文章编号:1000-7601(2023)03-0159-07

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.03.21

# 土地利用变化对土壤水补给来源影响研究

# 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:为探究不同植被类型深剖面土壤水补给来源,以黄土区长武塬为研究区,采集两种土地利用方式(农地、18 a 苹果园、26 a 苹果园)下 20 m 深土壤剖面,测定土壤水及其稳定性和放射性同位素含量,基于同位素方法对不同土地利用类型下不同深度土壤水来源进行溯源分析。研究表明:(1)苹果园土壤水含量明显低于农地,说明果园耗水强度更大,对深层土壤水影响更为显著。(2)农地、18 a 和 26 a 苹果园下降水偏移量分别为-22‰、-20‰和-6‰,说明降水补给土壤水后受到蒸发作用影响,且农地土壤水比果园受到的蒸发效应更强。(3)该区土壤水补给主要以活塞流为主;对于补给不同深度土壤的可能水源,6 m 以下补给水的同位素组成(δ<sup>2</sup>H=-83.8‰,δ<sup>18</sup>O=-12.1‰)较0~6 m (δ<sup>2</sup>H=-68.8‰,δ<sup>18</sup>O=-10.1‰)更为贫化,且6 m 以下补给水的氢氧稳定同位素组成与日降水量≥50 mm·d<sup>-1</sup>的降水更相似。与农地(δ<sup>2</sup>H=-70.6‰,δ<sup>18</sup>O=-10.4‰)相比,果园土壤补给水的氢氧稳定同位素组成(δ<sup>2</sup>H=-76.1‰,δ<sup>18</sup>O=-11.1‰)更贫化。综上,深层和果园土壤可能需要更高强度降水的补给,本研究对深厚非饱和带水循环过程的理解及水资源管理具有重要意义。

关键词:土地利用变化;同位素示踪;土壤水补给来源;黄土塬

中图分类号:S152.7 文献标志码:A

# Impacts of land use change on sources of soil water recharge

GAI Haoqi, SHI Peijun, LI Zhi

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

Abstract: To explore the deep soil water recharge sources under different vegetation, the Changwu Loess Tableland was chosen as the study area, and soil samples from the surface down to 20 m under two land use types (farmland, 18-year apple orchard and 26-year apple orchard) were collected and then the contents of soil water, stable ( $\delta^2$ H and  $\delta^{18}$ O) and radioactive (<sup>3</sup>H) isotopes were measured. Based on the isotopic method, the source of soil water at different depths under different land use types was traced. The results showed that (1) Soil water content under apple orchards was significantly lower than that of farmland, indicating that orchards consumed water more intensely and had a significant impact on deep soil water. (2) The precipitation offset values were -22%, -20% and -6% under farmland, 18-year and 26-year apple orchards, respectively, indicating that soil water was affected by evaporation after the rainfall recharge. Specifically, orchards had lower evaporation effects. (3) Soil water movement in this area was predominantly via piston flow. For the possible soil water source at different depths, the isotopic composition of the recharge water below 6 m ( $\delta^2 H = -83.8\%$ ,  $\delta^{18} O = -12.1\%$ ) was more depleted than that of  $0 \sim 6 \text{ m}$  ( $\delta^2 H = -68.8\%, \delta^{18} O = -10.1\%$ ), and the hydrogen and oxygen stable isotope composition of the recharge water below 6 m and the precipitation intensities  $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  were very similar. Compared with farmland ( $\delta^2 H = -70.6\%, \delta^{18}O = -10.4\%$ ), the hydrogen and oxygen stable isotope composition of orchard soil water  $(\delta^2 H = -76.1\%, \delta^{18} O = -11.1\%)$  was more depleted. These results suggested that deep and orchard soil water was recharged by higher-intensity precipitation and had important implications for the understanding of water cycle process and water resource management in deep unsaturated zones.

