

流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展

张 婷¹,徐彬鑫¹,康爱卿²,郑彦辰¹,李建柱¹

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072;
2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:流域水文、水动力、水质模型联合应用可以实现水资源从源头运动到不同水体的全过程模拟,对水资源开发利用与综合管理决策具有重要的意义。为深入了解流域耦合模型的发展与演变过程,总结了水文、水动力与水质3类模型的结构与特点,探讨了各类模型在耦合应用中的作用,综合评价了单向传输耦合、双向传输耦合与接口传输耦合各自的优势与不足,并对耦合模型中的时空匹配问题进行了讨论。指出目前耦合模型中存在着结构松散和参数率定、应用标准不明确等问题,未来耦合模型将成为解决流域智能管理与决策问题的重要手段。

关键词:水文模型;水动力模型;水质模型;耦合方式;尺度匹配

中图分类号:P343.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)03-0011-09

Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins// ZHANG Ting¹, XU Binxin¹, KANG Aiqing², ZHENG Yanchen¹, LI Jianzhu¹ (1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: The application of hydrology-hydrodynamic-water environmental integrated models can provide the whole process simulation of regional water resources from the source to the water body, which is of great significance for the development and utilization of water resources and comprehensive decision-making management. In order to deeply understand the development and evolution of the basin coupling simulation system, the structure and characteristics of hydrological, hydrodynamic and water environmental models were summarized and the role of the models in the coupling system was discussed. The advantages and disadvantages of one-way coupling, two-way coupling and interface transmission coupling were summarized and reviewed, and the spatial and time scale matching problems in the coupling model was discussed. The problems such as loose structure, difficult parameter calibration and unclear application standard in the current coupling model were pointed out. Model coupling system can be an important measure to solve intelligent basin management and decision making in the future.

Key words: hydrological model; hydrodynamic model; water quality model; coupling method; scale matching

流域是自然形成的水资源动态系统,是水循环过程及水行政管理中的重要单元。对流域内水问题的理解与研究,是水资源开发利用、优化配置、综合决策管理等宏观问题研究的重要基础^[1]。研究的首要任务是获取流域翔实的水文、气象信息,但受限于观测站点分布、地理条件与历史因素,同时考虑到经济成本,观测数据往往集中在流域的中下游区域,且一些数据在时间上也不具有连续性,客观上限制了流域管理决策的精细化。因此,流域水文、水动力、水质模型成为补充缺测数据的重要手段,以及流域水资源综合管理的有效工具。

在流域水问题的模拟研究中,一般采用水文模型、水动力模型和水质模型对流域内的产汇流过程、水流运动过程和污染物对流扩散过程单独进行模拟,忽略了流域中复杂的水力联系。此外,由于单一模型本身存在机理缺陷,往往不能切实反映流域中关键要素的响应关系^[2],也不能满足模拟过程的精细化需求。因此,多模型联合系统在流域水系统的综合模拟中逐步得到了应用^[3]。在多模型系统中,水文模型可以对流域内的产汇流过程进行模拟,水动力模型则可以对河道水流的运动变化规律进行模拟,而水质模型通常由扩散方程来模拟营养物、泥沙

等,在此基础上考虑内部源汇项从而体现其时空变化情况。3 种模型联合使用,在一定程度上弥补了水文观测的“数据盲区”,可为流域管理提供更加可靠的模拟结果,同时一体化程度更高,便于管理者更全面地掌握流域水文、水动力及水质情况。若要实现流域的智能综合管理与决策,满足流域决策模型的计算需求,需构建水文、水动力、水质等多模块集成的流域智能管理云平台。但耦合模型系统结构较为复杂,耦合过程中常出现模型不匹配、尺度不一致等问题,随着流域决策对预测要素多样性和多过程模拟时空一致性的要求不断提高,水文、水动力、水质模型的耦合模式及时空尺度匹配问题已成为亟待解决的关键技术问题。目前有关 3 种模型耦合应用的研究文献较少,这为进一步开展研究工作带来了不便。本文通过查阅国内外文献资料,综述了国内外水文、水动力、水质模型联合应用的研究进展,总结了模型常见的耦合方式,并对耦合过程中存在的时空尺度匹配问题进行了简要分析。

1 模型理论与特性

1.1 水文模型

水文模型是对现实水文系统进行概化,并在一定条件下对水文变量的变化进行模拟和预报的一种数学语言或物理模型^[4]。一般可根据是否有随机过程分为确定性模型和随机性模型;还可根据对流域空间特性的描述分为基于概念的集总式模型,具有物理含义的半分布式模型和基于物理机制的全分布式模型。在模型耦合应用系统研究中,由于涉及空间尺度的匹配问题,后一种分类方式应用更为普遍。水文模型一般可用水量平衡方程表示产流量计算过程,如式(1)所示,而汇流计算则采用马斯京根法或单位线法。

$$R = P - E - W_p - W_s + \Delta W \pm R_c \pm R_y \pm R_{other}$$

(1)

式中: R 为流域产流量,mm; P 为流域降水量,mm; E 为流域蒸散发量,mm; W_p 为植物截留量,mm; W_s 为地面坑洼储水量,mm; ΔW 为土壤蓄水量的增量,mm; R_c 为不闭合流域的径流交换量,mm; R_y 为跨流域引水量,mm; R_{other} 为其他因素引起的水量增减,mm。

水文模型以流域内降水过程为主要输入条件,输出是流域出口断面的流量或水位过程,因此水文模型是一种输入具有分散性而输出具有集中性的模型。传统的集总式模型一般采用面平均雨量作为输入,伴随着地理信息系统的发展,物理含义更明确的分式水文模型自 20 世纪 70 年代开始兴起^[5]。

