

施肥对银杏叶片光合作用及营养元素质量分数的影响

国靖, 汪贵斌, 曹福亮

(南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: 采用单因素试验和正交试验方法, 研究了不同施肥处理对银杏 *Ginkgo biloba* 叶片中的氮、磷和钾质量分数以及新梢叶片光合作用的影响, 为银杏用材林的施肥提供理论依据。结果表明: 银杏对氮和钾的吸收有协同作用, 在氮和钾肥单施时, 叶片中氮和钾元素质量分数变化趋势相同。单施磷肥对银杏吸收土壤中的氮和钾有抑制作用, 配施时土壤中磷元素高, 对氮影响较大, 对钾影响较小。在单施处理中, 净光合速率均是在氮、磷和钾最大施肥量时达到最大值, 不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$), 蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳摩尔分数变化无规律。配施处理中, 蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳摩尔分数都是在处理2(氮肥 100 g·株⁻¹, 磷肥 400 g·株⁻¹, 钾肥 40 g·株⁻¹)达到最大值, 净光合速率是在处理5(氮肥 200 g·株⁻¹, 磷肥 400 g·株⁻¹, 钾肥 90 g·株⁻¹)达到最大值。氮、磷、钾同施能够使土壤元素含量更均衡, 促进银杏对营养元素的吸收, 提高叶片光合作用效能。图4表6参18

关键词: 植物学; 银杏; 施肥; 光合作用; 营养元素

中图分类号: S723.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2016)06-0969-07

Photosynthesis and nutrient content with fertilization for *Ginkgo biloba* leaves

GUO Jing, WANG Guibin, CAO Fuliang

(Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: To provide a theoretical basis for fertilization of ginkgo (*Ginkgo biloba*) timber forests, nitrogen, phosphorus, and potassium content in ginkgo leaves and photo-biological characteristics of new ginkgo shoots were studied. These factors were related to the rapid growth of trees. An experiment with different fertilizer treatments was designed based on single factor designs and orthogonal designs. Results showed that absorption of N and K in ginkgo was synergistic. The N and K content had the same variation trends when it was single N or K fertilizer. Single P fertilizer had an inhibiting effect on the absorption of N and K. When NPK fertilizer was used, high P content in the soil also had a inhibiting effect on N absorption. Also, fertilization improved the photo-biological characteristics of ginkgo. The net photosynthetic rate (P_n) always reached maximum with single N, P, and K fertilizers. The net photosynthetic rate was significantly different ($P < 0.05$) while the transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), and intercellular CO₂ concentration (C_i) were not significantly different ($P > 0.05$). Treatment 2 had the highest T_r , G_s , and C_i value while Treatment 5 had the highest P_n . Thus, for ginkgo combined N, P, and K fertilizer can improve soil elemental balance, promote nutrient absorption, and increase photosynthesis. It suggested that we can use more K to increase the N absorption ability of the tree in the production practice. [Ch, 4 fig. 6 tab. 18 ref.]

Key words: botany; *Ginkgo biloba*; fertilization; photosynthesis; nutrition content

收稿日期: 2015-11-24; 修回日期: 2016-01-08

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD21B04); 江苏省科技支撑计划项目(BE2013443); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 国靖, 从事森林培育及经营研究。E-mail: 524780432@qq.com。通信作者: 汪贵斌, 教授, 博士, 从事经济林栽培和农林复合经营等研究。E-mail: guibinwang99@163.com

林木施肥是人们有意识地将某种有机或无机的营养物质施入土壤中或喷施在植物体上,以改善林木营养状况和促进林木生长,达到优质、高产、高效、低成本的经营措施^[1]。林木施肥始于 18 世纪德国,法国首先在树木生理和土壤化学研究的基础上对林木施肥进行试验研究^[2]。林木施肥是一项非常重要的集约经营措施,林业发达国家十分重视用材林集约经营技术的研究和应用^[3]。中国林木施肥起步较晚,大部分试验致力于研究幼林期的施肥效应,缺乏系统的理论和技术支撑体系,研究结果分歧较大^[4]。银杏 *Ginkgo biloba* 是中国特有珍贵经济树种,分布广泛,适应性强,耐盐,耐旱,耐瘠薄,适于在山区、平原、沿海盐碱地上栽植。木材优良,树干通直,具有极高的观赏价值,亦有涵养水源,防风固沙,保持水土等功效^[5]。有研究^[6]表明:银杏生长必须有 16 种元素,如果土壤中元素的含量不足以满足银杏生长的需要,就必须人工补充,即施肥。且施肥的时候,营养元素的比例搭配往往不能满足银杏最优生长的需要。合理施肥是银杏高产稳产的关键技术,然而在生产实践中广大栽植户对银杏科学施肥的重要性认识不足,以经验施肥为主,往往是有肥施什么肥,这样不仅不能满足银杏生长发育的要求,而且还增加了生产费用^[7]。笔者研究了不同施肥处理对银杏用材林中银杏的光合作用及叶片营养元素含量的影响,能为银杏用材林的施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

