

郑群威, 苏维词, 杨振华, 等. 基于集对分析法的喀斯特地区水资源安全动态变化及原因分析: 以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 846-857.

DOI: 10.11932/karst20190602

基于集对分析法的喀斯特地区水资源安全动态变化及原因分析——以贵州省为例

郑群威¹, 苏维词^{1,2}, 杨振华², 周奉¹

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 400047; 2. 贵州科学院山地资源研究所, 贵阳 550001)

摘要: 根据中国西南喀斯特地区特殊的水文水资源特点, 从水资源赋存、供水状况、用水状况、水资源利用效率、水资源管理等五个方面构建了水资源安全评价指标体系, 选择SPA(集对分析法)对贵州省2001—2015年水资源安全状况进行了动态评价。结果表明: 贵州省2001—2007年水资源处于临界安全状态, 2008—2015年水资源整体处于安全和较安全等级(除2009干旱年份外)。从影响水资源安全的5大要素类的变化看, 水资源赋存受自然环境因素影响显著, H2值较不稳定; 供水状况因受水利工程建设的影响, 2001—2015年H2值由0.53上升到0.90; 用水状况因生产用水和生态环境用水的提高, H3值由2001年的0.87下降为2015年0.20; 水资源利用效率因万元GDP用水量以及农田亩均灌溉用水量的显著下降, H2值由2001年的0.26增加到2015年的0.88, 向安全和较安全等级转变明显; 水资源管理受生活污水处理率、森林覆盖率显著提高的影响, H2值由2001年的0.09增加到2015年的0.58, 由原先的极不安全等级提升到临界安全等级, 但在某些方面, 如万元GDP污染物减排率等仍有较大的提升空间; 供水状况、水资源利用效率、水资源管理这几个方面均表明人类行为对水资源安全影响显著。

关键词: 集对分析法; 喀斯特地区; 水资源安全

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2019)06-0846-12 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

中国西南喀斯特地区因其特殊的地上地下“二元三维”储水空间结构, 雨水下渗迅速, 地表储水能力弱, 便于有效利用的地表水资源相当有限^[1-2]。同时, 随着人口的增长和社会经济的快速发展, 需水压力增加迅速, 加上大量生活污水、工业废水的排放, 水资源污染状况较为突出, 造成了诸如水资源短缺、水环境污染、水环境功能受损、洪涝灾害等水资源安

全问题^[3-5], 已严重制约了西南喀斯特地区的社会经济的可持续发展。

目前, 学者们对水资源安全的研究较多, 并取得了不少的研究成果。研究内容主要包括水资源安全的定义^[6]、评价指标体系的构建^[7]、评价模型的设计和选择^[8]、水资源安全对策^[9]等方面。研究对象主要包括流域^[10]、城市^[11]、农业^[12]等。水资源安全评价指标主要从压力—状态—响应^[13]、水质—水量^[14]、驱动力—压力—状态—影响—响应^[15], 水资源自身条件

基金项目: 国家重点研发计划课题“喀斯特高原山地石漠化综合治理与混农林业复合经营技术与示范”专题——石漠化坡面产流效率及集蓄灌一体化技术与示范(2016YFC0502601-04); 贵州省科技计划子专题“贵州省水资源分布与开发利用途径研究”(黔科合J重大学[2015]2001); 国家十三五重点研发计划课题“西部石漠化地区农村饮用水与污水处理关键技术与示范”(2016YFC0400708)

第一作者简介: 郑群威(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水资源开发与评价。E-mail: zhengqw158@163.com。

通信作者: 苏维词(1966-), 男, 研究员, 研究方向: 喀斯特地区资源、生态环境与可持续发展。E-mail: suweici@sina.com。

收稿日期: 2018-12-03

—水资源社会安全—水资源经济安全—水资源生态安全^[16]等角度构建。权重的确定和模型的选取方法包括熵权法^[17]、层次分析法^[18]、模糊综合评价法^[19]、系统动力学模型^[20]、投影寻踪模型^[21]、人工神经网络模型^[5]、NBA-MEPP模型^[22]、支持向量机^[23]、水贫乏指数^[24]、逻辑斯蒂曲线模型^[25]等。部分学者亦将这些方法、模型应用于西南喀斯特地区水资源安全评价中,如张凤太等构建了基于DPSIRM概念模型的评价指标体系,并借助灰色-集对模型对贵州省水资源安全进行了评价^[26];刘丽颖等构建BP人工神经网络模型,对贵州省9个州市的水资源安全进行了评价^[1];杨振华等从需水压力、工程性缺水、承载状态、生态基础、人为响应5个方面构建了基于工程性缺水的指标体系,对贵阳市水资源安全进行了评价。这些研究有助于我们更清楚的了解喀斯特地区水资源安全及动态状态,但同时也存在着一些不足之处:①确定指标权重时过于依赖专家经验,主观性较强,忽略了指标客观信息;②在指标选取上未能充分考虑西南喀斯特地区特殊的水文地质结构以及人类活动对水资源安全的显著影响。

基于现有指标权重确定的不足,文章采用层次分析法与变异系数法相结合的方法确定指标权重,既考虑了客观因素,又结合了主观经验,具有较强的科学性。评价指标主要从水资源赋存、供水状况、用水状况、利用效率、水资源管理5个方面进行构建,综合考虑了影响水资源安全的喀斯特自然环境状况以及该区域社会、经济发展需求等因素,可较好的描述了水资源安全演化的原因及内在机理,突出了资源、环境与人类活动的耦合关系,凸显了人类行为的重要性。基于此,文章在充分考虑西南喀斯特地区特殊的水文地质条件的基础上,从以上5个方面共22

个指标构建了涵盖水资源管理等人类活动的水资源安全评价指标体系,采用变异系数法与层次分析法相结合的方法确定指标权重,并采用集对分析法对贵州省2001-2015年的水资源安全状态进行评价和动态分析,为西南喀斯特地区水资源有效利用和社会经济发展提供决策依据。

