

黄土高原退耕还林措施对深层土壤含水率的影响

焦 瑞¹, 赵 英¹, 司炳成², 兰志龙¹, 张建国^{1,3}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 深层土壤水分分布状况对于黄土高原植被恢复和农业可持续发展意义重大。对陕北黄土区不同退耕还林措施(1979 年种植的侧柏林、油松林和苹果林)及农地(对照)20 m 深土壤剖面的土壤水分、根系分布状况及土壤粘粒含量进行了取样分析。结果表明:退耕还林措施显著降低了土壤含水率,总体表现为农地(11.30%) > 苹果林(6.66%) ≈ 油松林(6.48%) ≈ 侧柏林(5.92%)。深层土壤含水率同时受植物根系和土壤质地的影响,植物根系是影响 4~10 m 土壤含水率的主要因素,根系通过吸水作用降低了土壤含水率,但随着深度的增加,根系对土壤含水率的影响逐渐减弱,土壤质地对土壤含水率的影响逐渐增强,土壤含水率与土壤粘粒含量之间呈正相关关系。侧柏人工林根系影响土壤水分深度可达 18 m,油松林的影响深度为 16 m,35 a 树龄的苹果林耗水深度为 19 m 左右。

关键词: 深层土壤水分;退耕还林;土壤质地;植物根系;黄土高原

中图分类号: S157.2 文献标志码: A

Effects of conversion of cropland to forest measures on deep soil moisture in Loess Plateau

JIAO Rui¹, ZHAO Ying¹, SI Bing-cheng², LAN Zhi-long¹, ZHANG Jian-guo^{1,3}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

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

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loss Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Deep soil water distribution has great significance for vegetation restoration and sustainable development of agriculture in Loess Plateau. In this study, soil samples in a depth of 20 m profile under different conversion of cropland to forest measures (artificial Chinese Arborvitae forest, artificial Chinese Pine forest and apple forest planted in 1979) and cropland (as contrast) were collected. The soil moisture concentration, roots distribution and soil clay concentration were measured. The results demonstrated that the conversion of cropland to forest measures significantly reduced soil moisture concentration. Cropland had the highest moisture concentration (11.30%) in the four types of land use, whereas there are small differences of soil moisture concentration among artificial apple forest (6.66%), Chinese Pine forest (6.48%) and Chinese Arborvitae forest (5.92%) had little differences in soil moisture concentration. Soil moisture concentration was influenced by plant roots and soil texture. Plant roots were the main factors affecting the deep soil moisture concentration, roots through the suction effect of reducing the soil moisture concentration. With the increasing of soil depth, the effects of roots on soil moisture concentration was gradually weakened whereas soil texture effect becomes more significant. The influence of depth is 18 m for Chinese Arborvitae forest, 16 m for Chinese Pine forest and is 19 m for old apple forest.

Keywords: deep soil water; conversion of cropland to forest; soil texture; plant roots; Loess Plateau

收稿日期: 2017-01-06 修回日期: 2017-03-29

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目(2014KJXX-44); 国家自然科学基金(4137124, 41371233, 41471222)和中国科学院水利部水土保持研究所人才专项共同资助

作者简介: 焦 瑞(1991—), 女, 黑龙江人, 硕士研究生, 研究方向为土壤水分高效利用。E-mail: nuijiao0103@163.com。

通信作者: 张建国(1981—), 男, 黑龙江人, 博士, 主要从事土壤水盐运移和荒漠化防治研究。E-mail: zhangjianguo21@nwsuaf.edu.cn。

土壤水分是黄土高原植被生长最主要的水源^[1],也是影响植被和生态环境恢复的主要限制因子^[2-3]。退耕还林(草)政策使黄土高原土地利用呈现多种方式,不同土地利用方式会影响土壤水分的含量及其分布规律^[4-6],因此充分认识各利用类型条件下土壤水分的变化规律是土地资源高效利用的前提^[7]。人工林草在控制黄土高原水土流失中具有重要作用,但现有的乔木^[8]、果园^[9-12]和高产农地^[13-14]对土壤水分的消耗超过了降雨的补给,使得深层土壤趋于干燥化,造成土壤干层^[15]。土壤干燥化不仅对植被自身的生长造成不利影响,而且对陆地水文循环产生了一定的影响^[16]。

