

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201403015

范川,黄复兴,李晓清,等. 施肥对盆栽香樟幼苗不同根序细根养分的影响[J]. 广西植物, 2015, 35(4):507-514

Fan C, Huang FX, Li XQ, et al. Effects of fertilization on nutrient concentrations of different root orders' fine roots in *Cinnamomum camphora* seedlings [J]. *Guihaia*, 2015, 35(4):507-514

施肥对盆栽香樟幼苗不同根序细根养分的影响

范川¹, 黄复兴¹, 李晓清^{2*}, 李贤伟¹, 舒翔¹, 李平¹(1. 四川农业大学 林学院 长江上游林业生态工程四川省重点实验室,
四川 雅安 625014; 2. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要: 以盆栽的1年生香樟实生苗为研究对象,采用指数施肥的方式,测定1~5级细根的C、N、P、K含量,并探讨施肥对香樟幼苗细根养分浓度的影响。结果表明:(1)不同根序细根的全C浓度差异不显著,施肥对细根全C浓度影响不显著($P>0.05$);(2)在所有根序中,N、P浓度最高的是1级根,但其K浓度却最低;N、P含量最低的是5级根;(3)细根的N、P含量随着根序的增加呈显著的下降趋势($P<0.05$);(4)施N肥能显著增加1~2级细根的N含量,施P肥能显著增加1级根的P含量,N+P肥较之P肥更能提高1级根对P的吸收;(5)C:N:P受根序的影响非常明显,1级根平均为366:16:1,5级根则为807:12:1,而且C:N:P随着根序增加而显著升高,但N:P无显著影响;(6)虽然施肥对细根C含量无影响,但施N肥或N+P肥对1~2级细根中N的含量有显著性增加。综合分析可知,处理9对香樟苗期养分浓度指标影响最为显著,即施肥量为氮素4g·株⁻¹、磷素4g·株⁻¹、钾素2g·株⁻¹时,对香樟幼苗细根的生长发育有较好地促进作用。研究结果可为香樟的速生丰产及资源的高效利用提供理论依据。

关键词: 香樟; 施肥; 细根; 根序**中图分类号:** Q945.12; S792.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2015)04-0507-08

Effects of fertilization on nutrient concentrations of different root orders' fine roots in *Cinnamomum camphora* seedlings

FAN Chuan¹, HUANG Fu-Xing¹, LI Xiao-Qing^{2*},
LI Xian-Wei¹, SHU Xiang¹, LI Ping¹

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, The Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering of Sichuan Province, Ya'an 625014, China; 2. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

Abstract: Setting one-year-old potted *Cinnamomum camphora* seedlings as the research object, using exponential fertilization method, we detected the first to the fifth order fine roots C, N and P contents, in order to explore the effects of fertilization on *C. camphora* seedlings, and to provide a theoretical basis for *C. camphora* fast growing and efficient use of resources in nurturing process. The results were as follows: (1) C concentrations of the differences orders' fine root were not significant, with the rise of the root order, while C content overall upward trend. Fertilization had no significant effect on the C concentration of fine root ($P>0.05$); (2) N and P concentrations of first order roots were the maximum, while fifth order roots were the minimum, with the rise of root orders, N and P concentrations significantly decreased (P

收稿日期: 2014-06-09 修回日期: 2014-12-10

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201104109); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC09B05)。

作者简介: 范川(1973-),男,四川渠县人,博士,副教授,主要从事人工造林理论及技术研究,(E-mail)fanchuan01@163.com。

*通讯作者: 李晓清,博士,研究员,主要从事森林培育研究,(E-mail)464394961@qq.com。

<0.05); (3) N significantly increased the N content level of the first to the second fine roots, P fertilizer significantly increased the P content of a root, mix of nitrogen and phosphorus fertilizer could improve the root uptake of P; (4) C : N : P had a significant difference in different root orders roots; (5) The first order roots' mean C : N : P was 366 : 16 : 1, the fifth order root 807 : 12 : 1, with increased root order, C ratio of three kinds of elements increased significantly, while the N : P changed little; (6) Fertilization did not change the proportion of C; however, N fertilizer or mix of nitrogen and phosphorus fertilizer significantly increased the N proportion of the first to second order roots. In conclusion: The treatment 9 pairs of *C. camphor* on seedling stage indicators impact most significantly. A fertilizer with the nitrogen 4 g · plant⁻¹, the phosphorus 4 g · plant⁻¹ and the potassium 2 g · plant⁻¹, would have significant promote growing for growing and development of fine roots in *C. camphor* seedlings.

