

文章编号: 100128166(2010)0320297209

数字黑河的思考与实践 1: 为流域科学服务的数字流域

李 新, 程国栋, 吴立宗

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 多学科数据的收集和积累、多学科模型的集成以及现代化的观测系统是发展流域科学的必要前提。/数字黑河 0 是为黑河流域科学研究和流域集成管理而搭建的集数据、模型和观测系统于一体的信息化平台, 是 /数字地球 0 在流域尺度上的一次实践性尝试。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。/数字黑河 0 已阶段性地完成了数据集成, 在线数据量超过 1 000 GB, 并实现了完全共享, 有力地支持了黑河流域的各项研究工作; 在模型集成方面已初步建成了流域综合模型和空间决策支持系统。/数字黑河 0 的进一步构想是在 eScience 的框架下将数据系统、观测系统、模型系统、信息发布系统、高性能计算及科学计算可视化集成为一个整体。

关 键 词: 数字流域; 流域科学; 数据集成; 模型集成; 流域观测系统; 黑河流域

中图分类号: P334 **文献标志码:** A

1 引 言

美国前副总统戈尔提出的数字地球^[1]概念, 在我国科学界、政府和公众中都引起了积极的反响, 首届国际 /数字地球大会 0 于 1999 年率先在北京召开, 并迅速衍生出数字中国、数字省份、数字城市等一系列基础地理信息建设项目。数字流域是 /数字地球 0 在流域尺度上的实践性尝试, 由本文开始的系列文章, 将从发展流域科学的角度, 介绍数字流域的一个具体实例))) /数字黑河 0, 并尝试回答以下问题:

什么是数字流域? 它有哪些特征? 数字流域和流域科学有什么关系? 数字流域就是流域基础地理信息建设加上流域模型吗? 流域观测系统和流域集

成模型在数字流域中起着什么样的作用? 数字流域需要什么样的流域信息基础设施? 数字流域如何应用于流域综合管理和决策支持? 数字流域的将来是怎么样?

我国科学界对数字流域的认识存在着以下观念。其一, 将数字流域理解为数字高程模型 (DEM) 及构建于 DEM 基础上的数字水文模型^[2], 这种概念的实质是流域水系的数字化表达; 其二, 为流域水文、水质预报和水资源管理服务的数字流域, 数字黄河是一个成功的实例, 其建设过程中提出了数字流域应由数据层、模型层和应用层组成的思路, 并强调将流域模型作为数字流域的引擎^[3, 4]; 其三, 更重视为流域综合管理而服务的数据采集、传输、管理、可视化到模型模拟和应用的信息技术综合集成^[5, 6]。

¹ 收稿日期: 2009212214; 修回日期: 2010201223.

* 基金项目: 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: KZCX2XB2209); 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); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 / 地表过程建模环境和模型集成研究 0 (编号: KZCX2ZYW 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: lixir@lzb.ac.cn

国际上流域综合管理中的信息化水平较高,其特点是在典型流域普遍建立了由地面自动网站、遥感、降水雷达等先进的观测手段和畅通的通讯系统组成的监测体系,数据集成度高、共享程度高,模型和决策支持系统的应用已经达到了实用的水平^[7],但并没有采用数字流域的概念,而是更多地沿用流域信息基础设施(Cyberinfrastructure)^[8]等概念,与第三种观念较为相似。

与以上观念既有共同点又有区别,始于 1999 年的 /数字黑河 0 研究^[9],其核心目标是为流域科学服务。流域是地球系统的缩影,是自然界的基本单元。因此,从地球系统科学基础研究的角度看,流域科学可以被看作是地球系统科学的研究方法在流域尺度上的具体体现;而从流域综合管理的应用角度看,流域科学也是在流域尺度上通过对自然资源和人类活动的优化配置而为可持续发展服务的应用科学^[10]。因此, /数字黑河 0 的定位,更多地是从以上 2 个角度为流域科学研究和流域集成管理搭建集数据、模型和观测系统于一体的信息化平台,其不同于其他数字流域的主要特点是:

(1) 强调为集成模型服务的数据集成。数据的科学内容集成重于技术集成,强调综合多种来源的数据,生产出更高质量的模型数据集,为流域尺度的 /水)土)气)生)人 0 综合模拟提供包括驱动、参数、验证的综合数据集。

(2) 流域集成模型是数字流域的骨架。将流域作为整体考虑,以水为主线,模拟流域尺度上的水文)生态)人类活动的过程及其相互作用,以建立 /水)土)气)生)人 0 综合模型为目标;同时,发展以先进的信息技术为支撑的建模平台,为建立综合模型提供有力工具。

(3) 流域观测系统是数字流域的重要组成部分,遥感、无线传感器网络等新兴的观测技术将为数字流域提供完备的观测信息。

(4) 在流域尺度上实践地球系统科学的研究方法,充分吸收现代地学研究中应对复杂系统、非线性和不确定性的研究方法,重视对模型和观测信息的融合,重视对于不确定性的度量。

