

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.039

鲁睿, 张明军, 张宇, 等. 不同降雨量及雨强条件下兰州南山人工侧柏林土壤水分入渗规律[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 364-376.

LU Rui, ZHANG Mingjun, ZHANG Yu, et al. Soil water infiltration of artificial *Platycladus orientalis* of Nanshan mountain in Lanzhou under different rainfall and rainfall intensity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 364-376.

不同降雨量及雨强条件下兰州南山人工侧柏林土壤水分入渗规律

鲁睿^{1,2}, 张明军^{1,2}, 张宇^{1,2}, 车存伟^{1,2}, 强玉泉^{1,2},
刘灵灵^{1,2}, 王志兰^{1,2}, 谷来磊^{1,2}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070)

摘要: [目的] 降雨是干旱半干旱地区土壤水分的主要来源, 将野外观测和模型模拟相结合研究降雨入渗规律, 可以更系统地掌握土壤水分亏缺状况。[方法] 通过定点观测, 应用 Hydrus-1d 模型对兰州南山人工侧柏林土壤水分动态变化进行模拟, 评估模型在干旱区的适用性, 分析不同降雨条件下土壤水分响应状况和入渗机制。[结果] Hydrus-1d 模型在兰州南山人工侧柏林有较好的适用性, 且深层模拟效果更优。降雨量 < 30 mm 时, 10 cm 处土壤含水量对降雨响应最为强烈, 30, 50 cm 处受降雨影响相对较小且有明显的滞后, 70 cm 以下没有响应; 降雨量 > 8.2 mm 时存在湿润峰。模拟期内, 最大入渗深度为 70 cm, 最大入渗量为 23.7 mm, 入渗深度随时间增加而入渗量和入渗速率却随时间延长而减小。降雨量与入渗量、入渗深度和入渗速率呈显著正相关 ($p < 0.05$)。降雨量 < 20 mm 时, 降雨强度对入渗量、入渗深度和入渗速率存在显著影响。[结论] 使用 Hydrus-1d 模型可以较好地模拟兰州南山人工侧柏林土壤水分动态变化并计算入渗量、入渗速率和入渗深度, 且分析发现降雨量对该地土壤水入渗过程的影响更显著。

关键词: 降雨; 入渗; Hydrus-1d 模型; 土壤含水量; 侧柏

中图分类号: S157; P933

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0364-13

Soil Water Infiltration of Artificial *Platycladus orientalis* of Nanshan Mountain in Lanzhou Under Different Rainfall and Rainfall Intensity

LU Rui^{1,2}, ZHANG Mingjun^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, CHE Cunwei^{1,2}, QIANG Yuquan^{1,2},
LIU Lingling^{1,2}, WANG Zhilan^{1,2}, GU Lailei^{1,2}

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Resource and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] Precipitation is the main source of soil water in arid and semi-arid regions. By combining field observation and model simulation to study the regularity of rainfall infiltration, the soil water deficit can be mastered more systematically. [Methods] Through fixed point observation, the Hydrus-1d model was applied to simulate the dynamic change of soil water in *Platycladus orientalis* on the artificial of Nanshan Mountain in Lanzhou, evaluate the applicability of the model in arid region, and analyze the soil water response and infiltration mechanism under different rainfall conditions. [Results] The Hydrus-1d model had good applicability in the artificial side of Nanshan in Lanzhou, and the deep simulation effect was better. When the rainfall was less than 30 mm, the soil moisture content at 10 cm has the strongest response to rainfall, while the influence of rainfall at 30 and 50 cm was relatively small and had an obvious lag, and there was no response below 70 cm. There was a wetness peak when the rainfall was more than 8.2 mm. During the simulation period, the maximum infiltration depth was 70 cm and the maximum infiltration volume was 23.7

收稿日期: 2023-10-25

修回日期: 2023-12-03

录用日期: 2023-12-26

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-03-06

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41771035); 甘肃省基础研究创新群体项目 (22JR5RA129)

第一作者: 鲁睿 (1999—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事寒旱区生态水文研究。E-mail: lurui09012022@163.com

通信作者: 张明军 (1974—), 男, 博士生导师, 主要从事气候变化与水文过程研究。E-mail: mjzhang2004@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

mm. The infiltration depth increased with time, while the infiltration volume and infiltration rate decreased with time. Rainfall was positively correlated with infiltration volume, infiltration depth and infiltration rate ($p < 0.05$). When the rainfall was less than 20 mm, the rainfall intensity had a significant effect on the infiltration amount, infiltration depth and infiltration rate. [Conclusion] The Hydrus-1d model can be used to simulate the dynamic change of soil water in *Platycladus orientalis* on the artificial of Nanshan in Lanzhou and calculate the infiltration amount, infiltration rate and infiltration depth. Moreover, it is found that the rainfall has a more significant effect on the soil water infiltration process.

Keywords: rainfall; infiltration; Hydrus-1d model; soil water content; *Platycladus orientalis*

Received: 2023-10-25

Revised: 2023-12-03

Accepted: 2023-12-26

Online(www.cnki.net): 2024-03-06

土壤水是干旱半干旱地区植物生长的主要限制因子^[1],降雨入渗是干旱区土壤水的主要来源,通过影响土壤水的分布对植物生长和稳定性产生可持续的调节作用^[2]。土壤水入渗过程受降雨、植被、坡度、土壤性质的共同影响^[3],降雨量和降雨强度作为表征降雨特征的指标,直接决定雨后土壤入渗规律^[4]。前人研究^[5]表明,土壤平均和稳定入渗率随降雨强度增加而增大,但也有研究^[6-7]发现,降雨强度过大会破坏土壤本身的物理结构,导致入渗能力下降。一般地,当其他条件相同时,降雨强度越大,土壤入渗能力越强^[8];降雨量越大,土壤含水率变化越大^[9],入渗量越大,且随着深度的增加土壤含水量变化幅度减小^[10]。然而,由于土壤含水量变化的时空异质性,大尺度的土壤水分入渗研究费时费力。兰州南北两山自 2000 年以来,在国家生态文明思想的指引下造林面积迅速增加,目前形成以人工林为主的森林群落环境^[11],由于北山为阳坡,光照强,更为干旱,自然条件下的降雨对维持植被生长作用并不显著,植被吸收的土壤水分多来自人工灌溉,因此选择南山作为研究点。研究兰州南山不同降雨条件下人工林土壤水分入渗规律可对该地植被可持续发展及生态恢复提供参考。

目前,土壤水分运移研究方法较多,但每种方法都有一定局限性。零通量面法对仪器的性能稳定性要求较高^[12],模型模拟的结果需要进行验证^[13],水均衡法需要进行地下水资源评价^[14],示踪法需要选择合适的示踪剂^[15],而蒸渗仪法无法满足大尺度的研究需求^[16]。Hydrus-1d 是用来研究饱和及非饱和和孔隙水运移和物质传送的模型,具有灵活的输入输出功能和参数优化模块,由于其优良的适用性和可操作性而被普遍应用^[17-18]。该模型兼顾土壤水热、溶质运移及根系吸水,现有大量研究^[19-25]表明在模拟土壤水分动态变化及地下水补给、农业灌溉、水土保持、污染评估和污水处理均有较好的适用性。王宇翔等^[26]对科尔沁沙地草甸—沙地相间区土壤水分动态变化进行模拟发现,降雨量与沙丘表层土壤水分呈正相

关;李冰冰等^[27]通过模拟土壤水分时空变化,评估 Hydrus-1d 模型在渭北旱塬的适用性和准确性;洪光宇等^[28]选用 Hydrus-1d 模型模拟土壤水分时空变化,评估 Hydrus-1d 模型在毛乌素沙地杨柴人工林地的适用性。目前对于干旱半干旱区土壤水分的研究多集中在农田和沙地,对于干旱区乔木林土壤水的研究较少,兰州南山土壤质地均一,土壤水分运移受土壤粒度影响较小,更有利于模型模拟^[29],且使用传统土壤水分研究方法费时费力,因此,基于数值模拟的方法研究兰州南山土壤水入渗规律是有必要的。

本研究广泛调查兰州南山包气带岩性结构,野外实时观测土壤体积含水量及气温、降雨、相对湿度、风速和辐射量等气象要素,采样测定并计算土壤容重、土壤粒度、根系深度及分布,基于此,使用包气带水分运移数值模拟模型,计算得出不同降雨条件下土壤水分入渗深度、速率和入渗量,探讨土壤水分入渗规律,旨在为该区域生态环境可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兰州(32.18°—42.95°N, 92.76°—108.76°E),平均海拔 1 520 m,位于陇中黄土高原的西部,市区南北群山对峙,东西黄河穿城而过,是青藏高原向黄土高原的过渡地区。地貌复杂多样,地势自西南向东北倾斜地形呈狭长状,东西长 1 655 km,南北宽 530 km;地处季风气候区与非季风气候区的过渡地带,温带大陆性气候,温差大,降雨少,年平均降水量 350 mm,年平均气温 10.3 °C,日照充足,全年平均日照时间 2 446 h,无霜期 180 天以上。冬季漫长且较寒冷,雨雪少;春季转瞬即逝,冷暖变化大;夏季短促,气温较高;秋季短促,降温快。土壤主要是灰褐土、灰钙土、栗钙土等,属于典型的黄土地貌。

