

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180001

夏军,张翔,韦芳良,等.流域水系统理论及其在我国的实践[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):01-07,13. XIA J, ZHANG X, WEI F L, et al. Water system theory and its practices in China[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 01-07, 13. (in Chinese)

# 流域水系统理论及其在我国的实践

夏军<sup>1,2</sup>, 张翔<sup>1,2</sup>, 韦芳良<sup>1,2</sup>, 王强<sup>1,2</sup>, 余敦先<sup>1,2</sup>, 徐晶<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 武汉大学 水安全研究院, 武汉 430072)

**摘要:** 针对变化环境的水循环与水安全问题, 对水系统的基本概念、理论与意义进行了介绍, 指出了以多学科视角, 将自然科学和社会科学相融合以研究变化环境下的水问题是当前国际地球系统水科学发展前沿。分析了水系统研究的难点与水-社会-生态关联性研究的发展趋势, 强调了水系统的耦合与解耦、水系统模型的敏感性、水系统的监测等方面研究的重要性, 探讨了自然系统和人类系统间的协同演变及其集合响应机制研究于构建水系统耦合模型的必要性。以淮河、鄱阳湖、汉江为例, 从不同的角度论述了水系统理论在我国水问题研究中的实践与指导意义, 并认为水系统理论的进一步研究应加强内在机理及概化准确性等方面的研究, 构建水系统模拟平台, 增强水系统模型对气候及环境变化的适应性, 加强在变化环境下流域水资源可持续利用规划与决策管理中应用推广。

**关键词:** 水系统; 水循环; 生物地球化学过程; 人文过程; 关联

**中图分类号:** TV 213    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0001-07

## Water system theory and its practices in China

XIA Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiang<sup>1,2</sup>, WEI Fangliang<sup>1,2</sup>, WANG Qiang<sup>1,2</sup>, SHE Dunxian<sup>1,2</sup>, XU Jing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Research Institution for Water Security, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Targeting the problems of water security and water cycle under changing environments, this paper introduces the basic concepts, theories, and implications of water system. From the interdisciplinary perspective, the frontier of water science development will be combining natural science and social science so as to study the water problem under changing environments. This paper analyzes the development trend of the study on nexus of hydro-social ecology. It emphasizes the importance of studies on the coupling and decoupling of water system, the sensitivity of water system modeling, and the monitoring of water system. It also discusses the necessity of the co-evolution and ensemble response mechanism between natural system and human system to the construction of water system coupling models. Taking Huai River basin, Poyang Lake, and Han River basin as examples, this paper illustrates the practical and guiding significance of water system theory in China from different perspectives. The further study of water system theory should strengthen the internal mechanism and generalization accuracy in order to enhance the adaptability of water system models to climate and environmental changes. The communication between water management decision makers and researchers also should be propelled.

**Key words:** water system; water cycle; biogeochemical process; humanity factor; nexus

收稿日期: 2017-08-09    修回日期: 2017-10-16    网络出版时间: 2017-12-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171226.1042.034.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41571028); 国家水体污染控制与治理重大专项课题(2014ZX07204-006)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41571028); A Major National Water Pollution Control and Governance Special(2014ZX07204-006)

作者简介: 夏军(1954-), 湖北孝感人, 中国科学院院士, 从事系统水文学方面研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

通讯作者: 张翔(1969-), 北京市人, 教授, 博士生导师, 从事生态水文学方面研究。E-mail: zhangxiang@whu.edu.cn

近年来,与生态学、社会科学等其它学科的交叉成为水文学发展的前沿方向。生态水文学<sup>[1-4]</sup>创立了生态系统水循环及水与生态系统互馈作用研究的新方向,社会水文学<sup>[5-6]</sup>的提出进一步扩展了水与社会经济的相互作用研究领域。围绕变化环境的水循环与水安全问题,国际上实施了一系列涉及到水与气候、水与人类、水与社会、水与生态、水与环境及其联系的科学研究计划。1987 年国际科学理事会(ICSU)发起了国际地圈生物圈计划(International Geosphere Biosphere Program, IGBP)(1987-2015 年),水文循环的生物学方面(Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle, BAHC)是其核心研究计划之一,主要研究植物在地表和大气水文过程中的作用;1996 年国际社会科学联合会(ISSC)启动了全球环境变化的人文因素国际项目(IHDP: International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change)(1996-2014 年),重点研究人类活动对全球环境的影响<sup>[7]</sup>;2004 年,地球系统科学联盟(ESSP)推动成立“全球水系统计划(GWSP)”,核心议题是“人类活动如何影响全球水系统以及以水循环为纽带联系的三大过程(水循环物理过程、水质生态过程和人类经济过程)的作用与反馈如何”<sup>[8]</sup>;2013 年,国际水文科学协会(IAHS)正式发布并启动了 2013-2022 年十年科学计划——Panta Rhei,主题是“处于变化中的水文科学与社会系统”,将水文系统视为自然环境与人类社会之间的一个不断变化的交界面,以应对水安全、人类的安全与发展以及环境管理决策等方面的问题<sup>[9-10]</sup>;2014 年开始,国际水文计划进入了第八阶段(2014-2021 年),强调了变化环境下的水安全问题<sup>[11]</sup>;同年,国际科学理事会(ICSU)等国际组织发起了“未来地球计划(Future Earth)”(2013-未来),以“动态地球、全球可持续发展、向可持续性转型”为研究主题,强调了水、能源、粮食之间的协同、平衡管理以及其与自然环境、经济、社会、政治之间的关联性<sup>[12]</sup>。因而,以多学科视角,将自然科学和社会科学相融合以研究变化环境下的水问题是当前国际地球系统水科学发展前沿。

