

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.017

密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系*

刘晓丽¹ 汪有科^{2,3} 马理辉^{2,3} 梁宇⁴

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采用根钻法(洛阳铲)及干燥法分层获取枣林深层根系的细根干重密度和土壤水分数据,利用有序聚类法对深层土壤水分数据进行垂直分层,划分为3层,即强耗水层(2.0~4.4 m)、弱耗水层(4.4~5.0 m)和微弱耗水层(5.0~7.0 m)。该分层结果能较好地反映出深层根系吸收利用土壤水分的特征,其中强耗水层内,不同土层枣林的细根干重密度波动较大,但土壤水分并未随根系波动而改变,土壤含水率低且较为稳定;弱耗水层内细根干重密度连续减少,土壤含水率呈现增加趋势;微弱耗水层内5.0 m以下土层未发现细根,土壤含水率显著提高。

关键词: 黄土丘陵区 密植枣林 土壤水分 垂直分层 有序聚类分析

中图分类号: S151.9⁺1; S714.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)07-0090-08

Relationship between Deep Soil Water Vertical Variation and Root Distribution in Dense Jujube Plantation

Liu Xiaoli¹ Wang Youke^{2,3} Ma Lihui^{2,3} Liang Yu⁴

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between deep soil water (below 2 m) vertical variation and root distribution in the nine-year-old dense jujube plantation in Loess hilly region. The soil core method and oven drying method were used to determine fine root dry weight density and soil water content. Sequential cluster analysis method was adopted to stratify the whole soil water profile into three layers, i. e. strong depletion layer (2.0~4.4 m), less strong layer (4.4~5.0 m) and weak depletion layer (5.0~7.0 m) based on the combined analysis of soil water content and the root dry weight density. This stratification result could well reflect soil water characteristic absorbed by root. In the strong depletion layer, fine root dry weight density decreased fluctuantly with the increase of soil depth, but soil water content was low and stable. While in the less strong layer, fine root dry weight density decreased continuously, soil water content presented increasing tendency. The maximum fine root depth was 5 m, there was no fine root in the weak depletion layer and soil water content increased obviously. This study determine the soil layer range of deep soil water depletion degree in densely jujube plantation. It shows that root distribution characteristic has an important effect on the deep soil water variation.

Key words: Loess hilly region Dense jujube plantation Soil water Vertical stratification Sequential cluster analysis

收稿日期: 2013-03-14 修回日期: 2013-04-16

* 国家自然科学基金资助项目(31200343)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B04)、西北农林科技大学博士科研启动基金资助项目(2012)和中国科学院“西部之光”资助项目(2013)

作者简介: 刘晓丽, 博士生, 主要从事农业水土资源利用与保护研究, E-mail: liuxiaoli@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 汪有科, 研究员, 主要从事农业水土资源利用与保护研究, E-mail: gjzwyk@sina.com.cn

引言

土壤水分是影响黄土丘陵区林木生长和植被恢复的重要因子^[1-2],而降水是该区域土壤水分唯一的补充来源^[3]。特定植被、地形、土壤质地和土地利用方式下,受降水、林木根系吸收的影响,林地土壤剖面水分会形成一定的层次^[4]。黄土丘陵区人工林建设过程中,常因较高的种植密度和产量,林地深层土壤水分过度消耗,发生利用性土壤干层^[5-6]。枣树是耐旱树种,为了提高该区退耕还林枣树的产量,在以往稀植(450~750株/hm²)、乔化(树高5m以上)枣林基础上,1999年推行密植(1665株/hm²以上)、矮化(树高2m以下)的种植模式,产量由2250kg/hm²提高到了19800kg/hm²^[7]。随着枣林矮化密植种植模式在黄土丘陵区的推广,在取得高产的同时,林地深层土壤水分的过度消耗等问题亟待研究^[8]。因此,研究黄土丘陵区密植枣林深层土壤水分的垂直变化特征,有助于深入理解该种植模式下深层土壤水分的利用状况,为预防人工林深层土壤水分过度消耗提供依据。

目前,研究土壤水分垂直分层应用较为广泛的方法有经验法^[9]和变异系数法^[10-11],这些方法多是在经验和统计学的基础上初步指定变异数值作为分界线,给出的指标间界限不够明确,数学逻辑性不严密。李俊等^[12]、王信增等^[4]利用有序聚类法对黄土高原土壤水分剖面进行垂直分层,Warren等^[13]研究了太平洋西北部旱生黄松林和湿地花旗松林0~2m土壤水分的垂直分层状况,但这些研究仅以土壤含水率进行层次划分,没有考虑林木根系的实际分布状况,分层结果及分层命名不能准确反映林地土壤剖面水分利用状况。黄土高原土层深厚、质地均一,是研究林木根系与土壤水分的理想区域。0~2m深度的土壤水分由于外界条件(蒸发、灌溉、降水和林木蒸腾等)影响较大,变化较为复杂,2m以下土层的土壤水分除受成土的环境有关外,主要受分布于其中的植物根系吸水的影响,能真实反映林地的水分利用状况。因此,本文研究深层土壤(2m以下)的水分变化状况。

