

# 基于 Hydrus-1D 模型的宁夏河东沙地固定沙丘 花棒林土壤水分动态模拟

张维福<sup>1,2,3</sup>, 展秀丽<sup>1,2,3</sup>, 马思怡<sup>1,2,3</sup>, 张呈春<sup>1,2,3</sup>, 马晓霞<sup>1,2,3</sup>

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 宁夏银川 750021; 2. 中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 宁夏银川 750021; 3. 宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 宁夏银川 750021)

**摘要:** [目的] 探究宁夏河东沙地固定沙丘花棒林土壤水分的变化规律, 为该区沙漠化持续治理和防沙治沙效果评价提供科学参考。[方法] 利用 Hydrus-1D 模型, 模拟 0—150 cm 土壤剖面的土壤水分垂直分布和时间变化特征, 并采用决定系数  $R^2$ 、均方根误差 RMSE 和相对误差 RE 评价了模型在宁夏河东沙地的适用性。[结果] ①降雨入渗表现出阈值依赖特征: 降雨量小于 2.2 mm 时, 入渗深度小于 5 cm, 降雨量介于 3.6~8.2 mm 时, 入渗深度介于 5~15 cm; 降雨量介于 10.8~22.8 mm 时, 入渗深度介于 15~30 cm; ②利用 Hydrus-1D 模型模拟花棒林地不同深度土壤含水量总体模拟效果较好, 模拟阶段和验证阶段决定系数分别为 0.756 和 0.773, 均方根误差分别为 0.071% 和 0.064%, 相对误差分别为 0.030%, 0.032%; 表层 5 cm 和深层 125 cm 土壤含水量拟合精度不高, 15, 30, 50, 80 cm 土壤含水量模拟效果较好, 土层决定系数范围为 0.571~0.849, 均方根误差为 0.000 1%~0.042%。[结论] 不同降雨事件下的入渗效果有所差异, 总体上降雨入渗的深度随着降雨量的增加而增加。Hydrus-1D 模型模拟的土壤含水量与实测值吻合度较高, 并证明该模型适用于模拟宁夏河东沙地土壤剖面的含水量。

**关键词:** 土壤水分; Hydrus-1D 模型; 入渗深度; 适用性; 宁夏河东沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0267-10

中图分类号: S152.7

**文献参数:** 张维福, 展秀丽, 马思怡, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的宁夏河东沙地固定沙丘花棒林土壤水分动态模拟[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 267-276. Zhang Weifu, Zhan Xiuli, Ma Siyi, et al. Simulation of soil moisture dynamics under *Hedysarum scoparium* forests on fixed sand-dunes in eastern sandy land of Yellow River in Ningxia based on Hydrus-1D model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 267-276. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.013; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.013.

## Simulation of soil moisture dynamics under *Hedysarum scoparium* forests on fixed sand-dunes in eastern sandy land of Yellow River in Ningxia based on Hydrus-1D model

Zhang Weifu<sup>1,2,3</sup>, Zhan Xiuli<sup>1,2,3</sup>, Ma Siyi<sup>1,2,3</sup>, Zhang Chengchun<sup>1,2,3</sup>, Ma Xiaoxia<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Geographic Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. China-Afghanistan Joint Laboratory for International Cooperation on Characteristic Resources and Environmental Governance in Arid Areas, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Key Laboratory of Resources Evaluation and Environmental Regulation in Arid Areas of Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** [Objective] Soil moisture spatiotemporal dynamics in fixed sand-dunes (planted with *Hedysarum scoparium*) in eastern Yellow River sandy land in Ningxia Hui Autonomous Region were investigated, to provide scientific insights for sustainable desertification control and effective evaluation of sand stabilization measures. [Methods] The HYDRUS-1D model was employed to simulate the vertical distribution (0—150 cm profile) and temporal variations in soil moisture in fixed dunes. The model performance in eastern sandy land of Yellow River

收稿日期: 2025-04-07 修回日期: 2025-06-11 采用日期: 2025-06-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“宁夏河东沙地水分在土壤-植被系统演变中的驱动作用”(42161013); 宁夏自然科学基金项目(2024AAC03078)

第一作者: 张维福(1995—), 男(回族), 宁夏回族自治区中卫市人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区生态水文与荒漠化防治。Email: 18109551420@163.com。

通信作者: 展秀丽(1983—), 女(汉族), 甘肃省白银市人, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化防治方面的研究。Email: zhanxiuli@mail.nu.edu.cn。

in Ningxia was evaluated using the coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), and relative error (RE). [Results] ① Rainfall infiltration exhibited threshold-dependent characteristics: infiltration depth was limited to  $<5$  cm when precipitation  $<2.2$  mm, 5—15 cm for 3.6—8.2 mm rainfall, and 15—30 cm for 10.8—22.8 mm rainfall. ② The model demonstrated satisfactory performance in simulating soil-water content across most depths (calibration  $R^2=0.756$ , validation  $R^2=0.773$ ; RMSE=0.071% and 0.064%; RE=0.030% and 0.032%). Although surface (5 cm) and deep layer (125 cm) simulations showed lower accuracy, intermediate layers (15, 30, 50, and 80 cm) achieved better results ( $R^2=0.571$ —0.849, RMSE=0.0001%—0.042%). [Conclusion] The infiltration patterns varied significantly across rainfall events, showing a positive correlation between the amount of precipitation and infiltration depth. The HYDRUS-1D model proved suitable for simulating the soil moisture dynamics in this arid sandy ecosystem, with simulations closely matching field observations.

**Keywords: soil moisture; Hydrus-1D model; infiltration depth; applicability; sandy land east of the Yellow River in Ningxia Hui Autonomous Region**

土壤水分是评价土壤特征的重要指标<sup>[1]</sup>,是植被生长的物理基础<sup>[2]</sup>。在干旱半干旱区,土壤水分是影响沙生植被生长的关键因素<sup>[3]</sup>,同时植被的生长状况也会对沙地土壤水分时空变化<sup>[4]</sup>、土壤物理特征的演化起着关键的作用<sup>[5]</sup>。目前,很多学者在干旱半干旱区针对土壤水分变化<sup>[6-7]</sup>、土壤水分稳定性<sup>[8-9]</sup>和降雨入渗等<sup>[10]</sup>方面已取得一定的研究成果。研究<sup>[11]</sup>发现近些年开展的大规模植被种植以及荒漠化治理等一系列造林工程,导致土壤水分亏缺严重。因此,研究人工固定沙丘土壤水分动态变化特征,掌握固定沙丘土壤水分的时空分布规律,对于干旱半干旱区生态恢复及沙漠化治理有着重要的科学意义。

