

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.040

CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.040

刘皓月, 吴松柏, 刘庭宇. 暴雨强度与过程对渭北旱塬塬边土壤水分亏缺的调控机制[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 253-263.

LIU Haoyue, WU Songbai, LIU Tingyu. Regulation mechanism of rainstorm intensity and process on soil moisture deficit in the edge zones of Weibei rainfed plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 253-263.

暴雨强度与过程对渭北旱塬塬边 土壤水分亏缺的调控机制

刘皓月^{1,2}, 吴松柏^{1,2}, 刘庭宇^{1,2}

(1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: [目的] 为阐明塬边土壤水分亏缺的时空演变规律, 揭示暴雨(24 h降雨量 ≥ 50 mm)对土壤水分亏缺的调控机制, 优化苹果园水分管理。[方法] 在距塬边 3.5 m (L1)、7 m (L2) 及 11.5 m (L3) 处布设土壤水分传感器, 分别监测 2023 年苹果生长季距地表 10、40、70 cm 深度土层的体积含水量动态。基于实测数据率定与验证 Hydrus-2D 模型, 通过情景模拟, 控制暴雨总量不变, 定量解析暴雨强度、间隔及过程对塬边土壤水分亏缺补充量的影响。[结果] 生长季内, 塬边(L1, L2)在 40、70 cm 土层持续存在土壤水分亏缺。相较于塬内(L3), 塬边 L2 与 L1 点 40 cm 土层的平均含水量分别降低 3.21% 与 6.76%; 70 cm 土层则分别降低 3.32% 与 5.77%。模型模拟表明, 在相同暴雨总量(160 mm)条件下, 降雨间隔对塬边土壤水分亏缺的补充量影响不显著; 然而, 随着暴雨强度增加(历时缩短), 其对塬边土壤水分亏缺的补充量呈下降趋势, 深层土层(70 cm)甚至出现负补偿。基于马尔科夫链-蒙特卡洛方法生成的 90 场随机降雨过程分析进一步揭示, 塬边土壤水分亏缺的补充量与最大 1 h 累计降雨量呈负相关, 表明短时高强度暴雨反而不利于塬边深层土壤水分的补充恢复。[结论] 揭示暴雨强度与过程特征对渭北旱塬塬边土壤水分亏缺的关键调控作用, 指出未来极端降雨格局变化可能加剧该区域深层土壤水分的胁迫风险, 为渭北旱塬苹果园的水分精准管理与补充灌溉制度的制定提供科学依据。

关键词: 渭北旱塬; 边缘区域; 土壤水分; 暴雨特征; 时空变化; Hydrus-2D

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0253-11

Regulation Mechanism of Rainstorm Intensity and Process on Soil Moisture Deficit in the Edge Zones of Weibei Rainfed Plateau

LIU Haoyue^{1,2}, WU Songbai^{1,2}, LIU Tingyu^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127)

Abstract: [Objective] To clarify how different rainstorm characteristics (24-h rainfall ≥ 50 mm) regulate the spatiotemporal dynamics of SM deficits in the edge zone and optimize water management in apple orchards. [Methods] SM sensors were installed at 3.5 m (L1), 7 m (L2), and 11.5 m (L3) from the plateau edge to monitor volumetric SM at 10, 40, and 70 cm depths during the 2023 apple growing season. These observations were used to calibrate and validate a Hydrus-2D model. Scenario simulations with equal total rainstorm amounts were then conducted to quantitatively assess the effects of rainstorm intensity, interval, and temporal structure on SM-deficit replenishment. In addition, 90 stochastic rainstorms were generated using a Markov chain-Monte Carlo framework to further analyze SM responses to rainstorm variability. [Results] The edge zone (L1 and L2) exhibited persistent SM deficits at 40 and 70 cm depths throughout the growing season. Compared with L3 (inner zone), average SM at L2 and L1 was 3.21% and 6.76% lower at 40 cm, and 3.32% and 5.77% lower at 70 cm,

收稿日期: 2025-10-08

修回日期: 2025-12-03

录用日期: 2025-12-11

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(42477360)

第一作者: 刘皓月(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事坡面水文研究。E-mail: liuyue1112025@163.com

通信作者: 吴松柏(1990—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事坡面水文和土壤侵蚀研究。E-mail: s.wu@nwu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

respectively. Under scenarios with equal total rainstorm amounts (160 mm), rainstorm interval had negligible influence on SM-deficit replenishment, whereas higher intensity (shorter duration) rainstorms reduced SM replenishment and even produced negative recharge in deeper soil layers (70 cm). Stochastic rainstorm simulations further showed that SM replenishment was significantly negatively correlated with maximum 1-h cumulative rainfall depth, indicating that short-duration, high-intensity storms are ineffective for restoring deep SM deficits. [Conclusion] Rainstorm intensity and temporal structure exert a critical regulatory influence on SM-deficit dynamics in the edge zones of the Weibei rainfed plateau. Future shifts toward more intense, short-duration rainfall events may exacerbate deep-soil water stress in local orchards. These findings provide a scientific basis for precise water-management strategies and the development of supplementary irrigation schedules for apple orchards in the region.

Keywords: Weibei rainfed plateau; edge zone; soil moisture; rainstorm characteristics; spatiotemporal variation; Hydrus-2D

Received: 2025-10-08

Revised: 2025-12-03

Accepted: 2025-12-11

Online(www.cnki.net): 2026-01-13

渭北旱塬塬边土壤水分是影响当地植被(作物)生长、沟坡侵蚀、沟道发育等生态与地貌过程的关键因素^[1-3]。一方面,渭北旱塬是世界优质苹果生产基地之一^[4],在塬面土地资源有限的背景下,其塬边地带也广泛种植着苹果树,由于沟壁侧向蒸散发的强烈消耗,塬边土壤水分常处于亏缺状态,从而制约苹果树的正常生长发育和苹果质量^[5];另一方面,塬边土壤水分不足影响沟壁植被的恢复进程,改变坡面产流机制与土壤侵蚀强度^[6-7],进而削弱水土保持及固沟保塬措施的成效^[8]。因此,深入探究塬边土壤水分亏缺的时空演变规律,对优化塬边作物水分管理、促进沟壁植被重建、防治水土流失及维护塬体稳定均具有重要意义。

目前,虽鲜有研究专门聚焦于渭北旱塬塬边土壤水分的时空变化,但与之具有相似水文特征的梯田田埂及切沟沟岸等区域已受到较多关注。例如,LÜ等^[9]研究发现,梯田边缘因侧壁蒸发强度较高,其土壤水分体积分数显著低于内部区域;MELLIGER等^[10]和LI等^[11]也研究发现,切沟沟壁植被的蒸腾耗水导致沟缘附近土壤水分体积分数明显偏低,且随着与沟缘距离的增加(通常为1.0~2.5 m),此差异逐渐消失。然而,塬边在地形结构、植被组成及水文过程方面均与梯田田埂或切沟沟岸系统存在差异,其土壤水分亏缺的时空格局及主控因素仍有待进一步厘清。