目前关于退耕还林类型对土壤水分特征的影响研究较多,但对于深层土壤水分变化的研究较少。农地多以 2~3 m 土层深度为主,林地大多集中在 6 m 以上,而对 10 m 以下的土壤水分特征了解较少。目前对于深层土壤水分垂直分层的研究仅依据含水率的变化并未结合根系分布和土壤剖面质地特征,而植被根系和土壤颗粒含量是影响深层土壤含水率的主要因素。本文通过对陕北高西沟地区农地及不同退耕还林类型土壤深层水分特征进行分析,同时结合根系和质地的分布规律,进一步探究不同退耕还林措施对土壤水分的利用深度以及影响深层土壤

水分利用的主要因素,以期为该地区土地利用方式的优化配置和生态环境建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省米脂县东北方向 20 km 处的高西沟(37°87'N, 110°18'E)。该区属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,年平均气温 8.4℃,年均降雨量 440 mm,且主要集中在 7—9 月,约占全年降水的 75%。高西沟是国家级水土保持示范区,自 20 世纪 50 年代实施退耕还林措施至今,退耕还林类型多样,主要树种有人工柠条林、人工侧柏林、人工油松林及苹果林等。

1.2 样地选择

分别选择 1979 年种植的农地(对照)、侧柏林、油松林和苹果林 4 种退耕还林类型,每种类型 2 个重复(注为 a 点和 b 点),共 8 个采样点。4 种类型在 1979 年之前均为耕地,其中农地种植作物为马铃薯和大葱。为使不同退耕还林类型之间含水率有可比性,各样点均选在岍坡中部或下部,坡度相近,坡向为东坡或东南坡。同一树种的长势基本相同,且具有一定的规模,样地植被覆盖度约为 70%~80%。

表 1 不同退耕还林类型采样点基本情况

Table 1 Characteristics of the soil sampling plots under different conversion of cropland to forest measures

样地名称 Name	植被高度/m Vegetation height	地貌部位 Landform positions	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree	海拔/m Altitude	质地类型 Soil texture
农地 Cropland	0.3	岍坡中部 Middle slope	东南 Southeast	0°	1069	粉壤土 Silty loam
侧柏林 Arborvitae forest	3.0	岍坡下部 Lower slope	东南 Southeast	12°	1076	粉壤土 Silty loam
油松林 Pine forest	5.0	岍坡中部 Middle slope	东南 Southeast	10°	1018	粉壤土 Silty loam
苹果林 Apple forest	3.5	岍坡下部 Lower slope	东 East	0°	1084	粉壤土 Silty loam

1.3 土壤样品采集及测定

试验于 2015 年 7 月 15 日开始,采样顺序为农地、侧柏林、油松林和苹果林,平均每 2 d 采集一个样点,采样时间共 8 d。在上述采样地按照图 1 所示的采样位置,采用深剖面土钻人工取土的方法取 0~20 m 深度范围内的土壤样品,每隔 20 cm 采集 1 个土壤样品。

土壤含水率采用烘干法测定,测定间隔为 20 cm,烘箱内于 105℃下烘干 12 h 至恒重,土壤质地采用吸管法测定,测定间隔为 50 cm;土壤容重采用环刀法,测定深度为 50 cm;土壤贮水量^[17]采用公式(1)进行计算:

$$W_c = 10 \times \theta_m \cdot \rho \cdot h \quad (1)$$

式中, W_c 为土壤贮水量(mm); θ_m 为土壤质量含水率($g \cdot g^{-1}$); ρ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); h 为土层深度(cm)。

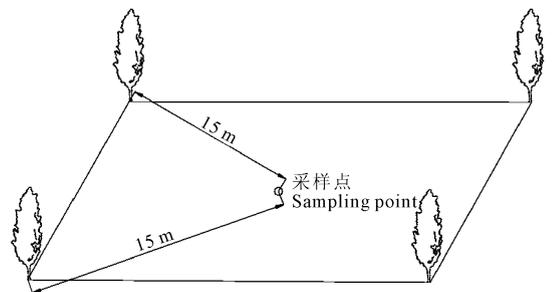


图 1 林地采样点位置示意图

Fig. 1 Diagram of forest land sampling point

1.4 根系调查方法

在同一个土柱上将采集的0~10 m土壤样品通过孔径为1 mm的网筛用清水冲洗,得到植物根系测定间距为20 cm。采用WinRHIZO根系分析软件计算植物根系密度。

