

网络出版时间:2022-04-13 13:11

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.10.005

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220412.0949.013.html

施肥对闽楠根系形态及苗木质量的调控作用

王妍^{1,2},冯金玲¹,吴小慧¹,黄蓝明¹,吴娟¹,陈宇¹,赵城昊¹,杨志坚¹

(1 福建农林大学 林学院,福建 福州 350002; 2 中国林学会,北京 100091)

【摘要】【目的】对不同氮磷钾施肥条件下闽楠幼苗根系形态和苗木质量进行研究,为闽楠壮苗培育提供科学依据。【方法】以 1 年生闽楠盆栽实生苗为材料,采用“3414”施肥试验方法,设氮、磷、钾 3 个因素,每个因素设不施肥和低、中、高施肥 4 个水平,其中中水平为常用施肥量(当地 N 、 P_2O_5 和 K_2O 的常用施肥量分别为 0.532、0.133 和 0.356 g/株),低水平为中水平的 0.5 倍,高水平为中水平的 1.5 倍,共计 14 个处理。采用田间随机区组试验和常规田间管理,分析不同施肥处理对闽楠幼苗根系形态指标(总根表面积、总根体积、根平均直径、根尖数、根系总根长、小细根长、粗细根长、粗根长、比表面积、组织密度和比根长)的影响;通过相关分析,揭示各根系形态指标与植株形态(苗高、地径和苗木质量指数)、植株营养元素(N 、 P 、 K 和 C)积累量、叶片生理生化指标(叶绿素总量、净光合速率(P_n)、水分利用效率(W)、淀粉含量、酸性磷酸酶和硝酸还原酶活性)的相互关系;通过极差分析,筛选最佳氮磷钾施肥方式;通过逐步回归分析和通径分析,构建苗木质量的施肥调控途径,筛选影响苗木质量的关键指标。【结果】施肥可以显著提高闽楠幼苗的总根表面积、总根体积、根尖数、小细根长和根总长度,其中以中水平 NPK 配施(N 0.532 g/株, P_2O_5 0.133 g/株, K_2O 0.356 g/株)时的根系养分吸收量最大,低水平 P 肥与中低水平 NK 肥配施(N 0.532 g/株, P_2O_5 0.067 g/株, K_2O 0.178 g/株)时的养分运输能力最强,低水平 N 肥与中水平的 PK 肥配施(N 0.266 g/株, P_2O_5 0.133 g/株, K_2O 0.356 g/株)时的养分利用效率最高。粗细根长随 P 肥施用量增加相应增加,比表面积随 P 肥施用量增加先降后升,组织密度随 N 和 K 肥施用量增加先降后升,而施磷肥对其无显著作用;其余指标大部分均随 N、P 和 K 肥施用量增加先增后降。在施肥方式中,氮磷钾 3 因素配施时闽楠根系生长最好;在双因素配施中,粗根生长以磷钾肥配施最好,其余指标均以氮磷肥配施最好;在单因素施肥中,以氮肥对闽楠根系生长最好,磷肥最差。总根表面积、比根长、粗根长、根尖数、比表面积、硝酸还原酶活性和植株 N 积累量是培育闽楠壮苗的主导因素,其中以提高植株 N 积累量最为关键。【结论】氮磷钾配施条件下,闽楠主要通过提高根尖数、延长小细根和粗细根长度,提高根系总长度和总表面积,调节根平均直径,改变比表面积和比根长,保持总根表面积和比表面积在一定水平上的平衡,促进营养元素特别是 N 元素的吸收,调控地上部分和地下部分各器官的平衡生长,提高苗木质量指数。

【关键词】 闽楠;施肥方案;氮磷钾肥;根系形态;苗木质量;植株元素积累量

【中图分类号】 S792.24

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2022)10-0044-13

Effects of fertilization on root morphology and seedling quality of *Phoebe bournei*

WANG Yan^{1,2}, FENG Jinling¹, WU Xiaohui¹, HUANG Lanming¹, WU Juan¹,
CHEN Yu¹, ZHAO Chenghao¹, YANG Zhijian¹

(1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2 Chinese Society of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated root morphology and seedling quality of *Phoebe bournei*

【收稿日期】 2021-11-19

【基金项目】 福建省林木种苗科技攻关项目“闽楠气培扦插及组培新技术研究”(KLh16H04A);福建省林业科技项目“基于水土保持的锥栗林生态栽培技术研究”(K1520033A);福建省水土保持试验站项目“长汀县红壤侵蚀区人工群落演变特征及改造提升技术研究”(KH180280A)

【作者简介】 王妍(1975—),女,内蒙古固阳人,高工,博士,主要从事森林培育研究。E-mail:wykelly@126.com

【通信作者】 杨志坚(1978—),男,福建漳浦人,讲师,博士,主要从事森林培育研究。E-mail:yzj1208@163.com

seedlings under different nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilization treatments to provide basis for the cultivation of strong seedlings. 【Method】 In this experiment, 1-year-old potted seedlings of *P. bournei* were selected in the “3414” fertilization experiments, which included a total of 14 experimental treatments with three factors of N, P and K and four levels for each factor (zero, low, medium and high fertilization level). The medium level was the usual amount of fertilization, with N, P_2O_5 and K_2O rates of 0.532, 0.133 and 0.356 g/plant, respectively. The low level was 0.5 times of the medium level and the high level was 1.5 times. The random block field experiment and conventional field managements were adopted. The effects of different fertilization treatments on root morphological indexes (total root surface area, root volume, mean root diameter, root tip number, total length of root, small fine root length, thick fine root length, coarse root length, specific root surface area, root tissue density and specific root length) of *P. bournei* seedlings were analyzed. The correlation analysis method was used to reveal the relationship between each root morphological index and plant morphology (seedling quality index, height and ground diameter), plant element (N, P, K and C) accumulation, and leaf physiology and biochemistry (chlorophyll content, P_n , W , starch content, acid phosphatase activity and nitrate reductase activity). The range analysis method was used to screen the best NPK fertilization mode. The stepwise regression analysis and path analysis methods were applied to determine key indexes and to construct a fertilization mode to regulating seedling quality. 【Result】 Fertilization significantly increased total root surface area, root volume, root tip number, total length of root and small fine root length of *P. bournei* seedlings, with the largest nutrient absorption under medium level of N, P and K application (N: 0.532 g/plant, P_2O_5 : 0.133 g/plant, and K_2O : 0.356 g/plant), the maximum nutrient transport capacity under low level of P fertilizer combined with low and medium levels of N and K fertilizers (N: 0.532 g/plant, P_2O_5 : 0.067 g/plant, and K_2O : 0.178 g/plant), and the highest nutrient use efficiency under low level of N fertilizer combined with medium level of P and K fertilizers (N: 0.266 g/plant, P_2O_5 : 0.133 g/plant, K_2O : 0.356 g/plant) for root system. The thick fine root length increased, and specific root surface area decreased firstly and then increased with the increase of P fertilizer application. The root tissue density had no significant changes by P fertilizer, which decreased firstly and then increased with the increase of N and K fertilizers. Other root indexes increased first and then decreased with the increase of N, P and K fertilizers. NPK fertilization was the best for root growth of *P. bournei* seedlings. With the application of two fertilizers, PK fertilization was the best for coarse root growth, while NP fertilization was the best for other indexes. N fertilizer was the best for root growth, and P fertilizer was the worst for *P. bournei* seedlings under single fertilization. Total root surface area, specific root length, coarse root length, root tip number, specific root surface area, nitrate reductase activity and plant N accumulation were the leading factors for cultivating strong seedlings of *P. bournei*, in which plant N accumulation was dominating. 【Conclusion】 After NPK fertilization, *P. bournei* seedling increased number of root tip, extended small fine root and thick fine root length, improved total root length and surface area, adjusted root average diameter, changed specific surface area and root length for keeping the balance of total root surface area and specific surface area, promoted absorption of elements, and regulated balanced growth of organs in aboveground and underground parts to improve seedlings quality.

