

油茶-鼠茅草复合系统细根空间分布及地下竞争

丁怡飞^{1,2} 曹永庆^{1*} 姚小华¹ 吴鹏飞¹ 龚洪恩¹ 傅松玲² 张平安³

(¹中国林科院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400; ²安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036; ³青田县林业局, 浙江青田 323900)

摘要 采用田间分层挖掘法和图像扫描分析法, 研究油茶-鼠茅草复合系统中油茶与鼠茅草细根生物量及形态空间分布, 并用 Levins 提出的生态位重叠公式计算了油茶与鼠茅草种间的地下竞争指数。结果表明: 油茶和鼠茅草细根 (≤ 1 mm) 的平均生物量分别是 0.52 和 0.38 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$, 油茶细根生物量是鼠茅草的 1.37 倍; 在水平方向上, 油茶细根生物量整体趋势随着距树干距离增加而下降, 而油茶细根的根长密度与比根长随着距树干距离的增加而升高; 鼠茅草的细根生物量整体趋势随着距树干距离增加先升高后下降, 根长密度及比根长都分布比较均匀; 不同水平距离鼠茅草的根长密度均大于油茶, 除距树干 90 cm 外, 油茶细根生物量与竞争指数均大于鼠茅草; 在垂直方向上, 油茶细根生物量是随着土层加深先升高再下降, 根长密度随着土层的加深而升高, 比根长分布均匀; 鼠茅草的细根生物量及根长密度均随着土层的加深而下降, 而比根长则随着土层深度增加而上升; 除 0~10 cm 土层外, 油茶细根生物量与竞争指数均大于鼠茅草。在油茶-鼠茅草复合系统中, 油茶根系遭遇鼠茅草根系的竞争, 作为生存策略, 为了避开这种竞争, 最大限度地获取土壤中的资源, 其根系产生了各种可塑性反应。

关键词 油茶; 鼠茅草; 细根; 种间竞争

Spatial distribution of fine roots and underground competition in *Camellia oleifera*-*Vulpia myuros* intercropping system. DING Yi-fei^{1,2}, CAO Yong-qing^{1*}, YAO Xiao-hua¹, WU Peng-fei¹, GONG Hong-en¹, FU Song-ling², ZHANG Ping-an³ (¹Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China; ²College of Forestry and Gardening, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; ³Qingtian County Forestry Bureau, Qingtian 323900, Zhejiang, China).

Abstract: Using methods of field stratified excavation and image scanning, the spatial distribution of biomass and morphology of fine root (≤ 1 mm) of *Camellia oleifera* and *Vulpia myuros* in *Camellia oleifera*-*Vulpia myuros* intercropping system was examined. The underground competition between those two species was quantified by the niche overlap formula proposed by Levins. The results showed that the fine root biomass of *C. oleifera* was 1.37 times as high as that of *V. myuros*, with average fine root biomass of *C. oleifera* and *V. myuros* being 0.52 and 0.38 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$, respectively. In the horizontal direction, fine root biomass of *C. oleifera* decreased with increasing distance from trees, while the root length density and specific root length of *C. oleifera* increased with the increases of distance from trees. Fine root biomass of *V. myuros* decreased with the increases of distance from trees, and the root length density and specific root length showed an even distribution. The root length density of *V. myuros* was greater than that of *C. oleifera* at different distances from trees, whereas fine root biomass and competition index of *C. oleifera* were greater than that of *V. myuros* except for the distance 90 cm. In the vertical direction, fine root biomass of *C. oleifera* first increased and then decreased with the deepening of soil layer, and the root length density increased with the soil layer, while the specific root length was evenly distributed. The fine root biomass and root length density of *V. myuros* decreased with the deepening of the soil

浙江省省院合作林业科技项目“浙江省油茶林地高效复合经营技术研究与示范”(2014SY03)资助。

收稿日期: 2017-07-27 接受日期: 2018-01-16

* 通讯作者 E-mail: caoyq1981@163.com

layer, while the specific root length increased with the soil layer. Except for the 0–10 cm layer, the fine root biomass and competition index of *C. oleifera* was greater than that of *V. myuros*. Our results indicated that fine roots of *C. oleifera* had higher plasticity to avoid competition and maximize uptake of soil resources in the intercropping system.