1.5 人工林根系耗水深度

王志强等^[18]研究表明,深层土壤含水率年际变化较小,主要受植被和质地的影响。因此,农地土壤含水率主要受质地的影响,林地土壤含水率受土壤质地和林地植被的影响。通常,为了研究林地植被根系对土壤含水率的影响,确定人工林的耗水深度,必须排除质地对土壤含水率的影响^[19]。参照王志强^[18]的研究方法,首先建立深层土壤含水率和质地

的相关关系;其次依据林地土壤质地,估算林地只在受质地作用的情况下,深层土壤含水率的理论值;最后通过对比人工林理论含水率与实际测定的含水率,得出林地只在受根系影响下的耗水量,确定林地植被的耗水深度^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同退耕还林类型下土壤水分垂直分布特征

土壤剖面水分受降雨、蒸发、植物吸水、地形条件以及土壤质地等因素的影响,表现出明显的垂直差异性。在0~20 m范围内,同一林龄退耕还林地的土壤含水率大小表现为农地>苹果林≈油松林≈侧柏林(表2)。

表2 不同退耕还林类型下0~20 m土壤含水率

Table 2 Soil moisture of 0~20 m depth under different conversion of cropland to forest measures

退耕还林类型 Vegetation type	土层深度/m Soil depth	平均值/% Mean	最大值/% Maxium	最小值/% Minium	标准差 Standard deviation
农地 Cropland	0~20	11.50	19.01	7.95	1.01
侧柏林 Arborvitae forest	0~20	6.05	16.37	3.57	1.64
油松林 Pine forest	0~20	6.59	12.31	4.46	1.49
苹果林 Apple forest	0~20	6.71	13.62	3.15	1.68

从图2的土壤剖面水分分布曲线可以看出,0~2 m的土层土壤含水率变化较剧烈,农地、侧柏林、油松林和苹果林土壤平均含水率表现为农地(8.83%)>油松林(7.36%)>侧柏林(5.45%)>苹果林(3.85%)。由于0~2 m土层是植物根系的主要分布层,同时也是水分的主要消耗层,受降雨和蒸发的影响较大,因此土壤含水率变化较大。对于2~10 m深土层,农地的含水率显著高于林地,3种林地之间无显著差异($P > 0.05$)(图2)。4种退耕还林类型土壤平均含水率分别为11.48%、5.77%、4.75%和5.30%,其中农地土壤平均含水率约为林地的2.2倍。2~10 m受外界气候条件的影响较小,土壤水分消耗的差异主要是由植物根系的吸水作用所致。在10~20 m土层中,土壤含水率随深度的增加呈逐渐上升趋势,不同退耕还林类型表现为农地>侧柏林>苹果林>油松林。由公式(1)可推算出农地0~20 m土壤贮水量为3 266.0 mm,侧柏林、油松林和苹果林0~20 m土壤贮水量分别为1 670.0、1 858.4 mm和1 905.6 mm。与农地相比,不同林地土壤0~20 m贮水量依次减小了1 596、1 407.6 mm和1 360.4 mm。

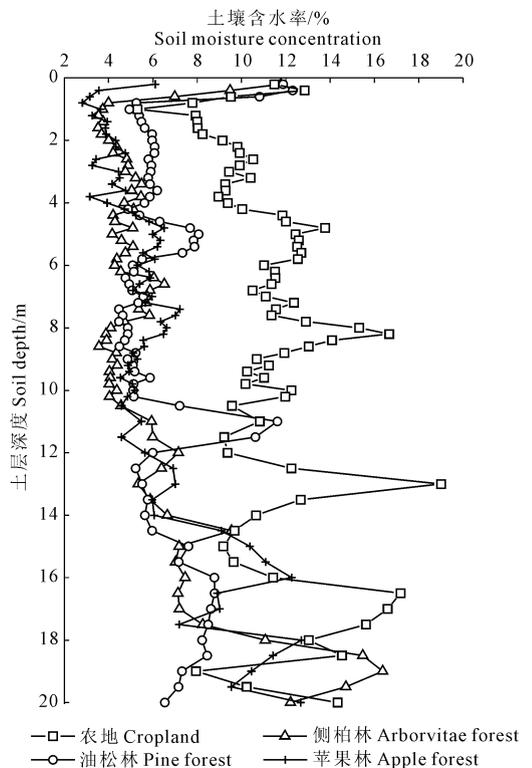


图2 不同退耕还林措施下土壤水分垂直分布

Fig.2 Soil moisture distribution under different conversion of cropland to forest measures

