

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.05.011

面向金泽水库取水安全的太浦河多目标联合调度研究

王磊之¹, 胡庆芳¹, 戴晶晶², 王银堂¹, 葛 慧³, 李伶俐¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 太湖流域管理局水利发展研究中心, 上海 200434;

3. 南京信息工程大学水文气象学院, 江苏 南京 210024)

摘要:为强化上海市黄浦江供水系统的重要组成部分金泽水源地取水安全,又兼顾太湖流域及太浦河沿线区域防洪、供水需求,开展了太浦河太浦闸与沿线88个闸控口门的多目标联合调度研究。在分析太浦闸及两岸河道现有调度方式的基础上,拟定了两类共10个联合调度方案。采用细化后的太湖流域水量水质模型,对各调度方案进行了模拟。然后,构建了反映防洪、供水、水环境需求的多目标函数,采用蚁群优选算法对所有调度方案进行了优选。结果表明:与现状调度方案相比,太浦闸同时根据太湖水位和金泽断面水质情况加大下泄流量,同时太浦河沿线河道闸门有序控制,可显著提高金泽水源地关键水质指标达标率、抬升金泽水源地最低水位,又基本不影响流域及区域其他调度需求。

关键词:太浦河;金泽水库;取水安全;多目标联合调度

中图分类号:TV212

文献标识码:A

文章编号:1004-6933(2017)05-0061-08

Research on multi-objective joint operation of Taipu River oriented to water supply safety of Jinze Reservoir

WANG Leizhi¹, HU Qingfang¹, DAI Jingjing², WANG Yintang¹, GE Hui³, LI Lingjie¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering & Science, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Water Development Research Center of Taihu Basin Administration, Shanghai 200434, China)

3. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to strengthen the water supply safety of Jinze water source which is an important component of the Huangpu River water supply system in Shanghai, meanwhile considering the flood control and water supply demands of Taihu Lake area and Taipu River, this paper studied a multi-objective joint operation of Taipu Sluice and 88 sluice-controlled floodgates along Taipu River. Based on the analysis of present operation modes of Taipu Sluice and floodgates along the river, two kinds of joint operation schemes (10 schemes altogether) were proposed. Then a refined model of water quantity & quality of the Taihu Lake Basin was adopted to simulate the above-said schemes, thus setting up the multi-objective functions of flood control, water supply and water environment. Then an ant colony optimization algorithm was used to optimize the above schemes. The results showed that compared with the present schemes, increasing flow discharge by referring to the water level of Taihu Lake and water quality in Jinze section, with the floodgates along the Taipu River under the ordered control, could significantly improve the key water quality index of Jinze water source and obviously elevate the Jinze lowest water level, while the other operation demands of the basin and other regions were barely affected.

Key words: Taipu River; Jinze Reservoir; water intaking safety; multi-objective joint operation

基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(14231200102);水利部公益性行业科研专项(201501014,201501007);国家自然科学基金(51479118,51509157,51609140)

作者简介:王磊之(1991—),男,博士研究生,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: wanglz@nhri.cn

通信作者:胡庆芳,高级工程师。E-mail: hqf_work@163.com

社会经济发展对水资源量与质的要求不断提高,且水资源利用目标日趋多元化,因此,优化水利工程运行调度,成为有效协调区域用水矛盾,合理配置生产用水、生活用水和生态用水的客观要求。国内外学者针对水利工程多目标联合调度开展了持续探索。其中,关于水库群多目标调度的研究开展较早、成果也较多,其主要目的是通过优化水库群调度运用方式,以协调防洪、供水、发电、航运、输沙等利用目标,提高水资源综合利用效益^[1-2]。另有一些学者在水库传统防洪兴利目标基础上,进一步考虑了河道内生态需水保障、水污染防治等目标要求^[3-5]。还有一些学者则研究了更为复杂的多水源、跨区域、不同类型工程的协同调控问题,进一步拓展了水利工程多目标联合调度的维度和尺度^[6-7]。近年来,我国一些河网地区水资源利用与水生态环境保护之间的矛盾比较突出,水质型缺水问题凸显,一些学者开始研究以河网闸坝群为主体的水利工程多目标联合调度,如黄玖等^[8]以防洪排涝安全、水质改善和引水规模最小为综合目标,提出了珠三角北村水系水闸、泵站、水库联合调度方案;吴浩云^[9]基于太湖流域水量水质耦合模型分析后发现,优化望虞河西岸河道及闸门调度方式,在对防洪、航运影响较小的情况下,可以改善引江济太效果;陈炼钢等^[10-11]以保障蚌埠水源地取水安全和减轻突发性水污染事故对河道水质影响为目标,提出了以分期小流量慢速下泄为主要特征的淮河干流闸坝群联合应急调度方案;张永勇等^[12]构建了闸坝水量水质联合调度模型,其在温榆河流域的实例研究表明优化闸坝群调度可以改善全流域水环境状况,提高水资源利用率;张翔等^[13]分析了淮河水系沙颍河闸坝群不同调度方案对应的各控制断面的防洪、供水和水质超标风险,采用多目标模糊综合决策方法得到了最佳调度方案。

