

统筹防洪、供水、生态的流域水资源系统优化调度研究

杨子桐¹,方国华²,叶 健^{2,3},黄显峰²,金其强¹

(1. 长江航运发展研究中心,湖北 武汉 430010; 2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;
3. 江苏省水利厅,江苏 南京 210029)

摘要:为协调防洪、供水、生态补水多目标调度之间关系,实现流域水资源系统经济、社会、生态多维度整体优化,构建了秦淮河流域水资源系统优化调度模型,提出了与河网水动力水质模型的耦合计算方法,并采用 NSGA III 算法对耦合模型进行求解。结果表明:与常规调度相比,1%、2%、5% 频率防洪调度经济维度和生态维度分别优化 2.9% 和 5.3%、13.0% 和 4.9%、15.1% 和 7.0%;50%、75%、95% 频率供水调度社会维度优化 9.3%、13.1%、18.8%,汛期生态调度经济维度优化 3.6%、8.6%、4.4%,非汛期生态调度经济维度优化 6.1%、4.9%、4.8%;根据优化调度得出不同河段的河道水位控制线,提出了不同时期防洪、供水、生态补水的调度决策规则,有效提升了河网调蓄能力和防洪、供水、生态整体优化效果,提高了水资源综合利用效益。

关键词:河网水动力水质模型;水资源系统优化调度;河道水位控制;秦淮河流域

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0071-08

Research on optimization and scheduling of watershed water resources system for integrated flood control, water supply, and ecology//YANG Zitong¹, FANG Guohua², YE Jian^{2,3}, HUANG Xianfeng², JIN Qiqiang¹(1. Yangtze River Shipping Development Research Center, Wuhan 430010, China; 2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Water Conservancy Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to coordinate the multi-objective scheduling of flood control, water supply, and ecological replenishment, and achieve the overall optimization of the economic, social, and ecological dimensions of the water resources system in the Qinhuai River Basin, an optimization scheduling model for the water resources system in the Qinhuai River Basin was constructed. A coupling calculation method with the hydrodynamic water quality model of the river network was proposed, and the NSGA III algorithm was used to solve the coupling model. The results show that compared with conventional scheduling, 1%, 2%, and 5% frequency flood control scheduling optimizes the economic and ecological dimensions by 2.9% and 5.3%, 13.0% and 4.9%, 15.1% and 7.0%. 50%, 75%, 95% frequency water supply scheduling optimizes social dimension 9.3%, 13.1%, 18.8%. During flood season ecological replenishment scheduling optimizes economic dimension 3.6%, 8.6%, 4.4%. During non-flood season ecological replenishment scheduling optimizes economic dimension 6.1%, 4.9%, 4.8%. According to the optimized scheduling, the water level control lines of different river sections were obtained, and the scheduling decision rules for flood control, water supply, and ecological replenishment in different periods were proposed. This effectively improved the regulation and storage capacity of the river network and the overall optimization effect of flood control, water supply, and ecology, and enhanced the comprehensive utilization efficiency of water resources.

Key words: hydrodynamic water quality model; optimization and scheduling of water resources system; river water level control; the Qinhuai River Basin

流域水资源系统是流域内工程体系和河网水系的集合,工程体系调度直接影响河网水系状态,关乎防洪、供水、生态、发电、航运各调度目标任务的实现^[1]。然而各调度目标任务通常在不同时段存在一定竞争与矛盾,各目标任务的实现对经济、社会、生态多维度产生影响,并直接反映于河道水位的时

基金项目:江苏省水利科技重大项目(2020005);长江航务管理局重点科技项目(2024-CHKJ-013,2024-CHKJ-015)
作者简介:杨子桐(1995—),男,工程师,博士,主要从事水资源规划及航运规划研究。E-mail:353060461@qq.com
通信作者:方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhufgh@163.com

空变化。因此,有必要统筹流域内工程体系的运行调度,精准调控河道水位,以实现经济、社会、生态多维度整体优化,并协调不同时段各目标任务之间关系,推进流域水利高质量发展^[2]。国内外关于流域水资源优化调度的研究开始于 20 世纪 90 年代,由单一类型水利工程单目标调度逐渐演变为流域水资源系统多目标优化调度^[3-5],进而对如何协调多目标之间的关系进行了研究。当前协调多目标之间关系大多以水电站或水库为研究对象,以综合效益最大^[6-7]、总体风险最小^[8-9]、多目标均衡^[10]等为目标,采用 Pareto 最优方法进行求解^[11-12];或以水闸或泵站为研究对象,以不同调度目标下水位控制方案最优为目标,采用河网水动力水质模拟方法进行模拟求解^[13-15]。例如吴浩云等^[16]统筹协调防洪、供水、水生态、水环境等目标,开展了多目标驱动的太湖调度水位研究。然而以上方法难以完全协调各调度目标之间关系,目前关于不同调度目标下复杂水网流域河道水位精细化控制的研究还较少。

秦淮河流域河网交错,工程类型多样,不同河段和不同时段存在着防洪、供水、生态需求在某一方面的侧重,不同水文条件下不同目标之间的矛盾较为突出,而复杂水力联系加剧了流域水资源系统优化调度的“维数灾”困境,使得流域水资源系统调度综合效益发挥不充分、不完全。传统优化调度方法无法满足以河道水位控制为主的流域水资源调度整体优化需要,亟须发展统筹防洪、供水、生态的流域水资源系统优化调度理论与方法。鉴于此,本文在构建秦淮河流域水动力水质模型基础上,统筹经济、社会、生态多维度整体优化要求,按照防洪、供水、生态补水 3 种调度目标,确定侧重不同调度目标下的目标函数和约束条件,耦合流域水资源系统优化调度模型与河网水动力水质模型,研究基于 NSGA III 算法对模型求解,提出不同河段和不同时段的水资源调度防洪、供水、生态补水优化调度协调规则,以期在实际水资源调度提供水位控制参考。

