

DOI: 10.5846/stxb201709021587

王来, 高鹏翔, 仲崇高, 刘滨, 侯琳, 赵玉健, 张硕新, 张远迎. 核桃-小麦复合系统中细根生长动态及竞争策略研究. 生态学报, 2018, 38(21): - .
Wang L., Gao P. X., Zhong C. G., Liu B., Hou L., Zhao Y. J., Zhang S. X., Zhang Y. Y. Growth dynamics and competitive strategies of fine roots in a walnut-wheat agroforestry system. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

核桃-小麦复合系统中细根生长动态及竞争策略研究

王 来¹, 高鹏翔¹, 仲崇高¹, 刘 滨¹, 侯 琳^{1,3}, 赵玉健⁴, 张硕新^{1,3}, 张远迎^{2,*}

1 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学理学院, 杨凌 712100

3 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 杨凌 712100

4 商丘职业技术学院, 商丘 476000

摘要:以核桃(*Juglans regia*)-小麦(*Triticum aestivum*)间作复合系统为研究对象,用微根窗和根钻相结合的方法采样,研究复合系统中核桃和小麦细根年内年际的生长动态和竞争适应策略,为农林复合系统的经营管理和竞争模型的建立提供理论依据和技术支持。结果表明,间作核桃和小麦根系均在上半年有一个大的生长高峰(5 和 4 月),在下半年有一个小的生长高峰(9 和 11 月),二者的竞争主要发生在上半年的大生长高峰期。在各年份各土层,间作核桃的根长密度均低于单作核桃,且在从第 7 年开始存在显著差异。在 0—20 cm 土层间作小麦根长密度在第 3—7 年间获得迅速提高,从第 7 年开始显著高于单作小麦,但在 20 cm 以下土层则相反。间作使核桃和小麦细根生态位实现了分离,11 年的观察期内间作核桃比单作核桃细根的垂直分布中心下移了 6.59 cm,间作小麦比单作小麦的上移了 8.59 cm。在根系竞争策略方面,小麦根系是通过短期内的快速生长,迅速占据土壤空间获得竞争优势;而核桃根系是通过根系的逐年积累,逐步占据土壤空间从而获得竞争优势。可以干扰核桃根系积累过程的“竞争-干扰-再平衡”农林复合经营管理策略可以让复合系统中核桃和小麦保持各自竞争优势的情况下实现共存。在根系形态方面,自身细根直径较小者小麦在剧烈竞争区域以增加细根直径减小比根长来适应竞争,而自身细根直径较大者核桃则相反。

关键词:农林复合;种间关系;根系竞争;细根;核桃;小麦

Growth dynamics and competitive strategies of fine roots in a walnut-wheat agroforestry system

WANG Lai¹, GAO Pengxiang¹, ZHONG Chonggao¹, LIU Bin¹, HOU Lin^{1,3}, ZHAO Yujian⁴, ZHANG Shuoxin^{1,3}, ZHANG Yuanying^{2,*}

1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 College of Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling 712100, China

4 Shangqiu Polytechnic, Shangqiu 476000, China

Abstract: The competition and ecological plasticity of fine roots between intercropping trees and alley crops are vital for the sustainable management in agroforestry system. To understand the interspecific competition and the adaptive strategy of fine roots in agroforestry system, both minirhizotron and soil core methods were used in investigating the dynamic of fine roots in the walnut-wheat (*Juglans regia*-*Triticum aestivum*) intercropping system at Weibei loess area. The monocultural systems were compared with the intercropping one. The results showed that there were two growth peaks of both walnut and wheat

基金项目:“十三五”国家科技支撑计划(2015BAD07B050202)

收稿日期:2017-09-02; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhy@nwsuaf.edu.cn

roots in the agroforestry system. One was from April to May and the other was from September to November. During April and May, large root biomass was gained and the major interspecific competition took place between walnuts and wheats. The root length density of walnut in the intercropping system was lower than walnut monoculture system at all the soil layers during all the growth periods. A significant difference was found since the 7th year after planting. In surface soil (0—20 cm), the root length density of wheat increased rapidly from the 3th to 7th year in the intercropping system, and became significantly greater than the wheat monoculture since the 7th year. However, the opposite trend was observed in the soil layer below 20 cm. The root ecological niche of walnut and wheat separated in the intercropping system. The roots vertical distribution center of walnut and wheat moved down for 6.59 cm and moved up for 8.59 cm than that in the walnut and wheat monoculture systems, respectively. In the aspect of root competition strategy, the wheat took competitive advantage through rapid growth and occupied more space in a short term than the walnut, however, the walnut trees took the space by accumulating their roots year by year and gradually took the advantageous place in the intercropping system. Walnut and wheat coexisted in the agroforestry system following the "competition-disturbance-rebalance" management strategy, which can interfere with the accumulation process of walnut root. In root morphology respect, wheat, whose fine root diameter was smaller at the beginning, tended to increase fine root diameter and reduce specific root length. However, the opposite trend was found for the walnut in the agroforestry system.

Key Words: agroforestry; interspecific relationship; root competition; fine root; walnut tree; wheat

在一个多物种的生态系统中各物种间的竞争互惠关系决定着系统本身的稳定性和可持续性^[1]。农林复合系统作为一个多物种的人工植被系统,其各物种功能器官在空间生态位上的差异,功能活跃期在时间上的交替,形态和功能的竞争性适应特征,及物种的空间配置格局,形成了农林复合系统资源高效利用的理论基础^[2-3]。然而,在实践中农林复合系统往往因为物种配置和结构安排的不合理而失去其优越性。农林复合系统地上部分对光照竞争的不合理配置很容易发现从而得以改善;但地下部分物种间根系对营养、水分和空间竞争的不合理结构由于隐蔽性较高,很难被发现,往往被忽视。因此,由农林复合系统的物种配置安排而引起的物种间互害竞争多数发生在地下^[4],特别是在水资源缺乏的地区尤为如此^[5]。所以,在农林复合系统的科学研究和具体实践中愈来愈关注发生在地下的物种间根系竞争及根土水分关系^[6-10]。但以往的研究多集中在复合系统物种间的优势互补和资源利用效率方面^[11-12],而对物种间的竞争策略研究较少^[13],特别是针对发生在地下物种间根系的竞争策略研究更少。本研究试验区选择在水资源较为缺乏的渭北黄土区,以近年迅速发展起来的核桃(*Juglans regia*)经济林与当地主要口粮小麦(*Triticum aestivum*)形成的间作复合系统为研究对象,分别以核桃和小麦的单作系统为对照,讨论核桃-小麦复合系统中小麦和核桃根系的竞争适应策略,为高效农林复合系统的构建、经营管理和竞争模型的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

