

木麻黄和台湾相思苗木混植对生长和营养含量的影响

金学伟^{1,2}, 陈 灿^{1,2*}, 袁 锋^{1,2}, 江传阳³, 陈增焰^{1,2}, 陈子川^{1,2},
林 晗^{1,2*}, 吴承祯^{2,4}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 森林生态系统过程与经营福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002;
3. 福建省晋江姑头国有防护林场, 福建 泉州 362200; 4. 武夷学院, 福建 南平 354300)

摘 要:为探究种间竞争对木麻黄和台湾相思生长的影响,利用相邻混植和独立盆栽试验测定木麻黄和台湾相思生长和养分含量的变化,分析两者的种间竞争差异。结果表明,混植对木麻黄树高和根冠比影响显著($P<0.05$),但对地径无显著影响($P>0.05$)。与单植栽培方式相比,混植栽培方式下木麻黄树高和地上生物量分别增加 57.28%、20.92%,而根总长、根总表面积以及根总体积分别减少 62.67%、51.25%和 285.19%;混植对台湾相思树高影响显著($P<0.01$),对其地径、根冠比无显著影响($P>0.05$);在混植栽培方式下,台湾相思树高、地径、总生物量、根总长、根总表面积以及根总体积分别减少 119.17%、17.72%、35.75%、11.15%、33.79%和 44.62%。根系在磷信号刺激下,仅有台湾相思 L4 和 SA4 径级增加;木麻黄叶中 Na 含量降低 81.63%,而 P 元素和 K 元素分别增加 11.38%、12.30%,根中 Na、P、K 元素含量分别减少 26.17%、28.29%和 21.45%。台湾相思叶中 Na、K 元素含量分别降低 6.23%、7.78%,P 元素增加 7.55%,根中 Na、P、K 元素含量分别增加 24.81%、22.05%、24.53%。木麻黄和台湾相思在混植栽培方式下,均通过改变自身形态或营养成分抑制对方,说明邻株竞争可以改变沿海人工林中植物的适应性和群落结构,也表明植物根系在邻株竞争中存在重要作用。因此,研究结果可为沿海防护林的更新恢复和经营管理提供理论指导。

关键词:邻株竞争;木麻黄;台湾相思;根系

中图分类号:S722.33

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)04-0127-07

Effects of Mixed-Planting Pattern on Photosynthetic Characteristics and Growth of *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa* Seedlings

JIN Xue-wei^{1,2}, CHEN Can^{1,2*}, YUAN Feng^{1,2*}, JIANG Chuan-yang³, CHEN Zeng-yan^{1,2},
CHEN Zi-chuan^{1,2}, LIN Han^{1,2*}, WU Cheng-zhen^{2,4}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. College Key Lab of Forest-Ecosystem Process and Management in Fujian, Fuzhou 350002, Fujian, China;
3. Diantou State-Owned Protective Forest Farm of Jinjiang, Quanzhou 362200, Fujian, China;
4. Wuyi University, Nanping 354300, Fujian, China)

Abstract: *Casuarina equisetifolia* and *Acacia confusa* are two key species of coastal shelterbelts in southeast China. The aim of the paper was to explore the effects of interspecific competition on the growth of *C. equisetifolia* and *A. confusa* under mixed-planting and single-planting patterns by determining the growth and nutrient content and analyzing the competition differences of the two species. The results showed that

收稿日期:2022-05-29 修回日期:2022-07-24

基金项目:国家自然科学基金(42071132);福建省林业科技项目(2021FKJ22);福州市科技项目(榕科[2021]266号);福建农林大学优秀研究生学位论文资助基金(1122YS01010)。

第一作者:金学伟。研究方向:植物地理学方向。E-mail:fafujxw1997@163.com

* 通信作者:陈 灿,博士,副教授。研究方向:海岸带森林与环境。E-mail:canchen@fafu.edu.cn
林 晗,博士,副教授。研究方向:森林培育学。E-mail:fjlinhan@163.com

