匀施入后用表土覆盖。并人工定期定量对苗木进行浇灌,每盆定量浇灌 8 000 mL,保证苗木充足水分供应。

1.3 指标测定与方法

1.3.1 形态指标 2016 年 8 月对所有幼苗分地上部和根系两部分进行收获。苗高和地径测定分别用直尺和电子游标卡尺测量;生物量测定采用全株收获法,分别测定根、茎以及叶的鲜重后,将各器官带回实验室内用烘箱于 80℃中烘干至恒重,称量并计算各组分的生物量;将盆栽盆体用水浸泡取出完整根系后采用 Epson 根系扫描仪进行根系扫描,获取形态结构图像后,根系各形态指标(根系总长度、表面积、体积、平均直径和根尖数)采用根系图像分析软件 WinRHIZON Pro 进行测定。

1.3.2 生理指标 将所有试验植株洗净晾干后带回实验室进行相关生理指标测定。叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性分别采用氮蓝四唑法和氧化愈创木酚法测定^[20],可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[21]测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[22]测定。

1.4 数据处理与分析

所有试验数据用 Excel 2010 进行整理后,运用 SPSS 19.0 分别对施氮水平、分隔模式处理进行方差分析(One-way ANOVA),并对差异显著性指标进行多重比较(LSD 法);采用 Sigmaplot 10.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 施氮和根系分隔对尾叶桉和降香黄檀幼苗生长的影响

表 1 显示,同一分隔模式下,尾叶桉的地径、苗高均随氮素水平的增加而增加,且不同氮素水平间地径的差异均达显著水平($P<0.05$)。而同一氮素水平中,分隔模式对尾叶桉地径的影响表现为不隔>网隔>膜隔,除施氮 0 g·株⁻¹水平的网隔与膜隔(T₄与 T₇)、3 g·株⁻¹水平的不隔与网隔(T₂与 T₅)差异不显著外,其他氮素水平不同分隔模式间均有显著差异($P<0.05$);尾叶桉苗高则在施氮 0 g·株⁻¹、6 g·株⁻¹水平下,分隔模式对苗高生长均表现为不隔>网隔>膜隔,而 3 g·株⁻¹水平下的苗高生长规律与之相反,除施氮 6 g·株⁻¹水平的 3 种分隔模式以及 3 g·株⁻¹水平的不隔与膜隔(T₂与 T₈)苗高存在显著差异外($P<0.05$),其他同一氮素水平下不同分隔模式对苗高生长的影响差异不显著。9 个对比处理中,尾叶桉地径在 T₃ 处理下生长量达到最大值,比最小值 T₄ 处理增 6.62 mm。苗高则同在 T₃ 处理达到最大值,值为 119.21 cm,比最小值 T₇ 处理增 38.83 cm。

氮肥的施入对降香黄檀的地径、苗高生长均有明显的促进作用,并随着氮素水平的增加,降香黄檀地径、苗高均呈递增趋势(表 1)。同一分隔模式下,不同氮素水平间降香黄檀的地径存在显著差异($P<0.05$),而同一氮素水平中,不同分隔模式下降香黄檀的地径生长规律为膜隔>不隔>网隔,不同分隔模式地径的差异均达显著水平($P<0.05$);同一氮素水平下,分隔模式对降香黄檀苗高影响与地径表现规律一致,均为膜隔>不隔>网隔,除施氮 6 g·株⁻¹水平的网隔和膜隔(T₆与 T₉)存在显著差异

外($P<0.05$),其他施氮水平下不同分隔模式间对苗高生长差异不显著。9 个对比处理中,降香黄檀地径最大为 T_9 处理,其比最小值 T_4 处理高 74.1%,与地径出现最大值的规律一致,降香黄檀苗高在 T_9 处理达到最大值,值为 27.88 cm,其比最小值 T_4 处理高 54.4%。

2.2 施氮和根系分隔对幼苗叶片生理指标的影响

2.2.1 施氮和根系分隔对尾叶桉叶片生理指标的影响 由表 2 可知,施氮能够使尾叶桉叶片 SOD、POD 活性、可溶性蛋白含量均显著升高。其中,施氮 3、6 $g \cdot 株^{-1}$ 状态下,不隔模式尾叶桉叶片 SOD 活性分别为不施氮的 1.12 和 1.43 倍,网隔模式分别为 1.15 和 1.25 倍,而膜隔模式分别为 1.21 和 1.26 倍;不隔模式叶片 POD 活性分别为不施氮的

1.19 和 1.46 倍,网隔模式分别为 1.22 和 1.34 倍,而膜隔模式分别为 1.25 和 1.43 倍;不隔模式可溶性蛋白含量则分别为不施氮的 1.04 和 1.17 倍,网隔模式分别为 1.02 和 1.09 倍,而膜隔模式分别为 1.02 和 1.21 倍。这说明施氮能够使尾叶桉维持较高的 SOD、POD 活性,以减轻脂膜过氧化作用对细胞膜的伤害。同时,施氮促使尾叶桉叶片 MDA 含量显著降低(表 2)。其中不隔模式 MDA 含量降幅分别为不施氮的 35.29%和 52.10%,网隔模式分别为 11.90%和 50.00%,而膜隔模式分别为 30.88%和 52.21%。

