

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.012

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.012

石骁驰,王云强,童永平.黄土塬区不同林龄苹果园深层土壤水分亏缺的时空变化特征[J].水土保持学报,2026,40(5):195-203.

Shi Xiaochi, Wang Yunqiang, Tong Yongping. Spatiotemporal patterns of deep soil water deficit in apple orchards of different stand ages in loess tableland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 195-203.

黄土塬区不同林龄苹果园深层土壤水分 亏缺的时空变化特征

石骁驰^{1,2}, 王云强^{1,2,3}, 童永平^{1,3}

(1. 中国科学院地球环境研究所黄土科学全国重点实验室, 西安 710061; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061)

摘要: [目的] 科学评估深层土壤水分亏缺的发育风险, 对黄土塬区主导经济林苹果园的水分管理、更新调控与可持续经营具有重要意义。为此, 亟须揭示该区不同林龄苹果园深层土壤水分亏缺的时空演变和垂向分异特征。[方法] 在洛川塬选取农地、不同林龄(幼、中、老)苹果园, 于 2021—2025 年开展 0~5 m 土壤体积含水量(SWC)的原位观测, 分析 1~5 m 土层土壤含水量亏缺(Δ SWC)动态及土壤储水量亏缺(Δ SWS)关键层位。[结果] 监测期内, 农地深层 SWC 阶段性增加, 果园整体趋于干燥, 幼龄果园后期干燥明显, 中龄果园水分亏缺持续, 老龄果园 SWC 阶段性回升; 以农地为参照, 果园 1~5 m 平均土壤含水量亏缺普遍存在且垂向异质性明显, 亏缺强度为中龄(2.5%)>老龄(1.3%)>幼龄(0.2%), 其中, 中龄果园亏缺的土层最厚(2~5 m); 2021—2025 年, 3 个林龄果园 1~5 m 平均 Δ SWC 均显著下降($p < 0.001$, $R^2 > 0.74$), 中龄果园下降最快(斜率为 -0.003 5), 表明土壤水分亏缺持续加剧, 并随林龄增长呈先增强后减弱的变化规律; 不同土层 Δ SWS 显示, 4~5 m 土层是各林龄果园土壤水分亏缺的关键层位, 幼、中、老龄果园对应 Δ SWS 分别为 -9.0、-17.3、-13.2 mm。[结论] 果园水分亏缺评估应同时考虑林龄和关键亏缺层位, 并将土壤水分承载力作为栽植密度和果树更新的重要依据。

关键词: 黄土塬区; 苹果园; 林龄; 深层土壤水分; 水分亏缺

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0195-09

Spatiotemporal Patterns of Deep Soil Water Deficit in Apple Orchards of Different Stand Ages in Loess Tableland

Shi Xiaochi^{1,2}, Wang Yunqiang^{1,2,3}, Tong Yongping^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Observation and Research Station of
Earth Critical Zone on the Loess Plateau in Shaanxi, Xi'an 710061, China)

Abstract: [Objective] Scientifically assessing the development risk of deep soil water deficit is of great significance for water management, renewal regulation, and sustainable operation of apple orchards, the dominant economic forest type in the Loess Tableland. Therefore, there is an urgent need to clarify the spatiotemporal evolution and vertical differentiation patterns of deep soil water deficit in apple orchards of different stand ages in this region. [Methods] Farmland and apple orchards of different stand ages (young, middle-aged, and mature) were selected in the Luochuan tableland. Based on in situ observations of volumetric soil water content (SWC) in the 0-5 m soil profile from 2021 to 2025, the dynamics of soil water content deficit (Δ SWC) and the key layers of soil water storage deficit (Δ SWS) in the 1-5 m soil layer were analyzed. [Results] During the monitoring period, deep SWC in farmland increased in stages, whereas apple orchard soils generally became drier. Young

收稿日期: 2026-02-27

修回日期: 2026-03-26

录用日期: 2026-04-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-05-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(42525706)

第一作者: 石骁驰(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水分与土壤健康研究。E-mail: xiaochi883@gmail.com

通信作者: 王云强(1981—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤水文过程研究。E-mail: wangyq@ieecas.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

orchards showed obvious drying in the later stage, middle-aged orchards exhibited persistent water deficit, and mature orchards showed staged recovery in SWC. With farmland as the reference, the mean Δ SWC in the 1–5 m layer was widespread and showed obvious vertical heterogeneity in the orchards. Deficit intensity ranked as middle-aged (2.5%) > mature (1.3%) > young (0.2%), among which the middle-aged orchards had the thickest deficit soil layer (2–5 m). From 2021 to 2025, the mean Δ SWC in the 1–5 m layer of orchards of all three stand ages declined significantly ($p < 0.001$, $R^2 > 0.74$), with the fastest decline in middle-aged orchards (slope = $-0.003\ 5$), indicating that soil water deficit continuously intensified and followed a pattern of first increasing and then decreasing with stand age. The Δ SWS in different soil layers showed that the 4–5 m soil layer was the key layer of soil water deficit for orchards of all stand ages, and the corresponding Δ SWS values in young, middle-aged, and mature orchards were -9.0 , -17.3 , and -13.2 mm, respectively. [Conclusion] The assessment of orchard water deficit should simultaneously consider stand age and key deficit layers, and the soil water carrying capacity should be taken as an important criterion for planting density and orchard renewal.

Keywords: loess tableland; apple orchards; stand age; deep soil water content; water deficit

Received: 2026-02-27

Revised: 2026-03-26

Accepted: 2026-04-06

Online(www.cnki.net): 2026-05-12

土壤水分亏缺是制约黄土塬区生态恢复和果业生产的关键因子之一^[1-2]。随着植被恢复工程的推进和苹果园经济林面积的持续扩张,区域水分消耗显著增加,而供给相对有限,导致土壤水分供需矛盾日益突出。这种矛盾随着时间的推移不断累积,已经引发区域深层土壤水资源量的持续下降^[3-4]。有研究^[1,5]表明,在水分收支处于负平衡背景下,深层土壤水分一旦形成亏缺且持续一段时间后,其自然恢复过程极为缓慢,甚至导致土壤干层的形成,进而直接威胁植被恢复的可持续性与经济林生产的长期稳定性。因此,在水资源约束日益严峻的背景下,揭示深层土壤水分亏缺的发育特征并解析其演变规律,已成为黄土塬区水分可持续管理亟待解决的关键基础科学问题,对于保障区域生态安全与林业经济效益至关重要^[5-6]。

