中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 5 期: 1484 ~ 1505
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

地表-地下过程耦合的数值水文模型综述

舒乐乐[1], 陈昊[1], 孟宪红[1*], 常燕[1], 胡立堂[2], 王文科[3], 束龙仓[4], 俞烜[5], Christopher DUFFY[6], 姚莹莹[7], 郑东海[8]

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学与冻土工程重点实验室 , 兰州 730000;
2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;
3. 长安大学水利与环境学院, 西安 710054;
4. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098;
5. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008;
6. Pennsylvania State University, State College, PA 16801, USA;
7. 西安交通大学地球环境科学系, 西安 710054;
8. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101
* 通讯作者, E-mail: mxh@lzb.ac.cn

收稿日期: 2023-01-03; 收修改稿日期: 2024-03-19; 接受日期: 2024-04-01; 网络版发表日期: 2024-04-18
国家自然科学基金项目(41930759, 42325502)、中国科学院西部之光-西部交叉团队项目(xbzg-zdsys-202215)、中国科学院人才计划青年项目、国家冰川冻土沙漠科学数据中心项目、青海省防灾减灾重点实验室开放基金重点项目(QFZ-2021-Z02)和2023年度兰州市第一批科技计划项目(2023-1-49)资助

摘要 水文模型是利用数学公式对水文循环过程的描述, 是理解自然界水的时空运动和分布规律的重要工具; 它不仅可以利用观测数据来验证理论的可靠性与适宜性, 还能预测水文变量未来趋势, 实现理解自然与预测自然的目的. 随着计算方法的快速发展、观测与试验手段的持续更新, 目前基于物理过程的地表-地下过程耦合的数值水文模型快速发展. 这种模型以微观尺度的守恒原理和物理公式为基础, 利用数值方法将地表和地下水流进行耦合计算, 从而模拟流域尺度水文响应过程. 由于其物理过程明确、时空分辨率高且利于学科耦合, 数值水文模型已成为水文模型发展的前沿和主流方向之一. 本文阐述了地表-地下过程耦合数值水文模型的理论基础, 从模型框架、数值求解方法、空间表达和耦合算法等方面对比和分析了当前主流数值水文模型, 同时与传统水文模型比较, 厘清了数值水文模型的优劣势, 探讨了未来数值水文模型发展的方向.

关键词 数值水文模型, 地表-地下过程耦合, 数值方法, 水文模型

1 引言

科学模型是对自然规律认识的基础上通过已知变量计算未知变量的数学方法. 水文模型集合了人类对水文循环过程的认识, 通过数学公式表达水文过程的时空运动规律, 既可结合观测数据验证理论的可靠性与适宜性, 也可预测未来变化趋势, 从而实现理解与预测自然的目的(Wagener等, 2010; 任立良等, 2011;

中文引用格式: 舒乐乐, 陈昊, 孟宪红, 常燕, 胡立堂, 王文科, 束龙仓, 俞烜, Duffy C, 姚莹莹, 郑东海. 2024. 地表-地下过程耦合的数值水文模型综述. 中国科学: 地球科学, 54(5): 1484–1505, doi: 10.1360/SSTe-2022-0420
英文引用格式: Shu L, Chen H, Meng X, Chang Y, Hu L, Wang W, Shu L, Yu X, Duffy C, Yao Y, Zheng D. 2024. A review of integrated surface-subsurface numerical hydrological models. Science China Earth Sciences, 67(5): 1459–1479, https://doi.org/10.1007/s11430-022-1312-7

© 2024 《中国科学》杂志社

Vallis, 2016; Fatichi等, 2016; Duffy, 2017; Peel和McMahon, 2020). 当前水文模型作为高效且经济的科学试验工具, 对农业生产、水资源管理、防灾减灾、污染物控制、社会经济发展关键决策有不可或缺的支撑作用(任立良等, 1996; 徐宗学, 2010; Zheng等, 2010; Fatichi等, 2016; 汤秋鸿等, 2019; Yu等, 2020). 同时被用于验证水循环理论, 并指导科学观测网络布局等(Beven, 2012; Li等, 2018; Blöschl等, 2019).

水文模型描述了水文循环基本过程, 一般包括降水、截留、入渗、孔隙介质的水平流动、蒸散发, 以及径流. 在高寒地区, 由冰川、冻土和积雪引起的水分相变过程更加复杂, 并且这种相变深刻影响了原本的山坡水文过程(王磊等, 2014; 杨大文等, 2018). 除自然水文过程外, 模型还需考虑人类活动对水文循环的影响. 图1展示了流域水循环的全过程及其涉及的各种要素, 如降水、蒸发、融化、产流、汇流、河川径流、入渗、壤中流、地下水补给和基流等过程, 还包括了冰川、积雪、冻土、植被覆盖、土地利用以及湖泊、河流等地表过程. 在微观尺度上, 水文过程呈现出高度复杂和异质性的特点. 在宏观尺度上, 由于微观尺度的特征被平均, 水文过程的复杂性实际上有所降低, 大尺度水文模型对水流的描述变得更为概念化, 计算过程和复杂性相对较低(Wood等, 1988; Grayson等, 1992; Blöschl等, 1995; Savenije, 2001; Sivapalan, 2003; Peel和McMahon, 2020).

现有水文模型尚无法完全满足复杂多变的水问题研究和工程应用. Peel和McMahon(2020)对比总结了279个降水径流模型, 并引述Clark等(2011)评论: “模型数量之多表明, 流域尺度上环境动态过程的科学理解依旧不充分, 可能归咎于现阶段在观测和表达自然系统异质性上的困难.” 因此, 新的水文模型不断涌现.

水文模型发展存在降低模型复杂度与精细化表达水文物理过程之间的矛盾, 因此产生了自上而下(Top-down)和自下而上(Bottom-up)两种模型开发思路, 聚焦于水文过程的物理参数化、数据限制、不确定性和计算资源限制等(Franchini和Pacciani, 1991; 任立良等, 1996; Sivapalan等, 2003; Sivapalan, 2003, 2018 Savenije, 2010; Semenova和Beven, 2015; Vallis, 2016, Clark等, 2017; Novotny, 2018).

自上而下的建模思路以长期和大尺度的流域水文响应作为出发点, 逐步深入, 对小尺度具体物理过程进行细化和复杂化模拟. 流域单元被概念化为想象的存储空间——即“水桶模型”, 计算单元上的驱动要素与流域响应表达为简单经验关系、线性/非线性关系、多元共线拟合关系. 基于水桶概念的水文模型关注地表产汇流过程如何在河流断面上形成径流过程线, 简化水在坡面和河道内的流动过程以及地表-地下水之间的双向交互, 对产汇流和基流过程描述都具有明显的概念化特征. 然而, 自然流域内地表水和地下水交互频繁, 交互界面的水流动方向和强度随水力梯度关系而变化(Winter, 1999; Levine和Salvucci, 1999; Maxwell和Miller, 2005; 王文科等, 2007; Sulis等, 2012; Krause等, 2014; Maxwell和Condon, 2016; Mukherjee等, 2018).

自下而上的建模思路从微观的水文计算单元(Hydrological computation unit, HCU)和最基础物理公式出发, 集合所有HCU的水文过程, 构成对整体流域长时间大范围的水文响应, 这类模型也被称为基于过程或者基于物理的模型. 其HCU是流域上表达空间异质性所需的小面积. 由(质量、能量、动量)守恒定理构建基础控制方程, 利用微观尺度的物理方程描述水文过程, 在高时空分辨率上计算水和能量在三维空间的存储、运动与转换过程, 通过集合微观物理过程反映流域尺度的水文响应. 需要强调的是构建这类水文模型基础的物质/能量守恒与水热传输定理(如达西定律)等具有普适性, 即能够脱离单个模型而独立存在, 且能够被物理实验证实, 其参数也具有明确物理意义(Beven, 1989; Fatichi等, 2016; Li等, 2018; Ntona等, 2022).

图2展示了不同流域水文模型的空间和过程特征(Hrachowitz和Clark, 2017), 在“空间分辨率-过程复杂度”二维连续空间中, 横坐标反映水文模型的空间分辨率, 即模型对流域空间异质性表达的精细程度; 纵坐标为物理过程的复杂程度. 如以SWAT和VIC为代表的传统水文模型偏于左下方, 意味着此类模型的空间分辨率低, 以子流域/水文响应单元为HCU, 水文物理过程相对简单, 属于自上而下模型; 而以MIKE-SHE、ParFlow、PIHM/SHUD为代表的地表-地下过程耦合的数值水文模型居于右上角, 属于自下而上模型, 意味着该类模型具有较高的空间分辨率和更多HCU, 对水文物理过程的刻画和表达更加精细.

地表-地下过程耦合的数值水文模型(Integrated Surface-Subsurface Numerical Hydrological Model, 简

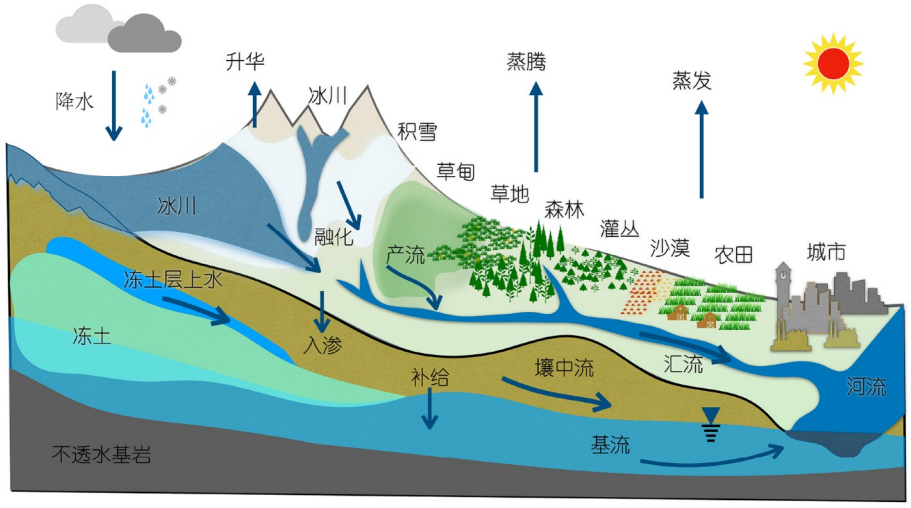


图 1　流域水文循环过程示意图

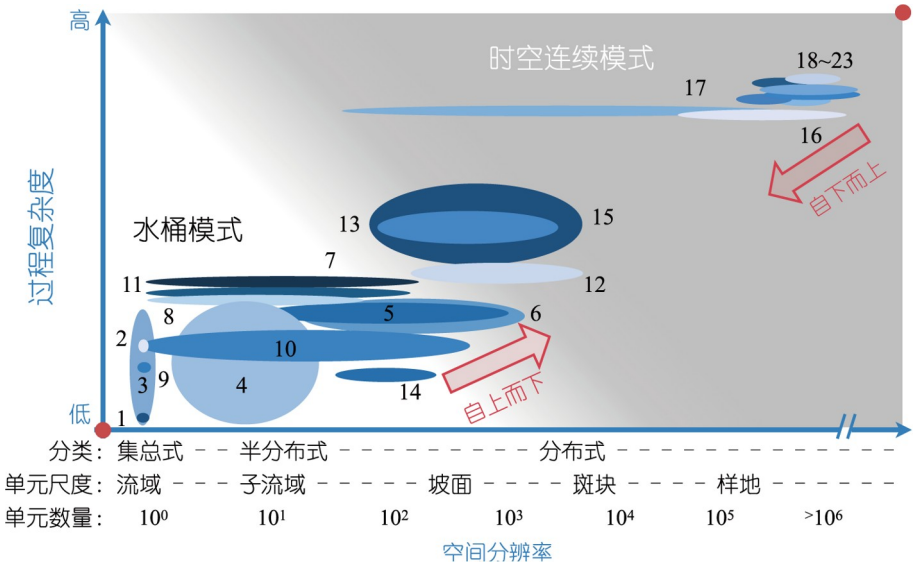


图 2　常用水文模型在空间分辨率-过程复杂度中的位置示意图

空间分辨率轴线显示了各个模型HCU数量和尺度, 过程复杂度轴表示一个HCU内过程的数量, 阴影表示从水桶模型(白色)过渡到时空连续模型(灰色), 红点表示分辨率-过程复杂性的两个端点. 图中模型分别为: 1, unit hydrograph(Sherman, 1932); 2, HBV(Bergström, 1992); 3, SUPERFLEX(Fenicia等, 2011); 4, FLEX-Topo(Gharari等, 2014); 5, mhM(Samaniego等, 2010); 6, mhM-topo(Nijzink等, 2016); 7, SWAT(Arnold等, 1998); 8, NWS-Sacramento(Burnash和Singh, 1995); 9, GR4J(Perrin等, 2003); 10, HYPE(Lindström等, 2010); 11, VIC(Liang等, 1994); 12, TOPMODEL(Beven和Kirkby, 1979); 13, CRHM(Pomeroy等, 2007); 14, TACD(Uhlenbrook等, 2004); 15, WASIM-ETH(Schulla和Jasper, 1998); 16, DHSVM(Wigmosta等, 1994); 17, MIKE-SHE(Refsgaard和Storm, 1996); 18, ParFlow(Kollet和Maxwell, 2008); 19, CATFLOW(Zehe等, 2001); 20, HYDRUS-3D(Šimůnek等, 2008); 21, CATHY(Camporese等, 2010); 22, HydroGeoSphere(Jones等, 2006); 23, PIHM/SHUD(Qu和Duffy, 2007; Shu等, 2020). 修改自Hrachowitz和Clark(2017)