Key words: *Camellia oleifera*; *Vulpia myuros*; fine root; interspecific competition.

20 世纪 90 年代以后,国内外学者在研究农林复合经营系统的界面作用机理时发现,有些树木和作物之间的地下竞争要比地上竞争更为激烈(Anderson *et al.*, 1993; Huxley *et al.*, 1994),根系的分布特征对整个系统具有重要的意义。在复合系统中,影响植物对土壤水分及养分吸收利用的根系、特别是细根分布是制约系统生产力的关键因素。有研究表明,通过树种选择及合理的时空搭配,可以使林木和作物的根系在空间上以互补的方式利用资源,避免种间强烈竞争,提高复合系统的资源利用率(Droppelmann *et al.*, 2000; Allen *et al.*, 2005),进而提高复合系统的生产力。

油茶(*Camellia oleifera* Abel.)是我国南方重要的木本油料树种,亦是世界四大木本油料树种之一,适生于低山丘陵地带(何方等, 2004; 庄瑞林等, 2008)。近年来,林地地力退化、部分地区水土流失严重等一系列问题逐步显现,从而导致生物多样性丧失,果实产量下降,品质变劣(Mason, 1969; Greenham, 1955)。采取油茶林地复合经营方式,以耕代抚,是当前油茶产业基地经常采用的林地管理方式(庄瑞林等, 2008)。鼠茅草(*Vulpia myuros* C. Gmelin)是越年生禾草,株高约 50 cm,每年 9 月萌发,翌年 6 月死亡,留下的种子可于当年 9 月萌发。鼠茅草具有须根系的特点,可以提高易受侵蚀土壤的稳定性(栾好安等, 2016),防止水土流失,并且一次播种,多年受益,降低了劳动量(杨洪晓等, 2015)。鼠茅草腐解不仅抑制其他杂草生长(Meyer *et al.*, 1992),还能补充土壤中的有机物,改良土壤的物理化学性质(Cleland *et al.*, 2006; Krahulec *et al.*, 2007)。此外,鼠茅草的生长需肥期与油茶错开,满足作为冬季绿肥的生长期要求,且栽培鼠茅可省去刈割这一工序(刘广勤等, 2010)。由于根系研究的复杂性及繁琐性,至目前油茶-鼠茅草复合模式的细根分布特征、种间竞争关系等还未见研究报道,该模式是否适合该区发展有必要进行研究。对油茶-鼠茅草复合模式的细根空间分布特征和地下种间竞争情况研究,能为该区油茶-鼠茅草复合系统构建中间作物的选择、结构优化配置等提供理论指导,使油

茶-鼠茅草复合系统生态和经济效益达到最佳水平。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验林位于浙江省丽水市青田县山口镇油茶种植基地(28°6'8" N, 120°17'26" E, 海拔 487 m),地处浙江省南部山区,瓯江中下游,属中亚热带季风性气候,温暖湿润,四季分明,雨量充沛,热量资源丰富,年平均气温 18.6 °C,全年无霜期平均 294 d,全县年平均日照时数为 1663.9 h, ≥10 °C 积温天数为 261 d 左右。历年平均降水量 1697.7 mm,主要布在 4—6 月,试验区土壤以花岗岩风化残坡积物母质白岩砂土为主,土层厚度 35~40 cm, pH 值 4.12~4.21;其中,有机质含量为 11.06~14.06 g·kg⁻¹,全 N 含量 0.45~0.61 g·kg⁻¹,全 P 含量 0.11~0.17 g·kg⁻¹,全 K 含量 10.43~12.3 g·kg⁻¹,速效 N 含量 38.03~49.83 mg·kg⁻¹,速效 P 含量 1.32~5.01 mg·kg⁻¹,速效 K 含量 45.8~70.3 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料与设计

油茶林分年龄 5~6 a,株行距 2 m×3 m,2017 年 3 月 5 日测得油茶平均树高(1.42±0.21) m,地径(4.57±1.01) cm,东西冠幅(1.60±0.29) m,南北冠幅(1.68±0.29) m。于 2016 年 10 月中旬林下撒播鼠茅草,平均播量 22.5 kg·hm⁻²,在调查期间 2017 年 5 月,鼠茅草开始倒伏,高度为 20 cm,覆盖度为 95.8%。据调查在鼠茅草枯死期,地上部分干物质质量最高达 2597.7 kg·hm⁻²。

