

文章编号:0559-9350(2016)10-1219-08

变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法

王 浩, 贾仰文

(流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 在人类活动和气候变化影响下, 流域水循环发生了深刻变化。水多、水少、水脏、水浑等流域水问题背后的科学基础是“自然-社会”二元驱动力作用下的流域水循环及其伴生的水环境、水生态过程的演变机理, 有效解决这些水问题需要一套流域“自然-社会”二元水循环理论来支撑。本文在简述二元水循环研究历程的基础上, 从水循环的驱动力、结构、功能属性和演变效应等方面, 对比分析了自然水循环和“自然-社会”二元水循环的不同特征, 阐述了变化中的流域“自然-社会”二元水循环的基本原理, 包括学科范式、科学问题、研究内容与研究方法等。文章还讨论了二元水循环研究面临的机遇与挑战, 如水资源的数量-质量-效率统一度量与转化问题及解决方法等, 并进行了研究总结。

关键词: 流域; 水循环; 自然水循环; “自然-社会”二元水循环; “自然-人类”耦合系统

中图分类号: TV213

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20151297

1 研究背景

在太阳辐射和地心引力等自然驱动力的作用下, 地球上各种形态的水通过蒸发蒸腾、水汽输送、凝结降水、植被截留、地表填洼、土壤入渗、地表径流、地下径流和湖泊海洋蓄积等环节, 不断地发生相态转换和周而复始运动的过程, 称为水循环(或水文循环)。水循环是地球上一个重要的自然过程, 因此又称自然水循环。它将大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互联系起来, 并在它们之间进行水分、能量和物质的交换, 是自然地理环境中最主要的物质循环。与人类最直接相关的是发生在陆地的水循环, 而发生在陆地一个集水流域的水循环, 称为流域水循环。流域尺度的水循环是陆地水循环的基本形式, 除了大气过程在流域上空有输入输出外, 陆地水循环的地表过程、土壤过程和地下过程基本上都以流域为基本单元。

水是人类生存和经济社会发展的重要基础资源。随着人类活动的加剧, 如土地利用的改变、水利工程的兴建和城市化的发展, 打破了流域自然水循环系统原有的规律和平衡, 极大地改变了降水、蒸发、入渗、产流和汇流等水循环各个过程, 使原有的流域水循环系统由单一的受自然主导的循环过程转变成受自然和社会共同影响、共同作用的新的水循环系统, 这种水循环系统称为流域“天然-人工”或“自然-社会”二元水循环系统^[1]。

水多、水少、水脏、水浑等流域水问题背后的科学基础是“自然-社会”二元驱动力作用下的流域水循环及其伴生的水环境和水生态过程的演变机理, 有效解决这些水问题需要一套流域“自然-社会”二元水循环理论来支撑。流域“自然-社会”二元水循环研究受到国内外学者的广泛关注, 研究历程经历了概念与模式的论述, 基于二元模式的水资源、水环境和水生态评价方法研究, 模型的研发与应用等阶段。王浩等^[1]提出了内陆干旱区的“天然-人工”二元水循环模式, 用于指导西北地区水资源合

收稿日期: 2015-12-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2015CB452701, 2006CB403404); 国家自然科学基金项目(51379215)

作者简介: 王浩(1953-), 男, 北京人, 院士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。

E-mail: wanghao@iwhr.com

通讯作者: 贾仰文(1965-), 男, 山东人, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: jiayw@iwhr.com

理配置和承载力研究,并从多尺度区域水循环过程模拟的角度论述了二元水循环模式^[2]。

基于二元水循环的概念与模式,国内学者随后开展了水资源、水环境和水生态评价与管理研究。例如,惠泱河等^[3]开展了二元模式下的水资源承载力系统动态仿真研究,朱一中等^[4]将二元模式下的水文循环过程与机制作为水资源承载力研究的理论基础,黄强^[5]等采用小波分析等方法探讨了二元模式下黄河年径流变化规律,王浩等^[6]开展了基于二元模式的西北水资源及其开发利用评价,高前兆^[7]等分析了河西内陆河石羊河武威盆地水循环二元结构与水资源转化关系,王浩等^[8-9]论述了基于二元模式的年径流演化理论并应用于无定河流域、提出了基于二元水循环模式的水资源评价理论方法,王西琴等^[10]研究了基于二元水循环的河流生态需水水量与水质综合评价方法,张军民等^[11]以新疆玛纳斯河为例研究了干旱区内陆河水文循环二元分化生态效应,刘德地等^[12]以二元动态水循环模式为基础研究了佛山市水资源优化配置,周祖昊等^[13]探析了基于二元水循环理论的用水评价方法,魏娜等^[14]研究了基于二元水循环的用水总量与用水效率控制研究等。

