应用生态学报 2017年1月 第28卷 第1期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jan. 2017, **28**(1): 96-104 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201701.027

农田向农林复合系统转变过程中土壤物理性质的变化

王 来[1] 高鹏翔[1] 刘 滨[1] 仲崇高[1] 侯 琳[1,2] 张硕新[1,2*]
([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 以渭北黄土区农林实践中被广泛采用的核桃-小麦间作复合模式为研究对象,以两物种的单作系统为对照,研究单作农田向农林复合系统转变对土壤物理性质的影响,为农林复合系统经营管理和模型的建立提供理论依据.结果表明: 核桃-小麦间作对土壤物理性质的改善作用主要发生在0~40 cm土层.核桃-小麦间作可以避免表层(0~20 cm)土壤容重升高,同时在20~40 cm土层对单作农田形成的犁底层也有显著的改善作用.核桃-小麦间作对各土层田间持水量均表现出持续的改善作用,除在20~40 cm土层略低于核桃单作外,其他从第5年开始均高于两单作系统.核桃-小麦间作对各土层土壤孔隙度均存在持续的改善作用,在0~20和20~40 cm土层与两单作系统相比存在显著差异,同时也能提高毛管空隙度的比例.农田向农林复合系统转变过程中对土壤容重、田间持水量、土壤孔隙度均有持续的改善作用,且对浅层土壤的改善作用强于深层土壤.

关键词 农林复合系统; 土壤容重; 土壤孔隙度; 间作; 核桃; 小麦

Changes of soil physical properties during the conversion of cropland to agroforestry system.

WANG Lai[1], GAO Peng-xiang[1], LIU Bin[1], ZHONG Chong-gao[1], HOU Lin[1,2], ZHANG Shuo-xin[1,2*] ([1]*College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*; [2]*Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*).

Abstract: To provide theoretical basis for modeling and managing agroforestry systems, the influence of conversion of cropland to agroforestry system on soil physical properties was investigated via a walnut (*Juglans regia*)-wheat (*Triticum aestivum*) intercropping system, a wide spreading local agroforestry model in northern Weihe River of loess area, with the walnut and wheat monoculture systems as the control. The results showed that the improvement of the intercropping system on soil physical properties mainly appeared in the 0-40 cm soil layer. The intercropping system could prevent soil bulk density rising in the surface soil (0-20 cm), and the plow pan in the 20-40 cm soil layer could be significantly alleviated. The intercropping system had conti-nuous improvement on soil field capacity in each soil layer with the planting age increase, and the soil field capacity was higher than that of each monoculture system in each soil layer (except 20-40 cm soil layer) since the 5th year after planting. The intercropping system had continuous improvement on soil porosity in each soil layer, but mainly in the 0-20 and 20-40 cm soil layer, and the ratio of capillary porosity was also improved. The soil bulk density, field capacity and soil porosity obtained continuous improvement during the conversion of cropland to agroforestry system, and the improvement on soil physical properties was stronger in shallow soil layer than in deep soil.

Key words: agroforestry system; soil bulk density; soil porosity; intercropping; walnut tree; wheat.

本文由国家科技支撑计划项目(2015BAD07B050202)资助 This work was supported by the National Science and Technology Support Plan (2015BAD07B050202).
2016-06-12 Received, 2016-10-25 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sxzhang@nwsuaf.edu.cn

土壤肥力是农业生产的基础,土壤物理性质是土壤肥力的重要指标.土壤物理性质不仅影响土壤保持和供应水肥的能力,对调控土壤气热状况和地表径流的产生也有重要作用[1-2].不同的土壤物理性质会造成土壤水、气、热的差异[3],影响土壤矿质养分和水分的供应状况,从而影响作物的生长发育[4-6].长期不合理的土地利用及土壤侵蚀导致黄土高原土壤质量明显退化,严重制约着该区农业生产[7].改善土壤物理性状,提高土壤蓄水保肥能力对当地农业生产至关重要[8].农林复合系统由于其多样性的产出和收益均衡等优点[9],在世界很多地区,特别是发展中国家被广泛采用,在国计民生方面发挥着重要作用.由于土壤是农林业生产的物质基础,因此,农林复合系统与土壤理化性质的关系研究也受到了广泛关注[10-16].然而,过去的研究多集中在农林复合系统与作物单作系统相比对土壤理化性质的改善方面,对农田向农林复合系统转变的过程中土壤理化性质的变化过程研究鲜有报道.过程研究是农林复合系统模型建立的关键.本研究以在渭北黄土区的农林实践中被广泛采用的核桃-小麦间作系统为研究对象,以两物种的单作系统为对照,讨论小麦单作农田向核桃-小麦间作系统转变的过程中土壤物理性质的变化特征, 以期为农林复合系统的科学管理和模型建立提供理论依据.

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

试验区位于渭河以北黄土高原南缘,海拔 700~800 m,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,雨热同季.年平均日照时数为 2053.3 h,年光合总有效辐射为 5×10^8~6.3×10^9 J·m^{-2}.年平均气温 11.6 ℃,大于等于 10 ℃ 的积温为 3800 ℃,绝对最低气温 -20.6 ℃,绝对最高气温 41.4 ℃,最冷月 1 月平均气温 -2.2 ℃,最热月 7 月平均气温 25.3 ℃.年平均降雨量 615.0 mm,6—9 月降水量约占全年的 70%左右.年平均无霜期 215 d,初霜日 10 月 29 日左右,终霜日 3 月 27 日左右.耕层土壤为黄土母质发育成的褐土.该地在农业种植制度为一年两熟与一年一熟的交错地带.

