

干旱半干旱区退化草地土壤水分变化及其对降雨时间格局的响应

高露¹, 张圣微^{1,2}, 朱仲元^{1,2}, 高文龙¹, 杜银龙¹

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2.内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要: 降雨是干旱半干旱地区的主要水分来源, 降雨量、降雨时长和降雨强度等共同影响降雨入渗, 进而影响降雨对地表下不同土层的补充。研究干旱半干旱区退化草地生态系统不同土层土壤水分对不同量级降雨时间格局的动态响应变化, 对于揭示水土关键要素、草地荒漠化防止及应对气候变化的影响均具有重要意义。基于2018年连续对锡林郭勒盟正镶白旗额里图牧场的降雨及地表下5, 15, 30, 60, 100 cm的土壤体积分含水率数据的观测, 探讨了各土层土壤水分变化及其对降雨事件大小的响应。结果表明: 对于干旱半干旱区草地而言, 降雨可以显著影响5—60 cm的土层土壤水分; 随着土层加深, 相同降雨过程引起的土壤水分增量呈降低趋势, 0—10, 10—20 cm土层土壤水分增量明显, 小于3, 6, 20, 50 mm的降雨不能到达地表以下5, 15, 30, 60 cm土层; 高降雨强度、降雨前较高的土壤含水率有利于雨水的下渗, 5—60 cm土层的土壤水分增量与降雨强度、土壤初始含水率以及二者交互作用均呈显著或极显著线性关系, 100 cm土层的土壤水分增量与降雨强度、土壤初始含水率以及二者交互作用均无显著线性关系, 且30, 60 cm土层土壤水分增量只在无雨日间隔极短且降雨量很大的情况下有明显波动。

关键词: 干旱半干旱; 降雨; 土壤体积分含水率; 土壤水分增量

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0195-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.028

Soil Moisture Changes in Degraded Grassland and Its Response to Rainfall Temporal Pattern in Arid and Semi-arid Areas

GAO Lu¹, ZHANG Shengwei^{1,2}, ZHU Zhongyuan^{1,2}, GAO Wenlong¹, DU Yinlong¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2. Key Laboratory of Protection and Utilization of Water Resources of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018)

Abstract: Rainfall is the main source of water in arid and semi-arid areas. Rainfall, rainfall duration and rainfall intensity all affect rainfall water infiltration, which in turn affects the replenishment of rainfall to different soil layers under the surface. It is important to study the dynamic response of soil moisture in different soil layers to different rainfall patterns in arid and semi-arid areas to reveal the key elements of water and soil, grassland desertification prevention and climate change responses. Through the continuous observations of the rainfall and the volumetric water content data of 5, 15, 30, 60 and 100 cm below the soil surface in the Xilin Gol League, and the changes of soil moisture in each soil layer and their response to the rainfall events were studied. The results showed that for grassland in arid and semi-arid areas, rainfall could significantly affect the soil moisture in soil layer of 5—60 cm; with the deepening of soil layer, the soil moisture increment caused by the same rainfall process showed a decreasing trend. The increase in soil moisture in 0—10 cm and 10—20 cm soil layer was obvious, while if the rainfall was less than 3, 6, 20, 50 mm, water could not reach the 5, 15, 30 and 60 cm soil layers. The heavier rainfall intensity and the higher soil moisture content before rainfall were favorable for the rain water infiltration. The increase of soil moisture in 5—60 cm soil layer had significant or extremely significant linear relationship with rainfall intensity, initial soil moisture content and their interaction. But there was no significant linear relationship in 100 cm soil layer. The soil moisture increments in the 30 and 60 cm soil layers occurred only when the rain-free day interval was extremely short or the rainfall was very large.

Keywords: arid and semi-arid; rainfall; soil volumetric water content; soil moisture increase

收稿日期: 2019-06-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(51779116, 51669018); 中国科学院“西部之光”青年学者计划项目

