

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.032.

盖浩琪, 石培君, 李志. 黄土区长武塬土地利用变化对土壤水平衡的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 154-159.

GAI Haoqi, SHI Peijun, LI Zhi. Impact of Land Use Change on Soil Water Balance in Changwu Tableland of Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 154-159.

黄土区长武塬土地利用变化对土壤水平衡的影响

盖浩琪, 石培君, 李志

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]揭示土地利用变化对土壤水平衡中各水文变量的影响,明确黄土区水循环演变机制,进而为相似研究提供技术支撑。[方法]以黄土区长武塬为研究区,采集农地、18 a和26 a苹果园下20 m土样,测定了土壤水及其稳定性和放射性同位素含量,分解量化了土壤水平衡中各分量,评估了其土地利用变化的响应。[结果]以农地为基准,18 a和26 a苹果园土壤水储量减少7.3%~14.3%,深层渗漏量减少41.2%~80.0%,蒸散发量增加5.0%~9.6%。蒸散发中,蒸发量减小8.6%~17.2%,而蒸腾量增加了12.9%~25.4%。[结论]3种土地利用方式下土壤水含量存在显著差异,土壤水氧同位素剖面总体呈现先减小后稳定的变化趋势,农地条件下土壤水受到的蒸发最强。深根植物苹果树主要通过增加蒸腾耗水而减少其他水文变量的通量,显著影响水文过程。

关键词: 黄土塬; 同位素示踪; 深层渗漏; 土地利用变化; 土壤水分平衡

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0154-06

Impact of Land Use Change on Soil Water Balance in Changwu Tableland of Loess Region

GAI Haoqi, SHI Peijun, LI Zhi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the impact of land use change (LUC) on various hydrological variables in soil water balance as well as the mechanism of water cycle in loess region, and then to provide technical support for similar research. [Methods] We chose the Changwu loess tableland as the study area, and then collected soil samples from the surface down to 20 m under three land use types (farmland, 18-year apple orchard and 26-year apple orchard). Then, the content of soil water, stable ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and radioactive (^3H) isotopes were measured. The components of soil water balance were decomposed and quantified, and their responses to land use changes were evaluated. [Results] Compared with farmland, the soil water storage under apple orchard (stand age 18 and 26 years) decreased by 7.3%~14.3%, the deep drainage decreased by 41.2%~80.0%, and the evapotranspiration increased by 5.0%~9.6%, of which evaporation decreased by 8.6%~17.2%, while transpiration increased by 12.9%~25.4%. [Conclusion] There were significant differences in soil water contents under three land use types, and the soil water oxygen isotope profiles showed a general trend of decreasing and then stabilizing, with soil water subject to the strongest evaporation under farmland. Deep-rooted fruit trees mainly reduced the flux of other hydrological variables by increasing transpiration water consumption, which significantly affected the hydrological process.

Keywords: loess region; isotope tracing; deep drainage; vegetation change; soil water balance

收稿日期: 2022-04-21

修回日期: 2022-05-30

资助项目: 国家自然科学基金“黄土区潜水补给的方式、速率与控制因素”(42071043)

第一作者: 盖浩琪(1998—), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 研究方向为旱区植被变化生态水文效应。E-mail: 2020050718@nwfau.edu.cn

通信作者: 李志(1978—), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 主要从事旱区水循环与水环境演变机理与调控研究。E-mail: lizhibox@nwfau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

土壤水是联系降水、植被和地下水的^{关键中间环节},对植被承载力和地下水补给有重要影响^[1-4]。黄土高原深厚非饱和带中储存了巨大的土壤水^[5],为其农业生产和经济发展提供了重要水源。然而,退耕还林还草工程导致土地利用类型发生了巨大的变化,进而改变了土壤水的时空分布和土壤水文过程^[5-7]。其中,受关注较多的是农地转变为林地^{的水文效应},发现此种变化显著降低了土壤水含量,形成了土壤干层并减少深层渗漏量^[2,8-9],加剧了水资源短缺的危机。但需要注意的是,当前土地利用变化的水文效应研究多针对单个水文变量^[10-11],缺少对水循环系统中各分量的量化研究,不利于全面理解水文过程变化与植被变化间的关系。