Key words: *Cinnamomum camphora*; fertilization; fine root; root orders

细根是吸收水分和养分的重要器官,是植物体最活跃也是最敏感的部分之一,在能量流动和物质循环过程中起着极其重要的作用。根系的分枝系统十分复杂,不同个体根因其在根系中着生部位的不同,生理及生态功能均有巨大差异(Guo *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2010)。另外,不同形态结构的细根由于其养分含量差异显著,从而导致细根生理功能的异质性(许旻等, 2011)。相关研究表明,处于根系末端的1级根的N含量最高,但其寿命最短;5级根N浓度最低,然而其寿命却是最长的(Pregitzer *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2004, 2008a)。细根内在的养分浓度可对土壤养分的吸收及其细根周转等生态过程带来影响,进而影响生态系统物质和养分循环(苗宇等, 2013)。

细根受多种因素的影响,程瑞梅等(2012)认为土壤理化性质对细根的影响明显大于土壤温度、降水及气温变化。Bates *et al.*(1996)研究显示,当土壤贫瘠时,增加土壤养分有效性,能促使植物体内碳向地下部分转移,这一趋势有利于细根生长、生物量积累及根系结构的优化,从而增强细根吸收养分与水分的能力(King *et al.*, 2002; Gaudinski *et al.*, 2001)。N是限制植物生长的主要矿质元素,根系则是N吸收和C消耗的重点,它在树木生长发育过程中是最为重要的营养器官(Nadelhoffer, 2000; Ostertag, 2001)。P作为生命过程中的重要元素,能促进细胞分裂和根快速生长;K能提高与改善作物的产量与质量,增强作物的抗逆性(史振声, 1994; 李玉影等, 2002)。香樟(*Cinnamomum camphora*)是珍稀的亚热带常绿阔叶树种,目前我国施肥研究多集中于农作物,而对于林木苗木培育的研究方面还稍显不足。施肥虽然在对增加产量、改善品质、增强抗性和提高经济效益等方面能起积极作用,但黄

复兴等(2013)认为不同配方的肥料及施肥方式对苗木生长产生的影响是不同的。因此,本文以盆栽香樟幼苗为研究对象,研究施肥对香樟不同根序细根养分含量的影响,拟筛选适宜香樟幼苗阶段的施肥配方,提高养分利用率,为定向培育提供理论依据与参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

在雅安市(102°81'~103°88' E, 29°70'~30°74' N)四川农业大学林学院植物苑内进行盆栽试验。雅安市年均气温 14.1~19.9 °C,年降雨量 726.1~1 774.3 mm,无霜期 280~320 d。

1.2 材料

所用苗木是由四川省林业科学研究院川南林业研究所提供的一批 500 株的 1 年生实生香樟苗,其平均苗高 50 cm 左右,地径 0.5 cm,每株叶片 20 片左右,无病虫害,长势良好。2011 年 11 月,将苗木栽植于上口口径 30 cm,下口径 15 cm,高 35 cm 的塑料花盆中。栽植用土为有机质含量 10.14 g · kg⁻¹,全氮 0.26 g · kg⁻¹,碱解氮 17.15 mg · kg⁻¹,速效磷 10.57 mg · kg⁻¹,速效钾 66.75 mg · kg⁻¹,pH6.55 的耕作土。所用肥料有硫酸钾(K 的质量分数为 44.8%),尿素(N 的质量分数为 46.3%),过磷酸钙(P₂O₅ 的质量分数 ≥18%),均为分析纯。

1.3 实验设计

采用三因素(N, P, K)三水平(0、2、4 g · 株⁻¹)正交设计,施肥量及施肥方式与黄复兴等(2013)的相同。

1.4 样品采集

2012 年 10 月,从每个处理的 3 个重复中各随

机选取 1 盆无病虫害、生长正常的苗木, 每处理共 3 盆, 9 个处理共 27 盆植株, 用于采集细根。细根采集与分级采用黄复兴等(2013)的方法。

1.5 养分测定

样品烘干后, 对不同处理根序的细根进行粉碎研磨, 称取 0.3 g 用于全 N、全 P、全 K 的测定, 另称取 0.02 g 用于全 C 的测定。全 N 采用凯氏定氮法; 全 P 采用硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法; 全 K 采用火焰光度计法; 全 C 采用重铬酸钾氧化外加加热法(黄复兴等, 2013)。

1.6 数据处理与统计分析

应用软件 Microsoft Excel 2007 对数据进行处理、作图, 在 SPSS 17.0 中用 Duncan 法对各指标差异显著性进行分析。

2 结果与分析

2.1 施肥对香樟幼苗细根 N 浓度的影响

由图 1 可以看出, 随着根序的增加, 细根的 N

浓度显著降低($P < 0.05$), 1 级根 N 浓度最高, 平均为 $10.56 \sim 22.95 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 5 级细根 N 浓度最低, 平均为 $4.78 \sim 5.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。施 N 肥与施 N+P 肥均显著增加了 1、2 级细根的 N 浓度($P < 0.05$), 尤以 N+P 肥效果最为显著($P < 0.05$)。而各施肥处理对 3~5 级细根 N 浓度影响不显著($P > 0.05$)。施 P+K 肥对各级细根 N 浓度影响不显著($P > 0.05$)。

施加的 N、P、K 养分对细根平均 N 浓度的影响是不同的(表 1), 其中氮素极显著的提高了 1 级细根平均 N 浓度($P < 0.01$), 而磷素与钾素对 1 级细根平均氮浓度没有显著影响($P > 0.05$)。

2.2 施肥对香樟幼苗细根 P 浓度的影响

图 2 表明, 随着根序的增加, 细根的 P 浓度逐渐降低, 但差异不显著($P > 0.05$)。1 级根平均 P 浓度最高, 平均为 $0.81 \sim 1.31 \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。5 级根平均 P 浓度最低, 为 $0.63 \sim 0.68 \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。施肥对 2 级以上细根 P 浓度无显著影响($P > 0.05$)。施 P 肥显著提高了 1 级根 P 浓度($P < 0.05$), 施氮肥对细根 P 浓度无显著影响($P > 0.05$), 但 N+P 肥促进了 1 级根对

