

刘丽颖,杨清伟,曾一笑,等.喀斯特地区水资源安全评价模型构建及其应用:以贵州省为例[J].中国岩溶,2018,37(2):203-210.
DOI:10.11932/karst20180206

喀斯特地区水资源安全评价模型构建及其应用 ——以贵州省为例

刘丽颖^{1,2},杨清伟¹,曾一笑³,和秀娟³,官冬杰³

(1. 重庆交通大学河海学院,重庆 400074; 2. 重庆工商大学数学与统计学院,重庆 400067;

3. 重庆交通大学建筑与城市规划学院,重庆 400074)

摘 要:为探讨地下水资源丰富而地表水资源短缺的喀斯特地区水资源安全评价问题,以典型喀斯特地区贵州省为例,构建了喀斯特地区水资源安全评价指标体系,将熵权法与模糊综合评价模型相结合,从空间和时间上对贵州省 9 个州(市)2005—2014 年水资源安全进行定量评价,结果表明:贵阳、黔东南、铜仁地区水资源安全处于良好等级,遵义、黔南、毕节、黔西南处于一般等级,安顺、六盘水处于差等级;2005—2014 年,贵州省水资源安全相对稳定,都处于一般等级,但水资源安全呈现上升的趋势,这是由于贵州省近年来高度重视生态环境保护的结果。随着生态环境与经济发展矛盾的加剧,贵州省要更多地注重水资源供水安全指标的管理,调整产业结构,使经济、社会效益逐渐成为生态效益的补充和实现形式。

关键词:喀斯特;贵州省;水资源安全;熵权法;模糊数学

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)02-0203-08

0 引 言

水资源安全是 20 世纪末国际社会提出的一个重要概念,与经济安全、粮食安全和军事安全一样,是人类安全问题之一^[1],因而得到国内外学者的广泛关注。水资源安全与否会引发诸多自然现象和生态过程的变化,研究水资源安全情况对于了解区域生态环境、气候以及促进可持续发展都有着重要作用。

2000 年以来,中国学者对水资源安全的定义、内涵、评价模型和预测方法进行了研究,水资源安全的评价模型和方法得到了进一步的丰富和完善。目前,水资源安全问题研究主要是以区域(或者流域)研究为核心,集中在水资源安全的评价指标体系研究^[2-3],水资源安全的综合评价(包括现状评价^[4-6]、

历史评价^[7-9]、动态评价^[10-11]),以及水资源安全的预警和控制^[12-13]等方面,已有的研究大多集中在干旱和半干旱地区,对喀斯特地区水资源安全状况的研究比较少。

中国西南喀斯特地区虽然在传统意义上属于水资源丰富区,但地表水资源短缺,地下水资源丰富,形成了特殊的“二元”水结构系统,生态地位极其重要^[14]。由于特殊的地质环境和人类活动的影响,喀斯特地区最容易发生旱涝灾害、水土流失、沙漠化、崩塌等灾害。中国西南部的喀斯特地区水资源安全已经受到各种如季节性缺水、频繁交替的洪涝和干旱、水污染等威胁。水资源是喀斯特地区生态平衡、环境保护、经济发展、消除贫困的决定性因素。贵州省喀斯特地貌分布广、类型多,伴随着社会经济快速发展,

资助项目:国家科技支撑计划项目(2014BAB03B01);国家社科基金后期资助项目(16FJY010);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0210);黔科贵州省重大应用基础专题(黔科合 JZ 字[2014]200206);重庆工商大学 2015 年校级科研项目(670101577)

第一作者简介:刘丽颖(1982—),女,讲师,博士研究生,研究方向为水资源与可持续发展。E-mail:lly@ctbu.edu.cn。

通信作者:杨清伟(1972—),男,博士、博士后,教授,博士生导师,研究方向侧重于水土介质生物地球化学与环境地球化学、重金属污染环境效应与生态恢复。E-mail:qwyang2001@163.com。

收稿日期:2017-02-08

其水资源安全情况备受关注。

本文以典型喀斯特地区贵州省为研究对象,基于贵州省 2005—2014 十年间的统计数据,从水资源供水安全、社会安全、经济安全、生态安全 4 个方面出发,构建一套有针对性的反映贵州省喀斯特地区水资源安全的指标体系,并运用熵权法与模糊数学综合评价相结合的方法,对贵州省不同区域和不同年份的数据进行计算和分析,旨在探讨贵州省水资源安全在空间和时间上的分布状况,提出切实可行的水资源安全保障措施,以期为保证该地区的水资源安全提供科学依据。

