

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2020.01.001

过程水文学的方法框架与学科体系探讨

吴普特^{1,2} 高学睿^{1,2} 卓拉^{1,2} 赵西宁^{1,2} 韩昕雪琦³ 安婷莉³ 高洁^{2,3}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所 陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学旱区节水农业研究院 陕西 杨凌 712100;
3.西北农林科技大学水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于水科学发展历程和实体水-虚拟水耦合流动理论基本框架,指出过程水文学是揭示实体水-虚拟水在复杂系统中耦合流动规律与伴生效应的交叉学科,进一步明确了其科学内涵、主要特征、学科框架、学科基础、方法体系和主要研究方向。在明晰过程水文学科学价值的基础上,认为过程水文学的发展有望解决未来经济社会复杂系统面临的水科学问题。

关键词: 过程水文学; 实体水; 虚拟水; 耦合流动; 伴生效应; 交叉学科

中图分类号: TU122 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2020)01-0001-07

Methodological framework and discipline system for process hydrology

WU Pute^{1,2}, GAO Xuerui^{1,2}, ZHUO La^{1,2}, ZHAO Xining^{1,2}, HAN Xinxueqi³, AN Tingli³, GAO Jie^{2,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the development of hydrology science and the basic framework of physical and virtual water coupled flow theory, this study indicated that the process hydrology is an interdisciplinary that can reveal the coupled flow law and associated effects of physical and virtual water in complicated system. In addition, this study makes a detailed analysis of the scientific connotation, main characteristics, framework, discipline basis, method system and core tasks of process hydrology. Given the theoretical value and practical significance of process hydrology, it can be concluded that the development of process hydrology can provide measures and new views to cope with new challenges in hydrology that the sustainable developments of nature, economy and society faces.

Key words: process hydrology; physical water; virtual water; coupled flows; associated effects; interdisciplinary

自人类诞生以来,水资源一直支撑着人类文明的发展,水问题也一直伴随在人类社会进步的每一个阶段^[1]。人类文明的进步史也是一部悠久的水利史^[2],在一次次人与水的交互和博弈中,治水实践与水科学认识相互融合、螺旋式上升,正是在这一实践与认知过程中水文学应运而生。水文学是研究地球上水的起源、存在、分布、循环运动等变化规律,并运用这些规律为人类服务的知识体系^[3]。陆地水文学是目前发展最迅速、最丰富的水文学分支学科,其发展历程大致可以分为 4 个阶段,如图 1 所示。

在 600 多年的发展历程中,陆地水文学先后经历了启蒙时期、奠基时期、理论发展时期和新发展时期。20 世纪 90 年代以来,基于水科学新概念的不断涌现与认知范式的变革,人-水关系逐渐成为水文学核心问题,标志着水文学进入新发展时期。

基金项目 “十三五”国家重点研发计划(2018YFF0215702); 中国工程院咨询研究项目(2016-ZD-08)

作者简介: 吴普特(1963—)男,教授,博士,主要从事区域农业高效用水研究。E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

引用本文: 吴普特,高学睿,卓拉,等.过程水文学的方法框架与学科体系探讨[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):1-7.

WU Pute, GAO Xuerui, ZHUO La, et al. Methodological framework and discipline system for process hydrology [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(1): 1-7.

