

典型地面覆盖下黄土丘陵区干化土壤深层水分变化研究

张珂萌¹ 汪 星² 汪有科¹ 李 群¹ 吴九江¹ 张敬晓³
(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 宁夏大学农学院, 银川 750021;
3. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 为了探寻黄土高原丘陵区干化土壤修复措施,采用野外试验,布设 1 000 cm 深地下土柱,并在土柱表层进行 9 种不同覆盖处理(种植刺槐、苜蓿、柠条、枣树、早熟禾和覆盖石子、树枝、地布和白色地膜),以土柱表面完全裸露作为对照,用中子土壤水分仪测量 0~1 000 cm 不同深度土壤含水率,通过 2014—2018 年连续观测数据分析发现:在天然降水条件下刺槐、苜蓿、柠条和枣树处理试验年降水入渗深度表现为逐年减小,最终仅有 100 cm,并在试验第 2 年后土壤含水率一直处在负增长状态,其中刺槐、苜蓿、柠条在第 4 年时 1 000 cm 土柱水分均被消耗而降低,整个土柱干化程度加重,而枣树耗水较轻,300 cm 以下的深层土壤干化程度并未加重;早熟禾年降水入渗深度可达 300 cm,试验期间土壤水分消耗量小于当年降水量,0~300 cm 以内干化土壤水分得到缓解;石子、树枝、地布和白色地膜的 5 年最大修复深度可达 280、300、580、600 cm;石子和树枝覆盖的土壤水分缓解深度达 700 cm,白色地膜和地布覆盖土壤水分缓解深度可达 1 000 cm;裸露地表在天然降水下土壤水分缓解深度达 520 cm,土壤水分修复深度达 240 cm。

关键词: 干化土壤;覆盖措施;土壤干化指数;土壤水分修复

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0336-10 **OSID:** 

Water Variation of Deep Desiccation Soil in Loess Hilly Area
under Typical Mulching

ZHANG Kemeng¹ WANG Xing² WANG Youke¹ LI Qun¹ WU Jiujiang¹ ZHANG Jingxiao³
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China
3. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Soil desiccation is becoming more and more serious in hilly areas of the Loess Plateau, which has become an important factor restricting ecological restoration and reconstruction in the region. To find a solution to the ecological problem of dry soil remediation, a large-scale underground soil column with depth of 1 000 cm was planted in the field. Totally nine typical mulches were used on the surface of soil columns, separately for planting *Robinia pseudoacacia*, alfalfa, *Caragana korshinskii*, jujube and *Poa pratensis*, and covering stones, branches, ground cloth and white film. Taking bare soil column as control. Through the analysis of continuous observation data from 2014 to 2018, it was found that under natural precipitation conditions, infiltration depth of *Robinia pseudoacacia*, alfalfa, *Caragana korshinskii* and jujube was decreased to 100 cm, after the second year of the experiment, the soil moisture in column was in a negative growth state. In the fourth year (2017), the water content of 1 000 cm soil column was reduced by consumption, and the drying degree of the whole soil column was deepened, among them, that planted *Robinia pseudoacacia* was the most heavy, and that planted jujube was the lightest. Soil moisture in columns of jujube below 300 cm was not increased or consumed. The infiltration depth of *Robinia pseudoacacia* could reach 300 cm, the water consumption during the experiment was slightly less than that of the current year precipitation, which can alleviate the drying soil within 300 cm. The maximum restoration depths of covering stones, branches, ground cover and white film were 280 cm,

300 cm, 580 cm and 600 cm during the experiment, respectively. Until the fifth year, the mitigation depth of soil moisture covered with stones and branches reached 700 cm, and that covered with ground cover and white film reached 1 000 cm. Covering white film was the best of all. Under natural precipitation, the soil moisture mitigation depth of bare soil column reached 520 cm, and restoration depth reached 240 cm.

Key words: desiccation soil; mulching measures; soil desiccation index; soil moisture remediation

0 引言

我国黄土高原地区由于多年来大力进行人工植被生态建设,人工林(草)地普遍发生土壤干化现象,自东南到西北土壤干化现象逐渐严重,具有地域性特征,且随年限的增加土壤干化程度加剧^[1-2],如 7 龄紫花苜蓿草地和 23 龄柠条灌木林,耗水深度可达 15.5 m 和 22.4 m^[3-6]。有学者从土壤干层形成机制进行划分,把由气候干旱和降雨量较低引起的土壤干化称为常态干化;把由于人类在植被建设过程中没有遵循自然规律,在适合低耗水性植物生长的地区种植强耗水性植物,或采用高密度粗放经营和不合理的种植方式等人为因素导致的土壤干化,称为加速干化^[7-9]。黄土高原地区具有“低降水、高蒸发”^[1]的气候特征且土壤水分主要以活塞流入渗为主,即使有降水补给,入渗深度也大多维持在表层 0~3 m^[10],因此土壤形成常态化干层是不可避免的生态水文现象。也有研究表明采取轮作方式如苜蓿-早熟禾轮作^[11]可以提高当地土壤养分利用率,但对土壤水分恢复作用不大^[12]。而黄土高原人工造林活动则导致当地各类林地土壤加速干化,形成的土壤干层土壤含水率较低,位于降水渗透深度以下且形成之后具有相对持久和干层土壤湿度恢复困难等基本特征^[4,13-14],即使人工林死亡或者被砍伐,深层土壤水分仍然很难恢复,使得土壤长期失去水分调节功能,对土地的可持续利用造成不利影响^[15-17],已经成为制约黄土高原植树造林成效的严重生态隐患。无论是常态化还是加速化一旦形成土壤干层,都会阻碍陆地水分小循环,削弱水文大循环,并严重影响该地区植被建设和区域生态稳定和可持续发展^[18],且在长期干化土壤中,刺槐等人工林(草)也会逐渐衰退^[19]。另有学者通过黄土高原果园覆草,提高土壤含水率,