1.2　试验材料

试验地设在陕西省岐山县枣林镇张家沟村(34°21′21″ N,107°43′42″ E),该村各类农林复合经营模式总面积达 130 hm^2,主要模式为果农间作,约占 90%.试验地设置在 20 世纪 70 年代中期修建,位于坡中位置的梯田上.耕层土壤质地为黏壤土,无灌溉条件;田面南高北低,坡度 2°~3°;梯田南北宽 30~45 m,东西长约 300 m,总面积约 1.1 hm^2;核桃-小麦间作、核桃单作和小麦单作种植面积分别约为 0.5、0.4 和 0.2 hm^2,自核桃定植当年起,该试验地被设定为固定观测样地,进行连续观测.该试验地在种植核桃树前为一年一熟的小麦单作农田.间作核桃和单作核桃定植时间均为 2003 年,南北行向,采用“品”字形栽植,小冠疏层树形,株行距均为 3 m×6 m(主栽品种为‘香玲’,零星混杂有‘辽核’和‘鲁光’等,均为嫁接苗).

单作小麦和间作小麦均为冬小麦,行距 20 cm,基本苗 210.5 万株·hm^2.间作小麦的种植,给树行留 1 m 宽的树行带,小麦在每个树行间的种植带宽度为 5 m,种植带两边距离树行均为 0.5 m,从第 1~11 年均保持 5 m 种植带宽.小麦品种为‘小偃 22’,每年 10 月 5 日左右播种,第二年的 6 月 5 日左右收获,收获时根茬高度控制在 20~30 cm.播种前耕地,耙抹,然后播种,耕地深度在 20 cm 左右.核桃的收获期为每年 9 月 15 日左右.

1.3　研究方法

1.3.1 采样点设置　在核桃-小麦间作和单作核桃中,各选取 3 株样木(树的胸径、树高、冠幅均接近其整个样地的平均值),同时回避地头边缘树行,在样木处设置采样点(图 1).在小麦单作样地内,按“品”字形布设 3 个采样点.

1.3.2 采样时间　从定植核桃树第一年(1 a)起 3 种土地利用方式每隔 1 年各采样 1 次,采样时间为当年的 11 月下旬地面封冻前.

1.3.3 土壤容重　土壤容重用环刀法测定,环刀容积 100 cm^3.在核桃树行间垂直于树行方向,土壤断面与样树树基中心对齐,挖 100 cm 深的土壤剖面,每一层 10 cm.在每一土层中心位置用环刀取出原状

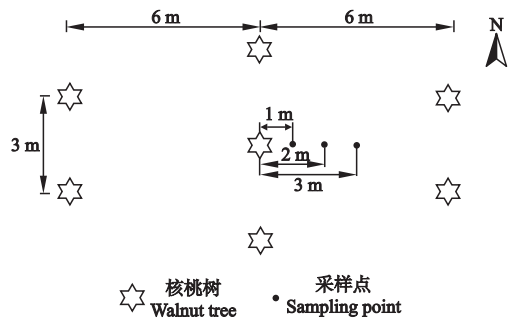


图 1　在样木下采样点布设示意图

Fig. 1　Layout diagram of sampling points under the sample trees.

土,每层重复取样 3 次.称量精确到 0.01 g.

1.3.4 田间持水量　田间持水量用威尔科克斯(Wilcox)法测定[17].采样时间和方法与土壤容重相同.称量精确到 0.01 g.

1.3.5 土壤孔隙度的计算　公式如下:

$$p=(1-\frac{d_v}{d_s})\times 100\% \quad (1)$$

式中:p 代表土壤总孔隙度(%);d_v 代表土壤容重($g\cdot cm^{-3}$);d_s 代表土壤密度($g\cdot cm^{-3}$).这里土壤密度采用通用的平均值 2.65 $g\cdot cm^{-3}$[18].

$$p_c=f_c\times d_v \quad (2)$$

式中:p_c 代表土壤毛管孔隙度(%);f_c 代表田间持水量(%).

$$p_n=p-p_c \quad (3)$$

式中:p_n 代表土壤非毛管孔隙度(%).

1.4 数据计算

试验数据用 Microsoft Excel 软件进行初步整理.不同处理间的差异采用 SAS 9.2 软件进行方差分析(ANOVA),图表制作用 OriginPro 8.0 软件完成.土壤采样时,分层安排为:每层10 cm,采样深度范围 0~100 cm土层.在数据初步分析的基础上,为了讨论方便,将讨论的土壤层次设定为 0~20、20~40、40~60和 60~100 cm 等 4 个土层.

2 结果与分析

2.1 土壤容重的变化特征

从图 2 可以看出,0~20 cm 土层,核桃-小麦间作的土壤容重随种植年限的增加变化不大,在各年份均与小麦单作无显著差异;核桃单作的土壤容重随种植年限的增加逐渐增加,从第 5 年开始显著高于核桃-小麦间作和小麦单作,差异达极显著水平($P<0.01$).

20~40 cm 土层,核桃-小麦间作土壤容重随种植年限的增加呈现逐渐减低的趋势,但在第 11 年与小麦单作的差异也未达到显著水平.核桃单作也呈逐渐降低趋势,且从第 9 年开始显著低于小麦单作($P<0.05$),但与核桃-小麦间作间各年份均无显著差异.

40~60 和 60~100 cm 土层,核桃-小麦间作土壤容重随种植年限的增加均有略微降低趋势;但 3 种土地利用方式间在各年份均无显著差异(图 2).

总之,核桃-小麦间作在 11 年中,除表层(0~20 cm)土壤外,对其他各土层土壤容重均有一定的改善作用,但与对照相比差异均未达到显著水平.核桃单作的土壤容重在浅层土壤(0~20 cm)迅速提高,但在 20~40 cm 土层有显著降低.