采样点位于兰州南山的教育厅林场(36.03°N, 103.92°E),海拔 1 755 m。林场占地面积 15.5 hm²,位于阴坡,坡度 30°左右;植被主要为侧柏

(*Platycladus orientalis*), 平均林龄 32 年, 还有少量柠条(*Caragana korshinskii*)。土壤种类主要为灰钙土, pH 为 7.8~8.2, 根据土壤质地分类为壤土, 土壤粒度和土壤容重见表 1。

表 1 采样点土壤粒度和容重

Table 1 Soil particle size and bulk density at sampling site

土层深度/cm	黏粒/%	粉粒/%	沙粒/%	容重/(g·cm ⁻³)
10	8.5	70.6	21.0	1.10
30	7.9	71.8	20.3	1.12
50	8.8	70.2	21.1	1.17
70	8.0	70.9	21.5	1.25
90	6.5	70.2	23.4	1.19
110	6.3	67.9	25.8	1.10
130	7.0	67.9	25.1	1.03
150	6.3	66.3	27.4	0.94
170	6.6	66.7	26.7	1.05
190	6.1	66.4	27.5	1.18

1.2 野外观测与研究方法

1.2.1 野外观测与试验 在距离林场 100 m 处安装自动气象站(CR800/850)用于获取气象数据, 采集频率为 30 min。将深度为 200 cm 的土壤分为 10 层, 使用土壤墒情监测仪(EJ-200)实时监测 2023 年 4 月 19 日至 9 月 5 日 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170, 190 cm 处的土壤体积含水量, 采集频率为 30 min。使用土钻在同一深度处采集土壤样品, 用于土壤容重和粒度的测定。根据土壤水分动态变化程度对整个土层进行重新划分, 0—30 cm 土壤受外界因素干扰强烈, 划为浅层, 110—190 cm 土壤水分较为稳定, 划为深层, 将中间过渡的 30—110 cm 土层划为中层。于 2023 年 8 月使用体积为 100 cm³ 的根钻取根系样品, 实验室内淘洗采集根系样品并称重, 以获得根系密度。土壤容重使用环刀法测得, 土壤粒度在甘肃省治沙研究所使用 MS2000 马尔文激光粒度仪(Mastersizer2000—APA2000)测得。

1.2.2 土壤水分运移模型 土壤水分以垂向运动为主, 因此仅考虑一维垂向运移而忽略土壤水分的水平流动和侧向流动, 将地作为坐标原点, 选取 Z 轴向下为正方向, 则一维饱和—非饱和带土壤水分运移基本方程为^[30]:

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

式中: θ 为土壤体积含水率(cm³/cm³); t 为时间(d); z 为土层深度(cm); $K(\theta)$ 为非饱和和渗透系数(mm/d); h 为压力水头(cm), 饱和带 $h > 0$, 非饱和带 $h < 0$; $S(z, t)$ 为植被根系吸水项(d⁻¹), 裸露区为 0。

1.2.3 土壤动力学参数确定 土壤水分特征曲线利用 Van Genuchten 模型来拟合土壤体积含水量与土

壤水吸力的函数关系^[31]。公式为:

$$K(\theta) = K_s S_e^{\frac{1}{n}} [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{n}})^m]^2 \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

式中: θ_r 为土壤残余含水量(cm³/cm³); θ_s 为土壤饱和含水量(cm³/cm³); α 、 n 、 l 均为经验参数, 主要受土壤组成、容重、孔隙度等影响; α 为土壤进气值的倒数(cm⁻¹); n 为土壤孔径分布参数; K_s 为饱和渗透系数(cm/d); S_e 为土壤有效水含量, 根据拟合结果不断调整参数。以获得最合适的参数值。

1.2.4 根系吸水模块 根系吸水采用水势差为基础的 Feddes 模型进行数值解析, 即根系吸水速率 $S(z, t)$, 公式为:

$$S(z, t) = \alpha(h) \gamma(z) T_p \quad (4)$$

式中: T_p 为潜在蒸腾速率(cm/d); $r(z)$ 为根系吸水分布函数(cm⁻¹), 反映根系吸水在垂向土层中的空间差异性, 常用的有指数、线性和分段函数, 一般采用根长、根重密度进行表示; $\alpha(h)$ 为水分胁迫函数($0 \leq \alpha \leq 1$), 反映植被根系吸水速率因为土壤水分亏损而减少的情况, 采用 S-Shaped 描述:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} \right)^p} \quad (5)$$

式中: h_{50} 为潜在蒸腾速率下降 1/2 时土壤的负压(cm); p 为常数, 表示蒸腾速率随负压增加的下降坡度。

1.2.5 边界及初始条件 选择 2023 年 4 月 19 日至 9 月 4 日共 139 天为模拟期, 上边界设为大气边界—接受入渗和蒸发, 由于该地地下水位较深, 远大于本研究深度所以下边界设为自由入渗边界。土壤动力学参数是利用测得的土壤粒度数据在 Hydrus-1d 模型中的人工神经网络进行预测, 再进行反演, 获得的最优结果, 调整后的参数见表 2。残余含水率和饱和含水率在 10 cm 处最小, 最大值分别出现在 190, 30 cm 处。由于该地土壤质地较为均一, 调整后的不同深度的参数也较为一致, 无明显的变化规律。

1.2.6 空间和时间离散 将 2 m 的土壤剖面分为 5 层, 按 1 cm 等间隔将剖面分成 200 个单元格, 相应的, 设置 201 个节点和 10 个观测点(模型最多允许设置 10 个)。观测点分别在 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170, 190 cm 处。模拟时间段为 2023 年 4 月 19 日至 9 月 4 日, 共 139 天。依据收敛的迭代次数逐渐调整时间离散的间隔, 初始间隔设置为 0.01 d, 最小时间间隔设置为 0.000 1 d, 最大时间步长设置为 1 d。

表 2 反演后的模型参数
Table 2 The model parameters after inversion

土层深度/cm	$Q_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$Q_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	a/cm^{-1}	n	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	l
0	0.059 0	0.401	0.004 3	1.278 0	135.85	0.5
10	0.058 5	0.321	0.003 8	1.186 0	90.80	0.5
30	0.065 7	0.477	0.004 1	1.359 0	122.40	0.5
50	0.069 5	0.326	0.004 0	1.222 5	100.04	0.5
70	0.072 3	0.374	0.004 4	1.223 0	76.61	0.5
90	0.072 3	0.328	0.004 2	1.178 4	107.29	0.5
110	0.074 5	0.357	0.003 9	1.235 8	152.43	0.5
130	0.068 7	0.379	0.003 6	1.231 0	189.56	0.5
150	0.066 9	0.399	0.004 0	1.227 6	157.50	0.5
170	0.069 8	0.401	0.004 1	1.235 4	180.31	0.5
190	0.075 2	0.427	0.003 9	1.243 1	112.95	0.5

1.2.7 模型精度评价 采用均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)和决定系数(R^2)3个统计指标来定量评价拟合效果。决定系数(R^2)的值越接近1,说明模拟值与实测值之间的误差越小。相对误差(RE)绝对值越小,表明模拟结果与实测值误差越小,拟合效果越好。均方根误差(RMSE)表征模型的拟合程度,能够很好地反映模拟结果同实测结果之间的误差,RMSE计算结果越小,说明模拟结果误差越小,表明模型参数及模拟结果与实际情况相符,能够准确反映研究区土壤水分动态变化情况。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{6}$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n y_i} - 1 \tag{7}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \tag{8}$$

式中: x_i 为实测值; y_i 为模拟值; $\bar{x}$ 为实测值的平均值; n 为样本数量。

2 结果与分析

2.1 模型精度评价

利用 Hydrus-1d 模型模拟 2023 年 4 月 19 至 9 月 4 日兰州南山侧柏林土壤水分在降雨条件下的动态变化,并且使用由土壤墒情监测仪测得的土壤含水量数据进行检验(图 1)。模型在模拟土壤深层 130, 150,170,190 cm 时模拟效果较好(表 3),决定系数(R^2)为 0.851 7~0.940 0,RMSE 为 0.165 5~0.596 4,RE 为 0.002 0~0.010 6;在模拟浅层和中层

