

何婷婷,汪有科,史志鹏. 半干旱黄土丘陵山地不同地面覆盖下的土壤水分响应[J]. 江苏农业科学,2019,47(19):246-255.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.057

# 半干旱黄土丘陵山地不同地面覆盖下的土壤水分响应

何婷婷<sup>1</sup>,汪有科<sup>2</sup>,史志鹏<sup>1</sup>

(1. 江苏建筑职业技术学院,江苏徐州 221116; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

**摘要:**为了探索黄土丘陵山地不同覆盖措施下的土壤水分变化,在陕北米脂山地建立野外大型土柱,土柱表层覆盖有早熟禾、苜蓿、柠条、枣树、刺槐 5 种植被和石子、树枝、白膜、黑膜地布 4 种非植被以及裸地,共 10 个处理,研究各覆盖措施 10 m 土层土壤含水率的全年变化和垂直变化。2017—2018 年观测结果分析得出:植被覆盖中,土壤含水率早熟禾最高,刺槐最低。裸地受降雨补给明显,11 月下旬土壤储水量增加 277.2 mm,为该地区同时期降雨量的 3.85 倍。非植被覆盖全年土壤含水率均高于裸地,从大到小依次为白膜>黑膜地布>石子>树枝。各处理 0~0.6 m 土层土壤含水率全年变化较大,土壤含水率在植物休眠期随时间变化规律表现为倒“U”形。0.6~2.6 m 土层土壤含水率变化幅度小,受降雨影响小,2.6~6 m 土层白膜覆盖土壤含水率最高,刺槐含水率最低,平均值为 5.77%,接近枣树的凋萎系数。6~10 m 土层土壤含水率不受当年降雨影响。相对于裸地,白膜覆盖土壤水分蓄积效果最好,刺槐水分亏缺最严重。采用非植被覆盖对于浅层土壤水分蒸发的抑制作用明显。采用石子、树枝和薄膜覆盖,能增加表层土壤含水率,其中白膜比黑膜对土壤干层的修复效果更好;生育期,各生草覆盖和枣树自身生长需要消耗大量水分,土壤水分长期处于亏损状态;非植被覆盖 2.6~6 m 土层,白膜覆盖土壤储水量增加了 156.34 mm,降雨利用率达到 49.5%。休眠期,生草覆盖、枣树和裸地的降雨入渗深度均达到 2.6 m,休眠期是土壤水分消耗的关键时期,黑膜覆盖冬季保水效果较白膜覆盖好。

**关键词:**半干旱;丘陵山地;覆盖;土壤水分;土壤干层

**中图分类号:** S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)19-0246-09

陕北地区属于典型的半干旱气候区,干旱缺水与水土流失一直是制约当地经济发展的主要因素<sup>[1-3]</sup>,退耕还林(草)以后,植被的参与使得降雨入渗、土壤蒸发和地表径流等都发生了重大变化,枣树以其独特的耐旱性和地形适应性成为了当地的主要经济树种<sup>[4-5]</sup>,然而由于陕北地区大多为丘陵沟壑地貌,加之枣树根系较深,耗水量大,使得该地区出现了不同程度的土壤干化现象<sup>[6-8]</sup>,严重影响了当地枣树的正常生长和枣果产量,利用工程措施提高雨水利用效率对于旱作区枣林的可持续发展具有重要意义<sup>[9-10]</sup>,近年来,国内外学者通过研究该地区不同植被种植类型下的土壤水分分布,分析该地区的土壤干化影响因素,提出了基于雨水高效利用的一系列措施,取得了良好的效果<sup>[11-17]</sup>。

土壤水分作为土壤-植物-大气连续体的重要组成部分,不仅直接影响着植物的正常生长,而且对半干旱地区的植被分布和可持续发展具有重要意义<sup>[18]</sup>。地表覆盖技术能够有效增加土壤水分,提高雨水利用效率,是一种半干旱和干旱地区广泛应用的保墒措施,该技术自上世纪 70 年代引入我国后,在旱作农业中得到了广泛应用,目前这项技术已经被成功

用于干旱和半干旱地区的小麦<sup>[19-22]</sup>、玉米<sup>[23-25]</sup>、大棚蔬菜<sup>[26-28]</sup>以及果树<sup>[29-32]</sup>上。大量研究表明,地表覆盖不仅能有效增加土壤储水量,减少土壤养分流失,改善土壤结构和土壤水肥、气热状况,并且在冬季能实现地表保温,具有很好的生态效益,对果树的产量和品质改善方面也有积极的作用<sup>[33-34]</sup>。常用的地表覆盖物有秸秆、地膜、树枝和生草<sup>[35-37]</sup>,目前关于地表覆盖保墒的研究大多集中在覆盖措施对土壤水热状况、蒸腾作用、根系分布和对作物的生长和产量的影响<sup>[38-40]</sup>上,而且研究大多选用秸秆和地膜等地表覆盖物。将现有的各类地表覆盖措施结合当地具体情况进行系统研究的报道较少,本研究结合陕北米脂地区实际情况,选择各类植被和非植被覆盖措施,在已有干化土壤的基础上,对于各覆盖条件下的土壤水分时间和空间变异性进行连续 2 年的系统观测和分析,研究各类覆盖措施对于当地土壤干层的恢复情况,为陕北地区的土壤干层恢复筛选适宜的地表覆盖方式,也为当地雨养植物的可持续发展提供理论依据。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2017 年 4 月至 2018 年 6 月在陕北榆林米脂试验站进行,该试验基地位于米脂县远志山(109.47°E,37.18°N),为黄土高原丘陵沟壑区,平均海拔 1 049 m,坡度 21°~39°,年平均气温 8.5℃,昼夜温差大,属于典型的半干旱气候。年平均日照时长 2 372.7 h,无霜期 160 d,年平均降水量为 452 mm,最大降雨量 704.8 mm,最小 186.1 mm,降雨年际浮动大且年内分配不均匀,该区土壤为黄绵土,透水性强,土壤

收稿日期:2018-07-09

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2015BAC01B03);江苏省住建厅项目(编号:2017ZD218);江苏建筑职业技术学院校级科研项目(编号:JYQZ18-01);江苏建筑职业技术学院校级教育科学研究项目(编号:ZX2018-19)。

作者简介:何婷婷(1985—),女,陕西武功人,硕士研究生,讲师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:ht821002@126.com。

容重  $1.29 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ , 田间持水量  $23.4\%$ , 土壤饱和含水率  $39.8\%$ , pH 值  $8.6$ , 地下水埋深超过  $50 \text{ m}$ 。

## 1.2 试验设计

试验采用野外大型土柱, 选择一片宽阔水平阶地, 人工开挖 19 个直径  $80 \text{ cm}$ 、深  $1\,000 \text{ cm}$  的大型土柱, 土柱内壁采用防水塑料膜与周围土层隔开以避免土柱内水分向周围扩散或周围植物根系影响土柱水分, 土柱高出地面  $15 \text{ cm}$ , 采用混凝土井圈防止降雨后产流, 相邻土柱间距为  $1.6 \text{ m}$ , 采用分层回填土人工压实形成, 回填土容重  $(1.2 \pm 0.14) \text{ g/cm}^3$ , 与周围土壤大体一致, 19 个土柱分别采用早熟禾、苜蓿、刺槐、柠条、枣树 5 种植被覆盖和树枝、石子、白膜、黑膜 4 种非植被覆盖以及清耕共 10 个处理, 清耕 1 个重复, 其余处理各 2 个重复 (图 1), 各处理的具体设计见表 1。



