## DOI: 10.20103/j.stxb.202412042978

马兵,滕远,汪星,吕雯,吴贤忠,汪治同.土壤干化背景下种植苜蓿地土壤水分对降雨的响应.生态学报,2025,45(12): - . Ma B, Teng Y, Wang X, Lü W, Wu X Z, Wang Z T.Response of soil moisture to rainfall in alfalfa field under severe soil drying condition. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): - .

# 土壤干化背景下种植苜蓿地土壤水分对降雨的响应

马 兵<sup>1,2</sup>,滕 远<sup>1,2</sup>,汪 星<sup>1,2,\*</sup>,吕 雯<sup>3</sup>,吴贤忠<sup>4</sup>,汪治同<sup>5</sup>

1 宁夏大学林业与草业学院,银川 750021

2 林木资源高效生产全国重点实验室,银川 750021

3 宁夏大学生态环境学院,银川 750021

4 兰州城市学院城市环境学院,兰州 730070

5 阿拉善左旗宗别立镇综合保障和技术推广中心,阿拉善左旗 750300

摘要:土壤干燥化是制约半干旱黄土丘陵区生态环境可持续发展的瓶颈问题,自然降雨是当地土壤水分补充的唯一途径。为了 探究黄土丘陵区深厚土壤干燥化背景下再种植深根系、多年生植物后的土壤水分对降雨的敏感性,在宁南王洼水土保持试验站 进行了野外模拟干燥化土壤再种植苜蓿试验,采用 CS650 型土壤水分探头对 2022—2024 年 10—600 cm 土层水分进行连续监 测,分析结果表明:1)黄土丘陵区入渗到土壤中的水量与降雨量之比随降雨量增加而提高,小雨对 10 cm 以下土壤水分存储基 本为无效,中雨以上的降雨对 10 cm 土层以下水分产生有效增持作用,中雨、大雨、暴雨入渗到土壤中的水量与降雨量之比由 36%可提升到 61%;2)在深层土壤干化背景下,再种植苜蓿第 1 年土壤水分以储蓄为主,储蓄主要集中在 10—340 cm 土层;苜 蓿种植第 2 年和第 3 年土壤水分以消耗为主,分别占降雨量的 13.1%、50.5%、10—340 cm 土层储水消耗量分别为 45.4 mm、 185.3 mm;3)苜蓿种植第 1 年消耗水分约当年降雨的 31.1%,种植第 2、3 年耗水量超过当年降雨量,种植苜蓿第 1 年和第 2 年 产量及水分利用效率与对照无显著差异(P>0.05),第 3 年产量较对照降低,差异显著(P<0.05),但水分利用效率差异性不显著 (P>0.05)。该研究可为黄土丘陵区人工植被可持续更替及合理利用水资源提供科学依据。

关键词:土壤干燥化;苜蓿;土壤水分;典型降雨;黄土丘陵区

# Response of soil moisture to rainfall in alfalfa field under severe soil drying condition

MA Bing<sup>1,2</sup>, TENG Yuan<sup>1,2</sup>, WANG Xing<sup>1,2,\*</sup>, LÜ Wen<sup>3</sup>, WU Xianzhong<sup>4</sup>, WANG Zhitong<sup>5</sup>

1 School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Yinchuan 750021, China

3 School of Ecology and Environment Ningxia University, Yinchuan 750021, China

4 College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China

5 Alashan Left Banner Zongbieli Town Comprehensive Security and Technology Promotion Center, Alxa Left Banner 750300, China

Abstract: Soil desiccation poses a critical bottleneck constraining the sustainable development of the ecological environment in semi-arid loess hilly regions, where natural precipitation serves as the sole replenishment source for soil moisture. Desiccation of deep soil layers induced by artificial forest and grassland vegetation on the Loess Plateau has shown a persistent intensification trend. Particularly since the large-scale implementation of the Grain for Green Project in 1999, the severity of regional soil water deficits has been significantly exacerbated. Compounded by the region's thick loess deposits

收稿日期:2024-12-04; 网络出版日期:2025-00-00

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2022AAC05019);国家自然科学基金项目(32060301);国家自然科学基金项目(32260422)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xingwang1984@ foxmail.com

ranging from tens to over a hundred meters, the deep groundwater cannot replenish shallow soil through capillary rise. ultimately leading to the formation of permanent dry soil layers. Current research on soil desiccation remediation remains inadequate, predominantly focusing on surface-level interventions such as various mulching measures, bare land treatments, and cultivation of annual shallow-rooted crops. However, there are limited reports addressing the cultivation of perennial deep-rooted vegetation systems under such deep soil desiccation conditions. To explore the sensitivity of soil moisture to rainfall after replanting deep-rooted and perennial plants under the background of deep soil desiccation in loess hills, in this study, the CS650 soil moisture probewas used to continuously monitor the soil moisture from 0 to 600 cm soil in 2022-2024, and the analysis results showed that: 1) The ratio of water infiltration into the soil to the soil in the loess hilly area increased with rainfall, light rain was basically ineffective for soil moisture storage below 10 cm, and rainfall above moderate rain had a significant effect on the water storage below 10 cm. The ratio of water infiltrated into the soil by moderate heavy, and torrential rain can be increased from 36% to 61%. 2) Under the background of deep soil drying, the soil moisture in the first year of replanting alfalfa was mainly deposited, with savings mainly concentrated in the 0-340 cm soil layer. In the second and third years of alfalfa planting, soil moisture consumption was the main one, accounting for 13.1% and 50.5% of the rainfall, respectively, and the water storage consumption of the 0-340 cm soil layer was 45.4 mm and 185.3 mm, respectively. 3) The water consumption in the first year of alfalfa planting was about 31.1% of the rainfall of the current year, the water consumption in the second and third years of planting exceeded the rainfall of the current year, and there was no significant difference in the yield and water use efficiency of alfalfa in the first and second years of alfalfa planting compared with the control (P>0.05), and the yield in the third year was significantly lower than that of the control (P < 0.05), but the difference in water use efficiency was not significant (P > 0.05). This study can provide a scientific basis for the sustainable replacement of artificial vegetation and the rational utilization of water resources in the loess hilly area.

