

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.01.008

引用格式: 郝奇琛, 孙倩, 李亚松, 等. 厦门市多水源多目标联合配置研究[J]. 华东地质, 2022, 43(1): 79-86. (HAO Q C, SUN Q, LI Y S, et al. Study on the combined allocation of multiple water sources with multiple objectives in Xiamen City[J]. East China Geology, 2022, 43(1): 79-86.)

厦门市多水源多目标联合配置研究

郝奇琛^{1,3}, 孙倩², 李亚松^{1,3}, 李政红^{1,3}, 朱玉晨^{1,3}, 李剑锋^{1,3}, 崔伟哲^{1,3}

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;
2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)数学与统计学院, 山东 济南 250353;
3. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要: 通过遗传算法和权重系数法, 兼顾地表水、地下水等多种水源以及供水能力、供需关系等约束条件, 构建厦门市多水源联合配置模型, 研究经济、社会、生态等多种目标条件下, 各行政区多种水源的联合配置优化方案。结果表明: 在特枯水年只有优先考虑社会效益方案才能达到较高的生活用水保证率; 常规开采地下水条件下, 岛内思明和湖里两区以配置九龙江的外调水为主, 岛外其他四区以配置本地地表水和地下水为主; 开采地下水储存资源作为应急供水水源可大幅提升供水安全保障程度, 但也改变了各区的供水结构, 地下水供给占比大幅提升。研究表明, 可以利用遗传算法面向不同目标对多种水源进行合理配置, 地下水能够在保障供水安全中发挥更大作用。

关键词: 地表水-地下水; 遗传算法; 多目标; 优化配置; 应急供水

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2022)01-079-08

厦门市位于我国东南沿海, 区域降雨量整体较大, 但远离山区的迎风面, 因叠加雨影效应的影响, 局部形成相对干旱区^[1], 特别在秋冬季节, 连续数月无有效降雨现象时常发生^[2], 加之社会经济较发达, 水资源需求大, 进一步加剧了供水紧张形势, 威胁供水安全^[3]。水资源包括地表水、外调水、地下水等多种水源^[4], 如何进行合理配置以满足生产、生活及生态用水等多种目标, 是值得探讨的问题。

国外最早关于水资源优化配置的研究源于 20 世纪 40 年代 Masse 提出的水库优化调度^[5]。1962 年, 哈佛大学所著的《水资源系统分析》首次将系统方法引入水资源配置模型, 随后线性规划、非线性规划、多目标规划、智能优化算法等多种算法被大量应用^[6-7]。尤其是近些年来, 水质约束、水资源环境和生态效益及可持续利用等问题被越来越多地考虑到优化配置中, 模型优化目标呈现出多样化复杂化的趋势^[8-10]。20 世纪 60 年代, 我国开始以水库

优化调度为先导的水资源分配研究, 重点侧重对水量的合理分配。2000 年以来, 水资源配置从单纯为经济社会服务扩展到对居民生活、工农业生产和生态保护都要兼顾的“三生”用水配置^[11], 配置水源也从单一地表水源扩展到多水源^[12-13]。进入 21 世纪, 对于水资源优化配置的理论和方法研究, 从当今发展需要和新技术应用出发, 在水资源优化配置的基本概念、优化目标、平衡关系、需求管理、供水管理、决策变量以及模型的数学描述等方面取得明显进展^[5, 14-15], 特别是加强了以流域水循环模拟为基础的优化配置研究^[16-17], 配置模型的求解方法也更多的侧重智能优化算法。

目前, 关于地下水资源的优化配置通常只考虑其可开采资源, 在特枯水年可能难以保障供水安全, 地下水具有大量的储存资源可供应急开采, 但关于应急条件下的配置方案研究还较少。本文考虑地下水常规开采和应急开采两种情景, 采用智能

* 收稿日期: 2021-08-05 修订日期: 2022-01-18 责任编辑: 叶海敏

基金项目: 中国地质调查局“厦漳泉同城化地区综合地质调查(编号: DD20190303)”项目资助。

第一作者简介: 郝奇琛, 1986 年生, 男, 副研究员, 博士, 主要从事水文地质调查及研究。Email: haoqichen@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 孙倩, 1988 年生, 女, 讲师, 博士, 主要从事水资源优化配置研究。Email: sunqian@qlu.edu.cn。