图1 试验布设

表1 试验设计

处理	具体设计与管理
清耕处理	土柱表面无任何覆盖措施, 定期去除杂草
生草处理	种植早熟禾、苜蓿、刺槐、柠条 4 种当地草种, 采用人工种植后移栽到土柱中, 不浇水不施肥, 定期去除杂草
枣树覆盖	将枣林地原有枣树重新移栽, 枣树为 6 年生枣树, 表面无覆盖
秸秆覆盖	秸秆采用玉米秸秆切成 $10 \text{ cm}$ 左右的长度, 人工压实, 覆盖厚度 $30 \text{ cm}$
石子覆盖	筛选直径 $2 \sim 5 \text{ cm}$ 左右均匀砾石, 人工压实, 覆盖厚度 $30 \text{ cm}$
树枝覆盖	枣林就近剪切梨枣树枝, 长度约 $10 \text{ cm}$ 左右, 晒干后均匀覆盖, 人工压实, 覆盖厚度为 $30 \text{ cm}$
薄膜覆盖	双层覆盖 $0.015 \text{ mm}$ 的无色透明塑料膜或黑色地布, 上下膜间距为 $15 \text{ cm}$ , 薄膜上设有若干不对称直径约 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 的小孔以便雨水进入, 薄膜根据破损情况定期更换

## 1.3 试验数据采集与指标计算

1.3.1 气象数据 利用试验样地的小型综合气象观测站 (BLJW-4) 测定气象数据, 利用温度和湿度传感器测定试验地环境温度和湿度, 利用风速仪和净辐射传感器测定风速和净辐射量, 利用翻斗式雨量筒测定降雨量, 所有气象数据经数据采集器每  $30 \text{ min}$  采集 1 次。

1.3.2 土壤水分测定 土壤水分测定包括中子仪测定和自动监测 2 种。

中子仪测定: 每个土柱中间埋设 1 根长  $10 \text{ m}$  的 TRIME-IPH/T3 土壤剖面含水率测量仪铝制中子管, 采用 CNC-503DR 型中子仪每隔  $10 \text{ d}$  定位监测不同深度土壤含水率, 电磁感应探头沿土壤深度每隔  $20 \text{ cm}$  设置 1 个, 监测土柱  $10 \text{ m}$  内的土壤水分, 每 3 个月对中子仪校正 1 次。

自动监测: 在清耕土柱内和周围农地上为了增加土壤水分监测数据的连续性, 设置 cs650 型土壤水分探头, 实时自动监测土壤水分, 探头测量范围  $5\% \sim 50\%$  体积含水率 (VWC), 精确度为  $\pm 3\%$  VWC。土柱内按照上密下疏的原则共布设 30 个土壤水分探头; 在  $0 \sim 1 \text{ m}$  土层深度内每隔  $0.1 \text{ m}$  设置 1 个探头,  $1 \sim 3 \text{ m}$  土层深度内每隔  $0.2 \text{ m}$  设置 1 个探头,  $3 \sim 6 \text{ m}$  土层深度内每隔  $0.5 \text{ m}$  设置 1 个探头,  $6 \sim 10 \text{ m}$  土层深度内每隔  $1 \text{ m}$  设置 1 个探头, CR1000 数据采集器每隔  $30 \text{ min}$  自动记录 1 次数据。

1.3.3 指标计算 土壤含水量计算公式如下:

$$C = \text{VWC} / \rho. \quad (1)$$

土壤储水量计算公式如下:

$$E = C \times \rho \times H \times 10. \quad (2)$$

式中:  $C$  表示土壤质量含水率,  $\%$ ;  $E$  表示土壤储水量,  $\text{mm}$ ;

VWC 表示土壤体积含水量,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\rho$  表示土壤容重,  $\text{g/cm}^3$ ;  $H$  表示土层深度,  $\text{cm}$ 。

土壤水分相对亏缺指数 (compared soil water deficit index, 简称 CSWDI), 用以评价各个处理不同土层土壤水分相对亏缺程度<sup>[40]</sup>, 其计算公式如下:

$$\text{CSWDI}_i = \frac{CP_i - SM_i}{CP_i - WM}. \quad (3)$$

式中:  $\text{CSWDI}_i$  为不同覆盖第  $i$  土层土壤水分相对亏缺值;  $i$  为采样土层系列;  $CP_i$  为对照样地即裸地第  $i$  层土壤含水率,  $\%$ ;  $SM_i$  为不同覆盖措施土柱第  $i$  层土壤含水率,  $\%$ ;  $WM$  为凋萎系数,  $\%$ 。

不同覆盖土壤水分相对亏缺指数 (plot compared soil water deficit index, 简称 )<sup>[40]</sup> 计算公式如下:

$$\text{PCSWDI} = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{\text{SWScp}_i - \text{SWS}_i}{\text{SWS}_{\text{wm}}}}{k}. \quad (4)$$

式中:  $\text{PCSWDI}$  为样地土壤水分相对亏缺指数;  $\text{SWScp}_i$  为对照样地即裸地第  $i$  层土壤储水量,  $\text{mm}$ ;  $\text{SWS}_i$  为样地第  $i$  土层土壤储水量,  $\text{mm}$ ;  $\text{SWS}_{\text{wm}}$  为凋萎系数对应的土壤储水量,  $\text{mm}$ ;  $k$  为样地土层的分层数。

土壤水分相对亏缺量 (deficit soil water storage, 简称 )<sup>[40]</sup> 计算公式如下:

$$\text{DSWS} = \sum_{i=1}^k \text{SWScp}_i - \sum_{i=1}^k \text{SWS}_i. \quad (5)$$

式中:  $\text{SWScp}_i$  为对照地第  $i$  土层土壤储水量,  $\text{mm}$ ;  $\text{SWS}_i$  为样地第  $i$  土层土壤储水量,  $\text{mm}$ 。

变异系数计算公式如下:

$$CV = \frac{\sigma}{E_x}; \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E_x)^2}。 \quad (7)$$

式中:  $\sigma$  为土壤含水率样本观测值的标准差;  $E_x$  为平均值;  $x_i$  为每个样本的土壤含水率;  $n$  为样本个数。

#### 1.4 数据处理和绘图

数据处理采用 SPSS 21.0 进行, 绘图采用 sigmaplot 12.5 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 气象资料分析

图 2 为试验地 2 年平均气温、降雨量和相对湿度的年内变化, 可以看出, 试验地气温和降雨具有年际变化, 降雨集中在 5—11 月, 降雨总量为 359.8 mm, 为全年降雨总量的 89.7%, 最大降雨量出现在 9 月份, 为 89.2 mm; 平均气温年内波动较大, 最高温度出现在 7 月上旬, 为 35.6℃, 最低温度出现在 1 月下旬, 为 -8.9℃, 该地区 2017 年 12 月至 2018 年 2 月最低气温低于 0℃, 为冻土时间段; 相对湿度受降雨和风速等气象因子影响, 全年波动较大, 只在冻土时间段表现出相对稳定的较低值, 这主要是因为此时段本地区降雨较少, 空气干燥, 加之冻土的影响使得蒸发较少, 因此环境相对湿度也比

较低。

### 2.2 不同覆盖下土壤水分年际变化

2.2.1 植被覆盖下土柱土壤含水率年际变化 选择早熟禾、苜蓿、柠条、刺槐、枣树覆盖和裸地为研究对象。由图 3 可以看出, 所有处理的土壤含水率从 2017 年 4 月至 11 月有明显的下降, 其中苜蓿覆盖的土壤含水率从 14.3% 降低到 6.65%, 降低了 7.65 个百分点, 降低最为明显; 柠条、枣树和对照分别从 11.8%、10.6%、10.7% 下降到 7.45%、8.4% 和 6.0%, 分别降低了 4.35、2.2、4.7 个百分点。相比之下, 早熟禾和刺槐变化较小, 只下降了 0.4 和 1.5 个百分点。6 种处理相比较, 早熟禾全年土壤含水率最高, 刺槐最低, 并且刺槐初始土壤含水率也最低, 其原因主要是因为此试验布设于 2012 年初, 至 2017 年试验已布设 5 年多, 所以各个处理初始土壤含水率并不一致, 说明长期种植早熟禾能够明显提高土壤平均含水率, 而长期种植刺槐则对土壤水分消耗较大。该地区 2017 年 11 月累计降雨 72 mm, 各处理土壤含水率在 11 月下旬均增加, 其中裸地土壤含水率增加了 2.2 百分点, 10 m 土层土壤储水量增加了 277.2 mm, 相当于同时期降雨的 3.85 倍, 这主要是由于对照表面没有覆盖, 土壤水分受降雨补给明显, 因此土壤储水量增加也最多。综合图 3 可以看出, 相比裸地, 采用早熟禾、苜蓿、柠条和枣树覆盖可以增加土壤含水量, 达到覆盖保墒的目的, 而长期种植早熟禾效果更好。