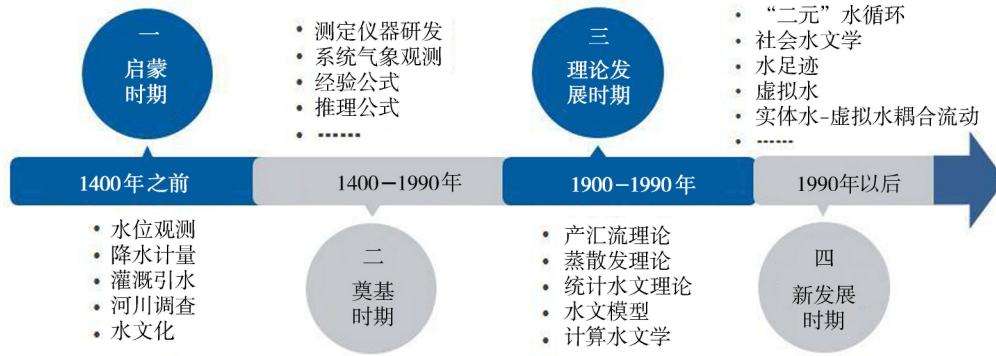


图1 陆地水文学的发展历史及趋势

Fig.1 Developing history and trend of land hydrology

1993年,英国学者Allan^[4]创造性地提出虚拟水概念,揭示了商品贸易中的水科学问题。瑞典水文学家Falkenmark^[5]于1995年提出了“蓝水”和“绿水”的概念,拓展了传统水资源的内涵。2002年,荷兰学者Hoekstra等^[6]提出了水足迹理论,构建了自然-经济-社会系统的水资源取用、转化、消费、污染的全过程评价体系,为水资源可持续利用研究提供了新的抓手。

2006年王浩等^[7]提出“二元”水循环理论,揭示了强人类活动对实体水资源系统的影响,2012年Sivapalan等^[8]提出社会水文学概念,强调人类活动构成了水循环过程另一新的内部驱动因素,标志着以人-水关系为主要研究对象的水文学正式上升到知识体系的高度,为理解和预测新时期人-水耦合系统及其协同进化过程提供了学科基础^[9]。但“二元”水循环理论和社会水文学均聚焦于“自然-人工”系统中实体水的“产生-运移-利用-转化”过程,注重从实体水角度研究人-水系统中的水科学问题,尚未将生产系统和消费系统加以区分。

近年来,随着经济全球化进程加快和区域间贸易规模的不断扩大,内嵌于商品中的虚拟形态水资源通量越来越大,单纯考虑实体水的理论方法似乎并不能完全解决当前的水问题,现有的以实体水为主要研究对象的陆地水文学学科体系亦不能完全满足当前的水资源开发利用和可持续管理需求。虚拟水概念的诞生打破了传统实体水安全保障认知模式,但基于传统学科认知的局限性和复杂系统解析手段的缺陷,目前学术界还没有完全建立基于实体水和虚拟水统一认知的科学理论与方法体系。在贸易全球化背景下,全球范围内出现的越来越多的水问题迫使人们必须从更广泛的视角、采用更全面的方法来应对和调控。在此过程中,实体水-虚拟水耦合流动过程的解析和模拟将成为现代水资源管理学科的重要研究任务。自2016年以来吴普特等^[10-11]先后提出实体水-虚拟水耦合流动理论基本框架和量化方法,为进一步解析实体水和虚拟水循环、转化、流动作用机制、建立全过程量化方法提供了基本思路。上述研究为新时期水科学的发展指明了方向,为自然-经济-社会复杂系统中水文过程的认识开展了重要的前期探索,催生了新的水文学分支(过程水文学)的出现和发展。

1 过程水文学的科学内涵和主要特征

过程水文学是描述陆地上的水以实体水、虚拟水的形式,在自然-经济-社会复杂系统中循环转化、耦合流动过程与规律及其伴生效应的一门交叉学科,涉及哲学、水文学、水资源学、经济学、社会学、工程学、管理学等多学科知识,作为陆地水文学学科的重要分支,是水科学知识体系伴随人类文明和社会生产力发展到新阶段取得的新进展和新成果。

1.1 过程水文学的科学内涵

过程水文学拓展了传统水科学的认知范畴。在人类社会早期发展阶段,地球上的水在重力和太阳能的驱动下呈现天然水文循环状态^[12],无论是区域间实体水调运还是区域间虚拟水贸易的强度都极其微弱,实体水和虚拟水基本上在区域内流动运移,很难发生跨区域的时空分离,实体水-虚拟水的耦合流动效应并不显著(图2)。

