

刘丽颖. 气候变化下贵州省水资源安全空间评价及敏感性分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 714-723.
DOI:10.11932/karst2020y35

气候变化下贵州省水资源安全空间评价 及敏感性分析

刘丽颖^{1,2}

(1. 社会经济应用统计重庆市重点实验室, 重庆 400067; 2. 重庆工商大学数学与统计学院, 重庆 400067)

摘要:探讨气候变化下水资源安全的时空演变规律,对喀斯特地区水资源安全的保障有着重要意义。文章采用GA-BP神经网络模型,研究了贵州省水资源安全的空间分异特征,并分析其对气候要素变化的敏感性。结果表明:(1)研究区水资源安全有较强的空间异质性。2001—2015年,黔南的水资源安全一直是全省最差的地区,贵阳的水资源安全改善最为明显,变化幅度最小的是安顺;(2)当变动率相同时,年平均降雨量的变动对水资源安全的影响最大,其增加10%时水资源安全指数上升0.95%,单位地表水资源量变动的影响其次,单位地下水资源量变动的影响最小;(3)对年平均降雨量变化最为敏感的地区是遵义、毕节、六盘水和黔西南。研究结果可为贵州省水资源的调控和开发提供参考。

关键词:贵州省;水资源安全;空间评价;气候变化;敏感性

中图分类号:TV213.4;P467 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)05-0714-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

全球气候变化和水循环的改变,降水不均和持续干旱等极端天气事件频发,给水环境带来很大的影响和压力^[1-2]。研究表明,全球环境变化对不同区域的影响不同^[3],喀斯特地区生态系统极为脆弱,自身的抗干扰能力和恢复能力较弱,因而对气候变化更为敏感^[4]。极端气候的出现更是给脆弱的喀斯特地区造成较大压力。研究气候变化下喀斯特地区水资源安全的空间分异特征,以及水资源安全对气候变化的敏感性,是确保研究区水资源可持续利用,保障区域经济和水资源协调发展的基础。

目前,喀斯特地区水资源安全的相关研究较多,研究内容有基于水环境、社会和经济等剖析喀斯特水资源安全的内涵和本质^[5],有基于空间和区域视角

的喀斯特水资源安全的定量评估^[6]。评估方法有涵盖微观过程的定点观测^[7]、野外和室内试验^[8]、数值模拟^[9]等,相关研究从不同尺度水文过程^[10]、水资源脆弱性^[11]、水资源承载力^[12]等角度度量水资源安全。不少学者以典型喀斯特地区——贵州省为例,展开相关研究。研究显示,近年来,贵州的水资源安全状态有所好转^[13-14],但存在工程性缺水、水资源浪费、制度障碍等水资源安全问题^[15],其中人类活动对水资源安全影响显著,经济发展和人口密度是制约水资源安全的主要因素^[16]。

气候变化与人类活动对岩溶系统的影响逐渐成为水资源领域的研究热点^[17]。研究表明,气候变化以及过多的水消耗,可能会对岩溶水资源未来的可用性产生重大影响^[18-19]。岩溶含水层中的水量和质

基金项目:重庆市科学技术委员会项目(cstc2019jcyj-msxm0760);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800825);重庆工商大学重点平台开放项目(KFJJ2018068);重庆工商大学科研启动项目(1956008)

作者简介:刘丽颖(1982—),女,讲师,博士,主要从事环境统计和水资源可持续发展研究。E-mail:lly@ctbu.edu.cn。

收稿日期:2019-11-14

量可能取决于年代际尺度上补给或减少,因此,水资源管理应考虑气候的周期性^[20]。有研究发现地下水位与地下水开采量负相关,与降雨量正相关,这表明岩溶系统的地表水与地下水之间存在密切的水力联系和相互作用^[21]。Dimkić认为气候变化和人类用水需求综合作用下造成水资源短缺,防止岩溶泉过度开采是防治水资源短缺的措施^[22]。气候模拟预测,未来几十年世界上许多喀斯特地区的气温将有所升高,而降水量将减少,尽管未来形势不容乐观,但很少有专门量化气候变化对岩溶水资源影响的研究^[23]。气候的变化将直接或间接地影响地下水的质^[24]量,降水、气温、气压的改变与喀斯特地貌发育有着密切关系^[25]。近年来,中国西南喀斯特地区降水的年际与年内变化增大,变差系数显著增加,进而增加了极端气候事件的发生概率。虽然贵州喀斯特地区降水量和水资源总量的变化、降水季节变异性等都会显著影响其水资源安全等级,但水利工程设施的完善,水资源利用技术的提高和管理制度的有效监管等措施表明,人类行为对岩溶地区水资源安全有着调节和补充作用^[26]。

总体上,已有研究中,基于时间序列的水资源时空格局的研究较少,加之西南地区历史资料缺乏,时空数据分析理论尚不成熟,关于喀斯特地区水资源安全时空分布特征的研究尚不多见。本文基于贵州省2001–2015年的统计数据,构建喀斯特地区水资源安全评价指标体系,采用GA-BP神经网络模型,对贵州省水资源安全空间分异进行评价,并分析其对主要气候要素变化的敏感性。

1 研究区概况

贵州省位于云贵高原东部,平均海拔1 100 m。地势西高东低,东西部的海拔高差超过2 500 m。贵州地质背景独特,景观异质性突出,行成了独特的喀斯特生态系统。全省雨量充沛,年平均降水量1 100~1 300 mm,雨季主要集中在4–9月,但水资源时空分布不均匀,降水的变异系数较大,加之独特的喀斯特地貌,地表蓄水能力弱,极易引起季节性干旱。2009年–2011年间,贵州遭遇了百年不遇的旱灾,2013年大旱再次来袭。贵州省河流属长江水系和珠江水系,境内河网密集。充沛的降水和气温的综合作用加剧了岩溶侵蚀,水土流失十分严重。裂隙、漏斗、暗河等地下通道广为分布,具有独特的地表水和地下水二元水文结构。

