植物营养与肥料学报 2014,20(1):118-128
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0113

氮、磷肥对杉木幼苗生物量及养分分配的影响

于钦民[1], 徐福利[1,2*], 王渭玲[3]
(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院, 水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3 西北农林科技大学生命科学学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 采用盆栽试验,研究了不同氮、磷肥对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)幼苗生物量及养分分配的影响。结果表明,供磷可促进杉木幼苗植株和各器官生物量的增加,并影响叶、茎、根生物量的分配比例,氮、磷处理幼苗叶生物量占全株生物量的45% 以上,施氮反而降低杉木叶、茎、根的生物量;施氮显著增加根和叶的氮含量,而显著降低根和叶的磷含量,对茎的氮、磷含量没有明显影响;施磷显著降低叶、茎、根的氮含量,叶、茎、根的磷含量随供磷水平的增加而逐渐增加。氮磷配施显著影响叶、茎、根的氮、磷含量和氮、磷累积量。叶片是主要的氮、磷养分存储器官。氮(或磷)水平的增加可降低杉木幼苗的磷(或氮)利用效率,提高氮(或磷)的利用效率;氮、磷肥显著影响杉木幼苗叶、茎、根的 N/P 比。研究结果说明,氮、磷肥增加了杉木幼苗各器官生物量和氮、磷含量,影响了幼苗的养分分配和营养平衡。

关键词: 杉木; 氮、磷肥; 生物量; 养分分配; N/P 比
中图分类号: S791.27.01; S725.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0118-11

Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on biomass and nutrient distribution of *Cunninghamia lanceolata* seedlings

YU Qin-min[1], XU Fu-li[1,2*], WANG Wei-ling[3]
(*1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China;*
2 Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China; 3 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract: A pot experiment method was used to study the effects of different nitrogen and phosphorus fertilization on biomass and nutrient distribution of *Cunninghamia lanceolata* seedlings. The results show that the high phosphorus fertilization increases the biomass amounts of total plant and individual parts, and the plant biomass allocation ratios among leaves, stems and roots are also affected by different phosphorus fertilization. For treatment supplied with nitrogen and phosphorus, the biomass of leaves accounts for more than 45% of total plant biomass. Instead, applying nitrogenous fertilizer reduces the biomass amounts of leaves, stems and roots in *Cunninghamia lanceolata*. The application of nitrogen significantly increases N concentrations of roots and leaves, and remarkably decreases P concentrations of roots and leaves, but has no significant effect on nitrogen and phosphorus concentrations of stems. The application of phosphate fertilizer significantly decreases N concentrations of leaves, stems and roots. P concentrations of leaves, stems and roots are increased with the increase of phosphorus fertilization supply. Nitrogen mixed with phosphorus fertilization can significantly affect N and P concentrations, and N and P accumulations of leaves, stems and roots. Leaves are the main tissue for nitrogen and phosphorus accumulation in the plant. High nitrogen or phosphorus levels on *Cunninghamia lanceolata* decrease P or N nutrient

收稿日期: 2013-05-10 **接收日期:** 2013-09-26
基金项目: 国家重点基础研究发展计划"973 计划"(2012CB416902)资助。
作者简介: 于钦民(1986—),男,广西梧州人,硕士研究生,主要从事养分管理方面的研究。E-mail: minqinyu@163.com
* 通信作者 E-mail: xfl-163@163.com

use efficiencies, increase N or P nutrient use efficiencies. Different nitrogen and phosphorus fertilization ratios on *Cunninghamia lanceolata* significantly influence N/P ratios of leaves, stems and roots. This research results indicate that the nitrogen and phosphorus fertilization increases biomass and N and P concentrations in leaves, stems and roots of *Cunninghamia lanceolata* seedlings, and affects nutrient distribution and nutrient balance of total plant.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; nitrogen and phosphorus fertilization; biomass; nutrient distribution; N/P ratio

氮、磷是植物生长发育需求量较大的两种矿质营养元素,对植物的生长具有调控作用,同时,它们也是陆地生态系统中限制林木生长的重要因子[1],不同程度地限制着植物个体的生长、群落的发育乃至整个生态系统的生产力[2-5]。在这种情况下,植物为满足自身生长发育的需求,会通过重新分配这些受限资源来调节,以缓解氮、磷营养胁迫的压力。因此,氮和磷的供应调控着植物的生长,了解植物的这些养分利用过程,尤其是重要的生态、经济树种,如杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等,对更好地认识和发挥植物潜在的生理生态功能、指导林分和林地营养管理和提高森林生产力等具有重要的理论和实践意义。

杉木是我国特有的、著名的速生用材树种[6],是我国南方地区最主要的造林树种之一,其面积和蓄积在我国人工林中均居首位,对缓解我国木材供需矛盾具有重要意义。但是,不合理的林业经营措施引起了杉木林地地力衰退,导致了林地生产力降低和林木质量下降,已严重影响和限制了杉木人工林的生产力及可持续发展[7-8]。张建国[9]等认为,从本质上说地力衰退的原因是土壤肥力系统的失调或破坏。因此,通过施肥补充土壤营养,调节营养平衡是提高林分生产力的必然途径[10]。为此,许多学者对杉木人工林幼林施肥效应[11-12]和苗木施肥效果[9,13]进行了大量研究,对施肥导致土壤营养变化规律、树木的营养特性和肥效作用机理有了比较深入的认识,取得了一定的进展。但是对施肥如何影响杉木氮、磷养分分配和营养平衡缺乏深入的探讨。本文旨在研究氮、磷营养对杉木幼苗生物量的分配及氮、磷养分分配的影响,以探讨杉木苗木对氮、磷营养的需求特性和吸收利用机制,明确不同养分供给条件下杉木生长与养分分配的基本规律,为杉木苗木培育、养分管理和幼林施肥提供基础理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地设在陕西杨凌中国科学院水利部水土保持研究所盆栽实验场(108°～108°07′E,34°12′～34°20′N),海拔520 m,年均降水量635 mm,年均气温12.9℃。供试土壤为黄棕壤,取自商洛市镇安县北城坡0—40 cm土层(原生植被为油松纯林,土壤条件与杉木所需生长条件一致),土样过0.5 cm筛后加10%的碎石和砂子混匀而成培育基质。土壤有机质含量18.55 g/kg,全氮1.39 g/kg,硝态氮35.54 mg/kg,铵态氮10.11 mg/kg,有效磷3.54 mg/kg,pH为7.22。

1.2　试验设计

供试苗木为大小一致、生长良好的1年生杉木幼苗(产自广西柳州市融安县西山林场,酸性红壤土,pH 6.5,平均苗高15.50 cm,平均地径0.34 cm),试验容器为直径30 cm、高25 cm的塑料桶,每盆装基质10 kg,种植杉木幼苗一株。试验共16个处理(试验方案见表1),每个处理6盆。在防雨棚下进行试验。