在模型研发与应用方面,贾仰文等^[15-18]开发了模拟对象为二元水循环系统的黄河流域分布式水文模型WEP-L,并应用于水资源评价与演变规律分析;构建了海河流域二元水循环模型并应用于水资源调控方案研究。王润冬等^[19]探讨了二元水循环模型中关于农田水循环模拟的关键技术;邵薇薇等^[20]研究了海河流域农田水循环模式与水平衡要素的通量;王浩等^[21]建立了流域水循环及其伴生过程综合模拟平台并应用于海河流域水资源、水环境与水生态未来演变预估与综合调控;徐凯等^[22]基于二元水循环多目标决策模型进行了流域水循环系统多维调控方案的评价与优选;袁鑫^[23]开展了蒲河流域二元水循环生态需水研究;王喜峰等^[24]构建了基于二元水循环理论的水资源资产化管理框架等。

国际上虽然没有提出“二元水循环”的概念,但研究了流域水循环中自然系统与人工系统或社会系统的相互作用与协同演化问题,关注焦点实质上与国内是一致的。例如,Jia^[25]将城市流域水循环系统划分成自然子系统与人工子系统,自然子系统由降水、地表、土壤、地下水和河道等部分组成,人工子系统由供水、下水道和污水处理厂等部分组成,并分析了两大系统对东京都水收支的影响;Liu等^[26]提出了人类与自然耦合系统概念,Sivapalan等^[27]论述了社会水文学(Sociohydrology),Viglione等^[28]从社会水文学模拟的视角探讨了如何对待洪水风险,剖析了社区集体记忆、接受风险的态度和对防洪减灾措施的信任度所起的作用,国际水文科协10年科学计划(2013—2022年)将“变化中的水文循环与社会系统”列为该10年研究计划的主题^[29]等。

然而,目前国内外对流域“自然-社会”二元水循环的理论与研究方法仍然缺乏系统的论述,学科范式、科学问题、研究内容与研究方法等尚不十分清晰,有必要加以探析。

2 自然水循环与二元水循环的特征对比分析

2.1 水循环的驱动力 自然水循环的驱动力是太阳辐射和重力等自然驱动力。而二元水循环除了受自然驱动力作用外,还受机械力、电能和热能等人工驱动力的影响。更重要的是人口流动、城市化、经济活动及其变化梯度对二元水循环造成更大更广泛的直接影响。因此,研究二元水循环必然要与社会学 and 经济学交叉,水与社会系统的相互作用与协同演化是研究焦点。

2.2 水循环的结构 自然状态下,“降水-坡面-河道-地下”四大路径形成自然水循环结构,它是典型的由面到点和线的“汇集结构”。随着人类社会的发展,一元自然水循环结构被打破,社会水循环的路径不断增多,“自然-社会”二元水循环结构逐步形成。初期,社会水循环有取水、用水、排水三大主要环节,现在发展成取水、给水、用水装置内部循环、排水、污水收集与处理、再生利用等复杂的路径。与自然水循环的四大路径相对应,社会水循环也形成了“取水-给水-用水-排水-污水处理-再生回用”六大路径,它是典型的由点到线和面的“耗散结构”。自然水循环的四大路径与社会水循环的六大路径交叉耦合、相互作用,形成了“自然-社会”二元水循环的复杂系统结构。