目前,土壤水分变化的研究方法包括野外监测、室内试验、遥感反演和数值模拟等。利用遥感数据对土壤水分进行反演,可以获得大尺度范围内表层的土壤水分分布以及空间分布特征<sup>[12]</sup>,但对于局部地区土壤水分反演的精度不足,而数值模拟方法克服了这3种方法的缺点,具有低成本、高效率等优点<sup>[13]</sup>。随着计算机技术的发展,土壤水分模拟模型已经从物理试验模型、经验模型发展到数值模拟阶段<sup>[14]</sup>,利用数值模拟土壤水分的方法已经成熟。许多学者已经应用不同的土壤水分模拟模型<sup>[15-16]</sup>对土壤水分动态变化进行了研究。Hydrus-1D模型是模拟土壤水分运移情况的方法之一。该模型因快捷、适用性强等特点,已经被广泛应用于不同土地类型的土壤水分变化<sup>[17]</sup>、溶质运移<sup>[18]</sup>。王宇祥等<sup>[19-20]</sup>通过Hydrus-1D模型模拟科尔沁沙丘-草甸相间区土壤含水量和半流动沙丘土壤水分漏渗量。Guan Hongjie等<sup>[21]</sup>利用Hydrus-1D模型对毛乌素沙地进行土壤水分数值模拟并评估了生物结皮类型和降雨特征对径流的影响。洪光宇等<sup>[22-23]</sup>利用Hydrus-1D模型模拟毛乌素沙地杨柴灌木林土壤含水量和流动沙丘土壤

含水量动态变化。Jia Wuhui等<sup>[24]</sup>使用Hydrus-1D模型对毛乌素沙区土壤湿度进行模拟并估算了不同植物样地的地下水蒸散发。综上所述,Hydrus-1D模型是目前比较成熟、应用较多的模拟多层土壤水分动态变化的模型。

宁夏河东沙地是国家和宁夏生态治理的重点区域。多年来,该地区防沙治沙工作取得了重大效果,地表覆被面积增加显著。对该区土壤水分变化的研究是评价防沙治沙效果和生态恢复持续发展的重要科学依据。宁夏河东沙地风沙土机械组成主要以细砂和粉砂为主<sup>[25-26]</sup>,土壤水分变化过程中不易受团聚体的影响<sup>[19]</sup>,对于模型模拟土壤水分变化效果更加显著。因此,在该区选择运用Hydrus-1D模型将能更加准确地模拟该地区固定沙丘土壤水分的时空变化规律。本研究选取宁夏河东沙地白芨滩国家级自然保护区为研究区域。该区域人工固沙采取的是工程措施与生物措施相结合的治沙模式,固沙植物花棒分布较广,长势较好。以固定沙丘(花棒林)为研究对象,基于2023年5月18日至2023年10月21日连续观测5,15,30,50,80,125 cm各层土壤含水量数据、土壤水分特征参数等数据,利用Hydrus-1D模型对土壤含水量动态变化进行模拟并评价其适用性,以为沙漠化持续治理和防沙治沙效果评价提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

白芨滩自然保护区位于宁夏回族自治区灵武市以南40 km,地理位置 $37^{\circ}49'$ — $38^{\circ}20'N$ , $106^{\circ}20'$ — $106^{\circ}37'E$ ,平均海拔1 300 m,面积约为748.43 km<sup>2</sup>(图1)。该区域属于中温带干旱区,典型的大陆性气候,冬季冷而长,夏季热而短,温差大,日照时间长,四季分明。年降雨量较少,年均温在10.4℃,年均降雨

量为206.2~255.2 mm,降雨量主要集中在6—9月。土壤类型为风沙土,土壤结构松散。研究区植被主要以沙生植物为主,主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等。

## 1.2 样地布设

2023年5月,在固定沙丘布设1台土壤含水量自动检测系统(RS-QXZN-M2-DC-12,山东仁科测控技术有限公司),配备6层土壤含水量自动检测传感器,分别布设在土层深度5,15,30,50,80,125 cm处。同时,对气象基本要素风速、风向、空气温度、空气湿度、太阳辐射量和降雨量等进行观测,观测高度为2 m,所有数据的采集间隔均为5 s。

## 1.3 测定指标与方法

### 1.3.1 土壤物理性质测定

2023年7—9月,在固定沙丘(花棒林)内开挖100 cm×100 cm×150 cm土壤剖面,在0—10,10—20,20—40,40—60,60—100,100—150 cm土层深度处使用环刀进行土壤样品取样,每层取3个重复土壤样品,并带回实验室对土样进行模型参数的测定。土壤容重通过烘箱进行长时间的烘干测定,土壤饱和含水量通过长时间的水分浸泡对其进行测定,土壤饱和导水率通过马氏瓶测定。采用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 3000, Malvern instruments Ltd, UK)对土壤机械组成进行测定。土壤机械分级标准采用美国农业部USDA制度,分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2.00 mm)(表1)。

### 1.3.2 植被数据

2023年5—10月,每15 d进行一次植被调查,采用冠层分析仪(LAI-2200C)对植被叶面积指数(LAI)进行测定。由于根系变化比较缓慢,因此,根系数据为一次采样后确定的结果,在研究区内开挖100 cm×100 cm×150 cm土壤剖面,对0—10,10—20,20—40,40—60,60—100,100—150 cm土层深度进行分层根系取样。

## 1.4 观测期降雨变化特征

在试验观测期(2023年5月18日至10月21日)共发生降雨27次(图1),总降雨为124.2 mm。本试验区24 h降雨主要以0~10 mm降雨事件为主,总共23次,其中,24 h降雨量≤5 mm的降雨有19次;24 h降雨量为5~10 mm的降雨有4次;而24 h降雨量为10~25 mm的降雨仅有4次。

## 1.5 模型的介绍与评价

### 1.5.1 土壤水分运动方程

模型仅考虑水分一维垂直运动,采用经典的

Richards方程<sup>[27]</sup>描述:

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

式中: $\theta$ 为土壤饱和含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $t$ 为时间(d); $z$ 为垂向空间坐标(cm); $h$ 为压力水头(cm); $s$ 为农作物根系吸水率( $\text{cm}/\text{h}$ ); $K(h)$ 为非饱和含水率( $\text{cm}/\text{d}$ )。

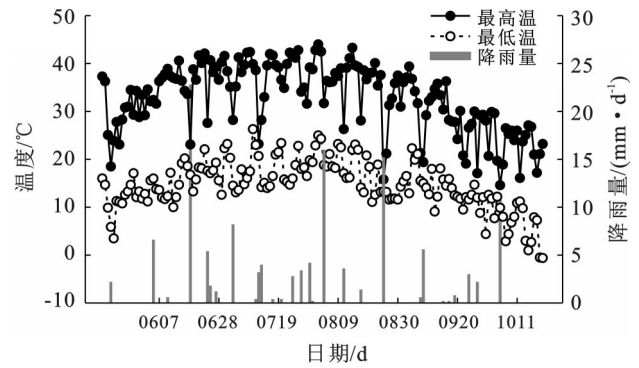


图1 观测试验区2023年5—10月温度和降雨量  
Fig.1 Temperature and rainfall in observation area from May to October 2023

