

文章编号: 100128166(2010)0820851215

数字黑河的思考与实践 3: 模型集成*

李 新, 程国栋, 康尔泗, 徐中民, 南卓铜, 周 剑, 韩旭军, 王书功
(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:介绍了数字黑河模型集成研究的进展。¹ 流域科学研究中的模型集成由发展流域集成模型和建模环境这 2 个主题所构成, 前者可概括为(水)土)气)生)人)集成模型, 后者是支持集成模型的高效开发的软件工具, 注重于应用先进的信息技术为建模提供支撑。² 将模型集成分为知识途径和技术途径, 讨论了建模环境在模型集成中的作用, 以及科学模型和流域管理模型的关系。³ 回顾了黑河流域模型集成的总体目标是发展两种类型的集成模型, 其中第一种回应科学目标, 是地球系统模型在流域尺度上的具体体现, 以建成能够综合反映流域水文)生态)经济相互作用的模型为标志; 第二种集成模型回应管理目标, 以建成空间显式的流域水资源决策支持系统为目标。⁴ 对黑河流域已有的水文、地下水、水资源、陆面过程、土地利用、生态、社会经济与生态经济建模工作做了系统的综述。⁵ 分析了黑河流域集成模型研究中存在的问题和所面临的挑战。

关键词: 数字流域; 模型集成; 流域集成模型; 建模环境; 决策支持系统; 黑河流域

中图分类号: P334 **文献标志码:** A

1 引 言

数值模拟是地球系统科学的基本研究方法, 它在地球系统科学研究中的作用被誉为第二次哥白尼革命^[1]。模型既是我们对地球系统科学认识的公式化知识的集大成者; 同时, 模型也能够重演过去、预测未来、根据真实和假设的情景对未来可能的变化未雨绸缪地提出应对策略。

对于无限复杂的地球巨系统, 数值模拟几乎是再现其各个圈层的内部过程及其相互作用的唯一手段, 只有通过数值模拟, 才能把定性的概念模型上升为定量模型。发达国家在发展地球系统模型方面已经取得了很大进展。流域科学研究中的综合集成模型的建立可借鉴地球系统模型的发展思路, 从中汲取养料。但是, 由于流域研究的尺度与整个地球系统有很大不同, 其建模思路和重点也有所不同, 可概

括为(水)土)气)生)人)集成模型的发展^[2-3]。它一般应包括地表水、地下水、水质、能量平衡、植被动态、作物生长、碳氮等生物地球化学循环、土壤侵蚀等模块, 有些模型也实现了和大气模型的单向(大气模型作为驱动)或双向耦合, 而进一步耦合土地利用和社会经济模型则是极具挑战的前沿。严格意义上说, 目前还没有包含了以上所有模块的流域集成模型, 但许多模型已经包含了其中若干个组分。国际上较为知名的流域集成模型包括: 美国农业部(USDA)的 SWAT^[4-5]及在此基础上发展出的多种集成模型、美国环保署(EPA)的 BASINS^[6]、美国地质调查局(USGS)在 MODFLOW 基础上发展的地表地下水耦合模型 GSFLOW^[7]、丹麦水文研究所(DHI)的 MKE SHE 和 MKE BASN 等系列软件^[8-9], 以及近年来发展起来的 ParFlow^[10]。可以看出, 这些模型或软件工具多以分布式水文模型或地

¹ 收稿日期: 201020323; 修回日期: 2010205205

* 基金项目: 国家杰出青年科学基金项目/流域尺度陆面数据同化系统研究 0(编号: 40925004); 中国科学院西部行动计划(二期)项目/黑河流域遥感)地面观测同步试验与综合模拟平台建设 0(编号: KZCX22X-B2209); 中国科学院知识创新工程重要方向项目/地表过程建模环境和模型集成研究 0(编号: KZCX22YW-Q1021)资助。

作者简介: 李新(19692), 男, 甘肃酒泉人, 研究员, 主要从事陆面数据同化、遥感和 GIS 在冰冻圈和水文水资源研究中的应用、流域集成研究, E-mail: lxin@lzb.ac.cn

下水模型为骨架,而进一步耦合区域气候模型、陆面过程模型、动态植被/作物生长模型是近几年才开始的新尝试。

模型集成的另一个重要环节是建模环境(modelling environment)。它是支持集成模型的高效开发、已有模型或模块的便捷连接、模型管理、数据前处理、参数标定、可视化的计算机软件平台。建模环境的发展,可以大大加快建模的效率以及模型与数据的集成,方便模型之间的相互比较和模型选择,并能支持决策支持系统的快速定制^[11, 12]。在地球系统科学领域,建模环境的发展得到了高度重视,如 NASA 地球科学技术办公室支持了地球系统模拟平台(ESMF)^[13],致力于为地球系统模拟提供统一的软件平台,目前平台中已经包含了大气、海洋、陆地、流域水文等各类模型。英国 eScience 计划支持了/网格计算支持的地球系统模拟平台 0(GENIE)项目,目标是研制一个统一的地球系统模拟平台^[14]。在流域模拟以及水文和环境科学领域,建模环境的发展自 20 世纪 80 年代以来就得到了高度重视,目前较为成熟的建模环境包括模块化建模系统(MMS)^[15]、空间建模环境(SME)^[16]、模块化建模系统 OMS^[17]。对水文和生态领域建模环境的更为详细的介绍可参考文献[11, 18, 19]。

我们认为,流域科学研究中的模型集成由发展流域集成模型和建模环境这两种主要的研究活动所构成,前者注重于通过建模对流域相关科学知识的集成,后者注重于应用先进的信息技术为建模提供支撑,二者相辅相成,共同构成数字流域研究中的模型集成主题。

本文是数字黑河系列论文^[20]的第三篇,是对数字流域研究中模型集成的思考。其中,在本节概述之后,第二节介绍了我们对于模型集成的理解;第三节回顾了黑河流域模型集成的总体目标;第四节详细综述了黑河流域的建模研究进展;第五节总结全文并讨论了黑河流域模型集成研究所面临的挑战。

2 什么是模型集成?

2.1 模型集成的知识途径和技术途径

从计算机科学的角度看,模型在结构上远比数据复杂,而且与其所表达的过程密切联系,因此,模型集成也远比数据集成困难^[21, 22]。我们从计算机建模的角度,根据水文、生态、陆面过程等环境模型的特点,将这类模型概化为物理结构、输入输出接

口、用户界面和辅助工具这 4 个组成部分(图 1)。

(1) 物理结构由核心结构和外围结构组成,核心结构是指模型的控制方程(通常为微分方程)和参数化方程;外围结构则包括数值求解方案、模型的空间和时间剖分方案、初始化方案以及与其他模型的耦合接口。模型物理结构的各个组成部分都与我们对水文和生态过程的理解以及相应的数学求解有关,是对与流域有关的水文与生态等知识的形式化表达。

(2) 输入输出接口是指模型和模型数据集之间的关系。模型数据集可分为驱动数据、参数集、验证和诊断数据三大类^[23],一般来说,它们的输入、输出及预处理都与模型的物理结构无关,可相对独立。

(3) 用户界面通常包括命令行界面、图形用户界面、Web 用户界面等。

(4) 辅助工具,如参数标定、模型数据集制备等工具。

本文只讨论与模型集成密切相关的物理结构和输入输出接口。我们将模型集成分为技术途径和知识途径。其中,技术途径一般只需要和输入输出接口打交道,但有时也会涉及到模型物理结构的外围结构。总体而言,它是一个信息技术))) 计算机科学、软件工程、计算数学范畴内的问题,因此称为技术途径。知识途径是指:因为模型耦合的需求,不得不修改模型的控制方程,或者增加新的控制方程后与原控制方程联立求解。这类似于发展一个新的模型,建模本身成为多学科综合的一种方法论,往往由多学科的人员在交叉领域中合作完成。这样的模型集成增加了新的水文、生态或其他流域科学的知识,因此称之为模型集成的知识途径。