称为数值水文模型)基于自下而上的建模思路, 属于分布式水文模型中的一个特殊类别(图3), 将地表-地下水文物理过程利用数值方法紧密耦合起来. 既有别于数值方法求解的地下水模型(如MODFLOW(McDonald和Harbaugh, 1984; Niswonger等, 2011)), 也不同于地表-地下水过程概念化的传统水文模型. 地下水模型常采用数值方法, 但关注点在地表以下数十米至数百米的空间, 其中包括低透水层和裂隙的水流过程, 超出

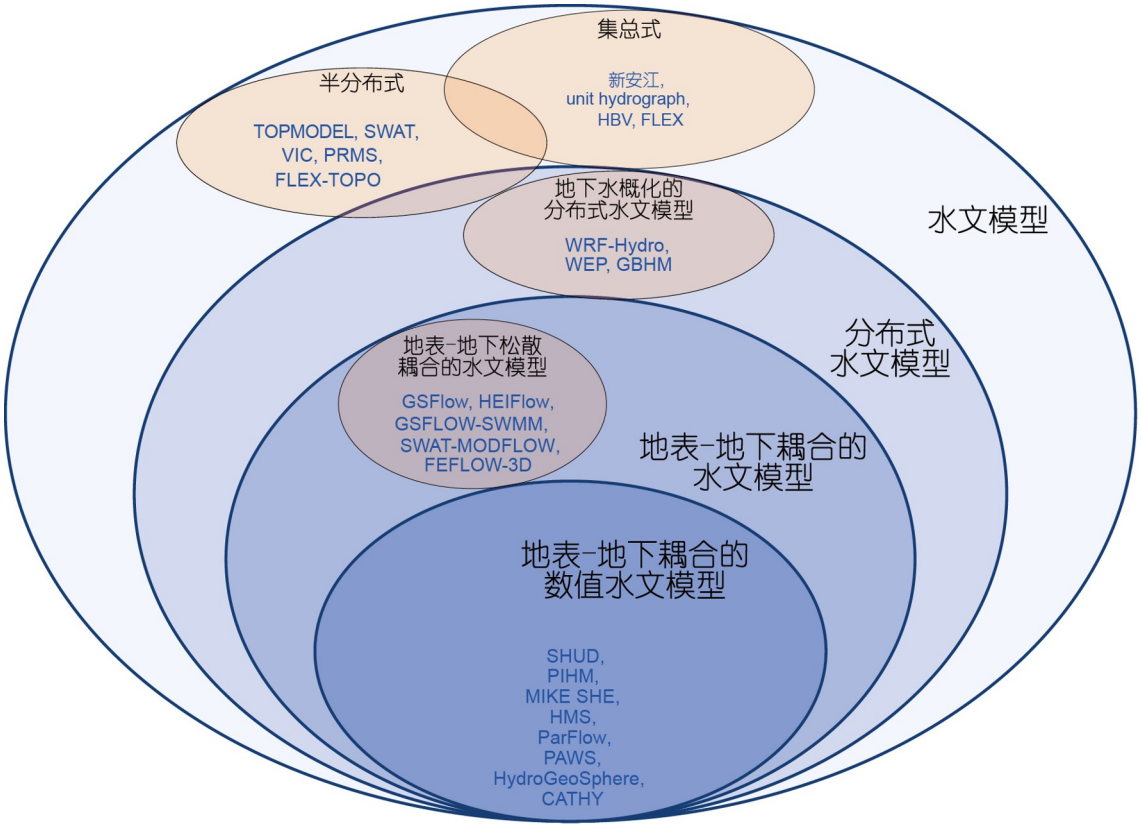


图 3　水文模型分类示意图

图中蓝色文字是该类别代表性模型. 图中模型分别为: 新安江(赵人俊和王佩兰, 1988)、unit Hydrograph(Sherman, 1932)、HBV(Bergström, 1992)、FLEX(Gharari等, 2014)、TOPMODEL(Beven和Kirkby, 1979)、SWAT(Arnold等, 1998)、VIC(Liang等, 1994)、PRMS(Leavesley等, 1983)、WRF-Hydro(Gochis等, 2018)、WEP(Jia等, 2001)、GBHM(Yang等, 1998)、GSFlow(Markstrom等, 2008)、HEIFlow(Tian等, 2018; Zheng等, 2020; Han等, 2021)、GSFLOW-SWMM(Tian等, 2015)、SWAT-MODFLOW(Park等, 2019)、FEFLOW-3D(Hu等, 2020)、SHUD(Shu等, 2020)、PIHM(Qu和Duffy, 2007)、MIKE-SHE(Refsgaard和Storm, 1996)、HMS(Yu等, 1999, 2006; Yu, 2000)、ParFlow(Kollet和Maxwell, 2006)、PAWS(Shen和Phanikumar, 2010)、HydroGeoSphere(Aquanty, 2013)、CATHY(Bixio等, 2002; Camporese等, 2010))

水文模型所关注的"降水-径流"范畴; 同时地表水过程简化为地下水运动的边界条件. 传统水文模型中地下水模块不具有实际含义的地下深度, 而利用概念化的水桶模型反映地下水补给-存储-释放过程, 例如新安江模型(赵人俊和王佩兰, 1988)、VIC(Liang等, 1994)和WRF-Hydro模型(Gochis等, 2018)的释水曲线(Savenije, 2001). 数值水文模型对物理过程描述具有普适性, 也更准确反映人类活动影响, 并且易于耦合其他(水热耦合、污染物传输、植被生态等)物理过程, 成为近几十年来水文模型新兴且重要的发展方向(胡立堂等, 2007; 王蕊等, 2008; Maxwell等, 2014; Paniconi和Putti, 2015; Hrachowitz和Clark, 2017; Peel和McMahon, 2020; 束龙仓等, 2022; Ntona等, 2022). 尤其是2000年以来, 全球水文研究者新发展了20多个重要的数值水文模型, 极大推动了数值水文模型的发展.

2　数值水文模型的理论基础

数值水文模型始于20世纪70年代, Freeze和Harlan (1969)提出了基于水动力偏微分物理方程的模拟方法和统一地表-地下水文过程的模型蓝图(Freeze和Harlan, 1969; Cooley, 1971). 但受限于当时计算能力, 直到20世纪80年代SHE(Abbott等, 1986)模型出现, 数值水文模型才崭露头角. Beven(2012, 图1.2)总结了水文建模的5个基本步骤: 认知模型、数学模型、过程模型、模型校准和模型验证.

2.1 控制方程

数值水文模型使用物质守恒公式作为控制方程(Governing equation), 显式地描述流域中地表水和地下水储量与流量关系(公式(1)和(3)), 通常使用圣维南方程(公式(1))和理查兹方程(公式(4))来分别计算地表和地下水流过程(Freeze和Harlan, 1969; Maxwell和Miller, 2005; Farthing和Ogden, 2017; Singh, 2018; Haque等, 2021). 各种数值水文模型的核心控制方程基本相同, 但其简化程度和求解方案不同, 分别对地表、地下水的不同过程采取一维、二维和三维的不同简化方法. 流域水文的基本控制方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (vh) - \frac{Q_e}{A} + \frac{Q_{su}}{A}, \tag{1}$$

$$v = n^{-1} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}, \tag{2}$$

$$S_w(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot q + \frac{Q_e}{V} + \frac{Q_{ss}}{V}, \tag{3}$$

$$q = -k_e(h)\nabla(h+z). \tag{4}$$

公式(1)和(3)分别是地表水和地下水的质量守恒控制方程, 公式(2)和(4)分别是地表水和地下水流动的计算公式. 公式中h为地下水水头高度、非饱和层的含水量或地表水高度(L); t为时间(T); v为地表水水平平均流速($L\,T^{-1}$); Q_e为地表与地下交互流量($L^3\,T^{-1}$), 从地表至地下流量为正; Q_{su}为地表水的源汇项或者边界条件($L^3\,T^{-1}$), 可包括降水、灌溉、蒸散发等过程; A为控制单元的垂直投影面积(L^2); n为曼宁系数$\left(TL^{-\frac{1}{3}}\right)$, R为水力半径, 即过水面积与湿周之比(L), S_f为摩擦坡度($L\,L^{-1}$). $S_w(h)$是储水系数($L^3\,L^{-3}\,L^{-1}$), 即单位水头下降时单位体积内可释放的水量, 包含了地下水的储水系数(L^{-1})和非饱和土壤层的含水量($L\,L^{-1}$); q为地下水径流量($L^3\,L^{-2}\,T^{-1}$), 是水头高度或含水量的函数, 采用达西定律或理查兹方程(公式(4))计算; Q_{ss}为地下水或土壤水的源汇项或者边界条件($L^3\,T^{-1}$), 实际计算中可包含单位面积地下水渗漏、注入、抽取以及蒸散发等流量; V为控制单元的体积(L^3); $k_e(h)$为有效水力传导度($L\,T^{-1}$), 是土壤含水量或基质势的函数; z为距离某一基准面的垂直距离(L); 公式中q和v的计算分别依据曼宁公式(公式(2))和理查兹方程(公式(4)). 流域尺度的地表-地下过程耦合计算基于水头连续性和地表-地下间水量交换Q_e. 公式(3)是地下水水量平衡公式的出发点, 左边是单位水头/水位线变化引起的控制体水量变化, 右边是达西定律/理查兹公式计算的渗流量、地表-地下交互量、源汇项之间的差值.

流域水文模型还需要对地表过程, 即蒸散发和积雪融化进行模拟, 实际模型计算时归入源汇项. 冰川、积雪和蒸散发通常作为模块与地表和地下水文过程进行松散耦合, 即计算的时间步长不同, 或者无需迭代计算. 土地利用、农业活动等过程在模型中通过改变植物物候和水力学参数的形式展现其对水文和陆面过程的影响.

2.2 边界条件

边界条件通常分为Dirichlet和Neumann两类. Dirichlet边界条件(Dirichlet boundary condition, DBC)是偏微分方程的第一类边界条件, 也称为固定边界条件, 其指定了空间某点的固定值. 例如, 在地下水流动问题中, Dirichlet边界条件限定固定地下水水头高度. Neumann边界条件(Neumann boundary condition, NBC)也被称为偏微分方程的第二类边界条件, 其给定空间特定位置上目标变量的一阶导数. 在地下水流动问题中, 给定某点处固定流量, 如注水或者取水流量. 作为三维的数值水文模型, 两类边界条件都可以施加在空间任意位置的任意方向上. 数值水文模型中存在常见的边界条件或者假设, 其中包括:

(1) 流域底部不透水边界, 属于NBC, 其流量为零. 此假设适用于大部分流域的水文研究. 当需要体现深层地下水对模拟系统影响时, 可以设定系统非零底部边界条件, 实现与深层地下水的交互.

(2) 封闭的流域边界, 流域在坡面单元的地表和地下水的水平方向上无来自外部的水量, 也不向外部流失水量, 即边界上的HCU与域外的流量为零. 当模拟对象的边界是流域边界, 且地表水和地下水的流域边界一致时, 此假设完全成立. 当模拟域为流域一部分(例如河漫滩)时, 则需要专门设定DBC或者NBC, 来确保域内水量平衡. 但实际应用中边界条件难以通过观测获取, 因此替代办法是扩大模拟域——扩大模拟域直至零流量的流域边界. 在重点研究区采用精细网格, 研究区边界至流域边界范围采用较粗网格, 既可以保证研究区边界条件合理, 同时避免边界的观测数据的掣肘.

(3) 流域顶部边界. 流域上层边界, 流域顶部的边

界条件实际上为降水和灌溉, 作为NBC施加在流域上. 数值水文模型通常将蒸散发也作为NBC作用于地表和地下, 但是蒸散发作为边界条件不是外部输入, 而是根据气象驱动和土壤温湿度计算而来.

(4) 河流出口边界. 河流出口是流域唯一的水平方向流量出口, 因此水文模型都符合质量守恒定律或水量平衡公式: $\Delta S=P-\mathrm{ET}-Q$, ΔS为流域水储量, P为降水量, ET为蒸散量, Q为径流量.

2.3　数值方法求解

从控制方程(公式(1)和(3))可知目标变量h是随时间t和空间变化的函数, 因此数值方法需要在时间和空间上对目标对象进行离散化. 流域三维空间进行水平和垂直离散化, 是数值水文模型必经步骤. 好的空间离散化方案不仅要满足研究区域的模拟精度、满足边界条件限制, 同时需减少HCU数量以降低对计算资源的依赖性. 水平空间离散化方案, 通常分为结构化和非结构化方案, 模型对比一节将仔细讨论. 垂直方向上, 主要是针对土壤层进行划分, 由地表划分至底部不透水边界; 垂直方向的离散化方案非常灵活, 存在距离等差、等比或者任意划分, 也可以通过饱和或非饱和层进行划分.

数值方法可分为显式求解(Explicit method)与隐式求解(Implicit method): 当下一时刻变量由前一时刻变量直接计算得到的, 称为显式求解法; 当下一时刻变量由一系列公式、矩阵或者迭代算法计算得到, 称为隐式求解法. 相同时空分辨率条件下, 显式求解法的计算速度显著高于隐式求解法, 但是隐式求解法可以保证计算的稳定性, 因此可采用较大时间步长进行计算, 而显式求解法必须受制于CFL条件. CFL条件是保证数值方法收敛性和稳定性的必要条件(非充分条件), 以Courant、Fredrichs和Lewy共同命名(Courant等, 1928). CFL条件即数值方法的时间步长要足够小, 方能够保证计算精度, 否则结果不收敛或者不稳定.