Key Words: soil drying; alfalfa; soil moisture; typical rainfall; loess hilly region

黄土高原地区人工林地出现土壤干化现象最早发现于 20 世纪 80 年代引起以李玉山为代表的诸多生态 学、土壤学、林学专家关注,随后许多学者就其发生的机理、分布、危害及防治对策进行了大量研究<sup>[1-5]</sup>。1999 年国家在黄土高原地区开展了大规模退耕还林还草工程,显著提高了植被覆盖率,水土保持及其综合生态效 益得到显著提升<sup>[6-7]</sup>,同时不合理的人工植物种选择和过大栽植密植,造成深层土壤水分过度消耗,导致深层 土壤水分亏缺<sup>[8-9]</sup>,形成黄土高原严重的深厚土壤干层<sup>[10]</sup>。土壤干层的形成阻碍了土壤上下层水分的交换, 抑制了大气、植被、土壤间的水分循环,在这种情况下已有人工林衰败后土壤水分能否满足后续植被可持续更 替需求一直是学术界关注的焦点。根据黄土高原生态建设的人工植被出现的早衰及综合评价研究,目前学术 界较为一致的观点是"黄土高原人工植被建造存在过度绿化"问题<sup>[11]</sup>。由于地形的限制,该地区无法实现有 效的灌溉系统建设,导致天然降雨成为土壤水分补充的唯一途径。因此,如何高效利用自然降水,对于缓解乃 至解决林地土壤干燥问题至关重要。陈洪松等<sup>[12]</sup>在室内通过模拟降雨实验,探讨了起始土壤湿度如何影响 干化黄土斜坡的雨水渗透过程。张敬晓等<sup>[13]</sup>在野外构建裸地土柱,来探究自然降雨条件下干化土壤的水分 恢复状况。众多研究者针对黄土的渗透机理及其特性展开了广泛而深入的研究工作<sup>[14-15]</sup>,取得了丰富的学 术成果。但这些研究主要基于室内人工模拟降雨、室外裸地土柱进行的,相比于栽植物的土柱具有一定的局 限性,不能反映天然降雨在干化土壤中的入渗机理。

穆兴民等人<sup>[16]</sup>在宁南试验认为,在年降水量 450 mm 和土壤水分严重亏缺条件下,5 m 层内土壤含水量 恢复到当地自然含水量水平大约需要 15 年。也有学者<sup>[17]</sup>研究认为,土壤干层一旦形成,其土壤水分就会长 期处于稳定的低水平状态,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<sup>[18]</sup>。对于黄土高 原人工植被后续更替方面,有专家对多年生沙打旺和苜蓿衰败后进行了种植农作物试验研究,程积民等<sup>[19]</sup>研 究表明沙打旺草地退化后,要恢复到种植之前的含水量,需要 6—7 年时间。据刘沛松等<sup>[20]</sup>记载,生长 10 年 后的苜蓿地翻耕后轮作马铃薯,轮作 1、4、10 年和 18 年时 0—600 cm 层土壤湿度分别为 10.1%、5.6%、6.9%和 9.2%,草粮轮作有效缓解了苜蓿干层干燥化加剧的状态,并能有效恢复干层水分。刘忠民等<sup>[21]</sup>认为,随着苜 蓿种植年限的加长,土壤上层水分可得到恢复,苜蓿翻耕后可轮作 1 年生浅根系的草谷子作物。多年来前人 对干化土壤恢复效应的研究中,对浅根系、耗水少的 1 年生作物研究较多。基本结论为在黄土高原地区土壤 干化背景下再种植浅根系农作物可以正常生长,甚至草粮轮作的种植模式,能够有效恢复前期土壤干层。但 人工林衰败后对后续深根系、多年生植被的更替以及造林树种的选择也是一种潜在的威胁<sup>[21–24]</sup>,目前人工林 造成林地土壤水分严重干化情况下进行多年生、深根系植物的再种植研究极少,仅有的文献<sup>[25–26]</sup>报道还无法 证明黄土高原人工林存在的深厚土层干化对后续多年生、深根系植物再种植的影响,如土壤水分状况、自然降 雨入渗机理、土壤干燥化程度、耗水量和水分利用效率等。

苜蓿属于多年生,深根系植物,也是黄土高原退耕还林(草)广泛种植优良牧草,在区域生态环境建设发 挥重要作用。因此,本研究以28龄柠条林地土壤干燥化为背景,研究柠条伐后再植苜蓿后的土壤水分特征, 揭示自然降雨条件下苜蓿地土壤水分与降雨的关系及其水分利用效率等,回答土壤干燥化背景下种植多年 生,深根系植物的可行性,以期为黄土丘陵区人工植被可持续发展及合理利用水资源提供科学依据。

# 1 材料与方法

# 1.1 试验区概况

研究区位于宁夏固原市彭阳县王洼小流域(106.65°E,36.10°N),海拔 1882 m(图 1),年平均降水量 480 mm(主要集中在 6—9月),年平均蒸发量 1400 mm。土壤容重均值为 1.33 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量为 23%,凋萎含 水量均值为 7.12%。地貌属于典型的黄土高原梁峁丘陵地,土壤类型以黄绵土为主。自然植被类型由灌木草 原向典型草原过渡,原生植物多以低矮禾草为主,并伴有少量灌木,代表性植被有长芒草(Stipa bungeana Trin.)、阿尔泰狗娃花(Heteropappus altaicus (Willd.) Novopokr.)等,人工植被主要有紫花苜蓿(Medicago sativa L.), 疗条锦鸡儿(Caragana korshinskii Kom.)、山桃(Amygdalus davidiana (Carr.) Franch)等。其中苜蓿以产量



