流域数学模拟系统发展方向及关键技术

余 欣[1]，寇怀忠[2]，王万战[1]
（1. 黄河水利科学研究院，河南 郑州 450003；2. 黄河水利委员会，河南 郑州 450003）

摘要：重点介绍了黑河流域综合模型、数字流域模型、二元演化模拟系统以及黄河数学模拟系统等4个流域模拟系统的新进展；从发展理念、生产方式、质量评测、集成建模以及支撑途径等5个方面，凝练了系统模拟系统发展新态势，突出水-经济-生态过程的耦合模拟，注重构件化组装的集约化生产方式，突出模型科学评价和公共开发环境建设，重视多源数据同化和模型参数化. 今后一个时期，要重点做好数学模型不确定性及评价技术、数学模型复杂数据高效存取及其仿真可视化、协调大尺度和跨学科模型集成及云服务技术、三维/四维变分同化技术、基于物联网的混合虚拟河流试验技术、水循环及其多物质输移过程和模拟技术等方面研究工作.

关 键 词：水-经济-生态过程耦合模拟；构件化组装；质量评测；综合集成环境
中图分类号：P333 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-640X(2012)01-0005-08

1 国内几个代表性的流域模拟系统

以建设目标、总体架构、建模方法及关键技术为主线，重点介绍了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所开展的“数字黑河”模型集成、清华大学研制的数字流域模型、中国水利水电科学研究院开发的二元演化模拟系统以及黄委构建的黄河数学模拟系统.

1.1 黑河流域综合模型

2003—2008年，中国科学院寒区旱区环境与工程研究所开展了“黑河流域交叉集成研究的模型开发和模拟环境建设”项目，初步建成“数字黑河”流域综合模型[1].

数字黑河由数据平台、模型平台和数字化观测系统组成，其核心是观测、数据和模型平台中的信息基础设施建设，但同时也外延而扩展为以流域综合模型为骨架的各种应用[2-3].

(1)模型集成总体设计 从“水-土-气-生-人”复杂系统集成的角度出发，运用集成的流域模拟模型和管理模型，利用大量空间数据，把流域作为水-生态-经济整体研究，既定量地描述流域过程机理，又回答宏观层面的战略决策问题. 为此，要求科学目标和流域管理目标并重，发展两种类型的集成模型. 第一类集成模型更多地回应科学目标，主要通过对水文和生态过程的模拟促进对流域水循环和生物化学循环的深入理解. 重点是以区域大气模型为驱动，以分布式水文模型以及陆面过程模型为骨架，耦合地下水模型、水资源模型和生态模型，建立能够综合反映流域水文和生态过程的集成模型；在此基础上耦合社会经济模型，形成具有综合模拟能力的流域集成模型. 第二类集成模型回应流域管理目标，最终建成以空间显式的流域集成模型为基本骨架的流域水资源和其他自然及社会经济资源可持续利用空间决策支持系统. 同时，发展以先进的信息技术为支撑的建模环境，为建立流域集成模型提供有力工具.

(2)近期建设目标 一是提出适用于黑河流域上、中、下游的模拟模型. 上游以分布式水文模型为核心，兼顾气候模拟以及区域气候模型输出结果的降尺度研究，重点解决出山口径流变化预测问题和大气-植被-

收稿日期：2011-10-12
作者简介：余 欣(1971-)，男，河南南阳人，教授级高级工程师，博士研究生，主要从事河流泥沙、水利信息化方面研究. E-mail：yuxin_yrcc@yahoo.com.cn

土壤-冻土-积雪系统耦合问题;中游以水-生态-经济耦合为核心,以水资源合理利用为核心的流域可持续发展合理策略的问题,即建成多学科集成的生态水文和生态经济模型;下游在考虑水-生态-经济耦合系统的同时,侧重于解决地表水和地下水模型的耦合及与生态的关系. 二是初步建成模拟环境.

(3)主要集成模型 综合模型研制中涉及了各类水文模型、地下水模型、水资源模型、陆面模型、土地利用模型、生态模型、社会经济与生态经济模型. 同时,引进和应用了模块化建模系统(MMS:the modular model system)和空间建模环境(SME:spatial modeling envionment)等多种建模环境.

