

枸杞—苜蓿间作地上生物量分布变异及其竞争强度

周孚明, 苏鹏海

(甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要: [目的] 探究枸杞—苜蓿间作地上生物量分布变异及其竞争强度, 为林草间作的种间配置调控和可持续经营提供科学依据。[方法] 以枸杞—苜蓿间作作为研究对象, 采用空间分割法对枸杞和苜蓿的地上生物量进行取样, 定量分析间作模式各组分地上生物量的分布变异及空间竞争。[结果] 单作条件下, 水平方向上枸杞树地上生物量分布于距离枸杞行 0—90 cm 范围内, 且随着距离枸杞行距离增加而减少; 垂直方向上, 枸杞树地上生物量分布重心在距离地面 40—60 cm 范围内。间作苜蓿条件下, 水平方向上枸杞地上生物量分布向枸杞行方向移动, 垂直方向上枸杞地上生物量分布重心向上移动, 在距离地面 60—80 cm 范围内。在水平方向距离枸杞树行 30—90 cm 和垂直方向 0—60 cm 范围, 苜蓿的竞争能力强于枸杞, 且随着距离枸杞行距离和地面高度的增加, 苜蓿的竞争能力逐渐减弱。枸杞—苜蓿间作的种间竞争强度随距离枸杞行距离的增加而降低, 竞争强度可分为 3 个区域, 即高强度竞争区域、中等强度竞争区域和低强度竞争区域, 分别距枸杞行 0—60, 60—90 cm 和 90—150 cm。建议间作苜蓿应距离枸杞行 60 cm 外开始种植。[结论] 林草过度间作使处于地上空间竞争弱勢的作物生物量发生迁移和减少, 对其生长产生抑制。为了有效降低林草间作中林草之间对地上空间的竞争, 减少牧草对林木的地上空间竞争胁迫, 使林木获得更好的生长空间, 应适当增大林木与牧草之间种植的距离, 将牧草种植于高强度竞争区域之外。

关键词: 林草间作; 空间配置; 生态位; 分布变异; 种间竞争

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0053-06

中图分类号: S759.3, S551.7

文献参数: 周孚明, 苏鹏海. 枸杞—苜蓿间作地上生物量分布变异及其竞争强度[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 53-58. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.008; Zhou Fuming, Su Penghai. Distribution variation of aboveground biomass and competition intensity of *Lycium barbarum* and *Medicago sativa* intercropping [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 53-58.

Distribution Variation of Aboveground Biomass and Competition Intensity of *Lycium Barbarum* and *Medicago Sativa* Intercropping

Zhou Fuming, Su Penghai

(Research Institute of Water and Soil Conservation of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: [Objective] The aboveground biomass distribution variation and competition intensity of wolfberry (*Lycium barbarum*)-alfalfa (*Medicago sativa*) intercropping were studied in order to provide a scientific basis for interspecific allocation regulation and sustainable management of forest-grass intercropping. [Methods] Aboveground biomass samples of wolfberry and alfalfa were acquired by the spatial segmentation method. The distribution variation and spatial competition of the aboveground biomass of each component in the intercropping model were quantitatively analyzed. [Results] Under monoculture conditions, the aboveground biomass of wolfberry trees in the horizontal direction was distributed in the range of 0—90 cm from the wolfberry row, and decreased with increasing distance from the wolfberry row. The distribution of above-ground biomass of wolfberry in the horizontal direction at 40—60 cm above the soil surface moved to the direction of the row of wolfberry when intercropped with alfalfa, and the gravity center of the distribution of above-ground biomass of wolfberry moved upward in the vertical direction at 60—80 cm above the soil

收稿日期: 2021-06-19

修回日期: 2021-08-24

资助项目: 国家自然科学基金地区基金“甘肃引黄灌区枸杞—豆科牧草复合系统水盐分异特征及互馈机制研究”(51669002)

第一作者: 周孚明(1963—), 男(汉族), 甘肃省榆中县人, 高级工程师, 主要从事水土保持科学基础理论、生态规划设计及水土保持监测等方面的研究。Email: 649741757@qq.com。