传统的土壤水平衡研究多试图直接测量各水文变量^[12-13],并基于水量平衡方程推算不可直接测量的变量,如深层渗漏量^[8]。但部分变量在旱区的通量很小^[14],间接估算的误差往往导致结果不可信。数值模拟方法在长序列观测基础上校准模型,可在一定程度上解决直接测量存在的问题,但仍存在土壤和植物根系参数难以获取等问题^[15]。比较而言,示踪法在估算小通量水文变量方面往往非常有效^[16-19],如氯离子质量平衡法、水稳定性和放射性同位素示踪等方面^[20-21],在旱区已有广泛应用。需要注意的是,单一示踪剂往往只能用在某个水文变量的估算方面有优势,如氯离子和氡质量平衡法估算深层渗漏^[14,22]、水稳定同位素估算蒸发比率^[8],而难以全面分解水循环各变量。但联合应用多种示踪剂,有望解决此问题,为水循环机理研究提供技术支撑。

本研究以黄土区长武塬为研究区,通过联用氢氧稳定性和放射性同位素分解不同土地利用方式下土壤水平衡各分量,探究土地利用变化的影响,以期为该区水循环过程的理解和水资源管理提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省长武县王东村(34°59′—35°18′N,107°38′—107°58′E),地势平坦,海拔 1 220 m,属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,是典型的旱地雨养农业区,无灌溉,年均日照 2 226.5 h,年均气温 9.1℃,≥10℃ 积温在 2 500~4 500℃,无霜期 171 d^[13]。1957—2018 年均降水量 581.0 mm^[17],多集中于 7—9 月,占全年降水量的 55% 以上。土壤田间持水量为 22.5%,稳定湿度为 15.5%,凋萎湿度为 8.5%,地下水位埋深 30~100 m^[5,9]。土地利用方式主要为农地和苹果园。农地常年种植作物以玉米、小

麦为主,一年一熟或两年三熟^[3];苹果园是自 1980s 开始由农地转化而来,提升经济收入的同时也显著改变了土壤水循环状况。

1.2 样品采集与分析

为评估农地转化为苹果园对土壤水循环的影响,2020 年 6 月选取 3 块样地:农地、18 a 和 26 a 苹果园,苹果园均由农地转化而来(表 1)。3 块样地间距较近,具有相似的土壤和水文气象条件,均无灌溉,因此,样地间土壤水的差异充分体现了土地利用变化的影响^[23]。利用土钻法采集土样,采样深度为 15~20 m,间隔为 20 cm。收集的土样除去根系杂物后,一部分装入铝盒用于土壤水含量的测定;剩余部分装入 250 ml 聚乙烯塑料瓶中并用 Parafilm 封口膜密封防止蒸发,冷藏避光保存用于同位素测定。为分析土地利用变化的影响,果园下采样深度应该达到根系吸水的最大深度。根据已有研究^[24],在 18 a 果园下,取样深度为 15 m,26 a 苹果园下取样深度为 20 m,均达到了根系吸水的最大深度,可从后文中结果验证。

2013—2019 年,在长武农业生态试验站收集日降水样品,在 4℃ 下冷藏以供同位素分析^[17]。

表 1 采样点基本信息

土地利用方式	原利用方式	植被生长年限/a	采样深度/m	纬度(N)	经度(E)
农地	农地	—	20	36°32′33″	110°47′59″
苹果园	农地	18	15	36°32′28″	110°48′04″
苹果园	农地	26	20	36°27′48″	110°45′21″

注:表中“—”表示未发现。

1.3 测定方法

采用烘干法测定土壤水含量。使用真空冷凝抽提系统(LI-2100)抽提土壤水,将抽提的水分用 0.22 μm 滤头过滤,去除杂质后转移到 1.5 ml 玻璃瓶低温保存。使用液态水同位素分析仪(ABBGLA431-TLWIA)测定 δ²H,δ¹⁸O,精度分别为±0.2‰和±0.03‰,测定结果为维也纳标准平均海水(V-SMOW)对应的千分差,见公式(1)。土壤中氡含量使用液体闪烁计数器(Quantulus 1220,Perkin Elmer,Singapore)进行测定,以水样/闪烁液为 8:12 配置样本,检出限为 2.0 TU^[14]。

