典型喀斯特峰丛洼地地区水资源安全度评价

——以贵州平塘县为例

张凤太 易武英

(贵州师范学院资源环境与灾害研究所, 贵州贵阳 550018;

南京大学地理与海洋学院, 江苏南京 210093;

贵州省山地资源研究所, 贵州贵阳 550001)

【摘要】喀斯特峰丛洼地虽降水量丰富(多年平均降水量1000mm以上),但特殊地质地貌结构导致地表水向地下水转化速度快,地表可利用水资源极其匮乏,人水矛盾极为突出。以喀斯特峰丛洼地发育极为典型地区平塘县为案例,在参考前人研究成果的基础上,结合研究区区域特征,根据驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)概念模型构建水资源安全度评价框架,筛选出27个因子构建评价指标体系,运用多级模糊综合评判法,结合熵权法,定量计算2005~2013年平塘县水资源安全度综合指数,并初步分析其水资源安全度的影响因素及其作用机制。结果表明:研究期间平塘县水资源安全度整体状况不佳,但呈良好的变化趋势,水资源安全度综合指数呈增大的变化趋势,从2008年的-0.2161上升到2013年的0.1920;2008、2009、2010年水资源安全度隶属等级均介于一般与不安全之间,2011、2012年介于较安全与一般之间。

【关键词】水资源安全度, DPSIR 概念模型, 多级模糊综合评判法, 喀斯特峰丛洼地, 贵州平塘县

【中图分类号】X821 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1003-6563(2016)05-0039-05

水资源安全是国家安全重要组成部分,目前已上升为重大研究课题,吸引了众多学者围绕其开展研究。MariosSophocleous从自然和社会等方面初步探讨了影响水资源安全的因素;DavidRogers阐述了水资源安全对国家稳定的重要性。Walterm等人提出建立水资源安全预警机制的观点。Heike等人从水资源供需平衡研究了流域水资源安全。程国栋等人从虚拟水着手开辟水资源安全与水安全研究的新领域,夏军从水资源的承载力方向入手研究水资源的安全性,贾绍凤等人从压力指数角度研究区域水资源安全评价问题,建立评价指标体系,李少华从复杂局系统视角下研究水资源的安全问题。国内外水资源安全主要研究内容概括为以下几个方面:水资源安全概念的界定、水资源安全度量、水资源安全评价,以及水资源安全保障体系的建设等方面。水资源安全研究方法主要有:模糊综合评价方法[9]、层次分析法、投影寻踪评价模型、DPSIR模型、多层次多目标模糊优选模型等。

喀斯特峰丛洼地生态本底极其脆弱,受特殊地质地貌结构影响,虽降水量丰富,但地表水向地下水转化速度快,地表可利用资源量极其短缺,且利用效率极低。随着人口的增长、经济的发展及城镇化进程的推进,各类用水量不断增加,废水排放量增加,水域污染加重,水资源供需矛盾日益突出,水资源安全问题极为严峻,因此,开展喀斯特峰丛洼地水资源安全度研究具有重要的现实意义。2007

年范荣亮等人研究了普定后寨河典型喀斯特流域水资源安全，但至今为止有关喀斯特地区尤其是有关喀斯特峰丛洼地的水资源安全方面研究并不多见。本文在参考前人研究成果的基础上，根据 DPSIR 概念模型，结合研究区区域特征，构建具有区域特色的水资源安全评价指标体系，运用多级模糊综合评判模型，以喀斯特峰丛洼地发育典型地区平塘县为例，定量分析其 2005~2013 年水资源安全度变化特征，研究其水资源安全的影响因子，并提出缓解水资源安全的对策措施。

