

Study on Water Resource Carrying Capacity of Chongqing City by DPSIR Coupling Model

Xuerou Weng, Xunjian Long*, Yan Ye, Feng Peng

Southwest University, Chongqing
Email: *lmcx402@swu.edu.cn

Received: Feb. 14th, 2020; accepted: Mar. 12th, 2020; published: Mar. 19th, 2020

Abstract

Based on the basic characteristics of water resources management, a Driving forces-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) model with 26 related indicators is constructed by considering ecological environment benign development, which couple with Principal Component Analysis (PCA) and Synthetic Weighting Method (SWM) to study the state of regional water resources carrying capacity evaluation for Chongqing city. The results show that the evaluation model of water resource carrying capacity based on DPSIR model is feasible, and the indexes selected are comprehensive and representative in the evaluation process. In the process of weight calculation of the coupled evaluation model, the evaluation results based on PCA and SWM have a similar trend of change, and the overall conclusion is consistent. The results show that the carrying capacity of water resources in Chongqing has been continuously optimized and gradually enhanced in the last 15 years, and the score reached the maximum in 2017, indicating that the protection measures have realized the common development of the water resource with the economy, society and ecology.

Keywords

Water Resources Carrying Capacity, DPSIR Model, Main Component Analysis, Comprehensive Weighting Method, Chongqing

基于DPSIR耦合模型的重庆市水资源承载研究

翁薛柔, 龙训建*, 叶 琰, 彭 锋

西南大学, 重庆
Email: *lmcx402@swu.edu.cn

收稿日期: 2020年2月14日; 录用日期: 2020年3月12日; 发布日期: 2020年3月19日

*通讯作者: 龙训建(1982-), 女, 重庆, 博士, 讲师, 主要研究方向水资源规划与管理, 生态水文过程等。

摘要

针对重庆市水资源管理基本特征,考虑生态环境良性发展,选取26个相关指标构建驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)概念模型,结合主成分分析法和综合权重法开展区域水资源承载力状态评价研究。结果表明:基于DPSIR模型构建的水资源承载力评价模型具有可行性,评价模型中选取的指标在评价过程中具有全面性和代表性;在耦合评价模型的权重计算过程中,基于主成分分析法和综合权重法得到的最终评价结果具有相似的变化趋势,整体结论具有一致性。模型最终评价结果显示,近15a来重庆市水资源承载能力持续优化,逐步增强;2017年得分达最大值,表明研究区内水资源系统采取的保护措施实施效果良好,实现了水资源系统与经济、社会、生态共同发展。

关键词

水资源承载力, DPSIR概念模型, 主成分分析, 综合权重法, 重庆

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. 引言

我国学者最早于 20 世纪 80 年代提出水资源承载力这一概念,旨在基于客观角度,如实反映水资源承载力的状态,以推进经济社会的可持续发展[1]。水资源承载力是指:一定区域、一定时段,维系生态系统良性循环,水资源系统支撑经济社会发展的最大规模[2]。目前在水资源承载力的理论、方法模型和应用方面都已开展了广泛的研究,主要成果可分为两类,一是数学理论方法的应用,主要包括投影寻踪法[3]、物元可拓模型法[4]、系统动力学[5] [6]等;另一类则是考虑区域实际的改良型耦合方法,如将层次分析法与模糊数学耦合[7]、主成分分析法与熵权法耦合[8]、层次分析与压力-状态-响应耦合[9]等。但研究仍存在较大瓶颈,如评价体系尚未统一,理论研究还需完善。在方法不断改进的过程中,加拿大统计学家 David Rapport 和 Tony Friend 为健康评价生态系统的环境质量于 1979 年提出的 PCR (压力-状态-响应)模型[10]得到广泛认可,此后,改进后的 DPSIR 模型(驱动力-压力-状态-影响-响应)被广泛应用于水资源[11]、土地资源[12]、生态安全评价[13]、环境管理科学的决策与实施[14]等方面,是一种较为实用的多指标评价模型。

重庆市作为中国西南地区主要工商业城市,因其特殊的长江经济带、长江绿水发展区、“一带一路”的重要联结位置,评价其水资源承载状态具有实际意义。其中,张倩[15]等人利用水生态足迹模型研究得出重庆市 2003~2016 年水资源开发利用程度处于危险状态,与王卫国[16]、郭晓娜[17]等人研究结果相反,表明水生态足迹模型在评价区域水资源可持续利用时会因采用的模型不同而出现不一致的评价结论,该方法仍需建立统一的模型体系避免结果的较大差异;崔莹[18]、吕平毓[19]等人分别采用模糊综合评价法、主成分分析法对重庆市 2005~2014 年水资源可持续利用能力进行评价,前者的评价体系未充分考虑水资源对社会的反作用效果,后者虽从水资源、社会、经济、生态环境各方面选取了 29 个指标构建评价体系,但单一的主成分分析法缺少在主观层面考虑对指标的重视程度,计算得出的指标权重缺乏地域特殊性。

鉴于此,本文尝试构建一种同时考虑主客观因素的评价模型,运用既能联系水资源与社会-经济-生态之间的关系,又能表现水资源状态对社会的反馈及响应的 DPSIR 模型来构建评价指标体系,选用主成分分析法和

综合权重法分别计算指标权重，利用所得权重对重庆市 2003~2017 年水资源承载力进行评价分析，并比较不同权重计算方法下评价结果之间的差异，以期为区域水资源可持续发展提供理论和方法支撑。

2. 研究区概况与数据

2.1. 研究区概况

重庆市位于中国西南部，地处东经 105°11'~110°11'，北纬 28°10'~32°13'；为我国最年轻的直辖市，国家中心城市，也是长江上游地区的经济、金融、科技、航运和商贸物流中心，西部大开发重要的战略支点、“一带一路”和长江经济带重要联结点以及内陆开放高地。地理位置示意图见图 1 所示。

