

Multi-Objective Water Resources Allocation Based on Three-Step Method

Dan Li¹, Shenglian Guo¹, Jing Tian¹, Xingjun Hong^{1,2}, Dedi Liu¹

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: 00030306@whu.edu.cn

Received: Aug. 6th, 2018; accepted: Oct. 6th, 2018; published: Oct. 8th, 2018

Abstract

A multi-objective water resources optimal allocation model for transboundary region is established after an overall consideration of national economic water demand, water balance and eco-environmental water consumption. In order to ensure the equality among stakeholders, the index and benefit ratio is introduced, and the multi-objective problem is transformed into several single-objective problems by adopting the three-step method, which can greatly simplify the solution process. The proposed model and method are verified through the case study in the middle and lower reaches of Han River. The outputs of Highest Water Profit (HWP) model show that the allocation benefits of subdivisions located in Tangbai River basin have more effects on each other while the cities that are located downstream of Danjiangkou Reservoir do not depend upon the allocated water to others. The Highest Ratio of Highest Water Profit (HRHWP) model presents that the benefit ratio is lowest in summer, mainly due to the largest water demand in this period. In spring, autumn and winter, the indices all exceed 0.9. The results of Final Water Profit (FWP) model show that the water shortage rates are 3.11%, 3.69% and 3.94% at frequency of 50%, 75% and 95%, respectively. The domestic water consumption is basically satisfied at the planning year, but there are relatively larger shortages in agricultural irrigation and ecological environment water consumption. The water shortage in Tangbai River basin is more serious than that in the main stream area below Danjiangkou Reservoir.

Keywords

Water Resources, Multi-Objective, Optimal Allocation, Three-Step Method, Middle and Lower Reaches of Han River

基于三步优化的多目标水资源配置研究及应用

李丹¹, 郭生练¹, 田晶¹, 洪兴骏^{1,2}, 刘德地¹

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

作者简介: 李丹(1980-), 女, 高级工程师, 博士后, 主要从事水文学及水资源配置、水资源管理等方面的研究工作。

摘要

统筹考虑国民经济需水、水量平衡和生态环境用水的前提下,建立了跨区多目标水资源优化配置模型。为了保证各用水户的利益分配公平性,引入了用水效益比指标,并采用三步法将多目标问题转化为多个单目标问题,简化求解过程。通过汉江中下游水资源优化配置的应用研究,验证了所提方法的实用性。可能最大效益模型(HWP)结果表明,位于唐白河流域的分区,其配置效益受其它用水分区的配水影响较大,而丹江口干流以下区域由于受水库调蓄优化,配置效益不受影响。从最大效益比模型(HRHWP)结果看出,由于夏季需水量最大,效益比值较小,而春、秋和冬季的效益比均超过0.9。分析总效益模型(FWP)结果得到,频率为50%、75%和95%时,全区域的缺水率分别为3.11%、3.69%和3.94%。规划水平年生活用水基本满足,而农业灌溉和河道内生态环境用水缺口较大。由于缺少丹江口水库的调节,唐白河流域的缺水情况明显较丹江口以下干流地区严重。

关键词

水资源, 多目标, 优化配置, 三步法, 汉江中下游

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

为了解决水资源时空分布不均造成的水资源短缺问题,在遵循合理性、高效性和可持续性等原则的前提下开展水资源优化配置研究,既是需水管理的核心之一,也是区域水资源系统可持续发展的关键[1]。国内自上世纪60年代开始水资源配置研究,经过近六十年的发展,在水资源配置理论及应用研究等方面取得了可喜的成果[2][3]。近几年,针对水资源优化配置的研究进一步深入。刘德地等[4]通过耦合水文模型和水资源优化配置模型,定量分析了气候变化和人类活动对水资源时空分布及其配置的影响。邓铭江[5]通过对西北调水方案的初步分析,提出了西北“水三线”建设的空间格局与水资源配置方略。李建勋等[6]基于复杂性理论建立了水资源配置框架体系,并综合采用WebService、知识可视化和组件化技术进行实现以辅助配水决策。吴丹等[7]构建了流域初始二维水权耦合配置模型,并提出基于满意度的主从递阶交互式迭代算法对模型进行求解。张妍等[8]在充分考虑地表径流随机性的基础上,分别构建具有不同目标的灌区水资源优化配置模型,并应用于黑河中游灌区的水资源配置。此外,针对多目标优化求解时容易出现维数灾或陷入局部最优等问题,很多学者也是尝试改进或引入新的算法,如混沌算法[9]、模拟退火遗传算法[10]、改进的类电磁学算法[11]、改进的鲸鱼算法[12]以及蝙蝠算法[13]等,极大地提高了求解效率。刘德地等[14]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。田晶等[15]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。

随着经济社会的快速发展以及生态文明建设的进一步强化,作为战略性经济资源和生态环境控制性要素的水资源,其合理配置需要考虑的因素日益增多,尤其当涉及到多个行政区域的用水时,特别是在经济发展阶段差别较大

的南方地区，矛盾更为突出。以往的水资源优化配置模型通常以全区域缺水量最小为社会效益目标，难以保证各分区用水户利益分配的公平性。为了弥补这个缺陷，本文引入用水效益比指标，并采用三步法[16]求解跨区水资源优化配置模型，既简化了求解过程，也能充分考虑各用水户的用水公平性。汉江流域是长江中游最大支流，是国家水资源配置的战略水源地。由于流域内社会经济的发展，已经面临着水资源开发利用矛盾日益突出、用水量不断增加、水污染日趋严重和人类活动对水生态环境影响日益增加等问题。因此，本文以汉江中下游为研究对象，在论证水资源配置模型及方法适用性的同时，配置结果也能为汉江流域建立最严格的水资源管理制度提供技术支撑。

