

# 新疆杨树-紫花苜蓿林草复合系统中 根系分布特征及生产力

杨 涛<sup>1,2</sup>, 鲁为华<sup>3</sup>, 李 斌<sup>1,2</sup>, 段志平<sup>1,2</sup>, 申 磊<sup>1,2</sup>,  
滕元旭<sup>1,2</sup>, 刘婷婷<sup>1,2</sup>, 田钰泉<sup>1</sup>, 张 伟<sup>1,2</sup>, 李鲁华<sup>1,2</sup>

(1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832000; 2. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832000;  
3. 石河子大学动物科技学院, 新疆 石河子 832000)

**摘 要:**为了解杨树(*Populus L.*)-紫花苜蓿(*Medicago sativa L.*)林草复合系统中两种植物根系的分布及相互关系,利用 WinRHIZOTM 对 3 a 生紫花苜蓿和 7 a 生杨树在单作和间作条件下 0~60 cm 土层中的根长密度(RLD)、平均根直径(ARD)和比根长(SRL)的分布进行测定分析。结果表明:间作紫花苜蓿 RLD 降低了 10.01%~54.29%,20~60 cm 土壤中紫花苜蓿 ARD 降低了 11.15%~37.30%,间作苜蓿的 SRL 比单作苜蓿高 10.52%~28.78%;间作增加了 0~40 cm 土层中杨树 ARD 的 20.36%~28.08%,增加了苜蓿种植区域 0~20 cm 土层中杨树 RLD 的 15.51%~34.23%。杨树 SRL 受到的影响较小,仅在 8 月 5 日的 0~20 cm 土层中测得单作和间作 SRL 存在差异,单作杨树 SRL 比间作杨树高 14.46%。单作和间作苜蓿的最高产量均在第一次收获时期,间作降低了苜蓿的产量,在第一次、第二次和第三次收获中产量分别降低了 24.7%、30.9% 和 43.7%,与单作苜蓿相比,杨树/紫花苜蓿林草复合系统中苜蓿的总产量减少了 31.2%。通过计算土地当量比,发现杨树与紫花苜蓿复合经营为杨树林带增加了额外来自紫花苜蓿的收入,能够提高系统 41% 的生产力。综上所述,林草复合系统中紫花苜蓿根系分布及生长受到了不利影响,而杨树根系受到了有利的影响。相比单作种植,林草复合系统有较高的生产力和资源利用效率,具有提高新疆地区防护林带生态和经济回报率的潜能。

**关键词:**林草复合系统;杨树;紫花苜蓿;根系分布特征;产量;新疆  
**中图分类号:**S344.3;S54;S792.11      **文献标志码:**A

## Root distribution characteristics and productivity in a poplar-alfalfa silvopastoral system

YANG Tao<sup>1,2</sup>, LU Weihua<sup>3</sup>, LI Bin<sup>1,2</sup>, DUAN Zhiping<sup>1,2</sup>, SHEN Lei<sup>1,2</sup>,  
TENG Yuanxu<sup>1,2</sup>, LIU Tingting<sup>1,2</sup>, TIAN Yuquan<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Luhua<sup>1,2</sup>

(1.College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;  
2. Key Laboratory of Oasis Agro-Ecology of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832000, China;  
3. College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** In order to investigate the root distribution and relationship of a poplar (*Populus L.*)-alfalfa (*Medicago sativa L.*) silvopastoral system, the spatial distributions of root length density (RLD), average root diameter (ARD), and specific root length (SRL) of 3-year-old alfalfa and 7-year-old poplar in the 0~60 cm soil depth in sole and intercropping systems, were determined and analyzed by WinRHIZOTM software. The result showed that intercropping reduced 10.01%~54.29% RLD of alfalfa, and reduced 11.15%~37.30% of ARD of alfalfa in the 20~60 cm soil layer. The specific root length (SRL) of intercropped alfalfa was 10.52%~28.78% higher than that of

收稿日期:2019-03-21      修回日期:2020-01-31  
基金项目:国家牧草产业技术体系石河子综合试验站项目(CARS-34);国家自然科学基金(31460335,31560376);中国博士后科学基金面上项目(2015M582737)  
作者简介:杨涛(1994-),男,安徽巢湖人,硕士研究生,研究方向为耕作学与农业生态学。E-mail:215550492@qq.com  
通信作者:李鲁华(1967-),女,新疆塔城人,教授,主要从事耕作学与农业生态学研究。E-mail:shzlluhua@163.com  
张伟(1979-),男,新疆玛纳斯人,博士,副教授,主要从事耕作学与农业生态学研究。E-mail:bluesky2002040@163.com

sole alfalfa. Oppositely, intercropping increased 20.36%~28.08% of *ARD* of poplar in the 0~40 cm soil layer, and increased 15.51%~34.23% of the *RLD* of poplar in the alfalfa grown areas in the 0~20 cm soil layer. The poplar *SRL* was less affected, and the difference between sole-cropped and intercropped *SRL* was determined only in the 0~20 cm soil depth on August 5, the sole-cropped poplar *SRL* was 14.46% higher than intercropping. The highest yield of sole-cropped or intercropped alfalfa was both at the first harvest stage, and intercropping reduced the yield of alfalfa. In the first, second, and third harvests, the yield decreased by 24.7%, 30.9%, and 43.7%, respectively. The total yield of alfalfa in the poplar/alfalfa silvopastoral system was reduced by 31.2%, compared with the sole cropping. According to the land equivalent ratio, the combination of poplar and alfalfa added additional income from alfalfa, and it increased the productivity rate by 41%. In summary, the root distribution and growth of alfalfa in forest and grass complex system were adversely affected, and the root system of poplar was beneficially affected. Compared with the sole cropping, the silvopastoral system had higher productivity and resource utilization efficiency, and had the potential to improve the ecological and economic return of the shelter belt in Xinjiang.

