

深层干化土壤水分恢复试验研究

田璐^{1,2} 张敬晓³ 高建恩^{1,4} 董建国^{1,4} 汪有科^{1,4}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 河北水利电力学院水利工程学院, 沧州 061000; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探索黄土丘陵区深层干化土壤在不同覆盖措施下的土壤水分恢复特征, 在陕西省米脂县丘陵山地建造大型模拟干化土壤土柱, 地表分别进行薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、栽植枣树、刺槐及裸地 6 个处理, 对 2014—2017 年土壤水分进行定位监测。数据分析结果表明: 至试验期结束, 薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地土壤水分恢复深度分别为 1 000、1 000、700、480 cm, 薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地、枣树、刺槐 0~1 000 cm 深度范围内土壤储水量变化量分别为 1 211.4、853.4、662.5、523.2、17.8、-235.7 mm, 全年覆盖降雨贮存效率分别为 63.4%、42.4%、29.4%、23.0%、-8.5%、-20.3%, 4 年生枣树耗水区域为 0~300 cm 范围, 刺槐耗水深度达 1 000 cm, 枣树年均蒸散量为 586.4 mm、刺槐年均蒸散量为 666.5 mm, 是枣树的 1.1 倍。该研究结果对黄土区大面积干化土壤修复及合理选择人工栽植植物具有积极意义。

关键词: 黄土丘陵区; 干化土壤; 覆盖措施; 土壤含水率; 土壤水分恢复度

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0255-08

Experiment on Dry Soil Water Restoration in Deep Layer

TIAN Lu^{1,2} ZHANG Jingxiao³ GAO Jian'en^{1,4} DONG Jianguo^{1,4} WANG Youke^{1,4}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. College of Water Conservancy Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061000, China

4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the soil water recovery under deep ground cover in the loess hilly region, a simulated soil column with depth of 1 000 cm and diameter of 80 cm was constructed in the hilly hills of northern Shaanxi, and there were six treatments of surface: the film mulching was provided with 16 small holes with an asymmetric diameter of about 2 mm for rainwater to enter and regularly updated every year; the stone mulching was uniform graveled with diameter from 2 cm to 5 cm, covering a thickness of 10 cm; the branch mulching was cut jujube branches, the length was about 10 cm, evenly covered after drying, the thickness was 10 cm; bare land without any covered; planting jujube with a diameter of 1 cm and height of 50 cm, without any other covering measures, regularly removed weeds; planting locust with a diameter of 1 cm and a height of 50 cm, without any other covering measures, regularly removed weeds. Soil moisture content of sloping farmland was taken as reference. Analysis of the positioning monitoring data for 2014—2017 showed that at the end of the trial period, taking the average water content of sloping farmland as the recovery target, the film mulching, stone mulching, branch mulching and bare soil moisture recovery depth was 1 000 cm, 1 000 cm, 700 cm and 480 cm; taking the actual soil water content of sloping farmland as the recovery target, the film mulching and stone mulching soil moisture recovery depth was 1 000 cm, the branch mulching recovery depth was 740 cm, and the bare land recovery depth was 440 cm. From the degree of recovery, the results were consistent. The water storage capacities of film mulching, stone mulching, branch mulching, bare land, jujube tree and locust were

收稿日期: 2018-10-17 修回日期: 2018-12-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703)

作者简介: 田璐(1994—), 女, 博士生, 主要从事农业水资源高效利用研究, E-mail: 1119585908@qq.com

通信作者: 汪有科(1956—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物高效用水和水土保持研究, E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

increased by 1 211.4 mm, 853.4 mm, 662.5 mm, 523.2 mm, 17.8 mm and -235.7 mm, respectively. The precipitation storage efficiency were 63.4%, 42.4%, 29.4%, 23.0%, -8.5% and -20.3%, respectively. The water consumption area of four years old jujube was ranged from 0 cm to 300 cm, its annual average evapotranspiration was 586.4 mm, locust consumed water up to 1 000 cm, and its annual average evapotranspiration was 666.5 mm, which was 1.1 times of jujube. The research result had positive significance for the large-area dry soil restoration in the loess area and the rational selection of artificially planted plants.

Key words: loess hilly region; soil desiccation; coverage mulching; soil water content; soil water restoration degree

0 引言

黄土高原位于我国腹地,是东南季风气候向西北内陆干旱气候过渡带^[1],存储于深厚黄土层中的土壤水对维持和调节植物的生长非常重要^[2]。长期以来黄土高原一直面临着水资源严重不足的问题^[3],大面积、高密度的人工林建设造成了土壤水分的严重亏缺,形成了土壤干层^[4-5]。王志强等^[6]最新研究表明,干层一旦形成,其土壤湿度就会处于稳定的低水平,且具有持久性,林后放牧荒坡土壤水分要恢复到持续放牧荒坡至少需要150年。孙剑等^[5]研究表明,6年生苜蓿草地0~1 000 cm土壤水分恢复到当地土壤稳定湿度需要23.8年。干层的存在使树木生长衰退,难以成林^[7];植被提早衰退,生长周期短,林下更新不良^[8];衰败的草地重新造林难度更大^[9-10]。枣树由于耐旱、耐贫瘠、营养价值高等优点,在黄土丘陵区的种植规模不断扩大,是该区域的支柱产业之一^[11]。刺槐是黄土高原常见的造林树种,长期种植会消耗深层土壤水分,形成干层^[8]。多年来,众多科研工作者为黄土高原区域保蓄土壤水分、提高土壤水分利用效率开展了大量的研究工作^[12-14]。

