自然及管理因素对伊犁河谷草地土壤水分动态的影响

普颖颖，张文太，李 政，黄国平

（新疆农业大学 草业与环境科学学院，新疆土壤与植物生态过程自治区级重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：[目的] 研究自然及管理因素下草地土壤水分变化特征，为退化草地的生态恢复提供科学参考。[方法] 通过定点监测 12 个坡面小区，利用 TDR 水分测定仪及其探头测定灰钙土和棕红土两种退化草地坡面表层 0—10 cm 的土壤含水量，采用数据对比分析和统计分析相结合的方法，分析降雨、气温、坡位等自然因素和灌溉、土壤管理因素对坡面表层土壤水分动态变化的影响。[结果] 降雨和气温对表层土壤含水量的变化有显著性影响，不同降雨量对表层土壤含水量的影响不同；坡位对草地坡面表层土壤含水量没有显著性影响；红棕土持水性强，表层土壤含水量高于灰钙土；各管理措施中，水平沟处理能够在降雨后最大化的增大表层土壤含水量，枯草覆盖处理能显著减缓降雨后表层土壤含水量的下降速率。不同集雨补灌方式下，表层土壤含水量差异不明显，但集雨补灌措施可以在短时内提高表层土壤含水量。[结论] 表层土壤水分主要受降雨、管理等因素的控制，能够通过人为管理调控土壤水分，从而达到植被恢复的目的。

关键词：降雨；气温；坡位；管理措施；表层土壤含水量

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)01-0058-07 **中图分类号**：S157.2，S152.7

文献参数：普颖颖，张文太，李政，等. 自然及管理因素对伊犁河谷草地土壤水分动态的影响[J]. 水土保持通报，2020，40(1)：58-64. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.009；Pu Yingying，Zhang Wentai，Li Zheng，et al. Effects of natural and management factors on soil moisture dynamics in grassland of Ili River valley[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(1)：58-64.

Effects of Natural and Management Factors on Soil Moisture Dynamics in Grassland of Ili River Valley

Pu Yingying，Zhang Wentai，Li Zheng，Huang Guoping

（*Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes*，*College of Grassland and Environmental Sciences*，*Xinjiang Agricultural University*，*Urumqi*，*Xinjiang* 830052，*China*）

Abstract：[Objective] The variation characteristics of grassland soil moisture under natural and management factors were analyzed to provide a scientific reference for the ecological restoration of degraded grassland. [Methods] Twelve sloping area plots were monitored by fixed points. A time-domain reflector (TDR) and probe were used to determine the soil water content of the top 0—10 cm of two degraded grassland slopes with sierozem and brown-red soil. The data were compared and statistically analyzed. Combined methods were used to analyze the effects of natural factors such as rainfall，temperature，slope position，and irrigation，and soil management factors on hillslope soil moisture dynamics. [Results] Rainfall and temperature had significant effects on the surface soil water content，and varied rainfall intensity had different effects on the surface soil water content. The slope position has no significant effect on surface soil water content. Brown-red soil had a high water capacity，and the surface soil moisture content was higher than that of sierozem. Among the various management measures，the horizontal ditch treatment maximized the surface soil water content after rainfall，and the grass-cover treatment significantly reduced the decrease of surface soil water content after rainfall. There was no significant difference in surface soil water content under different rainwater harvesting

收稿日期：2019-07-26 **修回日期**：2019-09-22

资助项目：国家自然科学基金地区项目“伊犁河谷天然草地土壤水库—小水窖联合集雨技术与应用”(41761059)；新疆维吾尔自治区科学技术厅“自治区天山创新团队计划(土壤保育与节水减肥创新团队)”(2017D14009)

第一作者：普颖颖(1995—)，女(汉族)，新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人，硕士研究生，研究方向为水土保持与生态修复。Email：puyy1995@163.com。

通讯作者：张文太(1984—)，男(汉族)，山东省冠县人，博士，副教授，博士生导师，主要从事土壤水资源开发、水土保持与防洪减灾研究。Email：zwt@xjau.edu.cn。

methods, but supplementary irrigation with harvested rainfall can increase the surface soil water content in a short time. [Conclusion] The surface soil moisture is mainly controlled by factors such as rainfall and management. Therefore, soil moisture can be controlled through artificial cultivation management to achieve vegetation restoration.

Keywords: rainfall; temperature; slope position; management measures; surface soil water content

伊犁河谷天然草地面积 3.40×10^6 hm^2，占河谷土地总面积的 60.9%，可利用草地面积 3.10×10^6 hm^2，是构成伊犁河谷生态环境的重要组成部分[1]。近年来，新疆天然草原草地退化面临严峻形势[2]，伊犁河谷草地退化面积 2.20×10^6 hm^2，占总面积的 64.70%，占可利用面积的 71.20%[1]。退化主要表现在毒害草蔓延，植被盖度降低，地上生物现存量减少，草层变矮[3]。草地的严重退化，加剧了土壤侵蚀，使得水土流失状况更为严重[4]。而植草护坡能有效减少堤防土壤流失量[5]，因此，植被的快速重建，显得迫在眉睫。

