

山地枣树在不同土层厚度下的土壤水分状况变化

冯 喆¹, 马理辉^{2,3*}, 王志昊¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100;
3. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 土层厚度作为土壤的关键属性, 决定了生根空间、水分和养分储量等影响植物生长的一系列条件。为探究不同土层厚度下山地枣树土壤水分状况及耗水策略, 构建足够大且可控制的土体空间, 设置 2、3、4、5、6 m 共 5 种土层厚度的试验小区, 对其土壤水分进行定位观测。结果表明, 枣树耗水量随着土层厚度的增加呈现先降低后增高的变化趋势, 浅土层抑制了枣树地上部分的生长而加强了细根的生长发育, 越厚的土层枣树生长状况越好, 细根生长发育随之得到加强; 土层越厚, 枣树土壤水分状况越好, 2~4 m 深土层在 11 a 枣树耗水下深层土壤水分已邻近凋萎湿度, 此后枣树耗水仅能依靠降雨补充, 5 m 和 6 m 深土层因土壤储水充足其浅层土壤水分较 2~4 m 深土层更高; 不同土层厚度下降雨补给量和补给深度不同, 厚土层较浅土层降雨补给深度更深。因此, 枣树在深层土壤储水严重缺乏的浅土层中会抑制自身生长发育而加强根系吸水能力, 随着土层厚度与深层土壤储水的增加, 枣树保持着深层土壤储水越多、生长状况越好、耗水量越多的规律。该研究阐明了枣树为适应土层厚度带来的土壤储水量差异其耗水机制的改变, 揭示了深层土壤储水对枣树生长耗水的影响, 研究结果可为干旱区植被恢复与重建提供一定的理论依据。

关键词: 土层厚度; 土壤水分; 枣树; 耗水; 垂直分布

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2024)01-0140-07

Variation of Soil Moisture of Jujube Trees Under Different Soil Thickness in Hilly Region of Loess Plateau

FENG Zhe¹, MA Li-hui^{2,3*}, WANG Zhi-hao¹

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Institute of Soil and
Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Soil thickness is a key feature to determining a series of conditions that affect plant growth, such as rooting space, water and nutrient storage. In order to explore the soil water consumption strategy of jujube trees within varying soil layers, a large enough and controllable soil space was constructed in this study. Experimental plots with five soil layers (i. e., 2, 3, 4, 5 and 6 m, respectively) were set up for localized observation of the changes in soil water. The results showed that the water consumption of jujube trees decreased first and then increased with the increase of soil layer thickness. Shallow soil layer inhibited the growth of aboveground part of jujube trees, but strengthened the growth and development of fine roots. Thicker soil layer, in contrast, benefited the growth of above-and underground parts. The thicker the soil layer, the better the soil moisture condition. The soil moisture in the depth of 2 to 4 m was close to the withering humidity point under the water consumption of 11-year-old jujube trees. The water consumption,

收稿日期: 2022-12-16 修回日期: 2023-01-09

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD190070402)。

第一作者: 冯 喆。研究方向: 水土资源高效利用。E-mail: fz1002@nwfufu.edu.cn

* 通信作者: 马理辉, 副研究员。研究方向: 根系生态学; 水土资源高效利用。E-mail: gjzmlh@126.com

therefore, was expected to be supplemented by rainfall. The soil moisture at shallow soil layers of 2 and 4 m was higher than that at deep soil layers of 5 to 6 m. The rainfall recharge amount and depth differed at varying soil layers. The rainfall recharge depth was deeper in thick soil layer than in shallow soil layer. Therefore, jujube trees might inhibit their growth and development in shallow soil layer. The water storage in deep soil was severely constrained by a lack of water absorption capacity from roots. With the increase of soil thickness and water storage, jujube trees maintained more water storage in deep soil. This study elucidates the change in water consumption mechanism of jujube trees for the adaptation to variation of soil water storage in relation to soil thickness. Our results reveal the influence of deep-soil water storage on the growth and water consumption of jujube trees, providing a theoretical support for vegetation restoration and reconstruction in arid areas.

