

# 变化环境下 2000—2015 年贵阳市水资源脆弱性评价

穆 瑾, 赵翠薇

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

**摘要:**为了客观评价贵阳市水资源脆弱性,结合相关利益机构及专家的建议,从暴露性、敏感性和适应能力3个方面入手,构建水资源脆弱性评价指标体系,在GIS技术支持下,利用层次分析法(AHP)对2000—2015年贵阳市水资源脆弱性进行评价。结果表明:贵阳市水资源脆弱性空间差异比较显著,水资源脆弱性增强和变弱并存,整体表现出由“中南部高且周边低”到“北弱南强”之态势;云岩区、南明区、白云区、乌当区、观山湖区和花溪区6个区水资源脆弱性增强明显,其中增强最为显著的是观山湖区、花溪区和乌当区,清镇市、修文县、息烽县和开阳县4个县(市)则以脆弱性减弱为主。研究成果可为贵阳市社会经济持续健康发展以及水资源合理利用提供参考依据。

**关键词:**水资源;脆弱性评价指标体系;变化环境;贵阳市;GIS;层次分析法

中图分类号:TV211.1 文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2019)09-0012-06

## Assessment of Water Resources Vulnerability in Guiyang City from 2000 to 2015 under Changing Environment

MU Jin, ZHAO Cui-wei

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** The vulnerability of water resources in Guiyang City in 2000-2015 was evaluated using Analytic Hierarchy Process (AHP) in GIS platform. An index system in aspects of exposure, sensitivity, and adaptability for the evaluation was established. Research findings suggest that the vulnerability of water resources in Guiyang City differed remarkably in spatial scale, with vulnerability intensifying and also weakening coexisted. From 2000 to 2015, the vulnerability developed from being high in the middle and south and low in surrounding areas towards low in the north while high in the south. In Yunyan district, Nanming district, Baiyun district, Wudang district, Guanshan Lake district and Huaxi district, the vulnerability of water resources has intensified evidently, among which Guanshan Lake district, Huaxi district and Wudang district witnessed the most remarkable changes. In Qingzhen city, Xiwen county, Xifeng county, and Kaiyang county, the vulnerability of water resources mostly weakened. The results offer reference for the sustainable and healthy development of social economy and the rational utilization of water resources in Guiyang.

**Key words:** water resources; vulnerability evaluation index system; changing environment; Guiyang City; GIS; analytic hierarchy process

### 1 研究背景

水资源是国家基础性的自然资源,也是战略性经济资源,同时又是一个国家综合国力的有机组成部分。然而,随着环境变化和社会经济的发展,人类

对水资源的需求日益增加<sup>[1]</sup>,造成水资源脆弱性增强,而水资源脆弱性是阻碍区域社会经济可持续发展的重要因素之一。

水资源脆弱性研究起源于20世纪60年代法国Albinet和Margat<sup>[2]</sup>所做的地下水资源脆弱性研究,随后,地下水资源脆弱性研究成果逐渐丰富<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期:2018-01-18;修回日期:2018-02-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC05023)

作者简介:穆瑾(1992-),女,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事土地利用与房地产估价方面的研究。E-mail:695251300@qq.com

通信作者:赵翠薇(1968-),女,贵州贵阳人,教授,博士,硕士生导师,主要从事气候变化与生态环境保护研究。E-mail:972487901@qq.com

20世纪90年代逐渐出现了对地表水资源脆弱性的研究:一方面以流域水资源系统为研究对象<sup>[5-6]</sup>;另一方面以地域水资源系统为研究对象,评价了不同区域水资源脆弱性<sup>[7-8]</sup>。21世纪初,随着全球气候变化的加剧,水资源脆弱性的研究转向了全球气候变化下的水资源脆弱性的影响评价<sup>[9-11]</sup>。纵观各项研究可知国内外对水资源系统脆弱性的研究多侧重于对地下水资源的研究,且研究成果也较为丰富。对于地表水资源脆弱性的研究相对较少,并且较少考虑到区域实际情况和区域相关利益机构参与程度,同时水资源脆弱性研究大部分都集中在时间尺度上的定量评价,而忽略了空间上的脆弱性变化状况。

