

# 欧李林龄对不同坡面土壤水分特征的影响

王安民, 丁爱强, 豆巧莉, 汝海丽, 王可壮

(平凉市水土保持科学研究所, 甘肃 平凉 744000)

**摘要:** [目的] 研究不同林龄欧李在生长季(4—9月)对坡面土壤水分动态及时间稳定性的影响,为欧李在黄土高原丘陵沟壑区小流域综合治理中的合理配置提供科学依据。[方法] 基于对欧李不同坡度标准径流小区土壤水分长期定位观测,利用 Origin Pro 软件对土壤水分进行计算分析。[结果] ①欧李栽植后,土壤储水量有所下降,但不明显,有逐渐恢复的态势,不同坡度土壤储水量差异不明显。②在生长季,5°和10°小区0—40 cm和100 cm以下土层土壤含水量较低,表现为弱变异,40—100 cm土层土壤储水量较高,表现为中等变异;15°小区0—100 cm土层土壤水分年际之间相差较大,120 cm以下土层的土壤含水量较高,均处于中等变异区间。③随着欧李林龄增加,不同坡度坡面土壤水分的时间稳定性逐步增强,其中15°小区最明显。[结论] 结合欧李在坡面的生长状况,研究认为“欧李+水平阶”的坡面治理模式在黄土高原沟壑区10°以下坡面上配置有一定优势。

**关键词:** 欧李; 土壤水分; 时空动态; 时间稳定性; 黄土丘陵沟壑区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)06-0023-08

**中图分类号:** S152.7<sup>+</sup>5

**文献参数:** 王安民, 丁爱强, 豆巧莉, 等. 欧李林龄对不同坡面土壤水分特征的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 23-30. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.003; Wang Anmin, Ding Aiqiang, Dou Qiaoli, et al. Effect of *Cerasus humilis* stand age on soil moisture characteristics of different slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 23-30.

## Effect of *Cerasus Humilis* Stand Age on Soil Moisture Characteristics of Different Slopes

Wang Anmin, Ding Aiqiang, Dou Qiaoli, Ru Haili, Wang Kezhuang

(Pingliang Municipal Institute of Soil and Water Conservation Science, Pingliang, Gansu 744000, China)

**Abstract:** [Objective] The influence of different forest ages on the soil moisture dynamics and time stability of different slopes during the growing season (April-September) was determined in order to provide a scientific basis for the rational use of *Cerasus humilis* in the comprehensive management of small watersheds in hilly and gully areas of the Loess Plateau. [Methods] Based on long-term positioning observations of soil moisture in standard runoff plots with different slopes, the relevant parameters of soil moisture were calculated and analyzed using Origin Pro software. [Results] ① Soil water storage decreased after tree planting, but the decrease was not significant. There was a gradual recovery trend, but differences in soil water storage on different slopes were not significant. ② During the growing season, soil water contents in the 0—40 cm layer and below 100 cm in the 5° and 10° slope plots were low, and the coefficient of variation showed weak variation. Soil water storage in the 40—100 cm soil layer was high, and the coefficient of variation showed moderate variation. Soil water storage in the 0—100 cm layer for the 15° slope plot exhibited a large difference between the two study years. The soil water content below 120 cm was high and exhibited medium variation. ③ The temporal stability of soil water gradually increased with increases in the growth and age of *Cerasus humilis*, and was most obvious for the 15° slope plot. [Conclusion] The slope treatment model of “*Cerasus humilis* + level bench” has some advantages on slopes of less than 10° in hilly and gully areas of

收稿日期: 2022-04-06

修回日期: 2022-06-06

资助项目: 平凉市科技计划项目资助“黄土高原塬面保护抗疏力生态型护坡模式研究”[平科任(2021)2号]”

第一作者: 王安民(1982—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 学士, 高级工程师, 主要从事水土保持科研及推广工作。Email: 593928177@qq.com。

通讯作者: 丁爱强(1991—), 男(汉族), 甘肃省康乐县人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持科研及推广工作。Email: aiqiangding5@163.com。

the Loess Plateau, depending on the growth status of *Cerasus humilis*.

**Keywords:** *Cerasus humilis*; soil water; time and space dynamics; temporal stability; the hilly and gully area of the Loess Plateau

黄土高原丘陵沟壑区,由于降雨季节性不均匀、植被稀疏和地形破碎等因素导致水土流失严重,该区是黄河流域主要的泥沙策源地。近年围绕着中央提出的黄河流域生态保护和高质量发展战略,流域综合治理得到了快速发展,而在此治理过程中作为流域水土流失治理的主要方式,水土保持工程措施和林草措施的结合模式显得尤为重要。在干旱半干旱区,如何在土壤水分承载力范围内进行合理配置的首要问题就是要掌握不同水土保持工程措施和林草措施结合模式与土壤水分间的相互作用机制。典型的丘陵沟壑状地形景观影响着土壤水分的时空分布和稳定性,而土壤水分又是影响植物生长和分布的重要因子,亦是该区小流域综合治理中植被恢复和重建的限制因子。因此研究该区水土保持工程和林草措施相结合影响下土壤水分的时空动态变化和稳定性规律可为半干旱的黄土高原地区生态建设和恢复提供重要的理论支持。

