

海南中部典型槟榔–象草复合系统中根系空间分布及地下竞争

周 华, 熊嘉乾, 吴金群, 郑晓敏, 黄 海, 陈海辉, 余雪标*

海南大学林学院, 海南海口 570228

摘 要: 农林复合系统中, 各组分根系的空间分布决定了其对系统内资源的竞争能力, 是复合系统设计的重要依据。本文采用带状分层挖掘法, 对槟榔–象草复合系统中二者的根系密度和空间分布进行研究, 并用 Levins 提出的生态位重叠公式计算槟榔与象草的地下竞争指数。结果显示, 槟榔根系的生物量密度 (1343.88 g/m^3) 是象草 (558.53 g/m^3) 的 2.41 倍。在水平方向上, 槟榔细根 (0~2 mm)、中根 (2~5 mm) 和粗根 (>5 mm) 的生物量密度、根长密度及竞争指数随根系距槟榔树干基部距离的增加呈下降趋势; 象草的根系生物量密度、根长密度及竞争指数则随距离的增加呈上升趋势, 且分布相对均匀。水平方向上, 在距槟榔树干 80 cm 内时槟榔的整体根系生物量密度显著大于象草, 120~140 cm 处时象草的根系生物量密度显著大于槟榔, 其余距离内二者之间的差异不显著; 20~40 cm 处槟榔的根长密度大于象草, 但差异不显著, 其余水平距离内象草根系的根长密度均显著大于槟榔; 除距离树干 20~60 cm 处, 其余区域内象草的竞争指数均大于槟榔。垂直方向上, 0~20 cm 土层内槟榔细根、中根、粗根以及象草根系的生物量密度、根长密度及竞争指数均显著大于 20~40 cm 土层; 在 2 个土层中, 槟榔根系的根长密度均小于象草, 而槟榔根系的生物量密度与竞争指数均大于象草。研究表明: 槟榔和象草的根系分布在空间上虽然有重叠, 但二者在一定区域内各有优势, 均不能对另一方形成绝对竞争优势, 从而二者均能够在竞争中健康生长。因此, 为了能够有效降低槟榔和象草之间的竞争, 同时充分发挥各自的优势, 将二者产量效益最大化, 应适当增加象草与槟榔树间的种植距离, 并适当加强间作区域内上层土壤的水肥投入。

关键词: 农林复合系统; 根系; 空间分布; 种间竞争

中图分类号: S344.2 文献标识码: A

Spatial Distribution and Underground Competition of Roots in Typical Areca Nut–elephant Grass Complex System in Central Hainan, China

ZHOU Hua, XIONG Jiaqian, WU Jinqun, ZHENG Xiaomin, HUANG Hai, CHEN Haihui, YU Xuebiao*

College of Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: In the agroforestry system, the spatial distribution of the root system of each component determines its competitive ability to the resources in the system, which is an important basis for the design of an agroforestry system. In this paper, the root density and spatial distribution of *Areca catechu* and elephant grass in the compound system were studied by the zonal layered mining method, and the underground competition index of *A. catechu* and elephant grass was calculated by the niche overlap formula proposed by Levins. The biomass density of betel nut root (1343.88 g/m^3) was 2.41 times that of elephant grass (558.53 g/m^3). In the horizontal direction, the biomass density, root length density and competition index of fine roots (0–2 mm), middle roots (2–5 mm) and thick roots (> 5mm) of *A. catechu* decreased with the increase of the distance between roots and the base of *A. catechu* trunk. The root biomass density, root length density and competition index of elephant grass increased with the increase of distance, and the distribution was relatively uniform. In the horizontal direction, the root biomass density of *A. catechu* in 80cm from the trunk of *A. catechu* was significantly higher than that of elephant grass, and the root biomass density of elephant grass in 120–140 cm was

收稿日期 2022-06-07; 修回日期 2022-09-08

基金项目 海南省重点研发计划项目 (No. ZDYF2020075)。

作者简介 周 华 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 热带森林培育与保护。*通信作者 (Corresponding author): 余雪标 (YU Xuebiao), E-mail: yuxuebiao@163.com。

significantly higher than that of *A. catechu*, but there was no significant difference between them in other distances. The root length density of *A. catechu* in 20–40 cm was higher than that of elephant grass, but the difference is not significant. The root length density of elephant grass in other horizontal distances was significantly higher than that of *A. catechu*. Except 20–60 cm from the trunk, the competition index of elephant grass in other areas was higher than that of betel nut. In the vertical direction, the biomass density, root length density and competition index of fine root, middle root, thick root and elephant grass root in 0–20 cm soil layer were significantly higher than those in 20–40 cm soil layer. In the two soil layers, the root length density of *A. catechu* root system was smaller than that of elephant grass, while the biomass density and competition index of *A. catechu* root system were larger than that of elephant grass. The results show that although the root distribution of *A. catechu* and elephant grass overlaps in space, they have their own advantages in a certain area, and neither can form an absolute competitive advantage over the other, thus both can grow healthily in the competition. Therefore, in order to effectively reduce the competition between betel nut and elephant grass, give full play to their respective advantages, and maximize their yield and benefit, we should appropriately increase the planting distance between elephant grass and betel nut trees, and appropriately strengthen the water and fertilizer input in the upper soil in the intercropping area.