图 1 研究区示意图 Fig.1 Schematic diagram of the study area

3

高、草质优良成为彭阳县助农植物,非常适用于家畜饲养,彭阳县苜蓿总种植面积稳定在8万 hm<sup>2</sup>。

1.2 降雨分布

4

2022—2024 年年降雨量分别为 385 mm、345.6 mm、 366.7 mm。根据中国气象局关于降雨类型的划分标准, 将日降雨量小于 10 mm 划分为小雨,日降雨量 10—25 mm 划分为中雨,日降雨量 25—50 mm 划分为大雨,日 降雨量 50—100 mm 划分为暴雨<sup>[27]</sup>。由图 2 可知,小雨 降雨次数为 212 次,降雨次数最多,占总降雨次数的 89.1%,降雨量为 477.6 mm,占总降雨量的 44.4%;中雨 降雨次数为 20 次,占总降雨次数的 8.4%,降雨量为 324.9 mm,占总降雨量的 30.1%;大雨降雨次数为 5 次, 占总降雨次数的 2.1%,降雨量为 201 mm,占总降雨量 的 18.7%;暴雨降雨次数为 1 次,占总降雨次数的0.4%, 降雨量为 72.2 mm,占总降雨量的 6.7%。从降雨类型 看,研究区的降雨主要以小雨为主。



1.3 试验设计与指标测定

1.3.1 模拟土壤干层土柱建造

试验区选在梁峁顶部(坡度约9°)的水平阶地,坡向为南坡的28龄柠条地。柠条伐后采用开挖回填的方 式构建种植苜蓿的土柱,土柱长宽规格为300 cm×300 cm,样地水分探头布设深度规格600 cm,土柱内每隔 30 cm踩实一次进行分层回填原状土,尽量保持土壤容重(1.3±0.5)g/cm<sup>3</sup>与原状土一致,另一方面控制土壤含 水量在8%左右,土柱周围包裹一层厚约1 mm的塑料防水布与外界土壤隔离,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,试验土柱砌的水泥高出地表20 cm,无径流产生。土柱于2021年8月建成, 2021年8月—2022年4月为自然沉降期,以消除回填所产生的误差,2022年4月中旬采用穴播的方式在试验 土柱地面种植甘农3号紫花苜蓿,苜蓿种植密度为15穴/m<sup>2</sup>,共3次重复。

1.3.2 土壤水分测定

在土柱中心埋设 CS650 型(*Campbell Scientific*,美国)土壤水分探头测定 0—600 cm 深度内的不同土层深 度土壤体积含水率,精度为±3%。以相应深度土层烘干法测定结果对 CS650 型土壤水分自动监测系统进行 数据可靠性分析。图 3 为土壤水分探头布置的示意图,土壤水分探头在柱体 0—300 cm 范围每间隔 10 cm 布 设一个水分探头,300—360 cm 每间隔 20 cm 布设一个水分探头,360—600 cm 每间隔 40 cm 布设一个水分探 头。在土柱外安装 CR1000 型数据采集器,与柱体内的水分探头相连,以定时记录各探头数据,观测步长为 1 次/h。对照农地苜蓿选取在试验地约 120 m 处且坡度、坡向相近的水平地梯田,对照农地苜蓿的土壤水分 测定采用烘干法测定,取样间隔为 40 cm,共 3 个重复,采样深度为 0—600 cm,每个取样深度间隔为 20 cm。 1.3.3 苜蓿产量测定

以附近雨养农地苜蓿为对照,对照苜蓿与试验苜蓿每年刈割3次,留茬高度3 cm,每次收割面积为6 m<sup>2</sup>, 收割后称鲜草重。取部分鲜草样,在 60℃烘4 h,之后在 105℃烘 10 h,冷却后称干草重量,计算干物质率,推 算地上生物量,重复3次。

1.3.4 根系测定

采用根钻法对 600 cm 深土柱上的苜蓿进行 3 次根系重复取样,3 次重复发现在该深度有根系后,再追加 3 次重复,直到 6 次重复在该深度以下再无根系,判为苜蓿根系分布的最大深度。根钻直径为 10 cm,钻头长度 10 cm,每次取样深度间距为 10 cm,取样时间在每年的 10 月 20 号左右。

1.3.5 气象因子测定

在试验区样地西侧约 200 m 处设有 BLJW-4 小型综合气象观测站(北京博伦经纬公司,中国),用于测定



图 3 土柱及土壤水分探头布置

Fig.3 Soil column and soil moisture probe arrangement

A 是原位测试苜蓿土壤水分监测柱状示意图,周围有 6 m 深的防水土工布隔离外围水分与植物根系干扰;B 是土壤水分探头布设剖面示意图,传感器在 0—300 cm 深度间距为 10 cm,300—360 cm 间距为 20 cm,360—600 cm 间距为 40 cm;C 是水分探头局部放大示意图,为了减小水分探头之间互相干扰,每个水分探头按照左右摆动安装

气象因子,监测的指标有气温(℃),降雨量(mm)等。

1.4 指标判定与计算

1.4.1 降雨类型划分及降雨后时间的选择

所有雨型挑选了降雨量与降雨前初始土壤含水量不同的两场(暴雨一场)降雨进行了分析,不同的雨型 在降雨结束后选择5个时间段来比较降雨后水分的入渗及消耗规律,分别是降雨起始、降雨结束、土壤水分迁 移结束(除暴雨)、表层10 cm恢复降雨起始水平、表层20 cm恢复降雨起始水平。

# 1.4.2 降雨入渗深度

对比不同时间段水分探头观测土壤水分得到增加所对应的深度即为降雨入渗深度[14]。

1.4.3 不同深度土层土壤体积含水量计算

不同深度土层日平均土壤体积含水量采用公式(1)进行计算:

$$DSWC_{i} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (SWC_{i})$$
(1)

式中,DSWC<sub>i</sub>土层深度 *i* 的日平均土壤体积含水量(%);SWC<sub>i</sub>为土层深度 *i* 在 1 日内第 t 次测定的土壤体积含水量(%);*t* 为 1 日内测定的次数。

不同土层深度月平均土壤体积含水量采用公式(2)进行计算:

$$MSWC_i = \frac{1}{m} \sum_{T=1}^{m} (DSWC_{iT})$$
(2)

式中, MSWC<sub>i</sub>为土层深度 i 的月平均土壤体积含水量(%); DSWC<sub>ir</sub>为土层深度 i 在当月第 T 天的日平均土壤体积含水量(%); m 为当月的天数。