土壤水分是水资源含量中的重要组成部分之一，也是植物生长的主要影响因子，影响植物的正常生长[6]。土壤水分的变化主要受降水的影响，又是降水、林冠截流、土壤蒸发、地表径流、地下渗漏等多种因素共同影响而达到动态平衡的结果[7-8]。降雨是伊犁地区低山丘陵主要的水分补给，但伊犁低山丘陵地区降雨主要集中在 4—8 月，且分布不均。加上温度高，土壤蒸发量增大，与植物需水不能达到平衡，因此要通过一些水土保持或者微集雨措施来增加土壤含水量。目前来看，所有水土保持措施都能在不同程度上提高土壤的含水率，深入了解不同水土保持措施含水率的变化规律并选择适当的水土保持措施来提高坡面土壤水分的含量，对于增加土地生产力和作物产量有着重要的意义[9]。垄沟集雨种植系统在田间形成作物水分微环境，使降水通过垄面聚集到沟中作物根部，同时促进降雨的入渗，改善了作物水分供应状况，进而提高作物产量[10-11]。覆盖枯草可以改善土壤结构、减少土壤水分蒸发、强化降水入渗，缩小昼夜温差，减轻土壤流失，抗御土壤风蚀，抑制田间杂草[12]。Atkinson 等[13]研究表明打孔有益于提高土壤的物理性状，从而使得水分可以快速渗透土壤，提高土壤含水量。雨水集蓄在时间和空间两个方面实现雨水富集，从而实现对天然降水的调控利用。集雨补灌不仅对植物生长促进作用大，同时，能改良土壤理化性质，促进农业经济结构调整和优化，减轻水旱灾害威胁，实现恢复和改善自然生态与稳定农业生产的有效统一[14]。

表层土壤是整个土壤圈与外界环境的接触面，直接受到外在环境的影响，相对于深层土壤来说，其环境具有太阳辐射强、温度高、蒸发大、风速快以及受人类活动影响显著的特点，从而导致水分含量低、变异性强[15]。本文通过研究表层土壤水分的变化规律，探讨自然及管理因素对表层土壤水分的影响，以期为新疆维吾尔自治区伊犁地区水土保持建设和生态恢复的重建提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区伊犁河北岸、伊犁河谷中部低山丘陵区的伊宁市北山坡九城生态园（81°09′E，48°53′N）。该区域属于温带大陆性干旱气候，气候温暖湿润，四季分明，昼夜温差大，年均气温 9.2 ℃，最低温度≤−36 ℃，年均日照时间为 3 614 h，年均降水量 206～512 mm，并以短时间降雨为主，无霜期 178 d。研究区草地类型为温性荒漠草原类，该类型草地面积占伊犁河谷草地总面积 3.2%[16]。伊宁市草地总面积占伊犁河谷草地总面积的 2.5%，其中可利用草地面积占 2.4%，过度放牧过度造成了伊宁市草地严重退化。

1.2　试验设计

试验于 2018 年 5 月份开始，以伊犁河谷自然草地坡面为研究对象，进行定位试验。本试验在九城生态园水土保持示范区内选取布设了 12 个自然降雨径流观测小区，每个小区的长度为 10 m，宽度为 2 m。依据本研究的需要，分别采取了不同土壤管理措施，表 1 为小区试验布设详情。为了防止地表径流从试验区域内进出，试验中每个小区都在周围设置了围埂，防止外部径流，另外还在试验区域下部设置修建了集水槽，以承接试验区内流出的泥沙及径流，并利用硬质塑料管道引入集水桶内。

1.3　测定指标及方法

定点监测各个处理坡面上、中、下坡的表层 0—10 cm 土壤含水量，无雨情况下每 2 d 进行一次监测，有雨情况下雨后进行一次监测，利用美国 Spectrum Field Scout TDR100 便携式土壤水分速测仪进行测定。试验区设定小型气象站，监测试验期间降雨、气温等气象数据。

表 1 伊犁河谷草地小区试验布设

小区编号		处理
灰钙土	棕红土	
1	7	枯草覆盖
2	8	水平沟
3	9	增渗孔
4	10	对 照
5	11	单倍补灌
6	12	双倍补灌

注:①单倍补灌小区的补灌量为小区面积 0.5 mm 的日降雨量;②双倍小区的补灌量为小区面积 1 mm 的日降雨量;③有雨情况下不进行补灌,无雨情况下每隔 2 d 进行 1 次补灌。

2 结果与分析

2.1 土壤水分的变化特征

表 2 是不同管理措施下两种土壤类型坡面表层土壤含水量的统计特征值。如表 2 所示,在灰钙土坡面上,各管理措施表层土壤含水量均值从小到大排列为:枯草覆盖<增渗孔<对照<双倍补灌<单倍补灌<水平沟,各处理间差异性很小,土壤含水量变化最大与最小的管理措施为水平沟、枯草覆盖,变化区间值为 12.0%和 9.5%。在棕红土坡面上,各管理措施表层土壤含水量均值从小到大排列为:增渗孔<枯草覆盖<对照<水平沟<单倍补灌<双倍补灌,各处理间有一定差异,枯草覆盖和增渗孔处理与其他几组处理有显著性差异。土壤含水量变化最大与最小的管理措施为水平沟、对照,变化区间值为 24.3%和 9.8%。