苹果园是黄土塬区的主导经济林类型,其中洛川塬作为黄土高原最典型的苹果适植区^[7],苹果种植面积已超过 3.3 万 hm^2 。由于产业发展历史较长,洛川塬苹果园普遍存在不同林龄果树并存的格局。科学评估洛川塬深层土壤水分亏缺的分布演变特征,对于指导地方果业高质量发展具有重要的现实意义。已有研究^[8-9]指出,自农地转为苹果园后,其深层土壤水分收支及剖面储水量会发生系统性减少,且在多年尺度上呈显著累积效应。进一步研究^[10-11]表明,这种土壤水分减少的累积效应与林龄显著相关:随树冠扩大和根系下扎,果树的蒸散量与耗水深度均增加,导致水分亏缺强度及其主导层位发生阶段性演变。除了受到树龄的影响外,苹果园土壤剖面水分亏缺的发育和演变过程还具有明显的深度依赖

性^[12],不同深度土层的水分亏缺对环境因子的响应速度和幅度存在显著差异^[3,13-14]。尽管有从不同角度揭示苹果园深层土壤水分亏缺与林龄、土层深度之间的关系,但现有研究^[15]多侧重于单次剖面调查、单一林龄样地或特定深度分析,对于相同地貌单元内不同林龄苹果园之间的系统对比仍显不足。而不同林龄果园的比较,能够在相近立地和管理背景下,借助林龄序列间接反映苹果园长期生长过程中深层耗水对土壤水分亏缺的累积影响。因此,亟须综合考虑林龄序列、不同土层深度的土壤水分动态变化过程,以更准确地诊断和识别深层水分亏缺的关键时段、关键层位和演变规律。

鉴于此,本研究在洛川塬面相同的地貌单元内,选取不同林龄苹果园为研究对象,于 2021—2025 年间,持续开展深度为 5 m 的土壤水分定位观测,从连续观测角度揭示不同林龄苹果园深层土壤水分亏缺的垂向分布与动态演变特征,识别不同林龄的关键土壤水分亏缺层位及其变化规律,以期为黄土塬区苹果园健康评估、果树更新与可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

依托陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站,选取黄土高原典型苹果种植带陕西省延安市洛川县($35^{\circ}26' \sim 36^{\circ}04' \text{N}$, $109^{\circ}13' \sim 109^{\circ}45' \text{E}$)典型塬面为研究区。洛川县位于黄土高原中南部,地势平坦,黄土厚度达 80~220 m,属于典型的黄土塬区。该区属暖温带季风气候区,雨热同期,多年平均气温 9.2°C ,多年平均降水量 590 mm,且多集中在 6—9 月,年日照时间 2 418.8 h,无霜期约 180 d^[16]。土壤

类型为黑垆土,地貌以黄土塬为主,海拔约1 100 m。得益于较高的土壤肥力,适宜的生长期温度与丰富的光照资源,因此,被认为是苹果种植的优质产区。经过多年的发展,洛川县已成为黄土高原典型的苹果产业示范区。然而,由于该区地下水位较深,苹果园的水分补给来源以降水为主。研究^[12]表明,在气候变化和人类活动的影响下,局部地区土壤水分亏缺问题尤为严峻,深层土壤水资源不足已经成为制约当地苹果产量与品质提升的关键因素。

1.2 样点选择与样品采集

在洛川塬面选取3个不同林龄的代表性苹果园,于2021年初开展深剖面土壤水分长期观测试验,并同步选取永久性农地为对照样地。3个不同林龄的苹果园分别为:2017年建园(幼龄果园,记为Y17)、2009年建园(中龄果园,记为Y09)和2001年建园(老龄果园,记为Y01)。在每个林龄果园内,设置2个重复观测样点;典型农地(ND)作为土壤水分对照,设1个观测样点。各果园样地在坡位、坡向和管理措施方面保持基本一致:南北向栽植,果树种植间隔均为4 m × 5 m,且均为无灌溉雨养果园。不同林龄果园的地表管理均采用生草与清耕相结合的模式,施肥以早春有机肥配施化肥、生长季追施复合肥(氮磷钾)为主。

在每个观测样点,使用直径为10 cm的土钻进行分层取样。在0~2 m深度的取样间隔为20 cm,而在2~5 m深度的取样间隔为50 cm。取样完成后,在钻孔内安装0~5 m深度的PVC观测管,待稳定一段时间后,采用便携式TDR探头原位监测全剖面的土壤体积含水量(SWC,%),每隔20 cm记录1个SWC数据。为更准确地揭示不同林龄苹果园深剖面土壤水分的变化,本研究从2021年5月开始,持续开展深剖面SWC观测,至2025年6月止,共获得20次SWC监测数据,考虑到本研究关注的是1~5 m深层土壤水分亏缺的阶段性与年际演变,而非表层土壤对单次降雨事件的短时响应,监测时间设置以生长季及关键干湿转换阶段为主。深层土壤水分变化相对缓慢,20次观测已覆盖2021—2025年不同年份和主要水分变化阶段,可满足对深层土壤水分亏缺演变特征的识别。

本研究旨在揭示不同林龄苹果园深层土壤水分亏缺的时空变化特征及其差异。因此,在数据分析过程中,为尽量减小季节性降水的影响,剔除表层0~1 m的SWC数据,专注于1~5 m的深层SWC变化。已有研究^[17]表明,黄土高原1 m以内土层的土壤含水量受降水入渗与蒸发影响强烈,月际波动大,属于土壤水分活跃层;而1 m以下土层的土壤含水量变异性相对较低,其变化主要取决于植被耗水速率和土壤水分深层渗漏,土壤水分大都处于亏缺状态,多

数经济林已经形成土壤干层^[10]。本研究将土壤体积含水量观测的下限设为5 m,主要基于2个方面考虑:一是苹果园的根系分布大都集中在5 m以上,因而1~5 m土层被认为是土壤水分亏缺集中出现的典型深度区间;二是与黄土高原土壤水分研究常用的5 m观测深度保持一致,便于不同学者^[11,18]研究成果的比较与分析。综上,本研究后续的深层土壤水分数据分析,均基于1~5 m的观测数据。

