

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.04.018

# 重庆市水资源可持续利用能力的模糊评价<sup>①</sup>

崔莹<sup>1</sup>, 谢世友<sup>1,2</sup>, 柳芬<sup>1</sup>, 冯欢<sup>1</sup>, 陈川<sup>1</sup>

1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

**摘要:** 针对重庆市水资源时空分布不均、水资源利用率低以及水环境恶化等现状, 利用重庆市政府公开资料及统计资料, 采用熵权和模糊综合评判相结合的方法, 对重庆市 2005 年—2014 年水资源可持续利用能力进行评判. 根据最大隶属度的原则将水资源可持续利用能力划分为 5 个等级, 并采用等级赋值法对评价结果进行量化, 计算出水资源可持续利用指数. 评价结果表明: 重庆市水资源可持续利用能力整体上呈上升趋势, 2005 年—2009 年略有波动, 降水量的多少对水资源可持续利用能力影响较大, 2010 年—2014 年, 水资源可持续利用能力指数从 2.88 持续上升到 4.04, 其中水资源开发利用程度贡献最大. 水资源与环境矛盾突出, 成为制约水资源可持续利用的主要因素.

**关键词:** 水资源; 可持续利用; 熵权法; 模糊综合评判

**中图分类号:** K903

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2017)04-0115-09

水是人类生活赖以生存的自然资源. 据理论估算, 全球地表总水量约为 13.86 亿  $\text{m}^3$ , 但可供人类利用的淡水资源仅占总水量的 0.34%<sup>[1]</sup>. 中国人均水资源量仅占世界平均水平的 31%, 水资源分布不均、水体污染、水资源重复利用率低等问题又使我国水资源可持续利用的形势更为严峻.

水资源可持续利用是指在维持水的持续性和生态系统整体性的条件下, 支持人口、资源、环境与经济协调发展和满足当代人和后代人用水需要的全部过程<sup>[2]</sup>. 重庆是我国长江上游的经济中心, 不仅在长江经济带中具有沟通东西的桥梁作用, 而且在三峡库区的运行中也占有重要地位. 因此, 探讨重庆市水资源可持续利用能力具有重要的现实意义.

对水资源可持续利用的评价方法主要有<sup>[3-6]</sup>: 综合评分法、多元统计法、协调度法、属性识别法、综合测度法以及模糊物元模型法等. 徐良芳等<sup>[7]</sup>提出运用离差法、主成分分析法等对指标进行计算, 并采用动静结合的方法对指标进行评价; 曾群<sup>[8]</sup>采用定量的层次分析法和综合指数法对武汉市水资源进行了评价, 探究武汉市水资源持续利用的变化趋势; 马艳<sup>[9]</sup>采用层次分析法和模糊综合评判相结合的方法对西安市水资源进行了评价, 在权重的确定上主观性较强. 本文采用客观的熵权法确定权重, 使用双层模糊综合评判的方法对重庆市水资源可持续利用能力做出评价.

## 1 研究区域概况和数据来源

### 1.1 区域概况

重庆市位于长江上游三峡库区, 四川盆地东部, 是二、三级阶梯的自然过渡地带, 幅员面积 82 403  $\text{km}^2$ ,

① 收稿日期: 2016-03-16

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2011BAC09B01、2006BAC01A16); 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA0002).

作者简介: 崔莹(1990-), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事地貌环境与应用地理研究.

通信作者: 谢世友, 教授.

东西长约 450 km, 南北宽约 450 km<sup>[10]</sup>. 地形以山地为主, 大小河谷纵横交错, 自然资源丰富多样. 气候为温暖湿润的亚热带季风气候, 降水充足, 热量丰富. 境内长江横贯东西, 水运发达, 又有嘉陵江、乌江汇入, 形成多个港口. 在全国经济地理环境中, 重庆地处东部发达区和西部资源富集区的过渡地带, 具有承东启西的纽带作用, 是长江上游的经济中心.