江苏省东台市地处 32°33'~32°57'N, 120°07'~120°53'E。东台市黄海森林公园属亚热带和暖温带的过渡区,季风显著,雨热同季。常年平均气温为 15.0 ℃,无霜期 220.0 d,降水量 1 061.2 mm,年日照时长 2 209.0 h。试验林为 2005 年定植的银杏用材林,株行距为 3.00 m×8.00 m,平均胸径 15.10 cm,平均树高 9.35 m。土壤为沿海砂质盐碱土, pH 8.42,容重为 1.28 g·cm⁻³,全氮为 0.75 mg·g⁻¹,全磷 0.26 mg·g⁻¹,全钾 5.25 mg·g⁻¹,碱解氮 34.48 mg·kg⁻¹,速效磷 4.84 mg·kg⁻¹,速效钾 72.13 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

采用单因素试验设计与正交试验设计。单因素试验分别是尿素、过磷酸钙和硫酸钾 3 因素 4 水平处理,总计 13 种处理(其中 1 个为对照 ck),3 个重复·处理⁻¹,10 株·重复⁻¹(表 1)。试验小区与试验地外围设 2 行保护行。

正交试验采用 $L_9(3^4)$ 正交设计,设置 3 个因素,3 种水平,9 种处理,3 个重复·处理⁻¹,共计 27 个小区。试验小区与试验地外围设 2 行保护行,肥料种类为尿素、过磷酸钙、硫酸钾(表 2)。

尿素含氮质量分数为 46%;过磷酸钙含五氧化二磷质量分数为 16%;硫酸钾含氧化钾质量分数为 53%。

2014 年 4 月和 2015 年 4 月对试验林分进行施肥,施肥方式为环沟状施肥,在树冠投影边缘与银杏茎干距离的 1/2~2/3 之间,分东西两侧施肥。

1.3 测定指标及数据分析

1.3.1 叶片营养元素质量分数测定 在 2015 年 5 月对每个小区内的每株树进行采样,取样时间在上午 10:00 左右,采样部位为树冠中部新梢中部的第 8~12 片功能叶。带回实验室用去离子水洗净,105 ℃ 迅速杀青 15 min,在 60~80 ℃ 下烘干至恒量,粉碎,然后称取 0.500 0 g·叶样⁻¹用浓硫酸-高氯酸(H_2SO_4 - $HClO_4$)法消煮,供化学分析用。测定方法:氮、磷用流动分析仪测定,钾用原子吸收光谱测定。

表 1 单因素试验肥料处理

Table 1 Single factor trial fertilizer treatments

肥料种类	施肥水平/(g·株 ⁻¹)				
	对照	1	2	3	4
尿素(N)	0	600	400	200	100
过磷酸钙(P)	0	800	600	400	200
硫酸钾(K)	0	200	90	40	15

表 2 正交试验肥料处理

Table 2 Orthogonal trial fertilizer treatments

处理号	肥料用量/(g·株 ⁻¹)		
	尿素	过磷酸钙	硫酸钾
1	100	200	15
2	100	400	40
3	100	600	90
4	200	200	40
5	200	400	90
6	200	600	15
7	400	200	90
8	400	400	15
9	400	600	40

