

# 核桃-小麦复合系统中细根的分布及 形态变异研究

王 来<sup>1</sup>, 仲崇高<sup>1</sup>, 蔡 靖<sup>1,2</sup>, 姜在民<sup>1,2</sup>, 张硕新<sup>1,2</sup>

(1 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】研究核桃(*Juglans regia*)-小麦(*Triticum aestivum*)复合系统中细根的分布格局及形态变异, 为种间关系研究及农林复合系统的合理设计提供依据。【方法】以核桃、小麦单作为对照, 采用根钻法取样, 用 WinRHIZO 根系分析系统对根系形态进行分析, 比较核桃-小麦复合系统与单作系统中植物细根的空间分布和形态差异。【结果】①复合系统中核桃细根根长的垂直分布重心深度为 35.49 cm, 比核桃单作(29.97 cm)下移了 5.52 cm; 水平径向的分布重心为距树干基部 0.91 m, 比核桃单作(0.99 m)向树干基部靠近了 0.08 m。复合系统中小麦根长的分布重心深度为 18.46 cm, 比小麦单作(26.04 cm)上移了 7.58 cm。②复合系统中核桃细根的平均根长密度为 83.6 cm/dm<sup>3</sup>, 比核桃单作(135.6 cm/dm<sup>3</sup>)降低了 38%; 复合系统中小麦根长密度为 1.74 cm/cm<sup>3</sup>, 比小麦单作(1.22 cm/cm<sup>3</sup>)增加了 42%。③复合系统中核桃细根的平均比根长在 0~30 cm 土层为 5 149.34 cm/g, 大于核桃单作(3 624.68 cm/g), 而在 30~100 cm 土层为 2 626.59 cm/g, 小于核桃单作(3 906.9 cm/g); 复合系统中小麦比根长在 0~50 cm 土层为 10 019.5 cm/g, 小于小麦单作(11 811.7 cm/g); 在 50~100 cm 土层为 14 328.9 cm/g, 大于小麦单作(13 389.6 cm/g)。【结论】复合系统中 0~30 cm 土层及水平径向距树干基部 1.5~2.0 m 是根系竞争最剧烈的区域, 为了适应复合系统的地下竞争, 核桃和小麦在生长过程中对细根的空间分布及形态产生了可塑性反应。

【关键词】 农林复合系统; 细根; 种间关系; 根系分布; 根系形态

【中图分类号】 S664.01; S512.1<sup>+</sup>1

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)07-0064-07

## Spatial distribution and morphological variations of the fine roots in walnut-wheat intercropping agroforestry ecosystem

WANG Lai<sup>1</sup>, ZHONG Chong-gao<sup>1</sup>, CAI Jing<sup>1,2</sup>, JIANG Zai-min<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuo-xin<sup>1,2</sup>

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

2 Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 This paper studied the distribution patterns and morphological variations of fine roots in walnut (*Juglans regia*)-wheat (*Triticum aestivum*) agroforestry system to provide theoretical basis for the interspecific relationship research and management of agroforestry ecosystem. 【Method】 With walnut, wheat monocropping ecosystem as control, samples were collected by soil coring method. WinRHIZO root analysis system was conducted to measure root morphology parameters. Moreover, differences of the fine roots spatial distribution and morphological variations between the agroforestry ecosystem and monocropping ecosystem were analyzed. 【Result】 ① The vertical gravity center of walnut fine root length in agroforestry ecosystem is 35.49 cm, compared with that in walnut monocropping ecosystem, which is 29.97 cm, moving down 5.52 cm. The distance between the radial gravity centers of walnut fine root length

\* [收稿日期] 2010-12-29

[基金项目] 国家“十二五”科技支撑计划项目“高效可持续农林复合系统构建及调控技术研究”(2011BAD38B0202)

[作者简介] 王 来(1980—), 男, 河南方城人, 在读硕士, 主要从事农林复合系统种间关系研究。E-mail: wanglaia\_724@163.com

