

# 基于BP神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价

龚巧灵<sup>1</sup>, 官冬杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 3. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100785)

**摘要:**三峡库区水资源安全关系到库区的生态安全,对库区水资源安全利用进行评价,找出问题较为严重的区域,明确其限制因子,从而为库区水资源可持续发展和水资源安全提供科学的决策依据。结合2000—2014年三峡库区水资源安全数据,选取BP神经网络构建水资源安全利用评价模型,结合ARIMA模型进行指标预测,分析了三峡库区重庆段水资源安全利用的时空差异。研究表明:(1)三峡库区重庆段2014年水资源安全利用总体分布在较不安全到较安全之间,渝中区和沙坪坝区为较不安全等级,沙坪坝区等7个区县为基本安全,其他区县为较安全等级;在子系统的评价中,主城区的社会安全与供需安全等级均为最低,为极不安全和较不安全等级。(2)2000—2014年水资源安全利用等级主要受生态安全因子制约,供需安全因子次之;2015—2020年水资源安全利用等级主要受供需安全因子限制,生态安全因子次之。2000—2020年水资源安全利用等级总体呈上升趋势。

**关键词:**水资源学;水资源安全评价;BP神经网络;随机森林;三峡库区

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0292-08

## Study on Water Resources Security Evaluation of Chongqing Section of Three Gorges Reservoir Based on BP Neural Network

GONG Qiaoling<sup>1</sup>, GUAN Dongjie<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The safety of water resources in the Three Gorges Reservoir area is largely related to the ecological security of the reservoir area. The evaluation on the security utilization of water resources in the Three Gorges Reservoir area facilitates to find out the areas with serious security problems and in turn illustrate the limiting factors that affect the safe use of water resources aiming at providing a scientific basis for the sustainable development and safe utilization of water resources. The water security data of the Three Gorges Reservoir area in 2000—2014 By were chosen, the BP neural network was employed to construct an evaluation mode of safe utilization of water resources. Then, index prediction in combination with an ARIMA model was performed to analyze the temporal and spatial differences of security utilization of water resources in Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area. (1) In general, the security utilization of water resources in 2014 was situated in a range from less secure to safer. Specially, Yuzhong and Dadukou Districts were the less safe areas; Shapingba and Jiangbei Districts were the basically safe areas; other districts were the safe areas. With the respect to the evaluated subsystem, the security for both the society and the supply-demand loop in the main urban area were the lowest level. Their security levels were extremely unsafe and unsafe, respectively. (2) During the period from 2000 to 2014, the security level of water resources utilization was mainly constraint from the ecological

收稿日期:2016-12-13

修回日期:2017-01-19

资助项目:国家自然科学基金(41201546);国家十三五重点研发计划(2016YFC0400700);重庆市自然科学基金(cstc2012jjA20010);国家科技支撑计划项目(2014BAB03B01);重庆交通大学研究科研创新(创新基金)项目(CYS16187)

第一作者:龚巧灵(1991—),女,新疆五家渠人,在读硕士,研究方向:国土资源与3S技术。E-mail:gongqiaoling1437@163.com

通信作者:官冬杰(1980—),女,黑龙江省富锦人,博士,教授,博士生导师,研究方向:生态环境与可持续发展、水资源安全利用评价、3S应用等。E-mail:guandongjie\_2000@163.com

security factors and successively from the safety factors of supply-demand loop; during the period from 2015 to 2020, the security level of water resources utilization was mainly restricted by the safety factors of supply-demand loop, and followed by the ecological security factors. During the period from 2000 to 2020, the utilization level of water resources security presented the general uptrend.

**Keywords:** water resources science; water resources security evaluation; BP neural network; random forests; Three Gorges Reservoir area

三峡库区的特殊地理位置决定了它是国家生态环境保护的敏感区域,三峡库区生态环境建设是关系到长江流域水质安全的关键所在。探索库区水资源安全的时空分异及演变趋势是保证库区生态安全的重要前提。随着三峡工程建设的进行,三峡库区水资源和生态环境保护中存在的问题日益突出。社会经济的发展导致生活污水、工业污水排量增加,农业面源污染的范围和程度日益加剧。因此,必须针对三峡库区的特点,建立科学的水资源安全利用评价指标体系及评价模型,找出水资源安全利用问题较为严重的区域,明确影响水资源安全利用的主要因子,对促进三峡库区水资源保护、实现水资源和社会经济可持续发展具有重要的理论意义和实践意义。