2. 研究方法

2.1. 水资源优化配置模型

本文所建模型在统筹考虑各用水户单元的需水、水量平衡、生态环境用水及各种约束条件的前提下，使各区域水量配置效益达到最优，其目标函数如下：

$$\max Z_k = \sum_t (p_k^a \times x_{kt}^a + p_k^d \times x_{kt}^d + p_k^u \times x_{kt}^u) \quad (1)$$

约束条件为：

$$SW_{k,t} + \sum_{i \in UN} y_{i \rightarrow k,t} = \sum_{j \in DN} y_{k \rightarrow j,t} + x_{kt}^a + x_{kt}^d + x_{kt}^u \quad \forall k, t \quad (2)$$

$$\sum_{j \in DN} y_{k \rightarrow j,t} \geq \alpha_{kt}^e \times ED_{kt} \quad \forall k, t \quad (3)$$

其中

$$\alpha_{kt}^e = \begin{cases} 1 & \text{生态需水满足要求} \\ 0 & \text{生态需水不满足要求} \end{cases} \quad \forall k, t \quad (4)$$

$$x_{kt}^a \leq AD_{kt} \quad \forall k, t \quad (5)$$

$$x_{kt}^d \leq DD_{kt} \quad \forall k, t \quad (6)$$

$$x_{kt}^u \leq UD_{kt} \quad \forall k, t \quad (7)$$

$$x_{kt}^a \geq 0 \quad \forall k, t \quad (8)$$

$$x_{kt}^d \geq 0 \quad \forall k, t \quad (9)$$

$$x_{kt}^u \geq 0 \quad \forall k, t \quad (10)$$

$$y_{i \rightarrow k,t} \geq 0 \quad \forall k, t \quad (11)$$

$$y_{k \rightarrow j,t} \geq 0 \quad \forall k, t \quad (12)$$

式中： Z_k 为第 k 分区在研究时段的总净经济效益， P_k^a 、 P_k^d 和 P_k^u 分别为第 k 分区的农业、工业和生活用水净经济效益系数， x_{kt}^a 、 x_{kt}^d 和 x_{kt}^u 分别为第 k 分区 t 时刻的农业供水量、工业供水量和生活供水量， SW_{kt} 为第 k 分区 t 时刻的区间产水量， $y_{i \rightarrow k,t}$ 为第 k 分区 t 时刻的上游来水量， $y_{k \rightarrow j,t}$ 为第 k 分区 t 时刻的下游去水量， α_{kt}^e 为第 k 分区 t 时刻的河道生态需水满足系数， ED_{kt} 为第 k 分区 t 时刻的河道生态需水量， AD_{kt} 、 DD_{kt} 和 UD_{kt} 分别为第 k 分区 t 时刻的农业需水量、工业需水量和生活需水量。

2.2. 多目标优化的三步法

若目标函数为单个分区的最优化，则每个分区都能求得一个可能最大效益值，但对于跨区域的水资源配置问题，面对有限的水资源，不可能使每个分区都达到最大供水效益，求解上述多目标模型比较困难。因此，本

文尝试利用三步法求解，思路如下：首先建立可能最大效益模型(HWP)，即以各分区的效益最大化为单目标函数，求出每个分区不同时刻的可能最大效益；其次建立最大效益比模型(HRHWP)，设 λ 为各个分区实际效益和可能最大效益的比值，以任意时刻全区域效益比之和最大建立单目标优化模型；最后建立总效益模型(FWP)，目标函数为全区域的总经济效益最大，据此即可求出最终优化配置结果。

第一步：根据分区个数 n ，建立 n 个HWP模型，以分区1为例，其目标函数如下：

$$\max f_1^* = \sum_t (p_1^a \times x_{1t}^a + p_1^d \times x_{1t}^d + p_1^u \times x_{1t}^u) \quad (13)$$

式中： f_1^* 为分区1在研究时段的最大可能经济效益， P_1^a ， P_1^d 和 P_1^u 分别为分区1的农业、工业和生活用水净经济效益系数， x_{1t}^a ， x_{1t}^d 和 x_{1t}^u 分别为分区1在 t 时刻的农业供水量、工业供水量和生活供水量。

约束条件见式(2)~(12)。同理可分别求得其它分区的 $f_2^*, f_3^*, \dots, f_n^*$ 。

第二步：本着用水户平等的原则，同一时刻各分区的 λ 应相同，据此建立HRHWP模型，其目标函数为：

$$\max Y = \sum_t \lambda_t \quad (14)$$

约束条件：

$$p_k^a \times x_{kt}^a + p_k^d \times x_{kt}^d + p_k^u \times x_{kt}^u \geq \lambda_t \times f_{kt}^* \quad \forall k, t \quad (15)$$

其他约束条件同式(2)~(12)。这里的 λ_t 为 t 时刻的效益比， f_{kt}^* 为第 k 分区 t 时刻的可能最大效益，其他符号意义同上。

第三步：基于HWP和HRHWP模型结果，建立FWP模型，其目标函数如下：

$$\max W = \sum_k \sum_t (p_k^a \times x_{kt}^a + p_k^d \times x_{kt}^d + p_k^u \times x_{kt}^u) \quad (16)$$