[通信作者] 张硕新(1959—), 男, 陕西户县人, 教授, 博士生导师, 主要从事植物生理生态和森林生态研究。

E-mail: sxzhang@nwsuaf.edu.cn

and the tree in agroforestry ecosystem is 0.91 m, which is 0.08 m closer to the tree than that (0.99 m) of walnut in monocropping ecosystem. The vertical gravity center of wheat root length in agroforestry ecosystem is 18.46 cm, compared with that in wheat monocropping ecosystem, which is 26.04 cm, moving up 7.58 cm. ②The total mean root length density of walnuts in agroforestry ecosystem is  $83.6 \text{ cm/dm}^3$ , which is  $135.6 \text{ cm/dm}^3$  in walnut monocropping ecosystem. The former decreases 38% than the latter. The total mean root length density of wheat in agroforestry ecosystem is  $1.74 \text{ cm/cm}^3$ , which is  $1.22 \text{ cm/cm}^3$  in wheat monocropping ecosystem. The former increases 42% than the latter. ③In 0—30 cm soil depth, the specific root length of walnut is  $5149.34 \text{ cm/g}$  in agroforestry ecosystem, which is greater than  $3624.68 \text{ cm/g}$  in walnut monocropping ecosystem. But in 30—100 cm soil depth, the specific root length of walnut is  $2626.59 \text{ cm/g}$  in agroforestry ecosystem, which is smaller than the  $3906.9 \text{ cm/g}$  in walnut monocropping ecosystem; In 0—50 cm soil depth, the specific root length of wheat is  $10019.5 \text{ cm/g}$  in agroforestry ecosystem, smaller than the  $11811.7 \text{ cm/g}$  in wheat monocropping ecosystem. In 50—100 cm soil depth, the specific root length of wheat is  $14328.9 \text{ cm/g}$  in agroforestry ecosystem, greater than the  $13389.6 \text{ cm/g}$  in wheat monocropping ecosystem. 【Conclusion】 In agroforestry ecosystem, most of the root competitions appear in 0—30 cm soil depth and radial 1.5—2.0 m to the tree. As responses to adapt to the competition and maximize access to resources in soils in agroforestry systems, the spatial distribution and morphology in fine roots might have a high plasticity during the growth of walnut and wheat.

**Key words:** agroforestry; fine root; interspecific relationship; root spatial distribution; root morphology

农林复合系统的种间作用有2种表现形式,一是以空气为介质的光、热、水分的地上竞争,二是以土壤为介质的根系之间养分、水分的地下竞争<sup>[1]</sup>,且农林复合经营各组分之间的关系很大程度上决定于地下部分的相互作用<sup>[2]</sup>,特别是在干旱半干旱条件下,种间的地下根系竞争问题尤为突出<sup>[3-4]</sup>。根系是植物从土壤中吸收水分和矿质元素的主要器官<sup>[5-6]</sup>,其生理功能几乎全部由细根(直径 $<2 \text{ mm}$ )完成<sup>[7-8]</sup>,其在土壤中的空间结构和分布决定了植物获取土壤资源的多寡<sup>[9]</sup>,也决定了植物个体间或种群间对土壤资源的竞争能力<sup>[10]</sup>。间作物根系在土壤空间分布上的差异、根系功能活跃期在时间上的错位及形态特征的变化,形成了复合系统资源高效利用的互补基础<sup>[11]</sup>。但目前对农林复合系统中细根的分布和形态变异的研究资料相当匮乏,尤其鲜见针对渭北黄土区农林复合系统细根分布和形态变异的研究<sup>[12-13]</sup>。本试验研究了渭北核桃(*Juglans regia*)-小麦(*Triticum aestivum*)复合系统根系形态、数量及在土壤中的空间分布格局,以期为农林复合系统中种间竞争的人为调控及物种的合理配置提供依据。

## 1 试验区概况

试验地设在陕西省岐山县张家沟村(N $34^{\circ}21'21''$ ,E $107^{\circ}43'42''$ ),海拔736 m,地势南高

北低,坡度 $3^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。各类农林复合经营模式总面积达 $130 \text{ hm}^2$ ,主要模式为果农间作,约占90%。试验区地处渭北黄土区,属温带大陆性季风气候,全年平均日照时数2185 h,年总光合有效辐射为 $5\times 10^8\sim 6.3\times 10^9 \text{ J/m}^2$ ,平均气温 $11.6^{\circ}\text{C}$ ,无霜期164 d,年平均降水量679 mm,6—9月的降水量约占全年的70%。试验区土壤以黄土母质发育成的褐土为主,黄土层厚100~250 m,有机质含量为 $14.5 \text{ g/kg}$ ,碱解氮含量 $116 \text{ mg/kg}$ ,速效磷含量 $19.8 \text{ mg/kg}$ ,速效钾含量 $64.5 \text{ mg/kg}$ 。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料

研究对象为梯田核桃-小麦复合系统(以下简称复合系统)。梯田南北宽30~45 m,东西长200 m;梯田田面南高北低,坡度 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ,土壤为黏壤土,面积约 $0.8 \text{ hm}^2$ ,无灌溉条件。其中复合系统 $0.4 \text{ hm}^2$ ,核桃种植于2003年,品种为“香玲”,株距3 m,行距4 m,核桃树带南北行向,树盘直径0.8 m,平均胸径8.2 cm,株高3.5 m,东西冠幅2.8 m;小麦全园种植,不留树行带,冬小麦品种为“小偃22”,2009-10-05播种,行距20 cm,基本苗210.5万株/ $\text{hm}^2$ 。在同一梯田面上的复合系统东西两边,分别设置核桃单作和小麦单作为对照,种植安排均与复合系统相同,面积各 $0.2 \text{ hm}^2$ 。于2010-05-10—15(小麦灌