1 研究区概况

秦淮河流域位于长江下游南岸、江苏省西南部,地处 31°34'N~32°10'N、118°39'E~119°10'E,涉及南京、镇江两市,总面积 2 684 km²。秦淮河流域面积较小,河道水位受水文条件影响较大,开展的水资源调度以防洪、供水、生态补水 3 种调度目标为主,不同调度目标下调水路线、控制水位、调节流量、调度时期等差异较大,水资源调度过程以短期为主。研究区概况见图 1。

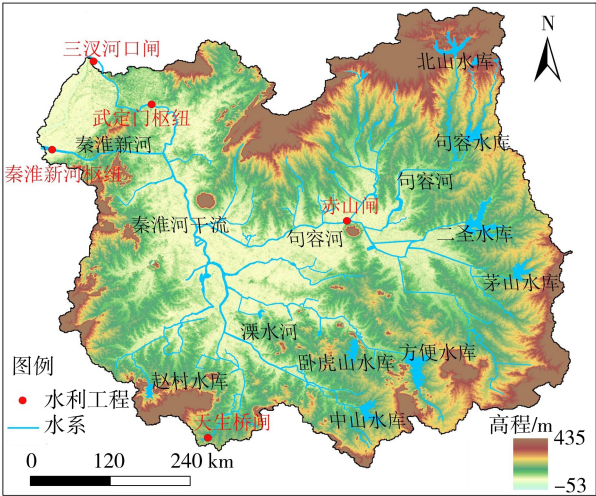


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 河网水动力水质模型构建

2.1.1 河网概化

由于秦淮河流域内河网密布,水流运动受人工控制的水闸、泵站、船闸等水利工程影响较大,为便于开展河网水动力水质模拟,根据秦淮河流域水系情况及各类水利工程布置与运行特点,将河网概化为 14 条外河道、6 条内河道、78 个断面、10 个无调蓄能力节点,工程体系概化为 4 座水闸、2 座泵站、1 座船闸,如图 2 所示。

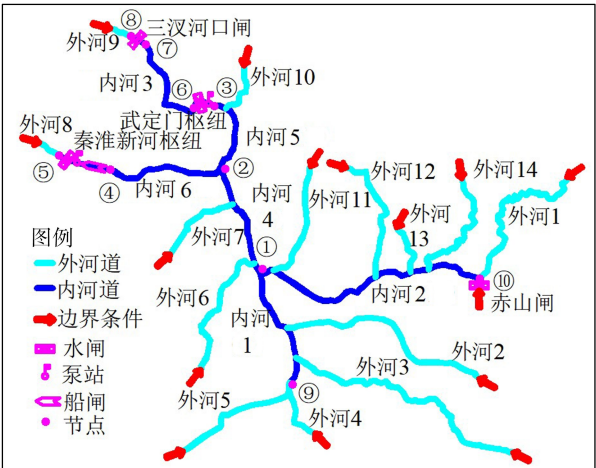


图 2 秦淮河流域河网概化

Fig. 2 Outline of river network in the Qinhuai River Basin

2.1.2 模型模拟方法

基于圣维南方程,采用 Preissmann 四点隐式差分格式的三级联解法求解河道水位追赶方程,修正水利工程所在河道追赶系数以模拟水利工程过流能力,并对节点水位方程进行处理计算,实现流域内河道水流运行的有效模拟^[17]。在建立河网水动力模型基础上,基于一维对流扩散方程,采用隐式迎风差

分格式的三级联解法求解河道水质追赶方程,并对节点浓度方程进行处理计算,实现流域内河道水质变化的有效模拟。

2.1.3 边界条件

将 15 个山丘区和 82 个圩区实测径流过程分别作为河网水动力水质模型集中入流和旁侧入流的水文边界处理。秦淮河流域处于长江下游,其河道水位变化还受长江潮位影响,依据长江流域综合规划及防洪规划成果,秦淮河流域防洪调度时段长江潮位采用防御 1954 年型典型洪水标准,其余调度时段三汊河口闸下游水位过程采用南京站实测长江潮位资料,秦淮新河枢纽下游水位采用潮位平均滞后时间 40 min 的内插南京站实测长江潮位得到。根据赤山湖水质评价结果及分析,采用 GB3838—2022《地表水质量标准》Ⅲ类水污染物浓度下限作为赤山闸下水质边界;由于三汊河口闸及秦淮新河枢纽无实测水质资料,根据秦淮河入江口水质评价结果及分析,采用Ⅱ类水污染物浓度下限作为水质边界。

2.1.4 模型率定与验证

为保证模型能够精确模拟防洪、供水、生态补水 3 种调度目标下水资源调度过程,选取 2015 年 6 月 26 日至 7 月 6 日防洪、2005 年 6 月 4—9 日供水、2015 年 8 月 3—8 日汛期生态补水、2009 年 2 月 10—16 日非汛期生态补水 4 次实际调水资料进行模型参数率定。同时,选取 2016 年 7 月 1—12 日防洪、2008 年 6 月 15—27 日供水、2019 年 7 月 24—28 日汛期生态补水、2016 年 2 月 3—9 日非汛期生态补水 4 次实际调水资料进行模型验证。模型率定与验证结果见表 1。由表 1 可见,率定阶段,水位相对误差均值为 3.59%,流量相对误差均值为 3.24%,COD 质量浓度相对误差均值为 3.92%,模型确定性系数(R^2)均值为 0.85。验证阶段,水位相对误差均值为 4.26%,流量相对误差均值为 3.79%,COD 质量浓度相对误差均值为 4.11%, R^2 均值为 0.85。整体上该模型能有效模拟不同调度