优化算法进行水资源优化配置,提出不同目标条件下的配置方案,为水资源高效利用和安全保障提供参考。

1 研究区概况

厦门市土地总面积 $1\,699.39\text{ km}^2$ ^[18],地貌以丘陵山地为主,多年平均降雨量 $1\,513.3\text{ mm}$ (1956—2015年)^[18],但时空分布不均,3—8月份降雨量占全年降雨量的 $85.6\%\sim 89.0\%$ 。多年平均水资源量为 $13.62\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ (1999—2018年),其中地表水资源量为 $13.43\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,地下水资源量为 $2.39\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,重复量为 $2.20\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,各区的水资源量如图1所示。以2019年常住人口计算,人均水资源量仅 287.6 m^3 ,约为全国人均水资源量的 $1/7$,为极度缺水地区。据《厦门市水资源公报(2019年)》^[18],当年用水总量为 $6.81\times 10^8\text{ m}^3$,其中生活、生产和生态用水占比分别为 37.3% 、 57.7% 、 5.0% ,生产用水占比最大。厦门市用水对外依赖度高,供水量中来自九龙江的区外调水占比 57.3% ,地下水占比仅 6.4% ,其余为本地地表水供给,地下水开发利用程度低。

采用三次平衡理论^[19]对2030年的供需情况进行预测分析。经预测,平水年需水量为 $7.94\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$;特枯水年需水量为 $8.13\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,其中工业需水 $2.58\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,农业需水 $2.29\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,

生活需水 $3.08\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,生态需水 $0.18\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。平水年可供水量为 $11.05\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,特枯水年可供水量为 $6.30\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,其中本地地表水量为 $2.28\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,区外调水量为 $3.46\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,地下水为 $0.49\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,其他水源水量为 $0.07\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ (表1)。应急条件下可动用的地下水储存资源量为 $2.10\times 10^8\text{ m}^3$ 。

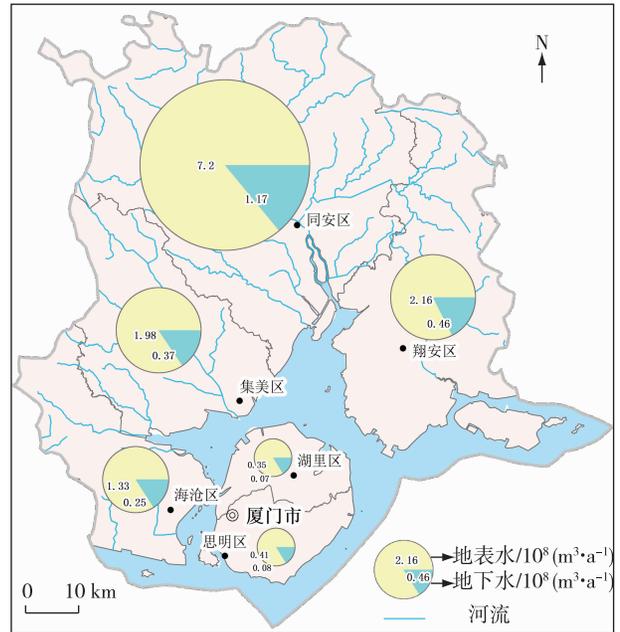


图1 厦门市各行政区水资源分布图

Fig. 1 Water resources distribution of Xiamen City

表1 2030年不同水源的可供水量

Table 1 The volume of available water from different sources in 2030

行政区	本地地表水/ $10^8(\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1})$			外调水/ $10^8(\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1})$			地下水/ $10^8(\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1})$	其他/ $10^8(\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1})$	可供水总量/ $10^8(\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1})$		
	平水年	枯水年	特枯水年	平水年	枯水年	特枯水年			平水年	枯水年	特枯水年
思明	0.09	0.08	0.07	0.90	0.73	0.40	0.00	0.02	1.01	0.83	0.49
湖里	0.08	0.07	0.06	0.90	0.73	0.40	0.00	0.01	0.99	0.81	0.47
同安	1.75	1.54	1.23	0.19	0.16	0.09	0.24	0.01	2.19	1.95	1.57
翔安	0.50	0.45	0.35	0.77	0.63	0.34	0.16	0.01	1.44	1.25	0.86
集美	0.48	0.43	0.34	0.98	0.80	0.44	0.04	0.01	1.51	1.28	0.83
海沧	0.30	0.23	0.22	1.57	1.27	0.70	0.05	0.01	1.93	1.56	0.98
合计	3.20	2.80	2.27	5.31	4.32	2.37	0.49	0.07	9.07	7.68	5.20

