

# 基于河湖水系连通的水资源配置框架

陈睿智<sup>1,2</sup>, 桑燕芳<sup>1</sup>, 王中根<sup>1</sup>, 李宗礼<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 水利部 水利水电规划设计总局, 北京 100120)

**摘要:** 在气候变化、经济持续高速发展的背景下, 水资源形势日趋严峻。通过河湖水系连通工程改变自然水系连通情况, 建立起大范围、跨流域的水资源统筹调配格局, 进行水资源时间和空间上的重新分配, 实现多源互补、丰枯调剂, 成为解决我国水资源配置问题的新途径。相比传统水资源配置, 基于河湖水系连通的水资源配置更多考虑跨流域(区域)水资源合理利用, 涉及更广泛的区域范围和利益群体。基于河湖水系连通的水资源配置的基本特征和原则, 本次研究提出新型水资源配置模式——权益保障与均衡发展模式, 在考虑不同区域、行业、部门利益的前提下, 突出权益保障与均衡发展。同时, 探讨了对河湖水系连通后水资源配置中的主要技术与方法, 包括跨流域水循环过程模拟技术、调水区与受水区丰枯遭遇分析方法、受水区可供水量计算方法等问题。

**关键词:** 河湖水系连通; 水资源配置; 配置模式; 丰枯遭遇

**中图分类号:** TV213.4   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0001-04

## Framework of Water Allocation Based on Interconnected River System Network

CHEN Rui zhi<sup>1,2</sup>, SANG Yan fang<sup>1</sup>, WANG Zhong gen<sup>1</sup>, LI Zong li<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China)

**Abstract:** In the context of global climate change and rapid development of economy, the contradiction between water supply and demand was sharpening. The project of Interconnected River System Network (IRSN) can change the connectivity of nature water system to develop the large scale and inter basin water resources allocation framework, redistribute water resources in time and space, and then realize the multi source complementary and high and low water adjustment, therefore IRSN strategy has become a new approach to solve the water resources allocation issue in China. Compared with the traditional water resources allocation, water resources allocation base on IRSN emphasizes the inter basin water resources utilization, which involves a larger area and benefit group. Based on the characteristics and principle of the water resources allocation through IRSN, a new water resources allocation mode—Rights Protection and Balanced Development Mode is proposed in this paper, and the main techniques and methods of water resources allocation through IRSN are discussed, including the inter basin water cycle simulation, analysis of synchronous asynchronous encounter probability in the water division area and intake area, and the calculation method for available water supply in the water division area.

**Key words:** Interconnected River System Network; water resources allocation; water resources allocation mode; synchronous asynchronous encounter probability

## 1 研究背景

受自然地理环境和季风气候的影响, 我国水资源时空分

布严重不均, 总体上与社会经济发展格局不匹配。受气候变化和人类活动的共同影响, 近几十年来我国水资源的分布正在发生着显著变化, “北少南多”的水资源格局愈加明显<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2013-03-27   修回日期: 2013-06-13   网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.015.html>

基金项目: 水利部 2011 年水利重大课题“河湖连通实践总结与深入推进对策研究”(水重大 2011-8)

作者简介: 陈睿智(1986), 男, 广东汕头人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: chenrz.10s@igsnr.ac.cn

通讯作者: 王中根(1973), 男, 河南潢川人, 研究员, 博士, 主要从事流域水循环模拟与水资源管理研究。E-mail: wangzg@igsnr.ac.cn

大部分缺水地区修建了大量蓄、引、提工程,过度开发利用水资源,引发河道断流、湖泊干涸、湿地萎缩、地下水位下降等严重问题。这些问题已经严重制约着我国社会经济的可持续发展。为保障我国的供水安全,亟需通过工程措施调整和改善自然水系的连通状况,建立起大范围、跨流域(区域)的水资源调配格局,对水资源进行时间和空间上的重新统筹分配,实现多源互补、丰枯调剂,缓解我国水资源短缺的紧张局面。

