

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

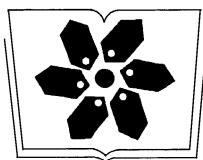
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

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 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

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

DOI: 10.5846/stxb201203040288

王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 王军辉, 何茜, 苏艳, 陈博, 马建伟, 董菊兰. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7452-7462.

Wang L P, Yan Z Y, Li J Y, Wang J H, He Q, Su Y, Chen B, Ma J W, Dong J L. Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7452-7462.

指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响

王力朋¹, 晏紫伊¹, 李吉跃^{1,*}, 王军辉², 何茜¹, 苏艳¹,
陈博¹, 马建伟³, 董菊兰³

(1. 华南农业大学林学院, 广州 510642; 2. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

3. 小陇山林业科学研究所, 天水 741022)

摘要:为探求楸树不同无性系生物量分配和根系形态的差异, 2011 年 3—8 月在甘肃省天水市小陇山林科所, 以 2 年生楸树无性系 1-4、7080 和 015-1 组培苗为试验材料, 设置了 CK、6、10、14 g 尿素/株 4 个处理, 研究指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响。结果表明: (1) 同一无性系中, 10 g 尿素/株的根、茎、叶生物量及总生物量、根长、根表面积、根体积和根平均直径均高于其它处理。无性系 015-1 的生物量和根系形态参数整体上高于无性系 1-4 和 7080。无性系 015-1 在 10 g 尿素/株的根、茎、叶生物量及总生物量分别为 89.44 g、61.30 g、79.97 g、230.71 g, 是 CK 的 1.48、1.52、2.09、1.66 倍; 根长、根表面积和根体积为 22667 cm、6260 cm²、578.14 cm³, 是 CK 的 1.94、1.54、2.43 倍。(2) 指数施肥和无性系的遗传差异明显影响楸树不同无性系生物量的分配格局。适量施氮明显促进 3 个楸树无性系生物量的积累, 而氮素缺乏或过量均不利于生物量的积累。8 月同一无性系的根冠比均随施氮量的增加而降低; 同一处理下无性系 7080 的根冠比高于无性系 1-4 和 015-1。无性系 1-4 和 7080 的生物量主要向叶和茎分配, 而无性系 015-1 主要向叶分配。(3) 指数施肥在 6 月和 7 月主要促进细根根长和根表面积的增加; 指数施肥在 8 月主要促进细根、中等根和粗根体积的急剧增加, 分别比 7 月高达 36.88%、124.96%、154.79%。这利于根系在中后期吸收更多养分, 从而引起生物量分配格局的变化。(4) 生物量参数和根系形态参数关系密切。根生物量、地上生物量、总生物量分别和根长、根表面积、根体积、根平均直径极显著正相关; 根冠比和根长、根表面积、根体积、根平均直径极显著负相关; 比根长和地上生物量、总生物量显著正相关, 和根冠比极显著负相关。

关键词: 楸树; 指数施肥; 生物量分配; 根系形态

Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones

WANG Lipeng¹, YAN Ziyi¹, LI Jiyue^{1,*}, WANG Junhui², HE Qian¹, SU Yan¹, CHEN Bo¹, MA Jianwei³, DONG Julian³

¹ College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

² Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

³ Xiaolongshan Forestry Science and Technology Research Institute, Tianshui 741022, China

Abstract: In order to study the differences of *Catalpa bungei* clones' biomass allocation and root morphology, an exponential fertilization trial was conducted with three nitrogen dose levels of 6, 10, 14 g urea per plant and CK. The experimental materials were two-year *Catalpa bungei* clones 1-4, 7080 and 015-1 tissue culture-seedlings. We conducted

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD21B03)

收稿日期: 2012-03-04; 修订日期: 2012-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljyymy@vip.sina.com

the experiment in Xiaolongshan forestry science and technology research institute, Tianshui city, Gansu province from March to August 2011. The results showed that: (1) After the end of the fertilization, the root biomass, stem biomass, leaf biomass, total biomass, root length, root surface area, volume of root and root average diameter with 10 g urea per plant treatment were higher than other treatments in the same clone. The clone 015-1 showed higher values of biomass parameters and root morphological parameters than the clone 1-4 and clone 7080. The root biomass, stem biomass, leaf biomass and total biomass of clone 015-1 with 10 g urea per plant treatment were 89.44 g, 61.30 g, 79.97 g, 230.71 g, which were 1.48, 1.52, 2.09, 1.66 times that with CK. The root length, root surface area and volume of root of the same treatment were 22667 cm, 6260 cm², 578.14 cm³, and 1.94, 1.54, 2.43 times that with CK respectively. (2) Exponential fertilization and genetic differences of the clones significantly affected three *Catalpa bungei* clones' biomass allocation pattern. The application of nitrogen exponential fertilization significantly promoted the root biomass, stem biomass, leaf biomass and total biomass accumulation of three *Catalpa bungei* clones, while nitrogen deficiency or excess showed negative effects to the accumulation of biomass. In August the root to shoot ratio of the same clone decreased with the increase of the amount of nitrogen. For the same treatment, the clone 7080 showed higher ratio than the clone 1-4 and clone 015-1. The biomass of the clone 1-4 and clone 7080 were mainly allocated to leaves and stems, while the clone 015-1 to leaves. (3) Exponential fertilization in June and July increased three *Catalpa bungei* clones' fine root lengths and surface areas, accounting for the proportion of the whole plant' root length and root surface area up to 96.99%, 86.82%, 93.10%, 72.52%. Exponential fertilization mainly increased three *Catalpa bungei* clones' volumes of roots. The fine roots, roots, and coarse roots in August increased by 36.88%, 124.96%, and 154.79% compared with those in July. This helped the roots intake more nutrients in the late of exponential fertilization, thus would affected the changes in the pattern of biomass allocation of three *Catalpa bungei* clones. (4) The biomass parameters and root morphological parameters of three *Catalpa bungei* clones were closely related. After the end of the fertilization, the root biomass, aboveground biomass and total biomass were extremely positively related to root length, root surface area, root volume and root average diameter. The root-shoot ratio was significantly negatively correlated with root length, root surface area, root volume, root average diameter. The specific root length was significantly positively correlated with aboveground biomass, total biomass and significantly negatively correlated with root-shoot ratio.