苗木定植后,选择生长良好的杉木苗进行施肥处理,每个施肥处理6个重复,定期浇水,保证苗木充足的水分。氮肥用尿素(含N 46%),磷肥用过磷酸钙($P_2O_5 \geq 12\%$)。先将肥料溶于水中,以溶液的形式施入,肥料分2次施入,间隔时间为15d。

1.3　测定项目和方法

施肥处理150 d后各处理随机挑选3盆收获全株,将叶、茎、根分开,于105℃杀青后在80℃烘干至恒重,分别测定叶、茎和根的干重,然后测定叶、茎、根的氮、磷含量。植株样品用浓$H_2SO_4-H_2O_2$消煮,氮含量用凯氏定氮法测定,磷含量用钼锑抗比色法测定。植株叶、茎和根的养分累积量=干重(叶、茎和根)×养分含量(叶、茎和根)[14],氮、磷养分利用效率=生物量/养分贮量[15]。

表1 氮、磷施肥方案

Table 1 Nitrogen and phosphorus fertilization scheme

编号 Number	处理 Treatment	施氮量 N rate (N g/pot)	施磷量 P rate (P_2O_5 g/pot)	编号 Number	处理 Treatment	施氮量 N rate (N g/pot)	施磷量 P rate (P_2O_5 g/pot)
1	N_0P_0	0	0	9	N_1P_2	2	4
2	N_1	2	0	10	N_1P_3	2	6
3	N_2	4	0	11	N_2P_1	4	2
4	N_3	6	0	12	N_2P_2	4	4
5	P_1	0	2	13	N_2P_3	4	6
6	P_2	0	4	14	N_3P_1	6	2
7	P_3	0	6	15	N_3P_2	6	4
8	N_1P_1	2	2	16	N_3P_3	6	6

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 SSPS 软件进行统计分析,用可重复双因素方差分析法和 LSD 法进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 氮、磷肥对杉木苗植株生物量的影响

生物量是衡量树木生产力的重要指标,其与植物光合作用关系密切。植物不同器官生物量的大小表明了光合产物分配的多少。由表2和表3可以看出,施氮和施磷均对杉木幼苗的生物量分配与积累有显著影响,且施氮与施磷有显著交互作用。随着供磷水平的提高,杉木叶、茎、根的生物量呈显著增长趋势,而施氮反而会降低杉木叶、茎、根的生物量。不同施肥处理的叶、茎、根生物量显著高于不施肥处理(N_0P_0),氮磷配施明显促进杉木幼苗叶、茎、根的生长,其中 P_3 + N 处理的效果最为显著。与施氮处理相比,施磷促进了杉木幼苗的生长,可能与南方土壤氮素含量普遍高而磷较缺乏有关,因此可以判断杉木幼苗的生物量受磷素养分的限制。

从各处理的叶茎比(干重比)可以看出,随着供

表2 不同氮、磷水平下杉木幼苗的平均生物量 (g/plant,DW)

Table 2 The mean biomass of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different N and P application rates

氮、磷水平 N,P rate	处理 Treatment	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	全株 Total plant
N_0	N_0P_0、P_1、P_2、P_3	7.81 ±2.63 b	4.73 ±1.71 a	3.61 ±1.47 a	16.15 ±5.80 a
N_1	N_1、N_1P_1、N_1P_2、N_1P_3	5.98 ±1.66 d	3.04 ±0.96 d	2.69 ±1.26 b	11.71 ±3.81 c
N_2	N_2、N_2P_1、N_2P_2、N_2P_3	7.24 ±1.57 c	3.52 ±1.03 c	3.06 ±1.28 b	13.82 ±3.81 b
N_3	N_3、N_3P_1、N_3P_2、N_3P_3	8.56 ±1.94 a	4.06 ±1.38 b	3.53 ±1.16 a	16.14 ±4.41 a
P_0	N_0P_0、N_1、N_2、N_3	5.71 ±1.55 c	2.68 ±0.61 d	2.05 ±0.65 d	10.44 ±2.70 d
P_1	P_1、N_1P_1、N_2P_1、N_3P_1	6.07 ±1.60 c	3.15 ±1.40 c	2.57 ±1.09 c	11.78 ±4.00 c
P_2	P_2、N_1P_2、N_2P_2、N_3P_2	8.20 ±1.61 b	4.24 ±1.04 b	3.46 ±0.89 b	15.89 ±3.39 b
P_3	P_3、N_1P_3、N_2P_3、N_3P_3	9.62 ±1.07 a	5.27 ±0.86 a	4.81 ±0.43 a	19.69 ±2.15 a

注(Note):同列数据后不同字母表示(氮水平或磷水平)处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment(N or P level) at the 5% level.

表 3　氮、磷肥对杉木幼苗生物量的分配

Table 3　Nitrogen and phosphorus fertilization for *Cunninghamia lanceolata* seedling biomass distribution

处理 Treatment	叶干重 Leaf dry mass (g/plant)	茎干重 Stem dry mass (g/plant)	根干重 Root dry mass (g/plant)	全株干重 Total mass (g/plant)	根冠比 Root/shoot ratio	叶茎比 Leaf/stem ratio
N_0P_0	3.69 ±0.03 k(52.79)	2.02 ±0.15 i(28.90)	1.28 ±0.25 f(18.31)	6.99 ±0.35 i	0.22	1.83
N_1	5.01 ±0.39 ij(53.41)	2.43 ±0.37 hi(25.91)	1.94 ±0.37 def(20.68)	9.38 ±0.73 ghi	0.26	2.10
N_2	6.71 ±0.38 fg(55.82)	2.99 ±0.46 fgh(24.88)	2.32 ±0.58 cde(19.30)	12.02 ±1.35 def	0.24	2.27
N_3	7.43 ±0.32 ef(55.57)	3.28 ±0.52 fg(24.53)	2.66 ±0.46 cd(19.90)	13.37 ±1.20 de	0.25	2.29
P_1	8.34 ±0.32 de(46.83)	5.33 ±0.57 abc(29.93)	4.14 ±0.61 b(23.24)	17.81 ±1.7 9 c	0.30	1.57
P_2	9.08 ±1.06 cd(47.66)	5.57 ±0.64 ab(29.24)	4.40 ±0.61 ab(23.10)	19.05 ±2.30 bc	0.30	1.63
P_3	10.14 ±0.45 ab(48.90)	5.99 ±0.56 a(28.88)	4.61 ±0.39 ab(22.22)	20.74 ±1.39 ab	0.29	1.70
N_1P_1	4.34 ±0.54 jk(52.86)	2.17 ±0.48 hi(26.43)	1.70 ±0.47 ef(20.71)	8.21 ±1.36 hi	0.26	2.03
N_1P_2	6.23 ±0.70 gh(52.18)	3.28 ±0.54 fg(27.47)	2.43 ±0.29 cde(20.35)	11.94 ±1.50 def	0.26	1.91
N_1P_3	8.35 ±0.56 de(48.29)	4.27 ±0.63 de(24.70)	4.67 ±0.26 ab(27.01)	17.29 ±1.41 c	0.37	1.97
N_2P_1	5.38 ±0.58 hi(54.56)	2.53 ±0.54 ghi(25.66)	1.95 ±0.59 def(19.78)	9.86 ±1.41 fhg	0.25	2.18
N_2P_2	7.56 ±0.56 ef(53.35)	3.60 ±0.37 ef(25.41)	3.01 ±0.40 c(21.24)	14.17 ±1.21 d	0.27	2.10
N_2P_3	9.31 ±0.78 bcd(48.44)	4.95 ±0.44 bcd(25.75)	4.96 ±0.38 a(25.81)	19.22 ±1.53 abc	0.35	1.88
N_3P_1	6.21 ±0.39 gh(55.20)	2.57 ±0.52 ghi(22.84)	2.47 ±0.40 cde(21.96)	11.25 ±1.22 efg	0.28	2.46
N_3P_2	9.91 ±0.57 abc(53.83)	4.51 ±0.57 cd(24.50)	3.99 ±0.38 b(21.67)	18.41 ±1.42 bc	0.28	2.21
N_3P_3	10.67 ±0.73 a(49.58)	5.86 ±0.44 a(27.23)	4.99 ±0.70 a(23.19)	21.52 ±1.85 a	0.30	1.82