**Keywords:** silvopastoral system; poplar; alfalfa; root distribution characteristics; yield; Xinjiang

不合理的农牧生产造成生态环境污染加重,水土流失、沙漠化、荒漠化等严重的环境问题急需解决。通过改善作物种植方式、合理使用耕作及栽培措施,可以对土壤—植被—大气界面进行调控,显著影响农田能量辐射平衡,达到保护水土资源和促进系统内资源循环的作用<sup>[1]</sup>。在西北地区的退耕还林工程、防沙治沙工程和草牧场防护林工程等生态建设中,运用林草复合系统既能充分发挥生态防护功能,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发展的有效统一<sup>[2-3]</sup>。已有统计表明,我国农林(林草)复合系统的总面积为 $45\times 10^6\sim 76\times 10^6\text{ hm}^2$ <sup>[4-5]</sup>,并且随着国家实施退耕还林,退牧还草等一系列生态工程的启动,复合种植已经成为部分地区加强生态和经济可持续发展的重要手段<sup>[6]</sup>。

对林草复合系统的研究始于20世纪70年代中期,初期的研究主要集中在系统生产、生态和综合效益评价上,从20世纪90年代开始,种间相互关系的探索逐步成为林草复合系统研究的热点<sup>[7]</sup>。紫花苜蓿在我国种植面积广,尤其是在我国西北地区,种植面积约占栽培草地面积的80%<sup>[8]</sup>。新疆的荒漠化及沙化面积大、分布广、危害严重,紫花苜蓿与林木间作种植这一举措在当地具有重要的生态、经济和社会价值<sup>[9]</sup>。已研究发现,紫花苜蓿作为林下作物已经体现出其优越性。在我国东北地区,紫花苜蓿间作桑树(*Morus alba* L.)能够提高土壤有效氮含量,对树的生长有促进作用<sup>[10]</sup>;紫花苜蓿间作林木系统中土壤含水率、酶活性和生物群落多样性都有所提高<sup>[11]</sup>。在黄土高原地区的林草复合系统中,曾艳琼等<sup>[12]</sup>研究表明,紫花苜蓿间作花椒树(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.)能多层次利用光

能,调节林草复合系统内的温度环境。当前林下生草的相关研究主要集中在其经济和环境效益上,但关于林草复合系统中植物的相互影响,尤其是直接交互器官——根系的分布及相互关系则鲜有报道。

在研究根系的生理和生态分布中,根系单位体积内根长(根长密度 *RLD*)、平均根直径(*ARD*)和单位重量的根长(比根长 *SRL*)决定根系吸收养分和水分的能力,也更能反映根系的空間分布情况,与作物生长发育密切相关<sup>[13-15]</sup>。新疆地区为防止风沙和土地荒漠化,有大面积的农田防护林资源,建设林草复合系统能够进一步提升生态和经济价值。本研究通过分析杨树间作紫花苜蓿根系的空間分布及林草复合系统的生产力,分别与单作紫花苜蓿和单作杨树进行比较,了解杨树-紫花苜蓿复合系统中根系的相互关系及其影响,以为林草复合系统的推广优化及林草间作管理提供理论参考与实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于石河子147团,地理位置为 $86^{\circ}10'E, 44^{\circ}37'N$ 。该地属典型的大陆性气候,干旱少雨,蒸发量大,年平均气温 $6.6^{\circ}C$ ,年降水量110~200 mm,年蒸发量1500~2000 mm,无霜期148~187 d。土壤类型为轻盐化灌耕灰漠土,有机质含量为 $16.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量 $137.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮含量 $16.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量 $5.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 供试材料

本试验中供试紫花苜蓿(*M. sativa* L. cv. Sanditi)品种为‘三得利’,由百绿(天津)国际草业有限公司提供。供试杨树(*Populus alba* L. var. pyra-

midalis Bge.) 品种为‘新疆杨’,为新疆当地广泛栽培的农田防护林树种。

### 1.3 试验设计

单作及间作紫花苜蓿均播种于 2015 年,播种量  $18\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,播种深度 2 cm,行距为 15 cm。单作及间作杨树栽植于 2011 年,行距为 5.6 m,间距为 1.4 m。杨树-紫花苜蓿系统中紫花苜蓿与杨树的间距为 1 m(如图 1 所示)。单作紫花苜蓿、单作杨树和杨树-紫花苜蓿小区各设置 3 个重复,每个重复小区面积  $6\text{ m}\times 3\text{ m}$ 。各小区采用当地常规田间管理,滴灌灌水,每年灌水 6 次,每次灌溉量为  $500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,苜蓿生长季及时除草。

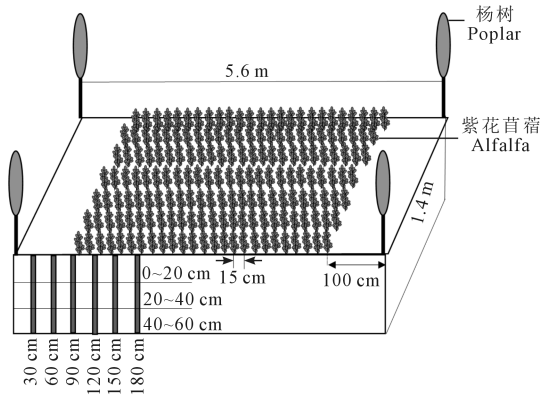


图 1 杨树-紫花苜蓿系统田间配置及根系样本采集示意图  
Fig.1 Diagram and sampling points of the poplar/alfalfa silvopasture system

### 1.4 根系样品采集

根系样品的获取采用连续钻土取样法,此方法对植株和土壤的破坏小,并且能分析根系在不同土层的分布情况<sup>[16]</sup>。在紫花苜蓿返青期至枯黄期(4月22日至9月19日),每隔 15 d 在各小区间进行一次采样。使用根钻(直径 3 cm,深 20 cm)向下垂直收集各小区 0~60 cm 土层中杨树和紫花苜蓿的细根,为保证根系采集的连续性,根钻头要保证锋利,且每层土需要一次采成。单作和间作各小区中设置 6 个采样点,其中林草复合小区中每隔 30 cm 直线上设置一个采样点,分别距杨树 30, 60, 120, 150 cm 和 180 cm(图 1),单作杨树小区根系采集与林草复合小区相同;单作紫花苜蓿取小区中心直线上的连续 6 个采样点采集,单作苜蓿和间作苜蓿取样点距离苜蓿种植行的距离一致,在距离苜蓿种植行 5~10 cm 处,方法与林草复合小区相同。

取回土芯装入密封袋后编号带回实验室处理,在水中浸泡并搅拌 1 h 后,倒入 0.2 mm<sup>2</sup> 的筛网中,用水冲洗掉根部土壤,淘汰死根仅保留活根。将洗