随着社会经济的高速发展,我国的水资源开发利用量已接近警戒线,水资源时空分布极其不均,水污染日益加剧,局部地区与水相关的生态环境问题愈发严重<sup>[13-14]</sup>。人类社会与自然环境的需水矛盾逐步加大,大型水利枢纽、跨流域调水工程等人为调控工程对流域生态环境的影响已不容忽视。因此,迫切需要从水系统的角度,研究变化环境下水循环过程中各

个环节间的联系与反馈机制以及水循环系统的整体调控与高效利用<sup>[15]</sup>。夏军<sup>[16]</sup>针对国家重大需求和国际科学前沿问题,综述了中国水资源管理与水系统科学发展面临的机遇与挑战,建议加强水系统的科学基础理论研究与创新、“水与气候”、“水与生态”、“水与社会”应用问题的综合研究和水系统科学与水资源管理的交叉研究。本文针对自然科学和社会科学相融合以研究变化环境下的水问题的前沿领域,介绍水系统的基本概念、理论与意义,指出了从多学科视角,水系统研究的难点与水系统多要素关联性研究的发展趋势,通过实例分析,阐述水系统理论与方法在解决我国复杂水问题中的实践意义。

## 1 水系统理论概述

### 1.1 水系统基本概念

水系统是由以水循环为纽带的三大过程(物理过程、生物与生物地球化学过程和人文过程)构成的一个整体,而且内在包含了这三大过程的联系及其之间的相互作用<sup>[8]</sup>。其基本概念见图 1。

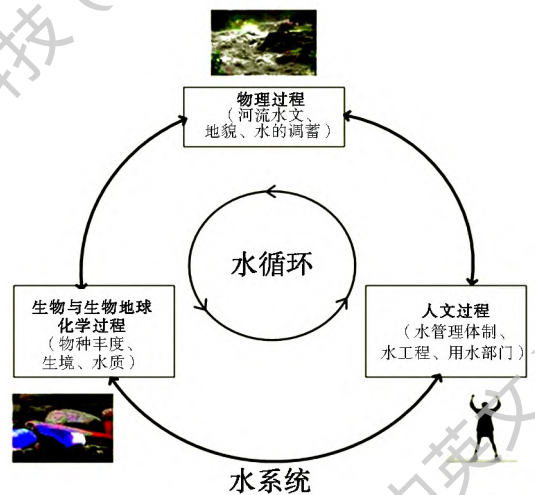


图 1 水系统要素的关系及概念示意(转引自 GWSP)<sup>[8]</sup>  
Fig. 1 Nexus and concepts of water system elements(from GWSP)

物理过程即传统的全球水循环的物理过程,包括降水、蒸散发、下渗、径流、地貌、泥沙过程、水汽输送等。它不仅包括地球陆地表面的水文过程,而且还包括在海洋和大气中的水文过程。

生物与生物地球化学过程则包括水生生物及其相关的生态系统及其生物多样性。这些生物也是全球水系统的地球化学作用中不可或缺的环节,而不仅仅是简单地受物理-化学系统的变化的影响,这当中也包括全球水系统和水质中的生物地球化学循环。

人文过程包括与水相关的组织机构、工程、用水部门等,人类社会不仅是水系统中的一环,其本身也

是水系统内变化的重要媒介。人类社会在遭受到水资源可利用量的变化所带来威胁的同时,也会采取不同的行动以减轻或适应这样的变化。

全球水系统在地球系统的非生物动力学中起着关键的作用。水循环为地球系统中的各个过程提供了物质交换和能量转换的载体。例如,通过与碳循环及其他生物地球化学循环的耦合,水有助于调节二氧化碳及其他重要气体的释放及储存,维持陆地和水生生态系统的完整性和生物多样性。水文循环控制由大陆到海洋的水性物质的运输,云、雪覆盖和水汽的全球分布则调节地球的能量平衡。同时,全球水系统在人类社会中也发挥着核心的作用。随着水系统与经济、社会、技术等社会过程的联系愈加紧密,这些过程的“全球化”使得水系统的全球化更加凸显。比如一些大型国际组织所实施的与水相关的政策会直接影响全球范围内的取水、配水及调水,进而影响全球范围内的水文情势、污水排放、水体的生物地球化学作用及水生生态系统的完整性。

