

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.003

考虑调水和供水规则的水库优化调度

王宗志¹, 谈丽婷¹, 耿敏², 刘克琳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. 山东省防汛抗旱物资储备中心, 山东 济南 250014)

摘要: 针对用于调节当地地表水资源的水库受多水源影响需要制订新调度规则的问题, 考虑非常规水调蓄能力低的特点, 在优先配置非常规水的基础上对受水区水库设置调水和供水规则, 建立了考虑调水和供水效率的水库优化调度模型, 并采用理想点法和遗传算法对调度规则寻优。将模型应用于威海市区米山水库, 结果表明: 与标准调度策略相比, 优化后的水库调度规则使多年平均调水量减少 2 692.4 万 m^3 , 多年平均弃水量减少 417.5 万 m^3 , 提高了天然来水和外调水的利用率; 枯水年对外调水的依赖性高于丰水年和平水年, 平均调水量仅减少 398 万 m^3 ; 在该调度规则下, 减少外调水量的同时增加非常规水的配置可将农业供水保证率从 75% 提高到 88.4%。

关键词: 水库优化调度; 调水过程; 供水规则; 非常规水; 水资源利用效率; 米山水库

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)01-0015-07

Reservoir optimal operation considering water transfer and supply rules // WANG Zongzhi¹, TAN Liting¹, GENG Min², LIU Kelin¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Shandong Province Flood Control and Drought Relief Material Reserve Center, Jinan 250014, China)

Abstract: For the reservoirs used to regulate local surface water resources, new dispatching rules need to be formulated due to the influence of multiple water sources to improve the water resource utilization efficiency. Considering the low regulation and storage capacity of unconventional water, water transfer and supply rules are set for the reservoirs in the water receiving area on the basis of priority allocation of unconventional water, and the reservoir optimal operation model considering the efficiency of water transfer and supply is established. The ideal point method and genetic algorithm are used to optimize the operation rules. Taking the Mishan Reservoir in Weihai City as an example, the results show that compared with the standard operation strategy, the optimized reservoir operation rules reduce the average annual water transfer by 26.924 million m^3 and the annual average waste water by 4.175 million m^3 . The utilization ratio of natural incoming water and external transferred water is improved. The dependence of external water transfer in dry years is higher than that in wet years and normal years, and the average water transfer volume is only reduced by 3.98 million m^3 . Under this regulation, the assurance rate of agricultural water supply can be increased from 75% to 88.4% by reducing the amount of external water transfer and increasing the allocation of unconventional water.

Key words: reservoir optimal operation; water transfer process; water supply rule; unconventional water; water resource utilization efficiency; Mishan Reservoir

在水资源时空分布不均, 人类社会用水需求攀升的背景下, 通过跨流域调水, 开发利用再生水、海水淡化水等非常规水可以有效缓解流域间水资源供需矛盾^[1-2]。随着国家水网行动的实施, 受调水输入条件影响的水库越来越多。由于外调水在一定程度上改变了水库的入库径流过程, 因此水库原调度

规则需要优化调整, 以适应新变化, 进而提高供水效益^[3-6]。目前, 国内外学者对调水输入条件下水库调度的运行管理进行了大量研究。郭旭宁等^[7]将调水和供水看作主从递阶决策问题, 提出了确定水库群调水和供水规则的二层规划模型, 将跨流域水库群调水与供水过程有效耦合起来; 李成振等^[8]在

基金项目: 国家自然科学基金(U2240223); 水利部技术示范项目(SF-202210)

作者简介: 王宗志(1977—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水资源复杂系统运行与管理研究。E-mail: zzwang@nhri.cn

水库群调水与供水研究中提出一种双调水控制线法,用以控制调水过程的稳定性;Wang 等^[9]根据跨流域调水供水的双向性,在多水库调度中,耦合对冲规则,建立了一套同时考虑跨流域调水和供水的双向运行规则;Tan 等^[10]将改进的对冲规则用于水库群调度研究,通过水库群的聚合分解,得到了水库间调水和供水的最优规则。上述研究着眼于水库群调水与供水分配之间的关联性,从而优化得到了调水和供水规则,但忽略了调水量变动对水库供水效率的影响。因此,一些学者认为水库调水易造成“过量供水”而产生弃水,在确定调水规则时,需优化调水规模及其过程。彭勇等^[11]针对受水水库出现边引水边弃水的问题,提出了一种增加受水区水库满引与不引之间线性插值的引水状态,用以提高引水效率;Zhu 等^[12]针对受水水库的联合调度提出了增加两条引水线的水库分区运用规则,把水库有效库容划分为3个分区,将引水线与分区内的引水量作为决策变量进行优化;Liu 等^[13]将跨流域调水水库群的供水量和调水量作为决策变量,采用遗传算法加以优化,有效克服了人为设置调水分区、供水分区的主观性;马永胜等^[14]考虑到调水过程变幅大,不利于水库蓄存的问题,建立了调水效率最高和调水过程波动最小的目标函数,优化了水库调水过程。以上研究通过对跨流域水库(群)调水、供水规则以及调水量的合理制订,实现了外调水和本地水的合理调配。

