

晋陕峡谷河流阶地枣林土壤水分 有效性及干燥化分析

钞锦龙¹, 胡磊¹, 雷添杰², 张鹏飞¹, 郝小梅¹, 赵德一¹

(1.太原师范学院,山西 晋中 030600;2.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:选取晋陕峡谷河流阶地枣林土壤作为研究对象,采用土壤水分有效性指标 A_w 、土壤干燥化强度指数(SDI)等,定量研究河流阶地0~500 cm土层土壤水分有效性及干燥化的空间差异。结果表明:不同阶地土壤水分有效性 A_w 具有显著性差异($P<0.05$),一级阶地(0.36)显著高于二级(0.08)和三级(0.14)阶地。不同深度土壤水分有效性差异为:0~200 cm土层土壤,除60~100 cm土层外,各层一级阶地显著高于二级、三级阶地($P<0.05$);110~300 cm、310~500 cm土层土壤水分有效性分别表现为一级阶地最低(最大值-0.06)和最高(最大值1.04)的水分状况($P<0.05$)。对土壤水分有效性分级,一级阶地多处于无效水和富余水状态,二、三级阶地多处于难效水状态。200~500 cm土层土壤平均干燥化强度为:三级阶地(69.87%)>二级阶地(69.23%)>一级阶地(-24.78%)。综合考虑土壤水分相关指标及植被生长规律,河流三级阶地更适合枣树生长,而一级、二级阶地需加强灌溉管理,并增加适当的农艺措施才能满足枣树的正常生长发育条件。

关键词:枣林;土壤水分有效性;干燥化;河流阶地;晋陕峡谷

中图分类号:S152.7+1 **文献标志码:**A

An analysis on soil moisture availability and dryness of jujube forest in River Terrace of Jinshaan Valley

CHAO Jinlong¹, HU Lei¹, LEI Tianjie², ZHANG Pengfei¹, HAO Xiaomei¹, ZHAO Deyi¹

(1. Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi 030600, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The soil of jujube forest on river terraces in Jinshaan Valley was selected as the research object. The soil water availability index (A_w) and the soil drying intensity evaluation method (SDI) were used to quantitatively study the soil water availability and spatial drying difference of 0~500 cm river terrace. The results showed that, there was a significant difference in soil water availability between different terraces ($P<0.05$). The first terrace (0.36) had significantly higher A_w than the second terrace (0.08) and the third terrace (0.14) did. The significant difference of soil water availability in different depths was: in 0~200 cm soil except 60~100 cm, the first terrace of each layer was significantly higher than the second and third terrace ($P<0.05$); the lowest (maximum value: -0.06) and the highest (maximum value: 1.04) water status of the first terrace were shown in 110~300 cm and 310~500 cm, respectively ($P<0.05$). For the classification of soil water availability, the first terrace was mostly in the state of invalid water and surplus water, and the second and third terraces were mostly in the state of less available water. The average drying strength of 200~500 cm soil was as third terrace (69.87%) > second terrace (69.23%) > first terrace (-24.78%). Considering the soil moisture index and the law of vegetation growth, this paper holds that the jujube trees grew more easily in the third terrace of the river, while the first and second terraces needed to strengthen irrigation management and increase agronomic measures to suit the normal growth and development of jujube.

收稿日期:2019-12-04

修回日期:2020-08-25

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2017167);国家自然科学基金项目(41601569)

作者简介:钞锦龙(1984-),男,山西吕梁人,博士,副教授,主要从事区域自然资源开发利用及可持续发展研究。E-mail:chaojlnet@163.com

通信作者:胡磊(1993-),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为资源评价与开发。E-mail:sunshinehulei@163.com

Keywords: jujube; water availability; soil desiccation; river terrace; Jinshaan Valley

黄土高原是我国生态脆弱和水土流失最严重的地区之一^[1]。黄土高原干旱及半干旱区降水稀少,蒸发剧烈,且降水又是该区唯一的水分输入途径^[2],所以水分成为限制该地区植被生长和农业生产的关键因素^[3],其在黄土高原生态修复及实现区域农业可持续发展过程中起重要作用。因此在植被恢复和农业活动中,有效利用黄土高原有限的土壤水分尤为重要^[1]。土壤水分有效性是指植被利用土壤水分的难易程度^[3],研究土壤水分有效性不仅有利于充分利用降水资源,提高林木存活率和经济作物产量,而且对避免人工林根系过耗作用形成土壤干层,以及防止生态恶化具有重要意义。

