

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

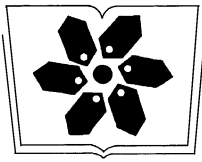
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
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 2 期

2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

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

DOI: 10.5846/stxb201112071876

魏红旭, 徐程扬, 马履一, 段 劼, 江俐妮, 朱开元, 周江华. 氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响. 生态学报, 2013, 33(2): 0659-0667.

Wei H X, Xu C Y, Ma L Y, Duan J, Jiang L N, Zhu K Y, Zhou J H. The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in *Larix olgensis* Henry seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0659-0667.

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收 和利用效率的影响

魏红旭^{1,2}, 徐程扬^{1,*}, 马履一¹, 段 劼¹, 江俐妮¹, 朱开元², 周江华²

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护国家重点实验室, 北京 100083;

2. 浙江省农业科学院花卉研究开发中心, 杭州 311202)

摘要:有关氮(N):磷(P)供给比例对苗木P吸收和利用影响的研地究仍存在盲点。选用长白落叶松(*Larix olgensis* Henry.)播种苗作为材料,对比了1:3、1:2、1:1、2:1、3:1五个N:P供给比例对温室条件下苗木生长、针叶和根系中P的含量以及P的吸收和利用效率的影响差异。另设试验对比了分别以 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N为N源情况下5个N:P比例对P吸收的动力学特征的影响差异。结果表明:1)随着N:P比例的增加根系有变粗和变长的趋势且根系生物量分配逐渐提高($P=0.0027$);2)1:2比例下叶片P浓度较2:1和3:1比例分别提高37%和45%($P=0.0187$),但是P利用率却分别下降了84%和37%($P=0.0008$),并且P吸收效率分别下降了48%和62%($P=0.0004$);3) NH_4^+ -N环境中,随着N浓度提高,P吸收速率呈线性上升($R^2=0.908$),而在 NO_3^- -N环境中P吸收速率和N:P比例间无相关关系($R^2=0.005$)。前者和后者环境中 $V_{\max}$ 值分别为0.89和0.60 mmol/h/g FM, K_m 值分别为0.15和0.03 mmol/L。综上:如在N、P同时存在的情况下欲提高长白落叶松苗木对P的吸收和利用效率,可考虑适当控制N的硝化并在一定范围内提高N:P供给比例。

关键词:长白落叶松;氮磷比例;根系;磷素吸收;养分效率;养分吸收动力学

The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in *Larix olgensis* Henry seedlings

WEI Hongxu^{1,2}, XU Chengyang^{1,*}, MA Lüyi¹, DUAN Jie¹, JIANG Lini¹, ZHU Kaiyuan², ZHOU Jianghua²

1 Province-Ministry Co-construct Key laboratory of Forest Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Flower R&D Center, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 311202, China

Abstract: The effect of supply ratio of nitrogen (N): phosphorus (P) on P uptake and utilization in germinated Changbai larch (*Larix olgensis* Henry.) was analyzed in our research. The seedlings were cultivated in a greenhouse where fertilizers were supplied according to N:P ratios of 1:3, 1:2, 1:1, 2:1 and 3:1. Seedling morphology and biomass accumulation, P content and concentration of needles and roots were measured. The method of vector diagnosis was used to analyze the interactions among biomass, P content and P concentration. Some seedlings were cultivated in hydroponic solutions for six hours to detect their kinetic characteristics. Two inorganic N sources, NH_4^+ -N and NO_3^- -N, were employed to create the same N:P ratios in the greenhouse experiment with the P source of PO_4^{3-} , separately. The results showed that root biomass accumulation and diameter increased significantly with the increase of N:P ratio ($P=0.0027$ and 0.10013, respectively).

基金项目:国家林业局“十一五”科技支撑项目(2006BAD24B01);林业公益行业科研专项资金项目(201004021);国家林业局林业科学技术推广项目(2011-44)

收稿日期:2011-12-07; 修订日期:2012-03-13

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

Compared to the N:P ratio of 1:1, the N:P ratio of 3:1 increased the fine root length, surface area and volume by 14% ($P=0.0178$), 21% ($P=0.0004$) and 5% ($P=0.0009$), respectively. Root P concentration, root P content and needle P content were not affected by N:P ratios ($P>0.05$). However, needle P concentration was higher in N:P ratio of 1:2 than 2:1 ($P=0.0270$) and 3:1 ($P=0.0014$), but it was not significantly different from that in N:P ratios of 1:3 ($P=0.0669$) and 1:1 ($P=0.0804$). In N:P ratios of 2:1 and 3:1, P utilization index was higher than the N:P ratio of 1:2 by 84% ($P=0.0002$) and 37% ($P=0.0014$), respectively. With the increase of N:P ratio, P uptake efficiency increased linearly. N:P ratio positively correlated with P uptake efficiency ($R^2=0.978$). Vector diagnosis indicated that, compared to the N:P ratio of 1:2, the N:P ratio of 1:1 resulted in a nutrient dilution while the N:P ratios of 3:1, 2:1 and 1:3 resulted in a nutrient deficiency for needles; the N:P ratio of 2:1, 1:1 and 1:3 resulted in a nutrient excess while the N:P ratio of 3:1 resulted in a nutrient dilution for roots. The activity of acid phosphatase of needles in the N:P ratios of 2:1 and 3:1 was higher than that in the N:P ratio of 1:1 ($P=0.0026$) while the activity of acid phosphatase of roots in the N:P ratio of 1:2 was higher than that in 1:1 ($P=0.0003$). In solutions containing $\text{NH}_4^+\text{-N}$ or $\text{NO}_3^-\text{-N}$, the P uptake rate did not change among N:P ratios ($P=0.3247$ and 0.0934 , respectively). However, the P uptake rate linearly and positively correlated with the ratio of $\text{NH}_4^+\text{-N:P}$ ($R^2=0.908$), while there was no significant correlation between P uptake rate and $\text{NO}_3^-\text{-N:P}$ ratios ($R^2=0.005$). In solutions supplied with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $V_{\max}$ and K_m were regressed to be 0.89 and 0.60 mmol/h/g FM and 0.15 and 0.03 mmol/L, respectively. In conclusion, for improving the efficiencies of P uptake and utilization of larch seedlings under the circumstance of both supplied N and P, nitrification should be avoided and the N:P ratio should be increased within a certain range.

