

晋西北黄土丘陵区人工林地土壤水分亏缺评价

刘庚, 牛俊杰, 朱炜歆, 王玲

(太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心, 山西 太原 030012)

摘要: [目的] 定量评价半干旱黄土丘陵区人工林地土壤水分亏缺现象, 为科学指导该区域合理配置植被和生态恢复建设提供理论依据。[方法] 以地处晋西北的五寨县为目标研究区域, 通过构建土壤水分亏缺定量评价模型, 对柠条林(*Caragana korshinskii*)、小叶杨林(*Populus simonii*)、油松林(*Pinus tabulaeformis*)土壤水分相对亏缺指数和样地土壤水分相对亏缺指数进行计算。[结果] 3 种人工林地均有不同程度的土壤水分相对亏缺现象, 小叶杨林和柠条林在 0—200 cm 有轻微土壤水分亏缺, 小叶杨林在 200—600 cm 深度内没有土壤水分亏缺, 柠条林在 200 cm 深度以下土壤水分亏缺值随土层深度增加而升高; 油松林在 0—200 cm 土层深度内, 土壤水分亏缺严重, 在 200 cm 深度以下土壤水分亏缺值随土层深度增加而有所降低; 3 种林地的样地土壤水分相对亏缺指数分别为 0.16, -0.12 和 0.31, 油松林的土壤水分亏缺程度高于另外 2 种林地; 3 种人工林地均有不同程度的干层分布, 以轻度 and 中度干层为主, 油松林在浅层土壤有重度土壤干层发育。[结论] 晋西北黄土丘陵区 3 种人工林地中, 油松林土壤水分亏缺最为严重。

关键词: 水分亏缺; 人工林地; 土壤水分亏缺; 黄土丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0309-06

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.057

Assessment on Soil Water Deficit Under Different Artificial Forestland in Loess Hilly Regions of Northwestern Shanxi Province

LIU Geng, NIU Junjie, ZHU Weixin, WANG Ling

(Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley,
Taiyuan Normal University, Taiyuan, Shanxi 030012, China)

Abstract: [Objective] We aimed to quantitatively assess the soil water deficit under vegetation in the semiarid loess hilly region in order to provide theoretical support for the selection of vegetation types and ecological restoration pattern. [Methods] The compared soil water deficit index(CSWDI) and plot compared soil water deficit index(PCSWDI) of *Caragana korshinskii*, *Populus simonii* Carr and *Pinus tabulaeformis* in soil profiles of 0—600 cm depth were calculated to quantify soil water deficit and its profile distribution under different vegetation types on April, May, June and July in Wuzhai County, Northwestern Shanxi Province. [Results] Soil water deficit appeared in all three artificial forestland. Soil water deficit was found in *P. simonii* and *C. korshinskii* in soil layers between 0 and 200 cm, however, it was hardly found in *P. simonii* between 200 and 600 cm. Below 200 cm, soil water deficit increased with increasing CSWDI in *C. korshinskii*. The *P. tabulaeformis* had led to a serious deep soil desiccation, especially in soil layers from 0 to 200 cm. Soil water deficit decreased in the layers below 200 cm with the increase of soil depths in *P. tabulaeformis*. PCSWDI of *C. korshinskii*, *P. simonii* and *P. tabulaeformis* was 0.16, -0.12 and 0.31, respectively. The soil water deficit of *P. tabulaeformis* was more severe than that in the others two forestland. The dried soil layer was distributed in all three artificial forestland with a different degree, mainly for mild and moderate dry layer distribution. Extreme dry layer presented in shallow soil of *P. tabulaeformis*. [Conclusion] The soil water deficit in the *P. tabulaeformis* was the severest among the three artificial forests in the loess hilly regions.

