

基于人工神经网络的喀斯特地区水资源安全评价

刘丽颖^{1,2}, 官冬杰³, 杨清伟¹, 苏维词^{4,5}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆工商大学

数学与统计学院, 重庆 400067; 3. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074;

4. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 5. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 对喀斯特地区水资源安全状况进行评价, 为喀斯特地区水环境管理与可持续发展提供科学依据。[方法] 以喀斯特典型分布区贵州省为例, 建立喀斯特地区水资源安全评价指标体系, 构建 BP 人工神经网络模型, 对贵州省 9 个州市水资源安全进行评价, 并与熵权物元模型相比较。[结果] 贵州省 9 个州市的水资源安全, 有 2 个处于比较安全状态, 6 个处于一般状态, 1 个处于比较不安全状态。评价结果与熵权物元模型评价结果基本一致。[结论] 该体系评价结果合理, 评价方法简便直观, 该模型对类似地区水资源安全评价有一定的参考价值。

关键词: 水资源; 安全; 神经网络; 喀斯特地区; 模型构建

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0207-08

中图分类号: TV213, P642.25

文献参数: 刘丽颖, 官冬杰, 杨清伟, 等. 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. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 032; Liu Liying, Guan Dongjie, Yang Qingwei, et al. Assessment of Water Resources Security in Karst Area Based on Artificial Neural Network [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 207-214. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 02. 032

Assessment of Water Resources Security in Karst Area Based on Artificial Neural Network

LIU Liying^{1,2}, GUAN Dongjie³, YANG Qingwei¹, SU Weici^{4,5}

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

400074, China; 2. School of Mathematics and Statistics, Chongqing Technology and Business

University, Chongqing 400067, China; 3. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong

University, Chongqing 400074, China; 4. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing

400047, China; 5. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] Water resource security was evaluated to provide scientific basis for water environment management and sustainable development in Karst area. [Methods] A case study of Guizhou Province in karst was carried out and an evaluation index system of water resources security was established. The BP artificial neural network model was constructed to evaluate the water resources securities of 9 cities in Guizhou Province, and the results were compared with entropy weight matter element model. [Results] Water resource securities of 9 cities were evaluated in Guizhou Province, among which two cities were assessed at relatively safe level, six cities at general level, and one city at relatively unsafe level. The evaluation results were basically the same to the results of the entropy weighted matter element model. [Conclusion] The results are reasonable and the method is simple and intuitive. The model has certain reference value for similar areas of water resources security evaluation.

Keywords: water resources; security; neural network; karst area; model construction

收稿日期: 2016-05-13

修回日期: 2016-06-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特城市边缘带土地利用/覆盖变化及其环境效应”(41261038), “三峡库区生态安全后续发展动态模拟及其可视化预警评价”(41201546); 国家科技支撑计划项目(2014BAB03B01); 重庆市自然科学基金项目(cstc2012jjA20010); 重庆工商大学 2015 年校级科研项目(670101577)

第一作者: 刘丽颖(1982—), 女(汉族), 辽宁省辽阳市人, 博士研究生, 讲师, 主要从事水资源与可持续发展研究。E-mail: lly@ctbu.edu.cn。

通讯作者: 官冬杰(1980—), 女(汉族), 黑龙江省富锦市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事城市空间格局演化、土地利用预测、生态模拟与环境评价、“3S”技术应用等方面的研究工作。E-mail: guandongjie_2000@163.com。

水资源是人类生存和发展必不可少的自然资源,是经济社会可持续发展和维持生态平衡的重要基础。随着世界人口的持续增长和经济社会的快速发展,出现如水资源短缺、水环境污染、水土流失、洪涝灾害频繁等水资源安全问题。水资源安全到目前为止没有一个公认的定义。目前的定义主要有两大类,一种是从水资源本身来进行定义,主要考虑的是水资源自身的安全状态和水资源的基础是否保持良好^[1];一种是从水资源对社会经济发展的保障程度来定义。如贾绍凤^[2]认为水资源安全涉及社会安全、经济安全和生态安全等几个层次。水资源安全要保证人人都有获得安全饮用水的权利,保证社会可持续发展的经济用水和生态用水。本研究认为水资源安全主要是指在保持生态环境良性循环的前提下,水资源对经济发展和人民生活的保障程度,保障程度越高就越安全。水资源安全研究已引起学术界的高度关注,成为当前水资源科学中的一个重点和热点问题^[3-5]。近年来,国内外学者对水资源安全评价的方法主要包括:层次分析法^[6]、灰色关联分析^[7]、集对分析法^[8-9]、模糊分析法^[10]、系统动力学方法等^[11]。但是以上方法皆为直接建模,过程复杂且效果不是非常理想,在评价的各个环节都存在不同程度的主观判断,进而影响评价结果的客观性。