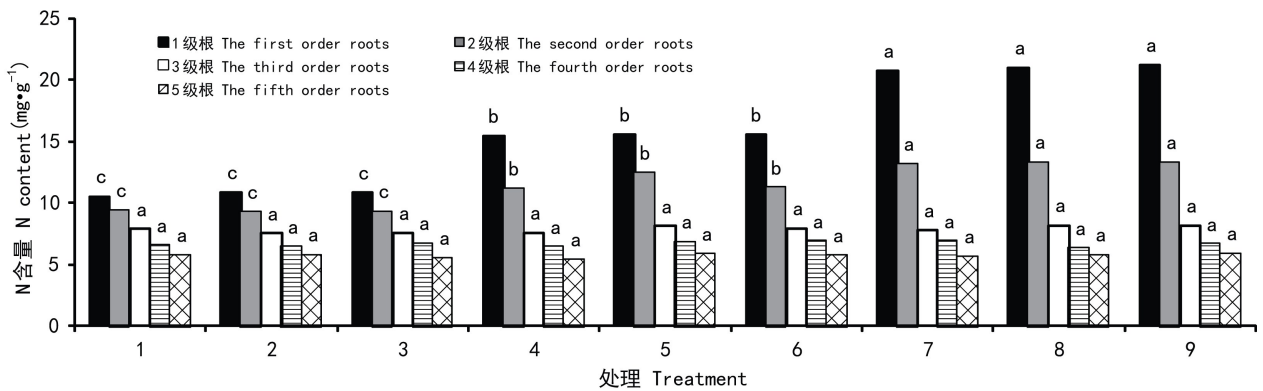


图 1 施肥对香樟 1~5 级细根 N 含量的影响 不同小写字母代表同一根序在不同处理间有显著性差异。下同。

Fig. 1 Effects of fertilization on N contents of the first to the fifth order fine roots Different small letters mean significant differences among different treatments. The same below.

表 1 施肥对香樟细根 N 含量影响的主效应方差分析及极差分析

Table 1 Main effects ANOVA and range analysis about the effects of fertilization on N content in fine roots

源 Source	细根平均 N 浓度 Average N concentration in fine roots ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)								
	Ⅲ型平方和 Sum of squares of Type Ⅲ	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>Sig.</i>	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>K3</i>	<i>R</i>
N	665.571	2	332.785	9 254.034	0.000	10.80	17.52	22.86	12.06
P	0.226	2	0.113	3.149	0.065	16.91	17.13	17.11	0.20
K	0.002	2	0.001	0.035	0.966	17.02	17.09	17.04	0.07
误差 Error	0.719	20	0.036						
总和 Total	8 405.426	27							

R-squared=0.999.

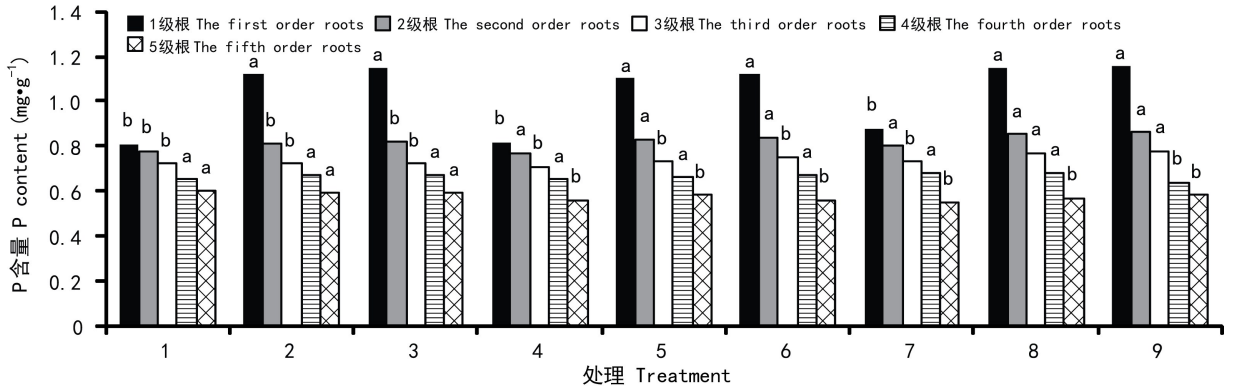


图2 施肥对香樟各1~5级细根P含量的影响

Fig. 2 Effects of fertilization on P contents of the first to the fifth order fine roots

表2 施肥对香樟细根P含量影响的主效应方差分析及极差分析

Table 2 Main effects ANOVA and range analysis about the effects of fertilization on P content in fine roots

源 Source	细根平均P浓度 Average P concentration in fine roots ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)								
	Ⅲ型平方和 Sum of squares of Type Ⅲ	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>Sig.</i>	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>K3</i>	<i>R</i>
N	0.010	2	0.005	2.948	0.075	1.10	1.12	1.15	0.05
P	1.102	2	0.551	329.303	0.000	0.84	1.26	1.28	0.44
K	0.004	2	0.002	1.215	0.318	1.11	1.12	1.14	0.03
误差 Error	0.033	20	0.002						
总和 Total	35.153	27							

R-squared=0.999.