基金项目:国家自然科学基金项目(42071043)

收稿日期:2022-04-11 修回日期:2022-07-23

作者简介: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@nwafu.edu.cn 通信作者:李志(1978-),男,山东沂水人,教授,主要从事环境变化与水文过程研究。E-mail:lizhibox@nwafu.edu.cn

#### Keywords: land use change; isotope tracing; soil water source; Loess Plateau

土壤水作为水循环中的重要组成部分是联系 降水、植被和地下水的重要介质,对植物生长和地 下水补给具有重要作用<sup>[1-3]</sup>。黄土高原是全球黄土 分布最广和最厚的区域,深厚非饱和带储存了巨大 的"土壤水库",为农业生产和经济发展提供了重要 水源<sup>[1,4]</sup>。然而,退耕还林还草工程导致土地利用 类型发生了巨大变化,对土壤水产生了重要影 响<sup>[5-6]</sup>,例如土地利用方式转变减小了土壤储水量, 尤其是深根植被的引入会导致深层土壤水严重亏 缺,逐渐形成稳定的土壤干层,加剧了区域水资源 短缺危机<sup>[7-9]</sup>。但土地利用变化导致的土壤水亏缺 能否恢复?如果深层土壤水能够被补给,其水源特 征如何?这些问题都不清楚。因此,亟需明确土壤 水补给机制及其对土地利用变化的响应,从而促进 植被和水资源利用的可持续管理。

目前多采用动态监测方法以确定土壤水补给 来源,而此方法需长期观测才能获得足够数据<sup>[10]</sup>; 另外,深厚非饱和带土壤水运动缓慢,进一步增加 了监测难度。同位素示踪法在大气水汽来源识别、 土壤水和地下水补给机制确定方面具有显著优 势<sup>[11-12]</sup>,为土壤水运动机制研究奠定了基础。不同 种类同位素的优点和应用范围不同,如氢氧稳定同 位素可有效识别土壤水来源和估算土壤蒸发损 失<sup>[5,13]</sup>,而放射性同位素可准确量化土壤水年龄和 深层渗漏<sup>[12,14-15]</sup>。因此,联合使用氢氧稳定和放射 性同位素,更有利于研究土壤水在深厚包气带中的 运动过程。

本研究以黄土区长武塬为研究区域,联合使用 氢氧稳定同位素和氚同位素,探究土壤水补给机 制,进而明确土地利用变化对土壤水补给的影响, 以期为该区域水资源合理利用与管理提供理论 依据。

1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院长武农业生态试验站 (35°28′N,107°88′E),为典型的黄土塬区,位于黄土 高原南部,地势平坦。属于西北内陆暖温带半湿润 大陆性季风气候区,年均日照时数2226.5h,年均 气温9.1℃,年均降水量581.0 mm<sup>[11]</sup>,大多集中于 7—9月,占年降水量的55%以上。地下水位埋深84 m<sup>[16]</sup>。研究区黄土深厚,主要土壤类型是粘黑垆 土,母质为中壤质马兰黄土<sup>[17]</sup>,土壤田间持水量 22.5%,稳定湿度 15.5%,凋萎湿度 8.5%<sup>[18-19]</sup>。该 地区以旱作农业为主,多数区域无灌溉;农地多为 玉米和小麦轮作,自 20 世纪 80 年代以来大量转变 为苹果园。

### 1.2 样品采集与分析

基于样点配对法选取三块距离较近的样地,分 别为农地、18 a 和 26 a 苹果园,苹果园均由农地转 化而来。三块样地土壤和水文气象等条件相似,均 无灌溉,样地间土壤水的差异充分体现了土地利用 变化的影响。2020 年 6 月采用人工土钻法采集土 壤样品,农地和 26 a 苹果园采样深度均为 20 m、 18 a苹果园采样深度为 15 m,采样间隔为 0.2 m。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<sup>[20]</sup>;剩余部分装入 250 mL 聚乙二 烯塑料瓶中,用 Parafilm 封口膜密封防止蒸发,冷藏 避光保存用于土壤水提取。

2013—2019年,长武农业生态实验站采用雨量 计收集日降水样品,水样保存在150mL聚乙烯塑料 瓶中,并在4℃下冷藏供进一步分析<sup>[11]</sup>。

#### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤水含量 采用烘干法测定。采样当天, 先称量装有原状土的铝盒,再将铝盒放入烘箱,
105℃下烘8h至恒重,再次称量,记录铝盒及样品的总重量,计算土壤含水量(式1):

$$SM_i = \frac{WW_i - DW_i}{DW_i - AW_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中, $SM_i$ 为第*i* 层土壤水含量( $g \cdot g^{-1}$ );  $WW_i \setminus DW_i$ 分别为第*i* 层土壤样品湿重和干重(g);  $AW_i$ 为铝盒 质量(g)。

1.3.2 同位素含量 运用真空冷凝抽提系统(LI-2100,ABB,USA)抽提土壤水,将抽提的水分用 0.22  $\mu$ m 滤头过滤,去除杂质后转移到 1.5 mL 玻璃瓶低 温保存。通过液态水同位素分析仪(LGR GLA431-TLWIA,ABB,USA)测定  $\delta^2$  H、 $\delta^{18}$  O,精度分别为 ±0.2‰和±0.03‰,测定结果为维也纳标准平均海水 (VSMOW)对应的千分差值式(2)。此后,按水样: 闪烁液=8:12 的比例配置样本,使用液体闪烁计 数器(Quantulus 1220,Perkin Elmer,Singapore)测定 土壤样品中氚含量,检出限为 2.0 TU<sup>[21]</sup>。

$$\delta = \frac{R_{sample} - R_{reference}}{R_{reference}} \times 1000$$
(2)

式中, $\delta$ 为同位素比值,即元素重同位素丰度与轻同位素丰度之比; $R_{sample}$ 、 $R_{reference}$ 分别为水样和维也纳标

准平均海水<sup>18</sup>0、<sup>2</sup>H的浓度。

### 1.4 土壤蒸发效应分析

为定性分析不同土地利用方式下蒸发效应强弱, 引入降水偏移量(PO),该指标能够区分平衡分馏(如 蒸汽的凝结)和非平衡分馏下的水文过程(如蒸发)。 降水偏移量一般为0<sup>[5]</sup>,植物蒸腾不影响 PO,而地表 蒸发会导致 PO<0,因此,可通过计算 PO 揭示蒸发效 应。PO 值越接近零,表明蒸发强度越弱<sup>[5]</sup>。

$$PO = \frac{\delta^2 H - m\delta^{18}O - n}{S}$$
(3)

$$S = \sqrt{(S_{\delta^2 H})^2 + (S_{\delta^{18} O})^2}$$
(4)

式中,m、n分别为大气降水线的斜率和截距,分别 取7.67和8.76;S为仪器分析误差(‰),在本研究 中分别为0.2和0.03。

### 1.5 土壤水溯源分析

为探究土壤水补给机制及对土地利用变化的 响应,需明确土壤水补给来源。已有研究表明,由 于地下水埋深大,土壤水仅可能来自当地降 水<sup>[6,22-23]</sup>。因此,将降水类型划分为雨季(7—9月) 和旱季(10月—次年6月),同时根据日降雨量(P) 划分降水等级为  $P \ge 10 \text{ mm} \cdot d^{-1}$ ,  $P \ge 20 \text{ mm} \cdot d^{-1}$ ,  $P \ge 30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $P \ge 40 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $P \ge 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}_{\circ}$ 降水补给土壤水过程中存在强烈蒸发,其同位素会 沿蒸发线进行非平衡分馏,进而导致土壤水同位素 组成偏离其初始来源(即大气降水)<sup>[24]</sup>。基于此, 本研究通过识别当地大气降水线 (Local meteoric water line, LMWL)与土壤水蒸发线(Evaporation line of soil water isotopes, EL-SW)的交点确定初始水 源。需要注意的是,以往研究多通过最小二乘法拟 合得到土壤水蒸发线:但最新研究表明,土壤水同位 素分馏受季节变化影响较大,上述方法的拟合结果可 能存在偏差,需要基于 Craig-Gordon 模型估算蒸发线 斜率[13]。因此,本研究采用该方法进行估算:

$$Slope_{EL} = \frac{del_H}{del_0} \tag{5}$$

$$del_{H} = \frac{hr \times (\delta_{P} - \delta_{A}) - (1 + \delta_{P} \times 10^{-3}) \times (\varepsilon_{k} + \varepsilon/\alpha^{+})}{1 - hr + \varepsilon_{k} \times 10^{-3}}$$

