

论文

流域科学及其集成研究方法

程国栋, 李新*

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: lixin@lzb.ac.cn

收稿日期: 2014-11-12; 接受日期: 2015-03-18; 网络版发表日期: 2015-05-14

国家自然科学基金重大研究计划项目(编号: 91225302, 91425303)和中国科学院创新交叉团队项目资助

摘要 文章讨论了流域科学的概念、研究方法和基础建设. 流域是自然界的基本单元, 又具有陆地表层系统所有的复杂性, 使得流域成为适合开展地球系统科学实践的绝佳单元. 流域科学是流域尺度上的地球系统科学, 它在过去 20 多年来快速发展起来, 目标是理解和预测流域复杂系统的行为, 同时服务于流域可持续发展. 然而, 流域科学面临认识复杂系统、实现尺度转换和模拟人-自然系统协同演进等困难, 这些困难的核心是方法论的困难. 本文重点讨论了流域科学的研究方法, 包括自组织复杂系统方法、统计力学主导的升尺度方法、基于选择和进化原理的达尔文学说、强调人-自然协同演进的水经济和生态经济思路、以及非结构化问题综合集成方法. 这些方法一起, 正在搭起整体和还原方法之间的桥梁, 构建起一个兼顾硬集成和软集成, 既考虑自然系统又考虑人, 并在实践上可操作的研究方法体系. 这些方法将推进流域科学走向成熟, 并为整个陆地表层系统科学方法论研究做出贡献.

关键词

流域科学
陆地表层系统科学
地球系统科学
自组织复杂系统
尺度
达尔文学说
人-自然协同演进
综合集成
宏观科学

地球系统科学自概念肇始到目前已经历了20多年的快速发展. 各类地球系统模型的建立, 地球观测系统的日趋成熟, 标志着地球系统科学已经越过了其婴幼儿期, 正在成长为一个翩翩少年. 然而, 科学上的斐然成就, 技术上的阔步前行, 并未本质性地提高对地球系统的可预报性, 在面对更好地服务于人类社会可持续发展的目标时, 也还有一条需要跨越的鸿沟(Reid等, 2010). 地球科学各个分支学科所取得的成就, 如何从根本上支持天气、气候和环境预报能力的提升? 如何更好地集成社会科学的成就, 从而凸显出“人”在地球系统中的角色? 如何支持一个可持续的未来地球? 是目前地球系统科学迫切需要回答的课题.

地球系统科学研究, 当然应该有全球视野. 然而, 大千世界, 纷繁复杂, 地球系统科学研究中一个突出的问题是难以确定地球系统的基本单元并划定单元之间的边界. 如何冲破迷雾找寻到更有效的集成地球系统“水-土-气-生-人”各个要素的方法, 我们或许应该将视野首先聚焦在地球系统的一个基本单元上, 而流域, 就是这样的一个基本单元.

从水文的角度看, 流域可被视为一个“原子”单元, 全球陆地正是由从汇水区到子流域到小流域再到大江大河的一个个流域组成的. 流域是由分水岭分割而成的自然地域单元, 水、泥沙、其他沉积物和化学物质, 都主要在流域内部循环, 并通过水流汇集到流域出口处. 因此, 流域是一个既与外界保持着物

中文引用格式: 程国栋, 李新. 2015. 流域科学及其集成研究方法. 中国科学: 地球科学, 45: 811-819

英文引用格式: Cheng G D, Li X. 2015. Integrated research methods in watershed science. Science China: Earth Sciences, 58: 1159-1168, doi: 10.1007/s11430-015-5074-x

质、能量和信息交换,但同时又相对封闭、有着清晰边界的系统。

从生态的角度看,流域也被认为是陆地生态系统的一个浑然天成的单元。生态学家认为,“流域生态学的一个重要意义在于它是生态学理论研究和实际应用相结合最适宜的实验地”(邓红兵等,1998),因此,必须把流域看做一个完整的、异质性的生态单元,研究流域内不同层级、高地、沿岸带、水体间物质、能量和信息交换,来分析和模拟流域生态系统的整体功能,并以流域为单元来实现生态修复(蔡庆华等,1998;陈求稳和欧阳志云,2005)。

从社会经济的角度看,世界上不少行政边界是流域分水岭或者大江大河,人类的经济活动往往沿主要河流展开,流域经济带因而成为规划经济活动的一个重要单元。此外,流域内普遍存在着上下游用水矛盾以及由水而激发的其他矛盾,因此,流域更是管理水资源、土地资源和其他资源以及探索社会可持续发展的一个理想单元。

总之,流域一方面是一个相对封闭的系统,它和外部系统的交换界面较为清晰,这有利于厘清系统的边界,相对独立而又可控地开展研究;另一方面,流域又是由水资源系统、生态系统与社会经济系统协同构成的、具有层次结构和整体功能的复杂系统(程国栋等,2011;Cheng等,2014),它具有陆地表层系统所有的复杂性,其综合研究几乎需要涉及到地球系统科学的各个门类。这两个特点相辅相成,使得流域成为适合开展地球系统科学实践的绝佳单元。