然而,极端气候变化导致降雨径流减少^[15],为了满足日益增长的用水需求,许多城市开始强调非常规水资源的利用,如再生水回用、雨水集蓄、海水淡化等^[16-18]。当非常规水纳入受水区供水系统时,外调水、当地水与非常规水资源密切相连,受水区水库调度既受外调水的影响,还受非常规水资源利用状况的影响,有必要对水库调度方式进一步调整。为此,本文提出考虑调水和供水规则的水库优化调度模型,研究多水源供水格局下受水水库运行方式,为常规和非常规水资源双重影响下的水库调度运行管理提供参考。

1 多水源受水水库调水和供水模型

采用模拟优化法研究多水源受水水库运行调度。其中,多水源模拟模块基于配水、调水和供水规则对非常规水、外调水和天然来水进行调节计算,根据非常规水源和用户匹配关系优先配置非常规水,再对受水水库设定调水和供水规则,调节天然来水和外调水,以尽可能满足剩余需水;水库调度优化模块在评估水库调度性能的基础上对设定的调水、供

水规则和外调水量进行优化,该模块中的时段调水量和调度规则为决策变量;通过优化算法生成相应决策变量后,将其输入到模拟模块中进行长系列调节计算,得到该决策变量下的水库调度性能,最终根据调度性能的优劣选取最佳决策值。模型总体框架见图1。

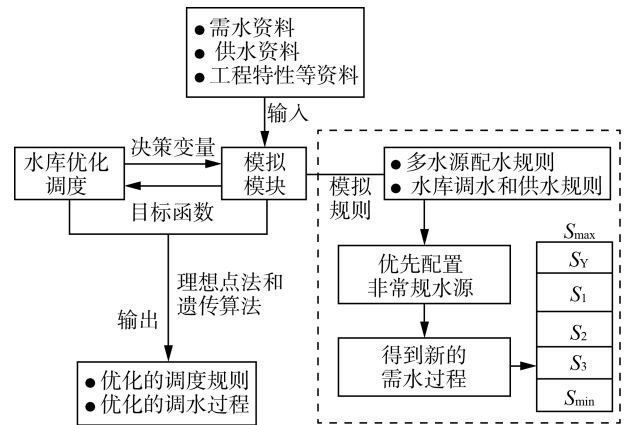


图1 模型总体框架

Fig. 1 Overall framework of model

1.1 多水源模拟模块

a. 多水源配水规则。由于非常规水设施(如再生水厂、海水淡化水厂)调蓄能力低,因此优先利用非常规水。各用户非常规水利用量受水质影响^[19],需要设定非常规水的供水系数,用以约束非常规水对各用户的供水量,本文将这类供水系数称为非常规水的供水阈值。对相应用户配置非常规水之后,再进行天然来水和外调水的调配。

b. 水库调水和供水规则。根据库容分区理论^[20]为受水区水库设置了4条调度线(图1),用以控制水库的调水和供水。其中, S_Y 为调水启动线,当水库初始蓄水量位于 S_Y 之上时,水库不引入外调水,反之,按水库时段调水能力 Y_{\max} 进行调水;其余3条调度线 S_1 、 S_2 、 S_3 依次限制农业、生态、城市用户供水,称为供水限制线^[21-22]。

以 t 时段为例,配置非常规水的水库调水和供水运行方式具体过程为:

步骤1 优先计算非常规水供水量:

$$W_{sit} = \eta_{si} D_{it} \quad (1)$$

式中: W_{sit} 为 t 时段 s 非常规水源供给 i 用户的水量; D_{it} 为 t 时段 i 用户的需水量; η_{si} 为 s 非常规水源对 i 用户的供水阈值。根据分质供水原则,当非常规水无法满足用户水质要求时,供水阈值为0。

步骤2 计算 i 用户 t 时段新的需水量 N_{Dit} ,该需水量采用下述水库调水和供水规则进行调配:

$$N_{Dit} = (1 - \eta_{si}) D_{it} \quad (2)$$

步骤3 当时段初蓄水量 V_t 位于 S_Y 之上时,水

库不调水,调水量 $Y_t = 0$, 否则,按时段调水能力 $Y_t = Y_{\max}$ 调水。

步骤 4 判断时段初蓄水量 V_t 与 t 时段各用户供水限制线 S_{1t} 、 S_{2t} 、 S_{3t} 的关系:如果 $V_t \geq S_{1t}$,各用户按需供水;如果 $S_{2t} \leq V_t < S_{1t}$,农业用户限制供水,其余用户按需供水;如果 $S_{3t} \leq V_t < S_{2t}$,农业、生态用户限制供水,城市用户按需供水;如果 $V_t < S_{3t}$,各用户限制供水。4 种情况水库总供水量分别为

$$W_{Rt} = N_{D1t} + N_{D2t} + N_{D3t} \quad (3)$$

$$W_{Rt} = (1 - \alpha_1)N_{D1t} + N_{D2t} + N_{D3t} \quad (4)$$

$$W_{Rt} = (1 - \alpha_1)N_{D1t} + (1 - \alpha_2)N_{D2t} + N_{D3t} \quad (5)$$

$$W_{Rt} = (1 - \alpha_1)N_{D1t} + (1 - \alpha_2)N_{D2t} + (1 - \alpha_3)N_{D3t} \quad (6)$$