(6)

式中,hr为相对湿度,采用 1957—2018 年的相对平 均湿度; $\delta_p \pi \delta_A \beta$ 别为月降水量加权同位素平均值 ( $\delta^2 H = -62.5\%, \delta^{18} O = -9.3\%$ )和水蒸汽同位素组 成(%o); $\delta_A = (\delta_p - \varepsilon^+)/\alpha^+; \varepsilon_k$ 为动力分馏系数 (%o);  $\varepsilon$ 为总分馏系数(%o); $\alpha^+$ 为液体与蒸汽之间 的动力学同位素分馏系数。 $\varepsilon^+$ 为平衡分馏系数 (‰),  $\varepsilon^+ = (\alpha^+ - 1) \times 1000$ ; 其中,  $\varepsilon = \varepsilon^+ + \varepsilon_k, \varepsilon^+$  和  $\alpha^+$  均与温度有关<sup>[13]</sup>, 此处温度取当地年平均气温。

$$10^{3} \ln \left[\alpha^{+} (^{2}H)\right] = \frac{1158.8 T^{3}}{10^{9}} - \frac{1620.1 T^{2}}{10^{6}} + 4.84T$$

$$4.84T = 161.04 + 2.9992 \times 10^{9}$$
(7)

$$\frac{794.84T}{10^3} - 161.04 + \frac{2.9992 \times 10^9}{T^3}$$
(7)

$$10^{3} \ln \left[ \alpha^{+} \left( {}^{18} \mathrm{O} \right) \right] = -7.685 + 6.7123 \frac{10^{3}}{T} -$$

$$1.6664 \, \frac{10^6}{T^2} + 0.3504 \, \frac{10^9}{T^3} \tag{8}$$

$$\varepsilon_k(^2 H) = q(1 - hr) (1 - 0.9755)$$
 (9)

$$q_k(^{18}\text{O}) = q(1 - hr) (1 - 0.9723)$$
 (10)

式中,q为空气动力学扩散系数,其范围为0.5~1.0 (饱和土壤条件下取0.5,非常干燥的土壤条件下取 1.0),由于蒸发土层随时间推移具有交替的饱和干燥 条件,本研究取0.75。最终计算得土壤水蒸发线斜率 范围为2.80~4.00(n=22645),平均值为3.25±0.24<sup>[11]</sup>。

### 2 结果与分析

### 2.1 土壤水含量和同位素组成特征

果园土壤水含量明显低于农地(图 1a, P< 0.05),且随树龄增长,土壤水含量逐渐降低,说明果 树耗水强度较农地大,对深层土壤水影响显著<sup>[19]</sup>。 浅层(0~4 m)土壤水含量变化剧烈,但14 m以下土 层间差异较小,表明深根果树造成土壤水亏缺的土 层主要为4~14 m,说明苹果树根系吸水深度可达 14 m。由图 1b 可知,土壤水 δ<sup>18</sup>O 在 0~2 m 土层变 化剧烈(P<0.05),随深度增加同位素组成趋于稳 定,且农地和果园下浅层土壤水氧同位素组成均比 深层富集,说明浅层土壤水氧同位素易受蒸发和降 水入渗影响,而深层土壤水氧同位素可能仅受极端 降水的影响。两种土地利用方式下浅层(0~6 m)土 壤水氧同位素组成差异显著,反映了土地利用方式 对土壤水氧同位素组成的影响<sup>[25]</sup>,而6m以下土壤 水同位素组成相比浅层变化较小,反映了土地利用 变化前降水补给的影响。由氚含量剖面分布可知, 峰值出现在 6.6 m 处,为 46.6 TU(图 1c),表明 1963 年降水在 54 a 内向下移动的距离为 6.6 m。总而言 之,说明6m可作为分析土地利用变化影响的临界 深度<sup>[13]</sup>。果园和农地土壤水同位素剖面没有出现 明显的峰值,且氚剖面呈抛物线状,说明土壤水主 要以基质流的形式运移。