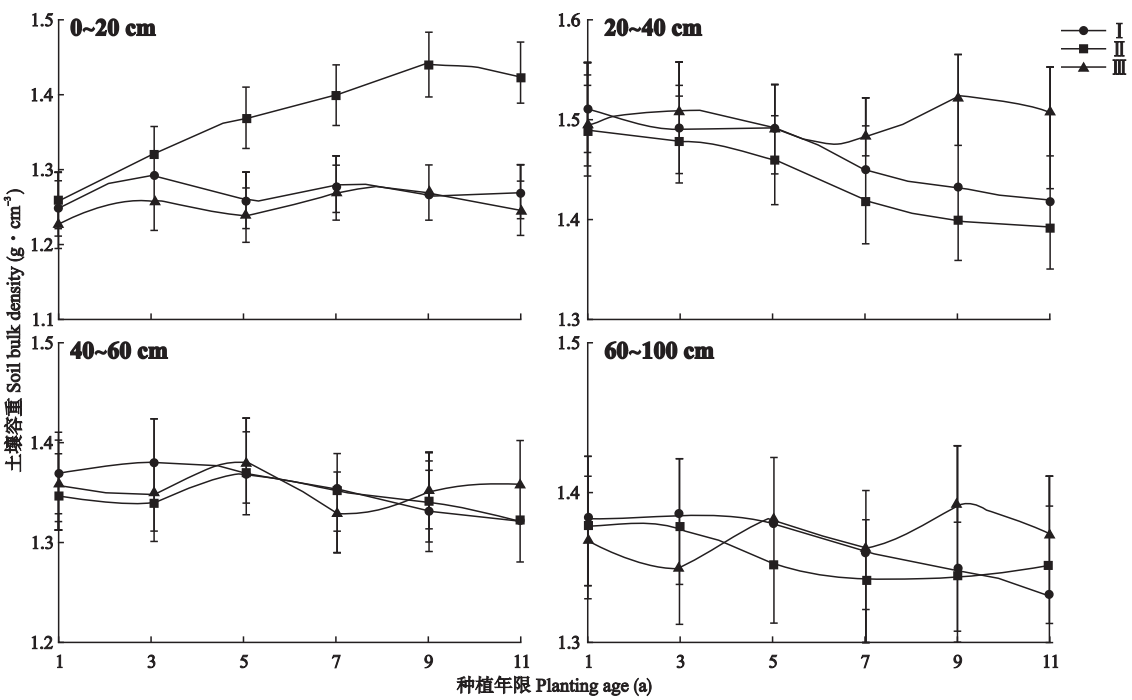


图 2 3 种土地利用方式不同土层土壤容重的动态变化特征

Fig.2 Dynamic characteristics of soil bulk density in different soil depths of three land use patterns.

Ⅰ: 核桃-小麦间作 Walnut-wheat intercropping; Ⅱ: 核桃单作 Walnut monoculture; Ⅲ: 小麦单作 Wheat monoculture.下同 The same below.

2.2　田间持水量的变化特征

从图 3 可以看出,0~20 cm 土层,核桃-小麦间作的田间持水量随种植年限的增加呈现逐渐增加趋势,但在各年份与小麦单作的差异均未达到显著水平.核桃单作的田间持水量变化趋势与核桃-小麦间作相反,呈迅速降低趋势,从第 5 年开始显著小于核桃-小麦间作和小麦单作,且差异达极显著水平(P<0.01).

20~40 cm 土层,核桃-小麦间作和核桃单作的田间持水量随种植年限的增加均呈现逐渐增加趋势,在各年份前者均略小于后者,但二者间的差异均未达到显著水平.核桃-小麦间作和核桃单作的田间持水量分别从第 9 和 7 年开始显著高于小麦单作(P<0.05).

40~60 和 60~100 cm 土层,核桃-小麦间作和核桃单作的田间持水量随种植年限的增加均呈现逐渐增加趋势.核桃-小麦间作的田间持水量在第 9 年开始显著高于小麦单作(P<0.05),但核桃单作与小麦单作间均无显著差异.

总之,核桃-小麦间作的田间持水量随种植年限的增加在各土层均呈现逐渐增加趋势,除表层土壤(0~20 cm)外,其他各土层从第 9 年开始均显著高于小麦单作.核桃单作的田间持水量在表层土壤(0~20 cm)随种植年限增加迅速降低,但在其他各土层也呈现逐渐升高趋势.

2.3　土壤孔隙性的变化特征

2.3.1 土壤总孔隙度　从图 4 可以看出,0~20 cm 土层,核桃-小麦间作土壤总孔隙度随种植年限的增加无显著变化,且在各年份与小麦单作间均无显著差异.核桃单作的土壤总孔隙度随种植年限的增加呈迅速降低趋势,从第 5 年开始显著小于核桃-小麦间作和小麦单作,且差异达极显著水平(P<0.01).

20~40 cm 土层,核桃-小麦间作和核桃单作的土壤总孔隙度随种植年限的增加均呈现逐渐增加的趋势,在各年份前者均略小于后者,但二者间的差异均未达到显著水平.核桃-小麦间作和核桃单作的土壤总孔隙度分别从第 9 和 7 年开始显著高于小麦单作(P<0.05).

40~60 和 60~100 cm 土层,核桃-小麦间作的土壤总孔隙度随种植年限的增加呈现微弱增加的趋势.但复合系统、核桃单作和小麦单作三者间的差异在各年份均未达到显著水平.

总之,核桃-小麦间作对土壤总孔隙度的影响主要在 20~40 cm 土层,在第 9 年后可以观察到显著的提高,对其他土层无显著影响.核桃单作的土壤总孔隙度在表层土壤(0~20 cm)随种植年限的增加迅速降低,而在 20~40 cm 土层则可以显著提高;对其他土层无显著影响.