2.2 植被细根根系密度对土壤含水率的影响

通过对比不同退耕还林类型下的土壤水分分布(图 3)可以发现,表层土壤含水率变化较为剧烈,2~10 m 土层的平均含水率最低且无显著变化,但 10~20 m 土层平均含水率变异较大。每个采样点除植被覆盖类型不同,其它自然因素(气候、海拔、坡向、地形)基本一致,因此土壤含水率主要是受植物根系吸水能力和土壤性质(质地)的影响。由图 3 可知,苹果林、油松林和侧柏林最大细根密度均出现在 0~20 cm 浅层土壤,分别为 0.24、0.72 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 1.32 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。0~2 m 为土壤水分活跃层,土壤含水率与气候条件密切相关,受降雨、温度等影响较大,且大多数植物的根系也分布在这一层,这有利于植物对雨水的吸收,也同样会对土壤水分特别是深

层土壤水分的重新分布产生重要影响。苹果林、侧柏林、油松林在 2~10 m 土层的平均细根密度分别为 0.041、0.045 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 0.0031 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$,该层土壤含水率受根系影响较大。苹果林在 4~10 m 土层根系密度较小,并且土壤含水率相对较大,但变化较小;油松林在 6.3 m 处根系密度突然增加,此深度的含水率也因此变小;侧柏林在 6.2 m 和 8.3 m 深度的根系密度最大,而土壤含水率在此深度则是由大变小。由于没有灌溉条件,有限的降水是研究区土壤水分的唯一来源,其补给深度有限^[21],同时由于 0~2 m 土层的强烈蒸发作用和根系耗水作用,使得该层土壤水分不能够及时有效地向下补给,当根系的耗水量长期高于补给量时必然造成深层土壤出现干层。

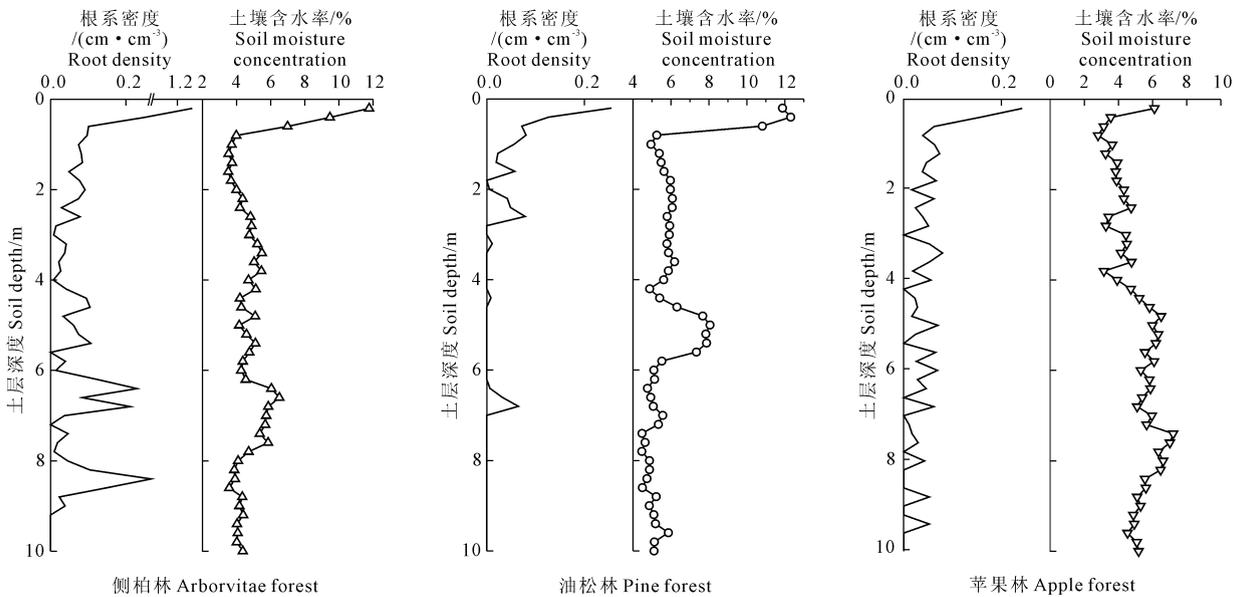


图 3 不同退耕还林措施下植被根系密度分布

Fig.3 Root density distribution under different conversion of cropland to forest measures

