

乔江波, 袁遥遥, 贾小旭, 朱元骏, 邵明安. 黄土塬区黑垆土果园转化为农田的适宜年限评估——基于生态与经济视角[J]. 土壤学报, 2026,

QIAO Jiangbo, YUAN Yaoyao, JIA Xiaoxu, ZHU Yuanjun, SHAO Ming'an. Evaluation of the Optimal Conversion Duration for Converting Orchards to Cropland in Loess Tableland Regions: From an Ecological and Economic Perspective[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

黄土塬区黑垆土果园转化为农田的适宜年限评估——基于生态与经济视角 *

乔江波¹, 袁遥遥¹, 贾小旭^{2,3}, 朱元骏¹, 邵明安¹

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 长期果园种植会造成土壤干燥化, 形成土壤干层。果园转化为农田能够有效缓解土壤干燥化, 但转换所需的适宜年限尚不明确。本研究从生态和经济双重视角, 结合果园转化为农田后土壤储水量、土壤干层、作物水分利用效率、土壤水分时间稳定性及农户收入指标, 评估果园(AO)转化为农田的适宜年限。试验选取果园和转换年限为3、5和7年的苹果园转换的农田(CCA3、CCA5和CCA7), 并以纯农田(CL)作为对照。采用土钻法连续2年监测了不同样地0~10 m深土层的土壤含水量。结果表明: 深层土壤储水量排序为CL>CCA7>CCA3>CCA5>AO, 且CCA3、CCA5和CCA7之间无显著差异($P>0.05$)。CCA3、CCA5和CCA7的土壤干层均已消失, 三者的作物水分利用效率也无显著差异。随着转换年限的增加, 土壤水分时间稳定性增强, 但农户收入显著降低。因此, 综合生态与经济效益, 果园向农田转换的适宜年限为3年左右。本结果为黄土塬区合理的土地利用管理提供了重要参考。

关键词: 黄土塬区; 土壤干层; 土壤水分补给; 土壤水分时间稳定性; 果园还耕

中图分类号: X833

文献标志码: A

Evaluation of the Optimal Conversion Duration for Converting Orchards to Cropland in Loess Tableland Regions: From an Ecological and Economic Perspective

QIAO Jiangbo¹, YUAN Yaoyao¹, JIA Xiaoxu^{2,3}, ZHU Yuanjun¹, SHAO Ming'an¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] Apples are widely cultivated on the Loess Plateau due to their remarkable economic and

* 国家自然科学基金项目(42307412, 42377316, U24A20629)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42307412, 42377316, U24A20629)

作者简介: 乔江波(1991—), 男, 山西晋城人, 博士, 副研究员, 主要从事旱区土壤水文研究。E-mail: jiangboqiao815@163.com

收稿日期: 2026-01-21; 收到修改稿日期: 2026-07-28; 网络首发日期(www.cnki.net): 2026-07-28

ecological benefits. However, long-term orchard cultivation tends to induce soil desiccation and consequently form a dried soil layer. Studies have demonstrated that converting orchards back to cropland can effectively alleviate soil desiccation, whereas the optimal time required for this conversion remains unclear. 【Method】 Therefore, this study evaluated the suitable duration for apple orchard to croplands from an ecological and economic perspective, which included soil water storage (SWS), dried soil layers (DSL), crop water use efficiency (CWUE), soil water temporal stability and farmers' income. The experiment selected orchards and croplands converted from apple orchards with conversion ages of 3, 5 and 7 years (Cropland Converted by Apple Orchard, CCA; 3, 5 and 7) as research objects. In addition, pure cropland served as the control group (CL). Soil water content (SWC) in the 0-10 m soil layer of different sample plots was monitored continuously for two years using the soil auger method. 【Result】 The results showed the deep SWS followed the order: CL > CCA7 > CCA3 > CCA5 > AO, and there were no significant differences for CCA3, CCA5, and CCA7 ($P>0.05$). The DSL of CCA3, CCA5, and CCA7 all disappeared. There were also no significant differences in CWUE for them. As the conversion years increased, the temporal stability of SWC increased. In addition, as the duration increased, the farmers' income significantly decreased. 【Conclusion】 Therefore, the suitable conversion period for transforming orchards into croplands is around 3 years from an ecological and economic perspective. The findings of this study provide an important reference for the rational land use management on the Loess Plateau.

Key words: Loess tableland area; Dried soil layer; Soil water replenishment; Soil water temporal stability; Orchard returned to cropland

目前全球正面临严重的土地退化问题^[1-3], 植被恢复被认为是控制退化地区土壤侵蚀、改善土壤质量和提高地区生计水平的有效措施^[4-6]。然而, 在旱区, 大量人工林的深根系会导致深层土壤干燥化, 形成土壤干层^[7-9]。为缓解旱区人工林导致的深层土壤干燥化, 研究表明将深根植被转换为浅根植被可通过减少蒸腾作用增加深层土壤储水量, 进而缓解深层土壤干燥化^[10-13]。如, Wang 等^[14]基于环境政策综合气候 (EPIC) 模型发现, 在干旱区苜蓿种植后改种番茄、大豆等浅根作物, 可有效缓解苜蓿种植导致的深层土壤干旱。牛虎虎等^[12]和 Zhang 等^[10]也发现, 黄土高原苹果园转换为农田后, 土壤含水量迅速恢复, 在 2 年内均可恢复至 7 m 左右深度。