林木通过根系吸收土壤中的水分,根系的分布空间直接影响到林木拥有土壤水分空间的大小^[14-15]。根系尤其是细根在土壤中的分布状况,在很大程度上决定着林木对不同土层水分的吸收量^[16]。本研究将直径小于2mm的根系定义为细根,结合黄土丘陵区密植枣林细根分布特征,对深层土壤水分剖面进行垂直分层,探讨深层土壤水分与根系分布的关系。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黄土丘陵沟壑区——陕西省米脂县(东经119°49′、北纬37°5′)密植枣林中,平均海拔高度1049m。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,多年平均降水量为412.6mm,7~9月降水量占全年50%以上。研究区土壤属于砂壤土,土壤容重平均为1.30g/cm³,田间持水量平均为23.4%(质量含水率)、饱和含水率平均为39.8%、凋萎含水率为5.5%。土壤较为贫瘠,0~1m土层有效氮、磷、钾含量(质量比)分别为34.71、2.90、101.8mg/kg,有机质含量为2.1g/kg,pH值8.6。土层深厚,地下水埋深50m以下,对本试验根系吸水的影响可忽略。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计与方法

选择西南向阳坡、林分密度(株行距为2.4m×2.4m)相同的9年生枣林。选取长势相当的4株枣树(接近样地平均树高和平均直径的树木)作为一块样地,在林地100m²范围内,选取3块样地作为重复。针对密植林植株根系分布互相影响的特点,在每块样地内分别选取5个位置进行取样(图1)。取样点代表了与树干不同距离的水平位置。通过这5个位置取样数据的平均值,可减小水平位置因素对根系分布差异的影响。

2011年9月下旬(果实收获期)采用根钻法进行试验。为了便捷地获取2m以下土层中的土样,采用洛阳铲进行取样。洛阳铲能够利用重力作用插入土壤中,不需要转动,较传统旋转下压式根钻省力、省时;已有文献报道的旋转下压式根钻的直径一般不大于0.1m^[17],而本试验采用洛阳铲获得的土芯直径为0.16m,获取土芯的体积大于传统的旋转式根钻。另外,因洛阳铲具有特殊的结构,提升钻杆时土样不会脱落,较挖掘法获取深层土样减少了开挖的土方量。为了保证深层取样不发生偏移,在地

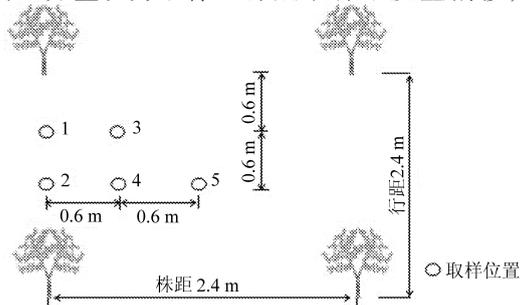


图1 枣林地取样位置示意图

Fig. 1 Sampling position diagram in jujube plantation

面安置铁架,确保钻杆每次取样均是垂直向下、不发生水平偏移。

样地选定后,先去除地表杂草和枯枝落叶,然后以 0.2 m 深度分层取土样。土样在现场通过孔径为 1 mm 的筛网进行冲洗,直到连续两个土层没有根系出现时,结束取样。试验发现,最大细根深度出现在 5 m 深度的土层中,因此,本研究土壤水分的垂直分布区间确定在 2~7 m 深度范围内,根系的垂直分布区间确定在 2~5 m 深度范围内。没有根系的土层中,根质量计为 0 g。根系样品共计 240 个(每个取样位置 3 次重复、5 个水平位置、16 个土层深度)。每个取样点、每层的根系样品分别标记后当天带回实验室,再用孔径为 1 mm 的筛网冲洗,去除杂质和死根,然后分拣、装袋、干燥。从取样到开始干燥整个过程历时不超过 6 h。干燥时,先在 105℃ 下杀青 5 min,然后 75℃ 干燥 36 h。用精度为 0.000 1 g 的电子天平称量,获得根干质量。同时,每个土层取样

时,将 50 g 左右的没有根系的土样放入铝盒,每个土层重复 2 次,土样共计 780 个(每个取样位置 3 次重复、5 个水平位置、26 个土层深度、2 个土层重复),利用干燥法获得土壤含水率。

