

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.009

基于系统动力学的城市社会经济干旱模拟与对策研究

赵璧奎^{1,2,3}, 邱 静^{1,2,3}, 李宁宁^{1,2,3,4}, 黄本胜^{1,2,3}, 程 涛^{1,2,3}, 陈颖毅^{1,2,3}, 李泽君^{1,2,3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635;
3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635; 4. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 528478)

摘要:为解决城市旱情分析和抗旱决策技术问题,在分析社会经济干旱特点基础上,提出了城市干旱风险调控思路,构建了城市供水网络系统动力学模型。以广东省汕尾市公平水库供水片区为例,以水文干旱为输入条件,推演了旱情发展趋势,定量评估了抗旱措施在干旱风险调控中的效果。结果表明:在特大干旱情景下,公平水库供水片区通过采取生活节水、限制工农业和生态用水、启用水库补水、实施黄江应急供水工程、动用死库容供水等综合措施,可保障调度期内基本用水需求;所建立的城市供水网络系统动力学模型揭示了水文干旱引发社会经济干旱的链式传导机制,实现了社会经济干旱情景精准模拟和抗旱措施效果反馈和推演。

关键词:社会经济干旱;系统动力学;抗旱;城市供水;汕尾市

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0063-07

Urban socio-economic drought simulation and countermeasure study based on system dynamics//ZHAO Bikui^{1,2,3}, QIU Jing^{1,2,3}, LI Ningning^{1,2,3,4}, HUANG Bensheng^{1,2,3}, CHENG Tao^{1,2,3}, CHEN Yingyi^{1,2,3}, LI Zejun^{1,2,3}
(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research, Guangzhou 510635, China; 3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, China; 4. Civil Engineering School, Sun Yat-sen University, Zhuhai 528478, China)

Abstract: In order to solve technical problems of drought analysis and drought-resistance decision making in cities, a new idea of urban drought risk control was put forward, and a system dynamics model of urban water supply network was constructed based on analysis of socio-economic drought characteristics. Taking the water supply region of Gongping Reservoir in Shanwei City of Guangdong Province as an example, the development trend of drought was deduced with hydrological drought as the input condition, and the effect of drought-resistance measures in drought risk control was evaluated quantitatively. The results show that under the extreme drought scenario, the basic water demand of the water supply region of Gongping Reservoir can be guaranteed during the operation period by adopting comprehensive measures, including reducing domestic water consumption, restricting water use in agriculture, industry, and ecology, replenishing reservoir water, implementing the Huangjiang River emergency project of water supply, and using the dead storage capacity of the reservoir for water supply. The established urban water supply network system dynamics model reveals the chain transmission mechanism of hydrological drought to socio-economic drought, and realizes the accurate simulation of socio-economic drought and the feedback and inference of drought-resistance measures.

Key words: socio-economic drought; system dynamics; drought resistance; city water supply; Shanwei City

干旱灾害具有发生频率高、影响范围广、持续时间长、灾害影响损失严重等特点,严重干旱将造成粮

食减产、人畜饮水困难,破坏自然生态系统平衡稳定等严重后果^[1-2]。国内外学者针对气象干旱^[3-4]、水

基金项目:粤港水安全保障联合实验室项目(2020B1212030005);国家自然科学基金青年科学基金项目(52309014);广东省重点领域研发计划项目(2020B1111380003);广东省水利科技创新项目(2021-01);广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515010898);广州市科技计划项目(202201011541)

作者简介:赵璧奎(1985—),男,正高级工程师,博士,主要从事抗旱减灾、水资源规划与管理研究。E-mail:674860282@qq.com

通信作者:李宁宁(1994—),女,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:465956539@qq.com

文干旱^[5-6]开展了大量研究,为干旱成因分析^[7]、特征分析^[8-9]、风险评估^[10-11]、旱情发展预测^[12-13]提供了重要理论依据。然而,由于干旱成因和影响的复杂性,目前对有效干旱指标的确定仍面临着诸多挑战^[14-15]。王劲松等^[16]指出干旱指标设计必须结合区域气候和水资源特点;栗晓玲等^[17]提出目前的干旱指数存在难以量化干旱经济损失、未考虑区域用水需求等问题。

干旱发展的一般规律是依次由气象干旱、水文干旱向农业干旱和社会经济干旱传播。国内学者基于干旱指标解释了气象干旱向水文干旱传播的自然规律^[18-20];周佳伟等^[21]揭示了社会经济干旱滞后于水文干旱、气象干旱的基本规律;陈金凤等^[22]引入了水贫乏指数研究,建立了评价社会经济干旱的指标体系。社会经济干旱在“自然-社会”二元耦合作用下发展形成,其模拟评价更为复杂^[23-25],旱灾物理成因和内在机理仍有待更深入研究。