变异系数 C_V 的大小反映了土壤水分的变异性大小,一般认为:变异系数 $C_V \leqslant 0.1$ 时为弱变异性;$0.1 < C_V < 1$ 时为中等变异性;$C_V \geqslant 1$ 时为强变异性[17]。表 2 显示,各处理变异系数都为中等变异性,说明表层土壤含水量变异性较大,但比较各处理间土壤含水量的变异系数,发现各处理之间的变异系数相差较小,不同管理措施对表层土壤含水量的变异性无太大影响。

表 2 不同管理措施下伊犁河谷草地 2 种土壤类型坡面表层土壤含水量的统计特征值

管理措施	灰钙土					棕红土				
	极小值/%	极大值/%	平均值/%	标准差/%	变异系数	极小值/%	极大值/%	平均值/%	标准差/%	变异系数
对 照	1.9	11.7	3.9[a]	1.75	0.44	3.6	21.7	6.2[a]	3.09	0.50
枯草覆盖	1.1	10.6	3.5[a]	1.84	0.53	3.5	16.7	5.9[b]	2.73	0.46
水平沟	2.5	14.5	4.3[a]	2.13	0.49	4.0	28.3	6.3[a]	3.85	0.61
增渗孔	1.6	11.1	3.8[a]	1.71	0.45	3.6	15.6	5.5[b]	2.89	0.52
单倍补灌	2.2	12.0	4.2[a]	1.78	0.42	4.0	23.1	6.6[a]	3.57	0.54
双倍补灌	1.7	11.3	4.0[a]	1.78	0.45	4.3	26.1	7.3[a]	4.08	0.56

注:表中同列不同小写字母表示在 5%水平上差异显著。

2.2 自然因素对土壤水分的影响

2.2.1 降雨和气温 本试验于 2018 年 5—9 月连续对试验区进行了气象数据的监测(见图 1)。新疆降雨等级按日雨量分为 4 个等级:小雨(0.1～6.0 mm),中雨(6.1～12.0 mm),大雨(12.1～24.0 mm)和暴雨(≥24.1 mm),有效雨日(量)为上面 4 个等级雨日(量)的总和[18]。

由图 1 可知,5—9 月共计有 17 场小雨,1 场中雨,1 场暴雨,其中 6 月降雨量较多,中雨和暴雨都集中在 6 月,7—8 月都是小雨,9 月无降雨。试验区最大降雨量为 82.4 mm,出现在 6 月,此降雨大部分在坡面上产生产流,以地表径流的形式损失掉,小部分入渗到坡面土壤中。最小降雨量为 0.2 mm,此降雨大部分入渗到坡面土壤中。

试验区 5—9 月日平均气温大部分在 13～30 ℃之间,波动较大,6—8 月中旬气温都比较高,8 月下旬—9 月气温开始逐渐降低。在降雨过后,气温会出现短暂下降的状态,随着时间推移,气温呈逐渐回升状态。

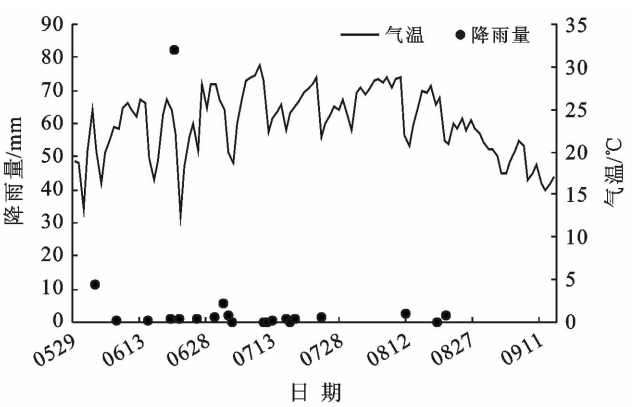
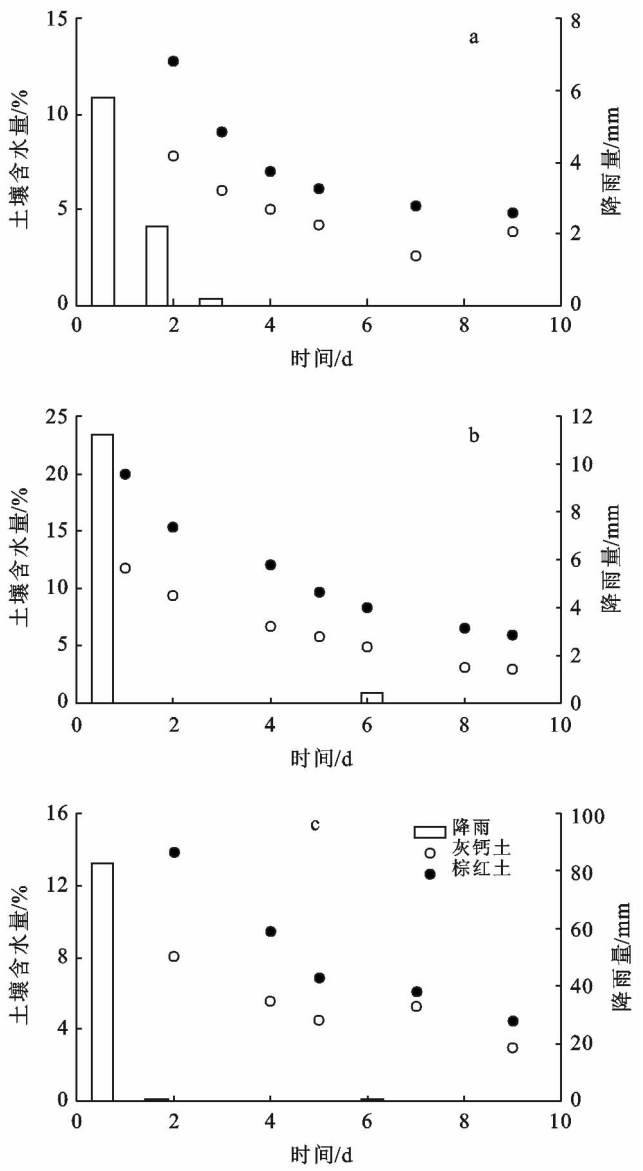


