考虑土壤结构和吸附力作用下的土壤水分运移模拟

王云权*，陈思源，齐鹏飞

中国地质大学（武汉）环境学院，武汉 430078

* 通信作者，E-mail：wangyq@cug.edu.cn

2024-05-28 收稿；2024-10-24 修回；2024-10-24 接受

基金项目：北方农牧交错带生态退化的地质−生态−水文耦合机制与生态承载力阈值识别项目（U2244230）

中图分类号：S152.7　　文章编号：2096-8523(2026)01-0272-07　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240286

摘　要：传统土壤水力模型基于毛细理论，对土壤结构（大孔隙）和土壤吸附作用的表征较差，不能准确刻画近饱和以及土壤含水量较低情形下的土壤水力特征，因而不能准确模拟土壤水分运移特征。为了对比不同土壤水力特征模型的表现，基于 FLUXNET 数据库 7 个站点土壤含水量的连续实测数据，分别使用考虑土壤结构、吸附力以及毛细作用的 FXW-M3 模型和仅考虑毛细力的 VGM 模型，通过改进的 HYDRUS-1D 软件对站点实测土壤含水量数据进行模拟分析。结果表明考虑土壤结构和吸附力影响的 FXW-M3 模型显著提高了土壤水分运移模拟的精度。7 个站点 FXW-M3 模型的均方根误差 *RMSE* 的平均值为 0.004 8 cm^3/cm^3，低于 VGM 模型的 0.011 3 cm^3/cm^3；相关系数 *R* 的平均值为 0.80，高于 VGM 模型的 0.75。模拟结果表明土壤结构和干吸附力对土壤水分运移有着显著影响。

关键词：土壤结构；吸附力；土壤水分运移；FXW-M3 模型；VGM 模型；HYDRUS-1D 软件

土壤水分是陆地系统中一个重要变量，影响着陆地表面和大气之间的水汽和能量交换，是植物和土壤微生物生存和生长必不可少的要素[1]。因此准确刻画土壤水分的时空动态特征具有重要的意义，也是土壤物理领域研究的核心课题。

土壤水分运移过程可以由 Richards 方程表征[2]，求解该方程依赖于土壤水力特征的准确刻画。土壤水力特征包含描述土壤水势和土壤含水量相互关系的土壤水分特征曲线（SWRC）以及描述土壤导水率和土壤水势/含水量间相互关系的导水率曲线（HCC）。当前广泛使用的土壤水力特征模型，如 van Genuchten-Mualem 模型[3-4]（VGM 模型）主要考虑了毛细水的运移特征，将土壤孔隙概化为一系列大小不一的毛细管[5-6]，认为其是水分运移的主要通道。

然而，真实的土壤水分除了受毛细作用吸持的毛细水外，还包括大孔隙中的重力水以及吸附在颗粒表面的吸附水或者薄膜水[7-14]。文献中通常将土壤大孔隙的影响称为土壤结构的影响[15]。一方面，越来越多的研究表明，在低含水率条件下，土壤吸附作用主导的薄膜水是土壤水分的主要运移形式，不考虑薄膜水的运移则会显著低估土壤的导水率[16-20]；另一方面，土壤大孔隙的存在早已被认识到对土壤水力特征具有重要影响[21-30]。在实际应用过程中，由于土壤导水率测量困难，费时费力，通用的方法是基于饱和导水率 K_s 和土壤水分特征曲线的拟合参数来预测非饱和导水率。由于经典土壤水力模型（如：VGM 模型）未能很好表征土壤大孔隙的影响，该通用方法常常高估非饱和导水率的数值[31]。

近年来，针对经典模型对土壤水力特征表征的不足，一系列改进模型被开发出来。例如：越来越多的土壤水力模型同时考虑了毛细力和吸附力的影响[7-14]，改善了低含水下土壤水力特征的表征效果。WANG 等[32] 进一步考虑了土壤大孔隙的影响，基于 FREDLUND 等[33] 的土壤水分特征曲线模型，提

著录信息：王云权，陈思源，齐鹏飞. 考虑土壤结构和吸附力作用下的土壤水分运移模拟［J］. 地质科技通报，2026，45(1)：272-278.
WANG Yunquan, CHEN Siyuan, QI Pengfei. Simulation of soil water transport considering the effects of soil structure and adsorption forces［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 272-278.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