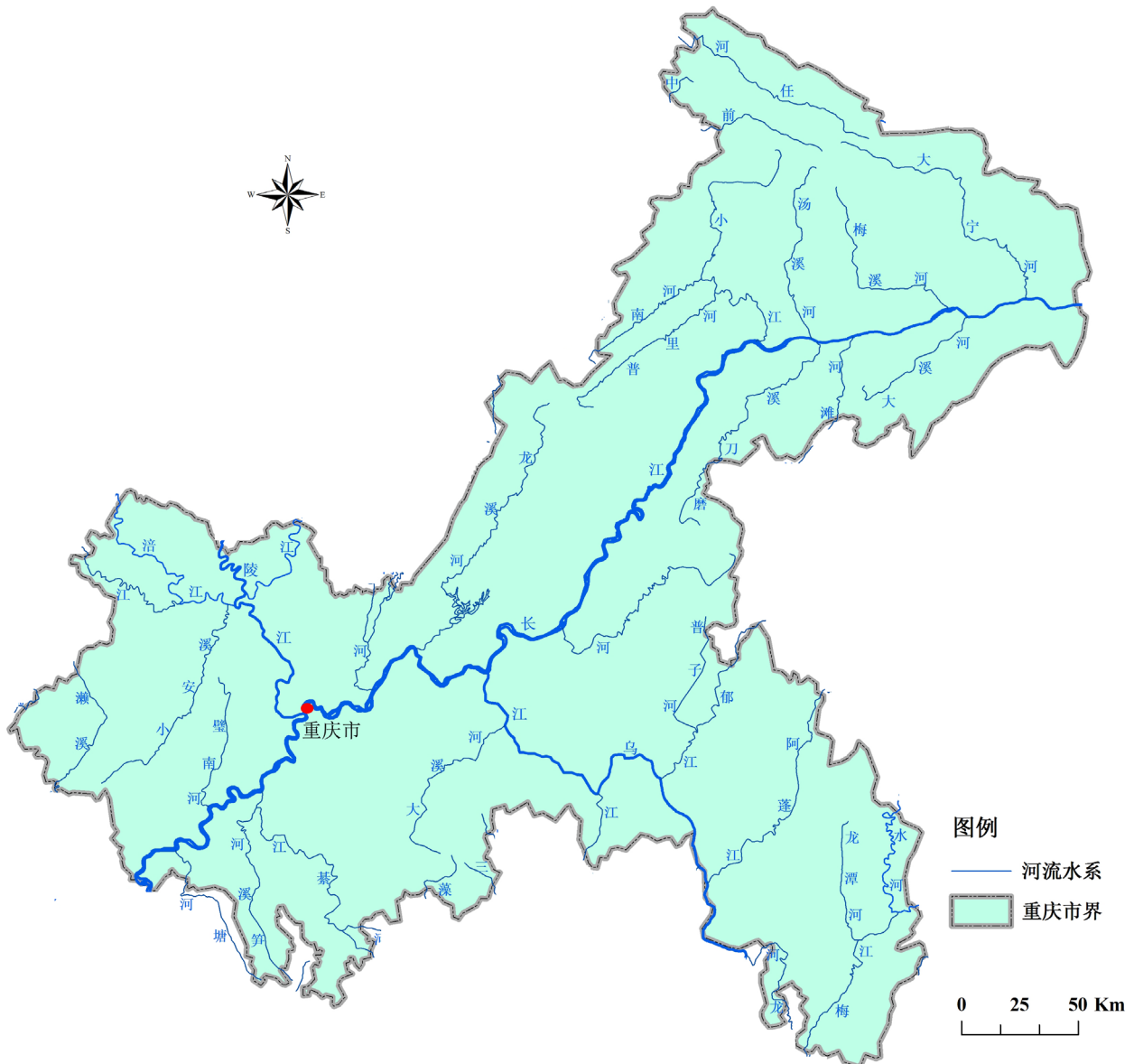


Figure 1. Sketch map of watersheds of Chongqing city

图 1. 重庆市流域水系图

区境属亚热带季风性湿润气候，四季分明，空气湿润；境内河流纵横，均属长江水系，长江自西南向东北

横穿市境,北有嘉陵江,南有乌江汇入,形成向心的网状水系。重庆市水资源特点主要为:一是时空分布不均。在区域内呈现东部多,西部少的地域不均分布;在年内分布呈现汛期占 70%,非汛期占 30%的时间不均分布。二是当地水资源不足。全市多年人均占有当地水资源量为 1700 m³,约为世界人均水资源量的 1/5,属中度缺水城市,西部 11 个区县人均水量仅 500~1000 m³属重度缺水地区。三是过境水丰富,但开发利用较低,有较大的利用空间。

2.2. 数据来源

本文原始数据主要来源于 2003~2017 年《重庆市水资源公报》及《重庆统计年鉴》等资料。

3. 研究方法

3.1. DPSIR 概念模型框架

DPSIR 概念模型[20]是一种基于因果关系组织信息及相关指数的层次框架模型,由目标层、准则层和指标层构成,其中准则层包括驱动力、压力、状态、影响及响应 5 大指标类型,涵盖经济、社会、环境、政策四大要素,准则层中大类指标又包括多个与之关联的具体小指标。其中,五大指标的意义[21]分别是:驱动力是指导致水资源系统发生变化的自然和社会经济因素;压力是通过驱动力作用直接施加于水资源系统促使其变化的压力,主要是社会经济发展对水资源的需求指标;状态是指水资源系统在压力作用下所处的状态,主要为水资源系统满足用水需求的能力指标;影响是水资源系统的状态对社会经济、生活及人类健康的影响;响应是社会对水资源系统的开发利用采取的管理措施。由于具体指标数量较多,涉及面广,为判断各指标对准则层的贡献,区分各指标对最终评价结果的影响程度,本文以重庆市 2003~2017 年水资源承载力状态为研究目标层,利用主成分分析法和综合权重法对指标层中的指标体系进行权重计算,再分别计算对应目标层得分,最后对两种评价方法下的结果进行对比。