neighboring plant competition had a very significant effect on the height and root-shoot ratio of *C. equisetifolia* ($P < 0.05$), but no significant effect on the ground diameter ($P > 0.05$). Compared with single-planting cultivation, the height and aboveground biomass of *C. equisetifolia* increased by 57.28% and 20.92%, respectively, while the total root length, total root surface area and total root volume decreased by 62.67%, 51.25% and 285.19%, respectively. Neighboring plant competition had a significant effect on the height of *A. confusa* ($P < 0.01$), and no significant effect on its ground diameter and root-shoot ratio ($P > 0.05$). The height, ground diameter, total biomass, the total root length, total root surface area, and total root volume of *A. confusa* decreased by 119.17%, 17.72%, 35.75%, 11.15%, 33.79% and 44.62%, respectively. Under the stimulation of phosphorus signal, only L4 and SA4 diameter grades of *A. confusa* increased. Na content in leaves of *C. equisetifolia* and *A. confusa* decreased by 81.63% and 6.23%, respectively, while P and K increased by 11.38% and 12.30%, respectively, and the contents of Na, P and K in the roots decreased by 26.17%, 28.29% and 21.45%, respectively. The contents of Na and K in *C. equisetifolia* leaves increased by 11.38% and 12.30%, respectively, while the contents of Na, P and K in roots decreased by 26.17%, 28.29% and 21.45% respectively. The contents of Na and K in *A. confusa* leaves decreased by 6.23% and 7.78% respectively, while that of P increased by 7.55%. The contents of Na, P and K in the roots increased by 24.81%, 22.05% and 24.53%, respectively. *C. equisetifolia* and *A. confusa* inhibited each other by changing their own morphology or nutrient composition under the mixed cultivation, indicating that the competition between neighboring plants could change the adaptability and community structure of plants in coastal plantations, as well as that plant roots played an important role in neighbor competition. Therefore, the results can provide theoretical guidance for the regeneration, restoration and management of coastal shelterbelts.

Key words: neighbor competition; *Casuarina equisetifolia*; *Acacia confusa*; root system

在自然环境中植物的生长会不可避免地受邻株植物的影响^[1]。资源匮乏时相邻植物在生长过程中发生争夺营养的相互竞争尤为明显,主要表现为植物能够通过根系分泌物、化学信号传递以及菌根相互作用等来识别邻株植物^[2],并改变其根系生长行为、二氧化碳同化效率以及养分含量等^[3-4]。同时,在混植栽培下植物根系的可塑性更为直观,具有较高的形态可塑性和生理可塑性的树种能够快速抢占资源,获得更多的养分和水资源^[3,5]。然而,植物根系在不同环境下通过根系生长和养分吸收的可塑性对 N、P 以及其他元素的吸收含量有所不同^[6]。随着混植强度增强,异种树木的生长对不同环境因子的响应存在差异^[7]。因此,混植对植物的生物量、元素含量、根系形态、根系的养分吸收能力等均具有重要影响。当植物生长环境恶劣时,这些影响将更加显著。

木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)因根系发达、耐盐耐碱、抗风性强和适应力高等特性成为我国东南和华南沿海主要的优良沿海防护树种^[8]。但也存在生物多样性较低、结构单一、病虫害多、林带老化、防护功能下降等问题,为提高抗风效果,调整林分结构,尝试与具有抗酸碱、抗风沙、耐污染等特性的台湾相思(*Acacia confusa*)混交的方式进行更新和植

被修复。混交林中由于引入了新的树种,植物竞争由种内转到种间,以往海防林混交种植模式,更多倾向于从混交林的防风效果上考虑,未重视种间竞争的客观存在以及对海防林建群树种的健康生长的影响。目前,国内外有关林木混植栽培的研究主要侧重邻株竞争对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、木荷(*Schima superba*)和马尾松(*Pinus massoniana*)等用材树种光合作用、生物量、根系形态的影响^[4,9],在不同条件下,草本植物对木本植物幼苗的影响^[10],以及混交林细根变化等^[11],对恶劣环境条件下防护林等生态公益林混交树种竞争尚未见报道。若忽视海防混交林个体间的种间竞争,将埋下混交林密度不合理、生长不良、防护林寿命减短或长期防护效果减弱的隐患。

林武兴^[12]研究表明木麻黄高密度种植会增强自身化感作用,对植物生长产生抑制效果,而低密度种植或调整林分结构对木麻黄自我生长抑制有很好的缓解作用,在木麻黄纯林中种内竞争影响较小,且本研究探究木麻黄林下套种台湾相思对木麻黄林更新影响,故本研究设计木麻黄和台湾相思混植与单植相比较,通过测定树高、地径、生物量、根系指标、元素含量,分析生长和生物量、根系形态以及营养含量拟探讨木麻黄和台湾相思混植后的竞争效应,为