这种划分也有利于理清模型集成和建模环境的关系。从图 2 可以看出,技术途径和知识途径的实现方式大不一致。由于前者主要是一个信息技术问题,建模环境可以完全支持这种类型的模型集成研究,大大增强集成模型的开发效率,并促进模型与 GIS 数据及可视化环境的集成。而后者,囿于新的集成模型的复杂性,特别是不同模型或模块中的方程需要联立解算,因此,在现阶段,在源程序级别上发展新的模型))) 甚至完成或部分完成模型集成还不可避免。但建模环境在知识途径中也可以大有用武之地,它可以依靠建模语言或图标拖放式的建模方式快速解构已有模型,并在此基础上构建新的模型;也能够更容易地使新模型与数据管理、参数标定、可视化、高性能计算等功能高度集成。

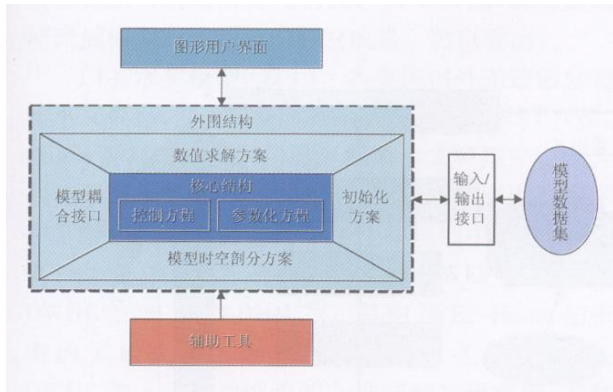


图 1 从计算机科学的角度看水文、生态、陆面过程等环境模型的结构

Fig 1 The structure of environmental model from a viewpoint of computer science

2.2 科学模型和流域管理模型的关系

模型是工具还是假说,一直是一个水文领域争论不休的问题^[24]。我们认为,首先应该将流域集成模型区分为科学模型和流域管理模型。科学模型以理解流域水文生态过程为主旨,是科学假说;而流域管理模型的主要目的是应用于流域水资源及其他自然和社会经济资源的管理,是工具。前者通常建立在已有的物理定律的基础上,因而常被称为机理模型,而后者可以不问本因,通常是经验模型或系统模型;前者因为流域科学自身的复杂性而往往十分复杂,后者则力求简单易用;前者不重用户界面,后者则要求傻瓜化;前者常常有庞大的计算量,而后者必须计算简单;前者理论上可以有更好的预测能力,但也存在很大的不确定性,而後者的预测能力一般依赖于根据系统过去的特性而外推。

关于集成模型的另一个争论是简单还是复杂。爱因斯坦说过,“Make everything as simple as possible but not simpler”)也就是既要尽可能地追求简约之美,但同时又不失真实性。二者的平衡是建模的艺术,将水资源管理模型建立在成熟的科学模型之上^[11, 25, 26]正反映了这种趋势。图 3 概括了两类集成模型的关系,新一代的科学模型将具有强大的功能,但随着模型集成度的提高,不确定性也随之增加,如何控制不确定性,需要依靠新兴的数据同化方法,在流域模型的动力学框架内融合多源观测数据,从而显著减少模拟的不确定性,同时增加模型的预测能力。但具有同化能力的流域集成模型显然结构太复杂、输入众多,很难被流域管理者和利益相关者直接使用,可行的途径是依据特定的流域特征,将气

候变化、土地利用变化、流域规划以及社会经济要素定制为不同的情景,依靠情景驱动模型;同时,在计算方面大力简化,或依靠科学模型计算得到的高分辨率数据离线支持决策分析,使得空间决策支持系统变得简单易用。总之,模型集成应该兼顾科学模型强有力的预测能力,和管理模型简单、实用、健壮、易交互的特性。

3 黑河流域模型集成总体设计

黑河流域研究中所面临的各种挑战,已在各种文献中详细介绍,此处不再赘述。总结起来,回答这些复杂问题单单依靠以前的单学科研究积累是远远不够的,需要从(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,把流域作为生态)水)经济整体研究,才能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。这就要求我们科学目标和流域管理目标并重,发展两种类型的集成模型。

第一种集成模型更多地回应科学目标,主要通过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;在此基础上进一步尝试耦合社会经济模型,形成具有综合模拟能力的流域集成模型。

第二种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,应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。

针对以上总体设计,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所于 2003) 2008 年开展了“黑河流域交叉集成研究的模型开发和模拟环境建设”项目(以下简称黑河流域模型集成项目),并制定了第一阶段的具体目标:

(1) 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)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,务必回答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

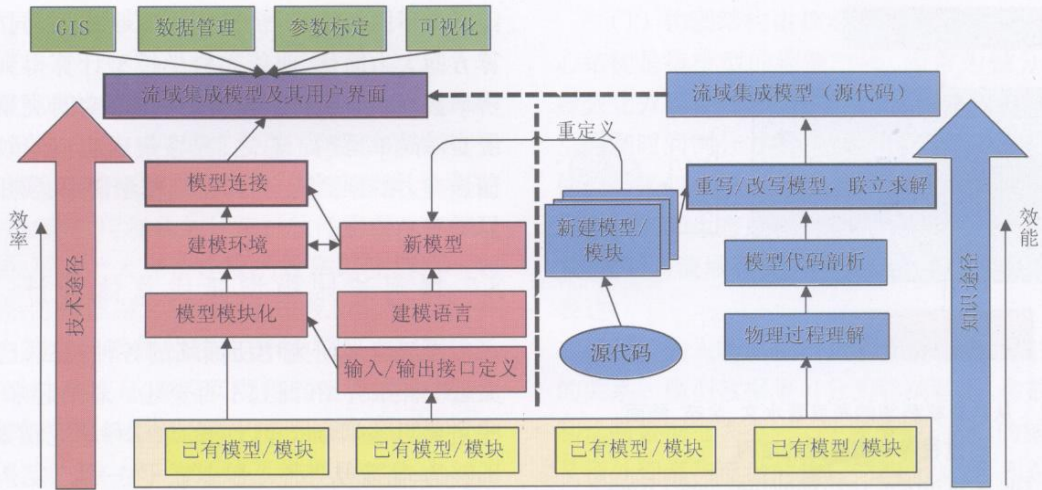


图2 模型集成的知识途径和技术途径

Fig. 2 Intellective and technical approaches for model integration

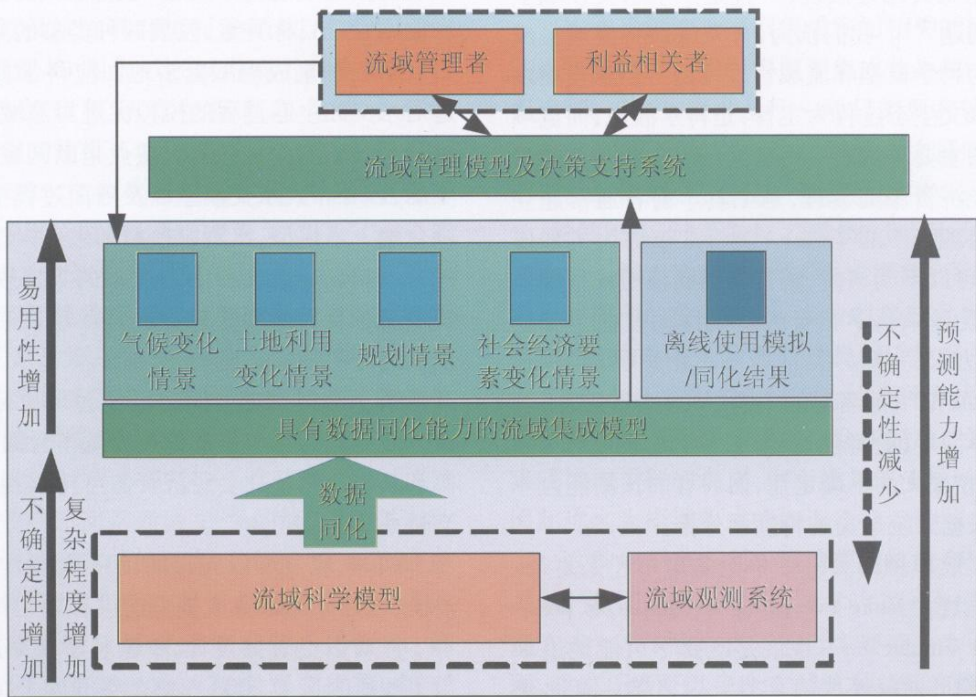


图3 流域模型集成研究中科学模型和管理模型的关系

Fig. 3 The relationship between scientific model and water resource management model