从全球范围来看,地球的水量十分丰富,但能为人类所利用的水资源却极为有限,淡水资源严重短缺,供需矛盾日益突出,再加上水源污染造成“水质型缺水”,更加剧了水资源短缺的矛盾,因此水资源安全利用评价一直是国内外研究的重点<sup>[1-3]</sup>。现有的水资源安全利用评价方法大都需要构建水资源安全评价指标体系,并赋予各指标权重,而根据研究者侧重点不同,指标的权重值就会有差异。目前指标权重的确定大都是采用AHP(层次分析法)<sup>[4]</sup>,熵权法<sup>[5]</sup>,模糊数学分析法<sup>[6]</sup>、SPA(集对分析法)<sup>[6]</sup>等方法,这些方法虽然各有优点,但都具有不同程度主观性,在应用过程中均受到一定限制。为更为客观的对水资源安全利用进行综合评价,本文结合机器学习算法的自主学习优势,基于R语言<sup>[7]</sup>选取BP神经网络<sup>[8-9]</sup>构建三峡库区重庆段的水资源安全利用评价模型,构建RF(随机森林)模型<sup>[10]</sup>进行对比,并结合前人研究成果进行了对比验证,通过GIS技术进行可视化展示,分析三峡库区重庆段水资源安全利用的时空变化,明确其限制因子,对水资源安全利用可起到一定的预警作用,并为库区水资源可持续发展和水资源安全提供科学的决策依据。

## 1 研究区概况

三峡库区是指受长江三峡工程淹没的地区。三

峡库区重庆段面积为46 118 km<sup>2</sup>,占三峡库区总面积的85.6%,包括重庆市内的22个区县,东起巫山县、西至江津区、北起开州区、南至武隆区。地理范围在北山区峡谷及川东岭谷地带,北屏大巴山、南依川鄂高原,具有冬季温暖春季早、夏季炎热多伏旱,秋季多雨、湿差较大以及多云雾天等气候特征。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 水资源安全利用评价指标体系构建

由于水资源安全利用评价涉及的方面广而复杂,地域性的影响也十分显著,因此目前还没有一个公认的、统一的水资源安全评价指标标准。水资源安全的评价是动态复杂的过程,评价的结果既要体现研究区域水资源的总体状况,又要反映出影响水资源安全的主要因素,评价指标的选取既要遵循系统性、可操作性、独立性、简明性和完备性等原则,又要体现出区域的异质性特征。

基于以上原则背景,从水资源安全的内涵机理及实际意义出发,借鉴国内外相关研究成果<sup>[11-12]</sup>,从水资源经济安全、水资源社会安全、水资源生态安全和水资源供需安全4个角度,通过查阅《重庆市2015年统计年鉴》、《重庆市水资源公报》、《重庆市水土保持公报》、《三峡库区历史资料汇编》、《三峡公报》等统计资料,配合咨询统计局、环保局等相关单位,结合三峡库区重庆段水资源安全现状及资料的可获得性,共筛选了21个水资源安全利用评价指标(表1)。

### 2.2 三峡库区重庆段水资源安全利用评价模型构建

**2.2.1 BP神经网络算法** BP神经网络是一种由大量神经元及其之间的相互连接构成的运算模型。其本质是通过网络的变换和动力学行为得到一种并行分布式的信息处理能力,并在不同程度上模仿人脑神经系统的信息处理能力。它是通过对大量训练样本的反复学习,由其内部自适应过程不断修改各个神经元之间的相互连接权值,最终使神经网络的权值分布收敛在一定的范围内。其构建步骤如下:(1)网络初始化,确定输入层( $M$ ),隐含层( $p$ )和输出层( $q$ )的神经元个数;(2)根据输

入向量  $M_1, M_2, \dots, M_m$  和期望输出  $T_1, T_2, \dots, T_l$ , 进行网络训练; (3) 根据网络误差更新各层连接权值及阈值, 直到满足误差要求; (4) 将待分类预测数据输入构建好的 BP 神经网络模型进行分类预测。

表 1 三峡库区重庆段水资源安全利用评价指标体系

目标层 A	指标层 X	意义
经济安全	人均 GDP( $X_1$ )	表征水利设施建设能力
	万元产值工业用水( $X_2$ )	表征工业生产用水压力
	万元产值农业用水( $X_3$ )	表征农业生产用水压力
	万元 GDP 耗水量( $X_4$ )	表征区域经济发展对水资源的需求压力
	城镇化率( $X_5$ )	表征区域人口城镇化水平
社会安全	人口自然增长率( $X_6$ )	表征人口增长速度对水资源的影响
	人口密度( $X_7$ )	表征人口密集程度对水资源的影响
	人均粮食( $X_8$ )	表征人均粮食占有量
	城市污水综合处理能力( $X_9$ )	表征城市水污染治理能力
	工业废水化学需氧量( $X_{10}$ )	表征工业生产对谁环境质量的影响
生态安全	生活废水化学需氧量( $X_{11}$ )	表征人民生活对水环境质量的影响
	船舶油污污水处理后排放达标率( $X_{12}$ )	表征流域水污染治理能力
	单位耕地面积化肥施用量( $X_{13}$ )	表征化肥对水环境质量的影响
	单位耕地面积农药施用量( $X_{14}$ )	表征农药对水环境质量的影响
	酸雨频度( $X_{15}$ )	表征地区水生态安全状况
供需安全	森林覆盖率( $X_{16}$ )	表征生态系统的完整性
	生态用水比重( $X_{17}$ )	表征水资源的生态投入现状
	废水排放总量( $X_{18}$ )	表征废水污染能力
	单位面积粮食产量( $X_{19}$ )	表征水资源对粮食产量的影响
	人均生活用水量( $X_{20}$ )	表征人民生活对水资源的需求压力
	产水模数( $X_{21}$ )	表征地区水资源量的有限性