2.3 土壤粘粒含量对土壤含水率的影响

由图 4 土壤含水率与土壤质地之间的关系发现,除农地外,在 0~10 m 的土层中含水率受土壤质地的影响较小。在 10~20 m 的土层中,土壤含水率的变化受质地的影响较大。苹果林 14~16 m 土壤含水率变化与粘粒含量变化一致,油松林 11~19 m 土壤含水率变化趋势与粘粒含量变化一致,侧柏林土壤含水率在 14.5 m 和 19 m 处出现峰值,此深度的土壤粘粒含量也相对较大。农地、油松林、苹果林和侧柏林的含水率峰值分别出现在 13~15 m、11~13 m、15~16 m 和 17~19 m 之间,此时的土壤粘粒含量也基本处于峰值。通过分析土壤粘粒含量和土

壤含水率之间的关系得出二者之间呈现正相关关系,并且随着土层深度的增加,土壤质地对含水率的影响增大(图 5)。

2.4 不同退耕还林类型植被耗水深度及耗水量

由图 2 可以看出,表层的土壤含水率受外界气候的影响较大,而 4 m 以下的土壤含水率受外界环境因素的影响较小。因此本研究以农地 4 m 以下的土壤实测含水率为基准,建立农地土壤含水率与土壤粘粒之间的关系式(图 5)。依据此关系式,通过不同林地的土壤粘粒含量来推算不同林地深层土壤含水率的理论值,对比林地土壤含水率理论值与实测值,即可得出在只有根系作用下的土壤含水率。

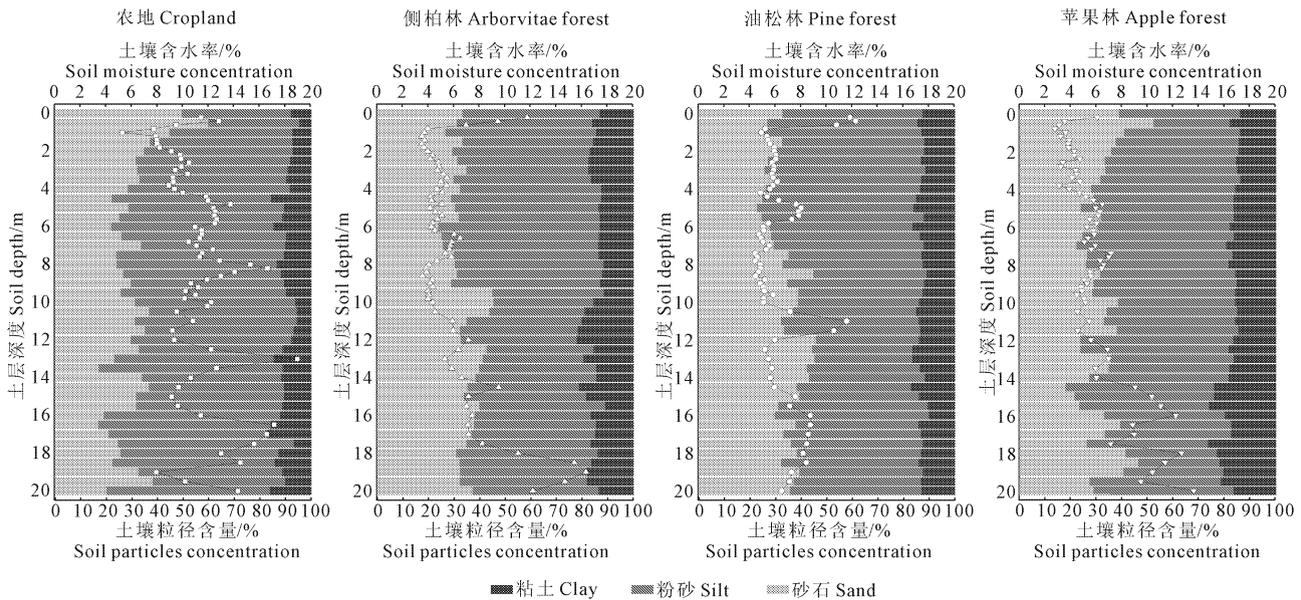


图 4 不同退耕还林措施下土壤水分剖面水分及质地分布特征

Fig.4 Soil moisture and texture distribution under different conversion of cropland to forest measures

