DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.006; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.006.
赵意茹, 高钰琪, 王中琦, 等. 黄土塬区不同土地利用方式土壤水分对次降雨的响应特征[J].水土保持研究,2025,32(2):34-42.
Zhao Yiru, Gao Yuqi, Wang Zhongqi, et al. Response of soil water content to rainfall events under different land use types on the loess tableland [J]. Research of Soil and Water Conservation,2025,32(2):34-42.

黄土塬区不同土地利用方式土壤水分对次降雨的响应特征

赵意茹[1], 高钰琪[2], 王中琦[1], 房凤如[1,3], 韩晓阳[1,3], 刘文兆[1,3], 朱元骏[1,3]

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院(水土保持研究所) 陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西 杨凌 712100; 2.长武县农业技术推广中心, 陕西 长武 713600; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘　要:[**目的**]探究土壤水分对次降雨响应过程,揭示该地区不同土地利用方式的土壤水分特征,进而为缺水地区降水利用和农业水资源合理配置提供观测依据。[**方法**]对 2021 年黄土塬区苜蓿草地、休闲地、高产农田(正常施肥)和低产农田(长期不施肥)4 种土地利用方式的土壤水分进行了定位监测,并分析其对大于 30 mm 的 3 次降雨事件响应过程。[**结果**]随着降雨量的增加,苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田的降雨入渗和水分再分布深度也呈增大趋势,最大水分入渗深度分别为 300,500,500,500 cm。不同土地利用方式土壤含水量具有明显的季节特征,月均土壤含水量呈现先增大后减小的趋势,最小值分别出现在 8 月、1 月、1 月和 6 月,最大值均在 10 月。雨季后,土壤水分仍处于再分布过程,12 月底苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田水分再分布深度分别达到 400,700,800,700 cm;土壤储水量变化滞后于降雨量,9—10 月土壤储水量变化最强烈,苜蓿地、休闲地、高产农田和低产农田土壤储水量增幅分别为 390.6,197.5,299.8,157.4 mm。[**结论**]4 种土地利用方式中,亏缺严重的苜蓿草地土壤水分对降雨的响应最为敏感,最大响应深度可达 400 cm,土壤储水量变化幅度也最大,水分再分布过程导致其变化滞后于降水量。

关键词:土壤水分; 入渗深度; 土地利用方式; 次降雨; 黄土塬区

中图分类号:S152.7　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1005-3409(2025)02-0034-09

Response of soil water content to rainfall events under different land use types on the loess tableland

Zhao Yiru[1], Gao Yuqi[2], Wang Zhongqi[1], Fang Fengru[1,3], Han Xiaoyang[1,3], Liu Wenzhao[1,3], Zhu Yuanjun[1,3]

(1.*Shaanxi Changwu National Field Scientific Observation and Research Station of Farmland Ecosystem, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering & Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*Agricultural Technology Extension Center of Changwu County, Changwu, Shaanxi* 713600, *China*; 3.*Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [**Objective**] The aims of this study are to explore the response of soil water to rainfall, to reveal the soil water characteristics of different land use types in this area, and to provide observation basis for rainfall utilization and rational allocation of agricultural water resources in water shortage areas. [**Methods**] The soil water contents (SWC) of alfalfa field, fallow field, fertilized cropland (normal fertilization) and unfertilized cropland (no fertilization) of the loess tableland in 2021 were monitored. The effects of three rainfall events (greater than 30 mm) on soil water content were analyzed. [**Results**] With the increase of rainfall, the

收稿日期:2024-06-13　　**修回日期:**2024-07-16　　**接受日期:**2024-07-18
资助项目:国家自然科学基金(42007011,41971049);中国科学院西部青年学者项目(XAB2018B08)
第一作者:赵意茹(1999—),女,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为土壤水分运移。E-mail:zyr99111@163.com
通信作者:韩晓阳(1987—),男,山东聊城人,博士,副研究员,主要从事植被格局与土壤水碳关系研究。E-mail:xyhan11@nwafu.edu.cn

infiltration and water redistribution depths of alfalfa field, fallow field, fertilized cropland and unfertilized cropland also showed an increasing trend, and the maximum water infiltration depths were 340, 500, 500 and 500 cm, respectively. The SWC of different land use types had obvious seasonal characteristics, the monthly average SWC generally showed an increasing trend first and then decreased, the minimum values appeared in August, January, January and June, respectively, and the maximum values appeared in October. Soil water was still in the process of redistribution after the rainy season, the water redistribution depths of alfalfa field, fallow field, fertilized cropland and unfertilized cropland reached 400, 700, 800 and 700 cm, respectively, at the end of December. The change of soil water storage lagged behind rainfall, which was the strongest from September to October, the increase amounts of soil water storage in alfalfa field, fallow field, fertilized cropland and unfertilized cropland were 390.6, 197.5, 299.8 and 157.4 mm, respectively. [**Conclusion**] Among the four land use types, the soil water of alfalfa field with severe deficit was the most sensitive to rainfall. The maximum response depth could reach 400 cm, and the change range of soil water storage was also the largest. The process of water redistribution led to its change lagging behind precipitation.

