

白晶晶, 吴俊文, 何茜, 等. 不同配方施肥对楸树幼苗生物量分配及养分利用的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(6): 91-97.

# 不同配方施肥对楸树幼苗生物量分配及养分利用的影响

白晶晶<sup>1</sup>, 吴俊文<sup>1</sup>, 何茜<sup>1</sup>, 苏艳<sup>1</sup>, 李吉跃<sup>1</sup>, 王军辉<sup>2</sup>, 董菊兰<sup>3</sup>

(1 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642;

2 中国林业科学研究院 林业研究所/国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

3 甘肃省小陇山林业科学研究所, 甘肃 天水 741022)

**摘要:**【目的】探讨氮、磷、钾配施对楸树 *Catalpa bungei* 苗木生物量分配及养分利用的影响。【方法】选 2 年生楸树苗木无性系 1-4 为试验材料, 设定 12 个不同 N、P、K 配方施肥处理, 对苗木生长过程中生物量及养分利用进行监测。【结果和结论】N、P、K 配施对生物量累积及分配影响显著, 总生物量最大 [ $(331.05 \pm 5.21) \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ] 为处理 T10 (T10) (尿素、钙镁磷肥、硫酸钾均为  $12 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ ), 是不施肥对照 (CK) 的 3 倍, 是单施 N 肥  $12 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  处理 (CK<sub>12</sub>) 的 2 倍。当 N 肥、K 肥量固定时, 随着 P 肥施肥量增加, 苗木根系生物量比例先升高后降低, 当施 P 肥  $12 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  时, 苗木根系生物量比例达到最大。不同处理对苗木 N、P、K 含量影响显著, 其中 T10 的 N、P、K 含量最高, 分别为  $(5.32 \pm 0.17)$ 、 $(0.84 \pm 0.07)$  和  $(4.89 \pm 0.11) \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ , 是 CK 的 5、6 和 8 倍; N 最高施肥效率为 T10 [ $(57.11 \pm 0.94) \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ]。综合分析得出, 适当比例 N、P、K 配施能够有效提高楸树苗木生物量, 提高苗木 N、P、K 含量和氮肥利用效率, P 肥对苗木根系生物量的积累有显著作用。

**关键词:** 楸树; 幼苗; 配方施肥; 生物量分配; 肥料利用率  
**中图分类号:** S723.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-411X(2015)06-0091-07

## Effects of different fertilization formulas on *Catalpa bungei* seedling biomass allocation and nutrient use efficiency

BAI Jingjing<sup>1</sup>, WU Junwen<sup>1</sup>, HE Qian<sup>1</sup>, SU Yan<sup>1</sup>, LI Jiyue<sup>1</sup>, WANG Junhui<sup>2</sup>, DONG Julian<sup>3</sup>

(1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 3 Xiaolongshan Forestry Science and Technology Research Institute, Tianshui 741022, China)

**Abstract:**【Objective】The purpose of this study was to investigate the effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on *Catalpa bungei* seedling biomass allocation and nutrient use efficiency. 【Method】Biennial *C. bungei* seedling clone 1-4 was selected as experimental material, twelve different nitrogen, phosphorus and potassium fertilization treatments were set, and the growth biomass and nutrient use efficiency were determined. 【Result and conclusion】Nitrogen, phosphorus and potassium fertilization had a significant effect on the biomass accumulation and allocation; treatment 10 ( $12 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$  urea,  $12 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$  calcium magnesium phosphate,  $12 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$  potassium sulfate) had the maximum total biomass [ $(331.05 \pm 5.21) \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ ], three times of no fertilization (CK) and two times of single nitrogen fertilization of  $12 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$  (CK<sub>12</sub>). When fertilization of N and K was fixed, the proportion of seedling root biomass initially increased, then decreased with increasing P fertilization, and the maximum value ap-

peared when  $12\text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$  P fertilization was set. Different treatments had a significant effect on nitrogen, phosphorus and potassium contents of seedling. Treatment 10 was the maximum in nitrogen, phosphorus and potassium contents [  $(5.32 \pm 0.17)$ ,  $(0.84 \pm 0.07)$  and  $(4.89 \pm 0.11)\text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$  ], which were 5, 6 and 8 times of CK respectively. The maximum nitrogen fertilization efficiency was treatment 10,  $(57.11 \pm 0.94)\text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ . Based on comprehensive analyses, the appropriate proportion of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization can increase biomass and improve nitrogen, phosphorus and potassium contents and nitrogen use efficiency of *C. bungei* seedling. Furthermore, potassium significantly affects the root biomass accumulation.

**Key words:** *Catalpa bungei*; seeding; fertilization formulas; biomass allocation; fertilizer use efficiency

土壤科学研究普遍认为,不同氮(N)、磷(P)、钾(K)配方施肥对植物增产有重要作用,并能有效提高肥料利用率<sup>[1]</sup>.且三大营养元素在苗木生长过程中有不可忽视的作用,研究表明,不同N、P、K配施方式对在沙地造林的毛白杨 *Populus tomentosa* 苗高、地径以及立木蓄积量有较大影响<sup>[2]</sup>;N、P配施能够改变长白落叶松 *Lavix algensis* 苗木养分库N、P吸收及利用情况<sup>[3]</sup>;配方施肥对印楝 *Azadirachta indica* 林分生长和结实产量影响显著<sup>[4]</sup>;适合比例配方施肥能够显著促进毛红椿 *Toona ciliata* var. *pubescens* 早期生长及幼林提早郁闭<sup>[5]</sup>;不同施肥处理对任豆 *Zenia insignis* 容器苗叶面积、叶片数、生长量及生物量均有显著影响<sup>[6]</sup>.由此可见,林木培育过程中,根据不同N、P、K比例,科学合理施肥能够在短期内有效地促进林木生长,提高经济效益.