1 水资源安全评价模型构建

1.1 指标体系构建

依据水资源安全的内涵,在遵循区域性、科学性、代表性、可操作性等原则基础上,结合西南喀斯特地区水文、地质、地貌、社会经济的特性,参考水资源安全评价的传统指标以及喀斯特地区地域特色及其特征指标的基础上,从水资源赋存、供水、用水、效率及管理5个方面选取22个指标构建评价指标体系(图1),这些指标相互联系相互影响共同决定着该地区的水资源安全。其中,降水量、水资源量、产流系数以及降水时间变化情况代表了水资源赋存状况,而水资源赋存状况又对地表、地下以及工程供水产生影响,不同的供水方式以及供水量会影响用水状况;随着社会经济发展和居民生活水平的提高,导致生产用水和生活用水的增加,会对西南喀斯特地区水资源安全造成巨大压力,严重影响水资源供需平衡,胁迫反馈到社会经济发展中,促使人们提高水资源利用效率,如采用高效节水技术减少万元GDP用水量、降低亩均灌溉用水量等,并通过水资源管理减少污染物排放,降低人类对水资源造成的压力,加强对水资源的调控,实现水资源与社会经济的良性耦合发展。具体指标如表1,按各指标属性分为正向型指标和负向型指标,并分别对正向型指标和负向型指标进行赋权评价。

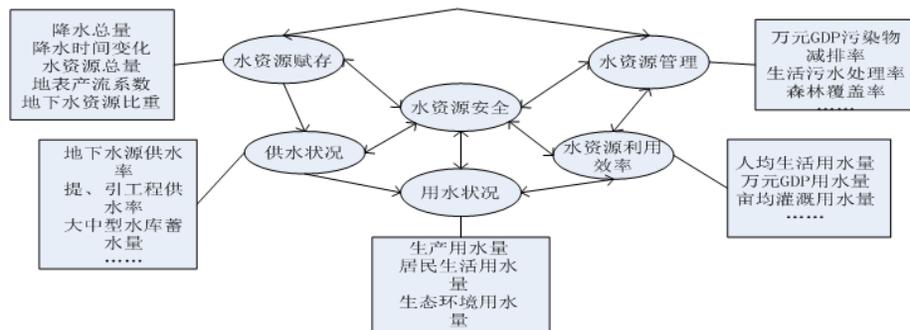


图1 水资源安全评价模型框架

Fig. 1 Evaluation model framework of water resource safety

表1 喀斯特地区水资源安全评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of water resource security in karst areas

目标层	准则层	指标层	权重	释义	
水资源安全评价	水资源赋存	X1+	降水总量(亿m ³)	0.014	反映可利用水资源的补给能力
		X2-	降水季节变异性	0.013	反映降水时间差异对水资源量的时间不平衡
		X3+	水资源总量(亿m ³)	0.015	反映水资源的可利用潜力
		X4-	地下水资源比重(%)	0.014	反映地下水总量占总水量的比重,喀斯特区地下水占比较大
		X5+	地表产流系数	0.004	反映降水转化成地表径流的比重,喀斯特地表径流相对较小
	供水状况	X6-	地下水源供水率(%)	0.188	反映地下水供水量占总供水的比重
		X7+	提水、引水工程供水率(%)	0.043	反映引水、提水工程供水量占总供水的比重
		X8+	农田灌溉设施满足率(%)	0.092	反映农田水利设施对农田灌溉的满足程度
		X9+	大中型水库蓄水量(亿m ³)	0.113	反映水利工程的蓄水能力
	用水状况	X10-	生产用水量(亿m ³)	0.019	反映工业活动对水资源的需求程度
		X11-	居民生活用水量(亿m ³)	0.046	反映居民生活对水资源的需求程度
		X12-	生态环境用水量(亿m ³)	0.056	反映生态系统对水资源的需求程度
	水资源利用效率	X13-	水资源开发利用率(%)	0.035	反映人类活动对水资源的开发利用程度
		X14-	万元GDP用水量(m ³ ·万元 ⁻¹)	0.141	反映产业活动对水资源的利用效率
		X15-	农田灌溉亩均用水量(m ³ ·亩 ⁻¹)	0.026	反映农业活动对水资源的利用效率
		X16-	人均生活用水量[L·(人·日) ⁻¹]	0.022	反映人类生活对水资源的利用效率
	水资源管理	X17+	万元GDP污染物减排率(%)	0.064	反映产业活动对水体污染物的削减程度
		X18+	生活污水处理率(%)	0.059	反映生活污水的减少对水环境的影响
		X19+	森林覆盖率(%)	0.007	反映植被覆盖对降水产蓄的调节能力
		X20-	岩溶石漠化率(%)	0.011	反映裸漏地表对降水调配的影响
		X21-	输沙模数(t·km ⁻²)	0.015	反映降水汇流过程中土壤的侵蚀下降状况
		X22-	人口总量控制(p·km ⁻²)	0.004	反映人口总量对水资源的需水压力

1.2 指标赋权

采用层次分析法与变异系数法相结合的方法对各指标进行组合赋权,既体现主观信息又反映客观信息(表1)。

$$w_i = \frac{C_i A_i}{\sum_{i=1}^m C_i A_i} \quad (1)$$

式中: w 表示组合权重; C 表示变异系数法权重; A 表示层次分析法权重。

1.3 指标分级

参考有关水资源安全等级标准的相关研究文献^[2,13-15,18-21],结合喀斯特地区供水、用水、管理等实际状况,并依据专家意见对水资源安全标准做出适当调整,将水资源安全等级划分为“安全、较安全、临界安全、不安全、极不安全”5个等级,并确定各指标分级标准(表2)。

表 2 水资源安全评价指标等级划分标准
Table 2 Grade classification standard of water resource security evaluation index

准则层	评价指标	安全	较安全	临界安全	不安全	极不安全
水资源赋存	X1+	>2 200	(2 000, 2 200]	(1 800, 2 000]	(1 600, 1 800]	≤1 600
	X2-	[0, 0.3)	[0.3, 0.6)	[0.6, 0.9)	[0.9, 1.2)	≥1.2
	X3+	≥1 200	[1 000, 1 200)	[900, 1 000)	[700, 900)	<700
	X4-	<10	[10, 15)	[15, 20)	[20, 25)	≥25
	X5+	[0.8, 1)	[0.6, 0.8)	[0.4, 0.6)	[0.2, 0.4)	[0, 0.2)
供水状况	X6-	[0, 10)	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	≥25
	X7+	≥50	[45, 50)	[40, 45)	[35, 40)	<35
	X8+	(80, 100]	(60, 80]	(40, 60]	(20, 40]	≤20
	X9+	>250	(200, 250]	(100, 200]	(50, 100]	≤50
用水状况	X10-	<75	[75, 80)	[80, 85)	[85, 90)	≥90
	X11-	[0, 10)	[10, 12)	[12, 15)	[15, 20)	≥20
	X12-	<0.2	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.8)	≥0.8
水资源利用效率	X13-	[0, 10)	[10, 20)	[20, 30)	[30, 40)	≥40
	X14-	[0, 300)	[300, 600)	[600, 1 000)	[1 000, 1 500)	≥1500
	X15-	<300	[300, 400)	[400, 500)	[500, 600)	≥600
	X16-	<60	[60, 80)	[80, 100)	[100, 120)	≥120
水资源管理	X17+	(40, 50]	(30, 40]	(20, 30]	(10, 20]	≤10
	X18+	>20	(10, 20]	(0, 10]	(-10, 0]	≤-10
	X19+	≥40	[35, 40)	[30, 35)	[20, 30)	<20
	X20-	<5	[5, 10)	[10, 15)	[15, 20)	≥20
	X21-	<200	[200, 1 000)	[1 000, 2 500)	[2 500, 5 000)	≥5000
	X22-	[0, 100)	[100, 200)	[200, 300)	[300, 400)	≥400

