

综合缺水量最小的水资源优化配置模型及应用

穆振宇¹, 谭安琪¹, 艾学山¹, 陈森林¹, 李天庆²

¹武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉

²中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2022年5月1日; 录用日期: 2022年6月14日; 发布日期: 2022年6月29日

摘要

合理、高效地分配水资源成为水资源领域亟待解决的问题, 水资源优化配置是解决该问题的重要手段, 如何有效协调不同用水类别之间的竞争关系, 并考虑用水需求和供水能力在时间尺度上的变化情况是难点。本文提出一种流域水资源配置的综合缺水量最小优化数学模型, 即通过定义权重系数建立调度期综合缺水量最小目标函数, 并在建立约束条件时建立水库自身蒸发渗漏损失以及退水流量的计算公式, 最终联立目标函数与约束条件进行求解, 其南盘江流域的实际应用表明: 1) 权重系数的设置有效协调了各种用水类别间的竞争关系, 实现了水资源在用水配置上的最优分配, 具有很强的适用性与应用价值。2) 供水条件时间变化特性会使得系统内出现结构性缺水, 在水库蓄水期其影响较强。3) 受调度过程影响相同水库的年蒸发渗漏损失可能不同, 且损失水量占比明显, 不可忽略。

关键词

水资源配置, 缺水量最小, 权重系数, 蒸发渗漏

Optimal Water Resources Allocation Model of Minimum Comprehensive Water Shortage and Its Application

Zhenyu Mu¹, Anqi Tan¹, Xueshan Ai¹, Senlin Chen¹, Tianqing Li²

¹School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming Yunnan

Received: May 1st, 2022; accepted: Jun. 14th, 2022; published: Jun. 29th, 2022

作者简介: 穆振宇(1999-), 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源配置, Email: 1165638656@qq.com

文章引用: 穆振宇, 谭安琪, 艾学山, 陈森林, 李天庆. 综合缺水量最小的水资源优化配置模型及应用[J]. 水资源研究, 2022, 11(3): 274-285. DOI: 10.12677/jwrr.2022.113030

Abstract

Rational and efficient allocation of water resources has become an urgent problem, and the optimal water resources allocation is an important means to solve this problem. How to effectively coordinate the competitive relationship between different water use categories and consider the changes of water demand and water supply capacity in time scale is the difficult point. This paper proposes an optimal water resources allocation model to minimize the comprehensive water shortage during the operation period. The weight coefficient, calculation formulas for the evaporation leakage loss, the return flow of the reservoir, and the constraint conditions are established. The application results in the Nanpanjiang River basin shows that: 1) The setting of weight coefficient effectively coordinates the competitive relationship among various water use categories, realizes the optimal allocation of water resources in water use allocation, and has strong applicability and application value. 2) The time-varying characteristics of water supply conditions will lead to structural water shortage in the system, which has a strong impact during the impounding period of the reservoir. 3) Affected by the operation process, the annual evaporation leakage loss of the same reservoir may be different, and the proportion of water loss is obvious, which cannot be ignored.

Keywords

Water Resources Allocation, Minimum Water Shortage, Weight Coefficient, Evaporation Leakage

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受人口增长以及气候变化影响,世界范围内发生的缺水以及水质安全问题与日俱增[1][2],如何合理、高效地分配水资源成为水资源领域亟待解决的问题[3],而由于水资源优化配置能够有效解决水资源时空分布不均,来水与需水不匹配等问题,是提高水资源的综合利用效率的根本途径,在水资源配置领域具有重要的研究意义与价值[4][5]。

水资源优化配置是指在流域或特定的区域范围内,以水资源的可持续利用和经济社会可持续发展为目标,对多种可利用水资源在区域间和各用水部门间进行的合理调配[6],然而,由于流域内往往供水节点繁多,联系复杂,结构多样,如何在水资源有限甚至匮乏条件下有效协调不同用水类别之间的竞争关系,并能考虑用水需求和供水能力在时间尺度上的变化情况,是水资源优化配置模型在建模和求解过程中面对的重难点。针对此问题,郭俊等将基尼系数及纳什效率系数作为模型约束以协调供需关系[7],谭佳音和蒋大奎[8]利用高效的优先规则进行水资源优化配置,从而提高了水资源短缺地区的水资源利用效率,岳琼等[9]利用区间两阶段模型考虑来水量时空分布不均问题。上述研究从约束、建立优先规则以及模型求解角度出发,增强了水资源优化配置模型在复杂情况下的适用性,但是,改进约束和建立优先规则两种方式在实际操作中缺乏一定的灵活性,无法完全发挥水资源优化配置模型的功能,且以往研究往往仅考虑供水节点之间的联系,而忽略了供水节点自身特性(如水库蒸发渗流损失)而导致的供水能力变化,最终导致求解结果不准确、不合理。

基于上述背景,本文提出一种流域水资源配置的综合缺水量最小优化数学模型,即通过定义权重系数建立调度期综合缺水量最小目标函数,并在建立约束条件时建立水库自身蒸发渗漏损失以及退水流量的计算公式,

最终联立目标函数与约束条件进行求解，其在南盘江流域的实际应用表明，本模型有效协调了流域内不同用水类别间的竞争关系，同时兼顾供水节点自身的供水能力变化情况，具有较强的应用价值。

