

# Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in the Han River Basin

Lele Deng, Shenglian Guo\*, Qianxun Li, Jing Tian

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei  
Email: leledeng@whu.edu.cn, \*slguo@whu.edu.cn

Received: Mar. 13<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 20<sup>th</sup>, 2020; published: May 21<sup>st</sup>, 2020

## Abstract

According to the status of water resources, social economy and environmental ecology in the Han River basin, a comprehensive evaluation index system consisting of 3 layers and 12 indicators is constructed. Index weights are determined according to the principal component analysis and entropy weight methods. The evaluation standards, fuzzy comprehensive evaluation and set-pair analysis evaluation models are used to comprehensively evaluate the water resources carrying capacity. The results show that the general trend of water resources carrying capacity from 2010 to 2016 gradually decreased first and reached the lowest value in 2013, and then gradually increased. The fuzzy comprehensive evaluation shows that the score of water resources carrying capacity is between 0.55 and 0.58 in each year, and the set-pair analysis shows that its carrying capacity has certain risks. Since the water resources carrying capacity in Han River basin has reached a certain scale, the development and utilization of water resources should be more reasonable and efficient. This study will provide technical support for the planning of Han River ecological and economic belt.

## Keywords

Water Resources Carrying Capacity, Fuzzy Comprehensive Evaluation, Set-Pair Analysis, Han River Basin

# 汉江流域水资源承载力综合评价研究

邓乐乐, 郭生练\*, 李千珣, 田 晶

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  
Email: leledeng@whu.edu.cn, \*slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年3月13日; 录用日期: 2020年4月20日; 发布日期: 2020年5月21日

作者简介: 邓乐乐(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事水资源规划与管理研究, Email: leledeng@whu.edu.cn。  
\*通讯作者: 郭生练(1957-), 男, 武汉大学二级教授, slguo@whu.edu.cn。

## 摘要

根据汉江流域水资源、社会经济和环境生态现状,构建由3层12项指标组成的综合评价指标体系。依据主成分分析法和熵权法确定指标权重,建立评价标准、模糊综合评判和集对分析评价模型,对汉江流域水资源承载力进行综合评价。结果显示汉江流域2010~2016年水资源承载力大体变化趋势为先逐步降低,在2013年达到最低值,后逐渐上升。模糊综合评价显示汉江流域水资源承载力各年得分在0.55~0.58之间,集对分析显示其承载力具有一定风险性。汉江流域水资源承载力已达一定规模,应合理开发并高效利用水资源。该研究将为汉江生态经济带可持续高质量发展规划提供技术支撑。

## 关键词

水资源承载力,模糊综合评判,集对分析评价,汉江流域

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

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

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



Open Access

## 1. 研究背景

随着我国经济社会的高速发展、社会生产力水平的提高以及人口的增长,人民对生活环境质量的要求进一步提高,水资源的需求量大幅度提升。而社会经济的发展也带来了诸多水污染和水生态环境恶化等问题。“承载力”一词源于生态学,原用以衡量特定区域在某一环境条件下可维持某一物种个体的最大数量。水资源承载力是一个国家或地区持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分,且往往是制约人类社会发展的“瓶颈”因素,它对一个国家或地区综合发展规模有至关重要的影响。水资源承载力研究已引发社会高度关注并成为水资源科学中一个重点和热点问题[1][2]。

常用的水资源承载力评价方法主要有层次分析法、主成分分析法、熵权法等,但这些方法在评价过程中未考虑不确定因素的影响。Zadeh 教授[3] 1965 年提出模糊集合理论的概念,用以表达事物的不确定性。模糊综合评价法充分考虑与被评价事物相关的各个因素以及各因素之间的关联性,具有模糊性、定量性和层次性等特点,弥补了过多考虑单因素的不足,从而对其作出合理的综合评价。席丹墀等[4]利用分层模糊评价法评价了京津冀地区水资源承载力状况,评价结论显示京津冀地区水资源承载能力总体上一一般。肖月洁等[5]针对四川省水土资源承载力,构建了模糊综合评价模型分析其区域差异及动态变化,发现四川省的水土资源承载力小幅提升。刘朝露等[6]采用熵值法和模糊评判法联合评价临海市 2010 年来水资源承载力水平,对该市水资源可持续利用决策具有一定的参考价值。张琦等[7]选用了 10 个主要影响因素作为评价因子,应用模糊综合评判模型对东北三省水资源承载力的具体状况开展定量研究,发现该地区水资源开发状况已达相当规模,但水资源短缺的现象仍然存在。赵克勤 1989 年提出了集对分析理论[8],该理论从同、异、反三个层面分析两个事物之间的联系。刘童等[9]利用集对分析构建了五元联系数模型对四川省水资源承载力进行了动态评价。金菊良等[10]重点综述了水资源集对关系结构分析、水资源集对预测、水资源集对评价、水资源集对决策调控 4 个方向的研究进展,并展望了水资源集对分析研究的未来发展趋势。