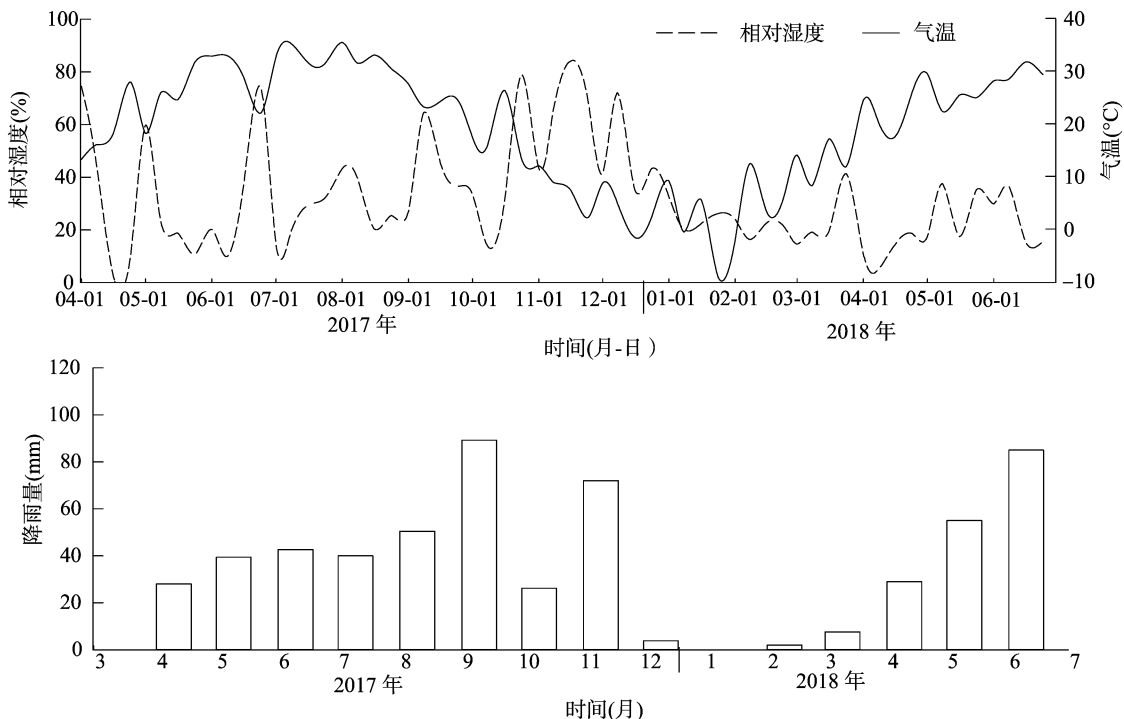


图2 试验区气温、降雨量和相对湿度年内变化

2.2.2 非植被覆盖下的土壤含水率年内变化 选择石子、树枝、白膜、黑膜和裸地为研究对象, 分析各个处理 10 m 土层内土壤含水率年内变化。由图 4 可知, 采用非植被覆盖土壤全年含水率均高于裸地, 其中白膜覆盖土壤含水率最高, 黑膜地布次之, 石子和树枝覆盖的土壤含水率较低。石子覆盖、树枝覆盖和裸地土壤含水率从 2017 年 4 月开始有轻微下降, 至 11 月末分别下降了 0.1、1.9、4.7 百分点, 这和图 3 中苜蓿、

枣树、柠条等生草覆盖的规律基本一致; 黑膜地布和白膜覆盖土壤含水率从 2017 年 4 月开始呈上升趋势, 至 11 月末分别增加了 3.7 百分点和 2.1 百分点, 说明采用薄膜覆盖可以在枣树生育期 (每年 4—10 月) 明显提高土壤含水率, 这和靳姗姗等的研究结果<sup>[30]</sup>一致, 主要是因为薄膜覆盖蒸发最少, 但是却能几乎完全收集降雨, 因此土壤水分在枣树生育期没有减少反而增加, 石子覆盖和树枝覆盖的土壤水分能通过覆盖

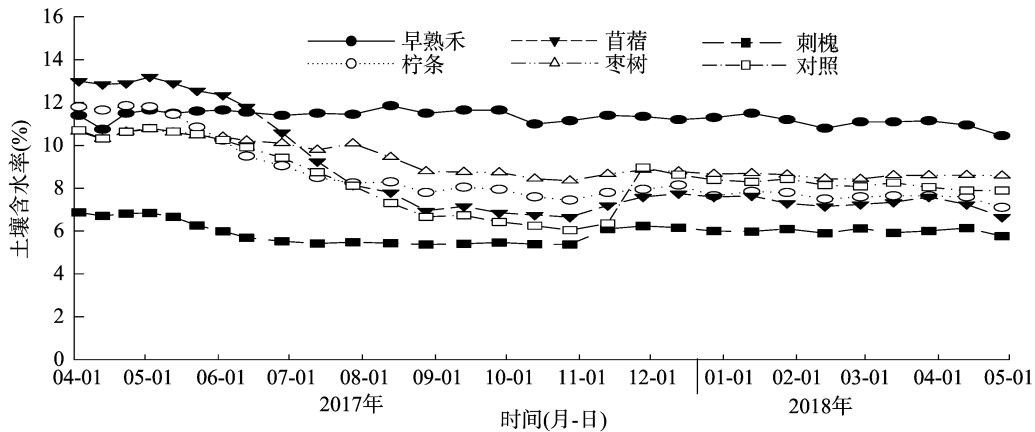


图3 植被覆盖下枣林土壤含水率年内变化

物缝隙微弱蒸发,其中裸地蒸发最严重,土壤水分损失最大。所有处理相比,白膜覆盖初始土壤含水率较高,说明长期采用白膜覆盖,土壤保水保墒效果好。

白盛元等研究黄土高原半干旱区土柱在不同雨强下的降雨入渗后发现,不论是单次降雨还是持续降雨,降雨对土壤入渗的影响深度不超过 4 m<sup>[18]</sup>。李陆生等研究黄土丘陵区不同

树龄枣树根系分布发现,6 年生枣树根系垂直分布不超过 3 m<sup>[39]</sup>。李巍等研究发现苜蓿等生草的土壤水分变化范围在 2 m 内<sup>[11]</sup>。因此,选择各处理 4 m 内土壤水分作为研究对象制作表 2。结合图 3、图 4 和表 2 看出,采用非植被覆盖要比植被覆盖土壤保墒效果好,其中以白色薄膜覆盖保墒效果最好。

