

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.01.003

# 流域综合治理方案制定的基本理论及技术框架

褚俊英<sup>1</sup>,王浩<sup>1</sup>,周祖昊<sup>1</sup>,王春懿<sup>2</sup>,张海萍<sup>1</sup>,牛存稳<sup>1</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:**针对我国流域综合治理方案制定过程中理论和技术框架缺失问题,从宏观、中观、微观尺度探索提出了流域综合治理方案制定的基础理论,即宏观的可持续发展理论、中观的流域“自然-社会”二元水循环理论以及微观的“木桶理论”;构建了流域综合治理方案制定的基本原则,即流域统筹、单元控制、系统均衡;以流域面临的水问题为导向,系统构建了由机理分析、量化模拟、规划集成和方案确定4个关联耦合层次构成的流域综合治理方案制定技术框架;对流域综合治理方案制定主要层次的未来发展趋势进行了展望。

**关键词:**流域综合治理;治理方案;技术框架;发展趋势

**中图分类号:**TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)01-0018-07

**Basic theory and technical framework for formulation of integrated watershed management plan**//CHU Junying<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, ZHOU Zuhao<sup>1</sup>, WANG Chunyi<sup>2</sup>, ZHANG Haiping<sup>1</sup>, NIU Cunwen<sup>1</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:** In view of the lack of theoretical and technical framework in the process of formulating the integrated watershed management plan in China, the basic theories of making the comprehensive management plan of the river basin are put forward based on the macro, medium and micro-scale exploration, which are the macro sustainable development theory, the middle natural-social dualistic water cycle theory and the micro bucket theory, respectively. The basic principles of the comprehensive management plan of the river basin, such as the overall planning of the river basin, unit control and system balance, are established. Based on the water problems faced by the river basin, the technical framework for formulating the integrated river basin management scheme is constructed, which is composed of mechanism analysis, quantitative simulation, planning integration and programe determination. The future development trend of the main levels of the integrated management scheme of the watershed is prospected.

**Key words:** integrated watershed management; management plan; technical framework; development trend

受全球气候变化以及强人类活动影响,我国面临严峻的流域水安全形势,流域水资源短缺已成为制约社会发展的重要因素,水环境污染,水生态系统面临威胁<sup>[1]</sup>,洪水灾害出现了多发、频发和重发的趋势<sup>[2]</sup>。流域水问题的根本解决具有相当的复杂性、艰巨性和长期性。近些年来,我国陆续发布《水污染防治行动计划》《“十三五”生态环境保护规划》以及《关于全面推行河长制的意见》,实施流域综合治理已成为推进我国生态文明建设的重大举措。在理念方面,流域综合治理强调建设生态海绵

流域实现“去极值、系统化”治理,寻求更为系统性、整体化的解决方案。在模式方面,流域综合治理目标已从传统的水资源单要素扩展为统筹考虑水资源、水环境、水生态、水安全、水文化等多要素;从原有的“末端治理”,转变为“源头减排、过程阻断、末端治理”全过程手段;从原有的政府为主体,转变为“政府监管、企业建管、公众参与”的多元主体模式<sup>[3-4]</sup>。在实践方面,我国流域综合治理项目呈现范围广、资金大、任务重、要素多,涉及专业广、部门多,时间要求紧,过程监管严格等特点<sup>[5-7]</sup>。

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400605);坪山河干流综合整治及水质提升工程专项课题(CSCEC-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

流域综合治理作为一个系统工程,通常包括规划编制(方案制定)、项目建议、可研报告编制、专项评价(如防洪影响评价、水土保持评价、环境影响评价等)、初步设计、施工图设计、工程施工等多个环节。其中,流域综合治理方案的制定尤为重要,实际上,更为详尽和细致的流域综合治理规划,不仅兼顾了流域综合治理规划的长远性、全局性、战略性内容,而且注重实现目标的方案途径,强调针对性和可操作性,是后续流域综合治理工程项目建议和可行性研究报告的关键环节,也是方案设计与工程实施的基础和前提。尽管长期以来学者在流域水资源综合规划、水资源保护规划、防洪规划、排涝规划、给排水规划、雨水利用规划等专项方面开展了大量研究,形成了若干基本理论和技术方法<sup>[8-10]</sup>,鉴于流域综合治理作为我国未来时期推进生态文明建设的创新战略实践,该系统更加凸显耗散性、非线性、动态性等复杂巨系统特征,其方案制定依然处于探索阶段,系统性、规范性有待进一步提升。本文从宏观、中观、微观角度总结了流域综合治理方案制定的3个基础理论,给出了方案制定的基本原则,系统构建了流域综合治理方案制定的层次化技术思路,并对其未来发展趋势进行了展望,旨在为流域综合治理实践提供参考。