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

式中: R 为同位素比值,即元素重同位素丰度与轻同位素丰度之比; R_{sample} 、 $R_{\text{reference}}$ 分别为水样和维也纳标准平均海水¹⁸O,²H 的浓度。

1.4 土壤水平衡分量的确定

为探究土地利用变化对土壤水平衡的影响,需分解

土壤水平衡各分量。研究区土壤水平衡见公式(2)。

$$P = E + T + \Delta S + D + R \quad (2)$$

式中: P 为降雨量(mm/a); ΔS 为土壤水储量变化(mm/a); D 为深层渗漏量(mm/a); E 为蒸发量(mm/a); T 为植物蒸腾量(mm/a); R 为地表径流(mm/a), 由于塬面地势平坦, 不产生地表径流, 因此, R 可忽略。

1.4.1 土壤水储量变化 农地为小麦和玉米轮作, 均为浅根植物, 土壤水长期处于动态平衡。苹果树作为深根植物, 在生长过程中根系不断生长而深入土层, 不断吸收深层土壤水而形成干层, 进而阻碍土壤水的补给。图1明确展示了这一过程。因此, 可采用空间换时间法, 将农地作为参照估算苹果树对土壤水消耗的长期影响。二者土壤储水量(SWS)的差值即为土地利用变化对土壤水储量的影响^[8]。由于关注长期变化, 此方法不需要动态测定土壤水含量。SWS表达式为:

$$SWS = \sum_{i=1}^n \theta_i \times \rho_i \times h_i \quad (3)$$

$$\rho_i = 1.49 - 0.32e^{-0.07d_i} \quad (4)$$

$$\Delta S = (SWS_A - SWS_F) / a \quad (5)$$

式中: θ_i 为土壤质量含水率(%); ρ_i 为土壤容重^[25](g/cm³); h_i 为土层厚度(cm); d_i 为土层深度(m); SWS_A , SWS_F 分别为果树和农地条件下的土壤储水量(mm); a 为果树树龄(a)。

1.4.2 深层渗漏 由于氡示踪法仅适用于不受根系影响的情况, 因此本研究基于前期土壤中氡含量的测定结果^[14], 由公式(6)计算得农地地下水潜在补给速率, 而深根果树下深层渗漏需以此为基准, 结合 ΔS 估算得到^[14, 26]。

$$D_F = \theta \frac{Z_i - Z_a}{\Delta t} \quad (6)$$

$$D_A = D_F - \Delta S \quad (7)$$

式中: D_A , D_F 分别为果园、农地条件下深层渗漏量(mm/a); θ 为整个土壤剖面的平均体积含水量(cm³/cm³); Z_i , Z_a 分别为氡峰深度和根系活跃层深度(cm), 根据土壤水含量观测数据^[9], 本研究取 2 m 作为 3 种土地利用方式下的根系活跃层深度; Δt 为降水输入年数(a)。

1.4.3 土壤蒸发 降水偏移量(PO)可定性分析土壤蒸发情况。当地降水的 PO 值一般为 0, 植物蒸腾不影响 PO, 而土壤蒸发导致 PO < 0, 因此, PO 大小可用来区分平衡和非平衡分馏下发生的水文过程, 特别是可通过 PO 定性分析土地利用类型对蒸发的影响^[23], 计算公式如下。

$$PO = \frac{\delta^2 H - m\delta^{18} O - n}{S} \quad (8)$$

$$S = \sqrt{(S_{\delta^2 H})^2 + (S_{\delta^{18} O})^2} \quad (9)$$

式中: m , n 分别为 LMWL 的斜率和截距, 即 7.67, 8.76; $\delta^2 H$, $\delta^{18} O$ 分别为不同土地利用方式下土壤水氢氧稳定同位素值(‰); S 为仪器分析误差(‰), 本研究中 $S_{\delta^2 H}$ 和 $S_{\delta^{18} O}$ 分别为 0.2, 0.03。