上海是我国第一大城市,2015 年全市常住人口超 2 400 万,饮用水安全对保障全市经济社会可持续发展意义重大。目前,黄浦江松浦大桥水源地是上海饮用水主要来源之一,但该水源地水质不稳定、总体评价较低,且易发生突发性水污染事件,故上海市在沟通太湖与黄浦江的骨干河道——太浦河的北岸建设金泽水库,为上海西南五区供应原水,从而与松浦大桥水源地形成“双源互备”供水格局。但太浦河是一条不完全封闭的多功能河道,其现有调度尚未充分考虑包括金泽水库水源地在内的取水安全需求。因此,笔者考虑金泽水库水源地取水安全,同时考虑太浦河上下游及左右岸防洪、供水需求,定量分析太浦河太浦闸及沿线河道闸门调控方式对改善

金泽水源地取水安全的效果,最终提出太浦河多目标联合调度方案,为金泽水库水源地运行提供技术参考。

1 研究对象与范围

本文主要研究对象为太浦河沿线闸门及金泽水库水源地。太浦河是太湖流域洪水与水量调度的骨干河道,也是黄浦江重要源流,具有防洪、排涝、供水、航运、生态等功能。太浦闸位于太湖东侧、太浦河进口处,目前净宽 120 m、设计流量 784 m³/s,是太湖流域控制性的水利工程之一。太浦河南北两岸分别为杭嘉湖区、阳澄淀泖区,共有 96 条河道与太浦河交汇,其中 88 条已建闸控制(北岸 42 条,南岸 46 条)。金泽水库是一座生态调蓄水库,位于金泽湖荡地区,水库引水方式为闸引,其水源地位于太浦河干流,目前正在建设过程中,预计 2020 年供水规模为 351 万 m³/d。

太浦河(闸)、金泽水源地、沿线口门及周边河湖关系见图 1(因太浦河沿线闸门众多,图表仅绘制出有代表性的 5 个闸门)。由于太浦闸及两岸河道闸门调度方式的变化不仅会影响太浦河水情,而且会影响太湖以及沿线区域水情,故本文研究范围不局限于太浦河,而包括太湖湖区、阳澄淀泖及杭嘉湖地区。



图 1 研究范围示意图

2 研究方法

研究对象地处平原河网地区,太浦河及沿线区域水量水质情况与沿线闸门调度之间具有复杂的非线性关系,不同于一般意义上的水库群系统,采用常规优化思路很难得到所谓的“最佳调度方案”,故本文基于太浦闸及太浦河两岸闸群现行调度规则及其可行调整方式,拟定若干具有代表性的联合调度方案,然后采用水量水质模型对不同调度方案进行数值模拟,再基于水量水质模拟结果,构建兼顾金泽水

源地取水安全和太浦河上下游及左右岸防洪、供水需求的多目标函数,最后通过多目标决策分析,得到适宜的太浦河闸群联合调度方案。

2.1 水量水质模型

本文采用太湖流域平原河网水量水质数学模型(简称“太湖流域模型”)模拟太浦河闸群调度对河网水情的影响。太湖流域模型是一个定量描述流域水量水质运动过程的模型系统,包括降雨径流模型、河网水量模型、废水负荷模型、河网水质模型、太湖湖流模型和太湖湖区水质模型 6 个子模型,其逻辑关系见图 2。太湖流域模型开发应用历史长,是研究太湖流域水文水环境问题的重要工具,关于该模型可详细参阅文献[14]。

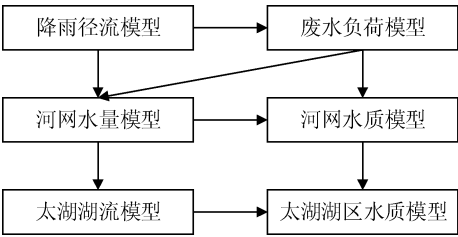


图 2 太湖流域模型各子模型间逻辑关系

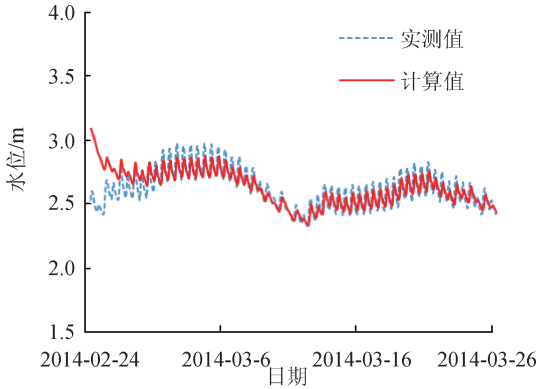
为提高太湖流域模型模拟精度,笔者细化了太浦河沿线区域河网及水闸资料,更新了污染源资料,共计细化吴江地区圩外河道 251 条,其中太浦河两岸支流细化至 36 条(南北岸各 18 条)。在细化河网及污染源的基础上,通过 2014 年 2 月 24 日—3 月 26 日太浦河调水试验期间水情监测资料,重新率定了模型。率定后的太湖流域模型可以较好地模拟太浦河及沿线区域水量水质变化。限于篇幅,本文仅给出了金泽站日均水位、流量及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的实测值、模拟值的对比情况(图 3)。

