

刘士玲, 陈琳, 庞圣江, 等. 施 N、P 肥对西南桦无性系幼苗生长及叶片 N、P 含量的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(2): 111-116.
LIU Shiling, CHEN Lin, PANG Shengjiang, et al. Effects of N and P fertilization on growth and leaf N and P contents of *Betula alnoides* clone seedlings[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(2): 111-116.

施 N、P 肥对西南桦无性系幼苗生长及叶片 N、P 含量的影响

刘士玲^{1,2}, 陈琳¹, 庞圣江¹, 张培¹, 杨保国¹,
韦菊玲¹, 李朝英¹, 贾宏炎¹
(1 中国林业科学研究院 热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600;
2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西 凭祥 532600)

摘要:【目的】研究施氮、磷肥对西南桦 *Betula alnoides* 无性系生长和叶片养分含量的影响, 筛选适宜的施肥配方。【方法】以 4 个西南桦优良无性系组培苗 (A5、FB4、FB4⁺、BY-1) 为研究对象, 试验按完全随机区组设计, 通过设置每株施 N(0、200、400 mg) 和施 P(0、70、140 mg) 共 9 个组合处理, 研究施肥处理间及无性系间幼苗的苗高、地径、生物量、根冠比、分枝数、叶面积和叶片养分含量等差异。【结果】不同施肥处理幼苗的苗高、地径、生物量、分枝数、根冠比和叶面积差异均极显著, 且施肥处理和无性系的交互作用对苗高、地径、根冠比和分枝数影响达极显著水平。各无性系均为处理 5 的幼苗生长表现最优, 其苗高、地径、生物量、分枝数和叶面积比其他施肥处理分别提高了 2.10%~74.13%、6.67%~91.45%、12.24%~358.33%、2.76%~712.64% 和 2.46%~456.31%。施肥处理对西南桦无性系幼苗叶片的 N、P 养分含量的影响均达到极显著水平, 而无性系之间及无性系和施肥处理的交互作用对叶片养分含量的影响差异不显著。叶片的 N、P 含量随着氮磷肥的添加而增加, 添加氮磷肥能够显著提高叶片中该种养分的含量。叶片 N、P 含量及其比值与生物量均符合抛物线关系, 且呈显著的正相关关系 ($P<0.0001$), 处理 5 的叶片 N/P 质量比约为 15, 这可能是影响西南桦生长的 N/P 限制比例。【结论】施肥显著促进了西南桦无性系幼苗的生长并提高了叶片养分含量, 但无性系之间差异不显著。综合幼苗的生长和叶片养分含量指标, 处理 5(每株施 N 200 mg 和施 P 70 mg) 条件下西南桦无性系生长表现最优。

关键词: 西南桦; 生物量; 无性系; 施肥; 叶片养分
中图分类号: S723.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2020)02-0111-06

Effects of N and P fertilization on growth and leaf N and P contents of *Betula alnoides* clone seedlings

LIU Shiling^{1,2}, CHEN Lin¹, PANG Shengjiang¹, ZHANG Pei¹, YANG Baoguo¹,
WEI Juling¹, LI Zhaoying¹, JIA Hongyan¹
(1 Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China;
2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, China)

Abstract: 【Objective】To reveal the effects of nitrogen and phosphorus additions on growth and leaf nutrient content of *Betula alnoides* clone seedlings, and select the optimal fertilization formula. 【Method】Four *B. alnoides* clones (A5, FB4, FB4⁺, BY-1) were chosen as the materials and a completely randomized experimental design with nine treatments including three N levels (0, 200 and 400 mg per seedling) and three P levels (0, 70 and 140 mg per seedling) was conducted to compare the differences in seedling height, root collar diameter, biomass,