图 1 2018 年 5—9 月伊犁河谷草地日降雨量和气温变化

降雨和温度对土壤水分变化影响巨大，在不同降雨和气温影响下，表层土壤水分的变化不同。0—3 mm 的小降雨过后，灰钙土和棕红土坡面各处理表层土壤含水量无明显变化，说明在这种微降雨过后，随着地表温度升高，表层土壤水分迅速蒸发，很快恢复到稳定状(图 2)。



注：a 为 5.8 mm 降雨下灰钙土和棕红土表层土壤含水量时间变化；b 为 11.2 mm 降雨下灰钙土和棕红土表层土壤含水量时间变化；c 为 82.4 mm 降雨下灰钙土和棕红土表层土壤含水量时间变化。

图 2　3 场降雨下灰钙土和棕红土表层土壤含水量的时间变化

图 2 主要分析了 3 场不同降雨量后 8 d 的表层土壤含水量的变化规律。在 3 场不同量的降雨下，11.2 mm 降雨后表层土壤含水量上升幅度最大(见图 2b)，降雨主要入渗到土壤中，其次是 82.4 mm 降雨(见图 2c)，在大暴雨降雨情况下，降雨主要以径流形式流损失。在不同降雨量的情况下，降雨后 4 d，表层土壤含水量下降迅速，到第 8 d，趋于稳定。

降雨后 8 d 气温与表层土壤含水量之间的相关性可以看出气温对表层土壤含水量变化的影响(见图 3)。从图 3 可知在两种土壤类型坡面上，降雨后 8 d 内表层土壤含水量随气温的升高而减小，两者存在显著的幂函数关系。气温可以解释 60%左右表层土壤含水量的变化，表明气温对表层土壤含水量变化有较大影响。

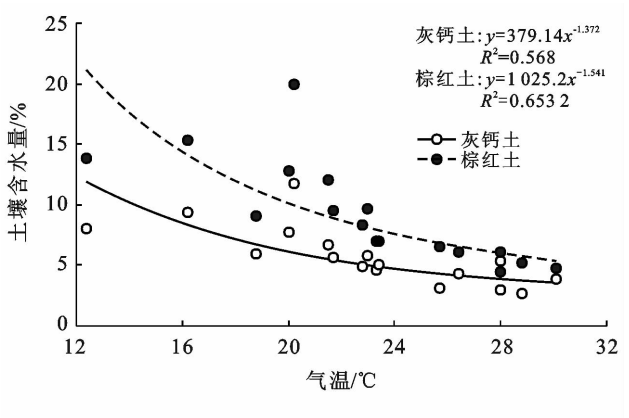


图 3　灰钙土和棕红土表层土壤含水量与气温的相关性

2.2.2　坡位　从图 4 可以看出，在不同管理措施下，灰钙土和棕红土的上坡、中坡、下坡之间的表层土壤含水量无显著性差异($p>0.05$)，说明坡位对两种土壤类型坡面表层土壤含水量没有影响。潘占兵等[19]在宁南黄土丘陵区研究发现受降水再分配影响，上、中、下坡 0—180 cm 平均土壤含水量变化趋势为：下坡＞中坡＞上坡。苏子龙等[20]在典型黑土区农业小流域研究发现 0—100 cm 各坡位土壤含水量中，下坡位土壤含水量最大，上坡位次之。同样，田迅等[21]在内蒙古草原研究发现坡底 0—50 cm 平均土壤含水量大于坡顶。表层土壤含水量的变异性较强，与深层土壤含水量的变化有一定差异，因此不同坡位对不同深度土层土壤含水量的影响不同。

2.2.3　土壤类型　灰钙土是伊犁河谷半荒漠草原带分布最广泛的地带性土壤，约占伊犁河谷总面积的 12%[22]。从伊犁河谷西部海拔 400 m 到东部的 1 200 m，大都分布在海拔较高的二、三级阶地及山前洪积—冲积扇。棕红土主要分布在伊宁县的青年农场等地，分布面积较小，易引起洪水灾害。表 3 是试验区两种土壤类型的土壤理化性质。从两者的土壤机械组成来看，灰钙土的沙粒含量高于棕红土，棕红土的粉粒和黏粒含量以及干容重高于灰钙土，两者都属于粉壤。灰钙土有机质含量高于棕红土，pH 值差异不大，而棕红土电导率高于灰钙土。图 5 显示，各管理措施下棕红土的表层土壤含水量与灰钙土的表层土壤含水量有显著性差异，棕红土表层土壤含水量比灰钙土约

高 20%左右。一般来说,具有较高持水性的土壤能够贮存较多的水。土壤沙粒含量低时,其持水能力较强,土壤水分的稳定性也高[23]。棕红土沙粒含量较低于灰钙土,因此其持水性较强,表层土壤含水量较高。