改善土壤理化性质,并促进该地区土壤的水、肥、气、热、生物因素形成平衡的综合生态系统^[20],说明采取恰当覆盖措施具有良好的蓄水效果。改善该地区土壤的持续干化现象直至完全恢复其“土壤水库”调节功能成为亟待解决的科学问题。本研究选择 9 种不同覆盖措施,在野外大规格土柱模拟试验条件下连续 5 年观测各个处理的剖面土壤含水率变化量,分析不同覆盖措施对深层干化土壤水分的影响,以期对黄土高原干旱和半干旱区人工林(草)地土壤水分修复提供数据和理论依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市米脂县境内的远志山试验站^[21](38°11'N,109°28'E),属于典型的黄土高原丘陵区,水土流失严重。以无定河为分水岭,地势总体东西高中间低。海拔最高 1 252 m,最低 843 m,平均海拔 1 049 m。干化土壤水分修复试验统一布设在同一台面上,坡度为 23°。前期为 23 年生苹果林,伐后成为进行不同覆盖措施的大规格野外土柱模拟试验样地。土壤理化性质见表 1,根据美国制分类标准,粒径 0.05~2 mm 为砂粒、0.002~0.05 mm 为粉粒、0~0.002 mm 为粘粒,试验区质地为粉壤土,且以黄土母质上发育的绵土为主,凋萎含水率为 23 年生苹果林伐后 1 000 cm 通体干化土层的平均含水率,同时也是本次试验的初始含水率。由于黄土丘陵区植被退化和水土流失严重,导致表层土壤侵蚀程度增强,以峁、沟、梁、川为主,沟壑密度 3~6 km/km²,土壤侵蚀模数 1.8 万 t/(km²·a),构成梁峁起伏、沟壑纵横、支离破碎的特殊地貌,且土壤颗粒粗化,蒸发作用剧烈;深层土壤粉粒含量高,土壤质地均匀,孔隙度小,在一定程度上加重了该地区土壤干化程度。

表 1 试验区土壤的颗粒组成和物理参数
Tab.1 Particle composition and physical parameters of soil in test area

颗粒组成(质量分数)/%			pH 值	田间持水率/%	饱和含水率/%	试验样地凋萎含水率/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)
粘粒	粉粒	砂粒					
(0~0.002 mm)	(0.002~0.05 mm)	(0.05~2.0 mm)					
9.12	60.06	30.82	8.6	23.4	39.8	7.6	1.3±0.05

研究区属于中温带半干旱性气候,昼夜温差大,温度变化范围为-25~38℃,多年平均气温8.4℃,无霜期160 d左右,年均日照时数2 761 h,日照百分率为62%,年均太阳总辐射量580.5 kJ/cm²,多年平均风速1.19 m/s,多年平均相对湿度60%,多年平均降水量451.6 mm。试验区设置小型气象站,试验期间自动气象站(RR-9100型)实时监测气象数据。图1为试验区2014—2019年月降水量情况。本试验期间降水量主要分布在6—9月^[21],占全年总降水量的67%(图1),而11月—翌年3月降水量占全年比例仅6%,降水年际不均匀^[7]与黄土丘陵区整体雨养气象^[22]规律一致。

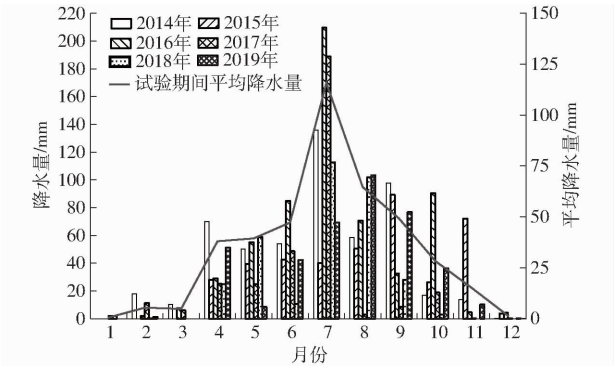


图1 试验区2014—2019年月降水量
Fig.1 Monthly precipitation of test area from 2014 to 2019

2 研究方法

2.1 试验布设

图2为不同覆盖方式大型野外土柱纵剖面示意图,其中土柱直径为80 cm,深1 000 cm,土柱内每隔30 cm 踩实一次进行分层回填原状土,尽量接近当地土壤容重,保持在(1.3±0.05) g/cm³,周围采用1 mm 厚塑料隔离,防止土柱内外水分交换及其他植物根系进入土柱影响试验结果,土柱地表采用高度20 cm 的混凝土井圈防止地表径流发生。试验土柱地面处理有种植刺槐、苜蓿、柠条、枣树和早熟禾以及覆盖石子、树枝、黑色地布和白色地膜9种处理(将早熟禾、苜蓿、柠条、枣树和刺槐视为植物覆盖处理;石子、树枝、地布和白色地膜视为非植物覆盖处理),并以土壤表面完全裸露作为对照,具体布设见图3。其中枣树和刺槐在土柱中均是单株种植,苜蓿和柠条种植密度分别为15 穴/m²和2 株/m²。每种处理重复3次,每个土柱中间位置安放1 000 cm 铝合金套管,利用CNC-503DR型中子土壤水分仪测定0~1 000 cm 深度内的不同土层深度土壤含水率,测定土壤含水率土层深度间隔为20 cm,在2014年8月完成试验初步布设,9月完成

仪器调试和数据初步校核,10月正式开始记录观测数据,观测期为2014年10月—2018年12月,每10 d观测一次,每3个月对 neutron 仪进行校准,另外考虑到中子仪对表层土壤含水率测定容易出现误差,且本研究重点是干化土壤深层水分的修复或消耗情况,所以截取40~1 000 cm 以上土壤水分变化情况。

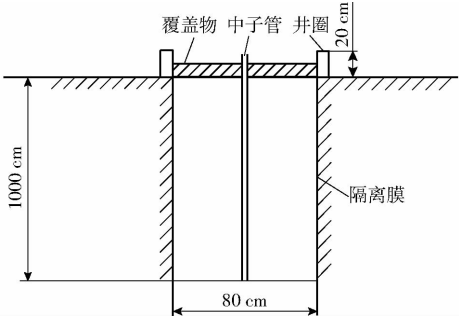


图2 不同覆盖处理试验布设纵剖面示意图
Fig.2 Longitudinal section diagram of test under different mulching treatments

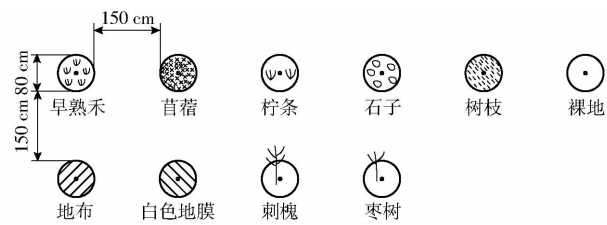


图3 不同覆盖处理试验布设俯视图
Fig.3 Overlooking schematic of test under different mulching treatments