广东省是我国干旱高发、频发的地区^[26-28]。2020年广东省城镇人口占比达74.15%,第二、三产业占比达95.7%,近年来广东干旱灾害呈现以农业干旱为主逐步向以社会经济干旱为主转变的趋势。为了进一步揭示气象水文干旱向社会经济干旱发展的内在机理,本文以广东省典型易旱区域为例,对城市水源、供水工程体系、供水对象关联关系进行调查梳理,构建供水网络的系统动力学模型,通过情景推演揭示社会经济干旱发展趋势和抗旱措施效果,为旱情研判和抗旱决策提供了一种新思路。

1 研究方法思路

1.1 社会经济干旱特点及研究方法

社会经济干旱以水文干旱为直接诱因、以水源短缺引发城乡供水不足为主要表征,其灾害严重程度与区域供水工程调配能力、水资源开发利用强度、管理决策水平等密切相关,对饮水安全和社会稳定具有更加直接的影响。因此,社会经济干旱研究必须在“自然-社会”二元水循环理论指导下,以水文干旱引起的水资源短缺现象为外因,以水资源开发利用、抗旱措施等人类活动为内因,揭示干旱灾害在内外因素叠加影响下,在供水体系网络中的发展规律。

本文采用田野调查法了解研究区乡镇级以上集中供水水源构成、供水工程布局及规模、实际用水需求和用水结构、常规抗旱措施等基础情况,运用系统动力学的存量-流量理论分析模型,构建融合“源-

供需”因果关系及“蓄-控-引-补”抗旱措施反馈回路的系统动力学模型,实现社会经济干旱的动态情景模拟预演功能。通过情景模拟预测旱情发展趋势及影响区域、供水缺口,根据区域水源条件提出系统、可行的抗旱措施,为编制抗旱预案、实现抗旱工程调度和抗旱决策提供科学依据。

1.2 城市干旱风险调控思路

徐翔宇等^[29]提出了战略性干旱灾害风险管理思想,在干旱监测和预报的基础上制定科学合理的旱灾风险管理方法和实施有效的应急抗旱行动。社会经济干旱是在气候变化和人类活动加剧双重因素作用下产生的,因此,城市干旱风险调控必须围绕社会经济干旱形成机理和发展趋势,进行解剖式分析和机理性研究^[30]。

本文在实例调查研究基础上,提出了基于供水体系模拟、抗旱措施推演的城市干旱风险调控思路,包括供水体系调查、抗旱应急供水工程规划、抗旱能力分析、水资源区域供需平衡及抗旱措施反馈系统动力学模型的构建、抗旱对策措施的制定与落地实施、根据水情滚动更新模型结果等具体工作流程,如图1所示。

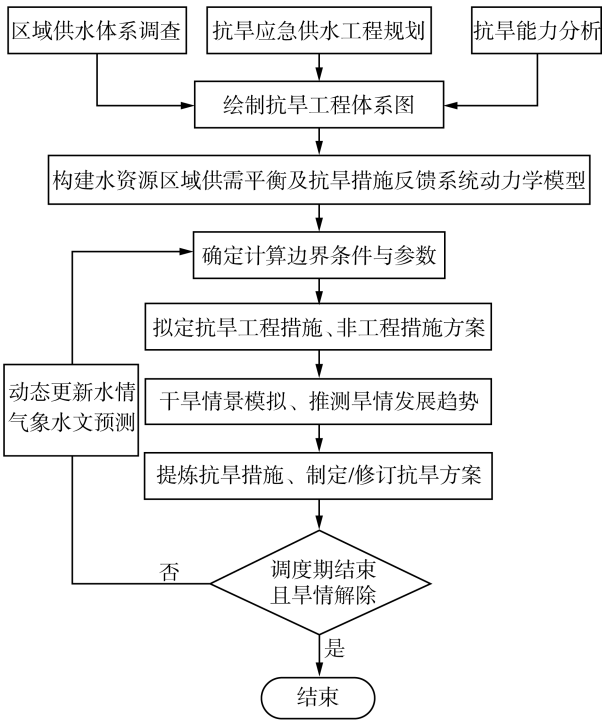


图1 城市干旱风险调控流程

Fig.1 Urban drought risk control process

2 系统动力学模型的建立

2.1 系统动力学模型构建

系统动力学模型是一种基于因果关系的机理性模型。模型借助因果关系图描述水资源供需拓扑关

系链,通过一组递推差分方程表述水资源存量-流量变化关系,并利用辅助方程模拟抗旱措施在系统中的反馈作用。

以水库蓄水量 V 作为状态变量,以水库净入库水量 Q_{in} 、净出库水量 Q_{out} 、天然降水量 R 、水库集雨面积 A 、蒸发量 E 、渗漏量 L 和供水量 D 作为速率变量(流量)。为体现抗旱措施差异化,将供水量细分为生活用水 D_L 、工业用水 D_I 、农业用水 D_A 、生态用水 D_E ,作为辅助变量。以抗旱非工程措施和工程措施作为决策变量,抗旱非工程措施决策变量 λ 包含生活节水 λ_L 、工业节水 λ_I 、农业节水 λ_A 、生态用水削减 λ_E 等不同用水类型非工程措施决策分量,对应的应急水源工程 $P = \{P_L, P_I, P_A, P_E\}$ 及其启用后的补水量则通过抗旱工程措施决策变量 $\gamma = \{\gamma_L, \gamma_I, \gamma_A, \gamma_E\}$ 模拟。各变量因果关系如图 2 所示。

