

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 12 期 Vol.33 No.12 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 12 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 森林低温霜冻灾害干扰研究综述 李秀芬,朱教君,王庆礼,等 (3563)
- 碱蓬属植物耐盐机理研究进展 张爱琴,庞秋颖,阎秀峰 (3575)

个体与基础生态

- 中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测 徐琳,陈效速,杜星 (3584)
- 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化 胡启鹏,郭志华,孙玲玲,等 (3594)
- 油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析 李明,王树香,高宝嘉 (3602)
- 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响 张蕊,王艺,金国庆,等 (3611)
- 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响 王若梦,董宽虎,何念鹏,等 (3622)
- 干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应 段爱国,张建国,何彩云,等 (3630)
- 生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响 黄杰勋,莫建民,李非里,等 (3639)
- 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应 吴芹,张光灿,裴斌,等 (3648)
- 冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系 张永平,张英华,黄琴,等 (3657)
- 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响 彭斌,李潘林,周楠,等 (3668)
- 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响 陶先萍,罗宏海,张亚黎,等 (3676)
- 光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响 王文林,王国祥,万寅婧,等 (3688)
- 植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定 徐亚军,赵龙飞,陈普,等 (3697)
- 不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择 肖云丽,印象初,刘同先 (3706)
- 性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响 曾宾宾,邵明勤,赖宏清,等 (3712)

种群、群落和生态系统

- 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价 袁菲,张星耀,梁军 (3722)
- 洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价 李建军,刘帅,张会儒,等 (3732)

景观、区域和全球生态

- 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应 徐宁,王晓春,张远东,等 (3742)
- 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 穆少杰,李建龙,周伟,等 (3752)
- 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响 侯明行,刘红玉,张华兵,等 (3765)
- 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征 周淑琴,荆耀栋,张青峰,等 (3774)
- 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化 杜荣荣,陈敬安,曾艳,等 (3783)

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应..... 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)

秦岭南北近地面水汽时空变化特征..... 蒋 冲,王 飞,喻小勇,等 (3805)

露天矿区景观生态风险空间分异..... 吴健生,乔 娜,彭 建,等 (3816)

基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较 孔 艳,江 洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析 潘 丹,应瑞瑶 (3837)

舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估..... 宋 科,赵 晟,蔡慧文,等 (3846)

不同基因型玉米间混作优势带型配置..... 赵亚丽,康 杰,刘天学,等 (3855)

气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响..... 陈 伟,熊 晶,陈 懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210191453

张蕊,王艺,金国庆,周志春,丰忠平.施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响.生态学报,2013,33(12):3611-3621.

Zhang R, Wang Y, Jin G Q, Zhou Z C, Feng Z P. Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3611-3621.

施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响

张蕊¹, 王艺¹, 金国庆¹, 周志春^{1,*}, 丰忠平²

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400; 2. 浙江省淳安县姥山林场, 淳安 311700)

摘要:以浙北、闽北和赣南 3 个木荷有代表性的种源作为试验材料,通过人工控制施氮来研究氮沉降对林地贫瘠土壤上木荷幼苗生长和氮磷效率的影响。实验分为 4 个处理组,分别人工喷施 NH_4NO_3 溶液 0、50、100 和 200 $\text{kg N hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。结果表明:氮沉降对木荷幼苗生长产生了不同程度的促进作用。木荷幼苗根系干物质重、总长、平均直径、根总表面积和总体积增加了 33%—73%,其中 $>0.5\text{mm}$ 直径的根系生长最为显著,根系呈粗壮舒张型。随氮水平的提高,氮磷吸收效率与根系总长、根系体积、根系平均直径和总表面积相关性增强。在中氮水平下,木荷幼苗根系氮吸收效率受 $>0.5\text{mm}$ 根长的作用显著,而磷吸收效率与 $\leq 0.5\text{mm}$, $0.5—1.0\text{mm}$ 和 $\geq 1.0\text{mm}$ 3 种直径根系根长均显著相关。木荷种源间差异显著,福建建瓯种源根系发达,氮磷的利用效率更高,低氮水平对其根系生长促进作用显著;浙江杭州种源在低氮水平下,地上部分生长促进作用显著,苗高和地径较对照分别增长 34% 和 26%,而根系生长发育迟缓,对氮素响应迟钝;低氮促进江西信丰种源整体增长,但随氮水平提高,地下部生长抑制加强。

关键词:木荷;种源;氮沉降;根系;生长发育

Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil

ZHANG Rui¹, WANG Yi¹, JIN Guoqing¹, ZHOU Zhichun^{1,*}, FENG Zhongping²

1 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China

2 Laoshan Forest Farm of Chun'an, Chun'an, 311700, China

Abstract: Nitrogen deposition is serious in southern China and it has massively altered plant growth and root formation. Thus, we choose *Schima superba*, which is a wide spread and most resistant plant in southern China, to evaluate its responses to elevated nitrogen (N) deposition and disclose the root growth and nitrogen and phosphorus use efficiency is, or is not, affected by N addition. The experiment was set up in the glass house from March to November in 2011. Dissolved NH_4NO_3 was sprayed on one-year-old seedlings of three geographically diverse provenances of *S. superba*, which grow in the container with the forest barren soil. The three provenances were Hangzhou of Zhejiang, Jian'ou of Fujian and Xinfeng of Jiangxi. Four treatments of 0, 50, 100 and 200 $\text{kg N hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ were arranged. After five month treatment, the plant materials were harvest. The mineral composition was determined after analyzing the root morphological and architectural parameters. The data were analyzed using SAS statistical program. The results indicated that *S. superba* responded significantly to N addition and exhibited positive affection. The root biomass, total root length, average root diameter, root surface area and volume were increased by 33%—73%. At the same time, the length of root $>0.5\text{mm}$ was increased most, and the root morphological changed into thicker and diastolic type. The correlation between nutrient absorption efficiency

基金项目:国家林业公益性行业专项项目(20110400107);国家科技支撑课题(2012BAD01B04);浙江省重点科技创新团队项目(2009R50035);浙江省农业新品种选育重大科技专项项目(2012C12908-6)

收稿日期:2012-10-29; 修订日期:2013-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zczhou_risf@163.com