浆期<sup>[14]</sup>),对核桃单作、小麦单作及复合系统同时进行根系采样。

2.2 研究方法

2.2.1 根系的采样及测定 采用根钻法取样,根钻直径 9 cm。对于核桃单作和复合系统,采用 1/4 营养空间内分层抽样的根系调查方法,分别在梯田田面的中间部位选取 3 株平均样木,在树干基部至间作通道中心布采样点(图 1)。具体方法为:在水平径向的 0~0.5,0.5~1.0,1.0~1.5,1.5~2.0 m 内分别设 2,4,6,8 个取样点,以保证各个范围的取样分数都在 3%~6%;取样深度为 100 cm,每 1 层 10 cm。对于小麦单作系统,在小麦田块内按“S”形布设 5 个取样点,取样深度为 100 cm,每层 10 cm。

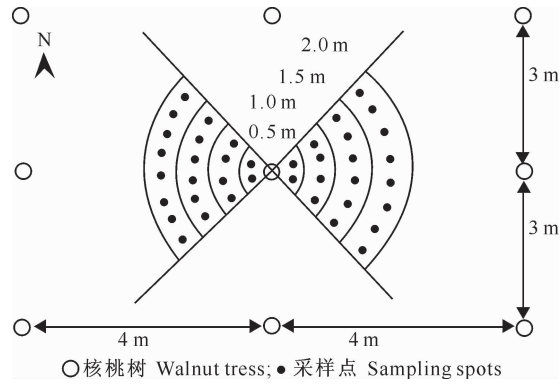


图 1 试验区采样点的布设示意图

Fig. 1 Sketch of sampling spots in the experimental fields

2.2.2 根系处理 将根钻钻取的土壤根系混合样,装入孔径为 0.28 mm 的网袋中,放入标签,扎好袋口,放入水中浸泡 24 h 后,用水冲洗掉袋内的泥土;再将含有杂质的根样从网袋中取出,放入直径 15 cm 的培养皿中,加适量的蒸馏水,去除杂质和死根(根据外形、颜色、弹性等区别死根和活根<sup>[15]</sup>),拣出直径小于 2 mm 的细根;并对复合系统中的核桃细根和小麦细根(因核桃根系不论粗细,颜色都是黑褐色,与小麦细根的灰白色很易区分)加以区分。将分选好的根系用 Epson Twain Pro 扫描仪获取形态结构图像,再用 WinRHIZO 根系分析系统分析其根长和平均直径,最后将根样放入烘箱中于 80 ℃ 烘至恒质量,测其干质量(精确到 0.000 1 g)。

2.2.3 数据处理 采用公式(1)将细根根长数据转变为密度值<sup>[16]</sup>。

$$X_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k x_i}{nk} \cdot \frac{1}{\pi r^2 h} \quad (1)$$

式中:  $X_i$  为根长密度值,  $x_i$  为根长,  $r$  为根钻半径(4.5 cm),  $h$  为每次取样土层厚度(10 cm),  $n$ 、 $k$  分别

为样木总数和样点总数。

根系分布重心用公式(2)计算:

$$WH = \sum_{i=1}^n D_i P_i \quad (2)$$

式中:  $WH$  为根系分布重心;计算垂直分布重心时,  $D_i$  为每层钻心的深度,  $P_i$  为每层根长占总根长的百分比;计算水平分布重心时,  $D_i$  为每个水平径向采样范围的中心位置到树干基部的距离,  $P_i$  为每个水平径向采样范围的根长占总根长的百分比。

2.2.4 数据统计与分析 用 Microsoft Excel 软件进行试验数据的初步整理及图表制作,试验结果的统计分析用 SAS 软件处理。

3 结果与分析

3.1 核桃-小麦复合系统中核桃细根的空间分布及形态特征

3.1.1 根长密度 由图 2 可知,在复合系统和核桃单作的 0~100 cm 土层深度内,随着土层深度的增加,核桃细根的根长密度均呈先升高后降低的趋势;且以在 10~20 cm 土层分布最为密集,其中复合系统为 291.5 cm/dm<sup>3</sup>,根长占总量的 40.39%;核桃单作为 553.1 cm/dm<sup>3</sup>,根长占总量的 27.52%。2 种系统内,核桃细根均主要分布在 0~40 cm 土层,其中复合系统 0~40 cm 土层内的根长占总量的 62.95%,小于核桃单作(75.58%),差异达显著水平( $P < 0.05$ )。复合系统根长的垂直分布重心为深度 35.49 cm,大于核桃单作(29.97 cm),差异达显著水平( $P < 0.05$ );这可能是核桃细根为了避开浅层土壤中小麦根系的剧烈竞争,使细根分布向下移动所致。