众多学者已就土壤水分有效性及土壤干燥化效应做了大量研究^[4-6],其中土壤水分有效性的研究侧重于采用土壤水势、作物产量、根系吸收速率等不同评价指标^[7-9],而评价方法则从考虑土壤质地的单一方法发展到邵明安等^[10]研究 SPAC 理论的动力学方法,土壤水分有效性评价转向考虑大气、土壤和作物综合影响因素^[3];在土壤干燥化效应研究方面,相关成果主要集中于土壤干层定义、成因、空间分布及影响因素等^[11-13]。黄河是中华文明的摇篮,黄河沿岸更是黄土高原地区人类重要的生产生活基地,其中,河流阶地因其特殊的沉积特点及良好的水土环境,不仅是当地重要的灌溉农业耕种平台,同时也是众多学者科学研究的重要对象。有关河流阶地的研究主要关注于河流阶地形成年代、沉积特征和对古气候指示意义的探讨,而对河流阶地土壤水分的研究尚有不足。

研究区位于黄河晋陕峡谷中段,采样地临县克虎镇则是黄河滩枣的主产区,而黄河滩枣主要分布于黄河河流阶地中,由于土壤水分条件及热量条件与周边山区存在较大差异,其品相及产量优于周边山区,并且在红枣收入中所占比重较大。所以,本文以河流阶地枣林土壤作为研究对象,对自然状态下各阶地不同深度土壤水分有效性的空间差异性和干燥化特征进行科学研判和分析,以期为提高林地生产力,获得更大经济和生态效益提供理论依据,同时也为黄河流域合理灌溉及生态保护提供基础理论支撑。

1 研究区概况

研究区位于晋陕峡谷临县境内(图1),地处 $100^{\circ}39'40''\sim 111^{\circ}18'02''\text{E}$ 、 $37^{\circ}35'52''\sim 38^{\circ}14'19''\text{N}$

之间,东临吕梁山,西边与陕西隔黄河相望。全域地貌为黄土丘陵沟壑区,海拔在 $1\,000\sim 1\,300\text{ m}$ 之间,地形跌宕起伏。研究区位于温带大陆性半干旱气候区,雨热同期,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。全县年均气温40 a来介于 $7.9^{\circ}\text{C}\sim 10.5^{\circ}\text{C}$ 之间,且呈由南向北递减趋势,无霜日约为160 d;全县年降水量 511.7 mm ,而采样区附近仅有 420 mm 左右,其中7—9月降水量占全年的59.32%。临县光照充足,年蒸发量是降雨量的4倍左右,干旱的气候条件特别适合枣树的生长,所以自古以来,黄河沿岸就有大片的枣园。研究区域土壤类型以黄绵土为主,此外还有风沙土、黑垆土等;土壤质地以轻壤、沙壤土为主,土壤平均容重 $1.10\sim 1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间,田间持水量和土壤凋萎湿度取值分别为20.5%和4.5%^[14-15]。

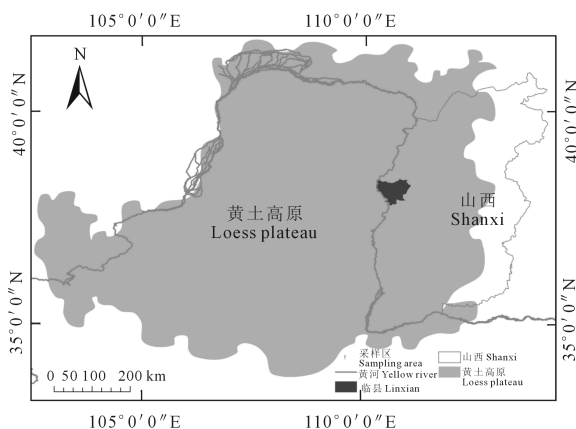


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

2 研究方法

2.1 土壤采集

野外采样选择土壤水分状况较好的雨季,时间为2019年9月19日—9月21日。采样前7、8月累计降水量约为 190 mm ,属于同时期正常年份降水。采样期内无降雨。在野外调查的基础上,选择临县克虎镇黄河沿岸河流一级、二级和三级阶地的枣林地进行采样研究,并且各阶地随机选取2块典型样地进行重复采样。样地均为无人工灌溉自然状态下的枣林地且林龄和生境相似,具体情况见表1。采样时每块枣林地按照“S”型重复钻取3个土壤剖面,每个剖面间距 $1\,000\text{ cm}$ 且保持与周围最近枣树根基距离相等,尽量避免与枣树过近。土壤采集使用人工土钻法取样,钻取 500 cm 深度土壤剖面,且每 10 cm 土层取样1次,用自封袋密封样本,最后带回实验室烘干称重处理。

