

黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态 变化特征及降雨特征对其影响

孙亚荣¹, 陈云明^{1,2}, 王亚娟¹, 刘少华¹, 赵敏¹, 刘乐², 卢森堡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:明确黄土丘陵区降雨对土壤水分影响,对准确评估降雨格局变化对生态系统结构和功能的影响具有重要意义。以陕北黄土丘陵区退耕地栽植后自然撂荒 23 年的柠条人工纯林为研究对象,通过土壤湿度传感器监测不同土层土壤体积含水量,探讨不同土层土壤水分补充增量对降雨特征(降雨量、降雨历时和降雨强度)的响应。结果表明:(1)土壤水分消耗和补充主要集中于 0—500 cm 土层,其月变化在垂直剖面呈“双峰”(4—5 月)、“单峰”(6 月)和“双峰”(7—10 月),随土层深度增加变化率减弱;(2)当降雨量>4 mm 时表层土壤水分得到有效补充,当其超过 142.8 mm 时补充深度可到达 200 cm 土层,其中长历时强降雨较短历时强降雨对土壤水分补充增量小,但其补充深度较深,达到峰值时间长,但小降雨长历时则土壤水分补充增量较小;(3)降雨特征对土壤水分影响随土层深度增加而减弱,其中降雨量和降雨历时对土壤水分影响主要在 0—50 cm 土层,而降雨强度对其影响主要在 0—30 cm 土层。降雨量(降雨历时)和土壤水分补充增量对数拟合最优,而降雨强度与其则表现为幂函数拟合最优,其可分别解释土壤水分补充增量的 39%~76%(降雨量)、0~97%(降雨历时)和 1%~91%(降雨强度)。综上所述,降雨量越大,降雨历时越长,对深层土壤水分补给增量越大,且土壤水分消耗和降雨对其补充分别在 0—500 cm 土层和 0—200 cm 土层。

关键词:黄土丘陵区;土壤水分补充;降雨特征;柠条人工林

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)01-0272-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.01.035

Dynamic Variation Characteristics of Soil Moisture in *Caragana korshinskii* Plantation in Loess Hilly Area and the Influence of Rainfall Characteristics on It

SUN Yarong¹, CHEN Yunming^{1,2}, WANG Yajuan¹, LIU Shaohua¹,

ZHAO Min¹, LIU Le², LU Senbao²

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Clarifying the impact of rainfall on soil moisture in the loess hilly area is great significance to accurately assess the impact of rainfall pattern changes on the structure and function of ecosystem. In this study, the artificial pure forest of *Caragana korshinskii* that had been abandoned for 23 years after being planted in the abandoned farmland in the loess hilly area of northern Shaanxi was taken as the research object. The soil moisture sensor was used to monitor the soil volume water content in different soil layers, and the responses of soil water supplement increment in different soil layers to rainfall characteristics (rainfall, rainfall duration and rainfall intensity) were discussed. The results showed that: (1) Soil water consumption and replenishment were mainly concentrated in the 0—500 cm soil depths, and the monthly variation in the vertical profile were “double peak” (April-May), “single peak” (June) and “double peak”, and the change rate decreased with the increasing of soil depth. (2) When the rainfall was more than 4 mm, surface soil moisture could be effectively replenished. When it exceeded 142.8 mm, the replenishment depth could reach 200 cm soil layer. The soil moisture replenishment increment of the long-duration heavy rainfall

收稿日期:2022-06-20

资助项目:国家自然科学基金项目(41771556);国家重点研发计划项目(2016YFC0501703);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BCF01001)

第一作者:孙亚荣(1996—),女,硕士研究生,主要从事流域管理研究。E-mail:Twosleyouth@163.com

通信作者:陈云明(1967—),男,研究员,博士生导师,主要从事植被生态与水土保持研究。E-mail:ymchen@ms.iswc.ac.cn

was less than that of short duration heavy rainfall, however, the replenishment depth of long-duration heavy rainfall was deep and the peak time was long. (3) The influence of rainfall characteristics on soil moisture decreased with the increasing of soil depth. The influence of rainfall and rainfall duration was mainly in 0—50 cm soil layer, and the influence of rainfall intensity was in 0—30 cm soil layer. The logarithmic fitting of rainfall (rainfall duration) and soil water replenishment increment was the best. While the logarithmic fitting of rainfall intensity and soil water replenishment increment was the best, which could explain 39%~76% of soil water replenishment increment (rainfall), 0~97% (rain duration) and 1%~91% (rain intensity), respectively. To sum up, the greater the rainfall and the longer the rainfall duration, the greater the soil moisture replenishment increment. And the soil water consumption and rainfall replenishment was in 0—500 cm soil layer and 0—200 cm soil layer, respectively.

Keywords: loess hilly area; soil moisture supplementation; rainfall characteristics; *Caragana korshinskii* plantation

黄土高原地形特点复杂,生态环境脆弱,由于不合理的资源利用和自然环境的双向胁迫,使得该区水土流失严重^[1]。自实施退耕还林(草)工程以来,区域植被恢复成效显著,年植被盖度已由 46.1% (2000 年)上升至 78.4% (2018 年)^[2],生态环境明显好转。植被恢复在减弱降雨动能、改善土壤理化性质、防治水土流失等方面同时存在一系列问题,植被恢复和更新以年径流量降低、土壤水分消耗为代价^[3],这致使部分区域土壤水分亏缺,打破土壤水分平衡,导致植被成活率降低,进而制约区域生态和经济的发展^[4]。