由本文开始的 4 篇论文将全面介绍 /数字黑河 0 的研究进展,其中:

数字黑河的思考与实践 1: 为流域科学服务的数字流域在总结和回顾国内外对于数字流域研究的基础上,从服务于流域科学的角度,提出我们自己对数字流域的定义,勾勒了数字流域的研究内容,介绍

了我们开展的 /数字黑河 0 的相关工作,并对未来的重点工作做了展望。

数字黑河的思考与实践 2 数据集成介绍了 /数字黑河 0 中数据集成方面的研究进展,在对数据集成的内涵进行剖析之后,回顾了 /数字黑河 0 网络信息系统的建设和相关技术集成工作,重点介绍了针对发展模型数据集的数据科学内容集成。

数字黑河的思考与实践 3 模型集成首先简要回顾了国内外在黑河流域开展的水文模拟工作,然后重点介绍我们开展的黑河流域模型集成工作。

数字黑河的思考与实践 4 流域观测系统介绍了黑河流域观测系统建设,并通过这一实例说明了建立流域观测系统的构想。

2 数字黑河的总体设计

2.1 为流域科学服务的数字流域

传统上以水文学和水资源管理为主题的流域研究,正因为多学科的强有力交叉以及地球观测技术和信息技术的大力推动而发生着革命性的变革。水与流域内其他系统的相互作用日益成为科学界所瞩目的焦点,生态水文、生态经济、环境水文地质、水文信息学等新学科应运而生。将流域作为一个整体来考虑,从 /水)土)气)生)人 0 的角度进行综合集成研究,正在催生出一门新的科学))) 流域科学(watershed science)。尽管对其特征和研究范围的定义尚不十分明确,甚至这一领域也还没有形成固定的术语,但相关的讨论无疑是十分热烈的,且都强调流域科学多学科交叉的鲜明特征^[11, 12]。与流域科学的逐渐成型直接相关,美国国家研究委员会(National Research Council NRC)在 1990 年代初出版了 5 水文科学的机遇 6^[13],掀起了水文综合研究的高潮之后,又组织专家,先后出版了 5 美国地质调查局的流域研究 6、5 美国流域的新策略 6 和 5 美国地质调查局的河流科学 6 这 3 本流域水文研究方面的咨询报告^[14~16],系统地对流域科学的多个方面做了较为全面的讨论。

世纪之交发展起来的流域科学无疑将经历这一时代各种新兴的信息技术的洗礼!丰富的野外自动(数字化)采集手段、多源的遥观测、新兴的无线传感器网络、强有力的计算机模拟、逼真的计算机可视化,都使得在实验室内))) 在计算机上,再现出流域丰富多彩的自然过程和社会经济活动成为现实。这种由多种新技术推动,在计算机上再现流域的过去、现在和将来的集成技术,即是数字流域。

流域科学的 2 个方面都将得益于数字流域:

(1) 在流域科学的基础研究方面,无论是流域尺度上的水循环、能量交换和生物化学循环研究,还是大气)水文)生态)社会经济相互作用研究,都将得到更为综合和多尺度的数据以及新的观测、模拟和科学计算可视化手段的有力支持。

(2) 从流域综合管理的角度,实时的监测、科学模型为骨架的决策支持系统、便捷的网络支持下的更为广泛的参与,都使得流域管理可以在更丰富准确信息的基础上,融入更多利益相关群体的关注。

因此,我们将 / 数字黑河 0 定位为:为流域科学研究和流域集成管理而搭建的集数据、模型和观测系统于一体的信息化平台。它是黑河流域研究的数据中心,又是它的虚拟实验室,模拟和观测平台;同时,也是播放流域的历史、现在和将来的演播室,是群决策的研讨厅。

2 2 数字黑河的集成观念

从整体上看,数字流域是对信息获取、处理、可视化、发布的多种数字技术的集成。/ 数字黑河 0 的集成观念,遵循 / 通过重新编排或扩充已有可靠资源来达到 / 创新 . 目的 0 的思路¹,重点开展数据集成和模型集成,并建立数字化的流域观测系统。

(1) 数据集成:包括技术层面上的数据库集成和数据科学内容集成。前者是指数据的标准化、规范化及一个分布式的信息系统,并通过多种 Web 服务方式实现数据共享。后者是指综合多种来源、多种分辨率的数据,准确地对流域进行数字化表达;并为流域模型的发展、验证和改进而制备模型参数、驱动和验证数据集的研究活动。

(2) 模型集成:流域综合模型研发中的信息技术支持是 / 数字黑河 0 的基本任务之一,其核心目标是发展一个支持研发 / 水)土)气)生)人 0 综合模型的模型建模环境。