2.3 水循环的功能属性 自然水循环的功能比较单一,主要是生态功能,养育着陆地植被生态系统、河流湖泊湿地水生生态系统。

有了人类活动以后,发挥单一生态功能的流域自然水循环格局就被打破,形成了“自然-社会”二元水循环。这主要体现在三大方面:(1)人类的各種生活、生产活动排放大量温室气体,导致地表温度升高,大气与水循环的动力加强,循环速率加快,循环变得更加不稳定,从而改变了流域水循环降水与蒸发的动力条件;(2)为人类社会经济发展服务的社会水循环结构日趋明显,水不单纯在河道、湖泊中流动,而且在人类社会的城市和灌区里通过城市管网和渠系流动,水不再是仅依靠重力往低处流,而可以通过人为提供的动力往高处流、往人需要的地方流,这样就在原有自然水循环的大格局内,形成水循环的侧枝结构——社会水循环,使得流域尺度的水循环从结构上看,也显现出“自然-社会”二元水循环结构;(3)随着人类社会经济活动发展,社会水循环日益强大,使得水循环的功能属性也发生了深刻变化,即:在自然水循环中,水仅有生态属性,但流域二元水循环中,又增加了环境、经济、社会与资源属性,强调了用水的效率(经济属性)、用水的公平(社会属性)、水的有限性(资源属性)和水质与水生陆生生态系统的健康(环境属性),因此从水循环功能属性上看,流域水循环也演变成了“自然-社会”二元水循环。

2.4 水循环的演变效应 流域水循环的演变,特别是二元水循环的形成与发展带来了一系列的资源效应、环境效应和生态效应。首先,水循环驱动力条件的变化、下垫面的改变、城市化进程加快以及社会水循环通量的不断加大,对流域水循环的健康和再生维持带来了不利影响,造成流域水资源的衰减,产生强烈的资源效应。例如,海河流域地表水资源近年来的急剧衰减,万年尺度形成的地下水被50年尺度的人类活动消耗殆尽^[30],就是一个明显的例子。其次,社会水循环在其各个路径上都带来了相应的污染物,对自然水循环形成很大影响,带来水环境的污染,产生强烈的环境效应。再有,人类社会经济大量取水、用水和耗水,把原来在河流、土壤和地下流淌的水的很大部分直接排入大气,造成河湖生态系统和河口海岸生态系统缺乏必须的淡水,产生了强烈的生态效应。

因此,为解决这些问题,就需要从基础层面上研究二元水循环的演变机理与演变规律,提出流域二元水循环的研究方法与技术,进而提出应对措施与调控方案。

3 二元水循环基本原理与研究方法

3.1 学科范式 水文学主要从研究自然水循环逐步发展起来,主要包括水文测验、水文预报和水文计算(通常简称“测报算”)等三个方面内容。而水资源学主要从研究社会水循环发展起来。从1896年美国地质调查局(USGS)成立水资源处,到给排水专业形成,水资源从取水-给水-用水-排水-污水处理-再生回用六大过程研究社会水循环。然而,不能仅用水文学、水资源学的方法研究流域水循环,因为现实的流域已找不到纯粹的自然水循环和社会水循环。从这两个视角观察都会产生越来越大的误差,用这套方法得出的结论不能有效指导实践。

无论是水文学还是水资源学,其学科范式都是“实测-还原(到自然状态)-建模-调控”的一元静态范式。这种范式的核心思想是将受人类干扰的实测数据,基于用水统计数据还原到没有人类干扰的天然状态,然后进行建模与调控,实质上是将水循环系统看成是还原论的线性叠加系统。而水循环本身属于典型的非线性系统,自然、社会两大循环系统之间呈现复杂的非线性互动关系,在人类活动干扰大的流域,由于社会水循环通量很大,极大地改变了原有水循环的演化机理,采用简单线性叠加的方式计算还原流量,将导致还原后的误差很大,基于这样的结果也难于指导实践。

而二元水循环的学科范式是“实测-分离-耦合(自然-社会)-建模-调控”二元动态范式,即:从过去研究纯自然水循环的方法,到用集总式或半分布式的水资源模型刻画灌区、工业、城市等社会水循环系统,并与分布式水文模型刻画的自然水循环系统进行耦合,解决人类活动影响下自然水循环与社会水循环的相互影响及反馈问题。

3.2 科学问题 二元水循环研究面临三大科学问题:(1)自然与社会水循环多过程耦合互馈机制;(2)二元水循环的演化机理与水资源演变规律;(3)基于水循环全过程的水资源量-质-效转化机理。