探明降雨、植被和土壤水间关系是科学合理利用水土资源最根本有效的方法,是保证生态环境可持续发展的关键一招^[5]。土壤水分是连接土壤—植被—大气连续体中大气降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的重要环节,是影响生态系统结构和功能的关键驱动因子^[6]。已有研究^[7]表明,土壤水分表现出复杂的空间变化,受植被、地形、降雨等因子影响。近年来,关于黄土高原土壤水分的研究受到学者的广泛关注,特别是人工造林过程中由于植被剧烈的蒸腾作用导致的深层土壤干燥化问题^[8]。据报道^[9],对黄土丘陵区 0—3 m 土层土壤含水量监测发现土壤水分随着土层深度增加呈先增加后减少的趋势,并有明显的垂直变异特征。由于黄土母质成因独特,其土层厚度空前。随着土层深度的增加,有研究^[10]发现,黄土塬区 0—15 m 黄土剖面土壤水分具有明显季节性波动变化特征,对黄土丘陵区植被配置具有重要指导意义。然而,由于深层土壤取样困难,关于黄土高原土壤水分的长期定位监测缺乏,尤其是通过高频率监测手段分析不同深度土壤水分空间异质性的研究鲜见。

降雨作为土壤水分补给的关键来源,其土壤水分补给能力与降雨特性紧密相关,并直接影响着流域水文过程和植被生长、稳定和生态功能。经过多年退耕

还林(草),黄土丘陵区产生的多种土地利用类型对降雨的响应具有差异^[11]。有关黄土丘陵区坡耕地和撂荒地降雨对土壤水分研究^[12]表明,随着土层深度增加土壤水分对降雨的响应减弱(0—60 cm)^[13]。而相比荒草地,灌木林土壤水分消耗更严重,且 0—30 cm 土层与 30—50 cm 土层灌木地和荒草地对降雨的响应规律相反。从降雨特征来看,降雨对土壤水分的补充深度随降雨量增加而增加,且 20—140 cm 土层土壤水分对 12.1 mm/h 降雨强度响应强烈^[14]。可见,土壤水分对降雨的响应程度受降雨量和降雨强度等影响,与区域土壤状况、典型降雨持续时间也密切相关。然而,现有研究成果多从单一降雨特性出发分析土壤水分对降雨的响应过程,在相当程度上对土壤剖面土壤水分动态变化特征及降雨对土壤水分的补充能力认识不足。因此,明确黄土丘陵区土壤水分时空变化特征及其对降雨特性(降雨量、降雨历时和降雨强度)的响应对区域植被生长恢复具有重要意义。

鉴于此,本研究以黄土丘陵区典型柠条人工纯林为研究对象,采用土壤湿度传感器进行野外定位监测,分析土壤水分的时空变化规律,进一步阐明不同深度土壤水分对降雨特征响应,通过丰富黄土高原土壤水分平衡基础数据库,以期为了解区域水资源评估提供可靠资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区纸坊沟小流域(36°43′48″N,109°15′16″E),海拔 1 283.3 m,属典型的森林草原带和梁峁状沟壑区。温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 8.8 ℃,年日照时间 2 395.6 h,日照百分率达 54%,无霜期 157 天。年均降水量 550 mm,降水分配不均,主要集中在 6—9 月。土壤类型以黄绵土为主,土壤平均容重为 1.27 g/cm³。自 1999 年延安市实施退耕

还林(草)工程以来,植被恢复成效显著,目前主要乔木层建群种为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、榆树(*Ulmus pumila*)等,灌木层为杠柳(*Periplocasepium*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等,草本以白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)等为主。

试验地为柠条人工纯林地,占地 400 m² (20 m×20 m),位于半阴坡,坡度 26°,退耕年限为 23 年,平均冠幅为 1.8 m×2.2 m,平均丛高 1.8~2.2 m,土壤类型以黄绵土为主,样地草本主要有白莲蒿(*Artemisia stechmanniana*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和覆盆子(*Rubus idaeus*)。

1.2 土壤水分与降雨测定

为避免由安装仪器引起土壤扰动导致数据监测误差,使监测数据更具代表性。2018 年 12 月,分别选取柠条人工纯林坡上、坡中和坡下安装土壤湿度传感器(CS655 Campbell Scientific,美国)。为明确柠条人工林地降雨对深层土壤水分影响,试验选取 10 个监测深度,每个深度设置 3 个重复(坡上、坡中和坡下),共计 30 个监测点。仪器安装具体流程:首先将 CS655 土壤温湿度传感器的探针与地面水平插入土壤表层(0—300 cm),深层土壤则采用土钻法,借助 PVC 管将其插入(500—1 000 cm),监测深度分别为 10, 30, 50, 70, 100, 200, 300, 500, 700, 1 000 cm。由于 CS655 基于 TDR 原理,导致土壤冻结时测量误差较大,因此本研究选取 2021 年 4—10 月土壤水分监测数据。仪器可 24 h 连续观测,监测频率为 1 次/h,其监测结果采用坡上、坡中和坡下 3 个监测点土壤水分平均值作为每小时土壤水分数据,通过对土壤水分小时数据进行累加取其平均值得到土壤水分日均值。此外,年降水数据利用 GMX 一体式气象仪器自动观测(GMX501 Gill,英国),GMX 提供小时数据可满足土壤水分在时间尺度上连续性变化研究需要。

1.3 降水事件的提取与土壤水分增量的确定

为避免次降雨发生后不同土层土壤水分动态变化无其他次降雨事件干扰。因此,试验将降雨间隔大于 24 h 的作为 2 次独立事件。同时,降雨历时通过对次降雨从某时刻开始到结束时其时间差计算,而土壤水分的补充深度则根据已挑选的降雨事件,通过明确各层土壤水分增量确定其补充深度。