Key words: soil layer thickness; soil moisture; jujube tree; water consumption; vertical distribution

土壤水分作为联系土壤-植被-大气连续体 (SPAC) 中的关键因子, 对当地生态系统的结构和功能起着非常重要的作用^[1]。目前, 众多学者对土壤水分的研究主要集中于植被因素 (植被种类、密度、树龄等)^[2-3]、气象因子 (降雨、温度等)^[4-5] 和地形因子 (坡向、坡度等)^[6,7] 等指标的影响, 但对于土壤层厚度这一重要指标对土壤水分影响的相关研究则鲜见报道。

土壤层厚度作为土壤质量的重要表征指标之一, 关系着土壤水分储量和土壤水分植被承载力^[8], 是植物生长发育的重要物质基础。子桂才等^[9]研究了不同土层厚度下油橄榄 (*Olea europaea*) 生长状况, 结果表明土层厚度对油橄榄各项生长和挂果指标均具有极显著影响; Li 等^[10] 和 Zhao 等^[11] 通过研究喀斯特地区不同土层厚度下的草本植物, 指出浅土层较厚土层明显抑制了植物地上各部分生物量的积累; 杨小琴等^[12] 研究了土层厚度对千根草 (*Euphorbia thymifolia*) 生物量分配的影响, 指出浅土层下千根草的根生物量分配较厚土层更高; 王林等^[13] 研究了不同土层厚度下刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 的水分和生长状况, 发现随着土层厚度变浅, 刺槐旱季土壤水分下降, 生长状况减弱, 土壤水分承载力出现不足。以上研究表明土层厚度的差异影响了植物的生长及水分状况, 当前深根系植被已成为全球普遍存在的现象, 深层土壤水分受到学者们的极大关注^[14-16], 而目前有关土层厚度的研究对象多为浅根系植被, 研究范围大多处于 1 m 以内, 对于深根系的林木而言仍处于浅层土壤的范畴^[17], 因此, 土层厚度这一重要指标的研究范围有必要得到扩充, 以了解深根林木在不同土层厚度下的土壤水分状况及其耗水策略。

本研究构建了足够大且可控制的土体空间, 以山地枣树 (*Zizyphus jujuba*) 土壤水分作为对象进行定位观测试验, 研究不同土层厚度下枣树土壤水分的变化

特征, 探究枣树在不同土层厚度下的耗水策略, 以期干旱区植被恢复与重建提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于陕西省米脂县银州镇远志山试验基地 (109°49'E, 37°39'N), 为典型黄土高原丘陵沟壑区, 海拔 1 049 m 左右, 属温带半干旱大陆性季风气候, 多年平均日照时数 2 761 h, 年平均气温 8.4 °C, 最高气温 38.2 °C, 最低气温 -25.5 °C。多年平均降水量 451.6 mm, 7、8 月降水量占全年降水量的 49%。当地土壤主要为黄土母质发育的黄绵土, 质地为粉质沙壤土, 土壤容重为 1.24 g·cm⁻³, 田间持水量 22%, 凋萎系数 5.16%。土壤贫瘠, 有机质含量为 0.21%。

1.2 试验布设

根据米脂县孟岔红枣基地 2012 年的取样发现^[18], 12 年生枣林的细根最大深度为 5 m 左右, 因而确定控制土体厚度的最大深度为 6 m, 构建起足够大 (土体厚度超过观测到的最大深度)、但可控制 (四周、底部围防渗膜) 的土体空间, 最小土体厚度为 2 m。2013 年初开挖了 2、3、4、5、6 m 共 5 种土体厚度的基坑, 基坑规格为 2 m×3 m (图 1), 确保单株枣树根系有足够大的生长空间。基坑四周和底部用防渗膜铺设与周围土壤隔离, 地面四周砌墙与周围土壤隔离, 使试验小区为相对隔离的土壤环境。采用原状土回填, 试验小区仅依靠自然降雨进行土壤水分补给, 排除地下水补给和土壤水分侧渗补给。以土体厚度为控制因子, 设置 5 个水平, 对应 5 个土体厚度, 同一水平设 4 个重复。2013 年春天栽植 2 年生枣树苗, 每个试验小区在中间位置栽植 1 株苗, 进行试验观测。各小区枣树生长状况见表 1。

1.3 观测指标及测定方法

1.3.1 土壤水分长期定位观测 按照测定深度各小

区分别安置了 2、3、4、5、6 m 的中子管,并采用 CNC503B 型 NP 中子仪测定各小区的土壤水分,测定深度间隔为 20 cm,2022 年自 5 月开始枣树生育期内隔 10 d 测定 1 次,如遇降雨则在雨停之后及时测定。

