

引用格式: 王丽平, 赵炯昌, 朱洪盛, 等. 黄土残塬小流域不同土地利用类型土壤水分特征[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(4): 784–792. WANG Liping, ZHAO Jiongchang, ZHU Hongsheng, *et al.* Soil moisture characteristics of different land use types in small watersheds of gully regions on the Loess Plateau[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(4): 784–792.

黄土残塬小流域不同土地利用类型土壤水分特征

王丽平¹, 赵炯昌¹, 朱洪盛¹, 池金洺¹, 王子涵¹, 于 洋^{1,2}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200)

摘要: 【目的】植被恢复是黄土高原生态建设的主要举措, 水分是该地区植被恢复的主要限制因子。开展不同土地利用类型水分动态研究, 旨在为流域综合治理中的植被恢复提供科学依据, 优化土地利用和水资源管理策略。【方法】在 2023 年生长季 (5—9 月), 以地处黄土残塬沟壑区的山西省吉县蔡家川流域 5 种典型土地利用类型: 乔木林 (刺槐 *Robinia pseudoacacia*)、灌木林 (黄刺玫 *Rosa xanthina*)、草地 (铁杆蒿 *Artemisia gmelinii*)、果园 (苹果 *Malus pumila*)、农田 (玉米 *Zea mays*) 为研究对象, 对不同土层 (0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180 cm) 土壤水分进行系统的定位监测。基于野外实测数据, 分析不同土地利用类型及土层深度对土壤水分的影响。使用最优分割法划分不同土地利用类型土壤水分垂直层次。【结果】生长季内不同土地利用类型土壤水分与降水变化趋势一致。各土地利用类型不同深度土壤水分差异显著 ($P < 0.05$)。不同土地利用类型土壤水分从高到低依次为农田 (21.06%)、灌木林 (17.88%)、草地 (15.17%)、果园 (15.02%)、乔木林 (13.29%)。土壤水分垂直变化表现出一定的层次性。将各土地利用类型土层水分垂直层次划分为强变异层、中等变异层以及弱变异层。草地和乔木林地的垂直层次一致, 强变异层为 0~10 cm 土层, 中等变异层为 10~100 cm 土层, 弱变异层为 100~180 cm 土层。灌木林强变异层以及中等变异层为 0~140 cm 土层, 深度范围大于其他土地利用类型。果园强变异层以及中等变异层为 0~80 cm 土层, 深度范围低于其他土地利用类型。农田土壤水分垂直变异不同于其他土地利用类型, 100~180 cm 土层变异性最强, 中等变异层为 0~20 cm 土层, 弱变异层为 20~100 cm 土层。【结论】土壤水分动态受降水、土地利用类型以及工程措施综合影响。在开展植被恢复时, 应重点关注不同土地利用类型土壤水分的动态变化特征。图 4 表 2 参 37

关键词: 土壤水分; 土地利用类型; 垂直分布; 蔡家川流域

中图分类号: S714.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)04-0784-09

Soil moisture characteristics of different land use types in small watersheds of gully regions on the Loess Plateau

WANG Liping¹, ZHAO Jiongchang¹, ZHU Hongsheng¹, CHI Jinming¹, WANG Zihan¹, YU Yang^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Jixian 042200, Shanxi, China)

Abstract: [Objective] Vegetation restoration is a primary measure for ecological construction of the Loess Plateau, and water is a major limiting factor for vegetation recovery in this region. This study aims to conduct research on water dynamics of different land use types, provide a basis for vegetation restoration in comprehensive watershed management, and optimize land use and water resource management strategies. [Method] During the growing season of 2023 (May to September), 5 typical land use types in Caijiachuan watershed of Jixian County, Shanxi Province, located in gully regions of the Loess Plateau, were systematically

收稿日期: 2024-11-24; 修回日期: 2025-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42177310)

作者简介: 王丽平 (ORCID: 0009-0001-8814-2112), 从事植被恢复与流域治理研究。E-mail: 17835391472@163.com。

通信作者: 于洋 (ORCID: 0000-0003-4431-2279), 教授, 博士生导师, 从事水土保持与流域治理研究。

E-mail: yangyu@bjfu.edu.cn

monitored for soil moisture at different depths (0–10, 10–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100, 100–120, 120–140, 140–160, 160–180 cm), including woodland (*Robinia pseudoacacia*), shrubland (*Rosa xanthina*), grassland (*Artemisia gmelinii*), orchard (*Malus Pumila*), and farmland (*Zea mays*). Based on field measurement data, the impact of different land use types and soil depths on soil moisture were analyzed. The vertical layers of soil moisture for different land use types were divided by the optimal segmentation method. **[Result]** The variation trends of soil moisture and rainfall were consistent in different land use types during the growing season. There were significant differences in soil moisture at different depths among various land use types ($P < 0.05$). The soil moisture content of different land use types from high to low was as follows: farmland (21.06%), shrubland (17.88%), grassland (15.17%), orchard (15.02%), and woodland (13.29%). The vertical variation of soil moisture exhibited a certain degree of hierarchy. The vertical layers of soil moisture in each land use type were divided into strong variation layer, moderate variation layer, and weak variation layer. The vertical layers of grassland and woodland were consistent, with a strong variation layer of 0–10 cm, a moderate variation layer of 10–100 cm, and a weak variation layer of 100–180 cm. The strong and moderate variation layers of shrubland ranged from 0 to 140 cm, with a depth range greater than that of other land use types. The strong and moderate variation layers in the orchard were between 0–80 cm, with a depth range lower than that of other land use types. Farmland showed distinct vertical stratification, with the strongest variation in the deep layer (100–180 cm), a moderate variation from 0 to 20 cm layer, and a weak variation from 20 to 100 cm layer. **[Conclusion]** Soil moisture dynamics are affected by rainfall, land use types and engineering measures. When carrying out vegetation restoration, special attention should be paid to the dynamic changes in soil moisture of different land use types. [Ch, 4 fig. 2 tab. 37 ref.]