2.2 指标计算

2.2.1 土壤储水量、土壤有效储水量和土壤水分消耗量

通过土壤体积含水率分层计算土壤储水量(SWS)和土壤有效储水量(AWS)^[7]。土壤储水量(SWS)计算公式为

$$SWS_h = 10\theta\Delta h \tag{1}$$

式中 SWS_h ——土层 h 的土壤储水量,mm
 θ ——土壤体积含水率,%
 Δh ——土层深度,cm

土壤有效水的上限是田间持水率,下限是本次试验样地的凋萎含水率(表1),本次试验中土壤有效储水量(AWS)指高于凋萎含水率的土壤储水量。计算公式为

$$AWS_h = (\theta - \theta_w)\Delta h \tag{2}$$

式中 AWS_h ——土层 h 的土壤有效储水量,mm
 θ_w ——土壤凋萎含水率,%

当测得的土壤含水率小于土壤凋萎含水率时有效储水量为0。

土壤水分消耗量表示经过2014—2018年不同植物覆盖措施连续生长土壤水分被过度消耗的逐年

积累情况。计算公式为

$$SM = P_r + \Delta W \tag{3}$$

式中 SM ——不同覆盖措施下土壤水分消耗量，mm

P_r ——降水量，mm

ΔW ——计算时段初与计算时段末土壤储水量之差，mm

2.2.2 土壤干化指数

为定量描述土壤干化程度^[17]，比较不同覆盖措施下土壤干化剖面分布特征和区域分布规律，采用土壤干化指数进行土壤干层分析^[14]，计算公式为

$$I_{SD} = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_{SS} - \theta_w} \times 100\% \tag{4}$$

式中 I_{SD} ——土壤干化指数，%

θ_{SS} ——土壤稳定含水率，%

其中稳定含水率指在黄土高原干旱气候、土壤质地、自然植被等因素作用下，通常旱地土壤能够长期维持的土壤含水率，其值为田间持水率的 50% ~ 75%^[23]，本文取田间持水率的 60%^[9-24]。土壤干化指数越小，表明土壤干化强度越高，可供植物吸收利用的土壤有效含水量越小，消除了降水量和土壤种类等因素的影响，可用于不同区域、土壤之间土壤干化强度的差异比较。李军等^[13-14]将土壤干化指数划分为 6 个级别，每 25% 分一层，但在本次试验中由于初期采用平均含水率为 7.6% 的极度干化状态，将划分细度改变，如表 2 所示。

表 2 土壤干化状态划分标准

Tab.2 Classification standard of soil desiccation state

干化程度	$I_{SD}/\%$
极度干化	<0
严重干化	[0,75)
轻度干化	[75,100)
无干化	≥100

2.3 数据处理

试验数据均为重复试验的平均值，其中土壤含水率均为体积含水率，数据整理利用 Excel 软件；试验布设图采用 AutoCAD 绘制；差异性分析采用 SPSS 17.0 软件，曲线和分布图采用 OriginPro 绘制。

3 结果与分析

3.1 不同覆盖处理下土壤含水率的差异性

表 3 为不同覆盖处理在试验期间（2014 年 10 月—2018 年 12 月）1 000 cm 土柱年平均含水率差异性。通过对土壤年平均含水率在不同土层深度分布的差异状况比较发现，试验初期（2014 年 10 月）刺槐、苜蓿、柠条、枣树、早熟禾、对照（裸地）、石子、树

表 3 不同覆盖处理下 2014—2018 年 1 000 cm 土柱
平均含水率

Tab.3 Average water content of 1 000 cm soil column
under different coverage measures from 2014

覆盖措施	to 2018					%
	2014 年 10—12 月	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	
刺槐	7.97 ^a	7.46 ^a	7.17 ^a	6.10 ^a	5.60 ^a	
苜蓿	8.29 ^a	8.10 ^{ab}	7.48 ^a	6.70 ^{ab}	6.65 ^b	
柠条	8.31 ^a	8.16 ^{ab}	7.55 ^a	6.87 ^{ab}	6.60 ^b	
枣树	8.36 ^a	8.184 ^{ab}	7.81 ^a	7.75 ^{bc}	7.55 ^{bc}	
早熟禾	8.42 ^a	8.55 ^{ab}	8.59 ^{ab}	8.63 ^{cd}	8.69 ^c	
对照	8.80 ^a	8.84 ^{abc}	9.46 ^{bc}	9.61 ^{de}	10.79 ^d	
石子	8.90 ^a	9.14 ^{bc}	9.95 ^{bc}	10.48 ^e	11.33 ^e	
树枝	9.00 ^a	9.22 ^{bc}	10.38 ^c	10.56 ^e	11.38 ^e	
地布	9.07 ^a	10.15 ^{cd}	11.80 ^d	13.26 ^f	13.77 ^f	
白色地膜	10.34 ^b	10.88 ^d	12.57 ^d	13.82 ^f	14.25 ^f	

注：同列数值后不同字母表示不同覆盖处理下土壤含水率差异显著（ $P \leq 0.01$ ）。

枝和地布处理处在同一水平，没有显著差异，白色地膜与其他覆盖处理存在显著差异；第 2 年（2015 年）植物覆盖处理之间没有显著差异，非植物覆盖处理之间除白色地膜外石子、树枝和地布之间均无显著差异，裸露地表作为对照仅与白色地膜之间存在显著差异，刺槐与各非植物覆盖处理都存在显著差异；第 3 年（2016 年）各植物覆盖处理之间仍然没有显著差异，非植物覆盖处理中石子和树枝没有显著差异，地布和白色地膜没有显著差异，分为 2 个水平差异，对照分别与植物覆盖处理中的早熟禾以及非植物覆盖处理中的石子和树枝没有显著差异，早熟禾和石子处理没有显著差异，其他植物覆盖处理与非植物覆盖处理之间均存在显著差异；第 4 年（2017 年）植物覆盖处理之间出现差异，如刺槐分别与枣树和早熟禾存在显著差异，且与对照和非植物覆盖处理之间均存在显著差异，非植物覆盖处理仍然为 2 个差异水平（石子和树枝、地布和白色地膜）未变；到第 5 年（2018 年）植物覆盖处理之间差异增大，刺槐分别与苜蓿、柠条、枣树以及早熟禾出现显著差异，苜蓿、柠条和枣树没有显著差异，枣树与早熟禾没有显著差异，对照与其他覆盖处理均存在显著差异，非植物覆盖处理依然是 2 个差异水平。说明白色地膜处理修复土壤水分效果最为明显，在试验初期就显现出与其他覆盖处理的显著差异，而随着时间的延续和降水的累积以及植物生理需水对土壤水分的消耗，各处理下的土壤含水率差异逐年显现并增大，各植物覆盖处理对土壤水分消耗能力的差别从初始的没有差异逐渐出现显著差异，在试验第 5 年表现为 3 个不同差异水平，而非植物覆盖处理由