Key Words: *Larix olgensis*; N:P; root; phosphorus uptake; nutrient efficiency; nutrient uptake kinetics

磷(P)素几乎在所有植物体生理代谢中都起着核心作用,P也是限制植物生长的主要营养元素之一^[1]。P在植物体内含量较低,且在土壤中移动性极差,土壤养分有效性较高时植物体内P浓度仅占干物质的0.4%—1.5%^[2]。与之相反,氮(N)素被植物吸收和利用的水平远高于P。大量研究力图通过量化树体N:P比例关系来估测生态系统的养分限制因子^[3-5]。最新研究结果显示P缺乏和桉树体内大多数氨基酸无明显关联^[1],但更多报道结果显示树体地上部分有机N和P浓度间呈正相关关系^[5-6]。然而,前人研究更多的关注于植物地上部分——尤其叶片的响应^[2,4-5]。对于根系养分吸收过程中N对P的影响研究相对较少。

已有研究结果表明,植物根系对P的吸收会因N素的添加而增强^[7-9]。然而,N对P吸收的影响是否和同化P的关键作用酶活性有关?由于针叶苗木对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有吸收偏好性^[10-11],在不同无机N形态环境中苗木根系对P的吸收是否也受该偏好性影响?N会对同化后P的利用产生何种影响?目前研究结果尚不能对这些问题给出明确答案。

长白落叶松(*Larix olgensis* Henry.)广泛的分布于我国东北长白山(42°23' N, 128°6' E)、北朝鲜(41°52' N, 128°23' E)和东俄罗斯(45°18' N, 137°6' E)地区,是典型的东亚温带针叶树种之一。因其速生及耐旱等特性,长白落叶松在我国东北地区得以广泛的培育和栽植^[12]。本研究以长白落叶松幼苗为材料,通过控制条件下不同N:P的供给创造不同N:P有效性比例,观察苗木对P的吸收和利用、根系形态以及酸性磷酸酶活性的影响(试验一)。同时,考虑到针叶树种对不同无机N素形态吸收的选择性^[10-11],本研究另选同一批的不同苗木用于养分耗竭试验,通过改变不同无机形态N素的浓度创造出和试验一相同的N:P供给比例,并观察根系对P素短期吸收的响应(试验二),用以补充解释试验一的结果。本研究力图通过控制试验手段从机理上解释N:P比例关系对P素吸收和利用的影响,为相关研究和生产工作提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物为长白落叶松(*L. olgensis* H.)播种苗,种子来自吉林省吉林市江密峰苗圃(43°45' N, 126°45'

E),发芽率为35%,千粒重3.9 g。本研究由两个试验组成。用于试验一的苗木采用盆栽方法培育;用于试验二的苗木采用常规方法培育后取样并移至控制环境。

1.2 试验方法及设计

(1) 试验一

试验地点为北京市门头沟区华北林业实验中心温室。育苗容器规格为24 cm × 20 cm × 36 cm (口径 × 底径 × 高);基质为1:1的草炭和珍珠岩,容重0.16 g/cm³,pH值6.63。N源采用北京凯恩威利化肥国际贸易有限公司生产的含N量43%的缓释N肥;P源为北京庆盛达化工有限公司生产的含P₂O₅量16%的过磷酸钙。通过同一容器内不同N:P供给量设置N:P比例为1:3(N 15 mg/株, P 45 mg/株)、1:2(N 20 mg/株, P 40 mg/株)、1:1(N 30 mg/株, P 30 mg/株)、2:1(N 40 mg/株, P 20 mg/株)、3:1(N 45 mg/株, P 15 mg/株)的处理。以上各N:P比例的设置参考我国东北地区对长白落叶松苗木培育中的N、P施肥量;1:3比例模拟生产上只基肥(磷酸二铵,18-46-0)不追肥处理,1:2—3:1比例分别表示尿素(46-0-0)追肥量逐渐增大直至供N总量达到供P量3倍的水平。每处理3重复,每重复1容器,完全随机摆设。2009年5月14日浇透底水以充分淋洗基质中预存养分,随后根据试验设计施肥后每盆播种50粒;5月29日出苗,6月8日幼苗出齐,6月13日间苗后每盆定株20。出苗期、夏季和秋季每盆灌溉量分别为0.8、0.4和0.2 L。每周雾化灌溉3次并将所有容器重新摆放一次以减少边际影响。基质平均温度26.3℃,昼、夜平均气温分别是30.1℃和20.2℃,空气湿度41%,自然光周期。2009年9月初收获苗木。

(2) 试验二

2009年4月末以常规方法于江米峰苗圃苗床内播种并育苗。为保证取样的代表性,2009年夏季苗木速生期时于苗圃内不同位置完整挖取长势均一的长白落叶松苗木500株并以冰盒(0—4℃)鲜运至实验室。所取苗木平均苗高8.4 cm、地径1.8 mm。洗净根系表面土壤及杂质后,用蒸馏水对苗木进行24 h的养分饥饿预处理。

