

文章编号: 0559-9350(2025)08-0981-10

长江黄河跨流域多线路成网互济的调水机制研究 I : 机制与模型

付 湘¹, 赵小丹¹, 彭少明², 范志鹏¹, 王 煜³, 李云玲²

(1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 3. 水利部黄河水利委员会, 河南 郑州 450003)

摘要: 变化环境下长江黄河跨流域多线路成网互济调水机制研究, 对提升黄河流域水资源安全保障能力具有重要的意义。本文针对长江黄河跨流域多线路调水, 统筹南水北调东、中、西三条线路各自特点和优势, 提出长江黄河跨流域成网互济调水机制的定义、总体架构及其组成部分之间的相互作用关系。围绕跨流域水网的多水源供给、多线路互济、多工程调控、多目标冲突、多主体博弈特征, 构建了多尺度、多过程、多要素与多约束的“源-流-网-配”协同优化模型。根据“源-流-网-配”系统的互动特性, 建立保障水网高效运行、水资源空间均衡、社会经济发展和生态健康的协同发展目标, 提出了基于 NSGA-II 和合作博弈的协同优化算法, 以实现水网资源的灵活互济配置。

关键词: 长江; 黄河; 跨流域调水; 成网互济; 调水机制; “源-流-网-配”协同优化

中图分类号: TV68

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20240702

1 研究背景

中共中央、国务院于2023年5月25日印发《国家水网建设规划纲要》, 明确到2035年, 基本形成国家水网总体格局, 通过多源互补、互联互通与有序调控, 构建与社会主义现代化国家相适应的水安全保障体系。联合国组织在主题为“水-促进繁荣与和平”的《2024年联合国世界水发展报告》中指出: 气候变化将加剧全球水循环, 进一步增加干旱灾害的频率和严重程度, 有效和公平的跨境流域水资源配置可以促进投资和收益共享, 最终促进社会繁荣与经济增长^[1]。在全球气候变化条件下, 水资源时空分布不均及其与经济社会发展布局不匹配的趋势正在持续扩大, 因此, 研究水网调控机制对于应对气候变化与人类和谐发展至关重要。

全球跨流域调水工程遍布世界大型河流流域, 如长江、黄河、尼罗河、亚马孙河、密西西比河、多瑙河、恒河等流域^[2]。通过跨流域调水工程, 在时空上重新合理分配水资源, 解决水资源分布不均所引发的一系列社会经济及生态环境问题, 目前国内外关于跨流域调水问题的研究主要围绕水网构建、联合调配和调水影响等方面展开。

水网构建聚焦国家发展战略和水网重大工程建设, 提出水网构建前沿理念和模式。Lee等^[3]提出通过整合信息与通信技术建设智能水网, 实现水资源的智能化调度与双向流控制, 提升管理效率; González-Bravo等^[4]分析水-能源-粮食之间的复杂关系, 优化三者平衡下水网的设计与运行。王建华等^[5]提出智能水网系统是由水物理网、水信息网和水管理网耦合组成的复合系统, 系统探析了水物理

收稿日期: 2024-10-31; 网络首发日期: 2025-07-14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20250712.2023.001>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202300); 国家自然科学基金项目(52479023, U21A2002)

作者简介: 付湘(1971-), 教授, 主要从事水文及水资源研究。E-mail: xfu@whu.edu.cn

通信作者: 赵小丹(2001-), 硕士生, 主要从事水资源配置研究。E-mail: xiaodan.zhao@whu.edu.cn

网、水信息网与水管理网的关键技术与具体建设方向；赵勇等^[6]提出中国“双T”型水网经济格局构想，实现南北方经济水网互联、互通与互济的中国经济发展新态势；夏军等^[7]分析变化环境下中国水资源供需关系，提出从区域“水-土-气-生”及“人-地”关系协调角度优化水网布局；郭旭宁等^[8]从水网“纲、目、结”结构、水网层次体系、水网功能任务等角度，分析国家水网理论内涵与技术框架；左其亭等^[9]从高科技、高效能、高质量、绿色四个维度出发，系统梳理国家水网建设需要把握的关键内容。

跨流域联合调配通过构建跨流域调水工程联合运行的多目标优化模型，实现整体优化。Ma等^[10]构建了原调水区和新增调水区联合向受水区调水的双跨流域调水模型，提出了一个三步框架来推导多水源联合运行的供水、调水和取水规则；Wu等^[11]权衡分析引汉济渭工程生态、经济效益，通过等值线图和函数公式描述多目标函数间的关系，并提出具有可行搜索空间的非支配短粒子群优化算法求解模型；Zhong等^[12]针对江苏段南水北调工程设计了供水和调水规则，建立了基于模拟优化的多目标优化运行模型，显著提高了供水率并减少了弃水量；王煜等^[13]研发考虑南水北调西线调入水量的黄河流域水资源整体优化配置模型，提出黄河流域水资源优化配置和南水北调一期调入水量配置方案；孔波等^[14]建立引汉济渭跨流域调水工程的电站-水库-泵站群多目标优化调度模型，提出综合改进布谷鸟算法，获得发电量、调水量、耗电量三个目标的解集关系；方国华等^[15]以受水区综合缺水率最小和泵站总能耗最小为优化目标，构建“湖泊-闸泵群”联合优化调度模型，提出了湖泊互济互调运行方式；贾丹妮等^[16]针对引汉济渭跨流域调水工程联合运行问题，构建了兼顾调水区枢纽工程运行关键指标和受水区用户侧多目标需求的联合调控模型。