楸树 *Catalpa bungei* 是紫葳科梓属树种,速生适应性强,分布范围较广,是我国优质珍贵用材树种,并具有较高园林观赏价值<sup>[7]</sup>.目前对楸树水分生理及N素施肥研究有一定进展,但国内外鲜见楸树配方施肥的研究,生产中多凭借经验对苗木进行施肥,缺乏科学施肥配比的综合研究.因此,为有利于楸树的定向培育,形成配套的栽培技术体系,亟待对楸树的配方施肥进行研究.本研究通过对楸树苗木进行不同N、P、K配施,探讨其对苗木生物量分配及养分利用状况的影响,为楸树养分管理及速生丰产提供科学依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设于  $105^{\circ}54' \text{ E}$ 、 $34^{\circ}28' \text{ N}$  的甘肃省天水市小陇山林业科学研究所塑料大棚.该地区海拔  $1\,160\text{ m}$ ,属于典型的黄土高原地貌,温带半干旱半湿润季风气候,年均降雨量  $600 \sim 800\text{ mm}$ ,年均蒸发量  $1\,290.0\text{ mm}$ ,年均气温  $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,无霜期  $190\text{ d}$  左右.

1.2 试验材料

试验材料为 2013 年甘肃省小陇山林业科学研究所培育的 2 年生楸树无性系 1-4 组培苗,选取生长

相对一致的苗木 93 株.2013 年 3 月采用规格为  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 45\text{ cm}$ (底径  $\times$  上口径  $\times$  高)的花盆,每个花盆配有塑料托盘,盆内套有双层白色塑料袋,每个花盆装基质约  $20\text{ kg}$ .基质是体积比为 6:4 的泥炭土和森林土,pH 7.47,有机质  $29.62\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全 N  $1.55\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全 P  $0.81\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全 K  $18.68\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解 N  $0.15\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效 P  $0.05\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效 K  $0.10\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,容重  $0.95\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,总孔隙度  $64.28\%$ .施肥前,无性系 1-4 苗高为  $(34.0 \pm 1.9)\text{ cm}$ ,地径为  $(5.82 \pm 0.42)\text{ mm}$ ,每盆 1 株幼苗.

1.3 研究方法

1.3.1 施肥方法 采用完全随机区组设计,设 N、P、K 肥 3 个因素.3 种肥料均为山西阳煤丰喜肥业(集团)有限责任公司产品.N 肥[尿素, $w(\text{N})$  为  $46\%$ ]设 10 和  $12\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  2 个水平<sup>[8]</sup>,P 肥[钙镁磷肥, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$  为  $12\%$ ]设 6、12 和  $18\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  3 个水平,K 肥[硫酸钾, $w(\text{K}_2\text{O})$  为  $50\%$ ]设 6 和  $12\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  2 个水平.共设 12 个处理,具体见表 1.另外,CK<sub>10</sub> 和 CK<sub>12</sub> 分别为单施 N 肥 10 和  $12\text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  处理,CK 为空白处理.每个处理 6 个重复,外加施肥前的 3 株破坏性取样,无性系 1-4 共计 93 株.

表 1 楸树苗木施肥方案  
Tab.1 Schedules of fertilization for *Catalpa bungei*

| 处理               | 施肥量/( $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ ) |     |     |
|------------------|----------------------------------------|-----|-----|
|                  | N 肥                                    | P 肥 | K 肥 |
| T1               | 10                                     | 6   | 6   |
| T2               | 10                                     | 6   | 12  |
| T3               | 10                                     | 12  | 6   |
| T4               | 10                                     | 12  | 12  |
| T5               | 10                                     | 18  | 6   |
| T6               | 10                                     | 18  | 12  |
| T7               | 12                                     | 6   | 6   |
| T8               | 12                                     | 6   | 12  |
| T9               | 12                                     | 12  | 6   |
| T10              | 12                                     | 12  | 12  |
| T11              | 12                                     | 18  | 6   |
| T12              | 12                                     | 18  | 12  |
| CK               | 0                                      | 0   | 0   |
| CK <sub>10</sub> | 10                                     | 0   | 0   |
| CK <sub>12</sub> | 12                                     | 0   | 0   |

P、K 肥作为基肥于 5 月 7 日一次性施入. N 肥采用指数施肥模型:

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

$$N_T = N_s(e^{rt} - 1), \tag{2}$$

其中,  $N_t$  为在 N 素增加率( $r$ )下的第  $t$  次施 N 量,  $N_s$  为苗木初始 N 含量,  $N_{t-1}$  为包括第  $t-1$  次施肥在内已施 N 肥总量,  $N_T$  为总施 N 量.

根据 N 肥的 10 和 12 g · 株<sup>-1</sup> 2 个处理水平(记作  $N_{10}$  和  $N_{12}$ ), 未施肥前,  $N_s$  为 0.525, 得出每周施 N 量(表 2).