## 1.2 水系统理论意义

在地球系统中,人文过程正成为许多相互作用的过程变化的主要驱动力,这些过程包括水、养分和能量循环,以及地表演化。受人文过程所影响,以水循环为纽带的三大过程构成的水系统也发生着显著和快速的变化。为了探知人类活动影响水系统动力机制的方式,为管理者如何应对这些变化以及人类社会和自然环境可持续发展的相关决策提供科学依据,以消除当前和未来水资源情势对公共卫生、经济发展、生物多样性所造成的威胁,水系统需要以流域或区域为基本单元,探究以水循环为纽带的流域水系统的物理、生物与生物地球化学、人文三大过程之间的联系及其反馈机制,建立流域水循环综合模拟科学平台,通过水系统调控,形成良性水循环。

在变化环境条件下,深入理解水系统运行机理及其对扰动的响应方式,才能使人类社会更好地适应快速演变的新系统状态。因此,首先需要探究人类活动及自然环境变化(气候变化、地球化学生物过程变化、水文情势变化、生物多样性变化、土地利用变化、灌溉及调水、工业污水、生活废水)的量级及引发这些变化的关键机理。例如,全球变暖加速了水文循环,导致了降水量和蒸发量的改变,但不同时间尺度气候条件的变异性以及人为调控工程使降水量和蒸发量改变的研究变得更为复杂。而在水文循环中,蒸散量和地下水(包括土壤水分)的变化相对于二者而言,观测和记录的难度更大。另外,在水文循环加速的条件下,一些局部地区由于土地覆盖的

改变,降水量呈现与整体相反的趋势;其他一些局部地区,由于大气气溶胶的增加,地表热能及蒸发的减少导致了局部降水量的减少。因此在气候变化对降水和径流长期趋势的影响的研究中,仍存在很多不确定性,有待更加深入的研究以减少这些不确定性所带来的影响。并且,在关于引发这些变化的关键机理方面,传统的研究中更多侧重于物理因素,关于地球化学、生物及人类因素的研究仍显不足,有待进一步拓展。

其次,深入理解水循环过程需要探知水循环各要素间的相互作用及反馈。水系统各要素间的联系分为两种不同的形式,一种是水系统及地球系统中不同部分空间上的联系,一种是由于自然或人类活动对水系统长期持续的影响而形成的时间上的联系。理解这些要素相互间的联系,以及这些联系如何影响人类社会的人口动态、土地利用变化、粮食生产及经济贸易,从而为人类社会提供有效的信息支撑。例如自然环境变化或人为气候调节可能会改变旱灾的频率及严重程度而导致极端缺水,进而影响区域的农业或森林生态系统。森林生态系统的改变可能会引起蒸散量和水分运移的变化。人类社会则通过改变蒸散量、径流和地下水补给(如修建水库)来应对旱灾带来的变化,河道系统遭到破坏,波及湿地的生态系统及生物多样性,如敏感性鱼类濒危。同时,修建水库等措施削减了河道输沙,改变了河口的营养化学状况,从而加剧了河岸侵蚀及河道富营养化,下游河道生态系统也因此恶化。环境及生态系统的恶化,反过来又促使人类社会提高环境保护、生态治理意识,多种生态治理措施的开展又能够在一定程度上减缓环境恶化趋势,使水系统达到新的平衡。因此,深入研究水循环系统各要素之间复杂而动态的关系,对于理解水循环过程、变化环境下的人类社会良性发展具有十分重要的意义。

最后,提高人类社会对快速演变的新系统状态的适应性,则要求对变化环境下社会经济发展的水系统承载能力与适应性进行探究,以制定可持续发展的水资源管理战略。人类的生存及健康与水资源的水量及水质密切相关,环境变化使得全球越来越多的地区遭受水危机,区域应对水危机的能力则与其对变化的敏感性及适应性相关联。现今对生态系统的保护和恢复已成为应对水危机中的重要环节,而水危机对人类及生态系统的胁迫更多地来自于资源管理而非资源稀缺。因此,在水资源管理的研究中需要更多地从水系统的角度考虑人类因素及其行为的生态后果。水系统的敏感性及适应能力取决于

自然环境、社会等不同因素间的相互作用,以水系统为视角进行研究有利于识别和量化这些因素及其相互作用在不同尺度下对其适应能力的影响,并利用地球物理、生态系统、社会等因素适应环境变化。水危机及水系统适应能力随着经济、政治等因素的全球化而改变,具有很强的区域性;同时,区域水系统的变化也会对社会及生态系统造成全球性的影响,如人口的大规模的跨界迁移,经济市场和贸易的中断,水生物种的缺失等。

### 1.3 水系统关联性与研究的难点

水系统理论旨在提升关于自然和人类系统如何相互作用的认识,以及理解二者如何在变化环境下协同进化。以科学地制定自然资源,尤其是水资源可持续发展的管理决策。但应当认识到,在水系统理论及其应用的研究中,仍存在着很多重点和难点。