跨流域调水影响主要分析调水工程对河道径流情势、社会经济与生态环境的影响。Liu等^[17]提出了调水的环境影响、经济影响与社会影响的衡量指标，评估调水工程对水源区和受水区的影响；Yang等^[18]建立了梯级多目标互补优化调度模型，量化南水北调西线和大渡河-岷江调水工程对水源区生态和水力发电的影响；Woo等^[19]利用SWAT模型建模，模拟多种转移水量、水污染浓度情景，分析跨流域调水对河流的影响。胡瑞媛等^[20]结合图论与景观格局指数法，从形态、结构、功能三个维度构建水系连通评价指标体系，分析塔里木河干流生态输水工程对水系连通的多维影响；景来红等^[21]分析南水北调西线工程对生态环境的影响，提出了一套涵盖调水规模界定影响评估-风险识别-适应调控的全链条技术体系；范志鹏等^[22]通过构建长江黄河跨流域多线路水网结点概化图，运用D-S证据理论与复杂网络理论，综合评估水网的结点重要性和水网韧性；刘欢等^[23]提出了包含资源层、社会层、经济层和生态层的水与关联要素适配性评价方法，在南水北调中线影响区开展应用分析。

当前国内在跨流域调水成网互济优化领域的研究尚处于起步阶段，整体优化研究较少，对跨流域水网体系诸多要素深层次关系的认识仍有待提升，跨流域水资源联合调配系统优化与整体协同的建模方法和技术研究不足，缺乏对跨流域多线路成网互济机制的深入探讨。

本文针对长江、黄河跨流域水网，提出适应气候变化的跨流域调水成网互济调水机制，建立多尺度、多过程、多要素与多约束的“源-流-网-配”协同优化模型，为水网整体效能提升提供理论技术支撑。

2 成网互济调水机制

成网互济调水机制是水资源调配系统“源-流-网-配”四个方面的总体架构及其相互关系的描述。

2.1 “源-流-网-配”的总体架构 “源-流-网-配”系统通过源源互补、源配协调、流网互动、网配互动等多种交互形式，可以实现水资源最大化利用的运行模式，从而更经济、高效地提高水网系统动态平衡能力。“源-流-网-配”系统内各部分之间的联系如图1所示，含义如下：

(1)“源”即水源，包括当地水与外调水。当地水分为地表水、地下水、非常规水；外调水取决于地区引调水工程，本研究外调水主要有南水北调水、黄河水。多水源利用按照“合理开发地表水，