时间离散化即模型时间步长. 时间步长和空间分辨率的组合关系, 对于数值方法求解的稳定性和收敛性都有显著影响. CFL条件是限制因素. 为保证数值方法稳定性, 空间分辨率越高, 则要求时间分辨率也越高, 时间分辨率与空间分辨率的(一次或多次)幂存在正比关系.

3　数值水文模型对比

以下从数值方法、空间网格结构、耦合方式、变量传递、河道拓扑关系、模型源代码获取方式等、对主要数值水文模型进行对比(表1).

3.1　数值计算方法

数值方法中主要有有限差分(Finite Difference, FD)、有限元(Finite Element, FE)和有限体积(Finite Volume, FV)法. 有限差分法方法简洁, 物理意义清晰, 编程容易, 因而是水文、气象领域应用最多的数值方

表 1　主要数值水文模型在模型结构、求解算法和空间特征等方面的对比

模型名称	数值方法	空间网格	河道拓扑关系	耦合方式	变量传递	开源	文献	国家
SHUD	FV	非结构	交叉	全局隐式	压力连续	是	Shu等(2020, 2024a, 2024b)	中国/美国
PIHM	FV	非结构	相邻	全局隐式	压力连续	是	Qu和Duffy(2007)	美国
CATHY	FE	非结构	无河道	次序迭代	边界条件交互	否	Bixio等(2002); Camporese等(2010)	意大利
HydroGeoSphere	FE	非结构	无河道	全局隐式	一阶变量交换	否	Aquanty (2013)	加拿大
OpenGeoSys	FE	非结构	相邻	次序迭代	一阶变量交换	是	Delfs等(2009, 2012)	德国
ParFlow	FD	结构	交叉	全局隐式	压力连续	是	Kollet和Maxwell(2006)	美国
PAWS	FD	结构	交叉	非同步交换	一阶变量交换	否	Shen和Phanikumar(2010)	美国
tRIBS	FE	非结构	相邻	非同步交换	一阶变量交换	否	Ivanov等(2004)	美国
inHM	FE	非结构	无河道	全局隐式	一阶变量交换	否	VanderKwaak和Loague (2001)	美国
MIKE SHE	FD	结构	交叉	非同步交换	边界条件交互	否	Abbott等(1986)	丹麦
GEOtop	FV	结构	无河道	全局隐式	压力连续	是	Rigon等(2006); Endrizzi等(2014)	瑞士/意大利

法(Paniconi和Putti, 2015); 有限元法可以保证全局物质平衡, 但是无法保证局部平衡; 有限体积法弥补了有限元这一缺陷, 既可以保证全局水量平衡, 也可以保证局部水量平衡. 三类方法并无明显优劣之分, 但其数学意义略有不同: 有限差分法计算空间中某一点的值, 有限元法计算某一HCU内的近似拟合曲线, 有限体积法作为有限元法的特例, 计算该HCU内的均值. 因此对于三种不同方法计算结果的解读应当略有差异, 但实际应用中模型用户层面通常将其视为相同含义.

3.2 空间离散化

在水文模型的空间描述中, 水平网格主要分为结构化和非结构化两类. 结构化网格特征在于其由几何形状和面积均一的HCU构成. 其网格具有以下优势: (1) 求解过程直观且逻辑性强; (2) 对于编程而言具有简洁性并支持高效并行计算; (3) 数据输入和输出可采用矩阵结构进行表达, 从而在数据的预处理、后处理及可视化方面实现高效和直观. 尽管矩形结构在规则化网格中最为常见, 但正三角形和正六边形也可行.

相较之下, 非结构化网格(或称不规则网格)展现出以下明显优势: (1) 对于不规则的三维地形有着更为精确的描述能力; (2) 对于不规则研究区的边界有较高适应性, 并能确保边界条件的处理贴近数值模拟的理论基础(Beven, 2012); (3) 允许HCU的面积进行动态调整, 在维持整体边界条件的前提下, 可以对特定区域进行细化或相反的处理. 因此, 采用非结构化网格既能确保关键区域的高分辨率模拟, 也能保证边界条件稳定性的同时, 不显著增加HCU数量, 达到模拟精度与计算开销之间的均衡.

图4利用了规则矩形网格和不规则三角网格对同一流域进行了空间离散化(图4a~4d), 在近似的平均HCU面积下矩形网格单元数与不规则三角形网的HCU数量近似, 但是矩形网格同时需要负担无效单元(流域外的空白单元), 并且其边界表达与实际边界差异较大(图4c). 当流域需要局部加密(深红色虚线范围)时, 矩形网格的HCU数量显著增加, 而不规则三角网的HCU数量增加较小(图4e~4h). 非结构化网格的主要缺陷是: (1) 计算过程相对复杂, 仅支持有限元和有限体积法; (2) 数据解读和可视化略复杂, 需要针对性的数据前处理和后处理软件.

3.3 变量耦合方式

地表-地下水文过程的耦合方式是模型间重要技术差异, 也是模型开发的难点之一. 图5演示了三种不同的耦合方式: 异步链接方法(Asynchronous linking)对地表和地下的水文过程分别采用不同时间步长进行计算, 然后交换变量形成新边界条件; 次序迭代(Sequential iteration)方法与异步链接方法相似, 但是在交换边界后需要进一步迭代寻找收敛的地表、地下水状态; 全局隐式法(Global implicit)将所有待求解变量放入统一的非线性方程组中进行求解(Panday和Huyakorn, 2004; Furman, 2008; Maxwell等, 2014). 三种方法的计算难度和复杂度依次增大. 由于地表和地下过程中水的运动速率存在显著差异, 且全局隐式求解法的迭代时间步长受制于CFL条件下变化速率最大的过程(通常为地表和河道过程), 因此同等条件下全局隐式方法求解效率最低, 但是全局隐式更能描述水在自然空间的连续运动, 保证全局水量平衡.

变量交换指不同控制方程之间的关键变量传递. 典型变量交换例如下渗流量是地表和地下水交互的关键变量, 影响地表水平流量和土壤含水量. 一阶变量交换方法中, 下渗量在地表计算中实现, 然后传递给土壤水计算模块. 边界条件交换方式则视下渗变量为土壤层的边界条件. 变量交换方法与地表-地下过程耦合方式紧密相关.

3.4 河道耦合关系

河川径流是流域模拟的重要变量. 数值方法模型采用了不同的方法描述河道、计算径流、计算河道与坡面单元交换关系(图6). 部分模型没有显式的河道单元, 所有HCU都是坡面单元, 但是当HCU地面积水超过某阈值后, 将其视为河道单元, 采用河道单元的计算公式, 例如, inHM(VanderKwaak和Loague, 2001)、CATHY(Bixio等, 2002)、GEOtop(Rigon等, 2006). 另一部分模型采用显式的河道单元, 即模型求解时存在坡面单元和河道单元, 两种单元的几何形状和计算方法都不相同. 但是在不同模型中, 河道与坡面单元的空间拓扑关系有两种选择, 即交叉或者相邻. 例如, PIHM模型水平上的坡面单元为三角形, 河道单元为矩形(由河道长度和宽度定义), 河道与邻近的坡面三角形共用一条边. 因此相邻关系中河道仅与左右

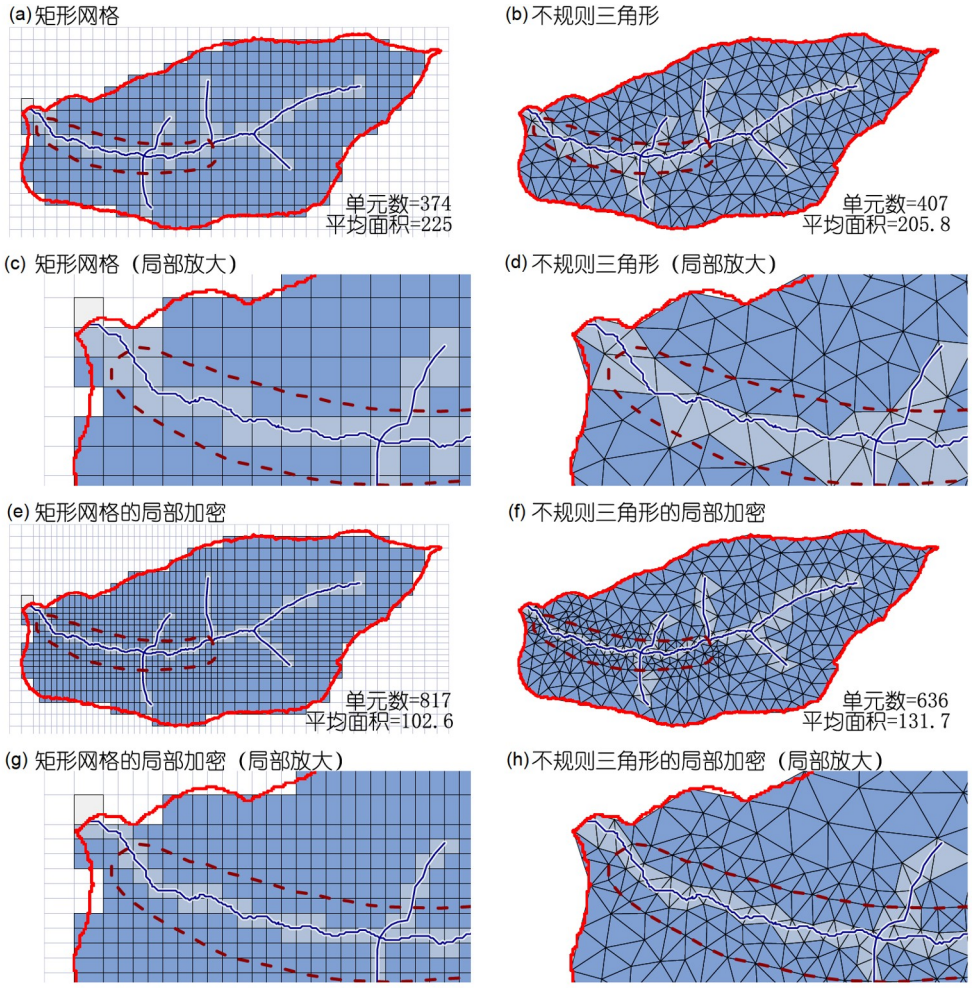


图 4　结构化和非结构化网格(不规则三角形)描述的流域、河流和流域边界差异

不规则三角形不仅在同分辨率下更好表现流域不规则边界, 同时在对模拟对象进行局部加密时能够不显著增加HCU总数

两个单元发生水量交换关系. 相邻关系的好处是空间关系简单, 且可计算河道水的左右来源. 但是相邻关系的缺点是: (1) 由于河道绵延曲折, 河岸三角形易出现大量钝角三角形; (2) 相邻关系决定了河道的精细程度与河道单元尺寸的关联关系, 当河道长度较小时, 河道附近单元也相应变小, 如果为计算量考虑减少坡面单元数量时, 必然要求过度简化河道; (3) 由于河道单元与左右两个坡面单元交互, 在河道起点处, 容易形成积水单元(Sink unit)——过多积水可能导致求解不稳定. 河道与坡面单元的相交关系可以避免以上的三种问题出现, 但是需要事先定义河道与坡面单元的空间拓扑关系, 并处理好河道地形与坡面地形之间的垂直方向对应关系. 使用相交关系形成的求解矩阵不再是有规律的对角线矩阵或稀疏矩阵, 给模型求解带来挑战.

3.5　其他

尽管是否开放源代码并非科学模型的关键特征, 但由于数值水文模型开发复杂度高, 是否开放源代码意味着用户能否了解其内部公式和求解过程, 同时开放源代码有利于用户了解和升级该模型, 也有利于与其他相关科学模型的耦合研究, 更能够提高模型试验的可重复性(Yu等, 2013, 2016). 非开源的模型往往在商业化方面获得成功, 如MIKE SHE和HydroGeoSphere. 当前数值水文模型无论在科研还是商业应用方面, 仍然由欧美发达国家引领.

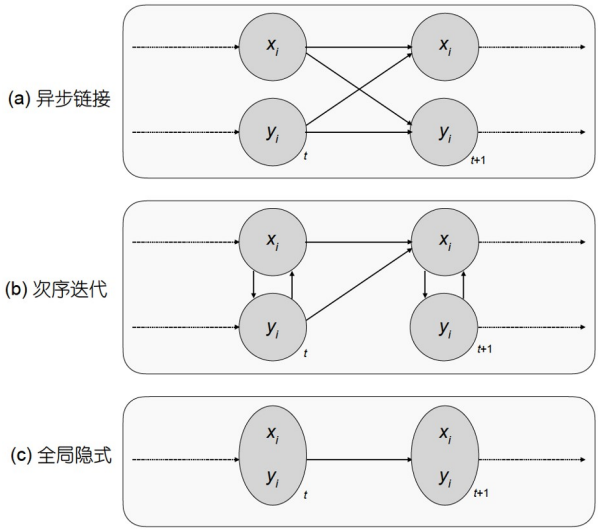


图 5　三种主要地表-地下变量的耦合计算以及变量传递方式的概念结构

图中变量x和y分别为地表和地下变量在t与t+1时刻的值

4　数值水文模型的特点

针对数值水文模型的特点总结是基于与其他非数值方法的水文模型进行的对比.