2 数据来源及研究方法

2.1 喀斯特地区水资源安全评价指标体系构建

喀斯特地区是一个特殊的地理单元,在自然因素和人为因素影响下有着独特的发展演变行为。喀斯特水资源系统具有其独特的特点:①系统的脆弱性。喀斯特地区生态环境对外界敏感性强,在外界的胁迫下不易恢复;②系统的不稳定性。喀斯特地区特殊的地理和地质环境以及气候特点决定其自然灾害和极端气候事件发生频率和强度较其他地区整体偏高;③水利工程驱动影响显著,喀斯特地区一直饱受工程性缺水问题困扰,水利工程的调水、蓄水能力对区域水资源安全影响较大。

喀斯特地区水资源安全评价指标体系的建立要突出水资源保护目标(水资源质量与数量的度量)、区域特征(工程性缺水的度量)、水资源脆弱性(脆弱性的度量)以及提供服务的能力(承载力的度量)。因此,本文将水资源安全系统分为五个子系统:水质子系统、水量子系统、工程性缺水子系统、水资源脆弱性子系统和水资源承载力子系统。指标的选取从水资源质量和数量、区域属性、供应、生态效益和社会经济效益的保证五个方面加以分析,其结构如图1。其中岩溶灾害发生次数,根据《贵州省国土资源公报》统计,包含滑坡、坍塌、泥石流,以及地面塌陷和地裂缝的次数。

2.2 喀斯特地区水资源安全等级划分及指标阈值确定

参考相关文献有关水资源安全等级标准的研究成果^[27–35],结合贵州省水资源、经济社会和生态系统的实际,并依据专家意见对水资源安全分级标准做适当调整,将水资源安全等级划分为5个等级:极不安全、不安全、临界安全、较安全、安全,分别用表示Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级,并确定各指标分级标准(表1)。

2.3 数据来源

研究数据主要来自2001–2015年贵州省及其各州市的统计年鉴、水资源公报、环境状况公报、国土资源公报、国民经济和社会发展公报等。其中部分缺失数据采用线性插值法获得。由于数据可获得性的限制,个别州市的指标进行了删减调整。根据2001–2015年间《贵州省水资源公报》所划分的丰、

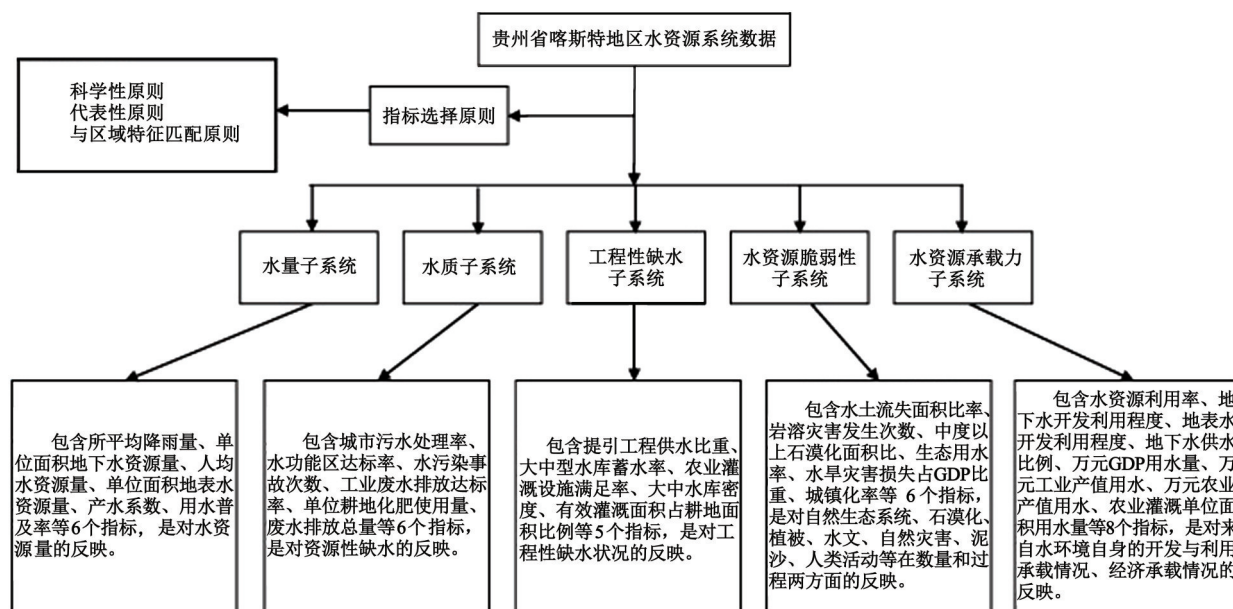


图1 喀斯特地区水资源安全评价指标框架

Fig. 1 Water resource security evaluation index framework in Karst areas

平、枯水年分类,选取2001–2002为平水年1,2003–2006偏枯水年,2007–2008平水年2,2009–2011枯水年和2014–2015为平水年3。

2.4 喀斯特地区水资源安全评价模型构建

遗传算法(GA, Genetic Algorithm)能够自动获取和优化搜索空间,调整搜索方向,克服传统优化算法容易陷入局部最优解的弊端,是一种全局优化搜索算法。它与误差反向传播(BP, back propagation)神经网络相结合已广泛应用于各个领域,取得了良好效果,并成为重要的智能算法之一^[36–37]。