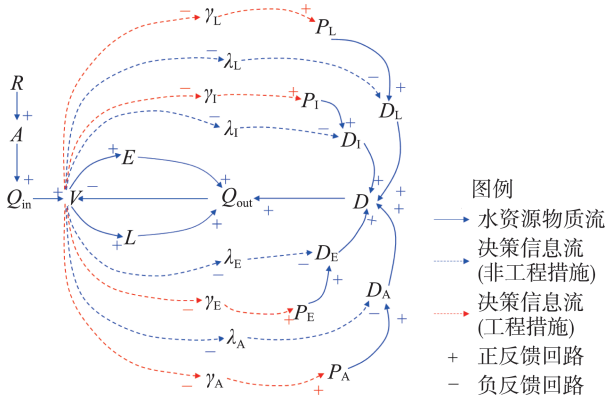


图 2 以水库为主要水源的供水体系因果关系

Fig. 2 Causal relationship of water supply system with reservoir as main water source

2.2 系统动力学方程及其求解

系统动力学模型可以通过系统动力学方程实现规则描述和模型表达。系统动力学方程包括入流量速率方程、出流量速率方程、供水量速率方程、水量损耗辅助方程、抗旱决策辅助方程和存量状态转移方程,分别为

$$Q_{in,t} = R_t A \varphi \quad (1)$$

$$Q_{out,t} = D_t + E_t + L_t \quad (2)$$

$$D_t = \lambda_t D_0 - \gamma_t P_t \quad (3)$$

$$\begin{cases} E_t = f_1(V_{t-1}) \\ L_t = f_2(V_{t-1}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \lambda_t = f_3(V_{t-1}) \\ \gamma_t = f_4(V_{t-1}) \end{cases} \quad (5)$$

$$V_t = V_{t_0} + \int_{t_0}^t (Q_{in,t} - Q_{out,t}) dt \quad (6)$$

式中: φ 为径流系数; t 为时段; t_0 为调度起始时刻; D_0 为初始用水需求。 λ_t 、 γ_t 采取决策树方法设定抗旱措施启用条件和启用规则。非工程措施以

用水需求管控为主,由 V_{t-1} 决定在 t 时段启用抗旱非工程措施。工程措施以开辟新水源为主,由 V_{t-1} 决定在 t 时段启用抗旱工程措施,包括打深水井、应急送水、水源连通等应急供水工程,代替了部分水库供水。

为了求模型数值解,通常需要对式(6)进行差分化处理:

$$V_t = V_{t-1} + (Q_{in,t} - Q_{out,t}) \Delta t \quad (7)$$

模型依次按照速率方程、辅助方程、状态转移方程的顺序逐时段完成求解计算,并循环迭代至调度周期 T 后,全部计算完毕,求解计算规则如图 3 所示。

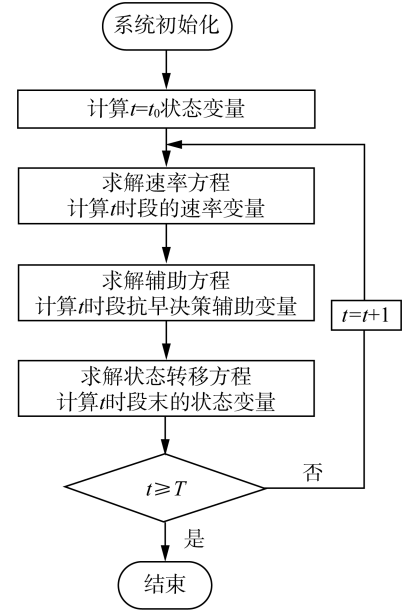


图 3 供水体系系统动力学模型求解计算规则

Fig. 3 Calculation rules for solving water supply system dynamics model

2.3 决策变量的规则设定

在现场情况调查、抗旱经验总结的基础上确定 λ_t 、 γ_t 的取值范围,并建立抗旱措施与决策之间映射规则,将定性决策转换成 λ_t 、 γ_t 定量值,实现抗旱措施在模型中的反馈控制。