(4)发展重点 围绕黑河流域水-生态-经济-管理耦合模型,加强参数和模型不确定性研究. 上游山区,将重点在自有版权分布式水文模型 DWHC 基础上,深究冻融和积雪水文的物理过程,加强人类活动(如修建梯级水电站)对山区水文过程影响研究,重点突破冻土水文过程模型,突出积雪水文模拟. 中游地区,加强季节性冻土和平原地下水排泄区微地貌的观测分析,提高数据资料的完整性;开展流域盆地水资源转化专题的综合研究;将 SME 和 PLM 景观模型(PLM:the patuxent landscape model)全面应用于中游地区. 下游地区,重点解决好地表水和地下水模型的耦合,开展生态水文建模工作.

1.2 数字流域模型系统

2001 年以来,清华大学以黄河流域为研究对象,开展了数字流域模型架构设计、关键技术研究和模型研发等工作. 其基本结构、主要进展和下阶段发展重点如下:

(1)基本结构 数字流域模型定位于大范围、流域级的水与迁移物过程模拟,是一个具有多层空间分辨率、模型参数易于获取、能够实现并行计算的整体模型[4].

(2)主要进展 着眼于大流域的水沙过程模拟,提出并建立了数字流域模型系统的框架. 模型框架依托 DEM 数据及其存取系统,以流域分级理论为依据,将全流域分为 4 级:坡面、小流域、区域(支流)和全流域,即在坡面上建立产流和产沙数学模型,在小流域河网、区域(支流)和全流域河网上分三级进行汇流演进. 通过"坡面产流、逐级汇流"的组织方式,将 4 个层次的模型整合成一个完整的数字流域模型系统. 该系统主要包括五项关键技术,即大流域 DEM 数据存取、流域沟道参数提取、基于遥感图像的模型参数提取、分布式降雨量数据存取和计算机集群并行计算. 模型可用于大流域的降雨-径流模拟和水资源量计算、次洪水和连续径流过程、辅以降雨预报模块可以预报洪水、大区域或局部小流域产流产沙计算等[5].

(3)发展重点 开展黄河流域区域模型研究,如河源区包括融雪模型的高山草原模型、黄土高原多沙粗沙区水沙一体化模型等;耦合集成降雨预报模型和产汇流模型、地下水运动模型、非点源污染物运动模型;研制全流域骨干河网模型、骨干水库调度模型;构建灌区水分运动模型、淤地坝滞流减沙模型等.

1.3 二元演化模拟系统

1999 年以来,中国水利水电科学研究院依托"黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理"项目开展了二元演化模型研制,其总体架构、核心模型及发展重点如下[6-8]:

(1)总体架构 流域水资源二元平台主要包括:基础平台(由网络和操作系统、安全机制、评价机制等组成)、数据库系统、应用系统(数据管理、应用分析和模型库)三部分.

(2)核心模型 流域水资源二元演化模型,主要由流域分布式水循环模型(WEP-L: water and energy transfer process model in large river basins)和流域集总式水资源调配模型(WARM: water allocation and regulation model)耦合而成.

WEP-L 模型最大的特点是对分布式流域水文模型与 SVATS(土壤-植物-大气通量交换方法)的综合,它可以模拟水循环各要素过程(包括植被截留蒸发、土壤蒸发、水面蒸发、植物蒸腾;降雨入渗及超渗坡面径流;壤中径流;地下水运动、流出与溢出;坡面和河道汇流;积雪融雪过程等),也可以模拟能量循环过程(包括短波辐射、长波辐射、潜热通量、地中热通量、显热通量、人工热排出量等). WARM 模型包括水资源合理配置模型和水资源调度模型. 水资源合理配置模型核心模块是水资源供需平衡模拟子模型、计量经济子模型、人口预测子模型、国民经济需水预测子模型、多水源联合调度子模型、生态需水预测子模型等. 水资源配置模型通常以月或旬为时间尺度,以大空间尺度为配置单元. 水循环模拟则以日为时间尺度,以配置单元套灌域、

土地利用和种植结构为空间尺度. 为此，采用双向耦合模式实现大尺度信息向小尺度的分解，以及小尺度信息向大尺度聚合.

