

基于改进模糊集对评价法的水资源承载力评价

——以龙川江流域为例

王正选^{1,2}, 邱金亮^{1,3}, 王静^{1,2}, 王兰^{1,2}, 欧福超^{1,2}, 行仙峰^{1,4}, 李云川^{1,4}

(1. 云南省高校水安全与节水减排重点实验室, 云南 昆明 650201;

2. 云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201; 3. 云南农业大学 建筑工程学院,

云南 昆明 650201; 4. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 水资源承载力对一个国家或地区可持续发展有至关重要的影响。综合考虑滇中龙川江高原流域特点和影响水资源承载力的因素, 选取14项指标, 建立水资源承载力评价指标体系; 以集对分析理论为基础, 对模糊集对评价模型进行改进, 采用最小信息熵原理将层次分析法和熵权法确定的权重进行主客观耦合得到综合权重, 建立水资源承载力的模糊集对评价模型。为比较, 分别采用改进的模糊集对评价模型和模糊综合评价模型对龙川江高原流域进行水资源承载力评价分析, 结果表明: 采用模糊综合评价法, 5个水平年的水资源承载力等级均为2级, 采用模糊集对评价法, 5个水平年的水资源承载力分别为2级、1级、2级、2级和1级。通过比较分析得出改进的模糊集对评价模型, 对指标信息挖掘充分、计算简洁, 评价结果可为龙川江高原流域进一步推行“河长制”的水资源保护与管理与清洁小流域治理提供科学依据。

关键词: 水资源承载力; 模糊集对评价法; 模糊综合评价法; 组合权重

中图分类号: TV21

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0070-06

Evaluation of water resources carrying capacity based on improved fuzzy set pair evaluation method: A case study in the Longchuan River Basin

WANG Zhengxuan^{1,2}, QIU Jinliang^{1,3}, WANG Jing^{1,2}, WANG Lan^{1,2},
OU Fuchao^{1,2}, XING Xianfeng^{1,4}, LI Yunchan^{1,4}

(1. Yunnan Province Key Laboratory of Water Security and Water Saving and Emission Reduction, Kunming 650201, China; 2. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. College of Architecture Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University Kunming 650201, China)

Abstract: The carrying capacity of water resources has a crucial impact on the sustainable development of a country or region. Taking the characteristics of the basin in the central Yunnan Plateau and the factors affecting the carrying capacity of water resources into account, 14 indexes are selected to establish an index system for evaluating the carrying capacity of water resources. Based on the theory of set pair analysis, the fuzzy set pair evaluation model is improved, and the principle of minimum information entropy is used to combine the subjective and objective weights of the AHP and entropy weight method to establish the fuzzy set pair evaluation model of water resources carrying capacity. For comparison, an improved fuzzy set evaluation model and a fuzzy comprehensive evaluation model were adopted respectively to evaluate the water resources carrying capacity of the Longchuan River Basin. The results show that the water resources carrying capacity of 5 years are all grade 2 by using the fuzzy comprehensive evaluation method, and the water resources carrying capacity of 5 years are respectively grades 2, 1, 2, 2 and 1 by using the fuzzy set pair evaluation method. Through the comparative analysis, it is concluded that the improved fuzzy set pair evaluation model is sufficient for the index information mining, and

收稿日期: 2017-05-31; 修回日期: 2017-07-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目子课题“水资源高效利用与抗旱灌溉技术与示范”(2012BAD40B02); 云南农业大学科技创新创业基金(2017ZKX119)

作者简介: 王正选(1992-), 男, 云南曲靖人, 在读硕士研究生, 研究方向为水文水资源。

通讯作者: 王静(1969-), 女, 云南曲靖人, 硕士, 讲师, 研究方向为水资源与环境工程。

the calculation is simple. The evaluation results can provide a scientific basis for the further protection and management of the river chief system of water resources in the Long chuan River Basin.

