

DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 01. 001

# 流域综合治理的多维嵌套理论与技术体系

褚俊英<sup>1</sup>, 周祖昊<sup>1</sup>, 王 浩<sup>1</sup>, 戴东宸<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100044;

2. 中建水务环保有限公司, 北京 100037)

**摘要:** 在分析流域综合治理发展历程基础上, 提出了流域综合治理的基本概念, 构建了流域综合治理系统的多维嵌套理论构架, 即主要体现在时间维、空间维、要素维、过程维以及调控维 5 个维度的耦合关联, 提出了流域综合治理的三大关键技术体系: 机理辨识技术体系、定量综合模拟技术体系以及优化决策技术体系, 旨在为我国流域综合治理实践提供支撑。

**关键词:** 水安全; 流域综合治理; 多维嵌套构架; 关键技术体系

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2019)01-0001-05

**Study on multi-dimensional nested theory and technological system for comprehensive watershed management //**  
CHU Junying<sup>1</sup>, ZHOU Zuhao<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, DAI Dongchen<sup>2</sup> (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2. China Construction Water Environment Co., Ltd. Beijing 100037, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the development process of comprehensive watershed management the basic concept of comprehensive watershed management is put forward, and a multi-dimensional nested theoretical framework of comprehensive watershed management system is constructed, including five dimensions of time, space, factor, process and regulation. Three key technical systems of comprehensive watershed management such as mechanism identification technology system, quantitative simulation technology system and optimization decision-making technology system are proposed, providing scientific support for the practices of comprehensive watershed management in China.

**Key words:** water safety; comprehensive watershed management; multi-dimensional nested framework; key technology system

流域作为水系的集水区, 是水文过程和环境生态功能的连续体, 成为具有层次结构和整体功能的复杂动态系统。在气候变化以及高强度人类活动的双重影响下, 我国流域水安全面临极大挑战, 如流域内污染负荷产生强度大、成分多, 污染物的迁移和转化规律极其复杂, 加上流域内经济社会快速发展过程中城市点源污染、面源污染防控措施长期乏力, 导致流域水质恶化, 城市黑臭水体大量存在。此外, 流域还面临水资源短缺、生态系统退化、内涝频发、防洪风险突出、水景观与水文化缺失等多个突出问题。流域水问题本质是流域水循环及其伴随过程的综合体现, 实施流域综合治理已成为我国社会经济可持续发展的重要战略。在流域综合治理的理论与实践方面, 不少学者开展的研究主要集中在流域水资源

水环境综合治理等方面, 关注体制和政策层面的分析<sup>[1-2]</sup>。靖中秋等<sup>[3]</sup>针对北方地区普遍存在的水资源、水环境与水生态问题, 提出了涵盖“点-线-面-管”的流域水环境综合治理模式。总体上, 我国流域综合治理的研究尚处于探索阶段, 迫切需要探索流域综合治理的理论架构与关键技术体系, 为流域综合治理提供支撑。

## 1 流域综合治理的发展历程

20 世纪末至 21 世纪初, 世界上许多国家不断创新流域综合治理体系。流域综合治理可分为 3 个主要阶段: 一是流域水资源开发利用阶段, 水资源具有防洪、供水、航运等单方面或多方面的功能, 为社会经济发展提供支撑与安全保障; 二是高强度社

基金项目: 坪山河干流综合整治及水质提升工程专项课题(CSEEC-PSH-2017-04)

作者简介: 褚俊英(1976—), 女, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事节水、水资源规划与管理等研究。E-mail: jchu@iwhr.com

会经济发展过程中流域水资源与水环境联合治理阶段,该阶段从最初的污染达标排放,逐步发展为面向总量控制的水质恢复,以及河流生态系统的保护与修复;三是面向整体功能的人与自然和谐共生的流域综合治理阶段(图1)。流域综合治理的发展历程具有如下特点:在空间方面,流域水环境治理体系从单纯重视河流自身扩展到整个流域水系;在要素方面,从单一体现水资源要素发展到统筹环境、生态等多个要素;在过程方面,从传统的“末端治理”模式转变为“源头减排、过程阻断、末端治理”多过程治理;在主体方面,从政府主导发展为政府、企业、非政府组织以及社会公众多元化网络治理,形成流域治理产业链。