2. 水资源优化配置数学模型及求解方法

2.1. 目标函数

设 $y(j)$ 表示第 j 用水节点所属的用水类别， $y(j) \in [1, 6]$ 。对各用水类别缺水量设置等差权重系数(表 1)，优化准则为调度期综合缺水量最小，即目标函数为：

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_{YS}} \left[\alpha_{y(j)} \left(D_{j,t} - \sum_{i=1}^{N_{GS}} (r_{i,j}^{GY} S_{i,j,t}) \Delta T_t \right) \right] \quad (1)$$

式中： T 为调度期长度； N_{YS} 为水资源系统内的用水节点数； N_{GS} 为水资源系统内的供水节点数； $D_{j,t}$ 为第 j 用水节点在第 t 时段的需水流量， m^3/s ； $r_{i,j}^{GY}$ 为第 i 供水节点与第 j 用水节点间的拓扑关系，当第 i 供水节点向第 j 用水节点供水时其值为 1，反之为 0； $S_{i,j,t}$ 为第 i 供水节点向第 j 用水节点的供水流量， m^3/s ； $\alpha_{y(j)}$ 为第 j 用水节点所属类别对应第 $y(j)$ 用水级别的重要性系数，其对应关系见表 1。

Table 1. Importance coefficient of water use category

表 1. 用水类别的重要性系数

用水节点所属类别	用水级别	权重系数 α_n
重要生活	1_SH	6
一般生活	0_SH	5
重要工业	1_GY	4
一般工业	0_GY	3
重要农业	1_NY	2
一般农业	0_NY	1

2.2. 约束条件

约束条件分为两类，一是工程水量平衡约束，二是决策变量边界约束。

2.2.1. 水量平衡约束

由于不同节点的入流、出流等条件各不相同，本文针对不同节点类型分别建立水量平衡关系约束。

1) 水库、水闸的入库流量为：

$$Q_{i,t}^{in} = Q_{i,t}^J + \sum_{j \in \bar{\Omega}_i^{GG}} Q_{j,t}^{out} + \sum_{j \in \bar{\Omega}_i^{YG}} Q_{j,t}^U \quad (2)$$

式中： $Q_{i,t}^{in}$ 为第 i 水库(闸) t 时段的入库流量， m^3/s ； $Q_{i,t}^J$ 为第 i 水库(闸) t 时段上游的区间流量， m^3/s ； $Q_{j,t}^{out}$ 为第 i 水库(闸) t 时段上游第 j ($j \in \bar{\Omega}_i^{GG}$) 供水节点的出流流量， m^3/s ； $Q_{j,t}^U$ 为第 j 用水节点 t 时段的退水流量， m^3/s 。如果给定第 j 用水节点的退水系数为 α_j ，则退水流量 $Q_{j,t}^U = \alpha_j Q_{j,t}^Y$ ；如果考虑滞时，比如 2 个时段滞时(分别为 $\beta_{j,1}$ 、 $\beta_{j,2}$)，则相邻 2 个时段的退水流量分别为 $Q_{j,t}^U = \alpha_j \beta_{j,1} Q_{j,t}^Y$ 、 $Q_{j,t+1}^U = \alpha_j \beta_{j,2} Q_{j,t}^Y$ 。

2) 供水节点水量平衡约束

水库水量平衡约束由五部分构成，一是水库入流量，二是水库出流量，三是水库供水量，四是水库蓄水变化量，五是渗漏及蒸发损失量，水量平衡约束如下：

$$\begin{cases} V_{i,t} = V_{i,t-1} + \left(Q_{i,t}^{in} - Q_{i,t}^{out} - \sum_{j \in \Omega_i^{GY}} Q_{i,j,t}^{DG} - Q_{i,t}^{SL} - Q_{i,t}^{ZF} \right) \cdot \Delta T_t \times 10^{-4} \\ Q_{i,t}^{SL} = \beta_i \frac{V_{i,t-1} + V_{i,t}}{2} \\ Q_{i,t}^{ZF} = \gamma_{i,t} \frac{A_{i,t-1} + A_{i,t}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $V_{i,t-1}$ 、 $V_{i,t}$ 分别为第*i*水库*t*时段始、末兴利蓄水量， 10^4 m^3 ； $Q_{i,t}^{out}$ 为第*i*水库*t*时段的出库流量， m^3/s ； $Q_{i,j,t}^{DG}$ 为*t*时段第*i*水库供给第*j*用水节点的供水流量， m^3/s ； $Q_{i,t}^{SL}$ 、 $Q_{i,t}^{ZF}$ 为第*i*水库*t*时段的渗漏损失、蒸发损失， m^3/s ； β_i 、 $\gamma_{i,t}$ 为第*i*水库的渗漏损失系数、蒸发损失系数， 10^{-4} s^{-1} ； $A_{i,t-1}$ 、 $A_{i,t}$ 分别为第*i*水库*t*时段始、末水库水面面积， 10^4 m^2 。