1 研究区概况

平塘县位于云贵高原东南坡向广西丘陵的过渡地带，东经 106. 40, 29"~107. 26' 19"，北纬 25. 29' 55"~26° 06' 41"之间。东邻独山县，南与广西南丹县毗邻，西与惠水县、罗甸县相连，北与贵定县、都匀市接壤，土地总面积 2805km²。地势西北高东南低，喀斯特地貌分布广，其中北部较为平缓，河流阶地较为发育；南部起伏较大，洼地发育，地下水深埋；东南部的四寨峰丛盆地、峰林洼地、残丘坡地、侵蚀剥蚀丘陵等较为典型。属于中亚热带季风湿润气候区，热量丰富，雨量充沛，多年平均降水 M 为 1196mm，多年平均水资源总量 16. 72 亿 m³，境内主要河流有六硐河、曹渡河和霸王河。到 2010 年，有中型水库 1 座；小（1）型水库有 4 座；小（2）型水库有 18 座；塘坝 431 座；水池 8827 口。平塘县虽然水资源总量丰富，但水资源利用程度低，属于典型的工程性缺水地区，因此，开展水资源安全度研究具有重要的现实意义。

2 研究方法数据来源

2.1 数据来源

数据主要来源于《2008—2013 年黔南州水资源公报》、《2009—2013 年贵州省统计年鉴》、《平塘政府工作报告》、平塘县统计局、水利局等，部分指标难以获取用黔南州或贵州相应的指标替代，其中贫困人口、贫困人口发生率的统计口径按 2008 年由于国家调整划分标准，农民人均纯收入 1196 元以下的人口通称为贫困人口。

2.2 多级模糊综合评价模型

模糊综合评价方法起源于 20 世纪 60 年代，是美国科学家扎德教授根据模糊数学的隶属度理论，以及现实中大量具有模糊性的经济现象而设计，将定性评价转为定量评价，能对受多种因素制约的对象作出准确评价，能较好地解决模糊的、非确定性、难以量化的问题，具有结果清晰，系统性强的特点，其计算步骤如下。

2.2.1 确定评价因素集 r

评价因素集 U 是综合评价指标的集合，它具有层次性。

$$\text{一级指标为: } U = \{U_1, U_2, \dots, U_k\} \quad (1)$$

$$i \text{ 级指标为: } U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{ik}\} \quad (2)$$

式中, U 为一级指标集合; U_k 为第一级指标第 k 个指标; U_i 为第 i 级指标集合; U_{ik} 表示第 i 个准则层的

第 k 个指标。

2.2.2 确定评语级 V

本文将研究区水资源安全状况将评语集划分为安全、较安全、一般、不安全、极不安全 5 个等级:

$$V = \{V_1 V_2 V_3 V_4 V_5\} = \{\text{安全 较安全 一般 不安全 极不安全}\} \quad (3)$$

2.2.3 熵权法确定指标权重

(1) 各评价指标归一化处理

正向指标归一化公式:

$$A_{ij} = \frac{a_{ij} - \min a_j}{\max a_j - \min a_j} \quad (4)$$

逆向指标归一化公式:

$$A_{ij} = \frac{\max a_j - a_{ij}}{\max a_j - \min a_j} \quad (5)$$

式中, A_{ij} 为第 i 个样本第 j 项指标归一化处理后的值; a_{ij} 为第 i 个样本第 j 项指标的待评价值; $\max a_j$ 为第 j 项指标最大的待评价值; $\min a_j$ 为第 j 项指标最小的待评价值。对土地生态健康评价指标归一化处理的基础, 划分各指标的安全等级, 安全、较安全、一般、不安全、极不安全对应等级分组值分别为 $(1, 0.8)$ 、 $(0.8, 0.6)$ 、 $(0.6, 0.4)$ 、 $(0.4, 0.2)$ 、 $(0.2, 0)$ 。

(2) 评价指标权重的确定

本文运用熵权法确定各评价指标权重,熵权法能有效克服主观因素,使结果更为客观,其计算公式如下:

$$e_j = (-1/\ln n) \times (G_{ij} / \sum_{i=1}^n G_{ij}) \times \ln(G_{ij} / \sum_{i=1}^n G_{ij}) \quad (6)$$

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

式中, e_j 为第 j 项评价指标的熵值; W_j 为第 j 项评价指标的权重; G_{ij} 为第 i 个样本第 j 项指标归一化后的值; n 为样本数; m 为评价指标数。

2.2.4 建立评判隶属度矩阵 R

从 U_k 到 V 的评判隶属度矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \vdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, R 为评判隶属度矩阵; n 为评语集中评语的数目; m 为子因素集 U_i 中指标的数目; r_{ij} 为子因素层

