

跨流域调水工程“用户-枢纽”群联合优化调配

贾丹妮¹, 武连洲^{1,2,3}, 粟晓玲^{1,2,3}, 朱兴宇¹, 马佳宁¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省水利科学研究院水资源与水环境研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西河湖长学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对跨流域调水工程运行中存在枢纽群调水与用户群需水不匹配的问题, 构建了兼顾水源区枢纽工程运行关键指标和受水区用户侧多目标需求的“用户-枢纽”群联合优化调配模型, 用户侧量化了受水区水资源、生态环境、社会经济子系统间函数关系, 嵌套于供水子系统的水量配置模型中, 枢纽侧考虑水源区枢纽侧调水、发电、能耗等多重效益目标, 确保最大化实现用户侧需水过程和枢纽侧调水过程的匹配。将模型应用于陕西省引汉济渭调水工程联合调配模拟, 结果表明: 联合优化调配模型可提高跨流域调水工程的整体运行效率, 灵活调控“用户-枢纽”群的需水与运行需求; 水量联合优化调配后, 各用户缺水率约为7%, 经济效益提升了3.6%, 水库群基本完成了调水任务, 电站群发电量超过5.43亿kW·h, 库空率约为8%, 降低了系统缺水风险。

关键词: 跨流域调水; 水量联合调配; 多阶段耦合模型; 引汉济渭调水工程

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)06-0188-10

Joint optimization and allocation model of “user-hub” group in inter-basin water transfer project//JIA Danni¹, WU Lianzhou^{1,2,3}, SU Xiaoling^{1,2,3}, ZHU Xingyu¹, MA Jianing¹ (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water Resources and Water Environment, Shaanxi Province Institute of Water Resources Science, Yangling 712100, China; 3. Shaanxi River and Lake Governor's College, Yangling 712100, China)

Abstract: To address the mismatch between water demand of user groups and water transfer operation of hub groups in management of inter-basin water transfer projects, a “user-hub” group joint optimization and allocation model was developed, which balanced key operational indicators of hub projects in the water source region and multi-objective demands of users in the water-receiving region. In construction of the model, functional relationships among water resources, ecological environment, and socio-economic subsystems in the water-receiving area were quantified and nested in the water allocation model of the water supply subsystem, and multiple benefit objectives on water transfer, power generation, and energy consumption of the hub side were considered, so as to realize the optimal synchronization between water demand processes on the user side and water transfer processes on the hub side. The model was applied to the joint regulation simulation of the Hanjiang-to-Weihe Water Diversion Project in Shaanxi Province, and the results show that the joint optimization and allocation model enhances the overall operational efficiency of the inter-basin water transfer project, enabling flexible regulation of water demands and operational requirements of the “use-hub” group. Specifically, the water shortage rate of users is maintained at approximately 7%, with an increase of 3.6% in economic benefits. The reservoir group largely fulfills its water transfer tasks, achieving a total power generation of over 0.543 billion kW·h, with a reservoir vacancy rate maintained at around 8%, thereby reducing the risk of water shortages in the system.

Key words: inter-basin water transfer; joint allocation of water resources; multi-stage coupling model; Hanjiang-to-Weihe Water Transfer Project

国家水网是系统解决水灾害、水资源、水生态、水环境问题, 保障水安全的重要基础和支撑。2023年5月, 中共中央、国务院印发的《国家水网建

设规划纲要》中强调要密织国家水网之“目”, 即在国家水网主框架下, 利用区域性河湖水系连通工程和引调排水工程, 构建城乡一体、互联互通的水网格

基金项目: 国家自然科学基金项目(52109035); 陕西省水利科技计划项目(2023slkj-10); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2452021083)

作者简介: 贾丹妮(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源联合优化调配研究。E-mail: jiadanni@nwafu.edu.cn

通信作者: 武连洲(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水网运行与水资源配置研究。E-mail: wulianzhou@nwafu.edu.cn

局^[1-3]。作为重要联通手段,南水北调、引汉济渭、大伙房等大型跨流域调水工程在缓解区域性水资源空间分布不均、水资源供需压力过大、生态环境恶化等问题中发挥了关键的战略作用^[4-6]。跨流域调水工程包括水库、泵站和电站等多调水工程枢纽和受水区多供水用户,组成要素众多,水力联系复杂^[7],受水区用户侧水量配置和水源区枢纽侧联合调度的难度较大。因此,如何在复杂的工程系统结构与运行工况下实现枢纽侧和用户侧的联合调配,充分发挥工程的经济、生态和社会效益,是当前亟须研究的难点之一。

根据系统结构特点,跨流域调水工程包括受水区有调蓄水库和无调蓄水库两大类,前者代表性工程有南水北调中线、大伙房跨流域调水工程等,后者代表性工程有引汉济渭等。受水区调蓄能力是决定跨流域调水工程水源区和受水区联合调配规则和工程运行效益的关键影响因素。对于受水区有调蓄水库的情况,国内外学者从水源区水库调水过程、受水区水库引水和供水过程角度开展了跨流域调水工程调度研究。例如:张弛等^[8]以大伙房跨流域调水工程受水水库碧流河水库为研究对象,构建了考虑水库供水效益与引水成本的水库实时跨流域调度理论分析框架,量化了不确定性预报信息对调度决策的影响,制定了相应条件下的水库群最优引水和供水准则;吕一兵等^[9]以调配水量和各受水水库弃水量最小为上层目标函数,水库期望供水质量与实际供水质量的差值最小为下层目标函数,获取了不同情景下工程最优调水和供水规则;Manshadi 等^[10]以跨流域调水工程水源区的经济和生态效益为目标,定量分析了调水过程对水源区发电、生态和经济的潜在影响,制定了水源区多目标均衡调度规则。以上研究在调度模型构建和规则提取方面取得显著性成果,但研究重点集中在受水区有调蓄水库的情况,针对受水区无调蓄水库或者调蓄能力一般的工程案例研究较少,在供需过程高度匹配情景下工程联合调配问题仍缺乏深入研究。

综合考虑系统经济、生态和社会效益,联合调控水源区枢纽群调度与受水区用户群水量配置是未来确保跨流域调水工程高效运行的关键手段之一。游进军等^[11]建立了二层结构流域生态调度模型,将上层水资源配置决策下的模拟供水结果作为下层水利工程调度的依据,从社会经济和工程运行等方面实现调度调控;Wang 等^[12]划分生活、生态和农业用水的供水等级,以此作为调度模型约束条件,研究不同入流条件下的水库蓄水和供水量,实现水资源配置与水库调度的统一;Jafarzadegan 等^[13]分析了伊朗