如前所述, 深根系植被向浅根系植被转换可有效缓解深层土壤干燥化, 但转换所需的适宜年限仍不明确。例如, Li 等^[11]研究表明, 黄土高原地区先前成熟果园导致的深层土壤水分亏缺, 需通过种植一年生作物 48~69 年才能缓解; Huang 和 Gallichand^[15]采用热湿耦合 (SHAW) 模型模拟得出, 10 m 土层的恢复年限为 6.5~19.5 年 (平均 13.7 年), 而 3 m 土层的恢复年限为 4.4~8.4 年 (平均 7.3 年)。然而, 以往对转换年限的计算均基于模型模拟, 无法真实反映田间实际情况, 导致结果存在一定不确定性。此外, 当深根植被为经济果树 (如苹果树、梨树) 时, 长期转换为浅根植被会显著降低农户家庭收入, 对当地农户而言不具可行性。因此, 综合考虑生态和经济因素, 评估经济林类深根植被向浅根植被转换的适宜年限至关重要。

黄土高原是我国典型的干旱半干旱地区, 由于生态环境脆弱、土壤侵蚀严重, 政府自 20 世纪 90 年代起实施了退耕还林还草政策^[16]。苹果因兼具经济和生态效益被广泛种植, 其种植面积占全球总种植面积的 22%^[17]。然而, 研究报道苹果种植已造成严重的深层土壤干燥化^[18-19]。近年来, 果园老化问题突出, 大量老化果园被砍伐后转换为农田, 这为研究果园转换为农田的适宜年限提供了良好平台。因此, 本研究以黄土塬区果园和果园转换不同年限农田为研究对象, 从生态 (土壤储水量 (Soil water storage, SWS)、土壤干层 (Dried soil layer, DSL)、作物水分利用效率 (Crop water use efficiency, CWUE) 和土壤水分时间稳定性) 和经济 (农户收入) 双重视角, 评估转化的适宜年限。研究结果对于黄土高原土地利用管理具

有重要意义。

1 材料与方法

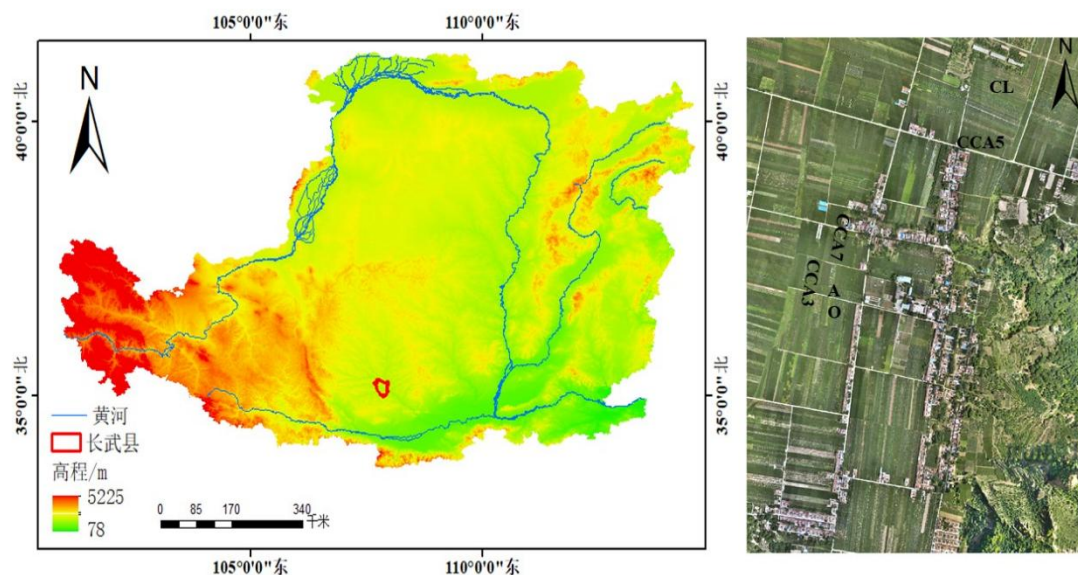
1.1 研究区概况

研究区位于陕西省长武县王东沟流域 ($35^{\circ}14'N$, $107^{\circ}41'E$)，地处黄土高原南部台塬区 (图 1)，为典型的黄土高原沟壑地貌单元，流域总面积约 8.3 km^2 ，其中台塬地占 35%，沟壑地占 65%。台塬平均海拔约 1 226 m，沟口最低海拔 946 m。研究区属暖温带半湿润大陆性季风气候，多年平均气温 9.1°C ，年蒸发量 940 mm，多年平均降水量 584 mm，其中 52.8% 的降水集中在 7 至 9 月，导致降水年内分布极不均衡。流域台塬区的优势土壤类型为黑垆土，母质为深厚的中壤质马兰黄土，土壤质地均匀、疏松、透水性良好，具有较强的水分调蓄能力，可发挥优良的“土壤水库”功能，为区域植被生长提供了有利条件。区域农业种植结构以冬小麦、春玉米和苹果为主。