表 2 无性系 1-4 的指数施 N 肥方案

Tab. 2 Schedules of exponential fertilization for *Catalpa bungei* clones 1-4

| 日期    | 施 N 量/(g · 株 <sup>-1</sup> ) |          |
|-------|------------------------------|----------|
|       | $N_{10}$                     | $N_{12}$ |
| 05-30 | 0.149                        | 0.159    |
| 06-06 | 0.192                        | 0.206    |
| 06-13 | 0.245                        | 0.269    |
| 06-20 | 0.316                        | 0.350    |
| 06-27 | 0.405                        | 0.456    |
| 07-04 | 0.521                        | 0.594    |
| 07-11 | 0.668                        | 0.773    |
| 07-18 | 0.858                        | 1.007    |
| 07-25 | 1.102                        | 1.311    |
| 08-01 | 1.415                        | 1.707    |
| 08-08 | 1.816                        | 2.223    |
| 08-15 | 2.223                        | 2.894    |

1.3.2 指标测量 在 5 月 7 日(施肥前)随机选取 3 株苗木进行破坏性取样, 9 月 2 日再次进行破坏性取样, 每个处理选择 3 株生长相对一致的苗木, 将植株带土根系放入尼龙网袋, 小心冲洗干净, 然后带回实验室用去离子水冲洗. 将苗木从根颈处剪下, 将植株分为根、茎、叶 3 个部分, 在 105 ℃ 条件下杀青 30 min, 然后 85 ℃ 条件下烘干到恒质量. 用电子天平测定根、茎、叶的生物量. 粉碎过 0.5 mm 筛, 全 N、全 P、全 K 均采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, N 采用半微量凯氏法测定, P 采用钼锑抗比色法测定, K 采用火焰光度计法测定. 根据测定的 N(或 P、K)质量分数, 植株根(或茎、叶)的 N(或 P、K)含量 = 根(或茎、叶)的 N(或 P、K)质量分数 × 相应的生物量<sup>[9]</sup>.

利用效率是衡量植株利用 N 等营养元素效率的重要指标, 用单位吸收量所产生的干物质量来表示. 根据养分参数<sup>[10]</sup>, 利用效率 = 总生物量 / N(或 P、K)吸收量 × 100%.

采用养分参数<sup>[11-12]</sup>, 计算 N、P、K 的吸收及施肥

效率: 表观吸收效率 = (施肥处理的 N(或 P、K)增量 - CK 的 N(或 P、K)增量) / 施 N(或 P、K)总量 × 100%; 施肥效率 = (施肥结束后的总生物量 - 施肥前的总生物量) / 施 N(或 P、K)总量.

1.3.3 数据分析方法 试验数据表示为平均值 ± 标准差, 采用 Excel2003 对试验数据进行统计分析和绘图, 利用 SPSS19.0 软件进行方差分析和 Duncan's 多重比较.

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对苗木生物量分配的影响

从表 3 可知, N、P、K 配方施肥能有效提高楸树无性系 1-4 生物量积累. 12 个处理中, T10 总生物量最高, 是 CK 的 3 倍多, 是 CK<sub>12</sub> 的 2 倍多. N、P、K 配施(T1 ~ T12)总生物量明显高于单施 N 肥处理(CK<sub>10</sub>, CK<sub>12</sub>). 在 P 肥、K 肥施肥量不变的情况下, 施 12 g · 株<sup>-1</sup> N 肥(T7 ~ T12)总生物量高于相应施 10 g · 株<sup>-1</sup> N 肥(T1 ~ T6)处理; N 肥、K 肥施肥量不变的情况下, P 肥对总生物量的影响为 12 g · 株<sup>-1</sup> 处理大于 6 和 18 g · 株<sup>-1</sup> 处理; 在 N 肥、P 肥施肥量不变的情况下, 总生物量为施 K 肥 12 g · 株<sup>-1</sup> 高于施 K 肥 6 g · 株<sup>-1</sup>.

N 肥有助于苗木总生物量增加, 但对苗木生物量分配没有显著影响. 从表 3 可知, 当 N 肥、K 肥量固定时, P 肥施肥量为 12 g · 株<sup>-1</sup> 时, 苗木根系比例达到最大, 茎、叶生物量相对 6 g · 株<sup>-1</sup> 时下降; 当 P 肥施肥量为 18 g · 株<sup>-1</sup> 时, 苗木根系比例下降, 茎、叶比例最大. K 肥对根茎叶生物量的分配影响不明显. N 肥能有效提高根、茎、叶生物量, 施 N 肥 12 g · 株<sup>-1</sup> 处理的根、茎、叶增幅大于 10 g · 株<sup>-1</sup> 处理. 当 N、K 肥施肥量固定时, 随 P 肥施肥量增加, 根、茎、叶生物量增幅先升高后降低, 在 12 g · 株<sup>-1</sup> 处理时达到最高值. N、P 肥施肥量不变时, 施 12 g · 株<sup>-1</sup> K 肥处理的根、茎、叶增幅大于施 6 g · 株<sup>-1</sup> K 肥处理.

2.2 不同施肥处理对各器官 N、P、K 分配的影响

叶片 N、P、K 含量高有利于叶绿素合成, 提高光合作用和植物体内生物量积累.