Key words: *Phoebe bournei*; fertilizer scheme; N, P and K fertilization; root morphology; seedling quality; plant element accumulation

根系形态结构与土壤养分等外界环境条件密切相关^[1]。植物在外界环境因子作用下,协同内部不同功能变化,形成能够响应环境变化的根系形态特征,达到最优状态以竞争土壤养分,进而维持植物的

高效生长^[2-3]。根体积、根表面积、根直径、根长等指标既反映了根系形态结构,也反映根在养分吸收、运输等功能中所起的作用^[4]。施肥可以改变土壤养分含量,根系形态对其反应最为敏感,因而根系具有可

塑性^[5]。近年来,施肥对根系重塑作用的研究结果并不一致。有研究认为,增施氮肥可以显著增加马尾松(*Pinus massoniana*)和海南吹楠(*Horsfieldia hainanensis*)苗木的根长和根表面积等指标^[6-7],增施钾肥能显著提高植物根直径和根体积等^[8-9]。另外一些研究则表明,施肥抑制根系生长,如增施氮肥会显著降低日本扁柏根的组织密度^[10]、檀香(*Santalum album*)幼苗的根平均直径^[11]和油松(*Pinus tabulaeformis*)的根长^[12];增施钾肥显著降低棉花(*Gossypium* spp)的根系总长、根生物量、总根表面积、根尖数和总体积^[13]。还有一些研究却发现,施肥对根系形态指标无显著作用,如增施氮肥对栓皮栎(*Quercus variabilis*)幼苗根系的氮、磷和钾含量无显著影响^[14]。由上可知,植物在养分捕获过程中,根系塑造是复杂的,可能与氮磷钾施肥量、配施方式及植物营养元素吸收利用、植物种类等因素有关,但是目前关于氮磷钾施肥量和配施方式对植株营养元素吸收和根系形态的影响及其相互关系的研究报道甚少。

苗木质量优劣关系着造林的成败,苗木形态和生理等指标在一定程度上可以反映苗木质量。施肥能够显著提高辐射松(*Pinus radiata*)等苗木的株高和地径^[15],提高幼苗叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白含量及光合特性^[7,16-17],增强叶片硝酸还原酶等活性^[18]。但是苗木形态和生理等某一指标片面和过分强调某一器官的生长状态,而不能全面反映苗木的生长活力。壮苗培育是各个器官相互协调的结果,如根系形态指标参数提高有利于根系对营养元素的吸收,而根系生长所需的物质和能量由叶片光合作用所产生^[19-20]。苗木质量指数反映苗木苗高与地径、地上部分与地下部分间的协调和平衡关系,是一个综合指数,可更系统地反映苗木质量^[14]。虽然根系形态对植株形态、植株元素积累量、叶片生理生化和苗木质量的影响研究已有不少报道,但是目前关于施肥条件下,根系形态、植株形态、植株元素积累量和叶片生理生化对苗木质量调控作用的研究仍显不足。

闽楠(*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang)为中国特有植物,是南方珍贵用材树种。闽楠存在生长周期长、天然更新慢等缺点,木材市场供应不足,需大力发展人工林,科学合理施肥是壮苗培育的核心技术。近年来,已在闽楠容器苗、幼树和人工幼林的施肥量和施肥方式^[21-22]等方面开展了一些研究,如王

晓等^[23]研究表明,施肥可以提高闽楠苗高、地径、叶面积、生物量、叶绿素以及氮磷钾含量;施福军等^[24]发现,施用氮肥可以提高闽楠幼苗叶片可溶性糖和可溶性蛋白。同时还有一些学者认为,施肥显著影响闽楠幼林的叶绿素荧光参数^[25],但关于施肥对闽楠苗木根系形态的影响却未见研究报道。为此,本研究以 1 年生闽楠幼苗为材料,采用“3414”施肥方案,分析不同氮磷钾施肥方式对闽楠幼苗根系形态变化的影响规律,了解根系形态与植株形态、营养元素积累量及叶片生理生化的相互关系,揭示施肥对苗木质量的调控机制,以期筛选闽楠苗木质量的关键影响指标,为闽楠壮苗培育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地设在福建农林大学田间苗圃内(119°23'E, 26°09'N)。该区属于亚热带海洋性气候,气候温和,年雨量充沛。年平均温度为 19.6℃,平均降水量为 1 350 mm,平均相对湿度约 77%,平均日照数为 1 848 h,无霜期为 326 d,≥10℃有效积温为 5 880℃。试验采用“3414”试验方案,设氮、磷、钾 3 个因素,每个因素又设不施肥和低、中、高 4 个施肥水平(分别用角码 0, 1, 2, 3 表示),其中中水平为常用施肥量,低水平为中水平的 0.5 倍,高水平为中水平的 1.5 倍,当地 N、P₂O₅ 和 K₂O 的常用施肥量分别为 0.532, 0.133 和 0.356 g/株,共计 14 个处理,各处理施肥方案见表 1。

田间试验采用随机区组排列,每处理设 3 次重复,每重复设 30 棵植株。供试材料为 1 年生闽楠实生幼苗,由福建省林科院提供。红壤、蛭石和沙子分别以 6:2:2 的体积比混合成栽培基质。基质 pH 值为 5.30,有机质含量为 5.78 g/kg,全 N 含量为 1.5 g/kg,全 P 含量为 0.035 g/kg,全 K 含量为 33.91 g/kg。供试肥料为尿素(N 含量 47%)、过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%)和氯化钾(K₂O 含量 60%)。

2018 年 3 月,选取生长良好、长势均匀、无病虫害的闽楠实生幼苗,栽植于 25 cm×35 cm 的塑料盆中,每盆 1 株。过磷酸钙作为基肥一次性施入。尿素和氯化钾分 4 次施入,其中按总量的比例 4 月施尿素 25%和氯化钾 20%,6 月施尿素 35%和氯化钾 25%,8 月施尿素 25%和氯化钾 35%,10 月施尿素 15%和氯化钾 20%。采取常规田间管理,土壤含水量保持在田间持水量的 75%左右^[26]。

表 1 闽楠幼苗“3414”氮磷钾施肥试验表

Table 1 The “3414” scheme of N, P and K fertilization for *Phoebe bourni* seedlings

g/株

处理 Treatment	配比 Mixture ratio	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0
T2	N ₀ P ₂ K ₂	0	0.133	0.356
T3	N ₁ P ₂ K ₂	0.266	0.133	0.356
T4	N ₂ P ₀ K ₂	0.532	0	0.356
T5	N ₂ P ₁ K ₂	0.532	0.067	0.356
T6	N ₂ P ₂ K ₂	0.532	0.133	0.356
T7	N ₂ P ₃ K ₂	0.532	0.200	0.356
T8	N ₂ P ₂ K ₀	0.532	0.133	0
T9	N ₂ P ₂ K ₁	0.532	0.133	0.178
T10	N ₂ P ₂ K ₃	0.532	0.133	0.534
T11	N ₃ P ₂ K ₂	0.798	0.133	0.356
T12	N ₁ P ₁ K ₂	0.266	0.067	0.356
T13	N ₁ P ₂ K ₁	0.266	0.133	0.178
T14	N ₂ P ₁ K ₁	0.532	0.067	0.178

1.2 指标及测定方法

1.2.1 植株根系形态指标的测定 于 2018 年 12 月中旬,每个处理选取 9 棵长势均匀、健康完好、无病虫害的标准株。取样后,将标准株带回实验室,用流水清洗掉根上的泥土,室内阴干,按根系、茎、叶剪断。根系用 Espon Expression 12 000xl 数字化扫描仪扫描,再用 WinRHIZO (Pro2012a,USA) 软件分析系统对根系形态指标进行分析,获取总根表面积、总根体积、根平均直径、根尖数和根系总根长等参数。然后将根系按小细根(根径<1 mm)、粗细根(1 mm≤根径<2 mm)和粗根(根径≥2 mm) 3 个径级分开,并分别测定根长。之后,将根系在 105 ℃条件下杀青 15 min, 75 ℃烘干至恒质量,用电子天平(Metiler Toledo,AL204)称根系干物质质量。根据图像分析软件记录的总根表面积、总根体积和根系总根长,结合测定的根系生物量,计算根系的比根长、比表面积和组织密度^[27],计算公式为:

比表面积 (cm²/g)=总根表面积(cm²)/根系干物质质量(g);

组织密度(g/cm³)=根系干物质质量(g)/根系总体积(cm³);

比根长(m/g)=根系总长度(m)/根系干物质质量(g)。

1.2.2 植株形态指标的测定 于 2018 年 12 月中旬,用直尺(精度 0.1 cm)测量地面到植株生长点的长度作为苗高;用游标卡尺(精度 0.1 mm)测地径,计算高径比(苗高(cm)与地径(mm)的比值)。将茎和叶于 105 ℃下杀青 15 min, 75 ℃条件下烘干至恒质量,用电子天平(AL204)称其干质量,计算植株总生物量、茎根比和苗木质量指数^[28],计算公式为:

植株总生物量(g)=叶干质量(g)+茎干质量(g)+根干质量(g);

茎根比=地上部分干质量(g)/根干质量(g);

苗木质量指数=总生物量/(高径比+茎根比)。

1.2.3 植株 N、P、K 和 C 元素积累量的测定 标准株烘干后,用植物粉碎机分别将其磨碎,过 0.5 mm 塑料筛,制成分析样品,装入自封袋内用于全氮、全磷和全钾含量的测定,各处理重复 3 次取平均值。称量 1.00 g 样品,用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮法制备待测液,N 含量采用凯氏定氮法测定,P 含量采用钼锑抗比色法测定,K 含量采用原子吸收分光光度计法测定,C 含量采用重铬酸钾法测定^[29]。各元素积累量的计算公式为:

植株 N(P、K 或 C 元素)积累量(mg/株)=植株总生物量×N(P、K 或 C 元素)含量^[6,30]。

1.2.4 叶片生理生化指标的测定 于 2018 年 10 月中旬,选择晴天上午 9:00—10:00,每个处理选择 3 棵标准株,每棵标准株选取当年生光照良好、方向相同、无病虫害、长势较一致的新梢顶芽下第 3 片成熟功能叶片 3 片,采用 Li-6400 便携式光合测定仪测定净光合速率(P_n)和蒸腾速率,计算水分利用效率(W,即净光合速率与蒸腾速率的比值),每个指标均重复测定 3 次。测定时饱和光强设为 1 200 μmol/(m²·s),空气流速为 500 μmol/s,温度控制在(25±1) ℃,CO₂ 浓度为 400 μmol/mol。

叶片光合参数测定结束后,采集相应叶片,迅速用液氮处理,除去叶脉,混匀,用作叶片生理生化指标测定。称取 0.15 g 于 25 mL 棕色容量瓶中,体积分数 95%乙醇定容,暗处保存,每隔 2~3 min 振荡容量瓶,观察叶片组织全部变白后,振荡均匀液体,

分别在 665,649 和 470 nm 下测定吸光度 A_{665} 、 A_{649} 和 A_{470} , 计算叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量, 其中叶绿素 a 含量 = $13.95A_{665} - 6.88A_{649}$, 叶绿素 b 含量 = $24.96A_{649} - 7.32A_{665}$, 总叶绿素含量 = 叶绿素 a 含量 + 叶绿素 b 含量。淀粉含量采用蒽酮比色法^[7,31]测定, 硝酸还原酶(Nitrate reductase, NR)活性采用活体法^[18]测定, 酸性磷酸酶(Acid phosphatase, ACP)活性参照董璐等^[17]的方法测定。

1.3 数据处理

“3414”试验可分析氮、磷和钾肥单因素、双因素及三因素互作效应^[26]。用 Excel 2016 软件进行数据处理, 采用 SPSS 16.0 进行差异显著性检验(LSD 法, 显著性水平设为 0.05)。采用极差法分析氮肥、磷肥和钾肥的单因素、双因素及三因素互作效应。采用相关分析法分析根系形态指标之间以及根系形态与植株形态、植株营养元素积累量、叶片生理生化指标间的相互关系。通过逐步回归分析和通径分析法分析施肥对苗木质量的调控作用。用 GraphPad Prism 7 (GraphPad Software Inc., San Diego, CA, USA)软件作图。

表 2 NPK 施肥量对闽楠幼苗根系形态的影响

Table 2 Effects of different N,P and K fertilization rates on root morphology of *Phoebe bournei* seedlings

处理 Treatment	总根表面积/cm ² Total root surface area	总根体积/cm ³ Root volume	根平均直径/mm Mean root diameter	根尖数 Root tip number	比表面积/(cm ² ·g ⁻¹) Specific root surface area	组织密度/ (g·cm ⁻³) Root tissue density
T1	67.93±0.03 h	1.06±0.10 g	0.62±0.06 c	1 958.2±254.2 h	82.34±4.61 e	0.79±0.11 a
T2	81.67±1.94 gh	1.39±0.06 g	0.68±0.01 b	2 046.0±91.0 h	120.72±10.42 cd	0.49±0.04 de
T3	249.45±20.83 b	4.46±0.41 b	0.68±0.02 b	4 903.4±280.5 a	231.93±32.70 a	0.25±0.04 f
T4	137.17±5.93 d	2.50±0.29 d	0.72±0.06 b	3 146.5±95.5 de	113.04±4.29 cd	0.49±0.05 de
T5	164.67±13.43 c	3.34±0.21 c	0.81±0.02 a	3 293.7±196.7 cd	105.33±7.44 d	0.47±0.03 de
T6	327.58±0.90 a	5.70±0.02 a	0.69±0.00 b	4 259.7±338.7 b	130.18±1.98 c	0.44±0.01 de
T7	176.42±9.44 c	3.23±0.25 c	0.73±0.02 b	4 045.8±433.2 b	121.43±5.83 cd	0.45±0.03 de
T8	92.03±1.30 fg	1.37±0.05 g	0.60±0.01 cd	2 297.5±130.5 gh	107.86±1.62 d	0.62±0.02 bc
T9	143.15±6.45 d	2.26±0.03 de	0.60±0.00 cd	3 372.8±434.2 cd	118.03±10.46 cd	0.54±0.03 cde
T10	91.91±0.76 g	1.32±0.07 g	0.57±0.03 cd	2 602.7±174.3 fg	103.54±6.65 d	0.68±0.04 b
T11	107.17±13.59 ef	1.32±0.16 g	0.49±0.00 e	3 450.7±126.3 cd	172.87±18.99 b	0.47±0.05 de
T12	119.60±6.54 e	1.87±0.09 f	0.62±0.00 c	3 037.5±212.5 de	79.03±8.23 e	0.82±0.09 a
T13	141.65±0.42 d	1.96±0.06 ef	0.55±0.02 d	3 597.5±96.5 c	130.99±11.27 c	0.56±0.06 cd
T14	144.46±12.18 d	3.03±0.46 c	0.83±0.06 a	2 808.7±51.3 ef	121.70±9.04 cd	0.40±0.06 e

注: 同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。表 3 同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$). The same for Table 3.

通过分析表 2 中 4 个 N 肥水平(T2、T3、T6 和 T11), 4 个 P 肥水平(T4, T5, T6 和 T7) 和 4 个 K 肥水平(T8、T9、T6、T10)处理间的变化规律, 可以看出, 总根表面积、总根体积和根尖数随着 N、P 和 K 肥施用量的增加呈先增后降趋势, 除低水平施 N 肥的根尖数最大外, 其余指标均在中等水平施肥时达到最大值。根平均直径随 N 和 K 施用量增加先

2 结果与分析

2.1 NPK 施肥量对闽楠幼苗根系形态的影响

氮磷钾施肥量对闽楠根系各形态指标均有一定程度的影响。由表 2 可见, 所有施肥处理的总根表面积、总根体积和根尖数均大于 T1(对照), T2、T3、T4、T5、T6、T7 和 T14 的根平均直径均大于 T1, 说明施用氮磷钾肥均能提高闽楠幼苗根系的总根表面积、总根体积和根尖数, 施磷或中低水平的 N 和 P 配施可促进闽楠根直径的增长。根系的比表面积除 T12 外其余处理均大于 T1, 说明合理施肥可提高闽楠幼苗根系的比表面积; 组织密度仅 T12 高于 T1, 其余处理均显著小于 T1, 其中 4 个水平施磷处理(T4、T5、T6 和 T7)之间无显著差异, 说明氮磷钾合理配施可以提高根的组织密度, 但单施氮、磷和钾肥对根组织密度具有抑制作用, 不同磷肥水平对组织密度无明显的影响。总根表面积和总根体积均以 T6 处理最大, 根平均直径以 T5 和 T14 处理较大, 根尖数和比表面积均以 T3 处理最大, 组织密度以 T12 处理最大。

增后降, 在中等施肥量时达到最大值; 随 P 肥施用量增加无规则变化, 在低水平施肥量时达到最大值。比表面积随 N 肥施用量增加无规则变化, 在低水平施肥量时达到最大值; 随 P 肥施用量增加先降后升, 随 K 肥施用量增加先升后降, 均在中等施肥量下达到最大值。组织密度随 N 和 K 肥施用量的增加先降后升, 随 P 肥施用量的增加而下降。