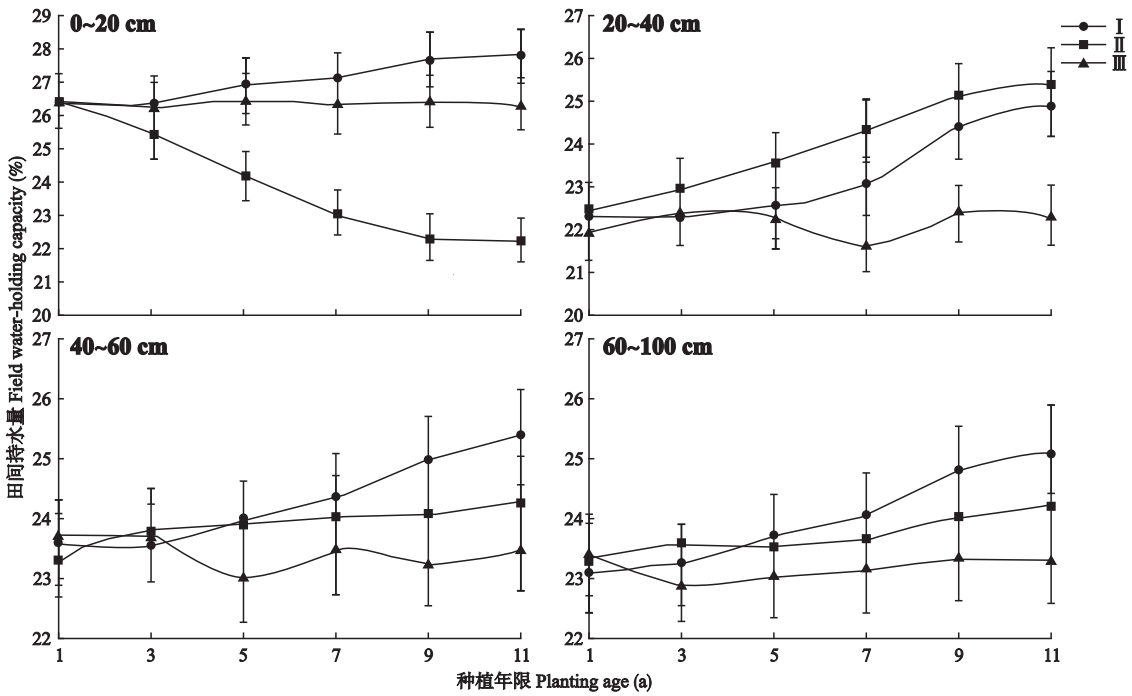


图 3　3 种土地利用方式不同土层田间持水量的动态变化特征

Fig.3　Dynamic characteristics of field water-holding capacity in different soil depths of three land use patterns.

2.3.2 土壤毛管孔隙度　从图 5 可以看出,0~20 cm 土层,核桃-小麦间作土壤毛管孔隙度随种植年限的增加呈现逐渐增加的趋势,且分别从第 7 和 11 年开始显著高于核桃单作和小麦单作($P<0.05$).核桃单作的土壤毛管孔隙度随种植年限的增加呈逐渐降低趋势,从第 7 年开始小于小麦单作,且差异均未达到显著水平.

20~40 cm 土层,核桃-小麦间作和核桃单作的土壤毛管孔隙度随种植年限的增加均呈现逐渐增加趋势,在各年份前者均略小于后者,但二者间的差异

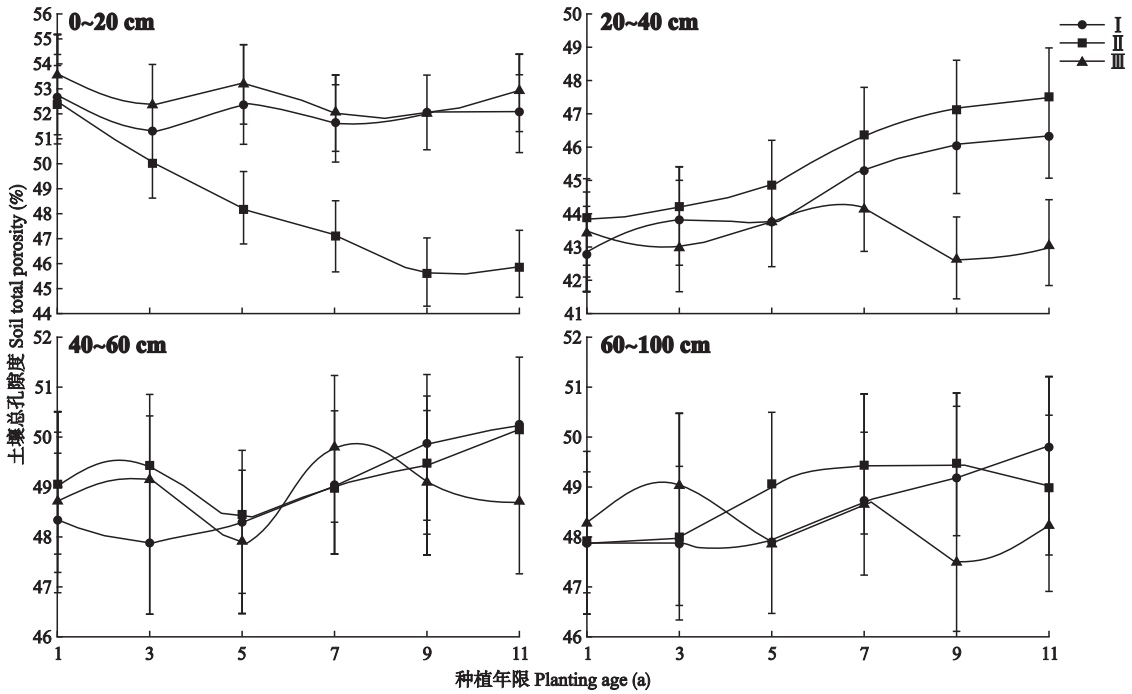


图 4　3 种土地利用方式不同土层土壤总孔隙度的动态变化特征

Fig.4　Dynamic characteristics of soil total porosity in different soil depths of three land use patterns.