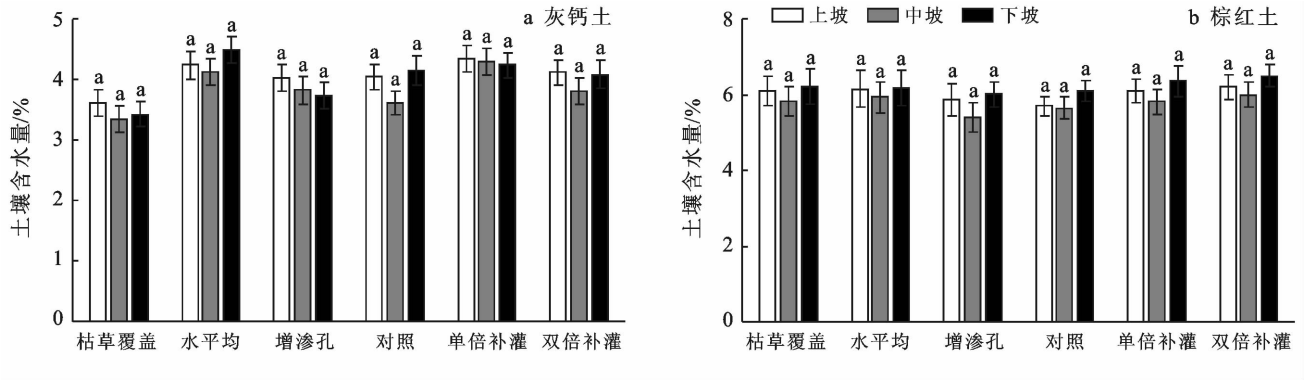
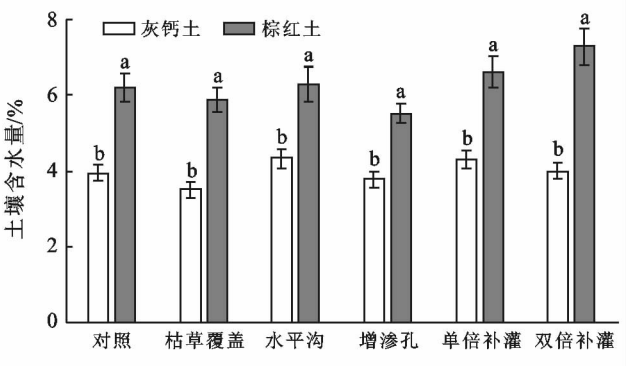


图 4 伊犁河谷草地不同管理措施对灰钙土(a)和棕红土(b)坡位表层土壤含水量的影响

表 3 伊犁河谷草地两种土壤类型的土壤理化性质

母质	取样土层/cm	有机质/(g·kg^{-1})	土壤颗粒组成			土壤质地	干容重/(g·cm^{-3})	pH 值	电导率/(us·cm^{-1})
			0.05～2 mm	0.002～0.05 mm	<0.002 mm				
灰钙土	0—10	22.67	22.76%	74.67%	2.57%	粉壤	1.21	8.58	120.7
棕红土	0—10	17.91	20.72%	75.96%	3.32%	粉壤	1.47	8.38	473.5



注:图中不同小写字母表示在 5%水平上差异显著。

图 5 不同管理措施下灰钙土和棕红土表层土壤含水量的对比分析

2.3 人为管理因素对土壤水分的影响

2.3.1 草地土壤管理措施 图 6 为不同土壤管理措施下灰钙土和棕红土坡面表层土壤含水量的变化特征。从图 6 中可以看出各处理表层土壤的水分变化分为土壤水分补充期和土壤水分消退期。土壤水分补充期是指降雨后,水分进入土壤,土壤含水量迅速增加。土壤消退期是指在降雨后,随着气温的上升,储存在土壤中的水分不断蒸发,土壤含水量迅速降低,很快恢复到原来的稳定状态。

根据土壤含水量的动态变化过程,结合降雨期间的水分蒸发量的季节变化规律,将试验区各处理表层土壤水分变化分为 2 个阶段。5—6 月为表层土壤水分强烈波动期,该期间降雨多且降雨量较大,温度高,土壤水分在降雨后迅速上升。后期随着温度的升高,蒸发加强,土壤水分又呈急剧下降状态。7—9 月为表层土壤水分的稳定期,在此期间,气温偏高,降雨量小且降雨次数减少,土壤水分波动较小,处于一个较为稳定的状态。