提高沿海防护林的更新恢复和人工林物种多样性提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

幼树试验地位于福建省福州市福建农林大学田间科技园内(26°05′15″N,119°13′42″E),属于亚热带季风气候,地势平坦,无霜期 326 d,年平均日照数为 1 700~1 980 h,年平均降水量为 900~2 100 mm,年相对湿度约 77%。试验期间最低气温 17℃,最高气温 38℃,平均气温 24℃^[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 木麻黄选自福建省惠安赤湖国有防护林场培育的幼苗,台湾相思选自广州瑞景园林种苗批发中心培育的幼苗,均为 1 年生,木麻黄平均树高 20.75 cm,地径 2.93 mm,台湾相思平均树高 61.67 cm,地径 3.37 mm。选择口径 26 cm、高 17.5 cm 的塑料盆,为模拟海岸带土壤,每盆放置基质沙土(沙:土=3:1)6.5 kg,基质 pH 为 6.30±0.04,电导率为 17.5±2.59 us/cm,速效 N、P、K 分别 0.4±0.05、0.7±0.05、1.8±0.7 g/kg。缓苗成活后,选取生长势较好株苗,于 2021 年 3 月 28 日在一个盆里同时栽种一棵木麻黄和台湾相思进行混植,结合预试验结果幼苗间隔 5 cm,另选择分别在同规格盆中单植木麻黄和台湾相思模拟纯林。采用随机排列,各处理均为 6 次重复,为防止培育期间苗木死亡,均设 9 盆。培育期为 4 个月,培育期间正常的水肥管理,定期除草检疫。

1.3 指标测定

1.3.1 生长及生物量测定 将混植栽培下木麻黄记为 MPA、台湾相思记为 MPC,纯植栽培下木麻黄记为 SPB、台湾相思记为 SPD,2021 年 8 月 1 日结束试验,每处理随机选取 6 株生长正常的植株,测定株高和地径。将茎、叶、根分离,称取鲜重后 105℃

条件下杀青 30 min,80℃下烘干至干重,测定各部分生物量。

1.3.2 根系指标测定 脱盆后将根系清洗干净后,根系按照直径分级法分为>5 mm(L1、SA1、V1)、2~5 mm(L2、SA2、V2)、0.5~2 mm(L3、SA3、V3)、<0.5 mm(L4、SA4、V4)4 级进行解析^[14],其中 L 为根长,SA 为根表面积,V 为根体积,采用 Epson 扫描仪(USA)扫描后用 WinRHIZO(Pro 2009c)根系图像分析软件进行根系形态分析,指标包括总根长、表面积、体积、平均直径、根尖数、细根表面积、细根体积等。

1.3.3 营养元素含量测定 根、叶烘干后用粉碎机(FM100)粉碎过 0.149 mm 筛测定养分含量,用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮法在数显温控消化炉进行消解后运用等离子体发射光谱仪(Optima 2100 DV 型 ICP-OES,PekinElmer,USA)分析测定^[15]。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2016 进行数据统计分析,使用 SPSS19.0 单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验不同处理之间的差异显著性,采用 Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 混植对幼苗生长的影响

混植对木麻黄和台湾相思树高影响极显著($P<0.01$),对地径无显著影响($P>0.05$)(表 1)。单植和混植的木麻黄地径整体小于台湾相思。竞争中的台湾相思树高和地径与单植相比分别减小 54.37%和 37.50%,竞争中的木麻黄树高与单植相比增加 57.28%,地径则减少 15.05%。邻株竞争对木麻黄根冠比影响显著($P<0.05$),对台湾相思根冠比影响不显著($P>0.05$)。在 2 种栽培方式下木麻黄的根冠比整体大于台湾相思,其中混植栽培条件下木麻黄和台湾相思的根冠比与单植相比分别减少 54.67%、21.62%。

表 1 混植对木麻黄和台湾相思生长的影响

Table 1 The influence of neighboring plant competition on the growth of *C. equisetifolia* and *A. confusa*