(NAE, PAE) and root total length, root volume, average root diameter and root surface area were increased with N concentration. In N100, the NAE was significant correlated with length of root >0.5 mm, whereas PAE was significant correlation with the length of root ≤ 0.5 mm, $0.5-1.0$ mm and ≥ 1.0 mm, respectively. NAE was significantly affected the PAE ($r=0.8729$, $P<0.01$), at the same time, the NAE and PAE was significantly correlated with the biomass of *S. Superba* ($r_{\text{NAE}}=0.4572$, $P<0.05$; $r_{\text{PAE}}=0.4750$, $P<0.01$). And they were finally affected by the growth of *S. Superba*. There were significant differences among provenances. Jian'ou of Fujian provenance had stronger developed root system and highest nitrogen and phosphors use efficiency. The root length, average root diameter, root surface area and volume were increased by 54% under low-level N addition. Low-level N addition increased root growth of Jian'ou, whereas it had more effect on the height and stem base diameter of Hangzhou of Zhejiang provenance, which increased 34% and 26%, respectively. And low-level N addition greatly promoted above-ground and root growth of Xinfeng of Jiangxi provenances, the seedling height, SBD and root biomass were increased by 44%, 33% and 49%. However, high level N addition inhibited the root growth of Xinfeng provenance. PAE and PUE of Hangzhou provenances were higher under N100 and N200 treatment, but they were increased under N50 and N100 in Jianou and Xinfeng provenance. NUE was decreased when N addition increased to middle-level. *S. superba* responded positively to N addition. The difference of root growth and morphological responded to N suggest that N plays an important role on nutrient uptake. The seedling growth of *S. superba* is close related with soil nutrient availability and genotypes which is the adaptation of climate in provenance site.

Key Words: *Schima superba*; provenance; nitrogen deposition; root system; growth

近年来随着人类活动及工业污染的加剧,大气氮沉降成为人们关注的重大环境问题之一。目前我国无机氮的排放量已逐渐达到一个较高水平。遆超普指出,我国南方氮沉降量在 2007 年就已达到 $45 \text{ kg N hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上,比 1980 年增长了 2 倍多^[1]。研究指出,较低水平的氮素可以促进植株生长^[2-6],如膏桐(*Jatropha curcas*)^[7]、黑杨(*Populus nigra*)^[8]、长白落叶松(*Larix algensis*)^[9]、西南桦(*Betula alnoides*)^[10]和马褂木(*Liriodendron chinense*)^[11]等主要造林树种在低氮处理下其地径、苗高、干物质积累量均明显增加,地下部与地上部比率增大,当施氮量达到一定水平后,植株整体水平则趋于稳定后下降,说明高水平的氮素处理会对植株造成明显的抑制作用。氮沉降向土壤中输入了大量的氮素^[12-13],这类类似于人工施肥,造成土壤营养环境的改变,影响了植株根系的生长发育^[14-16]。对长白落叶松的研究表明,低水平氮素增加了细根的数量、较粗根(2—5mm)的长度、根表面积和体积,高氮处理下根系生长受抑^[9]。从根系发育角度研究氮沉降对林木生长的影响,了解植株对营养元素的吸收利用情况,充分发掘林木有效利用土壤有限养分的潜力意义重大。

木荷(*Schima superba*)是山茶科木荷属常绿阔叶大乔木,为亚热带地带性常绿阔叶林的主要建群种,也是我国南方主栽的生态防护树种和珍贵用材树种,造林成效好,优质速生,丰产性显著。本研究组自 2001 年来,开展了木荷的多目标育种,发现其存在丰富的种源和家系变异,具有较强的觅取利用斑块养分能力的特性,同时揭示了水分和磷素对木荷种源生长的影响,已初选出一批优良种源和家系^[17-20]。有研究认为适量的氮素处理会增加木荷幼苗生长量,促进净光合速率和水分利用效率,但却降低了根系在全株的分配比例等^[4-5,21]。本文拟通过人工控制施氮,研究不同地理种源木荷在氮素增多情况下的生长表现,了解幼苗根系生长发育和氮磷利用效率的变化,探讨氮素对木荷不同种源苗木根系生长发育的影响及机制,进一步阐明不同种源苗木对不同水平氮沉降的响应差异,为在大气 N 沉降环境背景下,选育营养高效利用的木荷速生优质新品种提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

我国南方土壤多为红壤和棕红壤,其养分含量较低,并呈现出纬向变异模式^[22]。同时,我国南方氮沉降丰富,据文献资料,2005 年浙江杭嘉湖地区氮沉降量约为 $30.9 \text{ kg N hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[23],江西鹰潭地区氮沉降量约为

$30.7 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[24],而大岗山地区氮沉降量高达 $57 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[25],由于工业生产和农业耕作的影响,氮沉降量大小具有地域差异。据统计,2007 年浙江、福建和江西三省的氮沉降平均水平分别为 32.7 、 27.8 和 $22.2 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[1]。因此,以浙江杭州、福建建瓯和江西信丰 3 个不同纬度的木荷代表性种源为试验材料,以林地贫瘠土壤为基质,开展不同施氮水平的盆栽试验。实验选用的盆栽基质取自浙江省淳安县姥山林场的酸性贫瘠红壤,其有机质含量为 6.68 g/kg ,全氮和全磷含量分别为 0.41 g/kg 和 0.35 g/kg ,水解氮、速效钾和有效磷含量分别为 46.35 、 91.11 和 5.49 mg/kg ,pH5.06。

1.2 试验设计

试验以全株喷施 NH_4NO_3 溶液来进行施氮处理。分为 4 个处理组,分别为 N0(对照 $0 \text{ kg N hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、N50(低氮, $50 \text{ kg N hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、N100(中氮, $100 \text{ kg N hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和 N200(高氮, $200 \text{ kg N hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。每处理 30 株,共计 360 株。选用上端内径 16cm,下端内径 13.5cm,高 18cm 的营养杯作为盆栽容器。每营养杯装土约 3.75 kg ,整个盆栽试验在浙江省淳安县姥山林场实验大棚内进行。木荷种源试验种子于 2011 年 3 月 7 日播种,5 月中旬,将生长整齐一致的芽苗移栽,每盆移栽 2 株芽苗,成活后保留 1 株,幼苗在充分供水条件下培养。从 2011 年 5 月下旬到 11 月上旬,以设计施氮量的 18 次均分后,每月月初和月中分 2 次向幼苗全株喷施 NH_4NO_3 ,其中 7—9 月补加 2 次直至收获。

1.3 试验采收及指标测定

试验于 2011 年 11 月上旬收获。每个处理选取 9 株生长正常的盆栽苗木,量测其苗高和地径,并用根系图象分析系统(WINRHIZO ProSTD1600⁺型,加拿大 REGENT 公司)测定根系总长、根系平均直径、根总表面积和根系总体积等根系参数。同时植株分根、茎、叶,经 105°C 杀青 1h 后 80°C 烘干至恒量,测定各部分的干物质质量。用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮-钼锑抗比色法和凯氏定氮法分别测定各部分磷、氮含量^[26-27]。

1.4 数据处理

以单株测定值为单元,利用 SAS 软件 ANOVA 程序进行性状方差分析,并用 DUNCAN 法进行多重比较,以检验种源、氮素及其互作效应的显著性。磷素吸收效率=各器官或整株磷素吸收量/各器官或整株;磷素利用效率=各器官或整株干物质积累量/各器官或整株的磷素吸收量;氮素吸收及利用效率同上。