1.3 土壤样品测试与土壤水分量化指标

1.3.1 土壤颗粒组成 扰动土样带回实验室后进行风干处理,过2 mm筛后,采用Mastersizer 3000型激光粒度分析仪测定土壤颗粒组成。采用美国制标准划分土壤粒级:砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、黏粒(<0.002 mm)。采用变异系数(CV,%)来评估不同样地土壤颗粒组成的变异性,CV的计算方法为:

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中:SD为各粒级含量的标准差;M为各粒级含量的平均值。

1.3.2 土壤水分量化指标 获取所有样地SWC观测数据后,先对同一监测时间、同一土层深度、同一林龄的2个重复观测样点取平均,获得该特定林龄组的SWC数据;农地直接采用实测值。为更清楚地表征土壤水分变化的时间序列特征,本研究计算各样地每个深度节点的归一化土壤含水量距平(SWCA),计算公式为:

$$A_{z,t} = SWC_{z,t} - \overline{SWC_z} \quad (2)$$

式中:SWC_{z,t}为深度z在时刻t的体积含水量,%; $\overline{SWC_z}$ 为该深度在全部监测月份的平均值。随后进行归一化计算,公式为:

$$SWCA_{z,t} = 2 \times \frac{A_{z,t} - A_{z,\min}}{A_{z,\max} - A_{z,\min}} - 1 \quad (3)$$

式中:A_{z,min}与A_{z,max}分别为深度z在监测期内距平的最小值与最大值;本文SWCA为距平的归一化值,保留正负号,用于表征相对偏湿/偏干状态,而非0~1的最小-最大标准化。

在公式(3)的基础上,进一步计算不同林龄果园相对于农地的土壤含水量亏缺量(ΔSWC,%),其计算公式为:

$$\Delta SWC_{z,t} = SWC_{z,t}^{\text{orch}} - SWC_{z,t}^{\text{ND}} \quad (4)$$

式中:SWC_{z,t}^{orch}和SWC_{z,t}ND分别为果园与农地在深度z、日期t的土壤体积含水量,%。当ΔSWC_{z,t}<0时,表示果园该层位土壤含水量低于农地,为相对亏缺状态;其绝对值越大,表示相对亏缺程度越强。本文后续分层分析均基于该指标。

为消除样地间的初始背景差异,准确量化监测期内苹果园 SWC 亏缺的净加剧程度,以首次监测(2021 年 5 月)的 SWC 数据为基准,计算各层位果园相对于农地土壤含水量亏缺净变化量($\Delta\text{SWC}_{\text{net}}$,%)。该指标用于表征在剔除初始差异后,监测期内果园相对农地土壤含水量亏缺程度的净变化。计算公式为:

$$\Delta\text{SWC}_{\text{net}} = \Delta\text{SWC}_{z,t} - \Delta\text{SWC}_{z,t_0} \quad (5)$$

当 $\Delta\text{SWC}_{\text{net}} < 0$ 时,表示相对于首次监测,该土层果园相对于农地的土壤水分亏缺进一步加剧;其绝对值越大,表示净加剧程度越强。

为将 SWC 差异转换为更直观的储水量指标,计算每 20 cm 土层($\Delta z = 0.2$ m)的土壤储水量亏缺(ΔSWS ,mm),计算公式为:

$$\Delta\text{SWS}_{z,t} = \frac{\Delta\text{SWC}_{z,t}}{100} \times \Delta z \times 1000 \quad (6)$$

基于此,通过加和,获得不同土层(1~2、2~3、3~4、4~5、1~5 m)的相对储水量变化,用于比较不同土层对总体土壤储水量亏缺格局的贡献。

1.3.3 数据分析软件 土壤水分数据的预处理和基本统计分析采用 Excel 2021 软件完成。采用 OriginPro 2025 软件绘制土壤水分变化的时间序列图、剖面差值图和热图等。采用线性插值方法(仅在相邻 2 次实测数据之间插值,不进行外推)获得相同时间间距的土壤

水分数据,从而生成土壤水分变化的热图。研究区与样点的空间分布图利用 ArcGIS Pro 3.x 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同样地土壤基本理化性质的垂向分布与差异

2.1.1 土壤质地与立地条件 由图 1 可知,3 个不同林龄苹果园和永久性农地的土壤质地均发育于黄土母质,属于砂壤土或粉壤土,具有相似的土壤物理特性。在垂向分布上,根据已有研究^[19]结果,洛川塬区 1~5 m 土层均属于 L1 层的马兰黄土,不同样地间垂向的土壤水力特性也具有较好的一致性。特别是不同样地间土壤颗粒组成的空间变异较小(黏粒、粉粒、砂粒含量的平均 CV 分别为 12.7%、8.0% 和 11.4%)。鉴于土壤质地和水力特性的一致性,可直接通过监测土壤水分的动态变化来刻画苹果生长与水分消耗之间的相互关系,而无需通过额外观测土壤水势来消除质地的影响。各个苹果园空间距离较小(< 5 km),处于相同的气候背景和地形地貌,并采用一致的种植模式与田间管理措施。已有研究^[17]表明,不同的土壤改良措施可能对旱地苹果园的土壤团聚体结构和土壤水分状况产生影响。基于基本均一的立地环境条件,可有效排除气象、地形及人为管理等干扰,这也是开展本研究的重要前提。由此,本研究提出假设:在相对均一的立地与管理条件下,林龄是导致不同样地深层土壤水分差异的主要因子。

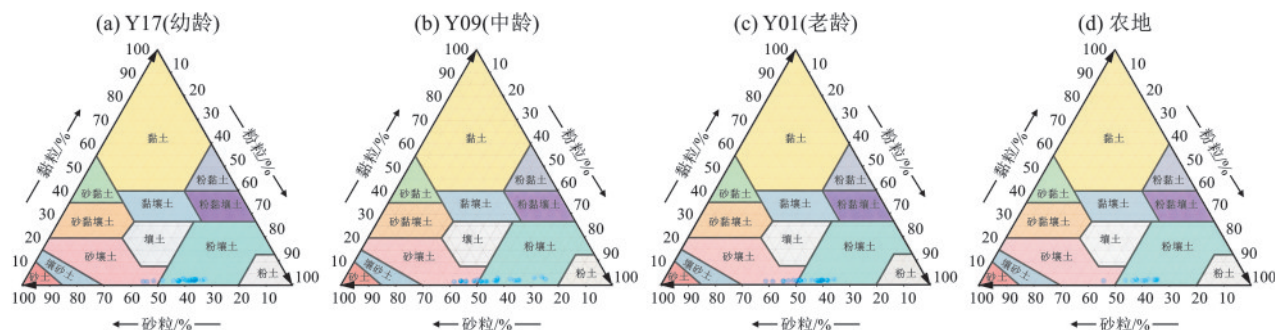


图 1 各样地 1~5 m 深度不同土层样品的土壤质地三角图(美国制)