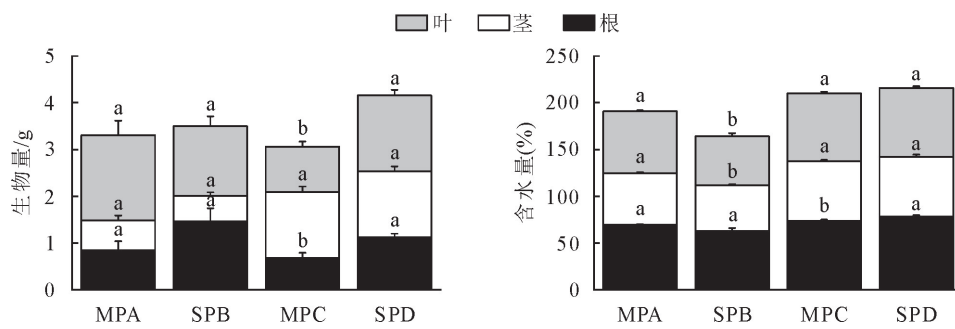
栽培方式	木麻黄(<i>Casuarina equisetifolia</i>)			台湾相思(<i>Acacia confusa</i>)		
	树高/cm	地径/mm	根冠比	树高/cm	地径/mm	根冠比
混植	9.83±0.48a	0.35±0.08a	0.34±0.04b	3.50±0.43b	0.79±0.08a	0.29±0.05a
单植	6.25±0.69b	0.56±0.09a	0.75±0.15a	7.67±0.56a	0.93±0.09a	0.37±0.01a

注:树高、地径均为增长量,同列不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

混植对台湾相思叶和根生物量影响显著($P<0.05$),对木麻黄叶、茎、根生物量影响不显著($P>0.05$)(图 1)。在竞争试验中木麻黄和台湾相思总生物量小于单植栽培方式,其中木麻黄叶、茎生物量比单植分别增加 22.98%、15.33%,根生物量减少

42.13%;台湾相思叶、茎和根生物量分别减少 39.98%、0.14%和 39.61%。

混植对木麻黄叶、茎含水量和台湾相思根含水量影响显著($P<0.05$)(图 1)。在混植栽培下,木麻黄总含水量大于单植栽培方式,而台湾相思相反,其中木麻



不同小写字母表示同树种同一径级不同栽植方式间差异显著($P < 0.05$),下同。

图1 混植对木麻黄和台湾相思生物量和含水量的影响

Fig. 1 The influence of neighboring plant competition on the biomass and water content of *C. equisetifolia* and *A. confusa*

黄叶、茎和根含水量整体增加,台湾相思叶、根含水量分别减少 1.78%、6.05%,茎含水量增加 0.69%。

2.2 混植对木麻黄和台湾相思根系生长与细根形态的影响

由表 2 可知,木麻黄和台湾相思的根系生长发育对竞争反应敏感,在混植栽培方式下,木麻黄和台湾相思根系总长、根总表面积和根总体积显著减小。根总体积减小尤为明显,木麻黄和台湾相思分别减小 74.04%和 71.21%。各栽培方式下,木麻黄根系总长和根总表面积整体大于台湾相思,木麻黄根总体积和根平均直径小于台湾相思。

木麻黄和台湾相思不同径级细根发育对混植的

响应程度差异明显。木麻黄和台湾相思在竞争栽培方式下根尖数、分枝数均小于单植栽培,而交叉数大于单植栽培方式(图 2)。在混植栽培方式下,木麻黄 L4、L3、L2、L1 比单植栽培方式分别减少 36.11%、47.42%、38.06%、17.57%;各径级根表面积减少 32.70%~44.83%;各径级根体积分别减少 46.48%、28.34%、46.80%、40.48%。台湾相思在单植栽培方式下,根长 L1 小于混植栽培方式,L2、L3 显著大于混植栽培方式;根表面积 SA1 小于混植栽培方式,SA2、SA3 显著大于混植栽培方式;根体积 V2、V3、V4 减少了 31.83%~54.80%,V1 无明显变化。

表 2 混植对木麻黄和台湾相思根系形态特性的影响

Table 2 The influences of neighboring plant competition on the root growth and development of *C. equisetifolia* and *A. confusa*

栽培方式	木麻黄(<i>C. equisetifolia</i>)				台湾相思(<i>A. confusa</i>)			
	根系总长/mm	根总表面积/cm ²	根总体积/cm ³	根平均直径/cm	根系总长/mm	根总表面积/cm ²	根总体积/cm ³	根平均直径/cm
混植	826.11±34.02b	105.64±8.92b	1.08±0.15b	0.41±0.023a	534.43±34.78a	94.41±7.61b	1.33±0.14b	0.56±0.016b
单植	1343.89±68.70a	159.78±5.24a	4.16±0.58a	0.46±0.012a	601.46±23.90a	129.20±4.70a	4.62±0.59a	0.76±0.027a