无论是早期经典水文学还是现代社会水文学,都聚焦于自然-经济-社会系统中实体水的产生-运移-利

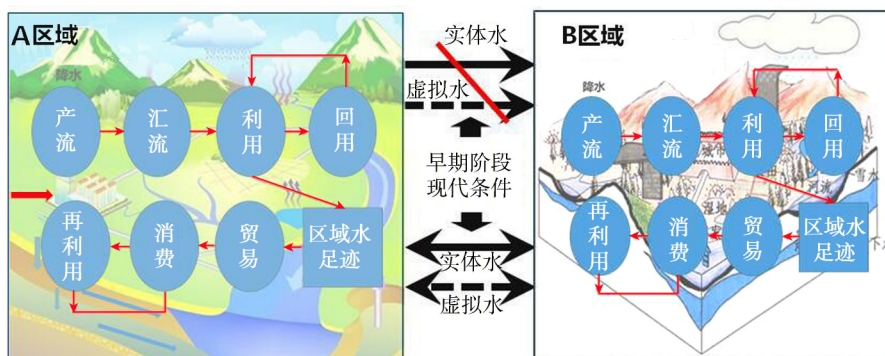


图 2 水资源的二维属性发生时空分离示意图

Fig.2 Schematic diagram of temporal-spatial separation of two-dimensional properties of water resources

用-转化规律。随着社会生产力的提高,特别是 21 世纪以来,全球区域间的联系更紧密,跨流域调水工程和跨区域商品贸易促使实体水和虚拟水在更广时空尺度上流动,从而促使水资源的物理属性(实体水)和贸易属性(虚拟水)在时空上发生了分离,使得实体水-虚拟水耦合流动效应凸显,水科学系统呈现出新特征。过程水文学正是在实体水-虚拟水统筹认知和管理基础上发展起来的新学科。

过程水文学以水在自然-经济-社会复杂系统中的流动路径与过程为基础,从以下 3 个层次揭示实体水-虚拟水在复杂系统中的循环转化、耦合流动和伴生效应:(a) 水在“自然-人工”作用下形成以“降水-广义水资源-取水-耗用水-退排水”为基本路径的实体水循环特征;(b) 水在经济生产过程中被利用,形成以“实体水摄取-实体水消耗-虚拟水嵌入”的基本路径;(c) 在社会系统中嵌入产品的虚拟水作为社会消费主要资源随区域间商品流通形成“虚拟水流动-虚拟水回用”的虚拟水运输路径。

过程水文学的提出和发展拓宽了水科学认知范畴,对研究复杂系统下的水资源利用规律具有独特阐释力,其研究重点是自然-经济-社会复杂系统中的实体水-虚拟水耦合流动过程与伴生效应,其研究范围不仅局限于自然系统的水循环过程,而且进一步延伸到经济系统和人类社会系统,研究的广度进一步深化。

1.2 过程水文学的主要特征

过程水文学坚持实体水和虚拟水并重。传统水科学的研究对象主要聚焦于实体水。基于生命周期理论,实体水的耗散并不是水资源生命周期的结束^[13]。在实体水耗散的同时,水的价值内嵌于产品中,以虚拟水的形式继续在经济社会系统中流动,服务于人类社会和生态系统。因此,在经济全球化背景下水科学研究应创新传统的研究范畴,从实体水和虚拟水 2 个维度才有可能完整认识自然-经济-社会复杂系统的水资源演化和运移规律。过程水文学正是基于以上考虑,将传统水科学研究对象进行拓展,从实体水-虚拟水全生命周期新视角认识水资源在自然-经济-社会复杂系统的流动过程。过程水文学发展了水科学理论,拓展了水文水资源的研究范围,丰富了解决水问题的方法与手段。

