

Multi-Objective Optimal Allocation of Water Resources in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River Basin

Jing Tian¹, Shenglian Guo^{1#}, Dedi Liu¹, Xingjun Hong^{1,2}, Shaokun He¹, Le Wang^{1,2}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan Hubei

Email: #slguo@whu.edu.cn

Received: Apr. 22nd, 2018; accepted: May 9th, 2018; published: May 16th, 2018

Abstract

Combined with the principles of efficiency, fairness and sustainability in the water resources allocation, a multi-objective water resources optimal allocation model is proposed and applied in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin. Taking economic, social and environment benefits as the objective functions, the non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) is used to optimize the allocation model. The years of 2010 and 2030 are selected as the baseline and planning level year, respectively. Based on the long-term historical runoff data from 1956 to 2011 and the water demand prediction in the planning level year, the optimal distribution is achieved by setting up the reservoir operation rules, water user priority and other variables. In the Pareto solutions, three indices of water shortage, economic benefit and pollutant discharge are compared and analyzed under different typical schemes, which indicates that the results are reasonable and applicable. This study can provide scientific basis for water resources planning and management in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin, which help decision-makers achieve more efficient and accurate water resources allocation.

Keywords

Water Resources, Multi-Objective, Optimal Allocation, NSGA-II, Hanjiang River

汉江中下游地区水资源多目标优化配置

田晶¹, 郭生练^{1#}, 刘德地¹, 洪兴骏^{1,2}, 何绍坤¹, 王乐^{1,2}

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉

#通讯作者: 郭生练, 二级教授, 研究方向: 水文水资源, Email: slguo@whu.edu.cn

文章引用: 田晶, 郭生练, 刘德地, 洪兴骏, 何绍坤, 王乐. 汉江中下游地区水资源多目标优化配置[J]. 水资源研究, 2018, 7(3): 223-235. DOI: 10.12677/jwrr.2018.73025

摘要

本文结合水资源配置过程中的有效性、公平性和可持续性原则,以社会、经济和生态效益为目标,构建了汉江中下游地区水资源多目标优化配置模型,并应用第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型进行求解。以2010年为现状水平年,2030年为规划水平年,采用1956~2011年的长系列历史径流资料和规划水平年需水预测的数据为基础,通过对水库运行规则和用水户优先级等变量的控制,实现汉江中下游地区的优化配置。在得到的最优Pareto解集中,选取不同的典型方案,对缺水量、经济效益和污染物排放量3个指标进行了对比分析。结果表明:该模型得到的水资源优化配置结果是合理可行的。研究结果可以为汉江中下游地区的水资源规划管理提供科学合理的依据,帮助决策者实现更高效和准确的水资源优化配置。

关键词

水资源, 多目标, 优化配置, NSGA-II, 汉江

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

目前以行政管理手段为主的传统水资源管理方法,不仅带来资源配置效率低以及用水严重浪费等诸多问题,而且难以及时调节区域间、行业间及社会经济与生态环境间的用水矛盾[1]。2011年中央一号文件指出,到2020年“基本建成水资源合理配置和高效利用体系”,实行最严格水资源管理的“三条红线”,实行人均用水量控制、用水效率控制和水功能区限制纳污控制。因此,寻求生态环境、社会和经济等多属性视野下有限水资源量的最优分配方式,使得区域整体上满足最严格水资源管理制度的要求,是水资源优化配置亟待解决的问题之一。

针对水资源优化配置问题,很多学者已进行了大量的研究。韩雁等[2]通过分析水资源系统的复杂性与不确定性,提出了基于区间不确定条件下的水资源复杂系统协调演化分析方法;王峰等[3]利用基于区间数的可能度不确定转换方法将配置模型转换为一个两层嵌套优化模型;刘德地等[4]从最严格水资源管理的考核要求出发,分析了目前水资源优化配置研究面临的技术问题与挑战,并针对动态的水资源优化配置模型结构、求解算法和方案评价等方面提出了对策和建议;洪兴骏等[5]通过将供水风险分析纳入水资源综合管理模型,来评估变化供需环境下的区域供水安全问题。此外,灰色理论[6]、大系统理论[7][8]和智能优化算法[9][10]等理论和方法也已应用到水资源优化配置中。纵观现有的水资源优化配置模型研究,虽然已经具备良好的理论依据,但在实际应用的过程中,很多研究都将配置中不确定的多目标问题转化为单目标问题进行求解,配置的结果在很大程度上受初始值和权重系数等人为因素的影响,且不能够为水资源管理部门提供可操作性强的灵活决策方案。

汉江流域是长江中游最大的支流,是国家水资源配置的重要战略水源地。但是,近年来汉江流域水资源开发利用和水生态环境保护现状却令人担忧。尽管流域的水资源量比较丰富,但降水量时空分布不均匀。并且随着人口和经济的快速增长,需水量不断增加,加之南水北调中线工程等跨流域调水工程的实施,汉江中下游地

区也面临着水资源缺乏问题。因此,研究汉江流域的水资源优化配置问题,是汉江流域实施最严格的水资源管理制度的迫切需求。

本文以社会、生态和经济的直接效益为目标,构建了一个考虑多目标协同优化的汉江中下游地区水资源配置模型。通过 NSGA-II 算法对不同水平年的水资源量进行优化求解,寻求使每一个子区域分得的水量均在流域整体的经济、社会、生态效益可接受的范围内,适合流域整体水资源可持续发展的帕累托最优解集,以为为管理部门提供针对性的决策依据和灵活的选择方案,同时也为解决流域缺水问题和水资源的合理配置提供科学合理的依据。

2. 研究方法

本文的研究方法包括两部分:1) 需水预测模型。采用指标分析法来预测不同水平年下各用水部门的需水量;2) 水资源优化配置模型。在模型中,将社会、经济、生态三个规划目标统筹考虑,采用 NSGA-II 算法得到区域水量配置的 Pareto 最优解集。具体的模型框架如图 1 所示。

