

黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征

张敏¹, 刘爽¹, 刘勇¹, 张红²

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

摘要: 为研究黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型下的土壤水分变化规律, 采用时域反射仪 TDR 在山西省五寨县分别对玉米农地、柠条林地、苜蓿草地 0—100 cm 土层进行连续 3 年的土壤水分观测, 掌握不同土地利用类型土壤含水量的季节变化规律和垂直分布特征。结果表明: (1) 农林草地土壤水分随时间的变化曲线基本呈“M”形分布, 三者季节变化规律相似, 但土壤含水量差异达到极显著水平 ($P < 0.01$), 表现为苜蓿草地 > 柠条林地 > 玉米农地; (2) 玉米农地与柠条林地土壤含水量随土层深度的增加呈“S”形分布, 苜蓿草地的变化趋势与两者完全相反, 玉米农地仅土壤表层 0—20 cm 含水量与降水存在显著相关性, 柠条林地和苜蓿草地 0—60 cm 土壤含水量均与降水显著相关; (3) 土壤含水量具有明显的垂直分布特征, 在 0—100 cm 土层中, 随着土层深度的增加, 玉米农地 CV 先逐渐降低后保持稳定, 柠条林地 CV 始终持续降低, 苜蓿草地 CV 先呈现波动变化后明显降低, 三者整体表现为表层土壤含水量变异系数大于深层; (4) 0—100 cm 范围内, 玉米农地的土壤层自上而下依次可划分为速变层、活跃层 2 个层次, 柠条林地和苜蓿草地的土壤层划分为速变层、活跃层和次活跃层 3 个层次。本研究结果表明林地和草地在涵养土壤水分方面优于农田, 林地和草地为黄土丘陵缓坡风沙区适宜的土地利用方式, 为该区域土壤水分管理及水土资源的合理开发利用提供理论依据。

关键词: 黄土丘陵缓坡风沙区; 土地利用类型; 土壤水分; 变异系数

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0115-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.018

Soil Moisture Variation Characteristics of Different Land Use Types in the Moderate Slope Sandy Area of Loess Hilly Region

ZHANG Min¹, LIU Shuang¹, LIU Yong¹, ZHANG Hong²

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006;

2. College of Environment and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006)

Abstract: In order to study the variation characteristics of soil moisture under different land use types in the moderate slope sandy area of loess hilly region, time domain reflectometry (TDR) was used in three land use types, which were maize farmland, *Caragana korshinskii* forest land and alfalfa grassland, in Wuzhai County, Shanxi Province. The soil moisture of 0—100 cm soil layer was observed for three years, and the seasonal variation and vertical distribution of soil water content of different land use types were grasped. The results showed that the seasonal variation curves of soil moisture in the three kinds of lands all showed M type distribution. The seasonal variations of the three kinds of lands were similar, but the difference of soil water content reached an extremely significant level ($P < 0.01$), which showed as follow alfalfa grassland > *C. korshinskii* forest > maize farmland. The soil water content of maize farmland and *C. korshinskii* forest showed S distribution with the increasing of soil depth, while the variation trend of alfalfa grassland was completely opposite to the other two lands. There was a significant correlation between the soil water content of 0—20 cm soil layer and precipitation in maize farmland, and there was a significant correlation between the soil water content of 0—60 cm soil layer and precipitation in *C. korshinskii* forest and alfalfa grassland. The

收稿日期: 2019-01-07

资助项目: 山西省自然科学基金项目(201601D021117); 国家自然科学基金项目(41871193, 41401618); 山西省“1331工程”土壤污染生态修复学科群项目(20181401)

第一作者: 张敏(1991—), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事生态恢复与水土保持研究。E-mail: zhangminty@126.com

通信作者: 刘爽(1983—), 女, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事土壤生态、农业生态以及生态系统、作物模型模拟研究。E-mail: liushuang@sxu.edu.cn

soil water content had obvious vertical distribution characteristics. In 0—100 cm soil layer, with the increasing of soil depth, the CV of maize farmland decreased gradually and then remained stable, however, the CV of *C. korshinskii* forest decreased continuously, the CV of alfalfa grassland fluctuated at first and then decreased obviously. The coefficient of variation of surface soil water content was higher than that of deep layer. In the range of 0—100 cm, the soil layer of maize farmland could be divided into rapid change layer and active layer from top to bottom, and the soil layers of *C. korshinskii* forest and alfalfa grassland could be divided into three layers, which were rapid change layer, active layer and sub-active layer. The results of this study showed that forest land and grassland were better than farmland in conserving soil moisture, and forest and grassland were suitable land use patterns in the moderate slope sandy area of loess hilly region. It provided a theoretical basis for the management of soil moisture and the rational development and utilization of soil and water resources in this area.