2.2.2 随机森林算法 随机森林算法(Random Forest, RF)是由美国加州大学伯克利分校计系教授 Leo Breiman 等于 2001 年提出的一种基于 CART (classification and regression tree)决策树的组合分类模型<sup>[13-14]</sup>。通过自助法(boot-strap)重采样,从原始训练样本集中随机抽取样本生成新的训练样本集,对每个样本构建决策树,并根据所有决策树中票数最高的投票结果作为最终分类预测结果。其构建步骤如下:(1) 设原始训练样本个数为  $N$ , 变量个数为  $M$ ; (2) 确定 1 个定值  $m$ , 既树的节点个数,  $m < M$ ; (3) 用 Bootstrap 从  $N$  中有放回的重重复随机抽取  $k$  个训练样本集( $k=1, 2, 3, \dots, N$ ), 并由此构建  $k$  棵决策树, 每次未被抽到的样本组成  $k$  个袋外数据, 既 out-of-bag, 简称 OOB; (4) 在树的每个节点处随机的从  $M$  个指标变量中选取  $m$  个变量, 按照节点不纯度最小原则从中选取一个进行无剪枝分支生长; (5) 重复步骤(3) 遍历  $k$  个树分类器; (6) 根据生成的多个决策树分类器对需要分类预测数据进行分类预测, 取决策树投票结果票数最高的作为最终分类结果。

2.3 三峡库区重庆段水资源安全利用等级划分及指标阈值确定

按照表 1 构建的水资源安全评价指标体系, 结合

国内外相关文献<sup>[11, 15-16]</sup>和指标分级标准, 将三峡库区重庆段水资源安全利用等级划分为 5 级, 分别为: I 级(极不安全)、II 级(较不安全)、III 级(基本安全)、IV 级(安全)和 V 级(非常安全)。各指标分级标准见表 2。

基于上述构建的三峡库区重庆段水资源安全利用评价指标体系和分级标准, 根据表 2 采用随机生成的方法在各个评价等级阈值区间内随机生成 100 组训练样本, 共生成 500 组训练样本。因本文 BP 神经网络模型中选用 sigmoid 函数作为隐含层激活函数, 其输出值域为  $0 \sim 1$ , 故将各等级期望输出定义为  $0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 。另外在模型训练过程中发现, 训练输出围绕期望输出上下浮动, 因此将训练输出在  $0 \sim 0.2$  的样本归为 I 级并以此类推。

表 2 中指标性质为“+”代表该指标对水资源安全利用呈正影响, 即越大约安全, 为“-”的代表该指标对水资源安全利用呈负影响, 即越大越不安全。为统一指标影响的一致性, 对负向指标数据先取倒数再乘以 100 以方便计算<sup>[17]</sup>。因各指标具有不同的量纲, 在网络训练前需对原始数据进行归一化处理, 本文选取最大最小法。

2.4 模型对比与验证

根据表 1 的水资源安全利用评价指标体系, 通过咨询相关专家, 参考相关文献并结合指标数据的可获

得性与连续性,对指标进行共线性筛选,分别选取  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{19}, X_{20}$  和  $X_{21}$  共 16 个指标构建三峡库区重庆段水资源安全利用横向评价指标体系。

表 2 三峡库区重庆段水资源安全利用评价标准

指标	量纲	I 级 极不安全	II 级 较不安全	III 级 安全	IV 级 较安全	V 级 非常安全	性质
$X_1$	万元	1000~10000	10000~20000	20000~30000	30000~40000	40000~150000	+
$X_2$	m <sup>3</sup> /万元	80~120	50~80	30~50	10~30	1~10	—
$X_3$	m <sup>3</sup> /万元	150~300	110~150	80~110	60~80	1~60	—
$X_4$	m <sup>3</sup> /万元	192~250	120~192	80~120	20~80	1~20	—
$X_5$	%	60~90	50~60	35~50	20~35	1~20	—
$X_6$	%	8~10	6~8	4~6	2~4	0.1~2	—
$X_7$	人/km <sup>2</sup>	3000~30000	1000~3000	500~1000	200~500	1~200	—
$X_8$	kg/人	1~300	300~400	400~500	500~600	600~1000	+
$X_9$	万 m <sup>3</sup> /d	1~80	80~130	130~180	180~220	220~350	+
$X_{10}$	万 t	7~10	5~7	3~5	1~3	0.1~1	—
$X_{11}$	万 t	12~18	11~12	10~11	9~10	5~9	—
$X_{12}$	%	30~70	70~80	80~90	90~95	95~100	+
$X_{13}$	kg/hm <sup>2</sup>	600~1000	500~600	350~500	200~350	50~200	—
$X_{14}$	kg/hm <sup>2</sup>	30~50	25~30	15~25	10~15	1~10	—
$X_{15}$	%	80~130	60~80	40~60	20~40	1~20	—
$X_{16}$	%	1~30	30~35	35~40	40~45	45~80	+
$X_{17}$	%	0.1~0.5	0.5~0.8	0.8~1.2	1.2~1.5	1.5~3	+
$X_{18}$	万 t	40000~50000	30000~40000	25000~30000	20000~25000	8000~20000	—
$X_{19}$	kg/hm <sup>2</sup>	1~800	800~1500	1500~2000	2000~3000	3000~5000	+
$X_{20}$	m <sup>3</sup> /a	75~180	60~75	45~60	30~45	10~30	—
$X_{21}$	—	30~60	60~70	70~80	80~90	90~200	+