约束条件同式(2)~(12)和(15)，这里的 W 为全区域总经济效益，其它符号意义同上。

三步法中每个模型均为单目标模型，可采用常规优化算法求解。

3. 汉江中下游水资源优化配置

3.1. 研究区概况

汉江是长江中游最大支流，发源于秦岭南麓，经汉中盆地与褒河汇合后始称汉江，于武汉市龙王庙汇入长江。干流全长1577 km(湖北省境内888 km)，流域面积15.9万 km^2 。其中，丹江口为汉江上游与中下游的分界，在汉江中下游汇入干流的主要支流有：北河、南河、小清河、唐白河、蛮河、竹皮河以及汉北河等。本次研究的对象为汉江中下游湖北省境内以汉江干流及其分支东荆河为主要水源以及补充水源的供水区域，包括武汉、襄阳、荆门、孝感、天门、仙桃、潜江等重要城市及其所辖的市、县、区以及“五三”、“沙洋”、“沉湖”等农场的全部或部分范围，面积约4.11万 km^2 ，具体见图1。

3.2. 水资源分区及水系概化

汉江流域属于长江流域的二级区，该二级区又进一步划分为三个三级区，即丹江口以上、唐白河和丹江口以下干流。本次的研究区域按水资源三级分区分别属于唐白河和丹江口以下干流区。图2为研究区水资源系统概化图。以水资源三级区套地级行政区界限，将研究区共划分为8个计算分区。其中，为了和地形GIS地图保持一致，将天门、潜江、仙桃合并为一个区域考虑。各分区面积见表1。

3.3. 模型参数

汉江流域1956~2000年多年平均地表水资源量为554.71亿 m^3 ，占长江流域地表水资源量的5.6%，相应径

流深为 358.3 mm，径流深低于长江流域平均值。汉江流域 50%、75%和 95%频率来水情况地表水资源量分别为 533.44 亿 m³、418.71 亿 m³ 和 285.02 亿 m³。汉江流域多年平均年地下水资源量为 161.53 亿 m³，约占长江流域

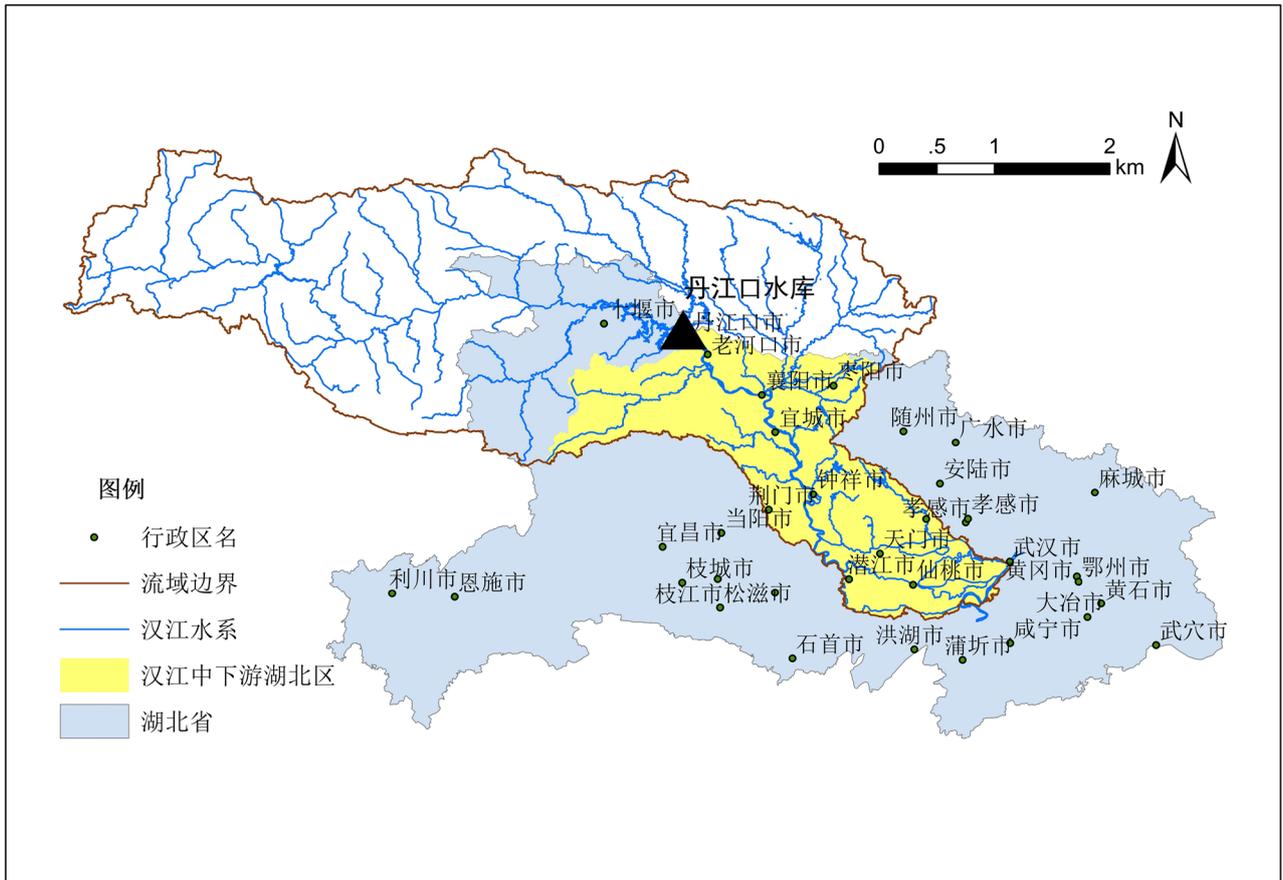


Figure 1. Sketch map of study area and location in the middle and lower Han River basin
图 1. 汉江中下游研究范围位置示意图

