

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2024362

王保华, 肖文博, 王珮, 等. 咸潮影响下基于水工程群联合调度的澳门、珠海供水安全保障研究[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(11): 81-86. WANG Baohua, XIAO Wenbo, WANG Pei, et al. Research on water supply security of Macao and Zhuhai under the influence of salt tide based on the joint regulation of water engineering groups[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(11): 81-86. (in Chinese)

咸潮影响下基于水工程群联合调度的澳门、珠海供水安全保障研究

王保华 肖文博 王珮 杨文辉

(中水珠江规划勘测设计有限公司, 广州510610)

摘要: 澳门、珠海地处珠江主要出海口磨刀门口门区, 本地水资源匮乏, 严重依赖过境水, 咸潮是威胁地区供水安全的主要风险因素, 枯水期流域骨干水库联合调度是保障两地供水安全的有效手段。通过建立上游西江骨干水库群联合调度模型、咸潮影响下的澳门珠海泵站群和水库群联合调度模型, 计算分析上游来水与咸潮上溯共同影响下的澳门、珠海供水缺口, 科学合理优化澳门、珠海供水体系, 提出供水安全保障方案。研究结果显示, 在2035年枯水期97%来水条件下, 竹洲头、平岗、广昌、黄杨泵站的平均取淡概率分别为32.7%、13.8%、0.0%和50.0%。为满足澳门、珠海用水需求, 高质量建设澳门、珠海常规和备用结合的供水安全保障体系, 建议对竹洲头、平岗、黄杨泵站进行扩建, 并新增约1亿m³的调蓄库容。本研究可为保障澳门、珠海两地长期供水安全提供参考。

关键词: 澳门; 珠海; 咸潮; 供水安全; 联合调度

中图分类号: TV697.1; P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2024)11-81-06

0 引言

澳门、珠海位于珠江三角洲南缘, 地处珠江主要出海口磨刀门口门区, 本地水资源匮乏, 严重依赖过境水。澳门三面环海, 城市供水主要依靠珠海供给, 形成两地共享一个水源系统的供水格局, 并以磨刀门水道为主要水源^[1]。

21世纪以来, 珠江三角洲咸潮活动日益强烈, 尤其是2004年、2009年、2012年, 严重的咸潮事件对澳门、珠海供水安全造成了极大威胁。水利部珠江水利委员会(以下简称珠江委)自2004年开始组织实施珠江“压咸补淡”应急调水措施, 有效压制了咸潮, 保障了澳门、珠海在枯水期的供水安全, 并改善了珠江三角洲网河区水生态环境, 开创了“千里调水、远水解近渴”的伟大奇迹, 一定程度上解决了澳门、珠海枯水期供水的燃眉之急, 并取得显著的社会、经济和生态效益^[2]。但珠海已建水库调蓄库容有限, 现状用水水平下, 若西江发生水污染事件无法取水, 已建水库供水能力将无法

满足澳门、珠海两地供水安全。未来随着两地经济社会发展、用水需求的不断增加, 仅依靠枯期水量调度将无法满足不同地区供水安全的需求^[3-4]。

随着“一带一路”倡议深入实施和粤港澳大湾区等国家战略的不断推进, 港珠澳大桥正式通车运营, 横琴粤澳深度合作区与珠三角国家自主创新示范区珠海高新区联动发展, 珠海、澳门迎来了最好的发展机遇及黄金发展窗口期, 同时, 也对水安全保障提出了更高的要求。因此, 迫切需提高城市供水保障能力和抵御风险能力, 使区域供水体系更加完善, 满足澳门、珠海水资源高保障需求, 助力两地经济社会高质量发展。

思贤滘地处西北江三角洲的顶部, 既是西江、北江的

收稿日期: 2024-10-08

第一作者信息: 王保华, 男, 正高级工程师, E-mail: 15146181@qq.com.

