

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.014

黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究*

卫新东^{1,2} 汪星¹ 汪有科^{1,2} 周玉红¹ 缪凌³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为明确半干旱黄土丘陵区不同年龄无灌溉旱作矮化修剪密植枣林的根系分布范围与其土壤水分的空间关系, 利用根钻法测定枣林株间不同深度的根系分布、枣树主干就近位置的根系量, 并采用土钻取土和中子仪定位测定结合了解不同年龄的枣林 10 m 深度的土壤水分。结果表明: 随着树龄增加, 1、3、5、12 a 枣树根系最大深度年平均增值在减小, 12 a 枣林垂直根系达 520 cm。枣树株间 100 cm 处向下的根系深度较浅, 枣林的垂直根系最大和最小值之差先增加后减小, 12 a 枣林垂直根系之差只有 180 cm。研究区枣树株间水平根系在枣林 3 a 时开始交汇, 枣树水平根系延伸无法确定, 所得到的水平方向根系实际是枣林多株树汇集的根系。枣林垂直根系对土壤水分的垂直变化作用显著, 但矮化修剪密植枣林株间根系深度差异并没有造成土壤水分因此而波动。随着枣树树龄的增加根系深度和土壤水分干层均增加, 0~2 m 土层的土壤水分年内变化幅度也增加, 而且根层范围的土壤水分随着树龄增加在降低, 但是土壤干层深度稍大于测得的根系深度。

关键词: 枣林 根系 土壤水分 黄土丘陵区

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0088-10

Root Distribution and Soil Water Dynamics of Jujube Plantations in Loess Hilly Regions

Wei Xindong^{1,2} Wang Xing¹ Wang Youke^{1,2} Zhou Yuhong¹ Miao Ling³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The spatial correlation between soil water content and root distribution in non-irrigation dense-dwarf jujube plantations was analyzed in semiarid hilly loess region of China. The soil coring method was used to sample roots at different depths within the 0 ~ 1 000 cm soil profile under different-aged jujube plants (1, 3, 5 and 12 a). The results showed that the increment of average annual root depth decreased with the increase of jujube stand age. The maximum root depth of 12-year-old jujube was 520 cm and the minimum root depth was 100 cm from the tree base, which was half-way between two trees planted 2 m apart. The difference between maximum and minimum root depths of 12-year-old jujube trees was 180 cm. Lateral roots started developing intersection networks after three years of planting. Soil water fluctuation was not induced by vertical root systems of dense-dwarf jujube plants. Root depth, dry soil layer depth and annual soil water variance within top 0 ~ 200 cm soil layer increased with increase of jujube stand age. However, root-zone soil water content decreased with increase of stand age, while dry soil layer depth was slightly larger than root depth. The results can provide vital technical support for jujube cultivation especially under semiarid conditions.

Key words: Jujube forest Root systems Soil moisture Loess hilly regions

收稿日期: 2014-12-07 修回日期: 2015-01-16
* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B04)和林业公益性行业科研专项资助项目(201404709)
作者简介: 卫新东, 博士生, 长安大学讲师, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: weixindongvip@163.com
通讯作者: 汪有科, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水灌溉研究, E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

引言

林木根系分布特点决定其水分利用策略,许多研究表明林木根系分布对土壤水分的消耗具有直接作用^[1-2]。干旱半干旱的黄土丘陵地区的林木普遍具有较深的根系,深层根系通过吸收深层土壤水分以维持季节性干旱的蒸腾耗水^[3-6],进而造成深层土壤水分的不断消耗。然而,降水最大入渗深度以下的土壤得不到自然降水的入渗补给,形成了“利用型”土壤干层^[7]。土壤水分是该区林分生长和稳定的主要限制因素,土壤干层的形成是该区林木恢复与重建过程中遇到的主要生态水文问题之一^[8-10]。因而,干旱半干旱地区林木深层根系分布及土壤水分的研究显得尤为重要。

大量研究证实林木根系分布深度影响到林木拥有地下营养空间的大小和土壤水分及养分的吸收利用,决定着林木从土壤中吸收并用于蒸发的水量,直接影响到地上部分产量的高低,是决定人工林生产能力的关键因素^[11]。林木根系特别是细根的分布特征及其对干旱的抗御能力是半干旱地区林木生产力高低的主要决定因素。据报道世界上许多生态系统中普遍存在着超过 2 m 的深层根系,在干旱季节通过根系传输的土壤水分决定着植被的蒸发能力,进而影响地表能量和大气中的水分平衡^[12-13]。Kleidon 等^[14]把根系深度作为植被水分亏缺的基础判别指标,认为根系深度是水分供应有限状况下全球植被的一个重要参数。但是在有关植被及大气水分和碳传输流动过程的研究中,很少有人关注根系深度这个参数的重要性。在全球气候模型中如果根系深度增加会导致较高的水分供应,对植被水文循环和净初级生产力有深远的影响^[15-16]。因此,林木根系深度的研究在干旱半干旱区生态环境研究中占有举足轻重的地位。

林地土壤水分在垂直方向上的分布特征受根系分布、气象条件和土壤特性等影响^[17-19],同时,根系在土壤剖面上的分布很大程度上依赖于土壤水分状况^[20-21]。黄土丘陵区耐旱树种——枣树(*Ziziphus jujube* cv. Lizao),拥有发达的垂直根与水平根,能充分吸收水分、抵御干旱。枣树常规的种植模式多为稀植、乔化、无水肥管理。为提高产量,1999 年开始进行了矮化修剪密植的种植模式,种植密度由 500 株/hm² 提高到 1 665 株/hm²、树高由 5 m 以上降低到 2 m 左右,枣果经济产量大幅度上升^[22]。这种种植模式被证明是该区经济效益与生态效益同步提高的有效途径。但同时,矮化修剪密植枣林中深层土壤水分是否过度消耗、是否造成土壤干层,成为回

答该模式能否在黄土丘陵区可持续发展亟待解决的科学问题。因而,掌握枣林深层根系空间分布特征,明确枣林地剖面土壤水分状况,可以更好地理解枣林对深层水分利用的过程,对维持半干旱的黄土丘陵区矮化修剪密植枣林的持续生产具有十分重要的意义。