水闸水量平衡约束：不需考虑蓄水变化量以及渗漏及蒸发损失量，流向下游的出闸流量加供水流量应该等于入闸总流量：

$$Q_i^{out} + \sum_{j \in \Omega_i^{GY}} Q_{i,j,t}^{DG} = Q_i^{in} \quad (4)$$

其中水回用工程水量平衡：流向下游河道的流量加供水流量应该等于用水量乘以回收系数：

$$\sum_{j \in \Omega_i^{GG}} Q_{j,t}^{out} + \sum_{j \in \Omega_i^{GY}} Q_{i,j,t}^{DG} = \sum_{j \in \Omega_i^{YG}} \lambda_j Q_{j,t}^Y \quad (5)$$

式中： λ_j 为第*j*用水节点的中水回用比例。

3) 用水节点供需水量平衡约束

用水节点水量平衡约束为：

$$Q_{i,t}^Y = \sum_{j \in \Omega_i^{GY}} Q_{j,i,t}^{DG} \leq D_{i,t} \quad (6)$$

2.2.2. 边界约束

1) 水库库容上下边界约束为：

$$0 \leq V_{i,t} \leq V_{i,t}^{\max} \quad (7)$$

式中： $V_{i,t}^{\max}$ 为第*i*水库*t*时段最大兴利库容， 10^4 m^3 。

2) 水库及水闸下泄流量上下边界约束为：

$$Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t}^{out} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad (8)$$

式中： $Q_{i,t}^{\min}$ 为第*i*水库或水闸*t*时段的最小下泄流量，即生态流量， m^3/s ； $Q_{i,t}^{\max}$ 为第*i*水库*t*时段允许的最大下泄流量， m^3/s 。

3) 单一管道供给流量边界约束为：

$$0 \leq Q_{i,j,t}^{DG} \leq Q_{i,j}^{DGMAX} \quad (9)$$

式中： $Q_{i,j}^{DGMAX}$ 为第*i*供水节点供给第*j*用水节点的流量上限， m^3/s 。

4) 复合管道复合流量边界约束为：

$$0 \leq \sum_{i, j \in \Omega_k^{GD}} Q_{i,j,t}^{DG} \leq \overline{Q}_k^{DGMAX} \quad (10)$$

式中： Ω_k^{GD} 为第*k*复合管道包含的所有供水-用水节点序号集合； \overline{Q}_k^{DGMAX} 为第*k*复合管道的输水流量上限，

m³/s。

2.3. 数学模型求解方法

式(1)~(10)所组成的优化数学模型属于典型的线性规划模型，可以利用相关商业软件进行求解，且能求得全局最优解。

3. 实例

3.1. 研究概况

南盘江发源于云南省曲靖市乌蒙山，经贵州省兴义市至广西红水河，是珠江的组成部分之一，其上游用水可分为农业、城镇、工业三类，为满足用水需求，需从临近的黑滩河流域进行调水。黑滩河为牛栏江右岸一级支流，属金沙江流域牛栏江水系，河道全长 35.8 km，其中黑滩河水库为流域内最大水库，水库总库容 13,500 m³，坝高 52 m，输水工程全长约 18.728 km，是主要供水节点之一，其蓄水对保障枯水年供水，减少供水破坏时间，降低破坏深度具有重要影响，对应流域网络节点图以及各类用水、供水节点如图 1 所示：

