

多年生人工柠条林生长对土壤水分的影响

王松伟¹, 郭忠升^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:研究多年生人工柠条林地生长对土壤水分的影响,对水资源紧缺的黄土丘陵区植被重建和生态建设具有重要的意义。以多年生的柠条林为对象,采用中子水分仪对黄土丘陵半干旱区(宁夏固原)多年生的柠条林地及撂荒地土壤水分进行长期定位观测与分析,研究了多年生人工柠条林生长对土壤水分的影响。结果表明:柠条林地和撂荒地各深层土壤容积含水量分别为 4.18%~14.67%和 2.87%~15.01%,柠条林地各个深度土层的土壤容积含水量普遍低于撂荒地同等深度土层土壤容积含水量。多年生的人工柠条林地同撂荒地二者的土壤容积含水量变异系数区间分别是 3.27%~31.12%和 7.39%~34.63%,都随土层深度增加而逐渐减小,是该区域土壤容积含水量变异系数所具有的共性。多年生的人工柠条林对 200 cm 以下深层土壤水分的消耗影响深远。

关键词:土壤容积含水量; 变异系数; 土壤水分

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0070-06

Effects of Perennial *Caragana korshinskii* Kom on Soil Moisture

WANG Songwei¹, GUO Zhongsheng^{1,2}

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

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

Abstract: It is of great significance to study the effects of planted *Caragana korshinskii* Kom soil moisture in loess hilly area with scarce water resources. The perennial *Caragana korshinskii* Kom land was selected as the study site. The long-term localization observation on soil moisture in perennial *Caragana korshinskii* Kom land and abandoned land was carried out by using a neutron moisture meter in the semi-arid area of the Loess Plateau (Guyuan of Ningxia) in order to analyze the effects of the planted perennial *Caragana korshinskii* Kom on soil moisture. The volumetric water contents of layers in deep soil in *Caragana korshinskii* Kom land and abandoned land ranged between 4.18 % and 14.67 %, and between 2.87%~15.01%, respectively. The soil volumetric water content of each deep soil layer in *Caragana korshinskii* Kom land was generally lower than that of the same depth soil in the abandoned land. The variation coefficients of soil volume water contents in the perennial *Caragana korshinskii* Kom land and abandoned land were 3.27%~31.12%, and 7.39%~34.63%, respectively. The variation coefficients of soil volume water contents in this area gradually decreased with the increase of soil depth. The perennial *Caragana korshinskii* Kom has the profound impact on the consumption of soil moisture in the depth below 200 cm.

Keywords: soil volumetric moisture content; variance coefficient; soil water

干旱、半干旱的黄土丘陵区水资源匮乏,植被覆盖率低,且水土流失灾害严重、生态环境脆弱,是黄土高原建设和恢复植被的关键地区^[1]。恢复和重建植被,并使其达到一定的标准,是进行水土保持、修复退

化生态系统的基础^[2]。该区域内仅靠降水补充的土壤水分是植物生长的主要水分来源,土壤水分很大程度上限制着植物的生长和生存^[2-3]。同时,降水和植物的生长共同影响着土壤水分的变化,特别是恢复多

收稿日期:2019-06-22

修回日期:2019-07-21

资助项目:国家自然科学基金“黄土丘陵半干旱区人工柠条林地土壤水分承载力研究”(41071193);国家自然科学基金“黄土丘陵半干旱区人工林草地土壤水资源利用限度”(41271539)

第一作者:王松伟(1995—),男,陕西延安人,硕士研究生,主要研究方向为水土保持林草与生态环境。E-mail: Tonystarkwang@126.com

通信作者:郭忠升(1963—),男,陕西富平人,博士,副研究员,研究方向为森林生态和经营、生态学。E-mail: guozs@ms.iswc.ac.cn

年的成年人工柠条林,长期消耗土壤水分,甚至影响着深层土壤水分使其不能得以补充,造成土壤水分出现亏空“断层”,进而造成土壤退化,将会对植物的生长发育产生影响,最终导致部分植物个体死亡,群落衰败以及生态系统的退化^[4]。

