

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.

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

洪光宇¹,王晓江¹,刘铁山¹,海 龙¹,吴振廷¹,胡尔查¹,高孝威¹,
杨海峰¹,李卓凡¹,李梓豪¹,斯 琴²,王乐军¹

(1.内蒙古自治区林业科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010010; 2.扎鲁特旗草原技术服务中心,内蒙古 扎鲁特旗 029100)

摘要: 在干旱半干旱区植被恢复与重建过程中,土壤储水量会发生明显变化。土壤水分是限制植被生长的主要因子,运用数学模拟的方法研究植被建设后土壤水分变化特征,能更快预测土壤水分的亏缺情况。本研究选用Hydrus-1D模型,模拟毛乌素沙地典型灌木林杨柴(*Hedysarum laeve*)群落的土壤水分空间和时间变化,评估Hydrus-1D模型在毛乌素沙地杨柴人工林地的适用性。以杨柴生长季为研究期,通过调查的各项实测值带入Hydrus-1D模型并对参数进行优化后模拟杨柴群落土壤水分时间和空间的变化过程,利用同时间段Watchdog土壤水分监测仪连续监测的不同土层土壤含水量数据作为对照值验证其模拟值的适用性。结果表明:研究区飞播杨柴灌木林地不同深度土壤水分实测值与模拟值的决定系数0.55—0.78,均方根误差0.005%—0.0143%,实测值与模拟值具有较好的一致性,说明Hydrus-1D模型适用于模拟毛乌素沙地杨柴灌木林土壤剖面的水分变化。

关键词: 毛乌素沙地; 杨柴灌木林; 土壤水分; Hydrus-1D模型; 适用性

文章编号: 1000-694X(2022)06-233-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00045

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

0 引言

中国西北干旱半干旱区生境恶劣,常年干旱少雨,植被稀疏,风沙严重。国家为了改善生态环境,近几十年,陆续开展了包括退耕还林还草、风沙源及荒漠化治理等一系列造林工程^[1],以此达到减少风蚀沙化土地及增加森林覆盖率等目的。工程实施后,大面积植被恢复是否会造成土壤干燥化及地下水的过度消耗等一系列问题产生了巨大的争议,已有研究发现大模工程的实施导致了土壤水分亏缺^[2]。土壤水分的变化一直是干旱半干旱区生态系统水循环过程中的研究重点,成为土壤特征研究中重要的指标^[3],土壤水分在干旱半干旱区是限制植被生长及影响群落结构稳定性的主要因子。因此,

了解该区土壤水分变化过程,探究土壤水分盈亏状况,对于干旱半干旱区生态系统的稳定与生态修复具有重要意义。

目前,在干旱半干旱区对土壤水分稳定性^[4-6]、土壤水分补给^[7-8]和土壤水分利用^[9]等方面已取得一定的研究成果。植被恢复后需要掌握其水文动态变化过程,主要是掌握水循环过程中各变量之间的分配方式,连续并全面地对每个水文过程进行动态监测难度较大,因此通过数学模型模拟水文过程、定量评价水文系统中土壤水分运移转化关系已经成为生态保护的主要内容^[10-12]。许多研究者已通过不同的土壤水分运移模型对干旱半干旱区的水分运移过程进行了系统地研究,Hydrus、Philip、SWAT等数学模型已在研究土壤水分分布变化中被

收稿日期:2022-02-10; 改回日期:2022-03-22

资助项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS03036);内蒙古重大专项(2019ZD007);国家自然科学基金项目(41867043)

作者简介:洪光宇(1985—),女,内蒙古呼和浩特市人,博士,副研究员,研究方向为沙地水资源管理与应用。E-mail: nmghgy@163.com

通信作者:王晓江(E-mail: xjwang_21cn@163.com)

广泛应用^[13-15]。

Hydrus-1D是基于Richards原理,同步将大气降水、植被吸水、地下水变化及土壤理化性质考虑在内的垂直水分循环过程,适用于全部边界条件模拟^[16-18],编辑过程相对简单且应用过程较为灵活,同时具备参数优化功能^[19-21],使得Hydrus-1D模型在不同的土地类型及不同植被覆盖中的土壤水分变化、溶质运移及土壤水分深层渗漏等方面进行应用^[22-23]。王宇祥等^[18]利用Hydrus-1D模型对沙区不同类型的沙丘与草甸区的土壤水分变化进行了模拟并进行了模型的适用性评价,以此计算出土壤深层渗漏对降雨的响应。王国帅等^[24]研究了荒漠绿洲的水盐动态过程,揭示了土壤水分的亏缺状态,以此评价其农业生态状况。李冰冰等^[22]对渭北旱塬农地及苹果园深度10 m的土壤水分时空变化进行了模拟,为研究深层土壤水分变化找到了可靠方法。毛乌素沙地腹地以沙丘为主,主要成分为细沙和粉沙粒,因此土壤水分运动过程中基本不受到团聚体的影响,更有利于通过模型准确描述各项水土保持工程实施后土壤水分变化、水分深层渗漏及地下水补给情况。

