

网络出版时间:2014-10-16 13:27 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.11.080
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.11.080.html

基于水库群调度的深圳公明供水调蓄工程效益分析

刘任远,黄 强,金文婷

(西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室,陕西 西安 710048)

【摘 要】 【目的】揭示公明水库的蓄水、供水、生态交换水量、损失水量之间的相互关系,分析其储备效益、供水效益和生态效益等。**【方法】**考虑深圳北线引水的不同选择,设置 2 种城市供水情景,其中情景 1 为近期北线引水固定不变,以供定需;情景 2 为远期北线引水有丰枯变化,以需定供满足城市供水要求。通过建立公明供水调蓄工程水库群优化调度模型,用 45 年长序列月径流资料采用决策动态优选的自适应算法求解模型,并将计算结果与采用水量平衡中的等流量常规调度结果进行对比分析。**【结果】**2 种情景的优化调度结果表明,公明水库的多年平均蓄水量有很大的差异,由情景 1 的 10 715 万 m^3 /年增加到情景 2 的 12 545 万 m^3 /年,平均每年增加 1 830 万 m^3 ,情景 2 的蓄水量已经超过了 12 141 万 m^3 的储备库容;城市供水保证率由情景 1 下的 0.70%~6.70% 提高到情景 2 下的 98.00%,最大连续缺水破坏时间由情景 1 的 45 年锐减到情景 2 的 0 年,满足了该地区的城市供水要求。**【结论】**通过水库群联合调度,深圳公明供水调蓄工程能够实现对深圳市中西部城区供水和储备水源等目标,并能发挥其生态效益。

【关键词】 水库群;优化调度;储备效益;生态效益;供水效益;公明供水调蓄工程;深圳
【中图分类号】 TV213.9 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2014)11-0205-08

Reservoirs operation based benefit analysis of Gongming water storage project in Shenzhen

LIU Ren-yuan, HUANG Qiang, JIN Wen-ting

(State Key Lab Cultivation Base of Northwest Arid Ecology and Hydraulic Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: 【Objective】 This study revealed the relationship between water storage, water supply, ecological exchange water and loss of water of Gongming water storage project, and analyzed its reserve benefit, ecological benefit and water supply benefit. **【Method】** Two water supply scenarios were set based on the options of water import from north. One used supply amount to decide demand amount with fixed quantity of water from recent northern line, and the other one decided supply amount based on demand amount assuming that the quantity of water from future northern line would change. Then an optimal operation model of multi-reservoir was built, and 45 years monthly runoff data were used to solve the model using adaptive algorithm of decision dynamic optimization. The model results were compared with measurements at last. **【Result】** The multiple-year average water storage capacities of Gongming reservoir were different under the two scenarios. The capacity increased from 107.15 million m^3 per year in scenario 1 to 125.45 million m^3 per year in scenario 2 with a net increase of 18.30 million m^3 per year. The storage capacity in scenario 2 was larger than the reserve capacity of 121.41 million m^3 . The city water supply guaranteed rate

[收稿日期] 2013-08-06
[基金项目] 国家重点基础研究计划项目(2011CB403306);水利部公益性行业科研专项(201101043,201001012,201101049)
[作者简介] 刘任远(1976—),男,甘肃兰州人,在读博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:lry_63@126.com
[通信作者] 黄 强(1958—),男,四川梓潼人,教授,博士生导师,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:sy-sj@xaut.edu.cn

increased from 0.7%—6.7% in scenario 1 to 98% in scenario 2, while the maximum water shortage time decreased from 45 years in scenario 1 to 0 in scenario 2. The city water supply requirement in the region was totally met. 【Conclusion】 Through joint operation of reservoirs, the Gongming water storage project could realize the water supply and water reserve targets of Midwest Shenzhen and exert their ecological benefits.

Key words: multi-reservoir; optimal operation; reserve benefit; ecological benefit; water supply benefit; Gongming water storage project; Shenzhen

我国对水库群优化调度的研究开始于 20 世纪 80 年代初,国内众多学者在此方面开展了很多研究,如张双虎等^[1]、黄强等^[2]提出递推计算方法,黄增川等^[3-4]应用多次动态规划法和空间分解法研究水库群的优化调度,黄强等^[5]和李亮等^[6]将大系统递阶控制理论引入到水库群优化调度中,赵基花等^[7]和尹轶凤^[8]提出水库群调度的人工神经网络方法等。随着计算机与人工智能技术的发展,遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、免疫算法等相继被应用到水电站水库的优化调度研究中^[9-10]。进入 21 世纪后,畅建霞等^[11]针对遗传算法中二进制编码的不足,提出基于十进制整数编码的改进遗传算法,实例计算结果表明该方法简便、快捷,能够避免“维数灾”;刘文亮^[12]采用遗传蚁群混合算法进行水库优化调度研究;张双虎等^[13]用随机动态规划结合遗传算法求解 2 个并联水库的优化调度问题。以上成果分别从不同角度、运用不同方法对水库群联合优化调度问题进行了研究,并运用于实践,使得水库群联合优化调度在水库防洪、发电、灌溉供水、航运等方面取得了长足发展。

