

北疆杨树 || 苜蓿复合系统中根系 分布特征及产量

代元帅¹, 鲁为华², 杨 涛¹, 刘婷婷¹, 申 磊¹,
滕元旭¹, 王秀媛¹, 张文龙¹, 李鲁华¹, 张 伟¹

(1.石河子大学农学院,新疆 石河子 832003;2.石河子大学动物科技学院,新疆 石河子 832003)

摘要:为研究杨树 || 紫花苜蓿种间相互作用对根系形态及空间分布的影响,对3 a生苜蓿和7 a生杨树在单、间作条件下0~60 cm土层中的根长密度(RLD)、平均根直径(ARD)和细根比根长(FSRL)进行了分析测定。结果表明:(1)间作杨树与苜蓿的RLD、ARD和FSRL在土壤中的水平和垂直方向存在显著差异。与单作苜蓿相比,间作苜蓿0~60 cm土壤中的RLD降低了54%,20~60 cm土壤中的ARD降低了18.8%,0~60 cm土壤中的FSRL提高了14.5%。与单作杨树相比,间作杨树0~20 cm土壤中的RLD增加了21.6%,0~60 cm土壤中的ARD和FSRL分别降低了14.5%和6.72%。(2)刈割措施会导致苜蓿RLD的下降。4月下旬苜蓿RLD最大,6月下旬和8月下旬苜蓿RLD显著下降($P<0.05$),间作苜蓿受到刈割的影响比单作苜蓿大,RLD表现为4月下旬单作苜蓿>4月下旬间作苜蓿>6月下旬单作苜蓿>6月下旬间作苜蓿>8月下旬单作苜蓿>8月下旬间作苜蓿。当地苜蓿一年刈割3次,间作苜蓿在每次刈割后FSRL会出现峰值,间作苜蓿的峰值比对应单作高12.3%~21.82%。间作杨树FSRL在6月上旬和8月下旬各出现一次峰值,间作杨树的峰值比对应单作高2.8%~16.7%。(3)整个生长季间作苜蓿产量比单作减少了43.8%。通过计算土地当量比($LER=1.42$),说明这种间作模式比单作提高了42%的生产力。(4)通过相关性分析表明RLD与苜蓿干草产量呈显著正相关,提高间作苜蓿干草产量的关键因素在于提高RLD。综上所述,间作对苜蓿产量和根系的RLD、ARD不利,但促进了苜蓿FSRL的提高与杨树根系分布和发育。相比单作,间作具有提高资源利用效率和防护林生态经济效益的潜力。

关键词:杨树 || 苜蓿;根系分布特征;土地当量比;生物量;竞争优势

中图分类号:S54;S19;S344.2 **文献标志码:**A

Distribution characteristics of roots and yield in a poplar || alfalfa silvopastoral system in northern Xinjiang

DAI Yuanshuai¹, LU Weihua², Yang Tao¹, Liu Tingting¹, SHEN Lei¹, TENG Yuanxu¹,

WANG Xiuyuan¹, ZHANG Wenlong¹, LI Luhua¹, ZHANG Wei¹

(1.College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: In order to investigate the temporal and spatial distribution characteristics of roots in a poplar || alfalfa, root length density (RLD), average root diameter (ARD), and fine specific root length (FSRL) of 3-year-old alfalfa and 7-year-old alfalfa in sole and systems were determined. The results showed that: (1) There were significant differences in RLD, ARD and FSRL between intercropped poplar and alfalfa at corresponding soil depths in both horizontal and vertical directions. Compared with monocropped alfalfa, the RLD of intercropped alfalfa in 0~60 cm soil decreased by 54%, ARD in 20~60 cm soil decreased by 18.8%, and FSRL in 0~60 cm soil increased

收稿日期:2020-01-08

修回日期:2020-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31460335,31560376);国家牧草产业技术体系石河子综合试验站项目(CARS-34);中国博士后科学基金项目(2015M582737)

作者简介:代元帅(1996-),河南襄县人,硕士,研究方向为绿洲农作制度。E-mail:1424260483@qq.com

通信作者:张伟(1979-),男,博士,主要从事绿洲生态与农作制度研究。E-mail:bluesky2002040@163.com

李鲁华(1967-),男,博士,主要从事绿洲生态与农作制度研究。E-mail:shziluhua@163.com

by 14.5%. Compared with the monocropped poplar, the RLD in the 0~20 cm soil of intercropped poplar increased by 21.6%, the ARD and FSRL in the 0~60 cm soil decreased by 14.5% and 6.72%, respectively. (2) The harvest managements significantly reduced ($P<0.05$) the RLD of alfalfa. The RLD of alfalfa was the largest in late April, and the RLD of alfalfa in late June and late August was significantly decreased ($P<0.05$). The effect of harvest managements on intercropped alfalfa was greater than that of sole-cropped alfalfa. The performance of the RLD was that of sole-cropped alfalfa in late April > intercropped alfalfa in late April > sole-cropped alfalfa in late June > intercropped alfalfa in late June > sole-cropped alfalfa in late August > intercropped in late August. Poplars were less affected by intercropping. Local alfalfa was harvested 3 times a year, and the FSRL would peak after each harvest of intercropped alfalfa. The peak value of intercropped alfalfa was 12.3%~21.82% higher than that of the corresponding monocrops. In early June and late August, the FSRL of intercropped poplar showed a peak, the peak value of intercropped poplar was 2.8%~16.7% higher than the corresponding monocropped poplar. (3) The yield of alfalfa from intercropping system in the whole growing season decreased by 48.3% compared with that from sole-cropped alfalfa. By calculating the land equivalent ratio, $LER=1.42$, it shows that this intercropping mode had more yield advantages than sole cropping. (4) Correlation analysis showed that RLD was significantly positively correlated with alfalfa hay yield, and the key factor to increase the yield of intercropping alfalfa hay was to increase RLD. In summary, intercropping was not beneficial to the RLD and ARD of alfalfa yield and root system, but promoted the increase of FSRL of alfalfa and the distribution and development of poplar root system. Compared with single cropping, intercropping had the potential to improve the efficiency of resource utilization and the ecological and economic benefits of shelter belt in Xinjiang.

Keywords: poplar || alfalfa; root distribution characteristics; average root diameter; land equivalent ratio; biomass; competitive advantage

新疆是我国五大牧区之一,不合理放牧对生态平衡造成威胁,加上新疆属于干旱和半干旱地区,生态系统一旦破坏是难以恢复的^[1-2]。而农林复合经营是一种可持续的种植模式,它是低投入资源节约型的生态农业方式,为实现北疆牧草经济效益和环境效益的统一提供了有效的解决途径^[3]。在中国西北地区退耕还林、防沙治沙和草牧场防护林等生态建设工程中采用农林复合种植模式,既能发挥其生态防护功能,又能为畜牧业的发展提供相当数量的饲草补充,实现生态环境治理与经济的有效统一^[4]。林草复合系统能提高系统内的生物多样性,降低外部能源的输入,对林木有显著防护效应,在干旱的农作地区可以有效防止水分蒸发、防风固沙和保持水土,并能固定土壤碳,创造相对适合的土壤环境^[5-10]。因此农林复合系统受到了越来越多的关注。

农林复合系统中根系结构直接改变地下和地上部分资源的可用性和气候条件,严重影响作物产量及生长发育状况^[11-13]。近些年国内有研究表明林下作物产量受到来自近林带树木根系对资源的强势竞争,是限制间作体系生产力的主要因素^[14]。如果林下树木与作物根系交互过于密集,地下部分的资源竞争就会加剧;过于稀疏,则不能充分发挥间作在资源高效利用上的优势^[15]。根系在水平和

