

N素指数施肥对降香黄檀及土壤N、P化学计量特征的影响*

温小莹 黄芳芳 唐成波 甘先华 张卫强

(广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 以降香黄檀 (*Dalbergia odorifera*) 苗木为研究对象, 用氮素指数施肥法对降香黄檀苗木进行梯度施肥处理, 探讨N素指数施肥对苗木及土壤氮、磷元素含量及化学计量特征的影响。结果表明, 指数施肥显著影响了植株体内各器官及土壤N、P含量, 随着施肥量的增加, 植株体内各器官及土壤N、P含量呈现逐渐增加的趋势; 指数施肥同时影响了植株和土壤的N/P, 施肥处理下的植株和土壤N/P显著低于未施肥处理。相关分析表明, 植株与土壤的元素含量和化学计量存在显著的相关关系。通过叶片N/P比值对生长状况进行判断可知, 试验中段植株生长受N、P元素共同限制, 试验结束时则主要受P元素限制。研究表明, N素指数施肥能够有效提高降香黄檀体内各器官元素含量, 在苗木抚育时应注意加强施肥以促进苗木生长。

关键词 降香黄檀; 指数施肥; 氮; 磷; 化学计量

中图分类号: S147.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2019) 02-0007-07

Effects of Nitrogen Exponential Fertilization on Stoichiometry Characteristics of *Dalbergia odorifera* Seedlings and Soil

WEN Xiaoying HUANG Fangfang TANG Chengbo GAN Xianhua
ZHANG Weiqiang

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization / Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract Through fertilizing seedlings of *Dalbergia odorifera* with different fertilization levels, we aimed to explore the effects of nitrogen exponential fertilization on stoichiometry characteristics of both plant and soil. The results showed that as fertilization amounts increased, the contents of nitrogen and phosphorus were significantly increased, and that the N/P were also significantly lower under fertilized vs. unfertilized treatments. Correlation analysis also showed that the stoichiometry characteristics were correlated between plant and soil. By compared the leaf N/P to the values from available data, it can be inferred that the seedling growth was N and P-constrained in the middle of the experiment, but switched to P constrain at the end of the experiment. We concluded that nitrogen exponential fertilization can effectively increase the contents of *D. odorifera* seedlings, and suggested that fertilization should be applied during seedling cultivation to promote their growth.

Key words *Dalbergia odorifera*; exponential fertilization; nitrogen; phosphorus; stoichiometry

* 基金项目: 广东省林业科技创新专项项目 (2015KJCX029 及 2017KJCX011), 林业科技创新平台运行补助项目 (2017-LYPT-DW-066 及 2017-LYPT-DW-068)。

第一作者: 温小莹 (1964—), 女, 高级工程师, 主要从事森林培育及森林生态研究, E-mail: wenxyi@yeah.net。

通信作者: 黄芳芳 (1987—), 女, 助理研究员, 主要从事森林生态学研究, E-mail: hff120876158@hotmail.com。

生态化学计量学是一门基于化学计量学理论的新兴学科^[1]，着重分析有机体中的主要组成元素（主要是C、N、P）的关系。化学计量特征不只决定了有机体的关键特征，同时决定了有机体在资源数量和种类上的需求^[2]。N、P是植物正常生长的限制性因素，N/P的变化对植物的正常生长具有重要的调控作用，其临界值被认为是土壤对植物生长养分供应状况的指标^[3]。

指数施肥是根据植物的生长曲线来递增对植物的施肥量^[4]。N素是植物生长的必需养分之一，是构成各种重要有机化合物（氨基酸、蛋白质、核酸等）必需的组成部分^[5]。N素影响苗木的生长发育、苗木产量和品质，合理选择施肥方法，对提高苗木N素的利用效率和产量品质、保护生态环境很重要^[6]。以往研究表明，指数施肥不但可以满足植物不同生长期所需的养分，也可以避免多余的肥料对土壤造成污染^[7-8]。