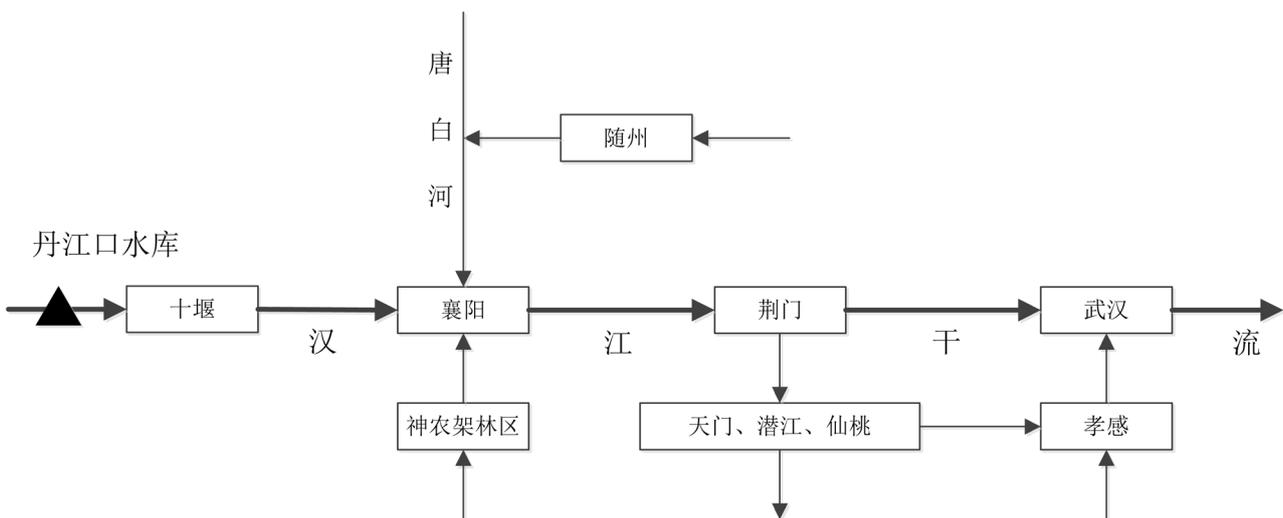


Figure 2. Conceptual diagram for water resources system in the middle and lower Han River basin
图 2. 汉江中下游研究区水资源系统概化图

地下水资源量的 6%。汉江流域多年平均产水系数(水资源总量与相应降水量比值)和产水模数(单位面积水资源总量)分别为 0.41 和 37.03 万 m³/km², 均低于长江流域多年平均值。

本次研究重点分析近景规划水平年 2020 年, 并分别计算 50%, 75%和 95%三个频率下的水资源供需关系。表 2 列出了研究区现状用水和规划水平年用水情况, 可以看出, 除神农架林区外, 其他七个分区的水资源需求量增长很快, 尤其是随州、襄阳、十堰和荆门市, 年均增长量均在 10%以上。

模型计算步长为“月”, 通过输入各计算分区各用水户需水长系列、径流过程、供水工程的特性等进行供需平衡计算。根据《长江流域水资源综合规划》成果, 各计算分区输入水资源量采用 1956~2000 年逐月长系列

Table 1. Divisions for water resources allocation in the middle and lower Han River basin
表 1. 汉江中下游水资源配置模拟分区

水资源三级区	地级行政区	面积(km ²)	备注	
唐白河	襄阳市	4064	丹江口以上占 24%	
	随州市	429		
	小计	4493		
丹江口以下干流	武汉市	1458	丹江口以下占 76%	
	十堰市	3148		
	襄阳市	12,829		
	荆门市	9362		
	孝感市	2793		
	仙桃市	2535		
	潜江市	538		省直辖县级行政单位
	天门市	2619		
	神农架林区	1318		
		小计		36,600
	合计	41,093		

Table 2. Comparison of water consumptions in current year and planning year in the middle and lower Han River basin
表 2. 汉江中下游研究区现状与规划年需水比较

分区	现状用水(万 m ³)	2020 年需水(万 m ³)					
		50%	年均增长率(%)	75%	年均增长率(%)	95%	年均增长率(%)
随州市	532	3782	21.7	4268	23.1	5202	25.6
襄阳市	161,941	475,531	11.4	515,360	12.3	569,147	13.4
神农架林区	538	574	0.6	592	1.0	644	1.8
十堰市	5616	14,847	10.2	15,813	10.9	18,545	12.7
荆门市	57,020	216,150	14.3	222,676	14.6	239,188	15.4
孝感市	51,084	120,834	9.0	128,099	9.6	140,875	10.7
天门-潜江-仙桃	79,913	236,616	11.5	267,231	12.8	310,669	14.5
武汉市	29,760	69,560	8.9	73,406	9.4	78,933	10.2
合计	386,405	1,137,895	11.4	1,227,445	12.3	1,363,202	13.4

径流过程。采用水文年进行水库调节计算，其中丹江口水库常规调度图如图 3 所示。每个计算分区用水分四大类：生活(包括城镇生活和农村生活，其中城镇生活含河道外环境用水)、城镇工业、农业灌溉、河道内生态环境用水。城镇生活、城镇工业、农村生活年需水过程均是由年需水总量按 12 个月平均分配到每月。农业灌溉年需水过程是由年需水总量乘以各月灌溉分配系数得到各月需水量。河道内生态需水量采用多年平均径流量乘以最小生态流量的百分比的方法计算。唐白河区域、丹江口区域的汛期和非汛期的最小生态流量的百分比统计如表 3 所示。

模型中的效益系数采用效益分摊系数法确定[17] [18] [19]。效益分摊系数法是 1996 年水利部颁布的《水利建设项目经济评价规范》中指定的方法，其原理是按获取生产要素的代价比例进行贡献分摊。其中农业灌溉效益分摊系数采用试验参数法确定，其它用水活动的供水效益分摊系数采用固定资产净值(或成本)比例法确定。

