

基于河湖水系连通的海口市水资源合理配置

黄国如^{1a,1b}, 李彤彤^{1a}, 王欣^{1a}, 洗卓雁^{1a}, 冯杰², 翁白莎²

(1. 华南理工大学 a. 土木与交通学院; b. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 从海口市重点河流、湖泊、水库及主要的水系连通工程出发, 概化海口市水资源系统, 对比重点水系连通工程前后水资源系统概化结果差异。基于考虑水资源量质效三位一体的配置目标, 构建并优化求解海口市水资源合理配置模型, 讨论现状和未来的水资源供需平衡关系。结果表明: 现阶段海口市各区域存在着水资源供需不平衡问题, 通过建设水系连通工程, 区域水资源短缺问题得到很大程度的缓解。

关键词: 河湖水系连通; 水资源系统; 水资源配置; 海口市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)05-0014-09

Rational allocation of water resources in Haikou based on connection of river and lake

HUANG Guoru^{1a,1b}, LI Tongtong^{1a}, WANG Xin^{1a}, XIAN Zhuoyan^{1a}, FENG Jie², WENG Baisha²

(1. a. School of Civil Engineering and Transportation; b. State Key Laboratory of Subtropical Building Science,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Department of Water Resources, China

Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: From the point of connection engineering of river, lake, reservoir and main water system in Haikou, lakes and reservoirs, the paper summarized the water resources system of Haikou, and compared the difference of result of water resources before and after the connection engineering of key water system was completed. This paper considered the allocation goal of three location as a whole of water resources quality and benefit and built a allocation model of water resources of Haikou. It discussed the present situation and future of the balance between water resources supply and demand. The result showed that there are imbalance problem of water resources supply and demand in every region of Haikou. The construction of connection project of water system can greatly alleviate the regional shortage problem of water resources.

Key words: connection of river and lake; water resources system; water resources allocation; Haikou

海口市是海南岛政治、经济、文化中心, 其战略地位和发展意义不言而喻。水资源是经济社会发展的基础资源, 海口市降水、径流和地下水等各方面的城市水资源量相对较为丰富, 但在时空上存在一定程度的不均匀分布问题。为此, 海口市积极、高效地进行水资源管理, 以支撑国民经济发展和满足居民生产生活需求。

本文基于水资源系统概化的内涵和原则, 根据海口市水系连通状态和供排水情况, 概化海口市水资源系统。根据海口市实际情况选择合理的目标函

数, 并加以水库、河道等约束条件限制, 构建海口市量质效三位一体的水资源合理配置模型。通过分析讨论现状与未来的水资源供需平衡关系, 为海口市水资源管理提供可靠的参考依据。

1 海口市水资源系统概化

1.1 海口市河湖连通工程

海口市降水丰沛, 地势平缓, 大小河流密布, 天然湖泊不多, 大多是为满足人类社会需要而建设的人工湖和水库工程。在现实社会中, 水资源分布和

收稿日期: 2016-05-09; 修回日期: 2016-06-08

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401048)

作者简介: 黄国如(1969-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。

区域经济发展通常存在不平衡问题,为减少水资源浪费,提高水资源利用率,海口市建设了若干水系连通工程,通过不同水系直接进行水资源输送,满足不同地区的用水需求,其中比较重要的有松涛水库补水、主城区水动力工程和在建的南渡江引水工程,其中尤以南渡江引水工程最为重要。

南渡江引水工程项目由水源工程、输配水工程、五源河综合整治工程和联通工程组成,其中水源工程包括闸坝工程和提水工程,主要是在海口市东山镇上游约400 m处建设拦河闸坝工程作为城市新增水源,通过提水泵站和输水管道提水到高地,然后穿岩凿洞沿输水箱涵顺坡而下,串连沿途诸座水库(含沙坡水库、永庄水库等),连通城市水系,解决沿

途中西部主城区、美安科技新城和羊山新增灌区(永兴片、昌旺片、龙泉片、龙塘片)的灌溉用水、东部主城区和云龙产业园生活用水问题。工程于2013年底正式立项,目前已经进入施工阶段,预计在2030年工程将完工并发挥整体效益,届时海口市的水资源系统将发生明显变化。因此,本文选择2014和2030年作为关键的时间节点,分别对两个时间点进行水资源概化并构建量质效水资源配置模型,探讨水资源配置效益的变化。