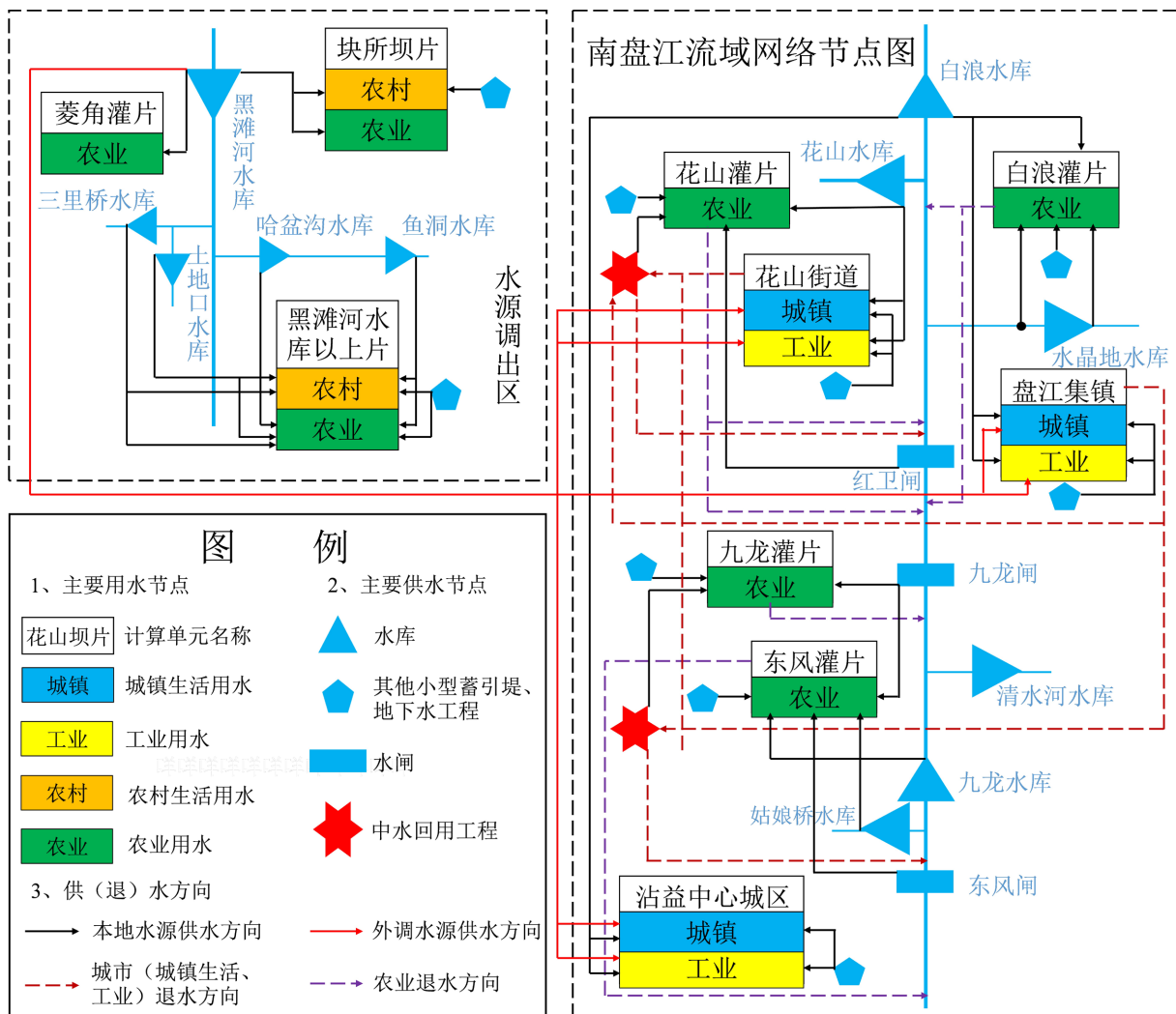


Figure 1. Network node diagram of Nanpanjiang River basin and water source transfer out area

图 1. 南盘江流域及水源调出区网络节点图

3.2. 系统优化求解及成果分析

3.2.1. 模型计算结果及比较

应用以上优化数学模型，采用线性规划方法进行求解，可得到各用水类别的空间分配结果，为便于比较，记无权重系数模型为 A1，有权重系数(本方法)模型为 A2，其计算结果见表 2：

Table 2. Calculation results of each model with or without weight coefficient

表 2. 有无权重系数时各模型计算结果

用水节点名称	用水级别	总需水量 (万 m ³)	模型 A1		模型 A2	
			总缺水量(万 m ³)	缺水率(%)	总缺水量(万 m ³)	缺水率(%)
黑滩河水库以上片 - 农业	0_NY	784.913	49.02	6.25	364.18	46.40
块所坝片 - 农业	0_NY	177.202	4.32	2.44	131.12	74.00
花山灌片 - 农业	0_NY	2095.120	0	0	0	0
九龙灌左片 - 农业	0_NY	346.031	0	0	0	0
九龙灌右片 - 农业	0_NY	151.661	0	0	0	0
东风灌左片 - 农业	0_NY	1320.689	0	0	0	0
东风灌右片 - 农业	0_NY	482.587	0	0	0	0
菱角灌片 - 农业	1_NY	202.955	14.29	7.04	35.82	17.65
白浪灌片 - 农业	1_NY	1809.402	0	0	0	0
盘江集镇片 - 工业	0_GY	197.376	26.71	13.53	13.36	6.77
花山街道片 - 工业	0_GY	4433.029	369.72	8.34	369.73	8.34
沾益中心城区片 - 工业	1_GY	2606.033	330.12	12.67	0	0
黑滩河水库以上片 - 农村	0_SH	114.874	9.45	8.23	0	0
块所坝片 - 农村	0_SH	114.874	9.17	7.99	0	0
盘江集镇片 - 城镇	1_SH	403.568	61.53	15.25	0	0
花山街道片 - 城镇	1_SH	301.291	22.71	7.54	0	0
沾益中心城区片 - 城镇	1_SH	2774.470	0	0	0	0
总计	-	18316.075	897.04	-	914.21	-

由上表可以得出，尽管在总缺水量上模型 A2 (914.21 万 m³)比模型 A1 (897.04 万 m³)多缺水 17.17 万 m³ (1.91%)，但是，从破坏的用水类别数进行分析，模型 A1 的 6 个用水类别中有 10 个用水节点存在缺水，而模型 A2 只有 3 个用水类别中的 5 个用水节点存在缺水，且模型 A2 中权重系数较大的工业用水和生活用水较于模型 A1 缺水比例大幅度减少，代价为权重系数较小的农业用水缺水量增多。

3.2.2. 结构性缺水原因分析

结构性缺水指由水资源系统供需结构引起的，在用水级别较低的用水户还没全部破坏时，用水级别相对较高的用水户已经破坏的情况[10][11]。由表 2 得知，模型 A2 中用水节点基本按照破坏次序进行缺水，但在农业类用水节点没有全部破坏的情况下，两个一般工业类用水节点(盘江集镇片 - 工业、花山街道片 - 工业)和一个重要农业节点(菱角灌片 - 农业)存在破坏，这三个用水节点的供水情况见表 3，缺水原因分析如下：