净的根系用镊子小心挑出晾干,根据根系形态和颜色区分林草复合系统中的杨树根系和紫花苜蓿根系,其中杨树根呈深棕色,苜蓿根呈乳白色<sup>[17]</sup>。

### 1.5 测定项目及方法

1.5.1 单作和林草复合系统中根长密度(RLD)、平均根直径(ARD)、比根长(SRL)的测定 利用 WinRHIZOTM 根系分析软件对洗净的新鲜根样进行分析,测得不同土层中的杨树和紫花苜蓿的根长和平均根直径(ARD),结合根钻取土量(141 cm<sup>3</sup>),计算杨树和紫花苜蓿的根长密度:

$$RLD(\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}) = \text{根长}(\text{cm}) / \text{根钻取土量}(141\text{ cm}^3)$$

之后将所取根样分解后放入干燥箱,105℃杀青 30 min 后调至 80~85℃烘干至恒重,称量干物质量,结合根长计算比根长:

$$SRL(\text{cm}\cdot\text{mg}^{-1}) = \text{根长}(\text{cm}) / \text{根干物质量}(\text{mg})^{[9]}$$

1.5.2 紫花苜蓿产量和土地当量比(LE<sub>R</sub>)的测定 试验中紫花苜蓿在初花期(小区内苜蓿 80% 以上开花)刈割,每年可以刈割 3 次,时间为 6 月 6 日,7 月 21 日和 9 月 4 日。每次收获小区内 1m×1m 面积上的紫花苜蓿,留茬 5 cm,将收获的新鲜苜蓿于 80℃~85℃ 的干燥箱中干燥至恒重,测定干草产量(kg·hm<sup>-2</sup>)。通过测量林草复合系统内杨树高及树径计算小区内树主茎总体积(作为试验计算土地当量比的产量因素):

主茎体积 =  $\pi / 12 (D_b^2 + D_t^2 + D_b D_t) H$   
式中, $D_b$ 为杨树底部直径, $D_t$ 为杨树顶部直径, $H$ 为杨树高<sup>[18]</sup>。根据杨树主茎体积计算单位面积杨树主茎体积产量。

土地当量比(LE<sub>R</sub>) = 间作苜蓿产量/单作苜蓿产量 + 间作杨树主茎体积产量/单作杨树主茎体积产量( $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ )

### 1.6 数据分析

采用 MS Excel 2010 进行数据整理分析,使用 SPSS 22.0 进行方差分析,其中多重比较采用 Duncan 法。RLD 和 ARD 的空间分布用 WinSURFER 8.0 制作的等高线图表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 杨树-紫花苜蓿林草复合系统中根系根长密度(RLD)分布特征

2.1.1 单作和间作紫花苜蓿的根长密度(RLD)分布特征 杨树-紫花苜蓿林草复合系统中的苜蓿 RLD 时空分布仅使用距离树 120、150 cm 和 180 cm

处(苜蓿生长区域)的采样点数据(图 2)。单作和间作苜蓿 *RLD* 呈现波动变化,各个土层中苜蓿 *RLD* 的峰值均出现在刈割期(6 月 6 日),间作苜蓿的 *RLD* 在各个时间段均显著低于单作苜蓿( $P<0.05$ ),且在不同的土层中单作和间作苜蓿的 *RLD* 存在差异,具体表现为:在 0~20 cm 土层中,单作和间作苜蓿的 *RLD* 差异在 7 月 6 日最大,间作比单作苜蓿低 44.67%,在 5 月 7 日单作和间作苜蓿 *RLD* 差异最小,间作比单作低 11.08%;在 20~40 cm 土层中,单作和间作苜蓿的 *RLD* 差异在 8 月 20 日最大,间作比单作苜蓿低 54.29%,在 5 月 22 日单作和间作苜蓿 *RLD* 差异最小,间作比单作低 10.72%;在 40~60 cm 土层中,单作和间作苜蓿的 *RLD* 差异同样在 8 月 20 日最大,间作比单作苜蓿低 52.41%,在 5 月 22 日单作和间作苜蓿 *RLD* 差异最小,间作比单作低 10.01%。综上所述,可以看出单作和间作的差异在刈割前较小,刈割后差异增大。刈割后紫花苜蓿 *RLD* 显著降低( $P<0.05$ ),第一次刈割对各个土层中的苜蓿 *RLD* 值影响最大。

第一次刈割前后,单作和间作苜蓿 *RLD* 的空间分布如图 3 所示,水平方向上,林草复合系统中苜蓿的 *RLD* 随离树距离的减小而减小。垂直方向上,单作和间作苜蓿的 *RLD* 都随土层深度的增加而减小。在第一次刈割后,单作苜蓿 *RLD* 在 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 的土层深度中分别降低了 40.33%、60.32%和 70.33%;间作苜蓿 *RLD* 在 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 的土层深度中分别降低了 62.04%、69.25%和 79.87%。在相同土层中刈割对间作苜蓿 *RLD* 的影响比单作大,说明在林草复合系统中由于受间作杨树的影响,紫花苜蓿的耐刈割性可能会下降。

2.1.2 单作和间作杨树的根长密度(*RLD*)分布特征 由图 4 可见,单作和间作杨树 *RLD* 由于受季节变化和土壤环境的影响,在 0~20 cm 土层中呈现波动变化,单作杨树 *RLD* 峰值出现在 6 月,间作杨树 *RLD* 峰值出现在 8 月。在 20~60 cm 土层中单作和间作杨树 *RLD* 都呈现缓慢增加而后逐渐平缓的变化趋势。在 0~20 cm 土层中间作杨树 *RLD* 总是显著高于( $P<0.05$ )单作杨树,单作和间作杨树 *RLD* 差异在 8 月 20 日最大,间作杨树 *RLD* 比单作高 37.92%。在 20~40 cm 土层中,单作杨树 *RLD* 差异在 8 月 20 日最大,间作杨树 *RLD* 比单作高 21.60%。在 40~60 cm 土层中单作和间作杨树 *RLD* 没有显著性差异( $P>0.05$ )。说明间作苜蓿对杨树 *RLD* 的影