根据同位素质量平衡原理, 定义蒸发损失占入渗水的比率(E/I)用于估算土壤蒸发率^[8]。该模型中将分馏水(蒸发)和非分馏水(蒸腾和深层渗流)作为输出水量。由于该研究区土壤水仅来自当地降水补给, 因此, 土壤蒸发损失量可根据降水量, 并结合当地气象因子进行估算^[8], 见公式(10)~(15)。

$$\frac{E}{T} = \frac{\delta_1 - \delta_s}{\delta_E - \delta_s} \quad (10)$$

$$\delta_E = \frac{(\delta_s - \epsilon^+) / \alpha^+ - hr\delta_A - \epsilon_k}{1 - hr + \epsilon_k / 1000} \quad (11)$$

$$10^3 \ln[\alpha^+ (^2H)] = \frac{1158.8t^3}{10^9} - \frac{1620.1t^2}{10^6} + \frac{794.84t}{10^3} - 161.04 + \frac{2.9992 \times 10^9}{t^3} \quad (12)$$

$$10^3 \ln[\alpha^+ (^{18}O)] = -7.685 + 6.7123 \frac{10^3}{t} - 1.6664 \frac{10^2}{t^2} + 0.3504 \frac{10^9}{t^3} \quad (13)$$

$$\epsilon_k (^2H) = q(1 - hr)(1 - 0.9775) \quad (14)$$

$$\epsilon_k (^{18}O) = q(1 - hr)(1 - 0.9723) \quad (15)$$

式中: E 为土壤蒸发量(mm/a); I 为输入水量(mm/a); δ_1 , δ_s , δ_E , δ_A 和 δ_P 分别为输入水初始同位素、土壤水同位素和蒸发水汽的同位素组成、水蒸汽同位素组成和月降水量加权同位素平均值($\delta^2 H = -62.5\%$, $\delta^{18} O = -9.3\%$), $\delta_A = (\delta_P - \epsilon^+) / \alpha^+$ (‰), 其中, 由于土壤水接受降水补给过程中存在强烈的蒸发作用, 其同位素组成会沿着蒸发线进行非平衡分馏, 从而导致土壤水同位素组成偏离其初始来源(大气降水), 因此, 本研究通过识别当地大气降水线与土壤水蒸发线的交点确定输入水初始同位素值(表2); hr 为相对湿度(无量纲), 采用 1998—2020 年年均相对湿度(0.662 9); ϵ_k 为动力分馏系数(‰); ϵ 为总分馏系数(‰); α^+ 为液体与蒸汽之间的动力学同位素分馏系数。 ϵ^+ 为平衡分馏系数(‰), $\epsilon^+ = (\alpha^+ - 1) \times 1000$; 其中, $\epsilon = \epsilon^+ + \epsilon_k$, ϵ^+ 和 α^+ 均与温度 t 有关^[8], 此处温度取当地年平均气温(282.1 K); q 为空气动力学扩散系数, 其范围为 0.5~1 (饱和土壤条件下取 0.5, 非常干燥的土壤条件下取 1), 由于蒸发土层随着时间的推移具有交替的饱和和干燥条件, 所以本研究中 q 取 0.75。

表 2 不同土地利用方式下土壤蒸发损失参数 %

土地利用类型	农地	18 a 苹果园	26 a 苹果园
$\epsilon_k(\delta^{18}\text{O})$	0.01	0.01	0.01
$\alpha^+(\delta^{18}\text{O})$	1.01	1.01	1.01
$\epsilon^+(\delta^{18}\text{O})$	10.80	10.80	10.80
$\delta_A(\delta^{18}\text{O})$	-20.48	-20.48	-20.48
$\delta_S(\delta^{18}\text{O})$	-8.50	-9.59	-8.89
$\delta_E(\delta^{18}\text{O})$	-16.39	-19.60	-17.55
$\delta_I(\delta^{18}\text{O})$	-11.27	-12.79	-11.39