ratio of root to shoot, branch number, leaf area and leaf nutrient content of *B. alnoides* clones in different fertilization treatments. 【Result】 Seedling height, root collar diameter, biomass, branch number, ratio of root to shoot and leaf area were significantly affected by fertilization treatment, and the effects of clone-fertilization treatment interaction were significantly different in seedling height, root collar diameter, ratio of root to shoot and branch number. Regardless of the clone, the treatment five had superior seedling height, root collar diameter, biomass, branch number and leaf area, being 2.10%–74.13%, 6.67%–91.45%, 12.24%–358.33%, 2.76%–712.64%, 2.46%–456.31% higher than those of other fertilization treatments, respectively. Leaf N and P contents of different fertilization treatments were significantly different, however there was no significant difference in clones and the interaction between clone and fertilization treatments. The contents of N and P in leaves increased with the additions of nitrogen and phosphorus fertilizers, and additions of nitrogen and phosphorus fertilizers could significantly increase the accumulation of these nutrients in leaves. Seedling biomass, leaf N content, leaf P content and N/P mass ratio were in a parabolic relationship, and they showed a significant positive correlation ($P<0.000\ 1$). N/P mass ratio of 15 might be the limiting ratio affecting the growth of *B. alnoides*. 【Conclusion】 Fertilization significantly promotes the growth and improves leaf nutrient contents of *B. alnoides* seedlings, but there is no significant difference among clones. Based on the seedling growth and leaf nutrient content indexes, treatment five (200 mg N and 70 mg P per seedling) exhibits the optimal growth performance for *B. alnoides* clones.

Key words: *Betula alnoides*; biomass; clone; fertilization; leaf nutrient

N 和 P 是植物生长最主要的限制元素, N 是植物的蛋白质、核酸、叶绿素和许多次生代谢产物中的重要成分, 在光合过程的酶活性中起着至关重要的作用, P 在植物代谢中起着核心作用。外源增施氮、磷肥, 能改变土壤中的氮磷结构比例, 调控植物应对环境的生长策略, 进而影响植物生长^[1]。不同植物对养分的需求以及不同土壤的特定肥力指标并不相同^[2]。有研究表明, 增加施肥后植物的生长效率和酶活性也增加^[3-4], 而有些研究者发现生长效率在很大程度上不受营养元素添加的影响^[5-6], 且适宜的施肥配方往往因树种或者无性系而异^[7-8]。因此, 有必要针对特定树种开展施肥配方研究。

西南桦 *Betula alnoides* 是我国热带、亚热带地区优良的乡土阔叶树种, 它生长快、材质优, 有较高的经济价值, 其林分具有优良的生态特性, 如涵养水源、维持生物多样性和固定碳素等, 当前种植面积已逾 15 万 hm^2 。随着西南桦种植业迅速发展, 对容器苗数量和质量的要求不断提高。育苗容器基质中的养分含量往往无法满足苗木的生长发育所需, 因此通过科学施肥补充苗木营养需求已成为国内外育苗管理的一项重要研究内容。目前, 西南桦苗木施肥的研究主要集中在营养元素的种类、最佳施肥量和施肥方法等方面^[9-15]。研究认为, 适量地添加 N、P 会增加西南桦幼苗生长量, 但现有对西南桦开展的配方施肥研究报道较少, 且多见于 N 或 P 的单独作用。鉴于此, 本文以 4 个西南桦无性系组培

苗为研究对象, 通过设置 N、P 添加试验, 阐明西南桦无性系对不同施肥处理的响应差异, 揭示西南桦无性系适宜的施肥配方, 为西南桦育苗施肥策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站中国林业科学研究院热带林业实验中心站点, 地理位置为 22°05'00"N, 106°48'12"E, 该地属于亚热带季风气候, 年平均气温 21.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温约 6 000~7 600℃, 年均降水量 1 400 mm, 相对湿度 80%~84%。

1.2 试验设计

2017 年 10 月—2018 年 1 月在热带林业实验中心苗圃温室内开展氮磷施肥对西南桦无性系幼苗生长及叶片 N、P 含量影响的试验。

参试的 4 个西南桦无性系为 A5、BY-1、FB4、FB4⁺, 其组培苗来自热带林业实验中心苗圃, 平均高度约为 4 cm。氮肥为尿素, $w(\text{N})\geq 46.4\%$, 设置 3 个单株施 N 水平 (0、200、400 mg)。磷肥为钙镁磷肥, $w(\text{P}_2\text{O}_5)\geq 18\%$, 设置 3 个单株施 P 水平 (0、70、140 mg)。为防止苗木缺素, 按照每株 332 mg 施入 K 肥, 钾肥为氯化钾 (K_2O 质量分数 $\geq 60\%$)。采用完全随机区组设计, 共 9 个组合处理, 具体见表 1, 每个小区 25 株, 3 次重复 (区组), 共计 2 700 株。