降雨是渭北旱塬土壤水分最主要的补给来源^[12],其特性对塬边水分时空动态具有重要影响。JIA等^[13]和WU等^[14]的研究表明,在降雨总量相同的情况下,高强度降雨对土壤水分体积分数,尤其是深层土壤水分体积分数的提升作用更为显著;而低于25 mm的降雨事件对深层土壤水分的补给效果有限。

尽管上述研究揭示了常规降雨条件下土壤水分变化的部分规律,但在全球气候变化背景下,黄土高原极端降雨事件频发、强度增强^[15],暴雨对塬边土壤水分亏缺的调控机制仍不明确,相关研究尚显不足。

为弥补前人研究的不足,本研究于2023年苹果生长季,在渭北旱塬距离塬边3.5、7.0、11.5 m处布设土壤水分传感器,同步测定距地表10、40、70 cm土层深度的体积含水量,系统刻画塬边土壤水分亏缺的时空变化特征。在此基础上,采用实测土壤水分数据对Hydrus-2D模型进行率定和验证,通过情景模拟,定量揭示不同暴雨特征对塬边土壤水分亏缺的调控机制,以期当地苹果园的水分精准管理与补充灌溉实践提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究在陕西省延安市黑木沟附近的渭北旱塬(35°45′03″N,109°25′33″E)上开展(图1a)。该区域属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降水量590 mm,集中在6—9月,年平均气温9.2℃,年平均太阳辐射量5440 MJ/m²,全年无霜期180 d^[16]。土壤以黄土沉积母质发育的均质粉壤土为主,土层深厚、结构疏松,最大厚度可达120 m^[17]。该区塬面海拔较高,光热资源丰富,昼夜温差显著,被联合国粮农组织认定为苹果最佳优生区。

研究区地下水埋深普遍在100 m左右^[18],难以对浅层土壤水形成有效补给,天然降雨是当地苹果树生长的主要水分来源。研究区地处典型的黄土高塬沟壑区,强烈的沟蚀不断切割、侵蚀土地,使得平坦的塬面日益缩小,当地村民迫于增产需求,苹果树的种植已广泛拓展至塬边地带(图1b)。实地调查发现,塬边苹果树普遍表现为生长迟缓、苹果产量与品

质均低于塬内区域,为维持塬边苹果产量与质量常需在生长季实施补充灌溉(图 1c)。此现象可能与塬边沟壁上密集分布的植被(如刺槐、白茅、侧柏和黄

背草等)有关,其强烈的侧向蒸散作用加剧塬边土壤水分的消耗,从而导致塬边土壤水分长期低于塬内^[19]。

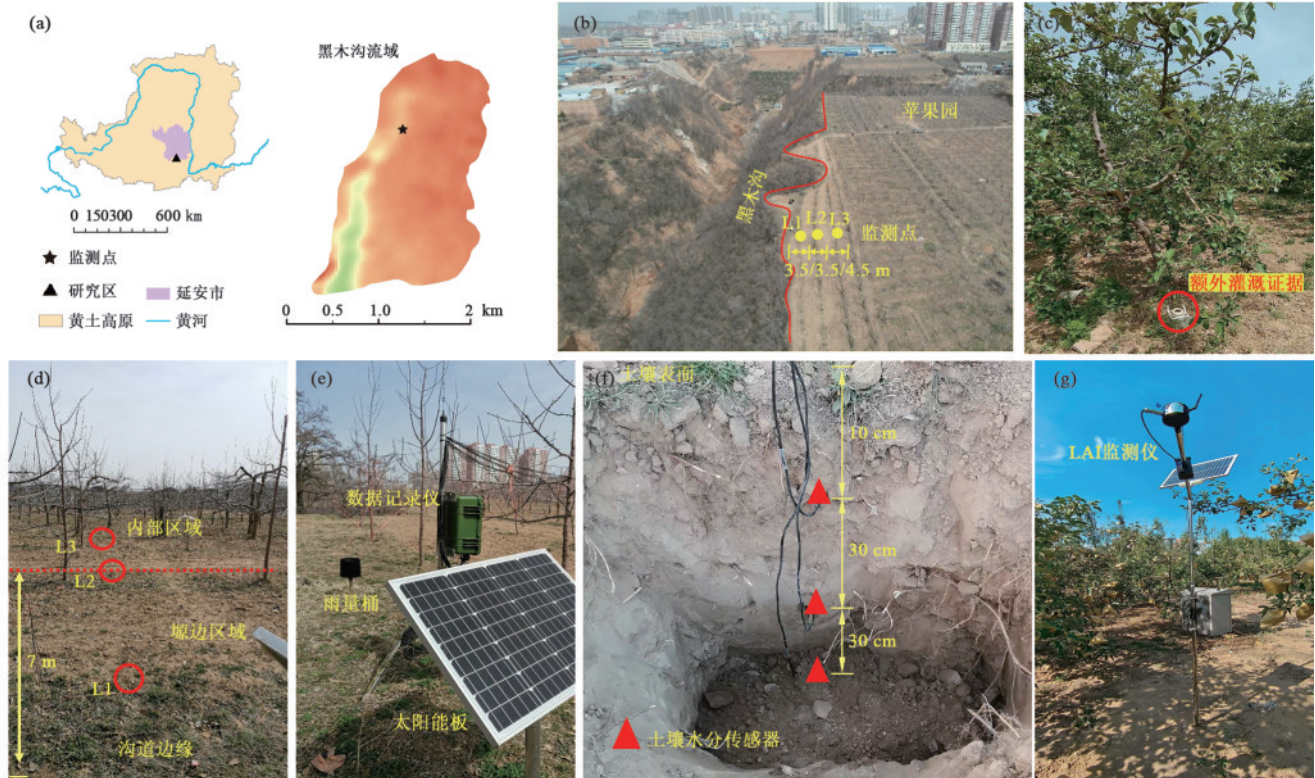


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 研究方法

为量化分析塬边土壤水分亏缺的时空变化特征及其对不同暴雨强度与过程的响应,本研究拟采用野外监测和数学模型相结合的研究方法。首先,通过野外监测数据揭示塬边土壤水分亏缺的时空变化特征;在此基础上,选取 2 场典型降雨条件下实测土壤水分数据,对 Hydrus-2D 模型进行率定和验证,进而基于模型情景模拟,量化分析不同暴雨强度、间隔、过程等特征对塬边土壤水分亏缺的调控机制。

1.2.1 野外监测与采样

1) 土壤水分监测

为监测塬边与内部区域土壤水分的时空动态,本研究沿垂直塬边方向布设 3 个土壤水分监测点,分别位于距塬边 3.5 m(L1)、7.0 m(L2)和 11.5 m(L3)处。每个监测点分别在距地表 10、40、70 cm 深度土层安装 RRECT5 型土壤水分传感器(北京雨根科技有限公司),测量精度为 ±1%。监测时段覆盖 2023 年整个苹果树生长季(4 月 1 日至 10 月 31 日),采样间隔设定为 1 h,传感器布设情况见图 1f。在传感器安装前,均进行实验室校准以保障传感器监测数据的

可靠性。校准方法为:于研究区采集原状土样,配制 5 组不同含水量的土壤样本,分别采用烘干法与传感器同步测定土壤水分体积分数,建立传感器读数与烘干法实测值之间的回归关系曲线,据此将传感器监测值转换为真实土壤水分体积分数。所有 9 个传感器所建立的关系曲线决定系数(R^2)均 > 0.95,表明校准过程有效,系统误差可控。