## 1 流域综合治理方案制定的基本原理

### 1.1 基础理论

按照空间单元精细化程度与理论指导功能的差异,流域综合治理方案制定的基础理论可分为宏观尺度的可持续发展理论、中观尺度的流域“自然-社会”二元水循环理论以及微观尺度的“木桶理论”。其中,可持续发展理论主要着眼于流域整体的特征,为流域综合治理根本目标与总体策略的设定提供总体指导与依据;流域“自然-社会”二元水循环理论主要着眼于流域自然与社会不同行业的特征,为流域综合治理规划过程中各项调控阈值的设定提供依据;“木桶理论”则主要着眼于流域各个控制单元的特征,为流域综合治理方案的优选提供理论基石。

a. 可持续发展理论。在宏观流域尺度上,可持续发展理论强调经济、社会发展与资源、环境协调统一,树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念,实现社会经济系统与资源环境与生态系统之间的平衡<sup>[11]</sup>。在此理论框架下,流域综合治理方案的确定通常需要在流域当前和未来的人类需求和自然需求之间取得平衡,具有技术、社会与经济可行性<sup>[12]</sup>。该理论为流域综合治理根本目标与总体策略的设定提供依据,促进流域综合治理从传统的粗

放式发展模式转变为高效的自律式发展模式,具体表现为:在价值取向方面,由传统水利功能实用价值向水生态文明价值观的转变;在思维方式方面,由立竿见影的愿景式思维方式向底线型全过程控制的思维方式转变;在治水路线方面,由单一目标、分区治理向流域统筹、系统治理转变,从而促进流域生态文明建设与人水和谐发展。

b. 流域“自然-社会”二元水循环理论。在中观行业尺度上,流域“自然-社会”二元水循环理论为流域综合治理提供了重要支撑。流域水循环在服务功能属性、循环结构、循环路径、驱动力、演变效应等多个方面呈现为“自然”与“社会”二元化的特征与规律。流域“自然-社会”二元水循环失衡是出现流域水问题的根本原因,具体表现为:①随着经济社会的发展,下垫面变化带来流域水资源的衰减,导致资源衰减效应;②流域社会水循环取用水通量的不断增大和强化,挤占了河流、湖泊以及海岸生态系统所需的淡水资源,导致生态效应;③社会水循环过程中伴随的污染物排放,导致环境效应<sup>[13]</sup>。在此理论框架下,流域综合治理应实现二元水循环过程中各要素供给、不同行业用户水循环过程中临界阈值的辨识与科学调控,如确定人类从自然界取、用、耗、排一体化过程中各个环节的水量以及不同污染物通量到底是多少,从而既不影响水循环的整体稳定性,又不损害社会经济和生态环境的健康发展,促进流域各环节、各行业、各要素的均衡与协调<sup>[14-15]</sup>。

c. “木桶理论”。在微观单元尺度上,“木桶理论”为流域综合治理不同方案的比选与优化提供了理论基石。“木桶理论”又称为“短板效应”,是指木桶的盛水量取决于桶壁上最短木板的长度,应不断提升木桶的各木板高度并使之均衡<sup>[16]</sup>。流域面临的水问题大小程度,取决于流域内每个控制单元的节水力度、污染控制程度、生态保护强度、景观文化沉淀以及防洪排涝措施实施状况。基于该理论框架,通过布设流域综合治理多种工程与非工程措施,促进每个控制单元不断克服“短板”、提升效率。在提高内部性方面,各个单元通过水资源合理配置与优化调度,尽可能提高流域控制单元内部最薄弱环节的效率,实现经济社会用水的安全性、生态用水的可靠性、景观文化的延续性;在降低外部性方面,各单元尽可能减少控制单元水资源开发利用过程所带来的突出效应,如洪灾与内涝危机、生态破坏与环境影响,从而提升系统的整体效应。