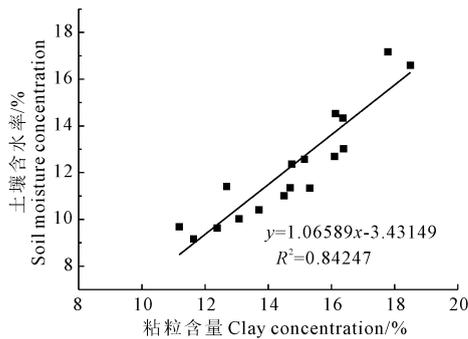


图 5 农地 4 m 以下土壤含水率与粘粒含量关系

Fig.5 Relationship between soil moisture concentration and clay concentration in 4~20 m soil layer of cropland

人工植被土壤含水率的变化受多种因素的影响,研究区域的主要影响因素为气候条件、土壤性质(质地)和植被耗水。由图 6 可知,人工林的实测值和基于质地的理论值在一定深度范围内基本保持平行,随着深度的增加,差距逐渐减小至基本相交。各林地实测值和理论值差距较大的土层深度分别为 2~13 m(侧柏林)、2~10 m(油松林)、2~9 m(苹果林),说明在该深度的土壤含水率受植被耗水的影响较大。随着深度的增加,植被对土壤含水率的影响逐渐减小。通过比较实测值和理论值可得到人工林的近似耗水深度,人工侧柏林耗水深度为 18 m,油松林为 16 m,苹果林为 19 m。由理论值和实测值的差值,可计算得出人工植被在 4 m 至最大耗水深度的耗水量分别为 1 514.8 mm(侧柏林)、1 015.1 mm(油松林)和 1 252.5 mm(苹果林)。

3 讨论

本研究通过分析植物细根系密度发现,不同植被在深层土壤剖面根系分布差异较大,其中油松林根系密度最小,侧柏和苹果林根系密度基本相同。测定不同林地的深层土壤含水率发现,土壤含水率的变化呈现明显的分层现象。通过对比土壤含水率与植被根系分布规律可以得出,不同植被根系的分布情况与土壤含水率的变化有一定的相关性。Qiu 等^[22]研究结果表明,不同植被类型的根系均分布在 0~1 m 土层,因此土壤含水率分布仅与植被类型有关。Wang 等^[23]研究了草地、林地以及农地 0~5 m 的土壤含水率发现,不同植被类型的土壤含水率存在显著差异,并且植被对土壤含水率的影响较大,这与本文的研究结果基本一致。

深层土壤含水率不仅受植被根系的影响,同时也受到质地的影响。质地和根系同时影响着深层土壤含水率,当林地的理论含水率和实际含水率的曲线较为接近,则证明质地对土壤水分的影响较大,反之则是根系对土壤水分的影响较大。王志强等^[24]和杨文治等^[25-26]的研究表明,粘粒含量与土壤含水率呈显著正相关,与砂粒含量呈极显著负相关。本研究通过对比土壤颗粒含量与土壤含水率也发现,粘粒含量越高土壤含水率越大。造成这种现象的原因是细颗粒土壤有更强的持水能力,土壤粘粒含量越高,其持水能力则越强。