欧李(*Cerasus humilis*)为蔷薇科(Rosaceae)櫻桃属(*Cerasus*)低矮型灌木,其根系主要分布于浅层土壤中,侧根发达<sup>[1]</sup>,研究表明在水平阶种植欧李可降低研究区土壤可蚀性因子  $K$  值,提高土壤抗侵蚀能力,而且对土壤可蚀性因子  $K$  值的影响效果比鱼鳞坑和自然坡都要好<sup>[2]</sup>,而且在陇东黄土高原有良好的适应性<sup>[3-4]</sup>。目前,关于欧李的研究主要集中在引种栽植前期对气候的适应性、生理遗传特性及经济价值等<sup>[4-7]</sup>方面的研究,而关于欧李对土壤水分影响以及土壤水分时空稳定性的相关研究还没有报道。鉴于此,本研究对其栽植后进行 4 a 监测,通过研究不同坡度径流小区微区土壤水分变化及时间稳定性,了解其在坡面条件下对土壤水分影响的规律,以期能为后期欧李在黄土高原丘陵沟壑区小流域综合治理中的合理配置提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于陇东黄土高原丘陵沟壑区的平凉市

崆峒区城南的纸坊沟流域,地理坐标为东经  $106^{\circ}47'—106^{\circ}52'$ ,北纬  $35^{\circ}12'—35^{\circ}21'$ ,属泾河干流一级支沟。地势南高北低,地形呈柳叶形,地貌呈丘陵沟壑状,海拔 1 365~2 104 m,相对高差 739.8 m,主沟道长 15.77 km,沟道平均坡降 4.34%,流域总面积 18.98 km<sup>2</sup>。气候属北温带半湿润大陆性季风区,多年平均年日照时数 2 381 h,总辐射量 506.48 kJ/cm<sup>2</sup>,年均气温 8.8 ℃,平均年蒸发量 1 499.2 mm,年均降水量 548.7 mm,汛期 6—9 月平均降水量 388.1 mm,占全年降水量的 70.7%。土壤从流域东南分水岭到西北主沟道出口依次为黑垆土、草甸土、红黏土、黄绵土、新积土 5 类土壤,植被主要以人工刺槐林和天然灌草为主,总体上呈上游最好、中游次之、下游较差,阴坡较好、阳坡较差。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地选择与数据来源

试验样地为径流监测场内坡度为  $5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}$  的 3 个标准径流小区(水平投影尺寸 20 m×5 m,面积为 100 m<sup>2</sup>),每个小区上(距上边沿 1 m,左右边沿 2.5 m)、中(矩形小区几何中心处)、下(距下沿 1 m,左右边沿 2.5 m)坡位处布设 TDR 水分测管,测管埋设于 2016 年、2017 年 2 月初开始整地(宽 0.5 m,水平阶之间无隔坡),2 月底栽植欧李,具体情况详见表 1。土壤水分使用时域反射仪 TDR 测定(型号:AZS-100,北京澳作生态仪器有限公司),测定深度 160 cm,每层 20 cm,每层测定 3 次;每月定期 15 日和 30 日前后测定,每次降雨之后第 1—2 d 内加测 1 次;仪器在本试验开始前进行了标定。由于栽植第 1 a 内需要进行整地和定期进行浇水、施肥、除草等田间管理,秋季对死亡的植株还需要补植,人为扰动严重,增加了土壤水分变化的不确定性,从第 2 a 开始,不需要进行浇水和整地,对土壤环境的扰动较小,因此本文以欧李长势稳定后的第 2 a(2018 年)作为研究起点,记为 2 a。

表 1 试验小区基本信息(2021 年 9 月)

坡度/ (°)	坡向	土壤类型	整地方法	株行距/ cm	生物量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	盖度/%	平均高度/ cm	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/ %
5	WN	黄绵土	水平阶	70×80	5 364	78	95	1.33	49.8
10	WN	黄绵土	水平阶	70×80	6 212	80	110	1.36	48.7
15	WN	黄绵土	水平阶	70×80	4 447	75	92	1.36	48.9

## 2.2 数据分析处理

### 2.2.1 相关参数计算方法及原理

(1) 土壤蓄水量(SWS)比土壤含水量更能直观地反映研究区域土壤水分的供给能力。 $j$  时间任意观测点  $i$  的  $SWS_{ij}$  计算公式为:

$$SWS_{ij} = \alpha_{ij} \cdot d \times 10^{-1}$$

式中: SWS 为土壤蓄水量(mm);  $\alpha_{ij}$  是  $j$  时间任意观测点  $i$  的土壤体积含水量(%);  $d$  为土层厚度(cm)。

(2) 变异系数( $C_v$ )随机变量的离散程度,即变异性的 大小,可用变异系数  $C_v$  的大小来反映,计算公式为:

$$C_v = \frac{S}{M}$$

式中:  $M$  为样本平均值;  $S$  为标准差。根据变量程度分级:  $C_v < 10\%$  为弱变异性,  $10\% \leq C_v \leq 100\%$  为中等变异性;  $C_v \geq 100\%$  为强变异性。

(3) 时间稳定性。利用 Spearman 秩相关系数法<sup>[8]</sup> 研究欧李不同生长期垂直方向土层之间土壤水分空间模式在时间上的相似性。计算公式为:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_{ij} - R_{ij'})^2}{n(n^2 - 1)}$$

式中:  $n$  为样点总数;  $R_{ij}$  是在位置  $i$  和时间  $j$  观测值的秩;  $R_{ij'}$  则是观测值在同一个测量点  $i$  而在不同时间  $j'$  的秩,其  $r_s$  值越接近 1,说明土层之间的土壤水

分的空间模式在时间上越相似,即土壤水分的时间稳定性越强<sup>[9]</sup>。

2.2.2 数据处理 前期数据处理使用 Excel,数据分析和图表制作在 Origin Pro 2021 中完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤储水量年变化