综合模型的发展及其应用是 / 数字黑河 0 的外延。在文献 [10] 中我们已对发展黑河流域模型平台的思路做了详细的介绍))) / 流域模型系统可概括为 - 水)土)气)生)人 . 集成模型的发展,应该科学目标和流域管理目标并重,既要发展具有综合模拟能力的流域集成模型,也要建成流域水土资源和社会经济资源可持续利用决策支持系统。流域集成模型应由包括冻土和积雪水文过程的分布式水文模型、陆面过程模型、地下水模型、渠系模型、动态植被模型和社会经济模型构成。0

模型集成还包括发展模型) 数据融合方法,特

别是数据同化和参数反演方法。

(3) 流域观测系统:对已有观测系统进行包括数据自动采集、传输、发布等方面的数字化改造,部署无线传感器网络,实现观测数据的远程传输,与遥感观测相配合,以 / 多系统的系统 0 的思路,形成遥感)地面观测一体化的、覆盖流域能水和生物化学循环及社会经济活动的数字化流域观测系统。

2 3 总体设计

数字黑河由数据平台、模型平台和数字化观测系统组成(图 1),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。

3 为什么选择黑河流域

3 1 黑河流域是典型的内陆河

内陆河流域是指以陆地上湖泊或洼地为最终容泄区的流域。它们在水文单元上更加完整,水循环在流域内即可闭合,因此是在流域尺度上,探索地球表层系统的各种相互作用的绝佳实验室。同时,内陆河流域水资源缺乏,用水矛盾尖锐,也为实践流域综合管理提供了很好的样板。

中国西北内陆河流域面积共计 219 万 $\text{km}^{2[17]}$,其中,黑河流域是我国第二大内陆河流域,面积共计 29.5 万 km^{20} ,从流域的上游到下游,以水为纽带形成了 / 冰雪)冻土)森林)草原)河流)湖泊)绿洲)沙漠)戈壁 0 的多元自然景观,流域内寒区和干旱区并存,山区冰冻圈和极端干旱的河流尾间地

¹ 人类基因组计划 (Human Genome Project HGP) 首席科学家柯林斯 (Francis Collins) 说,人类不是靠 / 自我开发 0 新基因来获取新功能,而是通过重新编排或扩充已有可靠资源来达到 / 创新 0 目的。人类基因组计划的一个重要的发现是确定了人类基因组的大约 32 亿个碱基对中,包含了大约 3 万个蛋白编码基因,这比原来预计的 6~10 万个在数量上要少得多。与低等动物相比,人类基因的数量只相当于蚯蚓和果蝇体内基因数目的 2 倍,将人类与老鼠的基因相比,人类只不过多了大约 300 个基因。由此看来,人类与低等动物的差别不在于基因数量的多寡,而主要在于人类某些基因的功能和控制蛋白质产生的机制更为高级复杂,更高效。

⁰ 在目前的 / 数字黑河 0 信息系统中,数据多以黑河流域研究区为界,其划界依据(程国栋,刘风景,王根绪,李新,徐中民,王义,潘启民,丁永建.黑河流域水资源合理利用与社会经济和生态环境协调发展研究.兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所,1999)。报告中,为了方便水资源评价,在流域划分时,中下游地区考虑了行政边界的完整性,而没有完全按照流域汇水边界。该研究区面积为 12 87 万 km^2 。从本文起, / 数字黑河 0 将使用正式的流域边界(图 2),其面积为 29 5 万 km^2 , / 数字黑河 0 中的各种数据,将依据流域边界重新修订和补充。

