

施硼量对黑木相思幼林生长和生理特性的影响*

丁文恩¹ 陈新强¹ 范秀琼¹ 陈朝黎²
曾炳山² 温伟文¹ 刘丽¹ 张春花³

(1. 梅州市农林科学院林业研究所 / 广东省林下特色资源(梅州)开发应用工程技术研究中心, 广东 梅州 514011;

2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520; 3. 广东省林业事务中心, 广东 广州 510173)

摘要 以黑木相思 *Acacia melanoxylon* SR17 人工幼林为研究对象, 设置 6 个施硼量处理 (0、2.5、5.0、7.5、10.0、12.5 g·株⁻¹ 硼砂), 分析不同施硼量对 0.6 a 黑木相思顶梢表型、叶片性状以及不同林龄 (0.6 a 和 1.6 a) 植株株高、胸径、地径、冠幅和叶片营养元素含量等指标的影响。通过相关性分析, 研究不同施硼量对黑木相思人工幼林生长和生理特性的影响。结果表明: 不施硼处理 (0 g·株⁻¹, CK) 会导致植株发生严重的顶梢枯萎、叶片呈黄红色, 甚至脱落的表型, 而施硼处理可以有效缓解这些症状。当施硼量达 10.0 g·株⁻¹ 时, 黑木相思无缺硼症状。施硼量的增加可以促进叶长、叶宽、叶周长、叶表面积的增加, 相较于 CK 处理, 12.5 g·株⁻¹ (B5) 施硼量处理叶长增加 17.53%, 叶宽增加 12.68%, 叶周长增加 16.77%, 叶表面积增加 29.15%。施硼量在 12.5 g·株⁻¹ 时可以显著促进不同林龄黑木相思株高的生长, 分别较 CK 处理增加 14.20% 和 62.22%。其 0.6 a 龄林分的地径和 1.6 a 龄林分的胸径也高于其他处理, 分别较 CK 处理增加 10.91% 和 64.14%。此外, 增加施硼量可以促进黑木相思叶片硼元素的含量, 但会抑制钾元素含量的积累。施硼量与黑木相思株高、胸径、叶片硼元素极显著正相关 ($P<0.01$), 与钾元素含量的积累极显著负相关 ($P<0.01$)。综上所述, 在该试验区施 10.0 g·株⁻¹ 的硼肥可以满足植株正常生长的需求, 而 12.5 g·株⁻¹ 的硼肥则可以较好的促进黑木相思的生长发育。

关键词 黑木相思; 硼肥施用量; 生长特性; 营养元素; 相关性分析

中图分类号: S722.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2023) 03-0058-09

Effect of Boron Application on the Growth and Physiological Characteristics of *Acacia melanoxylon* Young Forest

DING Wenen¹ CHEN Xinqiang¹ FAN Xiuqiong¹ CHEN Chaoli²
ZENG Bingshan² WEN Weiwen¹ LIU Li¹ ZHANG Chunhua³

(1. Forestry Research Institute, Meizhou Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Guangdong Engineering Technology Research Center (Meizhou) for the Development and Use of the Forest Characteristic Resources, Meizhou, Guangdong 514011, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China;

3. Forestry Affairs Center of Guangdong Provincial, Guangzhou, Guangdong 510173, China)

Abstract In this study, in order to investigate the effects of different boron amounts (0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, and 12.5 g·plant⁻¹ boric acid) on the phenotype of the top shoots and leaf traits of 0.6-year-old *Acacia melanoxylon* SR17 in an artificial forest, as well as on the plant height, ground diameter, diameter at breast diameter (DBH), crown width, and leaf nutrient content of plants of different ages (0.6 and 1.6-year-old). Correlation analysis was

* 基金项目: 广东省林业科技计划项目 (2021-KYXM-08)。

第一作者: 丁文恩 (1970—), 男, 高级工程师, 主要从事林木育种与森林培育工作, E-mail: dddd139@139.com。

通信作者: 陈新强 (1984—), 男, 工程师, 主要从事林木育种与森林培育工作, E-mail: 415567362@qq.com。

used to investigate the effects of different boron application rates on the growth and physiological characteristics of the artificial *A. melanoxylon* forest. Results showed that the absence of boron treatment ($0 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$, CK) caused severe top shoot withering, yellowish red color, and even shedding of leaves, while boron treatment effectively alleviated these symptoms. *A. melanoxylon* did not exhibit boron deficiency symptoms when the boron application rate reached $10.0 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$. Increasing the boron application rate promoted the increase of leaf length, width, circumference, and surface area. Compared with the CK treatment, the $12.5 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ (B5) boron application rate increased leaf length by 17.53%, leaf width by 12.68%, leaf circumference by 16.77%, and leaf surface area by 29.15%. The boron application rate of $12.5 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ significantly promoted the growth of the plant height of *A. melanoxylon* of different ages. Compared with the CK treatment, the plant height increased by 14.20% and 62.22% for the 0.6-year-old and 1.6-year-old forests under $12.5 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ boron application amount, respectively. In addition, increasing the boron application rate promoted the boron content but inhibited the accumulation of potassium in *A. melanoxylon* leaves. The boron application amount was significantly positively correlated with plant height, DBH, and leaf boron content ($P < 0.01$), and significantly negatively correlated with potassium content accumulation ($P < 0.01$). In summary, the application of $10.0 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ boron fertilizer can meet the needs of normal plant growth in the experimental area, while the application of $12.5 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ boron fertilizer can better promote the growth and development of *A. melanoxylon*.