1.3 研究方法

1.3.1 油茶与鼠茅草根系的辨别 本研究中的油茶和鼠茅草细根能很好地区分。在颜色上,油茶根和细根呈浅黄色,鼠茅草细根呈深褐色或略带褐色;在质地上,油茶根和细根硬而脆,鼠茅草根柔而软;在形态上,油茶根与细根不会分枝多、较短,鼠茅草细根比较浓密容易缠绕在一起,分枝较少、较长。

1.3.2 根系分布特征测定 2017 年 5 月初对油茶-鼠茅草复合模式的根系采用分层挖掘法进行取样调查。在间作鼠茅草的样地中,根据每木检尺数据,选择与平均株高、地径和冠幅都比较接近的 3 棵油茶

树作为标准木,在垂直于树行的方向上,距每棵油茶树干于距离 30、60 和 90 cm 处,用环刀在垂直方向 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 分层取样,根钻体积为 5 cm×5.5 cm×7 cm,每个重复 3 次。将根钻采集的带根土团装入自封袋,编号后带回实验室。取回后将带根土团浸泡至少 1 h,并对样品进行剧烈搅拌,倾倒在 0.2 mm 的圆形筛,将筛悬浮在一个大的水盆中,连续振摇洗涤掉根部土壤。冲洗分别拣出油茶和鼠茅草根系,根据马秀玲等(1997)将直径≤1 mm 的根看作吸收根,用 ESPON 扫描仪获取根系形态结构图像,采用 WinRHIZO 根系分析系统分析细根的长度、体积、表面积等指标,然后将根系放入烘箱,80℃烘至恒重,测量其生物量(精确到 0.0001 g)。

1.3.3 地下种间竞争强度的度量 本文采用Levins生态位重叠公式(余世孝,1995)来计测油茶和鼠茅草间的地下竞争指数,数学表达式为:

$$a_{hi} = \frac{\sum_{j=1}^r p_{hj}p_{ij}}{\sum_{j=1}^r p_{hj}^2}$$
$$a_{ih} = \frac{\sum_{j=1}^r p_{hj}p_{ij}}{\sum_{j=1}^r p_{ij}^2}$$

式中: p_{hj} 、 p_{ij} 分别是种 h 、种 i 对资源状态 j 的利用率,文中为细根生物量; 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。

1.4 数据处理

运用 Excel 对所获取的数据分别进行整理,统计分析使用 SPSS 22.0。用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验种内细根生物量、根长密度、比根长差异的显著性,并对差异显著者用 LSD 进行平均值比较;种间细根生物量、根长密度、比根长以及种间竞争指数的差异显著性用 Paired-samples T test 检验。

2 结果与分析

2.1 油茶与鼠茅草复合系统细根生物量分布特征

在供分析的 36 个样本、土壤总体积 6930 cm³ 内,油茶细根生物量总干重 3.6 g,单位体积干重 0.52 mg·cm⁻³;鼠茅草细根生物量总干重 2.65 g,单位体积干重 0.38 mg·cm⁻³;油茶细根生物量是鼠茅草细根生物量的 1.37 倍。

水平方向上(图 1),鼠茅草的细根生物量分布较均匀,平均为 0.35~0.47 mg·cm⁻³;油茶细根生物量整体趋势随着距树干的距离增加而下降,距树干 30 cm 的 1.19 mg·cm⁻³ 降到 90 cm 的 0.04 mg·cm⁻³,差异极显著($P<0.05$)。各距离油茶和鼠茅草相比,距树干 30 cm 油茶细根生物量大于鼠茅草,差异极显著($P<0.05$)。距树干 60 cm 油茶细根生物量略大于鼠茅草($P>0.05$),距树干 90 cm 时,油茶细根生物量小于鼠茅草的细根生物量,差异极显著($P<0.05$)。