2.1. 需水预测模型

本文以 2010 年为现状水平年,以 2030 年为规划水平年,基础数据主要来自《汉江流域综合规划》(下称《规划》)及《2010 年湖北省水资源公报》(下称《公报》)相关成果。首先以《公报》相关数据对现状水平年的用水指标进行校核和修正,进而对规划水平年的用水指标及定额进行预测。

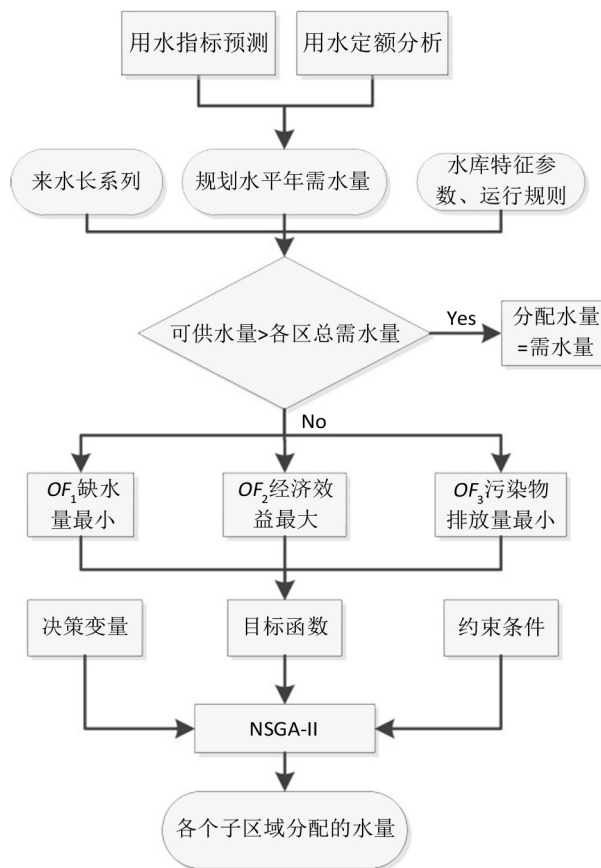


Figure 1. Framework of the water resources optimal allocation model

图 1. 水资源优化配置模型框架

各计算分区的用水部门分为：生活用水(含河道外环境用水)、工业用水、农业灌溉 3 种河道外需水和河道内生态用水共 4 类。

采用定额法[11]对河道外需水量进行估算，计算方法如下：

$$WD_{i,j}^t = q_{i,j}^t \cdot A_{i,j}^t \quad (1)$$

式中： $WD_{i,j}^t$ 为规划水平年第 i 计算分区的第 j 用水部门的需水量， m^3 。 $q_{i,j}^t$ 为规划水平年第 i 计算分区的第 j 用水部门的用水定额，对于生活、工业和农业灌溉用水，分别指人均生活用水定额(L/人)、万元工业增加值用水量($\text{m}^3/\text{万元}$)、农业灌溉综合定额($\text{m}^3/\text{亩}$)。 $A_{i,j}^t$ 为规划水平年第 i 计算分区的第 j 用水部门的用水户数，对于生活用水、工业生产用水和农业生产用水，分别指常住人口(人)、万元工业增加值(万元)和灌溉面积(亩)。

特别地，对于农业灌溉需水，由于其与当年气候条件密切相关，天然降水越多，则需要从河道中取用的灌溉水量就越少。水资源规划中常采用特定来水频率下的定额来表示(如 50%、75%、90%和 95%等)，但这不能反映每一种来水频率下灌溉需水的波动情况。本文以《规划》中复核的各地区基准和未来水平年下特定来水频率下的农业需水数据为基础，按 1956~2011 年各地区实际参考作物需水量与 4 种特定来水频率(50%、75%、90%和 95%)下参考作物需水量的比例关系倒推每一来水频率下的农业灌溉需水量。参考作物需水量 ET_0 主要反映气象因素(气温、湿度、日照时数和风速等)对作物需水量的影响，采用联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 方程[12]计算，公式如下：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中： R_n 为作物表面净辐射量， $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ； G 为土壤热通量， $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ； γ 为干湿表常数， $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ； T 为日平均气温， $^\circ\text{C}$ ； u_2 为地面以上 2m 高处的风速， m/s ； e_a 为饱和水汽压， kPa ； e_d 为实际水汽压， kPa ； Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率， $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ 。

河道内生态需水量的估算采用 Tennant 法[13]，通过多年平均径流量乘以维持河流正常功能需求的最小生态流量的百分比来计算。以月为计算步长，生活和工业的需水过程均不受季节影响，因此都是由年需水总量平均分配到每个月份；农业灌溉和河道内生态的月需水数据则通过年需水量乘以各个月份的分配系数得到，分配系数以《规划》报告提供的数据为准。

2.2. 水资源优化配置模型

2.2.1. 目标函数

分目标 1：缺水量最小

$$\min f(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (WD_{i,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (3)$$

式中： $t(t=1,2,3,\dots,T=12)$ 为月份； $i(i=1,2,3,\dots,n=28)$ 为计算分区； $j(j=1,2,\dots,m=4)$ 为用水部门； $x_{i,j}^t$ 为决策变量，表示在第 t 月份分配到第 i 计算分区的第 j 用水部门的水量， 万 m^3 ； $WD_{i,j}^t$ 为第 t 月份第 i 计算分区的第 j 用水部门的需水量， 万 m^3 。

分目标 2：供水效益最大

$$\max f(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (NER_{i,j} \cdot x_{i,j}^t) \quad (4)$$

式中： $NER_{i,j}$ 为第 i 计算分区的第 j 用水部门的用水效益系数， $\text{元}/\text{m}^3$ 。

分目标 3: COD 排放量之和最小

$$\min(TCOD) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (d_{i,j} \cdot p_{i,j} \cdot x_{i,j}^t) \quad (5)$$

