

# 几种典型覆盖下的土壤水分恢复研究

周玉红<sup>1</sup>, 董建国<sup>2</sup>, 汪有科<sup>1,2</sup>, 白盛元<sup>1</sup>, 靳珊珊<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 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:**为了探索半干旱黄土丘陵区典型覆盖措施下土壤水分恢复的特征,采用野外大型土柱定位观测了几种覆盖下土壤水分的变化,结果表明:(1)与裸地相比,薄膜覆盖下土壤水分增加最显著,其次为树枝覆盖;(2)从土壤水分的含量来看,裸地在当地有利于土壤水分的恢复;(3)从逐月累计土壤储水增量来看,经过一个生育期,不同处理下土壤储水增量均有不同程度的增加,到9月份时,薄膜覆盖>树枝覆盖>裸地>早熟禾。三种无植物处理下土壤储水增量随着时间的变化呈直线上升的关系,其中薄膜覆盖与逐月累计降雨量关系最紧密。有植物种植的处理中(早熟禾),土壤储水增量与时间呈非线性关系;(4)随着土层的增加,变异系数逐渐减小,早熟禾和裸地在200 cm以下,基本达到稳定,树枝覆盖在240 cm以下达到稳定,薄膜覆盖大概在340 cm以下达到稳定。

**关键词:**黄土高原; 土壤水分; 典型覆盖; 变异系数

中图分类号:S152.7;S274.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)02-0334-06

## Research on Soil Water Recovery Ability Under Different Typical Mulches

ZHOU Yuhong<sup>1</sup>, DONG Jianguo<sup>2</sup>, WANG Youke<sup>1,2</sup>, BAI Shengyuan<sup>1</sup>, JIN Shanshan<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation,

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

**Abstract:** This study aimed to analyze soil water recovery ability under different typical mulches in the hilly loess region and adopted the large soil columns to observe soil water contents in the field. Results showed that soil water content significantly increased under plastic film mulch compared with barren land. Weeding was beneficial to soil water recovery in the local area. Accumulative storage of soil water increased during growth period, which decreased in the order of film mulching>branches mulching>barren land>bluegrass planting at the end of September. Increment accumulative storage of soil water under four no-plant treatments has linear relations with the month change and plastic film mulch has the close relationship with monthly accumulative rainfall, but accumulative storage of soil water under bluegrass planting has the non-linear relationship with rainfall. With the increase of soil layers, variable coefficient became less gradually, and the variable coefficients became steady below the depth of 200 cm in bluegrass and barren lands; the stable depths under branch mulch and plastic film mulch were 240 cm and 340 cm, respectively.

**Keywords:** hilly loess region; soil water content; typical mulch; variable coefficient

水分一直是黄土高原地区植被生长的主要影响因素之一<sup>[1-3]</sup>,植被恢复与重建的效果主要决定于土壤水分动态变化<sup>[4]</sup>。以往的研究已经充分证明,黄土高原半干旱区人工林植被建设会造成土壤水分的不同程度亏缺<sup>[5-11]</sup>,随着人工植被生长年限的增加,深层土壤干化现象加重<sup>[12]</sup>。因此,土壤水分能否恢复一直是生态学科和土壤学科十分关注的热点问题。

黄土高原是一种特殊的地形地貌<sup>[13-15]</sup>,研究黄土丘陵区土壤水分的动态变化特征,有助于深入理解土壤水分修复及深层土壤水分的利用状况,预防黄土高原人工林深层土壤水分过度消耗的现象。总体来看,目前已经有很多学者研究了黄土高原地区人工林地的土壤干化问题<sup>[6,10-11]</sup>,以及如何防止土壤干化,进一步恢复土壤干层的研究<sup>[16-17]</sup>。但是,关于人工林草死