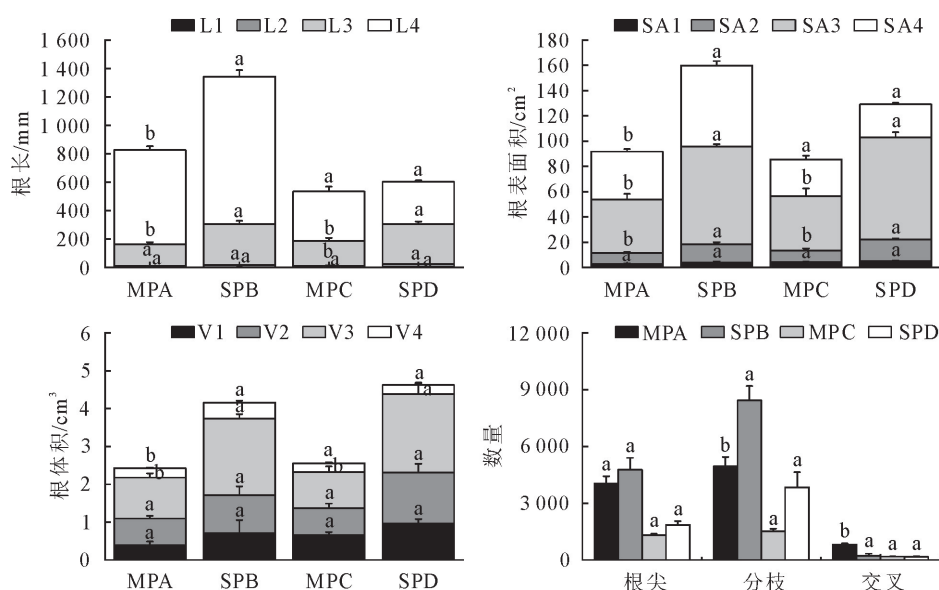


图2 混植对木麻黄和台湾相思细根形态的影响

Fig. 2 The effects of neighboring plant competition on the fine root morphology of *C. equisetifolia* and *A. confusa*

2.3 混植对木麻黄和台湾相思营养元素的影响

由图3可知,在混植栽培方式下,木麻黄叶中Al、Mg、Na分别降低57.83%、20.88%、44.94%,K、Mn、P分别增加11.38%、62.32%、12.31%,根中仅K、Na、P分别减少17.67%、26.17%、

28.29%,其余增加18.86%~103.47%;台湾相思叶中仅K、Na分别降低7.78%、5.87%,其余增加7.55%~76.13%,根中K、Na、P分别增加32.50%、32.99%、28.30%,其余减少12.23%~67.87%。

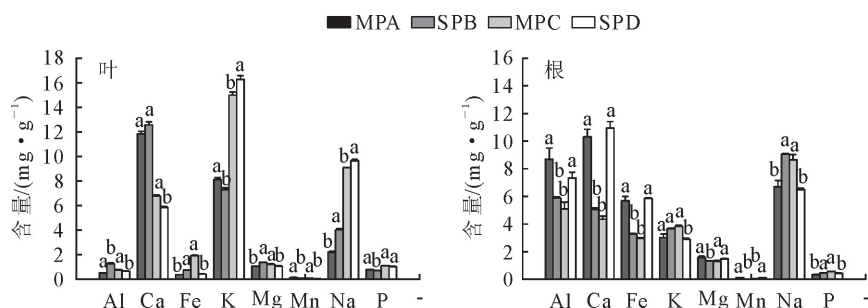


图3 邻株竞争对木麻黄和台湾相思养分的影响

Fig. 3 The effects of neighboring plant competition on the nutrient of *C. equisetifolia* and *A. confusa*

3 结论与讨论

3.1 结论

与单植栽培方式相比,混植栽培方式下木麻黄树高和地上生物量有所增加,但根总长、根总表面积以及根总体积分别减少62.67%、51.25%和285.19%。在混植栽培方式下,台湾相思树高、地径、总生物量、根总长、根总表面积以及根总体积分别减少119.17%、17.72%、35.75%、11.15%、33.79%和44.62%。木麻黄叶中P元素和K元素分别增加11.38%、12.30%,根中P、K元素含量分别减少28.29%和21.45%。台湾相思叶中K元素含量分别降低7.78%,P元素增加7.55%,根中Na、P、K元素含量分别增加24.81%、22.05%、24.53%。