1.2 海口市供排水情况

调查分析了海口市主要水源供给情况及污水处理工程后,根据行政区划,按秀英、龙华、琼山、美兰4个行政区划,各区域的供排水情况如图1所示。

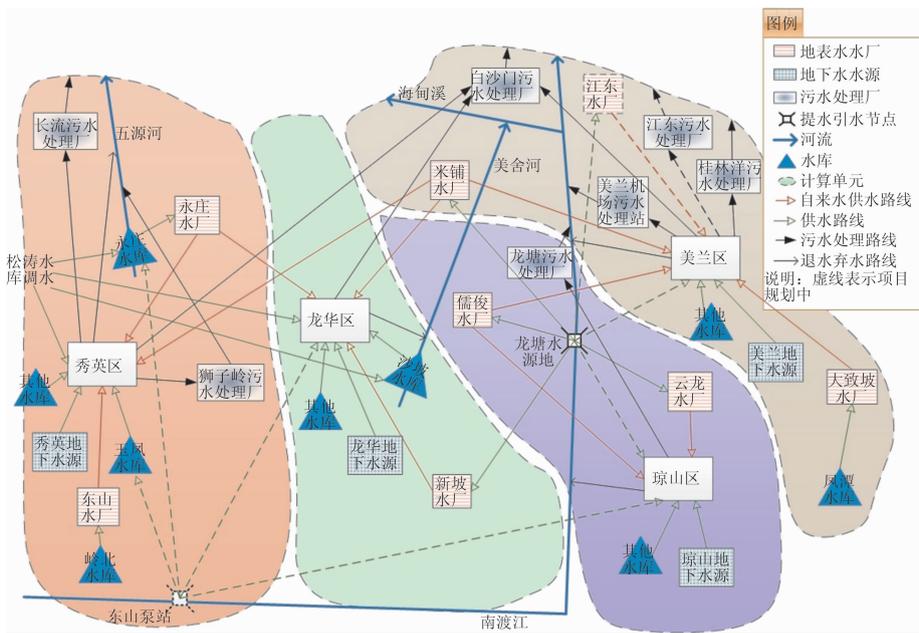


图1 海口市城镇供排水路线图

由图1可见,永庄水库和龙塘水源地是海口城区现阶段最主要的供水水源,永庄水库的供水范围覆盖了秀英以西和中部老城区一带,受南面狮子岭工业园和城市西扩发展战略影响,目前面临着水质安全和水量安全的双重压力。龙塘水源地主要指南渡江龙塘坝上游、龙塘水源厂周围的南渡江两岸区域,依托于儒俊水厂和米铺水厂分别向府城片和中心城区片供水。目前海口市政府已为两大水源地划定了饮用水水源保护区,水源安全性得到保证。

基本上各水源地秉承着成本节约原则,就近解决区域用水问题,但各行政区的发展速度存在着一定差异,原有的给排水安排难以满足区域发展需求时,难免会出现跨区域给排水情况。海口市现有供水水源供水能力有限,无法支撑城市发展,急需规划

建设新的城市供水水源。现规划在东山镇上游的南渡江增设水源工程,该工程是南渡江引水工程的重要组成部分,将解决城市用水增长需求和羊山地区灌溉缺水问题。未来海口市将形成永庄水库、龙塘水源地和东山闸坝3大水源格局,3处水源地在城市的位呈三角形分布,布局较为合理,能较好地完成各区域的供水任务。

除了上述的城市集中供水水源,地下水和水库也是海口市水资源来源之一,目前海口市的地下水和其他水库的供水范围基本限定在各自区域,不存在跨区域的供水线路。城市排污系统方面,白沙门污水处理厂(含一、二期工程)具有强大的污水处理能力,是城市排污系统中的最核心部件。其余的污水处理工程则基于就近原则,负责临近片区的污水

处理任务。

总体来说,海口市的水资源供给和排污线路安排较为经济、合理。

1.3 海口市水资源系统概化结果

根据海口市水资源系统网络图和实际供排水情

况,考虑到南渡江引水工程会使海口市河湖水系连通格局产生较大变化,为对比该变化对水资源系统概化结果的影响,选择工程完成并发挥效益的2030年作为未来水平年,得到海口市2030年水资源概化图(图2)。

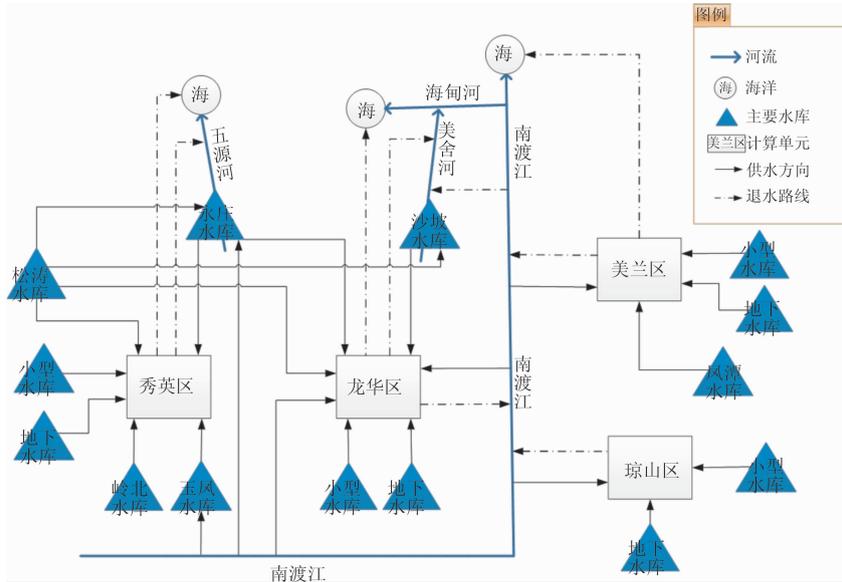


图2 海口市水资源概化图(2030年)