汇流点，又是分流点，来自西、北两江上游的水、沙在思贤滘汇流后重新分配，然后进入西北江三角洲。本研究以思贤滘为界，建立流域与区域水工程群联合调度模型。流域层面，建立上游西江骨干水库群联合调度模型，确定思贤滘来水过程。区域层面，建立咸潮影响下的澳门、珠海泵站群和水库群联合调度模型，计算分析上游来水与咸潮上溯共同影响下的澳门、珠海两地供水缺口，以期科学合理优化澳门、珠海供水体系，提出水安全保障方案。

1 供水系统

1.1 供水保障“三道防线”

自 2004 年水利部组织珠江委实施首次珠江“压咸补淡”应急调水以来，珠江委已连续 20 年成功实施枯水期“压咸补淡”调度，现已构建形成了以受水区当地水库群为“第一道防线”，以 3 d 内水头能够到达受水区、能快速反

应实施补水的近地水库为“第二道防线”，以流域远地的大型水库群为“第三道防线”的供水保障格局^[5]。本研究考虑的“第二道防线”水库为大藤峡水利枢纽，“第三道防线”水库为天生桥一级、龙滩和百色水利枢纽。

1.2 澳门、珠海供水系统概化

珠海现已初步构建“三大原水系统”（磨刀门水系、黄杨河水系和虎跳门水系原水系统），形成“江水为主、库水为辅、江库联动、江水补库、库水调咸”的供水格局，其中江水补库和库水调咸的联动机制在历年咸潮期间供水发挥了重要作用。全市主要有竹洲头、平岗及广昌泵站等 8 座取水泵站，设计取水规模 637 万 m³/d，调咸水库 13 座，调咸库容合计约 9 379 万 m³。

