



地下水-地表水集成模型研究进展

彭书艳, 陆 峰, 吴婷婷, 杨晓帆

Research progress in integrated groundwater-surface water models

PENG Shuyan, LU Zheng, WU Tingting, and YANG Xiaofan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于GSFLOW的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟

Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland
郜会彩, 肖玉福, 胡云进, 陈柳安, 周如杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 182–191

白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake
李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 48–54

黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究

Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin
祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 康卫东, 刘振英, 邵新民 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 29–43

安阳市地下水源热泵系统建设水资源管理区划研究

A study of the water resources management and division of the groundwater heat pump system construction in Anyang
朱文举, 平建华, 侯俊山, 宁艺武, 耿文斌 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 200–208

基于GIS的地下水资源分区研究及承载本底评价

Evaluation of natural carrying capacity and zoning of groundwater resources based on GIS
高萌萌, 李瑞敏, 刘琼, 王轶, 李小磊 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 184–190

云阳盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式

Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yunying Basin
常威, 黄琨, 胡成, 王清, 王宁涛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 9–15



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401001](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401001)

彭书艳, 陆峥, 吴婷婷, 等. 地下水-地表水集成模型研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 60-73.

PENG Shuyan, LU Zheng, WU Tingting, et al. Research progress in integrated groundwater-surface water models[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 60-73.

地下水-地表水集成模型研究进展

彭书艳^{1,2}, 陆 峥^{1,2}, 吴婷婷^{1,2}, 杨晓帆^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 北京 100875)

摘要: 地下水-地表水交互过程涉及物质运移与能量传输, 对流域水文生态环境有着直接影响, 已成为近年来水文地质等领域的研究热点。研究表明, 地下水-地表水集成模型是研究地下水与地表水交互的有效手段。通过回顾近年来地下水-地表水集成模型的相关研究, 概述了地下水-地表水集成模型分类、模型误差来源、模型应用、面临挑战与发展趋势等 5 方面内容。其中, 地下水-地表水集成模型根据耦合方案可分为完全耦合模型和松散耦合模型; 模型误差来源主要包括地形处理方案、驱动数据、模型参数化方案、人为因素和认知的有限性等 5 类; 目前, 集成模型广泛应用于气候变化和人类活动影响下的地下水-地表水规律变化以及水资源管理与优化配置方面的研究。随着水文学研究的深入发展, 地下水-地表水集成模型面临着基础数据需求增大、硬件平台要求提高、模拟范围难以准确把握和学科交叉趋势明显等挑战; 未来集成模型将向拓宽参数获取渠道、提高模型计算效率和加强不同学科融合等方面发展。

关键词: 地下水; 地表水; 地下水-地表水集成模型; 模型误差来源; 地下水-地表水交互; 水资源管理与优化

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0060-14

Research progress in integrated groundwater-surface water models

PENG Shuyan^{1,2}, LU Zheng^{1,2}, WU Tingting^{1,2}, YANG Xiaofan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Groundwater-surface water interaction involves material transport and energy transfer processes, which directly impacts the hydro-ecological environment of watersheds. It is a crucial component of the hydrological cycle which has become a hot issue in hydrogeology in recent years. The integrated groundwater-surface water models serve as a powerful tool for studying groundwater-surface water interaction. This paper reviewed recent studies on integrated groundwater-surface water models, providing an overview in five aspects: classification of integrated groundwater-surface water models, sources of model bias, model application, challenges, and trend of model development. Integrated models are categorized into fully coupled and loosely coupled models based on coupling schemes. There are five categories of sources of integrated model bias, including topographic processing,

收稿日期: 2024-01-01; 修訂日期: 2024-03-17

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077172)

第一作者: 彭书艳(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟研究。E-mail: sypeng@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 杨晓帆(1981—), 女, 博士, 教授, 主要从事地下水科学、环境流体力学、多尺度建模与数值模拟等方面的研究。

E-mail: xfyang@bnu.edu.cn

meteorological forcing bias, model parameters, anthropogenic process, and epistemic limitations. The integrated models are widely used to study the changes in groundwater-surface water patterns under the influences of climate change and human activities, and to research water resources management and optimization. In addition, the integrated models are facing multiple challenges, such as the increasing demand for basic data, higher requirements for hardware platforms, the difficulty in accurately determining the modeling region, and the evident trend of interdisciplinary integration. Finally, the integrated model development is expected to focus on enriching the approaches to obtaining model parameters, improving the simulation efficiency, and strengthening the integration of model coupling with different disciplines.

Keywords: groundwater; surface water; integrated groundwater-surface water model; source of model bias; groundwater-surface water interaction; water resources management and optimization

地表水和地下水是水资源的重要组成部分,二者之间水力联系紧密、相互转化频繁^[1],地下水-地表水交互是水文循环过程中“承上启下”的重要环节(图1)。相关研究表明,地下水-地表水交互由河床界面附近的水势能和动能梯度引起,其交换过程与特定的河流及地貌条件、水头分布、地下水流向、水文地质参数分布等多种因素有关^[2-3];且二者之间的交互具有较大的空间和时间跨度^[4],直接影响流域水文循环和水量收支^[5]。伴随着水量交换,多数溶质(例如污染物、有机物等)可通过径流、入渗、回归流、蒸散发等多种途径实现在地表与地下水系统之间的迁移转化^[6-7],大

大增加了地下水-地表水交互的复杂性,进而影响流域水质和水生态系统功能^[2, 8-9]。此外,气候变化和人类活动的双重作用也深刻影响着流域水循环过程、水资源时空分布以及地下水-地表水的相互转换关系^[10]。由此可见,地下水与地表水交互过程中的水分迁移和能量转换过程具有多样性、复杂性,需要将地下水和地表水视作一个整体,深入理解其中的水分和能量的循环机理^[10]。因此,研究地下水-地表水交互有助于加深对水文循环过程机理的理解和认识,对流域水资源保护与合理开发利用、流域水文生态环境和经济社会可持续发展等具有重要意义^[6, 11-12]。

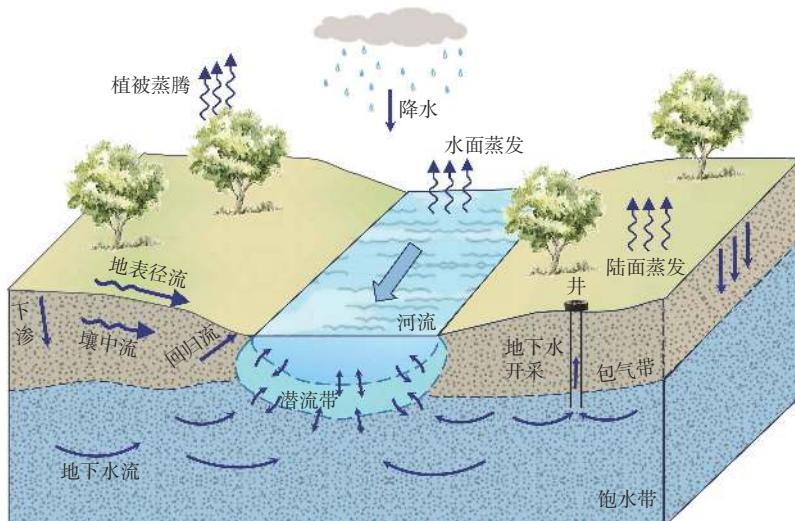


图1 地下水-地表水交互示意图

Fig. 1 A schematic of groundwater-surface water interaction

目前,量化地下水-地表水交互过程的研究方法众多,根据技术手段使用总则可分为野外测试试验、室内控制实验和数值模拟3类^[13]。其中,野外测试试验是获取地下水-地表水交互研究第一手数据的重要来源^[14],可采用温度热剖面法^[15]、示踪剂^[16]、地球化学

法^[17]、渗漏计法^[18]等多种方式针对感兴趣的变量展开观测。野外测试试验较为常用,但受制于观测尺度,仅适用于较小范围和较粗时间尺度的研究,且测量误差和不确定性相对较大^[9, 12]。室内控制实验中,常通过柱实验、窄缝槽和砂箱进行物理模拟^[4, 19-20],此类物