3.2 讨论

植物在自然环境生长过程中不可避免受到竞争影响,竞争不仅会改变植物生长行为的变化,而且种间竞争对植物生长指标的影响也会有所不同^[16-17]。本研究设置混植和单植2种栽培方式,在混植栽培方式下,台湾相思树高、地径,以及生物量均小于单植栽培方式,木麻黄树高大于单植栽培方式,地径小于单植栽培方式,根生物量相比单植栽培方式降低42.13%,地上部分增加20.92%。表明在混植情况下,木麻黄将大部分有机物分配至地上部分,导致根冠比降低。混植条件下幼苗植物倾向于争夺高度上的空间,而非增加地径,具备树高优势的植物在混植过程中,更有利获得阳光资源,从而获得长期的竞争优势^[18]。这可能是因为植物为获得最大化的资源而采取的最优分配策略,即木麻黄通过调节改变各器官的生物量,保证其能够最大化地获得被限制的

资源^[19]。与植物光合和氮代谢调控密切相关的钙离子浓度^[20]在木麻黄叶中含量增加、根含量中减少也证实了这一点,由此可见,这可能是木麻黄受异株竞争影响,为获得最大化的资源而采取的最优分配策略。

邻株竞争会导致植株根系生长分布情况发生一些改变,包括植株根系直径、根系表面积以及植株根系体积范围的进一步扩大或减小^[21]。研究人员都将许多植物此现象归结于为非自我之间根部的鉴别,在不同植物种类之间的植物根部中出现一种非自我的根部,相比出现这种自我的根部还将会产生出更多的根^[22-24]。本项研究还发现,在混植条件下,木麻黄与台湾相思植株的总根系长度、根总表面积、根总体积等均明显呈相对下降趋势。这是因为在邻近根丰度较低时,地下竞争强度与邻近根生物量成正比,在邻近根丰度较高时,地下竞争强度迅速增加,与Cahill等^[25]研究结论一致。Dudley等^[26]研究发现,P可以作为植物根系发育的部分信号,在混植栽培方式下,根中P含量降低,导致木麻黄根总长、根总表面积、根总体积都呈减少趋势,这可能是木麻黄根系感知上土壤中P信号刺激的结果,是其适应生长环境的响应措施。本研究中木麻黄叶中P元素在根含量减少28.29%,台湾相思与之不同,其根P含量有所增加,却仅L4、SA4径级增加,这可能是因为粗根(>5 mm)对P信号刺激较为敏感,细根(<5 mm)对P信号刺激不敏感。

养分含量主要由植株生物量以及元素含量所决定^[27-28],直接影响植物自身的生长状况,其分布特征是植物生物学特性与生存环境相统一的结果^[29]。本研究表明,在混植栽培方式下,K元素在木麻黄叶含量中增加,在根含量中减少,台湾相思与之相反。

这可能是因为低浓度 K 能够提高根系活力,有利于根系吸收水分与矿物质,中低浓度的可促进地上部分生长。同样植物叶中不同元素之间还会表现为拮抗或者促进等不同关系^[30],在混植栽培方式下,木麻黄叶中 K 元素含量增加 11.38%,Mg 元素降低 26.40%,Ca 元素降低 6.08%,台湾相思叶中 K 元素降低 8.43%,Mg 元素增加 12.98%,Ca 元素增加 15.98%。可能是因为 K 元素含量低时,Mg 元素促进其对 K 元素的吸收。相反,K 元素含量高时,Mg 与不同元素之间出现为拮抗作用有关^[31]。同时与 Quintero 等^[32]研究结果一致,低浓度的 Ca 元素促进 K 元素的吸收,高浓度的 Ca 元素抑制 K 元素的吸收。

参考文献:

- [1] 陈伟,薛立. 根系间的相互作用——竞争与互利[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1243-1251.
CHEN W, XUE L. Root interactions: competition and facilitation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1243-1251. (in Chinese)
- [2] BELFRAGE K, BJÖRKLUND J, SALOMONSSON L. Effects of Farm Size and On-Farm Landscape Heterogeneity on Biodiversity—Case Study of Twelve Farms in a Swedish Landscape[J]. Agroecology and Sustainable Food Systems, 2015, 39(2): 170-188.
- [3] 姚甲宝, 楚秀丽, 周志春, 等. 3 个与杉木混植木荷种源幼苗对光照响应的差异[J]. 林业科学研究, 2018, 31(6): 144-153.
YAO J B, CHU X L, ZHOU Z C, et al. Response of seedlings of three *Schima superba* provenances to different light environments when mixed planting with *Cunninghamia lanceolata* [J]. Forest Research, 2018, 31(6): 144-153. (in Chinese)
- [4] 姚甲宝, 楚秀丽, 周志春, 等. 不同养分环境下邻株竞争对木荷和杉木生长、细根形态及分布的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1441-1447.
YAO J B, CHU X L, ZHOU Z C, et al. Effects of neighbor competition on growth, fine root morphology and distribution of *Schima superba* and *Cunninghamia lanceolata* in different nutrient environments[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1441-1447. (in Chinese)
- [5] 李洪波, 薛慕瑶, 林雅茹, 等. 土壤养分空间异质性与根系觅食作用: 从个体到群落[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 995-1004.
LI H B, XUE M Y, LIN Y R, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and root foraging: from individual to community[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(4): 995-1004. (in Chinese)
- [6] 王鹏, 牟溥, 李云斌. 植物根系养分捕获塑性与根竞争[J]. 植物生态学报, 2012, 36(11): 1184-1196.
WANG P, MU P, LI Y B. Review of root nutrient foraging plasticity and root competition of plants[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(11): 1184-1196. (in Chinese)
- [7] 陈立新, 哈雪梅, 段文标, 等. 红松人工林优势木竞争指数影响因子的分析[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1-11.
CHEN L X, HA X M, DUAN W B, et al. Analysis on influencing factors of competitive index of dominant trees in *Pinus koraiensis* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1-11. (in Chinese)
- [8] 刘贺娜, 李坤玲, 洪滔, 等. 福州市长乐沿海木麻黄林下野生苗的根系形态特征[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2555-2561.
LIU H N, LI K L, HONG T, et al. Root morphological characteristics of wild seedlings under *Casuarina equisetifolia* forests at Changle in Fuzhou[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(12): 2555-2561. (in Chinese)
- [9] 陈智裕, 李琦, 邹显花, 等. 邻株竞争对低磷环境杉木幼苗光合特性及生物量分配的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(2): 177-186.
CHEN Z Y, LI Q, ZOU X H, et al. Effect of neighboring competition on photosynthetic characteristics and biomass allocation of Chinese fir seedlings under low phosphorus stress[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(2): 177-186. (in Chinese)
- [10] 张萌, 刘宁, 王雪剑, 等. 减少降水和草本竞争对白桦幼苗细根形态和生理特征的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 73-79.
ZHANG M, LIU N, WANG X, et al. Effects of reduced precipitation and herb competition on the morphological and physiological characteristics of the fine roots of *Betula platyphylla* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 73-79. (in Chinese)
- [11] 李佳梅, 朱启良, 马璟, 等. 华北石质山地麻栎和刺槐混交林浅层细根特征[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 37-42.
LI J M, ZHU Q L, MA J, et al. Comparison on fine root Traits of *Quercus acutissima* and *Robinia pseudoacacia* in lower soil layer in rocky mountainous area of northern China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 37-42. (in Chinese)
- [12] 林武兴. 木麻黄自身他感作用影响因素及缓解[J]. 防护林科技, 2006, 6(1): 1-5.
- [13] 李茂, 洪凯, 许珊珊, 等. 指数施肥对杉木优良无性系幼苗生长和养分含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1490-1497.
LI M, HONG K, XU S S, et al. Effects of exponential fertilization on the growth and photosynthetic characteristics of the superior clone of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(6): 1490-1497. (in Chinese)
- [14] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 37-49.
XI B Y. Morphology, distribution, dynamic characteristics of poplar roots and its water uptake habits[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 26(6): 1490-1497. (in Chinese)
- [15] 张志祥, 刘鹏, 徐根娣. 不同群落类型下南方铁杉金属元素含量差异及其与土壤养分因子的关系[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 505-516.
ZHANG Z X, LIU P, XU G D. Metal element contents of *Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis* in different community types and its relationship with soil nutrient factors in eastern

