

基于HYDRUS模拟的ABCD模型变量及参数物理基础研究

王旭东, 韩鹏飞, 张 锁, 曹志国, 王路军, 朱晓倩, 邢朕国

Research on the physical basis of variables and parameters of ABCD model based on HYDRUS simulation

WANG Xudong, HAN Pengfei, ZHANG Suo, CAO Zhiguo, WANG Lujun, ZHU Xiaolian, and XING Zhenguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究

Improvement and application of a distributed hydrological model in karst regions

梁桂星, 覃小群, 崔亚莉, 陈爽, 黄奇波 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 60-67

管道流模型参数敏感性分析及其在许家沟泉域的应用

A sensitivity analysis of conduit flow model parameters and its application to the catch area of the Xujiagou spring

武亚遵, 李彦涛, 林云, 曲鹏冲 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 68-75

基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

基于砂槽模型研究不同水流密度下盆地地下水流动系统

A study of the characteristics of groundwater flow system of a basin under variable density condition based on a physical sand box model

易磊, 漆继红, 许模, 吴明亮, 李潇, 岑鑫雨 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 40-40

鄂尔多斯高原湖泊蒸发原位试验研究

Research on in-situ test of lake evaporation in the Ordos Plateau

许文豪, 王晓勇, 张俊, 尹立河, 贾伍慧, 朱立峰, 董佳秋, 孙芳强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 16-23



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302015

王旭东, 韩鹏飞, 张锁, 等. 基于 HYDRUS 模拟的 ABCD 模型变量及参数物理基础研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 20-27.

WANG Xudong, HAN Pengfei, ZHANG Suo, *et al.* Research on the physical basis of variables and parameters of ABCD model based on HYDRUS simulation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 20-27.

基于 HYDRUS 模拟的 ABCD 模型变量及 参数物理基础研究

王旭东^{1,2,3}, 韩鹏飞^{4,5,6}, 张锁¹, 曹志国^{2,3}, 王路军^{2,3}, 朱晓倩⁷, 邢朕国^{2,3}

(1. 神华新街能源有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017200; 2. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 102211; 3. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211; 4. 中国地质大学(北京)水利部地下水保护重点实验室(筹), 北京 100083; 5. 中国地质大学(北京)地下水循环和环境演化教育部重点实验室, 北京 100083; 6. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 7. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 以 ABCD 模型为代表的概念性水文模型是量化水文循环过程的主要手段之一, 但是很少有研究检验 ABCD 模型变量和参数的物理基础及其与传统土壤水力参数的关系。以鄂尔多斯盆地台格庙矿区作为研究区, 首先使用 HYDRUS-1D 软件构建站点尺度土壤-植物-大气连续体模型模拟获取非冻结期“真实的”实际蒸散量, 其作为目标函数对 ABCD 模型进行校正, 然后对比 ABCD 模型模拟的土壤水储量和土壤水渗漏量与 SPAC 模型模拟的结果, 通过开展大量情景模拟探究 ABCD 模型中关键参数 a 和 b 与传统土壤水力参数之间的关系。结果表明: 在站点尺度, ABCD 模型可以用于模拟非冻结期月时间尺度的实际蒸散量和土壤水渗漏量; ABCD 模型中参数 a 与饱和含水率、残余含水率和曲线形状参数具有较强的线性相关性, 与饱和和渗透系数呈对数关系; 参数 b 与饱和含水率和曲线形状参数 n 具有较强的线性相关性, 与饱和渗透系数和曲线形状参数 a 呈对数关系。研究结果可以提高对概念性水文模型变量和参数物理基础的认识, 拓展水文模型在水文地质中的应用。

关键词: 水文模型; ABCD 模型; 土壤水力参数; 土壤水模拟软件; 鄂尔多斯盆地; 台格庙矿区

中图分类号: P33

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0020-08

Research on the physical basis of variables and parameters of ABCD model based on HYDRUS simulation

WANG Xudong^{1,2,3}, HAN Pengfei^{4,5,6}, ZHANG Suo¹, CAO Zhiguo^{2,3}, WANG Lujun^{2,3},
ZHU Xiaoqian⁷, XING Zhenguo^{2,3}

(1. Shenhua Group Xinjie Energy Co. Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017200, China; 2. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China; 3. National Institute of Low Carbon and Clean Energy, Beijing 102211, China; 4. Key Laboratory of Groundwater Conservation of Ministry of Water Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 5. Ministry of

收稿日期: 2023-02-18; 修订日期: 2023-03-10 投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42302280); 国家能源集团科技项目(GJNY-21-129)