本文选取毛乌素沙地腹地典型植被恢复区杨柴(*Hedysarum laeve*)人工林为研究对象,基于2018年5—9月土壤深度10、30、50、70、90、110 cm处水分含量的连续实测值、气象连续观测数值、土壤水分特征曲线参数等数据,利用Hydrus-1D模型对土壤水分进行模拟,并对其适用性进行评价,以期对沙区生态保护、植被修复、水资源管理与应用等方面研究提供科学的研究方法及依据。

1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯市乌审旗乌兰陶勒盖治沙站内(39°08′17″N, 109°31′36″E),地处毛乌素沙地的南缘,属于典型的温带大陆性气候,冬长夏短,四季分明,年降水量270—350 mm,每年7—9月降水量较大,占年降水量的60%—70%,年蒸发量2 100—2 600 mm,平均气温6—7℃,常年风沙较多。风沙土是研究区分布最广泛的土壤,其次是栗钙土、草甸土等。植被类型多样,主要的沙生灌木有杨柴、沙柳(*Salix psammophila*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)等,草本层植物主要为虫实(*Corispermum hyssopifolium*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)等^[25]。

2 材料与方法

2.1 布设样地

自2015年开始,在毛乌素沙地2002年进行飞播造林的典型杨柴人工林灌丛下布设2台土壤水分自动监测系统(Item 3345WD2 Watch Dog 2800 Weather Station,美国,图1),每台监测仪配备6个土壤水分含量自动监测传感器,分别布设在杨柴林内土壤深度为10、30、50、70、90、110 cm处,每30 min分别对不同深度土壤水分含量进行自动监测、记录并存储数据,本文选取2018年数据对其进行研究分析。同年在样地内安装1套气象监测系统(HOBO U30 便携式气象站,美国,Onset公司),对环境大气温度、太阳辐射、相对湿度和降水量等进行监测,每隔30 min监测系统自动记录并存储1次数据。



图1 样地概况

Fig.1 Overview of the studied area

2.2 测定指标和方法

2.2.1 土壤理化性质

2018年8月,利用环刀采样法在杨柴人工林样地内挖取6个100 cm×100 cm×120 cm土壤剖面,在深度分别为0—20、20—40、40—60、60—80、80—100、100—120 cm土层取样,每层取样3个重复。土壤取样后带回实验室通过压力膜仪对土壤水分特征曲线进行测定,利用浸水实验对土壤饱和含水率和土壤容重进行测定,利用马氏瓶渗透仪对土壤饱和和导水率进行测定,利用CLY-2000系列激光粒径分布仪(CLY-2000,国产)测定土壤粒级组成。土壤粒径分级标准采用美国农业部USDA制,黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002—0.050 mm)、砂粒(0.05—2.00 mm)。测量数据平均值均用于构建模型(表1)。杨柴灌木林土壤质地以砂粒为主,每层砂粒含量都在94.41%以上。不同土层黏粒和粉粒比例不

同, 30—50 cm 和 90—110 cm 土层黏粒较其他土层多, 分别为 4.95% 和 5.7%, 50—70 cm 土层粉粒较比其他土层占比高, 为 1.02%。采用压力膜仪测定出 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100、100—120 cm 深度(分别对应 10、30、50、70、90、110 cm 深度)土层不同压力下对应的土壤含水量, 导入 vanfit 土壤持

水曲线拟合程序进行土壤水分特征参数拟合, 利用实测的土壤颗粒粒径百分比和土壤干容重通过 Hydrus-1D 模型参数求解功能模拟各层 van Genuchten 特征指标, 之后利用实测的土壤含水率、饱和含水率和导水率对参数进行校正, 最终获取杨柴样地土壤的基本物理性质及各水力学参数(表 1)。

表 1 土壤基本物理性质和水力学参数
 Tabel 1 Basic physical properties of soil and the hydraulic parameters

土层深度 /cm	粒径组成/%			容重 /(g·cm ⁻³)	VG 参数					
	0.05—2.00 mm	0.002—0.05 mm	<0.002 mm		θ_r	θ_s	α	n	K_s	l
0—20	97.93	0.69	1.38	1.6507	0.0285	0.3398	0.0309	3.8507	36.1983	0.5
20—40	95.47	0.52	4.02	1.4860	0.0377	0.3948	0.0299	3.4402	32.1725	0.5
40—60	94.41	0.64	4.95	1.5149	0.0151	0.3869	0.0295	3.1932	25.6446	0.5
50—70	98.49	1.02	0.25	1.4782	0.0168	0.3917	0.0313	4.3366	56.3079	0.5
70—90	97.67	0.17	2.14	1.5286	0.0553	0.3787	0.0299	3.9854	43.3879	0.5
90—110	94.03	0.27	5.70	1.5259	0.0008	0.3844	0.0289	3.0738	22.9275	0.5