2) 降雨过程监测与降雨事件划分

为精确监测实际降雨过程,研究区内布设 1 台 RR3665R 型自动翻斗式雨量计(北京雨根科技有限公司),其分辨率为 0.2 mm。该设备监测时段覆盖 2023 年整个苹果树生长季(4 月 1 日至 10 月 31 日),采集时间间隔为 1 h,具体布设位置见图 1e。

为进一步分析土壤水分对降雨事件的响应规律,本研究依据 10 cm 土层水分体积分数对降雨的敏感特性,识别其在整个生长季中的周期性波动,据此将观测期划分为 15 个子周期(R1~R15),每个周期对应 1 次独立降雨过程。参考中国气象局的降雨等级划分标准^[20],将 15 场降雨划分为 4 种类型,即 R15 为小雨,R4、R5、R6、R9、R12 和 R14 为中雨,R1、R2、R3、R7、R10、R11 和 R13 为大雨,R8 为暴雨。

3) 土壤性质与植被根系密度

采用环刀(直径 6.18 cm、高 2 cm)分别于 3 个监测点(L1~L3)的 10、40、70 cm 深度土层采集原状土样,每层设置 3 个重复。

利用 Mastersizer 2000 激光粒度仪(英国马尔文仪器公司)测定土壤颗粒组成,获取粒径分布数据。

采用烘干法(105 °C, 24 h)测定土壤水分体积分数、干体积质量及总孔隙度。根系密度通过环刀法同步测定,每层同样设置 3 个重复。将采集的土样轻轻碾碎后,用镊子拣取全部活根,测量其总长度,结合环刀体积计算出根系密度(cm/cm^3)^[21]。全部土壤理化性质测定结果见表 1。

表 1 土壤性质与根系密度
Table 1 Soil properties and root densities

监测点	土层深度/ cm	干体积质量/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度	黏土/%	粉土/%	砂土/%	初始土壤水分 体积分数	根系密度/ ($\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$)
L1	10	1.21	0.54	5.43	84.11	10.46	0.14	2.08
	40	1.34	0.49	5.42	80.63	13.95	0.12	0.36
	70	1.26	0.52	4.85	83.97	11.18	0.18	0.36
L2	10	1.23	0.54	5.13	84.34	10.53	0.15	0.79
	40	1.39	0.48	4.82	83.09	12.09	0.16	0.32
	70	1.24	0.53	4.45	83.19	12.36	0.19	0.26
L3	10	1.17	0.56	5.32	82.94	11.74	0.18	0.40
	40	1.34	0.49	4.97	83.72	11.31	0.23	0.20
	70	1.29	0.51	5.08	84.87	10.05	0.24	0.10

4) 苹果树叶面积指数(LAI)

为获取苹果树冠层叶面积指数(LAI)的动态数据,在研究区内布设 1 台叶面积指数仪(北京星视图科技有限公司)。该设备成像分辨率为 500 万像素,于 2023 年整个苹果树生长季(4 月 1 日至 10 月 31 日)进行定点持续监测,读数间隔设置为 1 d,具体安装位置见图 1g。

1.2.2 Hydrus-2D 模型 野外监测虽可获取塬边土壤水分的实际动态数据,但在自然条件下,暴雨的强度、历时、间隔与总量等多重特征往往相互耦合,仅凭实测数据难以有效分离单一暴雨特征对塬边土壤水分亏缺的影响机制。为弥补此局限,本研究采用 Hydrus-2D 模型,系统模拟不同暴雨情景,通过控制变量实现对特定暴雨特征的独立效应分析,从而深入揭示塬边土壤水分亏缺对不同暴雨特征的响应规律。

1) 土壤水分运动方程

Hydrus-2D 模型采用 Richards 方程描述土壤水分运动^[22],其可以表示为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h) \quad (1)$$

式中: x 为水平向坐标,cm; z 为垂向坐标,cm; t 为时间,h; h 为压力水头,cm; θ 为土壤水分体积分数,%; $K(h)$ 为土壤非饱和导水率,cm/h; $S(h)$ 为根系吸水项,h。

土壤水分特征曲线利用 van Genuchten 模型进行

拟合^[23],拟合方程为:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^{1-1/n}} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{n/(n-1)})^{1-1/n}\right]^2 & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中: θ_r 为土壤残余水分体积分数; θ_s 为土壤饱和水分体积分数; S_e 为土壤相对饱和度; K_s 为土壤饱和导水率,cm/h; l 为土壤孔径关联度系数,一般取 0.5; α 为进气吸力倒数; n 为孔径分布指数。

2) 根系吸水模型

根系吸水采用 Feddes 模型^[24]进行计算,表达式为:

$$S(h) = \alpha(h) b(x, z) T_p L \quad (5)$$

式中: $S(h)$ 为根系吸水速率,cm; $\alpha(h)$ 为水分胁迫函数; $b(x, z)$ 为归一化的根系吸水空间分布函数,可根据各监测点实测植被根系密度给定,1/cm; L 为根区分布最大土壤表面宽度,cm; T_p 为潜在蒸腾量,cm。潜在蒸腾量和潜在土壤蒸发量可基于参考蒸散发(ET_0)进行分配,计算公式为:

$$\begin{cases} T_p = ET_0 (1 - e^{-\beta LAI}) \\ E_p = ET_0 - T_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸发量,可基于相关气象数据采用 Penman-Monteith 公式进行计算^[25],cm; T_p 为潜

在蒸腾量, cm; E_p 为土壤潜在蒸发量, cm; k 为冠层辐射消光系数, 一般取 0.5; LAI 为叶面积指数, 可根据实测 LAI 确定。值得注意的是, 根系吸水其他参数可直接从模型数据库中选用经过广泛验证的落叶果树(deciduous fruit)经验参数来确定^[25]。

3) 模型计算域与边界条件设置

根据研究区实际地形特征, 模型将土壤剖面概化为梯形计算域, 其上边界长 13.0 m, 下边界长 15.0 m, 垂直高度为 1.0 m, 几何尺寸与实地情况相符。模型初始条件由各监测点不同土层的实测土壤水分体积分数确定。边界条件设定为: 上边界及左侧边界设置为大

气边界, 用于输入实测降雨数据及基于公式(6)计算的潜在蒸散发量; 下边界设为自由排水边界; 右侧边界采用零通量边界, 忽略该方向的侧向水分交换。

4) 不同暴雨情景设置

为评估暴雨强度与间隔对塬边土壤水分亏缺的影响, 本研究基于实测暴雨过程 R8 的雨型特征, 分别设置 2 组情景: 一组控制总雨量为 160 mm, 设置 10、20、40、80 mm/h 4 种降雨强度(分别记为 X1~X4), 用于分析降雨强度效应; 另一组控制总雨量相同, 设置 0、6、12、18 h 4 种降雨间隔(分别记为 X5~X8), 用于分析降雨间隔效应。所设定情景的具体降雨过程见图 2。