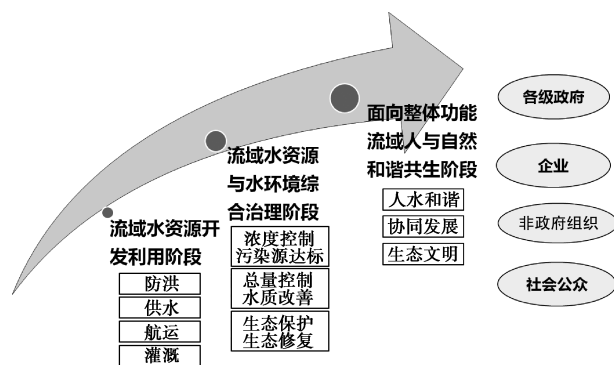


图1 流域综合治理的发展历程

随着气候变化与高强度人类活动,流域水问题日益呈现复杂性、交织性特点,流域综合治理作为解决流域水问题的有效方法,已成为世界上流域生态文明治理与提升生态治理能力的重要举措<sup>[4]</sup>。从基本概念上,流域综合治理是指以流域为基本单元,以流域水循环过程及其伴生过程为主线,充分发挥流域对水循环的天然调节作用,规范人类社会对水土资源的开发活动,减少对自然水循环的扰动,推进流域水信息化建设与智慧决策,实现流域地表-土壤-地下多过程立体化调控,水量、水质、水生态多要素综合调控,最大限度地实现“去极值化”和“系统均衡”目标,建设具有免疫机制的健康生态流域,促进社会经济可持续发展。

## 2 流域综合治理系统的多维嵌套结构

由于流域面临的多种水问题交织、关联、链接,流域综合治理涉及资源、环境、经济、社会等,是复杂动态的适应性系统,具有要素众多、层次复杂、关系错综复杂以及目标功能多样的特征,需充分融合水文水资源学、环境学、生态学、景观学、生物学等多学科专业知识。鉴于当前我国流域普遍面临的水资源短缺、水资源利用效率低下、水污染、水生态退化、水文化缺失等问题相互关联,面向流

域水循环及其伴生过程“时-空-要素-过程-调控”,流域综合治理系统具有多维嵌套结构,主要体现在5个维度的耦合:时间维、空间维、要素维、过程维以及调控维,见图2。

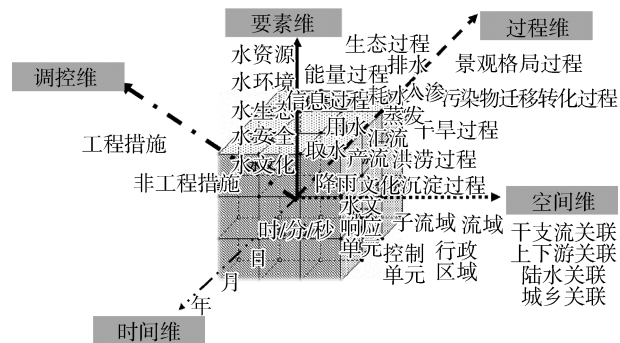


图2 流域综合治理的多维嵌套理论架构

在多维嵌套结构中,不同维度之间密切关联、相互作用、不可分割。表1给出了流域综合治理中要素维与其他维度的关系。如,水环境与水资源两要素密不可分,一方面流域污染物的降解、输移受到流域降水、蒸发、产流与汇流等自然水循环过程以及人类生活、工业和农业废污水排放与处理等社会水循环过程的影响,流域水资源短缺降低水环境容量,导致流域水环境恶化,进一步加剧缺水的矛盾;另一方面,社会水循环中节水与清洁生产措施在提高用水效率、缓解缺水的同时,也降低了水污染负荷强度,废污水深度处理技术的采用也在一定程度上增大了可利用的水资源量。此外,海绵城市建设通过改善城市水循环过程,可以同时起到雨涝调蓄、削减污染物、存储利用水资源、改善水生态系统以及营造水景观的多重效益<sup>[5]</sup>,具有实现多个维度目标的效用。