采用养分耗竭法开展试验,于9:00开始,采用自然光源,试验期间温度保持在23℃。初始营养溶液pH值调至6.5。将饥饿处理的苗木移入容积为90 mL的容器瓶中,每瓶10株苗。分别以NH₄⁺-N和NO₃⁻-N为N源开展不同N:P供给比例的吸收动力学试验,通过调整N浓度实现N:P浓度比例的变化。NH₄⁺-N由(NH₄)₂SO₄提供,NO₃⁻-N由KNO₃提供,P由H₃PO₄提供。每N源各设置5个N浓度:0.6、0.9、1.8、3.6和5.4 mmol/L/株。所有处理P浓度均为1.8 mmol/L/株。因此,各N浓度下分别对应和试验一相同的1:3、1:2、1:1、2:1、3:1的比例。每处理5重复,每瓶为一个测定单元。以小块海绵固定于瓶口处。为控制无氧呼吸,向每瓶内加入1滴H₂O₂。耗竭时间为6 h,逐瓶记录时间。营养液初始体积为75 mL,试验后在30 s内吸干根系表面水分、切下根系并称其鲜重,之后精测每瓶内剩余溶液体积和P浓度。以上试验方法设置参考魏红旭等的报道^[11]。

1.3 指标测定

试验一中苗木收获后立即洗净根系表面

其中10株分为叶、茎和根3部分。称量根系鲜重后,利用EPSON 1600+型扫描仪对根系形态扫描后,以WinRHIZO®软件(加拿大Regent公司)分析扫描生成的TIF图片,并获得根系长度、表面积、体积、根尖数和平均根直径的数据。扫描后根系和茎、根于烘箱内70℃烘干48 h后称其干重生物量,之后粉碎、过1 mm筛后,取0.5 g样品以H₂SO₄-H₂O₂消煮,取7 mL消煮液定容至50 mL,通过0.45 μm滤膜后测定P浓度(ICAP-OES, Perkin Elmer Co., Waltham, United States)^[13]。

试验二中剩余溶液P浓度测定方法同此。

试验一中每盆另外10株苗木以液氮保存至试验室进行酸性磷酸酶活性的测定:

0.1 g鲜样用蒸馏水洗净表面后以滤纸吸干,置于盛有10 mL反应液(以0.2 mol/L CH₃COONa为溶剂在pH值5.8时溶解0.5 g对硝基苯磷酸二钠)试管中,在25℃、黑暗条件下培养30 min后立刻加入1 mL的6

mol/L NaOH 终止反应,在波长 405 nm 处测定反应液中对硝基苯酚(NPP)的量(μg),酸性磷酸酶活性以 $\mu\text{g NPP}/\text{min}/\text{g}$ 根系 FW 来表示,并以培养前加入 1 mL 的 6 mol/L NaOH 为对照^[14]。

1.4 数据计算

P 利用指数的计算参考 Hawkins^[15]所使用的方法,以苗木整株生物量(mg)除以叶片 P 浓度(%)得到。P 吸收效率以全株苗木 P 含量占总供 P 量的百分比得到。为了更为直观的对苗木生物量和 P 吸收在不同施肥处理下的响应进行描述,参考 Salifu 和 Timmer^[16]所介绍的矢量养分分析的方法分别对苗木叶片和根系中的生物量、P 含量和 P 浓度间关系加以矢量化。离子吸收速率 I ($\text{mmol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 鲜重)的计算同魏红旭等^[11]的方法:

$$I = \frac{C_0 \times V_0 - C_1 \times V_1}{T \times RFM}$$

式中, C_0 和 C_1 分别表示处理前后营养液的离子浓度(mmol/L),本试验以营养液中 N 离子浓度的变化来计算 P 的 I 值; V_0 和 V_1 分别表示处理前后营养液的体积(L); T 为处理时间(h); RFM 为根系鲜重(g)。

Michaelis-Mentens 方程描述的计算采用 Hanes-Wolf 线性转换法^[17]:

$$\frac{C}{I} = \frac{K_m}{V_{\max}} + \frac{C}{V_{\max}}$$

式中, C 为营养液离子浓度(mmol/L); $V_{\max}$ 为最大吸收速率($\text{mmol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 鲜重); K_m 为表观米氏常数^[11]。

1.6 数据分析

用 SAS 9.0 软件(SAS Institute Inc., NC, U. S. A.) 的 ANOVA 过程的分析 N:P 供给比例(1:3、1:2、1:1、2:1、3:1)对试验一中测得的苗木生长、P 吸收和利用、酶活性以及试验二中的 P 吸收速率结果的影响,如果 one-way ANOVA 效应显著则以 Tukey 检验对结果在 $\alpha=0.05$ 水平进行多重比较。用 Sigmaplot 11.0 软件(Systat Software, Inc., Washington, U. S. A)对试验一中 P 吸收和利用数据和试验二中 P 吸收速率数据进行回归拟合分析并找出相关关系最为紧密的模型对其进行描述。对比利用 Hanes-Wolf 线性转换所计算出的 Michaelis-Mentens 系数在不同 N 源处理下对苗木根系对 P 吸收速率的差异,并用回归结果估计拟合精度。

2 研究结果

2.1 苗木生长响应

随着 N:P 供给比例的提高,长白落叶松苗木根系生物量呈现增加的趋势($P=0.0027$)(表 1)。2:1 和 3:1 比例下根系生物量分别较 1:3 比例提高了 18% ($P=0.0250$) 和 29% ($P=0.0003$),同时 3:1 比例下根系生物量较 1:1 比例提高了 28% ($P=0.0056$)。和根系生物量的规律类似,根系直径也表现出随着供 N 比例的提高而增加的趋势($P=0.0013$)。3:1 比例下细根长度、表面积和直径分别较 1:1 比例提高了 14% ($P=0.0178$)、21% ($P=0.0004$) 和 5% ($P=0.0009$),但是这两个比例下根系体积或根尖数间均无显著差异(根系体积 $P=0.0934$;根尖数 $P=0.1153$)。1:2 比例下根系长度、表面积和根尖数分别较 1:1 比例下根系高出 10% ($P=0.0024$)、13% ($P=0.0018$) 和 17% ($P=0.0005$)。