由图 2 还可知,在水平径向分布上,随着距树干基部距离的增加,复合系统内核桃细根的根长密度呈现出先略有升高而后降低然后又升高的变化趋势,最高点出现在距树干基部 0.5~1.0 m 处,为 91.6 cm/dm<sup>3</sup>,最低点出现在距树干基部 1.0~1.5 m 处,为 71.7 cm/dm<sup>3</sup>,不同水平径向各范围间根长密度差异达显著水平( $P < 0.05$ )。对于核桃单作,随距树干基部距离的增加,根长密度逐渐增大。复合系统和核桃单作根长密度在距树干基部 1.5~2.0 m 处均有升高趋势,可能是间作通道两边的核桃根系同时到达这个范围所致,这个范围很可能是复合系统中根系竞争最为激烈的区域。复合系统中核桃细根的水平径向分布重心为距树干基部 0.91 m,小于核桃单作(0.99 m)。可见,复合系统内小麦根系的竞争限制了核桃细根的水平伸展。

复合系统中核桃细根的总体平均根长密度为  $83.6\text{ cm/dm}^3$ , 小于核桃单作 ( $135.6\text{ cm/dm}^3$ )。说

明复合系统降低了核桃细根的根长密度, 在竞争中核桃细根处于弱势。

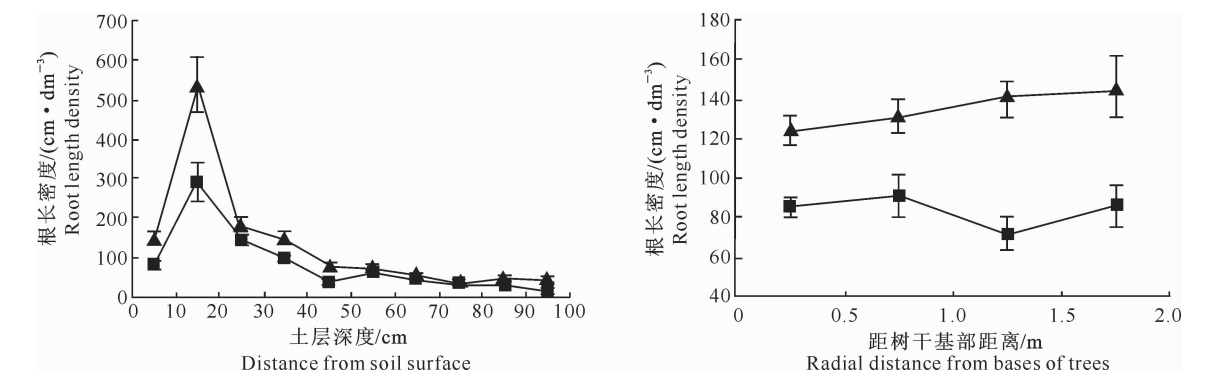


图 2 核桃-小麦复合系统中核桃细根根长密度的分布特征

—■—. 复合系统; —▲—. 核桃单作

Fig. 2 Distribution characteristics of root length density of walnut fine root in walnut-wheat agroforestry system

—■—. Intercropping ecosystem; —▲—. Walnut monocropping

3.1.2 平均直径 由图 3 可知, 在复合系统和核桃单作的 0~100 cm 土层, 核桃细根的平均直径随着土层深度的增加均呈现先波动升高而后降低的趋

势。在 0~30 cm 土层, 复合系统中核桃细根的平均直径为  $0.314\ 5\text{ mm}$ , 小于核桃单作 ( $0.356\ 7\text{ mm}$ ), 差异达显著水平 ( $P<0.05$ )。

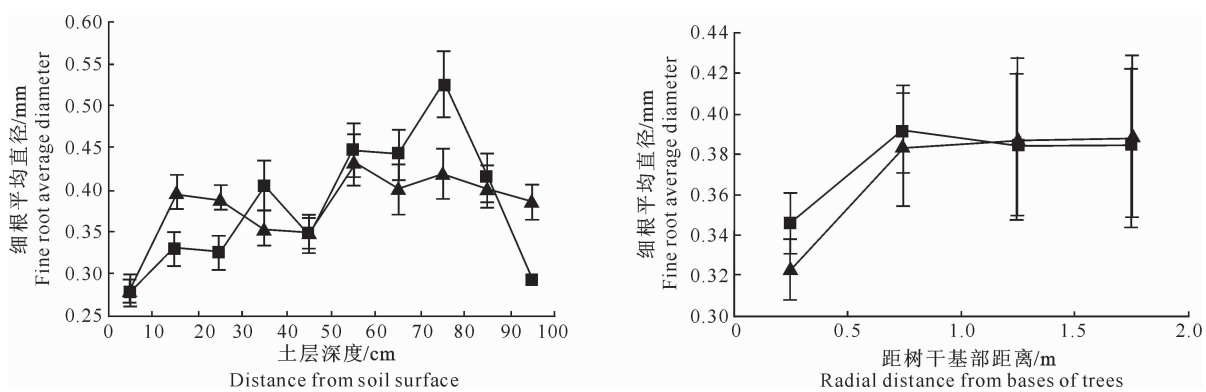


图 3 核桃-小麦复合系统中核桃细根平均直径的分布特征

—■—. 复合系统; —▲—. 核桃单作

Fig. 3 Distribution characteristics of average diameter of walnut fine root in walnut-wheat agroforestry system