农业用水净效益计算公式如下：

$$P_a = \gamma_a \sum_{i=1}^m A_i (Y_i - Y_{oi}) P_i - C_a / W_a \quad (17)$$

式中： P_a 为农业用水净效益系数，元/ m^3 ； γ_a 为农业灌溉效益分摊系数； A_i 为第 i 种作物的种植面积，亩； Y_i 为有灌溉措施情况下单位面积的多年平均产量，kg/亩，可根据灌区实验室、历史资料等确定； Y_{oi} 为无灌溉措施情

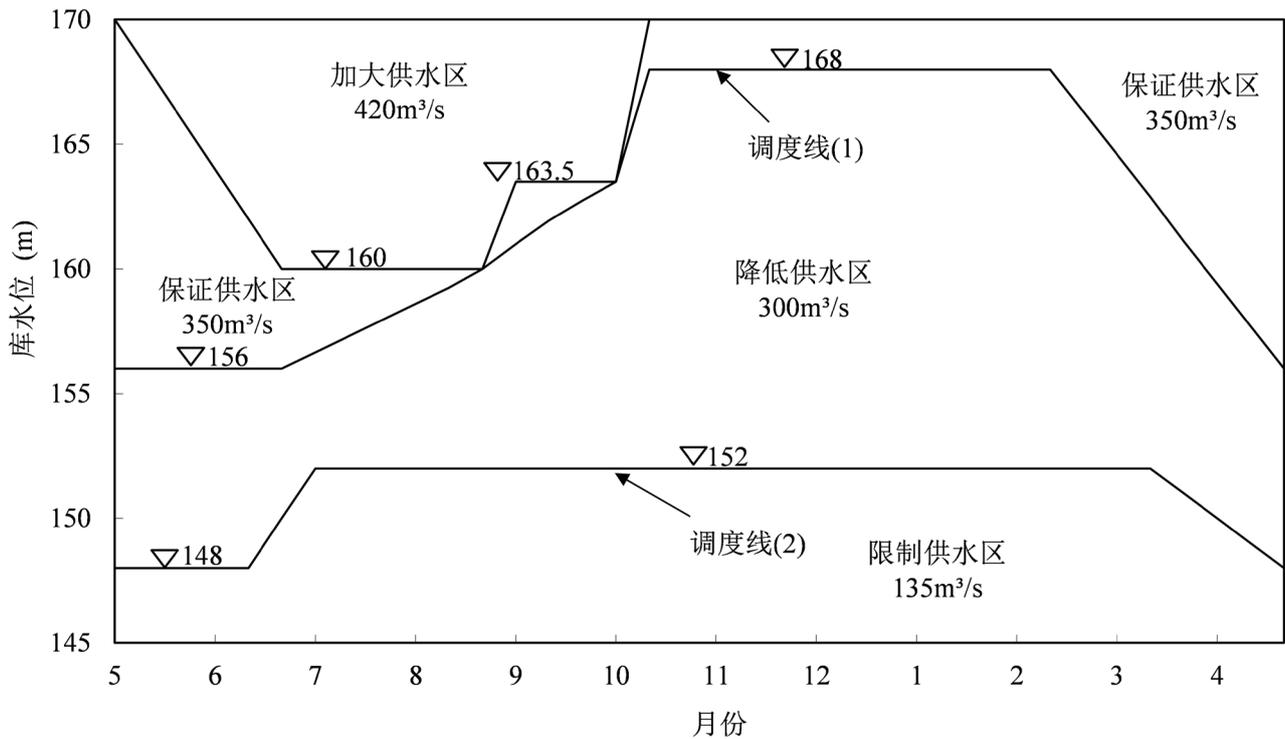


Figure 3. Danjiangkou Reservoir operation chart in normal water supply operation period

图 3. 丹江口水库正常运行期水库供水调度图

Table 3. Percentage of lowest ecological water demand in the rivers

表 3. 河道内最小生态环境需水量占全年的百分比

分区	汛期(5~10月)	非汛期(11~4月)
唐白河	27%	35%
丹江口以下	29%	29%

况下单位面积的多年平均产量, kg/亩, 可根据无灌溉措施地区的调查资料分析确定; P_i 为第 i 种农作物产品的价格, 元/kg; m 为农作物种类的总数目; C_a 为农业用水成本, 元/ m^3 ; W_a 为农业用水量, m^3 。

工业和生活用水净效益系数按下式计算:

$$P_i = \frac{10000 \times \gamma_i - C_i}{q_i} \quad (18)$$

式中: P_i 为工业用水净效益系数, 元/ m^3 ; q_i 为万元工业增加值用水量, m^3 ; C_i 为工业用水的供水成本, 元/ m^3 ; γ_i 为工业供水效益分摊系数。

4. 结果与讨论

4.1. 三步法求解结果及分析

HWP 模型是让单个分区的效益最大化, 据此求得各分区的配置水量。如模型 1 即代表进行水资源配置时, 随州市取最大经济效益。从表 4 中数据分析可知, 位于唐白河流域的分区, 其配置效益受其它分区配水影响较大, 而丹江口干流以下区域由于受到水库调蓄优化, 配置效益不受其它分区的配水影响。

本次模拟步长为月, 故利用 HRHWP 模型可求得 12 个月的效益比值, 对每个分区而言, 为了保证配水公平性, 在同一月份各个分区的效益比值相同, 具体结果见表 5。可以看出, 由于区域夏季需水量最大, 实际用水满足程度相对偏低, 因此其效益比值较其它季节小, 而春、秋和冬季的效益比值均超过 0.9。

根据 FWP 模型求解得到各分区的最优配置水量(表 6), 在 50% 需水频率情况下, 汉江中下游湖北区域河道外的总缺水量为 3.47 亿 m^3 , 其中农业和工业缺水量分别为 3.37 亿 m^3 和 972 万 m^3 , 生活用水基本满足要求。从分区来看, 主要集中在唐白河流域的随州和襄阳市, 其中, 随州市农业缺水率高达 33.1%, 襄阳市农业缺水率为 11.7%。