1.4 评价模型

1.4.1 模糊集对分析

设水资源安全评价指标体系为集合 $X_i (X_1, X_2, \dots, X_i, X_i \text{ 为指标}) (i=1, 2 \dots T, T \text{ 为指标数量})$, 评价等级标准为 $S_k (k=1, 2 \dots K, K \text{ 为等级标准数})$, 第 k 级等级标准用集合 B_k 表示, 根据集合 X_i 与集合 B_k 可构造集对 $H(X_i, B_k)$, 得到 $k=5$ 的多元联系度, 即:

$$\eta(X, B) = \omega\eta(x_i, B) = \sum_{l=1}^m \omega_l a_l + \sum_{l=1}^m \omega_l b_{l,1} i_1 + \sum_{l=1}^m \omega_l b_{l,2} i_2 + \sum_{l=1}^m \omega_l b_{l,3} i_3 + \sum_{l=1}^m c_l j \quad (2)$$

公式(1)中, $\eta(X, B)$ 表示指标 X_i 与评价等级 B 的联系度, a_l 为指标 x_i 对于不同等级 B 的同一联系度, b_l 为指标 x_i 对于不同等级 B 的对立联系度, c_l 为指标 x_i

对于不同等级 B 的差异联系度, i_1, i_2, i_3 为对应对立度系数, j 为差异度系数, w_l 为对应各分量的权重。

$$\text{令 } f_1 = \sum_{l=1}^m w_l a_l, f_2 = \sum_{l=1}^m w_l b_l i_1, f_3 = \sum_{l=1}^m w_l b_l i_2,$$

$$f_4 = \sum_{l=1}^m w_l b_l i_3, f_5 = \sum_{l=1}^m c_l j$$

则公式(1)变为:

$$\eta(X, B) = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 \quad (3)$$

式中: f_1 代表集对 $H(x_i, B_k)$ 的同一度, $f_2 + f_3 + f_4$ 代表集对 $H(x_i, B_k)$ 的对立度, f_5 代表集对 $H(x_i, B_k)$ 的差异度。根据正向指标和负向指标分别按照式(3)和(4)计算:

对于正向性指标, 指标值 x_i 与该指标 k 级评价标准的联系度 $\eta(x_i, B_k)$ 如下:

$$\eta(x_i, B_k) \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, x_i \geq S_1 \\ \frac{2x_i - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{2S_1 - 2x_1}{S_1 - S_2} i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, \frac{S_1 + S_2}{2} < x_i \leq S_1 \\ 0 + \frac{2x_i - S_2 - S_3}{S_1 - S_3} i_1 + \frac{S_1 + S_2 - 2x_i}{S_1 - S_3} i_2 + 0i_3 + 0j, \frac{S_2 + S_3}{2} < x_i \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{2x_i - S_3 - S_4}{S_2 - S_4} i_2 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_i}{S_2 - S_4} i_3 + 0j, \frac{S_3 + S_4}{2} < x_i \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2x_i - 2S_4}{S_3 - S_4} i_3 + \frac{S_3 + S_4 - 2x_i}{S_3 - S_4} j, S_4 \leq x_i < \frac{S_3 + S_4}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j, x_i < S_4 \end{array} \right. \quad (4)$$

对于负向性指标, 指标值 x_i 与该指标 k 级评价标准的联系度 $\eta(x_i, B_k)$ 如下:

$$\eta(x_i, B_k) \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, x_i \leq S_1 \\ \frac{S_1 + S_2 - 2x_i}{S_2 - S_1} + \frac{2x_i - 2S_1}{S_2 - S_1} i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, S_1 < x_i \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \\ 0 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_i}{S_3 - S_1} i_1 + \frac{2x_i - S_1 - S_2}{S_3 - S_1} i_2 + 0i_3 + 0j, \frac{S_1 + S_2}{2} < x_i \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{S_3 + S_4 - 2x_i}{S_4 - S_2} i_2 + \frac{2x_i - S_2 - S_3}{S_4 - S_2} i_3 + 0j, \frac{S_2 + S_3}{2} < x_i \leq \frac{S_3 + S_4}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2S_4 - 2x_i}{S_4 - S_3} i_3 + \frac{2x_i - S_3 - S_4}{S_4 - S_3} j, \frac{S_3 + S_4}{2} < x_i \leq S_4 \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j, x_i > S_4 \end{array} \right. \quad (5)$$

根据王文圣对水文水资源集对分析的研究, 本研究采用置信度准则确定样本的等级。即:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda, k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (6)$$

式中: h_k 为样本的 k 元联系度, λ 为置信度,取值范围一般为 $[0.8, 1.0]$ 。

2 实例分析

2.1 研究区概况

贵州省地处中国西南腹地, 下辖6个地级市, 3个自治州, 行政区总面积17.6167万 km^2 , 境内地势西高东低, 自中部向东、北、南三面倾斜, 喀斯特地貌发育广泛, 高原、山地、丘陵、盆地等地貌分布广泛, 素有“八山一水一分田”之说。贵州省属于亚热带湿润季风气候, 季节分明, 雨量充沛, 雨热同期, 最冷月(1月)平均气温多在 $3\sim 6\text{ }^\circ\text{C}$, 最热月(7月)平均气温一般在 $22\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$, 年平均降水量为1095mm, 降水多集中在6-9月, 地表径流密度为 $17.1\text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ 。贵州省多为喀斯特地貌, 地表储水能力较弱, 用水困难, 但通过建造水库、引水、提水、农田灌溉等水利工程设施, 较大的缓解了需水压力。