Key words *Acacia melanoxylon*; boron application amount; growth characteristic; nutrient element; correlation analysis

黑木相思 *Acacia melanoxylon* 是一种豆科 *Mimosaceae* 金合欢属 *Acacia* 的高大乔木，原产于澳大利亚，自然分布于东部沿海地区，从昆士兰经新南威尔斯、堪培拉、维多利亚一直往南延伸至塔斯马尼亚等地^[1-2]。该区域的气候与我国广东、广西、福建南部、云南西南部和海南等地相似，都是热带或亚热带季风气候。黑木相思具有干形通直、速生、木材材质好、纹理美丽的特点。其心材呈棕色或黑棕色，间有红色条纹、雨点状和鸟眼状图案，又被称为澳洲酸枝木或澳洲黑檀木，是澳大利亚的珍贵用材树种^[3]。同时，黑木相思是生态友好型树种，具有根瘤固氮功能，改土性能好，枯落物丰富，林分郁闭后可形成养分的生物循环，需氮量远小于桉树，有提高和恢复地力的生态作用^[4-5]，是集经济与生态价值于一体的高效树种。自二十世纪九十年代引进我国以来，黑木相思已成为广东、广西、福建、海南等省重点推广种植的相思类树种之一^[6]。虽然黑木相思具有根瘤固氮能力，但幼林期仍需要通过施肥促进其生长。目前，国内外学者对黑木相思人工林施肥研究主要针对 N、P、K 等大量元素^[1,7-11]，关于硼元素对黑木相思幼林期生长中的影响方面，仅见于陈朝黎等^[12]对不同硼条件黑木相思生长特性及异速生长进行分析。

硼是高等植物生长发育必需的微量元素之一，主要存在于植物细胞壁中，对植物营养生长具有重要作用^[13]。缺硼通常会阻碍生长代谢旺盛的新生组织的生长，如幼叶、茎尖和根尖分生组织等^[14-15]，造成植株矮小、茎部粗而黑，茎尖枯萎，叶片开裂且畸形，顶端分生组织停止生长。过量的硼会导致植株老叶叶缘失绿、坏死^[16]。此外，硼还会影响植株对生长环境中其他养分的吸收和积累，如在棉花 *Gossypium hirsutum* 生长过程中施用适量的硼可以促进棉花对氮、磷、钾等养分的吸收从而促进棉株的生长发育^[17]。因此在培育过程中，适量施用硼肥可以提高植株对营养元素的利用效率，对改善林木生长速度和木材品质具有重要意义。

硼主要以硼酸盐 (H_3BO_3^-) 的形式存在于土壤中，并且容易受到降雨淋洗的影响。我国南方地区普遍高温多雨，导致硼淋洗流失问题尤为严重^[18]，使得华南地区山地土壤普遍缺硼。然而，植物对硼肥的适应范围较窄，过量施用硼肥可能会对植株造成毒害，浪费硼资源，甚至引起环境污染。本研究以黑木相思优良无性系 SR17 为研究对象，分析不同施硼量对黑木相思顶梢表型、叶片性状和株高、冠幅、地径 (0.6 a 生)、胸径 (1.6 a 生) 等生长指标和叶片营养元素含量的影

响。通过相关性分析,研究不同施硼量对黑木相思人工幼林生长的影响,旨在优化黑木相思幼林施肥配方,揭示黑木相思对硼肥的需求量,并为黑木相思人工林培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于梅州市梅江区西阳镇鲤溪村(116°15'17"E, 24°17'14"N),地处亚热带季风气候,年平均温度 20.9~22.0℃,年平均降雨量 1 425.9~1 602.1 mm,年平均相对湿度 68%。该地为低山丘陵,海拔约 220~250 m,相对高度 30 m,坡度 20~30°,东南坡向。土壤为花岗岩发育而来的山地赤红壤,土层约 100 cm,其中砂石含量为 28.27%,粉砂含量为 26.39%,粘粒含量为 45.34%,土壤养分指标见表 1。原有林分为马尾松 *Pinus massoniana* 残次林,林下植被主要为白茅 *Imperata cylindrica* 和铁芒箕 *Dicranopteris dichotoma*,光照充足。

1.2 试验方法

以黑木相思优良无性系 SR17 为植株材料,由中国林科院热带林业研究所提供,定植苗平均地径约 0.5 cm、平均苗高约 58 cm。于 2020 年 12 月进行林地清理,采取开竖直带后垦穴整地法,带面宽 1.5 m,株行距为 3 m×3 m,种植穴规格为 50 cm×40 cm×35 cm。试验林于 2021 年 5 月下旬定植,定植前施加不含硼的 N15-P15-K15 的复合肥 250 g·株⁻¹和 12% 的钙镁磷肥 500 g·株⁻¹作为基肥,并按试验设计添加硼砂。随后在 2021 年 6 月、2021 年 12 月、2022 年 6 月、2022 年 12 月进行了 4 次抚育,主要抚育措施为铲草、培土、追肥。在 2021 年 6 月、12 月和 2022 年 12 月的追肥为不添加硼的 N15-P15-K15 复合肥 500 g·株⁻¹和尿素 100 g·株⁻¹。在 2022 年 6 月追肥时,施用不含硼的 N15-P15-K15 复合肥 500 g·株⁻¹和尿素

100 g·株⁻¹,并按实验设计添加硼砂,施用于植株茎基部上方 20 cm、穴深 15 cm 处,并及时覆土。

1.3 项目测定

1.3.1 生长指标测定 分别在 2021 年 12 月(即树龄 0.6 a)和 2022 年 12 月(即树龄 1.6 a)对试验区进行每木检尺,统计植株顶端枯梢情况和枯梢株数。用测高杆测量树高,用皮尺在南北和东西方向分别测量冠幅,2021 年 12 月用游标卡尺测量地径,2022 年 12 月用胸径尺测量胸径。

1.3.2 叶片性状的测定 在 2021 年 12 月进行 0.6 a 龄黑木相思植株叶片性状调查,每个小区选取 3 株平均木,并从每株树木上部、中部、下部的东、南、西、北 4 个方位各随机选取生长势相近的一年生枝条各 1 根,共 12 根枝条。在每根枝条梢部、中部、基部位置各随机抽取 2 片成熟叶片进行测量,每株共调查 72 个叶片。用 LAM-C 叶面积测量仪检测每个叶片样品进行检测,包括最大叶长(记为叶长)、最大叶宽(记为叶宽)、叶周长、叶表面积。同时,用 SPAD-502 叶绿素手持式测量仪测定叶片的叶色值。