—■—. Intercropping ecosystem; —▲—. Walnut monocropping

由图 3 还可知, 在水平径向分布上, 复合系统和核桃单作中核桃细根的平均直径均在距树干基部 0~0.5 m 处最小, 与距树干基部 0.5~2.0 m 处差异均达显著水平 ( $P<0.05$ ); 在距树干基部 0~1.0 m 处, 复合系统中核桃细根的平均直径略大于核桃单作, 而在距树干基部 1.0~2.0 m 处又略小于核桃单作, 但均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )。

再增加的趋势。在 0~30 cm 土层, 复合系统的平均比根长为  $5\ 149.34\text{ cm/g}$ , 大于核桃单作 ( $3\ 624.68\text{ cm/g}$ ), 且差异显著 ( $P<0.05$ )。在 30~100 cm 土层, 复合系统的平均比根长为  $2\ 626.59\text{ cm/g}$ , 小于核桃单作 ( $3\ 906.9\text{ cm/g}$ ), 且差异达显著水平 ( $P<0.05$ )。

3.1.3 比根长 比根长为单位质量的根系长度, 由根长除以其质量获得。图 4 显示, 在垂直方向上, 随土层深度的增加, 复合系统核桃细根的比根长基本呈现逐渐减小趋势, 且在土层深度为 70~80 cm 时达到最小值; 核桃单作呈先减小后增加然后又减小

图 4 还显示, 在水平径向分布上, 随着距树干基部距离的增加, 复合系统和核桃单作中核桃细根的比根长均逐渐增大。在距树干基部距离为 0~1.0 m 时, 复合系统比根长略小于核桃单作; 而在距树干基部距离为 1.0~2.0 m 时, 又略大于核桃单作。

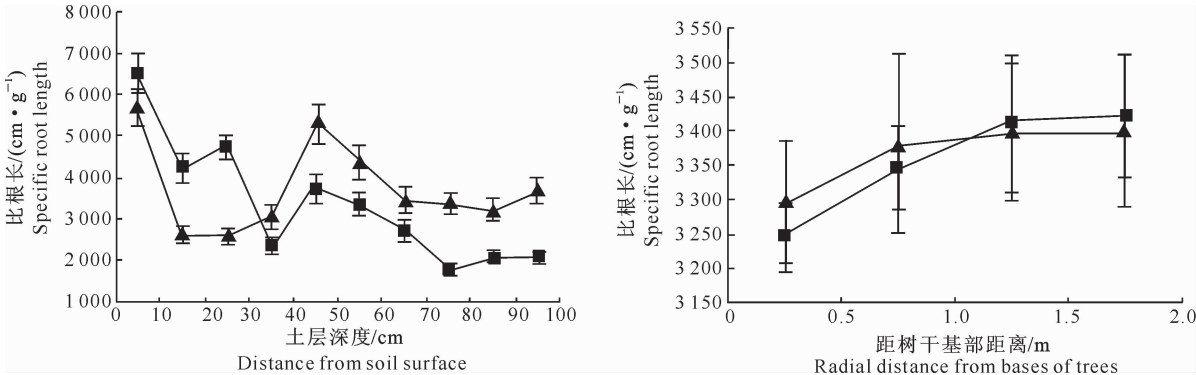


图 4 核桃-小麦复合系统中核桃细根比根长的分布特征

—■—. 复合系统;—▲—. 核桃单作

Fig. 4 Distribution characteristics of specific root length of walnut fine root in walnut-wheat agroforestry system

—■—. Intercropping ecosystem;—▲—. Walnut monocropping

3.2 核桃-小麦复合系统中小麦根系的  
空间分布及  
形态特征

3.2.1 根长密度 图 5a 显示,随土层深度的增加,复合系统及小麦单作 0~100 cm 土层小麦的根长密度呈负指数曲线分布趋势,因此参考苗果园等<sup>[17]</sup>的公式:

$$RLD=ae^{-bZ}.$$
 (3)

对复合系统小麦根长密度值(RLD)、小麦单作根长密度值(RLD<sub>CK</sub>)与土层深度(Z)的关系进行拟合,所得方程分别为:

$$RLD=3.837\ 2e^{-0.081\ 4Z},R^2=0.914\ 3;$$
 (4)

$$RLD_{CK}=3.053\ 2e^{-0.069\ 7Z},R^2=0.906\ 1.$$
 (5)

