

黄土丘陵区降水变化对退耕草地土壤水分特征的影响

杜好田¹, 焦峰^{1,2}, 姚静¹, 李冬冬², 方昭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:在全球气候变化背景下,我国黄土高原的降水格局将呈现出季节波动增强和极端降水事件增加的趋势。土壤水分是黄土丘陵区的主要限制因子,降水变化所引起的土壤水分的改变必然对该区生态系统的结构和功能产生显著的影响。选取黄土丘陵区退耕草地为研究对象,连续定位观测自然恢复小区不同降雨梯度下(0, ±20%, ±40%, ±60%, ±80%)土壤水分动态变化,研究土壤水分变化特征及其对降水变化的响应。结果表明:(1) 随年内季节性降水变化,退耕草地生长季内土壤含水量呈“W”形波动变化;(2) 随降水梯度的增加,各土层土壤含水量变化趋势一致,均呈“M”型变化;(3) -20%下 5—9 月份土壤含水量均能保持较高水平,适当的干旱处理有助于维持较高的土壤含水量。但减雨超过 40%或增雨超过 60%都不利于土壤水分的积累;(4) 0—30 cm 土层土壤含水量对降水的响应最为明显,随着土层深度的增加响应逐渐减弱;维持和利用浅层地表水是植被恢复的关键。

关键词:黄土丘陵; 退耕草地; 土壤水分; 降水变化

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0081-08

Effects of Precipitation Changes on Soil Moisture Characteristics of Returning Farmland in Loess Hilly Region

DU Haotian¹, JIAO Feng^{1,2}, YAO Jing¹, LI Dongdong², FANG Zhao²

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

2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the characteristics of soil water change and its response to precipitation changes, this paper takes the returned grassland in the Yanhe River Watershed of the Loess Plateau as the research object, and continuously conducts the positioning observation of soil moisture under different rainfall gradients (0, ±20%, ±40%, ±60%, ±80%) in the natural restoration area. The results showed that: (1) with the change of seasonal precipitation during the year, the soil water content in the growing season showed the ‘W’ shape fluctuation; (2) with the increase of rainfall gradient, the soil moisture content of each soil layer showed the same trend, showing ‘M’ Type change; (3) soil moisture content can be maintained at a high level from May to September under -20% of rainfall, indicating that proper drought treatment can help maintain high soil water content. However, rainfall reduced by more than 40% or rainfall increased by more than 60% is not conducive to the accumulation of soil moisture; (4) the soil water content of 0—30 cm soil layer has the most obvious response to precipitation, and the response gradually decreases with the increase of soil depth. Maintaining and utilizing shallow surface water is the key to vegetation restoration.

Keywords: loess hills; returning farmland; soil moisture; precipitation change

全球气候变暖会导致降水量时空格局发生重大改变,其中包括降水量变化、降水间隔变化,以及降水季节分布变化^[1]。同时许多大气环流模型显示全球降水格局将会在未来发生巨大改变(IPCC, 2013)。预测表明:21 世纪末中国年降水量将会显著增加,其

中我国北方降水增加的幅度冬季大于夏季,南方却相反^[2]。全球变暖促使中国降水和极端降水事件呈增加趋势^[3],已经严重威胁到人类的生存发展。研究表明,黄土高原年降水量及总降水日数呈下降趋势,而小雨、大雨和暴雨强度则表现为增加趋势^[4],这些变

收稿日期:2018-11-04

修回日期:2018-11-27

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0600801);科技基础性工作专项(2014FY210130)

第一作者:杜好田(1992—),男,河南新乡人,在读硕士,主要从事水土保持与环境效应监测评价。E-mail:duhaotian@163.com

通信作者:焦峰(1967—),男,陕西省三原人,博士,副研究员,主要从事 GIS 应用、水土保持与环境效应监测评价。E-mail:jiaof@ms.iswc.ac.cn

化趋势极易使生境脆弱的黄土高原产生严重水土流失。土壤水分作为制约干旱—半干旱黄土丘陵区植物生长的重要因素^[5],是黄土丘陵区植被恢复与重建的关键所在。区域降水格局变化势必引起土壤水分供应条件发生改变,进而将会严重影响生态系统的结构和功能。黄土高原的草地面积约 $2.32\times 10^7\text{ hm}^2$,占该区总面积的 33%,是黄土高原地区植被主体^[6],且植被覆盖度呈降低趋势^[7],退耕草地更容易捕捉土壤水分与降水相互作用极端事件^[8]。在黄土丘陵区,随着植被的恢复,土壤水分对降水的变化更为敏感,对资源可利用性的瞬时波动必定产生重大影响,所以本文选取退耕草地为研究对象。

目前,针对黄土高原土壤水分变化,国内学者已开展众多研究,多数集中在植被类型^[9-10]、土地利用类型^[11-12]、地形因子^[13-14]等对土壤水分空间分布的影响及土壤水分空间预测模型研究方面^[15-16]。有关土壤水分与降水量方面,李小英等^[17]研究发现黄土高原地区表层土壤水分与降水量显著正相关,同时表层土壤水分分布存在较大时空差异和明显的季节性变化特征;高红贝等^[18]研究降水过程对土壤水分影响发现,降雨量和降雨时长与土壤水分垂直分布呈现正相关,可直接影响土壤含水量的大小;张钦弟等^[19]指出随着降雨减少,土壤水分呈现线性递减趋势,其中 0—1 m 深度土壤水分与年降水量相关系数最大;王锡稳^[20]研究发现土壤水分与本句和前一句的降水量呈现显著相关,对短期降水改变存在明显响应特征;浅层土壤水分下渗需要一定的时间周期,从而深层土壤含水量变化存在一定的滞后性^[21]。以上研究侧重于大尺度、浅层地表水分、单次降水过程土壤水分变化。但小尺度、较深土层深度土壤水分、长期定位监测可以减少其他环境因子的干扰,更能直接的揭示土壤水分对降水变化的响应过程。所以,本研究