Keywords: soil water content; infiltration depth; land use type; rainfall events; loess tableland

水分是土壤系统中物质和能量循环的重要载体,在植物生长中起着至关重要的作用[1]。黄土塬区是典型的旱作农业区,降水是该区农田土壤水分的唯一补给来源,深厚的黄土如同土壤水库,其调蓄水分功能可有效缓解降水不足和季节分布不均所导致的旱情[2],为雨水转化为土壤水提供了良好条件[3]。降水入渗、再分布过程及其向土壤水的转化效率是决定土壤水库容量的关键因子[4]。近年来,黄土塬区土壤水资源短缺和农业生产需求之间的问题日益突出,因此充分认识土地利用方式、降水和土壤水分之间的相互关系是合理配置水资源和土地利用的重要前提[5]。由于不同土地利用方式植被覆盖度不同,其土壤水分对次降水的响应也存在差异[6],故探明黄土塬区不同土地利用方式土壤水分对次降雨的响应特征,对明确该地区植被格局和降水利用之间的耦合关系具有重要意义。

近年来,有关不同土地利用方式、降水与土壤水分之间相互作用的研究开展较多,取得了一系列重要进展。孙亚荣等[7]的研究表明黄土丘陵区降水对土壤水分的影响随着土层深度的增加而减弱;黄亚楠等[8]认为不同土地利用方式对土壤水分作用强度和深度不同。针对不同土地利用方式下土壤水分变化对降水的响应问题,赵思远等[9]观测了黄土高原王东沟小流域塬面荒草地、苹果地和玉米地的土壤水分特征,认为不同降水条件下对土壤水分入渗之间的差异主要受到作物根系的影响;朱乐天等[10]研究了黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分对降水响应,表明降水对土壤水分的补给和地表植被覆盖程度关系密切;袁日萍等[11]对黄土塬区不同种植方式下土壤水分变化的观测也表明,影响土壤水分的因素有降雨量、作物类型、生长阶段和单作或轮作等。此外,还有研究指出,不同降水强度对土壤水分的补给程度有所差异,且不同土地利用方式土壤水分对降水的响应机制不同[12]。上述研究说明降水对土壤水分的补给过程受多因素共同调控,且不同土地利用方式土壤水分对降水的响应不同。黄土塬区降水对土壤水分的补给过程一直都是该区域研究的关键问题,但不同土地利用方式土壤水分对自然条件下极端次降雨事件响应过程的实时观测还较少,无法准确揭示深层土壤剖面水分补给机制。

因此,本文以黄土塬区多年生苜蓿(*Medicago sativa* L.)草地、休闲地、高产农田和低产农田 4 种土地利用方式 10 m 剖面土壤水分为研究对象,通过实时观测 24 h 降雨量大于 30 mm 的次降雨事件后不同土地利用方式土壤水分的垂直剖面分布情况,量化土壤水分对次降雨事件的响应深度,明确降水、土壤水和土地利用方式之间的耦合关系,以期为该区域土地利用方式布局和降水资源的合理配置提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于黄土高原南部陕西长武县境内的长武塬上(107°41′E,35°14′N),西部和东部分布着董志塬和洛川塬,地势北高南低,塬面平均海拔为 1 220 m。该区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 9.1 ℃,年均降雨 580 mm,5—10 月降水占年降水量的 70%以上,无霜期 171 d,地下水位埋深一般在 50~80 m 以下[13]。土壤以黑垆土为主,母质是深厚的中壤质马兰黄土,土质均匀疏松,稳定入渗率为 1.35

mm/min[14]，田间持水量为 21.16%±0.86%(g/g)，萎蔫湿度为 9%～12%[13]。

1.2 研究方法

观测地点为陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站(长武站)深剖面土壤水热运动观测场，建成于2005年，共设4种土地利用方式，分别为苜蓿草地、休闲地、高产农田(正常施肥)和低产农田(长期不施肥)，其中苜蓿草地为深根系高耗水草地，休闲地为对照，高产农田与低产农田为不同施肥模式下的主要粮食作物小区，均为黄土塬区代表性的土地利用方式。小区面积 100 m^2(10 m×10 m)，小区之间用薄钢板镶嵌隔开以阻断土壤水分和养分水平交换，嵌入深度为 10 m。多年生苜蓿草地每年定期收获，生长季为每年3—10月，到2021年已种植16 a；农田小区为冬小麦—冬小麦—春玉米轮作，2021年种植的是冬小麦，生长季为2020年9月—2021年6月。

土壤水分数据是通过土壤水分自动观测系统进行实时观测获得，采用 HydraProbe Ⅱ土壤三参数传感器(Stevens，USA)和数据采集传输模块，CR1000 数据采集器(Campbell Scientific，USA)记录土壤含水量数据(体积含水量，cm^3/cm^3)，共设置21个监测层次，分别为10，20，30，40，50，70，100，120，160，200，220，260，300，340，400，440，500，600，700，800，1 000 cm，时间段为2021年1月1日—2021年12月31日。

降水数据来自长武站自动气象站(图1)。本研究选取年降水量为756 mm的极端年份(2021年)的降雨事件进行统计分析。依据国家气象局颁布的降雨等级划分标准，划分为小雨(24 h降雨量0.1～9.9 mm)、中雨(24 h降雨量10.0～24.9 mm)、大雨(24 h降雨量25.0～49.9 mm)、暴雨(24 h降雨量50.0～99.9 mm)、大暴雨(24 h降雨量100.0～249.9 mm)和特大暴雨(24 h降雨量≥250.0 mm)[15]。其中，降雨量<30 mm时，降雨对入渗的深度影响较小[16]，故本研究选择24 h降雨量>30 mm的降雨事件进行分析。