Keywords: soil water deficit; artificial forestland; soil water deficit; loess hilly region

收稿日期: 2014-03-19

修回日期: 2014-04-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“晋西北生态重建优势种林地土壤水分研究: 以沙棘和柠条为例”(41171423), “顾及污染物向异性特征的土壤有机污染物三维空间分布预测方法研究”(41401236); 山西省自然科学基金项目(2015021166)

第一作者: 刘庚(1981—), 男(汉族), 山东省微山县人, 博士, 讲师, 主要从事土壤信息技术研究。E-mail: liugeng9696@126.com。

通信作者: 牛俊杰(1968—), 男(汉族), 山西省岚县人, 博士, 教授, 主要从事自然地理与区域环境研究。E-mail: junjieniu@foxmail.com。

土壤水分是陆地植被生态系统和生物过程中的重要环境因子^[1],对半干旱黄土丘陵区的生态恢复和生态重建具有重要作用^[2-3],该区域由于自然环境和气候条件的特殊性,导致了土地干旱、土壤贫瘠、生态环境脆弱等诸多问题^[4-5]。晋西北作为黄土高原重要组成部分,生态环境同样十分脆弱,近年来通过退耕还林、人工林地建设等工程加强生态环境保护和生态恢复,但由于植被配置模式不合理等人为因素使得植被对土壤深层土壤水分过度消耗,形成土壤蒸散型干层或者蒸发型干层^[6],导致不同深度土层土壤水分出现不同程度的亏缺现象^[7-8]。已有研究表明,在半干旱黄土丘陵区人工林地土壤水分亏缺具有普遍性特征,油松、沙棘、柠条、苜蓿、侧柏、小叶杨和沙打旺等乔灌林地都出现由土壤水分亏缺导致的土壤干层发育^[9-10]。目前国内外在土壤水分亏缺评价方面从不同植被类型、立地条件、评价模型、评价指标等方面开展了相应的研究^[11-19],对于土壤水分亏缺的定性、半定量以及量化评价取得了较大的进步。对于晋西北和山西范围内不同植被浅层土壤水分的异质性、土壤水分时空变化、土壤水分利用效率以及植被需水量等方面也有相关研究^[20-22],但对于晋西北不同人工林地深层土壤水分亏缺的量化评价还鲜有报道。因此定量研究该区域不同人工林地的土壤水分亏缺对防止新的生态退化、生态重建的可持续发展具有重要意义。本研究选择地处晋西北的五寨县为研究区域,定量评估 3 种典型人工林地深层剖面土壤水分亏缺现状和程度,以期为解决该地合理配置植被模式,避免绿色荒漠等环境问题提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于晋西北的五寨县胡会乡石咀头村,海拔高度约为 1 430 m。该区常年无霜期为 110~130 d,年均气温 4.1~5.5 °C,极端最高气温 35.2 °C,最低-36.6 °C,全年 ≥ 10 °C的积温 2 452.3~2 787.5 °C,一般冻土平均初日为 11 月上旬,终日为 4 月上旬,最大冻土深度为 149 cm。全年降雨量平均为 448.4~478.3 mm,但分配极不均匀,主要集中在 7,8,9 月,占到全年降水总量的 65%,多以大雨至暴雨形式降落。该区蒸发强烈,蒸发量为降雨量的 3~4 倍,尤以春季为甚。植物群落和种类及其地理分布常随海拔高度、气候变化而发生变化,即气候是主要的影响因素,海拔在 1 500 m 以下的黄土丘陵区,代表性的植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、芦苇(*Phragmites australis*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)

等,典型的人工植被有柠条(*Caragana korshinskii*)、小叶杨(*Populus simonii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等。该县属于典型的半干旱黄土丘陵区,降水稀少、气候干旱等自然因素导致了诸多生态环境问题。