建国以来我国已兴建了一批跨流域调水工程,例如江南北调工程、引黄济青工程、引滦入津工程等,以及规划建设中的南水北调工程、引汉济渭工程等。根据新形势对水利发展的要求,水利部于 2009 年 10 月召开的全国水利发展“十二五”规划编制工作会议上提出了河湖水系连通战略<sup>[2]</sup>。该战略的实施,将调整和改变自然水系的连通状况,形成引排顺畅、蓄泄得当、丰枯调剂、多源互补、可调可控的江河湖库水网体系。河湖水系连通对水资源配置无疑提出了更高的要求,需要统筹考虑调水区、受水区以及输水区的多方利益协调问题,需要考虑气候变化背景下的调水区与受水区丰枯遭遇问题,因此从科研与管理上,加强基于河湖水系连通水资源配置理论与方法的研究。

目前,国内已有学者针对河湖水系连通开展了一系列研究<sup>[3-9]</sup>。这些研究主要集中在对概念、内涵、分类等方面的探讨,针对河湖水系连通后水资源配置问题的研究仍然较少,研究成果难以有效指导生产实践。因此,在前期研究的基础上<sup>[3-5]</sup>,本文尝试从基本特征、原则、模式、技术与方法等方面来尝试构建基于河湖水系连通的水资源配置框架,为深入开展河湖水系连通实践提供参考。

## 2 基于河湖水系连通的水资源配置模式

### 2.1 基于河湖水系连通的水资源配置基本特征

相比传统水资源配置,基于河湖水系连通的水资源配置更多考虑跨流域(区域)水资源合理利用,涉及更广泛的区域范围和利益群体,具有以下特征。

(1) 配置水源结构更加复杂。河湖水系连通后受水区可供配置的水源增加,除了本地地表水、地下水和中水等水源以外,需要重点考虑河湖水系连通后增加的外调水源,进行多水源统筹配置。

(2) 配置涉及区域范围扩大,利益群体增多。河湖水系连通后水资源配置所涉及的范围从传统的以流域为单元扩展到由调水区和受水区组成的大区域,利益群体从流域范围内的上下游、左右岸、不同行业、不同部门,扩展到由调水区、受水区和输水沿线组成的利益群体,需要协调多方利益。

(3) 配置目标更加合理,强调均衡发展。传统的水资源配置强调对生活用水和生产用水的保障,对生态用水重视不足,往往出现社会经济用水挤占生态环境用水的情况,不利于生态文明建设。河湖水系连通后,受水区可供水量增加,应该更加重视生态环境用水,实现水资源的经济社会和生态环境综合效益最大化。

### 2.2 基于河湖水系连通的水资源配置原则

基于河湖水系连通的水资源配置是传统水资源配置的新发展,应遵循传统水资源配置中公平、高效、可持续利用和第三方无损害等基本原则。公平原则是水资源配置的前提

和基础,要求区域间、行业间、部门间均应公平合理地共享水资源;高效原则要求水资源配置应追求水资源的综合利用效益的最大化;可持续利用原则要求合理调整水资源开发利用方式,确保在不破坏生态环境的前提下公平高效地利用水资源;第三方无损害原则要求在进行水资源配置时,不损害第三方利益。

基于河湖水系连通的水资源配置在上述原则的基础上,还应该考虑河湖水系连通的特殊性,在水资源配置过程中坚持多水源统筹原则:即要从经济、社会、生态与环境效益最大化的目标出发,统筹考虑本地水(河道水、水库水、地下水和其他水源)和外调水在不同区域、行业、用户之间的合理分配。

### 2.3 基于河湖水系连通的水资源配置模式

河湖水系连通后,将形成一个多目标、多功能、多层次、多要素的复杂水网系统。由于河湖水系连通工程的庞大性、连通格局的复杂性、气候变化的不确定性,传统的水资源配置思路已经不能完全满足河湖水系连通后水资源配置的要求。为确保河湖水系连通的水资源调配功能得到充分地发挥,在河湖水系连通水资源配置的基本特征和原则的基础上,本文尝试提出基于河湖水系连通的水资源配置模式——权益保障与均衡发展模式。该模式在重点考虑调水区与受水区丰枯遭遇问题的基础上,突出权益保障与均衡发展。