注(Note):括号中数据表示各部分干重占全株干重的百分比 Data in parentheses are percentages of the dry weight in individual plant parts out of the total dry weight in all plant parts. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

氮(或磷)水平的提高,叶茎比呈升高(降低)趋势。施肥处理的杉木幼苗的根冠比(干重比)在 0.22 ~ 0.37 之间,施肥后,根在植株体的重量所占比例增加。总体上看,施肥处理的叶生物量占全株生物量的 45% 以上,茎生物量在全株生物量所占比例不超过 30%,根生物量在全株生物量所占比例低于 25%。不施肥处理的植株叶、茎、根生物量显著低于施肥处理。

与不施肥处理相比,施氮条件下,杉木幼苗叶干重提高 35.77% ~ 101.36%,茎干重增加 20.30% ~ 62.38%,根干重增加 51.56% ~ 107.81%,由此可知根干重的增幅最大,其次为叶干重、茎干重。施磷条件下,叶干重增加 126.02% ~ 174.80%,茎干重增加 163.86% ~ 196.53%,根干重提高 223.44% ~ 260.16%,因此根干重的增幅最大,其次为茎干重、叶干重。在施氮(或磷)处理中,$N_3 + P(P_3 + N)$ 处理的叶干重、茎干重和根干重的增幅最大。此外,比较生物量可以看出,不同施氮水平对干物质在叶部累积的百分率影响不同,与不施肥处理相比,干物质在叶部的累积有所提高,增加幅度为 0.62% ~ 3.03%;根部干物质累积量也有不同程度的提高,增加幅度为 0.99% ~ 2.37%;与根部相反,茎部的干物质累积率下降了 2.99% ~ 4.37%,由此可见,干物质的累积由茎部向叶部和根部转移。不同施磷水平叶部干物质累积量有不同程度的下降,与不施肥处理相比,下降幅度为 3.89% ~ 5.96%;与叶部相反,茎部和根部的干物质累积率分别增加了 0 ~ 1.03%、3.91% ~ 4.93%,说明干物质的累积由叶部

向茎部和根部转移。氮磷配施处理的叶部干物质累积率变化不明显,茎部干物质累积量呈下降趋势,而根部则呈增加趋势,说明干物质的累积由茎部向根部转移。以上分析表明,施氮、磷肥使杉木幼苗地上部分(叶和茎)的干物质累积转移到地下部分(根),原因可能是杉木处于幼龄期,根系快速生长,为杉木苗的生长吸收更多养分,其机理需进一步研究。

2.2 氮、磷肥对杉木幼苗养分分配的影响

2.2.1 氮、磷肥对杉木幼苗氮含量和分配的影响

表4和表5显示,施氮显著增加杉木幼苗根和叶的氮含量,对茎的氮含量没有显著影响。施磷显著降低叶、茎和根的氮含量,随着供磷水平的增加,茎和根的氮累积量逐渐增加。氮磷配施显著影响杉木幼苗叶、茎、根的氮含量。施氮、磷可明显增加叶、茎和根的氮累积量,氮累积量主要集中在叶和茎。由于杉木叶、茎和根生物量分配的不同,氮累积量在植株中的分配也有明显差异,植株地上部分(叶、茎)的氮累积量达到70%～80%,而叶的氮累积量达到全株累积量的40%～60%,成为整个植株氮贮存的主要器官。可以看出,氮主要贮存在叶片,其次为茎和根。

2.2.2 氮、磷肥对杉木幼苗磷含量和分配的影响

从表6和表7可以看出,施氮显著降低杉木幼苗根和叶的磷含量和各器官的磷累积量,而对茎的磷含量没有显著影响。随着供磷水平的增加,杉木幼苗的叶、茎、根中磷含量和磷累积量呈现增长趋势。氮、磷配施显著影响叶、茎、根的磷含量和磷累积量。各施肥处理显著增加杉木叶、茎、根的磷累积量,由于叶、茎、根的生物量分配不同,磷在杉木植株内的累积量主要在叶和根器官。磷在叶的累积量达到全株磷累积量的35%～45%,根的累积量达到全株磷累积量的30%左右。说明磷在叶中的累积量最大,其次为根和茎。

2.3 氮、磷肥对杉木幼苗养分利用效率的影响

养分利用效率反映了树木对养分环境的适应状况和利用状况。从图1、图2、图3和图4可以看出,施氮显著降低了杉木幼苗的氮素利用效率,显著提高磷素利用效率;施磷使磷素利用效率明显下降,但显著提高氮素利用效率;氮磷配施处理中,N_3+P处理的氮、磷利用效率显著降低,表明较高水平的氮供应可限制杉木幼苗对氮、磷养分的利用,但其机理仍需进一步研究。

2.4 氮、磷肥对杉木幼苗N/P比的影响

由表8可以看出,不同施肥处理对杉木的N/P比产生重要影响。施氮可显著提高叶、茎和根的N/P比;施磷则叶和根的N/P比显著下降,茎的N/P比呈上升趋势,这是由于茎的氮含量增加幅度大于磷含量的增幅;氮磷配施处理下杉木幼苗叶、

表4 不同氮、磷水平下杉木叶、茎、根的平均氮含量和氮累积量

Table 4 The mean N concentrations and accumulations in different parts of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different nitrogen and phosphorus fertilizer treatments