出了一个新的土壤导水率(FXW-M3)模型，同时考虑了土壤结构、毛细作用和吸附力的影响，显著改善了对土壤非饱和导水率的预测效果。

然而，现有的研究主要还集中在土壤水力特征的表征层面，很少探讨不同土壤水力特征模型对土壤水分运移的影响[34-40]。因此，本研究基于 FLUXNET 数据库，利用数值反演的方法，对比分析经典的毛细水力模型(VGM 模型)和同时考虑土壤结构、毛细和吸附作用的模型(FXW-M3 模型)对土壤水分运移过程的表征能力，详细分析土壤水力模型架构对土壤水分运移的影响，以期为实际过程中选择合适的土壤水力模型提供依据。

1 数据与方法

1.1 站点选取及数据需求

本研究所需数据来自 FLUXNET 数据库，它是一个二氧化碳、水分和能量通量测量的全球网络。针对不同气候、土壤条件，选择了 7 个站点的数据(AU-ASM、AU-Emr、AU-Stp、AU-TTE、CN-Dan、IT-BCi 和 US-ARM)，各站点的详细信息如表 1 所示，土壤质地分类如图 1 所示。对于每个站点，我们以 d 为时间间隔收集了以下实测数据：气温(TA)、蒸汽压饱和差(VPD)、大气压力(PA)、风速(WS)、相对湿度(RH)、净辐射(NETRAD)、土壤温度(TS)、潜热通量(LE)、土壤含水量(SWC)。对于模拟时间，由于未考虑冻融，只选取土壤温度大于 0 的数据，此外为了减少植物根系信息缺乏带来的影响，选取非生长季节的数据。

表 1 站点信息

Table 1 Site information

站点名称	纬度	经度	模拟开始时间	模拟时间/d	年降雨量/cm	年平均温度/℃	年潜在蒸散发量/cm
AU-ASM	−22.2830	133.2490	2011/11/01	92	41.16	25.26	36.49
AU-Emr	−23.8587	148.4746	2013/01/01	92	56.60	23.02	34.50
AU-Stp	−17.1507	133.3502	2010/11/01	92	112.19	27.46	72.97
AU-TTE	−22.2870	133.6400	2013/10/01	92	27.74	30.09	29.39
CN-Dan	30.4978	91.0664	2004/07/01	92	55.04	5.70	66.85
IT-BCi	40.5237	14.9574	2009/02/01	92	119.67	18.86	66.92
US-ARM	36.6058	−97.4888	2004/05/12	92	90.13	16.39	63.39

1.2 数值模型

土壤水分运移方程由经典的 Richards 方程表征[2]：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial x}-1\right)\right], \tag{1}$$

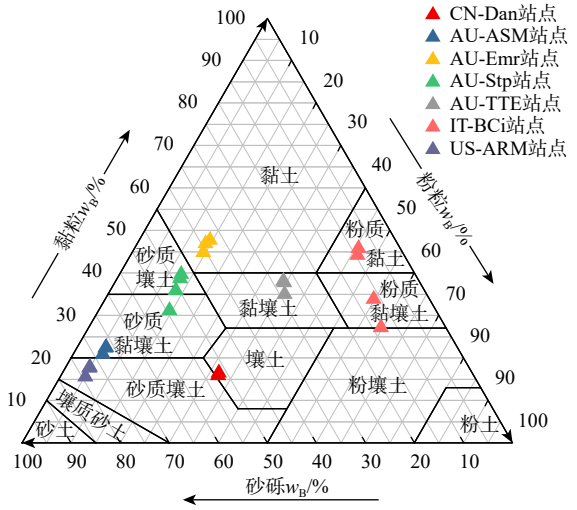


图 1 USDA-NRCS 土壤分级三角图

Fig. 1 USDA-NRCS soil classification triangle map

式中：h 为基质势，cm；θ 为体积含水量，$cm^3\cdot cm^{-3}$；t 为时间，d；x 为空间坐标，cm，向下为正；$K(h)$ 为非饱和土壤导水率，$cm\cdot d^{-1}$。