#### (1) 水系统的耦合与解耦。

水系统理论强调物理过程、人文过程、生化过程三大过程之间的联系与反馈,然而实现三大过程之间内在的耦合机制仍有待进一步研究。例如,不同子系统时空尺度不同,在构建水系统模型过程中,需要考虑如何克服不同子系统间尺度的差异,实现时空尺度的统一。而且,不同于物理过程,人文过程往往难以量化,关于如社会经济、人口、环境保护意识等因素对水循环过程影响的量化方法,直接关系到水系统模型描述的准确性。并且,模型构建完成之后,利用耦合模型模拟流域水循环过程,模型所输出的结果则为系统性的结果,应如何将这样系统性的结果,反向解耦到每一个过程中,指导解决物理过程、生化过程、人文过程中的实践问题,如水资源规划、环境治理和生态修复等。

#### (2) 水系统模型的敏感性。

同时,由于子系统本身以及相互间耦合的复杂性,水系统模型涉及的参数众多,对模型参数进行敏感性分析的难度不同于单一物理过程或生化过程模型。各个参数间的联系紧密程度不同,单因素敏感性分析的准确性以及多因素敏感性分析的可行性都将受到很大程度的影响。而变化环境下,要求模型能够根据模拟结果及实测结果之间的差异,不断地调整自身的参数,提高自身模拟的精度,以提高模型的适应性,即模型应当具有一定的数据同化能力,以应对快速变化的环境条件。

#### (3) 水系统的监测。

此外,综合的流域水资源监控信息系统对于流域水系统模型的构建及应用来说至关重要。在传统的水资源监控系统中,监测的对象主要包括控制断

面、水源地、水功能区、取退水口、排污口等,监测的重点主要为断面水质、水源地和水功能区水质、入河排污口排污流量、排污量等,未能满足流域水系统模型的需求,比如缺乏对流域局部和整体的水生态状况的量化、监测及评价等。故而,需要以生活需水、生产需水、生态需水三者的平衡为出发点,根据各子系统的特点,确定相应的数据缺口,建立全面的流域水资源监控信息系统,以描述及评价不同时段的流域水系统状态。通过流域水资源综合信息的采集、传输、模型分析,及时提供流域水系统决策方案,并给出方案实施情况的后评估结果,从而实现流域水系统状态的科学管理。

因此,如何克服时空尺度差异,实现各子系统间的耦合与解耦,建立与流域水系统模型相适应的综合监控信息系统,科学地对模型进行敏感性分析,构建能响应快速变化的环境而不断调整自身参数的水系统模型,是水系统理论及其实践研究中的关键。

当前,不论是生态水文学还是社会水文学,新的发展趋势都特别注重多元要素的关联性(nexus),强调基于自然和人类系统间的互馈机制研究,采用系统动力学耦合模拟流域水文、能源、粮食、生态环境、人口与社会经济的协同演变及其集合响应机制。Elshafei等<sup>[17]</sup>基于自然和人类系统间互馈机制,采用系统动力学耦合流域水文学、人口、经济学、环境、社会经济敏感性和集体反映,为社会水文学模型提出了一个原型框架,假定了社区敏感性转态变量和行为响应变量两个重要参数反映系统之间的相互反馈;Van Emmerik等<sup>[18]</sup>考虑了水库库容、灌溉面积、人口数量、生态健康和环境意识五个状态变量之间的相互作用,建立了由非线性常微分方程组成的人-水耦合系统控制方程,模拟了过去100年澳大利亚Murrumbidgee流域人-水系统的协同进化过程,揭示了在气候变化和社会经济发展驱动下人-水耦合系统的“钟摆”型变化规律;Feng等<sup>[19]</sup>在Van Emmerik等的研究基础上,探讨了供水、发电和环境系统之间的关联性,建立了六个非线性常微分方程描述水库蓄水、供水、发电、人口、生物质和环境意识的协同演化过程,加深了对耦合系统相互作用的理解;Hale等<sup>[20]</sup>构建了一个研究社会-水-生态系统的框架,可用于解构复杂水系统的关键组成要素及其之间的相互联系。这种多元要素关联分析的发展趋势推动了对水系统的深入理解和认识,对在变化环境下从多学科的角度研究水问题,发现内在的反馈机制及可能的新范式和新的模型方法,具有重要的科学意义。

## 2 水系统理论在我国的实践

水系统理论在我国的应用研究刚刚起步,近年来笔者在淮河、鄱阳湖、汉江等流域开展了相关的工作,阐述水系统理论于我国水资源可持续利用及发展的实践意义。

### 2.1 淮河流域水系统科学实践

淮河流域地处我国东部,介于长江和黄河两流域之间,是我国水污染比较严重的地区之一,流域内污染物入河量远远超出水域纳污能力,经治理后流域水质持续恶化的趋势得到遏制,总体水质显著改善,局部污染仍较严重<sup>[21]</sup>。流域及辐射区内高密度的人口分布与高污染产业结构不仅造成流域水质污染,也使得居民基本生活及经济发展对水资源需求逐渐增大,与生态系统之间的需水矛盾日益凸显。此外,由于防洪、灌溉、供水、防潮、排涝、环保、水产、航运和水力发电等多方面的需要,淮河流域上水库和闸坝等水利设施众多,闸坝拦蓄上游来水,降低了水体的自净能力,城镇工业废水与生活污水不断排入,水质持续恶化,导致河道内积聚的污染水体随洪水下泄,造成水污染事件<sup>[22]</sup>。并且,淮河流域河湖径流季节性变化大,水资源开发利用程度高,河道内生态用水常被挤占,有水无流或河湖干涸萎缩的现象时有发生,流域内中小河流水生生态系统破坏严重,河湖生态用水难以保障,因此导致河道干涸、断流,湖泊湿地萎缩,水生生物数量和种类减少,生物多样性降低,流域水生态功能下降<sup>[23]</sup>。

