植物生态学报 2024, **48** (9): 1202-1212 DOI: 10.17521/cjpe.2023.0295
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

基于稳定同位素示踪的不同覆砂厚度下枣树水分利用策略

李蓓蓓 张明军* 车存伟 刘泽琛 钟晓菲 张园园 张 宇

西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070

摘 要 干旱区覆砂条件显著影响土壤水分状况, 进而影响植被对土壤水分的吸收和利用。然而, 对于枣树(*Ziziphus jujuba*)在不同覆砂条件下的吸水策略及其对输入水的动态响应仍知之甚少。该研究于2023年5月利用氢氧稳定同位素方法结合贝叶斯混合模型(MixSIAR)研究了枣树在不同覆砂厚度下的水分利用策略及其对输入水的响应。结果表明: 不覆砂样地在灌溉后第2天出现土壤含水量(SWC)峰值, 覆砂5 cm的样地在灌溉后第4天出现峰值, 覆砂10和15 cm的样地在灌溉后第6天出现峰值, 覆砂显著提高了SWC, 增强了土壤的保水性。不覆砂样地的氧稳定同位素比值(δ^{18}O)和氢稳定同位素比值(δ^{2}H)分别为–5.4‰– –2.2‰和–76.1‰– –61.0‰, 覆砂样地的δ^{18}O和δ^{2}H分别为–5.6‰– –3.0‰和–61.0‰– –75.7‰。灌溉后第2、4、6天, 0–10 cm土层不覆砂样地枣树水分利用比例(16.2%、9.1%、10.0%)相较覆砂5、10、15 cm样地(73.0%、54.5%、37.0%; 49.0%、46.2%、22.8%; 27.1%、36.1%、21.4%)稳定且覆砂措施增加了枣树对0–10 cm土壤水的利用, 即枣树对深层土壤水的利用存在滞后效应。以上结果说明了覆砂措施能够有效提高土壤的保水性, 影响植物水分利用策略, 有利于植物适应当地的干旱条件以及应对其他的环境变化。

关键词 同位素; 覆砂厚度; 贝叶斯模型; 土壤水分; 枣树; 水分利用

李蓓蓓, 张明军, 车存伟, 刘泽琛, 钟晓菲, 张园园, 张宇 (2024). 基于稳定同位素示踪的不同覆砂厚度下枣树水分利用策略. 植物生态学报, 48, 1202-1212. DOI: 10.17521/cjpe.2023.0295

Water utilization strategy of *Ziziphus jujuba* under different sand cover thicknesses based on stable isotope tracing

LI Bei-Bei, ZHANG Ming-Jun*, CHE Cun-Wei, LIU Ze-Chen, ZHONG Xiao-Fei, ZHANG Yuan-Yuan, and ZHANG Yu

College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis in Gansu Province, Lanzhou 730070, China

Abstract

Aims Sand cover conditions in arid zones significantly affect soil water status, which in turn affects the utilization of soil water by vegetation. However, little is known about the water uptake strategies of *Ziziphus jujuba* under different sand cover conditions and its dynamic response to input water.

Methods In this study, the water utilization strategies of *Z. jujuba* under different sand cover thicknesses and their responses to input water were investigated using the hydroxide stable isotope method combined with a Bayesian mixed model (MixSIAR).

Important findings We found that the peak of soil water content (SWC) appeared on the 2nd day after irrigation in the non-sand-covered sample plots, on the 4th day after irrigation in the 5 cm sand-covered sample plots, and on the 6th day after irrigation in the 10 and 15 cm sand-covered sample plots. Sand cover significantly increased the SWC, and enhanced the water retention of the soil. The oxygen stable isotope composition (δ^{18}O) and hydrogen stable isotope composition (δ^{2}H) were –5.4‰– –2.2‰ and –76.1‰– –61.0‰ in the non-sand-covered sample plots, and –5.6‰– –3.0‰ and –61.0‰– –75.7‰ in the sand-covered sample plots, respectively. The 2nd, 4th, and 6th day after irrigation, the percentage of water utilization by *Z. jujuba* in the 0–10 cm soil layer without sand cover (16.2%, 9.1%, 10.0%) was stable compared with that in the 5, 10, 15 cm sand-covered sample plots (73.0%, 54.5%, 37.0%; 49.0%, 46.2%, 22.8%; 27.1%, 36.1%, 21.4%) and sand-covering measures increased the date palm's water utilization of the

收稿日期Received: 2023-10-19 接受日期Accepted: 2024-04-08
基金项目: 国家自然科学基金(41771035)和甘肃省基础研究创新群体项目(22JR5RA129)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41771035) and the Gansu Province Basic Research Innovation Group Program (22JR5RA129).
* 通信作者Corresponding author (mjzhang2004@163.com)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

0–10 cm soil water. The sand mulching measures increased the utilization of 0–10 cm soil water by *Z. jujuba*, i.e. there was a lag in the utilization of deep soil water by *Z. jujuba*. The above results show that sand mulching can effectively improve the water retention of soil and influence the water utilization strategy of plants, which has implications for the adaptation of plants to local drought conditions and other environmental changes.

Key words isotopes; sand cover thickness; Bayesian modeling; soil water; *Ziziphus jujuba*; water utilization

Li BB, Zhang MJ, Che CW, Liu ZC, Zhong XF, Zhang YY, Zhang Y (2024). Water utilization strategy of *Ziziphus jujuba* under different sand cover thicknesses based on stable isotope tracing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 48, 1202-1212. DOI: 10.17521/cjpe.2023.0295

土壤水和植物水作为生态系统中水循环的重要组成部分, 在维持自然能量平衡和物质迁移中起着重要作用(Liu et al., 2021)。我国西北干旱半干旱地区受自然条件限制, 蒸发强、降水量小且分布不均, 导致水资源匮乏的问题更为突出并且对农业用水安全产生了重大影响(Ding et al., 2018)。覆砂具有蓄水保墒、提高水分利用效率和保持土壤水分相对稳定的作用(Li et al., 2018), 为提高干旱环境下的土壤水分利用效率, 砂石覆盖成为当地一种常用的防护手段并被广泛应用, 使得有限水资源能够维持经济作物的正常生长(Jiménez et al., 2005; Sharma & Bhardwaj, 2017)。植物获得水源的方式具有多源性, 包括降水、地下水、河流和土壤水(Yeh et al., 2014; Good et al., 2015; Miguez-Macho & Fan, 2021)。在大多数陆地生态系统中, 土壤水是植物水分利用的主要来源, 由于根系分布及其生理特征使得它们在不同土层获取水分的能力具有差异性(Köcher et al., 2013; Fort et al., 2017; Schreel et al., 2019)。此外, 植物吸水策略也会随着降水和土壤水分状况的动态变化而变化, 例如先前的研究表明对于枣树(*Ziziphus jujuba*), 土壤含水量是影响其根系吸水季节变化的重要因素(Barbeta et al., 2020)。因此, 探究砂石覆盖对土壤水分状况的影响, 以及植物吸水策略的响应情况, 对于理解植物对干旱环境的适应性以及合理利用管理水资源具有重要意义。