**a. 时间维。**在时间维度上,流域综合治理可分为宏观上数年或多年尺度(如10年、100年、1000年等),中观上的年、月尺度,以及微观上的日、时、分、秒尺度。如在水环境方面,美国实施的TMDLs(total maximum daily loads)是在满足水质标准的条件下,以日为时间单位给出水体能够接受的某种污染物的最大日负荷量。在水资源方面,我国实施的最严格水资源管理制度中总量控制通常是年尺度,在水资源调度过程中可以细化到月、日、时尺度;在水环境方面,污染物的降解通常考虑到日尺度,在水污染应急调度中可以细化到时、分尺度;在水安全方面,洪水与内涝的研究通常可以细化到分、秒尺度。

**b. 空间维。**在宏观、中观、微观层面上,流域综合治理的空间维度分别为流域或行政区、控制单元、子流域与水文响应单元。从流域水循环及其伴生的完整过程看,流域、子流域、水文响应单元是逐级减少的,控制单元/行政区域是在流域空间分级基础

表1 流域综合治理中要素维与其他维度的关系

要素维	过程维	调控维		时间维	空间维
		工程措施	非工程措施		
水资源	流域水循环过程、水资源利用过程、节水过程、耗水过程等	引调水工程、节水灌溉工程、企业节水改造工程、污水再生利用工程、海水淡化工程、雨水和微咸水利用工程等	如水价制度、水权分配与交易制度、取水许可制度、水资源调度制度、资金优惠制度、公众参与制度等	数年、多年、年、月、日、时等	流域、区域、控制单元、子流域、水文响应单元等
水环境	污染物产生迁移转化过程、河湖水环境演化过程等	污水处理工程、调水引流、截污工程、曝气、生态清淤工程等；水生态方面包括水生态修复工程、生物修复与控制等水生态修复工程、生态-生物修复与控制工程、生态补水工程等	三同时制度、排污收费制度、污水定价制度、排污许可制度、水污染应急调度制度等	年、月、日、时、分等	流域、区域、控制单元、子流域等
水生态	河湖生态系统演替过程、坡面生态系统演替过程等	水生态修复工程、生物修复与控制工程等	地下水开采许可制度等	日、时、分、秒等	流域、区域、控制单元、子流域等
水安全	洪水演进过程、涝水过程、干旱过程等	防洪工程、蓄滞洪区建设工程、海绵体建设工程、排水管网工程、排水泵站工程、应急供水工程	洪水预报制度、洪水保险制度、洪泛区与河道管理制度等	时、分、秒等	流域、区域、控制单元、子流域、水文响应单元等
水文化	文化沉淀过程、景观格局演变过程等	景观带建设工程、景观节点建设工程等	水文化教育、水文化宣传制度等	数年、年等	流域、区域、控制单元、子流域等

上,体现水管理要求进行重新划分。①流域或区域。从流域自然和功能的统一性出发,以流域为单元,上下游、左右岸、干支流的开发利用具有相互影响、相互竞争的关系,应从流域生态系统平衡角度进行统筹考虑。欧盟、新西兰等地区和国家开始实施以流域为基本单元的管理模式,以流域为单元进行综合治理已成为重要发展趋势<sup>[1,6]</sup>。我国应探索建立以流域为基础的流域与区域相结合的管理体制。②控制单元。将复杂的流域水问题分解到控制单元,实施更为精准化和有效的管理,可为目标落实、任务分解、总量控制等提供基础<sup>[7]</sup>。通常,将水质不达标、生态和功能问题突出、存在事故风险和水环境质量下降风险等含有重要饮用水水源、具有重要生态功能以及水质达标难度较大的控制单元作为优先控制单元,进行重点治理和保护。③子流域或水文响应单元。水文响应单元主要是根据流域内的土壤类型、坡度、土地利用等因素划分的具有相同水文特征的最小水文单元<sup>[8]</sup>,是流域水循环模拟的基本单元,其划分情况将对分布式模型精度带来影响<sup>[9]</sup>

c. 要素维。随着社会经济水平的提高以及生态环境意识的增强,人们对流域的需求趋于多样化、层次化。流域面临的水问题交织关联,除了常态的流域缺水、水污染问题,特殊情景下的干旱、洪水、内涝问题也需要引起关注。流域水资源的开发、水害的防治以及水生态功系统功能的恢复具有复杂相关性,为突出合力治水,流域综合治理由单要素治理转变为多要素治理,包括了水资源、水环境、水生态、水安全、水文化等多方面,如欧洲莱茵河流域的综合治