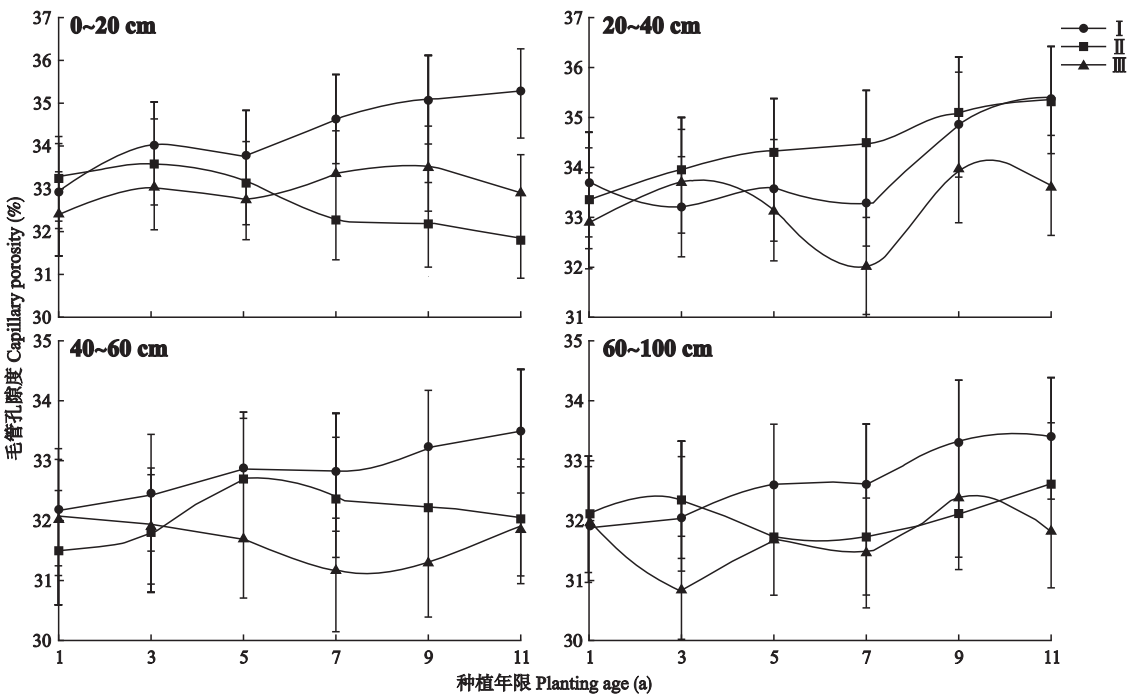


图 5　3 种土地利用方式不同土层土壤毛管孔隙度的动态变化特征

Fig.5　Dynamic characteristics of soil capillary porosity in different soil depths of three land use patterns.

均未达到显著水平.核桃-小麦间作的土壤毛管孔隙度与小麦单作间的差异各年份均未达到显著水平.核桃单作的土壤毛管孔隙度仅在第 7 年显著高于小麦单作($P<0.05$).

40~60 和 60~100 cm 土层,核桃-小麦间作的土壤毛管孔隙度随种植年限的增加呈现逐渐增加趋势.但复合系统、核桃单作和小麦单作三者间的差异在各年份均未达到显著水平.

总之,核桃-小麦间作在各个土层对土壤毛管孔隙度均有一定的提高作用,但最显著的影响在 0~20 cm土层,在第 11 年可以观察到显著提高.核桃单作的土壤毛管孔隙度在表层土壤(0~20 cm)随种植年限的增加逐渐降低,而在 20~40 cm 土层则存在显著提高,对其他土层无显著影响.

2.3.3 土壤非毛管孔隙度　从图 6 可以看出,0~20 cm土层,核桃-小麦间作和核桃单作的土壤非毛管孔隙度随种植年限的增加均呈现逐渐降低的趋势,在第 11 年小麦单作>复合系统>核桃单作,且三者间的差异显著($P<0.05$).核桃单作的土壤非毛管孔隙度从第 5 年开始显著小于核桃-小麦间作和小麦单作,且差异达到极显著水平($P<0.01$).

20~40 cm 土层,核桃-小麦间作和核桃单作的土壤非毛管孔隙度在第 9 和 11 年均显著高于小麦单作($P<0.05$),在此期间复合系统小于核桃单作,但差异未达显著水平.

40~60 和 60~100 cm 土层,核桃-小麦间作和核桃单作的土壤非毛管孔隙度仅在 60~100 cm 土层,第 3 年时显著低于小麦单作,但是随着种植年限的增加没有明显的趋势形成.其他年份核桃-小麦间作、核桃单作和小麦单作三者间的差异均未达到显著水平.

总的来说,核桃-小麦间作在浅层土壤(0~20 cm)对土壤的非毛管孔隙度有降低作用,而在20~40 cm土层又可以显著提高土壤的非毛管孔隙度;而在深层土壤(40~60、60~100 cm)对非毛管孔隙度没有显著的改善作用.核桃单作在 0~20 cm 土层可以显著降低非毛管孔隙度,而在 20~40 cm 土层则有显著的改善作用;在深层土壤(40~60、60~100 cm)对非毛管孔隙度没有显著影响.