跨流域调水工程中用户配置用水效率的不确定性,建立了综合随机动态规划模型,获得了不同经济条件下的水资源配置策略;Bozorg-Haddad 等^[14]根据受水区各城市的人口和可输送水量参数制定了可调水指数,用于表征各城市在跨流域调水工程中的输水能力,以实现用户间用水与供水公平。由此可见,受水区用户群和水源区枢纽群的联合调配可有效提升系统的综合效益。

本文针对受水区无调蓄水库情况,构建了跨流域调水工程“用户-枢纽”群联合优化调配模型。通过量化受水区水资源-生态环境-社会经济(water resources-ecology-economy, WEE)耦合关系,构建用户侧水量配置模型(以下简称“用户侧配置模型”)和枢纽侧优化调度模型(以下简称“枢纽侧调度模型”)以及对调配水方案进行优选评价,实现跨流域调水工程“用户-枢纽”群联合优化调配,并将模型应用于陕西省引汉济渭调水工程。研究成果可丰富跨流域调水工程调配运行理论体系,并为引汉济渭调水工程后续运行提供技术参考。

1 模型构建

1.1 模型关系解析

从跨流域调水工程整体运行的角度出发,水源区枢纽群与受水区用户群既有一定的独立性,又能通过调水、配水与需水过程耦合^[15]。在复杂巨系统工程中,最终配水效果是衡量工程运行效果的核心指标,而如何权衡水资源在生态环境和社会经济子系统间的调配效果是模型寻优方向的关键。因此,WEE 耦合关系中各要素间的互馈作用是工程运行过程中需要考虑的重要因素之一。

受水区各配置单元中水资源与生态环境、社会经济子系统是紧密耦合的互馈系统^[16]。水资源的稳定供给是社会经济、生态环境可持续发展的必要条件,通过兴建水利设施尽可能提高水资源供给水平,可以促进社会经济和生态环境的发展。然而不合理的开发方式会降低水资源的边际效益,低效发展模式会遏制社会经济的发展^[17-18]。与此同时,社会经济发展与生态环境变化也作用于水资源,科技发展推动水资源管理的进步,生态环境的改善可缓解水资源供需矛盾的压力^[19]。因此,将水资源与生态环境、社会经济子系统作为整体进行分析更有利于系统效益最大化。

在“用户-枢纽”群联合优化调配模型中,基于 WEE 耦合关系构建用户侧配置模型,枢纽侧调度模型以工程运行的社会经济效益作为运行目标,以实现区域高效用水和可持续发展目标。模型运行过程

中,将枢纽侧调度模型输出作为用户侧配置模型输入,驱动水资源在用户侧的优化配置,评价期望目标效益下的配水结果,最大化满足实际用户需求,实现水量配置与工程调度的联合调配。

1.2 模型构建流程

“用户-枢纽”群联合优化调配模型构建流程主要包括:数据输入、模型构建、方案优选。数据主要包括工程设计资料和水资源、生态环境、社会经济资料;联合调配模型主要分为用户侧配置模型与枢纽侧调度模型,在对用户侧配置模型的需求过程进行优化时耦合 WEE 关系以提升配水效果的协同性与可持续性;方案优选指基于多维评价模型评价分析多组优化解集,筛选出匹配程度最佳的调配水过程。“用户-枢纽”群联合优化调配模型构建流程如图 1 所示。

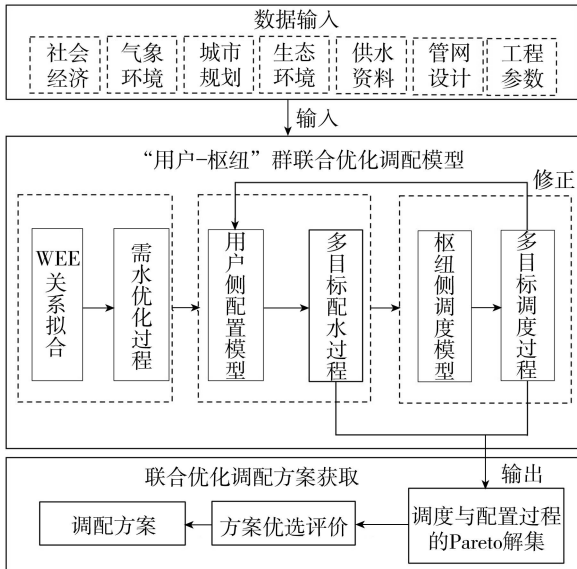


图 1 “用户-枢纽”群联合优化调配模型构建流程

Fig.1 Flow chart of joint optimization and allocation model of “user-hub” group

1.3 用户侧配置模型

针对跨流域调水工程受水区多用户、多水源的特点^[20],将用户侧配置模型分为供水子系统配置模型与用户群配置模型两层。在配水过程中考虑城市间与行业间的用水顺序,通过综合调配方式,保障水资源分配方案的合理性、稳定性和可持续性^[21]。

1.3.1 水资源配置原则

从用水部门的角度来看,水资源的分配过程按照用户需求可分为 3 个部分:刚性需求、弹性需求和奢侈需求^[22-24]。刚性需求指维持正常工业生产、满足居民基本需求、保证河湖生态健康所需的最低水量,在水资源分配过程中未能满足这一需求可能导致重大损失,此时水资源短缺成为阻碍社会和经济发展的主要限制因素。弹性需求指在可持续发展的

基础上,社会和经济快速发展所需的水量,当出现缺水状况时可采取有效措施弥补损失。奢侈需求指奢侈品消费、耗水行业和人造景观等所需的水量。

这些需求充分考虑了不同用水部门在满足底层需求基础上逐步满足总体需求,在水资源分配达到相同需求水平时,每个用水部门达到平等的发展地位和满意度。因此,本文模型中优先考虑满足刚性生活需水、生态需水、生产需水的三生需水,其次考虑弹性层面的三生需水,在供水富足时考虑奢侈层面的三生需水。