### 2.2 蒸发效应

由图 2 可知, 土壤水氢氧稳定同位素仅有少数落在 LMWL, 而大多分布在其右下侧, 表明土壤水同位



图 1 不同土地利用方式下土壤水(a)、氧稳定同位素(b)和氚的含量(c)剖面,氚含量(数据源自前期研究<sup>[21]</sup>) Fig.1 Soil profiles for water content(a),δ<sup>18</sup>O(b) and tritium(c) under different land use types

(The tritium content data comes from previous research<sup>[21]</sup>)



△ 26 a果园 26-year-old apple orchard

注:当地大气降水线为 $\delta^2$ H=(7.67±0.11) $\delta^{18}$ O+(8.76±1.0),n=228, $R^2$ =0.96,降水同位素数据来源于前期研究<sup>[11]</sup>。

Note: The LMWL was  $\delta^2 H = (7.67 \pm 0.11) \delta^{18} O + (8.76 \pm 1.0)$ , n = 228,  $R^2 = 0.96$ , the precipitation isotopic data comes from previous research<sup>[11]</sup>.

### 图 2 不同土地利用方式下降水和土壤水的 双稳定同位素组成图

Fig.2 The dual stable isotope compositions of precipitation and soil water under different land use types.

素组成可能受蒸发分馏作用影响<sup>[7]</sup>。蒸发程度可 通过土壤水氢氧稳定同位素的斜率和 PO 值大小表 征<sup>[5]</sup>。农地、18 a 和 26 a 苹果园下土壤水氢氧稳定 同位素的线斜率分别为 5.5、6.5和 6.7(表 1),说明 农地受到的蒸发效应最强,18 a苹果园次之,26 a 苹 果园最弱。进一步计算得到农地、18 a 和 26 a 苹果 园下 PO 值分别为-22‰、-20‰和-6‰,说明降水 补给土壤水后稳定同位素发生了非平衡分馏,即受 表 1 两种土地利用方式下土壤水趋势线

Table 1 The trend line of soil water under two land use types

土地利用方式	土壤水趋势线
Land use type	Trend line of soil water
农地 Farmland	$\delta^2 H = (5.50 \pm 0.55) \delta^{18} O + (-15.70 \pm 5.20)$ (R <sup>2</sup> = 0.86, n = 18)
18 a 苹果园 18-year-old apple orchard	$\delta^{2} \mathrm{H} = (6.46 \pm 0.35) \delta^{18} \mathrm{O} + (-6.72 \pm 3.30) \\ (R^{2} = 0.96, n = 18)$
26 a 苹果园 26-year-old apple orchard	$\delta^{2} \mathrm{H} = (6.70 \pm 0.58) \delta^{18} \mathrm{O} + (-2.29 \pm 5.34)$ $(R^{2} = 0.89, n = 18)$

到蒸发作用影响;相比果园,农地 PO 值较小,说明 其土壤水受到的蒸发效应更强,而果园下土壤水受 蒸发影响较小。土壤水氢氧稳定同位素的斜率和 PO 值对土地利用方式蒸发效应的分析结果一致。

#### 2.3 土壤水补给来源

该区土壤水主要来源于降水,且双同位素组成 比较表明补给过程经历了强烈的非平衡分馏。为 进一步探究土壤水补给来源,根据土壤水含量和氢 氧稳定同位素组成分布特征,将土层深度划分为0~ 6 m、6~14 m和>14 m;利用公式(5)~(10)估算初 始水源的同位素组成(图 3a、b)。6 m以下土壤水 补给来源( $\delta^2$ H=-83.8‰, $\delta^{18}$ O=-12.1‰)较0~6 m 土壤水源( $\delta^2$ H=-68.8‰, $\delta^{18}$ O=-10.1‰)更为贫 化,说明深层土壤水更易接受强降水补给;整体而 言,三个土层水源同位素组成都更接近雨季降水。 据此划分降水等级,0~6 m 土壤水源接近  $P \ge 20$ mm·d<sup>-1</sup>和 $\ge 30$  mm·d<sup>-1</sup>;然而,6 m 以下土壤水同 位素组成与  $P \ge 50$  mm·d<sup>-1</sup>降水更相似,说明深层 土壤水需要更高强度的降水补给。进一步分析土地