3.2. 指标权重计算方法

3.2.1. 主成分分析法

主成分分析是一种对高维变量的降维处理技术[22],通过因子分析,可以更为全面科学地涵盖可能影响驱动力、压力、状态、影响及响应的全部指标,准确反映水资源承载力变化[23]。对于有 n 年样本 p 个变量的原始资料构造矩阵 $X(n \times p)$,按如下方法计算主成分:

- 1) 对原始矩阵 $X(n \times p)$ 标准化处理,得到新的数据矩阵 $Y = (y_{ij})_{n \times p}$
- 2) 建立标准化后的 p 个指标的相关系数矩阵 $R = (r_{ij})_{p \times p}$
- 3) 计算相关矩阵 R 的特征值 λ_i 及相应的特征向量 u_1, u_2, \dots, u_p 。
- 4) 计算贡献率 e_m 、累计贡献率 E_m 和主成分荷载 z_m 。

$$e_m = \lambda_i / \left(\sum_{i=1}^p \lambda_i \right), E_m = \left(\sum_{j=1}^m \lambda_j \right) / \left(\sum_{i=1}^p \lambda_i \right), z_m = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p u_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

式中, λ_i 为相关系数矩阵 R 的特征值; λ_i 为主成分向量对应的特征值;林海明[24]等验证,一般情况下,当因子累计贡献率满足 $E_m \geq 85\%$ 时 m 个主成分就以较 p 少的指标个数综合体现了 p 个指标。

- 5) 计算单因子得分 F_i 、准则层得分 F_L 与综合得分 F_Z 。

$$F_L = \frac{E(m_i)}{\sum_{i=1}^m E(m_i)} F_i \quad (L = D, P, S, I, R; i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$F_z = E(m_D)F_D + E(m_P)F_P + E(m_S)F_S + E(m_I)F_I + E(m_R)F_R \quad (3)$$

式中, D 、 P 、 S 、 I 、 R 分别为驱动力、压力、状态、影响、响应。

3.2.2. 综合权重法

确定评价指标权重的方法主要有主观赋权法和客观赋权法。为了使指标权重既能符合实际情况,也能充分反映数据之间的关系,本文在具体指标权重计算过程中,先选用基于主观赋权法的层次分析法[7]与基于客观赋权法的熵值法[8]计算指标权重,再考虑主客观相结合的方式来确定评价指标的综合权重。

1) 层次分析法计算原则

对 DPSIR 结构模型中的准则层和指标层使用对比矩阵和 1~9 标度法确定两两指标比较结果,构成判断矩阵。计算矩阵的最大特征值 λ_{\max} 和该特征值下的特征向量 w 。特征向量标准化得到各指标权重向量 w_w 。

2) 熵值法计算方式

采用 Z-Score 标准化方法对 n 年 p 个指标进行标准化计算:

$$y_{np} = \frac{x_{np} - \bar{x}_p}{S} \quad (4)$$

式中, X_{np} 为第 p 项指标在第 n 年的原始数据; \bar{x}_p 为第 p 项指标的平均值; S 为原始数据 X_{np} 的标准差。

将指标值 y_{np} 平移变为 y'_{np} 消除负值,即 $y'_{np} = y_{np} + Z$, Z 为 y_{np} 中的最小值。

计算第 p 项指标在第 i 年的值 y'_{np} 的比重 R_{np} 、熵值 e_p :

$$R_{np} = \frac{y'_{np}}{\sum_{n=1}^i y'_{np}}, \quad e_p = -k \sum_{n=1}^i R_{np} \ln R_{np} \quad (5)$$

式中, $k = 1/\ln m$ 。由上式可知,熵值 e_p 取值区间在 [0,1] 之间。

计算各项指标的权重 w_a

$$w_a = \frac{1 - e_p}{\sum_{p=1}^i (1 - e_p)} \quad (6)$$

根据熵的可加性,可利用指标层各指标的差异性系数,得到准则层各要素的差异性系数,从而得到准则层各要素的权重。

3) 综合权重

计算差异程度系数 R_{En} 和修正系数 t

$$R_{En} = \frac{2}{n} (1 \cdot w_{a1} + 2 \cdot w_{a2} + \dots + n \cdot w_{an}) - \frac{n+1}{n}, \quad t = R_{En} \cdot \frac{n}{n+1} \quad (7)$$

式中, n 为指标个数; $w_{a1}, w_{a2}, \dots, w_{an}$ 为熵值法计算得到的客观权重向量 w_a 中各指标权重从小到大的重新排序。

t 值的选取取决于熵值法确定的指标权重向量 w_a 的差异程度。当熵值法确定的各指标权重相等时,表明各指标在评价中所起的作用相等,指标之间不存在差异,则 R_{En} 为 0,则 $t = 0$; 当 w_a 中各指标权重相差很大时,可近似认为只有其中一个指标起作用,该指标权重近似为 1,此时 R_{En} 近似为 $(n-1)/n$, $t \approx 1$,于是 t 的取值范围为 $0 \leq t < 1$ 。