1.4.4 土层储水量与入渗量的计算

土层储水量采用公式(3)进行计算:

$$W = 10 \times \omega \times h$$

式中,W为土层储水量(mm);ω为土壤体积含水量(%);h为土层深度(cm)。

入渗量:自然降雨情况下,入渗与蒸发同时进行,交互影响,无法直接通过测量来计量渗入土柱内的水量。 但水分入渗以后不断的转化为土壤水,因此可以通过降雨后土柱内土层储水量变化状况来间接反映降雨入渗

(3)

量,试验土柱砌的水泥高出地表 20 cm,无径流产生。

入渗量采用公式(4)进行计算:

$$\Delta W = W_{\rm nff} - W_{\rm nff} \tag{4}$$

式中, $\Delta W$ 为降雨影响深度内土层储水变化量(mm), $W_{\text{雨h}}$ 为降雨结束时土层储水量(mm), $W_{\text{nh}}$ 为降雨开始土层储水量(mm)。

1.4.5 水分利用效率的计算

苜蓿水分利用效率定义为苜蓿干草产量 Y(kg/hm<sup>2</sup>)与苜蓿耗水量 ET(mm)的比值。

$$WUE = \frac{Y}{ET}$$
(5)

$$ET(mm) = P - \Delta S \tag{6}$$

式中,WUE为苜蓿的水分利用效率,Y为苜蓿地上干草产量(kg/hm<sup>2</sup>),ET为苜蓿生长季内的耗水耗水量,P 为降雨量,ΔS为苜蓿剖面10—600 cm 土壤储水之差。

1.5 数据处理

试验中的水分数据为土壤的体积含水量(%),所有数据均采用 Excel 2016 软件进行数据统计分析与存储,用 IBM SPSS Statistics 26 进行统计分析,利用 Origin 23b 绘图。

# 2 结果与分析

2.1 典型降雨(小雨,中雨,大雨及暴雨)下苜蓿地的土壤水分入渗

2.1.1 小雨下的土壤水分入渗规律

2022年选取两场典型小雨作图 4,由图 4 可知第一场典型小雨发生在 2022 年 8 月 21 日 22:00,历时 8.5 h,降雨量 7.8 mm,降雨强度为 0.9 mm/h。随着雨滴的轻抚,表层 10 cm 土壤含水量从 20.6%提升至 22.3%,增加 1.7%,入渗深度达到 20 cm。雨停后,自然界的力量开始显现:蒸腾作用使得表层 10 cm 土壤含水量在 15 h 后降至 21.0%,同时,水分继续向下运移,10—30 cm 层平均土壤含水量由降雨起始的 20.5%微增至 20.7%,入渗深度最终达到 30 cm。经过 30 h,20 cm 土层土壤含水量恢复至降雨前的水平,显示出土壤对水分的短暂而有效的吸收与释放过程。第二场小雨则发生在同年 10 月 5 日 23:00,历时 11 h,降雨量 8.2 mm,降雨强度略低,为 0.7 mm/h。这次降雨导致表层 10 cm 土壤含水量从 20%提升至 21.9%,增加 1.9%,且 10—20 cm 层平



图 4 小雨土壤水分入渗规律

Fig.4 Soil water infiltration pattern in light rainfall

7

均土壤含水量也有所上升,从19.8%增至20.8%,入渗深度同样为20 cm。雨停后,土壤水分的变化趋势与前 一次相似,但恢复速度略有不同,表明土壤对水分的吸纳与释放受到多种因素的影响,如土壤类型、植被覆盖 及气象条件等。

两场小雨入渗量分别为 1.7 mm 与 1.9 mm(利用公式 4 计算),即使是看似微不足道的小雨,也能显著影响土壤的含水量(表1),其入渗量分别占降雨量的 21%与 23%,这一比例不容忽视。其次,水分入渗深度可达 30 cm,显示出土壤具有一定的蓄水能力,这对于维持生态平衡和植物生长至关重要。然而,值得注意的是,这些入渗的水分在 30—35 h 内会因蒸发而几乎全部损失,较雨前土壤含水量无显著性差异,表明土壤水分的增加是短暂且易变的。

表1 小雨最大影响深度内平均土壤含水量差异比较

Table 1 Comparison of the difference of average soil moisture content in the maximum impact depth of light rain 平均土壤含水量 Average soil volumetric water content/% 降水量 降雨结束 雨后 35 h 隆雨起始 雨后 15 h 雨后 20 h 雨后 27 h 雨后 30 h 雨后 16 h Precipitation/mm Rainfall onset Rainfall ends 15h After rain 27h After rain 20h After rain 30h After rain 16h After rain 35h After rain  $20.5 \pm 0.23 \text{bc}$ 21.0±0.12a 7.8 20.7±0.20ab 20.5±0.21bc 20.3±0.15c 8.2 19.7±0.21bc 20.3±0.24a  $20.1{\pm}0.20{\rm ab}$ 19.8±0.20bc  $19.7{\pm}0.17{\rm c}$ 

同行不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著, 一: 空值

# 2.1.2 中雨下的土壤水分入渗规律

2022年的试验期间,共记录7场中雨事件,本文选取8月18日与10月2日两场中雨作为研究对象(图5)。8月18日的降雨自09:15分开始,持续7h,总降雨量为13.7mm,平均降雨强度为2.0mm/h。此场降雨后,10—40 cm 土层的土壤含水量从17.1%提升至18.4%,增幅达1.3%,且观察到水分入渗深度达到40 cm。随后几天内,土壤水分继续下渗并有所蒸发,至雨后84h,20 cm 土层含水量回落至接近雨前水平(17.0%)。10月2日的降雨自22:30分开始,历时10h,降雨总量为18.4mm,降雨强度略低于前者,为1.8mm/h。这场降雨导致10—50 cm 土层含水量由18.2%上升至19.7%,入渗深度至少达到50 cm。雨后74h和95h的观测显示,表层及20 cm 深处的土壤含水量分别恢复至雨前状态,表明水分在这段时间内经历了显著的再分布与消耗。

两场中雨入渗量分别为 4.9 mm 与 7.4 mm,分别占降雨量的 36% 与 40%。值得注意的是,尽管两次降雨



图 5 中雨土壤水分入渗规律

Fig.5 Soil water infiltration pattern in moderate rainfall

表 2 中雨最大影响深度内半均土壤含水量差异	比较
------------------------	----

#### Table 2 Comparison of the difference of average soil moisture content in the depth of the maximum impact of moderate rainfall