降香黄檀（*Dalbergia odorifera*）是蝶形花科（Papilionaceae）黄檀属（*Dalbergia*）的落叶乔木，为国家Ⅱ级保护植物^[9]。树高15~20 m，最大胸径超过60 cm，产于印度、泰国等国家，中国海南、广东、广西省等地均有栽培，耐干旱、高温，栽培容易、生长较快，为华南地区主要造林树种之一。本文研究不同N素指数施肥浓度下降香黄檀苗木体内N、P元素及化学计量特征差异，及土壤、植株的元素含量及化学计量是否存在相关关系，探讨降香黄檀苗木生长对养分需求的特点，为降香黄檀的高效培育提供科学依据。

1 试验地概况

试验地设在广东省林业科学研究院（广州）中心苗圃内，位于113°23'E、23°14'N，海拔25 m。年平均温度23℃；最冷月份为1月，平均气温13℃；最热月份为8月，平均气温28.7℃；为典型亚热带季风气候。

2 材料与方法

2.1 试验材料

供试降香黄檀苗取自广东省林业科学研究院苗圃，分别选取生长健壮、大小一致的1 a生降香黄檀播种苗，2015年10月上旬植苗于装有黄心土+泥炭土（10:1）基质的塑料盆（底径×上口径×高：17 cm×22 cm×17 cm）中，每盆栽植1

株。为防止水肥流失，盆苗均用直径21 cm的白色塑料盘盛放。

2.2 研究方法

2.2.1 试验设计 本试验采用指数施肥方法，施肥量计算公式为^[10]：

$$N_T = N_s (e^{rt} - 1) \dots\dots\dots (1)$$

$$N_t = N_s (e^{rt} - 1) - N_{t-1} \dots\dots\dots (2)$$

式（1）和（2）中， N_T 为总施N量， N_s 为施肥处理前植株体内的初始含N量， r 为营养物相对添加率， t 为施肥的总次数， N_t 为第 t 次施N量， N_{t-1} 为前 $t-1$ 次累积的施N量。

试验共设5个施肥处理（各处理下每株苗在整个试验过程中的总施氮量分别设置为1 000、2 000、3 000、4 000、5 000 mg，编号为1~5）和1个不施肥处理（编号为0），每个处理12株苗木，每次具体施肥量见表1。施肥采用以色列化工集团的“优乐卉”水溶性肥料（N/P₂O₅:K₂O=1:1:1，N素含量20%），2016年3月29日第1次施肥，每7 d施肥1次，8月8日最后1次施肥，施肥总次数为20次（ $t=20$ ）。试验中采用水溶施用的方法进行，每株苗木每次施用50 mL。试验中段（6月）每个处理收获6株苗木及土壤分析元素含量，试验结束（8月）每个处理收获剩下的6株苗木及土壤分析元素含量。

2.2.2 指标的测定 土壤pH值采用土水质量比1:2.5电位法测定；全氮采用凯氏定氮法测定；全磷采用NaOH-熔融-钼锑抗比色法测定；碱解氮采用碱解扩散法测定；有效磷采用双酸浸提后钼锑抗比色法测定。

2.2.3 数据处理 采用单因素方差分析及LSD多重比较分析施肥处理对土壤和植株元素含量及化学计量的影响，采用Pearson相关分析土壤和植株元素含量及化学计量的相关性。分析在统计软件JMP 11中完成。

3 结果与分析

3.1 苗木N、P元素含量及N/P的动态变化

不同浓度N素指数施肥处理下苗木全株、叶片、根、茎的N、P元素含量及N/P在不同试验段呈现出一定程度的变化。

苗木全株、叶片、根、茎的N元素含量在试验中段施肥处理间均没有显著差异（ $P > 0.05$ ，

表 1 降香黄檀苗指数施肥质量
Table 1 Exponential fertilization plan for *Dalbergia odorifera* seedlings