λ_t 的各个抗旱非工程措施分量取值范围需要根据区域实际情况分别确定。粤东地区抗旱实践调查表明,生活供水抗旱措施主要包括倡导节水、分时段供水、限制高耗水企业用水等,通过采取这些措施,月平均可节约生活用水 10% ~ 20%, λ_L 取值范围为 0.8 ~ 1.0;工业供水抗旱措施主要为暂停部分工业用水,通过对区域内工业用水户进行行业类型及工业用水占比分析,重点保障能源、钢铁等重要企业的生产用水, λ_I 取值范围为 0.3 ~ 1.0;农业供水抗旱措施主要包括仅保障春耕用水、引导改种低耗水的经济作物等,根据灌区灌溉制度确定不同月份农

业用水,削减用水幅度,重点保障作物关键生长期用水, λ_A 取值范围为0~1.0;生态供水抗旱措施指当预测城镇生活用水水源面临枯竭时,允许生态流量破坏, λ_E 取值范围为0~1.0。 γ_i 的各工程措施分量取值需要根据区域实际可行的抗旱工程情况确定。城镇生活供水抗旱措施主要包括打深水井、供水管网的联网扩网、应急取水送水等,打深水井需要调查区域打井平均水深、出水量、打井工作周期等,以确定打深水井的抗旱能力及计划,联网扩网能力需要调查扩网段的设计能力、供给侧的供水能力盈余以及联网工程实施计划, γ_L 取值范围为0~1.0;工业用水供水抗旱措施主要为开辟新水源,可就近从河道抽水解决,其规模由泵站及水源水资源量决定, γ_I 取值范围为0~1.0;农业用水供水抗旱措施包括在田间地头打井和从附近河道沟渠抽水等,其规模由区域抗旱应急水泵设施额定流量决定, γ_A 取值范围为0~1.0;生态用水供水抗旱措施一般指通过污水处理厂再生水回用等进行污水资源化利用,需要通过调查污水处理厂实际运行的出水量进行估算, γ_E 取值范围为0~1.0。

3 实例分析

3.1 研究区概况

汕尾市位于粤东沿海,属亚热带季风气候区,土地面积4 396.7 km²,人口267.3万,城镇人口占57.1%,2021年全市GDP为1 288.04亿元,第一产业占比13.6%。区域降雨丰富但季节性差异大,年际变化较大,多年平均降水量为2 146 mm,其中枯水期降水量仅占14.4%,年降水量最大值是最小值的2~3倍。汛期降水集中、枯季降水锐减、旱涝急转导致汕尾市干旱灾害频发,21世纪以来平均3~4 a遭遇一次秋冬干旱或秋冬春连旱。

3.2 供水工程体系

公平水库是汕尾市主城区生活、工业、农业灌溉的主要水源,且公平水库供水片区的供水网络体系相对独立,具有代表性。本文选取公平水库片区作为典型案例,通过调查乡镇级以上集中供水工程信息,根据供水工程体系的拓扑关系绘制关联关系网络图,如图4所示。

公平水库供水体系中有大型水库1座(公平水库),中型水库5座(赤沙水库、朝面山水库、南门水库、朝阳水库、平龙水库),小型水库1座(赤岭水库),引水灌渠59 km,灌渠灌溉面积7 600 hm²,水厂7座,覆盖15个乡镇(街道)共计83.5万人。公平水库是整个片区的主要水源,集雨面积317 km²,兴利库容1.451亿 m³,死库容1 720万 m³,死库容中

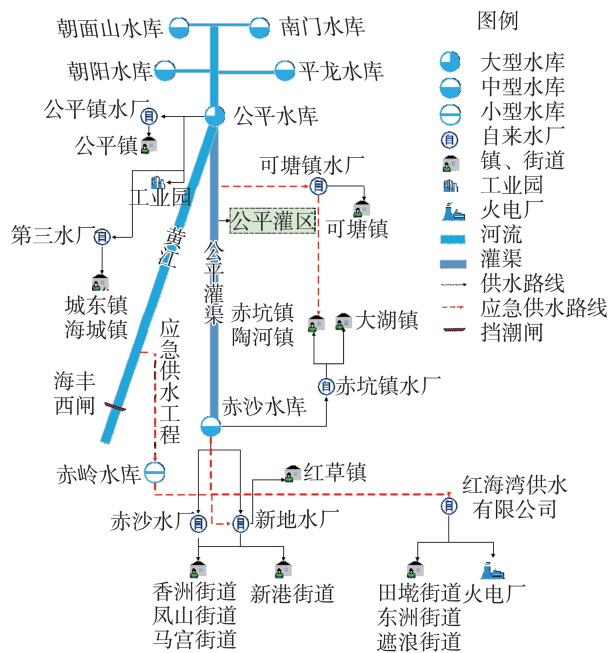


图4 公平水库片区供水工程体系网络

Fig.4 Water supply system network of Gongping Reservoir section

约1 000万 m³可通过采取应急抽水措施挖潜利用,水库通过14 km的明渠与城区的赤沙水库连通,经赤沙水库调节后向其他用户供水,公平水库还需要承担向可塘镇水厂的应急供水任务。经过公平灌渠沿程取水后,公平水库对城区月供水量按0.65利用系数推求。赤沙水库、朝面山水库、南门水库、朝阳水库、平龙水库兴利库容分别为1 017万、1 529万、1 167万、1 059万、1 165万 m³,集雨面积分别为23、13.05、12、12.85、10.6 km²。公平—赤沙供水片区主要供水对象及用水规模如表1所示,该片区生活、农业、工业、生态供水量比例为49:39:6:6。