Key words: water resources carrying capacity; fuzzy set pair evaluation method; fuzzy comprehensive evaluation method; comprehensive weight

1 研究背景

水资源承载力研究是水资源的可持续循环利用和水资源安全研究中的一个重要内容^[1-2],流域水资源承载力评价是流域水安全管理系统^[3-4]的重要组成部分,流域水资源承载力研究对于实行以保护水资源、防治水污染、改善水环境、修复水生态等为主要任务的“河长制”来说具有重要的意义。流域是具有层次结构和整体功能的复合系统,由社会经济系统、生态环境系统、水资源系统构成,并通过水量、水质和投资形成了相互依存与制约的关系^[5]。评价泛指从多角度估测研究对象的相应价值和效用,并对这些价值或效用一个综合价值来描述。流域水资源承载力评价的实质,就是把多层次多维系统评价指标最佳地转换成单层次一维系统评价指标的过程,该过程需要充分挖掘反映评价对象主要特征的客观信息和反映评价主体价值判断的主观信息,需要定性分析和定量计算综合集成的可操作的方法^[6]。一般集对分析法概念清晰,简单实用,但是该法认为等级边界是确定的,同时没有考虑评价指标对联系度的权重大小。事实上等级标准的边界是模糊的,如水质的好与差就是模糊的,模糊集对分析法在评价时考虑了等级边界的模糊性,同时考虑了评价指标的权重^[7]。根据水资源承载力评价过程中既要反映评价对象的主要特征信息,又要反映评价者的经验知识、智慧的原则^[8],本文对模糊集对评价模型的权重进行改进,采用最小信息熵原理将层次分析法和熵权法确定的权重进行主客观耦合得到综合权重,建立水资源承载力的模糊集对评价模型,对龙川江高原流域进行水资源承载力评价分析,评价结果可以为流域的可持续发展提供决策依据。

2 模糊集对评价模型

2.1 模糊集对评价法

集对分析理论(set pair analysis, SPA)是中国学者赵克勤于1989年提出的一种新的处理不确定性的方法,其核心思想是对不确定系统的两个有关联的集合构建集对,再对集对的特性进行同一性、差异性、对立性分析,然后建立集对的同异反联系度^[9]。

一般集对分析概念清晰,计算简洁,但是该方法不足之处是认为等级标准边界是确定的,同时没有考虑各评价指标对联系度的作用大小^[7]。实际上,在评价系统中等级标准的边界是个模糊的概念,模糊集对评价法充分考虑指标等级标准的边界模糊性和评价指标对联系度的权重,充分挖掘各指标信息。模糊集对评价法的具体步骤如下:

步骤1 分析影响因素并建立区域水资源承载力评价指标体系 $X_1, X_2, \dots, X_m$ (m 为评价指标个数)。

根据水资源承载力评价指标的物理含义及其对区域经济社会、生态可持续性的作用,建立区域水资源承载力评价等级标准 S_k ($k = 1, 2, \dots, K$; K 为评价等级数)。

步骤2 计算联系度,将评价样本第 i 指标值 X_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 看成一个集合 A_i ,第 k 等级标准看成集合 B_k ,则 A_i 和 B_k 构成一个集对 $H(A_i, B_k)$,为提高评价结果的分辨率,在评价时将 B_k 定为该指标1级评价标准构成的集合 B_1 ,则 A_i 和 B_1 构成一个集对 $H(A_i, B_1)$ 。指标联系度 $A_i \sim B_1$ 可由式(1)、(2) 计算得到,当 $K > 2$ 时,对于反向指标 $H(A_i, B_1)$ 的 K 元联系度:

$$\mu_{A_i \sim B_1} = \begin{cases} 1 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J \\ \frac{S_1 + S_2 - 2X_i}{S_2 - S_1} + \frac{2X_i - 2S_1}{S_2 - S_1}I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J \\ 0 + \frac{S_2 + S_3 - 2X_i}{S_3 - S_1}I_1 + \frac{2X_i - S_1 - S_2}{S_1 - S_3}I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J \\ \dots \\ 0 + 0I_1 + \dots + \frac{2S_{k-1} - 2x_i}{S_{k-1} - S_{k-2}}I_{k-2} + \frac{2x_i - S_{k-2} - S_{k-1}}{S_{k-1} - S_{k-2}}J \\ 0 + 0I_1 + I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 1J \end{cases} \quad \begin{cases} X_i \leq S_1 \\ S_1 < X_i \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \\ \frac{S_1 + S_2}{2} < X_i \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ \dots \\ \frac{S_{k-2} + S_{k-1}}{2} < x_i \leq S_{k-1} \\ S_{k-1} \leq x_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_1 \leq S_2 \leq \dots \leq S_{k-1}$ 。