理考虑了污染源控制与水环境治理、水生态保护(鲑鱼产卵与洄游)、水资源利用以及防洪减灾等多个方面<sup>[10]</sup>;浙江省2013年做出了“五水共治”的战略部署,即“治污水、防洪水、排涝水、保供水、抓节水”的统筹共治;深圳市突出问题导向提出了“五位一体”(水资源、水安全、水环境、水生态、水文化)的理念统领治水工作。

d. 过程维。在宏观尺度上流域综合治理的过程维表现为流域“自然-社会”二元水循环之间的耦合以及其伴生的水生态、水环境、水安全与水文化过程。在中观尺度上,表现在自然水循环和社会水循环分环节、分行业的过程,即自然主循环系统的“降水-坡面-河道-地下”的基本过程及其伴随的污染物迁移转化与生态系统演化过程,以及社会侧支循环系统的“取水-供水-用水-排水”的基本过程及其伴随的污染物迁移转化以及水生态系统演化过程,以及两者之间相互作用的物质、能量、信息传输与交换所带来的干旱过程、洪涝过程、景观格局过程、文化沉淀过程、生态过程等。在微观尺度上,过程维体现为降雨、径流、植被覆盖度、污染物迁移转化系数、生态系统结构和多样性等多个影响因子过程的细致识别。

e. 调控维。流域综合治理措施维包括措施集合、实施主体、实施机制等方面。①从措施集合看,流域综合治理可分为工程措施、非工程措施,工程措施见表1。非工程措施主要包括行政许可制度、价格制度、参与制度、宣传制度以及融资制度等<sup>[11]</sup>。②从实施主体看,流域综合治理措施实施主体包括

各级政府、企业、非政府组织以及社会公众等,不断构建网络化治理结构和实施链条,将治理目标落实到每个利益相关者<sup>[12]</sup>。世界流域综合治理经历了从部门各自为政向跨部门、跨地区综合治理转变,是法律法规制度不断完善的过程,其中建立了集权管理、分散管理或综合管理模式<sup>[13]</sup>。③从实施机制看,流域综合治理可分为政府主导、市场化以及社会自治等治理机制<sup>[1]</sup>,政府和社会资本合作模式在流域综合治理中日益得到广泛应用。

### 3 流域综合治理的关键技术体系

我国不同流域面临的水问题有所不同,如,海河流域主要存在水量短缺、河道断流、水体污染和湿地萎缩等问题;珠江流域存在着局部河段水污染严重、河流生境阻隔、湿地资源衰退、生物多样性降低等问题;太湖流域面临着防洪、水污染、水生态破坏等问题;西北诸河面临河湖萎缩、天然绿洲退化、生物多样性降低及生态系统失衡等问题。以流域面临的这些突出问题为导向,系统建立流域综合治理的关键技术体系尤为重要。流域综合治理的关键技术体系可以归纳为三类:流域水循环及其伴生过程机理辨识技术体系、流域综合治理全要素多过程综合模拟技术体系以及流域综合治理优化决策技术体系,分别为流域综合治理提供理论基础、定量工具以及决策支持。这三大技术体系之间耦合关联、互为支撑反馈,见图3。

#### 3.1 机理辨识技术体系

流域水循环及其伴生过程机理的识别,是科学认识流域水安全问题的重要基础和前提。流域综合治理机理辨识技术体系主要包括流域水循环及其演化机理、流域水资源供需规律与配置原理、流域水污染物迁移转化机理、流域水生态结构、功能与过程机理、流域洪水过程与内涝演化机理、流域水文化变迁机制等方面及其动态耦合、关联机制。总体上,流域水循环大量可靠信息的获取通常是流域综合治理各项机理识别的关键,将与云计算、大数据等高新技术不断融合。