Keywords: agroforestry system; root system; space distribution; interspecific competition

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.05.018

农林复合经营是一种高效的农业生产方式，可使单位面积耕地产量和经济效益最大化，在实际生产中占据重要的地位。国内外众多学者对农林复合系统地下环境的竞争研究表明，部分林木和作物之间的地下竞争要比地上更为激烈^[1-3]。根系作为植物的重要器官，承担着植物吸收水分和矿质元素的任务，直接关系到植物对水分及养分的吸收利用，而农林复合系统中林木和作物根系的空间分布决定了其对地下资源的竞争能力^[4]。有研究表明，在农林复合系统中，通过合理的树种选择及空间配置，可以使林木和作物根系在空间利用上达到互补，避开强烈的种间竞争，从而提高物种对于资源的利用率，提高复合系统的生产力^[5]。所以研究复合系统中林木与作物根系在土壤中的空间分布及其生长发育状况，对研究系统内各物种的关系具有十分重要的意义^[6-7]。

槟榔 (*Areca catechu* L.) 属多年生常绿乔木植物，原产于马来西亚，是我国热带地区重要的经济作物^[8]，主产区为海南省与台湾省，在广西和广东等地也有少量的栽培，其种植规模逐步由单一零散栽培发展为大规模生产^[9-10]。槟榔种植株行距一般为 2.5 m×2.5 m，林下空间充足，合理的间作设置可以充分利用槟榔林内的资源，改善槟榔的生长环境^[11]。有研究表明，槟榔林下栽培香草兰能够有效改善土壤养分状况和微生物环境条件，促进槟榔和香草兰的生长，提高槟榔林的整体经济效益^[12-13]。槟榔复合栽培香草兰后，可以提高土壤酶活性，进而促进槟榔根系生长^[14]。在槟榔复合栽培胡椒的模式中，胡椒根系总根长

相比于胡椒单一栽培时有所减小，但是根系表面积增大，相比之下，槟榔-胡椒复合栽培模式具有明显的产量优势^[15]。

象草 (*Pennisetum purpureum* Schum.)，又称紫狼尾草，原产于非洲，是适口性好、适应能力强、适应性强、管理粗放、易于栽培、病虫害少，得以在热带亚热带地区广泛推广应用，是我国南方重要牧草品种^[17-18]。

目前，关于槟榔-象草复合系统中，二者的根系分布和地下竞争状况尚不明确。本研究拟通过对槟榔-象草复合系统中的根系进行调查研究，比较二者根系的空间分布特征，探讨二者的种间地下竞争关系，从而为进一步发展和扩大槟榔-象草高效复合栽培模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于海南省屯昌县坡心镇洪涛坡农场 (19°17'10"N, 110°10'52"E, 海拔 105 m)，地处海南省中部偏北，五指山北麓，南渡江南岸，属于典型热带海洋季风区。春季常有干旱，夏季高温多雨，夏秋多台风，冬季凉爽多雨，年平均降水量 1960~2400 mm，以 5—11 月为主。年平均气温 23.5 °C，最高年平均气温 28.3 °C，最低年平均气温 20.3 °C。

所选的槟榔-象草复合经营地块，槟榔林龄 12 年，株行距 2.0 m×3.0 m，胸径(8.67±0.68)cm，树高(4.64±0.81)m，东西冠幅(1.83±0.35)m，南北

冠幅(1.78±0.38)m。象草为 2016 年扦插种植,种植时距离槟榔树行 30 cm,株行距 0.4 m×0.5 m,调查时高度(1.54±0.42)m。

1.2 方法

1.2.1 槟榔与象草根系的辨别 槟榔、象草根系的形态和颜色差别较大,根据二者根系的形态和颜色,能够很好地将象草和槟榔根系区分开来。颜色上,槟榔根系呈褐色且颜色偏暗,象草根系呈淡棕色;形态上,槟榔根系较粗且比较零散,而象草根系须根多且比较聚集。

1.2.2 根系分布特征测定 采用带状分层挖掘法,于 2021 年 7 月下旬对槟榔-象草复合模式的根系进行取样研究。在选定的样地中,对槟榔进行每木检尺,选择 4 株树高、冠幅和胸径相近且生长状况良好的槟榔树作为标准木,在垂直于槟榔树行方向,以槟榔树干基部外 20 cm 为起点,挖一条长 140 cm、宽 20 cm、深 40 cm 的样带,水平方向上每 20 cm 为一个取样点,即距树干基部 20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160 cm,分别记为 S₁、S₂、S₃、S₄、S₅、S₆、S₇,垂直方向上每 20 cm 为一层进行取样。最终每个样方取 0.2 m×0.2 m×0.2 m 共计 0.008 m³ 的土壤,将含有槟榔和象草根系的整个土壤样品进行称重,随后将根系从中挑出;从挑出根系后的剩余土壤中取 1 kg 左右的样品称重后装入密封袋中并编号,带回实验室冲洗并收集剩余根系,用于降低实验误差。返回实验室后,将根系样品用清水浸泡 1 h 以上,搅拌均匀,倾倒在孔径为 0.2 mm 的土筛中,将土筛悬浮在水盆中不断摇动冲洗,洗去土壤。冲洗后分别拣出槟榔和象草根系。

用游标卡尺测量槟榔根系直径,将其分为细根(0~2 mm)、中根(2~5 mm)和粗根(>5 mm),象草根系较细,不再进行分级。从已分类的槟榔根系中挑选出具有代表性的根系,测量其长度(精确至 0.1 cm)和重量(精确到 0.001 g),用于计算根系总长度。然后将根系放入烘箱中,烘干至恒重,测量其生物量(精确至 0.01 g)。