1 研究区概况

贵州省土地总面积约为 176 167 km²,约占中国土地总面积的 1.8%,其位于云贵高原,平均海拔高度为 1 100 m,喀斯特面积约为 109 084 km²,约占全

省土地面积的 61.9%。贵州省喀斯特地貌分布非常广泛,类型众多且差异明显,形成了独特的喀斯特生态系统。贵州省多年平均降水量为 1 100~1 300 mm,年用水量为 100 亿 m³ 左右,农业用水所占比重最大,约占总用水量的 50%,生态环境用水最少,比重未达到 1%。

2 数据来源与研究方法

2.1 构建喀斯特地区水资源安全评价指标体系

本研究根据喀斯特地区地貌、生态、水资源、经济和社会的特殊性,选择能体现水资源安全内涵、发展状态及发展过程的因素,同时遵循代表性、综合性、可观测性和易操作性等原则,在参考国内相关研究成果的基础上,综合归纳确定了评价喀斯特地区水资源安全的 14 个指标(图 1)。

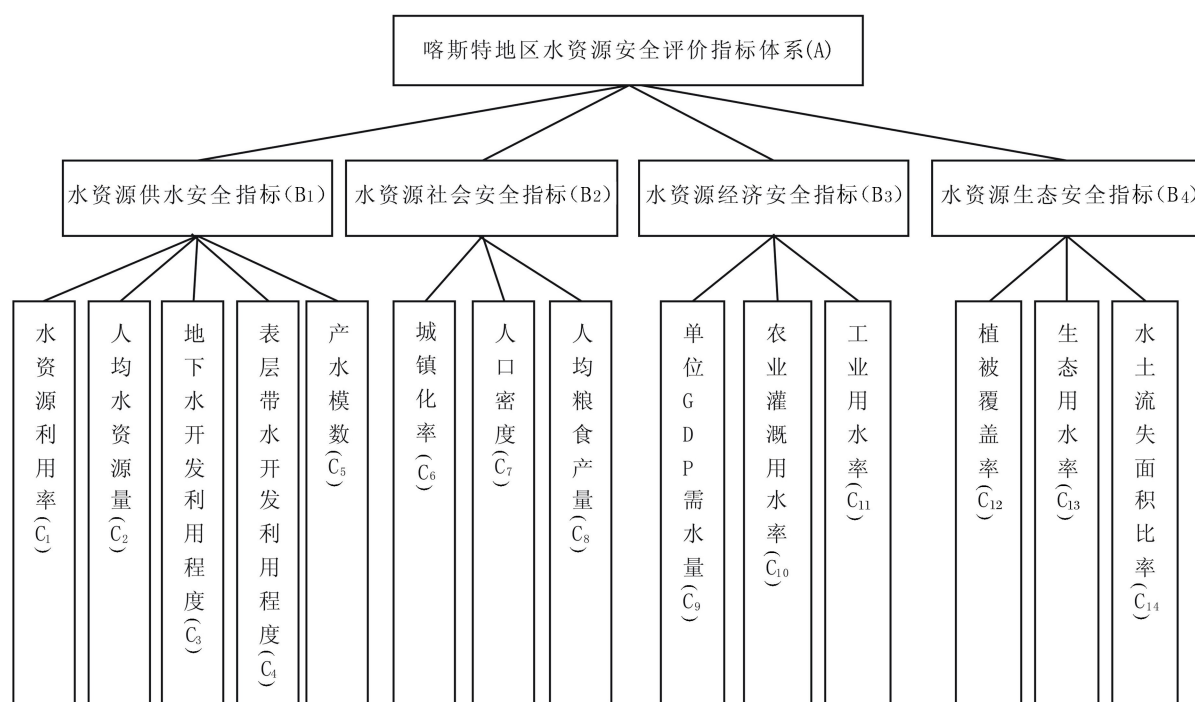


Fig. 1 Evaluation index system of water resources security in karst area

2.2 确定喀斯特地区水资源安全等级划分及指标阈值

水资源安全是一个相对的概念,并没有一个明确的界限。水资源安全的等级划分也没有统一的标准或公认的评价依据。本文根据国家水资源安全标准

和国内外相关的研究,结合喀斯特地实际情况,将贵州省喀斯特地区水资源安全划分为 5 个等级(表 1)。

2.3 数据来源

研究数据主要来源于 2005—2014 年《贵州省统

计年鉴》、《贵州省水资源公报》、《中国统计年鉴》、《贵州省环境状况公报》以及《贵州省国民经济和社会发展统计公报》(表 2,表 3)。

2.4 构建喀斯特地区水资源安全评价模型

2.4.1 确定喀斯特地区水资源安全评价指标权重

合理赋予指标权重是水资源安全评价中极其关键的一步。熵权法在计算过程中有数学公式作为理论基础,是一种不受主观因素影响、较为客观的赋予指标权重的方法。因此,本文选择熵权法计算喀斯特地区水资源安全评价指标的权重,具体计算步骤如下:

表 1 贵州省喀斯特地区水资源安全评价等级

Table 1 Evaluation level of water resources security in karst area of Guizhou Province

指标层	评价指标	好	良好	一般	差	非常差
水资源供水安全指标	水资源利用率/%	>80	80~55	55~30	30~5	<5
	人均水资源量/m ³	>10 000	10 000~1 700	1 700~1 000	1 000~500	<500
	地下水开发利用程度/%	<0.2	0.2~1.8	1.8~3.4	3.4~5.0	>5.0
	表层带水开发利用程度/%	<3	3~8	8~13	13~18	>18
	产水模数/%	>65	65~50	50~35	35~20	<20
水资源社会安全指标	城镇化率/%	<10	10~35	35~60	60~85	>85
	人口密度/人·km ⁻²	<25	25~100	100~500	500~1 000	>1 000
	人均粮食产量/kg	>500	500~60	360~220	220~80	<80
水资源经济安全指标	单位 GDP 需水量/m ³ ·万元 ⁻¹	<40	40~340	340~680	680~930	>930
	农业灌溉用水率/%	<20	20~40	40~60	60~80	>80
	工业用水率/%	<10	10~30	30~50	50~70	>70
水资源生态安全指标	植被覆盖率/%	>80	80~60	60~40	40~20	<20
	生态用水率/%	>1.6	1.6~1.2	1.2~0.8	0.8~0.3	<0.3
	水土流失面积比率/%	<15	15~30	30~45	45~60	>60

表 2 贵州省喀斯特地区水资源安全空间评价指标数据(2014 年)

Table 2 Spatial evaluation index data of water resources security in karst area of Guizhou Province(2014)

指标	地区								
	贵阳	遵义	安顺	黔南	黔东南	铜仁	毕节	六盘水	黔西南
水资源利用率/%	31.15	15.74	31.17	7.97	6.84	7.51	11.32	25.76	11.74
人均水资源量/m ³	743.00	1 965.97	1 093.33	3 755.49	4 970.37	3 012.63	1 572.16	1 001.91	2 133.76
地下水开发利用程度/%	0.66	1.72	0.23	3.44	3.12	0.90	3.00	0.35	1.57
表层带水开发利用程度/%	3.27	6.42	3.39	12.68	14.81	13.89	8.92	4.09	8.66
产水模数/%	41.79	39.26	27.14	46.38	57.07	51.94	38.28	29.05	35.84
城镇化率/%	72.00	12.42	39.50	39.92	33.00	17.35	31.67	45.00	32.00
人口密度/人·km ⁻²	562.85	199.68	248.25	123.51	114.82	172.42	243.48	289.94	167.95
人均粮食产量/kg	95.67	422.91	274.42	365.26	315.87	377.90	348.74	281.44	325.28
单位 GDP 需水量/m ³ ·万元 ⁻¹	50.16	119.91	182.68	149.95	202.34	131.16	111.72	84.12	126.50
农业灌溉用水率/%	27.25	66.23	56.25	57.23	69.70	58.55	25.52	24.39	47.10
工业用水率/%	43.12	14.31	28.19	24.17	14.51	19.80	48.02	56.60	33.10
植被覆盖率/%	44.20	51.24	42.00	53.50	63.44	54.94	44.06	45.30	45.70
生态用水率/%	1.34	0.95	0.38	0.62	0.51	0.71	0.77	0.54	0.42
水土流失面积比率/%	27.92	31.62	30.91	24.98	17.79	37.91	43.46	42.92	34.18

表 3 贵州省喀斯特地区水资源安全时间评价指标数据(2005—2014 年)

Table 3 Time evaluation index data of water resources security in karst area of Guizhou Province(2005—2014)