垂直方向上(图 1),油茶细根生物量随着土层加深先升高后下降,由 0~10 cm 土层 0.26 mg·cm⁻³ 升到 10~20 cm 土层 0.94 mg·cm⁻³,差异极显著($P<0.05$),10 cm 以下各层,随着土层加深而减少,无显著性差异($P>0.05$);鼠茅草细根生物量随土层加深而减少,由 0~10 cm 土层的 1.16 mg·cm⁻³ 降到 30~40 cm 土层的 0.07 mg·cm⁻³,差异极显著($P<0.05$),10 cm 以下各层,无显著性差异($P>0.05$)。各土层油茶和鼠茅草相比,0~10 cm 土层鼠茅草细根生物量多于油茶,差异极显著($P<0.05$)。10 cm 土层以下,油茶细根生物量均多于鼠茅草,差异极显著($P<0.05$)。

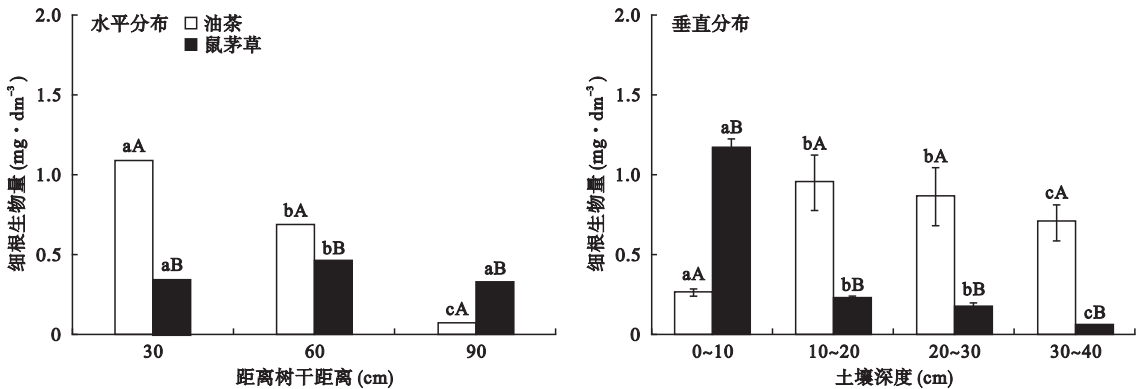


图 1 油茶-鼠茅草复合系统细根生物量空间分布特征

Fig.1 Spatial distribution of fine root biomass in *Camellia oleifera*-*Vulpia myuros* intercropping system

小写不同字母表示种内差异显著 ($P<0.05$), 大写不同字母表示种间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 油茶与鼠茅草复合系统细根根长密度与比根长分布特征

油茶-鼠茅草复合系统油茶与鼠茅草细根根长密度与比根长分布特征(图 2、图 3),水平方向上,油茶根长密度随着距树干距离增加而升高,最大值在 90 cm 处,最小值在 30 cm 处;鼠茅草根长密度则随着距树干距离增加先升高后下降,不同水平距离鼠茅草的根长密度均大于油茶,差异极显著 ($P<0.05$)。从生物量密度(图 1)和根长密度(图 2)二者分析,油茶根系主要分布 0~60 cm,分别占生物量密度总量和根长密度总量的 99.2%和 62.0%。鼠茅草的比根长(图 3)分布比较均匀,平均为 10.19~12.41 $\text{cm} \cdot \text{mg}^{-1}$,在距树干距离 30 与 60 cm,鼠茅草比根长均大于油茶,差异极显著 ($P<0.05$),说明所测区段根系均具有较强的吸收功能;油茶的比根长随着距树干距离的增加而升高,在 90 cm 处达到最大且显著大于鼠茅草 ($P<0.05$),说明油茶根系在此处吸水效率最好。

垂直方向上,油茶根长密度基本随着土层的加深先升高后下降,鼠茅草的根长密度随着土层的加深而减小,除了 30~40 cm 土层,鼠茅草细根根长密度均大于油茶,尤其在 0~10 cm 土层差异极显著 ($P<0.05$)。从生物量密度(图 1)和根长密度(图 2)二者分析,鼠茅草根系主要分布 0~20 cm,分别占生物量密度总量和根长密度总量的 87.5%和 80.7%。油茶细根比根长分布比较均匀(图 3),平均 2.20~3.40 $\text{cm} \cdot \text{mg}^{-1}$,鼠茅草细根比根长随着土层深度增加而增加,鼠茅草的比根长均大于油茶的比根长,差异极显著 ($P<0.05$)。