2.2 NPK 施肥量对闽楠幼苗根长的影响

由表 3 可见,所有施肥处理的小细根长和根系总长度均大于 T1,绝大多数处理的粗细根长(除 T11 外)均大于 T1,说明施氮磷钾肥可以提高闽楠幼苗小细根长、粗细根长和根系总长度,但高水平施氮会抑制粗细根的生长;除 T2、T10 和 T11 外,其余处理的粗根长均大于 T1,说明施肥可在一定程度上促进粗根的生长,但高水平施氮和施钾肥会抑制粗

细根的生长;除 T5 和 T12 外,其余处理的比根长均大于 T1,4 个水平施钾处理(T8、T9、T6 和 T10)之间无显著差异,说明合理的施肥可以提高闽楠幼苗根系的比根长,而施钾肥对比根长无显著促进作用。总体来看,小细根长和根系总长度均以 T6 处理最大,粗细根长以 T3 处理最大,粗根长以 T14 处理最大,比根长以 T11 处理最大。

表 3 NPK 施肥量对闽楠幼苗根长的影响

Table 3 Effects of different N,P and K fertilization rates on root length of <i>Phoebe bourni</i> seedlings					
处理 Treatment	小细根长/cm Small fine root length	粗细根长/cm Thickness fine root length	粗根长/cm Coarse root length	根系总长度/cm Total length of root	比根长/(cm·g ⁻¹) Specific root length
T1	305.52±44.04 i	37.77±2.05 h	11.16±3.19 d	354.46±38.80 i	428.25±40.75 cde
T2	334.01±2.09 i	37.87±2.60 h	11.03±2.41 d	382.92±2.92 i	566.25±51.75 cde
T3	953.20±67.18 b	170.23±1.56 a	27.63±2.38 b	1 119.44±81.67 b	1 040.25±138.75 a
T4	496.36±35.35 fg	84.43±8.52 ef	25.63±5.39 bc	606.42±21.44 fg	499.25±22.75 cde
T5	574.28±29.73 de	117.06±2.32 d	24.62±1.81 bc	649.30±67.19 ef	415.25±37.75 de
T6	1 332.45±2.00 a	140.60±9.83 c	29.69±0.14 b	1 502.75±7.98 a	597.25±8.75 c
T7	598.54±1.02 de	153.81±19.63 b	16.21±0.65 cd	768.57±21.31 cd	529.25±18.75 cde
T8	435.30±3.00 gh	42.88±3.89 h	13.01±3.82 d	491.20±2.93 h	575.25±11.75 cd
T9	633.43±67.69 d	81.61±5.77 ef	15.37±5.58 cd	730.42±67.89 d	602.25±77.75 c
T10	462.23±36.94 gh	42.64±3.56 h	8.16±1.22 d	515.70±33.49 h	581.25±61.75 cd
T11	649.61±89.78 d	33.46±1.99 h	9.93±0.07 d	693.01±91.84 de	1 117.25±128.75 a
T12	541.40±33.69 ef	55.49±4.40 g	13.66±1.47 d	610.55±36.62 fg	403.25±43.75 e
T13	726.82±29.07 c	77.64±6.15 f	11.48±3.47 d	815.95±19.45 c	754.25±58.75 b
T14	419.96±9.46 h	91.36±1.20 e	43.15±14.09 a	554.46±5.83 gh	467.25±10.75 cde

通过分析 4 个 N 肥水平(T2、T3、T6 和 T11)、4 个 P 肥水平(T4, T5, T6 和 T7) 和 4 个 K 肥水平(T8、T9、T6、T10) 处理闽楠根长的变化规律,可以看出,闽楠幼苗根系总长度和小细根长随 N、P 和 K 施肥量增加先增后降,在中等施肥量时达到最大值;粗细根长随 N 和 K 施肥量增加先增后降,随 P 肥施用量增加持续增加;粗根长随 N 和 K 施肥量增加先增后降,而随 P 肥施用量增加并无规律性变化,但均在中等施肥量时达到最大值;比根长随 N 和 P 施肥量增加无规律变化,随 K 肥施用量增加先升后降。

表 4 NPK 施肥方式对闽楠幼苗根系指标的影响

Table 4 Effects of different N,P and K fertilization mode on root indexes of <i>Phoebe bourni</i> seedlings							
指标 Index	NPK 配施 NPK combined application	NP 配施 NP combined application	NK 配施 NK combined application	PK 配施 PK combined application	N 单施 N single application	P 单施 P single application	K 单施 K single application
总根表面积/cm ² Total root surface area	259.65	245.91	245.91	235.67	245.91	190.41	235.67
总根体积/cm ³ Root volume	4.64	4.38	4.38	4.38	4.38	3.20	4.38
根平均直径/mm Mean root diameter	0.34	0.31	0.20	0.26	0.20	0.11	0.12
根尖数 Root tip number	2 945.20	2 857.40	2 857.40	1 962.20	2 857.40	1 113.20	1 962.20
比表面积/(cm ² ·g ⁻¹) Specific root surface area	152.90	152.90	128.39	26.65	111.21	24.86	26.65

表 4(续) Continued table 4

指标 Index	NPK 配施 NPK combined application	NP 配施 NP combined application	NK 配施 NK combined application	PK 配施 PK combined application	N 单施 N single application	P 单施 P single application	K 单施 K single application
组织密度/(g·cm ⁻³) Root tissue density	0.57	119.27	87.19	0.28	0.24	0.05	0.23
小细根长/cm Small fine root length	1 026.93	998.44	998.44	912.49	998.44	836.09	897.15
粗细根长/cm Thickness fine root length	136.77	136.77	136.77	111.17	136.77	69.38	97.96
粗根长/cm Coarse root length	34.99	19.76	21.54	34.99	19.76	13.48	21.54
根系总长度/cm Total length of root	1 148.29	1 119.84	1 119.84	1 011.55	1 119.84	896.33	1 011.55
比根长/(cm·g ⁻¹) Specific root length	714.22	714.22	551.43	187.63	551.43	182.01	27.10

表 4 表明,氮磷钾不同施肥方式对闽楠幼苗根系生长的影响存在一定的差异。在 7 种施肥方式中,NP 双因素施肥时组织密度的极差最大;NPK 配施时除组织密度外其他指标的极差均有最大值。在氮磷钾两因素配施中,根平均直径以 NP 极差最大,其次为 PK,最差的为 NK;粗根长以 PK 极差最大,其次是 NK,极差最小的是 NP;其余指标均以 NP 极差较大,其次为 NK,最小的为 PK。在氮磷钾单因素施肥中,比根长以 N 肥单施极差最大,其次为 P 肥,最差的为 K 肥;其他指标均 N 肥单施极差较大,其次为 K 肥,最差的为 P 肥。

2.4 NPK 施肥条件下闽楠幼苗根系指标的相关分析

分析 14 个施肥处理下闽楠幼苗根系指标间的相关关系,结果见图 1。由图 1 可知,闽楠幼苗根系总根表面积和总根体积除与比根长无显著关系外,与其他指标均显著相关,其中总根表面积与总根体积、根系总长度、小细根长和粗细根长的相关系数,以及总根体积与总根表面积、粗细根长、根系总长度和小细根长的相关系数均大于 0.80。根平均直径与粗细根长和粗根长呈极显著正相关,与组织密度和比根长呈极显著负相关,其中与粗根长的相关系数最大。根尖数除与根平均直径相关不显著外,与其他指标均有显著相关关系,其中与根系总长度、总根表面积、粗细根长和小细根长的相关系数均大于 0.80。根系总长度除与根平均直径相关不显著外,与其他指标均显著相关,其中与小细根长、总根表面积、总根体积和根尖数的相关系数均大于 0.80。小细根长除与根平均直径和粗根长无显著相关关系外,与其他指标均有极显著相关关系,其中与总根表面积、根系总长度、根尖数和总根体积的相关系数均大于 0.80。粗细根长除与比根长无显著相关关系外,与其他指标均极显著相关,其中与总根体积、根表面

积和根尖数的相关系数均大于 0.80。粗根长除与小细根长、比表面积和比根长无显著相关关系外,与其他指标均显著相关,其中与根平均直径和总根体积的相关系数大于 0.65。比表面积除与根平均直径和粗根长无显著相关关系外,与其他指标均极显著相关,其中与比根长、组织密度和根尖数的相关系数的绝对值均大于 0.65。组织密度与所有根系指标均呈极显著负关系,与比表面积、粗细根长和总根体积的相关系数的绝对值均大于 0.65。比根长除与总根表面积、总根体积、粗细根长和粗根长无显著相关关系外,与其他指标均显著相关,其中比表面积、根尖数和根平均直径的相关系数的绝对值均大于 0.50。