### 1.2 基本原则

流域综合治理方案制定应始终坚持流域统筹、单元控制、系统均衡三大基本原则,寻找流域综合治

理的优化解决方案,促进流域人水和谐与生态文明。其中,流域统筹是实现流域综合治理目标的前提条件,单元控制是流域综合治理落地的基础支撑,系统均衡是从单元到流域、从局部到整体优化的过程要求。3个原则互联互通,不可分割。

**a. 流域统筹原则。**流域以水循环为纽带驱动水污染、水沙、水盐、水生态等物质和能量循环,是维持生态环境系统平衡的载体,也是水问题产生和治理完整的自然地理单元。坚持流域统筹的原则,流域综合治理应总览流域全局,实现科学安排与通盘筹划,具体包括上下游、干支流、水域与陆域、城市与农村等多空间辨识,水安全、水资源、水环境、水生态、水景观以及水文化等多要素统筹,洪水涝水、产污排污、雨水控用、用水耗水、排水回用等多过程诊断以及源头减排、过程阻断、末端治理等多措施统筹等。

**b. 单元控制原则。**将流域分解成若干小流域,形成多个基本计算单元,有利于促进流域综合治理方案确定的针对性和操作性,提升流域治理的网格化、精细化程度<sup>[17]</sup>。按照流域特征与水问题特点,兼顾干支流、上下游以及左右岸的关系,将复杂的流域划分成既相互独立、又相互联系的基本单元,为流域综合治理措施的落实和管理提供支撑,如龙岗河、坪山河两河流域综合治理方案中进行了3级划分共计28个控制单元<sup>[5]</sup>。流域各计算单元采用分散式生态治理模式,尽可能做到雨洪立体分滞与平衡,污染物的产生和削减平衡,把洪水、污染尽量削减在本地。通过集中与分散结合的方式,把水资源利用、污染物与洪水的“产生-收集-处理-利用”过程结合起来。

**c. 系统均衡原则。**运用系统思维、平衡法则,通过不同时空条件下各控制单元相互依存、相互作用和相互反馈,促进系统整体达到和谐、均衡状态。如坪山河流域上游支流的生态补水通过汇流关系对下游干流的生态水量带来影响,通过比较不同水源(如水库水、再生水)补水方式带来的生态流量改善效果与经济成本大小,可确定上游单元、干流单元各补水方式的优先权<sup>[18]</sup>。由于流域中每个单元中污染负荷来源和数量、治理成本、雨洪强度与过程、生态系统结构与需水特征等方面存在差异,可采取联防联控治策略,使得边际成本和边际效益保持动态均衡,促进系统整体达到最优状态。

## 2 流域综合治理方案制定的层次化技术框架

流域综合治理作为复杂动态大系统,具有要素众多、层次复杂、关系错综以及目标功能多样性的特

征<sup>[3]</sup>。基于流域综合治理的大量实践,以流域面临的水问题为导向,提出流域综合治理方案制定的技术框架,由机理识别、量化模拟、规划集成、实施安排4个层次构成,如图1所示。这些不同的层次之间相互作用、耦合关联、动态反馈,其中,机理识别(L1)是指科学认知流域水循环规律,是流域综合治理方案确定的基础和前提;量化模拟(L2)为流域综合治理规划的调控阈值辨识、不同方案措施的效果评价提供定量技术支撑;规划集成(L3)通过阈值识别,在专项规划基础上进行整合与权衡,提出流域综合治理总体规划策略,为流域综合治理方案确定与实施提供指导与方向;实施安排(L4)是指通过权衡流域综合治理各项措施的经济性、有效性和可操作性,优化确定流域综合治理具体的工程与非工程解决方案、实施安排与保障措施,是流域综合治理方案制定的最终产出。

### 2.1 流域水循环及其伴生过程机理识别与问题辨识

流域水循环及其伴生过程机理识别与问题辨识,是流域综合治理方案制定的基础。从流域的视角,广泛收集流域社会人口、经济发展、土地利用、河湖水系与生态系统、气象水文、地理地貌、暴雨洪水过程、城市内涝特征、景观文化特征等长系列数据与资料,对流域水资源开发利用、流域污染负荷状况、河湖断面水质演变过程、生态系统结构与功能、生态流量保障状况<sup>[19]</sup>、防洪与内涝防治体系、水景观与水文化等演变特征与现状规律进行解析,识别迫切需要解决的流域水问题。在此过程中,除借助已有的历史统计数据与资料报告外,必要时进行现场调查与勘测,选取代表点进行取样化验,有效利用遥感、地理信息系统等现代分析技术已成为趋势。