响主要集中在 0~20 cm 土层,并且间作苜蓿对杨树根系的影响表现为促进作用,这种影响在杨树一年生长季的后半段更为明显。

2018 年 6 月 6 日单作和间作杨树 *RLD* 空间分布如图 5 所示。单作杨树 *RLD* 随土层深度和离树距离的增加而逐渐减小,间作杨树 *RLD* 垂直方向呈现与单作杨树相同的变化。水平方向上,在 0~20 cm 土层中,距离树 120、150 cm 和 180 cm 处(苜蓿生长区域),间作杨树 *RLD* 相比单作杨树有显著的增加( $P<0.05$ ),分别增加了 31.82%、34.23%和 15.51%;在 20~60 cm 土层单作和间作杨树 *RLD* 没有显著性差异( $P>0.05$ )。杨树 *RLD* 在苜蓿生长区域增加,说明此处土壤资源相对丰富,土壤环境有利于杨树根系的生长。

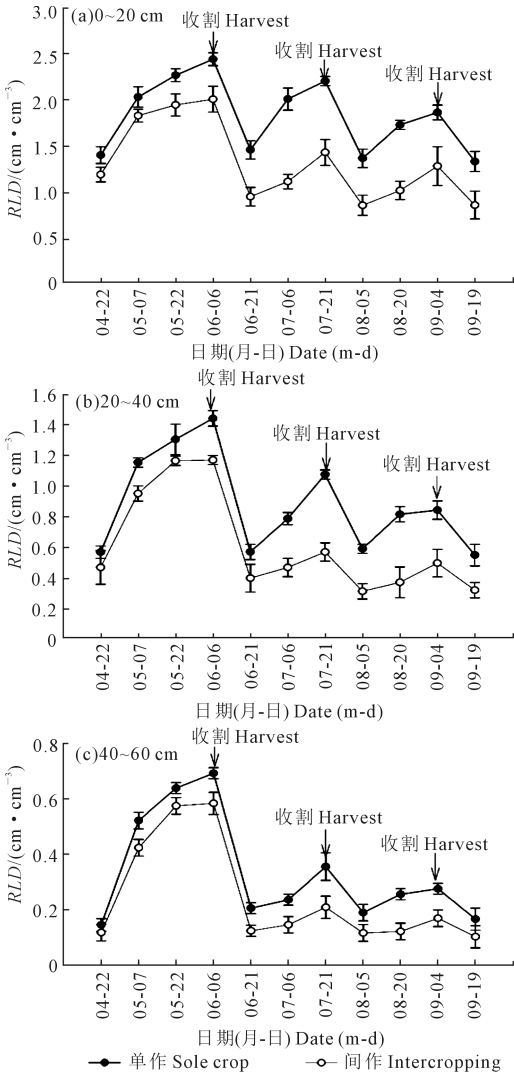


图 2 不同土层深度中单作和间作紫花苜蓿根长密度 (*RLD*) 随时间的变化 (2018 年)

Fig. 2 Temporal distribution of root length density (*RLD*) of sole and intercropped alfalfa at different soil depth in 2018

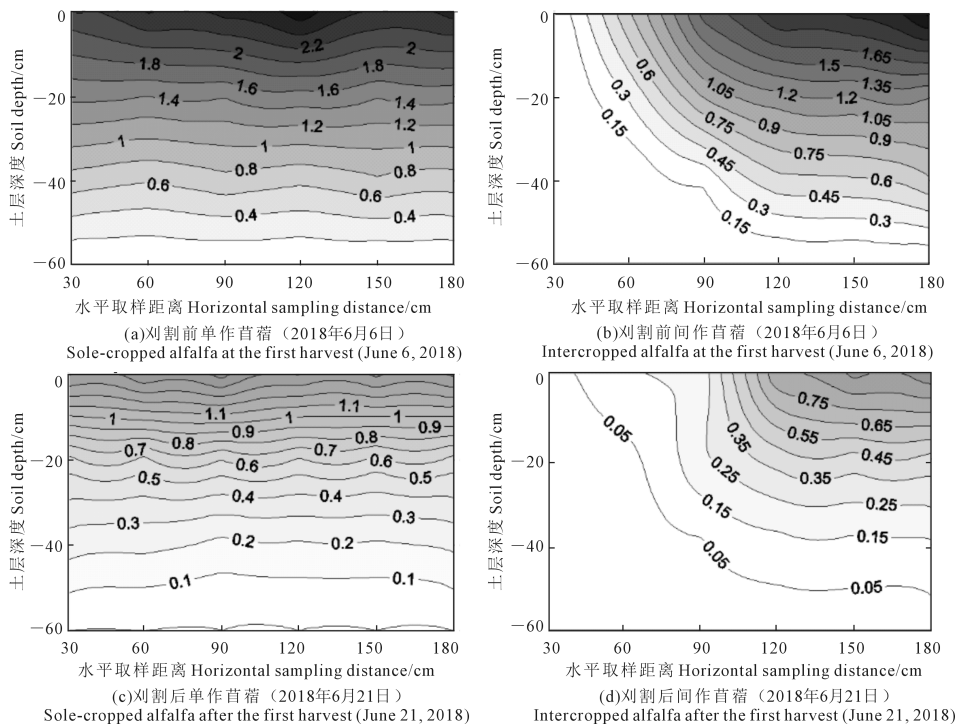


图 3 第一次刈割前后单作和间作紫花苜蓿根长密度 (RLD) 的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of root length density (RLD) of sole and intercropped alfalfa of the first harvest

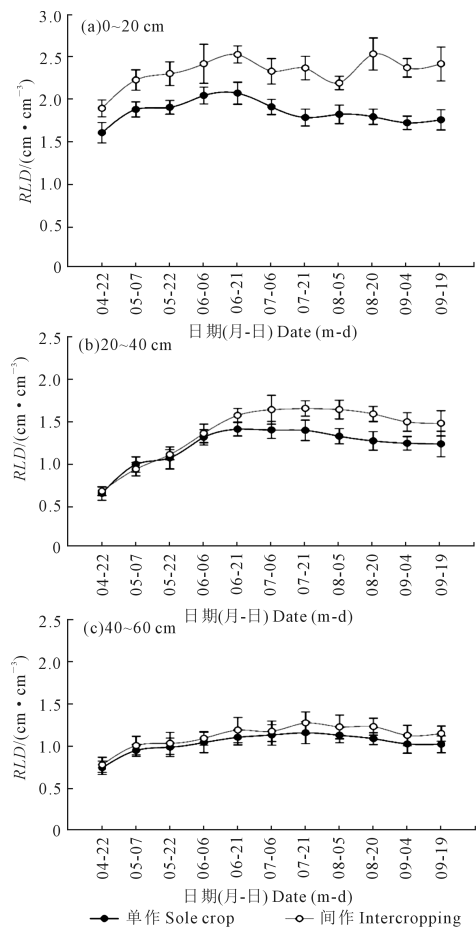


图 4 不同土层深度中单作和间作杨树根长密度 (RLD) 随时间的变化 (2018 年)

