

余蓉,李秉钧,刘世祥,等. 配方施肥对福建柏种子园产量及叶片光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(20):144-151.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.20.021

配方施肥对福建柏种子园产量及叶片光合特性的影响

余蓉¹,李秉钧¹,刘世祥¹,王希贤¹,荣俊冬¹,何天友²,郑郁善¹,李渊顺³,陈礼光¹

(1. 福建农林大学林学院,福建福州 350002; 2. 福建农林大学园林学院,福建福州 350002;

3. 福建省安溪丰田国有林场,福建泉州 362400)

摘要:为探究不同浓度的锌、硼、氮、磷配方施肥处理对福建柏 [*Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas] 种子园产量和叶片光合特性的影响,旨在为营建高产稳产的福建柏种子园提供科学的理论依据,以福建省安溪丰田国有林场福建柏种子园为研究对象,采用 5 因素 4 水平 $L_{16}(4^5)$ 正交试验设计,分析不同浓度的锌、硼、氮、磷配方施肥对福建柏种子园母树的球果表型、产量、种子数量和叶片光合特性的影响。结果表明,不同配方施肥处理下的福建柏种子园产量相比于对照组均有所提高,以处理 11(0.4% 浓度 $ZnSO_4$ 、0.3% 浓度硼酸、0.3 kg/株氮肥和 0.5 kg/株磷肥)的施肥促进效果最佳,果长、果径、单果种子数、球果产量、种子产量较对照组分别提高了 30%、18.7%、44.4%、112.3%、206.2%,处理 1 的施肥促进效果最低。不同配方施肥处理对福建柏叶片的光合特性存在显著性差异($P < 0.05$),其中处理 11 的施肥效果最佳,净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)分别比对照组增加了 345.7%、1100%、456.2%、340.8%,胞间二氧化碳浓度(C_i)值比对照组降低了 36.9%,处理 1 的施肥效果最小。通过综合分析产量指标和光合指标之间的相关性发现,福建柏叶片 G_s 、WUE 与球果产量和种子产量呈显著正相关($P < 0.05$),叶片 C_i 与球果产量和种子产量呈显著负相关($P < 0.05$)。综上所述,在实际生产中,0.4% 浓度 $ZnSO_4$ 、0.3% 浓度硼酸、0.3 kg/株氮肥和 0.5 kg/株磷肥的混合配方施肥更利于福建柏母树生长,达到种子园增产、稳产的目的。

关键词:福建柏;配方施肥;种子园产量;光合特性

中图分类号:S722.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)20-0144-08

配方施肥理论是在现代农业技术研究成果的基础上,依据植物对营养元素的需求特性以及肥料相互间产生的作用效应,提出最优施肥量配比^[1]。与传统施肥方式相比,配方施肥能够充分提高肥料的利用率,通过对植株进行营养补给,直接影响植

株体内生理代谢活动,以更好适应自身生长发育的需求,进而对光合作用产生一定影响,促进植物开花结果,增加产量。氮、磷在一定程度上调节植物个体生长、群落发育和整个生态系统的生产力^[2],氮、磷元素的缺乏会对植物的光合作用产生负面的作用,影响植物的生理特性,从而降低产量。刘显臣等在对欧李(*Cerasus humilis*)配方施肥的研究中发现,氮磷钾配合施肥能够大幅度提高果实的产量和品质,并对其他矿物质元素的积累产生影响^[3]。黄景贵等研究表明,氮素对假苹婆幼苗(*Sterculia lanceolata*)各生长指标和光合指标有显著影响,氮

收稿日期:2023-01-25

基金项目:福建省种苗科技攻关七期项目(编号:LZKG-202207)。

作者简介:余蓉(1998—),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为森林培育理论与技术。E-mail:870480404@qq.com。

通信作者:陈礼光,副教授,硕士生导师,主要从事森林培育研究。E-mail:clguang_cn@163.com。

[57] 邱岭军,胡欢甜,林宝平,等. 不同林龄杉木养分重吸收率及其 C:N:P 化学计量特征[J]. 西北林学院学报,2017,32(4):22-27.

[58] 芦奕晓,杨惠敏. 陇东黄土高原混播草地牧草叶片 N、P、K 重吸收及生态化学计量特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2020,56(3):285-293.

[59] Kobe R K, Lepczyk C A, Iyer M. Resorption efficiency decreases with increasing green leaf nutrients in a global data set[J]. Ecology,2005,86(10):2780-2792.

[60] Tang L Y, Han W X, Chen Y H, et al. Resorption proficiency and efficiency of leaf nutrients in woody plants in Eastern China[J]. Journal of Plant Ecology,2013,6(5):408-417.

[61] Achat D L, Pousse N, Nicolas M, et al. Nutrient remobilization in tree foliage as affected by soil nutrients and leaf life span[J]. Ecological Monographs,2018,88(3):408-428.

[62] 龙靖,黄耀,刘占锋,等. 西沙热带珊瑚岛典型乔木叶片性状和养分再吸收特征[J]. 生态环境学报,2022,31(2):248-256.