(3)发展重点　“自然-人工”二元水循环多元信息采集与同化技术；水循环大气-地表-土壤-间环节地下水过程的综合模拟；流域水量循环及伴生水化学、泥沙、生态过程综合模拟；流域环境虚拟与集成型数字流域平台构建技术.

1.4　黄河数学模拟系统

2003 年以来，黄河水利委员会编制了《“数字黄河”工程黄河数学模拟系统建设规划》，明确了模拟系统建设目标和主要任务，开展了集成平台和数学模型研发等工作[9].

(1)建设目标　以河流自然场、经济社会场和生态系统场耦合的“数字流域”的新理念为指导，运用先进的水利和信息技术，构建水利专业、宏观经济社会和生态系统模型，构建虚拟仿真的黄河流域，并借助其实现黄河治理开发和保护管理过程中的预警预报和方案生成，为各类重大治黄决策提供技术支撑.

(2)系统架构　系统采用基于. NET 的三层架构进行组织，同时考虑通过企业服务总线(ESB)等产品实现与 J2EE 等架构的有效集成. 远期将采用面向服务架构(SOA)的设计思想，利用 Web Service 等应用技术，实现模型分布式部署、组合和响应.

(3)主要进展　构建了黄河数学模拟系统集成平台，可以初步满足不同来源各类专业模型的集成和运行；研制了黄土高原第一副区水土流失模型、河道平面二维水沙数学模型、河道一维非恒定流水流-泥沙-水质模型、水库一维恒定流水沙模型、水库三维紊流水沙模型、河口平面二维潮流输沙模型等六类模型；建成了黄河超级计算中心，为数值天气预报、空间大尺度水沙模拟提供了稳定服务；编制了《黄河数学模型研发导则》、《黄河数学模型评价办法》，规范了研发过程，提供了评价标准等.

(4)发展重点　研究完善黄河数学模型评价指标体系，建立共享内的模型评测服务环境；建立河流-流域数值模拟平台，实现数字流域模型(TU-BASIN)与黄河数学模拟系统的耦合；研发黄土高原水土流失模型(二期)，建立可推广应用于丘陵沟壑区第一副区以中尺度流域为单元的水土流失年经验模型、以小流域为单元的次暴雨洪水泥沙作业预报模型，探讨解决黄土高原丘陵沟壑区第一副区资料匮乏流域侵蚀产沙量预报问题，初步建立第三副区年侵蚀经验模型和部分小流域次暴雨产沙数学模型等；研制水流运动-泥沙输移-河床演变全耦合模型、基于 MPI 的水库剖面二维水沙动力学模型、复式河道主槽一维与滩地二维复合模型、基于动力学模式的水沙演进实时校正模型；建成宁夏-内蒙古河道冰凌动力学模型；建立河道水质预警预报模型，实现黄河干流龙门以下干流突发性污染事故的过程预警预报.

2　流域数学模拟系统发展趋势

流域数学模拟系统建设，日益注重与 3S 技术，特别是 GIS 技术的耦合；注重前后处理可视化，以交互的方式监视和干预计算过程，实现驾驭式计算功能(computational steering)外[10]，在发展理念、生产方式、质量评测、集成建模以及支撑途径等方面均呈现了新的发展态势.

(1)在发展理念上，从水、经济、生态分离模拟转向水循环及其伴生水过程综合模拟和水-经济-生态过程的耦合模拟.

流域是一个相对完整的地貌单元，水文循环驱动化学、泥沙、生态演化迁移，塑造相应的河流地貌. 水流因传质而改变了特征，不同传质如污染物因泥沙存在而产生的吸附降解作用显著改变着各自的运动变化，不同流域地貌又造就各自独特的水文过程. 为研究单一传质或过程采用的“分离”方法，要转向多过程多传质耦合的“综合”方法，来实现水循环及其伴生水过程的综合模拟. 已经证明采用偏微分方程组(PDEs)的方法可求解多物理场现象，为综合模拟提供了技术支持[11-12].