3.2.1 自然与社会水循环多过程耦合互馈机制 (1)人类活动和“取水-给水-用水-排水-污水处理-再

生利用”社会水循环过程对“降水-蒸发-产流-汇流-入海”等自然水循环过程的作用机制；(2)二元水循环对水环境的作用与影响机制，重点包括流域面源污染与自然循环耦合演变机制，点源污染与社会循环的耦合演变机制，以及流域水环境与二元水循环的耦合演变机制；(3)自然水循环在人类社会驱动下演变后造成水资源量与质的影响，对社会水循环取用水过程形成反馈与制约。

3.2.2 二元水循环的演化机理与水资源演变规律 (1)人类活动影响下的流域水循环分项过程与系统演化机理；(2)伴随流域水循环系统演化的水资源演变机理，包括流域水资源的时空变异特性以及水资源数量与构成的演变规律。

3.2.3 基于水循环全过程的水资源量-质-效转化机理 (1)在二元水循环的全过程中水资源的数量、质量和效率效用转化的机理及经济效用与生态效用的统一度量；(2)如何基于水循环的全过程实现用水从低效向高效的转化。

3.3 研究内容 包括自然与社会水循环的相互影响与结构耦合、二元水循环多过程多尺度时空耦合、变化环境下水循环演变规律与水资源动态评价、未来预测与水循环调控方案等。

3.3.1 自然与社会水循环的相互影响与结构耦合 自然水循环与社会水循环相互影响并进行系统结构的耦合，形成相互嵌套的复杂系统。随着人类开发利用水资源强度的加大，流域水循环系统不再是由“降水-坡面-河道-地下”等基本路径组成的自然水循环结构，而是形成了由自然主循环与区域“取水-给水-用水-排水-污水处理-再生利用”社会侧支循环耦合而成的“自然-社会”二元水循环结构。尽管自然水循环与社会水循环的相互影响有积极的(如古代都江堰工程)，但社会水循环的急剧增强往往对自然水循环的健康维持和用水安全带来消极影响，使二元水循环复杂系统的脆弱性增大、恢复力减弱。因此，这部分研究内容既包括系统的驱动力、结构耦合和关键参数，也包括系统状态变量的阈值和恢复力。

3.3.2 二元水循环多过程多尺度时空耦合 自然水循环与社会水循环包括众多过程，各个过程的时空尺度差异大，存在尺度匹配问题需要攻克。从时间尺度上看，自然水循环的大气过程和地表过程瞬息万变，刻画需要较短的时间尺度(日、时、分、秒等)，而土壤过程和地下过程变化较慢，刻画需要较长的时间尺度(日、月、年等)；而社会水循环的取水、输水、供水、用水与排水过程的时间尺度与自然水循环的地表过程类似，但统计供用水数据往往是较长时间尺度(如年、月等)。从空间尺度上看，自然水循环包括坡面与田块产流单元，坡面、沟道、小溪、支流与干流等汇流单元，空间尺度从小的水文响应单元到大流域跨度很大；而社会水循环从末端用水器具、排水设施到大型跨流域调水工程，空间尺度跨度也很大，但统计供用水往往是分地区分行业的宏观数据。因此，多过程多尺度时空耦合方法是二元水循环研究的关键技术难点。

3.3.3 变化环境下水循环演变规律与水资源动态评价 研究在人类活动作用和气候变化影响下，流域水循环各分项过程与通量、水资源的总量及构成发生的时空演变，揭示变化环境下水循环演变规律。同时，由于二元水循环改变了产汇流条件，还原论的水资源评价方法难于指导实践，需要研究提出变化环境下水资源动态评价方法，并基于水资源的有效性、可再生性和可控性等评价准则，给水资源的全口径、层次化评价结果。

3.3.4 未来预测与水循环调控方案 由于气候的自然变异、全球气候变暖、下垫面的改变和社会经济的发展，未来的流域二元水循环系统与水资源本底条件将会进一步演变，因此需要耦合气候模式、水文模型、水资源配置模型与宏观经济多目标决策模型等建立定量分析工具，对未来水循环进行预测并分析其不确定性，为流域水循环调控提供支撑依据。