国内外学者进行了许多关于不同覆盖措施下土壤水分恢复的研究。文献[15-18]研究发现,覆盖措施能够提高土壤水分的利用效率,可以抑制土壤水分的蒸发,增加降水入渗。但这些研究大部分是在有植物根系消耗土壤水分的情况下进行,不能反映无植物利用情况下不同覆盖措施对土壤水分的影响,且很多是短期对土壤水分进行监测,鲜有对连续几年覆盖下土壤水分的恢复研究。本文在野外建造10 m深模拟干化土壤的大型土柱,以当地坡耕地为参照,分析不同覆盖措施下土壤水分和储水量的恢复情况,以及干化土壤中栽植枣树与刺槐的耗水规律,综合评价栽植植物和无植物情况下的深层干化土壤水分恢复特征,以为该地区防治土壤干化的研究提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省米脂县境内远志山红枣示范基地(37°40'~38°06'N,100°15'~110°16'E),为典型黄土丘陵沟壑区;属中温带半干旱性气候,年平均气温8.4℃,最高气温38.2℃,最低气温-25.5℃。多年平均降雨量为450 mm,试验期间年均降雨量为518.3 mm。土壤以黄土母质发育的黄绵土为主,质地为粉质沙壤土,容重1.29~1.31 g/cm³,田间持水率为22%。试验区土层深厚,地下水埋深在50 m以下,对根系吸水影响可忽略。试验地为前期栽植苹果23年伐后再利用地,试验土柱平均土壤体积含水率约7.5%,接近枣树凋萎系数6.5%。试验区附近坡耕地0~10 m土层平均含水率为15.3%,储水量为1 526 mm。

2 试验方法

2.1 样地布设

2014年5月在同一水平阶地上建造18个直径0.8 m、深10 m的大型土柱,间距1.6 m。分别设置裸地、石子覆盖、树枝覆盖、薄膜覆盖以及栽植枣树、刺槐6个处理(图1),每个处理3个重复,覆盖方式见表1。人工开挖后土柱内壁用防水塑料膜与周围土层隔开,避免土柱内外水分的扩散以及周围植物根系对水分的影响,上边界为高出地面0.1 m的混

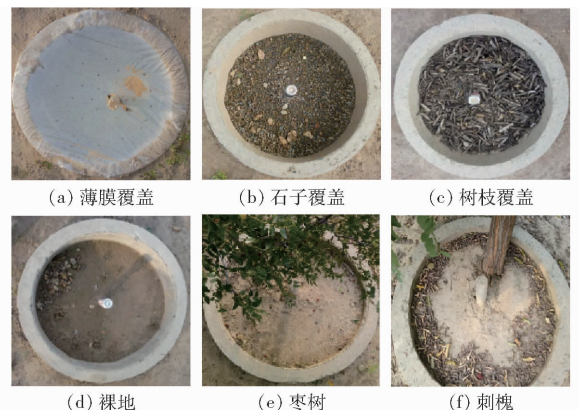


图1 不同覆盖措施实体图

Fig. 1 Entity pictures of different mulching measures

凝土井圈,防止降雨流失,水分变化只通过蒸散和入渗完成。回填土经过均匀掺混后每隔 30 cm 踩实一次,尽量保持土壤的密实度与周围实际原状土壤一致。图 2a 为土柱纵截面示意图,图 2b 为薄膜覆盖方式纵截面示意图。

表 1 田间试验设计

Tab.1 Design of field experiment

覆盖措施	覆盖方式与管理
裸地	无任何覆盖措施,定期去除杂草
栽植枣树	栽植地径 1 cm、高度 50 cm 枣树,无其他任何覆盖措施,定期去除杂草
栽植刺槐	栽植地径 1 cm、高度 50 cm 刺槐,无其他任何覆盖措施,定期去除杂草
石子覆盖	筛选直径 2~5 cm 均匀砾石,覆盖厚度为 10 cm
树枝覆盖	剪切长度大约 10 cm 枣树枝,晒干后均匀覆盖,厚度为 10 cm
薄膜覆盖	覆盖单层 0.015 mm 的白色塑料膜,薄膜上设有 16 个不对称直径约为 2 mm 的小孔以便雨水进入,每年定期更新薄膜

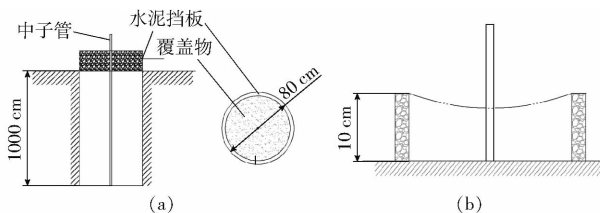


图 2 土柱纵截面示意图

Fig.2 Sketches of vertical sections of soil column

2.2 气象数据采集

利用小型综合气象观测站(BLJW-4型)测定气象数据。气象站设有温度和湿度传感器、翻斗式雨量筒、风速仪和净辐射传感器,分别用来获取环境温度、环境湿度、降水量、风速和净辐射值等气象数据。数据采集器每隔 30 min 读取数据一次。