1.4.4 植物蒸腾 蒸腾过程是指土壤水分通过树干运输到树冠并主要经过叶片气孔向大气输送的过程^[13]。基于水量平衡方程,蒸腾量计算可采用残差法:

$$T=P-\Delta S-E-D \tag{16}$$

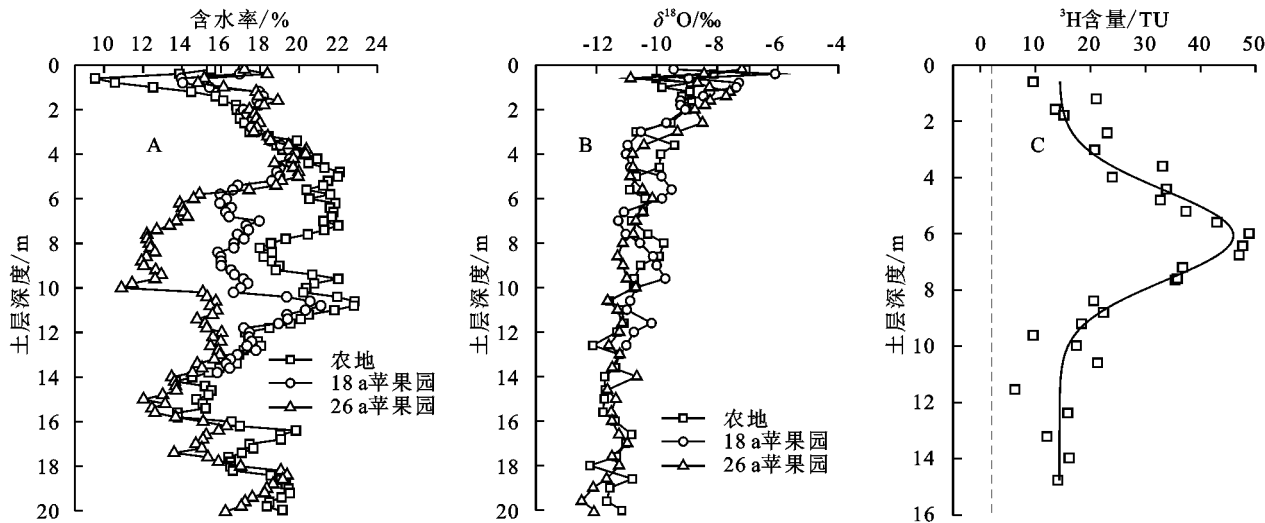
2 结果与分析

2.1 土壤水及同位素分布特征

3 种土地利用方式下土壤水含量存在显著差异(图 1A, $p<0.05$)。浅层 0—2 m 土壤水含量变化剧烈,可能是受降水、蒸发和根系吸水的共同影响导致。3 种土地利用方式下土壤水含量在 4—15 m 差异最

明显,苹果园下土壤水含量显著低于农地($p<0.05$),且随树龄增长,土壤水含量逐渐降低。26 a 苹果园下土壤水含量最低,而农地最高,说明果树种植对深层土壤水有显著的负影响^[5]。苹果园 15 m 以下土壤水含量与农地基本一致,表明苹果树的根系吸收利用 15 m 以上土壤水。

3 种土地利用方式下土壤水氧同位素剖面总体呈现先减小后稳定的变化趋势(图 1B),没有明显的峰值,说明土壤水主要以基质流的形式运移^[23]。 $\delta^{18}\text{O}$ 在 0—2 m 土层内变化较为剧烈($p<0.05$),随深度增加变幅逐渐减小,可能由于浅层土壤水受到蒸发和降水入渗影响较大导致^[8]。3 种土地利用下 0—6 m 土壤水氧同位素组成差异显著,反映了土地利用类型对土壤水氧同位素组成的影响;而 6 m 以下土壤水氧同位素基本相似,可能反映了土地利用变化前的降水补给影响。因此,6 m 可作为土地利用变化影响蒸发的最大深度。此外,由图 1C 可知,氚剖面在 6.1 m 深度处出现氚峰,为 48.8 TU(图 1C),表明 1963 年降水在 52 a 内向下移动的距离为 6.1 m。