研究区位于渭北黄土区的南部区域,试验地在陕西省岐山县枣林镇张家沟村(34° 21' 21"N, 107° 43' 42" E),试验区及试验地情况见王来^[14]。3种土地利用方式:小麦单作:品种为小偃22,播种期10月5日,行距20 cm,基本苗 2.1×10^6 株/hm²。核桃单作:品种为香玲,核桃于2003(1 a)年定植,株行距均为3 m×6 m。核桃-小麦间作:间作栽培中二者的品种及种植密度与各自单作相同。小麦在每个树行间的种植带宽度为5 m,给树行留1 m宽的树行带。3种土地利用方式具体栽培方法见王来^[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 年际根系生长动态采样

根钻法采样^[16]。取样深度为100 cm,每1层10 cm。在核桃-小麦间作和单作核桃样地中,各选取3株平

均样树,同时回避边缘树行。在每个样树下,垂直于树行方向上距树 1、2、3 m 处各设置 1 个采样点。在小麦单作样地内,避开样地边缘,按“品”字形布设 3 个采样点。从核桃树定植第一年(1 a)起 3 种土地利用方式每隔 1 年采样 1 次,时间为当年的 5 月 10 日左右(小麦灌浆期)^[17]。

1.2.2 细根形态特征测定

将获取的土壤根系混合样,进行浸泡,冲洗,分核桃和小麦,拣出直径小于 2 mm 活的细根^[16]。用 WinRHIZO 根系分析系统获得细根形态指标,有根长密度,细根直径,比根长^[18]。

1.2.3 根系分布中心

$$RVDC = \sum_{i=1}^n D_i \times P_i \quad (1)$$

式中,RVDC(Root Vertical Distribution Center)为根系垂直分布中心; D_i 为每层钻心的深度; P_i 为每层根长占总根长的百分比。

1.2.4 年内根系生长动态测定

采用微根窗(BTC-100 微根窗根系监测系统)进行原位细根的季节生长动态观测^[19-20]。于 2012 年 3 月在核桃-小麦间作、核桃单作和小麦单作样地分别安装了根系观察管^[15]。样地内的观察点设置与年际根系采样相同。于 2013 年 10 月 5 日小麦播种后,从 10 月 15 日开始每半个月用图像采集系统(BTC I-CAP)采集一次根系图像,完成为期 1 周年的观测。用图像分析软件(WinRHIZO TRON MF)获取根长参数,计算出根长密度,从而计算观测期间细根根长生长量^[21-23]。

1.3 数据处理与分析

试验结果的方差分析和重复序列分析用 SAS 9.2 软件完成,图用 OriginPro 8.0 软件制作。在数据分析的基础上,将讨论的土壤层次设定为 0—20、20—40、40—60 和 60—100 cm 4 个土层。

2 结果

2.1 细根生长的季节动态

2.1.1 核桃细根生长的季节动态

间作核桃细根,在各土层一年内均有两个生长高峰,在 3—6 月有一较大生长高峰,峰值发生在 5 月初;在 9—11 月有一较小生长高峰,峰值发生在 9 月中下旬(图 1)。间作核桃细根生长量在大的生长高峰期间小于核桃单作,在小的生长高峰期间则相反。在 0—20 cm 土层,间作核桃细根 9—11 月的小生长高峰为双峰,可能是由于 10 月上旬翻地(为播种小麦),表层核桃细根受到干扰,小麦播种后土壤扰动结束又出现一个小高峰(图 1)。

2.1.2 小麦根系生长的季节动态

间作小麦细根在各土层一个生命周期内均有两个生长高峰,在 3—4 月有一较大生长高峰,峰值发生在 4 月初;10 月中旬至 12 月有一较小生长高峰,峰值发生 11 月上中旬。间作小麦细根生长量在 0—20 cm 土层,在两个生长高峰均大于小麦单作;间作小麦细根生长量在 20—40、40—60、60—100 cm 土层,小生长高峰期间均高于小麦单作,在大生长高峰期间则相反。在 0—20 cm 土层,12 月中旬和 5 月中旬,间作小麦细根仍有少量生长,而单作小麦则没有(图 2)。

核桃-小麦间作复合系统中核桃和小麦根系的生长高峰在时间上与二者各自的单作系统相比,没有什么变化,基本是重合的。(图 1 和图 2)。

2.2 细根根长密度的年际变化

2.2.1 核桃细根

在各土层间作核桃细根根长密度,随种植年限的增加均呈现逐渐增加的趋势,但始终小于核桃单作,从第 7 年开始存在显著差异($P < 0.05$)(图 3)。在 0—20、20—40 cm 土层,间作核桃细根根长密度在第 5—7 年间