2.3.4 土壤非毛管与毛管孔隙度比值　土壤之所以具有供给作物生长所需的水分和养分的能力,其原因之一是土壤的多孔性质为作物生长创造了必要条件[19].在评价其生产意义时,孔径分布比单纯的孔隙度大小更为重要[18].这里非毛管孔隙度与毛管孔隙度的比值也就是土壤中大孔隙与小孔隙的比值.在 0~20 cm 土层,核桃-小麦间作的大小孔隙比随种植年限的增加均呈逐渐降低的趋势,说明毛管孔隙在本层土壤中的比例获得了一定的提高.在20~

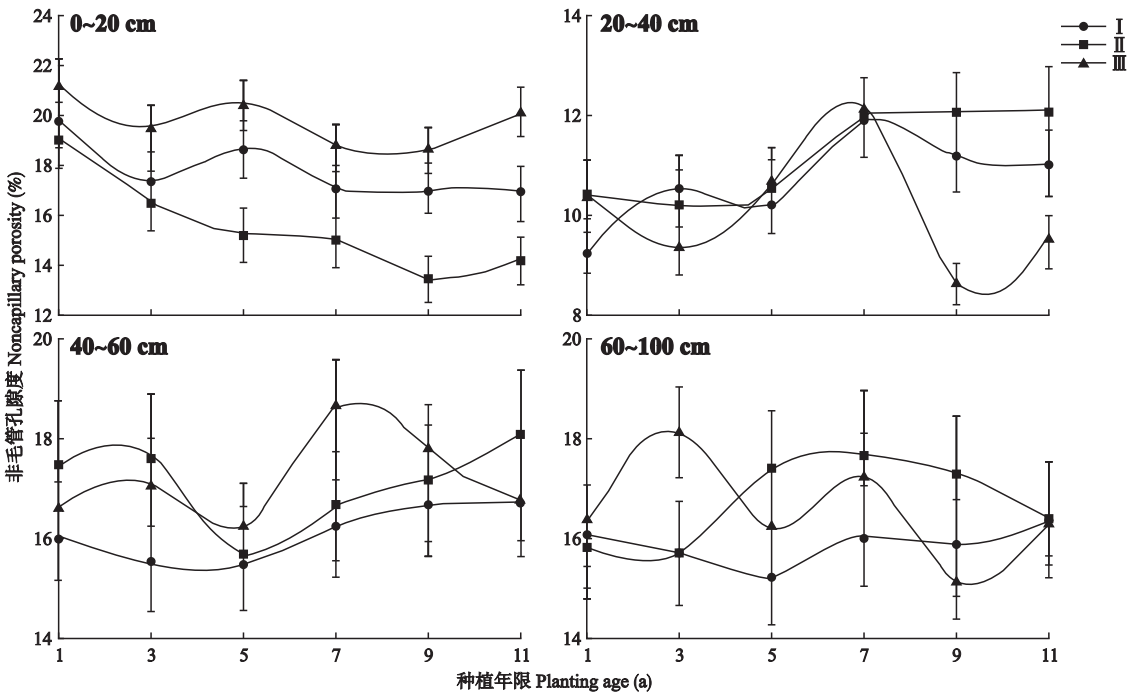


图 6　3 种土地利用方式不同土层土壤非毛管孔隙度的动态变化特征

Fig.6　Dynamic characteristics of soil noncapillary porosity in different soil depths of three land use patterns.

表 1 3 种土地利用方式不同土层土壤非毛管与毛管孔隙度比值的动态变化特征

Table 1 Dynamic characteristics of the ratio of noncapillary to capillary porosity in different soil depths of three land use patterns

种植模式 Land use pattern	土层深度 Soil depth (cm)	种植年限 Planting age (a)					
		1	3	5	7	9	11
核桃-小麦间作	0~20	1∶1.67	1∶1.97	1∶1.82	1∶2.03	1∶2.06	1∶2.09
Walnut-wheat	20~40	1∶3.61	1∶3.15	1∶3.28	1∶2.81	1∶3.13	1∶3.20
intercropping	40~60	1∶2.00	1∶2.10	1∶2.12	1∶2.02	1∶1.99	1∶2.01
	60~100	1∶2.00	1∶2.04	1∶2.14	1∶2.04	1∶2.11	1∶2.03
核桃单作	0~20	1∶1.73	1∶2.02	1∶2.19	1∶2.17	1∶2.39	1∶2.24
Walnut monoculture	20~40	1∶3.22	1∶3.35	1∶3.26	1∶2.90	1∶2.93	1∶2.92
	40~60	1∶1.80	1∶1.80	1∶2.10	1∶1.94	1∶1.88	1∶1.76
	60~100	1∶2.02	1∶2.06	1∶1.83	1∶1.79	1∶1.86	1∶1.99
小麦单作	0~20	1∶1.53	1∶1.70	1∶1.61	1∶1.78	1∶1.80	1∶1.64
Wheat monoculture	20~40	1∶3.16	1∶3.63	1∶3.12	1∶2.66	1∶3.94	1∶3.56
	40~60	1∶1.93	1∶1.86	1∶1.95	1∶1.67	1∶1.77	1∶1.91
	60~100	1∶1.96	1∶1.70	1∶1.95	1∶1.83	1∶2.13	1∶1.93

40 cm土层,大小孔隙比逐渐提高,说明大孔隙在本层土壤中的比例有一定的提高.在 40~60 和 60~100 cm土层,大小孔隙比稳定在 1∶2 左右,无明显的变化趋势(表 1).

核桃单作的大小孔隙比在各土层随种植年限增加的变化趋势与核桃-小麦间作相同(表 1).在 0~20 cm土层,核桃-小麦间作的大小孔隙比与核桃单作相比均大于后者,说明在本层土壤中核桃-小麦间作具有更高的大孔隙比例.