目前对土壤水分的研究,主要从土壤水分随时间、垂直空间变化两方面进行,根据土地利用方式、林分密度、植被类型和地形等不同对土壤水分的影响进行了深入的研究。孙雅楠等^[5]对岚县地区杨树、杏树、玉米和土豆4种不同植被0—300 cm深度的土壤水分进行分析,得出4种不同种类植物变异系数都随土层深度的增加而减小,不同植被的土壤含水量变化不同。孔凌霄等^[6]对晋西黄土区蔡家川流域4块不同坡向(阴、阳坡)、不同密度刺槐样地0—200 cm深度的土壤水分进行分析,得出坡向和密度对土壤水分具有显著性影响,土壤水分随着土层深度的增加先增加后减小最后趋于稳定。王舒等^[7]对晋西黄土丘陵沟壑区不同林龄(10 a, 15 a, 20 a)的人工刺槐林地0—400 cm土层土壤水分分布进行分析,得出随着林龄的增加土壤水分随坡位下降而增大的趋势有所改变,成熟的刺槐林对坡面土壤水分空间分配有明显调节作用。但是对已经恢复的多年生成年人工林地土壤水分变化规律的研究较少,且多数只是对较浅层土壤剖面水分进行研究,难以反映多年生人工林根系对土壤水分的影响情况。

本研究以多年生成年人工柠条林为研究对象,对0—740 cm土层土壤水分进行观测和分析,研究多年生人工林地土壤水分时空变化特征以及多年生柠条林生长对不同深度土壤水分的影响,为水土保持林长期经营和土壤水资源的可持续利用提供科学依据和理论指导。

1 研究区概况及方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏南部半干旱区的固原生态试验站,属于典型的黄土丘陵区(北纬35°59′—36°02′,东经106°26′—106°30′)。区域内沟沿线以上坡度为10°~25°,海拔高度为1 534~1 824 m,土壤侵蚀严重,侵蚀模数为1 000~8 000 t/km²。年均气温在7℃左右,最大年降水量634.7 mm(1984年),最小年降水量为259.9 mm(2006年),平均降雨量为414.9 mm,降水年变率为24.6%;年内降水量分布不均,多集中在6—9月,占全年总降水的70%以上,无霜期152 d。土壤类型为黄绵土,植被类型由灌木草原到典型草原过渡,原生植物多以低矮禾草为主,并伴有

少量灌木,代表性植被有长芒草(*Stipa bungeana* Trin)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* Willd Novopokr)、茼蒿(*Artemisia giraldii* Pamp)以及百里香(*Thymus mongolicus* Ronn)等。

1.2 材料和方法

研究区的供试林为2002年在沿山坡建立的长20 m、宽5 m,面积100 m²,坡度为9°的标准径流小区上播种的柠条林,播种密度为1.5 kg/100 m²,已经生长为16 a的成年人工柠条林,柠条林下有生长较好的草本植被覆盖,经测得柠条平均地径为11.48 mm,平均株高为1.59 m。同等立地条件下的撂荒地作为对照,并以在小区中心地带安置两个长度为8 m,间距1 m的中子仪铝合金套管,采用CNC503A(DR)型智能中子水分仪对林地剖面土壤含水量的长期定位测定观测。在2018年多年生柠条林的生长季里(4—9月)每月月中进行观测;观测时,因中子仪所测的土壤容积含水量为范围内的平均值,故以距地表5 cm处记录为第一个数据,20 cm处为第2个数据,以下土层每隔20 cm记录一次,深度直至740 cm。降雨等气象资料则来源于距试验地附近气象站以及周边布设雨量器所记录观测。

1.3 数据分析方法

试验采用Microsoft Excel 2019和SPSS 23.0处理分析数据,Origin进行绘制土壤水分垂直分布图。利用变异系数CV对土壤水分垂直变化层次进行划分,表示各层次土壤水分的稳定性。指标变异系数CV和标准差S的计算公式分别为:

$$CV = \frac{S}{x} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: x 为观测样本(土壤容积含水量)平均值; n 为样本总个数; x_i 为样本的第*i*个观测值。