理模型实验可较为直观地再现地下水水流系统形成、发育和地下水-地表水交互过程,有助于理解地下水水流系统的结构和功能^[21-22]。同样,由于室内条件和仪器设备规格限制,室内实验难以刻画大尺度的地下水-地表水交互过程,亦无法在不同空间尺度上评估地下水-地表水交互过程中各自的贡献与影响^[12,23]。相较于以上2类方法,基于物理过程的建模和数值模拟可以在不同时空尺度上集成多源数据,刻画水文循环的关键过程^[9,24],从而帮助分析包括地下水-地表水交互在内的水文循环过程中各关键要素的时空演变规律,揭示地下水、地表水各自特征及二者之间的交互作用机制^[25]。此外,构建与发展考虑多物理过程的地下水-地表水集成模型,开展地下水-地表水耦合数值模拟研究能够深入理解地下水-地表水交互对变化环境的响应机制,进而有助于实现流域水资源合理规划与流域生态环境可持续发展^[26]。

近年来,随着水文循环过程机理研究和计算机技术的不断发展,地下水-地表水集成模型得到快速发展

和广泛应用^[27]。本文从以下几个方面总结并概述与地下水-地表水集成模型相关的主要研究,包括模型分类与主要应用情况、模型误差来源分析,以及现阶段模型面临的挑战和未来的发展方向。

1 地下水-地表水集成模型的分类及常见模型介绍

1.1 地下水-地表水集成模型分类

地下水-地表水集成模型的分类依照不同标准而有所区别。一般来说,地下水-地表水集成模型可根据集成系统中包含的水文循环过程和要素的数量、水文循环过程与要素的概念/数学表征类型、不同过程和要素之间的联系程度、所涉及的模型组件与过程描述的性质和类型、模型的耦合方案/策略等多种特征进行分类^[6]。这些特征的组合数量庞大,因此存在着大量潜在分类方案。基于此,本文仅根据集成模型耦合方案的不同,将其分为完全耦合模型和松散耦合模型^[6,28],其中几种常见模型特征见表1。

表 1 常用地下水-地表水集成模型简介

Table 1 Model description

耦合方案	模型	地下方案	地表方案	耦合策略	特征	参考文献
完全耦合	ParFlow	有限体积	运动波/扩散波	压力连续	以瞬变偏微分方程描述各种水流运动,应用数值分析建立相邻网格之间的时空关系,不同界面之间的水量交换作为源汇项处理	[29]
	CATHY	有限元	扩散波	界面切换		[11]
	HGS	有限差分/有限元	扩散波	一阶转换		[30]
	InHM	有限体积	扩散波	一阶转换		[31]
松散耦合	MODFLOW	有限差分	运动波	一阶转换	地下水数值模型取代分布式水文模型的地下水模块,借助于公共参量的传递和反馈进行耦合	[32]
	FEFLOW	有限元	一维非稳态流			[33]
	GSFLOW	有限差分	PRMS组件			[34]

1.1.1 完全耦合模型

完全耦合模型是基于物理过程,将地表水和地下水组件集成到单个软件包中的模型,模型中地表与地下水网格单元之间存在严格的一一对应关系。因此,完全耦合模型可以实现对饱和带、包气带和地表水中所涉及的多数物理过程的具体描述,能够同时求解地表水和地下水水流的控制方程。在完全耦合模型中,通常采用三维 Richards 方程求解地下水水流,用二维 Saint-Venant 方程求解地表水流。

(1) 三维 Richards 方程

三维 Richards 方程是描述饱和-非饱和带中地下水水流的常用控制方程,其常见表达式为^[29,35-36]:

$$S_s S_w \frac{\partial \psi}{\partial t} + \phi \frac{\partial S_w}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{U} + Q_s + Q_e \quad (1)$$

式中: S_s ——贮水率;

S_w ——饱和度;

t ——时间;

ϕ ——孔隙率;

ψ ——压力水头;

Q_s ——一般源汇项;

Q_e ——地下与地表之间的水交换通量。

达西通量(\mathbf{U})为:

$$\mathbf{U} = -K k_r \nabla (\psi + z) \quad (2)$$

式中: K ——渗透系数;

k_r ——相对渗透率;

z ——垂向坐标。

(2) 二维 Saint-Venant 方程

由 x 和 y 方向上的 2 个表达动量守恒的连续方程和 1 个表达质量守恒的连续方程组成^[37],其常见表达

式为^[38]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hu^2 + \frac{gh^2}{2}\right)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial\left(hv^2 + \frac{gh^2}{2}\right)}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (5)$$

式中: u 、 v — x 、 y 方向上的水流速度;

h —水深;

t —时间;

g —重力加速度;

S_0 —河底比降;

S_f —河道摩擦阻力比降。

完全耦合模型具有较强的物理机制, 可以求解地下水-地表水瞬态流动过程, 高精度捕捉水文循环中各要素的时空特征^[28], 灵活地解决现实中可能遇到的大部分水资源相关的复杂问题^[6]。因此, 在需要考虑较多水文过程的较大尺度的数值模拟研究中, 完全耦合模型是当前最受认可的模型之一^[39]。然而, 此类模型在求解过程中要求地表与地下部分分离散方式一致, 规模庞大的离散化方案可能会导致高昂的计算成本; 模型构建所需的实测数据和物理参数众多, 模型校准困难; 模型边界条件和初始条件等的设置也可能引入更大的不确定性, 使得模型发展仍然面临诸多挑战。此外, 由于部分模型缺乏免费的源代码和必要模块(如作物生长与轮作、水库等), 模型推广应用受到一定限制^[40]。

1.1.2 松散耦合模型

松散耦合模型通常使用两个或多个单独的模型进行耦合, 其中地表水和地下水子系统通过使用松散耦合方案单独求解。松散耦合模型中的地下与地表子系统之间可以单向传输, 也可以互相提供边界条件和输入参数进行迭代求解, 进而实现刻画地下水-地表水交互过程。

松散耦合模型中, 地下部分的核心方程是达西定律推导出来的连续性方程^[28, 41]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) + Q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

式中: h —测压水头;

t —时间;

K_x 、 K_y 、 K_z —渗透系数 K 在 x 、 y 、 z 方向上的分量;

Q_s —一般源汇项。

对于潜水含水层, 忽略弹性释水的情况下, 潜水水流描述为^[28, 41]:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = 0 \quad (7)$$

对于局地尺度的建模, 松散耦合模型更准确且计算效率更高^[39]。松散耦合方案可以灵活地将单个模型应用于部分过程而非所有过程, 从而充分发挥集成模型中地表水与地下水模型各自的优势。此外, 松散耦合模型还具有操作简单、可视化效果好以及对数据要求相对较低等特点^[42]。但是, 松散耦合模型也存在其局限性, 例如缺乏评估地下水模型的适当方法; 对于非线性模型, 模型收敛较难等^[28], 且由于模型结构通常针对特定研究区而设置, 故无法参考以往研究得到普遍结论^[28]。

1.1.3 集成模型常用耦合策略

地下水-地表水集成模型的研究中, 用于实现地表水与地下水集成的耦合策略有 3 种: 一阶交换法^[43]、压力连续法^[29]和切换边界条件法^[11]。

一阶交换法基于达西定律实现交换界面的流动^[28]。此方法中, 地表-地下水交换通量与地下最上层节点和地表之间的水头差以及一阶交换系数的值呈线性相关^[44]。这种方法被用于模拟水分在不同连续体(如裂隙/大孔隙和岩石/土壤)之间的流动以及河流-含水层相互作用^[43]。研究指出, 一阶交换法既可以用于平衡模拟运行时间, 也可以在饱和条件下最小化地表-地下界面的水头差异^[43], 目前已被应用于 HydroGeoSphere (HGS) 模型和综合水文模型(integrated hydrology model, InHM)等。