Keywords: moderate slope sandy area of loess hilly region; land use type; soil moisture; coefficient of variation

黄土丘陵缓坡风沙区属于干旱半干旱区,植被覆盖度低,水蚀、风蚀交替发生,水土流失严重,是典型的生态脆弱区。该区域地下水埋藏深,植物难以利用,土壤水分为植物生长所需水分的主要来源^[1],是影响该区域植物生长和生态恢复的首要限制因子^[2]。土壤水分受降雨、植被类型、土壤性质、耕作方式和土地利用方式等因素影响呈现复杂的动态变化,因此揭示土壤水分变化特征可为该地区土壤水分管理及水土资源的合理开发利用提供理论依据,对该地区林草植被建设与生态环境治理具有重要作用。近年来,黄土丘陵缓坡风沙区的土地利用方式随着退耕还林(草)生态治理工程的实施发生了很大变化,土地利用变化对土壤水分产生极大的影响,已成为学者们关注的热点^[3]。目前,学者们^[4-6]分别针对黄土区不同土地利用类型的土壤水分变化特征进行了大量的研究和探讨,但针对黄土丘陵缓坡风沙区的研究相对缺乏,尤其将该地区典型土地利用类型农田、林地、草地结合起来的土壤水分动态变化的对比分析少见报道^[7]。本研究旨在揭示黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分的时间变化规律和垂直变化特征,从而为因地制宜、合理利用该区水土资源,促进当地生态环境的可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省忻州市五寨县胡会乡石咀头村,地处黄土丘陵缓坡风沙区,地理坐标为 111°28′—112°00′ E, 38°44′—39°17′ N,海拔 1 401 m,地面坡度 0~4°。该区域气候属于典型的寒温带半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 478.5 mm,降水主要集中于 7—8 月,占年降水量的 44.3%。该区域昼夜温差大,年平均气温 4.9℃左右,有效积温 2 452℃,无霜期 120 d。土

壤类型主要为黄土状淡栗褐土,有机质含量低,主要由砂粒和粉粒组成,土壤质地疏松,孔隙发达,透气性强^[8]。

1.2 数据来源

本研究以黄土丘陵缓坡风沙区具有代表性的 3 种土地利用类型为研究对象,选取传统耕作的玉米农地和 2013 年人工种植的柠条林地、苜蓿草地作为研究样地,利用时域反射仪 TDR(time domain reflectometry)定时定点监测土壤水分,监测时间为 2015 年 11 月 1 日至 2018 年 3 月 31 日,监测频率为每 2 h 测定 1 次,测定深度为 3 种植物根系集中分布的 0—100 cm 土层,分为 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 共 5 个土层。研究区的土壤水分主要来自大气降水,本研究中的降水数据来源于中国国家气象信息中心五寨县地面气候站定时观测资料。

1.3 数据分析

本研究利用单因素方差分析(One-Way ANOVA)比较 3 种土地利用类型土壤水分的组间差异,并基于 Person 相关关系分析降水与土壤含水量之间以及土壤层不同深度土壤水分之间的相关性。采用统计学中的变异系数(CV)为指标,即样本标准差与样本平均值的比值,精确描述土壤水分的季节变异程度与垂直变化层次。

研究采用 SPSS 22.0 软件计算土壤含水量变异系数、差异显著性、相关性等指标分析不同土地利用类型下土壤水分季节变化规律和垂直空间变化特征,使用 Origin 2017 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤水分季节变化规律

不同土地利用类型 0—100 cm 土壤层的平均土壤含水量具有明显的季节变化规律,在各年份内农林草地土壤水分随时间的变化曲线基本呈“M”形分布(图 1),但不同土地利用类型之间土壤含水量变化存在差异,这是因为在降雨条件相同的情况下,不同土