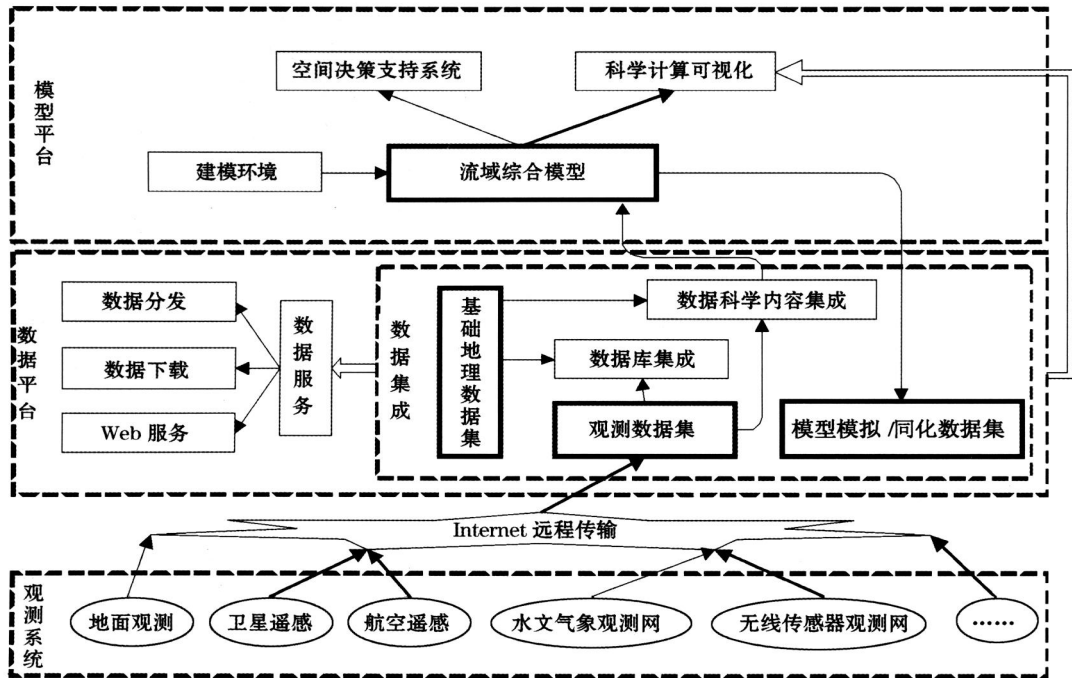


图 1 数字黑河的总体设计

Fig 1 General scheme of the Digital Heihe River Basin

区形成了鲜明对比。同时,黑河流域开发历史悠久,人类活动显著地影响了流域的水文环境,2 000多年来,这一地区的农业开发,屯田垦殖,多种文化的碰撞交流、此消彼长,无不与水深刻地联系在一起。自然和人文过程交汇在一起,使黑河流域成为开展流域综合研究的一个十分理想的试验流域。

近 30 年来,黑河流域已成为我国内陆河研究的基地,具有了较为完善的观测网络和各种科学研究与实验积累下来的大量资料;同时,它也是近年来开展内陆河综合治理的典型案列,是建设节水型社会的基地。

图 2 是黑河流域背景图。关于黑河流域的自然地理、水文水资源、生态环境和社会经济方面的概要介绍,可参考文献 [18] 等。

3.2 黑河流域研究工作回顾

黑河流域是我国内陆河研究的重要基地,自 1980 年代以来,开展了大量水文水资源、自然地理、生态环境、陆面过程、经济地理和遥感与地理信息系统技术等方面的研究,主要在流域集成研究、生态水文、生态经济与可持续发展、数字流域、生态恢复、同位素水文学等领域取得了阶段性的成果,积累了丰富的数据和资料,初步构建了流域综合模型及野外实验观测和试验示范平台。这些工作可以分为 3 个

阶段,分别是:

(1) 研究积累阶段。以基础性的调查和观测为主,开展了 / 河西走廊水土资源利用与生态环境现状调查 0 等研究项目,初步摸清了黑河流域水土资源和生态环境的状况,并提出水土资源的开发利用潜力,编制了黑河流域系列专题地图,出版了 5 河西走廊水土资源及其合理开发利用 6^[19]、5 黑河流域水资源合理开发利用 6^[20] 等专著。1988) 1993 年,在黑河流域展开大规模的陆气相互作用实验 (HEIFE),对黑河流域陆面过程、特别是绿洲和沙漠交互带的能量和水汽交换进行了系统的观测,积累了大量气象和水文观测资料,并开展了陆面过程和水文模拟,为流域尺度的水平衡研究奠定了基础^[21-22]。

(2) 系统研究阶段。以国家 / 九五 0 攻关项目 / 黑河流域水资源合理利用与经济社会和生态环境协调发展研究 0 与 / 冰雪水资源和出山口径流量变化及其趋势预测研究 0, 以及国家自然科学基金重点项目 / 西北干旱区内陆河流域水资源形成与变化的基础研究 0 为契机,深入开展了黑河流域水文水资源研究。研究问题主要集中在宏观层次角度,回答了水资源的承载能力和生态环境状况的调查结果,开展了出山口径流预报及其对气候变化的响应