2.3 土壤含水率测定

每个土柱中间位置安放 10 m 长铝合金套管,利用 CNC-503DR 型中子土壤水分仪测定 0~1 000 cm 深度内的土壤含水率,每 20 cm 为一个测层。观测期为 2014 年 5 月—2017 年 12 月,其中 2014 年 5 月—2016 年 5 月每 10 d 采集一次数据,本文中所用数据为每月月末所采集。2016 年 6 月、2016 年 12 月、2017 年 12 月月末各采集一次数据定期对中子仪进行校准,土壤含水率均为体积含水率。

2.4 相关指标计算

土壤储水量计算公式为

$$W = 10\theta d \quad (1)$$

式中 W ——土壤储水量,mm

θ ——土壤体积含水率,%

d ——土层厚度,cm

储水量变化量计算公式为

$$\Delta W = W_{\text{final}} - W_{\text{initial}} \quad (2)$$

式中 ΔW ——储水量变化量,mm

W_{initial} ——计算时段初期土壤储水量,mm

W_{final} ——计算时段末期土壤储水量,mm

试验区植物蒸散量利用农田水量平衡法计算。试验区植物为雨养,无灌水,无地下水补给,试验期间未发生地表径流,当植物耗水深度达到 1 000 cm 时停止对蒸散量的计算。因此,0~1 000 cm 深度范围内,植物蒸散量公式可简化为

$$ET = P_r - \Delta W \quad (3)$$

式中 ET ——植物蒸散量,mm

P_r ——降雨量,mm

降雨贮存效率^[19] (Precipitation storage efficiency, PSE)为计算时段内储水量变化量占降雨总量的百分比,即

$$I_{\text{PSE}} = \frac{\Delta W}{\sum P_r} \times 100\% \quad (4)$$

式中 I_{PSE} ——降雨贮存效率,%

为定量评价土壤水分恢复程度,比较各种覆盖处理不同时期的土壤水分恢复能力,根据王美艳等^[20]提出的土壤水分恢复度 (Soil water restoration degree, SWR)的计算方法加以修改,将其定义为某土层已经恢复的土壤储水量占应恢复土壤储水量的百分比,公式为

$$I_{\text{SWR}} = \frac{W_{\text{final}} - W_{\text{initial}}}{W_{\text{slopland}} - W_{\text{initial}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 I_{SWR} ——土壤水分恢复度,%

W_{slopland} ——坡耕地 0~1 000 cm 土壤储水量,mm

2.5 数据处理

用 Excel 2010 进行数据预处理,采用 Origin 9.0 软件进行绘图。

3 结果与分析

3.1 不同覆盖下土壤含水率变化

图 3 为各覆盖措施试验期间 0~1 000 cm 土壤平均含水率和各月降雨量。从图中可看出,薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地、枣树以及刺槐的初始土壤含水率(2014 年 5 月)接近,且均处于干化状态(土壤含水率仅在 7.5% 左右)。经过 2014 年 5 月—2015 年 2 月的水分积累,各覆盖下的土壤含水率均有明显提升,但已经出现不同覆盖下的土壤水分差异。2014 年是栽植枣树与刺槐的第 1 年,栽植树木以成活为主,生长量很小,所以生长耗水较小,因此土壤含水率在干化情况下还是略有增大,到

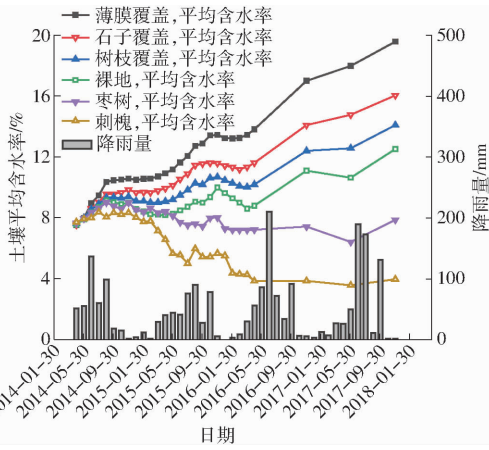


图3 不同覆盖措施各月0~1000 cm土壤平均含水率和降雨量

Fig. 3 Average soil water content in 0~1000 cm soil depth of different mulching measures and monthly precipitation

2015年3月土壤含水率由大到小顺序为薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、枣树、裸地、刺槐。2015年3月刺槐开始萌发生长,其下的土壤含水率持续降低,5月枣树开始萌发生长,其下的土壤含水率开始持续降低。5—9月是试验区雨季,薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地的土壤含水率整体呈上升趋势,与降雨量变化趋势贴近;5—9月是枣树与刺槐生长

最旺盛、耗水最大的时期,土壤含水率呈下降趋势。刺槐土壤含水率小于枣树土壤含水率,说明刺槐耗水量大于枣树,3—6月刺槐含水率下降速率是枣树下降速率的4倍,这个期间也是刺槐和枣树耗水的主要时期。

至观测期结束,薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地土壤含水率持续上升,较初始含水率分别增大12.1%、8.5%、6.5%、5.2%,说明覆盖措施能够提高土壤含水率,薄膜覆盖效果最好,石子覆盖次之,树枝覆盖效果最差。枣树土壤含水率较初始含水率上升0.2%,刺槐比初始含水率降低2.4%,说明试验期间刺槐耗水大于枣树耗水,种植刺槐比枣树更加消耗土壤水分。