Fig. 4 Temporal distribution of root length density (RLD) of sole and intercropped poplar at different soil depth in 2018

## 2.2 杨树-紫花苜蓿林草复合系统中根系平均根直径 (ARD) 分布特征

2.2.1 单作和间作紫花苜蓿的平均根直径 (ARD) 分布特征 杨树-紫花苜蓿林草复合系统中的紫花苜蓿 ARD 时空分布仅使用距离树 120、150 cm 和 180 cm 处 (苜蓿生长区域) 的采样点数据 (图 6)。单作和间作苜蓿 ARD 在 0~20 cm 的土层中呈现上升趋势,而在 20~40 cm 和 40~60 cm 的土层中受刈割影响 RLD 呈现波动变化。苜蓿与杨树间作造成地下部分资源竞争,影响了苜蓿根系的发育,导致间作苜蓿 ARD 在各个时间段都显著低于单作苜蓿 ( $P<0.05$ )。其中在 0~20 cm 土层中,单作和间作苜蓿的 ARD 差异在 6 月 21 日最大,间作比单作苜蓿低 15.82%;在 4 月 22 日单作和间作苜蓿 ARD 差异最小,间作比单作低 9.58%。在 20~40 cm 土层中,单作和间作苜蓿的 ARD 差异在 8 月 5 日最大,间作比单作苜蓿低 37.30%;在 6 月 6 日单作和间作苜蓿 ARD 差异最小,间作比单作低 12.30%。在 40~60 cm 土层中,单作和间作苜蓿的 ARD 差异在 8 月 5 日最大,间作比单作苜蓿低 27.84%;在 6 月 6 日单作和间作苜蓿 ARD 差异最小,间作比单作苜蓿低 11.15%。

2.2.2 单作和间作杨树的平均根直径 (ARD) 分布特征 单作和间作杨树 ARD 逐渐增加 (图 7),在 0~20 cm 土层间作杨树 ARD 显著高于 ( $P<0.05$ ) 单作杨树,单作和间作杨树 ARD 差异在前期较

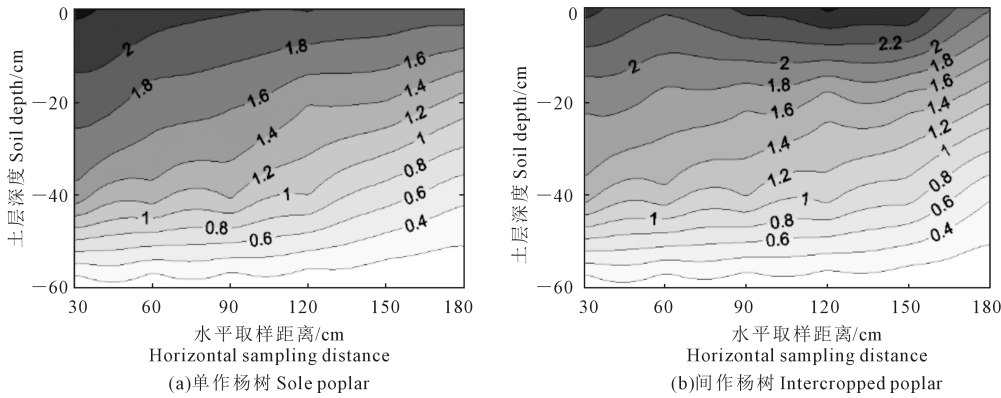


图 5 单作和间作杨树根长密度 (RLD) 的空间分布 (2018 年 6 月 6 日)

Fig.5 Spatial distribution of root length density (RLD) of sole and intercropped poplar on June 6, 2018

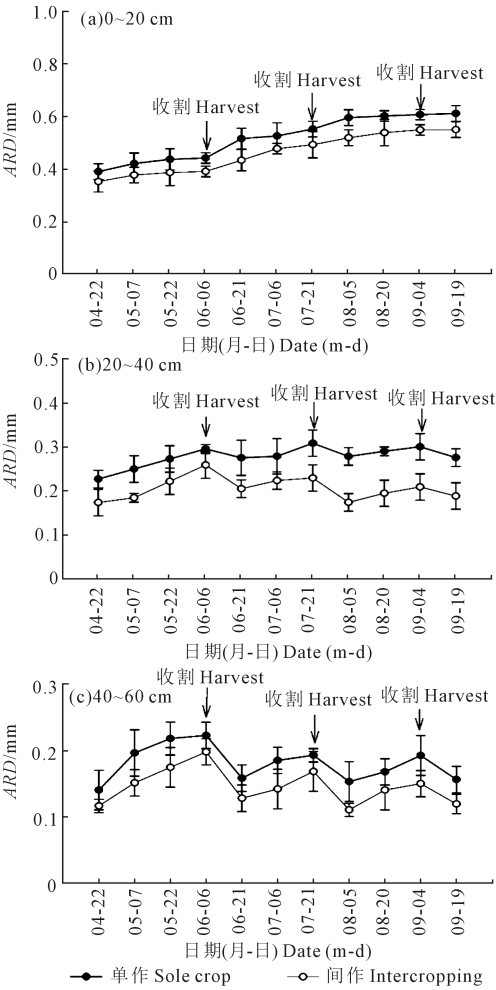


图 6 不同土层深度中单作和间作紫花苜蓿平均根直径 (ARD) 随时间的变化 (2018 年)

Fig. 6 Temporal distribution of average root diameter (ARD) of sole and intercropped alfalfa at different soil depth in 2018

小,两者差异在 9 月 4 日最大,间作杨树 ARD 比单作高 20.36%。在 20~40 cm 土层中,单作和间作杨树 ARD 差异出现在 6 月 6 日之后,两者差异在 8 月 20 日最大,间作杨树 ARD 比单作高 28.08%。在 40~60 cm 土层中,单作和间作杨树一年生长季中 ARD 均未表现出显著性差异 ( $P>0.05$ )。