从供水体系布局(图 1)来看，现状澳门、珠海供水系统可划分为东、西两片，其中东片供水工程主要包括竹洲头、平岗、广昌泵站，以及竹银、月坑、凤凰山、大镜山、梅溪、

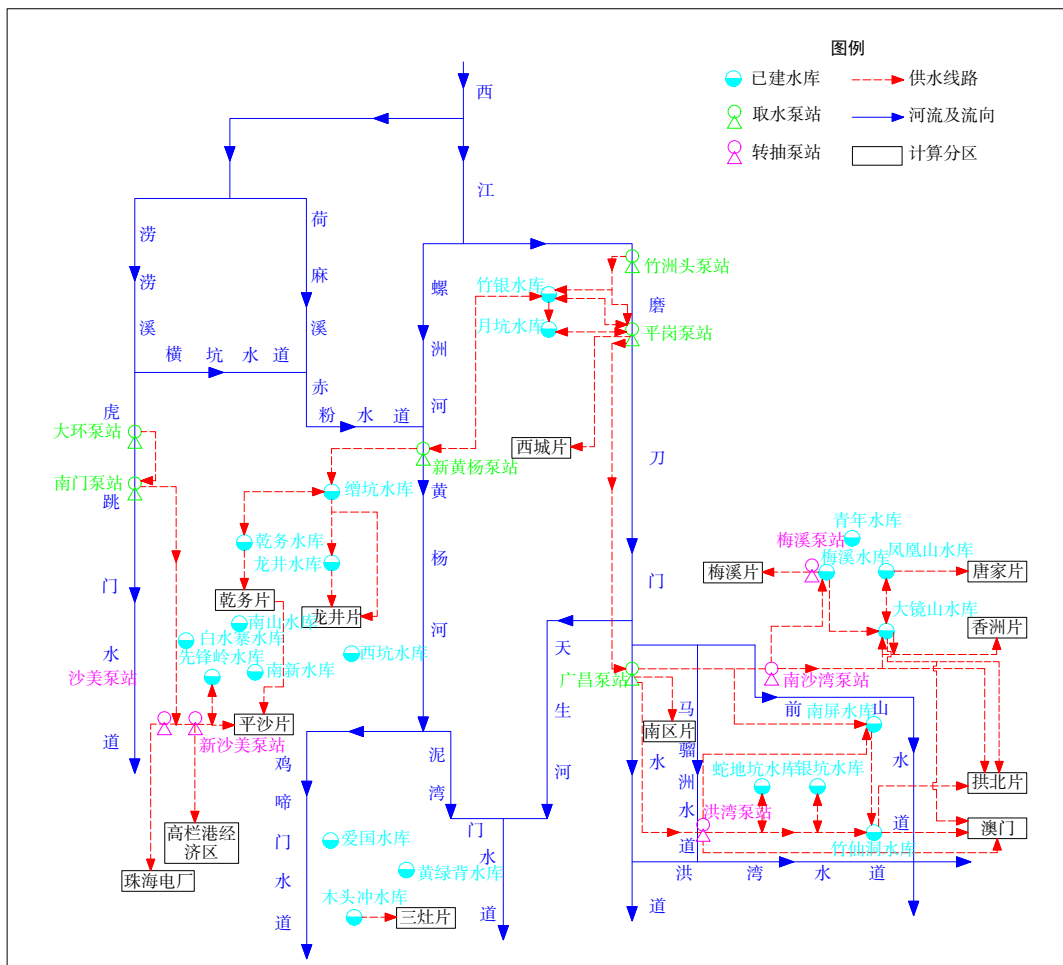


图 1 澳门、珠海供水系统概化图

南屏、蛇地坑、银坑、竹仙洞水库,总抽水能力 474 万 m^3/d ,总兴利库容 6 820 万 m^3 ;西片供水工程主要包括新黄杨、大环、南门泵站,以及缙坑、乾务、龙井、先锋岭、木头冲水库,总抽水能力 106 万 m^3/d ,总兴利库容 2 559 万 m^3 。

从供水对象分区来看,计算单元以水厂为节点分为东、西两片,共 11 个子片区。其中,东区包括南区、梅溪、唐家、香洲、拱北、澳门、西城共 7 个子片区;西区包括乾务、龙井、平沙、三灶共 4 个子片区,其中平沙片区包含珠海电厂、高栏港经济区工业用水户。

根据供水工程和供水对象,缙坑、乾务、龙井水库可概化为乾务库群,供水对象为乾务片和龙井片;竹银、月坑水库可概化为竹银月坑库群,供水对象为西城片;凤凰山、大镜山、梅溪水库可概化为北库群,供水对象为梅溪片、唐家片和香洲片;南屏、蛇地坑、银坑、竹仙洞水库可概化为南库群,供水对象为拱北片、南区片和澳门。

2 流域与区域联合调度模型建立与求解

2.1 上游骨干水库群联合调度模型

本次计算上游来水时考虑对下游“压咸补淡”作用较大的西江流域骨干水库群,包括天生桥一级、龙滩、百色、大藤峡水库等。按照其调度规则建立水库群联合调度模型进行逐月调节计算,并考虑一定的河道传播时间与区间径流汇入,得到上游骨干水库调节后的思贤滘逐日流量过程。

2.1.1 目标函数

水库群系统水量平衡^[6]:

$$\sum_{t=1}^T \left[\Delta W_{TY}(t) + \Delta W_{LT}(t) + \Delta W_{BS}(t) + \Delta W_{DTX}(t) + \sum_{i=1}^n \Delta W_{qj}(i,t) \right] = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^{m+n} \Delta W_{in}(j,t) - \sum_{j=1}^{m+n} \Delta W_{off}(j,t) \right]$$

式中: T 为总时段数; i 为区间序号; m 为总水库数; n 为总区间数; $\Delta W(t)$ 为 t 时段水库的蓄水量变化; TY 、 LT 、 BS 、 DTX 分别为天生桥一级、龙滩、百色、大藤峡水库; $\sum_{i=1}^n \Delta W_{qj}(i,t)$ 为 t 时段流域区间 i 的来水总量; $\sum_{j=1}^{m+n} \Delta W_{in}(j,t)$ 为流域的来水总量; $\sum_{j=1}^{m+n} \Delta W_{off}(j,t)$ 为流域总放水量。