过程水文学坚持以过程的观点研究水科学问题。过程水文学的核心理念来源于过程哲学。过程哲学坚持以过程的观点观察自然、认识世界,摒弃了旧唯物主义的实体观,认为宇宙的所有现实存在都是相互联系的,而世界本质上是一个不断生成的动态过程^[14]。一直以来,无论是水文预报还是水资源管理,主流观点是通过概化的经验性方法或趋势分析对流域水文要素进行评价,并对国民经济系统的用水量进行预估,受到数据和方法的限制,在对其复杂系统的子过程及其机理研究方面仍有较大潜力可以挖掘。过程水文学将过程哲学思想引入水科学研究领域,坚持以过程的观点,研究实体水-虚拟水在自然-经济-社会复杂系统的循环转化、耦合流动规律,以期提出针对性调控方案,解决新时期出现的复杂水问题。

过程水文学坚持过程特征与伴生效应统筹考虑。水文水资源过程及其伴生效应是不可分割的有机整体。过程水文学不仅关注实体水-虚拟水在自然-经济-社会复杂系统中循环转化及耦合流动的规律与特征,更关注这一过程所形成的伴生效应,包括资源伴生效应、环境生态伴生效应和经济社会伴生效应等。资源伴生效应主要体现在对区域水文过程的影响,环境生态伴生效应主要体现在水环境、水生态、水景观和水文化等方面,经济社会伴生效应的表现形式是实体水与虚拟水的时空协同互馈演化过程,这一过程及其格局不仅与区域生产力布局和产业结构布局等诸多方面有关,而且对区域经济社会用水需求也会产生显著影响。过程水文学坚持过程特征与伴生效应统筹考虑,以期实现水资源利用在量、质、效 3 个层面的预期目标,进而为

经济社会可持续发展提供科学依据。

2 过程水文学学科框架与方法体系

过程水文学强调水的自然、经济、社会属性并重,重点研究在自然-经济-社会复杂系统中实体水与虚拟水转化过程与机制、耦合流动与伴生效应以及水安全保障模式。

2.1 过程水文学的学科基础

过程水文学是哲学、生态学、水文学、经济学和社会学理论等多学科为基础。

过程水文学基于过程哲学观。过程哲学是后现代思想组成部分,承认人类与自然之间复杂的相互关系、承认事物之间相互依赖,认为每一事物都是关系中的事物、环境中的事件^[15]。过程哲学还原了现代自然系统与人类活动之间关系与发展的本质,同时也是生态学的哲学基础^[16]。水资源作为生态系统关键要素,过程哲学亦应是解决水危机的基本哲学思想与世界观。

过程水文学属水文学分支学科。水文学研究地球上水的起源、存在、分布、循环运动等变化规律^[17],过程水文学将水循环从实体水维度拓展至实体水-虚拟水维度,力求通过解析实体水-虚拟水在自然-经济-社会复杂系统中循环转化、耦合流动与伴生效应,实现水资源科学调控与高效可持续利用的目的。

过程水文学是自然科学与人文社会科学的交叉学科,其不局限于水文学与经济学交叉形成的水资源经济学科的微观经济学思维^[18],也不局限于生态学与社会学交叉形成的环境与自然资源社会学的定性主导思维^[19],而是在以上已有交叉学科基础上,从不同视角在不同时空尺度将水文学、经济学与社会学同时交叉,系统地解决相应过程水文学的科学问题。