1.2.3 地下种间竞争强度的度量 Levins 生态位重叠表示 2 种物种利用同一资源而相互重叠的情况,可以从某种意义上反映出由于生态位重叠所造成的竞争^[19]。利用 Levins 生态位重叠公式计测槟榔和象草间的地下竞争指数,竞争指数越大代表竞争能力越强^[20],数学表达式为:

$$a_{hi} = \sum_{j=1}^r P_{hj} P_{ij} / \sum_{j=1}^r P_{hj}^2$$

$$a_{ih} = \sum_{j=1}^r P_{hj} P_{ij} / \sum_{j=1}^r P_{ij}^2$$

$$P_{hj} = n_{hj} / \sum_{j=1}^r n_{hj}^2$$

$$P_{ij} = n_{ij} / \sum_{j=1}^r n_{ij}^2$$

式中, P_{hj} 为种 h 在第 j 个土层中的根系生物量(n_{hj})占其利用的所有土层中根系生物量的比例; P_{ij} 为种 i 在第 j 个土层中的根系生物量(n_{ij})占其利用的所有土层中根系生物量的比例。 r 为资源维数, $a_{hi} \neq a_{ih}$,文中以样方为资源位,计算各位点的竞争指数。

1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 22.0 软件对数据进行统计整理和单因素方差分析(one-way ANOVA),检验种内根系生物量密度、根长密度水平分布差异的显著性,并采用 Tukey 进行多重比较。对槟榔和象草的竞争强度指数、根系生物量密度、根长密度垂直分布的差异显著性采用 Paired-samples T test 检验法进行检验;用 GraphPad Prism 8.0.2 软件制图。

2 结果与分析

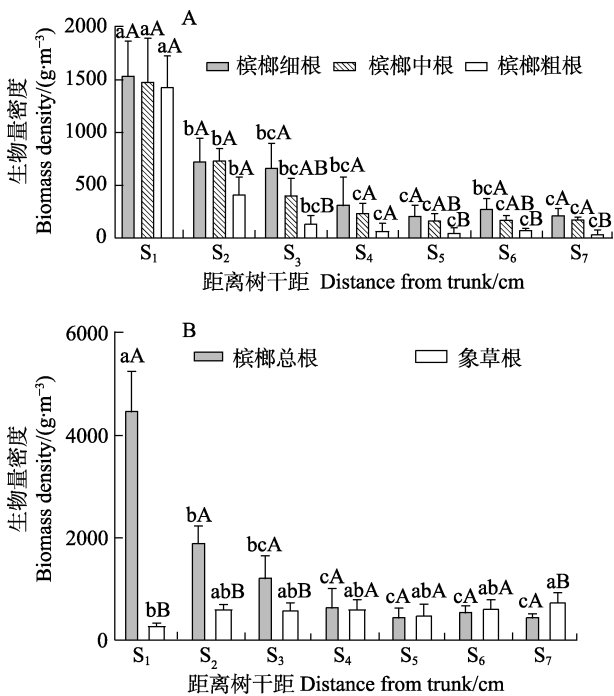
2.1 槟榔-象草复合系统根系生物量密度分布特征

取得的 56 个样品中,土壤总体积为 0.448 m³,其中槟榔细根、中根、粗根以及总根的生物量分别为 244.56、216.02、141.48、602.06 g;象草根系的生物量为 250.22 g。槟榔和象草根系的生物量密度分别为 1343.88、558.53 g/m³,槟榔根系生物量是象草的 2.41 倍。

2.1.1 生物量密度水平分布特征 水平方向上,槟榔细根、中根、粗根以及总根生物量密度整体上随着距树干基部距离的增加而下降,象草根系生物量密度分布则较为均匀(图 1)。由 S₁ 至 S₇ 槟榔细根生物量密度从(1541.15±327.71)g/m³ 下降到(216.23±64.43)g/m³,中根生物量密度从(1482.25±415.24)g/m³ 下降到(175.31±23.56)g/m³,粗根生物量密度从(1431.93±297.84)g/m³ 下降到(36.79±40.89)g/m³,总根生物量密度从(4455.32±

795.73)g/m³下降到(428.33±87.81)g/m³，差异均极显著 ($P<0.01$)；象草根系生物量密度整体呈增加趋势，从(281.49±57.70)g/m³增加到(742.45±186.35)g/m³，差异显著 ($P<0.05$)。

水平距离上，槟榔根系生物量的组成均表现为细根>中根>粗根，说明细根是决定槟榔根系分布的主要因素。随着距槟榔树干水平距离的增加，各距离上粗根生物量密度所占的比例逐步减小。各水平距离上槟榔和象草相比，槟榔根系的生物量密度在 S₁、S₂、S₃及 S₄上大于象草，且在 S₁、S₂和 S₃上差异显著 ($P<0.05$)；在 S₅、S₆及 S₇上槟榔根系的生物量密度均小于象草，且在 S₇上差异显著 ($P<0.05$)。综上，在水平方向上，不同区域内槟榔和象草根系生物量密度的分布各有优势：在距槟榔树干 80 cm 内时，槟榔根系生物量密度显著大于象草根系；120~140 cm 处象草根系生物量密度显著大于槟榔；其余水平距离内二者之间的差异不显著。