1.2 样品采集与分析

采用空间代时间的方法，选取 3 块由同龄成熟苹果园转换的农田作为研究样地，转换年限分别为 3 年 (CCA3)、5 年 (CCA5) 和 7 年 (CCA7)。选取与转换农田相邻、且与转换前苹果园同龄的成熟苹果园 (AO) 作为参考，且以纯农田 (CL) 作为对照 (图 1)。对于每个样地，选择 3 个地块作为重复样本。不同样地均位于平坦的塬面，且相距不超过 300 m。

2024 年 4 月至 2025 年 10 月采用直径 6 cm 的土钻采集不同样地 0~10 m 土层的土壤样品，采样间隔为：0~1 m 土层每 10 cm 采集 1 个样品，1~5 m 土层每 20 cm 采集 1 个样品，5~10 m 每 40 cm 一个土样，平均每月测一次，累计测定 18 次，采用烘干法测定土壤质量含水量。



注：AO：苹果园；CCA3、CCA5、CCA7：苹果园转换 3 年、5 年、7 年的农田；CL：纯农田。Note: AO: Apple orchard; CCA3, CCA5 and CCA7: Croplands converted from apple orchard for 3, 5 and 7 years; CL: Cropland.

图 1 研究区在黄土高原的位置及土壤采样点

Fig. 1 Location of the study area on the Loess Plateau and soil sampling sites

1.3 数据计算处理

土壤储水量指土壤在自然条件下能够保持的水量，具体计算公式如下^[20]：

$$SWS = \theta_v / 100 \times h \times 10 \quad (1)$$

式中，SWS 为土壤储水量（mm）； θ_v 为土壤体积含水量（%）； h 为土层厚度（cm）；0~10 m 土层的容重数据引自文献^[21]。

土壤干层的评价指标包括干层厚度（Dried soil layer thickness, DSLT）和干层内平均土壤含水量（Average soil water content within dried soil layer, DSL-SWC）^[22-23]。干层厚度指垂直剖面中所有土壤含水量低于田间稳定持水量的土层总范围，计算公式如下：

$$DSLT = \Delta h \times \sum_{i=1}^n S(\theta_i - \theta_{SFC}) \quad (2)$$

$$S(\theta_i - \theta_{SFC}) = \begin{cases} 0, & \theta_i - \theta_{SFC} > 0 \\ 1, & \theta_i - \theta_{SFC} < 0 \end{cases}, (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中， Δh 为测定土层厚度（cm）； S 为土壤水分亏缺指示函数（判别函数）； θ_i 为第 i 层土壤含水量（ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ）； θ_{SFC} 为田间稳定持水量（ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ），数值上等于田间持水量（FC）的 60%。其中，FC 数据基于文献中的预测公式获取^[24]，具体如下：

$$FC = 0.2022 + 0.004 \times \text{Clay} + 0.0304 \times \text{SOM} - 0.0019 \times \text{Sand} \quad (4)$$

式中，黏粒含量（Clay）、砂粒含量（Sand）和土壤有机质含量（SOM）的单位均为%。

干层内平均土壤含水量指干层厚度范围内土壤含水量的平均值，计算公式如下：

$$SWC_D = \frac{\sum_{i=1}^m SWC_{Di}}{m} \quad (5)$$

式中， m 为土层分层数。

产量水平的作物水分利用效率指单位作物耗水量产生的经济产量，计算公式如下：

$$CWUE = Y/ET \quad (6)$$

式中， Y 为作物净产量或经济产量（ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）； ET 为作物蒸散量，采用农田水量平衡方程估算^[25]：

$$ET = P + I + W - R - D - \Delta S \quad (7)$$

式中， P 为生育期降水量（mm）； I 为生育期灌溉量（mm）； W 为地下水补给量（mm）； R 为地表径流量（mm）； D 为深层渗漏量（mm）； ΔS 为土壤储水量变化量（mm）。由于试验区地下水位低于 50 m，且无灌溉措施，因此忽略地下水毛管上升、地表径流和深层渗漏的影响。

参考 Vachaud 等^[26]的研究方法，采用相对差分（Relative difference, RD）及其标准差（Standard deviation, SD）描述土壤含水量的时间稳定性特征。任意观测点 i 在时间 j 的土壤含水量相对差分 RD_{ij} 和标准差 SD 的计算公式如下：

$$RD_{ij} = \frac{SWC_{ij} - \overline{SWC_j}}{\overline{SWC_j}} \quad (8)$$

$$SD = \sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{SWC_{ij} - \overline{SWC_j}}{m-1}} \quad (9)$$

式中， SWC_{ij} 为观测点 i 在时间 j 的土壤含水量（ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ）； $\overline{SWC_j}$ 为时间 j 的平均土壤含水量； m 为总测定次数。平均相对差分（Mean relative difference, MRD）及其标准差（Standard deviation of relative difference, SDRD）的计算公式如下：

$$MRD_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m RD_{ij} \quad (10)$$

$$SDRD_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (RD_{ij} - MRD_i)^2} \quad (11)$$