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。

(2) 初步建成模拟环境。消化、吸收和改进已有的优秀建模环境, 建立利用 MMS 和 SME 等建模环境构建流域模型的能力。

4 黑河流域水文、生态与社会经济建模研究进展

黑河流域是在流域尺度上开展建模研究最丰富的地区。表 1~表 7 总结了多种水文、地下水、水资源、陆面过程、土地利用、生态、社会经济与生态经济

模型在黑河流域的应用情况。其中,许多模型是黑河流域模型集成项目的研究成果。可以看出:

(1) 水文模型(表 1)。各类国内外先进的分布式水文模型,如 TOPModel、新安江模型、SWAT、VIC、PRMS 等都被应用到黑河流域水文模拟中。山区径流预报是这类模型的主题,但部分模型也模拟了中下游地区的水文过程。在这些模型中,集成度较高、也更有创新性的模型是 WEPH eihe^[40]、DWHC^[43]和 WEB2DHM^[46]。其中, WEPH eihe 初步考虑了地表地下水相互作用和人工侧支循环; DWHC 加入了较为细致的一维冻融过程模拟,并预留了与中尺度大气模型 MM5 的嵌套接口; WEB2DHM 则兼备陆面过程模型的特点,能够完整地表达包括土壤冻融过程的地表能量平衡与水分循环,并能够模拟陆地碳循环。

(2) 地下水模型(表 2)。内陆河流域水循环的一个重要特征是地表水和地下水频繁而复杂的相互作用。因此,发展流域地下水)地表水耦合模型,成为黑河流域模型集成研究的首要任务之一,也吸引了众多建模者的关注^[47]。黑河流域地下水模拟的新趋势是考虑地下水与河流、井水和灌溉的相互作用,如周剑等^[50]、武强等^[53]、胡立堂等^[54]、王旭升等^[56]所发展的模型都不同程度地涉及到这些方面的建模,从而为建立更为成熟的中游集成模型打下了基础。此外,王旭升^[32, 57]也提出引入非饱和单元来实现较大厚度包气带渗流的处理,建立了含水层变饱和度地下水三维有限差分模型 AquiferFlow 作为通用模拟工具,同时从算法上提出了地下水模型与地表水文模型、土壤水模型的耦合技术,并基于 ModHydro 类库程序初步实现了各个耦合模块。

(3) 水资源模型(表 3)。区域尺度的水资源模型建模工作在黑河流域还较为薄弱。特别要指出的是,灌区是中游水资源管理的基本单元,加强对灌区水平衡的模拟,对于理解人工绿洲的水循环,加强农田水管理具有重要意义。

(4) 陆面过程模型(表 4)。黑河流域的陆面过程模拟具有悠久的历史,开始于 HEIFE 试验时对各种下垫面能量平衡特征的模拟^[58, 60],并在之后 20 多年的时间里,围绕内陆河流域陆面过程的特点,在深度和广度方面不断拓展。突出的进展是对寒区水文的重要过程)))冻融过程的模拟与参数化方案的改进^[61],以及对干旱区水平衡的最主要分量)))蒸散发的估计方案的不断改进^[66, 68],并且开展了和地下水模型、根区提水模型耦合的尝试^[63, 65]。这些改

进,都为进一步的集成模型提供了很好的元素。

(5) 土地利用模型(表 5)。除张华等^[69]将 CLUE2S 模型成功应用于黑河中游地区的土地利用变化模拟之外,黑河流域的土地利用建模研究还比较薄弱。进一步发展空间显式的土地利用模型依然是一个挑战。

(6) 生态模型(表 6)。黑河流域的生态模拟近年来得到了大力加强。突出的特点其一是这些模型都是空间显式的,在结构上与水文模型相似,因此有利于和水文模型的耦合。其二是,在模型中都广泛应用了遥感数据,甚至以遥感数据为主要信息源,这将为在全流域尺度上广泛使用可信的遥感数据产品,开展生态)水文耦合模拟打下重要的基础。

(7) 社会经济与生态经济模型(表 7)。这类模型强调的重点是水)生态)经济的协调发展,有些模型已经初步有了和土地利用、污染等自然环境指标的接口。进一步发展分布式的、空间显式的生态经济模型,发展/像元化社会经济要素 0 方法,是将经济模型与水文、生态等自然过程模型耦合起来的基础。

5 结论和讨论

数值模拟是流域科学研究中最重要的方法论之一。没有模型的数字流域只能是数字资料的堆砌;而有了模型,才能使数字流域动起来,才能使它具有预报未来,支持决策的能力。可以认为,流域集成模型是数字流域的骨架,是流域集成研究的总装室。

流域科学研究中的模型集成由发展流域集成模型和建模环境这两种主要的研究活动所构成。本文尝试回答了/什么是模型集成? 0以及它在数字流域研究中所起的作用。模型集成需要把由先进的信息技术支撑的技术途径和增加新的流域科学知识的知识途径协调一致起来。建模环境在发展流域集成模型中发挥着重要的作用,它可以大大加快建模的效率,支持模型与数据管理、参数标定、可视化、高性能计算等功能的集成,并支持决策支持系统的快速定制。

模型集成应该兼顾科学模型强有力的预测能力,和管理模型简单、实用、健壮、易交互的特性,要将流域综合管理模型建立在成熟的科学模型之上。黑河流域模型集成贯彻了这种思路,即科学目标和流域管理目标并重,同时发展流域尺度上的地球系统模型和流域水资源综合管理模型。

黑河流域是在流域尺度上开展建模研究最丰富

表 1 水文模型在黑河流域的应用

Table 1 Summary of the studies on hydrological modeling in the Heihe River Basin

模型分类	模型名称	模型设置及模拟区域	模拟量 (限于文中所模拟量)	主要输入 (不包括初始条件)	主要参数	模型应用者 / 作者及参考文献
概念模型和半分布式模型	HBV	流域为单元; 月步长; 上游	山区流域的蒸发和出山径流量	月气温和降水量	降水和气温的海拔梯度、固态降水分离阈值、度日因子等	康尔泗等 ^[27-28]
	TOPModel	1500 m 网格; 日或月步长; 干流山区	径流	DEM、降水量、蒸散发量	与水力传导、截留、土壤水分亏缺有关的 5 个参数	陈仁升等 ^[29]
	SRM	高程分带; 日步长; 干流山区	径流	DEM、气象数据、雪盖面积 (从遥感获取)	径流系数、度日因子、气温递减率、衰退系数	王建等 ^[30]
	新安江	流域为单元; 日步长; 黑河干流西支子流域	径流、蒸散发	日降水量和流域内日水面蒸发	流域蒸散发能力与实测水面蒸发之比、流域内不透水面积占全流域面积之比、蓄水量曲线的方次、土壤蓄水量、土壤的蒸散发系数、入渗率、退水系数、汇流参数	王书功等 ^[31-32]
	DTVGM	500 m 网格; 日步长; 干流山区	径流	DEM、土地覆盖、水文和气象数据	固态降水分离阈值、融雪临界气温、气温递减率、产流参数、土壤水流出系数	夏军等 ^[33-34]
分布式水文模型 (应用)	SWAT	403 个水文响应单元; 日步长; 干流山区	流域水循环各分量、产沙、输沙、土壤养分流失、生物量等	DEM、土地覆盖、土壤、气象	一系列与土壤和土地覆盖类型相关的参数、融雪径流参数、地下水参数	李硕等 ^[32]
	SWAT	157 个水文响应单元; 日步长; 干流山区	径流等水循环各分量	同上	同上	黄清华等 ^[35]
	SWAT	36 个水文响应单元; 日步长; 干流山区	径流 (本文注重于参数标定)	同上	同上	Li Zhanling 等 ^[36]
	SWAT	4 个子流域; 日步长; 干流山区	径流	同上	同上	王中根等 ^[37]
	VIC	1/64 度网格; 日步长; 干流山区	径流、土壤蒸发、植被蒸腾、截留水蒸发、蒸散发总量、土壤含水量、感热、潜热、土壤热通量	DEM、土地覆盖、植被、土壤、气象	一系列与土壤和植被类型相关的参数、汇流参数	王书功等 ^[31-32]
	PRMS	61 个水文单元; 逐时; 干流山区; 增加了融雪模型	径流、蒸发、基流、壤中流等水文变量	DEM、土地覆盖、植被、土壤、气象	一系列与土壤和植被类型相关的参数、潜在蒸散的气温校正系数等参数	周剑等 ^[38]
	DLBRM	2 km 网格; 日步长; 上中游地区	径流、蒸散发、层间流、地下水动态、雪水当量等水循环分量	DEM、土地覆盖、土壤、气象	一系列与土壤和土地覆盖类型相关的参数、汇流参数	He Chansheng 等 ^[39]
分布式水文模型 (研制)	WEPHiche	1 km 网格; 日步长; 上中游地区	蒸发蒸腾、入渗与径流、地下水运动、地下水流出和地下水溢出、坡面汇流与河道汇流、人工侧支循环等	DEM、土地利用、土壤、气象、灌区用水资料、生活用水、人口	一系列与土壤和植被类型相关的参数、地下水含水层参数、汇流参数、融雪参数	贾仰文等 ^[40-42]
	DWHC	1 km 网格; 日步长; 干流山区	各层土壤的温度、液态含水量、固态含水量、感热、潜热、水势梯度、水分入渗、毛细上升量	DEM、植被、土壤、气象	一系列与土壤和植被类型相关的参数、固态降水分离阈值、度日因子、土壤蒸发统一调整参数、植被蒸腾统一调整系数、汇流参数等	陈仁升等 ^[43-44]
耦合模型	MM5 + DHS2 VM	3 km 网格; 10 s 时间步长; 上中游地区	径流等水文变量; 地表能量平衡	DEM、土地覆盖、土壤、植被覆盖率、NECP 再分析资料	一系列与土壤和土地覆盖类型相关的参数	高艳红等 ^[45]
	WEBDHM (SB2 + GB2 HM + 冻土参数化)	水文响应单元; 逐时; 上游冰沟小流域	径流、土壤水分、土壤含冰量等水循环变量; 能量平衡各分量; 碳循环	DEM、土地覆盖、土壤、遥感、气象	一系列与土壤和土地覆盖类型相关的参数、从遥感提取的叶面积和光合作用有效能量比率	Wang Lei 等 ^[46]