3.3 边界条件确定

a. 初始条件。初始状态按2020年10月1日水库实际蓄水量确定。受汛期气象、水文干旱影响,汛末汕尾市水库有效蓄水率仅为30.8%,公平水库实际蓄水量为6 235万 m³,比多年平均同期偏少30%。初始条件体现了前期水文干旱对供水体系的累积影响效应。

b. 来水过程。考虑区域在连旱年份可能遭遇入汛时间推迟的情形,选取10月至次年5月作为调度期。按照最不利原则选取调度期累计降水量长系列数据中的最小值作为代表水文干旱的特枯典型年,根据蕉坑水文站1956—2021年每年10月至次年5月累积降水量长系列数据,选取1963年10月至1964年5月降雨过程,考虑水库蒸发渗漏水量损失,取综合径流系数为0.45,推求公平水库调度期入库水量过程(图5)。

表1 公平—赤沙供水片区供水对象及实际用水规模

Table 1 Water supply objects and actual water consumption scale of Gongping-Chisha water supply area

供水类型	用水对象	取水方式	设计供水量/ (t/d)	月供水量/ 万 m^3	实际用水量/ ($\text{万 m}^3/\text{d}$)
生活	新地水厂	公平水库—公平灌渠—赤沙水库—水厂	14.0	803	17.4
	赤沙水厂	公平水库—公平灌渠—赤沙水库—水厂	10.0	148	3.2
	公平镇水厂	公平水库直接取水	2.0	72	2.4
	第三水厂	公平水库直接取水	1.6	48	1.6
	可塘镇水厂	公平水库—公平灌渠—水厂	1.5	55	1.2
	赤坑镇水厂	公平水库—公平灌渠—赤沙水库—水厂	0.4	28	0.6
	红海湾供水有限公司	公平水库—公平灌渠—赤沙水库—水厂	0.5	18	0.4
工业	工业园	公平水库直接取水	1.0	42	1.4
	火电厂	公平水库—公平灌渠—赤沙水库—水厂—电厂	2.0	69	1.5
农业	公平灌区	公平水库—公平灌渠—灌区	25.0	969	21.0
生态	黄江河道	水库溢洪道		105	3.5

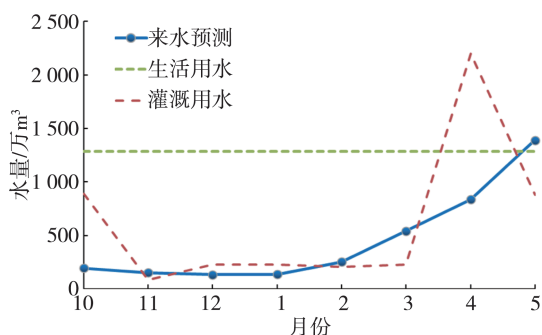


图5 公平水库 2020—2021 年调度期来水预测及生活与灌溉用水过程曲线

Fig. 5 Process curves of predicted incoming water of Gongping Reservoir and domestic and irrigation water in operation period from 2020 to 2021

c. 用水过程。灌溉用水量根据设计降水频率为 90% 时的灌区用水总量确定,按照用水计划分解得到逐月用水量,生活用水量根据 2020—2021 年实际供水量确定(图 5),公平灌渠沿程损失系数取 0.35。

d. 应急供水工程措施。经现场踏勘和方案论证,选取黄江应急引水工程作为抗旱工程具有较高可行性,施工期约 1~2 月,经赤岭水库(集雨面积 3.3 km^2 ,兴利库容 429 万 m^3)调蓄后向城区供水,初步测算枯水期可供水总量约 1000 万 m^3 。公平水库上游 4 座水库可向公平水库补水,枯水期有效补水约 500 万 m^3 。根据情景推演情况适时启用应急供水工程,直至调度期末基本生活用水得到保障,并最大限度满足其他用水需求。

e. 非工程措施。城镇集中供水采取限供轮供、停止高耗水服务业用水等阶梯式递进的用水管控措施,削减工业用水,限制农业灌溉从水库引水,按正常年份用水量的 80% 保障 4 月份的春耕用水。