式中: W_{Rt} 为 t 时段水库总供水量; N_{D1t} 、 N_{D2t} 、 N_{D3t} 分别为 t 时段农业、生态、城市用户配置完非常规水后的需水量; α_1 、 α_2 、 α_3 为农业、生态、城市用户的供水限制系数; I_t 为 t 时段水库来水量; q_t 为 t 时段水库弃水量。

步骤 5 计算时段末蓄水量:

$$V_{t+1} = V_t + I_t + Y_t - W_{Rt} - q_t \quad (7)$$

式中 V_t 、 V_{t+1} 分别为水库 t 时段初、末蓄水量。

步骤 6 循环步骤 1~5,计算下一时段,到最后—个时段 N 结束。

1.2 水库调度优化模块

1.2.1 目标函数

外调水可以有效缓解水资源供需矛盾,从提高用户供水保证率的角度,外调水量越多越好;然而,当水库来水较多时,受水库调蓄库容约束,容易造成大量弃水;而且外调水成本较高,大量调水是不经济的。为了提高外调水的供水效率,需要使水库弃水量尽可能小,设定目标函数为缺水率最小和水库年均弃水量最小:

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^N \frac{N_{Dt} - W_{Rt}}{N_{Dt}} \quad (8)$$

$$\min f_2 = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^N q_t \quad (9)$$

式中: f_1 为缺水率; N_{Dt} 为配置完非常规水的总需水量; N 为时段总数; f_2 为水库年均弃水量; M 为年份数; q_t 为 t 时段水库弃水量。弃水量越小,外调水用水效率越高。

1.2.2 约束条件

a. 水库水量平衡约束,即式(7)。

b. 水库库容约束。由水库的功能和工程特性决定每个时段蓄水量都要在一定库容范围内:

$$S_{\min} \leq V_t \leq S_{\max} \quad (10)$$

式中: S_{\min} 为最小库容,是死库容; S_{\max} 为最大库容。

c. 需水量约束:

$$W_{Rit} \leq N_{Dit} \quad (11)$$

式中 W_{Rit} 为水库 t 时段对 i 用户的供水量。

d. 调水量约束:

$$Y_t \leq Y_{\max} \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^N Y_{mt} \leq Y_{\text{capm}} \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (13)$$

式中: Y_{mt} 为第 m 年第 t 时段调水量; Y_{capm} 为第 m 年的调水总量控制指标。

e. 水库供水限制线约束。根据水库对用户供水的优先序,3 条供水限制线需满足如下约束:

$$S_{\min} \leq S_{3t} \leq S_{2t} \leq S_{1t} \leq S_{\max} \quad (14)$$

f. 非负约束。根据工程的实际情况,各决策变量为非负。

1.2.3 求解方法

本文建立的优化模型是一个多目标模型,将多目标转换成单目标求解是多目标优化求解的主要思路,常用方法包括目标规划法、线性加权和法、理想点法等。其中,理想点法^[23]利用决策者的先验信息构造满足所有目标的理想点,然后在约束条件内寻找与该理想点最接近的可行解,遗传算法则用于快速求解各目标理想点。本文采用理想点法和遗传算法^[24]对水库优化调度模型求解,具体过程为:①运用遗传算法对每个单目标 $f_i(x)$ 求解,得到其最优值 f_i^* ;②将各目标最优值 f_i^* 作为各目标函数逼近的理想点,构建新的单目标函数 $g(x)$;③运用遗传算法求得 $g(x)$ 的一个非劣解,据此得出各目标函数值,计算公式见式(15)。该方法既解决了量纲不统一的相互矛盾的多目标决策问题,又具有求解快速、简便的特点。

$$\min g(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^2 [f_i(x) - f_i^*]^2} \quad (15)$$

2 实例应用

2.1 研究区概况

威海市位于山东半岛东部,多年平均降水量 770 mm,其中汛期降水占 71.3%,且年际丰枯变化悬殊,人均水资源占有量 573 m³,不足全国平均水平的 25%,是一个典型的资源型缺水城市。威海市区仅有一座大型水库即米山水库,为缓解水资源短缺对经济社会发展的制约作用,近年来威海市区积极开展多水源供水行动,建设胶东调水工程,将外调水引入米山水库进行调蓄供水;建设海水淡化水厂和再生水厂,2017 现状年已具有一定规模的外调水、

再生水和淡化海水供水量。可见威海市区水资源系统是一个典型的多水源多用户系统,其概化图如图2所示。本文以威海市区为例,将多水源受水水库调水和供水模型应用于米山水库,优化得到米山水库受外调水和非常规水双重影响下的水库调度规则。