垂直方向上的分布受遗传、耕作方式和土壤环境因素的影响,另外随着植株生长,其根系分布也会有改变^[16]。因此研究复合系统根系分布特征、生理生态及其交互作用是提高复合系统效率的关键,而当下研究根系交互作用时通常使用根长密度(root length density, RLD)和平均根直径(average root diameter, ARD)和比根长(specific root length, SRL)等指标,忽略了细根比根长(FSRL)对根系交互作用表现更为敏感的问题^[17-19]。本研究研究了杨树和苜蓿间作的RLD、ARD和FSRL在土壤中的分布特征,并分别与单作杨树和单作苜蓿比较,以期为林草复合系统在北疆的推广优化及林草间作管理提供理论参考与实践依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点

研究地点位于新疆维吾尔自治区石河子市147团七连(东经 $86^{\circ}10'$,北纬 $44^{\circ}37'$;平均海拔450 m)。该地属于典型的温带大陆性气候,年平均气温 $6.6\sim 7.1^{\circ}\text{C}$,年降水量 $189\sim 200\text{ mm}$,年蒸发量 $1\ 500\sim 2\ 000\text{ mm}$,无霜期 $148\sim 187\text{ d}$ ^[20-22]。试验地土壤类型为轻盐渍化灌耕荒漠土,土壤有机质含量为 $17.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾的含量为 $135.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $18.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $5.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

这项试验于2018—2019年在一块8 a生人造杨树林进行,试验设3个处理,分别是杨树||苜蓿、单作杨树和单作苜蓿,每个处理各有3个重复小区(小区面积3 m × 6 m)。单作和间作杨树种植于2012年9月,南北向种植,杨树品种为‘新疆杨’,行株距为5.6 m × 1.4 m;间作和单作苜蓿播种于2015年9月,苜蓿品种为‘三得利’,由百绿(天津)国际草业有限公司提供。本试验采用当地农学家建议的田间管理方法,使用滴灌带进行灌溉,每年灌水6次,每次灌水500 m³ · hm⁻²。

1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 根样的采集及测定 采用连续钻土取样法采集根样,此方法对土壤和植株破坏程度较小,可以多时期多层次对根系进行取样(如图1所示)。2018—2019年的4月下旬至9月下旬,每隔15 d在各小区取样调查。间作区取样时,首先选取中间树行长势基本相同的3株样本树,然后在垂直于树行两侧距样本树底部30、60、90、120、150 cm和180 cm距离处分别取0~20、20~40 cm和40~60 cm深度的土壤样品(体积141 cm³)。单作杨树区取样的时间和方法与间作区一致。单作苜蓿区为避免边行效应可能对取样结果的代表性有影响,从距离地边至少50 m处取样,取样时在苜蓿行中间选取连续等距的6个采样点,每个采样点间隔距离为30 cm。获得的土芯样倒入纱网(40目)中在2 L水中浸泡12 h,然后用水冲洗掉全部土浆,将洗净后的根系低温保存。在实验室根据颜色、质地区分苜蓿、杨树根系(杨树根为棕色,质地较硬;苜蓿根为乳白色,质地较软),去除死根和其他杂质并将苜蓿、杨树根系分为粗根和细根(根直径小于2 mm的定义为细根,大于2 mm的定义为粗根)。

使用WinRHIZOTM图像分析软件对根长进行分析。将根样整齐摆放在一张A4纸上,拍照保存。通过软件扫描照片分析可以测得根的长度和平均根直径。扫描后的根在72℃下进行烘干,称重得到根的干物质质量。结合以上数据计算^[23]:

根长密度(cm · cm³) = 根长/根钻取土量(141 cm³)
比根长(cm · mg⁻¹) = 根长(cm)/根干物质质量(mg)

1.3.2 植株样品采集及测定 测定了2018—2019年杨树的地上生物量,苜蓿的产量。

(1)根据单位面积主径体积计算杨树的地上生物量。

主径体积 $V = \pi/12(D_{b2} + D_{l2} + D_b D_l H)$

其中, D_b 为杨树底部直径, D_l 为杨树顶部直径, H 为杨树高^[24]。

(2)刈割1 m × 1 m的苜蓿并测定苜蓿干物质的量来计算干草产量。苜蓿在初花期进行收割,每年刈割3次,本试验分别于6月中旬、7月下旬、9月上旬进行刈割。

1.3.3 土地当量比(LE_R) LE_R是评估间作体系种植模式有效性的最常用指标,普遍应用于农林体系^[25-26]。LE_R反映杨树||苜蓿系统与单一种植相比是否具有优势:

$$LE_R = (IA/MA) + (IS/MS)$$

式中, IA 和 IS 分别是间作苜蓿和杨树的单位地上生物量值, MA 和 MS 分别是单作苜蓿和杨树地上生物量值。LE_R大于1.0说明与单作相比间作具有优势,而小于1.0说明间作不具有优势。

1.3.4 竞争优势 用竞争优势表示复合系统中杨树相对于紫花苜蓿的资源竞争能力大小:

$$A_{sa} = Y_{ss}/(Y_{is} F_{is}) - Y_{sa}/(Y_{ia} F_{ia})$$

式中, A_{sa} 为杨树相对苜蓿的资源竞争力, Y_{ss} 、 Y_{sa} 分别为单作杨树主茎体积产量、单作苜蓿干草产量, Y_{is} 、 Y_{ia} 分别为间作杨树主茎体积产量、间作苜蓿干草产量, F_{is} 、 F_{ia} 分别为间作杨树、间作苜蓿所占面积比例。当 $A_{sa} > 0$ 时,表明杨树竞争能力强于苜蓿, $A_{sa} < 0$ 时反之。

1.4 数据分析

采用R3.6.1作图并进行方差分析。根长密度(RLD)的空间分布用WinSURFER 13.0制作的等高线图表示。

2 结果与分析

2.1 根长密度(RLD)分布特征

2.1.1 单作和间作苜蓿 RLD 随时间变化的分布特征 苜蓿 RLD 随生长时间变化明显,RLD 值具体表现为单作4月下旬苜蓿>单作6月下旬苜蓿>单作8月下旬苜蓿,间作苜蓿的 RLD 趋势与单作一致。如图2所示不同的种植制度 RLD 也有差异,表现为单作苜蓿 RLD >间作苜蓿 RLD。6月下旬(第二次刈割) RLD 差异最大,单作苜蓿比间作苜蓿 RLD 分别高53.2%和48.7%。在第二次刈割前后单作苜蓿的 RLD 在0~20、20~40 cm和40~60 cm的土层深度中分别降低了58.4%、62.3%和68.7%;间作苜蓿的 RLD 在0~20、20~40 cm和40~60 cm的土层深度中分别降低了35.8%、55.3%和63.5%。

2.1.2 单作和间作杨树 RLD 在不同土层中的分布特征 杨树的 RLD 在不同土层中随季节变化表现差异不同,间作杨树的根长密度始终大于单作杨树的根长密度,最显著的差异表现在6月下旬和8月