土壤水分特征曲线和非饱和导水率采用 van Genuchten-Mualem 方程<sup>[28]</sup>拟合:

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

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

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

式中: $\theta_s$ 为土壤饱和含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_r$ 为土壤残余含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $K_s$ 为饱和导水率( $\text{cm}/\text{h}$ ); $S_e$ 为无量纲的相对含水量; $\alpha, m, n, l$ 均为拟合参数。

### 1.5.2 根系吸水模型

Hydrus-1D使用水分胁迫指数研究根系吸水问题,采用Feddes模型<sup>[29]</sup>计算根系吸水。

$$S(z, t) = \alpha(h, t) \cdot \beta(z) \cdot T_p \quad (5)$$

式中: $\alpha(h, t)$ 为水分胁迫函数; $\beta(z)$ 为归一化根系吸水的分布函数; $T_p$ 为植被潜在蒸发量(cm)。

### 1.5.3 时间和空间离散

试验从2023年5月18日至2023年10月21日,共157 d。将0—150 cm土壤剖面划分为6层,通过时间离散化的方式,以天(d)为单位进行土壤水分的模拟。模型初始时间为0,模拟结束时间为157 d。初始时间步长为0.001 d,最小时间步长为0.000 1 d,最大时间步长为1 d。

### 1.5.4 边界设置

由于样地表层无径流发生,上边界设置为大气边界;下边界地下水位较深,沙土间隙大、通透性强,下边界设置为自由排水边界。

### 1.5.5 模型检验与数据处理

Hydrus-1D 模型是对实际土壤水分运移情况的模拟,主要取决于土壤水力学参数的准确性,所以需要对其  $\theta_r, \theta_s, \alpha, K_s, l, n$  参数进行不断地优化<sup>[19]</sup>。将观测的时间段分为两部分,即 2023 年 5 月 18 日至 2023 年 8 月 25 日用于模型模拟阶段,2023 年 8 月 26 日至 2023 年 10 月 21 日用于模型验证阶段,通过决定系数 (coefficient of determination,  $R^2$ )、平均误差 (mean error, ME)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均相对误差 (mean relative error, MRE) 4 个指标评价模型模拟的精度。 $R^2$  表示模拟值与实测值的密切程度,值越接近于 1,模拟的效果越好;ME 表示模拟值与实测值的偏离程度;RMSE 和 MRE 趋近于 0 时,表示模拟值越接近于实测值。计算公式<sup>[22]</sup>为

$$R^2 = \frac{\text{cov}(y^p, y^m)}{\text{var}(y^p) \text{var}(y^m)} \quad (6)$$

$$\text{ME} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i^p - y_i^m) \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i^p - y_i^m)^2} \quad (8)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^m - y_i^p}{y_i^p} \right| \quad (9)$$

式中: $y_i^p$  为土壤含水量的实测值; $y_i^m$  为土壤含水量的模拟值; $N$  为样本点个数。

## 1.6 数据处理

采用 Excel 2003 对原始数据进行整理和分析;采用 ArcGIS 10.2 和 Origin 2021 软件对统计的数据进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水力学参数

采用实测的土壤容重和土壤机械百分比数据通过 Hydrus-1D 模型自带的求解功能模块计算得到各层 van Genuchten 参数,利用实测的土壤含水量、饱和含水率和导水率对参数不断优化和校准,得到最终土壤水力学参数(表 1)。

表 1 研究区土壤基本物理性质和水力学参数

Table 1 Basic physical properties and hydraulic parameters of soil in study area

土层深度/ cm	机械组成/%			土壤容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土壤水力学参数					
	0.05~ 2.00 mm	0.002~ 0.05 mm	<0.002 mm		$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$K_s$	$l$
0—10	86.3	11.88	1.83	1.596 9	0.028 5	0.309 8	0.012 1	1.281 0	13.783 3	0.5
10—20	83.15	15.2	1.65	1.600 3	0.018 7	0.321 0	0.006 1	1.309 0	45.291 7	0.5
20—40	85.31	13.56	1.14	1.575 4	0.012 1	0.380 1	0.003 5	1.468 0	1.056 7	0.5
40—60	84.87	14.04	1.08	1.558 1	0.011 0	0.396 9	0.005 0	1.316 0	2.075 0	0.5
60—100	82.65	17.27	0.08	1.531 9	0.022 0	0.365 3	0.002 5	1.228 0	90.041 7	0.5
100—150	83.05	15.25	1.7	1.537 7	0.017 1	0.328 2	0.002 7	1.190 0	89.958 3	0.5

注: $\theta_r$  为残余含水量; $\theta_s$  为残饱和含水量; $K_s$  为饱和导水率; $\alpha, n, l$  为模型参数。

### 2.2 降雨量与入渗深度分析

通过分析次降雨事件中前后几天土壤含水量变化情况(表 2),研究不同降雨量大小与土壤水分入渗深度的关系。研究期内降雨量小于 25 mm,因此降雨事件等级只有小雨和中雨。所选的次降雨事件,时间跨度为 4 d,各降雨量事件下不同土层深度的土壤含水量变化情况如图 3 所示。

图 2a 为 2023 年 9 月 26—29 日发生降雨时的土壤含水量变化情况,降雨量为 2.2 mm(表 2),降雨时间段前后不同深度的土壤含水量保持稳定状态,入渗深度未达到 5 cm。图 2b 为 2023 年 8 月 10—13 日发生降雨时的土壤含水量变化情况,降雨量为 3.6 mm,研

究发现,8 月 11 日土壤剖面 5 cm 处入渗效果不明显,而 5 cm 土壤含水量在降雨后土壤含水量值明显增高,入渗效果明显,15 和 30 cm 土壤含水量保持稳定状态,即入渗深度达到 5 cm 而未达到 15 cm。图 2c 为 2023 年 7 月 2 日至 7 月 5 日发生降雨时的土壤含水量变化情况,降雨量为 8.2 mm,入渗效果显著,15 cm 土壤含水量在降雨期间和降雨后明显增加,30 和 50 cm 土壤含水量保持稳定状态,即入渗深度达到 15 cm 而未达到 30 cm。从图 2d, 2e, 2f 可知,在 10 月 6 日、8 月 26 日、6 月 18 日各发生了一次中雨事件,降雨量分别为 10.8、15.2 和 22.8 mm,这 3 次降雨使得 15 cm 土壤含水量明显增加,30 和 60 cm 土壤含水量