压力连续法假设地表与地下最上层节点的压力水头相等, 地表水和地下水流动方程在单个地表-地下界面节点上同时求解^[44]。此方法被视为地下与地表水文过程的典型耦合方式^[29], 地表压力快速变化导致地下边界数值不稳定的问题可通过小时间步长克服, 由此引起的较长模拟时间问题也可通过并行计算得到缓解^[43]。压力连续法已在陆地生态系统模拟器(advanced terrestrial simulator, ATS)和 ParFlow 等模型中得到应用^[45-46]。

切换边界条件法是可变饱和流动模型中的一种特殊处理方法, 方程中考虑了积水状态^[11], 因此可以将地表的潜在通量(降水和蒸散)划分为实际通量, 并计算地表存储的变化^[45, 47]。此方法虽与另外 2 种耦合策略完全不同, 但仍然保证了地表通量与压力水头的

连续性^[11], 目前已在 CATchment HYdrology(CATHY)模型中得以应用。

1.2 常见地下水-地表水集成模型介绍

1.2.1 完全耦合模型

(1) ParFlow/ParFlow-CLM 模型

ParFlow(<https://www.parflow.org/>)模型是劳伦斯利弗莫尔国家实验室^[48]开发的一款面向对象、开源的耦合地下水-地表水流运动集成求解器。它可使用多重网格预处理共轭梯度求解器求解稳态、完全饱和的水流, 也可使用 Newton-Krylov 求解器求解瞬态、可变饱和的水流。两种求解方法都提供了地下水压力水头的精确解, 且求解器计算性能优秀, 支持并行计算^[48-49], 从而为模拟大型复杂地下流动系统提供了解决方案。其中, ParFlow 的瞬态、可变饱和模式基于 Richards 方程描述三维地下水流动, 采用二维 Saint-Venant 方程描述地表径流, 将饱水带至地表水之间的区域视为一个水文连续体, 以全面刻画不同尺度(如坡面、流域、大陆等)的水文过程^[50-51]。

目前, ParFlow 实现了与通用陆面过程模型(common land model, CLM)、气象研究和预报模式(weather research and forecasting, WRF)、先进区域预测系统(advanced regional prediction system, ARPS)等中尺度大气模型及多种机器学习算法的集成^[29, 52-53]。尤其, ParFlow-CLM 已被广泛应用于气候变化对水文循环要素的影响^[54-55], 降水、气温等驱动数据的不确定性对水文模拟结果的影响^[56-57], 地下参数化方案的影响^[46, 58-59]等诸多水文过程及模型方面的研究。ParFlow-CLM 模型构架如图 2 所示。

(2) CATHY 模型

CATHY 是由 Camporese 等^[11]开发的基于物理的集成模型。该模型基于地下模块 FLOW 3D 和地表模块 SURF-ROUT 耦合而成。FLOW 3D 采用 Richards 方程的 3D 形式, 由可变饱和地下水水流的有限元求解。SURF-ROUT 是基于数字高程模型(DEM)的地表径流模块, 用于模拟坡面流和河流。地表和地下模块的耦合通过边界条件切换法实现。

(3) HGS 模型

HydroGeoSphere(HGS)模型是由 Therrien 等^[30]开发、基于 FORTRAN 2014 编写、非开源的地下水-地表水集成模型。HGS 是三维控制体积有限元模型, 可以选择多种空间离散化方案进行建模。模型动态整合了水文循环的关键组成部分, 如裸土和水体蒸发、植被蒸腾和根系吸收、积雪/融雪和土壤冻融的动态变

化^[45]。HGS 还可与大气边界层模型(atmospheric boundary layer model, ABL)耦合以模拟大气-地表-地下相互作用^[35]。HGS 可以在 Microsoft Windows 或 Linux 系统上运行, 其计算效率依赖于应用 OpenMP 的并行计算框架^[61]。HGS 应用图形用户界面(graphic user interface, GUI)生成网格, 应用 HSPLIT 和 Tecplot 进行可视化后处理^[10]。此外, HGS 还具有与 ArcGIS 等 GIS 工具的接口, 进而增强空间数据分析能力。

(4) InHM 模型

综合水文模型(integrated hydrology model, InHM)由 VanderKwaak^[31]推出, 可用于多孔介质中的三维可变饱和流动、溶质运移及地表明渠的二维流动^[62], 并且能够在没有事先假设的情况下模拟自然流域中的 4 种主要径流(超渗地面径流、饱和地面径流、地下径流和壤中流)的产流过程^[63]。此外, InHM 模型还被用于研究工程结构(如大坝拆除、森林道路等)对环境的影响^[63]。InHM 应用 Saint-Venant 方程的二维扩散波近似模拟地表流动, 并采用三维 Richards 方程求解地下水流, 地表水流和地下水水流的联系基于一阶交换系数法实现。

1.2.2 松散耦合模型

(1) MODFLOW

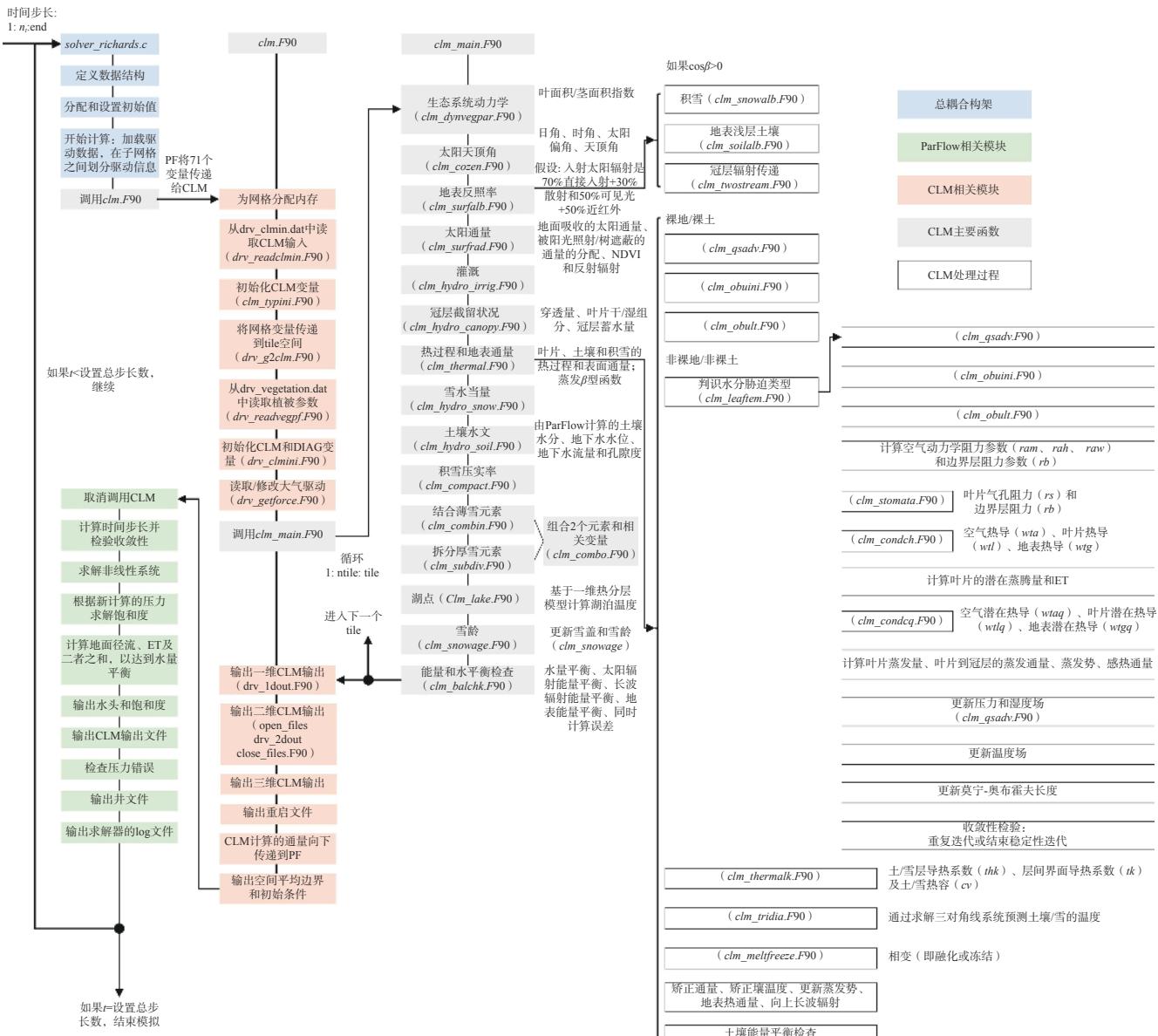
MODFLOW 是基于 FORTRAN 语言编写的模型, 使用有限差分法对多孔介质的三维地下水流动方程进行数值求解^[32]。MODFLOW 可以模拟地下水流动系统在多种自然和人类活动影响情景下的变化。该模型并未模拟陆地-大气相互作用、入渗和地表径流等地表过程。因此, 该模型常与 SWAT 模型等地表水模型耦合进行地下水-地表水交互方面的研究^[12, 40]。目前, 大部分松散耦合模型都基于 MODFLOW 或以某种方式与 MODFLOW 进行链接或耦合, 如 MODHMS 模型等^[6]。