喀斯特地区有着复杂的水文地质、地貌和生态环境条件、多种水资源赋存类型以及由此导致的“工程性”缺水等问题,使其流域空间结构、水系发育规律、

水文动态等方面表现出与常态流域的巨大差异,这也增加了喀斯特地区水资源的开发和利用难度。同时,由于喀斯特地区生态环境脆弱,近年来经济迅速发展,水污染加剧、水资源短缺和水资源供需矛盾尖锐等问题日益突显,已对当地生态环境的安全和社会经济的可持续发展构成了威胁。喀斯特地区的水资源安全的研究已成为一个值得关注的问题。因此,本研究以岩溶地貌最为发育的贵州省为例,通过建立喀斯特区域水资源安全评价指标体系(图 1),运用人工神经网络的方法,构建喀斯特地区水资源安全的评价模型,并依此模型对贵州省 9 个州市的 2013 年水资源安全情况进行评价,同时采用熵权物元模型对结果加以验证和比较分析,以期寻求一种更合适的评价方法,并对喀斯特地区水资源安全、生态安全、以及环境建设提供有益的参考。

1 研究区概况

贵州省地处中国西南部高原山地,地理坐标为 24°37'—29°13'N,103°36'—109°35'E,该省国土面积 176 167 km²,喀斯特地貌面积 109 084 km²,占该省国土总面积的 61.9%,是西南地区岩溶分布最广的省份,也是西南岩溶山区的核心部分。2013 年贵州省总人口 3 502 万人,其中农业人口 2 177.33 万人,非农业人口 1 324.89 万人,城镇化率为 37.83%,水资源总量为 759.44×10¹⁰ m³,比常年偏少 28.5%,人均水资源量为 2 168 m³。

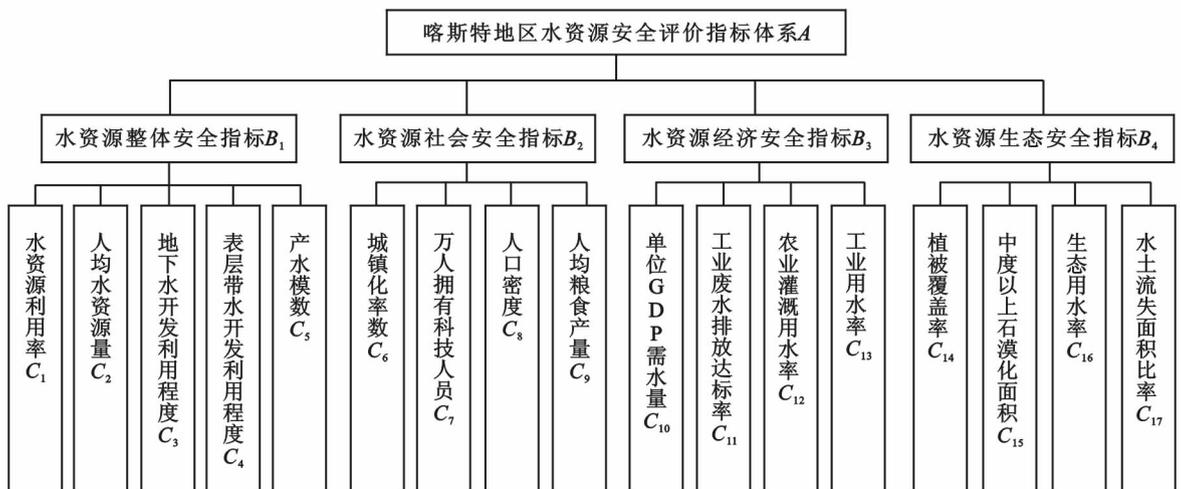


图 1 喀斯特地区水资源安全评价指标体系

2 研究数据与方法

2.1 喀斯特地区水资源安全评价指标体系构建

水资源安全的评价指标体系的建立是一个比较

复杂和值得探讨的问题^[12]。喀斯特地区水资源安全评价指标既要体现该区域水资源总体现状,如缺水类型、紧缺程度、供水类型等,反应水资源可持续利用状况和开发利用的满意程度,还应考虑水量水质对经济

和社会的保障程度、水资源与生态耦合程度等因素。基于以上考虑,本文遵循代表性、综合性、可观测性和易操作性等原则,充分考虑喀斯特地区地貌、生态、水资源、经济、社会的特殊性,结合贵州省水资源安全现状及资料的可获得性,能体现水资源安全的内涵、发展状态和发展过程的因素为指标,建立综合判断体系。在参考国内相关研究成果的基础上,本研究综合归纳确定了喀斯特地区水资源安全评价指标 17 个(图 1)。