流域水循环调控方案的编制要基于社会、经济、资源、环境和生态多维协调，要遵循公平、高效与可持续原则，在促进经济社会发展的同时，保持健康的水循环和良好的生态环境，即：上游地区的用水循环不影响下游水域的水体功能，水的社会循环不损害水的自然循环规律(减少冲击)，社会物质流循环中不切断、不损害植物营养素的自然循环，不产生营养物质物质的流失，不积累于自然水系而损害水环境，以维系或恢复全流域乃至河口海洋的良好水环境。调控方案编制后，要分析调控效果并提出政策建议。

3.4 研究方法 研究变化中的“自然-社会”二元水循环,需要采取三方面齐步并举的研究手段,即原型观测、物理模型和数学模型。

原型观测是对二元水循环的各个过程、参数和状态变量进行原位现场观测。对于自然水循环,多年来建立了一套水文气象和地下水观测网络,而对取水、输水、供水、用水和排水过程构成的社会水循环系统,目前的观测网络还比较薄弱,造成二元水循环的水平衡观测网络不闭合,对认识二元水循环的相互影响与协同演化机制不利,需要加强。

物理模型是在室内或野外制作物理实体模型,对二元水循环的重点环节进行实验研究。例如,农田灌溉蒸渗仪、平原水平衡实验场、坡面径流泥沙实验场和城市水循环实验模型等。物理模型对认识局部区域的“自然-社会”二元水循环耦合规律(如平原区超采区大理地下水的补给机理、城市复杂下垫面的降水入渗产流规律)等很有帮助,但由于受尺度问题制约,大流域大区域的二元水循环耦合规律研究离不开数学模型。

数学模型,是在原型观测基础上的反演。二元水循环的数学模型,因其刻画对象是自然与人类耦合系统中的水分运动,涉及气候、资源、环境、生态、经济与社会等诸多因素。需要基于IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)设定的未来气候变化情景以及研究区社会经济未来可能的变化,耦合GCM(全球气候模式)、RCM(区域气候模式)、气候降尺度模型、分布式水循环模型、水资源配置模型、宏观经济多目标决策模型及尺度传化技术,对未来水循环进行预测并分析其不确定性,为流域水循环调控提供支撑依据。下面对二元水循环数学模型的研究总体思路做简要介绍。

首先,在科学认知人类活动密集缺水流域(地区)“自然-社会”二元水循环模式及其内涵的基础上,综合宏观经济多目标决策分析模块、水资源配置模拟模块和分布式水循环模拟模块,从“宏观-中观-微观”3个层次耦合模拟流域“自然-社会”二元水循环的综合演化过程。其次,基于自然与社会二元驱动下流域水循环、水环境与水生态三大系统内在动力学演化机理,充分考虑水循环、水环境和水生态三大系统之间物质与能量交换关系,应用数据同化技术、组件技术、GIS技术、多模型耦合技术和大规模优化模型求解技术等先进技术,实现气候模式、流域水循环模型、流域水环境模型及流域生态模型的耦合,构建流域“水-环境-生态-经济”复杂大系统的耦合模拟模型。模型需要通过水循环、水环境和水生态3方面多要素的验证,以有效减小模拟结果的不确定性。

基于二元水循环数学模型,对流域水循环及其伴生水环境和水生态系统演化过程的长系列仿真模拟,可定量揭示流域水循环、水环境和水生态的演变规律,为流域综合调控提供科学认知基础。基于二元水循环数学模型,可对流域水资源、水环境及水生态三大过程演变进行系统的归因分析,从气候自然变异、全球变暖 and 区域人类活动等方面找出导致流域水资源历史变化的主要因素;基于IPCC未来气候变化情景和研究区社会经济变化情景,定量预测流域未来水资源及水环境和生态过程的演变趋势,提出调控优选方案,为流域综合治理方案的制定提供有力的科学支撑。

3.5 海河流域研究案例 基于上述二元水循环基本原理与研究方法,开展了海河流域水循环及其伴生的水环境与水生态模拟、预测与调控研究^[18,21,31-33]。

海河流域地处温带半湿润半干旱大陆季风气候区,多年平均降水总量为1710亿 m^3 ,水资源总量为370亿 m^3 ,人均水资源量仅为全国人均的13%,是我国最缺水的地区之一。根据《中国水资源公报》,2013年海河流域水资源总量为356亿 m^3 ,而总用水量371亿 m^3 ,超过当地水资源总量。海河流域水循环承受着自然变化和高强度人类活动的双重作用,呈现出明显的“自然-社会”二元特征。