后,土壤水分恢复能力的大小及恢复年限,一直是人们关心但又不能确定的科学问题,以往也有很多关于覆盖措施下的土壤水分修复能力的研究,但大部分是在有植物生长,根系消耗土壤水分的情况下进行,所以不能真实反映不同覆盖措施下降雨对土壤水分的提升能力。本研究采用野外大型土柱试验,观测对比裸地、种草、盖碎树枝和薄膜覆盖 4 种处理下土壤水分的恢复能力,来说明黄土丘陵区依靠降雨量,土壤水分的最大修复能力,为今后该地区防治土壤干层的研究提供科学依据。

## 1 试验区概况

研究区位于黄土高原丘陵沟壑区陕西省米脂县远志山(109.47E,37.18N),属于典型的中温带半干旱性气候区,降雨量少且年内分布不均,年均降雨量 450 mm,其中 7—9 月的降雨量占全年降雨量的 50%以上。2014 年生育期降雨量为 347.5 mm,见图 1。研究区土壤属于粉质砂壤土,0~1 m 土壤容重平均为 1.32 g/cm<sup>3</sup>,1~4 m 土壤容重有所增加,平均为 1.33 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率平均 21.5%。土壤较为贫瘠,0~1 m 土层的有效氮、磷、钾含量分别为 34.71, 2.90,101.8 mg/kg,有机质含量为 2.1 g/kg,pH 值为 8.6。该区土层深厚,土质均一。研究区地形相对高差达 140 m,土壤为黄绵土,坡度平均为 25°,土层深厚,地下水埋深 60 m 以下,故地下水对作物根系吸水的影响可忽略。

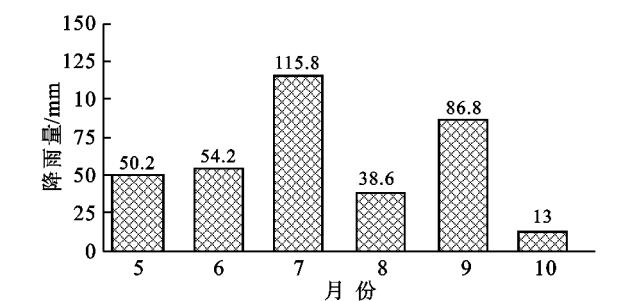


图 1 2014 年枣林生育期内的各月降雨量

## 2 试验方法

### 2.1 野外大型土柱试验及土壤水分测定

为了排除覆盖条件下周围其他植物根系消耗土壤水分的干扰,来确定试验处理条件下,降雨对土壤水分的提升能力,在陕北米脂远志山布设不同处理下(早熟禾、裸地、树枝覆盖、薄膜覆盖)的大型野外水泥土柱试验。土柱的规格为直径 80 cm,深度 1 000 cm,土柱内分层回填土壤,逐层由人工压实至接近当地土壤的容重,大致保持在 1.2±0.14 g/cm<sup>3</sup>,周围用约 1 mm 的塑料与柱体外土壤隔离,以防止其他植

物根系进入土柱之中(图 2)。早熟禾采用人工栽植的方式,种植在土柱中;树枝覆盖就地取材,采用剪下来的枣树枝,裁成长度 3~5 cm,覆盖厚度 15~20 cm;薄膜覆盖采用地表铺膜和地表 15 cm 高度铺膜的双层覆膜方式以防止土壤水分蒸发损失,分别在每层薄膜上不对称的戳直径 2~3 mm 的小洞以利于降雨入渗。覆膜根据破损情况,每年更新 3~4 次。采用中子仪定位观测方法测 0—1 000 cm 深度内的土壤水分,每 20 cm 为一个深度测点,每 10 d 采集数据一次。土壤水分均为体积含水量。由于本研究期间 400 cm 以下土壤水分未受到降雨入渗影响,土壤水分比较稳定,且值属于初始填置时的土壤水分。所以本研究只涉及 0—400 cm 深度内土壤水分的分析。