第一作者: 王旭东(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质研究。E-mail: 10000105@ceic.com

通讯作者: 韩鹏飞(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事水文模型和水文地质研究。E-mail: pfhan@cugb.edu.cn

Education Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 6. School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 7. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The conceptual hydrological model represented by the ABCD model is one of the main methods to quantify and analyze the hydrological cycle processes. However, few studies have examined the physical basis of the variables and parameters of the ABCD model and quantified the relationship between parameters in the conceptual hydrological model and traditional soil hydraulic parameters. In this study, we select the Taigemiao mining area in the Ordos basin as the research site. The HYDRUS-1D software is used to construct the soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) model at a site scale for obtaining the “real” actual evapotranspiration during the non-freezing period. The actual evapotranspiration obtained from the SPAC model is considered as the objective function of the ABCD model for calibrating the ABCD model. The soil water storage and soil water leakage simulated by the ABCD model are compared with the results of the SPAC model. The relationships between the parameters of a and b in the ABCD model and the traditional soil hydraulic parameters are analyzed through a large number of scenario simulations. The results show that the ABCD model can better simulate the site-scale monthly actual evapotranspiration and soil water leakage during the non-freezing period. It is indicated that parameter a in the ABCD model has a strong linear correlation with the saturated water content, residual water content and curve shape parameters, while it shows a negative logarithmic relation to the saturated coefficient of permeability. It is also found that parameter b has a strong linear correlation with the saturated water content and curve shape parameter n , while the logarithmic relationships is revealed between parameter b and the saturated coefficient of permeability and curve shape parameter α . This study can improve the understanding of the physical basis of variables and parameters in conceptual hydrological models, and expands the application of hydrological models to hydrogeology.

Keywords: hydrological model; ABCD model; soil hydraulic parameters; HYDRUS; Ordos basin; Taigemiao mining area

概念性水文模型常被用来研究流域水文循环过程,其优点在于结构简单、参数少、适用性强和过程机理清楚,同时它对数据的要求也比较低^[1-2]。概念性水文模型可以有效地模拟河流径流^[3-4],模型模拟的其他状态变量对于水文循环过程也同样重要,如土壤水是实时洪水预测的关键性状态变量^[5],其是否与真实的物理变量相匹配?如果概念性水文模型模拟的状态变量可以代替真实的物理量,那么可以节省大量的水文地质现场试验工作。Zhuo等^[6-7]成功把新安江模型应用到美国 Pontiac 流域,并将新安江模型模拟的土壤水含量与土壤水分和海洋盐度(Soil Moisture and Ocean Salinity, SMOS)卫星监测的土壤水遥感数据进行对比,发现二者拟合性较差。Han等^[8]将概念性水文模型 ABCD 模型和 bcd 模型应用到美国 NLRB 流域,得到模型可以较好地模拟年径流量;通过将 2 个模型模

拟的年土壤水储量和年实际蒸散量结果分别与全球陆地数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)土壤水数据和中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)全球实际蒸散遥感数据进行对比,发现 ABCD 模型和 bcd 模型模拟的实际蒸散量与 MODIS 数据匹配性较好; bcd 模型模拟的土壤水储量与 GLDAS 结果量级相同,相关性较差,而 ABCD 模型模拟的土壤水储量整体低于 GLDAS 数据结果。Han等^[9-10]将 bcd- α K 概念性水文模型成功应用到美国 Illinois 州 12 个典型流域,发现模拟得到的土壤水储量与 GLDAS 土壤水同化数据具有较好的一致性。概念性水文模型模拟的状态变量是否都可以等效代替真实的物理变量?尽管已经有研究对其开始进行探索,但目前该类研究还相对较少,此外,鲜有研究探讨概念性水文模型的变量和参

数与真实的物理量之间的关系。ABCD 模型是被广泛认可的概念性水文模型之一,已在大量流域得到成功应用^[1]。ABCD 模型中实际蒸散量是通过有效土壤水储量计算,其中的有效土壤水储量值是否是真实的土壤水储量?模拟获取的地下水补给量是否可以代表实际观测的土壤渗漏量?模型的关键参数 a 和 b 是否具有真实的物理意义,与传统土壤水力参数有何关系? Alley^[2] 指出参数 a 和 b 是控制水储量和蒸散量关系的关键参数,但是缺少物理解释。Sankarasubramanian 等^[11] 认为参数 b 值可以近似等价于土壤水储量和实际蒸散量的最大值,但不具有普适性。尽管这些问题已被研究人员关注,但是目前还没有被很好地解答。