2.1.2 约束条件

水库水量平衡约束:

$$V(t+1) = V(t) + Q_{in}(t) - Q_p(t) - Q_a(t)$$

式中: $V(t+1)$ 为水库 t 时段末库容; $V(t)$ 为水库 t 时段初库容; $Q_{in}(t)$ 为水库 t 时段内来水量; $Q_p(t)$ 为水库 t 时段内发电水量; $Q_a(t)$ 为水库 t 时段内弃水量。

水位约束:

$$Z_{\min} \leq Z(t) \leq Z_{\max}$$

式中: Z_{\min} 为水库死水位; $Z(t)$ 为水库 t 时段水位; Z_{\max} 为水库正常蓄水位。

库容约束:

$$V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max}$$

式中: V_{\min} 为水库死库容; $V(t)$ 为水库 t 时段库容; V_{\max} 为水库总库容。

出力约束:

$$N_{\min} \leq N(t) \leq N_{\max}$$

式中: N_{\min} 为水电站保证出力; $N(t)$ 为水电站 t 时段出力; N_{\max} 为水电站装机容量。

非负约束: 以上所有变量均为非负变量。

2.2 区域泵站群和水库群联合调度模型

区域水资源配置引入珠海、澳门主要供水水源西江磨刀门水道和各泵站工程,以区域供水量最大为目标,建立区域泵站群和水库群联合调度模型。相较于上游水库群调度,增加本地工程供水能力约束和供水管线过流能力约束。

2.2.1 目标函数

区域内供水量最大:

$$Q_{\max} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Q(i,j,t)$$

式中: T 为总时段数; M 为总泵站、水库工程数; N 为总用水户数; $Q(i,j,t)$ 为时段 t 工程 i 对用水户 j 供水量。

2.2.2 约束条件

工程供水能力约束:

$$\sum_{j=1}^N Q(i,j,t) \leq Q_{\max}(i,t)$$

式中: $Q_{\max}(i,t)$ 为时段 t 工程 i 的最大供水能力,对于泵站工程为时段内最大可取淡水量,对于水库工程为时段内入库径流与时段初剩余兴利库容之和。

供水管线过流能力约束:

$$L(k,t) \leq L_{\max}(k)$$

式中: $L(k, t)$ 为时段 t 管线 k 的过水量, $L_{\max}(k)$ 为管线 k 的最大过流能力。

其他约束与 2.1.2 小节相同。

2.3 模型求解

2.3.1 上游水库群调节计算

“第三道防线”中,天生桥一级、龙滩、百色水库距离河口地区较远,按各自调度规则进行逐月调节计算,并考虑一定的河道传播时间与区间径流汇入,得到上游骨干水库调节后的思贤滘逐日流量过程。规划水平年珠海城市供水保证率为 97%,对调节后的思贤滘枯水期逐月径流进行排频分析,选取 1992—1993 年为 $P=97\%$ 来水典型年。“第二道防线”大藤峡水利枢纽地理位置优越,且具有 15 亿 m^3 的调节库容,可快速应对下游咸潮影响^[7]。大藤峡水利枢纽调节计算以思贤滘流量为控制,按照大潮转小潮(7 d)期间 2 500 m^3/s (相应梧州 2 100 m^3/s)压咸,其他时间 2 200 m^3/s (相应梧州 1 800 m^3/s)对其进行补水。大藤峡补水前后思贤滘枯水期径流过程如图 2 所示。