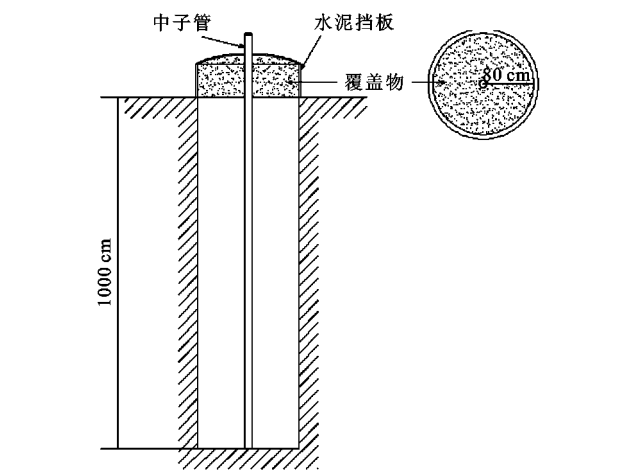


图 2 野外大型土柱试验设计示意图

### 2.2 灰色关联法

灰色关联度法(Grey Relational Analysis)是灰色系统分析方法的一种,根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,即“灰色关联度”作为衡量因素间关联程度的一种方法<sup>[18]</sup>。在所研究的系统中,如果两个因素变化的趋势具有一致性,即所得的相关系数越大,说明二者同步变化程度较高,即二者的关联度越大;反之则关联度较低<sup>[19-20]</sup>。在进行数据关联分析时,首先必须确定参考数列和比较数列。设一个参考数列  $x_0$ ,几个比较数列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,各比较数列与参考数列在各点的差:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i(\Delta_i(\min)) + \rho \max_i(\Delta_i(\max))}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i(\Delta_i(\max))} \quad (1)$$

$$\min_i[\Delta_i(\min)] = \min_i(\min_k |x_0(k) - x_i(k)|) \quad (2)$$

$$\max_i[\Delta_i(\max)] = \max_i(\max_k |x_0(k) - x_i(k)|) \quad (3)$$

式中: $\xi_i(k)$ ——第  $k$  个时刻比较曲线  $x_1$  与参考曲线  $x_0$  的相对差值; $\rho$ ——分辨系数,取值范围为  $[0, 1]$ ,一般取  $\rho=0.5$ 。由于关联系数只是反映比较数列和参考数列在某一时刻的关联程度,而反映不出时间序

列的整个关联程度,且结果较多,信息分布过于分散,不便于比较,因此有必要将每一个时刻的关联系数集中求出平均值,即  $R_i$

$$R_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (4)$$

式中:  $R_i$ ——比较数列  $x_i$  对参考数列  $x_0$  的关联度,  $R_i$  值越接近 1, 说明关联性越好。

### 2.3 变异系数法

变异系数( $C_V$ )是广泛用于反映土壤水分变化程度的一个统计量,依据  $C_V$  的大小来垂直划分土层,其计算公式为:

$$C_V = \frac{\sigma}{E_X} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E_X)^2} \quad (6)$$