2.2.2 施氮和根系分隔对降香黄檀叶片生理指标的影响 表 2 表明,施氮对降香黄檀叶片 SOD、POD 活性、可溶性蛋白含量均有显著影响($P<0.05$),

表 1 不同处理下尾叶桉和降香黄檀幼苗地上部分生长情况
Table 1 The aboveground growth of *E. urophylla* and *D. odorifera* seedling under different treatments

处理 Treatment			尾叶桉 <i>E. urophylla</i>		降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	
编号 No.	分隔模式 Root barrier	氮肥水平 N level/g	地径 Ground diameter/mm	苗高 Height/cm	地径 Ground diameter/mm	苗高 Height/cm
T_1	不隔 No barrier	0	10.84±0.34d	78.48±4.42ef	3.21±0.23e	14.33±4.71cd
T_2		3	13.50±0.42c	82.36±3.71de	4.76±0.17c	17.73±1.94cd
T_3		6	15.79±0.38a	119.21±5.32a	6.80±0.16b	25.83±2.51ab
T_4	网隔 Nylon barrier	0	9.17±0.19e	75.13±5.15ef	2.57±0.26f	12.71±3.43d
T_5		3	13.27±0.46c	89.23±6.36cd	3.30±0.16e	16.25±3.68cd
T_6		6	15.14±0.36b	105.81±3.54b	4.04±0.22d	20.62±4.13bc
T_7	膜隔 Plastic barrier	0	9.25±0.39e	70.38±4.87f	4.80±0.36c	15.90±2.92cd
T_8		3	11.28±0.34d	94.33±5.54c	6.68±0.21b	18.65±3.57cd
T_9		6	13.44±0.39c	96.32±5.96c	9.92±0.37a	27.88±5.84a

注:表内数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);下同
Note: Values in the table are given as mean±SD; Different letters in the same column show significant difference among treatments at 0.05 level($P<0.05$); The same as below

表 2 不同处理对尾叶桉和降香黄檀叶片生理指标的影响
Table 2 The leaf morphology of *E. urophylla* and *D. odorifera* seedling under different treatments

处理 Treatment	超氧化物歧化酶活性 SOD activity/($U \cdot min^{-1} \cdot g^{-1}$)		过氧化物酶活性 POD activity/($U \cdot min^{-1} \cdot g^{-1}$)		可溶性蛋白含量 Soluble protein content/($mg \cdot g^{-1}$)		丙二醛含量 MDA content/($\mu mol \cdot g^{-1}$)	
	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	降香黄檀 <i>D. odorifera</i>
T_1	188.69±0.91h	189.70±0.96f	345.63±3.91g	264.53±4.74e	13.26±0.11e	14.28±0.15e	1.19±0.12b	1.48±0.24a
T_2	210.58±0.54f	225.31±6.02c	479.54±1.20c	286.69±2.97d	13.76±0.04c	17.45±0.35c	0.77±0.02de	0.97±0.02cd
T_3	269.72±1.97a	276.77±8.99a	524.94±11.38a	320.72±2.43b	15.55±0.22a	23.31±0.48b	0.57±0.01g	0.62±0.03fg
T_4	199.95±5.67g	178.98±2.73g	364.47±6.03f	253.63±2.76e	13.45±0.02de	9.96±0.33g	0.84±0.01ed	1.24±0.05b
T_5	230.73±0.66c	218.44±1.05d	450.59±2.11d	265.24±3.53f	13.73±0.03c	13.18±0.45f	0.74±0.02ef	0.80±0.02de
T_6	250.03±0.22b	239.63±1.58b	498.97±0.41b	292.99±1.31d	14.72±0.22b	16.09±0.06d	0.42±0.01h	0.53±0.01g
T_7	179.16±0.76i	195.69±1.09e	372.70±0.93f	286.24±0.35d	11.45±0.32f	15.72±0.17d	1.36±0.08a	1.11±0.01bc
T_8	217.04±0.68e	245.26±1.37b	429.03±10.41e	311.41±0.11c	11.63±0.04cd	17.43±1.30c	0.94±0.02c	0.73±0.02ef
T_9	225.20±0.10d	279.62±0.79a	452.41±5.82d	359.19±8.70a	13.87±0.005c	25.43±0.42a	0.65±0.03fg	0.46±0.04g

且均随施氮量的增加而升高。其中,在施氮 3、6 g · 株⁻¹状态下,降香黄檀叶片 SOD 活性增幅最大的是膜隔模式,增幅分别达 25.33%和42.89%,随后依次是不隔模式和网隔模式;不隔模式叶片 POD 活性分别较不施氮处理提高了 8.38%和 21.24%,网隔模式分别为 4.58%和 15.52%,而膜隔模式分别为 8.79%和 25.49%;同时,施氮也能使降香黄檀叶片可溶性蛋白含量显著升高,且施氮 6 g · 株⁻¹增幅均大于 3 g · 株⁻¹,其中在 6 g · 株⁻¹水平下,可溶性蛋白含量增幅最大的是膜隔模式(63.24%),最小的是网隔模式(61.55%),而在 3 g · 株⁻¹水平下,可溶性蛋白含量增幅最大的则为网隔模式(32.33%),最小的为膜隔模式(10.88%);与不施氮处理相比,2 个施氮环境下(3、6 g · 株⁻¹)降香黄檀叶片 MDA 含量显著降低,其中不隔模式叶片 MDA 含量分别降低 34.46%和 58.11%,网隔模式分别为 35.48%和 57.26%,而膜隔模式分别为 34.23%和 58.56%。表明降香黄檀适量施氮能够降低其体内丙二醛的积累量,从而减少对其的伤害,提高自身耐受性。