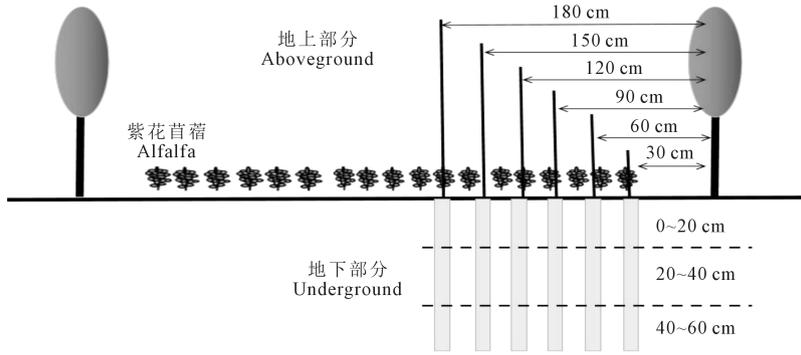
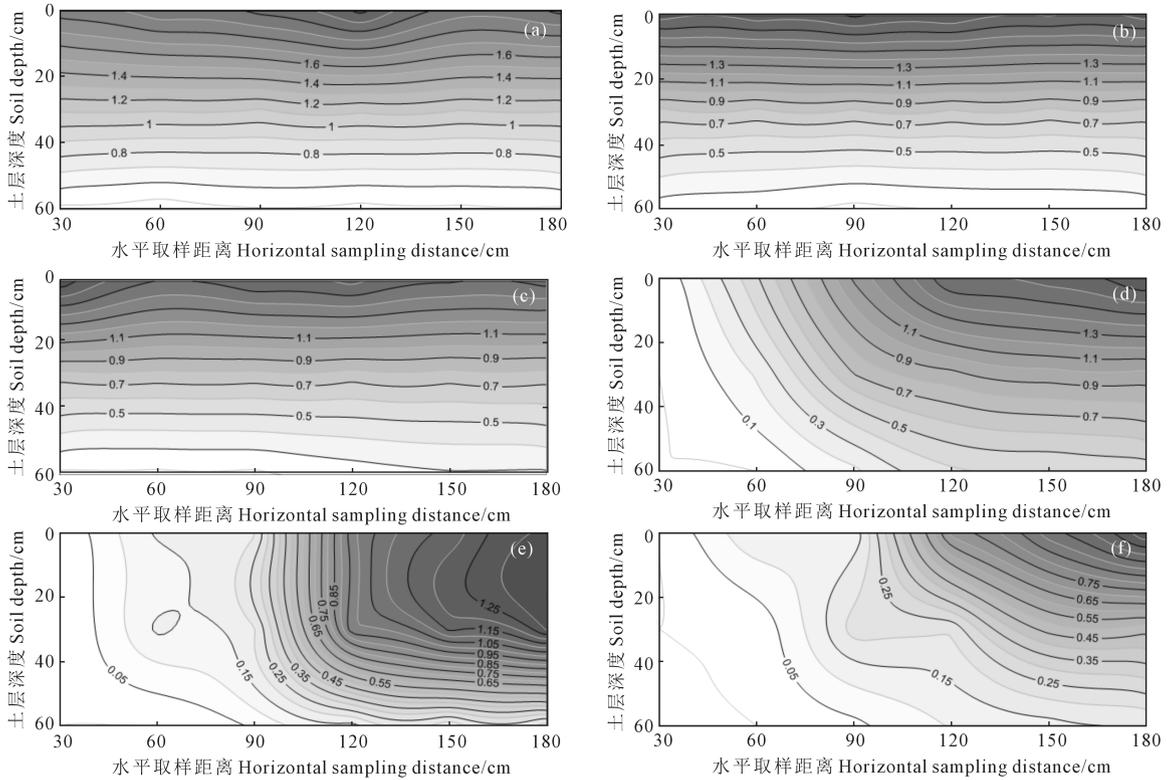


图 1 连续根钻采样示意图

Fig.1 Diagram and sampling point of the poplar || alfalfa silvopasture system



注：(a)：4月下旬单作苜蓿；(b)：6月下旬单作苜蓿；(c)：8月下旬单作苜蓿；(d)：4月下旬间作苜蓿；(e)：6月下旬间作苜蓿；(f)：8月下旬间作苜蓿。

Note：(a)：Sole-cropped alfalfa in late April；(b)：Sole-cropped alfalfa in late June；(c)：Sole-cropped alfalfa in late August；(d)：Intercropped alfalfa in late April；(e)：Intercropped alfalfa in late June；(f)：Intercropped alfalfa in late August.

图 2 单、间作苜蓿 RLD 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of sole and intercropped alfalfa

下旬,且 0~40 cm 差异达显著水平 ($P < 0.05$)。在杨树的生长季,0~40 cm 土层的 RLD 逐渐升高,其中 6 月下旬间作杨树 RLD > 8 月下旬间作杨树 RLD > 4 月下旬间作杨树 RLD,单作杨树 RLD 表现为相同的规律。如图 3,杨树 || 苜蓿中发现 0~20 cm 土层间作杨树的 RLD 在 6 月下旬和 8 月下旬间作比单作杨树分别高 25.6% 和 46.9%, 20~40 cm 土层 6 月下旬和 8 月下旬间作比单作杨树分别高 14.2% 和 17.6%。间作和单作杨树的 RLD 随着离树的距离增加而逐渐减小。

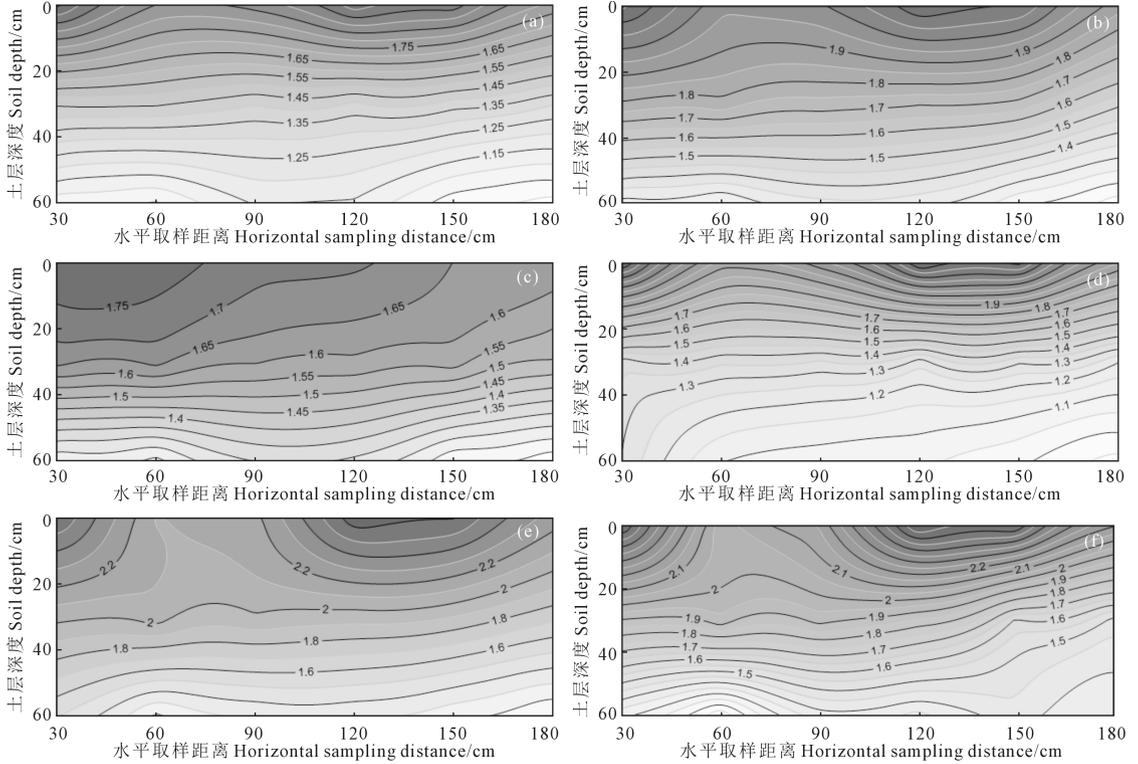
2.2 平均根直径 (ARD) 分布特征

2.2.1 单作和间作苜蓿 ARD 分布特征

使用苜蓿生长区域的采样点数据 (距离树行 120、150 cm 和 180 cm) 对杨树 || 紫花苜蓿复合系统中紫花苜蓿的 ARD 时空分布进行分析 (图 4)。单作苜蓿 ARD 在各个时间段和土层显著高于间作 ($P < 0.05$)。在 0~20 cm 土层中单、间作苜蓿的 ARD 呈现上升趋势,在 20~60 cm 土层中受刈割影响 ARD 出现波动。在刈割前苜蓿 ARD 出现 3 个波峰,分别出现在 6 月上旬、7 月中旬和 9 月上旬。其中在 0~20 cm 土层中,单、间作苜蓿的 ARD 在 6 月下旬差异最大,单作