2 结果与分析

2.1 多年生人工林地土壤水分垂直变化规律

试验区柠条于4月下旬开始发芽,生出幼苗,逐渐展叶;从5月中旬到6月中旬快速生长达到展叶盛期;6月下旬到8月初果实成熟;其后9月中旬生长速度减缓进入落叶硬化期^[8-9]。同时,该区域内年降水主要集中在6—9月,占到全年降水量的75%。因而在此期间,土壤水分的变化极为敏感^[8]。土壤水分得到大量的补充又受到高度的消耗,其垂直变化表现出不同规律。以2018年柠条生长期所测土壤剖面水分数据为例,并以同等条件下的撂荒地作为对照,研究

土壤容积含水量在垂直方向上的变化规律。由图 1 看出,柠条林地和撂荒地土壤容积含水量具有相同的变化趋势。在 0—200 cm 土层深度,撂荒地和柠条林地每个月的土壤容积含水量都具有较大的变化幅度,均为先增加后减小;而在 200—400 cm,二者容积含水量均以相近的变化幅度稳定增加;在土层深度 400 cm 之后,撂荒地和柠条林地的土壤容积含水量均表现出快速恢复的趋势。并且,在 0—200 cm 土层深度时,撂荒地和柠条林地的土壤水分含量基本上接近。其后土层深度为 200—400 cm,柠条林地的土壤水分含量接近撂荒地,二者含量几乎相同。随着土层深度的增加,撂荒地的土壤水分含量逐渐高于柠条林地。特别是在 400 cm 以下的土层中,二者均呈现出波折上升后趋于稳定,可以看出撂荒地的土壤水分含量显著高于柠条林地土壤水分含量。

分析其原因,是由于在地面到 200 cm 深的土层内,较浅层的土壤更易受到降水的补充或是蒸发散作用的消耗,使得土壤容积含水量的变化较大。而深层土壤水分不易受到蒸发散和大量植物根系吸收的消耗,进而含有较高的土壤容积含水量。该区域内降水稀少,但却是土壤水分唯一的补充来源,而且发生入渗具有一定的滞后性。强且密集连续降水对深层土壤水分才有一定的补给^[10],在发生最大降雨量(623.3 mm)之后的第二年达到最大入渗深度,仅为

290 cm^[11]。深层土壤水分难以得到补充,加之柠条具有更长的根系,消耗更深土层的土壤水分。另外,多年生人工柠条林地中的林下植被,较撂荒地上所生长的植被而言,更为茂密,长势更好。进而,也加剧了对植被对土壤中水分的消耗利用。

由于该区域降水的主要补给是通过降雨,而降雨具有一定的季节性,以至于土壤水分含量在季节的变化中呈现出一定的规律性。由图 1 所示,柠条林地平均土壤容积含水量在 9 月份时最多为 8.63%,其次是 7 月份为 8.18%,4 月份和 8 月份的含水量分别为 7.90%和 7.82%,最少的是 5 月、6 月份 7.44%和 7.41%。在而撂荒地平均土壤容积含水量则在 7 月份时最多为 9.15%,其次为 9 月份和 8 月份分别为 9.08%,9.06%,5 月份和 6 月份的平均土壤容积含水量分别为 8.49%,8.14%,4 月份最少为 7.88%。由于在柠条林的生长季内有大量降雨的补给,加之降雨对土壤水分补给的滞后性,加之 9 月份后柠条林生长变缓,使得土壤水资源在 9 月份最多。而 7 月、8 月份的土壤含水量远高于 5 月、6 月份的土壤含水量,其原因一方面是柠条在 5 月、6 月处于速生阶段,需水量远远大于降雨对土壤的补给量;另一方面,在 7 月、8 月份,均有过次降雨量超过 50 mm 的暴雨级别降雨,土壤水分得以补充。而撂荒地土壤水分各个月份的差异,则主要是受到降雨季节变化的影响。