经过20多年的持续探索,流域科学的框架初见端倪,已初步廓清了它的研究领域,探索了其综合研究方法。期间,美国国家研究委员会(NRC)的咨询报告起到了关键作用。这些报告包括:《水文科学的机遇》(NRC,1991)、《美国地质调查局的流域研究》(NRC,1997)、《美国流域的新策略》(NRC,1999)、《美国地质调查局的河流科学》(NRC,2007)和《水文科学的挑战和机遇》(NRC,2012)。

我们认为,流域科学兼备地球系统科学基础研究和区域可持续发展应用研究的特性。从地球系统科学基础研究的角度看,流域科学的目标是理解和预测流域复杂系统的行为,其研究方法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,流域科学关注流域尺度上人和自然环境的相互作用,因此它也是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。

1 流域科学的研究方法

1.1 系统科学

流域科学的研究方法就是地球系统科学的研究方法:这是一种以整体观(Holistic perception)为统领,兼顾整体论(holism)和还原论(reductionism)的研究方法。Schellnhuber(1999)指出,地球系统的整体研究方法可概括为:

(1)“鸟瞰原则”(the ‘bird’s-eye’ principle),即在地球之外看地球。地球观测系统50多年来的斐然成就使得从整体上观察地球变成现实。具体到流域尺度上,建立精细的、实时的、遥感与地面观测一体化的流域观测系统已经有不少实例可循。

(2)“数字仿真原则”(the digital-mimicry principle),即发展地球系统模型。模型对高度复杂的地球系统的仿真能力被誉为第二次哥白尼革命。在流域尺度上,发展流域集成模型已经蔚然成风。

(3)“小人国原则”(the ‘Lilliput’ principle),即利用实体模型仿真开展复杂系统的控制实验,最典型的例子是生物圈2号。生物圈2号是一个封闭的生态系统,与之相比,我们认为,流域作为一个相对可控的半封闭半开放系统,也是地球系统科学研究的“小人国”。

然而,整体论更多代表的是对地球系统科学的原则性的哲学思考。就流域科学而言,流域在本体论上都被当做一个整体,这点并无疑问,但在具体的建模、观测等科学实践中,还原论依然是主导的研究方法(Bergandi和Blandin,1998)。如何搭起整体和还原方法之间的桥梁,正是以下几个小节(1.2~1.6)要讨论的主要内容。

1.2 复杂系统

正如爱默生所言,“自然错综复杂、层层交叠、相互交织、而又无穷无尽”¹⁾。流域就是这样一个复杂巨系统(钱学森,1991)。复杂性首先表现为“大”,以一个

1) Ralph Waldo Emerson. 1860. Nature is intricate, overlapped, interweaved, and endless. Fate.

面积以 10^5 km^2 的流域为例, 如果流域模拟的空间分辨率仅仅以 1 km 计, 每一个响应单元上(可被看做一个子系统)的模型状态变量、生态和水文通量及参数可能多达100个, 则整个系统的自由度可达 10^7 , 和用于全球尺度的一般环流模型的自由度相当. 其次表现为“长”, 重演流域的过去, 预测其未来, 都需要很长的时间跨度. 其三表现为所涉及要素之“多”和它们之间复杂的相互作用, “水-土-气-生-人”(Cheng等, 2014)只是一个高度概括, 但每一个要素中都包含了大量具体要素, 它们之间并且和系统外的有关要素之间密密交织、环环相扣, 而人类活动更增加了其复杂性. 其四表现为不确定性, 在流域尺度上, 异质性被放大, 一些在全球尺度模型中被忽略、简化的过程, 在流域尺度上却凸显出来, 异质性和由此而带来的不确定性(李新, 2013)成为空前的挑战.

流域系统极为复杂, 但同时又表现出一定的自组织特征(Dooge, 1986; Sivapalan, 2005), 例如: 不仅流域的地貌、植被、水系表现出不同尺度上的自相似性; 而且土壤水分、蒸散发和地下水埋深等水文变量也展现出自组织的特点(Rodríguez-Iturbe和Rinaldo, 2001; Solé和Bascompte, 2006). 此外, 具有相似气候-水文特点的不同流域也在水文功能上表现出相似性(Wagener等, 2007). 因此, 流域又被称为具有一定自组织特征的复杂系统(Sivapalan, 2005).

流域的自组织特征给模拟流域系统行为带来了新的契机, 目前, 分形等自组织复杂系统方法已经在流域结构分析、地貌演化等方面取得了一定的成功(Rodríguez-Iturbe等, 2011; Perron等, 2012). 然而, 在水文预报和生态系统动态模拟中, 自组织复杂系统方法的应用却还乏善可陈. 由于自组织复杂系统既在其各个单元上表现出随机和无序, 又在整体上表现为有序和一定的确定性, 汲取统计物理学思路, 采用确定和随机动力学结合的方法, 可能是模拟自组织复杂系统行为的一个途径.

1.3 尺度问题

流域在空间和时间尺度上的跨度都非常大: 就水文过程的空间尺度而言, 从水分子、单点、坡面、汇水区、子流域、流域, 空间跨度可达 10^{15} 量级; 就生态过程的空间尺度而言, 从DNA、细胞、叶片、群落、直到生态系统, 跨度也从分子尺度到成千上万平方千米. 在时间尺度上, 从极为快速的生物化学过

程, 到以分钟、小时计的降雨-径流和土壤水文过程, 再到天、季节、年尺度的植物生长, 直到十年、百年计的群落演替, 乃至到百年至万年尺度的土壤风化、地貌演变等过程. 所有这些跨度极大的空间和时间过程互相交织在一起, 共同塑造出错综复杂、色彩斑斓的流域行为.