在模型的耦合模拟过程中,通过水文模型模拟

产生流域内各区域的径流过程数据,经处理后可作为水动力模型的输入。大部分分布式水文模型在子流域内仍采用传统的产汇流计算模式进行径流演算,并将子流域出口断面的流量过程作为下游水动力模型的入流边界条件^[6]。集总式模型在改进之后也可以对子流域的空间变异性加以考虑,并对不同的子流域进行不同的参数设置,改进后的集总式水文模型在参数调整的方案设置与最终径流模拟效果上已与分布式水文模型十分相近。

1.2 水动力模型

水动力学基本方程(控制方程)和边界条件、初始条件一起构成了对一个水力学问题完整的数学描述。水动力模型的核心是对水动力学基本方程的求解。针对不同特性水体的流动规律,可采用不同的控制方程进行描述,如描述一般流体运动最基本的 Navier-Stokes (N-S) 方程,在此基础上简化的水深平均平面二维浅水方程、一维圣维南方程组等。

水动力学方程属于偏微分方程,仅在少数情况下存在解析解,多数需要采用有限差分法、有限体积法和有限元法等算法^[7] 计算方程的数值解,各类求解方法优劣比较见表 1。随着计算方法和计算机技术的不断发展,以及对水流运动模拟精度要求的不断提高,基于数值模拟技术的水动力模型得到了更加广泛的应用。

表 1 流体运动方程求解方法比较

求解方法	优点	缺点
有限差分法	简单成熟,可构造高精度格式	处理复杂网格不够灵活
有限体积法	守恒性好,可处理复杂网格	精度不易提高(二阶以上方法复杂)
有限元法	基于变分原理,守恒性好	对于复杂方程处理困难
间断有限元法	精度高,守恒性好,易于处理复杂网格	计算量大,捕捉激波难度大
谱方法	精度高	拓扑结构,边界条件简单
粒子类方法	算法简单,可处理复杂拓扑结构	精度不易提高

水动力模型按照应用区域划分,可分为河道水动力模型、湖泊水动力模型与近海水动力模型^[8];按照模型维度划分,可分为一维水动力模型、二维水动力模型和三维水动力模型;根据常用功能来划分,还可分为仅进行水流运动模拟的水动力模型和同时进行水流运动和水质组分对流扩散转化模拟的水动力模型。

目前已有许多专家学者对水动力模型展开了多角度、多层次、不同领域的研究^[9-12],但在实际应用中仍存在以下难点问题:①计算域增大、离散程度提

高将大大增加偏微分方程组的求解难度,限制了水动力模型在复杂实际情况中的应用。例如在平原区河网水动力模拟中,由于平原感潮河网内部结构复杂,加之潮汐影响,水流具有往复性,由此构建的汉点方程组的系数矩阵为高阶稀疏矩阵,计算耗时长,且难以保持稳定,收敛性不佳^[3]。②数值模拟过程中可能存在虚假流动现象。当流域下垫面情况较复杂时,水流易受地形起伏影响,流速变化快,运动物理机制复杂,运用传统的底坡项近似方法与通量计算格式在干湿界面处理时易导致虚假流动的出现,造成模型崩溃^[13]。③高精度洪水演进模拟的效率及稳定性难以保证。为了提高模型模拟的精度,采用高分辨率地形构建水动力模型已成为趋势,但高分辨率地形的复杂拓扑结构导致更加复杂的地表水动力过程,在计算中易导致异常水深和伪高流速等非物理现象,造成计算失稳和计算时间的大幅增加^[14]。

另外,与水文模型相比,水动力模型的计算量大幅增加,计算效率是水动力模型一直以来面临的主要问题之一。采用合适的耦合方式,流域范围整体采用水文模型进行布局,重点区域用水动力模型加以补充修正,可充分发挥两者的优势,弥补单个模型的不足。

1.3 水质模型

水质模型可根据模拟原理,分为经验统计模型和机理模型两类。经验统计模型依靠数据驱动,模型通过预测变量和相关响应变量之间的统计关系(称为传递函数)来进行模型预测,如数据导向模型、面向数据模型、数据挖掘模型等。经验统计模型可用于长期/短期的水质指标预测,但由于其较大的不确定性及缺乏机理支撑的特性,其长期预测能力有待提高。因此,目前在耦合过程中,常用的水质模型往往为机理类模型。

机理类水质模型通过动态规律驱动水体中的主要生物化学过程及泥沙运动过程,这些过程通常需要应用微分/差分方程进行描述,并采用数值方法求解。模型将污染物在水体中的物理与生化过程划分为对流扩散与源汇变化过程,源汇变化量可表示为^[15]

$$S = S_s + S_R + S_0 \quad (2)$$

式中: S_s 为悬浮与沉降产生的内部源汇量, $g/(m^3 \cdot s)$; S_R 为生化反应产生的内部源汇量, $g/(m^3 \cdot s)$; S_0 为点源、面源、污染事故等产生的外部源汇量, $g/(m^3 \cdot s)$ 。

对机理类水质模型模拟指标进行归纳,可划分为5个层次:BOD-DO、CNP循环指标(有机氮、硝酸盐、氨氮、有机磷、磷酸盐等)、底泥释放速率、浮游生物与附生生物、重金属与毒性有机物。机理类水质模型根据其模拟对象不同进一步划分为常规水质