目前,根系方面的研究主要集中在根系生物量及单株根系水平和垂直分布上,矮化修剪密植林分根系分布及其土壤水分关系的影响报道很少^[23]。黄土丘陵半干旱区矮化修剪密植枣林深层根系分布的研究更少,已有研究为 0~1.5 m 深度内不同直径的根系随树龄增长^[24]及不同滴灌措施下根系的分布特征^[25-26],而枣林深层根系分布的研究尚未见报道。本文旨在揭示黄土丘陵区矮化修剪密植枣林根系最大分布深度、根系空间分布特征及枣林地土壤水分的变化,以期为该区枣林水分管理提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于典型的黄土高原丘陵沟壑区陕西省米脂县孟岔村(119°49'E,37°05'N)退耕还林形成的旱作红枣生态经济林示范基地。研究区属中温带半干旱性气候区,降水量少且年内分布不均,年平均降水量 412.6 mm,7~9 月份降水量占全年降水量的 50% 以上。研究区土壤属于粉质砂壤土,0~1 m 土壤容重平均为 1.30 g/cm³,1~5 m 土壤容重有所增加,平均为 1.31 g/cm³,环刀法测定田间持水率平均为 23.4%、饱和含水率平均为 39.8% (质量含水率)。土壤较为贫瘠,0~1 m 土层有效氮、磷、钾含量分别为 34.7、2.9、101.8 mg/kg,有机质质量比为 2.1 g/kg,pH 值为 8.6。该区土层深厚,土质均一,是研究根系分布的理想区域,地下水埋深 50 m 以下,对本试验根系吸水影响可忽略。试验区选择山坡上部较为平缓(坡度小于 10°)处,植树密度 2 m×3 m 的 1、3、5、12 a 矮化修剪密植枣林。林下经常除草保持地面无杂草生长。研究区林分种类为密植枣林,基本情况如表 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤水分测定

定位观测:选择 1、3、5、12 a 4 个树龄的枣树作为观测对象,4 棵枣树作为一块样地,在 4 棵树的中心位置安放 10 m 深铝管作为中子仪土壤水分测定点(图 1a),每个树龄选择 3 块样地作为 3 个重复。土壤水分用中子仪每月测定一次,本次计算每个样地从 2012 年 1 月—2013 年 12 月共 24 个月数据的

表 1 样地林分基本特征
Tab. 1 Stand characteristics of sample plots

树龄/a	平均树高/m	平均直径/mm	平均冠幅/m	杂草	株行距/(m×m)	产量/(kg·hm ⁻²)
1	0.65±0.12	8.1±1.5	0.52±0.22	无	2×3	0
3	2.11±0.26	21.3±2.2	1.34±0.33	无	2×3	6 150
5	2.23±0.24	42.5±3.2	1.92±0.22	无	2×3	14 550
12	2.27±0.32	85.3±3.5	1.95±0.25	无	2×3	16 500

平均值作为该林分的土壤水分。

取样干燥法测定:选择与根系测定相近长势和相同树龄的枣树,在距离树干 10 cm 处和 100 cm 处利用土钻取 3 个土样,在室内用干燥法测得土壤含水率。

1.2.2 根系测定

根系测定采用根钻法(洛阳铲)进行取样,在株间用根钻打孔测量根系(图 1b),钻孔之间距离为 10 cm,以 20 cm 土层作为一个取样深度。为了获得株间每 10 cm 一个土芯根样,在第 1 个株间,钻孔位置分别距树干 10、30、50、70、90、90、70、50、30、10 cm,第 2 个株间,钻孔距离树干 20、40、60、80、100、80、

60、40、20 cm,两个株间钻孔共同组成一个样地,共做 3 个样地,相当于距离树干 0~100 cm 之间每 10 cm 间隔点有 6 次重复。洛阳铲能借助钻头及钻杆的重力插入土壤中,不需要转动,直接提升钻杆就能取得土芯,可方便地获取 3 m 以下的深层土芯,比常用的旋转式根钻能更快地获取土芯样品。国内研究人员所用的根钻直径大部分小于 10 cm,国外学者 Achat 等^[27]使用内径为 6.5 cm 的根钻钻取土样。采用根钻法取样时,通常认为获取的土芯体积越大越能容纳更多的根系,越能代表样地的根系分布特征。本试验选用的洛阳铲获得的土芯直径为 10 cm,能更好地代表林地根系分布状况。

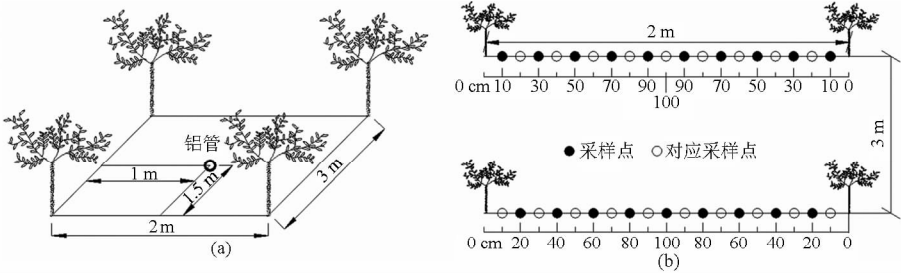


图 1 土壤水分测定点及根系采样点布置图
Fig. 1 Treatment layout for soil water sampling points and root sampling points
(a) 土壤水分测定点 (b) 根系采样点

取样时以 20 cm 深度分层取土芯(土芯根样),获得的土芯在野外现场通过孔径为 1 mm 的筛网进行预冲洗,将距离树干 10 cm 取得的土芯获得的根系带回室内干燥称量用于分析根系质量和土壤水分的关系,其余土芯不管根系直径,只确定根系有或者无,以确定根系分布的范围。同一深度的 6 个土芯全部无根系认为属于无根系分布,有一个土芯存在根系就认为该深度有根系分布,连续 3 个深度的土芯中没有根系出现时停止取样,认为更深层土壤无根系存在。

2 结果与分析

2.1 矮化修剪密植枣林株间根系特征

枣树株间距离为 2 m,以树干为起点,距树干最远处是 100 cm。2012 年 9 月份采用根钻法取土芯测得根系,以与树干的距离和钻孔深度作图 2a 可看出,枣树垂直根系较水平发达,1 a 水平根系延伸