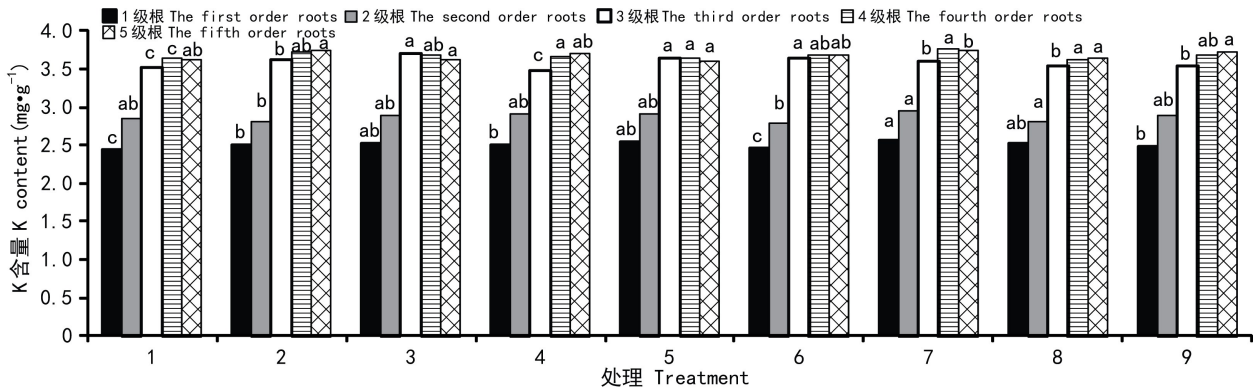


图3 施肥对香樟幼苗1~5级细根全K含量的影响

Fig. 3 Effects of fertilization on K contents of the first to the fifth order fine roots

P的吸收。

3种养分元素对细根平均P浓度的影响存在较大差异(表2),其中磷素对1级细根平均P浓度有显著影响($P < 0.05$),氮素与钾素对细根平均P浓度无显著影响($P > 0.05$)。

2.3 施肥对香樟幼苗细根K含量的影响

图3显示,各根序细根全K含量为2.44~3.76 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中1级根全K含量最低,为2.44~2.56

$\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$;3~5级根平均全K含量普遍最大,为3.52~3.76 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。各处理细根K含量随着根序的上升大致呈上升趋势,处理3和5细根K含量最高的为3级细根。处理1和7细根K含量最高的为4级细根。其余处理5级细根K含量最高。施肥对细根K含量的影响无明显规律。

2.4 施肥对香樟幼苗细根C含量的影响

从图4看出,各根序细根全C含量为337~438

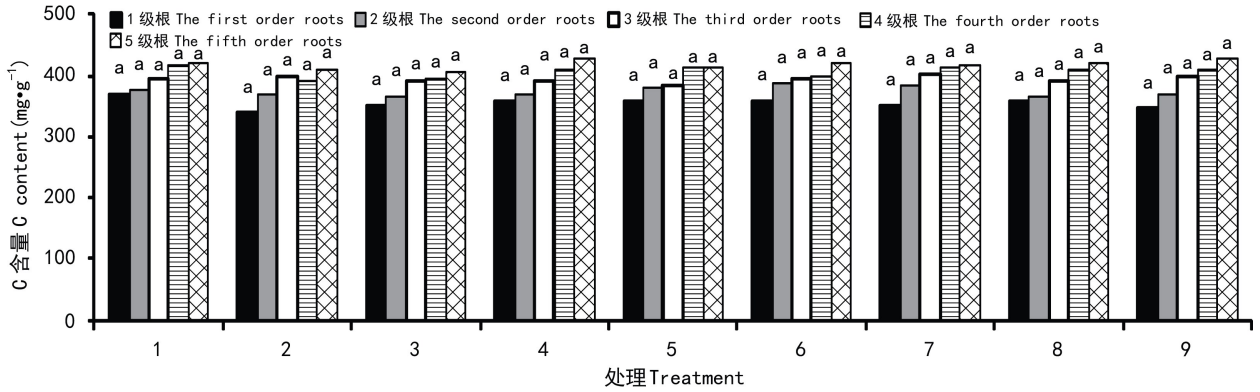


图 4 施肥对香樟幼苗 1~5 级细根全 C 含量的影响

Fig. 4 Effects of fertilization on C contents of the first to the fifth order fine roots

