

晋西黄土区不同水文年土壤水分特征及其主要影响因素分析

孙占薇^{1,2}, 马 岚¹, 梅雪梅³, 刘京晶¹, 王福星¹, 张金阁¹, 燕 琳¹

(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; 3. 华北水利水电大学 水资源学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 【目的】晋西黄土区生态环境脆弱, 土壤水分是制约植被生长的重要因子。为深入了解该区域土壤水分年际变化, 明确制约该区域土壤储水量的关键因子, 探讨晋西黄土区不同植被类型在生长季节内土壤含水量的变化。【方法】以定位观测法为主, 对人工刺槐 *Robinia pseudoacacia* 林、天然三角槭 *Acer buergerianum* 林和野艾蒿 *Artemisia lavandulaefolia* 草地生长季(5–10月)内 0~400 cm 土壤含水量进行监测; 在此基础上, 根据含水量标准差对土壤进行活跃层划分, 并通过生长季前后储水量的对比探究年际土壤储水量盈亏状况; 测定了典型样地的土壤性质, 并结合地形、不同水文年旱涝特征对土壤储水量的影响因子进行冗余分析。【结果】①人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地平均土壤含水量分别为 8.36%~9.63%、10.01%~13.19% 和 15.43%~19.17%, 野艾蒿草地表层土壤含水量显著高于人工刺槐林和天然三角槭林 ($P<0.05$)。②天然三角槭林土壤水分活跃层最深可达 180 cm, 人工刺槐林和野艾蒿草地土壤水分活跃层较浅; 中等湿润年土壤水分活跃层最深, 严重干旱年土壤水分活跃层最浅, 平水年土壤水分活跃层最浅。③严重干旱年, 人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地土壤水分亏缺土层深度分别为 100~300、0~200 和 0~100 cm; 平水年土壤水分的输入和输出达到平衡; 中等湿润年 0~200 cm 土层水分得到不同程度补给, 而 200~400 cm 土层的水分补给量接近于 0。④不同深度土层土壤储水量受不同环境因子影响, 其中植被类型和土壤容重是 0~100 cm 土层水分的主导因素, 100~200 cm 土层水分主要受容重和坡向控制, 而不同水文年旱涝程度、土壤黏粒和粉粒含量是 200~400 cm 土层水分的主导因素。【结论】干旱水文年土壤水分亏缺严重, 平水年及湿润年亏缺现象有所缓解, 植被类型对土壤储水量影响最大。今后黄土高原地区的造林, 不仅要考虑树种的耐旱能力, 更应充分考虑地形、土质及生长季降水的分配情况带来的影响。图 5 表 5 参 33

关键词: 水土保持学; 晋西黄土区; 典型植被; 水文年; 土壤水分; 冗余分析

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2021)01-0010-11

Characteristics of soil moisture and its main influencing factors in different hydrological years in western Shanxi loess region

SUN Zhanwei^{1,2}, MA Lan¹, MEI Xuemei³, LIU Jingjing¹, WANG Fuxing¹, ZHANG Jingge¹, YAN Lin¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. National Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Beijing Forestry University, Jixian 042200, Shanxi, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate soil moisture variation of different vegetation types during the growing season in the loess region of western Shanxi Province, where the eco-environment is fragile and soil moisture is an important factor restricting the vegetation restoration. [Method] The soil moisture content of 0–400 cm soil layer in the growing season (May to October) in artificial forestland (*Robinia pseudoacacia*), natural forestland (*Acer buergerianum*) and grassland (*Artemisia lavandulaefolia*) was

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-09-21

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFC0501704)

作者简介: 孙占薇, 从事土壤水分入渗及补给研究。E-mail: 876140768@qq.com。通信作者: 马岚, 副教授, 从事土壤水分入渗补给及坡面流阻力研究。E-mail: mlpcz@sina.com

monitored by location observation method. On this basis, the soil active layer was divided according to the standard deviation of moisture content, and the annual soil water storage profit and loss were explored by comparing the water storage before and after the growing season. The soil properties of typical sample plots were measured, and the redundancy analysis of the factors affecting soil water storage capacity was carried out in combination with topography and characteristics of drought and flood in different hydrological years. [Result] (1) The soil moisture of the artificial forestland, the natural forestland, and the grassland ranged from 8.36% to 9.63%, 10.01% to 3.19% and 15.43% to 19.17%, respectively, and the surface soil moisture content of the grassland was significantly higher than that of the forestlands ($P < 0.05$). (2) The depth of soil water active layer in the natural forestland reached 180 cm, deeper than that of the artificial forestland and the grassland. The soil water active layer was the deepest in moderate humid years, shallower in severe drought years, and the shallowest in normal years. (3) In severe drought years, the depth of soil water deficit of the three types was 100–300, 0–200 and 0–100 cm, respectively. The input and output of soil moisture could keep balance in normal years. In moderate humid years, the moisture content in 0–200 cm soil layer was replenished to different degrees, while the moisture content in 200–400 cm soil layer was close to 0. (4) The soil moisture storage of different soil layers was affected by different environmental factors among which vegetation types and bulk density were the dominant factors of soil moisture in 0–100 cm soil layer, and the water content of 100–200 cm soil layer was mainly controlled by bulk density and slope aspect, while the degree of drought and flood in different hydrological years, the content of soil clay and silt were the dominant factors of soil moisture in 200–400 cm soil layer. [Conclusion] The soil water deficit is severe in drought years, and is alleviated in normal or wet years. Vegetation types have the greatest impact on soil moisture storage. In the future restoration of vegetation in the Loess Plateau, we should not only consider the drought tolerance of tree species, but also the impact of topography, soil properties, and precipitation distribution during the growing season. [Ch, 5 fig. 5 tab. 33 ref.]