2.2 多目标决策模型

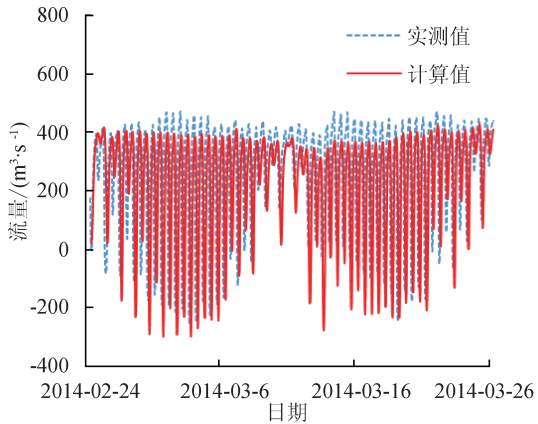
2.2.1 决策变量

太浦河调度对象包括太浦闸和沿线 88 个闸控口门(北岸 42 个、南岸 46 个)。现状太浦闸主要参照太湖水位分级泄流。东太湖水质优于太浦河,故加大太浦闸分级下泄流量可改善金泽水库水源地取水水位和水质状况。但由于太湖水位需满足环湖地区取水需求,因此在供水调度期间太浦闸下泄流量不能任意加大,以免使太湖水位下降过快而影响环湖地区取水。

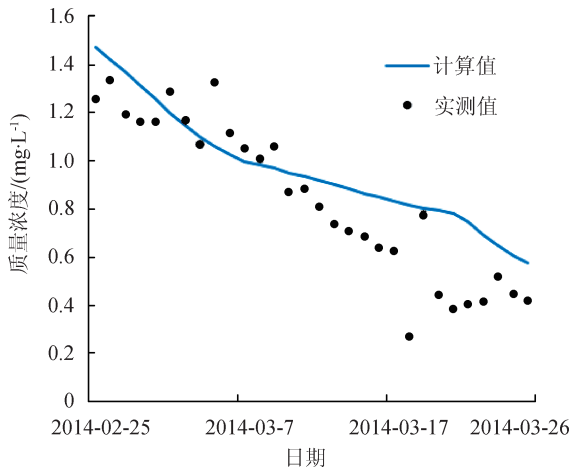
由于现状太浦河两岸地区水质比东太湖水质要差,因此在太浦河实行供水调度期间,优化两岸口门启闭状态可以减少沿线污染物进入太浦河的总量。现状太浦河两岸口门主要参照太浦河及区域代表站水位,视供水及排涝需求调控。在水利部太湖流域管理局提出的《太湖流域水量分配方案(报批稿)》



(a) 金泽水位



(b) 金泽流量



(c) $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度

图 3 金泽站日均水位、流量、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度实测与模拟对比

中对太浦河两岸口门的调度意见是:当太浦闸向下游供水时,两岸口门可根据地区水资源需求情况引水;当太浦河泵站向下游供水时,为保障太浦河水源地供水安全,视地区需水情况控制两岸口门引水。因此,太浦河多目标联合调度对应的决策变量可表述为:①太浦闸对应于不同太湖水位及金泽水源地水质的下泄流量;②太浦河南北两岸闸控口门引排控制水位。根据两类决策变量的不同组合,可形成太浦河联合调度方案集。

2.2.2 目标函数

由于太浦河闸群联合调度既要考虑金泽水源地

取水安全,又要兼顾太浦河上下游及左右岸防洪、排涝、供水需求,故具有明显的多目标性,笔者从防洪、供水、水质 3 个方面综合选取了 22 项指标(图 4),以全面反映太浦河水量水质联合调度的综合需求。