不同施肥配方处理对根、茎、叶各器官 N、P、K 含量分配有较大影响. 从图 1 可见, 楸树苗木 N 含量排序为叶 > 根 > 茎. 其中, 不同处理间根、茎、叶均有不同程度的差异, 且各处理显著高于 CK、CK<sub>10</sub> 和 CK<sub>12</sub>. 根、茎、叶 N 含量最高处理为 T10 [(1.58 ± 0.02, 0.91 ± 0.03, 3.00 ± 0.08) g · 株<sup>-1</sup>], 根、茎、叶 N 含量分别为 CK<sub>12</sub> 的 4、3、2 倍, 为 CK 的 7、6、3 倍. T1 ~ T6 施 N 肥量均为 10 g · 株<sup>-1</sup>, T7 ~ T12 施 N 肥

表 3 不同施肥处理下楸树苗木生物量分配<sup>1)</sup>  
Tab.3 The biomass allocation of *Catalpa bungei* seeding under different fertilization formula

| 处理               | 根                            |                         |                                            | 茎                            |                         |                                            | 叶                            |                         |                                            | 总生物量/<br>(g·株 <sup>-1</sup> ) |
|------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|
|                  | 生物量/<br>(g·株 <sup>-1</sup> ) | 占比 <sup>2)</sup> /<br>% | 增幅 <sup>3)</sup> /<br>(g·株 <sup>-1</sup> ) | 生物量/<br>(g·株 <sup>-1</sup> ) | 占比 <sup>2)</sup> /<br>% | 增幅 <sup>3)</sup> /<br>(g·株 <sup>-1</sup> ) | 生物量/<br>(g·株 <sup>-1</sup> ) | 占比 <sup>2)</sup> /<br>% | 增幅 <sup>3)</sup> /<br>(g·株 <sup>-1</sup> ) |                               |
| T1               | 69.36±2.22i                  | 34.89                   | 35.76                                      | 60.95±2.80h                  | 30.66                   | 23.61                                      | 68.50±2.52g                  | 34.46                   | 30.49                                      | 193.15±1.98j                  |
| T2               | 75.25±2.57hi                 | 35.65                   | 41.64                                      | 64.36±2.44gh                 | 30.49                   | 27.03                                      | 71.45±2.13fg                 | 33.85                   | 33.44                                      | 201.99±1.48i                  |
| T3               | 95.19±5.31f                  | 39.30                   | 61.59                                      | 72.12±2.42ef                 | 29.78                   | 34.78                                      | 74.88±1.06def                | 30.92                   | 36.87                                      | 229.8±2.15f                   |
| T4               | 125.02±4.15e                 | 44.75                   | 91.42                                      | 76.16±2.14de                 | 27.26                   | 38.82                                      | 78.19±1.33cd                 | 27.99                   | 40.18                                      | 249.54±8.19e                  |
| T5               | 66.17±3.10g                  | 31.68                   | 32.57                                      | 69.33±2.33f                  | 33.19                   | 31.99                                      | 73.39±1.82f                  | 35.13                   | 35.38                                      | 218.08±4.69g                  |
| T6               | 63.70±2.09g                  | 30.56                   | 30.09                                      | 70.46±2.44f                  | 33.80                   | 33.12                                      | 74.28±2.01ef                 | 35.64                   | 36.27                                      | 219.98±7.01g                  |
| T7               | 82.81±2.39h                  | 36.98                   | 49.21                                      | 68.30±2.31fg                 | 30.51                   | 30.97                                      | 72.79±2.93f                  | 32.51                   | 34.78                                      | 210.46±2.49h                  |
| T8               | 107.05±3.34f                 | 41.61                   | 73.44                                      | 72.64±2.64ef                 | 28.24                   | 35.30                                      | 77.57±1.62cde                | 30.15                   | 39.56                                      | 232.8±1.11f                   |
| T9               | 134.01±3.56b                 | 43.94                   | 100.41                                     | 85.35±2.69b                  | 27.98                   | 48.02                                      | 85.63±2.64b                  | 28.08                   | 47.62                                      | 304.99±1.72b                  |
| T10              | 144.35±2.00a                 | 43.60                   | 110.75                                     | 93.23±3.07a                  | 28.16                   | 55.90                                      | 93.47±2.47a                  | 28.23                   | 55.46                                      | 331.05±5.21a                  |
| T11              | 75.37±4.62d                  | 32.23                   | 41.76                                      | 79.08±2.72cd                 | 33.82                   | 41.75                                      | 79.38±2.42c                  | 33.95                   | 41.37                                      | 265.51±8.46d                  |
| T12              | 82.60±3.34c                  | 33.78                   | 49.00                                      | 80.83±2.21c                  | 33.05                   | 43.50                                      | 81.12±3.38c                  | 33.17                   | 43.11                                      | 286.97±6.78c                  |
| CK <sub>10</sub> | 44.38±2.96j                  | 30.14                   | 10.77                                      | 51.59±2.14i                  | 35.03                   | 14.25                                      | 51.29±1.27h                  | 34.83                   | 13.28                                      | 147.25±1.28l                  |
| CK <sub>12</sub> | 49.06±1.19j                  | 30.91                   | 15.45                                      | 53.14±2.50i                  | 33.48                   | 15.80                                      | 56.52±1.45i                  | 35.61                   | 18.51                                      | 158.71±1.79k                  |
| CK               | 33.60±2.56k                  | 30.84                   | 0.00                                       | 37.33±2.33j                  | 34.27                   | 0.00                                       | 38.01±1.81j                  | 34.89                   | 0.00                                       | 108.95±1.99m                  |

1)表中同列数据后,凡具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著( $P>0.05$ ,Duncan's 法);2)占比:为根、茎、叶生物量各占总生物量的比例;3)增幅:各处理与CK的差值。