模型、泥沙模型和水生植物模型。

目前的水质模型大部分由以下不同的物理、化学及生物模拟子模块构成:①水动力模块;②风浪模块;③泥沙模块;④毒性物质模块;⑤富营养化模块;⑥沉积物与底泥模块,也有一些水质模型在此基础上增添了水生植物模块。而包括EFDC、ECOM、MIKE 3等在内的部分水质模型在此类结构的基础上,还增加了网格划分、数据预处理、参数不确定性分析等功能,整合成为更先进的水环境模拟系统。

在耦合模拟系统中,水质模型往往需要的数据类型最多,因此一般位于耦合链的下端,以水文模型或水动力模型的输出作为其输入进行计算。

2 模型耦合常用方式

在流域模型模拟过程中,水文、水动力、水质耦合模拟相较于各模型单独使用可覆盖更多情境,提高模型模拟精度,同时,还能够反映耦合模型系统与外部间的反馈与相互作用。Brewer等^[16]总结了部分水文、水动力、水质及生态模型之间的耦合应用情况,研究发现,由于免费易于获取,且功能、接口便于使用者根据自身需求进行调整,WASP、SWAT与HEC-RAS这3种模型在耦合模拟中得到了更广泛的应用,而MIKE 11与MIKE SHE(23次)、ELCOM与CAEDYM(13次)、HEC-RAS与HEC-HMS(10次)的耦合应用频次相对较高。同时可以看出,同一系列模型的耦合应用更为常见,如HEC-RAS与HEC-HMS、MIKE 11与MIKE SHE等,由于为同一机构所研发,开发者为其设计了专用的数据传输格式,便于在模型间进行数据交换而无需二次转化。

根据采用的耦合方法不同,目前将不同模型间的耦合技术分为以下3种类型^[17-19]:①松散耦合,即一个模型的输出结果作为另一个模型的输入条件;②内部耦合,模型间共享边界条件、内部数据与参数信息,模型采用独立求解的方式,且模型共享信息在迭代求解过程中不断地更新替代;③全耦合,指模型控制方程进行联立或整体求解。此外根据各模型间数据传输的情况,耦合技术可分为单向传输耦合、双向传输耦合与接口传输耦合。

2.1 单向传输

单向传输是各模型间仅进行一次数据传输过程。根据各类模型所需数据不同,一般的传输过程是水文模型向水动力模型以边界条件的形式传递流量过程或水位过程,此后水动力模型又将模拟的水流流态、温度、盐度等变化情况传递给水质模型,完成水质指标的模拟。此类方法已在国内外得到广泛应用。

Debele等^[20]在雪松河(Cedar Creek)流域内采

用分布式水文模型 SWAT 模拟了溶解氧 (DO)、叶绿素 a 和逐小时气象数据,并将其作为水动力-水质模型 CE-QUAL-W2 的输入边界条件,对流域内水库水动力和水质进行了模拟。Chauvelon 等^[21]在隆河三角洲 (Rhone Delta) 采用集总式水文模型 GR3 模拟了径流过程,将其输入到水动力-水质模型 RMA2,计算了流域内的水位变化和盐度变化过程。Bui 等^[22]指出,由于水质模型需确定的参数较多,但实际监测的数据不足,采用耦合模型便可以很好地解决这一问题。他们采用 SWAT 模型对无实测资料的支流进行模拟,并将相应的水量与水质模拟指标以旁侧入流的形式汇入到 QUAL2K 水动力-水质模型中,在评估模型模拟精度的纳什效率系数 E_{ns} 和确定系数 R^2 等统计指标上耦合模型均有较好的表现。王晓青等^[23]将 SWAT 模型在澎溪河流域内各子流域模拟的径流、输沙量与氮、磷负荷量等分别以边界条件、河道范围内点源输入及旁侧入流的形式输入到 MIKE21 模型中,对澎溪河流域回水区的水质富营养化情况做出了预测。陈炼钢等^[15,24]在传统水动力-水质模型的基础上,增加了以马斯京根法

为基础的水文计算模块,同时在水动力模型的构建中采用了一二维嵌套、分块组合的形式,在淮河中游河网的模拟中,将各模块模拟计算结果依次汇入河网,较好地反映了淮河中游河网在闸坝群调控下的水流及污染物的演进特征与规律。不仅是水文-水动力-水质耦合模型,大部分的水文-水动力、水动力-水质耦合模型也采用了单向传输的耦合方式,具体见表 2。

单向传输往往以水文模型为基础,并将模拟结果作为水动力或水质模型的输入条件,模型间的要素反馈关系较弱。从上述研究可以发现,单向传输的耦合形式具有模型平行运行,互不干扰;耦合结构简单,便于调试;可减轻对实测资料的依赖等优势,因此最为常用。

2.2 双向传输

双向传输是在单向传输的基础上,作为原模拟数据接受方的模型又将模拟结果返回至数据提供方,从而提高模型连接紧密程度。相比于单向传输,采用双向传输技术的耦合模型不仅能提高模拟精度,还能在流域系统的模拟中采用不同的时间尺度,