40 cm,垂直根系达到 120 cm。由于株距只有 2 m,所以根系水平延伸超过 1 m 时便和相邻的枣树根系交汇,所以水平根系延伸超过 1 m 即无法确定其继续延伸的范围。3 a 以上枣林株间水平根系出现交汇,无法判读每株树的水平根系实际长度。由于本研究对象是矮化修剪密植枣林,所以反映的根系特征是一个群体根系特征而不是单株根系属性。由图 2a 中 3、5 和 12 a 枣树根系分布可看出,枣林垂直根系在距主干 10 cm 处根系深度最大且随树龄增加而加深,1、3、5、12 a 枣林在距主干 10 cm 处垂直根系分别达到 120、260、340、520 cm;根系最大深度年平均增值在减小,分别是 120、87、68 和 43 cm;枣林根系最浅处在两棵中间距树干 100 cm 处,1、3、5、12 a 枣林在距主干 100 cm 处垂直根系分别为 0、40、80 和 340 cm;根系最浅处年平均增值随树龄增加呈现增加趋势,分别为 0、13、26 和 28 cm。随着树龄的增加,枣林的垂直根系最大和最小值之差先增加后

减小,1 a 枣林垂直根系深度之差为 120 cm,3 a 枣林垂直根系之差 220 cm,5 a 枣林垂直根系之差 260 cm,12 a 枣林垂直根系之差只有 180 cm。由图 2a 看出矮化修剪密植枣林 3 a 之后株间的根系交织生长,12 a 之后根系交织层厚度达到 340 cm 以下,整个林地中根系深度分布趋向均匀。

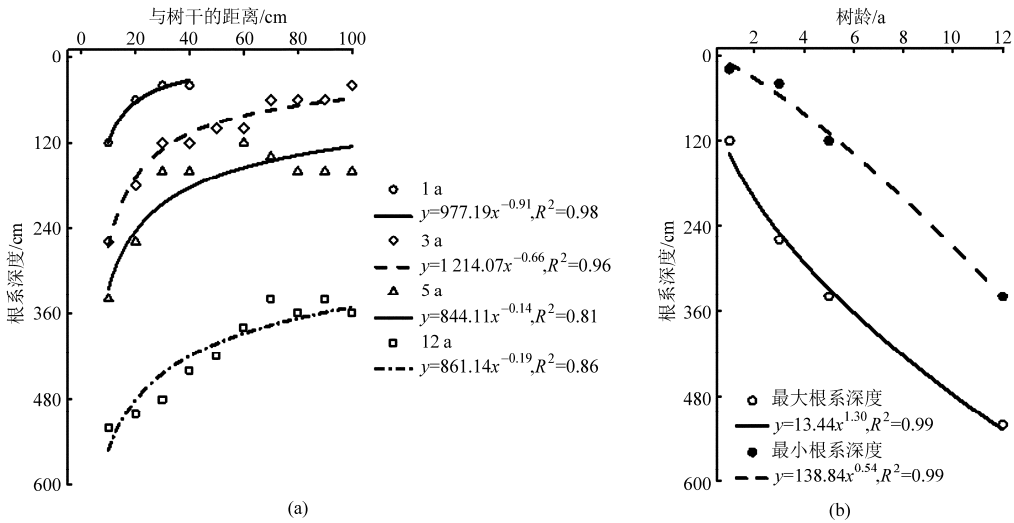


图 2 枣树根系深度和与树干距离及树龄的关系

Fig. 2 Relationships between depth of roots and distance of tree trunks and tree-age

2.2 矮化修剪密植枣林株间土壤水分差异性

由上述分析可知,矮化修剪密植枣林的株间根系分布深度在主干附近和两棵树中间的差异较大。为了判断株间土壤水分情况,于 2012 年 9 月用土钻法距离枣树主干 10 cm 和 100 cm(两棵中间)2 个位置进行取样测定,不同林龄的取土深度与该树龄的最大根系深度相同。测得土壤水分做表 2 进行比较分析。由于地表土壤水分受天气影响变化较大,特别是不能在同一时间取土样,容易出现表层土壤水分的差异,在半干旱区,地表温度对土壤水分的作用大于根系作用,为了减小地表土壤水分的变化影响,取 40 cm 以下的土壤水分进行分析。表 2 是 1、3、5 和 12 a 4 个树龄的枣树距离主干 10 cm 和 100 cm 处土层深度 40 cm 以下至根系最大深度范围的剖面土壤含水率比较。表 2 表明,在株距 2 m 的情况下,对同龄枣树而言,距树干 10 cm 和 100 cm 处的逐层土壤水分略有差异但差异不显著($P>0.05$)。一般根系密集处耗水较多,特别是在稀植林地体现明显,也就是说根系密集的地方土壤更加干化,但是在当地密植无灌溉情况下表现出土壤水分较为均匀的特点。无灌溉密植枣林土壤水分差异不明显的原因可能:一是 1 a 枣林根系稀少,没有造成株间土壤水分差异;二是枣树株间距离小,3 a 枣林株间根系已经交叉重叠,造成上部根系密度差异减小;三是根系本身具有的向水性,在水分较高处根系会主动增加密

度以获得更多水分从而形成半径 100 cm 范围土壤水分相对均匀;四是在此想了解土壤干层特征所以取了 40 cm 以下到该树龄根系最大深度范围的土壤水分值,而忽略了 0~40 cm 表层土壤水分。

2.3 不同树龄的根量与土壤水分

上面分析证明,密植株距间的水平方向土壤水分差异不明显。为了解密植枣林垂直方向根系与土壤水分情况,2012 年对研究区 1、3、5、12 a 枣林根系和 0~1 000 cm 深度的土壤水分进行了调查。取距离树干 10 cm 处的枣树根系并在取根样点附近仍距离树干 10 cm 处取土样,测得相应的根系量和土壤水分。1、3、5、12 a 枣林根系情况如图 3 所示。由图 3 可看出,枣林随着树龄的增加根系总量增加,根系深度增加。根系量最大值出现在 0~100 cm 之内。1、3、5、12 a 最大根系干质量密度分别为 23.01、45.61、89.95、565.73 g/m³。0~100 cm 深度内的根系总量分别占全根层根系总量的 93%、61%、57%、59%,3 a 之后 0~100 cm 内的根系比例基本稳定在 57%~61%。

不同龄枣树距树干 10 cm 处土层深度与根干质量密度关系拟合(图 3)表明,不同龄枣树根系干质量密度与土层深度存在较好的对数函数关系,决定系数 R^2 均在 0.85 以上。

林木根系吸收土壤中的水分对于干旱半干旱地区林地耗水、维持林地蒸发蒸腾及其生长具有重要

表 2 同龄枣树在距树干 10 和 100 cm 同一根层深度处的土壤体积含水率显著性分析

Tab.2 ANOVA results for soil water content at 10 cm and 100 cm away from base of tree trunk at 40 ~ 520 cm layer of soil profile for even-aged jujube