2.3 油茶-鼠茅草复合经营系统地下竞争指数

距树干不同距离和不同土壤层次的油茶-鼠茅草的地下竞争指数(图 4),并认为指数值大的,竞争能力强。水平方向上(图 4),距树干距离 30 cm 时,油茶对鼠茅草的竞争能力 ($a(\text{油茶}-\text{鼠茅草})=0.85$)强于鼠茅草对油茶的竞争能力 ($a(\text{鼠茅草}-\text{油茶})=0.12$),差异极显著 ($P<0.01$);距树干距离 60 cm

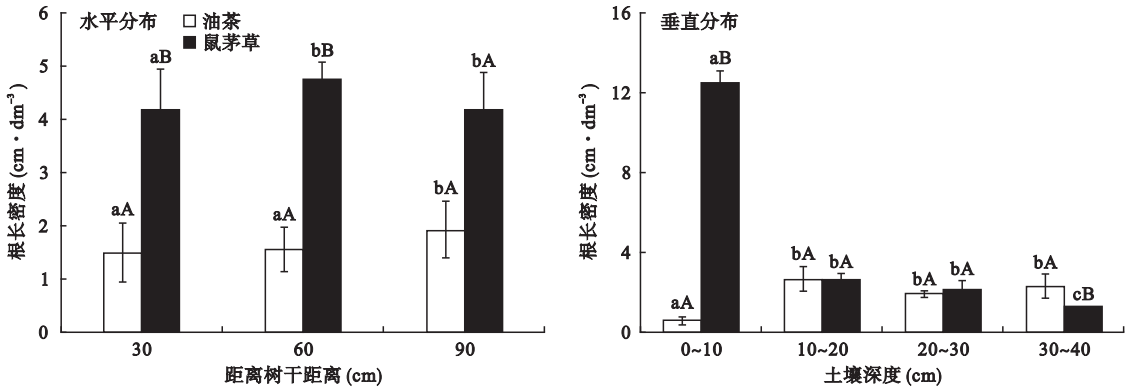


图 2 油茶-鼠茅草复合系统细根根长密度空间分布特征
Fig.2 Spatial distribution of root length density in *Camellia oleifera*-*Vulpia myuros* intercropping system
不同小写字母表示种内差异显著 ($P<0.05$),不同大写字母表示种间差异显著 ($P<0.05$)。

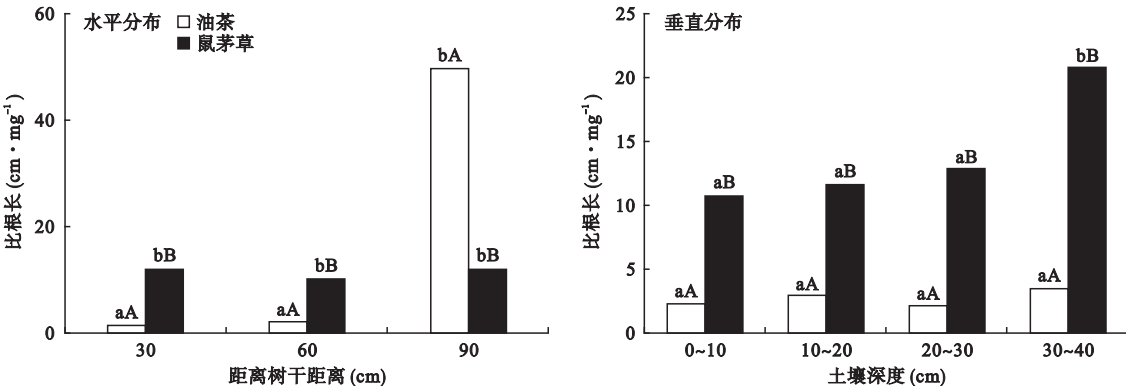


图 3 油茶-鼠茅草复合系统细根比根长空间分布特征
Fig.3 Spatial distribution of specific root length in *Camellia oleifera*-*Vulpia myuros* intercropping system
不同小写字母表示种内差异显著 ($P<0.05$),不同大写字母表示种间差异显著 ($P<0.05$)。