Key words: soil moisture; land use types; vertical distribution; Caijiachuan watershed

水资源是限制脆弱生态系统开展植被恢复重建的主要因素。作为地表水、地下水和大气水之间相互转化的纽带，土壤起到水库的功能，可以储存水分并减缓植被对较少或不稳定降水的依赖。然而，在植被恢复的不同阶段，植物对土壤水分的消耗超过了自然降水的补充，造成水分亏缺，因此导致一系列生态环境问题，尤其是在降水分不均且蒸发较强的地区，水分是影响生态系统结构和功能的关键因子。

黄土高原地区气候干旱，地下水埋藏较深，土壤水分主要来源于大气降水^[1]。1999 年以来，黄土高原地区实施了大规模退耕还林还草工程，生态建设使该区域显著变绿。在大规模植被恢复的背景下，不同类型乔木、灌木被应用于黄土高原流域综合治理。土壤水分时空分布受降水、土壤物理性质、地形、植被类型等诸多因素的影响。降水是该地区的主要水源，也是影响植被恢复成效的关键要素。人们围绕植被和降水的关系已开展了诸多研究。在年际尺度上，生长季不同类型植被土壤水分与降水呈显著正相关^[2]。通常，土壤表层 (0–40 cm) 水分对降水的响应较大，随深度的增加渐趋稳定。不同降水事件对土壤水分补给效果不同。小降水事件补充浅层土壤水分，有利于浅耕性植被生长，强降水事件补充深层土壤水分，有利于深根系作物生长^[3–4]。相关研究表明：植被在一定程度上能够削弱地形对土壤水分的影响^[5]。在干旱半干旱地区，土壤水分受植被类型影响更加明显^[6]。不同植被蒸散耗水、冠层对降水的再分配、根系特征是影响土壤水分格局的关键因素^[7–11]，而且植被还能够通过改善土壤水文物理性质进一步影响土壤水分^[12]。黄土高原降水量少蒸发量大，植被容易遭受干旱胁迫。植物会适应性调整根系的分布与形态^[13–14]。当降水补给不能够满足植被需要时，植被根系可能会向下延伸消耗深层土壤水分。若过度消耗深层土壤水分，深层土壤水分得不到补给，则会严重危害水资源安全。

残塬是黄土塬的类型之一。剧烈侵蚀导致塬面严重破碎化，形成残塬沟壑地貌。自退耕还林还草政策实施以来，晋西黄土区植被恢复工作取得了显著成效，植被覆盖率较高且呈显著改善趋势，土壤质量逐步改善，生态环境整体向好发展^[15–16]。土壤水分是植被恢复成功与否的关键因素之一，选择合理的工程措施和适宜的植被类型可以有效改善土壤水分条件，促进植被恢复^[17]。因此，研究土壤水分动态对于评估植被恢复产生的生态环境效应以及流域综合治理效应至关重要。相关研究发现：黄土高原残塬沟壑

区土壤水分长期处于亏缺状态^[18]。森林土壤水分输出主要为蒸散以及少量的地表径流,不同林地土壤水分呈现极强的时空异质性。诸多学者以变异系数为指标对土壤水分垂直变化进行研究^[19]。天然林表层(0~30 cm)土壤水分较人工林高且保水性好,但改善土壤入渗能力较弱^[20]。有研究表明:全球范围内极端降水事件的发生会更加频繁,并导致土壤水分变异加剧^[21]。基于此,本研究以黄土高原残塬沟壑区蔡家川流域5种土地利用类型为研究对象,开展不同深度土壤水分野外定位监测,研究不同土地利用类型对土壤水分的影响,分析不同土地利用类型土壤水分变化特征,为黄土残塬沟壑区植被恢复与生态建设提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域(36°14'27"~36°18'23"N, 110°39'45"~110°47'45"E),如图1所示。流域面积为34.23 km²,平均海拔为1 172 m,是典型的黄土残塬沟壑区。该区属暖温带大陆性气候,年平均降水量为575.9 mm。降水多集中在6—8月,年平均蒸发量为1 724.0 mm,年平均气温为10.0℃。土壤母质类型主要为碱性褐土,其中山地斜坡、梁顶、塬面有黄土覆盖,底层有一些红胶土。流域内植被类型丰富,乔木主要有刺槐 *Robinia pseudoacacia*、油松 *Pinus tabulaeformis*、辽东栎 *Quercus liaotungensis*、山杨 *Populus davidiana*、侧柏 *Platycladus orientalis*、胡枝子 *Lespedeza bicolor*、苹果 *Malus pumila* 等。灌木主要以黄刺玫 *Rosa xanthina*、丁香 *Syzygium aromaticum* 为主。农作物有玉米 *Zea mays*、小麦 *Triticum aestivum*、谷子 *Setaria italica* 等。草本植物主要以铁杆蒿 *Artemisia gmelinii*、艾蒿 *Artemisia vulgaris* 为主。