由式(4)和式(5)可见,复合系统的 b 值大于小麦单作,由负指数函数的特点可知,随土层深度的增加,复合系统小麦根长密度下降的幅度大于小麦单作。复合系统 0~20 cm 土层的小麦根长占总根长的 77.57%,大于小麦单作(63.78%);复合系统中小

麦根长的垂直分布重心为深度 18.46 cm,小于小麦单作(26.04 cm),差异达极显著水平(P<0.01)。说明复合系统使浅层土壤内的小麦根量增加,可能是核桃根系在深层的竞争作用迫使小麦的根系向浅层分布所致。

在水平径向上,当复合系统距树干基部距离分别为 0~0.5,0.5~1.0,1.0~1.5,1.5~2.0 m 时,0~100 cm 土层小麦根长密度分别为 1.34,1.87,1.90,1.84 cm/cm<sup>3</sup>;表现出随距树干基部距离的增加呈先增大后减少的趋势,在距树干基部距离为 0~0.5 m 时最低,距树干基部距离为 1.0~1.5 m 时最高,且均大于小麦单作(1.22 cm/cm<sup>3</sup>),差异达显著水平(P<0.05);这与复合系统中核桃细根根长密度的变化趋势相反,即小麦细根增加的同时核桃细根在减少,说明在复合系统的竞争中,小麦的根长密度增加,使其根系处于竞争强势。

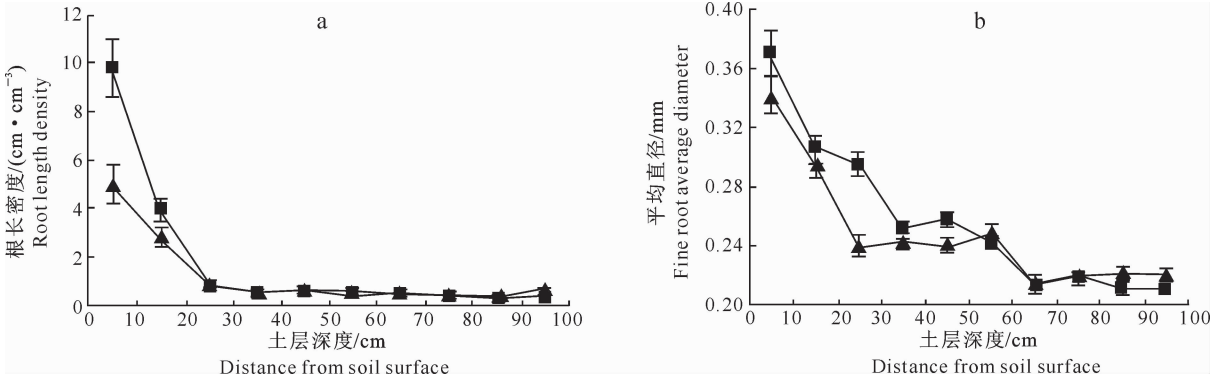


图 5 核桃-小麦复合系统中小麦细根根长密度(a)和平均直径(b)的垂直分布特征

—■—. 复合系统—▲—. 小麦单作

Fig. 5 Vertical distribution characteristics of root length density (a) and average diameter (b) of wheat fine root in walnut-wheat agroforestry system

—■—. Intercropping ecosystem;—▲—. Wheat monocropping

3.2.2 平均直径 图 5b 显示,在复合系统和小麦单作的 0~100 cm 土层内,小麦细根平均直径均随



土层深度的增加而逐渐减小。这种降低趋势在复合系统的 0~40 cm、小麦单作的 0~30 cm 段表现最为明显。在 0~50 cm 土层,复合系统中小麦细根平均直径为 0.295 5 mm,大于小麦单作(0.272 0 mm),且差异达显著水平( $P<0.05$ )。说明复合系统使小麦细根的平均直径增大,特别是在浅层土壤内增大更为明显。水平径向分布上,当距树干基部距离为 0~0.5,0.5~1.0,1.0~1.5,1.5~2.0 m 时,复合系统 0~100 cm 土层的小麦细根平均直径分别为 0.270 2,0.267 7,0.252 4,0.260 6 mm,表现出随着距树干基部距离的增加呈现先降低后升高的趋势,但差异不显著。