1.4 数据处理

(1)降雨强度

$$I = \frac{P}{T}$$

式中: I 为降雨强度(mm/h); P 为降雨量(mm); T 为降雨历时(h)。

(2)土壤蓄水补充增量

$$\Delta VWC = (VWC_2 - VWC_1)$$

式中: ΔVWC 为土壤水分补充增量; VWC_2 为土壤水分补充达到最大时土壤含水量(cm^3/cm^3); VWC_1 为降雨前土壤含水量(cm^3/cm^3)。

(3)土壤水分变化率

$$R = \frac{(VWC_4 - VWC_3)}{VWC_3}$$

式中: R 为土壤水分变化率; VWC_3 为本月平均土壤含水量(cm^3/cm^3); VWC_4 为上月平均土壤含水量(cm^3/cm^3)。

试验采用 Microsoft Excel 2020 软件进行数据整理,Origin 2022 软件制图,重复测量分析(ANOVA)检验不同土层土壤含水量间差异性,采用 Person 相关分析法分析土壤水分补充增量与降雨量、降雨历时和降雨强度间相关关系。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

研究区 2021 年 4—10 月共计 38 次独立降雨,累计降雨量达 659.8 mm,表现为 9 月降雨量最高,10 月其次,分别达 221.4,162.6mm,而 6 月降雨量最低,仅为 19.2 mm,说明该区降雨分布不均,变幅大(图 1)。此外,观测期间各月降雨量差异较大,在 0.2~142.8 mm 间波动,其平均降雨量为 19.89 mm,其中降雨历时最长可达 43 h,高于平均降雨历时 4.06 倍,而降雨强度最高达 18 mm/h,最小仅为 0.2 mm/h(图 2)。

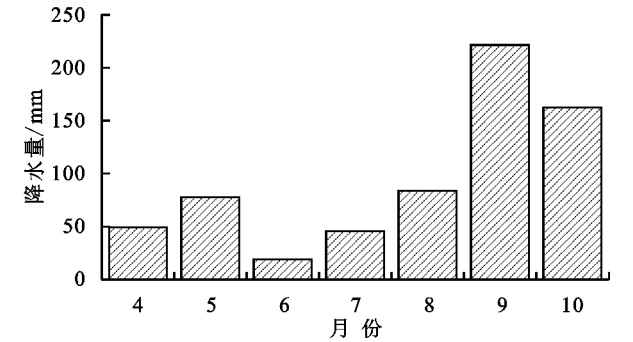


图 1 降水量的月变化特征

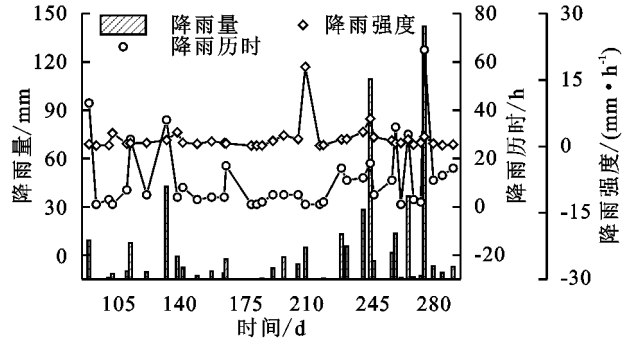


图 2 降雨特征分布

2.2 不同土层土壤含水量的时空变化特征

2.2.1 土壤含水量随时间的变化特征 由图3可知,单因素方差分析表明,不同土层间土壤含水量随时间的动态变化差异显著($p<0.05$),均随降雨量的发生波动明显,但随土层深度增加土壤水分变幅减小,且峰值存在明显滞后现象,500 cm以下土壤水分无明显变化,说明柠条人工纯林土壤水分的补给和消耗主要集中于0—500 cm土层。同时,不同土层土壤含水量

平均值表现为先增加后减少的趋势,在200 cm土层达到峰值,10,30,50,70,100,200,300,500,700,1 000 cm土层分别为0.097,0.142,0.166,0.117,0.177,0.224,0.178,0.159,0.137,0.139 cm^3/cm^3 ,但不同土层土壤水分表现为最大值随着土层深度增加而减少,而最小值趋于增加,分别为0.017~0.319,0.042~0.329,0.05~0.336,0.036~0.265,0.063~0.350,0.145~0.319,0.156~0.228,0.156~0.164,0.137~0.138,0.139 cm^3/cm^3 。