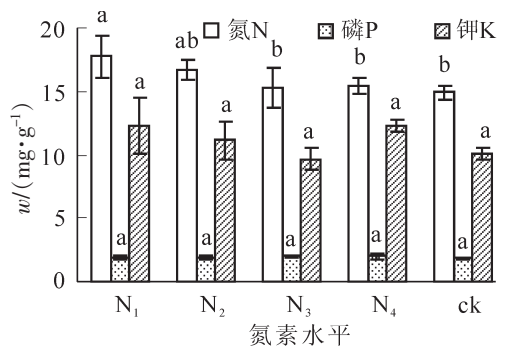
1.3.2 光合作用指标测定 2015 年 5 月使用 CIRAS-2 光合仪测定光合指标。选择晴朗无风的天气, 设定测定参数: 不控制叶温, 相对湿度 85%, 钢瓶供应二氧化碳摩尔分数为 $380 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 使用人工光源光照强度为 $1\,200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (银杏光饱和点之上)。在每个试验小区内选取向阳树冠层中高部位充分伸展枝条前端第 5~7 片成熟健康叶片, 进行净光合速率(P_n), 蒸腾速率(T_r), 气孔导度(G_s), 胞间二氧化碳摩尔分数(C_i)的测定。

2 结果与分析

2.1 施肥对银杏叶片氮、磷和钾质量分数的影响

2.1.1 氮肥对银杏叶片氮、磷和钾质量分数的影响 随氮肥施用量的增加, 银杏叶片氮和钾质量分数基本呈升高趋势, 磷先升高后降低(图 1), 表明在一定范围内, 银杏叶中氮和钾会随土壤中氮的增加而增加, 氮肥施用量过高时对银杏吸收土壤中的磷有抑制作用。方差分析表明: 不同氮素处理间银杏叶片磷、钾质量分数差异不显著($P>0.05$), 但银杏叶片中氮元素质量分数达到显著差异水平($P=0.048\,1$), N_1 水平银杏叶中氮质量分数与 N_3 , N_4 , ck 等处理差异显著($P<0.05$)。

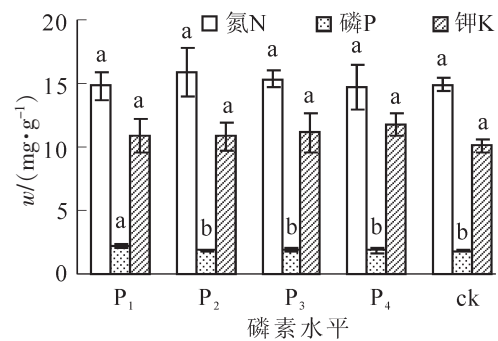
2.1.2 磷肥对银杏叶片氮、磷和钾质量分数的影响 随磷肥施用量的增加, 银杏叶片磷质量分数基本呈升高趋势, 氮和钾先升高后降低(图 2), 说明在一定范围内, 银杏叶中磷会随土壤中磷质量分数的增加而增加, 磷肥施用量过高时对银杏吸收土壤中的氮和钾有抑制作用。方差分析表明: 不同磷素水平处理间银杏叶片氮和钾质量分数差异不显著($P>0.05$), 但磷质量分数差异达到显著水平($P=0.010\,2$), P_1 水平磷质量分数与 P_2 , P_3 , P_4 , ck 差异显著($P<0.05$)。



相异字母表示 0.05 水平下差异显著,
相同字母表示 0.05 水平下差异不显著。

图 1 不同氮素处理下银杏叶片氮、磷和钾质量分数

Figure 1 N, P and K contents of ginkgo leave under different nitrogen treatments



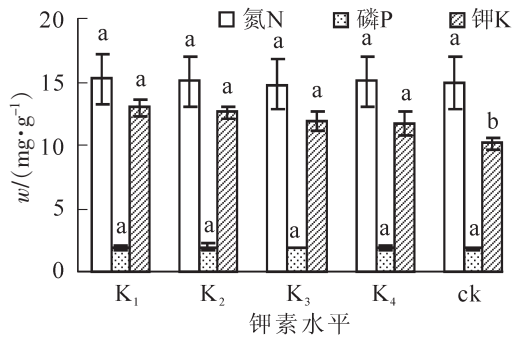
相异字母表示 0.05 水平下差异显著,
相同字母表示 0.05 水平下差异不显著。

图 2 不同磷素处理下银杏叶片氮、磷和钾的质量分数

Figure 2 N, P and K contents of ginkgo leaves under different phosphorus treatments