2 结果与分析

2.1 施氮对木荷不同种源幼苗生长及干物质积累量影响

从施氮处理下木荷种源苗高和地径的生长结果看出(表 1),施氮对木荷苗木的生长具有极显著的促进作

表 1 施氮对木荷生长和根系参数的影响(平均值(标准偏差), $n=9$)

Table 1 Effects of N addition on seedling growth and root characters of *S. superba* (mean (SD), $n=9$)

性状 Trait	施氮处理 N application level				变异来源 Source of variation F		
	N0	N50	N100	N200	种源 Provenance	氮处理 Nitrogen	种源×氮处理 Provenance× Nitrogen
SH	9.88(4.62)b	12.51(5.51)a	13.24(5.28)a	11.95(4.76)a	2.72+	8.18**	2.73*
SBD	2.50(0.91)b	2.98(0.88)a	2.87(1.02)a	2.77(1.08)a	6.36**	4.74**	2.32*
DB	2.12(0.90)b	3.18(1.66)a	3.88(2.26)a	3.95(2.59)a	6.11**	5.43**	0.56
RDB	0.84(0.39)b	1.28(0.79)ab	1.45(0.86)a	1.55(1.16)a	3.57*	4.46*	0.57
TRL	9.52(4.23)b	11.41(3.65)ab	13.18(4.53)a	9.70(2.31)b	1.98	4.32**	2.60*
ARD	0.98(0.33)	1.09(0.50)	1.31(0.55)	1.02(0.37)	1.48	2.24+	2.78*
RSA	239.67(104.84)b	288.67(120.25)ab	358.81(161.63)a	259.23(86.48)b	2.77+	3.85*	2.21+
RV	4.93(2.41)b	5.95(3.45)ab	8.34(4.80)a	5.71(3.07)ab	2.31+	2.75*	1.54

SH: 苗高 Seedling height (cm); SBD: 地径 Stem base diameter (mm); DB: 干物质重 Dry biomass (g); RDB: 根重 Root dry biomass (g); TRL: 总根长 Total root length (m); ARD: 平均直径 Average root diameter (mm); RSA: 总表面积 Root surface area (cm^2); RV: 根体积 Root volume (cm^3); 种源、氮处理和种源×氮处理自由度分别为 2, 3 和 6; + $P<0.10$; * $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

用,其中苗高在中氮条件下达到最大值(较对照高34%),而地径在低氮条件下即达到最大值(较对照高19%),但苗高和地径在高氮条件下均呈现下降趋势。木荷幼苗干物质积累量在施氮条件下呈现增长趋势,且在中、高氮条件下达到最大,说明在贫瘠土壤环境下,施氮有效地促进了木荷苗木的生长。3个木荷种源幼苗生长对氮素表现出的敏感程度不同。如浙江杭州和江西信丰种源在低氮水平下表现出显著的生长势,其中苗高较对照分别增长了34%和44%,地径分别增长了26%和33%,这种生长优势显著高于同水平氮量下福建建瓯种源,同时改变了3个种源原有的生长规律表现,即在低氮处理下,处于木荷中心产区,且具有高生长速率的福建建瓯种源的生长下降,而北部浙江杭州和南部江西信丰种源生长提高。福建建瓯种源则在中、高氮水平下表现出显著的生长优势,苗高和地径分别较对照增长了46%、19%和27%、15%,说明中心产区的福建建瓯种源地上部生长对低水平氮添加反应敏感性一般。随着氮水平的提高,3个种源又恢复为中心产区高而南北部种源低的生长规律。

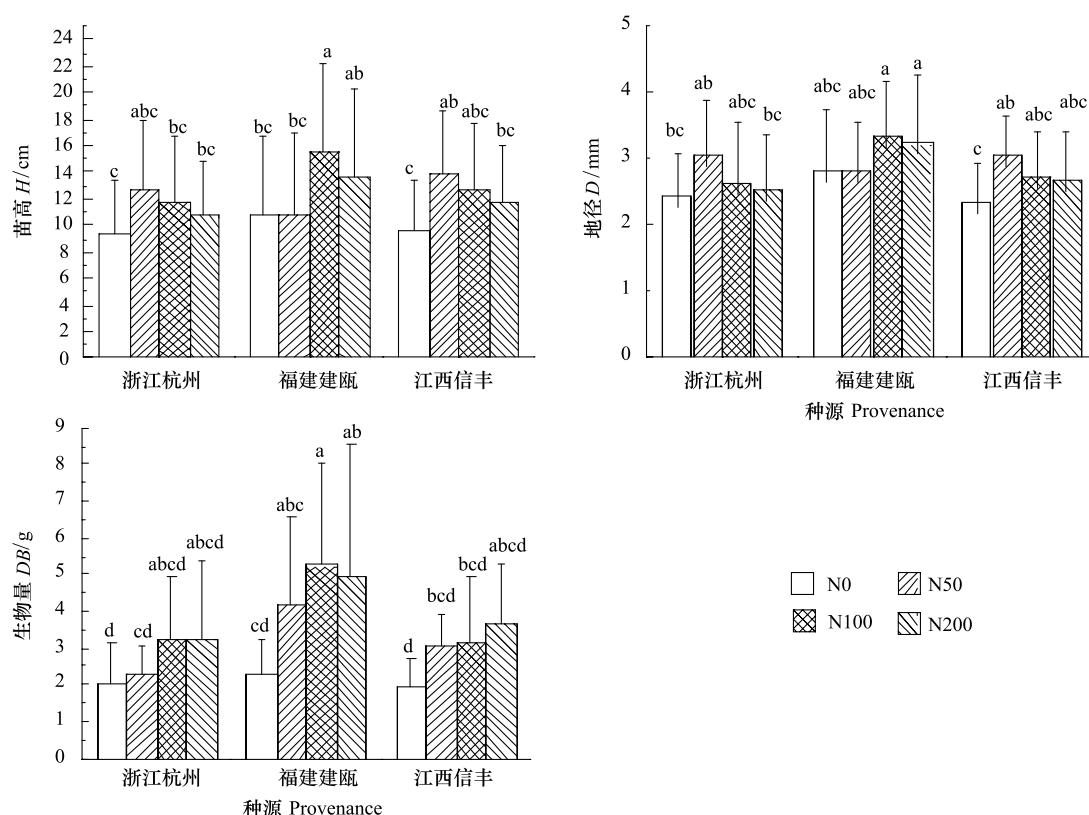


图1 施氮对3个木荷种源苗高、地径和生物量的影响(平均值(标准偏差), $n=9$)

Fig. 1 Effects of nitrogen addition on seedling height (H), stem base diameter (D) and dry biomass (DB) of three provenances of *S. superba* (mean (SD), $n=9$)

A: 浙江杭州 Hangzhou of Zhejiang; B: 福建建瓯 Jian'ou of Fujian; C: 江西信丰 Xinfeng of Jiangxi. 不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