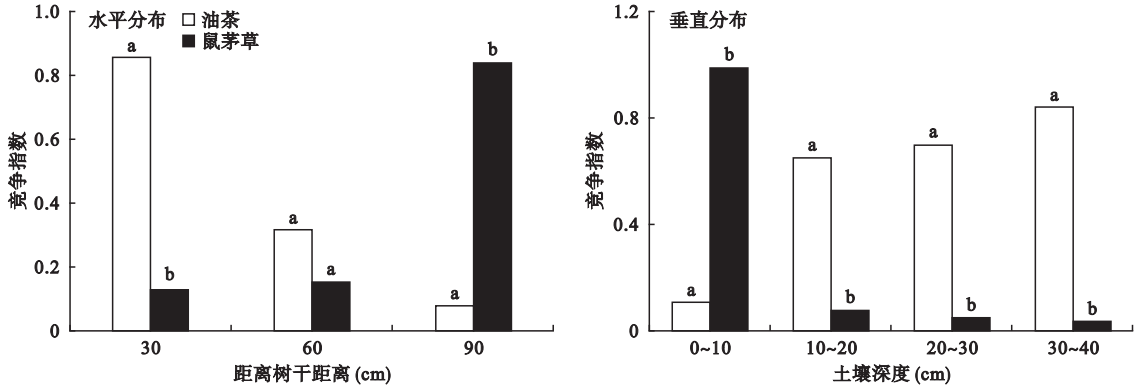


图4 油茶-鼠茅草复合系统油茶与鼠茅草细竞争指数
Fig.4 Interspecific competition between *Camellia oleifera* and *Vulpia myuros* in *Camellia oleifera*-*Vulpia myuros* intercropping system
字母不同者表示种间差异显著 ($P < 0.05$)。

时,油茶对鼠茅草的竞争能力 ($a(\text{油茶}-\text{鼠茅草}) = 0.32$)略强于鼠茅草对油茶的竞争能力 ($a(\text{鼠茅草}-\text{油茶}) = 0.15$),差异不显著 ($P > 0.05$);距树干距离 90 cm 时,鼠茅草对油茶的竞争能力 ($a(\text{鼠茅草}-\text{油茶}) = 0.84$)强于油茶对鼠茅草的竞争能力 ($a(\text{油茶}-\text{鼠茅草}) = 0.08$),差异极显著 ($P < 0.01$)。

垂直方向上(图4),0~10 cm 土层鼠茅草对油茶的竞争能力 ($a(\text{鼠茅草}-\text{油茶}) = 0.99$)强于油茶对鼠茅草的竞争能力 ($a(\text{油茶}-\text{鼠茅草}) = 0.11$),差异极显著 ($P < 0.01$);其余各土层,油茶对鼠茅草的竞争能力强于鼠茅草对油茶的竞争能力,且差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 油茶与鼠茅草细根生物量空间分布特征

本研究发现,在油茶-鼠茅草复合系统土层深度 40 cm、距树干距离 90 cm 的地下空间中,鼠茅草的细根生物量水平方向上分布均匀,垂直方向上随着土层的加深而下降,具有明显分层现象,鼠茅草细根生物量的 87.5% 分布于 0~20 cm 土层,12.5% 分布于 20~40 cm 土层,这与倪荣新等 (2016) 及骆宗诗等 (2010) 的结论相一致。油茶根系随着土层的加深先升高再下降,根系有一定的下移现象,这与王来等 (2011) 在研究核桃 (*Juglans regia* L.)-与小麦 (*Triticum aestivum* L.) 复合系统的细根分布与何春霞等 (2013) 对核桃 (*Juglans regia* L.)-决明子 (*Cassia obtusifolia* L.) 复合系统时的研究结论一致,垂直分布重心下移的趋势一致。分析原因可能是:在油茶-鼠茅草复合系统中,油茶根系由于在 0~20 cm 土层遭遇鼠茅草根系的竞争,作为生存策略,为了避开