3.2.3 比根长 图 6 显示,在复合系统和小麦单作的 0~100 cm 土层内,小麦细根比根长随土层深度的增加呈先降低后逐渐波动升高的趋势。复合系统中小麦细根比根长在 20~30 cm 土层达到最小值,而后又逐渐升高;而小麦单作在 10~20 cm 土层达到最小值。复合系统比根长最小值与小麦单作相比出现在更深土层处。在 0~50 cm 土层,复合系统小麦细根比根长为 10 019.5 cm/g,小于小麦单作(11 811.7 cm/g);在 50~100 cm 土层,复合系统小麦细根比根长为 14 328.9 cm/g,大于小麦单作(13 389.6 cm/g),且差异均达显著水平( $P<0.05$ )。推测小麦可能是通过在一定程度上降低比根长来适应复合系统中的剧烈竞争的,而在竞争较弱的区域则是以增加比根长来适应竞争的,小麦细根平均直径的垂直变化趋势也说明了这一点。当距树干基部距离为 0~0.5,0.5~1.0,1.0~1.5,1.5~2.0 m 时,复合系统中的小麦细根平均比根长分别为 12 580.8,12 350.3,12 530.3,12 235.4 cm/g,但差异不明显。

图 6 核桃-小麦复合系统中小麦细根比根长的垂直分布特征

Fig. 6 Vertical distribution characteristics of specific root length of wheat fine root in walnut-wheat agroforestry system

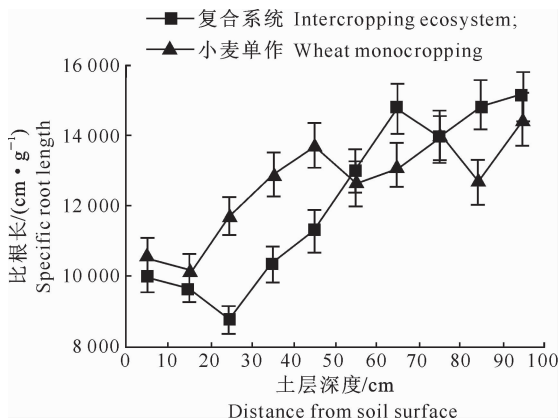
### 4 讨 论

樊巍等<sup>[18]</sup>对苹果(*Malus pumila*)-小麦(*T. aestivum*)复合系统的研究指出,如果没有小麦的干扰,苹果的根系分布有上移趋势;马长明等<sup>[19]</sup>对核桃(*J. regia*)-黄芩(*Scutellaria baicalensis*)复合系统的研究表明,间作条件下核桃根长密度小于核桃单作,在垂直方向上细根分布有下移现象,且在水平径向上伸展距离也受到抑制,与本研究复合系统中核桃细根根长密度变小、垂直分布重心下移及水平分布重心向树干基部靠近的结论一致。云雷等<sup>[20]</sup>、张劲松等<sup>[14]</sup>、樊巍等<sup>[18]</sup>、马长明等<sup>[19]</sup>的研究结果表明,复合系统中,林木细根根长密度在径向上随距树干基部距离的增加呈先增加后减少的趋势。本研究结果表明,当距树干基部 0~1.5 m 时,根长密度呈先增加后减少的趋势,但在距树干基部 1.5~2.0 m 时又略有增加,可能是由于间作通道两边的核桃根系同时到达这个范围所造成的,该范围很可能是复合系统根系竞争最为激烈的区域。复合系统小麦根长的垂直分布重心深度为 18.46 cm,小于小麦单作(26.04 cm),复合系统使小麦根分布上移,与孟平等<sup>[21]</sup>提出的复合系统中,小麦吸水根的垂直分布与小麦单作相比总体差异不明显的结论不一致,这可能与太行山低山丘陵区土层只有 80 cm,影响了作物根系的分布有关。

在垂直方向上,复合系统中核桃在 0~30 cm 土层的平均比根长大于核桃单作,但在 30~100 cm 土层内小于核桃单作。这与马长明等<sup>[19]</sup>的研究结果不一致。复合系统中小麦的比根长在 0~50 cm 土层内小于小麦单作,在 50~100 cm 土层内大于小麦单作。从核桃和小麦根长密度的分布可知,复合系统 0~30 cm 土层为根系竞争最为激烈的区域。由此推测,在复合系统根系竞争剧烈区,强势竞争者通过增加细根直径或减小比根长来适应竞争,弱势竞争者则通过减小细根直径或增大比根长来适应竞争;在竞争的平和区,强势竞争者通过减小细根直径或增大比根长来适应竞争,弱势竞争者通过增加细根直径或减小比根长来适应竞争;细根平均直径较大者往往会成为弱势竞争者。本研究中,在水平径向上,复合系统核桃细根比根长也存在类似的分布趋势,只是趋势不明显而已。

### [参考文献]

[1] 吴 刚,李 静,邓红兵.农林生态系统界面生态学初探[J].