由于人类活动的参与性，天然河流已变成人工天然河流，满足单目标的分散模型已不足以反应各种工程与非工程措施所引起的河流复杂响应. 流域管理的多目标和精细化，愈加突出自然过程、生态环境和经济社会的综合模拟，愈加需要全过程、全要素的动态定量模拟预报. 为此，要从“水-土-气-生-人”复杂系统集成的

角度出发,运用交叉集成的流域模拟模型和管理模型,构建流域数学模拟系统,实现水-生态-经济多场耦合.

(2)在生产方式上,从粗放的源代码级开发,转向模块化开发、构件化组装的集约化生产方式.

早期涉水模型多为"谁使用、谁开发"或"谁开发、谁使用",一个功能模块或模型对应一个或极其有限个用户. 同时限于开发者本人的知识背景,粗放的源代码级开发尽管增强了研发者对模拟问题的认知,也积累了大量的可供深加工"原材料". 但开发出来的程序模块化不足、复用性不强、可扩展性不够.

流域数学模拟系统建设重点解决"一个功能模块对应不同层次用户或多个不同功能模块对应一个用户",需要系统结构由粗放的源代码级开发向模块式、组件化方向发展. 这将使软件系统更易局部更新,适用范围更广,灵活性更强,也使用户可以更加方便地将自己编制的模型程序嵌入进这类软件中. 同时辅以足够的文件系统和用例帮助用户熟悉与操作软件、开发完备的错误防止措施及检测系统,从而使模型更易维护、知识更易积累、效用发挥更足、生命周期更长[13-15]. 可以敏捷地满足随需而变的应用系统需求.

(3)在质量评测上,从单纯注重结果,转向过程和结果并重,更加注重模型和参数的不确定性.

在评价模型时,经常听到"我才不管你怎样算,只要给出'合理'的结果就行". 潜意识中在回避模型本身的不确定性,将模型评测这个复杂的科学问题简单化,把一个目前还相对"灰色"的模型评测问题变成了仅以结果来确定是与否的"黑白"问题. 不重视甚或忽略模型和参数不确定性一直是制约国产软件发展的最主要瓶颈之一.

数学模型是对描述对象规律性认识的数学化表述,其主要误差包括数值误差、物理误差和边界误差等. 数值误差指计算机本身带来的可能误差和数值方法产生的误差;物理误差指模型所描述的物理现象数学表述不完备或简化处理而引起的误差;边界误差主要指初、边界条件表达不完备所引起的误差. James Westervelt 在其专著中还提出诸如被排除在外的因素引起的误差、内含误差、不正确的算法、不合适的内插和外推、不合适的时间和空间分辨率、不合适的时间步长算法、不正确的输入、不合适的执行次序等因素所带来的误差. 随着数学模型的大量研发和应用,使我们逐步认识到,在任何建模工作中,误差源是大量的,有时令人惊讶. 对模型人员的挑战是要敢于承认模型和参数的不确定性,追踪确认与模型相伴的实际误差,并了解这些误差对于模型为之服务的管理决策的可能影响等[16].

(4)在面向流域管理的集成建模上,由公共用户界面、科学模型集成于管理模型的底层、转化为管理模型的模块转向公共开发环境建设.

流域集成建模方法从发展阶段来讲,主要包括公共用户界面方法、科学模型集成于管理模型的底层、科学模型转化为管理模型的模块等(如图 1)[16-17]. 公共用户界面方法是已有的科学模型集中放置在公共用户界面之后,由它来逐个调用. 该方法一般只是适合于科学家和工程师. 将科学模型集成于管理模型的底层,可以使用非直接的方式调用模型,或者那些运行模型的科学家对它们进行参数化. 该方法一则受限于原模型的数据定义、时空分割方法等;二则需要顺序执行模型,如果模拟模型不断改变其他模型作为(在启动时)固定状态的条件,这种方法就不适应了. 舍弃已有科学模拟模型的用户界面和数据输入,将其转化为管理模型的模块或子程序,并且采用多个模型同步运行的公共执行环境(如美国地质调查局的模块建模系统(MMS)等),其不足之处在于:模拟模块依然存在由数据定义、内部数据格式、通信中的低效率所造成的问题等.