Key Words: *Catalpa bungei*; exponential fertilization; biomass allocation; root morphology

根系与氮素的反应是一个复杂的生理生态过程,表现出形态、解剖结构和生理等方面的变化^[1]。根系是植物的根本,根系形态的变化在养分摄取中起到了决定性的作用^[2]。直径是根系的重要结构特征,其粗细具有不同的生理功能^[3]。细根是指林木根系中木质化程度较低且直接与根尖连接具有吸收水分和养分的功能的那部分根系。目前,根径 2 mm 已经被专家广泛用作划分细根的标准^[4]。Caldwell 等研究认为根系的动态主要由细根动态决定,维持细根的生理功能主要在于保持细根的吸收能力^[5];Vogt 等发现气候因子和养分状况是决定细根生物量的两个重要因素,而细根生长主要受养分状况控制^[6];于立忠等研究发现施氮肥显著降低 1—2 级根的平均直径,显著降低 1 级根的平均根长和显著增加 1 级根的比根长^[7];刘金梁等研究表明施氮肥显著降低了水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)和落叶松(*Larix* spp.) 1—3 级根的生物量、水曲柳 2—4 级根和落叶松 3 级根直径,以及水曲柳 1—4 级根和落叶松 1 级根的比根长,但对根长影响不显著^[8];这些研究对认识根系结构和生理功能具有重要意义。

指数施肥是稳态营养理论的重要研究方向,是结合养分的指数供给和苗木指数生长的养分需求,采用类似于相对生长率的养分增加率,通过控制每次的施肥量和施肥次数,诱导植株奢侈消耗,最终使植物在体内形成养分载荷^[9]。指数施肥能够满足植物不同生长阶段的养分需求,比传统的施肥方法更加能提高植物的养分利用效率和生存竞争力^[10]。许多专家已经在黑云杉(*Picea mariana*)、铁杉(*Tsuga heterophylla*)、西南桦

(*Betula alnoides*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、沉香(*Aquilaria agallocha* Roxb.)、红厚壳(*Calophyllum inophyllum* L.)等树种上开展了有关指数施肥的氮素研究^[11-16]。这些研究主要集中在不同树种和确定最佳施氮量方面,而有关指数施肥如何影响同一树种不同无性系的根系形态,进而改变其生物量分配格局的作用机制则鲜有报道。

楸树(*Catalpa bungei*)是我国传统栽培的优质珍贵用材树种和著名园林观赏树种^[17],有关指数施肥对楸树不同无性系的生物量分配和根系形态影响的差异性研究比较薄弱。为此,本文研究指数施肥对3个楸树无性系生物量分配和根系形态的影响,探讨不同根径根系形态的变化规律,进而为楸树施肥管理和高效栽培提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在甘肃省天水市小陇山林业科学研究所大棚,105°48' E、34°29' N,海拔约1450 m。属温带半湿润季风气候,年均降雨量约600—800 mm,年均蒸发量约1290 mm,平均气温约11℃,极端最高气温39℃,极端最低气温-19.2℃,无霜期约180 d。

1.2 试验材料

试验材料取自甘肃省小陇山林业科学研究所苗圃,选取生长相对一致的3个楸树无性系2年生组培苗1-4、7080和015-1各48株。2011年3月初采用35 cm×35 cm×30 cm(底径×上口径×高)的花盆,每盆栽植1株。为了防止水肥流失,每个花盆配有塑料托盘;盆内套有双层白色塑料袋。基质是体积比为7:3的森林土和泥炭土,理化性质为pH值6.20,有机质74.44 g/kg,全氮3.03 g/kg,全磷1.47 g/kg,全钾20.29 g/kg,碱解氮325.36 mg/kg,有效磷131.88 mg/kg,速效钾372.94 mg/kg,容重0.96 g/cm³,总孔隙度63.64%。每个花盆装基质约20 kg。待缓苗至5月下旬进行施肥试验。施肥前,无性系1-4、7080和015-1的苗高分别为(26.11±0.60)、(26.91±0.44)、(26.95±0.43) cm,地径为(4.99±0.07)、(5.44±0.06)、(5.28±0.06) mm。期间正常浇水管理。

1.3 研究方法

1.3.1 施肥方法

采用指数施肥模型^[12]:

$$N_t = N_s(e^{rt} - 1) - N_{t-1} \quad (1)$$

式中, N_t 为相对增加率 r 下的第 t 次施肥量, N_s 为施肥前苗木的养分含量, N_{t-1} 为包括第 $t-1$ 次施肥的施肥总量, t 为施肥总次数, r 为养分相对增加率。 r 的确定参考Dumroses^[18]:

$$NT = N_s(e^{rt} - 1) \quad (2)$$

式中, NT 为 t 次施肥后苗木养分含量。试验前测得3个楸树无性系的平均氮含量为431 mg/株,即 $N_s = 431$ 。设置CK、6、10、14 g 尿素/株4个处理(表1),每个处理12株。5月27日开始第1次施肥,每周1次,共12次。 P_2O_5 为14%的过磷酸钙和 K_2O 为50%的硫酸钾(10、5 g/株)均作底肥在5月27日施入。具体施肥方法:过磷酸钙是用小铲在植株东、西、南、北4个方位挖1个深度为10 cm的小洞,然后将其等量施入后埋平。硫酸钾和含氮量为46%的尿素按处理溶于水,然后用烧杯对同一处理的苗木进行等量浇灌;后期由于尿素量较大,分2—3次进行浇灌。

表1 楸树无性系不同指数施肥处理的施肥量/(g/株)

Table 1 Amount of exponential fertilization in different treatments for *Catalpa bungei* clones

处理 Treatments	1 周	2 周	3 周	4 周	5 周	6 周	7 周	8 周	9 周	10 周	11 周	12 周	总量 Total
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N-6	0.109	0.136	0.171	0.214	0.268	0.336	0.421	0.527	0.660	0.827	1.035	1.297	6
N-10	0.131	0.171	0.223	0.291	0.379	0.494	0.645	0.841	1.097	1.430	1.865	2.433	10
N-14	0.146	0.196	0.263	0.352	0.472	0.633	0.848	1.136	1.522	2.039	2.732	3.661	14

1.3.2 指标测定

分别于第0周(5月25日)、第4周(6月23日)、第8周(7月21日)、第12周(8月18日),每个处理取生长相对一致的苗木3株,进行苗木根系形态和生物量指标的测定。将整个苗木分根、茎、叶进行破坏性取样,根系用枝剪(W103,广州)从根颈处剪下,放在尼龙网筛上用水冲去泥土,获得整株根系,用流水缓缓冲洗干净,冲洗时在根系下面放置100目筛以防止脱落的根系被水冲走,之后迅速将根系带入有空调控温的室内,用已设定根径等级(细根0—2 mm、中等根2—5 mm和粗根 ≥ 5 mm)的LA-S型植物根系分析仪系统(杭州万深检测科技有限公司)测得整株根系的根长、根表面积、根体积、根平均直径以及细根、中等根和粗根的根长、根表面积和根体积。把根、茎、叶分别放入烘箱,在85℃下烘干48 h后称其生物量。地上生物量=茎生物量+叶生物量,总生物量=地上生物量+根生物量,根冠比=根生物量/地上生物量,比根长=根长/根生物量。