求解方程(1)，需要土壤的水力特征信息。为了对比不同模型的表现，本研究选用 2 个水力模型：同时考虑土壤结构、吸附力以及毛细力的水力模型：FXW-M3 模型；考虑毛细力的水力模型：VGM 模型。其中，基于 VGM 模型的土壤水分模拟由 Hydrus-1D 软件求解而得[19]，基于 FXW-M3 模型的土壤水分模拟则由修改 Hydrus-1D 软件的原始代码来进行求解模拟。

1.2.1 FXW-M3 模型

FXW-M3 模型[32]中土壤水分特征曲线由 FREDLUND 等模型表征[33]，表示为：

$$\theta=\theta_s\left[1-\frac{\ln\left(1+\frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{h_0}{h_r}\right)}\right]\Gamma(h), \tag{2}$$

当 $h<h_a$ 时，导水率曲线(HCC)表示为：

$$K(h)=K(h_a)\left(\frac{\Gamma(h)-\Gamma(h_0)}{\Gamma(h_a)-\Gamma(h_0)}\right)^l\left[\frac{1-\left(1-\Gamma(h)^{\frac{1}{m}}\right)^{1-\frac{1}{n}}}{1-\left(1-\Gamma(h_a)^{\frac{1}{m}}\right)^{1-\frac{1}{n}}}\right]^2, \tag{3}$$

当 $h\geqslant h_a$ 时，导水率曲线(HCC)表示为：

$$K(h)=K_s\Gamma(h)^{\frac{\ln\left(\frac{K(h_a)}{K_s}\right)}{\ln(\Gamma(h_a))}}, \tag{4}$$

式中：θ 为体积含水量，$cm^3\cdot cm^{-3}$；θ_s 为饱和含水量，$cm^3\cdot cm^{-3}$；h_r 为残余含水量对应的基质势，cm，取值为-1.5×10^4 cm；h_0 为零含水量时对应的基质势，cm，

默认值为−6.3×10^6 cm；h_a 为临界基质势，cm，其值取决于单个土壤最小的大孔隙直径，默认值为−16 cm；m，n，l 为形状参数。

在 FXW-M3 模型中，l 默认值为 3.5。相较于传统的毛细模型，FXW-M3 模型同时表征了土壤结构、毛细力和吸附力的影响，可以描述全水分范围的土壤水力特征。有关 FXW-M3 模型的详细描述见 WANG 等[32]。

1.2.2　VGM 模型

VGM 模型[3-4] 的土壤水分特征曲线为：

$$S_c=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=(1+(\alpha_{VG}h)^{n_{VG}})^{-m_{VG}}, \quad (5)$$

式中：S_c 为与毛管水相关的有效饱和度；θ_s 为饱和含水量，cm^3·cm^{-3}；θ_r 为残余含水量，cm^3·cm^{-3}；α_{VG}，n_{VG}，m_{VG} 为土壤水分特征曲线的形状参数，$m_{VG}=1-\frac{1}{n_{VG}}$，$n_{VG}>1$。

导水率曲线表示为：

$$K_l=K_sS_c^{l_{VG}}\left(1-\left(1-S_c^{\frac{1}{m_{VG}}}\right)^{m_{VG}}\right)^2, \quad (6)$$

式中：K_s 为饱和导水率，cm·d^{-1}；l_{VG} 为形状参数，其值一般为 0.5。

1.3　模型设置

1.3.1　初始和边界条件

模拟的土壤深度和分层信息根据站点实际信息设定，模拟土壤的初始条件为基于观测值的给定含水量剖面：

$$\theta(x,t)=\theta_i(x),\ t=0。 \quad (7)$$

上边界设为大气通量边界，由实测的降雨量和基于 Penman-monteith 方程[22-23] 计算的潜在蒸散发通量来限定：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}, \quad (8)$$

式中：ET_0 为蒸散发速率，mm·d^{-1}；R_n 为净辐射，mm·d^{-1}；G 为土壤热通量，MJ·m^{-2} d^{-1}；T 为日平均气温，℃；u_2 为风速，m·s^{-1}；(e_s-e_a) 为饱和蒸汽压亏缺，kPa；Δ 为饱和水汽压−温度曲线的斜率，hPa·K^{-1}；γ 为干湿表常数，hPa·℃$^{-1}$。