重庆市水资源总量多年平均值为 515.86 亿 m<sup>3</sup>, 平均降水量为 1 567.67 mm. 降水时空分布不均, 时间上年内集中于夏秋两季, 降水量占全年的 70% 以上, 年际上丰枯水年降水变幅大, 2007 年的降水量 (642.58 mm) 比 2006 年 (380.32 mm) 多出近一倍<sup>[8]</sup>, 降水变率大, 空间上东多西少, 南多北少, 空间分布不均. 随着人口的逐年增多, 对水资源可持续利用能力的定量评价非常重要.

## 1.2 数据来源

所用数据资料主要来源于《重庆市水资源公报》(2005—2014)<sup>[11]</sup>、《重庆统计年鉴》(2005—2014)<sup>[12]</sup>、《重庆环境质量简报》(2005—2014)<sup>[13]</sup>.

## 2 评价指标体系的建立

本文选定指标的主要原则为<sup>[14]</sup>: 评价主体的区域性、指标参数的独立性、数据资料的综合性、现有资料的可利用性等. 根据以上指导思想, 建立重庆市水资源可持续利用能力评价指标体系, 如表 1 所示.

表 1 重庆市水资源可持续利用能力评价指标体系

目标层	准则层	指标
水资源可持续利用能力 A	水资源条件 A1	水资源总量 $a_1$ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ); 人均水资源量 $a_2$ (m <sup>3</sup> ); 年均降水量 $a_3$ (mm); 地下水资源量 $a_4$ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ); 年径流深度 $a_5$ (mm); 地下水资源模数 $a_6$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ); 产水系数 $a_7$ ; 产水模数 $a_8$ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )
	水资源与社会经济关系 A2	万元 GDP 用水 $a_9$ (m <sup>3</sup> ); 工业万元产值用水 $a_{10}$ (m <sup>3</sup> ); 年居民生活人均用水 $a_{11}$ (L); 年城镇公共人均用水 $a_{12}$ (L); 年农田灌溉亩均用水 $a_{13}$ (m <sup>3</sup> ); 用水弹性系数 $a_{14}$
	水资源开发利用程度 A3	水资源开发利用率 $a_{15}$ (%); 地表水控制率 $a_{16}$ (%); 农业用水比 $a_{17}$ (%); 工业用水比 $a_{18}$ (%); 生活用水比 $a_{19}$ (%); 生态环境用水比 $a_{20}$ (%)
	水资源与环境关系 A4	年城市污水排放量 $a_{21}$ (10 <sup>8</sup> t); 污径比 $a_{22}$ (%); 年工业废水 COD 排放量 $a_{23}$ (10 <sup>4</sup> t); 年生活污水 COD 排放量 $a_{24}$ (10 <sup>4</sup> t); 森林覆盖率 $a_{25}$ (%)

## 3 熵权法确定权重

权是指标在决策中相对重要程度的一种主观评价和客观反映的综合度量<sup>[15]</sup>, 具有随机性和模糊性的特点. 权重的确定方法有很多, 常用的主要有专家调查法 (Delphi) 法、层次分析法 (AHP)、比较法、频数统计法、试探法等. “熵”是物理学中度量物质系统能量衰竭的程度. 申农将其与信息论相结合, 创立了信息熵的概念, 即用“熵”来表示信息特征. 熵值越小, 信息无序度越小, 因此可以用信息熵评价所获信息的有序度来确定指标权重<sup>[15]</sup>, 这样计算过程更为客观, 评价结果更符合实际. 其计算步骤如下<sup>[16]</sup>:

### 1) 原始数据矩阵的构建

设有  $m$  个评价指标,  $n$  个评价事物, 则原始数据的矩阵为  $\mathbf{A} = a_{ij} (i, j)_{m \times n}$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 原始数据归一化, 得到归一化矩阵  $\mathbf{B} = b_{ij} (i, j)_{m \times n}$ , 其中:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (2)$$

式中,  $a_{\max}$ ,  $a_{\min}$  分别为同一指标中不同事物的最优者和最劣者.