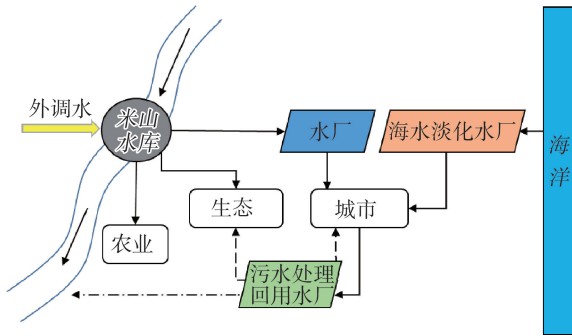


图2 研究区水资源系统概化图

Fig.2 Overview map of water resources system in study area

2.2 基本资料

模型所需数据包括研究区内非地表水水源可供水量数据、米山水库1956—2015年逐月入库径流数据、研究区内需水数据、水利工程特性数据等。其中,需水数据包括:2030规划水平年威海市区城市、生态需水分别为8960.8万 m^3 和1590.6万 m^3 ;2017现状年米山水库不对农业供水,为恢复米山水库对农业供水,假定米山灌区历史灌溉用水量为规划年农业需水,总量为4874.1万 m^3 。供水数据包括:根据《威海市水安全保障总体规划(2016)》,规划年污水再生水规模33万 m^3/d ,海淡水规模20万 m^3/d ,米山水库外调水年控制指标为10200万 m^3 。工程特性数据包括:2017现状工程条件下,米山水库死库容507万 m^3 ,兴利库容14897万 m^3 ,死水位19.7m,兴利水位30.0m。根据水库调度规则,各用户会出现限制供水情况,城市、生态和农业的供水限制系数按照经验分别取为0.1、0.3和0.5。

2.3 结果与分析

2.3.1 水库调度结果

根据图1的模型框架,采用理想点法和遗传算法优化得到米山水库的调水和供水规则,以指导水库运行调度,结果如图3所示。其中,米山水库的防洪高水位和正常蓄水位相同,因此水库调度规则的上限为兴利库容14897万 m^3 。

当水库蓄水量位于调水线上方时,米山水库不引入外调水,反之,米山水库按照时段调水能力引入外调水,调水线位置越高,表明该月份调水的可能性越大。根据图3,水库调水启动线表明非汛期(10月至次年5月)调水总体机会较大,这是由于汛期

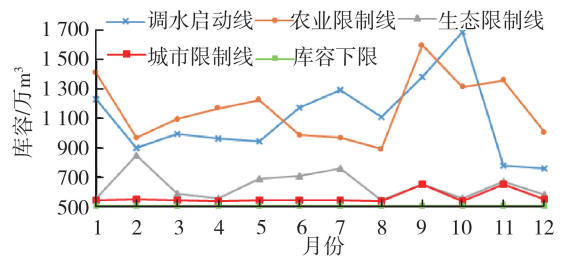


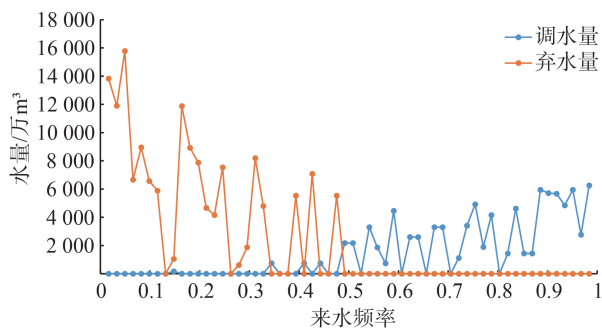
图3 米山水库调水和供水规则

Fig.3 Water transfer and supply rules of Mishan Reservoir

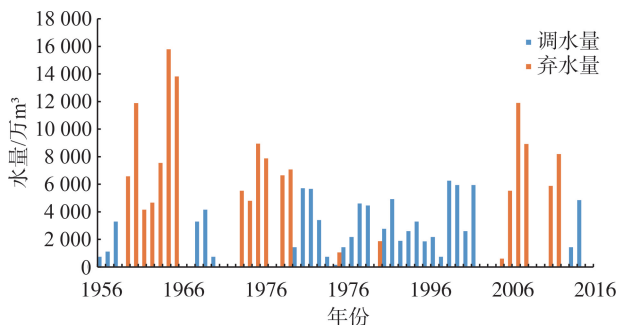
结束后来水较小,仅依靠天然来水供水容易造成各用户深度缺水,有必要增加调水;汛期(6—9月)同样存在调水可能性,原因是3—7月为农业需水高峰期,8—10月农业需水仍较多,因此当汛期为满足防洪要求而进行大量弃水时,为满足汛末用户需水,汛期也可能进行调水。农业用户限制线在调度周期内存在先降低后升高的趋势,该限制线越高,农业用户供水受到限制的机会越大,总体上看,6—8月农业用户供水限制线整体较低,其原因在于农业需水主要集中在这些月份,为了尽可能减小农业需水破坏,有必要减少农业限制供水的机会。汛期结束后农业限制供水机会较大,一是因为汛末农业需水量较小,有些月份甚至不需水;二是为了利于水库蓄水,防止未来出现连续枯水年造成严重水资源短缺。城市用户供水限制线在调度周期内趋于平稳,且接近水库最低蓄水量,其原因是城市用户既要满足高供水保证率,又要满足低破坏深度,供水要求高,供水受到限制的机会小。