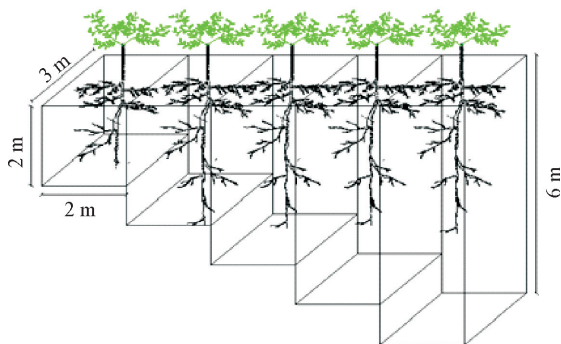


图 1 研究小区布设示意

Fig. 1 Layout diagram of the test area

1.3.2 降雨量测定 采用已经安装好的自动气象站(RR-9100,GRANT Instruments Ltd.,UK)进行观测,观测时间步长为 10 min。

1.3.3 土壤储水量及枣树耗水量 土壤储水量计算公式如下。

$$W = \sum_{i=1}^n \theta_i \times h_i \quad (1)$$

式中: W 为土壤储水量(mm); n 为土壤所划分的总层次数; θ_i 为第 i 层土壤的体积含水量(%); h_i 为第 i 层土壤的厚度(mm)。

利用水量平衡法计算枣树耗水量。试验小区无灌溉、无深层渗漏,不发生侧渗和地表径流,因此枣树耗水量只通过降雨量和土壤储水的变化量来计算。

$$E_T = P + \Delta W \quad (2)$$

式中: E_T 为枣树耗水量(mm); P 为降雨量(mm); ΔW 为计算时段起止土壤储水量的变化量(mm)。

1.3.4 细根根长密度 细根根长密度计算公式为

$$F_{RLD} = L / (\pi \times r^2 \times h) \quad (3)$$

式中: F_{RLD} 为细根根长密度($m \cdot m^{-3}$); L 为土芯内细根根长(m); r 为土芯半径(m); h 为采样深度(m)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 软件进行试验数据整理,利用 SPSS 22.0 软件进行单因素 ANOVA 检验与非参数检验分析不同处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同土层厚度土壤水分垂直分布状况

由图 2 可以看出,各小区土壤水分的消耗与补给主要发生在浅层土壤,深层土壤水分基本保持不变。2、3、4 m 深小区深层土壤水分在枣树根系吸水作用下都已接近凋萎湿度(5.16%),深层平均土壤含水率分别为 5.81%、5.38%、5.21%,表明深层土

壤已失去了“土壤水库”的调控能力,2~4 m 土层厚度下树体仅能靠当年降雨满足其水分需求,受到水分胁迫的风险大大增加。5 m 与 6 m 深小区深层土壤水分整体较高,深层土壤平均含水率分别为 9.86%、9.22%,最低值为 5.47%和 5.36%,分别出现在 2.6 m 和 1.8 m 处。因当年降雨基本满足枣树需水要求,各小区根系主要吸水深度与降雨入渗深度类似,分别为 1.6、1.6、2.2、2.2、2.2 m。

2.2 不同土层厚度土壤水分随时间变化特征

由图 3 可以看出,5 月土壤水分消耗较少,各深度小区土壤水分与初始值相差不大,由大到小关系为 5、2、3、6、4 m。6 月进入土壤水分快速消耗期,该时期除 5 m 深小区外各小区土壤水分均接近凋萎湿度,7、8 月随着雨季的到来,土壤水分得到补给,整体呈波动上升趋势,土层厚度为 2 m 和 3 m 的浅土层小区土壤水分变化速率较快,6 m 深土层土壤水分整体处于低值,其原因可能是该小区枣树生长状况最好(表 1),枣树需水量较大。9 月中旬后降雨明显减少,此时枣树处于果实成熟期,降雨量并不能满足需水要求,各小区土壤水分呈下降趋势。

表 1 各小区枣树生长状况

Table 1 Growth status of jujube tree in each district

小区深度/m	平均树高/m	平均冠幅/m	主枝粗度/mm	主枝长度/m
2	1.71±0.12	1.29±0.12	16.6±1.8	2.83±0.23
3	1.77±0.07	1.46±0.18	19.4±1.4	2.97±0.12
4	1.80±0.04	1.53±0.09	19.0±2.3	3.13±0.14
5	1.95±0.06	1.63±0.13	21.8±2.9	3.05±0.19
6	1.99±0.03	1.69±0.09	25.0±2.6	3.64±0.14