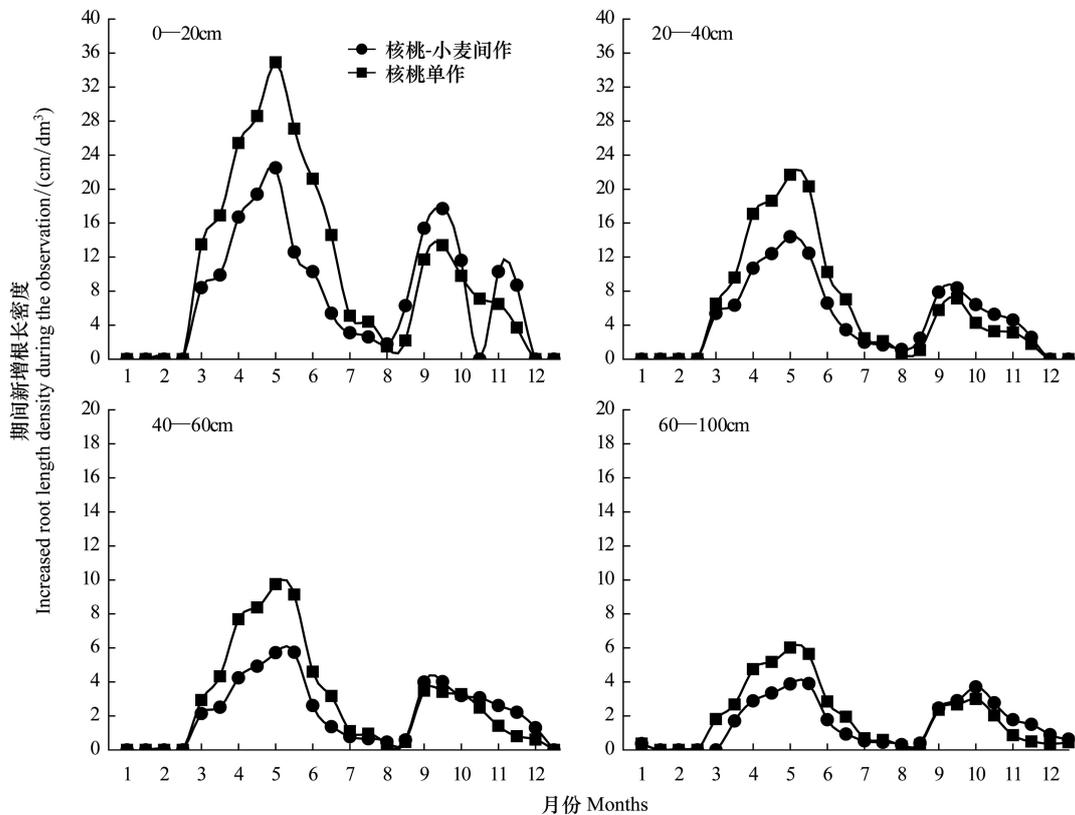


图1 核桃-小麦间作和核桃单作中核桃细根的季节生长动态

Fig.1 Growth dynamics of walnut fine root in different soil depth of walnut-wheat intercropping and walnut monoculture systems in a year

有一个迅速增加的过程;在40—60、60—100 cm 土层这个过程在第5—9年间,但各土层增加速度均低于核桃单作(图3)。

2.2.2 小麦根系

间作小麦细根的根长密度,在0—20 cm 土层随种植年限增加逐渐增加,从第7年开始显著高于小麦单作($P < 0.05$);而在20—100 cm 土层则相反,从第7年开始显著低于小麦单作($P < 0.05$)(图4)。

2.3 细根平均直径的年际变化

间作核桃细根的平均直径,除0—20 cm 土层外,其他各土层均有逐年增加的趋势,在0—60 cm 土层略小于核桃单作,其中在0—20 cm 土层第5年后差异显著($P < 0.05$);但在60—100 cm 土层大于核桃单作,第9年后差异显著($P < 0.05$)。核桃-小麦间作小麦根系的平均直径,在各土层随种植年限的增加均有增加的趋势,在第7年后均大于小麦单作,其中在0—60 cm 土层存在显著差异($P < 0.05$)(图5)。

间作小麦细根的平均直径随土层深度的增加均呈逐渐降低的趋势,间作核桃细根没有这个趋势,不同深度土层间差异不大。在0—20 cm 土层,间作核桃细根平均直径小于间作和单作小麦细根,且从第7年起与间作小麦细根的差异显著($P < 0.05$)。在0—20 cm 土层,单作核桃细根平均直径大于单作小麦细根,且从第9年起差异显著($P < 0.05$),这个差异应该是物种间的自然差异。在20—100 cm 土层,间作和单作核桃细根的平均直径均明显大于小麦细根(图5)。

2.4 细根比根长的年际变化

比根长是指单位质量(干重)的细根长度(m/g)。在0—40 cm 土层,间作核桃细根的比根长大于核桃单作,其中在0—20 cm 土层从第5年起差异显著($P < 0.05$);在40—100 cm 土层则相反,其中在40—60 cm 土层从第7年起差异显著($P < 0.05$)。间作小麦细根的比根长在0—60 cm 土层小于小麦单作,在60—100 cm 土层