然而, 现有的流域水文和生态理论, 多是在均值假设的前提上发展起来的, 如何将其上推至具有高度异质性、以非线性过程为主导的流域尺度上, 一直是一个困扰流域科学研究的基础问题(Dooge, 1986; NRC, 1991).

目前, 在流域水文研究中, 解决升尺度问题主要采用以下途径: (1) 用微观模型代替宏观模型, 但采用等效(effective或equivalent)参数作为模型的输入, 因此从微观到宏观的差异都被归结到依赖于尺度的参数中; (2) 重新定义宏观模型, 认为微观和宏观上由不同的物理规律主导, 因此撇开微观尺度上经典的物理规律, 在汇水区、流域等宏观尺度上, 基于水量平衡和能量平衡, 借助统计方法直接建立宏观尺度上的半物理半经验的模型, 典型者如Budyko假说及其各种应用(Budyko, 1974; Yang等, 2007). 在这类模型中, 输入往往是流域的宏观特征, 如径流、时间和空间平均的气候与水文变量与通量、平均的地貌特征、植被分布的统计特征等; (3) 使用统计力学方法, 也就是承认微观物理规律是正确的, 同时把宏观对象看作是由大量的一个个确定的、尺度不变(scale-invariant)的微观动力系统组成的随机系综(ensemble). 基于这种认识, 升尺度问题成为一个动力-统计问题, 因而可以采用统计力学方法来处理. 在水文领域常用的集合平均和集合预报方法, 正是根源于此.

目前, 升尺度方法个例研究较多, 但还鲜见提出一般性的理论, 而升尺度方法本身也难以验证, 这也和缺乏真正的多尺度观测有关(Vereecken等, 2007). 近年来, 多尺度观测的迅速开展为验证和发展尺度上推方法提供了新的契机.

1.4 牛顿学说与达尔文学说(Newtonism vs. Darwinism)

流域科学在自然科学层面的两个主要学科来源——水文学和生态学具有迥然不同的研究传统. 水文学体现了牛顿学说(Newtonism)的传统, 其骨架是以连续方程和能量、质量、动量平衡方程为基础的

动力学系统; 生态学则体现了达尔文学说(Darwinism)的传统, 选择和进化是系统演进的原理, 可以基于最大熵原理来构建代价函数, 通过进化计算来模拟系统的演进. 牛顿学说强调普遍性、简约性和可预报性; 而达尔文学说则强调特质、偶然性和自组织.

几十年来的流域科学实践表明, 流域既有受控于水循环、能量平衡等基本规律的共性, 同时也的确表现出鲜明的个性, 因此, 有了流域科学——甚至陆地表层系统科学是不是依赖于地域的科学(science of place)的质疑. 那么, 到底是普遍性还是个性起主导作用呢? 牛顿学说和达尔文学说的研究方法真的是完全冲突的吗? 在共性和个性之间是否有调和的余地?

目前, 牛顿学说主导下的研究方法在流域科学研究中占有支配地位. 突出表现在: 绝大多数生态和水文模型的框架都是牛顿式的, 这些模型用以牛顿力学为基础的控制方程来描述各种过程, 模型越来越复杂, 参数越来越多, 甚至出现了甚高分辨率模拟的趋势(Beven等, 2015), 但传统的模型思路并没有取得完全成功, 反而受困于过度复杂、过参数化、异参同效、不确定性难以估计、溯源和控制等方面的困扰(Harte, 2002).

达尔文学说的研究方法近些年来则在流域科学研究中越来越受到关注. 流域的异质性尽管看似无穷无尽, 但正如1.2节所述, 大大小小的流域都表现出自组织特征, 具有各种各样的自相似性. 那么, 自组织、自相似背后的控制因素是什么呢? 很可能就是达尔文学说所倡导的选择和进化原理. 因此, 20世纪80年代以来, 水文科学的先行者, 以及生态水文科学发轫之处的奠基者, 都提出了这样的想法——“新的水文学理论”、“水文学自身的定律”、“宏观尺度下的定律”(Dooge, 1986; Sivapalan, 2005), 并开展了不懈的探索. 然而, 总体上, 该方面科学实践的步伐还落后于超前的思想, 对于流域自组织自相似的研究主要还停留在格局描述, 还没有变成可操作、可预报的方法. 目前, 我们还没有看到一个水文学模型是完全建立在系统进化原理的基础上的, 但所幸的是, 在生物地理学和生态系统演进模拟方面却已看到了一线成功的曙光(例如, Phillips等, 2006).