综上,现阶段的水资源承载力研究仍然存在诸多问题,例如对承载力的内涵尚没有相对标准的定义,评价方法未能充分考虑各评价指标的不确定问题等。本文通过对汉江流域水资源承载力问题的研究,探讨汉江流域水资源承载力的内涵,构建汉江流域水资源承载力的指标评价体系并对其进行实证分析,提出提升汉江流域水资源承载力的对策建议。

## 2. 研究区概况和数据来源

### 2.1. 汉江流域概况

汉江是长江最大的支流，发源于秦岭南麓，干流流经陕西、湖北两省，注入长江，干流全长 1577 km，流域面积约 15.9 万 km<sup>2</sup>。流域水系发育，支流众多，涉及河南、湖北、重庆、四川、陕西、甘肃六个行政区。汉江流域处于东亚副热带季风区，冬季受欧亚大陆冷高压影响，夏季受西太平洋副热带高压影响，气候具有明显的季节性。汉江流域多年平均降水量为 904 mm，低于长江流域平均值，折合降水总量为 1399.5 亿 m<sup>3</sup>。降水年内分配极为不均匀，径流主要由降水补给，水量丰沛，径流年内分配不均，主要集中在 5~10 月，降水占年降水的 55%~65%，空间分布上总的趋势由南向北、由西向东递减。

汉江流域自然资源丰富、经济基础雄厚、生态条件优越，在流域经济社会发展格局中具有重要的战略地位和突出的带动作用。丹江口水库是我国南水北调中线工程的水源地，承担向北京、天津、河南、河北主要城市的供水任务。开展汉江流域的水资源承载力研究，做好汉江生态经济带的建设规划，有利于推动汉江流域经济社会可持续的高质量发展。

### 2.2. 数据来源

本研究数据主要来自以下：汉江流域水资源统计公报、各省(直辖市、自治区)统计年鉴(2010~2016)、各省(直辖市、自治区)水资源公报(2010~2016)、各省(直辖市、自治区)环境统计公报(2010~2016)及政府官方网站公示的相关数据。

## 3. 汉江水资源承载力评价指标体系

### 3.1. 指标体系构建

水资源承载力受水资源禀赋条件、社会经济发展水平、环境生态保护水平等诸多方面的影响。通过对水资源承载力内涵理解和影响因素分析，结合不同指标的特性，分析其科学性、代表性、可获得性等性质，构建了包含 3 个系统层，12 个指标层的水资源承载力评价指标体系，见表 1。指标极性中，正向即代表其值越大水资源承载力越强，负向则代表其值越大水资源承载力越弱。

Table 1. Evaluation index system of water resources carrying capacity in Han River

表 1. 汉江水资源承载力评价指标体系

目标层	特性层	指标层	指标含义	指标极性
水资源承载力	水资源子系统	X1 产水模数	单位面积的年水资源量	正向
		X2 供水模数	单位面积的供水量	负向
		X3 水资源开发利用率	供水量与水资源总量的比值	负向
		X4 人均水资源量	水资源总量与地区常住人口的比值	正向
		X5 人均 GDP	地区国内生产总值与常住人口的比值	正向
		X6 人口密度	单位面积土地上居住的人口数	负向
	社会经济子系统	X7 城镇化率	常住城镇人口占常住总人口的比例	负向
		X8 万元 GDP 用水量	总用水量与总 GDP 的值	负向
		X9 人均生活用水量	单位人口的生活用水量	负向
	环境生态子系统	X10 万元工业增加值用水量	工业用水量与工业增加值的比值	负向
		X11 生态用水率	生态用水量与总用水量的比值	正向
		X12 单位面积废水排放量	年废水排放总量与地区面积的比值	负向