Table 3. Water supply of general industrial and important agricultural water nodes with water shortage in model A2 (m³/s)
表 3. 模型 A2 中存在缺水的一般工业和重要农业用水节点供水情况(m³/s)

时段	盘江集镇片 - 工业			花山街道片 - 工业			菱角灌片 - 农业	
	缺水流量	供水节点		缺水流量	供水节点		缺水流量	供水节点
		白浪水库	黑滩河水库		花山水库	黑滩河水库		
1	0	0.0499	0	0	0.0557	1.3147	0	0.0804
2	0	0.0552	0	0.0111	0.0693	1.4368	0	0.11324
3	0	0.0499	0	0	0	1.3704	0	0.1347
4	0	0.0515	0	0	0	1.4161	0	0.1135
5	0	0	0.0499	0	0	1.3704	0	0.1425
6	0	0	0.0515	0	1.1268	0.2892	0	0.0377
7	0	0	0.0499	0	0.6124	0.7580	0	0.0084
8	0	0	0.0499	0	0.2794	1.0910	0	0.0080
9	0	0.0515	0	0	0.3739	1.0421	0	0.0014
10	0	0.0499	0	0.00002	0.2695	1.1008	0	0
11	0	0	0.0515	0	0.5662	0.8499	0.0831	0
12	0.0499	0	0	1.3704	0	0	0.05335	0

由表 3 可得缺水时段主要集中在 11 月与 12 月，这是由于为了将水库续至目标库容，向上述用水节点供水的白浪水库、黑滩河水库与花山水库降低了供水流量而转向用于蓄水(水库详细调度过程图见图 2~4)，因此上述节点在 11 月、12 月的缺水是合理的。

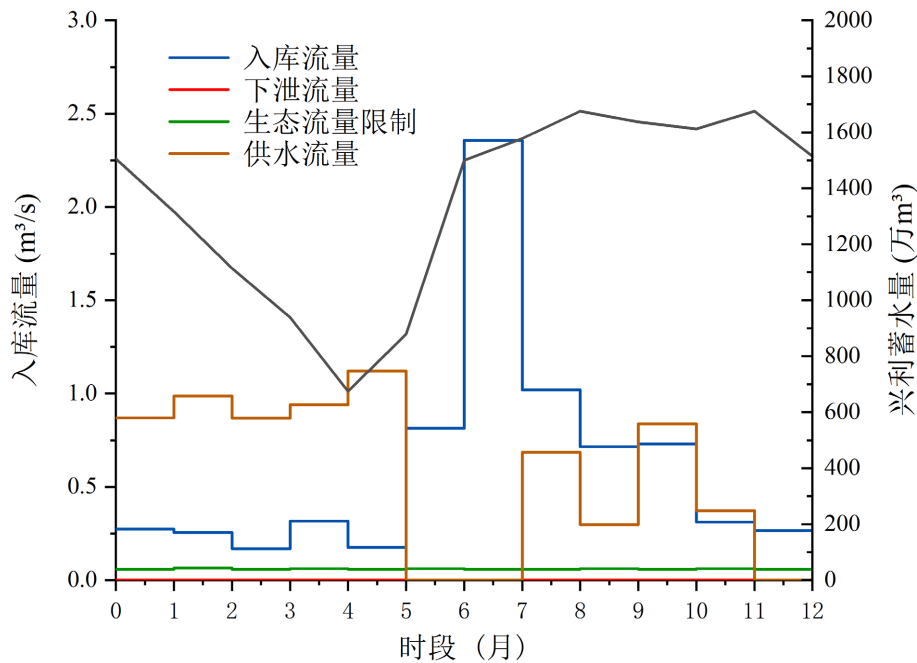


Figure 2. Model A2 operation process at the Bailang Reservoir
图 2. 白浪水库模型 A2 的调度过程