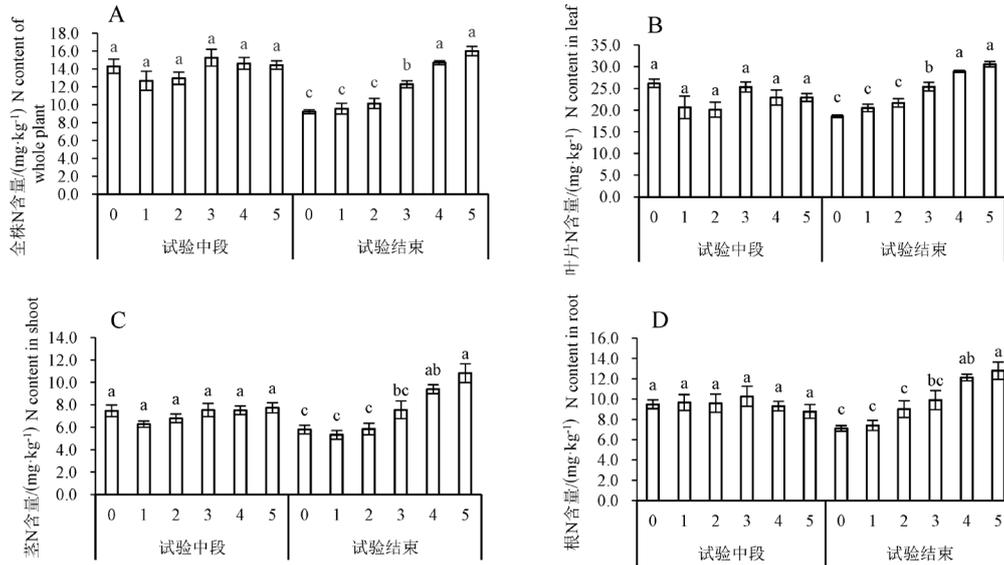
施肥处理 编号 Treatment No.	施 N 量 /mg Total N amount	次数 t																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1 000	103.66	112.44	121.97	132.30	143.51	155.68	168.87	183.18	198.70	215.54	233.80	253.61	275.10	298.42	323.70	351.13	380.89	413.16	448.18	486.15
2	2 000	143.36	160.16	178.94	199.91	223.33	249.51	278.75	311.42	347.92	388.69	434.25	485.14	542.00	605.52	676.48	755.77	844.34	943.30	1 053.85	1 177.36
3	3 000	168.77	192.06	218.56	248.71	283.03	322.08	366.51	417.08	474.63	540.11	614.63	699.43	795.93	905.75	1 030.71	1 172.92	1 334.75	1 518.91	1 728.47	1 966.95
4	4 000	187.60	216.37	249.55	287.82	331.96	382.87	441.59	509.31	587.42	677.50	781.40	901.24	1 039.45	1 198.86	1 382.72	1 594.78	1 839.35	2 121.43	2 446.77	2 822.01
5	5 000	202.60	236.16	275.27	320.86	374.00	435.95	508.15	592.31	690.41	804.76	938.05	1 093.41	1 274.51	1 485.59	1 731.65	2 018.45	2 352.75	2 742.42	3 196.64	3 726.08

注: 施肥次数下对应为各处理所施加的肥料质量 (mg), 由于所用肥料含 N 量为 20%, 各处理在试验过程中的施肥总质量分别为 0、5、10、15、20 及 25 g
Note: fertilization time corresponds fertilization mass. Since nitrogen content in fertilizer is 20%, total fertilizer mass for each treatment is 0, 5, 10, 15, 20 and 25 g, respectively

图1)。在试验结束时,苗木全株、叶片、根、茎的N元素含量施肥处理间差异显著($P < 0.05$),苗木整株及各器官N元素含量均随着施肥量增加呈现递增的趋势。与N元素变化趋势类似,试验中段苗木叶片和根部P含量在各施肥处理下差异不显著,全株和茎P含量仅在部分处理下有显著

差异(图2)。试验结束时,苗木全株及各器官P元素含量均随着施肥量增加呈现递增的趋势。

相比于无施肥处理,施肥处理下的苗木全株及各器官的N/P相对较低,到试验结束时尤为明显。试验结束时,各施肥处理之间的N/P差异不显著,以叶片N/P为各器官最高(图3)。