我们认为, 流域科学不应该是依赖于地域的科学, 流域科学需要普遍性的理论. 只有依赖普遍性的

理论, 我们才能够将一个流域的科学实践推广到另一个流域, 更能推广到地球表层系统科学中. 而要实现这一目标, 就需要结合牛顿学说和达尔文学说, 从水文学和生态学的不同视角来看流域, 在方法上综合动力学和进化思想(Harte, 2002). 目前, 由于两种学说在哲学传统和操作实践上都有很大的差别, 还很少见到真正融合了两种学说的工作(King和Caylor, 2012). 但牛顿学说和达尔文学说的结合是流域科学方法论探索的重要方向, 也是地球系统科学研究方法可以寄予重望之处(Eagleson, 2002; Harte, 2002).

1.5 水经济和生态经济研究方法

目前, 流域科学研究中对人的因素的研究主要集中在经济学方面, 相关研究主要从水文-经济(Harou等, 2009)、生态-经济(Costanza等, 2007)和水资源-经济(Cai, 2008)这三个学科的发展中汲取营养. 它们的侧重点不同, 但又有共同的渊源, 都研究经济活动和自然系统之间共同演进和相互依存的关系, 都强调社会经济行为是自然生态系统不可缺少的组成部分并会重塑整个系统, 都以可持续发展为落脚点.

和对自然系统的研究方法类似, 对流域经济系统的研究中也大量采用模型方法. 目前, 流域经济模型和生态水文模型的结合还不够紧密. 流域管理研究中常有的方法是: 基于静态情景方法模拟社会经济对水文和生态过程的影响, 这一方式虽然考虑了人-自然关系, 但未建立从自然系统到社会经济系统的动态反馈回路, 缺少二者之间的协同演进. 新兴的社会水文学(Sivapalan等, 2012)观点认为, 应该将经济和社会因素作为模型的内生变量, 发展人-自然相互作用的动力学方法, 显式地考虑水-生态-经济系统的协同演进. 此外, 生态系统服务的估价问题是经济模型和生态水文模型结合的另一个难点, 自然模型关心的重点是生态和水文系统中的物质和能量循环, 经济模型则最终都要为物质和能量流定价. 然而, 对生态系统服务的估价目前还被认为是有瑕疵的艺术”(Harou等, 2009), 不同的估价方法, 计算得到的生态系统服务价值量可能相差数倍. 但无论如何, 生态经济和水经济研究中, 关于自然资本无可取代, 强调公义和平等, 以及对长期可持续发展的重视, 都为流域管理和可持续发展研究注入了充满活力的新要素, 成为流域科学研究不可缺少的方面.

1.6 综合集成(Meta-Synthesis)

水文、生态、经济是流域科学集成研究的三大主要要素,这三个领域的研究方法都由定量方法主导。然而,除了这三个要素之外,在流域科学——特别是流域综合管理中,还必须考虑政治、法律、政策、文化、宗教、习惯、风俗、行为和心理等社会要素,这些社会要素及其建模都非常难以量化。如果我们将可以用数学方程描述,并采用定量方法解决的问题称为结构化(structured)问题,那么,后一类与社会要素有关,难以定量、难以形式化的问题则常常被称为非结构化(unstructured)、病态结构化(ill-structured)或奇异(wicked)问题。对于这类问题,显然需要寻找新的解决途径。

过去几十年来,为了应对复杂的非结构化问题,称为综合集成(meta-synthesis)或者软系统方法论(soft systems methodology)的一系列方法涌现出来,典型者如钱学森先生所倡导的“从定性到定量的综合集成方法论”及其具体操作方法“综合集成研讨厅”(钱学森等,1990)。这一方法论的核心思想是计算机和专家共同参与的从定性到定量的分析,经过10多年的发展,它已经逐渐成熟,并成为一种可操作的方法论。“综合集成研讨厅”由专家体系、知识体系、机器体系三大部分组成,它汇集了专家智慧、多源的数据和信息、各种计算机模型和计算机的高速计算能力,“把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来”(钱学森等,1990),形成了一个巨大的智能系统。我们认为,“综合集成研讨厅”的操作流程是一种把整体论和还原论结合起来的方法,可概括为:第一步,从宏观定性认识出发,由人提出议题(指难以明确定义的问题)以及对议题的假设和想定,这一过程强调对议题整体上的定性认识。第二步,在研讨厅中,依靠计算机协同工具的支持,汇集来自于不同专家的观点和知识(定性为主),同时依靠计算机收集和分析存储在网络上各种数据库中的数据和信息,在收集到足够的数据、信息和知识之后,采用决策方法对它们进行筛选、整理和形式化,在此基础上,形成概念模型。整个第二步中,人机互动以及计算机支持下的人-人互动非常关键,它们交叉或者同步进行。第三步,建立计算机模型,包括机理模型、数据驱动模型、推理模型等,运行模型以提供定量信息。第四步,在研讨厅中,对模型结果进行计算机辅助的群体讨论,可能

会重新回到议题,修正对议题的概念模型,如此通过反复的人机互动,渐进地(recursively)并最终与精密科学的定量方式为主(即定性到定量),增加对复杂系统的认识,提出对议题的解决方案(钱学森等,1990;于景元和周晓纪,2002;李耀东等,2004;Gu和Tang,2005)。