2.4.1 BP人工神经网络模型的构建及实现

贵州省水资源安全评价选用3层BP神经网络,即1个输入层,1个隐含层,1个输出层。其中输入神经元个数为31个,输出神经元个数为1个。隐含层神经元数根据经验公式 $n_1 = \sqrt{n + m} + \alpha$ 和 $n_1 = \log_2 n$ (n, m 分别为输入层与输出层神经元个数, α 为1~10之间的常数)确定。通过构造不同隐含层节点数网络结构对比得隐含层为12,建立31个输入节点、12个中间节点和1个输出节点的31–12–1结构的BP网络模型。先对样本进行归一化处理: $x_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$ 以每年的数据为1个样本,样本数为 $i=1, 2, \dots, 15$, 指标数为 $j=1, 2, \dots, 31$ 。

BP神经网络选用logistic激活函数,多目标输出。

设置BP网络学习率0.6,动量0.1,最大迭代次数10 000,迭代到收敛。选用模型测试集的均方误差(MSE)评价模型性能,MSE越小模型性能越好。本次神经网络31个指标划分5个等级,每个等级随机取10个样本,总共50个(10×5)个样本,取80%的数据训练BP神经网络,其余20%数据作为测试集。设定用于训练的各级样本的目标输出分别为:Ⅰ极不安全0~0.8,Ⅱ级不安全0.8~1.6,Ⅲ级临界安全1.6~2.4,Ⅳ级比较安全2.4~3.2,Ⅴ级安全3.2~4。

2.4.2 模型的改进及实现

利用遗传算法改进和优化BP神经网络训练的权值和阈值。设置种群大小20,变异概率0.1,迭代10 000次,得到的网络传递给BP神经网络,进行进一步训练。

```
ga = GA(ds.evaluateModuleMSE, net_ga, minimize=True, populationSize=20,
topProportion=0.2, elitism=False, eliteProportion=0.25, mutationProb=0.1,
mutationStdDev=0.2, tournament=False, tournamentSize=2)
```

将训练样本输入已构建好的GA–BP网络进行反复训练,当误差迭代10 000次后,误差0.002 7,满足误差要求。水资源安全GA–BP网络模型及训练结果可靠,可以投入使用。

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, Guizhou

目标层 A	准则层 B	指标层 C	级 别				
			极不安全Ⅰ级	不安全Ⅱ级	临界安全Ⅲ级	较安全Ⅳ级	安全Ⅴ级
喀斯特地区水资源安全 A	水质 B ₁	城市污水处理率 C ₁	<45	45~60	60~70	70~80	>80
		水功能区达标率 C ₂	<50	50~60	60~70	70~80	>80
		水污染事故次数 C ₃	>15	15~10	10~6	6~2	<2
		工业废水排放达标率 C ₄	<60	60~70	70~80	80~90	>90
		单位耕地化肥使用量 C ₅	>500	400~500	300~400	200~300	<200
		废水排放总量 C ₆	>10	7~10	4~7	1~4	<1
	水量 B ₂	年平均降雨量 C ₇	<300	300~800	800~1 200	1 200~2 000	>2 000
		单位面积地下水资源量 C ₈	<5	5~10	10~20	20~50	>50
		人均水资源量 C ₉	<500	500~1 500	1 500~2 500	2 500~3 000	>3 000
		单位面积地表水资源量 C ₁₀	<50	50~100	100~150	150~200	>200
		产水系数 C ₁₁	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
		用水普及率 C ₁₂	<60	60~70	70~80	80~90	>90
	工程性缺水 B ₃	提、引工程供水比重 C ₁₃	<60	60~70	70~80	80~90	>90
		大中型水库蓄水率 C ₁₄	<50	50~65	65~70	70~85	>85
		农田灌溉设施满足率 C ₁₅	<20	20~40	40~60	60~80	>80
		大中水库密度 C ₁₆	<2	2~4	4~6	6~8	>8
		有效灌溉面积占耕地面积比例 C ₁₇	<30	30~40	40~50	50~60	>60
	水资源脆弱性 B ₄	水土流失面积比率 C ₁₈	>50	30~50	20~30	10~20	<10
		岩溶灾害发生次数 C ₁₉	>800	800~600	600~400	400~200	<200
		中度以上石漠化面积比 C ₂₀	>40	40~30	30~20	20~10	<10
		生态用水率 C ₂₁	<1	1~2	2~3	3~5	>5
		水旱灾害损失占 GDP 比重 C ₂₂	>5.5	5.5~4	4~2.5	2.5~1	<1
		城镇化率 C ₂₃	<25	25~35	35~50	50~60	>60
	水资源承载力 B ₅	水资源利用率 C ₂₄	>50	50~30	30~20	20~10	<10
		地下水开发利用程度 C ₂₅	>10	10~7.50	7.5~5	5~2.5	<2.5
		地表水开发利用程度 C ₂₆	>50	50~35	35~20	20~10	<10
		地下水供水比例 C ₂₇	>20	20~15	15~10	10~5	<5
		万元 GDP 用水量 C ₂₈	>400	400~300	300~200	200~100	<100
		万元工业产值用水 C ₂₉	>320	320~220	220~120	120~20	<20
		万元农业产值用水 C ₃₀	>2 000	2 000~1 500	1 500~1 000	1 000~500	<500
		农业灌溉单位面积用水量 C ₃₁	>1 300	1 300~900	900~600	600~300	<300