保持平稳状态,即入渗深度达到 15 cm 而未达到 30 cm。通过对比各个降雨事件,发现次降雨后的第 2 天水分入渗效果显著,第 3 天土壤含水量值有所减小。

表 2 试验期内 6 次降雨事件统计  
Table 2 Statistics of 6 rainfall events during test period

降雨事件	分析时段	降雨发生时段	降雨量/mm	入渗深度/cm
小雨 (<10 mm)	20230926—20230929	20230927(06:32—14:29)	2.2	$h < 5$
	20230810—20230813	20230811(09:27—13:27)	3.6	$5 < h < 15$
	20230702—20230705	20230703(01:58—09:42)	8.2	$15 < h < 30$
中雨 (10~25 mm)	20231005—20231008	20231006(08:58—18:08)	10.8	$15 < h < 30$
	20230825—20230828	20230826(09:28—16:28)	15.2	$15 < h < 30$
	20230617—20230620	20230618(06:22—14:32)	22.8	$15 < h < 30$

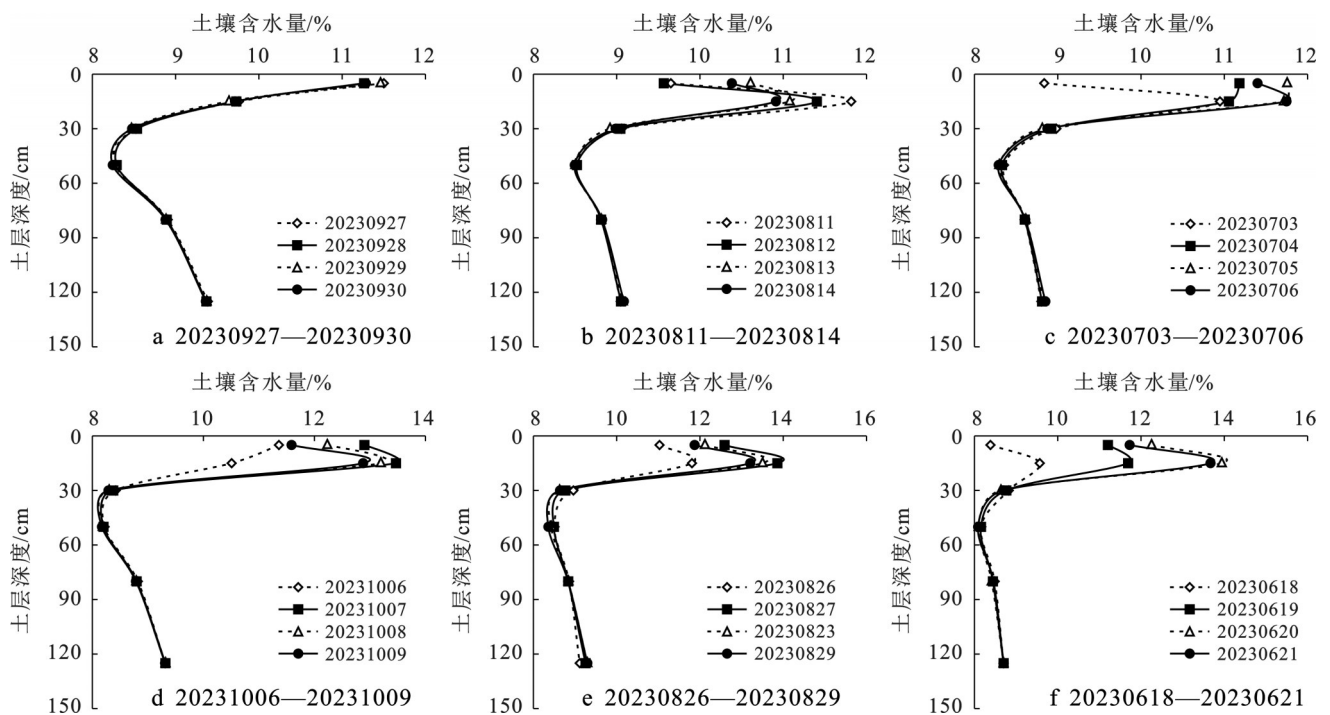


图 2 不同降雨事件下不同深度的土壤含水量变化

Fig.2 Changes of soil depth and soil water content under different rainfall events

2.3 土壤含水量总体模拟

通过 Hydrus-1D 模型模拟的土壤含水量总体变化(图 3),0—150 cm 土层土壤含水量模拟阶段的决定系数为 0.756,验证阶段的决定系数为 0.773。平均误差在模拟与验证阶段分别为 -0.000 4 和 0.001,均方根误差在模拟与验证阶段分别为 0.071 和 0.064,相对误差在模拟与验证阶段分别为 0.030,0.032(表 3)。

表 3 Hydrus-1D 模型模拟效果评价  
Table 3 Evaluation on simulation effect of Hydrus-1D model

阶段	R <sup>2</sup>	平均误差/%	均方根误差/%	相对误差/%
模拟阶段	0.756	-0.000 4	0.071	0.030
验证阶段	0.773	0.001	0.064	0.032

2.4 土壤含水量垂直变化模拟

选取 6,8,10 月中前期连续多天没有降雨干扰的土壤含水量来评估模型模拟土壤剖面含水量的能力。由图 4 可知,6 月 1 日土壤含水量呈现先减小后增大的趋势,在 80 cm 处达到最小值,为 0.083 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。8 月 4 日土壤含水量呈现先增大后减小再平缓的趋势,在 15 cm 处增大到最大值,为 0.140 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,在 50 cm 处减小到最小值,为 0.085 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。10 月 1 日土壤含水量呈现先减小后增大的趋势,在 50 cm 处减小到最小值,为 0.082 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。对比模拟值与实测值,这 3 d 土壤剖面 5 cm 处模拟值与实测值偏差较大,绝对值差值分别为 0.027,0.030 和 0.017 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。6 月 1 日土壤剖面 50,80 cm 模拟值与实测值的绝对值差值分别为 0.003 和 0.002 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。8 月 1 日土壤剖面 15 cm

模拟值与实测值的绝对值差值分别为 $0.011 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。10月1日土壤剖面125 cm模拟值与实测值的绝对值

差值分别为 $0.0024 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。总体来看,土壤含水量的模拟值与实测值吻合程度较高。