通讯作者: 苏鹏海(1992—), 男(汉族), 甘肃省合水县人, 工程师, 硕士, 主要从事水土保持科学基础理论、干旱区水资源利用等研究。Email: 799934433@qq.com。

surface. The competitive ability of alfalfa was stronger than that of wolfberry in the range of 30—90 cm horizontally and 0—60 cm vertically. The competitive ability of alfalfa gradually weakened with increasing distance from the wolfberry row and the soil surface. The interspecific competition intensity of wolfberry-alfalfa intercropping decreased with increasing distance from the wolfberry row. Competition intensity could be divided into three areas: high-intensity competition area, medium-intensity competition area, and low-intensity competition area (0—60, 60—90 cm, and 90—150 cm, respectively). It is recommended that intercropped alfalfa should be planted 60 cm away from the wolfberry row. [Conclusion] Intensive intercropping of forest and grass results in crop biomass migrating and decreasing due to weak competition for aboveground space, thereby inhibiting plant growth. In order to effectively reduce the competition for aboveground space between forests and grasses in forest-grass intercropping, the competition and stress of forages on forest trees should be reduced by appropriately increasing the planting distance between trees and forages, thereby enabling trees to obtain better growth space. Pastures should be grown outside areas of higher competition.

Keywords: forest and grass intercropping; space configuration; niche; distribution variation; interspecific competition

林草间作是一种集约化的生产方式,在提高土地利用效率、减少地表无效蒸发、增加光能利用率等方面作用显著,兼具生态与经济价值而被广泛应用,但是间作必然会导致不同物种共同利用有限资源,使种间产生直接或间接的相互竞争^[1-2],通常种间竞争的结果是不对称的,一种作物取得竞争优势,另一种作物被抑制或被迫迁移、甚至被消灭^[3-4]。而生态位是指作物在群落中的时空位置、功能和地位,即一个作物群落时空位置及与邻近作物群落的相互关系,种群生态位的研究可以定量作物与环境的相互关系和作物对资源的利用能力^[5-6]。在生态位理论基础上,利用作物种间竞争能力指数和竞争力强度指数研究人工林和牧草间作各组分种间关系,在减少间作作物种间竞争、指导林草间作系统的优化配置、提高间作系统有限资源利用率方面尤为重要^[7-8]。目前,已有许多专家学者在间作种间竞争方面开展大量研究和探索。例如,在紫花苜蓿与其他不同牧草间作的研究中发现,豆科牧草可以促进禾本科牧草根长、根表面积等根系参数的优化,豆科牧草本身根系特性与单作相比表现不一,与玉米和甜高粱间作时其根系特性受到明显地抑制,而与小黑麦和燕麦间作中则未受影响^[9]。在不同种植密度的研究中发现,不同竞争压力下的植物个体生长速率和成熟大小虽有变化,但其生长曲线变化不大,在种植密度梯度下单种和混种,相似的生态位宽和低密度种植均有利于作物生长^[10]。在核桃和大豆间作的研究中发现,在核桃树行水平方向 1~2.5 m 范围内是核桃和大豆地下根系种间竞争的主要区域^[11]。在杨树和小麦间作的研究中发现,杨树可利用深层土壤中的水分和养分资源,在一定程度上有助于缓解农林间作对水分和养分资源的竞争性利用,但林木在光照的竞争居于优势者地位,随着距林带距离的缩小,生态位重叠增加,光照资源竞争加

强,林木对小麦作物的胁迫效应增加^[12]。这些研究均能为优化间作系统的种间配置提供理论依据,但是以往的研究主要集中在间作系统中不同物种间的地下水分、养分竞争和地上光能利用等方面,林草间作的地上空间竞争研究较少,因此要准确指导林草间作系统中各组分的优化配置,还需对林草间作的地上空间竞争进行大量研究。本文以甘肃省引黄灌区枸杞—苜蓿间作为研究对象,采用空间分割的方法对间作系统各组分及对应单作的地上生物量进行取样,分析枸杞—苜蓿间作中各组分地上生物量的分布变异及其生态位重叠,探究枸杞和苜蓿间作的相互作用机制,解析间作系统各组分对地上空间资源的竞争能力,揭示枸杞—苜蓿间作地上空间竞争的种间关系,以期对林草间作模式的结构配置及管理进行指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省白银市景泰县景泰川电力提灌水资源利用中心灌溉试验站(37°23'N, 104°08'E),属于温带干旱型大陆气候,多年平均降水量 185 mm、蒸发量 3 028 mm,年平均辐射量 6.18×10^5 J/cm²,年平均气温 8.5 °C,年日照时数 2 652 h,无霜期 191 d。试验地土壤类型为壤土,干容重 1.61 g/cm³,田间最大持水量为 24.1%,土壤基础养分含量为:速效氮 74.51 mg/kg,速效磷 26.31 mg/kg,有机质 1.32 g/kg,pH 值 8.11。