隆水量	平均土壤含水量 Average soil volumetric water content/%								
Precipitation/mm	降雨起始	降雨结束	雨后 38 h	雨后 61 h	雨后 84 h	雨后 43 h	雨后 74 h	雨后 95 h	
· · I ···· ·	Rainfall onset	Rainfall ends	38h After rain	61h After rain	84h After rain	43h After rain	74h After rain	95h After rain	
13.7	$17.11 \pm 0.25 \mathrm{b}$	18.35±0.09a	18.08±0.24a	$17.32{\pm}0.18\mathrm{b}$	$17.03{\pm}0.18\mathrm{b}$	—	—	—	
18.4	$18.16{\pm}0.07{\rm d}$	19.66±0.17a	—	_	—	$19.42{\pm}0.09{\rm b}$	18.61±0.11c	$18.20{\pm}0.12\mathrm{d}$	

# 2.1.3 大雨下的土壤水分入渗规律

2022年试验期间的两场大雨,为我们深入理解降雨对土壤含水量和入渗深度的影响提供了依据。2022年9月18号20:00开始的降雨,历时17h,总降雨量为28.2 mm,降雨强度为1.7 mm/h,降雨结束时,10—60 cm土层的平均土壤含水量由18.8%增至21.1%,提升了2.3%,而60 cm以下的土层含水量未见变化,显示出此次降雨的入渗深度为60 cm。雨后48h,湿润锋面进一步下移至80 cm 深处,但此时表层10 cm的土壤含水量已恢复到降雨前的水平,表明蒸发作用显著。到了雨后第90 h,20 cm 土层的含水量也基本恢复,整场降雨的增湿效果在地表附近逐渐消散。相较于前者,2022年7月11号03:00开始的降雨虽然历时较短(仅10 h),但降雨量更大,达到39 mm,降雨强度为3.9 mm/h。这场降雨导致10—70 cm 土层平均土壤含水量从16.8%提升至19.7%,增幅为2.9%,入渗深度达到70 cm。值得注意的是,雨后62 h,湿润锋面继续下探至90 cm,且直至雨后第117 h,20 cm 土层的含水量仍显著高于降雨前,显示出较强的保水能力。这表明,在一定条件下,较高强度的降雨能更有效地补充深层土壤水分,且其影响更为持久。

两场大雨入渗到土壤中的入渗量分别为 13.6 mm 与 19.9 mm,分别占降雨量的 48%和 51%。对比两次降 雨事件,尽管两者的降雨量和强度有所不同,但都能显著提高土壤含水量,尤其是对于较深的土层,这对于植 被生长及地下水补给具有积极意义。其次,降雨结束后,土壤含水量的变化趋势受蒸发作用影响显著,尤其是 在表层土壤中,但是表层含水量恢复至雨前水平时,入渗在土壤中的水分较雨前相比仍有显著性差异(表 3)。



图 6 大雨土壤水分入渗规律 Fig.6 Soil water infiltration pattern during heavy rain

表3 大雨最大影响深度内亚均土壤今水量美导比较

		10 1			口:小主王:1 10-					
 Table.3 Comparison of the difference of average soil moisture content in the depth of the maximum impact of heavy rainfall										
降水量	 平均土壤含水量 Average soil volumetric water content/%									
Precipitation/mm	降雨起始	降雨结束	雨后 48 h	雨后 60 h	雨后 90 h	雨后 62 h	雨后 97 h	雨后 117 h		
 r r	Rainfall onset	Rainfall ends	48h After rain	60h After rain	90h After rain	62h After rain	97h After rain	117h After rain		
8.2	18.62±0.21d	20.37±0.13a	20.23±0.16a	$19.43{\pm}0.04{\rm b}$	$18.88{\pm}0.07{\rm c}$	—	—	—		
30	16 73±0 21d	$18.04\pm0.22$	_	_	_	$18.60\pm0.25$	18.06±0.25b	$17.57\pm0.23c$		

# 2.1.4 暴雨下的土壤水分入渗规律

在试验期间发生过一场大暴雨,以此作图 7。由图 7可知,2022年7月15号05:00开始降雨,历时14h, 降雨72.2 mm,降雨强度5.2 mm/h。降雨结束时,10— 90 cm 土层平均土壤含水量由降雨起始的16.2%增至 21.1%,提升4.9%,90 cm 土层以下土壤含水量没有变 化,入渗深度90 cm;雨后70h,10—120 cm 土层平均土 壤含水量由15.9%提升到18.2%,入渗深度120 cm。雨 后124h,90 cm 土层以上土壤含水量持续蒸发损失,表 层10 cm 土壤含水量恢复至降雨起始时的18.0%,还有 部分水分继续向下运移,10—130 cm 土层土壤含水量 由降雨起始时15.8%增加到17.5%,入渗深度130 cm。 雨后164h,20 cm 土层土壤含水量恢复至降雨起时的 16.8%,10—140 cm 土层平均土壤含水量由15.7%提升 到17.1%,入渗深度140 cm。



图 7 暴雨土壤水分入渗规律



暴雨为 72.2 mm 的降雨时,其入渗到土壤中的入渗 量为 44.4 mm,占降雨量的 61%,入渗深度可达 140 cm。在降雨结束 124—164 h,入渗到土壤中水分无显著差 异(表 4),表明暴雨对干化土壤有一定的修复作用。

|--|

Table 4 Comparison of the difference of average soil moisture content in the depth of maximum impact of heavy rainfall

降水量	平均土壤含水量 Average soil volumetric water content/%								
Precipitation/mm	降雨起始 Rainfall onset	降雨结束 Rainfall ends	雨后 70 h 70h After rain	雨后 124 h 124h After rain	雨后 164 h 164h After rain				
72.2	15.67±0.20c	18.84±0.21a	$17.66 \pm 0.33 \mathrm{b}$	17.22±0.19b	$17.08 \pm 0.25 \mathrm{b}$				