Key words: soil and water conservation; loess region in western Shanxi Province; typical vegetation; hydrological year; soil moisture; redundancy analysis

土壤水分作为植被生长的重要限制因素^[1], 对生态系统和水文过程起着重要作用。黄土高原地区覆盖的广袤而深厚的土层, 为降水转化为土壤水提供了有利的条件。退耕还林(草)措施实施后, 黄土区植被覆盖得到了极大改善, 覆盖度由 31.6% 增加到 59.6%^[2], 但该措施同时也加快了土壤的干燥化速度, 使得植被缺水问题日益严峻^[3]。因此, 土壤水分的变化规律和影响因素成为了近些年黄土高原地区的研究热点问题。土壤在接受降水补给的同时, 也因植被生长而消耗水分。已有研究表明: 黄土高原地区人工植被下的土壤存在不同程度的水分亏缺现象^[4]。不同水文年降水量及季节雨水分分配的差异, 使得不同时段土壤活跃层存在差异^[5]。土壤储水能力受植被类型、地形和土壤理化性质等多因素的制约, 这些环境因子通过交互作用直接或间接发挥着作用^[6]。目前, 关于黄土区土壤水分时空动态变化的研究成果较为丰富^[7–10], 但是大多数研究集中在某年的特定时间段, 缺乏代表性, 且侧重变化规律或单一影响因素的研究。本研究针对晋西黄土区具有代表性的人工刺槐 *Robinia pseudoacacia* 林、天然三角槭 *Acer buergerianum* 林和野艾蒿 *Artemisia lavandulaefolia* 草地, 探究严重干旱年、平水年和中等湿润年的土壤水分变化规律、水分盈亏状况及环境因素对不同土层储水量的影响, 为探索有利于区域土壤水分储存的植被类型提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域(36°14′~36°18′N, 110°40′~110°48′E), 地貌属于黄土高原

残塬沟壑, 海拔 904~1 592 m, 平均海拔 1 168 m。该地属暖温带大陆性季风气候, 多年平均降水量为 571.0 mm, 4~10 月降水量占全年的 90.5% 左右, 年平均气温 10.0 ℃, 潜在蒸发量 1 729.0 mm。土壤类型为褐土。研究区内分布着近 190 余种木本植被, 常见天然植被如辽东栎 *Quercus liaotungensis*、山杨 *Populus davidiana*、白桦 *Betula platyphylla*、侧柏 *Platycladus orientalis*、白皮松 *Pinus bungeana*、黄刺梅 *Rosa xanthina* 林等; 人工植被主要是刺槐、油松 *Pinus tabuliformis*、侧柏林等。研究区地理位置见图 1。

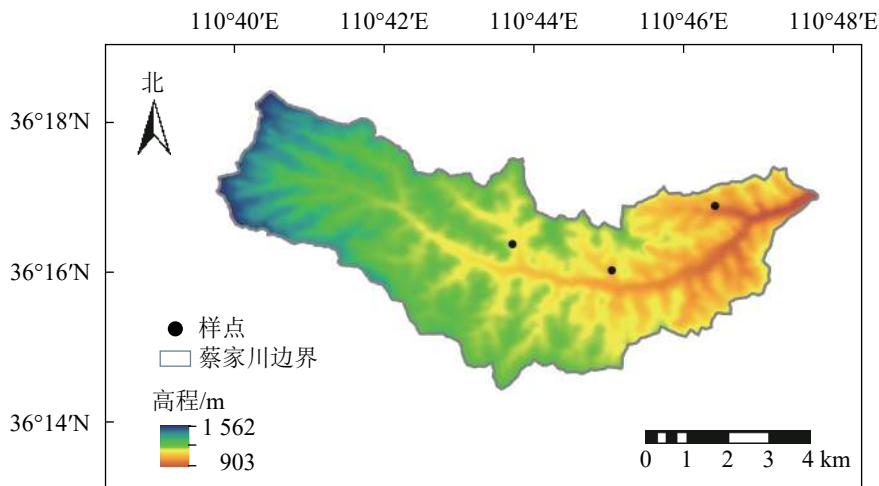


图 1 研究区地理位置示意图

Figure 1 Geographical location of studied area

1.2 样地设置

本研究在蔡家川流域内的嵌套小流域进行, 以 3 种典型植被 (人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地) 为研究对象, 乔木林地采用 20 m×20 m 的样方, 草地采用 1 m×1 m 的样方。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of experimental sample plots

样地类型	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	覆盖度/%	林分密度/(株·hm ⁻²)	平均树高/m
人工刺槐林	1 003~1 069	23.7	203	72	2 000	7.9
天然三角槭林	1 030~1 093	21.8	103	65	416	5.7
野艾蒿草地	980~1 047	20.2	333	86		

1.3 方法

在群落调查的基础上, 随机选择 3 个样地样点, 采用土钻法对 0~400 cm 土层以 20 cm 为间隔采集土壤样品。将获得的土壤样品一份装入铝盒带回实验室, 烘箱设定恒温 105 ℃, 烘干 24 h, 放置室温后测定土壤含水量, 另一份用于测定土壤其他理化性质。采用环刀法对 0~100 cm 土层以 10 cm 为间隔测定土壤容重。采用 MalvernSizer 2000 超声波粒度分析仪对土壤粒径进行分析, 采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质质量分数, 采取环刀法测定 0~100 cm 土层土壤孔隙度, 以上指标均设置 3 个重复。研究期内降水气象资料由观测点附近的气象站获得。土壤水分监测时间为 2016、2017 和 2019 年 3 a 的生长季初期 (5 月)、中期 (7 月) 和末期 (10 月)。

1.4 数据处理

标准化降水指数 (I_{SP}) 为 MCKEE 等^[11] 提出的评价旱涝程度的指数, 其优点在于化解了降水时空分布差异大, 难以直接相互比较的问题。标准化降水指数可以基于特定时间尺度计算降水量之和, 基于降水量的 Γ 分布, 并通过正态标准化得到^[12]。假设某一时段的降水量为 x (mm), 则其 Γ 分布的概率密度函数为:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}. \quad (1)$$

式 (1) 中: Γ 指的是 Gamma 函数。

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx. \quad (2)$$

式 (2) 中： α 、 β 分别代表形状参数和尺度参数 ($\alpha > 0$, $\beta > 0$)。用最大似然法估算 α 和 β 的最佳值。即：

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right); \quad (3)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}; \quad (4)$$