表 1 河网水动力水质模型率定与验证结果

Table 1 Calibration and verification results of river network hydrodynamic water quality model

阶段	调度目标	水位相对 误差/%	流量相对 误差/%	COD 质量浓度 相对误差/%	R^2
率定	防洪	5.20	-3.76	2.69	0.85
	供水	-3.63	2.90	-3.15	0.88
	汛期生态补水	3.96	-4.46	-5.43	0.79
	非汛期生态补水	1.57	-1.83	-6.04	0.86
验证	防洪	-7.91	6.24	2.67	0.83
	供水	2.94	1.95	3.11	0.91
	汛期生态补水	-4.84	4.44	-2.99	0.82
	非汛期生态补水	1.33	-2.51	6.17	0.83

目标下水利工程的运行工况,模拟结果较好反映了秦淮河流域河网水流和污染物迁移过程,模拟精度较高。

2.2 优化调度模型构建

2.2.1 目标函数

按照分别侧重防洪调度、供水调度、生态补水调度的情况,以经济、社会和生态各维度目标函数整体最优为总目标:

$$\max(H_{m,n}) = \max(H_{1,n}, H_{2,n}, H_{3,n}) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} X \in S \\ X \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $H_{m,n}$ 为第 m 个调度目标的第 n 个维度的关键要素, $m=1$ 为防洪调度, $m=2$ 为供水调度, $m=3$ 为生态补水调度, $n=1$ 为经济维度, $n=2$ 为社会维度, $n=3$ 为生态维度; X 为决策变量集合; S 为约束条件集合。

2.2.1.1 防洪调度

a. 经济维度。河道水位的持续升高会大大增加重要堤防工程发生险情的可能性,当达到警戒水位以上时会增加相应的防汛抢险经济成本。以东山站超警戒水位时间最小为目标函数:

$$\min(H_{1,1}) = \min\left(\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T T_{Gi,t}\right) \quad (3)$$

式中: $H_{1,1}$ 为防洪调度经济维度关键要素; $T_{Gi,t}$ 为 t 时段第 i 个断面超警戒水位时间; N 为断面数; T 为总时段数。

b. 社会维度。系统下泄流量代表整个系统在调度期内的泄洪能力,也代表减少洪灾损失、保障社会安全的能力^[18]。以秦淮新河闸和三汊河口闸下泄流量最大为目标函数:

$$\max(H_{1,2}) = \max\left(\sum_{i=1}^N Q_{Fi}\right) \quad (4)$$

式中: $H_{1,2}$ 为防洪调度社会维度关键要素; Q_{Fi} 为秦淮新河闸和三汊河口闸第 i 个断面的下泄流量。

c. 生态维度。是否满足河流健康和生态系统平衡的生态基本流量是衡量生态维度的重要方面。以典型河道断面削峰后生态缺水量最小为目标函数:

$$\min(H_{1,3}) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T |\min(0, Q_{i,t} - Q_{Di,t})| \quad (5)$$

式中: $H_{1,3}$ 为防洪调度生态维度关键要素; $Q_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个断面的流量; $Q_{Di,t}$ 为 t 时段第 i 个断面的生态基本流量。

2.2.1.2 供水调度

a. 经济维度。供水调度的泵站运行成本是衡量经济维度的重要方面。不考虑分时电价,以武定

门泵站和秦淮新河泵站总用电量最小作为目标函数:

$$\min(H_{2,1}) = \min\left(\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{\rho g Q_{i,t} \bar{H}_{j,t}}{3600 \eta_{j,t} \eta_{\text{mot}} \eta_{\text{int}}}\right) \quad (6)$$

式中: $H_{2,1}$ 为供水调度经济维度关键要素; $\bar{H}_{j,t}$ 为 t 时段第 j 个泵站的时均扬程; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; J 为泵站数量; $\eta_{j,t}$ 为 t 时段第 j 个泵站的装置效率; η_{mot} 为电动机效率; η_{int} 为传动效率。

b. 社会维度。干旱和缺水已成为农业发展的主要约束,更是社会发展的主要制约因素。以句容河、溧水河、秦淮河(江宁)、秦淮河(主城)灌溉总缺水量最小为目标函数:

$$\min(H_{2,2}) = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T |\min(0, Q_{k,t} - Q_{Gk,t})| \quad (7)$$

式中: $H_{2,2}$ 为供水调度社会维度关键要素; $Q_{k,t}$ 为 t 时段第 k 个河道的流量; $Q_{Gk,t}$ 为 t 时段第 k 个河道的灌溉取水量; K 为河道数量。

c. 生态维度。河道内水体污染物会严重威胁农业耕地、地下水和农产品安全,更会造成农业生态环境的破坏。以东山站 COD 质量浓度最小为目标函数:

$$\min(H_{2,3}) = \min(\rho_{\text{CODr}}) \quad (8)$$

式中: $H_{2,3}$ 为供水调度生态维度关键要素; ρ_{CODr} 为 t 时段重点断面的 COD 质量浓度。

2.2.1.3 生态补水调度

a. 经济维度。非汛期时,流域内降雨产流较少,需要泵站提水保证供水,经济维度以秦淮新河泵站总用电量最小作为目标函数,形式同式(6)。汛期时,流域内降雨产流较多,可通过自流引水进行生态调度,考虑水资源作为一种资源具有经济价值,以天生桥闸自流引水平均流量最小为目标函数:

$$\min(H_{3,1}) = \min\left(\sum_{t=1}^T Q_{\text{Sr}}/T\right) \quad (9)$$

式中: $H_{3,1}$ 为生态补水调度经济维度关键要素; Q_{Sr} 为 t 时段系统入口的流量。

b. 社会维度。河网水系连通是提高水资源调度能力的有效途径,也是造福民生、促进社会发展的有效手段^[19]。非汛期以秦淮新河和秦淮河水流交换率最大作为目标函数,汛期以溧水河、秦淮河干流、秦淮河、秦淮新河的水流交换率最大作为目标函数:

$$\max(H_{3,2}) = \max\left(\sum_{t=1}^T \frac{Q_{\text{Sr}} - Q_{\text{Fr}}}{Q_{\text{Fr}}}\right) \quad (10)$$