权益保障指保障调水区、受水区和输水沿线的权益;保障经济社会系统的用水权益(以供定需,提高用水效益)和生态环境系统的用水权益(以需定供,确保最低生态用水)。

均衡发展指在河湖水系连通形成的网络体系基础上,通过多水源、多用户的联合调度,使生活、生产、生态用水在空间、时间、过程上和水量、水质、效益上的得到均衡。

在进行基于河湖水系连通的水资源配置时,应在调水区和受水区水循环过程模拟、丰枯遭遇分析、受水区可供水量计算的基础上,以权益保障与均衡发展为目标构建水资源优化配置模型,以求得基于河湖水系连通的水资源优化配置方案,见图 1。

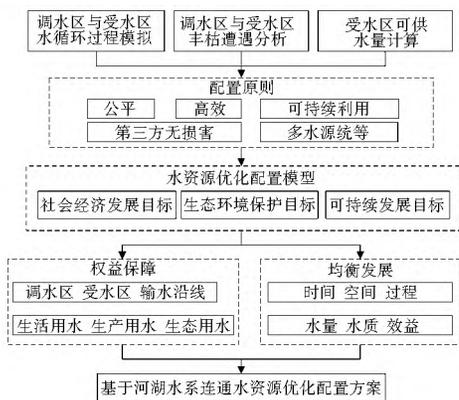


图 1 基于河湖水系连通的水资源配置框架

Fig. 1 Framework of water allocation based on the Interconnected River System Network

## 3 基于河湖水系连通的水资源配置主要技术与方法

为更好地实现水资源配置过程中的权益保障与均衡发

展,需要解决河湖水系连通后水资源配置的主要技术和方法,包括跨流域水循环过程模拟技术、调水区与受水区丰枯遭遇分析方法、受水区可供水量计算方法、基于河湖水系连通的水资源配置概念模型。

### 3.1 跨流域水循环过程模拟技术

水循环过程模拟是水资源配置的重要基础。在进行基于河湖水系连通的水资源配置前,需要对调水区和受水区降水、下垫面等水循环条件过程进行模拟分析,为调水区的可调水量和受水区的可供水量估算提供依据。

传统的流域分布式水文模型以流域为基本单元,缺乏考虑河湖水系连通后涉及的跨流域水量交换因素,不能完全适用于河湖水系连通后的水循环过程模拟。基于河湖水系连通的特点,需在传统分布式水文模型的基础上,考虑调水区和受水区的水量联系,建立跨流域分布式水文模型,模拟水循环条件改变情景下调水区和受水区的产汇流情况,为调水区和受水区的水资源状况进行同步估算提供基础。目前,已有一些分布式水文模型考虑到了跨流域调水的情况,将多个流域视为一个大流域,同时进行产汇流计算,如LDTVGM模型<sup>[10]</sup>、HIMS模型<sup>[11]</sup>等,适用于河湖水系连通后的水循环过程模拟。

### 3.2 调水区与受水区丰枯遭遇分析方法

调水区与受水区丰枯遭遇问题是基于河湖水系连通水资源配置的核心问题。由于基于河湖水系连通的水资源配置涉及跨流域(区域)范围,同一时期内调水区和受水区的水资源丰枯情况具有不确定性。同丰情况可能会造成工程效益无法发挥、水资源浪费,如调度失误甚至会导致洪水风险转移;而同枯情况下,调水量的确定会直接影响到调水区和受水区的基本用水保障。因此,为充分发挥河湖水系连通丰枯互补功能,避免同丰、同枯等极端气候带来的不利影响,在进行基于河湖水系连通的水资源配置前,需要通过丰枯遭遇分析,探明调水区和受水区的丰枯遭遇概率,在不损害调水区和受水区基本权益的前提下确定不同丰枯遭遇情景下调水区的调水量和受水区的水资源配置方案。

进行不同区域的丰枯遭遇概率分析,本质上属于求解具有线性或非线性相关关系的二维变量之间的联合分布。常用的二维变量联合分布模型主要有二维正态分布模型<sup>[12]</sup>、二维对数正态分布模型<sup>[13]</sup>、混合Gumbel模型<sup>[14]</sup>、二维P III分布模型<sup>[15]</sup>、Copula联合分布模型<sup>[16]</sup>等。其中Copula模型是目前丰枯遭遇计算中使用较为广泛、效果较好的方法。该方法是基于变量之间的非线性相关关系而建立的,可以描述变量之间非线性、非对称的相关关系,解决了两变量不一定满足具有相同类型的边缘分布问题,适合分析河湖水系连通水资源配置涉及的跨流域(区域)水资源丰枯遭遇问题。Copula联合分布模型的基本形式如下:

$$F(x, y) = C_{\theta}(F_X(x), F_Y(y)) \quad \forall x, y \quad (1)$$

式中: $X, Y$ 为连续的随机变量,其边缘分布函数分别为 $F_X$ 和 $F_Y$ ;  $C_{\theta}(u_1, u_2)$ 为Copula函数; $F(x, y)$ 为变量 $X$ 和 $Y$ 的联合分布函数; $\theta$ 为待定参数。