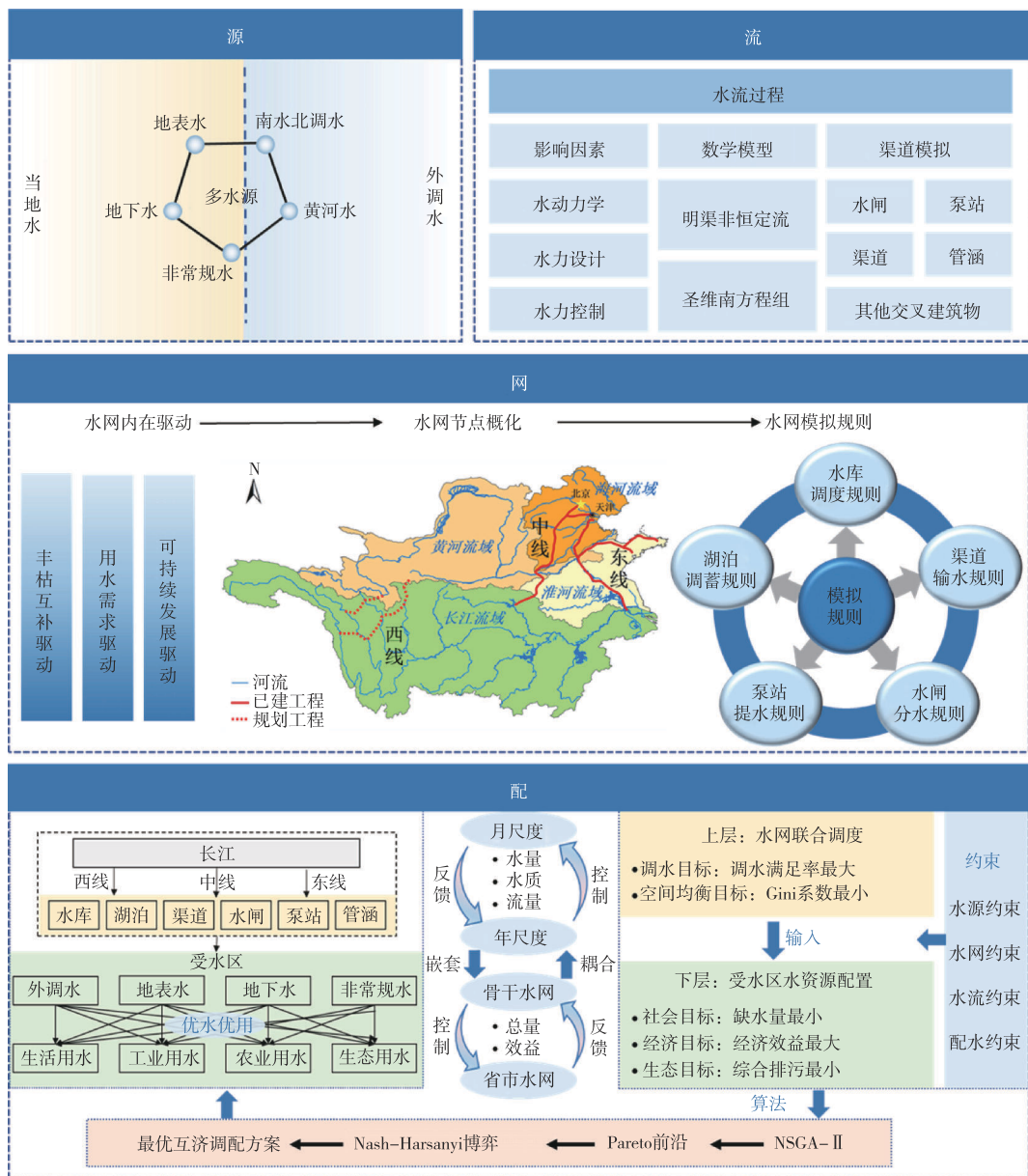


图1 水网互济调配机制

高效利用外调水，适度限制地下水，鼓励使用非常规水”的原则，统筹当地地表水、地下水、外调水、非常规水多个水源水文互补和时空互济关系，一方面在黄河极端枯水的背景下，加大南水北调水的利用量，限制黄河引水；另一方面针对中线水源与东线水源的不同丰枯年型，提倡水源丰的线路多调水。

(2) “流”是水体的流动，具体表现为在河湖及水库、堤防、渠道(渡槽)、水闸、泵站、管涵(隧洞、倒虹吸)等工程设施内水的流动。“流”有明确的流动方向，强调水流的动态过程。长距离输水中水流过程复杂，其主要影响因素分为水动力学因素、水力设计因素、水力控制因素，水动力学因素包括流速、水深等，水力设计因素主要是指设计流量、渠道长度、糙率等设计条件，水力控制因素则与水闸操控、分水口流量变化等人为调控因素有关。调水工程的水流过程一般认为是一维非恒定流，用圣维南方程组进行模拟。在研究大范围长时间尺度的水流变化时，水流的惯性力、摩擦力等在整体上的作用相对复杂，从宏观角度来看可对连续性方程和运动方程的一些次要因素进行合理简化，进而将圣维南方程组简化为水量平衡方程，实现复杂水流过程的分析。

(3) “网”是“流”的物理载体，是约束、控制水流的输配水工程设施，以重大引调水工程和骨

干输配水通道为纲、以区域河湖水系连通和供水灌溉工程为目、以重点调蓄工程为结,共同构成了完整的水网体系。在丰枯互补、用水需求、可持续发展的驱动下,利用东、中、西线时空上的互济联调,实现水资源互济调配。东线工程从水源稳定的长江下游通过泵站提水,沿线连通天然湖泊,具有较好的调蓄能力。中线工程从水质优良的丹江口水库调水,干线自流输水,通过节制闸和分水闸进行输水控制,渠道的调蓄能力较弱。西线规划分上下两线从雅砻江、大渡河、金沙江调水进入黄河上游,不同于东中线工程,西线工程没有独立的供配水系统,西线调水进入黄河干流后通过黄河供水系统统一调配,覆盖面广^[24-25]。东、中、西线的水源特性、工程特点不同,供水范围交叉关联,有良好的成网互济条件。利用多工程间的水力联系,建立优势互补的成网互济运行规则,包括水库调度规则、湖泊调蓄规则、渠道输水规则、泵站提水规则、水闸分水规则等,在骨干水网与省市水网互联互通的协助下实现多线路联合增供。

(4)“配”是指水网末端的受水区水资源配置。“配”需要统筹外调水和当地水,对生活、工业、农业与生态用水分层供水,极端枯水时优先保障维持基本生存、维持工厂生产、保障粮食安全、河湖基本生态的各部门刚性需水,满足优质生活需求、发展高耗水工业、实现农产品自足及外销、河湖补水等弹性需水参与优化配置^[26]。南水北调水主要供向生活、工业部门,兼顾农业和生态用水^[27],考虑到不同用水部门对水质的需求不同,基于优水优用的原则,在受水重叠区内东线优先向水质要求不高的工业等部门供水,中线优先向生活供水,黄河水、非常规水则优先农业灌溉等。受水区水资源配置考虑年尺度与月尺度下水量、水质、流量的控制与反馈,及空间尺度下骨干水网与省市水网联通下对总量、效益的控制与反馈,通过时空尺度的嵌套与耦合,构建水网联合调度和水资源配置的双层模型,采用NSGA-II算法求解得到Pareto前沿,进而运用Nash-Harsanyi博弈得到最优互济调配方案。

2.2 “源-流-网-配”的相互关系 “源-流-网-配”的系统贯穿了“长江黄河丰枯遭遇-多线路增供-成网互济-水资源调配”的全链条,整个系统及各元素间的关系呈现多尺度、多过程、多要素与多约束的特点,通过对其相互关系的厘清和把握能实现宏观到微观的精准调控。