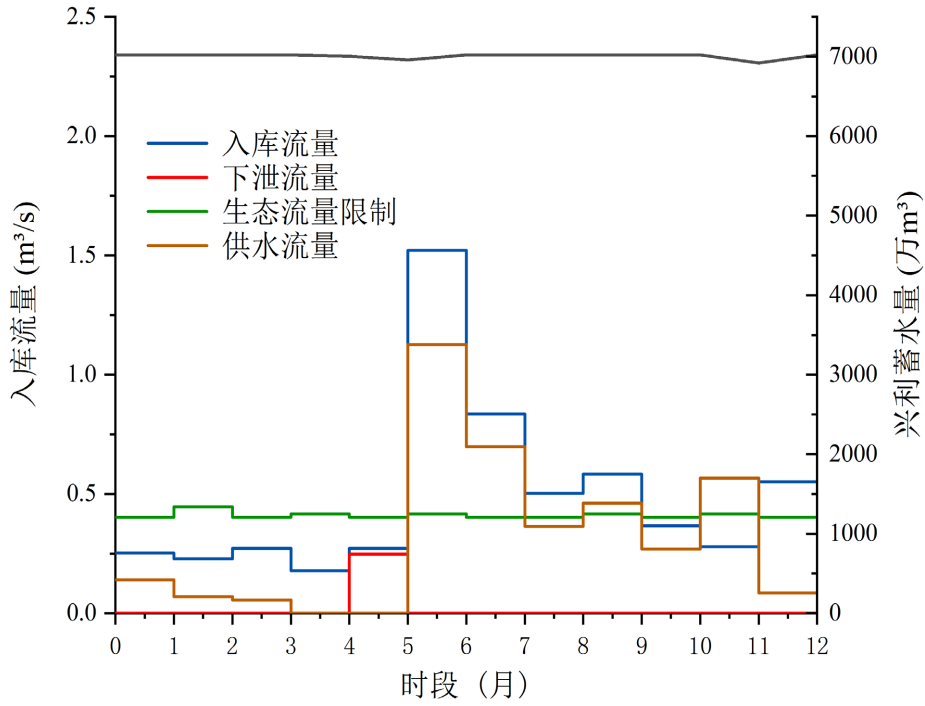


Figure 3. Model A2 operation process at the Huashan Reservoir
图 3. 花山水库模型 A2 调度过程

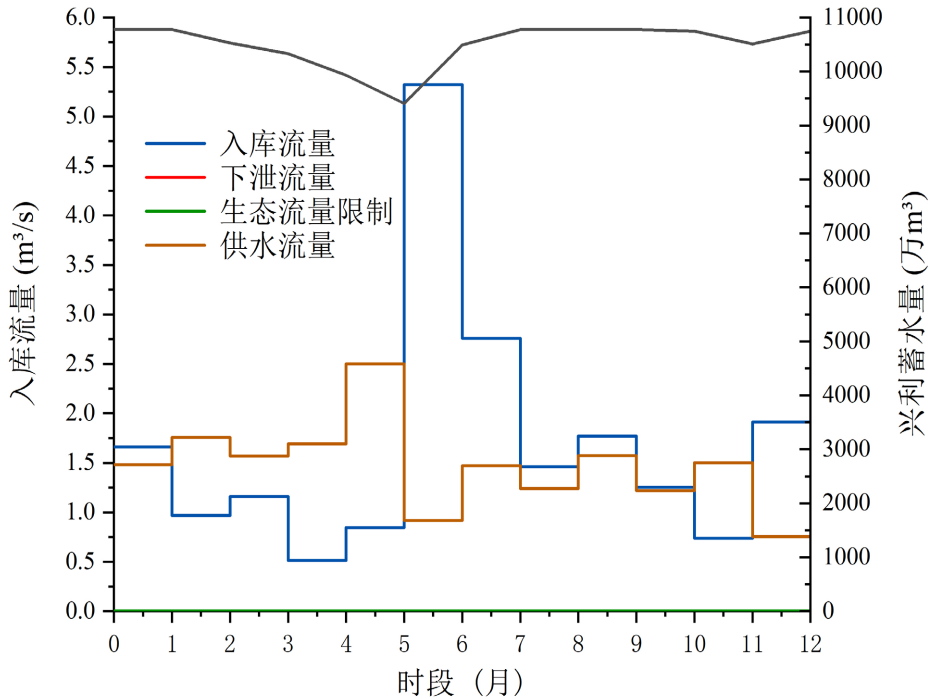


Figure 4. Model A2 Heitanhe Reservoir operation process
图 4. 模型 A2 黑滩河水库调度过程

3.2.3. 蒸发渗漏损失计算结果及分析

水资源配置系统内各水库的蒸发渗漏损失水量见表 4:

Table 4. Comparison of annual evaporative leakage loss water volume of reservoir (10^4 m^3)
表 4. 水库年蒸发渗漏损失水量对比(10^4 m^3)

	模型 A1	模型 A2	差值
白浪	118.91	127.96	9.05
花山	463.56	463.26	-0.30
水晶地	13.39	13.39	0.00
清水沟	45.92	45.92	0.00
九龙	0.00	0.00	0.00
姑娘桥	26.08	26.19	0.11
哈盆沟	5.28	6.28	1.00
鱼洞	40.12	42.11	1.99
三里桥	11.14	14.32	3.17
土地口	5.74	5.59	-0.16
黑滩河	715.08	717.38	2.30
合计	1445.23	1462.40	17.17

可见模型 A2 (1462.40 万 m^3)比模型 A1 (1445.23 万 m^3)多损失 17.17 万 m^3 ，这是由水库蓄(或泄和供水)过程不同而产生的，其中白浪水库调度过程与三里桥水库调度过程见图 5。