地利用类型的植物蒸腾和土壤蒸发各异。参考朱宝文等^[9]针对土壤水分动态变化规律的研究,本文将黄土丘陵缓坡风沙区土壤水分的季节变化分为5个主要阶段。(1)冬季稳墒期(1—2月):降水极少,农林草地土壤含水量均于2月达到全年的谷值,植物由于较低的气温凋萎或休眠,植物蒸腾和土壤蒸发缓慢,使得此阶段的土壤水分处于相对稳定状态;(2)春季增墒期(3—5月):气温逐步回升,土壤解冻后含水量升高,并且随着降水量的增加,农林草地土壤水分与降水同步变化,土壤含水量快速上升,且此阶段初期的土壤水分上升速度明显快于后期;(3)夏季缺墒期(6—8月):研究时段的6—8月降水量集中,占全年降水量的50%以上,而此阶段随气温的升高植物蒸腾和土壤蒸发加强,同时植物生长旺盛,土壤水分消耗逐渐大于补给,其中玉米农地和苜蓿草地的土壤含水量在7,8月明显下降,柠条林地在此阶段的土壤水分也有所降低,但其变化规律较前两者复杂;(4)秋季增墒期(9—11月):降水量充沛,此阶段气温逐渐降低,植物叶片开始凋落,生长缓慢,降水量与耗水量相比占优势,土壤水分得到降水的补偿,土壤含水量恢复较高的水平,柠条林地、苜蓿草地土壤含水量于10月达到全

年的峰值,玉米农地滞后1个月(于11月)达到峰值;(5)初冬失墒期(12月):随着降水量的减少,农林草地土壤含水量也呈现出下降的趋势。

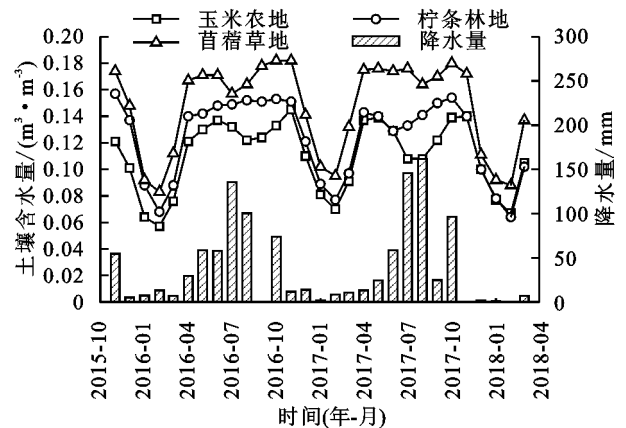


图1 不同土地利用类型0—100 cm平均土壤含水量随时间变化规律

农林草地3种土地利用类型土壤水分的季节变化规律具有相似性,不同土地利用类型土壤含水量差异见表1。不同土地利用类型的平均土壤含水量总体表现为苜蓿草地>柠条林地>玉米农地,结果表明林地和草地在涵养土壤水分方面优于农田。通过单因素方差分析发现,3种土地利用类型的土壤水分的影响存在极显著差异($P<0.01$)。

表1 不同土地利用类型土壤含水量差异

土地利用类型	最小土壤含水量/ ($10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	最大土壤含水量/ ($10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	平均值±标准差/ ($10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	变异系数/%
玉米农地	5.69	14.51	10.98±2.65	24.18
柠条林地	6.39	15.71	12.35±3.03	24.49
苜蓿草地	8.28	18.21	14.70±3.44	23.39

2.2 不同土地利用类型土壤水分垂直变化特征

考虑降水量(雨季与旱季)和植物生长(生长季与非生长季)的季节划分^[10],并结合图1所示,年内大致分2个时段(4—11月、12月至翌年3月)来研究土壤水分的垂直变化。由3种土地利用类型各时段平均土壤含水量的垂直变化(图2)可以看出,同一土地利用类型在4—11月、12月至翌年3月2个时段,土壤水分垂直变化趋势相似。其中,玉米农地与柠条林地土壤含水量随土壤剖面深度自上而下基本呈“S”形分布,即土壤含水量随土层深度的增加先减小后增大,然后在土壤深层又逐渐减小。苜蓿草地的变化趋势与两者完全相反,并且变化幅度最大。

4—11月,玉米农地土壤表层(0—20 cm)土壤含水量最高,在20—40 cm土层土壤含水量迅速下降,40 cm以下随土层深度的增加,土壤水分波动较平缓,表现为土壤含水量先略有增加后恢复平稳。柠条林地土壤表层含水量居中,土壤水分随土层深度增加先减小,随后在20—80 cm土层范围内逐渐增加,在80 cm

以下又开始减小。苜蓿草地土壤表层含水量最低,变化趋势与两者反之,变化程度最剧烈,在20—40 cm土层土壤含水量显著升高,在40—80 cm土层迅速下降,在80—100 cm又呈现增大的趋势。