土壤 10,30,70,90,110 cm 处时模拟结果误差相对较大, R^2 分别为 0.687 8,0.674 4,0.704 0,0.642 2,0.679 9,RMSE 分别为 1.625 8,0.559 9,0.713 1,0.775 0,0.652 9。10—190 cm 整个土层中 RE 绝对值均小于 0.03,均在可信范围区间。RMSE 最大值出现在 10 cm 处,说明 10 cm 处误差波动最大;深层土壤 130—170 cm 处 RMSE 值较小,均小于 0.20,即模型拟合结果深层的更为准确,且深层模拟结果误差更为平均,波动幅度更小。中、浅层只有 50 cm 处拟合结果决定系数大于 0.80,50 cm 处模拟效果较其他中浅层土壤模拟效果更好,决定系数为 0.953 8,均方根误差为 0.293 2,相对误差为 0.005 3,可能是由于 50 cm 处调参结果更符合实际情况。整体来看,模拟结果能较为准确地反映土壤水分的动态变化情况,与实测结果较为吻合,说明本文所建模型对该地进行土壤水分运动模拟研究的可靠性。

2.2 土壤含水量对降雨的动态响应

2023 年 4 月 19 日至 9 月 4 日研究区内降雨天数 37 天(图 2),降雨量 164.6 mm,单日最高降雨量 21.6 mm,最低降雨量 0.4 mm。按照我国降雨量分级,将 24 h 内降雨量在 0~9.9 mm 划为小雨,10.0~24.9 mm 划为中雨,25.0~49.9 mm 划为大雨^[32]。模拟期内降雨事件为小雨的频次最高,占比达到 91%,说明该区域降雨事件以小雨为主。分析实测数据发现,不同深度的土壤含水量具有相同的变化模式,总体来看,4,5 月由于气温回升,植物复苏,根系大量吸水,土壤含水量整体呈下降趋势,6 月开始降雨频繁,土壤含水量整体呈上升趋势。在无外界输入水量干扰时,土壤含水量具有随土层深度增加而增大的分布特征,浅层土壤 0—30 cm 受气温和降雨影响,土壤含水量的波动较为明显,且小雨、中雨和大雨对土壤含水量的影响范围均不超过 70 cm,但对土壤含水量的大

小影响较为明显,说明在降雨量 <30 mm 时降雨量的大小对降雨入渗的深度影响相对较小,对入渗量影

响较为明显;70 cm 以下的中深层土壤含水量变化较小,且不受即时降雨的影响。

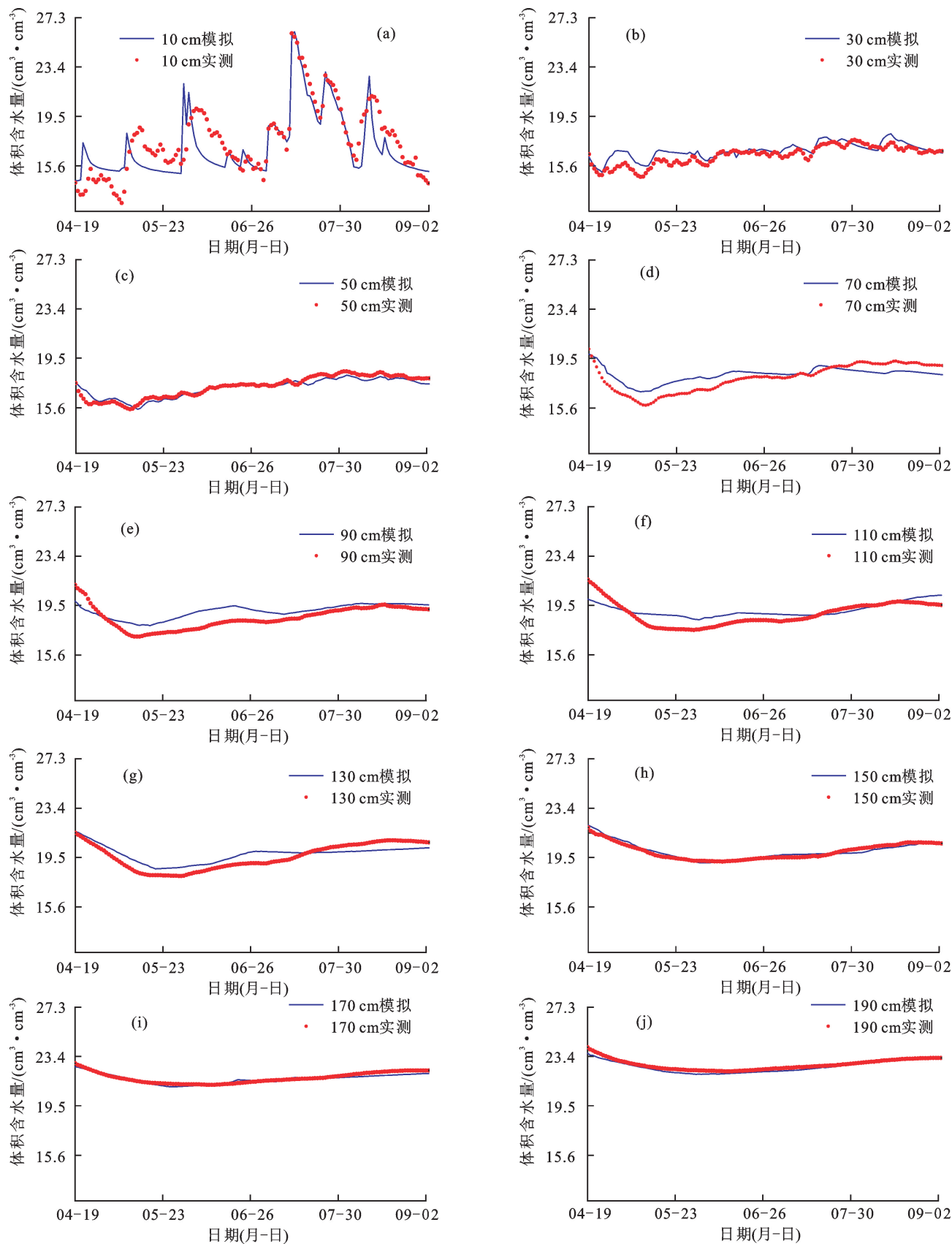


图 1 模拟土壤含水量与实测土壤含水量对比

Fig. 1 Comparison of simulated soil water content with measured soil water content

表 3 模拟结果检验指标统计值

Table 3 Test index statistics of simulation results			
土层深度/cm	R^2	RE	RMSE
10	0.687 8	0.025 4	1.625 8
30	0.674 4	0.022 3	0.559 9
50	0.953 8	0.005 3	0.293 2
70	0.704 0	0.013 7	0.713 1
90	0.642 2	0.027 4	0.775 0
110	0.679 9	0.014 6	0.652 9
130	0.851 7	0.010 6	0.596 4
150	0.926 5	0.002 0	0.187 1
170	0.940 0	0.002 9	0.165 5
190	0.937 4	0.006 2	0.186 5

降雨/灌溉水入渗土壤后导致土壤含水量显著增加的事件称为土壤湿润事件 (soil wetting event, SWE)。选择研究时段内由降雨引发的 6 次土壤湿润事件(表 4),对雨后土壤含水量动态变化进行分析,其中 SWE₅ 为大雨,其他均为中小雨。由图 3 可知,6 次土壤湿润事件均能造成浅层土壤含水量增加,10 cm 处含水量波动最为明显,30,50 cm 处受降雨影响相对较小且有明显的滞后,70 cm 处土壤含水量波动并不明显,即随着土层深度增加土壤含水量对降雨的响应变弱。由于降雨量小,即使 SWE₁ 和

SWE₃ 均有较为集中的降雨,但表层土壤含水量的波动却相对平缓,SWE₁ 发生在 4 月,气温低,土壤蒸发较弱,进入土壤的水分得以保留而缓慢下渗,而 SWE₃ 在 6 月,白天气温高土壤蒸发强烈,土壤含水量呈现明显的昼夜波动。