%

根层 深度/cm	1 a		3 a		5 a		12 a	
	10 cm	100 cm	10 cm	100 cm	10 cm	100 cm	10 cm	100 cm
40	11.52 ± 0.46	11.02 ± 0.22	11.28 ± 0.04	11.04 ± 0.65	11.27 ± 0.14	11.34 ± 0.10	10.26 ± 0.12	10.30 ± 0.07
60	11.40 ± 0.46	1136 ± 0.13	11.12 ± 0.17	11.33 ± 0.09	11.42 ± 0.05	11.44 ± 0.03	10.41 ± 0.10	10.36 ± 0.05
80	10.98 ± 0.17	1.50 ± 0.29	11.22 ± 0.28	11.41 ± 0.12	10.73 ± 0.15	10.71 ± 0.37	10.36 ± 0.05	10.37 ± 0.01
100	11.45 ± 0.30	11.13 ± 0.29	1.44 ± 0.12	11.44 ± 0.06	10.59 ± 0.06	10.64 ± 0.07	10.28 ± 0.14	10.32 ± 0.12
120	10.87 ± 0.12	11.09 ± 0.17	10.89 ± 0.29	11.16 ± 0.05	10.56 ± 0.25	10.54 ± 0.21	9.83 ± 0.06	9.76 ± 0.18
140	11.15 ± 0.25	11.04 ± 0.19	10.34 ± 0.05	10.24 ± 0.11	9.87 ± 0.19	9.92 ± 0.22	9.58 ± 0.06	9.56 ± 0.03
160			9.80 ± 0.30	9.42 ± 0.39	9.77 ± 0.05	9.76 ± 0.10	8.70 ± 0.16	8.71 ± 0.15
180			9.77 ± 0.15	9.81 ± 0.07	9.00 ± 0.06	8.99 ± 0.10	8.56 ± 0.03	8.57 ± 0.05
200			9.63 ± 0.08	9.58 ± 0.05	8.88 ± 0.05	8.94 ± 0.09	8.33 ± 0.11	8.36 ± 0.11
220			9.52 ± 0.06	9.56 ± 0.03	8.86 ± 0.04	8.78 ± 0.21	8.35 ± 0.03	8.37 ± 0.02
240			9.68 ± 0.05	9.65 ± 0.06	7.95 ± 0.06	7.99 ± 0.06	7.67 ± 0.05	7.67 ± 0.06
260			9.42 ± 0.03	9.37 ± 0.04	6.87 ± 0.10	6.85 ± 0.12	7.24 ± 0.11	7.34 ± 0.02
280			9.59 ± 0.21	9.63 ± 0.07	6.90 ± 0.03	6.71 ± 0.11	6.81 ± 0.06	6.79 ± 0.05
300					6.87 ± 0.02	6.62 ± 0.14	6.31 ± 0.04	6.35 ± 0.04
320					6.70 ± 0.12	6.82 ± 0.07	6.29 ± 0.16	6.37 ± 0.16
340					9.55 ± 0.28	9.80 ± 0.10	6.30 ± 0.14	6.35 ± 0.13
360							6.23 ± 0.17	6.27 ± 0.14
380							6.52 ± 0.16	6.52 ± 0.14
400							6.50 ± 0.05	6.52 ± 0.01
420							7.36 ± 0.02	7.37 ± 0.05
440							7.31 ± 0.09	7.32 ± 0.05
460							6.81 ± 0.15	6.76 ± 0.12
480							6.84 ± 0.15	6.81 ± 0.12
500							8.33 ± 0.05	8.36 ± 0.03
520							9.85 ± 0.02	9.85 ± 0.04

注:同龄枣树在同一根层深度条件下,距树干不同位置土壤水分差异均不显著($P>0.05$)。

作用。黄土丘陵区人工林普遍出现了土壤干层现象^[10,28],其形成的主要原因是土壤水分被植物根系吸收而长期得不到补给造成的。根系与土壤水分有直接关系,测定根系相同深度位置的土壤水分状况如图 4 所示。由于表层土壤水分波动较大,仍然用 40 ~ 1 000 cm 的土壤水分作图,图中水平虚线对应的土层深度代表最大根系深度。由图 4 看出,1 a 枣林(图 4a)土壤水分在根系层(0 ~ 120 cm)内没有明显变化,说明降水大于枣树根系对土壤水分的消耗。3 a 枣林(图 4b)土壤水分在根层(0 ~ 260 cm)内形成一个低水分区。5 a 和 12 a 枣林(图 4c、4d)土壤水分在根层内形成的低水分区更加扩大。各个树龄阶段的土壤水分在根系层以下都有一个较为明显的回升,凸显出根系对水分的影响。将不同树龄的根系层和 10 m 深土壤水分平均值作图 5 可以清楚看出,随着树龄增加根层的土壤水分降幅很大,大约从 11.25% 降到不足 8% (图 5a),由于根层水分的差异较大导致 1 000 cm 深度土壤水分均值也显示出随树龄增加而土壤水分降低的差异(图 5b)。

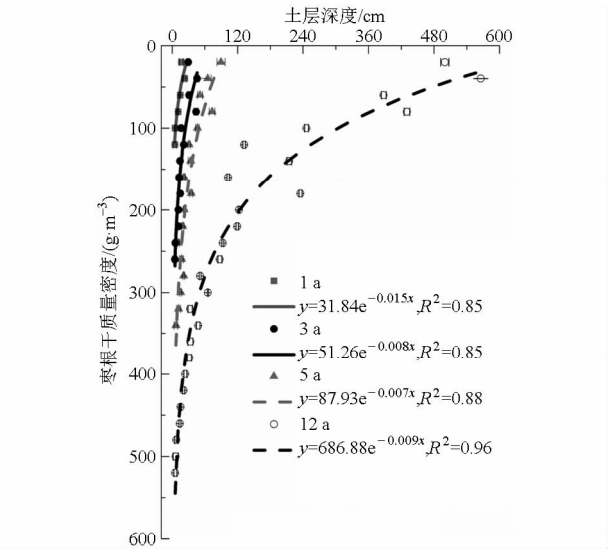


图 3 不同龄枣树距树干 10 cm 处根干质量密度与土层深度关系

Fig.3 Distribution of dried root weight densities of 1, 3, 5 and 12-year-old dense-dwarf jujube stands at 10 cm from base of tree trunks