1.2 试验对象与试验设计

试验于 2018 年 4—10 月选择枸杞—苜蓿间作、枸杞单作和苜蓿单作为研究对象,试验小区面积为 45 m²(7.5 m × 6.0 m),每个小区种植 2 行,每行 5 棵,共计 10 棵。枸杞品种为“宁杞 1 号”(3 a 生),

南北行种植,株距 1.5 m,行距 3.0 m;苜蓿品种为“甘农 3 号紫花苜蓿”(2 a 生),在距离枸杞行 30 cm 位置南北方向开始行播,行距 30 cm,播种深度 1~2 cm,播种量为 22.5 kg/hm²。试验灌溉水量控制:从试验开始,每间隔 5 d 测定一次土壤含水量,测量深度为 80 cm,土壤含水量低于田间持水量的 75% 时开始灌溉,灌水上限为田间持水量,灌水方式为小畦灌溉。试验设计为 3 个处理:枸杞—苜蓿间作、枸杞单作和苜蓿单作,每个处理 3 个重复。各试验处理田间耕作、施肥、灌溉和病虫害防治均一致。

1.3 地上生物量空间分布测定

本研究重点讨论间作条件下,地上不同空间位置枸杞和苜蓿地上生物量的分布变异,枸杞苜蓿间作模式下不同空间位置的竞争强度,及地上生物量的分布变异规律,从地上空间竞争的角度指导枸杞—苜蓿间作种植的优化配置,以期对枸杞和苜蓿提供良好的生长环境。9 月枸杞生长基本达到本年度最终状态,苜蓿处于第三茬初花期,此阶段枸杞苜蓿地上竞争基本达到最大值阶段,是枸杞苜蓿间作地上竞争的关键时期,所以取样时间定为 2018 年 9 月 5 日。此试验采用空间分割的方法进行取样,从垂直于枸杞树行开始,每 30 cm 为一个取样区域,区域宽度为 150 cm,分别标记为 E₁, E₂, E₃, E₄ 和 E₅,各区域从地面开始,每 20 cm 为一层,累积高度 100 cm 以上生物量单独计算,即每个取样空间为 150 cm×30 cm×20 cm (各区域除 100 cm 以上),分别对枸杞和苜蓿取样,取样区域划分如图 1 所示。每个取样空间取得的枸杞和苜蓿分别装于信封,烘箱内 105 °C 杀青 30 min 后 75 °C 烘干至恒重,分别称重和记录^[13]。

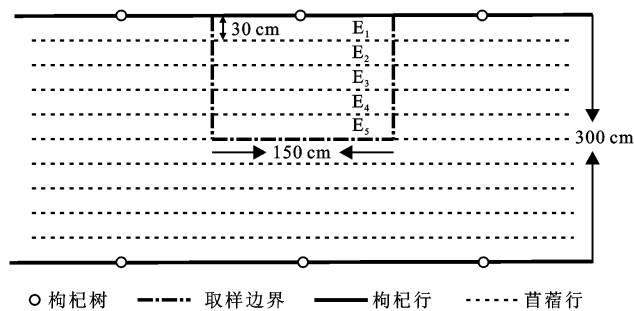


图 1 枸杞—苜蓿间作取样区域划分

1.4 计算方法

1.4.1 竞争能力指数 采用 Levins^[14] 提出的生态位重叠公式,此公式表示不同物种间共用同一种资源而相互重叠的情况,可反映因生态位重叠而产生的竞争关系,若两个物种按相同比例利用每一资源状态时,

重叠指数最大,其值等于 1。所以可以用此公式计算枸杞苜蓿间作系统中枸杞和苜蓿的竞争能力指数,计算公式为:

$$L_{LA} = B_L \sum_{j=1}^r P_{Lj} P_{Aj} \quad (1)$$

$$L_{AL} = B_A \sum_{j=1}^r P_{Aj} P_{Lj} \quad (2)$$

$$B_L = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r P_{Lj}^2 \quad (3)$$

$$B_A = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r P_{Aj}^2 \quad (4)$$

式中: L_{LA} 为枸杞树对苜蓿的竞争能力指数; L_{AL} 为苜蓿对枸杞树的竞争能力指数,阈值为 [0, 1]; B_L , B_A 分别为枸杞树和苜蓿的生态位宽度; r 为资源位数(垂直于地面方向 $r \leq 6$, 平行于地面方向 $r \leq 5$); P_{Lj} 为枸杞树在第 j 个空间层的生物量占其总生物量的比值; P_{Aj} 为苜蓿在第 j 个空间层的生物量占其总生物量的比值。