2.2 施氮对不同种源木荷苗木根系生长发育影响

木荷根系发达,较多的侧根数量满足了其在贫瘠土壤中的营养利用。氮添加不仅影响了木荷地上部的生长,同时也改变其根系的生长发育。在施氮处理下,随着氮水平的提高,木荷幼苗根系干物质质量呈现上升趋势,并在中、高氮水平下达到最高,根系总长、根系平均直径、根总表面积和根总体积则分别在中氮水平下最大(表1),其中 $>0.5\text{mm}$ 直径的根系生长最为显著,说明在贫瘠土壤环境下,增加的氮素刺激了根系的生长,尤其促进了侧根的增粗生长,根系体积增大,根系粗壮舒张。随着氮水平的升高,高氮沉降则抑制了木荷幼苗根系生长。

在贫瘠土壤环境下,3 个种源木荷幼苗根系生长对施氮处理的敏感程度不同(图 2,图 3,表 2)。北部浙江杭州种源对中、高氮反应强烈,根系干物质质量、总长、平均直径、总表面积和总体积较对照增长了 3%—75%,平均增长了 33%,0.5—1.0 mm 和 >1.0 mm 直径的根长平均分别增加了 16% 和 43%,而福建建瓯和江西信丰种源则在中、低氮水平下根系生长反应就已较为突出,中部福建建瓯种源增长幅度较大,根系干物质质量增长平均为 2.13 倍,4 个根系参数增长量平均在 54%,0.5—1.0 mm 和 >1.0 mm 直径的根长平均分别增加了 55% 和 63%。南部江西信丰种源根系干物质质量增长了 49%,4 个根系参数平均增长量仅有 4%,>1.0 mm 直径的根系较对照增加 7% 以上。说明氮素对中南部种源根系生长作用明显,尤其中部福建建瓯种源根系生长发育潜力更大,而氮素对北部种源木荷根系生长作用较弱。因此,不同种源木荷幼苗根系生长对氮素反应不同,造成了其在自然环境中适应性的改变,这有可能最终改变不同木荷种源苗木对外界环境的适应能力,导致种源之间生长差异,故而在育种时要充分考虑氮素对其根系生长的影响。

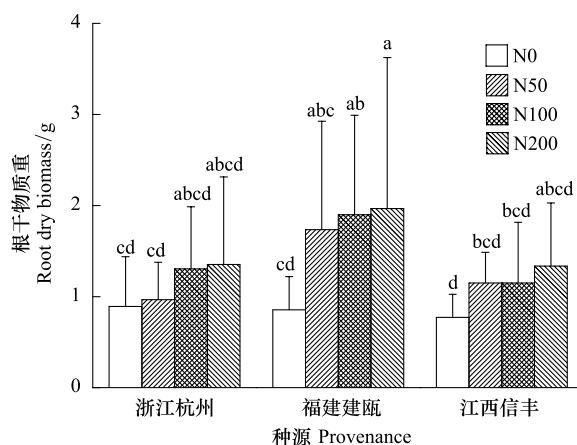


图 2 施氮对 3 个木荷种源苗木根系干物质质量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen addition on root dry biomass of three provenances of *S. superba*

不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

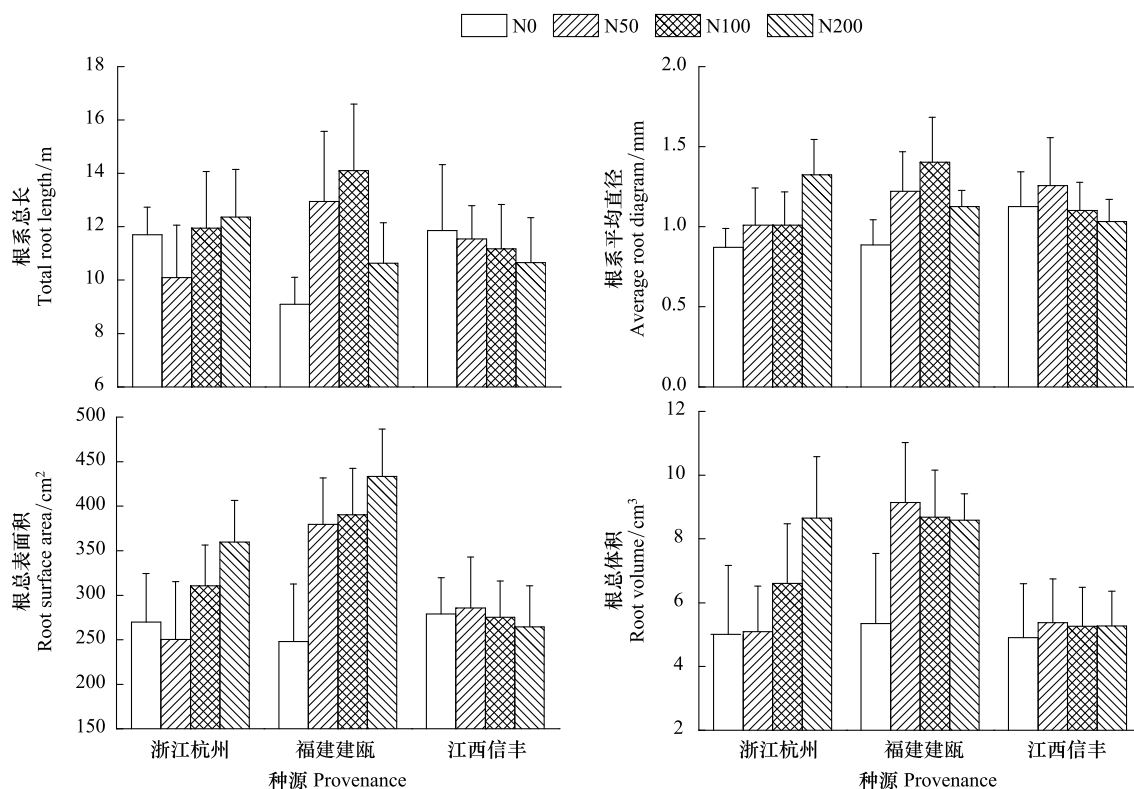


图 3 施氮对 3 个木荷种源苗木根系生长发育的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen addition on seedling root growth of three provenances of *S. superba*

2.3 施氮对木荷不同种源苗木氮磷效率的影响

施氮不仅改变了木荷幼苗根系的形态特征,而且影响了根系的氮磷营养的吸收和利用效率,且在种源间

差异显著(表3)。中、低氮处理增加了木荷幼苗的氮磷吸收效率和利用效率,但高氮水平下,磷素吸收效率开始下降,氮素利用效率则低于对照,说明施氮促进了木荷幼苗对贫瘠低磷土壤中磷素的吸收利用,同时由于土壤氮素的提高,其对氮素营养的吸收利用也开始增强。种源间变异规律和根系生长发育相似,浙江杭州种源在中、高氮水平下磷素吸收利用效率较高,平均增长23%以上,低氮处理降低了杭州种源磷素吸收效率,但磷素利用效率有所提高;中、低氮处理对福建建瓯和江西信丰种源磷素吸收和利用效率促进作用显著,但氮利用效率在中氮水平时则开始降低。