然而,随着经济、人口的高速增长,对于城市供水需求不断增大而当地自产水又远远不足的地区,水库群联合优化调度的目标不仅仅是防洪、发电、灌溉、航运,而应更侧重于储备水源以应对特枯年份或水污染等事件。目前国内以储备水源作为主要功能的水库较少,针对储备水库的效益分析尚存在空白。深圳是一个严重缺水且供水来源主要为境外调水的城市,随着深圳经济的高速发展和人口的不断增加,其供水需求亦日益增加,而一直以来东江引水是深圳市境外引水的唯一水源,一旦东江遭遇连续枯水年份或发生水污染等紧急事件,深圳市供水将面临巨大威胁。位于深圳中西部城区的公明供水调蓄工程就是这样一个承担着储备战略水资源重要任务的民生工程。因此,公明供水调蓄工程的首要效益是使得公明水库最大蓄水,以确保拥有应对紧急缺水情况的能力。但如果水库只是一味地蓄水,水长期

不周转将导致水质恶化,进而又面临着交换水量最大化的生态效益问题,因此如何通过联合调度使得公明水库每年的交换水量达到最大,以保证水库水质安全成为该供水调蓄工程亟待解决的问题之一。为此,本研究通过常规和优化调度的方法对深圳北线引水面临的 2 种不同供水情景进行调节计算,对公明供水调蓄工程的效益进行系统分析和科学评判,以期明确公明供水调蓄工程能否缓解深圳市中西部地区的供水压力,进而为该地区社会经济可持续发展中水资源的科学管理提供参考。

1 深圳公明供水调蓄工程概况

公明供水调蓄工程是一项集水库、管网、引水为一体的综合、复杂型工程,其工程包括了公明水库扩建工程,库容扩建为 14 247 万 m³;鹅颈水库—公明水库连通工程,长度为 4 660 m;公明水库至石岩水库供水工程,长度为 6 397 m。公明供水调蓄工程供水范围是深圳市中西部片区,包含整个宝安区、南山区以及福田区的大部分城区(梅林水厂供水区),合计供水面积约 950 km²。供水系统包括位于深圳西区的公明水库、石岩水库、鹅颈水库和茜坑水库,这 4 座水库分别对应不同规模的水厂,其供水系统见图 1。公明供水调蓄工程的任务是在保证向深圳市中西部供水保证率为 97% 的基础上,兼有储备水源、供水调蓄、雨洪利用及防洪等作用^[14-16],其作用是为深圳市中西部城区社会经济的可持续发展提供供水保障,并兼具改善生态环境的任务。因此,公明供水调蓄工程可能产生的效益见图 2。由于资料限制,本研究在分析公明供水调蓄工程水库群调度的基础上,主要探讨其储备效益、生态效益和供水效益。

2 公明供水调蓄工程水库群的优化调度

2.1 调度情景设置

按水库对应的水厂,公明供水调蓄工程的水厂

划分为观澜茜坑水厂、龙华茜坑水厂、光明水厂、岩石湖水厂、公明甲子塘水厂等。根据深圳市实际情况,以保证城市基本用水为前提,兼顾对公明水库水量、水质的要求^[17-20],设置如下水库群调度情景方