1.3.2 供水子系统配置模型目标

a. 经济目标。为合理计算社会生产供水的经济效益,利用改进的 Cobb-Douglas 生产函数评估工业供水与经济生产效益之间的关系。将社会生产水量投入作为社会生产函数的变量之一,引入可衡量效率系数与生产过程中技术进步的时间指数^[25],通过拟合社会资本、劳动力投入、耗能、水资源与社会生产总值的关系,获得社会生产供水效益,为水资源配置提供更为合理的依据^[26]。将此函数关系作为用户侧配置模型中的水资源-社会经济函数,并且在联合优化调配模型中作为实现用户侧经济效益最大的目标函数,使社会生产总值达到最大:

$$\max F_1 = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T A_0 (1 + \lambda)^t U_j^\alpha L_j^\beta P_{Gj}^\varepsilon W_{Sj,t}^\gamma \quad (1)$$

式中: F_1 为社会生产总值; A_0 为反映广义技术进步水平的效率系数; λ 为技术进步系数; U_j 为子系统 j 的资本投入; L_j 为子系统 j 的劳动力投入; P_{Gj} 为子系统 j 的单位 GDP 能耗; $W_{Sj,t}$ 为 t 时段子系统 j 的地区总用水量; α 为资本产出弹性; β 为劳动力产出弹性; ε 为耗能产出弹性; γ 为用水量产出弹性; T 为总时段数; J 为研究区中供水子系统数。

b. 生态目标。为解决传统经济学方法难以对生态用水价值进行统一度量的问题^[27],运用 Odum^[28] 提出的能值分析理论与方法,将生态系统内不同形式、不同类别流动的物质转换为统一标准的太阳能值,进行统一量计算。基于能量价值理论,明晰受水区各生态系统的投入价值、产出价值、转换关系^[17],整合水资源利用效率的概念,提出了生态用水效率函数,即水资源贡献产出的太阳能值与总用水量的比值(单位为 sej/m^3)。随后将生态用水效率、生态供水量与生态治理投入资金进行函数拟合,作为用户侧配置模型中的水资源-生态环境函数,并且在联合优化调配模型中作为实现用户侧生态效益最大的目标函数,使生态效益达到最大:

$$\max F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J f(W_{e,j,t}, U_{e,j}) \quad (2)$$

式中: F_2 为生态用水效率; $W_{e_j,t}$ 为 t 时段子系统 j 的生态用水量; U_{e_j} 为子系统 j 的生态治理投入资金。

c. 社会目标。供水基尼系数反映水资源在子系统间的供水公平程度, 表征社会发展效益水平^[29]。基尼系数越小, 系统间公平性越高^[30], 由此构建基尼系数最小的社会目标函数, 通过不断优化有限的水资源在供水子系统之间的分配以保障系统间的公平调配:

$$\min F_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{j'=2, j' > j}^J (W_{j,t}/D_{j,t} - W_{j',t}/D_{j',t}) / (TJO_t) \quad (3)$$

其中
$$O_t = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K W_{k,j,t} / D_{k,j,t}$$

式中: F_3 为供水基尼系数; $W_{j,t}$ 、 $D_{j,t}$ 分别为 t 时段子系统 j 的总供水量和需水量; $W_{k,j,t}$ 、 $D_{k,j,t}$ 分别为 t 时段子系统 j 中行业 k (生活、生态和生产) 的用水量和需水量; K 为行业总数, $K=3$; O_t 为 t 时段所有子系统的供水与需水量比值之和。

d. 约束条件。构建供水子系统配置模型时需要考虑需水、可供水等约束限制等。

1.3.3 用户群配置模型目标

a. 社会目标。为了保障水资源供给与配置城市或地区的用水安全, 实现协同发展, 选用各用户缺水最小作为目标:

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T |W_t - D_t| \quad (4)$$

式中: f_1 为各用户缺水量; W_t 、 D_t 分别为 t 时段各用户总供水量和总需水量。

b. 经济目标。为反映受水区经济发展水平与节水措施的实施效果, 选用子系统中各用户万元 GDP 用水量最小为目标:

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T W_t / G \quad (5)$$

式中: f_2 为各用户万元 GDP 用水量; G 为各用户万元 GDP 值。

c. 生态目标。为维持城市基本生态环境需要, 选择各用户生态环境满意度最高为目标, 生态环境满意度越高, 生态用水的需求满足程度越高:

$$\max f_3 = \sum_{t=1}^T W_{et} / D_{et} \quad (6)$$

式中: f_3 为各用户生态环境满意度; W_{et} 、 D_{et} 分别为 t 时段各用户生态供水量和生态需水量。

d. 约束条件。用户群的约束限制与供水子系统相同。

1.4 枢纽侧调度模型

a. 调水目标。跨流域调水工程以解决受水区

缺水问题及满足社会需求为首要任务, 因此选择多年平均调水量最大为目标:

$$\max W_d = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (1 - \varphi_i) Q_{t,i} \Delta t / Y \quad (7)$$

式中: W_d 为调度期多年平均调水量; I 为水库总数; φ_i 为水库 i 的水量损失系数; $Q_{t,i}$ 为调度时段 t 内水库 i 的出库流量; Y 为调度年数; Δt 为调度时段时长。

b. 发电目标。电站发电量是调水系统关键能量指标之一, 代表工程自身运行部分效益, 选择多年平均发电量最大作为目标:

$$\max E = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (k_n Q_{et,n} h_{t,n}) \Delta t / Y \quad (8)$$

式中: E 为调度期水电站多年平均总发电量; k_n 为电站 n 的综合出力系数; $Q_{et,n}$ 为调度时段 t 内电站 n 的发电流量; $h_{t,n}$ 为调度时段 t 内电站 n 的发电水头; N 为电站总数。

c. 能耗目标。调水工程通过泵站将水提升至输水隧洞, 其能量消耗越少, 则工程运行成本越低, 效益空间越大。选择泵站多年平均能耗最少作为调度目标:

$$\min P = \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z (g \eta_z q_{t,z} h_{t,z}) \Delta t / Y \quad (9)$$