### 3.2. 指标赋权

在综合评价中, 考虑各评价因子对水资源承载力的影响不同以及各个评价指标之间的各个量纲不同, 可采用主成分分析法和熵权法[11]。

主成分分析法的计算步骤主要包括: ① 数据标准化, ② 用标准化数据矩阵计算相关系数矩阵, ③ 求相关系数矩阵的特征值与相应的特征向量, ④ 确定主成分个数, 提取主成分。同一般利用主成分分析中主成分系数来确定主成分的权重不同。本研究根据各指标传递给决策者信息量的大小确定主成分的权重, 以熵权法计算的指标权重结果见表 2。在 12 个所选指标因子中, 人口密度、人均生活用水量、生态用水率及单位面积废水排放量所占权重较大, 均达到 0.09 以上, 万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量权重较小, 处于 0.07 以下。

### 3.3. 指标分级

指标体系建立以后, 需要对各单项指标进行分析, 确立其合理的取值范围和分级标准[12]。将研究区水资源承载力划分为 5 种状态, 各单项指标也相应地划分为 5 个等级(见表 2)。其中 I 级属情况很好, 表示本区水资源的供给情况比较乐观; II 级属情况较好, 区内水资源对社会经济的发展有较好的保障; III 级属情况一般, 表示本区水资源承载力系统之间处于基本平衡状态; IV 级属情况较差, 区内水资源对社会经济的发展有一定的保障, 但水资源开发利用程度已不宜继续扩大; V 级属情况很差, 表示水资源生态环境系统面临巨大破坏风险。

**Table 2.** Estimated evaluation index weights and classification standards of water resources carrying capacity  
**表 2.** 水资源承载力状态评价指标权重和分级标准

指标(单位)	权重	分级				
		I	II	III	IV	V
X1 产水模数(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	0.0777	>25	20~25	15~20	10~15	≤10
X2 供水模数(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	0.0788	<1	1~3	3~10	10~15	>15
X3 水资源开发利用率(%)	0.0713	<20	20~35	35~45	45~60	>60
X4 人均水资源量(m <sup>3</sup> /人)	0.0775	>550	500~550	450~500	400~450	<400
X5 人均 GDP(万元/人)	0.0893	>5	2.5~5	1~2.5	0.4~1	<0.4
X6 人口密度(人/km <sup>2</sup> )	0.0959	<110	110~150	150~200	200~250	>250
X7 城镇化率(%)	0.0892	<15	15~30	30~50	50~60	>60
X8 万元 GDP 用水量(m <sup>3</sup> /万元)	0.0660	<80	80~110	110~250	250~600	>600
X9 人均生活用水量(L/d)	0.0908	<100	100~150	150~200	200~300	>300
X10 万元工业增加值用水量(m <sup>3</sup> /万元)	0.0681	<8	8~10	10~15	15~20	>20
X11 生态用水率(%)	0.1000	>4	3~4	2~3	1~2	<1
X12 单位面积废水排放量(万吨/km <sup>2</sup> )	0.0954	<1.5	1.5~2.0	2~2.5	2.5~3.0	>3.0

## 4. 水资源承载力评价结果分析

### 4.1. 模糊综合评价

模糊综合评价数学模型的建立步骤[8]主要如下: ①建立评价因子集与评价集; ②建立模糊关系矩阵  $R$ ; ③权重向量  $W$  的计算; ④建立模糊综合评价模型  $B = W \cdot R$ 。

隶属函数的建立是模糊数学应用的关键, 根据隶属函数可确定各指标实际值的隶属度, 进行单因素评价, 并得到隶属函数关系矩阵。隶属函数的种类有很多, 选取不当会偏离实际情况, 影响计算结果。采用简单实用

的“降半梯形分布”定义上述 12 项指标其隶属度函数。当评价指标越小越优时，各指标对 I、II、III、IV、V 级水资源承载力的隶属度函数为：

$$\mu_1(u) = \begin{cases} 1 & u \leq a_1 \\ \frac{a_2 - u}{a_2 - a_1} & a_1 < u < a_2 \\ 0 & u \geq a_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_2(u) = \begin{cases} 0 & u \leq a_1, u \geq a_3 \\ \frac{u - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < u < a_2 \\ \frac{a_3 - u}{a_3 - a_2} & a_2 \leq u < a_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_3(u) = \begin{cases} 0 & u \leq a_2, u \geq a_4 \\ \frac{u - a_2}{a_3 - a_2} & a_2 < u < a_3 \\ \frac{a_4 - u}{a_4 - a_3} & a_3 \leq u < a_4 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_4(u) = \begin{cases} 0 & u \leq a_3, u \geq a_5 \\ \frac{u - a_3}{a_4 - a_3} & a_3 < u < a_4 \\ \frac{a_5 - u}{a_5 - a_4} & a_4 \leq u < a_5 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_5(u) = \begin{cases} 0 & u < a_4 \\ \frac{u - a_4}{a_5 - a_4} & a_4 \leq u < a_5 \\ 1 & u \geq a_5 \end{cases} \quad (5)$$