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

## 3 结果与分析

### 3.1 典型覆盖下土壤水分逐月变化规律

图3为种植早熟禾草、裸地、碎树枝覆盖和薄膜

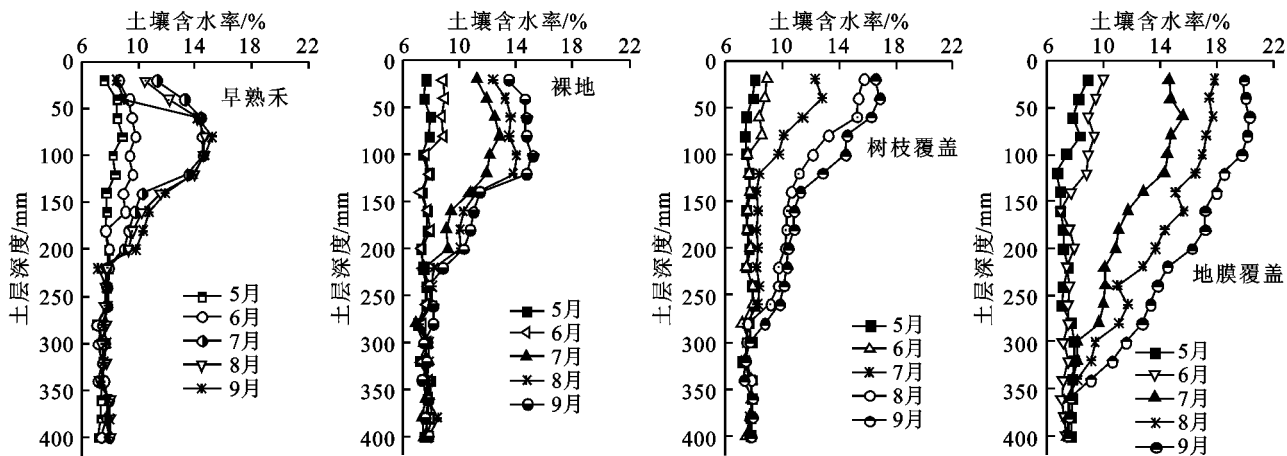


图3 不同处理下土壤水分垂直月动态

### 3.2 土壤水分逐月变化的灰色关联法分析

用灰色关联法进行分析 2014 年不同处理下全生育期各月土壤水分的分析。上述分析已经说明在整个生育期,5 月份土壤水分处于全年的最低值,其土壤水分的变化基本可以反映出年内土壤水分的初始值,因此以 5 月份的数据为参考数列  $X_0 = \{X_0(k) | k=1, 2, \dots, 20\}$ , 表示 0—400 cm 划分为 20 个层次。把 6 月, 7 月, 8 月, 9 月份土壤水分作为比较数列, 分别为  $X_6, X_7, X_8, X_9$ , 其中  $R_{06}, R_{07}, R_{08}, R_{09}$  为 5 月份与 6 月, 7 月, 8 月, 9 月份土壤水分灰色关联度。同时, 将裸地各月的平均土壤含水率作为参考数列  $X_0 = \{X_0(k) | k=$

覆盖 4 种不同处理下土壤水分逐月变化图, 由图可知, 各个处理经过一个生育期, 土壤水分均有不同程度的增加。从土壤水分增加的深度来看, 薄膜覆盖处理下土壤水分增加的深度最大, 在 7 月份时达到 300 cm, 9 月份时达到 360 cm; 其次是树枝覆盖, 在 7 月份时土壤水分的增加深度达 275 cm, 9 月份时达到 300 cm; 裸地(即除草情况下)处理中, 土壤水分在 7 月份时深度达到 220 cm, 9 月份大约达到 250 cm; 在种植早熟禾(浅根系植物)的处理中, 7 月份和 9 月份土壤水分增加的深度基本一致。由于植物根系消耗土壤水分, 上层(50 cm 以内)的土壤水分波动较大, 且明显小于其他几种处理, 说明除草有利于当地土壤水分的修复。

从土壤水分含量来看, 在整个生育期内, 各个处理下, 5 月份土壤水分处于最低值, 随着降雨量的增加, 土壤含水量依次增加, 6 月份土壤含水量稍微比 5 月份高一点, 即 6 月份土壤水分增加的速率较小; 7 月份时土壤含水量在各个处理下明显大于 6 月份的, 即 7 月份土壤含水量增加的速率大于 6 月份的; 到 9 月份时, 土壤水分达到最高值。其中, 薄膜覆盖下土壤水分增加的量最多, 其次是树枝覆盖, 裸地和早熟禾处理。早熟禾和裸地的土壤水分除了表层(50 cm 以内)以外, 逐月增加的趋势基本一致。

5, 6, 7, 8, 9), 将早熟禾、树枝覆盖和薄膜覆盖下的各月平均土壤水分分别作为比较数列, 采用 Matlab 7.1 软件进行计算, 为了提高计算结果的精度和计算效率, 在进行关联度分析前, 对所有原始数据进行均值化处理, 关联度分辨系数  $\rho$  取 0.5, 构建不同处理下各月土壤水分之间的灰色关联度分析模型。