基于层次分析法和熵值法的权重结果,采取主客观综合的方式,确定最终评价的综合指标权重 w [25]

$$w = (1-t)w_w + t \cdot w_a \quad (8)$$

式中, w_w 为用层次分析法计算得到的主观指标权重向量; w_a 是用熵值法计算得到的客观指标权重向量。

4. 结果与分析

4.1. DPSIR 模型体系

根据 DPSIR 模型的基本原理,本次目标层为重庆市水资源承载力发展状况,准则层为驱动力、压力、状态、影响及响应 5 类指标,结合重庆市经济、社会、生态等特点选取适宜合理的具体评价指标,共计 26 项,如下表 1 所示。其中,驱动力指标涵盖经济、水资源量、人口三类促使水资源系统变化的最原始指标;压力指标依据社会经济发展对水资源的需求、水资源利用方式、用水效率低等特点总结出 8 个指标;状态指标包括水资源量现状、水资源利用现状两方面;影响指标选取了植被覆盖率、城市化率等指标;响应指标主要选取了重庆市对水资源系统的经济投入,管理措施方面的指标。

Table 1. Evaluation index system of DPSIR model

表 1. DPSIR 模型评价指标体系

准则层	指标层	指标代码	单位
驱动力	人均 GDP	X1	万元
	人口密度	X2	人/km ²
	降水量	X3	mm
	人均水资源总量	X4	m ³
	单位 GDP 综合用水量	X5	m ³
压力	生产用水量	X6	m ³
	生活用水量	X7	m ³
	耗水率	X8	%
	生产耗水	X9	m ³
	生活耗水量	X10	m ³
	生态环境耗水量	X11	m ³
	废污水排放量	X12	亿 t
	生活污水排放量	X13	万 t
状态	水资源利用率	X14	%
	非常规水资源利用率	X15	%
	万元工业增加值用水量	X16	m ³
	地表水资源量	X17	亿 m ³
	重复计算量	X18	亿 m ³
影响	大中型水库年末蓄水总量	X19	亿 m ³
	植被覆盖率	X20	%
	污水处理率	X21	%
	饮用水源水质达标率	X22	%
	城市化率	X23	%
响应	治理水土流失面积	X24	km ²
	环境保护投资占 GDP 的比例	X25	%
	生态环境用水比重	X26	%

4.2. 主成分分析法计算结果

以重庆市 2003~2017 年水资源统计数据为基础, 按照主成分分析法计算步骤和公式(1)计算各准则层主成分的特征值及贡献率, 结果列于表 2。在此基础上, 按照公式(2)和(3)计算得到的单因子得分与其特征值贡献率, 可确定主成分得分的加权平均值, 结果见表 3。为直观各准则层主成分得分的加权平均值结果, 绘制逐年折线图, 见图 2 所示。

Table 2. Features and contribution rates of the main components

表 2. 主成分的特征值及贡献率

准则层	主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
驱动力	F1	3.005	60.10	60.10
	F2	1.439	28.78	88.89
压力	F3	4.832	60.40	60.40
	F4	1.968	24.60	85.01
	F5	2.464	41.06	41.06
状态	F6	1.593	26.54	67.61
	F7	1.339	22.32	89.93
影响	F8	3.478	86.95	86.95
	F9	1.551	50.38	50.38
响应	F10	1.146	38.20	88.57

Table 3. Main component score, score weighted average and comprehensive score

表 3. 主成分得分、得分加权平均值与综合得分

年份	驱动力			压力					状态			影响		响应		综合
	F ₁	F ₂	F _D	F ₃	F ₄	F _P	F ₅	F ₆	F ₇	F _S	F ₁	F ₉	F ₁₀	F _R	F _Z	
2003	-1.51	0.86	-0.75	-1.66	-0.30	-1.27	-1.26	0.45	2.50	0.54	-1.87	-1.72	-0.62	-1.25	-0.91	
2004	-1.30	0.43	-0.74	-1.04	-0.22	-0.80	-1.04	0.22	1.48	0.34	-1.72	-0.87	-1.25	-1.03	-0.78	
2005	-1.13	-0.31	-0.87	-1.23	-0.01	-0.88	-0.69	0.10	-0.24	-0.07	-1.29	-0.26	-1.09	-0.62	-0.74	
2006	-1.25	-0.29	-0.94	-1.03	0.06	-0.71	-1.88	-0.53	-0.85	-0.08	-0.75	0.23	-0.87	-0.25	-0.54	
2007	-0.60	1.42	0.06	-1.04	0.32	-0.64	-0.90	1.68	-1.64	-0.61	-0.39	0.53	-0.80	-0.04	-0.32	
2008	-0.38	0.37	-0.14	0.46	-3.46	-0.68	-0.48	0.52	-1.02	-0.29	-0.03	-0.68	-0.99	-0.81	-0.39	
2009	-0.24	-1.35	-0.60	0.05	0.47	0.17	-0.36	-1.29	-0.65	-0.10	0.13	1.67	-0.42	0.77	0.07	
2010	0.06	-1.14	-0.33	-0.08	0.65	0.14	0.41	-1.15	-0.33	-0.14	0.31	1.38	-0.19	0.71	0.13	
2011	0.37	-0.62	0.05	0.12	0.67	0.27	0.48	-0.55	-0.17	-0.08	0.50	1.78	-0.12	0.96	0.34	
2012	0.55	-0.68	0.15	0.36	0.43	0.38	0.70	-0.70	-0.07	-0.08	0.68	-0.59	0.31	-0.20	0.18	
2013	0.71	-1.02	0.15	0.41	0.52	0.44	0.72	-0.99	-0.10	-0.12	0.76	-0.75	0.55	-0.19	0.20	
2014	1.01	1.24	1.09	0.69	0.38	0.60	1.28	1.32	-0.04	0.22	0.42	-0.53	0.92	0.09	0.48	
2015	0.99	-1.19	0.28	0.99	0.29	0.79	0.83	-1.19	0.53	0.00	0.99	0.26	1.44	0.77	0.56	
2016	1.30	0.85	1.15	1.43	0.09	1.04	1.00	0.77	0.33	0.19	1.08	-0.53	1.41	0.30	0.75	
2017	1.41	1.43	1.41	1.58	0.09	1.15	1.18	1.37	0.28	0.29	1.18	0.09	1.72	0.79	0.96	