基于 R 语言 AMORE 包,选用 3 层 BP 神经网络对重庆市水资源安全利用进行评价,其中输入层神经元个数为 16,即 16 个指标变量,输出层神经元个数为 1,即水资源安全利用评价等级。隐含层的选取目前没有权威而统一的方法,本文选用目前较为成熟和常用的经验公式<sup>[18]</sup> $s = \sqrt{m+n} + a$  (  $a$  为 0~10 之间的整数),来测试并确定隐含层神经元个数,得到隐含层神经元个数为 4~14。通过试凑法逐一测试,以 LMS(最小均方)误差达到 0.001 为评判标准,得到最佳隐含层为 7,训练 59 次后达到误差标准,即三峡库区重庆段水资源安全利用横向评价 BP 模型为 16-7-1。经过计算,训练样本实际输出与期望输出相关系数为 0.989 1,分类完全正确,模型精度较高。为验证 BP 神经网络评价分类的可行性,选用 randomForest 包构建 RF 模型进行对比验证。训练样本与 BP 神经网络模型保持一致,经过调试后将 RF 模型分类树设置为 15 棵,每棵树的节点为 8。测试样本分类结果与期望输出完全一致,满足分类精度要求。将待分类实测数据输入模型进行分类判别,将得到的结果与 BP 神经网络结果进行对比,得到表 3。

表 3 中给出了 BP 模型分类预测结果的输出值,从两个模型的分类结果来看,评价结果完全一致的为

41%,为了更好的进行对比验证,将 BP 神经网络高于期望的预测结果判定为向高一级转化,低于期望的预测结果判定为向低一级转化。处理后得到的结果与 RF 模型一致性达到了 77.3%,剩余的 22.7%分类等级与 RF 模型误差基本在一个级别,由此可见选用 BP 神经网络模型和 RF 模型对水资源安全利用进行评价的结果基本一致。但 BP 神经网络和 RF 模型均是机器学习算法,为进一步对比验证 BP 神经网络建模实现水资源安全评价的可行性,将评价结果与施开放<sup>[19]</sup>等基于物元分析和熵组合权重对重庆三峡库区水资源承载力评价结果进行对比。水资源承载力“超载”表明了区域水资源承载潜力较小,即水资源利用呈不安全的状况,同理“满载”可视为水资源利用呈基本安全状况,“可载”可视为水资源利用呈安全状况。通过对比发现,重庆三峡库区水资源承载力为“超载”或“向超载转化”的区县,如渝中区、大渡口区、江北区等主城区,在本文水资源安全利用评价中均为较不安全及以下等级,水资源承载力为“可载”或“向可载转化”的万州区、丰都县、开州区和奉节县等,在本文水资源安全利用评价中均为较安全及以上等级。评价结果呈一致性,证明运用 BP 神经网络构建水资源安全利用评价模型是合理可行的。

表 3 BP 模型与 RF 模型评价结果对比表

区县	BP		RF 等级
	输出值	等级(倾向)	
巴南区	0.739683	Ⅳ(V)	V
北碚区	0.592332	Ⅲ	Ⅲ
大渡口区	0.349756	Ⅱ(Ⅲ)	Ⅲ
丰都县	0.601588	Ⅳ	Ⅳ
奉节县	0.706753	Ⅳ(V)	V
涪陵区	0.582646	Ⅲ(Ⅳ)	Ⅳ
江北区	0.482221	Ⅲ(Ⅳ)	Ⅳ
江津区	0.618136	Ⅳ	Ⅳ
九龙坡区	0.441885	Ⅲ(Ⅱ)	Ⅱ
开州区	0.640147	Ⅳ(Ⅲ)	Ⅱ
南岸区	0.521940	Ⅲ(Ⅳ)	Ⅱ
沙坪坝区	0.525129	Ⅲ(Ⅳ)	Ⅱ
石柱县	0.717597	Ⅳ	Ⅳ
万州区	0.633314	Ⅳ	Ⅳ
巫山县	0.616033	Ⅳ(Ⅲ)	Ⅱ
巫溪县	0.635280	Ⅳ	Ⅳ
武隆区	0.546206	Ⅲ	Ⅲ
渝北区	0.660311	Ⅳ(Ⅲ)	V
渝中区	0.332760	Ⅱ	Ⅱ
云阳县	0.628634	Ⅳ	Ⅳ
长寿区	0.628746	Ⅳ(Ⅲ)	Ⅲ
忠县	0.681026	Ⅳ(Ⅲ)	Ⅲ