海口市现状(2014年)的水资源系统概化图与2030年的区别仅在于:南渡江引水工程建设完工后,南渡江与永庄水库直接相连,并增加了南渡江和龙华区的连接路径,进而改变了海口市的水资源系统结构。可以猜想,相比于2014年,2030年的海口市水资源供需平衡关系可能会出现一些变动。

2 海口市水资源合理配置模型

2.1 目标函数

水资源配置是流域水资源规划的重要组成部分,科学合理的水资源配置方案能够有效支撑区域经济社会的可持续发展。在海口市水资源系统概化结果的基础上,在一定的用水目标条件下(例如缺水率最小、经济效益最大、环境污染最小等)进行水资源合理配置,充分发挥水资源边际效益的时空差异性,进而实现多目标综合效益最大化^[1-5]。

(1) 社会公平目标。社会公平是指在水资源配置中,考虑地区间水资源条件差异,尽量满足各地区的用水需求,减少区域缺水对社会发展和稳定的影响。采用时段缺水达到最小来表示社会效益,即:

$$f_1 = \min \left(\sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^m CL_i^t + VL_i^t \right) \quad (1)$$

$$CL_i^t = CX_i^t - CG_i^t \quad (2)$$

$$VL_i^t = VX_i^t - VG_i^t \quad (3)$$

式中: CL_i^t 和 VL_i^t 分别为 i 子区在 t 时段城市和农村缺水(在计算单元内部,分为城镇生活、工业建筑业、三产、城镇生态、农村生活、农业灌溉、林牧渔畜等7个用水户,其中前4个为城镇用户,后3个为农村用户), 10^4 m^3 ; CX_i^t 、 CG_i^t 、 VX_i^t 、 VG_i^t 分别为 i 子区 t 时段内的城镇需水、城镇供水、农村需水、农村供水, 10^4 m^3 。

(2) 经济效益目标。经济效益目标是指水资源供给分配最为经济高效,考虑因素包括了供水距离、水源开发、供水成本、供水效益等,受资料收集限制,本文采用总供水成本最小作为反映区域水资源配置的经济效益指标,即:

$$f_2 = \min \left(\sum_i \sum_j \sum_k co_{i,j,k} \cdot W_{i,j,k}^t \right) \quad (4)$$

式中: $co_{i,j,k}$ 为 j 水源向 i 子区 k 用户的供水成本,元/ 10^4 m^3 ; $W_{i,j,k}^t$ 为 j 水源在 t 时段向 i 子区 k 用户的供水量,包括了城镇供水和农村供水两个部分, 10^4 m^3 。

(3) 生态环境目标。生态环境目标是指水资源利用中尽量减少对自然环境的破坏,通常用污染物排放量来衡量,可以从当地污水所含的污染物中选取代表性污染物,以其最小排量来表示。在本文中,生态环境效益目标采用用户排放指标污染物 COD 的总量最小来表示,即:

$$f_3 = \min \left(\sum_t \sum_l DW_l^t \right) \quad (5)$$

$$DW_l^t = \sum_i \sum_k \left[(1 - \alpha_{i,k}) \cdot d_{i,k} + \alpha_{i,k} \cdot d'_{i,k} \right] \cdot \eta_{i,k} \cdot W_{i,k}^t \quad (6)$$

式中: DW_l^t 为在 t 时段 l 和 $l+1$ 节点间入河污染物量, kg; $\alpha_{i,k}$ 和 $\eta_{i,k}$ 分别为 i 子区 k 用户的污水处理率和排放率, %; $d_{i,k}$ 和 $d'_{i,k}$ 分别为处理前后的污水污染物浓度, mg/L; $W_{i,k}^t$ 为 t 时段 i 子区 k 用户的供水量, 10^4 m^3 。

2.2 约束条件

2.2.1 水库约束 包括了水库水量平衡、水库库容约束、水库下泄流量约束、水库供水能力约束。

(1) 水库水量平衡约束: 时段内水库保持入库和出库水量平衡, 表现为时段始末水库水量差等于时段内来水量扣除水库蒸发损失、渗漏损失、泄水建筑物泄流量和水库总供水。

$$V_p^t = V_p^{t-1} + R_p^t - W_{s_p}^t - W_{x_p}^t - \sum_{i=1} \sum_{k=1} W_{a_{i,p,k}}^t \quad (7)$$