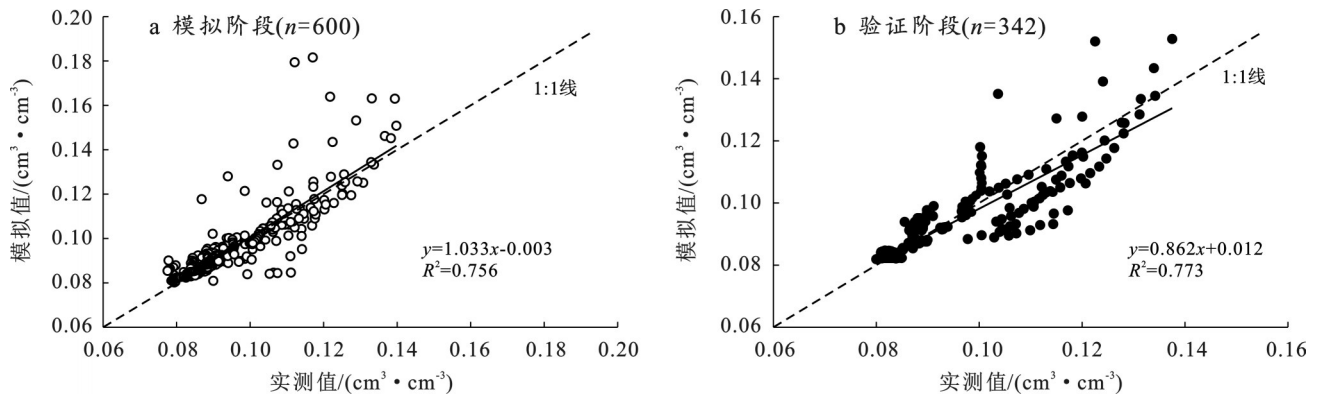


图3 试验样地土壤含水量总体模拟情况

Fig.3 Overall simulation of soil water content in experimental site

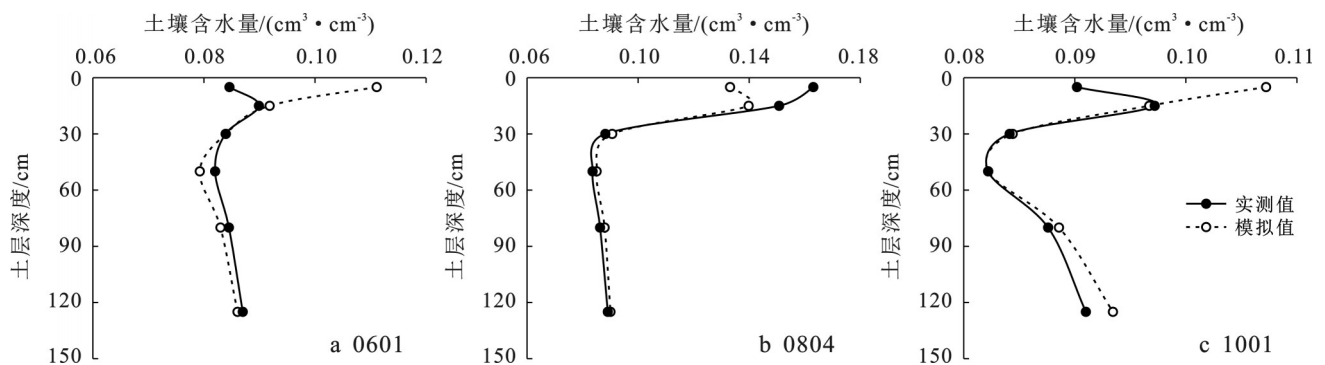


图4 试验样地土壤含水量的垂直变化

Fig.4 Vertical variation of soil water content in experimental site

## 2.5 土壤含水量时间动态变化模拟

通过对比观测期内实测的6层土壤含水量数据与Hydrus-1D模型模拟的结果(图5),可以看出研究期间内不同土层深度的模拟值与实测值吻合度较高,模拟的结果总体上可以反映出土壤含水量的实际变化。5,15,30 cm土层土壤含水量总体上模拟值比实测值较高,50,80,125 cm土层土壤含水量总体上实测值略高于模拟值。6总体上Hydrus-1D模型模拟的土壤含水量与实测值具有较高的吻合度。

从表4和图6中可以看出,ME在模拟阶段5,15,50 cm和验证阶段30 cm深度实测值小于模拟值,其他土层土壤含水量实测值均大于模拟值,模拟阶段RMSE在 $0.0001\% \sim 0.086\%$ ,验证阶段在 $0.009\% \sim 0.076\%$ ,模拟阶段MRE在 $0.008\% \sim 0.086\%$ ,验证阶段在 $0.007\% \sim 0.054\%$ 。除5 cm模拟阶段、验证阶段和125 cm验证阶段 $R^2$ 在0.5以下,其他阶段 $R^2$ 均大于0.5。因此,Hydrus-1D模型模拟河东沙地土壤含水量变化具有较好的效果。

由表4和图6可知,表层5 cm模拟值与实测值

RMSE, MRE相较于其他各层的差值较大,模拟阶段和验证阶段5 cm RMSE也是最大的,分别为 $0.086\%$ 和 $0.076\%$ 。15 cm土壤水分模拟值与实测值RMSE, MRE相对表层5 cm的值较小,但相对深层的值较大,建模阶段RMSE为 $0.041\%$ ,验证阶段RMSE为 $0.042\%$ 。15 cm模拟阶段和验证阶段ME与30,50,80,125 cm值近乎相同。30和80 cm土壤水分模拟值与实测值RMSE, MRE值较接近,模拟阶段RMSE值分别为 $0.014\%$ 和 $0.012\%$ ,MRE值分别为 $0.015\%$ 和 $0.014\%$ ,验证阶段RMSE值分别为 $0.015\%$ 和 $0.009\%$ ,MRE值分别为 $0.023\%$ 和 $0.014\%$ 。50 cm RMSE模拟阶段比验证阶段的值较小,分别为 $0.0001\%$ 和 $0.010\%$ ,MRE分别为 $0.017\%$ 和 $0.016\%$ , $R^2$ 分别为 $0.759$ 和 $0.571$ 。125 cm土层在模拟阶段和验证阶段的ME值与15,30,50,80 cm土层的值基本一致,而模拟阶段RMSE, MRE,  $R^2$ 分别为 $0.008\%$ , $0.008\%$ 和 $0.970$ ,验证阶段RMSE, MRE,  $R^2$ 分别为 $0.009\%$ , $0.007\%$ 和 $0.255\%$ ,发现RMSE, MRE值是低于15,30,80 cm,验证阶段 $R^2$ 低于0.5(图6,表4)。