表 1 不同 N:P 比对长白落叶松苗木根系生物量和形态指标的影响

Table 1 The effect of N:P ratio on root biomass and root morphological parameters of *L. olgensis* seedlings

N:P	生物量/mg Biomass	长度/cm Length	表面积/ cm^2 Surface area	体积/ cm^3 Volume	根尖数/条 Tip number	直径/mm Diameter
1:3	9.66 $\pm$ 0.07c	34.66 $\pm$ 0.36ab	6.49 $\pm$ 0.21b	84.11 $\pm$ 5.44c	69.83 $\pm$ 1.39b	0.57 $\pm$ 0.01b
1:2	10.00 $\pm$ 0.61bc	36.01 $\pm$ 2.52a	6.68 $\pm$ 0.28ab	95.70 $\pm$ 3.80ab	78.59 $\pm$ 1.21a	0.57 $\pm$ 0.01b
1:1	9.70 $\pm$ 0.45bc	32.80 $\pm$ 0.34b	5.91 $\pm$ 0.06c	87.75 $\pm$ 5.59bc	67.13 $\pm$ 4.48b	0.58 $\pm$ 0.01b
2:1	11.37 $\pm$ 0.48ab	35.64 $\pm$ 1.31ab	6.85 $\pm$ 0.21ab	99.63 $\pm$ 5.28a	78.83 $\pm$ 0.45a	0.61 $\pm$ 0.01a
3:1	12.46 $\pm$ 0.22a	37.26 $\pm$ 0.17a	7.14 $\pm$ 0.23a	98.43 $\pm$ 4.00ab	65.46 $\pm$ 5.34b	0.61 $\pm$ 0.02a

同一列中不同字母表示经 Tukey 检验不同比例对结果的影响间差异在 0.05 水平显著

2.2 N:P 比例对 P 素吸收和利用的影响

N:P 供给比例对叶片 P 浓度具有显著影响($P=0.0187$)。1:2 比例下叶片 P 浓度较 2:1 和 3:1 比例分别高 37% ($P=0.0270$) 和 45% ($P=0.0014$), 但是和 1:3 或 1:1 间差异不显著(1:3 $P=0.0699$; 1:1 $P=0.0804$) (图 1)。N:P 供给比例对根系 P 浓度($P=0.8889$)和叶片与根系中的 P 含量(叶片 $P=0.2459$; 根系 $P=0.9971$; 图 1)均无显著影响。和叶片 P 浓度的响应规律相反, 2:1 和 3:1 比例下 P 利用指数较 1:2 比例显著提高 84% ($P=0.0002$) 和 37% ($P=0.0014$) (图 2), 拟合结果显示当 N:P 比例为 0.488 时 P 利用指数将达到最小值 16。随着 N:P 供给比例的提高, P 吸收效率呈线性正相关响应(图 2), 3:1 比例下的 P 吸收效率较 1:3 和 1:2 比例显著高出 1.9 倍和 1.6 倍($P=0.0004$)。

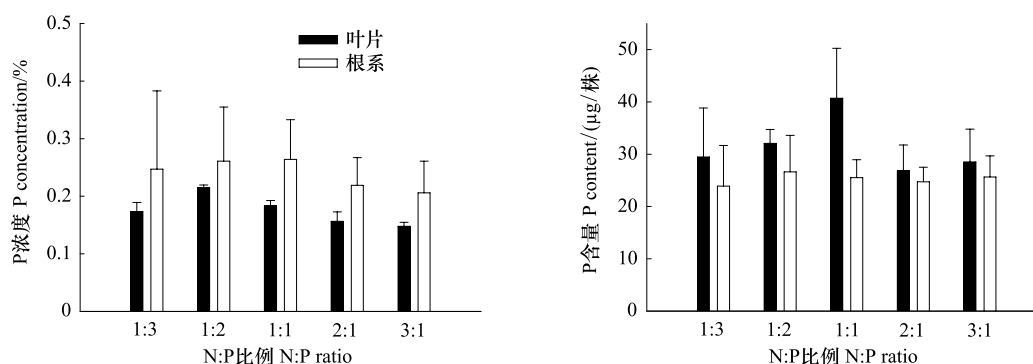


图 1 长白落叶松苗木叶片和根系中 P 浓度和 P 含量对不同 N:P 比例的响应

Fig. 1 Responses of P concentrations and P contents in needles and roots of *L. olgensis* seedlings to different N:P ratios

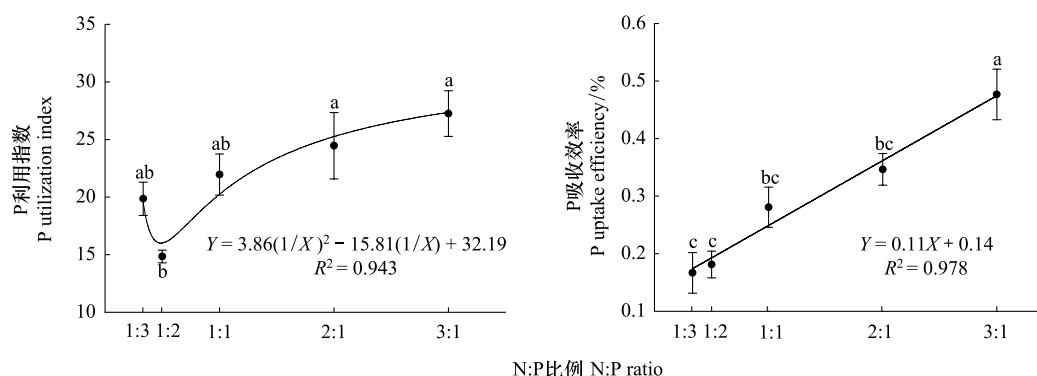


图 2 不同 N、P 比例对长白落叶松苗木 P 利用效率和 P 吸收效率的影响

Fig. 2 The effect of N:P ratio on P utilization index and P uptake efficiency of *L. olgensis* seedlings