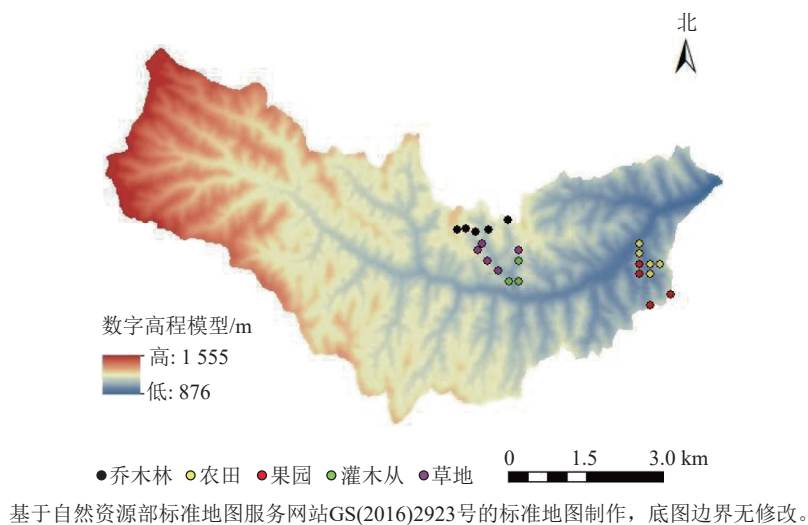


图1 蔡家川流域地理位置与采样点分布示意图

Figure 1 Location of Caijiachuan watershed and distribution of sampling points

1.2 土壤水分定位监测

为了系统监测流域内的土壤水分状况,采用网格法进行小流域尺度全面的野外踏查,并在此基础上布设样点,所选监测点涵盖了小流域内典型的土地利用类型。乔木林(刺槐)、灌木林(黄刺玫)、农田(玉米)各布设5个监测点,草地(铁杆蒿)布设3个监测点,果园(苹果)布设4个监测点。各监测点位置以及基本信息如图1和表1所示。使用便携式时域反射仪(TDR)定位监测流域内5种土地利用类型不同深度土壤水分,监测的土层深度设置为0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160和160~180 cm。监测时段为2023年生长季,即5—9月,每月测量2次,分别在月中以及月末进行。在使用TDR测量土壤水分之前,需要使用烘干法^[22]对TDR测量的土壤水分进行校正。使用烘干法测得实际质量含水量(土壤水分),之后根据土壤剖面容重换算为体积含水量(土壤水分),将其与TDR的介电常数进行拟合,得出回归方程 $y=1.8050x-0.3851$,决定系数(R^2)为0.99。其中: y 为采用烘干法测定的土壤含水量乘以土壤容重, x 为TDR的介电常数^[23]。

表 1 各土地利用类型基本信息

Table 1 General information of different land use types				
土地利用类型	平均坡度/(°)	树高/m	胸径/cm	冠幅/m
乔木林(刺槐)	22	13.30±2.02	18.54±4.21	4.26±0.78
灌木林(黄刺玫)	20	0.85±0.35	0.93±0.10(地径)	0.38±0.17
草地(铁杆蒿)	19	0.37±0.60	—	—
园地(苹果)	20	3.04±0.85	2.20±1.55	1.08±0.69
农田(玉米)	10	1.81±0.28	—	—

说明：—表示无此项。

1.3 数据统计与分析

使用 Excel 2021 对实测数据进行统计，采用双因素方差分析法分析土层深度与土地利用类型对土壤水分的影响，数据用平均值±标准差表示，并使用最小显著差异法 (LSD) 对同一因素不同水平间差异进行显著性检验 ($P<0.05$)。以上数据处理和图形绘制均在 R 4.3.2 中进行。同时使用 Matlab R2023a 结合最优分割法，采用标准差 (S) 和变异系数 (C_v) 对不同土地利用类型不同土层深度土壤水分进行聚类。本研究标准差用于衡量土壤水分的离散程度，反映了各土层土壤水分与平均土壤水分的偏离程度。变异系数则是标准差与平均土壤水分的比值，用于衡量不同土层土壤水分之间的相对变异性。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤水分时间 (生长季) 变化

由图 2 可知：生长季流域内发生降水 41 次，降水量为 311.1 mm，占全年降水量的 78.03%，最大降水量为 14.4 mm。降水以小到中雨为主。7—9 月降水量为 200.0 mm，占生长季降水量的 64.58%。生长季内，不同土地利用类型土壤水分变化趋势不同。5—6 月中旬，各土地利用类型土壤水分变化趋势一致，呈先下降后上升再下降的趋势。6 月中旬至 8 月中旬，不同土地利用类型变化趋势不同。这一时期农田土壤水分基本保持不变，灌木林与草地土壤含水量呈下降趋势。乔木林和果园土壤水分在 6 月中旬至 7 月中旬呈下降趋势，7 月中旬至 8 月中旬土壤水分保持不变。8 月中旬至 9 月中旬，各土地利用类型土壤水分变化趋势一致，均呈先上升后下降的趋势。5 月初至 7 月中旬草地土壤水分高于果园，7 月中旬至 9 月中旬果园土壤水分高于草地。生长季初期土壤水分高于生长季末期。综合对比可知不同土地利用类型土壤水分从高到低依次为农田 (21.06%)、灌木林 (17.88%)、草地 (15.17%)、果园 (15.02%)、乔木林 (13.29%)。