2 水资源配置优化模型构建

2.1 目标函数

多目标联合配置模型需综合考虑经济、社会、

生态3种因素,并在供水和需水等约束条件下使得经济、社会、生态协调发展。

目标一:经济目标,产业用水效益缺口最小,即经济效益最大化

$$g_1(WS) = \frac{P_{GDP} - \sum_{j=1}^m EW_j \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^L WS_{ijk} \right)}{P_{GDP}}, \quad (1)$$

式中: i 表示第 i 个分区; j 表示第 j 类用户用水; k 表示第 k 种供水水源; WS_{ijk} 表示第 k 个水源向分区 i 的第 j 类用户供水量, m^3/a ; EW_j 表示单位水资源为第 j 类用户带来的经济效益,元/ m^3 ; n, m, L 分别为分区数、用水户数、水源类型数,个; P_{GDP} 为该地区规划 GDP 金额,元。

目标二:社会目标,满足居民基本生活用水,实现社会效益最大化,即生活用水的缺水量最小

$$g_2(WS) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (WR_{ij} - \sum_{k=1}^L WS_{ijk})}{WRA}, \quad (2)$$

式中: WR_{ij} 表示分区 i 第 j 类用户需水量, m^3/a ; WRA 表示所有分区居民生活总需水量, m^3/a 。

目标三:生态目标,以满足生态用水的缺水量最小

$$g_3(WS) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \cdot (EWDL_{ij} - \sum_{k=1}^L WS_{ijk})}{EWD}, \quad (3)$$

式中: $EWDL_{ij}$ 表示分区 i 第 j 类用户的生态需水量, m^3/a ; EWD 表示所有分区生态总需水量, m^3/a 。

综合目标一、二、三,整体目标函数为: $\min f = \beta_1 g_1(\omega) + \beta_2 g_2(\omega) + \beta_3 g_3(\omega)$,其中 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为权重系数, $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$,根据不同的目标侧重,设定不同的权重系数,以此将多目标转化为单一目标,以解决多目标的优化问题。

2.2 约束条件

(1) 供水能力约束 $\sum_{j=1}^m WS_{ijk} \leq WSP_{ik}$, 式中 WSP_{ik} 为第 i 分区第 k 个水源的可供水量上限, m^3/a 。

(2) 用户需水量约束 $WR_{min_{ij}} \leq \sum_{k=1}^L WS_{ijk} \leq WR_{max_{ij}}$, 式中 $WR_{min_{ij}}, WR_{max_{ij}}$ 分别表示分区 i 第 j 类用户需水下限和上限, m^3/a 。

(3) 外调水分配约束 $\sum_{j=1}^m WA_{ij} \leq WAP_i$, 式中 WA_{ij} 为外调水为分区 i 第 j 类用户分配的水量, m^3/a ; WAP_i 表示分区 i 获得的外调水最大水

量, m^3/a 。

(4) 水源与用户间供需关系约束。当供需关系矩阵 $R_k = (r_{ijk}) = 1$ 时,表示第 k 类水源可向分区 i 的第 j 类用户供水; $R_k = (r_{ijk}) = 0$ 时,表示第 k 类水源与分区 i 的第 j 类用户间无供需关系。

2.3 模型求解方法

遗传算法是一种全局优化搜索算法,具有简单、通用、鲁棒性(稳健性或稳定性)强、适于并行处理、应用范围广等优点^[20]。遗传算法的优化流程为:①确定编码策略。编码方法可以分为3类:二进制编码方法、实数编码方法、符号编码方法。本模型采用的是实数编码。②定义适应度函数。遗传算法在进化搜索中以适应度函数为依据,利用种群中每个个体的适应度值来搜索。本模型直接将目标函数转化为适应度函数。③确定遗传参数,包括群体大小,进化代数,选择、变异方法,以及交叉概率、变异概率等。④随机产生初始化种群。⑤计算适应度,评价群体并优选个体。⑥通过随机配对,对优选的个体执行交叉,变异操作,产生下一代群体。⑦进化迭代。重复⑤、⑥,直到满足优化标准,输出结果,终止计算^[21]。