2.3 施氮和根系分隔对幼苗根系生长的影响

2.3.1 施氮和根系分隔对尾叶桉根系生长的影响

从表 3 可以看出,同一分隔模式下,施氮量的增加显著增加了尾叶桉根系的总长度、总表面积、总体积、平均直径、根尖数和比根长,且随氮素水平的增加呈增加趋势,各氮素水平间的差异均达显著水平($P<0.05$);同一氮素水平下,不同分隔模式下尾叶桉的各项根系指标总体表现为不隔>网隔>膜隔(除施氮 0 g · 株⁻¹、3 g · 株⁻¹水平下根总长度及 0 g · 株⁻¹水平下根总表面积外),且不同分隔模式间根系生长基本存在显著差异($P<0.05$)。T₃ 的根系生长在 9 个处理中达最大值,而除 T₄ 的根尖数、比根长为最小值外,其他根系形态生长则均是 T₇ 为最小,最大值分别是最小值的 1.91、2.02、2.79、3.13、2.07、1.85 倍。

2.3.2 施氮和根系分隔对降香黄檀根系生长的影响

表 4 结果显示了不同处理对降香黄檀根系生长的影响,同一分隔模式下,降香黄檀的根系生长量在氮素水平上均表现为 6 g · 株⁻¹>3 g · 株⁻¹>0 g ·

表 3 不同处理对尾叶桉根系生长的影响

Table 3 Effects of different treatments on the growth of root of *E. urophylla*

处理 Treatment	根总长度 Root length/cm	根总表面积 Root surface area/cm ²	根总体积 Root volume/cm ³	平均直径 Mean diameter/mm	根尖数 Root tip	比根长 Specific root length
T ₁	566.82±33.85de	276.47±3.55g	5.46±0.27e	0.57±0.02f	862.75±9.72e	4.72±0.20e
T ₂	673.48±64.07c	391.50±2.06d	6.31±0.13d	0.81±0.02d	981.82±5.64d	5.86±0.80d
T ₃	831.22±87.55a	537.19±2.33a	9.56±0.37a	1.41±0.07a	1359.15±34.20a	7.04±0.36a
T ₄	596.75±43.41d	281.32±2.93g	4.56±0.37f	0.51±0.01g	655.57±2.92g	3.80±0.43f
T ₅	774.71±38.31ab	363.57±1.27e	5.30±0.08e	0.92±0.01c	781.85±15.18f	4.14±0.51ef
T ₆	818.16±12.80ab	462.51±6.34b	7.83±0.03b	1.03±0.01b	1270.05±11.70b	6.80±0.38ab
T ₇	434.09±30.89f	265.77±37h	3.43±0.06g	0.45±0.02h	782.01±4.97f	5.98±0.66cd
T ₈	513.82±73.47e	341.67±9.84f	4.54±0.01f	0.68±0.01e	980.45±4.09d	6.21±0.77bcd
T ₉	752.20±14.31b	415.48±2.79c	7.12±0.02c	0.94±0.02c	1092.73±35.72c	6.62±0.52abc

表 4 不同处理对降香黄檀根系生长的影响

Table 4 Effect of different treatments on the growth of roots of *D. odorifera*

处理 Treatment	根总长度 Root length/cm	根总表面积 Root surface area/cm ²	根总体积 Root volume/cm ³	平均直径 Mean diameter/mm	根尖数 Root tip	比根长 Specific root length
T ₁	239.92±4.31f	183.63±0.80g	2.55±0.03h	0.54±0.01e	454.55±4.45i	8.58±0.79bc
T ₂	356.22±9.08d	234.09±3.91e	3.88±0.01e	0.83±0.01c	509.64±4.95g	8.99±0.89bc
T ₃	418.99±6.54b	314.99±2.73b	5.06±0.02b	0.95±0.04b	736.48±3.69b	12.62±2.18a
T ₄	219.82±9.76g	167.68±3.62h	2.05±0.03i	0.43±0.02f	484.09±5.15h	4.20±0.95e
T ₅	326.90±2.94e	237.55±3.90e	3.52±0.03f	0.76±0.03d	541.62±1.48f	4.66±1.06e
T ₆	389.16±2.61c	283.45±9.81c	4.84±0.02c	0.93±0.03b	622.80±0.94d	5.46±0.98de
T ₇	236.32±7.93f	191.92±1.45f	3.05±0.02g	0.58±0.02e	592.55±5.50e	7.04±0.64cd
T ₈	386.03±5.35c	259.13±1.06d	4.53±0.01d	0.74±0.04d	636.27±3.84c	10.16±0.93b
T ₉	485.81±4.34a	337.01±8.89a	5.77±0.03a	1.03±0.03a	834.39±2.23a	13.54±2.50a