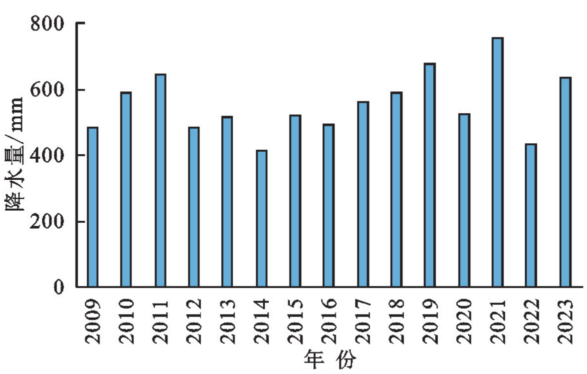

图1 2009—2023年年降水量

Fig. 1 Annual precipitation during the year 2009 to 2023

1.3 数据处理与统计分析

利用土壤水分自动观测系统测定各土层的土壤体积含水量[17]，第 i 层的土壤储水量 W_i(mm)计算公式为：

$$W_i=\theta_i\times D_i \tag{1}$$

式中：θ_i 为第 i 层的土壤体积含水量(cm^3/cm^3)；D_i 为第 i 层的土层厚度(mm)。

本研究观测深度为1 000 cm，共分为21层，则各土地利用方式0—1 000 cm土层的储水量 W(mm)为：

$$W=\sum_{i=1}^{n}\theta_i\times D_i \tag{2}$$

式中：$n=21$。

根据降雨量和降雨时间得到雨强的计算公式为：

$$I=\frac{p}{t} \tag{3}$$

式中：I 为平均降雨强度(mm/h)；p 为降雨量(mm)；t 为降雨时间(h)。

本研究主要采用 Microsoft Excel 2019 进行数据统计和整理，利用 Origin 2018 进行图表绘制，IBM SPSS Statistics 27 进行差异显著性分析，利用时间对比分析法判断降雨入渗深度和降雨后土壤水分的再分布深度，进一步揭示降雨过程对不同土地利用方式土壤水分的影响。

2 结果与分析

2.1 研究区月降雨分布情况

根据研究区2009—2023年的月均降水量和2021年各月降水量分布(图2)，2021年有5个月的月降水量高于近15年月均降水量，其中，2021年9月份和10月份降水量分别为226.8 mm和175.4 mm，降雨量总和约占全年53%。

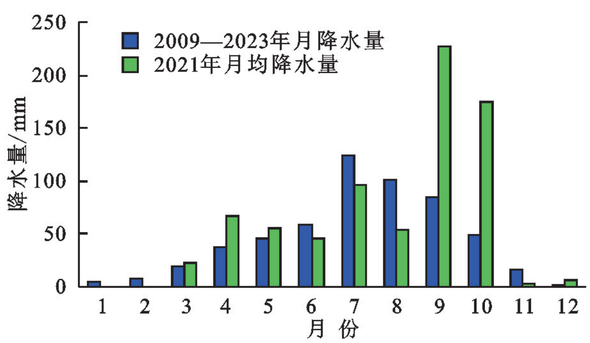

图2 长武2009—2023年降水量月均值和2021年月降水量

Fig. 2 Monthly average precipitation in Changwu during 2009 to 2023 and the monthly precipitation in 2021

2021年24 h降雨量25.0～49.9 mm(大雨)的降雨事件8次，24 h降雨量50.0～99.9 mm(暴雨)的降

雨事件 2 次(表 1)。选取 24 h 降雨量大于 30 mm 的降雨事件,将降雨开始前、大于 30 mm 降雨当天、降雨截止和大于 30 mm 降雨一周后作为一个完整的降雨事件。选择 3 次典型降雨事件(分别以 RE_1,RE_2 和 RE_3 表示),出现的时间段分别为 7 月 14 日—7 月 23 日、9 月 14 日—9 月 30 日、10 月 2 日—10 月 14 日,降雨量分别为 71.8 mm,197.4 mm,163 mm。

表 1　2021 年大雨和暴雨的分布情况

Table 1　Distribution of heavy rain and rainstorm in 2021

降雨类型	日期(月-日)	降雨历时/h	降雨量/mm	降雨强度/($mm \cdot h^{-1}$)
大雨	04-24	19	28.4	1.49
大雨	06-16	15	27.0	1.80
暴雨	07-15	4	70.4	17.60
大雨	08-21	2	26.0	13.00
大雨	09-18	22	34.6	1.57
大雨	09-22	7	34.2	4.89
大雨	09-24	12	28.6	2.38
大雨	09-25	16	30.4	1.90
暴雨	10-03	17	60.8	3.58
大雨	10-06	14	36.0	2.57

2.2　土壤含水量及其再分布对次降雨的响应特征

不同土地利用方式土壤含水量的变化及其再分布深度对降雨的响应具有明显差异(图 3,表 2)。RE_1 雨量条件下,苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田的降雨入渗深度分别为 100,120,200,260 cm,降雨结束后土壤水分继续向下运移,低产农田再分布深度可达 340 cm,RE_1 中 4 种土地利用方式对应的平均土壤含水量的变化范围分别为 19.5%～30.4%,26.8%～29.1%,24.5%～29.5%和 30.2%～33.5%;相对于 RE_1,RE_2 和 RE_3 的降雨量增加,苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田的降雨入渗深度也分别增大至 200,340,400,340 cm 和 300,500,500,500 cm,RE_3 降雨结束后,苜蓿草地土壤水分再分布深度可达 340 cm,RE_2 和 RE_3 对应的平均土壤含水量的变化范围分别为 20.0%～31.5%,29.3%～33.9%,27.9%～32.7%,31.8%～36.6%和 26.8%～32.8%,32.9%～35.5%,32.5%～35.8%,34.6%～36.6%;苜蓿草地 D_1 的土壤含水量变化幅度显著大于其他 3 种土地利用方式($p<0.05$),其在 RE_2 中变化幅度最大,为 11.5%,而休闲地、高产农田和低产农田之间无显著差异($p>0.05$)。