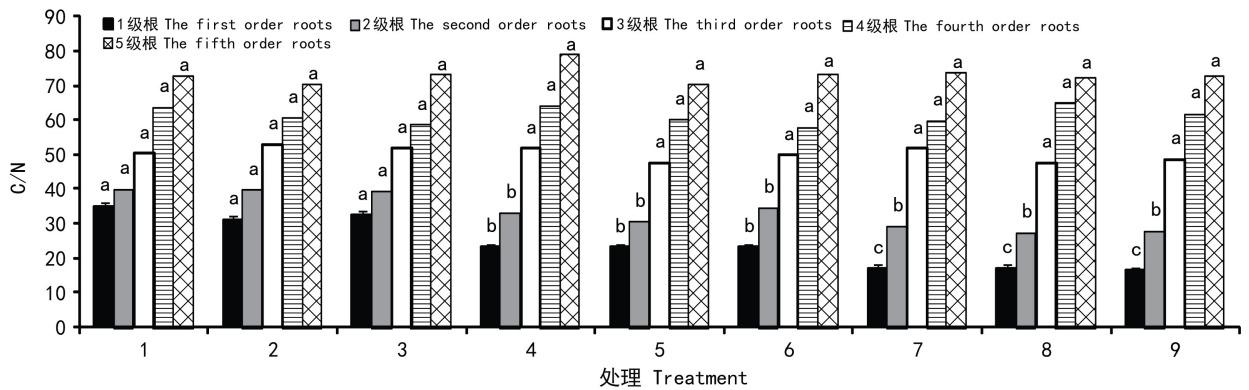


图 5 施肥对香樟幼苗 1~5 级细根 C:N 的影响

Fig. 5 Effects of fertilization on C:N of the first to the fifth order fine roots

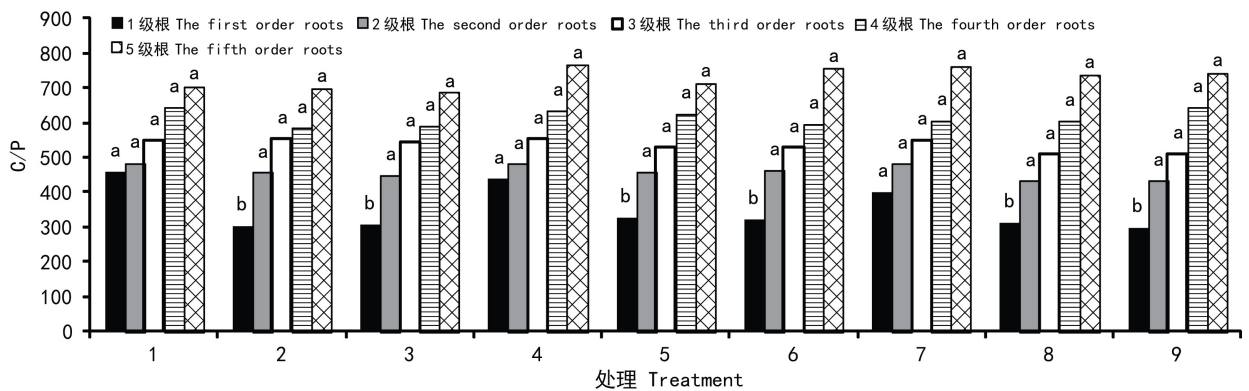


图 6 施肥对香樟幼苗 1~5 级细根 C:P 的影响

Fig. 6 Effects of fertilization on C:P of the first to the fifth order fine roots

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。其中 1 级根平均全 C 含量最小,为 $314 \sim 371 \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1}$; 5 级根平均全 C 含量普遍最大,为 $384 \sim 438 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。各处理细根 C 含量随着根序的上升大致呈上升趋势,但差异不显著 ($P > 0.05$)。各施肥处理 1~5 级细根 C 含量的变化无明显规律,

施肥对细根 C 含量也无显著影响 ($P > 0.05$)。

2.5 施肥对香樟幼苗细根 C:N, C:P 的影响

从图 5 和图 6 可以看出,随着根序的增加,各处理中 C:N, C:P 均升高。各根序中,1 级根 C:N, C:P 最低,分别为 $16 \sim 35$ 和 $273 \sim 458$,其中处理 1

即对照组 C : N、C : P 最高,处理 9 的 C : N、C : P 最低;5 级根 C : N、C : P 最高,分别为 53~70 和 680~814。由于施 N 肥显著提高了 1~2 级细根的 N 浓度,因此施有 N 肥的处理 1~2 级细根 C : N 显著低于其他未施 N 处理($P < 0.05$)。施 P 与 N+P 肥显著降低了 1 级细根 C : P($P < 0.05$)。

从总体而言,各处理 1 级根的 C : N : P 平均为 366 : 16 : 1,5 级根 C : N : P 平均为 807 : 12 : 1。随着根序的增加,C 的比例在增高,N、P 比例则相对稳定。