由灰色关联分析得到表 1, 从表中可知: (1) 分析不同处理与裸地的土壤水分关联度, 灰色关联度越大, 两条曲线越接近。从整体上看, 各个月份下薄膜覆盖与裸地的关联度最小, 说明薄膜覆盖下土壤水分与裸地明显不同, 即薄膜覆盖下土壤水分增加显著;

从横向来看,碎树枝覆盖在 5 月,6 月时与裸地的相关度高于早熟禾的,而在 7 月,8 月份时低于早熟禾,即早熟禾处理下土壤水分在生育期一开始就有波动,说明在干旱条件下,种草会消耗土壤中的水分,导致土壤水分降低,即低于裸地的土壤水分,也验证了前面在没有灌溉水分补给的条件下,除草有利于土壤水分的恢复。到 7 月份之后,由于降雨的大面积补给,

导致早熟禾的土壤水分与裸地土壤水分的关联度增大。(2) 从不同月份与 5 月份的关联分析来看,灰色关联度按月份呈依次递减的趋势,说明从 5 月份开始,各个处理下的土壤水分逐月增加,并且在 9 月份土壤水分达到最大值。薄膜覆盖 5—9 月份灰色关联度小于其他几种处理,说明薄膜覆盖下土壤水分的增加最明显,这与前面描述的结果一致。

表 1 不同处理下各月土壤含水率灰关联分析结果

月份	不同处理下各月土壤含水率与裸地			不同处理下各月间的土壤含水率				
	早熟禾	树枝覆盖	薄膜覆盖	关联度	裸地	早熟禾	树枝覆盖	薄膜覆盖
5 月	0.6755	0.7513	0.6521	$R_{06}$	0.8596	0.8087	0.8545	0.7614
6 月	0.5721	0.6795	0.5953	$R_{07}$	0.5831	0.5749	0.6834	0.5804
7 月	0.7375	0.6435	0.7149	$R_{08}$	0.5630	0.5819	0.5857	0.5362
8 月	0.7381	0.6540	0.5943	$R_{09}$	0.5358	0.5665	0.5666	0.5372
9 月	0.7603	0.7753	0.6942					

3.3 典型覆盖下的土壤储水增量与降雨量的关系

分析 4 种不同处理下逐月累计土壤储水增量,在整个试验中,降雨最大程度地得到入渗。由图 4 可以看出,在整个试验观测期间,累计降雨量达到 301.5 mm,薄膜覆盖下累计储水量为 287.69 mm,其差值为 13.81 mm,说明在薄膜覆盖下也不能保证全部降雨能够入渗到土壤中,有些小雨如 4 mm 以下降雨很难入渗到土壤中,即使大雨量也有极少量没有能够入渗到土壤中,实际中总会出现部分蒸发损失。

各个处理下土壤储水增量均有不同程度的增加,其中逐月累计土壤储水增量在 9 月份时:薄膜覆盖>树枝覆盖>裸地>早熟禾。薄膜覆盖下土壤储水增量和降雨量特别接近,说明薄膜覆盖能够最大程度地拦截利用降雨量,对当地土壤水分的修复作用最大。早熟禾在生育后期的土壤水增量明显低于裸地的,因为早熟禾的根系消耗了土壤水分,这里进一步说明当地除草有利于土壤水分的恢复。

由图 4 也可以看出,在 4 种处理下,土壤储水增量随着时间的变化,趋势呈线性关系,且相关性很好, $R^2$  均在 0.9 以上。各个处理下的土壤储水量增加情况与逐月累计降雨量对比可以看出,三种无植物处理下的土壤储水量与同期累计雨量均为线性关系, $R^2$  均在 0.9 以上,不同处理下土壤储水量有差异,各个处理的线性回归模拟线的截距和斜率不同,薄膜覆盖下的模拟直线斜率较高(77.44),随着时间(月份)的推移,趋势线越来越接近,说明薄膜覆盖下土壤储水量和当地生育期内的降雨量接近。树枝覆盖的斜率(38.34)小于降雨累计线(65.8),说明虽然随着降雨量累计增大,树枝覆盖下的土壤储水量也在增加,但是增加的效率较薄膜覆盖要小。裸地斜率之差仅为