Fig.1 USDA soil texture triangles for soil samples from different soil layers at 1~5 m depths across different sampling sites

2.1.2 深层土壤含水量动态 为比较各样地及不同土层深度的土壤含水量动态,对不同土层的 SWC 进行归一化距平处理,并绘制 SWCA 的时间动态变化曲线(图 2)。总体上,观测期内农地与果园在深层 SWC 变化上的差异较为明显,农地更易形成阶段性累积,而不同林龄果园整体更易表现为持续偏干。从时间序列来看,2021—2024 年各样地 1~5 m 土层的 SWCA 整体呈阶段性波动,尚未表现出持续同向变化。进入 2024 年下半年后,农地和果园的变化方向开始出现明显分化。2024 年 7 月至 2025 年 4 月,农地 1~5 m 土层 SWCA 由 0.201 升至 0.373,增加

0.172;同期幼龄、中龄和老龄果园分别由 0.060、0.017 和 0.155 降至 -0.022、-0.129 和 0.056,分别下降 0.082、0.146 和 0.099。表明在相同降雨背景下,农地更易形成剖面尺度的阶段性水分累积,而果园新增水分补给更易被苹果树持续耗水所抵消,因此,土壤含水量整体更易维持偏低状态。尤其在 2025 年 4—6 月,3 个林龄果园土壤水分进一步加速下降,幼龄、中龄、老龄果园的 1~5 m 土层归一化距平分别由 -0.022、-0.129 和 0.056 降至 -0.528、-0.731 和 -0.639,且均在 2025 年 6 月达到观测期最低值,与当年发生的持续性干旱事件有关^[20]。

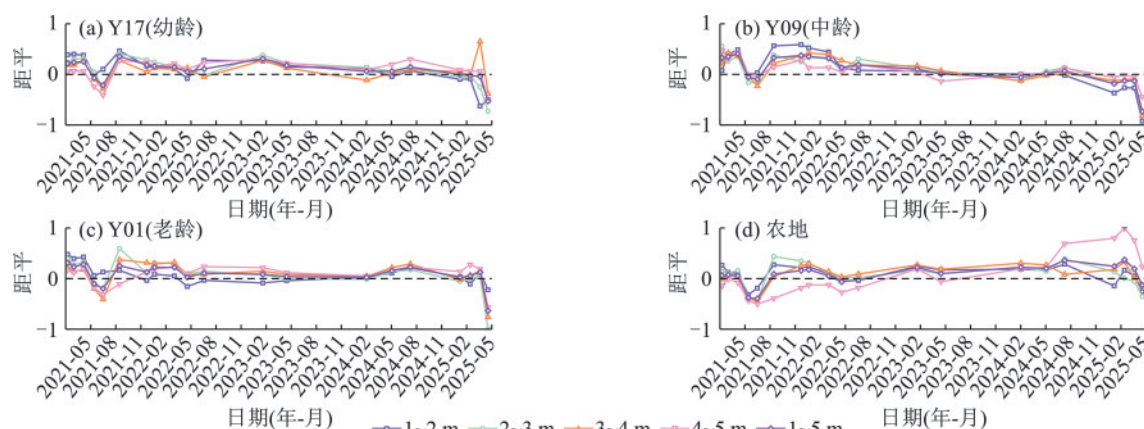


图2 不同样地不同土层深度归一化土壤含水量距平的时间变化

Fig.2 Temporal variations of normalized soil water content anomalies at different depths across different sampling sites

不同林龄果园之间,深层土壤水分的动态差异主要体现在水分亏缺过程的持续性及是否出现阶段性缓解。幼龄果园的土壤水分在2021—2024年各土层变化幅度较小,整体以短周期波动为主,1~5 m土层SWCA多在 $-0.217 \sim 0.356$ 波动,至2024年9月仍为0.147;进入2025年后,各土层变化方向趋于一致并转向亏缺加剧趋势,表明在多年消耗后剖面可利用水分减少,土壤水分由局部波动转向整体性下降。中龄果园自2022年以后SWCA总体持续下降,并在较长时间内维持这一趋势;其4~5 m土层在2025年3—6月连续4个监测期均为负距平,为 $-0.063 \sim -0.443$,说明较深层土壤亏缺状态具有较强的持续性。老龄果园同样出现亏缺加剧过程,但整体幅度弱于中龄果园,并在2024年土壤含水量出现阶段性回升,其中1~5 m土层的SWCA在2024年4—9月增加0.198;4~5 m土层同期增加0.173,此回升过程也是老龄果园区别于幼龄和中龄果园的一个明显特征。

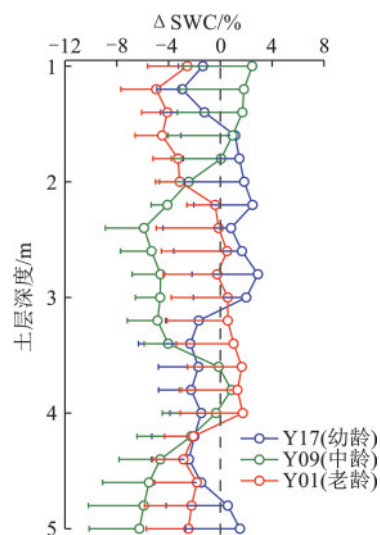
从深度差异来看,浅层土壤水分变化更频繁,而深层土壤水分变化更具持续性,在较长时间内维持同一水分状态后才发生调整。深层土壤水分对短期补给波动的响应较慢,更容易延续之前的水分状态,并在多年尺度上体现累积效应^[21]。总体来看,农地土壤水分更容易出现阶段性累积;而果园中,中龄果园亏缺加剧过程持续最明显(1~5 m土层SWCA由2022年6月的0.318持续下降,在2025年6月降至 -0.731),幼龄果园前期波动较小但后期亏缺加剧明显(1~5 m土层SWCA由2024年9月的0.147降至2025年6月的 -0.528),老龄果园亏缺加剧程度相对较弱并存在一定水分回升(1~5 m土层SWCA在2024年4—9月回升0.198)。