将分布式水循环模型与水资源配置模型和多目标决策分析模型耦合,进而与水环境模型、生态模型和气候模式耦合,构建了海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟平台NADUWA3E(Natural-Artificial Dualistic Water cycle model considering Economy, Environment and Ecology),其总体结构见图1。从河川径流量、地下水位、地表水水质(COD、氨氮)与地下水水质(硝态氮、氨氮)以及植被叶面积指数与NPP(净初级生产力)等多个指标对模型进行了验证^[21,31]。

采用验证后的NADUWA3E模型,开展了水资源演变及其归因分析^[31-32]、流域水循环多维临界整体调控模式与方案等应用研究^[33],简介如下:

(1)流域水资源演变规律分析。比较 1981–2005 年时段与 1956–1980 年时段模拟结果，揭示出海河流域水资源以下六大演变规律：①水资源总量及各分项总体呈现衰减的趋势；②地表径流和地下径流水平通量呈减少趋势，径流系数由 0.18 减少为 0.10；③地表水资源量与蒸发量均减小，但前者减少比例(51 %)远大于后者(1 %)；④狭义水资源量与广义水资源量均减少，但前者减少比例(28 %)远大于后者(11 %)；⑤地表水资源量急剧减少(51 %)，而地下水与地表水不重复量急剧增大(65 %)，狭义水资源的构成发生巨大变化；⑥平原区地表水资源量衰减比例(64 %)大于山丘区(39 %)。

(2)水资源演变归因分析。利用基于指纹的归因方法，对气候系统的自然变异、太阳活动与火山爆发、温室气体排放导致的全球变暖、区域人类活动(包括下垫面变化和人工取用水)4 个因素下的水资源演变进行了分离研究，定量评价了各影响因素对于海河流域水资源综合演变的影响程度，结果表明：海河流域过去 50 年水资源衰减的主要原因是区域人类活动(贡献率为 62 %)，其次是气候的自然变异(贡献率为 38 %)，而全球气候变暖会增加海河流域的水资源量。

(3)流域水循环多维临界整体调控模式与方案。在深入辨析水循环的资源、经济、社会、生态和环境等多维属性及其关联机制基础上，提出了水循环稳定和再生性维持、经济社会发展与水生态环境保护相协调的调控模式与方案，并通过方案调控效果评价给出五维均衡的总用水量、总耗水量、地下水超采量、国民经济可用水量、入海水量、COD 入河总量、粮食产量等未来总量控制目标和实现途径。

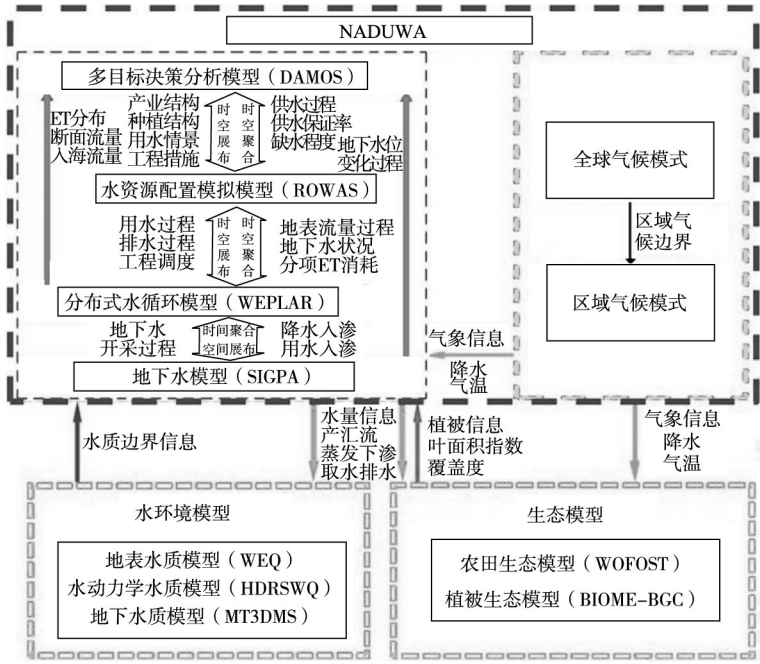


图1 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟平台 NADUWA3E 的总体结构

4 机遇与挑战

目前，国际上陆续开展“自然–人类”耦合系统、复杂性科学以及社会水文学研究；在国内，包含生态文明建设的五位一体国家战略和最严格水资源管理制度已开始实施。国内外科学与实践需求的形势发展，给变化中的流域“自然–社会”二元水循环研究带来了一系列机遇。