# 2.2 苜蓿地的土壤水分动态变化特征

本研究分析 2022 至 2024 年间苜蓿地的土壤水分动态变化特征,旨在通过科学方法揭示其干层变化与根系生长之间的关系,为苜蓿种植与土壤水分管理提供理论依据。采用王力等人<sup>[28]</sup>提出的方法,将土壤稳定湿度值作为土壤干层的上限阈值,以此界定干层范围,进而探讨不同年份苜蓿种植对土壤水分的影响。并持续跟踪了 2022 至 2024 年期间苜蓿地 10—600 cm 土壤剖面的含水量变化,结合根系分布数据,综合分析土壤水分动态。2022 年 10—340 cm 土层土壤含水量逐月递增,从 8.9%增至 17.4%,显示出良好的水分恢复趋势。 月累计入渗深度由 4 月的 160 cm 逐渐加深至 10 月的 340 cm,表明苜蓿根系有效促进了水分向深层土壤的渗透,使得 300 cm 以上土层的干层得到显著恢复。2023 年随着苜蓿生长,10—220 cm 土层土壤含水量开始消耗,月平均值略有下降,但整体仍保持在较高水平,介于 15.9%—17.2%之间。耗水深度逐月增加,从 4 月的90 cm 扩大到 10 月的 220 cm,干层厚度维持稳定,未进一步加深。2024 年 10—340 cm 土层土壤含水量继续

45 卷

减少,月平均值降至10.2%—16.0%,耗水深度进一步加大,特别是在生长旺季(4月至10月),达到340 cm,导 致干层厚度再次扩展至600 cm,接近观测极限。值得注意的是,340 cm以下土层的土壤含水量在三年监测期 内保持相对稳定,波动不大,表明该层次受苜蓿耗水影响较小,可能形成了相对稳定的湿润层或受地下水位 调节。

由图 8 还可知,苜蓿根系分布深度逐年加深,从 2022 年的 100 cm 增至 2024 年的 330 cm,这与年耗水深 度的增加趋势相吻合,表明苜蓿根系的延伸是驱动深层土壤水分变化的关键因素。根系的深扎有助于吸收更 深层次的水分,同时也加剧了深层土壤的干燥程度,尤其是在连续多年种植后。

本研究通过对苜蓿地土壤水分动态的长期监测,揭示了苜蓿种植对土壤水分的显著影响及其与根系生长的密切关系。随着苜蓿种植年限的增加,根系不断深入,带动水分向更深土层迁移,虽有利于植物本身的水分 供应,但也导致了更深层次土壤干燥化的加剧。





2.3 苜蓿地储水收支变化与产量变化

2022—2024年10—600 cm 土层储水收支变化如图 9。由图 9 可知,2022年10—600 cm 土层月储水变化为正,表现为先增加后减小趋势;月储水变化范围在 0.0—72.5 mm 之间,月均变化量为 34.6 mm。2023年月

10

储水变化为负,呈现较好稳定性;月储水变化范围在-2.3—-8.4 mm之间,月均变化量-5.7 mm。2024年月储 水变化为负,表现为先增加后减小趋势;月储水变化范围在-0.5 —-47.8 mm之间,月均变化量为-23.1mm。 截至 2024年10月底,10—600 cm 层总恢复量为45.4 mm。



Fig.9 Changes in water storage and expenditure in the 0-600 cm soil layer

表 5 显示,2022—2024 年苜蓿试验组与对照组水分利用特征及产量呈现阶段性变化规律。种植第 1 年, 两组耗水量(试验组 120.0 mm vs 对照组 126.0 mm)、干草产量(465.0 vs 503.0 kg/hm<sup>-2</sup>)及水分利用效率(3.8 vs 4.0 kg mm<sup>-1</sup> hm<sup>-2</sup>)差异均未达显著水平(P>0.05)。至第 2 年,两组耗水量(391.1 vs 413.3 mm)、产量 (4253.7 vs 4578.7 kg/hm<sup>2</sup>)及水分利用效率(10.8 vs 11.1 kg mm<sup>-1</sup> hm<sup>-2</sup>)仍保持统计同质性(P>0.05)。第 3 年试验组耗水量(552.0 mm)显著低于对照组(670.4 mm)(P<0.05),产量(9499.0 kg/hm<sup>2</sup>)亦显著低于对照组 (12089.0 kg/hm<sup>2</sup>),但水分利用效率(17.2 vs 18.0 kg mm<sup>-1</sup> hm<sup>-2</sup>)仍无统计学差异(P>0.05)。

Table 5	Comparison of w	ater use efficier	icy, yield and	water consu	mption of alfalfa	a in experime	ntal and cont	rol groups at di	fferent ages
		2022 年			2023 年			2024 年	
项目 Item	产量 Yield	耗水量 Water consumption	水分利 用效率 Water use efficiency	产量 Yield	耗水量 Water consumption	水分利 用效率 Water use efficiency	产量 Yield	耗水量 Water consumption	水分利 用效率 Water use efficiency
试验组 Test team	465.0a	120.0α	3.8A	4253.7a	391.1α	10.8A	9499.0a	552.0α	17.2A
对照组 Control group	503.0a	126.0α	4.0A	4578.7a	413.3α	11.1A	12089.0b	670.4β	18.0A

長5 不同年限试验组与对照组苜蓿的水分利用效率、产量与耗水量的比?	较
-----------------------------------	---

表格中产量的单位为 kg/hm<sup>2</sup>、耗水量单位为 mm、水分利用效率的单位为 kg mm<sup>-1</sup> hm<sup>-2</sup>;同一年限数据后不同小写字母、不同希腊字母、不同大写字母分别表示试验组与对照组处理之间的产量、耗水量、水分利用效率差异显著(P<0.05)

# 3 讨论

本研究在野外布设了深达 600 cm 深的大型土柱,并在自然降雨条件下进行长期定位监测,能够更真实地 揭示温度、辐射、风速等自然因子对降雨入渗规律的影响。尽管野外土柱试验能够模拟土壤干化后再种植高 耗水植被下的土壤水分状况,但仍无法完全等同于真实的状态。如土壤质地、容重、剖面含水量分布等方面均 与实际土壤之间存在一定差异。考虑到降雨后上部土层含水量的变化较下部土层更为显著,本研究在布置土 壤水分传感器时,遵循上层密集、下层稀疏的原则。即使本试验较前人在野外土柱试验探头布设精度更密,能 够更详细了解降雨在土壤中的入渗迁移过程,但仍有不足。如本试验探头布设间距最小为 10 cm 一个,无法 对每场降雨进行更精细的入渗深度监测,但是不影响我们反映不同雨型在干化土壤中的这种迁移入渗规律, 探头埋设精度需要我们后续进一步完善。