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln x_i}{n}. \quad (5)$$

式 (3)~(5) 中： n 为计算序列的长度， $\bar{x}$ 为多年平均降水量。 A 代表观测点的数量。

根据 I_{SP} 数值，MCKEE 等^[11] 将水文年划分为 7 个大类，分别是 $I_{SP} \leq -2.00$ 为极端干旱年， $-2.00 < I_{SP} < -1.50$ 为严重干旱年， $-1.50 \leq I_{SP} < -1.00$ 为中度干旱年， $-1.00 \leq I_{SP} < 1.00$ 为平水年， $1.00 \leq I_{SP} < 1.50$ 为中度湿润年， $1.50 \leq I_{SP} < 2.00$ 为非常湿润年， $I_{SP} \geq 2.00$ 为极端湿润年。

土壤储水量 (S_{ws}) 的计算公式为：

$$S_{ws} = \sum_{i=1}^n (\theta_i h_i). \quad (6)$$

式 (6) 中： θ_i 为第 i 层体积含水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)， h_i 为土层厚度 (mm)。

土壤含水量标准差 (D_S) 能够反映不同土层土壤水分变化情况。为了研究不同水文年活动层变化特征，采用土壤含水量标准差，将土壤剖面水分分布划分为 3 层，分别为土壤水分活跃层 ($D_S \geq 1.5$)，土壤水分次活跃层 ($1.0 \leq D_S < 1.5$) 和土壤水分相对稳定层 ($D_S < 1.0$)^[13]。

为分析环境因子对土壤储水量的影响程度，通过冗余分析 (RDA) 探究环境因子对不同土层 (0~100、100~200、200~300 和 300~400 cm) 土壤储水量的影响，环境因子包括植被类型、不同水文年旱涝程度、坡度、坡向、土壤有机碳质量分数、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、容重和毛管孔隙度。采用前向选择剔除部分冗余变量，并通过蒙特卡洛检验分析筛选出的环境因子与土壤储水量是否存在显著相关性。

本研究中方差分析、LSD 多重比较采用 SPSS 18.0，冗余分析 (RDA) 采用 CANOCO 4.5，其他基础数据处理和绘图采用 Excel 和 Origin。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分概况

根据 I_{SP} 对研究期内各时间段的干旱程度进行划分显示：2016、2017 及 2019 年 I_{SP} 分别为 -0.33 (平水年)、1.41 (中等湿润年) 以及 -1.57 (严重干旱年)。人工刺槐林、天然三角械林和野艾蒿草地平均土壤含水量分别为 8.36%~9.63%、10.01%~13.19%、15.43%~19.17% (表 2)。3 种植被类型 0~100 cm 土层土壤含水量差异显著 ($P < 0.05$)，100 cm 以下土层含水量差异不显著 ($P > 0.05$)。野艾蒿草地土壤含水量较高，天然林次之，而人工刺槐林最低。人工刺槐林冠层较高，地面灌草植被覆盖程度大于天然三角械林，相应耗水量较大，导致人工林表层土壤水分含量较低。0~100 cm 人工刺槐林、天然三角械林和野艾蒿草地土壤含水量标准差分别为 2.12、1.43 和 1.68，人工刺槐林变异程度最高，野艾蒿草地次之，天然三角械林变异程度最低，100~400 cm 土壤变异程度减小。不同植被类型土壤表层水分波动较大，而深层变幅平缓。该结论与汪星等^[14] 和徐志尧等^[15] 在对黄土高原半干旱区土壤水分动态变化研究结论一致，土壤含水量随着深度变化发生浮动，后趋于恒定。土壤表层受地表风力、辐射和降水的影响，容易产生波动，而深层干扰较小^[16]。

2.2 土壤水分垂直分布的年际差异

土壤水分垂直分布特征如图 2 所示。可以看出：生长季内，人工刺槐林和天然三角械林的土壤含水

表2 不同植被类型平均土壤含水量多重比较

Table 2 Multiple comparisons of average soil water contents of different vegetation types

土层深度/cm	土壤含水量/%					
	人工刺槐林		天然三角槭林		野艾蒿草地	
	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差
0~100	6.90~17.40	9.63±2.12 c	9.46~19.56	13.19±1.43 b	13.67~22.51	15.43±1.68 a
100~200	6.71~11.20	8.71±1.21 b	8.47~14.56	10.72±0.87 b	16.16~20.36	17.58±0.83 a
200~300	8.08~10.46	8.54±0.39 b	8.56~13.66	10.20±0.77 b	18.28~20.80	19.17±0.62 a
300~400	7.85~8.89	8.36±0.21 b	8.89~11.77	10.09±0.69 b	17.78~18.47	18.52±0.33 a

说明：同行不同字母表示同一土层不同植被类型土壤含水量差异显著($P<0.05$)