土壤下边界设为自由排泄边界。

1.3.2　参数选取

由于缺乏实测的土壤水力信息，本研究使用数值反演的方法来求取参数。使用 SCE-UA 方法[20](shuffled complex evolution method developed at the University of Arizona)这一全局优化算法调用 Hydrus-1D 程序，目标函数设为土壤水分观测值和模拟值间的均方根误差。

1.4　模型评估

采用均方根误差(*RMSE*)和相关系数(R)作为指标来评估观测值与模拟值之间的差异，以评估各种模型的有效性。

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-y_i)^2}, \quad (9)$$

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2\cdot\sum_{i=1}^{N}(y_i-y)^2}}, \quad (10)$$

式中：N 为数据总量；x_i 为实测值，$\bar{x}$ 为实测值的平均值；y_i 为模拟值，$\bar{y}$ 为模拟值的平均值。

2　结　果

2.1　模型的整体表现

基于 2 个水力模型的 7 个站点的土壤水分模拟结果如表 2 所示。整体而言，对于 FXW-M3 模型而言，7 个站点的 *RMSE* 在 0.0003 ~ 0.0179 cm^3·cm^{-3} 范围，R 在 0.75 ~ 0.89 范围，平均值分别为 0.0048 cm^3·cm^{-3} 和 0.80。相较之下，VGM 模型模拟的 *RMSE* 要明显更高，在 0.0013 ~ 0.0393 cm^3·cm^{-3} 范围，平均值为 0.0113 cm^3·cm^{-3}，R 则相对较低，在 0.67 ~ 0.80 范围，平均值为 0.75。但是，对于 AU-Emr 和 AU-TTE 2 个站点，虽然 FXW-M3 模型模拟的 R 要高于 VGM 模型的模拟结果，但 *RMSE* 值则略高于 VGM 模型的模拟结果。每个站点的模拟结果详细分析如下。

表 2　土壤含水量的模拟误差

Table 2　Simulation error of soil water content

站点		AU-ASM	AU-Emr	AU-Stp	AU-TTE	CN-Dan	IT-BCi	US-ARM	平均值
相关系数R	FXW-M3模型	0.81	0.80	0.80	0.81	0.89	0.76	0.75	0.80
	VGM模型	0.80	0.68	0.76	0.76	0.87	0.71	0.67	0.75
均方根误差*RMSE*/(cm^3·cm^{-3})	FXW-M3模型	0.0004	0.0038	0.0179	0.0020	0.0007	0.0003	0.0089	0.0113
	VGM模型	0.0054	0.0032	0.0393	0.0013	0.0065	0.0127	0.0112	0.0048

2.2 单个站点的模型表现

2.2.1 AU-ASM 站点

AU-ASM 站点的土壤类型为砂质黏壤土，总体来说，VGM 模型和 FXW-M3 模型都可以较好捕捉土壤水分的动态特征(图 2a)。在低含水率条件下，两者的模拟效果相差不大，但是在对降水事件的响应上，FXW-M3 模型的模拟效果要明显优于 VGM 模型。例如：对于发生在第 65 ~ 70 d 的持续降水事件，VGM 模型模拟的土壤水分要明显低于观测值，而 FXW-M3 模型与观测值的吻合较好。对此站点，VGM 模型和 FXW-M3 模型的 *RMSE* 分别为 0.005 4，0.000 4 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，*R* 分别为 0.80，0.81。

2.2.2 AU-Emr 站点

AU-Emr 站点的土壤类型为黏土。采用考虑土壤结构影响的 FXW-M3 模型时，*R* 从 VGM 模型的 0.68 提高到了 0.80。但是 FXW-M3 模型具有较高的 *RMSE* 值，为 0.003 8 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，高于 VGM 的 0.003 2 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。图 2b 表明，在第 23 d 后，FXW-M3 模型的模拟结果与实测值更为吻合，而 VGM 模型显著低估了降水事件后的土壤含水量。相反，对于前 23 d，FXW-M3 模型显著低估了土壤含水量，而 VGM 模型则吻合较好。值得注意的是，土壤初始含水量由观测的土壤水分插值而得，具有较大不确定性，因此，模拟的初始阶段的数值具有更高不确定性，代表性相对较差。在模拟第 71，90 d 时，2 个模型的土壤含水量模拟值都随降雨而有所上升但实测含水量没有上升，可能的原因是由环境因素而截掉了部分降雨以致实际土壤水分没有增加。