采用 Spearman 等级相关系数 r_s 分析各观测点土壤水分等级时间稳定性, 计算公式如下:

$$r_s = 1 - 6 \sum_{i=1}^n \frac{R_{ij} - R_{il}}{n(n^2 - 1)} \quad (12)$$

式中, R_{ij} 为第 j 时刻第 i 个观测点土壤含水量 θ_{ij} 的等级; R_{il} 为第 l 时刻第 i 个观测点的等级; n 为观测点总数。0~1 m 土层按 10 cm 间距划分共 10 层, 1~10 m 土层按 20 cm 间距划分共 45 层, 总计观测层数 $n=55$ 。 r_s 数值越趋近于 1, 表明第 i 个观测点的土壤含水量在 j 、 l 两个时段的稳定性越高。

1.4 统计分析

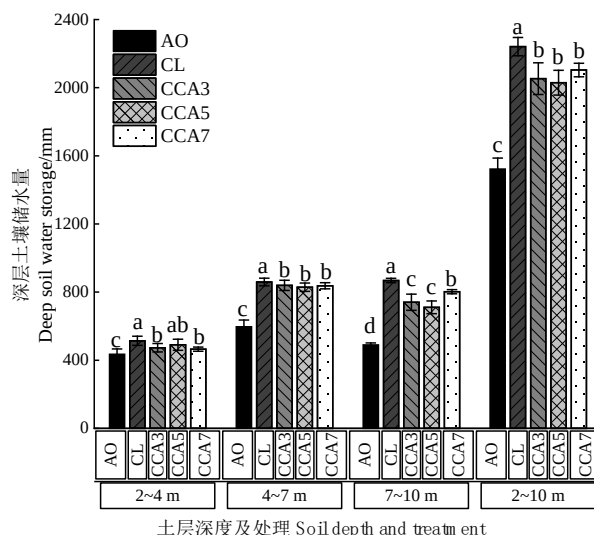
所有统计分析采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行。采用单因素方差分析 (ANOVA) 检验不同处理间土壤物理性质的差异, 随后采用 Duncan 多重比较法进行事后检验, 显著性水平设为 0.05。图表采用 Origin 2021 软件绘制。

2 结 果

2.1 深层土壤储水量对果园还耕的响应

由于 0~2 m 土层受植物根系、气候等因素影响较大^[27-28], 本研究重点分析 2~10 m 深层土壤储水量。2~10 m 土层不同处理的平均土壤储水量排序为: CL>CCA7>CCA3>CCA5>AO ($P<0.05$) (图 2)。即从 AO 转换为 CCA3 后, SWS 显著增加 ($P<0.05$), 而 CCA3、CCA5 和 CCA7 之间无显著差异 ($P>0.05$)。此外, 尽管 CCA3、CCA5 和 CCA7 的深层土壤储水量已显著恢复, 但仍明显低于 CL ($P<0.05$)。

为详细表征深层土壤储水量的恢复水平, 参考相关文献并结合其垂直分布特征^[12, 29], 将 2~10 m 土层分为 2~4 m、4~7 m 和 7~10 m 三个区段 (图 2)。2~4 m 土层不同处理的平均土壤储水量排序为: CL>CCA5>CCA3>CCA7>AO, 且 CCA3、CCA5 和 CCA7 之间无显著差异 ($P>0.05$); 4~7 m 土层不同处理的平均土壤储水量排序为: CL>CCA3>CCA7>CCA5>AO, 与 2~4 m 土层类似, CCA3、CCA5 和 CCA7 之间无显著差异 ($P>0.05$); 7~10 m 土层不同处理的平均土壤储水量排序为: CL>CCA7>CCA3>CCA5>AO, CCA3 和 CCA5 之间无显著差异, 而 CCA7 显著高于 CCA3 和 CCA5。此外, 无论是整个土壤剖面还是不同土层区段, CCA3、CCA5 和 CCA7 的土壤储水量均显著高于苹果园 (AO), 但显著低于纯农田 (CL) ($P<0.05$)。



注：图中数据以均值±标准偏差(SD)呈现，误差线代表标准偏差；不同小写字母表示同一土层深度下处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。Note: Data are presented as mean $\pm$ standard deviation (SD), error bars represent SD; Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same soil depth at $P < 0.05$. The same below.

图2 不同处理下各土壤深度的深层土壤储水量

Fig. 2 Deep soil water storage (SWS) of different soil depths for different treatments

2.2 土壤干层和作物水分利用效率对果园还耕的响应

与深层土壤储水量一致，由于2 m以内土壤含水量易受植物根系、气候等因素影响，本研究主要分析2~10 m土层的土壤干层特征(图3)。结果表明，对于2~10 m不同土壤深度，CCA3、CCA5和CCA7的干层厚度和干层内平均土壤含水量均为0(图3)，说明苹果园转换为农田3年后，土壤干层已完全消失。

不同处理的作物水分利用效率排序为：63.9(AO) > 28.7(CCA5) > 26.8(CCA7) > 25.3(CCA3) = 25.3 kg·hm⁻²·mm⁻¹(CL)(图4)。CL、CCA3、CCA5和CCA7之间无显著差异($P > 0.05$)，表明果园转换为农田后，不同还耕年限对作物水分利用效率无显著影响。