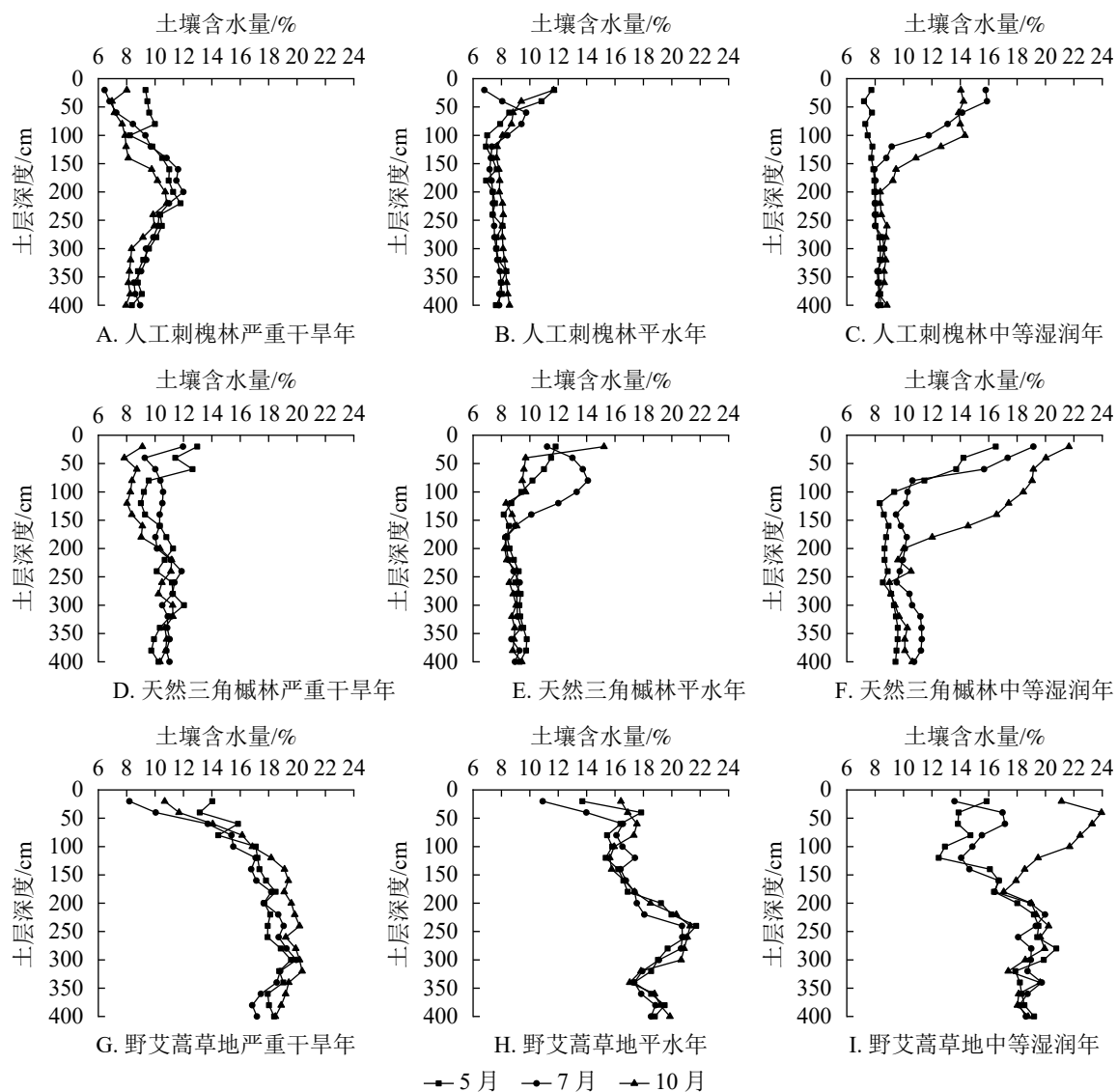


图2 土壤剖面含水量变化

Figure 2 Change of soil water contents with soil depth

量随着土层深度的增加而减小,而野艾蒿草地则相反。土壤活跃层变化更直观地反映土壤垂直剖面的年际差异。不同水文年 0~400 cm 活动程度划分结果见表3。对于严重干旱年,人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地活跃层下边界分别为 60、80、40 cm。而在平水年人工刺槐林及野艾蒿草地水分活跃层深度均不足 50 cm,但天然三角槭林可达 120 cm。在中等湿润年,人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地水分活跃层分别可达 140、180 和 140 cm。在所研究的水文年,天然三角槭林的土壤水分活跃层始终

表 3 样地土壤水分活动层划分

Table 3 Division of soil water active layers in sample plots

植被类型	年份	活跃层		次活跃层		相对稳定层	
		标准差/cm	范围/cm	标准差/cm	范围/cm	标准差/cm	范围/cm
人工刺槐林	严重干旱年	1.51~1.62	20~60	—	—	0.27~1.00	60~400
	平水年	1.38~2.83	20~40	1.00~1.07	40	0.21~0.75	40~400
	中等湿润年	1.50~4.69	20~140	1.48	140~160	0.18~0.61	160~400
天然三角械林	严重干旱年	1.99~2.01	20~80	1.00~1.26	80~120	0.27~0.98	120~400
	平水年	1.64~2.48	20~120	—	—	0.06~0.99	120~400
	中等湿润年	1.63~4.79	20~180	—	—	0.49~0.95	180~400
野艾蒿草地	严重干旱年	1.55~2.09	20~40	1.15	40~60	0.21~1.00	60~400
	平水年	2.00~2.75	20~40	—	—	0.08~0.99	40~400
	中等湿润年	3.67~5.00	20~140	—	—	0.25~0.84	140~400

说明：—表示该年份不存在相应活动层

较深，而土壤活跃层反映了土壤受降水和蒸发等因素的影响程度^[17]。这表明天然三角械林土壤受外界因素干扰较强。人工刺槐林、天然三角械林和野艾蒿草地活跃层深度从大到小均表现为中等湿润年、严重干旱年、平水年。次活跃层非普遍存在，天然三角械林和野艾蒿草地次活跃层均出现在水分较为匮乏的干旱年，而人工刺槐林的次活跃层出现在平水年和中等湿润年。

黄土高原地区降水对土壤补给的深度主要集中在 100~300 cm，土壤水分活跃层主要集中在 100 cm 左右。随植被恢复年限的增加，活跃层深度也有所增加^[18]。本研究表明：土壤活跃层深度最深可达 200 cm 左右。野艾蒿草地活跃层深度较浅，人工刺槐林和天然三角械林活跃层较深，这主要是由于林地如刺槐等具有发达的根系，由主根和多层侧根构成，侧根丰富而发达^[19]，且随着林龄增长，根系生物量逐年增加，根系具有感知水分梯度的能力，其吸水作用将土壤水分向下牵引，而草地的根系分布较浅，对深层土壤水分难以起到作用。土壤水分活跃层深度在干旱年和湿润年大于平水年。这主要是由于黄土丘陵区干旱年生长季降水量缺乏，旱季和雨季降水的分布存在明显差异，导致了土壤水分和根系分布的季节性差异^[20]。同时湿润年土壤水分在生长季整体性增加，雨季大量降水补充了植物生长消耗的水分，水分下渗程度也较高，生长季前后水分差异较大，从而使得湿润年土壤活跃层最深^[21]。

2.3 土壤水分盈亏状况的年际差异

生长季前后土壤储水量差值的大小变化反映了年内土壤水分补给或消耗特征。人工刺槐林、天然三角械林和野艾蒿草地生长季表层土壤储水量变化范围较深层土壤大，深层储水量变化接近于 0(图 3)。严重干旱年，生长季土壤储水量降低，表明由于降水量有限，不足以补充蒸散，不同植被类型均出现土壤水分亏缺的现象。人工刺槐林 100~300 cm 土壤水分亏缺程度较浅层(0~100 cm)和深层(300~400 cm)更为严重，天然三角械林在 0~200 cm 水分亏缺最为严重，而在深层部分土壤得到了补给。对于野艾蒿草地，0~100 cm 土层亏缺程度最高，随深度增加，亏缺程度减弱。人工刺槐林和天然三角械林的浅层土