目前,对淮河流域水生态系统特征缺乏全面系统的认识,对水生态系统结构和功能把握不到位,导致了制定有关管理方案存在一定的盲目性。淮河流域大部分区域水生态系统健康存在着不同程度的问题。需要以水系统的角度,将居民生活用水、工业生产需水、农业灌溉用水、闸坝调度等人文过程以及流域水生态系统中的生物与生物地球化学过程与流域水循环中的物理过程相联系,揭示各个过程之间及其自身内在的联系和反馈机理;关键指示生物和水生态健康标准,计算河流生态需水量,确定生态阈值及生态调控目标,分析闸坝可调能力,确定流域水系统响应变化环境的承载力和适应性;耦合水生态系统模型及水文模型、多闸坝水质模拟等模块,集成与拓展多闸坝水质-水量-水生态模型,模拟流域水系统中三大过程之间的相互作用及反馈;建立淮河流域水质-水量-水生态多维调控技术与调度系统平台,为流域水资源的可持续利用、生态保护与水污染控制等提供科学依据。

### 2.2 鄱阳湖流域水系统科学实践

鄱阳湖是我国最大的淡水湖和国际重要湿地,位于长江中下游南岸的江西省的北部,上接江西省内赣江、信江、抚河、饶河、修水五大河流(下称“五河”),下有湖口通长江。湖区水位受鄱阳湖流域“五河”入流和长江来水的双重影响,是一个典型的季节型、过水型、吞吐型的湖泊。在汛期“五河”大量洪水入湖,湖水巨增,湖面漫滩,水流迟缓;冬春季节,水位下降,湖滩出露,湖面减小,水流急剧。因而,鄱阳湖在洪水、枯水期时,湖位、面积、容积变化极大。

现今鄱阳湖水位及其变化已不再是纯天然状态,在湖区内由于大面积的围垦和湖汊的人工控制,通江水体的面积已大为压缩。在“五河”流域几乎都建有大型水利工程对入湖水量进行调控,而出湖水量则受到长江上游水利枢纽的影响,三峡水库蓄水期间,湖口长江水位偏低,五河来水补充不足,导致枯水期提前及延长,枯水期水位持续走低<sup>[24]</sup>。三峡工程运行和五河水库调度等新情况改变了流域水文情势,但这样的环境变化对湿地生态系统的影响(湿地植被退化、渔业资源衰退、湿地生物多样性面临威胁)尚未明朗,需要研究变化的量级以及关键机理<sup>[25-27]</sup>,以及流域水系统中人文过程(调控工程)、物理过程(鄱阳湖、五河及长江之间的水沙运移)、生物及地球化学生物过程(湿地生态系统内生物群落对水文情势及气候变化的响应)之间的相互作用及反馈;分析鄱阳湖水文生态时空演变规律,探究流域水系统中不同部分空间上的联系,以及气候变化和鄱阳湖水利枢纽工程等人类活动对水系统长期持续的影响而形成的时间上的联系;从流域水系统的角度研究水循环过程与社会用水、水政策互动关系,研发大尺度基于植被响应的水文生态模型,综合考虑保护区生态与环境保护及区域协调发展,提高流域水系统的承载能力及适应性,为鄱阳湖湿地生态系统健康与生物多样性保护提出适应性对策。

### 2.3 汉江流域水系统科学实践

汉江是长江最长的支流,流经陕西、湖北两省,于武汉市汇入长江。汉江流域特别是中下游地区为湖北社会、经济核心区,以汉江为主线构筑了湖北省南北经济走廊,汉江水源对流域的生活、生产和生态具有极其重要的支撑作用。

随着汉江中下游社会经济的高速发展,该地区的水文、水质、水生态、工业用水及跨流域调水等自然因素以及人为因素不断变化<sup>[28]</sup>。一方面多个调水工程的建设运行不仅减少了下泄流量,降低了

水位,改变了汉江干流的水文气象条件,加剧了汉江流域日趋严重的水环境和水生态问题<sup>[29]</sup>;另一方面,逐渐增加的化肥施用量及肥料流失量使得流域水体富营养化日趋严重,大量工业废水和生活污水的排放进一步加剧了水体富营养化。因此,河湖生态补水需求增加,水环境污染问题日益突出<sup>[30]</sup>,汉江水华发生的频率有增加趋势。为了改善流域中下游水环境质量状况,应以流域水循环为纽带,分析流域内各个调水工程、农业面源污染、工业污染与河道内营养化学作用之间的联系与反馈,确定流域水生态系统响应变化环境的承载能力及可恢复性<sup>[31]</sup>。基于汉江流域基础参数调查及评价,分析人类活动影响下水位、流量、流速等水文要素的时空分布变化趋势及水质时空变化规律,基于流域水系统中三大过程的联系与反馈,耦合流域水循环模型及基于物理机理的水生态模型,模拟流域水系统内生态需水过程,确定适宜生态需水量,指导流域水资源及水生态环境可持续发展。