以 1:2 比例作为参照进行矢量养分分析的结果显示:对于叶片,除 1:1 比例表现出相对养分稀释的趋势外,3:1、2:1 和 1:3 比例均表现出相对养分亏缺的趋势(图 3)。由于 2:1 和 3:1 比例下叶片 P 浓度显著低于 1:2 比例(图 1),此两个 N:P 比例下叶片的相对养分亏缺症状表现显著(图 3)。然而,2:1 和 3:1 比例下叶片酸性磷酸酶活性显著高于 1:2 比例($P=0.0026$; 表 2)。和 1:2 比例相比,3:1 比例下根系生物量显著提高(表 1),但 P 含量和浓度变化均不显著(图 1),因此该比例下苗木表现出显著的相对养分稀释症状,同时其它比例下苗木则表现出相对养分过量的趋势(图 3)。根系中酸性磷酸酶活性在 1:2 比例下显著高于 1:1 比例($P=0.0003$; 表 2)。

2.3 不同无机 N 形态对 P 素吸收的动力学特征影响

无论在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 还是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 溶液中,不同 N:P 比例下 P 吸收速率间差异均不显著($\text{NH}_4^+\text{-N}$: $P=0.3247$; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: $P=0.0934$)。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 环境中,随着 N 浓度提高而引起的 N:P 比例升高, P 吸收速率呈线性上升;然而

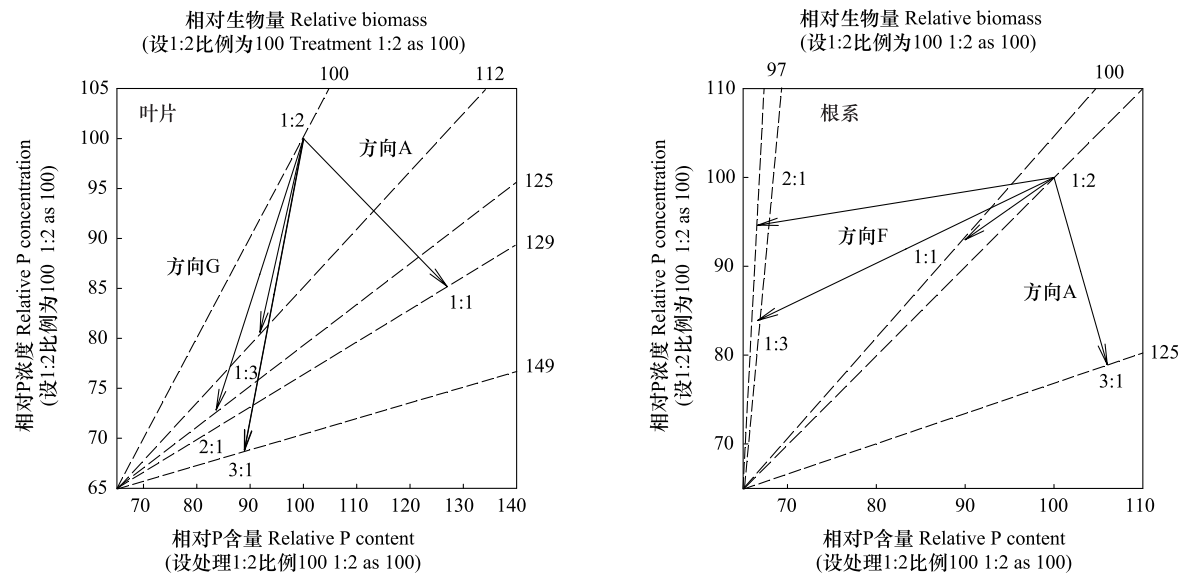


图3 长白落叶松苗木叶片和根系中生物量、P含量和P浓度间关系的矢量营养分析

Fig. 3 Vector analysis of the relationship between biomass, P content and P concentration in needles and roots of *L. olgensis* seedlings
参照值为100;方向A、F、G分别表示和参照点相比所表现出的相对养分稀释、过量和亏缺

NO_3^- -N 环境中,P 吸收速率的下降和 N:P 比例间无相关关系(图4)。吸收动力学参数拟合结果显示: NH_4^+ -N 环境中 $V_{\max}$ 值高于 NO_3^- -N 环境,表明 NH_4^+ -N 环境中根系吸收 P 的潜力较大,且运输 P 的载体数量和效率均较高; NH_4^+ -N 环境中 K_m 值高于 NO_3^- -N 环境,表明 NH_4^+ -N 环境中根系对 P 的亲合力较差(表3)。

表2 长白落叶松苗木针叶和根系中酸性磷酸酶的活性对 N:P 比例的响应/($\mu\text{g NPP min}^{-1} \text{g}^{-1}$ 鲜重)		
Table 2 Responses of activity of acid phosphatase in needles and roots of <i>L. olgensis</i> seedlings to different N:P ratios		
N:P	针叶 Needles	根系 Root
1:3	64.42 $\pm$ 4.43ab	84.52 $\pm$ 4.91ab
1:2	32.16 $\pm$ 0.18c	95.67 $\pm$ 4.83a
1:1	49.28 $\pm$ 1.03bc	66.52 $\pm$ 6.93b
2:1	76.64 $\pm$ 0.33a	79.10 $\pm$ 3.30ab
3:1	63.24 $\pm$ 2.37ab	90.36 $\pm$ 7.14ab