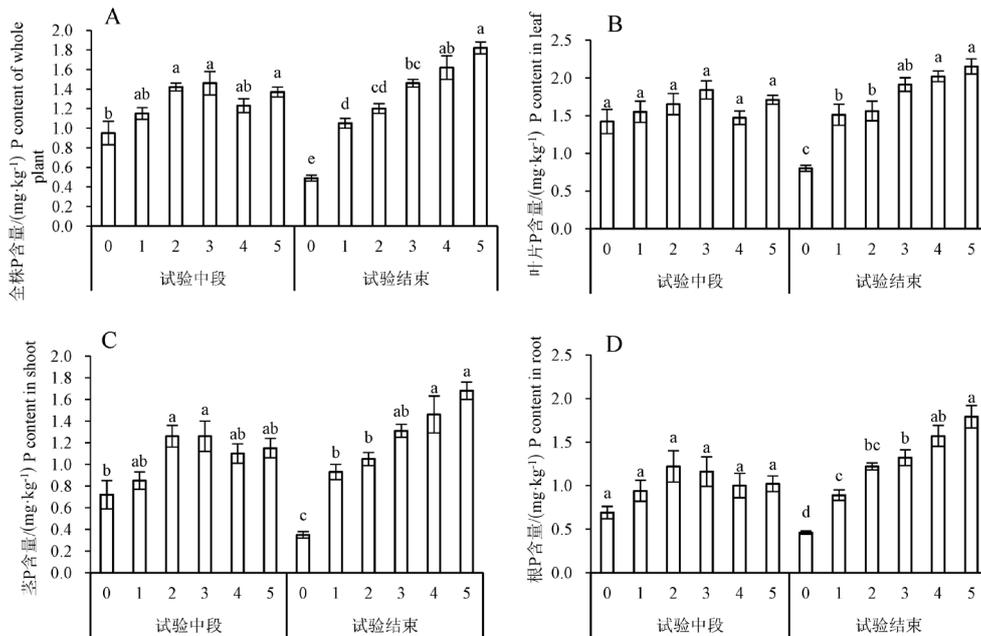


注:不同字母表示不同施肥处理下元素含量或化学计量在 $\alpha = 0.05$ 水平差异显著

Note: different letters denote nutrient contents or stoichiometries are statistically different under different treatments at $\alpha = 0.05$

图1 降香黄檀苗木各器官N元素含量

Figure 1 Nitrogen contents in different parts in *Dalbergia odorifera* seedlings



注:不同字母表示不同施肥处理下元素含量或化学计量在 $\alpha = 0.05$ 水平差异显著

Note: different letters denote nutrient contents or stoichiometries are statistically different under different treatments at $\alpha = 0.05$