案,水库群总兴利库容为 19 016 万 m³,城市需水量为 49 154~56 474 万 m³/年,当地自产水量为 5 896 万 m³/年。

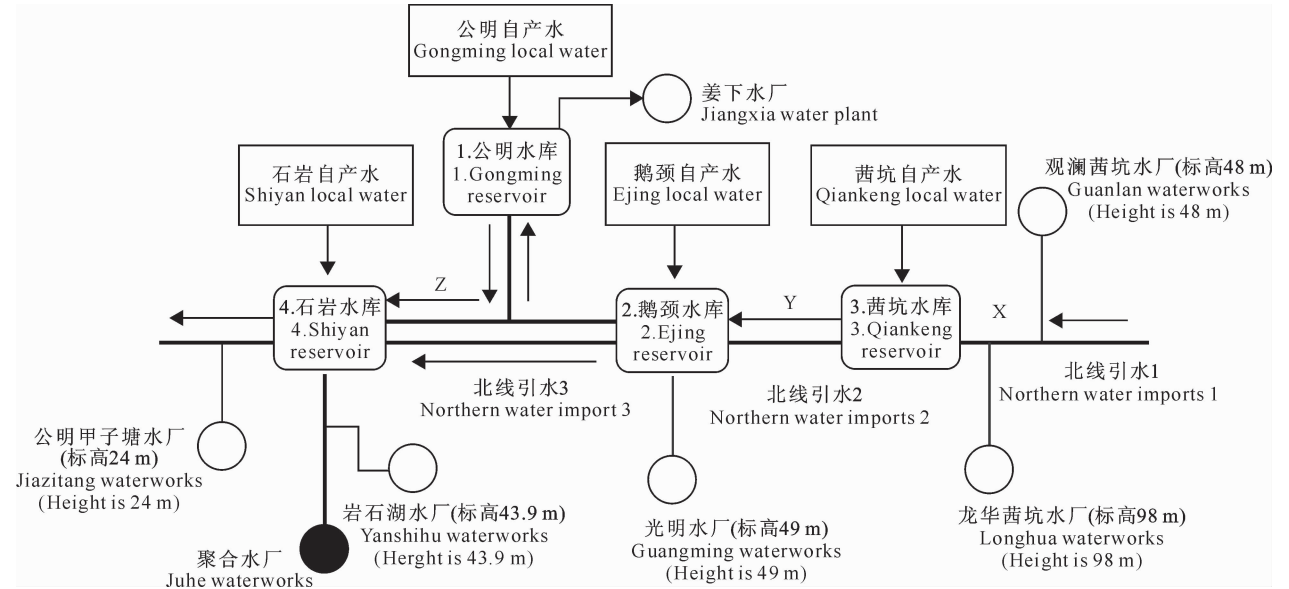


图 1 深圳市公明供水调蓄工程供水系统节点图
Fig. 1 Water supply system of Gongming water storage project

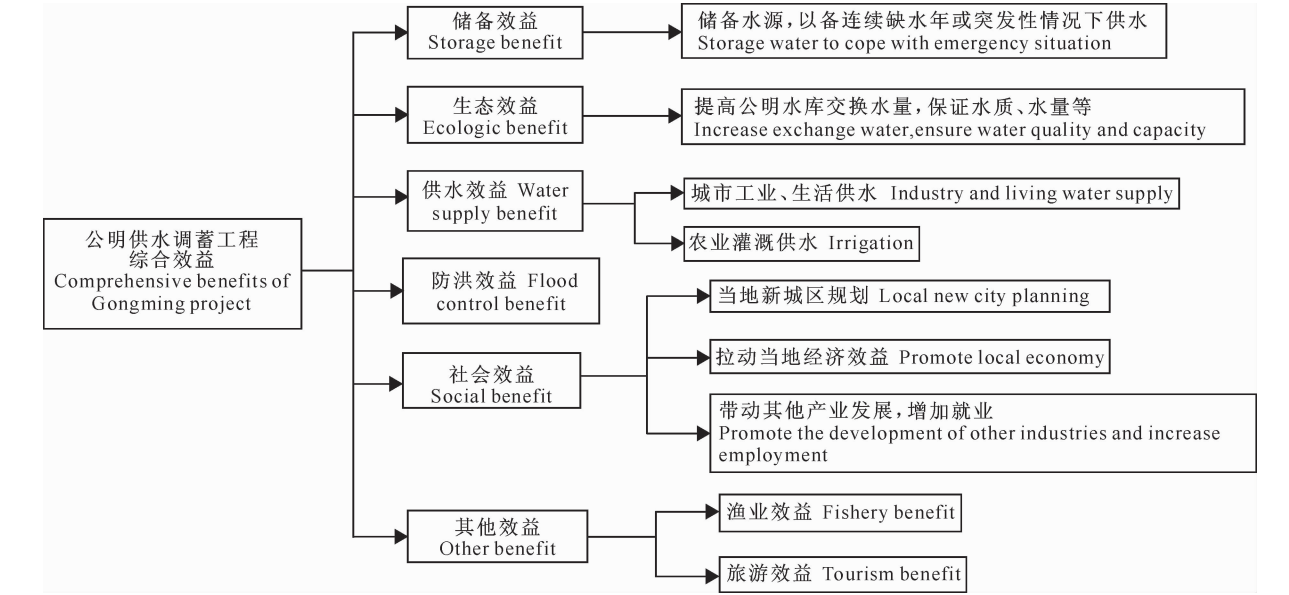


图 2 公明供水调蓄工程的综合效益图
Fig. 2 Comprehensive benefits of Gongming water storage project

情景 1: 以供定需, 近期北线引水 35 000 万 m³/年不变, 城市需水量为 49 154~56 474 万 m³/年, 总可供水量为 40 896 万 m³/年。设置此情景的目的是在供水不足时推求缺水量;

情景 2: 以需定供, 远期北线引水出现丰枯变化, 城市需水总量为 49 154~56 474 万 m³/年。设

置此情景的目的是按城市需水要求, 推求最小的北线引水量。

为了保证公明水库的水质环境, 建议当水库的库容达到储备库容 12 141 万 m³ 时需给姜下水厂供水。所以深圳市中西部城区供水规模将有所增加, 供水量增加至 56 474 万 m³/年。

2.2 优化调度模型的建立

由于公明水库的主要任务是储备水源,兼顾供水调蓄等,为了保证水库水质环境安全,提高深圳市中西部城区供水量,选取公明水库蓄水量最大及交换水量最大为目标,将缺水量最小转化为约束条件,另外有库容约束、城市供水量约束、各水库水量平衡约束以及各输水线路过水能力约束,建立水库的联合调度优化模型,并采用决策动态优选的自适应算法来求解模型。