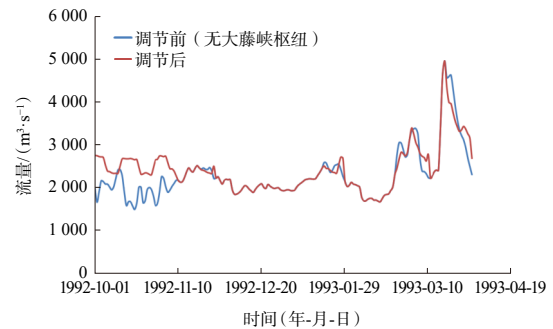


图 2 $P=97\%$ 典型年大藤峡补水前后思贤滘枯水期径流过程图

2.3.2 珠海泵站取淡概率

径流流量是咸潮强度的主要影响因素^[8]。根据近年来调水压咸过程中监测的咸潮资料和上游来水资料,通过数理统计方法分析出各取水口咸度超标时数和思贤滘流量之间的相应关系,据此计算分析澳门、珠海供水系统各取水泵站典型来水条件下取淡概率。 $P=97\%$ 来水条件下,枯水期(10月至次年3月)东区平岗、竹洲头、广昌泵站平均取淡概率分别为 13.8%、32.7%、0.0%,西区黄杨、大环、南门泵站平均取淡概率分别为 50.0%、50.0%、7.6%(表 1)。

表 1 典型年 $P=97\%$ 各泵站取淡概率(水文年)

| 泵站 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 | 年平均 | 枯水期平均 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 平岗 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 34.9 | 14.9 | 11.3 | 6.3 | 9.0 | 10.3 | 31.2 | 51.5 | 13.8 |
| 广昌 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 41.7 | 0.0 |
| 黄杨 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 68.5 | 51.9 | 50.7 | 43.5 | 46.5 | 46.1 | 61.4 | 72.4 | 50.0 |
| 竹洲头 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 56.8 | 34.9 | 30.8 | 23.9 | 27.5 | 28.7 | 50.4 | 62.8 | 32.7 |
| 大环 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 68.5 | 51.9 | 50.7 | 43.5 | 46.5 | 46.1 | 61.4 | 72.4 | 50.0 |
| 南门 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 23.3 | 8.3 | 5.7 | 1.9 | 4.2 | 4.9 | 20.8 | 47.4 | 7.6 |

2.3.3 区域泵站群和水库群联合调度

根据概化后的澳门、珠海供水体系,以水源、供水工程、用水户为节点,原水管道为连接线,建立供水网络^[9]。按照一定的配置原则,模拟各水源及供水工程向各用水户供水过程。①生态优先。蓄水工程优先满足河道内生态环境用水;②供水次序。当区域内有多个用水对象时,按照先生活用水,再工业用水、农业灌溉用水等的顺序进行供水。各类水源工程先用引提水工程,再用蓄水工程;先用近水后用远水;先用当地水,再用外引水;③余水充库。泵站能力有富余、且含氯度不超标时,泵站补库存蓄;④空间均衡。为保障各片区应急备用能力均衡协调,避免应急事件发生时由于应急水源过于集中,各片区供水能力受管网限制,泵站与水库联合运行时,尽可能保持各供水片区主要水库

蓄满率协调。各片区水源及供水优先顺序见表 2。

表 2 各片区供水水源及供水优先顺序表

| 片区 | 子片区 | 供水水源(按优先顺序) |
|-----|-----|----------------------|
| 南区片 | 南区片 | 广昌、平岗、竹洲头、南库群、竹银月坑库群 |
| | 梅溪片 | 广昌、平岗、竹洲头、北库群、竹银月坑库群 |
| | 唐家片 | 广昌、平岗、竹洲头、北库群、竹银月坑库群 |
| 东区 | 香洲片 | 广昌、平岗、竹洲头、北库群、竹银月坑库群 |
| | 拱北片 | 广昌、平岗、竹洲头、南库群、竹银月坑库群 |
| | 澳门片 | 广昌、平岗、竹洲头、南库群、竹银月坑库群 |
| | 西城片 | 平岗、竹洲头、竹银月坑库群 |
| 西区 | 乾务片 | 黄杨、乾务库群 |
| | 龙井片 | 黄杨、乾务库群 |
| | 平沙片 | 大环、南门、先锋岭、乾务库群 |
| | 三灶片 | 木头冲、乾务库群 |

