

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.003; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.003.

任鸿武, 汪星, 吕雯, 等. 宁南黄土丘陵区人工柠条林与苜蓿地土壤水分特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 158-166, 177.

Ren Hongwu, Wang Xing, Lü Wen, et al. Soil moisture characteristics of artificial *Caragana korshinskii* Kom. woodland and *Medicago sativa* L. field in loess hilly area of southern Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 158-166, 177.

# 宁南黄土丘陵区人工柠条林与苜蓿地土壤水分特征

任鸿武<sup>1</sup>, 汪星<sup>1</sup>, 吕雯<sup>2,3</sup>, 滕远<sup>1</sup>, 杨赵昱<sup>2</sup>, 侯嘉娜<sup>1</sup>, 马维薇<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学 林业与草业学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学 生态与环境学院,

银川 750021; 3. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

**摘要:** [目的] 探究柠条与苜蓿土壤水分特征, 阐明宁南山区人工植被对土壤水分的影响, 进而为生态环境高质量发展提供科学依据。 [方法] 采用土壤水分自动监测系统对宁夏固原彭阳县人工种植柠条林地 (20 a) 与紫花苜蓿地 (18 a) 0—200 cm 土层生长季土壤水分进行了长期定位监测。 [结果] (1) 人工柠条林地与苜蓿地土壤含水量差异显著 ( $p < 0.05$ ), 0—200 cm 土层柠条林地土壤含水量平均值大于苜蓿地, 苜蓿地土壤含水量下降幅度大于柠条林地; (2) 柠条林地 0—200 cm 土层土壤含水量先增大后减小再增大, 苜蓿地整体呈现“S”形; (3) 人工柠条林地与苜蓿地分别在 60—200 cm 土层和 40—200 cm 土层土壤水分垂直变异系数趋于稳定, 柠条林地在 30—40 cm 土层土壤水分变异系数大于苜蓿地; (4) 人工柠条林地 0—200 cm 土层平均土壤储水量较苜蓿地显著提高 ( $p < 0.05$ ), 5 月 7 日—6 月 7 日和 6 月 26 日—7 月 9 日人工柠条林地平均土壤储水量高于苜蓿地; (5) 人工柠条林地与苜蓿地 0—200 cm 土层土壤含水量对降雨的响应最深层为人工柠条林地 40 cm 土层、苜蓿地 30 cm 土层, 人工柠条林地 0—30 cm 土层土壤含水量对降雨的响应速度大于苜蓿地。 [结论] 苜蓿地 0—200 cm 土层平均土壤含水量相较于人工柠条林地较低, 且 40—200 cm 土层土壤含水量受降水补给有限, 易造成水分亏缺。

**关键词:** 土壤水分; 柠条苜蓿; 土壤水分入渗; 土壤储水变化量

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0158-09

## Soil moisture characteristics of artificial *Caragana korshinskii* Kom. woodland and *Medicago sativa* L. field in loess hilly area of southern Ningxia

Ren Hongwu<sup>1</sup>, Wang Xing<sup>1</sup>, Lü Wen<sup>2,3</sup>, Teng Yuan<sup>1</sup>, Yang Zhaoyu<sup>2</sup>, Hou Jiana<sup>1</sup>, Ma Weiwei<sup>2</sup>

(1. School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the soil moisture characteristics of *Caragana korshinskii* Kom. and *Medicago sativa* L., to elucidate the impact of artificial vegetation on soil moisture in the southern mountainous areas of Ningxia, and to provide scientific basis for high-quality development of the ecological environment. [Methods] An automatic soil moisture monitoring system was used to monitor the soil moisture in 0—200 cm soil layer of planted *Caragana korshinskii* Kom. woodland (20 a) and *Medicago sativa* L. field (18 a) in Pengyang County, Guyuan City, Ningxia. [Results] (1) There were significant differences in soil moisture contents of artificial *Caragana korshinskii* Kom. woodland and *Medicago sativa* L. field ( $p < 0.05$ ). The average soil moisture content in 0—200 cm soil layer was higher in *Caragana korshinskii* Kom. forest than that in *Medicago sativa* L. field. The decrease of soil water content in *Medicago sativa* L. field was greater than that in *Caragana korshinskii* Kom. forest. (2) The soil water

收稿日期: 2024-01-22

修回日期: 2024-05-06

接受日期: 2024-05-21

资助项目: 国家自然科学基金 (32260422, 32060301); 宁夏自然科学基金优秀青年项目 (2022AAC05019)

第一作者: 任鸿武 (1991—) 男, 陕西西安人, 硕士研究生在读, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1411998058@qq.com

通信作者: 吕雯 (1979—) 女, 宁夏银川人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持、水资源高效利用研究。E-mail: lvwen@nxu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

content in 0—200 cm layer of *Caragana korshinskii* Kom. forest increased first, then decreased and then increased again. The overall trend of soil water content for *Medicago sativa* L. field showed a S-shaped pattern. (3) The vertical variation coefficient of soil moisture in artificial *Caragana korshinskii* Kom. forest and *Medicago sativa* L. field tended to be stable in 60—200 cm soil layer and 40—200 cm soil layer, respectively, and the variation coefficient of soil moisture in artificial *Caragana korshinskii* Kom. woodland was greater than that in *Medicago sativa* L. field in 30—40 cm soil layer. (4) The average soil water storage in 0—200 cm soil layer of artificial *Caragana korshinskii* Kom. woodland was significantly higher than that in *Medicago sativa* L. field ( $p < 0.05$ ), and the average soil water storage in artificial *Caragana korshinskii* Kom. woodland was higher than that in *Medicago sativa* L. field from May 7 to June 7 and from June 26 to July 9. (5) The deepest response depths of soil moisture content to rainfall in 0—200 cm soil layer for artificial *Caragana korshinskii* Kom. forest and *Medicago sativa* L. field were 40 cm and 30 cm, respectively. Soil water content in 0—30 cm soil layer of artificial *Caragana korshinskii* Kom. forest responded more rapidly to rainfall than *Medicago sativa* L. field. [Conclusion] Compared with artificial *Caragana korshinskii* Kom. forest, the average soil moisture content in 0—200 cm soil layer in *Medicago sativa* L. field was lower, and the soil moisture content of 40—200 cm soil layer was limited by precipitation recharge, which was easy to cause water deficit.

