

基于多层次模糊综合评价模型的喀斯特地区水资源承载力研究

戴明宏¹, 王腊春¹, 汤 昊²

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省科学技术情报研究所, 江苏 南京 210042)

摘 要: [目的] 研究影响水资源系统承载力变化的关键因素, 为贵阳市水资源的可持续利用及合理管理政策的制定提供决策依据。[方法] 以贵阳市为例, 将水资源系统分为水资源、生态环境、社会经济 3 个子系统, 选取评价指标, 建立多层次模糊综合评价模型对该市水资源承载力进行评价。[结果] 整体上, 2003—2013 年贵阳市水资源承载力状况不断提高, 可较好地支持贵阳市社会经济发展。其中水资源子系统指数处于波动缓慢下降状态, 生态环境子系统指数呈持续上升趋势, 社会经济子系统指数呈下降趋势。[结论] 水资源子系统对水资源承载能力的贡献率逐渐降低, 生态环境质量的改善是水资源承载力提高的主要驱动因素, 而社会经济子系统是水资源承载力提高的主要压力源。

关键词: 水资源承载力; 喀斯特地区; 多层次模糊综合评价模型; 贵阳市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)01-0151-06

中图分类号: TV211.1

文献参数: 戴明宏, 王腊春, 汤昊. 基于多层次模糊综合评价模型的喀斯特地区水资源承载力研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 151-156. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.026

Research on Water Resources Carrying Capacity in Karst Areas Based on Multilevel Fuzzy Comprehensive Evaluation Model

DAI Minghong¹, WANG Lachun¹, TANG Hao²

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Jiangsu Science and Technology Information Institute, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

Abstract: [Objective] The objective of the research is to study the key factors that influence the water resource carrying capacity in Guiyang City of Guizhou Province in order to provide basis for the sustainable development of water resources and soci-economy in the city. [Methods] Taking Guiyang City as a case study, the water resources system was divided into three subsystems including water resource, ecological environment and socio-economic subsystems. Evaluation indices were selected and multilevel fuzzy comprehensive evaluation model was established. [Results] The result showed that water resources carrying capacity improved continuously from 2003 to 2013, which contributed to the socio-economic development in Guiyang City. The evaluation index of water resource subsystem fluctuated, and decreased slightly during the study years. The evaluation index of ecological environment subsystem increased significantly, while the evaluation index of socio-economic subsystem decreased dramatically. [Conclusion] The contribution of water resources subsystems to water resources carrying capacity has decreased. The improvement of ecological environment is the main driver of the increasing water resources carrying capacity, while the socio-economic subsystem is the main obstruction of water resources carrying capacity.

Keywords: water resources carrying capacity; karst areas; multilevel fuzzy comprehensive evaluation model; Guiyang City

收稿日期: 2014-12-01

修回日期: 2015-03-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特地区人类活动主导下的生态环境变化与流域水文循环响应耦合机理”(41371045); 国家“十二五”科技支撑计划项目“喀斯特山区水资源演变规律及监测技术研究”(2012BAJ25B09)

第一作者: 戴明宏(1989—), 女(汉族), 山东省莱州市人, 硕士研究生, 从事岩溶地区水资源开发、区域可持续发展研究。E-mail: daiminghong89@126.com。

通讯作者: 王腊春(1963—), 男(汉族), 江苏省金坛市人, 博士, 教授, 博导, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: wang6312@263.net.cn。

西南喀斯特地区可溶性双重含水介质和独特的地表—地下二元储水结构组成了特殊的水文水循环系统,使其在水系发育、水文过程等方面与非喀斯特地区存在显著差异^[1],其主要体现为工程性缺水严重,地下水资源开发利用难度大,如西南喀斯特地区地下水资源丰富且水质较好^[2],但开发利用率较低,仅为 8%~15%^[3]。这也导致了喀斯特地区水资源系统对生态环境、人口和社会经济发展的承载力变化与非喀斯特地区相比存在较大差异^[4],且地下水极易受到不合理人类活动的污染^[5]。