受限于目前的观测手段,从流域尺度上对 ABCD 模型模拟的土壤水储量和地下水补给量检验具有较大难度。但是在站点尺度上对其真实性进行检验具有一定的可行性。本文首先基于土壤水分运移模拟软件 HYDRUS-1D 在站点尺度构建具有坚实物理基础的土壤-植物-大气连续体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)模型,将模型模拟结果认为是“实际观测值”,但并不需要构建完全符合研究区实际情况的 SPAC 模型,故该模型无需严格率定;再利用 HYDRUS-1D 软件获取“观测”实际蒸散量对 ABCD 模型进行校正,模拟得到 ABCD 模型的参数和其它变量。对比 ABCD 模型与“真实”SPAC 模型的模拟结果,从理论上探究 ABCD 模型模拟的月土壤水储量和地下水净补给量(土壤水渗漏量)在站点尺度是否具有真实性。进一步通过大量情景模拟分析,量化关键性参数 a 和 b 与传统土壤水力参数之间的关系,探讨关键性参数 a 和 b 的物理意义。

1 研究区概况

台格庙矿区位于黄河中游内蒙古自治区鄂尔多斯盆地,地表高程变化范围在 1 348 ~ 1 494 m 之间,最大高差约 150 m(图 1)。矿区降水蒸发不强烈,多年平均气温为 8.6 °C,多年平均降水量和潜在蒸发量分别为 434 mm 和 1 712 mm。土壤类型以壤砂土为主。植被类型主要为草地,根系深约 1 m。

矿区内主要出露地层为白垩系地层和第四系地层,白垩系和第四系含水层构成一个统一复杂的含水层系统。第四系含水层包括第四系风积砂含水层和第四系湖积相含水层,平均厚度约 9 m。第四系含水层以下为白垩系地层,大部分地段下伏为白垩系棕红

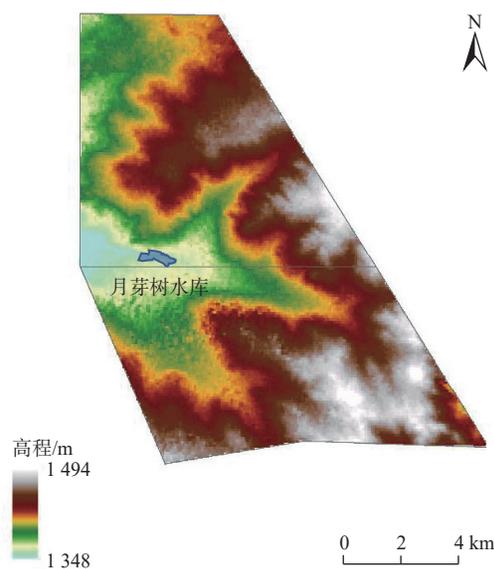


图 1 研究区地形图

Fig. 1 Topographic characteristics in the study area

色风化砂岩,平均厚度约 400 m。

2 研究方法与数据

2.1 ABCD 模型

ABCD 模型结构简单,分为土壤水层和地下水层,且只含有 4 个参数。模型通过输入月降水量和潜在蒸发量数据,就可以模拟获取实际蒸散量、土壤水储量和地下水补给量(土壤水渗漏量)等变量。ABCD 模型中的土壤水层代表根系主要活动区,水分经由土壤水层渗漏补给地下水。土壤水在月时间步长的均衡方程可表示为:

$$S_j - S_{j-1} = P_j - E_j - I_j \quad (1)$$

式中: j ——时间步长/month;

S_j ——月末土壤水储量/mm;

P_j ——降水量/mm;

E_j ——实际蒸散量/mm;

I_j ——地下水补给量(土壤水渗漏量)与直接径流量之和/mm。

地下水的月时间尺度均衡方程为:

$$G_j - G_{j-1} = cI_j - dG_j \quad (2)$$

式中: G_j ——月末地下水储量/mm;

c ——补给到地下水和产生直接径流的分配系数, $0 \leq c \leq 1$;

d ——地下水排水系数, $d > 0$ 。

Thomas 等^[13] 提出 $(E_j + S_j)$ 是 $(P_j + S_{j-1})$ 的非线性函数,可表示为:

$$E_j + S_j = \frac{P_j + S_{j-1} + b}{2a} - \left[\left(\frac{P_j + S_{j-1} + b}{2a} \right)^2 - \frac{(P_j + S_{j-1})b}{a} \right]^{0.5} \quad (3)$$