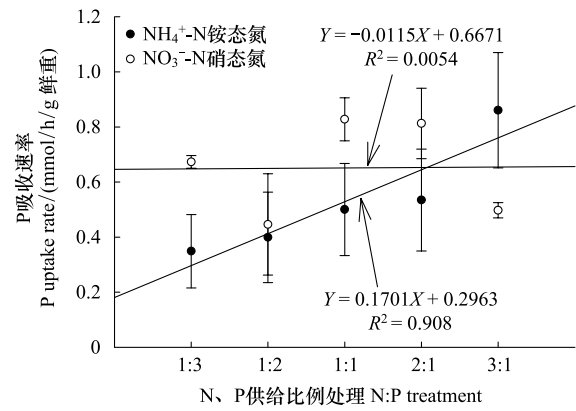


图4 以铵态 N 和硝态 N 为 N 源情况下不同 N:P 比例处理对长白落叶松苗木根系 P 吸收速率的影响

Fig. 4 Effects of NH_4^+ -N and NO_3^- -N originated N:P ratios on P uptake rate in roots of *L. olgensis* seedlings

表3 不同 N 源供给情况下长白落叶松苗木对 P 素吸收的动力学拟合参数估计及其精度

Table 3 Estimation of indices for kinetics of P absorption by roots of <i>L. olgensis</i> seedlings subjected to different N sources				
N 源 N source	参数 Parameter		拟合精度 Regression reliability	
	最大吸收速率 $V_{\max}$ /($\text{mmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}$ 鲜重)	米氏常数 K_m /(mmol/L)	决定系数 R^2	估计误差 SE of estimate
NH_4^+ -N	0.89	0.15	0.769	0.107
NO_3^- -N	0.60	0.03	0.753	0.166

3 讨论与结论

3.1 苗木根系生长响应

试验一中随着 N:P 比例的提高根系生物量的增加(表 1)很有可能是苗木根系在 N 供给逐渐充盈的情况下对供 P 量逐渐降低直至胁迫程度的一种响应机制^[17]。该响应很有可能和根系的细胞分裂素分泌有关^[6]。Güsewell 和 Bollens^[18]对 4 种草本植物的研究结果显示:在中、高 N+P 供给总量的情况下根系生物量均随着 N:P 供给比例的提高而增加,但是在低供养总量时根系生物量和 N:P 供给比例间呈反比。也许试验一中 N+P 的供给总量(60 mg/株)对于长白落叶松苗木来说属于中等偏高水平。细根形态方面,本研究中根系生长结果表明,当 N:P 供给比例较小时,根系主要通过增加新生根系数量提高吸收效率;当供给比例较高时,根系主要通过直径的变粗和变长提高觅养效率(表 1)。当 N:P 供给比例较低时,N 供给相对不足,新生根系数量的增加可能是对此的一种响应机制以攫取更多的 N 素资源;当 N:P 供给比例较高时,虽然 N 供给相对充足,但是 P 的相对缺乏可能对根尖细胞分裂素的产生影响更为显著^[19-20],因此导致根系变长和变粗以启动觅养响应机制。另外,叶片生物量结果和苗木地上形态结果对 N:P 比例响应不显著的根本原因,可能是试验一设计中 N:P 梯度范围不够广泛,没有引起显著的细胞分裂素向地上部分的转移。在另外一个相关研究中^[18] N:P 供给比例在 1.7—135 范围内,植物地上部分生长对此产生了显著响应。

3.2 P 的吸收和利用

试验一中较低 N:P 供给比例时叶片 P 浓度较高是 P 供给量提高的结果(图 1)。但是由于叶片生物量对 N:P 比例响应不显著,P 含量(生物量 × 浓度)亦没有产生显著响应(图 1)。拟合结果显示当 N:P 为 0.488 时 P 利用效率最低,且此时 P 吸收效率亦较低,这说明当 N:P 供给比例较低时,虽然 P 的相对供给量较高,但是长白落叶松苗木对 P 的吸收和利用效率都没有因此而提高。和 1:2 比例相比,更高比例的 N:P 供给下叶片养分亏缺和供 P 不足有关(图 3 A),而根系养分的相对稀释可能源自上文所述的应对相对供养不足而引起的根系生物量增加(图 3 B)。综上,在对长白落叶松苗木进行培育的过程中应规避较低或较高的极端 N:P 供给比例以防止 P 吸收利用效率低下或相对供给不足。

3.3 酸性磷酸酶活性

试验一中叶片酸性磷酸酶活性总体上与叶片 P 浓度间呈负相关关系($Y = -0.0014X + 0.2539$, $R^2 = 0.807$),这个结果与对欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)新生针叶随供 P 量下降而变化的趋势类似^[21],说明酸性磷酸酶在叶片中的活性的提高主要是对 P 供给相对不足的一种响应机制。虽然根系 P 浓度没有对 N:P 比例产生显著响应,但是 1:2 比例下酸性磷酸酶活性显著高于 1:1 比例。产生这种现象的原因可能有:1)根系酸性磷酸酶受缺 P 诱导而产生,但是这种应急响应并没有引起足够显著的 P 吸收的反馈;2)根系酸性磷酸酶的产生不仅受根系 P 的影响,也受到根系 N-P 的联合作用^[21];3)根系酸性磷酸酶的分泌受到了根际微生物的影响^[22];4)由较低的 P 吸收效率(图 2)可以推测,本研究使用过磷酸钙作为 P 供给源可能导致了大量的 P 素在出苗前淋失。