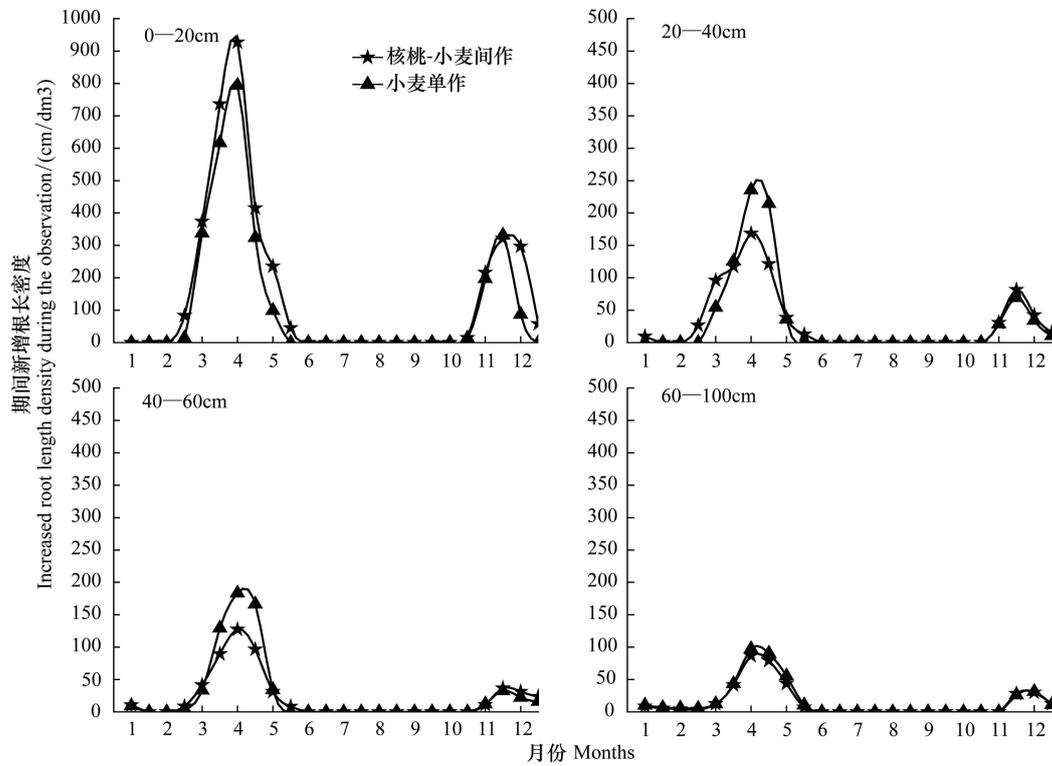


图2 核桃-小麦间作和小麦单作中小麦根系的季节生长动态

Fig.2 Growth dynamics of wheat root in different soil depth of walnut-wheat intercropping and wheat monoculture systems in a year

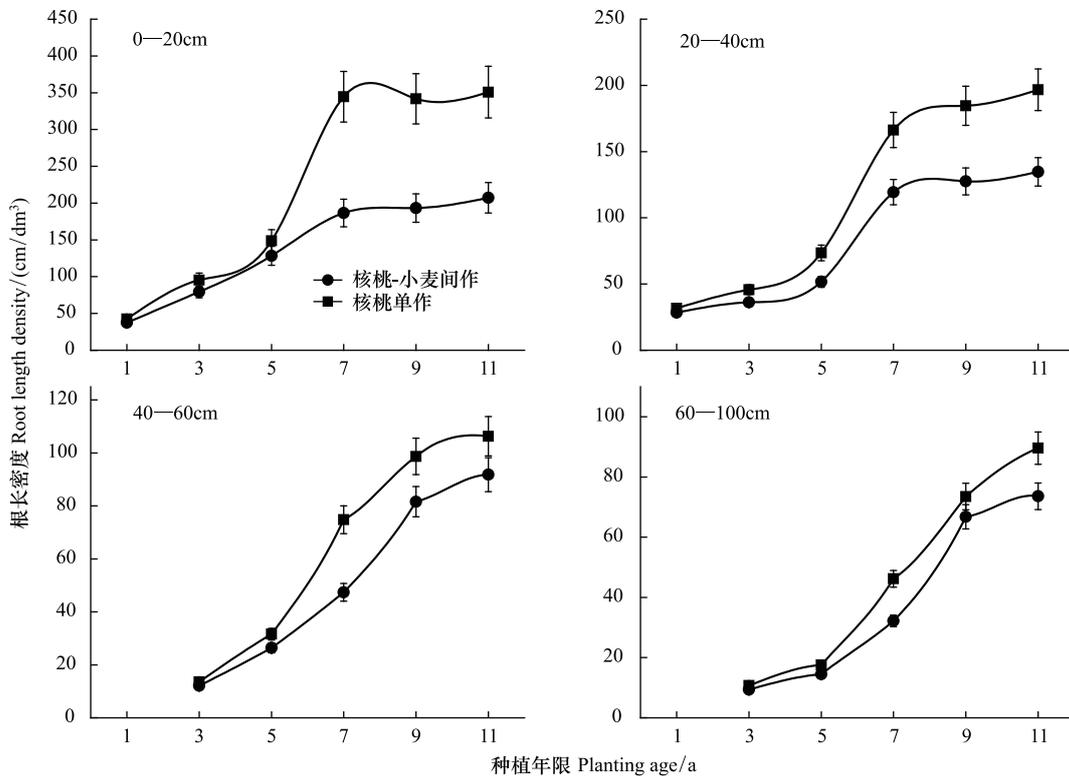


图3 核桃-小麦间作和核桃单作中核桃细根的年际生长动态

Fig.3 Annual growth dynamics of walnut fine root in different soil depth of walnut-wheat intercropping and walnut monoculture systems

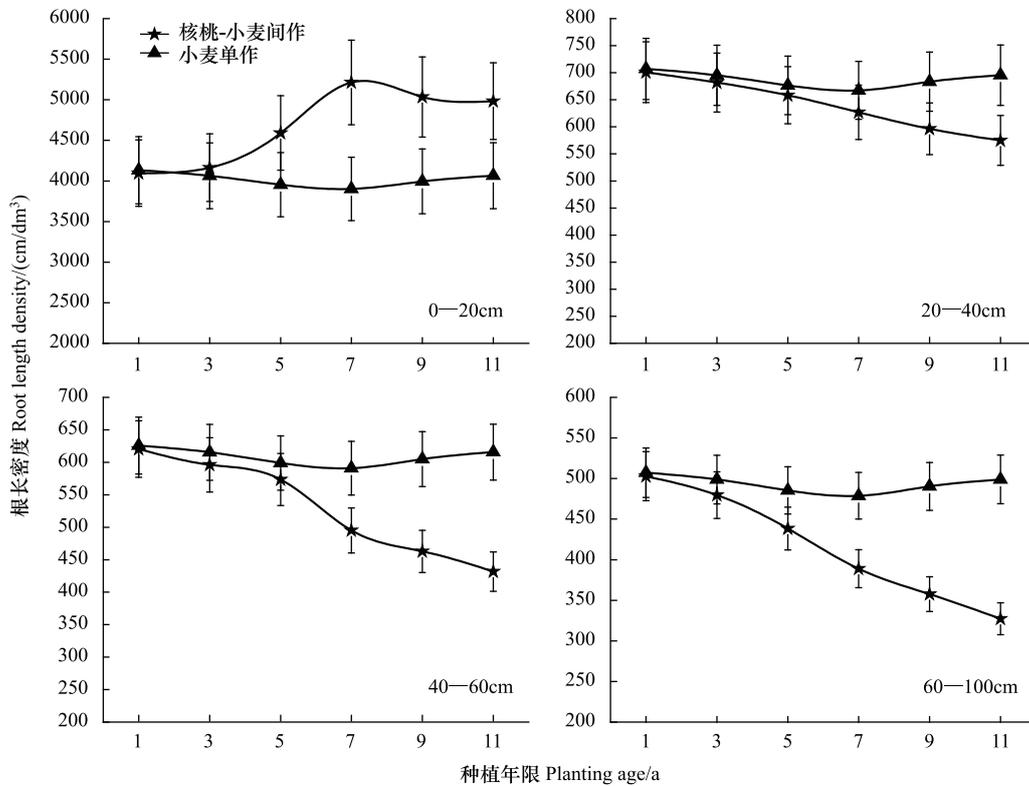


图4 核桃-小麦间作和小麦单作中小麦根系的年际变化

Fig.4 Annual growth dynamics of wheat root in different soil depth of walnut-wheat intercropping and wheat monoculture systems