2.2.3 AU-Stp 站点

AU-Stp 站点的土壤类型为砂质黏壤土，观测的土壤水分整体变动较小，土壤含水量最终稳定在 0.25 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 左右，对降水事件的整体响应不太明显。总体来说，VGM 模型和 FXW-M3 模型的表现都相对较差，都不能较好捕捉土壤水分的动态特征(图 2c)。FXW-M3 模型将 *RMSE* 从 VGM 模型的 0.039 3 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 降低到了 0.017 9 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，*R* 从 0.76 提高到了 0.80。2 个模型都表现出对降雨事件的强响应，但观测值的变动较小。推测该站点模拟较差的原因主要来自于降水事件和土壤水分观测间的不匹配。

2.2.4 AU-TTE 站点

AU-TTE 站点的土壤类型为砂质壤土。总体来说，VGM 模型和 FXW-M3 模型都可以较好的刻画出实测土壤含水量的动态特征(图 2d)。在第 1 ~ 58 d 时间段，没有降雨事件，含水量较低，2 个模型的拟合效果相差不大，但 FXW-M3 模型的模拟结果比

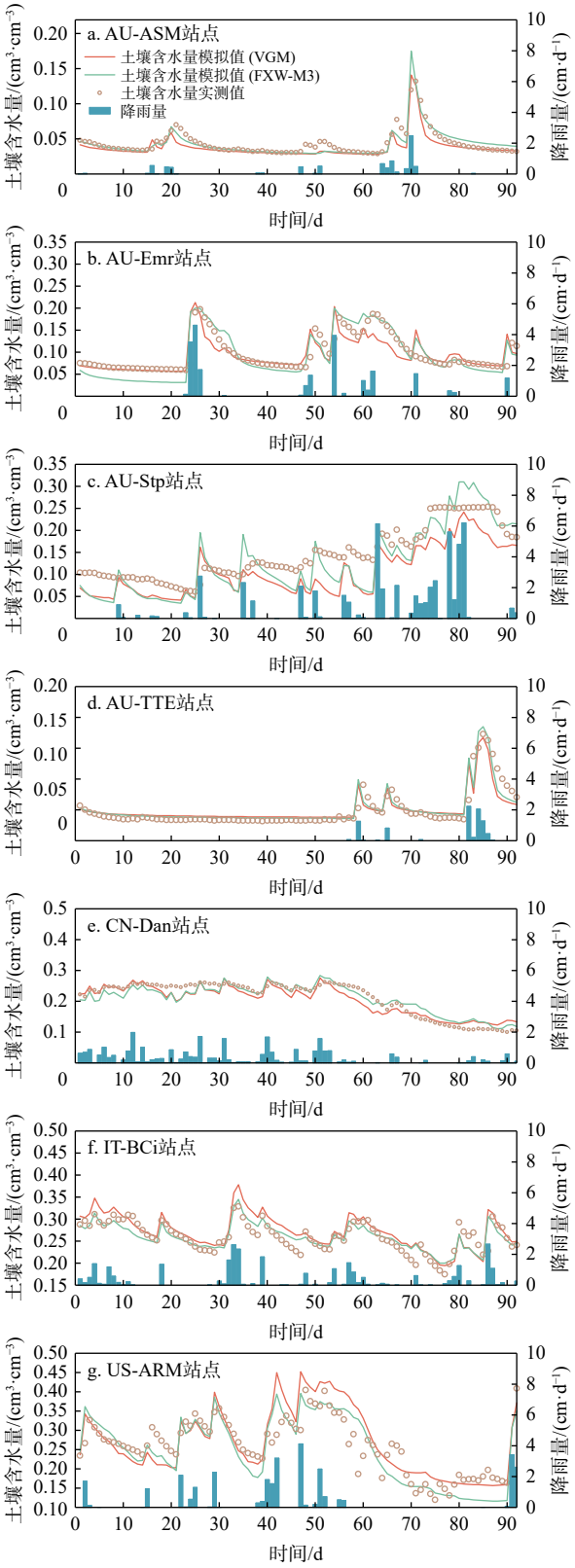


图 2 7 个站点土壤含水量的实测值和模拟值

Fig. 2 Measured and simulated values of soil water content at seven sites

VGM 模型的结果低且更接近实测值。在第 85 d 降雨后，VGM 模型的预测值明显低于实测值，而 FXW-M3 模型的预测值更接近实测值。在该站点中，FXW-M3 模型将 *R* 从 VGM 模型的 0.76 提高到了 0.81，但 *RMSE* 略高于 VGM 模型的 0.001 3 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，为 0.002 0 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。