表 2 流域水文-水动力-水质单向传输耦合模型研究实例

耦合模型名称	应用流域	流域面积/ km ²	模型间交换数据 (用途)	耦合目的	时间尺度转换
SWAT+CE-QUAL-W2 ^[20]	Cedar Creek	5 244	子流域污染物汇流与气象数据(边界条件与初始条件)	SWAT 模型的一维经验模型无法模拟流域内水库的水动力和水质过程,CE-QUAL-W2 可提供二维分析	设计了“中介”模型,提取了 SWAT 模型的每小时输出数据,并将其转化为 CE-QUAL-W2 可接受的数据格式
GR3+RMA2 ^[21]	Rhone 三角洲	110	流域流量过程(边界条件)	为评估不同水文气象驱动条件下潟湖与上游流域间的通量交换过程	使用了能保证交换数据可用性良好的动态时间步长
SWAT+QUAL2K ^[22]	Cau 河流域	6 030	子流域流量、污染物汇流过程(旁侧入流汇入)	采用 SWAT 可模拟流域内各支流污染物的浓度与排放量,解决数据不足的问题	未转换,采用 SWAT 模型日尺度输出数据作为边界条件
GR4J+线性扩散波洪水演进模型 ^[25]	伊利诺伊河流域	2 025	子流域出流过程(点源入流、均匀分布式入流)	分析集总式水文模型产生径流汇入河网水动力模型的方式(均匀入流、点源入流)与精细程度对径流模拟精度的影响	线性插值法
tRIBS+OFM ^[26]	Peacheater Creek 流域	64	地表径流、地下径流过程(水动力模块边界条件)	将水文模型耦合到动力波模型中可实现从水文气象边界条件向流域规模水动力模拟所要求的条件无缝过渡	用较短的地表流时间步长和相对较长的地下流时间步长,并假定水文模型中的径流在水动力模型中以相同的速率产生
HL-RDHM+Brezo ^[27]	Oklahoma 和 Arkansas 边界流域	808	地表径流、浅层地下径流过程(点源旁侧入流)	水动力模型能更好地反应河流/河道“真实”的物理特征,改善原有水文模型不足,进一步提升模拟可信度	HL-RDHM 水文模型的结构允许其以任意的时间步长输出数据
TOPMODEL+MikeFlood ^[28]	大庙峡流域	468	子流域出流过程(上游边界条件、点源边界条件)	采用水文模型补充研究流域内缺失数据,进一步扩大模拟范围	未说明 TOPMODEL 与 MikeFlood 数据转换方式
DYNHYD5+WASP ^[29]	Marion 湖流域	4 860	流域平均流量过程与水量(水质模型初始条件)	DYNHYD5 可为 WASP 水质模块提供必要的水流运动过程	DYNHYD5 对结果(流量和水量)取平均值以匹配水质模型的时间步长
HEC-RAS+QUAL2K ^[30]	基隆河流域	501	流域下游潮位(水质模型下游边界条件)	QUAL2K 模型未考虑潮汐影响,选用 HEC-RAS 来评估潮汐影响对水质模拟的影响	可直接使用模拟水位时间序列输入
EFDC+WASP ^[31]	Wissahickon Creek	164	流域内水温与水流过程(水质模型初始条件)	通过将 EFDC 与 WASP 进行外部链接,对 EFDC 内部的水动力控制方程与水质控制方程进行解耦,可显著提高计算效率	将 WASP 中的计算河段与水动力模型中的网格直接进行对应链接,以使其处于同一维度

功能更全面。

尽管双向传输技术有上述优点,但由于其结构较单向传输更为复杂,往往需要对模型结构与运行代码进行修改,因此在模型原理的理解上对使用者提出了更高的要求。目前采用双向传输的多模型耦合模拟系统多以水文-水动力耦合模型为主。如 Hoch 等^[32] 基于 PCR-GLOBWB 水文模型和 LFP、DFM 水动力模型构建了一套耦合模型系统 GLOFRIM,系统中水动力模型将径流、水位等作为边界条件进行迭代计算,最终结果与水文模型同时时间步长更新;而后续模拟过程中,在每一时间步长内,水动力模块会将淹没区域的水文过程模拟结果反馈至水文模块,从而实现模型间的双向传输。Fleischmann 等^[33] 在尼日尔的一处大型干-湿混合湿地流域进行了双向耦合模型的构建:根据尼日尔上游流域的实际特点,采用嵌入一维水动力模块的 MGB 水文模型在流域范围内进行模拟,模型选取了 下渗水量作为水文、水动力模型间的交换指标,模型在任意一个时间步长内,先由水文模型根据土壤饱和度与淹没面积计算出该时刻漫滩区域的下渗水量,若是在淹没区域产生了下渗水量,就将其从水动力模型计算的漫滩控制洪水量中扣除,转移到水文模型的土壤存储容量模块中,以进行长时间序列的蒸散发与水量变化分析。

实现双向传输的案例较少,但仍有学者进行了积极地探索和尝试,如 Paiva 等^[34] 将分布式水文模型 MGB-IPH 和水动力模型 IPH-IV 进行了耦合连接,同时对 MGB-IPH 模型进行了改进,即根据河段地理条件,在流域范围内灵活选择水动力模型和水文模型。水文模型计算的流域坡面汇流结果传递至水动力模型,而水动力模型的模拟结果又可传递至下游子流域,从而实现水文、水动力模型间数据的双向传输。Paiva 并非在全部河段都采用水动力模型进行河道汇流模拟,只在平原地区的主河道采用水动力模型模拟,而在一些坡度较高的河段,洪水波可以被近似地考虑为运动波,因此为了减小计算量,采用水文模型进行汇流演算。相较于单纯的 MGB-IPH 模型,修改后的 MGB-IPH 耦合模型在纳什效率系数、DI (delay index) 等模型判别指标上精度更高^[32-35]。

综上,双向传输系统的构建主要源于两方面考虑:①完善物理机制。水动力模型一般采用完全圣维南方程组进行河道流量过程演算,相较于传统水文模型采用的马斯京根法或经验槽蓄曲线法,能更好地描述河道中水流运动规律。②减轻运算负担。在较大范围的流域内,采用水动力模型进行河道汇流演算模拟往往需要很长的运算时间,根据流域内

