

陇东黄土高原中沟小流域不同植被措施 土壤水分差异分析

张立俞¹, 邸利¹, 任艺彬², 黄海霞³, 倪帆¹,
吴贤忠⁴, 王安民⁵, 汝海丽⁵, 刘俊俊⁶

(1.甘肃农业大学 资源与环境学院, 兰州 730070; 2.陇东学院 农林科技学院,
甘肃 庆阳 745000; 3.甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 4.兰州市城市学院, 兰州 730070;
5.平凉市水土保持科学研究所, 甘肃 平凉 744000; 6.泾川县自然资源局, 甘肃 泾川 744300)

摘要:为了分析林草地土壤水分含量随土壤剖面深度和时间的变化及林分密度对土壤含水量的影响,以陇东黄土高原中沟小流域林地和草地以及不同林分密度的刺槐林地为研究对象,从 2018 年 4 月—10 月,对 0—120 cm 土层的土壤含水量进行了测定。结果表明:(1)在近地表(0—60 cm),不同密度的林地和不同地形部位的林草地多为随土层深度的增加土壤含水量下降,表层土壤含水量变异系数大于深层,并在 0—60 cm 范围内变幅最大。(2)不同林分密度刺槐林土壤水分含量随时间和土层深度的变化趋势基本一致:低密度林分>中密度林分>高密度林分;但中、低密度刺槐林土壤水分在 0—60 cm 范围内差异很小,并在 7—8 月份 2 个密度等级林地的含水量非常接近,建议该区域造林密度选择 2 000~4 000 株/hm²的中密度。(3)不同地貌部位林地和草地土壤含水量随着土层深度的变化不一,塬面表现为林地>草地,梁坡表现为 0—40 cm 土壤范围内林地>草地,40 cm 以下二者差异很小,草地略高于林地;沟台表现为 0—20 cm 土壤范围内林地>草地,20 cm 以下草地>林地。故陇东黄土高原塬面与梁坡适宜种树,沟台则适合种草。

关键词:土壤水分; 林分密度; 林地; 草地; 陇东黄土高原

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0159-06

Difference in Soil Water in Zhonggou Small Watershed with Different Vegetation Measures in Loess Plateau of East Gansu

ZHANG Liyu¹, DI Li¹, REN Yibin², HUANG Haixia³, NI Fan¹,
WU Xianzhong⁴, WANG Anmin⁵, RU Haili⁵, LIU Junjun⁶

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University,
Lanzhou 730070, China; 2.College of Agriculture & Forestry, Longdong University, Qingyang,
Gansu 745000, China; 3.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
4.Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 5.Pingliang Water and Soil Conservation Science Institute,
Pingliang, Gansu 744000, China; 6.Jingchuan County Natural Resources Bureau, Jingchuan, Gansu 744300, China)

Abstract: Taking the forestland and grassland in the Zhonggou small watershed in the Loess Plateau of east Gansu and the *Robinia pseudoacacia* forest land with different stand densities as the research objects, the soil water content of the 0—120 cm soil layer was measured from April to October 2018 to analyze the change of soil moisture content with soil profile depth and time and the effect of forest density on soil moisture content. The results showed that: (1) the soil water content all decreased with the increase of the soil depth in forestland with different densities and the forest and grassland at different topography position, and the coefficient of variation of soil water content in the surface was greater than that in the deep layer, with the lar-

收稿日期:2020-08-11

修回日期:2020-09-04

资助项目:国家自然科学基金地区项目“陇东黄土丘陵沟壑区典型小流域刺槐林分结构及其水文效应的时空变化”(31660235);甘肃农业大学大学生创新创业训练项目(202010052)