2.2.5　CN-Dan 站点

CN-Dan 站点的土壤类型为壤土。降雨在模拟前期比较集中。总体而言，VGM 模型和 FXW-M3 模型都可以较好捕捉土壤水分的动态特征。在第 31 ~ 69 d，VGM 模型的土壤含水量模拟值明显低于实测值，而 FXW-M3 模型与观测值拟合较好。相较之下，FXW-M3 模型将 *RMSE* 从 VGM 模型的 0.006 5 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 降低到 0.000 7 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，将 *R* 从 0.87 提高到了 0.89。

2.2.6　IT-BCi 站点

IT-BCi 站点的土壤类型为黏质壤土。图 2f 可以看出，VGM 模型整体上高估了土壤含水量，而 FXW-M3 模型的模拟值与土壤含水量实测值吻合更好。FXW-M3 模型将 *RMSE* 从 VGM 模型的 0.012 7 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 降低到了 0.000 3 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，将 *R* 从 0.71 提高到了 0.76。

2.2.7　US-ARM 站点

US-ARM 站点的土壤类型为粉质壤土。与 IT-BCi 站点类似，从第 40 d 开始，VGM 模型的模拟值高估了土壤含水量，而 FXW-M3 模型和实测值的吻合更好。FXW-M3 模型 *RMSE* 从 VGM 模型的 0.011 2 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 降低到 0.008 9 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，*R* 从 0.67 提高到了 0.75。

3　讨　论

3.1　不同土壤水力特征模型的影响

7 个站点的模型模拟结果表明，基于 FXW-M3 模型的模拟效果整体上要优于基于 VGM 模型的模拟效果。对高含水率区域的模拟效果有所改进，例如：在 AU-Emr（黏土），IT-BCi（黏质壤土）和 US-ARM（粉质壤土）3 个站点，FXW-M3 模型都更好地捕捉到高含水量段的水分动态特征。这可能是由于 FXW-M3 模型考虑了土壤结构的影响，可以更好刻画高含水率段的土壤水力特征[17]。这 3 个站点的土壤质地都为细质土壤，很多研究证实土壤结构特别是大孔隙的影响在细质土壤中更为明显[13-14, 17]。

在土壤质地较粗的 AU-ASM 和 AU-TTE 站点中，FXW-M3 模型和 VGM 模型的结果比较相似，都可以较好捕捉土壤水的动态特征。

除了考虑土壤结构的影响，FXW-M3 模型还考虑了吸附作用的影响，而 VGM 模型则没有考虑。吸附作用被认为是低含水率下土壤水分运移的主要驱动力，然而本研究中 7 个站点的模拟结果显示，2 个模型在低含水量下的差异并不显著。这可能是由于几个站点观测的土壤水分范围波动较窄，并且基于反演算法的模型评估存在异参同效的情况，使得不同模型的对比存在一定的不确定性。

总体来说，在都具有 5 个拟合参数的情形下，FXW-M3 土壤水力模型的模拟结果整体上要略优于 VGM 模型。

3.2　模拟的不确定性

由于缺乏实测的土壤水力参数，使用反算模型来获取参数，进而对比分析不同模型的模拟效果。然而，由于土壤水力特征模型有 5 个未知参数，在反算过程中难以避免会出现异参同效的情况[21-23]，使得不同的模型架构都可以有相对较好的模拟效果。为了减小由参数反演带来的不确定性，可以基于实测土壤水力特征来开展模型模拟，或基于多源数据进行模型校验，从而减少模型模拟的不确定性。

此外，本研究选取的 7 个站点虽然代表了不同气候、不同土壤类型的影响，但观测的土壤水分变动范围较窄，未能涵盖从饱和到极端干燥的土壤水分区间，这也使得模型对比存在一定的不确定性。

4　结论与展望

本研究基于 7 个站点的观测数据，基于反演方法，对比分析了 2 个土壤水力特征模型在土壤水分动态模拟中的效果差异。模拟结果表明考虑土壤结构、毛细和吸附作用的土壤水力模型 FXW-M3 模型总的来说可以更好捕捉土壤水分的动态特征，特别是可以更好捕捉对降雨事件的响应。相较之下，仅考虑毛细作用的 VGM 模型则会高估土壤水分的动态特征。