选择黄土高原丘陵区延河流域退耕草地为研究对象,利用遮雨棚装置模拟不同降水梯度,并设置野外定点观测试验,连续监测固定深度土壤水分大小,研究不同降水事件下土壤水分的变化规律,为应对未来全球气候变化下黄土丘陵区植被恢复和重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验布设在安塞腰鼓山梯田试验地($36^{\circ}51'30''\text{N}$, $109^{\circ}19'23''\text{E}$),位于延安正北方向,距延安市 36 km。该地区为森林草原带,与森林带相比,草原植被在该区占有较大的优势^[22],属于暖温带半干旱气候,地形以沟壑为主。土壤类型为黄绵土,土质绵软,结构疏松,遇水后易崩解,属极强度侵蚀区。植被类型是自然恢复初期灌草丛,以早熟禾、野豌豆、猪毛蒿、苦苣菜等为优势物种。平均海拔高度为 1 371.9 m,年平均降水量为 505.3 mm,年内降水分布不平衡,多集中在 6—9 月份,年平均气温 8.8°C 。全年无霜期为 157 d。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 选择退耕草地为研究对象,2015 年对样地进行前期整地和除杂处理,在样地四周布设围栏保护试验不受人类和动物的干扰。通过搭建遮雨棚装置(由支撑结构、遮雨结构和集雨结构 3 部分构成)模拟降水梯度变化,雨后分别将集水桶中雨水均匀的洒入对应的增加降水小区。依据研究区降水年型和干旱划分标准设置 9 个降水梯度(表 1),样方小区面积为 $3\times 3\text{ m}$,设有 2 m 宽的间隔缓冲带以避免小区间相互干扰,每个降水梯度样地设置 5 个重复,共 45 个小区。为减少边际效应、地形、气象因子的干扰,样地布设在距离其他类型地 50 m 以上的相同地形条件下。

表 1 黄土丘陵区干旱划分标准

—80%	—60%	—40%	—20%	0	+20%	+40%	+60%	+80%
特旱	重旱	大旱	小旱	平水年	丰水	多雨	雨涝	特涝

1.2.2 数据获取 在每个试验小区中心埋入 200 cm 长的 PVC 管,分别在地表以下 30 cm,60 cm,120 cm 处放置 DS 1923 纽扣式温湿度记录仪于 PVC 管中,每隔 2 h 自动记录土壤湿度和温度的数据,精确度分别为 0.5%和 0.5°C 。从 2017 年 4 月 17 日纽扣温湿度记录仪开始记录,2017 年 11 月 3 日进行数据导出,期间分别于 2017 年 7 月 21 日、8 月 16 日和 11 月 3 日用烘干法实测土壤含水量,对纽扣湿度数据进行标定并求出对应的土壤含水量。降水数据通过安塞气象观测站获取。

1.3 数据处理 对所有数据用 Excel 2016 进行简单预处理后,运用 SPSS 19.0 对不同年份(1987—2017 年)的降雨量、各等级降水日数和土壤含水量之间进行回归分析。用单因素方差分析(one-way ANOVA)与 Duncan's test 多重比较不同降雨梯度和不同土层深度土壤含水量间的差异,以及双因素方差分析(Two-way MANOVA)不同降雨梯度与土层深度对土壤含水的交互影响。在进行数据分析之前对各类数据进行正态分布检验(单个样本 K-S 检验),检验结果所有数据均符合正态分布。所采用的绘图软

件为 Sigmaplot 12.5。

2 结果与分析

2.1 研究区 30 a 降水特征及降雨梯度下雨强分布规律

如图 1 所示,研究区 1987—2016 年年降水量平均值为 485.0 mm (最多年降水量为 714.8 mm,最少年降水量为 273.8 mm),年降水量波动较大且总体呈现出下降的趋势。相邻 5 a 年降水量变异系数呈现波动增加的趋势,2012—2016 年变异系数最大,为 35.37%,最大和最小年降水量均发生在这一区间。10 a 滑动平均年降水量分别为 538.4 mm,472.0 mm 和 444.7 mm,线性拟合年降水量下降速率为 32.60 mm/10 a(不显著)。