表 2 贵州省水资源安全评价丰、平、枯代表年份划分

Table 2 Division of or high, normal, and low flow years in water resources security evaluation of Guizhou Province

年份	时段平均降雨量/mm	水文径流
2001—2002	1 175.25	平水年 1
2003—2006	1 077.83	偏枯水年
2007—2008	1 213.25	平水年 2
2009—2011	958.80	枯水年
2014—2015	1 320.15	平水年 3

3 结 果

3.1 水资源安全空间分异评价结果

将贵州省各州市的水资源安全评价指标各年份区间的平均数据进行归一化处理后,输入训练好的 GA-BP 网络进行检验,网络输出分级评价结果见表 3。

用 ArcGIS 软件作为实现工具,将贵州省各州市水资源安全属性数据输入,得到基于 GA-BP 模型的水资源安全空间分布图(图 2)。

表3 贵州省各州市水资源安全空间分异评价结果
Table 3 Spatial differentiation evaluation results of water re-
source security in each city of Guizhou Province

	平水年1	偏枯水年	平水年2	枯水年	平水年3
贵阳	I	II	III	IV	IV
遵义	II	III	III	III	III
安顺	III	III	III	III	III
黔南	I	I	II	II	III
黔东南	II	II	III	III	III
铜仁	II	II	III	III	III
毕节	II	II	II	III	IV
六盘水	III	III	III	IV	IV
黔西南	I	II	III	II	III

评价结果表明(表3,图2),在研究所划分的五个时段内,贵州省各州市的水资源安全覆盖了 I、II、III 和IV四个等级,没有 V 等级,整体呈上升趋势。

3.2 喀斯特地区水资源安全对气候变化的敏感性分析结果

从单一气候要素的模拟入手,进一步分析水资

源安全对主要气候要素变化的敏感程度,以期能够深入理解气候变化对水资源安全的影响。

假设年平均降雨量、单位面积地表水资源量、单位面积地下水资源量等水文要素相对独立,同时不考虑其他因素的改变,将年平均降雨量、单位面积地表水资源量、单位面积地下水资源量分别改变±10%、±20%、±30%、±50%。利用敏感度系数,即水资源安全指标变化的百分率与不确定因素(年平均降雨量、单位面积地表水资源量、单位面积地下水资源量)变化的百分率之比,计算公式为 $E = \Delta A / \Delta F$, ΔA 为水资源安全指标变化的百分率, ΔF 为不确定因素变化的百分率,计算不同气候变化情景下水资源安全综合指数变化,分析水资源安全对气候要素变化的响应特征,并进一步探索水资源安全对这3个要素的敏感性。各单因素负向变化,表征水资源紧缺,意味着干旱程度;各单因素正向变化,表征水资源富足或者较多,意味着洪涝程度。趋势率以最小二乘法线性拟合的斜率来表示,正值表示增加趋势,正值越大表示增速愈快,否则相反。

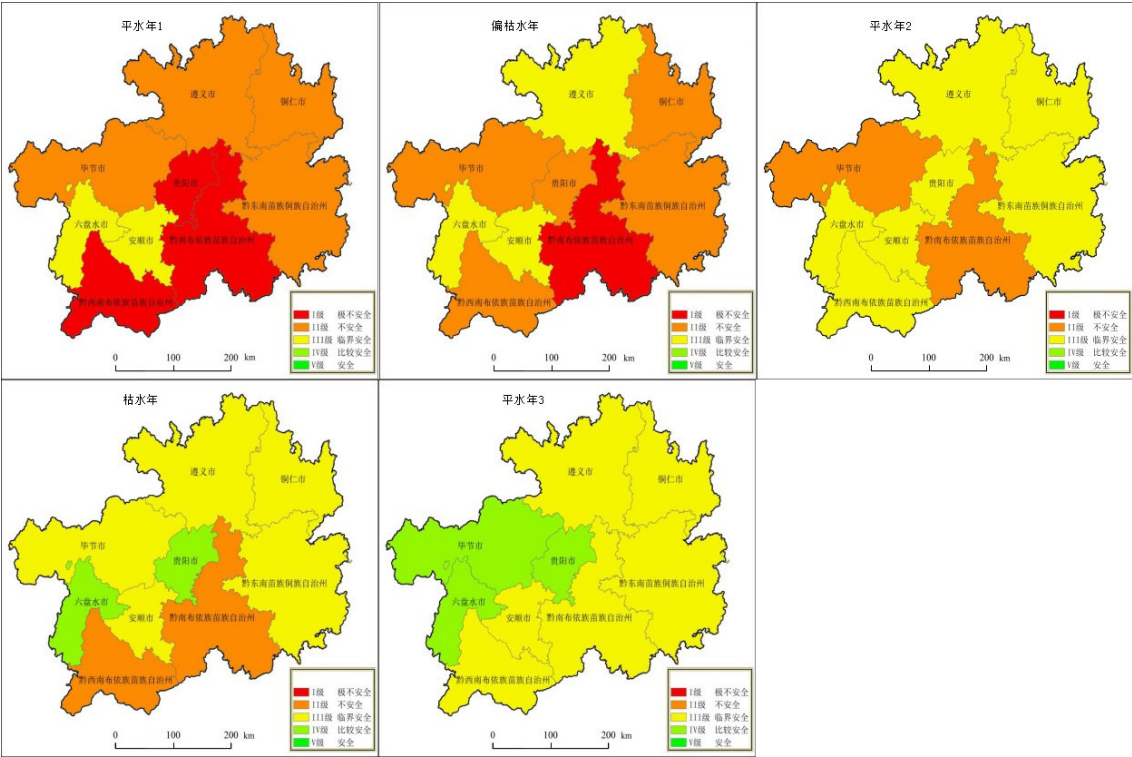


图2 贵州省水资源安全等级空间分布图

Fig. 2 Grade of spatial distribution of water resource security in Guizhou Province