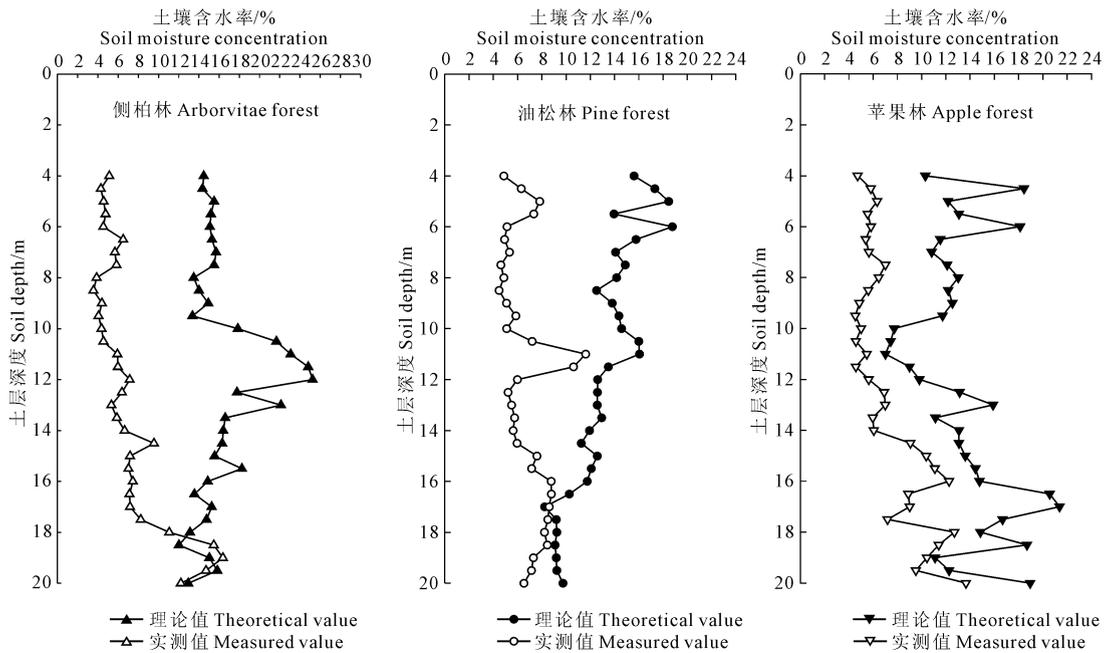


图 6 不同退耕还林类型土壤含水率实测值与估算值比较

Fig.6 Comparison between soil moisture of measured and estimated values under different conversion of cropland to forest types

曹裕等^[27]研究指出苹果树的耗水深度超过 12 m。王亚莉等^[28]测定了黄土高原旱作苹果园 0~10 m 土壤含水率结果表明,果园随着种植年限的增长,土壤含水率逐渐降低,在 24 a 后,达到土壤凋萎湿度。王锐等^[29]研究得出 20 a 的苹果树的耗水深度可达 19 m。上述研究分析的土壤剖面水分特征及植被耗水深度,仅从土壤含水率方面进行了分析,但并没有考虑质地对土壤水分的影响。本文得出人工侧柏林根系对土壤水分的影响深度可达 18 m,油松林的影响深度为 16 m,苹果林影响深度为 19 m 左右。测得的细根根系深度与确定的耗水深度有一定偏差,这一方面可能是由于采样方法的缺陷导致更深层的根系未采集到,另一方面则是由于 10 m 以上的土壤含水率过低,使得 10 m 以下的水分不断向上补给。

由于研究区地下水埋藏深达 50 m,不能补给植物,因此 10~20 m 土层的水分主要通过降水入渗来补给,而 10 m 以上土层由于根系的影响必然会降低深层土壤水分的补给。根系的影响深度越深造成的土壤干层现象越严重,要补给该土层的土壤水分,所需的贮水量为 1 000 mm 以上,这在特大丰水年也难以实现。因此,从植被长期的生长状况来看,尚不能达到涵养水源的效果。

4 结 论

(1) 在 20 m 土层的范围内土壤平均含水率为

农田 > 苹果林 ≈ 油松林 ≈ 侧柏林,其值分别为 11.3%、6.66%、6.48%、5.92%。农田含水率的最大值为 19.02%,出现在 13 m 深处,苹果林的最大值为 13.61%,出现在 18.6 m 的深度,油松林和侧柏林最大值分别为 12.31% 和 16.37%,分别出现在 11 m 和 19 m。

(2) 农田的土壤含水率远高于林地。在 0~20 m 的剖面中,农田的土壤平均含水率比林地高 4.95%,由此可以推算林地土壤贮水量在 0~20 m 的剖面至少减少了 1 454.7 mm。