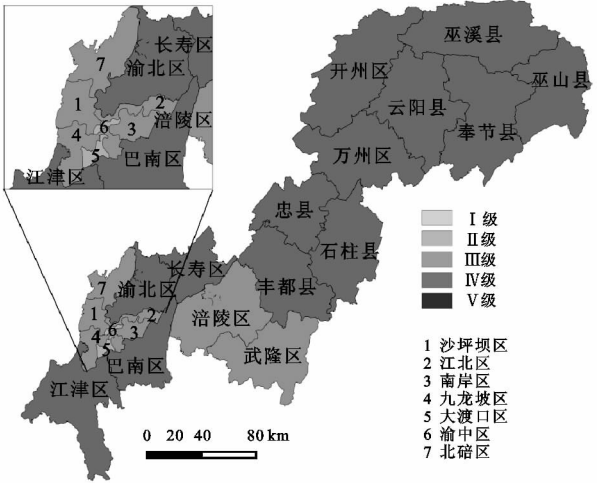


图 1 三峡库区重庆段水资源安全利用空间分异

表 4 水资源利用安全子系统模型参数表

子系统	BP 模型	迭代次数	输出与期望相关系数
经济安全	(4,6,1)	300	0.9911
社会安全	(4,10,1)	71	0.9869
生态安全	(6,12,1)	325	0.9960
供需安全	(2,2,1)	19	0.9718

经过训练,各子系统训练样本实际输出均在期望输出等级范围内,且相关系数均在 0.97 以上,模型精度较高可以投入使用。将各子系统实测数据分别输入训练好的网络中,得到各区县各个子系统的水资源安全评价等级,将评价结果导入 ArcGIS 中进行可视化展示,结果见图 2。

图 2 展示了三峡库区重庆段水资源安全利用各子系统的安全状况。图 2A 展示了水资源经济安全子系统的空间分异,其中巫山县的水资源经济安全因其人均 GDP 较低,万元工业产值用水量和万元 GDP 耗水量过高,属于较不安全等级,开州区、云阳、忠县等 7 个区县因其人均 GDP 较低,基本都在 25 000 元以下,其他经济安全因子等级较为适中,属于基本安全等级;图 2B 展示了水资源社会安全的空间分异,其中除巴南区以外的主城区因其城镇化率过高、人口密度过大、人均粮食较少等原因均属于极不安全等级,而城镇化率较高得巴南区和万州区、人口自然增长率相对较高的开州区和云阳县,以及各项社会安全因子都稍偏低的巫山县均属于较不安全等级;图 2C 展示了水资源生态安全的空间分异,其中因渝中区酸雨频度过高且无农作物收成、大渡口区化肥施用量过多且粮食产量低、九龙坡区各项社会安全指标均偏低、武隆县和巫溪县的酸雨频度过高且生态用水比例偏低等因素,这些区县的生态安全等级最低为基本安全;图 2D 展示了水资源供需安全的空间分异,自上游向下游呈等级升高趋势,其中除渝北和北碚以外的

3 结果与分析

3.1 三峡库区重庆段水资源安全利用空间分异评价

3.1.1 水资源安全利用总体评价 将收集到的 2014 年三峡库区重庆段水资源安全利用评价指标实测数据输入训练好的 BP 神经网络,得到 2014 年三峡库区重庆段各区县的水资源安全利用等级,将评价结果导入 ArcGIS 中进行等级划分,结果见图 1。图 1 展示了 2014 年三峡库区重庆段水资源安全利用的总体状况,整体分布在Ⅱ级(较不安全)到Ⅳ级(较安全之间)。其中渝中区和大渡口区的水资源安全利用等级最低,为较不安全等级;沙坪坝区、江北区、南岸区、九龙坡区、北碚区、涪陵区和武隆区稍好为基本安全;其他区县为较安全等级。

3.1.2 水资源安全利用子系统空间分异评价 为了更进一步的分析各区县的水资源安全利用等级差异,需对各子系统水资源安全进行进一步评价。根据 2.1 中指标的分类,分别构建水资源经济安全、社会安全、生态安全和供需安全 4 个子系统的 BP 神经网络评价模型,经过多次调试,各子系统水资源安全利用评价模型构建结果见表 4。

主城区以及江津区、巴南区、涪陵区和开州区,因其人均生活用水量较高,而产水模数较低均属于较不安全等级。

综合图 1 和图 2 可以得出,造成 2014 年渝中区和大渡口区水资源利用安全等级偏低是原因主要是其社会、生态和供需安全等级较低。从图 1 可以看

出,主城区的水资源利用安全总体是低于库区其他区县的,虽然其经济水平相对较高,但相应的人口压力大,资源约束性强,反而在经济相对一般的郊县,各项水资源安全指标因子较为均衡,长短互补,水资源利用较为安全。