12月至翌年3月,3种土地利用类型0—100 cm不同深度土层土壤含水量均小于4—11月的土壤含水量,因为12月至翌年3月为旱季,降雨量明显小于4—11月,说明降水是影响土壤水分变化的主要因素之一。此时段,玉米农地土壤表层含水量仍明显高于柠条林地和苜蓿草地,三者变化趋势与4—11月一致,但变化幅度比4—11月小。

不同土地利用类型土壤水分与降水量及不同深度土壤水分之间的相关性分析见表2,结果表明,玉米农地仅土壤表层(0—20 cm)的土壤含水量与降水量极显著相关($P<0.01$),说明降水因子对农田土壤表层影响剧烈,对20 cm以下土层的影响较小。柠条林地和苜蓿草地0—60 cm土层土壤含水量与降水量均呈现显著相关性($P<0.05$),且土壤表层(0—20

cm)与降水的相关性最强($P < 0.01$),相关性随着土层深度的增加逐渐被削弱。表明降水在柠条林地和苜蓿草地可以下渗到土壤深层,这可能与土壤孔隙结构、植物根系分布、植物生长利用情况密切相关。另由表 2 可知,3 种土地利用类型不同深度土壤水分的空间相关性,说明相邻土层之间的相关性较强,随土层间隔的增加,土层之间相关性系数越小,相关性越差。

2.3 不同土地利用类型不同深度土壤水分季节变异程度

3 种土地利用类型土壤水分随时间变化趋势基本一致,但不同土地利用类型在同一土层深度的土壤平均含水率存在较大的差异,且同一土地利用类型不同土壤层之间的垂直变化存在差异,分别计算不同土地利用类型 0—100 cm 不同深度土层土壤水分的季节变异系数。由图 3 可知,3 种土地利用类型土壤水分季节变异系数其垂直变化具有相似的特征,总体来看,浅层土壤含水量变异系数大于深层。土壤表层(0—20 cm)CV 值最大,说明表层土壤水分随时间变化剧烈,该土壤层直接与外界环境接触,土壤水分受降水蒸发的影响,水分交换活跃,同时是植物根系主要分布层,受植物生长等因素影响较大,土壤水分变化显著。玉米农地在 0—100 cm 土壤层中, CV 值随深度增加呈现降低的趋势,其中在 40 cm 以下土层中 CV 值变化趋于平缓。柠条林地在 0—100 cm 土壤层中, CV 值持续降低且降低幅度大于玉米农地,说明随着土壤深度的增加,柠条林地土壤所受外界环境的影响明显减弱,因此在土壤深层土壤水分季节变异程度最低。苜蓿草地 CV 值变化与前两者略有差异,其中在 0—60 cm 土层