表 1 试验样地基本情况
Table 1 Basic information of experimental plot

位置 Position	河床距离/m Riverbed distance	平均树龄/a Average tree age	平均株高/cm Average height of trees	树冠直径/cm Crown diameter	栽种密度/cm ² Planting density	草本生物量 Herbaceous biomass
一级河流阶地 First terrace of river	45	50~60	550	300~500	400×550	稀疏 Sparse
二级河流阶地 Second terrace of river	95	50~60	600	300~500	600×500	稀疏 Sparse
三级河流阶地 Third terrace of river	230	50~60	700	300~500	500×500	稀疏 Sparse

2.2 土壤水分有效性、土壤供水系数、水分亏缺度计算

土壤水分有效性指标 A_w :指实际有效水分与最大有效水分之比,表征植被能够充分利用土壤水分含量的程度。计算公式为^[1]:

$$A_w = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_f - \theta_w}$$
 (1)

式中, A_w 为土壤水分有效性指数, θ 为土壤实际水分含量, θ_w 为土壤凋萎湿度, θ_f 为田间持水量。土壤水分有效性指数 A_w 值越大,表示土壤水分可被植被吸收利用的程度越大, A_w 值小于 0 表示土壤水分为无效水,不能被植被吸收。

土壤水分有效性分级:前人研究表明,土壤凋萎湿度、生长阻滞持水量和田间持水量是土壤水分对植被生长影响的 3 个转折点^[16-17]。当土壤水分低于土壤凋萎湿度,植被叶片开始出现萎缩现象;田间持水量是土壤含水量的最大值;生长阻滞持水量是指土壤毛管悬着的水分由连续转为断裂状态,植被吸收土壤水分受到一定程度的抑制作用,取值为田间持水量的 60%^[1]。刘增文等^[18] 又将土壤凋萎湿度和田间持水量之间的有效水分分为 3 个等级:(1)难效水,其范围为凋萎湿度到田间持水量的 60%;(2)中效水,其范围为田间持水量的 60%~80%;(3)易效水,其范围为田间持水量的 80%~100%。

土壤供水系数 K_s :可反映土壤水分胁迫对腾发量的影响。其公式为^[1]:

$$K_s = \frac{\ln(A_w + 1)}{\ln(101)}$$
 (2)

式中, K_s 为土壤供水系数,当 $A_w = 100$ 时, $K_s = 1$,此时作物为最大腾发量;当 $A_w = 0$ 时, $K_s = 0$,此时作物不能吸水,其腾发量也为 0。

土壤水分亏缺度 K 表示土壤水分对植被生长的亏缺程度。计算公式为^[1]:

$$K(\%) = \frac{\theta_a - \theta}{\theta_a} \times 100\%$$
 (3)

式中, θ_a 为生长阻滞持水量,取田间持水量的 60%; θ 为实际土壤水分湿度。根据土壤水分亏缺度 K 值将水分亏缺度分为 4 级:(1) 若 $K \leq 0$,为不亏缺;(2) 若 $0 < K \leq 25\%$,为轻度亏缺;(3) 若 $25\% < K \leq 50\%$,为中度亏缺;(4) 若 $K > 50\%$,为严重亏缺。

2.3 土壤干燥化强度评价方法

本研究采用杨文治等^[19] 的观点,将土壤干层上限定为土壤稳定湿度,下限定为土壤凋萎湿度,其中土壤稳定湿度取值田间持水量的 60%。

土壤干燥化强度指数 SDI (Soil desiccation index) 大小表示土壤干燥化程度,计算公式为^[13]:

$$SDI = \frac{SSM - SM}{SSM - SW} \times 100\%$$
 (4)

式中: SDI 是土壤干燥化指数, SSM 是土壤稳定湿度, SM 是实际土壤湿度, SW 是土壤凋萎湿度。根据 SDI 数值大小,结合枣林生长状态,可以将土壤干燥化强度分为 6 级:(1) 若 $SDI \geq 100\%$,为极度干燥化;(2) 若 $75\% \leq SDI < 100\%$,为强烈干燥化;(3) 若 $50\% \leq SDI < 75\%$,为严重干燥化;(4) 若 $25\% \leq SDI < 50\%$,为中度干燥化;(5) 若 $0 \leq SDI < 25\%$,为轻度干燥化;(6) 若 $SDI < 0$,为无干燥化。