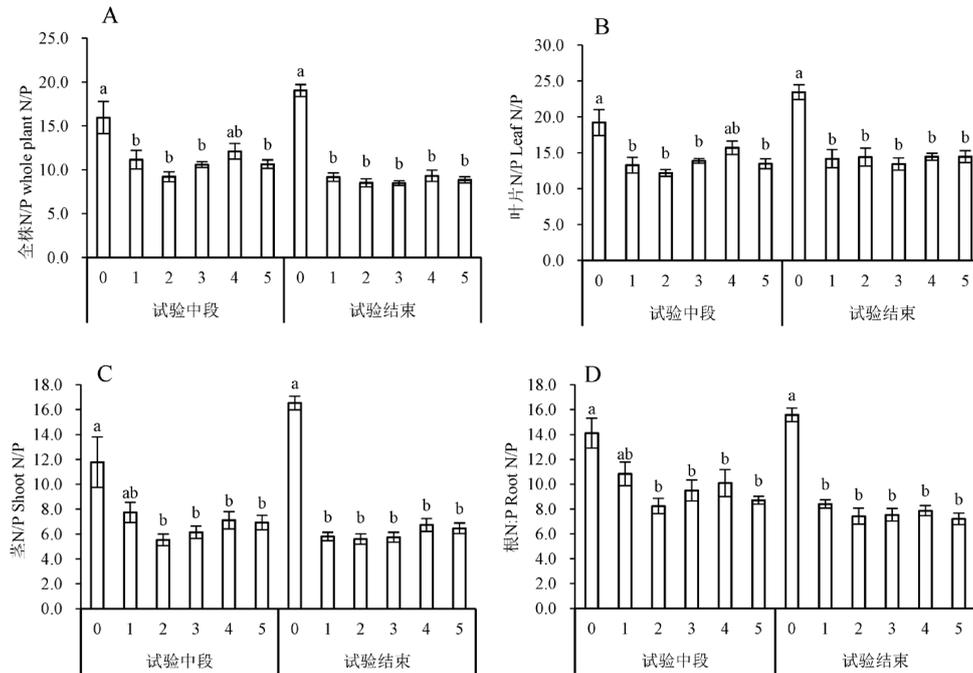
图2 降香黄檀苗木各器官P元素含量

Figure 2 Phosphorus contents in different parts in *Dalbergia odorifera* seedlings

3.2 N 素指数施肥对土壤 N、P 含量的影响

指数施肥对土壤元素含量影响显著。在试验中段，土壤 N 元素含量随着施肥量的增加呈现先增加后减少的趋势，试验后期则呈现逐渐增加的趋势（图 4A）；土壤 P 含量在试验中期和结束时

均随着施肥量增加呈现逐渐增加的趋势，并且在试验结束时该趋势尤为明显（图 4B）；土壤 N/P 在试验中期和结束时均表现为施肥处理显著低于未施肥处理，且各施肥处理之间 N/P 没有显著差异（图 4C）。

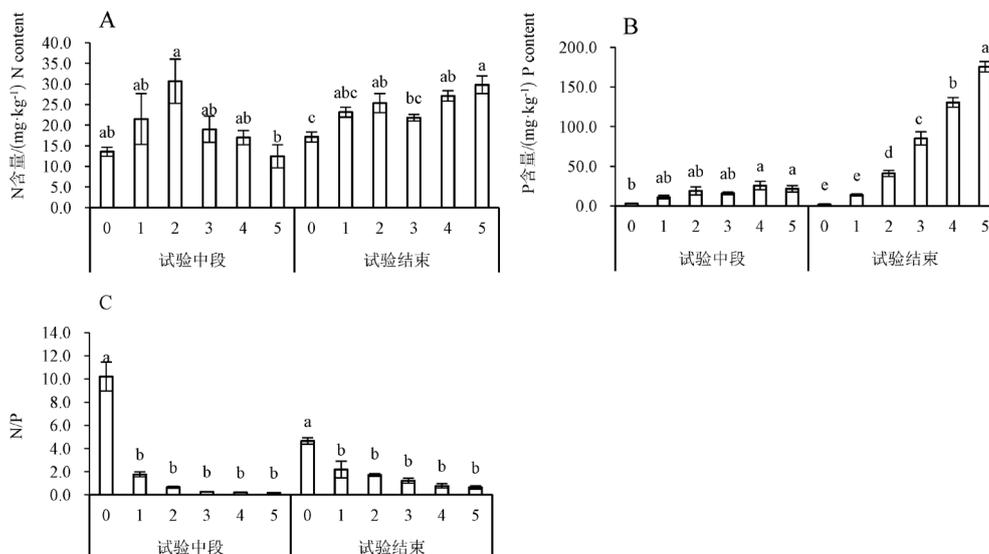


注：不同字母表示不同施肥处理下元素含量或化学计量在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著

Note: different letters denote nutrient contents or stoichiometries are statistically different under different treatments at $\alpha=0.05$

图 3 降香黄檀苗木各器官 N/P

Figure 3 N/P in different parts in *Dalbergia odorifera* seedlings



注：不同字母表示不同施肥处理下元素含量或化学计量在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著

Note: different letters denote nutrient contents or stoichiometries are statistically different under different treatments at $\alpha=0.05$

图 4 降香黄檀种植土壤 N、P 元素含量及 N/P

Figure 4 Nitrogen, phosphorus contents and N/P in soil growing *Dalbergia odorifera* seedlings