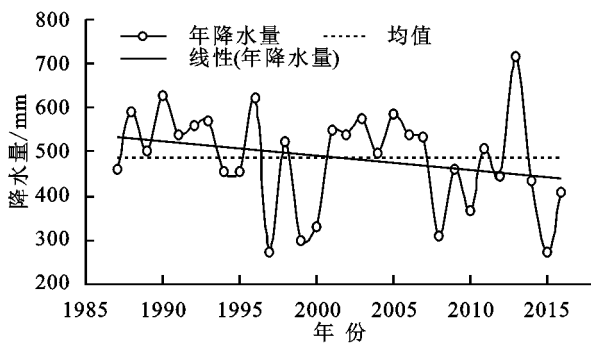


图 1 1987—2016 年年降水量变化

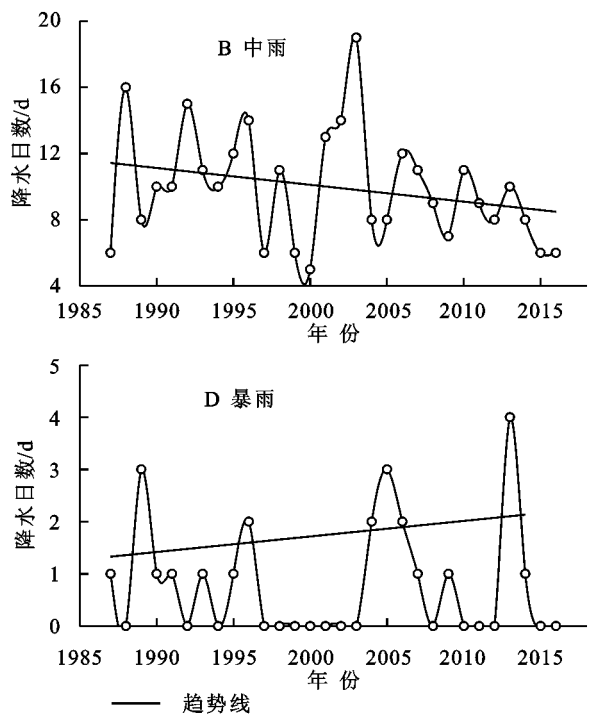
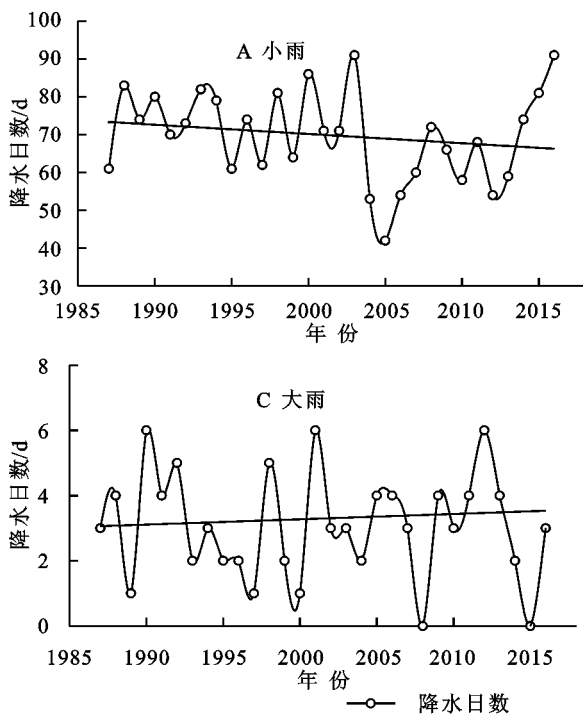


图 2 1987—2016 年各等级降水日数变化

研究区年降水量呈现下降趋势,且年内降水有较大波动,所以有必要开展不同降雨梯度下土壤水分变化特征研究。从图 3 可以看出,在遮雨棚处理的条件

如图 2A 所示,年降水小雨日数呈波动递减的趋势(不显著),最小年降水次数发生在 2015 年,为 42 d,最大年降水日数发生在 2016 年,是最小年降水日数的 2.17 倍。10 a 滑动平均年降水小雨日数分别为 73.6 d,67.4 d,68.4 d,变异系数分别为 10.6%,23.2%,16.8%,年降水小雨日数变异性呈现先增大后减小的趋势。从图 2B 可以看出,1987—2016 年年降水中雨日数在 5~19 d 浮动且呈现下降的趋势(不显著),10 a 滑动平均年降水中雨日数分别为 11.2 d,10.2 d,8.5 d,年降水中雨日数下降趋势减缓。图 2C 所示,1987—2016 年年降水大雨日数共计 92 d,其中最大日数发生在 2012 年,为 6 d,10 a 滑动平均年降水大雨日数分别为 3.2 d,3.1 d,2.9 d,变异性明显大于中雨和小雨且呈增加趋势,变异系数分别为 48.3%,53.6%,63.8%。线性拟合结果呈现上升趋势(不显著)。图 2D 显示,1987—2016 年年降水暴雨日数共计 24 d,暴雨次数发生为 0 d 的年份共计 16 a,随暴雨年发生日数的增加,暴雨发生年份总数迅速减少,10 a 滑动平均年降水暴雨日数分别为 1 d,0.7 d,0.7 d,变异性呈增加趋势。从线性拟合的结果看,暴雨日数呈增加的趋势(不显著)。从整体上看,年内不同类型等级降水次数的总和呈现递减的趋势,降水日数则表现为小雨>中雨>大雨>暴雨,其中中雨、大雨、暴雨降水日数的总和和占总降水日数的 16.53%。