1.4 数据处理

试验数据表示为平均值 $\pm$ 标准误差,用Excel 2003对试验数据进行统计分析和绘图,并用SPSS 13.0进行方差分析和0.05水平的Duncan多重比较。

2 结果与分析

2.1 指数施肥对楸树无性系生物量分配的影响

表2可知,同一无性系不同处理的根、茎、叶生物量和总生物量均随施氮量的增加而先增加后降低,均在N-10取得最大值。无性系015-1在N-10的根、茎、叶生物量和总生物量高于其它无性系和处理,分别为89.44、61.30、79.97、230.71 g,其中根生物量和总生物量是CK的1.48、1.66倍。无性系7080在N-10的茎生物量为52.79 g,是CK的1.97倍;无性系1-4在N-10的叶生物量为71.93 g,是CK的2.15倍。方差分析表明(表3):不同无性系及不同处理根、茎、叶生物量和总生物量差异极显著($P<0.01$)。多重比较发现:无性系015-1在N-10的根生物量和总生物量显著高于其它无性系和处理。无性系015-1在N-10的茎生物量除与无性系1-4的N-10、无性系015-1的N-6及N-14无显著差异外,均与其它无性系和处理差异显著。无性系015-1在N-10的叶生物量均显著高于其它无性系和处理(除了无性系015-1在N-10的叶生物量和N-14无显著差异外)。说明适量施氮明显促进了3个楸树无性系根、茎、叶生物量和总生物量的积累,而氮素缺乏或过量都不利于生物量的积累。无性系015-1的生物量参数高于无性系1-4和7080。

表2 指数施肥对楸树无性系生物量分配的影响

Table 2 Effects of exponential fertilization on biomass allocation of *Catalpa bungei* clones

无性系 Clones	处理 Treatments	根 Root			茎 Stem			叶 Leaf			总生物量/g Total biomass
		生物量/g Biomass	比例/% Proportion	增幅/g Growth	生物量/g Biomass	比例/% Proportion	增幅/g Growth	生物量/g Biomass	比例/% Proportion	增幅/g Growth	
1-4	CK	53.34 $\pm$ 0.89f	45.45	0	30.49 $\pm$ 1.60f	25.98	0	33.52 $\pm$ 0.40e	28.56	0	117.35 $\pm$ 2.04g
	N-6	55.99 $\pm$ 1.02ef	34.03	2.65	48.95 $\pm$ 1.70d	29.75	18.46	59.60 $\pm$ 1.86cd	36.22	26.08	164.54 $\pm$ 3.94de
	N-10	64.88 $\pm$ 2.61de	33.59	11.54	56.32 $\pm$ 2.33abc	29.16	25.83	71.93 $\pm$ 0.91b	37.24	38.41	193.13 $\pm$ 4.19bc
	N-14	60.29 $\pm$ 1.59def	32.67	6.95	53.03 $\pm$ 2.13bcd	28.73	22.54	71.25 $\pm$ 1.66b	38.60	37.73	184.57 $\pm$ 2.89c
7080	CK	56.11 $\pm$ 1.38ef	46.73	0	26.75 $\pm$ 1.72f	22.28	0	37.21 $\pm$ 2.39e	30.99	0	120.07 $\pm$ 2.18g
	N-6	63.93 $\pm$ 4.08de	40.67	7.82	39.72 $\pm$ 1.59e	25.27	12.97	53.53 $\pm$ 2.07d	34.06	16.32	157.18 $\pm$ 5.40e
	N-10	74.61 $\pm$ 2.65bc	39.49	18.5	52.79 $\pm$ 1.98bcd	27.94	26.04	61.51 $\pm$ 3.66c	32.56	24.3	188.91 $\pm$ 6.99c
	N-14	67.48 $\pm$ 2.35cd	38.07	11.37	50.91 $\pm$ 2.18cd	28.72	24.16	58.85 $\pm$ 1.22cd	33.20	21.64	177.24 $\pm$ 2.28cd
015-1	CK	60.54 $\pm$ 4.14def	43.52	0	40.38 $\pm$ 1.93e	29.03	0	38.19 $\pm$ 2.78e	27.45	0	139.11 $\pm$ 8.60f
	N-6	78.82 $\pm$ 1.76b	38.46	18.28	56.60 $\pm$ 3.20abc	27.62	16.22	69.51 $\pm$ 0.64b	33.92	31.32	204.93 $\pm$ 5.36b
	N-10	89.44 $\pm$ 1.20a	38.77	28.9	61.30 $\pm$ 0.71a	26.57	20.92	79.97 $\pm$ 6.54a	34.66	41.78	230.71 $\pm$ 8.12a
	N-14	78.03 $\pm$ 6.27b	37.37	17.49	57.88 $\pm$ 1.38ab	27.72	17.5	72.91 $\pm$ 1.99ab	34.92	34.72	208.82 $\pm$ 3.99b

比例为根、茎、叶的生物量占总生物量的百分数,增幅为施氮处理与CK的差值,同列不同小写字母表示不同无性系和处理生物量差异显著($P<0.05$)