目标一:公明水库蓄水量最大。有:

$$W_{gm}(i)=\max\sum_{j=1}^nW_{gm}(i,j)。(1)$$

式中: $W_{gm}(i)$ 为公明水库第*i*年总蓄水量,万 m³; *i* 为年数, *i* = 1, 2, ..., 45; *j* 为以年为计算周期的月时段数, *j* = 1, 2, ..., 12; $W_{gm}(i, j)$ 为公明水库在第*i*年*j*月时段的蓄水量,万 m³。

目标二:公明水库交换水量最大。交换水量的定义为每年公明水库总的蓄水量与供水量之和,单位为万 m³。有:

$$W_{jh}(i,j)=\max\sum_{j=1}^n[W_{gm}(i,j)+W_{gm}g(i,j)]。(2)$$

式中: $W_{jh}(i, j)$ 为公明水库在第*i*年的交换水量,万 m³; $W_{gm}g(i, j)$ 为公明水库在第*i*年*j*月时段的供水量,万 m³;其他符号意义同式(1)。

公明供水调蓄工程水库群优化调度所采用的方法为决策动态优选的自适应算法,该算法根据水库群供水系统可能出现的各种运行工况,选择主要调控参数,然后利用计算机进行人机对话试验,最终得到满意的水库群调度方案。公明供水调蓄工程水库群优化调度模型的求解步骤如下。

Step 1:输入基本资料,包括来水、需水、各水库的水位库容关系、最大库容、死库容等。

Step 2:通过循环茜坑、鹅颈、石岩水库蓄水比例,使其能够保证各水厂的供水要求。计算第*i*年*j*月时段下北线引水之后的剩余水量 $W_{hrs}(i, j)$,当

$W_{hrs}(i, j) \geq 0$ 时,该时段的缺水量 $W_{que}(i, j) = 0$, $W_{hrs}(i, j)$ 和 $W_{que}(i, j)$ 的单位均为万 m³。

Step 3:判断各水库是否满足约束,“是”则进入下一步;“否”则返回 Step 2,重新制定各水库蓄水比例。

Step 4:计算公明水库入库水量,当 $W_{hrs}(i, j) < 0$ 时, $W_{que}(i, j) > 0$, 则 $W_{gm}g(i, j) = W_{que}(i, j) + W_{jx}$, 其中 W_{jx} 为姜下水厂的供水量,由公明水库的时段库容确定,单位为万 m³。

Step 5:判断公明水库在第*i*年*j*月时段的时段末库容 $V_{gm}(i, j)$,单位为万 m³。

Step 6:进行长序列计算,循环 *i* = 1, 2, ..., 45, *j* = 1, 2, ..., 12。

Step 7:判断各项指标是否满足要求,“是”则统计公明水库蓄满率、交换水量、供水保证率;“否”则返回 Step 2,重新制定各水库蓄水比例。

Step 8:输出优化调度结果。

为了体现优化调度较常规调度的优越性,更全面地分析公明供水调蓄工程的作用和影响,本研究同时采用水量平衡中的等流量常规调度方法对公明供水调蓄工程水库群进行调度,以与优化调度结果进行对比。常规调度按照水量平衡原则,在北线引水 2 种情形下,首先根据各水库初库容与公明水库储备库容的关系,考虑蓄供水的优先次序,并在满足各水库水量平衡方程、库容约束、城市供水量约束及各输水线路过水能力的前提下,进行水库群调节计算。

3 公明供水调蓄工程的综合效益分析

采用 1960-04—2005-03 共 45 年的长序列月径流资料,通过求解公明水库的联合调度优化模型^[21-22],得出公明水库的联合调度优化结果如表 1 所示。然后通过对水库蓄水量、供水量和生态水量等的分析,探讨公明供水调蓄工程的综合效益。

表 1 不同供水情景下深圳公明供水调蓄工程对公明水库水量的影响

Table 1 Effects of different scenarios on water amount of Gongming reservoir

情景 Scenario	调度方案 Scheme	入库水量/ (万 m ³ · 年 ⁻¹) Reservoir inflow	蓄满 周期/年 Full period	供水量/ (万 m ³ · 年 ⁻¹) Supply water	蓄水量/ (万 m ³ · 年 ⁻¹) Water storage	交换水量/ (万 m ³ · 年 ⁻¹) Exchange water	缺水量/ (万 m ³ · 年 ⁻¹) Water shortage	蒸发渗漏 损失/(万 m ³ · 年 ⁻¹) Loss of evaporation and leakage
1	常规 Normal	3 966.38	3.59	2 564.37	10 438.79	2 564.37	10 081.9	1 175.06
	优化 Optimal	3 836.24	3.71	2 812.29	10 714.92	2 812.29	9 691.6	789.12
2	常规 Normal	8 745.7	1.63	7 189.67	12 489.78	7 189.67	0	1 307.09
	优化 Optimal	8 796.7	1.62	7 230.33	12 544.84	7 230.33	0	1 311.19