从计算机科学的角度,最彻底的集成方法是从头开发新软件. 从底层集成避免软件之间接口的复杂性,这是因为不同软件是在不同的时间和地点,使用不同的语言和方法开发的. 如通用的地理信息系统. 当前的挑战是建立一个用于开发大量集成化软件组件的公共开发环境. 近阶段,解建仓等[18]提出的"知识可视化综合集成支持平台",为流域集成建模和水利信息化综合集成应用提供了新的模式和平台. 以平台为核心的应用模式如图 1 所示,该过程反映开发方法和具体使用平台的步骤:①专家或决策者在脑海中形成主题. 包括灵感触发,思想形成到明确主题. ②概念形成. 绘制知识图,将主题转化为整体或者上层概念,通过知识图著作工具进一步细化概念. ③关系的形成,通过知识图概念关系的连接,优化概念结构,反复逼近,获得满意的主知识图. ④主知识图分解为子知识图,即从定性到定量的转换,具体表现在概念向方法、模型的转换,主知识图向有方法和关系形成子知识图的转换. ⑤数据模型关联,即定量表达,具体表现在知识图与组件关联,这

需要以组件为核心应用模式的强力支持.⑥应用的部署和使用.平台还提供应用运行环境,即将编辑好的知识图加载到运行环境中执行.

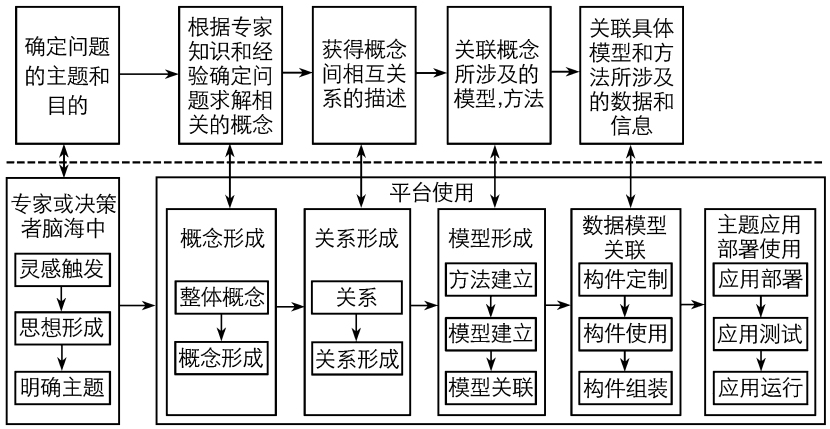

图 1　以平台为核心的应用模式

Fig. 1　The application model with platform as its core

(5)在支撑途径上,更加注重多源数据同化,更加注重以模型关键参量和物理图式确定基础性研究.

“数据同化”是由早期气象学中的“分析”(Analysis)技术发展而来的,其基本含义是:根据一定的优化标准和方法,将不同空间、不同时间、采用不同观测手段获得的观测数据与数学模型有机结合,纳入统一的分析与预报系统,建立模型与数据相互协调的优化关系[19].数据同化可为数值计算、数值预报提供初始场、边界条件,确定某些难以观测的输入量;同时,模型中的某些参数也可以通过同化得到优化.因而,利用数据同化技术可以最大限度地提取观测数据所包含的有效信息,提高和改进分析与预报系统的性能.目前发展的数据同化方法有很多种,如多项式内插法、最优插值法、客观分析法、Blending 法、Nubging 法、卡尔曼滤波法、变分伴随法等.以上方法已在气象学和海洋学领域得到广泛应用[20-21],水利行业中也有涉及[22-23].

业务应用是规律研究和模型建设的目的和归宿,并为其提供需求和检验平台;规律研究可以为数学模型和业务应用提供基础支撑;模型作为“中介”,是联系业务应用和基本规律研究的纽带,通过业务应用检验规律研究的可靠性.数学模型要求机理研究不仅能给出一个物理图式,能定性描述,更要给出准确的数学公式,能定量表达.基本规律之于数学模型,犹如空气和水之于人的生命,基本规律研究认识不清楚,流域模拟系统就没有生命力,就不能持续健康发展.围绕模型关键参量和物理图式的确定,开展流域水循环及其伴生物质演化过程规律性研究尤为必要且更具针对性.