### 3.3 受水区可供水量计算方法

可供水量是水资源配置的重要依据。传统水资源配置

在处理河湖水系连通涉及的调水问题时,通常将调水量作为一个固定值,仅考虑本地水资源的不同保证率。这个方法简单易行,但缺乏考虑丰枯遭遇问题,可能会导致水资源配置结果难以满足实际需求、水资源利用效率不高等问题。区别于传统方法,基于河湖水系连通的受水区可供水量计算需要建立在跨流域水循环过程模拟的基础上,重点考虑调水区不同丰枯情景对调水量的影响以及调水区与受水区的丰枯遭遇问题,计算不同丰枯遭遇情景下受水区的可供水量。另外,河湖水系连通后受水区可供水量计算可能会涉及到洪水资源化问题。通过河湖水系连通工程,可将汛期调水区原本无法进行开发利用的部分洪水资源转化为受水区的可供水量。这部分水量需结合河湖水系连通工程的调水能力与调水准则等来确定。

### 3.4 基于河湖水系连通的水资源配置概念模型

考虑到河湖水系连通后水资源配置的基本特征,在构建基于河湖水系连通的水资源配置模型时应突出多水源统筹原则,综合考虑各水源的水质情况、供水成本、供水保证率等各种因素,处理好外调水源和本地水源的供水优先序问题,实现优水优用。此外,与传统的水资源配置相比,基于河湖水系连通的水资源配置更加强调生态用水的保障,因此,在水资源优化配置模型构建过程中,应突出生态环境目标,保障生态环境用水权益。

基于河湖水系连通的水资源优化配置模型目标函数和约束条件设定时应充分体现权益保障与均衡发展。在具体的目标函数设定时,可通过经济效益目标、社会效益目标、生态环境效益目标和可持续发展度目标四个目标函数来协调河湖水系连通后的社会经济用水与生态环境用水的关系。其中,经济效益可用供水净效益来量化;社会效益目标不易度量,可以用区域缺水来间接反映,区域缺水程度直接影响到社会发展和安定,是社会效益的一个侧面反映;生态环境效益可用生态环境用户供水保证率来量化;可持续发展度用于均衡社会经济用水与生态环境用水比例,可利用社会经济用水与生态环境用水比值构建的隶属度函数来量化。为确保不同丰枯遭遇情景下的权益保障与均衡发展,应根据不同丰枯遭遇情景的具体情况设置模型参数。

## 4 结语

河湖水系连通战略是我国新时期提出的一种治水新思路。目前相关实践工作得到广泛开展,但是河湖水系连通的理论研究还十分薄弱,尤其是水资源配置、调度等运行管理方面。本文基于传统水资源配置理论,重点研究了基于河湖水系连通的水资源配置的特征,提出了基于河湖水系连通的水资源配置模式——权益保障与均衡发展模式,并对河湖水系连通后的水资源配置主要技术进行探讨,包括跨流域水循环过程模拟技术、调水区与受水区丰枯遭遇分析方法、受水区可供水量计算方法、基于河湖水系连通的水资源配置概念模型。基于河湖水系连通的水资源配置是一个十分复杂的系统性问题,涉及到广泛的区域范围和利益群体,本文主要是框架性地探讨了河湖水系连通后水资源配置的一些关键问题,具体的生产实践指导理论仍有待深入研究。