表 1 西南桦无性系苗木单株施肥处理

Table 1 Fertilization treatment for per seedling of *Betula alnoides* clone

处理编号 No. of treatment	施N量/mg N application amount	施P量/mg P application amount	施K量/mg K application amount
1(CK)	0	0	332
2	0	70	332
3	0	140	332
4	200	0	332
5	200	70	332
6	200	140	332
7	400	0	332
8	400	70	332
9	400	140	332

移苗前将黄心土、炭化树皮、沤制锯末、沤制树皮按体积比 1:1:3:6 充分混合, 做为基质装入 12 cm (直径)×15 cm(高) 的无纺布袋, 置于塑料盘中。育苗基质 pH 为 6.14, 全 N、全 P、全 K 和有机质质量分数分别为 4.24、0.70、3.18 和 29.97 g/kg。磷肥作为基肥一次性施入基质中, 移苗后 1 个月, 开始追施氮肥和钾肥, 每周施肥 1 次, 共 10 次。每隔 2 周移动 1 次苗盘, 以减小边际效应对试验结果的影响。

表 2 不同施肥处理下的西南桦无性系苗木生长表现¹⁾

Table 2 Growth performance of *Betula alnoides* clone seedlings in different fertilization treatments

项目 Item	编号 Number	苗高/cm Seedling height	地径/mm Root collar diameter	生物量/g Biomass	根冠比 Ratio of root to shoot	分枝数 Branch number	叶面积/cm ² Leaf area
处理 Treatment	1(CK)	10.01±1.33e	1.17±0.34c	0.24±0.04c	0.39±0.07a	0.87±0.62c	73.59±14.77c
	2	10.80±1.79de	1.26±0.34c	0.27±0.06c	0.37±0.15a	1.66±0.89bc	84.54±21.02c
	3	11.07±1.77d	1.39±0.33c	0.31±0.08c	0.38±0.07a	2.11±1.54b	98.36±23.34c
	4	16.61±0.50abc	2.07±0.27ab	0.86±0.17b	0.27±0.10b	6.78±0.84a	364.97±85.89ab
	5	17.43±0.49a	2.24±0.29a	1.10±0.19a	0.18±0.02d	7.07±0.27a	409.39±94.00a
	6	17.07±1.36ab	2.10±0.32ab	0.97±0.26ab	0.21±0.04bcd	6.88±1.45a	399.57±87.38a
	7	15.92±0.76c	1.90±0.33b	0.89±0.12b	0.26±0.08bc	6.58±0.93a	317.79±81.23b
	8	16.36±0.80bc	2.00±0.27ab	0.98±0.18ab	0.20±0.02cd	6.51±1.15a	354.25±107.68ab
	9	16.15±0.74bc	2.03±0.24ab	0.89±0.18b	0.23±0.05bcd	6.17±0.75a	347.78±123.73ab
无性系 Clone	A5	14.77±3.19a	1.59±0.42c	0.69±0.36a	0.28±0.10a	5.42±3.07a	257.15±148.43a
	FB4	14.80±2.32a	1.85±0.33ab	0.69±0.30a	0.29±0.10a	5.12±1.93a	279.42±151.72a
	FB4 ⁺	14.81±2.89a	1.81±0.47bc	0.81±0.44a	0.24±0.09a	4.90±2.60a	305.94±186.45a
	BY-1	14.02±3.82a	2.01±0.59a	0.70±0.34a	0.30±0.13a	4.39±2.87a	246.47±134.38a
变异来源 Source of variance	处理 Treatment	114.19**	39.06**	58.06**	17.99**	126.47**	33.05**
	无性系 Clone	0.42	4.00**	0.72	1.76	0.65	0.53
	处理×无性系 Treatment×Clone	2.27**	2.46**	0.70	2.09**	2.60**	0.31

1) 同一项目同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's法); “***”表示差异达0.01显著水平(双因素方差分析)
1) Different lowercase letters in the same column of the same item indicated significant differences($P<0.05$, Duncan's test); “***” indicated significances at 0.01 level(Two-way ANOVA)