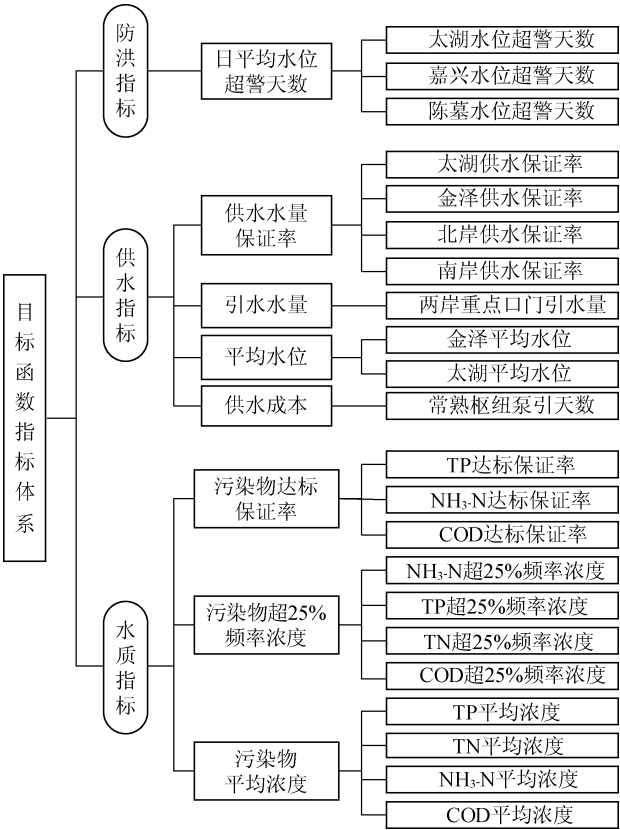


图 4 目标函数指标体系

- a. 防洪指标。以日平均水位超警天数表示,选取太湖及南北岸区域河网代表站嘉兴、陈墓站水位超警戒天数($T_{\text{太湖}}$ 、 $T_{\text{嘉兴}}$ 和 $T_{\text{陈墓}}$),共 3 个。
- b. 供水指标。包括控制断面供水保证率、太浦河两岸重点口门引水量(W)、平均水位和供水成本 4 类共 8 个。其中供水保证率指标分别是太湖、金泽水源地、太浦河北岸、太浦河南岸供水保证率($P_{\text{太湖}}$ 、 $P_{\text{金泽}}$ 、 $P_{\text{陈墓}}$ 、 $P_{\text{嘉兴}}$),以断面水位超过最低允许引水水位天数占统计时段总天数比例表示;太浦河两岸重点口门引水量(W)是太浦河沿线各重点口门引水量之和;平均水位指标分别是金泽($H_{\text{金泽}}$)和太湖平均水位($H_{\text{太湖}}$)。供水成本以望虞河常熟枢纽泵引天数代表($M_{\text{常熟}}$),主要是因为太浦闸调度方式变化导致的太湖水位的变化会影响常熟枢纽运用方式。
- c. 水质指标。表征金泽水源地水质状况的 11 个指标,包括统计时段内金泽断面 TP、 $\text{NH}_3\text{-H}$ 和 COD 达标保证率(P_{TP} 、 $P_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 、 P_{COD})、超 25% 频率的浓度($\rho_{25\%}$ 、 $\rho_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 、 $\rho_{25\%}$ 、 ρ_{TP} 、 $\rho_{25\%}$ 、 ρ_{TN} 、 $\rho_{25\%}$ 、 ρ_{COD})和平均浓度($\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 、 $\rho(\text{COD})$)。

2.2.3 约束条件

太浦河联合调度约束条件主要包括控制断面水位约束、水量约束(流量、流速)、水量水质平衡及动力学条件约束和工程运行约束 4 个方面。

a. 水位约束。

$$Z_{\min} < Z_i < Z_{\max} \tag{1}$$

式中: Z_i 为河湖控制断面水位; $Z_{\max}$ 、 $Z_{\min}$ 分别为该控制断面最高允许水位和最低允许水位。

b. 水量约束。

$$Q_{\min} < Q_i < Q_{\max} \tag{2}$$

$$V_{\min} < V_i < V_{\max} \tag{3}$$

式中: Q_i 为河湖控制断面流量; $Q_{\max}$ 、 $Q_{\min}$ 分别为该控制断面最大允许流量和最小允许流量; V_i 为某控制断面流速; $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 分别为该控制断面最大允许流速和最小允许流速。

c. 水量水质平衡及动力学条件约束。即太浦河沿线以及太湖流域各水利工程、河湖之间的水量、水力、水质物理依存关系。

d. 工程运行约束。包括太浦闸及太浦河沿线水利工程引水、过水能力以及工程调度方式约束等。

需指出的是,上述 4 类约束条件中,第 1~2 类约束条件在目标函数中以罚函数项的形式加以体现,而第 3~4 类约束条件由太湖流域模型描述。

2.2.4 决策方法

笔者根据太湖流域模型对太浦河联合调度方案的模拟结果,确定各项防洪、供水和水质指标值,采用蚁群算法将所有调度方案分为好、较好、中等、较一般和一般共 5 类,然后在好的方案中再根据目标函数确定最优的联合调度方案。换言之,就是将多目标决策问题转化为先聚类、后优选的问题。蚁群算法进行聚类的原理及具体过程可参见文献[15],聚类过程中需要确定的各项指标权重采用层次分析法确定,以反映不同调度目标的相对重要性。总体上,3 个领域目标的重要性为水质 > 供水 > 防洪,而在水质指标中以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的重要性程度最高。各指标权重见图 5。

3 结果分析与讨论

3.1 联合调度方案

适当加大供水调度期间太浦闸下泄流量有助于改善金泽水源地水质,因此,太浦闸可以在现行调度的基础上适当加大各级下泄流量。同时,由于金泽水源地关键水质因子 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度要满足地表水Ⅲ类标准($\rho(\text{NH}_3\text{-N}) \leq 1.0 \text{ mg/L}$),故太浦闸还可以根据金泽水质情况加大各级泄量。综合两方面的情况,笔者提出了 5 种可行调度方案,见表 1。