对于正向指标,当 $K > 2$ 时, $H(A_i, B_1)$ 的 K 元联系数为:

$$\mu_{A_i \sim B_1} = \begin{cases} 1 + 0I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & x_i \geq S_1 \\ \frac{2X_i - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{2S_1 - 2X_i}{S_1 - S_2}I_1 + 0I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & \frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_i + S_1 \\ 0 + \frac{2X_i - S_2 - S_1}{S_1 - S_2}I_1 + \frac{S_1 + S_2 - 2X_i}{S_1 - S_3}I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 0J & \frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_i < \frac{S_1 + S_2}{2} \\ \dots & \dots \\ 0 + 0I_1 + \dots + \frac{2X_i - 2S_{k-1}}{S_{k-2} - S_{k-1}}I_{k-2} + \frac{S_{k-2} + S_{k-1} - 2X_i}{S_{k-2} - S_{k-1}}J & S_{k-1} \leq x_i < \frac{S_{k-2} + S_{k-1}}{2} \\ 0 + 0I_1 + I_2 + \dots + 0I_{k-2} + 1J & x_i \leq S_{k-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_{k-1}$ 。

步骤4 样本联系数 $\mu_{A \sim B}$ 的计算: 设评价样本为集合 A , 所有指标 1 级评价等级标准为集合 B , 则集对 $H(A, B)$ 的 K 元联系数为:

$$\begin{aligned} \mu_{A \sim B} &= \sum_{i=1}^m \omega_i \mu_{A_i \sim B_1} \\ &= \sum_{i=1}^m \omega_i a_i + \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,1} I_1 + \dots + \\ &\quad \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,k-2} I_{k-2} + \sum_{i=1}^m \omega_i c_i J \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{令 } f_1 = \sum_{i=1}^m \omega_i a_i, \dots, f_{k-1} = \sum_{i=1}^m \omega_i b_{i,k-2},$$

$$f_k = \sum_{i=1}^m \omega_i c_i; \omega_i \text{ 表示指标 } i \text{ 的权重。则式(4) 变为}$$

$$\mu_{A \sim B} = f_1 + f_2 I_1 + \dots + f_{k-1} I_{k-2} + f_k J \quad (5)$$

式中: f_1 为评价样本隶属于 1 级标准的可能性; f_k 为评价样本隶属于 K 级标准的可能性。

步骤5 水资源承载力综合评判。为避免个人主观性对评价结果的影响,采用置信度准则判断样本所属等级,其公式为:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda, k = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

式中: λ 为置信度,不宜过大,过大则评价结果趋向于保守、稳妥;亦不宜过小,过小则评价结果可靠性变差,风险变大;一般建议在 $[0.50, 0.70]$ 内取值。

2.2 权重的改进

2.2.1 层次分析法(AHP)和熵权法 AHP 法确定权重首先要将评价目标分解成一个多级指标,然后判断每一层中各指标的相对重要性,引入 1~9 比率标度对判断出的相对重要性进行定量。AHP 法能够综合考虑评价指标体系中各级指标的重要程度,但是在采用分级定量法赋值来构造权重判断矩阵时,会出现系统中不同因素的权重相差巨大的问题,而且该方法主观性较强,无法给出客观的赋值^[10]。

根据信息论的基本原理,信息是系统有序度的一个度量,而熵是系统无序程度的一个度量。在评价体系中信息熵越小,提供的信息量也就越大,则在评价体系中占的权重就越大,反之亦然。因此可以利用信息熵计算各个指标的权重,为评价体系提供科学的依据。熵权法作为客观赋权法^[11],主要是根据各指标传递的信息量大小来确定权重,但是由于指标信息数据的采集难免受到随机干扰,有时候它的解释能力较弱。