4.1　显著优势

(i) 强物理过程描述. 数值水文模型由物理公式(如达西-理查兹公式、圣维南方程、格林-安普特公式等)描述流域水文过程, 其参数多基于可测量水力学参数, 如土壤水力传导度、土壤孔隙度、地表粗糙度等. 数值水文模型利用基本物质和能量守恒原理描述来求解整体流域响应, 属于自下而上方法, 是对客观自然过程的数学描述; 即在流域物理过程和空间结构表达上, 物理性模型优于概念模型和集总式模型. 物理性的数值水文模型不仅有利于无径流观测流域的研究突破, 对于历史和气候条件下的水文研究也具有可靠物理意义(Abbott等, 1986; Vertessy等, 1993; Wagener等, 2004; Held和Soden, 2006; Todini, 2007; Milly等, 2008; Peel和McMahon, 2020). 集总式和半分布式模型中常用抽象参数表达重要的水文物理过程, 例如SWAT的产流过程由CN值(Curve Number)决定, CN值综合了土壤、土地利用、农业管理、坡度等多个水文信息(Bartlett等, 2016).

(ii) 高时间分辨率. 由于数值水文模型的高分辨率, 依据CFL条件限制, 其时间分辨率运行在秒至小时级别, 对于描述流域变化的快过程有显著优势, 例如描述洪水过境、洪水淹没以及水化学过程. 部分模型具有自适应时间步长——模型算法根据变化速度及系统收敛状况, 自动调整时间步长, 既显著提高模型整体运行效率, 又满足数值计算的收敛性要求. 数值水文模型的对比试验中, 由于其模拟对象尺度较小, 诸多模型的

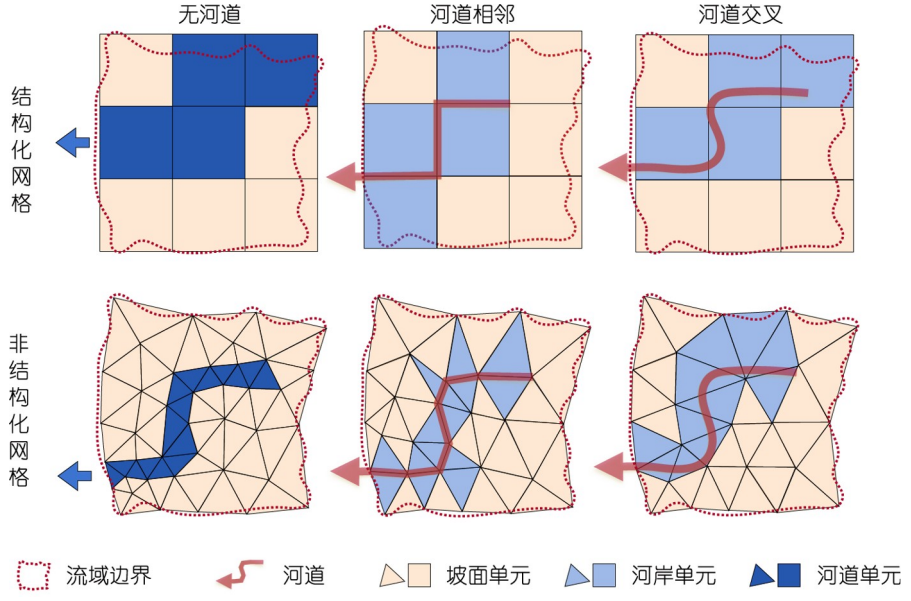


图 6　几种不同的河道与坡面HCU的空间拓扑关系

时间步长在0.001秒至30分钟之间(Kollet等, 2017).

(iii) 高空间分辨率与空间连续性. 高空间分辨率意味着模型可以更好表现流域空间异质性特征(McDonnell等, 2007; Maxwell和Kollet, 2008; Mirus等, 2011; Mascaro等, 2015; Fatichi等, 2016). 空间连续性表现为, 水文变量在较高分辨率的离散空间内的连续过程, 例如水沿着"山顶-半坡-坡底-河道-河流出口"地表或地下路径传播过程都可以在数值水文模型中进行跟踪. 与之对比, SWAT以水文响应单元为最小单位计算水的产汇流, 但无法描述水从HRU最远点到河流的过程, 因而也无法描述污染物在HRU内的传播路径.

(iv) 地表-地下过程耦合. 更真实地表述了地表-地下水的交互过程, 同时增强了模型在不同流域的通用性. 例如, 大部分概念性模型固定了地下水向河流的流向——坡面流向河道; 无法使用统一方法表达干旱地区河流在干旱季节渗漏补给地下水, 湿润季节地下水补给河流的过程. 数值水文模型的地表-地下紧耦合方法中, 地下水与河流交互方向由实时水力梯度决定, 即水可以双向流动. 传统的以子流域分割的水文模型中, 子流域的地下水直接贡献给其径流, 并演进至流域出口; 此方式在部分山区无法反映高山区地下水补给, 通过深层地下水路径补给给末端径流的过程, 而数值方法耦合地表-地下水文过程的模型则可胜任.

(v) 更可靠的气候变化与人类活动的水力学表达. 物理性模型天然具有表达环境动态演变的能力, 因为其基于物质和能量守恒定律, 而非一时一地的观测数据拟合关系(Fatichi等, 2016). 人类活动对流域水文循环的主要影响是: (1) 土地利用变化; (2) 水利工程; (3) 抽水与灌溉(Peters和Meybeck, 2000; Ntona等, 2022). 数值水文模型中通过蒸发、地表径流、植被物候规律以及土壤特性变化四个方面来体现土地利用, 有效地表达了土地利用的水力学特征(Shu等, 2020, 2024a; Ewen和Parkin, 1996). 对比SWAT模型, 其土地利用特征由CN值表达, CN值缺少足够物理性而难以测量; CN值同时包含土壤透水性和土地利用导致的粗糙度与不透水面积, 且难以表达物候特征, 因此模型结构的不确定性较大(Singh, 2018).

(vi) 可计算的空间变量多. 数值方法模型在水平和垂直方向进行空间划分, 因此总体HCU数量多, 形成三维的计算结果; 模拟产生的数据量远大于集总式和半分布式模型, 模型高分辨率输出有利于与观测对比, 也能更好地指导未来观测布设.

(vii) 利于学科模型紧密耦合. 由于数值水文模型物理机制明确、可计算变量丰富、满足守恒条件约束, 并且可以跟踪物质在空间的传输过程, 奠定了与其他学科模型深度耦合的理论基础(Ewen等, 2000; Fatichi等, 2016). 前文提到的空间连续性有利于多学科的耦合研究, 例如模型详细描述水从山坡汇流的路径, 方便进行陆面过程(Shi等, 2015; Kuffour等, 2020)、地球化学(Shi等, 2018)、污染物运动(Bao等, 2017; Li等, 2017)、农业经济(Cobourn等, 2018)、湖泊动态(Ladwig等, 2021; Shu等, 2024b)、土壤侵蚀及地貌变迁(Zhang等, 2016)、海岸带地下水交互(Yu等, 2021)和冰冻圈过程(冰川、冻土、积雪)(Endrizzi等, 2014)等方面的模型耦合. 典型的模型耦合案例包括CLM-PAWS(Shen等, 2013)、CLM-ParFlow(Kuffour等, 2020)、ATS(Painter等, 2016)、Flux-PIHM(Shi等, 2013)、LE-PIHM(Zhang等, 2016)、tRIBS-VEGGIE(Ivanov等, 2008)等.

4.2 限制因素

(i) 参数要求高. 参数要求高表现为数量多、可靠性要求高、物理性要求高, 调参难度大(Maxwell和Miller, 2005, Ampadu等, 2013). 集总式模型仅需要3~6个参数即可准确模拟"降水-径流"过程(Ye等, 1997; Perrin等, 2001; Wagener等, 2004; Beven, 2010, 2012; Peel和McMahon, 2020), 但数值水文模型由于其控制方程数量以及流域水文过程的复杂性导致其参数数量较多. 以水力传导度(Hydraulic conductivity, K)为例, 在SWAT等模型中只需要一个K值, 但是SHUD模型(Shu等, 2020)中至少需要三个K值, 即地表垂直入渗、地下垂直方向和地下水平方向三个K值; 当需要模拟多层地下水过程时, 则需要更多层三维方向的K值. SWAT利用CN表达了土壤水力特征、土地利用特征和农业管理, 但数值水文模型通常需要超过10个参数表达以上特征. 数值水文模型中的参数通常具有具体的物理意义, 且参数敏感性强, 因此参数的可靠性直接决定模拟结果的优劣. 物理参数值的变化范围被限定在特定范围内, 并且由于其参数数量大增加了调参难度(Vertessy等, 1993; Anderman和Hill, 1999; Sivapalan, 2003; McDonnell等, 2007; Keating等, 2010; Fatichi等, 2016); 无法避免参数数量增多带来的异参同效(Equa-

finality)问题和参数不确定性问题(Savenije, 2001; Beven和Freer, 2001; Ebel和Loague, 2006; 李新, 2013).

(ii) 运行效率不高. 数值水文模型的高时空分辨率优势伴随着计算效率低的劣势; 其计算效率显著低于建立于天尺度的"降水-径流"模型. 计算效率低的主要原因有三个: (1) HCU数量多、分辨率高; (2) 计算时间步长小; (3) 求解方法复杂, 模型需要迭代寻找可收敛的时间步长. 计算效率限制了模型的应用范围, 当前典型应用范围在10^{-6}~10^{6}km^2(Maxwell等, 2014; Paniconi和Putti, 2015; Kollet等, 2017). 通过并行计算提高求解效率是模型应用方面的重要挑战; 现有的数值水文模型都有相应的并行化方案, 但计算效率尚不能满足大范围长时序模拟需求. 数值水文模型并行化的难点在于: 模型HCU空间上有直接的相关性, 因此如何对空间单元进行并行分组是首要挑战; 其次, 分组后的组内单元计算依赖该时间步长的另一组单元变量值, 甚至需要相互迭代, 因此要求每时间步长不同组变量同步. 并行计算中数据同步时间在计算时长占比较高, 因而调高数据同步的时间步长是推进并行化计算的重要技术策略.

(iii) 建模过程复杂. 表现为: (1) 水平空间分割复杂, 水平空间的分割常见为规则(规则化四边形、三角形、六边形)或不规则分割(三角形、四边形或混合性质); (2) 垂直空间分割复杂, 包含固定距离分割、水文特征分割或动态分割等; (3) 空间拓扑关系复杂, 主要是指不同HCU间的耦合关系, 包括陆面过程与水文过程的交互关系、显式河道与坡面单元的交互关系等.

(iv) 开发难度大. 数值水文模型涉及的物理过程众多、数学求解难度大、参数众多、计算资源要求高、模型调试复杂等特点, 使得其开发难度大. 现有数值水文模型大多都是多人团队经过多年开发方成形. 例如SHUD模型, 纵使有PIHM从2004~2020年共17年的研究积累, SHUD依然经历6年开发历程(见 https://github.com/shud-system/shud); 从ParFlow在github(https://github.com/parflow/parflow)上的开发历史分析, 其团队三位科学家研究6年后发布了ParFlow第一版本, 其后陆续发布了更新版本, 合作团队包括美国普林斯顿大学、科罗拉多矿业大学、华盛顿州立大学、雪城大学、劳伦斯-利佛摩国家实验室, 德国的伯恩大学、于利希研究中心、地球系统超算中心, 法国地球环境研究所等多家实力雄厚的大学和研究机构(见https://parflow.org/#team), 足见其研究的重要性和研发难度.

4.3 模型时空尺度问题

水文模型的尺度问题一直是关键和待解决的问题. Blöschl等(2019)列举了"水文学的23个未解难题", 多个议题涉及水文规律和模型的尺度问题, 同时包含空间参数及水文响应的空间异质性. 尽管自然水循环的研究尺度横跨从分子到星球尺度(10^{-2}~10^{7}m)(Dooge, 1988), 实际的水文学研究, 特别是水文模型, 主要关注10^{-2}~10^{7}m的范围.

水文模型的空间尺度主要有两种解读: (1) 粒度(Grain)或空间分辨率, 即针对某特定空间区域或单位观察、总结或计算的水文规律或参数. 例如, 图2中描述了水文模型的基本计算单位和覆盖面积(Blöschl, 1999; Hrachowitz和Clark, 2017), 此处讨论的尺度为粒度. (2) 幅度(Extent), 即研究对象的空间延伸, 可表述为大尺度研究区域或小尺度研究区域(Becker, 1992; 苏凤阁, 2001; 高红凯和赵舫, 2020; 苟娇娇等, 2022). 这种分类常涉及坡度、流域、大洲等尺度, 但其HCU的面积实际上存在明显差异.

粒度不可避免地导致单元内部的空间异质性、最优单元分辨率和参数代表性问题. 事实上, 不存在一个完美的单元(Blöschl, 1999). 如数值水文模型的HCU往往是面积较小的单元, 这主要是因为它们所依赖的公式(如达西-理查兹公式和圣维南方程)均源于实验室或理想坡面的观测和理论. 随着HCU的面积增大, 与其所依赖的物理公式的距离也变得更远, 导致其更趋向于基于概念或统计拟合的模拟框架. 数值水文模型试图通过整合小尺度的物理公式来模拟流域乃至星球范围的水文循环. 在基本HCU内, 模型使用单一的水文参数, 因此, 流域的空间异质性使用HCU之间的参数差异来表达. 例如, 每个HCU具有一个土壤水力传导度(K)值, 而流域内的n个HCU则有n个K值. 理论上, 每个HCU的K值应该代表该HCU的真实土壤水力传导度, 但由于HCU的面积远大于采样点的面积, 所得K值与HCU内不同位置测得的K值并不一致. 然而, 模型在实际应用中展示的空间趋势在很大程度上可以通过这种简化的取值方法来表示, 例如流域上下游之间多个HCU的K值分布与实际上下游土壤水力传导度趋势基本一致(Yu等, 2014). 为了保留参数的空间异质性, 数

值水文模型的参数仍需要优化.