由图 4 可知,降雨量和降雨强度是影响土壤水分入渗的关键因素,SWE₅ 降雨量达到 28.8 mm,土壤含水量对降雨响应最强烈,雨后 0—70 cm 土层土壤含水量增加量分别为 9.802,0.738,0.249,0.226 cm³/cm³;SWE₂ 和 SWE₄ 均由 2 次降雨组成,土壤含水量对降雨响应也较为明显,土壤含水量增加量分别为 4.476,0.238,0.249,0.449 cm³/cm³ 和 5.546,0.369,0.126,0.149 cm³/cm³;SWE₁ 和 SWE₃ 降雨量分别为 8.2,11.8 mm,但 SWE₁ 降雨强度大于 SWE₃,由图 4 可得,SWE₁ 土壤含水量雨后变化量分别为 3.54,0.712,0.04 cm³/cm³,对降雨的响应更显著;SWE₆ 降雨量和降雨强度都较大,但由于强烈的地表蒸发,对降雨的响应相对较弱。降雨量和降雨强度越大,土壤含水量对降雨的响应越强烈且降雨强度在小降雨事件中的作用更显著,随着土层深度增加,土壤含水量变化幅度减小。

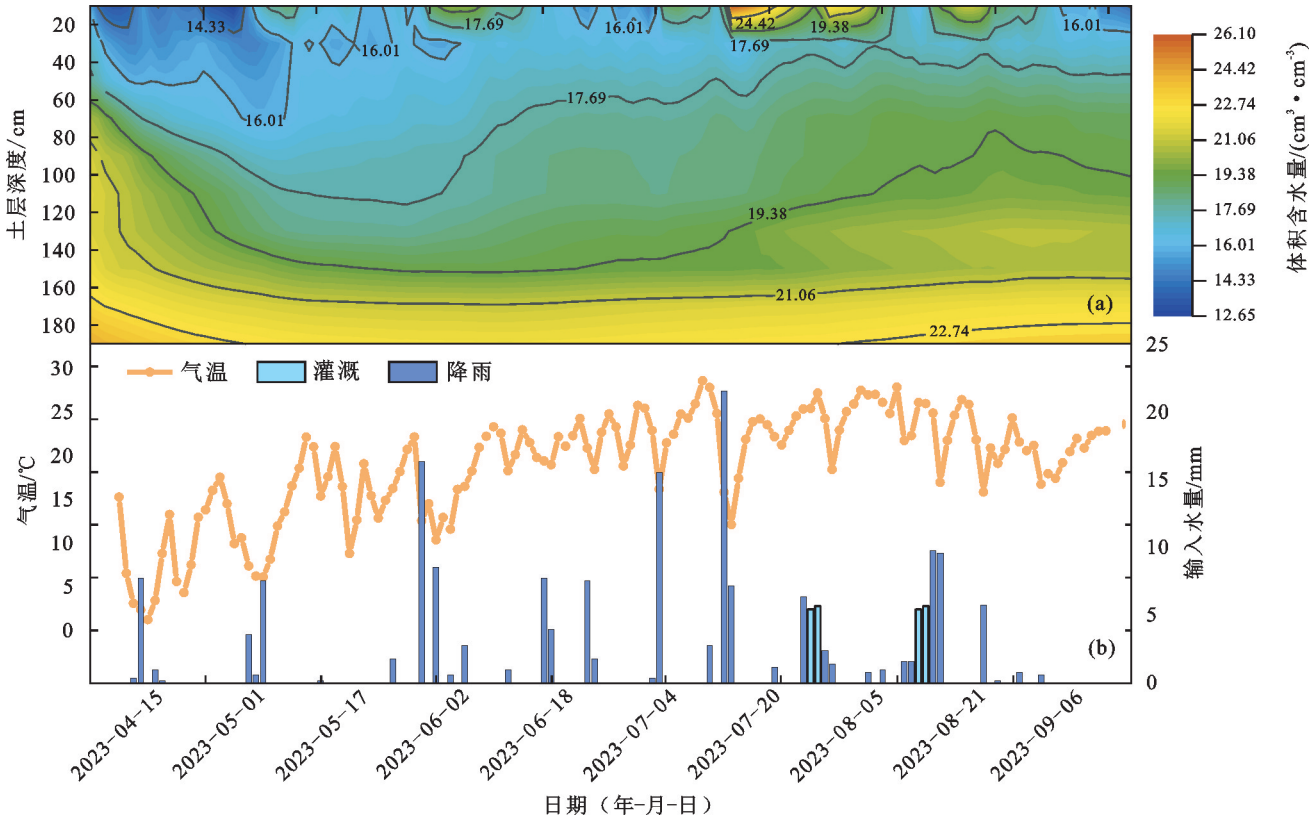


图 2 模拟期内实测土壤体积含水量及气温和输入水量变化

Fig. 2 Temporal and spatial dynamics of measured soil volumetric water content and air temperature and water input during the simulation period

表 4 6 次土壤湿润事件的基本信息

Table 4 Basic information of six soil wetting events

土壤湿润事件	降雨类型	日期(月-日)	降雨历时/h	降雨量/mm	降雨强度/(mm·h ⁻¹)
SWE ₁	小雨	04—21—04—22	5.0	8.2	1.638
SWE ₂	中雨	05—31	10.0	16.4	1.638
	小雨	06—02	8.0	8.6	1.074
SWE ₃	中雨	06—17—06—18	8.5	11.8	1.386
SWE ₄	小雨	07—02	1.0	0.4	0.396
	中雨	07—03	8.0	15.6	1.950
SWE ₅	大雨	07—12—07—13	18.0	28.8	1.596
SWE ₆	中雨	08—10—08—11	10.5	19.4	1.842

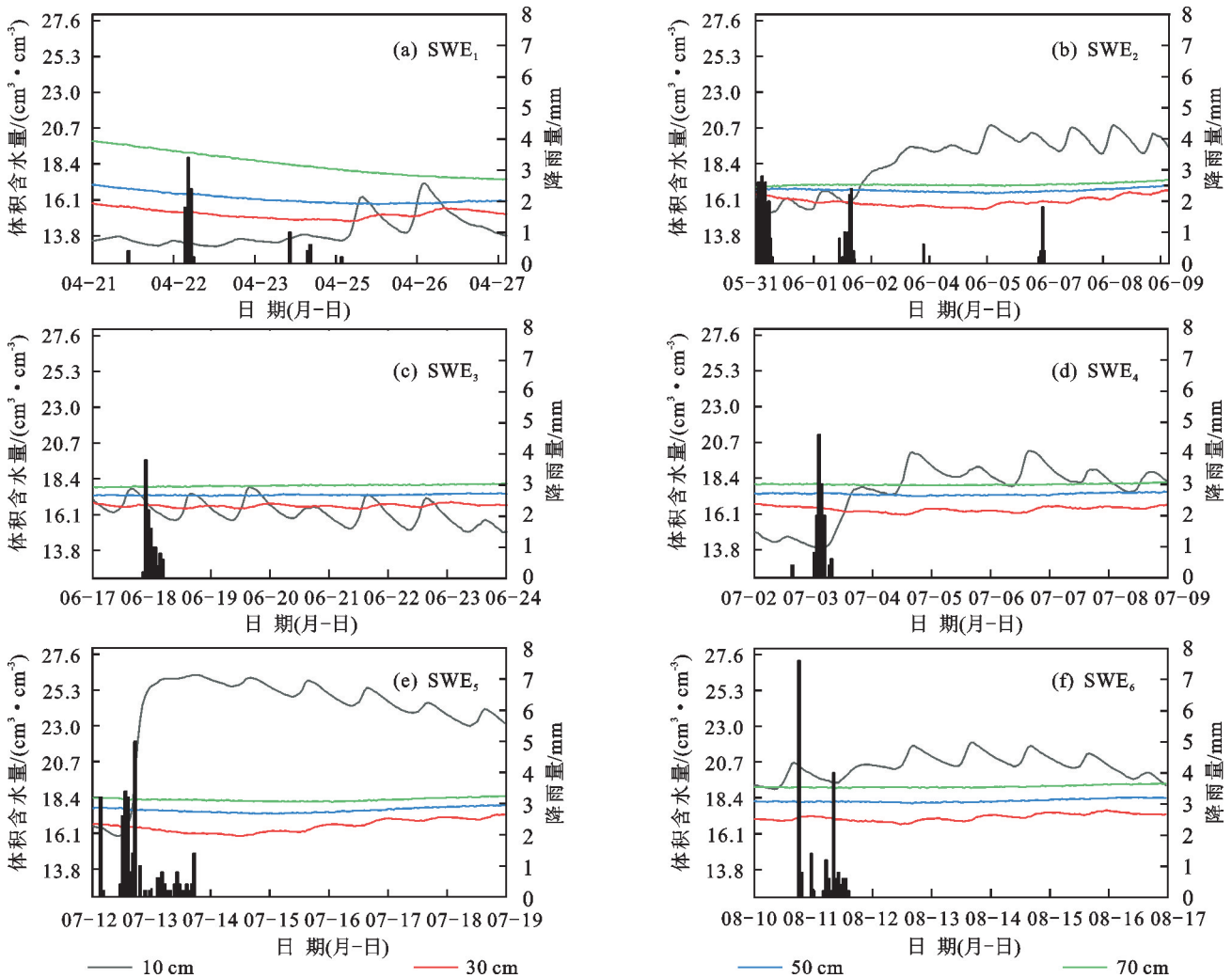


图 3 6 次土壤湿润事件下土壤水分动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of soil water under six soil wetting events