式中: P 为泵站多年平均能耗; Z 为泵站总数; η_z 为泵站 z 的转换效率系数; $h_{t,z}$ 为调度时段 t 内泵站 z 的扬程; g 为重力加速度; $q_{t,z}$ 为调度时段 t 内泵站 z 提水流量。

d. 约束条件。构建枢纽侧调度模型时需要考虑水库水量平衡、库容、出力等约束限制。

1.5 模型求解与方案评价

1.5.1 模型求解

由于联合优化调配模型求解过程涉及多维、多变量、多约束等非线性优化问题, 采用先整体后局部的分析方法, 求解流程见图 2。具体过程为: ①以工程调水过程作为供水子系统输入, 在实现各社会、经济、生态目标的条件下优化子系统的需水过程; ②在供水子系统配置模型中获得实际供水过程, 并作为用户群需水优化过程的输入, 将优化的需水过程分配给用户侧的每个用户; ③基于枢纽侧调度模型对水库群调水进行优化, 将得到的最优调水过程与用户群需水过程作为用户群配置模型的输入, 当指标满足工程项目需水时, 输出最终调配方案, 否则修改初始调水过程。针对多目标优化求解问题, 本文采用改进的非支配排序遗传算法^[31]驱动模型运行。经过多次实验和比较, 最终设定在所有优化过程中的种群大小为 1000, 决策变量长度为 672, 迭代次数为 10000。

$$H = \sqrt{CB} \quad (10)$$

其中

$$C = 3(B_1 B_2 B_3)^{1/3} / B$$

$$B = (B_1 + B_2 + B_3) / 3$$

式中： C 为耦合度，反映子系统间的耦合协调作用； B 为各子系统综合评价得分的算术平均值； B_1 、 B_2 、 B_3 分别为水资源、生态环境和社会经济子系统的综合评价指标。

2 实例分析

2.1 研究区概况与数据来源

作为陕西省重点发展的核心经济区，关中地区高速发展导致对水资源需求日益增长，目前水资源量已不能满足未来城市的发展需求^[35]。引汉济渭调水工程将秦岭以南丰沛的水资源输送到关中地区，对缓解关中地区水资源短缺问题、改善地区水资源分配不均衡具有重要作用。引汉济渭调水工程中黄金峡和三河口水利枢纽的主要任务是在保障生态基流基础上满足调水目标，并兼顾发电需求。引汉济渭调水工程受水区用户系统概化如图3所示，配水部分包括关中地区21个直接受水对象。汉江是南水北调中线工程的水源地，各调水工程需要在严格的水量分配方案下完成调度任务。

关中地区各城市经济社会指标数据均来源于

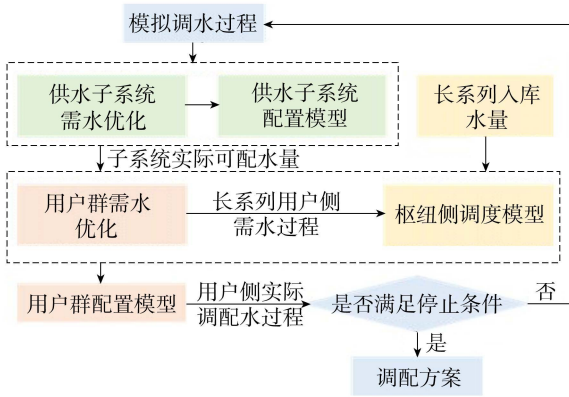


图2 模型求解流程

Fig. 2 Flow chart for model solution

1.5.2 方案评价

为实现受水区水资源与生态环境、社会经济子系统间的协同发展，利用耦合熵权法的TOPSIS法对调配水方案进行协同效果评估^[32-33]。对水资源子系统选取缺水率、人均用水量，生态环境子系统选取生态用水量、生态供水保证率，社会经济子系统选取生产耗水量、万元GDP用水量分别作为各子系统评价的代表性指标，根据耦合度公式^[34]和水资源、生态环境、社会经济子系统总体综合评价结果，计算各子系统间耦合协调度 H 并作为调配水方案的评价指标：

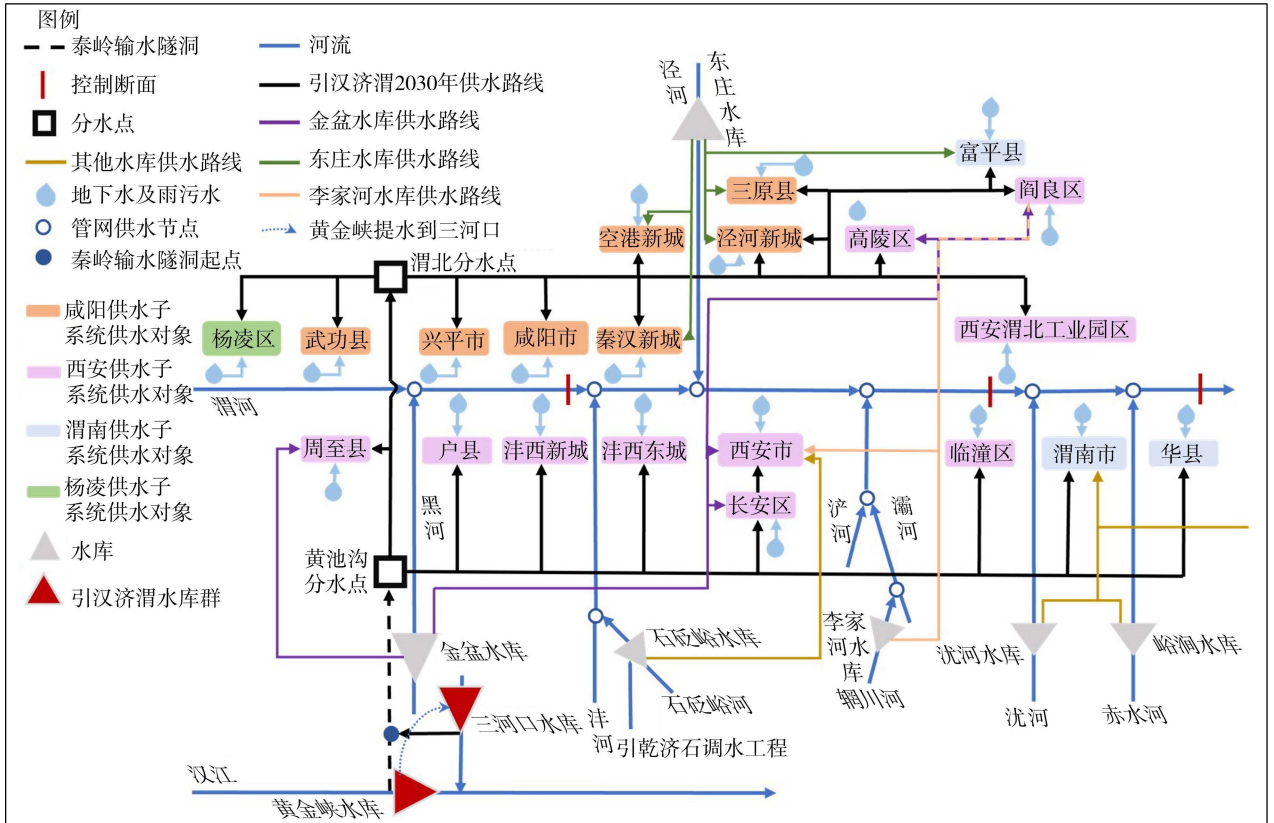


图3 引汉济渭调水工程受水区用户系统概化图

Fig. 3 Network node diagram of user groups in receiving area of Hanjiang-to-Weihe Water Transfer Project