比间作高 21.23%; 在 20~40 cm 土层中, 单、间作苜蓿的 ARD 在 8 月上旬差异最大, 单作比间作高 59.49%;

在 40~60 cm 土层中单、间作苜蓿的 ARD 在 5 月和 9 月差异显著, 单作比间作分别高 27.15% 和 29.41%。



注: (a): 4 月下旬单作杨树; (b): 6 月下旬单作杨树; (c): 8 月下旬单作杨树; (d): 4 月下旬间作杨树; (e): 6 月下旬间作杨树; (f): 8 月下旬间作杨树。

Note: (a): Sole-cropped poplar in late April; (b): Sole-cropped poplar in late June; (c): Sole-cropped poplar in late August; (d): Intercropped poplar in late April; (e): Intercropped poplar in late June; (f): Intercropped poplar in late August.

图 3 单作和间作杨树的 RLD 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of sole and intercropped poplar

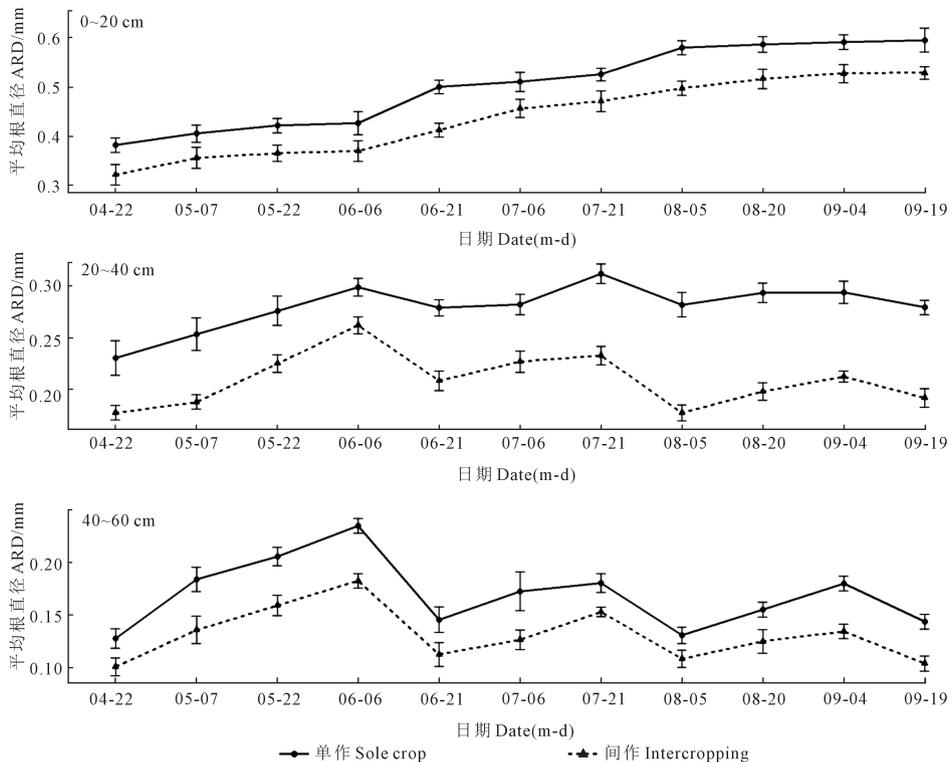


图 4 不同土层深度中单作和间作苜蓿平均根直径 (ARD) 时空分布

Fig.4 Temporal distribution of average root diameter (ARD) of sole and intercropped alfalfa at different soil depth

2.2.2 单作和间作杨树 ARD 分布特征 如图 5 所示,单、间杨树 ARD 在杨树整个生育期中逐渐增加,0~40 cm 土层中单作杨树 ARD 在各时段总是显著低于间作 ($P < 0.05$)。在 0~20 cm 土层中单、间作 ARD 在 9 月初差异最大,单作杨树 ARD 比间作低 16.34%。在 20~40 cm 土层中 ARD 在 6 月之后差异逐渐显著,在 8 月下旬差异最大,单作杨树 ARD 比间作低 21.58%。在 40~60 cm 土层中,单、间作杨树在整个生育期无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.3 细根比根长 (FSRL) 分布特征

2.3.1 苜蓿 FSRL 分布特征 如图 6 所示,杨树 || 苜蓿复合系统的 FSRL 随着时间呈波动性变化。0~20 cm 土层中,间作和单作苜蓿的 FSRL 呈下降趋势;在 0~40 cm 土层中,间作苜蓿的 FSRL 值始终高于单作 ($P < 0.05$);20~60 cm 土层中,间作和单作苜蓿的 FSRL 与刈割相关,刈割后苜蓿的 FSRL 值先上升后下降,直至下一次刈割后又上升。2018 年的试验数据表明,在 0~20 cm 土层中,单作和间作苜蓿 FSRL 值在 6 月下旬差异最大,间作苜蓿 FSRL 值比单作高 25.64%;在 4 月下旬单作和间作苜蓿 FSRL 值差异最小,间作比单作高 11.46%。在 20~40 cm 土层中,单作和间作苜蓿 FSRL 值在 6 月下旬差异最大,间作苜蓿 FSRL 值比单作高 33.62%;在 4 月下旬单作和间作苜蓿 FSRL 值差异最小,间作比单作

高 13.83%。在 40~60 cm 土层中,单作和间作苜蓿的 FSRL 值在 4 月下旬和 8 月下旬没有显著性差异 ($P > 0.05$),在其他时间段均有差异,其中在 6 月下旬差异最大,间作比单作苜蓿高 21.82%。

2.3.2 杨树细根的 FSRL 分布动态 从杨树生长季到结束,细根比根长随季节变化趋势类似,单作的细根比根长始终高于间作 (图 7)。在 0~20 cm 土层中杨树活细根随季节呈下降趋势。在 20~60 cm 土层中,细根比根长在 6 月上旬和 8 月下旬各出现了 1 次高峰,6 月上旬峰值高于 8 月下旬。在 9 月上旬比根长达到最低值后,又出现了上升的趋势。单、间作比根长的最高和最低谷值出现时间一致,单作的两个高峰分别发生在 6 月上旬和 8 月下旬,最低谷出现在 9 月上旬;间作的最高峰比单作分别高 10.6%~13.4% 和 2.8%~16.7%。间作与单作 FSRL 值的差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 土地当量比 (LER)