则相反,在各土层均存在显著差异($P<0.05$)(图6)。

除0—20 cm 土层外,间作核桃细根的比根长随种植年限增加均呈现逐渐降低趋势。间作小麦细根的比根长,除在20—40 cm 土层第1—3年间有一个迅速下降过程外,其他整体上变化不大(图6)。

2.5 细根垂直分布中心的变化

间作核桃细根的垂直分布中心深度,随种植年限的增加均呈越来越深趋势,从第7年开始显著深于核桃单作($P<0.05$),在11年的观察期内从20 cm 增大到38.85 cm,比核桃单作深6.59 cm。间作小麦细根的垂直分布中心深度,随种植年限的增加呈越来越浅趋势,从第5年开始显著浅于小麦单作($P<0.05$),在11年的观察期内从25.15 cm 减小到16.75 cm,比小麦单作浅8.59 cm(图7)。

在核桃-小麦间作系统中核桃与小麦细根的垂直分布中心深度之间的差距,随种植年限的增加逐渐扩大,从第5年开始二者差异达到显著水平($P<0.05$),在第11年时二者相距22.10 cm(图7)。

3 根系竞争策略分析

3.1 根系在时间上的竞争关系

核桃-小麦间作中核桃和小麦的根系在一年中均有一大一小两次生长高峰。在上半年二者各有一个大的生长高峰,核桃根系的发生在3—6月,峰值发生在5月初;小麦根系的生长高峰发生在3—4月间,峰值发生在4月初(图1和图2)。在上半年,二者的高峰期大部分时间是重合的,且二者都是两个生长高峰中的大高峰期,所以核桃和小麦的地下根系间的竞争主要发生在这个时期。另一方面,小麦根系生长高峰的峰值比核桃细根的早1个月左右,这就可以让小麦根系优先占据土壤空间,从而限制核桃细根的生长。这很可能就是核桃-小麦间作中核桃的细根在各土层的生长高峰均小于核桃单作的原因。

在下半年,核桃-小麦间作中核桃和小麦的根系均有一个小的生长高峰。核桃根系生长高峰出现在9—10

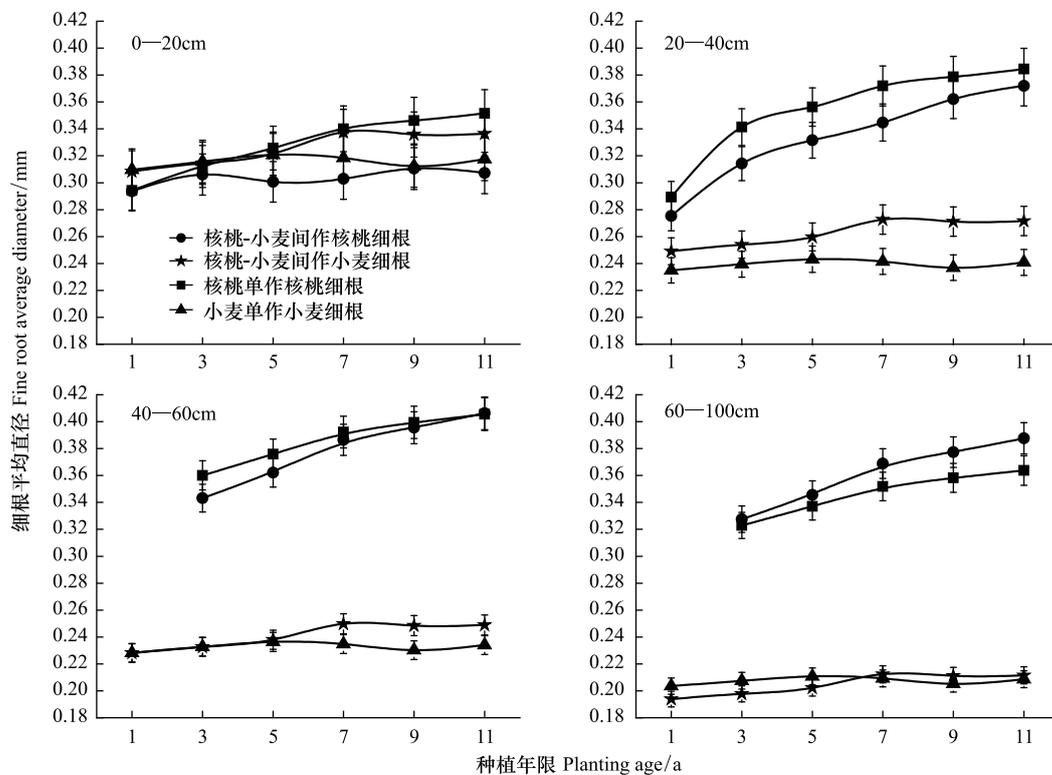


图5 三种土地利用方式不同土层细根平均直径的年度变化

Fig.5 Annual dynamics of fine root average diameter in different soil depth of three land use patterns

月,峰值发生在9月中下旬;小麦根系生长高峰出现在10月中旬至12月初,峰值发生11月上中旬(图1和图2)。下半年高峰重合时间较少,在此期间二者竞争也小。所以要研究二者根系的竞争应在上半年大生长高峰期间进行。