式中: $d_{i,j}$ 为第 i 计算分区的第 j 用水部门的单位废污水排放量中重要污染因子的含量, mg/L; $p_{i,j}$ 为第 i 计算分区的第 j 用水部门的污水排放系数。

2.2.2 约束条件

1、分区水量平衡约束

$$W_i^t = \sum_{n=1}^{N_i} \alpha_{n,i} \cdot W_n^t + R_i^t + \sum_{k=1}^{K_i} \beta_{k,i} \cdot O_k^t - \sum_{j=1}^m (cc_{i,j}^t \cdot x_{i,j}^t) - L_i^t - TW_i^t \quad (6)$$

式中: W_i^t 为第 i 计算分区的水量, W_n^t 为位于第 i 计算分区上游的第 n 计算分区的水量, 万 m^3 ; $\alpha_{n,i}$ 为第 n 计算分区与第 i 计算分区之间的水力联系, $0 \leq \alpha_{n,i} \leq 1$; R_i^t 为第 i 计算分区的天然来水量, 万 m^3 ; $\beta_{k,i}$ 为第 k 水库与第 i 计算分区之间的水力联系, $0 \leq \beta_{k,i} \leq 1$, 根据河流在第 i 计算分区与第 k 水库中的分水系数确定; O_k^t 为第 k 水库的出库水量, 万 m^3 ; $cc_{i,j}^t$ 为耗水系数, $0 \leq cc_{i,j}^t \leq 1$; L_i^t 为蒸发、渗漏和输水损失的水量, 万 m^3 ; TW_i^t 为流域外调水量, 万 m^3 。

2、水库约束

1) 水库水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + I_t - O_t - EV_t \quad (7)$$

2) 水库库容约束

$$V_{\min,t} \leq V_t \leq V_{\max,t} \quad (8)$$

式中: V_t 为 t 时段初库容, V_{t+1} 为 t 时段末库容; I_t 为 t 时段水库入库水量; O_t 为 t 时段水库出库水量; EV_t 为 t 时段水库蒸发损失; $V_{\min,t}$ 为 t 时段水库最小库容; $V_{\max,t}$ 为 t 时段水库最大库容。单位均为万 m^3 。

3、需水约束

$$x_{i,j}^t \leq WD_{i,j}^t \quad (9)$$

4、供水能力约束

$$\sum_{j=1}^m x_{i,j}^t \leq AWR_i^t \quad (10)$$

式中: AWR_i^t 为 t 时段第 i 计算分区可供水量, 万 m^3 。

5、非负约束

$$x_{i,j}^t \geq 0 \quad (11)$$

2.2.3. 求解的优化算法

水资源配置系统是一个复杂的大系统, 传统的优化方法难以获得系统的全局最优解。而第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)可以求解这类多边谈判问题。因其良好的收敛性和稳定性, 已成为当前多目标优化问题主流的解决方法之一[14]。NSGA-II 算法将水资源优化配置问题模拟为生物进化问题, 以分配至各子区各用水户的供水量作为决策变量, 对决策变量进行编码并组成可行解集, 通过判断目标函数的优化程度来进行优胜劣汰, 从而产生新一代可行解集, 如此反复迭代来完成水资源优化配置。算法采用拥挤度和拥挤度比较算子, 不但降低了非劣排序遗传算法的复杂性, 而且使得准 Pareto 域中的个体能均匀地扩展到整个 Pareto 域, 保证了种群的多

样性[15][16]。因此，本文选用了 NSGA-II 算法来对模型进行求解。

3. 汉江中下游水资源优化配置

3.1. 研究区域

根据研究的需要及掌握的资料，选取汉江中下游湖北省境内范围作为研究对象，区域内国土面积约为 4.11 万 km²，涉及神农架、十堰、襄阳、荆门、孝感、天门、仙桃、潜江和武汉及其所辖的市、县、区以及“五三”、“沙洋”、“沉湖”等农场的全部或部分范围。年降水量总的趋势是自东南、西南向西北递减，全区域变化在 800~1300 mm 之间。为较详细地进行水资源评价和规划工作，本文的配置模型按照水资源综合规划的四级分区方式，将汉江中下游地区以水资源四级区套县(市)级行政区形成的分区作为计算分区。由于地缘关系和简化模型的需要，将产生径流量微乎其微、其需水也非常小的地区进行合并，最终共取 28 个计算单元，其单元划分的空间分布见图 2。

3.2. 研究数据

1、水平年及计算步长

本文取 2010 年为现状水平年，2030 年为规划水平年，计算步长为“月”。

2、径流过程

根据《长江流域水资源综合规划》成果，输入的各计算分区的水资源量及水库入库流量采用 1956~2011 年各分区本地水资源量(部分无水文控制站点的水资源四级区套县的水资源量，由三级区套地级市水资源量按面积