式中: V_p^t 为 t 时段末 p 水库的库容, 10^4 m^3 ; R_p^t 为 t 时段内 p 水库来水量, 10^4 m^3 ; $W_{s_p}^t$ 和 $W_{x_p}^t$ 分别为 t 时段内 p 水库的损失水量和下泄水量, 10^4 m^3 ; $W_{a_{i,p,k}}^t$ 为 t 时段 p 水库对 i 子区 k 用户的供水量, 10^4 m^3 。

(2) 水库库容约束: 水库库容约束是对于正常水库, 水位都应高于死水位, 在汛期时小于等于水库防洪限制水位, 同时水库水量在任意时段都不大于水库总库容。

$$V_{\min p} \leq V_p^t \leq V_{\max p} \quad (8)$$

式中: $V_{\min p}$ 取水库死库容, 10^4 m^3 ; $V_{\max p}$ 在汛期取汛限库容, 非汛期取水库总库容, 10^4 m^3 。

(3) 水库下泄流量约束: 水库下泄流量受泄水建筑物的泄流能力限制, 同时泄流量应能够满足下游河道正常生态、航运、发电等需求。

$$Q_{x_p}^t \geq W_{x_p}^t \geq q_{x_p}^t \quad (9)$$

式中: $Q_{x_p}^t$ 为 p 水库泄水建筑物允许的最大泄流量, 10^4 m^3 ; $q_{x_p}^t$ 为保证水库下游河道正常功能的流量, 取下游河道生态、航运、发电需水量的最大值, 10^4 m^3 。

(4) 水库供水能力约束: 对于水库型水源, 水库供水量受取水口容量、渠道尺寸等限制, 总供水量应小于等于水库允许的最大取水量。

$$\sum_i \sum_k W_{a_{i,p,k}}^t \leq W_{\max p}^t \quad (10)$$

式中: $W_{\max p}^t$ 为 t 时段 p 水库允许的最大取水量, 10^4 m^3 。

2.2.2 河道约束 河道分为若干个节点, 节点间河道可视为一小水库, 类似地, 河道约束包括了河道节点水量平衡、节点河道流量约束、河道取水口供水能力限制。

(1) 河道节点水量平衡约束: 两个节点间河道段水量平衡, 时段始末的水量差等于区间来水与河道取水的差值。

$$Q_l^t = Q_{l-1}^t + R_{r_l}^t - \sum_h \sum_i \sum_k W_{b_{i,k,h}}^t \quad (11)$$

式中: Q_l^t 为 t 时段末节点间水量, 10^4 m^3 ; $R_{r_l}^t$ 为 t 时段内节点区间天然来水和人工排放的总水量, 10^4 m^3 ; $W_{b_{i,k,h}}^t$ 为 h 取水点供给 i 子区 k 用户的水量, 10^4 m^3 ; $\sum_h \sum_i \sum_k W_{b_{i,k,h}}^t$ 为该段河道所有取水点的总供水量, 10^4 m^3 。

(2) 节点河道流量约束: 为维持河流生态系统不严重退化, 保持河道对污染物的稀释自净能力, 保证水生生物生长繁殖, 实现河床冲刷与泥沙淤积的动态平衡, 满足河道正常的航运功能, 河流节点流量应大于河道的生态环境和航运功能所需水量。

$$Q_l^t \geq q_l^t \quad (12)$$

式中: Q_l^t 为 t 时段该节点处的河道流量, 10^4 m^3 ; q_l^t 取该处生态基流量和航运需水量的较大值, 10^4 m^3 。

(3) 取水口供水能力约束: 对于每一个河道取水口, 其供水量受取水口泵站、输水管道容量限制。

$$\sum_{i=1} \sum_{k=1} W_{b_{i,k,h}}^t \leq W_{q_{\max h}}^t \quad (13)$$

式中: $W_{q_{\max h}}^t$ 为 h 取水点最大供水能力, 10^4 m^3 。

2.2.3 地下水约束 在水资源开发利用时, 地下水过度开采容易导致地面沉降, 在水资源合理配置中, 地下水源的供水量应小于可开采量。

$$\sum_{i=1} \sum_{k=1} W_{c_{i,g,k}}^t \leq G_g^t \quad (14)$$

式中: $W_{c_{i,g,k}}^t$ 为 t 时段地下水 g 开采口向 i 子区 k 用户的供水量, 10^4 m^3 ; G_g^t 为 t 时段 g 开采口的可开采量, 10^4 m^3 。