3 结果与分析

3.1 土壤水分含量分析

河流阶地枣林 0~500 cm 土层土壤水分情况如图 2,结果表明:一级阶地枣林土壤含水量具有明显上升趋势,二、三级阶地土壤含水量自上而下无明显差异;一级阶地 100 cm 以上、300 cm 以下部位,二、三级阶地 100 cm 以上、200 cm 以下部位土壤的含水量波动较大。各阶地平均含水量为一级阶地 (10.26%)>三级阶地 (6.75%)>二级阶地 (5.84%)。不同深度水分情况为:一级河流阶地土壤含水量变化范围在 1.77%~27.44%之间,最小和最大值分别出现在 120、400 cm 深度土壤中;二级河流阶地土壤含水量变化范围在 3.09%~13.96%之间,土壤含水量最小和最大值分别出现在 140、460 cm 深度土壤

中;三级河流阶地土壤含水量变化范围在 3.62%~12.35%之间,土壤含水量最小、最大值分别出现在 310、30 cm 深度土壤中。

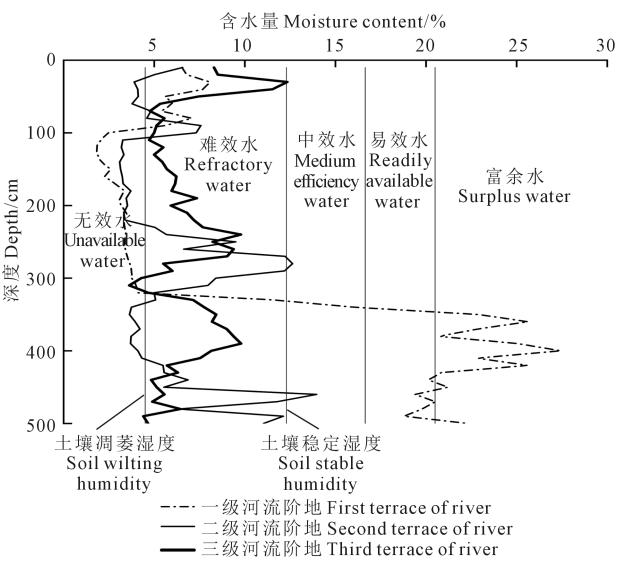


图 2 土壤剖面湿度
Fig.2 Soil profile humidity

3.2 土壤水分有效性空间差异分析

3.2.1 土壤水分有效性的大小和分级 利用有效性指标 A_w 对河流不同阶地枣林土壤水分有效性进行比较(表 2)。结果显示河流阶地之间土壤水分有效性具有显著性差异($P<0.05$):一级阶地(0.36)显著高于二级(0.08)和三级阶地(0.14),其中二级和三级阶地之间差异不显著。河流阶地不同深度土壤水分有效性差异表现为:对 0~200 cm 土层土壤,除 60~100 cm 土层不显著外,其他部位土壤水分有效性均表现为三级阶地>二级阶地>一级阶地($P<0.05$);对 110~300 cm、310~500 cm 土层土壤,土壤水分有效性分别表现为一级阶地最低和最高两种水分状况($P<0.05$),而二、三级阶地在 210~400 cm 土层内表现无显著差异。

如图 2 所示,河流阶地土壤水分有效性等级划分结果为:一级阶地 100 cm 深度以上土壤为难效水,110~300 cm 深度土壤为无效水,310~500 cm 深度土壤为富余水;二级阶地 110~200 cm 深度土壤为无效水,其余部分土层均为难效水;三级阶地土壤水分基本上均属难效水。