如图 1 所示,从不同径流小区整体土壤储水量情况来看(箱线图所示),不同坡面的年均土壤储水量随着坡度增大而增大,5°和 10°小区年均土壤储水量基本维持在 260 mm 左右,15°小区年均土壤储水量基本维持在 280 mm 左右,土壤储水量之间的差异不显著;不同时期土壤储水量的波动程度也随着坡度的增大而增大,极大值出现在 5°径流小区,极小值出现在 10°径流小区,无异常值出现。从欧李生长的不同年份来看(柱状图),2 a 内,不论是均值还是不同坡度的土壤储水量均要高于以后年份,通过方差分析,不同坡度之间以及不同年份之间土壤储水量的差异均不明显(图中不作标注);在同一年份内,2 a 土壤储水量表现为:15° > 10° > 5°,此后 3 a,4 a,5 a 内,5°和 10°径流小区土壤储水量不相上下,均小于 15°径流小区土壤储水量。此外,在图 1 中也能看到,4 a 内的降雨量虽然呈波动变化,但是从 3 a 开始,土壤储水量呈增加态势。

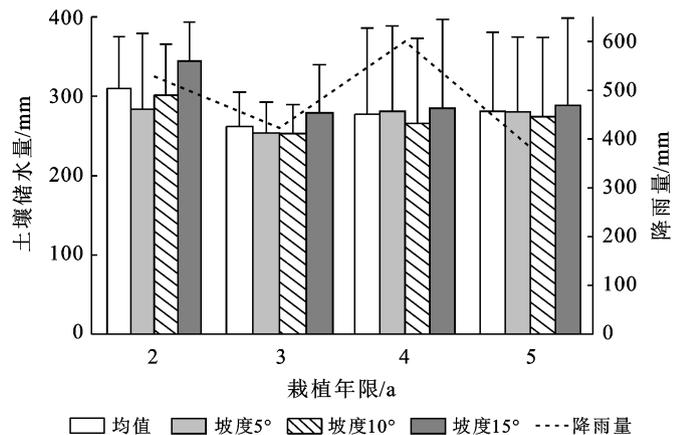
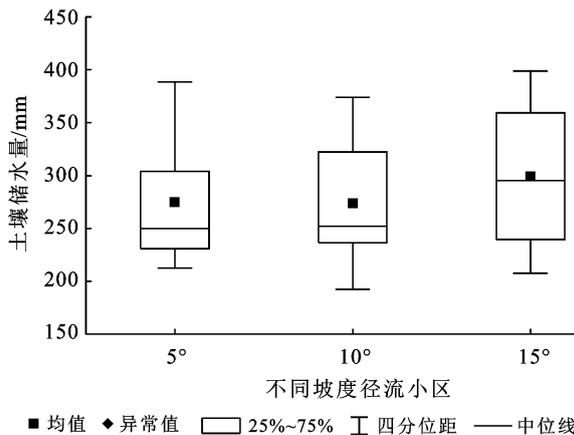


图 1 纸坊沟流域欧李生长期不同坡面和栽植年限土壤储水量变化

### 3.2 土壤储水量时空分布

由图 2 可以看出,降雨量在年际间差异较大,第 4 a 和 5 a 之间的差值达 217.5 mm,年内分布不均匀,主要集中在 6—8 月,但是 2021 年降雨却 4 月和 9 月相对较多。结合降雨变化,从土壤水分垂直分布角度来看,欧李长势稳定之后的第 2 a,随着降雨的逐渐增加,径流小区内土壤储水量也呈增加态势,随着坡度增加,土壤深层储水量增加;第 3 a,生长季内降雨相

对分布均匀,雨量较上年同期少 105.8 mm,5°和 10°小区土壤储水量在 0—2 cm 和 100 cm 以下土层出现明显干燥情况,6—7 月,15°小区也开始出现这种干燥的情况;第 4 a,生长季内的降雨波动变化范围大,最小 4 月降雨 13.2 mm,最大 8 月降雨量达到了 284.2 mm,约占生长季总降雨的 47%,土壤储水量 4—6 月表现为 0—20 cm 和 100 cm 以下相对干燥,其中 100 cm 以下土层在 6 月时最为干燥;第 5 a,4 月

的土壤储水量较于前 3 a 同期大, 5 月之后, 5° 和 10° 小区土壤储水量 0—20 cm 和 100 cm 以下逐渐开始减小, 7—8 月 10° 小区土壤储水量较低, 15° 小区 0—100 cm 土层储水量也逐渐开始减小。从欧李的生长过程来看, 在生长季, 5° 和 10° 小区 0—40 cm 和 100

cm 以下土层土壤储水量较低, 40—100 cm 土层土壤储水量较高; 15° 小区 0—20 cm 土层储水量较低, 20—100 cm 土层虽然某个时段也存在的高水期, 但并不是连续的, 相较于其他两个区, 120 cm 以下土层的土壤储水量较高。