4.2. 不同频率配置结果及分析

2020 规划水平年取农业灌溉需水频率分别为 50%, 75% 和 95%, 采用各计算分区 1956~2000 年逐月长

Table 4. Optimal benefit for each division in 2020 in the middle and lower Han River basin (Unit: 0.1 billion yuan)

表 4. 汉江中下游 2020 水平年各分区最优效益(单位: 亿元)

分区	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8
随州市	4.95	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63
襄阳市	638.36	760.38	638.36	638.36	638.36	638.36	638.36	638.36
神农架林区	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
十堰市	54.84	54.84	54.84	54.84	54.84	54.84	54.84	54.84
荆门市	301.28	301.28	301.28	301.28	301.28	301.28	301.28	301.28
孝感市	110.03	110.03	110.03	110.03	110.03	110.03	110.03	110.03
天门-潜江-仙桃	356.98	356.98	356.98	356.98	356.98	356.98	356.98	356.98
武汉市	561.41	561.41	561.41	561.41	561.41	561.41	561.41	561.41

Table 5. Benefit ratio of each month calculated by the HRHWP model

表 5. HRHWP 模型求得的各月效益比

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
λ	0.97	0.95	0.91	0.93	0.80	0.81	0.76	0.80	0.91	0.90	0.95	0.97

系列径流过程,丹江口水库 1956~2000 年长系列入库径流,配合《汉江流域水量分配方案(送审稿)》中的不同水平年的各工程调水过程(含引汉济渭和引江济汉工程)进行汉江中下游湖北地区水库调节和水资源分配计算。

根据建立的水资源配置模型,对汉江流域地区的供水、用水进行了模拟计算,分析了各控制断面 2020 水平年不同需水频率下的供需情况,统计了各控制断面 2020 水平年的缺水量。由表 7 可知,就整个汉江中下游湖北地区而言,频率为 50%、75%和 95%时,研究区域的缺水率分别为 3.11%、3.69%和 3.94%。2020 规划水平年,城镇和农村生活用水基本得到满足;而农业灌溉和河道内生态环境用水缺口较大;需水频率为 50%时,农业灌溉和河道生态需水缺水率分别为 5.15%和 3.28%;频率为 75%时,农业灌溉和河道生态需水缺水率分别为 6.04%

Table 6. Optimal allocation water for each division in 2020 (50%) in the middle and lower Han River basin

表 6. 汉江中下游 2020 年各分区最优配置水量(50%)

分区	农业(万 m ³)			工业(万 m ³)			生活(万 m ³)		
	需水	供水	缺水	需水	供水	缺水	需水	供水	缺水
随州市	3445	2306	1139	138	136	2	199	199	0
襄阳市	274,534	242,520	32,014	170,232	169,262	970	32,123	32,113	10
神农架林区	76	74	2	225	225	0	272	272	0
十堰市	7258	6754	504	4309	4309	0	3281	3281	0
荆门市	137,724	137,652	72	61,476	61,476	0	16,951	16,951	0
孝感市	61,097	61,097	0	49,721	49,721	0	10,016	10,016	0
天门 - 潜江 - 仙桃	144,929	144,929	0	70,565	70,565	0	21,122	21,122	0
武汉市	25,876	25,876	0	23,735	23,735	0	19,949	19,949	0
区域合计	654,939	621,208	33,731	380,401	379,429	972	103,913	103,903	10

Table 7. Water resources supply and demand balance at different frequency in the middle and lower Han River basin

表 7. 汉江中下游区域不同频率水资源供需平衡分析结果

来水频率	项目	城镇生活(万 m ³)	农村生活(万 m ³)	城镇工业(万 m ³)	灌溉农业(万 m ³)	生态环境(万 m ³)	合计(万 m ³)
50%	需水	65,873	38,040	380,401	654,939	395,192	1,534,445
	供水	65,867	38,036	379,429	621,208	382,243	1,486,782
	缺水	6	4	972	33,731	12,949	47,663
	缺水率	0.01%	0.01%	0.26%	5.15%	3.28%	3.11%
75%	需水	65,873	38,040	380,401	744,489	395,192	1,623,993
	供水	65,867	38,036	379,427	699,552	381,147	1,564,028
	缺水	6	4	974	44,937	14,045	59,965
	缺水率	0.01%	0.01%	0.26%	6.04%	3.55%	3.69%
95%	需水	65,873	38,040	380,401	880,247	395,192	1,759,752
	供水	65,867	38,035	379,424	826,759	380,334	1,690,419
	缺水	6	5	977	53488	14,858	69,333
	缺水率	0.01%	0.01%	0.26%	6.08%	3.76%	3.94%