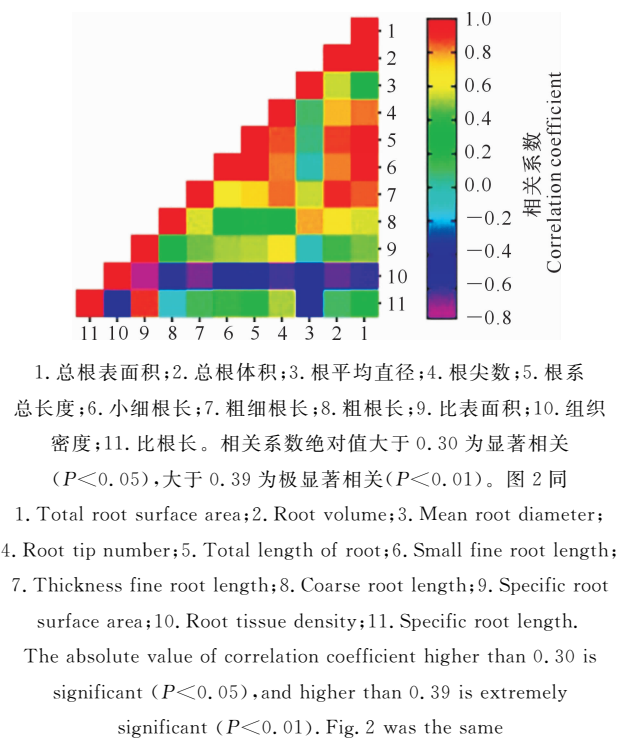


图 1 NPK 施肥条件下闽楠幼苗根系指标间的相关关系
Fig.1 Correlation between root indexes of *Phoebe bournei* seedlings under N,P,and K fertilization

2.5 NPK 施肥条件下闽楠幼苗根系指标与植株元素积累量、叶片指标的关系

闽楠幼苗根系指标与植株营养元素(N、P、K 和 C)积累量及叶片指标(叶绿素总量、 P_n 、 W 、淀粉含量、酸性磷酸酶和硝酸还原酶活性)的相关性分析结果见图 2。

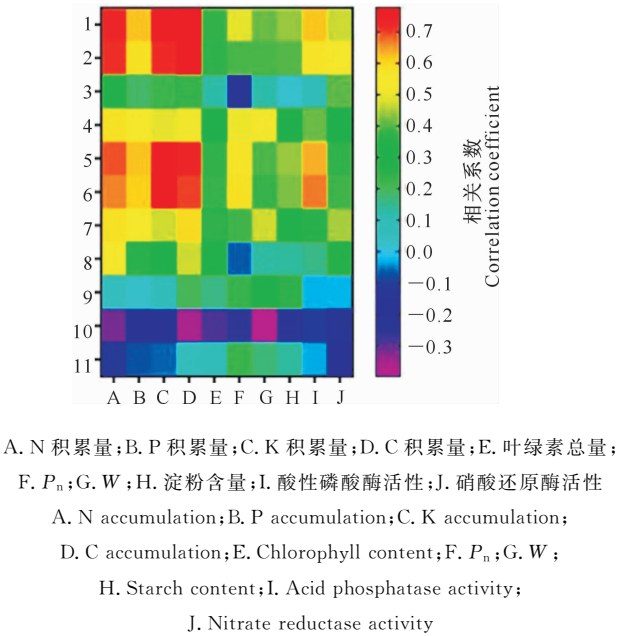


图 2 闽楠幼苗根系指标与植株元素积累量及叶片生化指标的相关关系

Fig. 2 Correlation between root indexes, plant elements accumulation and leaf indexes of *Phoebe bournei* seedlings

图 2 表明,总根表面积、总根体积、根尖数、根系总长度、小细根长和粗细根长与植株 N、P、K 和 C 积累量均呈极显著正相关,与总根表面积相关系数

最大。根平均直径与植株 N 和 C 积累量呈显著正相关。粗根长与植株 N 和 C 积累量呈极显著正相关,与植株 K 积累量呈显著正相关。组织密度与植株 N 和 C 积累量呈显著负相关。在所有根系指标中,只有总根表面积、根系总长度和小细根长与植株 N、P、K 和 C 积累量的相关系数均大于 0.60。总根表面积、总根体积、根尖数、根系总长度和小细根长,与叶绿素总量、 P_n 、 W 、淀粉含量、酸性磷酸酶和硝酸还原酶活性均呈显著正相关。根平均直径只与硝酸还原酶活性呈极显著正相关,与其他指标均无显著相关性。粗细根长与 P_n 、淀粉含量和酸性磷酸酶活性均呈显著正相关,与 W 和硝酸还原酶活性均呈极显著正相关。粗根长与叶绿素总量呈显著正相关。比表面积与 W 呈显著正相关。组织密度与 W 呈极显著负相关。

2.6 NPK 施肥条件下闽楠幼苗根系指标与植株形态指标的相关关系

对闽楠幼苗根系各个指标与苗木质量指数、苗高、地径进行相关分析,结果见图 3。图 3 表明,苗木质量指数与总根表面积、总根体积、根尖数、根系总长度、小细根长、粗细根长和粗根长均呈极显著正相关,与根平均直径呈显著正相关,与比根长呈显著负相关,其中相关系数大于 0.60 的指标有总根表面积、总根体积、根系总长度和小细根长。苗高与比表面呈极显著正相关,与根尖数和比根长呈显著正相关,与组织密度呈显著负相关。地径与根尖数和根系总长度呈极显著正相关,与总根表面积、小细根长和粗细根长呈显著正相关。

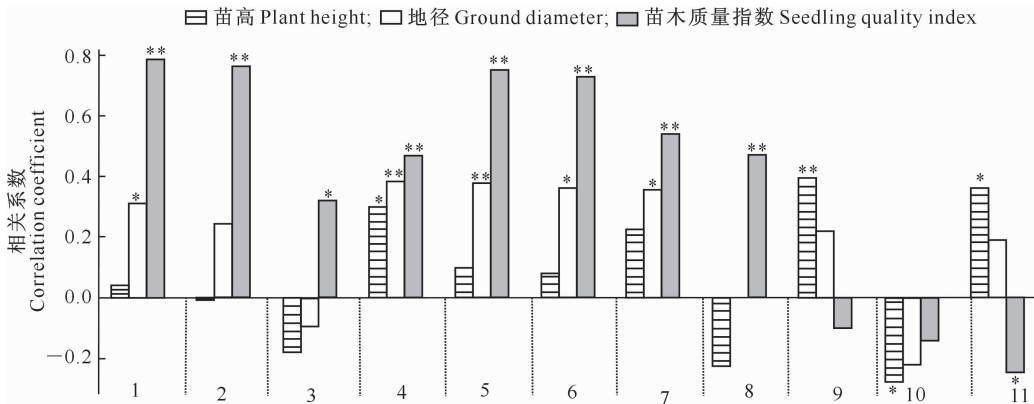


图 3 施肥作用下闽楠幼苗根系指标与植株形态指标的相关分析

Fig. 3 Correlation between root indexes and plant morphological indexes of *Phoebe bournei* seedlings under fertilization

2.7 闽楠苗木质量主导因素分析

通过逐步回归分析,建立不同施肥方式下根系形态指标与根系相关生长指标对闽楠苗木质量指数的回归方程,有:

苗木质量指数 = 0.312 7 + 0.002 6X₁ - 0.000 1X₂ + 0.001 3X₃ - 0.003 9X₄ + 0.000 31X₅ + 0.002 9X₆ - 0.929 7X₇。(P<0.001,R²=0.988)

式中:X₁ 为根系表面积,X₂ 为根尖数,X₃ 为粗根长,X₄ 为比表面积,X₅ 为比根长,X₆ 为植株 N 积累量,X₇ 为硝酸还原酶活性。由此可得,总根表面积、根尖数、粗根长、比表面积、比根长、植株 N 积累量和硝酸还原酶活性是培育闽楠壮苗的主要因素。