图4为1956—2015年调水量和弃水量,由图4(a)可知,调水量和弃水量有明显分界点,天然来水的丰枯程度决定了调水和弃水的发生。据图4(b),1956—2015年,共有30年进行调水,20年产生弃水。丰水年和部分平水年不需要调水,天然来水足以满足用户需水,并且由于来水较多,通常会造大量弃水,其中1964年弃水量最大,为1.58亿 m^3 ;枯水年和部分平水年不弃水,由于天然来水较少,有必要引入外调水以保证用户需水,其中,1999年调水量最大,为6257万 m^3 ;一些丰枯交替的年份,调水量和弃水量的发生容易受到年际来水变化的影响,即连续几年来水较枯,出现某一年来水较丰,仍然需要引入少量外调水以补充供水,如1981—1984年来水频率均大于75%,为连续枯水年,1985年天然来水频率为33%,来水较丰,该年仍调入163万 m^3 水量补充供水。

供水水库调度主要采用标准调度策略(standard operating policy, SOP),即每一个时段内水库释放所



(a) 不同来水频率



(b) 不同年份

图4 1956—2015年调水量和弃水量

Fig. 4 Annual water transfer and disposal from 1956 to 2015

有可供水量来满足用户需水^[25]。由于米山水库供水调度常采用经验性调度,而SOP调度规则符合经验性调度,因此本文将1956—2015年SOP调度规则与优化得到的调水和供水规则进行比较,如图5和表1所示。

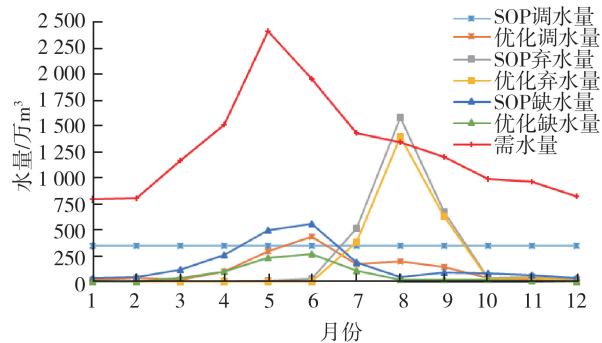


图5 不同调度规则下的水库月均调水量、弃水量和缺水

Fig. 5 Average monthly diverted water, discarding water and water shortage under different operation rules

由表1可见,本文提出的水库调度规则可以在提高各用户供水保证率的同时使多年平均调水量减

表1 不同调度规则结果比较

Table 1 Comparison results of different reservoir operation rules

调度规则	供水保证率/%			多年平均调水量/ 万 m ³	多年平均弃水量/ 万 m ³	多年平均缺水/ 万 m ³	丰水年年均调水量/ 万 m ³	平水年年均调水量/ 万 m ³	枯水年年均调水量/ 万 m ³	丰水年年均弃水量/ 万 m ³	平水年年均弃水量/ 万 m ³	枯水年年均弃水量/ 万 m ³
	城市	生态	农业									
SOP	87.1	85.7	73.8	4200.0	2905.5	2018.4	4200.0	4200.0	4200.0	8969.6	1326.2	0
优化调度	91.3	89.3	75.3	1507.6	2488.0	827.0	10.8	1108.7	3802.0	7711.0	1120.5	0

少2692.4万 m³,多年平均弃水量减少417.5万 m³,多年平均缺水减少1191万 m³,既节省了调水成本,还提高了天然来水和外调水的利用效率。此外,通过典型年调度结果统计比较,可以得到优化调度规则下丰、平、枯水年对外调水的依赖分别减少4189万 m³、3091万 m³和398万 m³,枯水年对外调水的依赖大大高于平水年和丰水年;丰水年和平水年的年均弃水量分别减少14%和15.5%,可知天然来水越少,其利用率越高。由图5可知,两种调度规则下水库弃水均集中在7—9月,水库缺水集中在3—8月,SOP由于缺乏调水线而采用固定调水量,忽略了年内来水丰枯性对调水量的影响,造成弃水多、缺水也多的情况,优化调度通过设置调水和供水规则,优化了调水过程和各用户供水量,减少了调水量、弃水量和缺水量。

2.3.2 非常规水源配置对水库调度的影响

根据2017现状年非常规水用水情况,基础方案中再生水对城市的供水阈值为0.1,再生水对生态的供水阈值为0.2,海淡水对城市的供水阈值为0.2,对各用户配置完非常规水后,按照优化的水库调度规则进行调水和供水。为研究非常规水配置量的变化对水库运行调度的影响,结合非常规水利用技术发展水平,设定了不同方案,见表2。