θ_r : 残余含水率; θ_s : 饱和含水率; K_s : 饱和导水率; α 、 n 、 l : 模型参数。

2.2.2 气象数据

潜在蒸发量采用 Penman-Monteith 公式计算, 通过气象站记录的日气象数据, 带入到公式中计算出日参考潜在蒸散量(ET_0)。

2.2.3 植被数据

在 2018 年 5—9 月, 每 10 天进行 1 次植被调查。采用了 SunScan 冠层分析系统(Delta-T Devices SunScan, 英国)对杨柴人工林叶面积指数(LAI)进行调查。采用挖掘法对杨柴的根系密度进行调查, 挖取 1 m×1 m×1 m 的土壤剖面, 分别对 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 深度土层处进行根系取样, 带回实验室处理得出。叶面积指数及根密度均为模型所需参数^[17]。

2.3 模型的选取

2.3.1 土壤水分运动方程

本文采用经典的 Richards 方程^[26]描述土壤水分运移过程, 仅考虑垂向运动。

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - s(z, t) \\ \theta(z, t) = \theta_0(z) \\ h(z, t)|_{z=B} = h(B, t) \\ -K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = q_0(0, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为时间(h); θ 为土壤体积含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

h 为负压水头(cm); z 为垂向空间坐标(cm); $K(h)$ 为非饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); $q_0(0, t)$ 为上边界水分通量($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); $h(B, t)$ 为下边界负压值(cm); $s(z, t)$ 为根系吸水速率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

土壤水分特征曲线和非饱和导水率利用 van Genuchten 方程拟合^[27]:

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

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

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

式中: θ_s 为土壤饱和含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_r 为土壤残余含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); K_s 为饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); S_e 为无量纲的相对含水量; α 、 m 、 n 、 l 均为拟合参数。

2.3.2 根系吸水模型

通过 Hydrus-1D 模型模拟杨柴根系在不同土层 z 处吸水的值, 表达式如下^[28]:

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

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 为植被日潜在蒸发量,cm。

2.4 模型的建立与验证

2.4.1 时间和空间离散

选取2018年5月18日至9月16日为研究期,把杨柴灌木林模拟的土壤剖面设置为6层,采用时间离散化的方式进行以小时为单元进行数值模拟,共模拟2 928 h,依据收敛的迭代次数逐渐调整时间离散的间隔^[22]。本模拟中起始时间设置为0,模拟结束时间为2 928 h。初始时间步长为0.01 h,最小时间步长为0.01 h,最大时间步长为1 h。

2.4.2 边界设置

本文中模拟的杨柴样地地下水埋深均较大,且沙土渗透性强,所以下边界统一设置为自由排水边界,由于样地内均无径流产生,上边界都设置为无径流的大气边界。

2.4.3 土壤参数

初始土壤水力参数中残余含水率、饱和含水率、饱和导水率、 α 、 n 、 l 、根系吸水等模型参数是将土壤干容重及砂粒、粉粒、黏粒含量代入Rosetta公式进行预测而得(表1),其中饱和含水率、土壤干容重、饱和导水率属于实测值。水分胁迫函数是根据实测值叶面积指数、根系密度和 ET_0 代入模型中自带的Feddes函数模拟根系吸水过程获取^[28]。

2.4.4 模型检验及数据处理

为了确定模拟杨柴人工林土壤水分动态过程的准确性,利用决定系数 R^2 、平均误差 ME 、均方根误差 $RMSE$ 和平均相对误差 MRE 对模拟精度和误差进行评价,其中, R^2 的大小决定了模拟值与实测值的密切程度, ME 决定了偏离程度, $RMSE$ 和 MRE 趋向于0即模拟值越接近于实测值,计算公式

如下:

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

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

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

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

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

利用Excel进行作图,土壤水分实测值和模拟值的拟合及模型各个参数的准确性采用SAS 9.4软件进行验证。

3 结果与分析

3.1 土壤水分总体模拟

通过优化参数后Hydrus-1D模型模拟水分总体变化(图2),杨柴180 cm层土壤水分动态变化在模拟阶段的决定系数为0.587,在验证阶段为0.547。平均误差在模拟阶段和验证阶段分别为-0.0053和0.0087,均方根误差在模拟阶段和验证阶段分别为0.00017和0.00038(表2)。

3.2 土壤水分空间尺度变化模拟

选取6—8月每月首日没有降雨影响下的土壤垂直水分来评估模型的模拟能力(图3)。可以看出杨柴群落土壤水分含量的垂直方向呈先增大后减小再增大再减小的趋势,呈“M”状变化。7月1日土