2.3　不同土地利用方式土壤含水量季节变化特征

苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田土壤含水量均呈现明显的季节特征(图 4—5)。月均土壤含水量总体呈现先增大后减小的趋势,苜蓿草地最小值在 8 月,为 18.8%,休闲地和低产农田最小值在 1 月,分别为 27.8%和 30.1%,高产农田土壤水分最小值出现在 6 月,为 27.1%,最大值均出现在 10 月,分别为 27.2%,33.9%,33.5%和 34.9%。

土壤水分活跃层随着季节呈现出明显变化,苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田 1—8 月的土壤水分活跃层分别为 0—200,0—70,0—100,0—160 cm,波动范围分别为 15.8%～31.7%,13.0%～33.0%,11.5%～31.0%和 15.7%～36.8%;随着降雨量的增加,土壤水分再分布导致变化深度增大,9—12 月分别可达 0—400,0—700,0—800,0—700 cm,含水量波动范围分别为 16.2%～36.5%,19.1%～36.5%,11.5%～39.4%和 15.0%～40.4%。

2.4　不同土地利用方式土壤储水量季节变化特征

2021 年,苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田 0—10 m 剖面土壤储水量月均值分别为 2 048.3,3 231.7,3 071.4,3 277.8 mm(表 3)。其中苜蓿草地土壤储水量显著小于其他 3 种土地利用方式($p<0.05$),休闲地和低产农田土壤储水量无显著差异($p>0.05$),低产农田的土壤储水量显著大于高产农田($p<0.05$)。4 种土地利用方式的土壤储水量随着降雨量的增大而增大。苜蓿草地土壤储水量最大值出现在 11 月,为 2 385.9 mm,而休闲地、高产农田和低产农田最大土壤储水量均出现在 10 月,分别为 3 364.8,3 265.0,3 424.5 mm。9—10 月间土壤储水量变化最强烈,苜蓿地、休闲地、高产农田和低产农田土壤储水量增加值分别为 390.6,197.5,299.8,157.4 mm,苜蓿地的土壤储水量增加幅度最明显。

3　讨 论

不同土地利用方式土壤水分及其再分布对降雨响应存在明显差异。土壤水分再分布受到降雨强度、降雨量、初始土壤含水量等因素影响[18],降雨前期低产农田土壤含水量较高,3 次降雨事件中,其土壤水分再分布深度均最大,分别为 340,400,500 cm;而苜蓿草地的土壤水分再分布深度均最小,最大水分运移深度为 340 cm,这与多年苜蓿的连作致使土壤形成稳定性土壤干层密不可分[19],其上层土壤缺水较多,降雨到达后需要先补给上层的缺水,降雨充足时才能缓慢补给到深层。雨季后,土壤水分在重力作用下继续向下运移,12 月底苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田土壤水分再分布深度分别达到 400,700,800,700 cm。