的实际地理条件,并针对运动波方程的优势,灵活选取水文模型和水动力模型进行河道汇流演算,既保留了水文模型运算速度快的特点,又能在重点河段提供精确的河道演算结果。

2.3 接口传输

除上述两种方式外,也有大量商业软件为模型设计了专用数据接口以进行数据交换,如丹麦水资源及水环境研究所开发的 MIKEFLOOD 集成了 MIKE11 与 MIKE21 模型^[28],模型间数据传递在单一软件内即可完成,极大地降低了耦合模拟的应用难度。但商业软件大多为闭源软件,接口不易获取,而现有模型的数据接口标准又较为杂乱,无统一标准。为解决传统模型数据接口开发难以标准化、规范化的问题,欧盟委员会在水框架法令的指导下开发了 OpenMI (open modeling interface) 接口标准,该标准规定了模型运行时各模型间交换数据应遵循的规范,并以数据接口的形式加以确定。通过采用该标准,各模型可以并行执行,并共享每一时间步长内的信息^[35]。

目前,OpenMI 已能满足以下需求^[36]:①连接不同维度的模型;②连接不同尺度的模型(从区域气候模型到径流模型);③连接不同时间步长的模型;④连接基于不同空间表达的模型(如网格、栅格、多边形);⑤连接不同平台的模型(如 Windows、Unix、Linux)等。

随着 OpenMI 标准的普及,诸多商业软件也将其计算引擎接入了 OpenMI 协议,实现了数据传输接口兼容性的提升。如丹麦水资源及水环境研究所开发的 MIKE 系列软件,荷兰代尔夫特水力学所的一维河网/河网综合模型软件、英国华霖富水力学研究公司开发的 InfoWorks ICM 系列软件等。国内外的研究者也采用了 OpenMI 协议对模型的耦合方法进行了一系列改进,并取得了不错的效果。Sánchez-Marrè 等^[37] 介绍了在比利时 Dender 河流域与安特卫普市入海口区域应用 OpenMI 将一维水动力模型 Waqua 与 Delft3D 耦合的案例,在两个模型间流量与水位数据采用双向传输的形式进行交换,从而使得洪水预报的精度得到了提高。除针对不同维度模型进行集成应用研究之外,也有采用 OpenMI 对多种不同类型的模型进行集成的研究。Shrestha 等^[38] 应用了 OpenMI 接口构建了由 2 个已有模型和 2 个新开发模型组合的泥沙运移耦合模型,采用 SWAT 模型模拟农村地区的水量与泥沙通量,城市地区的河道及管网系统则采用 SWMM 模型进行模拟。由于 SWMM 的泥沙模拟模块不适用于流域内河网系统,Shrestha 等^[38] 开发了符合 OpenMI 标准的泥沙运移

模型以及用于补偿该泥沙模型中运动黏度参数的河流温度模拟器。

双向数据交换的方式易导致计算程序中的“死锁”现象(即当结构中两个以上的运算单元,双方都在等待对方停止运行,以获取运算结果,但是没有一方提前退出),OpenMI 架构对此也提供了解决方法:使用外推令连接中的一个组件能计算出被请求的值,预防“死锁”现象的发生。与其他传统的模型集成方式进行比较,OpenMI 结构规范,开发成本低,集成效率高的优势十分明显,作为相对更先进的一种集成方式,该标准必将得到进一步的普及与推广。

3 耦合应用中时空尺度匹配问题

3.1 时间尺度匹配问题

现有的水文、水动力、水质模型耦合方案中,多采用单向数据交换的形式,即水文模型模拟上游流域产流与坡面汇流,汇入河道后,采用水动力模型对河道汇流过程进行模拟。其中主要的传输数据为流量过程,如果水动力模型在此阶段中耦合了水质模拟模块,一般还会传输水文模型模拟的气象数据。

由于水文、水质模型模拟时间步长较长,最小模拟时间单位通常为日或小时;而水动力模型步长较小,通常需以秒或分钟作为最小模拟时间单位,因此传递过程中会出现时间尺度不匹配的情况,这也是流域模型全过程耦合亟待解决的问题。目前广泛采用的解决方法是线性插值法,可自动对于输入的边界条件文件进行线性插值,满足模型的模拟时间步长要求^[39]。在数值求解时,不同的数值格式对时间步长的要求不同,一般来说,隐格式的稳定性较好,可以采用较长的时间步长,而显格式需要采用较短的时间步长。部分水动力模型在特定条件下可以选择较长的时间步长,例如 Paz 等^[40]利用 HEC-RAS 水动力模型对巴拉圭河上游流域进行模拟,选择了 12 个不同的时间步长进行比较,均取得了令人满意的模拟精度,由于入流的边界条件和控制点的水文时间序列均为日尺度数据,最终选取了 12 h 作为时间步长进行模拟。

另外,针对模型时间步长不统一的问题,也可通过降低输入水文模型的降雨时间尺度,进而达到精细化流量过程模拟的目的。针对日以下尺度的降雨随机模拟,可通过降雨随机模拟模型实现。采用降雨随机模拟模型除了可以对缺测的降雨序列进行插补及对无观测数据的站点进行随机生成以外,还可以将全球气候模式(GCM)生成的气候变化情景以降尺度的方法生成较高时空分辨率的气候要素值^[41]。在该类方法中,Bartlett-Lewis 矩形脉冲法可