6.49,小于薄膜覆盖和树枝覆盖,这也就说明裸地在相同降雨量下土壤储水量较小。在有植物栽植(早熟禾)的情况下,土壤储水增量和时间呈非线性关系,模拟方程为: $y = -7.71x^2 + 68.21x - 67.51$ 。这个一元二次方程说明随着时间的延长,虽然降雨累计增加,但为由于植物消耗水分仍然会造成土壤储水量达到一定值后出现减小的情况。

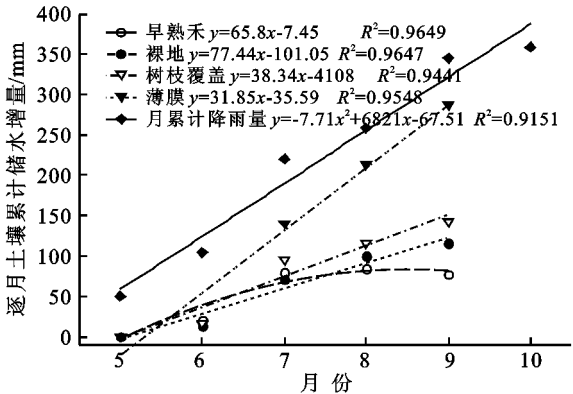


图 4 不同覆盖下逐月累计储水增量

3.4 典型覆盖下土壤水分垂直变化特征

通过对比表 2 可以看出,4 种典型覆盖下,垂直方向上平均土壤水分具有差异性。由土壤水分的差异性可将不同处理划分为三个层次,裸地在 0—120 cm 为土壤水分快速修复层,120—200 cm 为易修复层,200—400 cm 为缓慢修复层;早熟禾在 0—140 cm 为土壤水分快速修复层,140—200 cm 为易修复层,200—400 cm 为土壤水分缓慢修复层;树枝覆盖在 0—120 cm 为土壤水分快速修复层,120—240 cm 为易修复层,240—400 cm 为缓慢修复层;薄膜覆盖在 0—340 cm 都为快速修复层,340—400 cm 属于缓慢修复层。第一个层次的深度也为变异系数最大的范围,说明随着累计降雨的增加,该层次土壤水分变化

也最大。第二层变异系数减小,说明降雨对该层次影响减弱,这个也基本反映降雨入渗的影响深度范围。第三层变异系数最小,这个层次基本属于降雨入渗未到达的范围,代表原有土壤水分的水平。从变异系数也可以看出,上层土壤水分受降雨和耗水的影响比较大,相应的变异系数也较大。随着土层的增加,变异系数逐渐减小,早熟禾和裸地在 200 cm 以下,基本达到稳定,树枝覆盖在 240 cm 以下达到稳定,薄膜覆盖大概在 340 cm 以下达到稳定。在整个土层内,土壤

含水率均值随着深度的增加而减小,其中在 100 cm 内早熟禾的平均土壤含水率较其他几种处理下波动最显著( $p<0.05$ ),说明除了受降雨和耗水的影响外,早熟禾的根系消耗土壤水分也是一个重要的因素,导致其较大的波动性。再次验证了上面提到的除草在当地有利于土壤水分恢复的结论。而在横向比较来看,树枝覆盖和薄膜覆盖均不同程度地提高了土壤含水率,其中薄膜处理下土壤水分增加最多,变异系数也最大,最大值为 40.79%。