3.4 模拟结果分析

根据水库实际蓄水量、特枯典型年来水过程和

用水量过程,利用系统动力学模型进行逐月水量平衡计算,判断水库可正常供水维持的时间(月数)及供水量缺口。当水库蓄水量不足以维持至调度期末时,按顺序依次启用抗旱措施并反馈至模型重新迭代计算,直至调度期末水库蓄水量大于 0 或达到预定目标值。按照正常供水方案,公平水库和赤沙水库仅能正常供水至 2021 年 1 月底(维持 4 月),至调度期末预计供水缺口为 6249 万 m^3 ,因此,需要依次采取下列措施:

a. 实施节水措施(措施 A)。采取阶梯式渐进限供节水措施,即 2020 年 10 月至 2021 年 1 月供水量按削减 10% 计算,2021 年 2—5 月按削减 15% 计算,即从 2020 年 10 月开始,模型中各月 λ_L 分别取 0.9、0.9、0.9、0.9、0.85、0.85、0.85、0.85,反馈计算后,系统可维持供水至 2021 年 2 月底(维持 5 月),调度期末预计供水缺口为 4495 万 m^3 。

b. 削减农业灌溉、工业和生态用水(措施 B)。从 2020 年 10 月开始,削减全部从水库取用的农业灌溉用水,仅 2021 年 4 月春耕用水按需水量的 80% 供给,即模型中 4 月 λ_A 取 0.8,其他各月 λ_A 均取值为 0。削减工业用水指停止工业园(敏兴、协祥盛两家工厂)从公平水库取工业用水,即模型中各月 λ_I 均取值为 0。削减生态用水指公平水库停止向黄江河道泄放生态流量,即模型中各月 λ_E 均取值为 0。以上措施叠加后可维持供水至 2021 年 3 月底(维持 6 月),预计 2021 年 4 月底将出现最大供水缺口 542 万 m^3 。

c. 启用公平水库上游 4 座水库补水(措施 C)。按有效补水 500 万 m^3 计算,模型中各月 γ_L 分别取 0、0、0、0.4、0.4、0.2、0、0,可维持供水至 2021 年 3 月底(维持 6 月),预计 2021 年 4 月底将出现最大供水缺口 42 万 m^3 ;

d. 实施黄江应急取水工程(措施 D)。按照 9

月底开工、11 月底通水计划,取水量 5 万 m³/d,即模型中各月 γ_L 分别取 0、0.1、0.1、0.1、0.1、0.1、0.1、0.1。预计 4 月底水库达到 50% 的最大破坏深度,4 月叠加公平水库的死库容挖潜利用 1 101 万 m³,可延长供水至 2021 年 5 月底(维持 8 月)。

采取不同的抗旱措施组合,公平水库蓄水量变化过程如图 6 所示,图中当纵坐标小于 0 时,采用虚线表示水库蓄水量低于死库容后水量缺口的累积量。

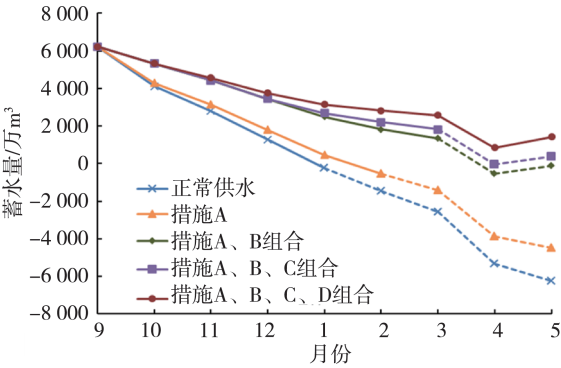


图 6 不同抗旱措施公平水库蓄水量及缺水量变化过程
Fig.6 Processes of water storage and water shortage of Gongping Reservoir with different drought resistance measures

2021 年汕尾市遭遇 1963 年以来罕见旱情,以上分析成果有效支撑了政府的抗旱决策。汕尾市政府先后采取发布节水倡议书、限制公平灌渠沿线农业灌溉取水、紧急实施黄江应急引水工程(施工 40 d 并提前完工通水)、架设 8 座抽水泵站并利用死库容做好应急准备等系列措施,有效应对了 2021—2022 年秋冬春连旱,使汕尾市在遭遇特大干旱的情况下,未出现城乡大范围缺水和重大干旱灾害损失,维护了经济社会的稳定发展。

4 结 语

本文分析了城市社会经济干旱问题及其主要特点,提出了基于供水体系模拟、抗旱措施推演的城市干旱风险调控思路,构建了城市供水网络系统动力学模型。以广东省汕尾市公平水库供水片区为典型案例,以 2020 年汛末实际水库蓄水量为初始条件,选取 1956—2021 年特枯典型年的降雨过程作为边界条件,结合实际用水需求模拟了城市供水体系中水资源存量-流量动态变化过程,推演了阶梯式渐进限节节水,削减农业灌溉、工业生产和生态用水,启用上游 4 座梯级水库补水和实施黄江应急取水工程等抗旱措施的叠加调控效果。应用实践表明,所建立的区域供水网络系统动力学模型,实现了历史特大干旱情景下城市社会经济干旱的精准推演,揭示

了从水文干旱到用水需求管控、抗旱工程协同调配与干旱灾害评估的链式传导机制,具有过程逻辑清晰、结果定量可靠等优点,形成了适用于多主体多目标区域的旱灾风险防范决策技术,可为城市干旱预测、预警、预演、预案的数字孪生模型构建提供借鉴。

参考文献:

[1] SHI Haiyuan,ZHOU Zhaoqiang,LIU Lin,et al. A global perspective on propagation from meteorological drought to hydrological drought during 1902-2014 [J]. Atmospheric Research,2022,280:106441.