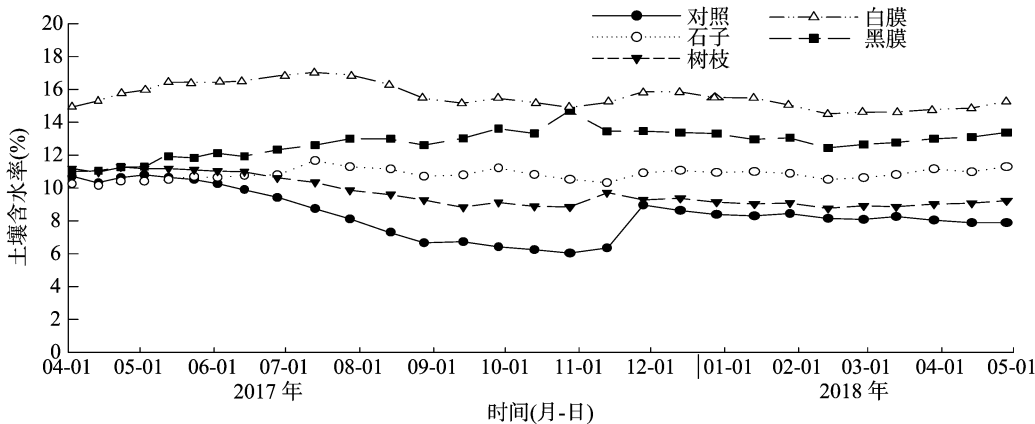


图4 非植被覆盖下枣林土壤含水率年内变化

表 2 不同覆盖措施下土壤含水率统计特征值

覆盖措施	含水率(%)					极差(百分点)	方差	变异系数	偏度	峰度
	最大值	最小值	均值	中值	标准差					
早熟禾	12.93	9.10	11.041 3	11.0	0.784 34	3.83	0.615	0.07	0.653	0.823
苜蓿	15.56	8.88	11.283 7	12.2	1.752 74	6.69	3.072	0.16	1.065	-0.078
柠条	13.79	8.88	10.674 3	11.3	1.390 83	4.92	1.934	0.13	0.977	-0.435
枣树	12.93	8.65	9.867 2	10.8	1.159 95	4.29	1.345	0.12	1.267	0.463
刺槐	10.36	5.45	8.219 8	7.9	1.381 64	4.92	1.909	0.17	-0.767	-0.792
对照	14.54	6.30	8.748 0	10.4	2.129 55	8.23	4.535	0.24	1.260	0.394
石子	14.76	6.65	8.553 6	10.7	1.776 63	8.12	3.156	0.21	1.488	2.378
树枝	14.31	7.16	9.331 0	10.7	2.095 38	7.15	4.391	0.22	1.382	0.507
白膜	15.68	7.05	11.547 8	11.4	3.283 15	8.63	10.779	0.28	-0.059	-1.819
黑膜	16.42	6.53	8.736 5	11.5	2.670 81	9.89	7.133	0.31	1.498	1.044

2.3 不同覆盖下土壤水分垂直变化

魏新光等通过对黄土丘陵区枣林地 0~10 m 土层土壤含水率连续 3 年的动态监测,将黄土丘陵地区土壤含水率在垂直方向划分为 4 层,分别为土壤水分剧烈变化层(0~

0.6 m),土壤水分变化层(0.6~2.6 m),土壤水分干层(2.6~6 m)和土壤水分恢复层(6~10 m)<sup>[38]</sup>。

由图 5-a 可知,各处理 0~0.6 m 土层土壤含水率全年变化较大,在枣树休眠期(2017 年 11 月至 2018 年 3 月)表现

为倒“U”形。从 2017 年 10 月下旬至 11 月下旬,各处理土壤含水率均有所增加,其中早熟禾从 9.3% 增加到 17.4%,苜蓿从 7.1% 增加到 13.6%,柠条从 6.7% 增加到 12.4%,枣树从 6.0% 增加到 12.4%,刺槐从 5.9% 增加到 13.5%,树枝覆盖从 8.1% 增加到 12.6%,而白膜覆盖、黑膜覆盖、石子覆盖和裸地土壤含水率增加较少,分别从 11.2%、15.3%、12.5% 和 6.3% 增加到 14.7%、17.1%、13.7% 和 9.1%。这是因为在 11 月该地区降雨较多,达到 72 mm,说明各生草和树枝覆盖土壤含水率受降雨影响较大,而薄膜和石子覆盖受降雨影响较少,这是因为薄膜覆盖形成了一个相对封闭的环境,而石子覆盖经人工压实后缝隙较小,因此降雨入渗具有明显的滞后性。石子、白膜、黑膜覆盖和裸地土壤含水率在 12 月中旬才达到最大值也说明这个问题。

由图 5-b 可以看出,相比于 0~0.6 m 土层,0.6~2.6 m 土壤含水率年内变化幅度较小,除黑膜和白膜覆盖外,各处理土壤含水率在枣树生育期有轻幅下降,而在休眠期基本保持不变。总体而言,该层土壤含水率受降雨影响小,土壤含水率最大的是白膜,其次是黑膜,最小的是刺槐,这也进一步说明相比于植被覆盖,采用非植被覆盖可以提高土壤水分变化层

的土壤含水率。

图 5-c 和图 5-b 表现出相同的变化趋势,除黑膜覆盖外,其他处理土壤含水率大小也基本一致,并且受降雨影响很小。相比之下,白膜覆盖土壤含水率一直较高,平均值为 14.52%,而刺槐土壤含水率一直较低,全年平均值只有 5.77%,接近枣树凋萎系数。说明在该地区从土壤水分可持续发展的角度考虑,种植刺槐耗水较大,不适合;另外,因为该层是土壤水分干层,也说明在该层采用白膜覆盖可以明显提高土壤含水率,有利于土壤干层的恢复。

图 5-d 是 6~10 m 土层土壤水分动态变化,该层所有处理土壤含水率年内变化都不明显,基本不受降雨的影响。相比之下,种植早熟禾土壤含水率最高,为 10.49%,而种植刺槐最低,土壤含水率只有 6.86%,这和其他土层的分析结果基本一致。

如表 3 所示,同一处理不同深度土壤含水率差异较大,土壤含水率垂直分层明显;除苜蓿、柠条、枣树和刺槐外,同一处理,随着土层深度增加,土壤含水率越小;除刺槐外,随着土层深度的增加,土壤含水率的标准差也越小,说明随着深度增加,土壤含水率受降雨影响越小。这和魏新光等对于枣林地