#### 3.2 综合模拟技术体系

流域综合治理的定量模拟,是指综合考虑流域时间、空间、过程、要素、措施等不同维度参数特征,对流域水循环及其伴随过程进行定量模拟,评估不同措施所带来的效果与影响。各流域所面临的主导问题不同,模拟的关注点也明显不同,但通常水质水量过程是核心。流域综合治理定量综合模拟技术体系具体包括:流域分布式水循环模拟、流域水资源供需模拟与优化配置、流域污染负荷迁移转化模拟、流域水质过程模拟、基于遥感的流域生态需水模拟、流域洪水过程与风险模拟、面向低影响措施的内涝积水过程模拟、流域水文化传播的社会学模拟等多个模块及其综合集成。总体上,与遥感技术、地理信息系统耦合,实现全要素、多过程的综合耦合模拟,着力体现变化环境下的不确定性,为水问题诊

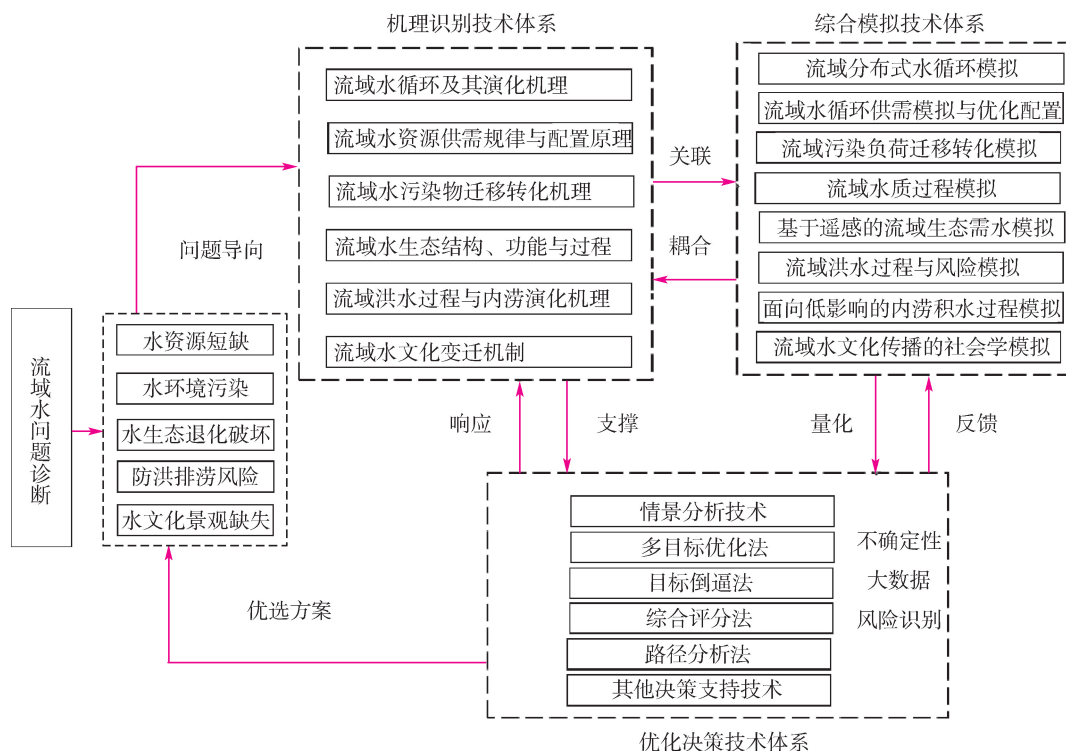


图3 流域综合治理的关键技术体系结构

断、措施优选以及效果评估提供支撑,是流域综合治理定量综合模拟技术的发展趋势<sup>[14]</sup>。

### 3.3 优化决策技术体系

如何利用系统工程理论,权衡多种流域综合治理措施的科学性和经济性,是决定流域治理成败的关键。代表性的优化决策技术有:①情景分析法。即通过设置多种情景,对流域综合治理的措施进行比较,确定最优方案。如刘起方等<sup>[15]</sup>构建了进化博弈模型,以淮河流域为例对政府两种管理情景(即关停、罚款)对企业水污染治理行为带来的效果进行了评价和论证。②多目标优化法。曹寅白等<sup>[16]</sup>提出了多维临界调控的准则与模型,给出不同维度目标函数与权衡机制,以海河流域为例进行不同方案的评价与优选。③目标倒逼法。流域综合治理确定了水质、水资源、水生态、水安全等多维目标后,通过计算水环境容量倒逼污染物削减量,通过优化配置计算水资源供给量,通过防洪排涝目标要求给出防洪排涝方案等,协调优化给出项目清单并进行投资估算。④综合评分法。通过对不同措施的重要性程度确定指标权重和评分<sup>[17]</sup>,结合聚类分析或模糊算法确定流域综合治理措施的优先次序<sup>[4]</sup>,或对实施的治理措施的效应进行评估<sup>[18]</sup>。⑤路径分析法。将正向算法中的控制参数由连续变量进行离散化,通过路径分析提高了优化方案的针对性和可行性<sup>[19]</sup>。

这些决策优化技术可归纳为主观经验法、统计分析法以及定量模拟法。随着空间分析、信息技术的不断发展,复杂适应系统理论方法与整体分析模型被提出,使得不确定性决策技术、风险决策以及交互式决策技术以及大数据决策技术等等现代新决策技术日益在流域综合治理水资源、水环境、水生态等多个维度得到发展和应用,为流域综合治理的决策提供必要的支持。

## 4 结语

流域综合治理是解决流域性水问题的有效方法,是构建生态文明治理体系和提升生态治理能力现代化的重要组成部分。本文构建的流域综合治理系统多维嵌套结构和流域综合治理三大关键技术体系可为我国流域综合治理实践提供科学支撑。

### 参考文献:

[1] 范兆轶,刘莉,国外流域水环境综合治理经验及启示[J]. 环境与可持续发展,2013(1):81-84. (FAN Zhaoyi, LIU Li. Foreign expertise reference of watershed system management [J]. Environment and Sustainable

Development,2013(1):81-84. (in Chinese))

- [2] 陆桂华,张建华. 太湖水环境综合治理的现状、问题及对策[J]. 水资源保护,2014,30(2):67-69. (LU Guihua,ZHANG Jianhua. Present status and problems of comprehensive treatment of water environment in Taihu Lake and countermeasures [J]. Water Resources Protection,2014,30(2):67-69. (in Chinese))