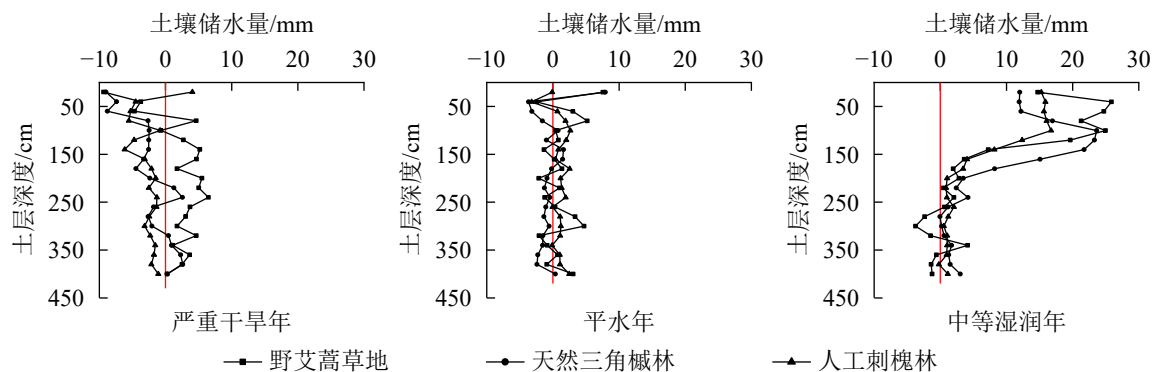


图 3 不同植被类型土壤水分盈亏状况

Figure 3 Status of soil water in different vegetation types

壤水分损失量大于野艾蒿草地。平水年生长季, 土壤水分的输入和输出达到平衡, 各植被类型土壤储水量差异较小。中等湿润年生长季, 各植被类型均表现出降水补给土壤水的现象。在 0~100 cm 土层中, 野艾蒿草地的土壤水分补给量最高; 在 100~200 cm 的土层中, 天然三角槭林的土壤水补给量最高; 在深层土层 (200~400 cm) 中, 各植被类型土壤水分补给量较小, 接近于 0。

黄土高原土壤的蓄水能力受到土壤性质的影响, 其入渗深度一般较浅, 降水无法到达土壤深层, 使得土壤蓄水能力在浅层和深层存在较大的差异^[22]。本研究中, 人工刺槐林中湿润年的土壤水分补给量较小, 严重干旱年水分亏缺情况较严重, 且水分亏缺土层与天然三角槭林和野艾蒿草地不同, 说明了人工刺槐林地的耗水模式与天然三角槭林和野艾蒿草地的耗水模式存在差异。这主要是因为人工刺槐林扎根较深, 对深层水分的吸收大于其他林地, 其深根系的分布, 更是改变了土壤理化性质。水分的过度消耗极有可能会引起土壤出现干层, 从而阻碍降水的垂直入渗进而导致该地区的地下水无法得到补给^[23]。降水特征、气象因子、冠层结构和这些因素的相互作用影响了林冠降水的再分配^[24]。与人工刺槐林相比, 天然三角槭林枝叶茂盛, 林冠结构更为扁平致密, 该结构不利于穿透雨的形成^[25]。野艾蒿草地深层土壤较难得到补给的原因是根系主要分布在浅层^[26], 表层土壤吸收了大部分降水, 从而使得深层土壤水分很难通过降水入渗得到补给。

2.4 环境因子对土壤水分的影响

土壤储水能力与植被类型、地形、土壤理化性质、降水等因素息息相关。由图 4 可以看出: 0~100 cm 土壤有机碳质量分数和砂粒含量较高, 随土层深度增加降低, 黏粒含量和粉粒含量变化趋势相反, 以上性质在 100 cm 以下土层相对稳定。因此将土壤有机碳、黏粒、粉粒和砂粒分为 0~100 cm 和 100~400 cm 等 2 个部分与土壤储水量进行分析。冗余分析 (RDA) 结果表明: 环境因子解释了前 4 轴土壤储水量变化的 93.6%, 其中环境因子解释了前 2 轴土壤储水量变化的 89.4%, 因此前 2 轴很好地说明了环境因子对