2.3 不同土层厚度枣树耗水特征

由表 2 可见,不同土层厚度下枣树生育期内耗水量由大到小关系表现为:6、2、3、5、4 m。其中,6 m 深小区产生较大水分亏缺,2 m 和 3 m 深小区降雨大致满足枣树耗水,4 m 和 5 m 深小区土壤分别得到 37.7 mm 和 35 mm 的水分补给。在枣树整个生育期中,6 月与 9 月枣树产生较大水分亏缺。生育期内各月份枣树耗水量变化情况见图 4,随着生育期的进行,枣树耗水量整体呈现先增加后减少的变化趋势。5 月枣树处于萌芽展叶期,各小区枣树耗水量不高,6 m 深小区耗水量偏大;至 6 月下旬,随着枣树从萌芽展叶期进入开花坐果期,枣树耗水量出现明显增长;7 月枣树进入开花坐果后期,各小区枣树耗水量提高;8 月,枣树处于果实膨大期,各小区枣树耗水量进一步增大,2、3 m 和 6 m 深小区内枣树耗水量明显高于 4 m 和 5 m 深小区;9 月随着枣林进入果实成熟期,枣树耗水量较果实膨大期开始减少。

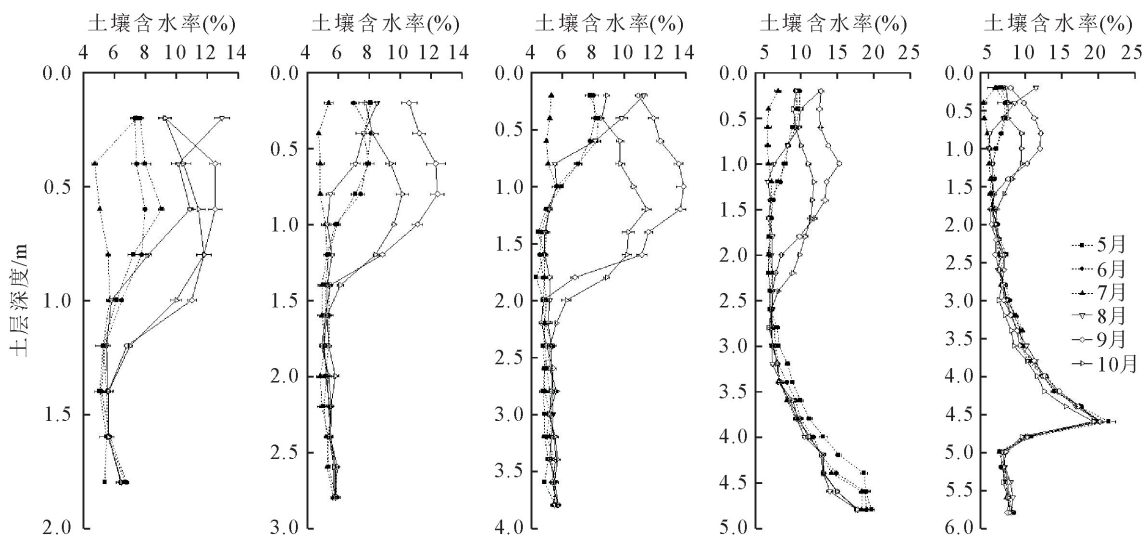
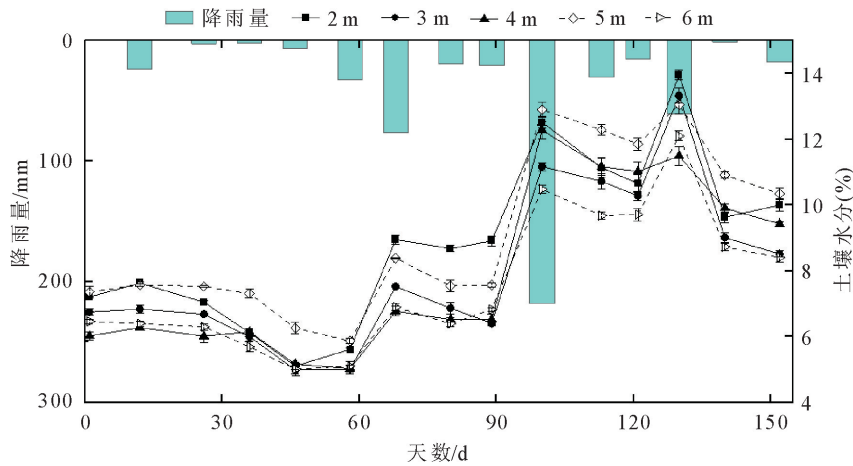