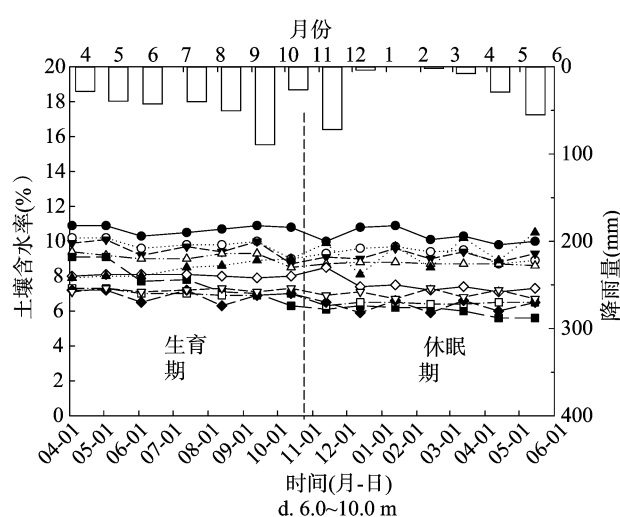
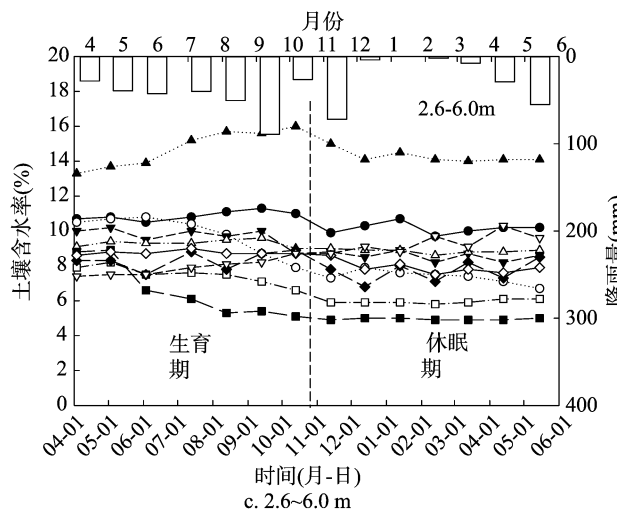
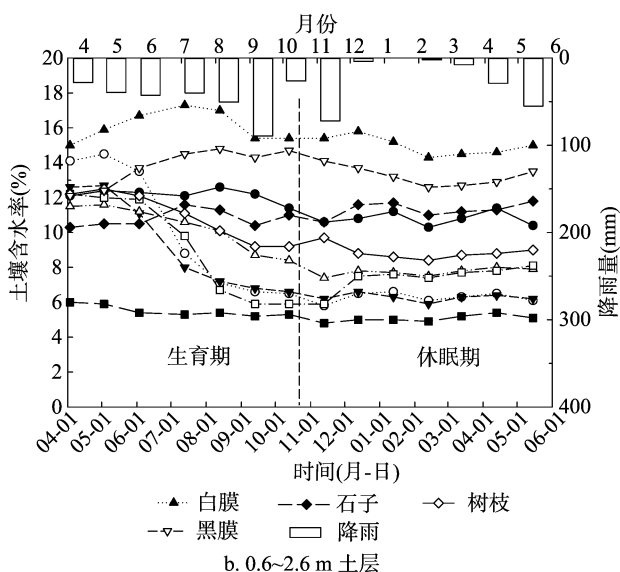
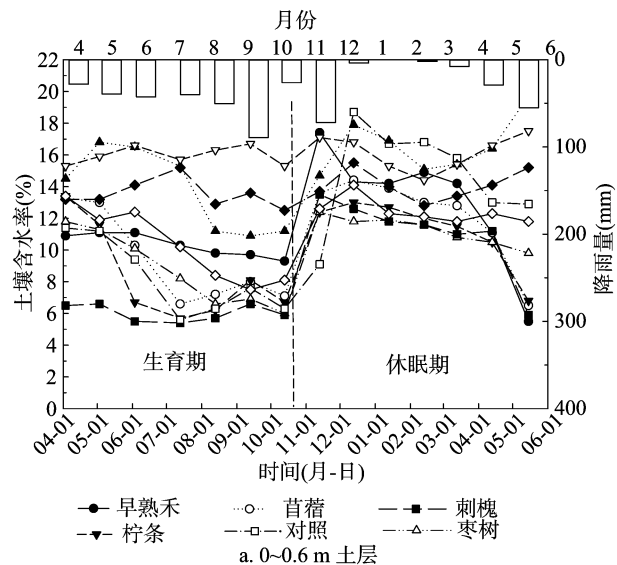


图5 不同覆盖措施下土壤含水率的垂直变化

表 3 各覆盖措施不同深度土壤含水率显著性分析和水分亏缺分析

不同覆盖	土层深度 (m)	含水率(%)		变异系数 CV (%)	各层 CSWDI	不同覆盖 PCSWDI	不同覆盖 DSWs (mm)
		均值	标准差				
早熟禾	0~0.6	11.70a	3.01	25.73	-0.02	-0.66	-892.48
	0.6~2.6	11.47ab	0.80	6.97	-0.60		
	2.6~6	10.51ab	0.48	4.57	-1.02		
	6~10	10.49b	0.40	3.81	-1.00		
苜蓿	0~0.	10.77a	3.05	28.32	0.08	-0.29	-440.96
	0.6~2.6	8.21b	3.24	39.46	0.02		
	2.6~6	8.59b	1.51	17.58	-0.51		
	6~10	9.55ab	0.46	4.82	-0.75		
柠条	0~0.6	9.81a	2.92	29.77	0.20	-0.26	-433.52
	0.6~2.6	7.78b	2.44	31.36	0.10		
	2.6~6	9.14ab	0.72	7.88	-0.65		
	6~10	9.37a	0.44	4.70	-0.70		
枣树	0~0.6	9.98a	2.17	21.74	0.18	-0.29	-446.99
	0.6~2.6	9.01ab	1.61	17.87	-0.13		
	2.6~6	9.08ab	0.30	3.30	-0.64		
	6~10	8.91b	0.29	3.25	-0.58		
刺槐	0~0.6	8.56c	3.13	36.57	0.35	0.28	274.92
	0.6~2.6	5.28a	0.34	6.44	0.57		
	2.6~6	5.77ab	1.40	24.26	0.25		
	6~10	6.86b	1.17	17.06	-0.03		
石子	0~0.6	13.81a	0.94	6.81	-0.27	-0.27	-276.59
	0.6~2.6	11.06b	0.52	4.70	-0.52		
	2.6~6	8.00c	0.65	8.13	-0.35		
	6~10	6.59d	0.46	6.98	0.04		
树枝	0~0.6	11.35a	2.02	17.80	0.02	-0.24	-327.34
	0.6~2.6	9.89b	1.47	14.86	-0.30		
	2.6~6	8.32c	0.51	6.13	-0.43		
	6~10	7.76c	0.43	5.54	-0.27		
白膜	0~0.6	15.18a	2.59	17.06	-0.43	-1.12	-1 348.6
	0.6~2.6	15.54a	0.92	5.92	-1.36		
	2.6~6	14.52a	0.83	5.72	-2.11		
	6~10	8.91b	0.86	9.65	-0.58		
黑膜	0~0.6	16.06a	0.87	5.42	-0.54	-0.53	-543.97
	0.6~2.6	13.51b	0.89	6.59	-0.98		
	2.6~6	8.61c	0.90	10.45	-0.51		
	6~10	7.08d	0.22	3.11	-0.09		
裸地	0~0.6	11.49b	4.33	37.68			
	0.6~2.6	8.31a	2.26	27.20			
	2.6~6	6.71a	0.88	13.11			
	6~10	6.75a	0.34	5.04			

注:采用单因素方差分析的 LSD 多重比较,同一覆盖措施的同一列中标有不同小写字母者表示组间差异显著( $P < 0.05$ )。

土壤含水率垂直分布的研究结果<sup>[38]</sup>一致。白膜覆盖 6 m 内土壤含水率较高,平均土壤含水率大于 14.5%,黑膜覆盖 2.6 m 内土壤含水率较高,平均土壤含水率大于 13.5%,均高于其他处理,说明采用薄膜覆盖,可以明显增加表层土壤含水率,并且对当地土壤干层的修复有一定的效果。相比黑膜覆盖,白膜覆盖对于土壤干层的修复效果更好。

计算各覆盖措施不同土层土壤水分相对亏缺指数看出,10 m 土层内,相对于裸地,刺槐土壤水分表现为亏缺,其余处理土壤水分均为蓄积状态,其中白膜覆盖土壤水分蓄积效应最好,PCSWDI 为 -1.12,其次为早熟禾和黑膜,PCSWDI 分别

为 -0.66 和 -0.53,根据土壤储水量计算公式(2),3 个处理 10 m 内土层土壤储水量相比于对照分别增加 1 348.6、892.48、543.97 mm,相当于试验地年平均降雨量的 2.98、1.97、1.20 倍。除早熟禾外,其余植被覆盖表层土壤均表现出不同程度的水分亏缺,而非植被覆盖表层土壤均为累积性,说明相对于裸地,采用非植被覆盖抑制蒸发作用明显,而种植植被由于自身生长要消耗大量水分,表层土壤水分减少。各处理深层土壤 2.6 m 以下土壤水分均表现为累积性,说明相对于裸地,采用覆盖措施对于该地区土壤干层的恢复有很好的效果。