2.4 方案设定

厦门市供水水源包括本地地表水、地下水、外调水(九龙江水)及其他水源,地下水又可分为可开采资源和部分储存资源。用户类型包括生活用水、农业用水、工业用水以及生态用水。水资源优化配置的过程是计算不同水源分别配置给不同行政区不同用户的水量(图2)。在水资源的配置和调度中包括多种目标,以及丰水年和枯水年等不同的情景。经三次平衡分析,平水年和枯水年各区总体上不缺水,但特枯水年缺水量为 $1.83 \times 10^8 m^3$,为比较不同目标权重下水资源的优化配置情况,选择特枯水年进行优化配置。以2018年为现状水平年,2030年为规划水平年。在常规开采地下水条件下,分别考虑经济、社会、生态不同目标,设置了4种常规开采方案,地下水只配置其可开采资源;在应急条件下,除可开采资源外,考虑临时开采部分地下水储存资源作为应急水源,设置了应急方案。

方案一:优先考虑经济效益。在经济效益最大化的基础上,综合考虑供需水量等约束条件对水资源进行合理分配。在对模型求解过程中,利用德尔非法设定经济和生态目标权重分别为0.65和

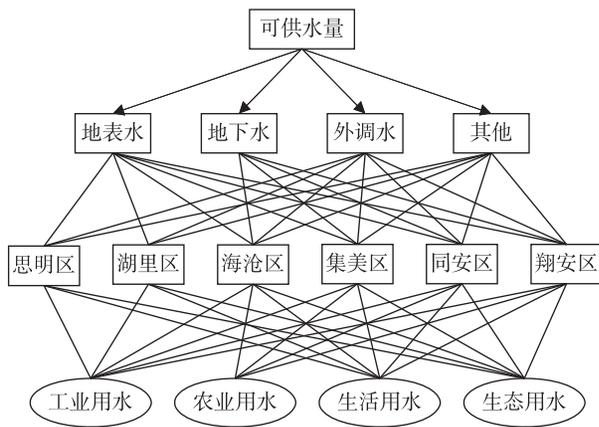


图2 多水源配置结构示意图

Fig. 2 Allocation structure of multiple water source

0.35, 社会目标不作为目标函数, 但作为约束条件, 限定最低目标。

方案二: 优先考虑社会效益。在缺水程度尽量小的基础上, 综合考虑供需水量等约束条件对水资源进行合理分配。社会和经济目标权重分别为 0.65 和 0.35。

方案三: 优先考虑生态环境效益。在尽量保证生态需水量的基础上, 综合考虑供需水量等约束条件对水资源进行合理分配。生态和社会目标权重分别为 0.65 和 0.35。

方案四: 统筹考虑经济、社会和生态三个目标, 对水资源进行合理分配。在对模型求解过程中, 设定经济、社会和生态目标权重分别为 0.35、0.40 和 0.25。

应急方案: 目标与方案四相同, 统筹考虑 3 个目标。除可开采资源外, 地下水增加了部分储存资源作为供水水源, 地下水可供配置的水量总计为 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 增加应急开采后, 整体上可满足供水需求, 但需要对不同地区的不同产业用水进行优化配置。

3 结果与讨论

3.1 优化模型运行结果

优化模型设置了 600 个种群, 交叉概率设置为 0.8, 变异概率为 0.2, 进化代数 9 600 次。约束容限阈值为 1×10^{-10} , 函数容限阈值为 1×10^{-10} 。在设置的进化代数之内均可满足收敛标准。4 种方案优化后的经济效益值为 0.54~0.72 万亿元, 体现出不

同目标条件下优化结果的差异性。

3.2 不同目标条件下各产业的配置水量

根据情景和方案设置, 地下水常规开采条件下, 特枯水年无法满足用水需求。经优化配置, 得到了不同目标条件下不同产业的配置水量和保证率(图 3)。方案一优先考虑经济效益, 工业用水分配的水量最大, 为 $2.39 \times 10^8 \text{ m}^3$, 供水保证率达 93%。其他目标条件下, 工业用水的保证率分别为 72%(方案二)、75%(方案三)、73%(方案四), 明显小于方案一。方案二优先考虑社会效益, 生活用水分配的水量最大, 为 $2.62 \times 10^8 \text{ m}^3$, 供水保证率达 85%, 而其他方案均较低, 方案一最低, 仅为 51%。方案三优先考虑生态环境效益, 因生态环境用水需求较小, 故更容易 100% 保障。方案四统筹考虑了 3 个目标, 优化后的各产业的保证率更加均衡, 工业、农业、生活、生态的保证率分别为 73%、74%、76% 和 100%。应急开采方案可全部达到 100%, 不再详述。