2.2 不同土地利用类型土壤水分空间变化

由表 2 可知：不同土地利用类型、土壤深度以及两者的交互作用对土壤水分影响显著 ($P<0.05$)。由图 3 可知：灌木林和农田土壤水分高于其他 3 种土地利用类型，整体上农田土壤水分 (21.06%) 高于灌木林 (17.88%)，但不同深度土层内，表现出不同的规律。0~20 cm 土层灌木林土壤水分高于农田，且在 0~10 cm 土层深度范围内，灌木林土壤水分显著高于农田 ($P<0.05$)，而在 120~180 cm 土层农田

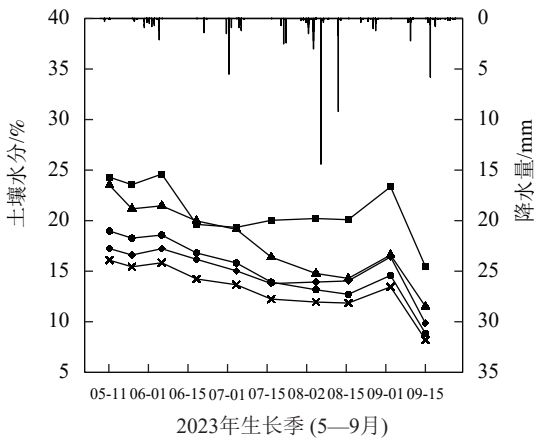


图 2 研究区 2023 年生长季 (5—9 月) 不同土地利用类型土壤水分对降水的响应

Figure 2 Response of soil moisture to rainfall under different land use types in the study area during the growing season (May to September) in 2023

表 2 不同土地利用类型不同深度土壤水分方差分析

Table 2 Variance analysis of soil moisture at different depths for various land use types					
变量	自由度	总平方和	均方	F	P
土地利用类型	4	8 919.5	2 229.87	93.92	<0.05
深度	9	888.2	98.69	4.16	<0.05
土地利用类型×深度	36	2 817.0	78.25	3.30	<0.05
残差	1 050	24 930.2	23.74		

土壤水分显著高于灌木林 ($P<0.05$)。草地和果园土壤水分差异在各个土层均不显著。0~10 cm 土层, 乔木林土壤水分显著低于草地和果园 ($P<0.05$), 其他深度范围内三者土壤水分差异不显著。