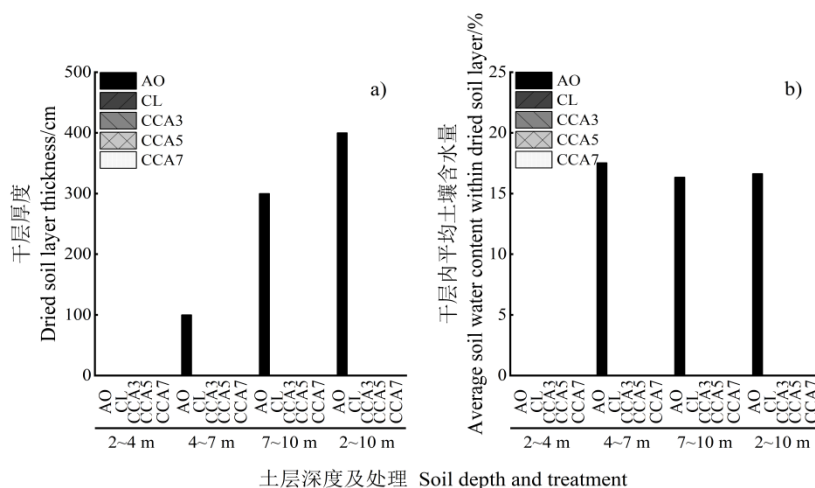
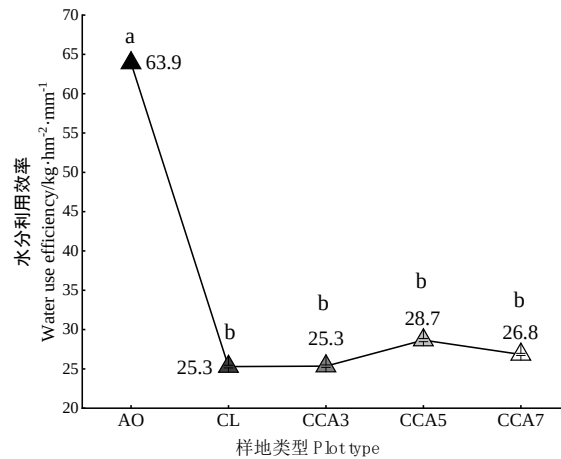


图3 不同处理下各土层深度土壤干层厚度(a)及干层内土壤平均含水量(b)

Fig. 3 Dried soil layer thickness (DSL, a) and average soil water content within dried soil layer (DSL-SWC, b) under different treatments at various soil depths



注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$. The same below.

图 4 不同处理条件下的作物水分利用效率

Fig. 4 Crop water use efficiency (CWUE) under different treatments

2.3 土壤水分时间稳定性对果园还耕的响应

采用相对差分法和 Spearman 秩相关系数法分析土壤含水量的时间稳定性特征，图 5 显示了 5 种处理 (AO、CL、CCA3、CCA5、CCA7) 土壤含水量的 MRD 分布范围，分别为-27.05%~28.70% (AO)、-22.68%~23.24% (CL)、-12.77%~15.23% (CCA3)、-20.71%~15.07% (CCA5) 和-16.92%~13.80% (CCA7)。随着转换年限的增加，MRD 的分布范围呈减小趋势，表明土壤含水量的时间稳定性逐渐增强。且 CCA3、CCA5 和 CCA7 的 MRD 均值无显著差异 (图 6)。垂直误差线代表 SDRD，AO、CL、CCA3、CCA5 和 CCA7 的平均 SDRD 值分别为 9.72%、6.44%、5.99%、6.83%和 4.98%，呈逐渐减小趋势，进一步表明土壤含水量的时间稳定性不断增强。

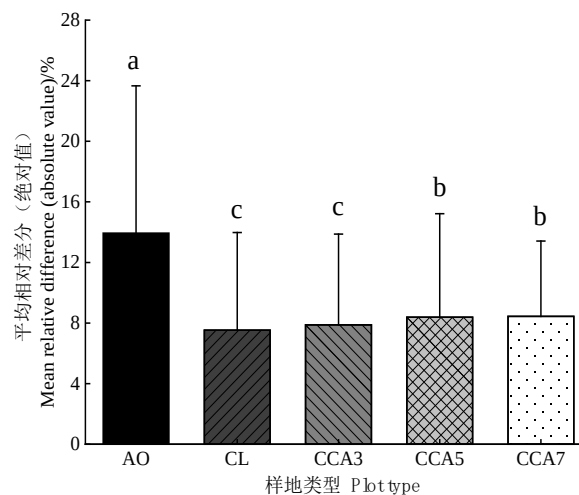


图 5 不同处理方式下平均相对差分的显著性分析

Fig. 5 Significance analysis of mean relative difference (MRD) for different treatments