1.2 样点采集与分析

选择在该县具有代表性的柠条林地、小叶杨林地和油松林地,以多年撂荒草地为对试样地,样地均设在低缓坡地上。油松林龄为 30 a,平均树高约为 4.5 m,油松喜光、抗瘠薄、抗风,在土层深厚、排水良好的酸性、中性或钙质黄土上,-25 °C 的气温下均能生长,花期 4—5 月,球果第二年 10 月成熟。柠条林龄为 35 a,平均树高约为 2 m,柠条主根入土深,根系极为发达,萌生力很强,常形成密生树丛,具有很好的防风固沙作用,种子为红色,花期 5—6 月,果期 7 月。小叶杨林龄为 50 a,平均树高约为 9 m,小叶杨喜光,喜湿,耐瘠薄,耐干旱,也较耐寒,适应性强,山沟、河滩、平原、阶地以及短期积水地带均可生长,花期 3—5 月,果期 4—6 月。一般 3—7 和 9—12 月是土壤水分最大的失墒期,该县由于 4 月初土壤才能解冻,因此选择 2013 年 4—7 月的每月 22—26 号在野外采集土壤样品,每种植被样地选 3 个点进行重复采样,撂荒地样地样方大小为 2 m×2 m,柠条、小叶杨、油松林地的样方大小为 10 m×10 m。采用土钻取土法,从地表向下垂直每间隔 10 cm 采集 1 次样品,采样深度为 0—600 cm,将采集好的样品装入铝合内并用胶带密封。在实验室内采用烘干法进行土壤水分含量测定,在 105 °C 高温条件下,连续烘干 24 h,达到恒重后称重,依据公式计算。将样地中每层 3 次采样所测定出土壤含水量的平均值作为该层深度的土壤含水量。萎蔫系数通过离心机法测定土壤水分特征曲线获取,田间持水量在野外实地测定。

1.3 数据分析方法

对于不同植被的土壤水分亏缺定量评价,已有学者展开了相应的研究,大多采用土壤贮水亏缺度、土壤贮水亏缺量、土壤有效水分储存量、土壤水分亏缺补偿度^[11-14]、土壤有效水亏欠量、土壤干燥化指数等评价指标^[23-24]对土壤水分亏缺进行评价。为定量研究本区域不同人工林地相对于多年撂荒草地土壤剖面土壤水分的亏缺程度,本文采用土壤水分相对亏缺指数(compared soil water deficit index, CSWDI)和样地土壤水分相对亏缺指数(plot compared soil water deficit index, PCSWDI)进行分析^[25],计算模型定义如下:

$$CSWDI_i = \frac{CP_i - SM_i}{CP_i - WM} \quad (1)$$

式中:CSWDI_i——不同林地第 i 土层土壤水分相对

亏缺值; i ——采样土层序列; CP_i ——对照样地即多年撂荒草地第 i 层土壤含水量(%); SM_i ——样地第 i 层土壤含水量(%); WM ——萎蔫系数。值越大表明土壤水分亏缺越严重,若值小于 0,表示土壤水分没有亏缺。

$$PCSWDI = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{SWS_{cp_i} - SWS_i}{SWS_{cp_i} - SWS_{wm}}}{k} \quad (2)$$

式中:PCSWDI——样地土壤水分相对亏缺指数; SWS_{cp_i} ——对照样地即多年撂荒地第 i 层土壤储水量(mm); SWS_i ——样地第 i 土层土壤储水量; SWS_{wm} ——萎蔫系数对应的土壤储水量(mm); k ——样地土层的分层数。

土壤储水量计算公式为:

$$W_i = M_i \times P_i \times h \times 10 \div 100 \quad (3)$$

式中: W_i ——土壤储水量(mm); M_i ——土壤含水量(%); D_i ——土壤容重(g/cm^3); h ——土层深度(cm); i ——土层序列。样地土壤水分相对亏缺指数值越大,该样地土壤水分相对亏缺程度越高,若值小于 0,表明土壤水分没有亏缺。