- [3] 靖中秋,于鲁冀,梁亦欣,等. 北方地区流域水环境综合治理模式研究与实践[J]. 水污染防治,2018,36(5):45-48. (JING Zhongqiu, YU Luji, LIANG Yixin, et al. Research and practice of watershed environment comprehensive management mode in the northern region of China[J]. Environmental Engineering,2018,36(5):45-48. (in Chinese))
- [4] QIN Huapeng, SU Qiong, KHU S T. An integrated model for water management in a rapidly urbanizing catchment [J]. Environmental Modelling & Software,2011,26:1502-1514.
- [5] 李兰,李锋.“海绵城市”建设的关键科学问题与思考[J]. 生态学报,2018,38(7):2599-2606. (LI Lan, LI Feng. The key scientific issues and thinking on the construction of“Sponge City”[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(7):2599-2606. (in Chinese))
- [6] 高爽,祝栋林,车前进. 基于流域视角的水环境综合治理规划研究:以江苏省淀山湖为例[J]. 中国环境管理,2015(5):54-60. (GAO Shuang, ZHU Donglin, CHE Qianjin. Watershed perspective based integrated management of water environment: a case study of Dianshan Basin in Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2015(5):54-60. (in Chinese))
- [7] 雷坤,孟伟,乔飞,等. 控制单元水质目标管理技术及应用案例研究[J]. 中国工程科学,2013,15(3):62-69. (LEI Kun, MENG Wei, QIAO Fei, et al. Study and application of the technology on water quality target management for control unit [J]. Engineering Sciences, 2013,15(3):62-69. (in Chinese))
- [8] 陈祥义,肖文发,黄志霖,等. 空间数据对分布式水文模型 SWAT 流域水文模拟精度的影响[J]. 中国水土保持科学,2016,14(1):138-143. (CHEN Xiangyi, XIAO Wenfa, HUANG Zhilin, et al. Impact of spatial data on the accuracy of watershed hydrological simulation of SWAT model[J]. Science of Soil and Water Conservation,2016,14(1):138-143. (in Chinese))
- [9] 宁吉才,刘高焕,刘庆生,等. 水文响应单元空间离散化及 SWAT 模型改进[J]. 水科学进展,2012,23(1):14-20. (NING Jicai, LIU Gaohuan, LIU Qingsheng, et al. Spatial discretization of hydrological response units and improved SWAT model[J]. Advances in Water Science, 2012,23(1):14-20. (in Chinese))