1.2.2 数据分析

定义根干重密度来表示单位土芯体积内的根干质量,计算公式为

$$R_{\text{dwd}} = W_{\text{R}} / V_{\text{S}} \quad (1)$$

其中 $V_{\text{S}} = H\pi D^2 / 4$

式中 R_{dwd} ——根干重密度, g/m^3

W_{R} ——根干质量, g V_{S} ——土芯体积, m^3

H ——取样深度, 0.2 m

D ——土芯直径, 0.16 m

使用 DPS 数据处理软件(v 7.55)进行有序聚类分析及方差分析。在有序聚类分析中,将枣林各个取样点 2~7 m 土层所取土样(共 26 层)的土壤含水率值,构成向量有序样品

$$X = \begin{bmatrix} X_{111} & X_{121} & X_{131} & X_{141} & X_{151} & X_{112} & X_{122} & X_{132} & X_{142} & X_{152} & X_{113} & X_{123} & X_{133} & X_{143} & X_{153} \\ X_{211} & X_{221} & X_{231} & X_{241} & X_{251} & X_{212} & X_{222} & X_{232} & X_{242} & X_{252} & X_{213} & X_{223} & X_{233} & X_{243} & X_{253} \\ X_{311} & X_{321} & X_{331} & X_{341} & X_{351} & X_{312} & X_{322} & X_{332} & X_{342} & X_{352} & X_{313} & X_{323} & X_{333} & X_{343} & X_{353} \\ \vdots & \vdots \\ X_{2611} & X_{2621} & X_{2631} & X_{2641} & X_{2651} & X_{2612} & X_{2622} & X_{2632} & X_{2642} & X_{2652} & X_{2613} & X_{2623} & X_{2633} & X_{2643} & X_{2653} \end{bmatrix}$$

其中各元素第 1 个下标(即数字 1, 2, ..., 26)表示 2.0, 2.0~2.2, 2.2~2.4, ..., 6.8~7.0 m 土层的编号;各元素第 2 个下标(即数字 1, 2, 3, 4, 5)表示 5 个取样点位置;各元素第 3 个下标(即数字 1, 2, 3)表示取样的重复次数。将所有向量有序样品定义成数据块,然后用有序样本最优分割法进行处理。在方差分析中,将各个土层的根干重密度平均值、标准差及样本数定义为数据块,采用 Duncan 新复极差多重比较法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 枣林根干重密度与土壤含水率随土层深度的垂直变化

图 2 为根干重密度及土壤含水率随土层深度变化的关系图。随着土层深度的增加,根干重密度逐渐减少,而土壤含水率则总体呈增加趋势。整个剖面的土壤含水率在 5.52%~12.03% 之间变化,在 2.0~4.4 m 土层中土壤含水率变化不大,在 3.2 m 的土层中,土壤含水率出现最低值,为 5.52%,接近凋萎含水率。2.0~4.4 m 土层内细根分布较多,占整个深层土层的 96.4%,因此导致根系在该层吸水强烈,故土壤含水率较低且趋于稳定,该层土壤已出现严重干燥化现象。4.4 m 以下土层中细根分布很

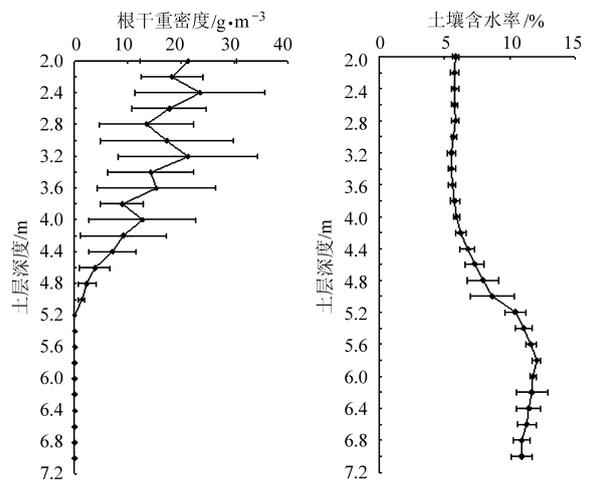


图 2 根干重密度与土壤含水率剖面分布特征

Fig. 2 Profile characteristics of root dry weight density and soil water content

少,仅占整个深层土层的 3.6%,吸收的土壤水分也较少,故土壤含水率在下层又开始增加。细根最大深度为 5 m,5 m 以下没有细根分布,所以土壤含水率明显增加。曹扬等^[15]研究表明阴坡立地刺槐在 3.3 m 处形成了含水率低的土层。张义等^[18]和王永东等^[19]研究表明,土壤含水率最低值出现的位置就应该是植物根系吸收水分用于植物生长与蒸腾的土壤水分最多的土层。因此,本研究认为枣树根系对土