尽管野外水文观测往往基于特定的局部点进行, 但其得到的数据反映了较大流域的水文响应特征. 如流域出口的水文观测, 尽管这一观测点仅位于流域出口的数平米区域, 但所测数据, 如水位、流量、泥沙含量等, 实际上反映的是上游各个贡献区域众多地表与地下水文过程的综合效应. 而真正的小尺度观测, 往往针对完全封闭且可控的水文过程, 如实验室内对饱和土壤水动态的达西试验, 以及控制水头的饱和和非饱和土壤水分运动的Vauclin试验(Vauclin等, 1979). 基于大尺度观测得到的降水与产流关系, 如超渗产流与饱和产流, 常基于概念化公式或实验性曲线进行拟合. 而小尺度的水文过程描述更倾向于采用物理性更强的公式, 如圣维南方程、曼宁公式、达西-理查兹公式和格林-安普特公式等.

数值水文模型应用案例的面积跨度较大. 数值水文模型测试和发布时, 常模拟V-Catchment、Vauclin试验和不透水板试验(Slab test case)来检验其模型算法(面积10^0~10^3 m^2), 然后在小流域开展模拟验证(约10^4~10^8 m^2), 模型的应用范围覆盖流域、国家至大洲范围(Kollet和Maxwell, 2006; Shen和Phanikumar, 2010; Paniconi和Putti, 2015; Shu等, 2020; Chen等, 2023). 从理论上讲, 基于物理原理构建的数值水文模型不应受到区域范围的限制. 在实际应用中, 其限制主要源于数据的可用性和计算资源. 随着全球基础地理数据的增长, 数据的限制已经大大减少(Shu等, 2024a), 数值水文模型最大的挑战主要来自计算资源与模型算法的求解效率.

时间的分辨率以及时间跨度范围也是应用水文模型需要考虑的因素之一. 数值水文模型的时间分辨率或时间步长受CFL条件的限制, 并根据空间分辨率和流动速率来确定. 因此, 大部分数值水文模型并没有固定的计算时间步长, 而是根据特定计算变量是否满足CFL条件或误差是否在给定步长下收敛来动态调整. 通常, 空间分辨率越细、变量变化速率越高, 实际计算的步长就越小. 数值水文模型不仅可以针对特定水文事件进行短期模拟分析, 还可广泛应用于长期的水资源管理和应对气候变化研究.

数值水文模型对驱动数据的时间分辨率非常敏感. 模型中产流过程由地表圣维南方程决定的水平流动过程和达西定律决定的下渗过程共同决定, 降雨强度显著影响水平流动和下渗过程的水量分配比例. 例如, 逐日数据中24mm d^{-1}, 在模型无法将其不均匀分配在24h间隔上, 因此采用平均值1mm h^{-1}(24mm 24h^{-1}), 或0.167mm min^{-1}. 日分辨率上的降雨强度平均分配在小时或分钟分辨率上, 导致高时间分辨率上的降雨强度显著降低, 直接影响产流量. 降雨之外的辐射、温度、风速等气象要素也存在类似的分辨率要求. 因此, 数值水文模型通常要求天以上时间分辨率的气象驱动数据方可满足其理论和实际要求.

4.4　不确定性与参数率定

不确定性问题是长期萦绕水文研究的重大问题, 直接影响模型的适用性和结果可信度, 但当前尚无确定的结论(Beven和Binley, 1992; Georgakakos等, 2004; Beven, 2006; Montanari, 2007; Pechlivanidis等, 2011). 水文模型的不确定性表现为数据、模型物理过程、参数和初始条件的不确定性(Refsgaard等, 2006; Clark等, 2016). 水文模型依赖于降水、温度、土壤湿度和径流量等数据, 数据的测量误差、数据处理误差和时空变异性都会造成数据的不确定性. 模型结构不确定性, 源于模型的简化和假设; 任何模型都无法完全捕捉到自然系统的复杂性, 从而导致结构的不确定性. 例如模型对冰冻圈(冰川、积雪和冻土)过程的简化和省略, 导致模型无法准确反映高寒区流域水文过程. 初始条件引入的不确定性通常经过一定模拟时间后能够消除, 这段模拟时间称为模型预热期. 当前缺乏对预热期长度估算的可靠算法, 研究中采用个人经验或寻找某一变量进入稳定态的时间作为预热期(Bernsen等, 2008; Rahman和Lu, 2015; Seck等, 2015; Kim等, 2018).

参数不确定性表现为异参同效现象, 指在可接受的模拟精度阈值上, 多个不同的参数组合可得到相似的模拟效果, 但并非每组参数都能反映实际的水文过程(Beven和Freer, 2001; Savenije, 2001; Todini, 2007; McDonnell等, 2007; Zehe等, 2014). 数值水文模型的参数不确定性问题显著, 主要原因是其参数众多, 参数维度大(Orth等, 2015), 通过参数优化方法, 不同的参数组合模拟的结果总是能接近观测. 参数优化目标通常针对单一变量(如出口径流); 采用高时空分辨率的多个观测变量作为参数优化目标, 可以有效降低参数不确定性(Aubert等, 2003; Camporese等, 2009; Shi等, 2013). 数值水文模型相比传统水文模型, 可模拟的变

量更多, 时空分辨率更高, 因此多变量参数优化变为可能(Maxwell等, 2015; Hrachowitz和Clark, 2017).

在模型参数率定(参数优化)过程中, 敏感参数、率定方法、目标函数的选择都直接影响结果, 并导致不同的误差和不确定性(Madsen等, 2002; Cuntz等, 2015; Flipo等, 2023). 数值水文模型可调节参数的数量众多, 同时参数与评价模型的目标函数间具有非线性关系, 导致无法通过人工参数调节实现率定, 因此自动化参数优化几乎是唯一可行方案. 有效参数在参数空间内分布不均和参数间存在复杂非线性关系, 同时受数值水文模型运行效率限制, 一般参数枚举和蒙特卡洛采样的计算效率低, 并容易困于局部最优解, 因此实践中常使用遗传优化算法(Vrugt等, 2003; Tolson和Shoemaker, 2007; Shen和Phanikumar, 2010; Razavi和Tolson, 2013; Shi等, 2014; Yu等, 2014; Hansen, 2016).

5 展望

5.1 通用数据集

当需要复杂模型及高时空表现能力时, 建模者对数据资源的需求也会相应增加. 数值水文模型需要在实践中证明其在不同流域、气候和人类活动背景下的适应性, 才能凸显其物理性结构的优势, 因而需要模型在全球任意流域做大量测试, 但模型数据制备是阻碍模型应用的瓶颈, 因此建立通用模型数据和数据准备工具对模型发展与应用都有实用价值(Leonard和Duffy, 2013; Li等, 2021; Ntona等, 2022). 建立通用数据集首先需厘清构建水文模型所需关键数据. 水文模拟所需的三组关键数据为: (1) 流域地理特征, 包括流域边界、高程、坡度、河网等; (2) 土壤、地质和土地利用数据, 及其物理性参数, 如土壤水力学参数、不透水面积、粗糙度等; (3) 气象驱动数据, 包括降水, 以及驱动能量传递和蒸散发过程的温度、风速、湿度、气压和辐射等(Leonard和Duffy, 2013; Peckham等, 2017; Ntona等, 2022).

建立一个提供这三组关键数据的公共服务平台, 不仅降低了水文模型学习、研究和推广的门槛, 同时也便于科学家进行大量可重复、交叉比较试验. 美国国防部高级研究计划局的Model Integration(MINT)项目在私有服务器上建立了全球数据集, 可实现全球任意流域快速、过程可重复的模型部署, 但其服务尚未对外开放(Garijo等, 2019; Gil等, 2021). HydroTerre (https://hydroterre.psu.edu)是水文模型通用数据平台, 但现阶段仅支持美国本土范围HUC12(Hydrological Unit Code level 12)级别(平均面积约100km^2)的数据共享服务(Leonard和Duffy, 2013). 全球数据云平台(Global Hydrologic Data Cloud, https://ghdc.ac.cn/)可为全球绝大部分流域提供模型部署所需基础数据, 并制备指定模型的输入文件(Shu等, 2024a).

除数据平台规划和建设的挑战外, 数据可用性也是建设公用数据平台的障碍. 数据可用性包含两层含义: (1) 数据是否存在或者数据质量是否能满足需求; (2) 数据是否开放获取, 或允许再发布. 当前全球流域边界分级和河网数据存在前一问题, 即数据匮乏或质量不高; 包括HydroSheds、MeritHydro等全球数据, 尚不足以支撑快速模型部署的质量要求. 部分全球数据(例如, ASTER GDEM、USGS Global Land Cover、SoilGrids、GLDAS、FLDAS等)使用公用协议(Public Domain), 允许任何数据平台的数据再组织和再发布, 但仍有部分数据使用私有协议, 限制了其原创平台之外的数据共享. 例如, 中国气象数据网CLDAS(http://data.cma.cn)和中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)中大量数据集明确禁止其网站以外的数据分享或再发布.

5.2 多过程耦合

当前数值水文模型的主要关注点依然是“降水-径流”过程, 对蒸散发、植被动态、温度/能量时空分布、冰川-积雪-冻土等直接影响水分运移的过程表达仍以松散耦合为主. 潜在蒸散发计算常采用彭曼-蒙蒂斯公式, 然后乘以土壤水分含量计算出的水分胁迫系数获得实际蒸散发. 植被物候通过叶面积指数、气孔导度、根系深度等参数的时间序列, 单向影响水文过程, 而土壤水分等变化无法反馈给植物生长状态. 冰川和积雪过程以度日模型为主, 冰雪融化在模型计算中视为额外的地表边界条件或降水. 由于缺乏对温度和能量的耦合计算, 在高寒冻土区, 模型无法反映土壤冻结和融化过程对水文过程的影响(王磊等, 2014; Sun等, 2019, 2023). 当前陆面过程模型以上过程的刻画较为详细, 因此数值水文模型可与之耦合, 提高对能量、水分相变和植被动态过程的刻画.

5.3　多学科耦合

物质和能量本身没有边界，不同学科模型针对不同过程，但又相互交叉，模型隔离现象是由于学科划分以及科学问题导致. 当前面临快速人类活动以及气候变化挑战，系统化展现人类活动和自然过程的协同作用的影响必然需要模型间耦合，以实现对物质能量的运动规律的合理、完备、系统化的数学描述(Wagener等, 2010; Clark等, 2015). 黑河综合遥感联合试验说明流域水循环是一个涵盖水文、气象、冰冻圈、地貌、生态、人类活动的“错综复杂、层层交叠、相互交织、无穷无尽”的复杂巨系统(程国栋和李新, 2015; 李新等, 2023).

气象、陆面过程、冰冻圈、农业、生态、环境、地貌、海洋等学科的模型模块耦合研究发展迅速，例如数值水文模型与滑坡(Simoni等, 2008)、植被生态(Bertoldi等, 2010; Chiesa等, 2014)、海水入侵(Mazzia和Putti, 2005; Povich等, 2013; Yu等, 2021)、冰冻圈过程(Dall'Amico, 2010; Dall'Amico等, 2011; Endrizzi等, 2014; Painter等, 2013, 2016)等的耦合研究取得显著进展. Maxwell和Condon(2016)通过耦合ParFlow和CLM模型揭示了地下水侧向流强烈影响大尺度蒸散发. 美国MINT计划建立了自动化模型耦合框架，将水文模型(SHUD和TopoFlow模型)(Peckham等, 2017)、农业模型、经济模型进行耦合，以应对气候变化引发的自然和社会经济风险，为政府决策提供快速响应和支持(Garijo等, 2019; Gil等, 2021). WRF-Hydro系统(Gochis等, 2018)成功地松散耦合了气象(WRF), 陆面过程(NOAH)和水文(Hydro)模型，实现了地球系统中能量和水的模拟，但是其水文模型仍有进步空间. 黑河遥感试验不仅研发了HEIFLOW、GBEHM等关注“水土气生人”的耦合模型(李新等, 2010; Yang等, 2015; Tian等, 2015, 2018; Li等, 2018), 还研发了降水、积雪、蒸散发、土壤水分、净初级生产力等流域高分辨率生态水文产品，全面应用于流域生态水文关键过程研究和模型发展与验证，揭示了黑河流域复杂水文循环过程(李新等, 2012, 2023).

5.4　模型测试与对比

当前数值水文模型已初具规模，模型在底层设计、数学方法、求解算法上各有不同，但是缺乏针对性和系统性的模型间对比. 本文从典型数值水文模型的设计、结构做了技术层面对比，但与传统水文模型间对比研究相比(Maxwell等, 2014; Paniconi和Putti, 2015; Kollet等, 2017; Newman等, 2017; Haque等, 2021)依然不足.

基准测试(Benchmarking)是模型间对比的起点, 近年来也受到关注(Woods等, 2003, Sebben等, 2013; Smith等, 2004; Nearing和Gupta, 2015; Newman等, 2017). 多个数值水文模型(例如，SHUD、Parflow、PAWS)的描述文章发表时使用若干理想化试验，包括V形流域、Vauclin等(1979)、低透水面试验(Slab test case)等(Kollet和Maxwell, 2006; Paniconi和Putti, 2015). 模型的描述文章(例如Kumar等, 2009; Shen和Phanikumar, 2010; Shu等, 2020)对比了不同模型在地表水和地下水过程的解析解和实验室观测结果，有效证明了模型的能力.