1.4.2 竞争强度指数 采用 Pianka^[14] 提出的生态位重叠公式,可以客观反映出不同物种对资源利用或生态适应的相似性,用于计算资源不足情况下,物种对共用资源的竞争程度,计算公式为:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^r P_{Lj} P_{Aj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^r P_{Lj}^2 \sum_{j=1}^r P_{Aj}^2}} \quad (5)$$

式中: A 为枸杞—苜蓿间作的竞争强度指数,阈值 [0, 1]; r 为资源位数(垂直于地面方向, $r \leq 6$, 水平与地面方向, $r \leq 5$); P_{Lj} 为枸杞树在第 j 个空间层的生物量占它利用全部空间层中总生物量的比值; P_{Aj} 为苜蓿在第 j 个空间层的生物量占它利用全部空间层中总生物量的比值。

1.5 数据处理

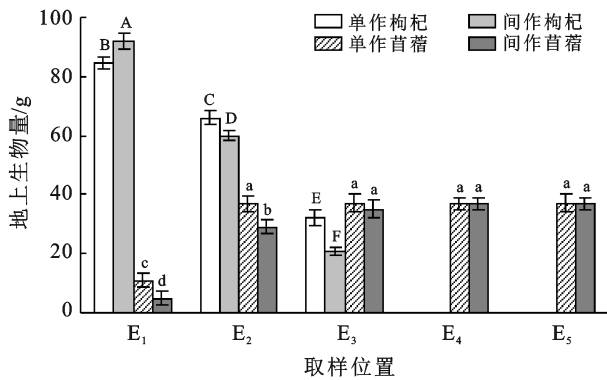
使用 SPSS 22.0 软件对数据进行单因素方差(one-way ANOVA, $p \leq 0.05$) 分析和显著性检验;使用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据整理和绘图。

2 结果与分析

2.1 枸杞—苜蓿间作在水平方向地上生物量分布变异

图 2 为不同处理下枸杞和苜蓿地上生物量水平于枸杞行的分布特征。由图 2 分析可知,枸杞地上生物量分布在距枸杞树行 90 cm 范围内,单作枸杞和间作枸杞的地上生物量均随着距枸杞行距离的增大而降低。相比于单作枸杞,间作枸杞总地上生物量降低 5.4%, 差异显著 ($p < 0.05$)。在距离枸杞树行 60 cm 范围内单作枸杞地上生物量占总地上生物量的 82.5%, 间作枸杞地上生物量占总地上生物量

88.5%，占比增加 6%。间作使距离枸杞行不同范围内枸杞树的地上生物量变化不同，在 0—30 cm 范围内比例增加 9.1%，30—60 cm 和 60—90 cm 占比分别降低 9.1% 和 35.9%，差异显著 ($p < 0.05$)，表明由于种间空间竞争关系，枸杞树的地上生物量分配向距离枸杞树干的位置增加。间作苜蓿地上生物量随着距枸杞行距离的增加而升高，在 90 cm 之外不再受间作枸杞树影响，间作使苜蓿地上生物量在 0—30 cm 和 30—60 cm 分别降低 54.5% 和 21.4%，差异显著 ($p < 0.05$)，60—90 cm 稍有降低，但差异不显著。相比于单作苜蓿，间作苜蓿的地上总生物量降低 10.1%，差异显著 ($p < 0.05$)。



注：①苜蓿生物量为实测生物量的 1/10；②大写字母表示枸杞生物量间差异显著 ($p < 0.05$)，小写字母表示苜蓿生物量间差异显著 ($p < 0.05$)。下同

图 2 水平枸杞行方向枸杞和苜蓿地上生物量分布特征

2.2 枸杞—苜蓿间作在不同高度地上生物量分布变异

图 3 为不同处理下枸杞和苜蓿地上生物量在距离地面不同高度的分布特征。由图 3 分析可知，间作苜蓿使得枸杞地上生物量在距地面不同高度变化显著，相比于单作枸杞，间作枸杞在距地面 60 cm 以下地上生物量降低，0—20 cm，20—40 cm 和 40—60 cm 地上生物量分别降低 60.1%，44.4% 和 26.2%，60 cm 以上的生物量增加，60—80 cm，80—100 cm 和 100 cm 以上分别增加 33.1%，29.2%，21.6%，差异显著 ($p < 0.05$)，表明由于种间空间竞争关系，枸杞树的地上生物量分配向距离地面更高的位置增加。单作苜蓿和间作苜蓿地上生物量随着距离地面高度的不同差异不明显，相比于单作苜蓿，间作苜蓿在 0—80 cm 范围内的地上生物量均有所降低，但各层的差异均不显著，而 80—100 cm 的地上生物量降低 47.1%，差异显著 ($p < 0.05$)，这是由于枸杞和苜蓿的种间竞争使苜蓿的生长高度降低，80—100 cm 的地上生物量减少。