磷钾配方施肥有利于生物量积累及进行光合代谢活动^[4]。配方施肥除了需要不可或缺的大量元素(氮、磷)外,微量元素(锌、硼)也起到无法代替的作用,两者配合施肥更利于植物生长。Tavallali 研究发现,锌和硼的配合施用显著影响开心果(*Pistacia vera*)植株干质量,在两者的协同作用下可以防止有毒物质在叶片中的吸收和积累,促进光合作用和植株生长^[5]。Kugbe 等的研究表明,锌、硼元素增强了植物对生理和环境的耐受性,促进植株更好吸收氮、磷元素,在氮磷钾配方施肥的基础上添加锌、硼肥能够使玉米(*Zea mays*)产量增长 10 倍^[6]。由此可见,多种元素配方施肥能够充分发挥肥料作用,使植株更好地吸收养分。配方施肥通过改善植物光合特性,促进光合产物的积累,从而增强植株的生育能力,为较高产量的形成奠定了物质基础。

福建柏 [*Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas] 是国家二级保护植物,是福建省所特有的珍稀树种^[7],具有树干通直、树形优美、生长迅速、坚实耐用的特点,兼具材用、观赏和生态价值^[8]。种子园是良种生产的重要基地,近年来,福建柏种子园存在产量低下且种子质量不稳定的现象,难以满足社会对林木良种的需求。因此,如何增强母树开花结实的能力,提高种子园产量已成为当今福建柏研究领域较热门的话题。目前,杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus*

massoniana)、日本落叶松(*Larix kaempferi*)等树种的种子园已提出了适宜的配方施肥方案^[9-11],这为林业生产实践提供了科学施肥的理论依据,而关于福建柏种子园的配方施肥研究却鲜有报道。

鉴于此,本研究以福建省安溪县丰田国有林场福建柏种子园为研究对象,探究不同施肥配比下的大量元素(氮、磷)和微量元素(锌、硼)对母树球果果长、果径、单果种子数、球果产量、种子产量和叶片光合特性的影响,旨在营建高产稳产的种子园,以期为福建柏长期科学施肥和可持续经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省安溪县丰田国有林场(25°16'~25°20' N, 118°1'~118°57' E),地处福建省东南沿海、闽南金三角西北部。该试验样地为亚热带季风气候,海拔 500~650 m,全年气候温和多雨,年平均气温 19.5 °C,无霜期可达 330 d,降水夏多冬少,年平均降水量 1 800 mm,具有丰富的水热资源,年日照时数 2 069 h。土壤为黄红壤,土层厚度可达 60 cm,林下主要的植被类型有:芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、杜荃山(*Maesa japonica*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)等。试验样地土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 试验样地土壤理化性质

全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	水解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)
1.582	0.153	12.048	96.372	1.813	75.289	30.640

1.2 试验材料

试验种子园建于 2014 年,占地面积 1.73 hm²,株行距 2 m×3 m。在种子园内,选取生长良好(每年病虫害防治 2 次)、水肥条件(每年施肥 1 次、连续 30 d 未降雨进行灌溉)、管理状况(每年除草、松

土 2 次)和树体长势较为一致的福建柏同一无性系母树为研究对象,母树生长与理化性质如表 2 所示。2 种微量元素溶液分别采用 ZnSO₄·7H₂O 和硼酸配制,N 肥采用尿素(含 N 46%),P 肥采用过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)。

表 2 试验样地母树生长与理化性质

地径 (cm)	树高 (m)	胸径 (cm)	东西冠幅 (m)	南北冠幅 (m)	全氮含量 (%)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (mg/kg)	全硼含量 (mg/kg)	种子产量 (粒)
6.50	3.31	5.96	1.53	1.44	10.58	0.80	185.94	67.99	2 637

1.3 试验设计

试验包含 ZnSO₄ 浓度、硼酸浓度、氮肥用量和磷肥用量 4 个影响因素(表 3、表 4)。ZnSO₄ 浓度设

置 4 个处理水平,分别为 A1(0.2%)、A2(0.3%)、A3(0.4%)、A4(0.5%);硼酸浓度设置 4 个处理水平,分别为 B1(0.1%)、B2(0.2%)、B3(0.3%)、B4

(0.4%) ; 氮肥用量设置 4 个处理水平, 分别为 C1 (0.1 kg/株)、C2 (0.2 kg/株)、C3 (0.3 kg/株)、C4 (0.4 kg/株); 磷肥用量设置 4 个处理水平, 分别为 D1 (0.2 kg/株)、D2 (0.4 kg/株)、D3 (0.5 kg/株)、D4 (0.6 kg/株)。采用 5 因素 4 水平 $L_{16}(4^5)$ 正交表设计, 并以林场进行常规施肥的处理作为对照组, 标记为 CK, 总共 17 个处理, 每个处理各 5 株。

为确保微量元素直接作用于植物体, 能被母树有效吸收, 于 2020 年 3 月采用高效低耗的输液施肥方式, 将 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 和硼酸 2 种微量元素按溶度配成溶液装在输液袋中, 在树体主干距地面约 20 cm 处位置, 用手持电钻沿树干斜向下 45° 钻 2 个深 2~3 cm 的小孔, 把输液袋悬挂于高处, 排出输液袋管道中的空气, 将 2 个针头插入钻孔, 并确保针头周围无液体渗出, 从而充分提高母树对肥料的利用率。氮、磷肥采用沟施方式, 在距离母树树干 1 m 处开环状沟槽, 宽度深度均为 20 cm, 再将肥料撒入土壤中, 混合均匀后覆盖填平。