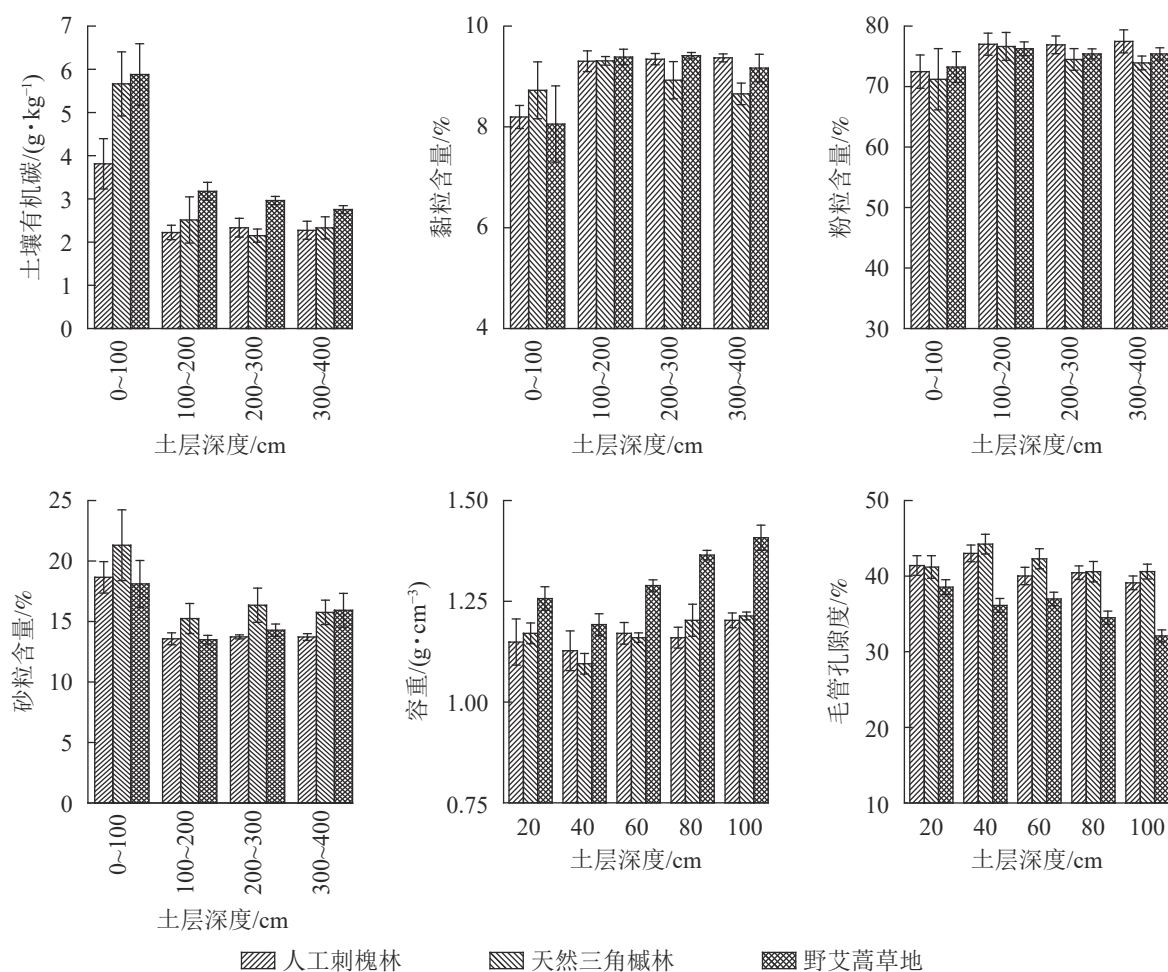


图 4 土壤理化性质

Figure 4 Physical and chemical properties of soil

土壤储水量的影响。单个环境因子与前 2 轴的土壤储水量变化的相关系数见表 4，环境因子与第 1 轴的相关系数更大，坡度、植被类型、100~400 cm 黏粒含量、容重以及毛管孔隙度与第 1 轴均表现为极显著相关 ($P<0.01$)。

RDA 排序图展示了不同土层深度土壤储水量与环境因子之间的关系 (图 5)。图 5 显示：植被类型、容重和坡向是影响 0~100 cm 土层土壤储水量的主要环境因子，容重和坡向是影响 100~200 cm 土层土壤储水量的主要环境因子，不同水文年旱涝程度和粉粒含量是影响 200~300 cm 土层土壤储水量的主要环境因子，300~400 cm 土层土壤储水量主要是由土壤黏粒含量和毛管孔隙度控制。对影响土壤储水量的环境因子进行前向选择和蒙特卡洛检验结果显示 (表 5)：主导土壤储水量的环境因子为植被类型、坡度、不同水文年旱涝程度以及土壤表层的黏粒含量 (0~100 cm)，其中植被类型、坡度与土壤储水量极显著相关 ($P<0.01$)，它们分别解释了土壤储水量 66.4% 和

表 4 环境因子与前 2 轴相关系数

Table 4 Correlation coefficients between environmental factors and the first two axes

环境因子	冗余分析排序轴	
	第1轴	第2轴
坡向	0.461 6*	-0.144 0
坡度	-0.649 7**	0.676 4**
植被类型	0.950 4**	-0.051 0
0~100 cm有机碳质量分数	-0.212 5	-0.633 3**
100~400 cm有机碳质量分数	-0.237 1	-0.677 8**
0~100 cm黏粒含量	-0.293 3	-0.328 8
0~100 cm粉粒含量	0.121 4	-0.478 4*
0~100 cm砂粒含量	-0.029 3	0.477 0*
100~400 cm黏粒含量	-0.610 1**	0.316 9
100~40 cm粉粒含量	-0.287 3	-0.133 8
100~400 cm砂粒含量	0.357 8	0.033 4
容重	0.749 4**	-0.151 6
毛管孔隙度	-0.732 1**	0.387 9
不同水文年旱涝程度	0.109 9	0.019 4

说明：**表示极显著相关 ($P<0.01$)，*表示显著相关 ($P<0.05$)