2.2 过程水文学的主要研究方向

过程水文学的核心任务是进一步发展实体水-虚拟水耦合流动理论与方法(图3),实现实体水调度与虚拟水贸易调控在水资源管理中的有机统一,保障自然-经济-社会复杂系统中的水安全与水资源可持续利用。过程水文学聚焦以下4个主要研究方向:

a. 实体水-虚拟水循环转化机理。水足迹是实体水-虚拟水循环转化过程的主要量化指标^[11]。开展多时空尺度水足迹精准量化和过程模拟研究^[21],揭示实体水-虚拟水循环转化过程与机制是实体水-虚拟水统筹管理的关键前置性工作。

b. 实体水-虚拟水耦合流动过程。实体水-虚拟水耦合流动格局日趋复杂,与区域水安全密切相关。厘清区域用水单元全产业链实体水-虚拟水流动过程与机理,建立通用解析方法,是实体水-虚拟水统筹管理的重要基础。

c. 实体水-虚拟水流动伴生效应。在解析实体水-虚拟水耦合流动过程的基础上^[22],进一步评价实体水-虚拟水耦合流动伴生的资源、环境生态、经济社会效应,构建相应评价指标体系与标准,是建立区域实体水-虚拟水统筹配置与优化的基本前提。

d. 实体水-虚拟水协同管理模式。创新传统水资源管理方法,提出区域实体水-虚拟水统筹优化协同管理新方法,形成多时空尺度综合水安全保障模式是过程水文学理论与方法应对区域水资源供需矛盾,实现新时期水资源可持续利用的科学方案^[23]。

2.3 过程水文学的研究方法

过程水文学的方法体系借鉴多学科典型研究手段,主要包括实验观测、数值模拟及优化调控等方法(图4)。

实验观测。通过水文观测、田间耗水测量、水环境监测等,探求微观尺度实体水-虚拟水转化过程及水资源消耗伴生效应,是实体水-虚拟水耦合流动过程量化机理的重要研究手段。

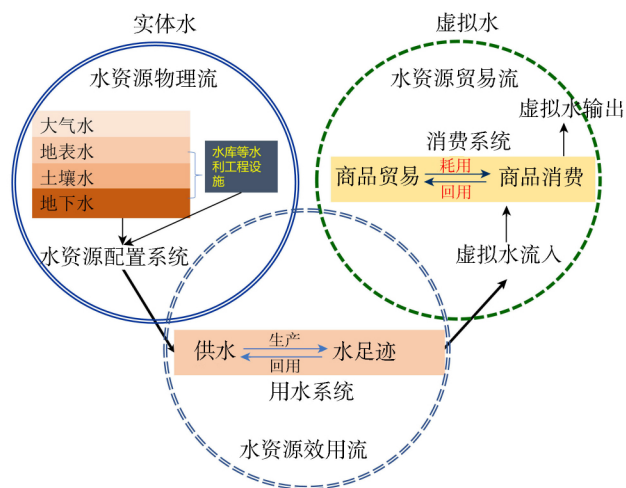


图3 实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动过程路径结构示意图^[20]

Fig.3 Route and structure of coupled flow of physical water and virtual water

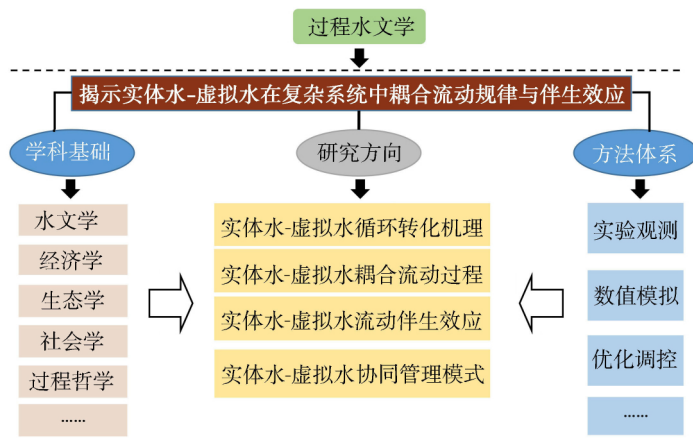


图 4 过程水文学的学科基础、研究重点与方法体系

Fig.4 Discipline basis , research topics and method system of process hydrology

数值模拟。结合水文模型、地理信息系统、经济学模型与社会学模型,实现宏观多时空尺度水文过程定量解析,是实体水-虚拟水耦合流动量化与伴生效应评价的重要基础^[24]。