根据以上优化配置结果可以看出, 不同目标条件下, 配置的水量有所不同, 当某一产业目标权重设置较大时, 其供水保证率相对更高。因此, 可通过调整权重实现对不同目标条件的优化。方案一侧重经济目标, 工业和农业都是完成经济目标的重要制约因素, 但工业的供水保证率为 93%, 明显大于农业的供水保证率 69%, 说明工业对经济目标的贡献率更大, 工业供水保证率明显高于农业供水保证率。除方案二生活供水保证率能达到 85%, 其他方案都低于 76%, 说明无法在特枯水年保障生活用水的情况下, 再兼顾其他产业用水需求。特别是方案一, 如果优先满足经济目标, 生活供水保证率只有 51%, 显然不能满足基本的生活用水需求。

3.3 各行政区不同水源的配置水量

图 4 为不同水源在各行政区的配置结果。从行政区角度看, 由于岛内的思明区和湖里区城镇化率极高, 不具备开采地下水的条件, 故不配置地下水。配置结果显示, 两个区主要配置水源为九龙江的区外调水, 4 个方案占比均超过了 85%, 与现状条件下的供水格局相似。同安区主要配置的水源是本地地表水, 4 个方案占比 75%~89%, 其他主要为地下水(方案三除外)。翔安区、集美区和海沧区主要配置的水源为区外调水, 但本地地表水和地下水也占有一定比例。

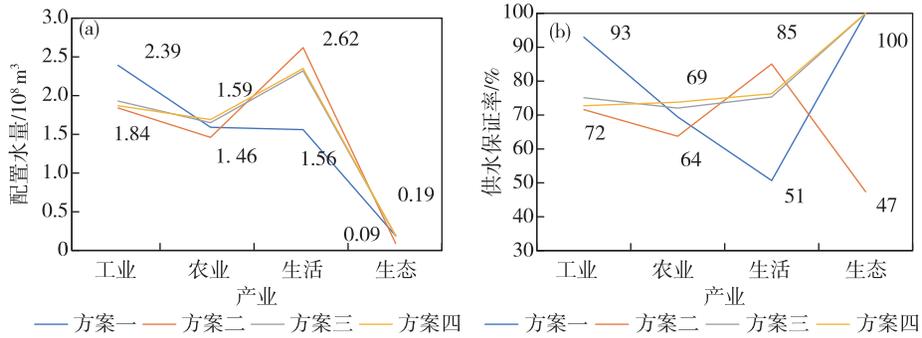


图 3 不同目标条件下水量配置结果(a)及供水保证率(b)

Fig. 3 Water allocation (a) and water supply guarantee (b) under different target