3 讨论

3.1 细根 N、P、C、K 浓度对施肥的响应

细根内 N 含量是反映土壤养分供应状况的一个重要指标。N 常作为植物生长发育的一个限制因素,N 增加可能会导致土壤中 P 的吸收量增加,影响 C 的固定。丁国泉等(2009)认为这是植物体内 C-N 关系决定的,根系以消耗 C 为代价来吸收 N。细根组织的 N 浓度随着序级的增大而显著减小(黄锦学等,2010)。本研究中,各处理 1 级根的 N、P 含量最高、C 含量最低。5 级根 N、P 含量最低,C 含量最高。这与苗宇等(2013)对台湾栾木前 5 级根的研究结果相一致。原因可能为以下 4 个方面:(1) 1 级根是整个根系中生理活动最旺盛的部分,根尖细胞分裂迅速,组织内酶和 RNA 投入高,因而对 N 和 P 需求大,同时它位于整个根系的先端,与土壤接触面积最大,承担着养分与水分吸收的作用,因此 N 和 P 浓度最高(熊德成等,2012);(2) 由于其生理代谢旺盛,呼吸速率较快,而施 N 肥更加促进了低级根的呼吸速率,因此根的生长和呼吸消耗了大量的 C,与其高级根以及未施 N 的处理相比,C 含量相对较低(Farrar *et al.*, 2000; Burton *et al.*, 2002);(3) 低级根主要由初生组织构成,皮层细胞是其结构中主要的细胞类型,在其形态构成上对 C 需求较低,而随着根序的增加,细根皮层细胞减少,木质部增加,在更高级的细根中皮层细胞甚至消失,而完全由次生组织构成,由于次生组织本身包含大量死亡细胞,从而导致组织整体代谢低(Chang *et al.*, 2008);(4) 大直径的根系具备了较高的运输能力和外部抗逆性,在形态构成上需要投入较高的 C,因此高级根的 C 含量相对较高(Son *et al.*, 2003)。另有关于植物施肥方面的研究表明,植物代谢旺盛的

部位(如叶片、根尖等),其 N、P 浓度最高(徐永刚等,2011)。这充分说明植物的生理代谢作用决定着其养分分配格局。

于立忠等(2009)认为,土壤养分的有效性也决定着细根养分的分配格局,而施 N 肥处理能够提高细根全 N 浓度。本研究中,各施肥处理 1~2 级细根 N、P 含量相较于对照组均显著提高。施 N 肥与 N+P 肥显著提高了 1~2 级根的 N 含量,施 P 肥与 N+P 肥则显著提高了 1 级根的 P 含量,施肥略微降低了 C 含量。在所有处理中,随着 N 肥浓度的提高,细根中 N 浓度也随之增高。而在单施 P 肥的处理中,P 肥显著提高了 1 级根 P 含量,但 P2 与 P3 两个浓度的 P 肥对细根 P 含量的影响无显著差异。但 N+P 肥混施促进了细根对 P3 浓度 P 肥的吸收,苗宇等(2013)认为 N 增加能促进细根对土壤中 P 的吸收。低级根中的 N、P 大部分投入到根系的生理代谢过程中,这一过程需要大量酶、蛋白质以及 rRNA 的投入来满足生产所需的酶和蛋白质,而 N、P 分别是合成酶和 rRNA 的主要元素,因此 N、P 之间在低级根中呈现出较稳定的化学计量学关系(熊德成等,2012)。

本研究中,各处理 1 级细根 K 浓度最低,而各级细根 K 浓度变化规律大致为先升高后降低,峰值集中在 3~5 级细根。这与吴勇(2011)的研究结果相似,他的研究表明,进入秋冬季后,台湾栾木 1 级根 K 含量 60% 以上转移至更高级细根。原因可能在于,本研究采样时间为 2012 年 10 月中旬,香樟幼苗已度过快速生长期,植株生长减缓,细根代谢减弱甚至开始衰老。而 K 是比较活跃的元素,在树木体内常以游离状态存在,极易发生迁移,廖利平(1994)认为在 3 种大量元素中 K 的内循环量是比较高的。大量研究显示,细根衰老过程中存在 K 的迁移,其迁移比例在 18%~67% 之间(廖利平等,2000; Vogt *et al.*, 1995)。施肥对各级细根 K 浓度无明显影响,但增加了 1~5 级细根 K 总含量。1 级细根平均养分含量为 $N > K > P$ 。这可能是由于 K^+ 的一个重要特点是能被植物组织快速吸收。植物体内处于游离状态的 K 大量地从根部输送到叶片,以满足植物光合作用所需,致使根系当中的 K 含量较低。各器官中 K 浓度除受自身遗传特性影响外还受诸如降水淋溶和人工施肥等因素的影响(荣俊冬等,2007)。

根系 C 含量的变化是与细根的结构与功能相适应的,本研究对照细根 C 含量随着根序的增加而

升高,大部分施肥处理细根 C 含量也随着根序的增加升高,个别处理 C 含量随着根序的增加呈先升高后降低趋势,但总体差异不显著。这与熊德成等(2012)对亚热带 6 种天然林树种的研究结果相似。但与于立忠等(2009)和 Pregitzer *et al.*(2002)的研究结果不尽相同,这可能与种植地气候条件,土壤性质,栽种方式,施肥方式,管理措施,树种差异等有关。在本研究里,各施肥处理中各根序的全 C 含量与对照相比均无显著差异。这可能是因为本试验采用盆栽的方式,各植株与土壤养分循环体系相对封闭且独立,同时由于所选植株皆为 1 年生实生苗,而施肥对 1 年生香樟根系分解及周转影响并不显著。

3.2 细根 C : N : P 对施肥的响应

根系吸收养分需要 C 的投入,其 C : N : P 既能反映土壤的营养状况,又能反映根系构建成本。植物的 C、N 的代谢过程是密切相关的,他们之间既相互促进又相互制约。C、N 在体内的分配和代谢决定着植物的生长过程和生产力,同时也体现了植物根系对周围环境的适应能力。植物根系吸收周围环境中 N 素养分的同时也受到体内 C 素的供应限制。相关研究表明,细根中 C : N 平均为 41 : 1 (Jackson *et al.*, 1997)。