氮磷水平 N, P rate	处理 Treatment	氮含量 N concentration(g/kg)			氮累积量 N accumulation(mg/plant)		
		叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
N_0	N_0P_0、P_1、P_2、P_3	7.00±0.79 c	9.72±2.01 a	8.25±0.50 b	51.21±15.47 c	48.73±21.97 a	30.21±12.85 ab
N_1	N_1、N_1P_1、N_1P_2、N_1P_3	8.65±2.56 b	9.87±2.30 a	9.82±1.25 a	50.49±14.30 c	29.60±9.64 c	27.10±14.71 b
N_2	N_2、N_2P_1、N_2P_2、N_2P_3	8.40±3.36 b	9.58±3.58 a	9.43±0.99 a	59.67±22.38 b	31.97±9.92 c	27.90±9.04 b
N_3	N_3、N_3P_1、N_3P_2、N_3P_3	9.96±1.69 a	9.85±2.87 a	9.51±0.75 a	84.61±19.77 a	39.04±14.47 b	33.08±9.27 a
P_0	N_0P_0、N_1、N_2、N_3	11.78±2.51 a	12.36±3.61 a	9.64±1.37 a	69.94±27.80 b	34.52±14.89 bc	20.19±7.53 c
P_1	P_1、N_1P_1、N_2P_1、N_3P_1	7.41±0.99 b	9.31±1.29 b	9.19±0.94 b	44.76±11.72 d	30.76±18.19 c	23.46±9.46 c
P_2	P_2、N_1P_2、N_2P_2、N_3P_2	7.19±1.09 b	8.41±1.78 c	9.15±0.77 b	57.23±17.65 c	36.65±15.87 b	31.29±6.84 b
P_3	P_3、N_1P_3、N_2P_3、N_3P_3	7.63±1.40 b	8.94±1.50 c	9.03±1.16 b	74.05±19.30 a	47.41±12.38 a	43.34±5.74 a

注(Note):同列数据后不同字母表示(氮水平或磷水平)处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment(N or P level) at the 5% level.

表 5　不同施肥处理下叶、茎、根的氮含量和氮累积量

Table 5　N concentrations and accumulations in different parts of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different fertilizer treatments

处理 Treatments	氮含量 N concentration(g/kg)			氮累积量 N accumulation(mg/plant)		
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
N_0P_0	7.90 ±0.25 de	6.53 ±0.11 h	7.66 ±0.08 g	29.16 k (55.90)	13.20 g (25.31)	9.80 g (18.79)
N_1	12.78 ±1.09 b	13.45 ±0.97 b	10.72 ±0.58 a	64.02 de (54.48)	32.69 cd (27.82)	20.80 def (17.70)
N_2	13.89 ±1.10 a	15.29 ±0.31 a	10.44 ±0.77 ab	93.19 b (57.13)	45.71 b (28.02)	24.23 de (14.85)
N_3	12.57 ±0.65 b	14.18 ±0.46 b	9.74 ±0.84 bc	93.40 b (56.33)	46.49 b (28.04)	25.92 de (15.63)
P_1	6.69 ±0.72 f	11.23 ±0.44 c	8.65 ±0.26 def	55.77 fg (36.82)	59.86 a (39.53)	35.82 c (23.65)
P_2	6.57 ±0.94 f	11.12 ±0.44 c	8.24 ±0.65 fg	50.56 ghi (33.99)	61.93 a (41.63)	36.27 c (24.38)
P_3	6.84 ±0.56 f	10.01 ±0.36 d	8.45 ±0.19 efg	69.36 d (41.23)	59.94 a (35.63)	38.94 bc (23.14)
N_1P_1	7.23 ±0.40 ef	8.18 ±0.66 fg	8.08 ±0.44 fg	31.38 jk (49.90)	17.76 fg (28.25)	13.74 fg (21.85)
N_1P_2	7.25 ±0.57 ef	8.33 ±0.23 f	9.74 ±0.72 bc	45.18 i (47.02)	27.34 de (28.46)	23.66 de (24.62)
N_1P_3	7.35 ±0.60 ef	9.51 ±0.69 de	10.75 ±0.68 a	61.38 ef (40.33)	40.63 bc (26.69)	50.19 a (32.98)
N_2P_1	6.88 ±0.53 ef	9.05 ±0.40 ef	9.93 ±0.38 abc	36.99 j (46.68)	22.89 ef (28.89)	19.36 ef (24.43)
N_2P_2	6.31 ±0.47 f	7.38 ±0.70 gh	9.25 ±0.17 cde	47.71 hi (46.72)	26.56 de (26.01)	27.84 d (27.27)
N_2P_3	6.53 ±0.26 f	6.61 ±0.17 h	8.10 ±0.20 fg	60.78 ef (45.48)	32.71 cd (24.47)	40.16 bc (30.05)
N_3P_1	8.84 ±0.31 cd	8.77 ±0.62 ef	10.10 ±0.30 abc	54.90 fgh (53.63)	22.53 ef (22.01)	24.94 de (24.36)
N_3P_2	8.62 ±0.53 d	6.83 ±0.56 h	9.37 ±0.68 cd	85.45 c (55.63)	30.79 de (20.04)	37.38 bc (24.33)
N_3P_3	9.81 ±0.31 c	9.62 ±0.81 de	8.83 ±0.74 def	104.68 a (51.04)	56.35 a (27.47)	44.08 ab (21.49)

注(Note): 括号中数据表示各部分氮累积量占全株氮累积量的百分比 Data in parentheses are percentages of N accumulation in individual plant parts out of total N accumulation in all plant parts. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

表 6　不同氮、磷水平下叶、茎、根的平均磷含量和磷累积量

Table 6　The mean P concentrations and accumulations in different parts of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different nitrogen and phosphorus fertilizer treatments