于水分损失较小且保蓄水分能力较好,在第 2 年就形成 2 个水平差异。

3.2 不同覆盖处理下降水逐年入渗深度

试验初期土柱土壤含水率基本保持在 7.6% 的通体干化状态。图 4 为 2014—2018 年试验期间不同覆盖处理下降水逐年入渗深度垂直分布。通过表 3 将各处理第 5 年平均含水率的差异情况分为 3 个梯度(刺槐-苜蓿-柠条、早熟禾-枣树和非植物覆盖处理),裸露地表作为对照。图 4 显示刺槐、苜蓿、柠条、早熟禾和枣树等植物覆盖处理由于耗水较

多,入渗深度在试验期间均小于裸露地表,更小于各非植物覆盖处理;非植物覆盖处理由于其保墒蓄水作用致使年入渗深度逐年增加,白色地膜甚至在第 5 年后深达 1 000 cm 土层。具体年尺度入渗深度如下:在试验初期(2014 年)不同覆盖处理均有不同程度入渗;刺槐仅入渗到 100 cm 且 200 ~ 300 cm 内含水率因消耗而降低,早熟禾入渗达 200 cm,苜蓿、柠条和枣树入渗至 260 cm;裸露地表(对照)、石子、树枝和地布处理可入渗至 300 cm;白色地膜的入渗深度可达 400 cm 以下;刺槐、苜蓿和柠条在第 2 年后

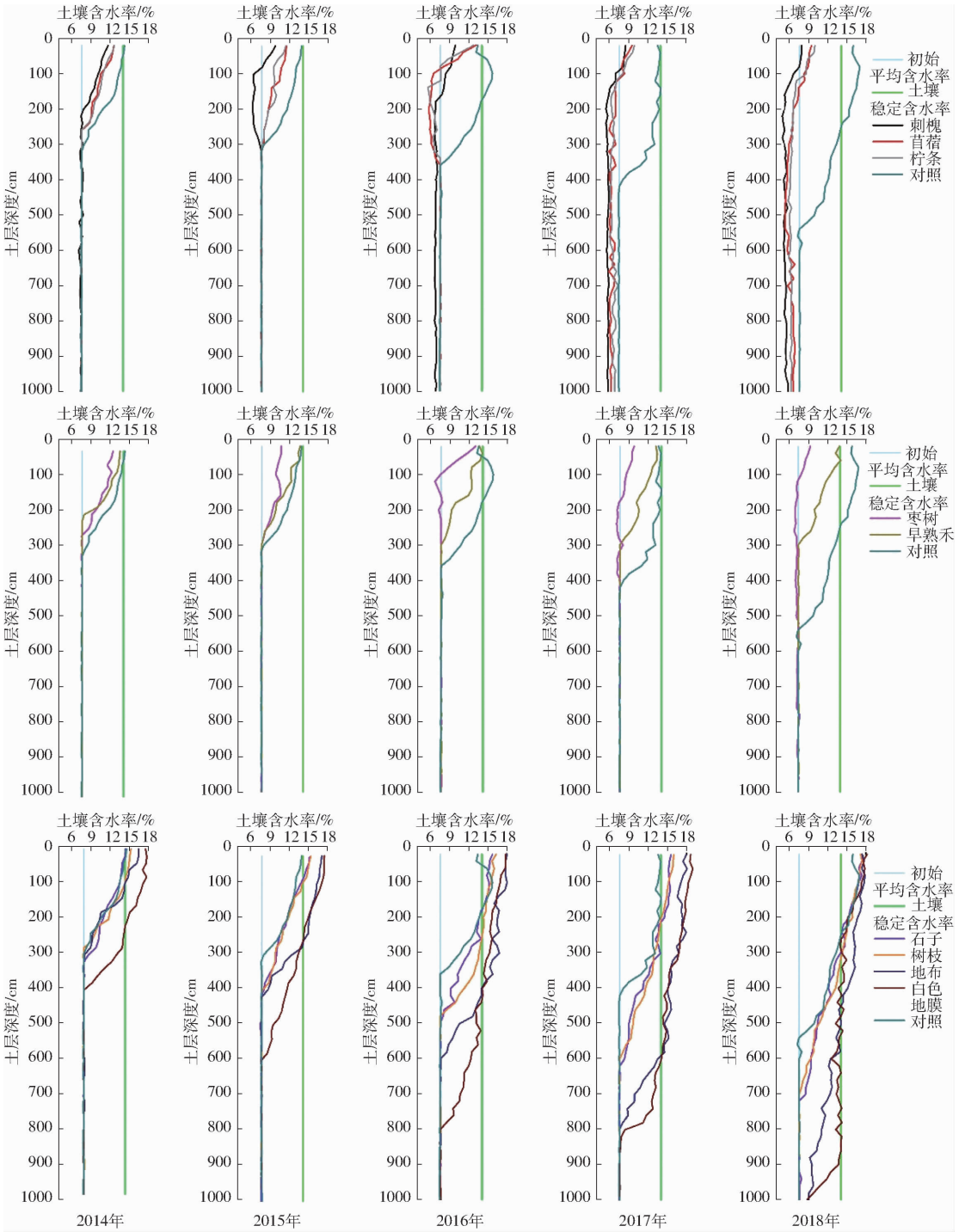


图 4 不同覆盖处理 2014—2018 年试验期间年降水入渗垂直深度变化曲线

Fig. 4 Variation curves of vertical depth of annual precipitation infiltration with different coverage measures from 2014 to 2018

入渗深度减小,第 2~3 年(2015—2016 年)保持在 100 cm 以内且 200~400 cm 内土层含水率均被消耗,第 4 年(2017 年)时年降水无法继续向下入渗,土柱内水分被消耗,土壤含水率逐渐降低,干化程度加重,到第 5 年(2018 年)土壤干化程度更甚,1 000 cm 土柱通体土层含水率下降;早熟禾和枣树的入渗深度在第 2 年达 300 cm,300 cm 以下土壤水分无法得到降水补充,枣树的入渗深度自第 3 年减小到 100 cm 以内,至第 5 年,早熟禾的逐年入渗深度由 200 cm 增至 300 cm,随降水量的减小出现一定的滞后现象,刺槐、苜蓿、柠条从第 2 年开始入渗深度不再增加;非植物覆盖处理下的年入渗深度呈现逐年加深,第 2 年石子、树枝和地布处理达 400 cm,白色地膜处理可达 600 cm;第 4 年石子、树枝入渗达 500 cm,