壤水分的吸收作用达到最大的土层出现在3.2 m。

2.2 枣林土壤水分的垂直分层

2.2.1 变异系数法分层结果

变异系数是衡量资料中各观测值变异程度的一个统计量,计算公式为

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 C_v ——变异系数

s ——标准差 \bar{x} ——平均值

陈洪松等^[20]采用变异系数法,将荒草地和裸地剖面0~3 m内土壤水分垂直变化的层次从上到下依次划分为4层:速变层(变异系数30%以上)、活跃层(变异系数20%~30%)、次活跃层(变异系数为10%~20%)和相对稳定层(变异系数0~10%)。研究表明,上层土壤水分受降水蒸发的影响,变异系数较大;随土层深度的增加,变异系数呈降低趋势,最下层土壤是相对稳定层。根据上述变异系数划分区间,采用变异系数法将枣林深层土壤剖面分为相对稳定层、次活跃层、相对稳定层3个层次(表1)。结果表明,2.0~4.4 m土层的变异系数较小,是相对稳定层,而4.6~5.0 m土层的变异系

表1 枣林深层土壤水分剖面垂直分层

Tab.1 Vertical stratified results of deep soil water profile in jujube plantation

土层深度/m	样本数	土壤含水率均值/%	标准差/%	变异系数/%	层次
2.0	15	5.84	0.26	4.5	相对稳定层
2.2	15	5.72	0.32	5.6	相对稳定层
2.4	15	5.77	0.262	4.5	相对稳定层
2.6	15	5.75	0.242	4.2	相对稳定层
2.8	15	5.80	0.30	5.1	相对稳定层
3.0	15	5.69	0.21	3.6	相对稳定层
3.2	15	5.52	0.291	5.3	相对稳定层
3.4	15	5.55	0.251	4.6	相对稳定层
3.6	15	5.58	0.29	5.1	相对稳定层
3.8	15	5.78	0.38	6.5	相对稳定层
4.0	15	5.91	0.25	4.2	相对稳定层
4.2	15	6.24	0.40	6.4	相对稳定层
4.4	15	6.73	0.58	8.4	相对稳定层
4.6	15	7.28	0.73	10.0	次活跃层
4.8	15	7.93	1.17	14.7	次活跃层
5.0	15	8.64	1.69	19.5	次活跃层
5.2	15	10.42	0.77	7.4	相对稳定层
5.4	15	11.03	0.61	5.5	相对稳定层
5.6	15	11.62	0.41	3.5	相对稳定层
5.8	15	12.03	0.35	2.9	相对稳定层
6.0	15	11.74	0.22	1.9	相对稳定层
6.2	15	11.68	1.16	9.9	相对稳定层
6.4	15	11.43	0.95	8.3	相对稳定层
6.6	15	11.30	0.72	6.4	相对稳定层
6.8	15	10.88	0.62	5.7	相对稳定层
7.0	15	10.91	0.77	7.0	相对稳定层

数急剧增加,是次活跃层,5.0~7.0 m土层的变异系数也很小,又属于相对稳定层。

2.2.2 有序聚类法分层结果

有序聚类法是对样本进行分类的一种多元统计方法,其分类时样本是有顺序的,分类结果不会打乱样本顺序。本文使用有序聚类法中的最优分割法,使得各段样品内部的差异最小,而各段样品之间的差异达到最大。为了清晰地反映土壤含水率在26个土层的变化情况,以土层深度为垂直轴线,用DPS软件中的有序聚类分析将所有可能的土壤水分聚类解全部输出,结果如表2所示。

确定枣林土壤水分的最优分类数是聚类分析的关键。从表2中可以看出,随着分类数的增加,误差函数依次减小,误差函数是分类个数的严格单调下降函数^[21]。以误差函数为y轴、分类数为x轴作碎石图(图3)。误差函数与分类数的拟合关系呈指数分布规律,决定系数为0.958。随着类的不断聚集,分类数越大,误差函数小。当分类数在3以上时,各分类间误差函数差异较小,当分类数在3以下时,分类间的距离迅速增大,确定枣林26个土层土壤水分的最优分类数为3类。

利用有序聚类法对深层土壤水分剖面进行垂直分层,分层方法数学理论基础严密,将整个土壤剖面划分为3层,而采用变异系数法也划分为3层,有序聚类法与变异系数法对深层土壤水分的分层结果大致吻合,进一步验证了有序聚类法分层的合理性。

2.3 枣林土壤剖面根干重密度与土壤含水率的相关性分析

本研究利用有序聚类法,在不打乱土层样本深度次序的前提下,将剖面深层土壤水分分成3层。分别计算出对应土层的根干重密度及土壤含水率均值,并对根干重密度和土壤含水率进行相关性分析,结果列于表3,根干重密度与土壤含水率的相互关系见图4。

从表3看出,土壤剖面分成3层后,根干重密度随土层深度的增加显著减小,土壤含水率随土层深度的增加显著增加。根系在土壤中的分布状况,在很大程度上决定着林木对不同土层水分的吸收量。由图4可以看出,土壤含水率与根干重密度呈一元二次方程函数关系,决定系数为0.9341,随着根干重密度的增加,土壤含水率先急剧减少而后趋于稳定。2.0~4.4 m土层的根干重密度值较大,土壤含水率均值较低(5.84%),且土壤含水率在该层出现最低值,接近凋萎含水率,表明枣林根系吸水较为强烈,土壤水分在该层已被过度消耗,该层对植物供水