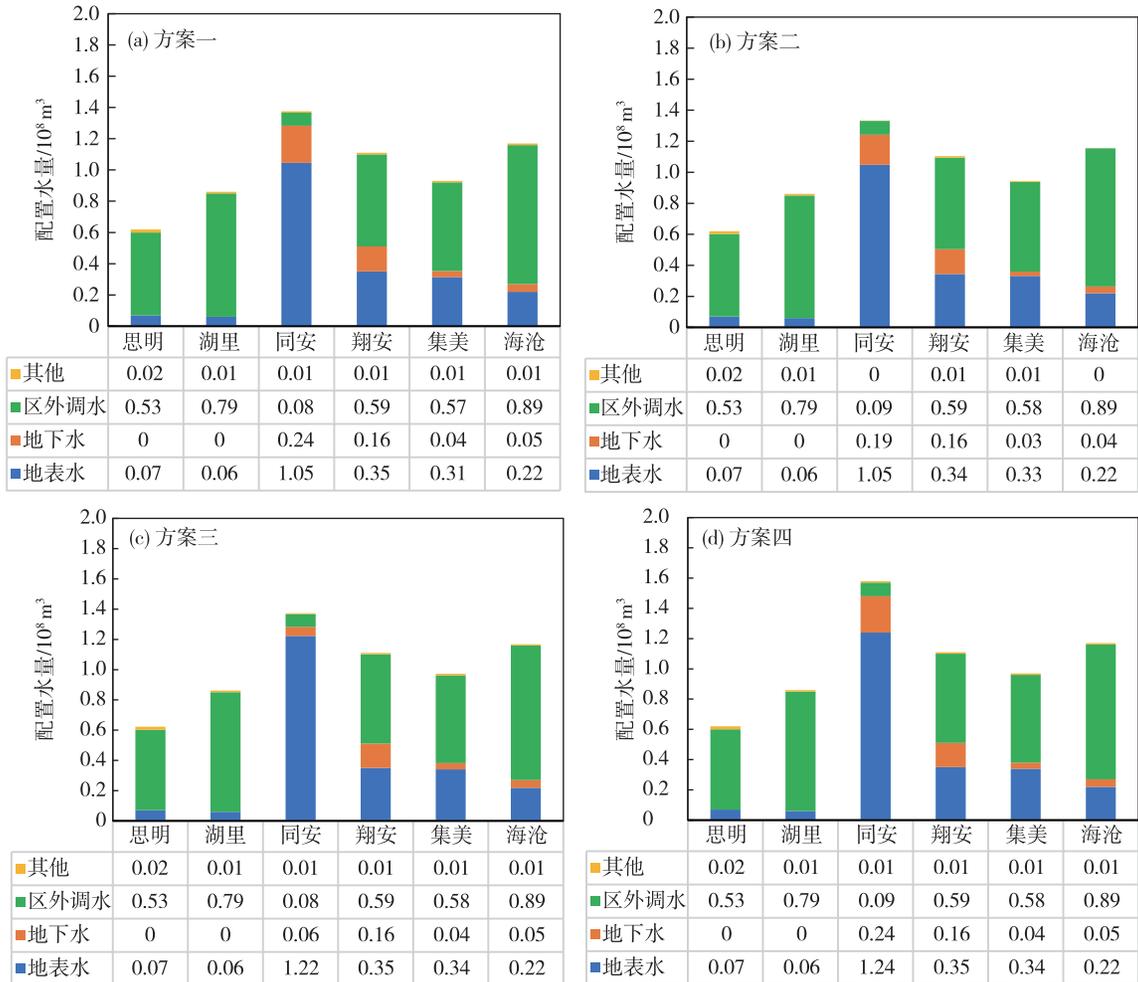


图 4 各行政区不同水源的配置结果

Fig. 4 Allocation of different water sources in each region

从水源角度看,地表水主要配置给了同安区,其次为翔安区、集美区等。区外调水主要配置给了海沧区、湖里区,其次是翔安区、集美区和思明区。

地下水主要配置给了同安区和翔安区,集美区和海沧区有少量配置,思明区和湖里区没有配置。

虽然 4 种方案的配置目标不同,但每个行政区

配置的水源结构变化不大,这主要受各区的产业结构控制。比如,湖里区和思明区,这两个区的城镇化率为100%,主要以城镇生活和工业用水为主,无农业用水需求,供水水源以外调水为主,无地下水。优化目标发生变化时,水量只是在不同目标间发生了转移,但总量和不同水源的比例基本没有变化。变化比较大的主要是同安区,其农业用水需求占比较大,同时也是唯一一个以本地地表水为主要供水水源的行政区,导致不同目标条件下的配置水量有所差异。

3.4 应急开采条件下水源优化配置对比

应急开采地下水可大幅提高特枯水年的供水保障程度(图5),各产业用水均可达到100%以上,但也很大程度上改变了各行政区的供水结构。根据应急开采条件下各行政区不同水源的配置比例(图6),可以看出地下水的供水占比大幅提高,提高幅度最大的是翔安区、海沧区等,岛内的湖里区和思明区也有较大幅度的提升,但海沧区以及岛内的思明和湖里两区的地下水资源很少,故应急条件下需要从岛外的同安等区配置地下水,以满足各区的用水需求。与此同时,同安区配置的地下水占比有所减少,更多的配置了本地地表水。