[2] YILDIRIM G,RAHMAN A,SINGH V P. Meteorological and hydrological drought hazard, frequency and propagation analysis: a case study in Southeast Australia [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44:101229.

[3] 袁飞,章益棋,刘懿,等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估 [J]. 水资源保护,2021,37(1):46-52. (YUAN Fei,ZHANG Yiqi,LIU Yi,et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index [J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):46-52. (in Chinese))

[4] 曹永强,李可欣,任博,等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022,42(5):28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):28-36. (in Chinese))

[5] VAN LOON A F. Hydrological drought explained [J]. WIREs:Water,2015,2(4):359-392.

[6] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023,51(1):1-9. (in Chinese))

[7] 吕娟,高辉,孙洪泉. 21 世纪以来我国干旱灾害特点及成因分析 [J]. 中国防汛抗旱,2011,21(5):38-43. (LYU Juan,GAO Hui,SUN Hongquan. Analysis of the characteristics and causes of drought disasters in China since the 21st Century [J]. China Flood & Drought Management,2011,21(5):38-43. (in Chinese))

[8] 张林燕,郑巍斐,杨肖丽,等. 基于 CMIP5 多模式集合和 PDSI 的黄河源区干旱时空特征分析 [J]. 水资源保护, 2019, 35(6):95-99. (ZHANG Linyan, ZHENG Weifei, YANG Xiaoli, et al. Temporal-spatial characteristics of drought in source region of Yellow River based on CMIP5 multi-mode ensemble and PDSI [J].

- Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 95-99. (in Chinese))
- [9] 栗晓玲,梁箴. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 17-23. (in Chinese))
- [10] 屈艳萍, 酆建强, 吕娟, 等. 旱灾风险定量评估总体框架及其关键技术[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 297-304. (QU Yanping, LI Jianqiang, LYU Juan, et al. A quantitative framework for assessing drought disaster risk and key techniques [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 297-304. (in Chinese))
- [11] 吴志勇, 范思琦, 何海, 等. 湖南省农业干旱灾害风险区划研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 31-39. (WU Zhiyong, FAN Siqi, HE Hai, et al. Study on risk regionalization of agricultural drought disaster in Hunan Province [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 31-39. (in Chinese))
- [12] 杨扬, 安顺清, 刘巍巍, 等. 帕尔默旱度指数方法在全国实时旱情监视中的应用[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 52-57. (YANG Yang, AN Shunqing, LIU Weiwei, et al. Application of Palmer drought severity index method to real time drought survey in China [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 52-57. (in Chinese))
- [13] 邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 371-378. (ZOU Xukai, REN Guoyu, ZHANG Qiang. Drought variations in China based on a compound index of meteorological drought [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 371-378. (in Chinese))
- [14] 郝增超, 侯爱中, 张璇, 等. 干旱监测与预报研究进展与展望[J]. 水利水电技术, 2020, 51(11): 30-40. (HAO Zengchao, HOU Aizhong, ZHANG Xuan, et al. Study progresses and prospects of drought monitoring and prediction [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(11): 30-40. (in Chinese))
- [15] 王红瑞, 洪思扬, 秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 1-4. (WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 1-4. (in Chinese))
- [16] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65. (WANG Jinsong, GUO Jiangyong, ZHOU Yuewu, et al. Progress and prospect on drought indices research [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 60-65. (in Chinese))
- [17] 栗晓玲, 张更喜, 冯凯. 干旱指数研究进展与展望[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 9-18. (SU Xiaoling, ZHANG Gengxi, FENG Kai. Progress and perspective of drought index [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(5): 9-18. (in Chinese))
- [18] 刘永佳, 黄生志, 方伟, 等. 不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 93-102. (LIU Yongjia, HUANG Shengzhi, FANG Wei, et al. Propagation and dynamic change of meteorological drought to hydrological drought in different seasons [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 93-102. (in Chinese))
- [19] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 80-86. (in Chinese))
- [20] 薛联青, 白青月, 刘远洪. 人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 57-62. (in Chinese))
- [21] 周佳伟, 陈晓宏. 气象、水文和社会经济干旱的特征与响应关系[J]. 水文, 2022, 42(4): 18-22. (ZHOU Jiawei, CHEN Xiaohong. Characteristics and response relationship of meteorological hydrological and socioeconomic droughts [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(4): 18-22. (in Chinese))
- [22] 陈金凤, 傅铁. 水贫乏指数在社会经济干旱评估中的应用[J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 130-133. (CHEN Jinfeng, FU Tie. Application of water poverty index to socioeconomic drought assessment [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9): 130-133. (in Chinese))
- [23] 严登华, 王浩, 杨舒媛, 等. 干旱区流域生态水文耦合模拟与调控的若干思考[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 773-778. (YAN Denghua, WANG Hao, YANG Shuyuan, et al. Some opinions on the eco-hydrological processes simulation and regulation in arid basins [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(7): 773-778. (in Chinese))
- [24] MEHRAN A, MAZDIYASNI O, AGHAKOUCHAK A. A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: linking climate variability, local resilience, and demand [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(15): 7520-7533.
- [25] 吴志勇, 程丹丹, 何海, 等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 36-45. (in Chinese))