需要指出,“综合集成研讨厅”是一个由人和计算机共同构成的虚拟环境,而信息技术的迅猛发展为“综合集成研讨厅”提供了勃勃生机,以互联网为基础的信息搜索、网上百科、电子邮件、即时通讯、社交网站、博客、微信、网络会议、以及支持集体讨论和群体思维的群件(groupware)等技术都使得迅速汇聚集体智慧、融合多种信息成为可能。此外,大数据的挖掘,语义分析的进步,也为不仅仅使用因果关系,而且依靠通过数据本身展现出来的相关关系来决策提供了更多的可能性。

对于流域科学而言,“综合集成研讨厅”可被当作新一代的决策支持系统(DSS)(Tang,2007),它是处理流域综合管理中极为常见的非结构化的问题,以及开展群决策的一个理想平台。

2 流域科学的基础建设

流域科学研究方法的繁荣和成熟,离不开观测技术和信息技术的强烈驱动。国外多用流域信息基础设施(cyber-infrastructure)和e-science等概念来描述流域科学研究中所需的观测、建模、信息系统等基础建设,我们则将流域科学的基础建设概括为3M平台,即观测(Monitoring)、模型(modeling)和数据分析处理(manipulating)一体化平台(Cheng等,2014)。

2.1 观测系统

正如地球系统科学研究离不开地球观测系统,发展流域科学的重要前提之一也是建立流域观测系统。卫星和地面观测技术的快速进步,极大地推进了流域科学的各个分支的发展,重塑了这些学科的面貌。卫星遥感已经能够观测到主要的水文、生态变量和通量(NRC,2008),并且展现出多尺度、更加专门(如全球降水计划)、空间和时间分辨率越来越精细的趋势。就地面观测而言,新技术层出不穷,最大的特点是大量使用传感器网络以及各种足迹尺度观测技术(如:宇宙射线土壤水分观测系统、大孔径闪烁仪

等). 这些新技术为流域观测带来了前所未有的机遇, 并且迅速地演进为流域观测的主流手段, 使得建立分布式、多尺度、实时控制的流域观测系统成为可能.

过去10年来, 以流域为单元建立分布式的观测系统蔚然成风. 国际上较为成熟的流域观测系统包括美国基金委支持的关键带观测平台(CZO, Critical Zone Observatory)、欧洲的陆地环境观测平台(TERENO, Terrestrial Environmental Observations)(Zacharias等, 2011; Bogena等, 2015)、丹麦水文观测系统(HOBE, Danish Hydrological Observatory)(Jensen和Illangasekare, 2011)、加拿大的变化中的寒区的观测网络(CCRN, Changing Cold Regions Network)(Debeer等, 2015)、中国的黑河流域观测系统(李新等, 2010a; Li等, 2013)等. 这些观测系统的共同特征是: (1) 多变量、多尺度观测; (2) 大量使用传感器网络技术; (3) 新的观测技术的试验场; (4) 航空遥感作为获取流域精细DEM等甚高分辨率数据的重要手段; (5) 监测和控制试验并重; (6) 与模型建模目标密切配合; (7) 与信息系统高度集成.

2.2 模型平台

流域科学研究中需要多种多样的模型. 模型既可能被应用于全流域生态-水文-社会经济集成研究, 也可能被应用于单学科研究; 既可能应用于整个流域尺度, 也可能应用于汇水区、单点等较小尺度; 既可能应用于理解流域复杂系统、验证科学假设, 也可能侧重于在流域综合管理中的应用. 因此, 必须开发一个模型平台, 来管理不同的模型, 我们把模型平台定义为“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”(李新等, 2010b). 和模型自身不同, 模型平台总体上是一个信息技术范畴内的集成系统, 可采用不同的体系结构和技术方案来开发侧重点不同的模型平台(南卓铜等, 2011).

我们认为, 从流域科学基础建设的角度, 新一代模型平台应具有这样一些特征: (1) 平台中既包括地表水、地下水、陆面过程、冰冻圈、生态过程、植被生长等自然过程模型, 也应包括土地利用、水资源调配与管理、经济、政策等社会经济模型; (2) 支持模型向流域尺度的扩展; (3) 支持从分钟到年、数十年甚至上万年的时间尺度模拟; (4) 支持数据同化和模型-观测融合; (5) 集成知识系统, 充分利用非结构化

信息; (6) 集成机器学习技术; (7) 具有在网络环境下运行的能力, 支持云计算; (8) 具有快速定制决策支持系统的能力.

2.3 数据平台

狭义的流域信息基础设施主要指流域数据信息系统, 由此可见数据平台在流域科学中的重要性. 传统的数据平台的核心功能是数据管理, 但我们认为流域科学所需的数据平台还必须具备整合大量观测数据和模型数据, 并生产新的数据的能力(李新等, 2010c). 它支持三个层次的数据集成: (1) 数据库集成, 主要指对各类空间数据统一建库, 实现对异构数据的统一访问; (2) 数据内容集成, 即利用多种来源、多分辨率的数据, 在质量控制的基础上, 整合成为服务于模型发展、验证和改进的数据集; (3) 数据再分析, 指应用数据同化等方法, 融合来自于地面观测、遥感观测、模型输出的多种数据, 产生创新性的新的数据产品.