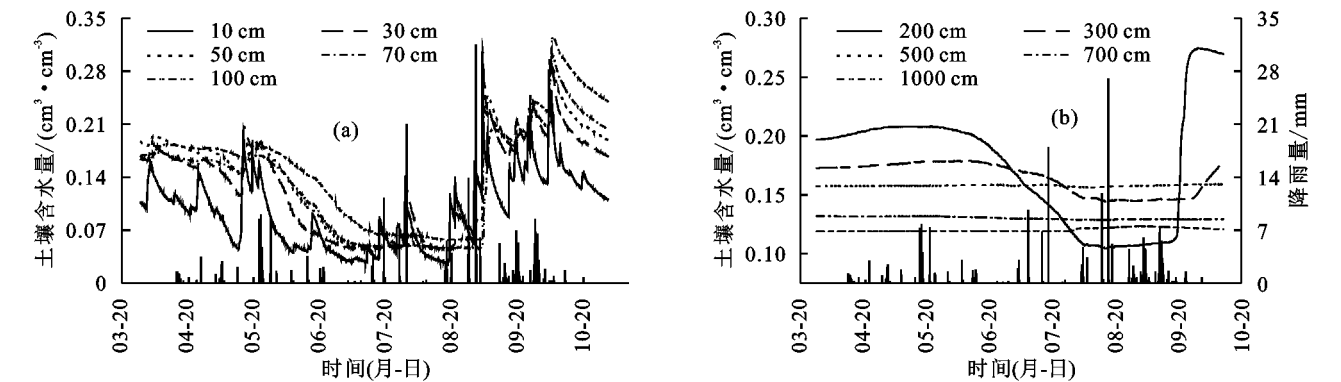


图3 不同土层土壤含水量的动态变化特征

2.2.2 土壤含水量的剖面变化特征 由图4可知,不同月份土壤含水量垂直变化呈季节性规律,4—5

月(双峰)、6月(单峰)和7—10月(双峰)垂直变化趋势相似,但随土层深度增加变化率均减弱。

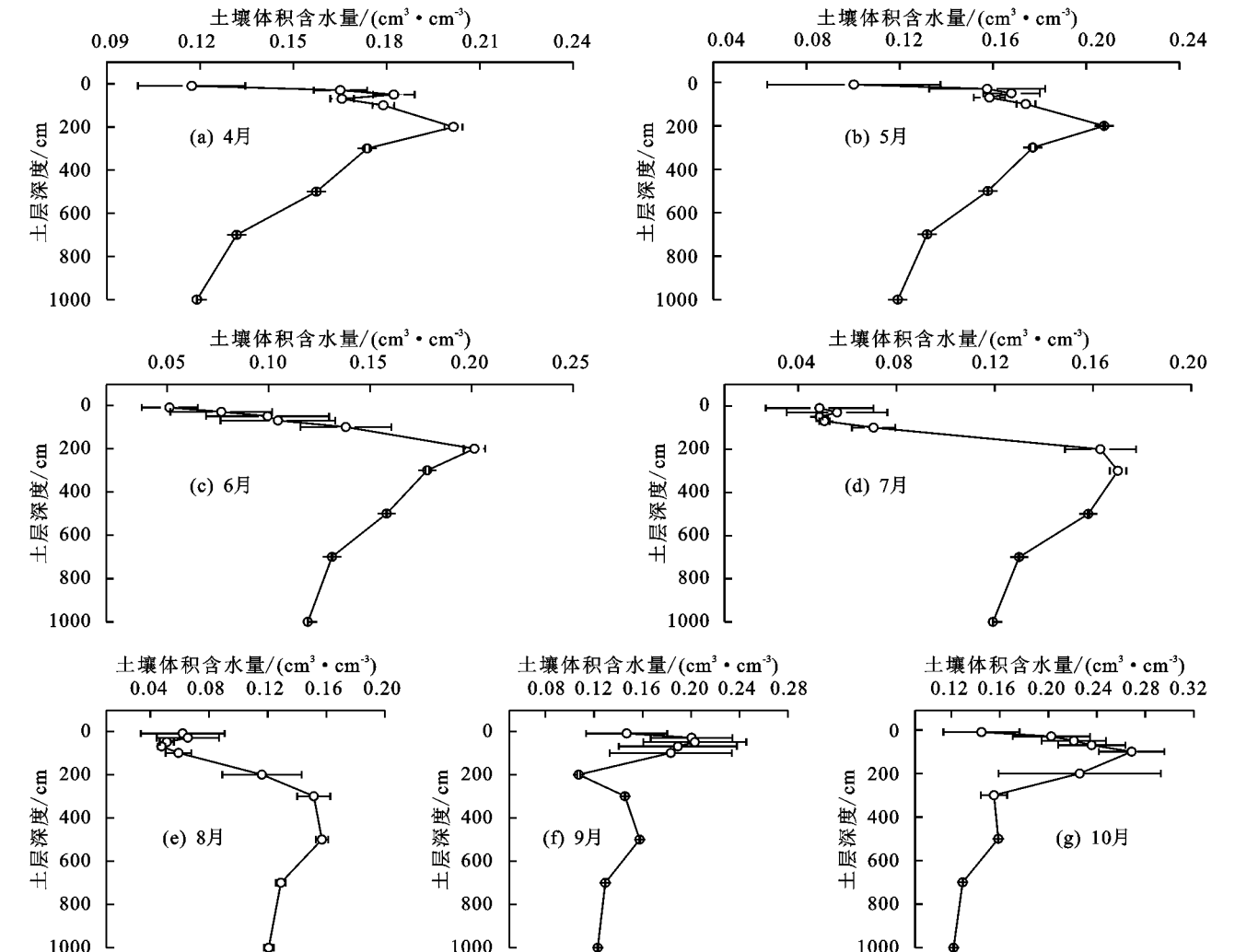


图4 土壤含水量的剖面变化特征

与 5 月相比,6 月 0—100 cm 各土层土壤水分显著降低,在 7 月达最小值,6,7 月变化率分别为 0.21~0.51, 0.51~0.71 倍,减小幅度在 0.051~0.138,0.049~0.056 cm^3/cm^3 ,4,5,6 月土壤水分平均值分别为 0.159,0.155, 0.126 cm^3/cm^3 ,说明 6—7 月柠条人工林进入土壤水分消耗期,但 7 月后各土层土壤水分缓慢回升,平均土壤含水量整体增加,7,8,9,10 月分别为 0.102,0.096, 0.156,0.186 cm^3/cm^3 。4—10 月垂直剖面土壤含水量分别在 0.117~0.202,0.100~0.208,0.051~0.201,0.049~0.17.0,0.048~0.157,0.107~0.203,0.122~0.269 cm^3/cm^3 间波动。此外,不同土层土壤含水量最小值表现为随时间先减少后增加的趋势,而最大值则表现为先平稳后减少再增加的动态演替过程,且观测期土壤含水量表现为 10 月土壤含水量高于 4 月剖面土壤含水量。