2.2 喀斯特地区水资源安全等级划分及指标阈值确定

根据国内外有关标准及相关文献,将指标划分为 5 个等级,定性描述为:极不安全、比较不安全、一般、比较安全、安全,分别用表示 I, II, III, IV, V 级。通过参考相关学者的研究成果,以及国家、行业 and 地方的环境质量标准、背景等,结合贵州省水资源、经济、社会和生态系统的实际,确定各指标对应的等级阈值(表 1)。

表 1 喀斯特地区水资源安全评价指标等级划分

目标层	指标层	水资源安全级别				
		极不安全 I 级	比较不安全 II 级	一般 III 级	比较安全 IV 级	安全 V 级
整体安全指标	C ₁ 水资源利用率/%	>50	30~50	20~30	10~20	<10
	C ₂ 人均水资源量/m ³	<500	500~1 000	1 000~2 000	2 000~4 000	>4 000
	C ₃ 地下水开发利用程度/%	>10	7.5~10	5~7.5	2.5~5	<2.5
	C ₄ 表层带水开发利用程度/%	>50	35~50	20~35	10~20	<10
	C ₅ 产水模数/%	<10	10~20	20~40	40~50	>50
社会安全指标	C ₆ 城镇化率/%	<25	25~35	35~50	50~60	>60
	C ₇ 万人拥有水利科技人员(人/万人)	<3	3~5	5~7	7~10	>10
	C ₈ 人口密度(人/km ²)	>300	100~300	50~100	20~50	<20
	C ₉ 人均粮食产量/kg	<200	200~400	400~600	600~800	>800
经济安全指标	C ₁₀ 单位 GDP 需水量(m ³ /万元)	>1 060	610~1 060	140~610	24~140	<24
	C ₁₁ 工业废水排放达标率/%	<60	60~70	70~80	80~90	>90
	C ₁₂ 农业灌溉用水率/%	>85	70~85	55~70	40~55	<40
	C ₁₃ 工业用水率/%	<5	5~20	20~35	35~45	>45
生态安全指标	C ₁₄ 植被覆盖率/%	<10	10~20	30~50	50~60	>60
	C ₁₅ 中度以上石漠化面积比/%	>40	40~30	30~20	10~20	<10
	C ₁₆ 生态用水率/%	<1	1~2	2~3	3~5	>5
	C ₁₇ 水土流失面积比率/%	>50	30~50	20~30	10~20	<10

注:研究数据主要来源于《贵州省统计年鉴 2013》、《贵州省环境公报 2013》、《贵州省水土流失公告》和《贵州省水资源公报》,详见表 2。

表 2 贵州省各州市水资源安全指标(2013 年)

指标层	水资源安全指标值										指标释义
	贵阳	遵义	安顺	黔南	黔东南	铜仁	毕节	六盘水	黔西南		
C ₁ 水资源利用率/%	31.15	15.74	31.17	7.97	6.84	7.51	11.32	25.76	11.74	水资源开发量大小	
C ₂ 人均水资源量/m ³	743	1 966	1 093	3 755	4 970	3 013	1 572	1 002	2 134	人口对水资源的压力	
C ₃ 地下水开发利用程度/%	10.22	5.66	11.83	2.36	0.47	0.90	0.71	4.59	2.56	地下水供水量/地下水总量	
C ₄ 表层带水开发利用程度/%	30.59	15.57	29.46	7.89	6.75	7.20	11.22	24.48	11.54	地表水供水量/地表水总量	
C ₅ 产水模数/%	41.79	39.26	27.14	46.38	57.07	51.94	38.28	29.05	35.84	水资源相对量的指标	
C ₆ 城镇化率/%	72.00	12.42	39.50	39.92	33.00	17.35	31.67	45.00	32.00	区域发展对水资源的压力	
C ₇ 万人拥有水利科技人员(人/万人)	6.27	3.00	2.96	2.50	2.32	2.37	1.59	2.81	2.77	水资源管理能力	
C ₈ 人口密度(人/km ²)	563	200	248	124	115	172	243	290	168	人口压力程度	
C ₉ 人均粮食产量/kg	95.67	422.95	274.42	365.26	315.87	377.90	348.74	281.44	325.28	农业生产比重	
C ₁₀ 单位 GDP 需水量(m ³ /万元)	50.16	119.96	182.68	149.95	202.34	131.16	111.72	84.12	126.50	经济发展对水资源的压力	
C ₁₁ 工业废水排放达标率/%	97.2	89.5	88.3	97.9	68.8	63.9	80.6	82.6	98.5	水资源的污染处理能力	
C ₁₂ 农业灌溉用水率/%	27.25	66.23	56.25	57.23	69.70	58.55	25.52	24.39	47.10	对农业生产损耗状况	
C ₁₃ 工业用水率/%	43.12	14.31	28.19	24.17	14.51	19.80	48.02	56.60	33.10	工业对水资源的索取程度	
C ₁₄ 植被覆盖率/%	44.20	51.24	42.00	53.50	63.44	54.94	44.06	45.30	45.70	地表蓄水能力	
C ₁₅ 中度以上石漠化面积比/%	11.82	19.00	11.55	9.94	7.32	28.95	28.36	36.16	15.85	水土流失状况	
C ₁₆ 生态用水率/%	1.34	0.95	0.38	0.62	0.51	0.71	0.77	0.54	0.42	水资源生态承载状况	
C ₁₇ 水土流失面积比率/%	27.92	31.62	30.91	24.98	17.79	37.91	43.46	42.92	34.18	水土流失状况	