2012—2021年《陕西省统计年鉴》,各类供水与用水量数据来自2012—2021年《陕西省水资源公报》,受水区能值计算所需的蒸发数据来自国家科学气象数据中心(<http://data.cma.cn/>),自然资源数据从NASA POWER(<https://power.larc.nasa.gov/>)获得。

2.2 结果与分析

2.2.1 受水区 WEE 耦合关系建立

为了得到各供水子系统 WEE 耦合关系(表1),对2012—2021年各供水子系统的社会生产总值、生态用水效率和用水量等要素进行线性化处理,采用岭回归对各供水子系统要素进行分析,以解决水资源-社会经济函数各要素之间存在多重共线性的问题,提高方程拟合的准确性。图4为水资源-社会经济函数中各供水子系统生产要素的回归系数岭迹图。以西安供水子系统为例,随着岭参数 R_c 的增大,时间(t)的回归系数迅速减小后趋于稳定;单位GDP能耗(P_c)的回归系数也迅速下降,由正转为负;资本投入(U)、劳动力投入(L)和社会总用水量(W_s)的回归系数都迅速上升,最终各要素回归系数在 $R_c=0.25$ 附近趋于稳定。因此,如图4(a)回归

结果所示,以 $R_c=0.25$ 为最佳岭参数,建立西安供水子系统水资源-社会经济函数。采用相同分析方法可得,咸阳、渭南、杨凌供水子系统 R_c 可分别取0.15、0.1、0.05建立水资源-社会经济函数。各供水子系统水资源-生态环境函数中生态用水效率与生态用水量、生态投入能值要素没有共线性问题,因此可通过简单回归分析构建函数。表1中各拟合方程的决定系数 R^2 均大于0.94,方程拟合效果良好。

2.2.2 受水区用户群分析

通过对用户侧供水子系统和用户群配置模型以及枢纽侧调度模型分别求解,得到“用户-枢纽”群联合调配 Pareto 解集。以用户侧各供水子系统多目标优化的 Pareto 曲面(各供水子系统分别优化求解后的平均值)为例,从图5可以看出:①行业用水基尼系数均小于0.01,实现相对公平,但行业间用水的公平程度始终与生态和经济系统存在冲突,而生态用水效率的提升离不开社会经济的发展。②优化结果中受水区多年平均社会生产总值最小为2.07万亿元,基本满足经济发展需求,当研究区存在当前经济发展较为落后的情形,可舍弃相对公平的配

表1 各供水子系统 WEE 耦合关系

Table 1 WEE coupling relations for each water supply subsystem

供水子系统	水资源-社会经济函数	水资源-生态环境函数
西安	$F_{11} = 2(9.65 \times 10^{-25})(1 + 0.029)^t U_1^{0.287} L_1^{0.502} P_{G1}^{-0.293} W_{S1,t}^{0.646} (R^2 = 0.964)$	$F_{21} = 0.107 + 0.456W_{e1,t} + 0.461U_{e1} (R^2 = 0.972)$
咸阳	$F_{12} = 1.289(1 + 0.00079)^t U_2^{0.584} L_2^{0.166} P_{G2}^{0.06} W_{S2,t}^{0.142} (R^2 = 0.951)$	$F_{22} = 0.047 + 0.488W_{e2,t} + 0.485U_{e2} (R^2 = 0.986)$
渭南	$F_{13} = 1.24(1 + 0.0006)^t U_3^{0.603} L_3^{0.163} P_{G3}^{-0.075} W_{S3,t}^{0.112} (R^2 = 0.947)$	$F_{23} = 0.019 + 0.633W_{e3,t} + 0.318U_{e3} (R^2 = 0.942)$
杨凌	$F_{14} = (1.077 \times 10^{-7})(1 + 0.01)^t U_4^{0.444} L_4^{0.243} P_{G4}^{0.387} W_{S4,t}^{0.082} (R^2 = 0.967)$	$F_{24} = 0.2 + 0.45W_{e4,t} + 0.454U_{e4} (R^2 = 0.986)$

注: $F_{11} \sim F_{14}$ 分别为 t 时段西安、咸阳、渭南、杨凌供水子系统的社会生产总值; $F_{21} \sim F_{24}$ 分别为 t 时段西安、咸阳、渭南、杨凌供水子系统的生态用水效率。

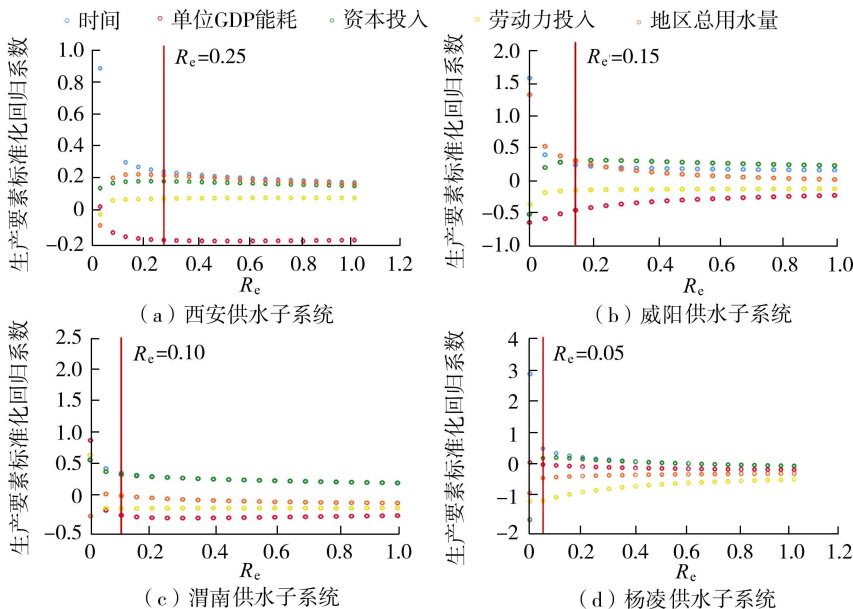


图4 各供水子系统生产要素回归系数岭迹图

Fig. 4 Ridge plot of regression coefficients of production factors for each water supply subsystem

