

晋西黄土区山地枣林土壤水分及干燥化效应*

钞锦龙¹, 胡磊¹, 郝小梅¹, 陶军², 李浩杰¹

(1. 太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中 030619; 2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100038)

摘要: 研究选取晋西黄土区立地条件不同的山地枣林作为研究对象, 采用土壤干燥化强度评价法(SDI)定量分析和评估0~500 cm土壤水分和干燥化效应. 结果表明:(1) 土壤含水量随深度加深呈先下降后上升趋势, 其耗水最大位于60~220 cm部位土层. (2) 不同立地条件下枣林土壤含水量存在显著差异($P < 0.01$), 其中不同坡位下阳坡坡底(9.10%)显著高于阳坡坡中(6.08%)和坡顶(6.68%), 不同坡向下阴坡(9.86%)显著高于阳坡. (3) 土壤干燥化强度指标大小为: 阳坡坡中(76.38%) > 坡顶(67.63%) > 阳坡坡底(26.50%) > 阴坡坡中(25.63%). 本文认为阳坡坡底和阴坡坡中位置适合枣树自然生长, 而阳坡坡中和坡顶位置应该减小种植密度, 且辅以合理的管理经营.

关键词: 黄土区; 山地; 土壤水分; 干燥化效应

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.05.29.0001

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)04-0481-09

引文格式: 钞锦龙, 胡磊, 郝小梅, 等. 晋西黄土区山地枣林土壤水分及干燥化效应[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(4): 481-489.

英文引文格式: CHAO J L, HU L, HAO X M, et al. Soil moisture and desiccation effects of mountain jujube forests in the loess plateau of western Shanxi[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(4): 481-489.

Soil Moisture and Desiccation Effects of Mountain Jujube Forests in the Loess Plateau of Western Shanxi

CHAO Jinlong¹, HU Lei¹, HAO Xiaomei¹, TAO Jun², LI Haojie¹

(1. School of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong Shanxi, 030619, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing, 100038, China)

Abstract: In this study, the jujube forest with different site conditions in the loess region of Western Shanxi Province was selected as the research object, and the soil moisture and drying effect of 0~500 cm were quantitatively analyzed and evaluated by SDI. The results showed that: (1) the soil water content decreased first and then increased with the depth, and the largest water consumption was in the soil layer of 60~220 cm. (2) Under different site conditions, the soil moisture content of jujube forest was significantly different ($P < 0.01$), among which, the bottom of the sunny slope (9.10%) was significantly higher than the middle of the sunny slope (6.08%) and the top of the slope (6.68%), and the downhill slope (9.86%) was significantly higher than the sunny slope. (3) The index of soil drying intensity is: in the sunny slope (76.38%) > in the top (67.63%) > in the bottom (26.50%) > in the shady slope (25.63%). In this paper, it is considered that the position of the bottom of the sunny slope and the middle of the shady slope is suitable for the natural growth of jujube trees, while the position of the middle and the top of the sunny slope should reduce the planting density and be supported by reasonable management.

Key words: loess plateau; mountain; soil moisture; desiccation effect

0 引言

黄土高原降水量稀少、蒸发剧烈, 地表水分匮乏. 此外, 由于黄土覆盖, 区域地下水埋藏过深, 难以被植被吸收利用. 因此, 土壤储水成为区域深根性植被的“天然水库”^[1]. 土壤水作为陆地水循环的重要环节, 其动态

* 收稿日期: 2020-05-29

基金项目: 2020年度山西省高等学校哲学社会科学项目(10200641), 2020年山西省社科联项目(SSKLZDKT2020110).

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

变化影响着植被的生存与生长^[2]以及整个生态系统的演替方向. 在黄土高原区, 正常年份降雨入渗深度0~200 cm, 而湿润年份或者雨季林地降水补充深度一般也不会超过200~300 cm^[3], 因此, 黄土高原区植被状况与土壤水分条件紧密相关. 然而大量研究发现黄土高原人工林种植区域, 大气降水、植被耗水与土壤储水关系失衡, 导致天然土壤水库储水量不断下降^[4], 造成严重的土壤干燥化现象, 影响区域植被类型和结构. 前人的研究^[3]表明土壤干层通常发生在降水渗透层以下, 半干旱区200 cm以下不能获得天然降水的及时补给, 同时土壤水分又受到植被根系的过耗作用, 长期累积形成干层. 干层厚度的累积又进一步阻碍了自然降水对于深层土壤的补给, 加重了土壤水分的亏缺^[5]. 土壤干层会导致很多生态问题, 比如林木低效低产的“小老树”, 人工林草植被的衰败以及局部气候的干旱化等^[6]. 所以, 因地制宜合理种植人工林草, 防止干层发生, 避免生态环境恶化已成为生态文明建设的关键问题.