(下转第 13 页)

- 410-416. ( LI Zehong, DONG Suocheng, LI Yu, et al. Dynamic analysis on agricultural water footprint and its driving mechanism in Wuwei Oasis [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(3): 410-416. (in Chinese) )
- [22] 孙世坤,王玉宝,吴普特,等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 142-148. ( SUN Shikun, WANG Yubao, WU Pute, et al. Spatial variability and attribution analysis of water footprint of wheat in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 142-148. (in Chinese) )
- [23] 郭相平,高爽,吴梦洋,等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 295-302. ( GUO Xiangping, GAO Shuang, WU Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 295-302. (in Chinese) )
- [24] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint manual; setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011: 40-42.
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [26] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G, et al. The water footprint of cotton consumption; an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries [J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186-203.
- [27] 蔡甲冰,刘钰,许迪等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 83-90. ( CAI Jiabing, LIU Yu, XU Di, et al. Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 83-90. (in Chinese) )
- [28] 赵四申,王秀,高清海,等. 不同机械施肥方式对玉米生长发育及产量效应的影响[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 123-127. ( ZHAO Sishen, WANG Xiu, GAO Qinghai, et al. Effect of different mechanical fertilization patterns on maize growth and yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(3): 123-127. (in Chinese) )

(收稿日期:2018-10-09 编辑:熊水斌)

(上接第5页)

- [10] 王同生. 莱茵河的水资源保护和流域治理[J]. 水资源保护, 2002(4): 60-62. ( WANG Tongsheng. Water resources protection for Rhine River and management of the river basin [J]. Water Resources Protection, 2002(4): 60-62. (in Chinese) )
- [11] CHU Junying, WANG Hao, WANG Can. Exploring price effects on the residential water conservation technology diffusion process; a case study of Tianjin city [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(5): 688-698.
- [12] 刘美玲,石高平. 流域水污染的协作治理研究[J]. 水利经济, 2018, 36(2): 54-58. ( LIU Meiling, SHI Gaoping. Collaborative governance of water pollution in basins [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(2): 54-58. (in Chinese) )
- [13] 杨朝晖,褚俊英,陈宁,等. 国外典型流域水资源综合管理的经验与启示[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 33-37. ( YANG Zhaohui, CHU Junying, CHEN Ning, et al. Experiences and lessons of integrated water resources management in typical watersheds abroad [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 33-37. (in Chinese) )
- [14] LEE J G, SELVAKUMAR A, ALVI K et al. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices [J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 37: 6-18.
- [15] 刘起方,马光文,刘群英. 流域水污染治理模式的进化博弈模型[J]. 水资源保护, 2008, 24(3): 69-72. ( LIU Qifang, MA Guangwen, LIU Qunying. Evolutionary game theory for water pollution control in river basins [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(3): 69-72. (in Chinese) )
- [16] 曹寅白,甘泓,汪林,等. 海河流域水循环多为临界整体调控阈值与模式研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [17] CHU Junying, WANG Jianhua, WANG Can. A structure-efficiency based performance evaluation of the urban water cycle in Northern China and its policy [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2015, 104: 1-11
- [18] 余海霞,来勇,李晓龙,等. 杭州城市河道综合治理工程生态环境效应评估指标体系[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 90-94. ( YU Haixia, LAI Yong, LI Xiaolong, et al. Evaluation index system of ecological environmental effect of urban river comprehensive treatment projects in Hangzhou City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 90-94. (in Chinese) )
- [19] 邓义祥,郑一新,富国,等. 路径分析法在滇池流域水污染防治规划中的应用[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 520-526. ( DENG Yixiang, ZHENG Yixin, FU Guo, et al. Application of route analysis method in the water pollution control planning in Lake Dianchi Catchment [J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(4): 520-526. (in Chinese) )

(收稿日期:2018-06-26 编辑:彭桃英)