式中: $H_{3,2}$ 为生态补水调度社会维度关键要素; Q_{Fr} 为 t 时段系统出口引调水流量。

c. 生态维度。河流水质改善是保护水资源、维护生态平衡的重要任务。非汛期时以武定门(闸上)COD 质量浓度下降时间最短为目标函数,汛期时以东山站 COD 质量浓度下降时间最短为目标函数:

$$\min(H_{3,3}) = \min(t_1) \quad (11)$$

式中: $H_{3,3}$ 为生态补水调度生态维度关键要素; t_1 为 COD 质量浓度下降到设定等级标准的时间。

2.2.2 约束条件

2.2.2.1 共性约束

a. 水量平衡约束。河道在一段时间内应满足如下水量平衡:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + \sum_{t=1}^T (Q_{\text{Li},t} - Q_{\text{Oi},t})t \quad (12)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为第 i 个断面 t 时段初、末的河道水量; $Q_{\text{Li},t}$ 、 $Q_{\text{Oi},t}$ 分别为 t 时段第 i 个断面的入、出河流量。

b. 水利工程边界条件约束。流域内沟通各级水利工程的水力联系以修正追赶方程的方式进行计算,水闸和泵站的水力联系需分别依据过闸流量曲线和机组装置性能曲线进行修正:

$$Q_{\text{L}} = f(Z_{\text{Li},t}, Z_{\text{Li}+1,t}) \quad (13)$$

式中: Q_{L} 为过闸流量或泵站机组流量; $f(\cdot)$ 为过闸流量关系曲线或泵站机组性能曲线; $Z_{\text{Li},t}$ 、 $Z_{\text{Li}+1,t}$ 分别为 t 时段闸(泵)上、下水位。

c. 水利工程运行能力约束。水闸或泵站在运行过程中过流或提水能力需满足工程设计要求:

$$0 \leq Q_{\text{Tk},t} \leq Q_{\text{Tk},\max} \quad (14)$$

式中: $Q_{\text{Tk},t}$ 为 t 时段第 k 个水闸或泵站的过流或提水流量; $Q_{\text{Tk},\max}$ 为第 k 个水闸或泵站的设计流量。

d. 其他约束。考虑流域实际调度情况,包括河道输水能力约束、非负约束、航运最低水位约束等。

2.2.2.2 个性约束

a. 水位约束。流域内河道各断面在任一时刻的水位必须高于河道最低允许水位,低于河道最高允许水位,以保证模拟计算的稳定性,即:

$$Z_{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{\max} \quad (15)$$

式中: $Z_{\min}$ 、 $Z_{\max}$ 分别为 t 时段第 i 个断面所在河道的最低、最高允许水位; $Z_{i,t}$ 为 t 时段第 i 个断面的水位。防洪调度时, $Z_{\max}$ 为历史最高洪水位(河道水位可短暂超过警戒水位但不能达到历史最高洪水位);其他调度时, $Z_{\max}$ 为警戒水位。

b. 供水保证率约束。流域水资源调度需考虑满足调度期内供水保证率要求:

$$P_{\min} \leq \frac{T_1}{T+1} \times 100\% \leq 100\% \quad (16)$$

式中: $P_{\min}$ 为最低供水保证率; T_1 为满足供水要求的时段数。供水调度时, $P_{\min}$ 为 95%; 其他调度时, $P_{\min}$ 为 90%。

c. 重点断面 COD 质量浓度约束。流域水资源调度需考虑重点断面的 COD 质量浓度要求:

$$0 \leq \rho_{\text{COD}} \leq \rho'_{\text{COD}} \tag{17}$$

式中 ρ'_{COD} 为重点断面 COD 限制质量浓度。生态调度时, ρ'_{COD} 取 GB3838—2022《地表水质量标准》Ⅱ类水对应 COD 质量浓度; 其他调度时, ρ'_{COD} 取 GB3838—2022《地表水质量标准》Ⅲ类水对应 COD 质量浓度。

2.3 优化调度模型求解

2.3.1 模型耦合方法

目前,流域内河网水系之间的水力联系多被简化或以滞时法、马斯京根法等水动力学方法确定,缺乏从河道断面角度考虑调度决策方案与河网水动力水质状态的实时交互^[20]。相较于简单的水动力学方法,河网水动力水质模型能够合理模拟水流在各河道断面的演进过程以及不同水质参数的变化过程。流域水资源优化调度模型与河网水动力水质模型耦合,不同于常规调度,需要离散工程水位过程再进行河网水动力模拟,这种情况下的优化调度可由工程水位-流量关系曲线和决策变量推求工程水位运行过程,其中工程水位-流量关系曲线和由初始种群生成的决策变量可看作已知变量,进行直接求解,使得模型计算更为高效、稳定。耦合模型计算流程如图 3 所示。