3) 定义熵

根据熵的定义,  $m$  个评价事物  $n$  个评价指标, 第  $i$  个评价指标的熵为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \left( \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中  $f_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^m b_{ij}}$ , 且当  $f_{ij} = 0$  时,  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ .

4) 评价指标权重  $W$  的计算

第  $i$  个评价指标的熵权为

$$W_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (4)$$

式中  $0 \leq W_i \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^m W_i = 1$ .

## 4 模糊综合评判模型

由于评价指标较多, 如果采用单层模糊评判, 会使大量指标的权重  $< 0.1$ , 导致模糊变换结果过小而无法做出准确评判. 本文采用双层综合评判, 即先将每一层综合评判, 再将评判结果作为高一层评判的评判矩阵, 进行第二级模糊评价.

### 4.1 建立因子集

将重庆市水资源可持续利用能力的评价指标分为 4 个因子集, 即  $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ , 使得

$$A = \sum_{i=1}^4 A_i, A_i \cap A_j = \phi (i \neq j) \quad (5)$$

则将  $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$  称为第一层因子集.

设

$$A_i = \{a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, a_3^{(i)}, \dots, a_{n_i}^{(i)}\} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

其中  $n_1 + n_2 + \dots + n_k = \sum_{i=1}^k n_i = n$  称为第二层因子集.

## 4.2 确定评判集和系数

根据重庆市的实际和数据特点,将水资源可持续利用能力划分为 5 级,即:  $V = \{V_1(\text{强}), V_2(\text{较强}), V_3(\text{一般}), V_4(\text{较弱}), V_5(\text{弱})\} = \{I, II, III, IV, V\}$ . 为了更精确地表达评判结果,采用等级赋值法将评判集赋予数字的形式,把结果向量  $B$  中的元素作为评判集对应元素的权,用加权平均的结果作为答案<sup>[17]</sup>,即:

$$V = \{5(V_1), 4(V_2), 3(V_3), 2(V_4), 1(V_5)\}$$

## 4.3 权重的确定

采用熵权法确定权重,运用 MATLAB 软件经过计算得到各指标权重(表 2).

表 2 重庆市水资源可持续利用能力指标权重

准则层	权重	指标层	权重	层次组合权重
$A_1$	0.216 4	$a_1$	0.134 4	0.029 1
		$a_2$	0.147 0	0.031 8
		$a_3$	0.117 0	0.025 3
		$a_4$	0.097 0	0.021 0
		$a_5$	0.134 3	0.029 1
		$a_6$	0.096 3	0.020 8
		$a_7$	0.139 7	0.030 2
		$a_8$	0.134 3	0.029 1
$A_2$	0.226 6	$a_9$	0.139 0	0.031 5
		$a_{10}$	0.152 7	0.034 6
		$a_{11}$	0.120 2	0.027 2
		$a_{12}$	0.195 8	0.044 4
		$a_{13}$	0.185 3	0.042 0
		$a_{14}$	0.207 0	0.046 9
$A_3$	0.342 0	$a_{15}$	0.143 8	0.050 6
		$a_{16}$	0.165 3	0.056 6
		$a_{17}$	0.090 4	0.030 9
		$a_{18}$	0.136 9	0.046 8
		$a_{19}$	0.168 4	0.057 6
		$a_{20}$	0.290 7	0.099 5
$A_4$	0.215 0	$a_{21}$	0.238 9	0.051 4
		$a_{22}$	0.150 4	0.032 3
		$a_{23}$	0.223 8	0.048 1
		$a_{24}$	0.214 8	0.046 2
		$a_{25}$	0.172 0	0.037 0

## 4.4 评价标准的划分

由于原始数据是不同的量纲,判别标准不一,因此在进行模糊评价之前要对其进行等级划分,以此作为指标满意程度的划分依据. 由于国内外对水资源可持续利用能力的评价未能有一个统一的标准值,表 3 中的 25 项 5 级指标分级标准,是在参考国内其他城市水资源可持续利用能力指标分级情况,以及咨询专家意见的基础上确定的<sup>[18-19]</sup>,并采用对称不等分间隔划分法,对评价指标进行分级(表 3).