根系吸水造成的土壤水分下降程度还可以用土

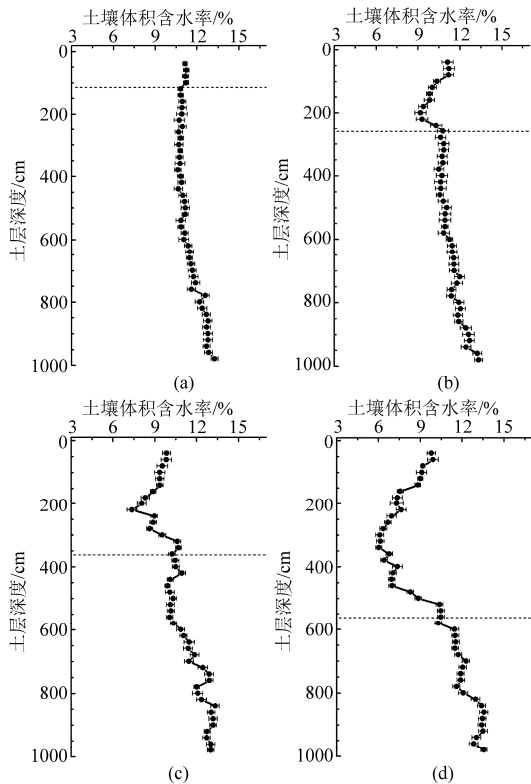


图 4 枣树在 40~1 000 cm 土层内的土壤含水率
Fig.4 Distribution of soil water content at 40~1 000 cm soil layer for 1, 3, 5 and 12-year-old dense-dwarf jujube
(a) 1 a (b) 3 a (c) 5 a (d) 12 a

壤水分亏缺度表示,即

$$k = \frac{\theta_a - \theta}{\theta} \times 100\% \tag{1}$$

式中 k ——水分亏缺度, %

θ ——土壤含水率

θ_a ——阻滞含水率,其值等于田间持水率的 60%

当 $k < 0$ 时水分不亏缺, $k < 25\%$ 时水分轻度亏缺, $25\% \leq k \leq 50\%$ 时水分中度亏缺, $k > 50\%$ 时水分严重亏缺。

根据式(1),对 1、3、5、12 a 枣林 0~1 000 cm 土层内土壤水分亏缺度进行计算如图 6 所示。图 6 中

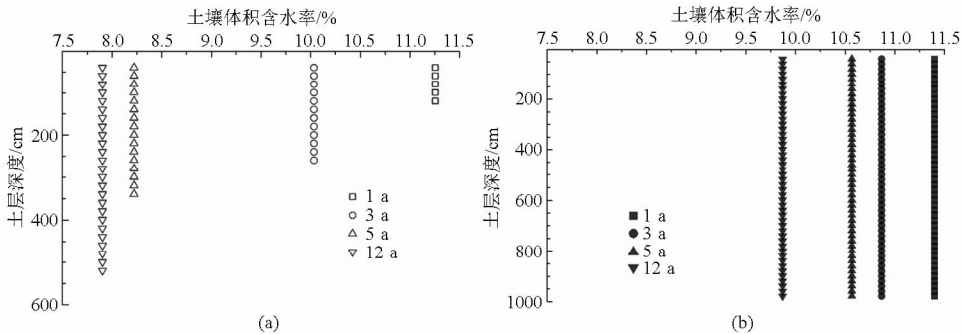


图 5 最大根层内土壤水分均值及 40~1 000 cm 土层内土壤水分均值
Fig.5 Average soil water content for 1, 3, 5 and 12-year-old dense-dwarf jujube
(a) 最大根层内土壤水分均值 (b) 40~1 000 cm 土层内土壤水分均值

的 3 条竖直线表示不同的土壤水分亏缺程度,当亏缺度小于 0 时,土壤水分不亏缺,当亏缺度小于 25% 时为轻度亏缺,当亏缺度为 25%~50% 时为中度亏缺,当亏缺度大于 50% 时为严重亏缺。从图 6 可以看出土壤水分亏缺度表现出剖面分布特征。1 a 枣林(图 6a)土壤水分基本处于不亏缺状态。3 a 枣林(图 6b)土壤水分在 100~260 cm 之间处于不亏缺和轻度亏缺,根系层(260 cm)以下处于不亏缺状态。5 a 枣林(图 6c)土壤水分在 200 cm 土层附近有一处达到中度亏缺,根系层更多处于轻度亏缺。12 a 枣林(图 6d)土壤水分在 240~480 cm 土层之间处于严重亏缺,在 40~80 cm 和 520~580 cm 范围处于轻度亏缺,根层以外 600~1 000 cm 土壤水分不亏缺。

2.4 不同树龄枣树周年林地土壤水分变化

上述研究采用取样法分析了矮化修剪密植枣林在不同树龄阶段的株间根系和土壤水分情况。以下是矮化修剪密植枣林 4 棵枣树中间(图 1a)采用中子仪定位观测的土壤水分周年动态变化。观测数据是每月测定 3 次,在此分析 12 个月的平均值。由于表层土壤更多反映天气作用,而反映根系耗水较弱,所以仍然分析 40~1 000 cm 以下土层水分,作 1、3、5、12 a 枣林土壤水分剖面分布图,如图 7 所示,图中水平虚线对应最大根系深度,竖直线为 40~1 000 cm 的平均土壤含水率。由图 7 看出,标准差能够反映一个周年中土壤水分的变动范围,0~200 cm 深度内土壤水分在一年中波动较大,越到表层波动越大,随着树龄的增加土壤水分的波动范围也增加,1、3、5、12 a 枣林 40 cm 深度土壤体积含水率标准偏差分别为 2.64%、4.41%、5.27% 和 6.19%。标准偏差反映出枣林在旱季消耗土壤水分的能力和雨季土壤水分恢复的能力。标准偏差在 0~200 cm 土层有较大值也说明当地土壤水分恢复能力在 200 cm,由 200 cm 深度向上的标准偏差加大说明土壤水分恢复能力也在增强。1 a 枣林 200 cm 以上土层标准偏