中缓慢下降,在 60—80 cm 土壤层中略有波动变化,在 80—100 cm 土层中急剧下降。

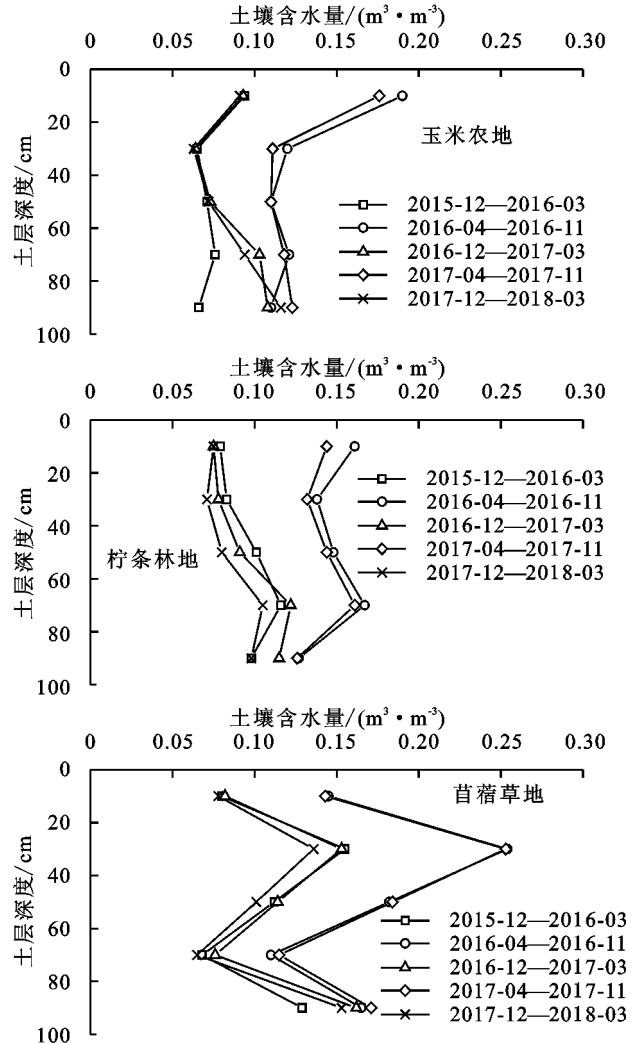


图 2 不同时段不同土地利用类型 0—100 cm 土壤含水量垂直变化特征

表 2 不同土地利用类型土壤水分与降水及不同深度土壤水分相关性分析

土地利用类型	土层深度/cm	相关系数					
		降水	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm
玉米农地	0—20	0.43*	1				
	20—40	0.30	0.95**	1			
	40—60	0.19	0.77**	0.91**	1		
	60—80	0.11	0.43*	0.58**	0.74**	1	
	80—100	0.36	0.23	0.25	0.37*	0.71**	1
柠条林地	0—20	0.58**	1				
	20—40	0.49**	0.94**	1			
	40—60	0.43*	0.83**	0.96**	1		
	60—80	0.39	0.71**	0.85**	0.94**	1	
	80—100	0.31	0.49**	0.61**	0.72**	0.89**	1
苜蓿草地	0—20	0.54**	1				
	20—40	0.49**	0.93**	1			
	40—60	0.46*	0.88**	0.99**	1		
	60—80	0.34	0.66**	0.85**	0.93**	1	
	80—100	0.21	0.39*	0.51**	0.61**	0.76**	1

注: ** 表示相关性在 0.01 水平上显著; * 表示相关性在 0.05 水平上显著。

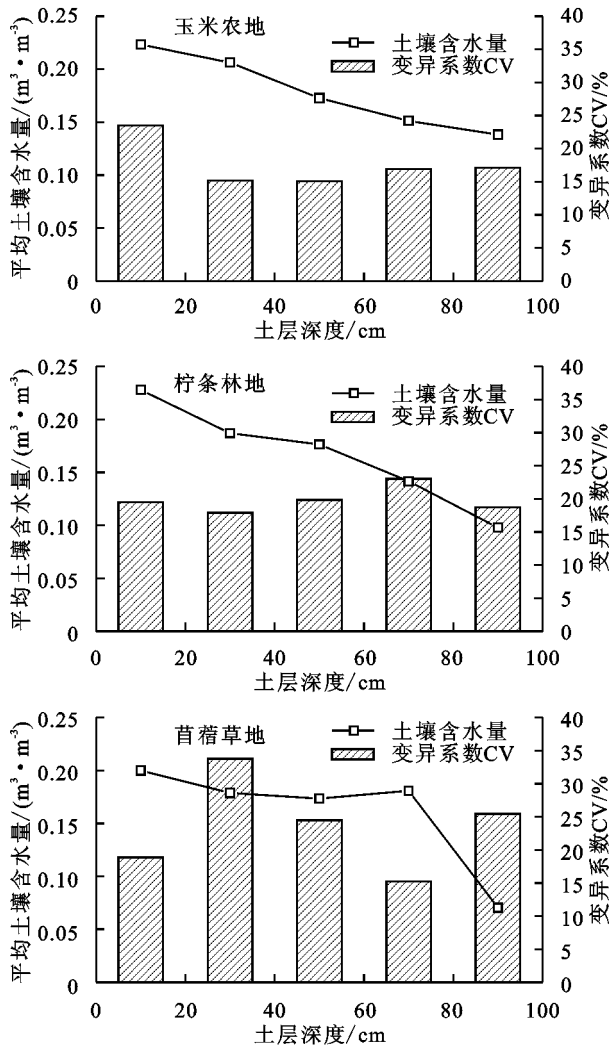


图3 不同土地利用类型0—100 cm各土层的土壤水分季节变异系数

2.4 不同土地利用类型土壤水分垂直变化层分布

贾志清^[11]利用土壤水分季节变异系数将土壤水分垂直变化层次分为速变层($CV > 30\%$)、活跃层($20\% < CV \leq 30\%$)、次活跃层($10\% < CV \leq 20\%$)、相对稳定层($0 < CV \leq 10\%$)4个分层。本研究使用该变异系数法确定黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型0—100 cm土层土壤水分的垂直变化层次。由图4可知,地表至地下100 cm深度范围内,玉米农地的土壤层自上而下依次可划分为速变层、活跃层2个层次,柠条林地和苜蓿草地的土壤层划分为速变层、活跃层和次活跃层3个层次。玉米农地的速变层范围(0—40 cm)大于柠条林地和苜蓿草地(0—20 cm),且玉米农地的活跃层范围比后两者更靠近土壤深层。柠条林地和苜蓿草地0—100 cm内各层次的深度范围一致。3种土地利用类型0—100 cm土层中均未出现相对稳定层,说明农林草地0—100 cm土层土壤水分活动相对活跃,相对稳定层的出现至少在距离地表100 cm以下。