表 2 地下水模型在黑河流域的应用

Table 2 Summary of the studies on groundwater modeling in the Hehe River Basin

模型分类	模型名称	模型设置及模拟区域	模拟量(限于文中所模拟量)	主要输入(不包括初始条件)	主要参数	模型应用者 / 作者及参考文献
应用商业软件	FEFLOW	三角网格 (35 760 个), 含水层厚度 200~500 m 月步长; 中游盆地 (5 024.4 km ²)	地下水水位	水文地质	水力传导系数等水文地质参数	W en Xiaohu 等 [48]
	FEFLOW	有限元; 月步长; 下游额济纳三角洲 (11 545 km ²)	地下水水位	DEM、水文地质、气象、灌溉、地下水补给和开采量	水力传导系数等水文地质参数	李守波等 [49]
	FEFLOW / MIKE11	有限元网格 (66 073 个有限元); 日步长; 中游盆地	地下水水位、地下水和河流的补给与排泄关系	DEM、土地覆盖、植被、土壤、水文地质、水系、气象、灌区灌溉资料、河道引水、地下水开采量	一系列与土壤和土地覆盖类型相关的参数、地下水参数	周剑等 [50]
自发展模型	黑河中游地下水模型	三角网有限单元, 1 421 个单元, 单层; 月步长; 中游	地下水水位	水文地质条件、边界条件、源汇项	水力传导系数等水文地质参数	张光辉等 [51]
	黑河下游地下水模型	不规则多边形网格, 双层; 月步长; 下游额济纳盆地 (33 987.5 km ²)	地下水水位	水文地质条件、边界条件、源汇项	水力传导系数等水文地质参数、非饱和土壤水分运动参数	武选民等 [52]
	地表河网) 地下水水流耦合模型	地表河流采用一维剖分, 地下水含水层选用三角形网格; 月步长; 下游金塔) 鼎新盆地和额济纳盆地 (32 900 km ²)	地下水水位、河水水位、河流断面流量	水文地质条件、灌溉水入渗补给量、水库入渗补给量、地下水开采量等	水力传导系数等水文地质参数、河流参数	武强等 [53]
	干旱区地表) 地下水集成模型, 基于 PGM S	多边形有限差分, 垂向上共分 8 个模拟层, 每层 3 755 个单元, 总单元数为 30 040 月步长; 黑河干流中游地区 (8 716 km ²)	地下水水位、地下水与河流和井的补给与排泄关系、泉水流量	水文地质、气象、泉水、用水情况	水力传导系数等水文地质参数、曼宁粗糙系数等河流参数	胡立堂等 [54 55]
	地表、包气带和地下水相互作用) 的三水源模型	有限元; 月步长; 中游张掖甘州区	地下水动态、河流渗漏、地下水与河流和井的补给与排泄关系	水文地质、泉水、用水情况	水文地质参数	王旭升等 [56]

表 3 水资源模型在黑河流域的应用

Table 3 Summary of the studies on water resource modeling in the Hehe River Basin

模型分类	模型名称	模型设置及模拟区域	模拟量(限于文中所模拟量)	主要输入(不包括初始条件)	主要参数	模型应用者 / 作者及参考文献
已有模型与自发展模型的组合	灌区水平衡模型	逐日; 中游灌区	田间尺度: 作物蒸腾、蒸发、田间排水、蓄水量变化; 灌区尺度: 灌区用水和耗水、到达田间的水量、渠系输水损失、水库水平衡	灌区、渠系、水库、灌溉、作物、土壤、气象	渠系水有效利用系数、不同生长阶段的作物参数、土壤参数	加孜拉# 阿布都拉克 [58]

表 4 陆面过程模型在黑河流域的应用

Table 4 Summary of the studies on land surface modeling in the Hehe River Basin

模型分类	模型名称	模型设置及模拟区域	模拟量(限于文中所模拟量)	主要输入(不包括初始条件)	主要参数	模型应用者 / 作者及参考文献
应用已有模型	简易一维陆面过程模型 (基于 SB)	土壤层 (细分为 15 层)、植被层和大气参考层; 10 min 步长; HEIFE 试验区	水平衡各分量、能量平衡各分量	气象、土壤属性、作物类型	一系列与土壤和作物类型相关的参数、叶面积	牛国跃等 [60]

续表

模型分类	模型名称	模型设置及模拟区域	模拟量(限于文中所模拟量)	主要输入(不包括初始条件)	主要参数	模型应用者 / 作者及参考文献
	SHAW	植被层、残留层、土壤层; 日步长; 上游草地和云杉林观测站	土壤水分、蒸散发等水循环分量; 长波辐射、短波辐射、感热和潜热等能量平衡各分量	气象、站点信息	一系列与土壤和植被类型相关的参数、粗糙度参数、雪参数、残留物参数	康尔泗等 ^[61]
	改进的 Shuttleworth and Wallace 蒸散模型	双层冠层; 逐日; 中游临泽站	蒸散发	气象、土壤属性、叶面积	空气动力阻力、冠层叶片边界层阻力、地表与冠层间湍流交换阻力、土壤阻力、冠层尺度的气孔阻力	吉喜斌等 ^[62]
	SiB2+ 包气带入渗模型	逐时; 中游临泽站	水平衡各分量、地下水位	气象、灌溉、土壤质地	一系列与土壤和植被类型相关的参数	周剑等 ^[63]
	NCAR /LSM	逐时; 下游额济纳观测站	地表温度、土壤含水量、能量平衡各分量	气象、站点信息、植被类型、土壤类型	一系列与土壤和植被类型相关的参数、空气动力参数	冯起等 ^[64]
	HYDRUS2D	日步长; 下游(胡杨)	根区提水(植被和地下水的相互作用)	气象、植物生长状况及结构	与土壤类型有关的水力参数、根分布	Zhu Yonghua ^[65]
自发展模型	灌溉农田春小麦生长条件下的土壤水分运移模型	春小麦生长模型为日步长, 土壤水分模型可变步长(1~60 min); 中游临泽站	每日作物生长状态变量、各土层根系吸水剖面分布、各土层土壤含水率剖面分布以及田间水平衡收入和支出各项	气象、土壤属性、作物特性、叶面积	土壤水力参数、作物参数、根系参数	吉喜斌等 ^[66]
	灌溉农田水平衡模型	前一模型的扩展; 中游临泽站	土壤含水量、根区提水、蒸发、植被蒸腾	气象、土壤属性	土壤参数、气孔导度等植被参数、根分布	Ji X bin ^[67]
	TSEBPS	中游绿洲(盈科站)	感热与潜热通量	气象、热红外遥感、叶面积	土壤参数、空气动力参数	Xin Xiaozhou ^[68]