为了进一步探讨各覆盖措施对于土壤水分干层的恢复效果,绘制各覆盖措施 2017 年 4 月 3 日和 2018 年 4 月 3 日土壤水分垂直剖面(图 6)。以 12% 和 5% 的质量含水率作为土壤稳定持水量和凋萎系数<sup>[5]</sup>,按照土壤含水率大于等于稳定含水率即认为干层恢复作为标准。可以看出,2017 年 4 月,经过 3 年覆盖后,各处理深层土壤含水率出现了一定差异,并且土壤干层恢复也达到了一定深度,其中白膜恢复深度达到 480 cm;黑膜和树枝覆盖恢复深度为 200 cm,其余处理土壤干

层无恢复。2018 年 4 月土壤水分剖面显示,各生草覆盖深层土壤含水率进一步降低,土壤干层进一步加深,而覆盖膜后,白膜和黑膜土壤干层恢复深度分别达到 7 m 和 4.4 m,说明薄膜覆盖对土壤干层的恢复有很好效果,其中白膜效果最好;而植被覆盖,随着植物个体的增长,自身蒸腾作用加大,对土壤水分的消耗也逐渐加大,土壤水分进一步减少,干层厚度进一步加大,程度加深。

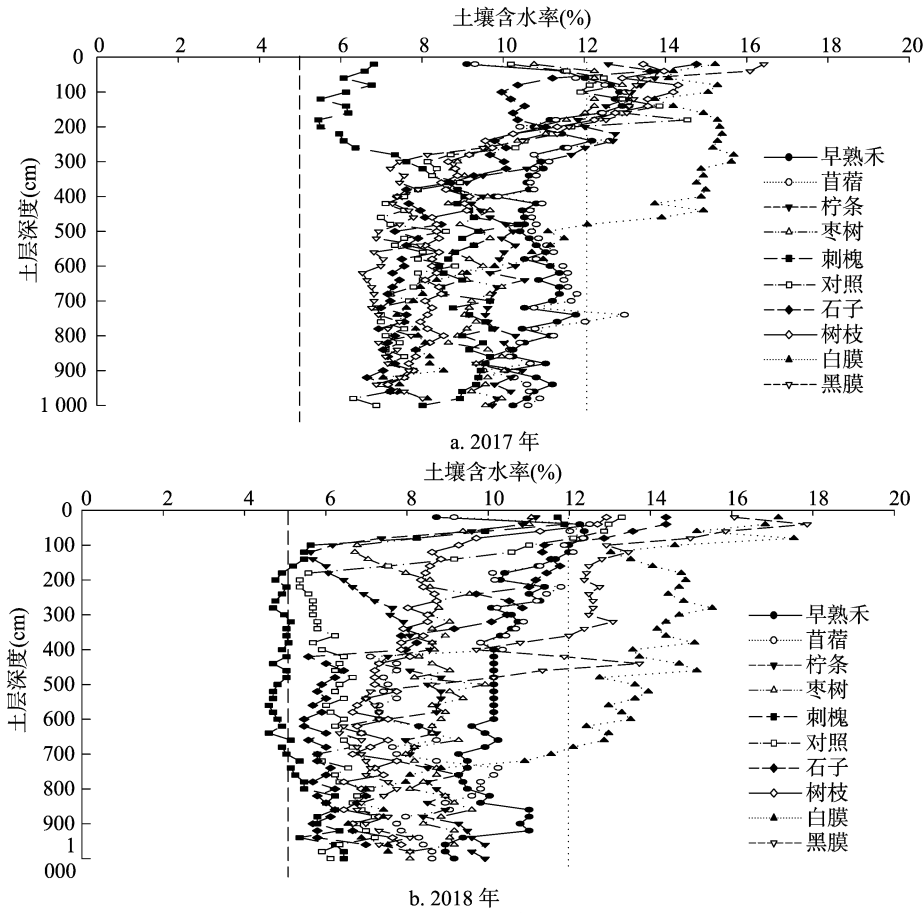


图6 各覆盖措施不同年份土壤水分垂直剖面

为了分析不同覆盖措施在植物生长期和休眠期土壤水分的消耗状况,以 2017 年 4 月 3 日至 10 月 28 日作为枣树生育期,2017 年 10 月 29 日至 2018 年 4 月 2 日作为枣树休眠期,研究各覆盖措施 0~10 m 土层土壤储水量变化量绘制表 4 和表 5。各层土壤储水量变化量为计算时段末土壤储水量减去计算时段初土壤储水量,降雨利用率为各覆盖措施土壤储水量变化量与同时段降雨量的比值,若为负值,则认为雨水没有储存而全部消耗,降雨利用率标记为零。

从表 4 可以看出,在植物生育期,各生草覆盖、枣树和裸地的土壤垂直方向土壤储水量变化量均为负值,虽然同期降雨量较大,为 315.4 mm,是全年降雨量的 90%,但是因为生草和枣树生长需要消耗大量水分,土壤水分支出大于收入,长期处于亏损状态;和采用植被覆盖措施相比,采用非植被覆盖措施各土柱深层土壤水分都不同程度地增加了,尤其是 2.6~6 m 的土壤水分干层土壤储水量增量明显,说明采用非植被覆盖措施对黄土高原土壤干层的修复有一定效果,尤其

是采用白膜覆盖,10 m 内土壤储水量相比裸地增加了 156.24 mm,降雨利用率达到了 49.5%。而采用树枝覆盖由于 2.6 m 内土壤水分蒸发较大,10 m 土层内总的土壤储水量变化为负值。非植被覆盖 10 m 土层土壤储水量增量为白膜覆盖>黑膜地布>石子覆盖>树枝覆盖。

由表 5 可知,由于在植物休眠期,各种生草蒸腾作用减弱,加之此期间气温普遍较低,相对湿度较小,因此蒸发较少,各个处理 0~0.6 m 土层土壤含水率相对于生育期均有所提高,土壤储水量变化量均为正值。说明土壤储水量在休眠期有所增加,而这个期间降雨虽不及生育期多,但是降雨入渗补给表层土壤水分作用明显,各个生草覆盖和枣树以及裸地的降雨入渗深度均达到了 2.6 m。非植被覆盖中只有黑膜覆盖在枣林休眠期土壤水分增加,其他处理 10 m 内土壤水分仍处于消耗状态,虽然各处理 0.6 m 土层土壤水分受到降雨的补给土壤储水量增加,但是在冬季由于表层土壤冻结,温度降低,在温度梯度的作用下,深层土壤水分向上运移,补充浅层土壤

表 4 枣林生育期不同覆盖措施下各层土壤储水量变化量

覆盖措施	土壤储水量变化量(mm)									
	早熟禾	苜蓿	柠条	枣树	刺槐	裸地	石子	树枝	白膜	黑膜
0~0.6 m	-12.10	-46.87	-50.65	-43.85	-4.54	-38.56	-5.29	-40.07	-24.95	0.00
0.6~2.6 m	-17.64	-191.52	-151.2	-78.12	-17.64	-158.76	17.64	-75.6	10.08	65.52
2.6~6 m	12.85	-111.38	-55.69	-4.28	-158.51	-55.69	25.70	4.28	115.67	55.69
6~10 m	-5.04	-60.48	-60.48	-45.36	-141.12	-15.12	8.08	10.22	55.44	10.08
10 m	-21.92	-410.26	-318.02	-171.61	-321.80	-268.13	51.42	-101.16	156.24	131.29
降雨量(mm)	315.4									
降雨利用率(%)	0	0	0	0	0	0	16.3	0	49.5	41.6