(2) FEFLOW

FEFLOW 是由德国柏林水资源规划与系统研究所(WASY GmbH)于 1979 年创建的一款商业软件。该模型是地下水流动、传热和传质建模最常用的软件之一, 但是它无法模拟地面沉降^[64]。FEFLOW 常与 MIKE 地表模型结合使用, 用于研究简单或复杂的水文地质构造中的地下水-地表水交互。MIKE FEFLOW 提供了基于图形的交互式用户界面、与 GIS 系统的数据接口以及可以解决复杂问题的编程接口^[33]。

(3) GSFLOW

GSFLOW 由美国地质调查局^[34]开发。该模型基

图 2 ParFlow-CLM 模型构架图 (修改自 Condon 等^[60])Fig. 2 ParFlow-CLM flow chart (modified after Condon et al^[60])

于FORTRAN 和 C 语言编写, 模型代码开源, 可跨平台运行。GSFLOW 通过降水径流建模系统(precipitation-runoff modeling system, PRMS)与三维模块化地下水水流模型 MODFLOW-NWT 耦合, 将地表、包气带和饱和带整合在一起^[65]。PRMS 通过平衡积雪、植被冠层和土壤的物质与能量收支模拟径流、蒸散发和入渗等过程。MODFLOW-NWT 是地下水模型 MODFLOW-3 的升级版, 用于模拟地下水水流、径流、湖泊-含水层相互作用、地下水开采与人工补给等^[66-67]。

2 地下水-地表水集成模型误差来源分析

数值模型是对自然过程的简化, 其模拟结果是真

实数据的近似, 受到模型底层简化方法的限制^[68]。由于建模过程没有完美方案, 模型模拟结果均存在一定误差^[69]。厘清地下水-地表水交互模拟的误差来源, 对于优化模型性能具有重要意义。模型误差来源于多种因素, 如模型结构、输入数据、参数化方案等。根据误差类别, 地下水-地表水集成模型误差来源总体上可分为地形处理方案、驱动数据、模型参数化方案、人为因素和认知的有限性 5 大类^[70](表 2)。

地形处理方案上, 集成模型所需的地形坡度数据通常经过一定的预处理, 例如原始数据分辨率升/降尺度, 通过地形平滑处理调整河网等, 其目的在于确保输入数据与模型分辨率的尺度匹配以及流域内河

表 2 地下水-地表水集成模型模拟结果误差来源
Table 2 Potential sources of bias acting on integrated groundwater-surface water model simulation results

误差类别	潜在误差来源	参考文献
地形处理方案	原始河道数据及其处理方案 DEM精度的损失	[70–71]
驱动数据	驱动数据自身变量 驱动数据预处理方案 地表参数	[56, 72–73]
模型参数化方案	水文地质参数 初始条件 模型离散化方案	[62, 74–75]
人为因素	大坝和水库建设 地下水开采 土地利用变化 物理过程认识不足	[70, 76]
认知的有限性	真实物理过程简化的影响 尺度问题 真实性检验问题	[40, 70]

网的连通性^[77]。DEM 数据分辨率损失及地形平滑处理会导致真实地形起伏和流域面积的变化,进而对模拟径流产生未知的影响^[70]。Condon 等^[71]为改进水文集成模型所需的地形输入数据,提出了基于 Priority Flood 算法改进的地形处理工具 Priority Flow,并展示了地形处理方案对水文模拟的影响,进行了水文过程线对河道坡度处理方案的敏感性分析。由于水文循环过程极为复杂,任意要素的变化都可能对其他要素产生潜在影响。因此,地形处理方案对径流和地下水-地表水交换通量的影响易向下传递,进而对蒸散发、地下水水位等其他要素的模拟结果产生未知影响。

气象驱动数据是集成模型的重要误差来源之一。由于测量大气条件较为困难,驱动数据中的变量(降水、气压等)通常由地面观测、卫星遥感及气候模型等各种来源融合而成。除数据自身的误差,驱动数据的预处理方案也可能引入新的误差。这些误差会随着输入传递至集成模型中,可能会对流域水文循环模拟结果准确性产生重大影响^[56]。如, Schreiner-McGraw 等^[57]基于 ParFlow-CLM 研究了降水数据中的不确定性通过流域传播的机制。结果表明,降水数据不确定性经地形再分配后会引起地下水储量模拟结果的变化。地形对模拟通量传播不确定性的影响比可变的地下参数的影响更大。此外,使用可用数据集的平均降水进行单一模拟比使用各个产品单独模拟的平均模拟结果对模型性能指标的改善效果更好,进一步量化了降水和气温数据集的不确定性对山区流域模拟地下水补给的影响^[72]。气温和降水的不确定性对地下水补给的综合影响是叠加的,综合不确定性水平大致等于单个不确定性的总和。模拟水量收支不确定性的大小反映了在山区开发高质量的气象驱动数据集

的重要性。Shuai 等^[73]基于 ATS 模型比较了 3 种网格化气象数据集驱动下的流域水文变量,评估了气象驱动数据时空分辨率对模拟流域水文响应的影响,研究表明,最佳数据集取决于感兴趣的要素数量及其空间和时间尺度。

模型参数化方案中,渗透系数、孔隙度、曼宁粗糙度、van Genuchten 参数、土壤和植被参数、压力水头和饱和度的初始场、模型网格离散方案等均会对模拟结果造成影响。例如, Sulis 等^[74]设置 3 种地下-陆面过程参数化方案,基于地面系统建模平台(terrestrial systems modeling platform, TerrSysMP)展开数值模拟,评估了增加地下-陆面物理过程的复杂程度对模型模拟性能的影响。结果显示,更详细的地下与陆面过程设置方案改善了土壤湿度和地下-地表-下边界大气层之间能量分配的模拟结果;同时,不同的湍流传输参数化方案对地下信号进入地表具有绝对的控制作用,而大气下边界层的状态参量则与土壤湿度和温度无显著相关性。Foster 等^[75]比较了地形复杂的科罗拉多河源头流域从 100 m 到 1 km 分辨率的模型模拟的变化,对 4 个数量级的渗透系数和曼宁粗糙度系数进行了敏感性分析,结果表明,渗透系数调节地表和地下对径流的贡献,而曼宁粗糙度系数对高强度入渗-超渗流的持续时间起调节作用。为了研究土壤性质的变化对流域尺度水文过程和物质输运的影响, Ran 等^[62]基于 InHM 模型对渗透系数、曼宁粗糙度系数和侵蚀系数 3 种影响土体性质的参数进行了敏感性分析。近地表渗透系数的增加可有效降低流量峰值和总量,并可能导致产流机制从霍顿产流向邓恩产流转变;曼宁粗糙度系数的增加会减慢流速,从而大大降低排泄量和产沙量,进而导致径流产生后沿河道的渗透增加;侵蚀系数的降低会减缓输沙速率、降低输沙总质量,最终减缓景观演变。