下,在降水量变化的同时雨强也发生了改变,随着降水梯度的增加,小雨数量减小,其他雨型呈波动增加趋势。在-60%~-40%降雨梯度处理下,大雨雨型

消失, -80%时, 全部变为小雨。在+20%~+40%时, 小雨数量不变, 中雨数量减小, 大雨数量增加。在+60%~+80%时, 出现暴雨。

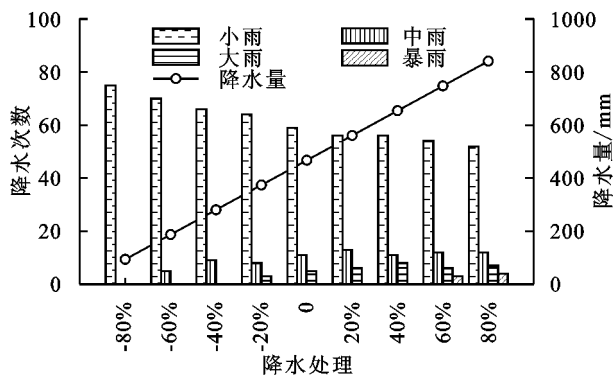


图3 2017年4—10月降雨梯度下雨强分布

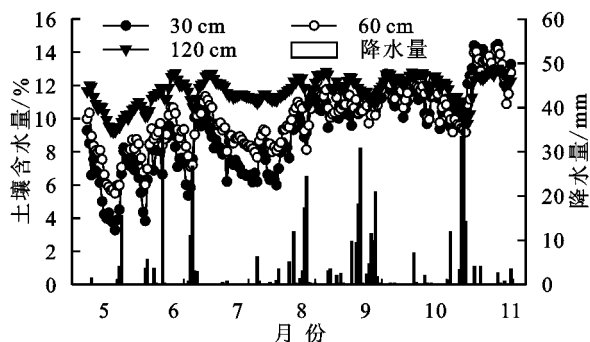


图4 退耕草地土壤水分季节动态变化

2.2 退耕草地不同土层土壤水分分析

如图4所示, 随着降水事件的发生, 0—30 cm, 30—60 cm 和 60—120 cm 土层深度土壤含水量响应的方式大致相同, 在退耕草地生长季内土壤含水量呈“W”形波动变化。随着累计降水量的增加, 变化趋势逐渐减缓。其中 0—30 cm 土层土壤含水量变化最大, 极差为 11.20%, 变异系数为 26.37%。60—120 cm 土层土壤含水量变化最小, 极差为 3.78%, 变异系数为 7.34%。且土壤平均含水量 0—30 cm > 30—60 cm > 60—120 cm。4 月份到 8 月中旬, 0—30 cm 与 30—60 cm 土壤含水量相差较大, 在一次降水事件过后会迅速减小差距, 然后随着时间的推移, 土壤含水量差距再次被拉大。8 月中旬以后, 降水比较集中, 不同深度的土壤含水量都维持在较高的水平。10 月末, 退耕草地植物枯死, 各层含水量均出现突然上升并维持更高土壤含水量的现象。

黄土丘陵区退耕草地生长季内, 0—30 cm, 30—60 cm, 60—120 cm 土壤平均含水量变化趋势基本一致, 均随降水梯度的增加呈现“M”形状的变化趋势(图5)。表明特旱和雨涝均不利于土壤水分保持, 在小旱和丰水的情况下, 土壤较平水年更容易维持水分。对于 0—30 cm 土层土壤平均含水量, 增减雨措施在 5 月份差异最大, 变异系数为 36.9%, 其他月份变异系数在 3.0%~

21.5%。30—60 cm 土层土壤平均含水量 5 月份与 0—30 cm 土层土壤平均含水量基本一致, 6 月份土壤平均含水量增加, 7 月份减小, 8 月、9 月、10 月份均呈增加趋势, 60—120 cm 土层土壤平均含水量与 30—60 cm 土层土壤平均含水量变化基本一致。

从 5—10 月土壤水分总体特征, 可以看出一 80%, -60% 降水时, 土壤含水量在草本植被整个生长期都较小, 生长末期土壤含水量偏低, 处于亏损状态; +80% 土壤含水量并不是最高, 较 +60% 有下降趋势; -40% 至 +60% 区间, 从 6 月份开始, 土壤含水量差异变小, 土壤含水量逐渐趋于同一水平。且 -40%, -20% 可以使土壤含水量保持较高水平。+20% 土壤含水量较 +40%、+60% 波动更小, 更利于增加土壤含水量。0—30 cm, 30—60 cm, 60—120 cm 土层土壤水分随降水梯度的增加表现为“M”型变化趋势^[23], 但随深度的增加, 变化幅度逐渐减小。

2.3 研究区退耕草地土壤含水量对降水变化的响应

不同降水等级下, 土壤含水量响应方式存在很大差异(图6)。0—30 cm 土层对小雨、中雨、大雨、暴雨事件响应速度快, 土壤水分最小值出现在降水当天, 最大值均在降水后第 1 天出现, 然后缓慢下降。30—60 cm 土层与 0—30 cm 土层对降水事件的响应方式相似且较缓, 土壤水分最小值出现在降水当天, 但土壤水分均在降水后第 4 天达到最大值, 然后缓慢下降。60—120 cm 土层小雨降水事件当天, 土壤含水量达到最小值, 第 4 天达到最大值。土壤含水量在中雨及中雨以上降水事件发生后第 2 天达到最小值, 中雨第 5 天达到最大值, 大雨和暴雨第 6 天达到最大值。

0—30 cm 土层和 30—60 cm 土层, 中雨降水事件发生前后, 土壤含水量变异性最大, 变异系数分别为 12.47%, 7.23%, 这可能与降水前土壤的初始含水量有关。60—120 cm 土层土壤水分变异性较 0—30 cm 土层和 30—60 cm 土层小, 小雨事件变异性最小, 变异系数为 1.58%, 大雨事件变异性最大, 变异系数为 4.62%。暴雨发生时雨滴打击地面强度大, 容易使表层的土壤孔隙堵塞, 影响土壤水分的下渗, 从而 60—120 cm 土层土壤水分暴雨事件变异性较大雨事件小。

总体上看, 土壤水分随着土层深度的增加对不同等级降水的响应逐渐减缓, 土层越深, 土壤水分的变异性越小, 土壤水分最小、最大值出现的越迟, 土壤水分变化越平缓。由表 2 可知, 土壤水分与土层深度存在极显著的相关性($p < 0.01$), 不同深度土壤水分的改变主要是由于土壤水分下渗和消耗导致的, 所以上层土壤水分的大小势必会影响下层水分的大小。降水等级的改变影响单次土壤水分补给量和土壤下渗情况, 降雨等级增大会