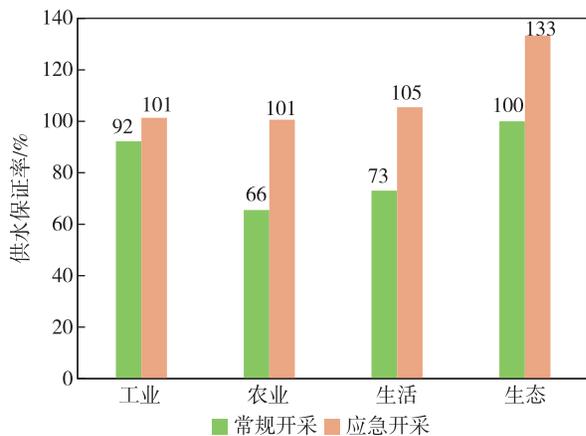


图5 应急开采条件下供水保证率提升情况

Fig. 5 Improvement of water supply guarantee under emergency conditions

4 结论

(1)受地表水、地下水等不同水源分布的约束和影响,不同行政区联合配置的水源各有侧重。岛内的思明区和湖里区以外调水为主,岛外的同安区

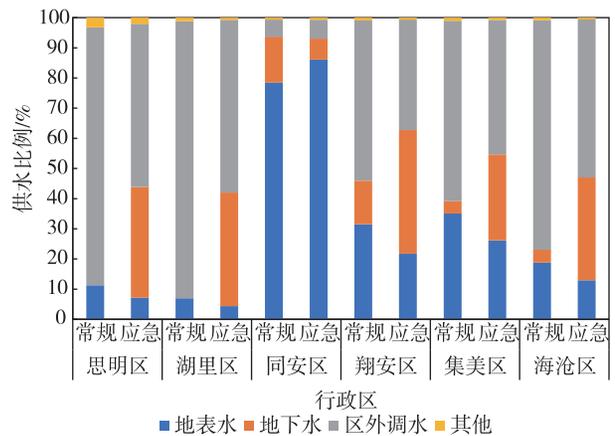


图6 两种开采情景下水源配置结果对比

Fig. 6 Comparison of water source allocation under two mining conditions

以本地地表水为主,其他各区则包括多种水源。

(2)权重系数法可以用来调节不同的配置目标,但特枯水年,无法在保障生活用水情况下再兼顾其他产业用水需求。若要同时保障多种用水目标,需要增加更多供水水源,其中应急开采地下水储存资源是一种有效的解决方案。

(3)在开采地下水储存资源作为应急供水水源情景下,可大幅提高特枯水年各产业的供水保障程度,均可实现100%以上的供水保证率。

参考文献

- [1] 林彤. 福建省水足迹研究[D]. 福州:福建师范大学, 2015.
LIN T. Study on the water footprint of Fujian[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015.
- [2] 庄明龙, 许茜, 沈盛湘, 等. 厦门市水资源公报(2017年)[R]. 厦门:厦门市水利局, 2018:23-24.
ZHUANG M L, XU Q, SHEN S X, et al. Xiamen water resources bulletin (2017)[R]. Xiamen: Xiamen Water Conservancy Bureau, 2018:23-24.
- [3] 王吉苹, 吝涛, 薛雄志. 基于系统动力学预测厦门水资源利用和城市化发展[J]. 生态科学, 2016, 35(6): 98-108.
WANG J P, LIN T, XUE X Z. Prediction water utilization and urbanization development of Xiamen City by System Dynamics [J]. Ecological Science, 2016, 35(6):98-108.
- [4] 陈国光, 张晓东, 张洁, 等. 自然资源分类体系探讨[J]. 华东地质, 2020, 41(3):209-214.