评价指标	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
水资源利用率/%	11.60	12.30	9.29	8.90	9.50	8.90	15.20	9.40	12.10	7.85
人均水资源量/m ³	2 555.00	2 059.00	2 649.00	2 826.00	2 226.00	2 283.00	1 806.00	2 796.00	2 168.00	3 458.00
地下水开发利用程度/%	3.18	3.12	2.39	2.98	2.80	2.86	0.51	0.43	0.81	0.95
表层带水开发利用程度/%	8.66	11.31	8.66	8.20	10.23	9.80	14.74	9.11	11.85	7.49
产水模数/%	56.25	46.24	59.86	64.78	51.68	54.30	35.55	55.29	43.11	68.86
城镇化率/%	26.87	27.42	28.20	29.11	30.00	33.81	35.00	36.50	37.80	40.01
人口密度/人·km ⁻²	223.15	224.41	225.97	229.27	232.19	237.79	240.00	241.45	243.53	245.76
人均粮食产量/kg	308.86	281.30	303.10	322.02	330.30	319.71	252.78	309.93	294.11	324.54
单位 GDP 需水量/m ³ ·万元 ⁻¹	509.00	442.00	339.90	286.11	256.55	220.44	167.00	135.00	115.00	103.00
农业灌溉用水率/%	54.80	54.10	49.24	50.20	50.10	49.30	44.40	52.40	49.90	50.40
工业用水率/%	28.60	27.30	32.43	33.10	34.00	38.80	42.20	27.30	29.40	29.00
植被覆盖率/%	34.93	39.93	39.93	39.93	39.93	40.52	41.53	47.00	48.00	49.00
生态用水率/%	0.40	0.70	0.57	0.49	0.55	0.60	0.60	0.60	0.70	0.73
水土流失面积比率/%	41.54	41.54	41.54	41.54	41.54	31.37	31.37	31.37	29.23	29.23

确定评价对象,建立评价指标体系,构造指标水平矩阵:

$$R' = \begin{bmatrix} r'_{11} & \cdots & r'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{m1} & \cdots & r'_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

对评价矩阵进行标准化处理得矩阵 $R = (r_{i,j})_{m \times n}$ 。其中,正负指标计算方式不同,对于正向指标为:

$$r_{i,j} = \frac{r'_{i,j} - \min(r'_{i,j})}{\max(r'_{i,j}) - \min(r'_{i,j})} \quad (2)$$

对于负向指标为:

$$r_{i,j} = \frac{\max(r'_{i,j}) - r'_{i,j}}{\max(r'_{i,j}) - \min(r'_{i,j})} \quad (3)$$

计算第 j 个指标的熵 H_j :

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{i,j} \times \ln f_{i,j} \quad (4)$$

其中:

$$f_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\sum_{i=1}^m r_{i,j}} \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{\ln m} \quad (6)$$

式中: $f_{i,j}$ 为第 j 个指标下第 i 个项目的指标值的比重。计算第 j 个指标的熵权 W_j :

$$W_j = \frac{(1 - H_j)}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} \quad (7)$$

2.4.2 构建水资源安全评价模型

(1)确定评价对象的因素集

设 $U = \{u_1, u_2, \cdots, u_m\}$ 为被评价对象的 m 种评价因素,其中 m 是评价因素的个数,由具体的指标体系所决定,本研究中 m 值为 14。

(2)确定评价对象的评语集

设 $V = v_1, v_2, \cdots, v_j$ 是将评价对象可能得到的结果进行分级所构成的集合,其中: v_j 代表第 j 个评价结果, $j = (1, 2, \cdots, n)$, n 为总的评价结果数。一般划分为 3~5 个等级,本研究中将水资源安全情况分为好、良好、一般、差、非常差 5 个等级,即 $n=5$ 。

(3)单因素模糊评价

构造等级模糊子集后,逐个对被评价对象从每个因素 u_i 上进行量化,也就是确定从单因素来看被评价对象对各等级模糊子集的隶属度,进而得到模糊关系矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}$$

式中: $r_{i,j}$ 表示某个被评价对象从因素 u_i 来看对等级模糊子集 v_j 的隶属度。在确定隶属关系时对于正负指标有不同公式,正向指标计算公式为:

当 $x_i \geq r_{i,5}$ 时,
$$U_{i,5} = 1, U_{i,1} = U_{i,2} = U_{i,3} = U_{i,4} = 0 \quad (8)$$

当 $r_{i,j} \leq x_i \leq r_{i,j+1}$ 时,

$$U_{i,j} = w_i - w_j \cdot \left| \frac{x_i - r_{i,j}}{r_{i,j+1} - r_{i,j}} \right|$$

$$U_{i,j+1} = w_i \cdot \left| \frac{x_i - r_{i,j}}{r_{i,j+1} - r_{i,j}} \right| \quad (9)$$