氢氧稳定同位素比值(δ^2H和δ^{18}O)作为一种理想的示踪工具被广泛地应用于生态水文学的研究中, 尤其可以揭示植物水分利用策略(Beyer et al., 2020)。传统的根系调查法及染色法(王鹏等, 2023)等, 虽然有助于了解植物的水分状态, 但无法提供水分来源的详细信息, 而氢氧同位素可以在不干扰植物根系结构或生长环境的条件下通过测量植物组织中的同位素组成, 精准捕捉植物吸水来源的动态变化(Tang, 2023)。近年来, 贝叶斯混合模型(MixSIAR)主要用于各潜在源分析(Stock & Semmens, 2016), 利用稳定水同位素和贝叶斯混合模型可以定量确定植物的吸水来源(赵玲等, 2022)。先前利用同位素技术对植物水分利用策略变化的研究主要集中在干湿季节转化的自然条件下(Bowen, 2010; 周盼盼等, 2016; 苏鹏燕等, 2020), 然而对人工干预下植物水分利用策略变化的研究相对缺乏。自然条件下的研究主要关注植物如何适应自然环境的变化, 主要揭示植物在自然条件下适应和生存的机制, 以及它们如何与自然环境相互作用, 而人工干预下的研究则关注人类活动对植物水分利用策略的影响, 这有助于评估人类干预对植物水分利用策略的影响以及可能出现的环境问题和可持续管理策略。

兰州市位于黄土高原西部, 所覆盖的黄土状物质深厚疏松, 且地下水位极深(达60 m以上), 因此降水成为土壤水分的唯一来源(Wang et al., 2021)。兰州市的气候和土壤条件适合一些耐旱型的经济果树生长, 种植经济果树可以为农民提供多样化的收入来源, 减少农业风险, 增加农民的生计稳定性(许春娟等, 2022), 枣树由于其生态价值和经济价值在当地大面积种植。因此, 了解干旱区覆砂条件下枣树如何利用土壤水, 尤其在气候变化不断加剧, 导致水资源供需矛盾加大的背景下, 高效利用灌溉水变得更加紧迫(Hamzei, 2011)。本研究旨在: 1)通过一次灌溉后连续采样测定土壤含水量动态变化以分析覆砂条件对土壤保水性的影响; 2)利用灌溉水、植物木质部水和土壤水同位素研究不同覆砂条件下植物水分利用策略对输入水的响应差异。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

兰州市(35.57°–37.12° N, 102.58°–104.57° E)位于黄土高原西部, 属于干旱半干旱气候区, 总面积约1.31 × 10^4 km^2, 地处黄河上游, 地势整体上西南高, 东北低。年平均气温10.3 ℃, 昼夜温差较大, 年降水量约300 mm, 降水较少且多集中于7–9月。辖

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

区内有城关区、七里河区、西固区、安宁区、红古区、永登县、皋兰县和榆中县(李吉均等, 1996)。本研究在兰州市西固区马泉村(36.13° N, 103.48° E)的试验田进行大田实验，该样地为5年生枣树果园，果园面积为576 m^2，枣树间距离东西2.5 m，南北3.5 m，枣树平均冠幅1 m。果园西侧有灌溉渠，南侧与其他农田相连，北侧与东侧均为道路(图1)。该地区地下水埋藏较深，土壤类型以灰钙土为主，是人类长期生产生活的结果。

1.2 数据与方法

1.2.1 样品采集

选取4株长势良好，树龄、胸径和树高均较为接近的枣树作为采样的样树，实验设置4个处理：分别覆砂5、10和15 cm处理，以不覆砂处理作为对照。覆砂方式为田面平铺，覆砂粒径为2.0–4.0 cm，覆盖半径为80 cm，覆砂材料于灌溉后当天覆盖，灌溉方式为大水漫灌，灌溉水源引自黄河水。在2023年5月5日(灌溉前)、5月11日(灌溉后第2天)、5月13日(灌溉后第4天)和5月15日(灌溉后第6天)对马泉村试验田不同覆砂处理后的土壤样品和植物样品进行取样。为避免光照和温度对实验的影响，每次采样时间控制在北京时间8:00–11:00的晴天进行采样。

土壤样品采集：利用手持式取土器钻取土壤样品，土取样深度为100 cm，取样间隔为10 cm，每层取2个平行样。所采样品分为2份：一份装入自带的铝盒中，用于测量土壤含水量；一份装入10 mL的实验玻璃瓶中密封，带回实验室冷冻保存，用于土壤水氢氧稳定同位素的测定(古丽哈娜提•波拉提别克等, 2022)。

植物样品采集：取直径0.3–0.5 cm、长0.5–0.6 cm的非绿色枝条。迅速剥去枝条的表皮和韧皮部，保留木质部，立即装入玻璃瓶中，用封口膜密封，冷藏(祖姆热提•于苏甫江等, 2022)。

降水样品采集：在采样地旁的空地放置雨量桶，为了防止雨水的蒸发，在雨量桶内部安置一个漏斗，漏斗口处用乒乓球封盖，待降雨结束后，立即对雨水样品进行收集，最大程度地减小由蒸发造成的数据误差。将收集好的降水样品装入HDPE塑料瓶后盖紧瓶盖，并用Parafilm膜将瓶口密封，带回实验室低温保存等待分析。

灌溉水样品采集：灌溉水样品在灌溉时用HDPE塑料瓶在试验田西侧灌溉渠中获取，采样时用灌溉水清洗HDPE塑料瓶3次后收集2瓶，收集后拧紧瓶盖，并用Parafilm膜密封瓶口，带回实验室冷藏待测。

1.2.2 样品分析

采集的样品在西北师范大学地理与环境科学学院稳定同位素实验室进行处理与分析(车存伟等, 2020)。

(1)土壤和植物样品水分的提取：使用北京剑灵公司开发的BJJL-2200型全自动真空冷凝抽提系统进行抽提。

(2)水样同位素测定：采用T-LWIA-45-EP型激光光谱液态水同位素分析仪(Los Gatos Research, Mountain View, USA)，测定的δ^2H和δ^{18}O以相对维也纳标准平均海洋水(VSMOW)的千分差值(‰)表示：

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中，R_{sample}为水样中的同位素比率，即重同位素和轻同位素的比值，δ^2H和δ^{18}O分别为^{2}H/^{1}H和^{18}O/^{16}O，R_{standard}为V-SMOW中的同位素比率。δ^2H和δ^{18}O的测量精度分别为±1‰和±0.3‰。

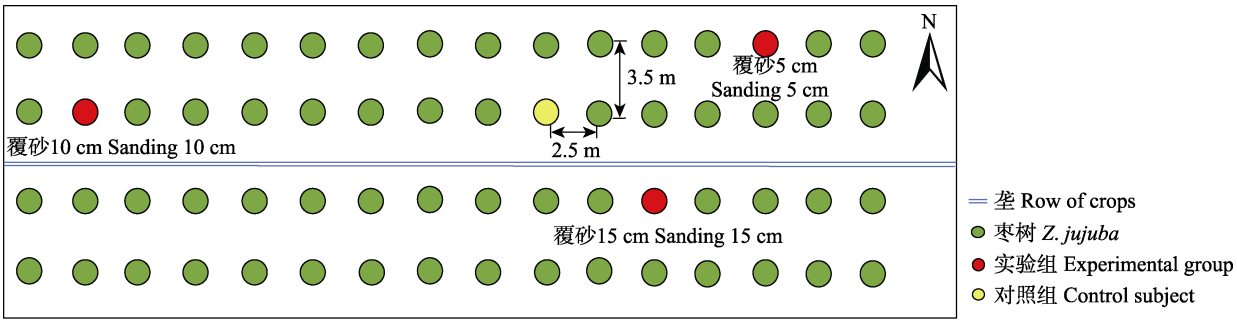


图1 干旱区覆砂条件下枣树试验田概况。
Fig. 1 Overview of the experimental field of *Ziziphus jujuba* under sand-covered conditions in arid zones.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