同一处理相同器官的生物量比例在不同无性系间存在明显规律,无性系7080同一施氮处理根生物量的

比例(40.67%、39.49%、38.07%)和无性系 015-1(38.46%、38.77%、37.37%)变化不大,但都明显高于无性系 1-4(34.03%、33.59%、32.67%);无性系 1-4 施氮处理茎生物量的比例(28.73%—29.75%)高于无性系 7080(25.27%—28.72%)和无性系 015-1(26.57%—27.72%);无性系 1-4 各施氮处理叶生物量的比例(36.22%—38.60%)明显高于无性系 7080(32.56%—34.06%)和无性系 015-1(33.92%—34.92%)。无性系 1-4、7080 和 015-1 施氮处理根生物量的比例分别比 CK 下降了 11.42—12.78、6.06—8.66、4.75—6.15 个百分点;无性系 1-4 和 7080 茎生物量的比例分别比 CK 上升了 2.75—3.77、2.99—6.44 个百分点,而无性系 015-1 茎生物量的比例比 CK 下降了 1.31—2.46 个百分点;3 个无性系叶生物量的比例分别比 CK 上升了 7.66—10.04、1.57—3.07、6.47—7.47 个百分点。说明施氮促进了无性系 1-4 和 7080 的光合产物偏向叶、茎分配,无性系 1-4 的光合产物偏向叶分配最明显,施氮促进无性系 015-1 的光合产物向叶分配。同一无性系同一施氮处理根、茎、叶生物量的增幅具有明显的规律,无性系 1-4 整体上遵循:叶(26.08、38.41、37.73 g)>茎(18.46、25.83、22.54 g)>根(2.65、11.54、6.95 g);无性系 7080 整体上遵循:茎(12.97、26.04、24.16 g)>叶(16.32、24.30、21.64 g)>根(7.82、18.50、11.37 g);无性系 015-1 整体上遵循:叶(31.32、41.78、34.72 g)>根(18.28、28.90、17.49 g)>茎(16.22、20.92、17.50 g)。

表 3 生物量和根系形态的的双因素分析表

差异来源 Source of variance	生物量 Biomass				根系形态 Root morphology			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	整株 Total	根长 Root length	根表面积 Root surface area	根体积 Root volume	根平均直径 Root average diameter
无性系 Clones	38.707 **	34.945 **	24.159 **	59.433 **	7.682 **	2.680	23.695 **	5.396 *
处理 Treatments	22.846 **	91.946 **	116.952 **	136.910 **	85.300 **	32.977 **	122.278 **	32.446 **
无性系 × 处理 Clones × Treatments	1.823	1.595	3.301	2.015	3.793 **	0.955	4.886 **	1.224

* $P<0.05$, * * $P<0.01$

2.2 指数施肥对楸树无性系根冠比的影响

图 1 可知,3 个无性系的根冠比整体上是 5 月最大,CK 在 8 月的根冠比远远高于施氮处理。5 月无性系 7080 和 015-1 的根冠比分别为 1.33、1.40,均明显高于无性系 1-4(0.81)。6 月同一无性系不同处理的根冠比都无显著差异,无性系 7080 的根冠比为 0.59—0.66,明显高于无性系 1-4(0.45—0.50)和无性系 015-1 (0.47—0.48)。7 月同一无性系不同处理的根冠比均无显著差异(除了无性系 1-4 的 N-14 和 CK 差异显著)。8 月无性系的根冠比均随施氮量的增加而降低;同一处理下无性系 7080 的根冠比(0.88、0.69、0.65、0.62)高于无性系 1-4(0.83、0.52、0.51、0.49)和无性系 015-1(0.77、0.63、0.63、0.60);同一无性系施氮处理

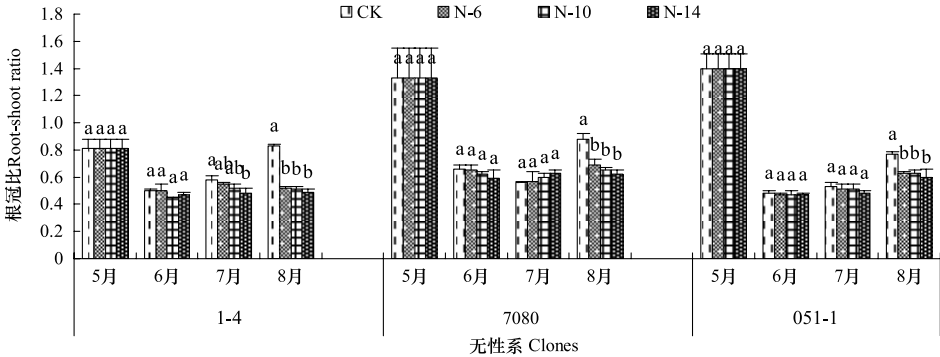


图 1 指数施肥对楸树无性系根冠比的影响

Fig. 1 Effects of exponential fertilization on root to shoot ratio of *Catalpa bungei* clones
不同小写字母表示同一无性系同一月份不同处理差异显著 ($P<0.05$)

的根冠比无显著差异,而施氮处理和 CK 差异显著。

2.3 指数施肥对楸树无性整株根系形态的影响

表 4 可得,3 个无性系的整株根长、根表面积、根体积和根平均直径具有相同的变化规律: $N-10>N-14>N-6>CK$ 。根长的最大值分别为 19366、17797、22667 cm,是 CK 的 1.99、1.53、1.94 倍;根表面积的最大值为 6178、6208、6260 cm^2 ,比 CK 上升了 82.57%、61.04%、53.51%;根体积的最大值为 487.19、430.22、578.14 cm^3 ,是 CK 的 1.90、1.94、2.43 倍;根平均直径的最大值为 36.83、44.95、38.93 mm,是 CK 的 1.75、2.17、1.63 倍。方差分析表明:不同处理的根长、根表面积、根体积和根平均直径都分别差异极显著(表 3),而不同无性系的根表面积无显著差异($P=2.680$)。多重比较可得:无性系 015-1 在 N-10 的根长和根体积显著高于其它无性系和处理。无性系 015-1 在 N-10 的根表面积和无性系 1-4 的 N-10、无性系 7080 的 N-6、N-10、N-14、无性系 015-1 的 N-14 无显著差异。无性系 7080 在 N-10 的根平均直径除与无性系 7080 的 N-14、无性系 015-1 的 N-10 无显著差异外,均与其它无性系和处理显著差异。说明适量施氮有利于提高楸树无性系的根系形态,过量施氮对根系形态有抑制作用。无性系 015-1 的根系形态参数整体上高于无性系 1-4 和 7080。

表 4 指数施肥对楸树无性系根系形态的影响

Table 4 Effects of exponential fertilization on root morphology of *Catalpa bungei* clones