当 $x_i \leq r_{i,1}$ 时,

$$U_{i,1} = 1, U_{i,2} = U_{i,3} = U_{i,4} = U_{i,5} = 0 \quad (10)$$

负向指标计算公式为:当 $x_i \geq r_{i,1}$ 时,

$$U_{i,1} = 1, U_{i,2} = U_{i,3} = U_{i,4} = U_{i,5} = 0 \quad (11)$$

当 $r_{i,j+1} \leq x_i \leq r_{i,j}$ 时, $U_{i,j} = w_i - w_j \cdot \left| \frac{x_i - r_{i,j}}{r_{i,j+1} - r_{i,j}} \right|$

$$U_{i,j+1} = w_i \cdot \left| \frac{x_i - r_{i,j}}{r_{i,j+1} - r_{i,j}} \right| \quad (12)$$

当 $x_i \leq r_{i,5}$ 时,

$$U_{i,5} = 1, U_{i,1} = U_{i,2} = U_{i,3} = U_{i,4} = 0 \quad (13)$$

式中: $U_{i,j}$ 为第 i 个指标对第 j 级标准的相对隶属度; w_i 为第 i 个指标的权重系数; x_i 为第 i 个指标的现状值; $r_{i,j}$ 为第 i 个指标的第 j 级安全标准值。当 $1 \leq i \leq 5$ 时, $U_{i,j}$ 组成矩阵 $U_{1,j}$; 当 $6 \leq i \leq 8$ 时, $U_{i,j}$ 组成矩阵 $U_{2,j}$; 当 $9 \leq i \leq 11$ 时, $U_{i,j}$ 组成矩阵 $U_{3,j}$; 当 $12 \leq i \leq 14$ 时, $U_{i,j}$ 组成矩阵 $U_{4,j}$ 。

(4) 多指标综合评价

将权重向量(W)与模糊关系矩阵(R)合成计算, 就可以得到各被评价对象的模糊综合评价结果矢量(B)。模糊综合评价的模型为:

$$B = W \cdot R =$$

$$(a_1, a_2, \dots, a_m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = b_1, b_2, \dots, b_n \quad (14)$$

式中: b_j 表示被评级对象从整体上看对评价等级模糊子集元素 v_j 的隶属程度。

3 结果与分析

3.1 喀斯特地区水资源安全评价指标权重计算结果

权重的计算结果(表 4)表明, 对水资源安全影响较大的指标层是水资源供水安全和生态安全。其中, 水资源利用率、人均水资源量、植被覆盖率和生态用水率是喀斯特地区水资源安全的主要影响因素。

3.2 喀斯特地区水资源安全空间评价结果及分析

空间评价是指对贵州省同一时间段内, 不同区域

表 4 贵州省喀斯特地区水资源安全评价指标权重值

Table 4 Evaluation index weight value of water resources security in karst area of Guizhou Province

指标层	指标	权重	子系统权重值
水资源供水安全指标	C ₁	0.124 9	0.434 4
	C ₂	0.099 0	
	C ₃	0.070 4	
	C ₄	0.071 1	
	C ₅	0.069 0	
水资源社会安全指标	C ₆	0.036 3	0.100 8
	C ₇	0.031 6	
	C ₈	0.033 0	
水资源经济安全指标	C ₉	0.055 1	0.190 4
	C ₁₀	0.083 4	
	C ₁₁	0.052 0	
水资源生态安全指标	C ₁₂	0.097 8	0.274 3
	C ₁₃	0.099 2	
	C ₁₄	0.077 3	

的水资源安全进行评价。本研究将贵州省 9 个州(市)2014 年指标数据(表 2)代入式(8)~(14), 计算 4 个指标层的等级隶属度。以贵阳为例, 其隶属度矩阵如下:

$$U_{\text{贵阳}} = \begin{bmatrix} 0.049 & 0.093 & 0.085 & 0.173 & 0.003 \\ 0 & 0 & 0.014 & 0.061 & 0.026 \\ 0.074 & 0.064 & 0.044 & 0.008 & 0 \\ 0 & 0.133 & 0.084 & 0.011 & 0 \end{bmatrix}$$