2.3 枸杞—苜蓿间作地上空间竞争能力分布

图 4 为间作条件下枸杞和苜蓿竞争能力指数水

平分布。由图 4 分析可知，枸杞的竞争能力指数随着距枸杞树行距离的增加而减小，苜蓿的竞争能力指数随着距枸杞树行距离的增加呈先增后减的变化趋势，在 30—60 cm 范围内达最大值。在距离枸杞树行 0—30 cm 的范围内，枸杞对苜蓿的竞争能力显著强于苜蓿对枸杞的竞争能力 ($p < 0.05$)，在 30—90 cm 范围内枸杞对苜蓿的竞争能力显著低于苜蓿对枸杞的竞争能力 ($p < 0.05$)。

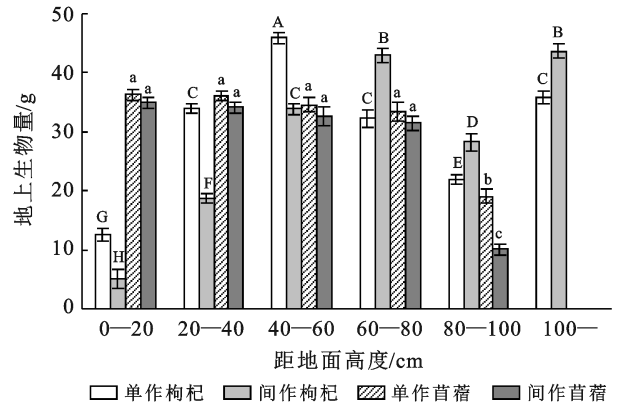
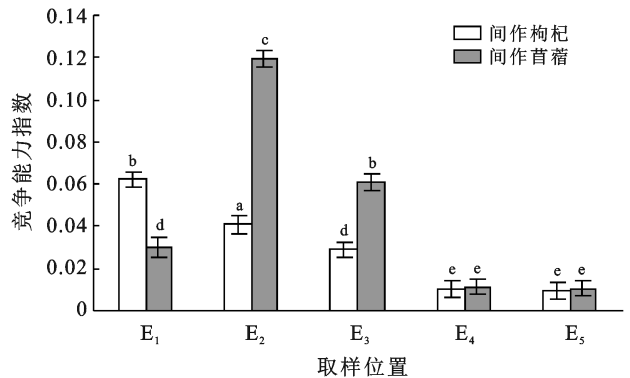


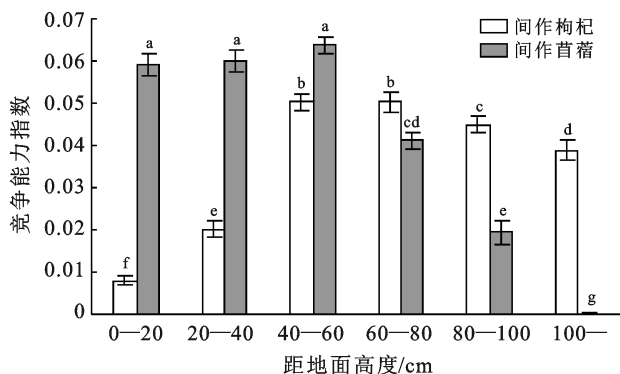
图 3 不同高度枸杞和苜蓿地上生物量分布特征



注：小写字母表示枸杞和苜蓿在地上同一水平位置竞争能力指数差异显著 ($p < 0.05$)

图 4 种间竞争能力指数水平分布特征

图 5 为间作条件下枸杞和苜蓿竞争能力指数垂直分布。由图 5 分析可知，枸杞的竞争能力指数随着距离地面高度的增加呈现先增加后降低的变化趋势，在距离地面 60—80 cm 高度范围内达最大值；苜蓿的竞争能力指数在距离地面 60 cm 范围内变化较小，在距离地面 60 cm 以上随着距离地面高度的增加而显著降低 ($p < 0.05$)。在距离地面 0—60 cm 的高度范围内，枸杞对苜蓿的竞争能力显著低于苜蓿对枸杞的竞争能力 ($p < 0.05$)，在 60 cm 以上的高度范围内枸杞对苜蓿的竞争能力显著强于苜蓿对枸杞的竞争能力 ($p < 0.05$)。