注:A,B 分别为不同土地利用方式下土壤含水率和氧稳定同位素剖面,C 为农地下土壤氚剖面分布,其中,氚含量数据源自前期研究^[14],黑色虚线表示液体闪烁计数器测定氚的检出限。

图 1 不同土地利用方式下土壤含水率及同位素分布特征

2.2 土地利用变化对土壤水平衡的影响

为探究土壤水平衡对土地利用变化的响应,首先计算不同土地利用方式下 PO 值进行定性说明。F,A18 和 A26 条件下 PO 值分别为 -22‰,-20‰,-6‰,可见,农地 PO 值较小,说明土壤水受到的蒸发最强,而果园下土壤水受到的蒸发较小^[23]。再量化土壤水平衡各分量,结果见表 3。

较农地,18 a 和 26 a 苹果园下土壤水年均亏缺量分别为 13.6,26.4 mm,说明农地转为果园后减少了土壤水储量,且随着果树树龄增加,深层土壤水分亏缺量增多^[9]。农地下深层渗漏量为 33 mm/a,占

年均降水的 6%;18 a 和 26 a 苹果园下深层渗漏量分别为 19.4,6.6 mm/a。农地、18 a 和 26 a 苹果园下年平均蒸散量分别为 548.0,575.2,600.8 mm,占年均降水量的比例分别为 94%,99%,103%,表明农地转变为苹果园后蒸散发作用增强。进一步划分 ET,农地、18 a 和 26 a 苹果园下蒸发量分别为 203.4,185.9,168.5 mm,而蒸腾量分别为 344.7,389.3,432.3 mm,表明农地转换为苹果园后,蒸发降低但蒸腾大幅升高。随果树年龄增长,蒸腾耗水逐渐增加^[13];蒸发和蒸腾分别占蒸散量的 28%~37%和 63%~72%,说明了植物蒸腾在蒸散中的主导作用^[8,13]。

表3 不同土地利用方式下土壤水分平衡

土地利用类型	农地	18 a 苹果园	26 a 苹果园
$E/I/\%$	35.0	32.0	29.0
$\Delta S/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	—	13.6	26.4
$D/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	33.0	19.4	6.6
$ET/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	548.0	575.2	600.8
$E/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	203.4	185.9	168.5
$T/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	344.7	389.3	432.3
$ET/P/\%$	94.0	99.0	103.0

3 讨论

土壤水平衡可简单表述为输入量与输出量的权衡^[6,13]。黄土塬土壤水的主要输入项为大气降水,而输出主要为蒸散发^[10]。长武县年降水量的变化趋势不显著,因此,长武塬土壤水输入项基本不变。输出项中,温度升高可能导致土壤蒸发加剧^[2];同时,大量农地转换为苹果园也会影响蒸发和蒸腾^[9]。多种因素共同作用下,亟需明确土壤水平衡各分量的变化。但传统方法往往难以准确分解量化土壤水平衡的各分量,本研究通过联用不同示踪剂量化了土地利用变化对土壤水平衡的影响,可加深对 SPAC 系统中水文过程的理解。联用多种示踪剂量化水量平衡各分量,克服了其他研究中采用田间监测法难以直接量化深层渗漏量,从而导致水量平衡组分不闭合现象的发生^[13],也解决了当蒸散发量超过降水量时,数值模拟无法准确量化的问题^[9],相比之下,本研究构建的方法更具优势,同时,也为类似研究提供了技术支撑。