按照最大隶属度法则, 贵阳市水资源供水安全方面最大隶属度($U = 0.173$)属于差等级; 社会安全方面最大隶属度($U = 0.061$)属于差等级; 经济安全方面最大隶属度($U = 0.074$)属于好等级; 生态安全方面最大隶属度($U = 0.133$)属于良好等级。采用相同的分析过程, 对贵州省各州(市)的水资源安全进行综合评价, 分别得到水资源安全利用的指标隶属度百分比(图 2)。结果表明: 2014 年贵阳、黔东南、铜仁地区水资源安全处于良好等级, 遵义、黔南、毕节、黔西南处于一般等级, 安顺、六盘水处于差等级。各州(市)的水资源安全综合等级次序为贵阳 > 黔东南 > 铜仁 > 遵义 > 黔南 > 黔西南 > 毕节 > 六盘水 > 安顺, 这一结果与前人研究基本一致^[15]。

以贵阳为代表的区域, 城镇化水平较高, 城市污水处理率和工业废水达标率都较高, 注重水环境的保护, 拥有比较完善的水功能区, 同时采用节水设备, 提

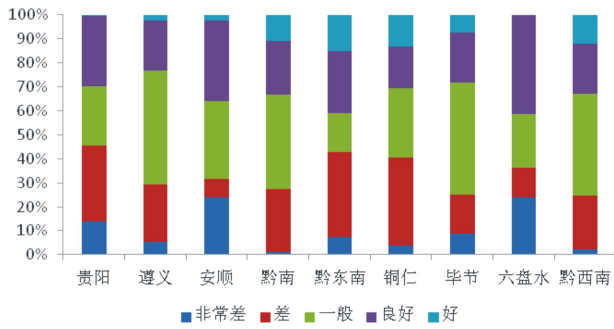


图 2 2014 年贵州省各州市水资源安全综合评价

Fig. 2 Comprehensive evaluation of water resources security in different regions of Guizhou Province in 2014

高水资源的利用效率;水土流失率和石漠化程度较低,生态环境保护较好。然而,水资源安全伴随着经济,特别是工业的迅速发展而呈现较大压力,在今后发展中,调整产业结构,选择合适的主导产业,有利于实现水资源的最优配置与最小消耗,促进水资源与经济社会的协调发展。

以遵义为代表的区域水资源安全处于一般状态,主要原因为:山区众多,地形高差较大,给水资源开发带来极大困难,单位国内生产总值和人均用水量都很大,但该地区农业用水、工业用水及生活用水的效率较低,节水潜力很大。因此,应全面实施节约用水,以缓解该地区的水资源供需矛盾,加强对节约用水的宣传教育,大力发展节水灌溉,提高水资源的重复利用率,加强水资源管理^[16]。

安顺、六盘水人均水资源量和产水模数低,加之近年来经济迅速发展,对水资源安全造成一定的压力。今后应注意因地制宜、因水制宜、按需制宜,分别采用类型多样、规模不一的水资源开发工程和管理模式,以确保该地区水资源安全可持续利用,取得经济、生态和社会三大效益。此外,该地区石漠化和水土流失较为严重,需要继续加强喀斯特地区水土流失的治理,恢复植被,减少石漠化面积,提高表层岩溶带的调水和蓄水功能,重建良性的生态环境。

3.3 喀斯特地区水资源安全时间评价结果及分析

同理,根据表 3 数据对贵州省 2005—2014 年的水资源安全进行评价。以 2005 年为例,水资源供水安全、社会安全、经济安全、生态安全 4 个指标层的隶属度矩阵如下:

$$U_{2005} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1347 & 0.1493 & 0.0915 & 0.0590 \\ 0 & 0.0446 & 0.0563 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0298 & 0.1407 & 0.0200 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0806 & 0.1565 & 0.0372 \end{bmatrix}$$

根据最大隶属度法则得到 2005 年贵州喀斯特地区水资源安全评价各指标层评价结果,采用熵权法对每个子系统取权重,权重矩阵为 $W = [0.4344, 0.1008, 0.1904, 0.2743]$,将其代入式(14),得到 2005 年贵州省喀斯特地区水资源安全的隶属度:好为 0,良好为 0.0687,一般为 0.1194,差为 0.0865,非常差为 0.0358。同理可计算出各年份的水资源供水安全、社会安全、经济安全、生态安全 4 个指标层的隶属度矩阵,以及综合评价结果,即贵州省 2005—2014 年水资源安全隶属度(表 5)、水资源安全利用的指标隶属度百分比(图 3)。结果表明:2005—2014 年贵州省水资源安全相对稳定,都处于一般等级,但水资源安全呈现上升的趋势,这归功于贵州省近年来正确的发展思路。随着生态环境与经济发展矛盾的加剧,人们高度重视生态环境保护,使得生态效益在综合效益体系中的地位不断提升并成为其主体,而经济、社会效益逐渐成为生态效益的补充和实现形式^[17]。