表 5 土地利用模型在黑河流域的应用

Table 5 Summary of the studies on land use and land cover change modeling in the Heihe River Basin

模型分类	模型名称	模型设置及模拟区域	模拟量(限于文中所模拟量)	主要输入(不包括初始条件)	主要参数	模型应用者 / 作者及参考文献
应用已有模型	CLUES	张掖市(黑河中上游)	土地利用	土地利用现状、DEM、气象、人口密度、劳动力、文化程度、收入或 GDP、灌溉面积、种植指数、水资源总量、生态需水量	与城市的距离、与河流的距离、与道路的距离、人口密度、海拔、坡度、坡向	张华等 ^[69]

表 6 生态模型在黑河流域的应用

Table 6 Summary of the studies on ecological modeling in the Heihe River Basin

模型分类	模型名称	模型设置及模拟区域	模拟量(限于文中所模拟量)	主要输入(不包括初始条件)	主要参数	模型应用者 / 作者及参考文献
应用已有模型	CEC	1 km 网格; 日步长; 全流域	NPP	SPOT VEGETATION 遥感数据、全球格网化气象再分析资料、土地利用	光能利用率、光合作用有效辐射能占太阳入射辐射总量的比例等参数	卢玲等 ^[70-71]
	CASA	1 km 网格; 月步长; 全流域	NPP	SPOT VEGETATION 遥感数据; 逐日气温、降水和辐射资料、土地覆盖、土壤	光能利用率、土壤质地和容重等参数、	陈正华等 ^[72]
	TESm	4 km 网格; 日步长; 全流域	NPP、NEP、异养呼吸、植被碳和氮含量、土壤碳、叶面积、蒸散发、营养元素	DEM、植被、土地利用、土壤、气象	植被光合参数、土壤参数、地形参数等	彭红春 ^[73]

表 7 社会经济与生态经济模型在黑河流域的应用

Table 7 Summary of the studies on socioeconomic and ecoeconomic modeling in the Hehe River Basin

模型分类	模型名称	模型设置及模拟区域	模拟量(限于文中所模拟量)	主要输入(不包括初始条件)	主要参数	模型应用者 / 作者及参考文献
自发展模型	黑河流域(水)生态) 经济发 展耦合模型	系统动力学模型; 全流域	水) 生态) 经济协调发展的 3 种方案; 未来生态、生产和生活需水量; 土地利用变化; GDP 和产业结构等	人口、GDP、农民人均收入等经济统计数据; 单方水效益; 用水量; 分水方案等	人口自然增长系数、用水结构转换系数、投资结构转换系数等 10 个参数	方创琳等 ^[74]
	黑河流域水资源承载力模型	6 个模块: 宏观经济、人口、土地资源约束、水资源模拟转化与开发利用、水环境、水利工程投资; 中游	灌溉面积、GDP、水资源利用量、人均生化需氧量、生态保护面积、人均粮食占用量	经济、人口、土地利用面积、分水情景、水资源利用状况、水环境指标、水利工程	渠系利用系数、节水速度、低压管道和滴灌节水指标、工业节水指标、引地下水渠系利用	徐中民 ^[75 76]
	环境经济综合模型	以绿色 GDP 为核算指标; 张掖市	水资源、环境污染物排放、GDP 等经济指标	经济、人口、各部门耗水状况、人口用水定额	宏观经济参数、污染物排放系数等	陈东景 ^[77]
	水资源优化配置模型	兼顾经济、生态和生活用水的多目标均衡; 全流域	经济、生态和生活用水的供给和需求量; 各区域的边际收入	人口、生活用水、生态用水、工业用水、GDP、初始的边际收入	生活用水定额、生态用水配额、生产用水定额	Wang Jinfeng ^[78]

注: 缩略词解释见附表

的地区, 在水文、水资源、陆面过程、土地利用、生态、社会经济及生态经济建模领域已经应用了大量已有模型, 并发展了一些新的模型。这些丰富的模型 / 组件 0, 为进一步的模型集成准备好了原料, ,

但是, / 数字黑河 0 的模型集成, 还面临着众多的挑战:

在集成模型发展方面, 虽然地表) 地下水模型的耦合、分布式水文模型和陆面过程模型的耦合, 已经进入研究者的视野, 但真正意义上的生态) 水文集成模型尚未完成。我们曾展望过黑河流域集成模型的组成及建模重点^[3], 这里不再重复, 而是重点讨论存在的问题。

(1) 山区分布式水文模型中, 对冻土水文过程的建模还十分薄弱, 特别是冻融过程对水平方向水分交换的影响, 几乎还是一个未被涉及到过的建模领域。

(2) 地表) 地下水的多次交换在现有的模型中还不能被准确刻画, 其复杂性又因为灌溉和打井等人工过程的影响和干扰而更加复杂化。

(3) 人类活动正在成为或已成为驱动水循环的主要动力之一, 社会水循环、而非自然水文过程是水资源重新分配的主导因素, 但水资源模型和土地利用模型的研究都还十分薄弱。

(4) 模型中普遍没有显式的生态过程和生物化学循环, 对植被动态和作物生长的模拟还没有被

考虑。

(5) 点源和非点源污染的模拟在黑河流域目前尚未开展, 随着对环境问题的进一步关注, 水质模型和水化学模型必将被提上日程。

(6) 本文没有介绍黑河流域大气模型方面的进展, 实际上, 和大气模型的耦合是发展真正意义上的 / 地球系统模型 0 所必不可少的一步。

从方法的角度看:

(1) 模型不确定性的研究单薄, 集合预报、多模型预报等现代模拟方法, 在黑河流域还鲜有尝试; 参数估计、数据同化等方法的研究和应用应进一步加强。

(2) 现有的模型多依据微观尺度的观测而建立, 这样的模型外推至流域尺度是否合适? 对流域尺度异质性的模拟可能是一个真正的挑战^[79]。

(3) 从表 1~ 表 7 可以看出, 各种水文模型所需的输入类似, 这愈加凸显了数据集成的重要性。制备更高质量的高分辨率模型数据集, 是数字黑河研究中迫切的任务。数据集成和模型集成相辅相成, 需要互相促进。

(4) 遥感发挥的作用还不大。各类遥感观测为分布式模型提供了天然的分分布式的高分辨率输入, 但现有模型, 多没有使用遥感数据以及进一步同化遥感数据的能力。

最后, 流域集成模型显然应该是一个公共模

型^[80]。因此,模型集成最大的挑战也许来自于团队协作的能力,来自于多学科的研究人员能否更有效地协同作战。黑河流域模型集成,需要继续秉承/十年铸一剑的精神,共同打造一个流域科学的模拟平台)))也唯有此,才可能更好地在流域尺度上实践地球系统科学的理想。

英文缩略词:

BASNS Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources 点源和非点源污染评价系统

CASA: Carnegie Ames Stanford Approach, CASA 模型(一个生态系统生产力模拟模型)

CLUES the Conversion of Land Use and its Effects at Small region extent 小区域土地利用变化及其效应模型

DEM: Digital Elevation Model, 数字高程模型

DHI Danish Hydraulic Institute, 丹麦水力研究所

DHSVM: Distributed Hydrology Soil Vegetation Model, 分布式水文土壤植被模型

DLBRM: Distributed Large Basin Runoff Model, 分布式大流域径流模型

DTVGM: Distributed Time Variant Gain Model, 分布式时变增益模型

DWHC: Distributed Water and Heat Coupled model, 分布式水热耦合模型

EPA: Environmental Protection Agency USA, 美国环保署

ESMF: Earth System Modeling Framework, 地球系统模拟平台

FEFLOW: Finite Element subsurface FLOW system, 有限元地下水流系统

GBHM: Geomorphology-Based Hydrological Model, 基于地形的水文模型

GENIE: Grid ENabled Integrated Earth system modeling framework, 网格计算支持的地球系统模拟平台

GIS Geographic Information System, 地理信息系统

GSFLOW: Ground water and Surface-water FLOW model, 地下水)地表水流耦合模型

HBV: Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model, 半分布式降雨径流模型

HEIFE: Atmosphere-land surface processes experiment at the Heihe River Basin, 黑河流域地-气相互作用野外观测试验