2.1.3 钾肥对银杏叶片氮、磷和钾质量分数的影响 随钾肥施用量的增加, 银杏叶片氮、钾质量分数基本呈升高趋势, 磷先升高后降低(图 3), 说明在一定范围内, 银杏叶中氮、钾会随土壤中钾质量分数的增加而增加, 钾肥施用量高时对银杏吸收土壤中的磷有抑制作用。方差分析表明: 不同钾质量分数处理间银杏叶片氮、磷质量分数差异不显著($P>0.05$), K_1 , K_2 , K_3 , K_4 水平钾质量分数与 ck 差异显著($P=0.011\,2$)。

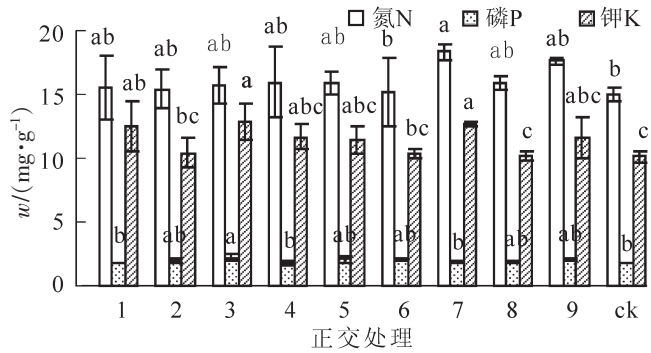
2.1.4 配方施肥对银杏叶片氮、磷和钾质量分数的影响 在配施肥试验处理中, 各个处理氮、磷、钾元素质量分数均高于对照组(图 4), 其中处理 7 氮最高, 达到 $18.31 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 处理 3 磷最高, 达到 $2.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 处理 3 钾最高, 达到 $12.88 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。方差分析表明: 不同处理间氮、磷、钾元素质量分数差异显著 ($P<0.05$)。处理 7 氮最高, 与 ck 差异显著 ($P=0.021\,5$)。处理 3 磷最高, 与处理 1, 4, 7, ck 差异显著($P=0.046\,0$)。处理 3 钾最高, 与处理 2, 6, 8 和 ck 差异显著($P=0.041\,4$)。正交处理中元素质量分数高于单施某一种肥料, 说明配方施肥会提高银杏吸收土壤中营养元素的能力, 且影响银杏吸收营养元素的最重要因素是土壤中营养元素的含量, 土壤中钾质量分数高, 会促进银杏对土壤中氮的吸收。



相异字母表示 0.05 水平下差异显著，
相同字母表示 0.05 水平下差异不显著。

图 3 不同钾素处理下银杏叶片氮、磷和钾的质量分数

Figure 3 N, P and K contents of ginkgo leaves under different potassium treatments



相异字母表示 0.05 水平下差异显著，
相同字母表示 0.05 水平下差异不显著。

图 4 不同正交处理下银杏叶片氮、磷和钾的质量分数

Figure 4 N, P and K contents of ginkgo leaves under different orthogonal treatments

2.2 施肥对叶片光合作用的影响

2.2.1 氮肥对银杏叶片光合作用的影响 不同的氮肥施用量对光合作用影响较大(表 3)。N₄ 处理的蒸腾速率和气孔导度最高，而 N₁ 处理的净光合速率最高，胞间二氧化碳摩尔分数则以 N₃ 处理最高。蒸腾速率、气孔导度和胞间二氧化碳摩尔分数变化趋势相同，都是随着氮肥施用量增加先升高后降低的趋势，在氮肥用量 100 g·株⁻¹ 时达到最大值，净光合速率变化趋势是随着氮肥施用量的增高而增高，在氮肥施用量 600 g·株⁻¹ 时达到最大值。方差分析表明：不同氮肥处理下，银杏叶片的净光合速率($P=0.011\ 1$)，蒸腾速率($P=0.007\ 1$)，气孔导度($P=0.012\ 6$)和胞间二氧化碳摩尔分数($P=0.009\ 5$)均达到显著差异水平。N₄ 处理的蒸腾速率和气孔导度与 N₁、N₂ 和 ck 差异显著，N₁ 处理的净光合速率与 N₃、ck 差异显著，N₃ 处理的胞间二氧化碳摩尔分数与 N₁、ck 差异显著。

表 3 不同氮素水平对银杏光合作用参数的影响

Table 3 Effect of different nitrogen fertilization treatments on photosynthetic parameters