第一作者:张立俞(1998—),女,甘肃酒泉人,本科,研究方向为生态学。E-mail:1397437506@qq.com

通信作者:邸利(1961—),女,河北保定人,学士,教授,主要从事森林生态研究。E-mail:dili@gsau.edu.cn

任艺彬(1989—),男,甘肃庆阳人,学士,讲师,主要从事生态学研究。E-mail:171344121@qq.com

gest variation in the layer of 0—60 cm and the active layer of soil moisture became shallow; (2) the change trend of soil moisture content of *Robinia pseudoacacia* forests with different densities over time and soil depth was basically the same; the soil moisture decreased in the order: low-density stands > medium-density stands > high-density stands, the soil moisture difference in the layer 0—60 cm between the medium and low density level was very small, and the water content of stands at the two density grades in July and August was very close; it is recommended to choose planting density at 2 000~4 000 plants/hm² in this area; (3) the water content of the forest and grassland at different landforms varied with soil depth, it was higher in woodland than grassland at tableland surface; in ridge slope, it was higher in forestland than grassland within 0—40 cm soil layer, while the difference between the two below 40 cm was very small, soil moisture in grassland was slightly higher than the forest land, it was higher in woodland than grassland within 0—20 cm soil layer in gully platform, while it was higher in grassland woodland below 20 cm. Therefore, the tableland surface and ridge slope in the Loess Plateau of east Gansu are suitable for planting trees, and gully platform is suitable for planting grass.

Keywords: soil moisture; stand density; forestland; grassland; Loess Plateau of east Gansu

在黄土高原区国家先后启动了天然林保护、退耕还林(草)与“三北”防护林建设等一系列林业重点生态工程,其主要目的是恢复这一地区的生态植被;植被措施(植树种草等)和农业耕作措施与工程措施被认为是水土保持三大措施^[1],措施的实施会影响土壤水分的动态过程和静态分布^[2];反之,土壤水分的分布和动态发生变化,也会影响水土保持措施的实施及其效益^[3]。目前有关水土保持措施对土壤水分的影响研究已有很多,不同林分密度的对比及林、草地的对比研究均有,但未见细化到不同地形部位林草地土壤水分的研究,也未见有关陇东黄土高原人工刺槐林土壤水分的系统研究。

在自然状态下,土壤水分在气候、土壤、地形及植被的共同作用下表现出极大的时空异质性及很强的尺度效应^[4-5]。不同的地表形态水分的静态分布和动态过程不同,从而引起土壤含水率的变化^[6]。在土壤垂直剖面上,不同植被类型土壤含水量受外界环境(气温、降水、土壤蒸发)与植被生长(植被蒸腾、植被根系吸收)的共同影响,表现出不同的变化特征^[7]。近年来关于黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分的效应、动态变化、影响等方面的问题,国内已进行了广泛研究^[8]。有研究表明,在大尺度上土壤含水量的空间异质性主要受降水等大气属性的影响;在小尺度范围地形、植被、土地利用类型、土壤理化性质、有机质含量等是土壤含水量的主要控制因素^[9-11]。土壤水分在多因子的影响下具有极大的时空异质性,气候(温度、降雨等)、地形(坡向、坡度、坡位等)、土地利用、植被等对土壤水分的时空异质性皆有重要影响^[12-13]。杨海军等^[14]研究了晋西黄土残塬沟壑区水土保持林地的水量平衡后认为:大气垂直降水量是黄

土区水土保持林地的唯一水分输入量;刺槐、油松等乔木林的蒸散量超过同期降水量,易于发生土壤干旱;造林密度过大是造成林地蒸散量大的直接原因。杨新民等^[15]研究了陕北黄土丘陵沟壑区刺槐林地的水量平衡,认为该区的林冠截留量、径流量和蒸散量之和已等于大气降水量,大气降水没有多余的水量可补给林下土壤来储存,土壤水分经常处于亏缺状态。马玉玺等^[16]研究了丘Ⅱ区刺槐林的材积生长与水分生态条件的关系,表明当年的降水没有或仅有少量得到利用;刺槐由于蒸散量大,生产力过高,恶化了土壤水分环境,加剧了土壤的干燥,而不利于刺槐林后期的生长。