相关学者为防治土壤干层可能带来的环境问题, 已就土壤干层定义、成因、空间分布及影响因素等^[7-10]做了大量研究. 最新成果多集中在不同因素影响下土壤水分的差异研究, 如霍嘉仪等^[11]、索立柱等^[12]研究不同植被类型土壤水分差异, 梁海斌^[13]、常译方^[14]、孟秦倩等^[15]分别对林龄、密度和坡向因素影响下植被土壤水分异质性进行了探究. 晋西山地枣树栽培历史悠久, 且有关枣林土壤水分的探讨也有报道, 其主要研究了不同林龄、密植方式对土壤水分影响, 以及垂直根系分布与土壤水分的关系等^[16-18]. 但针对山地枣林在不同立地条件下土壤水分变异情况和原因, 以及干层状况的报道尚不多见.

研究区位于晋陕峡谷中段的丘陵地区, 枣树是黄土沟壑区珍贵的果树资源, 同时采样区临县红枣也是获得国家地理标志的保护产品, 红枣作为本地农业主导产业, 在区域农业经济发展中占据重要地位. 因此本文研究晋西黄土区山地枣林土壤水环境, 对不同立地条件下水分差异进行分析, 以及对土壤干层强度和厚度定量评价, 可为进一步揭示黄河沿岸山地枣林深层土壤干燥化原因, 提高林地生产力, 获得更大经济和生态效益提供理论依据. 同时也是坚持生态优先、绿色发展, 践行以水而定、量水而行的黄河生态治理理念的具体体现.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样区位于晋陕峡谷中段山西省临县境内, 地理坐标37°35'52"~38°14'19"N, 100°39'40"~111°18'02"E之间. 东临吕梁山, 西与陕西隔黄河相望. 临县大部分区域属于黄土丘陵沟壑区, 海拔1 000~1 300 m, 地形高低起伏. 同时, 临县位于温带大陆性半干旱气候区, 雨热同期, 冬季寒冷干燥, 夏季炎热多雨. 临县年均降雨量为511.70 mm, 但采样区(克虎镇)周边区域年均仅有420 mm, 且主要集中在7—9月, 占年降水量的59.32%(图1). 年蒸发量2 149 mm左右, 是降雨量的4倍, 年日照时长2 807 h, 光照充足, 该气候条件特别适合枣树生长. 因此临县又被称为“中国红枣之乡”. 临县境内, 黄绵土是主要的土壤覆盖类型, 此外还有风沙土、黑垆土等. 土壤的总体特点为机质低、结构疏松、土地坡度大等; 土壤质地以沙壤土、轻壤土为主; 田间持水量和凋萎湿度分别为20.5%、4.5%, 土壤平均容重为1.20 g/cm³左右^[1,19].

1.2 土壤采集与湿度测定方法

野外采样时间为2019年9月21日至22日, 正值该地区雨季末期, 土壤水分状况良好, 且采样前7月、8月累计降水量约为190 mm, 属同时期正常年份降水. 采样期间无降雨过程, 选择这一时段采样可以有效分析区域在雨季后土壤水分维持状况. 野外调查随机选取东西走向山体的阳坡坡底、坡中、坡顶以及阴坡坡中位置的枣林为研究对象, 所选典型样地生境相似且树龄相同, 其基本情况见表1(海拔、坡度、坡向仪器测量, 树龄调查走访获得), 由于受实际采样点可达性限制, 在阴坡只选择坡中位置进行分析和对比研究. 在选取的典型样地上, 按

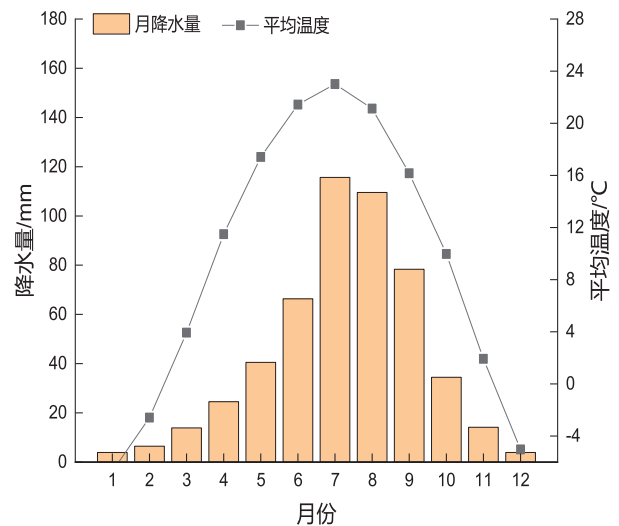


图1 研究区1979—2018年月均降水及温度情况
Fig 1 Annual average precipitation and temperature in the study area from 1979 to 2018

照“W”形布设3个采样点,其间距约为1 000 cm,且采样尽量避免与枣树过近造成的土壤水分误差.采用人工土钻法,钻取深度为500 cm的土壤剖面,每隔10 cm土壤取样1次,每层样本处理3个重复.然后自封袋密封,最后带回实验室,在105 °C温度下连续烘干24 h以上,直至恒重.土壤含水量的计算公式为:

$$Q = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Q 为样品的土壤质量含水量(%), W_1 为湿土重(g), W_2 为干土重(g).