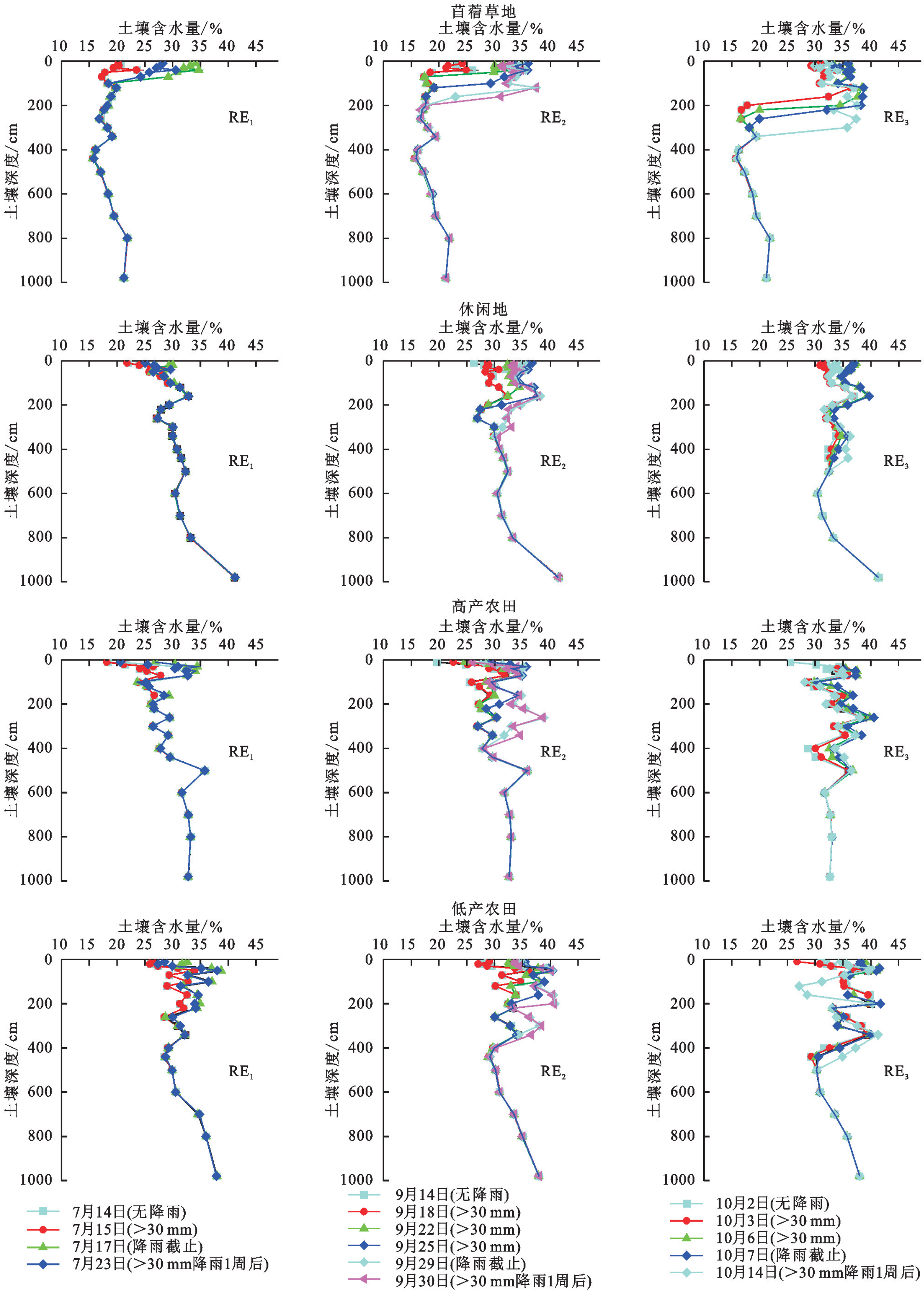

图 3 不同土地利用方式土壤水分剖面分布

Fig. 3 Soil water content of profile distribution under different land use types

表 2　降雨期间土壤含水量的变化情况

Table 2　Changes of soil water content during rainfall periods

土地利用方式	RE$_1$				RE$_2$				RE$_3$			
	土层深度/cm	变化范围/%	变化量/%	平均值/%	土层深度/cm	变化范围/%	变化量/%	平均值/%	土层深度/cm	变化范围/%	变化量/%	平均值/%
苜蓿草地	0—100(D$_1$)	19.5~30.4	10.9a	23.9	0—200(D$_1$)	20.0~31.5	11.5a	26.1	0—340(D$_1$)	26.8~32.8	6.0a	29.9
	100—1000(D$_2$)	18.5~18.6	0.1a	18.5	200—1000(D$_2$)	18.3~18.4	0.1a	18.3	340—1000(D$_2$)	18.6~18.7	0.1a	18.6
	0—1000(D)	18.8~22.4	3.6a	20.3	0—1000(D)	19.1~24.6	5.5a	22.0	0—1000(D)	24.1~28.1	4.0a	26.2
休闲地	0—120(D$_1$)	26.8~29.1	2.3b	27.7	0—400(D$_1$)	29.3~33.9	4.6b	31.8	0—500(D$_1$)	32.9~35.5	2.6b	34.1
	120—1000(D$_2$)	31.4~31.5	0.1a	31.4	400—1000(D$_2$)	33.4~33.5	0.1a	33.4	500—1000(D$_2$)	34.0~34.1	0.1a	34.1
	0—1000(D)	29.6~30.5	0.9b	30.0	0—1000(D)	30.5~33.8	3.3b	32.3	0—1000(D)	33.1~35.2	2.1b	34.1
高产农田	0—200(D$_1$)	24.5~29.5	5.0b	26.6	0—400(D$_1$)	27.9~32.7	4.8b	30.3	0—500(D$_1$)	32.5~35.8	3.3b	34.2
	200—1000(D$_2$)	30.4~30.5	0.1a	30.5	400—1000(D$_2$)	32.5~32.6	0.1a	32.6	500—1000(D$_2$)	32.2~32.5	0.3a	32.5
	0—1000(D)	27.6~30.0	2.4ab	28.6	0—1000(D)	29.3~32.7	3.4ab	31.0	0—1000(D)	32.5~35.1	2.6ab	33.9
低产农田	0—340(D$_1$)	30.2~33.5	3.3b	31.6	0—400(D$_1$)	31.8~36.6	4.8b	34.3	0—500(D$_1$)	34.6~36.6	2.0b	35.6
	340—1000(D$_2$)	32.3~32.5	0.2a	32.4	400—1000(D$_2$)	32.7~32.8	0.1a	32.8	500—1000(D$_2$)	34.5~34.6	0.1a	34.5
	0—1000(D)	30.9~33.1	2.2b	31.9	0—1000(D)	32.1~35.4	3.3b	33.8	0—1000(D)	34.6~36.1	1.5b	35.4