陇东黄土高原属典型的黄土沟壑区,在流域尺度,地形是影响土壤水分空间异质性的的重要因素^[17-20]。鉴于前人的研究成果,本文以陇东黄土丘陵沟壑区的中沟小流域不同植被措施(高、中、低密度人工刺槐林与次生草地)的土壤水分观测为基础,综合考虑不同土地利用方式(林地、草地)土壤水分特征及大面积退耕还林(尤其是人工纯林)的林分密度这一植被治理措施下的土壤水分差异。力争明确不同地貌部位适宜种植的植被类型与种植密度,为该区域植被措施的合理布局与配置提供土壤水分依据。

1 研究区概况

试验区就设在位于陇东黄土高原泾川县官山林场中沟小流域(107°31'E, 35°20'N)内,该小流域面积 2.09 km²,海拔 1 072~1 351 m,年日照时数 2 315.4 h,年平均气温 10℃,无霜期 174 d,降雨量年度变化较大且年内分布不均匀,全年降水主要集中于 7—9 月份,年平均降雨 555 mm,年蒸发量 1 181.6 mm,干燥度 0.95~1.28;土层深厚,日照充足,但地形破碎,有塬面、梁坡、沟台和

沟谷。因地处森林草原过渡带,植被覆盖率低,现有林地均是近40 a来人工营造,草地为林间撂荒草地,主要树种为刺槐(*Robinia pseudoacacia*),占整个林分面积的92%。其他造林树种有杨树(*Populus tremula*)、旱柳(*Salix matsudana*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)、侧柏(*Biota orientalis*)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)等。林下草本植物主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* linn.)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria faberii*)、多花胡枝子(*Lespedeza fioribunda*)等。

表1 样地信息

样地编号	植被类型	恢复年限/a	经纬度	地貌部位	密度/(株·hm ⁻²)	覆盖度/%
1	刺槐林	40	35°20'24.4"N,107°31'4.6"E	梁坡	4563	
2	刺槐林	35	35°20'31.9"N,107°31'10.4"E	塬面	2196	
3	刺槐林	30	35°20'41.4"N,107°31'11.5"E	塬面	750	
4	刺槐林	30	35°19'48.8"N,107°31'11.5"E	塬面	1600	
5	刺槐林	25	35°20'44.8"N,107°30'55.2"E	沟台	5400	
6	刺槐林	40	35°20'22.3"N,107°31'6.9"E	梁坡	3780	
7	刺槐林	30	35°21'2.2"N,107°31'11.5"E	塬面	1227	
8	刺槐林	30	35°20'56.4"N,107°31'34.8"E	塬面	1625	
9	刺槐林	30	35°20'50.8"N,107°31'31.6"E	塬面	1000	
10	刺槐林	25	35°20'41.8"N,107°31'12.5"E	梁坡	1678	
11	草地	40	35°20'42"N,107°31'8.5"E	塬面		95
12	草地	40	35°20'44.6 N,107°31'2.1"E	梁坡		93
13	草地	40	35°20'43.7"N,107°30'53.5"E	沟台		96

测定的土层深度为0—120 cm,按照0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm,100—120 cm分层,每层取3个重复,即在无人扰动自然状态下,随机选取样地上、中、下3个采样点。在105~108℃下烘烤8 h至恒重,测定各土壤样品的含水量,每层土壤含水量取其算数平均值。
土壤质量含水率=(湿土质量-烘干土质量)/烘干土质量×100% (1)

2.2 数据处理与分析

所有数据采用 Excel 2010 进行分析,使用 Origin 2019 软件绘制图形,采用 SPSS 9.1 进行单因素方差分析,以此来研究不同水土治理方式和不同林分密度刺槐林地土壤水分含量的差异。