减少地表孔隙度,减缓下渗速度,产生较多的地表径流。影响降水对土壤的水分转化率^[24]。同时降雨发

生前土壤初始含水量和土层深度的交互作用对土壤含水量也存在极显著的相关性($p<0.01$)。

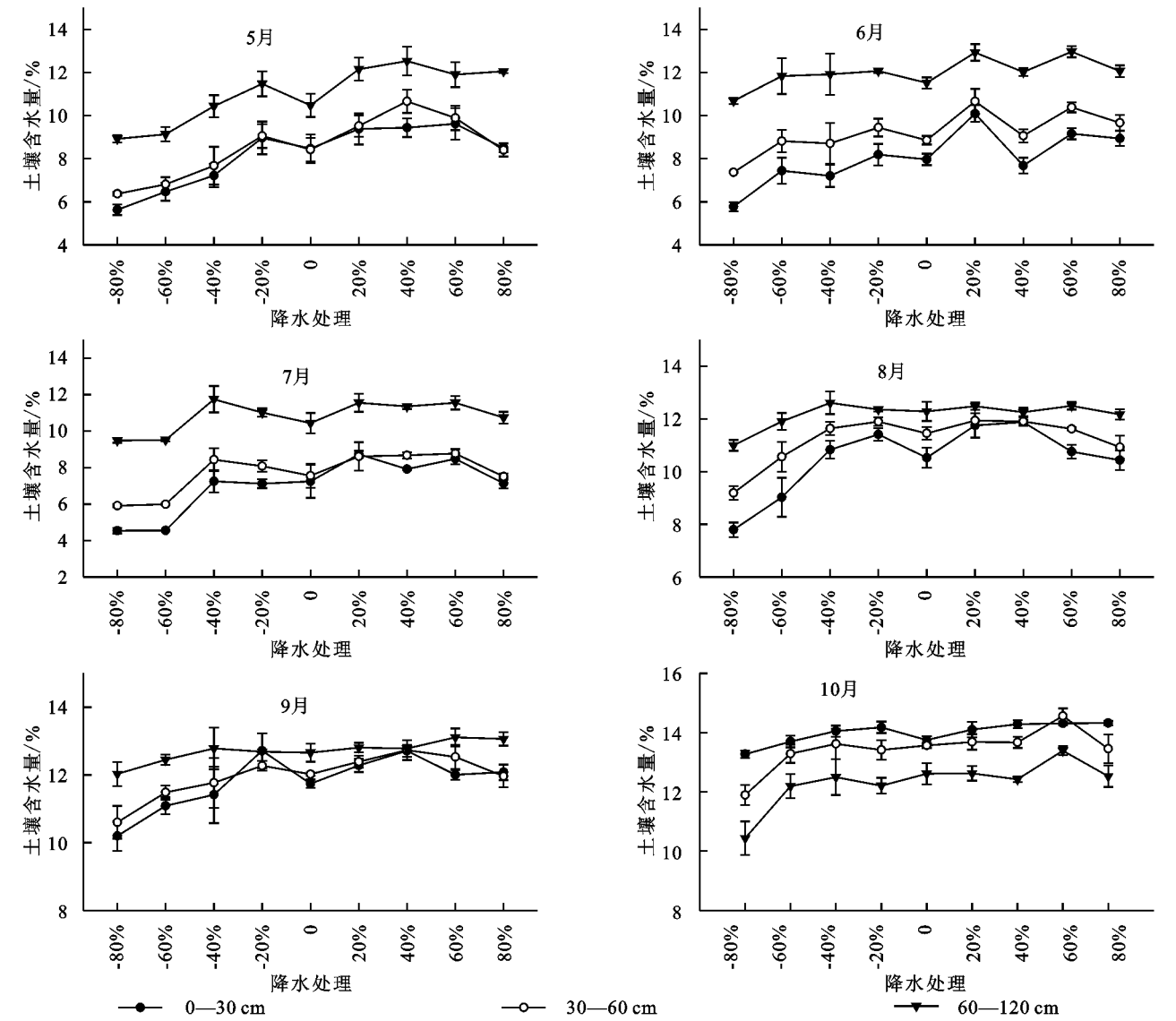


图5 降雨梯度下退耕草地土壤含水量变化

表2 降水与退耕草地土壤水分多因素方差分析		
因素	F 值	p 值
降水等级(PL)	55.64	0.00*
降水前后(B)	4.57	0.00*
土层深度(S)	281.14	0.00*
PL×B	0.65	0.92
PL×S	1.66	0.15
B×S	2.03	0.01*
PL×B×S	0.10	1.00

对退耕草地生长季内(4—10月份)不同土层土壤含水量方差分析表明,不同土层深度土壤含水量在不同月份之间存在不同的相关性。其中降水对0—30 cm 土层土壤含水量影响最大^[23],对60—120 cm 土层土壤含水量影响最小。0—30 cm 土层土壤平均含水量呈波动增加趋势,4月份土壤含水量与5月、8

月、9月、10月份土壤含水量存在显著差异。60—120 cm 土层土壤平均含水量在10.43%~12.65%之间,其中4月份土壤含水量与5月、6月、7月份土壤含水量存在显著差异,与其他月份土壤含水量不存在显著差异。30—60 cm 土层4月、5月、6月份土壤含水量不存在显著差异,后几个月份之间存在显著差异。

如图7所示,不同土层土壤含水量均随累计降水量的增加而增加,呈对数函数关系,相关性显著($p<0.05$)。0—30 cm 相关性系数为0.73,30—60 cm 相关性系数为0.71,60—120 cm 相关性系数为0.55,在相同累计降水量下,土层深度越深,土壤含水量越多,累计含水量增加的初期,0—30 cm 土壤含水量增加幅度最大,60—120 cm 土层土壤含水量增加幅度最小,即土层深度越深,对累计降水量的响应越慢。