1.3.3 叶片养分指标测定 分别在 2021 年 12 月(即树龄 0.6 a)和 2022 年 12 月(即树龄 1.6 a)采集植株树冠 2/3 处,东、南、西、北 4 个方位枝条顶梢 50 cm 范围内的成熟叶片,测定硼、氮、磷、钾含量,每个处理 3 次重复。营养元素的测定方法如下:按照 NY/T 2017—2011 标准^[19],用干灰化—甲亚胺比色法测定叶片硼含量;按照 NY/T 2017—2011 标准,用凯氏定氮仪法测定叶片氮含量,用钒钼黄吸光光度法测定叶片磷含量,用火焰原子吸收分光光度法测定叶片钾含量。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2013 与 SPSS 26.0 软件进行数据整理、显著性差异分析和图形绘制,用最小显著性差异法(Least-Significant Difference, LSD)检验不同施硼量处理的差异显著性。

表 1 试验林土壤物理和化学指标

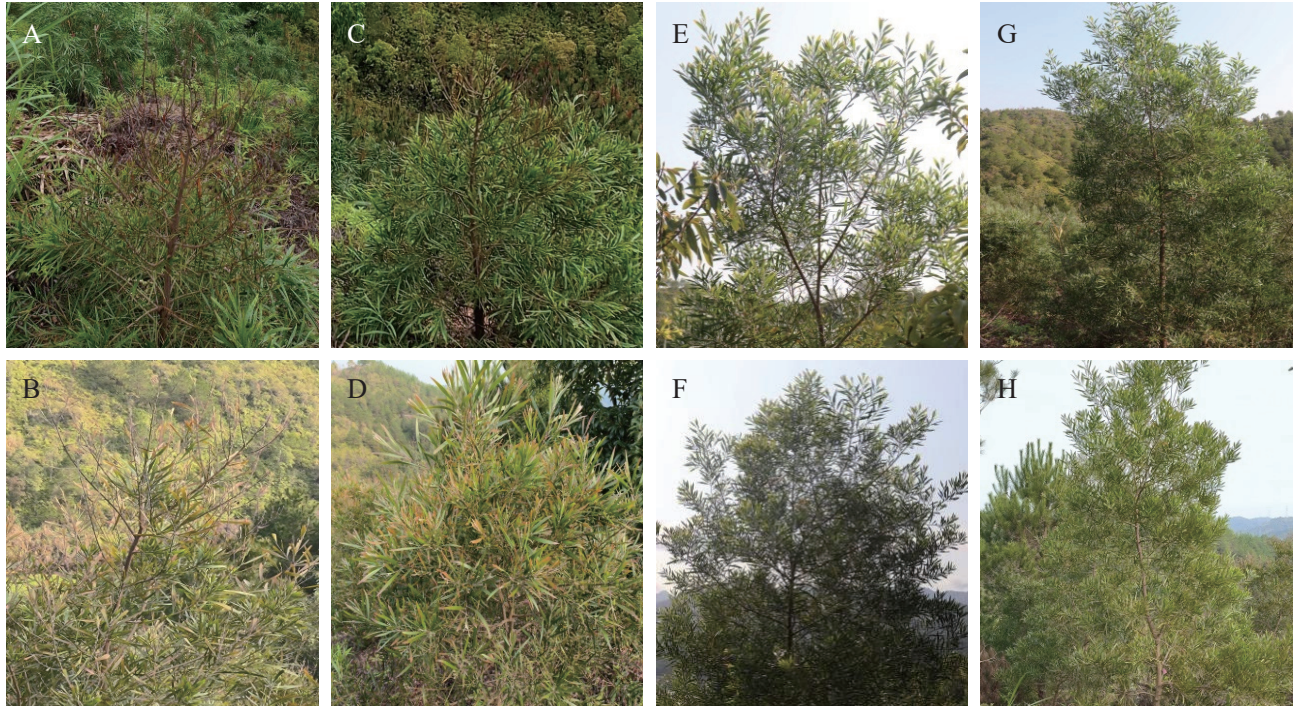
Table 1 Soil physical and chemical information of experimental forests

土层深度/cm Soil depth	pH 值 pH value	有机质/% Organic matter content	全氮/(mg·kg ⁻¹) Total N content	总磷/(mg·kg ⁻¹) Total P content	总钾/(g·kg ⁻¹) Total K content	速效氮/(mg·kg ⁻¹) Rapid available N	速效磷/(mg·kg ⁻¹) Rapid available P	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Rapid available K	有效硼/(mg·kg ⁻¹) Available P content
0~20	4.22	27.81	699.33	260.50	22.65	37.16	16.09	98.18	1.26
20~40	4.18	28.77	454.00	245.17	23.62	21.08	15.78	115.23	0.85
40~60	4.23	23.81	437.17	290.83	22.28	20.46	19.76	108.91	1.24

2 结果与分析

2.1 不同硼肥处理的枯梢表现

缺硼会导致植株顶梢枯萎，丧失顶端优势。本研究观察了不同施硼量处理下 0.6 a 龄黑木相思植株的顶端枯梢表现，结果如图 1、图 2 所示。

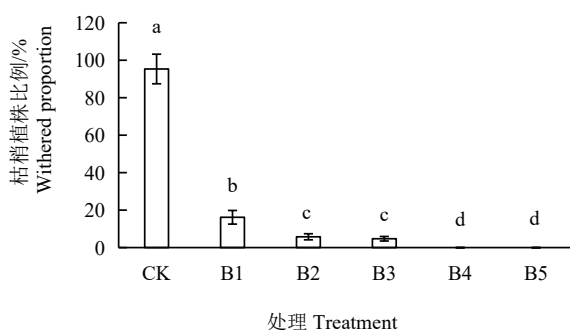


注：A：CK 处理上坡；B：CK 处理中坡；C：CK 处理下坡；D：B1 处理；E：B2 处理；F：B3 处理；G：B4 处理；H：B5 处理。

Note: A: CK treatment uphill; B: CK treatment of middle slope; C: CK processing downhill; D: B1 processing; E: B2 processing; F: B3 processing; G: B4 processing; H: B5 processing.