2.2 数据来源

研究数据主要来源于贵州省水利厅公布的《贵州省水资源公报》(2001-2015), 贵州省环境保护局公布的《贵州省环境状况公报》(2001-2015), 以及《贵州省统计年鉴》、《国民经济和社会发展统计公报》等资料。另外, 部分指标涉还及其他来源, 如降水季节变异性采用贵州省国家气象站点逐日数据计算得到, 2001年石漠化率从贵州省2000年正式立项开展的全省石漠化遥感调查项目结果得到, 2005、2011年石漠化率从贵州省《石漠化状况公报》中得到, 其余年份从贵州省政府工作报告中每年的石漠化治理状况得到。

2.3 评价结果及分析

2.3.1 水资源安全状况

将贵州省2001-2015年的评价指标值、等级标准代入公式(3)、(4)中, 得到贵州省2001-2015年水资源安全评价因子与评价等级的集对分析集合, 并对同一性(f_1)、差异性(f_2-f_4)、对立性(f_5)进行分析, 可得到贵州省2001-2015年水资源安全评价指标的联系度, 结合各指标的权重和联系度, 得到贵州省2001-

2015年水资源安全状况与评价等级的联系度。取置信度 $\lambda = 0.6$, 如 2001 年 $H3=f_1+f_2+f_3=0.687>0.6$, 根据置信度准则, 可判断 2001 年贵州省水资源安全为临界安全等级, 同理, 可得到贵州省 2001-2015 年的水资源安全等级(表 3)。

表 3 贵州省 2001-2015 年水资源安全等级联系度
Table 3 Link degrees of water resource security levels of Guizhou Province from 2001 to 2015

年份	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	安全等级
2001	0.287	0.080	0.320	0.149	0.164	临界安全
2002	0.268	0.114	0.288	0.126	0.203	临界安全
2003	0.046	0.153	0.423	0.196	0.181	临界安全
2004	0.051	0.242	0.357	0.299	0.051	临界安全
2005	0.288	0.186	0.261	0.229	0.036	临界安全
2006	0.309	0.167	0.255	0.201	0.068	临界安全
2007	0.398	0.109	0.409	0.081	0.003	临界安全
2008	0.492	0.143	0.248	0.103	0.014	较安全
2009	0.440	0.149	0.212	0.123	0.075	临界安全
2010	0.516	0.200	0.154	0.127	0.004	较安全
2011	0.477	0.142	0.243	0.095	0.042	较安全
2012	0.680	0.158	0.122	0.040	0	安全
2013	0.509	0.224	0.063	0.088	0.116	较安全
2014	0.677	0.073	0.077	0.104	0.069	安全
2015	0.671	0.050	0.074	0.153	0.051	安全

由表 3 可知, 贵州省 2008 及 2010 年以后水资源处于较安全等级以上, 其余年份均处于临界安全等级, 从趋势上看, 贵州省水资源等级正在向较安全等级方向发展, 且累计联系度 $H2$ 与 $H3$ 之间的差距正在逐渐缩小, 这表明贵州省蓄水工程、引水工程、提水工程、农田灌溉等水利设施正在不断完善, 在供水能力以及水资源利用技术、工业节水技术等方面也在不断提高。而在 2008-2009 贵州省水资源安全等级由较安全降为临界安全, 这一方面是因为贵州省经济快速发展, 各产业需水量增加, 人口增加且向城市聚集而降水不均所致, 更主要的原因是因为 2009 年开始出现大旱, 并持续到 2011 年, 其中 2009 年降水总量仅为 1 673 亿 m^3 , 地表水资源量减少, 导致供水能力不足所致。但 2010-2011 年水资源安全由临界安全上升为较安全等级, 是因为大旱期间贵州省加强

了各项水利设施建设, 包括临时安排的大量的钻井取水等应急供水工程, 较快的提高了供水能力, 在一定程度上保障了水资源安全。

2.3.2 水资源安全影响因素分析

从各评价准则的加权等级联系度, 可得出贵州省 2001-2015 年水资源安全中 5 大影响因素安全状态变化。根据表 3 和图 2 可知, 贵州省 2001-2015 年水资源安全等级主要是由水资源赋存、供水状况、用水状况、水资源利用效率、水资源管理等因素类对 f_1 、 f_2 、 f_3 的加权等级联系度决定的, 越趋向高等级联系度, 则其水资源安全等级越高, 反之则越低, 水资源安全等级越低。2001 年以来, 贵州省水资源组成要素中安全和较安全的要素类越来越多, 不安全和较不安全的要素类越来越少, 其中, 供水状况、水资源利用效率、水资源管理这几个要素类从不安全、较不安全向较安全、安全状态转变趋势明显。

通过对贵州省 2001-2015 年水资源安全评价指标体系中各指标的历年变化情况及其对水资源安全要素类的贡献率, 影响水资源安全的主要因子如下:

(1) 从水资源赋存(图 2a)来看, 2005、2006、2009、2013 年处于不安全等级, 2011 年因西南地区大旱, 降水量极少, 可利用水资源极少, 是唯一处于极不安全等级的年份, 其余年份均处于临界安全等级。水资源赋存的影响因素可分为两类: a. 降水特征, 贵州省属于亚热带湿润季风气候, 季节分明, 雨量充沛, 多年平均降水量达 1 951 亿 m^3 。但其降水的时空变异性也较突出, 贵州省降水多集中在 6-9 月份, 雨热同期, 降水季节变异性平均指数值为 0.733(图 3a); b. 水量特征, 除 2009 和 2011 年受西南大旱影响, 贵州省地表、地下水资源量骤然降低外, 其余年份地表、地下水资源量值虽有波动, 但总体上相对稳定。贵州省多为岩溶地貌, 水分下渗严重, 部分地表水通过溶蚀裂隙、落水洞等流入地下, 导致其产流系数多介于 0.45~0.55 之间, 地表径流量较小, 地下水资源量平均值达到 252 亿 m^3 (图 3b)。

(2) 从供水状况(图 2b)来看, 2001-2007 年中, 除 2003 和 2004 年处于不安全等级外, 其余年份均处于临界安全等级, 2008 年以后均处于较安全等级, 整体上呈波动上升趋势。供水主要分为地表水源供水和地下水源供水, 地下水利用难度较大, 利用成本较高, 且过量开采地下水, 易造成地下水位大幅度下降, 破坏地表植被, 严重者甚至会造成地面沉降、塌