1.3 生长及养分含量测定

试验结束时, 统计每个小区幼苗的存活率, 测定所有幼苗的苗高、地径、分枝数等。每个小区分别选取 5 株标准西南桦无性系幼苗, 用于生物量、叶面积和叶片养分含量的测定。用去离子水将苗木冲洗干净, 并分为根、枝和叶 3 部分取样。吸干叶片表面水分, 应用 Microtek Scan Maker 9700XL 扫描仪获取叶片图像, 叶面积计算采用 Chen 等^[16]的方法。将根、枝和叶部分分别放入烘箱内, 65 ℃ 条件下烘 48 h 至恒质量, 测定各部分的干物质量。将烘干称质量后的叶片样品粉碎, 过筛后用于叶片养分含量的测定。植株样品用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 全 N、全 P 含量分别用扩散法和钼锑抗比色法测定。

1.4 数据分析

利用 SPSS 19.0 软件一般线性模型对西南桦幼苗生长和叶片养分含量指标进行方差分析和 Duncan's 多重比较分析, 用 Sigmaplot 10.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 西南桦无性系幼苗生长表现

不同施肥处理下的西南桦无性系幼苗生长情况见 表 2。方差分析表明: 不同施肥处理对西南桦无性系幼苗的苗高、地径、生物量、根冠比、分枝数

和叶面积影响极显著 ($P<0.01$); 4 个无性系的生长指标 (地径除外) 均差异不显著 ($P>0.05$); 施肥处理和无性系的交互作用除对生物量和叶面积无显著影响外, 其他生长指标均差异极显著。

施肥处理的西南桦无性系幼苗各生长指标 (除根冠比外) 均高于 CK 处理。其中, 处理 5 的苗高、地径、生物量、分枝数和叶面积生长表现最优。多重比较发现, 处理 5 和处理 4、6 的苗高差异不显著, 3 个处理的苗高均显著高于其他处理, 是 CK 处理的 1.66~1.74 倍; 处理 5 和处理 4、6、8、9 的地径、叶面积差异不显著, 比 CK 处理分别提高了 70.94%~91.45% 和 372.59%~456.31%; 处理 5 和处理 4、6、7、8、9 的分枝数差异不显著, 是 CK 处理的 8.13 倍;

处理 5 和处理 6、8 的生物量差异不显著, 是 CK 处理的近 4.58 倍。不同施肥处理西南桦幼苗根冠比表现为 CK 处理最大, 与处理 2 和 3 无显著差异, 但均显著高于其他处理。

无性系间比较, 除地径外, 4 个无性系各生长指标均无显著性差异, 但无性系 FB4⁺的苗高、生物量和叶面积均略高于其他 3 个无性系, BY-1 的地径和根冠比大于其他 3 个无性系。

2.2 西南桦无性系幼苗叶片养分状况

由表 3 可知, 施肥处理对西南桦无性系幼苗叶片的 N、P 含量的影响均达到极显著水平 ($P<0.01$), 无性系对叶片养分含量的影响均未达到显著水平, 且不存在明显的无性系和施肥处理的交互作用。

表 3 不同施肥处理对西南桦无性系苗木叶片养分含量的影响¹⁾

Table 3 Effects of different fertilization treatments on leaf nutrient contents of <i>Betula alnoides</i> clone seedings			
项目 Item	编号 Number	w/(g·kg ⁻¹)	
		N	P
处理 Treatment	1(CK)	21.42±2.66c	1.49±0.39c
	2	22.08±3.07c	1.76±0.41bc
	3	22.47±3.08c	1.94±0.49ab
	4	30.06±3.05b	1.84±0.25ab
	5	30.33±2.58b	2.00±0.23a
	6	28.69±2.57b	2.17±0.34a
	7	30.55±3.00ab	1.81±0.23ab
	8	32.63±1.35a	1.86±0.28ab
	9	30.08±2.08b	1.98±0.2ab
无性系 Clone	A5	28.20±4.65a	1.86±1.12a
	FB4	28.15±4.68a	1.86±0.90a
	FB4 ⁺	28.64±5.06a	1.94±1.07a
	BY-1	27.07±5.06a	1.81±1.70a
变异来源 Source of variance	处理 Treatment	32.96**	3.44**
	无性系 Clone	1.82	0.62
	处理×无性系 Treatment×Clone	1.05	0.63

1)同一项目同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's法); “**”表示差异达0.01显著水平(双因素方差分析)
1) Different lowercase letters in the same column of the same item indicated significant differences($P<0.05$, Duncan's test); “**” indicated significances at 0.01 level(Two-way ANOVA)