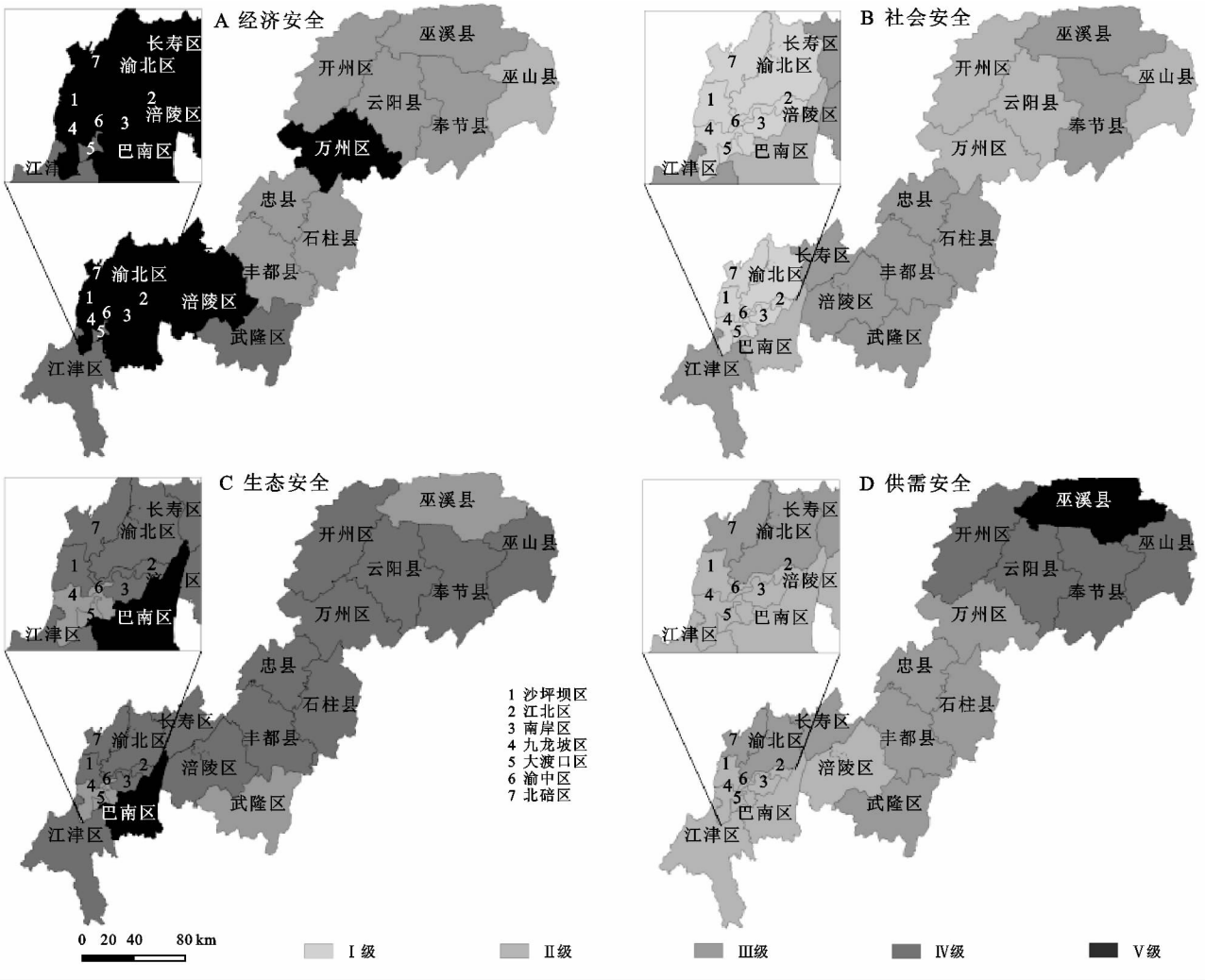


图 2 三峡库区重庆段水资源经济安全、社会安全、生态安全、供需安全等级

### 3.2 三峡库区重庆段水资源安全演变趋势

3.2.1 三峡库区重庆段水资源安全利用动态评价

同横向指标选取原则,选取  $X_1, X_4, X_5, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{18}, X_{20}$  和  $X_{21}$  共 14 个指标构建三峡库区重庆段水资源安全利用纵向评价指标体系。并根据指标分类对应的分为水资源经济安全、社会安全、生态安全和供需安全 4 个子系统。构建出的 BP 神经网络模型各参数及评价结果见表 5。

表 5 中以水资源总体安全为例, (14, 10, 1) 表示水资源总体安全利用评价 BP 模型输入层为 14 个神经元, 隐含层为 10 神经元, 输出层为 1 个神经元, 其他模型以此类推。从表中可以看出, 从 2000—2014 年, 三峡库区重庆段的水资源利用安全等级总体呈稳步上升趋势。从各子系统安全的历年变化来看, 波动