氮磷水平 N, P rate	处理 Treatment	磷含量 P concentration (g/kg)			磷累积量 P accumulation (mg/plant)		
		叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
N_0	N_0P_0、P_1、P_2、P_3	1.13 ±0.23 a	1.15 ±0.24 b	1.50 ±0.22 a	9.36 ±4.28 a	5.64 ±2.50 a	5.66 ±2.62 a
N_1	N_1、N_1P_1、N_1P_2、N_1P_3	0.82 ±0.12 b	1.27 ±0.43 a	1.34 ±0.29 b	4.96 ±2.13 d	4.36 ±2.34 b	3.68 ±1.91 c
N_2	N_2、N_2P_1、N_2P_2、N_2P_3	0.82 ±0.11 b	1.15 ±0.15 b	1.35 ±0.23 b	5.92 ±1.70 c	3.77 ±1.19 c	4.06 ±1.62 c
N_3	N_3、N_3P_1、N_3P_2、N_3P_3	0.82 ±0.11 b	1.20 ±0.37 ab	1.40 ±0.21 ab	6.95 ±1.05 b	5.15 ±3.05 a	5.06 ±2.05 b
P_0	N_0P_0、N_1、N_2、N_3	0.74 ±0.06 d	0.88 ±0.13 c	1.13 ±0.05 c	4.31 ±1.33 d	2.50 ±0.63 d	2.31 ±0.73 d
P_1	P_1、N_1P_1、N_2P_1、N_3P_1	0.95 ±0.11 b	1.18 ±0.27 b	1.49 ±0.21 ab	5.88 ±2.31 c	3.93 ±2.39 c	3.90 ±1.96 c
P_2	P_2、N_1P_2、N_2P_2、N_3P_2	0.87 ±0.24 c	1.35 ±0.18 a	1.59 ±0.17 a	7.20 ±2.72 b	5.37 ±1.54 b	5.56 ±1.80 b
P_3	P_3、N_1P_3、N_2P_3、N_3P_3	1.02 ±0.23 a	1.37 ±0.35 a	1.39 ±0.23 b	9.78 ±2.56 a	7.13 ±1.85 a	6.70 ±0.62 a

注(Note): 同列数据后不同字母表示(氮水平或磷水平)处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment(N or P level) at the 5% level.

表7 不同施肥处理下叶、茎、根的磷含量和磷累积量

Table 7 P concentrations and accumulations in different parts of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different fertilizer treatments

处理 Treatments	磷含量 P concentration(g/kg)			磷累积量 P accumulation(mg/plant)		
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
N_0P_0	0.80 ±0.01fg	0.88 ±0.02 ef	1.17 ±0.04 efg	2.96 h(47.51)	1.77 f(28.41)	1.50 f(24.08)
N_1	0.66 ±0.06 i	0.97 ±0.09 e	1.12 ±0.05 fg	3.32 h(38.65)	3.11 de(36.20)	2.16 ef(25.15)
N_2	0.73 ±0.03 ghi	0.95 ±0.11 e	1.07 ±0.04 g	4.88 g(47.75)	2.85 de(27.89)	2.49 def(24.36)
N_3	0.77 ±0.03 fgh	0.69 ±0.06 g	1.17 ±0.03 efg	6.09 f(53.10)	2.27 ef(19.79)	3.11 cde(27.11)
P_1	1.11 ±0.01 c	1.43 ±0.01 b	1.65 ±0.09 ab	9.24 c(38.95)	7.64 b(32.21)	6.84 ab(28.84)
P_2	1.24 ±0.08 b	1.32 ±0.08 bc	1.71 ±0.05 a	11.30 b(43.21)	7.34 b(28.07)	7.51 a(28.72)
P_3	1.37 ±0.09 a	0.97 ±0.03 e	1.48 ±0.03 abcd	13.92 a(52.43)	5.82 c(21.92)	6.81 ab(25.65)
N_1P_1	0.82 ±0.02 f	0.77 ±0.03 fg	1.29 ±0.12 defg	3.32 h(46.17)	1.68 f(23.37)	2.19 def(30.46)
N_1P_2	0.80 ±0.03 fg	1.61 ±0.15 a	1.57 ±0.18 abc	4.97 g(35.35)	5.27 c(37.48)	3.82 c(27.17)
N_1P_3	0.98 ±0.02 d	1.73 ±0.15 a	1.40 ±0.50 cde	8.22 de(37.13)	7.37 b(33.29)	6.55 ab(29.58)
N_2P_1	0.91 ±0.05 e	1.25 ±0.11 cd	1.68 ±0.10 a	4.89 g(43.16)	3.16 de(27.89)	3.28 cd(28.95)
N_2P_2	0.70 ±0.05 hi	1.28 ±0.02 c	1.36 ±0.02 cdef	5.27 fg(40.95)	3.51 d(27.27)	4.09 c(31.78)
N_2P_3	0.93 ±0.01 de	1.13 ±0.02 d	1.28 ±0.06 defg	8.64 cd(41.98)	5.58 c(27.12)	6.36 b(30.90)
N_3P_1	0.97 ±0.05 de	1.26 ±0.12 cd	1.33 ±0.04 cdef	6.08 f(48.29)	3.24 de(25.74)	3.27 cde(25.97)
N_3P_2	0.74 ±0.07 gh	1.19 ±0.09 cd	1.71 ±0.10 a	7.28 e(37.45)	5.35 c(27.52)	6.81ab(35.03)
N_3P_3	0.78 ±0.01f g	1.66 ±0.07 a	1.42 ±0.10 bcd	8.35 cd(33.19)	9.75 a(38.75)	7.06 ab(28.06)

注(Note)：括号中数据表示各部分磷累积量占全株磷累积量的百分比 Data in parentheses are percentages of P accumulation in individual plant parts out of total P accumulation in all plant parts. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

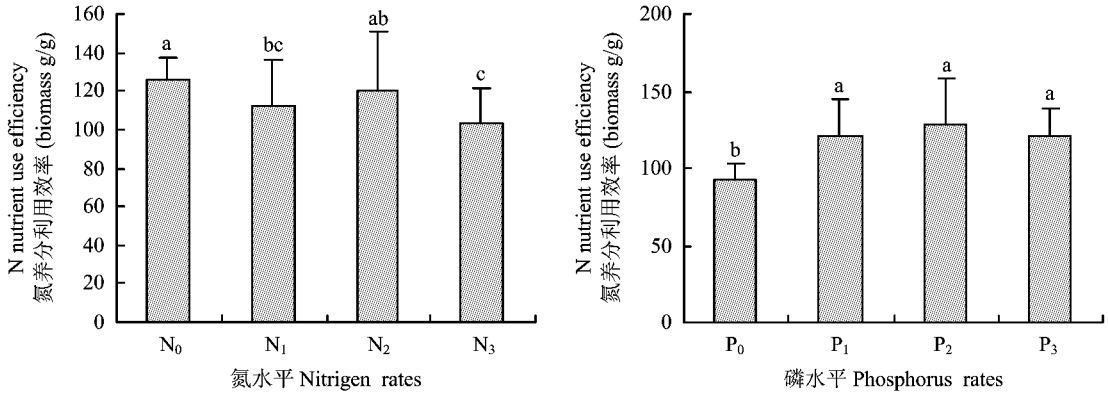

图1 不同氮、磷水平下杉木幼苗氮素利用效率

Fig.1 N use efficiency of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different nitrogen and phosphorus fertilizer treatments

[注(Note)：N_0、N_1、N_2、N_3、P_0、P_1、P_2、P3 代表施 N 或 P 水平相同的 4 个处理的平均值,具体见表 2 Reprensent the mean values of 4 treatments applied with corresponding N or P rates, as shown in Table 2；柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significant among treatment at the 5% levels.]