2.3 喀斯特地区水资源安全评价模型构建

2.3.1 BP神经网络模型构建 神经网络具有广泛的自适应性和学习能力,在理论上可以逼近任何非线性函数,是国际上非常活跃的前沿研究领域之一,在生态安全问题研究中被广泛采用^[13-14]。它通过对有代表性的样本自学习、自适应,能够掌握事物的本质特征,能有效解决水资源系统中的非线性模糊问题,从而避开其他方法寻求水资源与社会经济系统之间耦合关系的困难,对水资源安全易于做出客观正确的评价。目前,BP神经网络已在水环境质量评价^[15-16]、水质评价^[17-18]、土地生态安全评价^[19]、水环境承载力评价^[20]等方面得到了广泛应用。因此本研究采用BP神经网络方法对喀斯特地区水资源安全进行综合评价,具体建模程序为:

(1) 确定网络层数。根据典型喀斯特地区贵州省水资源安全评价,本研究选用3层BP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17个,输出神经元个数为1个。

(2) 确定隐含神经元个数。隐含层神经元数根据经验公式 $n_1 = \sqrt{n+m} + \alpha(n, m)$ (输入层与输出层神经元个数; α —1~10之间的常数)。通过构造不同隐含层节点数网络结构对比得隐含层为4,建立17个输入节点、4个中间节点和1个输出节点的17~4~1结构的BP网络模型。

(3) 数据无量纲化处理。先对样本进行归一化处理 $X_{ij} = \frac{X_{ij} - \min}{\max - \min}$ 。以每个州市的数据为1个样本,样本数为 $i=1, 2, \dots, 9$, 指标数为 $j=1, 2, \dots, 17$ 。

(4) BP网络训练。对建立的BP网络进行训练,隐含层神经元的激活函数选取 Transig 函数,输出层神经元激活函数选取 Logsig 函数。训练函数采用 Trainlm,学习函数采用 Learngdm,性能函数采用 mse。网络创建: $\text{net} = \text{newff}(\text{minmax}(p), [4, 1], \{\text{'tansig'}, \text{'logsig'}\}, \{\text{'trainlm'}, \text{'learngdm'}, \text{'mse'}\})$; 设定用于训练的各级样本的目标输出分别为: I 级: 不安全 0~0.125, II 级: 比较不安全 0.125~0.375, III 级: 一般 0.375~0.625, IV 级: 比较安全 0.625~0.875; V 级: 安全 0.875 以上。

根据表1所给的指标分级标准,对每级标准随机生成10个学习样本,共生成50个学习样本。将50个样本已归一化后的数据及其相应的目标值组成训练样本,网络的训练次数初步定为1000次,训练目标设定为学习参 $\eta=0.1, \alpha=0.9, E \leq 0.00001$ 。输入已建好的BP网络进行反复训练,当迭代57次后,误差0.0452,满足误差要求。水资源安全评价的BP网络

模型及训练结果可靠,可以投入使用。

2.3.2 熵权物元分析模型构建 物元模型由蔡文教授于20世纪80年代初创立,它以形式化的模型研究事物拓展的可能性和开拓规律,主要用于解决不相容的复杂问题,适合多因子评价,是目前等级评价中使用比较广泛的一种方法^[21]。因此本研究选取熵权物元模型对评价对象进行评价,以期对BP模型评价结果进行验证。喀斯特地区水资源安全物元模型的构建步骤为:物元分析中所描述的对象(喀斯特地区水资源安全) N 及特征向量 c 和特征量值 v 组成喀斯特地区水资源安全物元 $R=(N, c, v)$, 如果对对象 N 有 n 个特征向量 c_1, c_2, \dots, c_n 及其对应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n , 则称 R 为 n 维喀斯特地区水资源安全物元,即:

$$R=(N, c, v)=\begin{pmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1) 确定经典域和节域物元矩阵。喀斯特地区水资源安全的经典域物元矩阵可表示为:

$$R_{oj}=(N_{oj}, C_i, V_o)$$

式中: R_{oj} ——喀斯特地区水资源安全经典域物元; N_{oj} ——所划分喀斯特地区水资源安全的第 j 个评价等级(其中, $j=1, 2, \dots, n$); C_i ——第 i 个评价指标。喀斯特地区水资源安全经典域物元矩阵可表示为:

$$R_{oj}=(N_{oj}, C_i, V_o)=\begin{pmatrix} N_{oj} & c_1 & (a_{oj1}, b_{oj1}) \\ & c_2 & (a_{oj2}, b_{oj2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{ojn}, b_{oj2}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: (a_{oji}, b_{oji}) ——对应评价等级 j 的量值范围,即经典域。