根据入渗过程中的含水量分布情况,将湿润带与未经水分入渗影响的干土带的交界面称为湿润峰,即土壤含水量有明显增大趋势的转折点,将深度间隔与湿润峰到达该深度的时间的比值称为湿润峰在此深度处的运移速率。6 次土壤湿润事件中,SWE₃ 没有出现明显湿润峰,其他 5 次在 10,30 cm 处均有湿润峰(图 3),10 cm 处湿润峰运移速率分别为 0.169 5, 0.188 7,1.428 6,1.429 0,0.588 2 cm/h;30 cm 处分别为 2.500 0,0.289 9,0.500 0,0.400 0,0.800 0 cm/

h,50 cm 处土壤含水量受降雨影响较小,湿润峰不明显。SWE₁降雨量较小但降雨强度大,且四月中下旬气温相对较低,土壤蒸发弱,所以存在明显的湿润峰,但湿润峰运移速率较小;SWE₂有 2 次降雨,所以在 10 cm 处有 2 次湿润峰产生,30 cm 处由于第 2 次降雨量和降雨强度都相对较小只有 1 次明显的湿润峰。因此,降雨量较小时也出现明显湿润峰,但是湿润峰出现的时间有明显滞后。SWE₄和 SWE₅表层土壤蒸发不足以对湿润峰的产生和运移产生较大影响,所以

10 cm 处湿润峰运移速率大于 30 cm 处。SWE₆降雨发生在 8 月中上旬,气温高,表层土壤蒸发强烈所以

30 cm 处湿润峰运移速率更高。因此该地区当降雨量>8.2 mm 时产生湿润峰。

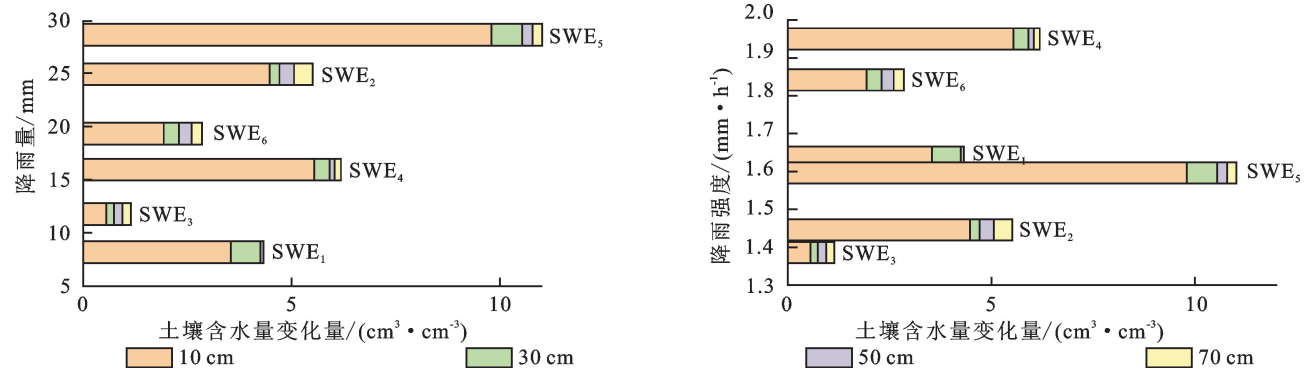


图 4 不同降雨条件下土壤水分动态响应

Fig. 4 Dynamic response of soil water under different rainfall conditions

2.3 不同降雨条件下降雨的入渗规律

根据模拟结果,分析计算 6 次土壤湿润事件每天的入渗深度(图 5)可知,雨后随时间增加入渗深度增大,但增大的幅度逐渐减小。6 次土壤湿润事件最大入渗深度分别为 33,53,12,47,70,59 cm。SWE₁降雨量小于 SWE₃,但降雨强度大于 SWE₃,SWE₁雨后 5 天入渗深度分别为 21,28,31,32,33 cm,SWE₃雨后 2 天入渗深度分别为 10,12 cm,6 月 19 日以后土壤含水量基本不受该场降雨影响,SWE₃的入渗深度小于 SWE₁。SWE₁和 SWE₂第 2 次降雨为小雨,SWE₂第 2 次降雨前入渗深度已经达到 40 cm,2 次降雨混合后入渗深度最大到 53 cm,第 2 次降雨量和降雨强度均小于第 1 次降雨,所以第 2 次降雨入渗深度

不会超过 13 cm,因此小雨的入渗深度不超过 35 cm;SWE₂、SWE₃、SWE₄和 SWE₆均为中雨,最大入渗深度均不超过 60 cm;SWE₅为大雨,其入渗深度达到 70 cm。SWE₁、SWE₂、SWE₃、SWE₅降雨强度小于 1.800 0 mm/h,SWE₅降雨量大,所以入渗深度大;SWE₄和 SWE₆降雨强度分别为 1.950 0,1.842 0 mm/h,其中 SWE₆降雨量更大,因此 SWE₆入渗深度也更大。

综上,降雨量和降雨强度均影响入渗深度,且降雨量的影响程度大于降雨强度,降雨量和降雨强度越大,入渗深度越大,而随着土层深度增加土壤含水量变化越小,即入渗越弱;雨后入渗深度随时间增加,但入渗强度减小。

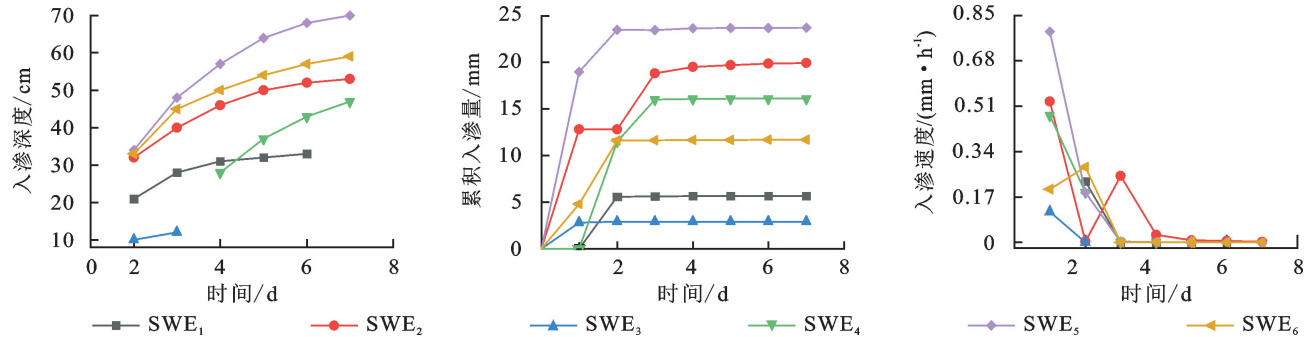


图 5 6 次土壤湿润事件入渗规律

Fig. 5 Infiltration rule of six soil wetting events

根据模拟结果计算每次降雨后入渗速率和入渗量(图 5),6 次土壤湿润事件中降雨入渗量分别为 5.659 8,19.919 0,2.919 0,16.114 0,23.703 5,11.693 8 mm。SWE₁和 SWE₃降雨量偏小,但 SWE₁降雨强度大,SWE₁在雨后 5 天均有水分下渗,而 SWE₃只有雨后 2 天有下渗;SWE₁雨后累积入渗量和入渗速率均高于 SWE₃。SWE₂有 2 次降雨,入渗量和入渗速率也在其影响下产生明显波动,5 月 31 日降雨入渗量达到 12.8 mm,入渗速率为 0.527 6

mm/h,第 2 天由于气温较高土壤蒸发强烈,入渗量只有 0.009 0 mm,6 月 2 日再次降雨,入渗量为 6 mm,入渗速率为 0.249 6 mm/h,之后入渗速率和入渗量逐渐减小,到 6 月 7 日和 6 月 8 日由降雨输入到土壤中的水分不再下渗。SWE₄7 月 3 日开始入渗,7 月 6 日结束,入渗量分别为 11.500 0,4.527 0,0.048 0,0.039 0 mm,入渗速率分别为 0.476 2,0.187 8,0.001 6,0.001 5 mm/h。SWE₅和 SWE₆在雨后 7 天均有入渗,SWE₅入渗量和入渗速率逐渐减小,SWE₆在第 2 天(8