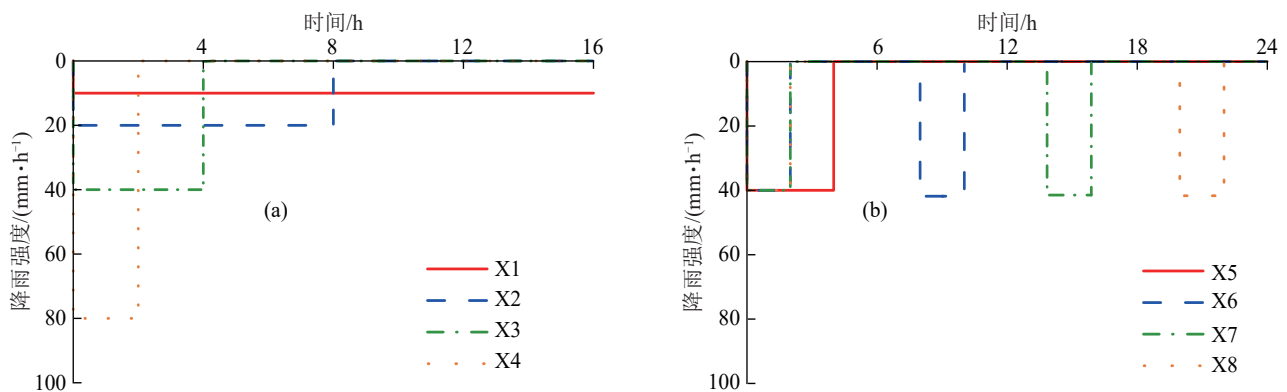


图 2 8 种典型暴雨情景

Fig. 2 Eight typical rainstorm scenarios

考虑到恒定均匀降雨过程与实际暴雨过程存在显著差异, 为深入揭示不同降雨过程对塬边土壤水分亏缺的影响, 本研究基于马尔科夫链-蒙特卡洛方法^[26]生成 90 场随机暴雨过程, 并控制每场降雨总量均为 160 mm。具体生成步骤包括: 首先基于 R8 暴雨过程分析, 确定每小时无雨转雨的概率 $p_{dw}=0.04$, 以及由雨转无雨的概率 $p_{wd}=0.19$; 随后采用蒙特卡洛模拟, 依据 p_{dw} 与 p_{wd} 逐时判定降雨发生状态; 进一步根据 R8 过程中降雨强度所符合的 Gamma 分布, 利用蒙特卡洛方法生成各降雨时段的强度值; 最终通过等比缩放确保每场模拟降雨的总量一致。

为统一表征塬边土壤水分亏缺程度, 在研究暴雨对塬边土壤水分亏缺的调控机制时, 选取 L3 与 L1 点之间的土壤含水量差值作为塬边土壤水分亏缺的分析指标。该选择基于 2 点考虑: 一方面, L3~L1 点与 L3~L2 点的土壤含水量差值变化趋势基本一致; 另一方面, L1 点作为最靠近塬边的位置, 其土壤水分亏缺程度最为显著, 因而更具代表性。

2 结果与分析

2.1 塬边土壤水分亏缺时空变化特征

根据 L1~L3 点的土壤水分体积分数监测结果(图 3), 塬边(L1、L2)与塬内(L3)在各土层均存在水

分差异, 且 L1 点的亏缺差值显著大于 L2 点。从垂直分布来看, 不同土层的水分亏缺幅度差异明显: 10 cm 土层中, L2 与 L1 点的平均含水量分别较 L3 点降低 0.61% 和 0.93%, 反映出塬边表层土壤水分亏缺较小; 而在 40 cm 土层, L2、L1 点分别较 L3 点降低 3.21% 和 6.76%; 70 cm 土层的差异与之相近, 分别达 3.32% 和 5.77%。表明塬边土壤水分亏缺程度随距沟缘距离的减小而加剧, 且主要集中于 40、70 cm 土层。

降雨是驱动土壤水分动态的关键因素, 不同降雨类型下各点位的土壤水分差异变化显著, 进而影响塬边水分亏缺的时空变化模式。具体而言, 小雨期间(R12)各土层水分差值基本稳定, 说明其对塬边土壤水分亏缺影响甚微; 中雨(R2)仅引起 10 cm 土层土壤水分差值的波动, 40、70 cm 土层则维持稳定; 而在暴雨(R8)过后, 40、70 cm 土层的土壤水分亏缺均得到一定程度的缓解, 其中 40 cm 土层 L1、L2 点的亏缺幅度分别减少 10.71% 与 6.64%, 70 cm 土层则分别减少 1.91% 与 1.93%。说明暴雨是缓解塬边土壤水分亏缺的关键自然过程, 因而有必要深入探究其强度、历时与分布等特征对塬边土壤水分亏缺恢复的具体影响机制。

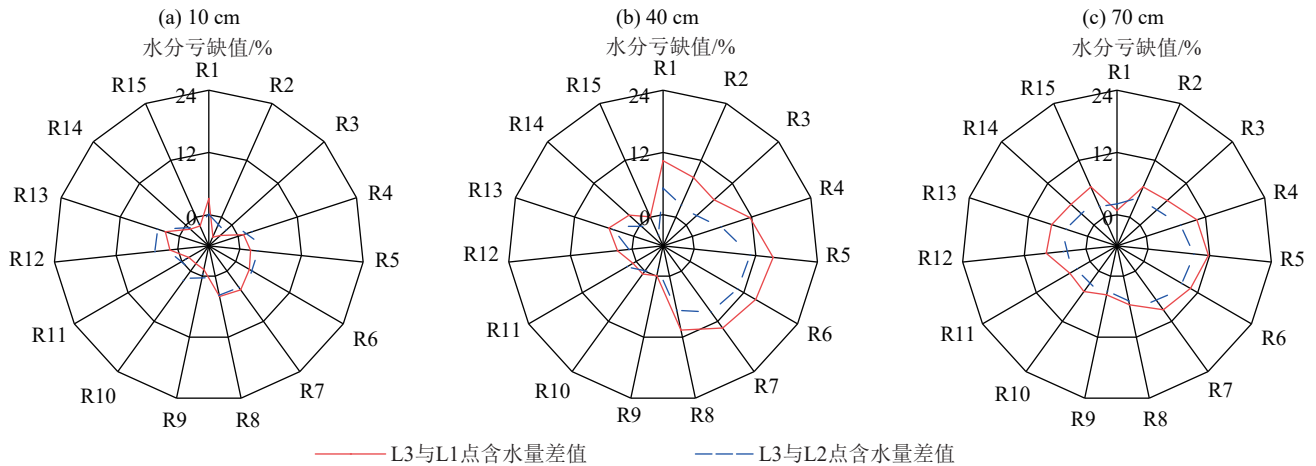


图 3 不同土层深度塬边土壤水分亏缺时空变化过程

Fig. 3 Spatiotemporal dynamics of soil moisture deficits at different soil depths in the edge zone of the plateau

2.2 暴雨特征对塬边土壤水分亏缺的影响

2.2.1 模型验证 在应用Hydrus-2D模型模拟暴雨对塬边土壤水分的影响前,需对模型进行参数率定与验证。本研究从生长季观测的15场降雨事件中,选取R11(大雨)和R8(暴雨)2次高强度降雨过程分别用于模型率定与验证。率定所得土壤水力参数见表2,模拟与实测含水量的对比见图4。结果显示,R8与R11事件中各土层水分体积分数模拟值与实测值