2.3 不同深度土壤水分补充增量变化特征

由图 5 可知,差异分析表明,不同土层土壤水分补充增量存在差异,其中 10 cm 土层与 30,50,70, 100,200 cm 土层土壤水分补充增量差异均显著($p < 0.05$),其余均表现为无显著差异($p > 0.05$)。随着降水事件的增大,土壤水分增量逐渐增大,但降雨事件对土壤水分补给次数随土层深度增加而减少,分别为 24,15,10,6,5,1 次,且土壤水分有效补给深度可达 200 cm 土层,平均土壤水分补充增量随土层深度增加整体趋于减小,10,30,50,70,100 cm 土层分别为 9.59%,7.43%,5.34%,5.77%,6.9%。土壤水分补充范围分别在 2.0%~19.9%,2.1%~15.2%,1.1%~17.5%,0.7%~17.5%,1.4%~18.2%,14.5%。

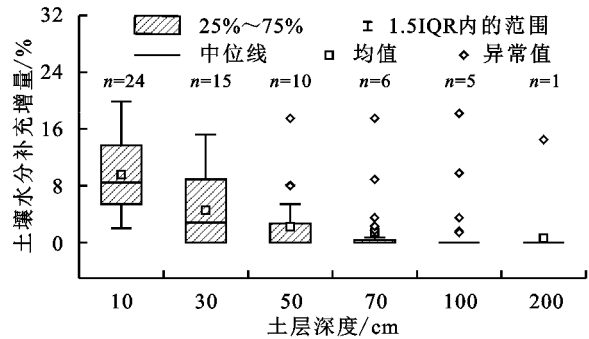


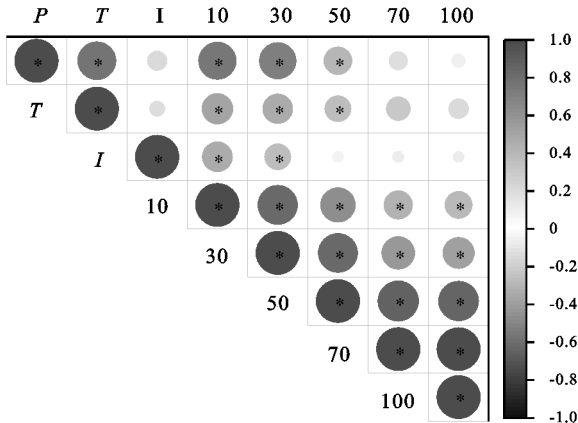
图 5 土壤水分补充增量变化特征

2.4 降雨特征与土壤水分补充的影响

2.4.1 降雨量对土壤水分补给的影响 不同土层土壤水分补充增量与降雨量在 0—50 cm 土层呈显著正相关($p < 0.05$),50 cm 土层以下无显著相关性($p > 0.05$),说明随土层深度增加降雨量对土壤水分增量影响减弱,在 50 cm 土层以下降雨量对土壤水分补充增量无显著影响(图 6)。

由图 7 可知,土壤水分补充增量随降雨量增加整体呈增加的变化趋势,其中当降雨量 <4 mm 时无水

分补充,降雨量在 4~11.2 mm 时,土壤水分有效补充深度在 0—10 cm 土层,且土壤水分增幅 $<10.3\%$ 。10—50 cm 土层土壤水分补充增量对降雨响应存在滞后,在降雨量 >12.4 mm 时才能得到有效补给,10,30,50 cm 土层增幅分别在 7.5%~19.7%,2.1%~9.3%,1.1%~4.2%。50—100 cm 土层土壤水分补充增量对降雨量的响应更加滞后,当降雨量 >25.8 mm 时才能补给,其增幅在 1.3%~3.5%。当降雨量超过 142.8 mm 时,其对土壤水分有效补给深度可达 100—200 cm 土层,增长幅度为 14.5%。通过对不同土壤水分补充增量和降雨量进行模型预估,结果表明土壤水分补充增量和降雨量表现为对数模型 $[y = a \ln x + b]$ 拟合最优。可见,土壤水分补充增量随降雨量的增加而增加。此外,通过不同土层降雨量和土壤水分补充增量的决定系数 R^2 可知,降雨量对土壤水分补充增量的解释率存在差异,其中在 100 cm 土层解释度最高,可解释土壤水分补充增量变化的 76%,其次是 50 cm 土层,为 69%,在 30 cm 土层对土壤水分补充增量的解释率最低,仅为 39%。



注:P 为降雨量(mm);T 为降雨历时(h);I 为降雨强度(mm/h);10,30,50,70,100 分别为土层深度(cm)。

图 6 降雨特征与不同土层土壤含水量相关性分析

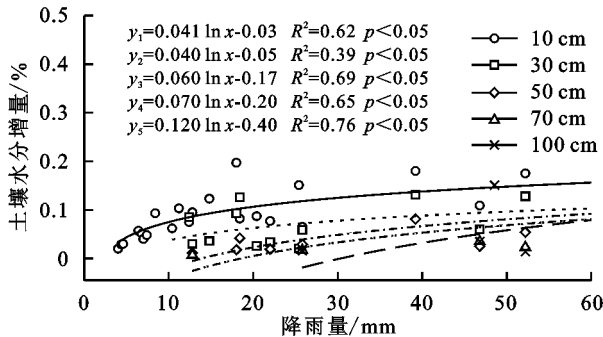


图 7 降雨量与不同土层土壤水分补充增量相关性分析

2.4.2 降雨历时对土壤水分补给的影响 不同土层土壤水分增量与降雨历时相关性迥异,其中在 0—50 cm 土层土壤水分增量和降雨历时呈显著正相关($p < 0.05$),50 cm 土层以下无显著相关性($p > 0.05$)