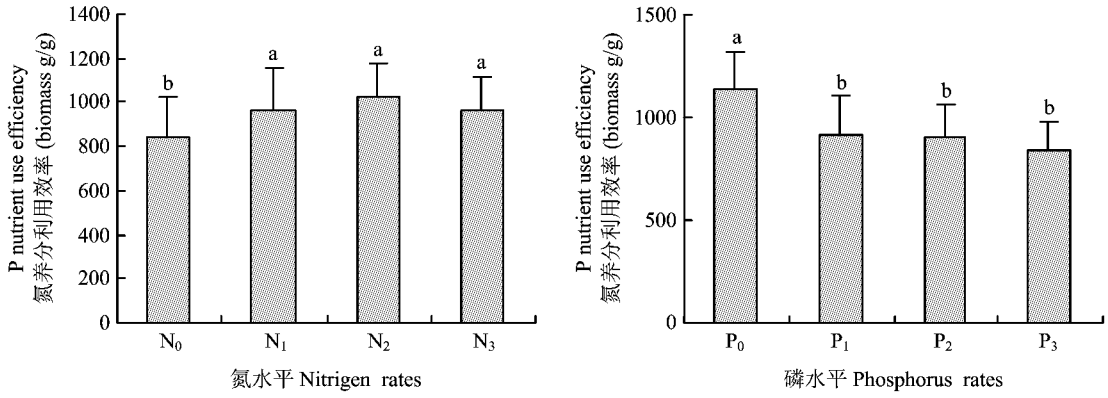

图 2　不同氮、磷水平下杉木幼苗磷素利用效率

Fig. 2　P use efficiency of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different nitrogen and phosphorus fertilizer treatments

[注(Note): N_0、N_1、N_2、N_3、P_0、P_1、P_2、P3 代表施 N 或 P 水平相同的 4 个处理的平均值,具体见表 2 Reprensent the mean values of 4 treatments applied with corresponding N or P rates, as shown in Table 2; 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant among treatment at the 5% levels.]

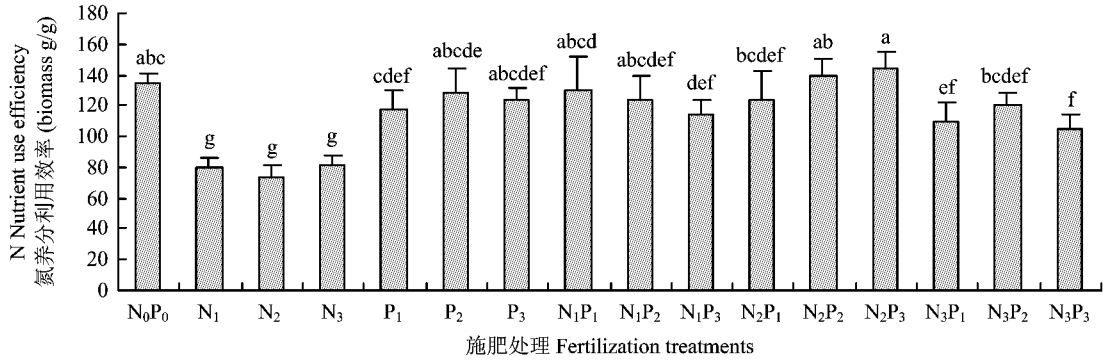

图 3　不同施肥处理下杉木幼苗氮养分利用效率

Fig. 3　N use efficiency of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different fertilizer treatments

注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant among treatment at the 5% levels.]

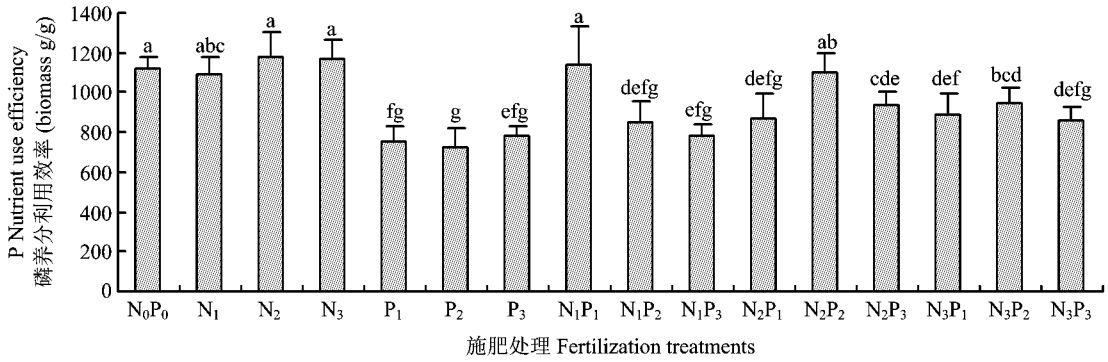

图 4　不同施肥处理下杉木幼苗磷养分利用效率

Fig. 4　P use efficiency of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different fertilizer treatments

注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant among treatment at the 5% levels.]

茎、根的 N/P 比没有明显的变化。说明施氮增加叶、茎、根的氮含量,施磷增加叶、茎、根的磷含量,反映出杉木幼苗的生长会受氮、磷水平的影响。

表8 不同施肥处理下根、茎、叶的氮/磷比

Table 8 N/P ratios in different parts of *Cunninghamia lanceolata* seedlings under different fertilizer treatments

处理 Treat.	氮/磷比 N/P ratio		
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
N_0P_0	9.89 ±0.38 d	7.44 ±0.09 ef	6.56 ±0.25 cde
N_1	19.35 ±1.75 a	13.92 ±2.20 c	9.61 ±0.26 a
N_2	19.11 ±1.36 a	16.21 ±2.34 b	9.71 ±0.49 a
N_3	16.45 ±1.08 b	20.54 ±1.70 a	8.36 ±0.91 b
P_1	6.04 ±0.65 gh	7.84 ±0.37 e	5.25 ±0.37 fg
P_2	5.31 ±1.01 h	8.46 ±0.69 e	4.83 ±0.26 g
P_3	5.01 ±0.72 h	10.29 ±0.17 d	5.72 ±0.05 defg
N_1P_1	8.81 ±0.38 de	10.57 ±0.77 d	6.34 ±1.01 def
N_1P_2	9.09 ±0.56 d	5.22 ±0.45 h	6.21 ±0.29 def
N_1P_3	7.46 ±0.46 efg	5.57 ±0.92 gh	8.22 ±2.43 b
N_2P_1	7.59 ±0.70 ef	7.26 ±0.41 efg	5.91 ±0.21 defg
N_2P_2	9.11 ±1.33 d	5.76 ±0.53 fgh	6.80 ±0.06 cd
N_2P_3	7.04 ±0.17 fg	5.87 ±0.07 fgh	6.33 ±0.39 def
N_3P_1	9.03 ±0.17 d	6.99 ±0.73 efg	7.61 ±0.02 bc
N_3P_2	11.78 ±0.72 c	5.75 ±0.20 fgh	5.49 ±0.08 efg
N_3P_3	12.49 ±0.48 c	5.79 ±0.59 fgh	6.24 ±0.24 def