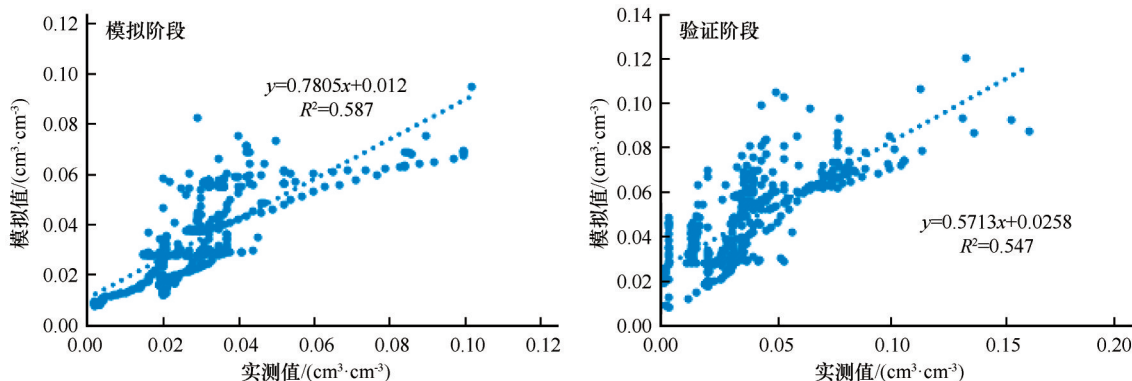


图2 土壤水分含量模拟效果

Fig.2 Simulation results of soil moisture

表 2 土壤水分变化模拟值统计分析				
Table 2 Analysis of soil moisture simulations				
时间段	R^2	平均误差 $ME/\%$	均方根误差 $RMSE/\%$	相对误差 $MRE/\%$
模拟阶段	0.587	-0.0053	0.00017	0.2779
验证阶段	0.547	-0.0087	0.00038	0.3081

壤含水量先在 30 cm 处增大到 $0.038\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右后减小,在 90 cm 处又增大到 $0.055\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右后减小。6 月 1 日和 8 月 1 日土壤水分在校准期与验证期间的实测值与模拟值吻合度较高,但二者之间在不同深度土层存在着一定的偏差,主要在 10、50、110 cm 处。

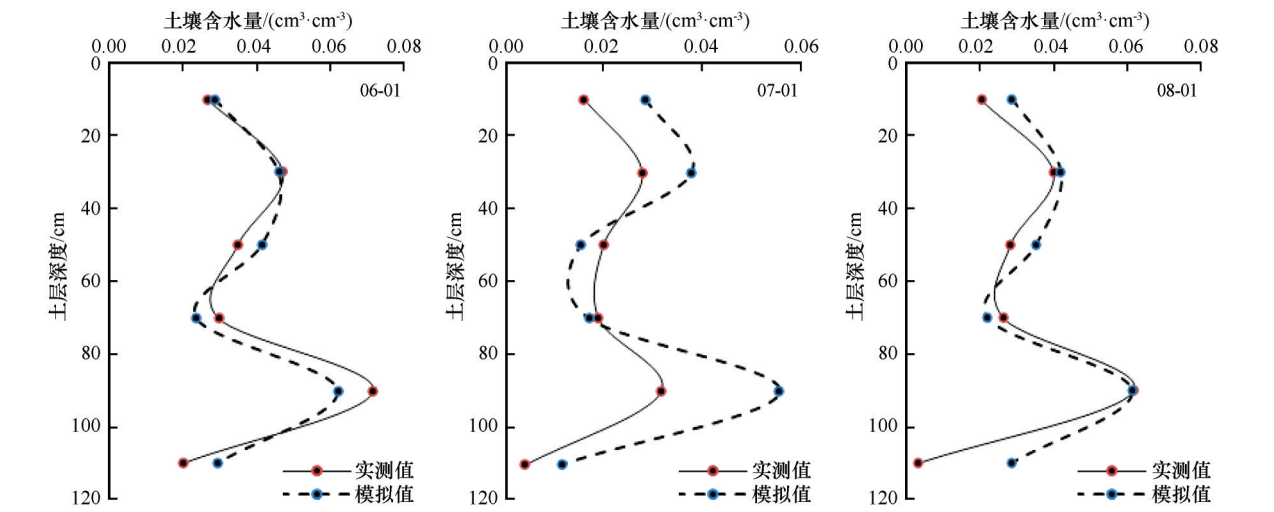


图 3 土壤水分剖面变化
Fig.3 Profile variation of soil moisture

3.3 土壤水分时间尺度变化模拟

利用 2018 年实测的不同深度土壤水分数值对利用优化参数后 Hydrus-1D 模型结果进行对比(图 4)。可以看出不同深度土壤水分含量的模拟值与实测值吻合度较高,模拟的结果总体上说可以较准确地反映出不同深度土壤水分的变化。10 cm 和 110 cm 土层深度土壤水分含量模拟值稍高于实测值,30、50、70、90 cm 土层深度土壤水分含量模拟值

与实测值几乎重合,总体上看 Hydrus-1D 模型的结果与实测值拟合效果较好,相关性强。

采用不同深度土壤水分的实测值数据对所建 Hydrus-1D 模型进行验证(图 5),验证结果中不同深度土壤水分的实测值与模拟值总体分布较集中,分布于 1:1 线上或两侧,总体模拟效果较理想。110 cm 深度土壤水分建模和检验阶段拟合曲线平行偏离 1:1 线,土壤水分含量模拟值被高估。 ME 在 70 cm