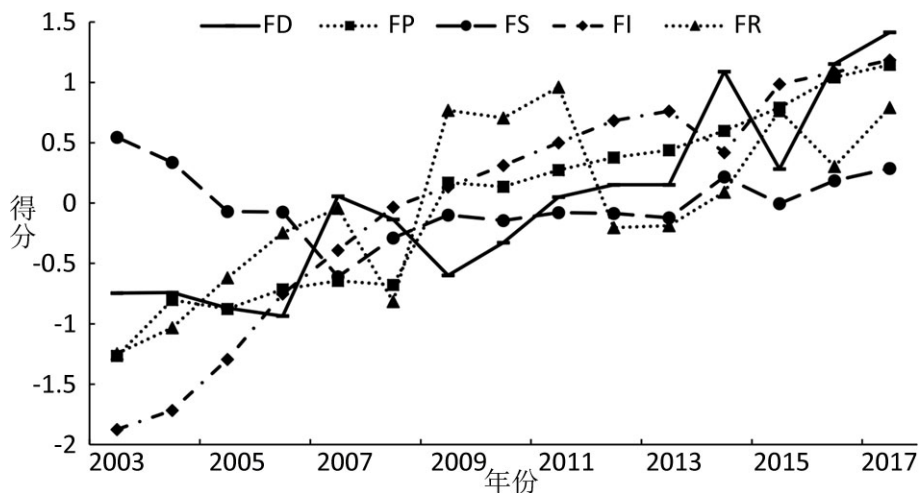


Figure 2. Weighted average curve for the score of the main component of each criterion layer
图 2. 各准则层主成分得分的加权平均值曲线

一般情况下，在主成分分析法的计算结果中，主成分得分有正有负，正值说明被评价年份水资源承载力处于平均水平以上，负值则相反。从图 2 及表 3 可以看出，2003~2017 年间驱动力得分总体呈上升趋势。分析其可能的原因，李坤峰[26]等人通过重庆市水资源承载力影响因子评价发现经济的快速发展必然会对水资源系统产生驱动力并产生明显影响，但人口的持续增长会导致驱动力得分略有波动；在 2009~2017 年之间，经济社会发展与水资源系统之间是相互促进的，这也印证了经济、社会及水资源系统之间保持可持续发展的实际性与可能性。压力得分稳步上升，随着人民生活水平的日益提高，多样化的用水方式随之出现，用水量也持续增多，这不仅对水资源承载力造成压力，同时也表明水资源承载力的动力有所提升。状态因子得分起伏较大，先呈下降趋势，在 2007 年后逐步上升，曲线涨幅与吕平毓[19]等人研究的水资源系统得分相似，其水资源系统选用指标也代表了重庆市本身水资源的丰富程度，结果表明在 2007 年后社会经济不断发展，水资源承载力状态逐步趋向稳定，非常规水资源利用率逐渐趋向合理利用态势，水库蓄水量也逐渐增大。影响指标逐年稳步上升，仅在 2014 年得分有所下降，分析发现主要原因在于重庆市饮用水水质达标率在 2014 年仅 97.4%，而其他年份均保持在 100%。总体上可以归纳为，在政策引导下，重庆市相关部门共同努力下，人民环保意识逐渐增强，植被覆盖率、污水处理率、城市化率显著提高，在经济快速发展的同时使水资源承载力趋于良好的方向发展。响应指标得分起伏较大，在重庆市治理水土流失情况的长期奋斗下，后期治理任务愈加困难，环境保护投资占比上下起伏，致使得分变化较大，在 2008~2015 年响应指标与综合得分变化趋势一致，说明在这几年响应指标对综合得分的影响较其他年份更大，重庆市政府采取的水资源保护措施效果更为明显。根据各准则层的变化趋势，综合发现重庆市水资源承载力发展状况良好，近几年各准则层得分均为正值，综合得分在 2009 年之后均处于平均水平以上。

4.3. 综合权重分析结果

借助于层次分析法(AHP)与熵值法分别进行各指标权重综合分析计算，最终求得各准则层权重及综合权重结果见表 4。由表 4 可知，通过层次分析法计算权重发现，驱动力、压力、状态、影响及响应准则层中权重最大的分别是人均 GDP、生产用水量、重复计算量、植被覆盖率和污水处理率(两者均占比 0.3333)、环境保护投资占 GDP 的比例；而通过熵值法计算得到的准则层权重中，各准则层中权重最大的分别为人口密度、生产用水量、重复计算量、污水处理率、治理水土流失面积，由此可见在压力、状态、影响指标中，人为判断与客观数据侧重的影响因素较为一致，在驱动力中主观考虑重庆市作为西南地区 and 长江上游最大的经济中心城市，其经济发展对水资源系统的影响更为显著，而通过客观数据显示人口密度对区域水资源承载力的影响是不可忽略的；关

于响应指标中主观权重计算发现环境保护投资占 GDP 的比例权重最大,这是由于近年来重庆市政府对水资源保护的重视与在环境保护方面不断加大投资,主观计算时更加注重近几年区域对水资源系统采取措施时的影响,而客观权重计算注重整体数据的描述情况;比较层次分析法与熵值法计算结果发现,两者计算结果有一定区别,熵值法计算权重值更加均匀,不如层次分析法计算各准则层中指标之间的相互差异大,两者之间的差别不仅说明了层次分析法反映了对区域水资源承载力评价时更加侧重近几年表现情况的主观性,熵值法表现了仅从实际数据提取结果的客观性,更体现了仅从主观或客观评价区域水资源承载力的不合理性与不准确性。