3.2 根系在空间上的竞争关系

本研究表明在核桃-小麦复合系统中核桃和小麦细根分布中心,分别出现了下移和上移现象。Xu等^[24]也采用了根系分布中心这一概念,得出核桃根系分布中心下移和农作物根系分布中心上移的结论,与本研究的结论一致;樊巍等^[25]、马长明等^[26]和Gao等^[27]也均得到类似结论的。说明在复合系统的竞争中,各组分根系生态位的分离已经成为共识。但也有不同意见,如孟平等^[28]认为农林复合系统与小麦单作小麦吸水根垂直分布总体差异不明显。这可能与研究区域的土层厚度、间作树种等因素有关,本研究位于土层深厚的黄土区,而孟平等的研究位于土层厚度只有80cm的太行山低山丘陵区。总之,核桃-小麦间作中二者的竞争实现了根系生态位的分离,使核桃根系向更深土层发展,这有利于提高土壤资源的利用效率。

3.3 根系的扩张策略

从小麦根系大生长高峰的峰形又高又窄可以发现,小麦根系是通过根系在短期内的快速生长,迅速占据土壤空间获得竞争优势的。而核桃根系生长高峰期较长,且峰值较低,不具备迅速占据土壤空间的竞争优势。但核桃树是多年生的,其每个时期生长的细根,一部分由于细根的周转而消失,一部分会进行次生生长而转变成输导根长期存在于土壤中,所以核桃根系会逐年增加和积累,随着种植年限的增加,它就会在竞争中胜出。也就是说核桃是通过根系的逐年积累,慢慢占据土壤空间从而获得竞争优势。

核桃与小麦根系竞争从某一个生长季来看核桃处于劣势,但随着种植年限的增加,核桃根系就会逐步获得竞争优势。间作小麦根系在20—40、40—60、60—100cm土层根长密度逐年下降,而间作核桃根长密度逐年增加也说明了这一点。但是,在0—20cm土层间作小麦根长密度与20—100cm土层相反。可能的原因是,在0—20cm土层由于每年播种小麦时的土地翻耕干扰(耕层深度基本在20cm左右)让核桃根系在这个

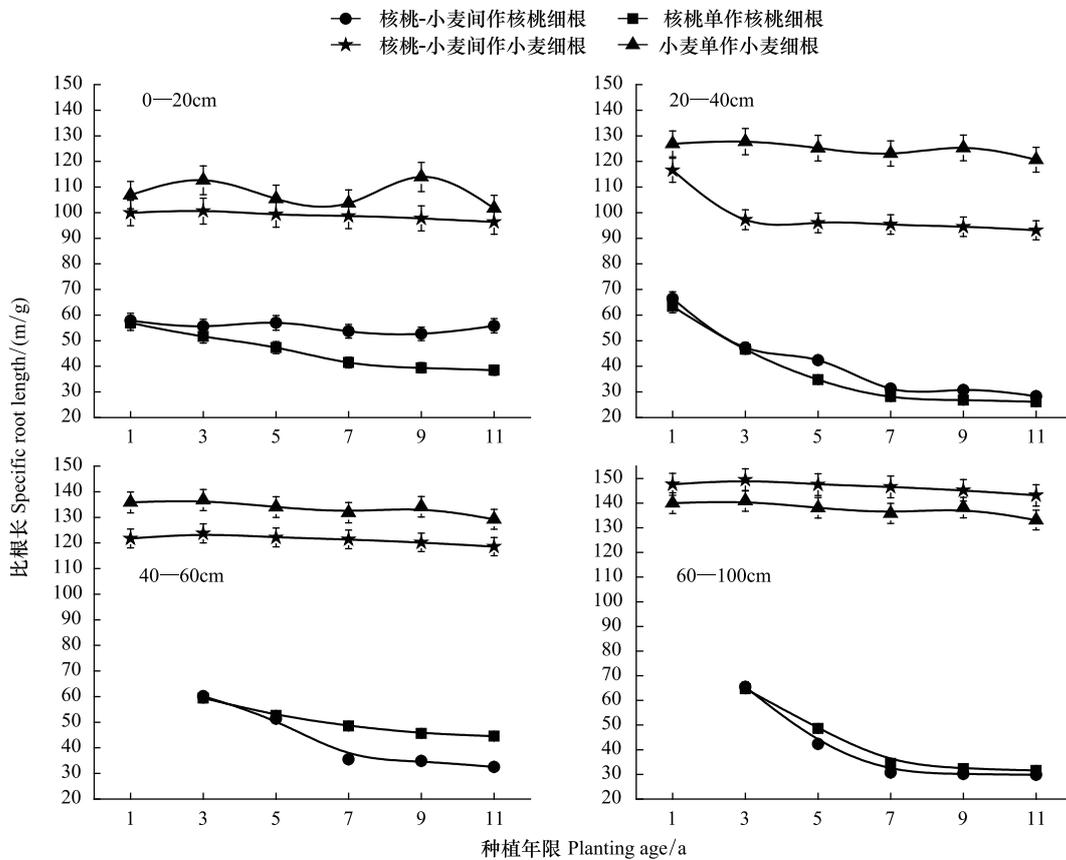


图6 三种土地利用方式不同土层细根比根长的年际变化

Fig.6 Annual dynamics of fine root specific root length in different soil depth of three land use patterns

土层无法完成逐年积累,这就为小麦根系竞争策略优势的发挥提供了机会。说明小麦细根是短期内的强势竞争者。

核桃-小麦间作的根系竞争,在没有干扰的情况下,小麦根系会在短期内取得竞争优势,但随着核桃根系的逐年积累和扩张,核桃根系的竞争优势逐年增强最终取得竞争的优势。在有干扰,核桃根系无法完成逐年积累的情况下,小麦根系的竞争策略优势就会得以体现,从而获得生存的空间。这也是在核桃-小麦间作中小麦能够存在,且能取得一定产量的地下原因(0—20 cm 土层为每年翻耕的干扰土层)。综上,这里提出“竞争-干扰-再平衡”农林复合经营管理策略;也即,在设计农林复合系统的结构和物种配置时应先考虑其各组分根系的竞争策略;在搞清楚各组分竞争策略的基础上,再安排合理的干扰措施来平衡各组分间竞争的管理策略,以达到各组分的共存和实现生产力的提高。