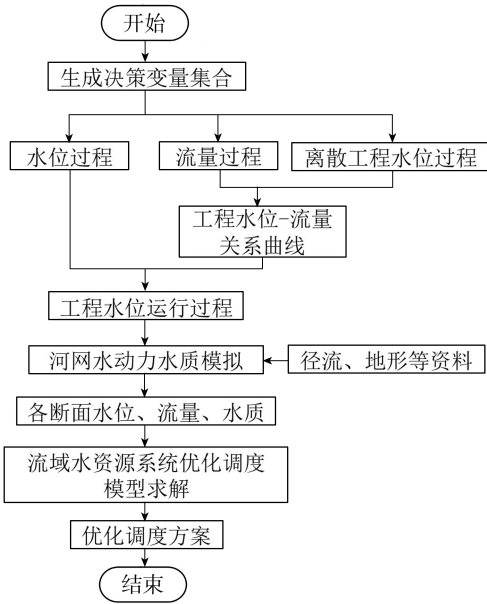


图 3 耦合模型计算流程

Fig. 3 Calculation process of coupling model

2.3.2 耦合模型求解方法

NSGA-Ⅲ算法作为改进的非支配排序遗传算

法,采用与最近空间参考点关联数量进行非支配排序,解决了 NSGA-Ⅱ在高维目标空间中因拥挤度计算失效导致的多样性不足问题,有效平衡了解的收敛性和多样性^[21-22]。本文按照防洪、供水、生态补水 3 种调度目标,以调度期内水闸过流流量、泵站提水流量为决策变量,确定流域水资源系统优化调度时段,将初始种群输入河网水动力水质模型进行计算,根据计算结果与参考线的距离确定各个解的 Pareto 等级,完成快速非支配排序,再进行选择、交叉、变异等操作,当迭代次数达到要求则终止运算并输出结果。

3 结果与分析

3.1 不同调度目标下非劣解集求解

根据秦淮河流域 1981—2020 年水文资料,选取防洪、供水、生态补水调度典型计算时段,对秦淮河流域水资源系统优化调度模型进行求解,并对计算结果进行分析。由于秦淮河流域生态补水调度存在汛期引石臼湖水和非汛期引长江水两种方式,故区分为汛期生态补水和非汛期生态补水两种情况。以东山站历次洪水位、东山站历次低水位、汛期东山站连续 5 d 平均水位、非汛期东山站连续 7 d 平均水位排频结果作为防洪、供水、汛期生态补水、非汛期生态补水调度计算时段选取依据。防洪调度选取典型调度时段的 1%、2%、5% 频率情况进行计算,供水调度、汛期生态补水调度和非汛期生态补水调度选取典型调度时段的 95%、75%、50% 频率情况进行计算,选取不同调度目标下的 20 个非劣解集方案作为调度结果。以 1% 频率下防洪优化调度为例进行展示,如图 4、图 5 所示。由图 5 可见,防洪优化调度的超警戒水位时间与系统最大下泄流量呈先正相关后负相关的关系,超警戒水位时间与削峰后生态缺水

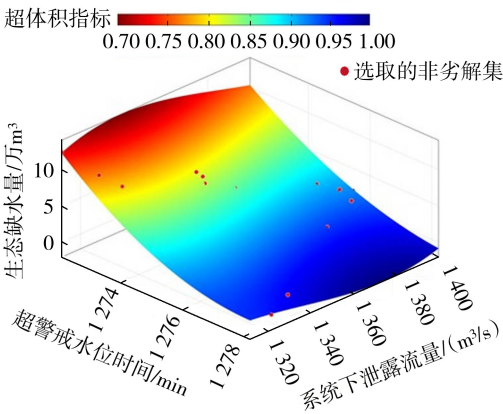


图 4 1% 频率下防洪优化调度的非劣解集

Fig. 4 Non-inferior sets of flood control optimal scheduling result at 1% frequency

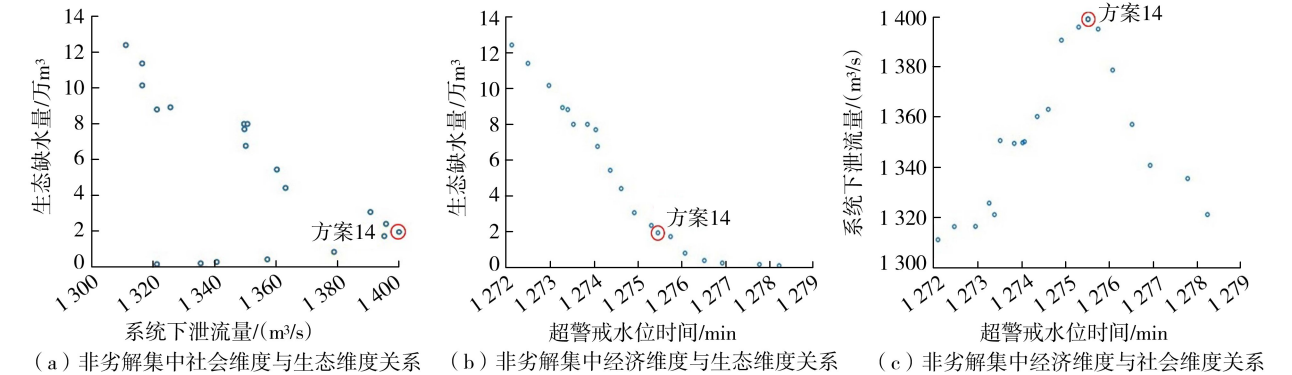


图 5 1%频率下防洪优化调度结果

Fig. 5 Flood control optimal scheduling results at 1% frequency

下泄流量呈先负相关后正相关的关系,按系统最大下泄流量最大选取方案 14。供水优化调度按灌溉总缺水量最小选取最佳方案,汛期生态补水优化调度和非汛期生态补水优化调度按水流交换率最大分别选取最佳方案。

3.2 优化调度与常规调度对比

为进一步分析优化调度的优势,将防洪、供水、生态补水优化调度下经济、社会、生态各维度的优化调度结果与常规调度进行对比,结果如表 2~5 所示,其中优化调度相较于常规调度更有利时优化率为正,反之则为负。由表 2 可见,相较于常规调度,防洪优化调度通过适当降低系统最大下泄流量,尽可能减少超警戒水位时间和削峰后生态缺水量,5%