第一作者: 高露(1995—), 女, 内蒙古乌海人, 硕士研究生, 主要从事植被生态水文研究。E-mail: 986065746@qq.com

通信作者: 张圣微(1979—), 男, 黑龙江双城人, 教授, 主要从事生态水文和定量遥感研究。E-mail: zsw_imaui@163.com

草地是全球分布面积最大的陆地生态系统,占全球陆地面积的 30%~40%,占我国陆地总面积的 40%以上,且大多数位于西北部寒冷干旱地区^[1-2]。锡林郭勒草原,是内蒙古典型草原的最重要组成部分,同时也是我国重要的畜牧业养殖基地和重要的生态屏障。研究草原生态系统的土壤水分变化对于草原保护和草原荒漠化防治等具有重要意义^[3],土壤水分作为生物圈和土壤带之间的纽带,限制植物蒸腾和光合作用,从而影响了水、能量和生物地球化学循环^[4]。干旱半干旱地区占地球陆地面积的 45%,降雨是干旱半干旱草地的主要水分来源,是控制陆地生物群落的生物多样性 and 生态系统功能的一个重要因素,对土壤水分时空格局的影响尤为明显^[5-6]。草地生态系统受长期干旱和少而强的降雨事件影响^[7-8]。已有研究^[9]表明,每年春季是土壤水分积累期,夏季为消耗期,秋季为稳定期。降雨量、降雨历时和降雨强度等共同影响降雨入渗,进而影响降雨对不同土层土壤水分的补充,草地表层和根层土壤水分受降雨强度影响^[10-11]。不同降雨量级、土壤质地、基础土壤水分含量等均影响天然降水的下渗过程,从而影响植被对降雨的有效利用^[12],大降雨事件增加了土壤含水率,对土壤剖面的蓄水具有重要意义^[13]。总之,关于土壤水分对降雨的响应研究集中在沙地和荒漠区^[14-15],在干旱半干旱区退化草地对该方面的研究存在明显不足,并且在干旱半干旱区退化草地仅 900 m²研究区内取 9 个研究点研究不同深度土层土壤含水率对不同量级降雨的响应甚少。而对于干旱半干旱地区而言理解气候变化对其生态系统潜在影响尤为重要^[16]。因

此,本文以锡林郭勒盟干旱半干旱区正镶白旗退化中的草原为主要研究对象,确定不同深度土壤水分变化,以及研究区不同深度土壤水分对降雨事件大小的响应,为草地资源利用、保护与荒漠化防止提供科学依据,同时对提高退化草地干旱预警水平提供决策支持,对该区域的可持续发展具有深远影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为内蒙古锡林郭勒盟正镶白旗,地理坐标为东经 114°05′—115°37′,北纬 42°05′—43°02′。属中温带半干旱大陆性气候,冬长春短,夏热秋凉,年均气温 1.9℃,降水量少而集中,年均降水量 314 mm,年均潜在蒸发量为 2 126 mm,为降水量的 6 倍多,部分土壤理化性质及地上生物量见表 1。地上生物量为 39.27~88.62 g,容重从浅层土至深层土逐渐增加,为 1.1~1.6 g/cm³,有机质含量从表层土至深层土逐渐减小,各层土壤为中性偏碱性。各土层以砂土为主,含量为(74.54±6.08)%,5—60 cm 土层粉粒含量逐层递减,0—10,80—120 cm 土层黏粒含量较多。植被以禾本科和菊科植物为主,代表性植物有羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)、克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng)等。全旗风蚀沙化、盐渍化、草原退化、水土流失总面积占全旗总面积的 80%以上,本区被列为京津风沙源治理工程的重点旗县之一^[17-18]。

表 1 土壤理化性质及地上生物量

样地	地上生物量/g	样点编号	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	pH	颗粒组成/%		
						黏粒	粉粒	砂粒
JCK-1	88.33	JCK-1-5	1.27	11.58	7.51	0.84	34.02	65.14
		JCK-1-15	1.31	10.02	7.56	0.35	26.38	73.28
		JCK-1-30	1.28	8.19	7.81	0.39	24.19	75.43
		JCK-1-60	1.15	3.48	8.20	0.67	17.91	81.43
		JCK-1-100	1.52	1.74	8.47	0.46	11.33	88.22
JCK-3	71.62	JCK-3-5	1.36	12.00	8.31	0.57	29.25	70.18
		JCK-3-15	1.38	8.57	8.40	0.47	23.97	75.57
		JCK-3-30	1.35	7.34	8.54	0.46	21.69	77.86
		JCK-3-60	1.54	7.58	8.75	0.64	16.86	82.51
		JCK-3-100	1.82	1.04	8.91	3.20	24.76	72.05
JPR1	76.59	JPR-1-5	1.23	12.00	7.66	0.72	30.71	68.57
		JPR-1-15	1.33	11.86	8.22	0.29	22.95	76.76
		JPR-1-30	1.38	7.30	8.34	0.42	19.06	80.53
		JPR-1-60	1.43	4.71	8.72	0.72	21.79	77.50
		JPR-1-100	1.40	2.02	8.85	2.10	28.77	69.14
JPI1	44.45	JPI-1-5	1.25	11.77	7.22	0.95	32.37	66.67
		JPI-1-15	1.28	11.06	7.95	0.17	24.90	74.92
		JPI-1-30	1.30	7.44	8.18	0.24	20.19	79.56
		JPI-1-60	1.47	4.99	8.97	1.65	32.72	65.63
		JPI-1-100	1.59	2.68	8.30	1.04	25.67	73.28
JPI3	83.81	JPI-3-5	1.32	10.69	8.08	0.90	35.56	63.55
		JPI-3-15	1.30	7.30	7.82	0.36	25.83	73.81
		JPI-3-30	1.43	2.64	8.34	0.26	18.40	81.35
		JPI-3-60	1.50	1.55	8.44	0.65	19.65	79.69
		JPI-3-100	1.51	5.51	8.78	1.41	28.76	69.84