**Keywords:** soil moisture; *Caragana korshinskii* Kom.; *Medicago sativa* L.; variation of soil water storage

土壤水分是黄土高原植物生长发育和生态环境重建的主要限制因子<sup>[1]</sup>,地表植被类型会改变降雨分配、雨水下渗和蒸散发消耗过程,从而对土壤水分的年内分配和降雨补给特征产生巨大影响<sup>[2-3]</sup>。研究区内降水是土壤水分和植物生长的主要水分来源,“低降水、高蒸发”的气候特征和土壤特性,加上人工林(草)导致该区土壤加速干化<sup>[4-5]</sup>,土壤干层的含水量不断降低,降水渗入深度变浅,形成了具有相对持久和干层土壤湿度恢复困难等基本特征<sup>[6-7]</sup>。多年生人工柠条和苜蓿的生长及土壤蒸发长期消耗土壤水分,致土壤水分长期供给不平衡。因此造成土壤退化致部分植物群落衰败,长此以往将会影响该区生态的可持续发展<sup>[8]</sup>。

众多学者相继开展了对黄土丘陵区旱地植被土壤水分的研究,研究主要集中在土地利用方式、植被类型和地形等因素对土壤水分的影响方面<sup>[9-10]</sup>。研究发现,柠条易吸收浅层(0—40 cm)土壤水分,当浅层土壤干燥时,主要吸收 40—80 cm 土层土壤的水分,土壤含水量随深度的增加会发生显著变化,对比相同立地条件下杨树、杏树、玉米等植被,0—300 cm 不同植被土壤水分变异系数均随土层深度的增加而减小<sup>[11-13]</sup>;紫花苜蓿的耗水深度在 500 cm 左右,且土壤水分的利用效率会随苜蓿生长年限的延长而降低,对土壤水分消耗的随着生长年限而增加,苜蓿草地 0—300 cm 土层耗水量在 556.2~577.8 mm,推断苜蓿的耗水深度在 500 cm 左右<sup>[14]</sup>;土壤水分补

给和消耗动态变化规律不同,降水对土壤水分的影响程度随深度的增加而减弱,随消耗量的增加而深度增加。土壤水分补给和水分的垂直入渗是水分循环的重要路径,增强了土壤-植物-大气间的垂直水分交换<sup>[15-16]</sup>。也有学者对土壤水分与降水的响应进行了研究,研究发现土壤水分入渗是一个复杂的过程,不仅受降水事件大小主导,而且植被覆盖类型等其他因素也会影响土壤水分的入渗过程<sup>[17]</sup>。有学者认为在干旱半干旱区 2.0 mm 降水具有湿润表层土壤的作用,3.0 mm 以上降水可能提高某些高大植物的储水入渗变化<sup>[18-19]</sup>,还有学者认为小于 5.0 mm 的降水对荒漠草原的土壤水分不起作用,小于 30.0 mm 的降水不能引起黄土丘陵沟壑区 40 cm 以下土壤水分的响应<sup>[20-21]</sup>。因此,对不同植被土壤水分造成的差异变化进行研究至关重要。在以往的研究中人工林草地土壤水分在不同深度土层的变化研究已取得了很多成果,在多年生人工种植高龄林草地不同植被土壤水分变化方面的研究还很不足,且多为单一植被土壤水分研究,对多年生人工林草的对比研究相对不足。因此,本研究以黄土丘陵宁南山区坡地人工种植柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)林(20 a)和人工苜蓿(*Medicago sativa* L.)地(18 a)为研究对象,对 0—200 cm 深度土层的土壤水分进行长期定位观测和分析,探索宁南山区坡地人工柠条林地和人工苜蓿地土壤水分的时空变异、土壤水分状况、降水对土壤水分变化的影响以及宁南山区坡地的水分消耗特征,为水

水土保持林草长期经营和土壤水资源的可持续利用提供科学依据和理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市彭阳县王洼镇,该区域为典型的黄土高原丘陵区,地处东经  $106^{\circ}32'$ — $106^{\circ}58'$ ,北纬  $35^{\circ}41'$ — $36^{\circ}17'$ 。海拔 1 248~2 418 m,年降水量 450~550 mm(图 1),蒸发量 1 360.6 mm,年平均气温  $7.4\sim 8.5^{\circ}\text{C}$ ,日照时数 2 311.2 h,无霜期 140~170 d,属典型温带半干旱大陆性季风气候。试验地 0—200 cm 土壤容重平均值为  $1.33\text{ g/cm}^3$ ,田间持水量为 19.36%,凋萎含水量均值为 7.12%,土壤母质为黄土及黄土状物,土层深厚,土质疏松<sup>[14]</sup>。该地区土地类型主要有耕地、林地和草地。耕地人工植被主要有玉米(*Zea mays* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)、等;林地人工植被主要有柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、山桃(*Amygdalus davidiana*)等;草地人工植被主要有苜蓿(*Medicago sativa* L.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)等<sup>[12]</sup>。

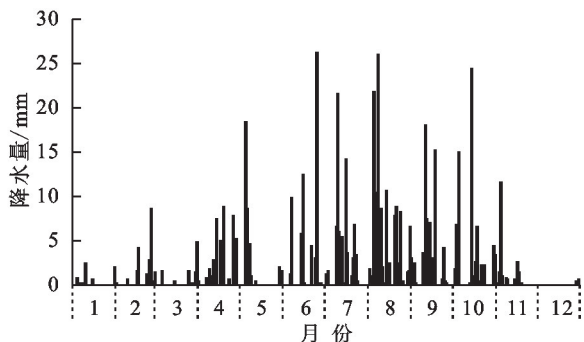


图 1 研究区 1—12 月降雨分布

Fig. 1 Rainfall distribution map from January to December in the study area

### 1.2 研究方法

在彭阳县王洼镇选择一块典型的人工种植 20 a 柠条林为样地,并以距样地约 100 m 的同等立地条件下人工种植 18 a 紫花苜蓿(甘农 3 号紫花苜蓿)作为对照。样地为长 40 m、宽 20 m 坡度  $9^{\circ}$ 、海拔 1 162 m 阳坡的柠条林,样地柠条 2000 年 5 月栽植,株距 2 m,行距 8 m,2 行为一带,带间距 5 m,柠条平均株高 1.5 m 左右;苜蓿 2002 年 4 月以 40 cm 的行距人工条播种植,长 30 m、宽 20 m。在柠条林和苜蓿地带间深度 0—200 cm 处布置 CS650 型土壤水分自动监测系统<sup>[22]</sup>,同类样地选取 3 个重复,样地间隔 20 m。

1.2.1 土壤含水量测定 采用土壤水分自动监测系统并结合烘干法测定土壤含水量。土壤水分自动监测时间为 2020 年 4 月 26 日—2020 年 9 月 26 日,监测深

度为 0—200 cm,每层 10 cm 共 20 层;土壤水分自动监测时间间隔 60 min。同时定期采用烘干法测定土壤含水量,土钻取样深度 200 cm,深度 0—200 cm 土层,每 10 cm 测 1 次共测 20 层,重复 3 次取平均值作为土壤质量含水量(%),结合土壤容重换算为体积含水量,对水分自动监测仪监测的数据进行校正。

1.2.2 气象数据获取 气象站获取降水量等气象数据,每 30 min 由数据采集器读取数据 1 次。

### 1.3 公式计算

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中:CV 为变异系数;S 为标准差; $x$  为观测样本(土壤容积含水量)平均值; $n$  为样本总个数; $x_i$  为样本的第  $i$  个观测值。

$$W = 10 \cdot \omega \cdot \Delta H \quad (3)$$

式中: $W$  为土壤储水量(mm); $\omega$  为体积含水量(%); $\Delta H$  为土层深度(cm)。

$$SM = P_r + \Delta W \quad (4)$$

式中:SM 为不同覆盖措施下土壤水分消耗量(mm); $P_r$  为降水量(mm); $\Delta W$  为计算时段初与计算时段末土壤储水量之差(mm)。

$$\Delta W = W_{\text{final}} - W_{\text{initial}} \quad (5)$$

式中: $\Delta W$  为储水量变化量(mm); $W_{\text{final}}$  为计算时段初期土壤储水量(mm); $W_{\text{initial}}$  为计算时段末期土壤储水量(mm)。