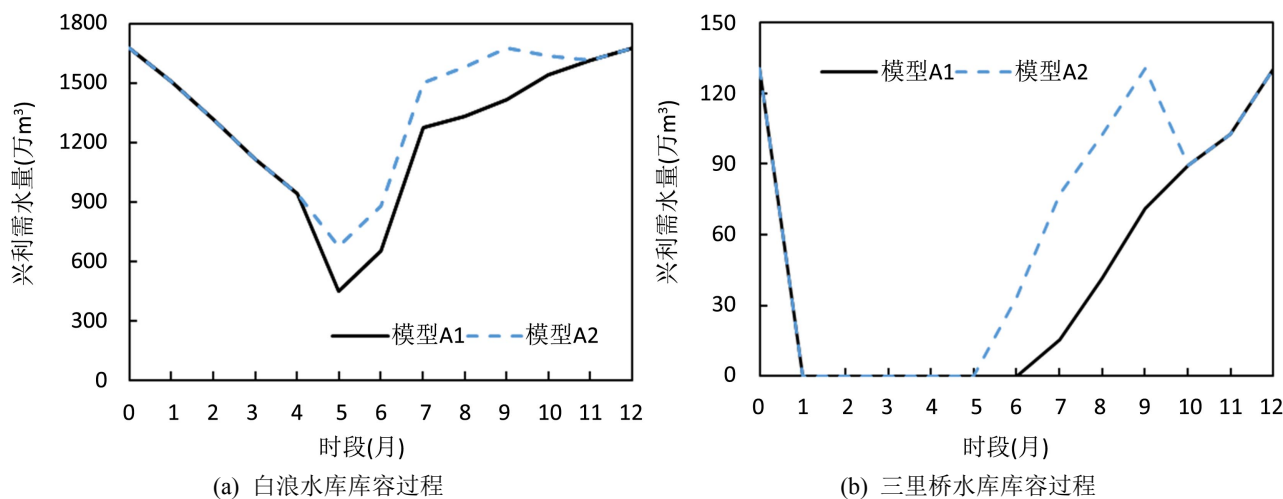


Figure 5. Dispatching process at the Bailang and Sanliqiao Reservoirs
图 5. 白浪水库与三里桥水库调度过程

3.2.4. 不同权重系数设置分析

对各用水类别缺水量设置不同权重系数(见表 5)，在三个模型下分别进行水资源优化配置的计算结果见表 6。

Table 5. Weighting coefficients of different models
表 5. 不同模型权重系数

用水级别	权重系数 α		
	模型 B1	模型 B2	模型 B3
1_SH	6	100	100
0_SH	5	100	100
1_GY	4	100	20
0_GY	3	100	10
1_NY	2	10	2
0_NY	1	1	1

Table 6. Calculation results of models with different weighting coefficients
表 6. 权重系数不同时各模型计算结果

用水节点编码单位	用水级别	总需水量 (万 m ³)	模型 B1		模型 B2		模型 B3	
			总缺水量 (万 m ³)	缺水率(%)	总缺水量 (万 m ³)	缺水率(%)	总缺水量 (万 m ³)	缺水率(%)
黑滩河水库以上片 - 农业	0_NY	784.913	364.18	46.40	364.18	46.40	364.18	46.40
块所坝片 - 农业	0_NY	177.202	131.12	74.00	131.12	74.00	131.12	74.00
花山灌片 - 农业	0_NY	2095.120	0	0	0	0	0	0
九龙灌左片 - 农业	0_NY	346.031	0	0	0	0	0	0
九龙灌右片 - 农业	0_NY	151.661	0	0	0	0	0	0
东风灌左片 - 农业	0_NY	1320.689	0	0	0	0	0	0
东风灌右片 - 农业	0_NY	482.587	0	0	0	0	0	0
菱角灌片 - 农业	1_NY	202.955	35.82	17.65	35.82	17.65	35.82	17.65
白浪灌片 - 农业	1_NY	1809.402	0	0	0	0	0	0
盘江集镇片 - 工业	0_GY	197.376	13.36	6.77	13.36	6.77	13.36	6.77
花山街道片 - 工业	0_GY	4433.029	369.73	8.34	191.03	4.31	369.73	8.34
沾益中心城区片 - 工业	1_GY	2606.033	0	0	162.25	6.23	0	0
黑滩河水库以上片 - 农村	0_SH	114.874	0	0	7.24	6.30	0	0
块所坝片 - 农村	0_SH	114.874	0	0	9.17	7.99	0	0
盘江集镇片 - 城镇	1_SH	403.568	0	0	0	0	0	0
花山街道片 - 城镇	1_SH	301.291	0	0	0	0	0	0
沾益中心城区片 - 城镇	1_SH	2774.470	0	0	0	0	0	0
总计	-	18316.075	914.21	-	914.18	-	914.21	-

由表 6 可以分析, 模型 B1 (914.21 万 m³)和模型 B3 缺水量相同, 且两者均比模型 B2 (914.18 万 m³)多缺水 0.03 万 m³ (0.003%), 而模型 B1 和模型 B3 只有 3 个用水类别中的 5 个用水节点存在缺水。模型 B2 由于生活类和工业类用水节点的权重系数相同, 从而将原本在模型 B1 和模型 B3 中只存在于一般工业节点(花山街道片 - 工业)的缺水量分摊到了重要工业和一般生活用水节点中。

从蒸发渗漏损失水量方面进行比较,模型 B1 和模型 B3 (1462.40 万 m³)比模型 B2 (1462.37 万 m³)多损失 0.03 万 m³ (见表 7), 这是由水库蓄水过程不同造成的水量损失。

Table 7. Comparison of annual evaporative leakage loss water volume of reservoir based on different weighting coefficients (10⁴ m³)
表 7. 不同权重系数条件下水库年蒸发渗流损失水量(10⁴ m³)

	模型 B1 (B3)	模型 B2	差值
白浪	127.96	127.96	0
花山	463.26	463.58	0.32
水晶地	13.39	13.39	0
清水沟	45.92	45.92	0
九龙	0.00	0.00	0
姑娘桥	26.19	26.19	0
哈盆沟	6.28	6.28	0
鱼洞	42.11	42.11	0
三里桥	14.32	14.32	0
土地口	5.59	5.59	0
黑滩河	717.38	717.04	-0.34
合计	1462.40	1462.37	-0.03