不同施肥处理叶片 N 含量均高于 CK 处理, 其中, 处理 8 的叶片 N 含量最高, 比其他处理增加了 6.80%~52.33%。多重比较进一步发现, 单施氮肥 (处理 4 和 7) 或氮磷肥混施 (处理 5、6、8 和 9) 的西南桦幼苗叶片 N 含量与 CK 相比显著提高, 单施磷肥的处理 2 和 3 对叶片 N 含量无显著影响。与 CK 相比, 各施肥处理显著影响了西南桦苗木叶片 P 含量, 其中, 处理 6 的叶片 P 含量最高, 是其他处理的 1.09~1.46 倍。无性系间比较, 无性系 FB4⁺的

叶片 N、P 含量高于其他 3 个无性系, 但差异不显著。

2.3 西南桦无性系幼苗单株生物量与叶片养分的相关性

通过绘制西南桦无性系幼苗叶片的 N、P 含量及其比值与生物量的散点图, 及对叶片的 N、P 含量及其比值与生物量的统计分析表明, 叶片 N、P 含量及其比值与生物量均符合抛物线关系, 且呈显著的正相关关系 ($P<0.000\ 1$, 图 1)。从拟合的一元二次抛物线方程可以看出, 西南桦幼苗生物量与叶片 N/P

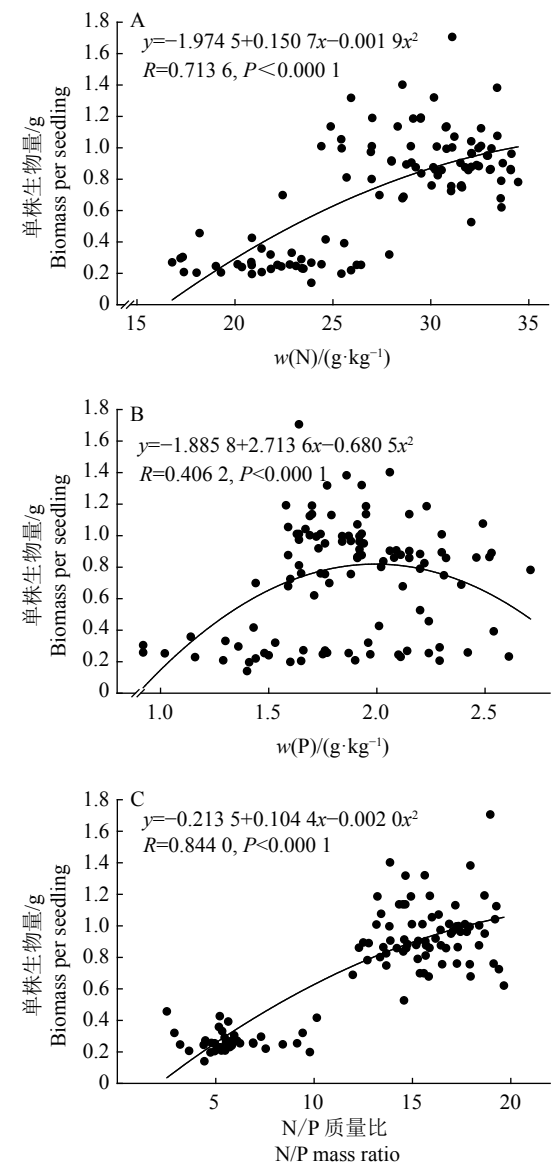


图1 西南桦无性系幼苗叶片养分含量与生物量的关系
Fig. 1 Relationship between leaf nutrient content and biomass of *Betula alnoides* clone seeding

质量比的相关性最大 ($R=0.844\ 0$), 其次是叶片 N 含量 ($R=0.713\ 6$), 叶片 P 含量与幼苗生物量的相关性最小 ($R=0.406\ 2$)。不同施肥处理相比, 西南桦幼苗生物量在处理 5 最大, 而在处理 6 略有降低, 结合生物量与叶片 N/P 质量比的变化规律图 (图 1C), 推测处理 5 的叶片 N/P 质量比约为 15, 这可能是影响西南桦生长的 N/P 限制比例。

3 讨论与结论

N、P 缺乏对植物产生负面影响^[17-18]。本研究中, 施肥处理的西南桦无性系幼苗的苗高、地径、生物量、叶面积和分枝数均高于对照, 其中, 处理 5 (每株施 N 200 mg、施 P 70 mg) 的生长表现最好, 这与以往研究者^[13,15,19-21]认为适量地添加氮磷肥能促进