表 3 重庆市水资源可持续利用能力指标分级标准

指 标	类型	等 级 划 分 标 准				
		I	II	III	IV	V
水资源总量 $a_1/10^8 \text{ m}^3$	正	>600	550~600	450~550	400~450	<400
人均水资源量 $a_2/\text{m}^3$	正	>2 000	1 800~2 000	1 400~1 800	1 200~1 400	<1 200
年均降水量 $a_3/\text{mm}$	正	>1 300	1 200~1 300	1 100~1 200	1 000~1 100	<1 000
水资源 条件 $A_1$						
地下水资源量 $a_4/10^8 \text{ m}^3$	正	>120	100~120	80~100	60~80	<60
年径流深度 $a_5/\text{mm}$	正	>800	700~800	600~700	500~600	<500
地下水资源模数 $a_6/10^4 \text{ m}^3$	正	>14	12~14	10~12	8~10	<8
产水系数 $a_7$	正	>0.6	0.5~0.6	0.3~0.5	0.2~0.3	<0.2
产水模数 $a_8/10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	正	>80	70~80	60~70	50~60	<50
水资源 与社会 经济关 系 $A_2$						
万元 GDP 用水 $a_9/\text{m}^3$	逆	<60	60~100	100~150	150~200	>200
工业万元产值用水 $a_{10}/\text{m}^3$	逆	<80	80~140	140~220	220~300	>300
年居民生活人均用水 $a_{11}/\text{L}$	正	>130	120~130	115~120	110~115	<110
年城镇公共人均用水 $a_{12}/\text{L}$	正	>70	65~70	55~65	45~55	<45
年农田灌溉亩均用水 $a_{13}/\text{m}^3$	逆	<230	230~250	250~280	280~300	>300
用水弹性系数 $a_{14}$	逆	<0	0~0.1	0.1~0.3	0.3~0.4	>0.4
水资源 开发利 用程度 $A_3$						
水资源开发利用 率 $a_{15}/\%$	逆	<12	12~14	14~16	16~18	>18
地表水控制率 $a_{16}/\%$	逆	<16	16~18	18~20	20~22	>22
农业用水比 $a_{17}/\%$	逆	<25	25~27	27~30	30~32	>32
工业用水比 $a_{18}/\%$	逆	<48	48~50	50~53	53~56	>56
生活用水比 $a_{19}/\%$	正	>17	16.5~17	16~16.5	15.5~16	<15.5
生态环境用水比 $a_{20}/\%$	正	>1.08	0.98~1.08	0.78~0.98	0.58~0.78	<0.58
水资源 与环境 关系 $A_4$						
年均城市污水排放量 $a_{21}/10^8 \text{ t}$	逆	<5.0	5.0~5.5	5.5~5.8	5.8~6.0	>6.0
污径比 $a_{22}/\%$	逆	<1.4	1.4~1.8	1.8~2.4	2.4~2.8	>2.8
年工业废水 COD 排放量 $a_{23}/10^4 \text{ t}$	逆	<5.0	5.0~7.0	7.0~9.0	9.0~11.0	>11
年生活污水 COD 排放量 $a_{24}/10^4 \text{ t}$	逆	<14	14~16	16~20	20~22	>22
森林覆盖率 $a_{25}/\%$	正	>43	40~43	36~40	31~36	<31