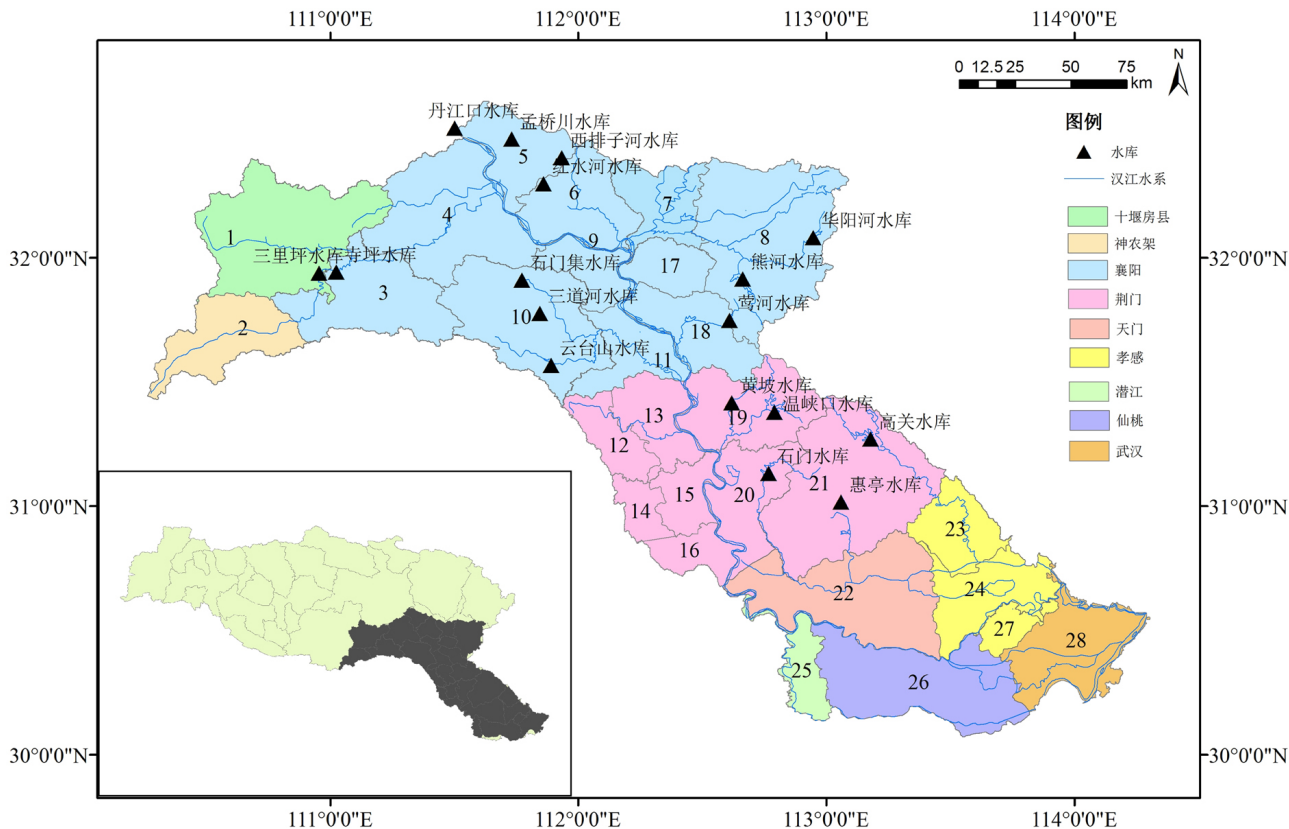


Figure 2. Spatial distribution of the computing units in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin

图 2. 汉江中下游各计算单元的空间分布

比分配)逐月长系列径流过程和水库监测入库流量过程进行调算。采用水文年进行水库调节计算。

3、需水过程

采用需水预测模型得到的各计算单元各用水户需水的长系列过程。

4、水利工程数据

汉江中下游研究区域内共有 17 座大中型水库,各水库的特征参数见表 1。水库的空间位置如图 2 所示。

5、模型参数

1) 经济效益系数

工、农业效益系数根据各自产业用水量 and 总产值确定,基础数据来源于湖北省统计局。而居民生活用水和生态环境用水效益难以量化,为了保证生活用水优先得到满足,本文对生活用水的效益系数赋予工、农业效益系数中的较大值,生态环境用水效益系数取其他三个行业的平均值。汉江中下游地区各市各行业的效益系数见表 2。

2) 污水排放系数

根据《城市排水工程规划规范》和汉江流域排污现状,本文中的生活和工业的污水排放系数分别取 0.6 和 0.2。而单位废污水排放量中重要污染因子的含量由各行业的废水排放总量和 COD 排放总量确定,基础数据来源于《湖北省环境统计公报》。

3) 算法主要参数

第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)参数选择如下:取种群大小 $p_{opsize} = 30$,染色体编码长度 $l_{chrom} = 12$,最大进化代数 $max_{gen} = 200$ 。

Table 1. Characteristics of reservoirs located in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin

表 1. 汉江中下游大中型水库特征参数值

水库编号	水库名称	集雨面积(km ²)	总库容(万 m ³)	兴利库容(万 m ³)	死库容(万 m ³)	汛限水位(m)
1	三里坪水库	524	51000	21100	26100	403/412
2	寺坪水库	186	26900	14500	10200	313.86
3	丹江口水库	95200	3391000	2122000	1269000	160.0/163.5
4	孟桥川水库	82	11033	8815	270	142.2
5	华阳河水库	139	10700	7080	140	144.19
6	熊河水库	314.5	19590	11590	2000	125
7	西排子河水库	412	22040	2200	223	111.8
8	红水河水库	190	10360	5890	540	117
9	石门集水库	252.3	15403	11469	185	195
10	三道河水库	780	15460	12742	2	154
11	云台山水库	236.5	12300	8900	500	163
12	莺河水库	147.5	12166	7631	362	132.7
13	黄坡水库	281	12561	7025	1010	76
14	温峡口水库	595	52000	26900	17600	105
15	石门水库	305	15910	6860	1300	195
16	高关水库	303	20108	15432	3089	118
17	惠亭水库	283.5	31340	17350	3250	84.75

4. 结果分析与讨论

4.1. 需水预测结果

按照上述需水预测过程，得到 2010 水平年和 2030 水平年下的需水预测结果，如表 3 所示。

Table 2. The economic return of each industry in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin (yuan/m³)

表 2. 汉江中下游各行业的经济效益系数(元/m³)

区域	工业	农业	生活	生态
十堰	285.16	120.18	285.16	230.17
神农架	77.25	55.45	77.25	69.98
襄阳	180.06	20.42	180.06	126.85
荆门	282.23	28.11	282.23	197.53
天门	182.79	10.96	182.79	125.51
孝感	322.68	52.07	322.68	232.48
潜江	565.5	64.76	565.5	398.59
仙桃	156.67	17.11	156.67	110.15
武汉	1436.21	130.46	1436.21	1000.96