利用方式对土壤水补给来源的影响(图 3c、d)可知, 农地和苹果园下土壤水源同位素组成均与雨季降 水同位素相似,说明两种土地利用方式下,土壤水 均主要来源于雨季降水补给。具体而言,果园氢氧 稳定同位素组成( $\delta^2$ H=-76.1‰, $\delta^{18}$ O =-11.1‰)比 农地 ( $\delta^2$ H=-70.6‰, $\delta^{18}$ O =-10.4‰)更为贫化,表 明果树作为深根植物,需要  $P \ge 50 \text{ mm} \cdot d^{-1}$ 的极端 降水补给。

### 3 讨 论

由土壤水氧同位素和氚含量剖面分布可知,深 厚黄土层中土壤水主要以活塞流形式运移。深根 植被下土壤水含量显著低于浅根植被,表明土地利 用变化显著降低了土壤水储量,甚至终止了深层土 壤水补给,可能是由于强烈的根系吸水作用造成。 与农地相比,苹果园土壤水线斜率、降水偏移量均 较大,表明苹果园土壤水受到的蒸发作用较弱<sup>[5]</sup>, 这可能因为深根植被下叶面积指数较高,导致地表 反照率较低。具体而言,浅根植被叶面积指数一般 为0~2,而深根植被通常大于 2<sup>[5]</sup>。

通过进一步估算水源可知,浅层(0~6 m)土壤 水主要接受降雨量≥20 mm·d<sup>-1</sup>和≥30 mm·d<sup>-1</sup>的 降水补给,而深层土壤水主要来自于雨季高强度降 水补给,因为雨季月降水几乎等于甚至高于蒸散发量,这就需要极端降水补给深层土壤水。此外,降水入渗深度与降雨量和降水强度有关,降水量越大则入渗深度越深<sup>[11]</sup>。不同土地利用方式下对土壤水源进行计算结果表明,果园土壤水可能仅受到极端降水的补给,而农地土壤水主要来源于雨季降水,这可能由于降水从树冠落到地面时,受到果树冠层截留作用影响<sup>[26]</sup>。有研究发现<sup>[27]</sup>,小雨的冠层截留率是大雨的2.1倍,说明降雨量越大,林木冠层的截留量越小,而且只有当冠层截留达到上限后,降雨才会以穿透形式降落下来,从而补给土壤<sup>[28]</sup>。因此,对于林地而言,土壤水可能在高强度降水时才能得到补给。

在干旱半干旱地区,地下水是农业生产和居民 生活的重要水源<sup>[1]</sup>,其对河流的贡献可高达 70%<sup>[8]</sup>。黄土塬区地下水主要来源于深厚非饱和带 土壤水的深层渗漏,土地利用类型转变后,果树由 于需要更多水分满足蒸腾需求,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<sup>[29]</sup>,但由于农地转变为果园后降水几乎全部用来 满足果树蒸腾耗水,很少补给到土壤水<sup>[30]</sup>,而且果 树的冠层截留作用也减少了降水对土壤水的补 给<sup>[27-28]</sup>,这就导致深层土壤水消耗后不易随时间的 推移得到补充<sup>[7]</sup>,进一步降低了黄土塬区的地下水 潜在补给量<sup>[9,12,29]</sup>。因此,为保证该地区植被恢复 的可持续性,需要制定适当的措施来平衡深层土壤 水供应与生态耗水之间的关系,例如可以定期修剪 果树,减小其蒸腾耗水量,或是在不影响当地居民 经济收益的情况下,采取间作、轮作的方式减少水 分消耗,从而促进深层土壤水的恢复。