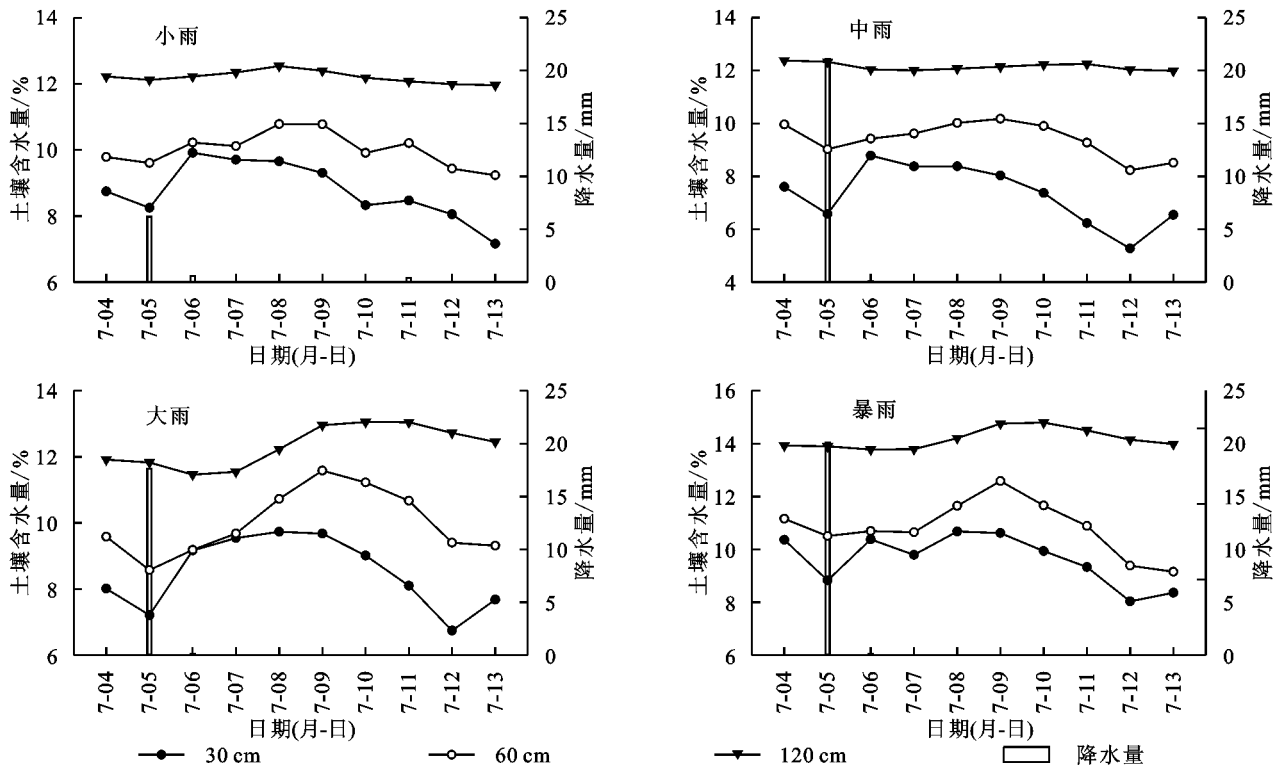


图 6 耕草地降水前后土壤水分动态

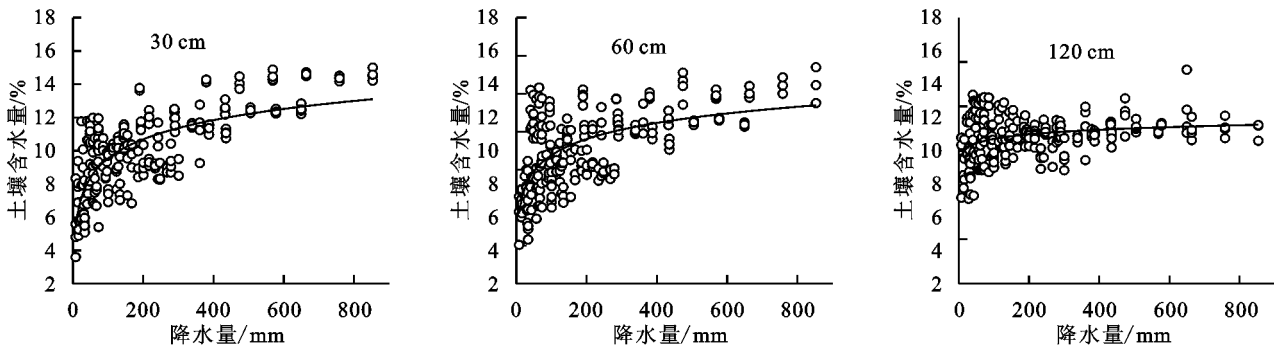


图 7 退耕草地土壤含水量与累计降水量相关分析

3 讨论

通过对黄土丘陵区近 30 a 降水特征分析发现研究区降水量总体呈减少趋势,并以每年 32.6 mm/10 a 的速度减少,降水量年际波动大;降水日数呈现小雨>中雨>大雨>暴雨,小雨和中雨日数总体呈减少趋势。黄土高原作为全球典型的干旱、半干旱区域,具有降雨量少,年内年际变化大等特征^[24],有研究表明近 50 a 陕西黄土高原地区年降水小雨日数、年降水中雨日数和总降水日数均呈现出减少的趋势^[5],和本试验研究所得的结果基本一致。20 世纪中期到 21 世纪初,全球变暖使我国降水时空格局发生重大改变,年内降水波动变大,高强度降水事件增多,低强度降水事件明显减少,导致出现干旱或洪涝的地区明显增多^[25],在我国西北地区,由于地形复杂,极端降水频发并有增加的趋势^[26],本研究发现小雨、中雨事件