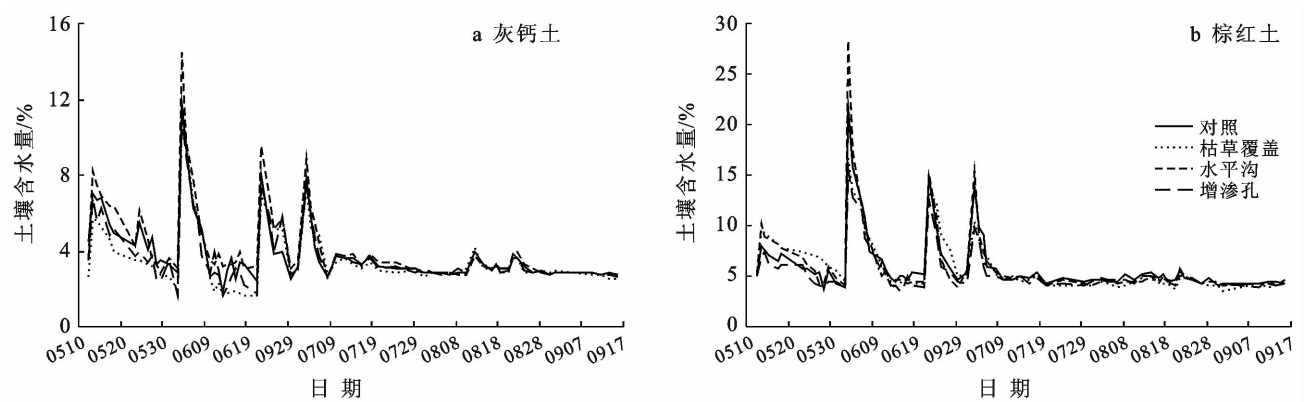


图 6 不同土壤管理措施下灰钙土(a)和棕红土(b)坡面表层土壤含水量的变化

各处理表层土壤含水量在降雨后有所升高,随后逐渐下降并恢复到稳定状态。在降雨过后,灰钙土和棕红土坡面水平沟处理表层土壤含水量上升幅度最大,水平沟可以拦蓄径流,增大土壤含水量;灰钙土坡面枯草覆盖处理表层土壤含水量上升幅度最小,这是由于部分降雨难以浸透枯草覆盖层,补充到土壤中。红棕土坡面上,增渗孔处理表层土壤含水量上升幅度最小,增渗孔促进了棕红土表层土壤含水量的下渗,使其表层土壤含水量大部分入渗到下部土壤中去。

在各处理表层土壤含水量恢复到稳定状态的时间里,两种土壤类型坡面各处理表层土壤含水量下降速度为:水平沟>对照>增渗孔>枯草覆盖。水平沟处理在降雨后的前期表层土壤含水量大,但后期因温度上升较快,表层积水迅速蒸发,含水量急剧下降。增渗孔处理中,大部分降雨渗入深层土壤中,在后期蒸发过程中,水分上移,能够在一定程度上增加表层土壤含水量,使得其土壤含水量在降雨后变化较为缓慢。枯草覆盖处理表层土壤含水量下降速率最慢,恢复到稳定状态的时间最长,说明枯草覆盖可以在一定程度上减缓水分的散失。

2.3.2　集雨补灌　集雨补灌措施可以有效补充土壤水分,是一种雨水高效利用的方式。图 7 为两种土壤类型坡面上不同补灌措施下,表层土壤含水量的对比分析。由图 7 可知,不同补灌方式下,表层土壤含水量差异不大,因为温度过高,补灌后,一部分水分流入深层土壤,被植物所吸收利用,另一部分水分迅速蒸发,从而恢复到稳定状态。孙乐凤[24]利用集雨补灌技术对干旱区玉米进行研究发现,集雨补灌可以显著提高深层土壤含水量,同时提高了玉米产量和水分利用效率。后期在进行集雨补灌效果研究时,可以进一步研究深层土壤含水量以及草被的生长状况。

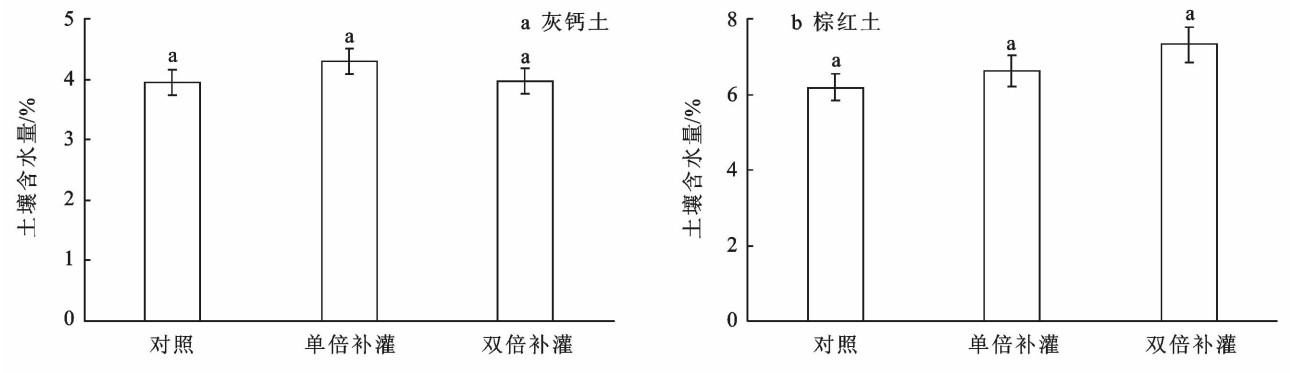


图 7　不同集雨补灌措施对灰钙土(a)和棕红土(b)坡面表层土壤含水量的影响

3　讨 论

对于自然因素来说,土壤含水量的变化主要受蒸发和降水等因子制约[25]。降雨可以在 8 d 内使表层土壤含水量高于平常状态值,这对于补充灌溉具有一定的借鉴意义。本文集雨补灌措施对表层土壤含水量没有太大影响,分析原因可能是由于灌溉的量太小,加上温度高,表层土壤水分很快散失。补充灌溉可以增加土壤含水量,但只有达到一定量时,才能够到达预期效果,促进植物的生长[26-27]。在降雨少的情况下,可以加大补灌量,确定补灌的周期,从而促进草被植物的生长。气温也是影响表层土壤含水量的一个重要因素,有相关研究表明,降雨结束后,土壤水分的再分布主要受土水势控制,随着时间的延长,蒸发作用逐渐占据主导地位[28]。因此,在降雨后及时采取一定的防蒸发措施,可以有效减缓表层土壤含水量的蒸发。