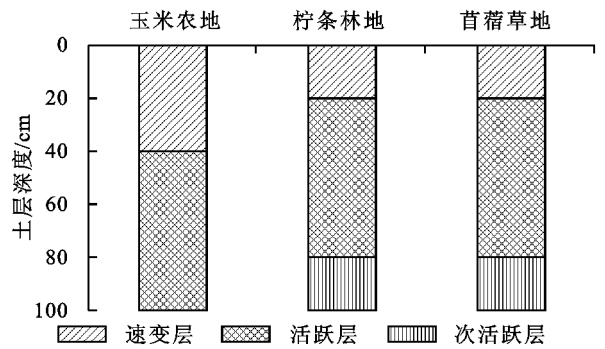


图4 不同土地利用类型0—100 cm各土层的土壤水分垂直变化层次分布

3 讨论

3.1 不同土地利用类型土壤水分季节变化差异

黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化具有明显的季节规律,农林草地的土壤水分变化曲线分冬季稳墒期、春季增墒期、夏季缺墒期、秋季增墒期、初冬失墒期5个阶段,此规律与陕北黄土高原沟壑区^[12]土壤水分年内季节动态划分的4个阶段(相对稳定期、强烈消耗期、恢复补偿期、缓慢蒸发期)具有一定的异同。土壤水分变化主要受降水、蒸发等气候条件因素的影响,冬季和春季土壤水分和降雨变化趋势一致。夏季6—8月降雨量大但土壤水分出现亏缺,主要是由于气温迅速升高导致土壤蒸发加剧,另一方面植物生长迅速,蒸腾耗水快速升高,消耗大量土壤水分^[13]。秋季9—11月,植物逐渐进入休眠期,需水量降低,并且气温降低,蒸腾耗水和地表蒸发减少,所以土壤水分随降雨的减少反而出现回升现象^[14]。本研究中3种土地利用类型土壤含水量变化虽有相似规律,但不同土地利用类型之间存在差异,其中苜蓿草地土壤含水量最高,柠条林地次之,玉米农地最低,表明在黄土丘陵缓坡风沙区林地和草地在涵养土壤水分方面优于农田。

3.2 不同土地利用类型土壤水分垂直变化差异

玉米农地0—40 cm土层中随土层深度增加土壤含水量持续降低,40 cm深度以下的土壤含水量变化趋于平缓,这与武建虎^[15]对玉米农田土壤水分动态规律的研究基本吻合。柠条林地在0—40 cm土层深度内土壤含水量逐渐降低,后在40—80 cm增加,在80—100 cm又降低,李竞等^[16]对柠条林地土壤水分变化的研究也具有相似规律。苜蓿草地土壤水分垂直变化特征与罗珠珠等^[17]的研究结果相似,即随土层深度的增加,苜蓿的土壤含水量增加,在20—40 cm土层达到全局最大值,后土壤含水量又大幅下降,在60—80 cm达到最低值后又增加。造成三者差异的原因有2点:一是不同植物根系发达程度不同,玉米根系较浅、对深层土壤水分的保持能力较差,所以深层土壤水分含量低,而柠条和苜

蓄根系发达、能够更好地涵养深层土壤水分；二是不同土地利用类型土壤水分下渗程度不同，农田深层土壤水分接受降水下渗的补偿有限^[18]。3 种土地利用类型不同土层含水量与降水量之间的相关性表明，农林草地土壤表层对降水比较敏感，但到了 60 cm 深度处，土壤含水量基本不受降水的影响了，这与张艳丽等^[19]的研究结果相似。