林木生长的研究结论一致。然而, Gotore 等^[6]研究表明, 单施氮肥对树木生长有负面影响; Rothstein^[22]研究表明, 与未施肥的对照处理相比, 单独或组合添加常量营养元素处理均未促进北美短叶松 *Pinus banksiana* 的生长。其原因可能在于林木不同生长阶段对施肥的需求不同或干旱胁迫等立地条件限制了林木对施肥的响应。此外, 添加氮磷肥能否促进植物生长与幼苗所生长的基质养分有关。基质养分趋于饱和状态时, 施肥不一定能促进幼苗的生长。如 Santiago 等^[23]研究表明, 高施 N 未促进巴拿马中部巴罗科罗拉多自然保护区吉加特半岛的 5 种最常见热带树种幼苗的生长, 与研究地土壤 N 养分已趋于饱和有关。

叶片的养分含量已被认为是反映林分生长和土壤肥力的重要指标^[24]。植物体内某种元素含量会随着该种元素的添加而明显增加, 但对于其他含量稳定的元素可能使其含量降低, 即产生稀释效应^[25]。本研究结果表明, 叶片的 N、P 含量随着氮、磷肥的添加而增加, 支持了 Chen 等^[12]、彭少麟^[25]和严正兵等^[26]的结论; 单施氮肥或磷肥, 西南桦无性系幼苗叶片 N、P 含量增加, 但与对照差异不显著, 这一结果在前人对刨花楠 *Machilus pauhoi* 的相关研究中也得到证实^[27]。植物叶片 N/P 质量比反映植物生长的环境养分供应状况, 被广泛应用于植物的营养限制诊断。研究认为, 较低的 N/P 质量比说明植物受 N 限制, 较高的 N/P 质量比说明植物受 P 限制。刘洋等^[28]根据巨桉 *Eucalyptus grandis* 生物量与 N/P 质量比的变化规律, 认为叶片 N/P 质量比 <15 时, 巨桉生长受 N 含量限制。本研究中, 西南桦无性系幼苗生物量在处理 5 施肥条件下最大, 而在处理 6 (每株施 N 200 mg、施 P 140 mg) 条件下略有降低, 结合生物量与叶片 N/P 质量比的变化规律, 推测叶片 N/P 质量比约为 15 可能是影响西南桦无性系生长的 N/P 质量比限制比例。

对于同一树种, 其生长对施肥的响应往往因种质材料而异。如韦如萍等^[8]对低 P 胁迫下杉木 *Cunninghamia lanceolate* 无性系根系形态进行研究, 发现杉木的根系形态指标随施 P 水平的变化呈极显著的基因型效应差异; 宋平等^[29]研究表明, 马尾松 *Pinus massoniana* 无性系幼苗的根系对不同 N、P 处理水平的形态反应差异显著; 赵燕等^[30]研究亦表明, 在相同施肥处理条件下, 不同系号毛白杨 *Populus tomentosa* 苗木的响应不尽一致。本研究中, 西南桦不同无性系幼苗的生长表现和叶片养分

状况对施肥的响应亦存在差异,但无性系间的差异不显著,与上述研究结果一致。

参考文献:

[1] VITOUSEK P M. Nutrient cycling and nutrient use efficiency[J]. *Am Nat*, 1982, 119(4): 553-572.

[2] SALIFU K F, JACOBS D F, BIRGE Z K D. Nursery nitrogen loading improves field performance of *Bareroot oak* seedlings planted on abandoned mine lands[J]. *Restor Ecol*, 2009, 17(3): 339-349.

[3] LI H, LI M C, LUO J, et al. N fertilization has different effects on the growth, carbon and nitrogen physiology, and wood properties of slow- and fast-growing *Populus* species[J]. *J Exp Bot*, 2012, 63(17): 6173-6185.

[4] BALSTER N J, MARSHALL J D. Eight-year responses of light interception, effective leaf area index, and stemwood production in fertilized stands of interior Douglasfir (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*)[J]. *Can J Forest Res*, 2000, 30(5): 733-743.

[5] SAMUELSON L, STOKES T, COOKSEY T, et al. Production efficiency of loblolly pine and sweetgum in response to four years of intensive management[J]. *Tree Physiol*, 2001, 21(6): 369-376.