2.2.2 组合权重 综合指标的主观权重 W_{lj} 和客观权重 W_{2j} , 可得组合权重 $W_j, j = 1 \sim m$, 根据最小相对信息熵原理^[12] 有:

$$\min F = \sum_{j=1}^m W_j (\ln W_j - \ln W_{lj}) + \sum_{j=1}^m W_j (\ln W_j - \ln W_{2j})$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m W_j = 1; W_j > 0, j = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

用拉格朗日乘子法解上述优化问题得:

$$W_j = \frac{(W_{lj} \cdot W_{2j})^{0.5}}{\sum_{i=1}^m (W_{li} \cdot W_{2i})^{0.5}} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

计算得到的组合权重结合了熵权法的客观性、适应性的优点和 AHP 法的系统性、简洁实用性的优点,使评价结果更准确。

3 龙川江流域水资源承载力

3.1 龙川江流域概况

龙川江发源于楚雄州南华县五街乡,是金沙江右岸的一级支流,属于长江水系^[13]。龙川江全长 246 km,流域面积 9 240.7 km²,多年平均地表水资源量 16.13×10^8 m³,多年平均地下水资源量 2.33×10^8 m³。流域平均海拔 1 992 m,流域以山区和丘陵

为主,占 95%,河谷盆地和浅丘约占流域面积的 5%。龙川江流经南华、楚雄、禄丰、牟定、元谋等 5 县市,龙川江在元谋县内的河谷是云南省最干旱的地区。龙川江高原流域上游主要属北亚热带干燥季风气候区,干雨季分明;下游河谷地段属于南亚热带干燥季风气候区,全年无霜,素有“天然温室”之称,较大的支流有紫甸河、龙川河、勐岗河、蜻蛉河等。龙川江高原流域 2000 年总人口 134.06 万人,国内生产总值 67.23×10^8 元。根据《龙川江流域水资源配置与保护研究》报告,龙川江全年水质评价河道 272.5 km,II~III 类河道占评价河道 27.7%,IV 类河道占评价河道 50.7%,V 类劣 V 类河道占评价河道 21.6%,因此进行流域的水资源承载力评价分析对于整个流域的保护和清洁流域的治理意义重大。

3.2 评价指标体系与评价等级标准

水资源是与经济社会、生态环境相耦合构成的水资源社会经济系统,是不断发展着的多层次的复杂巨系统。本文在选取水资源承载能力遵循科学性、整体性、定性与定量相结合、可行性的原则,在此基础上结合其他相似地区研究成果^[14-15]选取使用频率较高的指标,结合龙川江流域经济社会、水资源系统、以及开发利用方式特征,最终选取以下了 14 个评价指标,评价指标体系见图 1。

根据龙川江流域实际情况,参考国内其他相似地区研究成果^[16-17],将评价指标分为 3 个等级。其

中 1 级表示很好,表明水资源承载力较高,可供开发的 空间和潜力较大;2 级介于 1 与 3 之间,说明水资源 已开发到一定程度,可持续利用程度一般,水资源 承载力适中;3 级表示很差,表明水资源承载力低, 水资源可供开发程度十分有限,极易发生水资源短 缺;评价指标分级见表 1。