本课题组根据中国气象局关于降雨类型的划分标准,将日降雨量小于10 mm 划分为小雨,日降雨量10—25 mm 划分为中雨,日降雨量25—50 mm 划分为大雨,日降雨量50—100 mm 划分为暴雨,降雨事件后挑选5个时间段来分析逐次降雨的入渗特征,较前人进一步细化了雨水在土壤中入渗迁移过程。统计(2022—2024)年降雨状况,3年内小雨发生212次、中雨20次、大雨5次、暴雨1次,因此3年内降雨影响深度约212次大致可达30 cm、20次达50—60 cm、5次达80—90 cm、1次达140 cm。通过降雨特征参数与入渗量、入渗深度进行相关分析发现(图10),入渗量、入渗深度均与降雨量、降雨强度呈极显著正相关(P<0.01),即降雨量、降雨强度越大,雨水在土壤中入渗深度、入渗量越大,这与鲁睿等<sup>[29]</sup>研究结论一致。而入渗量、入渗深度与初始土壤含水量相关性不显著(P>0.05)。有研究表明<sup>[30]</sup>,暴雨对土壤水分补给有限,而本研究中得出降雨对土壤水分的补给效果依次为暴雨>大雨>中雨>小雨,主要原因有两点,其一,可能是4种雨型事件对土壤补给效果越好。张敬晓等<sup>[31]</sup>研究表明,黄土丘陵区独立大、中、小雨对干化土壤影响深度分别达140 cm、80 cm、40 cm,这与我们的试验结论相比有差异,分析主要原因可能是因为我们土柱上有苜蓿栽植,入渗到土壤中的水分一部分会被消耗掉,影响最终迁移深度。



图 10 土壤水分的响应指标与降雨特征参数和初始土壤含水量之间的相关关系 Fig.10 Correlation between response indicators of soil moisture with rainfall characterization parameters and initial soil moisture content

本研究还发现,小雨、中雨入渗到土壤中的水分在短时间内受地表蒸发及植被蒸腾被耗损掉,不能对深层 土壤形成有效补给,而大雨、暴雨对深层土壤水分的补给效果显著,尤其是入渗深度超过 90 cm,水分主要以 下渗为主,被蒸发损耗水分显著减少,这与李萍等<sup>[27]</sup>研究结论有所差异,可能是因为与试验土柱模拟干化土 壤有关,这个问题有待后续研究。降雨入渗深度关系到区域水分循环,入渗深度涉及到降雨特征、土壤特征、 植被类型、环境气温等多因素,因此黄土区降雨对土壤水分的影响深度需要更多更长时间的试验研究来证明。 紫花苜蓿属于多年生、深根系、强耗水作物,随着苜蓿生长年限的增加,土壤干燥化程度加剧。鉴于此,诸

45 卷

多学者[32-33]采用草粮轮作措施来恢复其土壤干层水分,取得较好成果。王志强等[34]在宁南试验认为,苜蓿 翻耕3年和12年后200 cm以上土层可以满足1年生农作物的生长需求。王学春等<sup>[35]</sup>研究表明,苜蓿翻耕 后,再种植粮食作物期间农田土壤水分得到恢复,且作物产量也显著提高。本研究进行深根系人工植被(柠 条)伐后再种植同类高耗水作物来探讨其土壤水分状况,同类研究还未见报道。需要说明,本试验土柱布设 完成至苜蓿种植前,经过几个月自然降雨,土柱剖面10—150 cm 层土壤含水量已由8%提升约2个百分点,土 壤水分基本已满足苜蓿发芽需求。刘沛松等<sup>[36]</sup>研究表明,苜蓿地降雨下渗和扩撒的临界深度为300 cm,而本 研究得出结论为 340 cm,这与刘沛松的研究结论不同,可能是上层未能完全利用的水分或非生长周期短期降 水继续扩散有关<sup>[37]</sup>或与土壤质地有关。本研究还发现,生长3年的苜蓿根系下扎深度达330 cm,这与有关结 论基本一致<sup>[38]</sup>。苜蓿种植第1年,地上生物量较少,仅消耗掉部分降雨,还有部分雨水保留在土壤中,促使 300 cm 层以上土壤水分大于土壤稳定湿度值(13.8%),土壤干层得到短暂恢复;第2年后开始出现耗水量大 于降雨量现象,降雨与土壤的双向供给才能满足苜蓿生长需求;第3年耗水量进一步加大,土壤干层再次出 现。本研究结果表明,苜蓿种植1-2年产量、水分利用效率较对照无显著差异(P>0.05),第3年产量开始出 现显著差异(P<0.05),但水分利用效率仍无差异(P>0.05)。随苜蓿生长年限的延长,产量较对照仍会持续下 降,但水分利用效率是否显著降低,还需后面研究。苜蓿属于多年生植物,在黄土高原有很多地方存在 8—10 龄的苜蓿地,对于前期人工林(柠条)生长造成严重土壤干化情况下再种植苜蓿情况如何?目前还缺乏研究, 本研究仅仅也是初步试验总结,更深入的研究仍需要持续观测与分析。

# 4 结论

(1)黄土丘陵区深层土壤严重干化情况下,降雨入渗比重随降雨量增加而提升,小降雨入渗到土壤中的水分仅占其降雨量的 21%—23%,中雨入渗到土壤中的水分约占其降雨量的 36%—40%,大雨入渗到土壤中的水分约占其降雨量的 61%。

(2)在深层土壤干化背景下,再种植苜蓿第一年土壤水分以储蓄为主,第2年苜蓿生长耗水量大于当年降雨量,土壤储水量出现减少,第3年苜蓿耗水量进一步加大,土壤水分储量持续降低,10—340 cm 土层前期 土壤储水消耗约83%。