然而反演算法本身的不确定性和模拟样本的局限性在一定程度上弱化了模型的对比结果。今后还需开展基于更详细数据测量、更多站点数据的模型对比研究，以期系统对比分析土壤水力特征模型对土壤水分运移的影响。

此外，为了进一步验证模型，未来研究建议考虑以下因素：①植物根系：植物根系的生长活动和环境

需要吸收土壤水分，同时根系的存在增加了土壤基质间的孔隙，所以还需要考虑植物根系的影响；②土壤异质性：在自然条件下土壤表现出强烈的空间异质性，进而显著影响土壤水分运移过程，如何刻画和表征这种空间异质性的影响也是精准刻画土壤水分运移动态的重要因素。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] VEREECKEN H, HUISMAN J A, PACHEPSKY Y, et al. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 76-96.

[2] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.

[3] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.

[4] 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.

[5] MILLINGTON R J, QUIRK J P. Permeability of porous solids[J]. Transactions of the Faraday Society, 1961, 57: 1200-1207.

[6] ORR F M, SCRIVEN L E, RIVAS A P. Pendular rings between solids: Meniscus properties and capillary force[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 67(4): 723-742.

[7] TOKUNAGA T K. Hydraulic properties of adsorbed water films in unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 2009, 45(6): 1-9.

[8] ROSSI C, NIMMO J R. Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness[J]. Water Resources Research, 1994, 30(3): 701-708.

[9] NIMMO J R. Comment on the treatment of residual water content in "a consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface" by L. Luckner et al[J]. Water Resources Research, 1991, 27(4): 661-662.

[10] TULLER M, OR D. Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: Film and corner flow in angular pore space[J]. Water Resources Research, 2001, 37(5): 1257-1276.

[11] LEBEAU M, KONRAD J M. A new capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): 1-15.

[12] WANG Y Q, MA J Z, ZHANG Y L, et al. A new theoretical model accounting for film flow in unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 2013, 49(8): 5021-5028.

[13] ZHANG Z F. Soil water retention and relative permeability for conditions from oven-dry to full saturation[J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(4): 1299-1308.

[14] TULLER M, OR D, DUDLEY L M. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configurations in angular pores[J]. Water Resources Research, 1999, 35(7): 1949-1964.

[15] NIMMO J R. Modeling structural influences on soil water retention[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(3): 712-719.

[16] VAN GENUCHTEN M T, NIELSEN D R. On describing and predicting the hydraulic properties[C]//Anon. Annales Geophysicae. [S.l.]: [S.n.], 1985, 3(5): 615-628.

[17] SCHAAP M G, LEIJ F J. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the mualem-van genuchten model[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 843-851.

[18] SCHAAP M G, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M T. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(3/4): 163-176.

[19] GERKE H H. Preferential flow descriptions for structured soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, 169(3): 382-400.

[20] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58(3): 523-546.

[21] SILVA O, GRIFOLL J. A soil-water retention function that includes the hyper-dry region through the BET adsorption isotherm[J]. Water Resources Research, 2007, 43(11): 1-13.

[22] WANG Y Q, JIN M G, DENG Z J. Alternative model for predicting soil hydraulic conductivity over the complete moisture range[J]. Water Resources Research, 2018, 54(9): 6860-6876.

[23] WANG Y Q, MA R, ZHU G F. Improved prediction of hydraulic conductivity with a soil water retention curve that accounts for both capillary and adsorption forces[J]. Water Resources Research, 2022, 58(4): 1-22.

[24] LIAO K H, LAI X M, ZHOU Z W, et al. A simple and improved model for describing soil hydraulic properties from saturation to oven dryness[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 180082.

[25] YANG Z L, LI Z, TONG X, et al. Weibull distribution models for describing soil hydraulic properties over the entire matric suction range[J]. Journal of Hydrology, 2023, 622: 129661.

[26] PETERS A, HOHENBRINK T L, IDEN S C, et al. Prediction of the absolute hydraulic conductivity function from soil water retention data[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27(7): 1565-1582.