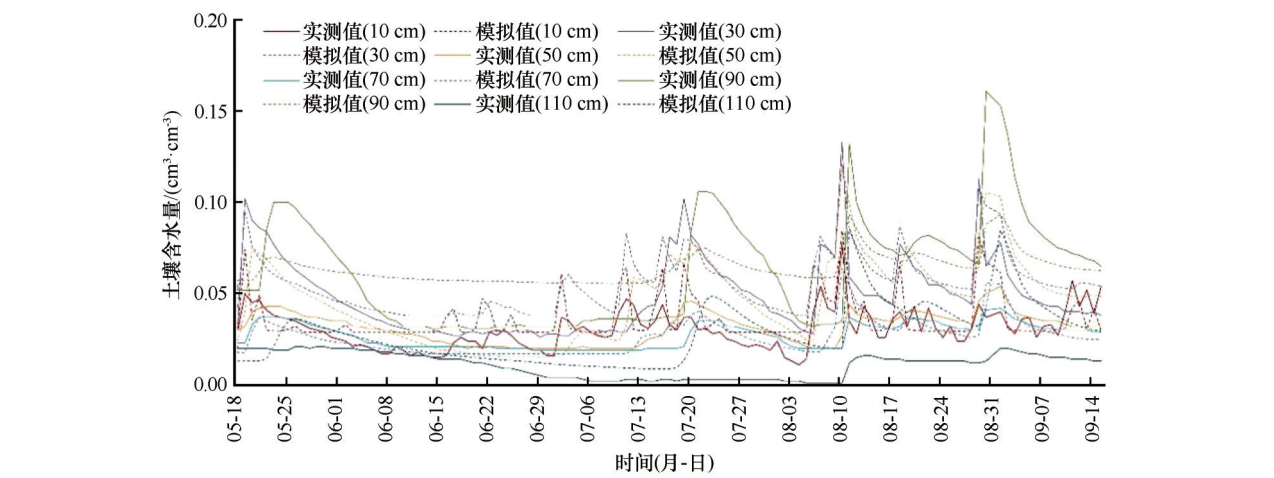


图 4 杨柴样地土壤水分动态模拟值与实测值对比
Fig.4 Comparison between the simulated and measured water contents in *Hedysarum laeve* plot