1.2 数据获取及统计分析

在研究区安置美国 Campbell 公司自动气象站对气象状况进行连续监测,分别观测降雨、风速、相对湿度、气温等气象数据。挖掘土壤剖面,在 9 个分区(JCK1、JCK2、JCK3、JPR1、JPR2、JPR3、JPI1、JPI2、JPI3)深度分别为 5,15,30,60,100 cm 处安装土壤水分传感器(CS655,Campbell,Scientific Inc.,USA),各层代表不同深度,5 cm 代表深度为 0—10 cm 的土壤水分,15 cm 代表深度为 10—20 cm 的土壤水分,30 cm 代表深度为 20—40 cm 的土壤水分,60 cm 代表深度为 40—80 cm 的土壤水分,100 cm 代表深度为 80—120 cm 的土壤水分,原状土回填。使用 3 个(J1、J2、J3)翻斗式雨量筒(TE525MM)测定降雨量。降雨量和土壤体积含水率均由采集器自动记录,其中降雨数据 1 min 记录 1 次、土壤体积含水率每 1 h 记录 1 次、气象数据为每 15 min 记录 1 次,由于降雨主要集中在 6—8 月且研究区 2018 年 6 月建成,因此选取 2018 年 7—11 月的数据进行分析(图 1)。

将当日土壤含水率平均值作为日土壤含水率,日累计降雨作为日降雨量,月累计降雨量为月降雨量,将间隔大于 24 h 的降雨作为 2 次独立降雨事件^[19-20],将降雨事件按该研究区降雨量分为 0.1~2,2.1~5,5.1~14,>14 mm 4 个量级,降雨事件发生的时间段累加为降雨历时,降雨量与降雨历时的比值作为降雨强度。

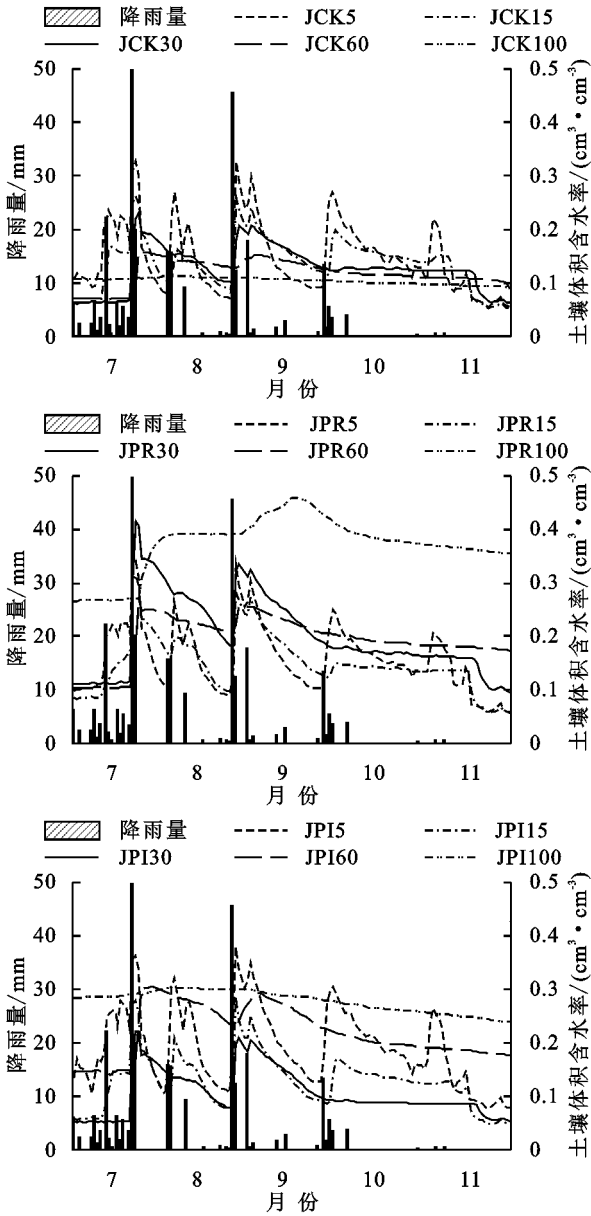
用土壤水分增量描述土壤水分对降雨响应程度。土壤水分增量为某次降雨事件后土壤含水率峰值减去降雨前土壤相对含水率,表示降雨对土壤水分的补给能力。