处理	蒸腾速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳摩尔分数/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
N ₁	1.48 ± 0.43 c	160.13 ± 35.3 b	13.00 ± 1.20 a	218.2 ± 30.3 bc
N ₂	1.68 ± 0.48 bc	180.18 ± 57.1 b	11.50 ± 1.50 ab	251.8 ± 19.5 ab
N ₃	1.88 ± 0.24 ab	197.36 ± 29.0 ab	10.30 ± 2.00 bc	269.4 ± 15.1 a
N ₄	2.15 ± 0.33 a	233.07 ± 51.3 a	12.00 ± 0.90 ab	262.9 ± 21.3 a
ck	1.50 ± 0.28 c	160.83 ± 36.2 b	8.70 ± 1.70 c	186.3 ± 28.5 c

说明：“±”后的数值为标准差，小写字母不同表示在 0.05 水平下各处理间差异显著。

2.2.2 磷肥对银杏叶片光合作用的影响 不同的磷肥施用量对光合作用影响较大(表 4)。P₁ 蒸腾速率、气孔导度和净光合速率是最高的，而 P₄ 的胞间二氧化碳摩尔分数最高。施磷肥的各个处理中，蒸腾速率、气孔导度和净光合速率呈现出相同的变化趋势，随磷肥的施用量增加而升高，在磷肥用量 800 g·

表 4 不同磷素水平对银杏光合作用参数的影响

Table 4 Effect of different phosphorus fertilization treatments on photosynthetic parameters

处理	蒸腾速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳摩尔分数/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
P ₁	2.67 ± 0.66 a	302.0 ± 77.8 a	12.87 ± 0.42 a	295.7 ± 14.2 a
P ₂	2.27 ± 0.34 ab	226.3 ± 33.7 ab	11.53 ± 1.17 a	278.0 ± 13.5 a
P ₃	2.12 ± 0.64 ab	224.3 ± 93.9 ab	11.67 ± 0.93 a	292.0 ± 7.8 a
P ₄	1.58 ± 0.16 b	161.3 ± 5.0 b	6.63 ± 1.55 b	302.7 ± 14.2 a
ck	1.51 ± 0.28 b	160.8 ± 36.2 b	8.68 ± 1.72 b	186.3 ± 28.5 b

说明：“±”后的数值为标准差，小写字母不同表示在 0.05 水平下各处理间差异显著。

株⁻¹时达到最大值。胞间二氧化碳摩尔分数是随着磷肥施用量增加先升高后降低的趋势，在磷肥用量 200 g·株⁻¹ 时达到最大值。方差分析表明：P₁ 的蒸腾速率与 P₄, ck 差异显著($P=0.045\ 7$)，P₁ 的气孔导度与 P₄, ck 差异显著($P=0.044\ 0$)，P₁ 的净光合速率与 P₄, ck 差异显著($P=0.002\ 8$)，P₁, P₂, P₃ 和 P₄ 的胞间二氧化碳摩尔分数与 ck 差异显著($P=0.000\ 4$)。

2.2.3 钾肥对银杏叶片光合作用的影响 不同的钾肥施用量对光合作用影响较大(表 5)。K₂ 蒸腾速率最高，ck 的气孔导度是最高的，K₁ 的净光合速率是最高的，K₃ 的胞间二氧化碳摩尔分数最高。施钾肥的各个处理中，蒸腾速率、气孔导度呈现出相同的变化趋势，而净光合速率变化趋势是随钾肥的施用量增加而升高，在 K₁, K₂ 水平达到最大。方差分析表明：K₂ 的蒸腾速率与 K₃ 差异显著，ck 的气孔导度与 K₁, K₃ 差异显著($P=0.048\ 4$)，K₁ 的净光合速率与 K₃ 差异显著，各处理间的胞间二氧化碳摩尔分数差异不显著。

表 5 不同钾素水平对银杏光合作用参数的影响

Table 5 Effect of different potassium fertilization treatments on photosynthetic parameters

处理	蒸腾速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳摩尔分数/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
K ₁	1.58 ± 0.11 ab	116.5 ± 7.2 b	10.7 ± 0.76 a	195.3 ± 10.5 a
K ₂	1.70 ± 0.15 a	126.0 ± 19.5 ab	10.7 ± 0.31 a	208.2 ± 13.2 a
K ₃	1.39 ± 0.13 b	100.5 ± 20.9 b	8.25 ± 1.46 b	217.5 ± 4.8 a
K ₄	1.62 ± 0.07 ab	130.3 ± 27.8 ab	8.87 ± 0.36 ab	217.3 ± 28.7 a
ck	1.51 ± 0.28 ab	160.8 ± 36.2 a	8.68 ± 1.72 ab	186.3 ± 28.5 a