#### 4.5 隶属度函数的确定

隶属度函数的确定方法主要有<sup>[20]</sup>: 模糊统计法、二元对比排序法、例证法、指派法等. 模糊统计法通过统计确定模糊集中元素的隶属度, 它直观地反映模糊集中的隶属程度, 但是计算量过大, 且带有主观因素的影响. 二元对比排序法是在多个评判事物之间进行两两对比, 进而对评价指标的满意程度进行排序<sup>[14]</sup>. 例证法是在元素较少的情况下, 根据实际情况, 赋予元素隶属度. 指派法是主观地根据人们的实践经验来确定模糊集合隶属函数的方法. 当模糊集合的论域为实数时, 又将隶属度函数称为模糊分布. 常见的模糊分布有矩阵型、梯形型、 $k$ 次抛物型正态型以及柯西型等. 由于选取的水资源可持续利用能力的指标均为定量指标, 且表 3 中对指标均赋予了最大值和最小值, 因此对于正向指标可指派半升梯形隶属度函数, 逆向指标采用半降梯形隶属度函数, 在此基础上加以修正, 对于中间型使其在中间点的隶属度为 1.0, 向两侧边缘递减到 0.5, 对于偏大和偏小型使其距临界值越远隶属度越大, 在临界值上属于两侧的等级均为 0.5<sup>[6]</sup>. 数学模型如下:

I 级

$$\mu(a_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{a_i - k_1}{a_i - k_2} \right) & a_i > k_1 \text{ 或 } a_i \leq k_1 \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_1 - a_i}{k_1 - k_2} \right) & k_2 < a_i < k_1 \text{ 或 } k_1 < a_i \leq k_2 \\ 0 & a_i \leq k_2 \text{ 或 } a_i > k_2 \end{cases} \quad (7)$$

## II 级

$$\mu(a_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{a_i - k_1}{a_i - k_2} \right) & a_i > k_1 \text{ 或 } a_i \leq k_1 \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_1 - a_i}{k_1 - k_2} \right) & k_2 < a_i \leq k_1 \text{ 或 } k_1 < a_i \leq k_2 \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{a_i - k_3}{k_2 - k_3} \right) & k_3 < a_i \leq k_2 \text{ 或 } k_2 < a_i \leq k_3 \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_3 - a_i}{k_3 - k_4} \right) & k_4 < a_i \leq k_3 \text{ 或 } k_3 < a_i \leq k_4 \\ 0 & a_i \leq k_4 \text{ 或 } a_i > k_4 \end{cases} \quad (8)$$

## III 级

$$\mu(a_i) = \begin{cases} 0 & a_i > k_2 \text{ 或 } a_i \leq k_2 \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{a_i - k_3}{k_2 - k_3} \right) & k_3 < a_i \leq k_2 \text{ 或 } k_2 < a_i \leq k_3 \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_3 - a_i}{k_3 - k_4} \right) & k_4 < a_i \leq k_3 \text{ 或 } k_3 < a_i \leq k_4 \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{a_i - k_5}{k_4 - k_5} \right) & k_5 < a_i \leq k_4 \text{ 或 } k_4 < a_i \leq k_5 \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_5 - a_i}{k_5 - k_6} \right) & k_6 < a_i \leq k_5 \text{ 或 } k_5 < a_i \leq k_6 \\ 0 & a_i \leq k_6 \text{ 或 } a_i > k_6 \end{cases} \quad (9)$$

## IV 级

$$\mu(a_i) = \begin{cases} 0 & a_i > k_4 \text{ 或 } a_i \leq k_4 \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{a_i - k_5}{k_4 - k_5} \right) & k_5 < a_i \leq k_4 \text{ 或 } k_4 < a_i \leq k_5 \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_5 - a_i}{k_5 - k_6} \right) & k_6 < a_i \leq k_5 \text{ 或 } k_5 < a_i \leq k_6 \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{a_i - k_7}{k_6 - k_7} \right) & k_7 < a_i \leq k_6 \text{ 或 } k_6 < a_i \leq k_7 \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{k_7 - a_i}{k_6 - a_i} \right) & a_i \leq k_7 \text{ 或 } a_i > k_7 \end{cases} \quad (10)$$