表 1 山地枣林地基本情况
Tab 1 Basic situation of mountain Jujube forest land

位置	海拔(m)	坡向	部位	坡度(°)	树龄(a)	枣树株高(cm)	栽种密度
阴坡坡中枣林	930	北	山坡中上	33	15	400	350 cm×350 cm
阳坡坡底枣林	814	南	山坡底	7	15	400	300 cm×350 cm
阳坡坡中枣林	940	南	山坡中上	35	15	350	400 cm×350 cm
坡顶枣林	1 023	-	山坡顶	9	15	300	300 cm×400 cm

1.3 土壤水分指标计算法

土壤储水量SMS(Soil Moisture Storage)指某一定厚度的土层实际所储存的水量,其公式为^[13,20]:

$$SMS = \frac{10 \times SMC \times BD \times H}{\rho} \quad (2)$$

式中: SMS 是土壤储水量, SMC (Soil Moisture Content) 是土壤质量含水量(%), BD (Bulk Density) 是土壤容重 (g/cm^3), H 是土层的厚度 (cm), ρ 是水的密度 ($1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$).

土壤有效储水量ASMS(Available Soil Moisture Storage)定义为土层实际储水量与凋萎湿度状态下的土壤储水量的差值,其公式为^[13,20]:

$$ASMS = SMS - SMS_{WM} \quad (3)$$

式中: $ASMS$ 是土壤有效储水量 (mm), SMS_{WM} 是指土层水分在凋萎湿度状态下的土壤储水量 (mm).

土壤水分过耗量SMO (Soil Moisture Overuse) 定义为土壤稳定湿度状态下的储水量与实际湿度土壤储水量的差值,其公式为^[13,20]:

$$SMO = SMS_{SSM} - SMS \quad (4)$$

式中: SMO 指土壤水分过耗量 (mm), SMS_{SSM} 指处于稳定湿度状态的土壤储水量 (mm).

土壤干燥化速度SSD(Speed Of Soil Desiccation)定义为人工造林地土壤过耗量与人工林树龄的比值,其公式为^[20]:

$$SSD = SMO/TA \quad (5)$$

式中: SSD 是土壤干燥化速度 (mm/a), TA (Tree Age) 是人工树龄 (a).

1.4 土壤干燥化强度评价法

为了定量研究土壤干燥化效应,通常划定干层发生时土壤水分的上下界线,以此判断干层发生与发育程度.本文采用杨文治等^[21]关于土壤干层的观点,将土壤干层水分的上下界分别设置为土壤稳定湿度和土壤凋萎湿度,其中土壤稳定湿度约占田间持水量的35~80%.持水量与土壤稳定湿度间的水分亏缺是黄土干旱区自然状态下的水分亏缺^[22],而非由于根系过耗和植被蒸腾作用所造成的土壤干燥化,是属于土壤在生境中的正常状态.由于野外实验不易获得不随季节和年份变化的土壤稳定水分含量,因此本研究土壤稳定湿度取值为田间持水量与土壤凋萎湿度的算数平均值^[13,23],该值为田间持水量的61%.

土壤干燥化指数SDI (Soil Desiccation Index) 是指某一土层实际土壤水分的过耗量占该层土壤稳定有效含水量的百分比.其公式为^[24]:

$$SDI = \left(1 - \frac{SM - SW}{SSM - SW}\right) \times 100\% = \frac{SSM - SM}{SSM - SW} \times 100\% \quad (6)$$

式中： SDI 是指土壤干燥化指数(%)， SSM 表示土壤的稳定湿度(%)， SM 表示土壤的质量含水量(%)， SW 表示土壤的凋萎湿度(%)。 SDI 值越大表明该层土壤干燥化强度越高，植物可以吸收利用的水分越少，反之，表明干燥化强度越低，植物可以利用的水分越多(表2)。

表 2 土壤干燥化强度划分标准^[1,24]