图 2 生育期内各深度小区月初土壤水分垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution map of soil moisture at the beginning of the month of each depth plot during growth period



天数起始时间自生育期起始时间即 5 月 6 日算起。下同。

图 3 生育期内各深度小区浅层土壤水分随时间变化情况

Fig. 3 Variation of shallow soil moisture with time in each depth plot during growth period

表 2 不同土层厚度土壤水分耗水量与补给量

Table 2 Soil water supply with different soil layers

土层厚度/m	耗水量/ mm	降雨量/ mm	土壤水分补给量/mm					
			5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	总计
2	532.5±4.0a	527.3	0.7±2.1a	-17.0±1.9a	39.3±3.0a	20.7±0.9a	-48.9±2.9a	-5.2±4.0a
3	521.4±4.2b		3.5±1.2a	-28.0±0.5b	23.3±1.1b	54.7±0.3b	-47.5±1.5b	5.9±4.2b
4	489.6±6.5c		-0.7±2.4a	-19.8±2.3a	32.8±0.6c	89.2±2.0c	-64.0±2.7c	37.7±6.5c
5	492.3±7.2c		1.7±1.4a	-48.3±2.5c	25.0±2.5b	99.4±2.0d	-42.9±2.7d	35.0±7.2c
6	545.9±7.3d		-11.7±1.8b	-20.7±1.1a	30.3±1.3c	39.5±1.1e	-56.1±2.3e	-18.6±7.3d

注:小写字母表示不同土层深度间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.4 降雨对土壤水分的补给

降雨量与土壤水分增量随时间变化关系见图 5,可以看出,旬尺度下枣树整个生育期内,仅有 7 月中旬、8 月中旬、9 月中旬 3 个时段降雨对各深度小区进行较多的水分补给,降雨量分别为 76.2、218、60.7 mm。9 月中旬降雨对各小区土壤水分的补给深度最大,分别达到了 150、180、220、240、210 cm,

8 月中旬降雨量最大,但多是短历时的强降雨,降雨量大、历时长的降雨相较于短历时的强降雨虽然土壤水分补充总量较小但补充深度更大^[19]。7 月中旬降雨量也较高,但各小区初始土壤水分较低,补充深度较浅。降雨对枣林地土壤水分的补给量与时间关系密切,5 月上旬 23.6 mm 的降雨仍能为 2、4、5 m 深小区带来约 5 mm 的水分补给,6 月下旬 32.2 mm 的

降雨量仅 2 m 深小区土壤水分获得 6 mm 的补给, 8 月下旬枣树处于果实成熟期时, 30.6 mm 的降雨量反而让各小区土壤产生不同程度的水分亏缺。

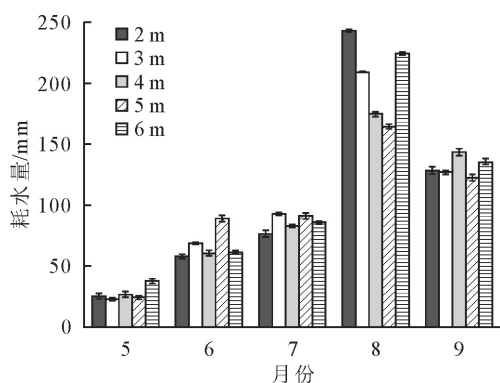


图 4 各深度小区枣树耗水量变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of water consumption of jujube trees in different depth zones

2.5 不同土层厚度枣树细根分布特征

枣树耗水量与其细根分布特征密切相关。枣树细根主要集中在 0~0.6 m 土层中, 且细根根长指标更能代表枣树吸收土壤水分能力的强弱^[20], 因

表 3 各深度小区 0~0.6 m 土层细根根长密度

Table 3 The length density of fine roots in 0—0.6 m soil layers in each depth plot

土层深度/m	细根根长密度/(m·m ⁻³)				
	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
0.2	668±50a	275±27b	249±50b	314±89b	548±129a
0.4	2 568±472a	1 903±471b	568±254c	819±125c	1 456±361b
0.6	2 425±578a	1 014±236b	616±213bc	473±10c	607±60bc

3 讨论

土壤水分主要受降雨补给、土壤蒸发及植物根系吸收三者影响而发生改变。土壤厚度作为土壤的关键属性, 其决定了生根空间、水分和养分储量等影响植物生长的一系列条件^[21]。土壤厚度的差异直接影响了植物的生长发育与根系分布, 众多学者研究表明, 土壤厚度越大时, 植株生长就越旺盛^[22-23], 同时植物耗水量也随之改变, 进而反馈至土壤水分的差异。