人为因素的影响亦是模型主要误差来源之一。Maxwell 等^[76]对比了 Lees Ferry 美国地质调查局水文观测站模拟径流量与测量仪观测的结果,发现河川的径流量完全由人为因素(大坝水力调控)控制。此外,人为分水活动、地下水开采、土地利用变化等因素,也可能对模拟结果造成未知影响。O'Neill 等^[70]提出可以在 ParFlow-CLM 中添加人为影响模块,如城市水文模块、地表水分水模块等,但这会对模型计算性能和历史用水数据的详尽程度提出更高要求,当下较难实现。

最后,建模者认知的有限性也会造成模型无法避免的误差。目前,在一个集成模型中囊括水文循环过程的所有环节仍是一个巨大的挑战。物理过程认知不

足, 模型概念设计中对真实物理过程的简化会带来模型结构的不确定性^[78], 模型结构的缺陷会引起模拟结果的偏差。Guevara-Ochoa 等^[40]指出, SWAT-MODFLOW 中缺少将地下水水位与土壤饱和度变化联系起来的模块, 导致 SWAT 模型在湿润期为 MODFLOW 模型提供了更高的补给, 而不是产生地表径流。此外, 模型模拟尺度及真实性检验等问题, 也会为地下水-地表水集成模型模拟结果带来未知的偏差。

3 地下水-地表水集成模型的应用

3.1 气候变化和人类活动影响下的地下水-地表水规律变化

气候变化和人类活动通过影响流域水文循环过程和水资源的再生能力对地下水-地表水交互产生间接影响。其中, 气候变化的影响主要体现在气温、降水等水文气象变量的变化, 改变了地表水和地下水的补给和排泄过程以及地表水-地下水的水分交换通量, 进而影响地下水-地表水交互^[79-80]。人类活动的影响主要体现在土地利用、农业灌溉、地下水开采等活动, 改变了地下水和地表水的补给和排泄条件、地下水和地表水的流动和储量、地表水和地下水水位, 进而影响地下水-地表水交互^[81-82]。在气候变化和人类活动的双重作用下, 地下水-地表水交互愈加复杂^[79]。

地下水-地表水集成模型成为研究气候变化和人类活动对地下水-地表水影响的有效手段。例如, Saha 等^[83]使用基于物理过程的栅格化地表-地下水文分析模型 (gridded surface subsurface hydrologic analysis, GSSHA), 预测了 IPCC 第四次评估报告中排放情景特别报告 (special report on emissions scenarios, SRES) 的气候变化情景 A2 和 B1 下 2020—2040 年间的地下水排泄/基流。模拟结果表明, 气候变化通过产生不同时间平均的地下水对径流的贡献, 显著影响地下水-地表水交互的时间格局。由于降水变化, 这些贡献在月、季和年尺度上存在差异。Vrzel 等^[84]耦合 FEFLOW、水流与平衡模拟模型 (water flow and balance simulation model, WaSiM) 以及 MIKE 11 三个模型, 研究了未来不同气候情景下降水、河流和地下水之间的交互。模型模拟结果表明, 地下水抽取区的含水层更容易受到气候变化的影响。Taie 等^[79]基于水文集成模型 SWAT-MODFLOW-NWT, 量化了三种气候排放情景 (RCP 2.6、4.5 和 8.5) 和两种地下水开采情景 (“抽水”和“非抽水”) 结合下的地表水-地下水交互。结果表明, 由于未来降水量普遍减少, 尽管在整个预测期内有起伏, 但大多数地表水和地下水储量和通量都受到了很大影

响。Essaid 等^[81]采用 GSFLOW 模型研究了灌溉方式对蒙大拿州史密斯河上游流域的径流、地下水排泄以及径流温度的影响, 结果显示仅用地表水灌溉会增加地下水储量和地下水排泄, 而仅开采地下水用于灌溉则导致地下水水位普遍下降、地下水储量与地下水排泄减少以及径流温度升高。Condon 等^[85]设置不同的情景, 应用 ParFlow-CLM 模型研究了抽水和灌溉对区域水文过程的影响。结果显示抽水和灌溉会改变区域水量平衡; 灌溉需求、地下水水位变化和潜热通量变异性之间存在一定的相互联系。

3.2 水资源管理与优化配置

水资源管理与配置对维持流域水资源和生态系统健康发展具有重要影响^[81, 86]。由于地下水与地表水资源紧密关联, 地下水-地表水联合利用常作为提高用水效率的水资源管理方案^[87]。因此, 为进一步优化水资源管理策略和配置方案, 需要深入了解地下水-地表水联合利用相关的水资源管理策略对水文过程的影响^[88-89]。

地下水-地表水集成模型是展开相关研究的有效手段。Liu 等^[90]采用土壤水气植被 (soil-water-atmosphere-plant, SWAP) 模型和 SWAT-MODFLOW 模型进行综合建模, 根据不同的井渠灌溉供应比例和 SWAP 确定的灌溉计划设计了 5 个场景展开数值模拟。结果表明, 渠改道与管井泵联合管理可以有效减少蒸发损失, 提高水分利用效率, 维持地下水水位, 同时保持当前作物产量水平。Parsapour-Moghaddam 等^[91]将基于遗传算法的优化模型与 MODFLOW 模型联动, 开发了一种基于启发式演化博弈的方法, 以确定地表水和地下水联合分配给目标冲突的水资源用户的演化稳定平衡策略。模型在伊朗拉夫桑詹平原的应用研究表明其可用于制定地表水和地下水分配政策。Wu 等^[92]采用优化的 GISFLOW 模型对西北半干旱地区地表水和地下水联合灌溉进行研究。研究结果体现了地下水-地表水强烈而复杂的相互作用在水循环中的重要性, 通过在时间和空间上优化不同灌区的地下水利用率, 可以实现流域规模的节水。节水潜力主要来源于输水管道系统和浅层地下水的非有益蒸散量的减少, 其大小在很大程度上取决于水资源管理方案和当地的水文条件。Mani 等^[86]耦合了 VIC 模型和 the USGS sparta groundwater model, 并引入混合整数线性分数规划方法, 研究了未来气候变化情景下路易斯安那州北部供水网络的地下水与地表水优化联合管理解决方案。Li 等^[93]以黑河中上游地区为研究区, 建立了基于网格的地表水-地下水综合模型 (grid-based integrated

surface-groundwater model, GISMOD), 采用对照方法估算灌溉需水量, 并对 GISMOD 模型性能进行了评估。结果表明, 利用 GISMOD 可以大致估算黑河流域实际灌溉耗水量的月度变化。该研究有助于提高对该流域农田水循环和农业用水机制的认识。

4 地下水-地表水集成模型面临的挑战

随着人们对水文过程的认识与理解的不断加深, 地表水地下水耦合模拟得以诞生并逐渐发展, 最终成为分析地下水-地表水交互的一种有效方法。得益于高性能计算的发展和水文模型理论水平的提高, 地下水-地表水集成模型逐渐成为流域尺度地下水-地表水交互研究的主力军^[25]。目前广泛使用的集成模型拥有各自的特点与多样化的应用领域。在未来水文领域深入发展与新的水资源问题不断涌现的过程中, 地下水-地表水集成模型也将面临越来越多的挑战, 主要体现在以下几个方面。

(1) 基础数据需求增大

地下水-地表水集成模型发展趋于复杂化与精细化, 进而对输入数据的数量与质量提出了更高要求。同时模拟结果的验证评估是集成模型应用研究不可或缺的关键步骤^[12]。模型在发展完善过程中对验证数据的指标数量与序列长度等方面的要求也将逐渐提高。但是, 当前各个国家的数据获取难度不同, 且不同数据集的质量控制存在较大差异^[94]。模型开发和校准所需数据不足时, 可能造成多方面模拟不确定性, 从而阻碍其推广应用^[95-96]。因此, 数据获取困难是地下水-地表水集成模型建模的重要限制性因素之一。