发生次数呈现减小趋势,大雨、暴雨降水事件发生呈增加的趋势,与前人研究结果基本相同。降水日数仅是影响小概率降水事件的主导因子,降水强度才是强降水事件中的主导因子^[27]。相关研究学者发现我国降水强度总体呈增大趋势,其中大雨和暴雨降水强度较为稳定,小雨和中雨强度变化最为显著^[28],本研究发现该地区降雨强度变化不明显。只有暴雨的强度出现了波动增加的趋势,其他等级降水则相反,导致这种降水特征变化差别与研究区的范围和数据采集的时间有关。这与王艳姣等^[29]对我国西北东部地区降水的研究结论相一致。

退耕草地生长季内土壤含水量变化呈现“W”形波动变化,生长季初期,植物生长植物需水量较大,同时降水量相对较少,土壤水分不能得到及时的补充,导致土壤含水量不断被消耗。7 月份植被处于生长

旺季,伴随降水量增加,土壤含水量得到补充并缓慢增加,当土壤含水量达到一定值后则停止增加。10月份植被出现枯死,对水分的需求量减少,此时土壤水分由于降水的补充再次增加。这与卢宗凡等^[20]研究得出的结论存在差异,这可能与2017年10月份降水量远高于普通年份有关。降水作为黄土丘陵区土壤水分的主要直接来源,直接影响着土壤水分的垂直分布。前人研究发现黄土高原土壤含水量随着降雨量的增加而增加,并呈显著的相关性^[17]。从而降雨季节性的分布规律也使得土壤含水量呈现不同的变化规律^[30],同时降水强度和土壤含水量的当前值会直接影响土壤水分下渗的速率,从而影响土壤水分垂直分布的形式^[31]。随着降水事件的发生,0—30 cm,30—60 cm和60—120 cm土层深度土壤含水量响应的方式大致相同,唐敏等^[11]的研究也得出相同结果,即退耕草地土壤水分垂直波动小,0—160 cm土壤含水量年变化趋势基本一致。退耕草地生长季内,5月份随降雨梯度增加,各土层土壤含水量变化趋势一致,均呈“M”型变化趋势。退耕早期植被浅根系物种较多,地下0—30 cm是根系分布的主要空间,因此植被生长主要靠吸收利用表层0—30 cm土壤水分^[32],土壤水分变化较大,随着土层深度的增加,植被根系影响作用减小,土壤水分变化幅度随之减小^[33]。对不同降雨梯度下土壤含水量的研究表明, +20%土壤含水量较+40%、+60%波动更小,更利于增加土壤含水量,当降水处理为-20%时,植被整个生育期均能保持较高的土壤含水量,说明适当的干旱处理对植物生长有促进作用且使土壤有较好的持水性,这与李小英等^[17]的研究结果存在差异。各层土壤含水量最小值出现在-80%降雨处理梯度下,这有可能因为-80%降雨条件是下全部为小雨,降水第二天土壤水分便达到最大值,总体土壤水分补充少,加上蒸散发的作用,所以导致各层土壤含水量都较低;结合生物量数据可以发现,在+40%至+60%(即降水量654.08~747.52 mm),植物生物量较高,由于土壤水分补充及时,作物长势相对较好,生物量较大。在+80%(降水量840.96 mm)时,生物量下降。适度的增雨措施会提高植被群落的盖度、密度、株高等特征,但是高强度降水反而不利于植物的生长,因为植物对水分的需求是存在一定阈值的,降水太多会引起植被盖度、高度、密度等特征有所降低,这可能也与植被类型和结构对降水的响应不同有关^[34]。对降水区间在-40%至+20%降水区间(即降水量280.32~560.64 mm),草地群落生物量差异较小,降水差异对自然恢复植被的影响较小,但降水量低于280.32 mm

时,土壤水分由于得不到有效补给,植被的生长就会受到明显抑制,引起植被生物量明显下降。这与张岩研究相一致^[35]。

随土层深度的增加,土壤含水量在一次降水事件发生后达到最大值的时间依次滞后0—30,30—60,60—120 cm分别存在1 d,3~4 d和4~6 d的延迟,且土层深度越深,土壤水分变化越缓慢,土壤含水量达到峰值后呈现减少趋势。当降雨强度为中雨或中雨以上强度时,60—120 cm土层土壤含水量受下渗及植被根系吸收水分的影响^[32]均未在降雨当天达到最小值,这可能是因为对于一次性的降水来说,降水量愈大,土壤接纳的水分愈多。但随着降水量的相对增大,地表产生积水,土壤水分下渗缓慢,加大了蒸发量,降水进入土壤的水分相应减少^[36],60—120 cm土层土壤水分未得到及时补充而呈现出先减小后增加的趋势。土壤含水量随着累计降水量而增加,且呈现对数增加趋势,0—30,30—60,60—120 cm土壤含水量增速较快的降水区间分别为0~200 mm,0~160 mm,0~40 mm,降水量再增加时,土壤水分增速变缓,但降水量达到一定值后,土壤含水量趋于固定值不再增加。降水再分配过程比较缓慢,土壤水分下渗速率受土壤容重、机械组成和降水强度等影响,土层越深,土壤水分向下传导越慢^[21]。