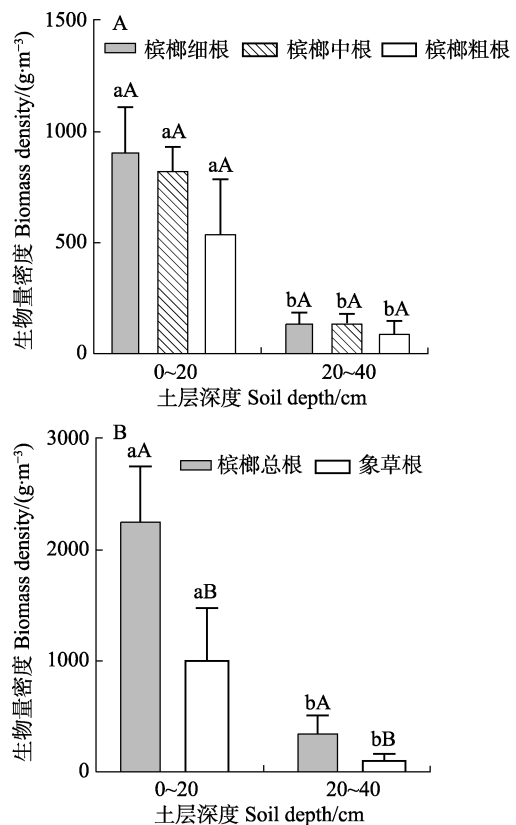
A：槟榔各径级根系间比较；B：槟榔总根和象草根比较；不同小写字母表示不同水平距离间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示相同距离上种内或种间差异显著 ($P<0.05$)。

A: Comparison of root systems in different diameter classes of *A. catechu*; B: Comparison of total roots between betel nut and elephant grass; Different lowercase letters indicate significant difference among different horizontal distances ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant intra-species or inter-species difference at the same distance ($P<0.05$).

图 1 槟榔-象草复合系统根系生物量密度水平分布特征
Fig. 1 Horizontal distribution characteristics of root biomass density of *A. catechu*-elephant grass complex system

2.1.2 生物量密度垂直分布特征 垂直方向上(图 2)，槟榔细根、中根、粗根、总根以及象草根系生物量密度在 0~20 cm 土层中均显著大于 20~40 cm 土层。由 0~20 cm 土层到 20~40 cm 土层：槟榔细根生物量密度由(907.25±205.01)g/m³降到(134.16±51.22)g/m³，中根生物量密度由(826.21±107.51)g/m³降到(138.18±42.61)g/m³，差异极显著 ($P<0.01$)；粗根生物量密度由(540.83±246.41)g/m³降到(90.79±57.20)g/m³，差异显著 ($P<0.05$)；槟榔总根生物量密度由(2274.28±480.44)g/m³降到(363.13±144.89)g/m³，差异极显著 ($P<0.01$)；象草根系生物量密度由(1009.76±467.67)g/m³降到(107.30±57.38)g/m³，差异显著 ($P<0.05$)。

槟榔各径级根系间比较，各土层根系生物量



A：槟榔各径级根系间比较；B：槟榔总根和象草根比较；不同小写字母表示不同水平距离间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示相同距离上种内或种间差异显著 ($P<0.05$)。

A: Comparison of root systems in different diameter classes of *A. catechu*; B: Comparison of total roots between betel nut and elephant grass; Different lowercase letters indicate significant difference among different horizontal distances ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant intra-species or inter-species difference at the same distance ($P<0.05$).

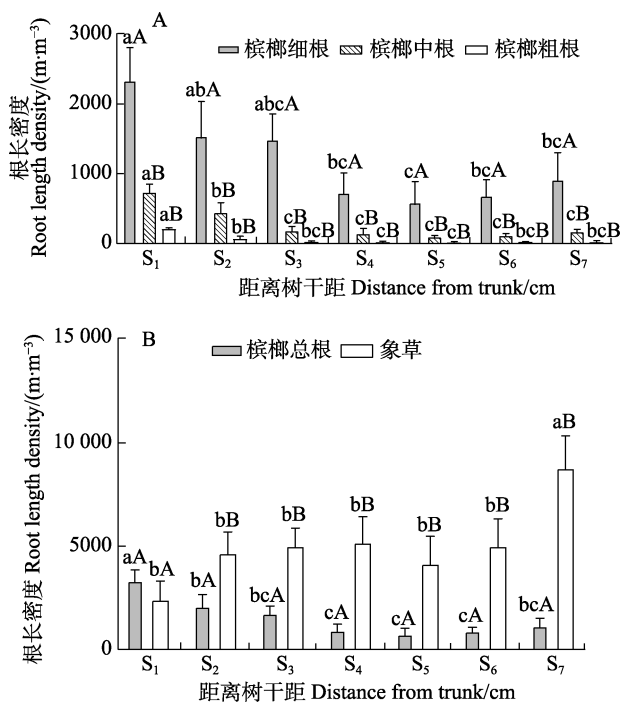
图 2 槟榔-象草复合系统根系生物量密度垂直分布特征
Fig. 2 Vertical distribution characteristics of root biomass density in *A. catechu*-elephant grass complex system

的组成均表现为细根>中根>粗根,但三者之间差异不显著 ($P>0.05$)。槟榔和象草相比,各土层槟榔根系的生物量密度均大于象草,在 0~20 cm 土层差异极显著 ($P<0.01$),在 20~40 cm 土层差异显著 ($P<0.05$)。综上,在垂直方向上,2 个土层中槟榔根系生物量密度均显著大于象草,且二者根系均主要集中于 0~20 cm 土层;2 个土层中的槟榔根系均以细根和中根为主,粗根所占比例最小。