注: 农业含林牧渔畜, 工业含建筑和三产, 生活含河道外生态。

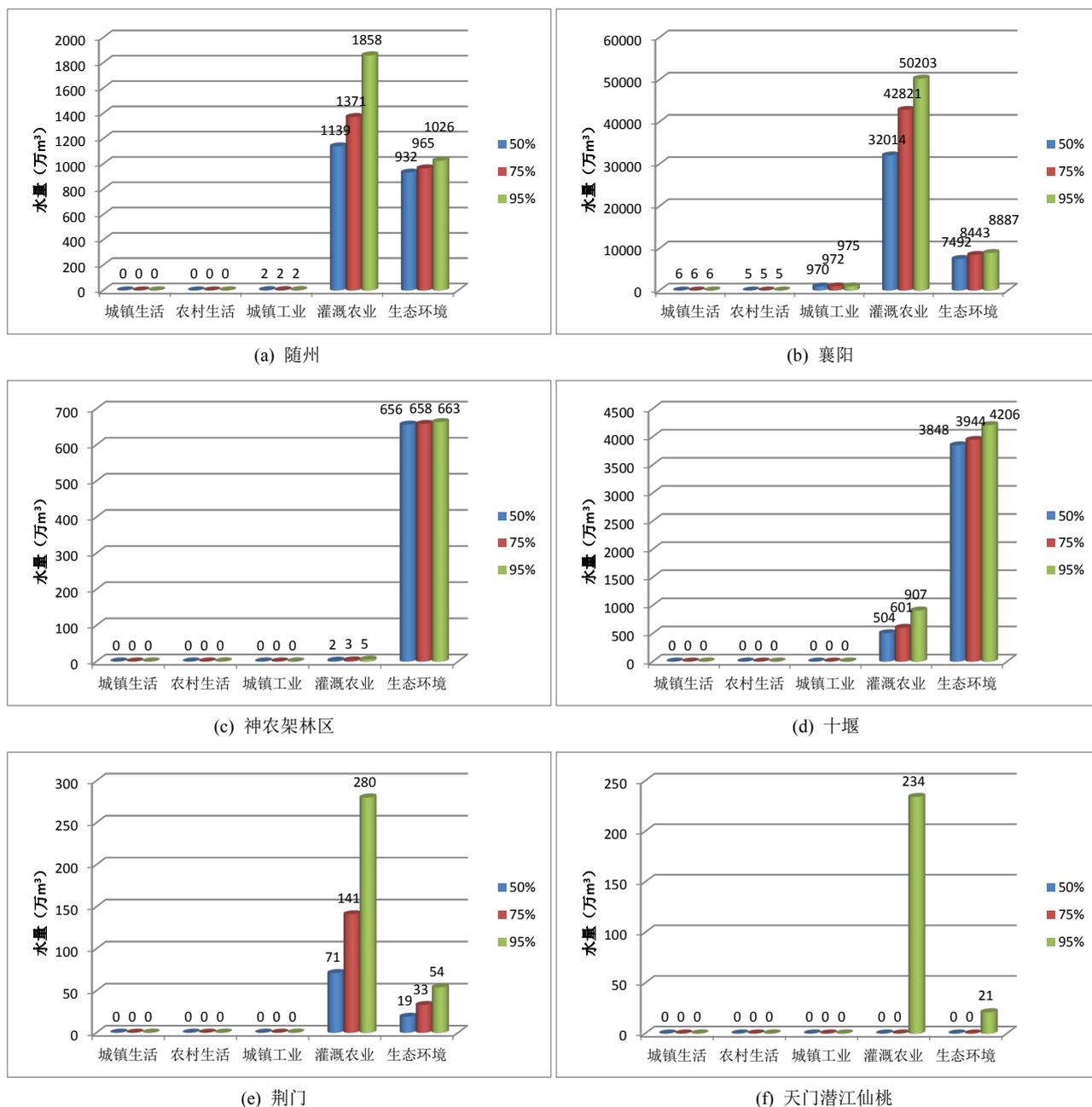


Figure 4. Water shortage for each division in the middle and lower Han River basin
 图 4. 汉江中下游各研究分区缺水水量图

和 3.55%；频率为 95%时，农业灌溉和河道生态需水缺水率分别为 6.08%和 3.76%；随着频率增高，需水缺口逐步增大。由于缺少丹江口水库的调节，唐白河流域的缺水情况仍然明显较丹江口以下干流地区严重，三种频率下，总体缺水率分别达到 24.84%，27.86%和 29.75%。农业灌溉缺水率和河道内生态环境缺水率更是分别高达 30.13%和 30.04%，33.20%和 32.41%，35.05%和 34.00%。受丹江口水库的调蓄，丹江口以下地区总体缺水率分别为 0.49%，0.57%和 0.65%。各子区城镇生活、农村生活和城镇工业用水都基本上没有用水缺口。

分析各分区的水资源供需情况发现(见图 4)，除孝感市和武汉市不缺水外，其他区域均存在不同程度的缺水，其中以唐白河流域随州市的缺水量最大，缺水率为 33.16%；其次是襄阳市，缺水率为 24.51%。

5. 结论

本文为了保证跨区域各用水户的利益分配公平性,通过引入用水效益比指标,将跨区多目标水资源配置问题转化为 HWP-HRHWP-FWP 三阶段模型,大大简化了高维优化求解过程,并以汉江中下游区域水资源优化配置为例,验证了所提方法的适用性,主要得到以下研究结论:

1) HWP 模型结果表明,位于丹江口水库以上的分区,包括随州市和襄阳市,其配置效益受其它用水分区配水影响较大,而丹江口干流以下区域由于受水库调蓄优化,配置效益不受其他分区配水影响,全区总配置效益可达 2150.55 亿元。

2) 从 HRHWP 模型结果得到的效益比看出,由于夏季需水量最大,效益比值相对较小,而春、秋和冬季的效益比均超过 0.9,表明夏季用水满足程度低于其它季节。

3) FWP 模型结果表明,2020 水平年在 50%频率下,汉江中下游湖北区域河道外的总缺水量为 3.47 亿 m^3 ,其中农业和工业缺水分别为 3.37 亿 m^3 和 972 万 m^3 ,生活用水基本满足要求。

4) 当频率分别为 50%、75%和 95%时,2020 年汉江中下游湖北地区缺水率分别为 3.11%、3.69%和 3.94%。其中,城镇和农村生活用水基本得到满足,而农业灌溉和河道内生态环境用水缺口较大。随着频率增高,需水缺口逐步增大。