单、间作苜蓿总产量相比,间作苜蓿的整个生长季干草产量减少了 43.8% (表 1)。3 次收获期中,单、间作苜蓿第一次干草产量均最高,随着刈割次数的增加产量降低。具体表现为,单作苜蓿第二次刈割干草产量比第一次降低 30.7%,第三次刈割比第二次产量降低 22.4%。间作苜蓿第二次刈割比第一次降低 38.9%,第三次刈割比第二次刈割降低

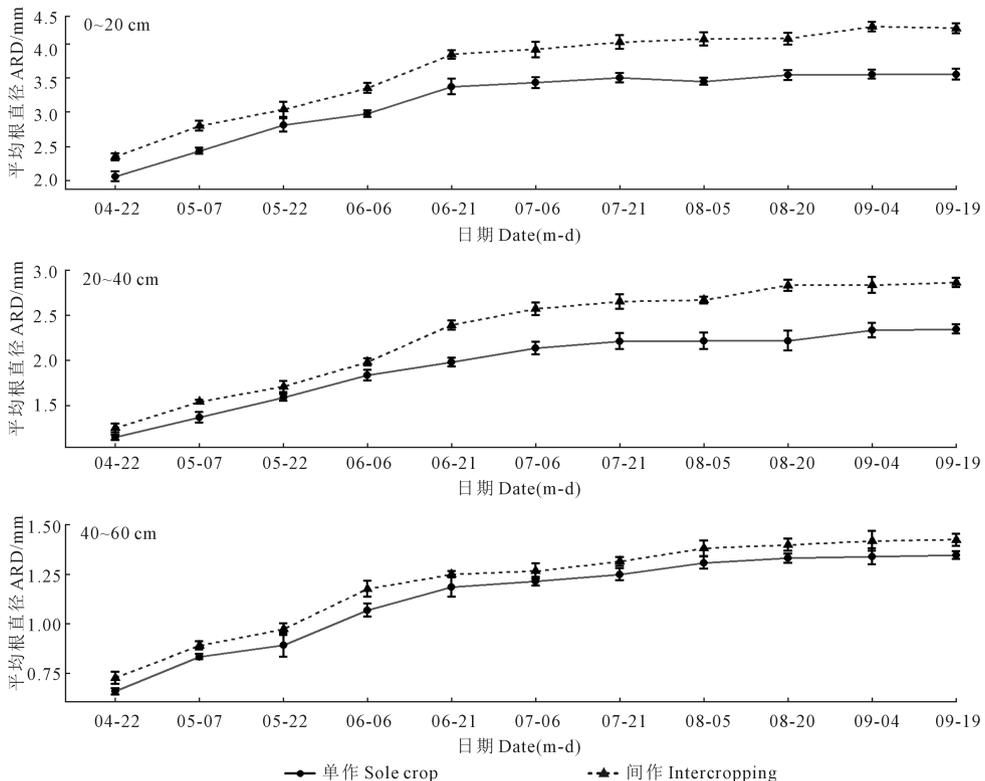


图 5 不同土层深度中单作和间作杨树平均根直径 (ARD) 时空分布

Fig. 5 Temporal distribution of average root diameter (ARD) of sole and intercropped poplar at different soil depth

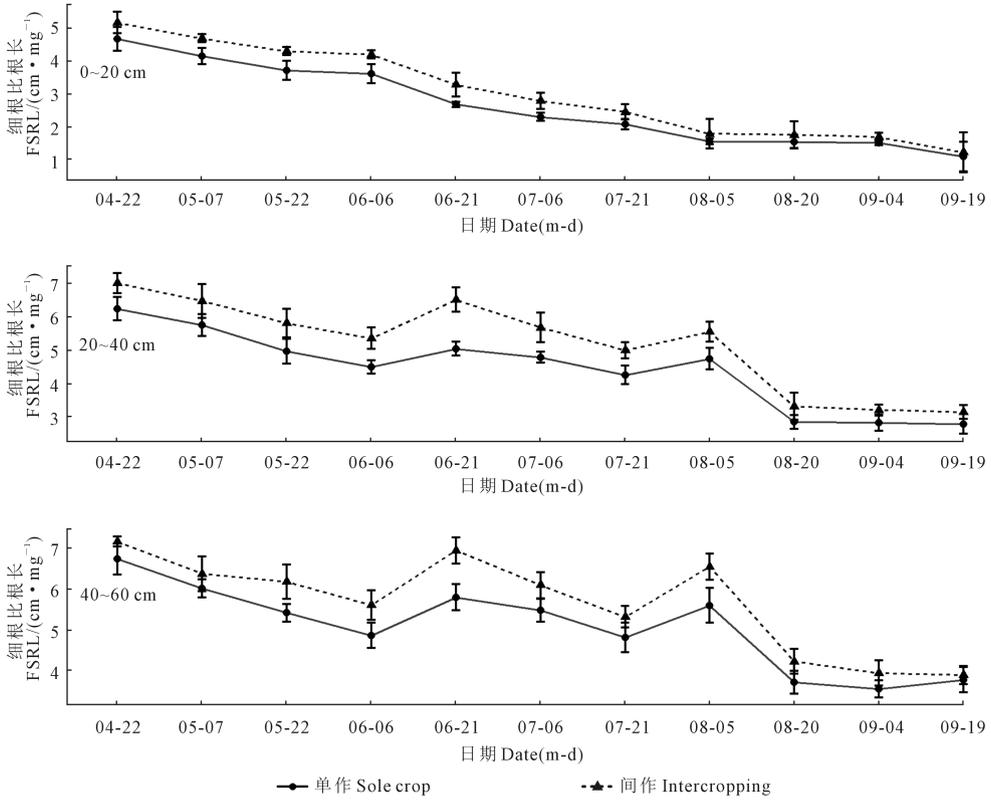


图 6 不同土层深度中单作和间作苜蓿细根比根长 (FSRL) 时空分布

Fig.6 Temporal distribution of fine specific root length (FSRL) of sole and intercropped alfalfa at different soil depth