图 1 不同施硼量处理的黑木相思的枯梢表型

Fig. 1 Performance of withered shoots of *Acacia melanoxylon* under different boron application amounts



注：不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。

Note: The different small letters in same column indicate significant difference at $\alpha=0.05$ level.

图 2 不同施硼量处理 0.6 龄黑木相思枯梢植株比例

Fig. 2 Withered proportion of *A. melanoxylon* under different boron application amounts

CK 处理的植株有 95% 出现顶梢枯萎的表型，其中上坡的枯梢情况最为明显，表现为顶端枝条干枯、叶片全部脱落，植株丧失顶端优势（图 1A）；中下坡植株枯梢状况略有减轻，表现为植株顶梢的叶片呈黄红色，部分叶片脱落（图 1B，图 1C）。B1 处理下，有 16% 植株顶端部位出现缺硼表型，

表现为顶梢叶片尖端呈黄色，但未出现明显脱落情况（图 1D）。B2 和 B3 处理植株未有明显顶端枯梢现象，5% 植株的梢部有少量叶片尖端变黄（图 1E，图 1F）。B4 和 B5 处理下，未发现植株顶端枯梢现象，梢部叶片浓绿（图 1G，图 1H）。

2.2 不同施硼量对黑木相思叶片表型和叶色值的影响

不同施硼量处理下，0.6 a 龄黑木相思叶片的叶长、叶宽、叶周长、叶表面积和叶色值见表 2。结果显示，施硼处理对植株叶片表型有显著影响，随着施硼量的增加，植株叶片的叶长、叶宽、叶周长和叶面积均呈增加趋势，且 B4 和 B5 处理植株的叶片表型指标均高于其他处理。与 CK 处理相比，B5 处理的叶长增加 17.53%，叶宽增

表 2 不同施硼量处理 0.6 a 生黑木相思的叶片表型

Table 2 Leaf characteristics of 0.6-year-old *A. melanoxylon* under different boron application amounts

处理 Treatment	最大叶长 /cm Leaf length	最大叶宽 /cm Leaf width	叶周长 /cm Leaf circumference	叶表面积 /cm ² Leaf area	叶色值 /SPAD value
CK	9.70 ± 3.39c	0.71 ± 0.32b	21.59 ± 7.43d	4.39 ± 2.46c	44.76 ± 10.08b
B1	10.01 ± 2.75c	0.73 ± 0.24ab	22.55 ± 6.12cd	4.79 ± 2.16bc	45.26 ± 7.28b
B2	10.02 ± 2.81c	0.76 ± 0.28ab	22.43 ± 5.82cd	4.91 ± 2.13bc	47.74 ± 6.50b
B3	10.54 ± 2.74bc	0.76 ± 0.25ab	23.56 ± 6.00bc	5.16 ± 2.03ab	53.48 ± 7.17a
B4	10.95 ± 2.46ab	0.79 ± 0.26ab	24.59 ± 5.08ab	5.51 ± 1.98a	54.94 ± 5.91a
B5	11.40 ± 2.32a	0.80 ± 0.23a	25.21 ± 5.05a	5.67 ± 1.78a	54.82 ± 4.22a

注：表中数值为平均值 ± 标准差。不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。

Note: The data indicate mean ± SD. The different small letters in same column indicate significant difference at $\alpha=0.05$ level.

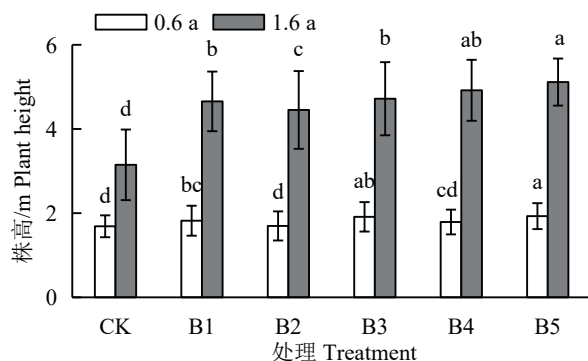
加 12.68%，叶周长增加 16.77%，叶表面积增加 29.15%。此外，与 CK、B1、B2 处理相比，B3、B4、B5 处理植株的叶色值显著增加。由此说明，缺硼会使黑木相思植株叶片变得短小，叶色值降低。通过施用硼肥，可以增加叶片的叶长、叶宽、叶周长和叶表面积，并提高叶绿素含量，从而促进植株的光合作用。

2.3 不同施硼量对黑木相思生长指标的影响

2.3.1 株高生长 分析不同施硼量处理下 0.6 a 龄和 1.6 a 龄黑木相思人工幼林的株高，结果表明（图 3），1.6 a 龄黑木相思植株的株高均显著大于 0.6 a 龄。不同施硼量处理显著影响了不同林龄植株的株高，0.6 a 龄时 B5 处理的株高最高（1.93 m），而 CK 和 B2 处理株高最低，分别为 1.69 m 和 1.70 m。其中 B5 处理的株高增长量相较于 CK 处理增加 14.20%。1.6 a 龄时，CK 处理植株的株高（3.15 m）显著低于其他施硼量处理，而 B5 处理

植株株高最高（5.11 m），较 CK 处理增加 62.22%。在 1 年内，CK 处理植株的株高增长量最低（1.46 m），而 B5 处理植株的株高增长量最高（3.19 m）。由此说明，缺硼显著抑制了不同林龄黑木相思植株的株高生长，而相较于其他处理，B5 处理的施硼量能更好促进黑木相思的株高生长。