几个重要数值水文模型间对比，发现对比的模型皆可胜任试验所设计的任务；在简单模拟任务上，模型间差异小于5%；但对于复杂水文过程(如地表-地下交互强烈、空间异质性强、地下水快速变化等), 各模型结果差异显著(Maxwell等, 2014; Kollet等, 2017; Tijerina-Kreuzer等, 2021). 初步模型间对比认为, 模型并无显著优劣之分. 该研究仅仅针对理论性和理想化试验，缺乏针对真实流域模拟效果的对比研究；且对比对象仅限于地表和地下水文变量间对比，未对蒸散发、基流分割等等更多水文过程中的变量做对比. 真实流域数据对比应包含径流、空间上的土壤水、地下水、蒸散发等要素的观测与模拟结果对比. 数值水文模型能够得出高时空分辨率的水文变量，因此模型结果与观测的对比复杂多样，涉及不同时空尺度的数据对比. 可靠模型间对比更加需要通用数据集提供数据支撑.

6　结论

本文在总结数值水文模型理论的基础上，系统对比分析了不同数值水文模型的计算方法、地表地下过程耦合方式, 重点评述了数值水文模型的特点, 厘清不同数值水文模型的优缺点，以期对当前数值水文模型未来发展方向提供研究思路和方法参考.

数值水文模型以微观尺度的守恒原理和物理公式为基础, 利用数值方法将地表和地下水流进行耦合计算, 从而模拟流域的宏观水文响应过程. 其主要优势是: 强物理过程描述、高时间分辨率、高空间分辨率与空间连续性、地表-地下过程耦合、合理人类活动的水力学表达、丰富的计算变量、利于学科模型紧密耦合; 其当前发展的限制因素为: 参数要求高、参数不确定性、运行效率低、建模过程复杂、开发难度大. 数值水文模型的研究应当关注通用数据集建设、多过程耦合、多学科交叉, 并进一步提高计算性能, 扩展应用范围.

地表-地下过程耦合的数值水文模型研究是水文模型发展的前沿和主流方向之一, 也“是不容错过的机遇”(O’Connell和Todini, 1996; Peel和McMahon, 2020). 受制于代码开源、数据制备、全球适应性验证等限制, 国产数值水文模型工作尚未展示出足够的科学影响力. 科学社区应在支持新模型研发的同时, 加强已有数值水文模型在全球的验证、推广和改进工作, 不仅实践中给科学研究和工程应用提供支撑, 也能够提升对自然水循环的理解(舒乐乐等, 2022).

任何或复杂或简单的模型的开发都服务于特定的物理过程预测, 并携带自身优缺点. 本文讨论的关注点依然是流域尺度上以“降水-径流”为核心科学问题的水文模型范畴, 未对地貌演变、土壤侵蚀、水沙运移、溶质运移/反应、水热运移/相变、气候变化等流域水循环相关问题展开讨论.

参考文献

程国栋, 李新. 2015. 流域科学及其集成研究方法. 中国科学: 地球科学, 45: 811–819

高红凯, 赵舫. 2020. 全球尺度水文模型: 机遇、挑战与展望. 冰川冻土, 42: 224–233

苟娇娇, 缪驰远, 徐宗学, 段青云. 2022. 大尺度水文模型参数不确定性分析的挑战与综合研究框架. 水科学进展, 33: 327–335

胡立堂, 王忠静, 赵建世, 马义华. 2007. 地表水和地下水相互作用及集成模型研究. 水利学报, 38: 54–59

李新. 2013. 陆地表层系统模拟和观测的不确定性及其控制. 中国科学: 地球科学, 43: 1735–1742

李新, 程国栋, 康尔泗, 徐中民, 南卓铜, 周剑, 韩旭军, 王书功. 2010. 数字黑河的思考与实践3: 模型集成. 地球科学进展, 25: 851–865

李新, 李小文, 李增元. 2012. 黑河综合遥感联合试验研究进展: 概述. 遥感技术与应用, 27: 637–649

李新, 刘绍民, 柳钦火, 肖青, 车涛, 马明国, 晋锐, 冉有华, 闻建光, 徐自为, 李增元. 2023. 黑河遥感试验: 回顾与展望. 遥感学报, 27: 224–248

任立良, 刘新仁, 郝振纯. 1996. 水文尺度若干问题研究述评. 水科学进展, 7: 87–99

任立良, 江善虎, 袁飞, 雍斌, 龚露燕, 袁山水. 2011. 水文学方法的演进与诠释. 水科学进展2, 22: 586–592

舒乐乐, 常燕, 王建, 陈昊, 李照国, 赵林, 孟宪红. 2022. SHUD数值方法分布式水文模型介绍. 地球科学进展, 37: 680–691

束龙仓, 宫荣, 栾佳文, 龚建师, 陶小虎, 赵贵章, 陶月赞. 2022. 地下水与地表水水量交换识别及交换量计算——以新汴河宿州段为例. 水科学进展, 33: 57–67

苏凤阁. 2001. 大尺度水文模型及其与陆面模式的耦合研究. 博士学位论文. 江苏: 河海大学. 1–122

汤秋鸿, 刘星才, 李哲, 运晓博, 张学君, 于强, 李俊, 张永勇, 崔惠娟, 孙思奥, 张弛, 唐寅, 冷国勇. 2019. 陆地水循环过程的综合集成与模拟. 地球科学进展, 34: 115–123

王磊, 李秀萍, 周璟, 刘文彬, 阳坤. 2014. 青藏高原水文模拟的现状及未来. 地球科学进展, 29: 674–682

王蕊, 王中根, 夏军. 2008. 地表水和地下水耦合模型研究进展. 地理科学进展, 27: 37–41

王文科, 李俊亭, 王钊, 冯西洲, 徐敏, 王文明, 杨丽君. 2007. 河流与地下水关系的演化及若干科学问题, 吉林大学学报(地球科学版), 37: 231–238.

徐宗学. 2010. 水文模型: 回顾与展望. 北京师范大学学报(自然科学版), 46: 278–289

杨大文, 徐宗学, 李哲, 袁星, 王磊, 缪驰远, 田富强, 田立德, 龙笛, 汤秋鸿, 刘星才, 张学君. 2018. 水文学研究进展与展望. 地理科学进展, 37: 36–45

赵人俊, 王佩兰. 1988. 新安江模型参数的分析. 水文, 6: 2–9

Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, O’Connell P E, Rasmussen J. 1986. An introduction to the European hydrological system—Systeme hydrologique Europeen, “SHE”, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. J Hydrol, 87: 61–77

Ampadu B, Chappell N A, Kasei R A. 2013. Rainfall-riverflow modelling approaches: Making a choice of data-based mechanistic modelling approach for data limited catchments: A review. Can J Pure Appl Sci, 7: 2571–2580

Anderman E R, Hill M C. 1999. A new multistage groundwater transport inverse method: Presentation, evaluation, and implications. Water Resour Res, 35: 1053–1063

Aquanty I. 2013. HydroGeoSphere User Manual

Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. J Am Water Resour Assoc, 34: 73–89

Aubert D, Loumagne C, Oudin L. 2003. Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall-runoff model. J Hydrol, 280: 145–161

Bao C, Li L, Shi Y, Duffy C. 2017. Understanding watershed hydrogeochemistry: 1. Development of RT-Flux-PIHM. Water Resour Res, 53: 2328–2345

Bartlett M S, Parolari A J, McDonnell J J, Porporato A. 2016. Beyond the SCS-CN method: A theoretical framework for spatially lumped rainfall-runoff response. Water Resour Res, 52: 4608–4627

Becker A. 1992. Criteria for a hydrologically sound structuring of large scale land surface process models. In: O'Kane J. P, ed. Advances in Theoretical Hydrology. Amsterdam: Elsevier. 97–111

Bergström S. 1992. The HBV model—Its structure and applications. In: SMHI Reports Hydrology no 4. 33

Bernsen E, Dijkstra H A, Wubs F W. 2008. A method to reduce the spin-up time of ocean models. Ocean Model, 20: 380–392

Bertoldi G, Notarnicola C, Leitinger G, Endrizzi S, Zebisch M, Della Chiesa S, Tappeiner U. 2010. Topographical and ecohydrological controls on land surface temperature in an alpine catchment. Ecohydrology, 3: 189–204

Beven K. 1989. Changing ideas in hydrology—The case of physically-based models. J Hydrol, 105: 157–172

Beven K. 2006. On undermining the science? Hydrol Process, 20: 3141–3146

Beven K J. 2010. Preferential flows and travel time distributions: Defining adequate hypothesis tests for hydrological process models. Hydrol Process, 24: 1537–1547

Beven K. 2012. Rainfall-Runoff Modelling. Hoboken: Wiley. 472

Beven K J, Kirkby M J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. Hydrological Sci Bull, 24: 43–69

Beven K, Binley A. 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrol Process, 6: 279–298

Beven K, Freer J. 2001. A dynamic TOPMODEL. Hydrol Process, 15: 1993–2011

Bixio A C, Gambolati G, Paniconi C, Putti M, Shestopalov V M, Bublias V N, Bohuslavsky A S, Kasteltseva N B, Rudenko Y F. 2002. Modeling groundwater-surface water interactions including effects of morphogenetic depressions in the Chernobyl exclusion zone. Env Geol, 42: 162–177

Blöschl G. 1999. Scaling issues in snow hydrology. Hydrol Process, 13: 2149–2175

Blöschl G, Grayson R B, Sivapalan M. 1995. On the representative elementary area (REA) concept and its utility for distributed rainfall-runoff modelling. Hydrol Process, 9: 313–330

Blöschl G, Bierkens M F P, Chambel A, Cudennec C, Destouni G, Fiori A, Kirchner J W, McDonnell J J, Savenije H H G, Sivapalan M, et al.2019. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—A community perspective. Hydrological Sci J, 64: 1141–1158

Burnash R J, Singh V. 1995. The NWS River Forecast System-catchment modeling. In: Singh V P. ed. Computer Models of Watershed Hydrology. Colorado: Water Resources Publications. 311–366

Camporese M, Paniconi C, Putti M, Salandin P. 2009. Ensemble Kalman filter data assimilation for a process-based catchment scale model of surface and subsurface flow. Water Resour Res, 45: 1–4

Camporese M, Paniconi C, Putti M, Orlandini S. 2010. Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data. Water Resour Res, 46: 737–744

Chen X, Yu Z, Yi P, Aldahan A, Hwang H T, Sudicky E A. 2023. Disentangling runoff generation mechanisms: Combining isotope tracing with integrated surface/subsurface simulation. J Hydrol, 617: 129149

Chiesa S D, Bertoldi G, Niedrist G, Obojes N, Endrizzi S, Albertson J D, Wohlfahrt G, Hörtnagl L, Tappeiner U. 2014. Modelling changes in grassland hydrological cycling along an elevational gradient in the Alps. Ecohydrology, 7: 1453–1473

Clark M P, Kavetski D, Fenicia F. 2011. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. Water Resour Res, 47: W09301

Clark M P, Fan Y, Lawrence D M, Adam J C, Bolster D, Gochis D J, Hooper R P, Kumar M, Leung L R, Mackay D S, Maxwell R M, Shen C, Swenson S C, Zeng X. 2015. Improving the representation of hydrologic processes in Earth System Models. Water Resour Res, 51: 5929–5956

Clark M P, Schaefli B, Schymanski S J, Samaniego L, Luce C H, Jackson B M, Freer J E, Arnold J R, Moore R D, Istanbulluoglu E, Ceola S. 2016. Improving the theoretical underpinnings of process-based hydrologic models. Water Resour Res, 52: 2350–2365

Clark M P, Bierkens M F P, Samaniego L, Woods R A, Uijlenhoet R, Bennett K E, Pauwels V R N, Cai X, Wood A W, Peters-Lidard C D. 2017. The evolution of process-based hydrologic models: Historical challenges and the collective quest for physical realism. Hydrol Earth Syst Sci, 21: 3427–3440

Cobourn K M, Carey C C, Boyle K J, Duffy C, Dugan H A, Farrell K J, Fitchett L, Hanson P C, Hart J A, Henson V R, Hetherington A L, Kemanian A R, Rudstam L G, Shu L, Soranno P A, Sorice M G, Stachelek J, Ward N K, Weathers K C, Weng W, Zhang Y. 2018. From concept to practice to policy: Modeling coupled natural and human systems in lake catchments. Ecosphere, 9: e02209

Cooley R L. 1971. A finite difference method for unsteady flow in variably saturated porous media: Application to a single pumping well. Water Resour Res, 7: 1607–1625

Courant R, Friedrichs K, Lewy H. 1928. Über die partiellen differenzengleichungen der mathematischen physik. Math Ann, 100: 32–74

Cuntz M, Mai J, Zink M, Thober S, Kumar R, Schäfer D, Schrön M, Craven J, Rakovec O, Spieler D, Prykhodko V, Dalmasso G, Musuuza J, Langenberg B, Attinger S, Samaniego L. 2015. Computationally inexpensive identification of noninformative model parameters by sequential screening. Water Resour Res, 51: 6417–6441

Dall'Amico M. 2010. Coupled water and heat transfer in permafrost modeling. Dissertation for Doctoral Degree. Trento: University of Trento

Dall'Amico M, Endrizzi S, Gruber S, Rigon R. 2011. A robust and energy-conserving model of freezing variably-saturated soil. Cryosphere, 5: 469–484

Delfs J O, Blumensaat F, Wang W, Krebs P, Kolditz O. 2012. Coupling hydrogeological with surface runoff model in a Poltva case study in Western Ukraine. Environ Earth Sci, 65: 1439–1457

Delfs J O, Park C H, Kolditz O, Kalbus E. 2009. A physically based model concept for transport modelling in coupled hydrosystems. Grundwasser, 14: 219–235