### 3 结论

变化环境下的水问题是目前地球系统水科学研究国际前沿,这涉及到水与气候、水与生态、水与环境、水与社会及其联系。水系统理论将这些因素及其联系作为水循环系统的一部分,强调水循环研究的系统性,为水资源可持续发展提供了新的视角和方法。

当前,流域水系统理论与方法在我国的应用还刚刚起步,面临着众多的难题和挑战。例如,流域水系统模拟中如何量化人文过程中的各种因素(生产力、人口增长、居民用水需求、环境保护意识等)相互之间的影响,以及其对水循环中的物理过程、生化过程的影响,建立耦合模型,研究响应及反馈机制,从而平衡经济发展、生活基本需求以及生态环境间的用水矛盾。迫切需要输入研究应用数学模型概化人文过程中不同因素间的影响及其对其他过程的影响过程,其中内在的机理和概化的准确性都有待进一步的研究;水系统模型不同子系统之间的耦合和解耦也仍需要克服时空尺度的差异,不同子系统内部以及不同子系统之间的各个参数相互间的影响,在模型参数敏感性分析中如何考虑,也需要更加深入的研究,方能增强流域水系统模型对变换环境的适应性,以及对不同流域的适用性。

水系统的核心问题是对以水循环为纽带的三大过程(物理过程、人文过程、生物与生物地球化学过程)的互馈机理,不同流域具有不同的特征。本文分析了淮河、鄱阳湖、汉江中下游水系统的不同特点,

淮河流域多闸坝调控下的水环境保护与水生态恢复、鄱阳湖复杂江湖关系下的湿地生态保护和汉江大型水利工程影响下的水生态恢复等,均具有代表性。我国幅员辽阔,流域特征千变万化,在重大水利工程及国家、区域、流域的决策规划中,必须将全球变化的影响,尤其是气候变化及人类活动等因素的影响考虑在内,迫切需要深入研究水系统理论,加强水系统模拟的推广应用;在水系统理论与应用研究中,通过对以水循环为纽带的三大过程(物理过程、人文过程、生物与生物地球化学过程)的基本参数的观测及机理研究,构建多要素、多过程、多尺度双向反馈回路耦合模型,建立流域水系统综合模拟平台;分析人口基本需求、社会经济发展消耗及生态环境保护 and 恢复三者之间的用水矛盾,量化人为调控及环境治理工程的社会及生态后果,交叉应用自然科学及社会科学,建立决策者与科研工作者之间、供需双方之间的对话机制,是水系统理论与方法在变化环境下流域水资源可持续利用规划与决策管理中应用推广的重要途径。

### 参考文献(References):

- [1] ZALEWSKI M, JANAUER G A, JOLANKAI G. Ecohydrology: a new paradigm for the sustainable use of aquatic resources[J]. Paris: UNESCO (Technical Documents in Hydrology 7), 1997.
- [2] ZALEWSKI M. Ecohydrology the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources[J]. Guest Editorial, Ecological Engineering, 2000 (16): 1-8. DOI: 10.1016/s0925-8574(00)00071-9.
- [3] RODRIGUEZ-ITURBE I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate soil vegetation dynamics [J]. Water Resources Research, 2000, 36(1): 3-9. DOI: 10.1029/1999wr900210.
- [4] ZALEWSKI M. Ecohydrology-the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources[J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(5): 823-832. DOI: 10.1080/02626660209492986.
- [5] SIVAPALAN M, SAVENIJE H H G, BLÖSCHL G. Sociohydrology: A new science of people and water [J]. Hydrological Processes, 2012(26): 1270-1276. DOI: 10.1002/hyp.8426.
- [6] MCMILLAN H, MONTANARI A, CUDENNEC C, et al. Parata Rhei 2013 2015: global perspectives on hydrology, society and change[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(7): 1174-1191. DOI: 10.1080/02626667.2016.1159308.
- [7] JAGER J. The International human dimensions programme on global environmental change (IHDP)[J]. Global Environmental Change, 2003 (13): 69-73. DOI: 10.1016/s0959-3780(02)00081-x.
- [8] GWSP (Global Water System Project) (2005) The Global Water System Project: science framework and implementation activities. Earth System Science Partnership. Global Water Sys-