按照公式(8)对表 4 中各指标层综合权重及准则层权重加权平均可得准则层各指标评价值及重庆市水资源承载力综合评价结果,见表 5。

Table 4. AHP and entropy weights as well as comprehensive weights
表 4. AHP 和熵值法权重及综合权重

准则层	指标层	AHP 法	熵值法	综合权重	准则层权重
驱动力	人均 GDP(X1)	0.4174	0.1941	0.4116	0.2076
	人口密度(X2)	0.0975	0.2101	0.1004	
	降水量(X3)	0.2634	0.2079	0.2619	
	人均水资源总量(X4)	0.1602	0.1970	0.1612	
	单位 GDP 综合用水量(X5)	0.0615	0.1909	0.0649	
	生产用水量(X6)	0.3280	0.1692	0.3119	
	生活用水量(X7)	0.2319	0.1445	0.2231	
	耗水率(X8)	0.0327	0.1073	0.0403	
压力	生产耗水量(X9)	0.1065	0.1235	0.1083	0.3634
	生活耗水(X10)	0.0713	0.1156	0.0757	
	生态环境耗水量(X11)	0.0479	0.1106	0.0542	
	废污水排放(X12)	0.1585	0.1267	0.1553	
	生活污水排放(X13)	0.0231	0.1027	0.0312	
	水资源利用率(X14)	0.1255	0.1649	0.1274	
	非常规水资源利用率(X15)	0.0664	0.1472	0.0705	
	万元工业增加值用水量(X16)	0.0387	0.1607	0.0448	
状态	地表水资源量(X17)	0.2369	0.1691	0.2335	0.2166
	重复计算量(X18)	0.4071	0.1920	0.3963	
	大中型水库年末蓄水总量(X19)	0.1255	0.1661	0.1275	
	植被覆盖率(X20)	0.3333	0.2374	0.3299	
影响	污水处理率(X21)	0.3333	0.2632	0.3308	0.1302
	饮用水源水质达标率(X22)	0.1667	0.2631	0.1701	
	城市化率(X23)	0.1900	0.2363	0.1916	
响应	治理水土流失面积(X24)	0.3121	0.3388	0.3123	0.0821
	环境保护投资占 GDP 的比例(X25)	0.4885	0.3311	0.4871	
	生态环境用水比重(X26)	0.1994	0.3301	0.2006	

Table 5. Evaluation results of comprehensive weight method of water resources carrying capacity in Chongqing from 2003 to 2017
表 5. 2003~2017 年重庆市水资源承载力综合权重法的评价结果

年份	驱动力	压力	状态	影响	响应	综合评价
2003	0.3943	0.3084	0.6163	0.0000	0.0628	0.3326
2004	0.3573	0.4278	0.5528	0.0492	0.2023	0.3724
2005	0.2916	0.4598	0.5210	0.1890	0.3387	0.3929
2006	0.2688	0.5117	0.0542	0.3737	0.4566	0.3397
2007	0.5264	0.5830	0.4243	0.4955	0.5258	0.5208
2008	0.4429	0.2516	0.4634	0.6178	0.2647	0.3860
2009	0.2685	0.8195	0.3765	0.6761	0.7907	0.5881
2010	0.3335	0.8059	0.5196	0.7407	0.7449	0.6323
2011	0.4425	0.8171	0.5490	0.8046	0.8255	0.6803
2012	0.4680	0.8045	0.5366	0.8654	0.3486	0.6471
2013	0.4681	0.8189	0.5437	0.8895	0.3286	0.6554
2014	0.7573	0.8302	0.7892	0.8008	0.3927	0.7664
2015	0.5159	0.8539	0.5751	0.9631	0.5926	0.7161
2016	0.7896	0.8707	0.6980	0.9909	0.4175	0.7949
2017	0.8850	0.8878	0.7619	1.0225	0.5688	0.8513

从表 5 可知,重庆市 2003~2017 年水资源承载力评价呈波动上升趋势,2017 年达最大值 0.8513,说明近 15 年重庆市水资源承载力呈良性发展态势,研究结果与黎明[27]等人预测结果一致,由此也可预期至 2020 年,重庆市水资源可以满足其经济社会的发展要求,短期内不会成为重庆市经济发展的主要限制因素,但节水型社会建设、可持续发展的各种政策、手段仍然必要,才能持续保障区域水资源承载力的良好状况。另外,综合权重计算结果表明,重庆市社会经济发展对水资源系统已产生显著压力,其中生产生活用水对水资源系统的要求较高,这受重庆市立足于西南地区主要经济发展城市、长江经济带重要节点等发展方向所产生的水资源需求相一致。

4.4. 两种方法对比分析

在 DPSIR 模型框架下,将主成分分析法与综合权重法评价的综合结果进行对比,见图 3 所示。由于主成分分析法计算结果为相对水平,结果得分有正有负,这是主成分变量系数计算中产生的正号、负号(无序变量)所指示的相应指标存在的有机联系;综合权重法计算结果为绝对水平,结果均为正值。这是两种计算方法的结果数值上的差异体现,但用于分析研究区域水资源承载力变化趋势时并不矛盾。2003~2017 年期间,两种方法评价得到的重庆市水资源承载力总体得分均呈上升趋势。总体结果与吕平毓[19]等人评价研究的 2005~2014 年重庆市水资源可持续利用综合得分具有一致性。观察图 3 可知,两种方法对比下,2005~2007 年得分趋势存在略微差异,通过比较各准则层得分值发现,本次状态指标在 2006 年出现较大差异,其原因可能为,2006 年重庆市遭遇极端暴雨天气,地表水资源量达 15 年来最大值,使得主成分分析法中状态指标的第二主成分影响远大于非常规水利用率,使评价得分在 2005~2007 年间呈持续增长趋势。由此也可推断,尽管主成分分析法和综合权重法在进行指标评价时出发原则有所区别,但作为承载力评价子系统的耦合计算方法,其计算结果具有较好的一致性,在实际工作中可根据需要选择方法。