3.2 不同覆盖下的土壤水分恢复状况

通过上面分析可看出,除了栽植枣树与刺槐,其他4个处理土壤含水率最高阶段为11—12月,选取2014—2017年每年12月不同覆盖措施0~1000 cm深度各土层土壤含水率作土壤水分剖面分布曲线(图4),并且和就近的坡耕地土壤平均含水率(15.26%)及其实际含水率作比较分析,土壤含水率大于坡耕地含水率的土层称为恢复层,视其土壤水分完全恢复。

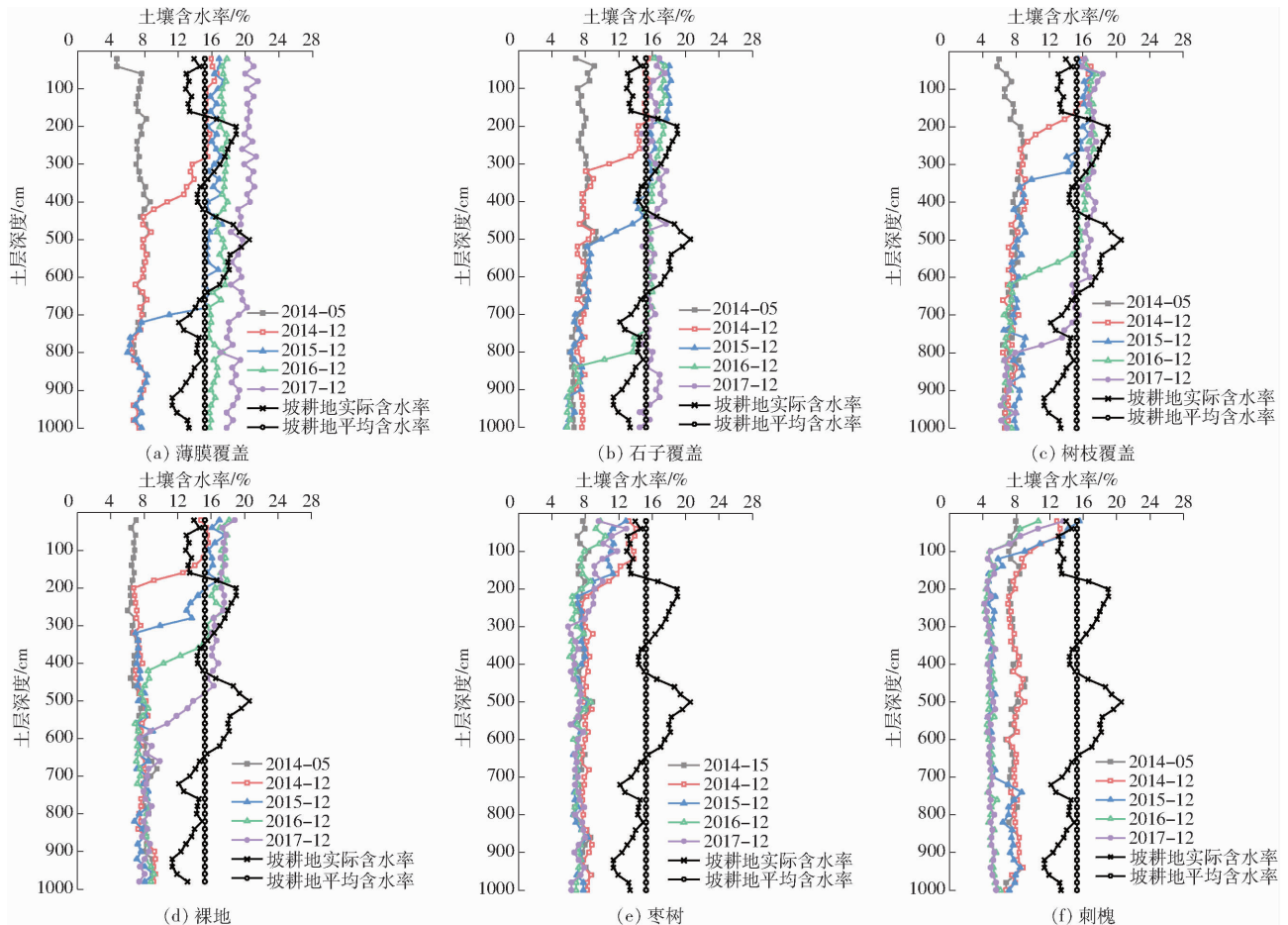


图4 不同覆盖措施剖面土壤含水率年际分布图

Fig. 4 Interannual distributions of soil water content of different mulching measures