2 结果与分析

2.1 降雨特征与土壤含水率动态

监测期间共发生 21 次降雨事件,各量级降雨特征见表 2。该研究区主要以Ⅰ级降雨为主,Ⅳ级降雨次之,分别占总降雨事件次数的 33.33%和 28.57%,但Ⅳ级降雨对总降雨量的贡献最大,占总降雨量的

79.60%,而Ⅰ级降雨量仅占总降雨量的 1.76%。随着降雨量级的升高,贡献度和降雨强度逐渐增大。



注:将 JCK1、JCK2、JCK3 分区地表以下 5,15,30,60,100 cm 土层土壤含水率取平均标记为 JCK5、JCK15、JCK30、JCK60、JCK100,JPR5 至 JPR100 和 JPI5 至 JPI100 同理。

图 1 各土层土壤水分随降雨量的日变化

表 2 各量级降雨特征

降雨级别	降雨次数	所占比例/%	降雨量/mm	贡献度/%	降雨历时/h	降雨强度/(mm·h ⁻¹)
Ⅰ	7	33.33	5.1	1.76	9.0	0.57
Ⅱ	4	19.05	11.8	4.07	7.5	1.57
Ⅲ	4	19.05	42.2	14.57	21.0	2.01
Ⅳ	6	28.57	230.6	79.60	72.0	3.20
合计	21	100.00	289.7	100.00	109.5	

由图 1 可知,土壤体积含水率与降雨分布格局较为一致。总体而言,5—60 cm 土层土壤含水率集中在 0~0.2 cm³/cm³,但 JPI60 土壤含水率明显超出该

范围。100 cm 土层土壤含水率较大,主要集中在 0.2~0.4 cm³/cm³,但 JCK100 土壤含水率最小在 0~0.1 cm³/cm³。总体而言,当降雨量相同时 100 cm 土层

土壤含水率最大,60 cm 次之,15 cm 最小。表 3 描述了降雨当天,各土层土壤含水率与降雨量的回归方程及相关系数,只有 5,15 cm 土层土壤含水率对当天降雨量有显著响应,其余土层土壤含水率对当天降雨量没有显著响应,且各土层回归方程系数由浅层到深层逐层递减。

表 3 各土层土壤含水率随降雨量变化的回归方程和 Pearson 相关系数

土层深度/cm	回归方程	<i>r</i>	<i>P</i>
5	$y=0.25x+15.65$	0.36*	0.04
15	$y=0.20x+14.01$	0.32*	0.04
30	$y=0.15x+13.41$	0.30	0.05
60	$y=0.06x+19.06$	0.15	0.34
100	$y=0.03x+24.69$	0.11	0.50

注:*y* 为土壤含水率(%);*x* 为降雨量(mm);*n* = 189; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.2 土壤水分增量对降雨的响应

表 4 描述了不同深度下土壤含水的增加量与降雨量的回归方程和 Pearson 相关系数。土层深度为 100 cm 的土壤水分增量对降雨量没有显著响应(*r* = 0.12, *P* = 0.094),而 5—60 cm 的土壤水分增量对降雨量在 0.01 水平双侧上呈显著正相关(*r* 为 0.55~0.85, *P* < 0.001)。30 cm 的土层土壤水分增量对降雨量相关性最大。

表 4 各土层土壤水分增量随降雨量变化的回归方程和 Pearson 相关系数

土层深度/cm	回归方程	<i>r</i>	<i>P</i>
5	$y=0.27x-0.02$	0.74**	<0.01
15	$y=0.23x-0.72$	0.81**	<0.01
30	$y=0.22x-1.86$	0.85**	<0.01
60	$y=0.10x-0.82$	0.55**	<0.01
100	$y=0.02x+0.14$	0.12	0.094

注:*y* 为土壤水分增量(%);*x* 为降雨量(mm); ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相差。

由表 5 和图 2 可知,地表下各土层土壤水分随降雨事件的发生而改变,随降雨量级的增大,各土层土壤水分补给量增加。Ⅳ级降雨事件均对各层土壤水分起到了补给作用,其中 7 月 14 日降雨量大于 20 mm,降雨强度偏小(<3.20 mm/h),5,15,30 cm 含水率有显著增加,且增加的幅度逐层减弱。7 月 22 日降雨量最大,降雨强度最大(>5 mm/h),5,15 cm 土层土壤初始含水率远大于该级别降雨下 5,15 cm 土层平均土壤初始含水率,对 5,15,30,60 cm 的土层起到了补给作用,且 30 cm 土层增加量最大。8 月 7 日降雨强度大于 5 mm/h,对 5,15 cm 土层起到了明显补给作用,仅 JPR 分区 30,60,100 cm 土层土壤初始含水率远高于该级别各土层平均土壤初始含水率。8 月 29 日降雨量大于 50 mm,降雨强度大于 3.20

mm/h,对 5 层土壤水分均起到了补给作用,且增加幅度逐层减弱。9 月 4 日降雨量为 20 mm,降雨强度较小(<3.20 mm/h),对各层土壤水分几乎没有补给。10 月 1 日降雨量大于 20 mm,降雨强度最小,仅对 5,15 cm 的土层起到明显补给作用。其中 8 月 29 日降雨对 JPI 分区 5,15 cm 土层土壤含水率补给最大;7 月 22 日降雨对 JPR 分区 30 cm 土层土壤含水率补给最大,对 JPI 分区 60cm 土层土壤含水率补给最大;7 月 14 日降雨对 JPR 分区 100 cm 土层土壤含水率补给最大,其余降雨事件对 100 cm 土层均无明显补给。