表2 施氮处理对3个木荷种源苗木不同径级根长的影响(平均值(标准偏差), $n=9$)

Table 2 Root length (m/plant) per diameter class of three provenances of *S. superba* in Nitrogen addition experiment (mean (SD), $n=9$)

种源 Provenance	根系分级 Root diameter class/mm	氮沉降处理 N application level				变异来源 Source of variation F		
		N0	N50	N100	N200	种源 Provenance	氮处理 Nitrogen	种源×氮处理 Provenance× Nitrogen
浙江杭州	≤0.5	7.28(1.18) a	6.14(0.95) b	6.92(1.06) a	6.82(0.98) ab	1.02	3.13 *	2.26 *
	0.5—1.0	2.95(0.20) b	2.73(0.16) b	3.42(0.18) a	3.45(0.17) a	1.70	4.22 **	2.39 *
	≥1.0	1.34(0.18) b	1.25(0.11) b	1.62(0.15) ab	2.22 (0.13) a	2.98 *	3.08 *	1.46
福建建瓯	≤0.5	5.28(1.19) b	7.01(1.03) b	7.90(1.16) a	6.62(0.87) b			
	0.5—1.0	2.43(0.29) b	3.68(0.19) ab	3.84(0.26) a	2.55(0.11) b			
	≥1.0	1.47(0.21) b	2.37(0.16) ab	2.41(0.17) a	1.78(0.12) b			
江西信丰	≤0.5	7.53(1.01) a	6.84(1.14) b	6.81(1.05) b	6.78(1.07) b			
	0.5—1.0	2.97(0.16) b	3.18(0.21) a	3.09(0.17) b	3.01(0.19) b			
	≥1.0	1.29(0.11) b	1.46(0.15) a	1.39(0.11) b	1.24(0.12) b			

种源、氮处理和种源×氮处理自由度分别为2, 3和6; + $P<0.10$; * $P<0.05$; ** $P<0.01$; 不同小写字母表示在0.05水平上差异显著

表3 施氮处理中3个木荷种源苗木的氮磷效率

Table 3 Nitrogen and phosphorus efficiency of three provenance of *S. superba* in Nitrogen addition experiment

种源 Provenance	性状 Trait	氮沉降处理 N application level				变异来源 Source of variation F		
		N0	N50	N100	N200	种源 Provenance	氮处理 Nitrogen	种源×氮处理 Provenance× Nitrogen
浙江杭州	PAE	2.32(0.68)	1.74(0.48)	3.04(0.91)	2.68(0.79)	7.47 **	1.68	1.66
	NAE	20.05(5.54) b	21.58(4.88) b	30.80(9.83) ab	37.28(9.06) a	8.34 **	8.80 **	1.56
	PUE	1.11(0.17) b	1.58(0.14) a	1.29(0.23) b	1.59(0.20) a	3.58 *	13.19 **	4.18 **
	NUE	0.13(0.01) a	0.14(0.02) a	0.13(0.02) a	0.11(0.01) b	2.78+	4.79 **	1.47
福建建瓯	PAE	2.35(0.94)	3.30(1.05)	4.24(1.29)	4.43(1.53)			
	NAE	21.31(5.76) b	38.13(8.24) ab	52.87(11.71) a	54.76(13.47) a			
	PUE	1.27(0.17)	1.65(0.32)	1.68(0.35)	1.51(0.36)			
	NUE	0.13(0.02)	0.14(0.03)	0.13(0.02)	0.11(0.02)			
江西信丰	PAE	2.13(0.82)	2.68(0.90)	2.42(1.02)	1.58(0.96)			
	NAE	21.28(6.23) b	23.28(6.68) b	30.15(7.36) ab	39.13(7.14) a			
	PUE	1.14(0.25) b	1.36(0.29) b	1.95(0.44) a	1.92(0.35) a			
	NUE	0.11(0.02)	0.12(0.02)	0.13(0.02)	0.11(0.01)			

PAE: 磷素吸收效率 Phosphorus absorption efficiency (mg/株); NAE: 氮素吸收效率 Nitrogen absorption efficiency (mg/株); PUE: 磷素利用效率 Phosphorus utilization efficiency (g/mg); NUE: 氮素利用效率 Nitrogen utilization efficiency (g/mg); 不同小写字母表示在0.05水平上差异显著; 种源、氮素和种源×氮素自由度分别为2, 3和6; + $P<0.10$; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

表 4 结果说明,木荷幼苗根系氮磷吸收利用效率在不同氮沉降水平下受根系结构参数影响显著。随氮水平的提高,PAE 和 NAE 与根系总长、根系体积、根系平均直径和总表面积相关性增强,在中氮水平下相关性达极显著水平。在中氮水平下,木荷幼苗根系 NAE 受 $>0.5\text{ mm}$ 根长的作用显著,而 PAE 则与 3 种不同直径根系根长均显著相关,说明木荷根系对氮磷吸收的敏感部位不尽相同,这也可能和贫瘠土壤中磷素缺乏有关。氮素吸收效率极显著影响了磷素吸收效率,同时氮磷素吸收效率又和木荷生物量呈显著正相关关系,从而最终导致木荷植株在生长上的差异。

3 讨论

本研究的结果表明,在林地贫瘠土壤条件下,施氮对木荷幼苗生长产生了不同程度的促进作用,类似于其他研究结果,说明低水平的氮沉降有利于木荷幼苗的生长^[2-3,6,20],但随着氮水平提高,高氮作用下木荷幼苗生长速度减缓,抑制作用开始显现。由于实验土壤较为瘠薄,在 $50\text{ kg N hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的氮水平时,木荷幼苗就已表现出明显的生长势,而地下部根系生长发育最大值仍出现在 $100\text{ kg N hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的中氮水平,这说明在贫瘠土壤环境下,增加的氮素不仅改变了土壤的营养环境,而且喷施于叶片上的氮素可被木荷幼苗直接吸收利用,地上部首先受到影响且第一时间做出反应,由于氮素与光合作用密切相关,氮素的增加促进了叶片生长,叶绿素增多,光合作用增强,从而增加了生物量积累^[28],之后营养物质供给到根部,促进根系生长,造成根系对氮素反应相对滞后。