进一步对 7 个主要因素与苗木质量指数进行通径分析,得到决定系数为 0.993,剩余通径系数为

0.109,通径分析结果见表 5。由表 5 可知,总根表面积、粗根长、比根长和植株 N 积累量的直接通径系数均为正值,对苗木质量指数均有促进作用,其中最大的为总根表面积,其次分别为比根长、植株 N 积累量和粗根长。根尖数、比表面积、硝酸还原酶活性的直接通径系数均为负值,表明其对苗木质量指数有抑制作用,抑制作用最大的为比表面积,其次为根尖数,最小的为硝酸还原酶活性。在根尖数、粗根长、比表面积、比根长、植株 N 积累量和硝酸还原酶活性对苗木质量指数的正间接作用中,均以通过总根表面积的影响最大,且通径系数值均大于 0.200;在总根表面积、根尖数、粗根长和比根长对苗木质量指数的负间接作用中,均以通过比表面积的影响最大,且通径系数绝对值均大于 0.200。

表 5 闽楠幼苗根系指标、植株元素积累量和叶片指标对苗木质量指数的通径分析

Table 5 Path analysis on effects of root indexes, plant elements accumulation and leaf indexes on *Phoebe bournei* seedling quality indexes

指标 Index	直接通径系数 Direct meridian coefficient	间接通径系数 Indirect meridian coefficient						
		总根表面积 Total root surface area	根尖数 Root tip number	粗根长 Coarse length	比表面积 Specific root surface area	比根长 Specific root length	植株 N 积累量 Plant N accumulation	硝酸还原酶活性 Nitrate reductase activity
总根表面积 Total root surface area	1.142	—	-0.141	0.050	-0.456	0.096	0.172	-0.073
根尖数 Root tip number	-0.171	0.944	—	0.029	-0.642	0.222	0.138	-0.048
粗根长 Coarse length	0.090	0.635	-0.054	—	-0.225	-0.054	0.125	-0.041
比表面积 Specific root surface area	-0.946	0.550	-0.116	0.021	—	0.378	0.010	0.004
比根长 Specific root length	0.429	0.256	-0.088	-0.011	-0.834	—	-0.026	0.028
植株 N 积累量 Plant N accumulation	0.238	0.824	-0.099	0.047	-0.042	-0.047	—	-0.078
硝酸还原酶活性 Nitrate reductase activity	-0.156	0.534	-0.053	0.024	0.026	-0.078	0.119	—

3 讨论与结论

根系通过吸收土壤中的水肥来保障植株正常生长,其功能异质性由根系形态结构变化所决定^[1,32],NPK 施肥可以改变土壤养分状态,闽楠幼苗通过再塑性根系形态结构增强养分吸收,但不同根系形态指标对 NPK 施肥量和施肥方式的响应不同。根系总长度、总根体积和总根表面积是衡量根系吸收养分的重要指标,本研究 NPK 施肥条件下,以 T6 处理最大。比根长指单位生物量的总根长,比表面积指单位生物量的根表面积,是衡量根系能量消耗和生长效益的重要指标;根尖数是根系生理活性最活跃的部分,具有响应和传递环境信号、吸收养分及合成物质等重要功能,本研究条件下均以 T3 处理最大。根直径和组织密度是衡量根系养分运输能力的

指标,本研究中以 T1 和 T12 处理的组织密度较大,T5 和 T14 处理的根平均直径较大。不同序级的根在形态结构上存在差异,低序级根的主要功能是获取植物养分资源,高序级根的主要功能是进行养分资源的运输。研究表明,T6 处理小细根长最大,T3 处理粗细根长最大,T14 处理粗根长最大。综上可知,中水平 NPK 配施(T6:N 0.532 g/株,P₂O₅ 0.133 g/株,K₂O 0.356 g/株)下闽楠根系养分吸收量最大,其中以小细根的作用为主;低水平 P 肥与中低水平 NK 肥配施(T14:N 0.532 g/株,P₂O₅ 0.067 g/株,K₂O 0.178 g/株)可以提高闽楠根系的养分运输能力,以粗根的作用为主;低水平 N 肥与中水平 PK 肥配施(T3:N 0.266 g/株,P₂O₅ 0.133 g/株,K₂O 0.356 g/株)时闽楠根系最活跃,具有较强的吸收和运输能力,养分利用效率最高,以根尖数和粗细

根的表现最为明显。

3.1 氮磷钾施肥量对闽楠幼苗根系形态的调节

氮是酶的基本成分,对根系形态结构有重要影响^[7,11,12]。与磷肥和钾肥相比,本研究中的氮肥对所有根系指标的作用均较大,说明闽楠幼苗根系生长对 N 肥需求最大。但施氮对不同树种根系形态指标的影响表现却不尽相同,马尾松等幼苗的细根体积、根表面积、根尖数、根系平均直径和总根长均随施氮量增加而增加^[6],美丽异木棉(*Ceiba speciosa*)的根系平均直径则下降^[16]。本研究表明,施氮肥可以显著提高闽楠幼苗根系的总根表面积、总根体积、根尖数、小细根长和根系总长度,但总根表面积、总根体积、根尖数、根平均直径、根系总长度、小细根长、粗细根长和粗根长均随 N 肥施用量增加呈先增后降趋势,与香瓜茄(*Solanum melongena*)的研究结果^[33]一致;比表面积和比根长随 N 肥施用量增加无规律变化,组织密度则先降后升,这可能由于低水平施 N 可以促进闽楠幼苗根系伸长和分枝,特别是增加小细根数量,提高根的比表面积和比根长,加强 N 吸收能力,提高根系 N 含量,增大根皮层细胞直径,降低根组织密度^[29]。

磷是植物必需的重要营养元素之一,对植物根系形态有刺激作用^[2]。本研究表明,与氮肥和钾肥相比,磷肥对闽楠幼苗各根系形态指标作用最小,说明闽楠幼苗生长对磷的需求相对较小,可能磷吸收需根释放大量有机酸,消耗大量植株能量和物质,基于效益理论闽楠幼苗相应降低了对磷的需求^[34]。但施磷肥却均能显著提高闽楠幼苗根系形态指标,总根表面积、总根体积、根尖数、根系总长度和小细根长均随施 P 量增加先增后降,这与辣木(*Moringa oleifera*)幼苗的研究结果^[35]相同。粗细根长随施 P 量增加相应增加,这与花生上的研究结果^[36]类似。根平均直径、粗根长和比根长随施 P 量增加无规则变化,比表面积先降后升,基于效益理论,这可能是在不同施磷水平下,闽楠幼苗通过保持根系吸收面积和体积与根比表面积之间的平衡,最大效率地吸收磷元素^[34,37]。本研究发现,施磷对闽楠幼苗根系组织密度无显著作用,可能是由于大部分磷贮存于组织液泡中,对木质化影响不大^[38]。

钾对植物体内酶活化、离子平衡、细胞膨压以及碳水化合物的运输等具有重要影响^[39-40]。本研究表明,施钾肥能显著提高闽楠幼苗根系的形态指标,总根表面积、总根体积、根尖数、根平均直径、比表面积、根系总长度、小细根长、粗细根长和粗根长均随

K 肥施用量增加先增后降,这与苦荞(*Fagopyrum tataricum*)的研究结果^[41]相似。组织密度随 K 肥施用量增加先降后升,可能是因为施钾可以提高闽楠根系的酶活性,促进碳水化合物向根系输送,加强根系细胞生长^[39],降低根系组织密度。随着根系钾离子吸收增多,为了减小钾离子对根部的胁迫,需提高根系组织密度,加快钾离子向其他器官运输^[42-43],因而不利于根系幼嫩组织的生长。本研究同时发现,施钾对闽楠幼苗的比根长无显著作用,可能钾不是植物体内有机物的组分,对单位生物量的根系长度影响不大^[40]。

3.2 氮磷钾施肥方式对闽楠幼苗根系形态的调节

7 种氮磷钾配合施肥方式中,除组织密度外,其他指标均以氮磷钾三因素配施的极差最大,说明氮磷钾肥对闽楠幼苗根系生长的影响存在交互作用,氮磷钾三因素合理配施可以满足闽楠幼苗对 N、P 和 K 元素的需求,促进其生长。本研究氮源为尿素,闽楠根系可以吸收 NO_3^- ,使根土界面 pH 升高,促进根吸收 K^+ ^[44];同时闽楠根也可以吸收 NH_4^+ ,使根土界面 pH 降低,促进土壤磷活化,进而促进 P 吸收,此时 H^+ 也与 K^+ 竞争原生质膜上的结合点,抑制 K^+ 吸收^[34-44];另外,根系对 NO_3^- 的最大吸收速率始终高于 NH_4^+ ,当根吸收的 K^+ 增大到一定量后,根细胞向土壤释放 H^+ ,又促进了 P 的吸收^[34]。氮磷钾双因素中,除粗根长外,其余指标均以 NP 肥配施较好,可能因为氮素和磷素都是细胞质和细胞核的组成成分,参与多种酶活动,优先向生长中心运输,促进细根分化和生长^[8,45],提高闽楠的根尖数和各级根长,提升总根表面积和总根体积。同时,磷元素是参与能量传递的高能磷酸化合物磷酸基团的组成成分,而 K 是碳水化合物的运输元素,能为粗根生长提供所需的碳水化合物和能量^[17,40],因此 PK 配施最利于粗根生长。