注:小写字母表示枸杞和苜蓿在地上同一垂直位置竞争能力指数差异显著($p \leq 0.05$)

图 5 种间竞争能力指数垂直分布特征

2.4 枸杞苜蓿间作系统地上竞争强度分布

图 6 为枸杞—苜蓿间作中竞争强度指数分布。由图 6 分析可知,随着距枸杞树行距离的增大,枸杞—苜蓿间作竞争强度表现出降低趋势,间作中竞争强度随距离枸杞树行的距离可大致分为 3 个区域,其中 0—60 cm 范围内的高强度竞争区域,60—90 cm 范围内的中等强度竞争区域,90—150 cm 范围内的低强度竞争区域,3 个区域的竞争强度差异显著($p < 0.05$)。

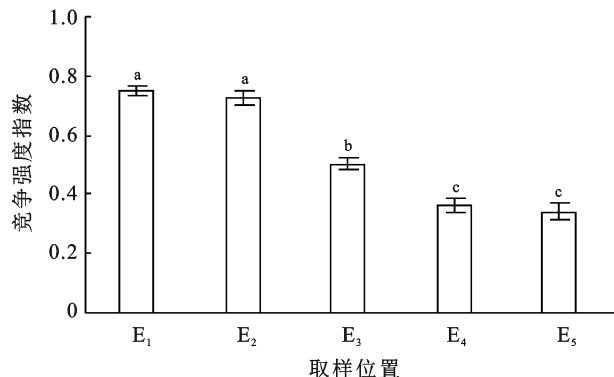


图 6 枸杞—苜蓿间作中竞争强度指数分布特征

3 讨论

3.1 枸杞和苜蓿地上生物量分布和变异特征

大量研究人员从生态位角度对间作复合系统中各作物的生物量时空分布、形态特征、水肥根耦合机理等进行了研究,研究^[15-19]表明,在复合系统中作物为在有限的时空内获得生长所需要的空间、营养、光照、水分等共需资源,不同物种间及相同物种内会进行争夺性竞争或自我调整再分配,以获取有限资源分配上的优势或适应环境改变。本研究中,枸杞树和苜蓿的个体形态在不同竞争区域差异性显著,在水平方向上,随着距枸杞行距离的增加,间作枸杞地上生物

量较单作枸杞明显减少,间作苜蓿的地上生物量较单作苜蓿逐渐恢复至单作水平,这与段志平^[15]在研究枣树小麦复合系统得出,距离枣树越远小麦植株光合性能表现越好、生物量越高,优化间作系统中杏树与小麦的行间距配置有利于小麦生物量增加的研究结果一致;在垂直方向上,间作枸杞的地上生物量分布重心上移(单作在距地面高度 40—60 cm,间作在距地面 60—80 cm),间作苜蓿地上生物量在距地面 80—100 cm 范围内相比单作降低显著,原因是苜蓿对低层空间的竞争强于枸杞,导致枸杞树通过增加高度、生物量上移来减少与苜蓿的空间竞争,以适应环境的变化,而位于下部的苜蓿由于枸杞树的遮阴和挤占等原因,高度降低、生物量积累减少;与单作相比,间作复合系统中,枸杞和苜蓿的地上生物量均显著降低,这与白伟^[16]在杏树和不同农作物(花生、谷子、甘薯)间作研究发现间作杏树与单作杏树产量差异不显著,农作物产量显著降低的结论不一致,这是因为杏树较以上农作物生态位宽,农作物对杏树竞争小,而枸杞—苜蓿间作中两种作物的生态位都较宽,种间竞争力强,导致枸杞和苜蓿的地上生物量均显著降低,与张晓娜^[17]在玉米—豆科间作中作物干物质积累减少的研究结果一致。