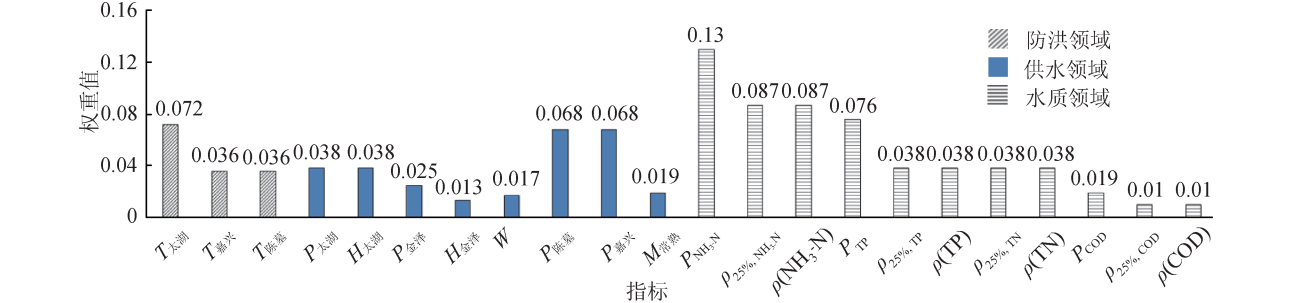


图5 模型目标函数指标权重

表1 太浦闸调度方案

太浦闸泄量/(m³·s⁻¹)								
太湖水位/m	方案1	方案2	方案3	方案4		方案5		
				$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) > 1 \text{ mg/L}$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) < 1 \text{ mg/L}$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) > 1 \text{ mg/L}$	$\begin{matrix} 1 \text{ mg/L} > \\ \rho(\text{NH}_3\text{-N}) > \\ 0.7 \text{ mg/L} \end{matrix}$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) < 0.7 \text{ mg/L}$
<2.5	0	0	0	0	0	0	0	0
[2.5,2.65)	0	0	0	30	0	30	20	0
[2.65,2.8)	20	20	30	80	20	80	50	20
[2.8,3.0)	50	30	50	100	30	100	80	30
[3.0,3.1)	50	50	80	100	50	100	80	50
[3.1,3.3)	50	60	100	100	60	100	80	60
[3.3,3.5)	50	70	120	100	70	100	80	70

注: $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为金泽断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度。

表1中,方案1~3仅参照太湖水位进行调度。其中,方案X1依据太浦闸规划调度规则拟定;方案X2依据2002—2014年太浦闸实际调度情况分析拟定(即现行调度方案);方案3在2基础上进一步加大太浦闸各级泄量;而方案4~5同时参照太湖水位和金泽断面水质情况调度。其中,方案3在方案2基础上,当 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度超Ⅲ类水标准(1 mg/L)时,加大太浦闸泄量,否则按方案3调度;方案5考虑到 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标对原水的敏感程度和处理难度(金泽水库生态净化及自来水厂 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率),当 $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) > 0.7 \text{ mg/L}$ 时,即提前加大太浦闸泄量,否则按方案4调度。

对于太浦河两岸闸门,笔者设计了两种调度方案,见表2。第一种方案(Z1)是当太浦河实施供水调度时,两岸口门敞开,两岸河网与太浦河的水量进出关系视水位差决定。另一种方案(Z2),当两岸地区代表站水位低于正常水位时(北岸陈墓、南岸嘉兴6月下旬—10月下旬水位低于2.7 m,其余时间低于2.6 m),两岸口门从太浦河引水;当两岸地区水位超过排涝水位时(北岸陈墓水位高于3.6 m,南岸嘉兴水位高于3.3 m),两岸口门向太浦河排水,其余情况两岸口门保持敞开状态。

根据太浦闸和太浦河两岸口门调度方案的组合,形成了10个联合调度方案,见表3。10个调度

方案可分为两类,其中第1类包含3种太浦闸下泄方案(仅依据太湖水位分级调度)和2种两岸闸门控制方案,共计 $3 \times 2 = 6$ 种方案;第2类包括2种太浦闸下泄方案(依据太湖水位和金泽断面水质调度)和2种两岸闸门控制方案,共计 $2 \times 2 = 4$ 种方案。

表2 太浦河两岸闸门调度方案

闸门	参照站	方案Z1	方案Z2
北岸闸门	陈墓	排水水位	$\geq 3.6 \text{ m}$
		引水水位	6月下旬—10月下旬 $\leq 2.7 \text{ m}$,其余时间 $\leq 2.6 \text{ m}$
南岸闸门	嘉兴	排水水位	$\geq 3.3 \text{ m}$
		引水水位	6月21日~11月1日 $\leq 2.7 \text{ m}$,其余时间 $\leq 2.6 \text{ m}$

表3 太浦河联合调度方案集

联合调度方案编号	太浦闸调度方案	两岸口门调度方案
仅根据太湖水位调度	1-1	Z1
	1-2	Z2
	2-1	Z1
	2-2	Z2
	3-1	Z1
	3-2	Z2
综合太湖水位和金泽水质调度	4-1	Z1
	4-2	Z2
	B4-1	Z1
	B4-2	Z2

3.2 方案模拟结果

根据水文监测结果,在丰水年,由于太湖来水较

多,金泽断面水质较好,水源地取水安全保障问题不大,金泽断面水质超标问题主要在枯水年和偏枯年较为突出。本文采用太湖流域模型,在太湖流域典型枯水年(年降水量频率 $P=90\%$,1971 年)和典型偏枯年(年降水量频率 $P=75\%$,1976 年),对 10 个太浦河联合调度方案进行模拟。为说明加大太浦闸泄量、控制两岸闸门的调度效果,本文重点选择其中 8 个方案分析模拟结果(方案 1-1、1-2 和方案 2-1、2-2 调度区别较小,因此在分析中去掉了方案 2-1、2-2)。表 4 给出了典型枯水年(1971 年)和典型偏枯年(1976 年)8 种方案对应的防洪、供水、水质方面代表性指标。