无性系 Clones	处理 Treatments	根长/cm Root length	根表面积/ cm^2 Surface area	根体积/ cm^3 Volum of root	根平均直径/mm Root average diameter
1-4	CK	9747 ± 899i	3384 ± 299d	256.94 ± 7.63e	21.04 ± 2.46e
	N-6	13711 ± 674gh	4462 ± 164c	346.87 ± 28.25d	28.18 ± 4.76cde
	N-10	19366 ± 1332b	6178 ± 450a	487.19 ± 5.46b	36.83 ± 0.65b
	N-14	16732 ± 600cde	5472 ± 126ab	382.86 ± 13.80cd	33.79 ± 1.63bcd
7080	CK	11599 ± 1012hi	3855 ± 343cd	221.44 ± 15.37e	20.68 ± 1.49e
	N-6	15379 ± 64efg	5592 ± 265ab	343.88 ± 9.99d	35.36 ± 0.63bc
	N-10	17797 ± 270bed	6208 ± 471a	430.22 ± 6.27c	44.95 ± 2.93a
	N-14	16155 ± 249def	5793 ± 93a	370.66 ± 13.73d	41.13 ± 5.16ab
015-1	CK	11657 ± 452hi	4078 ± 116cd	238.38 ± 11.17e	23.83 ± 0.92e
	N-6	14066 ± 391fg	4734 ± 41bc	377.93 ± 5.31cd	26.78 ± 0.95de
	N-10	22667 ± 443a	6260 ± 634a	578.14 ± 5.16a	38.93 ± 1.09ab
	N-14	18643 ± 1036bc	6147 ± 326a	499.08 ± 41.27b	36.32 ± 1.16b

2.4 指数施肥对楸树无性系比根长的影响

比根长决定着根系吸收养分、水分的能力,与根系的功能、分泌物、寿命、呼吸、可塑性和增殖等关系密切,是反映根系生理功能的重要指标^[15]。如图 2 所示,3 个无性系比根长的变化趋势是 5 月和 8 月低,而 6 月和 7 月比较高。5 月无性系 1-4 的比根长为 4.98 m/g,明显高于无性系 7080(2.34 m/g)和无性系 015-1(1.68 m/g)。6 月和 7 月比根长随着施氮量的增大而增大,6 月 N-14 的比根长分别是 7.79、6.66、4.82 m/g,7 月分别是 5.44、4.77、4.15 m/g。8 月无性系 1-4 和 015-1 的比根长均随施氮量的增加呈现先升高后下降,都在 N-10 最大,分别为 2.99、2.53 m/g,是 CK 的 1.64、1.41 倍。多重比较发现:6 月无性系 1-4 和 015-1 的 N-10、N-14 与 CK 差异显著,无性系 7080 的 N-6、N-10 和 N-14 和 CK 差异显著。7 月无性系 1-4 和 7080 不同处理的比根长无显著差异,无性系 015-1 的 N-14 和 CK 差异显著。8 月无性系 1-4 和 7080 的 N-6、N-10、N-14 和 CK 差异显著,无性系 015-1 的 N-10、N-14 和 CK 差异显著。

2.5 指数施肥对不同根径根长、根表面积和根体积的影响

图 3 可得:6 月和 7 月细根的根长和根表面积随着施氮量的增大而增大;8 月细根的根长和根表面积均随施氮量的增加而先升高后下降,都在 N-10 最大,分别为 17094.40、15720.64、19518.89 cm, 3939.33、3889.52、4669.17 cm^2 ,是 CK 的 2.01、1.56、1.98、1.91、1.55、1.90 倍。说明施氮明显提高了细根的根长和根表面积。同一月份无性系 015-1 的细根根长和根表面积整体上高于无性系 1-4 和 7080。细根根长占总根长

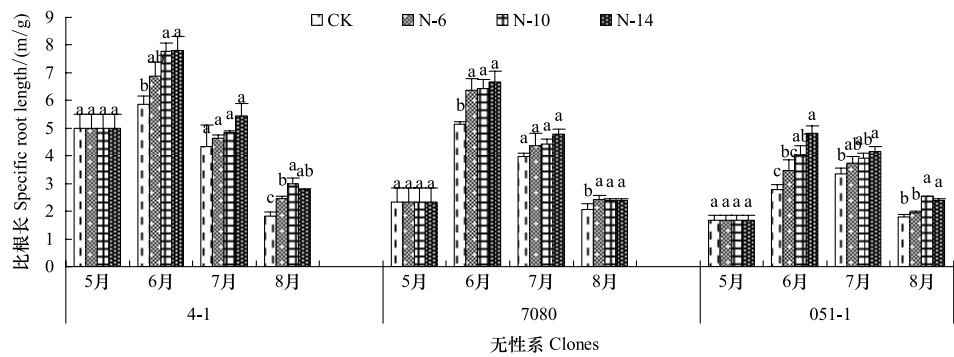


图2 指数施肥对楸树无性系比根长的影响

Fig. 2 Effects of exponential fertilization on specific root length of *Catalpa bungei* clones

的百分比(根据同一月份3个无性系的平均值所得)在6月、7月和8月分别为96.99%、93.10%、86.64%,细根根表面积占总表面积的百分比在3个月份为86.82%、72.52%、62.70%,均明显高于中等根、粗根的根长和根表面积。说明施氮对整株的根长和表面积的增加作用主要是细根根长和表面积的增加,而不是细根、中等根和粗根按比例增大^[19]。随着施氮量的增加和时间的推移,细根所占比例有所降低,这与饶龙兵^[20]的研究结果一致。6月细根根体积高于中等根和粗根;7月根体积的关系复杂;8月无性系1-4和015-1的粗根根体积远高于细根和中等根,无性系7080不同根径体积的关系不明显。

2.6 生物量和根系形态的相关性分析

对3个无性系生物量参数和根系形态参数进行相关性分析(表5),根生物量、地上生物量和总生物量间都极显著正相关($P<0.01$),根冠比和地上生物量、总生物量极显著负相关。根系形态参数间都极显著正相关。根生物量、地上生物量、总生物量都分别和根长、根表面积、根体积、根平均直径极显著正相关,说明根系形态参数的增加均可促进楸树生物量的增大,这和李玉英^[21]的研究一致。根冠比和根长、根表面积、根体积、根平均直径极显著负相关。比根长和地上生物量、总生物量显著正相关,和根冠比极显著负相关。

表5 生物量和根系形态的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of biomass and root morphology

参数 Parameter	根生物量 Root biomass	地上 生物量 Above ground biomass	总生物量 Total biomass	根冠比 Root to shoot ratio	根长 Root length	根表面积 Root surface area	根体积 Root volume	根平均 直径 Root average diameter	比根长 Specific root length
根生物量/Root biomass	1								
地上生物量/Above ground biomass	0.705 **	1							
总生物量/Total biomass	0.855 **	0.968 **	1						
根冠比/Root to shoot ratio	-0.158	-0.799 **	-0.633 **	1					
根长/Root length	0.728 **	0.820 **	0.851 **	-0.533 **	1				
根表面积/Root surface area	0.598 **	0.739 **	0.746 **	-0.549 **	0.878 **	1			
根体积/Root volume	0.722 **	0.872 **	0.887 **	-0.602 **	0.898 **	0.763 **	1		
根平均直径/Root average diameter	0.494 **	0.630 **	0.623 **	-0.511 **	0.731 **	0.836 **	0.660 **	1	
比根长/Specific root length	0.037	0.508 **	0.387 *	-0.670 **	0.704 **	0.677 **	0.559 **	0.561 **	1