月 11 日)入渗量和入渗速率最大,分别为 6.8 mm, 0.282 9 mm/h,由于 8 月 11 日的降雨量更大。分析 6 次土壤湿润事件可得,入渗量和入渗速率在雨后随时间变化都是逐渐减小的,累积入渗量随时间变化逐渐趋于稳定,降雨量和降雨强度均对入渗量和入渗速率产生影响,降雨量和降雨强度越大入渗量和入渗速率也越大。

3 讨论

3.1 模型精度评价

降雨是干旱半干旱地区土壤水分的主要来源,研究降雨条件下土壤水分的入渗机制对保持植物群落稳定性至关重要^[33]。Hydrus-1d 模型作为研究土壤水分运移的一种有效手段^[34-36],在不同的自然地理环境下需要对其结果检验,评估模型的适用性。通过计算,本研究中决定系数为 0.642 2~0.953 8,均方根误差为 0.165 5~1.625 8,相对误差绝对值为 0.002 0~0.022 3,整体拟合效果较好。与现有研究相比,均方根误差偏大,尤其是表层土壤,由于兰州市南山位于西北内陆,蒸发强烈,且昼夜温差大,使得表层土壤水分运动更加剧烈,土壤含水量波动较大^[37]。深层土壤 150—170 cm 处 RMSE 值较小,均小于 0.2,说明深层模拟结果的误差更平均,浅层土壤受降雨、灌溉和根系吸水的影响,水分交换更加频繁且剧烈,模拟结果误差的波动幅度也较大。本研究中的教育厅林场土壤类型属于壤土,3 个检验指标显示出的拟合效果具有一致性,50 cm 处的误差最小,拟合效果最好,且深层模拟效果整体比浅层好。

3.2 不同降雨条件下水分入渗差异

通过对体积含水量的分析发现,同一时间段不同土层含水量具有相同的变化模式,与 LI 等^[38]的研究结果一致。总体来看,研究时段内 4、5 月土壤含水量呈下降趋势,6、7、8 月呈上升趋势。这是由于 4、5 月气温回升,植物复苏,根系大量吸水;而 6、7、8 月降雨增多,入渗增加。降雨强度和降雨量显著影响土壤含水量,随着土层深度增加土壤水分对降雨的响应变弱,70 cm 以下土壤水分基本稳定^[39]。除 SWE₃外,其他事件在 10、30 cm 处均出现湿润峰,降雨量和降雨强度越大湿润峰运移速率越大,与袁仕方等^[40]的研究结果一致,藏东南主要为粗粒土,湿润峰是匀速向下运移的。其研究中随土层深度增加湿润峰运移速率减小,可能是因为土壤质地的差异导致的上述结果。粗粒土孔隙大,持水保水能力差^[41-43],降雨到达地面在重力作用下迅速入渗,随土层深度增加入渗速率基本不变,而本研究区土壤为壤土,粒径<0.05

mm 的颗粒比率达到 60%以上,土壤保水能力强,水分被吸附在土壤中,因此随着土层深度增加重力减小则湿润峰运移速率减小。SWE₃降雨集中在 6 月 17 日夜到 6 月 18 日凌晨,6 月 18 日气温在 15.2~28.7℃,使用彭曼公式计算的潜在蒸散发为 5.2 mm,土壤蒸发强烈,但降雨强度偏小,入渗速率也小,降雨后水分留在土壤表层,从夜晚到白天气温升高,蒸发变强,大量水分蒸发,所以土壤含水量变化较小,对该次降雨响应不明显。

降雨入渗过程包括储存和传导 2 个过程^[44],到达地面的水分在重力、阻力和毛管力的共同作用下向下运动^[45]。从研究期 6 次土壤湿润事件中可以看出降雨量和降雨强度是影响入渗量和入渗深度的重要因素,降雨量和降雨强度越大,入渗量和入渗深度越大^[46]。肖靖等^[47]研究认为,入渗量主要受降雨量影响,平均入渗率受降雨强度和降雨历时的共同影响,而本研究中发现,降雨量不但对入渗量产生影响对入渗速率也产生影响,可能是因为覆盖植被不同。LIU 等^[48]对比草地和森林土壤水分对降雨入渗的响应发现,林地吸收更多的水分,草地根系茂密,拦截大量降雨,土壤含水量响应有明显滞后,所以降雨量的大小对入渗速率的影响不明显。雨后入渗速率随时间和深度变化逐渐减小^[49],与本研究结果一致。但一些研究^[50-51]认为,雨后入渗速率在时间和空间尺度上均是先增加后减小的规律,但本研究中由于土壤没有饱和且降雨历时较短,水分入渗初期入渗速率最大。SWE₁存在入渗过程,但由于降雨量小,入渗过程并不强烈,且存在明显的滞后;SWE₃降雨量偏小且蒸发强烈,入渗过程微弱。SWE₂和 SWE₄包含两次降雨,但 2 次事件的入渗过程并不相同,2 次事件的入渗深度均随时间逐渐增加,但入渗量和入渗速率产生明显的差异。SWE₂入渗量和入渗速率有一个明显的波动,第 1 次降雨到达地面开始下渗,由于此期间还有部分水分被蒸发,入渗量和入渗速率随时间减小;第 2 次降雨发生时,入渗过程再次发生,入渗深度、入渗量和入渗速率再次增加,但由于土壤储存了第 1 次降雨的水分,在土壤前期含水量和降雨量的限制下^[52],第 2 次入渗过程相对缓慢。因此,SWE₂入渗深度持续增加而入渗量和入渗速率均呈现先增加后减小再增加然后减小的规律。SWE₄由于第 1 次降雨量太小,对土壤含水量并无贡献,因此入渗过程仅在第 2 次降雨后发生,入渗量和入渗速率并没有明显波动,不同于 SWE₂。SWE₅和 SWE₆雨后无其他输

入水分干扰,作为2次典型的雨入渗过程,其入渗深度随时间增加,但增加的程度逐渐减小,累积入渗量增加但入渗量减小,同时入渗速率逐渐减小。

降雨入渗过程主要受到气象条件、包气带岩性及地下水位埋深等的共同影响^[53],模拟期内兰州南山人工侧柏林降雨量输入的水分远大于灌溉量(图2),因此,降雨入渗对该地植被生长稳定性和生态恢复至关重要。对降雨量和降雨强度与入渗量、入渗深度和雨后24 h的入渗速率进行线性拟合(图6)发现,降雨量与入渗量、入渗深度和入渗速率呈显著正相关, R^2 分别为0.836 8、0.719 0和0.665 6。降雨强度对入渗量、入渗深度和入渗速率有影响,但并不显著。由于本文样本事件较少,且6次事件降雨强度差距较小,没有一个完整的降雨强度梯度,不同降雨强度对入渗

机制的影响不显著。但分析发现,降雨强度对入渗量、入渗深度和入渗速率的影响在降雨量 <20 mm时更显著, R^2 分别为0.932 5、0.911 5和0.645 5。由于本研究区位于西北内陆,气候干旱,降雨频次和降雨较少,降雨量 >20 mm的2次土壤湿润事件降雨历时为18 h,降雨强度较小,降雨量和降雨强度不一致,无法表征高雨强时的入渗状况,且在模拟期内观测到的经过冠层截流后对土壤水分有贡献的事件只有这6次,在雨强对入渗的影响方面还欠缺说服力,这就需要进一步拉长研究的时间尺度。此外,Hydrus-1d模型无法直接输入降雨强度,只能输入降雨量,因此在模型计算过程中,对于雨强对土壤表面的入渗的影响并未考虑,这也是该模型的局限性,后续可以通过改变模拟时间步长解决这一问题。