### 2.2 流域综合治理量化模拟系统构建

基于流域水循环及其伴生过程的机理识别与问题分析,构建流域综合治理的定量模拟系统平台,为合理预测流域水循环及其伴生过程的发展趋势、设定流域综合治理调控阈值、评估综合治理方案的效果提供平台。该平台通常包括流域水量水质子模型、面向生态的流域水资源配置子模型、流域洪涝风险评估子模型、流域综合治理调控措施优选子模型等多个组成。不同子模型之间通过参数、输入与输出变量进行耦合关联,从而体现了流域社会经济系统与资源环境系统之间的动态反馈关系<sup>[20]</sup>。在流域社会经济发展、水文、水资源开发利用、污染防治、防洪排涝、生态系统修复与治理、水管理与水文化特征分析的基础上,利用该平台可以对流域水循环过程及其伴生的水污染、水生态过程进行模拟和预测,得到流域污染物迁移转化与平衡关系、流域洪水过



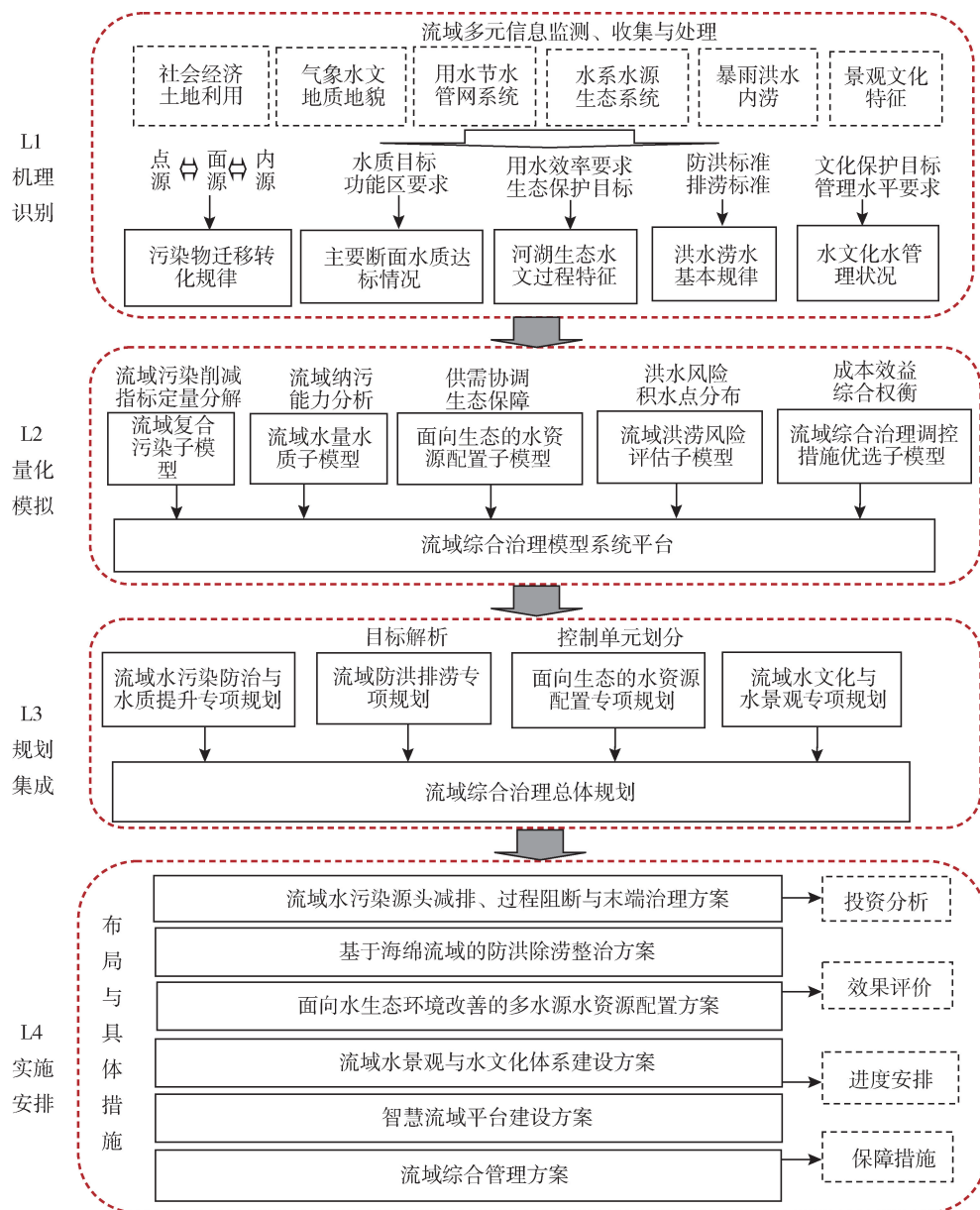


图1 流域综合治理方案制定的技术框架

Fig. 1 Technical framework for the development of integrated watershed management programmes

程与内涝风险分布、流域生态用水过程等量化结果。此外,利用该平台可得出流域不同时期、不同要素、不同过程的调控阈值,并支撑流域综合治理措施实施效果的定量评价。

### 2.3 流域综合治理专项与总体规划

在机理识别和量化模拟的基础上,进行多专业的综合集成,开展流域治理专项与总体规划,通常包括如下内容:①针对流域面临的突出水问题,量化流域综合治理的目标,根据实际情况需要分近中远期并分要素(如水资源、水环境、水生态、水文化、水管理等)提出;②基于流域的水系特征与管理要求,划分控制单元;③依据分要素设定不同控制目标,借助流域综合治理量化模拟系统,识别流域多个控制阈值(如用水总量、耗水总量、排水量、各污染物入河