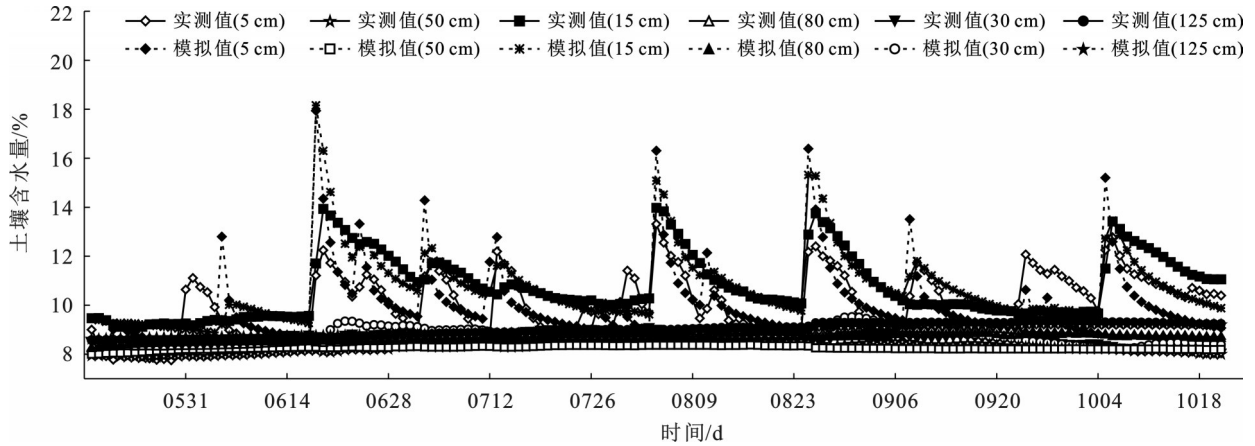


图 5 试验样地土壤含水量的时间动态变化

Fig.5 Temporal dynamic changes of soil water content in experimental site

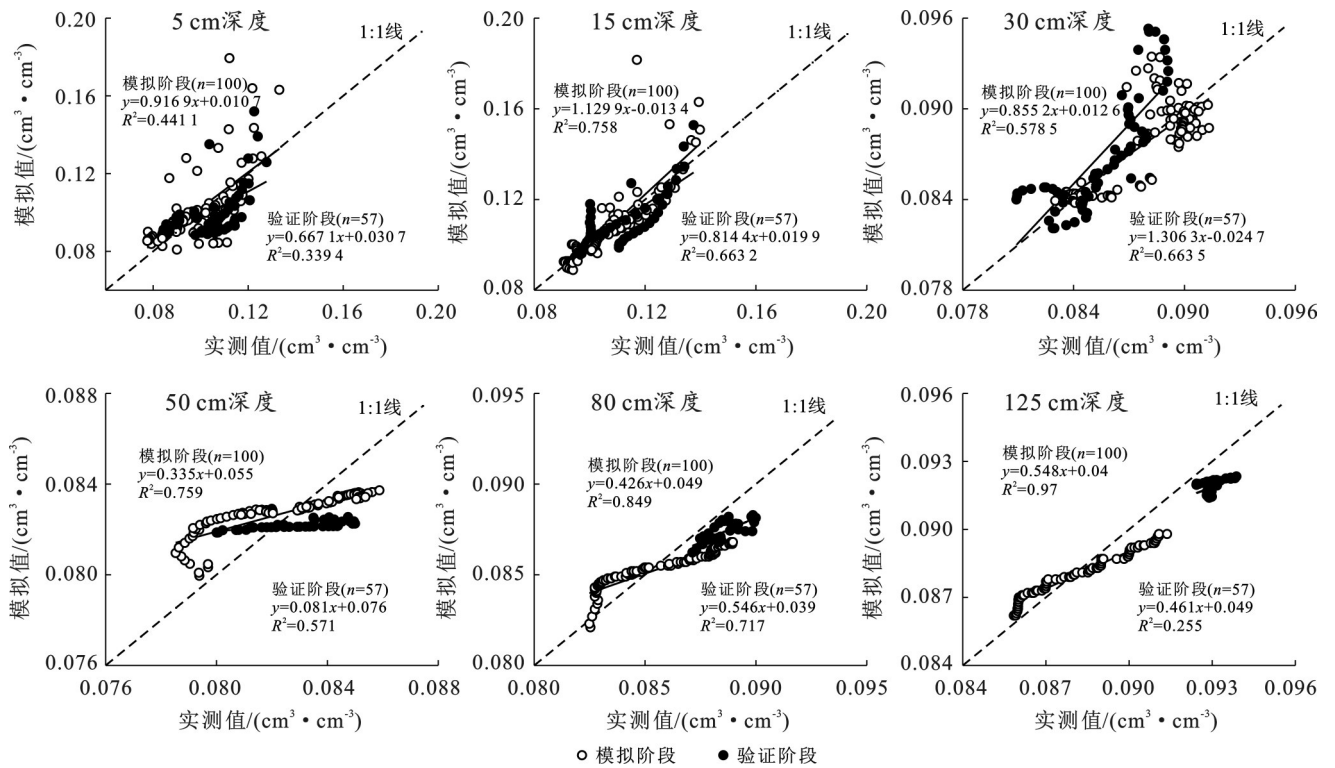


图 6 试验样地各土层土壤剖面含水量实测值与模拟值对比

Fig.6 Comparison of measured values and simulated values of water content in each soil profile in experimental site

### 2.6 土壤含水量相关性检验

通过分析土壤含水量模拟值与实测值显著性(表 5)。在模拟阶段 15,50,80,125 cm 土壤含水量模拟值与实测值具有极显著差异( $p < 0.01$ ),5 cm 土壤含水量模拟值与实测值具有显著差异( $p < 0.05$ ),30 cm 土壤含水量模拟值与实测值无显著差异。在验证阶段 50,80,125 cm 土壤含水量模拟值与实测值具有极显著差异( $p < 0.01$ ),5,15,30 cm 土壤含水量模拟值与实测值无显著差异。随着土层深度的增加,土壤含水量模拟值与实测值显著性也大幅提高,30 cm 深度土壤含水量模拟值与实测值显著性总体效果较差。

### 3 讨论

土壤水分的变化会影响植被群落的格局和土壤理化性质<sup>[26]</sup>,通过掌握干旱半干旱区土壤含水量的变化,有助于沙漠化治理。降雨是河东沙地土壤水分的主要来源。研究发现,降雨量 $< 2.2$  mm时,入渗深度 $< 5$  cm,降雨量大小介于 $3.6 \sim 8.2$  mm时,入渗深度介于 $5 \sim 15$  cm,降雨量介于 $10.8 \sim 22.8$  mm时,入渗深度介于 $15 \sim 30$  cm,这与一些学者的研究结论<sup>[30-32]</sup>基本一致。不同降雨强度下土壤水分入渗深度各不相同,降雨强度越大,水分入渗效果越显著<sup>[33]</sup>。

表 4 试验样地土壤含水量模型模拟结果回归评价  
Table 4 Regression evaluation of model simulation on soil water content in experimental site

类别	土层深度/cm	平均误差/%	均方根误差/%	相对误差/%
模拟阶段	5	-0.003	0.086	0.086
	15	-0.001	0.041	0.036
	30	0.000 2	0.014	0.015
	50	-0.000 2	0.000 1	0.017
	80	0.001	0.012	0.014
	125	0.000 2	0.008	0.008
验证阶段	5	0.004	0.076	0.054
	15	0.000 3	0.042	0.050
	30	-0.002	0.015	0.023
	50	0.000 4	0.010	0.016
	80	0.001	0.009	0.014
	125	0.001	0.009	0.007