这种竞争,油茶根系向下生长扩展以达到最大吸收所需养分和水分。

3.2 油茶与鼠茅草细根形态分布特征

本研究中,油茶细根的根长密度随着距树干距离的增加而升高,但有研究表明,在复合系统中林木细根根长密度在径向上随着距树干距离的增加呈先增加后减少的趋势(马长明等,2009;王来等,2011;何春霞等,2013)。由此可以得出,在水平方向上,鼠茅草对油茶细根根长密度影响不大。垂直方向上,油茶根长密度基本随着土层的加深而先升高后下降,鼠茅草的根长密度随着土层的加深而减小。分析原因是:不同植物在生长过程中,为了最大限度地获取土壤中的资源,其根系对养分的空间异质性产生了各种可塑性反应,同时环境条件也迫使根系在形态学特征上、时空分布特征上产生相应的变化 (Gross *et al.*, 1993; Pu *et al.*, 1997; 曾曙才等, 2003)。由于鼠茅草主要分布在 0~20 cm 土层,在该土层中油茶根长密度受到了较大影响。

比根长作为根系的一种形态特征,反映了根系吸收养分和水分的能力,因而认为在种间竞争中比根长大的植物较比根长小的植物具有竞争优势。据本研究知,在水平方向,油茶细根的平均比根长 $10.35 \text{ cm} \cdot \text{mg}^{-1}$,鼠茅草平均比根长 $12.77 \text{ cm} \cdot \text{mg}^{-1}$,鼠茅草比根长是油茶的 1.23 倍。可见,在相同的生物量分配中,鼠茅草较油茶更多地将生物量用于根系生长上,而加强了养分吸收能力,与油茶的竞争中处于优势。

3.3 油茶-鼠茅草复合经营系统地下竞争

竞争是植物形态、生活史以及植物群落结构和动态的主要动力之一(李博等,1998)。在骆宗诗等

(2010)研究的椒草种间地下竞争中, Levins 生态位重叠公式计测的花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*) 和杂草间的地下竞争指数, 实质是花椒和杂草对地下生态空间资源的共同占有率, 表示的物种间的关系是生态位重叠。本研究表明, 在距树干 0~60 cm 的水平范围和 10~40 cm 的土层内油茶对鼠茅草的竞争指数高于鼠茅草对油茶树的竞争指数, 其余空间, 鼠茅草对油茶的竞争能力显著强于油茶对鼠茅草的竞争能力, 油茶 Levins 竞争指数平均高出鼠茅草竞争指数 0.18, 这与骆宗诗等 (2010) 研究的花椒林中椒草种间地下竞争不同。分析原因可能是: 油茶根系为轴状根型深根性树种 (周政贤, 1963), 花椒为浅根性植物 (刘兴宇等, 2007), 在空间配置上, 油茶更适合林草间作模式。

3.4 油茶-鼠茅草复合经营模式配置

油茶-鼠茅草复合经营系统中, 在空间上, 鼠茅草主要分布在 0~20 cm 土层, 油茶主要分布在距树干 0~60 cm 的水平范围 10~40 cm 的土层内, 行间配置应在距树干 60 cm 以外的生长空间, 鼠茅草根控制行中间 100 cm 范围内, 并防止侵入油茶树行内; 在时间上, 利用油茶的 7—10 月油脂转化积累期, 错开了时间生态位的重叠。通过加强经营管理, 如在油茶距树干距离的 60 cm 范围内进行垄沟以保水保墒、增加根系生长空间。行间施肥时, 深施, 保证鼠茅草和油茶树体的营养供应, 减少种间竞争。

4 结 论

在油茶-鼠茅草复合经营系统研究中, 油茶主要分布在距树干 0~60 cm 的水平范围和 10~40 cm 的土层内, 鼠茅草主要分布在 0~20 cm 土层。油茶细根生物量是鼠茅草的 1.37 倍, 油茶 Levins 竞争指数平均高出鼠茅草竞争指数 0.18, 油茶根系由于在 0~20 cm 土层遭遇鼠茅草根系的竞争, 作为生存策略, 油茶根系有一定的下移现象以达到最大吸收所需养分和水分。综上, 油茶-鼠茅草间作的模式完全可以提高复合系统的复种指数和生产力。

参考文献

- 何 方, 胡芳名. 2004. 经济林栽培学: 第 2 版. 北京: 中国林业出版社.
- 何春霞, 孟 平, 张劲松, 等. 2013. 华北低丘山区核桃-决明子复合模式的根系分布. 林业科学研究, **26**(6): 715-721.
- 栾好安, 王晓雨, 韩 上, 等. 2016. 三峡库区橘园种植绿肥对土壤养分流失的影响. 水土保持学报, **30**(2): 68-72.
- 刘广勤, 朱海军, 周蓓蓓, 等. 2010. 鼠茅覆盖对梨园杂草控制及土壤微生物和酶活性的影响. 果树学报, **27**(6):