量均为12 g·株<sup>-1</sup>,施N肥量相同处理间N含量也有显著差异,可见不同N、P、K肥配施对植株N含量有较大影响。

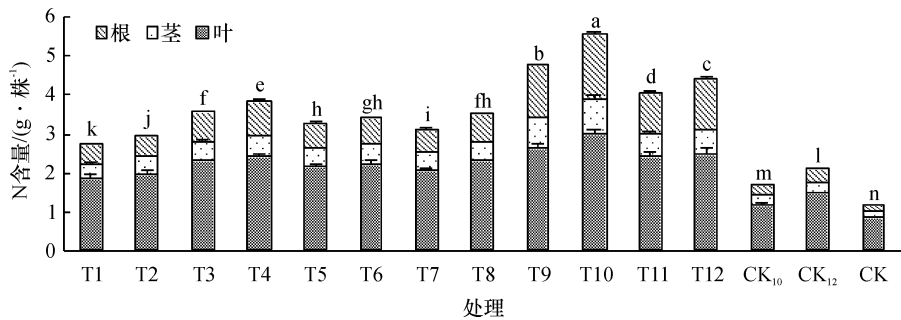
与CK相比,配方施肥能有效提高根、茎、叶P含量,但不同施肥处理对根、茎、叶P含量提高率不同(图2),且苗木P含量排序为叶>根>茎。各施肥处理间苗木P含量差异显著,其中根的P含量最高处理为T10[(0.345±0.059)g·株<sup>-1</sup>],其是CK[(0.037±0.002)g·株<sup>-1</sup>]的9倍。各处理中,T1、T2、T7和T8施P量为6 g·株<sup>-1</sup>,T5、T6、T11和T12施P量为18 g·株<sup>-1</sup>,但其植株P含量低于施P量12 g·株<sup>-1</sup>处理(T3、T4、T9和T10),可见,6 g·株<sup>-1</sup>施P肥量不足以满足植株体内P含量储量,18 g·株<sup>-1</sup>施P肥量抑制苗木体内P含量积累。

不同施肥处理间全株K含量有明显差异(图3),T10[(4.89±0.11)g·株<sup>-1</sup>]全株K含量显著高于其他配方施肥处理,其中T10[(2.64±0.04)g·株<sup>-1</sup>]根K含量为最高,是CK[(0.21±0.01)g·株<sup>-1</sup>]的13倍,占其全株K含量的54.0%。T1、T3、T5、T7、T9和T11施K肥为6 g·株<sup>-1</sup>,T2、T4、T6、T8、T10和T12施K肥为12 g·株<sup>-1</sup>,12 g·株<sup>-1</sup>处理比6 g·株<sup>-1</sup>处理更能使苗木K含量提高。12个施肥处理间差异显著( $P<0.05$ ),可见,不同N、P、K

肥配施对苗木K含量积累有显著作用。  
2.3 不同施肥处理对苗木表观吸收效率及施肥效率的影响

表观吸收效率可以反映N、P、K的吸收情况。P、K肥施肥量不变情况下,施N肥12 g·株<sup>-1</sup>处理的表观吸收效率高于10 g·株<sup>-1</sup>处理(表4),且各个施肥处理间差异极显著( $P<0.001$ ),T10的N、P肥表观吸收率均为最高[(76.11±3.87)%、(48.68±4.71)%]。K肥表观吸收率最高为T9[(112.11±0.65)%],N、P肥量固定,K肥6 g·株<sup>-1</sup>处理的表观吸收率高于12 g·株<sup>-1</sup>处理(T9、T10这2个处理仅有K肥量不同)。N、P、K表观吸收效率相关性分析显示,N、P表观吸收效率呈显著正相关,N、K表观吸收效率呈极显著正相关。说明N、P、K配施对肥料表观吸收效率有明显作用,且T10、T9这2个配比是N、P、K表观吸收效率最高的处理。

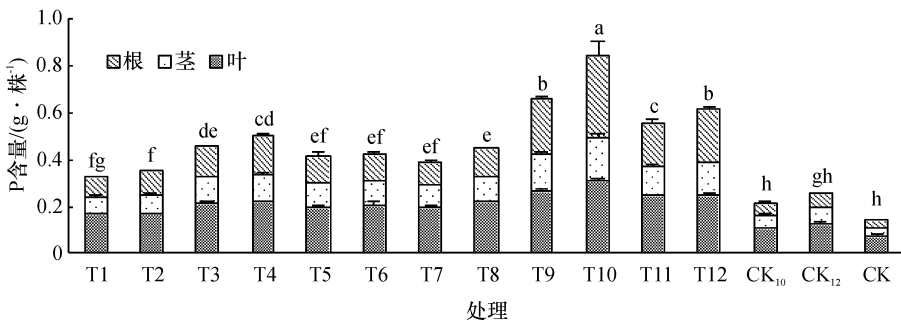
施肥效率可以反映N、P、K利用情况。如表5,T8和T9的P、K肥施肥效率最大,分别为(301.41±1.549)、(96.49±0.57)g·g<sup>-1</sup>。N肥最佳施肥效率为T10[(57.11±0.94)g·g<sup>-1</sup>],因此,在N、P、K肥均为12 g·株<sup>-1</sup>配施时,N肥利用效率最高,根据表3可知,生物量也在T10达到最大。



图中柱子 上方,凡具有一个相同小写字母者表示处理间全株 N 含量差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法).

