

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.021

# 黄土半干旱区枣林深层土壤水分消耗特征<sup>\*</sup>

刘晓丽<sup>1</sup> 马理辉<sup>2,3</sup> 杨荣慧<sup>4</sup> 吴普特<sup>2,3</sup> 汪有科<sup>2,3</sup>

(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:** 黄土区人工经济林普遍出现利用性土壤干层, 制约着植被的恢复与重建。为了准确计算黄土半干旱区密植高产枣林 (*Ziziphus jujube* Mill.) 深层土壤 (2 m 以下) 水分消耗量, 采用根钻法 (洛阳铲) 分层获得从地表到细根分布最大深度范围内的土壤含水率。结果表明: 枣林深层土壤水分消耗是一个逐渐加深、逐渐向下的过程。2、4、9 和 12 a 生枣林深层土壤水分消耗量分别为 0、29.6、149.9 和 155.7 mm, 可再供水量分别为 203.7、167.7、35.5 和 29.7 mm; 枣林生长第 9 年后, 2~4 m 土层几乎没有可利用的水分, 现有降水和滴灌已经不能满足枣林的耗水需求, 枣林吸收土壤水分有向深处延伸的趋势。以降水入渗最大深度为上界、细根分布最大深度为下界计算的深层土壤水分消耗量, 能更准确地评估林地利用性土壤干层的程度和深度。

**关键词:** 土壤水分 密植枣林 细根分布 降水入渗 黄土区

**中图分类号:** S151.9<sup>+</sup>1; S714.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0139-07

## 引言

国家退耕还林(草)工程实施十多年来, 黄土高原地区植被恢复迅速, 生态效益显著, 但人工林普遍出现了土壤干层<sup>[1]</sup>, 甚至是永久性土壤干层, 对生态水文环境造成了极大的破坏。黄土区地下水埋藏深, 降水是土壤水分补给的主要来源<sup>[2]</sup>。植物根系吸水是降水入渗最大深度以下土壤水分消耗的主要途径<sup>[3]</sup>。林木根系的分布空间决定了林木拥有土壤水分与养分的空间大小<sup>[4]</sup>, 因此, 细根分布最大深度是植物消耗土壤水分深度的重要参考指标。

有关深层土壤储水量、植被耗水方面的研究多采用比较法<sup>[5]</sup>, 即先设定不同的取样深度, 如 2、4、6、7、15、21 m<sup>[6-11]</sup>, 然后根据地表到取样深度范围内各层土壤含水率与农地相同土层的土壤含水率比较, 分析得出土壤储水量、土壤水分消耗量和植被耗水深度。由于深层根系取样困难, 目前以细根分布最大深度为取样深度进行根系分布的研究较少<sup>[12]</sup>。如果不考虑降水入渗最大深度和植物细根分布最大深度, 在计算土壤水分消耗量时, 不可避免地出现两方面问题: 一方面, 从地表到降水入渗最大深度范围内的土壤受到降水入渗补给的影响, 土壤含水率随

取样时期呈动态变化; 另一方面, 无法判断取样深度是否到达植物消耗土壤水分的最大深度。当取样深度比细根分布最大深度浅时, 会低估土壤水分消耗量; 反之, 取样深度比细根分布最大深度深时, 会高估土壤水分消耗量。因此, 在计算林地土壤水分消耗量时, 取样深度应该以细根分布最大深度为界。虽然有部分土壤水分借助毛细管力的作用能上升到根系分布层, 但是量很少, 可以忽略不计<sup>[13]</sup>。

利用性土壤干层的形成是由于黄土高原气候干燥, 植物根系吸收了降水入渗无法补给到的土层的土壤水分而造成的<sup>[14]</sup>。但是, 刘东生<sup>[15]</sup>认为黄土高原土壤水分低的主要原因是由于黄土成土时的气候干燥造成。曹扬等<sup>[16]</sup>也认为土壤干层的形成并不完全由植物根系吸收造成的。目前, 有关土壤干层、深层土壤水分消耗方面的研究很少将植物细根分布最大深度作为取样深度的标准。因此, 无法对土壤水分消耗的程度和范围作出准确地估算。