(2) 硬件平台要求提高

在不同时空尺度上进行地下水-地表水交互建模的计算成本非常高昂。从流域到大陆乃至全球尺度的转变容易导致计算量呈指数级增加。因此, 高分辨率模型对计算平台和存储空间的需求不断扩大, 解决计算效率和数据存储挑战成为大尺度建模工作中至关重要的部分^[94]。

(3) 模拟范围的确定具有一定挑战性

确定模拟范围是开展水文过程数值模拟的基础^[97]。地下水-地表水集成模型适用性广泛, 可在柱体、坡面、流域乃至大陆等多种尺度上开展模拟。三维水文过程数值模拟中, 研究对象根据地理特征通常可分为完整流域和非完整流域(如行政区)^[98]。完整流域的水文模拟常以地表流域作为集成模型的模拟范围。但是, 地表水和地下水运动的动力学边界通常不一致, 地表水流域未必能完全将地下水运动限制在内

部, 因而会产生跨流域地下水循环^[99-100]。跨流域地下水循环的存在将影响模型模拟结果, 如何选择集成模型的模拟范围是有待解决的问题。而非完整流域的水文模拟中, 合适的模拟范围不仅可以精确描述研究区的空间范围, 而且能避免过多的数据需求和计算负担^[97-98]。因此, 在选择集成模型的模拟范围时, 需要谨慎考虑。

(4) 学科交叉趋势明显

地下水-地表水交互包含多种水文循环要素, 该过程涉及水文地质、地球化学、生物和气候等诸多方面^[12], 抽水灌溉等人类活动的影响也使得地下水-地表水交互过程趋于复杂化, 单纯从水文学角度出发的地下水-地表水交互模拟可能无法满足水资源优化管理等应用需求。

5 结论与展望

本文综合国内外地下水-地表水集成模型的相关研究, 系统梳理了地下水-地表水集成模型相关研究进展。

(1) 根据耦合方案, 地下水-地表水集成模型可分为完全耦合模型和松散耦合模型。

(2) 根据误差类别, 模型误差来源可分为地形处理方案、驱动数据、模型参数化方案、人为因素和认知的有限性等 5 类。

(3) 集成模型在气候变化和人类活动影响下的地下水-地表水规律变化以及水资源管理与优化配置方面的研究广泛。

(4) 随着水文学研究的深入发展, 地下水-地表水集成模型面临着基础数据需求增大、硬件平台要求提高、模拟范围较难准确把握和学科交叉趋势明显等挑战。

为了应对产生的水资源问题未来可能带来的挑战, 地下水-地表水集成模型仍有待进一步发展与完善。

(1) 拓宽参数获取渠道。充分利用原位监测和遥感观测等已有观测数据, 并深入挖掘其潜力。面临参数难以直接获取的挑战时, 可在确保数据质量可靠的前提下, 灵活采用已有的数据同化、建模产品等作为替代方案, 并将其有效整合到集成模型中, 以提升模型准确性。例如, 通过对 DEM 数据的处理和分析, 获取坡度、地表流向等地形特征参数; 以气象再分析资料或气候模式数据作为集成模型的气象驱动输入等。

(2) 提高模型计算效率。随着高性能计算技术不断进步, 地下水-地表水集成模型模拟能力大幅提升, 模型分辨率与复杂度均逐渐提高。近年来, 众多模型积极尝试利用 CPU、GPU 等架构加速模型模拟, 取得

了显著成效。未来的地下水-地表水集成模型发展也应与下一代并行硬件技术发展齐头并进,以持续推动模型模拟能力进一步提升。此外,地下水-地表水集成模型耦合机器学习算法也有助于更好地处理数据缺失和计算复杂度较高的问题。

(3)加强不同学科融合。未来,基于地下水-地表水集成模型的水文学研究应与生态学、气象学、人文社会科学等多种学科进行交叉融合,以实现更全面的多过程水文模拟。此外,从水资源优化管理的角度,实现人类社会可持续发展的目的,未来的地下水-地表水集成模型的发展应更注重与社会经济学的交叉融合。

参考文献 (References) :

[1] XIE Yueqing, COOK P G, SIMMONS C T. Solute transport processes in flow-event-driven stream-aquifer interaction[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 363 – 373.

[2] STONEDAHL S H, HARVEY J W, WÖRMAN A, et al. A multiscale model for integrating hyporheic exchange from ripples to meanders[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): W12539.

[3] WOESSNER W W. Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling hydrogeologic thought[J]. *Groundwater*, 2000, 38(3): 423 – 429.

[4] BOANO F, HARVEY J W, MARION A, et al. Hyporheic flow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(4): 603 – 679.

[5] DE GRAAF I E M, GLEESON T, RENS VAN BEEK L P H, et al. Environmental flow limits to global groundwater pumping[J]. *Nature*, 2019, 574(7776): 90 – 94.

[6] BARTHEL R, BANZHAF S. Groundwater and surface water interaction at the regional-scale—A review with focus on regional integrated models[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(1): 1 – 32.

[7] BROECKER T, SOBHI GOLLO V, FOX A, et al. High-resolution integrated transport model for studying surface water-groundwater interaction[J]. *Ground Water*, 2021, 59(4): 488 – 502.

[8] STEWART R J, WOLLHEIM W M, GOOSEFF M N, et al. Separation of river network-scale nitrogen removal among the main channel and two transient storage compartments[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(10): W00J10.

[9] COLUCCIO K, MORGAN L K. A review of methods for measuring groundwater-surface water exchange in braided rivers[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(10): 4397 – 4417.

[10] 周妍,白国营,赵洪岩,等.分布式地表水-地下水耦合数值模型研究进展[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(3): 435 – 446. [ZHOU Yan, BAI Guoying, ZHAO Hongyan, et al. Research advances in distributed coupled surface-subsurface numerical model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(3): 435 – 446. (in Chinese with English abstract)]

[11] CAMPORESE M, PANICONI C, PUTTI M, et al. Surface-subsurface flow modeling with path-based runoff routing, boundary condition-based coupling, and assimilation of multisource observation data[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(2): W02512.

[12] NTONA M M, BUSICO G, MASTROCICCO M, et al. Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157355.

[13] ROSENBERRY D O, LABAUGH J W. Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water[R]. Denver: U S Geological Survey, 2008.

[14] ROSENBERRY D O, GLASER P H, SIEGEL D I, et al. Use of hydraulic head to estimate volumetric gas content and ebullition flux in northern peatlands[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(3): 1066.

[15] GLOSE A, LAUTZ L K, BAKER E A. Stream heat budget modeling with HFLUX: Model development, evaluation, and applications across contrasting sites and seasons[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 92: 213 – 228.

[16] BATCHELOR C, GU Chuanhui. Hyporheic exchange and nutrient uptake in a forested and urban stream in the southern appalachians[J]. *Environment and Natural Resources Research*, 2014, 4(3): 56.

[17] VOGEL R M, LALL U, CAI Ximing, et al. Hydrology: The interdisciplinary science of water[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4409 – 4430.

[18] SOLOMON D K, HUMPHREY E, GILMORE T E, et al. An automated seepage meter for streams and lakes[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4): e2019WR02698.

[19] MAO Meng, ZHENG Xiaoli, CHEN Chong, et al. Coupled effect of flow velocity and structural heterogeneity on transport and release of kaolinite colloids in saturated porous media[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(28): 35065 – 35077.

[20] 梁杏,张人权,牛宏,等.地下水水流系统理论与研究

方法的发展 [J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 143 – 151. [LIANG Xing, ZHANG Renquan, NIU Hong, et al. Development of the theory and research method of groundwater flow system[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 143 – 151. (in Chinese with English abstract)]

[21] BRUNNER P, THERRIEN R, RENARD P, et al. Advances in understanding river-groundwater interactions[J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(3): 818 – 854.