表 5 试验样地土壤含水量模拟值与实测值显著性  
Table 5 Significance of simulated and measured values of soil water content in experimental site

阶段	土层深度/cm	平均值±标准差	显著性
模拟阶段	5	0.097 4±0.012 8	0.004
	15	0.106 5±0.012 9	0.000
	30	0.088 1±0.002 4	0.007
	50	0.082 6±0.002 3	0.000
	80	0.085 9±0.002 2	0.00
	125	0.088 4±0.001 8	0.000
验证阶段	5	0.104 6±0.011 7	0.149
	15	0.109 1±0.012 4	0.178
	30	0.085 5±0.002 4	0.13
	50	0.082 9±0.001 5	0.000
	80	0.088 6±0.000 9	0.000
	125	0.093 0±0.000 3	0.000

本研究选择 Hydrus-1D 模型对固定沙丘(花棒林)0—150 cm 土壤水分的垂直分布变化进行模拟,研究发现不同深度土壤水分模拟值与实测值的差异小、波动起伏近乎重合,这也与一些学者得出的结论相似<sup>[34]</sup>。各层土壤含水量在垂直方向上有所差异,表层 5 cm 模拟值与实测值 RMSE, MRE 相较于其他各层的差值较大,模拟阶段和验证阶段 5 cm 的 RMSE 也是最大的,主要是由于表层土壤环境更加复杂,更容易受降雨入渗、土壤水分蒸发等影响。因此,表层土壤水分波动起伏大于深层土壤水分<sup>[22,33]</sup>,而 Hydrus-1D 模型是对垂直方向上土壤水分的运移情况进行模拟,未考虑到土壤水分横向运动过程<sup>[34]</sup>。

随着土层深度的增加,15 cm 土壤水分模拟值与

实测值 RMSE, MRE 相对表层 5 cm 的值较小,但相对深层的值较大。这说明降雨入渗及土壤水分蒸发对 15 cm 土壤水分具有一定的影响。15 cm 模拟阶段和验证阶段 ME 与 30, 50, 80, 125 cm 值近乎相同,说明 15 cm 处土壤水分年际变化较稳定。30, 80 cm 土壤水分模拟值与实测值 RMSE, MRE 值较接近。50 cm 的 RMSE 模拟阶段比验证阶段的值较小。125 cm 模拟阶段和验证阶段 ME 与 15, 30, 50, 80 cm 值近乎相同,说明模型模拟的土壤含水量值与实测值具有较好的吻合程度。但在本研究中发现,125 cm 深处的土壤含水量变化实测值与模拟值吻合度不高,因为 Hydrus-1D 模型主要通过水力学参数和根系分布特征来进行模拟预测,这与洪光宇等<sup>[22]</sup>在毛乌素沙地的研究结论一致。

本研究中,通过模拟花棒林群落土壤含水量的运移情况,发现模拟阶段与验证阶段各层的模拟值与实测值总体相差较小。洪光宇等<sup>[22]</sup>利用 Hydrus-1D 模型模拟毛乌素沙地杨柴灌木林土壤含水量时, $R^2$ 为 0.55~0.77, RMSE 为 0.005%~0.014%;朱超凡等<sup>[34]</sup>使用 Hydrus-1D 模型模拟人工草地土壤含水量时, RMSE 为 0.012%~0.034%;王宇祥等<sup>[19]</sup>通过 Hydrus-1D 模型模拟科尔沁沙丘-草甸相间区土壤含水量时, $R^2$ 为 0.76~0.87, RMSE 为 0.01%~0.02%。本研究利用 Hydrus-1D 模型模拟的土壤含水量  $R^2$  和 RMSE 与上述结果相似,说明 Hydrus-1D 模型可以对宁夏河东沙地土壤含水量的实际情况进行预测,能够为今后的荒漠化治理提供参考。

## 4 结论

(1) 通过对不同降雨等级降雨量与土壤水分入渗的关系分析,发现不同降雨事件下,土壤水分入渗深度也不同,降雨强度越大,入渗效果越显著。降雨量 < 2.2 mm 时,入渗深度 < 5 cm;降雨量大小介于 3.6~8.2 mm 时,入渗深度介于 5~15 cm;降雨量介于 10.8~22.8 mm 时,入渗深度介于 15~30 cm。

(2) Hydrus-1D 模型对土壤水分动态变化模拟的总体效果较好,模拟阶段和验证阶段决定系数分别为 0.756 和 0.773,均方根误差分别为 0.071% 和 0.064%,相对误差分别为 0.030%, 0.032%。表层 5 cm 和深层 125 cm 土壤含水量拟合效果不高,其他土层土壤含水量模拟效果较好,土层决定系数为 0.571~0.849,均方根误差为 0.000 1%~0.042%。实测值与模拟值具有较好的一致性,说明 Hydrus-1D 模型适用于模拟宁夏河东沙地土壤剖面含水量的动态变化。