水方式,集中供水给经济发展速度较快的用户;当社会经济发展到一定合理的水平时,可考虑舍弃一部分经济和生态效益以确保当前行业间配水的公平性。

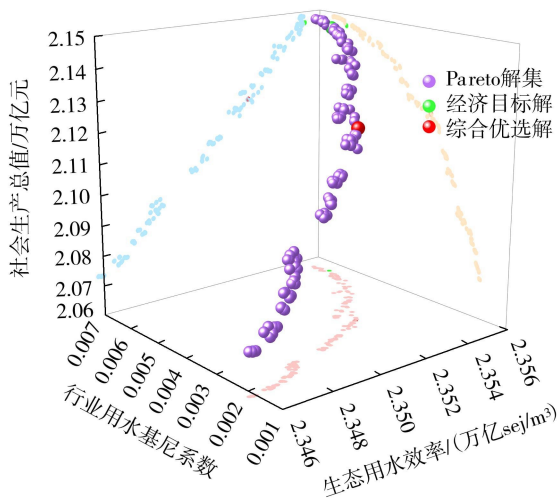


图5 供水子系统多目标优化的 Pareto 曲面

Fig. 5 Pareto surfaces for multi-objective optimization of water supply subsystems

通过优化和评价受水区需水、调水过程,得到两组最佳调配水方案,即经济与生态效益较高的方

案 1 和供水保证率较高的方案 2,如表 2 所示。增加常规调配过程方案(方案 3)进行对比分析。由表 2 可知,相比于方案 3,方案 1、2 的各项指标均有较大的提升,供水保证率从 43.01%提升到 90%以上,社会生产总值最大可提升 2.5%。而通过模型优化与决策后的方案,耦合协同度均大于 0.62,表明通过“用户-枢纽”群联合优化调配后得到的方案在水资源-社会经济-生态环境中表现为初级协调^[36]。

采用受水区多年平均水资源缺水率,即受水区用户缺水率与期望需水量之比,对优选方案做进一步分析,结果如表 3 所示。总体来看,方案 1 和方案 2 中各用户多年平均缺水率约为 7%,能有效缓解受水区未来城市用水紧张的状况;受水区各供水子系统 4 个重点城市(西安、咸阳、渭南、杨凌)缺水率均低于 7%,有效保障受水区重点城市群的社会经济用水需求。

2.2.3 枢纽侧水库群分析

利用 1955—2011 年入库径流数据,通过枢纽侧调度模型,得到三河口水库与黄金峡水库在不同需水方案下的调水情况(图 6)。方案 1 和方案 2 平均

表 2 优选方案的多属性决策结果

Table 2 Multi-attribute decision for preferred schemes

方案	需水量/亿 m ³	供水量/亿 m ³	供水保证率/%	供水基尼系数	生态用水效率/(万亿 sej/m ³)	社会生产总值/万亿元	耦合协同度
1	13.57	12.64	90.14	0.0039	2.354	2.125	0.620
2	13.49	12.57	91.92	0.0054	2.353	2.120	0.621
3	13.66	12.71	43.01	0.0110	2.345	2.073	0.584

表 3 研究区各用户缺水率

Table 3 Rate of water shortage for each customer in study area

用户	缺水率/%		用户	缺水率/%		用户	缺水率/%	
	方案 1	方案 2		方案 1	方案 2		方案 1	方案 2
西安市	6.03	6.04	华县	7.54	7.16	兴平市	7.56	7.31
咸阳市	5.71	5.92	临潼区	7.14	6.79	长安区	7.12	6.87
杨凌区	6.89	6.77	高陵区	8.08	7.75	沔东新城	7.27	7.27
渭南市	6.02	6.09	渭北工业区	8.09	7.73	秦汉新城	5.95	5.95
富平县	7.58	7.44	周至县	7.38	7.32	沔西新城	7.48	7.41
三原县	7.39	7.29	户县	7.67	7.39	空港新城	6.77	6.64
阎良区	7.41	7.15	武功县	8.37	7.93	泾河新城	7.12	6.79

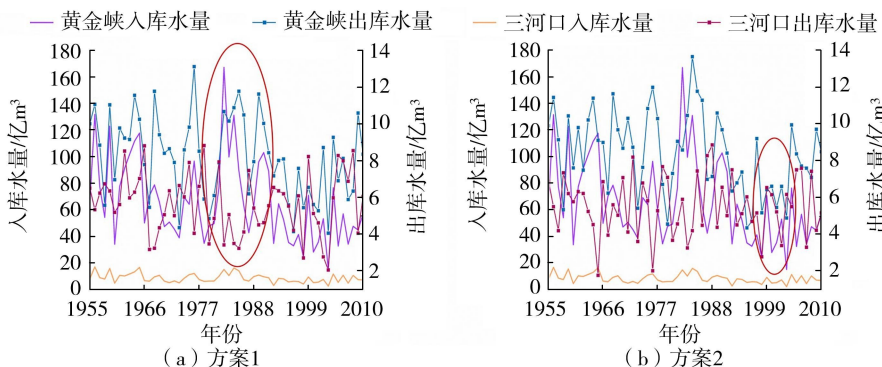


图 6 三河口与黄金峡水库出库和入库过程

Fig. 6 Inlet and outlet water processes of Sanhekou and Huangjinxia reservoirs

总调水量分别为 14.47 亿 m^3 和 14.31 亿 m^3 , 总发电量分别为 5.48 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 和 5.43 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 均满足发电需求; 方案 1 和方案 2 三河口水库多年平均弃水量分别为 0.86 亿 m^3 和 0.92 亿 m^3 , 库空率分别为 8.3% 和 7.0%, 方案 1 下三河口水库使用率更高。

黄金峡水库入库水量主要来自汉江干流, 水量较大, 方案 1 和方案 2 多年平均调水量分别为 8.62 亿 m^3 和 8.55 亿 m^3 。由于黄金峡水库为日调节水库, 不具备存蓄功能, 其向控制闸的调水量基本与入库径流同频。当黄金峡水库来水量较大时, 可作为调水量的主要来源(图 6(a) 中红圈所示), 此时三河口水库承担少量调水任务。