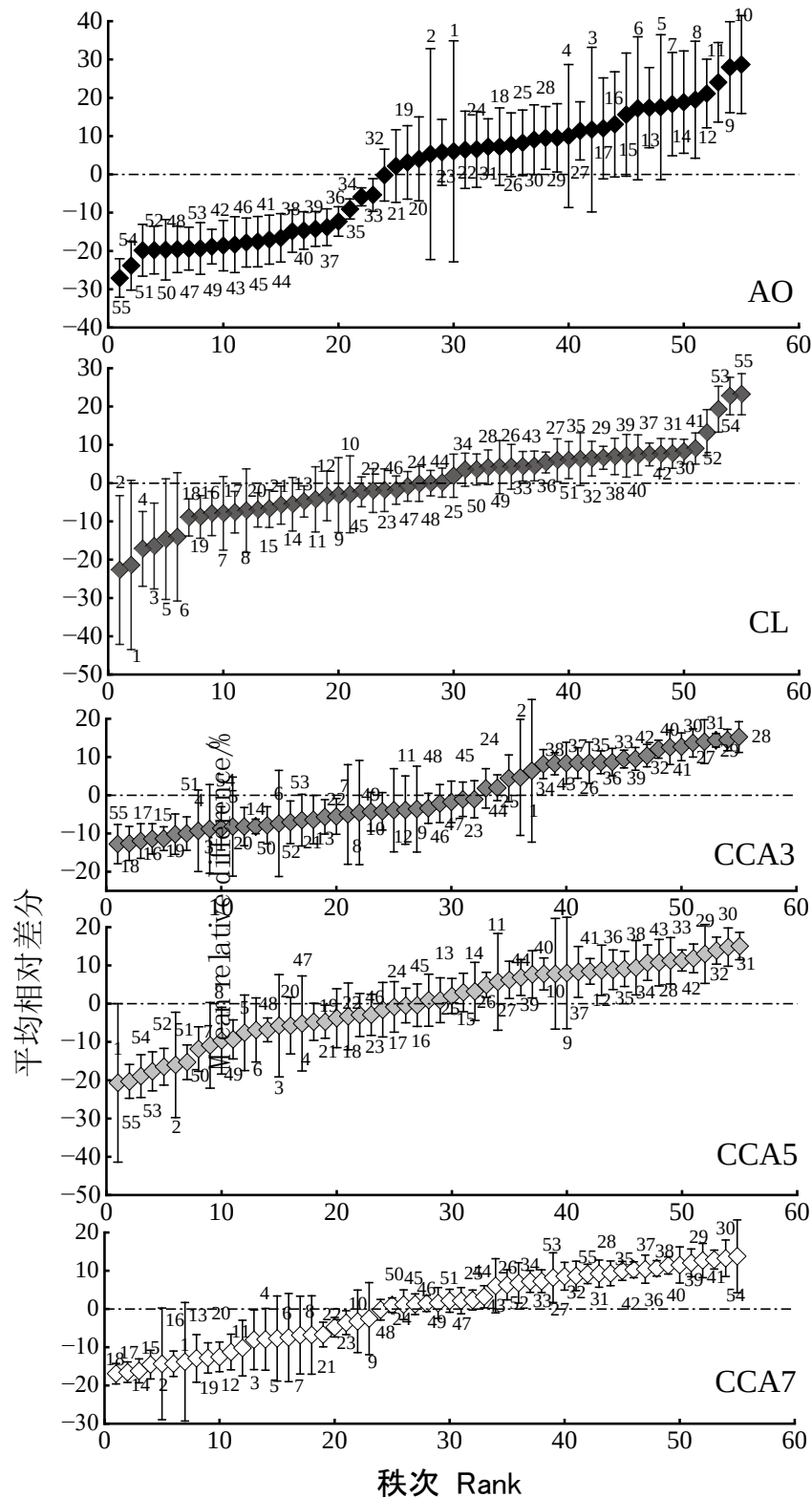


图 6 不同处理下土壤水分平均相对差分排序

Fig. 6 Ranking of mean relative difference in soil water content (SWC) from small to large under different treatments

2.4 农户收入对果园还耕的响应

为充分体现苹果种植与作物种植的收入差异,通过咨询当地农户(共走访 30 户塬面种植农户,其中果园、玉米和小麦分别 10 户),调查了每户过去 5 年苹果和作物的年净收入