数据统计分析以及计算在软件 SPSS 16.0 内完成,图形绘制在软件 OriginPro 8.0 内完成。

2 结果与分析

2.1 不同人工林地深层土壤水分含量特征

3 种人工林地与撂荒草地在 4 个月土壤剖面含水量特征如图 1 所示。

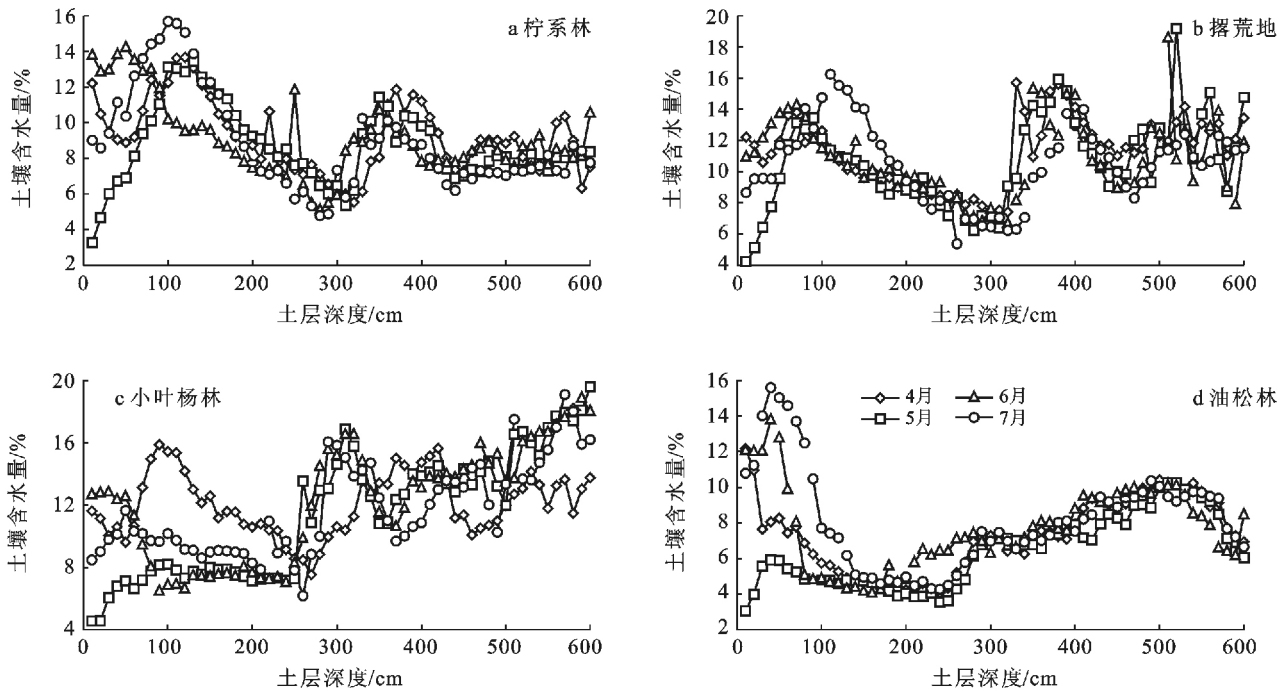


图 1 不同植被类型在不同月份中土壤水分含量

从图 1 可以看出,4 种植被在 4 个月的土壤水分含量随土层深度增加有明显的趋势特征,总体上表现出先升高后降低再升高的规律,但不同植被之间以及同种植被不同月份之间土壤含水量变化也有差异。3 种人工林地在 0—100 cm 土层深度内土壤含水量变化的差异较大,其主要原因是浅层土壤含水量大小受降水入渗、土壤物理蒸发以及植被根系吸水等因素影响较大,造成不同植被不同月份在该深度土层范围内土壤水含量变化范围较大。柠条林在 100—200 cm 土层深度内土壤含水量为降低趋势,在 200—600 cm 土层深度范围内为升高趋势,在 100—600 cm 深度范围内 4 个月份的土壤含水量大小较为接近;小叶杨林

4 月的土壤含水量与其他 3 个月份的土壤含水量差别较大,在 0—200 cm 深度范围内为降低趋势,在 200—600 cm 深度范围内为升高趋势;油松林 6,7 月在 0—100 cm 深度的土壤含水量明显高于 4 和 5 月,在 0—100 cm 深度范围内表现为升高的趋势,在 100—250 cm 深度范围内为降低趋势,在 250—600 cm 深度范围内土壤含水量又表现出升高趋势,在 100—600 cm 深度范围内,4 个月份的土壤含水量大小较为接近;撂荒地在 4 个月土壤含水量的规律以及大小也基本一致,5 月在 0—100 cm 深度内土壤含水量值稍微低于其他 3 个月,在 0—100 cm 深度范围内为升高趋势,在 100—300 cm 深度范围内为降低趋