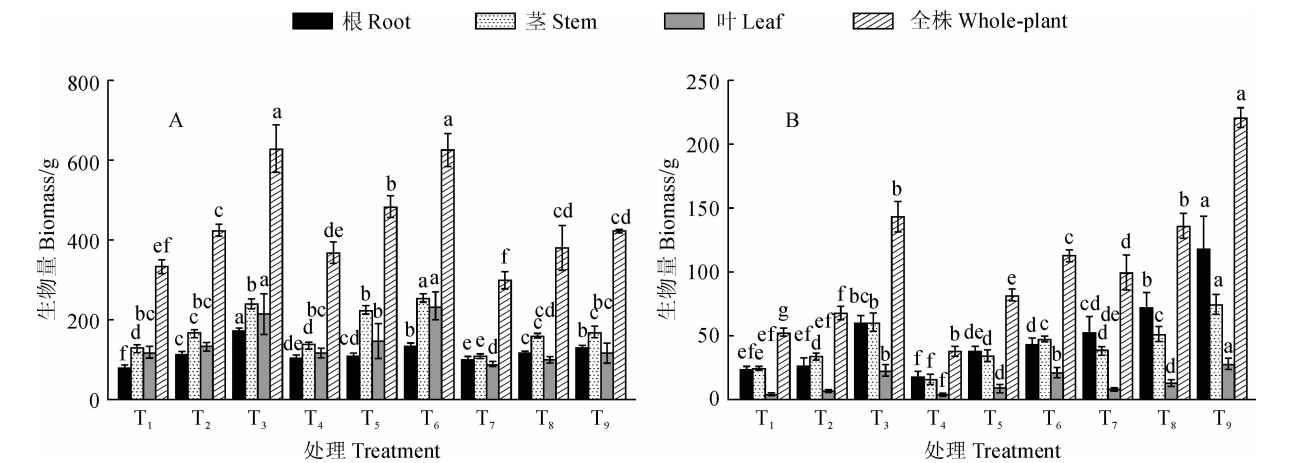


图1 不同处理对尾叶桉(A)和降香黄檀(B)各器官以及总生物量的影响

Fig.1 Effect of different treatments on the organs and total biomass of *E. urophylla* and *D. odorifera*

株⁻¹,表明氮肥的施入显著促进了降香黄檀根系的生长。同一分隔模式下,不同氮素水平的降香黄檀根总长度、根总表面积、根总体积、平均直径以及根尖数存在显著差异($P<0.05$),比根长则 T₁ 处理与 T₂ 处理及网隔模式下 3 种氮素水平间差异不显著。降香黄檀的根系生长规律与尾叶桉有所不同,同一氮素水平下,其根系生长总体表现为膜隔>不隔>网隔,各分隔模式间差异达显著水平。同时发现, T₉ 根系的各生长指标在 9 个处理中均达到最大值,而 T₄ 处理下的根系生长指标则相对较小(除根尖数外)。根总长度、根总表面积、根总体积、平均直径、根尖数、比根长最大值比最小值分别高54.75%、50.24%、64.47%、58.25%、45.52%、68.98%。

2.4 施氮和根系分隔对幼苗生物量积累及其分配的影响

2.4.1 施氮和根系分隔对尾叶桉幼苗生物量的影响 如图 1 所示,同一分隔模式下,不同氮素水平间尾叶桉各器官生物量及总生物量的表现均为 $6\text{ g} \cdot \text{株}^{-1} > 3\text{ g} \cdot \text{株}^{-1} > 0\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。其中,对根系生物量而言,生物量最大的处理 T₃(173.60 g)高出最小处理 T₁(80.73 g)达 92.87 g,不同氮素水平下根生物量均存在显著差异($P<0.05$)。茎的生物量同样随着氮素水平的增加而增加,施氮 $6\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 比不施氮在 3 种分隔模式下分别增加了 44.8%、44.1%、35.8%,且除 T₈ 与 T₉ 无显著差异外,其他氮素水平间茎生物量差异均达显著水平($P<0.05$)。而对叶生物量而言,其总体大小顺序为 $T_6 > T_3 > T_5 > T_2 > T_4 > T_1 > T_9 > T_8 > T_7$,施氮 $0\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 水平和膜隔模式下生物量差异不明显。不同分隔模式下,尾叶桉膜隔模式下的总生物量最小,除 T₁ 与 T₄、T₂ 与 T₈ 及 T₃ 与 T₆ 及间差异不显著外,其他同一氮

素水平下不同分隔模式间均存在显著差异($P<0.05$)。其中 T₃ 的总生物量达到最大值 628.57 g,是最小值 T₇(299.51 g)的 2.1 倍。

2.4.2 施氮和根系分隔对降香黄檀幼苗生物量的影响 施氮能够有效促进降香黄檀苗高和地径的生长,显然其生物量也随着氮素施入而增加(图 1)。同一分隔模式下,降香黄檀幼苗的根系生物量、茎生物量、叶生物量以及全株生物量均表现为 $6\text{ g} \cdot \text{株}^{-1} > 3\text{ g} \cdot \text{株}^{-1} > 0\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,除 T₁ 和 T₂ 的根、叶生物量以及 T₅ 与 T₆ 根生物量不存在显著差异外,其他器官以及总生物量各水平间均存在显著差异。同一氮素水平下,各器官以及总生物量均为在膜隔模式下达达到最大,而分别在施氮 $3\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 状态下不隔模式及施氮 $0\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 、 $6\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 水平网隔模式下达达到最小,不同分隔模式间的全株生物量存在显著差异($P<0.05$)。无论是根、茎、叶生物量还是全株总生物量,施氮 $6\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 水平膜隔模式(T₉)显著大于其他处理,且比最小处理的生物量(T₄)分别多 84.89%、78.24%、87.38%和 82.97%。