之间的RMSE分别为3.41%和1.71%,表明模型能够较好地重现不同降雨条件下L1~L3点各土层的土壤水分动态。模型亦准确捕捉到2场降雨过程中塬边土壤水分亏缺的时空变化趋势,说明其适用于研究不同暴雨特征对塬边土壤水分亏缺的调控机制。值得注意的是,受塬边土壤空间异质性的影响(表1),各监测点率定所得的水力参数存在一定差异(表2),符合实际土壤特性的空间变异规律。

表 2 土壤水力参数

Table 2 Soil hydraulic parameters

监测点	土层深度/cm	θ_r	θ_s	$\alpha/(1 \cdot \text{cm}^{-1})$	n	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	l
L1	10	0.12	0.44	0.013	1.35	2.0	0.5
	40	0.12	0.50	0.013	1.35	2.0	0.5
	70	0.12	0.46	0.008	1.35	2.0	0.5
L2	10	0.12	0.44	0.013	1.35	1.5	0.5
	40	0.12	0.46	0.013	1.35	0.8	0.5
	70	0.12	0.44	0.013	1.35	1.0	0.5
L3	10	0.12	0.44	0.013	1.50	2.0	0.5
	40	0.12	0.44	0.013	1.50	1.0	0.5
	70	0.12	0.44	0.010	1.45	2.0	0.5

2.2.2 暴雨强度对塬边土壤水分亏缺的影响 图5为X1~X4不同暴雨强度条件下L1与L3点各土层土壤含水量及其差值随时间的变化过程。在10 cm土层,所有降雨强度下L1与L3点的土壤水分体积分数均呈先升后降趋势。随着降雨强度增大,降雨历时缩短,土壤含水量峰值出现时间提前,但后期下降更为迅速。该土层的塬边土壤水分亏缺均表现为先缓解后回升的动态,至第10d时,X1~X4不同暴雨强度情景下塬边土壤水分亏缺的补充量分别为2.30%、2.08%、1.88%和1.83%。受土壤入渗滞的影响,40 cm土层的土壤水分体积分数响应较表层有所延迟,且L1点的响应时间显著长于L3点,主要源于其初始土壤含水量较低,需更多水分补充上层土壤。该土层的水分亏缺在第10d均

得到有效恢复,X1~X4不同暴雨强度情景下塬边土壤水分亏缺的补充量分别为11.11%、10.81%、9.69%和8.20%。70 cm土层的土壤水分体积分数变化趋势与40 cm土层相似,但在高降雨强度情景(40、80 mm/h)下,由于地表径流的快速形成使有效入渗减少,L1点该层土壤水分体积分数在整个过程中基本未获补充,降雨结束后塬边水分亏缺反而有所加剧,在10、20 mm/h的较低降雨强度下,地表径流产生较慢,土壤水得到有效补充,第10d时水分亏缺分别减少2.32%、1.72%。综上所述,尽管暴雨可显著缓解中浅层(10、40 cm)土壤水分亏缺,但随着雨强增大,地表径流损失加剧,导致其对深层土壤水分的补给效应减弱,甚至在极端高强度降雨条件下可能进一步加剧塬边土壤水分亏缺。