从图4可看出,薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地2014年末入渗深度分别为420、320、260、200 cm,以坡耕地平均含水率为恢复目标的恢复层厚度分别为280、180、160、120 cm。2015年末各覆盖措施入渗深度分别为720、500、340、320 cm,恢复层厚度在2014年的基础上分别增加400、200、100、80 cm;到2016年底,薄膜覆盖0~1 000 cm深度土壤水分完全恢复,完全恢复所需时长为3年,石子覆盖入渗深度为840 cm,恢复层厚度为740 cm,较2015年增加260 cm,树枝覆盖入渗深度为600 cm,恢复层厚度为520 cm,较2015年增加260 cm,裸地入渗深度为460 cm,恢复层厚度为340 cm,较2015年增加140 cm;2017年薄膜覆盖土壤含水率继续增大,平均含水率达19.6%,石子覆盖0~1 000 cm土壤水分完全恢复,完全恢复所需时长为4年,平均含水率达16%,树枝覆盖入渗深度达800 cm,恢复层厚度为700 cm,裸地入渗深度达580 cm,恢复层厚度为480 cm。图中坡耕地实际土壤含水率在180~340 cm以及440~540 cm两个深度范围内出现两个峰值,由于土柱中土壤颗粒组成比较均一,土壤含水率变化曲线没有发生如此大的波动,因此在两个波峰附近的土壤含水率与坡耕地实际含水率相差较大。至试验期结束,以坡耕地实际含水率及其平均含水率为参考得出的薄膜覆盖与石子覆盖恢复深度一致,均为1 000 cm,树枝覆盖恢复深度为700 cm,裸地恢复深度为480 cm。

整个观测期内,薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖以及裸地的土壤水分恢复深度逐年增大,且每年的恢复层厚度变化量由大到小均为薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地。土壤水分入渗过程体现为上部高含水土层土壤含水率的降低,下层低含水土层土壤含水率的升高以及入渗深度的增加,且土壤水分入渗过程中存在滞后效应,因此各覆盖措施入渗深度均大于恢复深度。

黄土高原干旱环境条件下,降雨不足以满足人工植物生长耗水时,为维持其正常生长,需从深层土壤吸收水分,导致土壤干化程度加剧。观测期内枣

树土壤含水率变化范围在0~300 cm深度,300 cm以下土壤含水率基本保持在2014年的水平没有发生变化,说明4年生枣树根系没有到达300 cm以下;2014年刺槐土壤含水率在0~140 cm范围内有所增大,随树龄增加,耗水深度不断增加,导致耗水层逐渐下移,2015年12月耗水深度已达720 cm,0~1 000 cm土层平均土壤含水率由初始的7.7%降低到6.6%;2016年底,耗水深度达1 000 cm,平均土壤含水率约为5.2%;2017年深层土壤含水率与2016年基本相同,说明土壤储藏水分已经不能利用,在0~1 000 cm深度范围内消耗的只有当年降雨量。由于土柱底部未密封,监测深度只有1 000 cm,因此刺槐根系是否消耗1 000 cm以下土壤水分还需做进一步研究。

综上,4种覆盖措施对土壤水分恢复效果最好的为薄膜覆盖,其次是石子覆盖、树枝覆盖,裸地恢复效果最差;在干化土壤上种植枣树,其干化程度基本不变,刺槐使土壤水分亏缺状态更加严重,说明枣树比刺槐更适合在当地种植。

3.3 不同覆盖下土壤储水量及降雨贮存效率变化

表2为2014年5月—2017年12月不同覆盖措施0~1 000 cm深度储水量变化量、降雨贮存效率及土壤水分恢复度。从表中可看出,薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地的土壤储水量增量均为正值,说明土壤储水量逐年增大,且每年的储水增加量以及降雨贮存效率由大到小均表现为薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地。到2017年末薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地土壤储水量分别增大1 211.4、853.4、662.5、523.2 mm;薄膜覆盖储水量总增量分别是裸地、石子覆盖、树枝覆盖的2.3、1.4、1.8倍。试验区2014年5—12月降雨总量为428 mm,2015年降雨总量为434.8 mm,2016年降雨总量为590.8 mm,2017年降雨总量为619.6 mm,年均降雨量为518.3 mm。2017年降雨量最大,但薄膜覆盖与石子覆盖土壤储水量以及降雨贮存效率较2016年小,原因在于2016年底薄膜覆盖土壤水分入渗深度达1 000 cm,石子覆盖2016—2017年间入渗深度达

表2 不同覆盖措施0~1 000 cm土壤储水量变化量、降雨贮存效率及土壤水分恢复度

Tab.2 Variation of soil water storage in 0~1 000 cm soil depth and precipitation storage efficiency and soil water restoration of different mulching measures

覆盖措施	$W_{\text{inital}}/\text{mm}$	2014年5—12月		2015年		2016年		2017年		$\sum \Delta W/\text{mm}$	PSE/%	SWR/%
		$\Delta W/\text{mm}$	PSE/%	$\Delta W/\text{mm}$	PSE/%	$\Delta W/\text{mm}$	PSE/%	$\Delta W/\text{mm}$	PSE/%			
薄膜覆盖	747.6	307.9	71.9	289.4	66.6	355.3	60.1	258.8	41.8	1 211.4	63.4	155.6
石子覆盖	750.9	231.9	54.2	175.2	40.3	262.4	44.4	183.9	29.7	853.4	42.4	110.1
树枝覆盖	758.3	178.6	41.7	129.5	29.8	172.2	29.1	182.2	29.4	662.5	29.4	86.3
裸地	752.3	144.4	33.7	100.1	23.0	135.9	23.0	142.8	23.0	523.2	23.0	67.6
枣树	763.8	131.8	30.8	-96.9	-22.3	-60.3	-10.2	43.2	7.0	17.8	-8.5	2.3
刺槐	769.6	60.8	14.2	-173.6	-39.9	-133.7	-22.6	10.8	1.7	-235.7	-20.3	-31.2