优化调控。基于由实验观测和数值模拟所解析的实体水-虚拟水耦合流动对变化环境的反馈过程,形成实体水-虚拟水协同调控方法体系,是实体水-虚拟水统筹管理的重要方法支撑。

3 过程水文学的科学价值

在高度市场化和经济全球化的背景下,单纯依靠传统的实体水调控与管理手段并不能完全解决区域甚至全球水问题。实体水-虚拟水统筹管理的科学理念虽然已经逐渐成为水科学的前沿和热点话题和研究方向,但尚未形成统一的科学理论和方法体系,即学科体系,因而也很难为水资源利用管理提供坚实的理论和依据。过程水文学拓展了传统水科学的认知范畴,从实体水-虚拟水 2 个维度拓展了水问题的应对策略与途径,为今后从经济社会全产业链视角管理和调控水资源提供了科学理论和系统的方法手段,为解决自然-经济-社会复杂系统中的水问题提供了新视角和新理论,可有效应对未来人类面临的新的水科学问题。

传统水科学主要聚焦于实体水循环和利用过程^[25-26],过程水文学将实体水-虚拟水统筹调控方法纳入现有的水循环模拟和水资源管理方法体系中,构建了“实体水模拟-虚拟水流动-水资源评价-实体水和虚拟水统筹配置”为模式的新的科学方法框架,丰富了传统的水资源规划与调度方法体系。

过程水文学的核心目标是通过创立和发展实体水-虚拟水统筹管理与调控理论及方法体系,建立区域水安全保障新模式,目的是通过实体水和虚拟水的统筹优化和调控,实现人类经济社会对水资源的竞争性需求和可持续利用。过程水文学框架下,区域水安全保障模式可以用图 5 来表达。

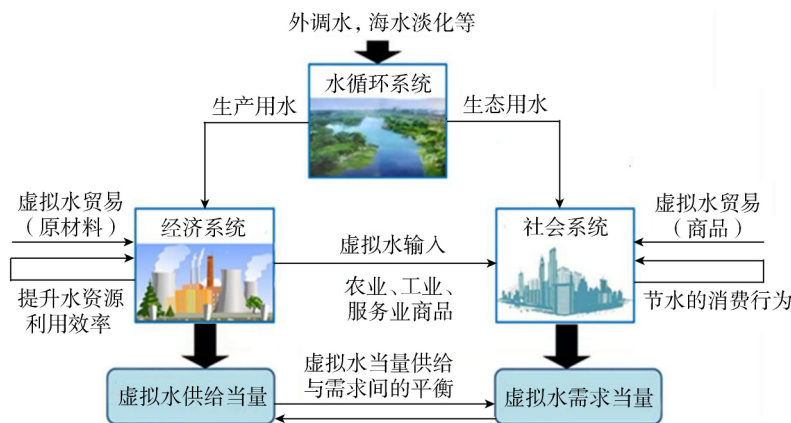


图 5 基于实体水-虚拟水统筹的区域水安全保障模式

Fig.5 Regional water security mode based on physical and virtual water coordination

自然系统中的水资源一部分进入社会系统,供给生态环境用水,另一部分进入经济系统被生产活动利

用。康玲等^[27]基于过程水文学理论,提出通过调整生产-消费结构、合理控制经济社会的实体水消费量以及统筹实体水和虚拟水的全口径水资源优化配置等多种措施,实现区域水资源可持续利用方案,创立基于实体水-虚拟水统筹调控的水安全保障新模式。