另外,0—20 cm 土层是比较特殊,虽然在核桃-小麦间作中核桃和小麦的根系生长高峰在3—5月相遇,但

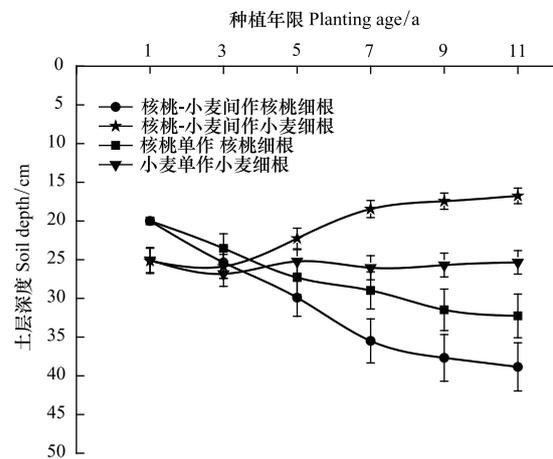


图7 细根根长密度的垂直分布中心随种植年限增加的变化特征
Fig.7 Dynamic characteristics of the vertical distribution center for length density of fine root with planting ages

在第一年由于核桃树新栽,根幕没有完全形成,又因定植深度为40 cm,所以这里假设核桃细根的垂直分布中心1 a时在定植深度的中心位置,均为20 cm

间作小麦根系的生长高峰和根长密度均高于小麦单作的。这说明间作系统的竞争作用提高了小麦根系的根长密度。张劲松等^[17]和孙守家等^[29]也发现了农林复合系统可以提高其中小麦根长密度的现象。推测这可能与土壤水分有关,因为根系从土壤中获得的水分被优先保证根系自身生长发育需求^[30],当遇到一定水分亏缺或竞争时就会刺激根系的生长。可能是核桃-小麦间作的耗水量较大,在3—5月份造成水分一定程度的亏缺(春季雨水较少),从而刺激了小麦根系的生长^[31-32]。但也有不同意见,如吴永波等^[33]发现杨农间作系统中小麦的根长密度小于小麦单作,这可能与他研究的区域在南方雨水较充裕有关。

3.4 根系的形态变异策略

核桃-小麦间作中小麦根系的平均直径在各土层比小麦单作都有增加,且存在显著差异,Xu等^[34],Wang等^[35]的研究结论也支持这个结果。另一方面,在各自单作的情况下核桃细根的平均直径大于小麦根系,所以推测,在核桃细根周转过程中留下的根孔,可以被小麦根系利用,直径较大的根孔给小麦根系的生长发育提供了宽松环境,因而导致了小麦细根平均直径的增加。而核桃细根则相反,要利用小麦根系留下的直径较小根孔,就需要更小的细根直径,这可能是导致核桃-小麦间作中核桃细根平均直径在0—20、20—40、40—60 cm土层,小于核桃单作的原因之一。综上,在一个竞争系统中细根直径较大的竞争者短期内可能处于被动地位,成为弱势竞争者。

比根长是指单位根重的根系长度(m/g),反映了根系中物质的分配,及根系生长扩张的能力^[36-37]。在较浅层土壤(0—20、20—40、40—60 cm),核桃-小麦间作中小麦根系的比根长比小麦单作的小,而在较深土层(60—100 cm)则相反。较小的比根长说明,小麦根系为适应竞争环境在根系中积累了更多的营养物质;在较深土层(60—100 cm)小麦根系比根长的增加,可能是在这个土层竞争较为缓和,根系将更多的营养用于生长新根所致^[38-39]。核桃-小麦间作中核桃细根比根长在较浅土层(0—20、20—40 cm)比核桃单作的大,而在较深土层(40—60、60—100 cm)则相反。核桃-小麦间作中核桃细根比根长在较浅土层增加的原因,可能是核桃细根受小麦根系的强烈竞争,使直径被动减小所致。在较深土层竞争较缓和,核桃-小麦间作中核桃细根可以利用对土壤理化性质的改善作用,获得良好生长,从而引起细根平均直径的增加和比根长的降低。

这里推测,自身细根直径较小者小麦在短期内为强势竞争者,在剧烈竞争区域以增加细根直径减小比根长来参与竞争;而自身细根直径较大者核桃在短期内为弱势竞争者,被动地以减小细根直径增大比根长来适应竞争。

4 结论

核桃-小麦复合系统中核桃和小麦根系生长高峰在4—5月相遇,且大部分时间是重合的,都是一年当中大的生长高峰,二者的根系竞争主要发生在这个时期。复合系统与核桃单作相比降低了核桃的根长密度,与小麦单作相比在浅层土壤可以提高小麦的根长密度,但在深层土壤则相反。复合系统使核桃和小麦细根生态位实现了分离。核桃-小麦复合系统中小麦是通过短期内根系的快速生长,迅速占据土壤空间获得竞争优势。而核桃是通过根系的逐年积累,逐步占据土壤空间从而获得竞争优势。

在农林复合系统构建过程中应考虑物种根系的生长高峰期、空间生态位、细根形态特征和竞争适应策略。物种间根系的生长高峰期及空间生态位应尽量避免重合。短期内的强势竞争者在长期的竞争过程中也可能处于劣势,掌握物种间根系的竞争适应策略,制定针对性的人为干扰措施,让种间竞争实现有益的平衡,即“竞争-干扰-再平衡”农林复合经营管理策略是农林复合经营成功的关键。

参考文献(References):

- [1] 戈峰. 现代生态学(第二版). 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 陈桂平, 柴强, 牛俊仪. 不同禾豆间作复合群体根系的时空分布特征. 西北农业学报, 2007, 16(5): 113-117.
- [3] Ong C K, Corlett J E, Singh R P, Black C R. Above and below ground interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 1991, 45(1/4): 45-57.