表3为不同方案结果比较,可见,增加非常规水的配置量可提升非常规水用户供水保证率。非常规水的配置意味着节省了水库对城市和生态的供水,节省的水库水可用于供给农业,进而提高其供水保证率。此外,鉴于本文中非常规水对用户的配置量是一个时不变的值,在水库来水较丰时段下,极易造成水库弃水量的增加,因此,随着非常规水配置量的增大,水库的弃水量也呈现上升趋势。非常规水配置量的增加从另一个角度也可以理解为水库供水用户需水的减少,所以水库引入的外调水量也随之减少。

图6采用桑基图^[26]的形式直观展现了不同方案下的水源用户的年均水量配置关系,图中水源用户间的连线粗细表明了水量的大小。比较图6中各方案,方案1、2、3、4中非常规水的配置量分别比基础方案增加896万 m³、318万 m³、1792万 m³和3006万 m³,而水库供给用户的总水量则分别减少

表2 非常规水不同供水阈值方案

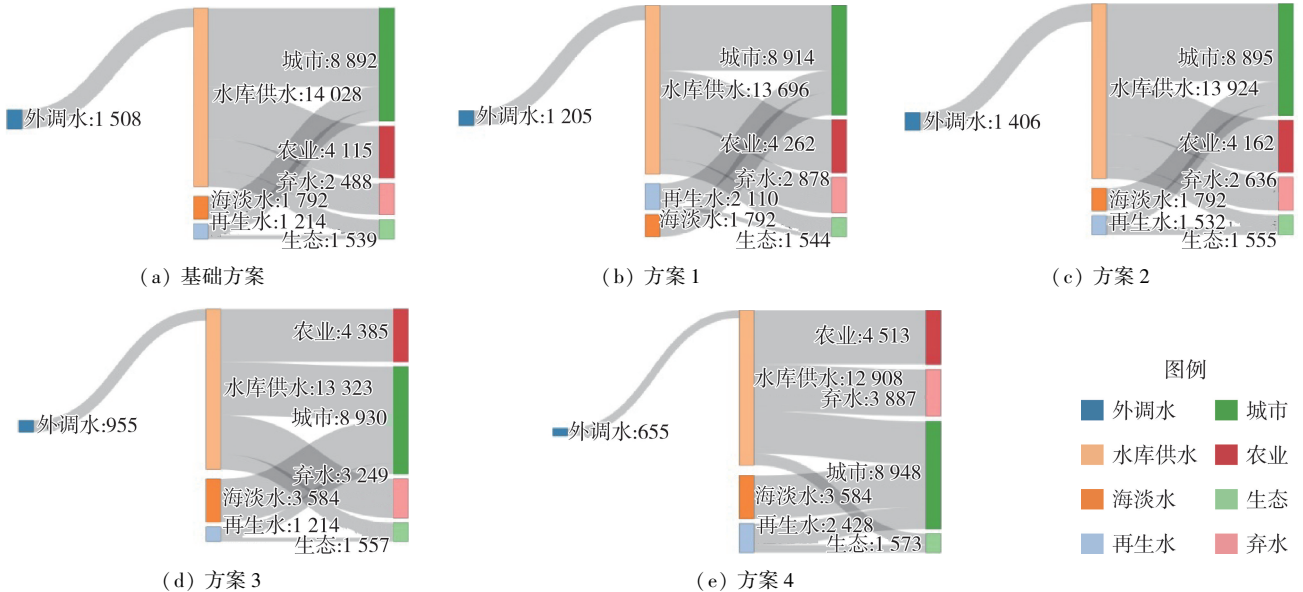
Table 2 Different water supply threshold schemes for unconventional water

方案	再生水对城市	自生水对生态	海淡水对城市
基础方案	0.1	0.2	0.2
方案1	0.2	0.2	0.2
方案2	0.1	0.4	0.2
方案3	0.1	0.2	0.3
方案4	0.2	0.4	0.3

表3 不同方案结果比较

Table 3 Comparison of different scheme results

方案	供水保证率/%			多年平均弃水量/万 m ³	多年平均调水量/万 m ³
	城市	生态	农业		
基础方案	91.3	89.3	75.3	2488	1 507.6
方案1	93.5	92.4	79.7	2 878.4	1 205.4
方案2	92.8	91.1	78.1	2 635.9	1 406.5
方案3	95.6	94.4	84.4	3 249.2	954.8
方案4	97.2	96.5	88.4	3 886.7	654.7

图6 不同方案下的水源用户的年均水量配置(单位:万 m³)Fig. 6 Annual average water volume allocation in different schemes (unit: 10⁴ m³)

了 332 万 m³、104 万 m³、705 万 m³ 和 1 120 万 m³。可见,非常规水配置量越多,水库总供水量越少,其中,非常规水主要配置给了城市和生态用水,将原本供给这些用户的水库水配置给了农业,实现了水源置换。可以说,非常规水的利用在保障城市用水的情况下恢复了被城市用水挤占的农业用水。