3 结果与分析

3.1 不同林分密度刺槐林地土壤含水量随土层深度与时间的变化

3.1.1 不同林分密度刺槐林地土壤水分随土层深度的变化 从土壤平均含水量在土壤垂直剖面上的变化

2 研究方法

2.1 样地设置与采样

试验于2018年4—10月在泾川县官山林场进行。依据前期林分结构调查的结果,将研究区内10个林地样地(表1)划分为高(≥4 000株/hm²)、中(2 000~4 000株/hm²)、低(1 000~2 000株/hm²)3个密度等级;同时在流域内主要的地表形态(塬面、梁坡、沟台)上选择林地(4个)与草地(3个)样地,采用传统的土钻采样法对土壤进行分层采样,以测定土壤的含水率。

曲线(图1)可以看出,高、中、低3个密度等级的人工刺槐林地土壤水分的变化趋势基本一致,均为在近地表(0—60 cm)随土层深度增加而减少(其中在0—40 cm土层范围内是迅速减少,40—60 cm减少的幅度有所放缓),60 cm处出现拐点之后,3个密度林地的土壤含水量随深度的变化趋于缓和(中密度林地几乎不变,而低密度和高密度略有增加);同时,在近地表(0—60 cm)中、低密度刺槐林土壤水分差异最小,但明显高于高密度刺槐林,大约高出3.50%;土壤含水量最大值出现在近地表0—15 cm的中密度林地(20.76%)。

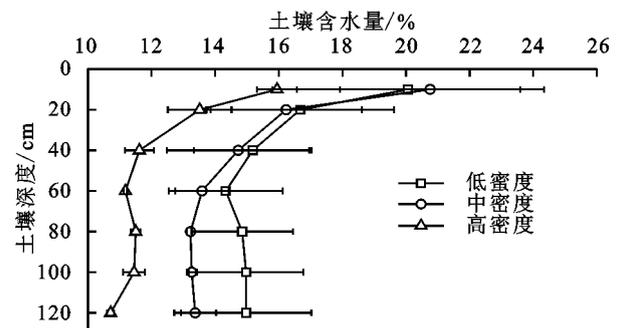


图1 不同林分密度刺槐林地土壤含水量随土层深度的变化

3.1.2 不同林分密度土壤水分含量季节性变化 由图 2 可以看出,随着时间的变化,高、中、低林分密度土壤水分含量变化趋势基本一致,呈现出几乎对称的变化状态(4—6 月缓慢下降,6—7 月快速上升,7—8 月迅速下降,8—10 月缓慢上升),且 6—8 月变化幅度大,而 4—6 月和 8—10 月变化较为和缓;3 个密度等级中高密度林地土壤水分含量的变化幅度最大(7.31%),并在 8 月份后仍然在缓慢下降(其他 2 个密度的林地这一时期土壤水分含量是略有所上升的);低、中密度林地的土壤水分含量在 7—8 月非常接近。详细分析中密度等级的人工刺槐林土壤水分含量随着时间的变化还可以看出:中密度刺槐林地在生长季(4—6 月)土壤含水量的下降幅度高于低密度与高密度。