同样地,喀斯特地区水资源安全的节域物元矩阵可表示为:

$$R_p=(N_p, C_n, V_p)$$

式中: R_p ——节域物元; p ——喀斯特地区水资源安全全体等级。相应的经典域复合物元矩阵和节域物元矩阵可表示为:

$$R_p=(N_p, C_n, V_p)=\begin{pmatrix} N_p & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: (a_{pi}, b_{pi}) ——节域物元关于特征 c_i 的量值范围,即节域。

(2) 确定待评价物元。把待评价对象 N_x 的物元表示为 R_x :

$$R_x = \begin{pmatrix} N_x & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

(3) 确定关联函数和关联度。喀斯特地区水资源安全指标关联函数 $K(x)$ 的定义为:

$$K(x_i) = \begin{cases} \frac{-p(X, X_o)}{|X_o|} & (X \in X_o) \\ \frac{p(X, X_o)}{p(X, X_p) - p(X, X_o)} & (X \notin X_o) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} p(X, X_o) = |X - 0.5(a_o + b_o)| - 0.5(b_o - a_o) \\ p(X, X_p) = |X - 0.5(a_p + b_p)| - 0.5(b_p - a_p) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $p(X, X_o)$ ——点 X 与对应特征向量的有限区间(即: $X_o = [a_o, b_o]$) 的距离; $p(X, X_p)$ ——点 X 对应于特征向量节域的有限区间, 即: $X_p = [a_p, b_p]$ 的距离^[22]; X, X_o, X_p ——喀斯特地区水资源安全物元的量值、经典域物元的量值范围和节域物元的量值范围。

(4) 计算综合关联度并确定评价等级。待评价对象 $N_x (x=1, 2, 3, \dots, m)$ 关于等级 j 的综合关联度 $K_j(N_x)$ 为:

$$K_j(N_x) = \sum_{i=1}^n W_i k_j(x_i) \quad (7)$$

式中: W_i ——喀斯特地区水资源安全各评价指标的权重; $K_j(N_x)$ ——待评价对象 N_x 关于等级 j 的综合关联度; $k_j(x_i)$ ——待评价对象 N_x 关于等级 j 的单指标关联度。若 $K_{jx} = \max[K_j(N_x)]$, 则 N_x 处于喀斯特地区水资源安全标准等级 j 级, $j=1, 2, \dots, n$;

(5) 权重的确定。在确定评价指标的熵权值时, 运算公式为:

$$H(y_j) = \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n z_{ij} \ln z_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

式中: z_{ij} ——第 i 个评价单元第 j 个指标标准化值。将评价指标的熵值转化为权重值:

$$d_j = \frac{1 - H(y_j)}{m - \sum_{j=1}^m H(y_j)} \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

$$(0 \leq d_j \leq 1, \sum_{j=1}^m d_j = 1) \quad (9)$$

结合案例各指标量值, 由公式(8)—(9)计算喀斯特地区水资源安全评价指标的权重(表 3)。

3 结果与讨论

3.1 BP 神经网络模型评价结果及分析

将表 2 中贵州省喀斯特地区的水资源安全评价指标值进行归一化处理, 输入训练好的 BP 网络进行检验, 网络输出值及分级评价结果详见表 4。

表 3 喀斯特地区水资源安全评价指标权重

目标层	指标层	权重
喀 斯 特 地 区 水 资 源 安 全	水资源利用率 C_1	0.063 3
	人均水资源量 C_2	0.064 0
	地下水开发利用程度 C_3	0.082 4
	表层带水开发利用程度 C_4	0.062 9
	产水模数 C_5	0.052 8
	城镇化率 C_6	0.058 7
	万人拥有水利科技人员 C_7	0.056 6
	人口密度 C_8	0.060 6
	人均粮食产量 C_9	0.054 6
	单位 GDP 需水量 C_{10}	0.055 6
	工业废水排放达标率 C_{11}	0.051 5
	农业灌溉用水率 C_{12}	0.056 0
	工业用水率 C_{13}	0.058 9
	植被覆盖率 C_{14}	0.051 4
	中度以上石漠化面积比 C_{15}	0.060 7
	生态用水率 C_{16}	0.056 8
	水土流失面积比率 C_{17}	0.053 2

表 4 BP 模型的喀斯特地区水资源安全评价结果

序号	区域	BP 模型输出值	BP 模型评价结果
1	贵阳	0.467 4	一般
2	遵义	0.497 7	一般
3	安顺	0.369 2	比较不安全
4	黔南	0.654 8	比较安全
5	黔东南	0.649 5	比较安全
6	铜仁	0.464 5	一般
7	毕节	0.450 1	一般
8	六盘水	0.490 6	一般
9	黔西南	0.491 8	一般