## V 级

$$\mu(a_i) = \begin{cases} 0 & a_i > k_6 \text{ 或 } a_i \leq k_6 \\ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{a_i - k_6}{k_6 - k_7} \right) & k_7 < a_i \leq k_6 \text{ 或 } k_6 < a_i \leq k_7 \\ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{k_7 - a_i}{k_6 - a_i} \right) & a_i < k_7 \text{ 或 } a_i > k_7 \end{cases} \quad (11)$$

在上述数学模型中,对于正向指标条件取前者,逆向指标条件取后者. $k_1, k_3, k_5, k_7$  分别是相邻两个等级区间的临界值, $k_2, k_4, k_6$  分别是 II, III, IV 等级区间的中间值.

## 4.6 模糊综合评判

## 4.6.1 第一层模糊评判

根据一级权重  $W_i (i=1, 2, \dots, m)$  和相应的评判矩阵  $R_i (i=1, 2, 3, 4)$ , 采用加权平均的算法, 分别对因子集  $A_i (i=1, 2, 3, 4)$  进行综合评判, 得到层模糊综合评判结果  $B_i$ :

$$B_i = W_i \cdot R_i \quad (12)$$

式中按普通矩阵乘法计算权向量与评价矩阵的乘积, 这种算法相对于模糊变换和以加代替取大的算法而言, 与以乘代替取小相比又淡化了主因子的突出作用, 并且充分利用了评判矩阵的信息, 综合程度强。

#### 4.6.2 第二层模糊评判

将第一层模糊综合评判的结果  $B_i$  作为第二层评判的评判矩阵  $R$ , 权重  $W$  为每一层层次组合权重相加之和, 采用加权平均的算法, 最终得到第二层综合评判结果  $B$ :

$$B = W \cdot R \quad (13)$$

式中按普通矩阵乘法计算权向量与评价矩阵的乘积。

## 5 评判结果

按照上述模型和已知数据, 使用 Visual Basic 软件对重庆市水资源可持续利用能力进行综合评判, 并按照最大隶属度的原则将能力划分成不同的等级, 结果如表 4 所示。

表 4 重庆市 2005 年至 2014 年水资源可持续利用能力模糊综合评价结果

年份	模糊综合评价结果					等级	各约束层模糊综合评价结果				综合指数
	I	II	III	IV	V		水资源条件	水资源与社会经济关系	水资源开发利用程度	水资源与环境关系	
2005	0.034 8	0.310 5	0.223 5	0.196 7	0.217	II	3.235 0	2.435 4	2.676 4	2.993 9	2.744 9
2006	0.083	0.15	0.057 5	0.328 4	0.381 1	V	1.685 4	2.371 5	1.905 4	3.124 7	2.225 5
2007	0.234 1	0.197	0.077	0.389	0.098 1	IV	4.144 2	2.680 1	2.877 4	2.749 2	3.080 5
2008	0.102 9	0.270 8	0.227 9	0.248 9	0.149 5	II	3.558 7	2.852 9	2.401 8	3.212 3	2.928 7
2009	0.048 4	0.132 5	0.162 8	0.404	0.252 3	V	2.501 3	3.073 8	1.711 9	2.313 8	2.320 7
2010	0.022 3	0.211 8	0.202 4	0.337 7	0.225 7	IV	2.699 9	3.318 3	1.710 9	2.540 2	2.467 4
2011	0.048 6	0.230 6	0.347 5	0.295 6	0.077 7	III	2.945 5	3.762 5	2.371 2	2.679 0	2.876 9
2012	0.108 2	0.246	0.321 8	0.269 6	0.054 3	III	2.827 2	3.943 8	2.647 5	3.131 4	3.084 1
2013	0.065 9	0.352 5	0.297 8	0.224 9	0.058 9	II	2.786 3	3.818 4	2.952 1	3.087 6	3.141 6
2014	0.475 2	0.347 9	0.793 3	0.072 9	0.068 5	I	4.397 2	4.070 0	4.520 1	3.109 6	4.042 6