Ⅲ级降雨事件 7 月 1 日降雨强度最大(>3.20 mm/h),但降雨量小于 10 mm,只对 JCK 分区 5 cm 土层土壤含水率起到了微弱补给。7 月 10 日与 7 月 18 日相比,降雨量相似(>10 mm),但 7—18 日降雨强度偏大(>2.01 mm/h(Ⅲ级降雨事件平均降雨强度)),为该级别降雨事件最大值,降雨前 JCK 分区土壤初始含水率 0.20,远高于该级别降雨事件的平均值 0.13,7 月 10 日对 5 cm 土层土壤含水率起到了补给作用。8 月 12 日降雨量 9.4 mm,降雨前 JPI 分区土壤初始含水率 0.22,远高于该级别降雨事件的平均值 0.16,对 5 cm 土层土壤含水率有较强的补充作用。

由表 6 可知,5,15 cm 土层的土壤水分增量与 *I*、*C* 和 *I* * *C* 均呈显著和极显著的线性关系,30,60 cm 土层的土壤水分增量只与 *I* 和 *I* * *C* 呈极显著的线性关系,100 cm 土层的土壤水分增量与 *I*、*C* 和 *I* * *C* 均无显著或极显著的线性关系。

3 讨论

3.1 土壤水分动态对降雨的响应

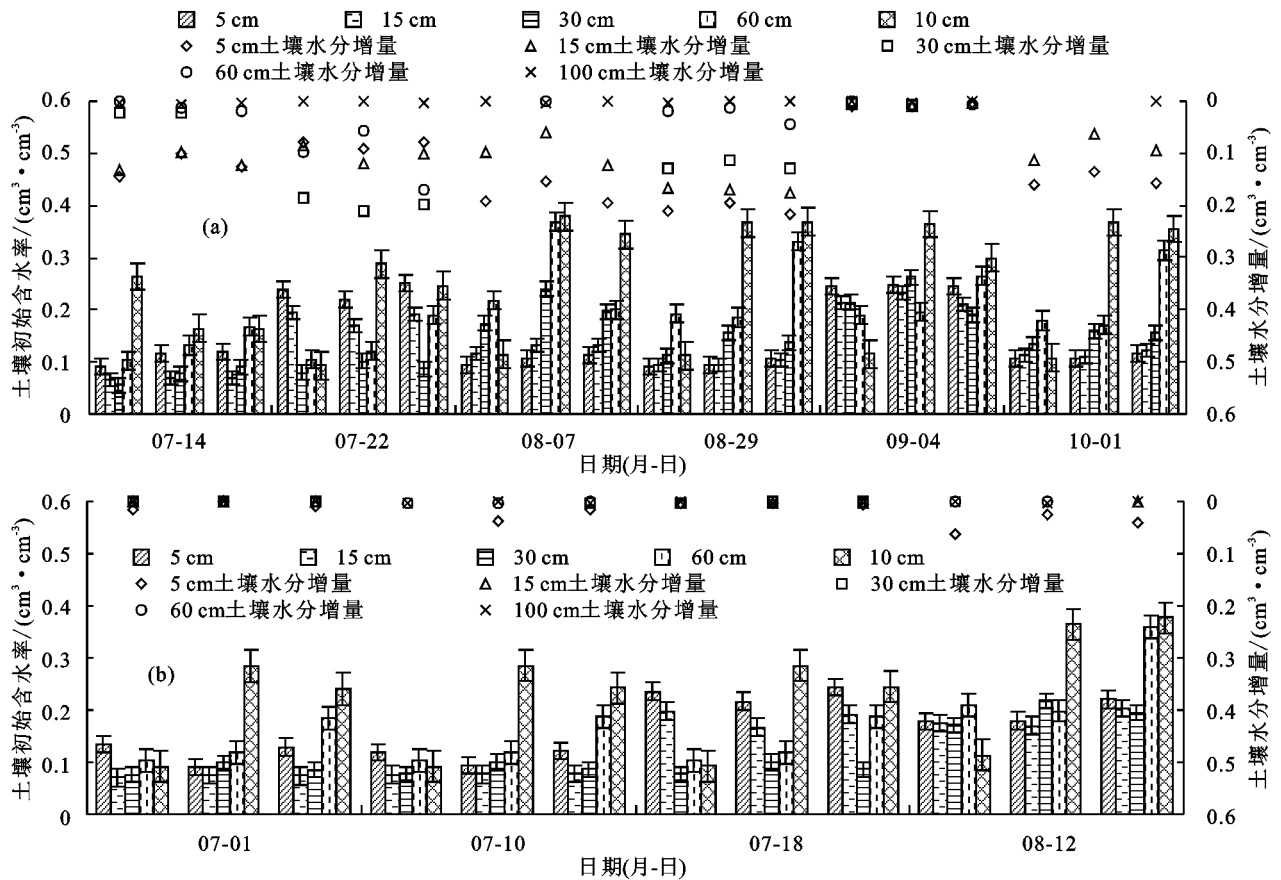
降雨显著影响 5—60 cm 土层土壤水分变化,土壤水分动态通常与降雨格局保持一致。该地区主要以生长季降雨Ⅰ级降雨为主,Ⅳ级降雨次之,且Ⅳ级总降雨量占总降雨量的 79.60%。这是由于春季降雨较少,雨季来临后,对于土壤水分得到较强的补给形成峰值,这与常昌明等^[21]研究结果一致。此外 100 cm 土层土壤含水率月动态明显高于 5—60 cm 土层,且 JCK100 土壤含水率相比于 JPR100 和 JPI100 少 0.17,0.25 cm³/cm³,这是由于该研究区潜水平埋藏较浅^[22],春季水分在土壤冻结过程中水分均呈向上运移趋势^[23],当土壤解冻,100 cm 土层土壤水得到地下水补充,土壤含水率大于 5—60 cm,而 JCK100 土壤含水率较小(表 1),可能是由于 JCK1 黏粒含量较少,约为 JCK 分区均值的 18.8%,土壤持水力弱。但 JPI60 土壤含水率较大,相比而言,可能是由于 JPI1 黏粒含量较多,土壤持水力较强,使土壤含水率增大,约为 JPI 分区