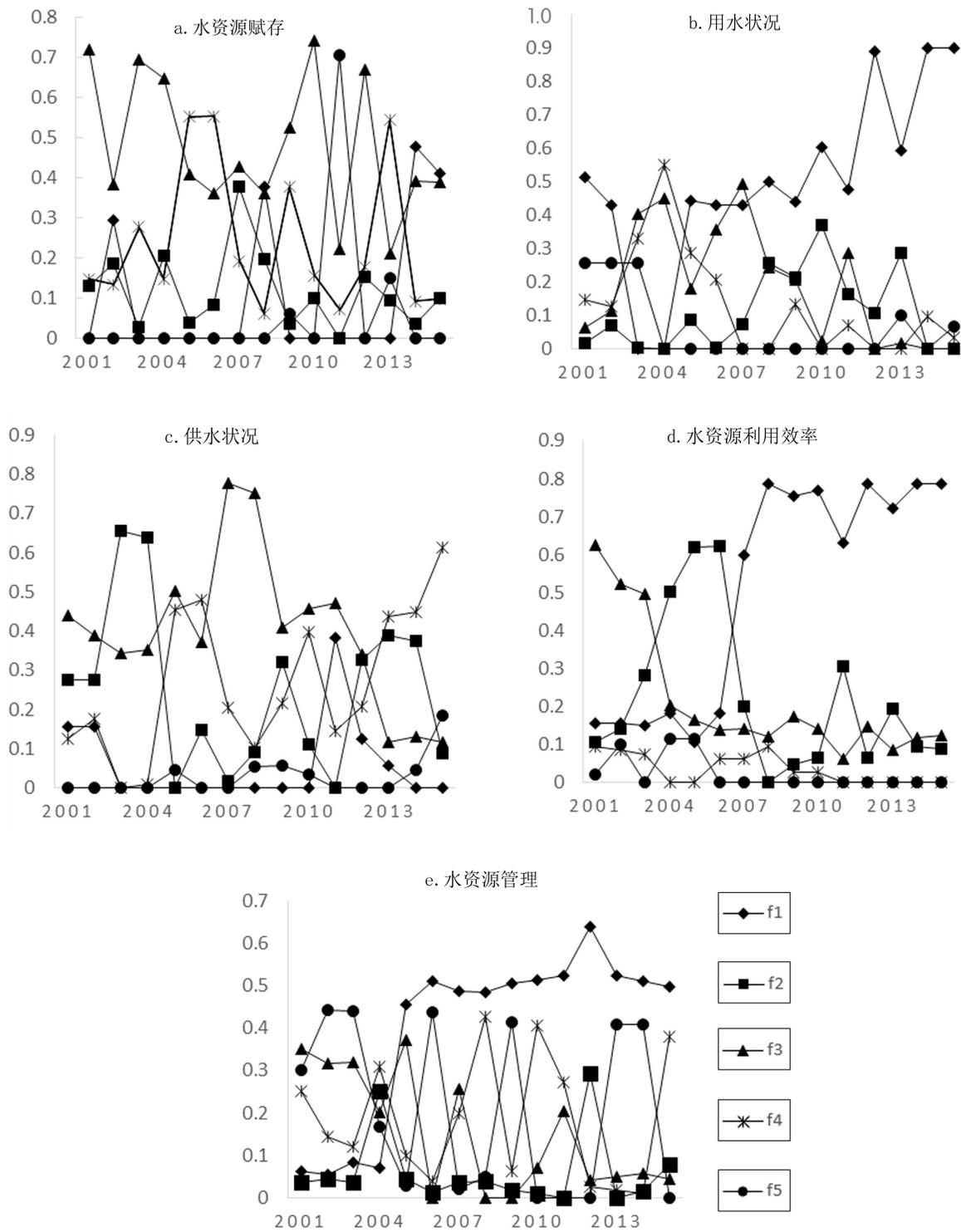


图2 评价准则的加权等级联系度

Fig. 2 Weighted link degrees of ranks of evaluation criteria

陷,20世纪80-90年代贵州水城盆地表现突出,2003和2004年地下水源供水率高达20%,严重危害贵州省水资源安全。减少地下水利用,加强地表水开发,有利于水资源安全,2008年贵州省经历特大雪灾,部

分地区洪涝灾害严重,贵州省当年投入40.4亿元用于水利建设,建设“滋黔一期”中型水库工程、水土保持工程、大中型灌区续建配套、节水改造、水文基础设施等项目缓解水害;尤其是在经历了2011年的特