4 结论与展望

水科学的发展与人类文明和社会生产力进步息息相关。伴随着经济全球化,水在自然-经济-社会复杂系统中循环、转化、流动过程日趋复杂。世纪之交,随着虚拟水和水足迹概念的产生,水科学认知范畴和知识体系进一步拓展,单纯依靠现实体水调控与管理手段并不能完全解决区域水问题。但基于传统学科认知的局限性和复杂系统解析手段的缺陷,目前学术界尚未建立实体水-虚拟水统筹考虑的水科学理论与方法体系。

本研究在充分总结水科学发展历程的基础上,依据实体水-虚拟水耦合流动理论基本理论框架,指出过程水文学是揭示实体水-虚拟水在复杂系统中耦合流动规律与伴生效应的交叉学科,明确了过程水文学的科学内涵、主要特征、学科框架、学科基础、方法体系和主要研究方向,初步形成了过程水文学的学科体系。最后,在明晰过程水文学科学价值的基础上,认为过程水文学的发展有望解决未来经济社会复杂系统面临的水科学问题。

伴随着经济一体化和贸易全球化的发展,水问题影响范围已不再局限于一个流域或一个国家,水资源压力将伴随贸易活动跨区域传导,由此带来的水问题仅仅依靠传统的实体水规划、调配和管理等手段难以有效解决。建立新的水科学研究范式,拓展传统水科学研究内涵,构建实体水-虚拟水统筹管理理论与方法体系,是新时期水科学领域重要的研究方向和命题。

参考文献:

- [1] 雷社平,阮本清,解建仓.论水与人类文明的历史关系[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2003,3(6):61-65. (LEI Sheping, RUAN Benqing, XIE Jiancang. Function of water resource on human civilization innovation mechanism [J]. Journal of Northwest A & F University (Social Science Edition), 2003, 3(6): 61-65. (in Chinese))
- [2] 邓建明,周萍.浅谈人类文明史各阶段的人水关系[J].水利发展研究,2013,13(9):87-90. (DENG Jianming, ZHOU Ping. Analysis of the relationship between human and water at various stages of human civilization history [J]. Water Resources Development Research, 2013, 13(9): 87-90. (in Chinese))
- [3] 杨大文,徐宗学,李哲,等.水文学研究进展与展望[J].地理科学进展,2018,37(1):36-45. (YANG Dawen, XU Zongxue, LI Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences [J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 36-45. (in Chinese))
- [4] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [C]//ODA. Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: ODA, 1993: 13-26.
- [5] FALKENMARK M. Land-water linkages: a synopsis [J]. FAO Land and Water Bulletin, 1995, 1: 15-16.
- [6] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade [C]//Value of water research report series No. 12. Delft, Netherlands: UNESCO-IHE, 2003: 13-23.
- [7] 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. (WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong, et al. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1496-1502. (in Chinese))
- [8] SIVAPALAN M, SAVENIJE H H G, BOÖSCHL G. Socio-hydrology: a new science of people and water [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1270-1276.
- [9] 陆志翔,WEI Yongping,冯起,等.社会水文学研究进展[J].水科学进展,2016,27(5):772-783. (LU Zhixiang, WEI Yongping, FENG Qi, et al. Progress on socio-hydrology [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 772-783. (in Chinese))
- [10] 吴普特,高学睿,赵西宁,等.实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论基本框架[J].农业工程学报,2016,32(12):1-10. (WU Pute, GAO Xuerui, ZHAO Xining, et al. The basic framework of the two-dimensional ternary coupled flow theory of solid water-virtual water [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 1-10. (in Chinese))
- [11] 吴普特,卓拉,刘艺琳,等.区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价[J].科学通报,2019,64(18):53-66. (WU Pute, ZHUO La, LIU Yilin, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(18): 53-66. (in Chinese))