表 5 贵州省水资源安全综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation results of water resources security of Guizhou Province

年份	好	良好	一般	差	非常差
2005	0.000 0	0.068 7	0.119 4	0.086 5	0.035 8
2006	0.000 0	0.041 7	0.158 6	0.087 4	0.022 6
2007	0.025 3	0.077 3	0.108 4	0.063 8	0.035 6
2008	0.015 4	0.060 5	0.126 4	0.066 7	0.041 4
2009	0.000 0	0.071 6	0.134 2	0.069 9	0.034 7
2010	0.000 0	0.078 8	0.136 6	0.060 3	0.034 7
2011	0.013 3	0.047 9	0.138 8	0.100 4	0.010 0
2012	0.012 2	0.108 3	0.109 3	0.050 4	0.035 2
2013	0.027 9	0.041 4	0.142 3	0.061 1	0.023 4
2014	0.064 0	0.064 7	0.108 4	0.030 2	0.043 1

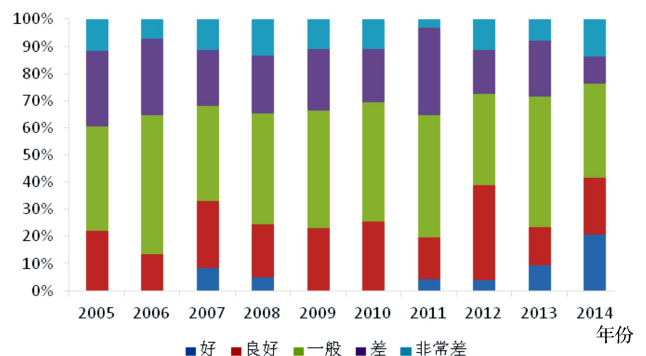


图 3 2005—2014 年贵州省水资源安全综合评价

Fig. 3 Evaluation results of water resources security in Guizhou Province from 2005 to 2014

然而,贵州省水资源安全处在一般水平,还有一定的发展潜力。从单个指标来看,水资源利用率、表层带水开发利用率、植被覆盖率都在逐年递增,但人均水资源量、地下水开发利用率、产水模数、人口密度、农业灌溉率在逐年递减,在递减的指标中多为水资源供水安全指标。总体来说,在经济发展和人为干扰的压力下,贵州水资源现状处于非均衡波动状态。随着生态环境与经济发展矛盾的加剧,贵州省要更多地注重水资源供水安全指标的管理。根据喀斯特地区的水资源特征和形成规律,在进一步开发上应重视对水资源的深度开发,实现由广度向深度开发的转变,由耗水型向节水型经济结构的转变,使经济效益和社会效益成为生态效益的补充。

此外,经济的迅速发展对喀斯特地区水资源安全的影响显著。现阶段贵州省主导工业多是资源环境消耗较大的资源型工业,主要以劳动密集型产业、传统产业为主,而高新产业和轻工业比重较小。工业生产的迅速发展,使排污量增加,工业用水量日益增加,从而对水资源安全发展产生消极影响。在今后的发展中,调整贵州产业结构,选择合适的主导工业,并明确工业发展方向,有利于实现水资源的最优配置与最小消耗。同时,扶持企业提高水循环利用效率,强化企业的节水意识,积极推进资源节约型企业建设,促进水资源与经济社会的协调发展。

4 结论与讨论

本文对贵州省9个州(市)2005—2014年水资源安全情况进行评价,评价结果直观地反映了该区域水资源安全状况,主要结论如下:

(1)贵阳、黔东南、铜仁地区水资源安全处于良好等级,遵义、黔南、毕节、黔西南处于一般等级,安顺、六盘水处于差等级;2005—2014年,贵州省水资源安全相对稳定,都处于一般等级,但水资源安全呈现上升趋势;水环境状态以及经济的迅速发展是此地区水资源安全的主要影响因素;评价结果反映的此地区水资源安全空间分布状况和时间变化趋势,与实际情况基本相符。

(2)选取了14个评价指标构成评价体系,但水资源安全评价涉及的因素众多,指标的选取需要在今后

的实践中不断完善。此外,水资源系统存在很强的模糊性和不确定性,模糊综合评价虽能有效处理这一类问题,但如何合理地界定评价指标阈值,如何建立一套更加全面的评价指标体系,以及如何量化各指标的影响度等问题,仍需今后进一步探索和完善。