### 1.4 数据分析

试验采用 Microsoft Excel 2013 进行数据计算,Furfer 8 和 Origin Pro 2022 处理制图,SPSS 27.0 进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 柠条林地和苜蓿地土壤水分时间动态变化

柠条林地和苜蓿地 0—200 cm 土层土壤含水量表现出不同的季节变化特征(图 2)。2020 年 4 月 26 日—9 月 26 日柠条林地 0—200 cm 土层平均土壤含水量较苜蓿地增加 5.9%,7—9 月苜蓿地 0—200 cm 土层平均土壤含水量下降值较柠条林地增大 27.9%,差异显著( $p < 0.05$ )。柠条林地和苜蓿地 0—10 cm 土层对降水响应迅速,且 0—30 cm 土层土壤含水量均以相近的增减幅度同时变化(图 2)。柠条林地较苜蓿地土壤含水量随深度的增加而增大的变化趋势更加显著( $p < 0.05$ ),柠条林地 40—60 cm 土层平均土壤含水量高于苜蓿地 1.01%,柠条林地 60—100 cm 土



层平均土壤含水量高于苜蓿地 2.91%,由此可知,柠条林地与苜蓿地在 40—200 cm 土层的土壤含水量随着

深度两者表现出差异性,柠条林地随土层深度的增加而增大,苜蓿地是先增大再减小后趋于稳定。

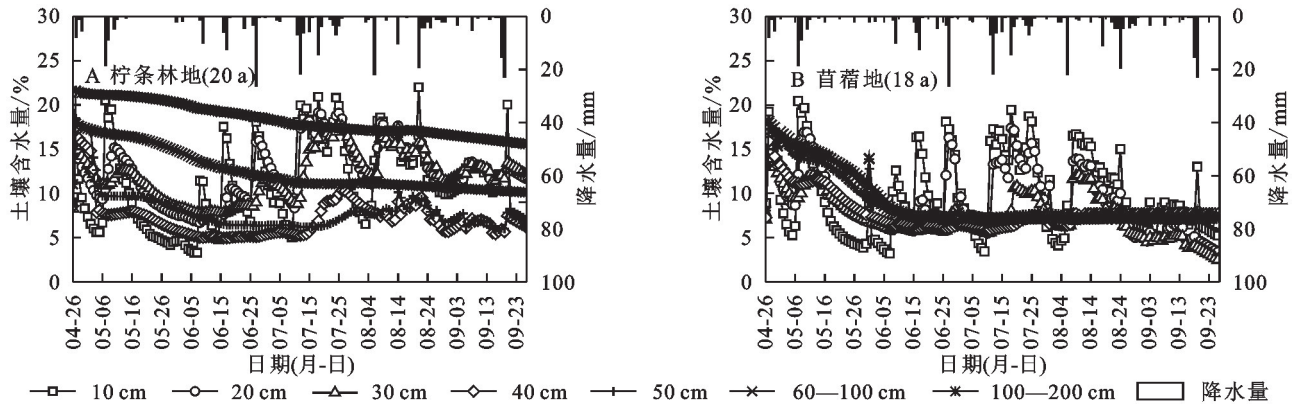


图2 0—200 cm 土层土壤含水量时间变化过程

Fig. 2 Temporal variation of soil water content in 0–200 cm soil layer

## 2.2 柠条林地和苜蓿地不同生育期土壤水分剖面变化

柠条和苜蓿在生育期各阶段土壤水分的补充与消耗在垂直变化上表现出不同规律(图3)。选取了 0—200 cm 土层内 5 月 6 日、6 月 15 日、7 月 10 日和 8 月 2 日 4 次从前一次降雨结束后土壤水分最高点至下次降雨前土壤水分最低点的有代表性时间段土壤水分数据进行分析。可知柠条林地在 0—200 cm 土层垂直剖面 4 个阶段土壤平均含水量均高于苜蓿地。5 月 6 日苜蓿地 0—200 cm 土层土壤平均含水量较

柠条林地降低了 24.88%(图 3A),两者在 0—70 cm 土层土壤平均含水量差异不显著。6 月 15 日苜蓿地 0—200 cm 土层土壤平均含水量较柠条林地降低了 56.87%(图 3B),7 月 10 日苜蓿地 0—200 cm 土层土壤平均含水量较柠条林地降低了 55.58%(图 3C),8 月 2 日苜蓿地 0—200 cm 土层土壤平均含水量较柠条林地降低了 52.27%(图 3D),6 月 15 日、7 月 10 日、8 月 2 日柠条林和苜蓿地土壤平均含水量均表现出 0—50 cm 土层差异不显著。

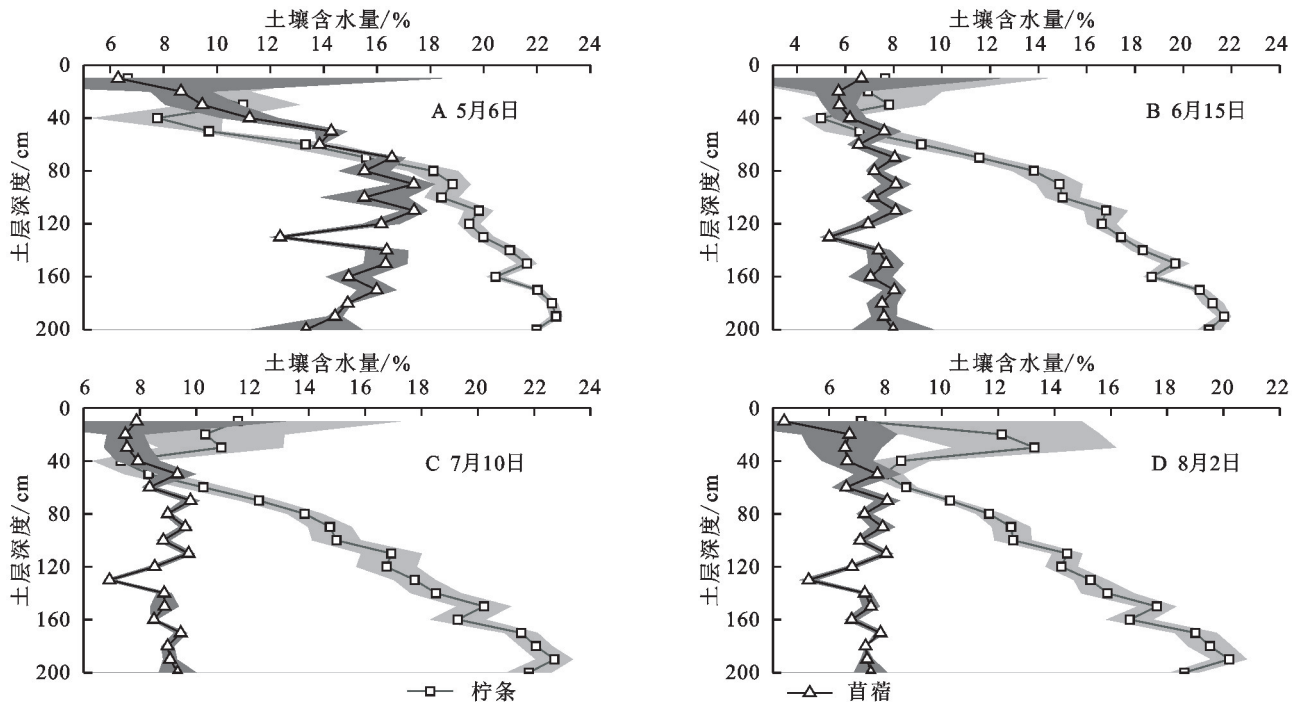


图3 柠条林地与苜蓿地 0—200 cm 土壤含水量剖面变化

Fig. 3 Changes of 0–200 cm soil moisture profile in *Caragana korshinskii* Kom. and *Medicago sativa* L.