Dooge J C I. 1988. Hydrology past and present. J Hydraulic Res, 26: 5–26

Duffy C J. 2017. The terrestrial hydrologic cycle: An historical sense of balance. WIREs Water, 4: e1216

Ebel B A, Loague K. 2006. Physics-based hydrologic-response simulation: Seeing through the fog of equifinality. Hydrol Process, 20: 2887–2900

Endrizzi S, Gruber S, Dall'Amico M, Rigon R. 2014. GEOtop 2.0: Simulating the combined energy and water balance at and below the land surface accounting for soil freezing, snow cover and terrain effects. Geosci Model Dev, 7: 2831–2857

Ewen J, Parkin G. 1996. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 1. Method. J Hydrol, 175: 583–594

Ewen J, Parkin G, O'Connell P E. 2000. SHETRAN: Distributed river basin flow and transport modeling system. J Hydrol Eng, 5: 250–258

Farthing M W, Ogden F L. 2017. Numerical solution of Richards' equation: A review of advances and challenges. Soil Sci Soc Amer J, 81: 1257–1269

Fatichi S, Vivoni E R, Ogden F L, Ivanov V Y, Mirus B, Gochis D, Downer C W, Camporese M, Davison J H, Ebel B, Jones N, Kim J, Mascaro G, Niswonger R, Restrepo P, Rigon R, Shen C, Sulis M, Tarboton D. 2016. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. J Hydrol, 537: 45–60

Fenicia F, Kavetski D, Savenije H H G. 2011. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development. Water Resour Res, 47: 1–3

Flipo N, Gallois N, Schuite J. 2023. Regional coupled surface-subsurface hydrological model fitting based on a spatially distributed minimalist reduction of frequency domain discharge data. Geosci Model Dev, 16: 353–381

Franchini M, Pacciani M. 1991. Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models. J Hydrol, 122: 161–219

Freeze R A, Harlan R L. 1969. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. J Hydrol, 9: 237–258

Furman A. 2008. Modeling coupled surface-subsurface flow processes: A review. Vadose Zone J, 7: 741–756

Garijo D, Khider D, Ratnakar V, Gil Y, Deelman E, Ferreira da Silva R, Knoblock C, Chiang Y, Pham M, Pujara J, Vu B, Feldman D, Mayani R, Cobourn K, Duffy C, Kemanian A, Shu L, Kumar V, Khandelwal A, Tayal K, Peckham S, Stoica M, Dabrowski A, Hardesty-Lewis D, Pierce S. 2019. An intelligent interface for integrating climate, hydrology, agriculture, and socioeconomic models. Marina del Ray: Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces: Companion. 111–112

Georgakakos K P, Seo D J, Gupta H, Schaake J, Butts M B. 2004. Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty through multimodel ensembles. J Hydrol, 298: 222–241

Gharari S, Hrachowitz M, Fenicia F, Gao H, Savenije H H G. 2014. Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration. Hydrol Earth Syst Sci, 18: 4839–4859

Gil Y, Garijo D, Khider D, Knoblock C A, Ratnakar V, Osorio M, Vargas H, Pham M, Pujara J, Shbita B, Vu B, Chiang Y Y, Feldman D, Lin Y, Song H, Kumar V, Khandelwal A, Steinbach M, Tayal K, Xu S, Pierce S A, Pearson L, Hardesty-Lewis D, Deelman E, Silva R F D, Mayani R, Kemanian A R, Shi Y, Leonard L, Peckham S, Stoica M, Cobourn K, Zhang Z, Duffy C, Shu L. 2021. Artificial intelligence for modeling complex systems: Taming the complexity of expert models to improve decision making. ACM Trans Interact Intell Syst, 11: 1–49

Gochis D J, Barlage M, Dugger A, FitzGerald K, Karsten L, McAllister M, McCreight J, Mills J, RafieeiNasab A, Read L. 2018. The WRF-Hydro modeling system technical description (Version 5.0). NCAR-TN

Grayson R B, Moore I D, McMahon T A. 1992. Physically based hydrologic modeling: 2. Is the concept realistic? Water Resour Res, 28: 2659–2666

Han F, Zheng Y, Tian Y, Li X, Zheng C, Li X. 2021. Accounting for field-scale heterogeneity in the ecohydrological modeling of large arid river basins: Strategies and relevance. J Hydrol, 595: 126045

Hansen N. 2016. The CMA evolution strategy: A comparing review. In: Lozano J A, Larrañaga P, Inza I, Bengoetxea E, eds. Towards a New Evolutionary Computation. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Berlin: Springer

Haque A, Salama A, Lo K, Wu P. 2021. Surface and groundwater interactions: A review of coupling strategies in detailed domain models. Hydrology, 8: 35

Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. J Clim, 19: 5686–5699

Hrachowitz M, Clark M P. 2017. HESS opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. Hydrol Earth Syst Sci, 21: 3953–3973

Hu L, Zhang M, Yang Z, Fan Y, Li J, Wang H, Lubale C. 2020. Estimating dewatering in an underground mine by using a 3D finite element model. PLoS ONE, 15: e0239682

Ivanov V Y, Vivoni E R, Bras R L, Entekhabi D. 2004. Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model. Water Resour Res, 40: 1–23

Ivanov V Y, Bras R L, Vivoni E R. 2008. Vegetation-hydrology dynamics in complex terrain of semiarid areas: 1. A mechanistic approach to modeling dynamic feedbacks. Water Resour Res, 44: W03429

Jia Y, Ni G, Kawahara Y, Suetsugi T. 2001. Development of WEP model and its application to an urban watershed. Hydrol Process, 15: 2175–2194

Jones J P, Sudicky E A, Brookfield A E, Park Y. 2006. An assessment of the tracer-based approach to quantifying groundwater contributions to streamflow. Water Resour Res, 42: 1–5

Keating E H, Doherty J, Vrugt J A, Kang Q. 2010. Optimization and uncertainty assessment of strongly nonlinear groundwater models with high parameter dimensionality. Water Resour Res, 46: 1–8

Kim K B, Kwon H H, Han D. 2018. Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling. J Hydrol, 556: 194–210

Kollet S J, Maxwell R M. 2006. Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. Adv Water Resour, 29: 945–958

Kollet S J, Maxwell R M. 2008. Capturing the influence of groundwater dynamics on land surface processes using an integrated, distributed watershed model. Water Resour Res, 44: W02402

Kollet S, Sulis M, Maxwell R M, Paniconi C, Putti M, Bertoldi G, Coon E T, Cordano E, Endrizzi S, Kikinzon E, Mouche E, Mügler C, Park Y, Refsgaard J C, Stisen S, Sudicky E. 2017. The integrated hydrologic model intercomparison project, IH-MIP2 A second set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. Water Resour Res, 53: 867–890

Krause S, Boano F, Cuthbert M O, Fleckenstein J H, Lewandowski J. 2014. Understanding process dynamics at aquifer-surface water interfaces: An introduction to the special section on new modeling approaches and novel experimental technologies. Water Resour Res, 50: 1847–1855

Kuffour B N O, Engdahl N B, Woodward C S, Condon L E, Kollet S, Maxwell R M. 2020. Simulating coupled surface-subsurface flows with ParFlow v3.5.0: Capabilities, applications, and ongoing development of an open-source, massively parallel, integrated hydrologic model. Geosci Model Dev, 13: 1373–1397

Kumar M, Duffy C J, Salvage K M. 2009. A second-order accurate, Finite Volume-Based, Integrated Hydrologic Modeling (FIHM) framework for simulation of surface and subsurface flow. Vadose Zone J, 8: 873–890

Ladwig R, Hanson P C, Dugan H A, Carey C C, Zhang Y, Shu L, Duffy C J, Cobourn K M. 2021. Lake thermal structure drives interannual variability in summer anoxia dynamics in a eutrophic lake over 37 years. Hydrol Earth Syst Sci, 25: 1009–1032

Leavesley G H, Lichty R W W, Troutman B M M, Saindon L G G. 1983. Precipitation-runoff modeling system. User's Manual. Water-Resources Investigations Report, Denver, Colorado. 207

Leonard L, Duffy C J. 2013. Essential Terrestrial Variable data workflows for distributed water resources modeling. Environ Model Software, 50: 85–96

Levine J B, Salvucci G D. 1999. Equilibrium analysis of groundwater-vadose zone interactions and the resulting spatial distribution of hydrologic fluxes across a Canadian Prairie. Water Resour Res, 35: 1369–1383

Li L, Bao C, Sullivan P L, Brantley S, Shi Y, Duffy C. 2017. Understanding watershed hydrogeochemistry: 2. Synchronized hydrological and geochemical processes drive stream chemostatic behavior. Water Resour Res, 53: 2346–2367

Li X, Cheng G, Lin H, Cai X, Fang M, Ge Y, Hu X, Chen M, Li W. 2018. Watershed system model: The essentials to model complex human-nature system at the river basin scale. J Geophys Res-Atmos, 123: 3019–3034

Li X, Cheng G, Wang L, Wang J, Ran Y, Che T, Li G, He H, Zhang Q, Jiang X, Zou Z, Zhao G. 2021. Boosting geoscience data sharing in China. Nat Geosci, 14: 541–542

Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, Burges S J. 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes

for general circulation models. J Geophys Res, 99: 14415–14428

Lindström G, Pers C, Rosberg J, Strömqvist J, Arheimer B. 2010. Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. Hydrol Res, 41: 295–319

Madsen H, Wilson G, Ammentorp H C. 2002. Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. J Hydrol, 261: 48–59

Markstrom S L, Niswonger R G, Regan R S, Prudic D E, Barlow P M. 2008. GSFLOW-Coupled Ground-water and Surface-water FLOW model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005), US Geological Survey techniques and methods. 240

Mascaro G, Vivoni E R, Méndez-Barroso L A. 2015. Hyperresolution hydrologic modeling in a regional watershed and its interpretation using empirical orthogonal functions. Adv Water Resour, 83: 190–206

Maxwell R M, Miller N L. 2005. Development of a coupled land surface and groundwater model. J Hydrometeorol, 6: 233–247

Maxwell R M, Kollet S J. 2008. Quantifying the effects of three-dimensional subsurface heterogeneity on Hortonian runoff processes using a coupled numerical, stochastic approach. Adv Water Resour, 31: 807–817

Maxwell R M, Condon L E. 2016. Connections between groundwater flow and transpiration partitioning. Science, 353: 377–380

Maxwell R M, Putti M, Meyerhoff S, Delfs J, Ferguson I M, Ivanov V, Kim J, Kolditz O, Kollet S J, Kumar M, Lopez S, Niu J, Paniconi C, Park Y, Phanikumar M S, Shen C, Sudicky E A, Sulis M. 2014. Surface-subsurface model intercomparison: A first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. Water Resour Res, 50: 1531–1549

Maxwell R M, Condon L E, Kollet S J. 2015. A high-resolution simulation of groundwater and surface water over most of the continental US with the integrated hydrologic model ParFlow v3. Geosci Model Dev, 8: 923–937

Mazzia A, Putti M. 2005. High order Godunov mixed methods on tetrahedral meshes for density driven flow simulations in porous media. J Comput Phys, 208: 154–174

McDonald M G, Harbaugh A W. 1984. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report. 83–875

McDonnell J J, Sivapalan M, Vaché K, Dunn S, Grant G, Haggerty R, Hinz C, Hooper R, Kirchner J, Roderick M L, Selker J, Weiler M. 2007. Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. Water Resour Res, 43: 1–6

Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch R M, Kundzewicz Z W, Lettenmaier D P, Stouffer R J. 2008. Climate change: Stationarity is dead: Whither water management. Science, 319: 573–574

Mirus B B, Loague K, Cristea N C, Burges S J, Kampf S K. 2011. A synthetic hydrologic-response dataset. Hydrol Process, 25: 3688–3692

Montanari A. 2007. What do we mean by 'uncertainty'? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. Hydrol Process, 21: 841–845

Mukherjee A, Bhanja S N, Wada Y. 2018. Groundwater depletion causing reduction of baseflow triggering Ganges river summer drying. Sci Rep, 8: 12049

Nearing G S, Gupta H V. 2015. The quantity and quality of information in hydrologic models. Water Resour Res, 51: 524–538

Newman A J, Mizukami N, Clark M P, Wood A W, Nijssen B, Nearing G. 2017. Benchmarking of a physically based hydrologic model. J Hydrometeorol, 18: 2215–2225

Niswonger R G, Panday S, Ibaraki M. 2011. MODFLOW-NWT, A Newton Formulation for MODFLOW-2005, https://doi.org/10.5066/F7XP7317, 2011

Nijzink R C, Samaniego L, Mai J, Kumar R, Thober S, Zink M, Schäfer D, Savenije H H G, Hrachowitz M. 2016. The importance of topography-controlled sub-grid process heterogeneity and semi-quantitative prior constraints in distributed hydrological models. Hydrol Earth Syst Sci, 20: 1151–1176

Novotny V. 2018. Watershed models. In: Jorgensen S V, Fath B, eds. Encyclopedia of Ecology. Amsterdam: Elsevier. 221–232

Ntona M M, Busico G, Mastrocicco M, Kazakis N. 2022. Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. Sci Total Environ, 846: 157355

O'Connell P E, Todini E. 1996. Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: An overview. J Hydrol, 175: 3–16

Orth R, Staudinger M, Seneviratne S I, Seibert J, Zappa M. 2015. Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. J Hydrol, 523: 147–159

Painter S L, Moulton J D, Wilson C J. 2013. Modeling challenges for predicting hydrologic response to degrading permafrost. Hydrogeol J, 21: 221–224