多尺度体现在空间、时间两个维度,系统涵盖国家骨干网、省级水网、市级水网等多重空间尺度,形成各层级水网协同、互联互通的水网体系。时间尺度上,年尺度应用于大范围的综合水资源配置,月尺度下工程调度能够应对季节性干旱引起的缺水风险。通过多时空尺度的结合,优化较小时空尺度下的联合调水,进而为较大尺度的外调水、当地水统筹配置提供边界条件,形成多尺度的嵌套关系,动态响应水资源需求变化。

多过程是系统的核心,包括“取水-输水-供水-用水-排水”过程^[28]。取水过程是指从南水北调工程通过泵站或取水口从长江流域中提取水资源的过程。输水过程是指提取的水资源通过水库、湖泊调蓄,及水闸、泵站、渠道(渡槽)、管涵(隧洞、倒虹吸)工程运行调控,经多个线路的输水渠道将水传输送到分水口的过程。供水过程是指骨干水网分水闸与受水区各层级水网结合将各类水资源供给受水区的过程。用水过程是指受水区用户的生活、工业、农业、生态用(耗)水过程。排水过程是指排水系统收集的废污水,经处理后排入自然资源系统中,或直接进入供水系统被再次利用。多过程联合的目的是从水网体系“纲、目、结”的三要素出发,通过国家水网主骨架与区域水网体系的互联互通,加强流域水网工程联合调度与水资源配置,提升水资源调控能力。

多要素,包括资源、工程、信息、管理四大要素^[29]。资源要素主要是指水网中天然河流水系的水资源条件,例如流量、水位、水质等;工程要素即水网中的人工水利设施,包括水库、水闸、堤防、泵站、渠道(渡槽)、管涵(隧洞、倒虹吸)等各类工程;信息要素囊括了与水资源利用相关的数据资料,有经济社会信息、生态环境信息及用水需求信息;管理要素侧重于水资源管理的非工程措施,例如行政、法律、管理体制等。

多约束则体现在水源约束、水网约束、水流约束和配水约束上,囊括了工程限制、自然资源限制、社会需水限制等。

“源-流-网-配”系统是一个科学、高效且具弹性的水资源调配系统,为国家水网的稳定运行和资

源合理利用提供了坚实的技术支撑。未来随着水网体系的不断完善与深入应用,“源-流-网-配”系统将进一步助力跨流域调水的水资源管理。

3 协同优化模型与求解方法

基于成网互济调水机制,构建“源-流-网-配”双层协同决策模型,上层模型的决策主体假定为整体水网的行政管理部门,优化跨流域调水满足率最大的同时兼顾调水公平性,实现水网整体效能。下层模型的决策主体假定为受水区多个用水部门,协调受水区用水时社会、经济、生态目标之间的冲突,将上层优化外调水量与当地水在多个受水区之间进行优化配置。通过双层协同优化,实现受水区的增供、增效,降低缺水损失、控制缺水深度,提升区域水资源互济调配能力。

3.1 目标函数 双层协同决策模型中上层水网优化调度模型时间尺度为月,空间尺度为市;下层受水区水资源优化配置模型时间尺度为年,空间尺度为省,上下层时空尺度耦合。以东、中线成网互济为例,模型上层目标函数 F_1 、 F_2 及下层目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 具体如下:

(1)上层优化目标。

①调水目标。为最大化多个工程的调水总量,以调水工程的供水满足率最大作为联合调度的调水目标:

$$\max F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L R_{l,t} \quad (1)$$

$$R_{l,t} = (Q_{El,t} + Q_{Ml,t})/D_{l,t} \quad (2)$$

式中: t 为计算时段,以月为计算时段, $T=12$; l 为受水区各市编号; $R_{l,t}$ 为调水工程 l 市在 t 时段内供水满足率,%; $Q_{El,t}$ 、 $Q_{Ml,t}$ 分别为东、中线调水工程在 l 市第 t 时段的供水量,亿 m^3 ; $D_{l,t}$ 为 l 市第 t 时段的需水量。

②空间均衡目标。基尼系数可以反映工程向各个受水分区的调水均衡程度,基尼系数越小表明水资源开发利用的公平性越好^[30]。基尼系数通常用洛伦兹曲线计算,其值等于洛伦兹曲线与45度线之间“不平等面积”和“完全不平等面积”之比。在本研究中,以受水分区数量的累积百分比为 x 轴,调水工程的供水量与受水分区需水之比的累积百分比为 y 轴,形成水资源分配的洛伦兹曲线。根据洛伦兹曲线,结合基尼系数原始公式计算推导出受水分区间调水满足率的基尼系数为^[31]:

$$\min F_2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{l'=2}^L \frac{|R_{l,t} - R_{l',t}|}{L \sum_{l=1}^L R_{l,t}} \quad (3)$$

式中: l' 为大于 l 的受水区编号; $R_{l',t}$ 为受水区 l' 市在 t 时段内供水满足率,%。

(2)下层优化目标。

①社会目标。在水资源配置时为保障受水区用水安全,使居民生活、生产及基本生态用水得到最大程度满足,确保社会正常运转,以受水区总缺水最小为社会目标:

$$\min f_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \left(D_{kn} - \sum_{m=1}^M x_{kmn} \right) \quad (4)$$