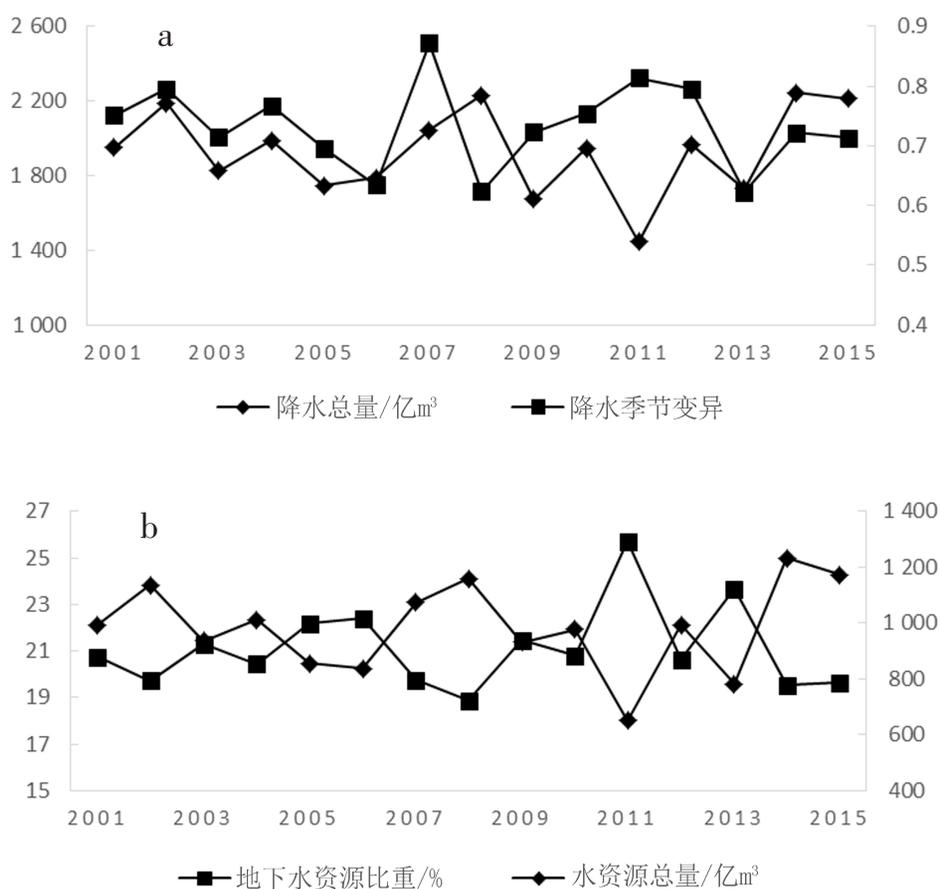


图3 水资源赋存主要指标变化特征

Fig. 3 Variation of main indexes of water resource occurrence

大干旱之后,贵州省大力建设大中型水库、农田灌溉设施、五小水利工程、调水工程、机井等各项水利设施以保障贵州省水资源安全。2001-2015年,水库蓄水量从30.5亿m³增加到299.8亿m³,引水、提水工程供水率基本维持在44%左右,提高了供水潜力,极大地保障了居民用水安全;农田灌溉设施满足率从2001年的36%增加到了2015年的85.5%,提高了近一倍,表明对农业水利投入加大,农业水利设施在逐渐完善,提高了农业生产供水能力(图4)。

(3)从用水状况(图2c)来看,2001和2002年处于临界安全等级,2003-2004年上升为较安全等级,2005和2006年又下降为不安全等级,其后直到2012年一直处于临界安全等级,2013-2015下降至不安全等级,起伏波动较大,且总体上呈下降状态。这是因为2001-2010因大规模的工业园区建设,工业生产用水量从72亿m³增加到88亿m³,工业生产用水量达到阶段性高值,呈先增后降态势;同时2001-2015年

生态环境用水量从0.38亿m³增加到0.74亿m³,处于持续上升态势,提升了一倍以上;2010年以来又因生态文明建设的推进,产业结构继续调整以及科学技术的不断提高,2010-2015年生产用水量从88亿m³下降到79亿m³;居民生活用水量常年处于波动状态,每年的用水量大致在12.5亿m³左右(图5)。

(4)从水资源利用效率(图2d)来看,2001-2003年处于临界安全状态,2004-2007年处于较安全状态,其后直到2015年均处于安全状态,总体上呈上升趋势。这表明2003年以前水资源利用技术相对落后,万元GDP用水量高达769m³,亩均灌溉用水量达到559m³,其后,随着工业节水技术的逐步提高以及农田灌溉设施的不断完善,提高了工业和农业的水资源利用效率,到2015年,万元GDP用水量下降至107m³,亩均灌溉用水量也下降到384m³;人均生活用水量基本保持在86m³左右,虽有起伏,但基本保持稳定状态(图6)。

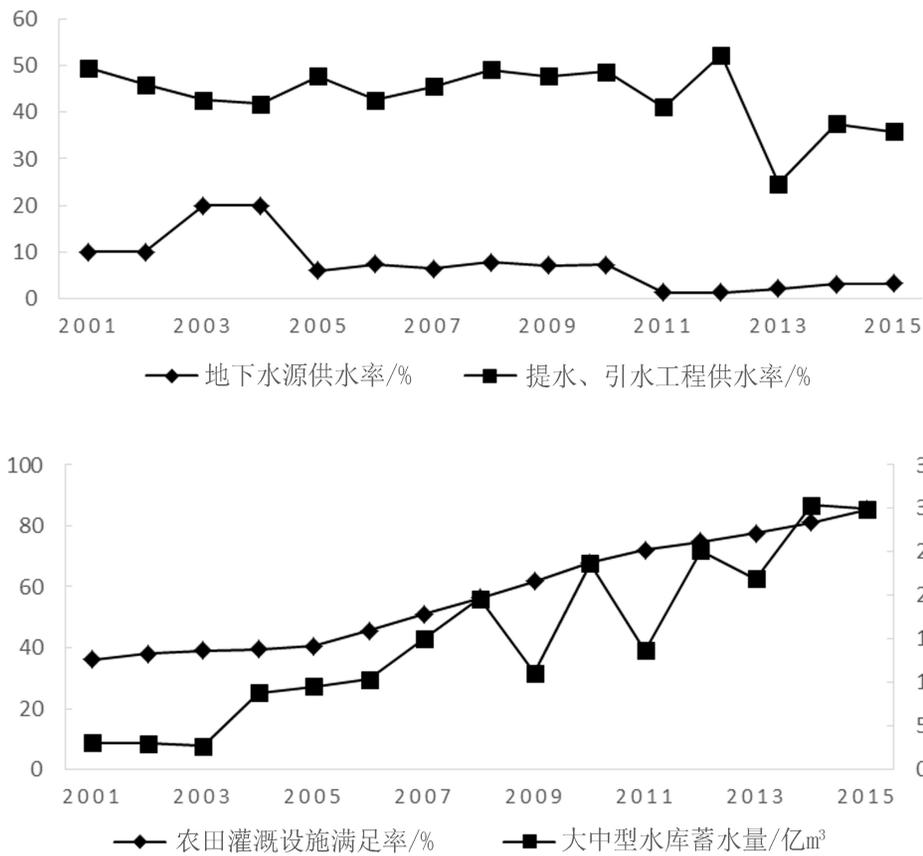


图4 供水状况各指标变化特征

Fig. 4 Variation of every index of water supply status

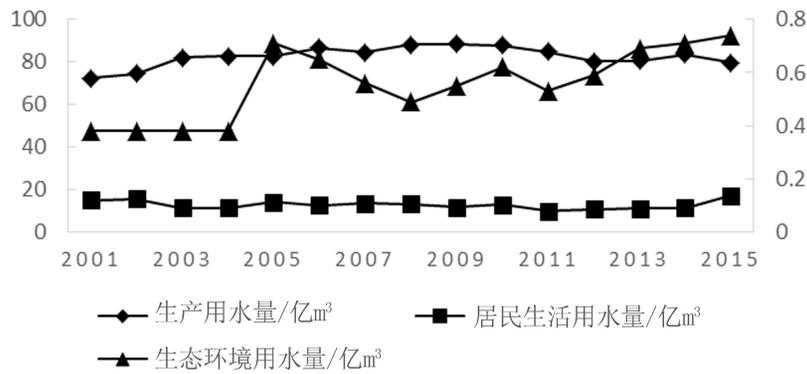


图5 用水状况各指标变化特征

Fig. 5 Variation of every index of water use status

(5)从水资源管理(图2e)来看,2001-2003年处于极不安全等级,2004-2006年处于不安全状态,2007年以后虽有起伏,但大致处于临界安全状态,总体上向高等级方向发展。2001-2015年,贵州省通过加强污水防治,生活污水处理率从3%提高到了90%,减少了水污染,保障了水质安全;另外通过植树造林、封山育林等措施,提高了森林覆盖率,降低了