4 结论

黄土丘陵区近三十年降水量总体呈递减趋势,年际波动较大,且日降雨数逐渐减小。退耕草地5—7月土壤含水量呈波动式减少,而后随着降雨量的增加土壤含水量逐渐恢复并增加,说明5—7月是植被恢复的重要月份,这一时间段可适当的人为补充土壤水分或调整植物搭配的模式促进植被的良性生长。通过遮雨棚模拟降水变化,发现-20%降水处理条件下土壤含水量较大,说明适当的干旱处理有助于维持较高的土壤含水量,近期气候引起的降水变化将不会对土壤水分产生较大的影响。同时研究表明减雨超过40%或增雨超过60%都不利于土壤水分的积累,在黄土丘陵区植被恢复的过程中,应控制土壤水分的补给量,使土壤含水量在当地植物生长的适宜范围内。不同月份及土层深度土壤含水量间存在显著差异,其中0—30 cm土壤水分对降水响应最为明显,随着土层深度的增加响应应逐渐降低;维持和利用浅层地表水是植被恢复的关键。

参考文献:

- [1] 王铭昊,李焕连,孙小婷.中国6个CMIP5模式对全球降水年际—年代际变率模拟的定量评估[J].气象,2018,44

- (5):634-644.
- [2] 吴佳,周波涛,徐影.中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应:CMIP5 模式模拟评估和预估[J].地球物理学报,2015,58(9):3048-3060..
- [3] Hsu P C, Li T, Murakami H, et al. Future change of the global monsoon revealed from 19 CMIP5 models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(3):1247-1260.
- [4] 孙智辉,曹雪梅,刘志超,等.陕西黄土高原地区降水日数和强度年代际变化[J].应用气象学报,2009,20(4):510-512.
- [5] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.
- [6] Lv Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration:quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. *Plos One*, 2012,7(2):1-10.
- [7] 肖强,陶建平,肖洋.黄土高原近 10 年植被覆盖的动态变化及驱动力[J].生态学报,2016,36(23):7594-7602.
- [8] William R L, Alexandra G, Anna T. Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought[J]. *Nature* 2018,561(7724):538-541.
- [9] 乔艳琴,樊军,高宇,等.黄土高原水蚀风蚀交错区植被间土壤水分竞争[J].自然资源学报,2014,29(5):801-809.
- [10] 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.
- [11] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.
- [12] 艾宁,强方方,朱清科,等.半干旱黄土丘陵区雨季土壤水分动态分析[J].土壤通报,2017,48(2):326-334.
- [13] 郭美丽,焦峰,薛超玉.黄土丘陵区土壤水分空间分布与环境因子的关系[J].中国水土保持科学,2018,16(1):46-55.
- [14] 王云强,邵明安,胡伟,等.黄土高原关键带土壤水分空间分异特征[J].地球与环境,2016,44(4):391-397.
- [15] 邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土丘陵小流域土壤水分空间预测的统计模型[J].地理研究,2001(6):739-751.
- [16] 贾小旭.典型黄土区土壤水分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.
- [17] 李小英,争虎.基于 SMOS 的黄土高原区域尺度表层土壤水分时空变化[J].中国沙漠,2014,34(1):133-139.
- [18] 高红贝,邵明安.干旱区降雨过程对土壤水分与温度变化影响研究[J].灌溉排水学报,2011,30(1):40-45.
- [19] 张钦弟,卫伟,陈利顶,等.黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局[J].自然资源学报,2018,33(8):1351-1362.
- [20] 王锡稳,王毅荣,张存杰.黄土高原典型半干旱区水热变化及其土壤水分响应[J].中国沙漠,2007(1):123-129.
- [21] 贾东于,文军,张堂堂,等.黄土高原降水对土壤含水量和导热率的影响[J].高原气象,2014,33(3):712-720.
- [22] 焦峰,温仲明,焦菊英,等.黄丘区退耕地植被与土壤水分养分的互动效应[J].草业学报,2006(2):79-84.
- [23] 张少康.黄土丘陵区降水变化对草地群落土壤水分及其利用效率的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [24] 张北赢,徐学选,李慧琴.黄土丘陵区典型小流域多年降水变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(6):28-32.
- [25] Qian W, Fu J, Yan Z. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961—2005 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007,34(11):11701-11705.
- [26] Chen H P. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21 st century using CMIP5 models[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(12):1462-1472.
- [27] 陈晓燕,尚可政,王式功,等.近 50 年中国不同强度降水日数时空变化特征[J].干旱区研究,2010,27(5):766-772.
- [28] Feng L, Zhou T, Wu B, et al. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011,28(2):464-476.
- [29] 王艳姣,闫峰.1960—2010 年中国降水区域分异及年代际变化特征[J].地理科学进展,2014,33(10):1354-1363.
- [30] 陈敏玲,张兵伟,任婷婷,等.内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应[J].植物生态学报,2016,40(7):658-668.
- [31] 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.
- [32] 徐明,张健,刘国彬,等.植被类型和降雨量对沟谷地土壤水分和温度空间分布的影响[J].草地学报,2017,25(3):499-507.
- [33] 蒋太明.降水入参与土壤水分动态模型研究进展[J].贵州农业科学,2005(S1):83-88.
- [34] 张腊梅,刘新平,赵学勇,等.科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应[J].生态学报,2014,34(10):2737-2745.
- [35] 张岩,张清春,刘宝元.降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J].地球科学进展,2002,17(2):268-272.
- [36] 仇化民,邓振镛.黄土高原旱作田土壤水分效应研究[J].自然资源,1995(4):46-51.