(3)光谱污染校正: 为了消除甲醇和乙醇等的污染, 本研究使用Los Gatos Research公司的光谱分析软件建立了校正曲线, 随后对存在污染的数据进行校正。

1.2.3 土壤含水量

土壤含水量(SWC)采用烘干法测得, 使用精度为0.000 1 g的电子天平称出湿土的质量, 在恒温烘箱((105 ± 2) ℃)中烘干至恒质量后再称出干土质量, 计算公式如下:

$$SWC = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, m_1为烘干前铝盒加湿土的质量(g), m_2为烘干后铝盒加干土的质量(g), m_0为空铝盒的质量(g)。

1.2.4 MixSIAR

基于R语言的MixSIAR包量化了一次灌溉后对不同深度土层补给的相对贡献率。该模型考虑了源值、分类和连续协变量(随机、固定、分类、嵌套效应)、先验信息的不确定性, 融合了贝叶斯混合模型的最新成果, 有效提高了模型计算的精度(Stock & Semmens, 2016; Wang et al., 2019)。

1.3 数据处理

采用Excel 2013对数据进行处理, 采用SPSS 25分析各层土壤水分δ^2H的差异, 运用最小显著差数(LSD)法对数据进行多重比较, 在0.05水平上检验其显著性, 合并δ^2H值相似的相邻土层, 并取平均值作为划分新土层的同位素值, 土层可划分为0–30、30–100 cm。基于R语言中的贝叶斯混合模型MixSIAR分析不同土层土壤水的贡献率, 由于多重比较分析下的不同土层土壤水贡献率差异不明显, 则划分为6个土层: 0–10、10–20、20–30、30–40、40–70和>70 cm。文中图表用Origin 2021软件绘制。

2 结果

2.1 土壤含水量变化特征

图2为不同覆砂厚度下SWC时空变化特征。不同覆砂厚度的枣树根区SWC呈现差异, 不覆砂样地的SWC小于覆砂的样地。不覆砂样地的SWC变化范围为1.6%–10.0%, 覆砂5 cm的样地为8.5%–15.9%, 覆砂10 cm的样地为10.1%–18.7%, 覆砂15 cm的样地为10.2%–23.4%, 不覆砂样地在灌溉后第2天的50 cm土层处SWC出现峰值, 覆砂5 cm的样地在灌溉后第4天的60 cm土层处出现峰值, 覆砂10和15 cm的样地在灌溉后第6天的60 cm土层处出现峰值。不同深度的SWC受灌溉和蒸发的影响不同, 相比不覆砂情况, 0–10 cm土层在覆砂后SWC变大且覆砂越厚其SWC越大, 在60 cm土层处4个样地出现明显波动且覆砂15 cm样地的SWC大于其他样地的覆砂情况。在90 cm土层处, 不覆砂样地的SWC迅速降低, 而覆砂样地的SWC波动相对稳定且逐渐增加。

表1为灌溉后枣树不同覆砂厚度下土层的平均SWC的变化情况。对比4个样地0–30 cm土层的平均SWC变化幅度为不覆砂<覆砂5 cm <覆砂10 cm<覆砂15 cm, 说明覆砂越厚, 样地的保水性越好。而对比4个样地30–100 cm土层的变化发现覆砂15 cm样地表现出良好的保水性。在不同覆沙厚度下, 覆砂厚度5 cm的平均SWC <覆砂10 cm的平均SWC <覆

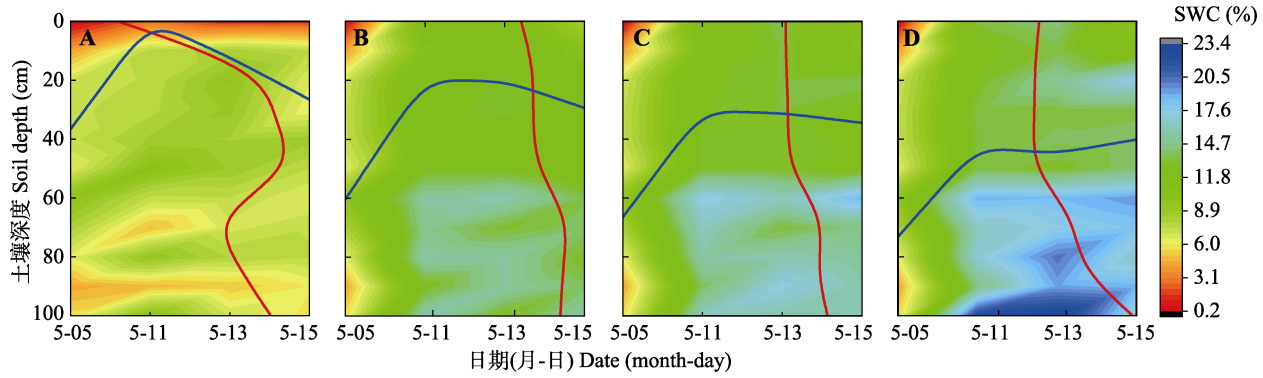


图2 不同覆砂厚度下枣树样地土壤含水量(SWC)时空变化。**A,** 不覆砂。**B,** 覆砂5 cm。**C,** 覆砂10 cm。**D,** 覆砂15 cm。蓝色线代表土壤含水量随时间的变化, 红色线代表土壤含水量随深度的变化。

Fig. 2 Spatial and temporal variation of soil water content (SWC) in *Ziziphus jujuba* sample plots under different sand cover thicknesses. **A,** Without sand cover. **B,** With 5 cm of sand cover. **C,** With 10 cm of sand cover. **D,** With 15 cm of sand cover. Blue line represents soil water content over time, red line represents soil water content over depth.

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0295

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表1 灌溉后枣树不同覆砂厚度下土层的平均土壤含水量(SWC)
Table 1 Mean soil water content (SWC) of *Ziziphus jujuba* soils under different sand cover thicknesses after irrigation

覆砂厚度 Sand thickness (cm)	土层 Layer of soil (cm)	SWC (%)		
		2023-05-11	2023-05-13	2023-05-15
0	0–30	6.4	7.1	5.5
	30–100	7.8	7.6	6.9
5	0–30	11.8	12.6	10.6
	30–100	13.9	13.8	13.1
10	0–30	12.0	13.4	11.7
	30–100	14.8	14.7	14.8
15	0–30	13.0	14.1	13.2
	30–100	16.2	17.4	16.4