式中: a ——产流控制参数, $a \leq 1$;

b —— $(E_j + S_j)$ 的上限值/mm。

此外, Thomas 等^[13] 假设土壤水储量可表示为:

$$S_j = (E_j + S_i) e^{-E_{vj}/b} \quad (4)$$

式中: E_{vj} ——潜在蒸发量/mm。

月径流量是直接径流量和地下水排泄量的总和, 流域的总径流量(Q_j)可表示为:

$$Q_j = (1 - c)I_j + dG_j \quad (5)$$

2.2 土壤-植物-大气连续体模型

本研究使用土壤水分运移模拟软件 HYDRUS-1D 中水流和根系吸水 2 个模块构建土壤-植物-大气连续体 SPAC 模型。参考研究区植被根系深度情况, 模型模拟厚度设置为 1 m, 将其剖分为 501 个节点, 模型剖分网格空间步长为 0.2 cm。模型以日为时间步长进行模拟。选用 van Genuchten-Mualem(VG)模型模拟非饱和水力参数^[14]:

$$w(h) = w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}, h < 0 \quad (6)$$

$$w(h) = w_s, h \geq 0 \quad (7)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (8)$$

$$S_e = \frac{w - w_r}{w_s - w_r} \quad (9)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1 \quad (10)$$

式中: w_s ——土壤饱和体积含水率/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

w_r ——土壤残余体积含水率/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$);

K_s ——饱和渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$);

α ——形状参数/ cm^{-1} ;

n ——形状参数;

l ——弯曲度参数;

h ——吸力/(cmH_2O);

S_e ——饱和度。

台格庙矿区土壤类型主要为壤砂土, 土壤均质。模型中土壤水力参数使用数据库中壤砂土(loamy sand)的参数, 参数值如表 1 所示。

模型上边界设置为表层可积水的大气边界, 台格庙矿区地下水埋深通常大于 5 m, 因此模型下边界设置为自由排水边界, 初始条件输入压力水头, 大气边

表 1 壤砂土土壤特征参数值

Table 1 Characteristic parameter values of the loamy sand soil

参数	$w_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$w_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	α/cm^{-1}	n	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	l
数值	0.078	0.41	0.124	2.28	350.2	0.5

界输入逐日降水量、潜在蒸发量和叶面积指数(leaf area index, LAI); 选用 Feddes 根系吸水模型^[15] 处理根系吸水。假定根系分布函数随深度呈线性关系, 对模型中根系分布进行设置。叶面积指数参考前人研究^[16], 基于每个月内叶面积指数变化较小且不同年份相同月份植被类型基本相同, 故本研究设定每个月的叶面积指数值是固定的。考虑到研究区冬季植被凋零和土壤冻结, 而 ABCD 模型未能考虑土壤冻结, 为便于对比, 本研究不模拟冬季(12月、1月和2月)时期情况。月平均叶面积指数值如表 2 所示。

表 2 叶面积指数逐月平均值^[16]

Table 2 Mean monthly leaf area index^[16]

月份	3月	4月	5月	6月	7月
叶面积指数	0.110	0.122	0.144	0.177	0.211
月份	8月	9月	10月	11月	
叶面积指数	0.232	0.201	0.154	0.108	

SPAC 模型中的土壤水储量(S)可表示为:

$$S = \int_0^{100} \left(w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \right) dx \quad (11)$$

式中: x ——土壤厚度/cm。

ABCD 模型中土壤水储量实际代表的是有效土壤水储量, 即不包含残余含水量部分, 与之对应的 SPAC 模型中有效土壤水储量(S_{ef}), 可表示为:

$$S_{ef} = S - H \cdot w_r \quad (12)$$

式中: H ——土壤的总厚度/cm。

模型底部排水强度(q_0)代表土壤水渗漏量或地下水补给量, 可表示为:

$$q_0(t) = -K \left(\frac{\partial h'}{\partial x} + \cos \alpha \right), x = 0 \quad (13)$$

式中: h' ——压力水头/cm;

α ——水流方向和坐标系的角度/($^\circ$)。

SPAC 模型获取的是逐日数据, 逐月的实际蒸散量和土壤水渗漏量数据可以通过累加得到。而 ABCD 模型计算的土壤水储量代表月末值, 因此本文选择每个月最后一天的土壤含水率数据在空间上进行积分得到月有效土壤水储量数据。