大数据时代对流域科学中的数据集成提出了新的挑战. 目前, 各种数据新技术层出不穷, 但往往更多从信息技术的角度着眼, 而忽略了数据和模型的集成. 面对信息时代的数据洪流, 研究人员迫切希望减轻数据处理的压力, 将更多时间和精力投入到用数据解决问题而非处理数据. 因此, 我们认为, 流域科学中数据平台最需要加强的功能是实现无缝、自动、智能化的数据-模型对接(Koike等, 2015), 为此, 高级别的自动数据质量控制、高层次的数据集成、以及数据向模型的推送技术都十分关键.

3 黑河流域生态-水文过程集成研究计划

在国内, 黑河流域是一个“水-土-气-生-人”集成研究的基地(程国栋等, 2008; 程国栋, 2009). 黑河流域集成研究, 目标就是要探索陆地表层系统科学的研究方法, 完善陆地表层系统科学的理论; 同时, 发展以科学模型为骨架的流域水资源综合管理决策支持系统, 为流域可持续发展找到一个强有力的支持工具. 这和流域科学的目标无疑是一致的.

与国际上流域科学的发展趋势契合, 2010年, 国家自然科学基金委员会启动了“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大研究计划(简称“黑河计划”). “黑河计划”是在已经较有优势的黑河流域集成研究的基

基础上, 将我国流域科学研究推进到国际先进行列的重大举措, 也将是一次陆地表层系统科学研究方法的全面实践。

“黑河计划”的科学目标是揭示植物个体、群落、生态系统、景观、流域等尺度的生态-水文过程相互作用规律, 刻画气候变化和人类活动影响下内陆河流域生态-水文过程机理, 发展生态-水文过程尺度转换方法, 建立耦合生态、水文和社会经济的流域集成模型, 提升对内陆河流域水资源形成及其转化机制的认知水平和可持续性的调控能力, 使我国流域生态水文研究进入国际先进行列。为实现上述科学目标, 黑河计划将集中多学科的队伍和研究手段, 建立联结观测、实验、模拟、情景分析以及决策支持等科学研究各个环节的“以水为中心的过程模拟集成研究平台”。计划执行至今, 已建立了系统的生态水文观测网络与数据平台, 开展了流域综合观测试验; 初步揭示了流域生态水文过程耦合机理; 构建了流域分布式生态-水文、地表水-地下水耦合模型(Yao等, 2015; Yang等, 2015), 为黑河流域水资源优化管理奠定了基础(程国栋等, 2014)。

目前, “黑河计划”已全面进入集成研究阶段, 黑河流域已有的集成研究实践和正在开展的持续探索, 都将为丰富流域科学的方法论做出实质性的贡献。

4 挑战、展望与小结

4.1 挑战

流域科学是流域尺度上的地球系统科学, 它继承了地球系统科学的认识论和方法论, 同时, 由于流域是一个相对可控的单元, 尺度适中, 但复杂性和异质性更加凸显, 因此, 流域科学的实践又独具特色, 可以丰富地球系统科学的理论和方法。流域科学的核心在于它是一个宏观科学, 在认识论上, 要将流域“水-土-气-生-人”作为一个整体, 将多尺度的异质性作为流域的内在组成部分(Sivapalan, 2005); 在方法论上, 尝试找到从整体上分析流域的宏观规律和方法, 但这种方法又不应该流于空谈, 而应该是一种可操作的整体论加还原论的研究方法。

流域科学的发展, 面临着显著区别于传统流域水文学、流域生态学的挑战:

第一, 宏观科学的挑战。水文和生态系统的自组织特性, 如何影响到流域系统的功能, 并进一步影响流域的水文、生态等过程, 都和尺度密切联系。自从Doogle(1986)提出建立水文学自身的理论以来, 水文科学的先行者曾乐观地估计尺度问题将在短期内取得突破, 然而, 在这方面的进展并不显著。哲学思考虽然鼓舞人心, 但理论总结鲜见, 实证工作更是非常少, 仅有的一些实证性案例研究也多缺乏普适性。如何寻求理论坚实又有普适性的尺度上推方法? 如何最终建立异质性宏观流域的水文和生态规律? 这些问题都依然是摆在流域科学发展面前的一个严峻挑战。

第二, 就是人的因素如何被集成到流域水文学和流域生态学研究。自然系统和社会经济系统是一个共同演进(co-evolution)的系统, 人类世(Anthropocene)以来, 各种人类活动加速度运行, 不可逆的人类活动, 造成地球系统不再按其既有的韵律运行, 带来大量未知的未知²⁾。对人-地系统共同演进的认识、建模、预报、控制和管理, 是流域科学所面临的另一个重大挑战。

4.2 展望

100年来, 统计力学、控制论、一般系统论、复杂系统理论等科学革命深刻地影响着今天的地球系统科学, 各种概念耳熟能详, 已成为地球系统科学的概念支柱。然而, 并不是每一种新理论都已经转化成地球系统科学中可操作的方法, 概念转化到应用的历程远未完成。流域科学呼唤自己的方法论, 同时也可以为地球系统科学方法论的发展做出贡献。

随着复杂系统理论和方法走向成熟, 再加上地球观测技术和信息技术双重强烈驱动, 我们大胆展望流域科学的研究方法在未来10年内可望取得突破。

首先, 统计力学方法、自组织复杂系统方法、基于进化原理的模型的综合应用, 有可能推动尺度问题取得真正的突破, 建立适用于宏观异质性水文和生态过程的数学方程。以这些新的宏观方程为水文和生态模型的控制方程, 将可能发展出尺度显式(scale-explicit)和普适性的流域生态水文模型, 模型