木荷适应性较强,其发达的须侧根保障了其在多种立地环境条件下生长,在养分竞争中具有一定的优势^[29]。本实验结果证实,氮沉降增加了木荷根系干物质量,根系总长度、平均直径、总表面积和体积亦有所增加,木荷幼苗根系更为粗壮舒张,且较粗根数量开始增多,密度加大,相关分析证实这种根系结构和木荷幼苗的氮磷吸收效率呈显著正相关,即这种根系结构更有利于对土壤营养元素的吸收。同时,氮磷吸收效率的提高促进了木荷幼苗干物质量的积累,并最终影响木荷生长。有研究认为,氮素可作为根系发育的局部信号,直接刺激和诱导侧根的发生和生长,通过增加根尖区细胞数量,刺激侧根伸长,同时氮素的增加会造成植株细根生物量和根尖数的减少^[30-34]。同时,叶片中高浓度的 NO_3^- 亦可对侧根生长发育进行调控^[35]。但土壤氮饱和后过量的氮素会对植株造成伤害,Zhang 等认为当外界 NO_3^- 浓度超过 10 mmol/L 时,植物侧根发育受抑,地上部生长发育阻滞^[31]。从土壤营养状况来看,该实验土壤基质取自森林中的贫瘠土壤,氮磷素含量较低,施氮后补充了土壤氮素养分,使得土壤 N/P 比率升高。研究显示,植物体内 N/P 比具有一定的范围,且该值和土壤 N、P 水平相关,具有指示植物是否受到营养限制的作用,一般认为该值 <14 时,植物受到氮素限制, >16 时受到磷素限制^[36-37]。施氮处理后,木荷叶片在中氮水平时 N/P 约为 16.0,而高氮处理下则约为 17.7,显然,随着施氮水平的提高,木荷生长更多的受到磷素的限制。植物为了保持和土壤相同水平的 N/P 比,因而调节代谢机制,降低了磷素的吸收,增加氮素吸收,叶片营养缺乏导致植物光合、糖代谢、碳水化合物库源分配产生变化,碳素更多的向地下部分分配,导致了根部生物量的提高^[38-39]。因此,不同水平氮沉降对木荷幼苗生长发育的影响,关键在于植株生长土壤的营养状况。

氮沉降下,木荷不同种源幼苗苗高、地径、干物质量、根系参数和氮磷吸收利用效率皆存在显著的种源差异,参试的 3 个种源分别来自浙北、闽北和赣南,分属木荷不同产区,具有较大的纬度差异。试验结果表明,木荷北部产区的杭州种源生长在整体上对施氮反应敏感,施氮初期,该种源地上部生长即已表现出优势,而地下根系生长缓慢,随着施氮水平的提高,地上部生长下降,而根系开始加速生长;中心产区的福建建瓯种源,在低水平氮沉降时根系生长旺盛,在氮水平达到一定程度后,地上部才表现出旺盛的生长势,生长表现相对滞后;南部产区的江西信丰种源地上部表现和浙江杭州种源相似,但地下部根系始终处于缓慢或抑制生长状态。木荷种源试验结果认为,福建建瓯属木荷中心产区,该区域气候适宜,水热资源丰富,立地条件优良,长期适应的结果致使福建建瓯木荷种源生长迅速,生物积累量大^[17,40]。该区域范围的马尾松(*Pinus massoniana*)^[41]和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)^[42]种源等亦有类似结果。这种长期适宜环境因子作用下形成的速生基因型,对低水平氮沉降的生长反应较小,只有在氮水平达到一定范围后,其体内 N、P 养分平衡发生改变,植株会根据

表 4 氮磷效率和氮沉降水平、根系参数等的相关分析

Table 4 The correlation analysis between Nitrogen and phosphorus efficiency and N deposition level and root growth traits												
	PAE	NAE	PUE	NUE	DB	L	D	S	V	≤0.5mm 根长	0.5—1.0mm 根长	≥1.0mm 根长
N0	PAE	1.0000	0.8704**	-0.5686**	0.2806	0.1932	0.1796	0.2663	0.3146	0.0415	0.3353+	0.3373+
	NAE	1.0000		-0.4588*	0.4090*	0.3614+	0.2153	0.3203	0.3203	0.2706	0.1471	0.1767
	PUE		1.0000	0.4462*	0.1399	-0.0417	-0.3820*	-0.1534	-0.2377	0.2324	0.1575	0.2758
	NUE			1.0000	-0.2237	-0.3795*	-0.6623**	-0.4503*	-0.4557*	-0.2529	-0.2419	-0.0880
N50	PAE	1.0000	0.5958**	-0.2390	0.6033**	0.3381+	0.3363+	0.4908**	0.5411**	0.3603+	0.4609*	0.4167*
	NAE	1.0000		0.1337	0.4409*	0.2821	0.3075*	0.3881*	0.3801*	0.1586	0.2642	0.3428+
	PUE		1.0000	0.6750**	0.0255	-0.0301	-0.0929	-0.0064	0.0123	-0.0430	-0.0250	0.0564
	NUE			1.0000	0.1875	0.3721*	0.1611	0.4353*	0.4450*	0.0847	0.1228	0.1171
N100	PAE	1.0000	0.8729**	-0.0894	0.4750**	0.5596**	0.5466**	0.5427**	0.4953**	0.4164*	0.4430*	0.4949**
	NAE	1.0000		-0.1041	0.4572*	0.7008**	0.6277**	0.6654**	0.5975**	0.3674+	0.3763*	0.4150*
	PUE		1.0000	0.2168	0.1274	0.1921	0.0920	0.1805	0.1675	-0.0287	-0.0334	0.0211
	NUE			1.0000	0.0891	0.3803*	0.2857	0.4576*	0.4682**	0.1323	0.1334	0.0535
N200	PAE	1.0000	0.8636**	-0.5399**	0.1348	-0.3141	-0.1701	-0.0766	0.0632	-0.1470	-0.2680	0.0058
	NAE	1.0000		-0.4650**	0.1359	-0.2993	-0.0628	-0.0866	0.0453	-0.1911	-0.2642	-0.0811
	PUE		1.0000	0.4956**	-0.0383	0.2430	0.1074	0.2333	0.1824	-0.1748	-0.1099	-0.1666
	NUE			1.0000	-0.0969	0.1203	0.1539	0.4816**	0.5855**	-0.0919	-0.1021	-0.0374

PAE: 磷素吸收效率 Phosphorus absorption efficiency (mg/株); NAE: 氮素吸收效率 Nitrogen absorption efficiency (mg/株); PUE: 磷素利用效率 Phosphorus utilization efficiency (g/mg); NUE: 氮素利用效率 Nitrogen utilization efficiency (g/mg); DB: 干物质重 Dry biomass (g); L: 根系总长 Total root length (m); D: 根系平均直径 Average root diameter (mm); S: 根系表面积 Root surface area (cm²); V: 根总体积 Root volume (cm³); + P<0.10; * P<0.05; ** P<0.01