Tab 2 Division standard of soil drying intensity

土壤干燥化指数 (SDI)	土壤干燥化强度等级
$SDI \geq 100\%$	极度干燥化
$75\% \leq SDI < 100\%$	强烈干燥化
$50\% \leq SDI < 75\%$	严重干燥化
$25\% \leq SDI < 50\%$	中度干燥化
$0 \leq SDI < 25\%$	轻度干燥化
$SDI < 0$	无干燥化

1.5 数据处理方法

本文运用单因素方差分析、LSD多重比较法比较不同坡位、坡向影响下土壤水分变化，同时使用SPSS19.0、Origin10.0处理数据。

2 结果与分析

2.1 土壤水分分析

山地枣林0~500 cm土壤剖面含水量特征如图2所示，自上而下含水量呈现先下降后上升的趋势，其耗水量最大出现在60~220 cm部位土层。其中除阴坡坡中0~30 cm土壤、阳坡坡底430~440 cm土壤含水量高于稳定湿度，以及阳坡坡中50~110 cm、190~240 cm土壤含水量低于凋萎湿度外，其余部位土壤均在土壤稳定湿度与凋萎湿度线内。

2.1.1 坡位对土壤含水量的影响

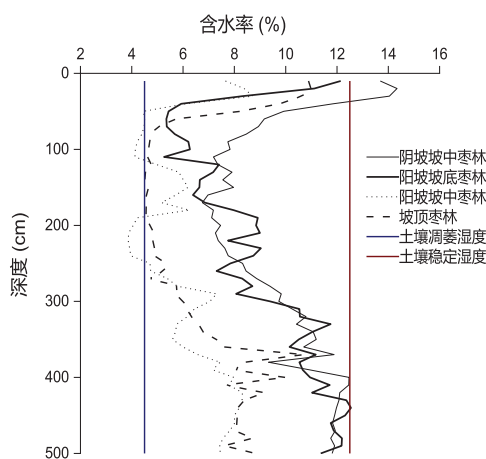


图 2 枣林土壤剖面含水量变化情况

Fig 2 Water content change of soil profile in Jujube forest

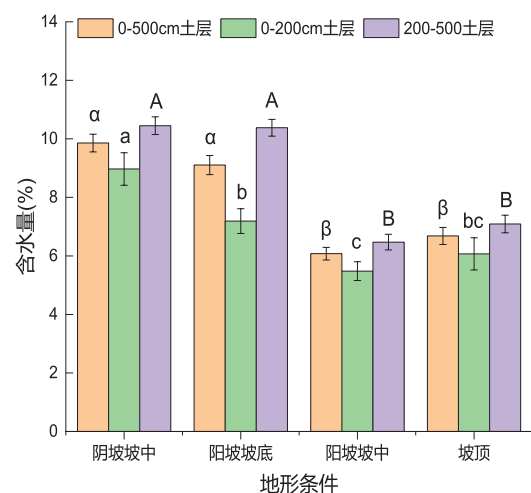


图 3 枣林土壤含水量情况

Fig 3 Soil moisture content of Jujube forest

注：最小水平 $P < 0.01$ ，其中 (α, β) 、 (a, b, c) 、 (A, B) 分别表示0~500 cm、0~200 cm、200~500 cm土层含水量方差分析的结果。

不同坡位枣林土壤平均含水量具有显著差异(图3)。0~500 cm土壤含水量，阳坡坡底(9.10%)显著高于阳

坡坡中(6.08%)和坡顶(6.68%),且 $P < 0.01$. 0~200 cm土壤含水量,阳坡坡底显著高于阳坡坡中($P < 0.05$),其中阳坡坡底土壤含水量变化范围为5.26%~12.14%,平均值7.19%;阳坡坡中含水量变化范围为4.05%~8.72%,平均值5.48%;而坡顶含水量变化范围为4.51%~10.99%,平均值6.07%. 200~500 cm土壤阳坡坡底含水量显著高于阳坡坡中和坡顶($P < 0.05$),其中阳坡坡底土壤含水量变化范围分别介于7.31%~12.55%之间,平均值为10.38%;阳坡坡中土壤含水量介于3.86%~8.31%,平均值6.47%;坡顶土壤含水量介于4.63%~10.70%之间,平均值7.09%(表3). 研究结果表明地形因素对降水的再分配使得到达地表降水资源呈现差异. 变异系数结果显示,0~200 cm土壤含水量变异系数(均值0.3)均大于200~500 cm土壤(均值0.19),进一步说明200 cm以上土壤相对以下土壤更容易受到降水和蒸发影响,使得土壤具有干湿交替变化特征.