贵阳市属于典型的喀斯特地区,峰丛与碟状洼地、漏斗、伏流、溶洞发育完整,其西北面临青藏高原、西南面临印度洋、东南面临太平洋,是西南季风和东南季风的交汇地,气候带上又位于信风带与西风带之间的过渡地带,特殊的地理位置决定了该区域气候变化规律的复杂性。同时,贵阳市也是贵州最大城市兼经济、金融、文化、教育、交通和集散等的中心,也是国务院确定的“黔中经济区”和“泛珠三角经济区”内重要的中心城市之一。2015年,贵阳市国内生产总值达2 287.152亿元,年末总人口达462.18万人,总用水量达到10.51亿 m<sup>3</sup>,随着用水需求量的增长,水资源将成为制约当地经济可持续发展的主要因素。通过对贵阳市水资源脆弱性进行评价,有利于了解研究区水资源脆弱性时空分布特征,对促进该区域社会经济持续健康发展以及水资源合理利用具有一定的现实意义。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

文中的数据来源有:贵阳统计年鉴、贵阳市各区县气象观测站点观测数据、贵阳市土地利用图、TM影像、贵阳市自来水公司数据、《贵阳市水资源公报》、《国民经济和社会发展公报》等。其中,人口密度、国内生产总值、普通中小学在校人口比例来源于《2001年贵阳统计年鉴》、《2006年贵阳统计年鉴》、《2011年贵阳统计年鉴》和《2016年贵阳统计年鉴》,国内生产总值按2000年可比价进行了换算;降水、气温和干旱指数数据来源于贵阳市各区县气象观测站点观测数据;人均水资源占有量、可利用降水资源、万元GDP耗水量、人均GDP和有效灌溉率通过计算获得;土地利用类型来源于“十年生态”数据,即2000年、2005年、2010年贵阳市土地利用图

和2015年TM影像;水质等级、城镇污水处理率和有效灌溉率来源于贵阳市自来水公司数据、《贵阳市水资源公报》和《国民经济和社会发展公报》,对于部分缺失值采用相邻年份替代。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 指标体系的构建

在总结现有研究的基础上,综合考虑气候因素和人为因素对水资源系统造成的影响,基于IPCC SREX报告和政府间气候变化专门委员会对暴露度、敏感性和适应能力的定义(表1),从暴露性、敏感性、适应能力3个方面综合归纳已有研究指标,并走访该研究区域的不同单位,结合贵阳市区域特点,以及调查、专家咨询得到的信息,并向25位来自政府机关、企事业单位和高校等不同部门的专家咨询(其中3位来自贵阳市发展和改革委员会、8位来自贵阳市水资源局、4位来自贵阳市自来水公司、5位来自高校科研单位和5位水资源专业硕士毕业生),在3个维度上优化选取了15个评价指标。其中暴露性方面包括人口密度、国内生产总值和土地利用类型3个指标;敏感性方面包括年平均降水量、年平均气温、干旱指数、人均水资源占有量、可利用降水资源和水质等级6个指标;适应能力方面包括万元GDP耗水量、人均GDP、普通中小学在校人口比例、供水综合管理能力、城镇污水处理率和有效灌溉率6个指标。

表1 脆弱性关键参数及其定义

Table 1 Definitions of key parameters of vulnerability	
参数	定义
暴露性	暴露性是指人口、生计、生态服务和资源、设施或社会、经济、文化等资产处于易受损害的位置,所以暴露度的衡量应以人口分布及其密度、经济产值及影响面积来衡量
敏感性	水资源对气候变化的敏感性,指气候变化条件下水资源的变化率,它是与地理气候联系的自然脆弱性的重要表征
适应能力	系统能够适应干扰、降低潜在损害以及应对不利后果的能力,适应能力评价由经济能力、人力资源以及环境能力3个方面构成

#### 2.2.2 水资源脆弱性等级的划分

水资源脆弱性评价标准要能够反映水资源脆弱性程度、反映水资源脆弱性特点、明确水资源脆弱性等级<sup>[12]</sup>。由于脆弱性指标之间的差异比较大,评价指标无法直接进行比较,必须按一定标准划分为几个等级以消除量纲不同的影响。根据评价指标特征,采用3种方法分级:①聚类分析方法分级<sup>[13-14]</sup>,采用最短距离法对指标进行分类,使用欧氏距离公式计算各指标间的距离,将距离较短的数值归为一类;②参照国家或国际标准进行分级;③参照有关参考文献分级或专家评估分级。