用 ArcGIS 9.3 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 BP 模型的水资源安全等级划分(图 2)。结果表明, 有 6 个州市的水资源安全利用等级为一般, 具体排序为: 遵义 > 黔西南 > 六盘水 > 贵阳 > 铜仁 > 毕节。由人均水资源量、人口密度、石漠化面积和水土流失比例等指标数据值可知, 该区域生态环境脆弱, 对水资源安全利用较为不利。安顺水资源安全利用等级为比较不安全, 存在水资源安全隐患, 进一步开发潜力较小。对相关统计数据进行分析, 可以发现, 安顺近年来经济发展迅速, 人口密度加大, 但水资源开发利用难度大、利用率低, 水土流失严重, 水资源的安全利用面临较大的压力。黔南和黔东南水资源安全利用等级为比较安全。这是因为该区域经济发展相对落后, 受喀斯特地质影响, 水资源开发规模小, 利用率低, 需求量相对较少, 因此水资源有一定的安全利用空间。评价结果与实际较为吻合。

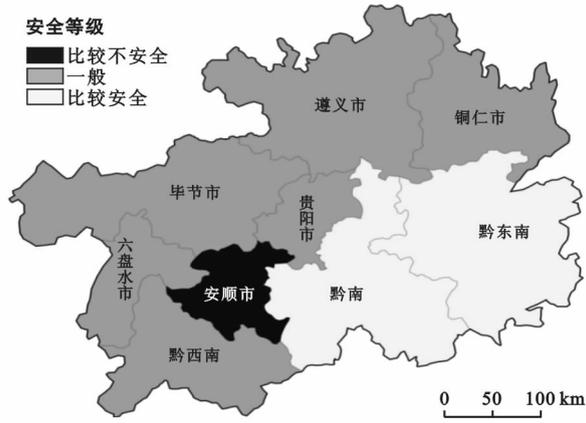


图 2 BP 模型的贵州省水资源安全等级划分

3.2 熵权物元模糊模型评价结果及分析

由表 2 评价指标量值,根据公式(5)–(6)计算略

斯特地区水资源安全评价指标关联度,以贵阳市 C_1 指标(水资源利用率)的计算结果为例介绍各指标意义,将 $C_1 = 31.15$ 带入相应的计算公式后,得到对应的评价等级关联度分别为: $k_{(C_1)_1} = -0.377, k_{(C_1)_2} = 0.058, k_{(C_1)_3} = -0.036, k_{(C_1)_4} = -0.264, k_{(C_1)_5} = -0.404$,可以判定贵阳市该指标属于 II 级,即比较不安全等级。同理可得其他指标的相关数值(表 5)。

将各项指标对应各等级的关联度量值(表 5)与其对应计算出的权重(表 3)代入公式(7),计算出各州市水资源安全综合关联度,并判断水资源安全等级。以贵阳市为例,其 $K_1 = -0.434, K_2 = -0.381, K_3 = -0.348, K_4 = -0.374, K_5 = -0.384$,可以判定贵阳市水资源安全级别为 III 级,即“一般”级别。同理可以判定其他各州市的水资源安全等级(表 6)。

表 5 贵州省各州市水资源安全评价指标关联度

关联度	贵阳					等级	遵义等级	安顺等级	黔南等级	黔东南等级	铜仁等级	毕节等级	六盘水等级	黔西南等级
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级									
$k_{(C_1)_j}$	-0.377	0.058	-0.036	-0.264	-0.404	II	IV	II	V	V	V	IV	III	IV
$k_{(C_2)_j}$	-0.246	0.486	-0.257	-0.629	-0.814	II	III	III	IV	V	IV	III	III	IV
$k_{(C_3)_j}$	0.110	-0.110	-0.604	-0.746	-0.813	I	III	I	V	V	V	V	IV	IV
$k_{(C_4)_j}$	-0.388	-0.126	0.294	-0.257	-0.402	III	IV	III	V	V	V	IV	III	IV
$k_{(C_5)_j}$	-0.636	-0.545	-0.090	0.179	-0.311	IV	III	III	IV	V	V	III	III	III
$k_{(C_6)_j}$	-0.940	-0.925	-0.880	-0.800	0.200	V	I	III	III	II	I	II	III	II
$k_{(C_7)_j}$	-0.343	-0.168	0.366	-0.104	-0.373	III	I	I	I	I	I	I	I	I
$k_{(C_8)_j}$	0.026	-0.974	-0.985	-0.986	-0.987	I	II	II	II	II	II	II	II	II
$k_{(C_9)_j}$	0.478	-0.522	-0.761	-0.841	-0.880	I	III	II	II	II	II	II	II	II
$k_{(C_{10})_j}$	-0.953	-0.918	-0.642	0.225	-0.343	IV	IV	III	III	III	IV	IV	IV	IV
$k_{(C_{11})_j}$	-0.930	-0.907	-0.860	-0.720	0.280	V	IV	IV	V	II	II	IV	IV	V
$k_{(C_{12})_j}$	-0.889	-0.855	-0.793	-0.638	0.362	V	III	III	III	III	III	V	V	IV
$k_{(C_{13})_j}$	-0.693	-0.578	-0.325	0.188	-0.100	IV	II	III	III	II	II	V	V	III
$k_{(C_{14})_j}$	-0.570	-0.355	0.290	-0.184	-0.380	III	IV	III	IV	V	IV	III	III	III
$k_{(C_{15})_j}$	-0.705	-0.606	-0.409	0.182	-0.133	IV	IV	IV	V	V	III	III	II	IV
$k_{(C_{16})_j}$	-0.202	0.338	-0.331	-0.554	-0.732	II	I	I	I	I	I	I	I	I
$k_{(C_{17})_j}$	-0.442	-0.069	0.208	-0.221	-0.391	III	II	II	III	IV	II	II	II	II