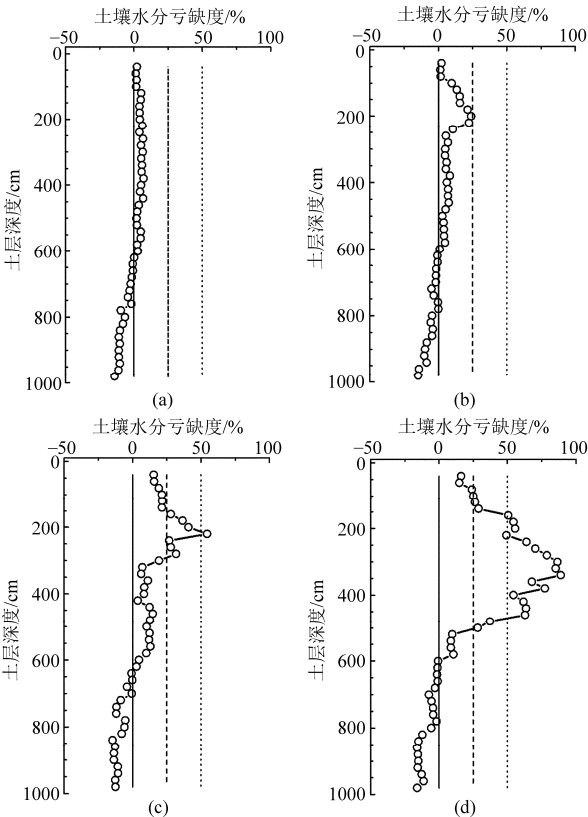


图 6 枣树土壤水分亏缺度

Fig. 6 Distributions of soil water deficit index under 1, 3, 5 and 12-year-old dense-dwarf jujube

(a) 1 a (b) 3 a (c) 5 a (d) 12 a

差较小,测得根系最大深度也在 0~200 cm 以内,所以 1 a 枣林的土壤水分处于一个年内可补偿水平。3 a 枣林耗水量增大,虽然在 0~200 cm 土壤深度以内仍然可以得到降水补充恢复,但是更多的时间处于耗水大于降水补充,所以 12 个月的平均土壤含水率较 1 a 枣林降低,由于垂直根系延伸使得更深层的土壤水分被消耗而降低。从图 7 中各个树龄的 0~1 000 cm 范围土壤水分均值与 1 a 枣林 0~1 000 cm 土壤水分平均值线比较,大致看出 3 a 枣林耗水土壤深度大于 400 cm。随着树龄增加,土壤耗水深度加大,5 a 枣林耗水深度超过 500 cm,12 a 枣林土壤水分消耗深度达 600 cm。与上述根系深度对比,土壤耗水深度大于所测得的根系深度。这说明虽然每个根系测点都有 6 次根钻的重复,但仍有很大范围的根系没有被测得,也就是说实际树木根系范围比所能测得的更大。

对图 7 中 200 cm 以上的标准差最小值和最大值分别做回归拟合(表 3)发现,不同龄枣林土壤水分活动层的土壤水分变化上限和下限符合线性函数,其函数的拟合效果良好,决定系数 R^2 的变化范围为 0.81~0.99。不同龄枣树土壤含水率变化的上限随着土层深度的增加而减小,其线性函数的斜

率分别为 -0.024、-0.036、-0.041、-0.043;不同龄枣树土壤含水率变化的下限随着土层深度的增加而增大,其线性函数的斜率分别为 0.007、0.010、0.015、0.025。

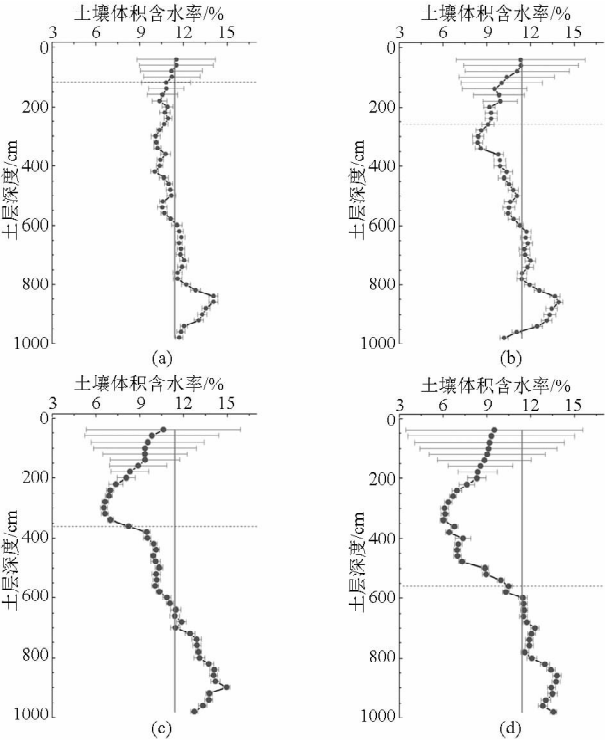


图 7 枣树 40~1 000 cm 土壤水分的分布特征

Fig. 7 Distribution of soil water content in 40~1 000 cm soil profile under 1, 3, 5 and 12-year-old dense-dwarf jujube

(a) 1 a (b) 3 a (c) 5 a (d) 12 a

表 3 不同龄枣拟合函数拟合系数及其决定系数

Tab.3 Determination coefficients from fitting different tree-ages

枣龄/a	a		b		R^2	
	上限	下限	上限	下限	上限	下限
1	0.007	-0.024	15.327	8.546	0.98	0.90
3	0.010	-0.036	17.292	6.504	0.98	0.81
5	0.015	-0.041	17.152	4.601	0.98	0.95
12	0.025	-0.043	17.745	2.189	0.99	0.96

注:拟合的线性函数形式为 $y = ax + b$, a 、 b 为拟合系数, x 为土层深度, y 为土壤体积含水率。

3 讨论

根系研究对林分生产力和生态意义重大,但是以往研究单株树木根系较多,研究矮化修剪密植的林分群体根系较少,矮化修剪密植枣林根系研究更少。矮化修剪密植枣林垂直主根系随着树龄的增加而加深,但是年平均生长速度在减弱,如前 5 a 主根系每年向下延伸达 68 cm,而 5~12 a 的主根系每年平均向下延伸只有 25.7 cm。矮化修剪密植枣林的主根系深度随着树龄的增加最终深度是多少还不清

楚,但是矮化修剪密植枣林在一定滴灌条件下其根系较同龄的稀疏枣林根系浅了很多,这个结果前期已有研究^[29-30]。这里根系最大深度较马理辉等^[29]前期研究更深,这可能是研究的枣林立地环境不同的原因,也可能是测根系时打钻的位置不同所致,比如这次打钻点距离主干更近。矮化修剪密植枣林垂直根系年平均深度和总的深度都小于以往对刺槐树种^[31]和沙打旺^[32]等的根系深度研究,也小于苜蓿根系深度^[33]。该结果说明枣树比刺槐、沙打旺和苜蓿更加适合当地的环境,对当地土壤水分破坏更小,有利于林分的持久生存。