式中: k 为受水区各省编号; n 为生活、工业、农业、生态共4类用水部门; m 为南水北调水、黄河水、当地地表水、地下水、非常规水共5种供水水源; D_{kn} 为受水区 k 用水部门 n 的年内总需水量,即 $\sum_{n=1}^N D_{kn} = \sum_{t=1}^T D_{k,t}$, 亿 m^3 ; x_{kmn} 为受水区 k 中水源 m 给用水部门 n 的分配水量,亿 m^3 。

②经济目标。在满足公平用水的基础上,为了实现用水效率和效益的最大化,确保水资源投入能够获得尽可能大的经济效益,以用水效益减去供水成本的净效益最大为经济目标:

$$\max f_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M x_{kmn} \alpha_{km} \beta_{kmn} (b_{kmn} - c_{kmn}) \quad (5)$$

式中: α_{km} 、 β_{kmn} 分别为受水区 k 水源 m 的供水优先系数、用水部门 n 的用水公平系数,计算公式见

式(6)(7); b_{kmn} 、 c_{kmn} 分别为受水区 k 中水源 m 向用水部门 n 供水的效益系数、费用系数, 元/ m^3 。

$$\alpha_{km} = (1 + \theta_{k, \max} - \theta_{km}) / \sum_{m=1}^M (1 + \theta_{k, \max} - \theta_{km}) \quad (6)$$

$$\beta_{kmn} = (1 + \mu_{k, \max} - \mu_{kn}) / \sum_{n=1}^N (1 + \mu_{k, \max} - \mu_{kn}) \quad (7)$$

式中: $\theta_{k, \max}$ 、 $\mu_{k, \max}$ 分别为受水区 k 中供水水源次序、用水部门次序的最大值; θ_{km} 、 μ_{kn} 分别为受水区 k 中供水水源 m 、用水部门 n 的次序序号。

③环境目标: 考虑到受水区的水生态环境保护, 应严格控制受水区污染物排放量, 化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)为污水中的主要污染物^[32], 因此采用 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 的污染排放量总和最小来表示环境目标:

$$\min f_3 = 0.01 \sum_{n=1}^N (p_{kn} \rho_{kn} \sum_{m=1}^M x_{kmn}) \quad (8)$$

式中: p_{kn} 为受水区 k 用水部门 n 的污水排放系数; ρ_{kn} 为受水区 k 用水部门 n 污水中的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 污染物质量浓度和, mg/L 。

3.2 约束条件 模型约束主要分为水源约束、水网约束、水流约束和配水约束, 其中水网、水流约束囊括了湖泊、渠道的水量平衡约束、工程能力限制等, 配水约束则与受水区需水、生态纳污能力及部门间均衡性有关, 多个约束与优化目标共同作用实现水资源调配的高效性、可持续性、公平性要求。

①水源约束。

$$\sum_{n=1}^N x_{kmn} \leq A_{km} \quad (9)$$

式中 A_{km} 为受水区 k 水源 m 的最大可供水量, 亿 m^3 。特别地, 受水区 k 中南水北调的最大可供水量为 $A_{k1} = \sum_{l \in k} \sum_{t=1}^T (Q_{El, t} + Q_{ML, t})$ 。

②湖泊水量平衡约束。

$$V_{t+1} = V_t + Q_{\text{in}, t} + P_{\text{in}, t} + S_{\text{in}, t} - P_{\text{out}, t} - S_{\text{out}, t} - W_t - E_t \quad (10)$$

式中: V_{t+1} 、 V_t 分别为湖泊在 t 时段末、初蓄水量; $Q_{\text{in}, t}$ 为 t 时段湖泊的天然来水量; $P_{\text{in}, t}$ 、 $P_{\text{out}, t}$ 分别为 t 时段泵站抽入、抽出湖泊水量; $S_{\text{in}, t}$ 、 $S_{\text{out}, t}$ 分别为 t 时段下泄入、出湖泊的水量; W_t 为 t 时段受水区对湖泊需水量; E_t 为湖泊的蒸发、渗漏损失水量。

③渠道水量平衡约束。除湖泊外, 水网中两座泵站(水闸)之间的渠道或河道构成一个渠段, 月尺度下渠段的产汇流过程会被显著坦化, 因此其调蓄能力可以忽略不计, 仅考虑该渠段的受水区用水、输水损失。渠道的水量平衡约束分别为:

$$P_{i, t} = P_{i+1, t} + q_{\text{in}, t} - w_t - q_{\text{loss}, t} \quad (11)$$

$$S_{j, t} = S_{j+1, t} - w_t - q_{\text{loss}, t} \quad (12)$$

式中: $P_{i, t}$ 、 $S_{j, t}$ 为河段 t 时段上游泵站、水闸抽(引)水量; $P_{i+1, t}$ 、 $S_{j+1, t}$ 为河段 t 时段到达下游泵站、水闸前的水量; $q_{\text{in}, t}$ 为渠段 t 时段区间来水量; w_t 为 t 时段受水区对渠段需水量; $q_{\text{loss}, t}$ 为渠段 t 时段的水量损失。