HYDRUS 变饱和孔隙介质中水流和溶质运移模型

MIKE BASIN: 丹麦水力研究所的一个集成的水资源管理模型

MIKE SHE: 丹麦水力研究所的 SHE 模型

MIKE 11: 丹麦水力研究所的水文模型

MM5: Mesoscale Model 5, 中尺度大气模型

MMS: Modular Modeling System, 模块化建模系统

MODFLOW: Modular finite-difference groundwater FLOW model, 模块化有限差分地下水流模型

NASA: National Aeronautics and Space Administration, 美国国家宇航局

NCAR/LSM: National Center for Atmospheric Research/Land Surface Model, 美国国家大气研究中心/陆面过程模式

NCEP: National Centers for Environmental Prediction, 美国国家环境预测中心

NEP: Net Ecosystem Production, 净生态系统生产力

NPP: Net Primary Production, 净初级生产力

OMS: Object Modeling System, 模块化建模系统

ParFlow: Parallel three-dimensional variably saturated groundwater FLOW model, 三维可变饱和度及可并行化的地下水模型

PGMS: Polygon-Grid finite-difference groundwater Modeling System, 多边形网格有限差分地下水模拟系统

PRMS: Precipitation-Runoff Modeling System, 降水径流模型

SHAW: Simultaneous Heat and Water model, 水热耦合模型

SHE: System Hydrologique Européen, 欧洲水文系统模型

SB: Simple Biosphere model, 简单生物圈模式

SB2: Simple Biosphere model version 2, 简单生物圈模式 2

SME: Spatial Modeling Environment, 空间建模环境

SPOT/VEGETATION: Systeme Pour l'Observation de la Terre/VEGETATION, 地球观测系统 植被

监测传感器

SRM: Snow Runoff Model 融雪径流模型

SWAT: The Soil and Water Assessment Tool 土壤

壤与水评价工具

TESm: Terrestrial Ecosystem Simulator 陆地生态系统模拟模型

TOPModel TOPgraphy based hydrobical Model 基于地形的水文模型

TSEBPS: Two2layer Surface Energy Balance Parameterization Scheme 地表能量平衡参数化两层模型

USDA: United States Department of Agriculture 美国农业部

USGS U. S Geological Survey, 美国地质调查局

VIC: Variable Infiltration Capacity model 可变下渗能力模型

WEB2DHM: Water and Energy Budget2based Distributed Hydrological Model 基于水热平衡的分布式水文模型

WEPHehe Water and Energy transfer Process Hehe 黑河水热传输过程模型

致谢: 感谢 / 黑河流域交叉集成研究的模型开发和模拟环境建设 0 项目组所有成员对本文工作的支持! 盖迎春协助绘制了本文插图, 在此致谢!

参考文献 (References):

- [1] Schellhuber H J - Earth system analysis and the second Copernican revolution [J]. Nature 1999, 402(SUPP): C192C23
- [2] Cheng Guodong Integrated Management of the Water2Eco2logy2Economy System in the Hehe River Basin [M]. Beijing Science Press 2009 581 [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 581]
- [3] Li X in Cheng Guodong On the watershed observing and modeling systems [J]. Advance in Earth Sciences 2008, 23(7): 7562764 [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): 7562764.]
- [4] Arnold J G, Fohrer N SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling [J]. Hydrological Processes 2005, 19(3): 5632572
- [5] Gassman P W, Reyes Green C H, et al The soil and water assessment tool Historical development applications and future research directions [J]. Transaction of the ASABE, 2007, 50(4): 121121250.
- [6] EPA. Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources, Basins Version 3.0 [R]. EPA, 2001, 337.
- [7] Markstrom S L, Niswonger R G, Regan R S et al. GSFLOW2coupled Groundwater and Surface2water FLOW Model Based on the Integration of the Precipitation2runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Groundwater Flow Model (MODFLOW2005) [R]. U. S. Geological Survey 2008: 240
- [8] Graham D N, Butts M B. Flexible integrated watershed modelling with MIKE SHE [C]. M Singh V P, Frevert D K, eds. Watershed Models. CRC Press, 2005. 2452272
- [9] DHI MIKE BASIN 2003: A Versatile Decision Support Tool for Integrated Water Resources Management Planning [R / OL]. http://www.dhi.com/software/waterResources/MIKEBASIN/References 2003
- [10] Kollet S J, Maxwell R M. Integrated surface2groundwater flow modeling: A free surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model [J]. Advances in Water Resources 2006, 29(7): 9452958.
- [11] Westervelt J. Simulated Modeling for Watershed Management [M]. [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 131.]
- [12] Dok D R. An introduction to model integration and integrated modeling environments [J]. Decision Support Systems 1993, 10(3): 2492254
- [13] ESMF Joint Specification Team. Earth System Modeling Framework: ESMF Requirements [R]. NASA Earth Science Technology Office 2005
- [14] Price A, Lenton T, Cox C, et al. GENIE: Grid enabled Integrated Earth System Model [J]. ERCM News 2005, 6(1): 15216
- [15] Leavesley G H, Restrepo P J, Markstrom S L, et al. The modular modeling system (MMS)2User's manual [R]. Report 962151, U. S. Geological Survey, 1996: 142
- [16] Maxwell T. The Spatial Modeling Environment Users Guide [M / OL]. http://www.uvm.edu/gee/SME3/2002
- [17] David Q, Markstrom S L, Rojas K W, et al. The Object Modeling System [C]. M Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer. CRC Press, 2002. 3172330
- [18] Argent R M, Houghton B. Land and water resources model integration: Software engineering and beyond [J]. Advances in Environmental Research, 2001, 5(4): 3512359
- [19] Argent R M. An overview of model integration for environmental application2components frameworks and semantics [J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(3): 2192234
- [20] Li X in, Cheng Guodong, Wu L izong. Digital Hehe river basin: An information infrastructure for the watershed science [J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(3): 2972305. [李新, 程国栋, 吴立宗. 数字黑河的思考与实践 1: 为流域科学服务的数字流域 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(3): 2972305.]
- [21] Dok D R, Kottmann J E. Model integration and a theory of models [J]. Decision Support Systems 1993, 9(1): 51263
- [22] Tang X ijin. Model integration [J]. Journal of System Engineering, 2001, 16(5): 3222329 [唐锡晋. 模型集成 [J]. 系统工程学报, 2001, 16(5): 3222329.]
- [23] Li X in, Wu L izong, Ma Mingguo et al. Digital Hehe river basin