## 2.3 柠条林地和苜蓿地土壤水分变异特征

柠条林地和苜蓿地土壤水分变异系数随土层深度的增加,整体呈递减的变化趋势。二者 5—8 月土壤水分变异系数趋势相似,0—40 cm 土层变化活跃,60—

200 cm 土层随深度的增加趋于稳定。柠条林地与苜蓿地 0—10 cm 土层土壤水分变异系数均为最高值。5—8 月柠条林地 0—50 cm 土层较 60—200 cm 土层土壤水分变异系数曲线波动较大,0—50 cm 土层水分交

换比较活跃,60—200 cm 土层则相对较稳定。5—8 月苜蓿地 0—40 cm 土层较 50—200 cm 土层土壤水分变异系数曲线波动较大,50—200 cm 土层土壤水分变异系数整体趋于稳定。5 月和 7 月柠条林地 40—50 cm 土层较 30—40 cm 土层土壤水分变异系数增大出现明显的拐点;而 6 月和 8 月 40—50 cm 土层较 30—40 cm 土层土壤水分变异系数变化值持续降低(图 4A)。苜蓿地 50—200 cm 土层土壤水分变异系数 5—6 月时段

较 7—8 月时段的变化值增大(图 4B)。50—90 cm 土层土壤水分变异系数 6—8 月时段较 5 月有所减小,50—200 cm 土层土壤水分变异系数 7—8 月趋于稳定。5—8 月柠条林地 50—60 cm 土层土壤水分变异系数趋于稳定,苜蓿地在 40—50 cm 土层已趋于稳定。柠条林地 60—200 cm 土层随土层深度的增加逐渐减小且各月之间差异也逐渐缩小,而苜蓿地在此剖面较柠条更趋于稳定,并未随土层深度的增加而减小。

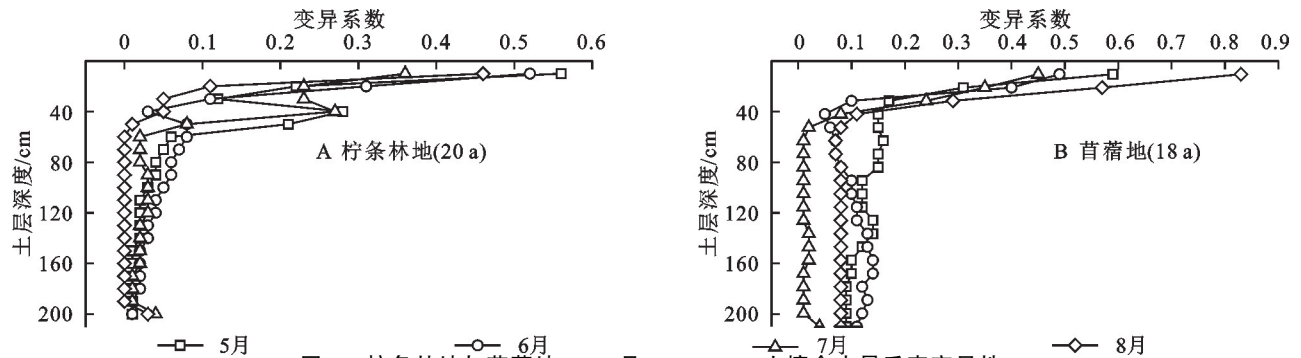


图 4 柠条林地与苜蓿地 5—8 月 0—200 cm 土壤含水量垂直变异性  
Fig. 4 Vertical variability of 0—200 cm soil water content between *Caragana korshinskii* Kom. and *Medicago sativa* L. from May to August

#### 2.4 柠条林地和苜蓿地土壤耗水规律

在 2020 年 4 月 26 日—9 月 26 日选取有效降雨后土壤水分相对高点至下次有效降雨前土壤水分相对低点的两个时段,分别为 5 月 7 日—6 月 7 日和 6 月 26 日—7 月 9 日。5 月 7 日—6 月 7 日柠条林地和苜蓿地 0—200 cm 土层土壤平均储水量极差为 4.6 mm;6 月 26 日—7 月 9 日柠条林地和苜蓿地土壤平均储水量极差为 7.09 mm。两者 0—200 cm 土层土壤平均储水量 5 月 7 日—6 月 7 日时段较 6 月 26 日—7 月 9 日时段变化值增大。6 月 26 日—7 月 9 日时段柠条

林地和苜蓿地 0—200 cm 土层平均降水量较 5 月 7 日—6 月 7 日时段提升 70.95%(图 1),且 0—200 cm 土层平均耗水量增加 64.29%,由此看出,降雨量和耗水量均是影响土壤储水量变化的因素。柠条林地土壤平均储水量在两个时段内均高于苜蓿地(图 5)。5 月 7 日—6 月 7 日苜蓿地 80—200 cm 土层土壤储水量较柠条林地降低了 35.86%,两者 0—70 cm 土层土壤平均储水量差异不显著。6 月 26 日—7 月 9 日苜蓿地 60—200 cm 土层土壤平均含水量较柠条林地降低了 55.18%,两者 0—50 cm 土层差异不显著。