较大的为生态安全子系统, 主要是因为 2006—2009 年这 4 a 的化肥农药施用量过高且废水排放量巨大, 这三项指标均是 15 a 来最大的几年。而后的几年, 一方面随着科技的进步, 机械化农业使得化肥农药的配比更精准, 降低了化肥农药的流失与浪费; 另一方面有效耕作面积在减少, 农村老龄化问题严重, 劳动力缺失, 居民不靠耕作创收, 只是满足个体粮食补给; 第三方面绿色农业生态农业等的政策的实施得到了良好的社会效应, 使得化肥农药的用量得到明显控制。肖新成等<sup>[20]</sup>根据 DPSIR 原理, 运用结构方程模型从农业面源污染的角度下对三峡库区重庆段 2000—2011 年的水资源安全进行了评价, 得到 12 a 间重庆三峡库区水资源安全总体呈先降低后升高的趋势 (因所选指标存在差异, 这里仅用整体趋势进行对比)。其评价视角可对应为本文中的水资源生态安全子系统,

由表 5 可以看出,2000—2011 年这 12 a 间,三峡库区重庆段水资源生态安全总体亦呈现先降低后升高的趋势,评价结果具有一致性。近 15 a 水资源供需方面在基本安全和非常安全之间波动变化,根据相关资料对饮用水困难人口及高温天数的统计,2006 年、2011 年和 2013 年,库区均出现了不同程度的饮用困难和高温干旱,因此这几年水资源供需安全等级较低;近年来,政府加大了对排污系统的规范化整治力度,在水资源规划中也明确要求降低各类用水总量和各项污染物排放总量,根据《重庆市十三五规划》中关于“十二五”规划主要发展指标进展情况的统计,各类用水总量与污染物排放总量均提前超额完成了指标,经济安全子系统呈稳步上升趋势;社会安全子系统基本保持在基本安全等级,近两年有上升趋势。

表 5 三峡库区重庆段水资源安全利用评价模型及结果

年份	总体安全 (14,10,1)[58]	经济安全 (2,7,1)[226]	社会安全 (6,5,1)[90]	生态安全 (4,3,1)[126]	供需安全 (2,10,1)[295]
2000 年	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ
2001 年	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅲ
2002 年	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ
2003 年	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ
2004 年	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ
2005 年	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ
2006 年	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ
2007 年	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅴ
2008 年	Ⅲ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅴ
2009 年	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅳ
2010 年	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2011 年	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ
2012 年	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ
2013 年	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅲ
2014 年	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ

注:方括号内数字代表达到误差要求的迭代次数,下同。

3.2.2 三峡库区重庆段水资源安全利用演变趋势 基于 R 语言 zoo 包和 forecast 包,构建 ARIMA 指标预测模型。先以 2000—2012 年的历史数据作为训练样本,2013 年、2014 年的历史数据作为验证样本对预测值进行误差精度验证,各指标预测误差百分比均在 10% 以内,预测误差满足要求。之后以 2000—2014 年共 15 a 的历史数据作为训练样本,预测 2015—2020 年共 6 a 的各评价指标数据,进行归一化后构建 BP 神经网络水资源利用安全评价模型,因指标极值发生变化,评价模型与 3.2.1 中存在细微差异但前 15 a 评价结果并无差异,因此只展现 2015—2020 年的评价结果,具体见表 6,模型参数含义同表 5。

从表 6 可以看出 2015 年之后的 6 a,三峡库区重庆地段的水资源利用安全总体由较安全向非常安全

转化。4 个子系统中,供需安全稳定在较为安全等级,其他 3 个子系统均向非常安全转化。由此可以看出,未来影响水资源安全利用等级的主要因素为供需方面的指标,在本文选取的指标中,人均用水量的高低是可以通过调控进行引导的,如通过政策控制区域人口数量,实行阶梯水价等。而生态方面的影响次之,但随着国家大力开展生态保护与生态补偿,生态安全总体走向良好。本研究运用 BP 神经网络机器学习算法对三峡库区重庆段水资源安全利用进行了评价,对水资源危机起到预警作用,并为决策者提供了科学依据。选用 RF 模型及已有相关研究成果进行了对比,研究结果具有一致性。选用机器学习算法有效的解决了指标赋权过程中的主观性,充分发掘了指标与等级之前的内在联系,使评价结果更客观可信,为水资源安全治理提供了有力的决策支撑。但在运用 BP 模型进行评价的过程中,仅选用了 3 层神经网络模型,有学者提出度隐含层神经网络泛化能力更强,预测精度更高,在今后的研究中将尝试建立多隐层神经网络来进行进一步研究。

表 6 2015—2020 年三峡库区重庆段水资源安全利用等级

年份	总体安全 (14,10,1)[58]	经济安全 (2,7,1)[230]	社会安全 (6,5,1)[90]	生态安全 (4,3,1)[124]	供需安全 (2,10,1)[295]
2015 年	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
2016 年	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
2017 年	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
2018 年	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ	Ⅳ
2019 年	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ
2020 年	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅳ

4 结 论

(1) 结合水资源安全的内涵及机理,参考国内外水资源安全指标体系,基于水资源经济安全、社会安全、生态安全和供需安全和 4 个角度,结合指标可获取性,选取 21 个指标因子构建了三峡库区重庆段水资源安全利用评价指标体系并明确了各指标评价等级的阈值范围。