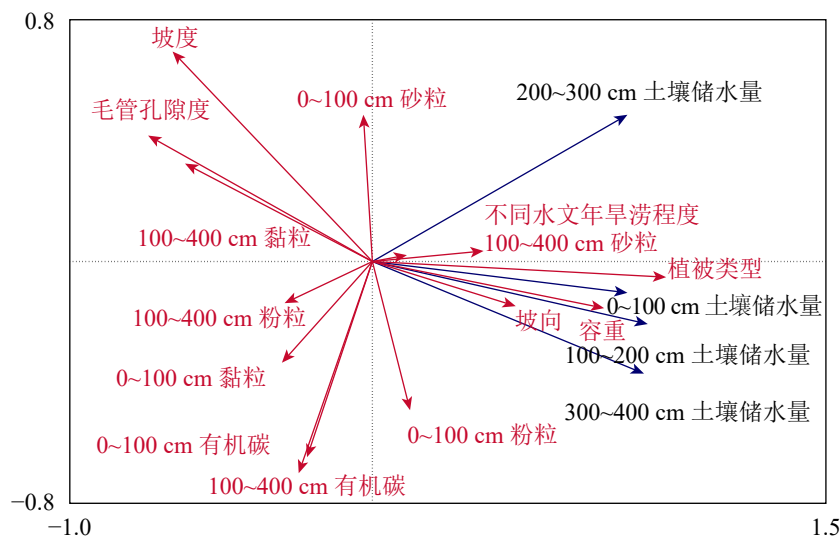


图 5 土壤储水量与环境变量的冗余分析排序图

Figure 5 RDA ranking chart of soil water storage and environmental variables

14.2%，而不同水文年旱涝程度和土壤表层粉粒含量与土壤储水量显著相关 ($P<0.05$)，它们分别解释了土壤储水量的 3.3% 和 2.4%。

不同植被类型的林冠层结构、凋落物以及根系等的差异影响了植被截留、蒸发和吸水，这些因素在不同时间尺度上影响着土壤水分的分布^[27]。传统观点认为：旱季土壤理化性质主导了土壤水分的空间分布，雨季则主要受地形因素的影响^[28]。土壤水分的主控因素在不同季节表现差异较大^[29]。本研究区非生长季，坡向极大地影响着融雪程度^[30]，而在干旱生长季，研究区盛行西北风，坡向对浅层土壤储水量的影响极大^[31]。黄土高原地区降水对土壤水分的补给程度可达 1.6~2.3 m^[32]。当出现低强度连续性降水时，深层土壤水可以得到一定程度的补给，可见在水分条件较好时段，降水可以补给 2.0 m 以下较深土层，因此不同水文年的旱涝程度 (降水量分布情况) 对 200~400 cm 土层储水量的影响作用不可轻视。土壤物理性质是土壤其他性质的结构性基础，对土壤入渗能力及持水量有极大影响^[33]，同时，深层土壤受蒸发

等作用扰动较小,因而土壤粉粒含量、黏粒含量对200~400 cm土层储水量影响也极为显著。

结合以上分析认为:今后黄土高原地区的造林工程,不仅要考虑树种耐旱能力,更应充分调查恢复区的地形、土质条件及生长季降水的分配情况,采取因地制宜的原则,使生态环境得到可持续发展。

3 结论

人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地0~400 cm土层土壤水分平均变化范围分别为8.36%~9.63%、10.01%~13.19%、15.43%~19.17%,野艾蒿草地0~100 cm土壤含水量显著高于人工刺槐林和天然三角槭林($P<0.05$),100~400 cm土壤含水量差异不显著。

不同植被类型和不同水文年的土壤水分活跃层均有差异,严重干旱年人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地土壤水分活跃层下边界分别为60、80、40 cm。在平水年人工刺槐林及野艾蒿草地土壤水分活跃层深度均不足50 cm,但天然三角槭林可达120 cm。在中等湿润年,人工刺槐林、天然林和野艾蒿草地土壤水分活跃层分别可达140、180和140 cm。

土壤盈亏状况年际差异较大:严重干旱年,人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地土壤水分亏缺程度严重土层分别为100~300、0~200和0~100 cm;平水年土壤水分的输入和输出达到平衡;中等湿润年,人工刺槐林、天然三角槭林和野艾蒿草地分别在0~100、100~180和0~100 cm土层土壤水分补给量最高,而在深层土层(200~400 cm)中,各植被类型下补给量较小,接近于0。

不同深度土层土壤储水量变化受不同环境因子主导:0~100 cm土层主要受植被类型和土壤容重控制;100~200 cm土层主要受容重和坡向控制;区域干湿状况、土壤黏粒和粉粒含量是200~400 cm深土层的主导因子。今后,黄土高原地区的造林工程,不仅要考虑树种的耐旱能力,更应充分考虑地形、土质及生长季降水分配的影响。

4 参考文献

- [1] GAO Xiaodong, WU Pute, ZHAO Xining, *et al.* Estimating the spatial means and variability of root-zone soil moisture in gullies using measurements from nearby uplands [J]. *J Hydrol*, 2013, **476**(7): 28–41.
- [2] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J]. *水土保持研究*, 2017, **24**(5): 63–68.
- [3] DENG Jingcheng, GAO Peng, MU Xingmin, *et al.* Impacts and advice of the grain for Green Project to ecological environment on the Loess Plateau [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2017, **24**(5): 63–68.
- [4] 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.
- [5] NING Ting, GUO Zhongsheng. Characteristics of the soil water cycle in an abandoned sloping field in the semiarid Loess Hilly Region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(15): 5168–5174.
- [6] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. *生态学报*, 2011, **31**(11): 3060–3068.
- [7] YANG Lei, WEI Wei, MO Baoru, *et al.* Soil water deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(11): 3060–3068.
- [8] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(6): 1234–

表5 环境因子的前向选择和蒙特卡洛检验

Table 5 Forward selection and Monte Carlo test of environmental factors

环境因子	<i>P</i>	<i>F</i>	贡献率/%
坡向	—	—	—
坡度	0.002**	17.6	15.1
植被类型	0.002**	49.4	70.4
0~100 cm有机碳质量分数	—	—	—
100~400 cm有机碳质量分数	—	—	—
0~100 cm黏粒含量	0.156	1.9	1.1
0~100 cm粉粒含量	0.034*	4.1	2.4
0~100 cm砂粒含量	—	—	—
100~400 cm黏粒含量	0.196	1.6	1.2
100~400 cm粉粒含量	0.276	1.4	1.0
100~400 cm砂粒含量	0.276	1.4	1.0
容重	0.052	3.5	1.6
毛管孔隙度	0.100	3.5	1.3
不同水文年旱涝程度	0.014*	4.5	3.3