矮化修剪密植枣林水平根系在3 a时就出现两树间根系交汇,所以水平根系的延伸距离超过100 cm便无法确定长度。随着树龄的增加垂直根系最大深度和最小深度差值减小,5 a枣林最深根系与最浅根系差值达260 cm,12 a枣林根层深度差值只有180 cm。矮化修剪密植枣林株间根系随着树龄增加,在交汇处根系向深层发展较快,这个现象过去还未见报道。当林木密度增大后株间根系交汇处根系是否存在由于根系交汇而加大交汇处根系向深层发展还有待后期做对比研究。

虽然本文研究的12 a枣林中出现根系交汇处根深与主根深度之差减小,但可认为由于枣树本身的特性最终主根深度还是最大的,目前测得主根系深度还不能完全反映枣树主根系的真实深度,因为主根本身稀少尤其深层主根系用根钻找到的几率更少。矮化修剪密植枣林的根系交汇重叠现象说明在3 a枣林的树之间任何位置都有根系可以吸收肥料和水分,所以从满足树木营养角度看,在生产经营管理中施肥和滴灌可以不再局限在单株树的主干附近,可以在株间和行间的任何位置。

前期有研究认为灌溉可以使得枣树根系变浅^[24]。本研究认为矮化修剪密植枣林根系较传统稀疏栽植根系变浅的原因可能是多种因素所致,如密植、修剪、施肥、灌溉都有作用。Comas等^[34]用盆栽试验证明重度修剪会减小根系生长长度。需要肯定的是能使树木根系生长深度变浅很重要,如果能有效控制树木根系深度,使得树木根系在降水能有效补充的深度范围内,那么树木在半干旱地区就不会形成土壤深层的干化,就不用担心由于枣林而产生当地土壤深层的干层问题。

对研究区枣林4棵树中间的土壤水分采用中子仪定位观测时间已经有2年,为了较好地对比不同年龄枣林地土壤水分与本文根系调查情况,本文选

择2012年12个月的观测数据进行分析。仅从研究的12个月来看,当地土壤当年水分恢复深度约为200 cm。除了1 a枣林土壤水分200 cm以下没有被消耗外,其他3、5、12 a枣林土壤水分均出现200 cm以下的土壤原有水分消耗,而且随着树龄的增加土壤水分亏缺加重,这种亏缺能否恢复、如何恢复仍需要继续研究。虽然枣树自身生长会造成土壤水分亏缺,但是枣树在土壤水分较低的情况下会通过减弱自身生长来适应,并不会造成枣树的死亡,甚至仍然会保持一定的结果量,这点在目前保存的几百年树龄的枣林就能说明。另外,枣林耗水深度小于刺槐^[35]、苜蓿^[36-37],这也是该树种能在当地自然生长4 000多年的原因之一。

人们研究作物土壤水分常常在0~200 cm的土层范围内,一方面是作物根系主要分布在此范围,另一方面土壤水分变化特别是一年内变化也在0~200 cm之内。但是,随着树龄的增加,整个根系层的土壤水分在缓慢减少,仅研究0~200 cm土层是不够的。甚至对于某一年龄树林,仅从观测一年的土壤水分也看不出其变化,这个微小的减少值在当年土壤水分监测中不易被监测出来。所以,研究多年生树林土壤水分需要做多年连续定位监测或者同时调查不同树林的深层土壤水分,尤其是不同树龄的树林土壤水分需要测定全根层范围土壤水分才能更真实地了解其特征。

4 结论

(1) 随着枣树树龄增加,1、3、5、12 a枣树根系最大深度年平均增值在减小,12 a枣林垂直根系达520 cm。枣林根系深度与树龄之间的关系符合幂函数关系。

(2) 枣树株间100 cm处向下的根系深度较浅,枣林的垂直根系最大和最小值之差先增加后减小,12 a枣林垂直根系之差只有180 cm。研究区枣树株间水平根系在枣林3 a时开始交汇,密植枣林的水平方向根系实际是枣林多棵树根系集中的特征。

(3) 枣林垂直根系对土壤水分的垂直变化作用显著,但矮化修剪密植枣林棵间根系深度差异并没有造成土壤水分因此而波动。

(4) 随着树龄的增加根系深度和土壤水分干层均增加,0~200 cm土层的土壤水分年内变化幅度也增加,200~600 cm土层根系数量和土壤水分均随着树龄增加而降低,该范围土壤水分逐年向深处干化。

参 考 文 献

1 单长卷,梁宗锁. 黄土高原刺槐人工林根系分布与土壤水分的关系[J]. 中南林业科技大学学报,2006,26(1):19-21.
Shan Changjuan, Liang Zongsuo. Relationship between root distribution of locust plantation and soil water in the Loess Plateau[J]. Journal of Central South Forestry University, 2006, 26(1): 19-21. (in Chinese)

2 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 Zhong, Cheng Xiangrong, Xue Wenpeng, 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)

3 Eduardo Vinícius da Silva, Jean-Pierre Bouillet, José Leonardo de Moraes Gonçalves, et al. Functional specialization of *Eucalyptus* fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths[J]. Functional Ecology, 2011, 25(5): 996-1006.

4 Daniel C N, Claudio R de Carvalho, Eric A D, et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures[J]. Nature, 1994,372(6507):666-669.

5 Kizito F, Dragila M, Sène M, et al. Seasonal soil water variation and root patterns between two semi-arid shrubs co-existing with Pearl millet in Senegal, West Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67(3): 436-455.

6 Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Zhang Yan. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 19(6): 707-718.

7 王力,邵明安,侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报,2000,14(4):87-90.
Wang Li, Shao Ming'an, Hou Qingchun. Preliminary research on measured indexes of dried soil layer [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 87-90. (in Chinese)

8 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报,2001,16(5):427-432.
Li Yushan. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2001,16(5): 427-432. (in Chinese)

9 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报,2001,16(5):433-438.
Yang Wenzhi. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2001,16(5): 433-438. (in Chinese)

10 穆兴民,徐学选,王文龙,等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. 土壤学报,2003,40(2):210-217.
Mu Xingmin, Xu Xuexuan, Wang Wenlong, et al. Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 210-217. (in Chinese)

11 Margaret R G, Grigal D F, Harding R B. Soil productivity index: predictions of site quality for white spruce plantations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(6): 1701-1708.

12 Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J B, et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale[J]. Oecologia, 1996, 108(4): 583-595.