3.3 氮磷钾肥对闽楠苗木质量的调控

总根表面积、总根体积、根尖数、根系总长度、小细根和粗细根长与苗木质量指数、叶绿素总量、 P_n 、W、淀粉含量、酸性磷酸酶活性、硝酸还原酶活性及 N、P、K、C 积累量均呈显著正相关,说明闽楠根系形态变化显著影响根元素吸收,改变生理代谢,调节叶片光合作用和水分利用效率,重新塑造植物形态,调控苗木质量。其中,总根表面积、根尖数、粗根长、比表面积、比根长、植株 N 积累量和硝酸还原酶活性是培育闽楠壮苗的主导因素。在所有根系形态指标与总根表面积的相关关系中,总根体积、根系总长度

和小细根长与相关系数较大;在与比根长的相关关系中,以比表面积、根尖数和根平均直径的相关系数较大;与粗细根长的相关关系中,以总根体积、总根表面积和根尖数相关系数较大;与根尖数的相关关系中,以根系总长度、总根表面积和粗细根长的相关系数较大;与比表面积的相关关系中,以比根长、组织密度和根尖数的相关系数较大。而且根尖数、粗根长、比表面积、比根长、植株 N 积累量和硝酸还原酶均通过总根表面积间接对苗木质量指数起最大的正向作用;总根表面积、根尖数、粗根长、比根长均通过比表面积间接对苗木质量指数起最大的负向作用。说明施肥后闽楠主要通过提高根尖数,延长小细根和粗细根长度,提高根系总长度和总表面积,调节根平均直径,改变比表面积和比根长,保持总根表面积和比表面积在一定水平的平衡,提高元素吸收量,特别是 N 元素,促进地上部分和地下部分各器官的平衡生长,提高苗木质量指数。因此,闽楠壮苗培育施肥调控的关键是提高植株的 N 积累量,其中以 T6 处理,即 N 施用量为 0.532 g/株, P_2O_5 施用量为 0.133 g/株, K_2O 施用量为 0.356 g/株时最佳。

[参考文献]

- [1] Meier I C, Tückmantel T, Heitkötter J, et al. Root exudation of mature beech forests across a nutrient availability gradient: the role of root morphology and fungal activity [J]. *New Phytologist*, 2020, 226(2): 583-594.
- [2] 梁尧, 蔡红光, 袁静超, 等. 深松结合不同施肥方式对春玉米根系时空分布特征的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6): 31-40.
Liang Y, Cai H G, Yuan J C, et al. Effect of subsoiling combined with different soil amendment practices on temporal and spatial distribution of spring maize roots [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2019, 47(6): 31-40.
- [3] 王群, 赵向阳, 刘东尧, 等. 淹水弱光复合胁迫对夏玉米根形态结构、生理特性和产量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(17): 3479-3495.
Wang Q, Zhao X Y, Liu D Y, et al. Root morphological, physiological traits and yield of maize under waterlogging and low light stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(17): 3479-3495.
- [4] Wang Y, Gao G, Wang N, et al. Effects of morphology and stand structure on root biomass and length differed between absorptive and transport roots in temperate trees [J]. *Plant and Soil*, 2019, 442(1): 355-367.
- [5] Li L, McCormack M L, Chen F, et al. Different responses of absorptive roots and arbuscular mycorrhizal fungi to fertilization provide diverse nutrient acquisition strategies in Chinese fir [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 64-72.
- [6] 宋平, 张蕊, 张一, 等. 模拟氮沉降对低磷胁迫下马尾松无性系细根形态和氮磷效率的影响 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1136-1144.
Song P, Zhang R, Zhang Y, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on fine root morphology, nitrogen and phosphorus efficiency of *Pinus massoniana* clone under phosphorus deficiency [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(11): 1136-1144.
- [7] 付晓凤, 王莉娜, 朱原, 等. 不同施肥处理对海南风吹楠幼苗生长及生理特性影响 [J]. *植物科学学报*, 2018, 36(2): 273-281.
Fu X F, Wang L S, Zhu Y, et al. Effects of different fertilization treatments on the growth and physiological characteristics of *Horsfieldia hainanensis* Merr. seedlings [J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(2): 273-281.
- [8] 刘俊良, 魏孔亮, 冯俊, 等. 不同浓度磷肥处理对橡胶树幼苗根系生长影响初步研究 [J]. *中国热带农业*, 2020, 94(3): 65-69.
Liu J L, Wei K L, Feng J, et al. Effects of different concentrations of phosphate fertilizer treatments on root growth of the rubber tree seedlings [J]. *China Tropical Agriculture*, 2020, 94(3): 65-69.
- [9] 薛欣欣, 魏云霞, 王文斌, 等. 钾、镁交互作用对橡胶幼苗生长及养分吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(10): 1870-1878.
Xue X X, Wei Y X, Wang W B, et al. Interaction of potassium and magnesium on the growth and nutrient absorption of *Hevea brasiliensis* seedlings [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10): 1870-1878.
- [10] Makita N, Hirano Y, Sugimoto T, et al. Intraspecific variation in fine root respiration and morphology in response to in situ soil nitrogen fertility in a 100-year-old *Chamaecyparis obtusa* forest [J]. *Oecologia*, 2015, 179(4): 959-967.
- [11] 李双喜, 杨曾奖, 徐大平, 等. 水分、养分和寄主对檀香幼苗根系生长及营养吸收的影响 [J]. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(1): 61-68.
Li S X, Yang Z J, Xu D P, et al. Effects of water, nutrient and host on root growth and nutrient absorption of *Santalum album* seedling [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2015, 24(1): 61-68.
- [12] Wang G, Liu F, Xue S. Nitrogen addition enhanced water uptake by affecting fine root morphology and coarse root anatomy of Chinese pine seedlings [J]. *Plant and Soil*, 2017, 418(1): 177-189.
- [13] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 钾营养对水培棉花生长发育的影响 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(11): 267-271.
Chen B L, Sheng J D, Jiang P A, et al. Effects of potassium nutrition on growth of cotton on liquid foster [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(11): 267-271.
- [14] 孙巧玉, 刘勇. 控释肥和灌溉方式对栓皮栎容器苗苗木质量及造林效果的影响 [J]. *林业科学研究*, 2018, 31(5): 140-147.