2.2.4 用水单元约束 对于某用水单元, 所有用户的总供水量应与各水源对该单元的供水量相等。

$$CG_i^t + VG_i^t = \sum_k \left(\sum_p W_{a_{i,p,k}}^t + \sum_h W_{b_{i,h,k}}^t + \sum_g W_{c_{i,g,k}}^t \right) \quad (15)$$

式中: CG_i^t 和 VG_i^t 分别为 i 子区城镇用户和农村用户的总供水量, 10^4 m^3 ; $W_{a_{i,p,k}}^t$ 、 $W_{b_{i,h,k}}^t$ 、 $W_{c_{i,g,k}}^t$ 分别为水库、河道、地下水对各用户的供水量, 10^4 m^3 。

(5) 非负约束: 整个配置模型中的所有变量均

大于零。

3 海口市水资源合理配置模型求解

3.1 所需数据

水资源配置涉及经济社会发展、生态环境纳污、水文水利统计、城乡供需水量等各方面,求解模型需要以下几个方面的基本资料和数据:

(1)蓄提引调水工程资料。海口市水资源配置中选择永庄、沙坡等10个中型水库及全市25个小型水库的水库特征值和调节参数,如水位库容关系、水库特征水位、供水对象等;河道提引水工程主要以龙塘水源地和南渡江引水工程东山泵站的取水为主,所需工程资料包括工程的取水特征值、供水流量、供水能力、供水对象等;引水工程则主要是以松涛水库向永庄、沙坡水库的补水量和南渡江引水工程的工程特征值为主。

(2)径流及供水资料。包括南渡江龙塘水文站的1951-2013年共63a的长系列径流量资料,不同来水频率下,10座中型水库典型年的逐月入库径流资料;小型水库及引提水工程的现状和规划水平的供水能力;计算单元的地下水资料,包括可开采量、开采能力,以及其他供水资料,包括各行政区不同水平年规划污水处理能力等。

(3)经济社会需水资料。海口市现状年(2014年)和未来水平年(2030年)不同发展情景下的需水资料。本文基于系统动力学理论,对海口市进行需水预测的结果如表1所示。

表1 海口市需水预测结果 10^4 m^3

假设情景	来水 频率	年 份			
		2014	2020	2025	2030
经济稳定发展	$P = 50\%$	73588	88567	91329	97462
且强化节水	$P = 75\%$	78989	93956	96656	102715
(低用水情景)	$P = 90\%$	86329	101208	103769	109671
经济高速发展	$P = 50\%$	73588	93012	102944	116150
且适度节水	$P = 75\%$	78989	98471	108394	121565
(高用水情景)	$P = 90\%$	86329	105828	115671	128734

(4)其他资料。各供水水源向4个计算单元7个用水户供水产生的供水成本,包括各供水机构的水价、水资源费资料,灌溉效益计算、污水处理技术、农业用水成本等研究成果^[6-11]。

3.2 求解思路

水资源合理配置模型中包括了社会公平、经济效益、生态环境3个目标,从多个目标出发,结合单

元内需供水平衡、水源供水能力、水库水量平衡等约束条件,配置模型可理解为多目标非线性方程组求解。在实际计算中,求解多目标规划问题的方法主要有化多为少法、分层序列法两类。化多为少法是根据目标内变量的相互关系,化多目标为单目标或双目标,通过减少目标数的方法求解模型;分层序列法是依据各个目标的重要性不同,先求出最重要目标的最优解集,再在该解集内继续求解次要目标,依次类推,直到得出满足所有目标的最优解。本文采用化多为少法。对于多目标规划问题,令函数值取极大或极小称为模型的理想目标,令函数大于或小于某数值称为模型的现实目标。受各种现实条件限制,很难全部达到所有目标值,因此,可将最主要目标确定为理想目标,其余目标根据优先级加以限值约束,转换成现实目标,以此完成多目标简化的过程。

海口市水资源合理配置模型求解过程分为以下几个步骤^[2,12]:

(1)构建目标函数:根据社会公平、经济效益、生态环境目标,结合计算单元经济社会、生态环境等相关参数,构建目标函数;

(2)基于化多为少法,将多目标函数模型转化为单目标函数模型;

(3)将蓄提引水工程资料、径流及供水限制资料、需水资料和其他参数等边界条件输入模型;

(4)利用LINGO软件建模并求解,输出配置结果;

(5)检查结果是否满足最优,如果未能出现最优解,调整模型结构、参数,直到模型输出最优解。

3.3 优化配置结果分析

水资源供需平衡关系是反映水资源配置效益的重要指标,在进行供需关系分析时,结合水资源系统概化结果,考虑海口市供水、给水和用水特征,排除不合理的跨区域调水,尽量真实地反映城市水传输系统。依据供水保证率的高低次序,优先满足城镇居民和农村居民生活用水,其次考虑工业、建筑业、第3产业和农业用水需求。同时为保护地下水资源,优先采用蓄提引调水工程的水量,尽量减少对地下水的依赖。所得结果如下:

3.3.1 基准年供需关系分析 通过基准年供需关系分析,研究目前水系连通格局下水资源对城市社会、经济、环境系统运作的支撑,从中发现不足并及时调整城市用水结构,以实现人与水资源的和谐发展。

选取2014年作为基准年,来水频率分别为

50%、75%、90% 3 个典型年,分别作为一般水平年、一般枯水年和特别枯水年,分析现阶段不同来水量

下海口市 4 个单元 7 个用户的水资源供需关系,配置结果如表 2 所示。

表 2 基准年供需关系分析表

10⁴ m³

区域	用户	一般水平年(P = 50%)			一般枯水年(P = 75%)			特别枯水年(P = 90%)		
		需水	供水	缺水	需水	供水	缺水	需水	供水	缺水
秀英	城镇生活	1889	1889	0	1889	1889	0	1889	1889	0
	工业建筑业	3573	3573	0	3573	3573	0	3573	3573	0
	第三产业	1156	1156	0	1156	1156	0	1156	1156	0
	河道外生态	283	283	0	283	283	0	283	283	0
	农村生活	545	545	0	545	545	0	545	545	0
	农田灌溉	3598	3598	0	4265	4265	0	5276	3595	1681
	林牧渔畜	1853	1853	0	2110	2110	0	2245	1603	642
	总量	12897	12897	0	13822	13822	0	14968	12645	2323
龙华	城镇生活	4822	4822	0	4822	4822	0	4822	4822	0
	工业建筑业	6998	6998	0	6998	6998	0	6998	6998	0
	第三产业	5131	5131	0	5131	5131	0	5131	5131	0
	河道外生态	723	723	0	723	723	0	723	723	0
	农村生活	332	332	0	332	332	0	332	332	0
	农田灌溉	2129	2129	0	2538	2538	0	3091	3091	0
	林牧渔畜	658	658	0	752	752	0	844	844	0
	总量	20794	20794	0	21296	21296	0	21941	21941	0
琼山	城镇生活	2724	2724	0	2724	2724	0	2724	2724	0
	工业建筑业	1534	1534	0	1534	1534	0	1534	1534	0
	第三产业	784	784	0	784	784	0	784	784	0
	河道外生态	409	409	0	409	409	0	409	409	0
	农村生活	645	645	0	645	645	0	645	645	0
	农田灌溉	10477	10477	0	12407	8913	3494	15400	7468	7932
	林牧渔畜	3853	3853	0	4363	4279	84	4565	2082	2484
	总量	20426	20426	0	22866	19288	3579	26062	15646	10416
美兰	城镇生活	4699	4699	0	4699	4699	0	4699	4699	0
	工业建筑业	892	892	0	892	892	0	892	892	0
	第三产业	3324	3324	0	3324	3324	0	3324	3324	0
	河道外生态	705	705	0	705	705	0	705	705	0
	农村生活	507	507	0	507	507	0	507	507	0
	农田灌溉	6512	6512	0	7697	5485	2213	9606	3571	6035
	林牧渔畜	2833	2833	0	3181	1849	1332	3627	925	2702
	总量	19471	19472	0	21005	17460	3544	23359	14622	8737

从表 2 可以看出,海口市各区域在一般水平年时,基本能实现各用户供需平衡。当来水较少的一般枯水年时,秀英和龙华区仍能实现供水率 100%,琼山和美兰区的农业用水出现一定缺口,特别是农田灌溉,琼山区灌溉缺水 $3\,494 \times 10^4 \text{ m}^3$,占灌溉需水量的 28.16%,美兰区灌溉缺水 $2\,213 \times 10^4 \text{ m}^3$,占灌溉需水量的 28.74%,另外美兰区的林业畜牧业也出现了较大程度缺水,缺水量 $1\,332 \times 10^4 \text{ m}^3$,占

灌溉需水量的 41.88%。当遇到特别枯水年时,来水量大幅度减少,农作物补水量增加,农业缺水更严重,除了龙华区仍能保证供需平衡外,秀英、琼山、美兰 3 个区的农业发展出现了不同程度缺水,琼山和美兰区的灌溉缺水量均超过了 50%。

从以上分析得知,一般情况下,海口市均能满足各行政区各用户的用水需求,当遇上来水量较少情况,极有可能出现水资源供不应求,限制社会经济特

别是农业的发展。

海口市地处海南岛北部海湾,有全岛最大河流南渡江穿城而过,地下水资源蕴藏量丰富,热带海洋性气候带来的多年平均降雨量为 1 660.43 mm,总体上水量充沛。但海口市目前缺乏足够的水资源配置工程,可利用水资源无法有效配置到需水区域,引发局部缺水现象,现状缺水属于工程型缺水。为此,海口市积极开展像龙塘坝下游至出海口江水综合利用、南渡江下游流域综合开发利用等多个水资源利用研究项目,以及采用各种工程措施,包括新建江东