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

3 讨论

在自然条件下,土壤中的矿质营养含量有限或有效性低,通常限制树木的生长发育。在营养缺乏的土壤环境中,增加供氮通常会促进植物的生长,表现为地上部生物量或总生物量随供氮水平的增加而增加[16],也有研究发现,施氮不但显著增加地上部分的生长,而且促进根生物量的增加[17]。另外,供磷不足或过多都会影响植物的生长。本试验中,施氮会降低叶、茎、根的生物量;叶、茎和根的生物量随供磷水平的增加而增加。由此可见,与施氮相比,施磷促进了杉木幼苗的生长,可能是由于南方土壤缺磷所造成的[18]。

张建国等[9]研究表明,施磷使一年生杉木苗光合产物的累积重点由根系向茎部和叶部转移,氮磷配施可使光合产物累积由根转移到茎和叶。本试验结果表明,在施氮处理中,光合产物的累积由茎部向叶部和根部转移;施磷处理光合产物累积由叶部向茎部和根部转移;氮磷配施处理干物质的累积由茎部转移到根部。上述差异可能是由于杉木处于幼龄期,当土壤养分受到限制时,大部分营养物质被用于根系生长。张建国等[13]研究发现,杉木苗木的光合产物由冠向根部转移,根冠比上升,表明苗木的营养亏缺没有得到改善,加剧了苗木营养失衡,这也许就是本研究中施肥造成杉木幼苗根比例上升的原因。

植物组织中的养分含量与养分累积量可反映植物的营养状况和养分需要量,与养分的供应浓度有直接的关系[19]。在本试验中,施氮显著增加杉木幼苗根和叶的氮含量,但显著降低根和叶的磷含量;施磷显著降低叶、茎、根的氮含量,叶、茎、根的磷含量随着供磷水平的增加而逐渐增长;氮磷配施显著影响叶、茎、根的氮、磷含量和氮、磷累积量。说明植物的养分含量随器官的不同而发生变化。由于叶生物量占全株生物量的45%以上,杉木幼苗的氮、磷养分主要储存在叶片中,主要是由于施磷影响了杉木叶、茎、根的生物量分配,进而影响氮、磷养分在杉木体内的分配。说明叶片是杉木幼苗重要的养分贮存库,与徐永刚等[20]的研究结果一致。

一般情况下,当某一营养元素供应水平增加时,会明显促进植物生长和该元素含量的增加,但对其它稳定供应的营养元素的含量造成相对稀释的作用,使其在植物体内的含量降低[21]。从本试验结果可以看出,磷素供应的增加对氮素在杉木幼苗叶、茎、根中的含量表现出明显的稀释效应,而施氮肥对根和叶的磷含量稀释效应显著,会影响杉木幼苗的正常生长。这可能是试验土壤受到磷素供应的限制,而氮供应能满足杉木幼苗生长的需要,也可能是与试验条件和周围的环境有关[22]。

植物的养分利用效率与不同贫富营养环境的养分供应量的关系存在很多争议,主要支持的观点是贫营养环境的植物养分利用效率高,富营养环境的植物养分利用效率低[14]。本试验的结果也验证了这一现象,随着供氮(或磷)水平的增加,杉木幼苗的氮(或磷)养分利用效率显著下降。氮(或磷)供应量的增加,能显著提高磷(或氮)的养分利用效率,并在一定水平上不再变化。

氮、磷的可利用性及二者之间的平衡不仅影响植物个体的生长发育,而且是植被发展、演替以及生态系统能量流动的重要驱动力[23]。根据植物营养平衡理论,从水生生态系统的研究发展起来的植物组织 N/P 化学计量比被广泛应用于陆地植物氮、磷限制的诊断[24]。本试验中,施氮显著提高杉木幼苗叶、茎和根的 N/P 比;施磷使叶和根的 N/P 比显著下降,茎的 N/P 比呈上升趋势;氮磷配施处理下杉木幼苗叶、茎、根的 N/P 比没有明显变化。该结果反映了氮、磷肥使杉木幼苗叶、茎、根的 N/P 比发生了变化,这可能是杉木幼苗为适应土壤氮、磷可利用变化的一个重要改变。叶片是植物生理代谢最为活跃的器官,被认为是对土壤养分供应水平最为敏感的部位[25]。依据植物鲜叶中的氮、磷含量及 N/P 可以推断出植物所受营养的限制状况,Güsewell 等[26]研究表明,植物鲜叶 N/P < 14,且氮浓度 <20.0 mg/g,受氮限制;N/P > 16,且磷浓度 < 1.0 mg/g,受磷限制;而当 14 < N/P < 16,同时氮浓度 <20.0 mg/g、磷浓度 < 1.0 mg/g,同时受到氮、磷的限制。在本试验中,单施氮肥处理杉木幼苗叶的 N/P 均 > 16,且磷浓度 < 1.0 mg/g,说明杉木幼苗生长受到磷供应的限制;其它施肥处理叶的 N/P 均 <14,且氮浓度 <20.0 mg/g,推测杉木幼苗生长受到氮供应的限制。

4 结论

本研究得出氮、磷肥对杉木幼苗生物量和养分分配有显著影响。随着供磷水平的增加,杉木幼苗植株和各器官的生物量逐渐增大,施氮反而降低了杉木叶、茎、根的生物量,叶生物量占全株生物量的比例最大,达到45%以上;氮、磷肥有助于杉木幼苗地上部分(叶和茎)的干物质累积向地下部分(根)转移;施氮可显著增加根和叶的氮含量,而降低根和叶的磷含量,对茎的氮、磷含量没有明显影响;施磷显著降低叶、茎、根的氮含量,叶、茎、根的磷含量随着供磷水平的增加而逐渐增加;氮磷配施显著影响叶、茎、根的氮、磷含量和氮、磷累积量。供氮(或磷)水平的增加降低了杉木幼苗的磷(或氮)的利用率,提高了氮(或磷)的利用率;氮、磷肥显著影响杉木幼苗叶、茎、根的 N/P 比。

由于各树种对养分需求、吸收、利用和转化的生理生态特性不同,以及对养分有效性变化的适应性的差异,不同营养元素的种类和数量对杉木的养分吸收利用过程的影响仍需更深入的研究。另外,供试土壤肥力不同,加之植株受气候、水分、栽培措施等多因素的影响,因此,在实际应用中需要对施肥量进行适当调整并选择合理的施肥时期。

参 考 文 献:

[1] Kerkhoff A J, Fagan W F, Elser J J, Enquist B J. Phylogentic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants[J]. Am. Nat., 2006, 168(4): 103-122.