2.2 不同林龄苹果园土壤含水量亏缺特征

2.2.1 土壤含水量亏缺的垂向分布与发育特征

从剖面分布来看,以农地为参照,1~5 m剖面的平均 ΔSWC 表明,不同林龄果园普遍存在土壤水分亏缺现

象,平均亏缺量依次为中龄(2.5%)>老龄(1.3%)>幼龄(0.2%)。不同林龄苹果园2021—2025年 ΔSWC 的剖面分布(图3)表明,土壤水分亏缺在垂向上并非随土层深度变化。同一剖面内,果园与农地的差异主要由少数关键土层所主导,其余土层的差距相对有限,表明深层土壤含水量亏缺并非整个剖面土壤水分的均匀消耗,而可能由于根系分布、可利用水储量及深层补给受限等因素共同作用,更易在特定深度形成亏缺并长期维持^[22]。



注: $n=20$,表示各深度点 ΔSWC 为20次监测结果的平均值;误差棒表示标准差(SD)。

图3 不同林龄苹果园2021—2025年土壤含水量亏缺(ΔSWC)的剖面分布Fig.3 Profile distribution of soil water deficit (ΔSWC) in apple orchards of different ages from 2021 to 2025

不同林龄果园之间深层土壤水分亏缺的垂向结构存在明显差异。中龄果园深层土壤在较宽深度范围内(约2.0~3.6、4.0~5.0 m)持续存在水分亏缺,且幅度更大,其中2.4、5.0 m处 ΔSWC 分别为 -5.9% 和 -6.2% 。结合土壤含水量亏缺净变化的时空演变特征(图4)可知,中龄果园水分亏缺在垂向上贯穿2~5 m,且在监测后期表现出较强的净加剧,说明该阶段树

体生长旺盛,蒸腾耗水需求较高,根系深层耗水更多^[10],因而更容易在剖面上形成较强、较连续的亏缺状态。老龄果园同样存在土壤水分亏缺,主要分布于1.0~2.2、4.0~5.0 m,但整体幅度较中龄减弱,其亏缺净加剧主要集中在剖面底部(4.0~5.0 m),说明苹果园进入老龄阶段后,其深层耗水强度有所减弱,土壤水分的剖面差异更多表现为亏缺状态的维持,而非进

一步加剧。幼龄果园整体更接近农地背景,反映其深层耗水量相对较少。从发育过程来看,监测前期各层位土壤含水量亏缺净加剧较弱,但进入监测中期后,部分土层尤其是2.0~5.0 m的亏缺净加剧逐渐增强,幅度由2022年6月的0.3%增至2025年4月的3.8%,表明果树由幼龄进入成龄阶段,随树冠和根系的生长,局部深度的水分消耗能力逐渐增强。

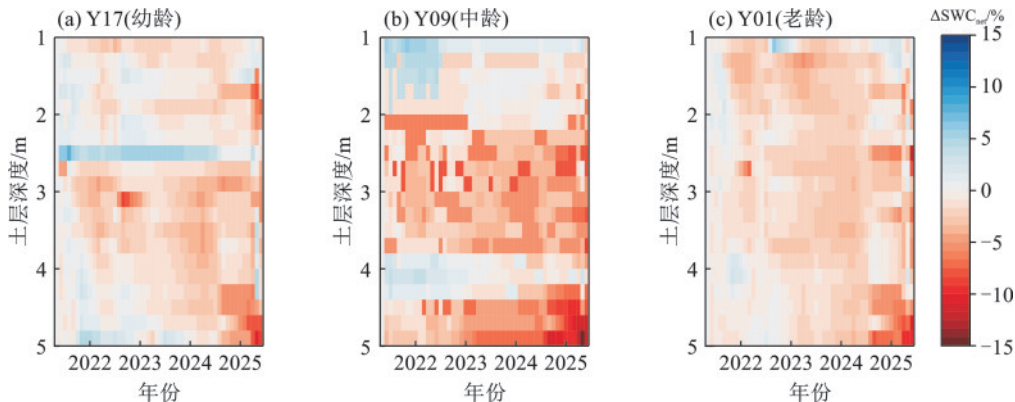
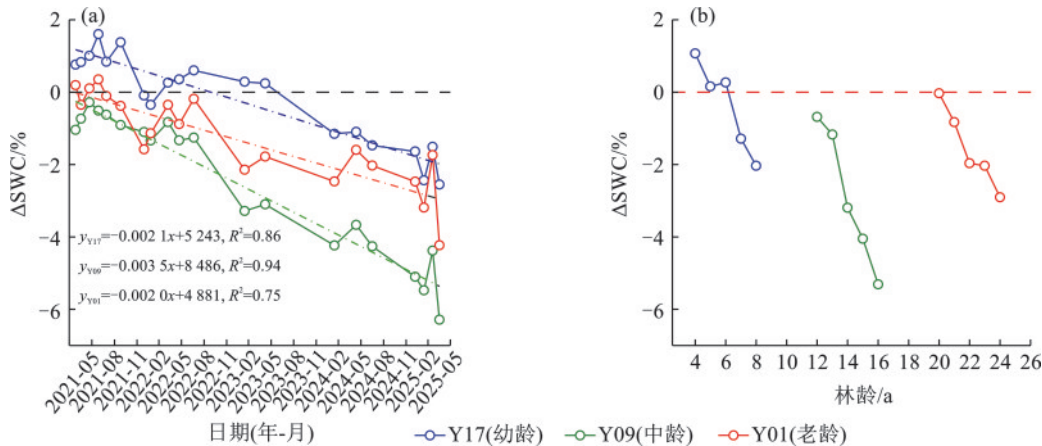


图 4 不同林龄苹果园深层土壤含水量亏缺净变化($\Delta\text{SWC}_{\text{net}}$)的时空演变特征

Fig.4 Spatiotemporal evolution of net change in deep soil water content deficit ($\Delta\text{SWC}_{\text{net}}$) in apple orchards of different stand ages