但二元水循环研究仍然面临诸多问题。首先是水资源“量–质–效”统一度量与转化问题。水资源既有工业、农业等经济价值和生活价值，又有生态环境价值，经济价值、生活价值与生态环境价值如何折算，水资源利用效率的不同如何影响其价值，如何寻求统一的折算当量，综合度量全流域各子单元的经济、生活和生态环境价值以及利用效率，情景分析法和多目标决策法是可能的解决方

向。其次是二元水循环系统与人类社会系统的协同演化问题。虽然人类社会是二元水循环系统的重要驱动力,但在二元水循环研究中对人类行为模式(社会学范畴)尚缺乏很好的刻画;同样,二元水循环系统的演化对社会经济模式和过程的影响也越来越大,因此对未来的预测与应对必须考虑二者的协同演化。

5 结语

在气候变化与人类活动影响下,流域水循环系统正在发生前所未有的迅速改变,“自然-社会”二元水循环多时空尺度的耦合日益紧密、系统复杂性日益增强。二元水循环的科学认知、量化与调控不仅对科学家来说是跨学科的空前挑战,对于塑造人类从根本上依赖的地球水圈的未来也非常关键。当前,国内外发展理念的转变为流域“自然-社会”二元水循环研究提供了良好的机遇,但是,这项研究涉及到资源、环境、生态、经济、社会等多个学科,学科交叉特点明显,因此需要来自相关学科研究者们更多的共同努力。将跨学科综合研究所获取的知识运用到水利、经济社会和生态环境决策过程中,对保持流域水循环系统的健康和经济社会发展的可持续性是非常重要的。

参 考 文 献:

- [1] 王浩,陈敏建,秦大庸,等.西北地区水资源合理配置和承载能力研究(96-912-01-04)报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2000.
- [2] 王浩,秦大庸,王建华.多尺度区域水循环过程模拟进展与二元水循环模式的研究[M]//刘昌明,陈效国.黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展.郑州:黄河水利出版社,2001.
- [3] 惠泱河,蒋晓辉,黄强,等.二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J].地理研究,2001,20(2): 191-198.
- [4] 朱一中,夏军,谈戈,等.关于水资源承载力理论与方法的研究[J].地理科学进展,2002,21(2): 180-188.
- [5] 黄强,蒋晓辉,刘俊萍,等.二元模式下黄河年径流变化规律研究[J].自然科学进展,2002,12(8): 874-877.
- [6] 王浩,陈敏建,秦大庸,等.西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
- [7] 高前兆,李小雁,仵彦卿,等.河西内陆河流域水资源转化分析[J].冰川冻土,2004,26(1): 48-54.
- [8] 王浩,王成明,王建华,等.二元年径流演化模式及其在无定河流域的应用[J].中国科学: E辑,2004,34(增刊 I): 42-48.
- [9] 王浩,王建华,秦大庸,等.基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J].水利学报,2006,37(12): 1496-1502.
- [10] 王西琴,刘昌明,张远.基于二元水循环的河流生态需水水量与水质综合评价方法-以辽河流域为例[J].地理学报,2006,61(11): 1132-1140.
- [11] 张军民.干旱区内陆河水文循环二元分化生态效应研究-以新疆玛纳斯河为例[J].水利经济,2006,24(6): 1-2,22.
- [12] 刘德地,陈晓宏,刘丙军,等.面向可持续发展的佛山市水资源优化配置[J].水资源保护,2008,24(6): 23-27.
- [13] 周祖昊,王浩,贾仰文,等.基于二元水循环理论的用水评价方法探析[J].水文,2011,31(1): 8-12.
- [14] 魏娜,游进军,贾仰文,等.基于二元水循环的用水总量与用水效率控制研究-以渭河流域为例[J].水利水电技术,2015,46(3): 22-26.
- [15] 贾仰文,王浩,王建华,等.黄河流域分布式水文模型开发与验证[J].自然资源学报,2005,120(2): 300-308.
- [16] 贾仰文,王浩,仇亚琴,等.基于流域水循环模型的广义水资源评价(I)--评价方法[J].水利学报,2006,37(9): 1051-1055.
- [17] 贾仰文,王浩,仇亚琴,等.基于流域水循环模型的广义水资源评价(II)--黄河流域应用[J].水利学报,2006,37(10): 1081-1087.
- [18] 贾仰文,王浩,周祖昊,等.海河流域二元水循环模型开发及其应用—— I .模型开发与验证[J].水科学