量、径流控制量等);④综合水文水资源、水环境、防洪排涝、水生态等多要素的专业知识,以问题为导向进行各专项规划,具体包括流域水污染防治与水质提升规划、面向生态环境提升的多水源水资源配置规划、流域防洪排涝安全保障规划以及流域水文化与水景观体系规划等;⑤在各专项规划基础上,运用复杂大系统控制理论,通过归类整合、措施综合等,汇总形成流域综合治理的总体规划,分控制单元、分要素、分时期确定总体调控指标要求,并提出流域综合治理总体规划体系与策略。

### 2.4 流域综合治理的实施安排与效果评价

基于流域综合治理专项与总体规划,权衡流域综合治理中多种措施的经济性、有效性和可操作性,优化提出流域综合治理实施安排,通常包括:①基于

流域综合治理的目标,将规划内容进一步细化到工程措施与非工程措施,进行各项措施的技术、经济参数的信息获取与适用性分析,注重单项技术和集成技术的灵活运用;②借助流域综合治理量化模拟系统(L2),进行不同方案(如源头减排、污水处理、生态修复、生态补水等)的组合优化与效果评估。通常需要构建评价指标体系(如弹性指标、可靠性指标、稳健性指标、经济性指标等),进行多目标优化或权衡。可借助线性与非线性动态规划、人工神经网络、多目标遗传算法等方法求解最优方案或非支配解的帕洛托前沿方案<sup>[21]</sup>。如,Su等<sup>[22]</sup>构建了流域稳健性指数(robustness index)最大化和经济成本最小化的污染负荷控制优化模型,以云南滇池为例采用NSGA-II算法进行求解,给出了流域不同污染控制方案条件下的帕累托目标函数前沿,对流域综合治理总体目标与分项目标的实施效果(如水质、缺水程度、防洪、内涝等多要素)进行动态评价;③根据流域综合治理方案的优化结果,分控制单元、分要素、分时期确定流域综合治理的工程与非工程方案(如流域水污染源头减排、过程阻断与末端治理方案,基于海绵流域的防洪除涝整治方案,面向水生态环境改善的多水源水资源配置方案,流域水景观与水文化体系建设方案,以及智慧流域平台建设方案等),并进一步给出工程项目布局、投资要求、任务分解、进度安排与保障措施等。