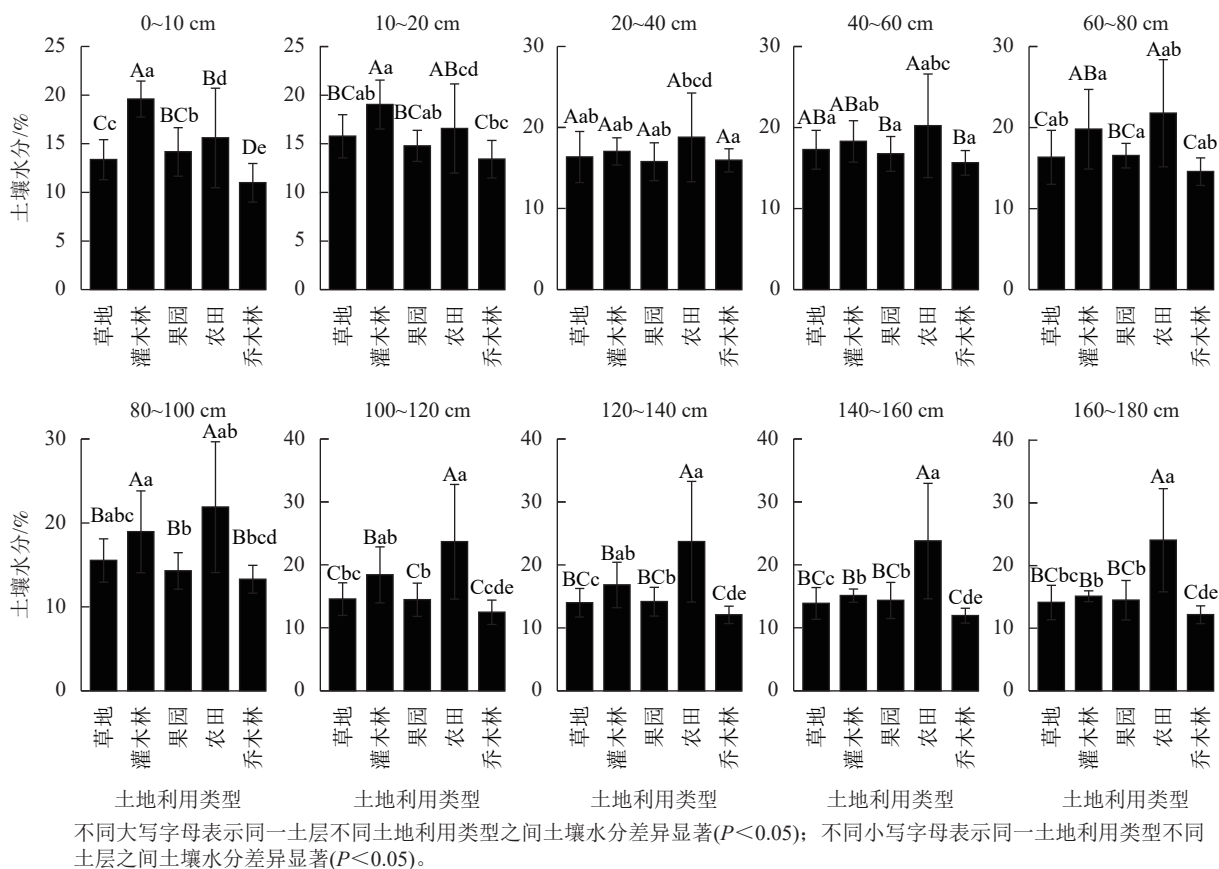


图3 不同土地利用类型土壤水分垂直变化
Figure 3 Soil moisture vertical changes across different land use types

依据标准差和变异系数, 采用有序分类中的最优分割法, 将各土地利用类型 0~180 cm 土层土壤水分垂直变化划分为强变异层、中等变异层、弱变异层 (图 4)。除农田外, 其他 4 种土地利用类型随着土层深度的增加土壤水分垂直层次分别是强变异层、中等变异层、弱变异层。草地和乔木林的强变异层 (0~10 cm 土层)、中等变异层 (10~100 cm 土层) 和弱变异层 (100~180 cm 土层) 均一致。灌木林强变异层为 0~120 cm 土层, 中等变异层为 120~140 cm 土层, 弱变异层为 140~180 cm 土层。果园强变异层为 0~10 cm 土层, 中等变异层为 10~80 cm 土层, 弱变异层为 80~180 cm 土层。农田土壤水分划分层次有别于其他土地利用类型, 强变异层出现在深层 (100~180 cm 土层), 表层是中等变异层 (0~20 cm 土层), 弱变异层为 20~100 cm 土层。

3 讨论

研究区农业为雨养农业, 土壤水分动态变化受降水入渗、地表蒸发和植物蒸腾的影响^[24]。土壤水分是制约该地区植被恢复与重建的重要因素。虽然降水集中生长季, 但是由于蒸散量大于降水对土壤水分的补给, 使得生长季前期土壤水分高于生长季末期。这与黄靖涵等^[25]在晋西黄土区对人工林土壤水分动

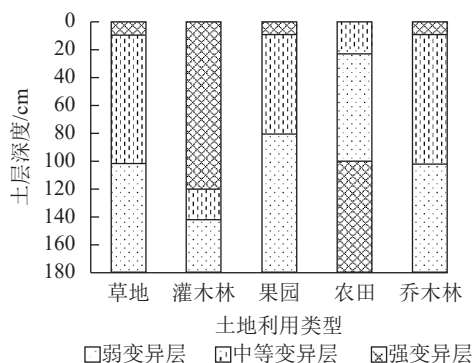


图4 不同土地利用类型土壤水分垂直层次划分
Figure 4 Vertical stratification of soil moisture by land use types

态的研究结果一致。6 月中旬至 8 月中旬, 降水呈增多趋势, 除农田外, 其他土地利用类型土壤含水量呈下降趋势。这是由于生长季内, 植被生长消耗大量水分, 气温升高导致蒸散量增加, 降水对土壤水分的补给小于植物蒸腾活动的需要, 使得土壤含水量呈下降趋势。农田土壤水分随着降水的增加基本保持不变, 则可能是由于降水对土壤水分的补给仅仅能够满足植物生长所需。综合整个生长季, 研究区不同土地利用类型土壤水分变化趋势与降水变化趋势一致。