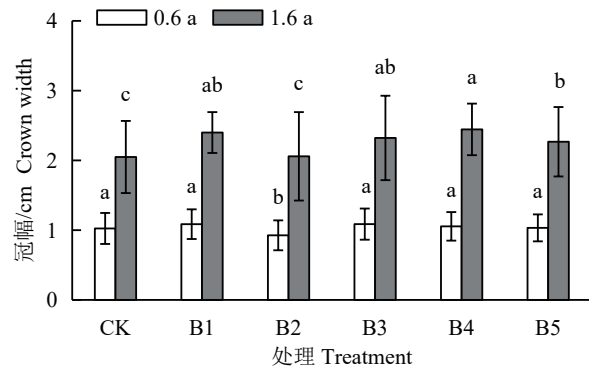
2.3.2 冠幅生长 分析不同施硼量处理下 0.6 a 和 1.6 a 龄黑木相思人工林的冠幅，结果表明（图 4），1.6 a 龄黑木相思幼林的冠幅均大于 0.6 a 龄。施硼量处理对不同林龄植株的冠幅产生了显著影响，0.6 a 龄时，B2 处理植株的冠幅（0.93 cm）显著低于其他施硼量处理，而 B3 处理冠幅最大（1.09 m）。1.6 a 龄时，CK 和 B2 处理植株的冠幅也显著低于其他施硼量处理，B4 处理植株冠幅最大（2.44 m）。此外，对于 1 年内植株冠幅的增长量而言，CK 处理植株的冠幅增长量最低（1.02 m），而 B4 处理植株的冠幅增长最大（1.39 m）。由此说明，硼供



注：不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。

Note: The different small letters in same column indicate significant difference at $\alpha=0.05$ level.

图 3 不同施硼量处理下 0.6 和 1.6 龄黑木相思的株高
Fig. 3 Plant height of 0.6 and 1.6-year-old *A. melanoxylon* under different boron application amounts



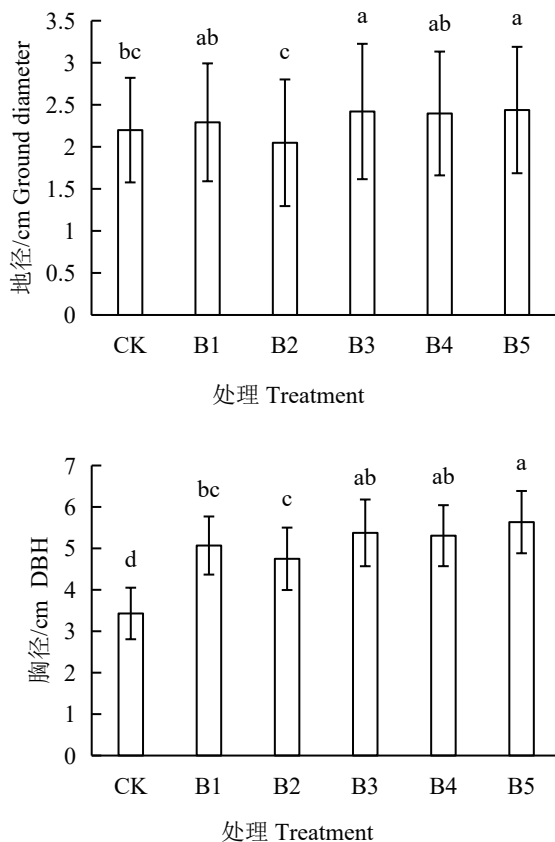
注：不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。

Note: The different small letters in same column indicate significant difference at $\alpha=0.05$ level.

图 4 不同施硼量处理下 0.6 和 1.6 龄黑木相思的冠幅
Fig. 4 Crown width of 0.6 and 1.6-year-old *A. melanoxylon* under different boron application amounts

应不足显著抑制了不同林龄黑木相思植株的冠幅生长,而相较于其他处理,B4处理的施硼量能更好的促进1.6 a龄黑木相思冠幅的增加。

2.3.3 地径和胸径生长 分析不同施硼量处理下0.6 a龄黑木相思植株的地径和1.6 a龄黑木相思植株的胸径,结果如图5所示。在0.6 a龄黑木相思植株中,CK和B2处理植株的地径低于其他施硼量处理,分别为2.05 cm和2.20 cm,其中B5处理植株地径最粗(2.44 cm),相较于CK处理增长10.91%。0.6 a龄黑木相思植株各施硼量处理下地径依次为B2<CK<B1<B4<B3<B5(图5)。在1.6 a龄黑木相思植株中,CK处理下的胸径显著低于其他施硼量处理(3.43 cm),而B5处理下植株的胸径仍最粗(5.63 cm),相较于CK处理增长了64.14%。各施硼量处理下植株的胸径依次为:CK<B2<B1<B4<B3<B5(图5)。以上结果表明,