本文研究发现表层土壤含水量的变化除了受降雨和气温主控因子的影响,还受土壤类型因素的影响。其它自然因素,如风速、太阳辐射、植被状况等也会对表层土壤含水量的变化产生一定影响。后期可以对这些因素开展相关研究内容。

由于降雨时间分布不均,伊犁低山区较为干旱,植被生长状况较差,不同的土壤管理措施在一定程度上可以影响该地区的植被重建和生态修复工作。通过对各处理表层土壤含水量的对比分析可知,不同土壤管理措施在降雨后作用明显。水平沟处理在降雨后的表层土壤含水量最大。水平沟措施改变了土壤的水分条件[29],在降雨补充下水平沟可以集蓄大量雨水,表层土壤含水量大幅度增加。然而枯草覆盖处理的表层土壤含水量增加幅度最小,可能是在降雨时有枯草覆盖的缘故,枯草会吸收水分。但在降雨后表层土壤含水量恢复到稳定状态的一段时间里,枯草覆盖处理下降速率最为缓慢,主要是由于地面的枯草有

利于缓和土壤温度,在高温时有隔热保温的作用[30]。单小琴[31]同样也在地表覆盖秸秆并且有效地减弱了0—20 cm 土壤含水率的波动幅度。

4 结 论

(1) 降雨和气温对表层土壤含水量影响显著,表层土壤含水量在降雨后显著升高,随着气温上升,又显著降低。

(2) 坡位对草地坡面表层土壤含水量没有显著性影响。

(3) 不同土壤类型的表层土壤含水量不同,棕红土表层土壤含水量要高于灰钙土,持水性较好。

(4) 不同管理措施表层土壤含水量在降雨后有明显差异。降雨使各处理表层土壤含水量增加,由高到低依次为:水平沟>对照>增渗孔>枯草覆盖。降雨结束后表层土壤含水量随时间呈现下降趋势,下降速率由高到低依次为水平沟>对照>增渗孔>枯草覆盖。在降雨后 4 d 内,表层土壤含水量下降的速率最快,气温上升的速率最慢,在此期间,可以采取相应的管理措施,减缓表层土壤含水量的蒸发。不同集雨补灌方式下表层土壤含水量差异不明显,但集雨补灌措施可在短时内提高表层土壤含水量,调控和再利用地表径流。后续还需要在坡面—沟道系统探讨集雨补灌措施的适用性。

[参 考 文 献]

[1] 范天文,张琳,王健.伊犁河谷草牧业现状及可持续发展对策[J].草学,2017(6):81-83.

[2] 朱美玲,蒋志清.新疆牧区超载过牧对草地退化的影响分析[J].草业与畜牧,2012(8):1-4.

[3] 范天文,闫凯,靳瑰丽.伊犁河谷天然草地退化现状及修复措施[J].草业科学,2008,25(3):22-25.

[4] Zhang Wentai, Zhou Jianqin, Feng Guanglong, et al. Characteristics of water erosion and conservation practice in arid regions of Central Asia:Xinjiang,China as an example[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2015,3(2):97-111.

[5] 肖胜生,胡志坚,张继松,等.鄱阳湖区典型堤防不同植草护坡产流产沙特征试验研究[J].水土保持通报,2019,39(2):10-15.

[6] 杨文治.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.

[7] 贾小旭,邵明安,魏孝荣,等.黄土高原北部草地表层土壤水分状态空间模拟[J].农业工程学报,2010,26(10):38-44.

[8] 程立平,刘文兆.黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J].农业工程学报,2011,27(9):203-207.

[9] 穆兴民.黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用[J].农业工程学报,2000,16(2):41-45.

[10] Ren Xiaolong, Jia Zhikuan, Chen Xiaoli. Rainfall concentration for increasing corn production under semiarid climate[J]. Agricultural Water Management,2008,95(12):1293-1302.

[11] Wu Yang, Jia Zhikuai, Ren Xiaolong, et al. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system combined with irrigation on improving water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in semi-humid area of China[J]. Agricultural Water Management,2015,158:1-9.

[12] 王景燕,胡庭兴,龚伟,等.天然林人工更新后枯落物对土壤微生物数量及有效养分含量的影响[J].四川农业大学学报,2010,28(3):285-290.

[13] Atkinson J L, McCarty L B, Bridges W C. Effect of core aerification frequency, area impacted, and top-dressing rate on turf quality and soil physical properties [J]. Agronomy Journal, 2012,104(6):1710.

[14] 赵文举,冀宏,范严伟,等.甘肃中部地区集雨补灌生态农业综合效应分析[J].中国水土保持,2011(12):48-50.

[15] 张建兵,熊黑钢,李宝富,等.干旱区农田土壤水分地温变化规律及其相互关系[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):127-133.