式中： $a_1$  为 I 级和 II 级的临界点， $a_5$  为 IV 级和 V 级的临界点， $a_2$  为 II 级的中间值， $a_3$  为 III 级的中间值， $a_4$  为 IV 级的中间值。对于越大越优型指标，隶属度函数的计算公式，只需将上式(1)~(5)中的  $\leq$ 、 $<$  改为  $\geq$ 、 $>$ ，将  $\geq$ 、 $>$  改为  $\leq$ 、 $<$  即可。确定了模糊评价矩阵  $R$  和权重集  $W$  后，根据综合评价模型，综合评价结果矩阵  $B = W \cdot R$  得到汉江流域各年份水资源承载力模糊综合评价结果  $B_1 \sim B_7$ 。

为了更好地反映水资源承载力的情况，对各指标影响做定量化，对等级 I, II, III, IV, V 评分分别取  $\alpha_1 = 0.95$ ， $\alpha_2 = 0.75$ ， $\alpha_3 = 0.50$ ， $\alpha_4 = 0.25$ ， $\alpha_5 = 0.05$ 。即： $A = I \cdot \alpha_1 + II \cdot \alpha_2 + III \cdot \alpha_3 + IV \cdot \alpha_4 + V \cdot \alpha_5$ ，数值越高，表示水资源承载力潜力越大，计算结果见表 3。由表 3 可见，2010~2016 年汉江流域水资源承载力综合评分值分别为 0.5727，0.5732，0.5605，0.5551，0.5677，0.5685，0.5761，均处于中等略偏上水平，表明汉江水资源开发利用已经初具规模，仍有一定的开发利用潜力。以最大隶属度原则确定模糊综合评价对应等级结果，2010~2016 年的评价等级结果分别是 I 级、I 级、I 级、I 级、II 级、I 级、I 级，表明汉江流域水资源承载状况较好。分析模糊关系矩阵可知，2014 年年人均 GDP、水资源开发利用率、万元 GDP 用水量 and 人均生活用水量这些指标隶属于第 II 等级的隶属度较高，抬高了整个系统对第 II 等级的隶属度。流域水资源承载力综合评分随时间上先下降后上升，变化趋势同第 I 等级隶属度。最高综合评分出现在 2016 年，最低评分出现在 2013 年，二者相差 0.0211。在对各等级的隶属度数值上，出现了对于 II 级隶属度先上升后下降，III 级隶属度逐步下降，IV 级隶属度逐步上升，V 级隶属度保持不变的情况。



**Table 3.** Fuzzy comprehensive evaluation results of water resources carrying capacity in Han River  
**表 3.** 汉江水资源承载力模糊综合评价结果

年份	I	II	III	IV	V	综合评分值 A
2010	0.367	0.068	0.264	0.134	0.168	0.5727
2011	0.331	0.145	0.211	0.145	0.168	0.5732
2012	0.277	0.203	0.196	0.157	0.168	0.5605
2013	0.256	0.225	0.189	0.162	0.168	0.5551
2014	0.264	0.265	0.136	0.167	0.168	0.5677
2015	0.284	0.242	0.129	0.177	0.168	0.5685
2016	0.319	0.219	0.107	0.187	0.168	0.5761

### 4.2. 集对分析评价

集对分析从系统性和代表性角度选择水资源系统评价指标体系并确定等级评价标准，将评价样本某指标值  $x_l$  ( $l=1,2,3,\dots,m$ ;  $m$  为评价指标数) 看成一个集合  $A_l$ ，把相应指标的评价标准看成另一个集合  $B_k$  ( $k=1,2,3,\dots,K$ ;  $K$  为评价等级数)，则  $A_l$  与  $B_k$  可构成一个集对  $H(A_l, B_k)$ 。为了评价方便，可将  $B_k$  特定为某指标 1 级评价标准构成的集合。设评价样本为集合  $A_l$ ，1 级评价标准为集合  $B_k$ ，则根据 SPA 原理，集对  $H(A_l, B_k)$  的  $K$  元联系度可定义为：

$$\mu = \mu_{A \sim B} = \sum_{l=1}^m w_l u_l = \sum_{l=1}^m w_l a_l + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,1} i_1 + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,2} i_2 + \dots + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,K-2} i_{K-2} + \sum_{l=1}^m w_l c_l j \quad (6)$$