表 2 0~500 cm 深度土壤水分指标统计
Table 2 Statistics of 0~500 cm depth soil moisture index

指数 Index	土壤深度/cm Soil depth	一级河流阶地 First terrace of river	二级河流阶地 Second terrace of river	三级河流阶地 Third terrace of river
A_w	10~50	0.15±0.03b	0.01±0.03c	0.32±0.06a
	60~100	0.05±0.05a	0.07±0.05a	0.04±0.01a
	110~200	-0.12±0.01c	-0.08±0.00b	0.08±0.01a
	210~300	-0.06±0.00b	0.21±0.07a	0.18±0.04a
	310~400	0.85±0.17a	0.00±0.03b	0.19±0.04b
	410~500	1.04±0.04a	0.24±0.07b	0.07±0.02c
	平均 Average	0.36±0.08a	0.08±0.03b	0.14±0.02b
K_s	10~50	0.60	0.15	0.76
	60~100	0.39	0.45	0.35
	110~200	0.00	0.00	0.48
	210~300	0.00	0.67	0.64
	310~400	0.97	0.00	0.65
	410~500	1.00	0.70	0.45
	平均 Average	0.78	0.48	0.59
$K/\%$	10~50	43.50 (中度亏缺 Moderate deficit)	61.54 (严重亏缺 Serious deficit)	21.79 (轻度亏缺 Slight deficit)
	60~100	56.91 (严重亏缺 Serious deficit)	54.31 (严重亏缺 Serious deficit)	58.13 (严重亏缺 Serious deficit)
	110~200	79.59 (严重亏缺 Serious deficit)	73.01 (严重亏缺 Serious deficit)	52.93 (严重亏缺 Serious deficit)
	210~300	71.46 (严重亏缺 Serious deficit)	35.77 (中度亏缺 Moderate deficit)	39.92 (中度亏缺 Moderate deficit)
	310~400	-46.59 (不亏缺 No deficit)	63.33 (严重亏缺 Serious deficit)	38.13 (中度亏缺 Moderate deficit)
	410~500	-71.87 (不亏缺 No deficit)	32.52 (中度亏缺 Moderate deficit)	54.88 (严重亏缺 Serious deficit)
	平均 Average	16.59 (轻度亏缺 Slight deficit)	52.52 (严重亏缺 Serious deficit)	45.12 (中度亏缺 Moderate deficit)

注:小写字母表示不同河流阶地同一深度土壤水分指标的方差分析结果,显著水平 $P<0.05$ 。
Note: The lowercase letters indicate the results of variance analysis of soil moisture index at the same depth in different river terraces, with significant level $P<0.05$.

3.2.2 土壤供水系数 从土壤供水系数上看(表2),不同阶地土壤供水系数 K_s 的变化为河流一级阶地(0.78)>三级阶地(0.59)>二级阶地(0.48),说明河流一级阶地土壤水分状况优于二、三级阶地,其土壤水分可达枣树生长所产生最大腾发量的78%,而二、三级阶地土壤水分仅能提供枣树生长所产生的约50%~60%的植被腾发量。不同深度土壤供水系数变化规律为:10~50 cm 土层,土壤供水系数 K_s 表现为三级阶地>二级阶地>一级阶地;60~100 cm 土层,各阶地土壤供水系数差异不大;110~300 cm 土层,一级阶地土壤供水系数 K_s 值最小且为0,说明土壤水分状况差,枣树不能吸水,腾发量为0;310~500 cm 土层,一级阶地土壤供水系数 K_s 值最大且接近1,说明土壤水分状态良好,基本可供其最大生长腾发量。

3.2.3 土壤水分亏缺 黄土高原的土壤水分亏缺在一定程度上限制了农业发展,但不同深度土壤水分亏缺情况不同。河流阶地枣林土壤水分亏缺情况为(表2):一级河流阶地总体表现为轻度亏缺,其中10~50 cm 土层为中度亏缺,60~300 cm 土层为严重亏缺,310~500 cm 土层为不亏缺;二级河流阶地总体表现为严重亏缺,其中除210~300 cm 土层为中度亏缺外,其余均为严重亏缺;三级河流阶地总体表现为中度亏缺,其中10~50 cm 土层为轻度亏缺,210~400 cm 土层为中度亏缺,其他深度土壤水分状况均为严重亏缺。

3.3 土壤干燥化分析

3.3.1 200~500 cm 深度土壤干层的分布情况 一般来说,土壤干层是指主要以植被过度蒸腾耗水所导致土壤水分相对持久性的“地区型干层”或“蒸发型干层”^[17],在黄土高原区域,由于0~200 cm 土层土壤受到大气降水的即时影响,水分亏缺容易得到缓解,故本文重点关注200~500 cm 深度土壤干燥化情况。图3为河流阶地200~500 cm 深度土壤干

层分布情况,其中除一级河流阶地340 cm 土层以下土壤不发育干层外,其他阶地干层基本超过500 cm (其中二级阶地280 cm 和460 cm 部位土壤未发育干层)。