表 2 不同处理下土壤水分垂直分层结果

层 次号	土层 深度/cm	裸地		早熟禾		树枝覆盖		地膜覆盖	
		土壤含水率	变异	土壤含水率	变异	土壤含水率	变异	土壤含水率	变异
		均值/%	系数/%	均值/%	系数/%	均值/%	系数/%	均值/%	系数/%
1	0—20	10.71a	22.70	9.31cde	16.47	12.33a	31.23	14.27a	33.54
2	20—40	11.27a	26.41	10.46abc	20.16	12.34a	31.76	14.01a	36.14
3	40—60	11.51a	26.06	12.16ab	23.70	11.76ab	33.62	14.10a	38.96
4	60—80	11.55a	26.09	12.62a	23.95	10.75abc	28.30	14.00a	36.18
5	80—100	11.27a	31.99	12.28a	26.11	10.26abcd	29.31	13.53ab8	39.01
6	100—120	11.25a	29.07	11.87ab	22.60	9.54abcd	24.45	12.97abc	38.76
7	120—140	9.62ab	21.92	10.08bcd	17.43	9.11bcd	18.71	12.10abc	39.12
8	140—160	9.24ab	15.97	9.54cde	12.13	8.88bcd	17.76	11.71abc	40.79
9	160—180	9.13ab	14.35	8.93cde	13.30	8.86bcd	17.86	11.48abc	37.63
10	180—200	8.85ab	16.70	8.80cde	9.53	8.85bcd	15.13	11.19abc	34.33
11	200—220	7.89b	7.89	7.73e	3.97	8.63cd	15.29	10.48abc	30.10
12	220—240	7.84b	2.20	7.78de	0.64	8.81bcd	11.81	9.95abc	27.28
13	240—260	7.94b	3.13	7.81de	1.23	8.63cd	9.48	9.93abc	27.20
14	260—280	7.34b	6.52	7.38e	4.44	7.72cd	7.80	9.77abc	22.68
15	280—300	7.68b	2.32	7.54e	3.39	7.64cd	2.09	8.87abc	19.64
16	300—320	7.60b	4.23	7.56e	1.69	7.35d	1.58	8.70abc	14.41
17	320—340	7.71b	3.32	7.39e	2.27	7.70cd	3.25	8.03bc	8.86
18	340—360	7.78b	1.37	7.84de	3.32	7.87cd	0.51	7.53c	3.93
19	360—380	7.86b	5.34	7.79de	3.37	7.78cd	0.94	7.52c	2.72
20	380—400	7.69b	2.47	7.68e	5.12	7.70cd	1.91	7.5c	1.75

注:小写字母表示各层平均土壤含水率均值间的差异显著性, $p<0.05$ 。

4 结论

(1) 在排除植物根系作用条件下,与裸地相比,经过一个生育期,薄膜覆盖下土壤水分增加最显著,而且土壤水分恢复深度也最大。由于薄膜覆盖成本较高,容易受到破坏,寿命太短,不宜重复使用,而且会对当地环境造成破坏。碎树枝覆盖下土壤水分较薄膜覆盖差,但仍较裸地土壤水分提升好,碎树枝覆盖不污染环境,而且寿命较薄膜长,所以值得推广。

(2) 从逐月累计储水量增值来看,经过一个生育期,不同处理下土壤储水增量均有不同程度的增加,经过一个雨季后土壤储水量表现为,薄膜覆盖>树枝覆盖>裸地>早熟禾。三种无植物处理下土壤储水增量随着时间的变化呈直线上升的线性关系。有

植物种植的处理(早熟禾),土壤储水增量与时间呈非线性关系。这个结果说明有植物生长条件下的各种覆盖措施产生的土壤水分效应往往体现在对植物生长的促进作用方面,而对土壤水分的修复能力常常被忽略。

(3) 不同覆盖下土壤水分垂直变化不同,随着土层深度的增加,变异系数逐渐减小,早熟禾和裸地在 200 cm 以下,基本达到稳定,树枝覆盖在 240 cm 以下达到稳定,薄膜覆盖大概在 340 cm 以下达到稳定。根据显著性和变异系数的大小,可以将不同处理下的土壤水分在垂直范围内划分为不同的层,即快速修复层、易修复层和缓慢修复层。这里土壤修复特征粗看与以往对林草地土壤水分特征研究<sup>[21-23]</sup>有相似之处,但是根本区别在于前者为恢复能力,后者是说耗水特性。