注:D$_1$,D$_2$和 D 分别为土壤水分活跃层、土壤水分稳定层和 0—1 000 cm 土层,小写字母代表差异性显著(p<0.05),下表同。

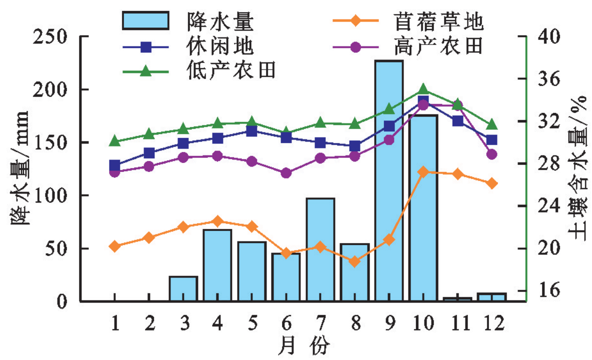

图 4　2021 年月均土壤含水量和降水量

Fig. 4　Monthly average soil water content and precipitation in 2021

苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田 3 次降雨事件中 D$_1$ 土壤含水量变化量分别为 10.9%,2.3%,5.0%,3.3%;11.5%,4.6%,4.8%,4.8%和 6.0%,2.6%,3.3%,2.0%。苜蓿草地 D$_1$ 的土壤含水量变化幅度明显大于休闲地、高产农田和低产农田,这是因为多年种植苜蓿会使浅层土壤含水量变少[20],水分入渗深度小,故降雨前后土壤含水量变化幅度大。3 次降雨事件中,苜蓿草地平均土壤含水量均为 D$_1$>D$_2$,休闲地、高产农田和低产农田在 RE$_1$ 和 RE$_2$ 中 D$_2$>D$_1$,RE$_3$ 中 D$_1$>D$_2$,这是因为多年生苜蓿草地已在 2—10 m土层形成稳定干层[21],D$_1$ 得到降雨补给,土壤含水量增大,D$_2$ 未得到补给,土壤含水量较小,故 D$_1$>D$_2$。休闲地并未种植作物,而高产农田和低产农田主要种植的都是浅根植物,主要吸收浅层土壤水分[22],故土壤含水量 D$_2$>D$_1$。RE$_3$ 与 RE$_2$ 时间间隔较短,受到 RE$_2$ 降雨量的影响,土壤含水量 D$_1$>D$_2$。同时,我们观测到的次降雨导致的入渗深度并不是最终的结果,降雨到达土壤后进一步的再分布是一个缓慢的、不断平衡的过程[23],会持续到本年度雨季结束后,再分布深度也会显著增加。

针对降雨入渗的影响因素,陈敏玲等[24]研究了降水格局对土壤水分的影响,结果表明土壤水分入渗和土壤储水增量主要由降水事件的大小主导;常昌明等[25]认为土壤水分入渗深度与降雨量、降雨强度和降雨前土壤含水量有关;魏雅芬等[26]研究表明降雨及水分下渗过程中,受到气温、相对湿度和光照等气象因子的影响。因此,土壤水分对降雨的响应过程受多种因素的影响,在后续研究中应全面考虑降雨强度、降雨历时、土壤初始含水量和气象因素等的综合影响。

另外,土壤储水量的变化与降水、土壤蒸发和植物蒸腾密不可分[27]。4 种土地利用方式 0—10 m 剖面的月均土壤储水量值分别为 2 048.3,3 231.7,3 071.4,3 277.8 mm,其中,苜蓿地明显低于其他 3 种土地利用方式(p<0.05),而高产农田的也显著低于低产农田,这与作物根系达到土层深度和时间密切相关[28]。土壤储水量的增加主要发生在 10 月,9 月降水量明显高于前几个月,储水量的季节变化明显滞后于雨季,这与王艳萍[29]和袁日萍[11]等的研究结果一致,并且这种滞后性与土壤水分垂直输送滞后和作物生长有关[30]。