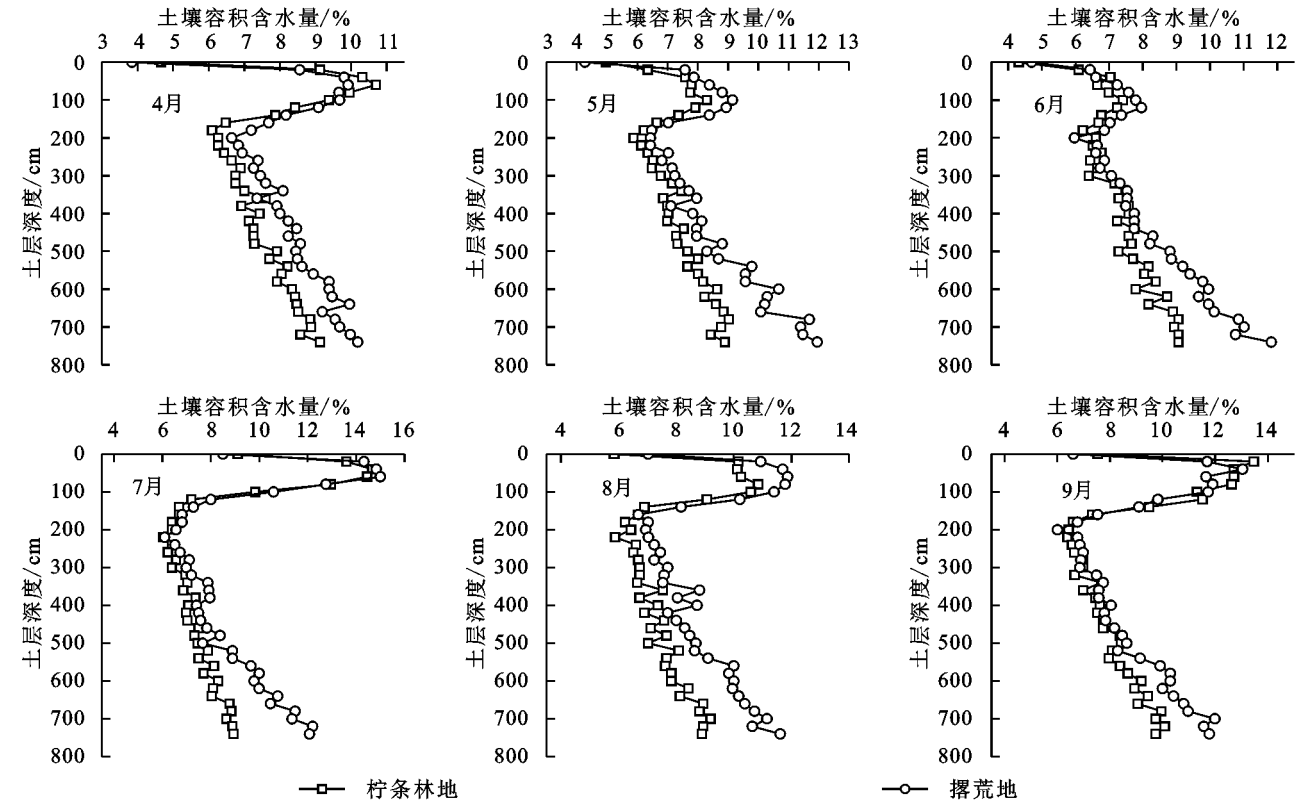


图 1 2018 年 4—9 月成年柠条林地与撂荒地土壤容积含水量垂直变化

2.2 柠条林地与撂荒地土壤水分比较

通过经典统计学方法得出的土壤体积含水量的描述性特征(表 1)。在柠条林的生长期,柠条林地和撂荒地不同深度的土壤体积含水量均值分别在4.18%~14.67%和 2.87%~15.01%,二者均随着深度的增加其土壤体积含水量表现出先增加—后减小—再增加的趋势。在变异系数上而言,除了撂荒地 160—180 cm、柠条林地 120—140 cm 土层深度的较其他深度突然升高外,其余土层的土壤体积含水量变异系数都随着深度的增加而减小,其中撂荒地的变化区间为 7.39%~34.63%,柠条林地的变化区间为 3.27%~31.12%。按照剖面土壤水分垂直变化变异系数划分:速变层(CV≥30%)、活跃层(CV:20%~30%)、次活跃层(CV:10%~20%)以及相对稳定层(CV≤10%)^[12-13]。因而,对柠条林地和撂荒地土壤体积含水量垂直变异分层分别为:0—40 cm 为速变层,40—100 cm 为活跃层,100—160 cm 为次活跃层,160—220 cm 为稳定层;0—40 cm 为速变层,40—80 cm