## 参考文献:

- [1] 吴普特,汪有科,辛小桂,等. 陕北山地红枣集雨微灌技术集成与示范[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 1-6.
- [2] 马非,张亚红,谢应忠. 半干旱黄土高原丘陵区不同植被条件下土壤水分研究进展[J]. 农业科学研究, 2007, 28(1): 76-79.
- [3] 李永红,高照良. 黄土高原地区水土流失的特点, 危害及治理[J]. 生态经济, 2011(8): 148-153.
- [4] 王林和,董智. 毛乌素沙地天然臭柏群落新梢生长规律的研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1998, 20(3): 15-21.
- [5] 樊军,郝明德,邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.
- [6] 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.
- [7] Liang Z S, Yang J W, Shao H B, et al. Investigation on water consumption characteristics and water use efficiency of poplar under soil water deficits on the Loess Plateau [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2006, 53(1): 23-28.
- [8] Fu B, Liu Y, Lü Y, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.
- [9] Chen L, Wang J, Wei W, et al. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [10] 杨文治,李壁成. 陕北黄土丘陵区水土保持科学试验问题[J]. 水土保持通报, 1982, 2(6): 封2.
- [11] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2491-2498.
- [12] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [13] 杨文治. 关于黄土高原生态环境建设问题的探讨[J]. 水土保持通报, 1992, 12(1): 1-8.
- [14] 杨文治. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系[J]. 中国科学: D辑, 1998, 28(4): 357-365.
- [15] 杨文治,田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 1-6.
- [16] 王志强,刘宝元,路炳军. 黄土高原半干旱区土壤深层水分恢复研究[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944-1950.
- [17] 王晓凌,陈明灿,李凤民,等. 黄土高原土壤干层水分恢复与作物产量响应[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 1-4.
- [18] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 湖北: 华中工学院出版社, 1987.
- [19] 王学萌,穆月英,唐翼东. 灰色系统分析方法论初探[J]. 系统辩证学学报, 1995, 3(2): 85-89.
- [20] 夏军. EXCEL2000 在灰关联分析中的运用[J]. 中国卫生统计, 2004, 21(2): 117-118.
- [21] 郑郁,张霞,辛向文,等. 陕北地区不同纬度带人工刺槐林土壤水分特征研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 8-12.
- [22] 张瑞,曹华,王云强,等. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 52-57.
- [23] 周萍,刘国彬,文安邦,等. 黄土丘陵区不同林龄乔灌林地土壤水分及持水性能研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 188-193.

~~~~~

(上接第 333 页)

- [6] 龚琴,周劲松,刘东明,等. 乡土植物在广梧高速公路生态绿化中的应用[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 486-491.
- [7] 王育松,上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报: 自然科学版, 2010, 33(2): 312-316.
- [8] 何汉杏,何秀春. 湖南舜皇山常绿阔叶林种类组成数量综合特征[J]. 中南林学院学报, 2004, 23(2): 23-26.
- [9] 宋明华,陈玉福,董鸣. 鄂尔多斯高原风蚀沙化梁地克隆植物的分布及其与物种多样性的关系[J]. 植物生态学报, 2002, 26(4): 396-402.
- [10] 刘国彬. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程[J]. 水土保持研究, 1997, 4(4): 110-128.
- [11] 付明胜,高登宽,马小哲,等. 山坡地林草植被配置模式的研究[J]. 水土保持研究, 1998, 5(4): 93-97.
- [12] 赵金辉,王奎玲,刘庆华,等. 黄背草种子萌发特性研究[J]. 西北农业学报, 2009, 18(3): 245-248.
- [13] 李延安,贾黎明,杨丽. 胡枝子应用价值及丰产栽培技术研究进展[J]. 河北林果研究, 2004(6): 185-192.
- [14] 杨吉华,张永涛,王贵霞,等. 栎树、黄连木、黄栌水分生理生态特性的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 152-154.
- [15] 张慧琴. 山杏、酸枣生态学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.