1) 从水资源条件的层面看, 重庆市水资源可持续利用能力波动较大, 变化区间为 1.68~4.39, 2005 年—2008 年出现一次较大波动, 这是由于降水量对水资源条件影响较大, 导致丰枯水年的水资源可持续利用能力差别较大, 从侧面表明重庆市水资源可持续利用能力不稳定。

2) 从水资源与社会经济关系的层面上可以看出, 重庆市水资源可持续利用能力上升趋势显著, 变化区间为 2.37~4.07, 且从 2010 年至 2014 年保持在较高水平, 趋势线呈上升趋势。说明重庆市的发展速度在水资源可承受范围之内, 且随着政府资金投入和供水工程的建设, 社会经济与水资源可持续利用能力逐渐得到协调发展。

3) 从水资源开发程度的层面看, 重庆市水资源可持续利用能力呈波动上升趋势, 变化区间为 1.71~4.52, 2006 年—2008 年出现一次较大波动, 2010 年后趋势线上升速度较快, 水资源开发利用程度有较大提高。表明节水率、水资源重复利用率的逐渐提高, 有利于水资源可持续利用能力的提高。

4) 从水资源与环境的层面上看, 重庆市水资源可持续利用能力整体处于中等水平, 徘徊在 2.3~3.1 之间, 上升幅度不明显。主要是因为重庆市经济发展较快, 水污染也随之增加, 但污染控制和治理的环节薄弱, 从而造成水体污染。说明重庆市在注重经济发展的同时, 没有对环境给与足够的重视, 现有的保护水环境的措施落实力度不够, 导致污水排放量大, 河流污染, 因此水资源与环境的关系成为制约水资源可持续利用的关键因素。

5) 从整体上看,重庆市 2005 年—2010 年水资源可持续利用能力呈波动上升趋势,趋势线先降后升,可持续利用能力较差,主要是人类活动对水环境造成的污染较大,2006 年为最低水平年,主要原因是枯水年降水过少,加之人们对水资源保护力度较差,2011 年以来,重庆市水资源可持续利用能力呈上升趋势,这是由于人类活动与环境的关系得到一定程度的改善,各种节水措施和资金的投入、水资源重复利用率的提高对水资源可持续利用能力做出了一定贡献。

## 6 结 论

1) 对重庆市水资源条件、水资源与社会经济关系、水资源开发利用程度以及水资源与环境关系进行了分析,指出了重庆市水资源可持续利用中的薄弱环节,认为水资源与环境关系亟待改善。

2) 在分析水资源意义的基础上,本着评价主体的区域性、指标参数的独立性、数据资料的综合性、现有资料的可利用性等指导原则,初步构建了重庆市水资源可持续利用评价指标体系,采用熵权法确定权重,对指标体系中各级指标的重要程度进行了客观评价。

3) 对重庆市水资源可持续利用能力的评价结果表明,2005 年—2014 年,重庆市水资源可持续利用能力整体呈上升趋势,2005 年—2009 年略有波动,呈先下降、后上升、再下降的变化,降水量对水资源可持续利用能力影响较大,说明重庆市水资源可持续利用能力对水资源条件依赖较大,水资源重复利用率低,2010 年—2014 年,水资源可持续利用能力指数从 2.88 持续上升到 4.04,其中水资源开发利用程度贡献最大,其次是水资源与社会经济关系的改善,水资源与环境的关系对其贡献最小,多年保持在中低水平。

4) 水资源与环境的关系是制约重庆市水资源可持续利用能力的关键因素,2005 年—2014 年中,有 6 年的水资源与环境关系指数在 3.0 以下,说明重庆市经济发展对水环境造成了巨大压力,环境保护措施落实不到位,污水处理力度和污水回用率低,水资源与环境的关系需大力改善。