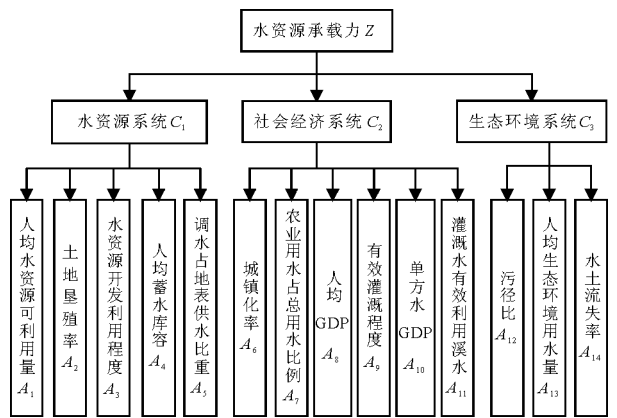


图 1 水资源承载力评价指标

3.3 评价指标值及权重

本次水资源承载力评价对龙川江流域 2000 年、2004 年、2010 年 3 个水平年进行评价,对 2020 年、2030 年两个规划年的水资源承载力进行了预测。本次水资源承载力评价指标值数据来源于《龙川江流域水资源资源配置与保护研究》报告和区域相关的“十二五”规划数据。指标数据值见表 2。

表 1 各指标分级值标准及权重

指标	分 级			熵权重	层次分析	组合权重
	1	2	3			
人均水资源可以用量/ m^3	850	650 ~ 850	650	0.060	0.072	0.061
土地垦殖率/%	6.67	26.7 ~ 6.67	26.7	0.062	0.093	0.081
水资源开发利用率/%	30	45 ~ 30	45	0.057	0.063	0.050
人均蓄水库容/ m^3	550	300 ~ 550	300	0.096	0.069	0.093
调水占地地表水比重/%	35	10 ~ 35	10	0.108	0.065	0.098
城镇化率/%	25	40 ~ 25	40	0.066	0.106	0.098
农业用水占总供水量比例/%	65	55 ~ 65	55	0.078	0.064	0.070
人均 GDP/元	7000	81000 ~ 7000	81000	0.065	0.071	0.065
有效灌溉程度/%	20	60 ~ 20	60	0.065	0.092	0.084
单方水 GDP/元	24.4	24.4 ~ 40	40	0.061	0.074	0.063
灌溉水有效利用系数	0.65	0.55 ~ 0.65	0.55	0.085	0.094	0.112
污径比/%	2	10 ~ 2	10	0.063	0.046	0.041
人均生态环境用水量/ m^3	5	2 ~ 5	2	0.062	0.043	0.037
水土流失率/%	10	50 ~ 10	50	0.071	0.048	0.048

根据各指标数据,采用最小信息熵原理计算组合权重,指标权重见表 1。

3.4 联系度的计算

定义水资源承载力评价指标 $x_i(i = 1, 2, \dots,$

14) 为集合 A_i ,对应指标 1 级评价标准集合为 B_1 ,构建集对 $H(A_i, B_1)(i = 1, 2, \dots, 14)$ 。根据分析所选水资源承载力评价指标,对于反向,选用式(2),正向选用式(3) 分别计算各集对 $H(A_i, B_1)(i = 1, 2,$

...,14) 的 3 元联系度 $A_i \sim B_1 = a_i + b_iI + c_iJ$, 部分结果见表 3。

设龙川江流域水资源承载力评价指标值构成集合 A , 14 个指标的 1 级等级标准构成集合 B , 用式(5)计算出集对 $H(A, B)$ 的联系度, 结果见表 4。

3.5 水资源承载力评价分析

根据置信度准则评判样本所属的等级, 即由式(6)计算 h_k 值, 计算结果见表 4。本研究取 $\lambda = 0.5$, 对于 2000 年, $h_1 = 0.480 < 0.5$, $h_2 = 0.720 > 0.5$, 由置信度准则可判断龙川江流域 2000 年水资源承载力为 2 级。同理, 可判断出其它 4 个水平年的水资源承载力等级。

为对比, 本文在同一指标体系下, 采用模糊综合评价法对龙川江流域的水资源承载力进行分析评价, 评价结果见表 5。

表 2 龙川江流域水资源承载力评价指标数据

指标	水平年				
	2000	2004	2010	2020	2030
A_1	782.70	763.86	743.16	705.27	843.86
A_2	0.15	0.146	0.143	0.14	0.137
A_3	0.346	0.373	0.417	0.578	0.388
A_4	524.59	527.97	621.97	719.02	742.88
A_5	0	0	0	0.02	0.35
A_6	0.275	0.320	0.418	0.448	0.526
A_7	0.809	0.783	0.716	0.779	0.726
A_8	5014.727	7199.011	17891.78	33601.38	56191.1
A_9	0.448	0.468	0.527	0.63	0.754
A_{10}	11.838	16.188	37.524	53.546	96.323
A_{11}	0.561	0.57	0.593	0.638	0.657
A_{12}	0.037	0.047	0.067	0.078	0.102
A_{13}	0	1.405	2.644	3.463	4.463
A_{14}	0.454	0.588	0.661	0.55	0.45