指标对第 j 级评价 V_j 的隶属度。

2.2.5 模糊综合评判

(1) 各级指标的评判隶属度的计算

根据指标权重 W 与评判隶属度矩阵 R , 运用模糊运算法则进行综合运算, 进行 i 级模糊综合评判, 得到评价指标对评价集的隶属度量 S_i :

$$S_i = W_i \circ R_i = (W_1, W_2, \dots, W_n) \circ \begin{bmatrix} R_{i1} \\ R_{i2} \\ \vdots \\ R_{im} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, S_i 为在第 i 级指标的评价结果; W_i 为评价指标 i 的权重; R_i 为在第 i 级指标的评判隶属度矩阵。

(2) 水资源安全度综合指数的计算

为了便于比较, 对评判等级分级进行赋值, 将综合评价结果转换成分值, 定量计算研究区不同研究时段水资源安全度综合指数, 其计算公式如下所示:

$$LI = S \circ \begin{bmatrix} \text{安全} \\ \text{较安全} \\ \text{一般} \\ \text{不安全} \\ \text{极不安全} \end{bmatrix} = S \circ \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ -2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, LI 为水资源安全度综合指数; S 为准则层的评判隶属度矩阵。

本文根据 DPSIR 概念模型构建平塘县水资源安全度评价指标体系, DPSIR 概念模型于 20 世纪 90 年代由联合国提出, 其为了综合分析、描述环境问题及其社会发展关系, 综合 PSR 模型和 DSR 模型优点提出了 dpsir 概念模型。该模型不仅能反映出社会 and 经济发展对人类行为对环境的影响, 同时还能反馈出人类行为对环境和社会产生的结果, 被广泛使用于各个领域研究中。本文在遵循科学、全面、客观、可操作性原则的基础上, 根据 DPSIR 概念模型构建水资源安全度评价框架, 从自然、社会、经济等方面, 结合研究区区域特征, 筛选出农村贫困人口、农村贫困发生率、人口自然增长率等 27 个指标, 建立平塘县水资源安全度评价指标体系, 确定各评价指标权重 (表 1)。

表 1 水资源安全度评价指标体系及指标权重

Tab. 1 Index system and weight of water safety evaluation

目标层	准则层	指标层	单位
水资源安全 综合指数 (A)	驱动力(B_1) (0.169 5)	农村贫困人口(C_1)(0.027 5)	万人
		农村贫困发生率(C_2)(0.027 1)	%
		人口自然增长率(C_3)(0.023 5)	%
		人均 GDP(C_4)(0.054 6)	元
		GDP 增长率(C_5)(0.036 7)	%
	压力(B_2) (0.311 9)	人均用水量(C_6)(0.029 5)	L
		水资源开发利用程度(C_7)(0.119 4)	%
		水资源开发利用效率(C_8)(0.065 7)	亿 m^3
		农业用水量(C_9)(0.028 3)	亿 m^3
		工业用水量(C_{10})(0.022 4)	亿 m^3
		城镇公共用水量(C_{11})(0.021 2)	亿 m^3
		居民生活用水量(C_{12})(0.025 3)	亿 m^3
	状态(B_3) (0.234 1)	人均水资源量(C_{13})(0.032 5)	m^3
		饮水卫生达标人口(C_{14})(0.028 4)	%
		水质保障程度(C_{15})(0.038 9)	%
		万元 GDP 耗用水量(C_{16})(0.049 8)	t/万元
		万元工业产值耗用水量(C_{17})(0.031 7)	t/万元
		干旱指数(C_{18})(0.029 9)	-
		单方水粮食产量(C_{19})(0.028 8)	kg/ m^3
	影响(B_4) (0.180 4)	饮用水安全率(C_{20})(0.031 3)	%
林草覆盖率(C_{21})(0.044 0)		%	
城镇化率(C_{22})(0.050 6)		%	
人均林地面积(C_{23})(0.029 3)		亩	
人均粮食占有量(C_{24})(0.025 3)		kg	
响应(B_5) (0.104 1)	水利投资在总行业固定资产投资的比例(C_{25})(0.030 0)	%	
	环境污染治理投资占 GDP 的比重(C_{26})(0.044 1)	%	
	工业废水排放达标率(C_{27})(0.029 9)	%	