- 应用生态学报, 2000, 11(3): 459-460.
- Wu G, Li J, Deng H B. Primary research on interface ecology in agroforestry ecosystems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 459-460. (in Chinese)
- [2] Ong C K, Corlett J E, Singh R P. Above and below ground interaction in agroforestry systems [J]. Forest Ecology and Management, 1991, 45(1): 45-57.
- [3] McIntyre B D, Riha S J, Ong C K, et al. Competition for water in a hedge-intercrop system [J]. Field Crops Research, 1997, 52(1/2): 151-160.
- [4] Smith D M. Physiological and environmental control of transpiration by trees in windbreaks [J]. Forestry Ecology and Management, 1998, 105(1/2): 159-173.
- [5] 吴 楚, 王政权, 范志强. 树木根系衰老研究的意义与现状 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1276-1280.
- Wu C, Wang Z Q, Fan Z Q. Significance of senescence study on tree roots and its advance [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1276-1280. (in Chinese)
- [6] 张小全, 吴可红, Dieter M. 树木细根生产与周转研究方法评述 [J]. 生态学报, 2000, 20(5): 875-883.
- Zhang X Q, Wu K H, Dieter M. A review of methods for fine-root production and turnover of trees [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 875-883. (in Chinese)
- [7] Bowen G D. Tree roots and the use of soil nutrients [M]. London: Academic Press, 1984: 147-177.
- [8] 王政权, 郭大立. 根系生态学 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1213-1216.
- Wang Z Q, Guo D L. Root ecology [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1213-1216. (in Chinese)
- [9] 陈 伟, 薛 立. 根系间的相互作用: 竞争与互利 [J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1243-1251.
- Chen W, Xue L. Root interactions: Competition and facilitation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1243-1251. (in Chinese)
- [10] 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.
- Luo Z S, Xiang C H, Zhang L, et al. Spatial distribution of fine roots and underground competition between Chinese prickly ash (*Zanthoxylum bungeum*) and weeds in Chinese prickly ash plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(2): 86-91. (in Chinese)
- [11] 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 [J]. 西北农业学报, 2007, 16(5): 113-117.
- Chen G P, Chai Q, Niu J Y. Research on root temporal and spatial distribution of intercropped cereal and legume crops [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2007, 16(5): 113-117. (in Chinese)
- [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.
- Zhu Q K, Zhu J Z. Characteristics of niche of agroforestry systems in Loess area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(1): 49-52. (in Chinese)
- [13] 云 雷, 毕华兴, 马雯静, 等. 晋西黄土区核桃花生复合系统核桃根系空间分布特征 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7): 67-70.
- Yun L, Bi H X, Ma W J, et al. Spatial distribution characteristics of root system of walnut trees in the walnut-peanut intercropping system in the Loess region of Western Shanxi [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(7): 67-70. (in Chinese)
- [14] 张劲松, 孟 平, 尹昌君, 等. 苹果-小麦复合系统中作物根系时空分布特征 [J]. 林业科学研究, 2002, 15(5): 537-541.
- Zhang J S, Meng P, Yin C J, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of wheat roots in apple-wheat intercropping [J]. Forest Research, 2002, 15(5): 537-541. (in Chinese)
- [15] Wang Z Q, Burch W H, Mou P, et al. Accuracy of visible and ultraviolet light for estimation live root proportions with minirhizotrons [J]. Ecology, 1995, 76: 2330-2334.
- [16] 赵 忠, 成向荣, 薛文鹏, 等. 黄土高原不同水分生态区刺槐细根垂直分布的差异 [J]. 林业科学, 2006, 42(11): 1-7.
- Zhao Z, Cheng X R, Xue W P, et al. Difference of fine root vertical distribution of *Robinia pseudoacacia* under the different climate regions in the Loess Plateau [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(11): 1-7. (in Chinese)
- [17] 苗果园, 尹 钧, 张云亭, 等. 中国北方主要农作物根系生长的研究 [J]. 作物学报, 1998, 24(1): 1-6.
- Miao G Y, Yin J, Zhang Y T, et al. Study on root growth of main crops in North China [J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(1): 1-6. (in Chinese)
- [18] 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 [J]. 生态学报, 1999, 19(6): 860-863.
- Fan W, Lu Q, Gao X R. Distribution pattern and growing dynamics of the roots system in apple-wheat intercropping system [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(6): 860-863. (in Chinese)
- [19] 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 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 181-186.
- Ma C M, Zhai M P, Liu C P. Root distribution characteristics of *Juglans regia* in monoculture and intercropping [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(6): 181-186. (in Chinese)
- [20] 云 雷, 毕华兴, 任 怡, 等. 黄土区果农复合系统种间水分关系研究 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(6): 110-114.
- Yun L, Bi H X, Ren Y, et al. Research on soil moisture relations among types of agroforestry system in the Loess Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 110-114. (in Chinese)
- [21] 孟 平, 张劲松, 尹昌君, 等. 农林复合系统与单作物系统作物根系差异特征的研究 [J]. 林业科学研究, 2002, 15(4): 369-373.
- Meng P, Zhang J S, Yin C J, et al. Experiments on characteristics of wheat roots difference between apple-wheat intercropping system and wheat monoculture system [J]. Forest Research, 2002, 15(4): 369-373. (in Chinese)