(图 8)。本试验条件下,降雨历时在 $<4\text{ h}$ 时无土壤水分有效补给,当降雨历时 $>4\text{ h}$ 时土壤水分有效补给整体在 $0\text{--}10\text{ cm}$ 土层, $30\text{--}50\text{ cm}$ 土层较 10 cm 土层滞后,在降雨历时达 11 h 时才能有效补给,而当降雨历时 $>18\text{ h}$ 时土壤水分有效补给深度可达到 200 cm 土层(图 8)。此外,土壤水分补充增量与降雨历时对数拟合最优 $y=a\ln x+b$,决定系数(R^2)除 100 cm 土层以外表现为随土层深度增加而减小,说明随着土层深度增加,降雨历时对土壤水分补充增量的解释减弱,其中降雨历时在 10 cm 土层可解释土壤水分补充增量的 23% ,在 $50\text{--}70\text{ cm}$ 土层对土壤水分补充增量解释率为 0 ,但在 100 cm 土层时解释率达 97% ,这可能与深层土壤水分入渗次数有关。

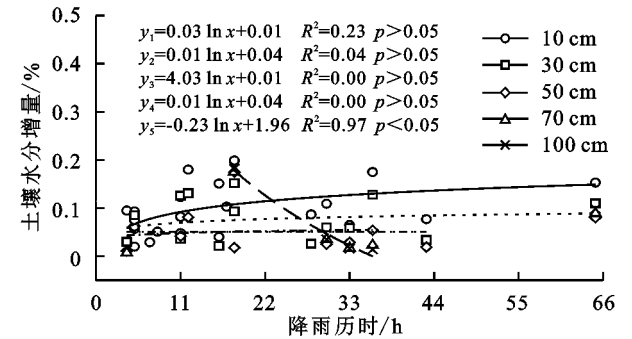


图 8 降雨历时与不同土层土壤水分补充增量相关性分析

2.4.3 降雨强度对土壤水分补给的影响 相关分析表明,土壤水分补充增量和降雨强度在 $0\text{--}30\text{ cm}$ 土层呈显著正相关($p<0.05$),当土层深度 $>30\text{ cm}$ 时则表现为不相关($p>0.05$),说明降雨强度对土壤水分影响主要在 $0\text{--}30\text{ cm}$ 土层,超过 30 cm 土层时则对土壤水分补充增量无显著影响(图 6)。通过对不同土壤水分补充增量和降雨强度进行模型预估,结果表明土壤水分补充增量和降雨强度幂函数模型($y=ax^b$)拟合最优(图 9)。由决定系数(R^2)可知,降雨强度对土壤水分补充增量的解释率均较差,其中在 $70\text{--}100\text{ cm}$ 土层解释度最高,可分别解释土壤水分补充增量的 $89\%\sim 91\%$,而 $0\text{--}50\text{ cm}$ 土层仅能解释土壤水分补充增量的 $1\%\sim 10\%$,其间差异可能与深层降雨所能入渗的次数有关。

综上所述,从单场降雨来看,降雨量小、降雨历时长,土壤水分补充增量较小,当降雨量大、降雨历时长较降雨量大、降雨历时短的土壤水分补充增量小,但补充深度深,达到峰值时间长。结合相关分析和模型拟合表明,土壤水分补充增量主要受降雨量影响,其次为降雨历时,且降雨量和降雨历时对土壤水分补充增量影响在 $0\text{--}50\text{ cm}$ 土层,而降雨强度对土壤水分补充影响则在 $0\text{--}30\text{ cm}$ 土层。