- CHEN G G, ZHANG X D, ZHANG J, et al. Discussion on natural resources classification system[J]. East China Geology, 2020, 41(3):209-214.
- [5] 韩春华. 沙颍河流域河流健康评价与水资源优化配置研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018.
- HAN C H. Study on river health evaluation and optimal allocation of water resources in Shaying river basin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [6] 沈大军, 刘斌, 郭鸣荣, 等. 以供定需的水资源配置研究——以海拉尔流域为例[J]. 水利学报, 2006, 37(11):1398-1402.
- SHEN D J, LIU B, GUO M R, et al. Supply-decided water deployment: a case study of Hailaer River basin[J]. Journal of Hydrauluc Engineering, 2006, 37(11):1398-1402.
- [7] 刘晓霞. 基于地表水和地下水动态转化的水资源优化配置模型研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2007.
- LIU X X. Study on optimal allocation model of water resources based on dynamic transformation of surface water and groundwater[D]. Beijing: China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2007.
- [8] HAO Q C, SHAO J L, CUI Y L, et al. Optimization of groundwater artificial recharge systems using a genetic algorithm: a case study in Beijing, China[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5):1749-1761.
- [9] SINGH A, PANDA S N. Optimization and Simulation Modelling for Managing the Problems of Water Resources[J]. Water Resources Management, 2013, 27(9):3421-3431.
- [10] ZHANG K, YAN H, ZENG H, et al. A practical multi-objective optimization sectorization method for water distribution network[J]. Science of The Total Environment, 2018, 656(15):1401-1412.
- [11] 顾世祥, 李远华, 何大明, 等. 以 MIKE BASIN 实现流域水资源三次供需平衡[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(1):5-10.
- GU S X, LI Y H, HE D M, et al. Watershed water resources three-allocation based on MIKE BASIN[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2007, 18(1):5-10.
- [12] 陈太政, 侯景伟, 陈淮. 中国水资源优化配置定量研究进展[J]. 资源科学, 2013, 35(1):132-139.
- CHEN T Z, HOU J W, CHEN Z. Quantitative studies of the optimization allocation of water resources in China—a review[J]. Resources Science, 2013, 35(1):132-139.
- [13] 宋立东, 佟智强, 刘浩, 等. 牡丹江市资源环境承载力评价[J]. 华东地质, 2021, 42(2):185-192.
- SONG L D, TONG Z Q, LIU H, et al. Evaluation on carrying capacity of resources and environment in Mudanjiang city[J]. East China Geology, 2021, 42(2):185-192.
- [14] 德佳硕, 郭萍, 张成龙, 等. 考虑气象因子的不确定性灌溉水资源优化配置[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(6):540-544.
- DE J S, GUO P, ZHANG C L, et al. Optimal allocation of irrigation water resources based on meteorological factor under uncertainty[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(6):540-544.
- [15] 徐桂民. 大沽河流域地表水与地下水联合调度研究[D]. 济南:济南大学, 2013.
- XU G M. Study on conjunctive operation of surface water and ground water in Dagu river basin[D]. Jinan: University of Jinan, 2013.
- [16] 王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展[J]. 水利学报, 2008, 39(10):1168-1175.
- WANG H, YOU J J. Advancements and development course of research on water resource deployment[J]. Journal of Hydrauluc Engineering, 2008, 39(10):1168-1175.
- [17] 李国礼, 周锴镔, 张庆, 等. 地表水与地下水联合数值模拟系统在阜阳市水资源优化管理中的应用[J]. 华东地质, 2018, 39(3):234-240.
- LI G L, ZHOU K E, ZHANG Q, et al. The application of a joint numerical simulation system of surface water and groundwater in optimized management of Fuyang water resources [J]. East China Geology, 2018, 39(3):234-240.
- [18] 庄明龙, 许茜, 王飞远, 等. 厦门市水资源公报(2019年)[R]. 厦门:厦门市水利局, 2020:1-2.
- ZHUANG M L, XU Q, WANG F Y, et al. Xiamen water resources bulletin (2019)[R]. Xiamen: Xiamen Water Conservancy Bureau, 2020:1-2.
- [19] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 区域缺水状态的识别及其多维调控[J]. 资源科学, 2003, 25(6):2-7.
- WANG H, QIN D Y, WANG J H, et al. State identification and multiple regulation of regional water resources shortage[J]. Resources Science, 2003, 25(6):2-7.
- [20] YENIAY O. Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms[J]. Mathematical and Computational Applications, 2005, 10(1):45-56.

[21] HILTON A B C, CULVER T B. Groundwater Remediation Design under Uncertainty Using Genetic Algo-

rithms[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2005, 131(1):25-34.

Study on the combined allocation of multiple water sources with multiple objectives in Xiamen City

HAO Qichen^{1,3}, SUN Qian², LI Yasong^{1,3}, LI Zhenghong^{1,3}, ZHU Yuchen^{1,3},
LI Jianfeng^{1,3}, CUI Weizhe^{1,3}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;*

2. *School of Mathematics and Statistics, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, Shandong, China;*

3. *Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)*

Abstract: Based on the genetic algorithm and weight coefficient method, the joint allocation model of multi-water sources in Xiamen City is constructed by taking into account of multiple water sources such as surface water and groundwater, as well as constraints including water supply capacity and the supply-demand relationship. The optimization of multi-water source joint allocation in various administrative districts with economic, social, and ecological objectives is studied. The results show that only the scheme giving priority to social benefit can achieve higher guarantee rate of domestic water in extra-dry year. Under the conventional condition of groundwater exploitation, Siming district and Huli district inside the island are mainly allocated with the external diversion water from Jiulong River, while the other four districts outside the island are mainly allocated with local surface water and groundwater. Mining groundwater storage resources as emergency water source can greatly improve the water supply security, but also change supply structure in each district with a great increase of groundwater supply proportion. The results show that the genetic algorithm can be employed to rationally allocate various water sources with different objectives, and groundwater may play a greater role in ensuring water supply security.

Key words: surface water-groundwater; genetic algorithm; multi-objective; optimization; emergency water supply