13 Stone E L, Paul J K. On the maximum extent of tree roots[J]. Forest Ecology and Management, 1991, 46(1): 59-102.

14 Axel Kleidon, Martin Heimann. Optimised rooting depth and its impacts on the simulated climate of an atmospheric general circulation model[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(3): 345-348.

15 Nepstad D C, de Carvalho C R, Davidson E A, et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures[J]. Nature, 1994, 372: 666-669.

16 Milly P C D, Dunne K A. Sensitivity of the global water cycle to the water-holding capacity of land [J]. Journal of Climate, 1994, 7(4): 506-526.

17 王永东,徐新文,雷加强,等. 塔里木沙漠公路防护林带土壤水分动态研究[J]. 科学通报,2008,53(增刊2):89-95.
Wang Yongdong, Xu Xinwen, Lei Jiaqiang, et al. Soil moisture dynamic research of the sheltbelt in the Tarim desert highway [J]. Chinese Science Bulletin, 2008,53(Supp.2): 89-95. (in Chinese)

18 张宇清,朱清科,齐实,等. 梯田埂坎立地植物根系分布特征及其对土壤水分的影响[J]. 生态学报,2005,25(3): 500-506.
Zhang Yuqing, Zhu Qingke, Qi Shi, et al. Root system distribution characteristics of plants on the terrace banks and their impact on soil moisture[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 500-506. (in Chinese)

19 胡小宁,赵忠,袁志发,等. 黄土高原刺槐林细根生长与土壤水分的耦合关系[J]. 林业科学, 2010,46(12):30-35.
Hu Xiaoning, Zhao Zhong, Yuan Zhifa, et al. Relationship between fine growth of *Robinia pseudoacacia* plantation and the soil moisture in the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(12): 30-35. (in Chinese)

20 刘昌明,王全肖. 土壤-作物-气界面水分过程与节水调控[M]. 北京:科学出版社,1990.

21 Carmen Ruiz-Sánchez M, Plana V, Ortuño M F, et al. Spatial root distribution of apricot trees in different soil tillage practices [J]. Plant and Soil, 2005, 272(1-2): 211-221.

22 吴普特,汪有科,辛小桂,等. 陕北山地红枣集雨微灌技术集成与示范[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(4):1-12.
Wu Pute, Wang Youke, Xin Xiaogui, et al. Integration and demonstration of the date micro-irrigation technology in the hilly of Shanbei[J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 1-12. (in Chinese)

23 Nancy N E, Retzlaff W A. Changes in physiological attributes of ponderosa pine from seedling to mature tree[J]. Tree Physiology, 2001,21(5): 275 – 286.

24 马理辉,吴普特,汪有科. 黄土丘陵半干旱区密植枣林随树龄变化的根系空间分布特征[J]. 植物生态学报,2012,36(4): 292 – 301.
Ma Lihui, Wu Pute, Wang Youke. Spatial pattern of root systems of dense jujube plantation with jujube age in the semiarid loess hilly region of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(4): 292 – 301. (in Chinese)

25 魏国良,汪有科,王得祥,等. 梨枣人工林有效吸收根系密度分布规律研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2010,38(1):133 – 138.
Wei Guoliang, Wang Youke, Wang Dexiang, et al. Study on the distribution characteristics of effective root density in *Ziziphus jujube* cv. Lizao plantation[J]. Journal of Northwest A&F University:Natural Science Edition, 2010, 38(1): 133 – 138. (in Chinese)

26 魏国良,汪有科,杨涛,等. 滴灌条件下梨枣根系分布特征研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(12):6136 – 6137,6319.
Wei Guoliang, Wang Youke, Yang Tao, et al. Research on root distribution characteristics of *Ziziphus jujube* cv. Lizao under drip irrigation condition[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(12): 6136 – 6137,6319. (in Chinese)

27 Achat D L, Bakker M R, Trichet P. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods[J]. Journal of Forest Research, 2008, 13(3): 165 – 175.

28 陈洪松,王克林,邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J]. 林业科学,2005, 41(4):155 – 161.
Chen Hongsong, Wang Kelin, Shao Ming'an. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 155 – 161. (in Chinese)

29 Ma Lihui, Wang Youke. Spatial distribution of roots in a dense jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1 – 2):57 – 68.

30 刘晓丽,马理辉,汪有科. 滴灌密植枣林细根及土壤水分分布特征[J]. 农业工程学报,2013,29(17):63 – 71.
Liu Xiaoli, Ma Lihui, Wang Youke. Distribution characteristic of fine root and soil water of densely jujube plantation with drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(17): 63 – 71. (in Chinese)

31 李鹏,李占斌,赵忠,等. 渭北黄土高原不同立地上刺槐根系分布特征研究[J]. 水土保持通报,2002,22(5):15 – 19.
Li Peng, Li Zhanbin, Zhao Zhong, et al. Researches on root distribution characters of *Robinia pseudoacacia* on different sites in Weibei Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(5): 15 – 19. (in Chinese)

32 程积民,万惠娥,王静,等. 黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复[J]. 生态学报,2004,24(12): 2979 – 2983.
Cheng Jimin, Wan Hui'e, Wang Jing, et al. Over depletion and recovery of soil moisture on *Astragalus adsurgens* grasslands in the loess hilly-gully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2979 – 2983. (in Chinese)

33 孙洪仁,武瑞鑫,李品红,等. 紫花苜蓿根系入土深度[J]. 草地学报,2008,16(3):307 – 312.
Sun Hongren, Wu Ruixin, Li Pinhong, et al. Rooting depth of alfalfa[J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(3): 307 – 312. (in Chinese)

34 Louise H C, Anderson L J, Dunst R M, et al. Canopy and environmental control of root dynamics in a long-term study of Concord grape[J]. New Phytologist, 2005, 167(3): 829 – 840.

35 李军,王学春,邵明安,等. 黄土高原半干旱和半湿润地区刺槐林地生物量与土壤干燥化效应的模拟[J]. 植物生态学报, 2010,34(3):330 – 339.
Li Jun, Wang Xuechun, Shao Ming'an,et al. Simulation of biomass and soil desiccation of *Robinia pseudoacacia* forestlands on semi-arid and semi-humid regions of China's Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010,34(3): 330 – 339. (in Chinese)

36 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报,2007,27(1):75 – 89.
Li Jun, Chen Bing, Li Xiaofang, et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 75 – 89. (in Chinese)

37 Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Liu Gang, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009,52(6): 835 – 842.