目前,水资源承载力研究已成为可持续发展和水资源安全战略研究的基础内容^[6]。国内关于水资源承载力的研究主要侧重于区域水资源承载力的评价方法和指标体系研究^[7-9],专门针对喀斯特地区特殊水文水循环背景下的水资源承载力研究相对较少。贵阳市作为典型的喀斯特高原城市,喀斯特面积达 6 830.26 km²,约占全市国土总面积的 85.02%,虽然降水丰富,但独特的地表—地下二元储水结构,造成地表水渗漏严重,水资源开发利用成本高,工程性缺水问题突出^[10],如 2011 年贵阳市两大“水缸”红枫湖和阿哈水库出现了严重的缺水问题,对贵阳市的社会经济发展造成了很大影响。此外,作为贵州省的省会城市,贵阳市是贵州社会经济发展的中心,社会经济的快速发展对水资源的需求量越来越大,水资源越来越成为制约发展的关键限制性因素。因此,对贵阳市水资源状况和水资源承载力进行评价研究,将有助于认识影响水资源系统承载力变化的关键因素,为贵阳市水资源的可持续利用及合理管理政策的制定提供决策依据,以期实现贵阳市水资源和社会经济的可持续发展。

1 研究方法

1.1 研究方法及数据来源

目前,关于水资源承载力的研究方法主要有常规趋势法、综合评价法和系统动力学法等^[9],其中综合评价法的应用较多,具体包括模糊综合评价法、灰色评价模型法、可拓物元模型法和数据包络模型法等。评价过程一般分为评价指标选择、指标权重确定、评价方法的选择和实施。本文结合层次分析法和模糊综合评价法,构建多层次模糊综合评价模型,在影响水资源承载力变化的单因素评价的基础上,通过综合评判矩阵首先对各子系统进行单独评价,进一步再对水资源承载能力作出综合评价,从而较全面的分析水资源承载力状况变化的趋势及其主要影响因素。

在评价过程中,由于不同评价指标对评价的贡献

不同,需要根据各评价指标对评价单元贡献的大小确定指标权重。本文采用熵权法确定指标权重。在水资源承载力评价中,某项指标变异程度越大,所占的权重也越大,由熵权法确定指标权重,能够避免人为主观因素的影响,使指标权重更符合客观实际,进一步保证了最终评价结果的客观性。

主要原始数据来源于《贵阳市水资源公报》(2003—2013 年)、《贵阳市国民经济和社会发展统计公报》(2003—2013 年)和《贵州省统计年鉴》(2003—2013 年)。

1.2 指标体系构建

关于喀斯特地区水资源承载力目前还没有统一的定义。我们将喀斯特地区的水资源承载力定义为:在一定的经济技术水平、社会生产和水资源合理开发利用条件下,喀斯特水资源系统可最大维持和供给工农业生产、人民生活 and 喀斯特生态环境等用水的能力。为能够全面真实地反映贵阳市水资源承载力的变化情况和喀斯特生态环境的特殊性,在选取指标时综合考虑了研究对象的水资源供给、生态环境质量和社会经济发展状况,选取了 15 个评价指标,构建包含水资源、生态环境和社会经济 3 个子系统的水资源承载力评价指标体系,并采用熵权法计算出各指标及其子系统的权重(表 1)。

1.3 模糊综合评价模型

模糊综合评价模型能够多层次、多因素地评价水资源承载力,更全面的反映区域水资源状况。它的基本原理^[11]为:建立评价对象的因素论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和评语论域 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$,其中 U 代表综合评判因素组成的集合, V 代表评语组成的集合,则模糊综合评判为:

$$B = A \circ R \quad (1)$$

式中: A —— U 上的模糊子集, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $0 \leq a_i \leq 1$; a_i —— U 对 A 的隶属度,表示单因素 U_i 在评定因素中所起作用的大小;“ \circ ”——模糊合成算子,在水资源承载力的模糊评价中选取加权平均型算子 $M(\circ, \oplus)$ 进行综合评价;评判结果 B —— V 上的模糊子集, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, $0 \leq b_i \leq 1$, b_i ——等级 V_i 对综合评判所得模糊子集 B 的隶属度,它表示综合评判的结果。评价矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: r_{ij} —— U_i 的评价对等级 V_j 的隶属度,因而矩