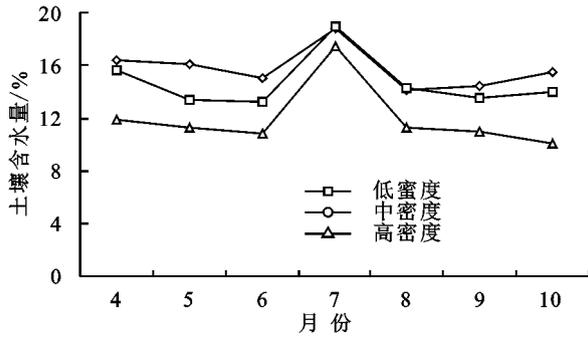


图 2 不同林分密度刺槐林地土壤水分含量随时间的变化

3.2 草地和林地的土壤水分垂直分布差异

考虑到地表形态对土壤水分的影响,研究分别选取了塬面、梁坡与沟谷 3 种地形部位的刺槐林地与草地进行比较。

3.2.1 塬面林地和草地土壤含水量随土壤剖面深度的变化 由图 3A 可以看出,塬面林草地土壤含水量随土层深度的变化趋势非常相似,均为随着土层深度的增加而减小;但林地土壤含水量明显要大于草地,其变化幅度也大,在 0—40 cm 范围内呈现锐减状态,40 cm 处出现拐点,从大于 20% 一直下降到 13% 左右,减少了近 8%,之后略有增加便基本保持稳定;而草地土壤含水量远远低于林地,大约低 10.57%,在 0—10 cm 的浅表层土壤含水量大于 6%,80 cm 处最低,在 3% 左右,并草地土壤含水量随土层深度的变化幅度明显小于林地,在 0—40 cm 范围内是缓慢减少的,之后变幅更小。

3.2.2 梁坡林地和草地土壤含水量随土壤剖面深度的变化 从图 3B 可以看出,梁坡上林地与草地土壤含水量的变化在表层是相反的;在 0—40 cm 范围内林地土壤水分含量一直在下降,到 40 cm 下降到最低点;而草地 0—40 cm 范围内是随着土层深度的增

加而逐渐增加的;40 cm 以下林地与草地土壤含水量的变化都趋于和缓;梁坡林地和草地深层土壤水分的含量是最为接近的。

3.2.3 沟台林地和草地土壤含水量随土壤剖面深度的变化 由图 3C 可得,沟台地林草在 0—20 cm 深度范围内变化趋势一致,均随着土层深度的增加而下降;但林地是一直下降,直到 60 cm 埋深处才降到最低点,而草地在 20 cm 左右转为升高,即林地与草地土壤水分随着土层深度的增加逐渐下降的态势只是在表层,20 cm 以下随着土层深度的增加,林草的变化趋势相反,在 20—60 cm 范围内,草地是逐渐增加的,而林地是继续下降;60 cm 以下随着土层深度的增加林地与草地土壤水分变化不再明显;沟台地林地土壤水分随着土层深度变化的总趋势最明显,基本上一直为减少状态。