相比农地,苹果园下 PO 值较大,表明苹果园土壤水受到的蒸发作用较弱^[23]。进一步地,根据土壤水分平衡分量计算结果可知,农田转为果园后土壤水储量和深层渗漏量均减少,且随着树龄的增加水分亏缺量越显著^[8-9]。然而,ET 随着树龄的增加而增加,其中,E 减小,T 增加,说明土地利用类型转变后,深根果树需要更多水分满足植物蒸腾需求^[8],而浅层土壤水不足以满足果树的生存所需,其根系会不断向深层土壤扎根,通过根系吸水消耗更多的深层土壤水^[14,24]。运用模型模拟方法量化土壤水平衡各分量可知^[9],浅根植物转化为深根植物后,蒸散发增加 2%,深层渗漏量减少 98%,与本研究结果均说明深根植物为满足蒸散发所需,耗水量更大,由此减少了地下水潜在补给量。另外,研究结果表明,深根果树下年均蒸散发量占降水量的比例接近或已超过 100%,说明农地转变为果园后降水全部用于满足果树蒸腾耗水需求,而很少补给土壤水^[6],而且果树的冠层截留作用也减少了降水对土壤水分的补给^[12,27],这就导致土壤水分消耗后不易随时间的推

移得到补充^[28],进一步影响地下水的补给^[14,22]。此结果与其他研究一致,即退耕还林会加重土壤干旱化程度^[5,11],减少深层渗漏量^[2,8-9]。

在干旱半干旱区,地下水是农业生产和居民生活的重要水源^[29],其对河流的贡献可高达 70%^[9]。黄土塬区地下水主要来源于深厚非饱和带中土壤水的深层渗漏^[30],土壤水储量的减少会显著地影响地下水补给。结果表明,农地转变为果园后土壤水储量明显减少,且蒸散发量已超过降水量,说明深根果树的种植已阻碍了地下水补给^[21-22,29],这将阻碍非饱和带和饱和带水的连通性^[14,16]。特别地,黄土塬区果园的种植面积已达到了耕地的 70%以上^[31],这对于区域地下水资源的可持续性将是一个挑战。因此,土地利用与地下水资源的管理将尤为重要^[28,31]。根据实际情况,一方面,对苹果园采取有针对性的水分管理措施,比如,可以通过采用地膜覆盖减少地表蒸发,提高土体保水蓄水能力;也可以通过对果树进行适当修剪来减少其蒸腾耗水量。另一方面,可以根据政府政策要求,在适当的树龄转变土地利用类型,减少植物根系吸水量;或是采取轮作、间伐措施减少果园的水分消耗,从而促进深层土壤水恢复,在不影响当地居民经济收益基础上,保证地下水资源的可持续利用。

4 结论

3 种土地利用方式下土壤水含量存在显著差异,主要表现为随树龄增长,土壤水含量逐渐降低;土壤水氧同位素剖面总体呈现先减小后稳定的变化趋势, $\delta^{18}\text{O}$ 在浅层土壤变化较为剧烈,随深度增加变幅逐渐减小。根据 PO 值计算结果,农地 PO 值较小,说明农地条件下土壤水受到的蒸发最强。进一步量化土壤水平衡各分量可知,农地转化为苹果园,土壤储水量减少,深层渗漏量减少,土壤蒸发强度减弱,但增加了植物蒸腾耗水。原因主要是深根植物加剧了土壤水的消耗,造成水分亏缺,影响了对地下水的补给。本研究结果有助于理解深根植被下土壤水分循环,对水资源短缺地区的地下水可持续管理具有重要意义。

参考文献:

- [1] 裴艳武,黄来明,邵明安,等.毛乌素沙地不同地下水位埋深下土壤水补给特征及影响因素[J].农业工程学报,2021,37(12):108-116.
- [2] Li B B, Biswas A, Wang Y Q, et al. Identifying the dominant effects of climate and land use change on soil water balance in deep loessial vadose zone[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245:106637.
- [3] 张瑞,李鹏展,王力.黄土旱塬区土壤水分状况与作物生长、