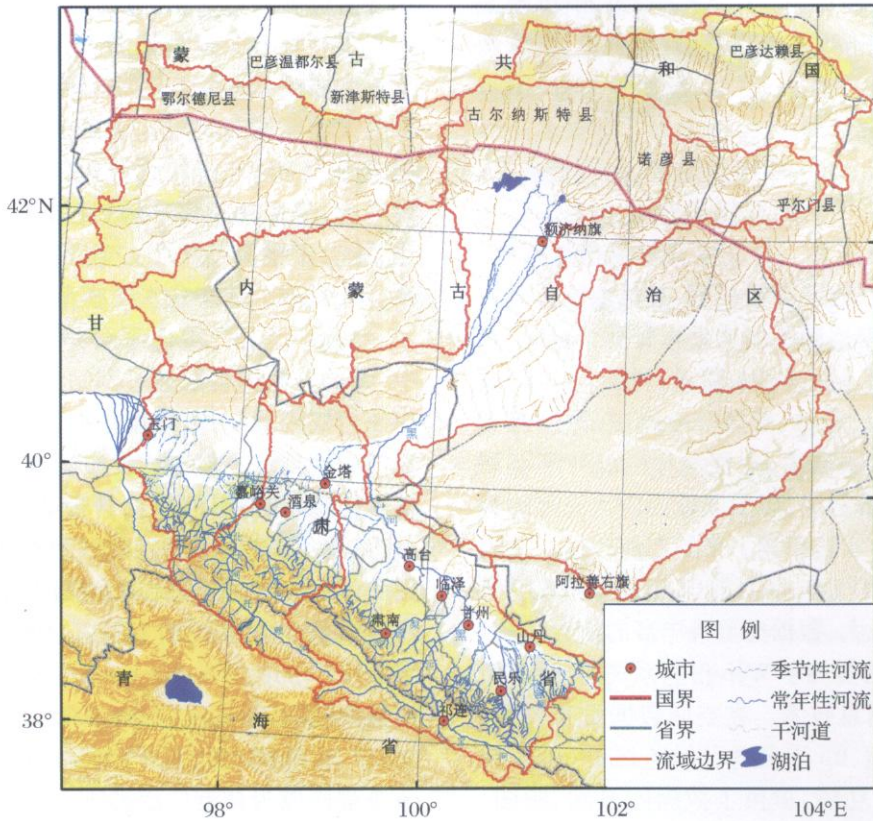


图 2 黑河流域图

Fig 2 Map of the Hehe River Basin

研究,针对寒旱区水文过程改进了一维的土壤)植被)大气耦合模型中的相应参数化方案,同时建立了很多可持续发展规划方面的模型,这些模型大多有比较完善的经济子系统,也初步涉及到了生态经济耦合关系,但由于缺乏生态系统的过程模拟模型的支撑,生态问题与经济问题的耦合研究还较为薄弱。另一方面,通过这一期研究,收集了大量的基本资料,建成了比较完善的水资源信息系统,并建立了流域水资源承载力的决策支持系统的雏形,在流域生态耗水方面的研究也取得了较好的进展^[18, 23]。

(3)综合研究阶段。特点是认识到应该把流域内的(经济)水)生态)作为整体进行研究。自2000年以来,设立了众多定位台站,已在黑河流域布置了临泽综合观测站、山区涵养林综合观测站、额济纳旗生态站等野外定位台站。强调多学科模型的交叉集成,进一步完善了黑河流域的观测数据和模型数据集,发展了山区分布式水热耦合模型,应用和改进了一系列的陆面过程模型、水文模型和生态模型,在此基础上,初步形成内陆河流域综合集成研究的通用建模环境和决策支持系统^[24]。开展了黑河

综合遥感联合试验^[25, 26],有力地推动了流域科学中的定量遥感研究,实现了建立一个开放的试验平台和发展多尺度、多分辨率、高质量并最终完全共享的流域综合数据集的目标。

所有这些研究工作都是建立“数字黑河”的重要基础。

4 数字黑河研究进展概述

4.1 数字黑河的阶段性工作重点

“数字黑河”研究总体上将分为3个阶段。

(1)集成的流域研究:其主要目标是数据集成和模型集成。

(2)虚拟流域:重点开展虚拟地理环境研究,通过先进的科学计算可视化及高带宽互联网上富有表现力的三维图形,逼真地再现流域的动态过程;逐步实现模型的在线计算;实现空间显式的流域水资源及其他自然与社会资源空间决策支持系统。

(3)数字流域:实现真正的信息集成,依靠完全自动化的流域观测系统实现对流域的全方位监测;在流域综合模型的支持下开展实时的水文预报,实

现水资源的精细管理;通过多分辨率、四维、沉浸式的可视化手段和虚拟现实再现流域、感知流域、管理流域。

4.2 数字黑河研究进展

/数字黑河0经过近 10 年的建设,在数据集成、模型集成、共享平台等方面取得了进展。

/数字黑河0首先是一个非常翔实的信息系统。它以全流域 1B10 万数字高程模型、其他地理基础数据、多期的高分辨率遥感图像为基本骨架,包括了多个时期的大比例尺土地利用 覆盖、植被、土壤、地质、水文地质、地貌、森林、草场等专题图,黑河流域气象、水文、地下水数据库,水资源和生态与环境评价数据库,社会经济数据,以及流域内较为完善的观测网络和各种科学实验积累下来的其他数据。在线数据量已超过 1 000 GB,是目前国内同类的数字流域研究中数据量最大、数据类型最丰富的信息系统。

/数字黑河0已实现了 Web 信息系统的目标,使用了多项领先的信息技术。在空间数据发布方面,除采用元数据搜索、ftp 下载等传统方法外,还实现了完整的 WebGIS 功能,提供了数据的显示、制图、转换、分析等 Web 服务。开发了多种在线和离线科学数据处理分析工具,实现了 EOS(地球观测系统)数据的自动下载和二次发布。