机体需求吸收利用额外的氮磷营养,最终导致加速或抑制生长发育;相反,浙江杭州和江西信丰种源分别位于非中心产区 and 次中心产区,生长环境因子相对较差,适度的营养刺激则会表现出较为明显的生长势,但整体生长表现仍低于中心产区种源。因此,现阶段对木荷的育种工作要充分考虑到氮沉降的影响,才能更好地适应环境改变。

氮素和磷素是植物生长所需大量元素,对植物的生长发育影响显著,施肥即是人们通过提高氮素和磷素在土壤中的配比含量来达到增产的目的,但事实证明过度施肥是造成减产的原因之一。本实验中模拟大气氮沉降对植物生长的促进效应可获得更多可利用的优良种源,达到速生增产的目的,但是长期的氮沉降环境下,林木是否依然会保持旺盛的生长,积累更多的干物质量仍需进行长期观测研究,以进一步更客观的揭示大气氮沉降下,氮素和磷素互作对木荷种源苗木生长发育的作用机理。

References:

- [1] Ti C P, Yan X Y. Estimation of atmospheric nitrogen wet deposition in China mainland from based on N emission data. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29: 1606-1611.
- [2] Nakaji T, Fukami M, Dokiya Y, Izuta T. Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutritient status of *Cryptomeria japonica* and *Pinus densiflora* seedlings. *Trees*, 2001, 15: 4533-461.
- [3] Nakaji T, Takenaga S, Kuroha M, Izuta T. Photosynthetic response of *Pinus densiflora* seedling to high nitrogen load. *Environmental Sciences*, 2002, 9: 269-282.
- [4] Li D J, Mo J M, Fang Y T, Li Z A. Effects of simulated nitrogen deposition on biomass production and allocation in *Shima superba* and *Cryptocarya concinna* seedlings in subtropical China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29: 543-549.
- [5] Mo J M, Li D J, Gundersen P. Seedling growth response of two tropical tree species to nitrogen deposition in southern China. *European Journal of Forest Research*, 2008, 127: 275-283.
- [6] Wu Q, Ding J, Yan H, Zhang S R, Fang T, Ma K P. Effects of simulated precipitation and nitrogen addition on seedling growth and biomass in five tree species in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35: 256-267.
- [7] Peng M J, Lang N J, Wu T, He L P, Zheng K, Xiang Z Y, Kong J J, Yuan R L. Growth response of *Jatropha curcas* seedlings to different levels of nitrogen supply. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25: 97-100.
- [8] Liu X H, Ding C J, Zhang W X, Li W W, Huang Q J, Su X H. Study on difference and primarily mechanism of nitrogen use efficiency (NUE) in *Populus nigra* seedlings genotypes. *Forest Research*, 2010, 23: 368-374.
- [9] Jiang L N, Wei H X, Liu Y, Cheng C Y, Ma L Y. Relationships between root morphological plasticity and heterogeneous N for *Larix algensis* seedlings. *Journal of northeast forestry university*, 2010, 38: 24-27.
- [10] Chen L, Zeng J, Xu D P, Zhao Z G, Guo J J, Lin K Q, Sha E. Effects of exponential nitrogen loading on growth and foliar nutrient status of *Betula alnoides* seedlings. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46: 35-40.
- [11] Fan R H, Yang S P, Zhou Z C, Jin G Q. Effect of nitrogen on the seedling growth of *Liriodendron* Chinese families. *Forest research*, 2009, 22 (1): 85-90.
- [12] Holland E A, Braswell B H, Sulzman J. Nitrogen Deposition Onto The United States And Western Europe: Synthesis Of Observations And Models. *Ecological Applications*, 2004, 15(1): 38-57.
- [13] Pearson J, Stewart G R. The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants. *New Phytologist*, 1993, 125: 283-305
- [14] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world:200 years of change. *Ambio*, 2002, 31: 64-71.
- [15] Linkohr B I, Williamson L C, Fitter A H, Leyser H M. Nitrate and phosphate availability and distribution have different effects on root system architecture of *Arabidopsis*. *Plant Journal*, 2002, 29: 751-760.
- [16] Desnos T. Root branching responses to phosphate and nitrate. *Plant Biology*, 2008, 11: 82-87.
- [17] Zhou Z C, Fan H H, Jin G Q, Wang Y S, Chen Y L, Rao L B. Geographic Genetic Variation and Preliminary Selection of Superior Provenance in *Schima superba*. *Forest Research*, 2006, 19: 718-724.
- [18] Lin L, Zhou Z C. Effects of soil moisture condition and phosphorus supply on the seedlings growth and phosphorus efficiency of *Schima superba* provenances. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009a, 20: 2617-2623.
- [19] Lin L, Zhou Z C, Fan H H, Jin G Q, Chen Y L, Hong G M. Provenance difference in stable carbon isotope discrimination of *Schima superba*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009b, 20: 741-746.
- [20] Lin L, Zhou Z C, Fan H H, Jin G Q, Feng J G, Chen L Y, Wang Y S. Inheritance and Variation of Seedling Growth Traits of Open-pollinated