1 000 cm(图4),且土柱底部未密封,当水分入渗深度超过1 000 cm后会继续向下运移,监测到的土壤储水量减小,降雨贮存效率减小。因此薄膜覆盖全年平均降雨贮存效率为63.4%,石子覆盖全年平均降雨贮存效率为42.4%。树枝覆盖与裸地在观测期内土壤水分入渗深度未达到1 000 cm,因此树枝覆盖全年平均降雨贮存效率为29.4%,裸地为23.0%。

由图4可知,2017年底枣树耗水深度未达1 000 cm,土壤储水量增加17.8 mm,枣树2015—2017年年均蒸散量为586.4 mm,大于试验期年均降雨量,到2017年末枣树高146 cm,冠幅为73.8 cm×88.2 cm。2016年底刺槐耗水深度超过1 000 cm,其2015—2016年年均蒸散量为666.5 mm,是枣树的1.1倍,显著大于试验期年均降雨量。为满足生长需消耗一部分土壤水分,当土壤含水率降低到4.8%(图4)左右时不再降低,之后生长依靠降雨和更深层土壤水分;2017年末,刺槐土壤储水量减小235.7 mm,2017年监测到其蒸散量为608.8 mm,显著低于2015—2016年蒸散量,且小于当年降雨量,但生命力旺盛,树高480 cm,冠幅为189.3 cm×197.4 cm。

到2017年底,薄膜覆盖恢复度为155.6%,石子覆盖恢复度为110.1%,土壤水分完全恢复,树枝覆盖恢复度为86.3%,裸地为67.6%,树枝覆盖与裸地土壤水分要完全恢复分别还需1年和3年时间,总时长约需5年和7年。枣树降雨贮存效率为-8.5%,显著大于刺槐的降雨贮存效率-20.3%。

4 讨论

本试验在模拟干化土壤的基础上,研究在自然降雨条件下薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、栽植枣树、刺槐以及裸地的土壤含水率变化情况。室内由于空间和操作限制,土柱体积不够大,且水分补充与蒸发条件也不能完全与野外吻合,对于研究土壤水分恢复状况的真实性有较大距离,野外建造土柱更符合实际情况。

土壤干化是由于自然降水、土壤储水以及作物耗水关系失衡导致的,其结果为土壤水库储水量显著降低^[21]。众多学者^[22-26]对干化土壤水分恢复研究发现,在自然条件下土壤水分恢复年限较长,且土壤水分入渗深度较浅,但这些研究多在考虑自然情况下有植物生存耗水问题,所以恢复时间较长,本研究结果主要体现了没有植物继续耗水情况下的干化土壤恢复特点,结果显示在全年地表覆盖下,薄膜覆盖0~1 000 cm土壤水分完全恢复至当地坡耕地水平需要3年时间,石子覆盖需要4年,树枝覆盖需要

5年,裸地需要7年。说明没有植物耗水情况下干化土壤水分恢复很快,这个结果较以往研究更乐观,也为今后干化土壤水分恢复提供了新途径。

前人研究中对于土壤干层划分的标准并不一致^[27],干化土壤湿度上限为土壤稳定持水率^[28],土壤稳定持水率在数值上相当于田间持水率50%~80%^[29],常见的是将田间最大持水率的60%作为划分土壤干层的指标^[30]。坡耕地0~200 cm由于地表耕作及土面蒸发等作用土壤含水率较小,但该层水分经过降雨可以很快修复,属于临时性干层^[27],200 cm以下土壤含水率均大于田间最大持水率的50%,因此认为试验区坡耕地土壤没有干化现象,坡耕地平均含水率(15.3%)大于田间最大持水率的60%(13.2%),所以按均值分析的土壤水分恢复状况较按田间最大持水率的60%恢复状况好,两者的恢复深度结果差异不大。张文飞等^[31]研究表明,坡耕地土壤含水率由于不同深度土壤颗粒组成不同,在垂直方向上土壤含水率有一定幅度的变化,但由于土柱内的土壤是回填土,在回填过程中进行了充分混匀,其土壤颗粒组成相对均一,土壤含水率变化波动较小,因此以坡耕地平均土壤含水率为恢复目标。李玉山^[28]曾用直线表示农地的田间持水率,用以说明森林中土壤干层的存在。WANG等^[32]也曾用于一年生枣树0~1 000 cm平均土壤含水率为基准确定多年生枣树根系分布深度,效果较好。以坡耕地实际土壤含水率为恢复目标得出的最终恢复深度与以其平均土壤含水率为恢复目标得出的最终恢复深度差异不大,恢复度相同。

在以天然降雨为土壤水分唯一补给源的黄土高原丘陵沟壑区,降雨相对不足,林地土壤水分长期处于负平衡,随植物的生长和林龄的增大,土壤干化程度加剧^[33]。本研究也表明了这一现象,到2015年枣树与刺槐树体恢复正常生长,生育期由于蒸散量较大,造成土壤含水率降低。当浅层土壤水分消耗殆尽,植物根系继续向下延伸,深层土壤储水不断消耗,造成深层土壤更加干化。针对在降水不足的半干旱黄土丘陵区枣树高耗水情况,汪有科等^[34]提出节水型修剪技术,提高枣树水分利用效率,研究结果表明节水型修剪能够有效提高水分利用效率,证明节水型修剪技术在生产中具有较好的应用价值。