本研究发现, 不同土层厚度枣树耗水量由大到小关系表现为: 6、2、3、5、4 m, 土层厚度浅的土壤中枣树耗水量反而较高, 随着土层厚度增加至 4 m, 枣树耗水量逐渐降低, 之后随着土层厚度的增加, 枣树耗水量逐渐增高。枣树耗水量与其细根分布特征密切相关, 为解释不同土层厚度下枣树耗水量的差异, 本研究通过对细根根长密度这一形态特征参数进行分析比较发现, 细根根长密度也随着土层厚度的增加呈现先降低后增大的变化趋势, 这与枣树耗水量表现的规律一致, 结合表 1 中所表现的随土层厚度

此, 为解释不同土层厚度枣树耗水量的差异, 对各深度小区 0~0.6 m 土层进行了打钻取样, 并选取细根根长密度这一形态特征参数进行分析比较, 结果见表 3。从表 3 可知, 随着土层厚度的增加, 细根根长密度呈现先降低后增大的变化趋势。

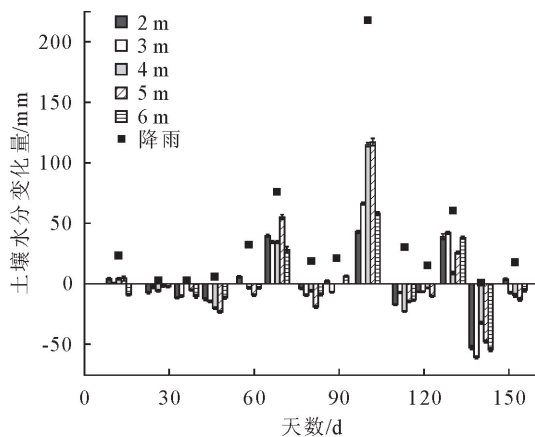


图 5 生育期内土壤水分增量随时间变化

Fig. 5 Variation of soil moisture increment with time during fruiting period

增加枣树生长状况加强的规律, 可以推断, 浅土层下枣树削减了地上部分的资源投入而加强了根系的生长发育, 提高自身吸收水分的能力来适应土壤水资源的严重匮乏, 随着土层厚度增加, 可利用资源总量变多, 促进了枣树的生长发育, 其根系生长随之得到加强。结合图 5 可知, 2 m 和 3 m 深小区枣树耗水量最大值发生在产生强降雨的 8 月, 而 2 m 和 3 m 深小区枣树树高、冠幅较小, 该区浅层土壤水分较高, 可能也存在较强的土壤蒸发造成浅层土壤更多的水分消耗。

在对不同土层厚度枣树土壤水分垂直分布状况的研究中, 发现 2~4 m 深小区深层土壤水分已邻近凋萎湿度, 此后枣树耗水量仅能依靠当年降雨, 难以抵御干旱频率和持续时间增加的风险, 深层土壤水分的缺乏会导致果树受到更严重的水分胁迫, 蒸腾速率、光合作用速率及日间叶水势均有所下降^[24], 这也造成了不同土层厚度下枣树生长状况的差异。5 m 与 6 m 深小区虽受到根系吸水作用即浅层土壤水分有所消耗但仍高于其他小区, 表明在有深层土壤可利用水分的情况下果树并不会将浅层土

壤水分完全吸收至凋萎湿度,而是倾向于吸收更深层的土壤水分^[25-26],相较于6 m深小区,5 m深小区土壤水分最低值所在位置更深,表明更高的深层土壤储水有效缓解了土壤干化程度的加深。有学者研究表明严重的水分胁迫会抑制植物的生长发育,显著降低其根系的生长量^[27-28],不同于该结论,本研究表明,严重的水分胁迫虽然抑制了枣树地上部分的生长发育,但其根系生长得到显著加强。这种差异可能源于植物对干旱适应程度的不同^[29-30],枣树作为耐旱植物,在完全干化的土壤中仍能保持存活,这得益于其发达的根系。但若仅以厚土层小区枣树为研究对象,则可得随着土壤水分的降低,植物根系生长受到抑制的结论,这意味着,不同于土壤水分严重匮乏的浅土层,厚土层内土壤水分越高,枣树生长发育状况越好,其蒸腾速率越高,对水分的需求越强,相应的其根系生长量也越高。