枣树因其抗旱性强, 在黄土高原地区大面积种植。为了提高产量, 近年来出现了矮化密植滴灌枣林的种植模式, 密植枣林深层土壤水分的消耗状况及干化程度亟待准确地评估。本研究以枣林细根分布最大深度为土壤水分消耗量的计算深度, 研究深

收稿日期: 2014-09-04 修回日期: 2014-10-15

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(31200343)、中国科学院“西部之光”资助项目(2013)、“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)和西北农林科技大学基本科研业务费资助项目(2014)

作者简介: 刘晓丽, 实验师, 博士, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: liuxiaoli@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 马理辉, 副研究员, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: gjzmlh@126.com

层土壤水分消耗随林龄增长的变化规律,为更准确地估算林地土壤干化的程度和深度提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土丘陵沟壑区陕西省米脂县孟岔村红枣林(东经  $119^{\circ}49'$ ,北纬  $37^{\circ}5'$ ,坡度为  $23^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ),属中温带半干旱性气候区,年平均降水量不足  $500 \text{ mm}$ ,7—9月降水量占全年降水量的  $50\%$  以上。取样地土壤属砂壤土,其中粘粒、粉粒、砂粒含量分别为  $5.5\%$ 、 $27.4\%$  和  $67.1\%$ 。 $0 \sim 1 \text{ m}$  土壤容重平均为  $1.30 \text{ g/cm}^3$ 、 $1 \sim 5 \text{ m}$  平均为  $1.31 \text{ g/cm}^3$ <sup>[17]</sup>,田间持水率平均为  $23.4\%$ 、饱和含水率平均为  $39.8\%$ 、凋萎含水率为  $5.5\%$  (质量含水率)。土壤较为贫瘠, $0 \sim 1 \text{ m}$  土层有效氮、磷、钾质量比分别为  $34.71$ 、 $2.90$ 、 $101.8 \text{ mg/kg}$ ,有机质质量比为  $2.1 \text{ g/kg}$ ,pH 值为  $8.6$ 。土层深厚,地下水埋深在  $50 \text{ m}$  以下,对根系吸水影响可忽略。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验设计

矮化密植枣林于 1999 年开始栽植,至 2011 年,形成了 2、4、9 和 12 a 生 4 种林龄的枣林,各枣林基

本情况如表 1 所示。2006 年开始进行滴灌,每株树对称布置 2 个滴头,每个滴头流量为  $4 \text{ L/h}$ ,滴灌  $8 \text{ h}$ ,每年分别在枣树开花期、果实膨大期、果实白熟期滴灌 3 次,种植株行距均为  $2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$ ,计算得出年滴灌水量为  $33.3 \text{ mm}$ 。在各枣林中,分别选择同坡度、西南向阳坡、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  $100 \text{ m}$  范围内,选取 3 块样地作为重复。由于密植林分植株根系互相交叉形成根网<sup>[18]</sup>,在每块样地内分别选取 5 个位置进行取样(图 1)。取样点代表了离树干不同距离的水平位置。通过这 5 个取样位置数据的均值,减小水平位置因素对根系分布差异的影响。同时,在枣林附近选择与样地同坡向、同坡度、类似土质的农地作为林地的对照。农地种植的作物为马铃薯,无灌溉措施。本研究认为该农地的深层土壤水分没有被植被吸收利用。

#### 1.2.2 试验方法

2012 年 9 月(果实收获期)采用根钻法进行取样。为了便捷地获取  $2 \text{ m}$  以下的土样,采用洛阳铲,获取的土芯直径为  $0.16 \text{ m}$ 。取样时,在地面安置铁架,确保钻杆每次取样均是垂直向下、不发生水平偏移。

表 1 枣林基本情况

Tab. 1 Site characteristics of jujube orchard

参数	林龄/a			
	2	4	9	12
茎粗/mm	$37.6^d \pm 6.3$	$58.1^c \pm 3.4$	$70.8^b \pm 5.5$	$85.3^a \pm 2.5$
树高/m	$1.26^e \pm 0.47$	$1.94^b \pm 0.14$	$2.33^a \pm 0.27$	$2.31^a \pm 0.22$
冠幅/m	$1.35^e \pm 0.29$	$1.75^b \pm 0.18$	$1.90^b \pm 0.25$	$2.23^a \pm 0.15$
产量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	2 250	15 000	19 800	19 800
林地面积/ $\text{hm}^2$	6	6	20	25