本研究发现在干化土壤中栽植的枣树与刺槐能够正常生长,且枣树耗水小于试验期年均降雨量,说明在前期干化土壤中再造植被仍然可行。但刺槐具有发达的垂直和水平根系,对深层土壤水分消耗强烈,加剧土壤干化程度,刺槐林下土壤含水率在4.8%左右,这样低的土壤含水率是否仍然可以再造

其他植被,需要后续更多试验研究验证。考虑到植被耗水状况对土壤干化程度的影响,建议在造林时考虑结合降雨造林,在半干旱区选择像枣树类耗水较小的树种。

5 结论

(1)以坡耕地 0~1 000 cm 平均土壤含水率为恢复目标,薄膜覆盖土壤含水率经过 3 年全部恢复,石子覆盖经过 4 年全部恢复,树枝覆盖土壤水分经过 4 年入渗深度达 800 cm,恢复层厚度为 700 cm,完全恢复需要 5 年时间,裸地经过 4 年入渗深度达 580 cm,恢复层厚度为 480 cm,完全恢复需要 7 年时间。以坡耕地 0~1 000 cm 实际土壤含水率为恢复目标,薄膜覆盖与石子覆盖在恢复深度上一致,树枝覆盖恢复深度为 740 cm,裸地恢复深度为 440 cm,以储水量计算的恢复度两者结果一致。总体来看,没有植物情况下深达 1 000 cm 的干化土壤在短期内

可以得到较好的恢复。

(2)薄膜覆盖、石子覆盖、树枝覆盖、裸地、枣树、刺槐 0~1 000 cm 土壤储水量增加量分别为 1 211.4、853.4、662.5、523.2、17.8、-235.7 mm,全年覆盖降雨贮存效率分别为 63.4%、42.4%、29.4%、23.0%、-8.5%、-20.3%,土壤水分恢复度分别为 155.6%、110.1%、86.3%、67.6%、2.3%、-31.2%。

(3)4 年生枣树耗水深度在 0~300 cm 范围内,300 cm 以下土壤含水率几乎不发生变化,4 年生刺槐耗水深度超过 1 000 cm。枣树年均蒸散量为 586.4 mm,年均降雨能够满足枣树生长需水。刺槐年均蒸散量为 666.5 mm,是枣树的 1.1 倍,年均降雨不能满足其生长需水,需消耗土壤水分。当刺槐林下土壤含水率降低到 4.8% 左右时不再变化,枣树土壤水分略有恢复,种植刺槐导致土壤更加干燥。

参 考 文 献

- [1] 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 Wenzhi. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2001,16(5):433-438. (in Chinese)
- [2] 李玉山. 土壤水库的功能和作用[J]. 水土保持通报, 1983(5):27-30.
- [3] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016,31(1):14-22.
SHAO Ming'an, JIA Xiaoxu, WANG Yunqiang, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2016,31(1):14-22. (in Chinese)
- [4] 孙长忠, 黄宝龙, 陈海滨, 等. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(3):7-14.
SUN Changzhong, HUANG Baolong, CHEN Haibin, et al. Interaction between soil water conditions and different kinds of artificial plant cover in the Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998,20(3):7-14. (in Chinese)
- [5] 孙剑, 李军, 王美艳, 等. 黄土高原半干旱偏旱区苜蓿-粮食轮作土壤水分恢复效应[J]. 农业工程学报, 2009,25(6):33-39.
SUN Jian, LI Jun, WANG Meiyang, et al. Effects of alfalfa-grain rotation on soil moisture restoration in semi-arid and drought-inclined areas of the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(6):33-39. (in Chinese)
- [6] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究[J]. 农业工程学报, 2007,23(11):77-83.
WANG Zhiqiang, LIU Baoyuan, WANG Xuyan, et al. Soil water restoration of different land use after artificial forest in the semi-arid area of Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(11):77-83. (in Chinese)
- [7] 侯庆春, 黄旭, 韩仕峰, 等. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究[J]. 水土保持学报, 1991,5(1):64-72.
HOU Qingchun, HUANG Xu, HAN Shifeng, et al. Study on the genesis and transformation of small old trees in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991,5(1):64-72. (in Chinese)
- [8] 侯庆春, 韩蕊蕊, 韩仕峰. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J]. 中国水土保持, 1999(5):11-14.
- [9] JANUSZ C. A long-term study of successional dynamics in the forest wetlands[J]. Forest Ecology & Management, 2008,255(3-4):630-642.
- [10] 李裕元, 邵明安. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究[J]. 应用生态学报, 2005,16(12):2321-2327.
LI Yuyuan, SHAO Ming'an. Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in North Loess Plateau of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005,16(12):2321-2327. (in Chinese)
- [11] 惠倩, 董建国, 汪有科, 等. 黄土丘陵区雨养梨枣树生长对初始土壤含水率的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4):25-30.
HUI Qian, DONG Jianguo, WANG Youke, et al. Response of jujube growth to initial soil water content in rainfed regions in Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016,34(4):25-30. (in Chinese)
- [12] 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道[J]. 中国科学院院刊, 2006,21(4):320-324.
ZHU Xianmo. Rebuild soil reservoir is an rational approach for soil and water conservation on the Loess Plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2006, 21(4):320-324. (in Chinese)
- [13] 王力, 卫三平, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应——以燕沟流域为例[J]. 生态学报, 2009, 29(3):1543-1553.
WANG Li, WEI Sanping, WU Faqi. Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau: a case study of Yangou catchment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(3):1543-1553. (in Chinese)
- [14] 王俊, 刘文兆, 钟良平, 等. 长期连续种植苜蓿草地地上部分生物量与土壤水分的空间差异性[J]. 草业学报, 2009,