表 3 配方施肥因素与水平

因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
$ZnSO_4$ 浓度 (%)	0.2	0.3	0.4	0.5
硼酸溶度 (%)	0.1	0.2	0.3	0.4
氮肥用量 (kg/株)	0.1	0.2	0.3	0.4
磷肥用量 (kg/株)	0.2	0.4	0.5	0.6

表 4 配方施肥正交设计表

处理	A ($ZnSO_4$ 浓度)	B (硼酸浓度)	C (氮肥用量)	D (磷肥用量)
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C3	D4
3	A1	B3	C4	D2
4	A1	B4	C2	D3
5	A2	B1	C4	D3
6	A2	B2	C2	D2
7	A2	B3	C1	D4
8	A2	B4	C3	D1
9	A3	B1	C2	D4
10	A3	B2	C4	D1
11	A3	B3	C3	D3
12	A3	B4	C1	D2
13	A4	B1	C3	D2
14	A4	B2	C1	D3
15	A4	B3	C2	D1
16	A4	B4	C4	D4

1.4 测定指标与方法

1.4.1 福建柏种子园产量指标测定方法 2020 年 10 月下旬前往丰田国有林场福建柏种子园进行测定, 以 16 个施肥处理的母树和林场常规施肥处理的对照组为对象, 在树冠的东西南北 4 个方位上随机采摘 20 粒球果进行测量, 用游标卡尺测量果径、果长, 并解剖球果计算单果种子数。对福建柏母树进行全株球果采集, 将每株母树所统计的球果产量与单果种子数相乘, 计算出母树的种子产量。

1.4.2 福建柏叶片光合参数测定方法 选择连续多日晴朗无云的上午 (测定时间 08:30—11:30), 从每个处理及其对照组中选取 3 株福建柏中上部生长状况较好、健康枝条的功能叶片, 并将叶片表面的灰尘用软毛刷刷去。使用 Li-6400XT 便携式光合作用系统 (Li-Cor, USA) 进行气体交换参数的测定, 测定前外接 CO_2 小钢瓶, 将叶片放于光合有效辐射值为 $1\ 000\ \mu mol/(m^2 \cdot s)$, 气体流速为 (500 ± 0.5) mmol/s, CO_2 浓度为 $400\ \mu mol/mol$ 的叶室中进行诱导, 随后测定叶片各项光合指标, 每株叶片测定 3 次、连续 3 d 测定取平均值。测定指标包括净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)、胞间二氧化碳浓度 (C_i) 和水分利用效率 (WUE), 其中 $WUE = P_n/T_r$, 待数据稳定后读取数据, 测定结束后将叶片小心取下, 装进自封袋中带回实验室, 用 Espon scanner V700 数字化扫描仪扫描叶面积, 并计算叶面积, 用 Excel 2010 重新计算各光合参数。

1.5 数据分析与统计

利用 Excel 2010 对试验数据进行处理, DPS、SPSS 26.0 对数据进行正交试验极差分析和相关性分析, 利用 Origin 2022 制图, 显著性水平定义为 0.05, 极显著性水平定义为 0.01, 试验数据以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同配方施肥对福建柏种子园产量的影响

不同配方施肥处理下福建柏种子园产量存在差异 (表 5)。福建柏球果平均果长在 17.1~22.1 mm, 平均果径在 16.5~19.7 mm, 单果种子数为 9~13 粒。处理 11 的配方施肥对果长、果径、单果种子数的效果最佳, 处理 1 的效果最低, 各处理的果长、果径、单果种子数均高于对照组, 不同处理之间的果长、果径、单果种子数无显著差异。综合分析表明, 不同配方施肥处理下福建柏球果果长和果

径、单果种子数略有提高,处理 11 的球果相对比较饱满,单果种子数较多,而处理 1 和 CK 的球果相对不饱满,单果种子数较少。各处理对福建柏单株球果产量和种子产量的影响不同。不同处理组之间的球果产量和种子产量均高于对照组。处理 11 的球果产量和种子产量均为最高,分别为 641 个和

8 323 粒,分别比对照组提高了 112.3% 和 206.2%,显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。处理 9 和处理 13 次之,球果产量分别比对照组增加了 93.1% 和 87.4%,种子产量分别比对照组增加了 179.7% 和 164.8%。说明不同配方施肥能有效提高福建柏球果产量和种子产量,达到增产的效果。