阵 R 中第 i 行 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ 即——对第 i 个因素 U_i 的单因素评判结果,评价计算中矩阵 A 代表

了各因素对综合评判重要性的权系数,因此满足 $\sum_{i=1}^m a_i = 1$,同时模糊变换也可退化为普通矩阵计算。

表 1 水资源承载力评价指标体系及其权重

目标层	准则层	权重	因素层	公式/含义	权重
水资源承载力	水资源子系统	0.22	人均供水量(m^3 /人)	供水量/人口数量,表征区域供水能力	0.23
			人均耗水量(m^3 /人)	耗水量/人口数量,表征区域用水程度	0.18
			水资源开发利用/%	供水量/水资源总量,表征区域水资源开发利用程度	0.17
			灌溉率/%	灌溉面积/耕地面积,表征区域农业用水水平	0.13
			工业用水率/%	工业用水量/总用水量,表征区域工业用水水平	0.15
			人均占有水量(m^3 /人)	水资源总量/总人口,表征人均水资源拥有量	0.14
	生态环境子系统	0.49	森林覆盖率/%	区域植被面积/总面积,表征区域绿化水平	0.28
			河道外生态用水率/%	河道外生态用水量/总用水量,表征河道外生态用水程度	0.21
			污水处理率/%	污水处理量/污水排放总量,表征区域污水处理情况	0.30
			COD 排放量/ 10^4 t	表征区域水污染程度	0.21
	社会经济子系统	0.29	人均 GDP(元/人)	表征区域经济发展水平	0.16
			城镇化率/%	表征区域城镇化水平	0.21
			人均粮食产量(t/人)	粮食总产量/总人口,表征农业水平	0.21
			工业比重/%	工业增加值/GDP 总量,表征区域工业化水平	0.16
			人口密度/(人· km^{-2})	表征区域人口密集程度	0.26

注:人口数量为公安户籍数。

1.4 多层次模糊综合评价模型具体计算过程

贵阳市水资源系统由水资源子系统、生态环境子系统和社会经济子系统构成。对贵阳市水资源承载力进行评价时遵循以下 2 个步骤: ① 对每个子系统进行单独的模糊综合评价,计算各子系统在评价年份的评价指数; ② 对 3 个子系统进行模糊综合评价,从而计算得出贵阳市水资源承载力综合评价指数。

评价因素 U 由 $\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}, \{u_7, u_8, u_9, u_{10}\}$ 和 $\{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}\}$ 构成,对应着评语集 $V =$

$\{v_1, v_2, v_3\}$ 。其中, v_1 级表示状况较好,该区域水资源仍有较大的承载力,水资源的供给对区域发展是有保障的; v_3 级表示情况较差,该区域水资源承载能力已经接近饱和值,进一步开发的潜力较小,容易引发水资源短缺问题,制约国民经济的发展; v_2 级介于以上两级之间,表明水资源开发利用已有相当规模,还有进一步开发的潜力。根据贵阳市地域特点和现有研究成果^[12-15]确定各分级指标对应评语集 V 的阈值(表 2)。

表 2 综合评价因素的分级指标

目标层	准则层	评价因素	v_1	v_2	v_3	
水资源承载力评价指标	水资源指标	人均供水量 u_1 (m^3 /人)	>400	400~300	<300	
		人均耗水量 u_2 (m^3 /人)	<90	90~100	>100	
		水资源开发利用率 u_3 /%	<20	20~30	>30	
		灌溉率 u_4 /%	<40	40~50	>50	
		工业用水率 u_5 /%	<50	50~60	>60	
		人均占有水量 u_6 (m^3 /人)	$>1\ 100$	1 100~1 000	$<1\ 000$	
	生态环境指标		森林覆盖率 u_7 /%	>40	40~30	<30
			河道外生态用水率 u_8 /%	>2	2~1	<1
			污水处理率 u_9 /%	>70	70~30	<30
			COD 排放量 u_{10} / 10^4 t	<4	4~5	>5
	社会经济指标		人均 GDP u_{11} (元/人)	$>30\ 000$	30 000~16 000	$<16\ 000$
			城镇化率 u_{12} /%	>45	45~40	<40
			人均粮食产量 u_{13} (t/人)	>0.16	0.16~0.1	<0.1
			工业比重 u_{14} /%	>0.4	0.4~0.35	<0.35
			人口密度 u_{15} / (人· km^{-2})	<450	450~500	>500
评分值	—	0.95	0.5	0.05		