[16] 孙慧兰,陈亚宁,李卫红,等.新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究[J].中国沙漠,2011,31(5):1273-1277.

[17] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:323-327.

[18] 刘波,肖子牛.1961—2005 年新疆区域分级雨日(量)的气候特征[J].干旱区地理,2011,34(3):419-428.

[19] 潘占兵,余峰,王占军,等.宁南黄土丘陵区坡向、坡位对苜蓿地土壤含水量时空变异的影响[J].水土保持研究,2010,17(2):141-144.

[20] 苏子龙,张光辉,于艳.典型黑土区农业小流域不同坡向和坡位的土壤水分变化特征[J].中国水土保持科学,2013,11(6):39-44.

[21] 田迅,高凯,张丽娟,等.坡位对土壤水分及植被空间分布的影响[J].水土保持通报,2015,35(5):12-16.

[22] 吴荣镇,权志城.新疆伊犁地区土壤[M].新疆:伊犁地区土壤土壤普查办公室,1995:1-277.

[23] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E C, et al. SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,92(4):436-446.

[24] 孙乐凤.集雨补灌条件下不同玉米种植密度对产量及水分利用的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.

(下转第 71 页)

类型 2017,2018 年变化规律不显著。短时间内,不同植被类型的土层和时间土壤水分变化规律尚不稳定,仍需继续监测各植被类型的土壤水分,为该地区植被稳定性提供指导意见。

[参 考 文 献]

[1] 杨磊,卫伟,陈利顶,等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. 地理研究,2012,31(1):71-81.

[2] 黄肖勇,李生宝. 半干旱黄土丘陵区土壤水分动态变化研究综述[J]. 农业科学研究,2009,30(3):69-72.

[3] 宁婷,郭忠升. 半干旱黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分循环特征[J]. 生态学报,2015,35(15):5168-5174.

[4] 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.

[5] 李细元,陈国良. 人工草地土壤水系统动力学模型与过耗恢复预测[J]. 水土保持研究,1996,3(1):166-178.

[6] 马驰,柴春山,薛睿,等. 半干旱黄土区不同植被类型土壤水分时序变化差异性研究[C]//2018 中国草学会年会论文集. 成都,2018:219-226.

[7] 李永平,兰占恩. 半干旱黄土区土壤水分运动规律研究[J]. 宁夏农业科技,1985,26(3):2-5.

[8] Yu Bowei, Liu Gaohuan, Liu Qingsheng, et al. Seasonal variation of deep soil moisture under different land uses on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019,19(3):1179-1189.

[9] 罗长寿,魏朝富,李瑞雪. 时序模型在四川盆地土壤水分动态预报中的应用[J]. 西南农业大学学报,2002,24(5):464-466.

[10] 徐志尧,张钦弟,杨磊. 半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(3):145-151.

[11] 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.

[12] 刘青柏,刘明国,王玉涛,等. 不同林型立地土壤水分性状及其持水能力的比较[J]. 干旱区研究,2011,28(5):775-779.

[13] 杨永辉,赵世伟,刘娜娜,等. 宁南黄土丘陵区不同植被措施的土壤水分特征[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):24-28.

[14] 武鹏艳. 兰州南山 4 种人工林枯落物持水性能及土壤水文效应的研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2016.

[15] 梁海斌,史建伟,李宗善,等. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应[J]. 水土保持研究,2018,25(2):87-93.

[16] 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.

[17] 李俊,毕华兴,李笑吟,等. 有序聚类法在土壤水分垂直分层中的应用[J]. 北京林业大学学报,2007,29(1):98-101.

[18] 王信增,焦峰. 基于有序聚类法的土壤水分剖面划分[J]. 西北农林科技大学学报(然科学版),2011,39(2):191-196,201.

[19] 易亮,李凯荣,张冠华,等. 黄土高原人工林地土壤水分亏缺研究[J]. 西北林学院学报,2009,24(5):5-9,49.

[20] 何其华,何永华,包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报,2003,21(2):149-156.

[21] 贾小旭. 典型黄土区土壤水分布及其对草地生态系统碳过程的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.

[22] 赵传普,徐学选,高朝侠,等. 黄土丘陵区不同植被类型下土壤水分动态[J]. 水土保持通报,2015,35(1):68-72.

[23] Yao Xueling, Fu Bojie, 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.

(上接第 64 页)

[25] 何其华,何永华,包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报,2003,21(2):149-156.

[26] 张洁,曹小娟,谢志远,等. 不同补充灌溉量对亚高温下辣椒幼苗质量影响的研究[J]. 灌溉排水学报,2014,33(1):90-92.

[27] 郭永青,李建明,邹志荣,等. 不同补充灌溉量对番茄幼苗生长的影响[J]. 西北农业学报,2010,19(4):169-172.

[28] 包含,侯立柱,刘江涛,等. 室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J]. 农业工程学报,2011,27(7):70-75.

[29] 王青杵,王改玲,石生新,等. 晋北黄土丘陵区不同人工植被对水土流失和土壤水分含量的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(2):71-74,79.

[30] 江才伦,彭良志,付行政,等. 三峡库区柑橘园不同土壤管理方式对土壤温度的影响[J]. 果树学报,2014,31(3):401-409.

[31] 单小琴. 季节性冻融期不同水肥及覆盖下土壤水热动态变化规律的试验研究[D]. 山西:太原理工大学, 2018.