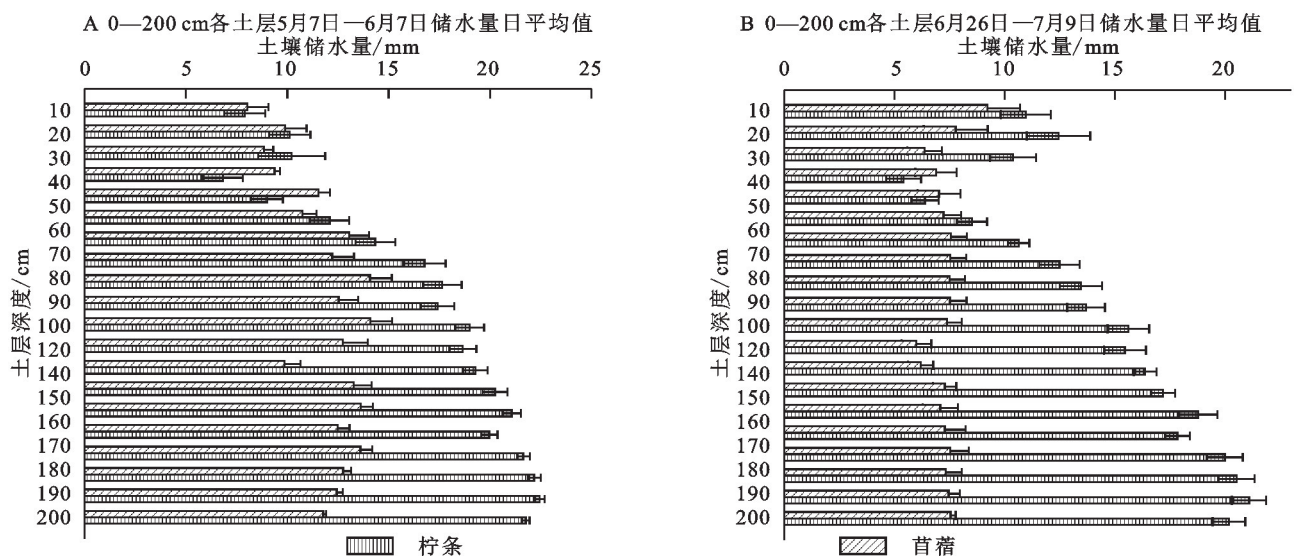


图 5 柠条林地与苜蓿地 0—200 cm 土壤储水量

Fig. 5 Soil water storage of 0—200 cm in *Caragana korshinskii* Kom. and *Medicago sativa* L.

5 月 7 日—6 月 7 日柠条林地 0—200 cm 土层土壤水分变化量低于苜蓿地(图 6A)。5 月 7 日—6 月

7日柠条林地 40—200 cm 土层平均土壤水分变化量仅为苜蓿地的 29.77%,两者 0—40 cm 土层土壤水分变化量差异不显著。6月26日—7月9日柠条林地 0—200 cm 土层土壤水分变化量高于苜蓿地(图 6B)。6月26日—7月9日苜蓿地 30—200 cm 土层平均土壤水分变化量仅为柠条林地的 23.91%,两者 0—20 cm 土层土壤平均含水量差异不显著。5月7日—6月7日柠条林地 0—200 cm 土层土壤水分变化量平均值仅为苜蓿地的 34.65%,柠条林地土壤水

分变化量平均值小于苜蓿地。6月26日—7月9日苜蓿地 0—200 cm 土层土壤水分变化量平均值仅为柠条林地的 38.46%,柠条林地土壤水分变化量平均值大于苜蓿地。可以看出 5月7日—6月7日和 6月26日—7月9日时段柠条林地与苜蓿地因植被生长时段不同土壤水分变化量也有所不同,同时柠条林地与苜蓿地 0—200 cm 不同土层也表现各异。综上,柠条与苜蓿的生育期需水量差异可导致不同时段不同土层植被土壤水分变化量情况不同。

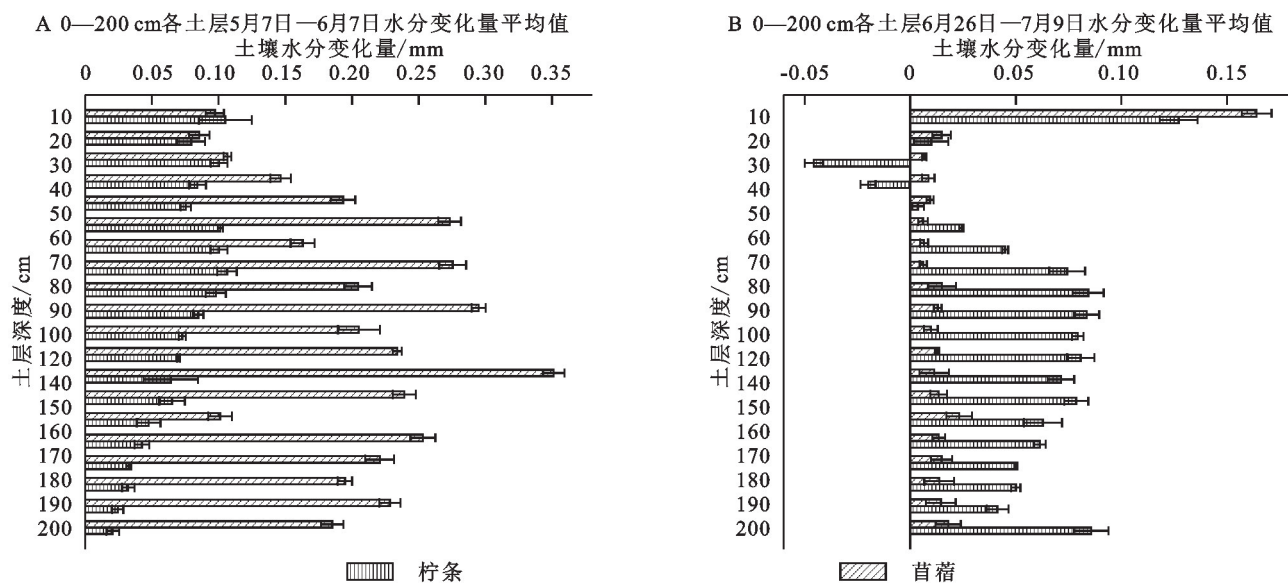


图6 柠条林地与苜蓿地 0—200 cm 土壤水分日变化量

Fig. 6 Daily variation of 0—200 cm soil moisture in *Caragana korshinskii* Kom. and *Medicago sativa* L.

## 2.5 柠条林地和苜蓿地土壤水分入渗响应

选取 2020 年 4 月 26 日—9 月 26 日不同的降水事件,依据国家气象局雨量划分标准<sup>[23]</sup>,分析 6 月 15 日—6 月 17 日、6 月 25 日—6 月 27 日、7 月 10 日—7 月 12 日土壤水分对降雨入渗的响应。由不同降水强度下柠条林地和苜蓿地土壤水分对降雨 72 h 内的响应情况可知(图 7—8),6 月 15 日—6 月 17 日降雨过程中(图 7A、图 8A),柠条林地 0—10 cm 土层土壤含水量增加量较苜蓿地多 1.8%,10—20 cm 土层有滞后现象,0—20 cm 土层

土壤含水量对降雨响应迅速变化显著( $p < 0.05$ ),其余土层变化不显著。6 月 25 日—6 月 27 日降雨过程中(图 7B、图 8B),柠条林地 0—10 cm 土层土壤含水量增加量较苜蓿地减少 1.8%,10—30 cm 土层有滞后现象,其余土层变化不显著。7 月 10 日—7 月 12 日降雨过程中(图 7C、图 8C),柠条林地 0—10 cm 土层土壤含水量增加量较苜蓿地少 0.3%。柠条林地与苜蓿地土壤含水量均为 0—10 cm 土层对降雨响应迅速,20—40 cm 土层均有滞后现象,其余土层变化差异不显著。