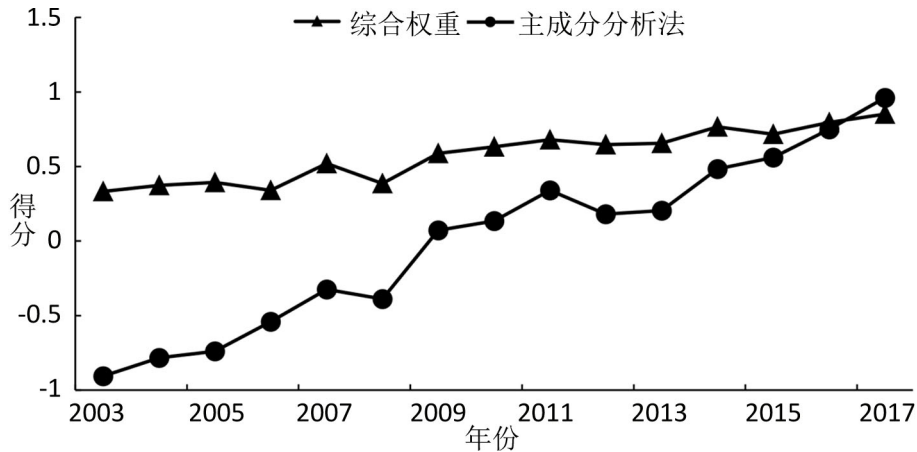


Figure 3. Score curve of comprehensive weight method and principal component analysis
图 3. 综合权重法与主成分分析法得分曲线

5. 结论

1) 基于研究区水资源系统、社会、经济与生态的历年统计资料,依据 DPSIR 模型利用主成分分析法、综合权重法两种权重计算方法,对重庆市 2003~2017 年水资源承载力状况进行评价。其中,指标评价体系较为全面准确地反映了重庆市水资源承载力的变化情况;其次,通过主成分分析法对准则层进行因子分析,提取指标层中更具代表性的指标,对 DPSIR 模型中筛选的指标层进行判断,建立简洁合理的指标层;最后,利用层次分析法和熵值法分别对指标体系进行主客观赋权,两者优化组合后得出的指标权重更加合理。

2) 经主成分分析法对指标进行降维,得出影响重庆市水资源承载力的 10 个主成分,涵盖社会经济、水资源开发利用状况和管理措施等各个方面的内容,反应各指标间的内在联系,使本研究选取的指标具有代表性和准确性。

3) 通过层次分析法和熵值法开展综合评价,从主客观两个方面对重庆市水资源承载力进行评价,综合评价法受指标选取个数影响明显,且计算过程复杂,在准则层具体指标的选择方面还可进一步深入探讨。

4) 本研究基于时间尺度对重庆市水资源承载力进行分析评价,两种方法计算结果趋势一致,均表明近 15 年间重庆市水资源承载能力逐步提升,区域水资源系统正在向可持续发展的方向发展。受基础资料等因素限制,如在下一步的研究中,能考虑空间特征,开展多种空间尺度对比研究,将更有利于为研究区水资源管理和区域可持续发展提供理论支撑。

基金项目

西南大学“大学生创新创业训练计划”项目(X201910635229);中央高校基本科研业务费专项资金资助(XDJ K2020C070);西南大学博士基金项目(SWU118079)。

参考文献

- [1] 金菊良,陈梦璐,郦建强,等. 水资源承载力预警研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 583-596.
JIN Juliang, CHEN Menglu, LI Jianqiang, et al. Advance in early warning of water resources carrying capacity. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 583-596. (in Chinese)
- [2] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 1-6 + 54.
ZUO Qiting. Review of research methods of water resources carrying capacity. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(3): 1-6 + 54. (in Chinese)
- [3] 苏永军,王慧,孔淑芹. 基于投影寻踪-物元可拓模型的区域水资源承载力评价[J]. 节水灌溉, 2017(2): 80-84 + 89.