- Ecologica Sinica, 2008, 28 (3): 1279-1286. (in Chinese))
- [23] 谭秀娟,郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. 生态学报, 2009, 29 (7): 3559-3568. (TAN Xiujuan, ZHENG Qinyu. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (7): 3559-3568. (in Chinese))
- [24] 韩怡. 基于生态足迹的哈大齐区域土地资源可持续利用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [25] 王丽媛. 河南省水土资源承载力时空分异及其耦合特征研究[D]. 开封: 河南大学, 2019.
- [26] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用[J]. 经济地理, 2019, 39 (4): 18-25. (CONG Xiaonan. Expression and mathematical property of coupling model, and its misuse in geographical science[J]. Economic Geography, 2019, 39 (4): 18-25. (in Chinese))
- [27] 左其亭,姜龙,冯亚坤,等. 黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 1-8. (ZUO Qiting, JIANG Long, FENG Yakun, et al. Spatiotemporal variation of ecological footprint of water resources in the provinces in the Yellow River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 1-8. (in Chinese))
- [28] 刘某承,李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26 (5): 401-406. (LIU Moucheng, LI Wenhua. Calculation of equivalence factor used in ecological footprint for China and its provinces based on net primary production[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5): 401-406. (in Chinese))
- [29] 刘某承,李文华,谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592-597. (LIU Moucheng, LI Wenhua, XIE Gaodi. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 592-597. (in Chinese))
- [30] 朱晓梅,魏加华,杨海娇,等. 黄河流域城市群水资源利用效率评估及驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 153-159. (ZHU Xiaomei, WEI Jiahua, YANG Haijiao, et al. Evaluation and driving factor analysis of water resources utilization efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 153-159. (in Chinese))
- [31] 杨玉霞,闫莉,韩艳利,等. 基于流域尺度的黄河水生态补偿机制[J]. 水资源保护, 2020, 36 (6): 18-23. (YANG Yuxia, YAN Li, HAN Yanli, et al. Compensation mechanism of the Yellow River water ecology based on watershed scale[J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6): 18-23. (in Chinese))
- [32] 邓辉,何政伟,陈晔,等. 四川盆地大都市边缘区土地利用时空格局模拟: 以资阳市雁江区为例[J]. 地理科学, 2013, 33 (12): 1524-1530. (DENG Hui, HE Zhengwei, CHEN Ye, et al. The land use spatio-temporal pattern simulation in metropolitan fringe of the Sichuan Basin: a case study in Yanjian District, Ziyang City, Sichuan[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33 (12): 1524-1530. (in Chinese))
- [33] 傅春,陈炜,谢珍珍. 中部地区生态足迹的比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (11): 1397-1404. (FU Chun, CHEN Wei, XIE Zhenzhen. A comparative study of the ecological footprint of the central region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(11): 1397-1404. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-11 编辑:施业)

(上接第 69 页)

- [26] 王水寒,邱建秀,王大刚. 1960—2014 年广东省干旱时空演变特征[J]. 热带地理, 2020, 40 (2): 357-366. (WANG Shuihan, QIU Jianxiu, WANG Dagang. Spatio-temporal variation of drought in Guangdong Province from 1960 to 2014[J]. Tropical Geography, 2020, 40 (2): 357-366. (in Chinese))
- [27] 余锐,孙丽颖,张菁,等. 广东大范围持续干旱过程的识别及其环流成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2023 (3): 21-29. (YU Rui, SUN Liying, ZHANG Jing, et al. Identification of large-scale persistent droughts and analysis of circulation causes in Guangdong[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(3): 21-29. (in Chinese))
- [28] 吴志勇,林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2016, 32 (1): 51-56. (WU Zhiyong, LIN Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 51-56. (in Chinese))
- [29] 徐翔宇,刘昀竺,汪党献,等. 干旱灾害风险管理的战略思考[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 1-5. (XU Xiangyu, LIU Yunzhu, WANG Dangxian, et al. Strategic study on drought disaster risk management[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(2): 1-5. (in Chinese))
- [30] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500-521. (ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500-521. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-07 编辑:施业)