3.1 公明水库的储备效益分析

公明水库的蓄水量主要由 2 部分组成,其一是水库自产水,多年平均蓄水量约 5 896 万 m³;其二是北线剩余水量。公明水库在 2 种情景下的多年调节蓄水量的变化如图 3 所示。由图 3 可知,情景 1 供水条件下,公明水库常规调度、优化调度的多年平均蓄水量分别为 10 439 和 10 715 万 m³,优化调度的蓄水量比常规调度增加了 276 万 m³,提高了 2.64%;情景 2 供水条件下,公明水库常规调度、优

化调度的多年平均蓄水量分别为 12 490 和 12 545 万 m³,优化调度的蓄水量比常规调度多 55 万 m³,增加了 0.5%;优化调度下情景 2 的多年平均蓄水量比情景 1 多 1 830 万 m³。情景 2 供水条件下,公明水库的蓄水量已经基本接近于正常库容,调度中对入库水量有所控制,所以优化调度的多年平均蓄水量较常规调度增幅不大。因此,优化调度可充分发挥水库储备水源,以备连续缺水年或突发性情况的发生。

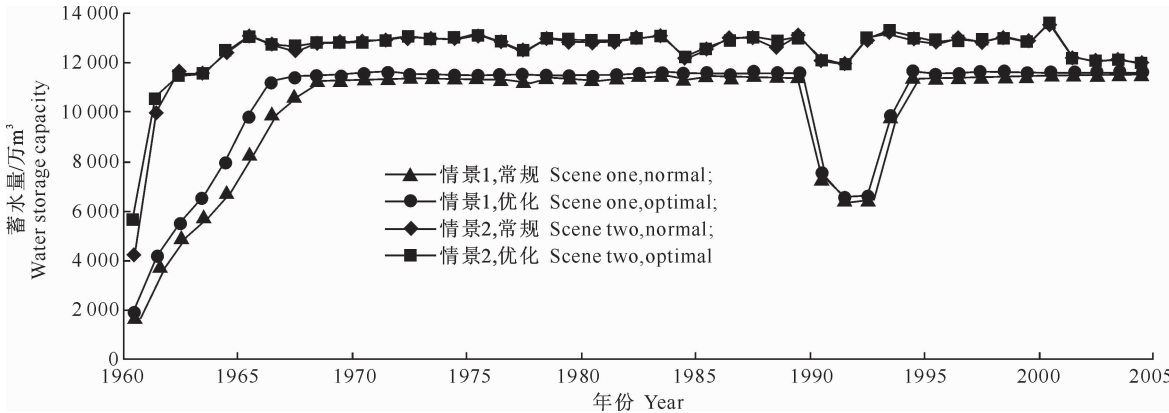


图 3 2 种供水情景下公明水库多年蓄水量的变化

Fig. 3 Changes of multi-year water storage capacity of Gongming reservoir under two scenarios

2 种供水情景下,优化调度与常规调度多年平均蓄水量相差不大,均以优化调度的蓄水量稍大。在情景 1 下,公明水库蓄水量未达到储备库容,不能完全实现储备水源目标;而在情景 2 下,公明水库蓄水量大于储备库容,可以实现储备水源的战略目标和正常调蓄目标。

3.2 公明水库的供水效益分析

公明水库的供水原则是在特枯年份及发生供水突发事件情况下供水,最大供水规模 136.5 万 m³/d。公明水库供水分为 2 类:一类是 1—9 月给姜下水厂供水,另一类是每年 12 月在北线引水工程检修期间给茜坑、鹅颈、石岩 3 个水库供水。公明水库在 2 种供水情景下历年的供水量变化如图 4 和图 5 所示。