3　模拟系统建设热点和难点问题

针对流域数学模拟系统建设,当前研究的热点和难点问题主要包括:

(1)数学模型不确定性及评价技术　不确定性研究的意义在于,它力图反映河流水沙数值模拟能在多大程度上接近真实的过程,以便使用者做到心中有数.主要研究方向包括:蒙特卡罗模拟等不确定性方法应用;模型误差来源、概率分布及其量化表达方法;数学模型质量评价准则及要素;数学模型评价标准用例建设等.

(2)数学模型复杂数据高效存取及其仿真可视化　针对数学模型复杂数据,研究流域数学模拟系统数据管理技术,实现海量复杂数据高效访问和存取;利用 VTK 等技术渲染模型结果复杂数据;研究相关技术,实现遥感影像、DEM 矢量数据、模型结果复杂数据的叠加耦合,以及基于流域实景地图环境的模型计算结果动态展示.

(3)协调大尺度和跨学科模型集成及云服务技术　主要包括:不同流态/空间尺度的高效能数值格式应

用研究(如坡面产流与溯源冲刷时流态计算等);水-生态-经济等多时空尺度模型的双向耦合技术;集成化软件组件的公共开发环境开发;数字流域平台/软件云服务技术等.

(4)卡尔曼滤波法和三维/四维变分同化技术应用 目的在于如何充分利用各类点/面观测数据,获得最佳的模式参数,构建适合的流域模型,减小观测值和计算值之间的误差;在复杂模型选择和海量观测数据提供间寻求平衡,提升无资料和不完全信息下水文过程预报精度.

(5)基于物联网的混合虚拟河流试验技术 混合虚拟河流试验是将现实河流试验和虚拟河流试验结合、互动而形成的一种虚实耦合河流试验方式,可以实现虚拟计算和现实模拟的同步.依据河流实体模型试验的相关方法与技术[24-25],重点建立包括虚拟河流试验相似原理等的理论框架;探讨野外河流试验、室内河流模型试验与数字虚拟试验的对应、关联与互补关系,建立动态复杂性河流系统的试验地理方法;设计与实现用于支持动态联动试验的传感器网络与实时信息传输技术,基于高性能计算、可视化地学协同技术,构建混合虚拟河流实验的计算支撑与综合集成协同研讨环境.

(6)水循环及其多物质输移过程及模拟技术 如流域水文与地貌特征关系研究及量化表达;黄土高原坡沟耦合侵蚀过程及模拟方法研究;坡面产沙与溯源冲刷过程相似性及模拟方法研究;水流运动-泥沙输移-河床演变全耦合模拟理论与技术;河道河势变化过程机理及模拟方法研究;波浪掀沙、潮流输沙过程耦合及其模拟方法研究;高含沙水流环境下不同类属污染物的沉降再悬浮、吸附解吸和降解过程及模拟方法研究;冰体热力生消、封冻河流阻力变化等过程及模拟方法;水库群联合调度模拟与优化耦合技术等.

参 考 文 献:

[1] 程国栋. 黑河流域水-生态-经济系统综合管理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (CHENG Guo-dong. The integrated pest management of water-ecological-economic system in Heihe River Basin[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))

[2] 李新, 程国栋. 流域科学研究中的观测和模型系统建设[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 756-764. (LI Xin, CHENG Guo-dong. On the watershed observing and modeling systems[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(7): 756-764. (in Chinese))

[3] 李新, 程国栋, 康尔泗, 等. 数字黑河的思考与实践 3: 模型集成[J]. 地球科学进展, 2008, 25(8): 851-865. (LI Xin, CHENG Guo-dong, KANG Er-si, et al. Digital Heihe River basin. 3: model integration[J]. Advances in Earth Science, 2008, 25(8): 851-865. (in Chinese))

[4] 王光谦, 刘家宏. 数字流域模型[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (WANG Guang-qian, LIU Jia-hong. Digital basin model [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))

[5] 王光谦, 李铁键. 黄河数字流域模型[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2(7): 492-499. (WANG Guang-qian, LI Tie-jian. Digital Yellow River model[J]. Sciencepaper Online, 2007, 2(7): 492-499. (in Chinese))