### 4 结 论

本研究以黄土高原长武塬作为研究对象,联合 使用氢氧稳定性和氚同位素探讨土壤水补给来源。 结果表明,该地区土壤水运动的主导方式为活塞 流。与农地相比,苹果园的土壤水线斜率和降水偏 移量均较大,说明土地利用方式转变后,土壤蒸发 作用减弱。通过进一步识别水源得出,深层土壤水 主要接受 50 mm · d<sup>-1</sup>的降水补给,其原因是小降水 只能补给浅层土壤水和供植物吸收利用,而难以入 渗到长期处于亏缺状态的深层土壤;果园接受补给 的土壤水同位素组成更为贫化,说明果树可能由于 冠层结构和深层根系的影响,需要极端降水才能进 行补给。因此,深根植被的种植会阻碍降水对深层 土壤水的补给。本研究对水资源有限、土地利用变 化剧烈的非饱和带地区地下水可持续管理具有重 要意义。

#### 参考文献:

[1] 程立平.黄土塬区深剖面土壤水分特征及其补给地下水过程研究
 [D].西安:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013.

CHENG L P. The characteristics of soil water in deep loess profile and the process of groundwater recharge on the Loess Tableland[D]. Xi'an: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Water and Soil Conservation and Ecological Environment Research Center of the Ministry of Education), 2013.

- [2] 唐洪根,周廷璋,辛沛. 淤积刺激下滨海湿地植物根系吸水及土壤水 分变化[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 87-92.
   TANG H G, ZHOU T Z, XIN P. Stimulation of sediment deposition to root water uptake and soil water change in wetland near sea[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 87-92.
- [3] 苏鹏燕,张明军,王圣杰,等.基于氢氧稳定同位素的黄河兰州段河 岸植物水分来源[J]. 应用生态学报,2020,31(6):1835-1843.
   SUPY, ZHANG MJ, WANG SJ, et al. Water sources of riparian plants based on stable hydrogen and oxygen isotopes in Lanzhou section of the Yellow River, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1835-1843.
- [4] 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.
  CHENG L P, LIU W Z, LI Z. Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 1975-1983.
- [5] 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.

- [6] 姬王佳,黄亚楠,李冰冰,等. 陕北黄土区深剖面不同土地利用方式下 土壤水氢氧稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4143-4149.
  JI W J, HUANG Y N, LI B B, et al. Oxygen and hydrogen stable isotope compositions of soil water in deep loess profile under different land use types of northern Shaanxi, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4143-4149.
- [7] 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.
  HU L J, SHAO M A. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] SCANLON B R, TYLER S W, WIERENGA P J. Hydrologic issues in arid, unsaturated systems and implications for contaminant transport[J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(4): 461-490.
- [11] 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.
- [12] 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, Part A: 126895.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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, 2020, 245: 106637.
- [16] 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.
  ZHANG R, LI P Z, WANG L. Relationship between soil moisture dynamics, crop growth and precipitation in rain-fed area of the Loess Tableland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 359-369.
- [17] 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.
  MU Y, WANG Y P. Study on soil water balance of apple orchards in the Loess Tableland of China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2017, 38(1): 161-167.
- [18] 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 the Chinese Society of Agricultural

Engineering, 2012, 28(15): 72-79.

- [19] 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. LIU J Y, HAN X Y, ZHU Y J. Deep soil water environmental effects after the mutual conversion between apple orchard and farmland in Changwu tableland region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 130-135.
- [20] 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.
  MU X M, XU X X, WANG W L, et al. Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 210-217.
- [21] 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.
- [22] 兰志龙,潘小莲,赵英,等. 黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土 壤含水量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 847-855. LAN Z L, PAN X L, ZHAO Y, et al. Effects of land use types on deep soil water content in the loess hilly area of the North Shaanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 847-855.

[23] 程立平,刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 651-658. CHENG L P, LIU W Z. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 651-658.