## 参考文献(References):

- [1] 夏军,刘昌明,丁永建,等.中国水问题观察(第1卷)[M].北京:科学出版社,2011.(XIA Jun, LIU Chang-ming, Ding Yongjian, et al. Water Issues Vision in China(First Volume)[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 陈雷.关于几个重大水利问题的思考——在全国水利规划计划工作会议上的讲话[J].中国水利,2010,(4): F7.(CHEN Lei. Thinking about Several Major Problems in Water Conservancy[J]. China Water Resources, 2010, (4): F7. (in Chinese))
- [3] 王中根,李宗礼,刘昌明,等.河湖水系连通的理论探讨[J].自然资源学报,2011,26(3): 523-529.(WANG Zhong-gen, LI Zong-li, LIU Chang-ming, et al. Discussion on Water Cycle Mechanism of Interconnected River System Network[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(3): 523-529. (in Chinese))
- [4] 李宗礼,李原园,王中根,等.河湖水系连通研究:概念框架[J].自然资源学报,2011,26(3): 513-522.(LI Zhong-li, LI Yuan-yuan, WANG Zhong-gen, et al. Research on Interconnected River System Network: Conceptual Framework[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 513-522. (in Chinese))
- [5] 李宗礼,郝秀平,王中根,等.河湖水系连通分类体系探讨[J].自然资源学报,2011,26(11): 1975-1982.(LI Zhong-li, HAO Xiur-ping, WANG Zhong-gen, et al. Exploration on Classification of Interconnected River System Network[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(11): 1975-1982. (in Chinese))
- [6] 左其亭,崔国韬.河湖水系连通理论体系框架研究[J].水电能源科学,2012,30(1): F5.(ZUO Qiting, CUI Guotao. Study on Theoretical System and Framework of Interconnected River System Network[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1): F5. (in Chinese))
- [7] 左其亭,马军霞,陶洁.现代水资源管理新思想及和谐论理念[J].资源科学,2011,33(12): 2214-2220.(ZUO Qiting, MA Jun-xia, TAO Jie. New Thoughts of Modern Water Management and Harmony Ideas[J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2214-2220. (in Chinese))
- [8] 李原园,酆建强.河湖水系连通研究的若干问题与挑战[J].资源科学,2011,33(3): 386-391.(LI Yuan-yuan, LI Jian-qiang. Issues and Challenges for the Study of the Interconnected River System Network[J]. Resources Science, 2011, 33(3): 386-391. (in Chinese))
- [9] 夏军,高扬,左其亭,等.河湖水系连通特征及其利弊[J].地理科学进展,2012,31(1): 26-31.(XIA Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics of Interconnected Rivers System and Its Ecological Effects on Water Environment[J]. Progress in Geography, 2012, 31(1): 26-31. (in Chinese))
- [10] 夏军,叶爱中,王蕊,等.跨流域调水的大尺度分布式水文模型研究与应用[J].南水北调与水利科技,2011,9(1): F7.(XIA Jun, YE Aizhong, WANG Rui, et al. Large Scale Distributed Hydrological Model of Inter-basin Water Transfer and its Application[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): F7. (in Chinese))
- [11] 刘昌明,郑红星,王中根,等.基于HIMS的水文过程多尺度综合模拟[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3): 268-273.(LIU Chang-ming, ZHENG Hong-xing, WANG Zhong-gen, et al. Multi-Scale Integrated Simulation of Hydrological Processes Using HIMS with Verified Case Studies[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2010, 46(3): 268-273. (in Chinese))
- [12] SHENG Y. Joint Probability Distribution of Annual Maximum Storm Peaks and Amounts as Represented by Daily Rainfalls[J]. Hydrological Sciences Journal, 2000, 45(2): 315-326.
- [13] 戴昌军,梁忠民.多维联合分布计算方法及其在水文中的应用[J].水利学报,2006,37(2): 160-165.(DAI Chang-jun, LIANG Zhong-min. Computation Methods of Multivariate Joint Probability Distribution and Their Applications in Hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2): 160-165. (in Chinese))
- [14] Yue S. The Gumbel Mixed Model Applied to Storm Frequency Analysis[J]. Water Resources Management, 2000, 14(5): 377-389.
- [15] Yue S. A Bivariate Gamma Distribution for Use in Multivariate Flood Frequency Analysis[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(6): 1033-1045.
- [16] Nelsen R B. An Introduction to Copulas[M]. New York: Springer Verlag, 2006.

## 《南水北调与水利科技》优先数字出版声明

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年起,将《南水北调与水利科技》印刷版期刊出版的定稿论文在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《南水北调与水利科技》编辑部