图 1 不同施肥处理下楸树苗木 N 含量的累积及分布

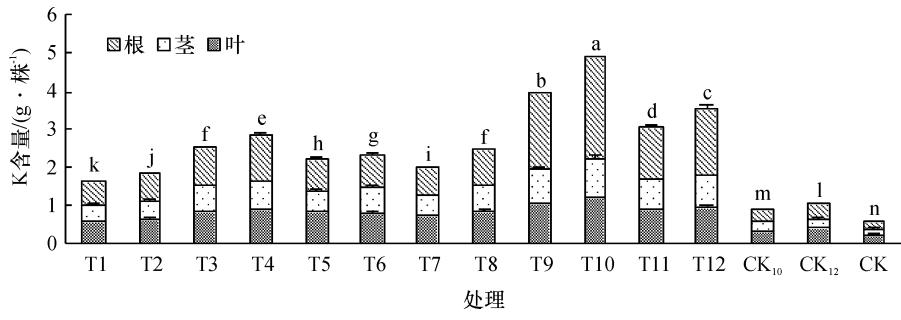
Fig. 1 The accumulation and distribution of nitrogen in *Catalpa bungei* seedling under different fertilization formula



图中柱子 上方,凡具有一个相同小写字母者表示处理间全株 P 含量差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法).

图 2 不同施肥处理下楸树苗木磷含量的累积及分布

Fig. 2 The accumulation and distribution of phosphorus in *Catalpa bungei* seedling under different fertilization formula



图中柱子 上方,凡具有一个相同小写字母者表示处理间全株 K 含量差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法).

图 3 不同施肥处理下楸树苗木 K 含量的累积及分布

Fig. 3 The accumulation and distribution of potassium in *Catalpa bungei* seedling under different fertilization formula

表 4 不同施肥处理对楸树苗木 N、P、K 表观吸收效率和施肥效率的影响<sup>1)</sup>

Tab. 4 Effects of nitrogen, phosphorus and potassium uptake and utilization efficiency of *Catalpa bungei* seedling under different fertilization formula

| 处理  | 表观吸收效率/%       |               |                | 施肥效率/(g·g <sup>-1</sup> ) |                |               |
|-----|----------------|---------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------|
|     | N              | P             | K              | N                         | P              | K             |
| T1  | 32.28 ± 2.05i  | 25.65 ± 1.50e | 34.81 ± 1.14g  | 38.56 ± 0.43g             | 246.33 ± 2.75d | 59.12 ± 0.66f |
| T2  | 36.83 ± 2.75gh | 29.07 ± 1.68d | 21.08 ± 0.42i  | 40.48 ± 0.32f             | 258.61 ± 2.05c | 31.03 ± 0.25l |
| T3  | 49.16 ± 1.87d  | 21.76 ± 0.76f | 63.89 ± 0.94d  | 46.52 ± 0.47d             | 148.62 ± 1.49h | 71.34 ± 0.72c |
| T4  | 54.93 ± 2.28c  | 24.89 ± 0.67e | 37.43 ± 1.68g  | 50.81 ± 1.78bc            | 162.32 ± 5.69g | 38.96 ± 1.37i |
| T5  | 43.65 ± 2.25ef | 12.78 ± 0.38g | 54.89 ± 2.02r  | 43.98 ± 1.02e             | 93.65 ± 2.17k  | 67.43 ± 1.56d |
| T6  | 45.43 ± 3.14de | 13.17 ± 0.94g | 29.25 ± 1.57h  | 44.39 ± 1.52e             | 94.53 ± 3.24k  | 34.03 ± 1.17k |
| T7  | 33.42 ± 1.37hi | 35.00 ± 1.54c | 47.65 ± 1.70f  | 35.27 ± 0.45h             | 270.37 ± 3.46b | 64.89 ± 0.83e |
| T8  | 40.11 ± 1.95fg | 42.94 ± 1.26b | 31.08 ± 0.49h  | 39.31 ± 0.20fg            | 301.41 ± 1.54a | 36.17 ± 0.19j |
| T9  | 61.70 ± 1.22b  | 36.10 ± 1.50c | 112.11 ± 0.65a | 52.39 ± 0.31b             | 200.84 ± 1.19f | 96.40 ± 0.57a |
| T10 | 76.11 ± 3.87a  | 48.68 ± 4.71a | 71.70 ± 1.97c  | 57.11 ± 0.94a             | 218.93 ± 3.61e | 52.54 ± 0.87g |
| T11 | 49.32 ± 3.39d  | 19.17 ± 1.14f | 82.27 ± 3.11b  | 45.24 ± 1.53de            | 115.61 ± 3.92j | 83.24 ± 2.82b |
| T12 | 55.09 ± 2.55c  | 21.87 ± 0.75f | 49.40 ± 2.10f  | 49.13 ± 1.23c             | 125.55 ± 3.14i | 45.20 ± 1.13h |

1) 表中同列数据后,凡具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 ( $P>0.05$ , Duncan's 法).

### 3 讨论与结论

当植物受到光合以及养分条件的限制时,会通过适当改变其生物量分配来提高它的适应程度及竞争能力<sup>[13]</sup>,楸树属于落叶树种,本研究 N、P、K 配施时,楸树苗木表现为生物量及养分含量累积并向根茎转移,这是一种对翌年造林积极响应的特性.康瑶瑶等<sup>[3]</sup>对 1 年生长白落叶松进行不同施肥量试验,结果显示,晚季收获时,叶片中 N 素减少,生物量和 N 素向根、茎中转移,与本试验结果基本一致.本试验针对楸树“慢-快-慢”的生长特性<sup>[14]</sup>,在其速生期 5—8 月持续施肥,使苗木生物量及养分含量显著增加,不同配方施肥苗木的生物量是不施肥对照的 1.8~3.0 倍,全株 N、P、K 含量分别为不施肥对照的 2.3~4.7、2.9~8.4、2.8~7.6 倍,且均为 T10(尿素、钙镁磷肥、硫酸钾均为 12 g·株<sup>-1</sup>)的含量最高.