表 5 不同处理对福建柏种子园产量的影响

处理	果长 (mm)	果径 (mm)	单果种子数 (粒)	球果产量 (个)	种子产量 (粒)
1	17.10 ± 2.33a	16.50 ± 0.37a	9 ± 1.00a	315 ± 11.85e	2 838 ± 330.54e
2	21.50 ± 6.67a	18.10 ± 0.64a	11 ± 1.53a	484 ± 66.20bcd	5 533 ± 1 435.78abcde
3	20.70 ± 2.16a	17.90 ± 1.20a	11 ± 2.52a	478 ± 115.27bcd	5 496 ± 2 251.48abcde
4	21.20 ± 2.31a	18.40 ± 1.90a	12 ± 2.08a	491 ± 136.32bcd	5 535 ± 690.86abcde
5	20.70 ± 2.30a	17.70 ± 1.10a	10 ± 1.15a	418 ± 98.81cde	4 284 ± 963.29bcde
6	20.40 ± 2.02a	18.20 ± 1.30a	12 ± 1.15a	489 ± 41.62bcd	5 730 ± 1 046.02abcde
7	21.90 ± 2.17a	18.60 ± 0.73a	13 ± 2.31a	519 ± 88.16abcd	6 705 ± 2 196.57abcd
8	21.20 ± 1.37a	18.40 ± 2.35a	12 ± 1.73a	495 ± 64.75abcd	5 947 ± 1 210.22abcde
9	21.30 ± 1.66a	18.90 ± 0.71a	13 ± 1.00a	583 ± 60.56ab	7 601 ± 1 240.05ab
10	20.20 ± 1.63a	17.60 ± 0.31a	10 ± 1.73a	393 ± 64.84de	3 942 ± 981.74cde
11	22.10 ± 1.67a	19.70 ± 0.65a	13 ± 2.65a	641 ± 11.85a	8 323 ± 1 590.62a
12	19.40 ± 2.75a	17.70 ± 1.46a	11 ± 1.53a	463 ± 84.51bcde	4 965 ± 1 278.64abcde
13	21.60 ± 2.29a	18.60 ± 0.77a	13 ± 2.89a	566 ± 64.51abc	7 196 ± 1 959.17abc
14	19.00 ± 1.61a	18.40 ± 1.40a	12 ± 2.08a	505 ± 25.58abcd	6 189 ± 763.17abcde
15	17.30 ± 0.37a	17.30 ± 1.95a	9 ± 1.53a	316 ± 36.17e	2 926 ± 325.01e
16	18.00 ± 1.42a	17.60 ± 1.30a	9 ± 2.31a	370 ± 51.83de	3 525 ± 1 381.21de
CK	17.00 ± 0.28a	16.60 ± 0.34a	9 ± 1.05a	302 ± 23.15e	2 718 ± 256.12e

注:同列数据后不同小写字母表示同一指标在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

极差分析结果(表 6)表明,4 种因素对球果产量的影响效应排序为 $D > C > A > B$,对种子产量的极差值大小排序为 $C > D > A > B$,最优处理组合均为 $A_3B_3C_3D_3$ 。

2.2 不同配方施肥对福建柏叶片光合特性的影响

不同配方施肥处理下福建柏叶片的光合特性存在差异(图 1)。各施肥处理的叶片净光合速率均大于对照组,其中处理 6、处理 11 和处理 13 增幅分别为 332.1%、345.7% 和 226.5%,说明配方施肥后叶片净光合速率得到提高,有利于提高母树的光合能力。施肥处理后的叶片气孔导度均高于对照组,处理 11 的气孔导度最大 [$0.12 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 显著高于对照组 ($P < 0.05$),增幅达 1 100%,其次是处理 6 和处理 13,相比对照组分别增长了 830% 和 810%,处理 1 的气孔导度最小,说明不同配方施肥处理可能使母树叶片的的气孔结构得到了改善,提高了叶片的气孔导度。各施肥处理后的叶片胞间二

氧化碳浓度值在 $217.31 \sim 343.03 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间波动,处理 11 最低,相比于对照组降低了 36.9%,处理 1 最高。施肥后的叶片蒸腾速率均高于对照组,处理 11 [$4.06 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$),处理 6 和处理 13 相比于对照组也分别增加了 395.9% 和 231.5%,处理 1 的蒸腾速率最低。各施肥处理叶片的水分利用效率为 $1.03 \sim 4.54 \text{ mmol}/\text{mol}$,较对照组有一定程度的提高,其中处理 11 的水分利用效率最大,增幅达 340.8%,处理 1 的最小。

极差分析结果(表 7)表明,4 种因素对叶片光合特性指标的影响效应排序均为 $C > D > A > B$,即氮肥对其光合特性效应最大,其次是磷肥、锌肥、硼肥。对叶片净光合速率、胞间二氧化碳浓度的最优处理组合为 $A_2B_2C_3D_3$,对叶片气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率的最优处理组合为 $A_2B_3C_3D_3$ 。