4 结论

1) 土层越厚,枣树土壤水分状况越好。2~4 m深土层在11 a枣树耗水下深层土壤水分已邻近凋萎湿度,此后枣树耗水仅能依靠降雨补充,厚土层(5 m和6 m)因深层土壤储水充足其浅层土壤水分较2~4 m深土层更高。

2) 不同土层厚度下降雨补给量和补给深度不同,厚土层较浅土层降雨补给深度更深。

3) 枣树耗水量随着土层厚度的增加呈现出先降低后增高的变化趋势。浅土层抑制了枣树地上部分的生长而加强了细根的生长发育,提高了枣树的根系吸水能力,厚土层拥有更多的深层土壤储水,枣树生长状况更好,根系吸水能力相应加强。

因此,枣树在深层土壤储水严重缺乏的浅土层中会抑制自身生长发育而加强根系吸水能力,但随着土层厚度与深层土壤储水的增加,枣树保持着深层土壤储水越多、生长状况越好、耗水量越多的规律。

参考文献:

- [1] 赵文举,李晓萍,范严伟,等.西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J].农业工程学报,2015,31(17):144-151.
ZHAO W J, LI X P, FAN Y W, et al. Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 144-151. (in Chinese)
- [2] 赵传普,徐学选,高朝侠,等.黄土丘陵区不同植被类型下土壤水分动态[J].水土保持通报,2015,35(1):68-72.
ZHAO C P, XU X X, GAO C X, et al. Dynamics of soil moisture under different vegetation types in Loess Hilly area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 68-72. (in Chinese)
- [3] 任婧宇,乔雨宁,闫璐瑶,等.黄土丘陵区主要树种土壤水分动态变化特征及影响因子[J].水土保持研究,2022,29(6):73-80.
REN J Y, QIAO Y N, YAN L Y, et al. Dynamic changes and influencing factors of soil moisture of main tree species in Loess Hilly region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 73-80. (in Chinese)
- [4] 李林傲,聂豪杰,荆庆芳,等.毛乌素沙地杨柴蒸腾耗水及其与环境因子的关系[J].节水灌溉,2022(12):103-109,118.
LI L N, NEI H J, JIANG Q F, et al. Correlations between the transpiration water consumption of *Hedysarum mongolicum* and environmental factors in Mu Us sandy land[J]. Water Saving Irrigation, 2022(12): 103-109, 118. (in Chinese)
- [5] 罗叙,李建平,张翼,等.荒漠草原土壤水分时空变化对降水变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(4):142-150.
LUO X, LI J P, ZHANG Y, et al. Responses of spatial and temporal variation of soil moisture to precipitation in desert steppe [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 142-150. (in Chinese)
- [6] 闵梓骁,张建新,范文波,等.不同立地条件下沙棘土壤水分分布特征及动态生长研究[J].水土保持学报,2022,36(4):204-210.
MIN Z X, ZHANG J X, FAN W B, et al. Soil moisture distribution and dynamic growth of *Hippophae rhamnoides* under different site conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 204-210. (in Chinese)
- [7] 焦瑞.陕北黄土丘陵区土地利用方式对土壤水碳垂直分布的影响[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2017.
- [8] BUTTLE J M, DILLON P J, EERKES G R. Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: an example from the Canadian Shield[J]. Journal of Hydrology, 2003, 287(1/4): 161-177.
- [9] 子桂才,李庆华,丁德品,等.土壤层厚度对3个油橄榄品种生长的影响[J].南方农业学报,2019,50(7):1534-1540.
ZI G C, LI Q H, DING D P, et al. The influence of soil thickness on the growth of three olive varieties [J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(7): 1534-1540. (in Chinese)
- [10] LI Z, LIU J C, ZHAO Y J, et al. Adaption of two grasses to soil thickness variation under different water treatments in a karst region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 298-306.
- [11] ZHAO Y J, LI Z, ZHANG J, et al. Do shallow soil, low water availability, or their combination increase the competition between grasses with different root systems in karst soil[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(11): 10640-10651.
- [12] 杨小琴,黄曦叶,刘金平,等.土层厚度对千根草构件性状和生物量分配及拓展能力的影响[J].草业科学,2020,37(10):1994-2002.
YANG X Q, HUANG X Y, LIU J P, et al. Effects of soil thickness on component properties, biomass structure and expanding ability of *Euphorbia thymifolia* [J]. Pratacultural Science, 2020, 37(10): 1994-2002. (in Chinese)
- [13] 王林,冯锦霞,万贤崇.土层厚度对刺槐旱季水分状况和生长