2) Ramsfield 矩阵, http://en.wikipedia.org/wiki/There_are_known_knowns

的不确定性也将被大大降低。

其次, 将有办法对非结构化的信息和知识进行集成, 将发展出更通用、有效、操作性更强的综合集成方法。该方法将可以再现和预报人-自然协同演进, 并由此把人的因素放在流域科学中, 人将成为流域科学的标签, 科学认知和科学模型在流域综合管理中将发挥更加主体的作用(Cai等, 2015)。

4.3 小结

本文讨论了流域科学的概念、研究方法和基础建设, 得到以下结论:

(1) 流域是地球系统的缩微, 是陆地表层系统科学研究的最佳基本单元, 必须把流域内的水、生态、人类活动当作一个整体来看待。流域科学在基础科学层面上是一个宏观科学, 旨在从流域整体上理解和预测流域复杂系统; 同时, 从应用科学的角度, 流域科学也是强调人的因素的科学, 是实现水资源和其他自然及社会资源综合管理, 并最终实现流域可

持续发展的科学基础。

(2) 流域科学的研究方法应该是一种新的整体论(neo-holism)。它是一种在科学实践上可以操作的整体论, 是兼顾硬集成和软集成方法, 既考虑自然系统又考虑人的方法。本文讨论了将会在流域复杂系统集成研究中发挥主要作用的方法, 包括自组织复杂系统方法, 统计力学方法主导的升尺度方法, 基于选择和进化原理、强调偶然性和自组织的达尔文学说, 注重人-自然协同演进和长期可持续发展的水经济和生态经济思路, 以及应对非结构化复杂问题的综合集成方法。综合应用这些方法, 将不仅可望在流域科学方法论上取得突破, 也可为陆地表层系统科学方法论做出贡献。

(3) 开展流域科学研究方法的系统实践十分必要。哲学思考、理论总结、方法探索、基础建设、野外试验应该很好地结合起来。黑河流域集成研究正是遵循这一研究思路, 其实践可以对流域科学这一方兴未艾的科学做出贡献。

致谢 感谢杨大文教授对本文提出的宝贵建议。

参考文献

- 蔡庆华, 吴刚, 刘建康. 1998. 流域生态学: 水生态系统多样性研究和保护的一个新途径. 科技导报, 5: 24-26
- 陈求稳, 欧阳志云. 2005. 流域生态学及模型系统. 生态学报, 25: 1184-1190
- 程国栋. 2009. 黑河流域水-生态-经济系统综合管理研究. 北京: 科学出版社
- 程国栋, 肖洪浪, 李彩芝, 等. 2008. 黑河流域节水生态农业与流域水资源集成管理研究领域. 地球科学进展, 23: 661-665
- 程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 等. 2014. 黑河流域生态-水文过程集成研究进展. 地球科学进展, 29: 431-437
- 程国栋, 徐中民, 钟方雷. 2011. 张掖市面向幸福的水资源管理战略规划. 冰川冻土, 33: 1193-1202
- 邓红兵, 王庆礼, 蔡庆华. 1998. 流域生态学——新学科、新思想、新途径. 应用生态学报, 9: 443-449
- 李新. 2013. 陆地表层系统模拟和观测的不确定性及其控制. 中国科学: 地球科学, 43: 1735-1742
- 李新, 程国栋, 马明国, 等. 2010a. 数字黑河的思考与实践4: 流域观测系统. 地球科学进展, 25: 866-876
- 李新, 程国栋, 康尔泗, 等. 2010b. 数字黑河的思考与实践3: 模型集成. 地球科学进展, 25: 851-865
- 李新, 吴立宗, 马明国, 等. 2010c. 数字黑河的思考与实践2: 数据集成. 地球科学进展, 25: 306-316
- 李耀东, 崔霞, 戴汝为. 2004. 综合集成研讨厅的理论框架、设计与实现. 复杂系统与复杂性科学, 1: 27-32
- 南卓铜, 舒乐乐, 赵彦博, 等. 2011. 集成建模环境研究及其在黑河流域的初步应用. 中国科学: 技术科学, 41: 1043-1054
- 钱学森. 1991. 谈地理科学的内容及研究方法. 地理学报, 46: 257-265
- 钱学森, 于景元, 戴汝为. 1990. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 13: 3-10, 64
- 于景元, 周晓纪. 2002. 从定性到定量综合集成方法的实现和应用. 系统工程理论与实践, 22: 26-32
- Bergandi D, Blandin P. 1998. Holism vs. reductionism: Do ecosystem ecology and landscape ecology clarify the debate? Acta Biotheor, 46: 185-206
- Bogena H, Bol R, Borchard N, et al. 2015. A terrestrial observatory approach to the integrated investigation of the effects of deforestation on water, energy, and matter fluxes. Sci China Earth Sci, 58: 61-75
- Budyko M I. 1974. Climate and Life. New York: Elsevier