表 6 福建柏种子园产量的极差分析

指标	因素	K_1	K_2	K_3	K_4	k_1	k_2	k_3	k_4	R
果长(mm)	A	80.46	84.25	83.03	75.74	20.12	21.06	20.76	18.94	2.126 7
	B	80.67	81.02	82.00	79.81	20.17	20.25	20.50	19.95	0.547 5
	C	77.39	80.18	86.40	79.53	19.35	20.04	21.60	19.88	2.252 5
	D	75.74	82.12	82.92	82.71	18.93	20.53	20.73	20.68	1.796 7
果径(mm)	A	70.84	72.90	73.93	71.97	17.71	18.23	18.48	17.99	0.771 7
	B	71.68	72.35	73.48	72.12	17.92	18.09	18.37	18.03	0.450 0
	C	71.20	72.86	74.71	70.87	17.80	18.22	18.68	17.72	0.959 2
	D	69.89	72.43	74.16	73.16	17.47	18.11	18.54	18.29	1.068 3
单果种子数(粒)	A	43.33	46.67	46.67	43.67	10.83	11.67	11.67	10.92	0.833 3
	B	45.00	45.33	46.33	43.67	11.25	11.33	11.58	10.92	0.666 7
	C	44.67	45.67	49.00	41.00	11.17	11.42	12.25	10.25	2.000 0
	D	40.33	46.33	47.33	46.33	10.08	11.58	11.83	11.58	1.750 0
球果产量(个)	A	1 768.00	1 920.00	2 080.00	1 756.67	442.00	480.00	520.00	439.17	80.833 3
	B	1 882.33	1 870.33	1 954.33	1 817.67	470.58	467.58	488.58	454.42	34.166 7
	C	1 801.33	1 878.67	2 186.00	1 658.67	450.33	469.67	546.50	414.67	131.833 3
	D	1 519.33	1 995.33	2 054.67	1 955.33	379.83	498.83	513.67	488.83	133.833 3
种子产量(粒)	A	19 403.00	22 666.68	24 830.32	19 836.68	4 850.75	5 666.67	6 207.58	4 959.17	1 356.833 3
	B	21 919.00	21 394.32	23 450.68	19 972.68	5 479.75	5 348.58	5 862.67	4 993.17	869.500 0
	C	20 697.32	21 792.32	26 999.68	17 247.32	5 174.33	5 448.08	6 749.92	4 311.83	2 438.083 3
	D	15 654.00	23 386.68	24 331.32	23 364.68	3 913.50	5 846.67	6 082.83	5 841.17	2 169.333 3

注: K_i 表示同一因素试验水平之和, k_i 表示 K_i 的均值, R 值表示极差,下同。

2.3 福建柏种子园产量和叶片光合特性的相关性分析

相关性分析(表 8)显示,在光合特性指标方面,福建柏叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 、WUE 之间均呈极显著正相关($P < 0.01$),且 P_n 、 G_s 、 T_r 、WUE 与 C_i 均呈极显著负相关($P < 0.01$)。在种子园产量方面,各个指标相互之间均呈正相关关系。福建柏球果果径与 P_n 、 G_s 、 T_r 、WUE 均呈现显著正相关($P < 0.05$),与 C_i 呈现显著负相关($P < 0.05$)。叶片 G_s 、WUE 与球果产量和种子产量呈显著正相关($P < 0.05$),叶片 C_i 与球果产量和种子产量呈显著负相关($P < 0.05$)。说明不同配方施肥处理对福建柏叶片的光合特性有显著的促进作用,能够增强叶片光合产物的合成,从而进一步促进球果产量和种子产量的增加。

3 讨论

配方施肥是根据植物需肥特性和肥料相互效应等因素,提出适宜的肥料施用比例的一种经营措施,能够有效改变土壤养分状况,促进作物增产^[12]。本研究表明,不同配方施肥处理均对福建柏球果的

果长、果径和单果种子数有一定的促进作用,能够显著提高球果和种子产量,这可能是由于肥料的补充输入,增强了土壤肥力,植物对养分的吸收能力加强,促进了产量的增加。此外,随着氮肥施用量的增加,球果和种子产量呈先增加后降低的趋势,这可能是由于福建柏吸收土壤养分达到了饱和状态,过量施入肥料制约了养分之间的有效性,导致产量的降低,这与许雅明、Cheng 等的研究结果^[13-14]相似。因此适宜的配方施肥能有效调控植株生殖生长和营养生长之间的关系^[15],促进母树进行养分吸收,增加花芽数量,从而提高种子园的球果产量和种子籽粒饱满度。

本研究中,施用氮肥、磷肥是影响福建柏球果和种子产量的主要因素,这与董璐等的研究结果^[16]相似,这可能是由于氮磷肥合理配比能够更好地激发母树生长活力,保证植株地上与地下部分协调生长,从而促进对养分的吸收和利用。此外,研究还发现锌肥、硼肥作为次要因素对植物产量也起到重要作用,该结果与 Zeidan 等和 Bejandi 等的研究结果^[17-18]相似,这是因为微量元素是植物生长和养分