2.2 槟榔-象草复合系统根系根长密度分布特征

2.2.1 根长密度水平分布特征

水平方向上(图 3),随着距槟榔树干基部距离的增加,槟榔细根、中根、粗根、总根、象草根长密度整体呈下降趋势,象草根长密度则呈增加趋势。从 S_1 到 S_7 ,槟榔细根根长密度从 $(2036.11\pm 506.28)\text{m}^3$ 下降到 $(882.78\pm 420.64)\text{m}^3$,中根根长密度从 $(725.63\pm 126.09)\text{m}^3$ 下降到 $(158.58\pm 44.79)\text{m}^3$,差异均极显著 ($P<0.01$);槟榔粗根根长密度从 $(206.01\pm 17.06)\text{m}^3$ 下降到 $(17.36\pm 27.37)\text{m}^3$,差异显著



A: 槟榔各径级根系间比较; B: 槟榔总根和象草根长密度比较; 不同小写字母表示不同水平距离间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示相同距离上种内或种间差异显著 ($P<0.05$)。

A: Comparison of root systems in different diameter classes of *A. catechu*; B: Comparison of total roots between betel nut and elephant grass; Different lowercase letters indicate significant difference among different horizontal distances ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant intra-species or inter-species difference at the same distance ($P<0.05$).

图 3 槟榔-象草复合系统根系根长密度水平分布特征
Fig. 3 Horizontal distribution characteristics of root length and density of *A. catechu*-elephant grass complex system

($P<0.05$); 槟榔总根根长密度从 $(3237.75\pm 621.02)\text{m}^3$ 下降到 $(1058.72\pm 462.25)\text{m}^3$, 差异极显著 ($P<0.01$); 象草根系根长密度从 $(2369.25\pm 945.49)\text{m}^3$ 增加到 $(8725.75\pm 1615.88)\text{m}^3$, 差异极显著 ($P<0.01$)。

各水平距离上槟榔各径级根系间比较,根长密度的组成均表现为细根>中根>粗根,且细根显著大于中根和粗根,中根和粗根之间差异不显著,说明细根是槟榔根长的主要组成部分。各水平距离上槟榔和象草相比,槟榔根长密度只在 S_1 处大于象草 ($P>0.05$),在 S_2 至 S_7 上均显著小于象草 ($P<0.05$)。综上,在水平方向上,象草根长密度的分布比槟榔更有优势,在距槟榔树干 20 cm 内槟榔总根长密度大于象草,20 cm 外象草根长密度显著大于槟榔。

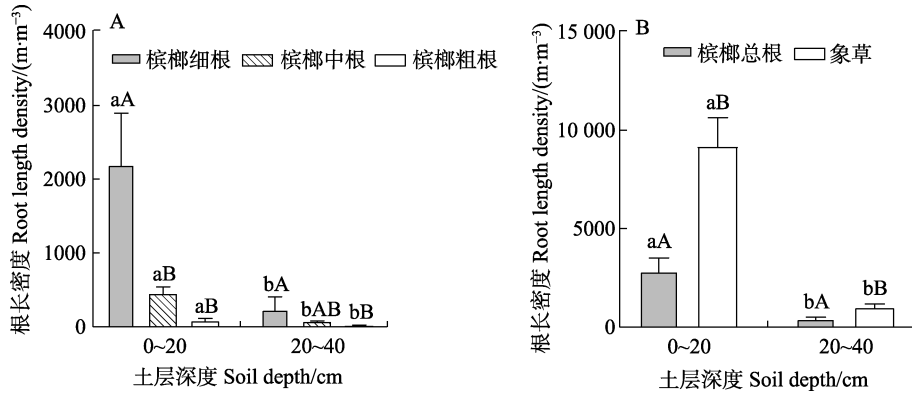
2.2.2 根长密度垂直分布特征

垂直方向上(图 4),槟榔细根、中根、粗根、总根以及象草根长密度在 0~20 cm 土层中均显著大于 20~40 cm 土层。由 0~20 cm 土层到 20~40 cm 土层,槟榔细根根长密度由 $(2204.8\pm 690.07)\text{m}^3$ 下降到 $(241.69\pm 165.00)\text{m}^3$,中根根长密度由 $(449.52\pm 91.03)\text{m}^3$ 下降到 $(66.78\pm 15.18)\text{m}^3$,差异均极显著 ($P<0.01$); 槟榔粗根根长密度由 $(79.64\pm 33.77)\text{m}^3$ 下降到 $(16.33\pm 7.00)\text{m}^3$,差异显著 ($P<0.05$); 槟榔总根长密度由 $(2733.96\pm 780.02)\text{m}^3$ 降到 $(324.81\pm 180.54)\text{m}^3$,差异极显著 ($P<0.01$); 象草根长密度由 $(9170.40\pm 1476.02)\text{m}^3$ 降到 $(970.57\pm 211.27)\text{m}^3$,差异极显著 ($P<0.01$)。

垂直方向上槟榔各径级根系间比较,各土层根长密度的组成均表现为细根>中根>粗根。各土层上槟榔和象草相比,槟榔根长密度均小于象草,且在 2 个土层上均有显著差异 ($P<0.05$),二者根系均主要集中于 0~20 cm 土层。

2.3 槟榔-象草复合系统地下竞争指数

水平方向上(图 5A),在 S_1 和 S_2 处槟榔根系的竞争指数 (5.09 ± 1.28 ; 1.25 ± 0.27) 均大于象草根系 (0.19 ± 0.08 ; 0.81 ± 0.14),且在 S_1 处差异极显著 ($P<0.01$)。其他距离处,象草根系的竞争指数均大于槟榔根系,且在 S_4 至 S_7 处差异显著 ($P<0.05$)。因此,随着距槟榔树干距离增加,槟榔根系的竞争能力逐渐降低,象草根系的竞争能力逐渐增强。二者相比,距离槟榔树干 60 cm 以内槟榔根系的竞争能力占据优势,60 cm 以外则