表2 枣林土壤水分的有序聚类结果

Tab.2 Sequential cluster results of soil water in jujube plantation

分类数	误差函数	最优分割结果
2	335.473 8	1 ~ 16, 17 ~ 26
3	125.580 7	1 ~ 13, 14 ~ 16, 17 ~ 26
4	94.863 5	1 ~ 12, 13 ~ 14, 15 ~ 16, 17 ~ 26
5	75.216 4	1 ~ 12, 13 ~ 14, 15 ~ 16, 17, 18 ~ 26
6	54.072 7	1 ~ 12, 13 ~ 14, 15 ~ 16, 17 ~ 18, 19 ~ 21, 22 ~ 26
7	44.060 8	1 ~ 12, 13 ~ 14, 15 ~ 16, 17 ~ 18, 19 ~ 21, 22, 23 ~ 26
8	37.005 2	1 ~ 12, 13 ~ 14, 15, 16, 17 ~ 18, 19 ~ 21, 22, 23 ~ 26
9	30.792 7	1 ~ 12, 13 ~ 14, 15, 16, 17, 18, 19 ~ 21, 22, 23 ~ 26
10	24.906 3	1 ~ 12, 13 ~ 14, 15, 16, 17, 18, 19 ~ 21, 22, 23, 24 ~ 26
11	19.296 9	1 ~ 11, 12 ~ 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 ~ 21, 22, 23, 24 ~ 26
12	16.750 7	1 ~ 11, 12 ~ 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 ~ 21, 22, 23, 24, 25 ~ 26
13	14.265 0	1 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 ~ 21, 22, 23, 24, 25 ~ 26
14	11.743 1	1 ~ 6, 7 ~ 9, 10 ~ 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 ~ 21, 22, 23, 24, 25 ~ 26
15	9.523 9	1 ~ 6, 7 ~ 9, 10 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 ~ 21, 22, 23, 24, 25 ~ 26
16	7.585 0	1 ~ 6, 7 ~ 9, 10 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 ~ 21, 22, 23, 24, 25 ~ 26
17	5.563 2	1 ~ 6, 7 ~ 9, 10 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 ~ 26
18	3.828 1	1 ~ 6, 7 ~ 9, 10 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
19	2.857 2	1 ~ 4, 5 ~ 6, 7 ~ 9, 10 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
20	2.097 2	1 ~ 4, 5 ~ 6, 7, 8 ~ 9, 10 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
21	1.604 0	1, 2 ~ 3, 4 ~ 6, 7, 8 ~ 9, 10 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
22	1.117 5	1, 2, 3 ~ 4, 5 ~ 6, 7, 8 ~ 9, 10 ~ 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
23	0.688 9	1, 2, 3 ~ 4, 5 ~ 6, 7, 8 ~ 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
24	0.293 3	1, 2, 3 ~ 4, 5, 6, 7, 8 ~ 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
25	0.110 5	1, 2, 3 ~ 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26

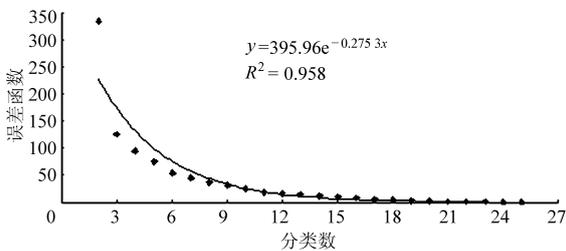


图3 枣林土壤水分聚类分析碎石图

Fig.3 Screen plot of soil water cluster analysis of jujube plantation

较强,虽然两者呈负相关,但相关系数不高,因此说明根系对土壤水分变化的影响不大,土壤含水率变异性较小。4.4 ~ 5.0 m 土层根干重密度较小,根系吸水较少,因而土壤含水率均值较高(7.95%),两者变化趋势趋于相反,呈显著负相关关系。5.0 m 以下土层没有细根分布,土壤含水率均值最高(11.3%)。虽然土层中没有根系,但土壤水分在土水势的作用下,由土水势高的土层向土水势低的土层运移可被植物利用,但可利用的水量很少^[22-23]。

表3 各土层中根干重密度和土壤含水率相互关系

Tab.3 Relationship between root dry weight density and soil water in different soil layers

分层序号	土层深度/m	根干重密度均值/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	根干重密度占整个土层的百分比/%	土壤含水率均值/%	相关系数
1	2.0 ~ 4.4	15.46 ± 5.12 ^A	96.4	5.84 ± 0.33 ^a	-0.63
2	4.4 ~ 5.0	2.46 ± 1.27 ^B	3.6	7.95 ± 0.68 ^b	-0.99 [*]
3	5.0 ~ 7.0	0	0	11.30 ± 0.49 ^c	