## 参考文献(References)

- [1] Lü Yihe, Fu Bojie, Feng Xiaoming, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. PLoS One, 2012, 7(2): e31782.
- [2] 张永旺, 王俊, 屈亚潭, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤水分有效性评价[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 79-85.  
Zhang Yongwang, Wang Jun, Qu Yatan, et al. Evaluating bioavailable soil water during vegetation restoration in the Loess Plateau [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 79-85.
- [3] 赵思腾, 赵学勇, 李玉霖, 等. 干旱半干旱区地下水埋深对沙地植物土壤系统演变的驱动作用综述[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9898-9908.  
Zhao Siteng, Zhao Xueyong, Li Yulin, et al. A review on the driving effect of groundwater depth on the evolution of sandy plant soil systems in arid and semi-arid region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9898-9908.
- [4] 朱林峰, 张宇清, 秦树高, 等. 油蒿群落不同恢复阶段的土壤水分空间异质性及植被特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 58-63.  
Zhu Linfeng, Zhang Yuqing, Qin Shugao, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture and vegetation characteristics in *Artemisia ordosica* community at different succession stages [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 58-63.
- [5] 田英, 许喆, 王娅丽, 等. 宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1515-1525.  
Tian Ying, Xu Zhe, Wang Yali, et al. Soil quality evaluation for different forest plantation of sandy land in Yinchuan Plain, Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1515-1525.
- [6] 韩新生, 刘广全, 许浩, 等. 宁夏南部半干旱黄土区3种土地利用类型的土壤水分时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 250-259.  
Han Xinsheng, Liu Guangquan, Xu Hao, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil moisture under three land use types in the semi-arid loess region of southern Ningxia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 250-259.
- [7] 何晓帆, 田丽慧, 汪海娇, 等. 高寒沙地沙棘群落的土壤水分时空变异特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 23-33.  
He Xiaofan, Tian Lihui, Wang Haijiao, et al. Temporal-spatial variation of soil moisture content of different *Hippophae rhamnoides* communities in an alpine desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 23-33.
- [8] 吴亚彪, 高晓东, 何娜娜, 等. 黄土高原极端降水对人工林地深层土壤水分的补给效应[J]. 生态学报, 2024, 44(23): 10757-10769.  
Wu Yabiao, Gao Xiaodong, He Nana, et al. Recharge effect of extreme precipitation on deep soil water in artificial forest on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10757-10769.
- [9] 王明明, 刘新平, 李玉霖, 等. 不同植被盖度沙质草地生长季土壤水分动态[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 54-61.  
Wang Mingming, Liu Xinping, Li Yulin, et al. Soil moisture dynamic under different plant coverages in sandy grassland during growing season [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 54-61.
- [10] 梁海荣, 王涛, 杨宇, 等. 毛乌素沙地与浑善达克沙地水分深层渗漏特征对比[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 69-76.  
Liang Hairong, Wang Tao, Yang Yu, et al. Comparison of deep soil recharge characteristics between Mu Us sandy land and Hunshandake sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2): 69-76.
- [11] 闵梓骁, 张建新, 范文波, 等. 不同立地条件下沙棘土壤水分分布特征及动态生长研究[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 204-210.  
Min Zixiao, Zhang Jianxin, Fan Wenbo, et al. Soil moisture distribution and dynamic growth of *Hippophae rhamnoides* under different site conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 204-210.
- [12] 张华, 押海廷, 徐存刚. 兰州市南北两山土壤水分遥感反演及植被需水量估算[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 566-580.  
Zhang Hua, Ya Haiting, Xu Cungang. Remote sensing retrieval of soil moisture and estimation of vegetation water requirements in the north and south mountains of Lanzhou City [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 566-580.
- [13] 张凡琛, 谷天峰, 孔嘉旭, 等. 基于HYDRUS模型的灌溉和降雨条件下黑方台斜坡土壤水分变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6): 110-116.  
Zhang Fanchen, Gu Tianfeng, Kong Jiayu, et al. Changes of soil moisture in Heifangtai slope under irrigation and rainfall [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(6): 110-116.
- [14] Pollacco J A P, Fernández-Gálvez J, Rajanayaka C, et al. Multistep optimization of HyPix model for flexible vertical scaling of soil hydraulic parameters [J]. Environmental Modelling & Software, 2022, 156: 105472.
- [15] 邹慧, 高光耀, 朱斌, 等. 黄土高原恢复草地土壤水分对降水响应及模拟[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 890-898.  
Zou Hui, Gao Guangyao, Zhu Bin, et al. Modeling of

- the response of soil moisture to precipitation in the restored grasslands of the Loess Plateau [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(4):890-898.
- [16] 董智今,张呈春,展秀丽.宁夏河东沙地生物土壤结皮对土壤性质及入渗过程的影响[J].*生态学报*,2022,42(17):7128-7136.  
Dong Zhijin, Zhang Chengchun, Zhan Xiuli. Effects of biological soil crusts on soil properties and soil water infiltration process of sandy land in the east of Yellow River in Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17):7128-7136.
- [17] Chen Yunfei, Liu Xiuhua, Zheng Ce, et al. Estimation of water budget components and its driving factors analysis in arid grassland [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 906:167654.
- [18] 王世明,范敬龙,赵英,等.咸水灌溉条件下塔里木河下游沙漠土壤水盐运移数值模拟[J].*干旱区地理*,2021,44(4):1104-1113.  
Wang Shiming, Fan Jinglong, Zhao Ying, et al. Numerical simulation of water and salt migration in desert soil in the lower reaches of Tarim River under salt-water irrigation [J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(4):1104-1113.
- [19] 王宇祥,刘廷玺,段利民,等.基于Hydrus-1D模型的科尔沁沙地沙丘—草甸相间区土壤水分动态模拟[J].*中国沙漠*,2020,40(2):195-205.  
Wang Yuxiang, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Dynamic law of soil moisture in Horqin sand dune-meadow area based on Hydrus-1D model and its applicability evaluation [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2):195-205.
- [20] 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 Yuxiang, Liu Tingxi, Duan Limin, 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.
- [21] Guan Hongjie, Cao Rongjiang. Effects of biocrusts and rainfall characteristics on runoff generation in the Mu Us Desert, northwest China [J]. *Hydrology Research*, 2019, 50(5):1410-1423.
- [22] 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 Guangyu, Wang Xiaojiang, Liu Tieshan, 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.
- [23] 洪光宇,王晓江,苏庆溥,等.毛乌素沙地流动沙丘土壤水分模拟及渗漏特征[J].*中国沙漠*,2023,43(2):288-298.  
Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Su Qingpu, et al. Simulation of soil moisture and leakage characteristics of mobile dunes in Mu Us Sandy Land [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(2):288-298.
- [24] Jia Wuhui, Yin Lihe, Zhang Maosheng, et al. Estimation of groundwater evapotranspiration of different dominant phreatophytes in the Mu Us sandy region [J]. *Water*, 2021, 13(4):440.
- [25] 展秀丽,王红,张呈春,等.宁夏黄河以东固定沙丘土壤粒度特征及小尺度空间分异[J].*东北林业大学学报*,2021,49(12):108-114.  
Zhan Xiuli, Wang Hong, Zhang Chengchun, et al. Soil grain size characteristics and small scale spatial differentiation of fixed dune in east of the Yellow River in Ningxia [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(12):108-114.
- [26] 张维福,张呈春,马思怡,等.宁夏河东沙地土壤水分动态变化[J].*水土保持通报*,2024,44(4):97-106.  
Zhang Weifu, Zhang Chengchun, Ma Siyi, et al. Dynamic changes of soil moisture in sandy lands in east of Yellow River in Ningxia [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(4):97-106.
- [27] Simunek J. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the One-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Porous Media[Z]. *Hydrus Software*, 2005:68.
- [28] 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.
- [29] Busscher W. Simulation of field water use and crop yield [J]. *Soil Science*, 1980, 129(3):193.
- [30] 洪光宇,王晓江,刘果厚,等.毛乌素沙地杨柴灌木林土壤水分对不同降雨格局的响应[J].*水土保持通报*,2021,41(2):76-83.  
Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Liu Guohou, et al. Response of soil moisture to different rainfall patterns in *Hedysarum laeve* in Mu Us sandy land [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2):76-83.
- [31] 李新乐,安景源,王丹阳,等.白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆干沙层土壤水分动态及其对小雨事件的响应[J].*中国草地学报*,2022,44(5):20-30.  
Li Xinle, An Jingyuan, Wang Danyang, et al. Soil moisture dynamics in dry sand layers of *Nitraria tangutorum* nebkha and its responses to small rainfall events [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(5):20-30.