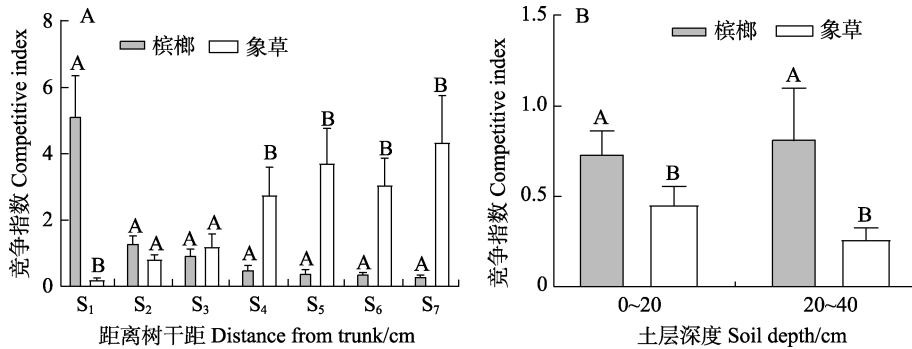


A: 槟榔各径级根系间比较; B: 槟榔总根和象草根比较; 不同小写字母表示不同水平距离间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示相同距离上种内或种间差异显著 ($P<0.05$)。

A: Comparison of root systems in different diameter classes of *A. catechu*; B: Comparison of total roots between betel nut and elephant grass; Different lowercase letters indicate significant difference among different horizontal distances ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate significant intra-species or inter-species difference at the same distance ($P<0.05$).

图 4 槟榔-象草复合系统根系根长密度垂直分布特征

Fig. 4 Vertical distribution characteristics of root length density of *A. catechu*-elephant grass complex system



不同大写字母表示种内差异显著 ($P<0.05$)。

Different capital letters indicate significant intraspecific difference ($P<0.05$).

图 5 槟榔-象草复合系统槟榔与象草竞争指数

Fig. 5 Competition index of betel nut and elephant grass in *A. catechu*-elephant grass complex system

是象草根系的竞争能力更强。垂直方向上(图 5B), 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层槟榔的竞争指数 (0.74 ± 0.12 ; 0.82 ± 0.28) 均大于象草 (0.45 ± 0.11 ; 0.26 ± 0.07), 且差异显著 ($P<0.05$)。综上, 在 2 个土层中, 槟榔根系的竞争能力均显著大于象草根系。

3 讨论

3.1 槟榔与象草根系空间分布特征

本研究发现, 在槟榔-象草复合系统土层深度 0~20 cm、距树干基部 20~160 cm 的地下空间中, 水平方向上槟榔各径级根系的生物量密度随着距树干距离的增加而下降, 象草根系的生物量密度和根长密度分布则比较均匀, 主要集中在距槟榔树干 40~160 cm 内, 且整体呈增加趋势。在距槟榔树干 20~40 cm 处是槟榔根系最集中的区域, 同

时也是象草根系分布最少的区域, 该区域内槟榔根系对于象草的生长影响较大, 象草根系生物量密度的增加能够提高其对土壤水分和养分的竞争吸收优势, 同时也是对槟榔根系竞争力减弱的积极回应^[21-22]。云雷^[22]、李洁^[23]通过对晋西黄土区苹果农作物间作系统的研究发现, 垂直方向上苹果细根在 20~40 cm 土层深度分布最多。而本研究发现, 同样作为经济林树种间作模式, 槟榔和象草的根系在垂直方向上具有明显的分层现象, 象草根系 90.4% 分布于 0~20 cm 土层, 仅有 9.6% 分布于 20~40 cm 土层, 0~20 cm 土层中的生物量密度是 20~40 cm 土层的 9.4 倍; 槟榔各径级根系在 0~20 cm 分布量同样显著高于 20~40 cm 土层。由此可知, 垂直方向上槟榔和象草的根系分布并未出现错开情况用于避免竞争, 这说明二者根系在 2 个土层中能够实现较好的共存, 正常生长。

3.2 槟榔-象草复合系统地下竞争

在植物生活史、群落结构和动态以及植物形态变化等方面,竞争是主要的动力之一^[24]。丁怡飞等^[25]利用 Levins 生态位重叠公式计算油茶和鼠茅草的地下竞争指数,其实质是分析油茶和鼠茅草对地下空间资源的共同占有率,表示物种间的生态位重叠。在地下生态系统中,植物吸收土壤资源的能力以及物种间的竞争强度由根系的密度和空间分布决定。因此,槟榔-象草复合系统中二者根系的分布格局和数量的多寡就决定了槟榔和象草的种间竞争能力。

本研究表明,在距槟榔树干 20~60 cm 水平范围和 0~40 cm 的土层内,槟榔根系的竞争指数高于象草根系;在距离槟榔树干 60~160 cm 水平范围内,象草根系的竞争指数显著高于槟榔根系,平均高 0.73,此结果与骆宗诗等^[26]研究花椒林中椒草种间地下竞争相似。这可能是因为,在槟榔-象草复合系统中,槟榔根系大部分集中在距树干 20~60 cm 范围内,此区域内绝大部分空间被槟榔根系占据,象草根系可利用空间较少,因而槟榔竞争能力更强;随着水平距离的增加,槟榔根系减少,象草根系得以更好地扩展,竞争力增强。因此槟榔与象草复合种植时,象草应该距离槟榔树 60 cm 以外开始种植最为合适。