3 结论与讨论

3.1 指数施肥对楸树无性系生物量分配的影响

氮素供应影响着植物对碳同化物质的分配格局^[22]。氮素缺乏时,植物会加大根系生物量的分配比例,以提高根系的氮素吸收能力^[23];适量增加氮素供应,能够促进植物根、茎、叶的生长,但往往对茎叶生长的促进

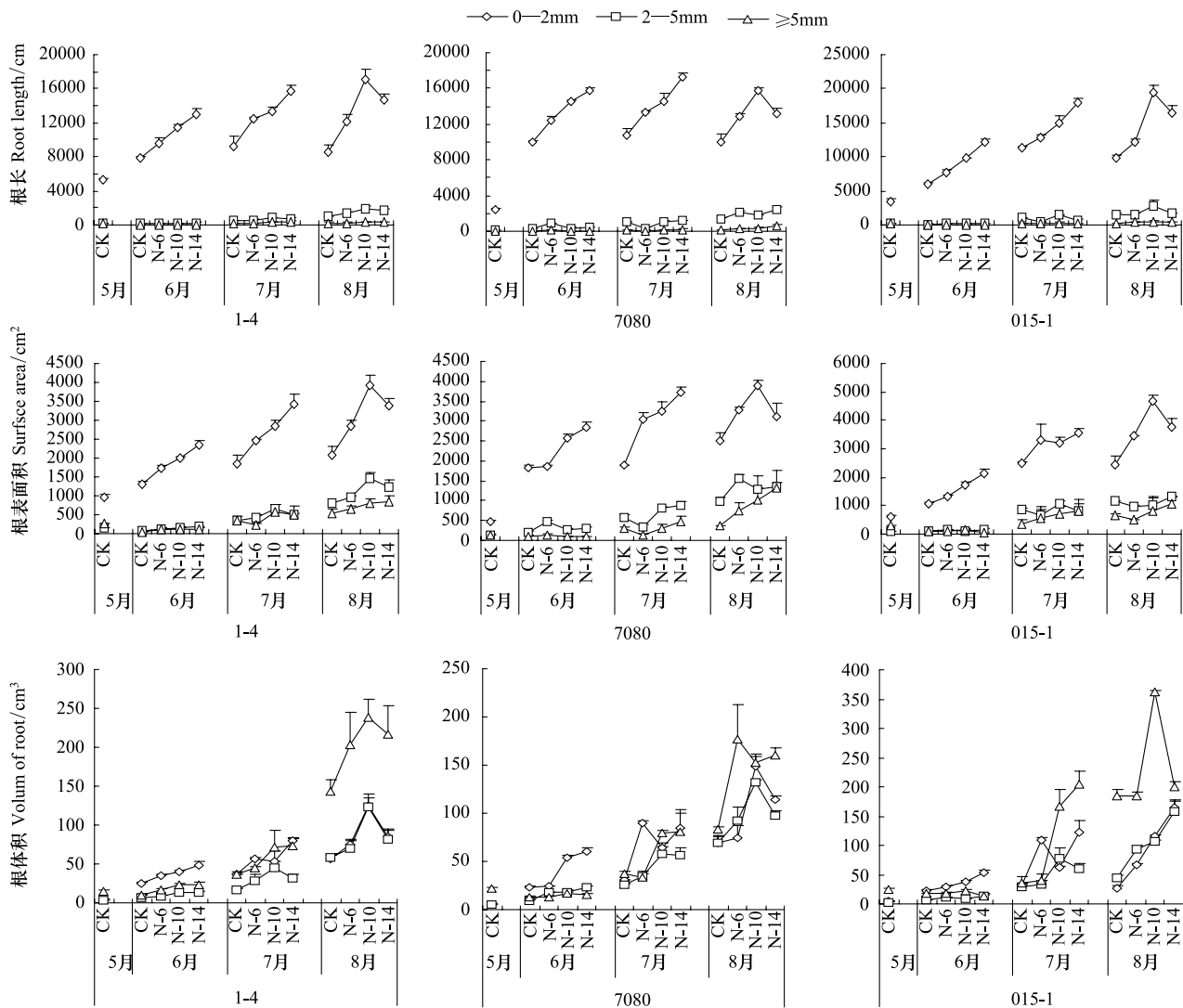


图3 指数施肥对不同根径根长、根表面积和根体积的影响

Fig. 3 Effects of exponential fertilization on root length, root surface area and root volume of different diameters

作用大于根系,导致随施氮量的增加根冠比降低;当氮素过量时,则会抑制植物的生长^[24]。这种分配格局因植物不同而有所差别。本试验中,随着施氮量的增加,根冠比逐渐下降,表明施氮促进光合产物更多的向茎叶分配,这与陈琳、贾瑞丰、白尚斌、彭明俊^[13,16,25-26]的研究结果一致。CK 由于氮素缺乏,根系吸收表面积减小,向茎叶的输氮量减少,使茎叶生长受阻,造成根冠比较大。施氮量为 14 g 尿素/株时,无性系的生物量积累都相应降低,可能是氮素超过了楸树的需求量,过多的氮素导致参与碳同化的关键酶-RuBP 羧化酶活性降低,造成光合作用减弱,且使植株的呼吸作用增加,从而导致楸树生物量的下降^[13,27]。无性系 015-1 在 N-10 的根、茎、叶生物量和总生物量均高于其它无性系和处理。无性系 7080 施氮处理根生物量的比例和无性系 015-1 变化不大,但都明显高于无性系 1-4;无性系 015-1 施氮处理根生物量相对 CK 的增幅明显高于无性系 7080 和无性系 1-4,说明无性系 015-1 的根系对氮素比较敏感,楸树生物量的分配格局除受氮素影响^[13,24]外,也受自身遗传特性^[20]的影响。

3.2 指数施肥对楸树无性系根系形态的影响

根系形态对土壤养分的反应敏感^[28],施氮能够促进根系分枝数的增加和总根长增长^[29-30],导致根表面积、直径和体积增加,比根长显著减小^[31]。低氮能够改变根系的生存策略^[32],供氮不足能影响叶片 CO₂ 的同化,导致分配到根系中的光合产物减少,容易引起细根衰老^[33]和死亡^[34],而直径增粗可以降低这种死亡的机