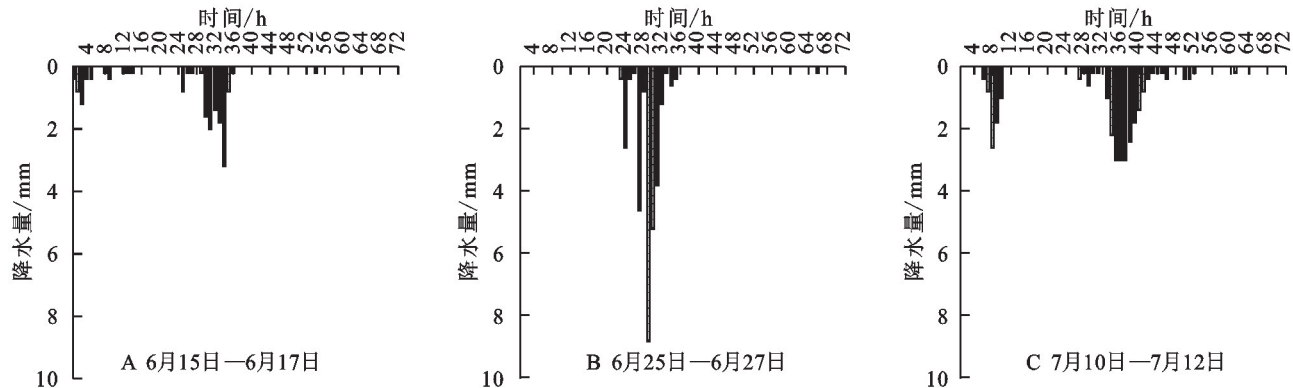


图7 柠条林地与苜蓿地 3 个不同时段降水量变化

Fig. 7 Changes in precipitation during three different time periods in *Caragana korshinskii* Kom. and *Medicago sativa* L.



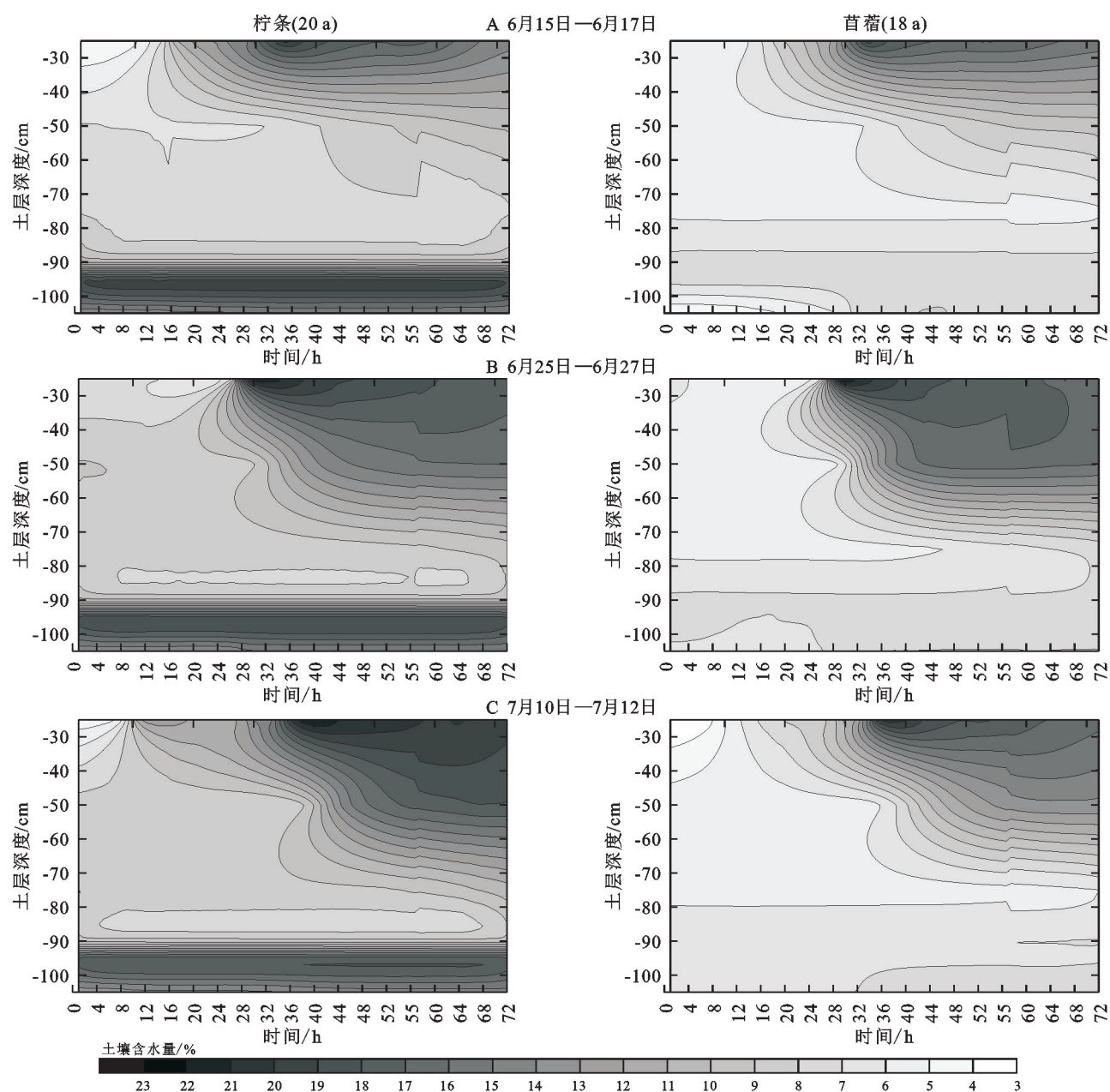


图8 柠条林地与苜蓿地0—200 cm土壤含水量响应变化

Fig. 8 Response of 0—200 cm soil water content in *Caragana korshinskii* Kom. and *Medicago sativa* L.

### 3 讨论

降雨季节性的分布规律使得不同植被在相同降水条件下土壤含水量呈现出不同的变化规律<sup>[24]</sup>。生长期3—9月柠条林地60—100 cm土层和100—200 cm土层土壤含水量变化趋势较苜蓿地变化不显著。因为生长期柠条林地各土层平均土壤含水量均高于苜蓿地,柠条林地土壤含水量对降水的入渗深度达0—40 cm土层,苜蓿地为0—30 cm土层。随着6月后降雨增加,柠条林地0—200 cm土层随着雨水的补充,土壤含水量得到一定的补充并有随深度的增加缓慢增加的趋势,苜蓿地表现出土壤含水量整体并未表现出随深度的增加而增加的趋势。因为苜蓿地0—50 cm土层土

壤含水量随深度变化呈增加趋势,60—200 cm土层土壤含水量并未随深度的增加而出现增大的趋势,分析认为0—50 cm土层易受降雨影响,60—200 cm土层不易受降水入渗影响,且研究区苜蓿地为多年生植被,根系对较深层土壤水分消耗较柠条林地更多,0—200 cm土层土壤含水量整体并未表现出随深度的增加而增加的趋势,这点与前人<sup>[14]</sup>认为苜蓿地土壤含水量也随深度的增加而增加结果不同。本研究中苜蓿地各个深度土层的土壤含水量普遍低于柠条林地同等深度土层土壤含水量,由于苜蓿种植多为密植撒播方式加上苜蓿根系较柠条深,耗水较柠条年耗水大加之年限增加后进一步增大两者水分的差异,植被的生长年限也是影响因素之一,这与前人<sup>[25]</sup>研究的是