说明：“±”后的数值为标准差，小写字母不同表示在 0.05 水平下各处理间差异显著。

2.2.4 配方施肥对银杏叶片光合作用的影响 不同的正交处理对光合作用影响较大(表 6)。处理 2 蒸腾速率、气孔导度、胞间二氧化碳摩尔分数最高，处理 5 净光合速率最高。配施肥的各个处理中，蒸腾速率、气孔导度呈现出相同的变化趋势，而净光合速率变化趋势不规律。根据方差分析表明：处理 2, 3, 4 的蒸腾速率与处理 1, 7, 8 差异显著($P=0.016\ 3$)，处理 2, 3, 4 的气孔导度与处理 7, 8, 9 差异显著($P=0.010\ 8$)，各处理间的净光合速率差异不显著($P>0.05$)，处理 1, 2, 3, 4, 6 的胞间二氧化碳摩尔分数与 ck 差异显著($P=0.027\ 2$)。由表 6 可知：氮磷钾肥同施更有利于提高银杏的净光合速率，促进光合作用的提高，且处理 3, 5, 7 钾施用量最高，净光合速率也较高。

3 结论与讨论

氮、磷、钾是植物生长的必需大量营养元素。孙利涛^[8]研究表明：叶是养分重要的储藏器官，且根、茎、叶中的氮、磷、钾的积累随施肥处理的不同存在差异。本研究表明：氮、磷、钾肥单施和配施

表 6 不同正交处理水平对银杏光合作用参数的影响

Table 6 Effect of different orthogonal fertilization treatments on photosynthetic parameters

处理	蒸腾速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳摩尔分数/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
1	1.30 ± 0.16 c	134.3 ± 9.4 bc	9.53 ± 1.53 a	242.3 ± 28.4 ab
2	1.78 ± 0.05 ab	187.3 ± 2.3 a	10.07 ± 0.65 a	265.2 ± 7.3 a
3	1.86 ± 0.05 a	154.8 ± 11.1 ab	10.27 ± 1.40 a	242.3 ± 18.8 ab
4	1.78 ± 0.18 ab	157.7 ± 31.2 ab	9.15 ± 1.28 a	248.7 ± 8.3 ab
5	1.57 ± 0.12 abc	141.8 ± 5.1 bc	10.35 ± 1.01 a	226.0 ± 19.8 abc
6	1.60 ± 0.14 abc	139.8 ± 22.4 bc	9.90 ± 1.55 a	231.8 ± 12.9 ab
7	1.36 ± 0.09 c	112.5 ± 10.5 c	8.65 ± 1.54 a	224.3 ± 30.1 abc
8	1.34 ± 0.13 c	110.0 ± 12.6 c	9.03 ± 0.82 a	212.7 ± 24.8 bc
9	1.42 ± 0.42 bc	126.3 ± 51.0 bc	9.05 ± 2.53 a	223.5 ± 30.4 abc
ck	1.51 ± 0.28 abc	160.8 ± 36.2 ab	8.68 ± 1.70 a	186.3 ± 28.5 c

说明：“±”后的数值为标准差，小写字母不同表示在 0.05 水平下各处理间差异显著。

对银杏新梢叶片氮、磷、钾质量分数及银杏的光合作用都有不同程度的影响。银杏对氮、钾的吸收有协同作用,在氮、钾肥单施时,叶片中氮、钾元素质量分数变化趋势相同;单施磷肥对银杏吸收土壤中的氮、钾有抑制作用,配施中土壤中磷元素高,对银杏氮元素吸收影响较大,对银杏对钾元素吸收的影响较小。吴家胜等^[7]提出磷施得过多,会对氮、钾的吸收有妨碍,与本研究结果相似。然而,罗凡等^[9]研究表明:在不同施肥方式下,茶树 *Camellia sinensis* 秋季新梢中氮、磷质量分数表现出较一致的变化趋势,氮、磷元素在茶树新梢中的累积具有很高的相关性,造成这种差异性的原因可能是树种不同和季节不同。同时,LAURIE 等^[10]研究得到,新型生物能源作物 *Fallopia sachalinensis* ‘Igniscum Candy’ 叶中磷素也是与氮素供应状况相关性高。王东光等^[11]研究得到磷素供应使得闽楠 *Phoebe bournei* 苗木对氮磷吸收平衡,可能导致钾等其他矿质元素吸收失衡,因而生长表现较差,与本研究结果不同。施肥时,应对各种营养元素的相互关系有充分的了解,对各种元素以一定的比例进行配施,且应注意用量^[12]。BURTON 等^[13]提出养分供应过量则可能对树木生长产生抑制作用。