④湖泊调蓄能力约束。

$$V_{\min, t} \leq V_t \leq V_{\max, t} \quad (13)$$

式中 $V_{\min, t}$ 、 $V_{\max, t}$ 分别为湖泊在 t 时段最小、最大蓄水量。

⑤泵站(水闸)工作能力约束。

$$P_{i, t} \leq P_{\max, t} \quad (14)$$

$$S_{j, t} \leq S_{\max, t} \quad (15)$$

式中: $P_{\max, t}$ 为 i 泵站在 t 时段最大抽水能力; $S_{\max, t}$ 为相应 j 水闸在 t 时段最大过流能力。

⑥调蓄湖泊北调控制水位约束。洪泽湖、骆马湖、下级湖除了给受水区供水, 还要优先保证原

有用水户的用水权益。因此，为减少北调抽水对当地可能产生的负面影响，在实际运行中设置了调蓄湖泊的北调控制水位。当湖泊水位低于北调控制水位时，则停止从该湖泊抽水，湖泊水位特征见表1。

表1 调蓄湖泊北调控制水位

单位: m

湖泊	死水位	蓄水位		调蓄北调控制水位			
		汛期	非汛期	7月上旬—8月底	9月上旬—11月上旬	11月中旬—3月底	4月上旬—6月底
洪泽湖	11.3	12.5	13.5	12.0	12.0 ~ 11.9	12.0 ~ 12.5	12.5 ~ 12.0
骆马湖	20.5	22.5	23.0	22.2 ~ 22.1	22.1 ~ 22.2	22.1 ~ 23.0	23.0 ~ 22.5
下级湖	31.5	32.5	33.0	31.8	31.5 ~ 31.9	31.9 ~ 32.8	32.3 ~ 31.8

⑦穿黄工程过水能力约束。南水北调水经穿黄工程输送到黄河以北地区，因此将其概化为受管涵过水能力约束的约束条件：

$$Q_{YC, out} = \min(Q_{YC, in}, Q_{YC}) \quad (16)$$

式中： $Q_{YC, out}$ 为穿黄工程的出流量； $Q_{YC, in}$ 为穿黄工程的入流量； Q_{YC} 为穿黄工程的过水能力。

⑧需水约束。为保证基本用水要求，分配给受水区各用水部门的总水量应该大于其刚性需水，并且不超过最大需水，即：

$$D_{kn, min} \leq \sum_{m=1}^M x_{kmn} \leq D_{kn, max} \quad (17)$$

式中： $D_{kn, min}$ 为保障受水区稳定的最小需水量，即各部门的刚性需水量，亿 m^3 ； $D_{kn, max}$ 为受水区 k 用水部门 n 的最大需水量，即弹性需水量和奢侈需水量，亿 m^3 。

⑨纳污能力约束。考虑到受水区的水生态环境保护，严格控制受水区污染物排放量，排放的重要污染因子总量应不超过该区域的纳污能力，即：

$$0.01 \sum_{n=1}^N (p_{kn} \rho_{kn} \sum_{m=1}^M x_{kmn}) \leq PT_{k, max} \quad (18)$$

式中 $PT_{k, max}$ 为受水区 k 最大允许排放重要污染物的总量，万t。

⑩部门用水公平性约束。为实现受水区部门间的水资源公平分配，同理引入用水部门满足率的基尼系数，即：

$$\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{n'=2, \\ n' > n}}^N \frac{|r_{kn} - r_{kn'}|}{N \sum_{n=1}^N r_{kn}} \leq \tau \quad (19)$$

$$r_{kn} = \sum_{m=1}^M x_{kmn} / D_{kn, max} \quad (20)$$

式中 r_{kn} 为受水区 k 用水部门 n 的满足率，%。基尼系数越小表明水资源开发利用的公平性越好，联合国相关组织的规定，基尼系数小于0.2代表绝对公平，0.2~0.3代表相对公平，>0.3~0.4代表基本合理，>0.4~0.5代表差距较大，0.5以上代表很不公平^[33]，因此取 $\tau = 0.3$ 。

3.3 求解方法 由于双层模型中多尺度耦合，因此我们采用迭代的方式求解，具体过程见图2。上层优化立足于水网的整体效益，采用NSGA-II算法协调跨流域调水的满足率最大与公平性之间的冲突，得到外调水量的非劣解集，引入Nash-Harsanyi博弈方法得到唯一解，上层模型的调控结果汇总为各省年尺度的南水北调工程调水量，作为外调水量边界条件输入下层模型；下层优化立足于受水区的综合效益，采用NSGA-II算法协调受水区用水部门的社会、经济、生态目标之间的冲突，得到受水区各用水户分配水量的非劣解集，引入Nash-Harsanyi博弈方法得到唯一均衡解，形成跨流域调水互济调配方案，全面提升水网的补网强链能力。

NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 是基于 Pareto 前沿的快速非支配遗传算

法^[34]，相较于第一代 NSGA，它采用快速非支配排序法、引入精英策略等，降低了算法的计算复杂度，保持种群多样性，并避免陷入局部最优。且相较于改进的 NSGA-III 算法，NSGA-II 在处理 2~3 个目标的优化问题上耗时更少、结果多样性更好^[35]。

为了能在 NSGA-II 算法计算得到 Pareto 前沿上选择唯一的最优解，研究引入了 Nash-Harsanyi 合作博弈实现效益分配^[36]。将多目标优化中的目标函数视为博弈的参与者，目标函数的解为参与者的策略。采用效用函数衡量每个参与者的效益，因此效用函数为 Pareto 前沿上目标函数值与个体最优点的差值，通过最大化整体效用乘积，得到博弈参与者达成共识的合作解^[37]。Nash-Harsanyi 博弈的解本身具有不变性，即针对量纲不一致、数量级差异大的多目标优化问题，是否归一化效用函数不影响最优解的选取。因此以下层模型为例，Nash-Harsanyi 博弈模型如下：