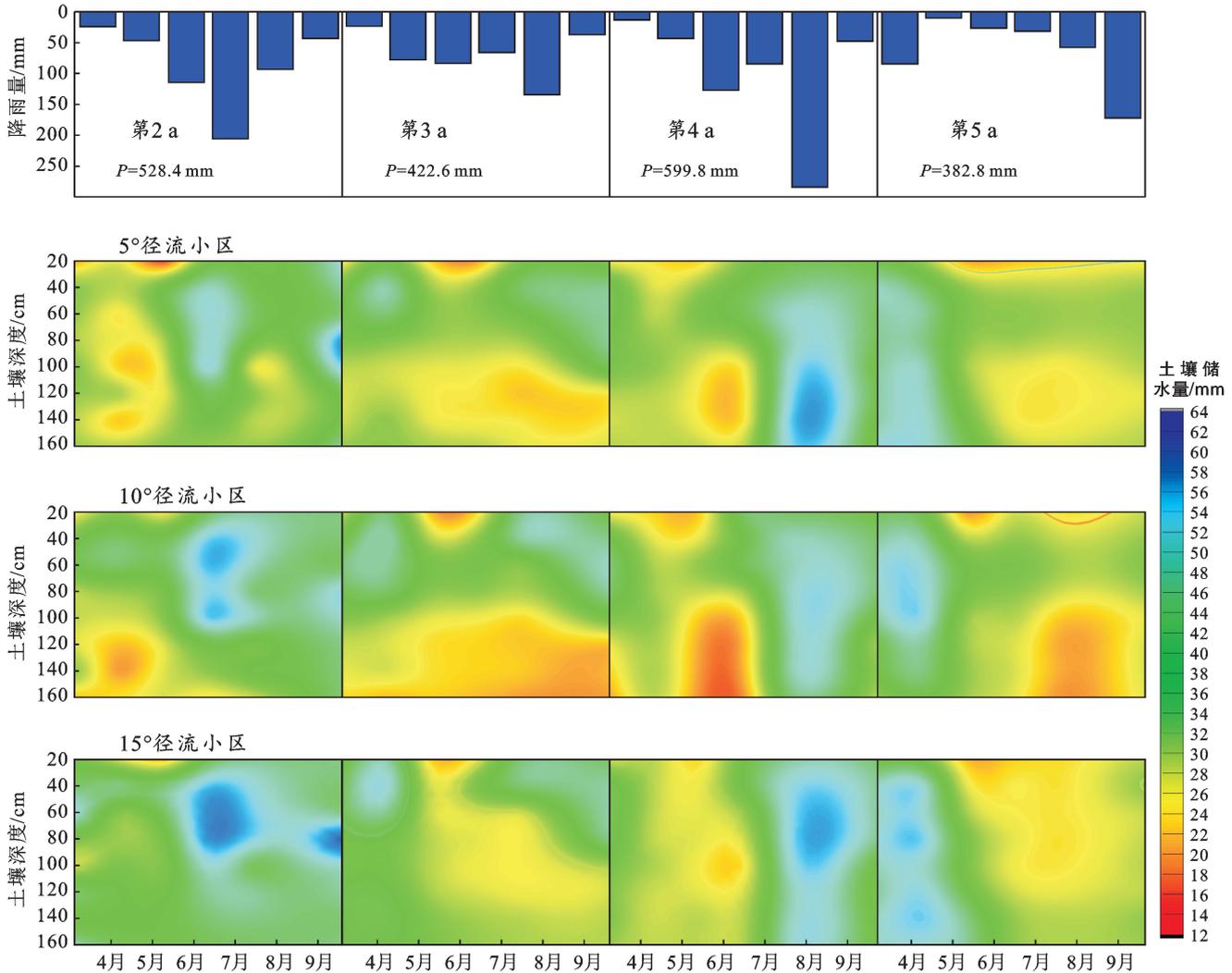


图 2 纸坊沟流域欧李生长季月降雨特征和坡面土壤储水量时空动态变化

### 3.3 土壤水分时空变异分布特征

由图 3 可以看出, 从土壤水分整体变异情况来看, 在欧李生长的不同时期, 不同坡面土壤储水量的变异系数小于 25%, 表现为弱变异或中等变异, 相对稳定, 其中弱变异层主要分布在 5° 径流小区 60—120 cm 土层, 10° 径流小区 20—100 cm 土层, 15° 小区无弱变异层; 中等变异层 5° 径流小区为 0—60 cm 和 120 cm 以下土层, 10° 径流小区 0—20 cm 和 100 cm 以下土层, 15° 小区全部为中等变异; 随土层深度的增加, 变异系数变化表现为 5° 和 10° 小区先减弱后增强, 15° 小区则先呈减弱趋势, 60 cm 土层以下基本

保持在 12% 左右。同一时期, 随着坡度的增大, 弱变异区逐渐减小, 稳定层主要集中在 40—120 cm, 但是在不同生长期表现不尽相同, 特别是在 10° 小区第 5 a 的 7 月前后和 15° 小区 3 a 的 5 月, 第 4 a 的 6—7 月之间及 5 a 的 5 月前后土壤储水量在垂直方向变异程度增大。同一坡度(图 4), 随着欧李生长年限的增加, 5° 小区在 5.32%~6.7% 的小范围内呈现先减小后增大趋势, 10° 小区土壤储水量变异系数在 6.16%~8.32% 的较小区间呈“增—减—增”波动变化, 15° 小区在 5.97%~11.64% 的相对大区间呈“增—减—增”波动变化。