地布达 600 cm,白色地膜达 800 cm,到第 5 年石子和树枝覆盖年入渗深度达 700 cm,而地布和白色地膜已达 1 000 cm 土层;裸露地表(对照)的年入渗深度随降水也逐年增加,第 5 年时达 520 cm 左右。

综上所述,在前期干化土壤中,早熟禾年入渗深度超过逐年降水入渗深度,说明有累积入渗深度,使得原有干化土壤可以得到缓慢修复;刺槐、苜蓿和柠条均可以完全消耗每次降水,所以没有累积降水入渗发生,而且出现不同程度的土壤干化加重现象;非植物覆盖处理下则均表现出不同程度年入渗深度增加趋势,说明非植物覆盖对干化土壤的修复作用较好。

3.3 植物生长条件下的干化土壤水分消耗

表 4 为试验期间不同植物覆盖处理下土壤储水

表 4 不同植物覆盖处理下土壤水分指标						mm
Tab.4 Soil moisture index under different plant cover measures						
降水年	植物覆盖处理	年平均降水量	土壤储水量	ΔW	土壤有效储水量	土壤水分消耗量
2014 年 8—12 月	刺槐	187.6	766.74	6.74	6.74	180.36
	苜蓿		828.80	68.80	68.80	118.30
	柠条		831.01	71.01	71.01	116.09
	枣树		835.78	75.78	75.78	111.32
	早熟禾		842.35	82.35	82.35	104.76
	对照		880.35	120.35	120.35	66.75
2015 年	刺槐	391.6	745.60	-21.14	—	412.74
	苜蓿		815.62	-13.18	55.62	404.78
	柠条		809.96	-21.05	49.96	412.65
	枣树		818.04	-17.74	58.04	409.34
	早熟禾		855.02	12.68	95.02	378.93
	对照		883.82	3.47	123.82	388.13
2016 年	刺槐	590.8	717.37	-28.23	—	619.03
	苜蓿		748.07	-67.55	—	658.35
	柠条		754.79	-55.17	—	645.97
	枣树		781.26	-36.78	21.26	627.58
	早熟禾		858.79	3.77	98.79	587.03
	对照		946.13	62.31	186.13	528.49
2017 年	刺槐	337.6	609.92	-107.45	—	445.05
	苜蓿		669.98	-78.09	—	415.69
	柠条		687.41	-67.38	—	404.98
	枣树		774.75	-6.52	14.75	344.12
	早熟禾		863.22	4.43	103.22	333.17
	对照		961.36	15.24	201.36	322.36
2018 年	刺槐	342.4	559.74	-50.18	—	392.58
	苜蓿		656.04	-13.94	—	356.34
	柠条		659.98	-27.44	—	369.84
	枣树		754.88	-19.87	—	362.27
	早熟禾		869.14	5.92	109.14	336.48
	对照		1078.69	117.33	318.69	225.08
第 2~5 年土壤水分指标平均值	刺槐	415.6	658.15	-51.75	—	467.35
	苜蓿		722.43	-43.19	—	458.79
	柠条		728.04	-42.76	—	458.36
	枣树		782.23	-20.23	—	435.83
	早熟禾		861.54	6.70	101.54	408.90
	对照		967.50	49.59	207.50	366.02

注:“—”表示刺槐、苜蓿、柠条和枣树土柱在 2015 年以后相继不再有有效储水量。

量、有效储水量及土壤水分消耗量等指标,其中2014年8月底完成本次试验的布设,9月完成试验仪器调试和数据校核,当年10月开始土壤水分数据观测,故降水量从2014年8月起算,2014年降水量是当年8—12月的累计降水量,故较其他年份降水量少,本次试验初始储水量为760 mm。由表4可看出,本试验期间年降水不均匀且平均降水量小于该地区多年平均降水量(451.6 mm),各试验年的储水量由大到小依次为:对照、早熟禾、枣树、柠条、苜蓿、刺槐,而土壤水分消耗量则与之相反;裸露地表(对照)土壤储水量随年限延长和降水增大较植物覆盖处理明显,植物覆盖处理除早熟禾随年限略有增加外其他植物覆盖处理下的土壤储水量总体呈现降低趋势,其中刺槐、苜蓿和柠条甚至在试验的第3年(2016年)已无有效储水量,而枣树在第5年(2018年)时没有有效储水量,说明随刺槐、苜蓿和柠条耗水增大土壤干化程度在加重,而枣树耗水小于上述3种植物,其土壤干化加剧时间出现较晚,且与当年降水相关。总体来看植物在生长的第1年耗水量小于降水量,土壤储水有一定增值,第2年除早熟禾覆盖措施之外的其他植物生长需水增加,出现土壤干化加剧问题。各植物的耗水量还表现出随降水量的增加而增加的特点。植物覆盖处理下试验期间的土壤平均储水量由大到小依次为:早熟禾、枣树、柠条、苜蓿、刺槐,且均低于对照;而平均耗水量与储水量

相反,由小到大依次为:早熟禾、枣树、柠条、苜蓿、刺槐,均大于对照。早熟禾的平均耗水量小于试验期间的平均降水量,可以正常生长且不会加深土壤干化程度,而刺槐、苜蓿、柠条、枣树的平均耗水量大于试验期间平均降水量,虽然可以在极度干化的土壤中生长,但土壤水分长期被消耗,会加剧土壤干化程度和干化深度,以刺槐最甚,枣树最轻。考虑到土壤水环境的可持续发展,应以种植耗水量较少、生长速度适中^[7,25]的浅根草灌为主,而苜蓿和柠条等深根草灌以及刺槐等耗水较大且深根植物不适合在已经干化的土壤种植。

3.4 不同覆盖措施下土壤干化程度的逐年变化

图5为试验土柱剖面土壤干化程度逐年变化情况。由图可看出,各植物覆盖处理下土壤水分情况,其中刺槐、苜蓿、柠条和枣树由于试验期间降水无法补充,生长消耗土壤水分,使得土壤含水率小于7.6%,所以土壤干化有所加重,只有早熟禾土壤水分在300 cm以内土层有所缓解,但无法达到深层;非植物覆盖处理显示了较好的土壤水分恢复效果,随着试验年限延长各处理下的土壤干化程度较初始状态均有所缓解(土壤含水率较初始含水率有所增加的土层深度视为缓解深度),甚至完全被修复(将无干燥状态视为修复状态)。试验第1年(2014年)土壤干层修复程度由小到大依次为石子和裸露地表(对照)、树枝和地布、白色地膜,距地表深度依次为