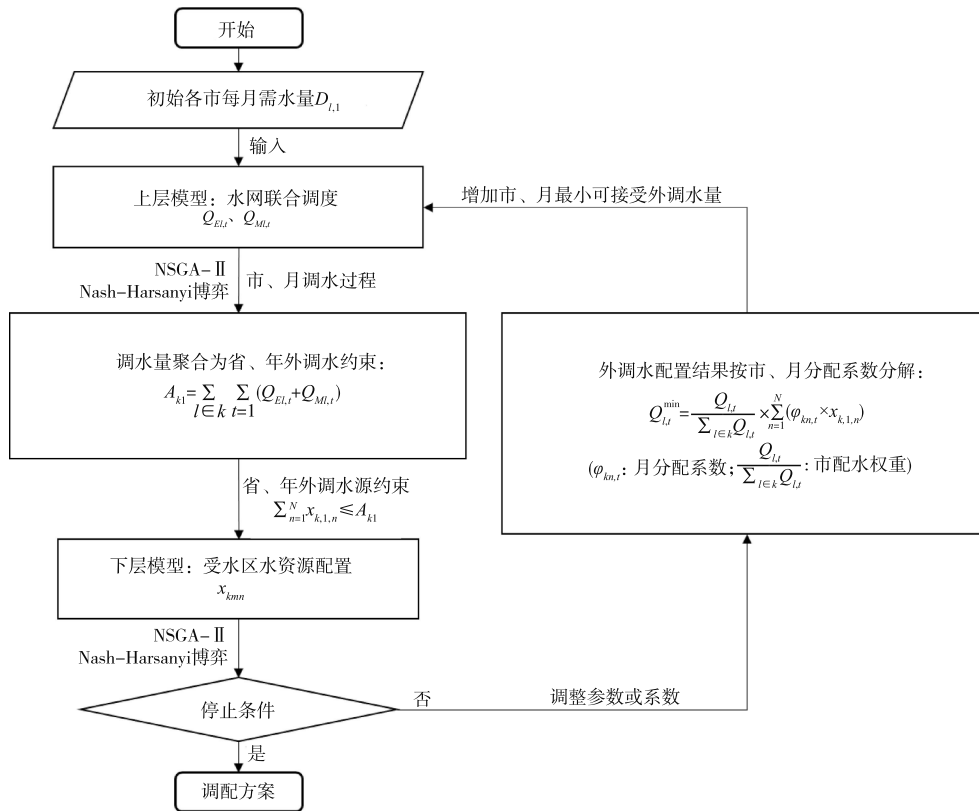


图2 模型求解过程

$$\begin{cases} \max (f_1 - f_1^*) [(-f_2) - (-f_2^*)] (f_3 - f_3^*) \\ \text{s.t. } f_1 \geq f_1^*; -f_2 \geq -f_2^*; f_3 \geq f_3^* \end{cases} \quad (21)$$

式中： f_1 、 f_2 、 f_3 分别为下层目标函数的值； f_1^* 、 f_2^* 、 f_3^* 分别为目标函数单目标最优解的值；由于目标函数 f_2 为经济效益最大，为了确保优化问题有意义，符合 Nash-Harsanyi 博弈每个参与方效用为正的必要条件，对目标函数 f_2 取负值。

4 结论

长江、黄河跨流域多线路成网互济能实现水资源互济联调，增强水资源总体调配能力。本文聚焦长江、黄河跨流域水网，深入探讨水资源调配系统中“源-网-流-配”四大方面的内涵与关联互动关系，以“源-网-流-配”总体架构与相互关系为核心，提出补网强链、成网互济调水机制。

针对水网的多水源供给、多线路互济、多工程调控、多目标冲突、多主体博弈特征，构建多尺

度、多过程、多要素与多约束的双层协同优化模型，上层模型着眼于实现水网整体效益最大化，下层模型着眼于实现受水区的综合效益最大化。双层协同优化模型采用NSGA-II算法与Nash-Harsanyi博弈方法联合求解方法，获得跨流域调水互济调配方案。