- sin. 2 Data integration [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3): 3062316 [李新, 吴立宗, 马明国, 等. 数字黑河的思考与实践 2 数据集成 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 3062316]
- [24] Savenije H H G. HESS Opinions / The art of hydrology [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(2): 1572161.
- [25] Surridge B, Harris B. Science-driven integrated river basin management: A miracle [J]. *Interdisciplinary Science Reviews*, 2007, 32(3): 2982312
- [26] Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science. *Hydrology of a Dynamic Earth* [R]. Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science Inc., 2007.
- [27] Kang Ersi, Cheng Guodong, Lan Yongchao, et al. A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of northwest China to climatic changes [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 42(suppl 1): 52263. [康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型 [J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(增刊 1): 47254]
- [28] Kang Ersi, Cheng Guodong, Lan Yongchao, et al. Application of a conceptual hydrological model in the runoff forecast of a mountainous watershed [J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(1): 18226 [康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 概念性水文模型在出山径流预报中的应用 [J]. *地球科学进展*, 2002, 17(1): 18226]
- [29] Chen Rensheng, Kang Ersi, Yang Jianping, et al. Application of Topmodel to simulate runoff from Heihe mainstream mountainous basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(4): 4282434. [陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. Topmodel 模型在黑河干流出山径流模拟中的应用 [J]. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 4282434]
- [30] Wang Jian, Li Shuo. Effect of climatic change on snowmelt runoff in mountainous regions of inland rivers in northwestern China [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49(8): 8812888 [王建, 李硕. 气候变化对中国内陆干旱山区融雪径流的影响 [J]. *中国科学: D 辑*, 2006, 35(7): 6642670]
- [31] Wang Shugong. Study on Parameter Estimation for Hydrological Model and Uncertainty in Estimated Parameters [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006. [王书功. 水文模型参数估计方法及参数估计不确定性研究 [D]. 中国科学院研究生院, 2006]
- [32] Cheng Guodong, Li Xi, Kang Ersi, et al. Integrated Model Development and Modeling Environment Building for Interdisciplinary Studies in the Heihe River Basin [R]. Lanzhou Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, 2008: 352 [程国栋, 李新, 康尔泗, 等. 黑河流域交叉集成研究的模型开发和模拟环境建设结题报告 [R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008: 352]
- [33] Xia Jun, Wang Gangsheng, Lv Aifeng, et al. A research on distributed time variant gain modeling [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 7892796 [夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟 [J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 7892796]
- [34] Xia Jun, Wang Gangsheng, Tan Ge, et al. Development of distributed time variant gain model for nonlinear hydrological systems [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(6): 7132723 [夏军, 王纲胜, 谈戈, 等. 水文非线性系统与分布式时变增益模型 [J]. *中国科学: D 辑*, 2005, 34(11): 106221071]
- [35] Huang Qinghua, Zhang Wanchang. Improvement and application of GIS based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semiarid catchment of Heihe river basin, China [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2004, 28(2): 22226. [黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(2): 22226]
- [36] Li Z L, Xu Z X, Shao Q X, et al. Parameter estimation and uncertainty analysis of SWAT model in upper reaches of the Heihe river basin [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(19): 274422753
- [37] Wang Zhonggen, Liu Changning, Huang Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(1): 79286. [王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79286]
- [38] Zhou Jian, Li Xi, Wang Genxu, et al. An improved precipitation runoff model based on MMS and its application in the upstream basin of the Heihe river [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(4): 7242736 [周剑, 李新, 王根绪, 等. 一种基于 MMS 的改进降水径流模型在中国西北地区黑河上游流域的应用 [J]. *自然资源学报*, 2008, 23(4): 7242736]
- [39] He C S, De Marchi C, Croley T E, et al. Hydrologic modeling of the Heihe Watershed by DLBRM in northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 4102421.
- [40] Jia Yangwen, Wang Hao, Yan Denghua. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe river basin. I. Model development and verification [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(5): 5342542 [贾仰文, 王浩, 严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟 (I)) 模型开发与验证 [J]. *水利学报*, 2006, 37(5): 5342542]
- [41] Jia Yangwen, Wang Hao, Yan Denghua. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe river basin. II. Applications [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(6): 6552661 [贾仰文, 王浩, 严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟 (II)) 模型应用 [J]. *水利学报*, 2006, 37(6): 6552661]
- [42] Jia Y W, Ding X, Qin C, et al. Distributed modeling of land surface water and energy budgets in the inland Heihe river basin of China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(10): 184921866
- [43] Chen Rensheng, Lv Shihua, Kang Ersi, et al. A Distributed Water-Heat Coupled (DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin (I): Model structure and equations [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(8): 8062818. [陈仁升, 吕世华, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型 (I): 模型原理 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(8): 806

- 818.]
- [44] Chen R S, Lv S H, Kang E S, et al. A distributed water-heat coupled model for mountainous watershed of an inland river basin of northwest China (I) model structure and equations [J]. *Environmental Geology*, 2008, 53(6): 1299-1309.
- [45] Gao Y H, Lv S H, Cheng G D. Simulation of rainfall runoff and watershed convergence process in the upper reaches of Heihe River Basin [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 47 (Special Issue): 128.
- [46] Wang L, Koike T, Yang K, et al. Frozen soil parameterization in a distributed biosphere hydrological model [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(3): 557-571.
- [47] Wang Xusheng, Zhou Jian. Advances in numerical modeling of groundwater flow in Heihe river basin [J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2009, (9): 352-38 [王旭升, 周剑. 黑河流域地下水流数值模拟的研究进展 [J]. *工程勘察*, 2009, (9): 352-38.]
- [48] Wen X H, Wu Y Q, Lee L, et al. Groundwater flow modeling in the Zhangye basin, northwestern China [J]. *Environmental Geology*, 2007, 53(1): 77-84.
- [49] Li Shoubq, Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong. Modeling of temporal and spatial distribution of groundwater level in the water table fluctuant belt of the lower reaches of Heihe river [J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(3): 391-396 [李守波, 赵传燕, 冯兆东. 黑河下游地下水波动带地下水时空分布模拟研究 2FEFL2 LOW 模型应用 [J]. *干旱区地理*, 2009, 32(3): 391-396.]
- [50] Zhou Jian, Cheng Guodong, Wang Genxu, et al. Integrating remote sensing and groundwater numerical modeling for the analysis of surface-groundwater transformation and its impact on land use in the middle reaches of the Heihe river basin [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(12): 1343-1354 [周剑, 程国栋, 王根绪, 等. 综合遥感和地下水数值模拟分析黑河中游三水转化及其对土地利用的响应 [J]. *自然科学进展*, 2009, 19(12): 1343-1354.]
- [51] Zhang Guanghui, Liu Shaoyu, Xie Yuebo, et al. Water Cycle and Groundwater Formation and Evolution in the Inland Heihe River Basin, Northwestern China [M]. Beijing: Geology Press, 2004: 398 [张光辉, 刘少玉, 谢悦波, 等. 西北内陆黑河流域水循环与地下水形成演化模式 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 398.]
- [52] Wu Xuamin, Chen Chongxi, Shi Shengsheng, et al. Three-dimensional numerical simulation of groundwater system in Ejina basin, Heihe river, northwestern China [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2003, 28(5): 527-532 [武选民, 陈崇希, 史生胜, 等. 西北黑河额济纳盆地水资源管理研究))) 三维地下水流数值模拟 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2003, 28(5): 527-532.]
- [53] Wu Qiang, Xu Junxiang, Zhang Zhihong, et al. Coupled modeling of surface water-groundwater system II Application [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(6): 754-758 [武强, 徐军祥, 张自忠, 等. 地表河网) 地下水流系统耦合模拟 II 应用实例 [J]. *水利学报*, 2005, 36(6): 754-758.]
- [54] Hu L T, Chen C X, Jiao J J, et al. Simulated groundwater interaction with rivers and springs in the Heihe river basin [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(20): 2794-2806.
- [55] Hu Litang. Integrated model for surface water and groundwater in arid inland river regions and its application [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(4): 410-418 [胡立堂. 干旱内陆河地区地表水和地下水集成模型及应用 [J]. *水利学报*, 2008, 39(4): 410-418.]
- [56] Wang X S, Ma M G, Li X, et al. Groundwater response to leakage of surface water through a thick vadose zone in the middle reaches area of Heihe River Basin, in China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(4): 639-650.
- [57] Wang Xusheng. Aquifer Flow: A Variable Saturated Groundwater Flow Model Based on Three Dimensional Finite Difference Method [R]. Beijing: School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, 2007: 49 [王旭升. 含水层变饱和度地下水流三维有限差分模型 [R]. 北京: 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 2007: 49.]
- [58] Jazira# Abderazah. Study on Water Balance Model of Irrigation Area in the Middle Reaches of Heihe Basin [D]. Nanjing: Hohai University, 2006: 92 [加孜拉# 阿布都拉扎克. 黑河流域中游灌区水平衡模型研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006: 92.]
- [59] Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jian, et al. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. *Plateau Meteorology*, 1994, 13(3): 225-236 [胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果 [J]. *高原气象*, 1994, 13(3): 225-236.]
- [60] Niu Guoyue, Wang Jian. A numerical simulation of one-dimensional land surface process model [J]. *Plateau Meteorology*, 1992, 11(4): 411-422 [牛国跃, 王介民. 简易一维陆面过程的数值模拟 [J]. *高原气象*, 1992, 11(4): 411-422.]
- [61] Kang Ersi, Cheng Guodong, Song Kechao, et al. Simulation of energy and water balance in Soil-Vegetation-Atmosphere transfer system in the mountain area of Heihe river basin at Hexi Corridor of northwest China [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(4): 538-548 [康尔泗, 程国栋, 宋克超, 等. 河西走廊黑河山区土壤) 植被) 大气系统能量平衡模拟研究 [J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(6): 544-551.]
- [62] Ji Xubin, Kang Ersi, Zhao Wenzhi, et al. Simulation of the evaporation from irrigational farmlands in the cases of the Heihe River Basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 713-719 [吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 等. 黑河流域山前绿洲灌溉农田蒸散发模拟研究 [J]. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 713-719.]
- [63] Zhou Jian, Li Xin, Wang Genxu, et al. Coupled land surface model SIB2 with the unsaturated seepage model and its application [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(6): 570-579 [周剑, 李新, 王根绪, 等. 陆面过程模式 SIB2 与包气带入渗模型的耦合及其应用 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(6): 570-579.]
- [64] Feng Qi, Zhang Yanwu, Si Jianhua, et al. Simulation experiment on energy transfer in SPAC system at lower reaches of the