表 3 龙川江流域联系度计算结果

联系度	2010			2020			2030		
	a_i	b_i	c_i	a_i	b_i	c_i	a_i	b_i	c_i
$\mu_{A_1 \sim B_1}$	0	0.932	0.068	0	0.553	0.447	0.939	0.061	0
$\mu_{A_2 \sim B_1}$	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$\mu_{A_3 \sim B_1}$	0	0.440	0.560	0	0	1	0	0.827	0.173
$\mu_{A_4 \sim B_1}$	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$\mu_{A_5 \sim B_1}$	0	0	1	0	0	1	1	0	0
$\mu_{A_6 \sim B_1}$	0	0	1	0	0	1	0	0	1
$\mu_{A_7 \sim B_1}$	2.320	-1.320	0	1	0	0	1	0	0
$\mu_{A_8 \sim B_1}$	0.706	0.294	0	0.281	0.719	0	0	0.671	0.329
$\mu_{A_9 \sim B_1}$	0	0.365	0.635	0	0	1	0	0	1
$\mu_{A_{10} \sim B_1}$	0	0.317	0.683	0	0	1	0	0	1
$\mu_{A_{11} \sim B_1}$	0	0.860	0.140	0.760	0.240	0	1	0	0
$\mu_{A_{12} \sim B_1}$	0	0.825	0.175	0	0.550	0.450	1	0	0
$\mu_{A_{13} \sim B_1}$	0	0.429	0.571	0	0.975	0.025	0.642	0.358	0
$\mu_{A_{14} \sim B_1}$	0	0	1	0	0	1	0	0.250	0.750

表 4 各样本年对 $H(A, B)$ 的联系度及 h_k 值

年份	f_1	f_2	f_3	h_1	h_2	h_3
2000	0.480	0.240	0.280	0.480	0.720	
2004	0.570	0.130	0.300	0.570		
2010	0.381	0.202	0.417	0.381	0.583	
2020	0.347	0.166	0.488	0.347	0.512	
2030	0.575	0.114	0.311	0.575		

由表 5 可见, 通过模糊集对评价法可以得出龙川江流域 2000 年、2010 年、2020 年水资源承载力处于 2 级, 说明水资源已开发到一定程度, 可利用空间有所减小可持续利用程度一般, 承载力适中; 2004 年、2030 年水资源承载力处于 1 级, 表明水资源承

载力较高, 可供开发的空间和潜力较大。根据《龙川江流域水资源配置与保护研究》报告的人口、经济、供需水量预测和评价结果, 2020 年、2030 年两个规划水平年水资源承载力分别处于适中和好的状态, 为保证该流域河流、水资源、生态环境和经济社会可持续发展, 需要继续提水资源利用效率, 优化水资源配置, 控制人口、经济的发展, 使经济发展在流域水资源可承受的范围内, 实现区域经济和生态和谐可持续发展。

采用模糊综合评价法对龙川江流域水资源承载力评价, 5 个水平年的水资源承载力等级都为 2 级; 采用改进的模糊集对评价法, 5 个水平年的水资源承载力分别为 2 级、1 级、2 级、2 级、1 级。通过比较