3.2 枸杞和苜蓿间作地上空间竞争

生态位分离不足是间作种植模式中林木与作物产生竞争的关键因素,树龄、作物种类、配置关系以及种植密度等多种因素均会对作物的生态位重叠度产生影响,而间作过度是间作种植模式中不同物种间生态位高度重叠,导致共需资源供应不足的主要原因^[18-20]。骆宗诗^[21]在花椒和杂草的地下种间竞争研究中发现,在水平方向距离花椒树行 30 cm 内和垂直方向 25—30 cm 土层内,花椒对杂草的竞争指数显著高于杂草对花椒的竞争指数;丁怡飞^[22]在研究油茶—鼠茅草间作中发现,在水平方向,鼠茅草的根长密度大于油茶,但在距树干 90 cm 以内,油茶细根生物量与竞争指数均大于鼠茅草,在垂直方向,油茶细根生物量随着土层深度增加先升后降,油茶细根生物量与竞争指数在地表 10 cm 土层以下均大于鼠茅草,本研究中,枸杞对苜蓿的竞争能力指数强于苜蓿对枸杞的竞争能力指数的区域分布在水平方向 0—30 cm 内和在垂直方向 60 cm 以上,以上区域内枸杞表现出空间竞争优势。王晗生^[23]在旱作果园的复合经营研究中得出,从果树幼龄后期开始间作浅根性低矮作物具有明显的间作优势,说明随着果树生长生态位增宽,间作低矮作物有利于间作系统物种间生态位分离,减少种间竞争,本研究中,枸杞—苜蓿间作地上空

间竞争能力强度指数明显分为 3 个区域,即高强度竞争区域、中等强度竞争区域和低强度竞争区域,分别为距枸杞行 0—60,60—90 cm 和 90—150 cm,并且枸杞和苜蓿的生态位重叠最大处出现在地上生物量重叠最多的区域。所以,生态位重叠为作物在同一资源位上的相遇频率,林草间作中林木和牧草的生态位重叠最大处出现在生物量相遇频率最高的同一生态位上,林草间作种间地上空间竞争程度是由林木和牧草地上生物量对同一生态位共用资源的利用程度决定的。

4 结论

本研究从间作模式下地上生物量空间分布、变异特征和种间地上竞争指数 3 个方面,研究了枸杞—苜蓿间作中林木和牧草的地上生物量生态位特征及其种间地上竞争状况,结果表明,枸杞的地上生物量主要分布在距离枸杞树 0—90 cm 的水平范围以内和距离地面向上的 40 cm 以上;苜蓿在水平 30—90 cm 和垂直 0—60 cm 的范围内竞争空间能力高于枸杞;水平 0—60 cm 是枸杞—苜蓿间作中地上空间的竞争高强区域。在高强度竞争区域内,处于地上空间竞争弱勢的枸杞生物量大幅度减少,苜蓿的生长对枸杞生长产生了较大的抑制作用。为了有效降低林草间作模式中林草对地上空间的竞争,减少牧草对林木的地上空间竞争胁迫,使林木获得更好的生长空间,应适当增大林木与牧草种植的距离,将牧草种植于高强度竞争区域之外。此外,本研究只是从地上生物量空间分布、变异特征和种间地上竞争指数等方面系统分析了枸杞—苜蓿间作地上竞争状况,下一步仍需要从枸杞、苜蓿产量和品质方面进行更深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 殷文,赵财,于爱忠,等. 秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(4): 633-641.
- [2] Hu Falou, Gan Yantai, Chai Qiang, et al. Boosting system productivity through the improved coordination of interspecific competition in maize/pea strip intercropping [J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 50-60.
- [3] Krapfl K J, Hatten J A, Roberts S D, et al. Capacity of biochar application and nitrogen fertilization to mitigate grass competition upon tree seedlings during stand regeneration [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 376: 298-309.
- [4] Wajmde C, Surethran P. Resource competition in contour hedgerow intercropping systems involving different shrub species with mature and young tea on sloping highlands in Sri Lanka [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2005, 143(5): 395-405.
- [5] 林开敏,郭玉硕. 生态位理论及其应用研究进展[J]. 福建林学院学报, 2001, 21(3): 283-287.
- [6] Costa W A J M D, Surethran P. Tree-crop interactions in hedgerow intercropping with different tree species and tea in Sri Lanka (I): Production and resource competition [J]. *Agroforestry Systems*, 2005, 63(3): 199-209.
- [7] 廖文超. 晋西黄土区不同树龄苹果与大豆间作系统水、肥、光空间分布特征[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [8] Thorsted M D, Weiner J, Jorgen E O. Above-and below-ground competition between intercropped winter wheat *Triticum aestivum* and white clover *Trifolium repens* [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(2): 237-245.
- [9] 蒯芳,刘晓静,童长春,等. 4 种间作模式下牧草根系特性及其碳、氮代谢特征研究[J]. 草业学报, 2019, 28(9): 45-54.
- [10] 关佳威,姬明飞,王志强,等. 不同种植密度条件下单混种作物的生长曲线[J]. 草业科学, 2015, 32(8): 1243-1251.
- [11] 许华森,云雷,毕华兴,等. 核桃—大豆间作系统细根分布及地下竞争[J]. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1612-1616.
- [12] 朱清科,朱金兆. 黄土塬面农林复合系统的生态位特征[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 49-52.
- [13] 苏鹏海. 枸杞生长对间作苜蓿与水分调控的响应研究[D]. 甘肃 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [14] Li Pufang, Ma Baoluo, Yan Weikai, et al. Plant architecture, plasticity, and adaptation strategies of two oat genotypes under different competition intensities [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(5): 1431-1439.
- [15] 段志平,刘天煜,张永强,等. 离树间距对枣麦间作小麦光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1445-1452.
- [16] 白伟,孙占祥,郑家明,等. 东北风沙半干旱区仁用杏作物间作对作物产量和土地生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2521-2528.
- [17] 张晓娜,陈平,庞婷,等. 玉米/豆科间作种植模式对作物干物质积累、分配及产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(4): 484-490.
- [18] Singh R, Saxena A. Weed dynamics and critical period of crop weed competition in cumin (*Cuminum cyminum*) under arid region of Rajasthan [J]. *Journal of Spices & Aromatic Crops*, 2013, 22(2): 165-169.