[2] Lea W C, Biekelhau D H, Leaf A L. Differential foliar response of northern hardwoods to fertilization[J]. Plant Soil, 1980, 54: 419-439.

[3] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea; how can it occur[J]. Biogeochemistry, 1991, 13: 87-115.

[4] Cassman K G, Kropf M J, Gaunt J *et al*. Nitrogen use efficiency of rice reconsidered: what are the key constraints[J]. Plant Soil, 1993, 155/156: 359-362.

[5] Crawford N M, Glass D M A. Molecular and physiological aspect of nitrate uptake in plants[J]. Trend plant Sci., 1998, 3: 389-395.

[6] 俞新妥. 杉木林地持续利用问题的研究和看法[J]. 世界林业研究, 1993, (2): 80-87.
Yu X T. Summary of the studies on the plantation productivity and nutrient cycling in Chinese fir plantation ecosystem[J]. World For. Res., 1993, (2): 80-87.

[7] 张鼎华. 炼山后林地土壤某些物理性状的变化[J]. 林业科技通讯, 1985, (5): 20-22.
Zhang D H. Changes of some physical properties of forest soil after controlled burning[J]. For. Sci. Techn., 1985, (5): 20-22.

[8] 马祥庆. 杉木人工林连载生产力下降研究进展[J]. 福建林学院学报, 2001, 31(4): 380-384.
Ma X Q. A review for research of productivity decline in Chinese fir plantations after successive plantings[J]. J. Fujian Coll. For., 2001, 31(4): 380-384.

[9] 张建国, 盛炜彤, 罗红艳, 熊有强. N、P、NP 营养对杉木苗木生长和光合产物分配的影响[J]. 林业科学, 2003, 39(2): 21-27.
Zhang J G, Sheng W T, Luo H Y, Xiong Y Q. Effects of N, P and NP nutrition on growth and allocation of photosynthetic products of Chinese fir seedlings[J]. Sci. Silv. Sin., 2003, 39(2): 21-27.

[10] 张建国, 盛炜彤, 熊有强, 万细瑞. 施肥对盆栽杉木苗土壤养分含量的影响[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 44-50.
Zhang J G, Sheng W T, Xiong Y Q, Wan X R. Effects of fertilization on soil nutrient content of potted Chinese fir seedling[J]. Sci. Silv. Sin., 2006, 42(4): 44-50.

[11] 范少辉, 俞新妥. 杉木人工林栽培营养研究[J]. 林业科学研究: 杉木人工林栽培营养研究专刊, 1996, 9(9): 1-9.
Fan S H, Yu X T. Research on nutrition of Chinese fir plantation cultivation[J]. For. Res.: Spec. issue res. nutr. Chinese Fir

plant. cultiv., 1996, 9(9): 1-9.

[12] 张建国，李贻铨. 杉木幼林施肥的时效性研究[J]. 林业科学研究：林木施肥与营养专刊，1999，9(2)：27-33.
Zhang J G, Li Y Q. Research on efficiency of young Chinese fir fertilization[J]. For. Res.: Spec. issue fert. Nutr. For., 1999, 9(2): 27-33.

[13] 张建国，盛炜彤，罗红艳，熊有强. 杉木营养平衡与苗木干物质的分配关系[J]. 林业科学，2003，39(3)：37-44.
Zhang J G, Sheng W T, Luo H Y, Xiong Y Q. Studies on relationship between nutrition balance and allocation of photosynthetic products in seedlings of Chinese fir[J]. Sci. Silv. Sin., 2003, 39(3): 37-44.

[14] 王忠强，吴良欢，刘婷婷，等. 供氮水平对爬山虎(*Parthenocissus tricuspidata Planch*)生物量及养分分配的影响[J]. 生态学报，2007，27(8)：3435-3441.
Wang Z Q, Wu L H, Liu T T *et al*. Effect of different nitrogen rates on *Parthenocissus tricuspidata* Planch seedling growth and nutrient distribution[J]. Acta Ecol. Sin., 2007, 27(8): 3435-3441.

[15] Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants[J]. Ann. Rer. Ecol. Syst. 1980, (1): 233-260.

[16] Rosengren B U, Majdi H, Asp H *et al*. Enzyme activities in isolated root plasma membranes from a stand of Norway spruce in relation to nutrient status and ammonium sulphate application [J]. New Phytol., 1995, 129: 537-546.

[17] Chapin F S. Vitousek P M, Van Cleve K. Plant response to multiple environmental factors[J]. Bioscience, 1987, 37: 49-57.

[18] 李荣华，汪思龙，王清奎. 不同林龄马尾松针叶凋落前后养分含量及回收特征[J]. 应用生态学报，2008，19(7)：1443-1447.
Li R H, Wang S L, Wang Q K. Nutrient contents and resorption characteristics in needles of different age *Pinus massoniana* (Lamb.) before and after withering[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(7): 1443-1447.

[19] Paponov I A, Posepanov O G, Lebedinskai S *et al*. Growth and biomass allocation, with varying nitrogen availability, of near-isogenic pea lines with differing foliage structure[J]. Ann. Bot, 2000, 85(4): 563-569.

[20] 徐永刚，宇万太，周桦，马强. 氮肥对杉木幼树各部分养分浓度与贮量的影响[J]. 中南林业科技大学学报，2011，31(8)：28-34.
Xu Y G, Yu W T, Zhou H, Ma Q. Effects of nitrogen fertilizer on nutrient concentration and storage in different parts of young Chinese fir[J]. J. Cen. South Univ. For. Techn., 2011, 31(8): 28-34.

[21] 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.
Peng S L. Research and practice on tropical and subtropical restoration ecology[M]. Beijing: Science Press, 2003. 177-180.

[22] 樊后保，廖迎春，刘文飞，等. 模拟氮沉降对杉木幼苗养分平衡的影响[J]. 生态学报，2011，31(12)：3277-3284.
Fan H B, Liao Y C, Liu W F *et al*. Effects of simulated nitrogen deposition on nutrient balance of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings[J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(12): 3277-3284.

[23] Vitousek P M. Nutrient cycling and limitation: Hawaii as a model system[M]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 2004.

[24] 赵琼，曾德慧. 林木生长氮磷限制的诊断方法研究进展[J]. 生态学杂志，2009，28(1)：122-128.
Zhao Q, Zeng D H. Diagnosis methods of N and P limitation to tree growth: A review[J]. Chin. J. Ecol., 2009, 28(1): 122-128.

[25] Tamm C O. Towards an understanding of relations between tree nutrition, nutrient cycling and environment[J]. Plant Soil, 1995, 168/169: 21-27.

[26] Güsewell S, Koerselman M. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants[J]. Perspec. Plant Ecol., Evol. System., 2002, 5(1): 37-61.