势,在 300—600 cm 深度范围内土壤含水量又表现出升高趋势。从 4 种植被 200—600 cm 深度范围内土壤剖面含水量分布特征来看,小叶杨林和撂荒地深层土壤含水量较大,柠条林次之,油松林最小,表明柠条林和油松林的生长对深层土壤的需水量更大。

对每种植被在 4 个月份同一层的含水量进行平均作为该层的平均含水量,将平均后的土壤含水量做描述性统计分析,结果如表 1 所示。

表 1 不同植被 4 个月份平均土壤水分含量的描述性统计分析

植被类型	最小值/%	最大值/%	均值/%	中值/%	标准差/%	偏度	峰度
柠条林	5.73	13.05	9.01	8.51	1.83	0.54	-0.34
撂荒地	6.99	16.34	10.90	10.81	2.17	-0.06	-0.54
小叶杨林	7.98	17.07	11.85	11.99	2.63	0.27	-1.19
油松林	4.38	10.84	7.38	7.31	1.95	-0.10	-1.28

2.2 不同人工林地土壤剖面水分的相对亏缺评价

基于构建的人工林地土壤剖面水分相对亏缺评价模型,对 3 种人工林地相对于对对照样地的剖面土壤水分相对亏缺指数进行计算,3 种林地剖面土壤水分的相对亏缺指数分布特征如图 2 所示。从图 2 可以看出,3 种林地剖面土壤水分亏缺情况差异较大。柠条林土壤水分相对亏缺指数最大值为 0.5,最小值为 -0.32,平均值为 0.16,小叶杨林土壤水分相对亏缺指数最大值为 0.25,最小值为 -0.63,平均值为 -0.07,油松林土壤水分相对亏缺指数最大值为 0.6,最小值为 -0.06,平均值为 0.31。从土壤水分相对亏缺指数剖面分布特征来看,在 0—200 cm 深度范围内,小叶杨林和柠条林的土壤水分相对亏缺指数在 0~0.25 之间,表明在该层深度范围内土壤水分亏缺不太严重,小叶杨林在 200—600 cm 深度范围内,除个别深度剖面土层土壤水分相对亏缺指数值大于 0 外,其他值基本都小于 0,表明在该层深度范围内,小叶杨林地土壤水分未出现亏缺现象。柠条林在 200—600 cm 深度范围内,土壤水分相对亏缺指数值随土层深度增加呈增大趋势,最大值达到 0.5,表明柠条林在该土层深度范围内土壤水分有一定的亏缺。油松林在 0—150 cm 深度范围内土壤水分相对亏缺指数值随土层深度增加呈逐渐增大趋势,表明在该层深度范围内土壤水分受土壤物理蒸发以及植被蒸腾作用强烈,土壤水分有较大亏缺现象,在 150—300 cm 深度范围内土壤水分相对亏缺指数值逐渐降低,降到最小值为 -0.06,在该土层深度范围内,土壤水分亏缺程度逐渐降低,在 300—400 cm 深度范围内,土壤水分相对亏缺指数值又逐渐升高,而在 400—500 cm 深度范围内为降低,在 500—600 深度范围内又升高,总体上来

从表 1 可以看出,4 种植被的描述性统计指标最小值、最大值、均值和中值的大小分别均为:小叶杨林>撂荒地>柠条林>油松林,其中小叶杨林和撂荒地的均值和中值较为接近,油松林的最大值、最小值、均值和中值明显较低。4 种植被土壤含水量的极差分别为 7.32%,9.35%,9.09%,6.46%,撂荒地土壤含水量变化范围最大,油松土壤含水量变化范围最小。