表3 山地枣林地土壤水分特征统计

Tab 3 Statistics of soil water characteristics of mountain Jujube forest land

样地	0~200 cm				200~500 cm			
	最大值(%)	最小值(%)	平均值(%)	变异系数	最大值(%)	最小值(%)	平均值(%)	变异系数
阴坡坡中	14.34	6.75	8.97	0.27	12.47	7.26	10.45	0.16
阳坡坡底	12.14	5.26	7.19	0.26	12.55	7.31	10.38	0.15
阳坡坡中	8.72	4.05	5.48	0.25	8.31	3.86	6.47	0.22
坡顶	10.99	4.51	6.07	0.40	10.70	4.63	7.09	0.23

2.1.2 坡向对土壤含水量的影响

不同坡向枣林土壤含水量差异同样显著($P < 0.01$,图3),阴坡枣林地0~500 cm土壤平均含水量(9.86%)显著高于阳坡(6.08%). 阴、阳坡不同深度土层含水量情况如表3所示,其中阴坡枣林0~200 cm土壤含水量变化范围为6.75%~14.34%,平均值为8.97%;200~500 cm土壤含水量变化范围为7.26%~12.47%,平均值为10.45%. 结果表明在坡度相近的阴阳坡,不同深度土壤水分均呈现阴坡大于阳坡的差异. 采样时段内太阳基本正东升、正西落,而土壤水环境的变异主要是阴阳坡蒸发量不同所致.

2.2 土壤干燥化分析

2.2.1 山地枣林土壤储水量比较

土壤储水量是研判土壤干层发育情况的重要指标. 如表4所示,土壤有效储水量变化范围在64.80~291.60 mm之间,土壤水分过耗量在158.40~385.20 mm之间,表明山地枣林土壤发生了不同程度的水分亏缺及土壤干燥化现象. 其中阴坡坡中枣林有效储水量、水分过耗量为最大和最小值,因此阴坡坡中土壤干燥化程度最轻、速度最小(干燥化速度7.92 mm/a),其次是坡底枣林地(干燥化速度10.20 mm/a),阳坡坡中和坡顶干层发育最为严重(干燥化速度19.26 mm/a、17.46 mm/a).

表4 山地枣林0~500 cm土壤水分指标

Tab 4 Soil moisture index of 0~500 cm in mountain Jujube forest

样地	土壤含水量(%)	土壤储水量(mm)	土壤有效储水量(mm)	土壤水分过耗量(mm)	平均土壤干燥化速度(mm/a)
阴坡坡中	9.86	591.60	291.60	158.40	7.92
阳坡坡底	9.10	546.00	246.00	204.00	10.20
阳坡坡中	6.08	364.80	64.80	385.20	19.26
坡顶	6.68	400.80	100.80	349.20	17.46

2.2.2 山地枣林土壤干层深度、厚度以及干燥化强度分析

在黄土高原,0~200 cm土壤受到大气降水的影响,水分亏缺容易得到缓解,所以,本文关注200 cm以下土壤干层状况. 图4表明山地枣林土壤干层深度均超过500 cm,干层厚度基本达到300 cm,且仅有阳坡坡底枣林430~440 cm部位土层未发育干层外,其它部位均有不同程度水分亏缺现象. 土壤剖面干燥化情况显示,土壤不同深度发育有不同强度的干层. 200~300 cm土层普遍发育有极度或强烈干燥层,且随着深度加深土壤干燥化强度减弱.