3 结 语

a. 构建的多水源受水水库调水和供水模型将调度规则和时段调水量作为决策变量,调整了水库运行方式,优化了调水过程。在米山水库应用实例中,与 SOP 调度规则下水库采用固定调水量相比,多年平均调水量和多年平均弃水量分别减少 2 692.4 万 m³ 和 417.5 万 m³,有效提高了天然来水和外调水的利用效率,其中,枯水年对外调水的依赖仅减少 398 万 m³,与平水年和丰水年相比,枯水年对外调水的依赖性较大。

b. 加大非常规水的配置能节省水库供水,这部分由非常规水置换出的水库水可以在不降低城市用水供水保证率的情况下有效增加农业用水的供水量,将农业用水的保证率从 75% 提高到 88.4%,因此,在城市用水中使用非常规水有利于恢复被城市

用水挤占的农业用水。

c. 水库调水量除受天然来水丰枯影响外,还受到用户需水影响。当非常规水配置量增大,用户剩余需水减小,水库调水量相应减小,因此,非常规水的利用可以减少调水量,降低调水成本。

参考文献:

- [1] LOPEZ J C. Inter basin water transfers and the size of regions: an economic geography example [J]. Water Resources and Economics, 2018, 21: 40-54.
- [2] 王栋,梁忠民,常文娟,等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 35-40. (WANG Dong, LIANG Zhongmin, CHANG Wenjuan, et al. Comprehensive evaluation of benefit of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 35-40. (in Chinese))
- [3] 孙万光,杨斌斌,徐岩彬,等. 有外调水源的多年调节水库群供水优化调度模型研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 21-27. (SUN Wanguang, YANG Binbin, XU Yanbin, et al. Study on optimal water supply operation model of pluriennial regulation reservoir groups with external water resource [J]. Journal of Hydroelectric

- Engineering, 2015, 34(6):21-27. (in Chinese))
- [4] 董增川,陈牧风,倪效宽,等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3):233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3):233-240. (in Chinese))
- [5] 黄显峰,吴志远,李昌平,等. 基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2):1-7. (HUANG Xianfeng, WU Zhiyuan, LI Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):1-7. (in Chinese))
- [6] 黄志鸿,董增川,周涛,等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3):202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3):202-208. (in Chinese))
- [7] 郭旭宁,胡铁松,吕一兵,等. 跨流域供水水库群联合调度规则研究[J]. 水利学报, 2012, 43(7):757-766. (GUO Xuning, HU Tiesong, LU Yibing, et al. Multi-reservoir operating rule in inter-basin water transfer-supply project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(7):757-766. (in Chinese))
- [8] 李成振,孙万光,陈晓霞,等. 有外调水源的库群联合供水调度方法的改进[J]. 水利学报, 2015, 46(11):1272-1279. (LI Chengzhen, SUN Wanguang, CHEN Xiaoxia, et al. The improvement of joint operation for multi-reservoir water supply system with external water resource [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(11):1272-1279. (in Chinese))
- [9] WANG Q, ZHOU H, LIANG G, et al. Optimal operation of bidirectional inter-basin water transfer-supply system [J]. Water Resources Management, 2015, 29(9):3037-3054.
- [10] TAN Q, WANG X, WANG H, et al. Derivation of optimal joint operating rules for multi-purpose multi-reservoir water-supply system [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551:253-264.
- [11] 彭勇,彭安帮,周惠成,等. 基于改进引水规则的跨流域供水水库联合优化调度研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(5):1346-1353. (PENG Yong, PENG Anbang, ZHOU Huicheng, et al. Improved water-transfer rule in water-supply multi-reservoir system under the condition of inter-basin water transfer [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(5):1346-1353. (in Chinese))
- [12] ZHU X, ZHANG C, YIN J, et al. Optimization of water diversion based on reservoir operating rules: analysis of the Biliu River Reservoir, China [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(2):411-421.
- [13] LIU K, WANG Z, CHENG L, et al. Optimal operation of interbasin water transfer multireservoir systems: an empirical analysis from China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(7):1-11.
- [14] 马永胜,史娟,潘景辰. 复杂跨流域调水系统联合优化调度研究:以陕西省引嘉入汉调水工程为例[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5):142-148. (MA Yongsheng, SHI Juan, PAN Jingchen. Joint optimal operation of complex inter-basin water transfer systems: taking Jialingjiang River to Hanjiang River Water Transfer Project as an example [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(5):142-148. (in Chinese))
- [15] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008(2):55-58. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff [J]. China Water Resources, 2008(2):55-58. (in Chinese))
- [16] JUSSAH O, MOHAMED O, SUŠNIK J, et al. Assessment of the potential contribution of alternative water supply systems in two contrasting locations: Lilongwe, Malawi and Sharm El-Sheikh, Egypt [J]. Journal of Water and Climate Change, 2020, 11(1):130-149.
- [17] 路琪儿,罗平平,虞望琦,等. 城市雨水资源化利用研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(6):80-87. (LU Qi'er, LUO Pingping, YU Wangqi, et al. Research progress of urban rainwater resources utilization [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6):80-87. (in Chinese))
- [18] TARROJA B, AGHAKOUCHAK A, SOBHANI R, et al. Evaluating options for balancing the water-electricity nexus in California: part 2: greenhouse gas and renewable energy utilization impacts [J]. Science of the Total Environment, 2014, 497-498:711-724.
- [19] BHUSHAN R, NG T L. Integrating desalination to reservoir operation to increase redundancy for more secure water supply [J]. Water Resources Research, 2016, 52:6137-6155.
- [20] 王宗志,程亮,王银堂,等. 基于库容分区运用的水库群生态调度模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(3):435-443. (WANG Zongzhi, CHENG Liang, WANG Yintang, et al. A multi-reservoir ecological operation model based on subdivision application of reservoir storage capacities [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3):435-443. (in Chinese))