总之,0~100 cm 土层内,第 11 年时,大小孔隙比为核桃-小麦间作(1∶2.33)<小麦单作(1∶2.26)<核桃单作(1∶2.23).说明核桃-小麦间作与两单作系统相比可以提高土壤中毛管孔隙的比例.

3 讨 论

本研究在小麦单作农田向初步成熟的核桃-小麦间作复合系统的转变过程中,采用固定样地观测的方法,对土壤物理性质的变化进行连续观测,以保证数据的连续性和可比性.结果表明,核桃-小麦间作系统对田间持水量和土壤孔隙度均有显著的改善作用.李天阳等[14]、贾树海等[15]和陈春峰等[16]的研究结论均支持本研究结果.

核桃-小麦间作在观测的 11 年中,除表层(0~20 cm)土壤外,对其他各土层的土壤容重均有一定的改善作用,相对影响最强的土层为 20~40 cm,但始终与对照的差异未达到显著水平.这可能是因为 11 年的观测期太短的缘故,因为土壤容重的改变是一个漫长的过程[20].在 20~40 cm 土层,可能与核桃树根系的活动对犁底层的改善作用有关[21-22].

核桃单作在 0~20 cm 土层可以显著增加土壤容重,在 20~40 cm 土层相反又显著降低了土壤容重.可能是由于表层土壤(0~20 cm)被(喷药、修剪和采摘等日常管理活动)频繁的踩踏,同时缺乏耕作,导致土壤密实度增加所致.在 20~40 cm 土层土壤容重降低的主要原因可能是核桃单作没有连年的耕地活动,再加上核桃树根系的连续活动,对以前形成的犁底层有一定的改善作用所致.

核桃-小麦间作的田间持水量和土壤毛管孔隙度随种植年限的增加在各土层均呈现逐渐增加的趋势.这可能与农林复合系统增加了土壤碳的输入有关[23-24].土壤有机质和有机碳的增加可以改善土壤的理化性质[25-26],从而提高土壤的毛管孔隙度,而田间持水量主要由土壤毛管孔隙度决定[27],最终土壤的持水能力得以提高.

核桃单作在 20~100 cm 土层对田间持水量也有一定的改善作用,其原因可能与核桃-小麦间作类似,与土壤有机质和有机碳有关.在 0~20 cm 土层田间持水量的迅速降低可能是本层土壤容重迅速增加所致.土壤容重的增加可以降低土壤的孔隙性从而降低田间持水能力[28-29].同时,在核桃单作中 0~20 cm土层,土壤的总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均呈下降趋势也支持这一说法.

核桃-小麦间作和核桃单作对土壤孔隙度的影响主要集中在浅层土壤(0~20、20~40 cm).0~40 cm土层是核桃树细根的主要分布区域[30].细根的生长和周转活动,一方面,可以提高土壤的孔性;另一方面,也可以提高土壤有机碳的输入[31-32].在浅层土壤,核桃树凋落物也可以提高土壤有机碳的

输入.这都为土壤毛管孔隙度的发育提供了有利条件[33].在深层土壤(40~60、60~100 cm),根系活动较弱,所以改善作用不显著.但也有可能与观测时间太短有关,随着种植年限的增加深层土壤的孔隙度也可能会得到显著改善.

4 结　论

除表层(0~20 cm)土壤外,核桃-小麦间作复合系统对其他各土层土壤容重均有一定的改善作用.在 0~20 cm 土层,由于核桃单作土壤容重明显增加,从第 5 年开始核桃-小麦间作土壤容重显著低于核桃单作.

核桃-小麦间作复合系统对各土层田间持水量均表现出持续改善作用.除表层土壤(0~20 cm)外,其他各土层从第 9 年开始均显著高于小麦单作.在 0~20 cm土层,从第 5 年开始核桃-小麦间作田间持水量显著大于核桃单作.

核桃-小麦间作复合系统对土壤总孔隙度的影响主要在 20~40 cm 土层,在第 9 年后可以观察到显著提高.核桃-小麦间作在各土层对土壤毛管孔隙度均有一定的提高作用,最显著的影响在 0~20 cm 土层.与小麦单作相比,核桃-小麦间作在 0~20 cm 土层对非毛管孔隙度有降低作用,与核桃单作相比则可增加非毛管孔隙度.

参考文献

[1] Li Q (李　强), Xu M-X (许明祥), Qi Z-J (齐治军), *et al*. Effects of long-term chemical fertilization on soil physical properties of slope lands in the loess hilly region. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(1): 103-109 (in Chinese)

[2] Alegre JC, Cassel DK. Dynamics of soil physical properties under alternative systems to slash-and-burn. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1996, **58**: 39-48

[3] Li J-Q (黎建强), Zhang H-J (张洪江), Cheng J-H (程金花), *et al*. Soil physical properties of different hedgerow systems in upper reaches of Yangtze River. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(2): 418-424 (in Chinese)

[4] Li C-H (李潮海), Wang Q (王　群), Hao S-P (郝四平). Advances of studies on the effect of soil physical properties on soil biological activity and crop growth. *Journal of Henan Agricultural University* (河南农业大学学报), 2002, **36**(1): 32-37 (in Chinese)

[5] Grimaldi M, Schroth G, Teixeira WG. Soil structure// Schroth G, Sinclair FL, eds. Tree, Crops and Soil Fertility: Concepts and Research Methods. Wallingford: CAB International, 2003: 191-208

[6] Wang H, Huang Y, Huang H. Soil properties under young Chinese fir based agroforestry system in midsubtropical China. *Agroforestry Systems*, 2005, **64**: 131-141