由表 4 可知,在防洪指标方面,由于水文条件的影响,在两种典型年,各调度方案效果差别较小,加大太浦闸泄量仅在典型偏枯年(1976 年)将嘉兴水位超警天数从 3d 减至 1d。而在供水指标方面,在典型枯水年(1971 年),无论是加大泄量还是控制两岸闸门调度,对金泽平均水位和太湖平均水位的影响均很小;在典型偏枯年(1976 年),无论是加大泄量还是控制两岸闸门调度,对太湖平均水位的影响均不大,但按方案 3 加大太浦闸泄量的方案 3-1 和方案 3-2 对提升金泽水库取水水位条件最为有利。水质指标方面,无论是在典型枯水年还是典型偏枯年,加大太浦闸泄量、控制两岸口门均可明显改善金泽水源地水质指标,以方案 1-1 和 4-1 为例,加大太浦闸泄量可使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度达标保证率由 77.5% 提升至 83.5%;以方案 4-1 和 4-2 为例,控制两岸口门可使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均质量浓度由 0.643 mg/L 降至 0.619 mg/L。尤其需要指出的是,根据金泽

断面水质提前预泄并对两岸口门进行控制水文方案 B4-2,可使金泽断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度指标达到最优。

3.3 调度方案优选

采用蚁群算法对 10 个太浦闸联合调度方案集进行优选,分别针对 1971 年、1976 年两种典型降水条件,将调度方案集分成好(Ⅰ)、较好(Ⅱ)、中等(Ⅲ)、较一般(Ⅳ)和一般(Ⅴ)共 5 类,统计时段选择 2—4 月(系年内主要枯水时段)、非汛期(10 月—次年 4 月)和全年 3 个时段。表 5 给出了 1971 年(枯水典型年)、1976 年(中等干旱年)Ⅰ类调度方案优选结果。

由表 5 可知,对于典型枯水年(1971 年),在全年、非汛期和 2—4 月, B4-2 为Ⅰ类方案,即根据金泽水库水质情况提前加大太浦闸泄量,同时控制两岸闸门的调度方案;对于典型偏枯年(1976 年),在全年、非汛期 B4-2 和 3-2 方案为Ⅰ类方案,而在 2—4 月 B4-2、B4-1 为Ⅰ类方案。因此,综合考虑,方案 B4-2 是典型枯水年和典型偏枯年的最佳调度方案。

图 6 给出了方案 B4-2 对应的典型枯水年、典型偏枯年金泽断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度模拟结果。为便于分析,图 6 同时给出了方案 2-2(即太浦闸依据 2002—2014 年太浦闸实际调度情况拟定,两岸闸门按照 Z2 控制运用)对应的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度过程线。由图 6 可知,方案 B4-2 中金泽断面 $\text{NH}_3\text{-H}$ 质量浓度在 1—5 月较现有调度方案明显降低,超过Ⅲ类水质标准的天数也大幅减少。具体来说,遇 $P=90\%$ 的典型枯水年(1971 年),方案 B4-2 对应的 $\text{NH}_3\text{-N}$

表 4 1971 年、1976 年降水条件下太浦闸联合调度方案模拟结果

年型	方案 编号	防洪指标			供水指标		水质指标		
		$T_{\text{太湖}}/\text{d}$	$T_{\text{嘉兴}}/\text{d}$	$T_{\text{陈墓}}/\text{d}$	$H_{\text{太湖}}/\text{m}$	$H_{\text{金泽}}/\text{m}$	$P_{\text{NH}_3\text{-N}}/\%$	$\rho_{25\%, \text{NH}_3\text{-N}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
1971 年	1-1	0	5	0	2.95	2.61	77.5	0.977	0.666
	1-2	0	5	0	2.95	2.60	83.2	0.895	0.633
	3-1	0	5	0	2.94	2.62	77.7	0.980	0.657
	3-2	0	5	0	2.94	2.61	83.5	0.891	0.625
	4-1	0	5	0	2.94	2.61	83.5	0.953	0.643
	4-2	0	5	0	2.95	2.60	90.9	0.903	0.619
	B4-1	0	5	0	2.94	2.62	85.4	0.895	0.628
	B4-2	0	5	0	2.94	2.61	92.9	0.837	0.604
1976 年	1-1	0	3	0	3.05	2.71	87.1	0.788	0.600
	1-2	0	2	0	3.05	2.71	91.5	0.778	0.587
	3-1	0	0	0	3.03	2.77	87.1	0.793	0.602
	3-2	0	0	0	3.03	2.77	91.5	0.774	0.585
	4-1	0	2	0	3.05	2.71	90.9	0.836	0.603
	4-2	0	2	0	3.05	2.71	94.5	0.825	0.592
	B4-1	0	2	0	3.04	2.72	94.5	0.752	0.581
	B4-2	0	2	0	3.04	2.71	97.3	0.738	0.571

表 5 1971 年(典型枯水年)和 1976 年(典型偏枯年) I 类方案优选结果

1971 年(典型枯水年) 方案			1976 年(中等干旱年) 方案		
2—4 月	非汛期	全年	2—4 月	非汛期	全年
B4-2	B4-2	B4-2	B4-2	B4-2	B4-2
			B4-1	3-2	3-2