看,油松林在 0—200 cm 深度范围内土壤水分亏缺较为严重,在 200—600 cm 深度范围内土壤水分相对亏缺指数虽有所降低,但基本上都大于 0,表明油松林在 0—600 深度内土壤水分都有亏缺的现象。油松林在浅层土壤的土壤水分相对亏缺程度高于柠条林和小叶杨林,对 300 cm 深度以下土壤,柠条林和油松林土壤水分亏缺程度较为相似,小叶杨林在该土层深度范围内土壤水分基本没有呈现亏缺现象。

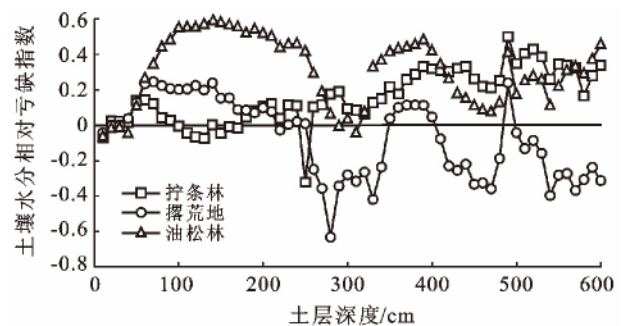


图 2 不同人工林地土壤水分相对亏缺指数

2.3 不同人工林地分层土壤的水分亏缺特征

为比较不同林地之间土壤水分亏缺状况,构建了样地土壤水分相对亏缺指数,分别计算了 3 种人工林地 0—600, 0—100, 100—200, 200—300, 300—400, 400—500, 500—600 cm 等不同分层的样地土壤水分相对亏缺指数值,计算结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,柠条林、小叶杨林和油松林的样地土壤水分相对亏缺指数值分别为 0.16, -0.12 和 0.31,油松林土壤水分亏缺程度高于柠条林和小叶杨林,小叶杨林的土壤水分亏缺程度最低。油松林在 100—200, 300—400 cm 土层范围内土壤水分亏缺较为严重,亏缺指数

值分别为 0.55 和 0.33,在其他分层范围内土壤水分亏缺值也都大于 0;柠条林在 300—400,400—500,500—600 cm 分层内土壤水分相对亏缺值分别为 0.2,0.31 和 0.33,有一定的土壤水分亏缺现象,在 0—100,100—200,200—300 cm 分层内土壤水分相对亏缺值都接近 0,表明土壤水分亏缺现象不严重;小叶杨林在 0—100,100—200 cm 分层内土壤水分相对亏缺值为 0.12 和 0.15,有轻微土壤水分亏缺现象,但在其他分层内,土壤水分相对亏缺值均小于 0,没有出现土壤水分亏缺现象。不同人工林地分层土壤以及不同样地之间的土壤水分亏缺特征表明,不同人工林地土壤水分亏缺程度不同,油松林土壤水分亏缺最严重,柠条林次之,小叶杨林土壤水分亏缺程度最轻,不同分层范围内土壤水分亏缺程度也不一致,表明在不同深度范围内土壤水分含量大小受土壤物理蒸发、降水入渗补给、植被蒸腾作用等综合因素的影响。

表 2 不同人工林地样地土壤水分相对亏缺指数

植被类型	柠条林	小叶杨林	油松林
PCSWDI	0.16	-0.12	0.31
PCSWDI ₀	0.05	0.12	0.20
PCSWDI ₁₀₀	0.00	0.15	0.55
PCSWDI ₂₀₀	0.07	-0.31	0.28
PCSWDI ₃₀₀	0.20	-0.22	0.33
PCSWDI ₄₀₀	0.31	-0.18	0.19
PCSWDI ₆₀₀	0.33	-0.31	0.29

注:PCSWDI₀—PCSWDI₆₀₀ 分别代表 0—100,100—200,200—300,300—400,400—500,500—600 cm 土层深度的 PCSWDI 值。