将日降雨序列分解到 1min 时间尺度的降雨序列^[42]。

3.2 空间尺度匹配问题

目前,无论是不同维度间的水动力模型耦合,还是水文模型、水动力模型间的耦合都存在模型空间尺度不一致的问题。一维水动力模型多用于描述河网,因此当研究区域内有湖泊时,单纯采用一维水动力模型并不能很好地反映水流特性,需要构建一、二维水动力耦合模型。但二者之间耦合边界网格的划分与连接方法不尽相同,存在着一、二维水动力模型耦合空间尺度的转换问题。同理,二、三维水动力模型也存在空间尺度的转换问题。在不同类型模型耦合时,水文模型的输出结果如何作为水动力模型、水质模型的输入,也是需要探讨的问题。

同类模型耦合的空间尺度匹配问题主要存在于水动力模型中。河网水动力模型大多为一维模型,但平原地区大多为河网、湖泊纵横交织的复杂水系,当研究区域水体横向空间尺度相差很大时,单纯采用一维模型不能很好地模拟:当模拟对象为宽度 10 ~ 50 m 中小河流时,采用一维模型能够很好地模拟水流运动特征;但是对大型河流(横向宽度 300 ~ 500 m),仅采用一维模型则不能很好地模拟水流运动特征^[43],需添加二维模型进行耦合模拟。一、二维模型间耦合方式有多种,已有研究大体上可分为侧向耦合、重叠耦合和边界搭接耦合。侧向耦合与重叠耦合适用于河网与其旁侧洪泛区的联合模拟,或者河网整体框架下局部重点关注地区的水流细节模拟;而边界搭接耦合为一、二维计算域在各自的计算边界处实现搭接耦合^[44]。

二维模型一般用于模拟浅水自由表面流动,而三维模型在水流参数垂向结构变化较大时适用性更强,可以更好地模拟复杂流动现象。路川藤等^[45]提出了在非结构网格基础上的二、三维嵌套数学模型概念,并成功应用于长江口的潮流模拟。Zounemat-Kermani 等^[46]也建立了二、三维耦合的水动力模型,将水体表面采用二维浅水方程计算,而深水水体采用三维模型计算。二、三维耦合的水动力模型研究成果不多,现有的二、三维耦合水动力模型在应用的全面性上有所欠缺,只能适用于特定情况的水流计算,如黄玉新等^[47]建立了能够考虑干湿界面变化、质量守恒、有较强通用性的二、三维耦合水动力模型。

在不同类型模型耦合的空间尺度匹配问题上,针对水文模型所模拟的坡面汇流汇入河网的方式进行了大量研究,如 Thompson 等^[48]将基于物理机制的分布式水文模型 MIKE SHE 和水动力模型 MIKE 11 进行耦合,每个时间段 MIKE SHE 模型和 MIKE 11 模

型都进行数据的交换和迭代计算。这种耦合是通过使用相邻 MIKE SHE 网格之间的线段,即河流连接线实现的。在模拟时,耦合河道的水位从 MIKE 11 的水位点(H-points)传递给邻近的 MIKE SHE 河流连接线,MIKE SHE 再计算从邻近网格到每条河流连接线的地面径流和河流含水层的交换。这些参数在下一个时间步长,再以旁侧入流或出流的形式返回给相应的 MIKE 11 的水位点,以此方式实现在两个模型之间参数传递和交换。Lerat 等^[25]将集总式 GR4J RR 水文模型与一维线性扩散波水动力模型进行耦合,将集总式水文模型的计算结果以旁侧入流的形式输入到水动力模型中,结果表明,以均匀入流和点源入流结合作为旁侧入流时,可以得到更加稳定的耦合模型,也更容易确定达成最佳模拟结果需设置的支流数量。而仅使用点源入流为旁侧入流的模型,虽然也可以达到类似的模拟水平,但点源入流的计算会导致连续性方程的数值解不稳定,且支流数量很难确定,需要通过大量的组合测试来确定最佳方案。

综合上述研究,对于耦合模型的空间尺度匹配问题,一般根据原有模型的关联程度进行选择,若原有模型连接已较为紧密,且结构原理相通,则可对模型代码进行改造,进一步提高连接效果;若原有模型并无此种联系,则多选取旁侧入流或边界条件等方式进行连接,但会针对入流方式进行调整,以取得更优的效果。

4 存在问题与展望

尽管目前流域水文-水动力-水质耦合模型有了飞速发展与广泛应用,但在实际应用中仍需进一步完善,多数的模型联合模拟系统还存在着以下问题:

a. 多采用已有模型进行“搭积木”式的连接,一般仅在选定边界处构建模型间水力联系,耦合结构不紧密,针对关键物理过程间的反馈机制描述效果并不理想。

b. 相较于单一模型,耦合模型结构更加复杂,对应的参数可识别性、敏感性等是否在耦合过程中发生变化,耦合模型系统的参数应整体率定还是各子模型分别率定,以及各单一模型间不确定性传递累加后是否影响耦合模型整体的准确度,尚缺乏相关的理论研究。

c. 应用标准不明确,水文模型采用的运动波方程在进行河道汇流计算时往往也能取得较好的精度,但研究者在耦合时如果不加区分地应用水动力模型,则会大幅增加运算时间。

随着流域决策精细化程度的提高,对预测要素

多样性和多过程模拟时空一致性的要求也不断提高。但耦合模型系统的结构较为复杂,多过程耦合中会出现模型不匹配、尺度不一致等问题,所以亟需从流域的角度来研究水文、水动力、水质多过程模型耦合,解析水文、水动力、水质等物理过程间的时空响应关系以及关键要素间的相关特性,建立多过程和多要素在不同时空尺度下的转换关系和耦合机理,研究典型耦合场景下的尺度匹配与转换方法。与单一过程模型相比,由水文、水动力、水质等多过程集成的流域水资源耦合管理系统的结构更为复杂,导致开发和应用的难度也更高,但随着社会经济的不断发展及流域智能管理与决策需求的增长,耦合模型将是未来模型发展的一个主要方向。