注: v_1 表示状况好; v_3 表示状况差; v_2 表示状况介于 v_1 和 v_3 之间。

水资源承载力评价指数的具体计算过程如下:

(1) 评判矩阵 R 的计算: 评判矩阵 R 中 r_{ij} 可通过评价因素的实际数值对照各因素的分级指标(表 2)来计算。为了消除等级之间数值差别不大而等级相差一级的跳跃现象, 对隶属函数进行模糊化处理。对于 v_2 级即中间区间, 令其落在区间中点的隶属度为 1, 两侧边缘点的隶属度为 0.5, 中间点向两侧线性递减处理。对于 v_1 和 v_3 两侧区间, 则令距临界值越远, 属于两侧等级的隶属度越大, 在临界值上属于两侧等级的隶属度各为 0.5。 v_1 和 v_2 级的临界值为 k_1, v_2 和 v_3 的临界值为 k_3, v_2 等级区间中点为 $k_2, k_2 = (k_1 + k_3)/2$ 。各评语等级相对隶属度计算公式参考文献 [16-17]。

(2) 计算各子系统评价指数: 令 $B = A \cdot R$, 其中

$b_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, m)$, 令评语等级集合为各等级赋值为 $v = \{0.95, 0.5, 0.05\}$, 按照加权平均原则计算 2003—2013 年水资源子系统、生态环境子系统和社会经济子系统的评价指数。

(3) 计算水资源承载力综合评价指数: 对上一步计算得到的各子系统评价指数进行综合评价, 加权平均后计算出水资源承载力的综合评价指数 L (表 3, 图 1)。

水资源承载力综合评价指数是衡量水资源承载程度的综合性指标, 评价指数越高, 水资源承载力的状况越好。根据相关研究成果^[18-20]、贵阳市自然环境特点及社会经济发展状况, 确定综合评价指数分级标准(表 4)。

表 3 2003—2013 年贵阳市水资源承载力综合评价指数和各子系统评价指数

项目	评价指数										
	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
水资源承载力	0.45	0.45	0.46	0.46	0.50	0.50	0.52	0.57	0.55	0.59	0.50
水资源子系统	0.54	0.48	0.50	0.41	0.50	0.52	0.42	0.38	0.40	0.55	0.36
生态环境子系统	0.28	0.29	0.29	0.33	0.38	0.43	0.49	0.61	0.75	0.76	0.68
社会经济子系统	0.67	0.71	0.72	0.71	0.69	0.61	0.64	0.64	0.33	0.34	0.32

表 4 水资源承载力评价指数分级标准

评价指数值	状态	状态含义描述
0	不可承载	水资源矛盾极为突出, 水资源供给无法满足生产生活的需要
[0.0, 0.2]	准不可承载	水资源供需矛盾有所缓解, 基本满足生产生活用水
[0.2, 0.5]	可承载	水资源较丰富, 水环境质量有所提高, 区域缺水问题得到解决
[0.5, 0.8]	良好可承载	水资源丰富, 水利设施齐全, 水污染治理效果明显
[0.8, 1.0]	理想可承载	水资源与生态、经济、社会协调发展, 成为该区域发展的优势资源