- 降水的关系[J].应用生态学报,2019,30(2):359-369.
- [4] 穆兴民,徐学选,王文龙,等.黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J].土壤学报,2003,40(2):210-217.
- [5] 刘锦月,韩晓阳,朱元骏.长武塬区苹果园和农田相互转换的深层土壤水环境效应[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):130-135.
- [6] 白晓,贾小旭,邵明安,等.黄土高原北部土地利用变化对长期土壤水分平衡影响模拟[J].水科学进展,2021,32(1):109-119.
- [7] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [8] Shi P J, Huang Y N, Ji W J, et al. Impacts of deep-rooted fruit trees on recharge of deep soil water using stable and radioactive isotopes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 300:108325.
- [9] Li B B, Wang Y Q, Hill R L, et al. Effects of apple orchards converted from farmlands on soil water balance in the deep loess deposits based on HYDRUS-1D model[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 285: 106645.
- [10] 刘增进,柴红敏,李宝萍.豫西黄土丘陵区林草植被蒸散量估算研究[J].灌溉排水学报,2012,31(3):99-102,138.
- [11] 张建李,李慧敏,徐佳佳.黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J].生态学报,2011,31(23):71-81.
- [12] 陶泽,司炳成,靳静静.矮化枣树冠层改变降雨截留历时过程同位素和化学特征[J].水土保持学报,2017,31(5):189-195.
- [13] 穆艳,王延平.黄土长武塬区苹果林地水量平衡研究[J].农业现代化研究,2017,38(1):161-167.
- [14] Li H, Si B C, Li M. Rooting depth controls potential groundwater recharge on hillslopes [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564:164-174.
- [15] 李杰彪,苏锐,田霄,等.干旱-半干旱地区地下水补给方法研究综述[J].世界核地质科学,2013,30(3):168-173.
- [16] Shi P J, Huang Y N, Yang C Y, et al. Quantitative estimation of groundwater recharge in the thick loess deposits using multiple environmental tracers and methods [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126895.
- [17] Xiang W, Evaristo J, Li Z. Recharge mechanisms of deep soil water revealed by water isotopes in deep loess deposits[J]. Geoderma, 2020, 369:114321.
- [18] Li Z, Jasechko S, Si B C. Uncertainties in tritium mass balance models for groundwater recharge estimation [J]. Journal of Hydrology, 2019,571:150-158.
- [19] Li Z, Chen X, Liu W Z, et al. Determination of groundwater recharge mechanism in the deep loessial unsaturated zone by environmental tracers[J]. Science of the Total Environment, 2017,586:827-835.
- [20] Zhang Z Q, Evaristo J, Li Z, et al. Tritium analysis shows apple trees may be transpiring water several decades old[J]. Hydrological Processes, 2017,31(5): 1196-1201.
- [21] Huang T M, Pang Z H. Estimating groundwater recharge following land-use change using chloride mass balance of soil profiles: a case study at Guyuan and Xifeng in the Loess Plateau of China [J]. Hydrogeology Journal, 2011,19(1):177-186.
- [22] Huang Y N, Li B B, Li Z. Conversion of degraded farmlands to orchards decreases groundwater recharge rates and nitrate gains in the thick loess deposits[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 314: 107410.
- [23] Ji W J, Huang Y N, Shi P J, et al. Recharge mechanism of deep soil water and the response to land use change in the loess deposits[J]. Journal of hydrology, 2021, 592:125817.
- [24] Li H J, Si B C, Wu P T, et al. Water mining from the deep critical zone by apple trees growing on loess[J]. Hydrological Processes, 2019,33(2):320-327.
- [25] Lu Y W, Si B C, Li H J, et al. Elucidating controls of the variability of deep soil bulk density[J]. Geoderma, 2019,348:146-157.
- [26] Zhang Z Q, Li M, Si B C, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622:584-593.
- [27] De Medeiros G A, Arruda F B, Sakai E, et al. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2001,49(3):211-224.
- [28] 胡良军,邵明安.黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J].应用生态学报,2002,13(8):1045-1048.
- [29] Huang Y N, Chang Q R, Li Z. Land use change impacts on the amount and quality of recharge water in the loess tablelands of China[J]. Science of the Total Environment, 2018,628:443-452.
- [30] 李晨曦.基于环境同位素的洛川塬区地下水补给机制研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [31] 程立平,刘文兆,李志,等.长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响[J].水科学进展,2016,27(5):670-678.