在模型集成方面,建立了内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(DWHC);针对寒旱区特征发展和改进了多种陆面过程模型参数化方案;发展了制备复杂地形条件下高分辨率的风、温、压、湿、降水

和辐射资料的方法;建立了含水层变饱和度地下水三维有限差分模型作为通用模拟工具;初步发展了一个多模型、多方法、情景导向、具有人工智能和群决策功能的空间显式水资源决策支持系统;引进和应用了 MMS(模块化建模系统)和 SME(空间建模环境)等多种建模环境;发展了陆面/水文数据同化系统,开展了大量水文变量的单点数据同化试验;系统地发展了分布式水文模型的参数估计方法。

/数字黑河0实现了科学数据的完全共享,其中,大部分数据可以通过网站浏览并且完全下载,不作任何权限限制;高精度数据、行业部门数据和国家法律法规规定不能在线发布的数据可以在网上查询基本信息,在与黑河数据管理委员会签订数据协议后,完全免费提供使用。/数字黑河0已拥有众多的用户(图 3),数据的共享为黑河流域的各项研究工作提供了非常重要的支持。在网络平台方面,/数字黑河0(<http://Mheihe.westgis.ac.cn/>)/黑河流域模型集成网0(<http://Mhmodeling.westgis.ac.cn/>)和/数字流域技术论坛0(<http://Mforum.westgis.ac.cn/>)都已成为具有广泛影响力的专业网站。

数据和模型集成以及流域观测系统方面的具体进展将在后续文章中做详细介绍。

5 总结与展望

/数字黑河0是/数字地球0在流域尺度上的一次实践性尝试,其核心目标是为流域科学服务,为黑河流域集成研究搭建一个集数据、模型和观测系统

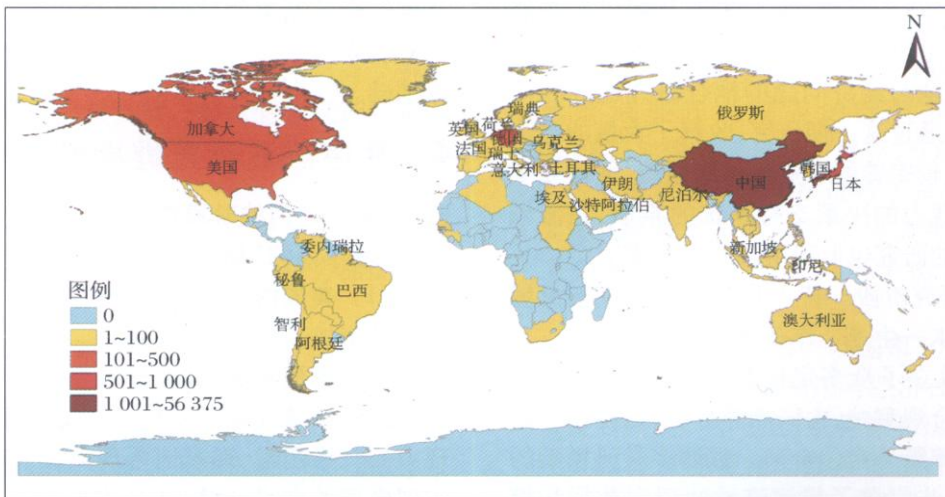


图 3 /数字黑河0网络信息系统的用户分布(2005—2009年)

Fig 3 Global visitors (2005-2009) of the Digital Heihe River Basin web information system

于一体的信息化平台。它是黑河流域研究的信息基础设施,是其 e2Science 的雏形。

始于黑河流域水资源信息系统的 / 数字黑河 0, 经过近 10 年的建设, 已初具规模, 阶段性地完成了数据集成, 网络信息系统已持续更新到 3.2 版, 在线数据量超过 1 000 GB, 并实现了完全共享, 有力地支持了黑河流域的各项研究工作。在模型集成方面, 已初步建成了流域综合模型和空间决策支持系统, 为最终建立 / 水) 土) 气) 生) 人 0 综合模型打下了坚实基础。

黑河流域研究, 正在总结过去 30 年研究工作的基础上^[27], 进入全面的集成研究阶段^[28]。与之相应, 流域研究的信息平台需要进一步加强, 以更好地适应地球观测时代和信息时代地学研究方法的革命, 适应在流域尺度上实践地球系统科学的要求。流域科学的宏大设想, 正在对 / 数字黑河 0 建设提出更高的要求。

展望 / 数字黑河 0 的未来, 它将具有以下特征:

数字流域首先是观测和数据的高度集成。在这里, 遍布流域的自动观测网络, 将和卫星遥感组成立体网络, 源源不断地将流域的各种数据迅捷地发送到信息中心, 经过质量控制、自动触发入库、规范化、标准化之后, 存储在海量的数据仓库中, 供用户通过互联网访问。数据经过加工和融合, 将成为流域综合模型的原料, ,