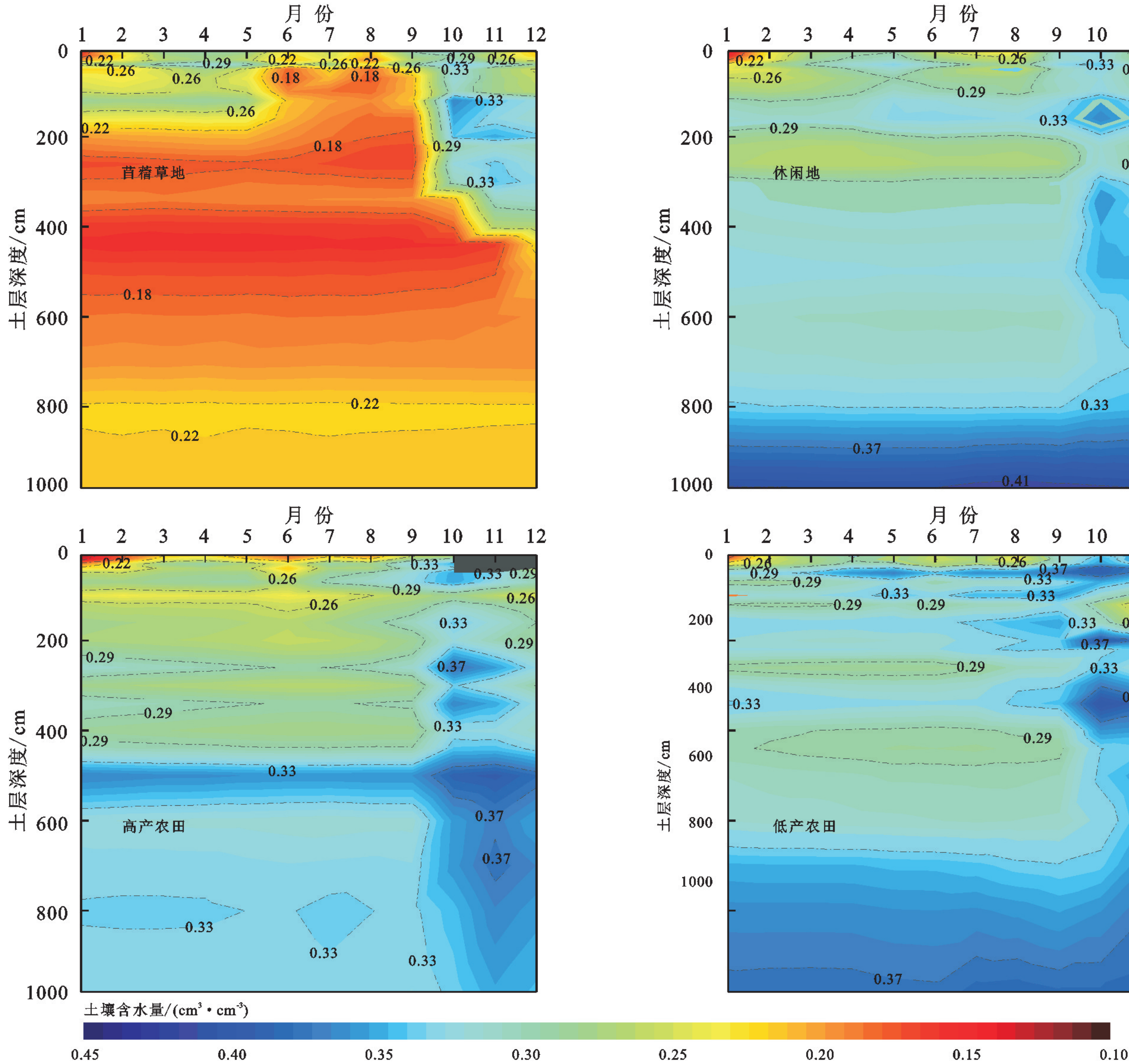

图5 不同土地利用方式土壤含水量季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of soil water content under different land use types

表3 2021年4种土地利用方式土壤储水量

Table 3 Soil water storage of four land use types in 2021

mm

月份	苜蓿草地	休闲地	高产农田	低产农田
1	1949.0	3149.4	3001.3	3217.1
2	1965.8	3158.3	3002.1	3217.8
3	1987.8	3171.0	3013.8	3223.8
4	2009.6	3181.8	3010.6	3230.5
5	1993.7	3208.9	2988.5	3231.1
6	1900.7	3200.7	2949.5	3199.5
7	1907.9	3198.4	2996.7	3246.4
8	1865.8	3193.1	3014.6	3260.8
9	1921.6	3242.6	3060.1	3292.3
10	2312.2	3440.1	3359.9	3449.7
11	2385.9	3364.8	3265.0	3424.5
12	2379.6	3271.4	3194.8	3339.9
平均	2048.3c	3231.7a	3071.4b	3277.8a

4 结论

(1) RE_1—RE_3的71.8～163 mm雨量下，苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田降雨入渗深度分别由100，120，200，260 cm增大至300，500，500，500 cm，其中苜蓿草地土壤水分再分布深度可达340 cm。

(2) 不同土地利用方式的土壤含水量具有明显的季节变化特征，且呈现先增大后减少的趋势，苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田土壤含水量最小值分别出现在8月、1月、1月和6月，最大值均在10月。

(3) 3次降雨事件后，不同土地利用方式的土壤储水量增幅差异明显，苜蓿地增幅最大，其次是高产农田、休闲地与低产农田；土壤储水量最大值均出现在10月雨季结束后，其变化滞后于降水量。

次降雨条件下土壤水分入渗深度及其响应过程受

多种因素影响,在后续研究中应综合多年际不同类型降雨事件,进一步探讨不同土地利用方式下降雨入渗规律,同时考虑土壤质地、土壤容重、气候条件等因素的影响,以明确土壤水分的消耗与补充机制。

参考文献(References):

[1] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2003,54(1/2):197-213.

[2] 程立平,林文,王亚萍,等.深层土壤水分对黄土塬区旱作冬小麦耗水的贡献[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):136-142.
Cheng L P, Lin W, Wang Y P, et al. Contributions of soil water in deep soil layers to water consumption of dryland winter wheat on the Loess Tableland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020,38(5):136-142.

[3] 杨文治.黄土高原土壤水资源与植树造林[J].自然资源学报,2001,16(5):433-438.
Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2001,16(5):433-438.

[4] 辛小桂,吴普特,汪有科,等.山地不同树龄枣园土壤水分状况研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):85-89.
Xin X G, Wu P T, Wang Y K, et al. Study on soil water condition of mountain jujube yards of different growth years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012,30(3):85-89.

[5] Yang Q, Fan J, Luo Z B. Response of soil moisture and vegetation growth to precipitation under different land uses in the Northern Loess Plateau, China[J]. Catena, 2024,236:107728.

[6] Yuan E S, Zhou Q W, Yan W H, et al. Response of the winter soil moisture of different vegetation types to rainfall events in karst slope land[J]. Hydrology Research, 2022,53(10):1271-1285.

[7] 孙亚荣,陈云明,王亚娟,等.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[J].水土保持学报,2023,37(1):272-279.
Sun Y R, Chen Y M, Wang Y J, et al. Dynamic variation characteristics of soil moisture in *Caragana korshinskii* plantation in loess hilly area and the influence of rainfall characteristics on it[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):272-279.

[8] 黄亚楠,林国伟,李志.黄土高原白草塬土地利用变化对地下水补给的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):250-255.
Huang Y N, Lin G W, Li Z. Impacts of changes in land use on groundwater recharge on Baicao loess tableland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019,37(3):250-255.

[9] 赵思远,贾仰文,牛存稳,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分对降雨的响应研究[J].中国农村水利水电,2022(3):174-182,188.
Zhao S Y, Jia Y W, Niu C W, et al. Response of soil water to precipitation under different land uses in the loess tableland region [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3):174-182,188.