[24] BOWEN G J, PUTMAN A, BROOKS J R, et al. Inferring the source of evaporated waters using stable H and O isotopes[J]. Oecologia, 2018,

#### (上接第141页)

[17] 中国农业百科全书总编辑委员会水利卷编辑委员会.中国农业百科全书:水利卷(上)[M].北京:农业出版社,1986;432-433.
Editorial Committee of Water Resources Volume of the General Editorial Committee of China Agricultural Encyclopedia. Encyclopedia of Chinese agriculture: Water conservancy (volume 1)[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986;432-433.

- [18] 庄旭东.暗管排水条件下农田土壤水盐分布田间试验及 SWAP 模型模拟[D].扬州:扬州大学,2021.
   ZHUANG X D. Field experiment and SWAP model simulation of soil water and salt distribution under underground drainage [D].
   Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [19] 王正兴,刘闯, ALFREDO H. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
  WANG Z X, LIU C, ALFREDO H. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 979-987.
- [20] 徐英,葛洲,王娟,等. 基于指示 Kriging 法的土壤盐渍化与地下水 埋深关系研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 123-130.
  XU Y, GE Z, WANG J, et al. Study on relationship between soil salinization and groundwater table depth based on indicator Kriging [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 123-130.
- [21] 马贵仁,屈忠义,王丽萍,等. 基于 ArcGIS 空间插值的河套灌区土 壤水盐运移规律与地下水动态研究[J].水土保持学报,2021,35
   (4):208-216.

MA G R, QU Z Y, WANG L P, et al. Research on soil water and salt movement and groundwater dynamics in Hetao irrigation district based on ArcGIS spatial interpolation [J]. Journal of Soil and Water

187(4): 1025-1039.

- [25] 靳宇蓉,鲁克新,李鹏,等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 792-801.
   JIN Y R, LU K X, LI P, et al. Research on soil water movement based on stable isotopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 792-801.
- [26] 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.
- [27] 马生军,吴文勇,畅建霞,等. 半湿润区苹果树冠层降雨截留模型应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 116-119.
  MA S J, WU W Y, CHANG J X, et al. A canopy interception model and its application for apple tree in semi-humid areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 116-119.
- [28] 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.
   TAO Z, SI B C, JIN J J. Canopy interception modified intra-rainfall isotopic and hydrochemical characteristics of dwarfed jujube tree [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 189-195.
- [29] LI H, SI B C, LI M. Rooting depth controls potential groundwater recharge on hillslopes[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 164-174.
- [30] 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.
  BAI X, JIA X X, SHAO M A, et al. Simulating long-term soil water balance in response to land use change in the Northern China's Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 109-119.

Conservation, 2021, 35(4): 208-216.

- [22] 常春龙.河套灌区农田生态地下水埋深及不同种植模式作物最适 灌水量研究[D]. 呼和浩特;内蒙古农业大学,2015.
   CHANG C L. Study on groundwater depth and optimal irrigation amount of crops in different planting modes in Hetao irrigation area
   [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015.
- [23] 童文杰,陈中督,陈阜,等. 河套灌区玉米耐盐性分析及生态适宜 区划分[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 131-137.
  TONG W J, CHEN Z D, CHEN F, et al. Analysis of maize salt tolerance in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 131-137.
- [24] 童文杰,刘倩,陈阜,等. 河套灌区小麦耐盐性及其生态适宜区[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 909-913.
   TONG W J, LIU Q, CHEN F, et al. Salt tolerance of wheat in Hetao irrigation district and its ecological adaptable region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(5): 909-913.
- [25] 孔繁瑞,屈忠义,刘雅君,等.不同地下水埋深对土壤水、盐及作物 生长影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2009,(5):44-48. KONG F R, QU Z Y, LIU Y J, et al. Experimental study on effects of different groundwater depths on soil water,salt and crop growth[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009,(5):44-48.
- [26] 王伦平,陈亚新,曾国芳.等.内蒙古河套灌区灌溉排水与盐碱化防治[M].北京:水利电力出版社,1993:315.
   WANG L P, CHENY X, ZENG G F, et al. Irrigation drainage and salinization control in Neimenggu Hetao irrigation area[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press,1993:315.