- 的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(3): 248-255.
- WANG L, FENG J X, WAN X C. Effects of soil thickness on dry-season water relations and growth in *Robinia pseudoacacia*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(3): 248-255. (in Chinese)
- [14] IVANOV V Y, HUTYRA L R, WOFSY S C, *et al.* Root niche separation can explain avoidance of seasonal drought stress and vulnerability of overstory trees to extended drought in a mature Amazonian forest[J]. Water Resources Research, 2012, 48(12): 12507.
- [15] OLIVEIRA R. S, BEZERRA L, DAVIDSON E A, *et al.* Deep root function in soil water dynamics in *Cerradosavannas* of central Brazil[J]. Functional Ecology, 2005, 19(4): 574-581.
- [16] GONG C, TAN Q Y, XU M X, *et al.* Mixed-species plantations can alleviate water stress on the Loess Plateau[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 458: 117767-117775.
- [17] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区深层土壤水分空间变异及其影响因子[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 355-362.
- YANG L, WEI W, CHEN L D, *et al.* Spatial variation of deep soil water in the Loess Hilly and gully regions and its influencing factors[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(4): 355-362. (in Chinese)
- [18] 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, WANG 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)
- [19] 孙亚荣, 陈云明, 王亚娟, 等. 黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态变化特征及降雨特征对其影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 272-279.
- SUN Y R, CHEN Y M, WANG Y J, *et al.* Dynamic variation characteristics of soil moisture in *Caragana korshinskii* plantation in Loess Hilly area and the Influence of rainfall characteristics on it[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 272-279. (in Chinese)
- [20] 李陆生. 山地旱作枣园细根分布格局及其土壤水分生态效应[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2016.
- [21] YOST J L, HARTEMINK A E. How deep is the soil studied-an analysis of four soil science journals[J]. Plant and Soil, 2020, 452(1/2): 5-18.
- [22] 何亚平, 蔡小虎, 费世民, 等. 土壤厚度对麻疯树生殖与生长性状的影响[J]. 四川林业科技, 2010, 31(3): 1-11.
- HE Y P, CAI X H, FEI S M, *et al.* The influences of soil depth on the characteristics of reproduction and growth of *Jatropha curcas*[J]. Journal of Sichuan forestry science and technology, 2010, 31(3): 1-11. (in Chinese)
- [23] 赵雅洁, 张静, 宋海燕, 等. 不同土壤厚度、水分和种植方式对喀斯特两种草本凋落物分解质量损失和化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6549-6558.
- ZHAO Y J, ZHANG J, SONG H Y, *et al.* Effects of different soil thickness, water and planting patterns on the litter mass loss and stoichiometry characteristics of two herbs in the Karst regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6549-6558. (in Chinese)
- [24] YANG M, GAO X, WANG S, *et al.* Quantifying the importance of deep root water uptake for apple trees' hydrological and physiological performance in drylands[J]. Journal of Hydrology, 2022, 606: 127471-127480.
- [25] 马小军. 黄土高原深层土壤干燥化对苹果树耗水特征的影响[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [26] 李会杰. 黄土高原林地深层土壤根系吸水过程及其对水分胁迫和土壤碳输入的影响[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2019.
- [27] 张芸香, 张荣荣, 王怡霖, 等. 干旱胁迫对杜仲截干苗生长和光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 1-6.
- ZHANG Y X, ZHANG R R, WANG Y L, *et al.* Effects of soil drought on the growth and leaf photosynthetic characteristics of *Eucommia ulmoides* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 1-6. (in Chinese)
- [28] NGUYEN L V, BERTERO D, HOANG D T, *et al.* Variation in quinoa roots growth responses to drought stresses[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2021, 208(6): 830-840.
- [29] 高成杰, 崔凯, 张春华, 等. 干旱胁迫对不同种源云南松幼苗生物量与根系形态的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 9-16.
- GAO C J, CUI K, ZHANG C H, *et al.* Effects of drought stress on biomass and root morphology of *Pinus yunnanensis* seedlings from different provenances[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 9-16. (in Chinese)
- [30] 崔颖, 李芊夏, 刘彬, 等. 干旱胁迫对地果幼苗形态与生理特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 82-88, 227.
- CUI Y, LI Q X, LIU B, *et al.* Effects of drought stress on morphology and physiological characteristics of *Ficus tikoua* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 82-88, 227. (in Chinese)