流域综合模型, 将在高性能计算的支持下, 快速地处理数据并同化多源观测, 对流域水文水资源(分水、灌溉、干旱、洪水、水质)的变化和需求做出快速预报与响应; 也能对未来气候变化、土地利用方式、社会经济发展和各种政策对水资源的影响, 做出合理的预报评估, ,

在虚拟研讨厅里, 逼真的可视化和虚拟现实将流域生动地再现出来, 上、中、下游的政府部门、流域水管理部门、民意代表, 可以通过高速的互联网召开视频会议, 借助于友好的界面访问流域数据, 使用决策工具评价不同的方案。系统中群决策的功能, 将给出可选的最佳方案, ,

流域科学研究者, 能够随时随地、不受限制地访问各种数据, 在模型库中选择所需模型在线计算, 或者在模型建模环境的支持下, 快速搭建和检验模型; 然后, 借助于可视化工具分析结果。跨地域、跨时间的多学科交叉与讨论, 将通过虚拟协同工作环境而变得更为便捷, ,

/ 数字黑河 0, 将以 e2Science 时代最新的信息技

术为依托, 将数据系统、观测系统、模型系统、信息发布系统、高性能计算及科学计算可视化连接为一个整体, 实现从观测、采集、处理、分析、发布、模拟、应用到决策的一体化构架。这一实践, 不仅能够丰富地球系统科学在流域尺度上的实践探索, 也有助于推动水科学和水管理的变革。

致 谢: / 数字黑河 0 的建设自 2000 年实施至今, 得到了众多同事、研究生和网络工程技术人员的帮助。对他们在数据库建设、网络平台开发、数据服务等方面的工作表示衷心感谢。年雁云、盖迎春协助绘制了黑河流域图和数字黑河总体设计图, 在此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Gore A. The Digital Earth: Understanding Our Planet in the 21st Century[M]. Los Angeles, California: Given at the California Science Center, 1998.
- [2] Ren Liliang, Liu Xinren. Hydrological processes modeling based on digital basin[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(4): 45252 [任立良, 刘新任. 基于数字流域的水文过程模拟研究[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(4): 45252.]
- [3] Wang Guangqian, Liu Jiahong. The digital model for the Yellow River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(2): 15221. [王光谦, 刘家宏. 黄河数字流域模型[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 15221.]
- [4] Liu Jiahong, Wang Guangqian, Li Tiejian. Digital watershed model for the Yellow River: Construction and application[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 1862195. [刘家宏, 王光谦, 李铁键. 黄河数字流域模型的建立和应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 1862195.]
- [5] Chen Xi, Zhang Xueren. Method and applications in constructing the Digital Tarim River Basin—the first phase[J]. Water Conservancy Planning and Engineering, 2005, (suppl 2): 69274 [陈嘻, 张学仁. 构建 / 数字塔里木河 0 一期工程的方法与实践[J]. 水利规划与设计, 2005, (增刊 2): 69274.]
- [6] Wang Hao, Zhang Xiaojuan, Jiang Yunzhong. Integrated management of urban and rural water affairs and construction of the digital river basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(3): 123-19 [王浩, 张小娟, 蒋云钟. 水务一体化管理与数字流域建设[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(3): 123-19.]
- [7] Information Center of the Yellow River Conservancy Commission. Investigation Report on the Representative Digital River Basins in the World[M]. Beijing: Research Center on the Digital Water Conservancy, Tsinghua University, 2007. [黄委会信息中心. 国际典型 / 数字流域 0 调研报告[M]. 北京: 清华数字水利工程研究中心, 2007.]
- [8] Neuse Prototype Hydrologic Observatory Design Team. Designing