- of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(3): 286-292.
- [29] 张会慧, 王世标, 王均睿, 等. 三江平原湿地不同利用方式对土壤理化性质及团聚体组成的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(6): 1679-1687.
- [30] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 359-366.
- [31] 伍海兵. 上海中心城区典型绿地土壤物理性质特征研究[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 155-161.
- [32] 李强, 李志伟, 王全, 等. 云南陆良植烟土壤粒径分布及其分形维数空间变异研究[J]. *山地学报*, 2017, 35(1): 23-31.
- [33] 蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 等. 不同管理模式对于干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4): 15-21, 39.
- [34] 徐香菇, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1523-1529.
- [35] 庄正, 张芸, 张颖, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 183-188.
- [36] 侯传庆. *上海土壤*[M]. 上海: 上海科技出版社, 1992.
- [37] 林立文, 邓羽松, 王金悦, 等. 南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3647-3656.
- [38] 安娜娜, 马琨, 王明国, 等. 玉米秸秆还田对土壤团聚体组成及其碳氮分布的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(5): 766-775.
- [39] 谢均强. 紫色土坡地团聚体稳定性特征及对侵蚀过程的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [40] 杨振奇, 郭建英, 秦富仓, 等. 裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 8-14.
- [41] 方薇. 植被恢复对滇东喀斯特坡地土壤团聚体稳定性的影响[D]. 云南 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [42] 王冰, 周扬, 张秋良. 兴安落叶松林龄对土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1618-1628.
- [43] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [44] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. *环境科学学报*, 2001, 10(3): 250-252.
- [45] 邢菊香, 郭建英, 赵杏花, 等. 黄土丘陵区退耕还林后土壤物理性质恢复特征的研究: 以陕西省吴起县为例[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(1): 41-46.
- [46] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 61-67.
- [47] 刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 197-205.
- [48] 梁士楚, 王伯荪. 广西英罗港红树林区木榄群落土壤粒径分布的分形特征[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(1): 17-22.
- [49] 尚应妮, 胡斐南, 赵世伟, 等. 不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 204-208, 239.
- [50] Brady N, Weil R. *土壤学与生活*[M]. 李保国, 徐建明, 译. 北京: 科学出版社, 2019.
- [51] Papadopoulos A, Bird N R A, Whitmore A P, et al. Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X-ray computed tomography [J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(3): 360-368.

(上接第 58 页)

- [19] 王颂宇, 梁晓红, 付婷婷, 等. 高粱与花生和大豆间作对其生物量及产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(9): 1071-1075.
- [20] Andersen M K, Hauggaard-Nielsen H, Jensen W E S. Competitive dynamics in two-and three-component intercrops [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44(3): 545-551.
- [21] 骆宗诗, 向成华, 章路, 等. 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.
- [22] 丁怡飞, 曹永庆, 姚小华, 等. 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.
- [23] 王晗生. 黄土塬区旱作果园的复合经营范式[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(5): 408-418.