(3)老龄柠条林伐后再种植苜蓿第1年和第2年产量及水分利用效率与对照没有显著差异(P>0.05),第3年产量较对照出现显著差异(P<0.05),但水分利用效率仍然没有显著差异(P>0.05)。

# 参考文献(References):

- [1] 赵景波, 杜娟, 周旗, 岳应利. 西安附近苹果林地的土壤干层. 生态学报, 2005, 25(8): 2115-2120.
- [2] 王力, 邵明安, 侯庆春. 黄土高原土壤干层初步研究. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2001, 29(4): 34-38.
- [3] 侯庆春,韩蕊莲,韩仕锋.黄土高原人工林草地"土壤干层"问题初探.中国水土保持,1999,(5):13-16.
- [4] 张海,王延平,高鹏程,孙平阳.黄土高原坡地土壤干层形成机理及补水途径研究.水土保持学报,2003,17(3):162-164.
- [5] 李海防,卫伟,陈利顶,郭二辉,黄勇.黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展.水土保持研究,2013,20(1):287-293.
- [6] Zhang B Q, He C S, Burnham M, Zhang L H. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China. Science of the Total Environment, 2016, 539: 436-449.
- [7] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, Han M W, He Z, Zan R B, Wang F, Gao P, Sun W Y. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China. Catena, 2017, 148; 126-137.
- [8] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Liu Y, Zhou J. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. Catena, 2013, 101: 122-128.
- [9] Yang L, Chen L D, Wei W, Yu Y, Zhang H D. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions. Journal of Hydrology, 2014, 513: 314-321.
- [10] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- [11] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 王壮壮, 武旭同. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110-1117.

- [12] 陈洪松,邵明安,王克林.土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响.农业工程学报,2006,22(1):44-47.
- [13] 张敬晓, 汪星, 许迪, 蔡甲冰, 吕望, 唐燕, 纳文娟. 自然降雨条件下干化土壤水分恢复试验. 农业工程学报, 2021, 37(4): 159-166.
- [14] 汪星, 张敬晓, 吕望, 单长河, 路梅, 李艳超. 黄土丘陵区深层干化土壤对降雨入渗的响应. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 29-38, 63.
- [15] 黄俊,金平伟,李敏,李岚斌,姜学兵.径流小区尺度土壤入渗率影响因子与估算模型研究.农业机械学报,2016,47(8):171-178.
- [16] 穆兴民,徐学选,王文龙,温仲明,杜峰.黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响.土壤学报,2003,40(2):210-217.
- [17] 贾小旭,邵明安,魏孝荣,朱元骏,王云强,胡伟.黄土高原土壤水可持续利用的思考与建议. 2020, 65(24): 2053-2056.
- [18] 王志强,刘宝元,王旭艳,韩艳锋.黄土丘陵半干旱区人工林迹地土壤水分恢复研究.农业工程学报,2007,23(11):77-83.
- [19] 程积民, 万惠娥, 王静, 雍绍萍. 黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复. 生态学报, 2004, 24(12): 2979-2983.
- [20] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 任小龙, 李永平, 刘世新. 宁南山区紫花苜蓿(Medicago sativa)土壤干层水分动态及草粮轮作恢复效应. 生态学报, 2008, 28(1): 183-191.
- [21] 刘忠民,山仑,邓西平,辛业全.宁南山区草田轮作研究 Ⅱ.不同轮作制度下的农田水分平衡.水土保持学报,1993,7(4):67-71.
- [22] 兰志龙, 潘小莲, 赵英, 司炳成, 汪有科, 焦瑞, 张建国. 黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤含水量的影响. 应用生态学报, 2017, 28(3): 847-855.
- [23] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. 林业科学, 1996, 32(1): 78-85.
- [24] 王国梁,刘国彬,常欣,许明祥.黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应.自然资源学报,2002,17(3):339-344.
- [25] 张珂萌, 汪星, 汪有科, 李群, 吴九江, 张敬晓. 典型地面覆盖下黄土丘陵区干化土壤深层水分变化研究. 农业机械学报, 2022, 53(2): 336-345.
- [26] Wu X Z, Wang X, Teng Y, Chen D, Wang X D, Ma B. Response of soil moisture to rainfall following deep soil drying in China's hilly loess lands. Science of the Total Environment, 2024, 950: 175145.
- [27] 李萍,李同录,王阿丹,张亚国,梁燕,赵纪飞.黄土中水分迁移规律现场试验研究.岩土力学,2013,34(5):1331-1339.
- [28] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探. 水土保持学报, 2000, 14(4): 87-90.
- [29] 鲁睿,张明军,张宇,车存伟,强玉泉,刘灵灵,王志兰,谷来磊.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.水 土保持学报,2024,38(2):364-376.
- [30] 王坤悦,李旭红,余新晓,贾国栋,张益,党毅.北京山区典型植被土壤水分对次降雨的响应.生态学报,2024,44(6):2561-2571.
- [31] 张敬晓, 汪星, 汪有科, 靳姗姗, 董建国, 汪治同. 黄土丘陵区林地干化土壤降雨入渗及水分迁移规律. 水土保持学报, 2017, 31(3): 231-238.
- [32] 蔡雪梅,罗珠珠,李玲玲,牛伊宁,蔡立群,谢军红,张耀全,马欣,潘占东.黄土高原旱作农田土壤水分对苜蓿种植年限和后茬春小麦的响应.草业科学,2020,37(9):1833-1844.
- [33] 刘沛松,李军,贾志宽,于亚军,刘世新.宁南旱区苜蓿草地土壤水分消耗规律及粮草轮作土壤水分恢复效应研究.中国农学通报, 2005,21(9):270-274.
- [34] 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. 生态学报, 2003, 23(9): 1944-1950.
- [35] 王学春,李军,方新宇,王美艳.半干旱区草粮轮作田土壤水分恢复效应.农业工程学报,2011,27(1):81-88.
- [36] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 王俊鹏, 李永平, 刘世新. 宁南旱区紫花苜蓿土壤干层水分特征及时空动态. 自然资源学报, 2009, 24(4): 663-673.
- [37] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. 土壤学报, 2002, 39(3): 404-411.
- [38] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438.