2.4 不同人工林地土壤相对干化特征

在半干旱黄土丘陵区,由于气候干旱,降雨量小、地下水埋藏深难以有效利用等原因,土壤水是该区域林草植被需水的最主要来源。该区域浅层土壤含水量的变化主要受外界降水入渗对深层土壤进行补给、植被蒸腾作用以及土壤物理蒸发等因素影响,深层土壤水含量消耗以及变化主要受植被根系吸水以及植被蒸腾作用因素影响。对黄土丘陵区不同人工林地深层土壤含水量来看,由降水入渗对土壤水的补给量要低于由于植被蒸腾作用的需水量,造成该地区深层土壤水分过度消耗,出现了深层土壤水分干燥化的现象,土壤干燥化到一定程度就导致土壤干层的发生。在该区域由生态恢复、退耕还林等工程种植的不同乔木、灌木人工林地均出现了土壤干燥化现象和土壤干层的发生,不同植被类型导致深层土壤的干燥化程度不同。按照已有研究结论将土壤干层分为 3 个等级:即含水量 < 6% 为重度干层,6% < 含水量 < 9% 为中度干层,9% < 含水量 < 12% 为轻度干层。4 种植被

在 4 个月份平均土壤含水量的剖面干层分布特征如图 3 所示。从图 3 可以看出,4 种植被均存在一定的土壤干燥化效应,随土层深度变化,其干燥化程度也不同。柠条林在 0—150 cm 以及 320—400 cm 深度范围内为轻度干层,在其它深度范围内基本为中度干层;撂荒地 0—320 深度范围内的干燥化特征与柠条林基本一致,320—400 cm 范围内没有发生干层现象,400—480 cm 深度范围内为轻度干层,480—600 cm 深度范围内几乎没有干层;小叶杨林在 0—600 cm 深度范围内整体干燥化现象不严重,0—250 cm 深度范围内为轻度干层,250—600 cm 深度范围内没有发生干层现象;油松林在 0—600 cm 深度范围内干燥化程度较为严重,0—50 cm 深度范围内为轻度干层,50—100 cm 深度范围内为中度干层,100—280 cm 深度范围内为重度干层,280—600 cm 深度范围内基本为中度干层。

通过对不同人工林地土壤相对干燥化特征分析可以看出,本研究区域所种植的人工乔木、灌木以及撂荒地均有不同程度的干燥化现象,且不同深度土壤剖面产生土壤干层的程度与不同的植被类型有密切关系,总体上看,小叶杨林浅层土壤有轻度临时性干层现象,而深层土壤几乎没有出现干层,撂荒地和柠条林大部分均为轻度干层和中度干层,但没有出现重度干层,油松林土壤干燥化程度最大,除部分为重度干层外,其他基本都为中度干层。

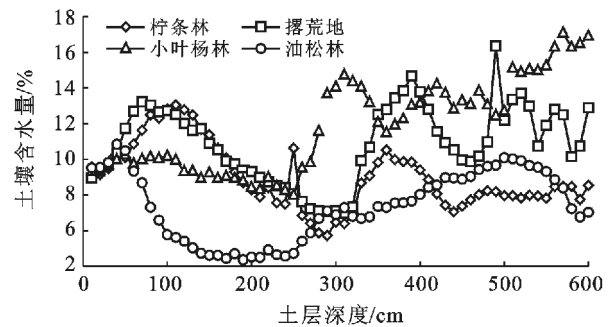


图 3 不同植被 4 个月份平均土壤水分含量的干层分布

3 结论

(1) 所研究 3 种人工林地以及对照样地多年撂荒地 4—7 月土壤含水量在浅层土壤剖面内变化较大,在深层剖面土壤含水量大小较为接近,不同植被浅层土壤含水量变化主要受外界降水入渗、土壤物理蒸发、植被蒸腾因素影响。在 0—600 cm 深度范围内含水量变化趋势总体为先升高后降低再升高,小叶杨林 4 个月平均含水量的平均值、最大值和最小值都最大,其次为撂荒地、柠条林和油松林。