率^[35]。植物吸收不同形态氮导致基质 pH 值的变化也是影响植物根系生长的主要原因。张彦东等研究发现营养液中 NH_4^+ 比例超过 50% 时,水曲柳幼苗出现明显抑制根系生长的现象^[36]。本试验中,指数施肥后期,N-14 的施氮量明显加大,而尿素是一种高浓度氮肥,通过脲酶作用水解成碳酸铵或碳酸氢铵,进而使基质中积累大量的 NH_4^+ ,根据电荷平衡原理,根系吸收 NH_4^+ 时放出 H^+ ,导致基质 pH 值的降低,进而抑制楸树根系的生长。

本研究中,3 个无性系细根的根长和根表面积从 5 月到 7 月增加较快,7 月和 8 月变化不大,8 月细根、中等根和粗根的根体积分别为 93.53、93.68、191.98 cm^3 ,比 7 月高达 36.88%、124.96%、154.79%。说明指数施肥改变了细根的生存策略,前期主要提高细根的根长和根表面积,后期主要提高根系体积,通过直径增粗^[8]和延长细根寿命^[37]来提高养分和水分的吸收和运输效率。植物根系吸收养分、水分的能力主要取决于根长而不是生物量,具有较大比根长的植物在根系生物量投入方面更有效率,因此,研究比根长对于了解根系功能和探明其生物量分配策略具有重要意义^[38]。同一无性系同一处理不同月份的比根长整体上具有相同的规律:6 月>7 月>8 月。主要因为指数施肥在不同月份对根长和根生物量的促进大小不同。6 月和 7 月施氮量较少,主要促进楸树细根根长和根表面积的增加;8 月施氮量明显增加,而细根已经发育完全,细根的养分和水分运输效率明显增加,促进生物量的增加幅度远远高于 6 月和 7 月。这与王冉等研究沉香发现指数生长初期,养分供给较少能促进根系的分枝及伸长生长;生长后期,营养供给较多则促进根系生物量的积累的结果^[15]基本一致。

References:

- [1] Chen H B, Wei X, Wang J, Wang Z Q. Morphological and anatomical responses of *Fraxinus mandshurica* seedling roots to different nitrogen concentrations. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(2): 61-66.
- [2] Zhang F S. The advances of nutrition studies on soil and plant(Vol. 1). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1992: 73-82.
- [3] Wang X R, Wang Z Q, Han Y Z, Gu J C, Guo D L, Mei L. Variations of fine root diameter with root order in Manchurian ash and dahurian larch plantations. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6): 871-877.
- [4] Yang L Y, Li W H. Fine root distribution and turnover in a broad-leaved and Korean pine climax forest of the Changbai Mountain in China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 1-5.
- [5] Caldwell M M, Pearce R P. Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological Processes Above and Below Ground. San Diego: Academic Press, 1994.
- [6] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, Boon P, O'Hara J, Asbjornsen H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 1995, 187(2): 159-219.
- [7] Yu L Z, Ding G Q, Shi J W, Yu S Q, Zhu J J, Zhao L F. Effects of fertilization on fine root diameter, root length and specific root length in *Larix kaempferi* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 957-962.
- [8] Liu J L, Mei L, Gu J C, Quan X K, Wang Z Q. Effects of nitrogen fertilization on fine root biomass and morphology of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*: a study with in-growth core approach. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(1): 1-6.
- [9] Li L L, Li J Y, Zhang F Q, Pan W, Wei D, He Q, Ding X G. A review of exponential fertilization of container seedling. *World Forestry Research*, 2010, 23(2): 22-27.
- [10] Wang R, He Q, Ding X G, Li J Y, Zhang F Q, Zhu B Z, Su Y. Effects of exponential fertilization on seedling growth and photosynthesis of *Aquilaria* spp. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(6): 58-64.
- [11] Salifu K F, Timmer V R. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(7): 1287-1294.
- [12] Hawkins B J, Burgess D, Mitchell A K. Growth and nutrient dynamics of western hemlock with conventional or exponential greenhouse fertilization and planting in different fertility conditions. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(4): 1002-1016.
- [13] 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(5): 35-40.
- [14] Wei H X, Xu C Y, Ma L Y, Jiang L N, Jiang C J, Liu F S, Zhang Q C. Nutrient uptake of *Larix olgensis* seedlings in response to different exponential regimes. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 685-690.