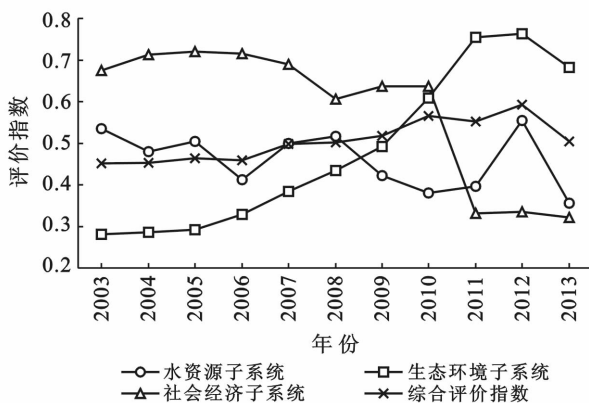


图 1 贵阳市水资源承载力综合评价指数和各子系统评价指数变化趋势

2 评价结果

如图 1 所示, 贵阳市水资源承载力整体上呈上升

趋势, 但上升幅度不大。2003—2013 年由可承载状态上升到良好承载状态, 其中 2003—2006 年水资源承载力处于可承载状态 ($\in [0.45, 0.46]$), 2007—2013 年水资源承载力进入良好可承载状态 ($\in [0.5, 0.59]$)。综合评价指数持续上升, 表明水资源系统能够为贵阳市的社会经济发展提供基本保障。但 2013 年水资源综合评价指数出现微弱下降, 分析其原因为社会经济的迅速发展对水资源承载能力产生了巨大压力, 水资源保障能力的提高无法满足社会经济高速发展对水资源需求的增加量。各子系统变化较复杂, 其中水资源子系统的评价指数在 2003—2013 年期间总体上呈波动缓慢下降趋势, 波动区间为 $[0.35, 0.55]$ 。生态环境子系统评价指数波动幅度较大, 在 2003—2012 年期间迅速上升, 2012 年达到最高值 0.76, 而后出现下降; 社会经济子系统的评价指数总

体上呈下降趋势,其中 2003—2008 年评价指数呈倒“U”型变化趋势,变化幅度较小,变化区间为 $[0.61, 0.72]$,2008—2010 年评价指数开始缓慢升高,而 2011—2013 年评价指数出现迅速降低,其变化区间为 $[0.32, 0.34]$ 。

3 讨论

3.1 水资源子系统

2003—2013 年水资源子系统评价指数呈波动下降状态,对水资源综合承载力的整体贡献率越来越小。分析其主要原因,一是水利设施建设不足,全市大型水库仅 5 座,总库容 $4.50 \times 10^9 \text{ m}^3$ 左右,在提供等量水资源供给的条件下,喀斯特地区的水利建设投入成本远高于非喀斯特地区^[21],而在相同投入条件下,现有水利工程无法满足需水量的日益增长;二是虽然 2003—2013 年间水利基础设施有所改善,但水利基础设施建设带来的水资源承载能力的提高不能满足社会经济迅速发展对水资源需求的增加,因此导致水资源子系统的贡献率不断下降。此外,贵阳市的水源地均位于城市近郊(如阿哈水库、红枫湖和百花湖),城市规模的不断扩大导致城市发展对水源地的生态环境造成了重要影响,如阿哈水库、红枫湖和百花湖出现了氮磷和有机物污染,导致水质性缺水问题逐渐凸显,进一步降低了水资源子系统的承载力。

从水资源子系统内部来看,一方面,农业灌溉率逐年提高,农业耗水量上升进一步增加了水资源子系统的压力;工业的水资源利用率不断提高,单位工业产值用水量逐年降低,但其对水资源子系统压力的缓解作用被其他用水户用水量增加产生的压力所抵消。另一方面,水资源子系统的波动除了受社会经济发展的影响外,也受降水量年际变化的影响,如 2006,2009,2013 年为偏枯水年,全市年降水量低于 1 000 mm,这直接导致了水资源总量的减少,这与水资源子系统评价指数变化上出现的低值相对应。

水资源子系统评价指数虽不断下降,但对水资源承载力的绝对贡献率还较高。喀斯特地区地表水渗漏严重,但地下水资源丰富且利用率较低,2003—2013 年全市地下水供给量仅占全市总供水量的 14%,这说明随着科技水平的提高,地下水资源的开发将有利于缓解贵阳市的水资源供需矛盾,提高水资源承载力。