在本研究各处理中,1 级根的 C : N : P 平均为 366 : 16 : 1,5 级根为 807 : 12 : 1。随着根序上升,C 的比例逐渐增大,N、P 比例变化不显著。施肥显著增加了 1~2 级根中 N、P 所占的比例。在所有处理的 1 级根中,对照处理 N : P 最低,为 12。处理 9 的 N : P 最高,为 17.5。N : P 不仅是决定群落结构和功能的关键性指标,也是评价生产力的指示指标 (Aerts *et al.*, 2000)。N : P < 14,植物生长主要受 N 限制;而 N : P > 16,则主要受 P 限制(曾德慧等, 2005; 阎恩荣等, 2008)。这不仅解释了为什么施肥能够显著增加 1 级细根的 N、P 含量,同时单施 P 肥时,P 肥达到一定量后,继续提高 P 肥浓度对细根 P 含量影响并不显著的原因。另外,本研究表明根序的变化对细根 C : N : P 有显著的影响,这与前人的研究结果相一致,但平均比值又不尽相同。主要原因应是细根的养分异质性在不同树种中具有不同表现(熊德成等, 2012)。

4 结论

在 1 年生盆栽香樟幼苗 1~5 级细根中,1 级根

代谢旺盛,N、P 含量最高,K、C 含量最低;而 5 级根由于木质化程度较高,N、P 含量最低,C 含量最高。随着根序上升,N、P 含量显著减少,K 含量升高;而 C : N : P 在各根序之间具有显著性差异。未施肥时,各根序 N : P 平均为 12,施 N+P 肥后,普遍 N : P > 16。施肥对 C 含量影响不显著。

综合而言,各施肥配方中,N 起主导作用;K 肥对细根 C、N、P、K 含量均无显著影响。处理 9 的施肥效果最好,即 N 素 4 g · 株⁻¹、P 素 4 g · 株⁻¹和钾素 2 g · 株⁻¹时,对细根养分含量影响最为显著,植株生长状况也最为优良,此组合可以在以后的科研及生产中进一步应用。

参考文献:

- Aerts R, Chapin FS. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: are evaluation of processes and patterns[J]. *Adv Ecol Res*, **30**(1):1-8
- Bates TR, Lynch JP. 1996. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability[J]. *Plant Cell Environ*, **19**:529-538
- Burton AJ, Pregitzer KS, Ruess RW, *et al.* 2002. Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes[J]. *Oecologia*, **13**(1):559-568
- Chang WJ, Guo DL. 2008. Variation in root diameter among 45 common tree species in temperate, subtropical and tropical forests in China[J]. *J Plant Ecol*, **32**(6):1 248-1 257
- Chen RM(程瑞梅), Wang RL(王瑞丽), Xiao WF(肖文发), *et al.* 2012. Spatial distribution of root biomass of *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir area, China(三峡库区马尾松根系生物量的空间分布)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **32**(3):824-831
- Ding GQ(丁国泉), Wang ZQ(王政权), Yu LZ(于立忠). 2009. Impacts of two year's fertilization on root morphological characters and nutrient contents of fine roots in Japanese larch plantation(连续两年施肥对日本落叶松细根形态和养分含量影响研究)[D]. Harbin(哈尔滨):Northeast For Univ(东北林业大学)
- Farrar JF, Jones DL. 2000. The control of carbon acquisition by roots[J]. *New Phytol*, **147**:43-53
- Fitter AH. 1996. Morphometric analysis of root systems: application of the technique and influence of soil fertility on root system development in two herbaceous species[J]. *Plant Cell Environ*, **5**:313-322
- Gaudinski JB, Trumbore SE, Davidson EA. 2001. The age of fine root carbon in three forests of the eastern united states measured by radiocarbon[J]. *Oecologia*, **129**:420-429
- Guo DL, Mitchell RJ, HendricksJJ. 2004. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest[J]. *Oecologia*:140, 450-457
- Guo DL, Mitchell RJ, Withington JM, *et al.* 2008. Endogenous and exogenous controls of root life span, mortality and nitrogen flux in a longleaf pine forest: root branch order predominates[J]. *J Ecol*, **96**:737-745