说明:—表示该环境因子已被剔除,*表示显著相关($P<0.05$),

**表示极显著相关($P<0.01$)

- 1240.
- ZHANG Beiyang, XU Xuexuan, LIU Wenzhao, *et al.* Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different yearly precipitation patterns [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19**(6): 1234 – 1240.
- [6] 王鑫, 杨磊, 赵倩, 等. 半干旱黄土小流域草地群落功能性状空间异质性及环境驱动[J]. 草业科学, 2019, **36**(9): 2201 – 2211.
- WANG Xin, YANG Lei, ZHAO Qian, *et al.* Spatial heterogeneity and environmental drivers of grassland community functional traits in the semi-arid loess small watershed [J]. *Pratacultural Sci*, 2019, **36**(9): 2201 – 2211.
- [7] YANG Lei, CHEN Liding, WEI Wei. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions [J]. *Catena*, 2015, **124**: 138 – 146.
- [8] FU Bojie, CHEN Liding, MA Keming, *et al.* The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China [J]. *Catena*, 2000, **39**: 69 – 78.
- [9] ZHAO Guangju, MU X, WEN Zhongming, *et al.* Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China [J]. *Land Degradation Dev*, 2013, **24**(5): 499 – 510.
- [10] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报, 2001, **16**(5): 427 – 432.
- LI Yushan. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau [J]. *J Nat Resour*, 2001, **16**(5): 427 – 432.
- [11] MCKEETB, DOESKENNJ, KLIESTJ. The relationship of drought frequency and duration to time scales[M]//MASTORAKIS N E, DEMIRALP M, MLADENOV V, *et al.* *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Stevens Point: World Scientific and Engineering Academy and Society, 1993: 179 – 1841.
- [12] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(7): 50 – 59.
- HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, LI Maosong, *et al.* Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2010, **26**(7): 50 – 59.
- [13] 王孟本, 李洪建. 柠条林蒸腾状况与土壤水分动态研究[J]. 水土保持通报, 1990, **10**(6): 85 – 90.
- WANG Mengben, LI Hongjian. Study on transpiration and variation of soil water of *Caragana korshinskii* [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 1990, **10**(6): 85 – 90.
- [14] 汪星, 周玉红, 汪有科, 等. 黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(3): 263 – 270.
- WANG Xing, ZHOU Yuhong, WANG Youke, *et al.* Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly regions of the Loess Plateau in China [J]. *J Hydraul Eng*, 2015, **46**(3): 263 – 270.
- [15] 徐志尧, 张钦弟, 杨磊. 半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(3): 145 – 151.
- XU Zhiyao, ZHANG Qindi, YANG Lei. Analysis of temporal variation of soil water in a growing season in semi-arid loess hilly area [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2018, **32**(3): 145 – 151.
- [16] 赵亚楠, 于露, 周玉蓉, 等. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(4): 1305 – 1315.
- ZHAO Ya'nan, YU Lu, ZHOU Yurong, *et al.* Soil moisture dynamics and deficit of desert grassland with anthropogenic introduced shrub encroachment in the eastern Ningxia, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(4): 1305 – 1315.
- [17] 王力, 邵明安. 黄土高原退耕还林条件下的土壤干化问题[J]. 世界林业研究, 2004, **17**(4): 57 – 60.
- WANG Li, SHAO Ming'an. Soil desiccation under the returning farms to forests on the Loess Plateau [J]. *World For Res*, 2004, **17**(4): 57 – 60.
- [18] 马婧怡, 贾宁凤, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(10): 3471 – 3481.
- MA Jingyi, JIA Ningfeng, CHENG Man. Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(10): 3471 – 3481.
- [19] 刘新春, 赵勇钢, 刘小芳, 等. 晋西黄土区人工林细根与土壤水碳的耦合关系[J]. 生态学报, 2019, **39**(21): 7987 – 7995.
- LIU Xinchun, ZHAO Yonggang, LIU Xiaofang, *et al.* Coupling fine roots with soil moisture and organic carbon in artificial forests in loess region of western Shanxi Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(21): 7987 – 7995.
- [20] 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]. *Trans CSAE*, 2016, **32**(24): 129 – 138.
- [21] 张扬, 赵世伟, 侯庆春. 草地植被恢复对次降雨土壤水分动态的影响分析[J]. 水土保持研究, 2009, **16**(3): 70 – 73.
- ZHANG Yang, ZHAO Shiwei, HOU Qingchun. Effects of vegetation restoration on soil water dynamics of individual rainfall in typical steppe [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2009, **16**(3): 70 – 73.
- [22] MA Lan, TENG Yanguo, SHANGGUAN Zhouping. Ecohydrological responses to secondary natural *Populus davidiana* and plantation *Pinus tabulaeformis* woodlands on the Loess Plateau of China [J]. *Ecohydrology*, 2014, **7**(2): 612 – 621.
- [23] JACKSON R B, CANADELL J, EHLERINGER J R, *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. *Oecologia*, 1996, **108**(3): 389 – 411.
- [24] FAN Junliang, SCHEUERMANN A, GUYOT A, *et al.* Quantifying spatiotemporal dynamics of root-zone soil water in a mixed forest on subtropical coastal sand dune using surface ERT and spatial TDR [J]. *J Hydrol*, 2015, **523**(1): 475 – 488.
- [25] 马昌坤. 黄土高原人工刺槐林地生态水文过程研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- MA Changkun. *Study on the Ecohydrological Processes of Black Locust Forest Land on the Loess Plateau* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [26] YU Y, WEI Wei, CHEN Liding, *et al.* Responses of vertical soil moisture to rainfall pulses and land uses in a typical loess hilly area, China [J]. *Solid Earth Discuss*, 2015, **6**(2): 595 – 608.
- [27] 王舒, 马岚, 张栋, 等. 晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, **52**(3): 253 – 258.
- WANG Shu, MA Lan, ZHANG Dong, *et al.* Plant diversity and soil moisture of artificial *Robinia pseudoacacia* forest in loess region of western Shanxi Province [J]. *J Beijing Norm Univ Nat Sci*, 2016, **52**(3): 253 – 258.
- [28] FAMIGLIETTI J S, RUDNICKI J W, RODELL M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. *J Hydrol*, 1998, **210**(1/4): 0 – 281.
- [29] 徐飞, 赖晓明, 朱青, 等. 太湖流域丘陵区两种土地利用类型土壤水分分布控制因素[J]. 生态学报, 2016, **36**(3): 592 – 599.
- XU Fei, LAI Xiaoming, ZHU Qing, *et al.* The controlling factors of soil moisture distribution under two typical land-use hillslopes in a hilly region of Taihu Lake basin [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(3): 592 – 599.
- [30] WILLIAMS C J, MCNAMARA J P, CHANDLER D G. Controls on the temporal and spatial variability of soil moisture in a mountainous landscape: the signature of snow and complex terrain [J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2009, **13**(7): 1325 – 1336.
- [31] CHO E, CHOI M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula [J]. *J Hydrol*, 2014, **516**(4): 317 – 329.
- [32] 易小波, 贾小旭, 邵明安, 等. 黄土高原区域尺度土壤干燥化的空间和季节分布特征[J]. 水科学进展, 2017, **28**(3): 373 – 381.
- YI Xiaobo, JIA Xiaoxu, SHAO Ming'an, *et al.* Regional spatial and seasonal characteristics of soil desiccation on the Loess Plateau [J]. *Adv Water Sci*, 2017, **28**(3): 373 – 381.
- [33] 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 Ecol Sin*, 2008, **28**(4): 1429 – 1445.