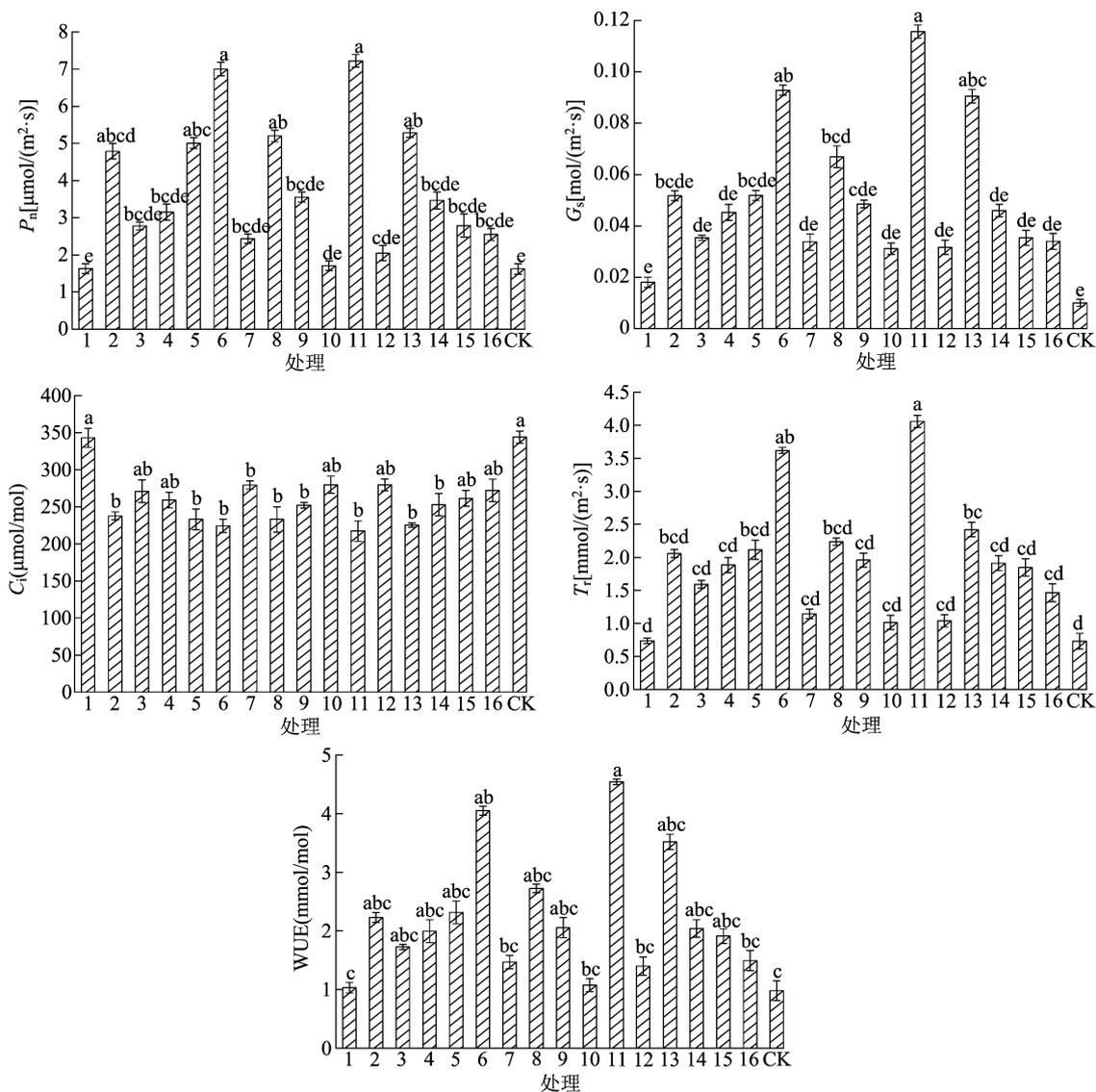
柱上不同小写字母表示同一指标在不同处理间差异显著($P<0.05$)

图1 不同处理对福建柏叶片光合特性的影响

吸收过程中的重要组成部分,锌肥可以通过影响福建柏母树生长代谢活动,参与体内生长素的合成^[19],从而促进作物的生长^[20]。而硼肥对福建柏母树花粉萌发、生长和种子形成都有激发作用,能够促进碳水化合物的转运^[21],从而提高种子园结实率和坐果率。然而,元素之间具有耦合、协同和激励作用^[22],单单施用一种元素会导致其他元素的利用效率下降,无法充分发挥植物的吸收能力。因此施肥应在满足福建柏对矿质营养元素的需求下,将氮、磷元素与锌、硼进行合理配比,充分发挥肥料效益,促进母树生长,增加种子园产量。

光合作用是植物生长发育和其他代谢活动的生理基础,它直接影响着植物的干物质积累、产量和品质。叶片的光合特性主要集中在净光合速率、

气孔导度、蒸腾速率、水分利用效率和胞间二氧化碳浓度等方面^[23-24]。在配方施肥后福建柏叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和水分利用效率含量均有显著的提高,说明配施通过调节叶片的气孔导度,促进叶片与水分和 CO_2 气体的交换,植株吸收 CO_2 的能力得到提升,这有利于光合产物的积累,进而促进净光合速率的提高。配方施肥加快了福建柏叶片的蒸发和水分输送,有利于植物叶片的营养吸收和光合物质的合成,从而优化福建柏母树整体光合能力。然而,不同配方施肥处理均降低了福建柏叶片胞间 CO_2 浓度值,有研究表明,胞间 CO_2 浓度与净光合速率呈现负相关,故认为在配方施肥后福建柏胞间 CO_2 浓度降低是光合速率上升的表现^[25]。