三河口水库作为引汉济渭调水工程的重要调节枢纽, 丰水期可存蓄余水, 枯水期进行补充调水, 对维持受水区的稳定供水有重要作用。方案 1 和方案 2 下三河口水库多年平均调水量分别为 5.85 亿 m^3 和 5.76 亿 m^3 。枯水年黄金峡水库可调水量不足时, 由三河口水库进行补充调水(图 6(b) 中红圈所示), 有力缓解了受水区缺水风险。

3 结 语

本文以受水区需水量作为用户与枢纽间的纽带, 考虑社会经济、生态环境和社会公平等因素对水资源调配的影响, 构建了各受水区 WEE 耦合函数。基于受水区优化需水过程, 建立了跨流域调水工程“用户-枢纽”群的联合优化调配模型, 在引汉济渭调水工程的运用中可实现水资源在社会经济、生态环境维度的均衡高效分配。

对引汉济渭调水工程运行结果的分析表明, 两种优选调配方案供水量为 12 亿~13 亿 m^3 , 调水量大于 14 亿 m^3 , 实现了供需水间的精准匹配与高效协调。受水区用户群缺水率约为 7%, 供水保证率均高于 90%, 有力保障了城市群的用水安全; 水源区枢纽侧在基本完成调水任务的同时, 提升了发电效益, 降低了能耗, 有效保障了工程自身运行效益。总体来说, 联合优化调配方案在保障水资源供应的同时, 实现了水资源调度与能源效益的双重优化, 为跨流域调水工程的高效运行提供了有力支撑。

参考文献:

[1] 赵勇, 何凡, 何国华, 等. 关于国家水网规划建设的十点认识与思考[J]. 水利发展研究, 2023, 23(8): 37-48. (ZHAO Yong, HE Fan, HE Guohua, et al. Ten insights and reflections on the planning and construction of the national water network[J]. Water Resources Development

Research, 2023, 23(8): 37-48. (in Chinese))

[2] 刘璐. 对国家水网的认识[J]. 水利发展研究, 2021, 21(12): 22-25. (LIU Lu. Awareness of national water networks[J]. Water Resources Development Research, 2021, 21(12): 22-25. (in Chinese))

[3] 张建云, 金君良. 国家水网建设几个方面问题的讨论[J]. 水利发展研究, 2023, 23(11): 1-7. (ZHANG Jianyun, JIN Junliang. Discussion on several issues concerning the construction of national water network[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(11): 1-7. (in Chinese))

[4] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 缺水流域用水竞争与协作关系: 以黄河流域为例[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 897-907. (SHANG Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, et al. Competition and cooperation relationship of water utilization in water shortage basins: a case study of Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 897-907. (in Chinese))

[5] 王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1168-1175. (WANG Hao, YOU Jinjun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1168-1175. (in Chinese))

[6] 牛玉国, 张金鹏. 构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展[J]. 水利经济, 2023, 41(2): 1-4. (NIU Yuguo, ZHANG Jinpeng. Research on building the Yellow River's large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(2): 1-4. (in Chinese))

[7] 张弛, 王明君, 于冰, 等. 松辽流域水资源综合调控研究进展与四大难题探究[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1379-1388. (ZHANG Chi, WANG Mingjun, YU Bing, et al. Research progress of comprehensive water resources regulation and four major problems in Song-Liao River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1379-1388. (in Chinese))

[8] 张弛, 陈晓贤, 李昱, 等. 跨流域引水受水水库最优调度决策的理论分析[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 492-504. (ZHANG Chi, CHEN Xiaoxian, LI Yu, et al. Analytical analysis for optimal operation of the recipient reservoir in inter-basin water transfer projects[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 492-504. (in Chinese))

[9] 吕一兵, 万仲平, 胡铁松, 等. 跨流域供水水库群联合调度的半向量双层规划模型研究[J]. 运筹与管理, 2023, 32(4): 8-13. (LYU Yibing, WAN Zhongping, HU Tiesong, et al. A semivectorial bilevel programming model of inter-basin water transfer-supply project[J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32(4): 8-13. (in Chinese))

- [10] MANSADI H D, NIKSOKHAN M H, ARDESTANI M. A quantity-quality model for inter-basin water transfer system using game theoretic and virtual water approaches [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(13): 4573-4588.
- [11] 游进军, 薛志春, 林鹏飞, 等. 二层结构的流域生态调度研究 I: 方法与模型 [J]. *水利学报*, 2021, 52(12): 1449-1457. (YOU Jinjun, XUE Zhichun, LIN Pengfei, et al. Study on the integrated river basin ecological operation based on two-layer structure I: methodology and model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(12): 1449-1457. (in Chinese))
- [12] WANG Zongzhi, ZHANG Lingling, CHENG Liang, et al. Optimizing operating rules for a reservoir system in northern China considering ecological flow requirements and water use priorities [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2020, 146(7): 04020051.
- [13] JAFARZADEGAN K, ABED-ELMDOUST A, KERACHIAN R. A fuzzy variable least core game for inter-basin water resources allocation under uncertainty [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(9): 3247-3260.
- [14] BOZORG-HADDAD O, ABUTALEBI M, CHU X F, et al. Assessment of potential of intraregional conflicts by developing a transferability index for inter-basin water transfers, and their impacts on the water resources [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(1): 40.
- [15] 王宗志, 叶爱玲, 刘克琳, 等. 流域水资源供需双侧调控模型及应用 [J]. *水利学报*, 2021, 52(3): 265-276. (WANG Zongzhi, YE Ailing, LIU Kelin, et al. Modeling of bilateral joint regulation of basin-wide water resources supply and demand [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(3): 265-276. (in Chinese))
- [16] 张沛. 塔里木河流域社会-生态-水资源系统耦合研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [17] 王庆明, 赵勇, 王浩, 等. 自然和社会水循环的能量驱动机制及其综合评价 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(6): 1-7. (WANG Qingming, ZHAO Yong, WANG Hao, et al. Energy driving mechanism of natural and social hydrology cycle and its comprehensive evaluation [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 1-7. (in Chinese))
- [18] 陈华君, 褚钰, 付景保. 南水北调中线水源区生态产业与环境耦合发展情景分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 194-201. (CHEN Huajun, CHU Yu, FU Jingbao. Analysis on ecological industry and environment coupling development in water source area of middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 194-201. (in Chinese))
- [19] 童玉芬. 新疆人口变动对生态环境的未来影响趋势与协调发展对策: 以塔里木河流域为例 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(2): 177-181. (TONG Yufen. Possible impact of population change on environmental evolution of Xinjiang in future and countermeasures; taking Tarim River Valley as an example [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(2): 177-181. (in Chinese))
- [20] 闻昕, 黄抒艺, 谭乔凤, 等. 江苏省南水北调多目标联合优化调度方法 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 118-124. (WEN Xin, HUANG Shuyi, TAN Qiaofeng, et al. A multi-objective joint optimal operation method for the South-to-North Water Diversion Project in Jiangsu Province [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 118-124. (in Chinese))
- [21] 王浩, 许新发, 成静清, 等. 水资源保护利用“四水四定”: 基本认知与关键技术体系 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 1-7. (WANG Hao, XU Xinfu, CHENG Jingqing, et al. “Basing four aspects on water resources” in water resources protection and utilization: basic cognition and key technology system [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 1-7. (in Chinese))
- [22] MASLOW A H. A theory of human motivation [J]. *Psychological Review*, 1943, 50(4): 370-396.
- [23] NIU Chen, CHANG Jianxia, WANG Yimin, 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.
- [24] 王煜, 彭少明, 武见, 等. 黄河流域水资源均衡调控理论与模型研究 [J]. *水利学报*, 2020, 51(1): 44-55. (WANG Yu, PENG Shaoming, WU Jian, et al. Research on the theory and model of water resources equilibrium regulation in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(1): 44-45. (in Chinese))
- [25] SOLOW R M. A contribution to the theory of economic growth [J]. *Quarterly Journal of Economics*, 1956(1): 65-94.
- [26] 高志玥. 渭河干流关中段生态基流保障的代价及适宜流量分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [27] 田桂桂. 基于物质循环的生态用水价值能值评估方法研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [28] ODUM H T. Self-organization, transformity, and information [J]. *Science*, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [29] 邵东国, 贺新春, 黄显峰, 等. 基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法 [J]. *水利学报*, 2005, 36(9): 1050-1056. (SHAO Dongguo, HE Xinchun, HUANG Xianfeng, et al. Optimal water resources deployment model based on maximal net benefit [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(9): 1050-1056. (in Chinese))
- [30] 李丽琴, 王志璋, 贺华翔, 等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究 [J]. *水利学报*, 2019, 50(3): 377-387. (LI Liqin, WANG Zhizhang, HE Huaxiang, et al. Research of water resources multi-dimensional equilibrium allocation based on eco-