为活跃层,80—140 cm 为次活跃层,180—220 cm 为稳定层。因二者的土层深度均达到 220 cm 时,其各自变异系数均小于 10%达到稳定层,且 220 cm 以下土层变化均不显著为稳定层,故可用 0—220 cm 深度土层的土壤体积含水量变异系数代表整个研究深度土层(0—760 cm)。由表一看出,在 0—40 cm 土层土壤体积含水量的变异系数最大,均为速变层,原因是受到地表降水的入渗补充、温度、通风状况以及蒸腾等外部作用使得该层土壤变化频繁。接着到达活跃层,在该层林木根系耗水和降水是影响其土壤含水量的变化主要因素,当土壤含水量受到植被消耗时,在水势梯度的作用下,深层土壤水分朝上转移,植被生长需要得以保障。因撂荒地没有柠条蒸腾作用的影响,并且所覆盖的植被根系深度不及柠条根系,对土壤水分的消耗较少,故比柠条林地在深度上更早的到达次活跃层。随后更深的土层受到外界干扰因素较少,其水分变化幅度小,含量较为稳定。

表 1 柠条林地和撂荒地土壤水分的统计特征

层次	土层深度/cm	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰值
速变层	0—20	9.11	4.18	5.87	1.82	31.01	1.12	0.23
	20—40	13.61	6.09	9.71	3.02	31.12	0.23	−1.31
	40—60	14.67	7.58	10.39	2.68	25.80	0.37	−0.42
活跃层	60—80	14.45	6.65	10.46	2.68	25.56	0.001	−0.45
	80—100	12.97	6.98	10.16	2.26	22.23	−0.16	−1.18
	100—120	11.31	7.41	9.46	1.32	13.93	−0.23	−0.30
	120—140	11.53	7.20	8.54	1.49	17.49	1.52	2.63
次活跃层	140—160	9.49	6.69	7.57	0.98	12.98	1.40	2.05
	160—180	7.32	6.43	6.71	0.29	4.29	1.96	4.69
稳定层	180—200	6.60	5.92	6.26	0.20	3.27	0.05	1.69
	200—220	6.60	5.88	6.32	0.22	3.61	−1.24	2.29

层次	土层深度/cm	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰值
速变层	0—20	8.50	2.87	5.54	1.92	34.63	0.27	−0.68
	20—40	14.32	6.43	9.73	2.94	30.27	−1.08	0.30
	40—60	14.84	6.60	10.52	2.90	27.56	−0.94	0.16
活跃层	60—80	15.01	7.24	10.57	2.56	24.26	0.41	0.59
	80—100	12.76	7.58	10.31	1.88	18.28	−1.39	−0.08
	100—120	11.74	7.79	10.00	1.37	13.66	−0.38	−0.32
次活跃层	120—140	10.21	7.96	9.02	0.92	10.23	−2.07	0.06
	140—160	9.11	7.28	8.09	0.76	9.42	−1.94	0.22
	160—180	9.19	6.17	7.21	0.97	13.39	3.56	1.69
稳定层	180—200	7.96	6.43	6.91	0.51	7.39	1.73	3.68
	200—220	7.20	5.97	6.46	0.48	7.39	0.56	−1.17