丁怡飞等^[25]对油茶-鼠茅草间作的种间地下竞争研究表明,在二者间作系统中,油茶平均竞争指数大于鼠茅草,其中距油茶树干 60 cm 内油茶的竞争能力要大于鼠茅草,60~90 cm 内鼠茅草竞争能力更强,此结果与本研究一致。但在垂直方向上,由于鼠茅草 87.5% 的根系分布于 0~20 cm 土层,为了避开竞争,油茶根系出现了下移现象,更多地集中在 20~40 cm 土层,这与本研究有所不同。这可能是因为油茶为深根性树种,花椒为浅根性植物,而槟榔与花椒相同,也属于浅根性植物^[27-29]。在空间配置上,槟榔-象草复合模式中二者根系垂直方向未出现避让现象,会产生更直接的竞争,另一方面也可以说明二者根系分布均未对对方造成绝对的影响,都能够保证自身正常生长。

槟榔和象草的根系分布在空间上虽然有重叠,但二者在不同区域内各有优势,均不能对另一方形成绝对竞争优势,从而二者都能够在竞争中健康生长。因此,为了有效降低槟榔和象草之间的竞争,同时充分发挥各自优势,将二者产量

效益最大化,应当适当增加象草与槟榔树间的种植距离,并适当加强间作区域内 0~20 cm 土壤的水肥投入。

参考文献

- [1] ONG C K, CORLETT J E, SINGH R P, BLACK C R. Above and below ground interactions in agroforestry systems[J]. *Forest Ecology and Management*, 1991, 45(1/4): 45-57.
- [2] 毛榕, 曾德慧. 农林复合系统植物竞争研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 379-386.
MAO R, ZENG D H. Research advances in plant competition in agroforestry systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2): 379-386. (in Chinese)
- [3] GAO L B, XU H S, BI H X, XI W, BAO B, WAN X G, BI C, CHANG Y. Intercropping competition between apple trees and crops in agroforestry systems on the Loess Plateau of China[J]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e70739.
- [4] KUMAR S S, KUMAR B M, WAHID P A, KAMALAM N V, FISHER R F. Root competition for phosphorus between coconut, multipurpose trees and Kacholam (*Kaempferia galanga* L.) in Kerala, India[J]. *Agroforestry Systems*, 1999, 46(2): 131-146.
- [5] ALLEN S C, JOSE S, NAIR P K R, BRECKE B J, NAIR V D, GRAETZ D A, RAMSEY C L. Nitrogen mineralization in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the Southern United States[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(1): 28-37.
- [6] 史建伟, 王孟本, 于立忠, 张育平, 张国明. 土壤有效氮及其相关因素对植物细根的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1634-1639.
SHI J W, WANG M B, YU L Z, ZHANG Y P, ZHANG G M. Effects of soil available nitrogen and related factors on plant fine root[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(10): 1634-1639. (in Chinese)
- [7] 王来. 渭北农林复合系统生产力及其土根响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
WANG L. The productivity of agroforestry systems in northern Wei River and responses of the soil and roots[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016. (in Chinese)
- [8] 陈光能. 海南槟榔高产栽培技术[J]. *中国果菜*, 2017, 37(3): 69-71.
CHEN G N. High yield cultivation techniques of Hainan *Areca*[J]. *China Fruit and Vegetable*, 2017, 37(3): 69-71. (in Chinese)
- [9] 符之学. 万宁市槟榔种植业现状及健康持续发展措施[J]. *现代农业科技*, 2018(9): 123-124.