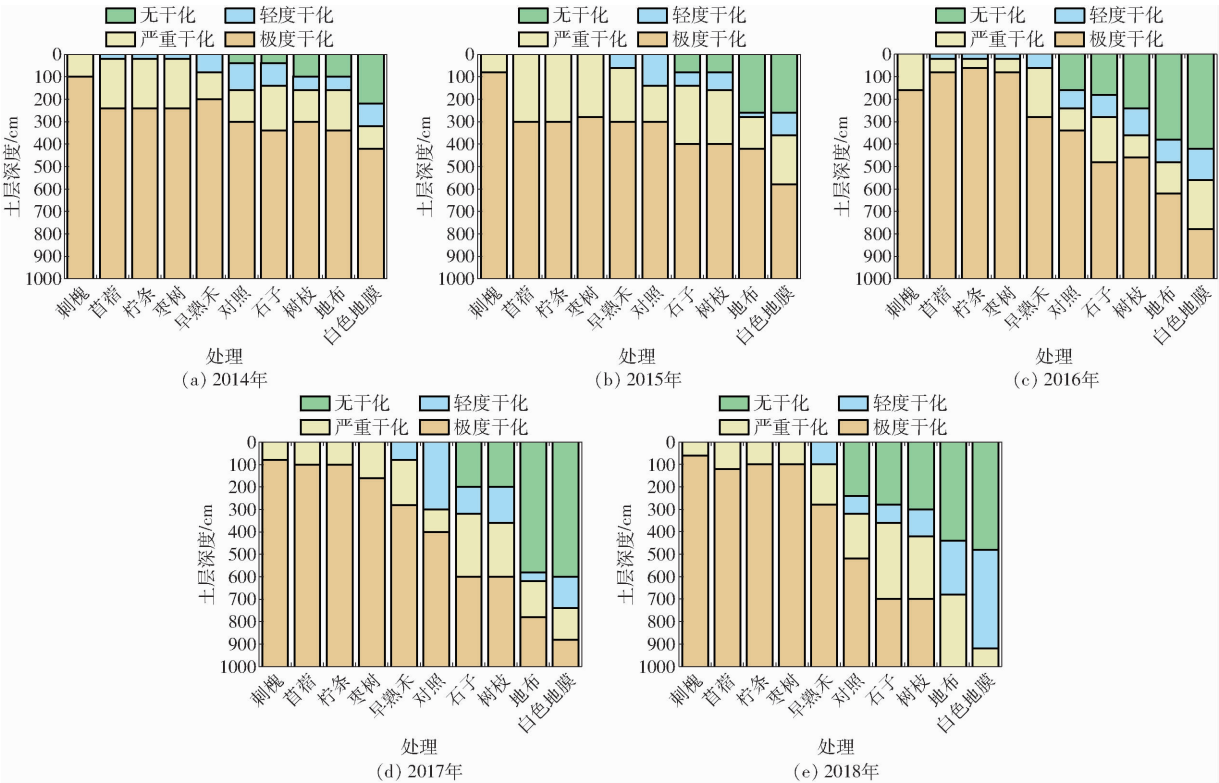


图5 不同覆盖处理下土壤干化程度随土层深度变化的垂直条形分布图

Fig.5 Vertical bar graphs of soil drying state of different cover measures with soil depth

40、100、220 cm;缓解程度由小到大依次为裸露地表和树枝、地布、石子、白色地膜,距地表深度依次为 300、340、380、420 cm;第 2 年(2015 年)的干层修复程度由小到大依次为裸露地表、石子和树枝、地布和白色地膜,距地表深度依次为 0、80、260 cm;裸露地表 0~300 cm 以内土壤极度干化状态可以得到缓解,石子和树枝的缓解深度达 400 cm、地布达 420 cm、白色地膜可达 580 cm 以内;第 3 年(2016 年)的土壤干层修复程度由小到大依次则为裸露地表、石子、树枝、地布、白色地膜,距地表修复深度依次为 160、180、240、380、420 cm;裸露地表的缓解深度在 340 cm 以内,石子在 480 cm 以内、树枝在 460 cm 以内、地布在 620 cm 以内、白色地膜在 780 cm 以内;第 4 年(2017 年)的土壤干层修复程度由小到大依次为裸露地表、石子和树枝、地布、白色地膜,距地表的修复深度依次为 0、200、580、600 cm;裸露地表的缓解深度在 400 cm 以内,石子和树枝在 600 cm 以内、地布在 780 cm 以内、白色地膜在 880 cm 以内;第 5 年(2018 年)的土壤干层修复程度由小到大依次为裸露地表、石子、树枝、地布、白色地膜,距地表修复深度依次为 240、280、300、440、480 cm,地布和白色地膜处理的 0~1 000 cm 深土层已经消除极度干燥化状态,而裸露地表(对照)的缓解深度则达 520 cm 以上,石子和树枝的缓解深度也在 700 cm 以内。综上所述裸露地表土壤水分修复效果受当年降水影响较大且有一定滞后现象,而缓解效果是持续累积过程。无论是修复还是缓解效果最好的都是覆盖白色地膜处理,其次是地布、树枝和石子。各非植物覆盖处理均优于裸露地表,而植物覆盖处理除早熟禾可以使 300 cm 以内干化土层得以缓解,其他植物覆盖措施均在不同程度消耗土壤水分,无法缓解已干化土壤水分状态。随降水累积入渗各非植物覆盖处理下的极度、轻度和严重干化状态逐渐减轻并下移,同时受降水的影响出现一定的波动,而作为对照组的裸露地表土柱则随逐年降水的变化呈现滞后,但深层土壤水分仍在缓慢增加。无论是白色地膜、地布、树枝、石子都能起到较好的含蓄土壤水分效果及恢复土壤水库的作用,其中白色地膜处理效果最佳。

4 讨论

本次试验以 23 年生苹果林伐后台地作为试验区样地,模拟苹果林地干化土壤建立大规格土柱进行不同地面覆盖试验,得出历时 5 年在天然降水条件下不同覆盖措施对土壤水分恢复和消耗的基本规律。由于本试验为土壤模拟试验,尽管土柱规格较大,且逐层以原状土压实填充,尽量还原当地原状土