式中： $w_l$  为指标  $l$  的权重。

设  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$  分别对应各指标等级 I~V 的阈值，则对于越小越优指标，某样本值  $x_l$  与该指标 1 级评价标准的联系度  $\mu_l$  为：

$$u_l = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, & x_l \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x_l}{s_2 - s_1} i_1 + \frac{2x_l - 2s_1}{s_2 - s_1} i_2 + 0i_3 + 0j, & s_1 < x_l \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2 + s_3 - 2x_l}{s_3 - s_1} i_1 + \frac{2x_l - s_1 - s_2}{s_3 - s_1} i_2 + 0i_3 + 0j, & \frac{s_1 + s_2}{2} < x_l \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{s_3 + s_4 - 2x_l}{s_4 - s_2} i_2 + \frac{2x_l - s_2 - s_3}{s_4 - s_2} i_3 + 0j, & \frac{s_2 + s_3}{2} < x_l \leq \frac{s_3 + s_4}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2s_4 - 2x_l}{s_4 - s_3} i_3 + \frac{2x_l - s_3 - s_4}{s_4 - s_3} j, & \frac{s_3 + s_4}{2} < x_l \leq s_4 \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \dots + 0i_{K-2} + 1j, & x_l > s_4 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $s_1 \leq s_2 \leq \dots \leq s_{K-1} \leq s_K$ 。对于越大越优指标，将式(7)各指标阈值倒序调换，各样本值对应到各区间即可得对应联系度  $m$ 。

联系数的集对势函数是联系数的伴随函数，其含义为联系数所表达的研究对象在当前宏观期望层次上所处的相对确定性状态和发展趋势。采用减法集对势进行态势分析。减法集对势是在集对分析的集对的同一度、差异度和对立度的基础上，把不确定性项  $b$  的值按照差异度系数按照比例取值法进行分配，如下：

$$s_f(u) = (a - c)(1 + b) \quad (8)$$

若差异度项按最乐观或最悲观情形分配到同一度项或对立度项，就可得到相应的最大减法集对势(乐观减法

集对势)  $s_{fa}(u) = (a+b) - c$  或最小减法集对势(悲观减法集对势)  $s_{fc}(u) = a - (c+b)$ 。则减法集对势  $s_f(u) \in [-1.0, 1.0]$ ，根据“均分原则”可把减法集对势  $S_f(u)$  划分为 5 个势级：反势  $S_f(u) \in [-1.0, -0.6)$ ，偏反势  $S_f(u) \in [-0.6, -0.2)$ ，均势  $S_f(u) \in [-0.2, 0.2]$ ，偏同势  $S_f(u) \in (0.2, 0.6]$ ，同势  $S_f(u) \in (0.6, 1.0]$ 。处于反势或偏反势的指标是引起区域水资源承载力较弱的主要因素，因此可被诊断识别为区域水资源承载力的脆弱性指标，是水资源承载力调控的主要对象。

#### 1) 汉江流域水资源承载力评价

将收集的数据，借助于前文有关联系度计算的相关公式，并基于五元联系数模型中差异度的分布区间，得到了汉江流域水资源承载力联系度变化区间，见表 4。联系度值越大，表明水资源承载力越高。

**Table 4.** Connection degree variation ranges of water resources carrying capacity in Han River

**表 4.** 汉江流域水资源承载力联系度变化区间值

年份	综合	水资源	社会经济	生态环境
2010	[0.34, 0.65]	[0.57, 0.75]	[-0.07, 0.45]	[1.00, 1.00]
2011	[0.33, 0.67]	[0.51, 0.74]	[-0.04, 0.49]	[1.00, 1.00]
2012	[0.29, 0.66]	[0.34, 0.67]	[-0.02, 0.52]	[1.00, 1.00]
2013	[0.27, 0.66]	[0.28, 0.61]	[-0.02, 0.55]	[1.00, 1.00]
2014	[0.31, 0.69]	[0.36, 0.69]	[0.01, 0.56]	[1.00, 1.00]
2015	[0.31, 0.68]	[0.36, 0.69]	[0.01, 0.55]	[1.00, 1.00]
2016	[0.34, 0.68]	[0.41, 0.74]	[0.03, 0.52]	[1.00, 1.00]
<i>m</i>	0.35	0.29	0.53	0.00