- Heihe river[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(6): 14521-150. [冯起, 张艳武, 司建华, 等. 黑河下游典型植被下垫面与大气间能量传输模拟研究 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(6): 14521-150.]
- [65] Zhu YH, Ren LL, Skaggs TH, et al. Simulation of populus euphratica root uptake of groundwater in an arid woodland of the Ejina basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(17): 2460-2469.
- [66] Ji Xbin, Kang Ersi, Zhao Wenzhi, et al. Simulation of soil moisture content dynamics in SPAC system of irrigated farmland in inland oasis, northwest China[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(2): 1942-201. [吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 等. 内陆绿洲灌溉农田 SPAC 系统土壤水分动态模拟研究 [J]. *中国沙漠*, 2006, 26(2): 1942-201.]
- [67] Ji X B, Kang E S, Chen R S, et al. A mathematical model for simulating water balances in cropped sandy soil with conventional flood irrigation applied [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 337-346.
- [68] Xin X Z, Liu Q H. The two-layer surface energy balance parameterization scheme (TSEBPS) for estimation of land surface heat fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(3): 491-504.
- [69] Zhang Hua, Zhang Bo, Meng Bao, et al. Land use and land cover change modeling in Zhangye city[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(5): 3592-363. [张华, 张勃, 孟宝, 等. 张掖市土地利用/覆盖变化模拟 [J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(5): 3592-363.]
- [70] Lu Ling, Li Xin, Veroustraete F. Estimation of net primary productivity of Heihe River Basin using remote sensing[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(6): 823-830. [卢玲, 李新, Veroustraete F. 黑河流域植被净初级生产力的遥感估算 [J]. *中国沙漠*, 2005, 25(6): 823-830.]
- [71] Lu L, Li X, Veroustraete F, et al. Analyzing the forcing mechanisms for net primary productivity changes in the Heihe River Basin, northwest China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(3): 793-816.
- [72] Chen Zhenghua, Ma Qingyuan, Wang Jian, et al. Estimation of Heihe basin net primary productivity using the CASA model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(2): 263-273. [陈正华, 麻清源, 王建, 等. 利用 CASA 模型估算黑河流域净第一性生产力 [J]. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 263-273.]
- [73] Peng Hongchun. Study on Dynamic Simulation of Ecosystem in the Heihe River Basin [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007: 136. [彭红春. 黑河流域生态系统动态模拟研究 [D]. 中国科学院研究生院, 2007: 136.]
- [74] Fang Chuanglin, Bao Chao. The coupling model of water ecology-economy coordinated development and its application in Heihe river basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 781-790. [方创琳, 鲍超. 黑河流域(水)生态)经济发展耦合模型及应用 [J]. *地理学报*, 2004, 59(5): 781-790.]
- [75] Xu Zhongmin. A scenario-based framework for multi-criteria decision analysis in water carrying capacity[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 21(2): 99-106. [徐中民. 情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用 [J]. *冰川冻土*, 1999, 21(2): 99-106.]
- [76] Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang. *Theory, Method and Applications of the Ecological Economy*[M]. Zhengzhou Yellow River Conservancy Press, 2003: 306. [徐中民, 张志强, 程国栋. 生态经济学理论方法与应用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 306.]
- [77] Chen Dongjing. Construction and application of an integrated environmental and economic model: A case study of Zhangye city in the Heihe river basin[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2006, 42(2): 621-621. [陈东景. 环境经济综合模型的构建及应用研究))以黑河流域张掖市为例 [J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(2): 621.]
- [78] Wang J F, Cheng G D, Gao Y G, et al. Optimal water resource allocation in arid and semiarid areas[J]. *Water Resources Management*, 2008, 22(2): 239-258.
- [79] Seyfried M S, Wilcox B P. Scale and the nature of spatial variability: Field examples having implications for hydrological modeling[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(1): 173-184.
- [80] Famiglietti J. Community modeling in hydrologic science[J]. *EOS*, 2008, 89(32), doi: 10.1029/2008EO320005.

Digital Heihe River Basin. 3: Model Integration

LIXIN, CHENG Guodong, KANG Ersi, XU Zhongmin, NAN Zhuotong,
ZHOU Jian, HAN Xu jun, WANG Shugong
(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract This paper provides an overview of model integration in the Digital Heihe River Basin research in its active. It could be concluded that model integration plays a backbone role in watershed science. It mainly consists of two themes. One is to develop an integrated watershed model which should be capable of representing the

processes of water-soil-atmosphere-biosphere-human continuum and the interactions among them. The other is to build a modeling environment which should focus on giving software support for efficient and effective model integration with advanced information and computational techniques. It is proposed that the model integration can be implemented in two approaches. The first is defined as the intellectual approach, through which the physics of different components of model or module could be completely coupled to form a new model. The second is defined as the technical approach, through which models or modules could be integrated through data exchange interfaces, remaining the core of each model untouched. The importance of the modeling environment to model integration and the relationship between the watershed management model and the scientific model are discussed. » The overall goal of model integration initiative in the Hehe River Basin is to develop two types of integrated models. One is for scientific purposes, which should be a localization of the Earth system model in the Hehe River Basin and features as a comprehensive model on hydrology, ecology and economy as well as their interactions at a basin scale. The other is for management purposes, which should target at building a spatially explicit decision support system for integrated river basin water resource management. ¼ Existing researches on modeling hydrology, groundwater, water resources, land surface processes, land use, ecology, social economics and ecological economics in the Hehe River Basin are summarized. ½ Bottlenecks in building an integrated model for the Hehe River Basin are addressed.

Key words: Digital river basin; Model integration; Integrated watershed model; Modeling environment; Decision support system; Hehe river basin

5 地球科学进展 6 / IODP 研究 0 专栏征稿启事

2004 年 4 月, 我国以 / 参与成员 0 的身份加入 IODP, 这对于我国地球科学研究早日整体上进入国际前沿、造就一批勇于承担推动地球科学发展重任的中国科学家来说, 是一次难得的机遇。

为了推动我国在 IODP 研究中发挥更大的作用, 展示国内学术界参与 ODP 及 IODP 相关研究所取得的科学成果, 中国 IODP 办公室与 5 地球科学进展 6 达成协议, 合作开辟 / IODP 研究 0 专栏, 目前已刊出多篇相关论文。

该专栏由中国 IODP 办公室负责组稿, 并组织专家审稿, 论文通过审稿后将以最快速度在 5 地球科学进展 6 上刊载。同时, 中国 IODP 办公室为专栏论文支付出版补贴 (版面费)。

欢迎国内从事相关研究的广大科研人员踊跃投稿, 来稿应具有科学性、创新性, 与 ODP / IODP 相关的研究性论文和综述论文均可, 请参照 5 地球科学进展 6 杂志格式要求撰写。

有关投稿事宜请联系中国 IODP 办公室 (<http://www.iodp2china.org>), 本启事长期有效。

地 址: 上海市四平路 1239 号同济大学海洋地质国家重点实验室 邮政编码: 200092

联系人: 拓守廷 电话: 021- 65982198 E-mail: iodp_china@tongji.edu.cn

中国 IODP 办公室