频率的经济、生态维度优化程度最大,分别为 15.1%、7.0%,1%频率的经济、生态维度优化程度最小,分别为 2.9%、5.3%。由表 3 可见,相较于常规调度,供水优化调度通过适当增加部分泵站总用电量和 COD 质量浓度,尽可能减少灌溉总缺水量,95%频率的社会维度优化程度最大,为 18.8%,50%频率的社会维度优化程度最小,为 9.3%。由表 4 可见,相较于常规调度,汛期生态补水优化调度通过适当减少水流交换率和增加 COD 质量浓度下降时间,尽可能减少自流引水平均流量,75%频率的经济维度优化程度最大,为 8.6%,50%频率的经济维度优化程度最小,为 3.6%。由表 5 可见,相较于常规调度,非汛期生态补水优化调度通过适当减少水流交

表 2 防洪优化调度与常规调度结果对比

频率/%	超警戒水位时间			系统最大下泄流量			削峰后生态缺水量		
	优化调度/min	常规调度/min	优化率/%	优化调度/(m³/s)	常规调度/(m³/s)	优化率/%	优化调度/万 m³	常规调度/万 m³	优化率/%
1	1275.4	1313	2.9	1400	1400	0	1.9	2.1	5.3
2	669.9	770	13.0	1340	1360	-1.5	9.0	9.5	4.9
5	520.4	613	15.1	1270	1340	-5.2	23.4	25.1	7.0

表 3 供水优化调度与常规调度结果对比

频率/%	泵站总用电量			灌溉总缺水量			COD 质量浓度		
	优化调度/(万 kW·h)	常规调度/(万 kW·h)	优化率/%	优化调度/万 m³	常规调度/万 m³	优化率/%	优化调度/(mg/L)	常规调度/(mg/L)	优化率/%
50	7.9	7.5	-5.3	315.4	347.7	9.3	14.9	14.6	-2.3
75	13.1	11.9	-10.1	2504.3	2881.5	13.1	16.6	15.9	-4.5
95	24.1	20.9	-15.3	3913.9	4817.3	18.8	19.1	17.8	-7.2

表 4 汛期生态补水优化调度与常规调度结果对比

频率/%	自流引水平均流量			水流交换率			COD 质量浓度下降时间		
	优化调度/(m³/s)	常规调度/(m³/s)	优化率/%	优化调度/%	常规调度/%	优化率/%	优化调度/h	常规调度/h	优化率/%
50	21.2	22	3.6	90.9	92.1	-1.3	44.9	46.7	-2.8
75	25.6	28	8.6	85.2	87.3	-2.4	57.2	60.1	-4.0
95	30.6	32	4.4	85.1	86.3	-1.4	65.8	68.0	-1.2

表 5 非汛期生态补水优化调度与常规调度结果对比

Table 5 Comparison results of optimized scheduling of ecological water replenishment during non-flood season and conventional scheduling

频率/%	泵站总用电量			水流交换率			COD 质量浓度下降时间		
	优化调度/ (万 kW·h)	常规调度/ (万 kW·h)	优化率/%	优化调度/%	常规调度/%	优化率/%	优化调度/h	常规调度/h	优化率/%
50	4.6	4.9	6.1	86.1	87.5	-1.6	103.6	98.7	-4.9
75	9.7	10.2	4.9	82.4	82.3	0.1	126.0	122.4	-2.9
95	19.8	20.8	4.8	78.9	79.2	-0.4	145.9	143.3	-1.8

换率和增加 COD 质量浓度下降时间,尽可能减少泵站总用电量,50%频率的经济维度优化程度最大,为 6.1%,95% 频率的经济维度优化程度最小,为 4.8%。由于优化调度是以全局最优为目标,部分维度利益可能受损,故存在部分维度优化率为负值的现象。总之,秦淮河流域水资源系统优化调度,经济、社会、生态多维度综合效果得到有效提升,水资源综合利用效益可得到进一步发挥。

3.3 优化调度下不同河段河道水位控制结果

为进一步满足秦淮河流域不同河段防洪、供水、生态协调需要,本文考虑以优化调度过程中河道水位的控制结果作为指导秦淮河流域水资源系统实际调度过程的依据。当遭遇不同频率洪水时,以相应防洪优化调度过程中的起调水位作为防洪控制线;当遭遇不同频率缺水时,以相应供水优化调度过程中的起调水位作为供水控制线,以相应生态补水优化调度过程中的起调水位作为生态控制线。以秦淮河干流为例,河道水位防洪、供水、生态补水控制线计算结果如图 6 所示。此外,还对秦淮河流域的句容河、溧水河、秦淮河(外秦淮河)、秦淮新河 4 条主要河道水位进行了计算,限于篇幅,结果不作展示。

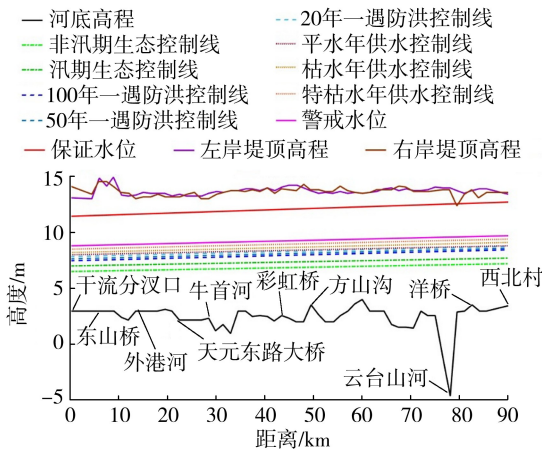


图 6 秦淮河干流河道水位防洪、供水、生态补水控制线
Fig. 6 Control line for flood control, water supply, and ecological replenishment of main stream of the Qinhuai River