3.3 土壤 N、P 含量与苗木 N、P 含量的相关关系

如表 2 所示, 植株与土壤的元素含量和化学计量存在显著的相关关系。其中, 植株全株及各器官 N 含量与土壤 N、P 含量相关性较高, 且均呈现正相关关系: 全株和茎 N 含量与土壤 P 显著正相关 ($P < 0.05$), 叶片和根 N 含量与土壤 N、P 显著正相关 ($P < 0.05$)。植株各器官的 P 含量则显著受到施肥处理的影响, 与土壤 N、P 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与土壤 N/P 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。全株 N/P 比与土壤 N/P 比呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。

4 讨论与结论

4.1 试验中段和结束时苗木各器官 N、P 值在各施肥处理下的变化差异明显, 这可能与施肥量有

关。指数施肥法的施肥量差异在后期才逐渐显现 (表 1), 因此在试验中段收获时, 不同处理下苗木体内的元素含量差异不大, 而后期则由于施肥量的明显差异而导致处理间苗木元素含量差异明显。试验后期, 随着不同处理施肥量的增加, 苗木 N、P 含量也逐渐增加 (图 1~图 4), 说明本试验所用的施肥量均促进了苗木的生长, 未出现过量情况。从未施肥处理苗木元素含量可看到, 试验后期元素含量要低于中期, 说明在苗木生长过程中消耗了体内养分, 在抚育过程中必须辅以施肥措施来促进苗木正常生长^[12]。

4.2 相比于苗木元素含量在试验过程中的变化, 土壤的养分含量变化更为明显 (图 5); 在试验中期, 土壤的 N、P 含量在各处理下已经出现一定的差异, 在后期, 这种差异则更为明显, 说明施肥

表 2 降香黄檀苗木及土壤 N、P 含量的关系

Table 2 Correlation of nitrogen and phosphorus contents between *Dalbergia odorifera* seedlings and soil

因子 Factor	指标 Index	土壤 N Soil N	土壤 P Soil P	土壤 N/P Soil N/P
全株 N Total N	<i>r</i> <i>P</i>	0.79 0.06	0.99 <.000 1	-0.57 0.23
全株 P Total P	<i>r</i> <i>P</i>	0.89 0.02	0.92 0.01	-0.88 0.02
全株 N/P Total N/P	<i>r</i> <i>P</i>	-0.75 0.09	-0.51 0.30	0.99 0.00
叶片 N Leaf N	<i>r</i> <i>P</i>	0.82 0.05	0.99 0.00	-0.67 0.14
叶片 P Leaf P	<i>r</i> <i>P</i>	0.86 0.03	0.87 0.02	-0.91 0.01
叶片 N/P Leaf N/P	<i>r</i> <i>P</i>	-0.71 0.11	-0.50 0.32	0.98 0.00
茎 N Shoot N	<i>r</i> <i>P</i>	0.74 0.10	0.98 0.00	-0.47 0.35
茎 P Shoot P	<i>r</i> <i>P</i>	0.89 0.02	0.92 0.01	-0.88 0.02
茎 N/P Shoot N/P	<i>r</i> <i>P</i>	-0.71 0.11	-0.44 0.38	0.98 0.00
根 N Root N	<i>r</i> <i>P</i>	0.84 0.04	0.99 0.00	-0.65 0.17
根 P Root P	<i>r</i> <i>P</i>	0.91 0.01	0.94 0.01	-0.84 0.04
根 N/P Root N/P	<i>r</i> <i>P</i>	-0.80 0.06	-0.58 0.23	1.00 <.000 1

注: 对每个因子, 首行为相关系数, 第二行为相关分析 P 值, 粗体标记为 $P \leq 0.05$ 的相关系数

Note: for each factor, first row shows the correlation coefficient, the second row show the P value, correlation coefficients with $P \leq 0.05$ are shown in bold

处理能够显著改善土壤养分库。苗木和土壤元素存在显著相关性(表2),说明土壤改善能够显著影响苗木生长。需要注意的是,N元素含量在苗木和土壤中的含量差异较小,而P元素含量在二者中出现较大差异,说明苗木对N、P元素的吸收存在明显差异,P肥施加后可能只有少部分能够以有效P的形式存在于土壤中。