2.3 多年生人工柠条林的生长对土壤水分的影响

营造人工林的初衷是为了形成现实生产力并且能够改善生态环境的功能,而这些功能的发挥则需以群落或林分体系来实现,因而达到有效植被群落质量标准是建设人工林的基本要求^[14]。同 2002 年该柠条林地密度 65 株/m² 相比较^[15],多年生的柠条林地密度减少了 32 株/m²,降低幅度为 49.2%。人工林地植株密度的降低,由于柠条林间个体对水肥的竞争,导致竞争能力弱的个体死亡;另外,该区域植物生长需水的唯一来源就是土壤水分,植物根系吸水、蒸发、蒸腾作用的耗水,加之不能及时得到降水的补充,导致土壤水分不断下降,形成土壤干层,造成植物的萎蔫甚至永久的衰败。对 2018 年柠条林地柠条生长期土壤容积含水量的平均值进行分析,研究二者土壤容积含水量总体垂直变化特征。如图 2 所示,在浅土层 0—200 cm 处,二者的土壤容积含水量总体上随着土层深度的增加经历了先增加后减少的过程。在 0—20 cm 土层深度的土壤,是中子源的部分中子在近地面发生逸散现象;另一方面,该层次土壤受到外界影响大,具有强烈的蒸散作用,进而导致该层土壤容积含水量偏低。在其后的土层中,二者土壤容积含水量因降水补充的影响逐渐减弱呈现出下降的趋势,多年生的人工柠条林根系最深可超过 500 cm,主要根系还是分布于 0—150 cm 土层^[16]。因而,在 20—200 cm 土层内,植物根系对该土层间的水分大量消耗利用,使得在其含水量急剧下降。在 200 cm 土层深度左右出现转折,土壤容积含水量逐渐增多。其原因在于,蒸发散作用对深层土壤水分的影响作用甚微,以及水分受到重力的作用向下不断入渗。但在 200 cm 后的土层深度里,撂荒地土壤容积含水量与柠条林地土壤含水量的差量逐渐扩大,而在该层次深度的土壤中变异性弱,几乎不受外界环境的影响,可推断柠条林根系也影响着深层土壤水分。张文文等^[17]于 2012 年通过 CNC503 A(DR)型智能中子水分仪,对该区域即 10 a 生柠条林地和撂荒地土壤容积含水量总体变化进行全年定位观测。利用 2012 年柠条林地全年土壤容积含水量的平均值,得出多年生的人工柠条林地和撂荒地土壤容积含水量,在不同深度土层的含量,以及随土层深度增加而呈现出的规律性变化与本文相同,即柠条林地土壤容积含水量随着土层深度的增加而减少,在 200 cm 土层深度时土壤容积含水量发生转折,开始随着土层深度的增加而增大,在土层深度 450 cm 左右时突破并一直高于萎

蔫系数。而 2012 年仅是柠条林地的土壤容积含水量出现低于萎蔫系数的情况,撂荒地并未出现。与 2018 年柠条林地和撂荒地的土壤容积含水量均出现在萎蔫系数之下的情况不同,2018 年柠条林地土壤容积含水量开始高于萎蔫系数时的土层深度,较 2012 年柠条林地土层深度更深。

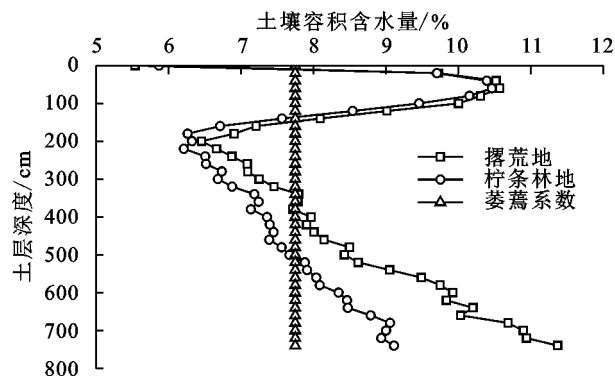


图 2 柠条林生长期平均土壤容积含水量变化

3 讨论

3.1 多年生人工林地土壤水分垂直变化规律

总体上来看,撂荒地各个深度土层的土壤容积含水量普遍高于柠条林地同等深度土层土壤容积含水量,由浅及深土壤容积含水量先增加后减少再增加,呈现出“N”型规律。该区域雨季与柠条生长季同期,土壤水分含量受到柠条林的生长和降水的共同影响。

3.2 柠条林地与撂荒地土壤水分变异系数比较

按照剖面土壤水分垂直变化变异系数划分:速变层(CV≥30%)、活跃层(CV:20%~30%)、次活跃层(CV:10%~20%)以及相对稳定层(CV≤10%)^[12-13]。总体而言,同前人研究结果^[17-19]相同,土壤容积含水量变异系数随着土层深度增加而逐渐减小直至趋于稳定。这是由于,在研究区内土壤水分的变化主要通过降雨补充和蒸腾散发消耗来实现的,而越深层的土壤水分受到降水补充以及蒸发散消耗影响将会越小。因此,土壤容积含水量变异系数将会随着土层深度的增加而减小。