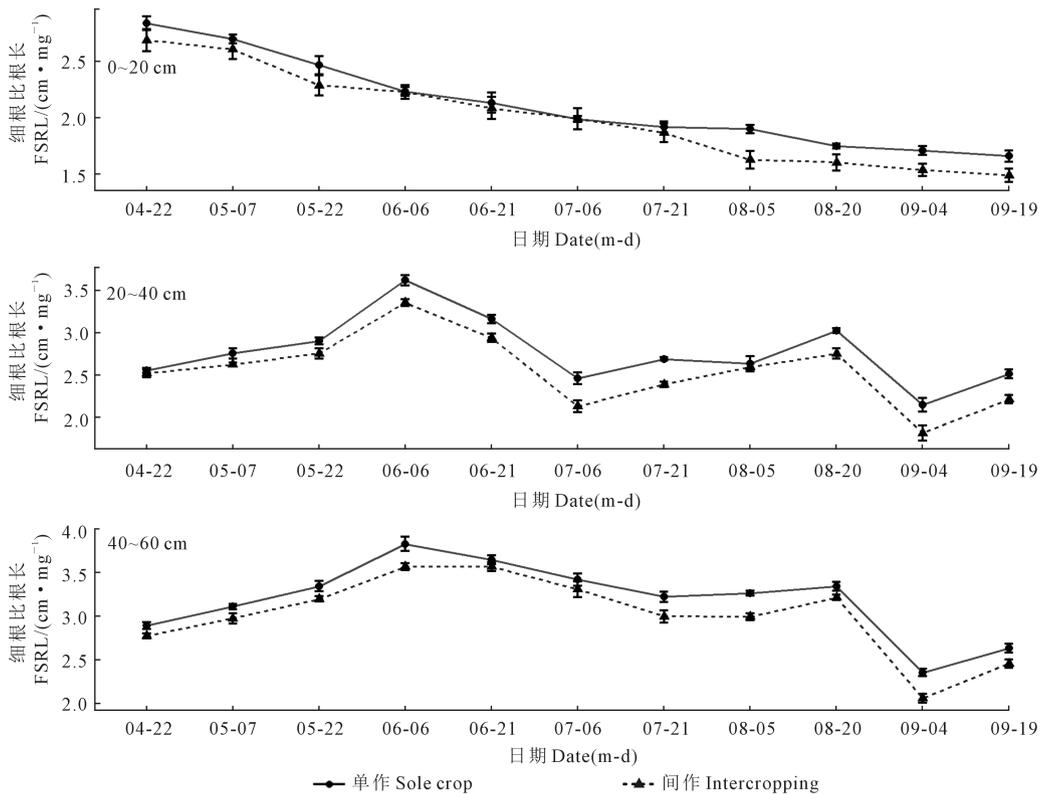


图 7 不同土层深度中单作和间作杨树细根比根长 (FSRL) 时空分布

Fig.7 Temporal distribution of fine specific root length (FSRL) of sole and intercropped poplar at different soil depth

表 1 单、间作苜蓿干草产量和杨树主茎体积产量

Table 1 Hay yield of alfalfa and stem volume yield of poplar in sole and intercropping systems

收获期 Harvest time	苜蓿干草产量/(kg·hm ⁻²) Hay yield of alfalfa				杨树主茎体积产量/(m ³ ·hm ⁻²) Stem volume yield of poplar				A _{sa} /(kg·hm ²)
	单作 Sole	间作(净面积) Intercropped (net area)	间作(总面积) Intercropped (gross area)	显著性 Significance	单作 Sole	间作 Intercropped	显著性 Significance	LER	
第一次 1st harvest	7060.03	4403.815	3498.825	*					
第二次 2st harvest	4889.88	2688.28	2144.45	*					-
第三次 3st harvest	3793.42	1757.92	1398.385	*					-
合计 Total	15743.47	8850.02	7041.66	*	148.63	143.92	NS	1.42	2.54

注:第一次收获(6月上旬),第二次收获(7月下旬),第三次收获(9月上旬),使用小区总面积中苜蓿的产量计算 LER。“*”表示在 $P < 0.05$ 的水平上单作和间作有显著性的差异;“NS”表示在 0.05 的水平上单作和间作没有显著性差异。

Note: The first harvest (in early June), the second harvest (in late July), and the third harvest (in early September), and the LER was determined using the gross area of intercropped alfalfa. “*” indicates significant difference between the sole and intercropping treatments ($P < 0.05$); “NS” indicates no significant difference ($P < 0.05$).

34.6%。间作苜蓿 3 次收获产量均显著低于单作($P < 0.05$)。因此,间作导致干草产量下降,刈割次数越多产量下降越多。另一方面,间作随刈割次数的增多,干草产量的降低速率高于单作,且达显著水平。这可能是受到苜蓿本身品质和种间对资源竞争的影响导致苜蓿刈割后再生所需的资源不足,再生产量下降。间作对杨树主茎体积产量没有显著性影响($P > 0.05$)。结果表明杨树||苜蓿系统的 LER(1.42) 大于 1,说明这种间作模式相比单作更具优势。

2.5 单、间作苜蓿中根系指标与干草产量的相关性分析

由表 2 和表 3 可知,单、间作苜蓿的干草产量与 RLD 之间呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.9986 和 0.9901。在单、间作苜蓿中 ARD 及 FSRL 与苜蓿干草产量分别呈正相关和显著负相关关系,单作下相关系数分别为 0.4235 和 -0.9099,间作下相关系数分别为 0.8677 和 -0.8926。说明 RLD、ARD 增长有利于苜蓿干草产量的提高,间作的干草产量与 ARD 表现出更强的正相关关系,而 FSRL 的增长不利于干草产量的提高。

单、间作苜蓿 RLD 与 FSRL 之间呈显著负相关关系,相关系数分别为 -0.9302 和 -0.8204; RLD 与 ARD 之间呈正相关关系,相关系数分别为 0.4700 和 0.6289; ARD 与 FSRL 之间呈负相关关系,相关系数分别为 -0.6611 和 -0.5504。结果表明,较粗的 ARD 对 RLD 增长有贡献作用,而 FSRL 的增长伴随着 ARD 和 RLD 的降低,FSRL 的增长是苜蓿与杨树竞争中处于弱势的表现。

表 2 单作苜蓿的根系指标与干草产量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of root index and hay yield in sole-cropped alfalfa

指标 Index	根长密度 RLD	平均根直径 ARD	细根比根长 FSRL	干草产量 Hay yield
根长密度 RLD	1			
平均根直径 ARD	0.4700	1		
细根比根长 FSRL	-0.9302*	-0.6611	1	
干草产量 Hay yield	0.9986**	0.4235	-0.9099*	1

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关($n = 10$)。下同。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates significant correlation ($P < 0.01, n = 10$). The same below.

表 3 间作苜蓿中根系指标与干草产量的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of root index and hay yield in intercropped alfalfa

指标 Index	根长密度 RLD	平均根直径 ARD	细根比根长 FSRL	干草产量 Hay yield
根长密度 RLD	1			
平均根直径 ARD	0.6289	1		
细根比根长 FSRL	-0.8204*	-0.5504	1	
干草产量 Hay yield	0.9901**	0.8677*	-0.8926*	1

3 讨论

间作会导致系统内弱势植物的生理指标下降,间作苜蓿 RLD、ARD 降低是与杨树发生资源竞争的结果。在本研究中,苜蓿根系竞争力比杨树根系弱,在资源竞争中处于劣势,导致间作苜蓿的 RLD、ARD 低于单作。Bayala^[28]报道,非洲刺槐||高粱,由于高粱与刺槐在对水资源的竞争中处于劣势,导致高粱 RLD、ARD 降低。受环境和刈割制度的影响,造成苜蓿 RLD、ARD 在不同深度和季节发生变化,表现为苜蓿 RLD、ARD 从4月下旬第一次刈割开始呈降低趋势并与单作苜蓿的 RLD 差异逐渐增大,每次刈割都会导致 RLD、ARD 急剧下降;在20~60 cm 土层中刈割后 RLD、ARD 会出现增长但不会恢复到刈割前水平。说明刈割会对苜蓿的根系分布和发育产生抑制,导致刈割后 RLD、ARD 降低,即使刈割后苜蓿重新进入返青期也不会达到原有水平,间作中刈割对紫花苜蓿分布和发育产生的抑制作用更强烈。但在0~20 cm 土层中单、间作苜蓿的 ARD 呈现上升趋势,这可能是表层根系对刈割反应不敏感的原因。间作中苜蓿距离杨树根部越近 RLD 越小,其他农林复合系统也报告了类似的结果,例如王宝驹等^[26]报道的枣麦间作系统中越靠近树行小麦 RLD 越小。间作杨树 RLD 在0~20 cm 的土层显著高于单作杨树,反映出林下种植苜蓿对保持水土和改良土壤具有的突出作用^[29-30]。北疆是典型的干旱区,潜在蒸发量超过2 000 mm,由于干旱少雨,地下水位浅(平均地下水位在3 m 以下),多用于放牧,必须灌溉才能取得较高的农业收益^[31]。大部分土壤水分(灌溉)和养分(施肥)都位于表层土壤中,这可能是树木和作物根系分布于土壤剖面0~60 cm 的一种解释。