3 澳门、珠海供水安全保障方案

根据相关工程规划,通过设定泵站、水库及其他工程规模,拟定 2035 年澳门、珠海供水保障体系。通过变更上游来水条件,模拟区域外径流量减少、发生应急水污染事件等,对澳门、珠海地区进行水资源供需平衡分析,提出澳门、珠海供水安全保障方案。

3.1 常规供水保障方案

保持上游水库群“压咸补淡”与本地现状水资源开发利用格局,2035年, $P=97\%$ 来水频率条件下,供水区域需水量为 10.43 亿 m^3 ,供水量为 8.30 亿 m^3 ,缺水量为 2.13 亿 m^3 ,缺水率为 20.4%。缺水范围主要在东区,缺水时段在 10 月至次年 3 月,最大缺水量基本在 11 月、12 月、1 月,供水保证率不能满足设计要求。主要原因是澳门、珠海地区作为国家发展战略重点区域,需求增长较快,现状供水体系无法满足设计水平年需水要求。

在保持现状水资源开发利用格局的基础上,考虑本地已有泵站扩建、加强再生水与海水淡化利用。预计 2035 年, $P=97\%$ 来水频率条件下,供水区域供水量为 10.43 亿 m^3 ,缺水量为 0 m^3 。因此,澳门、珠海常规供水保障方案为上游骨干水库群联合调度压咸提高取淡概率,下游本地泵站扩建规模增强抢淡补库能力。其中竹洲头泵站由 80 万 m^3/d 扩建至 360 万 m^3/d 、平岗泵站由 140 万 m^3/d 扩建至 360 万 m^3/d 、黄杨泵站由 50 万 m^3/d 扩建至 100 万 m^3/d 。

3.2 应急备用保障方案

通过本地泵站扩建与非常规水利用,可使澳门、珠海两地供水保证率满足设计要求。但若上游发生水污染事件,则现状蓄水工程仅可保障 9 d 正常供水。本地缺少应急和备用水源,供水保障能力不足。根据《城市供水应急和备用水源工程技术标准》(CJJT 282—2019)并结合澳门珠海实际,澳门、珠海应急备用保障天数取 60 d,应急备用供水期居民生活用水压缩比取 20%,公共用水压缩比取 30%,工业用水压缩比取 40%。

澳门、珠海地处珠江河口,咸潮影响显著,2035 年 $P=97\%$ 来水条件下,枯水期内本地水库蓄水量呈波动下降趋势,因此不同时段水库应急保障能力不同。枯水期不同月份起始发生 60 d 应急工况下对应的供水缺口与所需新增调蓄库容详见表 3,可见应急供水工况起始月份为 10 月

时应急供水缺口最大,为 9 481 万 m^3 ;应急供水工况起始月份为 12 月时应急供水缺口最小,为 7 296 万 m^3 。

为满足澳门、珠海 60 d 应急备用保障能力,在适度考虑应急工况下压缩供水的前提下,澳门、珠海本地需新增约 1 亿 m^3 调蓄库容。综合比选珠海当地水库新扩建条件与工程投资,推荐新建竹银水库二期(兴利库容 3 855 万 m^3)、扩建乾务水库(新增兴利库容 4 339 万 m^3)、新建白泥坑水库(兴利库容 1 927 万 m^3)。

表 3 各应急工况下供水缺口与所需新增调蓄库容表

| 应急工况起始月份 | 供水缺口/万 m^3 | 所需新增调蓄库容/万 m^3 |
|----------|--------------|------------------|
| 9 | 9 328 | 10 770 |
| 10 | 9 481 | 10 982 |
| 11 | 7 852 | 9 109 |
| 12 | 7 296 | 8 542 |
| 1 | 7 908 | 9 499 |
| 2 | 8 069 | 9 963 |