根据各指标情况,结合3种方法对指标进行量化分级。将水资源脆弱性分为5个等级,即微度脆弱(I)、轻度脆弱(II)、中度脆弱(III)、重度脆弱

(IV)、极度脆弱(V),见表2,在ArcGIS 10.2软件中进行脆弱性指数的计算得到空间分布图,通过自然断点法把水资源脆弱性分成5个等级。

表2 变化环境下水资源系统脆弱性评价标准

Table 2 Criteria of vulnerability assessment for water resource system in changing circumstances

评价指标	不同评价等级的标准				
	微度脆弱 (I)	轻度脆弱 (II)	中度脆弱 (III)	重度脆弱 (IV)	极度脆弱 (V)
人口密度 $E_1/(人 \cdot km^{-2})$	[0,3 242)	[3 242,7 831)	[7 831,10 809)	[10 809,12 033)	[12 033,+∞)
国内生产总值 $E_2/(亿元)$	[0,201.42)	[201.42,306.12)	[306.12,480.41)	[480.41,622.37)	[622.37,+∞)
土地利用类型 $E_3$	河流、湖泊	林地、草地	旱地、其他	水田	建设用地
年平均降水量 $S_1/mm$	(1 499,+∞)	(1 195,1 499]	(1 100,1 195]	(854,1 100]	[0,854]
年平均气温 $S_2/°C$	[0,13.4)	[13.4,14.0)	[14.0,14.5)	[14.5,16.1)	[16.1,+∞)
干旱指数 $S_3$	[0,0.97)	[0.97,1.03)	[1.03,1.23)	[1.23,1.37)	[1.37,+∞)
人均水资源占有量 $S_4/m^3$	[3 000,+∞)	[2 000,3 000)	[1 000,2 000)	[500,1 000)	[0,500)
可利用降水资源 $S_5/mm$	(385,+∞)	(292,385]	(142,292]	(-44,142]	(-∞,-44]
水质等级 $S_6$	I	II	III	IV	V
万元 GDP 耗水量 $A_1/m^3$	[0,149.93)	[149.93,243.76)	[243.76,434.72)	[434.72,535.26)	[535.26,+∞)
人均 GDP $A_2/(万元)$	(6.26,+∞)	(5.46,6.26]	(4.44,5.46]	(3.19,4.44]	[0,3.19]
普通中小学在校人口比例 $A_3/\%$	(0.18,1]	(0.15,0.18]	(0.14,0.15]	(0.06,0.14]	[0,0.06]
供水综合管理能力 $A_4$	(73,100]	(63,73]	(56,63]	(45,56]	[0,45]
城镇污水处理率 $A_5$	(0.49,1]	(0.38,0.49]	(0.33,0.38]	(0.08,0.33]	[0,0.08]
有效灌溉率 $A_6$	(0.65,1]	(0.58,0.65]	(0.48,0.58]	(0.19,0.48]	[0,0.19]

### 2.2.3 层次分析法确定指标权重

指标权重  $W_i$  通过运用层次分析法确定。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是美国运筹学家萨蒂 (Saaty T L) 在 20 世纪 70 年代提出的一种定性与定量方法相结合的多目标决策分析方法,其指标权重的分配见表 3。

表3 优化后指标权重分配结果

Table 3 Weight distribution results after optimization

准则层	指标层	作用	权重
暴露性 $B_1$	人口密度 $E_1$	+	0.133 5
	国内生产总值 $E_2$	+	0.066 8
	土地利用类型 $E_3$	+	0.133 5
敏感性 $B_2$	年平均降水量 $S_1$	-	0.087 4
	年平均气温 $S_2$	+	0.027 3
	干旱指数 $S_3$	+	0.028 3
	人均水资源占有量 $S_4$	-	0.221 7
	可利用降水资源 $S_5$	-	0.113 8
	水质等级 $S_6$	+	0.046 1
适应能力 $B_3$	万元 GDP 耗水量 $A_1$	+	0.008 8
	人均 GDP $A_2$	-	0.014 9
	普通中小学在校人口比例 $A_3$	-	0.025 0
	供水综合管理能力 $A_4$	-	0.048 4
	城镇污水处理率 $A_5$	-	0.014 1
	有效灌溉率 $A_6$	-	0.030 4