表 5 枣林休眠期不同覆盖措施下各层土壤储水量变化量

覆盖措施	土壤储水量变化量(mm)									
	早熟禾	苜蓿	柠条	枣树	刺槐	裸地	石子	树枝	白膜	黑膜
0~0.6 m	13.61	30.24	28.73	34.02	40.07	50.65	12.10	31.75	39.31	9.83
0.6~2.6 m	0.00	0.00	5.04	-10.08	2.52	47.88	7.56	-10.08	-20.16	-45.36
2.6~6 m	-34.27	-34.27	-21.42	-8.57	-8.57	-21.42	-68.54	-47.12	-81.40	68.54
6~10 m	-50.4	-15.12	5.04	10.08	-35.28	-25.2	-50.4	-45.36	-5.04	-5.04
10 m	-71.06	-19.15	17.39	25.45	-1.26	51.91	-99.29	-70.81	-67.28	27.97
降雨量	169.4									
降雨利用率(%)	0	0	10.3	15.0	0	30.6	0	0	0	16.5

水分,这也是造成各处理浅层土壤储水量增加而深层土壤储水量减少的另一个原因。可见,和生育期相比,休眠期才是各层土壤水分消耗的关键时期,而黑膜覆盖冬季保水效果较白膜覆盖好。

### 3 讨论

本试验结合 2 年连续数据,研究在不同覆盖措施下,土柱土壤含水率的全年变化,发现相比于裸地,种植刺槐耗水大,不适合作为覆盖保墒措施。这和李军等关于林地和荒草地耗水规律的研究结果<sup>[4]</sup>是一致的;采用非植被覆盖均能提高土壤含水率,覆盖保墒效果为:白膜>黑膜>石子>树枝,这和周玉红等关于不同覆盖保墒措施对于枣园土壤含水率的影响的研究结果<sup>[12,18,30]</sup>基本一致。

将垂直方向 0~10 m 土层划分成土壤水分剧烈变化层(0~0.6 m)、土壤水分变化层(0.6~2.6 m)、土壤水分分层(2.6~6 m)和土壤水分恢复层(6~10 m)4 层,分析各层不同覆盖措施土壤含水率全年变化发现:0~0.6 m 各处理土壤含水率年内变化均比较大,0.6~2.6 m 各处理土壤含水率年内变化较小,除刺槐和对照裸地外,其余处理 2.6 m 以下土壤含水率年内变化小,基本趋于稳定。从各处理土壤含水率变化结果来看,该分层方法适合黄土丘陵干旱区的枣林土壤水分垂直分层。总体而言,同一处理,随着土层深度的增加,土壤含水率逐渐减小,受降雨的影响也越小,这和繆凌等关于黄土高原不同植被类型和不同林龄枣树土壤含水率垂直分布的研究结果<sup>[13-14]</sup>是一致的。

分析不同覆盖措施土壤储水量在枣树生育期和休眠期的变化,发现休眠期才是枣树耗水的关键期。不论是枣树生育期还是休眠期,薄膜覆盖均能显著增加 10 m 内土层的土壤含水率,其中生育期采用白膜覆盖效果好,而休眠期采用黑膜地布覆盖效果较好。究其原因,主要是不同颜色的薄膜对光的

吸收效果不同,冬季土壤保温效果也不一样<sup>[31]</sup>。

已有研究表明,将 2 种覆盖措施结合起来或者将覆盖和管理措施结合起来使用能进一步提高果园土壤水分利用效率<sup>[23,29]</sup>,覆盖保墒措施能够改变土壤含水率的垂直分布,而土壤含水率又直接影响植物根系的分布<sup>[38-39]</sup>,是否能够将现有的覆盖保墒措施和管理措施有机组合起来,在经济性允许的前提下进一步提高土壤水分利用效率以及如何通过合理的覆盖措施调控植物的根系分布,进而调控植物根系对不同深度土层的土壤水分利用将是今后研究的重点。

### 4 结论

采取合理的覆盖措施能够显著增加土壤含水率,这对于山地土壤干层的修复具有重要的意义,2017—2018 年观测结果显示:

(1)不同覆盖措施土壤含水率年内变化中,采用生草覆盖,10 m 土层范围内,早熟禾全年土壤含水率最高,刺槐最低。裸地土壤水分受降雨补给影响明显,11 月下旬土壤储水量增加 277.2 mm,相当于同时期降雨的 3.85 倍;采用非植被覆盖全年土壤含水率均高于裸地,土壤含水率白膜>黑膜地布>石子>树枝。采用薄膜覆盖可以在枣树生育期(2017 年 4—10 月)显著提高土壤含水率;总体而言,采用非植被覆盖要比植被覆盖土壤保墒效果好,其中以白色薄膜覆盖保墒效果最好。

(2)不同覆盖措施土壤水分垂直变化显示,各处理 0~0.6 m 土层土壤含水率全年变化较大,土壤含水率在枣树休眠期(2017 年 11 月至 2018 年 3 月)表现为倒“U”形,其中生草覆盖和树枝覆盖土壤含水率受降雨影响较大,而薄膜覆盖和石子覆盖受降雨影响较小;0.6~2.6 m 土层土壤含水率变化幅度小,土壤含水率受降雨影响小;白膜覆盖 2.6~6 m 土层土壤含水率较高,平均值为 14.52%,而刺槐只有 5.77%,



接近枣树凋萎系数;所有处理 6~10 m 土层土壤含水率年内变化都不明显,不受降雨影响。

(3)不同覆盖不同深度土层土壤含水率显著性分析结果显示:土壤含水率垂直分层明显,随着土层的增加,土壤含水率逐渐变小,标准差逐渐变小,土壤含水率受降雨影响变小;采用薄膜覆盖,可以显著提高表层土壤含水率,白膜覆盖比黑膜覆盖对于土壤干层的修复效果更好。土壤水分亏缺情况显示,相对于裸地,白膜覆盖土壤水分蓄积效果最好,其次为早熟禾和黑膜地布,刺槐土壤水分亏缺最严重;采用非植被覆盖对于浅层土壤的蒸发抑制作用明显。

(4)不同年份,各覆盖措施土壤水分剖面显示,薄膜覆盖对土壤干层的恢复有一定效果,其中白膜效果最好;植被覆盖,随着植物个体的增长,自身蒸腾作用加大,干层厚度进一步加大。

(5)在枣树生育期,各生草覆盖和枣树由于自身生长需要消耗大量水分,因此土壤水分长期处于亏损状态;非植被覆盖 2.6~6 m 的土壤储水量增加明显,尤其是白膜覆盖,10 m 内土壤储水量增加了 156.34 mm,降雨利用率达到 49.5%。非植被覆盖措施对枣树生育期 10 m 土层土壤水分的增加效果为白膜覆盖>黑膜覆盖>石子覆盖>树枝覆盖;在枣树休眠期,生草覆盖和枣树以及裸地的降雨入渗深度均达到 2.6 m。非植被覆盖只有黑膜覆盖休眠期土壤水分增加,其他处理 10 m 内土壤水分仍处于消耗状态。和生育期相比,休眠期才是各层土壤水分消耗的关键时期,而黑膜覆盖冬季保水效果较白膜覆盖好。