2.3 气象数据、情景设计与模型评价

本研究以内蒙古鄂尔多斯盆地台格庙矿区气候

为背景开展模拟研究,收集到研究区周边气象站 1954 年 10 月 1 日—2012 年 12 月 31 日逐日降水量和 20 cm 小型蒸发皿蒸发数据。潜在蒸发量可以通过蒸发皿数据折算获取。模型的预热期和模拟期分别被设置为 1954—1959 年和 1960—2012 年。本文以纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)^[17]作为标准对模拟的非冻结期(每年 3—11 月)月实际蒸散量、土壤水储量和地下水补给量结果进行检验和评价。

3 结果分析

基于前人研究结果^[1], ABCD 模型初值通常影响前 10 个模拟步长,因此,本文以 SPAC 模型模拟的 1961—2012 年的非冻结期逐月实际蒸散量数据作为目标函数校正 ABCD 模型,校正好模型后,再进一步

对比 2 个模型模拟获取的非冻结期逐月土壤水储量和土壤水渗漏量值。经校正,参数 $a=0.65, b=74.30 \text{ mm}$ 。图 2 展示了 2 个模型非冻结期月实际蒸散量的对比结果,二者的振幅和波动趋势基本一致,且拟合效果较好,纳什效率系数为 0.84,结果表明在站点尺度可以使用 ABCD 模型模拟非冻结期月实际蒸散量。

图 3 为基于 HYDRUS-1D 软件构建的 SPAC 模型与 ABCD 模型模拟的 1961—2012 年非冻结期逐月土壤水储量结果。可见虽然二者模拟的土壤水储量波动趋势较为一致,但相比于 SPAC 模型模拟的有效土壤水储量,ABCD 模型模拟结果远远偏低。表明 ABCD 模型在月时间尺度下得到的非冻结期土壤水储量与传统意义的根系活动区有效土壤水储量不等价,其反映的可能是更为浅表层的土壤水储量。

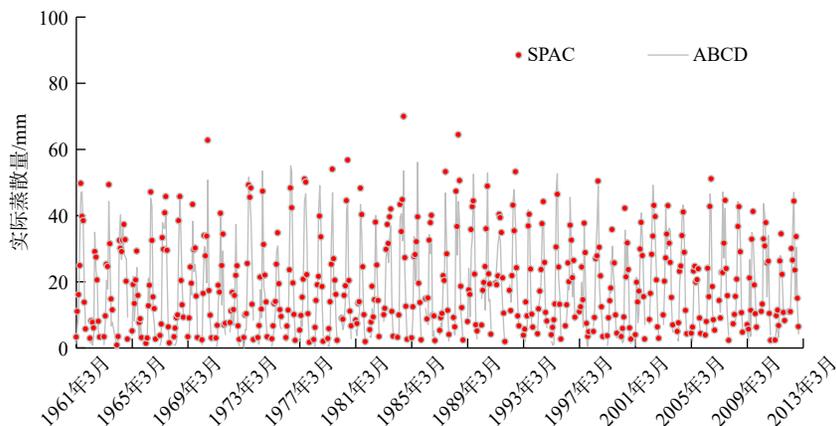


图 2 SPAC 模型和 ABCD 模型模拟的 1961—2012 年非冻结期逐月实际蒸散量变化

Fig. 2 Monthly variation of the actual evapotranspiration simulated by the SPAC model and ABCD model during the non-freezing period from 1961 to 2012

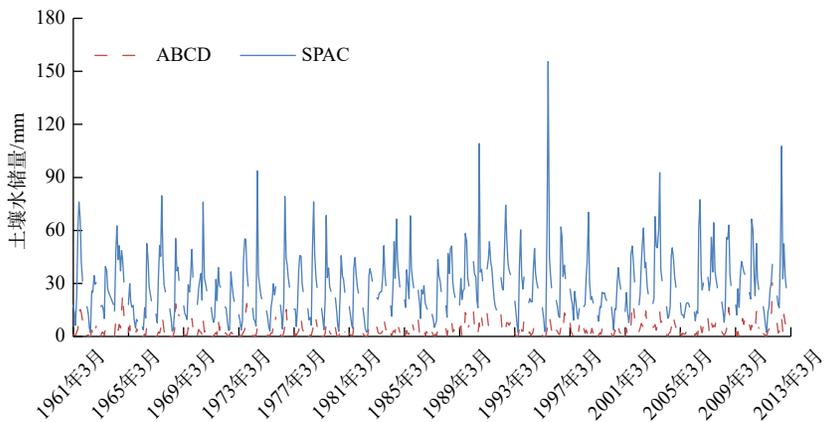


图 3 SPAC 模型和 ABCD 模型模拟的 1961—2012 年非冻结期逐月土壤水储量变化

Fig. 3 Monthly variation of the soil water storage simulated by the SPAC model and ABCD model during the non-freezing period from 1961 to 2012