3.3.2 200~500 cm 深度土壤干燥化强度与厚度分析 不同河流阶地枣林200~500 cm 深度土壤平均干燥化强度为:一级阶地(干燥化指数-24.74%)土壤无干燥化,二级阶地(69.23%)、三级阶地(69.87%)土壤均为严重干燥化(表3)。不同深度土壤干层发育情况:一级阶地除无干燥化土层外,以发育极度干层为主,主要分布在200~330 cm 土层范围内;二级阶地以发育极度干层和强烈干层为主,主要分布在200~240 cm 及320~430 cm 土层范围内;三级阶地以发育强烈和严重干层为主,主要分布在200~240 cm、260~280 cm、310~340 cm 及420~470 cm 土层范围内。

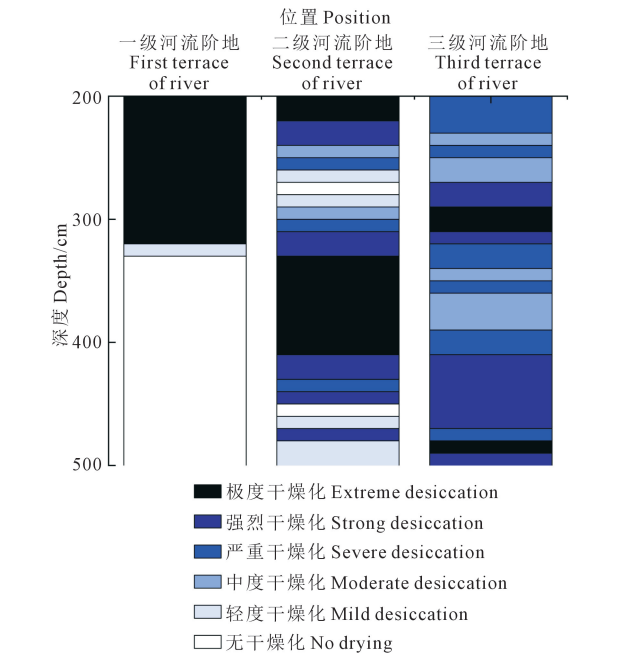


图3 枣林土壤剖面干层情况
Fig.3 Dry layer of soil profile of jujube forest

表 3 200~500 cm 深度土壤干燥化情况
Table 3 Drying of 200~500 cm soil depth

样地 Soil experimental plot	平均干燥化 指数/% Soil desiccation index	土壤干燥化 强度 Soil desiccation intensity	极度 干燥层/cm Extreme desiccation soil layer	强烈以上 干燥层/cm Strong desiccation soil layer	严重以上 干燥层/cm Severe desiccation soil layer	中度以上 干燥层/cm Moderate desiccation soil layer	轻度以上 干燥层/cm Light desiccation soil layer	土壤 干层/cm Dried soil layer
一级河流阶地 First terrace of river	-24.74	无干燥化 No drying	120	0	0	0	10	130
二级河流阶地 Second terrace of river	69.23	严重干燥化 Severe desiccation	100	80	30	20	50	280
三级河流阶地 Third terrace of river	69.87	严重干燥化 Severe desiccation	30	100	100	70	0	300

河流阶地 200~500 cm 深度土壤干层厚度情况为:三级阶地干层最厚(300 cm),二级阶地次之(280 cm),一级阶地干层发育最薄(130 cm)。

4 讨论

4.1 河流阶地土壤水分有效性的空间差异

土壤水分有效性受到降雨、耕作方式等因素的影响,具有多变和复杂性^[20],是反映水分胁迫和植被生长的重要指标^[21]。本文研究得出一级河流阶地土壤水分有效性(0.36)显著高于二级(0.08)和三级(0.14)阶地,这是由于一级阶地与河床距离最近,310 cm 深度以下土壤水分受到黄河水位变化影响,容易获得土壤地下水补给作用,所以土壤水分有效性平均表现最高;而对 310 cm 深度以上土壤,大多部位土壤水分有效性显著低于二、三级阶地,这是因为根据河漫滩相沉积层的粒度组成与洪水深度的关系规律^[16,22],洪水历时,发育形成中的一级阶地地势较低而洪水深度高,形成的河漫滩相沉积物粒度粗,反之二级和三级阶地形成沉积物粒度较细,所以导致 0~300 cm 土层在无黄河水分补给的条件下土壤持水性相对较差,表现为土壤水分有效性显著低于二、三级阶地。此外,三级阶地 0~200 cm 土层土壤水分有效性最高(60~100 cm 土层除外),可能是因为三级阶地采样点靠近黄河沿岸的山坡体,大气降水在坡面形成的地表径流能够在阶地附近累积,形成集水区,改善了三级阶地土壤水分状况。综合以上因素分析,二级阶地土壤水分有效性指标(0.08)最低的原因有以下 2 个方面,第一距离河床位置较远,第二无山坡径流汇集水分补给作用,所以天然降水为二级阶地土壤水分的唯一来源。