注:a、b、c、d 代表不同林龄间的差异显著性( $P < 0.05$ ),产量为 2007—2010 年的平均产量。

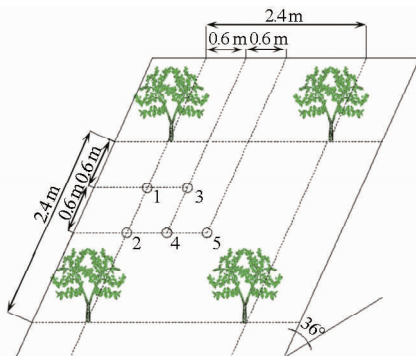


图 1 枣林取样位置示意图

Fig. 1 Scheme of sampling positions in jujube plantation

样地选定后,去除地表杂草、枯枝落叶。取样时,以  $0.2 \text{ m}$  深度分层取土样,在现场通过孔径为  $1 \text{ mm}$  的筛网对土样进行粗略冲洗。直到连续 2 个土层没有根系出现时,结束取样。每个取样位置每

层的根系样品分别标记带回实验室,再用孔径为  $1 \text{ mm}$  的筛网对土样进行精细冲洗,去除杂质、死根及直径  $2 \text{ mm}$  以上的根系。Chahine<sup>[19]</sup>认为直径小于  $2 \text{ mm}$  的根系是植物吸收水分的主要通道,在生态系统中起着重要的作用。本研究将直径小于  $2 \text{ mm}$  的根系作为细根。前期试验得出 2 a 生和 4 a 生枣林细根分布最大深度分别出现在  $2 \text{ m}$  和  $4 \text{ m}$  处,9 a 生和 12 a 生均为  $5 \text{ m}$ <sup>[20]</sup>。每个土层取样时,将  $50 \text{ g}$  左右没有根系的土壤放入铝盒,每个土层重复 2 次,干燥法获得土壤含水率。由于不同林龄枣林的土质类似,只在 12 a 生枣林中安装 3 根  $10 \text{ m}$  深的铝管,铝管间隔  $3 \text{ m}$ ,利用中子水分仪每  $0.2 \text{ m}$  分层监测土壤水分,用于分析整个林地的降水入渗最大深度。在 7—12 月期间进行观测,雨季(7—9 月)每月测 2 次,非雨季每月测 1 次,到 12 月结束观测。

### 1.2.3 数据处理

根干质量密度表示单位土芯体积内的根干质量, 表示为

$$R_{DWD} = W_R / V_S \quad (1)$$

式中  $R_{DWD}$ ——根干质量密度,  $g/m^3$

$W_R$ ——根干质量,  $g$

$V_S$ ——土芯体积,  $m^3$

土壤储水量

$$W = 10h\gamma\theta \quad (2)$$

式中  $W$ ——土壤储水量,  $mm$

$h$ ——土层深度,  $cm$

$\gamma$ ——土壤容重,  $g/cm^3$

$\theta$ ——土壤质量含水率,  $g/g$

土壤耗水量为土壤初始储水量和现有储水量的差值, 即

$$W_{deplete} = W_{initial} - W_{present} \quad (3)$$

式中  $W_{deplete}$ ——土壤耗水量,  $mm$

$W_{initial}$ ——土壤初始储水量,  $mm$

$W_{present}$ ——土壤现有储水量,  $mm$

土壤可再供水量为土壤现状储水量和土壤最小储水量的差值, 即

$$W_{supply} = W_{present} - W_{min} \quad (4)$$

式中  $W_{supply}$ ——土壤可再供水量,  $mm$

$W_{min}$ ——土壤最小储水量,  $mm$

在细根分布最大深度范围内, 用土壤含水率的最小值  $\theta_{min}$  来计算土壤最小储水量

$$W_{min} = 10h\gamma\theta_{min} \quad (5)$$

通过比较人工林草植被与农地的土壤含水率, 间接推断人工林草植被土壤水分被利用的程度, 是目前植被土壤水分消耗深度及程度研究的主要研究方法<sup>[5]</sup>。枣树种植前的土壤含水率为林地的初始含水率, 但试验取样时由于无法获得林地的初始含水率, 本研究将取样地附近农地的土壤含水率作为枣林地的初始含水率, 以实测土壤含水率均值作为现状含水率, 通过上述公式计算出林地深层土壤水分消耗量。由于是对比分析, 如果出现农地土壤含水率小于林地的情况, 则认为林地中这个土层的水分还未被利用。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水入渗最大深度的确定