注：表中 *m* 为每个对象在 2010~2016 年间承载力联系度区间长度的均值。

另外，根据五元联系数表达式，可以总结如下：若一个系统的不确定性越高，其联系度区间的极差就越大，从表 4 可以发现，3 个子系统之间的不确定排序(从大到小)为社会经济(0.53) > 水资源(0.29) > 生态环境(0)。生态环境系统中，生态环境用水率最高为 0.92%，出现在 2016 年，该指标各年数值均落于等级 V 区间内；单位面积废水排放量最高为 1.41 万吨/km<sup>2</sup>，出现在 2011 年，该指标各年数值均落于等级 I 区间内，故出现联系数中 *b* 值为 0，因此最终生态环境系统不确定性为 0。汉江水资源承载力联系度整体而言在 2010~2016 年间经历了先下降后提高的过程，中值从 2010 年的 0.49 下降到 2013 年的 0.47，再上升至 2016 年的 0.51，水资源承载状态变化不甚明显。汉江水资源承载力取决于 3 个子系统，其中社会经济的贡献最大，占 49.92%；水资源的贡献次之，为 30.53%；生态环境的贡献为 19.55%。社会经济的联系度在 2010~2016 年间持续提高，生态环境联系度一直保持在高位，水资源联系度则处于先降后升状态，造成了汉江水资源综合联系度在这段时间内呈现出波动变化。

生态环境子系统联系度常年保持在最高水平，社会经济子系统联系度在 7 年间不断上升，水资源子系统联系度经历了先降后升，具有高不稳定性。这说明汉江流域在水资源年际不均的条件下，实现了社会经济的快速发展，但是生态环境也一直面临着巨大压力，人与自然的矛盾凸显，亟需针对当前的发展思路进行调整，以适应新形势下的可持续发展的要求。

水资源子系统所包含的 4 个指标中，水资源开发利用率和供水模数为限制类指标，根据历史资料可知，两者在 7 年间均出现了先增后降的情况，同时产水模数出现了先降后增的情况，因此造成了其联系度出现了波动。因此，在无法控制天然降雨的前提下，做好区域的水资源存蓄、分配及合理利用，并加大节约用水力度，对改善水资源子系统的承载能力有一定的作用。

#### 2) 汉江流域水资源承载力发展趋势和风险

将有关数据进行计算整理得到了汉江流域水资源承载力五元联系数和减法集对势结果，见表 5。由表 5 可

知，汉江流域水资源承载力的五元现状联系系数在 2010~2016 年间，除了在 2010 年处于偏同势，剩下 6 年均处于均势区，变化不大，具有发展方向平稳的态势。其中汉江流域水资源承载力风险在 2010 年得到最低，对应减法集对势为 0.2292；在 2013 年水资源承载力风险最高，对应减法集对势为 0.1044。虽然从态势分析上看在 2010~2016 年间汉江流域水资源承载力态势多处于均势状态，但减法集对势的结果出现了一定程度的波动，很易出现减法集对势在 0 以下的情况，对整个水资源承载力系统不利。

**Table 5.** Results of connection number and set-pair subtractive situation in Han River  
**表 5.** 汉江流域联系系数及减法集对势结果

评价对象	年份	现状五元联系系数					减法集对势	态势分析
		<i>a</i>	<i>b</i> <sub>1</sub>	<i>b</i> <sub>2</sub>	<i>b</i> <sub>3</sub>	<i>c</i>		
水资源承载力	2010	0.37	0.07	0.26	0.13	0.17	0.2292	偏同势
	2011	0.33	0.14	0.21	0.14	0.17	0.1897	均势
	2012	0.28	0.20	0.20	0.16	0.17	0.1291	均势
	2013	0.26	0.23	0.19	0.16	0.17	0.1044	均势
	2014	0.26	0.26	0.14	0.17	0.17	0.1141	均势
	2015	0.28	0.24	0.13	0.18	0.17	0.1375	均势
	2016	0.32	0.22	0.11	0.19	0.17	0.1771	均势
水资源子系统	2010	0.74	0.00	0.14	0.12	0.00	0.8057	同势
	2011	0.66	0.08	0.12	0.14	0.00	0.7382	同势
	2012	0.51	0.14	0.22	0.14	0.00	0.5917	偏同势
	2013	0.51	0.04	0.32	0.13	0.00	0.5917	偏同势
	2014	0.51	0.14	0.23	0.12	0.00	0.5917	偏同势
	2015	0.51	0.16	0.21	0.13	0.00	0.5917	偏同势
	2016	0.51	0.21	0.17	0.11	0.00	0.5917	偏同势
社会经济子系统	2010	0.09	0.14	0.45	0.19	0.14	-0.0592	均势
	2011	0.07	0.24	0.35	0.21	0.14	-0.0900	均势
	2012	0.05	0.32	0.26	0.23	0.14	-0.1060	均势
	2013	0.01	0.43	0.18	0.25	0.14	-0.1621	均势
	2014	0.03	0.44	0.13	0.26	0.14	-0.1401	均势
	2015	0.07	0.39	0.13	0.28	0.14	-0.0871	均势
	2016	0.14	0.31	0.11	0.30	0.14	0.0016	均势
生态环境子系统	2010	0.49	0.00	0.00	0.00	0.51	-0.0235	均势
	2011	0.49	0.00	0.00	0.00	0.51	-0.0235	均势
	2012	0.49	0.00	0.00	0.00	0.51	-0.0235	均势
	2013	0.49	0.00	0.00	0.00	0.51	-0.0235	均势
	2014	0.49	0.00	0.00	0.00	0.51	-0.0235	均势
	2015	0.49	0.00	0.00	0.00	0.51	-0.0235	均势
	2016	0.49	0.00	0.00	0.00	0.51	-0.0235	均势