- [12] 刘家宏, 秦大庸, 王浩, 等. 海河流域二元循环模式及其演化规律[J]. 科学通报, 2010, 55(6): 512-521. (LIU Jiahong, QIN Dayong, WANG Hao, et al. Dualistic water cycle pattern and its evolution in Haihe River Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(6): 512-521. (in Chinese))
- [13] 王瑞波, 姜文来. 水资源生命周期理论初探[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(5): 29-33, 67. (WANG RuiBo, JIANG Wenlai. Study on the life cycle of water resource[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2012, 33(5): 29-33, 67. (in Chinese))
- [14] 杨富斌. 论怀特海的过程哲学观[J]. 求是学刊, 2013, 40(5): 23-32. (YANG Fubin. On Whitehead's viewpoints of process philosophy[J]. Seeking Truth, 2013, 40(5): 23-32. (in Chinese))
- [15] 胜栋. 环境价值: 处理人类与自然关系的新范式[J]. 郑州大学学报(哲学社会科学版), 2007, 40(5): 13-16. (SHENG Dong. Environmental value: a new paradigm for handling the relationship between human and nature[J]. Journal of Zhengzhou University(Philosophy and Social Sciences Edition), 2007, 40(5): 13-16. (in Chinese))
- [16] 李世雁. 生态学: 过程哲学的科学基础[J]. 科学技术与辩证法, 2007, 24(6): 11-13, 34. (LI Shiyan. Ecology: the scientific foundation of process philosophy[J]. Science Technology and Dialectics, 2007, 24(6): 11-13, 34. (in Chinese))
- [17] 徐宗学, 李景玉. 水文科学研究进展的回顾与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 450-459. (XU Zongxue, LI Jingyu. Progress in hydrological sciences: past, present and future[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 450-459. (in Chinese))
- [18] 孙宗凤. 用微观经济学理论对水资源配置中有关问题的新思考[J]. 江苏水利, 2007(12): 12-14. (SUN Zongfeng. New thinking on relevant issues in water resources allocation with microeconomic theory[J]. Jiangsu Water Resources, 2007(12): 12-14. (in Chinese))
- [19] 何玉宏. 生态哲学对社会学的影响与启示[J]. 求索, 2007, 24(1): 141-143. (HE Yuhong. The influence and enlightenment of ecological philosophy on sociology[J]. Seeker, 2007, 24(1): 141-143. (in Chinese))
- [20] GAO Xuerui, SUN Miao, ZHAO Yong, et al. The cognitive framework of the interaction between the physical and virtual water and the strategies for sustainable coupling management[J]. Sustainability, 2019, 11: 2567.
- [21] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 651-660, 669. (WU Pute, SUN Shikun, WANG Yubao, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651-660, 669. (in Chinese))
- [22] 韩雪, 孙才志. 中国主要农产品虚拟水流动格局形成机理研究[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1567-1576. (HAN Xue, SUN Caizhi. Virtual water flow patterns embedded in major crops in China[J]. Resources Science, 2013, 35(8): 1567-1576. (in Chinese))
- [23] 李素丽, 苗慧英, 邢九平, 等. 虚拟水理论在河北省农业用水管理中的战略应用分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4): 153-156. (LI Suli, MIAO Huiying, XING Jiuping, et al. Analysis of strategy application of virtual water theory to agricultural water management in Hebei[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(4): 153-156. (in Chinese))
- [24] 董起广. 泾惠渠灌区水资源健康配置研究及地下水数值模拟[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [25] 甘治国. 水资源系统多维调控技术与应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011.
- [26] 薛联青, 魏卿, 魏光辉. 塔里木河干流地表水与地下水耦合模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 195-201. (XUE Lianqing, WEI Qing, WEI Guanghui. Coupled simulation of surface water and groundwater in the main stream of Tarim River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3): 195-201. (in Chinese))
- [27] 康玲, 张翠萍, 姜铁兵, 等. 面向可持续利用的武汉市水资源优化配置[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(4): 19-22. (KANG Ling, ZHANG Cuiping, JIANG Tiebing, et al. Sustainable utilization oriented optimal allocation to water resources in Wuhan City[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(4): 19-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-08-13 编辑: 高建群)