成网互济的调水机制通过增强互济调配能力应对长江、黄河丰枯遭遇变化，保障受水区经济社会用水需求，为水网视角下长江黄河跨流域调水的可持续利用提供理论支撑与方法借鉴。

参 考 文 献：

- [1] United Nations. The United Nations World Water Development Report 2024: Partnerships and Cooperation for Water [R]. Paris: UNESCO, 2024. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>.
- [2] 王易初, 倪晋仁. 全球水系格局与水网构建研究进展[J]. 中国环境科学, 2023, 43(3): 1074-1086.
- [3] LEE S W, SARP S, JEON D J, et al. Smart water grid: the future water management platform[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 55(2): 339-346.
- [4] GONZALEZ PEREA R, BALLESTEROS R, ORTEGA J F, et al. Water and energy demand forecasting in large-scale water distribution networks for irrigation using open data and machine learning algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106327.
- [5] 王建华, 赵红莉, 冶运涛. 智能水网工程: 驱动中国水治理现代化的引擎[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1148-1157.
- [6] 赵勇, 王浩, 马浩, 等. 中国“双T”型水网经济格局建设构想[J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1271-1279, 1290.
- [7] 夏军, 陈进, 余敦先, 等. 变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1608-1617.
- [8] 郭旭宁, 刘为锋, 邢西刚, 等. 国家水网的理论内涵与战略策略关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1055-1063.
- [9] 左其亭, 田锦涛, 秦西, 等. 面向新质生产力发展需求的国家水网建设关键内容及研究展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 625-631.
- [10] MA Y, CHANG J, GUO A, et al. Optimizing Inter-basin water transfers from multiple sources among interconnected River basins[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125461.
- [11] WU L, BAI T, HUANG Q. Tradeoff analysis between economic and ecological benefits of the inter basin water transfer project under changing environment and its operation rules [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119294.
- [12] ZHONG H, LIAO T, FANG G, et al. Exploring optimal joint operating rules for large-scale inter-basin water transfer projects with multiple water sources, diversion routes, and water demand areas [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 49: 101504.
- [13] 王煜, 周翔南, 彭少明, 等. 基于黄河流域水资源均衡调配的南水北调西线一期工程水量配置[J]. 水科学进展, 2023, 34(3): 336-348.
- [14] 孔波, 付少杰, 黄强. 大型复杂跨流域调水工程电站-水库-泵站群多目标优化调度[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 67-72.
- [15] 方国华, 钟华昱, 闻昕, 等. 考虑湖泊互济互调运行的江苏省南水北调工程优化调度[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 776-787.
- [16] 贾丹妮, 武连洲, 粟晓玲, 等. 跨流域调水工程“用户-枢纽”群联合优化调配研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 188-197.
- [17] LIU Y, XIN Z, SUN S, et al. Assessing environmental, economic, and social impacts of inter-basin water transfer in China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130008.
- [18] YANG Y, CHEN S, ZHOU Y, et al. Method for quantitatively assessing the impact of an inter-basin water transfer project on ecological environment-power generation in a water supply region[J]. Journal of Hydrology, 2023, 618: 129250.
- [19] WOO S Y, KIM S J, LEE J W, et al. Evaluating the impact of interbasin water transfer on water quality in the

recipient river basin with SWAT[J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 145984.

- [20] 胡瑞媛, 畅建霞, 邓铭江, 等. 生态输水工程对水系连通的多维影响: 以塔里木河为例[J]. 水利学报, 2023, 54(11): 1359–1370.
- [21] 景来红, 严登明, 崔萌, 等. 南水北调西线工程生态环境影响及应对的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2024, 35(4): 521–529.
- [22] 范志鹏, 李云玲, 马睿, 等. 跨流域多线路水网韧性研究[J/OL]. 水资源保护, 2025: 1–13. [2025-05-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20240704.1615.015.html>.
- [23] 刘欢, 甘永德, 杨钦, 等. 基于水网视角的水与关联要素适配性评价[J/OL]. 水资源保护, 2024: 1–12. [2025-05-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20240304.1329.002.html>.
- [24] 彭少明, 王浩, 王煜, 等. 泛流域水资源系统优化研究[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 10–17.
- [25] 赵勇, 王浩, 邓铭江, 等. 黄河几字弯水网: 南水北调西线配套东延工程构想[J]. 水利学报, 2023, 54(9): 1015–1024.
- [26] NIU C, CHANG J, WANG Y, et al. A water resource equilibrium regulation model under water resource utilization conflict: A case study in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Research, 2022, 58 (6) : e2021WR030779.
- [27] 何奇峰, 李慧, 李云玲. 南水北调统筹时间和空间关系的思路探讨[J]. 水利技术监督, 2022(2): 173–175.
- [28] 王浩, 牛存稳, 赵勇. 流域“自然-社会”二元水循环与水资源研究[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1599–1607.
- [29] 甘泓, 汪林, 曹寅白, 等. 海河流域水循环多维整体调控模式与阈值[J]. 科学通报, 2013, 58(12): 1085–1100.
- [30] HE Y, TU Y, LIU J, et al. Quartet trade-off for regional water resources allocation optimization with multiple water sources: A decentralized bi-level multi-objective model under hybrid uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129341.
- [31] WU J, LUO J, DU X, et al. Optimizing water allocation in an inter-basin water diversion project with equity-efficiency tradeoff: A bi-level multiobjective programming model under uncertainty[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 371: 133606.
- [32] 贾晓琳, 付湘, 张翔, 等. 水质保护与用水效率的主从博弈稳健优化模型及其应用[J]. 水利学报, 2024, 55(7): 874–882.
- [33] 王占海, 何梁, 王保华. 基于 Dagum 基尼系数的广东省水资源空间均衡程度研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(12): 49–55.
- [34] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182–197.
- [35] 王昊煜, 高培超, 谢一茹, 等. 基于遗传算法的土地利用优化: NSGA-II 和 NSGA-III 的对比研究[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 639–649.
- [36] SHAPIRA N, HOUSH M, BROITMAN D. Decision-makers matter: An operational model for environmental-economic conflict resolution[J]. Environmental Science & Policy, 2019, 98: 77–87.
- [37] MADANI K, HOOSHYAR M. A game theory-reinforcement learning (GT-RL) method to develop optimal operation policies for multi-operator reservoir systems[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 732–742.

(下转第 1001 页)