- Beven K, Cloke H, Pappenberger F, et al. 2015. Hyperresolution information and hyperresolution ignorance in modelling the hydrology of the land surface. *Sci China Earth Sci*, 58: 25–35
- Cai X. 2008. Implementation of holistic water resources-economic optimization models for river basin management-reflective experiences. *Environ Modell Softw*, 23: 2–18
- Cai X M, Marston L, Ge Y C. 2015. Decision support for integrated river basin management-Scientific research challenges. *Sci China Earth Sci*, 58: 16–24
- Cheng G D, Li X, Zhao W Z, et al. 2014. Integrated study of the water-ecosystem-economy in the Heihe River Basin. *Nat Sci Rev*, 1: 413–428
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253–260
- Dooge J C I. 1986. Looking for hydrologic laws. *Water Resour Res*, 22: 46S–58S
- DeBeer C M, Wheeler H, Quinton W L, et al. 2015. The Changing Cold Regions Network: Observation, diagnosis, and prediction of environmental change in the Saskatchewan and Mackenzie River Basins, Canada. *Sci China Earth Sci*, 58: 46–60
- Eagleson P S. 2002. *Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function*. Cambridge: Cambridge University Press
- Gu J F, Tang X J. 2005. Meta-synthesis approach to complex system modeling. *Eur J Oper Res*, 166: 597–614
- Harte J. 2002. Toward a synthesis of the Newtonian and Darwinian worldviews. *Physics Today*, 55: 29–34
- Harou J J, Pulido-Velazquez M, Rosenberg D E, et al. 2009. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *J Hydrol*, 375: 627–643
- Jensen K H, Illangasekare T H. 2011. HOBE: A hydrological observatory. *Vadose Zone J*, 10: 1–7
- King E G, Caylor K K. 2011. Ecohydrology in practice: strengths, conveniences, and opportunities. *Ecohydrology*, 4: 608–612
- Koike T, Koudelova P, Jaranilla-Sanchez P A, et al. 2015. River management system development in Asia based on Data Integration and Analysis System (DIAS) under GEOSS. *Sci China Earth Sci*, 58: 76–95
- Li X, Cheng G D, Liu S M, et al. 2013. Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design. *Bull Amer Meteorol Soc*, 94: 1145–1160
- National Research Council. 1991. *Opportunities in the Hydrologic Sciences*. Washington D C: National Academy Press. 368
- National Research Council. 1997. *Watershed Research in the U.S. Geological Survey*. Washington D C: National Academies Press. 96
- National Research Council. 1999. *New strategies for America's Watersheds*. Washington D C: National Academies Press. 328
- National Research Council. 2007. *River Science at the U.S. Geological Survey*. Washington D C: National Academies Press. 206
- National Research Council. 2008. *Earth Observations from Space: The First 50 Years of Scientific Achievements*. National Academies Press
- National Research Council. 2012. *Challenges and Opportunities in the Hydrologic Sciences*. Washington D C: National Academies Press. 188
- Perron J T, Richardson P W, Ferrier K L, et al. 2012. The root of branching river networks. *Nature*, 492: 100–103
- Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Model*, 190: 231–259
- Reid W V, Chen D, Goldfarb L, et al. 2010. Earth system science for global sustainability: Grand challenges. *Science*, 330: 916–917
- Rodríguez-Iturbe I, Caylor K K, Rinaldo A. 2011. Metabolic principles of river basin organization. *Proc Natl Acad Sci USA*, 108: 11751–11755
- Rodríguez-Iturbe I, Rinaldo A. 2001. *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*. Cambridge: Cambridge University Press
- Schellnhuber H J. 1999. 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature*, 402: 19–23
- Sivapalan M. 2005. Pattern, process and function: Elements of a unified theory of hydrology at the catchment scale. In: Anderson M, ed. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. New York: Wiley. 193–219
- Sivapalan M, Savenije H H, Blöschl G. 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol Process*, 26: 1270–1276
- Solé R V, Bascompte J. 2006. *Self-Organization in Complex Ecosystems*. Princeton: Princeton University Press
- Tang X J. 2007. Towards meta-synthetic support to unstructured problem solving. *Int J Inform Technol Decis Making*, 6: 491–508
- Vereecken H, Kasteel R, Vanderborght J, et al. 2007. Upscaling hydraulic properties and soil water flow processes in heterogeneous soils: A review. *Vadose Zone J*, 6: 1–28
- Wagener T, Sivapalan M, Troch P, et al. 2007. Catchment classification and hydrologic similarity. *Geography Compass*, 1: 901–931
- Yang D W, Sun F, Liu Z, et al. 2007. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis. *Water Resour Res*, 43, doi: 10.1029/2006WR005224
- Yang D W, Gao B, Jiao Y, et al. 2015. A distributed scheme developed for eco-hydrological modeling in the upper Heihe River. *Sci China Earth Sci*, 58: 36–45
- Yao Y Y, Zheng C M, Tian Y, et al. 2015. Numerical modeling of regional groundwater flow in the Heihe River Basin, China: Advances and new insights. *Sci China Earth Sci*, 58: 3–15
- Zacharias S, Bogaena H, Samaniego L, et al. 2011. A network of terrestrial environmental observatories in Germany. *Vadose Zone J*, 10: 955–973