3.2 生态环境子系统

与非喀斯特城市相比,贵阳市生态环境脆弱性强,环境承载力低。2003—2013 年贵阳市生态环境

子系统评价指数整体上呈快速增长趋势(由 0.28 增长到 0.76),表明生态环境持续改善,对水资源承载力贡献率不断提高。

2003 年以来贵阳市积极实施了退耕还林和水土流失治理等生态环境保护建设工程,2011—2013 年完成石漠化治理面积 390.31 km^2 ,取得良好的生态效应,森林覆盖率由 2003 年的 34.4% 提高到 2013 年的 44.2%。同时,不断加强水环境基础设施建设和水环境污染物的减量化,如 2010 年完成新庄污水处理工程建设,城市污水处理率得到迅速提高,与 2009 年相比提高了 32.8%。2003—2012 年全市 COD 排放量由 $5.57 \times 10^4 \text{ t}$ 降低到 $4.41 \times 10^4 \text{ t}$,有效地减小了水环境压力。在河道外生态用水方面,由于生态用水主要依赖大气降水,占总用水量的比重较低,对水资源承载力影响很小。总之,加强生态环境建设,提高污水处理率,降低污染物排放量,对进一步提高全市水资源承载力具有重要的积极作用。

3.3 社会经济子系统

总体来看,社会经济子系统的评价指数呈降低趋势(由 0.67 降低到 0.32),表明社会经济的发展给贵阳市水资源带来了巨大压力。2003—2013 年,贵阳市 GDP 总量增长迅速,2010—2013 年 GDP 总量增长了 2 倍,达 2 000 亿元,GDP 年均增长率为 14.68%,比全国平均水平高 4.48%,尤其是 2013 年 GDP 增长率高达 16%,远高于全国平均水平,经济的高速发展直接带来了农业、工业和第三产业需水量的增加。其中工业增加值年均增长率为 15%,虽然单位 GDP 产值用水量不断下降,但工业用水绝对总量仍然较高,2003—2013 年工业用水总量年平均为 $6.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。此外,贵阳市作为贵州省社会经济发展的核心(2013 年 GDP 占全省的 26%),经济发展的集聚效应导致贵阳市人口增长迅速,进一步增大了水资源系统的压力。2003—2013 年全市人口数量迅速增长,2011 年总人口突破 400 万人,而 2013 年总人口已超过 450 万人,年均增长率为 2.7%,人口密度迅速升高,一方面带来居民生活用水量的激增,由 2003 年的 $1.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增长到 2013 年的 $1.74 \times 10^8 \text{ m}^3$;另一方面,人均供水量、人均耗水量和人均水资源量迅速减少,如 2003—2013 年人均水资源量从 $1\,216.2 \text{ m}^3/\text{人}$ 下降到 $742.5 \text{ m}^3/\text{人}$,人口的迅速增长对水资源的压力越来越大,水资源供需矛盾日益突出。

3.4 水资源承载力

2003—2013 年贵阳市水资源综合承载力状况逐步提高,由可承载状态跃进为良好可承载状态,水资源承载力系统呈现出良性发展态势。通过分析水资

源承载力与水资源、生态环境、社会经济子系统的变化趋势可以看出(图 1),水资源子系统对水资源承载能力的贡献率越来越小;生态环境子系统对水资源承载力提高的贡献作用明显,是水资源承载力提高的主要驱动力;社会经济子系统则成为水资源承载力提高的主要限制因素。2003—2013 年,贵阳市积极治理水土流失和石漠化,严格控制污染物排放,贵阳市生态环境质量明显改善,对水资源承载力的提高起到了关键作用,但在水资源子系统贡献率的持续下降和社会经济子系统对水资源承载力产生压力的共同作用下,2003—2013 年全市水资源承载力的综合评价指数仅提高了 0.05。