#### 3.1 不同施肥配方对楸树苗木生物量分配的影响

生物量及其分配直接影响植物的生长,合理施肥是提高植物生物量的有效措施. N 素指数施肥是苗木达到奢氧状态的方法之一<sup>[15]</sup>,本试验尿素施用量采用楸树无性系 1-4 N 肥指数施肥最佳量 10~12 g·株<sup>-1</sup><sup>[8]</sup>,不存在 N 素胁迫,从苗木生物量累积及生产上的成本节约等方面考虑, N、P、K 配施能够有效提高 N 肥利用率,利于苗木生物量累积. 本研究结果表明,不同比例 N、P、K 配施时,生物量累积程度不同. 单施 N 肥有利于楸树苗木生物量的增长, N、P、K 配施能使苗木生物量累积相对单施 N 肥成倍增长,可见, N、P、K 配施有利于 N 肥吸收利用,并提高苗木生物量. 其中, N 肥施用量 12 g·株<sup>-1</sup>比 10 g·株<sup>-1</sup>更有利于苗木生物量累积,相同 N、K 施用量下,苗木根系生物量分配与 P 肥施用量密切相关,根系生物量在 P 肥 12 g·株<sup>-1</sup>时达到最大. 这与 Tr-eseder 等<sup>[16]</sup>及 Güsewell 等<sup>[17]</sup>的研究结果类似,在 P 受限制的情况下,会抑制生物量积累,施 P 能够增加根系生物量,提高对 N 的吸收能力. K 与 N、P 的作用机理不同,它不参与苗木体内有机物质的组成,而是以 K<sup>+</sup> 离子的形式参与代谢活动<sup>[18]</sup>. 研究表明,增施 K 肥能够促进光合作用,并能促进光合产物累积<sup>[19]</sup>. 本研究中, K 肥的施用能够影响苗木生物量的累积,施 K 肥 12 g·株<sup>-1</sup>的全株生物量大于施 K 肥 6 g·株<sup>-1</sup>的全株生物量. 因此, N、P、K 配施能够显著提高楸树苗木生物量的累积, P 肥的施肥量影响楸树苗木生物量的分配格局.

#### 3.2 不同施肥配方对楸树苗木养分累积及分配的影响

土壤 N、P、K 的供应是植物营养元素与分配的  
<http://xuebao.scau.edu.cn>

主要影响因素之一. N 素是植物体内蛋白质、叶绿素、核酸和部分激素的重要组成部分,在植物细胞的生长、分化和各种代谢过程中起着重要作用<sup>[20]</sup>. 植物的生长和代谢活动与 P 养分供给状况密切相关, P 能促进蛋白质、脂肪、淀粉、糖、生物碱、纤维等物质的累积,并对作物碳水化合物合成、运输、分解起着重要作用<sup>[21-22]</sup>. K 是植物体内糖酵解过程中重要活化剂,参与单糖磷酸化过程,影响碳水化合物的合成和运输,是植物体内积累蔗糖及淀粉必不可少的营养物质<sup>[23]</sup>. Güsewell 等<sup>[24]</sup>研究表明,在自然生态系统中,一般植物叶片 N 与 P 含量都是显著正相关, Graciano 等<sup>[25]</sup>认为,施 N 肥可以提高桉树的 N 含量,而施 P 肥提高 P 含量. 与本研究结果相似,在相同施 P、K 水平下,施 N 肥 10 g·株<sup>-1</sup>的全株 N 含量高于施 12 g·株<sup>-1</sup>,且单施 N 肥的 N 含量显著低于配方施肥的各处理. 可见, N、P、K 配施对楸树苗木的 N 素提高有显著作用. 在相同 N、K 施用量下,楸树苗木全株 P 含量随 P 肥的施用量增加而呈现先升高后降低的趋势,并在 P 肥施用量为 12 g·株<sup>-1</sup>时达到最大值. 配方施肥下,苗木全株 K 含量显著高于单施 N 肥处理及不施肥对照,在相同 N、P 肥施用量下, K 肥施用量 12 g·株<sup>-1</sup>的全株 K 含量高于施用量 6 g·株<sup>-1</sup>,因此,配方施肥也能够显著提高苗木 K 含量. 配方施肥下,楸树苗木中叶片 N、P 含量高于根、茎,苗木叶片 N、P 含量越高,光合作用及有机物的积累能力越强,也是苗木达到奢氧状态的一个体现<sup>[16,26]</sup>. N、P、K 含量均在 T10 达到最大,因此 T10 为楸树苗木积累养分的最佳处理.