5) 从三级水资源分区来看,由于缺少丹江口水库的调节,唐白河流域的缺水情况明显较丹江口以下干流地区严重,三种频率下总体缺水率分别达到 24.84%、27.86%和 29.75%。而丹江口以下地区总体缺水率分别仅为 0.49%、0.57%和 0.65%。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(51539009)资助。

参考文献

- [1] 冯耀龙,韩文秀,王宏江,等.面向可持续发展的区域水资源优化配置研究[J].系统工程理论与实践,2003,23(2): 133-138.
FENG Yaolong, HAN Wenxiu, WANG Hongjiang, et al. Study on the sustainable development oriented optimal allocation to region water resources. Systems Engineering-Theory & Practice, 2003, 23(2): 133-138. (in Chinese)
- [2] 王浩,游进军.中国水资源配置 30 年[J].水利学报,2016,47(3): 265-271.
WANG Hao, YOU Jinjun. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 265-271. (in Chinese)
- [3] 齐学斌,黄仲冬,乔冬梅,等.灌区水资源合理配置研究进展[J].水科学进展,2015,26(2): 287-295.
QI Xuebin, HUANG Zhongdong, QIAO Dongmei, et al. Research advances on the reasonable water resources allocation in irrigation district. Advances in Water Science, 2015, 26(2): 287-295. (in Chinese)
- [4] LIU, D. D., GUO, S. L., SHAO, Q. X., et al. Assessing the effects of adaptation measures on optimal water resources allocation under varied water availability conditions. Journal of Hydrology, 2018, 556: 759-774.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.002>
- [5] 邓铭江.中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J].地理学报,2018,73(7): 1189-1203.
DENG Mingjiang. “Three Water Lines” strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1189-1203. (in Chinese)
- [6] 李建勋,解建仓,申静静,等.基于复杂性理论的水资源配置框架及方法体系[J].水电能源科学,2017,35(1): 21-24.
LI Jianxun, XIE Jiancang, SHEN Jingjing, et al. Framework and method system of water resources allocation based on complexity theory. Water Resources and Power, 2017, 35(1): 21-24. (in Chinese)
- [7] 吴丹,吴凤平.基于双层优化模型的流域初始二维水权耦合配置[J].中国人口·资源与环境,2012,22(10): 26-34.
WU Dan, WU Fengping. The coupling allocation of initial two-dimensional water rights in basin based on the bi-hierarchy optimal model. China Population Resources and Environment, 2012, 22(10): 26-34. (in Chinese)
- [8] 张妍,郭萍,张帆,等.基于评价的水资源优化模型适用性比较[J].排灌机械工程学报,2018,36(8): 1-5.
ZHANG Yan, GUO Ping, ZHANG Fan, et al. Applicability comparison of water resources optimization model based on effect

- evaluation. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(8): 1-5. (in Chinese)
- [9] 黄显峰, 邵东国, 顾文权, 等. 基于多目标混沌优化算法的水资源配置研究[J]. *水利学报*, 2008, 39(2): 183-188.
HUANG Xianfeng, SHAO Dongguo, GU Wenquan, et al. Optimal water resources deployment based on multi-objective chaotic optimization algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(2): 183-188. (in Chinese)
- [10] 何国华, 解建仓, 汪妮, 等. 基于模拟退火遗传算法的水资源优化配置研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(6): 196-202.
HE Guohua, XIE Jiancang, WANG Ni, et al. Optimal allocation of water resources based on simulated annealing-genetic algorithm. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(6): 196-202. (in Chinese)
- [11] 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+1463.
LI Weiqian, XIE Jiancang, LI Jianxun, et al. Water resources allocation based on the grey theory and the improved electromagnetism-like algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(12): 1447-1456+1463. (in Chinese)
- [12] 沙金霞. 改进鲸鱼算法在多目标水资源优化配置中的应用[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(4): 18-26.
SHA Jinxia. Application of ameliorative whale optimization algorithm to optimal allocation of multi-objective water resources. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(4): 18-26. (in Chinese)
- [13] 王梟涵, 丁文静, 赖学方. 基于蝙蝠优化算法的水资源配置[J]. *西安工程大学学报*, 2016, 30(2): 268-275.
WANG Xiaohan, DING Wenjing, and LAI Xuefang. Optimal allocation of water resources based on bat algorithm. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2016, 30(2): 268-275. (in Chinese)
- [14] 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 Haijin, 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)
- [15] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 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.
TIAN Jing, GUO Shenglian, LIU Dedi, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin. *Journal of Water Resources Research*, 2018, 7(3): 223-235. (in Chinese)
- [16] ROOZBAHANI, R., ABBASI, B., SCHREIDER, S., et al. A multi-objective approach for transboundary river water allocation. *Water Resources Management*, 2014, 15(28): 5447-5463.
- [17] 甘泓, 汪林, 倪红珍, 等. 水经济价值计算方法评价研究[J]. *水利学报*, 2008, 39(11): 1160-1166.
GAN Hong, WANG Lin, NI Hongzhen, et al. Assessment on methods for calculating economic value of water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(11): 1160-1166. (in Chinese)
- [18] 孙静, 阮本清, 张春玲. 新安江流域上游地区水资源价值计算与分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2007, 5(2): 121-124.
SUN Jing, RUAN Benqing, and ZHANG Chunling. Calculation and analysis of water resources value in upper reaches of Xinan River. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2007, 5(2): 121-124. (in Chinese)
- [19] 沈佩君, 关庆滔. 对湖北江汉平原水稻棉花灌溉效益分摊比例的分析[J]. *水利水电技术*, 1983(8): 15-20.
SHEN Peijun, GUAN Qingtao. Analysis on the proportion of irrigation benefit of rice and cotton in Hubei Jiangnan Plain. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1983(8): 15-20. (in Chinese)