3.3 不同土地利用类型土壤水分垂直剖面变异程度

在土壤垂直剖面上，土壤表层与大气直接接触，表层土壤水分受降雨的影响较为显著，降雨快速入渗表层使土壤水分急剧增加，雨后由于土壤蒸发和植物耗水使土壤水分迅速减小，从而土壤表层土壤水分干湿变化明显、波动较大，因此土壤表层(0—20 cm)的季节变异系数(CV)值最大。随着土层深度的增加土壤所受外界环境的影响减弱，所以土壤水分垂直剖面的季节变异系数随土层深度增加整体呈现减小的趋势，这与赵磊磊等^[20]的研究结果一致。

此外，植物根系的垂直分布也密切影响不同深度土壤水分季节变异程度。玉米根系主要分布在 0—40 cm 土层内，不同生长时期的玉米根系在 0—40 cm 所占比例可达 50%~80%；并且玉米根系的活力分布范围主要在 0—40 cm 内，其中 0—20 cm 的根系活力最强^[21]，因此玉米农地 0—40 cm 变异程度呈快速减小的趋势，40 cm 以下变异程度趋于平缓。柠条根系根系发达，3 年生柠条的根系 80% 集中分布在 0—60 cm 的土层中，侧根的发生则集中在 0—20 cm 土层中，且根系主要分布区也是根系生长活跃区^[22]，所以柠条在垂直剖面 0—60 cm 的变异程度较大，60 cm 以下变异程度明显较小。苜蓿根系也比较发达，还发现紫花苜蓿根系约 60% 以上分布在表层 0—30 cm 的土层中，所以土壤表层季节变异系数最大^[23]。

3.4 不同土地利用类型土壤水分垂直变化土层划分

土壤表层含水量在降雨和蒸散发的交替作用下波动明显，因此农林草地的土壤表层均为土壤水分速变层，其中玉米农地的速变层范围(0—40 cm)大于柠条林地和苜蓿草地(0—20 cm)。土层越深，土壤水分变异系数越小，土层随深度增加向活跃层过渡，其中玉米农地的活跃层范围比后两者更靠近土壤深层。张洪芬等^[24]以农田为研究对象，将其划分为速变层(0—40 cm)、活跃层(40—100 cm)、稳定层(100 cm 以下)，此结果与本研究具有相似性。玉米根系 0—40 cm 分布最多，平均生根深度浅于草地(20—60 cm)和林地(20—100 cm)，因此玉米在土壤深层涵养土壤水分的能力较差，导致玉米农地深层的变异系数要大于柠条林地和苜蓿草地，从而玉米农地深层仍为土壤水分活跃层；相比之下，柠条林地和苜蓿草地

0—100 cm 内各层次的深度范围一致，且苜蓿和柠条深层根系分布广泛，涵养土壤水分的能力好，因此土壤深层为次活跃层。

4 结论

(1) 农林草地土壤水分随时间的变化曲线基本呈“M”形分布，分为冬季稳墒期、春季增墒期、夏季缺墒期、秋季增墒期、初冬失墒期 5 个阶段。三者季节变化规律相似，但土壤含水量差异达到极显著水平($P < 0.01$)，表现为苜蓿草地 > 柠条林地 > 玉米农地。

(2) 玉米农地与柠条林地土壤含水量随土壤深度的增加呈“S”形分布，苜蓿草地的变化趋势与两者完全相反。玉米农地仅土壤表层 0—20 cm 含水量与降水存在显著相关性，柠条林地和苜蓿草地 0—60 cm 土壤含水量均与降水显著相关。

(3) 土壤含水量具有明显的垂直分布特征，在 0—100 cm 土壤层中，随着土壤深度的增加，玉米农地 CV 先逐渐降低后保持稳定，柠条林地 CV 始终持续降低，苜蓿草地 CV 先呈现波动变化后明显降低，三者整体表现为表层土壤含水量变异系数大于深层。

(4) 0—100 cm 范围内，玉米农地的土壤层自上而下依次可划分为速变层、活跃层 2 个层次，柠条林地和苜蓿草地的土壤层划分为速变层、活跃层和次活跃层 3 个层次。

综上所述，林地和草地在涵养土壤水分方面优于农田，林地和草地为在黄土丘陵缓坡风沙区适宜的土地利用方式。

参考文献：

- [1] 白天路. 基于遥感和地面实测水分数据的小流域土壤水分模拟[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [2] 梁海斌, 史建伟, 牛俊杰, 等. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条地土壤水分变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 143-148.
- [3] 肖列, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤水分及地上生物量的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 204-209.
- [4] 马骏, 刘爽, 刘勇. 晋西北沙区玉米不同耕作方式对土壤水分及效益的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(14): 152-158.
- [5] 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.
- [6] 韩丙芳, 马红彬, 沈艳, 等. 不同生态修复措施对黄土丘陵区典型草原土壤水分时空变异的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 214-219.
- [7] 马婧怡, 贾宁凤, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3471-3481.