3 讨论

3.1 施氮及根系互作对尾叶桉/降香黄檀幼苗地上部生长及叶片生理特性的影响

植物生长除了受自身遗传物质的影响外,还会受外界环境因子如水分、光照、土壤等的作用^[23]。氮素营养是影响植物生长发育的重要因子,其在一定供应范围内,对植物苗高、地径的生长均有明显的促进作用^[24-25]。本研究,施氮对尾叶桉和降香黄檀的苗高、地径生长具有明显的促进作用,且随着施氮水平的增加,尾叶桉和降香黄檀叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性及可溶性

蛋白含量显著升高,而丙二醛(MDA)含量则呈降低趋势。由此可知,与不施氮相比,施氮 $3, 6 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 能够提高两植株幼苗叶片 SOD、POD 的活性,较大程度上减缓了膜脂过氧化反应对植株造成的伤害;同时,叶片可溶性蛋白的含量显著提高,有效增加其细胞的渗透调节能力,为其生长提供更多的能量来源,而 MDA 含量降低则提高了植株细胞的生理功能,进一步使其维持较高的生命活力^[26]。同时发现,不隔模式显著提高了尾叶桉的苗高、地径,而降香黄檀苗高、地径增长却在根系膜隔下表现最好,这可能是由于植物的生长除了受 N 元素供应影响外,还会受到生长空间和种间根系的相互作用,从而影响养分的吸收利用。根系不分隔处理下,尾叶桉因其速生特性,根系相互作用优势明显,其可以占据降香黄檀地下部空间,但降香黄檀的根却较少到混交尾叶桉的地下部空间。本研究发现,尾叶桉根系总长度及根总表面积均高于降香黄檀,侧面反映了混交扩展了尾叶桉根系水平尺度的养分生态位,使得其通过根系吸收更多土壤养分,从而在 3 种分隔模式中生长表现最优。而非固氮树种与固氮树种混交后,能够提高非固氮树种营养水平改善土壤养分^[27]。虽不隔模式下尾叶桉或降香黄檀地下部养分和水分的竞争作用和促进作用并存且相互作用强烈,但树种间的相互作用改变其植株体内的养分释放过程^[28],提高了降香黄檀的固氮能力,从而弥补了养分部分流失的不足,使得降香黄檀在不隔模式生长较网隔模式好。这与苗锐等^[29]研究发现 3 种间作体系中不隔处理的蚕豆结瘤数目均多于膜隔处理的结果相似;根系用尼龙网分隔,则使尾叶桉或降香黄檀其中一种植物根系不能进入另一植物根区竞争养分,地下部根系间没有直接接触,尾叶桉根系生长虽受到一定程度限制,但由于可移动的养分及水分仍可以通过,尾叶桉从中吸收部分养分,从而使其生长略低于不隔模式而优于膜隔模式。而此模式下的降香黄檀生物固氮量主要由其地上部库强决定,缺少尾叶桉地下部的互作用致其地下部固氮能力有限,且土壤中的养分交换过程存在部分流失,养分不足是造成网隔模式下降香黄檀生长相对较差的重要原因;根系用塑料膜分隔,该处理下植物根系、养分和水分不存在物质交换,地下部的种间相互作用减至最小,尾叶桉无法获取更多养分且根系生长受到一定程度限制,因而其在膜隔模式下生长最差。降香黄檀则正好相反,其通过共生固氮将大气中的氮素转化为有机氮素固定于植物体内,且缺少了尾