总体而言,深层土壤含水量亏缺并不随林龄单调增强,表现为中龄阶段达到较强水平;幼龄阶段亏缺总体较轻但已呈现增强趋势;老龄阶段亏缺仍然存在,但更偏向于既有亏缺状态的维持。由此可见,果园深层土壤水分亏缺风险的加剧更可能发生在由幼龄向盛果期的过渡阶段,而进入老龄后土壤水分亏缺发育趋缓,剖面水分差异主要表现为前期土壤水分亏缺的延续。

2.2.2 土壤含水量亏缺的时间演变规律 为揭示不同林龄果园深层土壤水分亏缺的时间变化规律,本研究分析3个林龄果园1~5 m平均 ΔSWC 在2021—2025年的动态过程(图5a)。结果表明,3个林龄果园1~5 m平均 ΔSWC 均呈显著下降趋势($p<0.001$, $R^2>0.74$),表明深层土壤含水量亏缺在监测期内持续加剧,但不同林龄果园的加剧速率存在差异。中龄果园的下降速率最大,斜率为 $-0.003\ 5$,幼龄和老龄果园相近,斜率分别为 $-0.002\ 1$ 和 $-0.002\ 0$ 。



注:图中虚线表示线性拟合趋势线。

图 5 不同林龄苹果园 1~5 m 土层平均土壤含水量亏缺(ΔSWC)的时间动态与林龄演变趋势

Fig.5 Temporal dynamics and evolution trends with stand age of mean soil water content deficit (ΔSWC) in 1-5 m soil layer of apple orchards of different stand ages

分林龄看,幼龄果园在2021—2022年与农地整体接近,深层土壤水分尚未形成持续亏缺;自2024年起深层耗水逐渐增强,并在2024—2025年进一步加深,1~5 m平均 ΔSWC 由2024年7月的 -1.1% 降低至

2025年6月的 -2.6% ,表明随着林龄增加,树体生长、冠层扩大与根系取水范围加深,深层耗水逐渐增加,并不断累积^[23-24]。中龄果园在整个监测期内的土壤水分亏缺最为严重,1~5 m平均 ΔSWC 由2021年5月的

-1.0%降低至2025年6月的-6.3%,反映该阶段不仅亏缺水平最高,而且后期仍持续加深。老龄果园的1~5 m平均 ΔSWC 同样表现为亏缺逐步加深,但总体程度弱于中龄果园,且伴随阶段性缓解,2024年4—7月增加0.9%,2025年3—5月增加0.7%,说明老龄阶段深层耗水强度有所降低,亏缺发展相对放缓。已有研究^[25]在黄土高原苹果园中观察到老龄果园亏缺幅度较小的证据,可能与树势衰退导致需水降低有关。

将1~5 m平均 ΔSWC 变化映射到林龄序列后可以看出,幼龄果园深层土壤水分状况总体接近农地,进入中龄阶段后亏缺加深更为明显,老龄阶段虽呈增加趋势,但增幅趋缓(图5b)。林龄序列的对照不可避免地受到时空互代的影响:不同林龄对应的观测年份并不一致,而深层土壤水分对补给变化的响应较慢,常延续并叠加前期水分状态^[25];同时,不同年份进入果树生长季前的累计补给背景不同,也改变剖面可利用水储量的起点。因此,跨年份对照中

出现老龄果园土壤水分亏缺弱于中龄果园的现象,更合理的解释是林龄效应与前期水分背景共同作用的结果,而不宜仅依据树龄大小作单因素判断。

综上可知,果园深层土壤水分亏缺随林龄增长呈现先增强后减弱的演变规律,即幼龄果园由接近农地逐步转入持续亏缺并加深,中龄果园亏缺最重且累积加深速率最快,老龄果园亏缺次之,加深幅度较中龄果园偏缓,并伴随阶段性缓解。

2.2.3 土壤储水量亏缺的关键层位 从分层贡献看,1~5 m剖面土壤储水量亏缺主要由少数层位贡献,不同层位对总体亏缺的贡献存在明显差异(图6)。监测后期,4~5 m土层在3种林龄果园中均表现为共同的主要亏缺层位。截至2025年,幼龄、中龄和老龄果园4~5 m土层的 ΔSWS 分别为-9.0、-17.3、-13.2 mm,均为各自剖面中亏缺最强的层位。与此相比,1~4 m范围内的主导亏缺层位随林龄而变化,从而形成不同林龄果园土壤储水量亏缺的垂向差异。

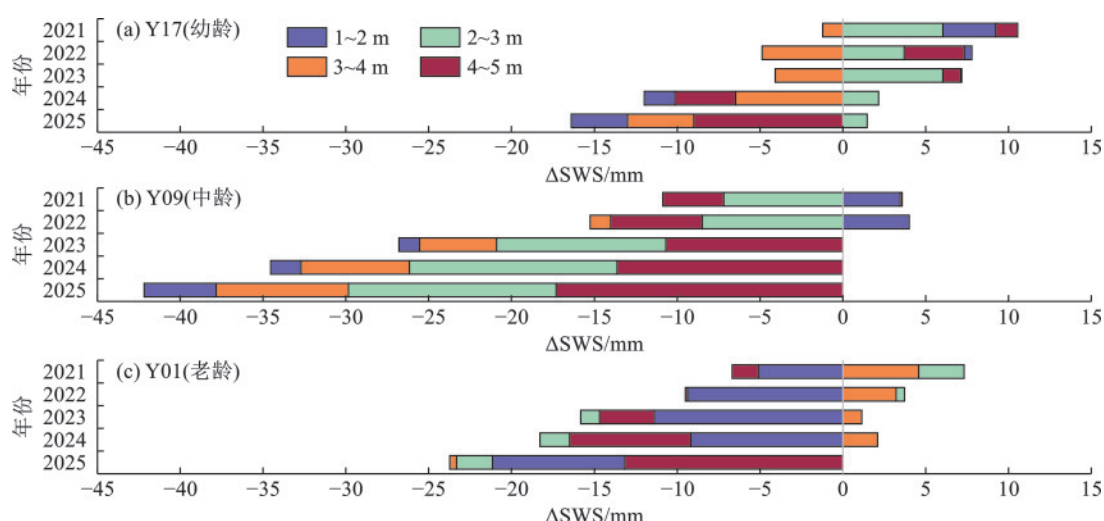


图6 不同林龄苹果园各层位土壤储水量亏缺(ΔSWS)的年际变化特征

Fig.6 Interannual variations of soil water storage deficit (ΔSWS) in different soil layers of apple orchards of different stand ages