- China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(5): 505-516. (in Chinese)
- [16] 徐佳文, 石福习, 张朝晖, 等. 中亚热带濒危植物毛红椿和南方红豆杉种内与种间竞争差异[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 1-8.
- XU J W, SHI F X, ZHANG C H, *et al.* Difference in intra- and inter-specific competition of two endangered plant species (*Toona ciliata* var. *pubescens* and *Taxus chinensis* var. *mairei*) in the middle subtropical zone of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 1-8. (in Chinese)
- [17] 宋保伟, 张宗勤, 宋西德, 等. 中国红豆杉种内和种间竞争关系的研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 12-16.
- SONG B W, ZHANG Z W, SONG X D, *et al.* Intraspecific and interspecific competition of *Taxus chinensis* of liuba in Shaanxi province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 12-16. (in Chinese)
- [18] 王平, 王天慧, 周道玮, 等. 植物地上竞争与地下竞争研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3489-3499.
- WANG P, WANG T H, ZHOU D W, *et al.* A literature review on the above and below ground competition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3489-3499. (in Chinese)
- [19] BLOOM A J, CHAPIN F S, MOONEY H A. Resource Limitation in Plants-An Economic Analogy[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1985, 16(1): 363-392.
- [20] GONG Z Z, XIONG L M, SHI H Z. Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency[J]. Science China(Life Sciences), 2020, 63(5): 635-674.
- [21] ZHANG Y, MA X H, ZHOU Z Z. The influence of light conditions and interspecific competition on the root foraging traits and seedling growth of two tree species[J]. Plant Biosystems, 2012, 146(1): 1-8.
- [22] 石培礼, 钟章成, 李旭光. 桉柏混交林根系的研究[J]. 生态学报, 1996, 16(6): 623-631.
- SHI P L, ZHONG Z C, LI X G. A study on root system of alder and cypress mixed plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(6): 623-631. (in Chinese)
- [23] 王政权, 张彦东. 水曲柳落叶松根系之间的相互作用研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 346-350.
- WANG Z Q, ZHANG Y D. Study on the root interactions between *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 24(3): 346-350. (in Chinese)
- [24] 王树起, 沈其荣, 褚贵新. 种间竞争对旱作水稻与花生间作系统根系分布和氮素吸收积累的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 860-863.
- [25] CAHILL J J F, CASPER B B. Investigating the relationship between neighbor root biomass and belowground competition: field evidence for symmetric competition belowground[J]. Oikos, 2000, 90(2): 311-320.
- [26] DUDLEY S A, FILE A L. Kin recognition in an annual plant[J]. Biology Letters, 2007, 3(4): 435-438.
- [27] 蔡金桓, 都成林, 薛立, 等. 3种园林植物的抗盐光合特性[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(2): 272-276.
- CAI J H, DU C L, XUE L, *et al.* Photosynthetic characteristics of three garden plants in response to salt stress[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(2): 272-276. (in Chinese)
- [28] 杨腾, 段劼, 马履一, 等. 不同氮素用量对文冠果生长、养分积累及转运的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 57-62.
- YANG T, DUAN Z, MA L Y, *et al.* Effects of N application rates on growth, nutrient accumulation and translocation of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(3): 57-62. (in Chinese)
- [29] 车宗玺, 刘贤德, 潘欣, 等. 甘肃省典型林区主要优势树种养分含量变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 237-243.
- CHE Z X, LIU X D, PAN X, *et al.* The variation characteristics of nutrients contents of main dominant tree species in Gansu province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(2): 237-243. (in Chinese)
- [30] 张尚矩, 林益明, 张立华, 等. 短枝木麻黄小枝衰老过程中 K、Ca、Mg 含量及其内吸收率季节动态[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2010, 49(6): 880-885.
- ZHANG S J, LIN Y M, ZHANG L H, *et al.* Seasonal dynamics of K, Ca, Mg contents and their internal absorption during branchlet senescence of *Casuarina equisetifolia* [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2010, 49(6): 880-885. (in Chinese)
- [31] NARWAL R, KUMAR V, SINGH J. Potassium and magnesium relationship in cowpea[J]. Plant and Soil, 1985, 86(1): 129-134.
- [32] QUINTERO M, HANSON J. Reaction of corn root tissue to calcium[J]. Plant Physiology, 1984, 76(2): 403-408.