[6] 王浩, 贾仰文, 王建华, 等. 黄河流域水资源及其演变规律研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (WANG Hao, JIA Yang-wen, WANG Jian-hua, et al. Study on the Yellow River Basin's water resources and their evolutionary laws[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))

[7] 王浩, 严登华, 贾仰文, 等. 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 479-489. (WANG Hao, YAN Deng-hua, JIA Yang-wen, et al. Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 479-489. (in Chinese))

[8] 游进军, 甘泓, 王浩. 水资源配置模型研究现状与展望[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 1-5. (YOU Jin-jun, GAN Hong, WANG Hao. Advance in water allocation model and prospect[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2005, 16(3): 1-5. (in Chinese))

[9] 水利部黄河水利委员会. "数字黄河"工程数学模拟系统建设规划报告[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2009. (Yellow River Water Conservancy Commission. Report of the mathematical simulation system construction of "Digital Yellow River" project[R]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Commission, 2009. (in Chinese))

[10] 叶素飞. 有压箱涵双孔出流水力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008: 8-10. (YE Su-fei. Hydraulic characteristic study on double-pore outflow of pressure box culvert[D]. Nanjing: Hohai University, 2008: 8-10. (in Chinese))

[11] 宁建国，马天宝，王成. 国内外爆炸力学仿真软件研究现状及发展趋势[C]//中国科学院技术科学论坛第二十三次学术报告会议(CAE 自主创新发展战略)论文集，上海，2006.（NING Jian-guo，MA Tian-bao，WANG Cheng. Research and development trends of simulation software for explosion mechanics at home and abroad[C]//Proceedings of Twenty-third Meeting of the Academic Report/Forum on Science and Technology of China Academic of Science：Development Strategy of CAE Independent Innovation，Shanghai，2006.（in Chinese））

[12] 胡振东. 多物理场耦合技术的研究进展与发展趋势[EB/OL].（2009-11-27）[2011-10-08] http://www.cntech.com.cn/news/media/2009-11/Multiphysics-Modeling-Trend.html.（HU Zhen-dong. Research and development trends of the coupled technology of multiple physical fields[EB/OL].（2009-11-27）[2011-10-08] http://www.cntech.com.cn/ news/media/2009-11/Multiphysics-Modeling-Trend.html.（in Chinese））

[13] 黄柳青，王满红. 构件中国-面向构件的方法与实践[M]. 北京：清华大学出版社，2006.（HUANG Liu-qing，WANG Man-hong. New software engineering：a component-oriented approach[M]. Beijing：Tsinghua University Press，2006.（in Chinese））

[14] 黄柳青. 软件的涅磐[M]. 北京：世界图书出版公司，2005.（HUANG Liu-qing. Software parinirvana[M]. Beijing：WPC，2005.（in Chinese））

[15] 杰拉尔德·温伯格，丹尼斯·温伯格. 系统设计的一般原理[M]. 张铠，王佳，译. 北京：清华大学出版社，2005.（WEINBERG G M，WEINBERG D. General principles of systems design[M]. ZHANG Kai，WANG Jia. Beijing：Tsinghua University Press，2005.（in Chinese））

[16] 詹姆斯·韦斯特程. 流域管理的模拟建模[M]. 程国栋，李新，王书功，译. 郑州：黄河水利出版社，2004.（WESTERVELT J. Simulation modeling for watershed management[M]. CHENG Guo-dong，LI Xin，WANG Shu-gong. Zhengzhou：Yellow River Press，2004.（in Chinese））

[17] 李纪人，潘世兵，张建立，等. 中国数字流域[M]. 北京：电子工业出版社，2009.（LI Ji-ren，PAN Si-bing，ZHANG Jian-li，et al. Digital basin of China[M]. Beijing：Publishing House of Electronic Industry，2009.（in Chinese））

[18] 解建仓，罗军刚. 水利信息化综合集成服务平台及应用模式[J]. 水利信息化，2010，10(4)：18-23.（XIE Jian-cang，LUO Jun-gang. Integrated service platform for the information explosion process in water resources industry and its application pattern[J]. Water Resource Information，2010，10(4)：18-23.（in Chinese））