初植或生长年限不长的状态,而多年生人工林草地经过生育周期多年循环,出现土壤水分剖面分布不均衡现象与前人<sup>[26]</sup>研究结论一致。可以看出,前人<sup>[27]</sup>提出土壤特性和气象因子是造成土壤水分分布不均衡的决定因素,人工种植方式、土壤质地等因素也是主要原因,与本研究认为引起土壤水分变化的因素较多,自然条件可能是先导因素不同植被利用方式或许会加剧这一现象的结果一致。

土壤水分的变异系数(CV)表明了各土层土壤水分运动的活跃程度。0—200 cm 土层柠条林地与苜蓿地均表现出 0—10 cm 土层土壤水分变异系数最高,因为 0—10 cm 土层土壤水分运动活跃,土壤干、湿交替频繁。柠条林地 5—8 月 0—60 cm 土层土壤水分变异系数变化较大,苜蓿地是 0—50 cm 土层变化较大,两者在 60—200 cm 土层土壤水分变异系数均随深度的增加趋于减小,因为土壤水分的变化主要通过降雨补充和蒸腾散发消耗来实现的,表层土壤含水量的变异性最强,随着土层深度的增大,变异性逐渐减弱。与前人<sup>[28]</sup>研究乔木灌草不同,土壤水分变异系数随土层深度的增加,呈先减小后增大的趋势,可能是因为土地利用方式、植被、坡度等因素的影响。

5 月 7 日—6 月 7 日柠条林地土壤储水量从 0—10 cm 土层的 7.8 mm 增加到 200 cm 土层的 21.7 mm,因为柠条这一树种根系十分发达,从而增加保水蓄水能力,同前人<sup>[29]</sup>对美国西部科罗拉多州多个土层深度土壤水分的研究结论一致,即植被土壤含水量随着土层深度的增加而增大。苜蓿地在本研究的两个阶段平均储水量均小于人工柠条林地,在耗水变化上则表现不同。5 月 7 日—6 月 7 日,苜蓿地土壤耗水变化量 406.1 mm 远大于人工柠条林地 140.6 mm 土壤耗水变化量,随深度的增加而逐渐减缓;6 月 26 日—7 月 9 日,苜蓿地耗水变化量 39.6 mm 显著低于人工柠条林地 104.8 mm 耗水变化量,而地表 0—10 cm 土层耗水变化量较大,造成两个不同时段柠条林地与苜蓿地耗水变化量不同的原因可能与季节、天气、温度、时段及植被生育周期相关,从而导致需水大小不同,这与前人<sup>[30]</sup>研究结果一致。

## 4 结论

(1) 不同土地利用方式的土壤含水量表现为明显的时间特征。0—200 cm 土层平均土壤含水量柠条林地大于苜蓿地,垂直剖面变化趋势不同,柠条林地随土层深度的增加先减小后缓慢增加,苜蓿地随土层深度的增加先减少后趋于稳定。不同植被土壤含水量的垂直分布变化及变异性特征与土地利用方式相关。

(2) 柠条林地与苜蓿地土壤含水量变异系数 0—10 cm 土层均有较强的变异性。0—40 cm 土层柠条林

地 5 月份 CV 值最高达到 0.57,苜蓿地 8 月份最高达到 0.83,而 40—200 cm 土层土壤变异性较弱,60 cm 土层 5—8 月柠条林地 CV 值均已在 0.10 以下,苜蓿地在 0.15 以下,土壤含水量变异系数随土层深度增加而逐渐减小。不同的植被类型对土壤储水消耗量的影响存在显著差异,0—200 cm 土层土壤储水量柠条林地大于苜蓿地,耗水量因植被生育期的不同而耗水量不同。

(3) 不同土地利用方式的土壤含水量受降雨的影响较大。柠条林地和苜蓿地 0—10 cm 土层土壤含水量对降雨响应迅速,0—30 cm 土层土壤含水量增长幅度柠条林地大于苜蓿地,降水入渗最深土层是柠条地 40 cm 土层。

## 参考文献(References):

- [1] 王云强,邵明安,刘志鹏.黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2012,23(3):310-316.  
Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2012,23(3):310-316.
- [2] 乔斌,陈国茜,石明明,等.不同土地利用方式下土壤水分动态及对降水的响应:以青海省互助县浅山旱地为例[J].中国农学通报,2020,36(13):115-123.  
Qiao B, Chen G Q, Shi M M, et al. Soil moisture dynamics and response to precipitation under different land use patterns: a case study of shallow mountain dry land in Huzhu, Qinghai[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020,36(13):115-123.
- [3] 张芳,曾馥平,杜虎,等.喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤水分对降水特征的响应[J].生态科学,2019,38(5):38-43.  
Zhang F, Zeng F P, Du H, et al. Response of soil moisture to precipitation characteristics in different land use patterns in karst peak-cluster depression area [J]. Ecological Science, 2019,38(5):38-43.
- [4] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2017,546:113-122.
- [5] Yan W M, Deng L, Zhong Y, et al. The characters of dry soil layer on the Loess Plateau in China and their influencing factors[J]. PLoS one, 2015,10(8):e0134902.
- [6] 宁婷,郭忠升.半干旱黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分循环特征[J].生态学报,2015,35(15):5168-5174.  
Ning T, Guo Z S. Characteristics of the soil water cycle in an abandoned sloping field in the semi-arid loess hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):5168-5174.
- [7] 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.  
Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,41(1):1-6.
- [8] 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.
- Guo Z S, Shao M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(8):1640-1647.
- [9] Yu B W, Liu G H, Liu Q S, et al. Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018,165:125-132.
- [10] Wang Y Q, Shao M A, Sun H, et al. Response of deep soil drought to precipitation, land use and topography across a semiarid watershed[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020,282/283:107866.
- [11] 孙雅楠.岚县不同植被的土壤水分特征研究[J].黑龙江工程学院学报,2019,33(2):13-17.
- Sun Y N. Research on soil moisture characteristics of different vegetation in Lan County[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2019,33(2):13-17.
- [12] 吕婷,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区典型天然灌丛和人工灌丛优势植物土壤水分利用策略[J].植物生态学报,2017,41(2):175-185.
- Lü T, Zhao X N, Gao X D, et al. Soil water use strategy of dominant species in typical natural and planted shrubs in loess hilly region[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017,41(2):175-185.
- [13] 石明明,王晓敏,周秉荣,等.高寒草原根系层土壤水分动态及其对降雨格局的响应[J].生态环境报,2020,29(9):1723-1729.
- Shi M M, Wang X M, Zhou B R, et al. Dynamic change of soil moisture at root layer and its response to precipitation pattern in the alpine grassland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020,29(9):1723-1729.
- [14] 张敏,刘爽,刘勇,等.黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2019,33(3):115-120,128.
- Zhang M, Liu S, Liu Y, et al. Soil moisture variation characteristics of different land use types in the moderate slope sandy area of loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):115-120,128.
- [15] 宋乃平,杨明秀,王磊,等.荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化[J].生态学报,2014,33(10):2618-2624.
- Song N P, Yang M X, Wang L, et al. Monthly variation in soil moisture under *Caragana intermedia* stands grown in desert steppe[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014,33(10):2618-2624.
- [16] 万素梅,胡守林,贾志宽,等.黄土高原地区苜蓿生产力动态及其土壤水分消耗规律[J].农业工程学报,2007,23(12):30-34.
- Wan S M, Hu S L, Jia Z K, et al. Alfalfa productivity dynamics and consumption of soil water in the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(12):30-34.
- [17] 张存厚,崔巍,越昆,等.干旱半干旱区土壤水分对降水的脉动响应:以荒漠草原达茂旗为例[J].干旱气象,2023,41(2):260-267.
- Zhang C H, Cui W, Yue K, et al. Fluctuating response of soil moisture to precipitation in arid and semi-arid areas: a case study of Damao County in desert steppe[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023,41(2):260-267.
- [18] Heisler-White J L, Blair J M, Kelly E F, et al. Contingent productivity responses to more extreme rainfall regimes across a grassland biome[J]. Global Change Biology, 2009,15(12):2894-2904.
- [19] Bachman S, Heisler-White J L, Pendall E, et al. Elevated carbon dioxide alters impacts of precipitation pulses on ecosystem photosynthesis and respiration in a semi-arid grassland[J]. Oecologia, 2010,162(3):791-802.
- [20] 徐冉,张圣微,朱仲元,等.典型草原禁牧条件下土壤水分对降雨模式的响应[J].干旱区研究,2019,36(6):1359-1367.
- Xu R, Zhang S W, Zhu Z Y, et al. Response of soil moisture content to rainfall patterns in typical steppe under grazing prohibition[J]. Arid Zone Research, 2019,36(6):1359-1367.
- [21] 姚雪玲,杨国靖,王帅,等.黄土丘陵沟壑区不同深度土壤水分对降雨的响应及其稳定性[J].干旱区地理,2021,44(22):507-513.
- Yao X L, Yang G J, Wang S, et al. Soil moisture response and stability to rainfall in different depths in Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021,44(2):507-513.
- [22] 高元亢,李婧,汪星,等.黄土丘陵苜蓿与柠条深层土壤干化状况及根系与养分特征[J].水土保持研究,2023,30(6):168-176.
- Gao Y K, Li J, Wang X, et al. Soil desiccation and root and nutrient characteristics of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* in loess hilly area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):168-176.
- [23] 刘鑫,毕华兴,李笑吟,等.晋西黄土区土壤水分时空异质性分析[J].水土保持研究,2006,13(6):51-54.
- Liu X, Bi H X, Li X Y, et al. Study on temporal and spatial heterogeneity of soil moisture using geological statistics method on Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006,13(6):51-54.
- [24] 陈敏玲,张兵伟,任婷婷,等.内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应[J].植物生态学报,2016,40(7):658-668.
- Chen M L, Zhang B W, Ren T T, et al. Responses of soil moisture to precipitation pattern change in semiarid grasslands in Nei Mongol, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016,40(7):658-668.