- FU Z X. Present situation and healthy and sustainable development measures of betel nut planting in Wanning City[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(9): 123-124. (in Chinese)
- [10] 孙慧洁, 龚敏. 海南槟榔种植、加工产业发展现状及对策研究[J]. *热带农业科学*, 2019, 39(2): 91-94.
- SUN H J, GONG M. Current development status and countermeasures of arecanut planting and processing industry in Hainan[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2019, 39(2): 91-94. (in Chinese)
- [11] 王华, 王辉, 赵青云, 庄辉发, 宋应辉, 朱自慧. 槟榔不同株行距间作香草兰对土壤养分和微生物的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 988-994.
- WAN H, WANG H, ZHAO Q Y, ZHUANG H F, SONG Y H, ZHU Z H. Influence of different planting spacing of *Areca nut* intercropping with *Vanilla* on soil microbes and nutrients[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 988-994. (in Chinese)
- [12] SUJATHA S, BHAT R. Response of *Vanilla (Vanilla planifolia A.)* intercropped in arecanut to irrigation and nutrition in humid tropics of India[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(7): 988-994.
- [13] 庄辉发, 梁伦涛, 杨交, 赵青云, 王辉, 朱自慧, 邢治彰. 槟榔/香草兰间作土壤碱解氮和微生物数量的分布特征[J]. *中国热带农业*, 2021(6): 50-54, 37.
- ZHUANG H F, LIANG L T, YANG J, ZHAO Q Y, WANG H, ZHU Z H, XING Y Z. Distribution characteristics of available nitrogen and microorganism quantity in *Areca/Vanilla* intercropping soil[J]. *Tropical Agriculture in China*, 2021(6): 50-54, 37. (in Chinese)
- [14] 鱼欢, 唐瑾暄, 李倩松, 秦晓威, 宗迎, 郝朝运, 白亭玉. 间作香露兜提高槟榔根系生长和土壤酶活性[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(11): 2219-2225.
- YU H, TANG J X, LI Q S, QIN X W, ZONG Y, HAO C Y, BAI T Y. Intercropping with *Pandanus amaryllifolius* roxb. improved root growth of *Areca catechu* L. and soil enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(11): 2219-2225. (in Chinese)
- [15] 罗丽霞, 李志刚, 曹俊伟, 赵正杰, 祖超, 王灿, 鱼欢, 郑维全, 杨建峰. 间作槟榔对胡椒根系空间分布的影响研究[J]. *中国热带农业*, 2020(6): 88-93.
- LUO L X, LI Z G, CAO J W, ZHAO Z J, ZU C, WANG C, YU H, ZHENG W Q, YANG J F. Influence of *Areca catechu* intercropping on the spatial distribution of black pepper root system[J]. *China Tropical Agriculture*, 2020(6): 88-93. (in Chinese)
- [16] SOMERVILLE C, YOUNGS H, TAYLOR C, DAVIS S C, LONG S P. Feedstocks for lignocellulosic biofuels[J]. *Science*, 2010, 329(5993): 790-792.
- [17] 钟天秀, 李有涵, 李菲, 彭小群, 柯善文, 陈曙, 解新明. 华南象草 *Pp4CL* 基因的克隆及其转基因烟草木质素含量分析[J]. *西北植物学报*, 2015, 35(12): 2355-2364.
- ZHONG T X, LI Y H, LI F, PENG X Q, KE S W, CHEN S, XIE X M. Isolation of 4-coumarate CoA ligase gene from *Pennisetum purpureum* cv. Huanan and lignin content analysis of transgenic tobacco plants[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(12): 2355-2364. (in Chinese)
- [18] 赖大伟, 赖志强, 易显凤, 姚娜, 蔡小艳, 邓素媛, 史静, 丘金花, 黄一龙. 优质高产牧草紫色象草的选育[J]. *草学*, 2022(2): 9-19.
- LAI D W, LAI Z Q, YI X F, YAO N, CAI X Y, DENG S Y, SHI J, QIU J H, HUANG Y L. Breeding on fine and high yield of new cultivar: *Pennisetum purpureum* 'zise'[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2022(2): 9-19. (in Chinese)
- [19] LEVINS R. Evolution in changing environments: some theoretical explorations[M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1968.
- [20] 周丹, 杨国亭. 蒙古栎林优势种生态位重叠的研究[J]. *林业科技*, 1999, 24(1): 20-22.
- ZHOU D, YANG G T. Study on niche overlap of dominant species in *Quercus mongolica* forest[J]. *Forestry Science & Technology*, 1999, 24(1): 20-22. (in Chinese)
- [21] EASTHAM J, ROSE C W. Tree pasture interactions at a range of tree densities in an agroforestry experiment. I. Rooting patterns[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1990, 41(4): 683.
- [22] 云雷. 晋西黄土区果农间作系统种间关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- YUN L. Research on interspecific relationship in economic tree and crop intercropping system on loess region of Western Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [23] 李洁. 晋西黄土区果农复合系统苹果树耗水特征及影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- LI J. Study on characteristics of water utilization of apple tree and its influential factors in agroforestry system in the loess region of West Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008. (in Chinese)
- [24] 李博, 陈家宽, A. R. 沃金森. 植物竞争研究进展[J]. *植物学通报*, 1998, 33(4): 18-29.
- LI B, CHEN J K, WATKINSON A R. A literature review on plant competition[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 33(4): 18-29. (in Chinese)
- [25] 丁怡飞, 曹永庆, 姚小华, 吴鹏飞, 龚洪恩, 傅松玲, 张平

- 安. 油茶-鼠茅草复合系统细根空间分布及地下竞争[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 981-986.
- DING Y F, CAO Y Q, YAO X H, WU P F, GONG H E, FU S L, ZHANG P A. Spatial distribution of fine roots and underground competition in *Camellia oleifera*-*Vulpia myuros* intercropping system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 981-986. (in Chinese)
- [26] 骆宗诗, 向成华, 章路, 谢大军, 罗晓华. 花椒林细根空间分布特征及椒草种间地下竞争[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 86-91.
- LUO Z S, XIANG C H, ZHANG L, XIE D J, LUO X H. Spatial distribution of fine roots and underground competition between Chinese prickly ash (*Zanthoxylum bungeum*) and weeds in Chinese prickly ash plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(2): 86-91. (in Chinese)
- [27] 周政贤. 油茶生态习性、根系发育及垦复效果的调查研究[J]. 林业科学, 1963(4): 336-346.
- ZHOU Z X. Investigation on ecological habits, root development and reclamation effect of *Camellia oleifera*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1963(4): 336-346. (in Chinese)
- [28] 刘兴宇, 曾德慧. 农林复合系统种间关系研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1464-1470.
- LIU X Y, ZENG D H. Research advances in interspecific interactions in agroforestry system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9): 1464-1470. (in Chinese)
- [29] 胡照辉, 王健, 杨毅敏. 槟榔根系及其养分特征分析[J]. 热带林业, 2008, 36(2): 7-9.
- HU Z H, WANG J, YANG Y M. Analysis of *Areca catechu* root system and its nutrient characteristics[J]. Tropical Forestry, 2008, 36(2): 7-9. (in Chinese)