- Hydrologic Observatories: A Paper Prototype of the Neuse Watershed [R]. Draft Version 4.0, 2004.
- [9] Li Xin, Cheng Guodong, Ding Yongjian, et al. Design of the water resource information system of the Heihe River Basin, northwest China [J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(4): 3782-382. [李新, 程国栋, 丁永建, 等. 黑河流域水资源信息系统设计 [J]. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 3782-382.]
- [10] Li Xin, Cheng Guodong. On the watershed observing and modeling systems [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 7562-764. [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): 7562-764.]
- [11] Aylward B. Towards watershed science that matters [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(13): 2643-2647.
- [12] Uhlenbrook S. Catchment hydrology: A science in which all processes are preferential [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(16): 581-585.
- [13] National Research Council. Opportunities in the Hydrologic Sciences [M]. Washington DC: National Academy Press, 1991: 368.
- [14] Committee on U. S. Geological Survey National Research Council Watershed Research in the U. S. Geological Survey [M]. Washington DC: National Academies Press, 1997: 96.
- [15] Committee on Watershed Management National Research Council. New Strategies for America's Watersheds [M]. Washington DC: National Academies Press, 1999: 328.
- [16] Committee on River Science at the U. S. Geological Survey National Research Council. River Science at the U. S. Geological Survey [M]. Washington DC: National Academies Press, 2007: 206.
- [17] Li Guoying. Sustaining the Healthy Life of the Inland River Basins in Northwest China [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2008: 213. [李国英. 维持西北内陆河健康生命 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008: 213.]
- [18] Cheng Guodong, Liu Fengjing, Wang Genxu, et al. Research Report on the Rational Utilization of Water Resources and the Coordination between Socioeconomic Development and Natural Environment in the Heihe River Basin, Northwest China [R]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, 1999: 292. [程国栋, 刘凤景, 王根绪, 等. 黑河流域水资源合理利用与社会经济和生态环境协调发展研究 [R]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1999: 292.]
- [19] Chen Longhen, Qu Yaoguang. Water and Land Resources and Their Rational Development and Utilization in the Hexi Region [M]. Beijing: Science Press, 1992: 263. [陈隆亨, 曲耀光. 河西地区水土资源及其合理开发利用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 263.]
- [20] Gao Qianzhao, Li Fuxing. Rational Development and Utilization of Water Resources in the Heihe River Basin [M]. Lanzhou: Science and Technology Press of Gansu Province, 1991: 228. [高前兆, 李福兴. 黑河流域水资源合理开发利用 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 228.]
- [21] Hu Yinqiao, Gao Youxi. Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the HEIFE [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 52(3): 285-296. [胡隐樵, 高由禧. 黑河实验 (HEIFE) 对干旱地区陆面过程的一些新认识 [J]. *气象学报*, 1994, 52(3): 285-296.]
- [22] Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jimin, 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.]
- [23] Kang Ersi, Cheng Guodong, Dong Zengchuan. Glaciers and Snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 304. [康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 304.]
- [24] Cheng Guodong, Li Xin, 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.]
- [25] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, et al. Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: Scientific objectives and experiment design [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感地面观测同步试验: 科学目标与试验方案 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 897-914.]
- [26] Li X, Li XW, Li ZY, et al. Watershed allied telemetry experimental research [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114, D22103. doi: 10.1029/2008JD011590.
- [27] Cheng Guodong. Integrated Management of the Water-Eco-logy-Economy System in the Heihe 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.]
- [28] Cheng Guodong, Xiao Honglang, Li Caizhi, et al. Water saving eco-agriculture and integrated water resources management in the Heihe River Basin, northwest China [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 661-665. [程国栋, 肖洪浪, 李彩芝, 等. 黑河流域节水生态农业与流域水资源集成管理研究领域 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 661-665.]

Digital Heihe River Basin. 1: An Information Infrastructure for the Watershed Science

LIX in, CHENG Guodong, WU Lizong

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Digital River Basin, as an information infrastructure for the watershed science, is a research environment that supports advanced data acquisition, storage, management, integration and visualization as well as other computing and information processing services over the Internet in the river basin scale. The Digital Heihe River Basin can be considered as an implementation of the Digital Earth concept in the Heihe River Basin, the second largest inland river basin of China. The Digital Heihe River Basin is composed of an information cyberinfrastructure and its applications. The former is further built up by a data integration platform, a modeling system and an automatic observing system, and the latter are various applications using integrated models and decision support systems. The first paper of these series papers provides an overview on the Digital Heihe River Basin. The data acquisition and integration of the Heihe River Basin have been partially completed; more than 1000 GB science data are available on the Internet with full and open data sharing policy, which supports various kinds of research work in the river basin successfully. A primary integrated model and a spatially explicit decision support system have been developed. For the next step, the data integration, modeling, automatic observing, information distribution, high performance computing and scientific computing visualization are proposed to be integrated as a system of systems in the framework of e2science, to support the watershed science studies in the Heihe River Basin.

Key words Digital River Basin, Watershed science, Data integration, Model integration, Watershed observing system, Heihe River Basin

2010年第 4 期要目

- 中国煤田地质学的现状与发展战略 张 泓, 张 群, 曹代勇, 李小彦,
李贵红, 黄文辉, 冯 宏, 靳德武, 张子敏, 贾建称, 石智军, 邵龙义, 程建远, 汤达祯, 姜在炳
埋藏历史对碳酸盐溶解) 沉淀的影响 黄思静, 龚业超, 黄可可, 佟宏鹏
基于卫星高度计的全球大洋潮汐模式的准确度评估 汪一航, 方国洪, 魏泽勋, 王永刚, 王新怡
华南沿海第四纪类网纹红土的赋存层位及其年代问题
..... 朱照宇, 吴 翼, 邱世藩, 杨 超, 黄宁生, 杨 恬, 曾 敬, 张金兰