表7 福建柏叶片光合特性的极差分析

指标	因素	K_1	K_2	K_3	K_4	k_1	k_2	k_3	k_4	R
P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	A	12.34	19.65	14.53	14.09	3.09	4.91	3.63	3.52	1.826 3
	B	15.48	16.96	15.23	12.95	3.87	4.24	3.81	3.24	1.002 1
	C	9.57	16.50	22.50	12.05	2.39	4.12	5.62	3.01	3.230 2
	D	11.33	17.11	18.84	13.33	2.83	4.28	4.71	3.33	1.879 0
G_s [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	A	0.15	0.25	0.22	0.21	0.04	0.06	0.05	0.05	0.023 7
	B	0.21	0.21	0.22	0.18	0.05	0.05	0.06	0.05	0.010 9
	C	0.13	0.22	0.32	0.15	0.03	0.06	0.08	0.04	0.048 8
	D	0.15	0.25	0.26	0.17	0.04	0.06	0.07	0.04	0.026 8
C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	A	1 111.03	969.94	1 028.65	1 011.52	277.76	242.48	257.16	252.88	35.273 1
	B	1 053.46	994.76	1 029.03	1 043.88	263.37	248.69	257.26	260.97	14.674 6
	C	1 154.86	996.85	913.44	1 055.98	288.71	249.21	228.36	264.00	60.353 5
	D	1 117.03	1 000.37	962.39	1 041.35	279.26	250.09	240.60	260.34	38.660 5
T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	A	6.27	9.11	8.07	7.64	1.57	2.28	2.02	1.91	0.711 0
	B	7.23	8.6	8.64	6.62	1.81	2.15	2.16	1.65	0.505 5
	C	4.83	9.3	10.77	6.18	1.21	2.33	2.69	1.55	1.485 2
	D	5.83	8.67	9.97	6.62	1.46	2.17	2.49	1.66	1.033 5
WUE(mmol/mol)	A	6.98	10.55	9.07	8.96	1.74	2.64	2.27	2.24	0.893 8
	B	8.92	9.39	9.64	7.61	2.23	2.35	2.41	1.90	0.508 2
	C	5.93	10.01	13.01	6.61	1.48	2.5	3.25	1.65	1.769 3
	D	6.74	10.69	10.89	7.24	1.68	2.67	2.72	1.81	1.038 2

表8 福建柏种子园产量和叶片光合特性的相关性分析

指标	相关系数									
	P_n	G_s	C_i	T_r	WUE	果长	果径	单果种子数	球果产量	种子产量
P_n	1.000									
G_s	0.942 **	1.000								
C_i	-0.859 **	-0.819 **	1.000							
T_r	0.953 **	0.944 **	-0.828 **	1.000						
WUE	0.960 **	0.987 **	-0.816 **	0.971 **	1.000					
果长	0.538	0.561	-0.623 *	0.457	0.496	1.000				
果径	0.626 *	0.725 *	-0.721 *	0.676 *	0.675 *	0.790 *	1.000			
单果种子数	0.537	0.613 *	-0.597	0.527	0.573	0.814 **	0.915 **	1.000		
球果产量	0.599	0.698 *	-0.636 *	0.603 *	0.644 *	0.836 **	0.946 **	0.959 **	1.000	
种子产量	0.578	0.678 *	-0.607 *	0.581	0.628 *	0.816 **	0.943 **	0.978 **	0.992 **	1.000

注: * 表示相关性达显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示相关性达极显著水平 ($P < 0.01$)。

锌、硼、氮、磷 4 种元素配方施肥在植株的生长、生理代谢中发挥着重要作用。熊靛等研究发现,氮磷钾配方施肥对竹叶花椒 (*Zanthoxylum armatum*) 叶片的光合特性有促进作用,认为氮肥的输入影响了植物体内叶绿素合成,加快光合作用发生反应,磷肥通过影响光合产物的合成、运输和能量转化来促进植物新陈代谢^[26]。王靖阳等和魏双雨等研究锌硼配方施肥对平欧杂交榛 (*Corylus heterophylla* × *Corylus avellana*) 和牡丹 (*Paeonia suffruticosa*) 的影响,认为锌肥对维持植物叶绿体的稳定具有重要作

用,硼肥可以通过调节叶片气孔开闭,控制植物对 CO_2 同化率,从而影响光合速率,使叶片产生更大的光合作用,增加有机物的积累^[27-28]。本研究结果表明,氮肥对福建柏叶片各项光合指标影响最大,其次是磷肥、锌肥、硼肥,随着氮肥施用量的增加,福建柏叶片的 P_n 、 G_s 、 T_r 、WUE 均呈先增加后降低的趋势, C_i 值则呈先降低后增加的趋势,造成原因可能是过量的施肥导致土壤肥料的淋溶流失,降低了对养分的吸收效率,对福建柏生长产生抑制作用,不利于植株进行光合作用,从而造成光合能力下降,

这与钱燕萍等、魏典典等的研究结果^[29-30]一致。

通过相关性分析可知,福建柏叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、WUE 的增加对球果产量和种子产量具有显著的促进作用,说明通过配方施肥有利于福建柏叶片更好地吸收营养元素,进而影响光合产物的合成,植株体内干物质得到不断积累,为福建柏种子园球果产量和种子产量的提高提供物质保障。

4 结论

不同配方施肥均能有效提高福建柏叶片的光合特性,从而促进福建柏的生长,进而提高福建柏种子园的球果产量和种子产量。0.4% $ZnSO_4$ 、0.3% 硼酸、0.3 kg/株氮肥和 0.5 kg/株磷肥的配方施肥方案对福建柏种子园的产量指标和光合指标的影响效果最佳,这为今后更好地营建增产、稳产和可持续经营的福建柏种子园提供了理论基础。

参考文献:

[1] 胡劭鸿,吕 寻,吴春燕,等. 日本落叶松无性系种子园球果产量对长期氮磷钾配方施肥的响应[J]. 北京林业大学学报,2022,44(1):9-18.