### 3 流域综合治理方案制定的趋势展望

#### 3.1 提升不确定条件下机理认知与量化模拟的可靠性

在机理识别与量化模拟层面,由于流域具有土地空间异质性以及人类社会经济活动的动态性,流域综合治理往往以流域水循环为主线,涉及水资源、水环境、水生态等多要素、多过程的内容,其方案确定日益注重多专业(如环保、水利、市政、生态、景观等)的配合与技术整合。受到该系统固有的复杂性特征的影响,流域综合治理的机理认知与量化模拟依然存在着极大不确定性,主要包括:①不可预测性,即信息缺失条件下无法预测复杂系统存在最优的状态<sup>[23]</sup>;②不可量化性,即模型结构和参数由于流域系统过于复杂或认知能力有限而无法很好量化<sup>[24]</sup>。这种复杂性使得综合治理机理识别过程中无法有效利用基于一致性假设的频率分布或主观概率分布信息<sup>[25]</sup>。当前流域综合治理方案的风险分析尚未包含在流域综合治理方案制定中,通常借助量化系统开展确定性条件下方案的可达性评价,导致在实际复杂变化环境条件下方案执行后无法达到

预期效果。如何借助大数据、云平台,充分利用GIS与遥感信息,构建面向不确定性、具有动态适应性的流域综合治理机理认知与量化模型,从而辅助流域综合治理方案的确定和优化,将成为未来研究与实践的重要趋势<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 构建传统与新兴技术综合权衡的规范化体系

在实施安排与效果评价层面,除了传统流域治理技术外,未来随着科学技术的进步与环保产业的发展,节水控源、截污系统、污染处理、生态治理、生态修复、生态补水、生态疏浚等领域的新技术、新产品和新工艺不断涌现<sup>[26]</sup>,特别是绿色基础设施的兴起和发展<sup>[27]</sup>,为流域综合治理整体解决方案的确定提供了多种技术选择。流域综合治理的新产品、技术与设备通常具有见效快、成本低等特点,但在不同流域的适用性、稳定性方面仍需深入论证。在流域综合治理方案确定过程中,需要因地制宜地进行适用性技术、前瞻性技术的综合集成与协调,实现新旧技术的优势互补,为流域综合治理发挥长效提供技术支撑。基于不同流域社会经济与自然条件特点,应构建规范化的适用技术清单,建立兼顾经济成本、技术效果、可靠性与灵活性等多目标的技术综合评价体系<sup>[28]</sup>,指导众多候选技术的综合比选,为流域综合治理方案制定规范化发展提供支撑。

#### 3.3 引入多主体市场化机制,构筑延伸产业化链条

在实施安排与效果评价层面,流域综合治理方案涉及多项工程措施与非工程措施。在政府主导条件下,通过宣传教育鼓励社会公众、企业与其他利益相关方共同参与,发挥其在信息收集、效果评估等方面的积极作用,有利于构建流域综合治理的长效机制。如,永定河流域治理利用市场化模式进行运作,由京津冀晋4省市政府及中国交通建设集团有限公司共同组建“永定河流域投资有限公司”,负责方案的总体实施和投融资运作<sup>[29]</sup>。在流域综合治理方案制定过程中,应在政府严格监管下,推进市场化、产业化运作,不断延伸相关产品与设备采购以及技术服务的产业链条。通过政府与社会资本合作模式,促进各利益方参与并实现共赢,代表性的流域综合治理公私合作PPP市场化模式有EPC总承包模式、BOT模式、TOT模式等<sup>[30-31]</sup>。其中,EPC总承包模式通常具有资金风险小,便于工程管理、进度控制的特点,在流域综合治理方案制定中得到应用。此外,流域生态补偿作为重要经济政策和管理制度,在流域综合治理方案制定中日益得到发展,为流域上下游利益共赢提供了市场化途径<sup>[32]</sup>。

## 4 结 语

宏观尺度的可持续发展理论、中观尺度的流域

“自然-社会”二元水循环理论以及微观尺度的“木桶理论”,是流域综合治理方案制定的基础理论依据。应始终坚持流域统筹、单元控制、系统均衡三大基本原则,以不同流域面临的突出水问题为导向,按照“机理分析、量化模拟、规划集成、实施安排”等层次化的科学逻辑,因地制宜地制定与组织实施流域综合治理方案,从根本上促进流域人水和谐与生态文明建设。流域综合治理系统具有复杂动态大系统的基本特征,其方案制定依然面临极大的不确定性。如何有效提升不确定条件下机理认知与量化模拟可靠性、如何构建传统与新兴技术综合权衡的规范化体系,以及如何引入多主体、构建产业化链条建立长效机制,已成为我国未来流域综合治理方案制定关注的难题与挑战。借助大数据、云平台,充分利用GIS与遥感信息,研发具有动态适应性的流域综合治理机理分析与效果评价模型平台,构建规范化的适用性技术清单,建立考虑经济成本、技术效果、可靠性与灵活性等多目标的技术评价体系,以及通过资本合作模式促进政府、企业与社会公众等利益方积极参与并实现共赢,已成为流域综合治理方案制定的重要发展趋势。