3.4 不同无机 N 形态对 P 吸收的影响

由于本研究试验一中 N:P 供给比例差异是由 N 和 P 的供给量同时变化而产生,因此试验一无法确切回答不同 N 素形态对 P 吸收的影响问题。试验二中,不同 N:P 比例下 P 吸收速率间差异不显著的结果很有可能跟各处理中 P 浓度不变有关。随着 NH_4^+ -N:P 比例的增加 P 吸收速率表现出的升高趋势(图 4)说明在根际 P 浓度不变的情况下, NH_4^+ -N 的增加具有促进 P 吸收的潜力。类似的,大麦(*Hordeum vulgare*)^[8]和彩萼石楠(*Calluna vulgaris*)^[9]的根系 P 吸收量被报道过与根际 NH_4^+ -N 浓度间呈正相关关系。Leonce 和 Miller^[7]曾提出假设认为环境 NH_4^+ -N 浓度主要通过提高运送 P 的载体向木质部释放 P 离子的速率来提高 P 的吸收效率。而 Humble 等^[8]则认为 N 对 P 吸收的促进作用可能和 N 中间体合成过程中 DPNH 或 ATP 等的周转速率提高有关。笔者认为:可能由于长白落叶松苗木对 NH_4^+ -N 的吸收偏好^[11],在 pH=6.5 的土壤条件下,根系对 NH_4^+ -N 的吸收的同时伴随着 H^+ 向根际溶液中反向运输^[7],之后随着根外环境中 H^+ 浓度的增加, H^+ 向根内流入的

电位差也随之增大,同时促进了和 H^+ 同向运输的阴离子 ($H_2PO_4^-$) 流进根内^[23]。本研究结果并非特例, Hawkins 和 Robbions^[24] 通过微电机离子检测技术发现,在 NH_4^+-N 环境中花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*) 苗木可以在 pH 值为 4 或 7 的环境中维持 H^+ 流出至根际,同时美国黑松 (*Pinus contorta*) 苗木可在 pH=7 时维持 H^+ 流出而大豆 (*Glycine max*) 幼苗可在 pH=4 时维持 H^+ 流入根内;严君等^[25] 也发现 NH_4^+-N 的添加能显著提高大豆的 P 吸收效率。相反, $NO_3^- -N$ 浓度的改变对 P 吸收无显著影响的结果可以解释为长白落叶松苗木对 $NO_3^- -N$ 吸收率较低^[11], 导致 H^+ 和 $H_2PO_4^-$ 均没有对 $NO_3^- -N$ 的供给产生显著响应。另一方面,吸收动力学参数拟合结果表明: NH_4^+-N 环境中根系运输 P 的载体效率高于 $NO_3^- -N$ 环境(表 3),这可能是由于后者与 $H_2PO_4^-$ 竞争运输阴离子的载体所致,也可能由于 $NO_3^- -N$ 的吸收需要更多的能量代价,影响了能量向 ATPase 的投入。 NH_4^+-N 环境中根系对 P 的亲合力较差可能和溶液中 NH_4^+ 对 $H_2PO_4^-$ 的吸引有关。

3.5 总结与结论

试验一中较高 N:P 比例时, N 的供给相对充盈而 P 的供给相对匮乏,长白落叶松苗木体内生物量更多的向根系分配,同时根系形态表现出变粗和变长的趋势(表 1)以提高觅养效率。然而,根系酸性磷酸酶活性并没有在高 N:P 比例下表现出太大的变化(表 2),同时 P 浓度也没有显著提高(图 1),因此导致了高 N:P 比例下根系 P 素被稀释的症状(图 3 B)。与根系不同,在 N:P 供给比例较低的 1:2 比例下,叶片 P 浓度表现出显著优势(图 1),导致与之相比的较高 N:P 供给比例下苗木出现显著的养分亏缺症状(图 3 A)。1:2 比例下叶片酸性磷酸酶活性的显著降低现象(表 2),根据前人研究结论^[14,21] 推测极有可能是此比例下 P 相对供给充分所致。但是,如上文所述根系 P 浓度响应并不显著(图 1),此情况下叶片 P 浓度和酸性磷酸酶活性出现的显著响应可能由于部分根系中的 P 以被分配(或重新分配)至叶片。此推论受叶片光合作用机理的支持,因为 P 是限制 RuBisCo 羧化效率最为重要的元素^[26]。因此,需要布设短期试验以排除 P 在苗木体内被重新分配的可能。

由于本研究没有观察基质中 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 含量的情况,上述结果无法从无机 N 形态角度给予合理解释。布设了另一短期的养分吸收动力学试验。结果显示,当 P 浓度不变时,无论溶液中 NH_4^+-N 或 $NO_3^- -N$ 浓度如何变化均没有引起 P 吸收速率的显著改变(图 4)。虽然设计的溶液中 N:P 浓度变化幅度可能会对此结果产生影响,但是 NH_4^+-N 溶液环境中随着 N:P 比例的增加 P 吸收速率所表现出的增加趋势从理论上充分回答了本文前言部分提出的疑问:对于针叶苗木而言根系 P 吸收速率随着 NH_4^+-N 有效性的增加而提高。这也进一步从理论上说明本研究试验一中根系 P 浓度的结果可能和基质中 NH_4^+-N 浓度相对较低有关。更明确的结论需要进一步试验方可确定。

综上,随着 N:P 比例由 1:3 提高到 3:1,虽然 P 的吸收和利用效率会随之增加,但叶片 P 浓度在 N:P 大于 1:2 后会有下降的趋势,且根系 P 的浓度不会产生显著相应。理论上, NH_4^+-N 较 $NO_3^- -N$ 更有利于提高苗木根系中运输 P 的载体效率,且随着 NH_4^+-N :P 比例的提高 P 的吸收速率有增加趋势。因此,如想在 N、P 同时存在的情况下提高苗木对 P 的吸收和利用效率,可考虑适当控制 N 的硝化并在一定范围内提高 N:P 供给比例。