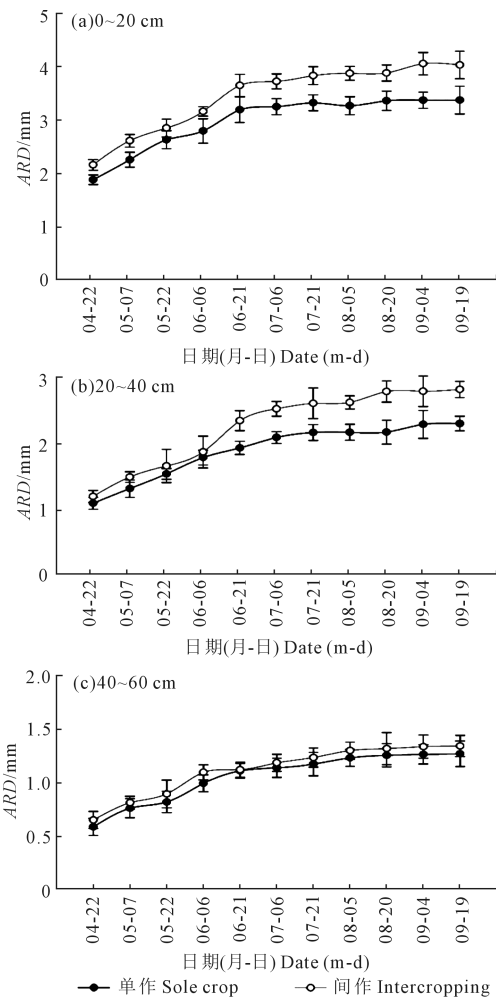


图 7 不同土层深度中单作和间作杨树平均根直径 (ARD) 随时间的变化 (2018 年)

Fig. 7 Temporal distribution of average root diameter (ARD) of sole and intercropped poplar at different soil depth in 2018

2.3 杨树-紫苜蓿林草复合系统中根系比根长 (SRL) 分布特征

2.3.1 单作和间作紫花苜蓿的比根长 (SRL) 分布特征 杨树-紫花苜蓿林草复合系统中的紫花苜蓿 SRL 时空分布仅使用距离树 120、150 cm 和 180 cm

处(苜蓿生长区域)的采样点数据(图 8)。单作和间作紫花苜蓿 SRL 值在 0~20 cm 土层中呈现下降趋势,在 20~60 cm 土层中受到刈割的影响单作和间作苜蓿 SRL 值呈现波动变化,刈割后苜蓿 SRL 值上升,随后 SRL 值下降直到下一次刈割后又上升。间作苜蓿 SRL 值在 0~40 cm 土层中的各个时间段都显著高于单作苜蓿( $P<0.05$ )。在 0~20 cm 土层中单作和间作苜蓿 SRL 值在 6 月 21 日差异最大,间作苜蓿 SRL 值比单作高 21.74%;在 4 月 22 日单作和间作苜蓿 SRL 值差异最小,间作比单作高 10.52%。在 20~40 cm 土层中单作和间作苜蓿 SRL 值也在 6 月 21 日差异最大,间作苜蓿 SRL 值比单作高 28.78%;在 4 月 22 日单作和间作苜蓿 SRL

值差异最小,间作比单作高 12.16%。在 40~60 cm 土层中单作和间作苜蓿的 SRL 值在 4 月 22 日和 9 月 19 日没有显著性差异( $P>0.05$ ),在其他时间段均有差异,其中在 6 月 21 日差异最大,间作比单作苜蓿高 19.62%。

2.3.2 单作和间作杨树的比根长(SRL)分布特征

单作和间作系统中杨树的 SRL 值随着时间的推移而减少(图 9)。在 8 月 5 日 0~20 cm 土层中,单作和间作杨树的 SRL 值有显著差异( $P<0.05$ ),单作杨树 SRL 比间作杨树高 14.46%,在其他时间段和土层中单作和间作杨树 SRL 无显著性差异( $P>0.05$ )。可以看出杨树作为林草复合系统中的强势作物,所受到的间作影响相比苜蓿要小。

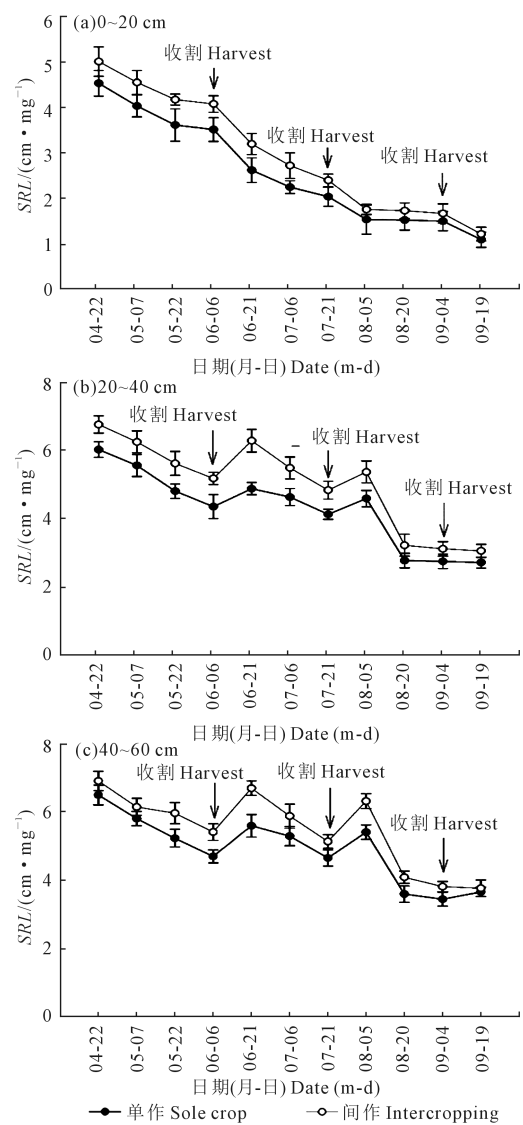


图 8 不同土层深度中单作和间作紫花苜蓿比根长 (SRL) 随时间的变化 (2018 年)

Fig.8 Temporal distribution of specific root length (SRL) of sole and intercropped alfalfa at different soil depth in 2018