利用 2012 年 7—12 月期间枣林地 0~5 m 土壤水分的定位观测数据, 绘制土壤水分随土层深度的变化曲线(图 2a)。可以明显地看出 0~0.6 m 土层土壤含水率随取样时间的变化很大, 0.6~2.0 m 土层土壤含水率变化较小, 2.0 m 以下土层土壤含水

率几乎没有变化。分层计算 0~5 m 土层土壤含水率的变异系数, 绘制土壤水分变异系数随土层深度的变化曲线(图 2b), 拟合方程为

$$y = 836.07x^{-1.1385} \quad (R^2 = 0.8974) \quad (6)$$

式中  $y$ ——土层深度,  $m$

$x$ ——土壤含水率变异系数, %

由图 2b 可看出, 0~2 m 土层变异系数值骤减, 2~5 m 土层变异系数值趋于稳定, 因而确定降水入渗最大深度为 2 m。这与杨新民等<sup>[21]</sup>研究黄土半干旱区降水入渗最大深度不超过 2 m 的结论一致。取样时各林龄样地土壤质地类似, 所以 12 a 生枣林样地的降水入渗最大深度能代表其他林龄样地的降水入渗深度。王志强等<sup>[3]</sup>用土壤含水率的方差值作为衡量土壤含水率年际变化程度的统计量, 以方差值作为划分土壤水分变异程度的标准, 其划分结果与从土壤剖面含水率分布图直观判别它的结果很接近。考虑到每个土层的土壤含水率均值并不相等, 因而采用变异系数值来比较, 它比方差值更能反映不同土层的变异程度。本文将 2 m 以下的土层定义为深层土壤<sup>[22]</sup>, 0~2 m 土层受降水入渗的影响, 不予讨论。主要讨论 2 m 以下深层土壤水分的变化情况。

## 2.2 深层土壤耗水特征

### 2.2.1 深层土壤耗水量

将农地土壤含水率作为枣林地初始土壤含水率, 不可避免地会出现一些误差。将 2 a 生枣林地与农地的深层土壤含水率进行成对样本比较, 计算得到  $t = 0.473 < t_{14}(0.05) = 2.145$  (14 为配对样本  $t$  检验自由度), 这说明 2 a 生枣林地深层土壤含水率与农地无差异, 选取的农地土壤含水率作为枣林地深层土壤含水率的初始值是合理的。同时也表明 2 a 生枣林细根分布最大深度(2 m)以下没有水分消耗。同理,  $t$  检验也表明 4 a 生枣林细根分布最大深度(4 m)以下土壤含水率与农地无差异, 反映了 4 a 生枣林 4 m 以下没有水分消耗。图 3 为根据枣林细根分布最大深度计算的深层土壤耗水量随土层深度的变化状况。

从图 3 可以看出, 2 a 生枣林尚未消耗深层土壤水分, 4 a 生枣林 4 m 以下无水分消耗。随着林龄的增长, 从第 2 年到第 9 年枣林地深层土壤水分消耗量逐渐增加, 从第 9 年到第 12 年土壤水分消耗量趋于稳定, 深层土壤水分消耗量随土层加深而减小。2.0~3.2 m 土层土壤水分消耗随林龄增长差异大, 3.2~5.0 m 土层土壤水分随林龄增长差异小。说明枣树生长过程中, 根系先吸收上层土壤水分, 当上层土壤水分供应不足且不能满足枣树生长需求时,