参考文献:

[1] 严登华,王浩,周梦,等. 全球治水模式思辨与发展展望[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 1-7. (YAN Denghua, WANG Hao, ZHOU Meng, et al. Scientific ideas and development prospects of global water management modes[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 1-7. (in Chinese))

[2] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展, 1997, 8(1): 94-98. (RUI Xiaofang. Some problems in research of watershed hydrology model[J]. Advances in Water Science, 1997, 8(1): 94-98. (in Chinese))

[3] 韩超,梅青,刘曙光,等. 平原感潮河网水文水动力耦合模型的研究与应用[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2014, 29(6): 706-712. (HAN Chao, MEI Qing, LIU Shuguang, et al. Research and application on a coupled hydrological and hydrodynamic model in plain tidal river network[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6): 706-712. (in Chinese))

[4] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 水文模型研究综述[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 221-229. (CHEN Rensheng, KANG Ersi, YANG Jianping, et al. Research review of hydrological modeling[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(3): 221-229. (in Chinese))

[5] REED S, KOREN V, SMITH M, et al. Overall distributed model intercomparison project results[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2004, 298(1/2/3/4): 27-60.

[6] ZHANG L, LU J, CHEN X, et al. Stream flow simulation and verification in ungauged zones by coupling hydrological and hydrodynamic models: a case study of the Poyang Lake ungauged zone[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2017, 21(11): 5847-5861.

[7] 岳良毅,汪学锋,尤云祥. 扩展型 Boussinesq 水波方程的一种改进有限体积/有限差分混合算法[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2015, 30(5): 484. (YUE Liangyi, WANG Xuefeng, YOU Yunxiang. A modified hybrid finite-volume/finite difference scheme for extended Boussinesq-

- type model[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(5):484. (in Chinese))
- [8] 赵琰鑫,张万顺,汤怡,等. 湖泊-河网耦合水动力水质模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1):53-58. (ZHAO Yanxin, ZHANG Wanshun, TANG Yi, et al. Numerical study of coupled one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic and water quality model for complex lake and river networks regions[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 9(1):53-58. (in Chinese))
- [9] EYINK G L, SREENIVASAN K R. Onsager and the theory of hydrodynamic turbulence [J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(1):87-135.
- [10] TIMBADIYA P V, PATEL P L, POREY P D. A 1D-2D coupled hydrodynamic model for river flood prediction in a coastal urban floodplain [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(2):05014017.
- [11] 王子悦,李一平,董志强,等. 太湖流域平原河网分流比影响因素 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (4): 49-54. (WANG Ziyue, LI Yiping, DONG Zhiqiang, et al. Influencing factors of flow diversion ratio in plain river networks of Taihu Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):49-54. (in Chinese))
- [12] 贾本有,吴时强,范子武,等. 粒子群算法在河道水动力模型参数校正中的应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3):143-148. (JIA Benyou, WU Shiqiang, FAN Ziwu, et al. Application of particle optimization in parameter calibration of channel hydrodynamic model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3):143-148. (in Chinese))
- [13] 李大鸣,王腾飞,孙仲谋,等. 北京山区单沟洪水演进水动力模型研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(9):105-113. (LI Daming, WANG Tengfei, SUN Zhongmou, et al. Study on hydrodynamic model of single gully flood routing in Beijing mountainous area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(9):105-113. (in Chinese))
- [14] 侯精明,李桂伊,李国栋,等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(2):96-107. (HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(2):96-107. (in Chinese))
- [15] 陈炼钢,施勇,钱新,等. 闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型: I. 理论 [J]. 水科学进展, 2014, 25(4):534-541. (CHEN Liangang, SHI Yong, QIAN Xin, et al. Hydrology, hydrodynamics, and water quality model for impounded rivers: I. theory [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4):534-541. (in Chinese))
- [16] BREWER S K, WORTHINGTON T A, MOLLENHAUER R, et al. Synthesizing models useful for ecohydrology and ecohydraulic approaches: an emphasis on integrating models to address complex research questions [J]. Ecohydrology, 2018, 11(7):1-26.
- [17] LIU Z, HASHIM N B, KINGERY W L, et al. Hydrodynamic modeling of St. Louis Bay estuary and watershed using EFDC and HSPF [J]. Journal of Coastal Research, 2008, 52:107-116.
- [18] 曾志强,杨明祥,雷晓辉,等. 流域河流系统水文-水动力耦合模型研究综述 [J]. 中国农村水利水电, 2017(9):72-76. (ZENG Zhiqiang, YANG Mingxiang, LEI Xiaohui, et al. A review of hydrological-hydrodynamic coupling models for river-basin systems [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9):72-76. (in Chinese))
- [19] 李云良,张奇,姚静,等. 湖泊流域系统水文水动力联合模拟研究进展综述 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2):263-270. (LI Yunliang, ZHANG Qi, YAO Jing, et al. Advances in integrated hydrological and hydrodynamic simulation of lake-catchment system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(2):263-270. (in Chinese))
- [20] DEBELE B, SRINIVASAN R, PARLANGE J Y. Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2008, 13(1):135-153.
- [21] CHAUVELON P, TOURNOUD M G, SANDOZ A. Integrated hydrological modelling of a managed coastal Mediterranean wetland (Rhone delta, France): initial calibration [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2003, 7(1):123-132.
- [22] BUI H H, HA N H, NGUYEN T N D, et al. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, 19(2):210-223.
- [23] 王晓青,李哲. SWAT 与 MIKE21 耦合模型及其在澎溪河流域的应用 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3):426-432. (WANG Xiaoqing, LI Zhe. SWAT and MIKE21 coupled models and their application in the Pengxi Watershed [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3):426-432. (in Chinese))
- [24] 陈炼钢,施勇,钱新,等. 闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型: II. 应用 [J]. 水科学进展, 2014, 25(6):856-863. (CHEN Liangang, SHI Yong, QIAN Xin, et al. Hydrology, hydrodynamics, and water quality model for impounded rivers: II. application [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6):856-863. (in Chinese))
- [25] LERAT J, PERRIN C, ANDRÉASSIAN V, et al. Towards robust methods to couple lumped rainfall-runoff models and hydraulic models: a sensitivity analysis on the Illinois River [J]. Journal of Hydrology, 2012, 418:123-135.
- [26] KIM J, WARNOCK A, IVANOV V Y, et al. Coupled