叶桉对其地下部水分与营养元素的竞争后,充足的养分及自身固氮能力令其表现出膜隔模式下生长最好。

3.2 施氮及根系互作对尾叶桉/降香黄檀根系形态的影响

植物所需的氮素绝大部分来自于土壤,而植物对土壤氮素的竞争互补利用、氮阻遏消减和氮转移等调控氮素利用的生理、生态学过程,很大程度上是依赖于根间互作产生的^[30-31]。随着土壤环境的改变,根系往往会通过改变自身的生长以及形态等来适应外界环境的变化^[32]。当土壤氮供应充足时,植物的根总长度、表面积和平均直径均会增加,同时促进植物根系根尖数和侧根的形成,但均在一定氮素范围内表现出此现象^[33-34]。本研究结果与前人一致,随着氮素施入浓度的增加,无论是尾叶桉还是降香黄檀其根系总长度、总表面积、总体积、平均直径以及根尖数和比根长均显著的提高。根系总长度、根系表面积、体积等根系参数是决定根系养分吸收范围、吸收强度的重要指标,通过延伸根长、扩大根系表面积、增加根系总表面积有助于水肥的获取,促进整株植物的生长^[35-36]。植物根系的比根长增大有效加快对养分和水分的利用效率,从而提高自身竞争力^[37],氮素水平为 6 g 时,不论是尾叶桉还是降香黄檀的比根长都最大,更有利于对水肥的吸收。尾叶桉在混交中具有较强的水肥竞争力,竞争优势明显高于降香黄檀,在根系不分隔时,尾叶桉占据更多的养分资源,根系生长得到显著提高。而在根系膜隔条件下,降香黄檀根系生长不受尾叶桉根系以及养分竞争的影响,表现出生长最好,这与前人研究大豆与小麦的间作体系得出的结果一致^[38]。通常比根长较大的植物有较多细根、较大根表面积^[39],其在相同养分及水分条件下对地下资源获取能力更强,有助于地上部分的生长,提高植物光合效率,进一步向根系分配更多的物质促进根系发育^[40],从而解释了降香黄檀苗高、地径和生物量均在膜隔条件下生长相对其他 2 种模式更好,而尾叶桉的苗高、地径、生物量在不隔模式下达到最好。

3.3 施氮及根系互作对尾叶桉/降香黄檀生物量的影响

生物量可作为植物对环境因子响应最直观的指标,研究其变化对了解植物对氮素的响应具有重要的意义^[41]。本研究,无论是何种分隔模式,各器官以及全株生物量积累均随着氮素水平的增加而增加。这可能是由于盆栽试验土壤营养元素有限,通

常在这种情况下,随着供氮的增加,植物地上部分的生物量以及全株生物量也会随之增加。而在所有处理中,尾叶桉茎所占的生物量比例最大,其次是 N_0 和 N_3 水平下的叶生物量,这主要是因为当土壤氮素营养较低时,尾叶桉需要将生物量更多地分配到地上以占据高度优势和生产更多光合产物以供生长^[40]。而在 N_6 水平下氮素营养充足,不但显著增加地上部分的生长,且将更多的光合产物分配至地下,促进根生物量的增长。这可能与尾叶桉的速生特性有关,在氮素营养充足情况下尾叶桉会向根系分配更多的生物量,促进其根系生长,从而扩大其获取水分和养分的空间。这与部分学者的得出的在氮不足的情况下,根系生物量累积较多的结果相反^[42-44]。安慧等^[45]在分析根域限制对连翘幼苗生

长的影响发现,根域体积减小后,根系的伸长会受阻,根系活力下降,从而导致根的重量减小。也有研究表明,根域限制减少了地上部分细胞分裂素以及叶面积和抑制侧枝生长而阻碍地上部生长^[46],以致同时影响了尾叶桉的地上部分与地下部分的生长,造成膜隔模式下尾叶桉的总生物量最小。就降香黄檀而言,9个处理中根系都占有较大比例,根系在分隔模式下的总生物量显著高于网隔和不隔模式,可能是由于无论是氮素较少还是充足条件下,降香黄檀首先促进根的生长以获取更多的水分与营养,再进一步调节地上与地下部分生物量的分配,而没有根系的相互作用,使得降香黄檀的生物量在膜隔下表现累积最多。

参考文献:

[1] 钟开新,王亚琴. 植物氮素吸收与转运的研究进展[J]. 广西植物, 2011, **31**(3): 414-417.
ZHONG K X, WANG Y Q. Progress on nitrogen uptake and transport in plant[J]. *Guihaia*, 2011, **31**(3): 414-417.

[2] 徐晓鹏,傅向东,廖红. 植物铵态氮同化及其调控机制的研究进展[J]. 植物学报, 2016, **51**(2): 152-166.
XU X P, FU X D, LIAO H. Advances in study of ammonium assimilation and its regulatory mechanism in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2016, **51**(2): 152-166.

[3] BROWN K R, THOMPSON W A, WEETMAN G F. Effects of N addition rates on the productivity of *Picea sitchensis*, *Thuja plicata*, and *Tsuga heterophylla*, seedlings[J]. *Trees*, 1996, **10**(3): 189-197.

[4] SIMS D A, SEEMANN J R, LUO Y. The significance of differences in the mechanisms of photosynthetic acclimation to light, nitrogen and CO₂ for return on investment in leaves[J]. *Functional Ecology*, 2010, **12**(2): 185-194.

[5] 吴巍,赵军. 植物对氮素吸收利用的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(13): 75-78.
WU W, ZHAO J. Advances on plants' nitrogen assimilation and utilization [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, **26**(13): 75-78.

[6] 李宪利,高东升. 铵态和硝态氮对苹果植株 SOD 和 POD 活性的影响(简报)[J]. 植物生理学报, 1997, **33**(4): 254-256.
LI X L, GAO D S. Effects of ammonium and nitrate nitrogen on the activities of superoxidase dismutase and peroxidase of apple trees [J]. *Plant Physiology Journal*, 1997, **33**(4): 254-256.

[7] GARCIA M C, LAMATTINA L. Nitric oxide and abscisic acid cross talk in guard cells[J]. *Plant Physiology*, 2002, **128**(3): 790.