4.3 苗木 N/P 值在施肥处理下差异不显著,但都显著低于不施肥处理,这反映了南方土壤普遍缺P导致植物 N/P 值偏低的情况,而复合肥的施加增加了苗木对P的吸收,使得 N/P 值下降。另一方面,不同施肥情况下苗木 N/P 值没有显著差异,表明植株可能对环境营养环境的变化产生非常快速的响应,让自身保持相对的元素比例以保持最优生长,达到稳态。植物体内元素代谢必须达到平衡后植物才能正常的生长和发育^[12]。Poorter 和 Villar^[13] 的研究也表明,植物体内可能存在不同含能物质的调节平衡机制。

4.4 氮(N)和磷(P)是森林生态系统最重要的限制性元素,并且N、P相互影响,共同影响植株苗木的生长和生态系统的稳定性^[14]。植物叶片的N/P比值可用于判断环境对植物生长的养分供应状况和植物生长速率^[2]。Braakhekke 和 Hooftman^[15] 的研究认为,除了考虑养分的相对含量,还应该结合考虑养分的绝对含量,当N/P>14而叶片P含量低于1.0 mg/g时,生长受到P限制;当N/P<10并且叶片N含量低于20.0 mg/g时受到N限制;N/P在10~14之间可认为受到N、P共同限制(当P<1.0 mg/g且N<20.0 mg/g)或两种元素都不缺少(当P>1.0 mg/g且N>20.0 mg/g)。本研究中,降香黄檀苗木生长受P元素限制明显。在无施肥处理下,降香黄檀叶片N/P在试验中段为19.2(图3),试验结束时为23.44,且叶片P含量均低于1.0 mg/g(图2),表明在无施肥处理下植物生长受P元素限制。施肥处理下,试验中段时降香黄檀叶片N/P在各处理为12.19~15.69,总体处于10~14之间,P<1.0 mg/g且N<20.0 mg/g(图1),试验中段植物生长受N、P元素共同限制。试验结束时施肥处理下N/P比值为13.43~14.44,总体>14且叶片P含量<1.0 mg/g,试验结束时植物生长受P元

素的限制。

参考文献

- [1] 樊兰英. 生态化学计量学的基本理论及应用领域[J]. 山西林业科技, 2016, 45(1): 37-39.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [3] 阎恩荣, 王希华, 周武. 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]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 13-22.
- [4] 吴俊文, 何茜, 李吉跃, 等. 不同氮素指数施肥下楸树无性系叶片发育动态变化[J]. 北京林业大学学报, 2015, 17(7): 19-28.
- [5] 乔峻, 李勇, 李文耀. 氮肥损失成因及有效利用[J]. 北方农业学报, 2004(5): 38-39.
- [6] 王冉, 何茜, 丁晓纲, 等. N素指数施肥对沉香苗期光合生理特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 58-64.
- [7] 潘冬梅, 吕新, 陈彦, 等. 膜下滴灌棉花施肥模型研究[J]. 中国棉花, 2008, 35(4): 7-8.
- [8] 何茜, 王冉, 李吉跃, 等. 不同浓度指数施肥方法下马来沉香与土沉香苗期需肥规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1193-1203.
- [9] 国家林业局和农业部. 国家重点保护野生植物名录(第一批) [M]. 北京: 国家林业局办公室, 1999: 8.
- [10] TIMMER V R. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedlings performance on competitive sites[J]. New Forests, 1997, 13(1): 279-299.
- [11] 温小莹, 黄芳芳, 甘先华, 等. N素指数施肥对格木、降香黄檀苗期生长的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(6): 1-7.
- [12] 刘忠新, 刘莉梅. 浅议植物生长所必需的营养元素与其生理功能[J]. 农村实用科技信息, 2007(12): 8.
- [13] POORTER H, VILLAR R. The fate of acquired carbon in plants: chemical composition and construction costs[J]. Plant Resource Allocation, 1997: 39-72.
- [14] 林成芳, 彭建勤, 洪慧滨, 等. 氮、磷养分有效性对森林凋落物分解的影响研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 54-62.
- [15] BRAAKHEKKE W G, DAP H. The resource balance hypothesis of plant species diversity in grassland[J]. Journal of Vegetation Science, 1999, 10(2): 187-200.