SPAC 模型和 ABCD 模型模拟的非冻结期月土壤水渗漏量比较结果见图 4。参数 $c=0.75$ 时, 2 个模型

模拟的土壤水渗漏量波动趋势及振幅基本一致, SPAC 模型模拟的结果偏大。此时纳什效率系数为 0.62, 表

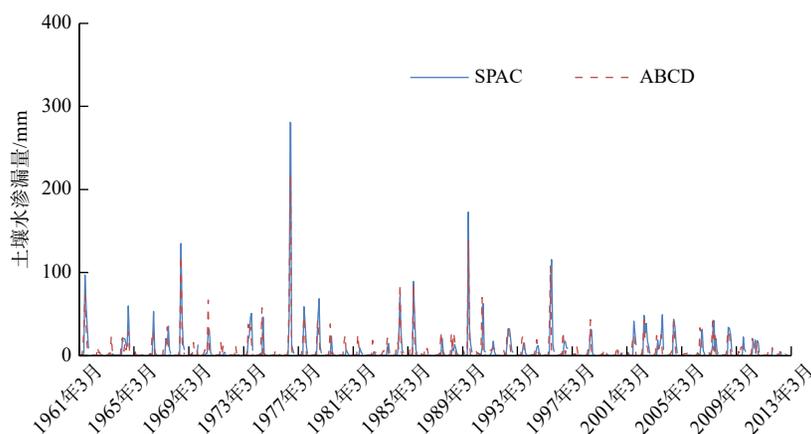


图4 SPAC模型和ABCD模型模拟的1961—2012年非冻结期逐月土壤水渗漏量变化对比

Fig. 4 Monthly variation of the soil water leakage simulated by the SPAC model and ABCD model during the non-freezing period from 1961 to 2012

明 ABCD 模型模拟的非冻结期月地下水补给量可以用于近似代替真实的土壤水渗漏量。

4 讨论

ABCD 模型的实际蒸散量由参数 a 和 b 控制, 那么参数 a 和 b 与 HYDRUS-1D 模型中的土壤水力参数有何关系? 本小节针对该问题开展研究。通过单一改变 HYDRUS-1D 软件构建的 SPAC 模型中土壤水力参数(饱和含水率 w_s 、残余含水率 w_r 、饱和渗透系数 K_s 、曲线形状参数 α 和 n) 的值, 会得到不同的月实际蒸散量值, 然后使用 SPAC 模型得到的实际蒸散量值校正 ABCD 模型, 在拟合最好的情况下可以获取最优的参数 a 和 b 的值, 拟合情况同样选择纳什效率系数作为评价标准。土壤水力参数的变化范围依据 HYDRUS-1D 软件土壤参数数据库确定, 饱和含水率的变化范围为 $0.36 \sim 0.43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; 残余含水率的变化范围在 $0.045 \sim 0.078 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间; 饱和渗透系数在 $100 \sim 750 \text{ cm/d}$ 之间变化, 曲线形状参数 α 和 n 的变化范围分别在 $0.036 \sim 0.145 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1.37 \sim 2.28$ 之间。这些参数变化范围所覆盖的土壤类型主要为细砂、砂、粉砂、壤砂、壤土和粉质黏土。在这些情景中使用 ABCD 模型对 SPAC 模型模拟的实际蒸散量拟合的纳什效率系数均大于 0.5, 表明模拟结果较好。可以用于进一步分析参数 a 和 b 与土壤水力参数的关系, 结果如图 5 所示。参数 a 与饱和含水率具有线性正相关关系, 而与残余含水率、曲线形状参数 α 和 n 具有线性负相关关系; a 值随着饱和渗透系数的增加而非线性减小, 二者呈对数关系。参数 b 值与饱和含水率和曲线形状参数 n 具有线性负相关, 而与饱和渗透系数和曲线形状参数 n 分别

呈正对数和负对数关系; 参数 b 值与残余含水率呈非单调曲线关系, 随着残余含水率的增大, 参数 b 值呈先降低后升高的变化趋势。

尽管本文初步论证了概念性 ABCD 水文模型模拟的实际蒸散量、土壤水储量、土壤水渗漏量和关键性参数 a 和 b 与真实的物理变量和参数之间的关系, 但更多的是基于理论模型的研究, 缺少真实野外实测数据的验证。将来的研究工作中可以通过涡度、剖面实测土壤含水率和蒸渗仪等设备获取实际测量的蒸散量、土壤水储量和土壤水渗漏量数据。此外, 由于受观测条件限制, 本次只是在站点尺度开展了研究, 将来可以进一步在流域尺度对模型的所有变量及参数进行检验。