- hydrological threshold regulation in inland arid region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 377-387. (in Chinese))
- [31] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [32] 崔思梦, 吴梦洋, 王小军, 等. 基于水足迹与水-能源-粮食关联关系的提水灌溉系统种植结构优化[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 967-977. (CUI Simeng, WU Mengyang, WANG Xiaojun, et al. Optimization of planting structure in pumping irrigation system based on water footprint and water-energy-grain nexus [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(8): 967-977. (in Chinese))
- [33] 常奂宇, 赵勇, 桑学锋, 等. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究 I: 方法与模型[J]. 水利学报, 2022, 53(6): 655-665. (CHANG Huanyu, ZHAO Yong, SANG Xuefeng, et al. Research on the coordinated regulation of water resources-food-energy-ecology in Beijing-Tianjin-Hebei Region I: methods and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(6): 655-665. (in Chinese))
- [34] 张洪芬, 曾静静, 曲建升, 等. 资源高强度流动区水、能源和粮食耦合协调发展研究: 以京津冀地区为例[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 17-21. (ZHANG Hongfen, ZENG Jingjing, QU Jiansheng, et al. Research on the coupling coordinative degree among water-energy-food system in high-intensity flow areas: a case study of Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(5): 17-21. (in Chinese))
- [35] 王浩, 刘家宏. 引汉济渭工程在国家水资源战略布局中的作用[J]. 中国水利, 2015(14): 47-50. (WANG Hao, LIU Jiahong. Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project plays an important role in China strategy of water resources [J]. China Water Resources, 2015(14): 47-50. (in Chinese))
- [36] QI Y Y, FARNOOSH A, LIN L, et al. Coupling coordination analysis of China's provincial water-energy-food nexus [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(16): 23303-23313. (收稿日期: 2023-10-30 编辑: 施业)

(上接第 187 页)

- [24] COTE D, KEHLER D G, BOURNE C, et al. A new measure of longitudinal connectivity for stream networks [J]. Landscape Ecology, 2009, 24(1): 101-113.
- [25] PRACHEIL B M, MCINTYRE P B, LYONS J D. Enhancing conservation of large-river biodiversity by accounting for tributaries [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2013, 11(3): 124-128.
- [26] 苏爱平. 东南诸河区水资源形势及管理对策浅议[J]. 水利科技, 2012(2): 6-8. (SU Aiping. A brief discussion on the water resources situation and management strategies in the Southeastern River Basin [J]. Hydraulic Science and Technology, 2012(2): 6-8. (in Chinese))
- [27] 吴浩云, 唐力, 秦忠, 等. 重点河湖生态流量管控下的美丽幸福太湖流域片建设[J]. 中国水利, 2019(20): 4-6. (WU Haoyun, TANG Li, QIN Zhong, et al. Construction of the beautiful and happy Taihu Lake under the control of ecological flow of key rivers and lakes [J]. China Water Resources, 2019(20): 4-6. (in Chinese))
- [28] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴: 2022 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [29] 万东辉, 杨芳, 解河海, 等. 西江干流四大家鱼繁殖期水库生态调度时机分析 [C]//中国水利学会 2018 学术年会论文集(第二分册). 南昌: 中国水利学会, 2018: 183-188.
- [30] 陈进, 刘志明. 近 20 年长江水资源利用现状分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 1-4. (CHEN Jin, LIU Zhiming. Analysis of water resources utilization in the Changjiang River Basin in recent two decades [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 1-4. (in Chinese))
- [31] 柳林云, 丁毅. 长江流域水力资源与水电规划[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 69-71. (LIU Linyun, DING Yi. Analysis on hydropower resources in Yangtze River Basin and hydropower generation planning [J]. Yangtze River, 2013, 44(10): 69-71. (in Chinese))
- [32] 陈桂亚, 陈潇, 蔡淑兵, 等. 新阶段提升长江流域水能资源利用效能研究[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 1-6. (CHEN Guiya, CHEN Xiao, CAI Shubing, et al. Study on improving water energy resources utilization efficiency of Changjiang River Basin in new stage [J]. Yangtze River, 2023, 54(10): 1-6. (in Chinese))
- [33] 王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵: “量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese)) (收稿日期: 2024-01-19 编辑: 施业)