本研究一级河流阶地 310 cm 深度以上土壤主要处于无效水状态,而以下为富余水,说明 0~310 cm 部位土壤水分严重胁迫植被生长,若出现持续干旱,则可能致使植被枯萎死亡,而 310 cm 深度以下土壤水分可以自由移动,对于植被生长无影响;二、三级阶地 0~500 cm 土层土壤多属于难效水状态,土壤水分对植被生长具有胁迫作用,特别是难以获得降水补充的 200 cm 土层以下部分土壤,若为枯水年,造成土壤重度干旱(约田间持水量 45% 以下),会严重影响枣树光合能力,损伤其细胞膜系统^[23],造成低效低产林;若为丰水年,土壤水分则有可能转为中效水,适合枣树生长发育。本文与张鹏飞等^[16]研究的黄河河流阶地土壤水分有效性表现为一级阶地最高,二级阶地次之的结论基本一致,但

其研究的河流阶地土壤各部位平均含水量明显偏高,以及各阶地土壤水分有效性状况与本文也有差异,这主要是由于采样时间不同,由自然降水年际差异(前者为丰水年,后者为正常年)以及土壤水分有效性标准划分不一造成的。

综上所述,虽然一级河流阶地土壤水分有效性大小显著高于二级、三级,但一级阶地 0~310 cm 深度土壤水分多为无效水,又因枣树根系主要分布并消耗该层内土壤水分^[24],因此一级阶地不适合枣树自然生长,尤其不利于幼龄枣树的发育。如大范围种植还需辅以人工灌溉,直到枣树根系生长至能有效获得地下水补给为止。对于二、三级河流阶地,尽管多属于难效水状态,在自然条件下,枣树生长受到一定的阻滞,但生长阻滞性大小取决于土壤含水量的多寡^[25]。由于三级阶地受山坡径流水分的额外补给,土壤水分胁迫相比二级阶地较小,若再辅以地布覆盖、修剪枣林以及灌溉管理等^[26]农艺措施,则更接近于中效水,适合枣树的生长发育。而对于二级阶地,应该适度减小枣树种植密度以及加强灌溉频率和增加水分补给量,改善枣林深层(200 cm 土层以下)土壤水分状况,从而增大土壤水分有效性。

4.2 河流阶地的土壤干层与水分平衡

研究普遍认为,土壤干层形成的原因有降水稀少,或在不当的地区植树造林和选择不适宜的树种栽培等^[27]。在黄土高原区域,土壤干层一定程度上是气候干旱的必然结果^[17],而植被类型选择不当、地形跌宕起伏以及林木密度过大都是加剧深层土壤干燥化的因素。本文研究阶地枣林 200~500 cm 深层土壤干燥化效应,分析不易受降水补给的永久性干层的强度和厚度,发现深层土壤普遍发育干层且干层发育强度和厚度不同,这是由于晋陕峡谷河流阶地林木根系过耗作用、地下水位、土壤粒度以及微地形条件综合作用下导致该地土壤水分循环出现负平衡的结果。又由于土壤干层发育在薄膜水带中,薄膜水向干层带运动,阻碍了大气降水的下渗^[28],进一步加剧土壤水分负平衡的过程。土壤水分负平衡严重影响陆地水分循环,切断了大气降水对地下水的补给作用,形成了土壤-植被-地表径流-大气的水分循环异常模式^[16,25]。河流阶地枣林土壤水分的负平衡过程,造成地下水资源匮乏,威胁植被生存,增加了该地区生态恢复建设的难度系数。所以应该因地制宜,择优选择适水条件的阶地进行人工植被栽培,同时实施科学合理的举措种植枣树,以促进黄河流域生态环境的可持续发展,加强黄河流域