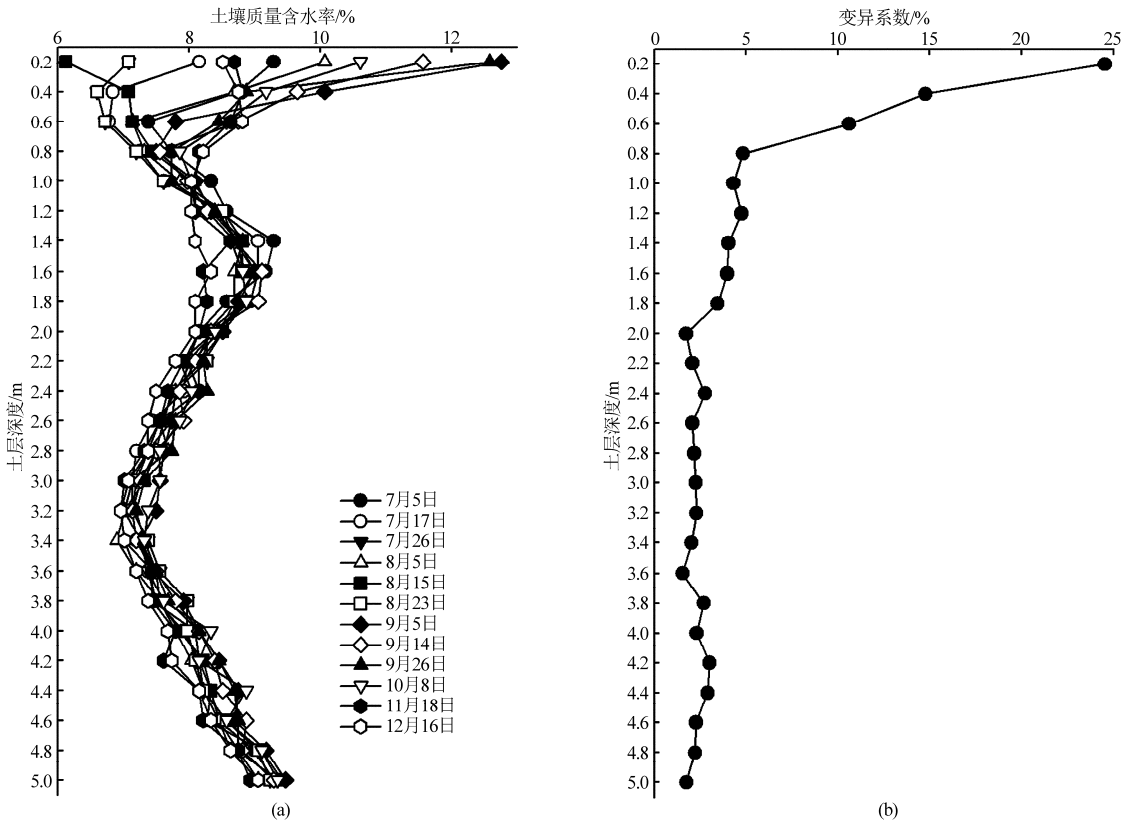


图2 12 a 生枣林 7—12 月土壤水分及变异系数

Fig. 2 Soil water content and variation coefficient in 12 years old jujube plantation ( July—December)

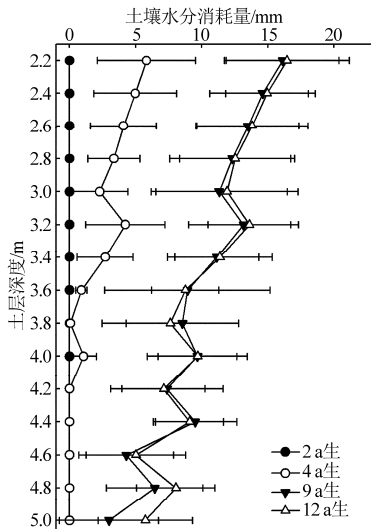


图3 不同林龄枣林深层土壤水分消耗量

Fig. 3 Deep soil water depletion in different years old jujube plantation

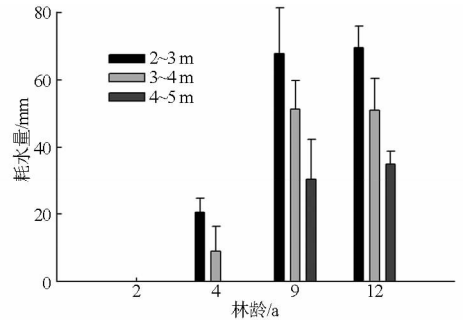


图4 不同林龄枣林分段土层耗水量

Fig. 4 Deep soil water depletion at 1 m interval in different years old jujube plantation