- SU Yongjun, WANG Hui and KONG Shuqin. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on projection pursuit matter element extension model. *Water Saving Irrigation*, 2017(2): 80-84 + 89. (in Chinese)
- [4] 刘玉邦, 梁川. 基于模糊物元分析的长江上游水资源承载力综合评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(3): 39-42.
LIU Yubang, LIANG Chuan. Comprehensive evaluation of the water resources carrying capacity in upstream of Yangtze River based on the fuzzy matter-element analysis. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2009, 20(3): 39-42. (in Chinese)
- [5] MARGANINGRUM, D. Carrying capacity of water resources in Bandung Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 118(1): 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012026>
- [6] 高亚, 章恒全. 基于系统动力学的江苏省水资源承载力的仿真与控制[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(4): 103-109.
GAO Ya, ZHANG Hengquan. Simulation and control of water resource carrying capacity in Jiangsu Province Simulation and control of water resource carrying capacity in Jiangsu Province. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(4): 103-109. (in Chinese)
- [7] 武荣, 李援农. 基于层次分析法的水资源安全模糊综合评价模型及其应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(04): 139-144+150.
WU Rong, LI Yuannong. Application of fuzzy assessment model of water resources security based on AHP. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(4): 139-144 + 150. (in Chinese)
- [8] 周涛, 梁虹, 焦树林, 等. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区地下水资源承载力评价[J]. *水科学与工程学报*, 2016(4): 16-19.
ZHOU Tao, LIANG Hong, JIAO Shulin, et al. Assessment on groundwater resources carrying capacity in karst area based on component analysis and entropy. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2016(4): 16-19. (in Chinese)
- [9] 王秀丽, 杨柳, 李恒凯. 基于 PSR-AHP 模型的稀土矿区生态安全评价[J]. *中国稀土学报*, 2018, 36(4): 504-512.
WANG Xiuli, YANG Liu and LI Hengkai. Ecological security assessment in rare earth mining area based on PSR-AHP model. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2018, 36(4): 504-512. (in Chinese)
- [10] 邱微, 赵庆良, 李崧, 等. 基于“压力-状态-响应”模型的黑龙江省生态安全评价研究[J]. *环境科学*, 2008(4): 1148-1152.
QIU Wei, ZHAO Qingliang, LI Song, et al. Ecological security evaluation of Heilongjiang Province with pressure-state-response model. *Environmental Science*, 2008(4): 1148-1152. (in Chinese)
- [11] FATEME, Z., SONDOSS, E., ALI, B., et al. Improved integrated water resource modelling by combining DPSIR and system dynamics conceptual modelling techniques. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 27-41.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.033>
- [12] 于伯华, 吕昌河. 基于 DPSIR 模型的农业土地资源持续利用评价[J]. *农业工程学报*, 2008(9): 53-58.
YU Bohua, LV Changhe. Assessment of sustainable use of agricultural land resources based on DPSIR framework. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008(9): 53-58. (in Chinese)
- [13] REIMOV, M., HUSKA, D. and PULATOV, A. The role of DPSIR Diagram in the analysis of ecological and social conditions of the Aral Sea shrinking problem in Uzbekistan. *Acta Regionalia et Environmentalica*, 2018, 15(1): 1-4.
<https://doi.org/10.2478/aree-2018-0001>
- [14] CHE, Y. Y., CHAI, H. Q., KE, L. L., et al. Based on DPSIR Model environmental planning and risk evaluation in the early stage of state-level new areas development: In China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 252(4): 042053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/252/4/042053>
- [15] 张倩, 谢世友. 基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(2): 93-100.
ZHANG Qian, XIE Shiyu. Using ecological water footprint model to analyze sustainable use of water resources in Chongqing. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(2): 93-100. (in Chinese)
- [16] 王文国, 龚久平, 青鹏, 等. 重庆市水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. *生态经济*, 2011(7): 159-162.
WANG Wenguo, GONG Jiuping, QING Peng, et al. Analysis of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Chongqing City. *Ecological Economy*, 2011(7): 159-162. (in Chinese)
- [17] 郭晓娜, 苏维词, 杨振华, 等. 城乡统筹背景下重庆市水生态足迹分析及预测[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(2): 69-75.
GUO Xiaona, SU Weici, YANG Zhenhua, et al. Assessment and forecast on ecological footprint of water resources in Chongqing under coordinating urban and rural background. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(2): 69-75. (in Chinese)
- [18] 崔莹, 谢世友, 柳芬, 等. 重庆市水资源可持续利用能力的模糊评价[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(4): 115-123.
CUI Ying, XIE Shiyu, LIU Fen, et al. Fuzzy evaluation of sustainable utilization of water resources in Chongqing. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2017, 39(4): 115-123. (in Chinese)
- [19] 吕平毓, 吕睿. 基于改进 PCA 的重庆市水资源可持续利用评价[J]. *人民长江*, 2016, 47(24): 40-45.
LU Pingyu, LU Rui. Evaluation on water resources sustainable utilization of Chongqing City based on modified principal components analysis. *Yangtze River*, 2016, 47(24): 40-45. (in Chinese)

- [20] GARI, O. G., A-URIBE, et al. A DPSIR-analysis of water uses and related water quality issues in the Colombian Alto and Medio Dagua Community Council. *Water Science*, 2018, 32(2): 318-337. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.06.001>
- [21] 陈洋波, 陈俊合, 李长兴, 等. 基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J]. *水利学报*, 2004(7): 98-103. CHEN Yangbo, CHEN Junhe, LI Changxing, et al. Indicators for water resources carrying capacity assessment based on driving-forces-pressure-state-impact-response model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(7): 98-103. (in Chinese)
- [22] 龙训建, 钱鞠, 梁川. 基于主成分分析的 BP 神经网络及其在需水预测中的应用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(2): 206-210. LONG Xujian, QIAN Ju and LIANG Chuan. Water demand forecast model of BP neural networks based on principle component analysis. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2010, 37(2): 206-210. (in Chinese)
- [23] 张妍, 尚金城, 于相毅. 主成分-聚类复合模型在水环境管理中的应用——以松花江吉林段为例[J]. *水科学进展*, 2005(4): 592-595. ZHANG Yan, SHANG Jincheng and YU Xiangyi. Application of principal component-cluster analysis complex model to water environment management: Case study in Songhua River in Jilin section as an example. *Advances in Water Science*, 2005(4): 592-595. (in Chinese)
- [24] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. *统计研究*, 2013, 30(8): 25-31. LIN Haiming, DU Zifang. Some problems in comprehensive evaluation in the principal component analysis. *Statistical Research*, 2013, 30(8): 25-31. (in Chinese)
- [25] 胡嘉. 基于 DPSIR 模型的攀枝花市盐边县水资源可持续利用评价研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016. HU Jia. The sustainability assessment of water resource in Yanbian County based on DPSIR model. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [26] 李坤峰, 谢世友, 张润甲. 重庆水资源承载力影响因子评价[J]. *人民长江*, 2009, 40(7): 4-6. LI Kunfeng, XIE Shiyu and ZHANG Runjia. Evaluation of influencing factors of water resources carrying capacity in Chongqing. *Yangtze River*, 2009, 40(7): 4-6. (in Chinese)
- [27] 黎明, 李百战. 重庆市都市圈水资源承载力分析与预测[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6499-6505. LI Ming, LI Baizhan. The analysis and prediction of water resource carrying capacity in Chongqing Metropolitan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6499-6505. (in Chinese)