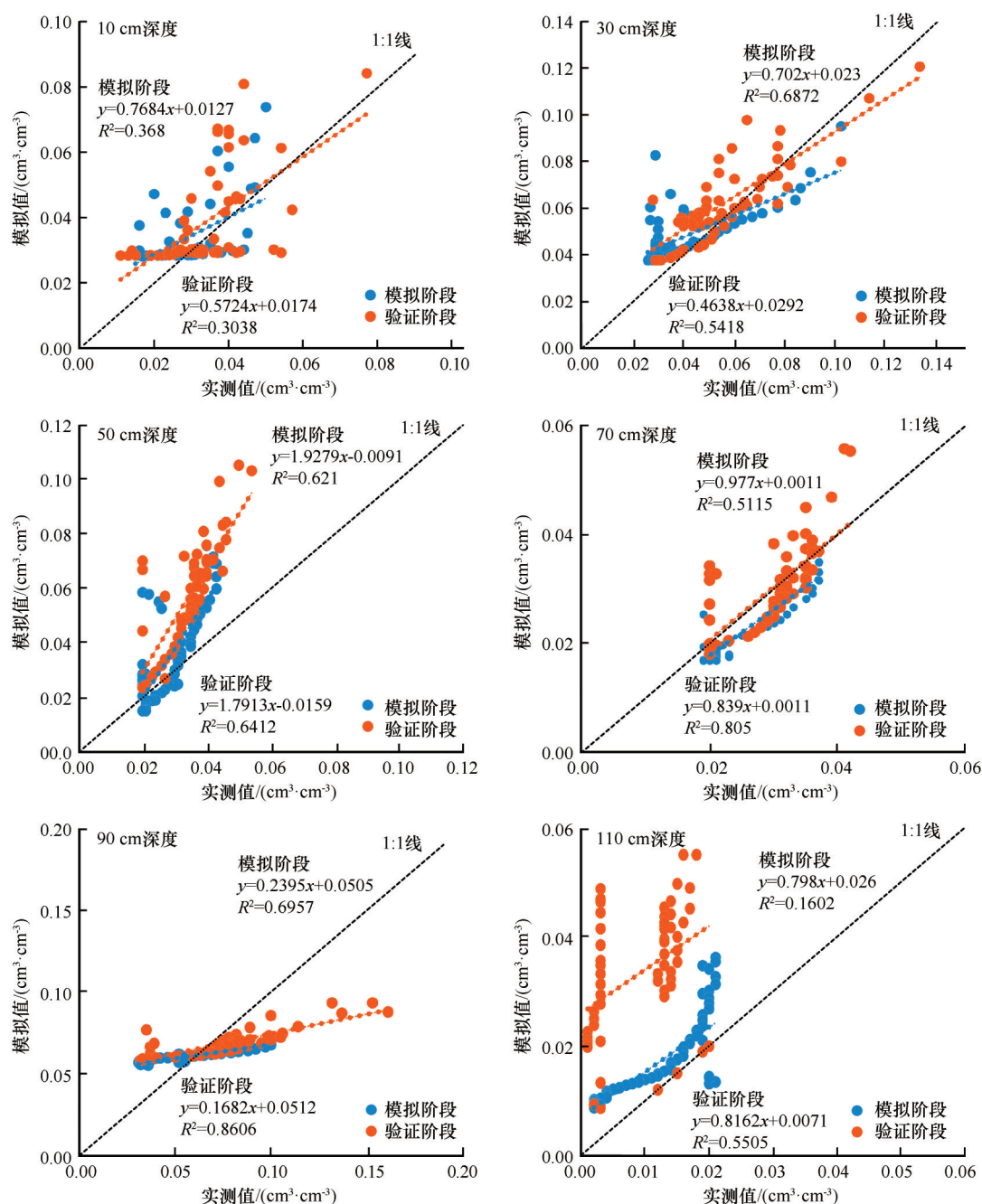


图5 不同土层深度土壤水分实测值与模拟值比较

Fig.5 Comparison of measured and simulated soil moisture

深度建模阶段和90 cm深度检验阶段数值均大于0, 土壤水分含量略小于实测值,其他深度土壤水分含量在建模和检验阶段数值均小于0。建模阶段RMSE在0.0040%—0.0217%, 检验阶段RMSE在0.0055%—0.0267%。建模阶段除了110 cm深度土壤,其他深度土壤MRE在0.1490%—0.5225%,检验阶段除110 cm深度土壤,其他深度土壤MRE在0.1518%—0.6655%(表3)。除10 cm和110 cm深度的模拟阶段 R^2 小于0.5外,其他的建模和检验阶段

R^2 均大于0.5。总体而言,率定后的Hydrus-1D模型对毛乌素沙地杨柴灌木林不同深度土壤水分变化模拟较理想。

3.4 降水入渗模拟

在降水补给杨柴人工林土壤过程中,实测值与模拟值变化具有异同(表4)。10、30、50、70 cm土层土壤水分入渗开始到达峰值时,土壤水分最大增量的差异较小,模拟效果较好,但90 cm深度模拟值小于

表 3 模型模拟回归评价

Tabel 3 Index evaluation of 0–110 cm soil layers in *Hedysarum* plot

类别	土层深度 /cm	平均误差 ME/%	均方根误差 RMSE/%	相对误差 MRE/%
建模 阶段	10	−0.0054	0.0104	0.3506
	30	−0.0069	0.0149	0.3494
	50	−0.0060	0.0137	0.3414
	70	0.0028	0.0040	0.1490
	90	−0.0119	0.0217	0.5225
	110	−0.0047	0.0071	1.0026
检验 阶段	10	−0.0051	0.0128	0.3175
	30	−0.0063	0.0125	0.1962
	50	−0.0232	0.0265	0.6655
	70	−0.0004	0.0055	0.1518
	90	0.0069	0.0230	0.2812
	110	−0.0241	0.0267	6.0432

实测值,110 cm 处模拟值大于实测值。土壤水分入渗的平均速率模拟值总体小于实测值,模拟入渗过程所需时间高于实测值。从入渗深度看,模拟值与实测值入渗深度相同,都随着降水量增大,入渗深度增加。

4 讨论

降水是干旱半干旱地区的主要水分来源,直接影响地表水及地下水分的补给,从而决定植物群落的稳定性,因此掌握土壤水分动态变化及沙地水循环过程中土壤水分的深层渗漏量尤为重要。Hydrus-1D 作为一套用于模拟饱和和多孔介质中水分、能量、溶质运移的数值模型,经过改进和完善,已经在多地模拟与验证并得到了广泛的认可与应用^[13,18,29–30],在一定程度上可以很好地模拟土壤水分及地下水分量随时间的变化趋势,为研究植物群落中土壤水分变化及地下水补给提供了有效方法。为此本实验选用优化参数后的 Hydrus-1D 模型对毛乌素沙地杨柴样地土壤水分运移进行了研究,模拟毛乌素 0—110 cm 剖面土壤的水分变化情况,探讨通过该模型与方法模拟土壤水分变化的适用性。基于 2018 年 5—9 月的实测数据进行比较,发现该模型适用于毛乌素沙地飞播杨柴灌木林,能较好地模拟土壤剖面水分的时间及空间变化特征,为进一步研究毛乌素沙地整体林水关系提供了重要的