注:大写字母表示各分类土层中根干重密度均值间的差异显著,小写字母表示各分类土层中土壤含水率均值间的差异显著,*表示极显著差异, $P < 0.05$ 。

综上所述,可以认为根系吸水是影响土壤水分的主要因素,根据各土层根干重密度所占的比重,从根系吸收利用土壤水的角度,本研究将枣林根系分布区内的土壤剖面分别命名为:强耗水层(2.0 ~ 4.4 m)、弱耗水层(4.4 ~ 5.0 m)及微弱耗水层(5.0 ~

7.0 m)。在用有序聚类法对土壤水分剖面进行垂直分层之后,通过根干重密度与土壤水分的相关性能进一步说明取样区域9年生密植枣林地深层土壤水分垂直变化的原因。

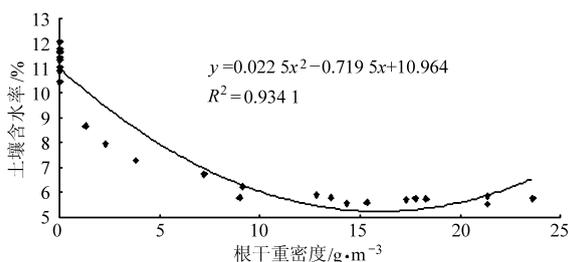


图4 枣林土壤含水率与细根干重密度相互关系

Fig. 4 Relationship between soil water content and fine root dry weight density of jujube plantation

3 讨论

杨新民等^[24]的研究表明,安塞县多年平均年降水量为537.7 mm,平水年仅1 m土层以上的土壤可得到水分的补偿,丰水年可达到2 m。本研究取样区域米脂县位于安塞县北部,年平均降水量略小于安塞县。2 m以下的土壤水分基本不受降水入渗的影响,完全受根系吸水的影响。在大多数土壤剖面中,根系生物量通常随着土层深度呈指数衰减规律^[25-26]。根系的垂直分布决定了根系吸水模式,进一步影响了土壤剖面水分动态^[27]。Jackson等^[28]研究表明尽管在深层土层中根系很少,但对林木的水分吸收发挥着非常重要的作用。因为当上层的土壤水分有很高的蒸发并处于胁迫时,它可以从深层土层中吸取水分,提高了植物的生存能力。Lee等^[29]和Olivera等^[30]研究得出,深层根系通过土壤水分的再分布过程能增大整个植物的水分传输效率,即当叶气孔闭合时,根系通过水力提升作用把深层土壤水分运移到浅层,改变了剖面土壤水分状况。Nepstad等^[31]研究表明旱季在东部亚马逊森林深层土壤中占少于2%的总根生物量可维持森林的蒸发量。枣树是耐旱树种,在干旱环境下当上层土壤水分不能满足密植枣林的蒸发蒸腾需求时,即该层土壤水分已接近凋萎湿度时,根系会进一步向下延伸到下层吸收水分,用来维持林木的正常生长,随着树龄的增长可导致深层土壤水分的干燥化有不断加深的趋势。本研究发现枣林细根最大分布深度为5 m,由于取样方法及取样数量的限制,5 m以下土层

或许仍存在极少量的细根,因此在干旱环境下这部分细根也会吸收少量的水分用来维持林木生长。

程立平和刘文兆^[32]调查了黄土塬区0~20 m土壤剖面水分分布特征,表明黄土深层土壤水分分布特征与黄土—古土壤序列有关。王志强等^[33]以农田、荒草地土壤水分为背景,用比较法研究了黄土高原0~20 m土层植被的土壤水分消耗深度,指出植被水分消耗深度达十几米甚至二十几米。上述土壤剖面水分特征的研究均未结合林木根系分布特征。Nippert等^[34]指出植被对土壤水分分布模式和程度的影响是基于根系分布所在的土层深度,可通过调查植被的根系分布特征来阐释。Wang等^[35]研究了黄土高原21 m深剖面土壤水分的垂直分布特征及影响因素,得出根区0~5 m深度的土壤水分主要受植被特性的影响,不同植被的根系分布、根系吸水量及蒸发特性不同,不同的根系密度分布在不同土层显著影响了土壤水分的动态循环过程。深层土壤水分亏缺主要是由植被强烈耗水引起的。基于此,本研究结合密植枣林的根系分布特征同时调查了根区深层土壤水分垂直变化状况,更好地阐述了二者之间的相互作用关系。