结合表4和图3可知,当变动率(年平均降雨量、单位地表水资源量、单位地下水资源量)相同时,年

平均降雨量的变化对水资源安全的影响最大。当年平均降雨量增加 10% 时,水资源安全指数上升

表 4 贵州省水资源安全指标单因素敏感性分析结果

Table 4 Single factor sensitivity analysis results of water resource security indicators in Guizhou Province

变化/%	年平均降雨量 C_7 /%	单位面积地下水资源量 C_8 /%	单位面积地表水资源量 C_{10} /%
-50	-4.89	-2.71	-4.37
-40	-3.90	-2.16	-3.50
-30	-2.91	-1.61	-2.63
-20	-1.93	-1.07	-1.76
-10	-0.96	-0.54	-0.88
0	0	0	0
10	0.95	0.54	0.88
20	1.88	1.07	1.77
30	2.78	1.61	2.67
40	3.66	2.15	3.57
50	4.51	2.68	4.47

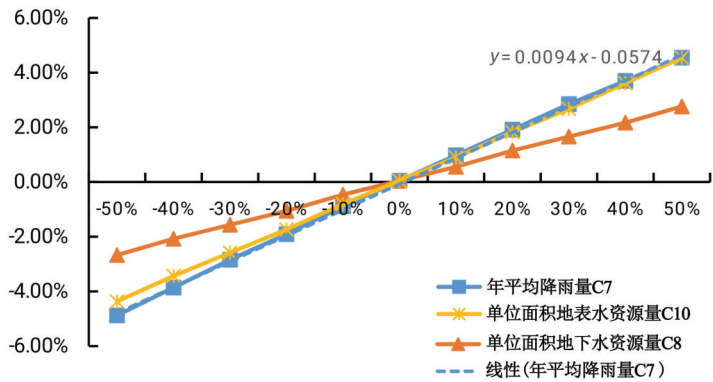


图 3 贵州省水资源安全指标单因素敏感性分析图

Fig. 3 Single factor sensitivity analysis chart of water resource security indicators in Guizhou Province

0.95%。单位地表水资源量变动的影响其次,单位地下水资源量变动的影响最小。

为了分析气候变化下各州市水资源安全变化情况和抗旱能力,对贵州省各州市气候变化下的水资源安全进行敏感性分析,结果如图 4。

4 分析与讨论

4.1 水资源安全空间分异和演变规律特征分析

(1)从年际变化来看,各州市的水资源安全有着不同程度的改善或恶化,有“改善型”、“稳定型”和“波动型”。其中,贵阳、遵义、黔南、铜仁、毕节、六盘水和黔东南的水资源安全呈现不同程度的改善。

安顺的水资源安全状态比较稳定,虽然一直处于临界安全状态,但是从综合评价指数来看,波动中略有恶化。安顺地处乌江流域和北盘江流域的分水岭地带、河源区降水相对较少,但人口密度大,工农业较发达,导致水资源安全面临一定的压力。

黔西南的水资源安全波动较大,从Ⅰ等级改善至Ⅲ等级,在 2009–2011 的枯水年份时段降为Ⅱ等级,随后略有好转为Ⅲ等级。从历史统计来看,2011 年黔西南是西南大旱中最为严重的州市之一,全年降雨量仅为 725.1 mm,比多年平均降雨量减少 43.1%。黔西南境内以岩溶地貌为主,溪流众多,有的落差大,具有强烈的侵蚀和搬运能力,水土流失严重。降水量的时空分布不均,导致存在生产生活用水的季节性缺水、区域性缺水和旱涝并存问题。在干旱年份,容易导致局部地区水资源供给不足,尤其是分散的农村地区。因此,区域需要通过发达的水利设施建设,实现水资源的科学调度,提高应对极端气候的能力。

(2)从空间分布来看,同一时期不同州市的水资源安全有明显的差异。2001–2015 年,黔南的水资源安全是全省最差的地区。黔南石漠化严重,自然灾害频繁,水环境的自我恢复和抵抗外界干扰能力较