根系形态结构的变化与地下资源的竞争关系密切,对当前环境变化表现出可塑性^[32-33]。FSRL 是根系形态结构特征的重要参数,可以被视为根对养分吸收与消耗的反应指标。植物通过增加 FSRL 提高对资源的竞争力^[34]。我们的研究表明,间作苜蓿的 FSRL 高于单作苜蓿,说明与杨树的竞争促进了间作苜蓿资源竞争力的提高;与单作杨树相比,间作杨树的 FSRL 较大,说明与苜蓿间作促进了杨树对资源的吸收和利用。试验结果表明,每次刈割都会促进苜蓿 FSRL 增加,到达峰值后急剧下降,直至下次刈割 FSRL 再次增加。这是由于苜蓿收获后地上部分同化器官遭到破坏,造成大量的根死亡,随着苜蓿地上部分的再生,光合作用得到恢复,根

系也进入再生期^[35]。再生期的苜蓿细根相比刈割前直径更小,数量更少,FSRL 开始增加。间作杨树根系的 FSRL 在土壤表层(0~20 cm) 随时间推移逐渐下降。甘雅文等^[36]研究发现树木根系分布较深,土壤表层的 FSRL 随时间推移降低,平均根直径逐渐增长证实了这一点。单作杨树的细根 FSRL 在4月下旬和6月下旬出现波动变化,表现为先升高后降低再升高至最高值。树木细根的生长是一个复杂的生理生态过程,杨树为落叶阔叶树种,4月下旬细根的生长先于叶生长,这种生长模式利用了上一年根系中储存的碳水化合物^[37-38]。Pregitzer 等^[39]认为土壤积温是重要的影响因素;Burton 等^[40]对北美槭树(*Acer saccharum*) 的研究表明,4月下旬细根的生长随着土壤温度增加而增加,同时与氮的有效性呈明显正相关。这些研究结果可以解释本试验杨树细根波动变化的原因。4月末细根开始生长,此时杨树未展叶,FSRL 开始迅速增长;4月下旬土壤积温较低,死根的生物量增加导致5月末 FSRL 开始降低;6月下旬土壤温度逐渐升高,促进了细根的生长,FSRL 数量开始上升;8月下旬土壤积温和土壤有效氮含量达到最大值,树冠生长稳定。生长出来的细根较短且直径较粗,FSRL 迅速降低至最低值。此外,本研究发现与单作杨树相比,间作 FSRL 的峰值更高,这可能与间作体系的恢复效应促进间作细根生长有关。复合系统中在作物生长后期特别是短生长期作物收获后会演变为互补作用。Querné 等^[41]研究表明随着树龄的增加树的根系逐渐发达,林下作物对树根系的影响会逐渐减小,与生物固氮作物间作可以促进树的根系生长发育。本研究通过对间作和单作杨树的比根长分析证实了这一点。农林复合经营的总体效益受多因素的影响:受不同组合模式(物种与田间配置)、植物总密度和管理制度等的共同作用^[42],因此还需要进一步研究间作杨树的根系修剪管理。通过调整管理措施,可以进一步优化林草间作的经济效益。

在 RLD、ARD 和 FSRL 与苜蓿干草产量的相关性分析中发现,RLD 和 ARD 与干草产量呈显著正相关,FSRL 与苜蓿干草产量呈显著负相关。说明间作虽然提高了苜蓿在间作中对资源的竞争力,但不利于干草产量提高,可能是由于苜蓿的生长受到杨树的威胁导致苜蓿在资源的分配上更倾向于根系发育,对地上部分同化器官的发育产生不利影响。这也是虽然间作苜蓿通过增加 FSRL 来提高资源竞争力,但干草产量比单作苜蓿低的原因。RLD、ARD 和 FSRL 之间的相关性分析表明,RLD、ARD 与

FSRL 之间存在负相关,RLD 与 ARD 之间存在正相关,说明提高苜蓿产量的关键在于提高苜蓿的 RLD 和 ARD。

本试验中间作导致紫花苜蓿的总干草产量降低了 43.8%,而对杨树主茎体积没有显著影响。说明杨树相较于苜蓿具有较强的竞争力,其竞争优势为 2.54。地中海地区的一项研究也有类似的发现,间作苜蓿与单作比减产了 21%~35%^[43]。此外,随着刈割次数的增加,单、间作苜蓿产量持续下降,第一次刈割对产量下降的影响最大,第二次刈割的干草产量与第一次刈割相比低 30.7%~38.9%,间作苜蓿产量受刈割次数的影响比单作大。说明第一次刈割对紫花苜蓿地上部分同化器官破坏最大,苜蓿干草产量下降显著,紫花苜蓿地上部分同化器官恢复力被破坏严重,在第二次和第三次刈割产量差异较弱,表现出较强的恢复力。在玉米 || 黑核桃、银杏 || 油菜模式中也发现了类似的产量下降^[44-45]。尽管研究结果表明间作会导致林下作物减产,但是农林复合系统的经济效益取决于同一土地上不同作物效益之和。收获林下作物的同时,还可以得到林木生产食物(如水果和坚果)、薪材、药品和其他产品,充分发挥经济效益^[46-47]。郑伟^[48]研究发现在苹果树下种植牧草,使苹果园单位面积的经济收益提高了 15.7%~36.22%。本试验中苜蓿 || 杨树 LER(1.42)大于 1,说明农林复合系统比单一种植更具有产量优势。

4 结 论

间作杨树和苜蓿的根系发生了生态位重叠,距离树行越近 RLD 越大,表现出明显的竞争关系;间作杨树与苜蓿的 FSRL 也受到间作影响,均低于单作,但差异不显著。此外,随着树龄增长,杨树在间作中的竞争优势越来越明显。紫花苜蓿对杨树根系有明显保护作用,在 0~20 cm 土层中苜蓿覆盖区域下的杨树 RLD、ARD 与单作杨树相比有显著的增加,尤其是在温度升高的夏季,苜蓿对杨树根系的保护更加显著。本研究发现间作促进了杨树在 20~40 cm 土层中 FSRL 的增加,一定程度上避免了杨树与苜蓿对土壤养分的竞争。

RLD 与苜蓿干草产量呈极显著正相关,FSRL 与苜蓿干草产量呈显著负相关,因此提高苜蓿 RLD 并降低 FSRL 是提高间作苜蓿产量的关键。刈割会影响根系 RLD、FSRL、ARD 在土层中的分布以及苜蓿产量,与单作相比间作受到刈割的影响较大。刈割后根系 RLD、FSRL、ARD 降低,在杨树和苜蓿整

个生育期中波动变化。随着刈割次数的增加,苜蓿的产量下降越多。间作对杨树主茎体积无显著影响,在收获木材的同时还能收获苜蓿,杨树与苜蓿间作有较高的经济价值。

参 考 文 献:

- [1] 徐丽君,徐大伟,逢焕成,等. 中国苜蓿属植物适宜性区划[J]. 草业科学,2017,34(11): 2347-2358.
- [2] 冉锦成,苏洋,胡金凤,等. 新疆畜牧养殖经济效益与碳排放脱钩关系的实证研究[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(1): 17-23.
- [3] Carsan S,Stroebel A,Dawson I. Can agroforestry option values improve the functioning of drivers of agricultural intensification in Africa[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability,2014,6: 35-40.
- [4] 张雷一,张静茹,刘方,等. 林草复合系统的生态效益[J]. 草业科学,2014,31(9): 1789-1797.
- [5] 季宝平,杨维,韩朝阳,等. 平原农业区林业发展制约因素分析及定位研究[J]. 陕西林业科技,2009,(2): 125-127.
- [6] Schoeneberger M M. Agroforestry: Working trees for sequestering carbon on agricultural lands[J]. Agroforestry Systems,2009,75(1): 27-37.
- [7] Dear B S,Peoples M B,Cocks P S, et al. Nitrogen fixation by subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) growing in pure culture and in mixtures with varying densities of lucerne (*Medicago sativa* L.) or phalaris (*Phalaris aquatica* L.) [J]. Australian Journal of Agriculture Research,1999,50(6): 1047-1058.
- [8] Mcallum M H,Peoples M B,Connor D J. Contributions of nitrogen by field pea (*Pisum sativum* L.) in a continuous cropping sequence compared with a lucerne (*Medicago sativa* L.) based pasture lie in the Victorian Wimmera[J]. Australian Journal of Agriculture Research,1999,51(1): 13-22.
- [9] Bowman A M,Peoples M B,Smith W, et al. Factors affecting nitrogen fixation by dry land lucerne in central-western New South Wales[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture,2002,42(4): 439-451.
- [10] Herridge D,Peoples M,Boddey R. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems[J]. Plant and Soil,2008,311(1-2): 1-18.
- [11] Dufour L,Metay A,Talbot G, et al. Assessing light competition for cereal production in temperate agroforestry systems using experimentation and crop modelling[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2013,199(3): 217-227.
- [12] Wang B J,Zhang W,Ahanbieke P, et al. Inter-specific interactions alter root length density,root diameter and specific root length in ju-jube/wheat agroforestry systems [J]. Agroforestry Systems,2014,88(5): 835-850.
- [13] Bouttier L A,Paquette A,Alain M, et al. Vertical root separation and light interception in a temperate tree-based intercropping system of Eastern Canada[J]. Agroforestry Systems,2014,88: 693-706.
- [14] 王红柳,岳征文,卢欣石. 林草复合系统的生态学及经济学效益评价[J]. 草业科学,2010,27(2): 24-27.
- [15] Waddell H A, Simpson R J, Ryan M H, et al. Root morphology and its contribution to a large root system for phosphorus uptake by *Rytidosperma* species (wallaby grass) [J]. Plant and Soil,2017,412(1-2): 7-19.

- [16] 张德闪,李洪波,申建波. 集约化互作体系植物根系高效获取土壤养分的策略与机制[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6): 1547-1555.
- [17] Fransen B, Kroon H D, Berendse F. Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different nutrient availability[J]. *Oecologia*, 1998, 115(3):351-358.
- [18] 梅莉,王政权,韩有志,等. 水曲柳根系生物量、比根长和根长密度的分布格局[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1):1-4.
- [19] 尹飞,王俊忠,孙笑梅,等. 夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2166-2178.
- [20] 唐湘玲,吕新. 石河子地区近48年来气候变化对棉花产量影响分析[J]. 中国农学通报,2010,26(20): 324-329.
- [21] 郭金强,王肖娟. 近50年来新疆石河子地区的气候变化[J]. 青海气象,2012,(1): 46-51.
- [22] 郭金强,王肖娟,朱蓉蓉,等. 石河子地区近50年日照时数变化特征[J]. 青海气象,2013,(2): 48-53.
- [23] Zhang W, Ahanbieke P, Wang B J, et al. Root distribution and interactions in jujube tree/wheat agroforestry system[J]. *Agroforestry Systems*, 2013, 87(4): 929-939.
- [24] Fortier J, Gagnon D, Truax B, et al. Biomass and volume yield after 6 years in multiclonal hybrid poplar riparian buffer strip[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(7): 1028-1040.
- [25] 刘婷婷,滕元旭,杨涛,等. 玉米||棉花的作物生理特性及根系特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 160-165.
- [26] Rao M R, Sharma M M, Ong C K. A study of the potential of hedge row intercropping in semiarid India using a two way systematic design [J]. *Agroforestry Systems*, 1990, 11(3): 243-258.
- [27] Rao M R, Sharma M M, Ong C K. A tree-crop interface design and its use for evaluating the potential of hedgerow intercropping[J]. *Agroforestry Systems*, 1991, 13(2): 143-158.
- [28] Bayala J, Teklehaimanot Z, Ouedraogo S J. Fine root distribution of pruned trees and associated crops in a parkland system in Burkina Faso[J]. *Agroforestry Systems*, 2004, 60(1): 13-26.
- [29] 王宝驹,李隆,李鲁华,等. 南疆枣麦间作系统中根长密度、根表面积密度分布特征[J]. 西北农业学报, 2014, 23(3): 67-73.
- [30] 程积民,万惠娥,王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438.
- [31] 裴宗平,余莉琳,汪云甲,等. 4种干旱区生态修复植物的苗期抗旱性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(3): 204-208.
- [32] 徐春燕. 石河子垦区浅层地下水及土壤水动态研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [33] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. *Plant Physiology*, 1995, 109: 7-13.
- [34] Rosolem C A, Witacker J P T, Vanzolini S, et al. The significance of root growth on cotton nutrition in an acidic low-P soil[J]. *Plant and Soil*, 1999, 212(2): 183-188.
- [35] 鲁为华,任爱天,杨晶晶,等. 滴灌苜蓿田间土壤水盐及苜蓿细根的空间分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 128-137.
- [36] 甘雅文,李隆,李鲁华,等. 新疆核桃与小麦间作系统种间根直径及比根长空间分布特征[J]. 西北农业学报, 2015, 24(5): 56-63.
- [37] Pregitzer K S, King J S, Burton A J, et al. Responses of tree fine roots to temperature[J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 105-115.
- [38] Pregitzer K S. Woody plants, carbon allocation and fine roots[J]. *New Phytologist*, 2003, 158(3): 421-423.
- [39] Pregitzer K S, Deforest J L, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees[J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.
- [40] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests[J]. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389-399.
- [41] Quemé A, Battie-Laclau P, Dufour L, et al. Effects of walnut trees on biological nitrogen fixation and yield of intercropped alfalfa in a Mediterranean agroforestry system [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 84: 35-46.
- [42] Zhang W, Ahanbieke P, Wang B J, et al. Temporal and spatial distribution of roots as affected by interspecific interactions in a young walnut/wheat alley cropping system in northwest China[J]. *Agroforestry Systems*, 2015, 89(5): 299-313.
- [43] Upson M A, Burgess P J. Soil organic carbon and root distribution in a temperate arable agroforestry system[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1-2): 43-58.
- [44] Jose S, Gillespie A R, Seifert J R, et al. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the mid-western USA. 3. Competition for nitrogen and litter decomposition dynamics[J]. *Agroforestry Systems*, 2000, 48: 61-77.
- [45] Cao F L, Kimmins J P, Wang J R. Competitive interactions in ginkgo and crop species mixed agroforestry systems in Jiangsu, China [J]. *Agroforestry Systems*, 2012, 84(3): 401-415.
- [46] Asbjornsen H, Hernandez-santana V, Liebman M, et al. Targeting perennial vegetation in agricultural landscapes for enhancing e-cosystem services[J]. *Renewable Agriculture & Food Systems*, 2013, 29(2): 101-125.
- [47] Liu W W, Li W H, Anthony M F. Traditional agroforestry systems: One type of globally important agricultural heritage systems [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, (4): 306-313.
- [48] 郑伟. 生草覆盖下不同施肥方式对苹果产量品质及水肥利用效率的影响及其机理研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2019.