[8] 苏丹,张凯,陈法霖,等. 施氮对不同有机碳水平桉树林土壤微生物群落碳代谢的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(18): 5 940-5 947.
SU D, ZHANG K, CHEN F L, *et al.* Effects of nitrogen application on carbon metabolism of soil microbial communities in *Eucalyptus* plantations with different levels of soil organic carbon[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 5 940-5 947.

[9] 陈雅君,闫庆伟,张璐,等. 氮素与植物生长相关研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2013, **44**(4): 144-148.
CHEN Y J, YAN Q W, ZHANG L, *et al.* Research progress on nitrogen and plant growth[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, **44**(4): 144-148.

[10] 张武,杨琳,王紫娟. 生物固氮的研究进展及发展趋势[J]. 云南农业大学学报, 2015, **30**(5): 810-821.
ZHANG W, YANG L, WANG Z J. Advance and development trend of biological nitrogen fixation research[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2015, **30**(5): 810-821.

[11] 袁颖红,樊后保,吴建平,等. 不同年龄人工林尾叶桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)叶片光合特性及水分利用效率[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(1): 58-63.
YUAN Y H, FAN H B, WU J P, *et al.* The photosynthesis characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations of different ages[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, **22**(1): 58-63.

[12] 任世奇,项东云,肖文发,等. 广西南宁桉树人工林降雨再分配特征[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(6): 1 473-1 480.
REN S Q, XIANG D Y, XIAO W F, *et al.* Rainfall redistribution of *Eucalypt* plantation in Nanning, Guangxi, China

- [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(6): 1 473-1 480.
- [13] 史进纳, 蒋代华, 肖 斌, 等. 不同连栽代次桉树林土壤有机碳演变特征[J]. 热带作物学报, 2015, **36**(4): 748-752.
SHI J N, JIANG D H, XIAO B, *et al.* Evolution characteristics of soil organic carbon in different generation of continuous *Eucalyptus* plantations[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, **36**(4): 748-752.
- [14] 陈亚梅, 刘 洋, 张 健, 等. 巨桉混交林不同树种 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(8): 2 096-2 102.
CHEN Y M, LIU Y, ZHANG J, *et al.* Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of different tree species in *Eucalyptus grandis* mixed plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(8): 2 096-2 102.
- [15] 杨曾奖, 徐大平, 陈文平, 等. 华南地区桉树/相思混交种植的林木生长效应[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(10): 2 339-2 344.
YANG Z J, XU D P, CHEN W P, *et al.* Growth effect of *Eucalyptus-Acacia* mixed plantation in South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(10): 2 339-2 344.
- [16] 余注光, 黄晓露, 冯娇银, 等. 巨尾桉萌芽林引入降香黄檀后的土壤化学性质变化[J]. 北京大学学报(自然), 2017, **18**(2): 243-247.
YU Z G, HUANG X L, FENG J Y, *et al.* Changes of chemical property in the soil of secondary *Eucalyptus* plantation after introducing *Dalbergia odorifera* [J]. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 2017, **18**(2): 243-247.
- [17] 莫慧华. 大青山珍贵树种格木、降香黄檀与巨尾桉混交效果初步评价[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [18] 黄雪蔓, 刘世荣, 尤业明. 第二代桉树人工纯林和混交林土壤呼吸及其组分研究[J]. 林业科学研究, 2014, **27**(5): 575-582.
HUANG X M, LIU S R, YOU Y M. Study on the soil respiration and its components of the second rotation *Eucalyptus* plantations in subtropical China[J]. *Forest Research*, 2014, **27**(5): 575-582.
- [19] 黄雪蔓, 刘世荣, 尤业明. 固氮树种对第二代桉树人工林土壤微生物生物量和结构的影响[J]. 林业科学研究, 2014, **27**(5): 612-620.
HUANG X M, LIU S R, YOU Y M. Effects of N-fixing tree species on soil microbial biomass and community structure of the second rotation *Eucalyptus* plantations[J]. *Forest Research*, 2014, **27**(5): 612-620.
- [20] 路文静. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012: 106-109.
- [21] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 67-68.
- [22] 蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014: 170-172.
- [23] 黄 华, 梁宗锁, 韩蕊莲. 持续干旱胁迫对女贞形态与生长的影响[J]. 林业科学, 2008, **44**(8): 145-148.
HUANG H, LIANG Z S, HAN R L. Effects of drought stress on morphology and growth of *Ligustrum lucidum*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, **44**(8): 145-148.
- [24] GROOT C C D, MARCELIS L F M, BOOGAARD R V D, *et al.* Interactive effects of nitrogen and irradiance on growth and partitioning of dry mass and nitrogen in young tomato plants[J]. *Functional Plant Biology*, 2002, **29**(6): 1 319-1 328.
- [25] 安 慧, 上官周平. 根域限制和氮素水平对连翘幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(4): 1 323-1 332.
AN H, SHANGGUAN Z P. Effects of root restriction and nitrogen application on the growth of *Forsythia suspensa* seedling[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(4): 1 323-1 332.
- [26] 张 楚, 张永清, 路之娟, 等. 低氮胁迫对不同苦荞品种苗期生长和根系生理特征的影响[J]. 西北植物学报, 2017, **37**(7): 1 331-1 339.
ZHANG C, ZHANG Y Q, LU Z J, *et al.* Effect of low nitrogen stress on the seedling growth and root physiological traits of *Fagopyrum tataricum* cultivars with different low-N treatments[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(7): 1 331-1 339.
- [27] 贾黎明. 固氮树种与非固氮树种混交林研究现状[J]. 世界林业研究, 1998, **11**(1): 20-26.
JIA L M. The review of mixtures of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species[J]. *World Forest by Research*, 1998, **11**(1): 20-26.
- [28] VIERHEILIG H, ALT-HUG M, ENGEL-STREITWOLF R, *et al.* Studies on the attractional effect of root exudates on hyphal growth of an arbuscular mycorrhizal fungus in a soil compartment-membrane system[J]. *Plant and Soil*, 1998, **203**(1): 137-144.
- [29] 苗 锐, 张福锁, 李 隆. 玉米、小麦和大麦与蚕豆间作体系不同根系分隔方式对蚕豆结瘤的影响[J]. 植物学报, 2009, **44**(2): 197-201.
MIAO R, ZHANG F S, LI L. Effects of root barriers on nodulation of faba bean in maize/faba bean, wheat/faba bean and barley/faba bean intercropping systems[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2009, **44**(2): 197-201.
- [30] 蒋三乃, 翟明普, 贾黎明. 混交林种间养分关系研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2001, **23**(2): 72-77.
JIANG S N, ZHAI M P, JIA L M. Advances on the research of interspecific nutrient interaction in mixed forest ecosystems[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, **23**(2): 72-77.
- [31] PALTA J A, IRP F, REBETZKE G J. Restricted-tillering wheat does not lead to greater investment in roots and early nitrogen uptake[J]. *Field Crops Research*, 2007, **104**(1-3): 52-59.