Table 3. Annual off-stream water demand projection of each city in the present and planning years

表 3. 汉江中下游地区现状和规划水平年各市年河道外毛需水量计算结果 单位：万 m³

水平年	区域	生活	工业	农业灌溉				河道外需水总量			
				P = 50%	P = 75%	P = 90%	P = 95%	P = 50%	P = 75%	P = 90%	P = 95%
现状水平年 (2010 年)	十堰	1056	1060	12,233	13,977	16,506	18,796	14,349	16,093	18,622	20,912
	神农架	187	857	418	514	859	917	1462	1558	1903	1961
	襄阳	21,767	181,989	212,347	246,432	268,209	288,192	416,103	450,188	471,965	491,948
	荆门	9114	61,401	95,569	103,853	116,982	119,937	166,084	174,368	187,497	190,452
	天门	5935	23,788	79,167	85,008	95,956	104,753	108,890	114,731	125,679	134,476
	孝感	5721	44,559	60,413	68,350	73,462	78,744	110,693	118,630	123,742	129,024
	潜江	1599	11,963	12,831	14,459	16,923	19,594	26,393	28,021	30,485	33,156
	仙桃	6212	40,541	55,362	66,255	75,885	82,967	102,115	113,008	122,638	129,720
	武汉	6329	61,174	22,112	25,256	28,193	29,927	89,615	92,759	95,696	97,430
	合计	57,920	427,332	550,452	624,104	692,975	743,827	1,035,704	1,109,356	1,178,227	1,229,079
规划水平年 (2030 年)	十堰	1296	1306	8199	9320	10,962	12,552	10,802	11,922	13,565	15,154
	神农架	267	1026	312	393	541	582	1604	1686	1833	1875
	襄阳	30,477	214,201	213,226	243,046	266,496	284,920	457,904	487,724	511,174	529,598
	荆门	12,233	76,752	91,691	95,998	104,735	107,316	180,676	184,983	193,720	196,301
	天门	8152	26,671	69,333	78,807	91,713	95,478	104,156	113,630	126,536	130,300
	孝感	7452	46,922	57,671	63,613	67,220	72,714	112,045	117,987	121,594	127,088
	潜江	2163	13,455	14,471	15,965	19,264	22,126	30,090	31,584	34,882	37,744
	仙桃	8581	44,226	52,097	58,079	67,951	73,099	104,904	110,886	120,758	125,906
	武汉	7710	75,799	23,740	27,286	30,297	32,208	107,250	110,795	113,806	115,717
	合计	78,331	500,358	530,741	592,507	659,179	700,994	1,109,430	1,171,196	1,237,869	1,279,683

1) 汉江中下游地区及其各子区的河道外总需水量呈增加的趋势, 在 50%、75%、90%和 95%四种频率下, 2010 水平年的河道外的毛需水量分别为 103.57 亿 m^3 、110.94 亿 m^3 、117.82 亿 m^3 和 122.91 亿 m^3 ; 2030 水平年的河道外的毛需水量分别为 110.94 亿 m^3 、117.12 亿 m^3 、123.79 亿 m^3 和 127.97 亿 m^3 。

2) 在同一水平年下, 各用水部门需水中, 以农业灌溉需水量最大, 农业灌溉需水量随来水频率的增长呈增加的趋势; 规划水平年的城镇生活和农村生活需水有小幅度的增加, 城镇工业需水有大幅度的增加; 在同一需水频率下, 规划水平年的农业灌溉需水量相较于现状水平年呈减小趋势, 占总需水量的比例也呈降低趋势。

3) 各个子区中, 从三级套市的统计角度来看, 襄阳市的需水量最大, 其次是荆门市, 神农架市的需水量最小。

4.2. 水资源优化配置结果

利用构建的水资源优化配置模型, 基于 NSGA-II 进行求解, 分别得到 2010 和 2030 水平年下, 汉江中下游全区域的 Pareto 解集, 限于篇幅, 本文仅以 75%保证率下的结果进行展示。水资源配置模型中 Pareto 边界上目标函数之间的关系见图 3。图 3 可以看出, 三个目标函数之间是互相影响并且相互冲突的。图 3(a)表明缺水量和经济效益之间呈负相关的关系, 意味着缺水量越小, 经济效益将会越大, 这也说明在水资源配置和水库调度规则最优的情况下, 二者可以同时达到最优; 图 3(b)表明 COD 的排放量和经济效益之间呈正相关的关系, 经济效益越大, 表明生活和工业的用水量越大, COD 的排放量随之增加; 图 3(c)表明 COD 的排放量受供水量的影响, 如果缺水量比较少, 意味着各部门用水增多, 污水的排放也增多, COD 也随之排入了河道中, 因此二者之间呈负相关的关系。整体来看, 即使增加供水可以增加经济效益并且降低缺水量, 但是因为污水排放系数 p_{ij} 和污水排放量中重要污染因子的含量 d_{ij} 的影响是不可忽略的, 所以会导致污染更加严重。

由于多目标优化配置结果有多个分配方案的 Pareto 最优解集, 且不同决策者对目标的偏好不同, 因此从 Pareto 最优解集中分别选取 A (缺水量最小)、B (经济效益量最大)、C (COD 排放量之和最小)三种典型的分配方案以供参考。表 4 为三种分配方案下的目标函数值。

由表 4 可以看出: 各个子目标是相互冲突的, 不能同时达到最优。2010 水平年下: 最大的经济效益为 10,840.3 亿元, 此时缺水量为 17.9 亿 m^3 , COD 的排放量最高, 为 54.6 万吨; 缺水量最小为 17.6 亿 m^3 时, 经济效益为 10,769.4 亿元, COD 排放量为 54.5 万吨; COD 排放量之和最小为 46.8 万吨时, 缺水量为 19.8 亿 m^3 ; 经济效益为 7559.1 亿元。在同一水平年下, 当经济效益增加时, COD 的排放量也随着增大, 说明经济发展与控制污染物排放之间是相互矛盾的。随着社会经济的发展, 在同一种方案下, 未来水平年下的经济效益、缺水量和 COD 的排放量均高于现状水平年。