[27] ZHANG Y G, WEIHERMÜLLER L, TOTH B, et al. Analyzing dual porosity in soil hydraulic properties using soil databases for pedotransfer function development[J]. Vadose Zone Journal, 2022, 21(5): e20227.

[28] DURNER W, DIAMANTOPOULOS E, IDEN S C, et al. Hydraulic properties and non-equilibrium water flow in soils[M]. Cham: Springer International Publishing, 2014: 403-434.

[29] DEXTER A R. Advances in characterization of soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 1988, 11(3/4): 199-238.

[30] VAN GENUCHTEN M T, NIELSEN D R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils[J]. Annales Geophysicae, 1985, 3: 615-627.

[31] FATICHI S, OR D, WALKO R, et al. Soil structure is an import-

ant omission in earth system models[J]. Nature Communications, 2020, 11: 522.

[32] WANG Y Q, MA R, ZHU G F. Representation of the influence of soil structure on hydraulic conductivity prediction[J]. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129330.

[33] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.

[34] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(7).

[35] DUAN Q Y, SOROOSHIAN S, GUPTA V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1015-1031.

[36] POLLACCO J A P, NASTA P, SORIA-UGALDE J M, et al. Reduction of feasible parameter space of the inverted soil hydraulic parameter sets for kosugi model[J]. Soil Science, 2013, 178(6): 267-280.

[37] 王兴华, 李小倩, 谢晓涵, 等. 土壤因子对三氯乙烯土−气分配系数的影响 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 272-278.
WANG X H, LI X Q, XIE X H, et al. Impact of soil factors on soil-gas partition coefficient of trichloroethylene[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 272-278. (in Chinese with English abstract)

[38] 王铭森, 邓斌, 张晚祺, 等. 非均质包气带土壤含水率分布定量刻画及其模拟 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(3): 296-308.
WANG M S, DENG B, ZHANG W Q, et al. Quantitative characterization and simulation of soil moisture distribution in heterogeneous vadose zone[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 296-308. (in Chinese with English abstract)

[39] 金玉, 陈文岭, 王铭森, 等. 基于露点水势仪与滤纸法的盐渍土蒸发过程中吸力动态规律 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(6): 270-280.
JIN Y, CHEN W L, WANG M S, et al. Dynamic law of suction during the evaporation process of saline soil based on dew point water potential meter and filter paper method[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(6): 270-280. (in Chinese with English abstract)

[40] 李培月, 李佳慧, 吴健华, 等. 黄土−古土壤互层对土壤水分运移及土体微结构的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 1-11.
LI P Y, LI J H, WU J H, et al. Effects of loess-paleosol interbedding on soil moisture transport and soil microstructure[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 1-11.

Summary for “考虑土壤结构和吸附力作用下的土壤水分运移模拟”

Simulation of soil water transport considering the effects of soil structure and adsorption forces

WANG Yunquan*, CHEN Siyuan, QI Pengfei

School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

* Corresponding author, E-mail: wangyq@cug.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Traditional soil hydraulic models based on capillarity theory, poorly characterize soil structure (e.g., soil macropores) and adsorption forces, which limits their ability to accurately describe soil hydraulic properties under near-saturation and low soil water content conditions. Consequently, these models struggle to accurately simulate soil water movement. [**Methods**] In this study, we evaluated the performance of different soil hydraulic characteristic models using continuous field-measured soil moisture data from seven FLUXNET sites. We employed the FXW-M3 model, which accounts for soil structure, adsorption, and capillary forces, and the VGM model, which considers only capillary forces. Using the improved HYDRUS-1D software, we simulated and analyzed site-specific soil moisture data. [**Results**] The results indicated that the FXW-M3 model significantly improved the accuracy of soil water movement simulation. The average root mean square error (*RMSE*) for the FXW-M3 model was 0.0048 cm^3/cm^3, which was lower than the 0.0113 cm^3/cm^3 for the VGM model. The average *R* for the FXW-M3 model was 0.80, which was higher than 0.75 for the VGM model. [**Conclusion**] These results highlighted the significant impact of soil structure and adsorption forces on soil water movement.

Key words: soil structure; adsorption forces; soil water transport; FXW-M3 model; VGM model; HYDRUS-1D software

Received: 2024-05-28; Revised: 2024-10-24; Accepted: 2024-10-24

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240286