- Huang FX(黄复兴), Fan C(范川), Li XQ(李晓清), *et al.* 2013. Effects of fertilization on the fine root growing of *Cinnamomum camphora* seedlings(施肥对盆栽香樟幼苗细根生长的影响)[J]. *J Northwest For Univ*(西北林学院学报), **28**(5):103-108
- Huang JX(黄锦学), Xiong DC(熊德成), Yang ZJ(杨智杰), *et al.* 2010. The order characteristics of fine root morphology and fine root respiration of *Ligustrum lucidum* and *Euscaphis japonica*(女贞和野鸭椿幼苗细根形态和细根呼吸的序级特征)[J]. *J Subtrop Res Environ*(亚热带资源与环境学报), **5**(4):71-77
- Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area and nutrient contents[J]. *Proceed Nat Acad Sci United States Am*, **94**(14):7362-7366
- King JS, Albaugh TJ, Allen HL, *et al.* 2002. Belowground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine[J]. *New Phytol*, **154**:389-398
- Li A, Guo DL, Wang ZQ, Liu HY. 2010. Nitrogen and phosphorus allocation in leaves, twigs, and fine roots across 49 temperate, subtropical and tropical tree species: a hierarchical pattern[J]. *Funct Ecol*, **24**:224-232
- Li YY(李玉影), Wu Y(吴英), Liu SQ(刘双权), *et al.* 2002. Effects of potassium on the yield and quality of spring wheat(钾对春小麦产量及品质的影响)[J]. *Soil Fert*(土壤肥料), (2):33-35
- Liao LP(廖利平). 1994. Overseas researches on within-tree nutrient cycling(国外林木养分内循环研究)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **13**(6):34-38
- Liao LP(廖利平), Gao H(高洪), Yu XJ(于小军), *et al.* 2000. Nutrient retranslocation in fine roots of *Cunninghamia lanceolata*, *Alnus cremastogyne* and *Kalopanax septemlobum* in the mixed plantations a pilot study(人工混交林中杉木、桫欏木和刺楸细根养分迁移的初步研究)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **11**(2):4-7
- Miao Y(苗宇), Chen LL(陈栋霖), Li XW(李贤伟), *et al.* 2013. Effects of fertilization on *Alnus formosana* fine root morphological characteristics, biomass and issue content of C, N under *A. formosana*-*Hemarthria compressa* compound mode(施肥对台湾桫欏木-扁穗牛鞭草复合模式下桫欏木细根形态特征、生物量及组织碳氮含量的影响)[J]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **37**(7):674-683
- Nadelhoffer KJ. 2002. Potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems[J]. *New Phytol*, **147**(1):131-139
- Ostertag R. 2001. Effect of nitrogen and phosphorus availability on fine-root dynamics in Hawaiian montane forests[J]. *Ecology*, **82**(2):485-499
- Pregitzer KS, Deforest JL, Burton AJ, *et al.* 2002. Fine root architecture of nine North American trees[J]. *Ecol Monogr*, **72**(2):293-309
- Rong JD(荣俊冬), Hao R(郝瑞), Zhu WJ(祝杰伟), *et al.* 2007. Study on the nutrient content(N, P, K) and seasonal dynamic state of fine bamboo roots in coastal sandy sites(沿海沙地竹林细根养分含量及其季节动态)[J]. *J Fujian Coll For*(福建林学院学报), **27**(4):313-317
- Shi ZS(史振声), Zhang XH(张喜华). 1994. Effects of potash fertilizer on grain quality of sweetcorn and its sugar content of stalk(钾肥对甜玉米籽粒品质和茎秆含糖量的影响)[J]. *Maize Sci*(玉米科学), **2**(1):76-80
- Son Y, Hwang JH. 2003. Fine root biomass, production and turnover in a fertilized *Larix leptolepis* plantation in central Korea[J]. *Ecol Res*, **18**(3):339-346
- Vogt KA, Vogt DJ, Asbjomsen H, *et al.* 1995. Roots, nutrients and their relationship to spatial patterns[J]. *Plant Soil*, **168-169**:113-123
- Wang ZQ, Guo DL, Wang XR, *et al.* 2006. Fine root architecture, morphology, and biomass of different branch orders of two Chinese temperate tree species[J]. *Plant Soil*, **288**(1-2):155-171
- Wu Y(吴勇). 2011. Research on fine for characteristics in *Alnus formosana* under cultivated forage grass(台湾桫欏木林草复合细根特性研究)[D]. Ya'an(雅安): Sichuan Agricultural University(四川农业大学)
- Xiong DC(熊德成), Huang JX(黄锦学), Yang ZJ(杨智杰), *et al.* 2012. Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species(亚热带六种天然林树种细根养分分异质性)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **32**(14):4343-4351
- Xu Y(许咏), Gu JC(谷加存), Dong XY(董雪云), *et al.* 2011. Fine root morphology, anatomy and tissue nitrogen and carbon contents of the first five orders in four tropical hardwood species in Hainan island, China(海南岛4个热带阔叶树种前5级细根的形态、解剖结构和组织碳氮含量)[J]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **35**(9):955-964
- Xu YG(徐永刚), Yu WT(宇万太), Zhou H(周桦). 2011. Effects of nitrogen fertilizer on nutrient concentration and storage in different parts of young Chinese fir(氮肥对杉木幼树各部分养分浓度与贮量的影响)[J]. *J Centr S Univ For*(中南林业科技大学学报), **31**(8):29-34
- Yan ER(阎恩荣), Wang XH(王希华), Zhou W(周武). 2008. N:P stoichiometry in secondary success in evergreen broadleaved forest, Tiantong, East China(天童常绿阔叶林演替系列植物群落的N:P化学计量特征)[J]. *J Plant Ecol*(植物生态学报), **32**(1):13-22
- Yu LZ(于立忠), Ding GQ(丁国泉), Zhu JJ(朱教君), *et al.* 2009. Effects of fertilization on nutrient concentrations of different root orders' fine roots in *Larix kaempferi* plantation(施肥对日本落叶松不同根序细根养分浓度的影响)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **20**(4):747-753
- Zeng DH(曾德慧), Chen GS(陈广生). 2005. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems(生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **29**(6):1007-1019