生态保护,保障黄河长治久安。

5 结 论

河流阶地枣树林 0~500 cm 深度土壤含水量大小关系为:一级阶地 (10.26%) > 三级阶地 (6.75%) > 二级阶地 (5.84%) 。

不同阶地间枣林土壤水分有效性 A_w 具有显著性差异 ($P<0.05$) ,一级阶地 (0.36) 显著高于二级 (0.18) 和三级 (0.14) 阶地。不同深度土壤水分有效性间的差异表现为:0~200 cm 土层土壤,除 60~100 cm 土层外,河流一级阶地显著高于二级、三级阶地 ($P<0.05$) ;110~300 cm、310~500 cm 土层土壤水分有效性分别表现为一级阶地最低和最高 ($P<0.05$) 。对土壤水分有效性分级,一级阶地 0~300 cm 土层土壤主要处于无效水状态,310~500 cm 土层土壤处于富余水状态;二级阶地和三级阶地主要属于难效水状态。

河流阶地土壤供水系数 K_s 的变化为河流一级阶地 (0.78) > 三级阶地 (0.59) > 二级阶地 (0.48) ;河流阶地土壤水分亏缺程度表现为二级阶地 (严重亏缺) > 三级阶地 (中度亏缺) > 一级阶地 (轻度亏缺) 。

河流阶地 200~500 cm 深度土壤均发育有干层,土壤平均干燥化强度为三级阶地 (69.87%) > 二级阶地 (69.23%) > 一级阶地 (-24.74%) 。

参 考 文 献:

[1] 吕文强,王立,党宏忠.黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性的空间分异特征[J].水土保持学报, 2015,29(6):233-240.

[2] 李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].生态学报,1983,3(2):91-101.

[3] 黄仲冬,齐学斌,樊向阳,等.土壤水分有效性及其影响因素定量分析[J].水土保持学报,2014,28(5):71-76.

[4] 裴艳武,黄来明,贾小旭,等.黄土高原 2 种典型灌木地土壤水分有效性及其影响因素[J].土壤学报,2019,56(3):627-637.

[5] 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.

[6] 杨磊,王伟,陈利顶,等.半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J].地理研究,2012,31(1):71-81.

[7] 张光灿,刘霞,贺康宁.黄土半干旱区刺槐和侧柏林地土壤水分有效性及生产力分级研究[J].应用生态学报,2003,14(6):858-862.

[8] 郭庆荣,李玉山.黄土高原南部土壤水分有效性研究[J].土壤学报,

1994,31(3):236-243.

[9] 李笑吟,毕华兴,张建军,等.晋西黄土区土壤水分有效性研究[J].水土保持研究,2006,13(5):205-211.

[10] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤水分物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:278-227.

[11] 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.

[12] 李田恬,王俊,刘文兆,等.增施氮肥对黄土高原旱作冬小麦农田土壤干层动态的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):152-156.

[13] 苟清平,朱清科,李依璇,等.陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应[J].生态学报,2019,39(19):7161-7168.

[14] 李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].生态学报,1983,3(2):91-101.

[15] 李玉山,韩仕峰.黄土高原土壤水分性质及其分区[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊(土壤分水与土壤肥力研究专集),1985,(2):1-17.

[16] 张鹏飞,钞锦龙,戴燕燕,等.黄河中段不同河流阶地枣林土壤水分的特征[J].江西农业学报,2019,31(7):51-56.

[17] 陈洪松,王克林,邵明安.黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J].林业科学,2005,41(4):155-161.

[18] 刘增文,王佑民.人工油松林蒸腾耗水及林地水分动态特征的研究[J].水土保持通报,1990,10(6):78-84.

[19] 杨文治,余存祖.黄土高原区域治理与评价[M].北京:科学出版社,1992:241-297.

[20] Gjongecaj B, Veizi P. The impact of various types of tillage on the soil water availability[J].Albanian Journal of Agricultural Sciences, 2014,13(2):29-40.

[21] 梁伟,白翠霞,孙保平,等.黄土丘陵区退耕地土壤水分有效性及蓄水性能——以陕西省吴旗县柴沟流域为例[J].水土保持通报,2006,26(4):38-40.

[22] 赵景波,罗小庆,黄小刚,等.西安周至渭河漫滩沉积特征与洪水变化[J].灾害学,2017,32(3):23-28.

[23] 刘倩,张国壮,李海超,等.土壤水分有效性对梨枣叶片光合参数和抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):1-6.

[24] 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.

[25] 牛俊杰,马树苗,赵景波,等.陕西省延川县孙家塬经济林土壤水分和水分平衡[J].水土保持通报,2014,34(4):33-38.

[26] 靳姗姗.典型农艺措施对山地旱作枣林土壤水分及枣树生长的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.

[27] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:107-111.

[28] 赵景波,牛俊杰,杜娟,等.咸阳市三原县新庄不同植被土层含水量研究[J].地理科学,2008,28(2):247-252.