- Sun Q Y, Liu Y. Effect of controlled-release fertilizer and irrigation method on seedling quality and outplanting performance of *Quercus variabilis* [J]. Forest Research, 2018, 31(5): 140-147.
- [15] Gallart M, Love J, Meason D F, et al. Field-scale variability in site conditions explain phenotypic plasticity in response to nitrogen source in *Pinus radiata* D. Don [J]. Plant and Soil, 2019, 443(1): 353-368.
- [16] 丁晓纲, 刘喻娟, 张晓珊, 等. 不同浓度指数施肥对美丽异木棉等 3 个树种幼苗生长的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 619-624.
- Ding X G, Liu Y J, Zhang X S, et al. Effects of different concentrations of exponential fertilization on the growth of *Chorisia speciosa* and other two tree species seedlings [J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(4): 619-624.
- [17] 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.
- Dong L, Zhang Y Q, Yang C T, et al. Root physio-ecological indices and yield of *Fagopyrum tataricum* with combining application of phosphorus and nitrogen fertilizer [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(5): 947-956.
- [18] 薛 启, 王康才, 隋 利, 等. 氮磷钾配施对藿香生长和产量的影响 [J]. 中药材, 2018, 41(4): 784-789.
- Xu Q, Wang K C, Shui L, et al. Effect of N, P and K combined application on the growth and yield of *Agastache rugosa* [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2018, 41(4): 784-789.
- [19] Coast O, Posch B C, Bramley H, et al. Acclimation of leaf photosynthesis and respiration to warming in field-grown wheat [J]. Plant, Cell & Environment, 2021, 44(7): 2331-2346.
- [20] Lambers H, Wright I J, Pereira C G, et al. Leaf manganese concentrations as a tool to assess belowground plant functioning in phosphorus-impooverished environments [J]. Plant and Soil, 2021, 461(1): 43-61.
- [21] 王 艺, 王秀花, 吴小林, 等. 缓释肥加载对浙江楠和闽楠容器苗生长和养分库构建的影响 [J]. 林业科学, 2013, 49(12): 60-66.
- Wang Y, Wang X H, Wu X L, et al. Effects of slow-release fertilizer loading on growth and construction of nutrients reserves of *Phoebe chekiangensis* and *Phoebe bournei* container seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(12): 60-66.
- [22] 欧建德. 福建闽楠人工幼林氮磷钾施肥效应与施肥模式 [J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(1): 92-97.
- Ou J D. N, P K formulas for fertilization with young *Phoebe bournei* plantations in Fujian Province [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2015, 32(1): 92-97.
- [23] 王 晓, 王樱琳, 韦小丽, 等. 不同指数施氮量对闽楠幼苗生长生理及养分积累的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 121-128.
- Wang X, Wang Y L, Wei X L, et al. Growth, physiology and nutrient accumulation of *Phoebe bournei* seedlings under different amount of exponential nitrogen fertilization [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(3): 121-128.
- [24] 施福军, 栗春青, 韦 艺, 等. 光氮互作对闽楠幼苗叶片光合生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2020, 40(4): 127-135.
- Shi F J, Su C Q, Wei Y, et al. Effect of light and nitrogen interaction on photosynthetic physiological characteristics in leaves of *Phoebe bournei* seedlings [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(4): 127-135.
- [25] 杨佳伟, 文仕知, 何功秀, 等. 施肥对闽楠幼树 PSII 叶绿素荧光快速光响应曲线的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(2): 43-49.
- Yang J W, Wen S Z, He G X, et al. Rapid light curves of PSII chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Phoebe bournei* saplings fertilized [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(2): 43-49.
- [26] 杨志坚, 冯金玲, 吴小慧, 等. 氮磷钾施肥对闽楠幼苗营养元素吸收与利用的影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 998-1011.
- Yang Z J, Feng J L, Wu X H, et al. Effects of N, P, and K fertilization on nutrient uptakes and utilizations of *Phoebe bournei* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 998-1011.
- [27] 贾林巧, 陈光水, 张礼宏, 等. 罗浮栲和米楮根形态功能性状对短期氮添加的可塑性响应 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4003-4011.
- Jia L Q, Chen G S, Zhang L H, et al. Plastic responses of fine root morphological traits of *Castanopsis fabri* and *Castanopsis carlesii* to short-term nitrogen addition [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4003-4011.
- [28] Yang Z J, Wu X H, Grossnickle S C, et al. Formula fertilization promotes *Phoebe bournei* robust seedling cultivation [J]. Forests, 2020, 11(7): 781.
- [29] 刘 颖, 贺静雯, 李松阳, 等. 干热河谷优势灌木种类的根系结构及碳氮磷元素含量特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(1): 31-39.
- Liu Y, He J W, Li S Y, et al. Root structure and element (C, N, P) content characteristics of dominant shrub species in a dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(1): 31-39.
- [30] 赵 琪, 张志军, 李 超, 等. 干旱条件下不同砧木对“蜜脆”苹果幼苗养分吸收利用的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2019, 47(9): 103-111.
- Zhao Q, Zhang Z J, Li C, et al. Effects of different rootstocks on nutrient absorption and utilization of “Honey Crisp” apple seedlings under drought stress [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Edi), 2019, 47(9): 103-111.
- [31] 代大川, 胡红玲, 陈 洪, 等. 遮阴对桢楠幼苗生长和光合生理特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48(4): 56-64, 74.
- Dai D C, Hu H L, Chen H, et al. Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Phoebe zhenan* seedlings [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Edi), 2020, 48(4): 56-64, 74.
- [32] Liu W X, Wang J R, Wang C Y, et al. Root growth, water and nitrogen use efficiencies in winter wheat under different irrigation and nitrogen regimes in North China Plain [J/OL].

- Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 01798. (2018-12-05). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01798>.
- [33] 冯云格, 陈菁菁, 孙小妹, 等. 施肥对日光温室西瓜茄根系生长及形态的影响 [J]. 核农学报, 2018, 32(1): 188-195.
Feng Y G, Chen J J, Sun X M, et al. Effects of organic fertilizer manure on growth and morphology of roots of pepino [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(1): 188-195.
- [34] 于星辰, 刘 倩, 李春杰, 等. 根际过程和高底物浓度促进黑土有机磷矿化 [J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 953-963.
Yu X C, Liu Q, Li C J, et al. Rhizospheric processes and high substrate concentration stimulating mineralization of soil organic P in black earth [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 953-963.
- [35] 陈祖静, 高晓翠, 周 玮, 等. 不同施肥量对辣木幼苗生长, 光合和养分特征的影响 [J]. 林业与环境科学, 2019, 35(2): 39-46.
Chen Z J, Gao X C, Zhou W, et al. Effect of fertilization on photosynthetic and nutrient characteristics of *Moringa oleifera* seedlings [J]. Forestry and Environmental Science, 2019, 35(2): 39-46.
- [36] 郑亚萍, 信彩云, 王才斌, 等. 磷肥对花生根系形态, 生理特性及产量的影响 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(8): 777-785.
Zheng Y P, Xin C Y, Wang C B, et al. Effects of phosphorus fertilizer on root morphology, physiological characteristics and yield in peanut (*Arachis hypogaea*) [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(8): 777-785.
- [37] 陈晓影, 刘 鹏, 程 乙, 等. 基于磷肥施用深度的夏玉米根层调控提高土壤氮素吸收利用 [J]. 作物学报, 2020, 46(2): 238-248.
Chen X Y, Liu P, Chen Y, et al. The root-layer regulation based on the depth of phosphate fertilizer application of summer maize improves soil nitrogen absorption and utilization [J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(2): 238-248.
- [38] 孙艳香, 冯 雪, 贾永红, 等. 植物“液泡膜” H^+ -PPase 的功能与应用 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2014, 29(4): 591-596.
Sun Y X, Feng X, Jia Y H, et al. Function and application of “tonoplast” H^+ -PPase from plant [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2014, 29(4): 591-596.
- [39] Hasanuzzaman M, Bhuyan M H M, Nahar K, et al. Potassium; a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses [J]. Agronomy, 2018, 8(3): 31.
- [40] 陆 潭, 陈华涛, 沈振国, 等. 植物钾通道与钾转运体研究进展 [J]. 华北农学报, 2019, 34(S1): 372-379.
Lu T, Chen H T, Shen Z G, et al. Advance of potassium channels and transporters in plant [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(S1): 372-379.
- [41] 王 炎, 李振宙, 黄小燕, 等. 不同钾肥处理对苦荞根系及产量的影响 [J]. 分子植物育种, 2019, 17(23): 7955-7961.
Wang Y, Li Z Z, Huang X Y, et al. Effect of different potassium fertilization treatments on the root and yield of *Tartary buckwheat* [J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(23): 7955-7961.
- [42] Li H, Chen Z, Zhou T, et al. Effects of high potassium and low temperature on the growth and magnesium nutrition of different tomato cultivars [J]. Hortscience, 2018, 53(5): 710-714.
- [43] 袁中山. 钾肥对文冠果苗木生长的影响 [J]. 中国林副特产, 2016, 141(2): 22-24.
Yuan Z S. Effect of potassium fertilizer on growth of *Xanthoxerces sorbi folia* seedlings [J]. Forest by-Product and Speciality in China, 2016, 141(2): 22-24.
- [44] 王 千, 张淑香, 依艳丽. 硝酸钾和硫酸钾对番茄幼苗生长、根系形态及钾素吸收和生理利用效率的影响 [J]. 核农学报, 2012, 26(2): 391-395, 402.
Wang Q, Zhang S X, Yi Y L. Effect of potassium nitrate and sulphate on growth, root morphological traits, potassium uptake and utilization efficiency of tomato seedlings [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(2): 391-395, 402.
- [45] 吴文景, 梅辉坚, 许静静, 等. 供磷水平及方式对杉木幼苗根系生长和磷利用效率的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2010-2018.
Wu W J, Mei H J, Xu J J, et al. Effects of phosphorus supply levels and methods on root growth and phosphorus use efficiency of Chinese fir seedling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 2010-2018.