方法。

不同土层水分含量在垂直方向上有着不同的分布特征,表层土壤波动最为频繁,30—90 cm 土壤波动强烈,110 cm 土层水分含量较稳定,通过参数输入和优化后的水力学参数,30—90 cm 土层模拟出的结果在校准期及验证期与实测值总体吻合度较好,但土壤表层 10 cm 和底层 110 cm 的实测数据与模拟值存在较大偏差。上层土壤的环境更复杂,受到蒸发、降水入渗和土壤理化性状的影响土壤水分变化较大^[17–18],模型难以完全把各项影响因素都考虑其中,因此预测结果略有偏差。杨柴群落土壤 110 cm 处属于干沙层^[31],自身水分含量较低,对降水入渗响应较小,在降水量大于 20 mm 时才有较小的波动,而且马上又恢复到一个较小且稳定数值,而 Hydrus-1D 在模拟过程中未能考虑到沙地水分分布规律的特殊性,而主要依靠土壤水力学参数和根系分布特征来进行模拟预测^[32],因此该土层的偏差较大。可以看出在校准期不同时间段模拟的效果也存在偏差,6 月拟合的效果优于 7 月,因为水分入渗土壤的过程相对复杂,主要受到土壤物理结构、养分含量及土壤水分初始含量等因素的影响,同时在植被群落中分布的空间异质性及瞬时气象变化都会影响模型的精准性,因此不会出现完全拟合或者瞬时拟合不紧密的结果^[23]。对降水入渗土壤过程进行模拟可以发现,入渗增量差值及深度差异性不明显,但是在入渗速率上模拟值明显小于实测值,模拟入渗过程比实际入渗过程更缓慢,模拟过程研究效果不理想,但最终降水对土壤水分补给的增量及补给深度模拟效果较为理想,可以较准确计算出土壤水分补给量。90 cm 深度的降水补给模拟值小于实测值,该样地前期已做过相关研究,该处受到壤中流的影响^[31],在降水可以入渗到该深度时水分会侧向运移到该土层。110 cm 深度降水入渗差值的模拟值明显小于实测值,因为该深度土层属于干沙层,土壤水分数值总体偏小且对水分补给的响应过程较弱,而 Hydrus-1D 并未将该因素考虑在内,因此模拟入渗过程偏差较大。李冰冰等^[22]利用 Hydrus-1D 模型模拟渭北旱塬土壤水分垂直分布时得出模型决定系数为 0.65—0.85,均方根误差 0.01%—0.02%,段良霞等^[10]在半干旱区对不同地貌的土壤水分变化进行模拟,得出均方根误差为 0.018%—0.029%,本文的研究结果与其相似,说明 Hydrus-1D 模型对研究区土壤水分动态能较好地预测。

表 4 不同降雨事件土壤水分入渗模拟
Table 4 Simulation of soil water infiltration after different rainfall events

土层深度 /cm	类别	参数	降水量/mm(降水时长/h)			
			32.4(8)	14.8(10)	63.61(8)	24.8(9)
10	模拟值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.021	0.020	0.039	0.036
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.001	0.001	0.005	0.002
	实测值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.047	0.022	0.039	0.036
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.008	0.002	0.005	0.0045
30	模拟值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.050	0.025	0.083	0.031
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.003	0.0007	0.0006	0.001
	实测值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.082	0.000	0.083	0.037
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.009	0.000	0.010	0.002
50	模拟值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.052	0.010	0.080	0.021
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.001	0.0001	0.008	0.0004
	实测值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.010	0.000	0.070	0.009
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.0003	0.000	0.008	0.0002
70	模拟值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.0114	0.000	0.026	0.008
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.0002	0.000	0.002	0.0001
	实测值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.0090	0.000	0.021	0.006
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.0002	0.000	0.001	0.00008
90	模拟值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.000	0.000	0.038	0.003
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.000	0.000	0.002	0.00005
	实测值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.000	0.000	0.150	0.004
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.000	0.000	0.010	0.00006
110	模拟值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.000	0.000	0.067	0.000
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.000	0.000	0.002	0.000
	实测值	最大差值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.000	0.000	0.000	0.000
		入渗速率/($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.000	0.000	0.000	0.000

5 结论

利用优化土壤水力学参数后的Hydrus-1D模型对毛乌素沙地杨柴样地 2018 年 5—9 月的土壤水分进行模拟,除表层和底部拟合效果较差外,其他土层决定系数 0.55—0.78,整体上模型可以较好地描述研究区土壤水分动态变化规律。

参考文献:

[1] Zhang Y, Peng C H, Li W Z, et al. Multiple afforestation programs accelerate the greenness in the 'Three North' region of China from 1982 to 2013[J]. Ecological Indicators, 2016, 61: 404–412.
[2] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and

plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151: 437–448.
[3] Lyu Y H, Fu B J, Feng X M, 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): 1–10.
[4] 郑云珠, 赵鑫, 朱超毛, 等. 乌素沙地固定沙丘表层土壤水分时间稳定性特征[J]. 节水灌溉, 2021(11): 41–46.
[5] 刘斐耀, 尤全刚, 吴思渊, 等. 干旱区绿洲耕地撂荒与复耕对土壤水力性质的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 169–178.
[6] 刘姣, 艾宁, 宗巧鱼, 等. 毛乌素沙地南缘臭柏群落土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 79–84.
[7] 裴艳武, 黄来明, 邵明安, 等. 毛乌素沙地不同地下水位埋深下土壤水补给特征及影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 108–116.