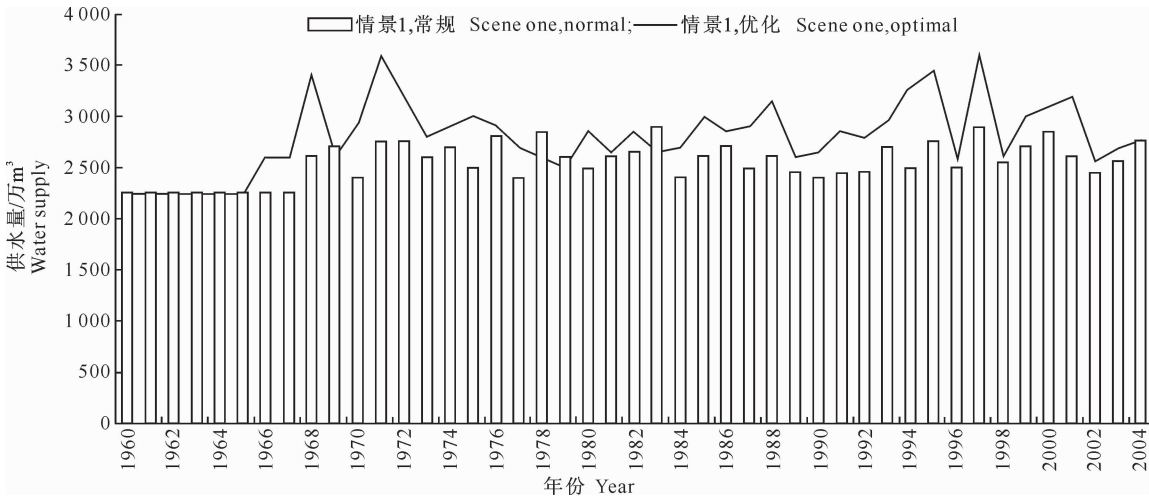


图 4 情景 1 供水条件下公明水库历年供水量的变化

Fig. 4 Changes of yearly water volume of Gongming reservoir in scenario 1

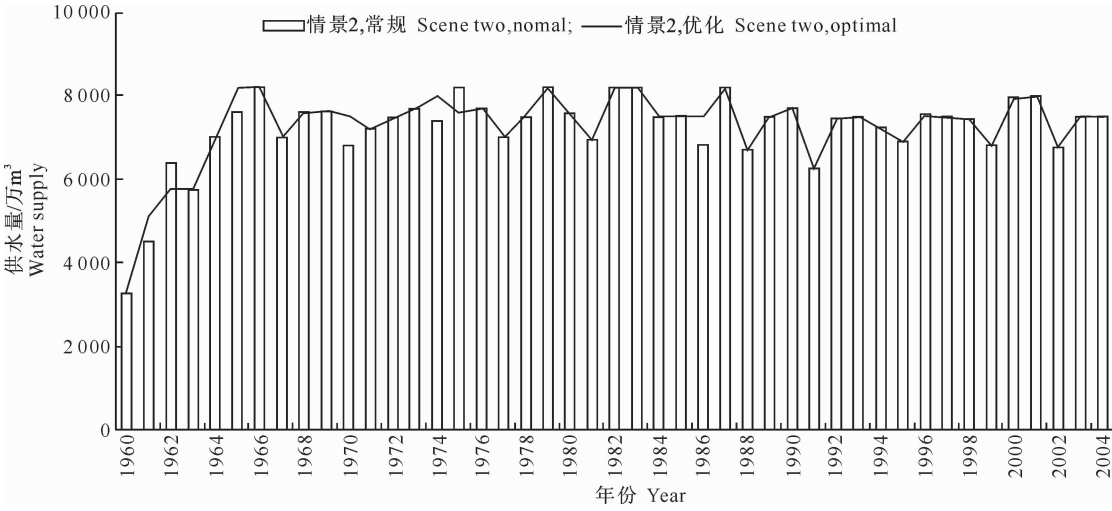


图 5 情景 2 供水条件下公明水库历年供水量的变化

Fig. 5 Changes of yearly water volume of Gongming reservoir in scenario 2

从图 4 及图 5 可知,情景 1 下常规与优化调度得到的供水量有所差异,优化调度的多年平均供水量较常规调度增加了 247.92 万 m^3 /年,增幅为 9.7%;情景 2 下常规调度和优化调度的供水量差别不大,优化调度的供水量较常规调度略有增加,平均增加 40.66 万 m^3 /年,增幅为 0.6%。在情景 2 供水模式下该地区不缺水,公明水库每年只需担负给姜下水厂供水以及在 12 月份给另外 3 个水库供水的任务,而这些供水量每年基本相同,因此从多年情况看优化调度比常规调度的提升程度不会太大。

3.3 公明水库的生态效益分析

公明水库为复合型、生态型供水水库,多方位、多角度的体现生态性原则^[13],地方政府将公明水库塑造成层叠地形,打造成生态农林观光区;在坝下入口区域营造了生态休闲区,是市民郊游踏青的好地方;另外还可以营造人工湿地,在恢复生态的同时起到净化水源涵养地与美化岸线的作用,打造出群山之中自然湖泊的景观效果。

根据公明供水调蓄工程的功能和特点,水库生态调度的目标为:在公明水库发挥自身作用的同时,使水体充分发生交换,保证水库水质、环境,即保证水库有足够的交换水量。由于公明水库没有弃水,所以交换水量基本等于公明水库的出库水量。

由表 1 可知,情景 1 下常规调度和优化调度得到的公明水库交换水量有一定差异,优化调度的交换水量为 2 812.29 万 m^3 /年,较常规调度(2 564.37 万 m^3 /年)增加 247.9 万 m^3 /年,提高了 9.7%。但在此情景下,公明水库只起到储备水源、向城市供水

的作用,并未起到生态供水的作用。情景 2 下,因北线来水出现丰枯变化,以供定需,因此 2 种调度的交换水量差异不大,优化调度的交换水量为 7 230.33 万 m^3 /年,较常规调度(7 189.67 万 m^3 /年)多 40.7 万 m^3 /年,提高了 0.6%。由此可以看出,情景 2 下公明水库交换水量总体较情景 1 下大。优化调度时,情景 2 较情景 1 每年多交换水量 4 418.04 万 m^3 ;常规调度时,情景 2 较情景 1 每年多交换水量 4 625.3 万 m^3 。因此情景 2 下的交换水量足以保证公明水库的水质环境安全。