- 1024-1028.
- 骆宗诗, 向成华, 章 路, 等. 2010. 花椒林细根空间分布特征及椒草种间地下竞争. 北京林业大学学报, **32**(2): 86-91.
- 李 博, 陈家宽, A.R. 沃金森. 1998. 植物竞争研究进展. 植物学报, **15**(4): 18-29.
- 刘兴宇, 曾德慧. 2007. 农林复合系统种间关系研究进展. 生态学杂志, **26**(9): 1464-1470.
- 马秀玲, 陆光明, 徐祝龄, 等. 1997. 农林复合系统中林带和作物的根系分布特征. 中国农业大学学报, (1): 109-116.
- 马长明, 翟明普, 刘春鹏, 等. 2009. 单作与间作条件下核桃根系分布特征研究. 北京林业大学学报, **31**(6): 181-186.
- 倪荣新, 葛永金, 洪小平, 等. 2016. 油茶—川西小黄花菊复合经营中根系分布特征研究. 浙江林业科技, **36**(4): 10-14.
- 王 来, 仲崇高, 蔡 靖, 等. 2011. 核桃-小麦复合系统中细根分布及形态变异研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **39**(7): 64-70.
- 杨洪晓, 周美华, 李俊良, 等. 2015. 温带果园护土生草鼠茅草的腐解和养分释放. 草业学报, **24**(4): 208-213.
- 余世孝. 1995. 数学生态学导论. 北京: 科学技术文献出版社: 23-67.
- 庄瑞林, 周启仁, 姚小华, 等. 2008. 中国油茶: 第 2 版. 北京: 中国林业出版社.
- 曾曙才, 苏志尧, 陈北光, 等. 2003. 植物根际营养研究进展. 南京林业大学学报: 自然科学版, **27**(6): 79-83.
- 周政贤. 1963. 油茶生态习性、根系发育及垦复效果的调查研究. 林业科学, **8**(4): 336-346.
- Anderson LS, Sinclair FL. 1993. Ecological interactions in agroforestry systems. *Agroforestry Abstracts*, **6**: 57-91.
- Allen SC, Jose S, Pkr N, et al. 2005. Nitrogen mineralization in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Biology and Fertility of Soils*, **41**: 28-37.
- Cleland EE, Chiariello NR, Loarie SR, et al. 2006. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**: 13740-13744.
- Droppelmann KJ, Ephrath JE, Berliner PR. 2000. Tree/crop complementarity in an arid zone runoff agroforestry system in northern Kenya. *Agroforestry Systems*, **50**: 1-16.
- Greenham DWP. 1955. The environment of the fruit tree: Managing fruit soils. *Scientia Horticulturae*, **12**: 25-31.
- Gross KL, Peters A, Pregitzer KS. 1993. Fine root growth and demographic responses to nutrient patches in four old-field plant species. *Oecologia*, **95**: 61-64.
- Huxley PA, Pinney A, Akunda E, et al. 1994. A tree/crop interface orientation experiment with a *Grevillea robusta*, hedgerow and maize. *Agroforestry Systems*, **26**: 23-45.
- Krahulec F, Nesvadbova J. 2007. Intergeneric hybrid *Festuca rubra* × *Vulpia myuros* in the Czech Republic. *Preslia*, **79**: 63-68.
- Mason JL. 1969. Effect of cultivation and nitrogen on fruit quality, yield and color of McIntosh apples grown in irrigated grass sod cover crop. *Canadian Journal of Plant Science*, **49**: 149-154.
- Meyer JR, Zehr EI, Meagher RL, et al. 1992. Survival and growth of peach trees and pest populations in orchard plots managed with experimental ground covers. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **41**: 353-363.
- Pu M, Mitchell RJ, Jones RH. 1997. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment. *Journal of Applied Ecology*, **34**: 645-656.

作者简介 丁怡飞, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 经济林栽培研究. E-mail: 291791538@qq.com

责任编辑 张 敏