4. 结论

本文首先定义权重系数建立调度期综合缺水量最小目标函数,并在建立约束条件时建立水库自身蒸发渗漏损失以及退水流量的计算公式,最终联立目标函数与约束条件进行求解,通过在南盘江流域的实际应用,可得出如下结论:

- 1) 权重系数的设置有效协调了各种用水类别间的竞争关系,实现了水资源在用水配置上的最优分配,具有很强的适用性与应用价值。
- 2) 供水条件时间变化特性会使得系统内出现结构性缺水,在水库蓄水期其影响较强。
- 3) 受调度过程影响相同水库的年蒸发渗漏损失可能不同,且损失水量占比明显,不可忽略。

基金项目

云南省重点研发计划“水资源高效开发利用和水环境保护关键技术与管理决策支持系统研究”(2019BC002); 国家自然科学基金项目(51779177)。

参考文献

- [1] MOGHADAM, S. H., ASHOFTEH, P. S. and LOÁICIGA, H. A. Optimal water allocation of surface and ground water resources under climate change with WEAP and IWOA modeling. *Water Resources Management*, 2022, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03195-0>
- [2] HUANG, Y., CAI, Y., XIE, Y., ZHANG, F., HE, Y., ZHANG, P., LI, B., LI, B., JIA, Q., WANG, Y. and QI, Z. An optimization model for water resources allocation in Dongjiang River basin of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under multiple complexities. *Science of the Total Environment*, 2022, 820: 153198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153198>
- [3] 姜秋香, 何晓龙, 王子龙, 吴云星. 基于区间多阶段随机规划模型的黑龙江省水资源优化配置研究[J/OL]. *水利水电科技进展*, 2022: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1439.tv.20220520.1411.002.html>, 2022-06-07. JIANG Qiuxiang, HE Xiaolong, WANG Zilong and WU Yunxing. Optimal allocation of water resources based on interval

- multi-stage stochastic programming model in Heilongjiang Province. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1439.tv.20220520.1411.002.html>, 2022-06-07. (in Chinese)
- [4] 何艳虎, 陈晓宏, 林凯荣, 吴孝情, 桂发亮. 东江流域水资源优化配置报童模式研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(6): 57-64.
HE Yanhu, CHEN Xiaohong, LIN Kairong, WU Xiaoqing and GUI Faliang. Newsboy model of water resources allocation and its application in Dongjiang basin. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(6): 57-64. (in Chinese)
- [5] 伍鑫, 陈植欣, 温庆博, 王忠静, 胡黎明. 基于强化学习的非常规水资源优化配置模型[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(7): 23-31.
WU Xin, CHEN Zhixin, WEN Qingbo, WANG Zhongjing and HU Liming. Optimal allocation model of unconventional water resources based on reinforcement learning. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(7): 23-31. (in Chinese)
- [6] 吴泽宁, 索丽生. 水资源优化配置研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2004(2): 1-5.
<https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2004.02.001>
WU Zening, SUO Lisheng. Advance on water resources optimal allocation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004(2): 1-5. <https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2004.02.001> (in Chinese)
- [7] 郭毅, 陈璐, 周建中, 周清, 李杰, 娄思静. 基于均衡发展的郁江流域水资源优化配置[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(3): 42-45.
GUO Yi, CHEN Lu, ZHOU Jianzhong, ZHOU Qing, LI Jie and LOU Sijing. Optimal allocation of water resources in Yujiang river basin based on balanced development. *Water Resources and Power*, 2020, 38(3): 42-45. (in Chinese)
- [8] 谭佳音, 蒋大奎. 基于水资源合作的水资源短缺区域水资源优化配置[J]. *系统管理学报*, 2020, 29(1): 118.
TAN Jiayin, JIANG Dakui. Optimal allocation of water resources in water stressed regions based on water resources cooperation among water using sectors. *Journal of Systems & Management*, 2020, 29(1): 118. (in Chinese)
- [9] 岳琼, 郭萍, 王友芝, 张成龙, 李鹏. 基于区间两阶段模糊可信性约束模型的灌区水资源配置[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 228-235.
YUE Qiong, GUO Ping, WANG Youzhi, ZHANG Chenlong and LI Peng. Optimal water allocation of irrigation district based on interval-parameter two-stage stochastic fuzzy credibility constrained programming. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 228-235. (in Chinese)
- [10] 孔祥铭. 基于 Copula 分析的水资源系统风险评估与管理方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2016.
KONG Xiangming. Development of Copula-based approaches for water resources systems risk assessment and management. Ph.D. Thesis, Beijing: North China Electric Power University, 2016. (in Chinese)
- [11] 阮本清, 韩宇平, 王浩, 蒋任飞. 水资源短缺风险的模糊综合评价[J]. *水利学报*, 2005(8): 906-912.
RUAN Benqing, HAN Yuping, WANG Hao and JIANG Renfei. Fuzzy comprehensive assessment of water shortage risk. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005(8): 906-912. (in Chinese)