石漠化率,森林覆盖率从30.8%增加到了50%;石漠化率从18.8%下降到了8.6%,提高了地表储水能力;人口密度基本维持在 $210 \text{ p}\cdot\text{km}^{-2}$,输沙模数也略有下降;但万元GDP污染物减排率起伏波动较大,这是因为万元GDP污染物减排率与GDP增长速度和污染物增加速度有关,2001-2015年此项指标各项数据均为正值,表明GDP增长速度超过污染物排放速度,而

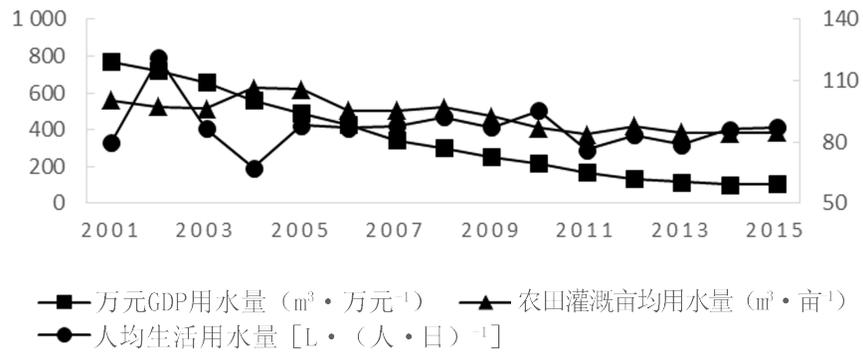


图 6 水资源利用效率各指标变化特征

Fig. 6 Variation of every index of water resource utilization efficiency

此项指标起伏波动较大,是因为虽然污染物处理速度在不断加大,但有时随着GDP的增长,污染物排放

量过大,导致污染物处理率增加并不明显,故而导致万元GDP污染物减排率波动较大(图7)。

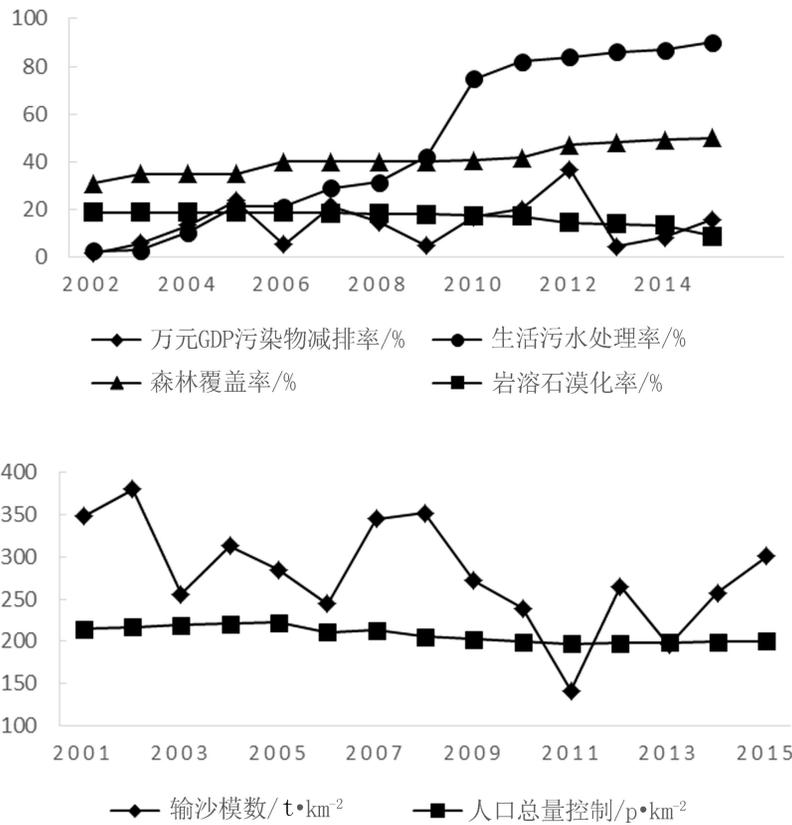


图 7 水资源管理各指标变化特征

Fig. 7 Variation of every index of water resource management

通过对以上5个要素类的分析结果可知,各要素类变化明显。其中,水资源赋存受自然因素影响显著,降水量的多少、水资源总量的多少、降水季节变异性的多少等都会显著影响其安全等级;用水状况因生产用水量、生态环境用水量的增加,整体上呈下

降趋势;水资源管理因生活污水处理率、森林覆盖率等的提高,由极不安全等级上升为临界安全等级;供水状况和水资源利用效率这两个要素类向安全和较安全等级转变明显,这表明各项水利设施不断完善,水资源利用技术不断提高,水资源管理制度不

断完善,人类行为对岩溶地区水资源安全影响较为显著。

3 结 论

利用集对分析法,从水资源赋存、供水状况、用水状况、水资源利用效率、水资源管理等五个方面对贵州省2001-2015年水资源安全进行了动态评价,得到以下结论:

(1)贵州省2001-2015年整体水资源安全从临界安全状态上升到安全状态,表明水资源安全整体处于改善趋势。从各年份水资源安全状态变化看,水资源安全受气候异常波动影响显著,如2009年水资源安全状态因极端干旱气候影响显著恶化,进一步说明贵州省水利基础设施建设不足,需进一步完善。

(2)从影响水资源安全的五大类组成要素看,水资源赋存主要受自然环境因素影响显著,需要统筹考虑乡镇村落居民(生活用水)、生态用水、产业发展(生产用水)与水利工程数量的空间匹配,解决因降水时空不均而造成的局部用水安全问题;供水状况受水利工程建设日趋完善的影响,2001-2015累积等级联系度 H_2 由0.61增加到0.81;用水状况受生产用水量、生态环境用水量影响, H_2 值呈波动下降趋势;水资源利用效率因工业节水技术的逐步提高以及农田灌溉设施的不断完善等, H_2 值由0.26增加到0.88,逐步向安全和较安全等级转变;水资源管理亦因污水处理率、森林覆盖率等的提高, H_2 值从0.09增加到0.58,向高等级方向转变明显;供水状况、水资源利用效率、水资源管理等的提高,均表明人类行为对水资源安全影响显著。