全年达标率达 92.9%,与现有方案相比可提高约 15 个百分点;遇 $P = 75\%$ 的典型偏枯年(1976 年),方案 B4-2 对应的 $\text{NH}_3\text{-H}$ 质量浓度全年达标率达 97%,与现有方案相比可提高了近 20 个百分点。可见,方案 B4-2 能有效提高两种典型年金泽断面取水安全保障程度。

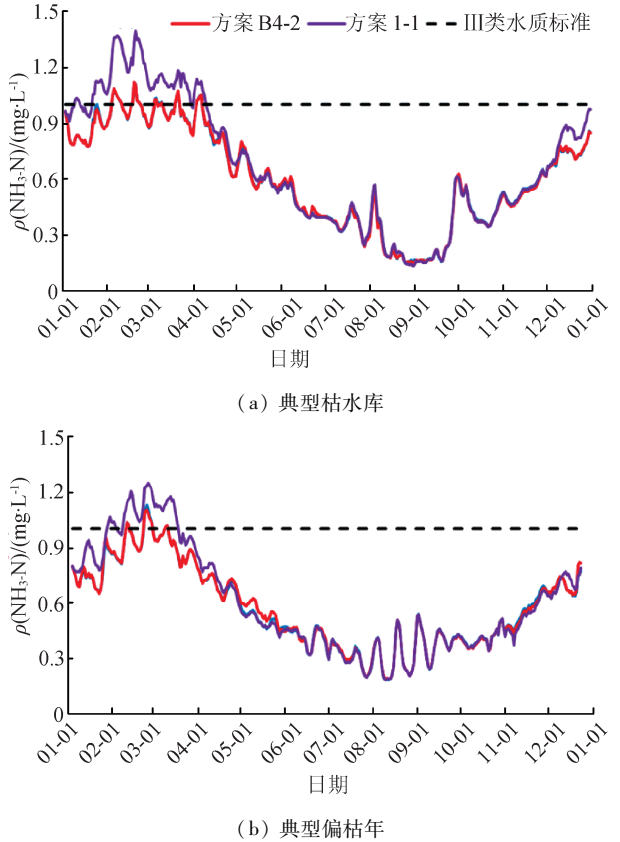


图 6 $P = 90\%$ (典型枯水年) 和 $P = 75\%$ (典型偏枯年) 的降水典型年方案 B4-2 和现有调度方案 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度过程

表 6 给出了方案 B4-2 和现有调度方案(方案 2-2)在两种典型年对应的金泽及地区代表站特征水位。由表 6 可知,在两种典型年下,方案 B4-2 较现有调度方案对金泽最低水位有明显抬升作用(能够抬升 4~5 cm),但对沿线地区代表站最低水位、平均水位影响较小。可见,方案 B4-2 能有效提升金泽水源地取水水位保障程度,同时基本不影响太浦河沿线区域水情。

表 7 给出了方案 B4-2 和现有调度方案(方案 2-2)在两种典型年对应的太浦河两岸进出水量模拟结果和南北两岸供水保证率。由表 7 可知,在北岸,两种方案进出水量的差异较小,均在 0.15

亿 m^3 之内。在南岸,入太浦河水量计算差值分别为 -1.31 亿 m^3 (1971 年) 和 -1.12 亿 m^3 (1976 年),出太浦河水量计算差值分别为 0.42 亿 m^3 (1971 年) 和 0.33 亿 m^3 (1976 年)。此外,方案 B4-2 计算的南北两岸供水保证率较现有调度方案均有一定增加,其中,北岸供水保证率在典型偏枯年由 43.8% 增加到 95.1%。B4-2 方案较现有方案对出入太浦河水量的影响相对较小,同时提升了太浦河两岸供水保证率,这对满足两岸水量调度需求是有利的。

表 6 1971 年(典型枯水年)和 1976 年(典型偏枯年)金泽、太湖及地区代表站特征水位 m

代表站	方案	1971 年水位		1976 年水位	
		平均水位	最低水位	平均水位	最低水位
金泽	2-2	2.60	2.24	2.70	2.25
	B4-2	2.61	2.29	2.71	2.29
陈墓	2-2	2.68	2.39	2.77	2.43
	B4-2	2.69	2.41	2.77	2.45
嘉兴	2-2	2.65	2.03	2.76	2.27
	B4-2	2.65	2.04	2.77	2.27

4 结 论

在分析太浦河太浦闸及两岸闸门调度方式的基础上,拟定了两类共 10 个联合调度方案,采用细化后的太湖流域模型,在典型枯水年($P = 90\%$) 和典型偏枯年($P = 75\%$) 对太浦河联合调度方案进行了模拟,根据多目标指标体系,优选出能够提高金泽水源地取水安全保障程度又兼顾太湖流域及太浦河沿线区域防洪、供水的调度方案,从而为今后完善太浦河调度方式,提高金泽水源地取水安全保障提供技术参考。

无论在典型枯水年还是典型偏枯年,方案 B4-2,即在金泽水源地 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度超过 0.7 mg/L 时加大太浦闸分级下泄流量,同时控制两岸口门运用的方案可取得最好的调度效果。与现有调度方案相比,该方案可显著改善金泽断面水质指标(主要是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度),并明显抬升金泽断面最低水位(4~5 cm),有效提高了两种典型年下的金泽断面取水安全保障程度。同时,方案 B4-2 对沿线地区代表站特征水位、太浦河两岸进出水量影响较小,基本不影响流域及区域其他调度需求。