吴家胜等^[14]研究得到不同的氮、磷、钾配施处理对银杏苗木叶片的叶绿素质量分数、光合速率也存在显著影响。同时,张往祥等^[15]研究得到氮、磷、钾的适量供给有利于银杏幼苗气孔导度、净光合速率和水分利用率的提高。本研究表明,这种影响在对银杏成林的施肥中也存在,无论是单施、配施,对银杏的光合作用都存在较大影响。在单施肥处理中,净光合速率均是在氮、磷、钾最大施肥量时达到最大值,不同施肥处理间差异显著。蒸腾速率、气孔导度、胞间二氧化碳摩尔分数变化无特定规律。配施处理中,蒸腾速率、气孔导度、胞间二氧化碳摩尔度都是在处理 2(氮肥 100 g·株⁻¹,磷肥 400 g·株⁻¹,钾肥 40 g·株⁻¹)达到最大值,净光合速率是在处理 7(氮肥 400 g·株⁻¹,磷肥 200 g·株⁻¹,钾肥 90 g·株⁻¹)达到最大值。由以上可知,单施氮、磷、钾肥均能提高银杏的光合作用,而氮磷钾肥同施能达到更好的效果。氮、磷、钾同施能够使土壤元素更均衡,促进银杏对营养元素的吸收,促进光合作用的提高。贺维等^[16]研究表明:与单施肥相比,施有机肥和混合肥显著增大了桢楠 *Phoebe zhennan* 苗木叶片净光合速率和气孔导度,与本研究结果相似。氮、钾施用量高,能够显著提高银杏的净光合速率,主要原因应该是钾元素可显著提高植物叶片中可溶性蛋白和叶绿素质量分数,可以显著增强植物的光合作用^[17],因此,钾对植物光合作用的提高有着极其重要的作用。氮质量分数与银杏叶片叶绿素、叶片脂类质量分数及叶片光合速率有密切的关系,氮是构成叶绿素 a 和叶绿素 b 的成分,叶绿体中含蛋白质 45%~60%,提高了叶片叶绿素质量分数,从而促进光合产物的形成^[14],提高银杏的净光合速率。舒翔等^[18]研究表明:磷肥能显著提高樟树 *Cinnamomum camphora* 幼苗达到最大净光合速率所对应的光照强度,原因可能是随着磷素浓度的升高,促进了樟树幼苗光合作用中关键的核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶 Rubisco 的活性。这种影响是否在银杏中存在还需进一步的研究。

4 参考文献

- [1] 吴立潮,胡曰利. 林木计量施肥研究动态[J]. 中南林学院学报, 1998, 18(2): 56 – 61.
WU Lichao, HU Yueli. Advances in research on theories and methods of forest calculated fertilization [J]. *J Cent South For Univ*, 1998, 18(2): 56 – 61.
- [2] 舒文波,杨章旗,兰富. 施肥对马尾松中龄林生长量和产脂的影响[J]. 福建林学院学报, 2009, 29(2): 97 – 102.
SHU Wenbo, YANG Zhangqi, LAN Fu. Effects of fertilization on the growth and resin yield of middle-aged forest of *Pinus massioniana* [J]. *J Fujian Coll For*, 2009, 29(2): 97 – 102.
- [3] 胡延杰. 国外工业用材林集约经营技术比较与借鉴[J]. 世界林业研究, 2010, 23(5): 6 – 10.
HU Yanjie. Comparison and reference on intensive management technologies of industrial plantation in foreign countries [J]. *World For Res*, 2010, 23(5): 6 – 10.
- [4] 吴晓芙,胡曰利. 林木生长与营养动态模型研究: 立地养分效应配方施肥模型[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(3): 1 – 8.
WU Xiaofu, HU Yueli. Study of dynamics models for forestry growth and nutrition: site and nutrient effect fertilization model [J]. *J Cent South For Univ*, 2002, 22(3): 1 – 8.
- [5] 曹福亮. 中国银杏志[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.