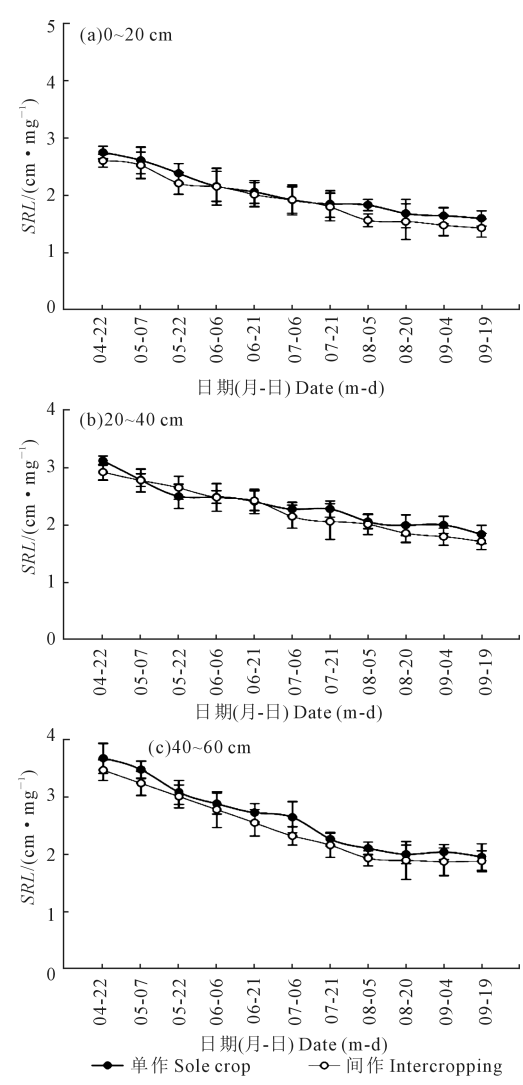


图 9 不同土层深度中单作和间作杨树比根长 (SRL) 随时间的变化 (2018 年)

Fig. 9 Temporal distribution of specific root length (SRL) of sole and intercropped poplar at different soil depth in 2018

2.4 林草复合系统的产量及土地当量比

在单作和间作紫花苜蓿的 3 次收获期中,第一次获得干草产量最高(表 1)。间作苜蓿 3 次收获相比单作苜蓿的干草产量都有显著下降( $P<0.05$ ),在第一次、第二次和第三次收获中分别降低了 24.7%、30.9%和 43.7%。与单作苜蓿干草产量相比,杨树-紫花苜蓿林草复合系统中苜蓿的整个生长季干草产量减少了 31.2%。综上所述,林草复合系统中间

作杨树对紫花苜蓿的影响最终导致间作苜蓿产量的显著下降,并且随着刈割次数增加间作干草产量下降越多,可能是由于间作杨树与苜蓿的资源竞争导致苜蓿刈割后再生所需的资源不足。间作对杨树主茎体积产量没有显著性影响( $P>0.05$ ),因为杨树在与苜蓿的资源竞争中处于优势。杨树-紫花苜蓿复合系统的  $LER$  (1.41) 大于 1.00,说明这种间作模式相比单作更具优势,实际增产率达 41%。

表 1 单作和间作紫花苜蓿的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 or intercropping system

| 收获期<br>Harvest stage | 苜蓿干草产量<br>Hay yield of alfalfa/( kg · hm <sup>-2</sup> ) |                              |                                |                     | 杨树主茎体积产量<br>Stem volume yield of poplar/( m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> ) |              |                     | LER  |
|----------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------|------|
|                      | 单作<br>Sole                                               | 间作(净面积)                      | 间作(总面积)                        | 显著性<br>Significance | 单作<br>Sole                                                                    | 间作           | 显著性<br>Significance |      |
|                      |                                                          | Intercropped<br>( net area ) | Intercropped<br>( gross area ) |                     |                                                                               | Intercropped |                     |      |
| 第一次<br>1st harvest   | 7731.72                                                  | 5816.32                      | 3739.06                        | *                   | —                                                                             | —            | —                   | —    |
| 第二次<br>2nd harvest   | 5252.62                                                  | 3625.65                      | 2330.75                        | *                   | —                                                                             | —            | —                   | —    |
| 第三次<br>3rd harvest   | 4151.31                                                  | 2336.78                      | 1502.21                        | *                   | —                                                                             | —            | —                   | —    |
| 合计 Total             | 17135.65                                                 | 11778.75                     | 7572.02                        | *                   | 142.62                                                                        | 138.84       | ns                  | 1.41 |

注:第一次收获(2018 年 6 月 6 日),第二次收获(2018 年 7 月 21 日),第三次收获(2018 年 9 月 4 日),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差异; ns, 表示在  $P<0.05$  的水平上单作和间作没有显著性差异。  
Note: The first harvest (June 6, 2018), the second harvest (July 21, 2018), and the third harvest (September 4, 2018), and the  $LER$  was determined using the gross area of intercropped alfalfa. \* indicates significant difference between the sole and intercropping treatments at  $P<0.05$  level; ns indicates no significant difference at  $P<0.05$  level.

3 讨 论

林草复合系统中资源的竞争是导致系统内弱势作物生理指标下降的原因之一,间作苜蓿  $RLD$  和  $ARD$  的减少是对资源竞争的反应<sup>[19]</sup>。在本试验中,由于杨树-紫花苜蓿系统中苜蓿根系相比杨树较弱,在资源竞争中处于弱势,导致不同土层中苜蓿  $RLD$  和  $ARD$  降低。并且随着杨树和紫花苜蓿根系的生长发育以及受刈割措施的影响,造成苜蓿  $RLD$  和  $ARD$  的降低量在不同土壤深度和不同阶段发生变化。Bayala 等<sup>[20]</sup>报道的非洲刺槐(*Parkia biglobosa*)/高粱(*Sorghum bicolor*)系统中反映了相似的现象,两个物种之间的资源竞争(水和养分)导致高粱  $RLD$  和  $ARD$  降低,说明资源竞争在复合系统内对树下作物根系生长发育产生抑制。  
苜蓿收获后由于地上部分同化器官遭到破坏,造成大量细根的死亡<sup>[21-22]</sup>,随着苜蓿地上部分的再生,光合作用恢复正常,根系也进入再生期,再生期的苜蓿细根相比刈割前直径更小、数量更少,造成  $ARD$  和  $RLD$  下降。由于林草复合系统中杨树对苜