5 结论

本文通过分别构建具有坚实物理基础的 SPAC 模型和概念性水文模型 ABCD 模型, 评价了站点尺度 ABCD 模型变量和参数的真实性及其物理意义, 得到以下结论:

(1) ABCD 模型可以用于模拟月实际蒸散量和土壤水渗漏量; 模拟的土壤水储量偏小, 不能代表传统认知的根系活动区的有效土壤水储量。

(2) ABCD 模型中参数 a 与饱和含水率具有线性正相关关系, 与残余含水率和曲线形状参数具有线性负相关关系, 与饱和渗透系数呈负对数关系; 参数 b 与饱和含水率和曲线形状参数 n 呈线性负相关, 与饱和渗透系数和曲线形状参数 α 分别呈正对数和负对数关系, 与残余含水率呈现先减小后增加的曲线关系。

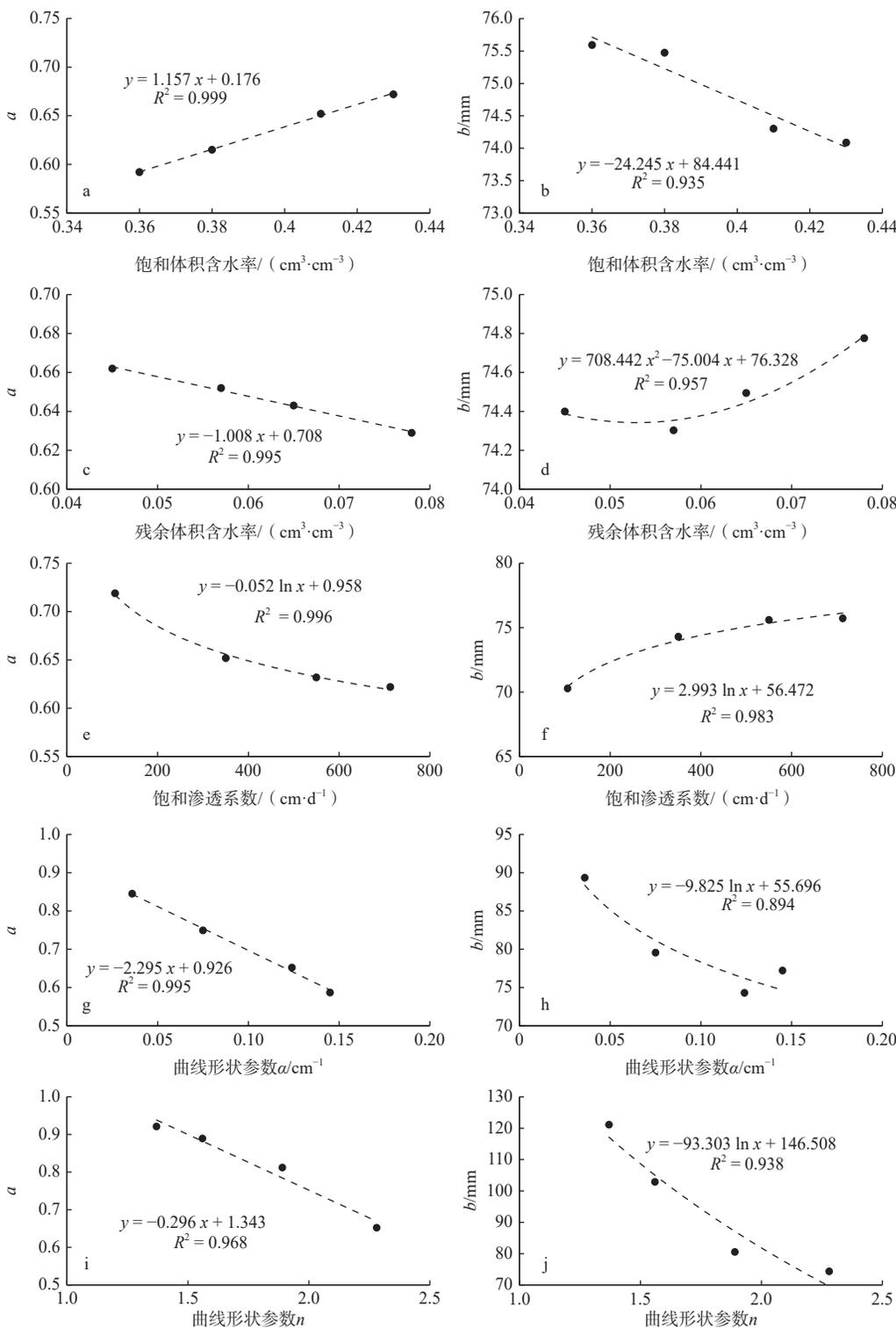


图 5 参数 a 和 b 与饱和体积含水率 (a, b)、残余体积含水率 (c, d)、饱和渗透系数 (e, f)、曲线形状参数 α (g, h) 和 n (i, j) 的关系

Fig. 5 Relationships between key parameters a and b and the saturated (a, b) and residual (c, d) water content, saturated coefficient of permeability (e, f), and curve parameters α (g, h) and n (i, j)

参考文献 (References) :

[1] 韩鹏飞, 王旭升, 蒋小伟, 等. 氢氧同位素在地下水

流系统的重分布: 从高程效应到深度效应 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 1 - 12. [HAN Pengfei, WANG Xusheng, JIANG Xiaowei, et al. Redistribution of

- hydrogen and oxygen isotopes in groundwater flow systems: From altitude effect to depth effect[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(2): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 韩鹏飞, 王旭升. 利用 ABCD 模型预测流域水文对极端气候的响应 [J]. *人民黄河*, 2016, 38(11): 16 – 22. [HAN Pengfei, WANG Xusheng. Forecasting the response of a catchment on extreme climate change with ABCD model[J]. *Yellow River*, 2016, 38(11): 16 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈炯烽, 张万昌. 概念性水文模型遗传算法多目标参数优选研究 [J]. *水利水电技术*, 2007, 38(6): 5 – 7. [CHEN Jiongfang, ZHANG Wanchang. Study on optimization of multi-objective parameter of genetic algorithm for conceptual hydrological model[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(6): 5 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 葛路, 刘登嵩, 许月萍, 等. 水文模型在不同时间尺度的适用性研究 [J]. *科技通报*, 2022, 38(1): 13 – 19. [GE Lu, LIU Dengsong, XU Yueping, et al. Study on the applicability of hydrological models to different time scales[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2022, 38(1): 13 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [5] OCHSNER T E, COSH M H, CUENCA R H, et al. State of the art in large-scale soil moisture monitoring[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(6): 1888 – 1919.