砂厚度15 cm的平均SWC，不覆砂样地低，这说明灌溉发生后覆砂显著地影响了SWC，不同覆砂厚度下SWC对输入水存在差异。

2.2 不同覆砂厚度土壤水的同位素变化特征

土壤水同位素比值均位于当地大气降水线($\delta^2H = 7.5\delta^{18}O + 7.5$)和输入水线($\delta^2H = 13.2\delta^{18}O - 2.1$)下，这表明灌溉水转化成土壤水的过程均经历了不同程度的蒸发(图3)。土壤水δ^2H和$\delta^{18}O$在垂直剖面上有相似的变化趋势，因此仅以不同覆砂厚度下$\delta^{18}O$为例分析同位素变化特征(图4)。空间上，灌溉前土壤水的δ^2H和$\delta^{18}O$值随深度增加呈现先贫化后趋于稳定的变化趋势，其中0–10 cm土壤水稳定同位素最贫化(δ^2H: –51.8‰, $\delta^{18}O$: –0.8‰)。灌溉后土壤水的δ^2H和$\delta^{18}O$值呈现先富集后随深度增加逐渐贫化趋于稳定的变化规律，土壤水的稳定同位素值随深度的变化呈相反的趋势。时间上，灌溉后的2、4和6天土壤水稳定同位素在0–30 cm土层随时间变化剧烈，主要受灌溉和蒸发的影响，而30–100 cm土层变化相对稳定，这主要受灌溉和土壤水的混合作用。另外，不同覆砂厚度下枣园土壤水同位素组成存在差异，说明覆砂厚度影响灌溉水对土壤水的补给，从而影响同位素的分布。

灌溉发生前$\delta^{18}O$和δ^2H值的变化范围分别为–5.3‰– –0.9‰和–77.8‰– –52.3‰。表2为不同覆砂厚度下灌溉发生后不同深度的同位素值变化。$\delta^{18}O$和δ^2H值的变化范围分别为–5.6‰– –2.2‰和–76.1‰– –60.9‰。灌溉发生后，不覆砂样地$\delta^{18}O$和δ^2H值的变化范围分别为–5.4‰– –2.2‰和–76.1‰– –61.0‰，覆砂5 cm样地$\delta^{18}O$和δ^2H值的变化范围分别为–5.5‰– –3.0‰和–74.5‰– –61.0‰，覆砂10 cm样地$\delta^{18}O$和δ^2H值的变化范围分别为–5.3‰– –3.6‰和–74.3‰– –67.4‰，覆砂15 cm样地$\delta^{18}O$和δ^2H值的变化范围分别为–5.6‰– –4.4‰和–75.7‰– –72.1‰，相较不覆砂情况下覆砂样地的$\delta^{18}O$和δ^2H值的变化相对较小，这是由于砂土覆盖抑制了一部分土壤水分的蒸发。尽管灌溉水补给土壤水使得土壤水同位素变得贫化，但是灌溉水对土壤水同位素的影响主要为浅层土壤，说明深层土壤水同位素几乎不受灌溉水变化的影响。

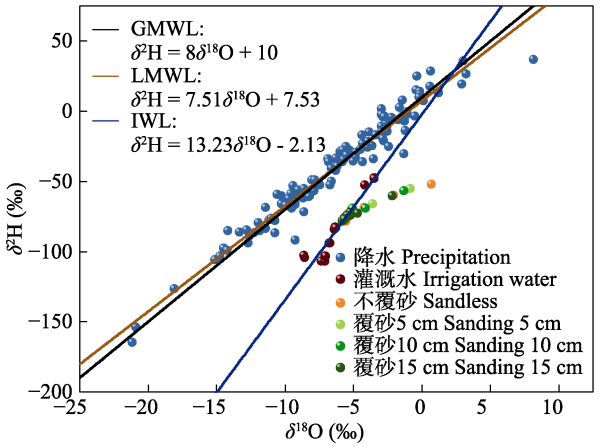


图3 不同覆砂厚度下土壤水同位素比值分布。GMWL，全球大气降水线; IWL，输入水线; LMWL，当地大气降水线。
Fig. 3 Distribution of soil water isotope ratios under different sand cover thicknesses. GMWL, global meteoric water line; IWL, input water line; LMWL, local meteoric water line.

2.3 不同覆砂条件下对枣树水分利用策略的影响

为了定量分析枣树水分利用来源及策略，本研究利用MixSIAR模型计算了不同覆砂厚度的土壤水对枣树根系吸水的贡献率(图5)。根据土壤含水量和同位素组成的变化特征，将整个土壤剖面划分为6个土层(0–10、10–20、20–30、30–40、40–70和>70 cm)。依据不同的覆盖条件，植物对土壤水的利用策略发生不同程度改变。随着灌溉水的补给，各土层含水量提高。灌溉发生后，不覆砂样地枣树对各土层的水分利用策略相比覆砂样地较为稳定，而覆砂样地枣树的水分利用策略更加灵活。

由图5发现不同覆砂厚度的枣树在灌溉后对各层水源的吸收比例明显不同。灌溉前，枣树主要利用70–100 cm的土壤水，由浅层至深层各层利用比例分别为8.3%、8.0%、13.3%、9.3%、26.9%、34.2%; 在灌溉后，4个样地枣树主要利用0–30 cm的土壤水。灌溉后的第2天，覆砂5、10和15 cm的枣树主要利用