4 公明供水调蓄工程对深圳中西部城区的供水效益分析

公明供水调蓄工程的目标是在实现城市供水保证率为 97.00%的前提下,尽可能多、快地让公明水库蓄水,并保证水质满足标准的要求。从供水保证率入手,分析公明供水调蓄工程对深圳市中西部城区的供水效益,按月统计其供水保证率,结果见表 2。由表 2 可知,在情景 1 下,常规调度和优化调度深圳市中西部城区供水保证率分别为 0.70% 和 6.70%,远小于设计要求的 97.00%,不能满足该地区供水要求;情景 2 下,常规、优化调度深圳市中西部城区供水保证率均为 98.00%,超过设计要求的 97.00%,实现了该地区供水目标。由于情景 2 下每年都不缺水,所以不进一步进行缺水分析。在此条件下,公明水库水资源时空分布发生了较大变化,可将丰水年的多余来水储存起来,用于补充枯水年城市供水需求,使得城市供水更加均匀平稳,提高了供

水保证率,缓解了缺水压力,保证了公明水库水质环 境的安全,实现了公明水库储备水源的设计意义。

表 2 基于公明供水调蓄工程的深圳中西部城市供水情况的对比

Table 2 Comparison of city water supply of Shenzhen City based on Gongming water storage project

情景 Scenario	调度方案 Scheme	城市供水 保证时间/月 Number of months with guarantee water supply	缺水破坏时间/月 Number of months with fail water supply	最大连续 破坏时间/年 Max number of years with continuous fail water supply	城市供水 保证率/% City water supply guarantee rate
1	常规 Normal	4	536	45	0.70
	优化 Optimal	36	504	45	6.70
2	常规 Normal	540	0	0	98.00
	优化 Optimal	540	0	0	98.00

5 结 论

通过对深圳公明供水调蓄工程水库群优化调度
计算结果与常规调度结果的对比分析,得到:

1)2 种北线引水情景下,公明水库的多年平均
蓄水量有很大差异,由情景 1 的 10 439 万 m³/年增
加到情景 2 的 12 545 万 m³/年,蓄水量平均增加
2 106 万 m³/年,情景 2 下的蓄水量已经超过了
12 141 万 m³ 的储备库容,能够实现公明水库储备
水源的设计意义。

2)公明供水调蓄工程的城市供水保证率由情景
1 下的 0.70%~6.70%提高到情景 2 下的98.00%,
最大连续缺水破坏时间由情景 1 下的 45 年锐减到
情景 2 下的 0 年,实现了该地区的城市供水要求。

综上所述,通过水库群联合调度,公明供水调蓄
工程能够实现向深圳市中西部城区供水和储备水源
等目标,并能发挥其生态效益,可为深圳市中西部地
区的社会经济可持续发展作出贡献。

[参考文献]

[1] 张双虎,黄 强,吴洪寿,等. 水电站水库优化调度的改进粒子
群算法 [J]. 水力发电学报,2007,26(1):1-5.
Zhang S H,Huang Q,Wu H S,et al. A modified particle swarm
optimizer for optimal operation of hydropower station [J].
Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26 (1): 1-5. (in
Chinese)

[2] 黄 强,张洪波,原文林,等. 基于模拟差分演化算法的梯级水
库优化调度图研究 [J]. 水力发电学报,2008,27(6):13-17,26.
Huang Q,Zhang H B,Yuan W L,et al. Study of optimal opera-
tion chart of cascade reservoirs based on linking simulation
with differential evolution algorithm [J]. Journal of Hydroelec-
tric Engineering,2008,27(6):13-17,26. (in Chinese)

[3] 董增川,许静仪. 水电站库群优化调度的多次动态线性规划方
法 [J]. 河海大学学报:自然科学版,1990,18(6):63-69.
Dong Z C,Xu J Y. Reservoir group optimal scheduling of multi-
ple dynamic linear programming method for Hydropower Sta-
tion [J]. Journal of Hohai University; Natural Sciences, 1990,

18(6):63-69. (in Chinese)

[4] 董增川,叶秉如. 水电站库群优化调度的分解方法 [J]. 河海大
学学报:自然科学版,1990,18(6):70-78.
Dong Z C, Ye B R. Method for decomposition of reservoir
group optimal scheduling of hydropower station [J]. Journal of
Hohai University; Natural Sciences, 1990, 18 (6): 70-78. (in
Chinese)

[5] 黄 强,王世定,颜竹丘. 应用大系统递阶控制理论解梯级水
电站水库群长期最优调度 [J]. 水电能源科学,1993,11(2):80-
87.
Huang Q, Wang S D, Yan Z Q. A decomposed-coordinated
model for optimizing dispatching of hydro-electric reservoirs in
series [J]. Water Resources and Power,1993,11(2):80-87. (in
Chinese)

[6] 李 亮,黄 强,肖 燕,等. DPSA 和大系统分解协调在梯级
水电站短期优化调度中的应用研究 [J]. 西北农林科技大学学
报:自然科学版,2005,33(10):125-128,133.
Li L,Huang Q,Xiao Y,et al. The application research of DPSA
and large-scale system decomposition-coordination for cascaded
hydroelectric short-term optimal scheduling [J]. Journal of
Northwest A&F University; Nat Sci Ed, 2005, 33 (10): 125-
128,133. (in Chinese)