- 型的水源涵养功能差异[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3338-3349.
- [4] 李士美, 谢高地. 草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性[J]. 中国草地学报, 2015, 37(2): 88-93.
- [5] 张平, 刘贤德, 张学龙, 等. 祁连山林草复合流域灌木林水文生态功能研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 922-929.
- [6] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 等. 森林生态系统水源涵养服务功能解析[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1679-1686.
- [7] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰国家级自然保护区台兰河上游不同海拔草地土壤持水能力研究[J]. 草地学报, 2017, 25(5): 966-972.
- [8] 王尧, 徐佩, 傅斌, 等. 森林生态系统水源涵养功能评估模型研究进展[J]. 生态经济, 2018, 34(2): 158-164, 169.
- [9] 周玉杰, 李建华, 王春燕, 等. 海南岛 3 种森林类型的土壤特性及水源涵养功能[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(36): 165-167, 172.
- [10] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰自然保护区台兰河上游不同植被类型的水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 210-216, 224.
- [11] 陈蜀江, 海鹰, 金海龙, 等. 新疆夏尔西里自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006: 1-25.
- [12] 王勇辉, 钟巧, 焦黎. 夏尔希里地区土壤重金属特征及空间变异分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1043-1050.
- [13] 海鹰, 姚建保, 兵布加甫, 等. 新疆夏尔希里自然保护区植物区系研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 98-103.
- [14] 钟巧, 王勇辉, 焦黎. 夏尔希里地区土壤重金属含量特征及空间变异分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 360-365.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 韩路, 王海珍, 于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 124-129.
- [17] 郭梦娇, 朱江, 程小琴, 等. 辽河源不同林龄油松林水源涵养能力研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 279-284.
- [18] 巍强, 张秋良, 代海燕, 等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 111-115.
- [19] 王昭艳, 左长清, 曹文洪, 等. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析[J]. 土壤学报, 2011, 44(4): 715-724.
- [20] 马维玲, 石培礼, 宗宁, 等. 太行山区主要森林生态系统水源涵养能力[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 478-489.
- [21] 胡淑萍, 余新晓, 岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 146-151.
- [22] 马国飞, 满苏尔·沙比提. 托木尔峰自然保护区台兰河上游森林植被水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 147-153.
- (上接第 120 页)
- [8] 郭晋丽, 刘爽. 晋西北风沙区长期不同植被恢复类型下土壤物理特征分析[J]. 山西农业科学, 2017, 45(11): 1794-1800.
- [9] 朱宝文, 郑有飞, 陈晓光. 高寒针茅草原植物生长季土壤水分动态变化规律[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 96-100.
- [10] 王贺年, 余新晓, 李铁涛. 北京山区林地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2011, 29(6): 701-706.
- [11] 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.
- [12] 易亮. 黄土高原沟壑区生态经济型防护林土壤水分养分特征与空间配置研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [13] 白一茹. 水蚀风蚀交错带坡面土壤水分特性研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [14] 马文. 黄土丘陵区典型人工林土壤水分补给与消耗特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [15] 武建虎. 农田土壤水分动态及其影响因素分析[J]. 地下水, 2011, 33(4): 13-14.
- [16] 李竞, 贾生海, 陈小红, 等. 黄土高原不同立地条件下柠条林地土壤水分的变化规律[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(2): 111-115.
- [17] 罗珠珠, 牛伊宁, 李玲玲, 等. 陇中黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤水分及产量响应[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 31-38.
- [18] 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.
- [19] 张艳丽, 张国珍. 黄土高原典型塬区土壤湿度特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(5): 190-195.
- [20] 赵磊磊, 朱清科, 聂立水, 等. 陕北黄土区陡坡土壤水分变异规律研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 253-259.
- [21] 刘晶森, 安顺清, 廖荣伟, 等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 517-521.
- [22] 毕建琦, 杜峰, 梁宗锁, 等. 黄土高原丘陵区不同立地条件下柠条根系研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 225-230.
- [23] 王月胜. 不同苜蓿品种根系特征及其抗寒性关系的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [24] 张洪芬, 王劲松, 黄斌, 等. 西峰黄土高原麦田土壤水分的垂直分布[J]. 土壤通报, 2007, 37(6): 1081-1085.