真实状况,但仍不可避免会存在一定差异,且试验土柱涉及的植物密度大于实际生产应用密度,这可能会加大土壤耗水量^[22],与实际存在一定差异。不同植物的凋萎系数不同,本次试验的凋萎含水率为 23 年雨养山地苹果林地伐后深层土壤的平均土壤含水率(7.6%),刺槐^[20]、苜蓿^[11]和柠条的凋萎含水率均小于该值,但是作为研究深层干化土壤恢复与干化土壤中植物耗水量相比,这种方法还是具有较强的合理性,对今后的研究具有参考意义。研究发现无论是刺槐(乔木)、柠条(灌木)还是苜蓿(牧草)均会造成黄土丘陵沟壑地区土壤干化程度加剧,且在当地干旱的气候条件下降水无法有效地下渗补给,土壤水分供需关系长期失衡,这与杨磊等^[25]和李艳梅等^[26]的研究结果一致。由于以往有关不同植物耗水的定位研究报道较少,本研究得出的植物处理耗水量尤其是不同植物耗水差异性具有参考意义,但深层干化土壤在植被覆盖处理下的土壤水分恢复性试验研究还需要进一步将适宜的植物与非植物覆盖措施相结合,充分利用当地降水条件^[27-28]既满足浅根耗水小植被的生理需水又能缓解已干化土壤水分负增长状态,为当地植被重建的良性循环提供依据,其中非植物覆盖处理下土壤水分的恢复情况较好,更接近实际。

通过上述分析发现黄土高原丘陵区不宜选取刺槐、苜蓿和柠条等植物作为干化土壤生态绿化措施,宜选择耗水较小的浅根植被,并因地制宜地综合配套石子、树枝、地布和白色地膜的非植物覆盖措施。作为深层干化土壤恢复以及植物覆盖条件下的土壤水分消耗情况研究,本研究的时间较短,但试验涉及多个处理连续观测 5 年的类似动态研究目前还少有报道,因此该阶段性试验结果对于半干旱黄土丘陵区目前存在的规模化林地土壤干化治理以及可持续发展具有较好的参考价值。

5 结论

- (1)干化土壤条件下,1~5 年生刺槐处理土壤的年降水入渗深度均只有 100 cm 左右;苜蓿、柠条和枣树 2 年生年入渗深度达 260 cm,3 年生入渗深度减小至 100 cm;早熟禾和裸露地表(对照)入渗规律接近,降水入渗深度呈逐年缓慢增加趋势;各非植物覆盖处理的入渗深度均逐年增加,其中白色地膜效果最佳,第 5 年时入渗深度达 1 000 cm。
- (2)干化土壤中的刺槐、苜蓿和柠条在生长第 2 年开始水分消耗量增大,年均土壤水分消耗量分别为 467.35、458.79、458.36 mm,土壤水分消耗量大于降水量,土柱内含水率呈负增长状态;枣树处理土

壤含水率也处于负增长状态但不严重,年均耗水量约为 435.83 mm;早熟禾和裸露地表(对照)土壤含水率处于增长状态,年均土壤水分消耗量分别为 408.90、366.02 mm,均小于试验期间平均降水量,对干化土壤有缓解作用。

(3)非植物覆盖处理对干化土壤均具有明显修复作用,其干化土壤水分恢复深度受当年降水影响

较大,试验期间石子、树枝、地布和白色地膜处理的最大恢复深度分别为 280、300、580、600 cm;干化土壤缓解深度则呈逐年积累趋势,在试验第 5 年(2018 年)石子和树枝的缓解深度可达 700 cm,而地布和白色地膜的缓解深度可达 1 000 cm 土层,说明采取非植物覆盖处理可以很好地储蓄水分,促进降水入渗从而恢复土壤水库功能。

参 考 文 献

[1] 董爽,李同川,郭成久,等. 陕北黄土区流域分水线土壤干层分布[J]. 水科学进展,2017,28(6):811-819.
DONG Shuang, LI Tongchuan, GUO Chengjiu, et al. Distribution of dried soil layers on the dividing waterline in the gully areas of the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6):811-819. (in Chinese)

[2] 陈宝群,赵景波,李艳花. 黄土高原土壤干层形成原因分析[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(3):85-89.
CHEN Baoqun, ZHAO Jingbo, LI Yanhua. Research on causes of dried soil layer in the Loess Plateau[J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(3):85-89. (in Chinese)

[3] 王志强,刘宝元,刘刚,等. 黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2009,52(6):835-842.
WANG Zhiqiang, LIU Baoyuan, LIU Gang, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J]. Sci. China Ser. D (Earth Sci.), 2009, 52(6):835-842. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 王志强,刘宝元,徐春达,等. 连续干旱条件下黄土高原几种人工林存活能力分析[J]. 水土保持学报,2002,16(4):25-29.
WANG Zhiqiang, LIU Baoyuan, XU Chunda, et al. Survival capability analysis of four kinds of articial forests in Loess Plateau [J]. Journal of Soil Water Consevation, 2002, 16(4):25-29. (in Chinese)

[6] 王志强,刘宝元,路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. 生态学报,2003,23(9):1944-1950.
WANG Zhiqiang, LIU Baoyuan, LU Bingjun. A study on water restoration of dry soil layers in the semi-arid area of Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(9):1944-1950. (in Chinese)

[7] 赵景波,周旗,侯甬坚. 黄土高原土壤干层对生态环境建设的影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2003,31(4):93-98.
ZHAO Jingbo, ZHOU Qi, HOU Yongjian. Effect of dried layer of soil ecological environmental reconstruction[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2003, 31(4):93-98. (in Chinese)

[8] ZHAO Jingbo, DU Juan, CHEN Baoqun. Dried earth layers of artificial forestland in the Loess Plateau of Shaanxi Provinse[J]. Journal of Geographical Sciences,2007,17(2):114-126.