(2) 运用 3 层 BP 神经网络模型对研究区 2014 年的水资源安全利用进行了评价,并选取 RF 模型及相关研究成果进行了可行性验证。得出渝中区和大渡口区的水资源安全利用等级最低为较不安全,沙坪坝区、江北区等 7 个区县稍好为基本安全。通过对子系统的评价得出了各区县水资源安全的短板,如巫溪县的经济安全、主城区的社会安全等是制约该区域水资源安全利用的主要因素,应加强该方面的管制与调控。

(3) 构建 BP 神经网络模型对研究区 2000—2014 年的水资源安全进行了评价,并运用 ARIMA

模型对各指标进行了预测。得出过去的 15 a 间,研究区水资源生态安全方面是限制水资源安全利用向更安全转变的主要逆向力,供需方面次之。2015—2020 年的水资源安全评价结果表明,研究区水资源供需安全是限制水资源总体转好的主要因素,生态安全次之,应着重加强这两方面的管制与调控。

参考文献:

[1] 张凤太,苏维词. 贵州省岩溶地区水土资源生态安全研究[J]. 水电能源科学,2015,33(9):152-154.

[2] Hurk M, Mastenbroek E, Meijerink S. Water safety and spatial development;an institutional comparison between the United Kingdom and the Netherlands [J]. Land Use Policy,2014,36(1):416-426.

[3] Zhou Z Y, Zhang X J, Dong W Y. Fuzzy Comprehensive Evaluation for Safety Guarantee System of Reclaimed[J]. Procedia Environmental Sciences,2013,18: 227-235.

[4] 许波,谢漠文,何兴东,等. 基于边坡单元的水库库岸稳定性层次分析与评价[J]. 水土保持通报,2016,36(3): 290-296.

[5] 刘洁,谢丽芳,杨国英,等. 丰水区城镇化进程与水资源利用的关系:以江苏省为例[J]. 水土保持通报,2016,36(3):193-199.

[6] 陈亚婷,张阳生,侯红蕊. 青海省湟源县滨水环境模糊综合评判及其建设[J]. 水土保持通报,2013,33(6):187-191.

[7] 明均仁,肖凯. 基于 R 语言的面向需水预测的随机森林方法[J]. 统计与决策,2012(9):81-83.

[8] 张颖,高倩倩. 基于灰色模型和模糊神经网络的综合水质预测模型研究[J]. 环境工程学报,2015,(2):537-545.

[9] 叶超,郝付军. 基于支持向量机和 BP 神经网络的滑坡变形复合式预测[J]. 水土保持通报,2016,36(3):332-337.

[10] 崔东文. 随机森林回归模型及其在污水排放量预测中的应用[J]. 供水技术,2014,8(1):31-36.

[11] Xuan W, Quan C, Shuyi L. An optimal water allocation model based on water resources security assessment and its application in Zhangjiakou Region, northern China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012,69(12):57-65.

[12] 杨家伟. 重庆市城镇水安全评价及保障体系研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.

[13] 赖成光,陈晓宏,赵仕威,等. 基于随机森林的洪灾风险评估评价模型及其应用[J]. 水利学报,2015,46(1):58-66.

[14] 张颖,高倩倩. 基于随机森林分类算法的巢湖水质评价[J]. 环境工程学报,2016,10(2):992-998.

[15] 赵超,申烨红,赵先贵. 基于水足迹理论的重庆市 2000—2012 年水资源评价[J]. 四川环境,2015,34(3): 62-68.

[16] 马骏,李昌晓,魏虹,等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报,2015,35(21):7117-7129.

[17] 胡昌军. 双隐层 BP 神经网络模型在区域水安全评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(3):196-200.

[18] 程福亨. BP 神经网络与模糊神经网络在空气质量评价中的研究[D]. 广州:广东工业大学,2012.

[19] 施开放,刁承泰. 重庆市三峡库区水资源承载力评价[J]. 灌溉排水学报,2012,31(5):108-112.

[20] 肖新成,何丙辉,倪九派,等. 农业面源污染视角下的三峡库区重庆段水资源的安全性评价:基于 DPSIR 框架的分析[J]. 环境科学学报,2013,33(8):2324-2331.



(上接第 291 页)

[14] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.

[15] 彭立,刘邵权. 土地功能视角下的土地资源人口承载力研究:以攀枝花、六盘水市为例[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(S1):74-81.

[16] 于广华,孙才志. 环渤海沿海地区土地承载力时空分异特征[J]. 生态学报,2015,35(14):4860-4870.

[17] 雷国平,常熙月. 哈尔滨所辖市县土地承载力分析[J].

东北农业大学学报,2013,44(5):132-137.

[18] 宋艳春,余敦. 鄱阳湖生态经济区资源环境综合承载力评价[J]. 应用生态学报,2014,25(10):2975-2984.

[19] 朱天明,杨桂山,苏伟忠,等. 长三角地区城市土地集约利用与经济社会发展协调评价[J]. 资源科学,2009,31(7):1109-1116.

[20] 彭资,谷成燕,刘智勇,等. 东江流域 1989—2009 年土地利用变化对生态承载力的影响[J]. 植物生态学报, 2014,38(7):675-686.