[7] Wang G-L (王改兰), Duan J-N (段建南), Jia N-F (贾宁凤), *et al*. Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in loess hilly area. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20**(4): 82-89 (in Chinese)

[8] Li Z (李　志), Liu W-Z (刘文兆), Wang Q-X (王秋贤). Effects of land use type and slope position on soil physical properties in loess tableland area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(6): 1303-1308 (in Chinese)

[9] Li W-H (李文华), Lai S-D (赖世登). Agroforestry in China. Beijing: Science Press, 1994 (in Chinese)

[10] Li H-S (黎华寿), Luo S-M (骆世明). Effect of different typical slope land used patterns on soil physical & chemical properties. *Journal of South China Agricultural University* (华南农业大学学报), 2001, **22**(2): 1-4 (in Chinese)

[11] Jose S, Gillespie AR, Pallardy SG. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, 2004, **61**: 237-255

[12] Udawatta RP, Kremer RJ, Adamson BW. Variations in soil aggregate stability and enzyme activities in a temperate agroforestry practice. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**: 153-160

[13] Udawatta RP, Kremer RJ, Garrett HE. Soil enzyme activities and physical properties in a watershed managed under agroforestry and row-crop systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **131**: 98-104

[14] Li T-Y (李天阳), He B-H (何丙辉), Tian J-L (田家乐), *et al*. Correlation analysis of soil physical and chemical properties under different planting patterns of blood orange garden in hilly areas of Chongqing City. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2013, **21**(11): 1395-1402 (in Chinese)

[15] Jia S-H (贾树海), Li M (李　明), Xing Z-K (邢兆凯), *et al*. Effect of different agroforestry patterns on soil physico-chemical properties and enzyme activities. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2014, **45**(3): 648-653 (in Chinese)

[16] Chen C-F (陈春峰), Wu J-E (吴骏恩), Liu J-Q (刘佳庆), *et al*. The improvement of soil aggregates by building rubber-based agroforestry ecosystems in Xishuangbanna, Southwest China. *Journal of Yunnan University* (Natural Sciences) (云南大学学报:自然科学版), 2016, **38**(2): 326-334 (in Chinese)

[17] Jiang P-F (江培福), Lei T-W (雷廷武), Liu X-H (刘晓辉), *et al*. Principles and experimental verification of capillary suction method for fast measurement of field capacity. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(7): 1-5 (in Chinese)

[18] Lin D-Y (林大仪). Soil Science. Beijing: China Forestry Press, 2002 (in Chinese)

[19] Li Z-H (李志洪), Wang S-H (王淑华). Effects of soil

bulk density on soil physical properties and wheat growth. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2000, **31**(2): 55-57 (in Chinese)
[20] Xu Y-X (徐友信), Liu J-T (刘金铜), Li Z-Z (李宗珍), *et al*. Spatial variability of bulk density under different land use types in the slope of low-land in Taihang Mountain. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2009, **25**(3): 218-221 (in Chinese)
[21] Hua W-D (花伟东), Guo Y-F (郭亚芬), Zhang Z-X (张忠学). Influence of plough pan on broke partially slope farmland to moisture content infiltration. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(5): 213-216 (in Chinese)
[22] Ahmed A. Effects of plow sole on soil infiltration rate and crop yield in irrigated soil. *Agricultural Mechanization in Asia*, *Africa and Latin America*, 1990, **21**: 24-26
[23] Ping X-Y (平晓燕), Wang T-M (王铁梅), Lu X-S (卢欣石). Review of advances in carbon sequestration potential of agroforestry. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2013, **37**(1): 80-92 (in Chinese)
[24] Xie T-T (解婷婷), Su P-X (苏培玺), Zhou Z-J (周紫鹃), *et al*. Research progress on carbon sink function of agroforestry system under climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(10): 3039-3046 (in Chinese)
[25] Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 2005, **124**: 3-22
[26] Zhou C-J (周彩景), Liu J (刘 军), Wang Y-Q (王益权), *et al*. Effect of organic compounds content and types on soil water retention capacity. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报:自然科学版), 2008, **36**(12): 115-120 (in Chinese)
[27] Li C-R (李传荣), Liu J-W (刘金文), Chen Y-J (陈永杰), *et al*. Dynamics of soil water contents and its physical features under fruit trees. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2001, **8**(3): 131-134 (in Chinese)
[28] Abid M, Lal R. Tillage and drainage impact on soil quality. I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. *Soil and Tillage Research*, 2008, **100**: 89-98
[29] Li Z (李 卓), Wu P-T (吴普特), Feng H (冯浩), *et al*. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(4): 611-620 (in Chinese)
[30] Xu H-S (许华森), Yun L (云 雷), Bi H-X (毕华兴), *et al*. Fine root distribution and underground competition in walnut soybean intercropping system. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31**(7): 1612-1616 (in Chinese)
[31] Carlos GT, Frank MH, Sam EF, *et al*. Agroforest system effects on soil characteristics of the Sarapiqui region of Costa Rica. *Agriculture*, *Ecosystems & Environment*, 1999, **73**: 19-28
[32] Marques M, Paulo H, Gama R, *et al*. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture*, *Ecosystems & Environment*, 2016, **221**: 99-108
[33] Gao C-X (高朝侠), Xu X-X (徐学选), Yu M-Z (宇苗子), *et al*. Impact of land use types on soil macropores in the loess region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(6): 1578-1584 (in Chinese)

作者简介 王 来,男,1980 年生,博士.主要从事农林复合生态系统研究. E-mail: yituyimi@139.com

责任编辑 张凤丽

王来, 高鹏翔, 刘滨, 等. 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, **28**(1): 96-104
Wang L, Gao P-X, Liu B, *et al*. Changes of soil physical properties during the conversion of cropland to agroforestry system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(1): 96-104 (in Chinese)