注:作用“+”表示指标层对准则层起正向驱动,如人口密度越大,则暴露性越显著;作用“-”则起负向作用,如年平均降水量越大,则敏感性越弱。

### 2.2.4 GIS 空间可视化

#### 2.2.4.1 数据空间化处理

对各评价指标进行数字化和图层编辑处理,生成 15 个主题数据层,将各个数据层转化为统一的数

据格式,同时位于统一的坐标系统中,以便具有相同地理位置的网格单元可以实现多重性的空间表达。采用统一的坐标系 Xian\_1980\_3\_Degree\_GK\_CM\_105E 进行投影,从而使各数据覆盖相同的空间区域。每个水资源脆弱性评价指标均为 Grid 栅格数据格式,栅格大小统一为 30 m×30 m。

#### 2.2.4.2 水资源脆弱度计算

在 ArcGIS 10.2 中,以 30 m×30 m 为单元,通过栅格计算器并结合水资源脆弱性指数 WVI 计算公式,得到 WVI 值<sup>[15]</sup>,即

$$WVI = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (1)$$

式中: $W_i$  为第  $i$  个评价指标的权重; $f_i$  为第  $i$  个评价指标的等级; $n$  为指标个数。WVI 是各指标综合作用于水资源的结果,它使水资源脆弱性以数值形式表示出来,WVI 值越大,说明水资源越脆弱,反之则脆弱性越轻微。

采用自然断点法把水资源脆弱性分为微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱 5 个等级,然后生成 WVI 的空间分布图。

## 3 结果与分析

### 3.1 贵阳市市域尺度水资源脆弱性

对贵阳市 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年水资源脆弱性进行评价,输出相应年份的水资源脆弱性分布图(图 1),并提取各脆弱度面积(表 4)。

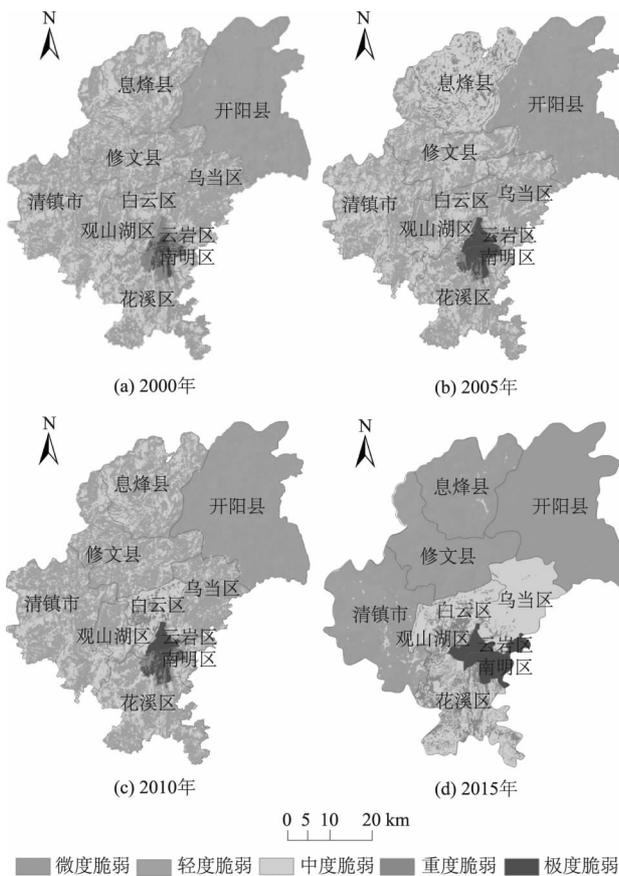


图1 贵阳市2000—2015年水资源脆弱性分布  
Fig.1 Vulnerability levels of water resource in Guiyang city from 2000 to 2015

表4 贵阳市2000—2015年不同等级脆弱性分布面积  
Table 4 Area of each vulnerability level from 2000 to 2015

脆弱性评价等级	2000年		2005年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
微度脆弱	1 866	23.16	1 237	15.34
轻度脆弱	3 857	47.86	3 598	44.64
中度脆弱	2 119	26.29	2 555	31.71
重度脆弱	138	1.80	487	6.04
极度脆弱	79	0.89	183	2.27

脆弱性评价等级	2010年		2015年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
微度脆弱	1 522	18.88	4 397	55.08
轻度脆弱	4 197	52.08	1 059	13.26
中度脆弱	2 020	25.07	1 597	20.01
重度脆弱	167	2.07	645	8.09
极度脆弱	153	1.90	284	3.56