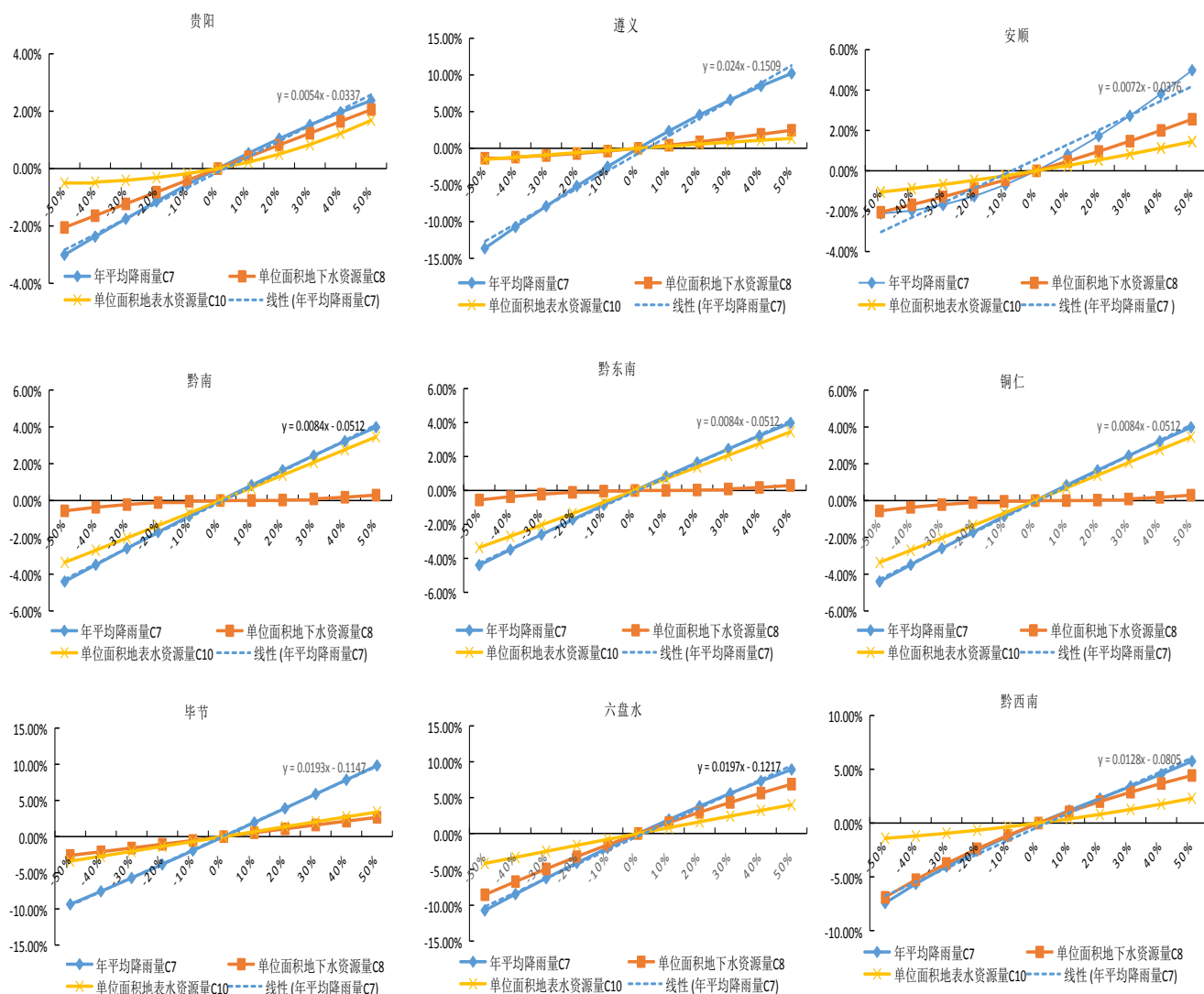


图4 贵州省各州市水资源安全指标单因素敏感性分析图

Fig. 4 Single factor sensitivity analysis chart of water resource security index in each city of Guizhou Province

弱,水利设施滞后,城市化水平较为落后,经济发展与人类活动对水环境影响较为严重,存在水资源安全隐患。

贵阳、毕节和六盘水在2015年末水资源安全等级为比较安全。贵阳经济相对发达,生态保护意识较强,水资源开发规模小,利用效率高,城市污水处理与废水回收等基础设施相对完善。然而,从水资源利用结构特点可知,贵阳水资源的主要需求压力来源于工农业发展,应该加强产业调整力度,合理安排产业布局。

毕节和六盘水在实施全国石漠化综合治理试点工程后,加强石漠化治理,大力实施退耕还林,封山育林与自然保护区保护,切实提高森林覆盖率,同时注重耕地和基本农田保护,加大农田改良和修复力

度,并开展生态旅游与特色产业指导,因地制宜,找到了一条适合石漠化区域的生态修复技术路径。这些举措使得水资源安全建设卓有成效。

(3)从变化幅度来看,贵阳>毕节>黔东南>黔南>黔西南>铜仁>六盘水>遵义>安顺。其中贵阳的水资源安全改善最为明显,从2001–2002年的极不安全,发展为2015年末的较安全状态。贵阳市人口密集,城镇率逐年提高,人居环境较好,水利设施不断完善,城市污水处理和垃圾处理条件较好,经济发展迅速,产业结构不断优化,水资源的开发利用逐渐趋于合理,水环境系统有一定的自我恢复和抗干扰能力。变化幅度最小的安顺虽然一直处于临界安全状态,但是却呈现略微的下降趋势。

(4)从变化的趋势来看,除安顺外,各州市水资

源安全整体有所提高。除贵阳、遵义和铜仁外,其他州市在偏枯水年和枯水年的水资源安全有不同程度的下降。

水资源安全评价通常是以经济、社会 and 环境的平衡或优化为基础,干旱、自然灾害和人类活动都将影响到水资源的安全。因此,水资源量的变化会影响水资源安全,但其作用大小与作用机制需要进一

步分析。考虑到2009–2011年,贵州省遭遇了较为严重的旱灾,因此着重以这一枯水时段为代表进行分析,各州市2009–2011年的综合评价结果如图5。黔南和黔西南的安全性最低,处于不安全等级。与平水年2时段相比,黔西南的水资源安全状态明显下降。分析认为,这与不同地区对水资源量的变化的敏感性存在差异。