情况（总收入-总支出）（图 7）。结果显示，苹果种植收入显著高于作物种植收入，分别是玉米的 9 倍和小麦的 23 倍。

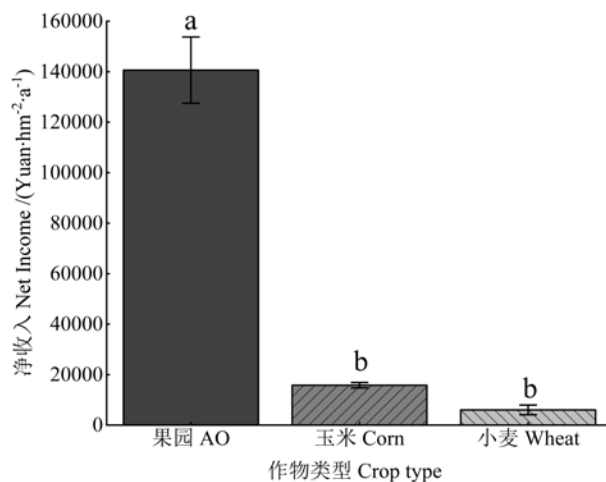


图 7 不同种植类型的作物净收入

Fig. 7 The income from crops of different planting types

3 讨论

3.1 果园转换为农田后土壤储水量的变化趋势

本研究结果表明，果园转换为农田后，深层 SWS 在初期快速增加，随后趋于稳定。牛虎虎等^[12]也发现，不同林龄苹果园转换为农田后，土壤含水量在 2 年内快速恢复至约 7 m 深度，转换后 2~6 年期间补给深度无显著增加，但 3~7 m 各土层的土壤含水量持续上升。Li 等^[11]也发现，果园转换为农田后，短期内深层土壤储水量骤增、之后深层渗漏趋于稳定。果园转换为农田后初期土壤含水量快速增加的主要原因如下：一是农田植被耗水量显著减少，导致降雨入渗量增加；二是干旱区果园种植导致深层土壤干燥化^[4, 19]，砍伐后短期内促进了土壤水分快速入渗。此外，研究表明，林地转换为农田可通过改变土壤孔隙度在短期内增加水分入渗^[30]。因此，转换初期土壤含水量的增加是土壤和植被共同作用的结果。随着转换年限的增加，一方面，当土壤含水量累积至接近田间持水量时，多余降水无法持续储存，只能通过渗漏或蒸发消耗，导致土壤储水量无显著增加；另一方面，长期来看，土壤含水量的补给来源和消耗途径无显著变化，形成动态平衡。因此，深层土壤储水量随时间延长趋于稳定。此外，本研究还得出 7~10 m 土层中，CCA7 深层储水量显著高于 CCA3 和 CCA5。这可能由于随着还耕年限的增加，更多的土壤水向下入渗到深层，导致 CCA7 深层储水量显著高于 CCA3 和 CCA5。牛虎虎等^[12]也发现：果园转化为农田后 2~6 年后虽然补给深度无显著增加，但是 3~7 m 不同土层土壤含水量持续上升，说明土壤水分一直在缓慢往下渗。

3.2 深层土壤含水量恢复时间的不确定性

本研究中，果园转换为农田 3 年后，深层土壤储水量随年限增加无显著变化，这与其他研究结果存在较大差异。例如，Li 等^[11]认为，先前成熟果园造成的深层土壤水分亏缺需要 48~69 年的一年生作物种植才能缓解；Zhang 等^[10]报道，土壤储水量恢复至原始农田水平需要超过 26 年；Huang 和 Gallichand^[15]采用 SHAW 模型模拟得出，10 m 土层的恢复年限为 6.5~19.5 年（平均 13.7 年），3 m 土层的恢复年限为 4.4~8.4 年（平均 7.3 年）。综上，以往研究认为果园恢复深层土壤含水量至少需要 10 年以上。造成上述较大差异的潜在原因如下：一是土壤方面，果园砍伐转化为农田后，大量的扰动会增加大孔隙，形成优先流，增加土壤

入渗^[28]。此外,随着还耕年限的增加,大量根系腐烂,形成优先流,导致大量土壤水分以优先流的形式进入土壤,而模型模拟以基质流为主,忽略了优先流的补给,导致较大差异。二是近年来极端气候频发,如极端降雨等,长武近6年的降雨量明显高于该地区的平均降雨量^[12],而模型预测或基于以往气象数据,或基于预测气象数据,无法反映真实的降雨特征,尤其是强降雨,这加大了预测的不确定性。三是果园砍伐前初始土壤水分亏缺条件不同,果园不同时期会造成不同程度的土壤水分亏缺,不同的前期土壤水分亏缺程度会显著影响砍伐后土壤水分的恢复时间。综上所述,深层土壤含水量恢复时间的不确定性由土壤、气候、砍伐前土壤水分亏缺程度共同影响。

3.3 研究的现实意义及不足

众多研究证实,果园转换为农田可有效缓解果园种植导致的土壤干燥化,但土壤储水量恢复至最初状态仍需较长时间^[10-12]。然而,长时间恢复会导致农户经济收入大幅损失,不具可行性。本研究从水资源视角出发,发现果园转换为农田3年后,不同生态效益指标(土壤储水量、土壤干层、作物水分利用效率和土壤水分时间稳定性)均随着年限的增加,无显著差异,尽管与纯农田仍存在差距,但土壤储水量已恢复至纯农田的90%左右。因此,综合考虑生态和经济因素,3年左右可能是适宜的转换年限。该结果对于黄土塬区农户对果园的管理具有重要的现实意义。

然而,本研究存在一些局限性:第一,研究基于空间代时间方法,该方法难以消除人工管理、恢复前土地利用方式、土壤质地等方面的差异,结果具有一定的不确定性。第二,研究仅在黄土高原单一小流域(黑垆土、暖温带半湿润气候)开展,结论难以推广至整个黄土高原或其他具有不同土壤和气候类型的干旱半干旱地区;第三,监测周期较短,无法验证适宜转换年限在长期尺度(10年及以上)的稳定性及极端气候的累积效应;第四,监测指标未涵盖土壤养分、土壤结构和生态效应等其他维度,缺乏“水-土-生态”的综合评估。因此,未来应继续开展长期原位监测,扩大研究区域,并综合考虑多项土壤指标。