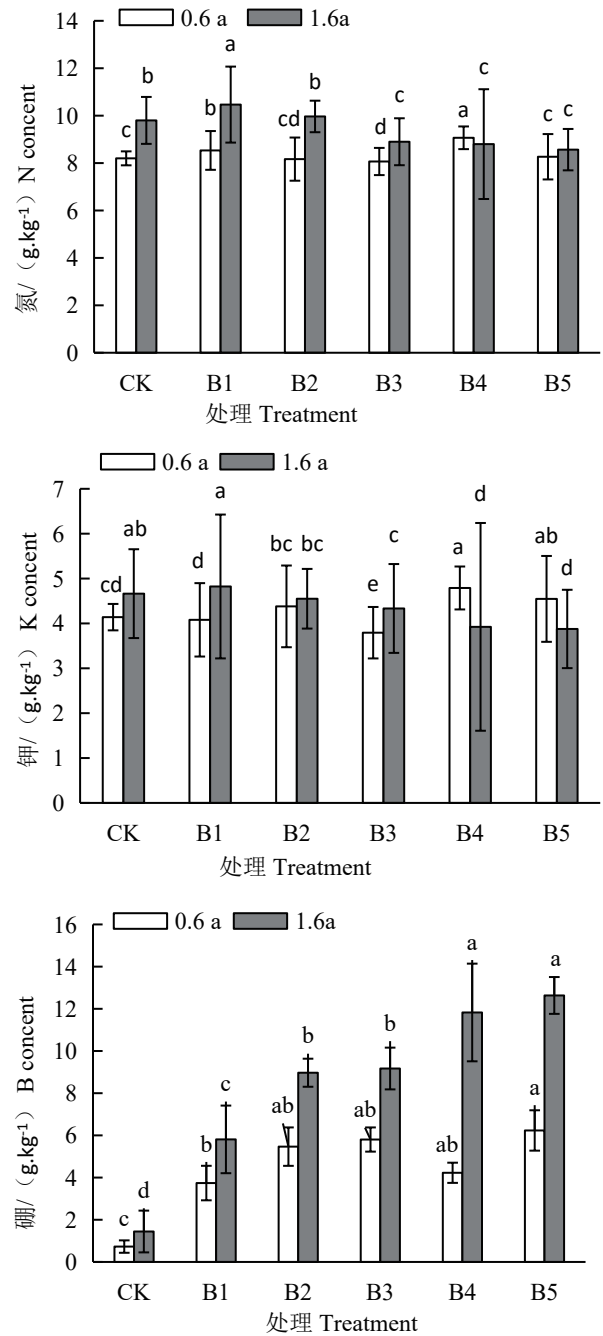
注:不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。
Note: The different small letters in same column indicate significant difference at $\alpha=0.05$ level.

图5 不同施硼量处理下0.6和1.6龄黑木相思的地径和胸径
Fig.5 Ground diameter and DBH of 0.6 and 1.6-year-old *A. melanoxylon* under different boron application amounts

相较于其他处理,B5处理的施硼量能更好的促进黑木相思地径和胸径的生长。

2.4 不同施硼量对黑木相思叶片营养元素含量的影响

为探究不同施硼量对黑木相思叶片中大量元



注:不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著。
Note: The different small letters in same column indicate significant difference at $\alpha=0.05$ level.

图6 不同施硼量处理下0.6和1.6龄黑木相思的叶片氮、钾、硼质量分数
Fig.6 N,K,B content of 0.6 and 1.6-year-old *A. melanoxylon* under different boron application amounts

表 3 不同施硼量处理黑木相思的叶片磷含量
Table 3 P content of 0.6 and 1.6-year-old *A. melanoxylon* leaves under different boron application amounts

处理 Treatment	叶片磷 / (g·kg ⁻¹) P content of leaves	
	0.6 a 0.6-year-old	1.6 a 1.6-year-old
CK	<60	62.50 ± 3.47
B1	<60	69.07 ± 9.99
B2	<60	60.80 ± 1.13
B3	<60	68.23 ± 5.83
B4	<60	60.00 ± 0.00
B5	<60	60.00 ± 0.00

注：表中数值为平均值 ± 标准差。

Note: The data indicate mean ± SD.

素氮、磷、钾的吸收和积累的影响，对不同株龄植株叶片硼、氮、磷、钾含量进行了测定。总体而言，随着施硼量的增加，不同株龄植株叶片的硼元素含量逐渐升高，除 0.6 a 龄的 B4 处理外。B5 处理下，不同株龄植株叶片的有效硼含量均达到最高值，分别为 6.23 mg·kg⁻¹ 和 12.63 mg·kg⁻¹，比同一株龄 CK 处理的植株叶片硼含量分别高出 8.55 倍和 8.75 倍。随着施硼量的增加和植株体内硼元素含量的积累，0.6 a 龄植株叶片氮和钾含量在 B4 处理下达到最大，而 1.6 a 龄植株叶片的氮和钾含量在 B1 处理下最大（图 6）。此外，随着施硼量的增加，钾元素含量的积累逐渐减少。0.6 a 龄时，各处理植株的叶片磷含量积累均小于 60 mg·kg⁻¹，1.6 a 龄时，与氮和钾元素相似，磷元素的积累也在 B1 处理下达到最大值（表 3）。以上研究表明，施硼量的增加可以促进不同株龄黑木相思叶片中硼元素的积累，大量元素如氮、磷、钾等大量元素的吸收和积累和株龄有关。同时，随着株龄的增加，B1 处理更有利于氮、磷、钾的积累。

2.5 施硼量与黑木相思林分生长特性的相关性分析

使用 Pearson 相关性分析法，分析施硼量与 1.6 a 龄黑木相思株高、冠幅、胸径和叶片营养元素含量等指标之间的相关性，结果如表 4 所示。施硼量与株高、胸径、叶片硼含量之间存在极显著正相关关系（ $P<0.01$ ），但与钾含量之间存在显著负相关关系（ $P<0.05$ ）。同时，株高与冠幅和胸径之间存在显著（ $P<0.05$ ）和极显著的正相关关

系（ $P<0.01$ ）。总之，施硼量极显著地影响了黑木相思株高、胸径等生长指标和叶片硼元素含量的积累，从而影响了植株的生长发育，同时也引起叶片中钾元素积累量的变化。