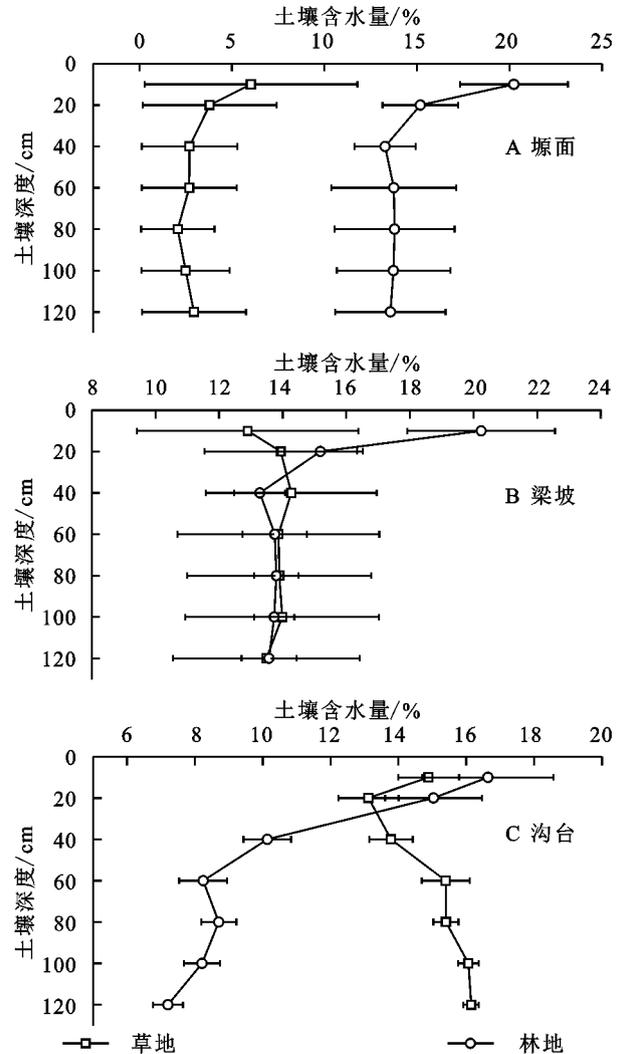


图 3 不同地形沟台林地和草地月平均含水量随土层深度的变化

3.3 林地和草地土壤水分的季节变化特征

由图 4 可知,林地和草地土壤含水量具有明显的

季节变化规律,变化趋势基本一致,从4月到10月整个生长季内大致表现为:缓降—急升—速降—缓升,整个地貌部位大体呈现出同一规律的动态变化(4—6月土壤水分含量缓慢降低,6—7月土壤水分含量直线迅速上升,7—8月土壤水分含量迅速下降,9—10月份土壤含水量缓慢下降),6—8月有较大变幅,7月份达到最大值并在不同地貌部位,土壤水分含量多为林地高于草地。

3.4 不同植被类型土壤水分随土层深度剖面的差异性

分析表2可知,不同地貌部位林地的变异系数均大于草地。综合分析表明:在0—60 cm范围内随着土层深度的增加,在不同地形部位(塬面、梁坡和沟台),林地的土壤含水量均呈现下降趋势,而草地变化没有林地明显。对0—20 cm土壤平均含水量进行分析显示:塬面林地土壤含水量比草地土壤高,沟台的差异较小,梁坡差异较大;在40—120 cm土层深度范围,塬面林地土壤含水量远远大于草地的土壤含水量,梁坡林地和草地的土壤含水量非常接近,沟台草地土壤含水量远高于沟台林地。不同密度人工刺槐林土壤含水量在不同埋深多表现为:低密度林分>中密度林分>高密度林分,但近地表(0—60 cm)中、低密度刺槐林土壤水分差异很小,并明显高于高密度刺槐林;同时生长季开始高、中、低密度刺槐林土壤水曲线呈现缓降—急升—速降—缓升的变化;3个密度等级在夏季(6—8月)最为接近,6—7月土壤含水量快速上升,7月达到峰值,之后迅速下降,并7—8月中密度和低密度刺槐林的土壤含水量几乎一致,曲线基本重合。