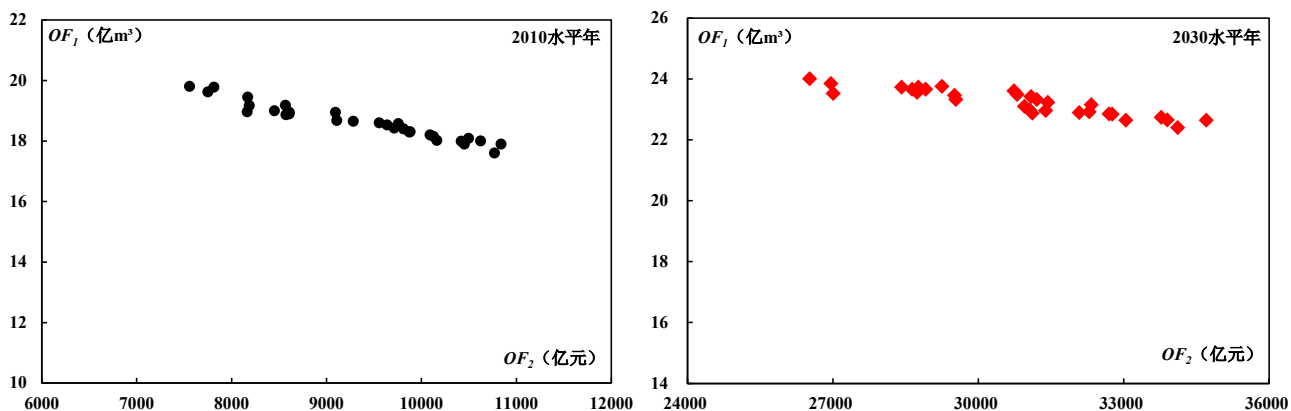
三种典型方案下的各三级套市的供水总量如图 4 所示。由图 4 可以看出: 整体上方案 A 的供水量高于方案 B, 其次是方案 C, 但三种方案下各区域的供水总量相差不大。各区域均存在不同程度的缺水问题。这主要是因为在本配置模型中, 采用了多目标优化, 缺水量最小这一子目标与其他子目标是相互冲突的, 在优化的过程中只能在他们中间进行协调和折中处理。其中, 十堰、神农架、襄阳和荆门的缺水量比较大。这是因为在非汛期, 襄阳市受地区来水影响和水库功能的限制, 缺乏有效调节。而荆门、十堰和神农架均处于流域的边缘, 无法从汉江干流取水, 只能使用本地区来水, 所以即使是通过水资源优化配置模型得到的供水量结果, 与这几个区域的需求量相比, 也存在很大的缺口。孝感、潜江、仙桃、武汉均处在汉江干流, 可以直接从干流取水, 所以这几个区域几乎不存在缺水情况。不同水平年相比, 大部分区域在规划水平年分得的水量均高于现状水平年, 这是由于与现状水平年相比, 规划水平年的需水量增加, 所以每个区域分配的水量也越多。但由于是相同的历史来水条件, 所以规划水平年下的各个区域的缺水量大于现状水平年。

不同水平年在三种方案下的各部门水资源优化配置结果见表 5。从用水户类型来看, 各子区的缺水部门较为一致, 河道内生态基本不存在水资源缺口, 城镇生活用水和农村生活用水缺口比较小, 工业和农业灌溉缺水

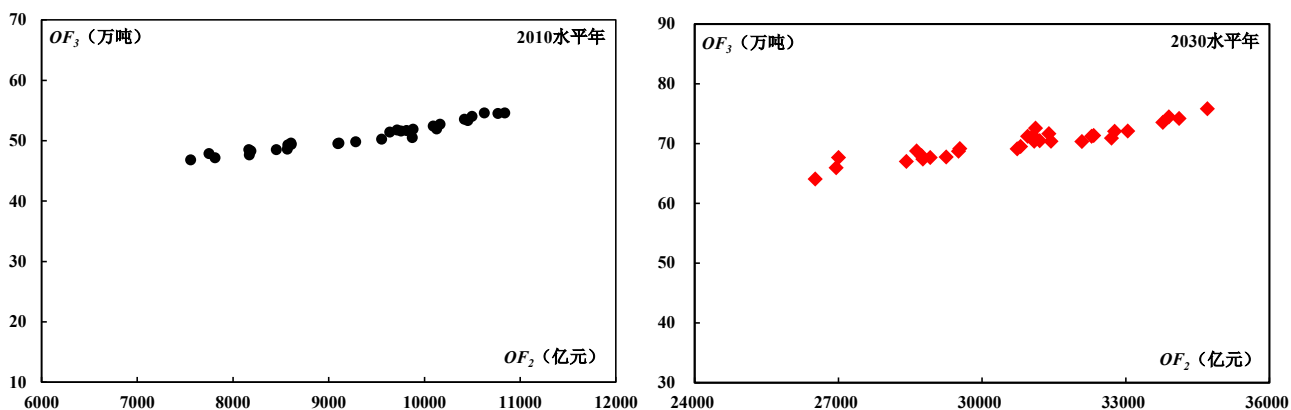
比较严重。从水平年来看，三种典型方案下，规划水平年的水资源缺口均大于现状水平年。