#### 参考文献:

- [1] 彭文启,刘晓波,王雨春,等.流域水环境与生态学研究回顾与展望[J].水利学报,2018,49(9):1055-1067. (PENG Wenqi, LIU Xiaobo, WANG Yuchun, et al. Review and prospect of progress in water environment and water ecology research[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9):1055-1067. (in Chinese))
- [2] 刘宁. 大江大河防洪关键技术问题与挑战[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 19-25. (LIU Ning. Problems and challenges on flood control for large rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 19-25. (in Chinese))
- [3] 褚俊英,周祖昊,王浩,等.流域综合治理的多维嵌套理论与技术体系[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 1-5. (CHU Junying, ZHOU Zuhao, WANG Hao, et al. Study on multi-dimensional nested theory and technological system for comprehensive watershed management[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 1-5. (in Chinese))
- [4] 郑晓,黄涛珍,冯云飞. 基于生态文明的流域治理机制研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2014, (4): 37-40 (ZHEN Xiao, HUANG Taozhen, FENG Yunfei. Research into mechanism of watershed governance based on ecological civilization[J]. Journal of Hohai University(Philosophy and Social Sciences), 2014, (4): 37-40. (in Chinese))
- [5] 季晓翠,王建群,傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 74-79. (JI Xiaocui, WANG Jianqun, FU Jiemin. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 74-79. (in Chinese))
- [6] 张卓群,肖强,王春莉. 大沽河流域综合治理模式分析[J]. 水资源开发与管理, 2018, 12: 1-5. (ZHANG Zhuoqun, XIAO Qiang, WANG Chunli. Analysis on comprehensive control mode of Dagou River Basin[J]. Water Resources Development and Management, 2018, 12: 1-5. (in Chinese))
- [7] 于露. 蒲河流域生态治理与修复实践[J]. 水资源保护, 2017, 33(增刊1): 155-158. (YU Lu. Practice of ecological management and restoration in Puhe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(Sup1): 155-158. (in Chinese))
- [8] 朱党生,张建永,史晓新,等. 现代水资源保护规划技术体系[J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 28-31. (ZHU Dangsheng, ZHANG Jianyong, SHI Xiaoxin, et al. Modern water resources protection planning system[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(5): 28-31. (in Chinese))
- [9] 李原园,李云玲,李爱花. 全国水资源综合规划编制总体思路与技术路线[J]. 中国水利, 2011(23): 36-41. (LI Yuanyuan, LI Yunling, LI Aihua. General idea and technical roadmap of developing National Integrated Water Resources Plan[J]. China Water Resources, 2011(23): 36-41. (in Chinese))
- [10] 金菊良,魏一鸣,付强,等. 城市防洪规划方案的综合评价模型[J]. 水利学报, 2002, 33(11): 20-26. (JIN Juliang, WEI Yiming, FU Qiang, et al. Comprehensive evaluation model for municipal flood control programming schemes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(11): 20-26. (in Chinese))
- [11] World Commission on Environment and Development (WCED). Our common future [M]. Oxford: Oxford University Press, 1987.
- [12] SAID A, SEHLKEB G, STEVENS D K, et al. Exploring an innovative watershed management approach: from feasibility to sustainability[J]. Energy, 2006, 31(13): 2373-2386.
- [13] 王浩,贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226. (WANH Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1219-1226. (in Chinese))
- [14] 褚俊英,桑学锋,严子奇,等. 水资源开发利用总量控制