- [6] ZHUO Lu, HAN Dawei. Could operational hydrological models be made compatible with satellite soil moisture observations?[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(10): 1637 – 1648.
- [7] ZHUO Lu, HAN Dawei. Misrepresentation and amendment of soil moisture in conceptual hydrological modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 637 – 651.
- [8] HAN Pengfei, WANG Xusheng, ISTANBULLUOGLU E. A null-parameter formula of storage-evapotranspiration relationship at catchment scale and its application for a new hydrological model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(4): 2082 – 2097.
- [9] HAN Pengfei, ISTANBULLUOGLU E, WAN Li, et al. A new hydrologic sensitivity framework for unsteady-state responses to climate change and its application to catchments with croplands in Illinois[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(8): e2020WR027762.
- [10] HAN Pengfei, WANG Xusheng, WAN Li, et al. Croplands decreased stability of streamflow with changing climate: An investigation of catchments in Illinois[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127461.
- [11] SANKARASUBRAMANIAN A, VOGEL R M. Annual hydroclimatology of the United States[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(6): 1 – 12.
- [12] ALLEY W M. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models[J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(8): 1137 – 1149.
- [13] THOMAS H A. Improved methods for national water assessment[R]. Washington: U. S. Water Resources Council, 1981.
- [14] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513 – 522.
- [15] FEDDES R A, BRESLER E, NEUMAN S P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems[J]. *Water Resources Research*, 1974, 10(6): 1199 – 1206.
- [16] 雷磊, 王双明, 徐哈, 等. 鄂尔多斯盆地海流兔河流域叶面积指数的时空变化及其与气象因子的关系 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35(6): 277 – 280. [LEI Lei, WANG Shuangming, XU Han, et al. Temporal and spatial variation of leaf area index and its relation to meteorological factors of Hailiutu River Basin in Ordos' s basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(6): 277 – 280. (in Chinese with English abstract)]
- [17] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282 – 290.

编辑: 张若琳