3.3 多年生人工柠条林的生长对土壤水分的影响

同前人研究结论^[20-21]一致,即柠条随着林龄的增加其吸收根的深度也会增加。在整个生长季里,撂荒地和柠条林地土壤容积含水量均出现在萎蔫系数之下的情况,但是撂荒地土壤含水量较柠条林地,出现低于萎蔫系数的土层深度更浅,在最大入渗深度的范围内。而多年生的柠条林地则远超最大入渗深度,难以通过降水补充土壤水分,将会发展成为土壤干层。

只有通过科学的土壤水分植被承载力理论,对人工柠条林进行干预,解决好柠条林生长及对深层土壤水分的消耗,实现土壤水资源的可持续利用,进而发挥出人工林保土固沙,改善生态环境的作用效果。

4 结 论

(1) 撂荒地各个深度土层的土壤容积含水量普遍高于成年柠条林地同等深度土层土壤容积含水量,由浅及深土壤容积含水量先增加后减少再增加,呈现出“N”型规律。

(2) 成年人工柠条林地同撂荒地二者的土壤容积含水量变异系数都随土层深度增加而逐渐减小,表层土壤水分具有强的变异性,而深层土壤变异性较弱(变异性),是该区域土壤容积含水量变异系数所具有的共性。

(3) 成年人工柠条林的生长受到土壤水分的限制,同时也影响着土壤容积含水量的变化。在生长期内土壤容积含水量变化趋势同撂荒地类似先增加后减少再增加,但柠条林对深层土壤水分的消耗影响深远。

参考文献:

- [1] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016,6(11):1019-1022.
- [2] Heras M D L, Espigares T, Merino-Martin L, et al. Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes [J]. Catena, 2011,84(3):114-124.
- [3] 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.
- [4] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报,2003,8(23):523-528.
- [5] 孙雅楠.岚县不同植被的土壤水分特征研究[J].黑龙江工程学院学报,2019,33(2):13-17.
- [6] 孔凌霄,毕华兴,周巧稚,等.晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征[J].水土保持学报,2018,32(5):163-169.
- [7] 王舒,马岚,张栋,等.晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征[J].北京师范大学学报:自然科学版,2016,52(3):253-258.
- [8] 郭忠升,邵明安.土壤水分植被承载力初步研究[J].科技导报,2006,24(2):56-59.
- [9] 方天纵,安守芹.应用有序聚类法对柠条苗高生长期的划分[J].内蒙古林学院学报,1996,18(1):22-26.
- [10] 宁婷,郭忠升.半干旱黄土丘陵区撂荒地土壤水分循环特征[J].生态学报,2015,35(15):5168-5174.
- [11] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林地土壤入渗过程分析[J].土壤学报,2009,46(5):953-958.
- [12] 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.
- [13] 刘鑫,毕华兴,李笑吟,等.晋西黄土区土壤水分时空异质性分析[J].水土保持研究,2006,13(6):51-54.
- [14] 郭忠升.黄土高原水土保持植被建设的标准与目标[J].水土保持通报,2000,20(7):53-58.
- [15] 李耀林,郭忠升.平茬对半干旱黄土丘陵区柠条林地土壤水分的影响[J].生态学报,2011,31(10):2727-2736.
- [16] 郭忠升,邵明安.土壤水分植被承载力数学模型的初步研究[J].水利学报,2004(10):97-101.
- [17] 张文文,郭忠升.不同密度人工柠条林土壤水分时空变化研究[J].西部大开发(土地开发工程研究),2018,3(1):25-31.
- [18] 郭忠升.半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量[J].水土保持通报,2009,29(5):69-72.
- [19] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):513-520.
- [20] 刘丽颖,贾志清,朱雅娟,等.共和盆地中间锦鸡儿人工林根系的分布特征[J].中国沙漠,2012,32(6):1626-1631.
- [21] 石坤,贾志清,张洪江,等.青海共和盆地典型固沙植物根系分布特征[J].中国水土保持科学,2016,14(6):78-85.