- 18(4):41-46.
WANG Jun, LIU Wenzhao, ZHONG Liangping, et al. Spatial variability of soil moisture and aboveground biomass of *Medicago sativa* under long term continuous planting[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(4):41-46. (in Chinese)
- [15] 胡敏, 苗庆丰, 史海滨, 等. 不同地膜覆盖对春玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2):173-177.
HU Min, MIAO Qingfeng, SHI Haibin, et al. Effects of different film mulching on growth traits and water use efficiency for spring maize[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(2):173-177. (in Chinese)
- [16] 冯浩, 刘晓青, 左亿球, 等. 砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(5):155-163.
FENG Hao, LIU Xiaoqing, ZUO Yiqiu, et al. Effect of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):155-163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160521&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.021. (in Chinese)
- [17] 李洪兵, 赵西宁, 王娟, 等. 生草和树枝覆盖对果园土壤持水性能的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1):136-141.
LI Hongbing, ZHAO Xining, WANG Juan, et al. Effects of ground covers and mulches on soil water-holding capacity in jujube orchards[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1):136-141. (in Chinese)
- [18] 杨直毅, 汪有科, 赵颖娜, 等. 树枝覆盖与保水剂对土壤水分的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1):97-99.
YANG Zhiyi, WANG Youke, ZHAO Yingna, et al. Influence of branch cover and water retaining agent on soil water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1):97-99. (in Chinese)
- [19] NIELSEN D C, VIGIL M F. Precipitation storage efficiency during fallow in wheat-fallow systems[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(2):537-543.
- [20] 王美艳, 李军, 孙剑, 等. 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应[J]. *生态学报*, 2009, 29(8):4526-4534.
WANG Meiyang, LI Jun, SUN Jian, et al. Soil desiccation characteristics of alfalfa grasslands and soil water restoration effects in alfalfa-grain crop rotations on the semi-arid areas of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8):4526-4534. (in Chinese)
- [21] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5):427-432.
LI Yushan. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5):427-432. (in Chinese)
- [22] 李军, 程积民, 郝明德, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. *生态学报*, 2007, 27(1):75-89.
LI Jun, CHENG Jimin, HAO Mingde, et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1):75-89. (in Chinese)
- [23] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. *林业科学*, 2005, 41(2):37-41.
CHENG Jimin, WAN Hui'e, WANG Jing, et al. Growth of *Caragana korshinskii* and depletion process of soil water in semi-arid region[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(2):37-41. (in Chinese)
- [24] 刘海松, 倪万魁, 杨泓全, 等. 黄土路基隆雨入渗现场试验[J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(1):60-63.
LIU Haisong, NI Wankui, YANG Hongquan, et al. Site test on infiltration of loess subgrade under rainfall circumstance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2008, 30(1):60-63. (in Chinese)
- [25] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4):530-540.
ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4):530-540. (in Chinese)
- [26] 郭忠升, 邵明安. 人工柠条林地土壤水分补给和消耗动态变化规律[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2):119-123.
GUO Zhongsheng, SHAO Ming'an. Dynamics of soil water supply and consumption in artificial caragana shrub land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2):119-123. (in Chinese)
- [27] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4):87-90.
WANG Li, SHAO Ming'an, HOU Qingchun. Preliminary research on measured indexes of dried soil layer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4):87-90. (in Chinese)
- [28] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. *生态学报*, 1983, 3(2):91-101.
LI Yushan. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle far land in the loess region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2):91-101. (in Chinese)
- [29] CHEN H S, SHAO M A, LI Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2008, 143(1/2):91-100.
- [30] 刘刚, 王志强, 王晓岚. 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(1):126-129.
LIU Gang, WANG Zhiqiang, WANG Xiaolan. Analysis of dried soil layer of different vegetation types in Wuqi Country[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(1):126-129. (in Chinese)
- [31] 张文飞, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区深层干化土壤中节水型修剪枣树生长及耗水[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7):140-148.
ZHANG Wenfei, WANG Xing, WANG Youke, et al. Growth and water consumption of jujube with water-saving pruning in deep dried soil of loess hilly area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(7):140-148. (in Chinese)
- [32] WANG X, ZHU D L, WANG Y K, et al. Soil water and root distribution under jujube plantations in the semiarid Loess Plateau region, China[J]. *Plant Growth Regul*, 2015, 77(1):21-31.
- [33] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010, 159(1-2):99-108.
- [34] 汪有科, 惠倩, 汪星, 等. 干化土壤中节水型修剪枣树生长与水分利用效率研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(2):247-254.
WANG Youke, HUI Qian, WANG Xing, et al. Growth and water use efficiency of water saving type pruning jujube tree in dry soil[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2):247-254. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170233&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.033. (in Chinese)