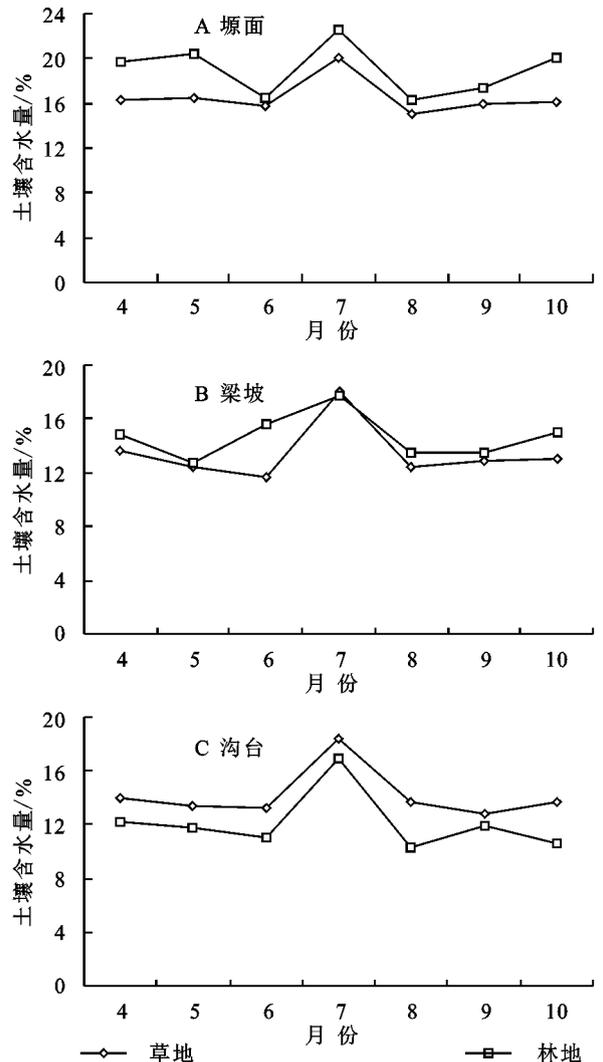


图4 不同地形林地和草地0—120 m平均土壤含水量季节性变化规律

表2 不同植被类型土壤水分随土层深度剖面的差异

土层深度/cm	塬面草地	塬面林地	梁坡草地	梁坡林地	沟台草地	沟台林地
0—10	15.43±0.50c	23.39±0.35d	12.90±0.11d	16.57±1.44a	14.11±0.29c	15.30±1.89a
10—20	15.52±0.49c	20.49±0.68b	13.93±0.11b	12.51±0.47b	13.20±0.18d	8.72±3.02b
20—40	15.58±0.14c	18.36±0.79cd	14.46±0.38a	11.17±0.09bc	13.55±0.10d	9.49±0.22b
40—60	16.96±0.51b	17.37±0.38a	13.87±0.08bc	11.24±0.01bc	14.54±0.15b	7.86±1.22b
60—80	17.39±0.30ab	17.54±0.28d	13.89±0.05b	11.65±0.05bc	14.70±0.13ab	8.64±0.09b
80—100	18.32±0.42a	18.70±0.54cd	13.98±0.10b	11.79±0.01bc	15.03±0.08a	9.80±0.26b
100—120	18.59±1.04a	18.85±0.66cd	13.49±0.18c	10.82±0.11c	14.89±0.19ab	9.68±0.14b
变异系数(Cv)	8.10	10.52	3.49	15.69	4.66	27.14

注:表中同一列字母不同时,表示同一类型土层深度之间土壤含水量差异显著($p < 0.05$),含有相同字母,则表示差异不显著($p > 0.05$)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

总的来看,不同林分密度与不同植被类型样地土壤水分含量均表现为随土层深度的增加先降低后上升,并随着土层深度的增加上层土壤水分含量的波动程度大于下层。这王迪海^[21-22]、李剑^[23]、胡小宁^[24]等前期在这一地区的研究结果相一致,但他们的观测

发现,土壤含水量是从100 cm开始随土层深度的增加缓慢增大,而我们的研究则显示:近地表0—60 cm土壤水分波动较大,在60 cm附近有明显的拐点,这一变化趋势在不同密度林地、梁坡与沟台林草地土壤水分垂直变化中均表现明显;由此表明:从2007—2018年10a的时间陇东黄土高原土壤水分速变层($C_v > 0.3$)变浅,土壤水分受外界条件的影响程度逐渐减轻,结合气象条件可深入分析这一地区经过40余年的植被恢复土壤水

分条件的变化。土壤水分含量随土层剖面深度的增加呈先降低后上升的变化趋势也与孔凌霄^[25]、安文明^[26]、张瑞^[27]、易彩琼^[28]、祝倩^[29]等的研究结果相一致,表明半干旱地区雨季土壤水分向深层入渗的滞后性,使表层土壤水分含量大于深层。

虽然不同密度刺槐林,无论随着土层深度的增加还是随着时间的变化,土壤含水量表现为:低密度林分>中密度林分>高密度林分,但也并非林分密度越低土壤含水量越高,鉴于在近地表(0—60 cm)中、低密度刺槐林土壤水分差异很小、土壤含水量最大值出现在近地表 0—15 cm 的中密度林地及低、中密度林地的土壤水分含量在 7—8 月非常接近等现象,我们认为中密度等级人工刺槐林生态耗水在近地表与夏季 7—8 月接近甚至低于低密度林地,从生态效益的角度来看在陇东黄土高原更适宜中密度林的种植;今后在区域植被建设和土地利用结构优化中,要充分考虑植被类型和地形的交互作用,开展混交林的研究,选择出适宜种植的混交林及其种植密度;同时完善土壤侵蚀观测,细化密度等级,以找出不同地形条件下更加适宜的种植密度;并关注中密度刺槐林地在 4—6 月土壤含水量的下降幅度高于低密度与高密度的事实,加强春季用水管理。