表 2 平塘县水资源安全度各级指标层的评判结果
 Tab. 2 The evaluation results of water resources safety index layer at all levels of Pingtang county

年份	目标层	准则层	指标层	水资源安全隶属等级
2008	-0.216 1	(0.035 0, 0.014 6, 0.018 9, 0.010 5, 0.145 1)	(0.000, 0.054 6, 0.023 5, 0.000, 0.091 3)	介于一般与不安全之间
			(0.073 1, 0.000 0, 0.025 3, 0.000 0, 0.213 4)	
			(0.032 5, 0.022 8, 0.029 9, 0.031 7, 0.117 1)	
			(0.025 3, 0.000 0, 0.000 0, 0.000 0, 0.155 2)	
			(0.000 0, 0.000 0, 0.000 0, 0.030 0, 0.074 0)	
2009	-0.216 3	(0.028 9, 0.016 2, 0.011 9, 0.044 1, 0.123 1)	(0.054 6, 0.000 0, 0.023 5, 0.000 0, 0.091 3)	介于一般与不安全之间
			(0.021 2, 0.051 9, 0.025 3, 0.028 3, 0.185 1)	
			(0.022 8, 0.000 0, 0.000 0, 0.090 8, 0.120 4)	
			(0.025 3, 0.000 0, 0.000 0, 0.060 6, 0.094 6)	
			(0.030 0, 0.000 0, 0.000 0, 0.029 9, 0.044 1)	
2010	-0.136 8	(0.048 6, 0.000 0, 0.038 8, 0.059 4, 0.077 3)	(0.054 6, 0.000 0, 0.036 7, 0.054 6, 0.023 5)	介于一般与不安全之间
			(0.071 9, 0.000 0, 0.000 0, 0.029 5, 0.210 4)	
			(0.052 7, 0.000 0, 0.092 6, 0.088 7, 0.000 0)	
			(0.025 3, 0.000 0, 0.060 6, 0.094 6, 0.000 0)	
			(0.000, 0.000 0, 0.000 0, 0.029 9, 0.074 1)	
2011	0.123 2	(0.090 4, 0.042 4, 0.041 3, 0.000 0, 0.050 0)	(0.023 5, 0.000 0, 0.091 3, 0.000 0, 0.054 6)	介于较安全与一般之间
			(0.206 3, 0.025 3, 0.028 3, 0.000 0, 0.051 9)	
			(0.000 0, 0.109 9, 0.038 9, 0.000 0, 0.085 2)	
			(0.079 9, 0.031 3, 0.044 0, 0.000 0, 0.025 3)	
			(0.074 0, 0.030 0, 0.000 0, 0.000 0, 0.000 0)	
2012	0.192 0	(0.137 2, 0.014 7, 0.019 1, 0.009 3, 0.043 9)	(0.114 8, 0.000 0, 0.000 0, 0.054 6, 0.000 0)	介于较安全与一般之间
			(0.141 7, 0.000 0, 0.029 5, 0.000 0, 0.140 6)	
			(0.181 3, 0.029 9, 0.022 8, 0.000 0, 0.000 0)	
			(0.155 2, 0.000 0, 0.025 3, 0.000 0, 0.000 0)	
			(0.029 9, 0.074 1, 0.000 0, 0.000 0, 0.000 0)	

3 结果分析

3.1 平塘县水资源安全度评价

由表 2 可知, 2005—2013 年平塘县水资源安全度综合指数呈增大的变化趋势, 从 2008 年的 -0.2161 上升到 2013 年的 0.1920, 表明研究期间, 平塘县水资源安全状况有所改善, 但从水资源安全隶属等级来看, 研究区的水资源安全整体状况不佳, 2008、2009、2010 年水资源安全隶属等级均介于一般与不安全之间, 2011、2012 年介于较安全与一般之间。总体而言, 平塘县水资源安全状况不佳, 但呈良好的变化趋势, 主要由于平塘县政府各职能部门加强了对饮水安全、病险水库、退耕还林、中小流域治理的重视, 在一定程度上缓解了平塘县水资源水量、水质安全问题。