- tion of tipping bucket flow meter in flow rate measurement of runoff plots[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(10):44-46.
- [12] Cao J S, Zhang W J, Qi Y Q. An automatic slope runoff sediment and flow monitoring system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014,30(1):5-9.
- [13] 李续峰,张兴义,刘洪家.径流泥沙混合装置研发[J].水土保持研究,2012,19(1):23-26,32.  
Li X F, Zhang X Y, Liu H J. Design of integrated equipment on runoff and sediment[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,19(1):23-26,32.
- [14] Colli M, Lanza L G, La Barbera P. Performance of a weighing rain gauge under laboratory simulated time-varying reference rainfall rates [J]. Atmospheric Research, 2013,131:3-12.
- [15] Schwambach D, Anache J A A, Wendland E C. Calibration and error investigation of large tipping bucket flow meters[J]. Catena, 2022,209:105834.
- [16] Nam K Y, Chang K H, Kim K E, et al. Method for analysis on optimization of averaging interval of rainfall rate measured by tipping-bucket rain gauges[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2008,24(1):17-24.
- [17] Nehls T, Nam Rim Y, Wessolek G. Technical note on measuring run-off dynamics from pavements using a new device: the weighable tipping bucket[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(5):1379-1386.
- [18] Wijayawardhana L M J R, Weerasinghe K D N, Navaratne C M. Tipping bucket device for measuring runoff in small catchments[J]. Hydrological Sciences Journal, 2021, 66(15):2258-2266.
- [19] Duchon C E, Biddle C J. Undercatch of tipping-bucket gauges in high rain rate events[J]. Advances in Geosciences, 2010,25:11-15.
- [20] Sun T, Cruse R M, Chen Q, et al. Design and initial evaluation of a portable in situ runoff and sediment monitoring device[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519:1141-1148.
- [21] Iida S, Shimizu T, Kabeya N, et al. Calibration of tipping-bucket flow meters and rain gauges to measure gross rainfall, throughfall, and stemflow applied to data from a Japanese temperate coniferous forest and a Cambodian tropical deciduous forest[J]. Hydrological Processes, 2012,26(16):2445-2454.
- [22] La B P, Lanza L G, Stagi L. Tipping bucket mechanical errors and their influence on rainfall statistics and extremes [J]. Water Science and Technology, 2002,45(2):1-10.
- [23] Wang J X, Fisher B L, Wolff D B. Estimating rain rates from tipping-bucket rain gauge measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008,25(1):43-56.
- [24] Humphrey M D, Istok J D, Lee J Y, et al. A new method for automated dynamic calibration of tipping-bucket rain gauges [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997,14(6):1513-1519.

~~~~~  
(上接第166页)

- [25] 王松伟,郭忠升.多年生人工柠条林生长对土壤水分的影响[J].水土保持研究,2020,27(3):70-75.  
Wang S W, Guo Z S. Effects of perennial *Caragana korshinskii* kom on soil moisture[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(3):70-75.
- [26] 高宇,樊军,彭小平,等.水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J].生态学报,2014,34(23):7038-7046.  
Gao Y, Fan J, Peng X P, et al. Soil water depletion and infiltration under the typical vegetation in the water-wind erosion crisscross region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(23):7038-7046.
- [27] 于晓燕,汪星,吕雯,等.黄土丘陵区带状柠条锦鸡儿林地深层土壤干化及根系分布[J].干旱区地理,2023,46(5):753-762.  
Yu X Y, Wang X, lyu W, et al. Deep soil desiccation and root distribution of belted *Caragana korshinskii* forest in loess hilly region[J]. Arid Land Geography, 2023,46(5):753-762.
- [28] 邱德勋,赵佰礼,尹殿胜,等.黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J].中国水土保持科学(中英文), 2021,19(3):72-80.  
Qiu D X, Zhao B L, Yin D S, et al. Vertical variation of soil moisture in the loess hilly and gully region and its influence factors [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(3):72-80.
- [29] Singh J S, Milchunas D G, Lauenroth W K. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland[J]. Plant Ecology, 1998,134(1):77-89.
- [30] 郭忠升,邵明安.土壤水分植被承载力初步研究[J].科技导报,2006,24(2):56-59.  
Guo Z S, Shao M A. Preliminary study of vegetation carrying capacity of soil water(VCCSW)[J]. Science & Technology Review, 2006,24(2):56-59.