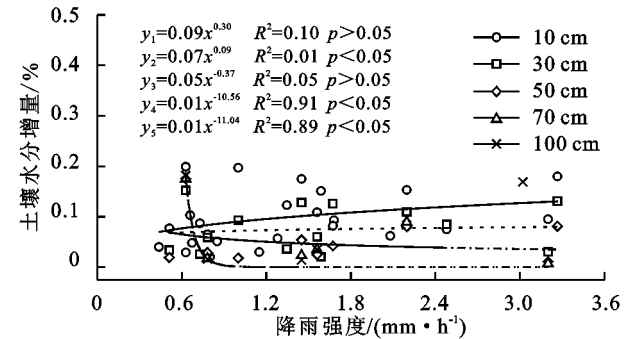


图 9 降雨强度与不同土层土壤水分补充增量相关性分析

3 讨论

3.1 土壤水分动态变化特征

土壤水分受降雨、植被的蒸腾和气候等因素的综合影响,其中降雨量是制约黄土丘陵区植被恢复的关键,也是土壤水分补充的重要来源。冯伟等^[15]以半干旱区为研究对象,分析土壤水分的动态变化特征及其降雨对其补充作用表明,当降雨量在 $(45.7\pm 14.1)\text{ mm}$ 时,降雨对土壤水分的补给深度可达 200 cm 土层,与本研究一致。然而,本研究通过土壤水分随时间的动态变化特征发现,土壤水分的补充深度可达 300 cm 土层,与本试验中次降雨对土壤水分的补充深度存在差异。一方面,生长季降雨充沛,充足的雨水使得土壤水分得到补充,但随着间歇性降雨以及多次降雨的累计,使得土壤水分向深层土壤水分缓慢入渗,即随着降雨的不断补给,使得水分持续补充下渗到深层土壤中^[16];另一方面,随着降雨量增加,气温逐渐下降,植被生长缓慢,根系耗水减少和植被的蒸腾作用减弱,导致深层土壤水分增加较快^[17-18]。同时,本研究发现,土壤水分随时间的变化其消耗深度在 $0\text{--}500\text{ cm}$ 土层间波动,且这一现象主要在 $5\text{--}8$ 月,这一结论与多数学者^[19-20]研究结果一致。随着气温升高,处于生长旺盛期的植被蒸腾作用和地表蒸散发作用较强,导致降水补给小于土壤水分消耗量,最终使得土壤水分亏缺^[21]。同时观测期($4\text{--}10$ 月)土壤水分随降雨的发生表现为波动明显,且观测末期土壤体积含水量高于观测初期土壤含水量,即 10 月末土壤含水量远高于 4 月初期土壤含水量,这可能与观测期降雨量较大有关。此外,本研究中柠条人工林平均土壤含水量随土层深度表现为先增加后减少的趋势,在 200 cm 土层土壤含水量达到最高($0.224\text{ cm}^3/\text{cm}^3$),其中在 $0\text{--}100\text{ cm}$ 土层土壤含水量变化剧烈,随着土层深度增加土壤含水量在 $100\text{--}500\text{ cm}$ 土层变化平缓, 500 cm 土层以下趋于稳定,这一现象在各个生态系统中均被广泛观察^[22-23]。这是因为越接近表层土壤含水量越容易受气候变化出现波动,随土层深度增加土

壤气候影响越小,加之柠条根系庞大,侧根发达,在水平方向和垂直方向覆盖面均较大,土壤水分通过根系渗入深层土壤,深层土壤含水量显著高于表层土壤含水量。

3.2 降雨特征对土壤水分增量的影响

降雨事件及雨水在土壤中的再分配可直接影响土壤水分的补充。降雨时,水分既要克服表土层的吸附截留,又要克制植被的蒸腾耗水,才能补给下渗到深层土壤,从而有效增加土壤水分补充^[24]。由于降雨量、降雨历时和降雨强度的不同,使得降雨对土壤水分的有效补给存在差异^[25]。本研究中当降雨量低于 4 mm 时为无效补给,而 >4 mm 的降雨事件可显著入渗到下层土壤,对表层 10 cm 及以下土壤水分起到有效补充作用,这与多数学者^[26-28]研究结果相近。此外,本研究中土壤水分补充与降雨量和降雨历时在 0—50 cm 土层呈显著正相关,50 cm 以下对土壤水分补充无影响,而降雨强度则表现为在 0—30 cm 土层与土壤水分补充呈显著正相关,30 cm 土层以下对其影响不显著。高露等^[29]研究表明,土壤水分补充和降雨量在 5—60 cm 土层呈显著正相关;石明明等^[30]研究表明,土壤水分增量和降雨量在 0—40 cm 土层呈显著性正相关,而降雨强度和土壤水分补充增量在 0—30 cm 土层为显著正相关,与本研究结果一致。同时,本研究发现,黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态变化观测末期较观测初期高,即土壤水分补充为正向补给状态。这主要与近年来黄土丘陵区降雨量增加有关,本研究中观测期年降水量 702 mm,较高的降水使得土壤水分补充机会增加,从而使得土壤水分补充呈正向补充状态。

土壤水分补充受降雨量、降雨历时和降雨强度影响深刻,忽略这些因素可能在很大程度上低估降雨对土壤水分补充作用。本研究仅对黄土丘陵区典型柠条人工纯林为研究对象,针对降雨特征对土壤水分进行具体探讨,而在复杂的环境中,降雨对土壤水分补充增量受植被类型及环境因素影响,本试验中影响因素和植被数量受限。因此,剖析影响土壤水分补充的其他环境及其间关系可作为今后的研究方向。

4 结论

(1)柠条人工林土壤水分消耗主要集中在 0—500 cm,500 cm 土层以下土层土壤水分无明显波动,各峰值存在明显的滞后现象;不同月份各剖面土壤水分呈“双峰”,“单峰”和“双峰”月变化规律,且随土层深度增加变化率减弱,其中 6—7 月处土壤水分消耗最高。

(2)降雨对土壤水分补充次数随土层深度增加而减少,最深可补充 200 cm 土层,且平均土壤水分补充

增量随土层深度增加整体趋于减小。

(3)降雨量小、降雨历时长,土壤水分补充增量较小,当降雨量大、降雨历时长较降雨量大、降雨历时短的土壤水分补充增量小,但补充深度深,达到峰值时间长。

(4)降雨量、降雨历时与土壤水分增量呈对数相关关系,与降雨强度则表现为幂函数关系最优,且降雨量、降雨历时和降雨强度对土壤水分增量影响随土层深度增加而减弱,其中降雨历时和降雨量对土壤是水分增量影响主要在 0—50 cm 土层,而降雨强度对其影响则在 0—30 cm 土层。

参考文献:

- [1] 孙亚荣,王亚娟,赵敏,等.黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应[J].环境科学,2022,43(10):4648-4657.
- [2] 孙亚荣,白应飞,王亚娟,等.1999—2018 年延安市各区县退耕还林草实施效果分析[J].水土保持研究,2023,30(1):1-7.
- [3] Wang T, Wang T, Zhu Q, et al. Researches on ecological solidification and melioration effects of plants on silty soft soil[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1011(1):e12052.
- [4] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J].水土保持学报,2021,35(1):205-212.
- [5] Mei X M, Ma L. Effect of afforestation on soil water dynamics and water uptake under different rainfall types on the Loess hillslope[J]. Catena, 2022, 213:303-314.
- [6] 赵文举,李晓萍,范严伟,等.西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J].农业工程学报,2015,31(17):144-151.
- [7] 付同刚,陈洪科,张伟,等.喀斯特小流域土壤含水率空间异质性及其影响因素[J].农业工程学报,2014,30(14):124-131.
- [8] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(6):707-718.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杜康,张北赢.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2020,27(6):72-76.
- [12] 陈伟,李亚新,王红阳,等.黄土丘陵区坡耕地与撂荒地土壤水分对降雨的响应特征[J].生态学报,2022,42(1):332-339.
- [13] 吴远菲,肖培青,郝仕龙,等.黄土丘陵区典型灌木和荒草地土壤含水量变化对降雨的响应[J].水土保持研

究,2022,29(4):121-126.