除降水外, 植被自身属性也是影响土壤水分分布的重要因素。植被地上部分如冠层的截留、蒸腾作用, 以及地下部分如根系构型、根系分布深度都会影响土壤水分时空分布。降水从大气进入土壤过程中, 首先受到植被冠层的截留, 乔木冠层主要截留小降水事件产生的降水^[26]。刺槐是黄土高原典型造林树种, 相较于其他植被类型冠幅较大。本研究区监测时段内降水以小到中雨为主, 使得刺槐对降水的截留效应较强。植被蒸腾是土壤水文循环的关键过程。相较于侧柏和油松, 刺槐的蒸腾作用较强^[27]。在这些因素共同作用下, 乔木林土壤水分低于灌木林和草地。另一方面, 根系对土壤水分空间格局的形成起着至关重要的作用。根系通过改变土壤结构和水力传导特性, 影响壤中流的速度和分布, 根系形成的空隙可以成为壤中流的通道。此外, 植被主要通过细根摄取与运输水分, 且在生长发育过程中优先利用根系附近的土壤水分。相关研究表明: 刺槐林深层土壤中水平根系发达, >2.0 m 土层土壤耗水速率最大, 且最大耗水深度可达 23.2 m 土层, 冠幅 2~3 倍范围内是细根主要分布区^[28-29]。前期人们对残塬沟壑区人工林土壤水分的垂直监测结果表明: 刺槐人工林土壤水分变异程度最大, 侧柏人工林土壤水分较为稳定, 且不同土层存在差异^[25]。本研究中, 相较于其他 3 种植被类型, 刺槐与苹果根系分布深, 需水量大, 土壤含水量较低。但是苹果相较于刺槐, 冠幅小、根系分布浅, 需水量小, 所以苹果土壤水分高于刺槐土壤。研究表明: 农田土壤水分显著高于其他土地利用类型, 随着土层深度的增加土壤水分呈上升趋势。一方面, 农田中的主要农作物玉米是 1 年生作物, 相较于其他植被类型, 根系分布较浅, 耗水量较小, 使得农田土壤含水量较高。另一方面, 农田主要分布于修筑了淤地坝的沟道。相关研究发现: 淤地坝通过减少地表径流增加蒸发及入渗实现水资源再分配, 能够提高两岸沟坡土壤水分^[30], 并且能够补给深层土壤水分^[31]。这也使得农田土壤水分随着土层深度增加呈上升趋势。邱德勋等^[32]研究了黄土丘陵沟壑区 0~1 000 cm 土层土壤水分垂直变异及影响因素, 发现撂荒草地土壤水分高于灌木林地。本研究草地土壤含水量低于灌木土壤, 可能是由于本研究区域灌木下植被覆盖物较多, 蒸发量较小引起的。这与李航等^[33]的研究结果一致。

不同土地利用类型土壤水分的垂直变化表现出明显的层次性, 在一定程度上能够反映植被根系分布与土壤水分稳定程度^[34]。相关研究将刺槐 0~120 cm 土层土壤水分按照深度划分为速变层和相对稳定层 2 个层次^[19], 其中速变层土壤水分变化剧烈, 受降水影响明显。一些学者将侧柏 0~180 cm 土层土壤水分按照深度划分为活跃层、次活跃层以及相对稳定层 3 个层次^[23]。还有一些学者将人工林 0~500 cm 土层土壤水分垂直层次划分为交换层、利用层、调节层和稳定层 4 个层次^[25]。以上学者根据土壤深度、研究地区以及研究对象的差异性, 均依据变异系数划分土壤水分垂直层次。本研究采用最优分割法, 以变异系数和标准差为指标, 将土壤水分划分为强变异层、中等变异层以及弱变异层。强变异层土壤水分变化剧烈, 受降水影响明显。中等变异层是植被吸水性根系主要分布区, 土壤水分主要受植被根系影响。乔木林、灌木林、草地、果园土壤水分变异程度随着土层深度的增加整体呈下降趋势。这与岳宏昌等^[35]对黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直分布的研究一致。研究表明: 在 0~2.0 m 土层, 土壤质地和根系生物量控制土壤水分的时空变异^[36]。本研究中农田深层土壤水分变异程度较大, 这主要由于农田多分布于沟道坝地, 深层泥沙沉积过程中可能会形成较为致密的土壤层, 使得上层土壤透水性较强, 下层土壤透水性弱, 阻碍水分的垂直运动, 增加水分分布的异质性, 同时有利于壤中流产生^[37], 使得深层土壤水分较高。

4 结论

生长季内不同土地利用类型土壤水分表现出显著的分层特征, 水分垂直变化可划分为强变异层、中等变异层以及弱变异层 3 个层次。其中灌木林(黄刺玫)土壤水分的强变异层以及中等变异层为 0~140 cm 土层, 变异范围大于其他土地利用类型。土壤水分动态受降水、土地利用格局以及工程措施综合影响。相较于灌草植被, 乔木耗水量大, 容易形成土壤干层。在开展植被恢复过程中, 可优先选择灌草植

被,在此基础上优化现有植被格局,以实现土壤水分的高效利用。为了更深入地揭示黄土高原残塬沟壑区土壤水分的动态变化规律,未来的研究不仅需要关注土壤水分的表层变化,还应拓展至更深层土壤水分的长期动态监测。同时,应进一步探讨根系生长与土壤水分之间的相互作用机制,从而为黄土高原地区的生态恢复提供指导。