水厂、农村饮水提质增效工程项目、南渡江引水工程等,解决海口市目前局部缺水问题。

3.3.2 2030年供需关系分析 按照稳定发展且强化节水、积极发展且适度节水两种情景下的需水结果,研究2030年水系连通格局变化后海口市水资源供需关系,进行河湖水系连通格局对水资源配置的效益分析。

(1)低用水情景。结合2030年水资源系统概化结果,预测经济社会稳定发展且采用强化节水措施情景下,各单元各用户供需关系结果如表3所示。

表3 低用水情景下2030年供需关系分析表

10^4 m^3

区域	用户	一般水平年($P = 50\%$)			一般枯水年($P = 75\%$)			特别枯水年($P = 90\%$)		
		需水	供水	缺水	需水	供水	缺水	需水	供水	缺水
秀英	城镇生活	2505	2505	0	2505	2505	0	2505	2505	0
	工业建筑业	5708	5708	0	5708	5708	0	5708	5708	0
	第三产业	3400	3400	0	3400	3400	0	3400	3400	0
	河道外生态	376	376	0	376	376	0	376	376	0
	农村生活	489	489	0	489	489	0	489	489	0
	农田灌溉	3611	3611	0	4260	4260	0	5235	5235	0
	林牧渔畜	2034	2034	0	2316	2316	0	2467	2467	0
	总量	18123	18122	0	19053	19053	0	20180	20180	0
龙华	城镇生活	5414	5414	0	5414	5414	0	5414	5414	0
	工业建筑业	8593	8593	0	8593	8593	0	8593	8593	0
	第三产业	11530	11530	0	11530	11530	0	11530	11530	0
	河道外生态	812	812	0	812	812	0	812	812	0
	农村生活	346	346	0	346	346	0	346	346	0
	农田灌溉	2022	2022	0	2399	2399	0	2909	2909	0
	林牧渔畜	721	721	0	823	823	0	923	923	0
	总量	29438	29438	0	29917	29917	0	30527	30527	0
琼山	城镇生活	3162	3162	0	3162	3162	0	3162	3162	0
	工业建筑业	1495	1495	0	1495	1495	0	1495	1495	0
	第三产业	2028	2028	0	2028	2028	0	2028	2028	0
	河道外生态	474	474	0	474	474	0	474	474	0
	农村生活	682	682	0	682	682	0	682	682	0
	农田灌溉	10070	10070	0	11858	11858	0	14631	14631	0
	林牧渔畜	4724	4724	0	5363	5363	0	5659	5659	0
	总量	22635	22635	0	25062	25062	0	28130	28130	0
美兰	城镇生活	5575	5575	0	5575	5575	0	5575	5575	0
	工业建筑业	1220	1220	0	1220	1220	0	1220	1220	0
	第三产业	10120	10120	0	10120	10120	0	10120	10120	0
	河道外生态	836	836	0	836	836	0	836	836	0
	农村生活	543	543	0	543	543	0	543	543	0
	农田灌溉	5906	5906	0	6941	6941	0	8606	8606	0
	林牧渔畜	3066	3066	0	3448	3448	0	3935	3935	0
	总量	27266	27266	0	28682	28682	0	30834	30834	0

由表 3 可知,借助已知工程性措施的效益,海口市在社会经济稳定发展且实行强化节水的措施下,2030 年 4 个单元所有用户在各种来水频率下均能实现水资源供需平衡,局部性缺水问题得到解决。