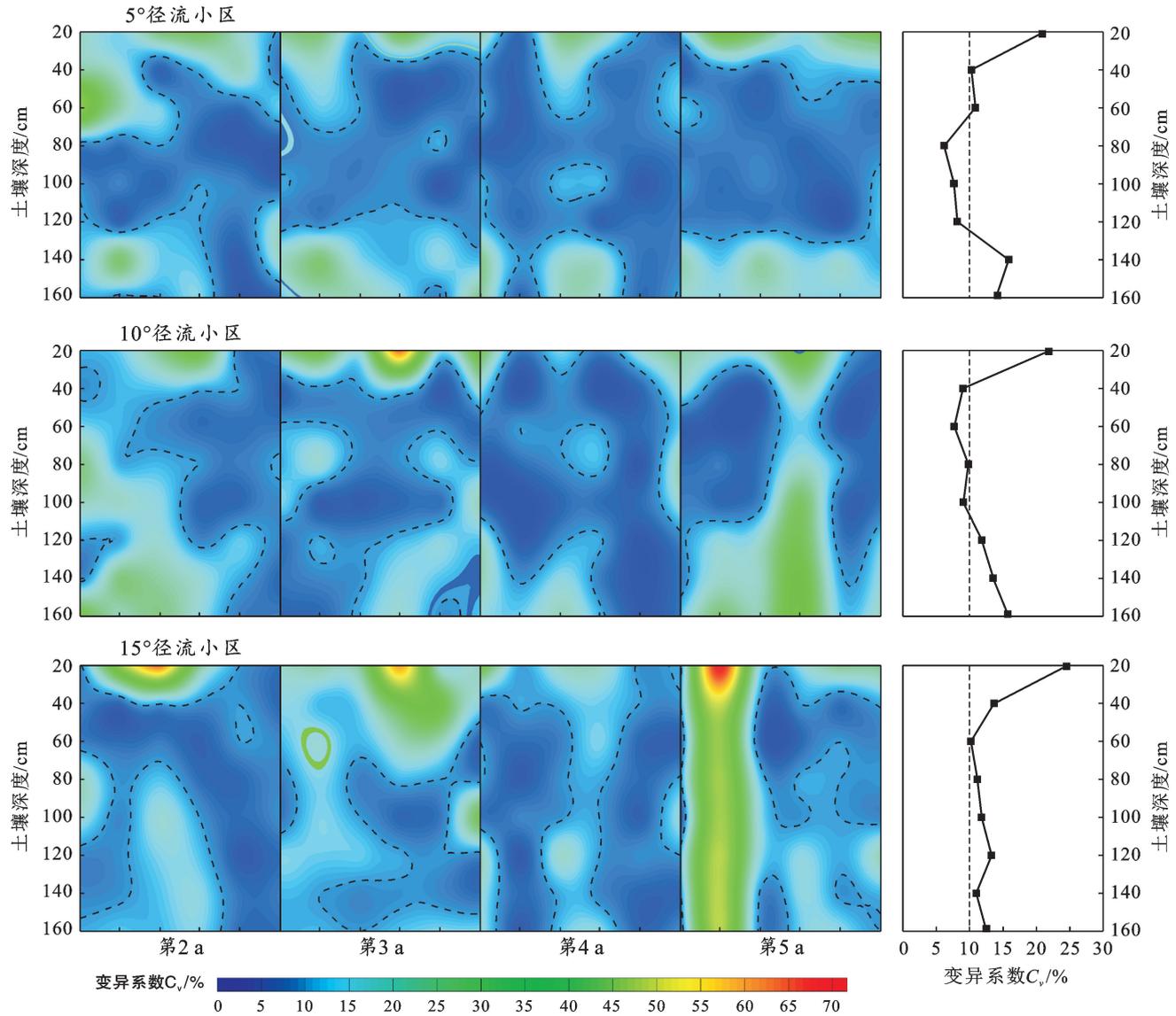


图 3 纸坊沟流域土壤水分变异系数时空变化分布特征 (黑色虚线代表  $C_v = 10\%$ )

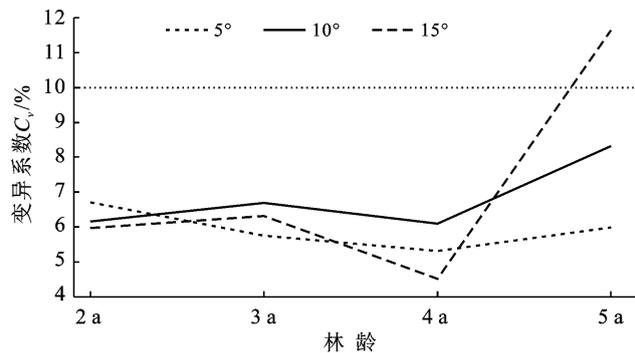


图 4 纸坊沟流域土壤水分变异系数年均值变化

### 3.4 时间稳定性分析

利用 Spearman 秩相关系数法对不同栽植年限欧李坡面土壤储水量的时间稳定性进行分析, 结果详见表 2—4。由表 2—4 可看出, 2 a 时, 5° 和 10° 径流小区土壤储水量不同土层间的时空稳定性较 15° 径流小

区强,  $r_s > 0.7$  的比例分别为 67.86%, 57.14%, 28.57%; 3 a 时, 5° 和 10° 径流小区土层土壤储水量的时空稳定性在个别土层表现较弱, 但是 15° 径流小区相邻土层间土壤储水量的时间稳定性很强 ( $0.81 \leq r_s \leq 0.92$ ),  $r_s > 0.7$  的比例分别为 25%, 25%, 35.71%; 4 a 时, 5° 和 10° 径流小区不同土层土壤储水量的时间稳定性出现分层现象, 即 5° 径流小区分别在 0—80 cm 和 80—160 cm 土层内稳定性强, 10° 径流小区分别在 0—100 cm 和 100—160 cm 土层内稳定性强, 但是 15° 径流小区除 0—20 cm 与 40 cm 以下土层间的时间稳定性较弱外, 其他土层之间的时间稳定性都很强,  $r_s > 0.7$  的比例分别为 75%, 53.57%, 89.29%; 5 a 时, 除 5° 和 15° 径流小区 0—20 cm 土层与 10° 土层 0—40 cm 土层外, 小区内其他土层土壤储水量的空间模式在时间上表现的十分相似 ( $0.82 \leq r_s \leq 1$ ),  $r_s > 0.7$  的比例分别为 75%, 78.57%, 78.57%。