5 参考文献

- [1] YANG Lei, ZHANG Handan, CHEN Liding. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(3): 292–301.
- [2] 翟博超, 朱燕, 申小娟, 等. 黄土丘陵区两个典型成熟森林群落土壤水分时空变化特征及对降雨事件的响应[J]. 水土保持研究, 2024, **31**(4): 170–178.
- ZHAI Bochao, ZHU Yan, SHEN Xiaojuan, *et al.* Spatiotemporal variation of soil moisture and the responses to rainfall events in two typical mature forest stands in the loess hilly region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, **31**(4): 170–178.
- [3] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 油蒿灌丛群落浅层土壤水分对不同降雨格局的响应[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(5): 1571–1578.
- WANG Bo, DUAN Yuxi, WANG Weifeng, *et al.* Responses of shallow soil water content in *Artemisia ordosica* community to different rainfall patterns [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(5): 1571–1578.
- [4] 郭茹茹, 杨磊, 李宗善, 等. 半干旱黄土高原苜蓿草地撂荒过程土壤水分变化特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(23): 8618–8626.
- GUO Ruru, YANG Lei, LI Zongshan, *et al.* Characteristics of soil moisture variation during the abandonment process of *Medicago sativa* grassland in the semi-arid the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(23): 8618–8626.
- [5] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报, 2012, **32**(16): 4961–4968.
- YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe, *et al.* Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(16): 4961–4968.
- [6] CHEN Liding, HUANG Zhilin, GONG Jie, *et al.* The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China [J]. *CATENA*, 2007, **70**(2): 200–208.
- [7] 陈钰馨, 郑博福, 傅赫, 等. 不同植被类型根系对土壤水分分布的影响[J]. 中国水土保持科学, 2023, **21**(1): 37–46.
- CHEN Yuxin, ZHENG Bofu, FU He, *et al.* Effects of roots in different vegetation types on soil water distribution [J]. *Science of Soil Water Conservation*, 2023, **21**(1): 37–46.
- [8] 费洪岩, 童倩, 万传宇, 等. 黄土高原不同林龄刺槐林土壤水分亏缺程度[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(5): 240–246.
- FEI Hongyan, TONG Qian, WAN Chuanyu, *et al.* Degree of soil moisture deficit of robinia pseudoacacia plantations at different ages on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(5): 240–246.
- [9] 陈海滨, 孙长忠, 安锋, 等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究 (I) 土壤水分的垂直变化和季节变化特征[J]. 西北林学院学报, 2003, **18**(4): 13–16.
- CHEN Haibin, SUN Changzhong, AN Feng, *et al.* A study on forest soil water features of Loess Plateau Gully and hilly region (I) vertical and seasonal variation of soil water [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2003, **18**(4): 13–16.
- [10] 陈海滨, 刘淑明, 党坤良, 等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究 (II) 土壤水分有效性及其亏缺状况的分析[J]. 西北林学院学报, 2004, **19**(1): 5–8.
- CHEN Haibin, LIU Shuming, DANG Kunliang, *et al.* A study on forest soil moisture features of gullied loess region of the Loess Plateau (II) analyses on the soil moisture availability and deficit state [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, **19**(1): 5–8.
- [11] 蔡燕, 王会肖. 黄土高原丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分动态[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(6): 79–81.
- CAI Yan, WANG Huixiao. Soil water dynamics of different vegetation in gully and hilly regions of the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, **13**(6): 79–81.
- [12] 刘卓昕, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J]. 水土保持研究, 2023, **30**(6): 206–213.
- LIU Zhuoxin, GAO Peng, MU Xingmin, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in loess

- region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(6): 206–213.
- [13] 程冰静, 李承, 李鹏. 干旱胁迫对不同杨树种群根系形态特征的影响研究[J]. *农业灾害研究*, 2023, **13**(9): 10–12.
CHENG Bingjing, LI Cheng, LI Peng. Effects of drought stress on morphological characteristics of root systems of different poplar populations [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2023, **13**(9): 10–12.
- [14] 薛玉振, 张林, 边翠芳. 干旱胁迫对刺槐幼苗生长及根系发育的影响[J]. *热带林业*, 2022, **50**(3): 15–18.
XUE Yuzhen, ZHANG Lin, BIAN Cuifang. Effects of drought stress on the growth and root development of *Robinia pseudoacacia* seedlings [J]. *Tropical Forestry*, 2022, **50**(3): 15–18.
- [15] 刘畅, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(5): 101–107.
LIU Cang, ZHANG Jianjun, ZHANG Haibo, *et al.* Characteristics of soil infiltration and soil quality evaluation after conversion of farmland to forest in loess region of western Shanxi Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(5): 101–107.
- [16] 刘泽晖, 毕华兴, 侯贵荣. 黄土残塬沟壑区范围界定及近 21 年来 NDVI 时空变化特征[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(6): 144–150.
LIU Zehui, BI Huaxing, HOU Guirong. Determining the scope of the residual gully region on the Loess Plateau and the characteristics of temporal and spatial changes of NDVI [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(6): 144–150.
- [17] 朱洪盛, 赵炯昌, 池金洺, 等. 晋西黄土区典型造林整地措施对土壤水分动态的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(5): 996–1004.
ZHU Hongsheng, ZHAO Jiongchang, CHI Jinming, *et al.* Soil moisture characteristics under level bench and vegetation in loess area of western Shanxi Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(5): 996–1004.
- [18] 郑芳, 张建军. 晋西黄土残塬沟壑区土壤水分的时空变化研究[J]. *水土保持研究*, 2010, **17**(5): 226–230.
ZHENG Fang, ZHANG Jianjun. Temporal and spatial changes of soil moisture in Remanent Loess Plateau Gully Region of western Shanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, **17**(5): 226–230.
- [19] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 等. 晋西黄土区典型林地土壤水分变化特征[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(1): 181–187.
ZHAO Danyang, BI Huaxing, HOU Guirong, *et al.* Soil moisture dynamics of typical plantation in loess region of west Shanxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(1): 181–187.
- [20] 云慧雅, 毕华兴, 王珊珊, 等. 不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(6): 183–189.
YUN Huiya, BI Huaxing, WANG Shanshan, *et al.* Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(6): 183–189.
- [21] 冉漫雪, 丁军军, 孙东宝, 等. 全球气候变化下土壤呼吸对温度和水分变化的响应特征综述[J]. *中国农业气象*, 2024, **45**(1): 1–11.
RAN Manxue, DING Junjun, SUN Dongbao, *et al.* A review of the response characteristics of soil respiration to temperature and moisture changes under global climate change [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, **45**(1): 1–11.
- [22] ZHU H D, SHI Z H, FANG N F, *et al.* Soil moisture response to environmental factors following precipitation events in a small catchment [J]. *CATENA*, 2014, **120**: 73–80.
- [23] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J]. *生态学报*, 2016, **36**(11): 3441–3449.
YU Yang, WEI Wei, CHEN Liding, *et al.* Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid loess hilly region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(11): 3441–3449.
- [24] 白天路, 杨勤科, 申佳. 黄土高原丘陵沟壑小流域土壤水分垂直分布变异特征及影响因子[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(12): 2508–2514.
BAI Tianlu, YANG Qinke, SHEN Jia. Spatial variability of soil moisture vertical distribution and related affecting factors in hilly and gully watershed region of Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(12): 2508–2514.
- [25] 黄靖涵, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 晋西黄土区典型人工林土壤水分的垂直分布特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(2): 387–395.
HUANG Jinghan, BI Huaxing, ZHAO Danyang, *et al.* Vertical distribution of soil moisture in typical plantation in the loess region of western Shanxi Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(2): 387–395.