2004 年,2030 年的水资源承载力,两种评价方法的结果有差异。随着国民经济的发展的需要,龙川江流域通过兴修水利工程等措施对水资源进行开发利用。2004 年的水资源开发利用程度、人均蓄水库容、有效灌溉程度和人均生态用水量均比 2000 年高;但是从国民经济发展速度来看,龙川江流域 2000 - 2004 年 GDP 增长了 47.9%,2004 - 2010 年流域 GDP 高速发展,增长了 155.5%。2004 年流域水资源开发利用程度增加,水资源利用效率提高,国民经济发展稳步提升,水资源承载力较 2000 年更高。虽然 2010 年流域水资源开发利用进一步提高,但是国民经济高速发展,对水资源的需求也大大增加,流域水资源承载力基本保持在适中状态。由于龙川江流域 2020 年,2030 年计划通过滇中调水工程从外流域调水增加地区供水量,这在一定程度上缓解了龙川江流域的水资源压力,提高水资源承载力等级,因此 2030 年龙川江流域水资源承载力为 1 级更符合流域实际情况。

表 5 龙川江流域水资源承载力评价结果

年份	模糊综合评价法	模糊集对评价法
2000	2	2
2004	2	1
2010	2	2
2020	2	2
2030	2	1

4 结论与建议

(1)通过两种方法评价结果的对比可以看出,模糊综合评价法可以得到每个水平年水资源承载力等级的隶属,但是对存在对指标信息挖掘不够充分的问题;模糊集对评价法不但可以得出每个水平年的水资源承载力等级,而且这种方法分辨率高,符合实际情况。因此,模糊集对评价法不仅模型理论严谨,果准确可靠,而且在运用该方法进行评价的过程中计算方法比较简便,给其他地区、流域水资源承载力评价提供借鉴。

(2)水资源承载力研究是可持续发展研究和水资源安全战略研究中的一个基础课题,龙川江高原流域水资源承载力研究对流域内河流水系、水资源的保护,对进一步提高流域水资源可持续利用水平、优化产业结构、缓解水资源供需矛盾具有重要意义。从评价结果来看,为让流域经济发展在流域水资源可承受的范围内,实现经济与生态环境协调发展,需

要积极推行“河长制”,加强水资源保护和管理,全面落实最严格水资源管理制度,严守水资源开发利用控制、用水效率控制,严守“三条红线”。

参考文献:

[1] Yang Qiyong, Zhang Fawang, Jing Zhongcheng, et al. Assessment of water resources carrying capacity in Karstarea of Southwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75 (1) :1 - 8.

[2] 郭钱,汪嘉杨,张 碧. 基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报,2017,32(3) :484 - 493.

[3] 吴开亚,金菊良,周玉良,等. 流域水资源安全评价的集对分析与可变模糊集耦合模型[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(3) :6 - 12.

[4] 王文圣,金菊良,丁 晶,等. 水资源系统评价新方法 - 集对评价法[J]. 中国科学:技术科学,2009,39(9) :1529 - 1534.

[5] 王 浩,秦大庸,王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报,2002,33(8) :1 - 6.

[6] 金菊良,王文圣,洪天求,等. 流域水安全智能评价方法的理论基础探讨[J]. 水利学报,2006,37(8) :918 - 925.

[7] 王文圣,李跃清,金菊良,等. 水文水资源集对分析[M]. 北京:科学出版社,2010.

[8] 左其亨. 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.

[9] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[10] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护,2017,33 (1) :52 - 56

[11] 熊黑钢,付金花,王凯龙. 基于熵权法的新疆奇台绿洲水资源承载力评价研究[J]. 中国生态农业学报,2012, 20(10) :1382 - 1387.

[12] 吴开亚,金菊良. 区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型[J]. 地理科学,2008,28(6) :754 - 758.

[13] 伍立群,顾世祥. 滇中水资源研究[M]. 昆明:云南科技出版社,2005.

[14] 王友贞,施国庆,王德胜等. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报,2005,20(4) :597 - 604.

[15] 惠洪河,蒋晓辉,黄 强,等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2001,21(1) :30 - 34.

[16] 左传英,王 静,张连根,等. 基于模糊集对聚类评价模型的云南省区域水资源用水效率评价[J]. 水电能源科学,2014,32(6) :29 - 32.

[17] 杨 鑫,王 莹,王 龙,等. 基于集对分析理论的云南省水资源承载力评估模型[J]. 水资源与水工程学报,2016, 27(4) :98 - 102.