29.6、149.9 和 155.7 mm, 年均深层耗水量分别为 0、7.38、16.65 和 12.97 mm。

在黄土高原气候、土壤质地、自然植被等因素作用下,旱地土壤能够长期维持的土壤湿度称为土壤稳定湿度<sup>[2]</sup>。李军等<sup>[23]</sup>研究表明可以采用土壤凋萎含水率与田间持水率的平均值来代替土壤稳定湿度,本研究计算得其值为 14.5%。以土壤稳定湿度作为土壤水分的上限值,以凋萎含水率到土壤稳定湿度之间土壤的水分贮存量作为土壤有效库容,计算 2~5 m 土层中的土壤有效库容为 351.7 mm。因此,不同林龄的深层土壤水分消耗量分别达到土壤有效库容的 0、8.42%、42.62% 和 44.27%。由此可见,随着林龄的增长,深层耗水量越来越大、最终

再吸收下层土壤水分。因此,枣林深层土壤水分的消耗是一个逐渐加深、逐渐向下的过程。

### 2.2.2 分段土层耗水量

将深层土层按 1 m 分段,分段统计各土层的耗水量(图 4)。从同一林龄来看,耗水量随土层深度的增加而递减;从同一土层来看,耗水量随林龄的增长先增加(2~9 a 生),而后基本趋于稳定(9~12 a 生)。2、4、9 和 12 a 生枣林的总耗水量分别达到 0、

趋于稳定,土壤越来越趋于干化。9 a 生和 12 a 生枣林 2~4 m 土层土壤水分消耗量趋于一致是由于土层中的水分已经被吸收尽。2~4 m 的土壤含水率接近凋萎含水率,也说明该土层已没有水分可被植物利用。分析 9 a 生和 12 a 生枣林深层土壤水分消耗量趋于稳定的主要原因可能是通过修剪树体,调控了地上部树体大小(树高 2.3 m 左右,冠幅 2.2 m 左右,产量控制在 19 800 kg/(hm<sup>2</sup>·a)和地下部根系深度(9 a 生和 12 a 生枣林细根分布最大深度均为 5 m)。由此,我们可以推测,大小一致的树体和产量可使得枣林深层土壤水分消耗量稳定在一定的范围<sup>[24]</sup>。

研究区多年平均降水量为 451.6 mm,2012 年枣树生育期(5—9 月)降水量累计为 429.4 mm,其中有效降水量累计为 341.3 mm(次降水量大于 10 mm)。通常情况下,小于 10 mm 的降水只能转化为土壤表层水分,很难被作物根系吸收。冯浩等<sup>[25]</sup>研究表明黄土区 86% 的降水入渗到土壤中可供作物利用。前期研究已得出每株树每年滴灌水量为 33.3 mm<sup>[23]</sup>,假定滴灌水分入渗率按 100% 计算,枣林地年补充总水量约为 326.8 mm。2、4、9 和 12 a 生枣林年均深层土壤耗水量分别占年补充总水量的 0、2.3%、5.1% 和 3.9%。由此推测,综合利用集雨措施(鱼鳞坑、水平沟等)、保水措施(秸秆覆盖、薄膜覆盖等)和补水措施(滴灌、喷灌等),可增加一定的林地土壤水分供给量,相应地减少一定的土壤水分消耗量,可抵消水量平衡中一部分深层土壤水分的消耗量,能起到缓解枣林深层土壤干化的巨大作用。

曹裕等<sup>[10]</sup>在黄土高原半湿润偏旱区的陕西延安和半干旱区的甘肃静宁分析苹果园地土壤耗水量为 362.7 mm,年平均耗水量为 23.44 mm,分别是 12 a 生枣林的 2.33 和 1.81 倍。本文认为其计算的耗水量偏大,分析其主要原因是由于选取的计算土层深度和土壤初始含水率的差异造成的。由于不知道苹果细根分布的最大深度,将 0~15 m 土层默认为苹果园地的耗水深度。另外,从地表到降水入渗最大深度这个范围的土壤水分受降水入渗的影响,其土壤含水率随取样时间在降雨前后变化,一次取样并不能准确计算土壤耗水量。因此,只有掌握了细根分布最大深度,才能较准确地计算出林地耗水的深度范围。