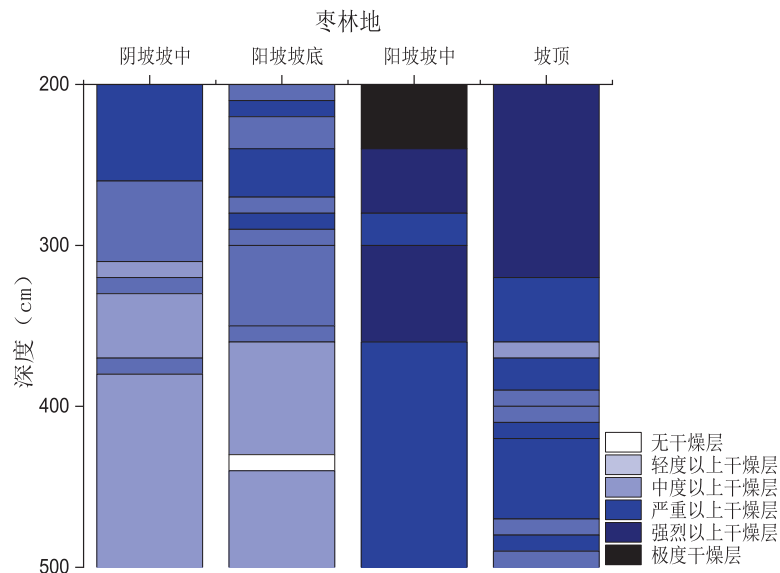


图 4 山地枣林土壤剖面干燥化情况

Fig 4 Drying condition of soil profile of Jujube forest in mountainous area

山地枣林土壤干燥化情况如表5所示,土壤平均干燥化指数变化范围在25.63%~76.38%之间,表明研究区土壤主要发育中度至强烈干燥层.不同立地条件下土壤平均干燥化强度指数大小关系为:阳坡坡中>坡顶>阳坡坡底>阴坡坡中,其中阳坡坡中干燥化指数76.38%,为强烈干燥化;坡顶干燥化指数67.63%,属于强烈干燥化;阳坡坡底干燥化指数26.50%,为中度干燥化;阴坡坡中干燥化指数25.63%,为中度干燥化.同时研究表明,阴坡坡中和阳坡坡底土壤以发育较厚的严重及以下等级干燥层为主,而以上等级干燥层较薄;阳坡坡中、坡顶情况与之相反.

表 5 山地枣林200~500 cm土壤干燥化强度及干层厚度

Tab 5 Drying strength and dry layer thickness of 200~500 cm soil in mountain Jujube forest

样地	平均干燥化指数(%)	土壤干燥化强度	极度干燥层(cm)	强烈以上干燥层(cm)	严重以上干燥层(cm)	中度以上干燥层(cm)	轻度干燥层(cm)	土壤干层(cm)
阴坡坡中	25.63	中度干燥化	0	0	60	70	170	300
阳坡坡底	26.50	中度干燥化	0	0	50	60	180	290
阳坡坡中	76.38	强烈干燥化	40	100	160	0	0	300
坡顶	67.63	严重干燥化	0	120	130	40	10	300

3 讨论

3.1 土壤水分变异性

黄土高原人工林种植区域,土壤的降水入渗深度一般不会超过200 cm^[25],因此浅层、深层土壤水分消耗主要驱动力不同^[26].本研究中,0~200 cm土壤由于受到采样前大气降水、物理蒸发作用,以及植被蒸腾作用的叠加影响,土壤水分变化活跃.而200~500 cm土壤,受到植被连续生长过程中根系过耗作用长期积累的影响^[2],结果导致土壤水分亏缺严重.枣树相较苜蓿、柠条和油松,根系分布较浅^[27],且枣树的最大根系量和土壤水分消耗主要发生在0~200 cm部位,且随着土壤深度增加,枣根干质量密度不断下降^[18,27],所以枣树对土壤生态位水分的“掠夺”主要以0~200 cm土壤水为主,且此部位土壤耗水量最大,而随着土壤深度增加枣林根系量和耗水量减少,土壤含水量呈现上升趋势.

阳坡坡底枣林土壤含水量显著高于阳坡坡中和坡顶,这是由于不同立地条件下坡底地势平缓(坡度约为7°),在相同降雨过程中其更易于水分下渗,并且坡底枣林位于山坡的水分汇集区,能够汇聚坡面地表径流,因此坡底枣林土壤储水量较高.阳坡坡中地形坡度较大(坡度约为35°),在相同降水条件下,坡中区域形成地表产流更为迅速,地表水的下渗比重降低.同时在坡度较大的地段受到地表蒸发和侧向蒸发的双重影响,相同的日照蒸

发环境下阳坡坡中枣林土壤储水量低。坡顶土壤含水量低于坡底而高于坡中, 主要由于地形较缓(坡度为 9°), 降水垂直下渗作用也相对坡中较强。然而, 坡顶地势高、风速大, 且接受到的日照时间长, 不利于土壤水分储存。此结论与王力等^[28]研究延安人工刺槐林地坡度越大, 土壤含水量越低相似。坡向对山地土壤的影响, 主要体现在不同坡向坡面水热微环境差异, 从而影响土壤水分条件。阳坡环境下, 地表接收到更多的太阳辐射用于地表增温, 温度升高使得近地表蒸发旺盛, 加之湍流扩散能力强, 使得水分散失较快, 导致土壤含水量偏低。而阴坡枣林平均地温低于阳坡, 土壤水分蒸发力较弱, 所以土壤水分状况相对较好。该结果与孟秦倩^[15]、李军^[3]等黄土高原不同坡向植被土壤湿度在阴阳坡的分布差异结果一致。