### 参考文献:

- [1] 杨志清. 21 世纪水资源展望 [J]. 水资源保护, 2004, 20(4): 66—68.
- [2] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 62.
- [3] 宋松柏, 蔡焕杰, 徐良芳. 水资源可持续利用指标体系及评价方法研究 [J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 647—652.
- [4] 门宝辉, 梁 川. 属性识别方法在水资源系统可持续发展程度综合评价中的应用 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(6): 675—678.
- [5] 王慧敏, 徐立中. 流域系统可持续发展分析 [J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 165—172.
- [6] 潘 峰, 梁 川, 王志良, 付 强. 模糊物元模型在区域水资源可持续利用综合评价中的应用 [J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 271—275.
- [7] 徐良芳, 冯国章, 刘俊民. 区域水资源可持续利用及其评价指标体系研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 119—122.
- [8] 曾 群, 蔡述明. 武汉市水资源可持续利用评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(4): 429—434.
- [9] 马 艳. 基于 AHP 的西安市水资源可持续开发利用模糊综合评价 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [10] 陈升琪, 等. 重庆地理 [M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2003: 1—3.
- [11] 重庆水利局. 重庆市水资源公报 [EB/OL]. (2005—2014) [2015—11—13]. <http://www.cqwater.gov.cn/slsj/szygb/Pages/Default.aspx>.
- [12] 重庆统计局, 国家统计局重庆调查总队. 重庆统计年鉴(2005—2014) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [13] 重庆环保局. 重庆市环境质量简报 [EB/OL]. (2005—2014) [2015—11—13]. <http://www.cepb.gov.cn/xxgk/hjzl/hjzkgb/index.shtml>.
- [14] 左东启, 李鸿业. 水资源评价指标体系研究 [J]. 水科学进展, 1996, 7(4): 367—373.
- [15] 邱苑华. 管理决策熵学及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 295.

- [16] 张先起,梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用 [J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061.
- [17] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 318-319.
- [18] 雷宏军,刘鑫,徐建新,等. 郑州市水资源可持续利用的模糊综合评价 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(2): 77-81.
- [19] 汤溟,王腊春. 基于熵权法的南京市水资源可持续利用评价 [J]. 四川环境, 2010, 29(1): 75-79.
- [20] 李家军,杨莉. 对隶属函数确定方法的进一步探讨 [J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2004, 33(6): 1-4.

## Fuzzy Evaluation of Sustainable Utilization of Water Resources in Chongqing

CUI Ying<sup>1</sup>, XIE Shi-you<sup>1,2</sup>, LIU Fen<sup>1</sup>,  
FENG Huan<sup>1</sup>, CHEN Chuan<sup>1</sup>

1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Key Laboratory of The Three-Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of the Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In order to solve the problems of uneven distribution of water resources in time and space, their low utilization rate and water environment deterioration in Chongqing, the sustainable utilization ability of Chongqing for its water resources between 2005 to 2014 was evaluated with the method of entropy weight and fuzzy comprehensive evaluation based on the disclosed information and statistical data of Chongqing Municipal Government. The sustainable utilization of the water resources was divided into five grades according to the principle of maximum membership degree, and the results of the evaluation were quantified with the rank assignment method, and the water resource sustainable utilization index was calculated. The results showed that on the whole, the sustainable utilization of water resources of the municipality exhibited an ascending trend, with some fluctuations, from 2005 to 2009; that precipitation noticeably influenced water resource sustainable utilization; and that its water resource sustainable utilization index rose from 2.88 in 2010 to 4.04 in 2014, the greatest contribution coming from the high level of water resource development and utilization. The study also demonstrated that there existed a conspicuous contradiction between water resources and environment in Chongqing, which was the main factor restricting the development of sustainable utilization of water resources.

**Key words:** water resource; sustainable utilization; entropy weight method; fuzzy comprehensive evaluation

责任编辑 胡 杨