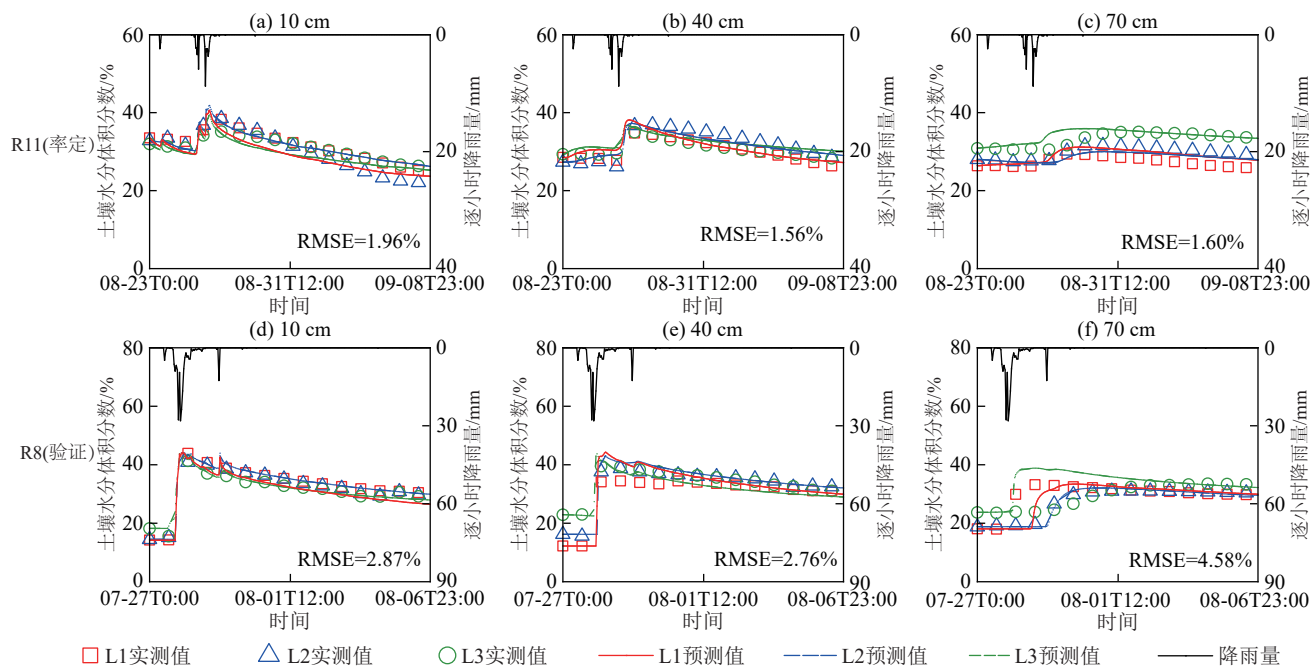


图 4 模型模拟值与野外实测值对比

Fig. 4 Comparison of model simulation and field observation

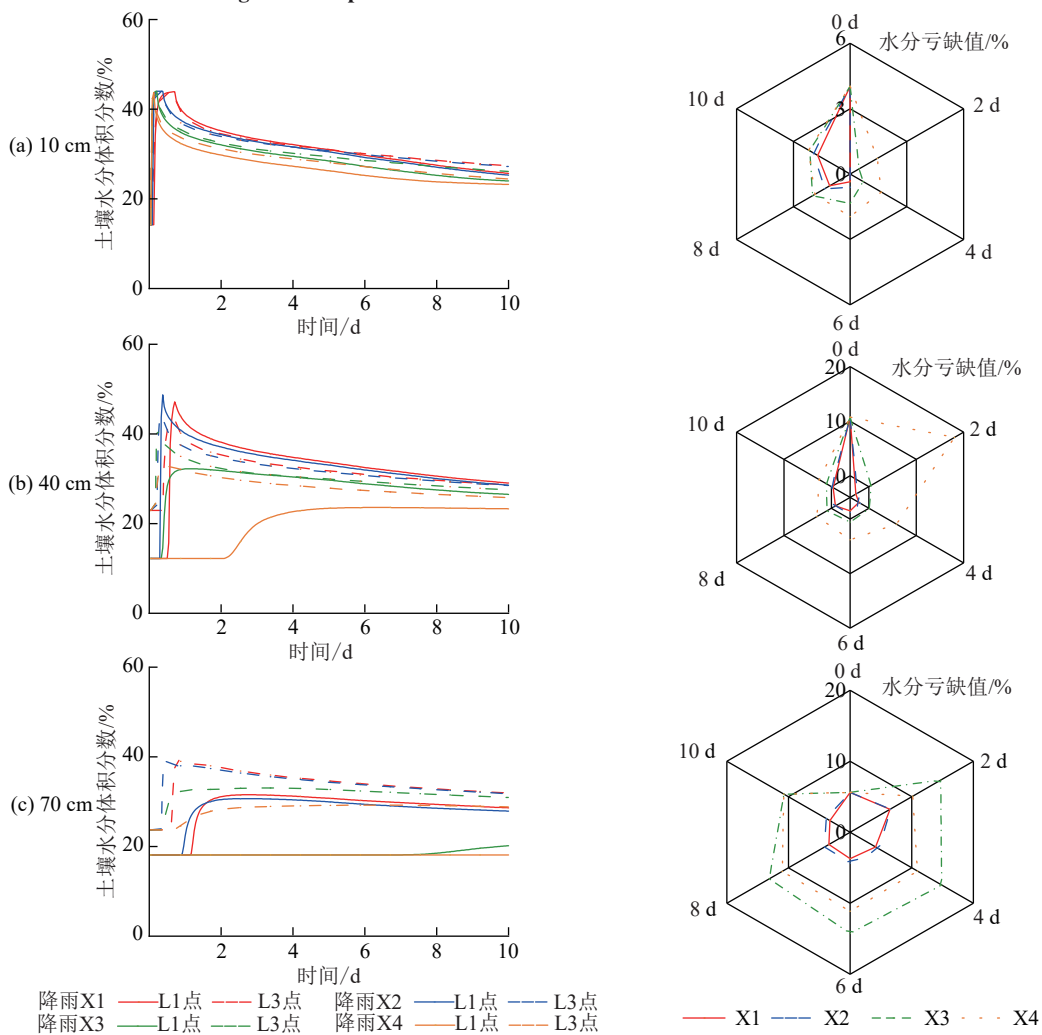


图 5 不同暴雨强度条件下 L1 和 L3 监测点各层土壤水分体积分数及其差值随时间的变化

Fig. 5 The variation of soil moisture and its difference in each layer at monitoring points L1 and L3 under different rainstorm intensities over time

2.2.3 暴雨间隔对塬边土壤水分亏缺的影响 由图 6 可知,X5~X8 不同暴雨间隔情景下 L1 与 L3 点各土层土壤水分体积分数及其差值的动态变化。在 10 cm 土层,各间隔情景下土壤水分体积分数均呈先上升后下降趋势,且间隔变化对该层塬边土壤水分亏缺的影响较小。至第 10 d,X5~X8 情景下的塬边土壤水分亏缺补充量分别为 1.79%、1.67%、1.63% 和 1.61%,表明该层土壤水分亏缺均获得一定程度的恢复。在 40、70 cm 等深层土层中,土壤水分体积分数对降雨的响应时间显著延长,尤以 L1 点 70 cm 土层最为明显,其水分体积分数在 5 d 后才开始上升,并在达到峰值后缓慢下降,反映出深层土壤具有较强的持水能力。40 cm 土层的塬边土壤水分亏缺在所有情景下均得到有效恢复,初

始亏缺为 10.72%,至第 10 d 时 X5~X8 情景对应的塬边土壤水分亏缺补充量分别为 9.76%、9.79%、9.80% 与 9.80%。而在 70 cm 土层,由于 L1 点水分响应滞后且补给量有限,塬边土壤水分亏缺呈现先升后降的变化过程,至第 10 d 时各情景下的塬边土壤水分亏缺补充量分别为 -3.20%、-2.26%、-2.17% 和 -2.19%,即塬边土壤水分亏缺较初始状态进一步加剧。

综合来看,相较于连续均匀暴雨(X5),间断性降雨有助于减少地表径流,从而提高对深层土壤水分的补给效率,使 70 cm 土层的塬边土壤水分亏缺减少约 1%。然而,由于本研究所设降雨间隔较短(≤ 18 h),其整体对塬边土壤水分亏缺补给量的影响较为有限。