[22] TRIPATHI M, YADAV P K, CHAHAR B R, et al. A review on groundwater–surface water interaction highlighting the significance of streambed and aquifer properties on the exchanging flux[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(17): 604.

[23] POETER E, FAN Ying, CHERRY J, et al. Groundwater in our water cycle: Getting to know earth's most important fresh water source[M]. Guelph: The Groundwater Project, 2020.

[24] LIU Minghuan, JIANG Yao, XU Xu, et al. Long-term groundwater dynamics affected by intense agricultural activities in oasis areas of arid inland river basins, Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 37 – 52.

[25] 胡立堂. 黑河干流中游地区地表水和地下水集成模拟与应用 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 563 – 569. [HU Litang. Integrated surface water-groundwater model and application in the middle branches of the Heihe River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2014, 50(5): 563 – 569. (in Chinese with English abstract)]

[26] LI Xin, CHENG Guodong, GE Yingchun, et al. Hydrological cycle in the Heihe River Basin and its implication for water resource management in endorheic basins[J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2018, 123(2): 890 – 914.

[27] 薛禹群. 中国地下水数值模拟的现状与展望 [J]. *高校地质学报*, 2010, 16(1): 1 – 6. [XUE Yuqun. Present situation and prospect of groundwater numerical simulation in China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2010, 16(1): 1 – 6. (in Chinese with English abstract)]

[28] HAQUE A, SALAMA A, LO Kei, et al. Surface and groundwater interactions: A review of coupling strategies in detailed domain models[J]. *Hydrology*, 2021, 8(1): 35.

[29] KOLLET S J, MAXWELL R M. Integrated surface–groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(7): 945 – 958.

[30] THERRIEN R, SUDICKY E A. Three-dimensional analysis of variablysaturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1996, 23(1/2): 1 – 44.

[31] VANDERKWAAK J E. Numerical simulation of flow and chemical transport in integrated surface-subsurface hydrologic systems[D]. Waterloo: University of Waterloo, 1999.

[32] MCDONALD M G, HARBAUGH A W. The history of MODFLOW[J]. *Ground Water*, 2003, 41(2): 280 – 283.

[33] HALDER S, ROY M B, ROY P K. Understanding the exchange process between ground and surface water using mini drive point piezometer and mathematical models to identify suitable managed aquifer recharge sites[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(40): 92736 – 92767.

[34] MARKSTROM S L, NISWONGER R G, REGAN R S, et al. 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) [M]. Reston: U S Geological Survey Techniques and Methods 6-D1, 2008.

[35] DAVISON J H, HWANG H T, SUDICKY E A, et al. Coupled atmospheric, land surface, and subsurface modeling: Exploring water and energy feedbacks in three-dimensions[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 86: 73 – 85.

[36] HEPPNER C S, RAN Qihua, VANDERKWAAK J E, et al. Adding sediment transport to the integrated hydrology model (InHM): Development and testing[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(6): 930 – 943.

[37] SHOKRI A. Developing a new numerical surface/ subsurface model for irrigation and drainage system design[C]. Melbourne: IAHS-AISH Publication, 2011, 345.

[38] 齐永孟. 基于 Saint-Venant 方程组的大规模流体模拟研究与实现 [D]. 青岛: 青岛大学, 2022. [QI Yongmeng. Research and implementation of large-scale fluid simulation based on Saint-Venant equations[D]. Qingdao: Qingdao University, 2022. (in Chinese with English abstract)]

[39] BANERJEE D, GANGULY S. A review on the research advances in groundwater–surface water interaction with an overview of the phenomenon[J]. *Water*, 2023, 15(8): 1552.

[40] GUEVARA-OCHOA C, MEDINA-SIERRA A, VIVES L. Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in Plains[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137886.

[41] 薛禹群. 地下水动力学 [M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 1997. [XUE Yuqun. Groundwater hydraulics [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese with English abstract)]

[42] QI Peng, ZHANG Guangxin, XU Yijun, et al. Response of water resources to future climate change in a high-latitude river basin[J]. *Sustainability*, 2019, 11(20): 5619.

[43] EBEL B A, MIRUS B B, HEPPNER C S, et al. First-order exchange coefficient coupling for simulating surface water-groundwater interactions: Parameter sensitivity and consistency with a physics-based approach[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(13): 1949–1959.

[44] LIGGETT J E, WERNER A D, SIMMONS C T. Influence of the first-order exchange coefficient on simulation of coupled surface–subsurface flow[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414: 503–515.

[45] KOLLET S J, SULIS M, MAXWELL R M, et al. The integrated hydrologic model intercomparison project, IH-MIP2: A second set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(1): 867–890.

[46] MAXWELL R M. Infiltration in arid environments: Spatial patterns between subsurface heterogeneity and water-energy balances[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(4): 970–983.

[47] MAXWELL R M, PUTTI M, MEYERHOFF S, et al. Surface–subsurface model intercomparison: A first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(2): 1531–1549.

[48] ASHBY S F, FALGOUT R D. A parallel multigrid preconditioned conjugate gradient algorithm for groundwater flow simulations[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1996, 124(1): 145–159.

[49] JONES J E, WOODWARD C S. Newton–Krylov multigrid solvers for large-scale, highly heterogeneous, variably saturated flow problems[J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(7): 763–774.

[50] MAXWELL R M, CONDON L E, KOLLET S J. A high-resolution simulation of groundwater and surface water over most of the continental US with the integrated hydrologic model ParFlow V3[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(3): 923–937.

[51] 陆峥, 胡锦华, 张圆, 等. 基于水文集成模型 ParFlow 的黑河流域下游地下水-地表水相互作用模拟研究 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28(3): 7–15. [LU Zheng, HU Jinhua, ZHANG Yuan, et al. Simulating groundwater-surface water interaction using an integrated hydrologic model ParFlow in the downstream of the Heihe River Basin [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(3): 7–15. (in Chinese with English abstract)]

[52] KUFFOUR B N O, ENGDAHL N B, WOODWARD C S, et al. Simulating coupled surface–subsurface flows with ParFlow V3.5. 0: Capabilities, applications, and ongoing development of an open-source, massively parallel, integrated hydrologic model[J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(3): 1373–1397.

[53] TRAN H, LEONARDUZZI E, DE LA FUENTE L, et al. Development of a deep learning emulator for a distributed groundwater–surface water model: ParFlow-ML[J]. *Water*, 2021, 13(23): 3393.

[54] MAXWELL R M, KOLLET S J. Interdependence of groundwater dynamics and land-energy feedbacks under climate change[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 665–669.

[55] CONDON L E, ATCHLEY A L, MAXWELL R M. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 873.

[56] MAINA F Z, SIIRILA-WOODBURN E R, VAHMANI P. Sensitivity of meteorological-forcing resolution on hydrologic variables[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(7): 3451–3474.

[57] SCHREINER-MCGRAW A P, AJAMI H. Impact of uncertainty in precipitation forcing data sets on the hydrologic budget of an integrated hydrologic model in mountainous terrain[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(12): e2020WR027639.

[58] 陆峥, 孙景博, 何源, 等. 黑河流域中游灌区含水层系统异质性对地表热通量和温度的影响模拟 [J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(6): 7–15. [LU Zheng, SUN Jingbo, HE Yuan, et al. Impacts of subsurface aquifer heterogeneity on surface heat fluxes and temperature: A case study in the irrigation area in the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(6): 7–15. (in Chinese with English abstract)]

[59] HERZOG A, HECTOR B, COHARD J M, et al. A parametric sensitivity analysis for prioritizing regolith knowledge needs for modeling water transfers in the

West African critical zone[J]. *Vadose Zone Journal*, 2021, 20(6): e20163.

[60] CONDON L E, ENGDAHL N, MAXWELL R M. ParFlow Advanced Short Course[Z/OL]. Arizona: University of Arizona, 2019. (2019-10-04) [2024-01-01]. [Https://github.com/hydroframe/ParFlow_Advanced_ShortCourse/blob/master/Additional_Materials/](https://github.com/hydroframe/ParFlow_Advanced_ShortCourse/blob/master/Additional_Materials/)

[61] HWANG H T, PARK Y J, SUDICKY E A, et al. A parallel computational framework to solve flow and transport in integrated surface–subsurface hydrologic systems[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 61: 39–58.