3 结论与讨论

硼是植物细胞壁的组成成分，参与果胶物质鼠李糖半乳糖醛酸聚糖 II（RG II）二聚体的交联，从而促进细胞壁的发育和结构的稳定。缺硼通常会导致细胞结构异常，从而抑制植株的生长^[13]。刘桂东等^[20]在研究缺硼对脐橙幼苗的影响时发现，缺硼会导致纽荷尔脐橙 *Citrus osbeck* ‘Newhall’ 幼苗上部叶片卷曲失绿。郝学明等^[21]在甜菜幼苗的缺硼胁迫试验中也发现，缺硼影响了植株叶片形态，导致叶片数减少，显著降低了植株叶长、叶宽、叶面积。在研究中，对不同施硼量下 0.6 a 龄黑木相思人工林进行观察，发现缺硼会导致植株顶端叶片黄化甚至脱落，而增加施硼量会缓解缺硼症状，使植株叶片浓绿（图 1）。此外，分析叶片表型发现，缺硼导致植株叶长、叶宽、叶面积均小于施加硼肥的处理，且叶色值降低（表 2）。研究表明缺硼胁迫下甜菜叶片的叶面积与光合色素含量、光合速率极显著相关^[21]。因此，缺硼可能通过抑制黑木相思叶片的发育，并降低叶绿素含量，进一步影响植株的光合速率，从而导致林木的生产力下降。

目前关于林木中植株施硼量的研究较其他大量元素氮、磷、钾等少。然而，硼是植物生长发育所必需的微量营养元素，缺硼会导致植株正常生长受阻。彭思华等^[22]在对云南松 *Pinus yunnanensis* 幼林的配方施肥试验中发现，在复合肥中配施镁、硼等微量元素，可以显著提高云南松幼林的生长速度和林分蓄积量。马朝忠等^[23]在对西南桦 *Betula alnoides* 幼林的配方施肥试验中发现，添加硼或硼和铜组合的氮磷钾肥可显著或极显著促进 2 a 龄西南桦幼林的树高、胸径和单株材积生长。这些研究表明，对于缺硼微量元素的人工林幼林生长来说，配方施肥对促进植株生长至关重要。本研究的结果表明，在 CK 处理下 0.6 a 龄植株普遍发现了顶端枯梢症状，其中上坡枯梢症状最为显著，而 B1 处理有 16% 植株有枯梢表型，B2、B3 处理中仅有 5% 植株有少量叶片边缘呈黄色（图 1），这表明施加硼肥可以有效改善植物顶

端枯梢表型。杨曾奖等^[24]在对桉树的微量元素营养研究中发现,尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 缺硼的典型症状为:幼林生长缓慢,生长势弱;植株顶部扩展的叶片坏死,叶腋间可见丛状腋芽;枝条和干型畸形生长。黑荆 *Acacia mearnsii* 和多种松树缺硼后也出现了类似的顶端枯梢症状。在施加硼肥后,枝条可恢复正常生长^[25-26]。造成这些症状的原因可能是缺硼植株虽然发生了细胞分裂,但分化功能受损,从而无法形成正常的器官,导致分化旺盛的顶梢枯萎^[12]。施加适量的硼肥不仅可以维持植株的正常形态发育,对黑木相思幼林也有明显的增产效果。与 CK 处理相比,不同施硼量的处理均促进了黑木相思株高、地径和胸径的生长,其中以 B5 处理对黑木相思幼林的促进效果最为显著。然而,过量的硼肥施用也可能对植株生长造成毒害。研究发现,当桉树叶片中硼含量低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时为硼缺乏,在 $20\sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时较为适宜,大于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时则会产生硼毒害现象^[23]。因此,在人工林培育过程中,应适量添加硼肥,施用 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 的硼肥可以满足黑木相思正常的顶梢发育,而施硼量在 $12.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 则可以更好地促进黑木相思幼林的生长力的提高。整体而言,适量施用硼肥对黑木相思植株正常形态的建成和增产效果都有积极作用。

随着施硼量的增加,黑木相思叶片中的硼元素含量随之升高,且两者间极显著正相关(表4)。这一结果与曾紫君等^[26]对棉花研究较为一致,即棉花幼苗叶中硼含量随施硼量的增加呈梯度性上升,表明环境中的硼含量会影响植株对硼元素的

吸收和积累。此外,植株体内硼元素含量与其他矿质元素的吸收和积累密切相关。例如,硼和钾在生理功能上相互依存,两者都可以增强细胞膜持水能力,使细胞膜保持稳定的透性。钾与植物叶片光合作用的进行、光合产物的产生和运输中发挥作用,而这些过程又与植物体内硼的存在形态和运输密切相关^[28]。先前的研究表明,土壤中过量的硼会阻止玉米 *Zea mays* 叶片中钾元素积累^[29],这表明过量的硼供应会拮抗植物对钾元素的吸收。在试验中,黑木相思人工幼林在 0.6 a 和 1.6 a 的株高、地(胸)径、冠幅生长均呈现出:随着施硼量的增加而增加的趋势,表明黑木相思在 0.6 a 和 1.6 a 均需要较多的硼元素以促进其生长。同时,不同株龄在不同施硼措施下对氮、磷、钾等大量元素的吸收和积累呈现出差异,0.6 a 龄时,植株叶片氮和钾含量在 B4 处理下达到最大,磷含量则各处理均小于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 1.6 a 龄时,植株叶片的氮、磷、钾含量在 B1 处理下最大,表明随着株龄的增加,B1 处理更有利于氮、磷、钾的积累。陈朝黎等^[12]在对不同硼条件黑木相思生长特性的研究表明:植株体内各种营养元素的吸收、运输和积累不仅受到硼供应水平的影响,还与植株株龄、组织部位和生存环境信号条件密切相关。因此,在不同施硼量条件下,不同株龄黑木相思生长过程中,营养元素间的交互作用仍需进一步探讨。

总的来说,黑木相思因缺硼而导致的顶梢枯萎,叶片发黄脱落的症状会随施硼量的增加而逐步缓解。当施硼量在 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时黑木相思顶梢

表4 施硼量和黑木相思生长、叶片营养元素含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between boron application amounts, growth, and physiological traits of *A. melanoxylon*

指标 Index	施硼量 Boron application	株高 Plant height	冠幅 Crown width	胸径 DBH	硼 B content	氮 N content	磷 P content	钾 K content
施硼量 Boron application	1							
株高 Plant height	0.70**	1						
冠幅 Crown width	0.30	0.50*	1					
胸径 DBH	0.71**	0.93**	0.37	1				
硼 B content	0.92**	0.73**	0.36	0.70**	1			
氮 N content	-0.39	-0.29	0.21	-0.40	-0.19	1		
磷 P content	-0.21	0.12	0.05	0.21	-0.17	-0.2	1	
钾 K content	-0.54*	-0.39	-0.30	-0.39	-0.43	0.46	0.26	1

注:“*”表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,“**”表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note:“*” indicates a significant correlation at the 0.05 level (bilateral), and “*” “*” indicates a significant correlation at the 0.01 level (bilateral).