- tem Project Office. Bonn, Germany. <http://www.gwsp.org> [19]
- [9] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE HHG, et al. Panat Rhei Everything Flows: Change in hydrology and society The IAHS Scientific Decade 2013-2022 [J]. Hydrological Sciences Journal/ journal Des Sciences Hydrologiques, 2013, 58 (6): 1256-1275. DOI: 10.1080/02626667.2013.809088.
- [10] SAVENIJE HHG, RHEI P. The new science decade of IAHS [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 366: 20-22. DOI: 10.5194/piahs.366.20.2015.
- [11] JIMENEZ CISNEROS B. Responding to the challenges of water security: the Eighth Phase of the International Hydrological Programme, 2014-2021 [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 366: 10-19. DOI: 10.5194/piahs.366.10.2015.
- [12] FE (Future Earth). Future Earth Strategic Research Agenda 2014 [R]. International Council for Science (ICSU), 2014. ISBN 978-0-930357-96-2. Paris.
- [13] 夏军, 苏人琼, 合希吾, 等. 中国水资源问题与对策建议 [J]. 中国科学院院刊, 2008, 23(2): 116-120. (XIA J, SU R Q, HE X W, et al. Water resources problems in China and their countermeasures and suggestions [J]. Bull Chin Acad Sci, 2008 (23): 116-120. (in Chinese)) DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2008.02.007.
- [14] 夏军. 跨流域调水及其对陆地水循环及水资源安全影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(6): 8-20. (XIA J. Impact of water diversion project across basins on land water cycle and water security [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(6): 8-20. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2009.06.003.
- [15] 夏军, 刘春霖, 任国玉, 等. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12. (XIA J, LIU C Z, REN G Y, et al. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(1): 1-12. (in Chinese)) DOI: 10.11867/j.issn.1005-8166.2011.01.0001.
- [16] 夏军. 我国水资源管理与水系统科学发展的机遇与挑战 [J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版), 2011, 13(4): 394-398. (XIA J. Opportunity and challenge: management of water resources and science of water system in China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University (Social Sciences Edition), 2011, 13(4): 394-398. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-9713.2011.04.003.
- [17] ELSHAFEI Y, SIVAPALAN M, TONTS M, et al. A prototype framework for models of socio hydrology: identification of key feedback loops and parameterisation approach [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2014, 18 (6): 2141-2166. DOI: 10.5194/hess-18-2141-2014.
- [18] VAN EMMERIK T H M, LI Z, SIVAPALAN M, et al. Socio hydrologic modeling to understand and mediate the competition for water between agriculture development and environmental health: Murrumbidgee River basin, Australia [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18 (10): 4239-4259. DOI: 10.5194/hess-18-4239-2014.
- [19] FENG M, LIU P, LI Z, et al. Modeling the nexus across water supply, power generation and environment systems using the system dynamics approach: Hehuang Region, China [J]. Journal of Hydrology, 2016. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.10.011.
- [20] HALE R L, ARMSTRONG A, BAKER M A, et al. iSAW: integrating structure, actors, and water to study socio hydro ecological systems [J]. Earth's Future, 2015, 110-132. DOI: 10.1002/2014ef000295.
- [21] 张翔, 李良, 吴绍飞. 淮河水量水质联合调度风险分析 [J]. 中国科技论文, 2014, 9(11): 1237-1242. (ZHANG X, LI L, WU S F, Risk analysis of joint operation on water quantity and water quality in Huai River [J]. China Science Paper, 2014, 9(11): 1237-1242. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2014.11.006.
- [22] 吴绍飞, 张翔, 邵全喜, 等. 不同流量情景径流对水质组合事件发生概率的影响研究——以淮河流域蚌埠闸为例 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(4): 669-679. (WU S F, ZHANG X, SHAO Q X, et al. Impact of river flow on water quality combination events under different scenarios: A case of Bengbu sluice in Huai River Basin [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015(4): 669-679. (in Chinese)) DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2015.04.003.
- [23] 孟钰, 张翔, 夏军, 等. 水文变异下淮河长吻鲢生境变化与适宜流量组合推荐 [J]. 水利学报, 2016, 47(5): 626-634. (MENG Y, ZHANG X, XIA J, et al. Definition of environmental flow components for leiocassis longirostris in the Huai River considering habitat change and hydrological change [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(5): 626-634. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150525.
- [24] 罗蔚, 张翔, 邓志民, 等. 近 50 年鄱阳湖流域入湖总水量变化与旱涝急转规律分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 845-856. (LUO W, ZHANG X, DENG Z M, et al. Variation of the total runoff into Poyang Lake and drought-flood abrupt alternation during the past 50 years [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 845-856. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2013.05.005.
- [25] DENG Z M, ZHANG X, XIAO Y. The evolution of Poyang Lake wetland hydroecology [C]. Communications in Computer & Information Science, 2013, 398: 235-24. DOI: 10.1007/978-3-642-45025-9\_25.
- [26] 邓志民, 张翔, 罗蔚, 等. 鄱阳湖湿地苔草对水位变化的响应 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2014(5): 865-876. (DENG Z M, ZHANG X, LUO W, et al. Response of Poyang Lake wetland carex to the water level change [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014(5): 865-876. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2014.05.003.
- [27] 张翔, 邓志民, 潘国艳, 等. 鄱阳湖湿地土壤水稳定同位素变化特征 [J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7580-7588. (ZHANG X, DENG Z M, PAN G Y, et al. Variation in stable isotope composition in soil water in Poyang Lake Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7580-7588. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201404160739.