表 2 5°径流小区不同深度土壤水分之间的 Spearman 秩相关系数矩阵

小区		5°径流小区							小区		5°径流小区						
林龄	深度/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	林龄	深度/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140
2 a	20—40	0.60							4 a	20—40	0.88 *						
	40—60	0.60	0.99 *							40—60	0.94 *	0.94 *					
	60—80	0.71	0.94 *	0.94 *						60—80	0.94 *	0.94 *	0.88 *				
	80—100	0.37	0.71	0.71	0.77					80—100	0.66	0.77	0.60	0.82 *			
	100—120	0.77	0.82 *	0.83 *	0.77	0.66				100—120	0.66	0.77	0.60	0.82 *	0.99 *		
	120—140	0.77	0.88 *	0.88 *	0.94 *	0.83 *	0.89 *			120—140	0.60	0.60	0.49	0.71	0.94 *	0.94 *	
3 a	140—160	0.14	0.60	0.60	0.71	0.83 *	0.26	0.60	140—160	0.89 *	0.89 *	0.81 *	0.98 *	0.89 *	0.89 *	0.81 *	
	20—40	0.94 *							5 a	20—40	0.60						
	40—60	0.94 *	0.88 *							40—60	0.49	0.94 *					
	60—80	0.60	0.49	0.71						60—80	0.49	0.94 *	0.99 *				
	80—100	0.43	0.37	0.54	0.94 *					80—100	0.54	0.94 *	0.88 *	0.88 *			
	100—120	0.37	0.26	0.20	0.54	0.60				100—120	0.54	0.94 *	0.88 *	0.88 *	0.99 *		
120—140	0.14	0.09	-0.09	0.26	0.37	0.94 *		120—140		0.54	0.94 *	0.88 *	0.88 *	0.99 *	0.99 *		
140—160	0.14	0.09	-0.09	0.26	0.37	0.94 *	0.99 *	140—160	0.60	0.99 *	0.94 *	0.94 *	0.94 *	0.94 *	0.94 *		

注：\* 表示在 0.05 的水平下相关性显著。下同。

表 3 10°径流小区不同深度土壤水分之间的 Spearman 秩相关系数矩阵

小区		10°径流小区							小区		10°径流小区						
林龄	深度/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	林龄	深度/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140
2 a	20—40	0.82 *							4 a	20—40	0.60						
	40—60	0.71	0.94 *							40—60	0.60	0.99 *					
	60—80	0.71	0.88 *	0.71						60—80	0.43	0.82 *	0.82 *				
	80—100	0.60	0.77	0.54	0.94 *					80—100	0.43	0.82 *	0.82 *	0.99 *			
	100—120	0.66	0.66	0.37	0.88 *	0.94 *				100—120	0.37	0.66	0.66	0.94 *	0.94 *		
	120—140	0.71	0.54	0.26	0.66	0.77	0.88 *			120—140	0.37	0.66	0.66	0.94 *	0.94 *	0.99 *	
3 a	140—160	0.77	0.49	0.26	0.66	0.60	0.77	0.71	140—160	0.37	0.66	0.66	0.94 *	0.94 *	0.99 *	0.99 *	
	20—40	0.94 *							5 a	20—40	0.82 *						
	40—60	0.09	0.31							40—60	0.54	0.82 *					
	60—80	0.03	0.26	0.94 *						60—80	0.54	0.82 *	0.99 *				
	80—100	-0.09	0.09	0.88 *	0.94 *					80—100	0.54	0.82 *	0.99 *	0.99 *			
	100—120	-0.26	-0.09	0.03	0.09	0.14				100—120	0.54	0.82 *	0.99 *	0.99 *	0.99 *		
120—140	-0.14	0.09	0.09	0.14	0.09	0.94 *		120—140		0.54	0.82 *	0.99 *	0.99 *	0.99 *	0.99 *		
140—160	-0.49	-0.37	-0.14	-0.03	0.09	0.94 *	0.82 *	140—160	0.54	0.82 *	0.99 *	0.99 *	0.99 *	0.99 *	0.99 *		