- [26] LOIK M E, BRESHEARS D D, LAUENROTH W K, *et al.* A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: climatology and ecohydrology of the western USA [J]. *Oecologia*, 2004, **141**(2): 269–281.
- [27] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(20): 148–159.
- LI Lanjun, SONG Xiaoyu, XIA Lu, *et al.* Response of evaporation and transpiration of typical afforestation tree species to climate changes in gully region of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(20): 148–159.
- [28] 岳玮, 刘讯, 刘姜艳. 黄土高原丘陵沟壑区主要造林树种细根生物量分布规律研究[J]. *生态科学*, 2015, **34**(5): 58–65.
- YUE Wei, LIU Xun, LIU Jiangyan. Research on the fine roots biomass and distribution of main afforestation tree species in Loess Plateau [J]. *Ecological Science*, 2015, **34**(5): 58–65.
- [29] 孟廷芳, 陈光杰, 武文杰, 等. 黄土高原生态林耗水深度和深层耗水量研究[J]. *土壤通报*, 2024, **55**(1): 50–56.
- MENG Tingfang, CHEN Guangjie, WU Wenjie, *et al.* Depth and amount of deep soil water consumption in ecological forests on the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, **55**(1): 50–56.
- [30] 屈凤莲, 姚西文, 毛泽秦. 淤地坝对沟坡土壤水分及作物生长影响的研究[J]. *人民黄河*, 2004, **26**(12): 26–27, 46.
- QU Fenglian, YAO Xiwen, MAO Zeqin. Study on effects of warping dams on soil moisture of gully slopes and crop growing [J]. *Yellow River*, 2004, **26**(12): 26–27, 46.
- [31] 温丽娜, 周波, 王立, 等. 淤地坝沟道植被覆盖/土地利用和土壤水分的分析[J]. *草原与草坪*, 2021, **41**(3): 41–47.
- WEN Lina, ZHOU Bo, WANG Li, *et al.* Analysis of vegetation cover, land utilization and soil moisture in the controlled area of check dam in loess gully region [J]. *Grassland and Turf*, 2021, **41**(3): 41–47.
- [32] 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*, 2021, **19**(3): 72–80.
- QIU Dexun, ZHAO Baili, YIN Diansheng, *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.
- [33] 李航, 严方晨, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J]. *生态学报*, 2018, **38**(11): 3889–3898.
- LI Hang, YAN Fangchen, JIAO Juying, *et al.* Soil water availability and holding capacity of different vegetation types in hilly-gullied region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(11): 3889–3898.
- [34] 常恩浩, 李鹏, 张铁钢, 等. 旱季雨季对黄土丘陵退耕区植被根系分布及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(24): 129–138.
- CHANG Enhao, LI Peng, ZHANG Tiegang, *et al.* Root systems distribution and water use pattern of vegetation from abandoned croplands during dry and wet season in loess hilly region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(24): 129–138.
- [35] 岳宏昌, 王玉, 李缠云, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直分布研究[J]. *水土保持通报*, 2009, **29**(1): 66–69, 82.
- YUE Hongchang, WANG Yu, LI Chanyun, *et al.* Vertical distribution of soil moisture in the loess hilly and gully area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, **29**(1): 66–69, 82.
- [36] TONG Yongping, WANG Yunqiang, SONG Yi, *et al.* Spatiotemporal variations in deep soil moisture and its response to land-use shifts in the wind-water erosion crisscross region in the critical zone of the Loess Plateau (2011–2015), China[J/OL]. *CATENA*, 2020, **193**: 104643 [2024-10-24]. DOI: [10.1016/j.catena.2020.104643](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104643).
- [37] 陈洪松, 邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. *水科学进展*, 2003, **14**(4): 413–420.
- CHEN Hongsong, SHAO Ming'an. Review on hillslope soil water movement and transformation mechanism on the Loess Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2003, **14**(4): 413–420.