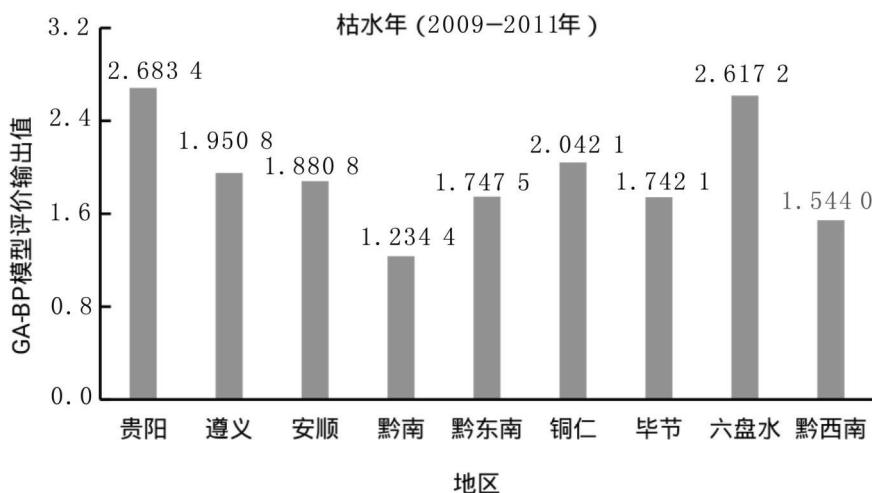


图5 枯水年(2009–2011年)GA-BP模型评价结果

Fig. 5 Evaluation results of GA-BP model in dry year (2009–2011)

4.2 喀斯特地区水资源安全对气候变化的敏感性分析

由图4可见,对年平均降雨量最为敏感的地区是遵义、毕节、六盘水和黔西南。这几个州市主要分布在黔西北、黔西和黔西南地区,在降雨量明显减少时,水资源安全状态下降明显,即这部分区域对干旱灾害发生更为敏感。池再香^[30]通过对贵州省东西部区域干湿状况的差异分析发现,近五十年贵州西部比东部区域的积温干燥度明显偏大、气候干湿指数明显偏低。在这一点上,本研究结果与此结论相吻合。

这种敏感性的差异是多种影响因素共同作用的结果。分析认为,一方面与地形地貌、植被等因素有关^[38]。西部区域植被覆盖较低,有典型的喀斯特地貌,削弱了生态系统抵御干旱的能力。西部区域海拔落差大,山高水低,所在的北盘江、乌江的河源区地下伏流溶洞密布,水资源时空分布不均,供水可靠性差,工程性缺水问题十分突出;另一方面与人类活动有关。在降水变化影响相近情况下,区域经济格局、水资源利用技术,水利工程的补充和调节作用

等,都能够影响区域水资源利用与发展,能够缓解降水等气候因素变化带来的影响。东部的铜仁和黔东南区域大力开展种草植树,改善生态环境,植被覆盖度及植被净初级生产力总体较高,亦因加强水资源保护、严格水资源管理等措施,使该区域能够缓解干旱等极端气候变化带来的影响。

5 结论与建议

本文采用GA-BP神经网络模型对贵州省水资源安全空间分异进行评价,其评价结果比较直观地反映了该区域水资源安全空间分异特征,主要结论如下:

(1) GA-BP模型拟合精度较好,评价结果符合研究区实际,能够基本反应贵州省喀斯特地区水资源安全的实际状况,表明GA-BP模型是水资源安全评价的有效方法之一;

(2) 从空间分布来看,同一时期不同州市的水资源安全利用有明显差异;2001–2015年,黔南的水资源安全状态最差;贵阳的水资源安全改善最明显,变化幅度最小的是安顺;对年平均降雨量变化最敏感

的地区是遵义、毕节、六盘水和黔西南；

(3) 贵州省不同州市的水资源承载力、脆弱性和水利工程状况存在明显差异。区域性的问题错综复杂,应该因地制宜,查找弱势,分类指导。就贵阳来说,水资源安全受经济增长、人口变化等要素的影响较大,需要平衡经济发展和水环境保护的关系,从而降低经济增长带来的水环境压力;以黔西南为代表的黔南和黔东南经济发展水平相对落后,但近些年经济增速快,存在资源、环境、经济和社会等不同类型问题的重叠。这些区域需要加强水资源调控和保护,降低生态脆弱性,提高抵御水灾害的能力。毕节和六盘水要加强环境保护,水源涵养林的建设力度,合理开发水资源;遵义、铜仁和安顺水利设施建设相对滞后,抵御自然灾害冲击能力不够,对人类活动影响的抵抗不足,可通过各类水利工程驱动,调控水资源的时间和空间分布,满足工农业生产的需求,解除工程性缺水的束缚,减轻洪涝灾害影响。

由于喀斯特地区的降雨存在较强的季节差异和空间异质性,本研究受数据资料的限制,缺乏对贵州省喀斯特地区年内变化演变规律的研究,此外,指标及其阈值与时间和空间尺度匹配的相关分析,在后续研究中有待深入。