均值的 1.2 倍;同样 JCK100 土壤有机质含量明显低于 JPR100 和 JPI100。除此之外,土壤水分也是大气的一种水源,土壤水分的消耗主要通过植被蒸腾作用和土壤蒸发作用,植被通过蒸腾作用消耗水分^[24]。

表 5 引起各深度土壤水分增加的降雨情况

日期 (月-日)	降雨 级别	无雨日 间隔/d	降雨量/ mm	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	分区	土壤水分增量/(cm ³ ·cm ⁻³)				
						5 cm	15 cm	30 cm	60 cm	100 cm
07-14	Ⅳ	1	24.6	1.75	JCK	14.3	13.2	2.1	0.1	0.2
					JPR	10.1	9.7	2.3	1.2	0.5
					JPI	12.5	12.2	−0.4	1.9	0.3
07-22	Ⅳ	1	72.3	7.61	JCK	7.7	8.4	18.4	9.8	0.1
					JPR	9.0	12.0	20.9	5.6	0
					JPI	8.0	10.2	19.9	16.9	0.2
08-07	Ⅳ	11	31.1	5.18	JCK	19.2	9.8	−0.2	−0.6	0
					JPR	15.3	5.9	−1.9	0.1	0.2
					JPI	19.6	12.3	−0.4	−0.7	0
08-29	Ⅳ	1	58.9	4.20	JCK	21.0	16.8	13.0	1.8	0.2
					JPR	19.5	16.9	11.3	1.2	−0.1
					JPI	21.7	17.7	13.0	4.3	0.1
09-04	Ⅳ	3	20.0	1.67	JCK	0.8	0.5	0.3	0	0.1
					JPR	0.9	0.8	0.6	−0.3	0.2
					JPI	0.3	0.3	−0.2	0.5	0.1
10-01	Ⅳ	1	23.8	1.44	JCK	16.0	11.3	−0.4	−0.6	−0.2
					JPR	13.5	6.3	−1.1	−0.4	−0.2
					JPI	15.8	9.5	−0.5	−0.9	−0.1
07-01	Ⅲ	4	6.0	4.00	JCK	1.5	0	−0.1	0	0
					JPR	−0.1	−0.1	0	0.1	0
					JPI	0.8	−0.1	−0.1	0.1	0.1
07-10	Ⅲ	2	13.2	1.64	JCK	−1.5	−0.8	−0.9	0.2	0.2
					JPR	3.9	−0.3	−0.9	0.2	0.1
					JPI	1.6	−0.6	0.3	0.1	0.3
07-18	Ⅲ	1	13.7	2.48	JCK	0.3	−0.4	0.2	0.2	0
					JPR	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2
					JPI	0.7	0.2	0.1	0.3	0.2
08-12	Ⅲ	4	9.4	1.57	JCK	6.2	−0.2	−0.4	−0.1	0
					JPR	2.6	−1.0	−0.6	0	0.2
					JPI	4.2	0	−0.4	−0.3	−0.1
07-04	Ⅱ	1	2.6	2.55	JCK	−1.8	0.3	0.1	0	0
					JPR	0.3	0.2	0.1	0	0
					JPI	−1.0	0.3	0.1	0	0.1
07-25	Ⅱ	2	2.8	1.77	JCK	−0.8	−1.3	−0.8	−0.1	0
					JPR	−1.5	−1.2	−0.8	0	0.1
					JPI	−1.4	−1.2	−0.7	−0.3	−0.2
09-15	Ⅱ	2	3.8	1.40	JCK	0.1	−1.0	0.1	0	0
					JPR	−0.5	−0.7	−0.1	0	−0.2
					JPI	−0.3	−0.9	0	−0.1	−0.1
10-06	Ⅱ	4	0.5	1.27	JCK	−1.8	0.3	0.1	0	0
					JPR	0.3	0.2	0.1	0	0
					JPI	−1.0	0.3	0.1	0	0.1