4.2 结论

(1) 在近地表(0—60 cm)处,无论是不同密度的林地,还是不同地表形态的林地与草地土壤含水量随土层深度的增加而降低,并且表层土壤含水量变异系数大于深层,0—60 cm 土壤水分变异系数呈快速减小的趋势,土壤水分波动较大,变化较剧烈,而在 60 cm 土层以下土壤水分趋于稳定。

(2) 不同密度刺槐林,无论随着土壤剖面的各个深度还是不同时段,土壤含水量多表现为:低密度林分>中密度林分>高密度林分;但中、低密度刺槐林土壤水分在近地表(0—60 cm)差异很小,并且 7—8 月份这 2 个密度等级林地的含水量非常接近。从生态效应的角度,我们认为陇东黄土高原区林地种植密度在 2 000~4 000 株/hm² 为宜。

(3) 不同地貌类型林地和草地土壤含水量随着土层深度的变化不一,塬面:林地>草地;梁坡:0—40 cm 土壤范围内林地>草地,40 cm 以下林地与草地土壤含水量基本保持在一个稳定状态,二者差异很小,草地略高于林地;沟台:0—20 cm 土壤范围内林地>草地,20 cm 以下草地>林地;塬面土层深厚林地较草地具有较强的涵养水源的作用而更为适宜种植,梁坡在表层林地含水量大于草地,40 cm 以下两者差异很小,以及梁坡地 5 月份土壤水分回升快,因

此适宜种植林木,沟台则种草优于种树。

参考文献:

- [1] 黄奕龙,傅伯杰,陈利顶.黄土高原水土保持建设的环境效应[J].水土保持学报,2003,17(1):29-32.
- [2] 潘佳祺.不同水土保持措施对地下水的动态影响研究[J].水土保持应用技术,2019(4):1-4.
- [3] 穆兴民,陈霖伟.黄土高原水土保持措施对土壤水分的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):39-44.
- [4] Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M, Albaladejo J, et al. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2001,253(1/4):211-226.
- [5] van Meerveld I T, McDonnell J J. Comment to "Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes, *Journal of Hydrology* 286: 113—134" [J]. *Journal of Hydrology*, 2005,303(1/4): 307-312.
- [6] 陈宝群.陕北黄土高原土壤水环境变化与植被建设[D].西安:陕西师范大学,2007.
- [7] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [8] 索立柱,黄明斌,段良霞,等.黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素[J].生态学报,2017,37(6):2045-2053.
- [9] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1/4): 259-281.
- [10] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D9):11865-11877.
- [11] Vinnikov K Y, Robock A, Qiu S, et al. Optimal design of surface networks for observation of soil moisture [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D16):19743-19749.
- [12] Yao X, Fu B, Lü Y, et al. The multi-scale spatial variance of soil moisture in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012,12(5):694-703.
- [13] 邱扬,傅伯杰,王军,等.土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J].生态学杂志,2007,26(1):100-107.
- [14] 杨海军,孙立达,余新晓.晋西黄土区水土保持林水量平衡的研究[J].北京林业大学学报,1993,34(3):42-50.
- [15] 杨新民,杨文治.黄土丘陵区人工林地土壤水分平衡初探[J].林业科学,1989,25(6):549-553.
- [16] 马玉玺,杨文治,杨新民.陕北黄土丘陵沟壑区刺槐林水分生态条件及生产力研究[J].水土保持通报,1990, 10(6):71-77.