Painter S L, Coon E T, Atchley A L, Berndt M, Garimella R, Moulton J D, Svyatskiy D, Wilson C J. 2016. Integrated surface/subsurface permafrost thermal hydrology: Model formulation and proof-of-concept simulations. Water Resour Res, 52: 6062–6077

Panday S, Huyakorn P S. 2004. A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. Adv Water Resour, 27: 361–382

Paniconi C, Putti M. 2015. Physically based modeling in catchment hydrology at 50: Survey and outlook. Water Resour Res, 51: 7090–7129

Park S, Nielsen A, Bailey R T, Trolle D, Bieger K. 2019. A QGIS-based graphical user interface for application and evaluation of SWAT-MODFLOW models. Environ Model Software, 111: 493–497

Pechlivanidis I G, Jackson B M, Mcintyre N R, Wheater H S. 2011. Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. Global Nest J, 13: 193–214

Peckham S D, Stoica M, Jafarov E, Endalamaw A, Bolton W R. 2017. Reproducible, component-based modeling with TopoFlow, a spatial hydrologic modeling toolkit. Earth Space Sci, 4: 377–394

Peel M C, McMahon T A. 2020. Historical development of rainfall-runoff modeling. WIREs Water, 7: e1471

Perrin C, Michel C, Andréassian V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. J Hydrol, 242: 275–301

Perrin C, Michel C, Andréassian V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. J Hydrol, 279: 275–289

Peters N E, Meybeck M. 2000. Water quality degradation effects on freshwater availability: Impacts of human activities. Water Int, 25: 185–193

Pomeroy J W, Gray D M, Brown T, Hedstrom N R, Quinton W L, Granger R J, Carey S K. 2007. The cold regions hydrological model: A platform for basing process representation and model structure on physical evidence. Hydrol Process, 21: 2650–2667

Povich T J, Dawson C N, Farthing M W, Kees C E. 2013. Finite element methods for variable density flow and solute transport. Comput Geosci, 17: 529–549

Qu Y, Duffy C J. 2007. A semidiscrete finite volume formulation for multiprocess watershed simulation. Water Resour Res, 43: W08419

Rahman M M, Lu M. 2015. Model spin-up behavior for wet and dry basins: A case study using the xinanjiang model. Water, 7: 4256–4273

Razavi S, Tolson B A. 2013. An efficient framework for hydrologic model calibration on long data periods. Water Resour Res, 49: 8418–8431

Refsgaard J C, Storm B. 1996. Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott M B, Refsgaard J C, eds. Distributed Hydrological Modelling. Dordrecht: Springer. 41–54

Refsgaard J C, van der Sluijs J P, Brown J, van der Keur P. 2006. A framework for dealing with uncertainty due to model structure error. Adv Water Resour, 29: 1586–1597

Rigon R, Bertoldi G, Over T M. 2006. GEOtop: A distributed hydrological model with coupled water and energy budgets. J Hydrometeorol, 7: 371–388

Samaniego L, Kumar R, Attinger S. 2010. Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. Water Resour Res, 46: W05523

Savenije H H G. 2001. Equifinality, a blessing in disguise? Hydrol Process, 15: 2835–2838

Savenije H H G. 2010. HESS opinions “topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)”. Hydrol Earth Syst Sci, 14: 2681–2692

Schulla J, Jasper K. 1998. Modellbeschreibung WaSiM-ETH. 1–152

Sebben M L, Werner A D, Liggett J E, Partington D, Simmons C T. 2013. On the testing of fully integrated surface-subsurface hydrological models. Hydrol Process, 27: 1276–1285

Seck A, Welty C, Maxwell R M. 2015. Spin-up behavior and effects of initial conditions for an integrated hydrologic model. Water Resour Res, 51: 2188–2210

Semenova O, Beven K. 2015. Barriers to progress in distributed hydrological modelling. Hydrol Process, 29: 2074–2078

Shen C, Phanikumar M S. 2010. A process-based, distributed hydrologic model based on a large-scale method for surface-subsurface coupling. Adv Water Resour, 33: 1524–1541

Shen C, Niu J, Phanikumar M S. 2013. Evaluating controls on coupled hydrologic and vegetation dynamics in a humid continental climate watershed using a subsurface-land surface processes model. Water Resour Res, 49: 2552–2572

Sherman L K. 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. Eng News Rec, 108: 801–805

Shi Y, Davis K J, Duffy C J, Yu X. 2013. Development of a coupled land surface hydrologic model and evaluation at a critical zone observatory. J Hydrometeorol, 14: 1401–1420

Shi Y, Davis K J, Zhang F, Duffy C J, Yu X. 2014. Parameter estimation of a physically based land surface hydrologic model using the ensemble Kalman filter: A synthetic experiment. Water Resour Res, 50: 706–724

Shi Y, Davis K J, Zhang F, Duffy C J, Yu X. 2015. Parameter estimation of a physically-based land surface hydrologic model using an ensemble Kalman filter: A multivariate real-data experiment. Adv Water Resour, 83: 421–427

Shi Y, Eissenstat D M, He Y, Davis K J. 2018. Using a spatially-distributed hydrologic biogeochemistry model with a nitrogen transport module to study the spatial variation of carbon processes in a Critical Zone Observatory. Ecol Model, 380: 8–21

Shu L, Ullrich P, Meng X, Duffy C, Chen H, Li Z. 2024a. rSHUD v2.0: Advancing the simulator for hydrologic unstructured domains and

unstructured hydrological modeling in the R environment. Geosci Model Dev, 17: 497–527

Shu L, Ullrich P A, Duffy C J. 2020. Simulator for Hydrologic Unstructured Domains (SHUD v1.0): Numerical modeling of watershed hydrology with the finite volume method. Geosci Model Dev, 13: 2743–2762

Shu L, Li X, Chang Y, Meng X, Chen H, Qi Y, Wang H, Li Z, Lyu S. 2024b. Advancing understanding of lake-watershed hydrology: A fully coupled numerical model illustrated by Qinghai Lake. Hydrol Earth Syst Sci, doi: 10.5194/hess-28-1477-2024

Simoni S, Zanotti F, Bertoldi G, Rigon R. 2008. Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS. Hydrol Process, 22: 532–545

Šimůnek J, van Genuchten M T, Šejna M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. Vadose Zone J, 7: 587–600

Singh V P. 2018. Hydrologic modeling: Progress and future directions. Geosci Lett, 5: 15

Sivapalan M. 2003. Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: Is there a connection? Hydrol Process, 17: 1037–1041

Sivapalan M. 2018. From engineering hydrology to earth system science: Milestones in the transformation of hydrologic science. Hydrol Earth Syst Sci, 22: 1665–1693

Sivapalan M, Blöschl G, Zhang L, Vertessy R. 2003. Downward approach to hydrological prediction. Hydrol Process, 17: 2101–2111

Smith M B, Seo D J, Koren V I, Reed S M, Zhang Z, Duan Q, Moreda F, Cong S. 2004. The distributed model intercomparison project (DMIP): Motivation and experiment design. J Hydrol, 298: 4–26

Sulis M, Paniconi C, Marrocu M, Huard D, Chaumont D. 2012. Hydrologic response to multimodel climate output using a physically based model of groundwater/surface water interactions. Water Resour Res, 48: W12510

Sun A, Zhou J, Yu Z, Jin H, Sheng Y, Yang C. 2019. Three-dimensional distribution of permafrost and responses to increasing air temperatures in the head waters of the Yellow River in High Asia. Sci Total Environ, 666: 321–336

Sun A, Zhou J, Yu Z, Su X, Song S, Wu Q, Schulla J. 2023. Quantified spatial-temporal variation of the fine-scale frozen soils during 1980–2014 in the headwaters of the Yellow River (HWYR) in High Mountain Asia. Catena, 222: 106836

Tian Y, Zheng Y, Wu B, Wu X, Liu J, Zheng C. 2015. Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture. Environ Model Software, 63: 170–184

Tian Y, Zheng Y, Han F, Zheng C, Li X. 2018. A comprehensive graphical modeling platform designed for integrated hydrological simulation. Environ Model Software, 108: 154–173

Tijerina-Kreuzer D, Condon L, FitzGerald K, Dugger A, O'Neill M M, Sampson K, Gochis D, Maxwell R. 2021. Continental hydrologic intercomparison project, phase 1: A large-scale hydrologic model comparison over the continental United States. Water Resour Res, 57: e2020WR028931

Todini E. 2007. Hydrological catchment modelling: Past, present and future. Hydrol Earth Syst Sci, 11: 468–482

Tolson B A, Shoemaker C A. 2007. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. Water Resour Res, 43: 737–744

Uhlenbrook S, Roser S, Tilch N. 2004. Hydrological process representation at the meso-scale: The potential of a distributed, conceptual catchment model. J Hydrol, 291: 278–296

Vallis G K. 2016. Geophysical fluid dynamics: Whence, whither and why? Proc R Soc A, 472: 20160140

VanderKwaak J E, Loague K. 2001. Hydrologic-Response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. Water Resour Res, 37: 999–1013

Vauclin M, Khanji D, Vachaud G. 1979. Experimental and numerical study of a transient, two-dimensional unsaturated-saturated water table recharge problem. Water Resour Res, 15: 1089–1101

Vertessy R A, Hatton T J, O'Shaughnessy P J, Jayasuriya M D A. 1993. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. J Hydrol, 150: 665–700

Vrugt J A, Gupta H V, Bouten W, Sorooshian S. 2003. A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water Resour Res, 39: 1201

Wagener T, Wheater H S, Gupta H V. 2004. Rainfall-Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Catchments. London: Imperial College Press

Wagener T, Sivapalan M, Troch P A, McGlynn B L, Harman C J, Gupta H V, Kumar P, Rao P S C, Basu N B, Wilson J S. 2010. The future of hydrology: An evolving science for a changing world. Water Resour Res, 46: 737–744

Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. 1994. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. Water Resour Res, 30: 1665–1679

Winter T C. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. Hydrogeol J, 7: 28–45

Wood E F, Sivapalan M, Beven K, Band L. 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. J Hydrol, 102: 29–47

Woods J A, Teubner M D, Simmons C T, Narayan K A. 2003. Numerical error in groundwater flow and solute transport simula-

tion. Water Resour Res, 39: 1158

Yang D W, Gao B, Jiao Y, Lei H M, Zhang Y L, Yang H B, Cong Z T. 2015. A distributed scheme developed for eco-hydrological modeling in the upper Heihe River. Sci China Earth Sci, 58: 36–45

Yang D, Herath S, Musiake K. 1998. Development of a geomorphology-based hydrological model for large catchments. Proc HYDRAULIC Eng, 42: 169–174

Ye W, Bates B C, Viney N R, Sivapalan M, Jakeman A J. 1997. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. Water Resour Res, 33: 153–166

Yu X, Bhatt G, Duffy C, Shi Y. 2013. Parameterization for distributed watershed modeling using national data and evolutionary algorithm. Comput Geosci, 58: 80–90

Yu X, Duffy C, Baldwin D C, Lin H. 2014. The role of macropores and multi-resolution soil survey datasets for distributed surface-subsurface flow modeling. J Hydrol, 516: 97–106

Yu X, Duffy C J, Rousseau A N, Bhatt G, Pardo Álvarez Á, Charron D. 2016. Open science in practice: Learning integrated modeling of coupled surface-subsurface flow processes from scratch. Earth Space Sci, 3: 190–206

Yu X, Xu Z, Moraetis D, Nikolaidis N P, Schwartz F W, Zhang Y, Shu L, Duffy C J, Liu B. 2021. Capturing hotspots of fresh submarine groundwater discharge using a coupled surface-subsurface model. J Hydrol, 598: 126356

Yu Z. 2000. Assessing the response of subgrid hydrologic processes to atmospheric forcing with a hydrologic model system. Glob Planet Change, 25: 1–17

Yu Z, Lakhtakia M N, Yarnal B, White R A, Miller D A, Frakes B, Barron E J, Duffy C, Schwartz F W. 1999. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. J Hydrol, 218: 72–91

Yu Z, Pollard D, Cheng L. 2006. On continental-scale hydrologic simulations with a coupled hydrologic model. J Hydrol, 331: 110–124

Yu Z, Lu C, Cai J, Yu D, Mahe G, Mishra A, Cudennec C, Van Lanen H A J, Orange D, Amani A. 2020. Preface: Hydrological processes and water security in a changing world. Proc IAHS, 383: 3–4

Zehe E, Maurer T, Ihringer J, Plate E. 2001. Modeling water flow and mass transport in a loess catchment. Phys Chem Earth Part B-Hydrol Oceans Atmosphere, 26: 487–507

Zehe E, Ehret U, Pfister L, Blume T, Schröder B, Westhoff M, Jackisch C, Schymanski S J, Weiler M, Schulz K, Allroggen N, Tronicke J, van Schaik L, Dietrich P, Scherer U, Eccard J, Wulfmeyer V, Kleidon A. 2014. HESS Opinions: From response units to functional units: A thermodynamic reinterpretation of the HRU concept to link spatial organization and functioning of intermediate scale catchments. Hydrol Earth Syst Sci, 18: 4635–4655

Zhang Y, Slingerland R, Duffy C. 2016. Fully-coupled hydrologic processes for modeling landscape evolution. Environ Model Software, 82: 89–107

Zheng C, Liu J, Cao G, Kendy E, Wang H, Jia Y. 2010. Can China cope with its water crisis?—Perspectives from the North China plain. Groundwater, 48: 350–354

Zheng Y, Tian Y, Du E, Han F, Wu Y, Zheng C, Li X. 2020. Addressing the water conflict between agriculture and ecosystems under environmental flow regulation: An integrated modeling study. Environ Model Software, 134: 104874

(责任编委: 李小雁)