参考文献

- [1] 张利平,陈小凤,赵志鹏,等.气候变化对水文水资源影响的研究进展[J].地理科学进展,2008,27(3):60-67.
- [2] Teegavarapu R S V. Modeling climate change uncertainties in water resources management models[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(10): 1261-1265.
- [3] 吕新苗,吴绍洪,杨勤业.全球环境变化对我国区域发展的可能影响评述[J].地理科学进展,2003,22(3):260-269.
- [4] 侯文娟,高江波,彭韬,等.结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J].地理科学进展,2016,35(3):58-68.
- [5] 夏军,石卫.变化环境下中国水安全问题研究与展望[J].水利学报,2016,47(3):292-301.
- [6] 贺向辉,梁虹,戴洪刚,等.喀斯特地区枯水资源时空演变的探讨:以贵阳地区为例[J].贵州师范大学学报(自然版),2007,25(3):29-34.
- [7] Lasha Asanidze, Guranda Avkopashvili, Kukuri Tsikarishvili, et al. Geoecological Monitoring of Karst Water in Georgia, Caucasus (Case Study of Racha Limestone Massif) [J]. Open Journal of Geology, 2017, 7(4): 822-829.
- [8] Wang W, Zhang G H, Liu C H. A New Attempt to Evaluate the Renewable Capacity of A Typical Karst, Groundwater System by Using 13C and 14C A Case Study of Karst, Groundwater in Pingyi—Feixian County, Shandong Province [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2018, 92(1): 424-425.
- [9] Wenping M, Qiang W, Yuan X, et al. Using numerical simulation for the prediction of mine dewatering from a karst water system underlying the coal seam in the Yuxian Basin, Northern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(5): 215.
- [10] Xu Y, Wang S, Bai X, et al. Runoff response to climate change and human activities in a typical karst watershed, SW China [J]. PLoS ONE, 2018, 13 (3) : e0193073. doi: 10.1371/journal.pone.0193073.
- [11] Xia J, Ning L, Wang Q, et al. Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of West China under a scenario of climate change [J]. Climatic Change, 2017, 144 (3): 549-563.
- [12] Dai D, Sun M, Xu X, et al. Assessment of the water resource carrying capacity based on the ecological footprint: a case study in Zhangjiakou City, North China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(11): 11000-11011.
- [13] 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.
- [14] 苏印,官冬杰,苏维词.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.
- [15] 杨全明,王浩,赵先进.浅析贵州水资源安全保障对策[J].国土资源科技管理,2005,22(2):54-58.
- [16] 姚望,周子琴,张凤太.基于PSR模型的贵州省水资源安全诊断与影响因素分析[J].人民珠江,2019,40(8):32-38.
- [17] 章程,蒋忠诚,Chris Groves,袁道先.岩溶 IGCP 国际合作 30 年与岩溶关键带研究展望[J].中国岩溶,2019,38(3):301-306.
- [18] Gleeson T, Wada Y, Bierkens M F, et al. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint, Nature, 2012, 488(7410), 197-200.
- [19] Taylor R G. Ground water and climate change [J]. Nat. Clim. Change, 2012, 3(4): 322-329.
- [20] Martin J B, Kurz M J, Khadka M B. Climate control of decadal-scale increases in apparent ages of eogenetic karst spring water [J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 988-1001.
- [21] Chu H, Wei J, Wang R, et al. Characterizing the interaction of groundwater and surface water in the karst aquifer of Fangshan, Beijing (China) [J]. Hydrogeology Journal, 2016, 25 (2): 1-14.
- [22] Dimkić D, Dimkić M, Soro A, et al. Overexploitation of karst spring as a measure against water scarcity [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24(25): 1-11.
- [23] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, et al. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches [J]. Reviews of Geophysics, 2014, 52 (3) : 218-242.
- [24] McGill B M, Altchenko Y, Hamilton S K, et al. Complex interactions between climate change, sanitation, and groundwater quality: a case study from Ramotswa, Botswana [J]. Hy-

- drogeology Journal, 2019, 27: 997-1015.
- [25] 李汇文, 王世杰, 白晓永, 等. 气候变化及生态恢复对喀斯特槽谷碳酸盐岩风化碳汇的影响评估[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6158-6172.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 杨梅, 卿晓霞, 王波. 基于改进遗传算法的神经网络优化方法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(5): 198-201.
- [29] 崔东文. 基于相空间重构原理的遗传神经网络模型在城市需水预测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 85-89.
- [30] 池再香, 李贵琼, 白慧, 等. 干季贵州省东西部区域干湿状况差异分析[J]. 中国农业气象, 2016, 37(3): 361-367.
- [31] 楚文海, 鄢贵权, 苏维词, 等. 贵州典型喀斯特流域水资源可持续利用对策研究[J]. 水利学报, 2008(06): 118-122.
- [32] 楚文海. 脆弱生态约束下典型喀斯特流域水资源可持续利用评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.
- [33] 曹欢. 喀斯特地区生态系统健康评价与管理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2011.
- [34] 宋松柏. 区域水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [35] Zhang, Jun-Yi, Wang, La-Chun. 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.
- [36] 杨梅, 卿晓霞, 王波. 基于改进遗传算法的神经网络优化方法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(5): 198-201.
- [37] 崔东文. 基于相空间重构原理的遗传神经网络模型在城市需水预测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 85-89.
- [38] 王孜昌, 王宏艳. 贵州省气候特点与植被分布规律简介[J]. 贵州林业科技, 2002(4): 47-51.

Spatial evaluation and sensitivity analysis of water resource security in Guizhou Province under climate change

LIU Liying^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Social Economy and Applied Statistics, Chongqing 400067, China; 2. College of Mathematics and Statistics, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract It is of great significance to the protection of water resource security in karst areas by the analysis of spatio-temporal evolution of water resource security under the climate change. Using GA—BP neural network model, the spatial differentiation of water resource security in Guizhou Province was evaluated, and its sensitivity to climate change was analyzed. The results show that the water resource security took on obvious spatial heterogeneity in the study area. From 2001 to 2015, the water resource security in Qiannan was always the weakest in province. Guiyang improved the most obviously, and Anshun changed the least. When the rate of change is same, the change of annual average rainfall has the greatest impact on the water resource security, with the increase of 10%, the water resource security index increases by 0.95%, followed by the impact of unit surface water resource change, and the unit groundwater resource change had minimal impact. The most sensitive areas to rainfall change are Zunyi, Bijie, Liupanshui and Qianxinan. The results can provide scientific and technological support for the regulation and development of water resources in Guizhou Province.

Key words Guizhou Province, water resource security, spatial evaluation, climate change, sensitivity

(编辑 张玲)