5. 结论

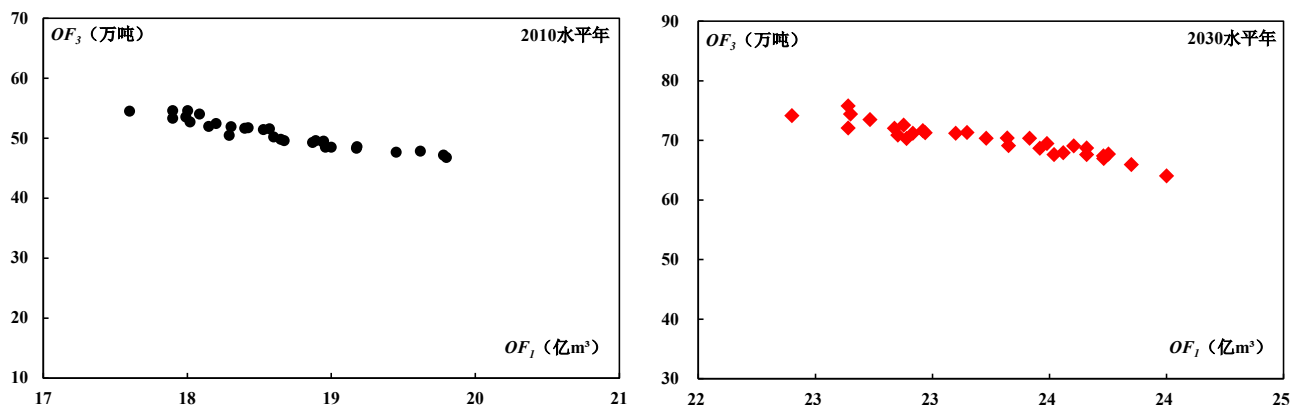
本文以 2010 年为现状水平年，2030 年为规划水平年，在汉江中下游地区建立了水资源多目标优化配置模型，并利用 NSGA-II 算法对模型进行了求解。此外，基于水资源优化配置的结果，分析了目标函数之间的定性关系，能够为水资源管理部门提供较为灵活的选择方案。得到的主要研究结论如下：



(a) 缺水量和经济效益之间呈负相关的关系



(b) COD 的排放量和经济效益之间呈正相关的关系



(c) COD 的排放量和水量之间呈负相关的关系

Figure 3. Relation between objectives of the Pareto frontier for the water allocation model

图 3. 水资源配置模型中 Pareto 边界上目标函数之间的关系

Table 4. Three typical schemes for water allocation of multi-objective optimization
表 4. 多目标优化三种典型的配水方案

水平年	方案	OF ₁ (亿 m ³)	OF ₂ (亿元)	OF ₃ (万吨)
2010	方案 A	17.6	10769.4	54.5
	方案 B	17.9	10840.3	54.6
	方案 C	19.8	7559.1	46.8
2030	方案 A	22.4	34121.3	74.1
	方案 B	22.6	34712	75.7
	方案 C	24	26525.6	64

Table 5. The allocation results of three typical schemes
表 5. 三种典型分配方案下的结果

水平年	区域	方案 A (万 m ³)				方案 B (万 m ³)				方案 C (万 m ³)			
		工业	农业	生活	生态	工业	农业	生活	生态	工业	农业	生活	生态
2010	十堰	520	6053	429	13950	642	3948	508	13961	604	3350	538	14275
	神农架	239	369	104	7999	340	237	77	10369	149	230	64	9626
	襄阳	131467	169758	21705	143093	112611	173197	20876	144221	111043	177586	21354	144007
	荆门	47816	79569	9114	89201	50507	79687	9510	85674	43140	76112	8375	85968
	天门	23447	79108	5901	30988	19351	76967	5360	30298	16226	70437	5495	27077
	孝感	44792	55626	5720	29921	43010	54802	5721	31105	36817	49282	5721	29788
	潜江	9496	6548	1598	6377	7933	10082	1495	7234	7620	4049	1175	6410
	仙桃	38634	57638	6210	30047	37087	54754	6109	29277	27309	37196	5501	26465
2030	武汉	60845	23088	6328	18947	60259	21185	5536	18785	60452	25061	6474	18597
	十堰	542	6123	1280	23951	604	4460	1259	23961	519	3350	1289	24275
	神农架	649	369	267	13679	640	237	240	13369	639	230	227	13626
	襄阳	142467	159308	30405	144121	133611	172747	29576	142894	132043	177136	30054	144207
	荆门	47816	79569	12214	89207	50507	79687	12210	88784	44140	76112	12075	89135
	天门	26447	77908	8151	31040	26351	77767	7610	31197	21226	76237	7745	31042
	孝感	46792	55626	7450	30050	45010	54802	7451	31105	42716	56282	7451	31157
	潜江	13296	8048	2162	6377	13435	10082	2059	6234	11420	9049	2039	6309
仙桃	43634	57718	8580	30047	43087	56754	8479	29277	42309	57196	7871	29646	
武汉	74845	23057	7708	18947	75799	21185	6916	18597	74452	25061	7854	18785	

1) 在同一水平年下, 汉江中下游地区的需水总量随来水频率的增长呈增加的趋势; 在同一需水频率下, 规划水平年的需水量相较于现状水平年呈增加的趋势。

2) 利用 NSGA-II 算法求解汉江中下游地区多目标水资源优化配置模型, 能够得到区域的非劣解集, 从解集的趋势可以看出: 三个目标函数之间互相影响并且相互冲突。在三种典型分配方案下, 各子区的缺水部门较为一致; 规划水平年的水资源缺口均大于现状水平年。