[2] 于钦民,徐福利,王渭玲. 氮、磷肥对杉木幼苗生物量及养分分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(1):118-128.

[3] 刘显臣,建德锋,张鹏霞,等. 配合施肥对长白山欧李果实 Ga、Fe、Zn 积累及产量、品质的影响[J]. 东北林业大学学报,2015,43(5):90-92.

[4] 黄景贵,粟春青,王凌晖,等. 氮磷钾指数配方施肥对假苹婆幼苗生长和光合特性的影响[J]. 西南农业学报,2021,34(12):2691-2699.

[5] Tavallali V. Interactive effects of zinc and boron on growth, photosynthesis, and water relations in pistachio[J]. Journal of Plant Nutrition,2017,40(11):1588-1603.

[6] Kugbe J X, Kombat R, Atakora W. Secondary and micronutrient inclusion in fertilizer formulation impact on maize growth and yield across northern Ghana[J]. Cogent Food & Agriculture,2019,5(1):1700030.

[7] 李秉钧,陈 乾,王希贤,等. 不同林龄福建柏纯林与混交林生长及养分的差异[J]. 西北植物学报,2022,42(4):694-704.

[8] 凡莉莉, Muhammad Waqqas Khan Tarin, 张洋洋,等. 不同生物炭处理对福建柏光合荧光特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(3):37-44.

[9] 葛艺早,刘文飞,吴建平,等. 不同施肥处理对杉木种子园种子品质的影响[J]. 森林与环境学报,2016,36(4):442-448.

[10] 陈元镇,陈 杰,李宝福. 闽北马尾松二代种子园土壤营养诊断研究[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(12):26-33.

[11] 吕 寻,胡劭鸿. 日本落叶松种子园结实母株种实性状对氮磷钾配比施肥的响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2020,40(6):6-11.

[12] 史建硕,郭 丽,王丽英,等. 优化配方施肥对华北地区露地辣椒产量、品质和养分吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(2):86-92.

[13] 许雅明. 施肥和植物生长调节剂处理对福建柏种子园产量的影响[D]. 福州:福建农林大学,2015.

[14] Cheng H Y, Zhu X Z, Sun R X, et al. Effects of different mulching and fertilization on phosphorus transformation in upland farmland [J]. Journal of Environmental Management,2020,253:109717.

[15] 黄婉莉,张朝坤,康仕成,等. 氮磷钾配比施肥对番石榴生长发育和果实品质的影响[J]. 南方农业学报,2022,53(5):1288-1295.

[16] 董 璐,张永清,杨春婷,等. 氮磷肥配施对苦荞根系生理生态及产量的影响[J]. 西北植物学报,2018,38(5):947-956.

[17] Zeidan M S, Mohamed M F, Hamouda H A. Effect of foliar fertilization of Fe, Mn and Zn on wheat yield and quality in low sandy soils fertility [J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2010,6(6):696-699.

[18] Bejandi T K, Sharifii R S, Sedghi M, et al. Effects of plant density, rhizobium inoculation and microelements on nodulation, chlorophyll content and yield of chickpea (*Cicerarietinum* L.) [J]. Scholars Research Library,2012,3(2):951-958.

[19] 杨秀霞,燕 辉,陈仁辉,等. 硅锌硼配施对红壤区双季稻产量和群体发育特征的影响[J]. 中国土壤与肥料,2016(6):121-128.

[20] 郑甲成,刘 婷,张百忍,等. 几种微量元素作用及对水稻发育的影响[J]. 吉林农业大学学报,2010,32(增刊1):5-8.

[21] 张景全,周同永. 叶面喷施硼肥对蓝莓产量及品质的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2021,36(3):553-557.

[22] 牟小梅,胡劭鸿,吕 寻. 磷肥对日本落叶松种子园结实母株种实性状和球果产量的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2020,40(5):18-24.

[23] Han W, Huang L D, Owojori O J. Foliar application of zinc alleviates the heat stress of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Journal of Plant Nutrition,2020,43(2):194-213.

[24] 李金博,曾昭文. 兴安落叶松生理指标和光合特性对不同光环境的响应[J]. 江苏农业科学,2021,49(8):149-153.

[25] 李焕忠,张吉立. 叶面喷肥对美国红栎叶片蒸腾速率和胞间二氧化碳浓度影响的研究[J]. 北方园艺,2011(5):94-97.

[26] 熊 靓,龚 伟,王景燕,等. 配方施肥对汉源葡萄青椒叶片光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(1):79-89.

[27] 王靖阳,王庆成,朱凯月,等. 硼、锌对平欧杂交榛光合生理、结实和果仁品质的影响[J]. 植物研究,2018,38(6):869-875.

[28] 魏双雨,吉文丽,杨丹怡. 叶施硼、锌对油用牡丹‘凤丹’光合特性和矿质元素含量的影响[J]. 西北林学院学报,2019,34(2):140-147.

[29] 钱燕萍,祝遵凌. 配方施肥对欧洲鹅耳枥幼苗光合生理的影响[J]. 东北林业大学学报,2015,43(11):32-36.

[30] 魏典典,张 刚,刘淑明. 配方施肥对文冠果光合作用的影响[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):27-31.