[6] GOTORE T, MUREPA R, GAPARE W J. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the early growth of *Pinus patula* and *Eucalyptus grandis*[J]. *J Trop Forest Sci*, 2014, 26(1): 22-31.

[7] 王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7452-7462.

[8] 韦如萍, 胡德活, 陈金慧, 等. 低磷胁迫下杉木无性系根系形态及养分利用响应研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 1-8.

[9] 白尚斌. 西南桦、思茅松和北美红杉幼苗对 N、P 养分的适应机制[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002.

[10] 邹慧. 西南桦幼苗菌根真菌接种与施磷效应研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.

[11] 陈琳, 曾杰, 徐大平, 等. 氮素营养对西南桦幼苗生长及叶片养分状况的影响[J]. *林业科学*, 2010, 46(5): 35-40.

[12] CHEN L, JIA H Y, ZENG J, et al. Growth and nutrient efficiency of *Betula alnoides* clones in response to phosphorus supply[J]. *Ann Forest Res*, 2016, 59(2): 199-207.

[13] 刘士玲, 陈琳, 杨保国, 等. 氮磷施肥对西南桦无性系生物量分配和根系形态的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(5): 23-29.

[14] CHEN L, WANG C S, DELL B, et al. Growth and nutrient dynamics of *Betula alnoides* seedlings under exponential fertilization[J]. *J Forest Res*, 2018, 29(1): 111-119.

[15] 艾娟娟. 不同林业废弃物基质及施肥配方对西南桦和柚木的生长效应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.

[16] CHEN L, ZENG J, JIA H Y, et al. Growth and nutrient uptake dynamics of *Mytilaria laosensis* seedlings under

exponential and conventional fertilizations[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2012, 58(5): 618-626.

[17] BOYCE R L, LARSON J R, SANFORD R L. Phosphorus and nitrogen limitations to photosynthesis in Rocky Mountain bristlecone pine (*Pinus aristata*) in Colorado[J]. *Tree Physiol*, 2006, 26(11): 1477-1486.

[18] TURNBULL T L, WARREN C R, ADAMS M A. Novel mannose-sequestration technique reveals variation in subcellular orthophosphate pools do not explain the effects of phosphorus nutrition on photosynthesis in *Eucalyptus globulus* seedlings[J]. *New Phytol*, 2007, 176(4): 849-861.

[19] GUO J, WU Y Q, WANG B, et al. The effects of fertilization on the growth and physiological characteristics of *Ginkgo biloba* L.[J]. *Forests*, 2016, 7(12): 293-306.

[20] NEWTON P F, AMPONSAH I G. Systematic review of short-term growth responses of semi-mature black spruce and jack pine stands to nitrogen-based fertilization treatments[J]. *Forest Ecol Manag*, 2006, 237(1/2/3): 1-14.

[21] WHITE P J, BROWN P H. Plant nutrition for sustainable development and global health[J]. *Ann Bot*, 2010, 105(7): 1073-1080.

[22] ROTHSTEIN D E. Effect of fertilization on growth and mortality of jack pine growing on poor, sandy soils in Michigan, USA: Implications for sustainable management[J]. *Forests*, 2018, 9(9): 549-561.

[23] SANTIAGO L S, WRIGHT S J, HARMS K E, et al. Tropical tree seedling growth responses to nitrogen, phosphorus and potassium addition[J]. *J Ecol*, 2012, 100(2): 309-316.

[24] BARRONGAFFORD G A, WILL R E, BURKES E C, et al. Nutrient concentrations and contents, and their relation to stem growth, of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities[J]. *Forest Sci*, 2003, 49(2): 291-300.

[25] 彭少麟. 热带亚热带恢复生态学研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 177-180.

[26] 严正兵, 金南瑛, 韩廷申, 等. 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(6): 551-557.

[27] 靳冰洁. 氮、磷施肥对刨花楠及马尾松幼苗生长的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.

[28] 刘洋, 张健, 陈亚梅, 等. 氮磷添加对巨桉幼苗生物量分配和 C : N : P 化学计量特征的影响[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(10): 933-941.

[29] 宋平, 张蕊, 张一, 等. 模拟氮沉降对低磷胁迫下马尾松无性系细根形态和氮磷效率的影响[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1136-1144.

[30] 赵燕, 董雯怡, 张志毅, 等. 施肥对毛白杨杂种无性系幼苗生长和光合的影响[J]. *林业科学*, 2010, 46(4): 70-77.