从图1和表4可以看出不同年份各脆弱性分布状况,水资源脆弱性空间差异比较显著。从整体来看,水资源脆弱性增强和变弱并存,脆弱性空间分布格局表现出由“中南部高且周边低”到“北弱南强”之态势,具体体现为:

(1)2000—2015年,贵阳市水资源微度脆弱面积增加2 531 km<sup>2</sup>,除了南部出现减少以外,微度脆弱面

积分分布由东北部向北部和西部地区扩展,微度脆弱的比例增加了31.92%;轻度脆弱面积减少2 798 km<sup>2</sup>,主要表现在北部、西部、中部和东部都有明显减小状况,降低比例达到了34.60%;中度脆弱面积减少522 km<sup>2</sup>,除了南部和中东部有所增加以外,其余区域都出现面积减少情况,减小比例达到了6.28%;重度脆弱面积增加507 km<sup>2</sup>,主要表现在中、南部出现零星增加,增加比例达到6.29%;极度脆弱面积增加205 km<sup>2</sup>,表现在东南部部分由原来的轻度和中度脆弱转变为极度脆弱,增长到极度脆弱的面积达到2.67%。

(2)2000—2005年,贵阳市水资源微度脆弱面积减少630 km<sup>2</sup>,其中南部区域表现最为明显,减少面积占7.82%;轻度脆弱减少260 km<sup>2</sup>,其中除了南部区域部分由微度脆弱转变为轻度脆弱以外,其余区域都出现一定程度的减少,减少比例达到3.22%,表现最为明显的是北部区域;中度脆弱面积增加437 km<sup>2</sup>,各区域都有零星分布的增加,增加比例达到5.42%,其中表现最突出的是北部区域;重度脆弱面积增加349 km<sup>2</sup>,增加比例达到4.33%,其中表现最明显是出现在北部区域;极度脆弱面积增加104 km<sup>2</sup>,增加面积占1.38%,表现在中南部部分重度脆弱转变为极度脆弱。

(3)2005—2010年,贵阳市水资源微度脆弱面积增加285 km<sup>2</sup>,增加比例达到3.54%,其中主要表现在东北部以及西南部有零星分布;轻度脆弱面积增加599 km<sup>2</sup>,增加面积达到7.44%,其中各区域都有所变化,表现最突出的是北部部分由中度和重度脆弱转变为轻度脆弱;中度脆弱面积减少535 km<sup>2</sup>,减少比例达到6.64%,其中表现最为突出的是北部区域部分由中度脆弱转变为轻度脆弱;重度脆弱面积减少320 km<sup>2</sup>,除了中南部有零星增加外,北部区域有明显减少,减少比例达到3.97%;极度脆弱面积减少30 km<sup>2</sup>,占总面积比例为0.37%,主要表现在中南部的极度脆弱有部分零星转变为了重度脆弱。

(4)2010—2015年,贵阳市水资源微度脆弱度面积增加2 875 km<sup>2</sup>,增加比例达到36.20%,主要表现在由东北部向北部和西部区域扩展,其中东北部分布面积最大;轻度脆弱面积减少3 138 km<sup>2</sup>,减少面积达到38.82%,各区域都有明显变化;中度脆弱面积减少423 km<sup>2</sup>,其中除了中东部有明显增加以外,北部和西部都表现出明显减少的状况,减少比例占总面积的5.06%;重度脆弱面积增加478 km<sup>2</sup>,主要表现在中南部有零星的增加状况,增加比例超过了6.00%;极度脆弱面积增加131 km<sup>2</sup>,增加比例达



府加强了对水资源的重视与保护。白云区 and 乌当区由大面积的轻度脆弱转变为中度脆弱,2015年中度脆弱面积比例分别增加到76.37%和96.24%,由于白云区 and 乌当区是贵阳市开发相对比较早的区域,该变化由建设面积增大造成。观山湖区和花溪区也向脆弱性恶化方向发展,其中大面积转化为中度和重度脆弱,两区中度脆弱和重度脆弱转变面积比例合计各自增加了69.10%和61.79%,这主要源于当地政府近来正大面积在该区域增加建设用地,其中花溪区兴建了大学城,随之带动了大量人口向该区域集中,同时带动了该区域经济产业链的发展。云岩区、南明区大面积转化为极度脆弱,2015年面积比例达到了99.82%和99.90%。因为这两区是贵阳市的老城区,是贵阳市经济发展的核心区域,面积相对较小且聚集了大量的人口,所以两区建设面积不断增大。随着两区经济和人口的剧增,需水量不断增加,从而导致该区域成为贵阳市水资源最为脆弱的区域。