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

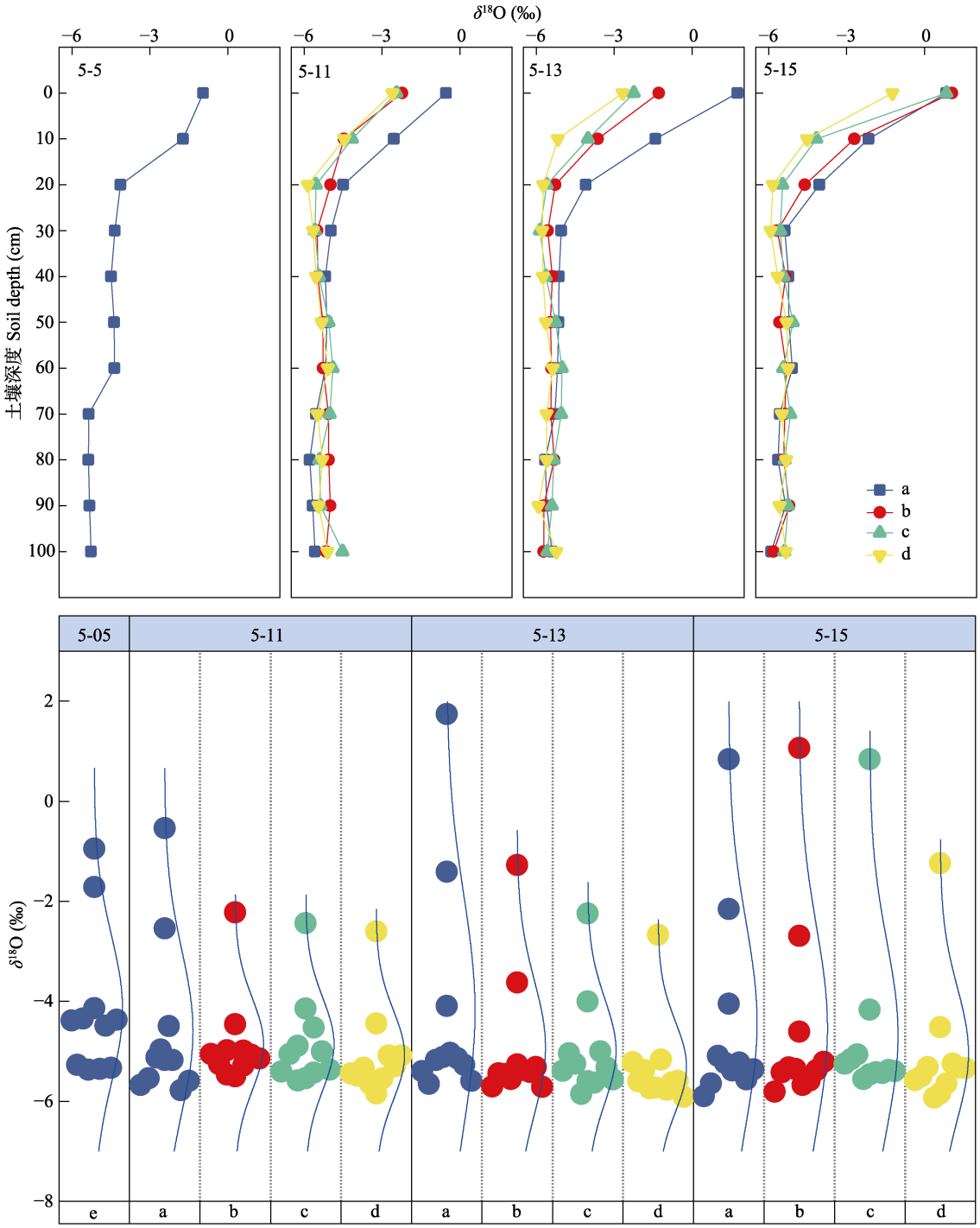


图4 不同覆砂厚度下土壤水氧稳定同位素组成($\delta^{18}O$)变化特征。a, 不覆砂; b, 覆砂5 cm; c, 覆砂10 cm; d, 覆砂15 cm; e, 灌溉前。
Fig. 4 Characteristics of oxygen stable isotope composition ($\delta^{18}O$) variations of soil water under different sand cover thicknesses. a, without sand cover; b, with 5 cm of sand cover; c, with 10 cm of sand cover; d, with 15 cm of sand cover; e, before irrigation.

0–10 cm的土壤水, 利用比例分别为73.0%、49.0%、27.1%、而不覆砂的枣树主要利用70 cm以下的土壤水, 利用比例为26.6%。灌溉后的第4天, 覆砂5、10和15 cm的枣树主要利用0–10 cm的土壤水, 利用比例分别为54.5%、46.2%、36.1%, 而不覆砂的枣树主要利用70 cm以下的土壤水, 利用比例为37.1%。灌溉后的第6天, 覆砂5和10 cm的枣树主要利用0–10 cm的土壤水, 利用比例分别为37.0%、22.8%, 而不覆砂和覆砂15 cm的枣树主要利用70 cm以下的土壤水, 利用比例分别为26.5%、27.1%。显然, 覆砂措施增加了枣树对0–10 cm土壤水的利用, 并在灌溉发生后对深层土壤水的利用发生滞后。

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0295

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表2 不同覆砂厚度下灌溉发生后不同土壤深度的同位素组成(‰)变化
Table 2 Changes in isotope composition (‰) at different soil depths after irrigation occurred at different sand cover thicknesses

覆砂厚度 Sand thickness (cm)	土层 Layer of soil (cm)	同位素 Isotope	2023-5-11	2023-5-13	2023-5-15
0	0–30	^{2}H	–64.6	–61.0	–63.8
		^{18}O	–3.1	–2.2	–2.7
	30–100	^{2}H	–76.1	–74.4	–75.0
		^{18}O	–5.4	–5.3	–5.4
5	0–30	^{2}H	–71.6	–69.6	–61.0
		^{18}O	–4.3	–3.9	–3.0
	30–100	^{2}H	–73.4	–74.5	–73.6
		^{18}O	–5.2	–5.5	–5.4
10	0–30	^{2}H	–71.2	–71.8	–67.4
		^{18}O	–4.4	–4.4	–3.6
	30–100	^{2}H	–72.2	–74.3	–72.0
		^{18}O	–5.1	–5.3	–5.3
15	0–30	^{2}H	–72.1	–72.9	–72.2
		^{18}O	–4.6	–4.8	–4.4
	30–100	^{2}H	–74.7	–75.7	–73.8
		^{18}O	–5.3	–5.6	–5.4

3 讨论

在干旱半干旱地区，土壤水是植被生长的重要水源(Gao & Shao, 2012; Liu & Shao, 2014)。在春旱的条件下，用砂石覆盖防止了水分从土壤表面蒸发到大气中，并增加了作物蒸腾作用，为干旱半干旱地区的经济作物提供有利的水分条件(Bu et al., 2013; Mo et al., 2017; Zhang et al., 2020)，砂石覆盖降低了灌溉水输入对于裸露土壤的直接冲击(Wang et al., 2017; Dai et al., 2020)，与不覆砂样地相比，覆砂措施提高了土壤含水量，优化土壤水消耗的时空波动。覆砂措施对较小强度的水有截留作用，而在灌溉后进行砂石覆盖对补给水量有积极的作用，且在覆砂后减少蒸发保留“旧水”在土壤中，由于不覆砂样地边下渗边蒸发使得SWC的峰值较早出现，且砂石较小的比热容使其升降温迅速，砂石覆盖后阻断了土壤水分的垂直蒸发，因此随覆砂厚度的增加使得SWC出现峰值的时间越滞后(蔡永坤等, 2014)。