### 2.3 深层土壤可再供水量

在所有枣林地土壤含水率中,12 a 生枣林地 3.0~3.2 m 土层的含水率最小(5.36%),比理论方法测得的凋萎含水率(5.5%)略小 0.14%。因此,

以 5.36% 作为可被根系吸收的土壤含水率最小值比理论得到的凋萎含水率更准确,同时以现有土壤含水率为上限值,计算不同林龄深层土壤(2~5 m)可再供水量。不同林龄枣林深层土壤分层累积的可再供水量如图 5 所示。图中显示,可再供水量随林龄的增长急剧减少,4、9 和 12 a 生枣林的可再供水量(167.7、35.5 和 29.7 mm)分别为 2 a 生(203.7 mm)枣林的 82.3%、17.4% 和 14.6%;可再供水量随土层深度而增加,9 a 生枣林 2~3 m、3~4 m 土层的可再供水量只有 3~4 mm、几乎没有可被利用的水分,4~5 m 土层的可再供水量也仅为 2 a 生枣林同土层的 36.3%。可以推测,随着枣林持续地产出,在现有自然降水和滴灌的情况下,深层土壤水分消耗有加重的趋势,根系会继续向下延伸,吸收更深层的土壤水分。因此,迫切需要增加滴灌水量,才能抑制深层土壤的干化。

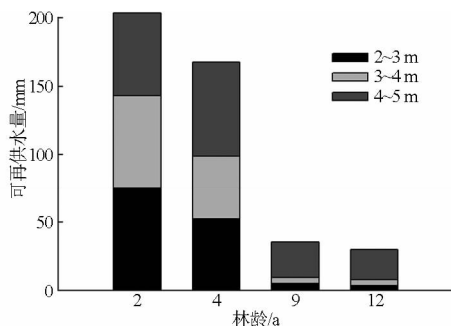


图 5 不同林龄枣林深层土壤可再供水量

Fig. 5 Deep soil water supply in different years old jujube plantation

### 3 结论

(1) 枣树生长过程中,根系先吸收上层土壤水分,当上层土壤水分供应不足且不能满足枣树生长需求时,再吸收下层土壤水分。随着林龄的增长,黄土半干旱区密植枣林深层土壤水分消耗深度逐渐加深,程度逐渐加重。枣林生长第 9 年后,2~4 m 土层几乎没有可以被利用的水分,土壤越来越趋于干化。

(2) 细根分布最大深度是植物消耗土壤水分深度的重要参考指标,以降水入渗最大深度为上界、细根分布最大深度为下界计算林地深层土壤水分消耗量及可再供水量,能较准确地计算林地耗水的深度范围,能更准确地评估利用性土壤干层形成的程度和深度。

(3) 随着枣林持续地产出,在现有自然降水和滴灌的情况下,深层土壤水分消耗有加重的趋势,根系会继续向下延伸,吸收更深层的土壤水分。因此,集水、保水、补水等措施可增加林地土壤水分供给量,对缓解枣林深层土壤干化有巨大作用。

## 参 考 文 献

- 1 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)
- 2 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)
- 3 王志强,刘宝元,张岩.不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J].地理学报,2008,63(7):703-713.  
Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Zhang Yan. Effects of different vegetation types on soil moisture in deep loess soil profiles[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7):703-713. (in Chinese)
- 4 Sarmiento G, Goldstein G, Meinzer F. Adaptive strategies of woody species in neotropical savannas[J]. Biological Reviews, 1985, 60(3):315-355.
- 5 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,2009,39(9):1297-1303.  
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, 39(9):1297-1303. (in Chinese)
- 6 邓振镛,方德彪,仇化民.甘肃东部旱作区土壤水库贮水力的研究[J].应用气象学报,1996,7(2):169-174.  
Deng Zhenyong, Fang Debiao, Qiu Huamin. Research on the soil reservoir moisture storage capability in the dry farming region province[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1996, 7(2):169-174. (in Chinese)
- 7 Eamus D, Chen X, Kelley G, et al. Root biomass and root fractal analyses of an open eucalyptus forest in a savanna of north Australia[J]. Australian Journal of Botany, 2002, 50(1):31-41.
- 8 Ritson P, Sochacki S. Measurement and prediction of biomass and carbon content of *Pinus pinaster* trees in farm forestry plantations, south-western Australia[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 175(1-3):103-117.
- 9 Dauer J M, Withington J M, Oleksyn J, et al. A scanner-based approach to soil profile-wall mapping of root distribution[J]. Dendrobiology, 2009, 62: 35-40.
- 10 曹裕,李军,张社红,等.黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J].农业工程学报,2012,28(15):72-79.  
Cao Yu, Li Jun, Zhang Shehong, et al. Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and landform zones of Loess Plateau in China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15):72-79. (in Chinese)
- 11 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, 193:300-310.
- 12 Maeght J L, Rewald B, Pierret A. How to study deep roots-and why it matters[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4:1-14.
- 13 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)
- 14 陈宝群,赵景波,李艳花.黄土高原土壤干层形成原因分析[J].地理与地理信息科学,2009,25(3):85-89.  
Chen Baoqun, Zhao Jingbo, Li Yanhua. Research on causes of dried soil layer in the Loess Plateau[J]. Geography and Geo-information Science, 2009, 25(3):85-89. (in Chinese)
- 15 刘东生.黄土与环境[J].西安交通大学学报:社会科学版,2002,22(4):7-12.  
Liu Dongsheng. Loess and environment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University: Social Sciences, 2002, 22(4):7-12. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 王锐,刘文兆,李志.黄土塬区10m深剖面土壤物理性质研究[J].土壤学报,2008,45(3):550-554.  
Wang Rui, Liu Wenzhao, Li Zhi. Physical properties of soils along a 10 m deep soil profile in loess tableland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3):550-554. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, 359(6394):373-380.
- 20 刘晓丽,汪有科,马理辉.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, Wang Youke, Ma Lihui. Analysis of fine root and soil water distribution under drip irrigated densely jujube plantation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17):63-71. (in Chinese)