(2) 3 种人工林地都具有不同程度的土壤水分亏缺现象,油松林样地土壤水分相对亏缺指数值最大,其次为柠条林和小叶杨林。油松林在 0—200 cm 范围内土壤水分亏缺严重,在 200—400 cm 范围内亏缺程度有所降低,柠条林和小叶杨林在 0—200 cm 范围内有土壤水分轻微亏缺现象,小叶杨林在 200—600 cm 基本没有出现土壤水分亏缺现象,柠条林在 200—600 cm 范围内土壤水分亏缺比浅层土壤严重。

(3) 小叶杨林和多年撂荒草地在浅层土壤有临时性轻度干层分布,深层土壤干层现象不明显,柠条林深层土壤有中度干层分布,油松林土壤干层现象较为严重,0—300 cm 深度范围属于中度和重度干层,300—600 cm 深度范围基本为中度干层,应通过有效的水保措施补充土壤水分。

[参 考 文 献]

- [1] Legates D R, Mahmood R, Levina D, et al. Soil Moisture: A central and unifying theme in physical geography [J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(1): 65-86.
- [2] Chen Hongsong, Shao Ming'an, Li Yuyuan. Soil Desiccation in the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2008, 143(1): 91-100.
- [3] 费喜亮, 张新民, 景凌云, 等. 半干旱黄土区土壤水分垂直分布规律的研究: 以甘肃省兰州市孙家岔流域为例 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 652-656.
- [4] 卫伟, 温智, 陈利顶, 等. 半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应 [J]. *环境科学*, 2012, 33(11): 3901-3904.
- [5] Chen Liding, Wei Wei, Fu Bojie, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective [J]. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31(4): 389-403.
- [6] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 45-49.
- [7] Wang Yunqiang, Shao Mingan, Shao Hongbo. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1/2): 9-17.
- [8] Liu Wenzhao, Zhang Xingchang, Dang Tinghui, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China [J]. *Agriculture Water Management*, 2010, 97(8): 1133-1138.
- [9] 李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4): 515-519.
- [10] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 等. 基于 TVDI 的黄土高原地表干燥度与土地利用的关系研究 [J]. *地理研究*, 2006, 25(5): 913-916.
- [11] 段争虎, 肖洪浪, 宋耀选. 黄土高原西部兰州市郊人工林地水分亏缺与调控研究 [J]. *中国沙漠*, 2006, 26(4): 527-531.
- [12] 肖列, 薛蕙, 刘国彬. 黄土丘陵区梯田果园土壤水分特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 964-971.
- [13] 雷泽勇, 刘心玲, 周凯, 等. 辽西北沙地人工林植物水分亏缺与恢复研究 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 86-90.
- [14] 王延平, 邵明安, 张兴昌. 陕北黄土区陡坡地人工植被的土壤水分生态环境 [J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3769-3778.
- [15] Rallo G, Provenzano G. Modelling eco-physiological response of table olive trees (*Olea europaea* L.) to soil water deficit conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2013(120): 79-88.
- [16] Li Yan, Cohen Y, Wallach R, et al. On quantifying soil water deficit of a partially wetted root zone by the response of canopy or leaf conductance [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65(1): 21-38.
- [17] Michelot A, Bréda N, Damesin C, et al. Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265(3): 161-171.
- [18] Liang Zongsuo, Yang Jianwei, Shao Hongbo, et al. Investigation on water consumption characteristics and water use efficiency of poplar under soil water deficits on the Loess Plateau [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2006, 53(1): 23-28.
- [19] Mengistu D K. The influence of soil water deficit imposed during various developmental phases on physiological processes of tef (*Eragrostis tef*) [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 132(3/4): 283-289.
- [20] 孙中峰, 张学培, 张晓明, 等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(2): 81-86.
- [21] 贾志清. 晋西北黄土丘陵沟壑区典型灌草植被土壤水分动态变化规律研究 [J]. *水土保持通报*, 2006, 26(1): 10-15.
- [22] 侯振宏, 贺康宁, 张小全. 晋西黄土高原半干旱区刺槐林分需水量的研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 180-183.
- [23] 段建军, 王小利, 张彩霞, 等. 黄土高原土壤干层评定指标的改进及分级标准 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 151-154.
- [24] 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.
- [25] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺 [J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 3060-3068.