3.4 不同时期秦淮河流域优化调度规则

为进一步协调秦淮河流域防洪、供水、生态补水

3 种调度目标之间的关系,本文以流域代表水文站——东山站的水位控制作为协调不同时期多目标优化调度之间关系的依据,如图 7 所示。具体协调规则为:①非汛期东山站水位尽量保持在 6.50~8.00 m,当水文预报未来存在降雨不足且水位线低于 8.00 m 时,实施供水调度,秦淮新河泵站优先开启,武定门泵站后开启;当水位线低于 6.50 m 或水环境较差时,实施生态补水调度,开启天生桥闸、武定门闸和秦淮新河闸。②汛期东山站水位尽量保持在 7.00~8.00 m,当水文预报未来存在 100 年一遇、50 年一遇、20 年一遇洪水且水位线分别高于 7.46、7.63、7.84 m 时,实施防洪调度,上游水库汛限水位控制,中游赤山闸分泄句容河洪水,必要时启用赤山湖蓄滞洪区,下游武定门闸优先开启,秦淮新河闸后开启,适时启用天生桥闸。③6 月,当水文预报未来存在特枯水、枯水、平水且东山站水位低于 8.50、8.20、8.00 m 时,实施供水调度,开启武定门泵站和秦淮新河泵站。④汛期当东山站水位线低于 7.00 m 或水环境较差时,实施生态补水调度,开启秦淮新河泵站和武定门闸。

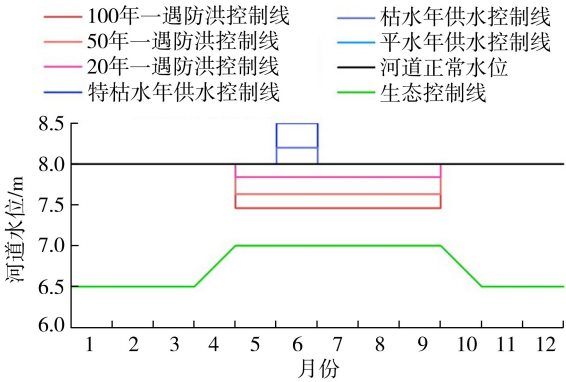


图 7 基于东山站水位的不同时期秦淮河流域优化调度规则
Fig. 7 Optimization and scheduling rules for the Qinhuai River Basin in different periods based on water level at Dongshan Station

4 结 论

a. 构建了秦淮河流域河网水动力水质模型,模型确定性系数均值为 0.85,能够有效模拟秦淮河流

域河网水动力水质;统筹了防洪、供水、生态补水等不同调度目标对经济、社会、生态多维度的影响,构建了秦淮河流域水资源系统优化调度模型,提出了优化调度模型与河网水动力水质模型的耦合计算方法,并基于 NSGA III 算法进行了模型求解。

b. 相较于常规调度,1%、2%和 5%频率下防洪调度经济、生态维度分别优化 2.9%和 5.3%、13.0%和 4.9%、15.1%和 7.0%;50%、75%、95%频率下供水调度社会维度优化 9.3%、13.1%、18.8%,汛期生态补水调度经济维度优化 3.6%、8.6%、4.4%,非汛期生态补水调度经济维度优化 6.1%、4.9%、4.8%。

c. 根据优化调度结果得出秦淮河流域不同河段的河道水位控制线,并制定了适应不同时期防洪、供水、生态补水的调度决策规则。所提出的水位控制方案能够科学指导秦淮河流域水资源系统调度,有效协调流域防洪、供水、生态多目标之间关系,实现经济、社会、生态多维度整体优化,提升水资源的综合利用效益。

参考文献:

[1] 万芳,王煜,王威浩,等. 水网构建对汾河流域水资源系统韧性演变的影响[J]. 水资源保护,2025,41(1):19-26. (WAN Fang, WANG Yu, WANG Weihao, et al. Influences of water network construction on water resources system resilience evolution in the Fenhe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025,41(1):19-26. (in Chinese))

[2] 董增川,倪效宽,陈牧风,等. 流域水资源调度多目标时变偏好决策方法及应用[J]. 水科学进展,2021,32(3):376-386. (DONG Zengchuan, NI Xiaokuan, CHEN Mufeng, et al. Multi-objective time-varying preference decision-making method for basin water resource dispatch and its application [J]. Advances in Water Science, 2021,32(3):376-386. (in Chinese))

[3] 邓坤,张璇,杨永生,等. 流域水资源调度研究综述[J]. 水利经济,2011,29(6):23-27. (DENG Kun, ZHANG Xuan, YANG Yongsheng, et al. A review of research on watershed water resources scheduling [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011,29(6):23-27. (in Chinese))

[4] TAN Qiaofeng, WANG Xu, WANG Hao, et al. Derivation of optimal joint operating rules for multi-purpose multi-reservoir water-supply system[J]. Journal of Hydrology, 2017,551:253-264.

[5] REDDY M J, KUMAR D N. Performance evaluation of elitist-mutated multi-objective particle swarm optimization for integrated water resources management[J]. Journal of

Hydroinformatics,2009,11(1):79-88.

[6] MORTAZAVI-NAEINI M, KUCZERA G, CUI L. Application of multiobjective optimization to scheduling capacity expansion of urban water resource systems[J]. Water Resources Research, 2014, 50(6):4624-4642.

[7] BISWAS P, DHAR A, SEN D. A numerical simulation model for conjunctive water use in basin irrigated canal command areas[J]. Water Resources Management,2017, 31(12):1-13.