表 6 熵权物元模糊模型的喀斯特地区水资源安全评价结果

综合关联度	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	等级
贵阳	-0.434	-0.381	-0.348	-0.374	-0.384	一般
遵义	-0.415	-0.248	-0.153	-0.154	-0.454	一般
安顺	-0.327	-0.253	-0.116	-0.342	-0.501	一般
黔南	-0.472	-0.436	-0.261	-0.199	-0.251	比较安全
黔东南	-0.547	-0.399	-0.435	-0.138	-0.185	比较安全
铜仁	-0.436	-0.306	-0.335	-0.295	-0.310	比较安全
毕节	-0.463	-0.346	-0.286	-0.305	-0.321	一般
六盘水	-0.400	-0.244	-0.177	-0.314	-0.420	一般
黔西南	-0.482	-0.332	-0.254	-0.148	-0.352	比较安全

用 ArcGIS 9.3 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,得到基于熵权物元模型的水资源安全等级划分如图 3 所示。熵权物元模型分析结果中,贵阳、遵义、安顺、毕节以及六盘水地区的水资源安全利用级别向“一般”转化,黔南、黔东南、铜仁和黔西南的水资源安全利用级别向“比较安全”转化。此评价结果与 BP 神经网络模型评价结果基本一致。



图 3 熵权物元模型的贵州省水资源安全等级划分

4 讨论

(1) BP 神经网络模型和熵权物元模型评价结果显示,贵州省水资源安全利用基本处于一般状态和比较安全状态,其主要瓶颈:一是“山高水(河)低、雨多地漏”的喀斯特水文地质地貌条件易造成特有的“喀斯特干旱”现象,使湿润的贵州喀斯特山区成了“缺水区”;二是贵州喀斯特山区雨水多,但方便可利用的水资源少,由于缺乏拦水、蓄水和调水等工程,造成严重的人畜饮水困难,水质也得不到保证;三是传统中拦蓄供水模式不适应喀斯特地域特点,难以解决缺水问题。基于以上特点贵州喀斯特山区成了“缺水区”,尤其“工程性缺水”已成为制约贵州喀斯特山区社会经济与生态协调发展的主要瓶颈。因此应根据喀斯特地区的水资源特征和其形成规律,因地制宜、因水制宜、因需制宜,分别采用类型众多,规模不一的水资源开发工程和管理模式,确保喀斯特地区水资源安全可持续利用,取得经济、生态和社会的三大效益。

(2) 对比表 4 和表 6 可以看出,人工神经网络模型与熵权物元模型评价结果基本一致,但仍有一定的差异:两种模型对贵阳、遵义、黔南、黔东南、毕节以及六盘水地区的评价结果一致。安顺、铜仁以及黔西南的熵权物元模型的评价结果比 BP 模型的评价结果高出一个等级,这是因为熵权物元模型更强调对影响

因子的分析,而 BP 模型强调非线性关系下的综合质量分析。从表 6 可以看出,该区域可认定为此等级,但不完全符合对应等级的标准,具备向其转化的条件,因此,两种模型的评价结果基本一致。

(3) BP 模型不需要建立复杂的显示关系,只需要给定如表 1 中的评价等级标准,对获得的样本数据进行简单的处理,便可以建立水资源安全利用评价的数学模型,模型计算简单、客观、适用性强。熵权物元模型需要确定权重,并构建样本数据与评价等级之间复杂的函数关系,从而得到量化结果;BP 模型不仅可利用输出值来判定水资源开发所处的阶段,而且可利用输出值大小进一步判断处于同一开发阶段的区域的水资源安全利用程度的大小,该模型不仅可以进行分类,还可以根据输出值进行较好的排序。熵权物元模型只能用等级分值来评价水资源安全利用程度的大小,对于水资源安全利用程度所处阶段的判断较为模糊。