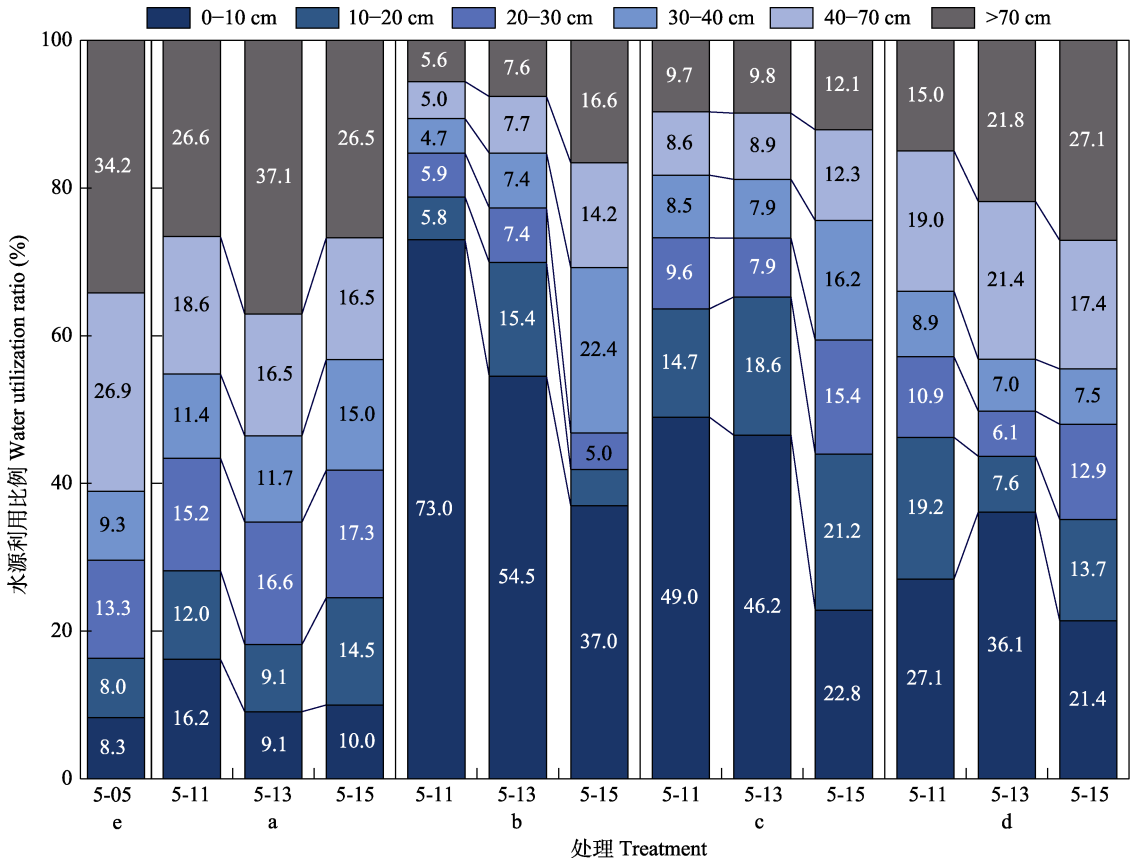


图5 不同覆砂厚度的土壤水对枣树根系吸水的贡献率。a，不覆砂; b，覆砂5 cm; c，覆砂10 cm; d，覆砂15 cm; e，灌溉前。
Fig. 5 Contribution of soil water to water uptake by *Ziziphus jujuba* roots with different sand cover thicknesses. a, without sand cover; b, with 5 cm of sand cover; c, with 10 cm of sand cover; d, with 15 cm of sand cover; e, before irrigation.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

此外, 砂石覆盖改变了田间土壤水分的运移方式, 具有较好的蓄水保水性能, 尤其是提高了深层土壤的调蓄能力, 为枣树提供了较好的土壤水分环境, 使深层水分向上运移供枣树利用, 较大幅度地提高了样地的SWC与供水能力。结合覆砂后植物的水分利用策略发现随覆砂厚度的增加, 植物对深层土壤水的利用发生滞后(Liao et al., 2021)。吕文聪等(2021)、白一茹等(2017)以及宋日权等(2010)的研究发现, 覆砂显著提高了SWC, 增强了土壤的保水性, 这是由于覆盖措施提高了对输入水的利用, 从而减轻了土壤水分消耗, 达到保水的作用(Liu et al., 2014), 本文研究结果与之一致, 覆砂15 cm的样地的SWC高于其他样地, 提高SWC有利于干旱区的农业生产生活, 有利于提高作物的经济效益(Duan et al., 2021)。

浅层土壤水对输入水的响应较为敏感, 而深层土壤水对比输入水而言具有更小的变化范围, 使得新的土壤水δ^2H值受灌溉δ^2H值的强烈影响(Geris et al., 2017; Tetzlaff et al., 2021)。表层土壤中的同位素值更容易受到灌溉水和蒸发的影响(Oliveira et al., 2005)。受输入水的影响, 在土壤垂直剖面上蒸发引起的同位素分馏效应随着土壤深度的增加而减小(Barbeta et al., 2020)。灌溉后土壤水的δ^2H和δ^{18}O值呈现先富集后随深度逐渐贫化趋于稳定的变化规律, 土壤水的稳定同位素值随深度的变化呈相反的趋势, 表层土壤水δ^{18}O和δ^2H由于灌溉水发生变化, 而在深层土壤中δ^{18}O和δ^2H相对富集, 是由于灌溉水补给和蒸发的相互作用。表层土壤水的同位素组成直接受灌溉水影响, 当覆砂厚度不同时, δ^{18}O和δ^2H的变化范围开始明显小于不覆砂的变化范围。说明覆砂样地对水分运移有促进作用, 覆砂厚度对枣树水分条件的改善具有重要意义(Diaz et al., 2005; Yang et al., 2023)。这与Zhao等(2020)的研究相一致, 其认为使用砂石覆盖可以有效改善土壤水分保持并减少土壤水分的蒸发。

不同生境下, 植物可随环境变化调整水分利用策略。Barbeta等(2015)研究了干旱敏感的植物物种并发现在干旱条件下, 这些植物倾向于将水分吸收源限制在浅层土壤中, 而避免深层土壤中的水源, 这可以帮助植物降低水分蒸散和维护生存, 同时减轻深层土壤中水分的竞争压力。灌溉发生后, 不覆砂样地枣树对各土层的水分利用策略相较覆砂样地较为稳定, 而覆砂样地的枣树的水分利用策略更为灵活。这与Ceacero等(2020)的研究结果不同, 在西班牙科尔多瓦的样地上, *Quercus ilex*在干旱时期环境强烈的蒸发使得深层地下水逐渐被利用, SWC恢复至最初的SWC, 因此地下水也是植物利用的重要水源。然而黄土高原由于黄土层较厚, 地下水水位较深, 植物根系很难从地下水获取水分, 因此土壤水成为植物利用的主要水源。分析比较不同砂石覆盖厚度下的植物水分利用策略可知枣树主要利用0–10 cm的土壤水分, 但随覆砂厚度的增加, 植物对0–10 cm的利用逐渐减少, 这是由于砂石的粒径和孔隙空间的变化的影响。在砂石的覆盖下, 覆盖层包含大量的多孔空间, 这些空间形成了多孔介质, 从而形成一定的“水通道”使得覆盖层与裸地界面完全连通(贾振江等, 2023)。此外, 不同覆砂厚度下枣树的水分利用策略不同。对于覆砂条件下的枣树, 发现前期SWC较低时, 植被水分利用对输入水更为敏感, 灌溉后主要水分来源由深层土壤向上层土壤转移。灌溉前植物主要从深层土壤中获取水分, 而灌溉发生后的枣树则先利用表层土壤水分转而吸取深层土壤水分, 这一研究结果与郝帅和李发东(2021)的一致。根据Yang等(2023)和Li等(2021)的研究发现枣树在雨后吸取表层土壤水分的状态持续至表层土壤水分亏缺时, 就会转而吸收更深层的土壤水分。但是, 不同覆砂厚度影响土壤保水性(Wang et al., 2014), 本研究中覆砂显著提高了SWC且提高了对表层土壤水的吸收, 延长了植物对深层土壤水的利用时间, 覆砂措施使得较多的水用于作物生产, 大大提高了土壤水的有效性。

4 结论

本研究利用稳定同位素方法和MixSIAR模型来评估不同覆砂条件下枣树对灌溉水的响应。在灌溉后, SWC在时间上整体呈现先增大后减小的变化趋势且0–30 cm的SWC增加最为显著, 不覆砂样地在灌溉后第2天出现土壤含水量峰值, 覆砂5 cm的样地在灌溉后第4天出现峰值, 覆砂10和15 cm的样地在灌溉后第6天出现峰值。不同覆砂厚度的土壤水同位素组成存在差异且变化程度各不相同。灌溉前土壤水的δ^2H和δ^{18}O随深度增加呈现先贫化后趋于稳定的变化趋势, 其中0–10 cm土壤水稳定同位素最贫化(δ^2H: –51.81‰, δ^{18}O: –0.85‰)。灌溉后土壤水

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0295

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

的δ^2H和δ^{18}O呈现先富集后随深度逐渐贫化趋于稳定的变化规律。最后，覆砂措施增加了枣树对0–10 cm土壤水的利用，并在灌溉发生后提高了对表层土壤水的利用及使用周期，大大提高了土壤水的有效性。本研究为人为干扰下深入研究枣树水分利用策略提供一些理论基础。若增加不同覆砂粒径的研究或对灌溉水的灌溉量进行控制，需考虑何种情况下对土壤水的利用策略最佳，从而实现对土壤水的高效利用。

参考文献

Bai YR, Zhao YP, Wang YQ, Zhang X (2017). Soil infiltration process and model analysis of field mulched with different thickness of gravel-sand in Ningxia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(4), 81-85. [白一茹, 赵云鹏, 王幼奇, 张兴 (2017). 宁夏砂田不同砾石覆盖厚度土壤入渗过程及模型分析. 水土保持学报, 31(4), 81-85.]