[19] 韩桂军，马继瑞，刘克修，等. 四维变分数据同化在非线性潮汐模型数值计算中的应用研究[C]//《专项学术交流会》筹备组. 我国专属经济区和大陆架勘测研究论文集，北京：海洋出版社，2002.（HAN Gui-jun，MA Ji-rui，LIU Ke-xiu，et al. A study on the application of 4D-VAR data assimilation for a non-linear numerical model of tide[C]//Preparatory Group of Special Academic Exchange. Proceedings of China Exclusive Economic Zone and the Continental Shelf Survey，Beijing：China Ocean Press，2002.（in Chinese））

[20] 王辉，刘桂梅，万莉颖. 数据同化在海洋生态模型中的应用和研究进展[J]. 地球科学进展，2007，22(10)：989-996.（WANG Hui，LIU Gui-mei，WAN Li-ying. Review on the data assimilation into marine ecosystem model[J]. Advance in Earth Science，2007，22(10)：989-996.（in Chinese））

[21] 费剑锋，韩月琪，王云峰，等. 扩展卡尔曼滤波数据同化试验—基于 Lorenz(1960)系统的研究[J]. 气象科学，2004，24(4)：413-423.（FEI Jian-feng，HAN Yue-qi，WANG Yun-feng，et al. Data assimilation test on the extended Kalman filter—the study based on Lorenz(1960) model[J]. Scientia Meteorologica Sinica，2004，24(4)：413-423.（in Chinese））

[22] 俞云利，赖锡军. 二维平面非恒定流数学模型的遥感水位数据同化[J]. 水科学进展，2008，19(2)：224-231.（YU Yun-li，LAI Xi-jun. 2D horizontal unsteady flow model for assimilating remote sensing water levels[J]. Advances in Water Science，2008，19(2)：224-231.（in Chinese））

[23] 黄勇，王颖. 集合卡尔曼滤波在浅水模式数据同化中的应用[J]. 解放军理工大学学报：自然科学版，2008，9(1)：85-90.（HUANG Yong，WANG Ying. Application of shallow water model by use of ensemble Kalman filter data assimilation[J]. Journal of PLA University of Science and Technology（Natural Science Edition），2008，9(1)：85-90.（in Chinese））

[24] 龚建华，李文航，周洁萍，等. 虚拟地理实验概念框架与应用初探[J]. 地理与地理信息科学，2009，25(1)：18-21.（GONG Jian-hua，LI Wen-hang，ZHOU Jie-ping，et al. Exploring conceptual framework and application of virtual geographic experiments[J]. Geography and Geo-Information Science，2009，25(1)：18-21.（in Chinese））

[25] 龚建华, 周洁萍, 张利辉. 虚拟地理环境研究进展与理论框架[J]. 地球科学进展, 2010, 25(9): 915-926. (GONG Jian-hua, ZHOU Jie-ping, ZHANG Li-hui. Study progress and theoretical framework of virtual geographic environments[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(9): 915-926. (in Chinese))

Development of numerical modeling system for river basins and critical techniques

YU Xin[1], KOU Huai-zhong[2], WANG Wan-zhan[1]

(1. *Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou* 450003, *China*; 2. *Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou* 450003, *China*)

Abstract: This paper introduces the state-of-the-art developments of the integrated model for the Heihe River Basin, the digital river basin model, the human-nature evolution modeling system and the Yellow River numerical modeling system in terms of developing philosophy, mode, quality control, model integration and support system. The systems are used mainly for coupled modeling of water-economic-ecological processes, and are made by integrating of modules in an intensive production manner. Efforts in their development focus on both scientific evaluation of the models involved and construction of environmental facilities suitable for and open to further public developments. Techniques such as multi-sourced data assimilation and parameterization are applied in the systems. Besides, the paper shows such technical problems needing to be addressed in the future as modeling uncertainty, model evaluation, high efficient save of, access to, and visualization of complex data, model integration for cloud computation of the large-scaled processes of multi-disciplinary variables, 3D/4D variational data assimilation, experimentation based on interactive digital and physical models for rivers, water cycling, transport of multiple agents and modeling techniques.

Key words: coupling modeling of water-economic-ecological processes; module assembly; quality control; comprehensive integration environment