5 结论

(1) 构建了一套比较完整,能反映喀斯特地域特色的水资源安全的评价指标体系和评价标准,并用 BP 人工神经网络模型对贵州省 9 个州市进行综合评价和等级划分,结果表明:贵州省 9 个州市中,有 2 个州市处于比较安全状态、有 6 个州市处于一般状态、有 1 个州市处于比较不安全状态。本结果与熵权物元模型评价结果基本一致。

(2) 本研究对 BP 神经网络模型在喀斯特地区水资源安全利用评价方面的应用性进行验证和比较分析。BP 神经网络模型,首先分析出水资源安全利用的影响因子,将其作为 BP 网络的输入,每一个影响因子对应 BP 网络输入层的一个节点,将识别问题的结果作为网络输出,输入层和输出层节点数目依具体问题的性质而定,当 BP 网络的结构确定后,用该网络对样本进行系列的监督学习,从而识别出类别与影响因子之间复杂的非线性映射关系。该模型自主学习的特性减少了设计者对先验知识的依赖,计算速度快,评价结果具有客观性,精度也较好。

(3) 本研究基于文献参考和喀斯特地区水资源安全利用特征,选取了 17 个评价指标构成了评价体系。但是,水资源安全评价涉及的因素众多,评价指标的选取需要在今后的实践中不断完善。此外,BP 神经网络自身存在一些缺陷和不足,隐含层神经元个数确定没有绝对准确的方法,一般通过试错获得,会造成网络的冗余性,增加网络学习的负担。因此,这种方法还需要进一步的完善。

[参 考 文 献]

- [1] 张翔,夏军,贾绍凤. 水安全定义及其评价指数的应用[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 145-149.
- [2] 贾绍凤,张军岩,张士锋. 区域水资源压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.
- [3] Waughrayd. Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus[M]. Washington: Island Press, 2011.
- [4] Lindhe A, Rosén L, Norberg T, et al. Uncertainty modelling in multi-criteria analysis of water safety measures[J]. Environment Systems and Decisions, 2013, 33(2): 195-208.
- [5] Yong Jiang. China's water security: Current status, emerging challenges and future prospects[J]. Environmental Science & Policy, 2015, 54: 106-125.
- [6] Yang Xiaohua, Sun Boyang, Zhang Jian, et al. Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China[J]. Natural Hazards, 2015, 75(5): 1-14.
- [7] Dai Jing, Qi Jing, Chi Jingjing, et al. Integrated water resource security evaluation of Beijing based on GRA and topsis[J]. Frontiers of Earth Science in China, 2010, 4(3): 357-362.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 杜向润,冯民权,张建龙. 基于改进模糊物元模型的水安全评价研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(8): 222-228.
- [11] Chen Zhihe, Wei Shuai. Application of system dynamics to water security research [J]. Water Resources Management, 2014, 28(2): 287-300.
- [12] 来海亮,汪党献,吴涤非. 水资源及其开发利用综合评价指标体系[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 95-101.
- [13] 袁曾任. 人工神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 1-12.
- [14] Liu Zelin, Peng Changhui, Xiang Wenhua, et al. Application of artificial neural networks in global climate change and ecological research: An overview[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(34): 3853-3863.
- [15] Yirgalem C, Ghinwa M N. Water quality monitoring using remote sensing and an artificial neural Network [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(8): 4875-4887.
- [16] Yang Fang, Wang Meng, Ye Min. Study on the Evaluation Model of Water Environment Quality based on Artificial Neural Network[C]// Arabia, United Arab Emirates, Dubai: 2012 International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE2012), 2012.
- [17] Najah A, El-Shafie A, Karim O A, et al. Application of artificial neural networks for water quality prediction [J]. Neural Computing and Applications, 2013, 22(1): 187-201.
- [18] Singh K P, Basant A, Malik A, et al. Artificial neural network modeling of the river water quality: A case study[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(6): 888-895.
- [19] Mazzocchi Chiara, Corsi Stefano, Sali Guido. Agricultural land consumption in Periurban areas: A methodological approach for risk assessment using artificial neural networks and spatial correlation in Northern Italy [J]. Applied Spatial Analysis and Policy, 2017, 10(1): 3-20.
- [20] Peng Yu. Study on the assessment of water resources carrying capacity in strategic environmental assessment [J]. Computer Science for Environmental Engineering and EcoInformatics, 2011, 158(1): 269-274.
- [21] 余健,房莉,仓定帮,等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260-266.
- [22] 施开放,刁承泰,左太安,等. 基于熵权物元模型的耕地占补平衡生态安全评价[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 243-250.