- 值模拟及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014(3): 17-23. (WU Z H, FU S S, LU O H, et al. Two dimensional numerical simulation and its application of water transfer in Nanji Lake of South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(3): 17-23. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nslr.dqk.2014.03.004.
- [13] 宋月清, 林仁. 水泵起动过程中泵站前池水位降落值的分析[J]. 水利学报, 1999(5): 71-76. (SONG Y Q, LIN R. Analysis on forebay water level depression during starting of pump station[J]. Journal of Hydraulic Engineer, 1999(5): 71-76. (in Chinese))
- [14] 张万台, 路明利, 吴秀云, 等. 引滦工程尔王庄暗渠泵站经济运行方案研究[J]. 水利学报, 2004, 35(8): 94-97. (ZHANG W T, LU M L, WU X Y, et al. Optimal operation program for pump station with complicated inlet and outlet[J]. Journal of Hydraulic Engineer, 2004, 35(8): 94-97. (in Chinese))
- [15] 王智勇, 陈永灿, 朱德军, 等. 一维-二维耦合的河湖系统整体水动力模型[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 516-522. (WANG Z Y, CHEN Y C, ZHU D J, et al. 1D-2D coupled hydrodynamic simulation model of river lake system[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 516-522. (in Chinese))
- [16] 陈文龙, 宋利祥, 邢领航, 等. 一维-二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 848-855. (CHEN W L, SONG L X, XING L H, et al. A 1D-2D coupled mathematical model for numerical simulating of flood protected zone[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 848-855. (in Chinese))
- [17] 姜晓明, 李丹勋, 王兴奎. 基于黎曼近似解的溃堤洪水一维-二维耦合数学模型[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 214-221. (JIANG X M, LI D X, WANG X K. Coupled one and two dimensional numerical modeling of levee breach flows using the godunov method[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 214-221. (in Chinese)) DOI: CNKI: 32.1309.P.20120224.019.
- [18] Hydrologic Engineering Center. HEGRAS 2D Modeling User's Manual Version 5.0[M]. Davis, CA: US Army Corps of Engineering, 2016.
- [19] CASULLI V. A high resolution wetting and drying algorithm for free surface hydrodynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 60(4): 391-408.
- [20] Hydrologic Engineering Center. HEGRAS Hydraulic Reference Manual Version 5.0[M]. Davis, CA: US Army Corps of Engineering, 2016.
- [21] 夏维力, 吕晓强. 基于BP神经网络的企业技术创新能力评价及应用研究[J]. 研究与发展管理, 2005, 17(1): 50-54. (XIA W L, LYU X Q. The evaluation and application research about technologic innovation capability of an enterprise based on BP neural network[J]. R&D Management, 2005, 17(1): 50-54. (in Chinese))
- [22] PARROTT A J A, KNOWLES O H. Restoration of tropical moist forests on bauxite mined lands in the Brazilian Amazon[J]. Restoration Ecology, 1999, 7(2): 103-116.
- [23] 李荣丽, 陈志彪, 陈志强, 等. 基于BP神经网络的流域生态恢复度计算——以福建长汀朱溪小流域为例[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1973-1981. (LI R L, CHEN Z B, CHEN Z Q, et al. Calculation of ecological recovery based on BP neural network: A case study of Zhuxi small watershed in Changting County, Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1973-1981. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201305241158.
- [24] 黄志全, 孟令超, 黄向春, 等. 基于数量化理论和BP神经网络的滑坡体积预测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 207-213. (HUANG Z Q, MENG L C, HUANG X C, et al. Prediction of landslide volume based on quantitative theory and BP neural network[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 207-213. (in Chinese)) DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2011.06.006.
- [25] 王恺宁, 王修信. 多植被指数组合的冬小麦遥感估产方法研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017(7): 44-49. (WANG K N, WANG X X. Research on winter wheat yield estimation with the multiply remote sensing vegetation index combination[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017(7): 44-49. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2017.210.

(上接第7页)

- [28] 张翔, 夏军. 气候变化对地表水资源可利用量影响的不确定性分析——以汉江上游为例[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 255-260. (ZHANG X, XIA J. Uncertainty analysis of the impact of climate change on the availability of surface water resources[J]. Resources Science, 2010, 32(2): 255-260. (in Chinese)) DOI: http://192.168.22.105/handle/311030/5600.
- [29] DENG Z M, ZHANG X, LI D, et al. Simulation of land use/land cover change and its effects on the hydrological characteristics of the upper reaches of the Hanjiang Basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(3): 1119-1132. DOI: 10.1007/s12665-014-3465-5.
- [30] 陈燕飞, 张翔. 汉江中下游干流水质变化趋势及持续性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1163-1167. (CHEN Y F, ZHANG X. Long term trends and sustainability trends of water quality in the middle and lower reaches of Hanjiang Main Stream[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7): 1163-1167. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyhj201507012.
- [31] ZHANG X, XIA J. Coupling the hydrological and ecological process to implement the sustainable water resources management in Hanjiang River Basin[J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(11): 3240-3248. DOI: 10.1007/s11431-009-0363-2.