4 结束语

本研究表明根干重密度随土层深度的增加而减少,深层土壤含水率随土层深度的增加而增加,表现出明显的层次特征。从根系吸收利用土壤水分的角度,密植枣林深层土壤剖面分别命名为:强耗水层(2.0~4.4 m)、弱耗水层(4.4~5.0 m)及微弱耗水层(5.0~7.0 m)。本文阐明了密植枣林地土壤水分利用程度的土层范围,指出枣树根系对土壤水分的吸收作用达到最大的土层出现在3.2 m,根系对深层土壤水分变化有巨大影响。研究认为结合根系分布特征进行土壤水分垂直分层的结果更符合林地实际水分消耗状况,分层结果有助于更好地理解枣林生态系统中根系对深层土壤水分的利用状况,为干旱半干旱区林木水分管理提供理论基础,对促进区域水文生态环境良性循环,维持人工经济林的可持续发展提供有价值的参考。

参 考 文 献

- 1 杨文治,田均良.黄土高原土壤干燥化问题探源[J].土壤学报,2004,41(1):1~6.
Yang Wenzhi, Tian Junliang. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 1~6. (in Chinese)
- 2 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等.黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J].北京林业大学学报,1998,20(3):7~14.
Sun Changzhong, Huang Baolong, Chen Haibin, et al. Interaction between soil water conditions and different kinds of artificial plant cover in the Loess Plateau [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(3): 7~14. (in Chinese)

- 3 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:272~274.
- 4 王信增,焦峰.基于有序聚类法的土壤水分剖面划分[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(2):191~196.
Wang Xinzeng, Jiao Feng. Partition of soil moisture profiles based on sequential clustering method [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011, 39(2): 191~196. (in Chinese)
- 5 王晗生.旱区经营人工植被对土壤干化过程的调控[J].自然资源学报,2011,26(4):562~577.
Wang Hansheng. Controls over soil desiccation for management of artificial vegetation in dry land areas of northern China [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(4): 562~577. (in Chinese)
- 6 Chen Hongsong, Shao Mingan, Li Yuyuan. Soil desiccation in the Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2008, 143(1~2): 91~100.
- 7 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):1~6.
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): 1~6. (in Chinese)
- 8 辛小桂,吴普特,汪有科,等.山地不同树龄枣园土壤水分状况研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):85~89.
Xin Xiaogui, Wu Pute, Wang Youke, et al. Study on soil water condition of mountain jujube yards of different growth years [J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 85~89. (in Chinese)
- 9 阮成江,李代琼.半干旱黄土丘陵区沙棘林地土壤水分及其对沙棘生长影响研究[J].水土保持通报,1999,19(5):27~30.
Ruan Chengjiang, Li Daiqiong. Soil moisture and its influence on seabuckthorn growth in semi-arid loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(5): 27~30. (in Chinese)
- 10 王子婷,于洪波,莫保儒,等.定西龙滩流域不同人工植被类型土壤水分动态研究[J].甘肃林业科技,2009,34(1):14~19.
Wang Ziting, Yu Hongbo, Mo Baoru, et al. Study on soil moisture dynamics of different artificial vegetation at Longtan Watershed in Dingxi [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2009, 34(1): 14~19. (in Chinese)
- 11 余新晓,张建军,朱金兆.黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J].林业科学,1996,32(4):289~297.
Yu Xinxiao, Zhang Jianjun, Zhu Jinzhao. Analysis and evaluation of soil water conditions of protective forest ecosystem in loess area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1996, 32(4): 289~297. (in Chinese)
- 12 李俊,毕华兴,李笑吟,等.有序聚类法在土壤水分垂直分层中的应用[J].北京林业大学学报,2007,29(1):98~101.
Li Jun, Bi Huaxing, Li Xiaoyin, et al. Application of sequential clustering method in vertical dividing of soil moisture profiles [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(1): 98~101. (in Chinese)
- 13 Warren J M, Meinzer F C, Brooks J R, et al. Vertical stratification of soil water storage and release dynamics in Pacific Northwest coniferous forests [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(1~2): 39~58.
- 14 杨喜田,杨小兵,曾玲玲,等.林木根系的生态功能及其影响根系分布的因素[J].河南农业大学学报,2009,43(6):681~690.
Yang Xitian, Yang Xiaobing, Zeng Lingling, et al. Ecological functions of tree root system and influencing factors on its distribution [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2009, 43(6): 681~690. (in Chinese)
- 15 曹扬,赵忠,渠美,等.刺槐根系对深层土壤水分的影响[J].应用生态学报,2006,17(5):765~768.
Cao Yang, Zhao Zhong, Qu Mei, et al. Effects of *Robinia pseudoacacia* roots on deep soil moisture status [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 765~768. (in Chinese)
- 16 Proffitt A P B, Berliner P R, Oosterhuis D M. A comparative study of root distribution and water extraction efficiency by wheat grown under high- and low-frequency irrigation [J]. Agronomy Journal, 1985, 77(5): 655~662.
- 17 孙力安,刘国彬,梁一民.不同直径土钻测定草地地下生物量方法探讨[J].中国草地,1994(2):32~35.
Sun Li'an, Liu Guobin, Liang Yimin. Studies on determining methods of underground biomass with different diameter coring [J]. Grassland of China, 1994(2): 32~35. (in Chinese)
- 18 张义,谢永生,郝明德.黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析[J].土壤,2011,43(2):293~298.
Zhang Yi, Xie Yongsheng, Hao Mingde. Study on characteristics of apple orchard soil moisture in gully region of Loess Plateau [J]. Soils, 2011, 43(2): 293~298. (in Chinese)
- 19 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 shelterbelt in the Tarim desert highway [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(Supp. 2): 89~95. (in Chinese)
- 20 陈洪松,邵明安,王克林.黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J].应用生态学报,2005,16(10):1853~1857.
Chen Hongsong, Shao Ming'an, Wang Kelin. Water cycling characteristics of grass land and bare land soils on Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1853~1857. (in Chinese)
- 21 张尧庭,方开泰.多元统计分析[M].北京:科学出版社,2003:352~358.
- 22 王浩,杨贵羽,贾仰文,等.土壤水资源的内涵及评价指标体系[J].水利学报,2006,37(4):389~394.
Wang Hao, Yang Guiyu, Jia Yangwen, et al. Connotation and assessment index system of soil water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 389~394. (in Chinese)
- 23 孟秦倩,王健,吴发启,等.黄土山地苹果园土壤水分最大利用深度分析[J].农业工程学报,2012,28(15):65~71.
Meng Qinqian, Wang Jian, Wu Faqi, et al. Soil moisture utilization depth of apple orchard in Loess Plateau [J]. Transactions of