[7] 赵基花,付永锋,沈 冰,等. 建立水库优化调度函数的人工神
经网络方法研究 [J]. 水电能源科学,2005,23(2):28-30.
Zhao J H,Fu Y F,Shen B,et al. Study on establishment of arti-
ficial Neural Network for optimal reservoir dispatching [J].
Water Resources and Power,2005,23(2):28-30. (in Chinese)

[8] 尹铁凤. 人工神经网络在供水优化调度中的应用研究 [D]. 上
海:华东理工大学,2014.
Yin Y S. Artificial neural network is applied in the study of op-
timal scheduling of water supply [D]. Shanghai; East China U-
niversity of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[9] 白 涛,黄 强. 仿生算法在水库(群)优化调度中的应用综述
[J]. 中国农村水利水电,2009,17(9):154-157,165.
Bai T,Huang Q. Bionic algorithm in reservoir (group) review
of the optimization scheduling application [J]. China Rural Wa-
ter and Hydropower,2009,17(9):154-157,165. (in Chinese)

[10] 万 芳,原文林,黄 强,等. 基于免疫进化算法的粒子群算法
在梯级水库优化调度中的应用 [J]. 水力发电学报,2010,29
(1):341-348.
Wan F, Yuan W L, Huang Q, et al. Application of particle

- swarm optimization and immune evolutionary algorithm to optimal operation of cascade reservoirs [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(1): 341-348. (in Chinese)
- [11] 畅建霞, 黄 强, 王义民. 基于改进遗传算法的水电站水库优化调度 [J]. *水力发电学报*, 2001, 25(3): 85-90.
- Chang J X, Huang Q, Wang Y M. Optimal operation of hydropower station reservoir by using an improved genetic algorithm [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2001, 25(3): 85-90. (in Chinese)
- [12] 刘文亮. 基于遗传蚁群混合算法的水库优化调度研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- Liu W L. Study on reservoir optimal operation based on genetic and ant hybrid algorithm [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [13] 张双虎, 黄 强, 黄文政, 等. 基于模拟遗传混合算法的梯级水库优化调度图制定 [J]. *西安理工大学学报*, 2006, 22(3): 229-233.
- Zhang S H, Huang Q, Huang W Z, et al. Based on simulation with genetic algorithm to establish optimal operation chart of cascade reservoirs [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2006, 22(3): 229-233. (in Chinese)
- [14] 黄牧涛, 王 乘, 张勇传. 灌区库群系统水资源优化配置模型研究 [J]. *华中科技大学学报*, 2004, 32(1): 93-95.
- Huang M T, Wang C, Zhang Y C. The optimized allocation model for water resources of multi-reservoirs system in the irrigation area [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2004, 32(1): 93-95. (in Chinese)
- [15] HoK C, Hui C C. Chemical contamination of the East River (Dongjiang) and its implication on sustainable development in the Pearl River Delta [J]. *Environmental International*, 2001, 26: 303-308.
- [16] 解建仓, 廖文华, 荆小龙, 等. 基于人工鱼群算法的泸瀾河流域水资源优化配置研究 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(6): 221-226.
- Xie J C, Liao W H, Jing X L, et al. Artificial fish swarm algorithm based water resources optimal allocation in Chanba river basin [J]. *Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed*, 2013, 41(6): 221-226. (in Chinese)
- [17] 陈 端, 陈求稳, 陈 进. 考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30(5): 248-256.
- Chen D, Chen Q W, Chen J. Review on optimization models of reservoir operation with consideration of ecological flow [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(5): 248-256. (in Chinese)
- [18] Wong K, Hugh S. A comparison of two methods for multi objective optimization for reservoir operation [J]. *Water Resource Bulletin*, 2003, 32(2): 337-343.
- [19] Willis R S, Simonovic S P. Optimal operation of reservoir simulated annealing [J]. *Water Resources Management*, 2002, 16(5): 401-428.
- [20] 唐国磊, 周惠成, 李宁宁, 等. 一种考虑径流预报及其不确定性的水库优化调度模型 [J]. *水利学报*, 2011, 42(6): 641-647.
- Tang G L, Zhou H C, Li N N, et al. Optimal operation model for hydropower station considering the inflow forecast and its uncertainty [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(6): 641-647. (in Chinese)
- [21] 杨道辉. 基于育种算法的水库优化调度 [J]. *水电自动化与大坝监测*, 2009, 33(10): 72-74.
- Yang D H. Breeding algorithm-based optimal reservoir operation [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2009, 33(10): 72-74. (in Chinese)
- [22] 李 想, 魏加华, 傅旭东. 粗粒度并行遗传算法在水库调度问题中的应用 [J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 29-33.
- Li X, Wei J H, Fu X D. Application of coarse-grained genetic algorithm to reservoir operation [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(4): 29-33. (in Chinese)