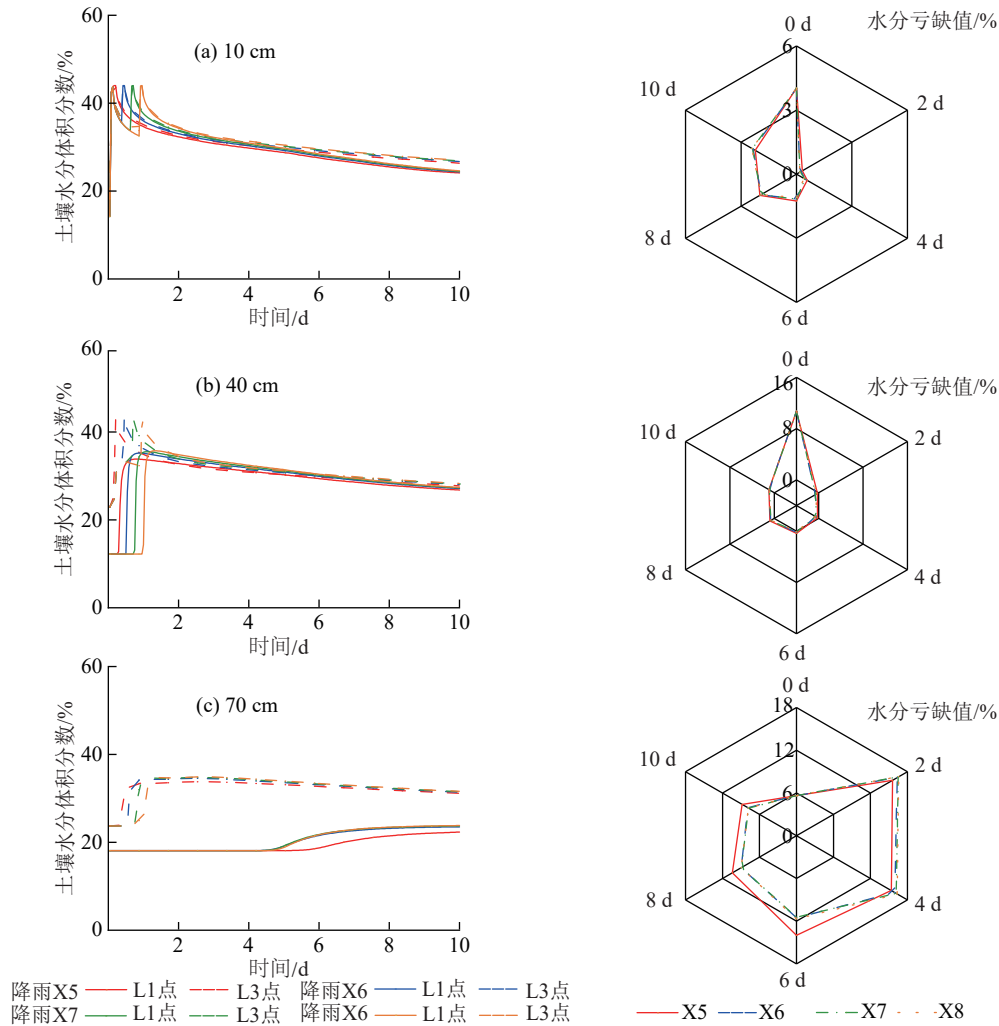


图 6 不同暴雨间隔条件下 L1 和 L3 监测点各层土壤水分体积分数及其差值随时间的变化

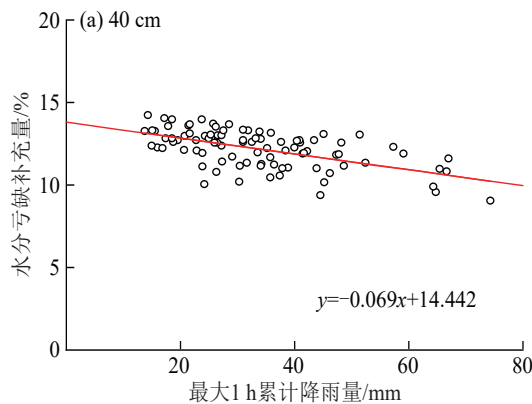
Fig. 6 The variation of soil moisture and its difference in each layer at monitoring points L1 and L3 under different rainstorm intervals over time

2.2.4 暴雨过程 90 场随机暴雨过程情景下的模拟结果表明,塬边不同土层的土壤水分亏缺补充量表现出显著差异。10、40、70 cm 深度土层的平均补充量分别为 4.21%、11.97% 和 -5.01%,表明 40 cm 土层的补给效果最为显著,而 70 cm 土层在多数暴雨事

件后水分亏缺反而加剧。40、70 cm 土层水分补充量的标准差分别为 1.70% 和 3.89%,反映出在总雨量一致的条件,70 cm 土层的水分受不同暴雨过程的影响程度更大,变异性更强。

进一步分析表明,40、70 cm 土层的塬边土壤水

分亏缺补充量与最大1 h累计降雨量呈负相关(图7),主要是因为短历时高强度暴雨促使大量降雨直接转化为地表径流,从而减少土壤入渗量,导致能



够补给至深层土壤的水量减少,进而造成塬边中深层土壤水分亏缺的补充量减少甚至加剧水分亏缺。

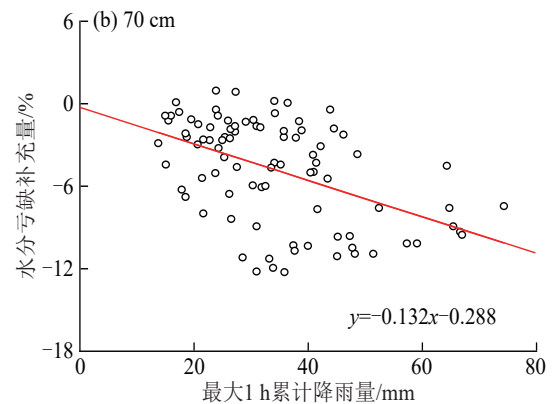


图7 最大1 h累计降雨量与塬边土壤水分亏缺补充量关系

Fig. 7 The relationship between the maximum 1-hour cumulative rainfall depth and the replenishment of soil moisture deficits

3 讨论

渭北旱塬塬边与塬内存在显著的土壤水分差异,且由塬边至塬内呈现连续水分梯度变化。具体表现为:在绝大部分研究时段,L1点各土层水分体积分数均显著低于L2点,而L2点又显著低于L3点,反映出土壤水分随距沟缘距离增大而递增的稳定空间模式。该梯度格局主要由沟壁侧向蒸散发与苹果树根系耗水的协同作用驱动,与前人^[9-11]在梯田田埂与切沟沟岸所得到的结论基本一致,但其影响范围(>7.0 m)远大于梯田田埂与切沟沟岸(2.5 m)。同时,监测点植被根系密度在不同土层深度均表现为L1>L2>L3的空间分布,也从沟壁与苹果树水分协同利用的角度进一步佐证该水分梯度形成的生态机制。

降雨特征是调控塬边土壤水分时空动态的关键因子。梁静等^[27]研究指出,暴雨对土壤水分的补给深度和补给量均显著高于中雨和小雨,其补给深度可达200 cm,补给量约占降水总量的87.5%,而小雨则难以形成有效补给。该结论与本研究中R8暴雨事件对塬边水分亏缺的补给效果最为显著的结果基本吻合(图2),进一步说明只有暴雨才能有效缓解塬边各土层的土壤水分亏缺。JIA等^[28]通过对北京一次特大暴雨的实地观测发现,降雨强度越高,土壤水分的增幅越大,与本研究中随暴雨强度增加、塬边水分亏缺补充量反而下降的规律存在差异。其原因在于,本研究所设定的暴雨强度(最高达80 mm/h)已显著超过土壤入渗能力,导致大量降雨转化为地表径流,从而削弱对土壤水分的实际补给效果。表明在总降雨量一致的情况下,长历

时、低强度的暴雨更有利于缓解塬边土壤水分亏缺,而短历时、高强度暴雨因地表径流损失增加,其补水作用反而降低。

本研究尚存在一定局限性,如未考虑植被冠层对降雨的截留效应。已有研究^[29-31]表明,植被截留会减少有效降雨量,从而削弱土壤水分的实际补给,可能导致模拟得到的塬边土壤水分亏缺与真实情况存在偏差。例如,李倩等^[32]对刺槐林及其混交林下草本层截留特性的分析表明,刺槐纯林的降雨截留量可达18.00 mm,显著高于其他林型,且截留量随植被盖度的增加而上升;MA等^[33]也研究指出,油松、辽东栎和白桦等乔木的实际截留量(5.00~10.00 mm)远高于草本层(0.29~1.14 mm)。然而,本研究的重点在于揭示暴雨对塬边土壤水分亏缺的调控机制,相对而言植被截留量占暴雨总量的比例较低,对土壤水分总体补给的影响有限,因此在本模型框架中予以忽略。

4 结论

1)在沟壁侧向蒸散发与苹果树根系耗水的共同影响下,苹果树生长季内渭北旱塬塬边区域(距塬边7 m范围内)40、70 cm土层的平均土壤水分体积分数较塬内区域偏低5.77%~6.76%,存在明显的土壤水分亏缺,而且塬边土壤水分亏缺程度随距沟缘距离的增加而减小。