蓿根系生长的抑制,刈割后间作系统内苜蓿根系受到的损伤比单作苜蓿大。本研究还表明,在林草复合系统中近树端地下部分竞争相对激烈,所以间作苜蓿的  $RLD$  随离树间距减小而减小,其他农林系统也得出了类似的结果,例如 Livesley 等<sup>[23]</sup>研究得出银桦(*Grevillea robusta*) || 玉米(*Zea mays*)系统中玉米的根长越靠近树行越小,因此可以通过调整树—草间距而减小系统内的竞争。  
通常  $SRL$  可以看作是反映根对养分吸收与消耗的指标,而较大的  $SRL$  表示较小的根直径<sup>[24-25]</sup>。在本研究中, $SRL$  可作为根系对地下部分资源竞争的反应,间作苜蓿的  $SRL$  较大,表明在间作系统内苜蓿通过提高根系的  $SRL$  值来提高对资源的竞争力,弥补资源损失,以保证自身的正常生长发育。这与 Wang 等<sup>[26]</sup>研究的枣树(*Ziziphus jujuba*) || 小麦(*Triticum aestivum*)系统中的小麦相比单作小麦有较大的  $SRL$  值和较小的  $ARD$  结果一致。  
众多研究已经表明紫花苜蓿在保持水土和改良土质上具有突出的作用<sup>[27-28]</sup>。本试验中,间作杨树的  $RLD$  和  $ARD$  在 0~20 cm 苜蓿覆盖土层中显著

高于单作杨树,反映出林下植草对树的保护作用。尤其是在 8 月份,雨水稀少且蒸发量大的情况下,林下覆盖种植苜蓿对杨树根系的保护作用更加显著。Upson 和 Burgess<sup>[29]</sup>报道的在英格兰的杨树林草复合试验中,间作牧草下杨树 *RLD* 显著增加也说明了林下生草对系统内树根系的保护作用。但是林下植草保护林木的措施存在一些限制,部分研究表明,在一些树龄较小的林木下间作牧草或其他林下作物可能会抑制幼龄树的根系发育。例如 Duan 等<sup>[30]</sup>在中国西北地区胡桃树 (*Juglans regia*) - 小麦复合系统中,受间作小麦影响胡桃树 (1 a 生) *RLD* 和 *ARD* 显著下降。但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甚至可以促进树的根系生长发育<sup>[31]</sup>,本试验中 7 a 生的杨树和固氮作物苜蓿间作的研究结果证明了前人研究的这些观点。

紫花苜蓿作为固氮作物,许多报道表明间作苜蓿有助于提高农林复合系统中养分的循环速率以及对水土的保护,特别是在干旱和半干旱地区<sup>[31-32]</sup>。试验中苜蓿对杨树根系的促进作用,表明苜蓿种植区域可能有更好的土壤环境及生物群落,更适合杨树根系的生长。单作和间作杨树 *SRL* 在多数时间里没有显著性差异,这反映出间作杨树对养分的吸收与单作杨树无显著差异,能够说明在杨树-紫花苜蓿林草复合系统中间作苜蓿根系对杨树的影响较小,杨树处于系统内资源竞争的优势方。

在资源的竞争中林下作物处于劣势是造成其产量减少的根本原因<sup>[33]</sup>。试验中,间作最终导致紫花苜蓿干草产量下降了 31.2%,而对杨树的主茎体积分量没有显著影响。本试验发现随着刈割次数增加苜蓿间作产量降低更多。刈割后,地上部分的再生需要根系为其提供能量物质,杨树-紫花苜蓿间作系统中地下部分的竞争影响了苜蓿根系对养分和水分的吸收,最终导致再生产量的下降。尽管林下作物产量有所下降,但试验中测得土地当量比 (1.41) 大于 1.00,说明林草复合系统相比单作种植更具优势,能够提高杨树林带 41% 的产量收获效益。林木的生长发育周期较长,短期内难以获得回报,而紫花苜蓿一年多熟效益回报较快,两者的结合能够显著提高复合系统的经济效益。

4 结 论

在林草复合系统中,地下部分的竞争导致紫花苜蓿 *RLD* 和 *ARD* 显著下降,且随离树距离增加地下部分竞争逐渐减小。林草复合系统中紫花苜蓿 *SRL*

值增加,而杨树 *SRL* 值受到影响较小,说明间作影响了林草根系对地下资源的吸收,而对树木根系吸收地下资源的影响较小。相反,林草复合系统中杨树的 *RLD* 和 *ARD* 在苜蓿生长区域的 0~20 cm 土层中有显著增加,尤其是在夏季气温较高的情况下,间作苜蓿对杨树根系保护作用显著。

刈割对林草复合系统中苜蓿根系的影响比单作更大,随着刈割次数的增加林草复合系统中苜蓿产量下降越多。杨树林带间作紫花苜蓿对杨树的产量没有显著影响,在此基础上还能够获得额外的苜蓿收益,杨树-紫花苜蓿林草复合经营有较高的生产和推广价值。

参 考 文 献:

[1] 刘昌明. 中国农业水问题:若干研究重点与讨论[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8):875-879.

[2] 樊巍, 高喜荣. 林草牧复合系统研究进展[J]. 林业科学研究, 2004, 17(4):519-524.

[3] 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.

[4] Zou X, Jr R L S. Agroforestry systems in China: a survey and classification[J]. Agroforestry Systems, 1990, 11(1):85-94.

[5] 平晓燕, 王铁梅, 卢欣石. 农林复合系统固碳潜力研究进展[J]. 植物生态学报, 2013, 37(1):80-92.

[6] 孙启忠, 玉柱, 马春晖, 等. 我国苜蓿产业过去 10 年发展成就与未来 10 年发展重点[J]. 草业科学, 2013, 30(3):471-477.

[7] 秦树高, 吴斌, 张宇清, 等. 锦鸡儿林草带状复合系统细根空间分异特征[J]. 林业科学, 2011, 47(7):42-49.

[8] 包爱科, 杜宝强, 王锁民. 紫花苜蓿耐盐、抗旱生理机制研究进展[J]. 草业科学, 2011, 28(9):1700-1705.

[9] 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.

[10] 胡举伟, 朱文旭, 张会慧, 等. 桑树/苜蓿间作对其生长及土地和光资源利用能力的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(3):494-500.

[11] 张萌萌, 敖红, 李鑫, 等. 桑树/苜蓿间作对根际土壤酶活性和微生物群落多样性的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(2):302-309.

[12] 曾艳琼, 卢欣石, 杨世民. 花椒树下苜蓿、百脉根和白三叶的光合生理生态特性研究[J]. 草业科学, 2008, 25(4):119-123.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] Böhm W. Methods of studying root systems[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979:1-3.