在水资源子系统中, 现状系数在 2010~2011 年间为同势, 在 2012~2016 年间为偏同势, 均显示出较好的发展态势, 但势度有所下降。但细致分析表中的 5 个分量, 可以发现,  $a$  的值在 7 年间从 0.74 下降到 0.66, 最终下降到 0.51, 而隶属于 II、III 等级的  $b_1$ 、 $b_2$  值却在波动有所上升, 这表明水资源系统面临的承载压力有所增加, 这与减法集对势的结果一致。上述结果表明, 水资源系统风险存在着加大趋势, 但现条件下仍能在一定程度上支撑流域社会经济发展。

社会经济子系统的减法集对势从 -0.0592 先下降至 -0.1621, 再逐步回升至 0.0016, 其中有主要两大影响指标, 分别是人均 GDP 和万元 GDP 用水量, 在这 7 年间, 人均 GDP 从 2010 年位于 III 等级的 2.23 万元/人逐步提升至 2016 年位于 II 等级的 4.46 万元/人, 万元 GDP 用水量从 2010 年位于 III 等级的 188.38 m<sup>3</sup>/万元下降至 2016 年位于 II 等级的 90.89 m<sup>3</sup>/万元。而人口密度和城镇化率的不断提高以及万元工业增加值用水量虽不断下降但仍处于高位的情形, 形成了这种波动变化态势。

环境生态子系统中各年各系数及减法集对势结果相同, 这与环境生态子系统中指标所处等级状态紧密相关。

综合上述对汉江流域水资源承载力情况的分析, 可以看出, 水资源子系统表现最好, 风险最低; 其次是社会经济子系统, 在近 7 年来逐步提升; 最后是环境生态子系统, 在 7 年中态势保持不变, 并且两级分化严重, 其中一指标单位面积废水排放量能维持在 I 级等级水平, 而另一指标环境生态用水率也维持在 V 级等级水平, 整体上并不利于环境生态系统的发展。

## 5. 结论

根据汉江流域水资源和经济社会发展现状, 结合指标特性构建了包含 3 个系统层 12 个指标层的水资源承载力评价体系。采用主成分分析法和熵权法相结合确定各指标权重, 并选用模糊综合和集对分析理论分别对汉江流域水资源承载力状况进行建模评估, 主要结论如下:

1) 模糊综合评判结果显示 2010~2016 年汉江流域水资源承载力综合评分值均略高于 0.50, 处于中等稍微偏上水平, 各年的评价等级分别是 I 级、I 级、I 级、I 级、II 级、I 级、I 级, 表明汉江流域水资源承载状况较好。

2) 集对分析理论评判结果显示, 汉江水资源承载力联系度在 2010~2016 年间经历了先下降后提高的过程, 中值从 2010 年的 0.49 下降到 2013 年的 0.47, 再上升至 2016 年的 0.51, 水资源承载状态变化不甚明显。采用减法集对势对水资源承载力发展趋势和风险进行分析, 发现水资源系统风险存在着加大趋势, 系统减法集对势有出现反势或偏反势的较大可能。

本研究所采用的模糊综合评价和基于集对分析的评价均考虑了水资源承载力系统中的不确定性因素, 且反映的水资源承载力状态与 2010~2016 年间先降后升的趋势吻合, 可根据实际需要选择简便可行的评价方法。两种评价方法均显示汉江流域水资源开发已达一定规模, 但仍有一定的开发潜力, 要深化产业结构改革, 坚持节水优先方针, 加强水资源综合规划, 加大环境生态保护力度, 推动汉江生态经济带的高质量发展。