不同林龄果园对比表明,中龄果园的关键亏缺层位最为集中,且亏缺范围最广,主要分布在2~5 m。说明中龄阶段的亏缺并非仅由最深层驱动,而是2~5 m内多个层位持续消耗共同作用的结果,因此其储水量总体亏缺最强。老龄果园土壤储水量的关键亏缺土层主要集中于1~2、4~5 m,而2~4 m土层相对较弱。2021—2025年,老龄果园1~2、4~5 m土层的土壤储水量均持续表现为亏缺,而3~4 m土层在2021—2024年多高于农地,仅在2025年出现轻度亏缺。说明老龄果园虽然存在明显的深层土壤储水量亏缺,但亏缺格局更偏向由特定层位主导,而不是像中龄果园那样在2~5 m范围内同步增强,表明其深层水分利用层位已经发生一定的调整^[26]。幼龄果园各层土壤储水量亏缺整体较弱,层间差异也相对有限,但其垂向亏缺格局已开始分化:3~4 m土层持

续表现为亏缺,4~5 m土层在监测后期与农地差异较小,转为主要亏缺层位。表明幼龄阶段深层土壤水分消耗总体仍较有限,但随着果树生长和根系下扎,深层水分亏缺已开始向更深层位发展。

上述关键亏缺层位的垂向异质性反映不同林龄果园深层水分消耗方式的差异。4~5 m土层补给受限,恢复较慢,因此在监测后期成为各林龄果园共同的主要亏缺层位。幼龄果园土壤储水量总体亏缺较轻,但深层亏缺已进入发育阶段;中龄果园亏缺范围扩展至2~5 m,导致深层耗水范围更大,总体亏缺最强;老龄果园因水分利用层位发生调整,对1~2 m层位水分利用相对增强,而4~5 m土层亏缺持续累积,从而导致2~4 m层亏缺相对减缓,并使其整体土壤储水量亏缺程度低于中龄果园。

2.3 苹果园土壤水分亏缺的对策建议

本研究发现,苹果园深层土壤水分亏缺的发育在不同林龄间具有明显的深度依赖性和阶段性:4~5 m 是不同林龄果园共同的主要亏缺层位;苹果园1~5 m 土壤水分亏缺随林龄增加呈先加剧后减缓趋势,中龄果园土壤水分亏缺最严重且深度范围最大,亏缺深度集中在2~5 m。可知,雨养苹果园的水分管理应以减缓深层土壤水分持续消耗为目标,并根据不同林龄果园的水分亏缺特征实施分龄调控。从管理优先序看,中龄果园应作为重点调控对象,生产上可通过合理修剪、控冠稳产、适度疏花疏果等措施降低蒸腾消耗,避免在高负载条件下进一步加重深层耗水。与此同时,可结合生草覆盖、绿肥间作、秸秆覆盖等地表管理方式,改善表层土壤保墒条件和降雨入渗利用过程,从而减轻深层土壤水分持续亏缺的风险^[27]。老龄果园的管理重点在于抑制既有水分亏缺的持续累积,维持树体耗水处于相对稳定水平,对于已经形成明显深层水分亏缺的地块,更适宜通过更新修剪、合理控制结果负载等方式降低树体耗水强度,减少不必要的水分支出;如果4~5 m 土层长期处于明显亏缺状态,且恢复迹象较弱,则需要结合果园更新改造逐步降低持续高耗水压力。幼龄果园整体亏缺虽弱,但在监测后期已显现亏缺加剧趋势,管理上宜在其向盛果期过渡阶段及早实施调控树势与稳定产量的干预措施,防范深层耗水在后续阶段快速增加并向2~5 m 深度拓展。

同时,区域果园的长期经营与植被更新应将关键层位的水分状况作为重要约束条件。鉴于4~5 m 土层在各林龄果园中均表现为主要土壤水分亏缺层,建议将该层位的水分状态作为评估地块深层水分承载能力的判别依据,以此识别当前立地条件是否具备持续维持高耗水果园的潜力。当4~5 m 土层长期处于水分亏缺状态且2~5 m 水分亏缺范围呈扩大趋势时,应同步考虑果园果树更新与栽植密度的调整,并采用集雨保墒措施,以提高降雨入渗利用效率、增强土壤蓄水能力,并缓解深层土壤水分亏缺的持续累积^[28-29]。由此使雨养果园的耗水强度与黄土塬区降水补给能力相匹配。

3 结 论

1)监测期内农地深层土壤水分呈阶段性增加趋势,而不同林龄果园的水分整体呈亏缺特征,其中,中龄果园亏缺过程最为持久,幼龄果园后期亏缺加剧趋势最明显,老龄果园加剧程度相对较弱,并存在阶段性水分回升。

2)以农地为参照,果园1~5 m 剖面深层土壤水分亏缺现象普遍存在,且具有明显的垂向异质性;平均水分亏缺强度表现为中龄(2.5%)>老龄(1.3%)>幼龄(0.2%)。其中,中龄果园亏缺土层最厚。

3)不同林龄果园1~5 m 平均 ΔSWC 均显著下降($R^2>0.74, p<0.001$),表明深层土壤水分亏缺在监测期内持续加剧,其中,中龄果园下降速率最快;整体上,果园深层土壤含水量亏缺随林龄的增长呈先增强后减弱的变化规律。

4)不同土层 ΔSWS 数据表明,4~5 m 土层是各林龄果园水分亏缺的关键层位,幼龄、中龄和老龄果园的水分亏缺量分别为-9.0、-17.3、-13.2 mm。因此,在黄土塬区雨养果园土壤水分的风险评估中,建议同时纳入林龄阶段与关键层位信息,并将关键层位水分状况作为土壤水分承载力的重要约束,用于指导栽植密度与果树更新周期,以实现果园耗水与降水补给的协同,降低深层土壤水分亏缺的持续累积风险。

参考文献:

- [1] Chen Hongsong, Shao Mingan, Li Yuyuan. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008, 143(1/2):91-100.
- [2] 王宪志,赵西宁,高晓东,等.黄土高原苹果园土壤水分及水分生产力模拟[J].应用生态学报,2021,32(1):201-210.
Wang Xianzhi, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. Simulation on soil moisture and water productivity of apple orchard on the Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1):201-210.
- [3] 杨雨萌,高晓东,邵晓亚,等.基于叶面积指数耦合STEMMUS模型的果园土壤水热特征[J].水土保持学报,2025,39(1):316-325.
Yang Yumeng, Gao Xiaodong, Shao Xiaoya, et al. Soil hydrothermal characteristics of orchard based on leaf area index coupled with STEMMUS model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):316-325.
- [4] Wang Xia, Fan Yanli, Yan Meifang, et al. Direct characterization of deep soil water depletion reveals hydraulic adjustment of apple trees to edaphic changes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 348:e109932.
- [5] Shao Mingan, Wang Yunqiang, Xia Yongqiu, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: A review[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1):1-8.
- [6] Feng Xiaoming, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11):1019-1022.
- [7] Hou Liyao, Liu Zhanjun, Zhao Jiarui, et al. Comprehensive assessment of fertilization, spatial variability of soil chemical properties, and relationships among nutrients, apple yield and orchard age: A case study in Luochuan County, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 122:e107285.
- [8] Li Bingbing, Wang Yunqiang, 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 and Environment, 2019, 285:e106645.

- [9] Chen Mingyu, Shao Mingan, Wei Xiaorong, et al. Response of the vertical distribution of soil water and nitrogen in the 5 m soil layer to the conversion of cropland to apple orchards in the Loess Plateau, China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022, 333: e107960.
- [10] Wang Yunqiang, Shao Mingan, Liu Zhipeng, et al. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China [J]. Pedosphere, 2015, 25(4): 546-554.
- [11] Wang Di, Wang Li. Soil water dynamics in apple orchards of different ages on the Loess Plateau of China [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-14.
- [12] 王延平, 韩明玉, 张林森, 等. 洛川苹果园土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 731-738.
Wang Yanping, Han Mingyu, Zhang Linsen, et al. Variation characteristics of soil moisture in apple orchards of Luochuan County, Shaanxi Province of Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 731-738.
- [13] Suo Lizhu, Huang Mingbin, Zhang Yongkun, et al. Soil moisture dynamics and dominant controls at different spatial scales over semiarid and semi-humid areas [J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 635-647.
- [14] 韩晓阳, 王亚萍, 朱元骏, 等. 黄土塬区果园-农田交界带土壤水分分布及农田对果园的供水特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 197-204, 215.
Han Xiaoyang, Wang Yaping, Zhu Yuanjun, et al. Soil water distribution and water supply characteristics of farmland to apple orchard in their adjacent areas on the loess tableland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 197-204, 215.
- [15] 程立平, 王亚萍, 齐光. 黄土塬区苹果种植对深剖面土壤水分和地下水补给的影响[J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2684-2694.
Cheng Liping, Wang Yaping, Qi Guang. Impacts of apple tree planting on deep soil water content and groundwater recharge for the loess tableland of China [J]. Geographical Research, 2021, 40(9): 2684-2694.
- [16] Liu Zhanjun, Hou Liyao, Zhu Yuanjun, et al. Vertical distribution and regulation of Olsen-phosphorus in 6-m soil profiles after farmland-to-apple orchard conversion on the Chinese Loess Plateau [J]. Catena, 2021, 202: e105254.
- [17] 温慧娴, 赵西宁, 高飞. 黄土高原不同降水量区苹果园土壤干燥化效应及生产水足迹模拟[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1927-1936.
Wen Huixian, Zhao Xining, Gao Fei. Simulation of soil desiccation effects and production water footprint of apple orchards in different precipitation areas of the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1927-1936.
- [18] Yu Bowei, Liu Gaohuan, Liu Qingsheng, et al. Effects of topographic domain and land use on spatial variability of deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. Hydrology Research, 2019, 50(5): 1281-1292.
- [19] 安芷生, Porter S C, Kukla G, 等. 最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据[J]. 科学通报, 1990, 35(7): 529-532.
AN Z S, PORTER S C, KUKLA G, et al. Magnetic susceptibility evidence for monsoon changes on the Loess Plateau during the past 130 000 years [J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(7): 529-532.
- [20] 王为, 黄慧, 耿浩博, 等. 2025 年全国旱情及干旱防御工作[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(12): 8-11.
Wang Wei, Huang Hui, Geng Haobo, et al. National drought disaster prevention in China in 2025 [J]. China Flood and Drought Management, 2025, 35(12): 8-11.
- [21] Wang Yakun, Jiang Yanan, Zhao Ying, et al. Modeling the impact of long-term land use changes on deep soil hydrological processes in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 643: e131944.
- [22] Tao Ze, Neil E, Si Bingcheng. Determining deep root water uptake patterns with tree age in the Chinese loess area [J]. Agricultural Water Management, 2021, 249: e106810.
- [23] Wang Yaping, Han Xiaoyang, Yan Weiming, 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: e107396.
- [24] 张静, 王力. 黄土塬区苹果园蒸散与环境因素的关系[J]. 林业科学, 2018, 54(3): 29-38.
Zhang Jing, Wang Li. The relationship between the evapotranspiration and the environmental factors in the apple orchards in the loess tableland area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(3): 29-38.
- [25] Wang Shaofei, An Juan, Zhao Xining, et al. Age- and climate-related water use patterns of apple trees on China's Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: e124462.
- [26] Shi Peijun, Gai Haoqi, Liu Wenzhao, et al. Links of apple tree water uptake strategies with precipitation and soil water dynamics in the deep loess deposits [J]. Journal of Hydrology, 2023, 623: e129829.
- [27] 梁青, 张体彬, 程煜, 等. 绿肥间作对渭北果园土壤水分、养分及苹果产量的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 250-259.
Liang Qing, Zhang Tibin, Cheng Yu, et al. Effects of green manure intercropping on soil moisture, nutrients, and apple yield in a Weibei apple orchard [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 250-259.
- [28] 倪文乐, 雷舒晨, 郝爱妮, 等. 渭北旱塬苹果园集雨保墒措施对土壤水分、根系及降雨利用的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4): 304-312.
Ni Wenle, Lei Shuchen, Hao Aini, et al. Impact of rainwater harvesting and moisture conservation measures in apple orchards of Weibei dryland on soil moisture, root systems, and rainfall utilization [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 304-312.
- [29] Ding Wenbin, Wang Fei, Dong Yunyun, et al. Effects of rainwater harvesting system on soil moisture in rain-fed orchards on the Chinese Loess Plateau [J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: e106496.