(下转第48页)

- 拟[J]. 海洋通报, 2003, 22(4):8-14. (BAO Yun, REN Jie. Numerical simulation of tidal current field under the forcing of southwest wind in the Pearl River Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2003, 22(4):8-14. (in Chinese))
- [11] 林若兰, 卓文珊, 曾珂, 等. 不同风向对珠江东四口门盐水入侵的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(1):70-79. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, ZENG Ke, et al. Influence of different wind direction on saltwater intrusion in east four portals of Pearl River [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1):66-75. (in Chinese))
- [12] 吕紫君, 冯佳佳, 孔俊, 等. 磨刀门盐水入侵特性及其动力机制研究[J]. 水道港口, 2018, 39(2):144-150. (LYU Zijun, FENG Jiajia, KONG Jun, et al. Study of the features and dynamics of saltwater intrusion in Modaomen waterway [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(2):144-150. (in Chinese))
- [13] 王青, 吕紫君, 孙杰, 等. 基于水幕方法的珠江河口抑咸对策[J]. 水资源保护, 2018, 34(5):50-56. (WANG Qing, LYU Zijun, SUN Jie, et al. Study on measures of saline water intrusion control to Pearl River Estuary based on water curtain method [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):50-56. (in Chinese))
- [14] 陈水森, 方立刚, 李宏丽, 等. 珠江口咸潮入侵分析与经验模型:以磨刀门水道为例[J]. 水科学进展, 2007, 18(5):751-755. (CHEN Shuisen, FANG Ligang, LI Hongli, et al. Saltwater intrusion analysis and experiential model for Pearl River Estuary, south China: a case study in Modaomen watercourse [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5):751-755. (in Chinese))
- [15] 路剑飞, 陈子燊. 珠江口磨刀门水道盐度多步预测研究[J]. 水文, 2010, 30(5):69-74. (LU Jianfei, CHEN Zishen. Salinity prediction at Modaomen Waterway in Estuary of Pearl River [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(5):69-74. (in Chinese))
- [16] 周凡涵, 刘丙军, 胡家昱, 等. 基于人工神经网络的河口区盐水入侵预报研究[J]. 水文, 2020, 40(6):55-62. (ZHOU Fanhan, LIU Bingjun, HU Jiayu, et al. Study of estuarine salinity prediction based on wavelet artificial neural network [J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(6):55-62. (in Chinese))
- [17] 尹小玲, 赵雪峰, 黄舒琴, 等. 分层型河口咸水上溯对径流潮汐共同作用的基本响应[J]. 水资源保护, 2020, 36(4):68-74. (YIN Xiaoling, ZHAO Xuefeng, HUANG Shuqin, et al. Basic response of saline water intrusion on combined action of runoff and tide in stratified estuary [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4):68-74. (in Chinese))
- [18] WANG Biao, ZHU Jianrong, WU Hui, et al. Dynamics of saltwater intrusion in the Modaomen Waterway of the Pearl River Estuary [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55(11):1901-1918.
- [19] 王艺霖, 苏程佳, 陈晓宏, 等. 磨刀门水道枯水期咸潮变化趋势及成因[J]. 水资源保护, 2019, 35(2):37-43. (WANG Yilin, SU Chengjia, CHEN Xiaohong, et al. Change trend and cause of salt tide in Modaomen Channel during dry seasons [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):37-43. (in Chinese))

(投稿日期:2021-10-12 编辑:施业)

(上接第 21 页)

- [21] ZENG X, HU T, GUO X, et al. Water transfer triggering mechanism for multi-reservoir operation in inter-basin water transfer-supply project [J]. Water Resources Management, 2014, 28(5):1293-1308.
- [22] 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):1-12. (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):1-12. (in Chinese))
- [23] 冯树民, 吴海月, 王弟鑫. 基于理想点法的多目标最短路求解算法研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(3):97-101. (FENG Shumin, WU Haiyue, WANG Dixin. Study of multi-objective shortest path algorithm based on ideal point solution [J]. Journal of Highway and Transportation Research, 2016, 33(3):97-101. (in Chinese))
- [24] 黄显峰, 石志康, 金国裕, 等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护, 2020, 36(4):47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4):47-51. (in Chinese))
- [25] WAN W, GUO X, LEI X, et al. A novel optimization method for multi-reservoir operation policy derivation in complex inter-basin water transfer system [J]. Water Resources Management, 2018, 32:31-51.
- [26] LUPTON R C, ALLWOOD J M. Hybrid Sankey diagrams: visual analysis of multidimensional data for understanding resource use [J]. Resources Conservation and Recycling, 2017, 124(4):141-151.

(收稿日期:2021-10-18 编辑:王芳)