[9] 赵景波,李瑜琴. 陕西黄土高原土壤干层对植树造林的影响[J]. 中国沙漠,2005,25(3):370-373.
ZHAO Jingbo, LI Yuqin. Effects of soil drying layer on afforestation in the Loess Plateau of Shaanxi[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(3):370-373. (in Chinese)

[10] 赵景波,孙桂贞,岳应利,等. 关中平原人工林地的干层及其成因[J]. 地理研究,2007,26(4):763-772.
ZHAO Jingbo, SUN Guizhen, YUE Yingli. Research of dried earth layer and its formation in the artificial forest land of Guanzhong plain[J]. Geographical Research, 2007, 26(4):763-772. (in Chinese)

[11] 阿芸,师尚礼,张晓燕,等. 5 龄紫花苜蓿轮作草地早熟禾的土壤养分变化特征[J]. 草业科学,2019,36(11):2863-2870.
A Yun, SHI Shangli, ZHANG Xiaoyan, et al. Variation characteristics of nutrient contents in a 5-year *Medicago sativa* and *Poa pratensis* rotation[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(11):2863-2870. (in Chinese)

[12] 王晗生. 旱区经营人工植被对土壤干化过程的调控[J]. 自然资源学报,2011,26(4):562-577.
WANG Hansheng. Controls over soil desiccation for management of artificial vegetation in dryland areas of Northern China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(4):562-577. (in Chinese)

[13] 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,2008,28(4):1429-1445.
LI Jun, CHEN Bing, LI Xiaofang, et al. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4):1429-1455. (in Chinese)

[14] 李军,陈兵,李小芳,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, CHEN Bing, LI Xiaofang, 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)

[15] 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.
LI Wei, HAO Mingde, WANG Xuechun. Depletion and restoration of soil water in different cultivating systems in Gully Region of Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3):99-105. (in Chinese)

[16] 邵明安,王全九,黄明斌,等. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[17] 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)

[18] 王丹丹,吴普特,赵西宁. 黄土高原退耕还林(草)效益评价研究进展[J]. 西北林学院学报,2010,25(3):223–228.
WANG Dandan, WU Pute, ZHAO Xining. Benefit evaluation of conversion of cropland of forest project[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3):223–228. (in Chinese)

[19] 韦景树,李宗善,冯晓珂,等. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J]. 应用生态学报,2018,29(7):2433–2444.
WEI Jingshu, LI Zongshan, FENG Xiaoyu, et al. Ecological and physiological mechanisms of growth decline of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7):2433–2444. (in Chinese)

[20] 殷淑燕,黄春长. 黄土高原苹果基地土壤干燥化原因及其对策[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(2):76–80.
YIN Shuyan, HUANG Chunchang. Soil dryization of the apple base in the Loess Plateau and its countermeasures[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(2):76–80. (in Chinese)

[21] 田璐,张敬晓,高建恩,等. 深层干化土壤水分恢复试验研究[J]. 农业机械学报,2019,50(4):255–262.
TIAN Lu, ZHANG Jingxiao, GAO Jian'en, et al. Experiment on dry soil water restoration in deep layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4):255–262. (in Chinese)

[22] 张岩,张清春,刘宝元. 降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2):268–272.
ZHANG Yan, ZHANG Qingchun, LIU Baoyuan. Study on vegetative coverage and height variation in Northern Loess Plateau [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2):268–272. (in Chinese)

[23] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社,2000:107–111.

[24] 胡伟,陈豫. 黄土高原半干旱区旱作农田土壤干燥化研究[J]. 河南农业科学,2013,42(4):75–79.
HU Wei, CHEN Yu. Research on soil desiccation on dry farmland in semi-arid area of Loess Plateau[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(4):75–79. (in Chinese)

[25] 杨磊,卫伟,陈利顶,等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干燥化效应[J]. 地理研究,2012,31(1):71–81.
YANG Lei, WEI Wei, CHEN Liding, et al. Soil desiccation in deep soil layers under different vegetation types in the semi-arid loess hilly region[J]. Geographical Research, 2012, 31(1):71–81. (in Chinese)

[26] 李艳梅,王克勤. 人工植被的土壤水分状况与水分动态研究[J]. 贵州林业科技,2003,31(3):1–7.
LI Yanmei, WANG Keqin. Research advance of soil water conditions and dynamics of planted forest[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2003, 31(3):1–7. (in Chinese)

[27] 高学睿,闫程晟,王玉宝,等. 黄土高原典型区雨水资源化潜力模拟与评价[J]. 农业机械学报,2020,51(1):275–283.
GAO Xuerui, YAN Chengsheng, WANG Yubao, et al. Simulation and evaluation of rainwater harvesting potential in typical areas of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(1):275–283. (in Chinese)

[28] 杨洁,金继明,邵进,等. 黄土高原中部典型流域植被恢复对径流的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(5):258–266,257.
YANG Jie, JIN Jiming, SHAO Jin, et al. Vegetation restoration and its impact on runoff in typical areas of middle Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(5):258–266,257. (in Chinese)

(上接第 315 页)

[20] WANG X, FENG D, LAI X, et al. Collisions for Hash functions MD4, MD5, HAVAL–128 and RIPEMD[J]. Cryptology Eprint Archive Report, 2004, 2004: 199.

[21] 史锦山,李茹. 物联网下的区块链访问控制综述[J]. 软件学报,2019,30(6):1632–1648.
SHI Jinshan, LI Ru. Survey of blockchain access control in internet of things[J]. Journal of Software, 2019,30(6):1632–1648. (in Chinese)

[22] 李燕,马海英,王占君. 区块链关键技术的研究进展[J]. 计算机工程与应用,2019,55(20):13–23.
LI Yan, MA Haiying, WANG Zhanjun. Research progress on key technologies of blockchain[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(20):13–23. (in Chinese)

[23] 邵奇峰,金澈清,张召,等. 区块链技术:架构及进展[J]. 计算机学报,2018,41(5):969–988.
SHAO Qifeng, JIN Cheqing, ZHANG Zhao, et al. Blockchain: architecture and research progress [J]. Chinese Journal of Computers,2018,41(5):969–988. (in Chinese)

[24] 孙俊. 基于区块链的农产品追溯系统研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2019.
SUN Jun. Research on retrospective system of agricultural products based on blockchain [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology,2019. (in Chinese)

[25] 葛艳,黄朝良,陈明,等. 基于区块链的 HACCP 质量溯源模型与系统实现[J]. 农业机械学报,2021,52(6):369–375.
GE Yan, HUANG Chaoliang, CHEN Ming, et al. HACCP quality traceability model and system implementation based on blockchain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):369–375. (in Chinese)

[26] 于合龙,陈邦越,徐大明,等. 基于区块链的水稻供应链溯源信息保护模型研究[J]. 农业机械学报,2020,51(8):328–335.
YU Helong, CHEN Bangyue, XU Daming, et al. Modeling of rice supply chain traceability information protection based on block chain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):328–335. (in Chinese)