#### 3.3 不同施肥配方对苗木表观吸收效率及施肥效率的影响

研究表明当营养元素达到胁迫水平时,其利用效率与植物生长状况关系密切,当营养在适当范围或充足时,吸收效率与植物生长关系更密切<sup>[27-29]</sup>. Aerts 等<sup>[30]</sup>认为 3 种苔草属 *Carex* 植物 N 素营养效率随 N 供应量的升高而下降,当养分供应量越高时,养分利用率会经历降低到一定水平后保持平稳的趋势<sup>[31]</sup>. 与本研究结果的 K 肥施用及其利用情况与之相似,本试验中, K 肥的表观吸收效率在施用量为 6 g·株<sup>-1</sup>时增加,而在施用量 12 g·株<sup>-1</sup>时减小,其变化趋势有待进一步求证. 不同配方施肥对 P、K 的表观吸收效率影响比较显著,相同 N、P 施用水平下,最佳施肥处理的 N、P 表观吸收效率相对其他较差处理明显提高. N 肥的肥料利用效率随不同配方而不同,其中施肥效率及养分吸收情况最佳处理为 T10.

参考文献:

[1] 黄元仿,贾小红. 平衡施肥技术[M]. 北京:化肥工业出版社,2002.

[2] 孙时轩,张振江,孙小丽,等. 毛白杨在沙地造林的施肥量及其配比[J]. 北京林业大学学报,1995,17(1):31-36.

[3] 康瑶瑶,刘勇,马履一,等. 施肥对长白落叶松苗木养分库氮磷吸收及利用的影响[J]. 北京林业大学学报,2011,33(2):31-36.

[4] 郑益兴,彭兴民,张燕平. 配方施肥对印楝人工林产量和生长性状的影响[J]. 林业科学研究,2009,22(4):545-552.

[5] 黄红兰,杨治国,张露. 毛红椿人工幼林配方施肥的初步研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(5):46-49.

[6] 曹艳云,彭玉华,郝海坤. 配方施肥对任豆容器苗生长的影响[J]. 林业科技开发,2010,24(5):77-81.

[7] 王臣,虞木奎,张翠,等. 盐胁迫下3个楸树无性系光合特征研究[J]. 林业科学研究,2010,23(4):537-543.

[8] 王力朋,李吉跃,王军辉,等. 指数施肥对楸树无性系幼苗生长和氮素吸收利用效率的影响[J]. 北京林业大学学报,2012,34(6):55-62.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[10] CORRALES I, AMENOS M, POSCHENRIEDER C, et al. Phosphorus efficiency and root exudates in two contrasting tropical maize varieties[J]. J Plant Nutrition,2007,30(6):887-900.

[11] 郭盛磊,阎秀峰,白冰,等. 落叶松幼苗碳素和氮素的获取与分配对供氮水平的响应[J]. 植物生态学报,2005,29(4):550-558.

[12] ROBERTS T L. Improving nutrient use efficiency[J]. Turkey J Agric Forestry, 2008, 32(3):177-182.

[13] WU G, DU G, CHEN M, et al. Response of seedling root of six herbaceous species to light and nutrient in alpine meadow of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Int J Bot, 2006, 2(4):395-401.

[14] 麻文俊,王军辉,张守攻,等. 楸树无性系苗期年生长参数的分析[J]. 东北林业大学学报,2010,38(1):4-7.

[15] TIMMER V R. Exponential nutrient loading: A new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J]. New Forests,1997,13(1/2/3):279-299.

[16] TRESEDER K K, VITOUSEK P M. Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of N and P in Hawaiian rain forests[J]. Ecology, 2001,82(4):946-954.

[17] GÜSEWELL S. Responses of wetland graminoids to the relative supply of nitrogen and phosphorus [J]. Plant Ecol, 2005,176(1):35-55.

[18] 孙骞,杨军,张绍阳,等. 钾营养与果树光合生理及果实品质关系研究进展[J]. 广东农业科学,2007,12(12):126-129.

[19] 曹冬梅,王云山,康黎芳,等. 根外施钾对苹果树光合速率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2004,12(1):85-87.

[20] 卢丽兰,甘炳春,魏建和,等. 不同生长条件下槟榔叶片N、P、K含量及其比例的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(1):202-208.

[21] 陈能场,徐胜光,吴启堂,等. 植物地上部氮素损失及其机理研究现状与展望[J]. 植物生态学报,2009,33(2):414-424.

[22] 陈能场,徐胜光,吴启堂,等. 植物地上部氮素损失及其机理研究现状与展望[J]. 植物生态学报,2009,33(2):414-424.

[23] 唐湘如,余铁桥. 磷钾肥对饲用稻产量和蛋白质含量的影响及其机理研究[J]. 中国农业科学,2002,35(4):372-377.

[24] GUSEWELL S, KOERSELMAN W, VERHOEVEN T A. Biomass N: P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in Wetlands[J]. Ecol Appl, 2004,13(2):372-384.

[25] GRACIANO C, GOYA J F, FRANGI J L, et al. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis* [J]. Forest Ecol Manag, 2006, 236(2):202-210.

[26] 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.

[27] MOLL R H, KAMPRATH E J, JACKSON W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization [J]. Agron J, 1982, 74(3):562-564.

[28] 何文寿. 宁夏春小麦磷素利用效率的基因型差异研究[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(2):1-6.

[29] 周志春,谢钰容,金国庆,等. 马尾松种源磷效率研究[J]. 林业科学,2005,41(4):25-30.

[30] AERTS R, DE CALUWE H. Nitrogen use efficiency of *Carex* species in relation to nitrogen supply[J]. Ecology, 1994, 75(8):2362-2372.

[31] JARAMILLO V J, DETLING J K. Small-scale heterogeneity in a semi-arid North American grassland: I: Tillering, N uptake and retranslocation in simulated urine patches [J]. J Appl Ecol, 1992, 29(1):1-8.

【责任编辑 李晓卉】