[14] 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.

[15] 冯伟,杨文斌,党宏忠,等.毛乌素沙地流动沙丘土壤水分对降雨的响应[J].中国沙漠,2015,35(2):400-406.

[16] 李萍,李同录,王阿丹,等.黄土中水分迁移规律现场试验研究[J].岩土力学,2013,34(5):1331-1339.

[17] 孙仕军,丁跃元,马树文,等.地下水埋深较大条件下井灌区土壤水分动态变化特征[J].农业工程学报,2003,3(2):70-74.

[18] Zhang D B, Zhang C, Ren H L, et al. Trade-offs between winter wheat production and soil water consumption via leguminous green manures in the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2021,10(272):108278-108283.

[19] 陈娟,宋乃平,陈林,等.荒漠草原不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J].水土保持学报,2021,35(6):198-206.

[20] 赵丹阳,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2021,35(1):181-187.

[21] 胡守林,贾志宽,万素梅.陇东黄土高原苜蓿草地土壤水分消耗及水分生态效应[J].农业工程学报,2009,25(8):48-53.

[22] 邹俊亮,邵明安,龚时慧.不同植被和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J].水土保持研究,2011,18(6):12-17.

[23] 赵亚楠,于露,周玉蓉,等.宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响[J].生态学报,2020,40(4):1305-1315.

[24] Wei L, Yang M Y, Li Z, et al. Experimental investigation of relationship between infiltration rate and soil moisture under rainfall conditions[J]. Water, 2022, 14(9):e1347.

[25] 杨志成,柯奇画,马芊红,等.喀斯特地区黄壤坡面土壤水分对降雨的响应[J].水土保持学报,2021,35(2):75-79.

[26] 王亚琳,周秋文,谢雪梅,等.湿润喀斯特地区冬季灌丛土壤水分对降雨的响应[J].水资源与水工程学报,2021,32(6):229-235.

[27] 徐露,张丹,向宇国,等.季节性干旱区紫色土坡耕地土壤水分对降雨的响应[J].水土保持学报,2020,34(6):37-45.

[28] 王博,段玉玺,王伟峰,等.油蒿灌丛群落浅层土壤水分对不同降雨格局的响应[J].应用生态学报,2020,31(5):1571-1578.

[29] 高露,张圣微,朱仲元,等.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[J].水土保持学报,2020,34(1):195-201.

[30] 石明明,王晓敏,周秉荣,等.高寒草原根系层土壤水分动态及其对降雨格局的响应[J].生态环境报,2020,29(9):1723-1729.

(上接第 271 页)

[12] 马婧婧,刘耘华,盛建东,等.新疆草地优势种植物相对生物量沿海拔梯度变化特征[J].草业学报,2021,30(8):25-35.

[13] 周泉,叶茂,赵凡凡.基于 VOR 模型的阿尔泰山林区森林生态系统健康评价[J].甘肃农业大学学报,2021,56(3):137-148.

[14] 常虹,孙海莲,刘亚红,等.东乌珠穆沁草甸草原不同退化程度草地植物群落结构与多样性研究[J].草地学报,2020,28(1):184-192.

[15] 乔木,陈亚宁,赵兴有.中国哈巴河流域农业地貌条件分区评价[J].干旱区地理,1997,20(2):67-72.

[16] 张小芳,张春平,董全民,等.三江源区高寒混播草地群落结构特征的研究[J].草地学报,2020,28(4):1090-1099.

[17] 黄国柱,席亚丽,赵传燕,等.围封对祁连山亚高山草地群落结构与生物量的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),2020,56(6):718-723.

[18] 何芳兰,金红喜,郭春秀,等.民勤绿洲边缘人工梭梭(*Haloxylyon ammodendron*)林衰败过程中植被组成动态及群落相似性[J].中国沙漠,2017,37(6):1135-1141.

[19] 马全林,卢琦,魏林源,等.干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征[J].生态学报,2015,35(7):2285-2294.

[20] 李晓敏,宋跃斌,姜万利.天山、阿尔泰山不同草地类型草群养分评价[J].草业与畜牧,2015,219(2):44-48.

[21] 张丽,张鲜花.天山北坡山地草原类组草地植物群落特征及多样性动态分析[J].新疆农业科学,2017,54(1):148-155.

[22] 刘东霞,卢欣石,李文红.呼伦贝尔退化草地植被演替特征研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(8):103-110.

[23] 陶利波,于双,王国会,等.封育对宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落特征及其稳定性的影响[J].中国草地学报,2018,40(2):67-74.

[24] 陈春波,彭建,李刚勇.新疆草地生态系统健康评价体系构建[J].干旱区研究,2022,39(1):270-281.

[25] 单贵莲,陈功,刘钟龄,等.典型草原健康评价的 VOR 和 VCOR 指数[J].草地学报,2012,20(3):401-406.

[26] 俞鸿千,蒋齐弘,王占军,等.VOR、CVOR 指数在宁夏干旱风沙区荒漠草原健康评价中的应用:以盐池县为例[J].草地学报,2018,26(3):584-590.