[32] 王利立, 朱永永, 赵彦华, 等. 施氮和根间互作对密植大麦间作豌豆氮素利用的协同效应[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(2): 200-210.

WANG L L, ZHU Y Y, ZHAO Y H, *et al.* Response of nitrogen utilization to root interaction and plant density in barley-pea intercropping system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(2): 200-210.

[33] 张亚敏, 马克明, 曲来叶. 干旱条件下接种 AM 真菌对小马鞍羊蹄甲幼苗根系的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(8): 2 611-2 619.

ZHANG Y M, MA K M, QU L Y. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi enhances the root system of *Bauhinia faberi* var. *microphylla* seedlings under drought stress conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(8): 2 611-2 619.

[34] VAN K C, HARTLEY C. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation[J]? *Field Crops Research*, 2000, **65**(2-3): 165-181.

[35] 牛芳华, 李志辉, 王昌熙, 等. 尾巨桉幼苗根系分布及生物量特征研究[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(1): 6-11.

NIU F H, LI Z H, WANG C X, *et al.* The study of root distribution and biomass characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*' saplings[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, **28**(1): 6-11.

[36] DAVIS J P, HAINES B, COLEMAN D, *et al.* Fine root dynamics along an elevational gradient in the southern Appalachian Mountains, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **187**(1): 19-33.

[37] CORTINA J, GREEN J J, BADDELEY J A, *et al.* Root morphology and water transport of *Pistacia lentiscus* seedlings under contrasting water supply: A test of the pipe stem theory[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, **62**(3): 343-350.

[38] 肖焱波. 豆科/禾本科间作体系中养分竞争和氮素转移研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.

[39] 徐 琨, 李芳兰, 苟水燕, 等. 岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系功能性状及相互关系[J]. 生态学报, 2012, **32**(1): 215-225.

XU K, LI F L, GOU S Y, *et al.* Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 215-225.

[40] 宋清华, 赵成章, 史元春, 等. 祁连山北坡混播草地密度制约下燕麦和毛苕子比根长分布格局[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(2): 497-503.

SONG Q H, ZHAO C Z, SHI Y C, *et al.* Spatial distribution patterns of specific root lengths of *Avena sativa* L. and *Vicia villosa* Roth in mixed-sowing grassland under density dependence in northern slope of Qilian Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(2): 497-503.

[41] 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.

[42] GORDON W S, JACKSON R B. Nutrient concentrations in fine roots[J]. *Ecology*, 2000, **81**(1): 275-280.

[43] NADELHOFFER K J. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems[J]. *New Phytologist*, 2000, **147**(1): 131-139.

[44] 郝龙飞, 王庆成, 刘婷岩, 等. 指数施肥对斑叶稠李苗木生物量分配、光合作用及根系形态的影响[J]. 林业科学, 2014, **50**(11): 175-181.

HAO L F, WANG Q C, LIU T Y, *et al.* Effect of exponential fertilization on biomass allocation, photosynthesis and root morphology of *Padus maackii* seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, **50**(11): 175-181.

[45] 安 慧, 上官周平. 光照强度和氮水平对白三叶幼苗生长与光合生理特性的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(11): 6 017-6 024.

AN H, SHANGGUAN Z P. Effects of light intensity and nitrogen application on the growth and photosynthetic characteristics of *Trifolium repens* L.[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(11): 6 017-6 024.

[46] HAVER D, SCHUCH U. Influence of root restriction and ethylene exposure on apical dominance of petunia (*Petunia x hybrida* Hort. Vilm.-Andr.) [J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, **35**(2): 187-196.

(编辑: 潘新社)