注:将 JCK1、JCK2、JCK3 3 个分区各土层土壤含水率取平均标记为 JCK;JPR 和 JPI 同理。



注:(a)为Ⅳ级降雨事件 JCK、JPR、JPI 分区 5、15、30、60、100 cm 土层土壤初始含水率(cm^3/cm^3)和土壤水分增量(cm^3/cm^3);(b)为Ⅲ级降雨事件 JCK、JPR、JPI 分区 5、15、30、60、100 cm 土层土壤初始含水率(cm^3/cm^3)和土壤水分增量(cm^3/cm^3)。

图 2 Ⅲ和Ⅳ级降雨事件各土层深度土壤初始含水率和土壤水分增量

表 6 多元线性回归分析

数据来源	土壤水分增量/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$				
	5 cm	15 cm	30 cm	60 cm	100 cm
降雨强度(I)	0.026 [*]	0.011 [*]	0 ^{**}	0 ^{**}	0.777
土壤初始含水率(C)	0 ^{**}	0.049 [*]	0.210	0.638	0.446
$I * C$	0 ^{**}	0.011 [*]	0 ^{**}	0 ^{**}	0.720

注: * 表示 $p < 0.05$ 线性显著; ** 表示 $p < 0.01$ 线性极显著。

3.2 地表以下不同土层土壤水分对不同级降雨的响应

水分作为干旱地区生态系统的主要限制因素,其中土壤水是干旱草地生态系统植物水分的主要来源,是养分循环和流动的载体^[25],降雨量越大,土壤水分增量就越大,且 5—60 cm 的土壤水分增量对降雨量在 0.01 水平双侧上呈显著正相关。研究发现,小于 3、6、20、50 mm 的降雨不能到达地表以下 5、15、30、60 cm 土层,小降雨事件只能导致较浅的降水入渗,但当降雨前土壤含水率较高时,对于 5 cm 土层而言,8 月 12 日降雨前 JPI 分区土壤初始含水率 0.22,远高于该级别降雨事件的平均值 0.16,降雨量 9.4 mm,对 5 cm 有较强的补充作用;对于 15 cm 土层而言,7 月 18 日降雨量 13.7 mm,降雨强度为该级别降雨事件最大值,降雨前 JCK 分区土壤初始含水率 0.20,远高于该级别降雨事件的平均值 0.13。对大降雨事件

而言,例如 7 月 22 日,降雨量降雨强度达到最大值且无雨日间隔极短,5、15 cm 土层土壤初始含水率远高于该级别降雨事件 5、15 cm 土层的平均值,该日 30、60 cm 土层得到了较强的补充作用。8 月 29 日干旱间隔极短且降雨量及降雨强度较大,同样对 30、60 cm 土层起到了明显的补给作用,因此,高降雨强度、降雨前较高的土壤含水率有利于雨水的下渗,且深层土壤水分响应量很小,30、60 cm 土层土壤水分增量只在无雨日间隔极短且降雨量很大的情况下有明显波动(图 2 和表 5),这与其他地区研究^[15、26-27]一致。

以上分析更需要大量降雨及土壤水分等数据,仅凭 2018 年 21 次 0.1 mm 以上的降雨远远不够,通过上述分析可结合天气预报降雨量,预测未来不同量级降雨土壤水分变化情况,从而提供准确的牧业气象服务,为干旱半干旱区缓解干旱提供重要理论依据。