表 4 15°径流小区不同深度土壤水分之间的 Spearman 秩相关系数矩阵

小区		15°径流小区							小区		15°径流小区						
林龄	深度/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	林龄	深度/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140
2 a	20—40	0.26							4 a	20—40	0.82 *						
	40—60	0.66	0.43							40—60	0.82 *	0.99 *					
	60—80	0.66	0.20	0.54						60—80	0.77	0.94 *	0.94 *				
	80—100	0.60	0.66	0.49	0.77	0.99 *				80—100	0.60	0.82 *	0.82 *	0.94 *			
	100—120	0.94 *	0.09	0.54	0.77	0.66				100—120	0.77	0.94 *	0.94 *	0.99 *	0.94 *		
	120—140	0.77	0.49	0.43	0.77	0.71	0.71			120—140	0.54	0.82 *	0.82 *	0.99 *	0.82 *	0.99 *	
3 a	140—160	0.60	-0.49	0.43	0.26	-0.03	0.66	0.03	140—160	0.71	0.94 *	0.94 *	0.82 *	0.99 *	0.82 *	0.94 *	
	20—40	0.94 *							5 a	20—40	0.71						
	40—60	0.70	0.87 *							40—60	0.54	0.94 *					
	60—80	0.26	0.54	0.81 *						60—80	0.54	0.94 *	0.99 *				
	80—100	0.31	0.49	0.64	0.82 *					80—100	0.54	0.94 *	0.99 *	0.99 *	0.99 *		
	100—120	-0.03	0.09	0.32	0.60	0.88 *				100—120	0.54	0.94 *	0.99 *	0.99 *	0.99 *		
120—140	0.06	0.06	0.03	0.29	0.75	0.84 *		120—140		0.43	0.82 *	0.94 *	0.94 *	0.94 *	0.94 *		
140—160	-0.09	-0.14	-0.12	0.09	0.60	0.82 *	0.92 *	140—160	0.43	0.82 *	0.94 *	0.94 *	0.94 *	0.94 *	0.94 *		

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

在干旱区,诸多学者通过研究不同乔、灌木林分对土壤水分的影响得出,植被在生长过程中会使得土壤出现“干化”现象<sup>[10]</sup>,产生“干层”,不同植物对应的土壤干层出现的深度有所不同,而且随着林龄的增加,干层的厚度增加<sup>[11]</sup>,土壤的干化现象逐渐严重,土壤水分恢复到土壤水分稳定湿度所需的时间以及难易程度逐步上升<sup>[12]</sup>,最典型的如刺槐、柠条、山杏、枣等,但是相对于柠条、油松和葡萄而言,欧李的耗水程度较低<sup>[13-15]</sup>。本研究结果0—160 cm土层土壤储水量在第3 a略降低后,基本维持在260—280 mm左右,保持稳定态势,除0—30 cm和100 cm以下土层相对较为干燥,5°和10°小区30—100 cm土层土壤储水量较高。一方面,水平阶的拦蓄作用增加了土壤水分,在黄土高原小流域水土保持综合治理中,水土保持工程措施作为生态修复的重要手段,为生物措施实施提供了保障,它主要通过改变坡面立地条件,如坡长、坡度、坡面粗糙度等,增加坡面对地表径流的拦蓄作用,提高了土壤水分含量<sup>[16-17]</sup>;另外,在该区已有的研究表明,欧李在坡地及类似的稍硬土质上根幅较大,根系集中分布在20—70 cm土层内<sup>[3]</sup>,在根系水力提升和土壤水势差的作用下<sup>[18]</sup>,下层土壤水分向该区域内移动,这就导致了浅层的根系集中分布区域内水分含量较高,它是土壤水库与土壤干层相转变的阈值界面<sup>[19]</sup>,土壤干层出现在根系集中分布区域的下方<sup>[20]</sup>。

土壤水分空间分布特征和时空稳定性与植被、地形、气候及土壤自身特性及其之间的相互作用联系紧密<sup>[21]</sup>。本研究结果表明15°径流小区的土壤储水量比5°和10°径流小区高,这主要与欧李的生长状况相关,由表1可知,欧李的生物量、盖度和株高10°最大,5°小区次之,15°小区最小,说明10°小区欧李长势最好,耗水量最大,15°小区欧李长势相对较差,耗水量小。刘志贤等<sup>[22]</sup>在对黄土丘陵沟壑区不同立地条件下欧李生长状况的研究中有相似的研究结果,0°和8°缓坡明显好于20°径流小区和38°陡坡坡面( $p < 0.05$ ),虽然靖亭亭等<sup>[23]</sup>指出坡位和坡向也是影响土壤水分空间变异的主控因子,但本研究中标标准径流小区在同一坡向上,而且面积小,坡位的影响可以忽略。本研究结果表明,在不同时段和不同土层深度,储水量与变异系数的关系不尽相同,在大范围上表现出土壤水分含量较高时,变异性较低,但在15°小区第5 a的4月,土壤储水量较高,但是此时的变异程度也较大,已有的研究结果也不尽相同,有的认为二者之间正相关<sup>[17,23]</sup>,有

的认为负相关<sup>[24]</sup>,也有认为没有相关性<sup>[25]</sup>,Penna等<sup>[26]</sup>研究发现土壤水分含量和变异系数之间先呈正相关,在土壤含水量26%~30%时变异系数为最大值,之后又呈负相关,而拐点的大小与土壤质地有关。本研究结果与Penna等的研究结果相似,但它可能是多个外部因子共同决定的,而具体的影响因子及影响机制期望能在下一步研究中得以解决。

降雨是土壤水分最主要来源,也是导致土壤水分值和变异系数在夏、秋季变化的主要因素<sup>[27]</sup>,但并非所有降雨都对土壤水分有影响,降雨的入渗和迁移深度与降雨事件连续性、降雨量、降雨强度、初始土壤含水量等因素有关<sup>[28]</sup>。本文研究结果表明欧李生长期季内降雨量与土壤储水量之间的相关性不显著,这一方面是由于降雨历时短而雨量大导致绝大部分降雨以坡面径流的方式流失,只有少部分入渗到土壤浅层之中;另一方面是由于欧李的冠层截流和蒸发耗散。