- the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15):65~71. (in Chinese)
- 24 杨新民, 杨文治, 马玉玺. 纸坊沟流域人工刺槐林生长状况与土壤水分条件研究[J]. 水土保持研究, 1994, 3(1):31~35.
Yang Xinmin, Yang Wenzhi, Ma Yuxi. Study on the condition growing of the man-made locust woodland and moisture eco-environment in the small watershed of Zhifanggou [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1994, 3(1):31~35. (in Chinese)
- 25 Psssioura J B. Soil conditions and plant growth [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2):311~318.
- 26 Araki H, Iijima M. Stable isotope analysis of water extraction from subsoil in upland rice (*Oryza sativa* L.) as affected by drought and soil compaction [J]. Plant and Soil, 2005, 270(1~2):147~157.
- 27 Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996, 108(3):389~411.
- 28 Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(14):7362~7366.
- 29 Lee J E, Oliveira R S, Dawson T E, et al. Root functioning modifies seasonal climate [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(49):17576~17581.
- 30 Oliveira R S, Bezerra L, Davidson E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in Cerrado savannas of central Brazil [J]. Functional Ecology, 2005, 19(4):574~581.
- 31 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(6507):666~669.
- 32 程立平, 刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):203~207.
Cheng Liping, Liu Wenzhao. Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on loess tableland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9):203~207. (in Chinese)
- 33 王志强, 刘宝元, 刘刚, 等. 黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 52(6):835~842.
Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Liu Gang, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau [J]. Science China: Earth Sciences, 2009, 52(6):835~842. (in Chinese)
- 34 Nippert J B, Wieme R A, Ocheltree T W, et al. Root characteristics of C_4 grasses limit reliance on deep soil water in tall grass prairie [J]. Plant and Soil, 2012, 355(1~2):385~394.
- 35 Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau [J]. Geoderma, 2013, 193~194:300~310.

~~~~~

(上接第 106 页)

- 16 张洪生, 张克强, 韩烈保, 等. 再生水灌溉对绿地土壤环境的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(增刊 1):78~84.  
Zhang Hongsheng, Zhang Keqiang, Han Liebao, et al. Effects of reclaimed water irrigation on soil environment of greenbelt [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(Supp. 1):78~84. (in Chinese)
- 17 焦志华, 黄占斌, 李勇, 等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):319~323.  
Jiao Zhihua, Huang Zhanbin, Li Yong, et al. The effect of reclaimed water irrigation on soil performance and the microorganism [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2):319~323. (in Chinese)
- 18 吴文勇, 刘洪禄, 陈鸿汉, 等. 再生水灌区调蓄工程对地下水盐分的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):22~25.  
Wu Wenyong, Liu Honglu, Chen Honghan, et al. Effect of regulation and storage engineering on groundwater salinity in reclaimed water irrigation district [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):22~25. (in Chinese)
- 19 李贵兵, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水条件下灌水器内生物膜生长对流量的影响 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(3):33~38.  
Li Guibing, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Effects of growth of biofilm to emitters flow in emitter of reclaimed wastewater irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):33~38. (in Chinese)
- 20 肖娟, 江培福, 郭秀峰, 等. 负水头条件下水质对湿润体运移及水盐分布的影响 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):101~107.  
Xiao Juan, Jiang Peifu, Guo Xiufeng, et al. Effect of water quality on wetting front moving and salt-water distribution under negative hydraulic head [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):101~107. (in Chinese)