参考文献

- [1] Liotta P H. Boomerang effect: The convergence of national and human security[J]. Security Dialogue, 2002, 33(4): 473-488.
- [2] 贾绍凤,张军岩,张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 538-545.
- [3] 韩宇平,阮本清. 区域水安全评价指标体系初步研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 267-272.
- [4] 万坤扬,胡其昌. 基于层次分析法的杭州市水资源安全现状评价及趋势[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 21-25, 222.
- [5] 郇建强,王建生,颜勇. 我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J]. 中国水利, 2011(23): 42-51.
- [6] 李继清,张玉山,李安强,等. 水资源系统安全研究现状及发展趋势[J]. 中国水利, 2007(5): 11-13.
- [7] 孙月峰,张表志,闫雅飞,等. 基于熵权的城市水资源安全模糊综合评价研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1): 87-91.
- [8] 孙才志,迟克续. 大连市水资源安全评价模型的构建及其应用[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 115-118.
- [9] 高媛媛,王红瑞,许新宜,等. 水资源安全评价模型构建与应用: 以福建省泉州市为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 204-214.
- [10] 杨振华,周秋文,郭跃,等. 基于SPA-MC模型的岩溶地区水资源安全动态评价: 以贵阳市为例[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1589-1600.
- [11] 聂靖璇,王晗,刘屹,等. 北京市水资源安全水平动态模型的构建与评估[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 565-573.
- [12] 位帅,陈志和,梁剑喜,等. 基于SD模型的中山市水资源系统特征及其演变规律分析[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1158-1167.
- [13] 秦成. 水资源安全预警研究: 以泉州市为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2011.
- [14] 张凤太,王腊春,苏维词,等. 基于熵权集对耦合模型的表层岩溶带“二元”水资源安全评价[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 70-76.
- [15] 苏印,官冬杰,苏维词,等. 基于SPA的喀斯特地区水安全评价: 以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2015, 34(6): 560-569.
- [16] Li B, Wang G, Ding H, et al. An evaluation method of the sustainability of water resource in karst region: A case study of Zunyi, China[J]. Applied Water Science, 2017, 7(3): 1-7.
- [17] 杜雪莲,王世杰,熊强辉,等. 基于模糊综合评价法的小流域喀斯特石漠化治理综合效益评价: 以贵州省普定县陈家寨小流域为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 586-593.

Construction and application of water resource security evaluation model in karst area: A case study of Guizhou Province

LIU Liying^{1,2}, YANG Qingwei¹, ZENG Yixiao³, HE Xiujuan³, GUAN Dongjie³

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. College of Mathematics and Statistics, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

3. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract Karst area is rich in water resources in the traditional sense. However, the surface water resources are deficient, and the groundwater resources are abundant, which forms a binary relation in water structure system. So the ecological status of this area is extremely important. The karst landform is widely distributed in Guizhou. With the rapid development of social economy, the situation of water resources security has attracted much attention. In order to analyze the current situation of water resources security in karst area, this study takes the typical karst area Guizhou Province as the research object. Fourteen indexes were selected from four aspects, including water supply, society, economy and ecology, to establish the evaluation index system of water resources security. Meanwhile, the entropy weight method and fuzzy mathematics comprehensive evaluation model were combined to perform quantitative evaluation of this study, so as to evaluate the water resources security of Guizhou Province in the 9 cities and in each year from 2005 to 2014.

According to the results, Guiyang, Qiandongnan, and Tongren were in good level, Zunyi, Qiannan, Bijie and Qianxi'nan were in the general level, Anshun and Liupanshui were in a poor level. In the past year from 2005 to 2014, the security of water resources in Guizhou Province is relatively stable, all in the general level, but it was on the rise. This is due to the correct development ideas in recent years in Guizhou Province, the government has realize the importance of sustainable development of the water resources, and began to strengthen the scientific management of water resources. During this period, the government has attached great importance to ecological protection, and has put the coordination of economic growth, population, resources and environment in a prominent strategic position. In addition, the improvement of urban sewage treatment capacity and enterprise waste water discharge standards also played an important role in the change of water resources security.

However, the water resources security in Guizhou is at a general level, and has a great development potential. Overall, the current situation for water resources in Guizhou is in a non-equilibrium fluctuating state under the pressures of economic development and human disturbance. With the contradiction between ecological environment and economic development intensified, Guizhou Province should focus on the water environment safety management, adjust the industrial structure so as to make the economic and social benefits become a supplement of ecological benefits.

Key words karst, Guizhou Province, water resources security, entropy weight method, fuzzy mathematics

(编辑 黄晨晖)