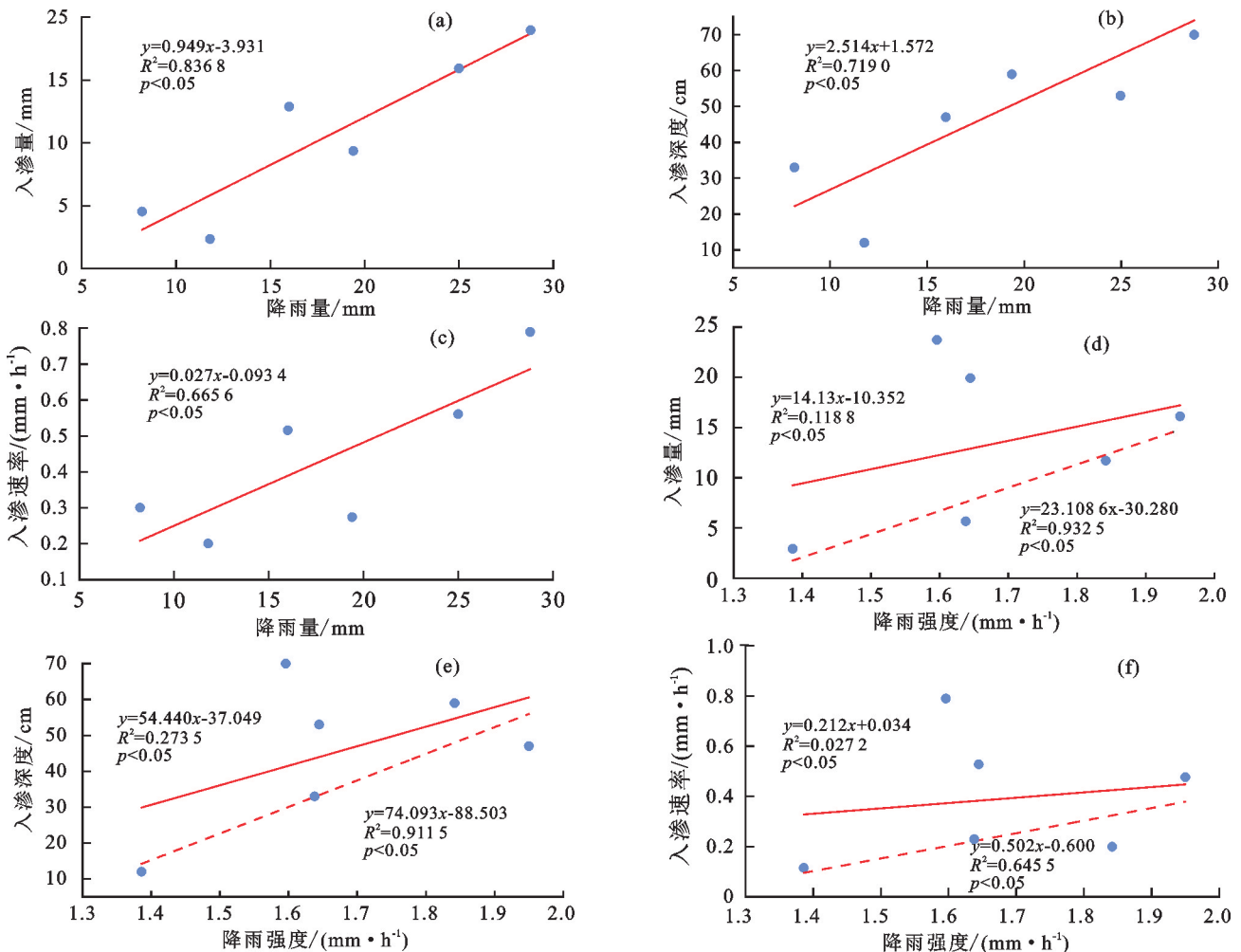


图6 降雨量和降雨强度与入渗量、入渗深度和入渗速率相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of rainfall and rainfall intensity with infiltration, infiltration depth and infiltration rate

4 结论

(1) Hydrus-1d模型在兰州南山人工侧柏林有较好的适用性,且深层的模拟效果较浅层更好,模拟结果可以表征该区域土壤水分运移规律。

(2) 降雨量和降雨强度越大,土壤含水量对降雨的响应越强烈,随着土层深度增加,土壤含水量对降雨响应减弱。降雨量 >8.2 mm时存在湿润峰,雨强越大湿润峰运移速率越大,随土层深度增加湿润峰运

移速率减小,降雨量较小时湿润峰产生明显的滞后。

(3)降雨量和降雨强度均影响入渗深度、入渗量和入渗速率,降雨量的作用更显著,而降雨强度的影响在降雨量较小时作用更显著。降雨量对入渗量的影响程度>入渗深度>入渗速率,随着土层深度的增加入渗过程减弱,入渗量和入渗速率减小;雨后入渗深度随时间增加,但入渗量和入渗速率随时间变化都是逐渐减小的。

本文通过将模型与实测数据相结合探讨不同降雨条件下土壤水分入渗规律,但土壤水分入渗还受气象因子、初始含水量、地形地貌、土壤质地及人为因素干扰,想要更为准确地把握降雨入渗规律还需进一步研究。

参考文献:

- [1] TIAN J, ZHANG B Q, WANG Y B, et al. Vertical partition patterns of infiltration within soil profile and its control factors at large-scale arid mountainous areas [J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: e129190.
- [2] WANG Y Q, SHAO M A, SUN H, et al. Response of deep soil drought to precipitation, land use and topography across a semiarid watershed [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 282: e107866.
- [3] HUANG J, WU P T, ZHAO X N. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments [J]. Catena, 2013, 104: 93-102.
- [4] HUANG J B, WEN J W, LUO D W, et al. Response characteristics of soil moisture to rainfall for a single grass type in an urban area [J]. Hydrology Research, 2023, 54(2): 99-115.
- [5] 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.
- [6] MORIN J, VAN WINKEL J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1223-1227.
- [7] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 耕作对土壤入渗性能的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1624-1630.
YANG Y H, ZHAO S W, LEI T W, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1624-1630.
- [8] HOU J M, ZHANG Y W, TONG Y, et al. Experimental study for effects of terrain features and rainfall intensity on infiltration rate of modelled permeable pavement [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 243: 177-186.
- [9] HAIYAN D A I, HAIMEI W A N G. Influence of rainfall events on soil moisture in a typical steppe of Xilingol [J]. Physics and Chemistry Earth, 2021, 121: e102964.
- [10] YAN W H, ZHOU Q W, PENG D W, et al. Soil moisture responses under different vegetation types to winter rainfall events in a humid Karst region [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(40): 56984-56995.
- [11] 朱潮, 武利玉, 魏翻江, 等. 兰州市北山典型侧柏混交林地土壤水分物理性质研究 [J]. 草原与草坪, 2021, 41(5): 45-51.
ZHU C, WU L Y, WEI F J, et al. Study on soil water physical properties of typical *Platycladu orientalis* mixed plantation in north mountain of Lanzhou City [J]. Grassland and Turf, 2021, 41(5): 45-51.
- [12] 李茜, 冷俊杰, 高佩玲, 等. 零通量面法用于农田蒸发蒸腾量的研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 176-179.
LI Q, LENG J J, GAO P L, et al. Study on the farmland evapotranspiration by zero flux plane method [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2): 176-179.
- [13] CHEN W L, WANG J J, LIU Y F, et al. Using bromide data tracer and HYDRUS-1D to estimate groundwater recharge and evapotranspiration under film-mulched drip irrigation in an arid Inland Basin, Northwest China [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(7): e14290.
- [14] 李智, 张晓鹏, 曲为贵. 白音锡勒牧场萤石矿水文地质调查与涌水量预测研究 [J]. 地下水, 2023, 45(3): 42-43, 78.
LI Z, ZHANG X P, QU W G. Hydrogeological investigation and water inflow prediction of fluorite mine in Baiyinxile pasture [J]. Ground Water, 2023, 45(3): 42-43, 78.
- [15] ZANNONI D, STEEN-LARSEN H C, RAMPAZZO G, et al. The atmospheric water cycle of a coastal lagoon: An isotope study of the interactions between water vapor, precipitation and surface waters [J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 630-644.
- [16] 赖恒安, 王艳艳. 包气带土壤水分运移研究方法综述 [J]. 农业与技术, 2022, 42(6): 37-40.
LAI H A, WANG Y Y. Review on research methods of soil moisture migration in vadose zone [J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(6): 37-40.
- [17] FAN C C, CHANG H W. The role of time in the hydrological behavior of residual soil slopes during rainfall events [J]. Catena, 2015, 124: 1-8.
- [18] LI Y, ŠIMŮNEK J, JING L F, et al. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D [J]. Agricultural Water Management, 2014, 142: 38-46.
- [19] 高震国, 钟瑞林, 杨帅, 等. Hydrus 模型在中国的最新研究与应用进展 [J]. 土壤, 2022, 54(2): 219-231.
GAO Z G, ZHONG R L, YANG S, et al. Recent