(2)2000—2005年变化情况。清镇市、修文县、观山湖区、白云区 and 乌当区部分轻度脆弱转化为中度脆弱,导致中度脆弱面积比例分别增加到了44.70%,43.13%,34.85%,37.29%,28.43%,这主要是因为随着经济的发展,当地政府加大了对该区域的开发,建设用地逐渐增大所产生的影响。花溪区由微度脆弱转化为轻度脆弱,导致轻度脆弱面积比例达到了60.35%,这源于花溪区经济的发展;开阳县变化状况比较小,以微度脆弱为主,当地政府一直重视对该区域水资源的保护;息烽县大部分轻度脆弱区转化成了重度脆弱区,重度脆弱面积比例达到了30.40%,这是因为息烽县矿产资源比较丰富,带动了相关工业在该地的兴建,当时息烽县追求工业的发展,忽略了对水资源的重视;老城区云岩区与南明区一直是贵阳市发展的中心,其极度脆弱面积不断增大,比例分别达到了61.38%和42.05%。

(3)2005—2010年变化情况。清镇市、修文县、乌当区、观山湖区、花溪区和开阳县变化比较小,主要由于当地政府在抓经济发展的同时,也注重对水资源的保护。息烽县由中度脆弱和重度脆弱向轻度脆弱转变,轻度脆弱比例达到了59.64%,这源于当地政府在追求“工业强县”的同时,意识到了水资源的重要性,加大了对水资源的保护与整治;白云区变化比较大,大部分轻度脆弱区转变为了中度和重度脆弱区,导致中度和重度面积比例合计达到了93.03%,这主要是因为白云区铝及铝加工工业园区的发展带动相关产业链的发展,从而对水资源产生影响;老城区云岩区与南明区依然是贵阳市水资源脆弱性最高的区域,

虽然当地政府也高度重视水资源状况,但是变化环境对水资源的影响依然很大,尤其是经济发展与人口增长对水资源造成了较大的压力。

(4)2010—2015年变化情况。清镇市、修文县、息烽县和开阳县水资源脆弱状况得到较大的缓解,其中微度和轻度脆弱面积比例合计分别达到了96.85%,99.99%,98.98%,99.99%,这主要源自该区域水资源相对比较丰富,人均水资源占有量比较大,同时当地政府也承接了供应贵阳市中心城区水资源利用的重任,因此贵阳市加强了对这几个区域水资源的开发与利用,并在利用过程中坚持开发与保护并重的原则。云岩区、南明区、白云区、乌当区、观山湖区和花溪区水资源脆弱性恶化较严重,其中中度和极度脆弱面积比例合计分别达到了99.90%,99.94%,23.25%,3.70%,43.91%,45.86%。虽然当地政府也加强了对水资源的保护与管理,但是由于这几个区域近来建设用地的大量剧增,改变了局地小气候,从而影响了当地降水以及气温状况,其中最主要的原因是经济的发展以及人口的剧增对水资源需求量的增加,从而导致该区域水资源脆弱性恶化加剧。

## 4 结 论

(1)在市域尺度上,贵阳市水资源脆弱性空间差异比较显著,2005—2015年间的4个统计年份都有不同程度的表现,但总体而言,水资源脆弱性增强和变弱并存,脆弱性空间分布格局表现出由“中南部高且周边低”到“北弱南强”之态势。

(2)在县域尺度上,总趋势表现出云岩区、南明区、白云区、乌当区、观山湖区和花溪区6个区水资源脆弱性增强明显,其中增强最为显著的是观山湖区、花溪区和乌当区,而清镇市、修文县、息烽县和开阳县4个县(市)则以脆弱性减弱为主。

### 参考文献:

- [1] 贺丽媛,夏 军,张利平.水资源需求预测的研究现状及发展趋势[J].长江科学院院报,2007,24(1):61-64.
- [2] ALBINET M, MARGAT J. Cartographic de la Vulnérabilité a la Pollution des Nappes Deau Souterraine [J].Bull. BRGM 2ème Série,1970,3(4):13-22.
- [3] RAHMAN A. A GIS Based DRASTIC Model for Assessing Groundwater Vulnerability in Shallow Aquifer in Aligarh, India[J]. Applied Geography,2008,28(1):32-53.