3) 优化配置模型得到的结果可以为水资源管理和水污染控制提供支持。三种典型分配方案下, 方案 A 与方

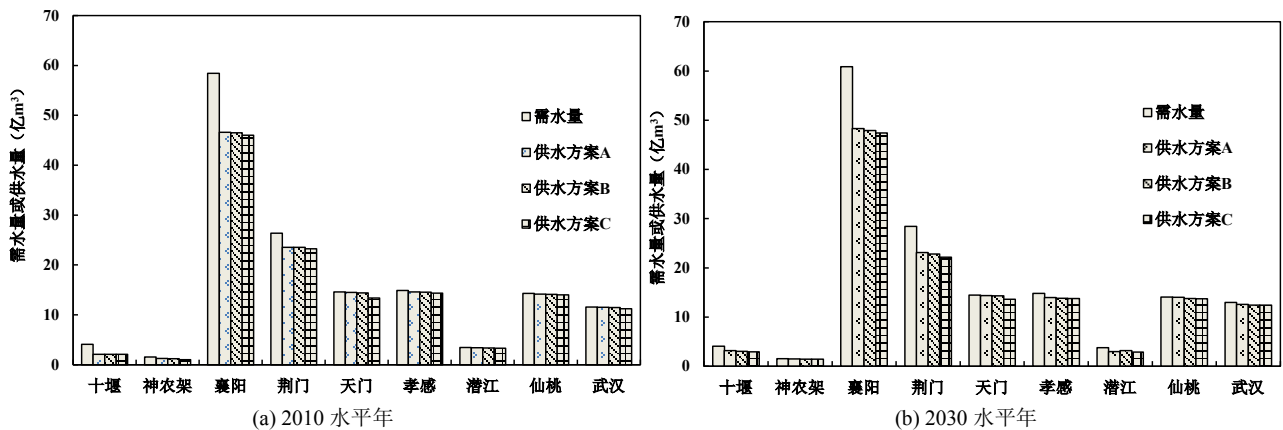


Figure 4. The total amount of water supply in each city under three typical allocation schemes
图 4. 三种典型分配方案下各市的供水总量

案 B 相差不大。如果区域侧重于经济发展，推荐采用方案 B；如果区域内污染比较严重，推荐采用方案 C。当决策者在制定决策时，可以依据地区发展的实际情况，在区域的非劣解集中进行权衡。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(51539009)资助。

参考文献 (References)

- [1] 马建华. 关于汉江流域实施水量分配管理若干问题的思考[J]. 人民长江, 2010, 41(17): 1-6.
MA Jianhua. Consideration on water quantity allocation in Hanjiang River Basin. Yangtze River, 2010, 41(17): 1-6. (in Chinese)
- [2] 韩雁. 基于区间不确定性水资源复杂系统协调演化研究[J]. 水利学报, 2008, 39(Z2): 892-898.
HAN Yan. Study on coordination evolvement of complex water resources system with interval uncertainty. Shuilixuebao, 2008, 39(Z2): 892-898. (in Chinese)
- [3] 王峰, 李树荣, 杨亭亭. 区域水资源区间多目标规划模型及求解[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 35-37.
WANG Feng, LI Shurong and YANG Tingting. Regional water resource interval multi-objective programming model and its solution. Water Resources and Power, 2011, 29(4): 35-37. (in Chinese)
- [4] 刘德地, 郭生练, 郭海晋, 等. 实施最严格水资源管理制度面临的技术问题与挑战[J]. 水资源研究, 2014(3): 179-188.
LIU Dedi, GUO Shenglian, GUO Haijing, et al. Technique controversies and challenges of applying the strictest water resources control system. Journal of Water Resources Research, 2014(3): 179-188. (in Chinese)
- [5] HONG, X., GUO, S., WANG, L., et al. Evaluating water supply risk in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin based on an integrated optimal water resources allocation model. Water, 2016, 8(9): 364.
- [6] 李维乾, 解建仓, 李建勋, 等. 基于灰色理论及改进类电磁学算法的水资源配置[J]. 水利学报, 2012, 43(12): 1447-1456.
LI Weiqian, XIE Jiancang, LI Jianxun, et al. Water resources allocation based on the grey theory and the improved electromagnetism-like algorithm. Shuilixuebao, 2012, 43(12): 1447-1456. (in Chinese)
- [7] 尼庆伟, 杨凤林, 吴文业, 等. 康平县水资源配置大系统多目标模型[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(3): 340-344.
NI Qingwei, YANG Fenglin, WU Wenye, et al. A large-scale system multi-objective programming model for water resources allocation in Kangping County. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(3): 340-344. (in Chinese)
- [8] 余美, 芮孝芳. 宁夏银北灌区水资源优化配置模型及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(7): 181-192.
YU Mei, RUI Xiaofang. Model of water resources optimal allocation and application in the Yinbei irrigation district of Ningxia. Systems Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(7): 181-192. (in Chinese)
- [9] 刘德地, 王高旭, 陈晓宏, 等. 基于混沌和声搜索算法的水资源优化配置[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(7): 1378-1386.
LIU Dedi, WANG Gaoxu, CHEN Xiaohong, et al. Optimal water resources deployment based on chaos harmony search algorithm. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(7): 1378-1386. (in Chinese)

- [10] 娄帅, 王慧敏, 牛文娟, 等. 基于免疫遗传算法水资源配置多阶段群决策优化模型研究[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 569-577.
LOU Shuai, WANG Huimin, NIU Wenjuan, et al. Optimization of multi-stage group decision making for water resource allocation. Resources Science, 2013, 35(3): 569-577. (in Chinese)
- [11] BREKKE, L., LARSEN, M. D., AUSBURN, M. and TAKAICHI, L. Suburban water demand modeling using stepwise regression. Journal of the American Water Works Association, 2002, 94: 65-95. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2002.tb09558.x>
- [12] ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [13] TENNANT, D. L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries, 1976, 1: 6-10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)
- [14] 刘士明, 于丹. 基于第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)的水资源优化配置[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 185-188.
LIU Shiming, YU Dan. Optimal allocation of water resources based on non-dominated sorting genetic algorithm-II. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(5): 185-188. (in Chinese)
- [15] 张超勇, 董星, 王晓娟, 等. 基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间调度[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 156-164.
ZHANG Chaoyong, DONG Xing, WANG Xiaojuan, et al. Improved NSGA-II for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 156-164. (in Chinese)
<https://doi.org/10.3901/JME.2010.11.156>
- [16] TABARI, M. M. R., SOLTANI, J. Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models. Water Resources Management, 2013, 27(1): 37-53. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0153-7>