2)塬边土壤水分亏缺程度受降雨特征调控。一般性降雨仅能短暂缓解表层土壤水分亏缺,而暴雨事件则可显著降低整个土层剖面的水分亏缺程度,且其缓解效应持续时间更长。

3)在总降雨量一致的情况下,暴雨间隔对土壤

水分亏缺补充的影响较小;而暴雨强度与过程的影响更为显著。短历时高强度暴雨促进地表径流的快速形成,减少有效入渗,从而导致塬边深层土壤水分亏缺的补充量随雨强增加而降低,甚至出现负补偿。因此,在制定塬边苹果树补充灌溉策略时,宜采用长历时、低强度的灌溉方式,并注意避免在短历时高强度暴雨后立即灌溉,以提升灌溉水分利用效率,保障果树生长需求。

参考文献:

- [1] 马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土高原沟壑区植被恢复对土壤入渗及产流的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):89-96.
MA X Y, MU X M, WANG S Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltration and runoff in the gully regions on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):89-96.
- [2] 穆兴民,杜敏,邵祎婷,等.黄土高原沟壑区土壤侵蚀特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(6):96-102.
MU X M, DU M, SHAO Y T, et al. Analysis of soil erosion characteristics on the tableland of Loess Plateau [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(6):96-102.
- [3] 金钊,彭建兵,庄建琦,等.黄土塬沟道侵蚀扩张机理与固沟保塬工程的科学性[J].中国科学:地球科学,2023,53(4):806-822.
JIN Z, PENG J B, ZHUANG J Q, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(4):806-822.
- [4] 赵爽,马子清,张雨田,等.陕西渭北地区不同时期控水对苹果产量、品质和水分利用效率的影响[J].北方园艺,2022(21):38-43.
ZHAO S, MA Z Q, ZHANG Y T, et al. Effects of water control on apple yield, fruit quality, and water use efficiency in Weibei area of Shaanxi Province [J]. Northern Horticulture, 2022(21):38-43.
- [5] YE L P, FANG L C, SHI Z H, et al. Spatio-temporal dynamics of soil moisture driven by "Grain for Green" program on the Loess Plateau, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 269: 204-214.
- [6] FATHOLOLOUMI S, VAEZI A R, FIROZJAEI M K, et al. Quantifying the effect of surface heterogeneity on soil moisture across regions and surface characteristic [J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: e126132.
- [7] LIN Z X, WANG Q, XU Y P, et al. Soil moisture dynamics and associated rainfall-runoff processes under different land uses and land covers in a humid mountainous watershed [J]. Journal of Hydrology, 2024, 636: e131249.
- [8] JIN Z, PENG J B, ZHUANG J Q, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(4):821-839.
- [9] LÜ H S, ZHU Y H, SKAGGS T H, et al. Comparison of measured and simulated water storage in dryland terraces of the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(2):299-306.
- [10] MELLIGER J J, NIEMANN J D. Effects of gullies on space-time patterns of soil moisture in a semiarid grassland [J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3/4): 289-300.
- [11] LI T C, SHAO M A, JIA Y H, et al. Profile distribution of soil moisture in the gully on the northern Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018, 171:460-468.
- [12] CHANG Y Q, HAN L, CHEN R, et al. Modelling of the trade-off between the deep soil moisture and vegetation restoration in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 645: e132274.
- [13] JIA Y H, LI T C, SHAO M G. A preliminary investigation of gully edge effect on the distribution pattern of soil moisture across a permanent gully [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: e125288.
- [14] WU X Z, WANG X, TENG Y, et al. Response of soil moisture to rainfall following deep soil drying in China's hilly loess lands [J]. Science of The Total Environment, 2024, 950: e175145.
- [15] 谢乐,侯鹏,周涛,等.黄土高原降雨特征对降雨侵蚀力时空变化的影响[J].生态学报,2025,45(10):4940-4951.
XIE L, HOU P, ZHOU T, et al. The rainfall characteristics effect spatiotemporal patterns of rainfall erosivity in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10):4940-4951.
- [16] 李天星,曹红霞,陈红武,等.渭北旱塬沟壑区苹果节水灌溉制度分析[J].干旱地区农业研究,2016,34(5): 255-261.
LI T X, CAO H X, CHEN H W, et al. Analyses of water-saving irrigation scheduling for apple in Weibei dryland gully [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5):255-261.

- [17] ZHU Y J, JIA X X, SHAO M G. Loess thickness variations across the Loess Plateau of China [J]. *Surveys in Geophysics*, 2018, 39(4):715-727.
- [18] LI H X, HAN S B, WU X, et al. Distribution, characteristics and influencing factors of fresh groundwater resources in the Loess Plateau, China [J]. *China Geology*, 2021, 4(3):509-526.
- [19] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG H X, et al. Soil moisture variations in response to precipitation properties and plant communities on steep gully slope on the Loess Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256:e107086.
- [20] 孙亚荣, 陈云明, 王亚娟, 等. 黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态变化特征及降雨特征对其影响 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1):272-279.
- SUN Y R, CHEN Y M, WANG Y J, et al. Dynamic variation characteristics of soil moisture in *Caragana korshinskii* plantation in loess hilly area and the influence of rainfall characteristics on it [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):272-279.
- [21] 田愉琴, 王兵, 汪建芳, 等. 黄土丘陵区典型草本根系特征对土壤抗剪特性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3):153-159.
- TIAN Y Q, WANG B, WANG J F, et al. Influence of typical herbaceous root characteristics on soil shear properties in loess hilly regions [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3):153-159.
- [22] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. *Physics*, 1931, 1(5):318-333.
- [23] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5):892-898.
- [24] BUSSCHER W. Simulation of field water use and crop yield [J]. *Soil Science*, 1980, 129(3):e193.
- [25] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193(1032):120-145.
- [26] FLANAGAN D. Usda-water erosion prediction project (WEPP) hillslope profile and watershed model documentation, Nserl Report [J]. *Journal of International Trade and Economic Development*, 2003, 12(1):97-99.
- [27] 梁静, 王国梁, 徐肖阳, 等. 黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态及其对降水的响应 [J]. *土壤学报*, 2025, 62(4):998-1009.
- LIANG J, WANG G L, XU X Y, et al. Dynamics of soil moisture and its response to rainfall in *Caragana korshinskii* plantation in loess hilly region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(4):998-1009.
- [28] JIA J B, YU X X, LI Y T. Response of forestland soil water content to heavy rainfall on Beijing Mountain, northern China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(3):541-550.
- [29] GE F C, XU M X, LI B B, et al. Afforestation reduced the deep profile soil water sustainability on the semiarid Loess Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 544:e121240.
- [30] HAN L, CHANG Y Q, CHEN R, et al. Response of soil moisture to vegetation and trade-off analysis in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142:e109273.
- [31] MIAO Y B, NIU J Z, WANG D, et al. Greening of China and possible vegetation effects on soil moisture [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158:e111382.
- [32] 李倩, 孙涵宇, 杨艳芬, 等. 黄土丘陵区混交人工林林下草本层植被特征及其对草本截留的影响 [J]. *水土保持学报*, 2025, 39(3):163-171.
- LI Q, SUN H Y, YANG Y F, et al. Characteristics of understory herbaceous vegetation in mixed plantations and their effects on herbaceous interception in loess hilly areas [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3):163-171.
- [33] MA M L, LI Q, WANG Y P, et al. Rainfall intensities determine accuracy of canopy interception simulation using the Revised Gash model [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2025, 362:e110389.