- [6] 钱炳炎. 银杏高产栽培与综合利用技术[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [7] 吴家胜, 应叶青, 曹福亮. 银杏施肥研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2003, **25**(3): 402 – 406.
WU Jiasheng, YING Yeqing, CAO Fuliang. Advances in research on fertilization for *Ginkgo biloba* [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2003, **25**(3): 402 – 406.
- [8] 孙利涛. 施肥对杨树生长及生理特性的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
SUN Litao. *Effects of Fertilization to the Growth and Physiological Characteristic of Poplar* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [9] 罗凡, 张厅, 龚雪蛟, 等. 不同施肥方式对茶树新梢氮磷钾含量及光合生理的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(12): 3499 – 3506.
LUO Fan, ZHANG Ting, GONG Xuejiao, *et al.* Efforts of different fertilization ways on the contents of N, P, K in the new shoots and photo-biological characters of tea tree [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(12): 3499 – 3506.
- [10] KONING L A, VESTE M, FREESE D, *et al.* Effects of nitrogen and phosphate fertilization on leaf nutrient content, photosynthesis and growth of the novel bioenergy crop *Fallopia sachalinensis* ‘Igniscum Candy’ [J]. *J Appl Bot Food Qual*, 2015, **88**(1): 22 – 28.
- [11] 王东光, 尹光天, 杨锦昌, 等. 磷肥对闽楠苗木生长及叶片氮磷钾浓度的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, **38**(3): 40 – 44.
WANG Dongguang, YIN Guangtian, YANG Jinchang, *et al.* Effects of phosphorus fertilization on growth and foliar nutrient (N, P, K) of *Phoebe bournei* seedlings [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2014, **38**(3): 40 – 44.
- [12] 吴国欣, 王凌晖, 梁慧萍, 等. 氮磷钾配比施肥对降香黄檀苗木生长及生理的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(2): 296 – 300.
WU Guoxin, WANG Linghui, LIANG Huiping, *et al.* Fertilizer treatments for growth and physiology of *Dalbergia odorifera* seedlings [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2012, **29**(2): 296 – 300.
- [13] BURTON A J, PREGITER K S, HENDRICK R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests [J]. *Oecologia*, 2000, **125**(3): 389 – 399.
- [14] 吴家胜, 张往祥, 曹福亮. 氮磷钾对银杏苗生长和生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2003, **27**(1): 63 – 66.
WU Jiasheng, ZHANG Wangxiang, CAO Fuliang. Effects of different application amount of nitrogen, phosphorus, potassium on growth and physiological properties of ginkgo seedlings [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2003, **27**(1): 63 – 66.
- [15] 张往祥, 吴家胜, 曹福亮. 氮磷钾三要素对银杏光合性能的影响[J]. 江西农业大学学报, 2002, **24**(6): 810 – 815.
ZHANG Wangxiang, WU Jiasheng, CAO Fuliang. Influence of different levels of N, P, K on photosynthetic characters and activeness in ginkgo leaves [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2002, **24**(6): 810 – 815.
- [16] 贺维, 胡庭兴, 王锐, 等. 施肥对桢楠幼苗光合生理及生长特性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(6): 1187 – 1197.
HE Wei, HU Tingxing, WANG Rui, *et al.* Effect of fertilization on photosynthetic physiology and growth characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2014, **34**(6): 1187 – 1197.
- [17] 胡春梅, 王秀峰, 季俊杰. 钾对瓜尔豆光合及胚乳中糖类含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(6): 858 – 863.
HU Chunmei, WANG Xiufeng, JI Junjie. Effects of potassium on photosynthesis and endospermous carbohydrates contents of guar [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.] [J]. *Plant Nut Fert Sci*, 2006, **12**(6): 858 – 863.
- [18] 舒翔, 范川, 李贤伟, 等. 施肥对香樟幼苗光合生理的影响[J]. 四川农业大学学报, 2013, **31**(2): 157 – 162.
SHU Xiang, FAN Chuan, LI Xianwei, *et al.* Effects of fertilization on photosynthetic of camphor (*Cinnamomum camphora* (L.) Presl) seedling [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2013, **31**(2): 157 – 162.