在水分稀缺的半干旱区, 山地不同立地条件下土壤对植被生长的影响主要表现在水分差异上。因此, 本文认为阳坡坡底和阴坡坡中枣林土壤含水量显著高于阳坡坡中和坡顶, 且200 cm以下部分土壤亏缺程度较轻, 更接近土壤稳定湿度值, 所以阳坡坡底和阴坡坡中适合大面积种植枣树; 而阳坡坡中和坡顶, 200~500 cm土壤含水量较低, 水分过耗量大, 如遇枯水年则土壤水分更接近凋萎湿度, 会抑制枣树生长发育甚至致其死亡, 所以阳坡坡中和坡顶位置应适当减少种植密度, 并辅以灌溉管理、修剪枝叶、覆盖地布等^[29]必要的农艺措施, 以及在坡度较大的地方修建梯田, 达到改善土壤水环境的目的。

3.2 土壤干燥化变异性

一般来说, 土壤干层是指植被过度蒸腾耗水导致土壤水分相对持久性的“地区型干层”或“蒸发型干层”^[30], 是土壤在地表植被、下垫面性质、生态气候带等综合因素作用下出现的土壤水循环负平衡现象^[5]。在黄土高原半干旱区域, 人工林地的土壤水循环的负平衡过程体现在林地耗水量明显大于大气降水的供应, 所以枣林地普遍发生干层现象, 但随着土壤深度加深, 植被耗水能力减弱, 土壤干燥化强度不断减弱, 直到接近或达到无干燥化水平。在干燥化强度变化中, 由于土壤生物的机械作用迫使土壤物理性质发生改变, 或是不同深度土壤质地、结构和容重的改变^[31], 均会导致土壤水分波动变化, 这可能是研究中土壤含水量曲线左右波动, 以及坡底枣林430~440 cm部位土层表现无干燥化现象的原因。从立地条件上看, 不同坡位枣林土壤降水下渗量的差异, 是阳坡坡中、坡顶枣林土壤干燥化程度严重的主要原因。同时, 不同坡向枣林地太阳辐射量的差异影响土壤蒸发力强度, 是导致阳坡枣林土壤干燥化强度大于阴坡的主要因素。本研究定量分析了山地枣林200~500 cm土壤干层情况, 由于长期受到植被蒸腾作用, 此土层容易形成土壤干层水分难恢复区, 从土壤水分的可持续利用及生态修复角度来说, 该深度水分状况更应受到关注。同时, 土壤干层的发育又进一步阻碍土壤降水下渗, 破坏了土壤水分的可持续循环过程, 最终影响生态环境向着不可持续发展的方向演替。所以因地制宜, 明确不同立地条件下土壤水分特征, 择优选择坡地种植位置。

4 结论

本文的研究结论如下:

(1) 山地枣林土壤含水量自上而下先减小后增加, 其耗水最大部位位于60~220 cm。不同坡位和坡向上枣林土壤含水量存在显著差异, 阳坡坡底显著高于阳坡坡中、坡顶($P < 0.05$); 阴坡极显著高于阳坡($P < 0.01$)。

(2) 研究区土壤发生了不同程度的水分亏缺及干燥化现象, 土壤水分过耗量的变化范围在158.40~385.20 mm之间。

(3) 土壤干层深度均超过500 cm, 干层厚度基本达到300 cm。土壤平均干燥化强度指标大小为: 阳坡坡中(76.38%) > 坡顶(67.63%) > 阳坡坡底(26.50%) > 阴坡坡中(25.63%)。

参考文献:

- [1] 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.
LI Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess region[J]. Acta Ecologica Sinica, 1983, 3(2): 91-101. (in Chinese)
- [2] HUANG L, ZHANG Z. Probabilistic modeling of soil moisture dynamics in revegetated desert area[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(2): 205-210.
- [3] 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 J, CHEN B, LI X F, et al. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1429-1445. (in Chinese)