- 进展, 2010, 21(1): 1-8.
- [19] 王润冬, 陆垂裕, 孙文怀, 等. MODCYCLE 二元水循环模型关键技术研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(2): 33-36.
- [20] 邵薇薇, 李海红, 韩松俊, 等. 海河流域农田水循环模式与水平衡要素[J]. 水利水电科技进展, 2013(5): 15-20, 25.
- [21] 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J]. 科学通报, 2013, 58(12): 1064-1077.
- [22] 徐凯, 汪林, 甘治国, 等. 流域水循环系统多维调控方案的评价与优选[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014(2): 118-123.
- [23] 袁鑫. 蒲河流域二元水循环生态需水研究[J]. 水利发展研究, 2015, 15(4): 32-34, 46.
- [24] 王喜峰. 基于二元水循环理论的水资源资产化管理框架构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(1): 83-88.
- [25] Jia Yangwen. Integrated Analysis of Water and Heat Balances in Tokyo Metropolis with a Distributed Model[D]. Tokyo, Univ. of Tokyo, 1997.
- [26] Liu J, Thomas D, Stephen R, et al. Coupled human and natural systems[J]. Ambio, 2007, 36(8): 593-596.
- [27] Sivapalan M, Savenije H, Bloeschl G. Sociohydrology: A new science of people and water[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1270-1276.
- [28] Viglione A, et al. Insights from socio-hydrology modelling on dealing with flood risk—Roles of collective memory, risk taking attitude and trust[J]. Journal of Hydrology, 2014, 518: 71-82.
- [29] Montanari A, Young G, Savenije H, et al. “Panta Rhei—Everything Flows”: Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022 [J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(6). DOI: 10.1080/02626667.2013.809088.
- [30] 刘家宏, 徐鹤, 秦大庸, 等. 海河流域万年尺度水循环演变[J]. 科学通报, 2013, 58(12): 1078-1084.
- [31] 贾仰文, 王浩, 等. 流域水循环及其伴生过程综合模拟[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [32] Jia Y, Ding X, Wang H, et al. Attribution of water resources evolution in the highly water-stressed Hai River Basin of China[J]. Water Resources Research, 2012, 48, W02513:1-18, doi: 10.1029/2010WR009275.
- [33] 王浩, 王建华, 贾仰文, 等. 海河流域水循环演变机理与水资源高效利用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions

WANG Hao, JIA Yangwen

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Water cycle in river basins has been changed profoundly under the impacts of human activities and climate change. Scientific basis behind water issues such as flooding, water scarcity, water pollution and turbidity is evolutionary mechanism of water cycle and accompanied water environment and eco-hydrology processes. Therefore, it is desired to establish a set of nature-society dualistic water cycle theory to support effective solutions of these water issues. In this study, on the basis of brief description of dualistic water cycle research history, comparative analysis of different characteristics of natural water cycle and nature-society dualistic water cycle is performed from aspects of driving forces, structures, functions and reactions, and basic theory of nature-society dualistic water cycle has been put forward, which includes subjective mode, scientific issues, study contents and study methods etc. Opportunities and challenges confronted by the dualistic water cycle study are also discussed, e.g., issue and solution method of united measuring and transforming of quantity-quality-efficiency of water resources, and a study summary is given at last.

Key words: river basin; water cycle; natural water cycle; nature-society dualistic cycle; coupled human-natural systems

(责任编辑: 王成丽)