#### 参考文献:

- [1]何小武,刘广全,郭孟华.黄土高原植被建设的水资源环境及对策[J].水利学报,2008,39(7):843-847.
- [2]Fan J,Shao M A,Wang Q J,et al. Toward sustainable soil and water resources use in China's highly erodible semi-arid Loess Plateau[J]. Geoderma,2010,155(1/2):93-100.
- [3]Jin T T,Fu B J,Liu G H,et al. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Hydrology Earth System Sciences,2011,15(8):2519-2530.
- [4]李军,陈兵,李小芳,等.黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J].生态学报,2008(4):1429-1445.
- [5]张晨成,邵明安,王云强.黄土区坡面尺度不同植被类型下土壤干层的空间分布[J].农业工程学报,2012,28(17):102-108.
- [6]曹裕,李军,张社红,等.黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J].农业工程学报,2012,28(15):72-79.
- [7]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.
- [8]Wang Y Q,Shao M A,Zhu Y J,et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2011,151(4):437-448.
- [9]蔺君,汪有科,卫新东.黄土丘陵区竹节式聚水沟的蓄水特性[J].应用生态学报,2013,24(12):3373-3380.
- [10]李虹辰,赵西宁,高晓东,等.鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响[J].应用生态学报,2014,25(8):2297-2303.
- [11]李巍,郝明德,王学春.黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复[J].农业工程学报,2010,26(3):99-105.
- [12]周玉红,董建国,汪有科,等.几种典型覆盖下的土壤水分恢复研究[J].水土保持研究,2015,22(2):334-339.
- [13]缪凌,董建国,汪有科,等.黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2016,23(2):13-18.
- [14]汪星,周玉红,汪有科,等.黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究[J].水利学报,2015,46(3):263-270.
- [15]Qiu Y,Fu B,Wang J,et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semiarid gully catchment of the Loess Plateau[J]. Journal of Arid Environments,2001,49(4):723-750.
- [16]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.
- [17]李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J].应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- [18]白盛元,汪有科,马建鹏,等.黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):218-231.
- [19]王晓峰,田霄鸿,陈自惠,等.不同覆盖施肥措施对黄土旱塬冬小麦土壤水分的影响[J].应用生态学报,2009,20(5):1105-1111.
- [20]Niu J Y,Gan Y T,Zhang J W,et al. Postanthesis dry matter accumulation and redistribution in spring wheat mulched with plastic flim[J]. Crop Science,1998,38(6):1562-1568.
- [21]刘战东,高阳,刘祖贵,等.降水特性和覆盖方式对麦田土壤水分的影响[J].农业工程学报,2012,28(13):113-120.
- [22]官情,王俊,宋淑亚,等.黄土旱塬区不同覆盖措施对土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J].地下水,2011,33(1):21-24.
- [23]殷涛,何文清,严昌荣,等.地膜秸秆双覆盖对免耕种植玉米田土壤水热效应的影响[J].农业工程学报,2014,30(19):78-87.
- [24]陈林,杨新国,翟德苹,等.柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和玉米产量的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):108-116.
- [25]蔡太义,贾志宽,孟蕾,等.渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):43-48.
- [26]Li X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. CATENA,2003,52(2):105-127.
- [27]Schoneck M W,Evanlyo G K. Effects of mulches on soil properties and tomato production II. Plant-available nitrogen,organic matter input, and tillage-related properties[J]. Journal of Sustainable Agriculture,1998,13(1):83-100.
- [28]Moreno M M,Moreno A. Effect of different biodegradable and polyethylene mulches on soil properties and production in a tomato crop[J]. Scientia Horticulturae,2008,116(3):256-263.
- [29]周婷婷,张育丽,万素梅.不同覆盖措施对南疆地区红枣产量及品质性状影响的研究[J].塔里木大学学报,2016,28(1):56-61.
- [30]靳姗姗,汪星,汪有科,等.不同覆盖措施对减少枣林休眠期土壤水分损失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):153-160.
- [31]许树宁,吴建明,黄杏,等.不同地膜覆盖对土壤温度、水分及甘蔗生长和产量的影响[J].南方农业学报,2014(12):2137-2142.

焦常锋, 常会庆, 朱晓辉, 等. 脱水污泥堆肥过程中养分、有机质与重金属的变化特征[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 255–260.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.058

# 脱水污泥堆肥过程中养分、有机质与重金属的变化特征

焦常锋, 常会庆, 朱晓辉, 吴 杰, 王启震

(河南科技大学农学院, 河南洛阳 471000)

**摘要:**对城市脱水污泥在堆肥过程中的氮、磷等主要养分、不同有机物以及铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)4种重金属的变化特性开展研究, 分析不同有机物与有效态重金属之间的相关关系。结果表明:堆肥结束时, 总氮、铵态氮含量分别降低了18.57%、13.93%, 硝态氮含量增加了7.69%, 速效磷含量增加了100.35%。堆肥期间不同有机物含量的变化趋势不同, 堆肥结束时污泥有机质、溶解性有机物含量分别下降了50.92%、12.11%, 而腐殖酸、富里酸、胡敏酸的含量分别增加了59.77%、30.85%、218.66%, 胡敏酸、富里酸的比值从0.10上升到0.24。在堆肥结束时4种重金属总量都高于堆肥开始时的含量。有效态重金属含量在堆肥结束时最低, 此时分别占重金属总量的28.13%、23.76%、11.08%、25.33%。污泥堆肥过程中不同有效态重金属和不同参数之间的相关性存在明显差异。

**关键词:**脱水污泥; 养分; 有机物; 重金属; 堆肥

**中图分类号:** S141.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)19-0255-06

随着我国污水处理规模的迅速发展, 污泥产量也逐年剧增。截至2015年年底, 我国年产剩余污泥(含水80%)高达3 500万t, 预计到2020年污泥产量将增加1倍<sup>[1-2]</sup>。脱水污泥堆肥处理是实现污泥减量化、稳定化、无害化和资源化的重要手段之一。堆肥过程是一个腐殖化的过程, 同时伴随着氮、磷等养分的释放与固定, 堆肥过程的多种因素会影响到重金属的有效性。因此, 研究脱水污泥堆肥过程中养分、有机物、重金属的变化, 对其后期的资源化利用及其农用评价具有重要的指导意义。

已有研究表明, 在污泥堆肥过程中不同类型的有机物与

重金属间会发生相互作用, 从而改变重金属的有效性<sup>[3-5]</sup>, 主要影响到重金属的分布, 如有机物质矿化对重金属的释放产生影响, 或由于pH值的改变影响重金属浓度, 重金属和新生成的腐殖质形成复合体或其他因素影响其有效性等<sup>[6-8]</sup>。重金属的生物有效性也受有机物形态, 如溶解态富里酸(FA)和不易溶解的胡敏酸(HA)含量变化的影响。难溶解的有机物阻碍植物对重金属的吸收, 由于它们和有机物结合紧密, 使其生物有效性降低。溶解态的有机物通过形成溶解性的金属有机物复合体而增强其生物有效性<sup>[9]</sup>。因此关注堆肥过程中有机物变化对重金属有效性的影响尤显重要。

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 41571319); 国家重点研发计划(编号: 2017YFD0801300); 河南省科技攻关项目(编号: 172102310181)。

作者简介: 焦常锋(1995—), 女, 河南南召人, 硕士研究生, 主要从事废弃物农用环境效应研究。E-mail: 2263492939@qq.com。

通信作者: 常会庆, 男, 山西太谷人, 博士, 副教授, 主要从事废弃物资源化研究。E-mail: hqchang@126.com

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

采集某市区污水厂脱水污泥, 部分样品保存于4℃冰箱, 部分自然风干, 研磨过20、100目筛后进行理化特征分析。

### 1.2 堆肥和采样

本试验是在自制的反应器(图1)中进行的。将堆肥污泥基质水分调节至60%, 曝气量为60 mL/min, 在堆肥第20天

[32] Liu Y, Gao M S, Wu W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 7–12.

[33] 李仙岳, 彭遵原, 史海滨, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 97–103.

[34] Ruppel S, Merbach E. Effect of black plastic mulch in gonnitrogenbalnde in cultivation of pickles [J]. Garten bauwissenc haft, 1996, 61(5): 230–237.

[35] 时连辉, 韩国华, 张志国, 等. 秸秆腐解物覆盖对园林土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 113–117.

[36] Matitschka G. Mineral N dynamic, N uptake and growth of lettuce

affected by mulch [J]. Acta Horticulture, 1996, 428: 85–94.

[37] Wang Y J, Xie Z K, Sukhdev S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3): 374–382.

[38] 魏新光, 聂真义, 刘守阳, 等. 黄土丘陵区枣林土壤水分动态及其对蒸腾的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 130–140.

[39] 李陆生, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区不同树龄旱作枣园细根空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 140–146.

[40] 杨 磊, 卫 伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3060–3068.