- 21 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,1994,1(3):31-35.  
Yang Xinmin, Yang Wenzhi, Ma Yuxi. Study on the condition growing of the man-made Locust Woodland and moisture environment in the small watershed of Zhifanggou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1994,1(3):31-35. (in Chinese)
- 22 刘晓丽,马理辉,汪有科,等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布的关系[J]. 农业机械学报,2013,44(7):90-97.  
Liu Xiaoli, Ma Lihui, Wang Youke, et al. Relationship between deep soil water vertical variation and root distribution in densely jujube plantation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):90-97. (in Chinese)
- 23 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)
- 24 Ma L H, Liu X L, Wang Y K, et al. Effects of drip irrigation on deep root distribution, rooting depth, and soil water profile of jujube in a semiarid region[J]. Plant and Soil,2013,373(1-2):995-1006.
- 25 冯浩,赵西宁,吴普特. 黄土区农田作物降水利用效率影响因素及提高途径分析[J]. 中国农业科技导报,2007,9(5):30-35.  
Feng Hao, Zhao Xining, Wu Pute. Analysis of influencing factors and improving approaches of crop utilization efficiency for rainfall in farmland at the Loess Plateau[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2007,9(5):30-35. (in Chinese)

## Deep Soil Water Depletion Characteristic of Jujube Plantation in Loess Semiarid Region

Liu Xiaoli<sup>1</sup> Ma Lihui<sup>2,3</sup> Yang Ronghui<sup>4</sup> Wu Pute<sup>2,3</sup> Wang Youke<sup>2,3</sup>

(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, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

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

**Abstract:** Soil dry layer has occurred widely in artificial economic forest in Loess region, which constrained vegetation restoration and reconstruction. In order to investigate deep soil depletion (below 2 m) in densely planted jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) orchard, soil coring method (Luoyang shovel) was used to get soil water content from surface to the maximum fine rooting depth at 0.2 m soil interval. The results showed that root water uptake had a tendency to extend gradually deep, deep soil water depletion was 0, 29.6, 149.9 and 155.7 mm in 2, 4, 9 and 12-year-old jujube plantation, deep soil water supply was 203.7, 167.7, 35.5 and 29.7 mm, respectively, annual deep soil water depletion accounted for 0, 2.3%, 5.1% and 3.9% of annual soil water supply. There was almost no available water in 2~4 m soil layer when the jujube plantation developed for 9 years. Jujube water requirement could not be met by the existing rainfall and drip irrigation amount. Soil dry layer extent and depth can be evaluated more accurately with the maximum rainfall infiltration depth and maximum fine rooting depth as upper and lower boundaries. Soil water content could be increased through water catchment, water conservation and water supplement, which played an important role in alleviating jujube plantation deep soil drying.

**Key words:** Soil water   Densely jujube plantation   Fine root depth   Rainfall infiltration depth   Loess region