4 结 论

(1)通过构建运用流域上游水库群与区域泵站和水库群的水资源联合调度模型,不仅能较好地模拟咸潮影响下澳门、珠海区域供水过程,还能为水资源供需分析与优化供水体系提供坚实基础。未来,可进一步研究模型在不同气候条件下的适应性,探索更高效的水资源管理策略。

(2)通过本地泵站扩建,增加枯水期取淡规模,可基本解决 2035 年澳门、珠海两地常规供水需求。

(3)在本地泵站扩建的基础上,珠海本地需新增约 1 亿 m^3 的调蓄库容后,可满足澳门、珠海 2035 年 60 d 应急备用水需求,建设高质量水安全保障体系。

参考文献

- [1] 何颖霞.珠江三角洲水乡村落水系文化景观特征与格局[D].广州:华南理工大学,2023.
- [2] 杨芳,何颖清,卢陈,等.珠江河口咸情变化形势及抑咸对策探讨[J].中国水利,2021(5):21-23.
- [3] 钱燕,卢康明.2021年珠江流域旱情分析与思考[J].中国防汛抗旱,2022,32(6):27-30.
- [4] 何治波,吴珊珊,张文明.珠江流域防汛抗旱减灾体系建设与成就[J].中国防汛抗旱,2019,29(10):71-79.

- [5] 王凤恩, 谢旭和. 2022—2023 年枯水期珠江流域供水保障“三道防线”调度与思考[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(2): 32–35.
- [6] 刘夏, 白涛, 武蕴晨, 等. 枯水期西江流域骨干水库群压咸补淡调度研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(5): 84–95.
- [7] 刘喜燕, 席望潮. 珠江流域水资源调配骨干体系研究[J]. 人民珠江, 2010, 31(S1): 4–6.
- [8] 刘斌, 刘丽诗, 吴炜, 等. 基于取淡与流量控制的压咸调度方案研究[J]. 水文, 2013, 33(4): 84–86, 74.
- [9] 郭聪, 游进军, 林鹏飞. 图论在水资源系统建模与配置计算中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(3): 295–306.

Research on water supply security of Macao and Zhuhai under the influence of salt tide based on the joint regulation of water engineering groups

WANG Baohua, XIAO Wenbo, WANG Pei, YANG Wenhui

(China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610)

Abstract: Macao and Zhuhai cities are located at Modaomen gate in the Pearl River estuary, where local water resources are scarce and heavily dependent on passing-by water resources. Salt tide is the primary risk factor threatening regional water supply, and joint regulation of basin backbone reservoirs during the dry season is an effective means to ensure water supply security for both regions. By establishing a joint regulation model for the upstream backbone reservoirs of the Xijiang river, a joint regulation model for Macao and Zhuhai pump stations and reservoir groups under the influence of salt tide, this paper calculates and analyzes the water supply gap of Macao and Zhuhai under the influence of upstream water and salt tide, scientifically and rationally optimize the water supply systems of Macao and Zhuhai and propose a water security plan. The research findings indicate that under 97% inflow conditions during the dry season in 2035, the average likelihood of obtaining fresh water at Zhuzhoutou, Pinggang, Guangchang, and Huangyang pump stations will be 32.7%, 13.8%, 0.0%, and 50.0% respectively. To meet the water demand of Macao and Zhuhai and to construct a high-quality, regular and reserve water supply security system for these cities, it is recommended to expand the facilities of Zhuzhoutou, Pinggang, and Huangyang pump stations, and to add approximately 100 million m³ of storage capacity. This study holds significant practical importance for ensuring the long-term water supply of Macao and Zhuhai.

Keywords: Macao; Zhuhai; salt tide; water supply security; joint regulation

编辑 张心怡