4 结 论

基于生态(土壤储水量、土壤干层、作物水分利用效率和土壤水分时间稳定性)和经济(农户收入)双重视角评估黄土塬区果园向农田转换的适宜年限后发现:生态效益方面,果园转换为农田3年后,随着还耕年限的增加,深层土壤储水量和作物水分利用效率均无显著变化,土壤干层消失,土壤水分时间稳定性趋于稳定;经济效益方面,转换年限越长,农户收入越少。因此,综合生态与经济效益,黄土塬区果园向农田转换的适宜年限为3年左右。该结果对于黄土塬区土地利用的合理管理具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] Gisladdottir G, Stocking M. Land degradation control and its global environmental benefits[J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(2): 99-112.
- [2] Smith P, Poch R M, Lobb D A, et al. Status of the world's soils[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2024, 49: 73-104.
- [3] Smith P, House J I, Bustamante M, et al. Global change pressures on soils from land use and management[J]. Global Change Biology, 2016, 22(3): 1008-1028.
- [4] Islam K R, Weil R R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 79(1): 9-16.
- [5] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J].

Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.

[6] IPCC. Fifth assessment report, climate change 2014: Synthesis report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[7] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2010, 159(1/2): 99-108.

[8] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113-122.

[9] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 206: 85-96.

[10] Zhang Z Q, Si B C, Li M, et al. Deficit and recovery of deep soil water following a full cycle of afforestation and deforestation of apple trees on the Loess Plateau, China[J]. Water, 2020, 12(4): 989.

[11] Li H, Si B C, Zhang Z Q, et al. Deep soil water storage and drainage following conversion of deep rooted to shallow rooted vegetation[J]. Agricultural Water Management, 2022, 261: 107359.

[12] Niu H H, Zhao X N, Gao X D, et al. Variation characteristics of the deep soil water and nitrogen in orchards in Weibei dry plateau after replanting food crops[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5926-5936. [牛虎虎, 赵西宁, 高晓东, 等. 苹果园改种粮食作物渭北旱塬深层土壤水氮变化特征[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5926-5936.]

[13] Niu H H, Cai Y H, Zhao G Y, et al. Deep percolation paradox: How cropland cropping reactivates nitrate transport in thick vadose zones of converted orchards[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2026, 399: 110131.

[14] Wang X C, Li J, Tahir M N, et al. Validation of the EPIC model and its utilization to research the sustainable recovery of soil desiccation after alfalfa (*Medicago sativa* L.) by grain crop rotation system in the semi-humid region of the Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 161: 152-160.

[15] Huang M B, Gallichand J. Use of the SHAW model to assess soil water recovery after apple trees in the Gully Region of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 67-76.

[16] Liu G B, Shangguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 11-19. [刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.]

[17] Gao X D, Zhao X N, Wu P T, et al. The economic-environmental trade-off of growing apple trees in the drylands of China: A conceptual framework for sustainable intensification[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126497.

[18] 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.

[19] Wang Y P, Han X Y, Yan W M, et al. Apple trees can extract soil water from both deep layers and neighboring cropland in the tableland region of Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2023, 232: 107396.

[20] Gao Y, Fan J, Peng X P, et al. Soil water depletion and infiltration under the typical vegetation in the waterwind erosion crisscross region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 7038-7046. [高宇, 樊军, 彭小平, 等. 水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 7038-7046.]

[21] Wang R, Liu W Z, Li Z. Physical properties of soils along a 10 m deep soil profile in loess tableland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3): 550-554. [王锐, 刘文兆, 李志. 黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 550-554.]

[22] Jia X X, Shao M A, Zhang C C, et al. Regional temporal persistence of dried soil layer along south-north transect of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 152-160.

[23] Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 14-22. [邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.]

[24] Wang Y P. Spatiotemporal distribution and influencing factors of soil water content in cropland-apple orchard mosaic pattern in the loess tableland of China[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2021. [王亚萍. 黄土塬区农田-果园镶嵌布局深剖面土壤水分时空分布及影响因素[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.]

- [25] Chai Q, Gan Y T, Turner N C, et al. Water-saving innovations in Chinese agriculture[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2014: 149-201.
- [26] Vachaud G, De Silans A P, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822-828.
- [27] Wang Z Q, Tang X D, Du K, et al. Annual-seasonal dynamics of soil water content in 10 m soil profiles under different land use types in the Loess Tableland region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9329-9341. [王中琦, 汤晓迪, 杜康, 等. 黄土塬区不同土地利用方式 10 m 剖面土壤水分年际和季节动态特征[J]. 生态学报, 2024, 44(20): 9329-9341.]
- [28] Zhao Y R, Gao Y Q, Wang Z Q, et al. Response of soil water content to rainfall events under different land use types on the loess tableland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 34-42. [赵意茹, 高钰琪, 王中琦, 等. 黄土塬区不同土地利用方式土壤水分对次降雨的响应特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 34-42.]
- [29] Yuan Y Y, Tian H Y, Qiao J B, et al. Rainfall determines the temporal stability of soil water content following the conversion of deep rooted to shallow rooted vegetation in arid regions[J]. Catena, 2026, 262: 109664.
- [30] Cui Z, Huang Z, Wang Y B, et al. Soil water deficit was effectively alleviated by higher water infiltration after the short-term forestland-to-farmland conversion in semi-arid area[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127893.

(责任编辑: 卢 萍)