- [8] 高月升,董振国,朱贵兵.地下水浅埋条件下毛乌素沙地农田土壤水分动态特征[J].地下水,2021,43(3):6-8.
- [9] 朱雅娟,崔清国,杜娟,等.毛乌素沙地三种灌木群落的水分利用过程[J].生态学报,2020,40(13):4470-4478.
- [10] 段良霞,黄明斌,张洛丹,等.黄土高原沟壑区坡地土壤水分状态空间模拟[J].水科学进展,2015,26(5):649-659.
- [11] 黄克威,王根绪,宋春林,等.基于LSTM的青藏高原冻土区典型小流域径流模拟及预测[J].冰川冻土,2021,43(4):1144-1156.
- [12] 张洛丹,张瑜,黄明斌,等.黄土高原沟壑区两种乔木林土壤水分平衡的模拟[J].水土保持研究,2015,22(2):26-31.
- [13] 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.
- [14] 巩伟,胡广录,付鹏程,等.干旱区沙漠-绿洲过渡带固沙植物的土壤水分入渗特征[J].中国沙漠,2020,40(5):200-208.
- [15] Pooja P P, Naveen J, Balaji N. Quantifying surface water and ground water interactions using a coupled SWAT-FEM model: implications of management practices on hydrological processes in irrigated river basins [J]. Water Resources Management, 2021, 35: 2781-2797.
- [16] 易小波,邵明安,赵春雷,等.黄土高原南北样带不同土层土壤容重变异分析与模拟[J].农业机械学报,2017,48(4):198-205.
- [17] 王宇祥,刘廷玺,段利民,等.科尔沁不同类型沙丘土壤水分时空变化特征及其环境影响因子[J].水土保持学报,2020,34(6):125-134.
- [18] 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.
- [19] Saito H, Simunek J, Scanlon B R, et al. Numerical analysis of coupled water, vapor and heat transport in the vadose zone using HYDRUS [J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5: 784-800.
- [20] Simunek J, Saito H, Sakai M, et al. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-saturated Media [Z]. Riverside, CA, USA: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2005.
- [21] 任利东,黄明斌,樊军.不同类型层状土壤持水能力的研究[J].农业工程学报,2013,29(19):105-111.
- [22] 李冰冰,王云强,李志. HYDRUS-1D模型模拟渭北旱塬剖面土壤水分的适用性[J].应用生态学报,2019,30(2):398-404.
- [23] 杨玉峥,林青,王松禄,等.大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究[J].土壤学,2015,52(3):547-557.
- [24] 王国帅,史海滨,李仙岳,等.基于HYDRUS-1D模型的荒漠绿洲水盐运移模拟与评估[J].农业机械学报,2021,37(8):87-98.
- [25] 洪光宇,吴建新,苏雅拉巴雅尔,等.毛乌素沙地退耕还林工程灌木林生态系统服务功能评价[J].内蒙古林业科技,2019,45(4):22-28.
- [26] 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.
- [27] van Genuchten M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.
- [28] Feddes R A. Simulation of field water use and crop yield [J]. Soil Science, 1978, 129(3): 194-209.
- [29] 何康康,杨艳敏,杨永辉.基于HYDRUS-1D模型的华北低平原区不同微咸水利用模式下土壤水盐运移的模拟[J].中国生态农业学报,2016,24(8):1059-1070.
- [30] 曹巧红,龚元石.应用Hydrus-1D模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J].植物营养与肥料学报,2003(2):139-145.
- [31] 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.
- [32] 吴元芝,黄明斌.基于Hydrus-1D模型的玉米根系吸水影响因素分析[J].农业工程学报,2011,27:66-73.

Applicability of Hydrus-1D Model in simulating the soil moisture in *Hedysarum leave* in Mu Us Sandy Land, China

Hong Guangyu¹, Wang Xiaojiang¹, Liu Tieshan¹, Hailong¹, Wu Zhenting¹, Huercha¹,
Gao Xiaowei¹, Yang Haifeng¹, Li Zhuofan¹, Li Zihao¹, Siqin², Wang Lejun¹

(1.Inner Mongolia Forestry Research Institute, Hohhot 010010, China; 2.Grassland Technologic Service Center of Zarut
Banner, Zarut Banner 029100, Inner Mongolia, China)

Abstract: In the process of vegetation restoration and reconstruction in arid and semi-arid areas, soil water storage will change obviously, and soil water is the main factor limiting vegetation growth. Using mathematical simulation method to study the characteristics of soil water change after vegetation construction can predict soil water deficit under global climate change more quickly. In this study, the Hydrus-1D model was used to simulate the spatial and time variation of soil moisture in a typical *Hedysarum leave* shrubbery community in the Mu Us Sandy Land, and to evaluate the applicability of the Hydrus-1D model in the *H. leave* shrubbery in the Mu Us Sandy Land. Taking *H. leave* growing season as the study period. The measured values were put into the Hydrus-1D model and the parameters were optimized to simulate the spatial and time variation of soil moisture in *H. leave* shrubbery. The soil moisture data of different soil layers monitored by Watchdog soil moisture monitor in the same time period were used as the control value to verify the applicability of the simulated value. The results showed that the coefficients of measured soil moisture and simulated soil moisture at different depths were in the range of 0.55–0.78, and the root mean square error was 0.005%–0.0143%. The measured soil moisture and simulated soil moisture were in good agreement, indicating that the Hydrus-1D model was suitable for simulating the soil moisture variation of *H. leave* shrubbery in Mu Us Sandy Land.

Key words: Mu Us Sandy Land; *Hedysarum leave* shrubbery; soil moisture; Hydrus-1D Model; applicability