Barbeta A, Gimeno TE, Clavé L, Fréjaville B, Jones SP, Delvigne C, Wingate L, Ogée J (2020). An explanation for the isotopic offset between soil and stem water in a temperate tree species. *New Phytologist*, 227, 766-779.

Barbeta A, Mejía-Chang M, Ogaya R, Voltas J, Dawson TE, Peñuelas J (2015). The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 21, 1213-1225.

Beyer M, Kühnhammer K, Dubbert M (2020). *In situ* measurements of soil and plant water isotopes: a review of approaches, practical considerations and a vision for the future. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 4413-4440.

Bowen GJ (2010). Isoscapes: spatial pattern in isotopic biogeochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38, 161-187.

Bu L, Liu J, Zhu L, Luo S, Chen X, Li S, Lee Hill R, Zhao Y (2013). The effects of mulching on maize growth, yield and water use in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 123, 71-78.

Cai YK, Li Y, Feng H (2014). Effects of gravel-sand mulching degree and size on soil moisture evaporation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 28(6), 273-277. [蔡永坤, 李毅, 冯浩 (2014). 不同砂石覆盖度和粒径对土壤水分蒸发的影响. 水土保持学报, 28(6), 273-277.]

Ceacero CJ, Díaz-Hernández JL, del Campo AD, Navarro-Cerrillo RM (2020). Soil rock fragment is stronger driver of spatio-temporal soil water dynamics and efficiency of water use than cultural management in holm oak plantations. *Soil and Tillage Research*, 197, 104495. DOI: 10.1016/j.still.2019.104495.

Che CW, Zhang MJ, Wang SJ, Du QQ, Ma ZZ, Meng HF, Qu DY (2020). Studying spatio-temporal variation and nfluencing factors of soil evaporation in southern and northern mountains of Lanzhou city based on stable hydrogen and oxygen isotopes. *Geographical Research*, 39, 2537-2551. [车存伟, 张明军, 王圣杰, 杜勤勤, 马转转, 孟鸿飞, 瞿德业 (2020). 基于氢氧稳定同位素的兰州市南北两山土壤蒸发时空变化及影响因素研究. 地理研究, 39, 2537-2551.]

Dai JJ, Zhang XP, Luo ZD, Wang R, Liu ZL, He XG, Rao ZG, Guan HD (2020). Variation of the stable isotopes of water in the soil-plant-atmosphere continuum of a *Cinnamomum camphora* woodland in the East Asian monsoon region. *Journal of Hydrology*, 589, 125199. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125199.

Diaz F, Jimenez CC, Tejedor M (2005). Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation. *Agricultural Water Management*, 74, 47-55.

Ding D, Zhao Y, Feng H, Hill RL, Chu X, Zhang T, He JQ (2018). Soil water utilization with plastic mulching for a winter wheat-summer maize rotation system on the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 201, 246-257.

Duan CX, Chen GJ, Hu YJ, Wu SF, Feng H, Dong QG (2021). Alternating wide ridges and narrow furrows with film mulching improves soil hydrothermal conditions and maize water use efficiency in dry sub-humid regions. *Agricultural Water Management*, 245, 106559. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106559.

Fort F, Volaire F, Guilioni L, Barkaoui K, Navas ML, Roumet C (2017). Root traits are related to plant water-use among rangeland Mediterranean species. *Functional Ecology*, 31, 1700-1709.

Gao L, Shao MG (2012). Temporal stability of shallow soil water content for three adjacent transects on a hillslope. *Agricultural Water Management*, 110, 41-54.

Geris J, Tetzlaff D, McDonnell JJ, Soulsby C (2017). Spatial and emporal patterns of soil water storage and vegetation water use in humid northern catchments. *Science of the Total Environment*, 595, 486-493.

Good SP, Noone D, Bowen G (2015). Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, 349, 175-177.

Gulhanat B, Chang SL, Bahjaynar T, Zhang YT (2022). Water sources of *Picea schrenkiana* and *Berberis heteropoda* in the Tianshan Mountains in summer. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33, 1893-1900. [古丽哈娜提·波拉提别克, 常顺利, 巴贺贾依娜尔·铁木尔别克, 张毓涛 (2022). 天山林区雪岭云杉和异果小檗夏季水分来源. 应用生态学报, 33, 1893-1900.]

Hamzei J (2011). Seed, oil, and protein yields of canola under combinations of irrigation and nitrogen application.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Agronomy Journal, 103, 1152-1158.

Hao S, Li FD (2021). Water sources of the typical desert vegetation in Ebinur Lake Basin. *Acta Geographica Sinica*, 76, 1649-1661. [郝帅, 李发东 (2021). 艾比湖流域典型荒漠植被水分利用来源研究. 地理学报, 76, 1649-1661.]

Jia ZJ, Liu XZ, Xu TY, Li WC, Liu QL, Chen JH, Ma B (2023). Analysis of soil water evaporation characteristics and its influencing factors under mixed sand cover. *Journal of Soil and Water Conservation*, 37, 227-236. [贾振江, 刘学智, 徐天渊, 李王成, 刘巧玲, 陈继虹, 马波 (2023). 砂土混合覆盖下的土壤水分蒸发特性及其因子分析. 水土保持学报, 37, 227-236.]

Jiménez CC, Tejedor M, Diaz F, Rodriguez CM (2005). Effectiveness of sand mulch in soil and water conservation in an arid region, Lanzarote, Canary Islands, Spain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60, 63-67.

Köcher P, Horna V, Leuschner C (2013). Stem water storage in five coexisting temperate broad-leaved tree species: significance, temporal dynamics and dependence on tree functional traits. *Tree Physiology*, 33, 817-832.

Li JJ, Fang XM, Ma HZ, Zhu JJ, Pan BT, Chen HL (1996). Late Cenozoic geomorphologic evolution of the upper Yellow River and uplift of the Tibetan Plateau. *Science in China* (*Series D*), 26, 316-322. [李吉均, 方小敏, 马海洲, 朱俊杰, 潘保田, 陈怀录 (1996). 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. 中国科学(D辑: 地球科学), 26, 316-322.]

Li R, Chai SX, Chai YW, Li YW, Lan XM, Ma JT, Cheng HB, Chang L (2021). Mulching optimizes water consumption characteristics and improves crop water productivity on the semi-arid Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 254, 106965. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106965.

Li S, Li Y, Lin H, Feng H, Dyck M (2018). Effects of different mulching technologies on evapotranspiration and summer maize growth. *Agricultural Water Management*, 201, 309-318.

Liao Y, Cao HX, Liu X, Li HT, Hu QY, Xue WK (2021). By increasing infiltration and reducing evaporation, mulching can improve the soil water environment and apple yield of orchards in semiarid areas. *Agricultural Water Management*, 253, 106936. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106936.