References:

- [1] Warren C R. How does P affect photosynthesis and metabolite profiles of *Eucalyptus globules*? *Tree Physiology*, 2011, 31(7): 727-739.
- [2] Broadley M R, Bowen H C, Cotterill H L, Hammond J P, Meacham M C, Mead A, White P J. Phylogenetic variation in the shoot mineral concentration of angiosperms. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(396): 321-336.
- [3] Ostertag R. Foliar nitrogen and phosphorus accumulation responses after fertilization: an example from nutrient-limited Hawaiian forests. *Plant and Soil*, 2010, 334(1/2): 85-98.
- [4] Huang W J, Zhou G Y, Liu J X. Nitrogen and phosphorus status and their influence on aboveground production under increasing nitrogen deposition in three successional forests. *Acta Oecologica*, 2011, doi: 10.1016/j.actao.2011.06.005.
- [5] Du Y X, Pan G X, Li L Q, Hu Z L, Wang X Z. Leaf N/P ratio and nutrient reuse between dominant species and stands: predicting phosphorus deficiencies in Karst ecosystems, southwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 2011 64(2): 299-309.

- [6] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [7] Leonce F S, Miller M H. A physiological effect of nitrogen on phosphorus absorption by corn. *Agronomy Journal*, 1966, 58(3): 245-249.
- [8] Humble G D, Leboudi A E, Rendig V V. Effect of nitrogen on phosphorus absorption by excised barley roots. *Plant and Soil*, 1969, 31(2): 353-365.
- [9] Khade S W, Rodrigues B F, Sharma P K. Arbuscular mycorrhizal status and root phosphatase activities in vegetative *Carica papaya* L. varieties. *Acta Physiologiae Planta*, 2010, 32(3): 565-574.
- [10] Miller B D, Hawkins B J. Ammonium and nitrate uptake, nitrogen productivity and biomass allocation in interior spruce families with contrasting growth rates and mineral nutrient preconditioning. *Tree Physiology*, 2007, 27(6): 901-909.
- [11] Wei H X, Xu C Y, Ma L Y, Jiang L N, Li X L, Yang Z. Dynamic kinetic characteristics of different forms of nitrogen absorbed by *Larix olgensis* seedling. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 407-412.
- [12] Zhu J J, Liu Z G, Wang H X, Yan Q L, Fang H Y, Hu L L, Yu L Z. Effects of site preparation on emergence and early establishment of *Larix olgensis* in montane regions of northeastern China. *New Forests*, 2008, 36(3): 247-260.
- [13] Williams P N, Zhang H, Davison W, Meharg A A, Hossain M, Norton G J, Brammer H, Islam M R. Organic matter-solid phase interactions are critical for predicting arsenic release and plant uptake in bangladesh paddy soils. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(14): 6080-6087.
- [14] Liang X, Liu A Q, Ma X Q, Feng L Z, Chen Y L. The effect of phosphorus deficiency stress on activities of acid phosphatase in different clones of Chinese fir. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 54-59.
- [15] Hawkins B J. Family variation in nutritional and growth traits in Douglas-fir seedlings. *Tree Physiology*, 2007, 27(6): 911-919.
- [16] 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.
- [17] Kronzucker H J, Siddiqi M Y, Glass A D M. Kinetics of NH_4^+ influx in spruce. *Plant Physiology*, 1996, 110(3): 773-779.
- [18] Güsewell S, Bollens U. Composition of plant species mixtures grown at various N:P ratios and levels of nutrient supply. *Basic and Applied Ecology*, 2003, 4(5): 453-466.
- [19] Forde B G. The role of long-distance signaling in plant responses to nitrate and other nutrients. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(366): 39-43.
- [20] Falkengren-Grerup U. Nitrogen response of herbs and graminoids in experiments with simulated acid soil solution. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1): 93-99.
- [21] Kolari K K, Sarjala T. Acid phosphatase activity and phosphorus nutrition in Scots pine needles. *Tree Physiology*, 1995, 15(11): 747-752.
- [22] Olde Venterink H. Legumes have a higher root phosphatase activity than other forbs, particularly under low inorganic P and N supply. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2): 137-146.
- [23] Marschner H. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. London: Academic Press, 2002: 889-889.
- [24] Hawkins B J, Robbins S. pH affects ammonium, nitrate and proton fluxes in the apical region of conifer and soybean roots. *Physiologia Plantarum*, 2010, 138(2): 238-247.
- [25] Yan J, Han X Z, Zu W. Effects of Nitrogen forms on root morphology and phosphorous efficiency in soybean (*Glycine max* L.). *Soybean Science*, 2010, 29(6): 1003-1007.
- [26] Warren C R, Livingston N J, Turpin D H. Photosynthetic responses and N allocation in Douglas-fir needles following a brief pulse of nutrients. *Tree Physiology* 2004, 24(6): 601-608.

参考文献:

- [11] 魏红旭, 徐程扬, 马履一, 江俐妮, 李雪莲, 杨卓. 长白落叶松幼苗对铵态氮和硝态氮吸收的动力学特征. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 407-412.
- [14] 梁霞, 刘爱琴, 马祥庆, 冯丽贞, 陈友力. 磷胁迫对不同杉木无性系酸性磷酸酶活性的影响. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 54-59.
- [25] 严君, 韩晓增, 祖伟. 不同形态氮肥对大豆根系形态及磷效率的影响. *大豆科学*, 2010, 29(6): 1003-1007.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《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 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 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