由熵权计算得,水资源开发利用程度对平塘县水资源安全度影响最大,其权重高达 0.1194,平塘县属于中亚热带季风湿润气候区,多年平均降水量 1111mm,且地下水资源储量丰富,但受特殊地质地貌影响,该地区地表可利用水资源量极其匮乏,工程性缺水问题突出,水库、山塘、渠道等绝大多数建于上世纪五六十年代,受技术条件和资金的制约,工程建设标准低,运行至今多数水库、山塘已经处于病险运行状态,灌溉渠道垮塌、淤积、渗漏严重,不能正常发挥效益。在石漠化治理试点工程中,由于工程投资规模的限制,水利水保工程部分投入不足,难以满足干旱期间的灌溉需求。因此,水资源开发利用程度的高低对该地区水资源安全具有重要影响。此外,水能资源开发利用率、人均生产总值、城镇化率均对平塘县水资源安全状况具有较大影响,其权重均在 0.05 以上,经济社会的发展工业用水量、居民用水量、农业用水量呈增加的变化趋势。

4 结论

本文根据 DPSIR 概念模型构建水资源安全度评价指标体系,运用多级模型综合评判模型对 2008—2013 年平塘县水资源安全度进行定量分析,结果表明,研究期间平塘县水资源安全度整体状况不佳,但呈良好的变化趋势,由于受收集资料的限制,如水资源安全度评价指标体系未包括污染河长比例等指标,在以后的研究中需进一步完善与改进。

参考文献:

- [1]李少华,董增川,周毅.复杂巨系统视角下的水资源安全及其研究方法[J].水资源保护,2007,23(2): 1-3+42.
- [2]H. I. Shuval. Are the conflicts between israel and her neighbors over the waters of the Jordan river basin an obstacle to peace israel-Syria As A Case study[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2000, 123 (1-4) : 605-630.
- [3]Giuseppe Crosa, Fabrizio Stefani, Camilla Bianchi and alessandro fumagalli. Water security in Uzbekistan : implication of return waters on the amu darya water quality J]. Environmental Science and Pollution Research, 20()5, (1) : 37-42.
- [4]Walterm. Grayman. Use of distribution system water quality models in support of water security [J]. NATO Science for Peace and Security Series C, 2006, (8) : 39-50.
- [5]Heike Wanke, Armin Dunkeloh and Peter Udluft. Ground-water recharge assessment for the kalahari catchment of north-eastern namibia and north-western Botswana with a regional-scale water balance model [J]. Water Resource Manage, 2008, 22(1): 1143-1158.

- [6]程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思想[J] •中国科学院院刊, 2003, 18(4):260-265.
- [7]夏军, 朱一中. 水资源安全的度量M:水资源承载力的研究与挑战[J]•自然资源学报, 2002, 17(3):262-269.
- [8]贾绍凤, 张军岩, 张士峰. 区域水资源承载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.
- [9]卢敏, 张洪海, 宋天文, 等. 区域水安全研究理论及方法探析[J]•人民黄河, 2005, 27(10):6-8.
- [10]王瑞芳, 秦大庸, 张占庞•层次分析法在山西省水资源安全评价中的应用[J]. 人民黄河, 2008, 30(9) :40-42.
- [11]董四方, 董增川, 陈康宁•基于 DPSIK 概念模型的水资源系统脆弱性分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(4) :1-4. 韩宇平, 阮本清, 解建仓•多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学, 2003, 25 (4): 37-42.
- [12]HAN Y P, RUAN B Q, XIE J C. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation[J]. Resources, 2003, 25(4) : 37-42.
- [13]范荣亮, 苏维词, 鄢贵权•喀斯特流域水资源安全评价及调控研究——以普定后寨河流域为例[D]•贵阳: 贵州大学, 2007.
- [14]王学武, 石豫川, 黄润秋, 等. 多级模糊综合评判方法在泥石流评价中的应用[J]. 灾害学, 2004, 19(2) :1-6.
- [15]Smeets E, Weterings R. Environmental indicators: typology and overview [R]. Technical Report No. 25, European Environmental Agency, Copenhagen, 1999.
- [16]汽琦, 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) =1591-1599.