- [4] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同降水类型区林地、草地与农田土壤干燥化效应比较[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 40-49.
LI J, CHEN B, LI X F, et al. Soil desiccating effects of forestlands grasslands and croplands in zones different in rainfall pattern on the Loess plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 40-49. (in Chinese)
- [5] 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 Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427-432. (in Chinese)
- [6] WANG L, WANG Q J. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2467-2477.
- [7] LIU B X, SHAO M A. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014(517): 974-984.
- [8] GAO X D, WU P T. Estimation of spatial soil moisture averages in a large gully of the Loess Plateau of China through statistical and modeling solutions[J]. *Journal of Hydrology*, 2013(486): 466-578.
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] 井乐, 李建平, 张翼, 等. 黄土高原不同土地利用方式下土壤干层差异[J]. 草业科学, 2018, 35(8): 1829-1835.
JING L, LI J P, ZHANG Y, et al. Study on dry soil layers under different land-use systems in the Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 1829-1835. (in Chinese)
- [11] 霍嘉仪, 陈丽华, 及金楠, 等. 晋西黄土区不同林地类型对土壤水分特性的影响[J]. 山地学报, 2018, 36(3): 364-371.
HUO J Y, CHEN L H, JI J N, et al. Effects of different types of woodland on soil moisture characteristics in the Loess Plateau of western Shanxi province, China[J]. *Mountain Research*, 2018, 36(3): 364-371. (in Chinese)
- [12] 索立柱, 黄明斌, 段良霞, 等. 黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2045-2053.
SUO L Z, HUANG M B, DUAN L X, et al. Zonal pattern of soil moisture and its influencing factors under different land usetypes on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 2045-2053. (in Chinese)
- [13] 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.
LIAGN H B, SHI J W, LI Z S, et al. Evaluation of soil desiccation intensity in different ages of caragana korshinskii kom in Loess hilly region, northwestern Shanxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 87-93. (in Chinese)
- [14] 常译方, 毕华兴, 许华森, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 227-232.
CHANG Y F, BI H X, XU H S, et al. Influence of different densities of Robinia pseudoacacia forest on soil moisture in Loess region of western Shanxi province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 227-232. (in Chinese)
- [15] 孟秦倩, 王健. 黄土高原坡面刺槐林土壤水分有效性分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 74-76.
MENG Q Q, WANG J. Effectiveness of locusts soil moisture in Loess Plateau[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(4): 74-76. (in Chinese)
- [16] 马建鹏, 董建国, 汪有科, 等. 黄土丘陵区枣林地土壤水分时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 851-859.
MA J P, DONG J G, WANG Y K, et al. Temporal and spatial variations in soil moisture under Jujube forests in the Loess Hilly Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7): 851-859. (in Chinese)
- [17] 刘晓丽, 汪有科, 马理辉, 等. 密植枣林地深层土壤水分垂直变化与根系分布关系[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 90-97.
LIU X L, WAGN Y K, MA L H, et al. Relationship between deep soil water vertical variation and root distribution in dense Jujube plantation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 90-97. (in Chinese)
- [18] 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.
WEI X D, WAGN X, WAGN Y K, et al. Root distribution and soil water dynamics of Jujube plantations in Loess Hilly regions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 88-97. (in Chinese)
- [19] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华, 等. 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.
LI Y S, HAN S F, WANG Z H, et al. Soil water properties and its zonation in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1985(2): 1-17. (in Chinese)
- [20] 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): 1-8.
GOU Q P, ZHU Q K, LI Y X, et al. Soil desiccation effects under different vegetation types in the Loess Region of Northern Shaanxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 1-8. (in Chinese)

- [21] 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.
YANG W Z, YU C Z. Regional management and evaluation of the Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [22] 李军,陈兵,李小芳,等.黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J].生态学报,2007,27(1):75-89.
LI J, CHEN B, LI X F, et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 75-89. (in Chinese)
- [23] LI J, CHEN B. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [24] 曹裕,李军,张社红,等.黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J].农业工程学报,2012,28(15):72-79.
CAO Y, LI J, ZHANG S H, et al. Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and landform zones of Loess Plateau in China[J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 72-79. (in Chinese)
- [25] 刘刚,王志强,王晓岚.吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析[J].水土保持研究,2004,11(1):126-129.
LIU G, WANG Z Q, WANG X L. Analysis of dried soil layer of different vegetation types in Wuqi county[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(1): 126-129. (in Chinese)
- [26] 牛俊杰,赵景波,王尚义.论山西褐土区农田土壤干燥化问题[J].地理研究,2008,27(3):519-526.
LIU J J, ZHAO J B, WANG S Y. Studies on soil desiccation of croplands in cinnamon soil region of Shanxi[J]. Geographical Research, 2008, 27(3): 519-526. (in Chinese)
- [27] 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 X, ZHOU Y H, WANG Y K, et al. Soil water characteristic of a dense Jujube plantation in the semi-arid hilly regions of the Loess Plateau in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 263-270. (in Chinese)
- [28] 王力,邵明安,侯庆春,等.延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析[J].西北植物学报,2001,21(1):101-106.
WANG L, SHAO M A, HOU Q C, et al. The analysis to dried soil layer of artificial *Robinia pseudacacia* forestry land in the Yanan experimental area[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(1): 101-106. (in Chinese)
- [29] 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].杨凌:西北农林科技大学,2019.
JIN S S. Effects of typical agronomic measures on soil moisture and Jujube growth in drying farming maountain Jujube plantations in hilly[J]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [30] 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.
CHEN H S, WANG K L, SHAO M A. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 155-161. (in Chinese)
- [31] 李小刚.影响土壤水分特征曲线因素[J].甘肃农业大学学报,1994,29(3):273-278.
LI X G. Factors affecting soil moisture characteristic curve[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 1994, 29(3): 273-278. (in Chinese)

责任编辑:赵新科