- Families from Plus-tree in *Schima superba*. Forest Research, 2009, 22: 155-160.
- [21] Li D J, Mo J M, Fang Y T, Cai X A, Xue J H, Xu G L. Effects of simulated nitrogen deposition on growth and photosynthesis of *Schima superba*, *Castanopsis chinensis* and *Cryptocarya concinna* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24: 876-882.
- [22] Lu R K. General status of nutrients (N, P, K) in soils of China. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(3): 280-286.
- [23] Chen Y, Tang X, Yang M S, Wu C Y, Wang J Y. Atmospheric N wet deposition in Hangzhou region under rice-wheat-vegetable cropping system. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6102-6109.
- [24] Wang T J, Liu Q, Zhao H, Zhou J, Fan J L. Atmospheric nitrogen deposition in agroecosystem in red soil region of Jiangxi province. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 280-287.
- [25] Ma X H. The ion elution effect of the rainwater in *Pinus massaniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantation. Acta Ecologica Sinica, 1989, 9(1): 15-20.
- [26] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen-total. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR, eds. *Methods of soil analysis*. Part 2: chemical and microbial properties, Agronomy Monograph 9. Agronomy Society of America, Madison, 1982, 595-624.
- [27] Anderson J M, Ingram J S I. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods. 2th eds. CAB International, Wallingford press, 1993.
- [28] Lu X K, Mo J M, Li D J, Zhang W, Fang Y T. Effects of simulated N deposition on the photosynthetic and physiologic characteristics of dominant understory plants in Dinghushan mountain of subtropical China. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29: 1-9.
- [29] Ma X H, Zhou Z C, Jin G Q, Zhang Y. Effects of competition on foraging behavior of *Pinus massoniana* and *Schima superba* in a heterogeneous nutrient environment. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33: 81-88.
- [30] Persson H, Ahlström K, Clemensson A L. Nitrogen addition and removal at Gårdsjön-effects on fine-root growth and fine-root chemistry. Forest Ecology and Management, 1998, 101: 199-206.
- [31] Zhang H M, Jennings A, Barlow P W, Forde B G. Dual pathways for regulation of root branching by nitrate. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 1999, 96: 6529-6534.
- [32] Sas L, Rengel Z, Tang C X. The effect of nitrogen nutrition on cluster root formation and proton extrusion by *Lupinus albus*. Annals of Botany, 2002, 89: 435-442.
- [33] Liu P W, Ivanov I I, Filleur S, Gan Y, Remans T, Forde B G. Nitrogen regulation of root branching. Annals of Botany, 2006, 97: 875-881.
- [34] Remans T, Nacry P, Pervent M, Girin T, Tillard P, Lepetit M, Gojon A. A central role for the nitrate transporter NRT2.1 in the integrated morphological and physiological responses of the root system to nitrogen limitation in Arabidopsis. Plant physiology, 2006, 140: 909-921.
- [35] Magaña R H, Adamowicz S, Pagès L. Diel changes in nitrogen and carbon resource status and use for growth in young plants of tomato (*Solanum lycopersicum*). Annals of Botany, 2009, 103: 1025-1037.
- [36] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 1441-1450.
- [37] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168: 377-385.
- [38] Hermans C, Hammond J P, White P J, Verbruggen N. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation?. Trends in Plant Science, 2006, 11: 610-617.
- [39] Marschner P. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3th edn. Academic Press, 2012.
- [40] Wang X H, Chen L Y, Ma L Z, Fan H H, Ye S W, Zhou Z C. Geographical provenance variation of growth and wood basic density of 7-year-old *Schima superba* and its provenance selection. Forest Research, 2011, 24(3): 307-313.
- [41] Liu Q H, Jin G Q, Zhang R, Chu D Y, Qin G F, Zhou Z C. Provenance variation in growth, stem-form and wood density of masson pine at 24-year-old and the provenance division. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45: 55-61.
- [42] Sun C Z, Xie G N, Li P. Variations of wood properties and characteristics and a tentative selection for structural timbers of *Cunninghamia lanceolata* provenances. Scientia Silvae Sinicae, 1993, 29: 429-436.

参考文献:

- [1] 逄超普, 颜晓元. 基于氮排放数据的中国大陆大气氮素湿沉降量估算. 农业环境科学学报, 2010, 29: 1606-1611.
- [4] 李德军, 莫江明, 方运霆, 李志安. 模拟氮沉降对亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响. 植物生态学报, 2005, 29(4): 543-549.
- [6] 吴茜, 丁佳, 闫慧, 张守仁, 方腾, 马克平. 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. 植物生态学报, 2011, 35: 256 - 267.
- [7] 彭明俊, 郎南军, 吴涛, 和丽萍, 郑科, 向正勇, 孔继君, 袁瑞玲. 不同供氮水平对青桐幼苗生长的影响. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 97-100.

- [8] 刘希华,丁昌俊,张伟溪,李文文,黄秦军,苏晓华. 不同基因型欧洲黑杨幼苗氮素利用效率差异及其机理初探. 林业科学研究,2010,23(3): 368-374.
- [9] 江俐妮,魏红旭,刘勇,徐程扬,马履一. 长白落叶松播种苗根系形态可塑性与氮素空间异质性关系. 东北林业大学学报,2010,38(1): 24-27.
- [10] 陈琳,曾杰,徐大平,赵志刚,郭俊杰,林开勤,沙二. 氮素营养对西南桦幼苗生长及叶片养分状况的影响. 林业科学,2010,46(5): 35-40.
- [11] 樊瑞怀,杨水平,周志春,金国庆. 氮素营养对马褂木家系苗木生长效应分析. 林业科学研究,2009,22(1): 85-90.
- [17] 周志春,范辉华,金国庆,王月生,陈奕良,饶龙兵. 木荷地理遗传变异和优良种源初选. 林业科学研究,2006,19, 718-724.
- [18] 林磊,周志春,范辉华,金国庆,陈奕良,洪桂木. 木荷稳定碳同位素分辨率的种源差异. 应用生态学报,2009,20(4): 741-746.
- [19] 林磊,周志春. 水分和磷素对木荷不同种源苗木生长和磷效率的影响. 应用生态学报,2009,20(11): 2617-2623.
- [20] 林磊,周志春,范辉华,金国庆,冯建国,陈柳英,王月生. 木荷优树子代苗期生长遗传和变异研究. 林业科学研究,2009,22, 155-160.
- [21] 李德军,莫江明,方运霆,蔡锡安,薛璟花,徐国良. 模拟氮沉降对三种亚热带树苗生长和光合作用的影响. 生态学报,2004,24(5): 876-882.
- [22] 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本状况. 土壤学报,1989,26(3): 280-286.
- [23] 陈义,唐旭,杨生茂,吴春艳,王家玉. 杭州稻麦菜轮作地区大气氮湿沉降. 生态学报,2009,29(11): 6102-6109.
- [24] 王体键,刘倩,赵恒,周静,樊建凌. 江西红壤地区农田生态系统大气氮沉降通量的研究. 土壤学报,2008,45(2): 280-287.
- [25] 马雪华. 在杉木林和马尾松林中与水的养分淋溶作用. 生态学报,1989,9(1): 15-20.
- [28] 鲁显楷,莫江明,李德军,张伟,方运霆. 鼎湖山主要林下层植物光合生理特性对模拟氮沉降的响应. 北京林业大学学报,2007,29, 1-9.
- [29] 马雪红,周志春,金国庆,张一. 竞争对马尾松和木荷觅取异质分布养分行为的影响. 植物生态学报,2009,33(1): 81-88.
- [40] 王秀花,陈柳英,马丽珍,范辉华,叶穗文,周志春. 7 年生木荷生长和木材基本密度地理遗传变异及种源选择. 林业科学研究,2011,24(3): 307-313.
- [41] 刘青华,金国庆,张蕊,储德裕,秦国峰,周志春. 24 年生马尾松生长、形质和木材基本密度的种源变异与种源区划. 林业科学,2009, 45: 55-61.
- [42] 孙成志,谢国恩,李萍. 杉木地理种源材性变异及建筑材优良种源评估. 林业科学,1993,29: 429-436.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research on the disturbance of frost damage to forests LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)
- Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)
- Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)
- Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs
habitat ecological factors LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)
- Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)
- Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)
- Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha
River DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)
- Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)
- Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)
- The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)
- Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)
- Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip
irrigation TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)
- The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)
- Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi*
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)
- Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)
- The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)
- Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng
..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land
..... ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P.
..... DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city
..... LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains
..... JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis
..... KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan
..... SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes
..... ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves
..... CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of
Sha River, Chengdu ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吴文良

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 12 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元