- [15] Wang R, Li J Y, Zhang F Q, Zhu B Z, Pan W. Growing dynamic root system of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different fertilizing methods. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 98-106.
- [16] Jia R F, Yin G T, Yang J C, Li R S, Zou W T. Effects of nitrogen application on the growth and photosynthetic characteristics of *Calophyllum inophyllum* seedlings. *Forest Research*, 2012, 25(1): 23-29.
- [17] Yu Y M, Wang J H, Ma J W, Li P Y, Ma L N. Effect of lanthanum chloride on growth of in vitro culture of *catalpa bungei*. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(1): 31-33.
- [18] Dumroese R K, Page-Dumroese D S, Salifu K F, Jacobs D F. Exponential fertilization of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency, leaching fractions, and early outplanting performance. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(12): 2961-2968.
- [19] Jin J, Wang G H, Liu X B, Chen X L, Li X G. Effect of different phosphorus regimes on root morphological characteristics of soybean seedling. *Soybean Science*, 2006, 25(4): 360-364.
- [20] Rao L B, Li X, Duan H P, Chen Y T. Growing responses of four exotic alder seedling under different nitrogen concentrations. *Forest Research*, 2012, 25(2): 246-253.
- [21] Li Y Y, Hu H S, Cheng X, Sun J H, Li L. Effects of interspecific interactions and nitrogen fertilization rates on above-and below-growth in faba bean/mazie intercropping system. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1617-1630.
- [22] Farrar J F, Jones D L. The control of carbon acquisition by roots. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 43-53.
- [23] Huo C F, Wang Z Q, Sun H L, Fan Z Q, Zhao X M. Interactive effects of light intensity and nitrogen supply on *Fraxinus mandshurica* seedlings growth, biomass, and nitrogen allocation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1658-1664.
- [24] Fan Z Q, Wang Z Q, Wu C, Li H X. Effect of different nitrogen supply on *Fraxinus mandshurica* seedling's biomass, N partitioning and their seasonal variation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1497-1501.
- [25] Bai S B, Wang Y X, Zuo X D, Rao L B. Growth response of *Sequoia sempervirens* seedlings to N nutrients. *Forest Research*, 2005, 18(5): 561-566.
- [26] 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(3): 97-100.
- [27] Manter D K, Kavanagh K L, Rose C L. Growth response of douglas-fir seedlings to nitrogen fertilization: importance of Rubisco activation state and respiration rates. *Tree Physiology*, 2005, 25(8): 1015-1021.
- [28] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 2004, 162(1): 9-24.
- [29] Hodge A, Robinson D, Griffiths B S, Fitter A H. Why plants bother: root proliferation results in increased nitrogen capture from an organic patch when two grasses compete. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22(7): 811-820.
- [30] Farley R A, Fitter A H. The responses of seven co-occurring woodland herbaceous perennials to localized nutrient-rich patches. *Journal of Ecology*, 1999, 87(5): 849-859.
- [31] King J S, Thomas R B, Strain B R. Morphology and tissue quality of seedling root systems of *Pinus taeda* and *Pinus ponderosa* as affected by varying CO₂, temperature, and nitrogen. *Plant and Soil*, 1997, 195(1): 107-119.
- [32] Eissenstat D M, Wells C E, Yanai R D, Whitbeck J L. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 33-42.
- [33] Xu W J, Wang Z Q, Fan Z Q, Sun H L, Jia S X, Wu C. Effect of shading on the senescence of fine roots of *Fraxinus mandshurica* seedlings. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 104-111.
- [34] Yu S Q, Wang Z Q, Shi J W, Quan X K, Mei L, Sun Y, Jia S X, Yu L Z. Estimating fine-root longevity of *Fraxinus mandshurica* and *larix gmelinii* using mini-rhizotrons. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1): 102-109.
- [35] Wells C E, Eissenstat D M. Marked differences in survivorship among apple roots of different diameters. *Ecology*, 2001, 82(3): 882-892.
- [36] Zhang Y D, Fan Z Q, Wang Q C, Wang Z Q. Effect of different nitrogen forms on growth of *Fraxinus mandshurica* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(5): 665-667.
- [37] Kem C C, Friend A L, Johnson J M F, Coleman M D. Fine root dynamics in a developing *Populus deltoides* plantation. *Tree Physiology*, 2004, 24(6): 651-660.
- [38] Robinson D, Hodge A, Fitter A. Constraints on the form and function of root systems // de Kroon H D, Visser E J W, eds. *Root Ecology*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2003: 1-26.

参考文献:

- [1] 陈海波, 卫星, 王婧, 王政权. 水曲柳苗木根系形态和解剖结构对不同氮浓度的反应. *林业科学*, 2010, 46(2): 61-66.
- [2] 张福锁. 土壤与植物营养研究新动态(第1卷). 北京: 北京农业大学出版社, 1992: 73-82.

- [3] 王向荣, 王政权, 韩有志, 谷加存, 郭大立, 梅莉. 水曲柳和落叶松不同根序之间细根直径的变异研究. 植物生态学报, 2005, 29(6): 871-877.
- [4] 杨丽韞, 李文华. 长白山原始阔叶红松林细根分布及其周转的研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 1-5.
- [7] 于立忠, 丁国泉, 史建伟, 于水强, 朱教君, 赵连富. 施肥对日本落叶松人工林细根直径、根长和比根长的影响. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1-6.
- [8] 刘金梁, 梅莉, 谷加存, 全先奎, 王政权. 内生长法研究施氮肥对水曲柳和落叶松细根生物量和形态的影响. 生态学杂志, 2009, 28(1): 957-962.
- [9] 李玲莉, 李吉跃, 张方秋, 潘文, 魏丹, 何茜, 丁晓纲. 容器苗指数施肥研究综述. 世界林业研究, 2010, 23(2): 22-27.
- [10] 王冉, 何茜, 丁晓纲, 李吉跃, 张方秋, 朱报著, 苏艳. N 素指数施肥对沉香苗期光合生理特性的影响. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 58-64.
- [13] 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.
- [14] 魏红旭, 徐程扬, 马履一, 江俐妮, 姜长吉, 刘福森, 张启昌. 不同指数施肥方法下长白落叶松播种苗的需肥规律. 生态学报, 2010, 30(3): 685-690.
- [15] 王冉, 李吉跃, 张方秋, 朱报著, 潘文. 不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响. 生态学报, 2011, 31(1): 98-106.
- [16] 贾瑞丰, 尹光天, 杨锦昌, 李荣生, 邹文涛. 不同氮素水平对红厚壳幼苗生长及光合特性的影响. 林业科学研究, 2012, 25(1): 23-29.
- [17] 于永明, 王军辉, 马建伟, 李平英, 马丽娜. LaCl_3 对楸树无性系试管苗生长的影响. 东北林业大学学报, 2011, 39(1): 31-33.
- [19] 金剑, 王光华, 刘晓冰, 陈雪丽, 李兴国. 不同施磷量对大豆苗期根系形态性状的影响. 大豆科学, 2006, 25(4): 360-364.
- [20] 饶龙兵, 李霞, 段红平, 陈益泰. 不同供氮水平对 4 种桉木幼苗生长的影响. 林业科学研究, 2012, 25(2): 246-253.
- [21] 李玉英, 胡汉升, 程序, 孙建好, 李隆. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响. 生态学报, 2011, 31(6): 1617-1630.
- [23] 霍常富, 王政权, 孙海龙, 范志强, 赵晓敏. 光照和氮交互作用对水曲柳幼苗生长、生物量和氮分配的影响. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1658-1664.
- [24] 范志强, 王政权, 吴楚, 李红心. 不同供氮水平对水曲柳苗木生物量、氮分配及其季节变化的影响. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1497-1501.
- [25] 白尚斌, 王懿祥, 左显东, 饶龙兵. 北美红杉幼苗对不同供 N 水平的生长反应. 林业科学研究, 2005, 18(5): 561-566.
- [26] 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.
- [33] 徐文静, 王政权, 范志强, 孙海龙, 贾淑霞, 吴楚. 遮荫对水曲柳幼苗细根衰老的影响. 植物生态学报, 2006, 30(1): 104-111.
- [34] 于水强, 王政权, 史建伟, 全先奎, 梅莉, 孙玥, 贾淑霞, 于立忠. 水曲柳和落叶松细根寿命的估计. 植物生态学报, 2007, 31(1): 102-109.
- [36] 张彦东, 范志强, 王庆成, 王政权. 不同形态 N 素对水曲柳幼苗生长的影响. 应用生态学报, 2000, 11(5): 665-667.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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

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 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	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 70.00 元