(3) 影响深层土壤含水率的因素主要有植物根系和土壤质地。不同植物的根系影响范围也不相同,通过公式可以大致估算其影响深度侧柏林为 18 m,油松林为 16 m,苹果林为 19 m 左右。在 0~10 m 的范围根系相对活跃,对土壤水分影响较大。随着深度的增加,根系对水分的影响逐渐减弱,质地在一定程度上影响土壤含水率,即粘粒含量越高,土壤含水率也越高。

参 考 文 献:

- [1] 王 军,傅伯杰.黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J].地理学报,2000,55(1):84-91.
- [2] 李玉山,韩仕峰,汪正华.黄土高原土壤水分性质及其分区[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1985,2:1-17.
- [3] 李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].生态学报,1983,3(2):91-101.
- [4] 王 莉,张 强,牛西午,等.黄土高原丘陵区不同土地利用方

- 式对土壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 53-56.
- [5] 王红梅, 谢应忠, 陈来祥. 黄土高原坡地土壤水分动态特征及影响因素[J]. 宁夏农学院学报, 2004, 25(4): 62-66.
- [6] 李 娜, 魏永霞. MATLAB 和 SPSS 在对坡耕地土壤水分空间变异性研究中的应用[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(6): 109-113.
- [7] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 46-52.
- [8] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 黄土丘陵半干旱地区人工林迹地土壤水分恢复研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 77-83.
- [9] 李玉山, 黄明斌, 杨新民. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 7-13.
- [10] 刘贤赵, 黄明斌. 渭北旱塬苹果园土壤水分环境效应[J]. 果树学报, 2002, 19(2): 75-78.
- [11] 樊 军, 胡 波. 黄土高原果业发展对区域环境的影响与对策[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 355-359.
- [12] 李 军, 陈 兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同退耕还林类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [13] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50-54.
- [14] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王艳萍, 王 力, 韩 雪, 等. 黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7571-7579.
- [18] 王志强, 刘宝元, 张 岩. 不同退耕还林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.
- [19] 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: 30-114.
- [20] 王志强, 刘宝元, 刘 刚, 等. 黄土高原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): 1279-1303.
- [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, 3(1): 31-35.
- [22] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau [J]. China. Journal of Hydrology, 2001, 240(3-4), 243-263.
- [23] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors [J]. Hydrological Science Journal, 2012, 57(2): 265-281.
- [24] 王志强, 刘宝元, 路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944-1950.
- [25] 杨文治, 邵明安, 彭新德, 等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1998, 28(4): 357-365.
- [26] 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: 30-114.
- [27] 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.
- [28] 王亚莉, 李 军, 王学春, 等. 旱塬旱作苹果园水分生产力与土壤干燥化效应模拟[J]. 西北农林科技大学: 自然科学版, 2011, 39(8): 131-146.
- [29] 王 锐, 刘文兆, 李丽霞. 退耕还林类型对黄土塬区深层土壤含水率的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 127-132.

(上接第 101 页)

- [22] 赵广帅, 李发东, 李运生, 等. 长期施肥对土壤有机质积累的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 840-847.
- [23] 李 为, 余龙江, 李 涛, 等. 岩溶生态系统土壤酶活性的时空动态及其与土壤肥力的关系——以桂林丫吉村岩溶试验场为例[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 260-266.
- [24] 朱美玲, 贡 璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2678-2685.
- [25] 秦华军, 何丙辉, 赵旋池, 等. 西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3580-3586.
- [26] Khalili - Rad M, Nourbakhsh F, Jalalian A, et al. The effects of slope position on soil biological properties in an eroded toposequence [J]. Arid Land Research and Management, 2011, 25(3): 308-312.
- [27] 孔 滨, 孙 波, 郑宪清, 等. 水热条件和施肥对黑土中微生物群落代谢特征的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 100-106.
- [28] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India [J]. Applied Soil Ecology, 2006, 31(3): 220-227.
- [29] 张成霞, 南志标. 土壤微生物生物量的研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(6): 50-57.
- [30] 成 毅, 安韶山, 马云飞. 宁南山区不同坡位土壤微生物生物量和酶活性的分布特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 148-153.
- [31] 樊向阳, 齐学斌, 黄仲冬, 等. 土壤氮素运移转化机理研究现状与展望[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 254-258.
- [32] 郑 华, 欧阳志云, 方治国, 等. BIOLOG 在土壤微生物群落功能多样性研究中的应用[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 456-461.
- [33] 安韶山, 李国辉, 陈利顶. 宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5225-5234.