- 的理论、模式与路径探索[J]. 节水灌溉, 2016(6): 85-89. (CHU Junying, SANG Xuefeng, YAN Ziqi. A Research on theory, pattern and path of total amount control of water resources utilization [J]. Water Saving Irrigation, 2016 (6): 85-89. (in Chinese))
- [15] 邹进. 基于二元水循环及系统熵理论的城市用水配置[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 16-20. (ZOU Jin. Allocation of urban water resources based on dualistic water cycle theory and system entropy [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (2): 16-20. (in Chinese))
- [16] 王建华. 基于社会学的节水型社会建设理论纲要 [C]//中国水利学会 2005 学术年会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [17] 赵越, 王东, 马乐宽, 等. 实施以控制单元为空间基础的流域水污染防治[J]. 环境保护, 2017, 45(24): 13-16. (ZHAO Yue, WANG Dong, MA Lekuan. Taking control unit as the spatial foundation for water pollution prevention and control in river-basins [J]. Environmental Protection, 2017, 45(24): 13-16. (in Chinese))
- [18] YAN Z Q, ZHOU Z H, SANG X F, et al. Water replenishment for ecological flow with an improved water resources allocation model [J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 1152-1165.
- [19] 褚俊英, 严登华, 周祖昊, 等. 基于综合功能辨识的城市河湖生态流量计算模型及应用[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 1357-1368. (CHU Junying, YAN Denghua, ZHOU Zuhao, et al. Ecological flow calculation in urban rivers and lakes base on synthesized ecosystem service function identification: model and application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (11): 1357-1368. (in Chinese))
- [20] PRODANOVIC P, SIMONOVIC S P. An Operational model for support of integrated watershed management [J]. Water Resources Management, 2019, 24(6): 1161-1194.
- [21] WEN C G, LEE C S. A neural network approach to multiobjective optimization for water quality management in a river basin [J]. Water Resources Research, 1998, 34(3): 427-436.
- [22] SU H, DONG F F, LIU Y, et al. Robustness-optimality tradeoff for watershed load reduction decision making under deep uncertainty [J]. Water Resources Management, 2017, 31: 3627-3640.
- [23] MAIER H R, GUILLAUME J H A, van DELDEN H V, et al. An uncertain future, deep uncertainty, scenarios, robustness and adaptation; how do they fit together? [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 81: 154-164.
- [24] GAO L, BRYAN B A, NOLAN M, et al. Robust global sensitivity analysis under deep uncertainty via scenario analysis [J]. Environmental Modelling & Software, 2016 76: 154-166.
- [25] 雷晓辉, 王浩, 廖卫红, 等. 变化环境下气象水文预报研究进展 [J]. 水利学报, 2018, 49(1): 9-18. (LEI Xiaohui, WANG Hao, LIAO Weihong, et al. Advances in hydro-meteorological forecast under changing environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 9-18. (in Chinese))
- [26] LARSEN T A, HOFFMANN S, LÜTHI C et al. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world [J]. Science, 2016, 352: 928-933.
- [27] DHAKAL K P, CHEVALIER L R. Managing urban stormwater for urban sustainability: barriers and policy solutions for green infrastructure application [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 203(1): 171-181.
- [28] GRIT R, JÖRG L, STEFFEN D, et al. Integrated urban water management: development of an adapted management approach [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(2): 709-718.
- [29] 马海玉, 陈占涛. 流域治理投资模式市场化: 永定河流域治理与生态修复案例研究 [J]. 经营与管理, 2018(11): 109-111. (MA Haiyu, CHEN Zhantao. Market-oriented investment model of watershed management: case study of yongding river basin management and ecological restoration [J]. Management and Administration, 2018 (11): 109-111. (in Chinese))
- [30] 庞洪涛, 薛晓飞, 翟丹丹, 等. 流域水环境综合治理 PPP 模式探究 [J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(1): 77-80. (PANG Hongtao, XUE Xiaofei, ZHAI Dandan, et al. Study on PPP model of watershed comprehensive management [J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42 (1): 77-80. (in Chinese))
- [31] 李香云, 罗琳, 王亚杰. 水利项目 PPP 模式实施现状、问题与对策建议 [J]. 水利经济, 2019, 37(5): 27-30. (LI Xiangyun, LUO Lin, WANG Yajie. Implementation status, problems and suggestions for PPP mode of water conservancy projects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5): 27-30. (in Chinese))
- [32] 陈军, 谭显英, 陈祖军. 太湖流域省际边界河湖治理生态补偿机制研究 [J]. 水资源保护, 2012, 28(2): 85-90. (CHEN Jun, TAN Xianying, CHEN Zujun. Ecological compensation mechanism for management of rivers and lakes in inter-provincial border region of Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(2): 85-90. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-04-12 编辑: 彭桃英)