## 基金项目

国家自然科学基金重点项目(51539009)资助。

## 参考文献

- [1] 邢菊, 周亮广, 金菊良, 程启鹏. 江淮分水岭地区水资源承载力系统结构模型评价[J]. 人民长江, 2019, 50(7): 110-116+122.  
XING Ju, ZHOU Lianguang, JIN Juliang, and CHENG Qipeng. Evaluation on water resources carrying capacity in Jianghuai watershed based on system structure model. Yangtze River, 2019, 50(7): 110-116+122. (in Chinese)
- [2] 张宁宁, 粟晓玲, 周云哲, 牛纪苹. 黄河流域水资源承载力评价[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1759-1770.

- HANG Ningning, SU Xiaoling, ZHOU Yunzhe, and NIU Jiping. Water resources carrying capacity evaluation of the Yellow River basin based on EFAST weight algorithm. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1759-1770. (in Chinese)
- [3] ZADEH, L. A. Soft computing and fuzzy logic. *IEEE Software*, 1994, 11(6): 48-56.
- [4] 席丹墀, 许新宜, 韩冬梅, 杨中文. 京津冀地区水资源承载力评价[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5): 575-581.  
XI Danchi, XU Xinyi, HAN Dongmei, and YANG Zhongwen. Evaluating water resources-carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(5): 575-581. (in Chinese)
- [5] 肖月洁, 杨中华, 马历, 唐宏. 基于模糊综合评价的四川省水土资源承载力时空演变分析[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(5): 106-114.  
XIAO Yuejie, YANG Zhongjian, MA Li, and TANG Hong. Spatiotemporal change in carrying-capacity of land and water resources in Sichuan province calculated using fuzzy assessment method. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(5): 106-114. (in Chinese)
- [6] 刘朝露, 陈星, 崔广柏, 许钦, 董凤军, 王君诺. 临海市水资源承载力动态变化及驱动因素分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(1): 46-52.  
LIU Chaolu, CHEN Xing, CUI Guangbo, XU Qin, DONG Fengjun, and WANG Junnuo. Analysis on dynamic change and its driving factors of water resources carrying capacity in Linhai city, China. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(1): 46-52. (in Chinese)
- [7] 张琦, 李松森, 夏慧琳. 基于模糊综合评判模型的东北三省水资源承载力研究[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 179-188+193.  
ZHANG Qi, LI Songsen, and XIA Huilin. A study on water resource carrying capacity of three provinces in northeast China based on fuzzy comprehensive evaluation model. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 179-188+193. (in Chinese)
- [8] 赵克勤. 集对分析中的不确定理论及若干应用[J]. *有色冶金设计与研究*, 1995, 16(3): 40-43.  
ZHAO Keqin. Uncertainty theory and some applications in set pair analysis. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 1995, 16(3): 40-43. (in Chinese)
- [9] 刘童, 杨晓华, 赵克勤, 薛淇芮. 基于集对分析的水资源承载力动态评价——以四川省为例[J]. *人民长江*, 2019, 50(9): 94-100.  
LIU Tong, YANG Xiaohua, ZHAO Keqin, and XUE Qirui. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity based on set pair analysis: A case study of Sichuan province. *Yangtze River*, 2019, 50(9): 94-100. (in Chinese)
- [10] 金菊良, 沈时兴, 崔毅, 陈鹏飞, 汪明武, 陈梦璐. 面向关系结构的水资源集对分析研究进展[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 97-111.  
JIN Juliang, SHEN Shixing, CUI Yi, CHEN Pengfei, WANG Mingwu, and CHEN Menglu. Research progress of relation structure-oriented set pair analysis in water resources. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 97-111. (in Chinese)
- [11] 戴明宏, 王腊春, 魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 193-199.  
DAI Minghong, WANG Lachun, and WEI Xingping. Spatial difference of water resource carrying capacity of Guangxi using fuzzy comprehensive evaluation model based on entropy weight method. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 193-199. (in Chinese)
- [12] 高超, 梅亚东, 吕孙云, 王越, 员江斌. 基于 AHP-Fuzzy 法的汉江流域水资源承载力评价与预测[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(9): 21-28.  
GAO Chao, MEI Yadong, LV Sunyun, WANG Yue, and YUAN Jiangbin. Assessment and prediction of water resources carrying capacity based on AHP-Fuzzy method: A case study on Hanjiang River basin. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(9): 21-28. (in Chinese)