叶片浓绿,且植株无缺硼症状。不同施硼量处理下,植株的叶长、叶宽、叶周长、叶表面积会随施硼量的增加逐渐增加。同时,施硼量极显著地影响黑木相思株高、胸径、硼元素和钾元素的含量。具体而言,施硼量在 $12.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 可以显著地促进 0.6 a 和 1.6 a 龄黑木相思株高、胸径和地径的生长。增加施硼量可以促进黑木相思叶片硼元素的含量,但同时也会抑制钾元素的积累。

参考文献

- [1] 林国胜,朱帅群,包以秋,等.施肥对黑木相思幼林生长和形质性状的影响[J].林业与环境科学,2020,36(3):44-47.
- [2] 吴清,曾炳山,陈考科,等.黑木相思无性系早期选择[J].广东林业科技,2014,30(6):40-44.
- [3] 罗万业,房亦文,林春兰.黑木相思的组培育苗技术[J].林业实用技术,2006(11):24.
- [4] 罗万业,曾伟,陈桂琼.浅谈黑木相思良种繁育及推广应用技术[J].绿色科技,2014(3):163-164.
- [5] 刘建潮.黑木相思引种栽培技术及效益分析[J].广东林业科技,2012,28(1):100-103.
- [6] 詹妮,黄烈健.我国相思类树种研究进展综述[J].热带林业,2015(3):41-45.
- [7] 陈利娜,裘珍飞,丁晓纲,等.钾对黑木相思苗木生长、根系形态的影响[J].中国农学通报,2016,32(22):5-9.
- [8] 郑家,裘珍飞,丁晓纲,等.施磷量对黑木相思苗木生长的影响[J].中国农学通报,2016,32(19):1-6.
- [9] 何茜,丁晓纲,王冉,等.指数施肥下黑木相思根系特征值的动态变化[J].广东林业科技,2011,27(5):1-6.
- [10] 裘珍飞,范春节,曾炳山.缺磷培养下黑木相思苗木的生理生化响应[J].西南林业大学学报(自然科学),2020,40(6):27-33.
- [11] 梁大瑜.基肥对黑木相思生长的影响试验[J].乡村科技,2022(3):50-52.
- [12] 陈朝黎,曾炳山,裘珍飞,等.不同硼条件黑木相思生长特性及异速生长分析[J].森林与环境学报,2023,43(2):201-209.
- [13] 徐芳森,王运华.我国作物硼营养与硼肥施用的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1556-1564.
- [14] DELL B, HUANG L. Physiological response of plants to low boron[J]. Plant and Soil, 1997, 193: 103-120.
- [15] YIN Q, KANG L, LIU Y, et al. Boron deficiency disorders the cell wall in *Neolamarckia cadamba*[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 176: 114332.
- [16] 张俊玲.植物营养学[M].北京:中国农业出版社, 2021.
- [17] AHMED N, ABID M, AHMAD F, et al. Impact of boron fertilization on dry matter production and mineral constitution of irrigated cotton[J]. Pak J Bot, 2011, 43(6): 2903-2910.
- [18] 刘鹏,吴建之,杨玉爱.土壤中的硼及其植物效应的研究进展[J].农业环境保护,2017,23(6):1556-1564.
- [19] 农业部果品及苗木质量监督检验测试中心(郑州),中国农业科学院郑州果树研究所.植物中氮、磷、钾的测定:NY/T2017-2011[S].北京:中国农业出版社,2011.
- [20] 刘桂东,胡萍,张婧卉,等.缺硼对脐橙幼苗硼分配及叶片细胞壁组分硼含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):179-186.
- [21] 郝学明,王响玲,吴贞祯,等.不同缺硼处理对甜菜苗期叶片生长及光合性能的影响[J].中国农学通报,2020(18):27-32.
- [22] 彭思华,王慷林,李莲芳,等.复合肥和微量元素配施对云南松幼林生长的影响[J].江西农业大学学报,2021,43(2):322-330.
- [23] 马朝忠,苏彬,庞正轰,等.西南桦幼林氮磷钾肥添加微量元素配方施肥效果分析[J].南方农业学报,2018,49(1):116-120.
- [24] 杨曾奖,徐大平,陈俊勤,等.微量元素对尾叶桉幼林生长的影响[J].华南农业大学学报,2005,26(2):91-94.
- [25] STONE L. Microelement nutrition of forest trees: A review[M]//BENGTSON G W, BRENDMUEHL R H, PRITCHETT L, et al. Forest fertilization, theory and practice. Muscle Shoals: Tennessee Valley Authority, 1968: 132-175.
- [26] STONE E L. Boron deficiency and excess in forest trees: A review[J]. Forest Ecology and Management, 1990, 37(1/2/3): 49-75.
- [27] 曾紫君,曾钰,闫磊,等.低硼及高硼胁迫对棉花幼苗生长与脯氨酸代谢的影响[J].作物学报,2021,47(8):1616-1623.
- [28] 吴秀文,郝艳淑,雷晶,等.不同钾和硼水平对棉花叶片逆境生理及其细胞壁硼的影响[J].农业资源与环境学报,2016,33(1):29-34.
- [29] AREF F. Evaluation of application methods and rates of zinc and boron on nitrogen, phosphorus and potassium contents of maize leaf [J]. Journal of Plant Nutrition, 2012, 35(8): 1210-1224.