(3)从保障并提高水资源安全水平出发,未来应着重从调整产业结构,提高水资源利用技术,加强水资源管理,优化水利工程空间布局,加大农田灌溉设施、农村饮水工程等的投入,加强喀斯特地区多样化水资源利用与优化配置实用技术的研发、推广;加强生态环境治理,提高地表储水能力,并充分利用行政和市场相结合的手段开发利用水资源,建立完善的管理措施和制度保障体系,保障水资源安全。

本文在采用层次分析法和变异系数法确定指标权重的基础上,从水资源赋存、供水状况、用水状况、水资源利用效率、水资源管理等角度对贵州省水资源历年状况进行评价,其评价结果与贵州省总体水资源供需实际状态吻合,有效的反映出水资源安全状态变化及其主要影响因素,但文章缺乏对水资源

利用限制因素的影响机制进行深入分析,也未预测水资源安全演变趋势,上述两点也成为后续水资源安全评价有待进一步研究的方向。

参考文献

- [1] 刘丽颖,官冬杰,杨清伟.基于人工神经网络的喀斯特地区水资源安全评价[J].水土保持通报,2017,37(2):207-214.
- [2] 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.
- [3] Proclamation of the Minister-class Conference on the 2nd World Water of Man of the United Nations. The Water Security in the 21st Century [R]. Proclamation of the Minister-class conference in Hague, 2000.
- [4] David Grey, Claudia W Sadoff. Sink or swim? Water security for growth and development [J]. Water Policy, 2007, 9: 545-571.
- [5] LIOTTA P H. Boomerang effect: The convergence of national and human security [J]. Security Dialogue, 2002, 33 (4) : 473-488.
- [6] 畅明琦,刘俊萍.水资源安全基本概念与研究进展[J].中国安全科学学报,2008,18(8):12-21.
- [7] 代稳,湛洪星.水资源安全评价指标体系研究[J].节水灌溉,2012,3:40-45.
- [8] 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].水利发电学报,2012,31(6):70-77.
- [9] 闵庆文.论西北地区的水资源安全:问题与对策[J].中国人口·资源与环境,2004,14(1):97-103.
- [10] 贾绍凤,张士锋.海河流域水资源安全评价[J].地理科学进展,2003,22(4):379-389.
- [11] 杨志峰,赵彦伟,崔保山,等.面向生态城市的水资源供需平衡分析[J].中国环境科学,2004,24(5):636-640.
- [12] 刘布春,梅旭荣,李玉中,等.农业水资源安全的定义及其内涵和外延[J].中国农业科学,2006,39(5):947-951.
- [13] 张军以,苏维词,张凤太.基于PSR模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J].中国环境科学,2011,31(6):1039-1044.
- [14] 邹胜章,朱明秋,唐建生,等.西南喀斯特区水资源安全与对策[J].地质学报,2006,80(10):1637-1642.
- [15] 曹琦,陈兴鹏,师满江.基于DPSIR概念的城市水资源安全评价及调控[J].资源科学,2012,34(8):1591-1600.
- [16] 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):204-213.
- [17] 张凤太,张军以,苏维词.基于熵权和主成分分析的岩溶区水资源安全评价:以毕节为例[J].环境工程,2016,10:174-180.
- [18] 张戈丽,王立本,丁世刚.基于AHP的济南市水安全评价研究[J].山东师范大学学报(自然科学版),2007,22(3):94-98.
- [19] 安鑫,周维博,马艳,等.基于熵权的模糊综合评价法在水安

- 全中的应用[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):137-140.
- [20] 宇鹏.基于系统动力学的水资源承载力评价研究[J].工业安全与环保,2013,39(2):38-42.
- [21] 吴开亚,金菊良.基于变权重和信息熵的区域水资源安全投影寻踪评价模型[J].长江流域资源与环境,2011,20(9):1085-1090.
- [22] 苏敏杰,白栩嘉.NBA—MEPP模型在区域水资源安全评价中的应用[J].人民长江,2017,48(13):36-43.
- [23] 畅明琦,刘俊萍,马惟.基于支持向量机的水资源安全评价[J].自然灾害学报,2011,20(6):167-171.
- [24] 绍骏,欧应均,陈金凤,等.基于水贫乏指数的长江流域水资源安全评价[J].长江流域资源与环境,2016,25(6):889-894.
- [25] 宋培争,汪嘉杨,刘伟,等.基于PSO优化逻辑斯蒂曲线的水资源安全评价模型[J].自然资源学报,2016,31(5):886-813.
- [26] 张凤太,王腊春,苏维词.基于DPSIRM概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J].中国环境科学,2015,35(11):3511-3520.

Analysis of dynamic change and reason of water resource security in karst areas using the set pair method: An example of Guizhou Province

ZHENG Qunwei¹, SU Weici^{1,2}, YANG Zhenhua², ZHOU Feng¹

(1. Geography and Tourism College of Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 2. Institute of Mountain Resources of Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract According to the features of hydrology and water resource in karst areas of southwestern China, an index system of evaluating water resource security is established involving five parts, water resource occurrence, water supply quo, water consumption situation, water resource utilization efficiency, and water resource management. With the SPA(set pair analysis), this paper dynamically evaluates the water resource security status of Guizhou Province from 2001 to 2015. The results show that the water resource in Guizhou Province from 2001 to 2007 was in a critical state, while from 2008 to 2015 it was generally safe and relatively safe (except 2009 a draught year). In terms of the change of five factors effecting water resource security, the water resource location depends on the natural environmental factors remarkably, so the H2 value was relatively instable; water supply status was influenced by water conservancy project construction, so the H2 value from 2001 to 2015 rose from 0.53 to 0.90; for water consumption status, as water consumption in production and ecological environmental purpose raised, H3 value declined from 0.87 in 2001 to 0.20 in 2015. In terms of water resource efficiency, it was drew down largely by the water using in Wanyuan GDP and farm land average irrigation, so the H2 value grew from 0.26 in 2001 to 0.88 in 2015, turning into secure and relatively secure ranks obviously. The water resource management was under the impact of increasing municipal sewage treatment rate and raising forest coverage rate, so the H2 value went up from 0.09 in 2001 to 0.58 in 2015, improving the original extremely unsecure rank into critical secure rank. But for some aspects, such as Wanyuan GDP pollution abatement rate, they still have a long way to go; the aspects of water supply, resource utilized efficiency, and resource management all indicate that human behavior has great influence on the water resource security.

Key words set pair analysis, karst area, water resource security

(编辑 张玲)