[62] RAN Qihua, HONG Yanyan, CHEN Xiuxiu, et al. Impact of soil properties on water and sediment transport: A case study at a small catchment in the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 211–225.

[63] RAN Qihua, TANG Honglei, WANG Feng, et al. Numerical modelling shows an old check-dam still attenuates flooding and sediment transport[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46(8): 1549–1567.

[64] PHAM H T, RÜHAAK W, SCHUSTER V, et al. Fully hydro-mechanical coupled Plug-in (SUB+) in FEFLOW for analysis of land subsidence due to groundwater extraction[J]. *SoftwareX*, 2019, 9: 15–19.

[65] TANVIR HASSAN S M, LUBCZYNSKI M W, NISWONGER R G, et al. Surface–groundwater interactions in hard rocks in Sardon Catchment of western Spain: An integrated modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 390–410.

[66] SOLEIMANI S, BOZORG-HADDAD O, BOROOMANDNIA A, et al. A review of conjunctive GW-SW management by simulation–optimization tools[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2021, 70(3): 239–256.

[67] NISWONGER R G, MORWAY E D, TRIANA E, et al. Managed aquifer recharge through off-season irrigation in agricultural regions[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(8): 6970–6992.

[68] ANDERSON M P, WOESSNER W W, HUNT R J. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport[M]. 2nd ed. London: Academic Press, Elsevier, 2015:444-445.

[69] DOHERTY J. Modeling: Picture perfect or abstract art?[J]. *Ground Water*, 2011, 49(4): 455.

[70] O’NEILL M M F, TIJERINA D T, CONDON L E, et al. Assessment of the ParFlow–CLM CONUS 1.0 integrated hydrologic model: Evaluation of hyper-resolution water balance components across the contiguous United States[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(12): 7223–7254.

[71] CONDON L E, MAXWELL R M. Modified priority flood and global slope enforcement algorithm for topographic processing in physically based hydrologic modeling applications[J]. *Computers & Geosciences*, 2019, 126: 73–83.

[72] SCHREINER-MCGRAW A P, AJAMI H. Combined impacts of uncertainty in precipitation and air temperature on simulated mountain system recharge from an integrated hydrologic model[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(4): 1145–1164.

[73] SHUAI Pin, CHEN Xingyuan, MITAL U, et al. The effects of spatial and temporal resolution of gridded meteorological forcing on watershed hydrological responses[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(8): 2245–2276.

[74] SULIS M, KEUNE J, SHRESTHA P, et al. Quantifying the impact of subsurface–land surface physical processes on the predictive skill of subseasonal mesoscale atmospheric simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(17): 9131–9151.

[75] FOSTER L M, MAXWELL R M. Sensitivity analysis of hydraulic conductivity and Manning’s *n* parameters lead to new method to scale effective hydraulic conductivity across model resolutions[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(3): 332–349.

[76] MAXWELL R M, CONDON L E. Connections between groundwater flow and transpiration partitioning[J]. *Science*, 2016, 353(6297): 377–380.

[77] BARNES M L, WELTY C, MILLER A J. Global topographic slope enforcement to ensure connectivity and drainage in an urban terrain[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2016, 21(4): 06015017.

[78] YUAN Lifeng, SINSHAW T, FORSHAY K J. Review of watershed-scale water quality and nonpoint source pollution models[J]. *Geosciences*, 2020, 10(25): 1–36.

[79] TAIE SEMIROMI M, KOCH M. How do gaining and losing streams react to the combined effects of climate change and pumping in the gharehsoo river basin, Iran?[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(7): e2019WR025388.

[80] VAN ENGELENBURG J, HUETING R, RIJPKEMA S, et al. Impact of changes in groundwater extractions and climate change on groundwater-dependent ecosystems in a complex hydrogeological setting[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(1): 259–272.

[81] ESSAID H I, CALDWELL R R. Evaluating the impact of irrigation on surface water–groundwater interaction

and stream temperature in an agricultural watershed[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599: 581 – 596.

[82] 郜晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 等. 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 29 – 43. [QI Xiaofan, LI Wenpeng, CUI Huqun, et al. Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 29 – 43. (in Chinese with English abstract)]

[83] SAHA G C, LI Jianbing, THRING R W, et al. Temporal dynamics of groundwater-surface water interaction under the effects of climate change: A case study in the Kiskatinaw River Watershed, Canada[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 440 – 452.

[84] VRZEL J, LUDWIG R, GAMPE D, et al. Hydrological system behaviour of an alluvial aquifer under climate change[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 1179 – 1188.

[85] CONDON L E, MAXWELL R M. Groundwater-fed irrigation impacts spatially distributed temporal scaling behavior of the natural system: A spatio-temporal framework for understanding water management impacts[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(3): 034009.

[86] MANI A, TSAI F T C, KAO S C, et al. Conjunctive management of surface and groundwater resources under projected future climate change scenarios[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 397 – 411.

[87] SINGH A. Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1688 – 1697.

[88] WANG Yiming, ZHOU Yuyu, FRANZ K J, et al. Irrigation plays significantly different roles in influencing hydrological processes in two breadbasket regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 844: 157253.

[89] DECHMI F, SKHIRI A. Evaluation of best management practices under intensive irrigation using SWAT model[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 123: 55 – 64.

[90] LIU Luguang, CUI Yuanlai, LUO Yufeng. Integrated modeling of conjunctive water use in a canal-well irrigation district in the lower Yellow River Basin, China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, 139(9): 775 – 784.

[91] PARSAPOUR-MOGHADDAM P, ABED-ELMDOUST A, KERACHIAN R. A heuristic evolutionary game theoretic methodology for conjunctive use of surface and groundwater resources[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(11): 3905 – 3918.

[92] WU Bin, ZHENG Yi, WU Xin, et al. Optimizing water resources management in large river basins with integrated surface water-groundwater modeling: A surrogate-based approach[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2153 – 2173.

[93] LI Lei, XU Zongxue, ZHAO Jie, et al. A distributed hydrological model in the Heihe River Basin and its potential for estimating the required irrigation water[J]. *Hydrology Research*, 2017, 48(1): 191 – 213.

[94] CONDON L E, KOLLET S, BIERKENS M F P, et al. Global groundwater modeling and monitoring: Opportunities and challenges[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(12): 2020WR029500.

[95] ELSHALL A S, ARIK A D, EL-KADI A I, et al. Groundwater sustainability: A review of the interactions between science and policy[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 093004.

[96] WU Bin, ZHENG Yi, TIAN Yong, et al. Systematic assessment of the uncertainty in integrated surface water-groundwater modeling based on the probabilistic collocation method[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(7): 5848 – 5865.

[97] 刘欢, 杜军凯, 贾仰文, 等. 面向大尺度区域分布式水文模型的子流域划分方法改进 [J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 36 – 44. [LIU Huan, DU Junkai, JIA Yangwen, et al. Improvement of watershed subdivision method for large scale regional distributed hydrology model[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 36 – 44. (in Chinese with English abstract)]

[98] 雷晓辉, 王海潮, 田雨, 等. 南水北调中线受水区分布式水文模型子流域划分研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(3): 10 – 13. [LEI Xiaohui, WANG Haichao, TIAN Yu, et al. Subbasin delineation for the service areas of south-to-north water diversion project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(3): 10 – 13. (in Chinese with English abstract)]

[99] 韩鹏飞, 王旭升, 蒋小伟, 等. 跨流域地下水循环研究进展 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 107 – 117. [HAN Pengfei, WANG Xusheng, JIANG Xiaowei, et al. Advances in interbasin groundwater circulation[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(4): 107 – 117. (in Chinese with English abstract)]

[100] CONDON L E, MARKOVICH K H, KELLEHER C A, et al. Where is the bottom of a watershed? [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(3): e2019WR026010.