4 结 论

(1)对于干旱半干旱区草地而言,降雨可以显著影响 5—60 cm 的土层土壤水分,且土壤水分动态与降雨分布格局基本保持一致。

(2)随着土层加深,相同降雨过程引起的各层土壤水分增量呈降低趋势,5,15 cm 土层土壤水分增量明显,其他土层仅受几次极端降雨过程影响而增加。小于 3,6,20,50 mm 的降雨不能到达地表以下 5,15,30,60 cm 土层,5—60 cm 的土壤水分增量对降雨量呈显著正相关。

(3)高降雨强度、降雨前较高的土壤含水率有利于雨水的下渗,且深层土壤水分响应量很小,5,15 cm 土层的土壤水分增量与降雨强度、土壤初始含水率以及二者交互作用均有显著和极显著的线性关系,30,60 cm 土层的土壤水分增量只与降雨强度及二者交互作用有极显著的线性关系,100 cm 土层的土壤水分增量与降雨强度、土壤初始含水率以及二者交互作用均无显著或极显著的线性关系。30,60 cm 土层土壤水分增量只在无雨日间隔极短且降雨量很大的情况下有明显波动。

参考文献:

[1] 徐柱.面向 21 世纪的中国草地资源[J].中国草地,1998 (5):1-8.

[2] White R P, Murray S, Rohweder M, et al. Pilot analysis of global ecosystems[J]. Word Resources Institute, 2000,4(6):275.

[3] Gremer J R, Bradford J B, Munson S M, et al. Desert grassland responses to climate and soil moisture suggest divergent vulnerabilities across the southwestern United States [J]. Global Change Biology,2015,21(11):4049-4062.

[4] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review [J]. Earth-Science Reviews,2010,99(3/4),125-161.

[5] Wu J G, Bai Y F, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau [J]. Ecology,2008,89(8):2140-2153.

[6] 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.

[7] Min S K, Zhang X, Zwiers F W, et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes [J]. Nature, Nature Publishing Group,2011,470(7334):378-381.

[8] Murray V, Ebi K L. IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX) [J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2012,66(9):759-760.

[9] 张军红,吴波.干旱、半干旱地区土壤水分研究进展[J].中国水土保持,2012(2):40-43.

[10] Li X Y, Zhang S Y, Peng H Y, et al. Soil water and temperature dynamics in shrub-encroached grasslands and climatic implications: Results from Inner Mongolia steppe ecosystem of north China [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2013,171:20-30.

[11] Albertson J D, Kiely G. On the structure of soil moisture time series in the context of land surface models [J]. Journal of Hydrology,2001,243(1):101-119.

[12] 王海梅,侯琼,冯旭宇,等.自然降雨过程对典型草原土壤水分的影响研究:以锡林浩特为例[J].干旱气象, 2016,34(6):1010-1015.

[13] Jana L, Heisler W, Alan K, et al. Increasing precipitation event size increases aboveground net primary productivity in a semi-arid grassland [J]. Oecologia, 2008,158(1):129-140.

[14] 程一本.干旱半干旱地区典型沙地深层土壤水分渗漏过程研究[D].北京:中国林业科学研究院,2018.

[15] 魏雅芬,郭柯,陈吉泉.降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应[J].植物生态学报,2008,32(6):1346-1355.

[16] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. Science,2007,316(5826):847-851.

[17] 胡尔查,朵兰.草原生态建设与发展对策:以正镶白旗为例[J].农业经济问题,2002(增刊 1):37-40.

[18] 艳燕,胡云锋,刘越,等.不同利用强度下草地植物物种多样性变化:以正镶白旗典型温性草原区为例[J].资源科学,2012,34(6):1032-1038.

[19] 卫智军,韩国栋,赵钢,等.中国荒漠草原生态系统研究 [M].北京:科学出版社,2013:138-152.

[20] 刘贤赵,康绍忠.降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述[J].水土保持通报,1999,19(2):60-65.

[21] 常昌明,牛建明,王海,等.小针茅荒漠草原土壤水分动态及其对降雨的响应[J].干旱区研究,2016,33(2): 260-265.

[22] 刘志军,梁金全,王宝华,等.内蒙古正镶白旗地下水的赋存条件与分布规律[J].西部资源,2012(4):118-119.

[23] 吴谋松,黄介生,谭霄,等.不同地下水补给条件下非饱和砂壤土冻结试验及模拟[J].水科学进展,2014,25 (1):60-68.

[24] 苏涛,王鹏新,杨博,等.基于生物量的区域土壤水分变化量反演[J].农业工程学报,2010,26(5):52-58.

[25] 于贵瑞,王秋凤,于振良.陆地生态系统水—碳耦合循环与过程管理研究[J].地球科学进展,2004,19(5): 831-839.

[26] 刘冰,赵文智,常学向,等.黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应[J].中国沙漠,2011,31(3):716-722.

[27] Fitzjohn C, Ternan J L, Williams A G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: Implications for runoff and erosion control [J]. Catena,1998,32:55-70.