[8] 丁紫玉,方国华,毛莺池,等. 考虑发电与弃水风险的梯级水电站水库风险调度模型[J]. 水资源保护,2024,40(2):100-106. (DING Ziyu, FANG Guohua, MAO Yingchi, et al. Risk dispatching model of cascade hydropower station reservoirs considering power generation and water abandonment risks [J]. Water Resources Protection,2024,40(2):100-106. (in Chinese))

[9] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA- II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA- II algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(4):51-58. (in Chinese))

[10] 金文婷,王义民,畅建霞,等. 黄河中下游水资源多目标利益对古贤水库运行的响应[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):52-59. (JIN Wenting, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Response of water resources multi-objective interests in middle-lower Yellow River to Guxian Reservoir operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(1):52-59. (in Chinese))

[11] SZEMIS J M, DANDY G C, MAIER H R. A multiobjective ant colony optimization approach for scheduling environmental flow management alternatives with application to the River Murray, Australia [J]. Water Resources Research,2013,49(10):6393-6411.

[12] JIA D, ZHANG T, WU L, et al. Multi-objective cooperative optimization of reservoir scheduling and water resources allocation for inter-basin water transfer project based on multi-stage coupling model [J]. Journal of Hydrology, 2024, 630:130673.

[13] 田世民,江恩慧,王远见,等. 基于黄河流域系统治理的水库多目标调度约束阈值研究[J]. 水利学报,2024,55(6):631-642. (TIAN Shimin, JIANG Enhui, WANG Yuanjian, et al. Research on constraint thresholds for multi-objective scheduling of reservoirs based on Yellow River Basin system governance[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(6):631-642. (in Chinese))

(下转第 124 页)

2025,41(1):42-48. (in Chinese))

[17] 唐瑜,宋献方,马英,等. 基于优化配置的南水北调受水区水资源价值研究[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(1):189-194. (TANG Yu, SONG Xianfang, MA Ying, et al. Study on water resources value in the intake area of the South-to-North Water Diversion Project based on water resources optimization[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 189-194. (in Chinese))

[18] 张平. 南水北调工程受水区资源优化配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[19] 宋丹丹,杨树滩,常本春,等. 江苏省南水北调受水区水资源配置[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(3):417-421. (SONG Dandan, YANG Shutan, CHANG Benchun, et al. Research of water resources allocation of Jiangsu intake district of South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 417-421. (in Chinese))

[20] HE Zhongzheng, WANG Chao, WANG Yongqiang, et al. Dynamic programming with successive approximation and relaxation strategy for long-term joint power generation scheduling of large-scale hydropower station group [J]. Energy, 2021, 222: 119960.

[21] 邓乐乐,郭生练,何绍坤,等. 雅砻江梯级电站发电优化调度研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(2): 109-116. (DENG Lele, GUO Shenglian, HE Shaokun, et al. Optimal operation of Yalong River's cascade reservoirs [J]. Journal of Water Resources Research, 2019, 8(2): 109-116. (in Chinese))

[22] LI Shuliang, HE Zhongzheng, HUANG Wei, et al. Study on the constraint handling method for high-dimensional optimization of cascade reservoirs [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449: 141784.

(收稿日期: 2024-09-24 编辑: 施业)

+++++

(上接第 78 页)

[14] 方国华,金德钢,刘俊,等. 甬江流域河网水利计算模型研究及应用[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 41-45. (FANG Guohua, JIN Degang, LIU Jun, et al. Study and application of hydro-calculation model in river network of Yongjiang River Basin [J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(2): 41-45. (in Chinese))

[15] 徐贵泉,陈长太,唐迎洲. 上海市分片水资源调度方案优化[J]. 水资源保护, 2013, 29(6): 80-84. (XU Guiquan, CHEN Changtai, TANG Yingzhou, et al. Scheme optimization of water resources regionalization scheduling in Shanghai City [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(6): 80-84. (in Chinese))

[16] 吴浩云,刘敏,金科,等. 多目标驱动的太湖调度水位研究[J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 1009-1021. (WU Haoyun, LIU Min, JIN Ke, et al. Research on multi-objective driven dispatching water level of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(3): 1009-1021. (in Chinese))

[17] 刘芹,方国华,孙洪滨,等. 环状河网堰闸过流追赶系数计算方法研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2015, 30(5): 571-579. (LIU Qin, FANG Guohua, SUN Hongbin, et al. Study on calculation method of chasing coefficient of weir sluice flow in looped river networks [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(5): 571-579. (in Chinese))

[18] 陈鹏飞,顾世祥,谢波,等. 分解协调技术在水资源大系统优化配置中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2006(11): 44-47. (CHEN Pengfei, GU Shixiang, XIE Bo, et al. Application of decomposition-coordination technique in optimal allocation of large-scale water resources system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(11): 44-47. (in Chinese))

[19] 刘晋,胡永辉,刘夏. 多目标协同下水系连通调度模拟[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 15-23. (LIU Jin, HU Yonghui, LIU Xia. Simulation on water system connected dispatching under multi-object cooperation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(6): 15-23. (in Chinese))

[20] 杨开斌,许浩,李天庆,等. 马斯京根系列方法在金沙江“11·03”白格堰塞湖溃决洪水演进中的应用[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 71-74. (YANG Kaibin, XU Hao, LI Tianqing, et al. Application of Muskingum methods in dam-breach flood routing of “11·03” Baige Barrier Lake on Jinsha River [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 71-74. (in Chinese))

[21] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 10-18. (in Chinese))

[22] 陶洁,王沛霖,王辉,等. 基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 111-119. (TAO Jie, WANG Peilin, WANG Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-III algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 111-119. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-09-09 编辑: 王芳)