利用Spearman秩相关系数法对不同栽植年限欧李坡面土壤储水量的时间稳定性进行分析中看到,相较于2 a时( $r_s > 0.7$ 的比例分别为67.86%,57.14%,28.57%),第5 a( $r_s > 0.7$ 的比例分别为75%,78.57%,78.57%)时土层的时间稳定性提高了10.5%~175%,这说明到欧李在生长过程改变了原来土壤水分的时间稳定状态,使不同深度土层土壤水分的相似性加强,即稳定性更强,这种现象在15°的坡面表现更明显。这主要是由于植物根系能够使小粒径团粒凝聚成更大粒径的土壤团,增加土壤的孔隙度<sup>[29]</sup>,为水分在不同土层之间的流动提供了通道,在外力作用下水分的转移速度更快,也使得土层之间水分的相似性更高,时间稳定性更高。

### 4.2 结论

在欧李生长过程中对不同坡度土壤水分的耗散相对较低,在5 a内土壤水分并没有持续下降,土壤水分的变异处于中等以下( $C_v < 25\%$ ),并使得土壤水分的时间稳定性逐步增强,结合欧李在坡面的生长和坡面土壤水分含量及变化,认为“欧李+水平阶”的坡面治理模式在黄土高原沟壑区10°以下坡面上实施有一定优势。但欧李影响下土壤水分含量与水分变异之间的关系尚不明确,有待于进一步深入研究。

### [参考文献]

- [1] 陈晓娜,段娜,高君亮,等.不同林龄欧李根系分布及形态特征[J].温带林业研究,2020,3(3):4-30.
- [2] 李金峰,刘林,薛丽萍,等.黄土丘陵沟壑区欧李人工林对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):21-26.

- [3] 汝海丽,马强,吕和平,等.欧李在陇东黄土高原地区引种栽植的生物学特征研究[J].中国水土保持,2020,4(4):49-52.
- [4] 姜生秀,严子柱.不同欧李幼苗品种光合特性比较[J].华北农学报,2020,35(6):122-132.
- [5] 张洪银,蔡焱红,殷韶梅,等.水分胁迫对欧李生长和经济效益的影响[J].农学学报,2020,10(9):48-52.
- [6] 王可壮,姚西文,汝海丽,等.陇东黄土高原沟壑区欧李引种栽植花期冻害调查研究[J].中国水土保持,2019,3(5):50-52.
- [7] 张晓艳,李连国,郭金丽,等.6-BA 预处理对干旱胁迫蒙原欧李生理响应特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(7):105-113,125.
- [8] Vachaud G, De Silans A P, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985,49(4):822-828.
- [9] 蔺鹏飞,朱喜,何志斌,等.土壤水分时间稳定性研究进展[J].生态学报,2018,38(10):3403-3413.
- [10] 黄亚楠,李晨曦,林国伟,等.洛川塬土壤水分特征及其对土地利用变化的响应[J].水土保持通报,2017,37(6):106-112.
- [11] 包维斌,王幼奇,刘鹏,等.宁南山区不同林龄杏树地土壤干层特征研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(8):101-110.
- [12] 梁海斌,史建伟,李宗善,等.晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应[J].水土保持研究,2018,25(2):87-93.
- [13] 李晓娜,宋进库,张微微,等.延怀盆地葡萄种植区不同土地利用方式表土风蚀特征分析[J].水土保持学报,2019,33(6):86-91.
- [14] 王小云.不同水土保持植物种类对土壤物理性质的影响[J].安徽农业科学,2018,46(26):113-115.
- [15] 李娜,陈迪,魏月娥,等.驼绒藜和欧李生物篱对土壤水分的影响[J].宁夏工程技术,2017,16(4):377-379.
- [16] 高思远,张建军,李梁,等.黄土区水土保持林地的蓄水动态及雨水渗透深度[J].中国水土保持科学,2019,17(2):17-26.
- [17] 沈晗悦,信忠保,王志杰.北京山区侧柏林坡面土壤水分时空动态及其影响因素[J].生态学报,2021,41(7):2676-2686.
- [18] 李奕然,马英,宋献方,等.华北山区典型人工林土壤水势动态和水分运移规律[J].生态学报,2021,41(14):5622-5631.
- [19] 左胜鹏,王会梅,李凤民,等.半干旱区 4 种典型豆科牧草群落生理生态的分异研究[J].水土保持研究,2010,17(1):167-173.
- [20] 卫新东,汪星,汪有科,等.黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J].农业机械学报,2015,46(4):88-97.
- [21] 高磊.黄土高原小流域土壤水分时间稳定性及空间尺度性研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2012.
- [22] 刘志贤,马海霞.黄土丘陵沟壑区不同立地条件下欧李生长状况研究[J].南方农业,2020,14(5):33-34.
- [23] 靖亭亭,胡海棠,邱春霞,等.东北黑土漫岗区春耕期土壤水分空间变异及地形影响[J].水土保持研究,2022,29(1):58-65.
- [24] Hupet F, Vanclooster M. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field [J]. Journal of Hydrology, 2002,261:86-101.
- [25] Charpentier M A, Groffman P M. Soil moisture variability with in remote sensing pixels [J]. Journal of Geophysical Research, 1992,97:18987-18995.
- [26] Penna D, Borga M, Norbiato D, et al. Hill slope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain [J]. Journal of Hydrology, 2009,364:311-327.
- [27] 白晓,张兰慧,王一博,等.祁连山区不同土地覆被类型下土壤水分变异特征[J].水土保持研究,2017,24(2):17-25.
- [28] 张敬晓,汪星,汪有科,等.黄土丘陵区林地干化土壤降雨入渗及水分迁移规律[J].水土保持学报,2017,31(3):231-238.
- [29] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):105-113.