表 8 1971 年(典型枯水年)和 1976 年(典型偏枯年)太浦河两岸闸门进出水量

年型	方案	北岸			南岸		
		入太浦河/亿 m ³	出太浦河/亿 m ³	供水保证率/%	入太浦河/亿 m ³	出太浦河/亿 m ³	供水保证率/%
1971	2-2	15.77	7.85	81.0	21.85	18.50	64.3
	B4-2	15.71	7.92	84.3	20.54	18.92	66.8
	方案差值	-0.06	0.07	3.3	-1.31	0.42	2.5
1976	2-2	19.47	8.98	43.8	22.95	17.48	77.0
	B4-2	19.36	9.12	95.1	21.83	17.81	89.9
	方案差值	-0.11	0.14	51.3	-1.12	0.33	12.9

参考文献:

[1] LABADIE J W. Optimal operation of multi-reservoir systems: state-of-the-art review [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(2) : 93-111.

[2] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联合优化调度研究进展与展望 [J]. 水科学进展, 2010, 21 (4) : 496-503. (GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems [J]. Advances in Water Science, 2010, 21 (4) : 496-503. (in Chinese))

[3] 郭文献, 夏自强, 王远坤, 等. 三峡水库生态调度目标研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20 (4) : 554-559. (GUO Wenxian, XIA Ziqiang, WANG Yuankun, et al. Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4) : 554-559. (in Chinese))

[4] 杨芳丽, 张小峰, 谈广鸣. 考虑生态调度的水库多目标调度模型初步研究 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010 (4) : 433-437. (YANG Fangli, ZHANG Xiaofeng, TAN Guangming. Elenmentary study of multi-objective operation model considering ecological operation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010 (4) : 433-437. (in Chinese))

[5] 卢有麟, 周建中, 王浩, 等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法 [J]. 水科学进展, 2011, 22 (6) : 780-788. (LU Youling, ZHOU Jianzhong, WANG Hao, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6) : 780-788. (in Chinese))

[6] 刘建林, 马斌, 解建仓, 等. 跨流域多水源多目标多工程联合调水仿真模型—南水北调东线工程 [J]. 水土保持学报, 2003, 17 (1) : 75-79. (LIU Jianlin, MA Bin, XIE Jiancang, et al. Simulation model of multi-reservoir and multi-consumer and multi-work for water unite regulation of cross-drainage basin: for example of the east route of the south-to-north water transfer project [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17 (1) : 75-79. (in Chinese))

[7] 杨柳, 汪妮, 解建仓, 等. 跨流域调水与受水区多水源联合供水模拟研究 [J]. 水力发电学报, 2015, 34 (6) : 49-56. (YANG Liu, WANG Ni, XIE Jiancang, et al. Joint water supply simulation of multiple local water sources and inter-basin water diversion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 (6) : 49-56. (in Chinese))

[8] 黄玫, 商良. 复杂河网水利工程水量水质联合调度研究 [J]. 水电能源科学, 2011, 29 (2) : 21-24. (HUANG Mei, SHANG Liang. Study on joint regulation of quantity and quality of water structures for complicated river network hydraulic project [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(2) : 21-24. (in Chinese))

[9] 吴浩云. 大型平原河网地区水量水质耦合模拟及联合调度研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.

[10] 陈炼钢, 施勇, 钱新, 等. 闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型: I. 理论 [J]. 水科学进展, 2014, 25 (4) : 534-541. (CHEn Liangang, SHI Yong, QIAN Xin, et al. Hydrology, hydrodynamics, and water quality model for impounded rivers: I: theory [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4) : 534-541. (in Chinese))

[11] 陈炼钢, 施勇, 钱新, 等. 闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型: II. 应用 [J]. 水科学进展, 2014, 25 (6) : 856-863. (CHEN Liangang, SHI Yong, QIAN Xin, et al. Hydrology, hydrodynamics, water quality model for impounded rivers: II : application [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6) : 856-863. (in Chinese))

[12] 张永勇, 夏军, 陈军锋, 等. 基于 SWAT 模型的闸坝水量水质优化调度模式研究 [J]. 水力发电学报, 2010, 29 (5) : 159-164. (ZHANG Yongyong, XIA Jun, CHEN Junfeng, et al. Study on optimal dam operation of water quantity and quality based on a distributed SWAT model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29 (5) : 159-164. (in Chinese))

[13] 张翔, 李良, 吴绍飞. 淮河水量水质联合调度风险分析 [J]. 中国科技论文, 2014 (11) : 1237-1242. (ZHANG Xiang, LI Liang, WU Shaofei. Risk analysis of joint operation on water quantity and water quality in Huai River [J]. China Sciencepaper, 2014 (11) : 1237-1242. (in Chinese))

[14] 程文辉, 王船海, 朱琰. 太湖流域模型 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.

[15] 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法在连续空间寻优问题求解中的应用 [J]. 控制与决策, 2003, 18 (1) : 45-48. (WANG Lei, WU Qidi. Ant system algorithm in continuous space optimization [J]. Control and Decision, 2003, 18 (1) : 45-48. (in Chinese))

(收稿日期: 2016 - 10 - 05 编辑: 彭桃英)