- p>modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow [J].
- Advances in Water Resources*
- , 2012, 37: 104-126.
- [27] NGUYEN P, THORSTENSEN A, SOROOSHIAN S, et al. A high resolution coupled hydrologic-hydraulic model (HiResFlood-UCI) for flash flood modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 401-420.
- [28] LI W, LIN K, ZHAO T, et al. Risk assessment and sensitivity analysis of flash floods in ungauged basins using coupled hydrologic and hydrodynamic models [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 572: 108-120.
- [29] TUFFORD D L, MCKELLAR H N. Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain [J]. *Ecological Modelling*, 1999, 114(2/3): 137-173.
- [30] FAN C, KO C H, WANG W S. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on river water quality simulation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(5): 1824-1832.
- [31] ZOU R, CARTER S, SHOEMAKER L, et al. Integrated hydrodynamic and water quality modeling system to support nutrient total maximum daily load development for Wissahickon Creek, Pennsylvania [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(4): 555-566.
- [32] HOCH J M, NEAL J, BAART F, et al. GLOFRIM V1.0: a globally applicable computational framework for integrated hydrological-hydrodynamic modelling [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10: 3913-3929.
- [33] FLEISCHMANN A, SIQUEIRA V, PARIS A, et al. Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 943-959.
- [34] PAIVA R C D, COLLISCHONN W, TUCCI C E M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 406(3/4): 170-181.
- [35] GREGERSEN J B, GJISBERS P J A, WESTEN S J P. OpenMI: open modelling interface [J]. *Journal of hydroinformatics*, 2007, 9(3): 175-191.
- [36] HARPAM Q K, HUGHES A, MOORE R V. Introductory overview: the OpenMI 2.0 standard for integrating numerical models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 122: 104549.
- [37] SÀNCHEZ-MARRÈ M, BÉJAR J, COMAS J, et al. Demonstration of integrated modelling using the OpenMI in the Scheldt River Basin [C]// iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software. Manno: iEMSS, 2008: 1094-1101.
- [38] SHRESTHA N K, LETA O T, DE FRAINE B, et al. OpenMI-based integrated sediment transport modelling of the river Zenne, Belgium [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 47: 193-206.
- [39] KURTULUS B, FLIPO N. Hydraulic head interpolation using anfis: model selection and sensitivity analysis [J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 38(1): 43-51.
- [40] PAZ A R, BRAVO J M, ALLASIA D, et al. Large-scale hydrodynamic modeling of a complex river network and floodplains [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(2): 152-165.
- [41] 殷水清, 谢云, 陈德亮, 等. 日以下尺度降雨随机模拟研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(9): 981-989. (YIN Shuiqing, XIE Yun, CHEN Deliang, et al. Review of stochastic simulation of sub-daily scale precipitation [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(9): 981-989. (in Chinese))
- [42] KOSSIERIS P, MAKROPOULOS C, ONOF C, et al. A rainfall disaggregation scheme for sub-hourly time scales: coupling a Bartlett-Lewis based model with adjusting procedures [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 980-992.
- [43] 徐祖信, 尹海龙. 平原感潮河网地区一维、二维水动力耦合模型研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 2004, 19(6): 51-59. (XU Zuxin, YIN Hailong. Development of coupled one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic model for tidal rivers [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2004, 19(6): 51-59. (in Chinese))
- [44] 王智勇, 陈永灿, 朱德军, 等. 一维-二维耦合的河湖系统整体水动力模型 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 516-522. (WANG Zhiyong, CHEN Yongcan, ZHU Dejun, et al. 1D-2D coupled hydrodynamic simulation model of river-lake system [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 516-522. (in Chinese))
- [45] 路川藤, 陈志昌, 罗小峰. 基于非结构网格的长江口二维三维嵌套潮流数值模拟 [J]. *水利水运工程学报*, 2013(4): 18-23. (LU Chuanteng, CHEN Zhichang, LUO Xiaofeng, et al. 2D and 3D nested tidal current numerical simulation of Yangtze Estuary based on finite volume method [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(4): 18-23. (in Chinese))
- [46] ZOUNEMAT-KERMANI M, MAHDAVI-MEYMAND A. Hybrid meta-heuristics artificial intelligence models in simulating discharge passing the piano key weirs [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 12-21.
- [47] 黄玉新, 张宁川. 二、三维耦合水动力模型研究 I: 模型的建立 [J]. *水道港口*, 2013(4): 34-40. (HUANG Yuxin, ZHANG Ningchuan. Research on a coupled model I: model establishment [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2013(4): 34-40. (in Chinese))
- [48] THOMPSON J R, SØRENSEN H R, GAVIN H, et al. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 293(1/2/3/4): 151-179.

(收稿日期: 2020-06-11 编辑: 熊水斌)