- [4] Casper B B, Jakson R B. Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 545-570.
- [5] 庞有祝. 黄土高原农林复合系统地下互作机理及管理[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [6] Monteith J L, Ong C K, Corlett J E. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 1991, 45(1/4): 31-44.
- [7] Ong C K, Deans J D, Wilson J, Mutua J, Khan A A H, Lawson E M. Exploring below ground complementarity in agroforestry using sap flow and root fractal techniques. *Agroforestry Systems*, 1998, 44(1): 89-106.
- [8] 蔡崇法, 王峰, 丁树文, 黄丽, 史志华. 间作及农林复合系统中植物组间养分竞争机理分析. *水土保持研究*, 2000, 7(3): 219-221, 252-252.
- [9] Zhang W, Ahanbieke P, Wang B J, Xu W L, Li L H, Christie P, Li L. Root distribution and interactions in jujube tree/wheat agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 2013, 87(4): 929-939.
- [10] 许华森, 毕华兴, 高路博, 云雷, 廖文超, 常译方. 晋西黄土区果农间作系统根系生态位特征. *中国农学通报*, 2013, 29(24): 69-73.
- [11] 程鹏, 曹福亮, 汪贵斌. 农林复合经营的研究进展. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(3): 151-156.
- [12] 李岩泉, 何春霞. 我国农林复合系统自然资源利用率研究进展. *林业科学*, 2014, 50(8): 141-145.
- [13] 何春霞, 陈平, 孟平, 张劲松, 杨洪国. 华北低丘山区果药复合系统间水分利用策略. *植物生态学报*, 2016, 40(2): 151-164.
- [14] 王来, 高鹏翔, 刘滨, 仲崇高, 侯琳, 张硕新. 农田向农林复合系统转变过程中土壤物理性质的变化. *应用生态学报*, 2017(01): 96-104.
- [15] 王来. 渭北农林复合系统生产力及其土壤响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [16] 王来, 仲崇高, 蔡靖, 姜在民, 张硕新. 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)*, 2011, 39(7): 64-70.
- [17] 张劲松, 孟平, 尹昌君, 马小奇, 冯伟东. 苹果-小麦复合系统中作物根系时空分布特征. *林业科学研究*, 2002, 15(5): 537-541.
- [18] 赵忠, 成向荣, 薛文鹏, 王迪海, 袁志发. 黄土高原不同水分生态区刺槐细根垂直分布的差异. *林业科学*, 2006, 42(11): 1-7.
- [19] Rytter R M, Rytter L. Quantitative estimates of root densities at minirhizotron differ from those in bulk soil. *Plant and Soil*, 2012, 350: 205-220.
- [20] 陈文岭, 靳孟贵, 刘延锋, 鲜阳, 黄金瓯. 微根管法监测膜下滴灌棉花根系生长动态. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 87-93.
- [21] 王孟本, 荀俊杰, 陈建文, 史建伟. 晋西北黄土区幼龄柠条细根的净生长速率. *生态学报*, 2010, 30(5): 1117-1124.
- [22] 史建伟, 于水强, 于立忠, 韩有志, 王政权, 郭大立. 微根管在细根研究中的应用. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 715-719.
- [23] Bernier P Y, Robitaille G. A plane intersect method for estimating fine root productivity of trees from minirhizotron images. *Plant and Soil*, 2004, 265(1/2): 165-173.
- [24] Xu H S, Bi H X, Xi W M, Powell R L, Gao L B, Yun L. Root distribution variation of crops under walnut-based intercropping systems in the Loess Plateau of China. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 51(4): 773-778.
- [25] 樊巍, 卢琦, 高喜荣. 果农复合系统根系分布格局与生长动态研究. *生态学报*, 1999, 19(6): 860-863.
- [26] 马长明, 翟明普, 刘春鹏. 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*, 2009, 31(6): 181-186.
- [27] Gao L B, Xu H S, Bi H X, Xi W M, Bao B, Wang X Y, Bi C, Chang Y F. Intercropping competition between apple trees and crops in agroforestry systems on the Loess Plateau of China. *PLoS One*, 2013, 8(7): e70739.
- [28] 孟平, 张劲松, 尹昌君, 马小奇, 冯伟东. 农林复合系统与单作作物系统作物根系差异特征的研究. *林业科学研究*, 2002, 15(4): 369-373.
- [29] 孙守家, 桑玉强, 孟平, 张劲松, 贾长荣, 任迎丰. 华北低山丘陵区农林间作系统中小麦根系时空分布及边行效应研究. *河南农业大学学报*, 2011, 45(6): 640-646.
- [30] 杨书运, 严平, 梅雪英, 孙秀邦. 土壤水分亏缺对冬小麦根系的影响. *麦类作物学报*, 2007, 27(2): 309-313.
- [31] 管秀娟, 赵世伟, 王俊振, 李壁成. 不同生育期干旱对冬小麦根冠生长发育的影响. *华北农学报*, 2001, 16(4): 71-76.
- [32] Li Q Q, Dong B D, Qiao Y Z, Liu M Y, Zhang J W. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1676-1682.
- [33] 吴永波, 吴殿鸣, 薛建辉, 褚军. 杨树-冬小麦间作系统细根分布特征及对施氮的响应. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(3): 320-325.
- [34] Xun H S, Bi H X, Gao L B, Yun L, Chang Y F, Xi W M, Liao W C, Bao B. Distribution and morphological variation of fine root in a walnut-soybean intercropping system in the Loess Plateau of China. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2013, 15: 998-1002.
- [35] Wang B J, Zhang W, Ahanbieke P, Gan Y W, Xu W L, Li L H, Christie P, Li L. Interspecific interactions alter root length density, root diameter and specific root length in jujube/wheat agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 2014, 88(5): 835-850.
- [36] Zamora D S, Jose S, Nair P K R. Morphological plasticity of cotton roots in response to interspecific competition with pecan in an alleycropping system in the southern United States. *Agroforestry Systems*, 2007, 69(2): 107-116.
- [37] Franssen B, Blijenberg J, de Kroon H. Root morphological and physiological plasticity of perennial grass species and the exploitation of spatial and temporal heterogeneous nutrient patches. *Plant and Soil*, 1999, 211(2): 179-189.
- [38] Isaac M E, Anglaere L C N, Borden K, Adu-Bredu S. Intraspecific root plasticity in agroforestry systems across edaphic conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 185: 16-23.
- [39] 刘俊, 杨清培, 宋庆妮, 余定坤, 杨光耀, 祁红艳, 施建敏. 毛竹种群向常绿阔叶林扩张的细根策略. *植物生态学报*, 2013, 37(3): 230-238.