(2)高用水情景。结合 2030 年水资源系统的概化结果,预测经济社会高速发展且在采用适度节水措施情景下,各单元各用户供需关系的结果如表 4 所示。

表 4 高用水情景下 2030 年供需关系分析表

10⁴ m³

区域	用户	一般水平年(P = 50%)			一般枯水年(P = 75%)			特别枯水年(P = 90%)		
		需水	供水	缺水	需水	供水	缺水	需水	供水	缺水
秀英	城镇生活	2684	2684	0	2684	2684	0	2684	2684	0
	工业建筑业	9987	9987	0	9987	9987	0	9987	9962	25
	第三产业	4655	4655	0	4655	4655	0	4655	4585	70
	河道外生态	403	403	0	403	403	0	403	391	12
	农村生活	520	520	0	520	520	0	520	520	0
	农田灌溉	3752	3752	0	4426	4426	0	5439	4161	1278
	林牧渔畜	2060	2060	0	2346	2346	0	2498	1898	600
总量	24061	24061	0	25021	25021	0	26186	24201	1985	
龙华	城镇生活	5689	5689	0	5689	5689	0	5689	5689	0
	工业建筑业	12838	12838	0	12838	12838	0	12838	12838	0
	第三产业	13460	13460	0	13460	13460	0	13460	13460	0
	河道外生态	853	853	0	853	853	0	853	828	26
	农村生活	366	366	0	366	366	0	366	366	0
	农田灌溉	2085	2085	0	2473	2473	0	2999	2999	0
	林牧渔畜	728	728	0	831	831	0	932	932	0
总量	36020	36020	0	36511	36511	0	37138	37112	26	
琼山	城镇生活	3330	3330	0	3330	3330	0	3330	3330	0
	工业建筑业	2430	2430	0	2430	2430	0	2430	2389	41
	第三产业	2594	2594	0	2594	2594	0	2594	2551	43
	河道外生态	499	499	0	499	499	0	499	466	33
	农村生活	725	725	0	725	725	0	725	725	0
	农田灌溉	10390	10390	0	12239	12239	0	15101	11026	4075
	林牧渔畜	4872	4872	0	5532	5532	0	5839	4263	1577
总量	24841	24841	0	27350	27350	0	30519	24750	5769	
美兰	城镇生活	5970	5970	0	5970	5970	0	5970	5970	0
	工业建筑业	1839	1839	0	1839	1839	0	1839	1723	116
	第三产业	12760	12760	0	12760	12760	0	12760	12760	0
	河道外生态	895	895	0	895	895	0	895	839	56
	农村生活	580	580	0	580	580	0	580	580	0
	农田灌溉	6099	6099	0	7167	7167	0	8887	6691	2196
	林牧渔畜	3086	3086	0	3472	3472	0	3961	2971	990
总量	31229	31229	0	32683	32683	0	34892	31533	3359	

从表 4 可以看出,与低用水情景相似,海口市在社会经济高速发展且实行适度节水措施下,2030 年

4 个单元所有用户在来水频率分别为 50% 和 75% 的情况下均能实现水资源供需平衡。

但在特别枯水年时,秀英区(工业建筑业、第3产业、河道外生态)、龙华区(河道外生态)、琼山区(工业建筑业、第3产业、河道外生态)、以及美兰区(工业建筑业、河道外生态)均出现了不同程度缺水,但这些城镇用户的缺水量较少,仅占各用户需水量的5%左右。

水资源缺口较大主要还是农业发展用水,除了龙华区,其他3个单元内的农业用水均出现供水不足问题,缺水深度基本在25%左右。海口市经济发展速度过快,节水措施又有限,当遇到来水量较少年份,就可能出现部分用户未能实现供需平衡现象。

4 结 论

为使水资源更好地服务于城市水系统,解决水资源分布不均问题,海口市建设了一些给排水工程和水系连通工程,人为地改变了自然水系的连通格局,也同时改善了海口市供水不足问题。依据水资源系统概化的内涵和原则,结合海口市水资源利用特点,对海口市现状(2014年)和未来(2030年)的水资源系统进行概化。基于水资源合理配置内涵、模式和原则,根据海口市实际情况选择合理目标函数,并加以水库、河道等约束条件限制,构建并求解海口市量质效三位一体的水资源合理配置模型。分析海口市现状(2014年)和未来(2030年)的水资源供需平衡关系得知,相比于2014年,2030年海口市各区域各用户的缺水问题都得到了较大幅度缓解,其主要原因在于南渡江引水工程建设所发挥的效益。

参考文献:

- [1] 蒋云钟,鲁帆,雷晓辉. 水资源综合调配模型技术及实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [2] 李兴拼. 广西北部湾水资源合理配置理论与模型研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- [3] 邓彩琼. 区域水资源优化配置模型及其应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [4] 姚荣. 基于可持续发展的区域水资源合理配置研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [5] 邵东国,贺新春,黄显峰,等. 基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J]. 水利学报,2005,36(9):1050-1056.
- [6] 温鹏. 对城市供水效益计算方法的初步研究[J]. 水利经济,1997(3):42-47+69.
- [7] 古璇清,王海丽,王小军. 广东省水稻灌溉效益研究[J]. 广东水利水电,2011(10):1-3+8.
- [8] 梁祝,倪晋仁. 农村生活污水处理技术与政策选择[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2007,7(3):18-22.
- [9] 朱杰敏,张玲. 农业灌区水价政策及其对节水的影响[J]. 中国农村水利水电,2007(11):137-140.
- [10] 吴天霖. 海口市污水海洋处置工程对附近海域的影响[J]. 热带地理,2008,28(4):338-341.
- [11] 王东鑫,胡超,张静,等. 海南省城镇污水处理厂污染物减排特征分析[J]. 环境污染与防治,2013,35(10):17-23.
- [12] 吴有平,刘杰,何杰. 多目标规划的LINGO求解法[J]. 湖南工业大学学报,2012,26(3):9-12.