总体上,贵阳市水资源承载力的变化除受水资源量年际变化不稳定的影响外,生态环境质量的改善成为水资源承载力提高的主要驱动因素,而社会发展尤其是人口的迅速增长和经济的高速发展,成为水资源承载力的主要压力源。贵阳市未来应加大水利设施建设,开发利用地下水资源,节约用水,提高水资源利用率,以提高水资源承载能力。

4 结论

(1) 2003—2013 年贵阳市水资源承载力呈上升趋势,其中水资源子系统对水资源承载能力的贡献率逐渐降低,生态环境质量的改善是水资源承载力提高的主要驱动因素,而社会经济子系统是水资源承载力提高的主要压力源。

(2) 社会经济子系统中,人口增长和经济高速发展是水资源承载力提高的主要限制因素,未来应从这 2 方面提高水资源承载能力,缓解水资源压力,如控制人口数量,调整产业结构,完善节水措施,加大污染防治力度,提高污水处理率等。

(3) 针对喀斯特地区特殊的水文环境,未来应加强水利基础设施的投入,加大地下水的开发利用。

此外,评价结果与贵阳市水资源实际状况较吻合,也表明多层次的模糊综合评价模型有较好的实际应用价值,同时在指标及其评语集设定方面进一步修正正是未来完善该方法的重要方面。

[参 考 文 献]

- [1] 杨明德,谭明,梁虹. 喀斯特流域水文地貌系统[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [2] 苏维词. 浅议贵州省喀斯特地下水资源及其开发利用模式[J]. 水土保持研究,2008,15(6):267-269.
- [3] 卢耀如,张凤娥,刘长礼,等. 中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性[J]. 地球学报,2006,27(5):393-402.
- [4] 孔兰,梁虹,贺中华. 喀斯特地区水资源承载力研究综述[J]. 水科学与工程,2007(6):5-8.
- [5] 张军以,王腊春,马小雪,等. 西南岩溶地区地下水污染及防治途径[J]. 水土保持通报,2014,34(2):245-249.
- [6] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,17(3):262-269.
- [7] 李磊,贾磊,赵晓雪,等. 层次分析—熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(4):456-460.
- [8] Wang Shuo, Yang Fenglin, Xu Ling, et al. Multi-scale analysis of the water resources carrying capacity of the Liaohe Basin based on ecological footprints[J]. Journal of Cleaner Production, 2013,53(16):158-166.
- [9] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.
- [10] 王腊春,史运良. 西南喀斯特山区三水转化与水资源过程及合理利用[J]. 地理科学,2006,26(2):173-178.
- [11] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,1994:8-22.
- [12] Zhang Junyi, Wang Lachun. Assessment of water resource security in Chongqing City of China: What has been done and what remains to be done? [J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2751-2772.
- [13] 苏永红,冯起,刘蔚,等. 应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载力[J]. 干旱区研究,2009,26(2):169-175.
- [14] 张美玲,梁虹,祝安,等. 贵州水资源承载力基于熵权的模糊物元评价[J]. 人民长江,2007,38(2):54-57.
- [15] Meng Lihong, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity in Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. Chinese Geographical Science, 2009,19(1):89-95.
- [16] 闵庆文,余卫东,张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究,2004,11(3):14-16.
- [17] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究:以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报,1993,8(3):229-237.
- [18] 张兴榆,曹明明,黄贤金. 基于综合评判模型的干旱半干旱地区水资源承载力评价研究:以黄河中游延安市为例[J]. 南京大学学报:自然科学版,2008,44(6):674-682.
- [19] 吕萍,刘东,赵菲菲. 基于熵权的建三江分局水资源承载力模糊物元评价模型[J]. 水土保持研究,2011,18(2):246-250.
- [20] 王江,李靖,魏红义,等. 基于 TOPSIS 法的区域水资源承载力预测评价:以陕西省关中地区为例[J]. 水土保持研究,2008,15(3):161-163.
- [21] 苏维词,张贵平. 地表起伏对区域发展成本影响浅析:以贵州为例[J]. 经济研究导刊,2012(6):144-146.