[10] 朱乐天,焦峰,刘源鑫,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分时空变异特征[J].水土保持研究,2011,18(6):115-118.
Zhu L T, Jiao F, Liu Y X, et al. Spatio-temporal varation characteristics of soil moisture under different land uses in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(6):115-118.

[11] 袁日萍,甘永德,王尚涛,等.不同种植方式下黄土塬区土壤水分变化特征[J].水利水电技术(中英文),2023,54(10):59-70.
Yuan R P, Gan Y D, Wang S T, et al. Variation characteristics of soil moisture under different planting patterns in Loess Plateau[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023,54(10):59-70.

[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.
Chen W, Li Y X, Wang H Y, et al. Dynamic response characteristics of soil moisture on slope cultivated land and abandoned land to different rainfall intensities in loess hilly region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(1):332-339.

[13] 王锐,刘文兆,李志.黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究[J].土壤学报,2008,45(3):550-554.
Wang R, Liu W Z, Li Z. Physical properties of soils along a 10 m deep soil profile in loess tableland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(3):550-554.

[14] 李玉山,史竹叶,张孝中,等.长武王东沟小流域土壤墒情影响因素与分布特征[J].水土保持通报,1990,10(6):1-6.
Li Y S, Shi Z Y, Zhang X Z, et al. Influencing factors and distribution characteristics of soil moisture in Wangdonggou small watershed of Changwu[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990,10(6):1-6.

[15] 仇知雨,梁忠民,赵建飞,等.场次降雨空间插值方法对比研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(11):60-68.
Qiu Z Y, Liang Z M, Zhao J F, et al. Comparative study on spatial interpolationmethods of rainfall events [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022,53(11):60-68.

[16] 鲁睿,张明军,张宇,等.不同降雨量及雨强条件下兰州南山人工侧柏林土壤水分入渗规律[J].水土保持学

报,2024,38(2):364-376.
Lu R, Zhang M J, Zhang Y, et al. Soil water infiltration of artificial *Platycladus orientalis* of Nanshan Mountain in Lanzhou under different rainfall and rainfall intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):364-376.

[17] 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.
Kong L X, Bi H X, Zhou Q Z, et al. Dynamics of soil moisture in different stand sites of *Robinia pseudoacacia* forestlands in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(5):163-169.

[18] 金世杰,费良军,傅渝亮.土壤水分再分布特性研究进展[J].排灌机械工程学报,2016,34(3):251-259,264.
Jin S J, Fei L J, Fu Y L. Progress in research on soil water redistribution[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016,34(3):251-259,264.

[19] Ren X L, Jia Z K, Wan S M, et al. The long-term effects of alfalfa on soil water content in the Loess Plateau of Northwest China [J]. African Journal of Biotechnology, 2011,10(21):4420-4427.

[20] Huang Z, Liu Y, Cui Z, et al. Soil water storage deficit of alfalfa (*Medicago sativa*) grasslands along ages in arid area (China)[J]. Field Crops Research, 2018,221:1-6.

[21] 韩晓阳,刘文兆,程立平.黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J].应用生态学报,2017,28(2):430-438.
Han X Y, Liu W Z, Cheng L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(2):430-438.

[22] 张守纲,樊军,盖佳敏.黄土坡面苜蓿种植比例对土壤水分的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):35-43.
Zhang S G, Fan J, Gai J M. Effects of proportions of *Medicago sativa* on the loess slope on soil moisture [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(6):35-43.

[23] 韩晓阳,王亚萍,朱元骏,等.黄土塬区果园-农田交界带土壤水分分布及农田对果园的供水特征[J].水土保持学报,2024,38(2):197-204,215.
Han X Y, Wang Y P, Zhu Y J, et al. Soil water distribution and water supply characteristics of farmland to apple orchard in their adjacent areas on the Loess Tableland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):197-204,215.

[24] 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.
Chen M L, Zhang B W, Ren T T, et al. Responses of soil moisture to precipitation pattern change in semiarid grasslands in Nei Mongol, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016,40(7):658-668.

[25] 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.
Chang C M, Niu J M, Wang H, et al. Dynamic change of soil moisture and its response to rainfall in a *Stipa klemenzii* steppe[J]. Arid Zone Research, 2016,33(2):260-265.

[26] 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.
Wei Y F, Guo K, Chen J Q. Effect of precipitation pattern on recruitment of soil water in Kubuqi Desert, northwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008,32(6):1346-1355.

[27] He L L, Ivanov V Y, Bohrer G, et al. Temporal dynamics of soil moisture in a northern temperate mixed successional forest after a prescribed intermediate disturbance[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,180:22-33.

[28] 高元元,李婧,汪星,等.黄土丘陵苜蓿与柠条深层土壤干化状况及根系与养分特征[J].水土保持研究,2023,30(6):168-176.
Gao Y K, Li J, Wang X, et al. Soil desiccation and root and nutrient characteristics of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* in loess hilly area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):168-176.

[29] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7571-7579.
Wang Y P, Wang L, Han X, et al. Dynamics of soil moisture depletion and replenishment in different land use types of the Loess Tableland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(22):7571-7579.

[30] 周玉燕,廖空太,张莉,等.山旱塬区苹果园不同覆盖措施对土壤水分运动及产量的影响[J].中国果树,2017(1):5-10.
Zhou Y Y, Liao K T, Zhang L, et al. Effects of different mulching measures on soil moisture and yield of apple orchard in the mountain plateau area[J]. China Fruits, 2017(1):5-10.