- progresses in research and applications of Hydrus model in China[J]. *Soils*, 2022, 54(2): 219-231.
- [20] 郭雯, 卢玉东, 卢阳春, 等. 基于 Hydrus-1d 模型的干旱区绿洲灌溉入渗研究[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(8): 129-132, 90.
- GUO W, LU Y D, LU Y C, et al. Simulation of irrigation infiltration in arid oasis based on Hydrus-1D model[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(8): 129-132, 90.
- [21] 杨洋, 李娟, 李鸣晓, 等. HYDRUS-1D 软件在地下水污染源强定量评价中的应用[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(12): 5293-5298.
- YANG Y, LI J, LI M X, et al. Application of HYDRUS-1D model in quantitative assessment of groundwater pollution resource intensity [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(12): 5293-5298.
- [22] 张博, 孙法圣, 王帆, 等. HYDRUS-1D 在基于过程的地下水污染评价中的应用[J]. *科技导报*, 2013, 31(17): 37-40.
- ZHANG B, SUN F S, WANG F, et al. Application of HYDRUS-1D in the process-based evaluation of groundwater pollution [J]. *Science and Technology Review*, 2013, 31(17): 37-40.
- [23] 肖素欣. 基于 Hydrus-1D 软件的大洼灌区灌水方案优选研究[J]. *水利技术监督*, 2019, 27(2): 148-150.
- XIAO S X. Study on optimum irrigation scheme of Dawa irrigation area based on Hydrus-1D software[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2019, 27(2): 148-150.
- [24] 丁素玲. HYDRUS-1D 软件在土壤环境影响评价中的应用[J]. *环境影响评价*, 2020, 42(4): 62-65.
- DING S L. Application of HYDRUS-1D in soil environmental impact assessment [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2020, 42(4): 62-65.
- [25] 王璐, 李升, 王友年, 等. 阿克苏河下游区灌溉入渗补给系数计算及影响因素分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(11): 65-73.
- WANG L, LI S, WANG Y N, et al. Calculation of irrigation infiltration recharge coefficient and analysis of influencing factors in the lower reaches of Aksu River [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(11): 65-73.
- [26] 王宇祥, 刘廷玺, 段利民, 等. 半干旱地区半流动沙丘水分深层渗漏量及其对降雨格局的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2710-2720.
- WANG Y X, LIU T X, DUAN L M, et al. Deep water leakage from semi-mobile dunes in semi-arid regions and its response to rainfall patterns[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2710-2720.
- [27] 李冰冰, 王云强, 李志. HYDRUS-1D 模型模拟渭北旱塬深剖面土壤水分的适用性[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 398-404.
- LI B B, WANG Y Q, LI Z. Applicability of HYDRUS-1D model in simulating the soil moisture in deep profiles on the Weibei rainfed highland, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 398-404.
- [28] 洪光宇, 王晓江, 刘铁山, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的毛乌素沙地杨柴 (*Hedysarum laeve*) 灌木林土壤含水量模拟[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(6): 233-242.
- HONG G Y, WANG X J, LIU T S, et al. Applicability of Hydrus-1D Model in simulating the soil moisture in *Hedysarum laeve* in Mu Us Sandy Land, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(6): 233-242.
- [29] 黄殿男, 赵超越, 张羽鑫, 等. 污泥改良沙化土壤水分入渗及再分布模拟[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2768-2775.
- HUANG D N, ZHAO C Y, ZHANG Y X, et al. Simulation on water infiltration and redistribution of sandy soil improved by sludge [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(8): 2768-2775.
- [30] KACIMOV A R, OBNOSOV Y V, ŠIMŮNEK J. Minimizing evaporation by optimal layering of topsoil: Revisiting ovsinsky's smart mulching-tillage technology via gardner-warrick's unsaturated analytical model and HYDRUS[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(5): 3606-3618.
- [31] 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): e892.
- [32] 石春茂, 罗娅, 杨胜天, 等. 干热河谷区不同坡位土壤水分对降雨的响应特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1352-1362.
- SHI C M, LUO Y, YANG S T, et al. Responses of soil moisture at different slope positions to rainfall in dry-hot valley [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1352-1362.
- [33] ZHU X, HE Z B, DU J, et al. Temporal variability in soil moisture after thinning in semi-arid *Picea crassifolia* plantations in northwestern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 401: 273-285.
- [34] ER-RAKI S, EZZAHAR J, MERLIN O, et al. Performance of the HYDRUS-1D model for water balance components assessment of irrigated winter wheat under different water managements in semi-arid region of Morocco [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: e106546.
- [35] WANG X F, LI Y, WANG Y C, et al. Performance of HYDRUS-1D for simulating water movement in water-repellent soils [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2018, 98: 1-14.
- [36] HAN M, ZHAO C Y, ŠIMŮNEK J, et al. Evaluating the impact of groundwater on cotton growth and root zone

- water balance using Hydrus-1D coupled with a crop growth model[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 160: 64-75.
- [37] ZHOU H, ZHAO W Z. Mechanisms of soil moisture availability in vadose zone of a sand dune system: Linking soil physical properties and rainfall patterns[J]. *Water and Environment Journal*, 2020, 34(S1): 139-157.
- [38] LI Q, ZHU Q, ZHENG J S, et al. Soil moisture response to rainfall in forestland and vegetable plot in Taihu Lake Basin, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(4): 426-437.
- [39] CHEN W L, LI Z S, JIAO L, et al. Response of soil moisture to rainfall event in black locust plantations at different stages of restoration in hilly-gully area of the Loess Plateau[J]. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(3): 427-445.
- [40] 袁仕方, 曹志翔, 韩志洋, 等. 藏东南粗粒土降雨入渗影响因素试验分析[J]. *高原农业*, 2022, 6(2): 189-196.
- YUAN S F, CAO Z X, HAN Z Y, et al. Experimental analysis on influencing factors of rainfall infiltration in coarse-grained soil in southeast Tibet [J]. *Journal of Plateau Agriculture*, 2022, 6(2): 189-196.
- [41] 符泉. 影响土壤水分入渗特性主要因素的试验研究[J]. *新农业*, 2022(8): 13-15.
- FU Q. Experimental study on main factors affecting soil water infiltration characteristics [J]. *New Agriculture*, 2022(8): 13-15.
- [42] 李松阳, 刘康妮, 余杭, 等. 云南省蒋家沟不同植被类型土壤物理性质对水分入渗特征的影响[J]. *山地学报*, 2021, 39(6): 867-878.
- LI S Y, LIU K N, YU H, et al. The influence of soil physical properties on the infiltration of soil covered by different vegetation types in the Jiangjia gully, Yunnan Province, China [J]. *Mountain Research*, 2021, 39(6): 867-878.
- [43] 李欣丽, 陈力. 变水头入渗条件下 VG 模型参数变化对土壤入渗的影响[J]. *人民珠江*, 2021, 42(9): 65-76.
- LI X L, CHEN L. Effect of VG model parameter changes on soil infiltration under varying-head infiltration [J]. *Pearl River*, 2021, 42(9): 65-76.
- [44] 曹静, 阿拉木萨, 张圆浩. 科尔沁沙地沙丘水分深层渗漏量和侧向运移量[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(3): 41-47.
- CAO J, A L, ZHANG Y H. Deep percolation and lateral migration of water in sandy dune in the Horqin sandy land [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(3): 41-47.
- [45] 王建新, 王恩志, 王思敬. 降雨自由入渗阶段试验研究及其过程的水势描述[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(12): 1920-1924.
- WANG J X, WANG E Z, WANG S J. Potential description of rainfall free infiltration phase [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(12): 1920-1924.
- [46] LIU X P, HE Y H, ZHANG T H, et al. The response of infiltration depth, evaporation, and soil water replenishment to rainfall in mobile dunes in the Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12): 8699-8708.
- [47] 肖婧, 王兵. 黄土丘陵区不同坡度撂荒地入渗特征影响因素试验研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 136-142.
- XIAO J, WANG B. Experimental study on the influence factors of infiltration characteristics of abandoned grassland with different slope gradients in Loess Hilly Region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 136-142.
- [48] LIU M X, WANG Q Y, GUO L, et al. Influence of canopy and topographic position on soil moisture response to rainfall in a hilly catchment of Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(6): 949-968.
- [49] ZHANG J Y, DUAN L M, LIU T X, et al. Experimental analysis of soil moisture response to rainfall in a typical grassland hillslope under different vegetation treatments [J]. *Environmental Research*, 2022, 213: e113608.
- [50] 白盛元, 汪有科, 马建鹏, 等. 黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 218-223, 231.
- BAI S Y, WANG Y K, MA J P, et al. Experimental study on rainfall infiltration in semiarid region of the Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2): 218-223, 231.
- [51] 孙媛, 董晓华, 郭梁锋, 等. 不同降雨条件下土壤水运动及再分布模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(增刊 2): 74-80.
- SUN Y, DONG X H, GUO L F, et al. Simulation study on soil water movement and redistribution under different rainfall conditions [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(S2): 74-80.
- [52] 淡彩虹, 许欢欢, 王兵, 等. 模拟降雨下前期含水量对黄绵土坡面产流产沙过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 31-36.
- DAN C H, XU H H, WANG B, et al. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment yield on loess slope under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1): 31-36.
- [53] 冯起, 张艳武, 司建华, 等. 土壤植被大气模式中水分和能量传输研究进展[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 143-150.
- FENG Q, ZHANG Y W, SI J H, et al. Study progress of water and energy transfer in soil-plant-atmosphere interface model [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(1): 143-150.