Liu BX, Shao MA (2014). Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 517, 974-984.

Liu JZ, Wu HW, Cheng Y, Jin Z, Hu J (2021). Stable isotope analysis of soil and plant water in a pair of natural grassland and understory of planted forestland on the Chinese Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, 249, 106800. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106800.

Liu XE, Li XG, Hai L, Wang YP, Li FM (2014). How efficient is film fully-mulched ridge-furrow cropping to conserve rainfall in soil at a rainfed site? *Field Crops Research*, 169, 107-115.

Lü WC, Qiu Y, Xie ZK, Wang XP, Wang YJ (2021). Effects of mulch gravels with different sizes on the process of water infiltration. *Research of Soil and Water Conservation*, 28(6), 46-51. [吕文聪, 邱阳, 谢忠奎, 王新平, 王亚军 (2021). 砾石覆盖粒径对土壤入渗过程的影响. 水土保持研究, 28(6), 46-51.]

Miguez-Macho G, Fan Y (2021). Spatiotemporal origin of soil water taken up by vegetation. *Nature*, 598, 624-628.

Mo F, Wang J, Zhou H, Luo C, Zhang X, Li X, Li F, Xiong L, Kavagi L, Nguluu SN, Xiong Y (2017). Ridge-furrow plastic-mulching with balanced fertilization in rainfed maize (*Zea mays* L.): an adaptive management in East African Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 236, 100-112.

Oliveira RS, Bezerra L, Davidson EA, Pinto F, Klink CA, Nepstad DC, Moreira A (2005). Deep root function in soil water dynamics in Cerrado savannas of central Brazil. *Functional Ecology*, 19, 574-581.

Schreel JDM, von der Crone JS, Kangur O, Steppe K (2019). Influence of drought on foliar water uptake capacity of temperate tree species. *Forests*, 10, 562. DOI: 10.3390/f10070562.

Sharma R, Bhardwaj S (2017). Effect of mulching on soil and water conservation—A review. *Agricultural Reviews*, 38, 311-315.

Song RQ, Chu GX, Ye J, Bai L, Zhang RX, Yang JS (2010). Indoor experiment on the effect of sand mixing on soil water infiltration and evaporation. *Journal of Agricultural Engineering*, 26(S1), 109-114. [宋日权, 褚贵新, 冶军, 白玲, 张瑞喜, 杨劲松 (2010). 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验. 农业工程学报, 26(S1), 109-114.]

Stock B, Semmens B (2016). *MixSIAR GUI User Manual v3.1. Scripps Institution of Oceanography*. UC San Diego, San Diego, USA.

Su PY, Zhang MJ, Wang SJ, Qiu X, Wang JX, Du QQ, Guo R, Che CW (2020). Water sources of riparian plants based on stable hydrogen and oxygen isotopes in Lanzhou section of the Yellow River, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 1835-1843. [苏鹏燕, 张明军, 王圣杰, 邱雪, 王家鑫, 杜勤勤, 郭蓉, 车存伟 (2020). 基于氢氧稳定同位素的黄河兰州段河岸植物水分来源. 应用生态学报, 31, 1835-1843.]

Tang Y (2023). Unravelling δ^{13}C signal in Scots pine trees for climate change and tree physiology studies. *Dissertationes Forestales*, 2023, 335. DOI: 10.14214/df.335.

Tetzlaff D, Buttle J, Carey SK, Kohn MJ, Laudon H, McNamara JP, Smith A, Sprenger M, Soulsby C (2021).

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0295

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Stable isotopes of water reveal differences in plant-soil water relationships across northern environments. *Hydrological Processes*, 35, 1-19.

Wang J, Fu BJ, Lu N, Zhang L (2017). Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 609, 27-37.

Wang J, Lu N, Fu BJ (2019). Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning. *Science of the Total Environment*, 666, 685-693.

Wang J, Zhang M, Argiriou AA, Wang S, Qu D, Zhang Y, Su P (2021). Recharge and infiltration mechanisms of soil water in the floodplain revealed by water-stable isotopes in the upper Yellow River. *Sustainability*, 13, 1-18.

Wang P, Chen G, Pei XJ, Tang XL, Song C (2023). Water use strategies of typical plants in a tunnel construction area at eastern margin of Qinghai-Xizang Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 43(4), 137-145. [王鹏, 陈果, 裴向军, 唐晓鹿, 宋词 (2023). 青藏高原东缘某隧道建设区典型植物水分利用策略. 水土保持通报, 43(4), 137-145.]

Wang Y, Xie Z, Malhi SS, Vera CL, Zhang Y (2014). Gravel-sand mulch thickness effects on soil temperature, evaporation, water use efficiency and yield of watermelon in semi-arid Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 261-265.

Xu CJ, Jia SH, Zhao X, Bai YS, Cao R (2022). Application of water saving irrigation and fertilization technology in jujube planting. *Water Resources Planning and Design*, (2), 82-84. [许春娟, 贾生海, 赵霞, 白有帅, 曹睿 (2022). 节水灌溉和施肥技术在枣树中的应用. 水利规划与设计, (2), 82-84.]

Yang Y, Zhang MJ, Wang SJ, Qu DY, Zhang Y, Wang JX (2023). Soil moisture variability affected by sand mulch: an isotope-based assessment of irrigated farmland in Northwest China. *Ecohydrology*, 16, 1-12.

Yeh HF, Lin HI, Lee CH, Hsu KC, Wu CS (2014). Identifying seasonal groundwater recharge using environmental stable isotopes. *Water*, 6, 2849-2861.

Zhang P, Wei T, Han QF, Ren XL, Jia ZK (2020). Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China. *Agricultural Water Management*, 241, 106382. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106382

Zhao L, Zhang L, Zhao N, Ge JZ, Jin JW (2022). Water use strategy of fruit-grass complex systems in different habitats based on isotope tracer. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(1), 86-94. [赵玲, 张露, 赵妮, 戈建珍, 金晶炜 (2022). 基于同位素示踪的不同生境果草复合系统水分利用策略. 水土保持学报, 36(1), 86-94.]

Zhao WJ, Cui Z, Zhou CQ (2020). Spatiotemporal variability of soil-water content at different depths in fields mulched with gravel for different planting years. *Journal of Hydrology*, 590, 125253. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125253.

Zhou PP, Zhang MJ, Wang SJ, Wang J, Zhao PP, Liu XM (2016). The characteristics of stable hydrogen and oxygen isotopes of greening plants in Lanzhou downtown. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 2942-2951. [周盼盼, 张明军, 王圣杰, 王杰, 赵培培, 刘雪梅 (2016). 兰州城区绿化植物稳定氢氧同位素特征. 生态学杂志, 35, 2942-2951.]

Zumrat Y, Dong ZW, Liu SYH, Ye M, Ma XD, Su ZH (2022). Analysis of water sources in *Tamarix ramosissima* and *Haloxylon persicum* communities in the desert-oasis transition zone. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(6), 213-221. [祖姆热提·于苏甫江, 董正武, 刘隋赟昊, 叶茂, 马晓东, 苏志豪 (2022). 荒漠-绿洲过渡带多枝柽柳和白梭梭水分溯源研究. 水土保持学报, 36(6), 213-221.]

责任编委: 宋 欣 责任编辑: 李 敏

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology