

# 基于 AHP - BP 模型的文山州水资源 可持续利用评价分析

张代凤

(云南省文山州水利电力勘察设计院, 云南 文山 663000)

**摘要:** 基于层次分析法和 BP 神经网络的基本原理和方法, 结合区域实际, 利用层次分析法构建了符合丰水地区水资源可持续利用指标体系和评价标准, 从水资源条件、水资源开发利用效率、生态环境状况、水资源合理配置和水资源管理能力五个方面提出 50 个评价指标, 运用双隐层 BP 神经网络, 建立 AHP-BP 水资源可持续利用评价模型, 对文山州不同规划水平年水资源可持续利用进行综合评价。结果表明: ①不同规划水平年各评价区域水资源可持续利用评价为 2~3 级, 即处于可持续与基本可持续之间, 反映了文山州现状及中、长期水资源可持续利用状况, 符合区域发展实际。②AHP-BP 评价模型克服了层次分析法判断矩阵构造主观性强和一致性不易检验等缺点, 满足客观评价要求, 且双隐层 BP 神经网络具有比单隐层网络学习时间短, 参数收敛迅速, 自适应能力强等优点。

**关键词:** 双隐层 BP 神经网络; 层次分析法; 水资源可持续利用; 综合评价; 文山州

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)04-0203-07

## Evaluation of sustainable use of water resources in Wenshan based on AHP-BP model

ZHANG Daifeng

(Yunnan Province Wenshan Water Power Survey and Design Institute, Wenshan 663000, China)

**Abstract:** Based on the basic principle and method and BP neural network AHP, Combined with the actual construction area, the paper built the index system and evaluation standard of sustainable utilization of water resources in accordance with abundant water area by using the analytic hierarchy process, brought forward 50 evaluation indexes from five aspects of water resources condition, development and utilization efficiency of water resources, state of ecological environment, rational allocation of water resources and water resources management ability. Using double hidden layer BP neural network, it established the sustainable utilization evaluation model of AHP-BP water resources and comprehensively evaluated the state of sustainable utilization of water resources of Wenshan state in different level years. The results show that the evaluation grade of sustainable utilization of regional water resources in different planning level years is 2 ~ 3, which is between sustainable and basic sustainable and reflects the state of Wenshan and the status of long-term water resources sustainable utilization that is accordance with the actual of regional development. The result shows that the model of AHP-BP evaluation and the evaluation method established in the study is reasonable and feasible. The AHP-BP evaluation model overcomes the shortcomings of the subjectivity of AHP judgment matrix and the consistency being not easy to test and can meet the requirements of objective evaluation. The two-hidden layer BP neural network has the advantages of short learning time, quick converge speed of parameters and strong adaptive ability etc compared with single hidden layer network.

**Key words:** two-hidden-layer BP neural network; AHP; sustainable utilization of water resources; comprehensive evaluation; Wenshan Prefecture of Yunnan Province

# 1 概述

水资源可持续利用是指在维持水的持续性和生态系统整体性的条件下,支持人口、资源、环境与经济协调发展和满足代内和代际人用水需要的全部过程<sup>[1-2]</sup>,水资源的可持续利用评价是区域可持续发展综合分析评价的核心技术之一,其难点是如何有效处理评价过程中存在的主观随意性、模糊性和随机性等不确定性问题<sup>[3]</sup>。目前,区域水资源可持续利用评价最常用的方法有模糊集理论方法、人工神经网络理论方法、灰色系统理论法、数理统计方法等等<sup>[4]</sup>,但由于水资源可持续利用系统的复杂性,评价指标众多,对评价指标的筛选普遍采用层次分析法<sup>[5-6]</sup>,存在明显的主观臆断成分。目前,国内虽然提出了一些水资源可持续利用指标体系,但普遍存在指标信息覆盖不全或指标间信息的重叠,影响了评价的科学性<sup>[7-8]</sup>。

为能客观地对区域水资源可持续利用进行评价,本文参考相关区域水资源可持续利用评价的若干指标<sup>[1-2,4-5,9-10]</sup>,构建符合丰水地区水资源可持续利用评价的指标体系和标准,并针对层次分析法判断矩阵构造主观性强和一致性不易检验等缺点,在层次分析法中引入双隐层 BP 神经网络,建立 AHP-BP 水资源可持续利用评价模型,对文山州水资源可持续利用进行评价分析,为区域正确的水资源可持续利用策略提供决策依据。

## 2 AHP-BP 评价模型

### 2.1 方法概述

层次分析法(The Analytic Hierarchy Process,以下简称 AHP)是由美国运筹学家、匹兹堡大学萨第(T. L. Saaty)教授于 20 世纪 70 年代提出,于 1982 年引入我国。AHP 基本原理是排序原理,即最终将各方法(或措施)排出优劣次序,作为决策的依据。具体可描述为:AHP 首先将决策的问题看作受多种因素影响的大系统,这些相互关联、相互制约的因素可以按照它们之间的隶属关系排成从高到低的若干层次,即构造递阶层次结构。然后请专家、学者或权威人士对各因素两两比较重要性,再利用数学方法,对各因素层层排序,最后对排序结果进行分析,辅助进行决策<sup>[11-12]</sup>。层次分析法属于定性与定量相结合的评价方法,存在明显的主观臆断成分。

BP 网络是一种单向传播的多层前馈神经网络,其主要特点是信号前向传播,误差反向传播。在前

向传播中,输入信号从输入层经隐含层逐层处理,直至输出层。每一层的神经元状态只影响下一层神经元状态,如果输出层得不到期望输出,则转入反向传播,根据预测误差调整网络权值和阈值,从而使 BP 神经网络预测输出不断逼近期望输出。由非线性变换单元组成的 BP 神经网络,不仅结构简单,而且具有良好的非线性映射能力 BP 网络主要应用于函数逼近、模式识别、分类和数据压缩等领域<sup>[13-14]</sup>。根据隐含层数的多少,BP 网络可以划分为单隐层网络和多隐层网络。理论上,单隐层 BP 网络已能映射或逼近任何函数,故常采用含有一个隐层的 BP 网络。研究表明,同单隐层相比,多隐层 BP 网络泛化能力强,预测精度高。其隐层层数的选择需从网络精度和训练时间上考虑,对于较简单的映射关系,在精度满足需求时可选择单隐层,以求网络速度;对于复杂的映射关系,可选择多隐层,以期提高网络的预测精度<sup>[15]</sup>。本文在设计过程中发现,针对大系统多指标的区域水资源可持续利用评价,双隐层 BP 网络更加有效。

本文结合层次分析法和 BP 网络的优点,将这两种方法相结合用于水资源可持续利用的综合评价。

### 2.2 指标体系及评价标准

本文结合丰水地区水资源开发利用现状,综合国内水资源可持续利用指标体系的优点,利用层次分析法构建适用于丰水地区水资源可持续利用评价的指标体系和标准,将水资源可持续利用指标体系分为目标层 A、准则层 B 和指标层 C 3 个层次。目标层 A 主要用于综合评价区域水资源可持续利用状况;准则层 B 用于反映水资源可持续利用水平和内部协调性;指标层 C 反映水资源可持续利用水平中各个准则层的具体指标。

为衡量区域水资源可持续利用的真实状态,依据以下原则提出评价指标及标准:a. 尽量采用已有的国家标准或国际标准中的指标,如文献[5]中的指标及标准;b. 参考或类比相关水资源可持续利用评价论文<sup>[1-2,4-5,9-10]</sup>的标准值;c. 评价标准值应尽量与国家、地方水利发展规划<sup>[16]</sup>的目标值相一致;d. 对那些没有参考或类比的评价指标,采用专家咨询法确定。为能合理对区域水资源可利用状况进行评价,将评价标准分为 1~5 级,依次表示优劣,并适当划定其隶属度。

区域水资源可持续利用评价指标体系及评价标准见表 1。

表 1 区域水资源可持续利用评价指标体系及评价标准

mm, m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, %, m<sup>3</sup>/万元, m<sup>3</sup>/亩, m<sup>3</sup>/人, 元, 万元, kg/m<sup>3</sup>, L/(人·d), 人/万人

目标 准则		指标层 C							指标 上下限
层 A	层 B	指 标	计算公式	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	
水资源 条件 B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> 降水量	统计口径		≥1500	≥1200	≥1000	≥800	<800	400 ~ 3000
	C <sub>2</sub> 径流深	统计口径		≥600	≥500	≥400	≥300	<300	150 ~ 1200
	C <sub>3</sub> 水资源稳定性	近 10 年平均水资源量/多年平均水资源量		≥0.95	≥0.9	≥0.85	≥0.8	<0.8	0.4 ~ 1.9
	C <sub>4</sub> 人均水资源	水资源总量/总人口		≥5000	≥4000	≥3000	≥2000	<2000	1000 ~ 10000
	C <sub>5</sub> 区域人均水资源可利用量	水资源可利用量/总人口		≥2000	≥1500	≥1000	≥700	<700	350 ~ 4000
	C <sub>6</sub> 水资源密度	水资源总量/国土面积		≥80	≥60	≥40	≥20	<20	10 ~ 160
	C <sub>7</sub> 地表水资源比重	地表水资源量/水资源总量 × 100%		≥95	≥85	≥65	≥50	<50	25 ~ 100
	C <sub>8</sub> 水功能区达标率	水功能区达标个数/水功能区总数 × 100%		≥90	≥75	≥60	≥40	<40	20 ~ 100
	C <sub>9</sub> 有效降水率	3 ~ 5 月降水量/平均降水量 × 100%		≥40	≥30	≥20	≥10	<10	5 ~ 100
水资源 开发 利用 效率 B <sub>2</sub>	C <sub>10</sub> 水资源开发利用率	供水总量/水资源总量 × 100%		≤10	≤15	≤25	≤40	>40	2 ~ 80
	C <sub>11</sub> 地表水控制利用率	地表蓄水工程调节水量/地表水资源总量 × 100%		≥20	≥10	≥5	≥1	<1	0.5 ~ 50
	C <sub>12</sub> GDP 用水量	用水总量/GDP		≤100	≤150	≤200	≤300	>300	50 ~ 600
	C <sub>13</sub> 工业增加值用水量	工业用水量/工业增加值		≤40	≤60	≤80	≤100	>100	20 ~ 200
	C <sub>14</sub> 工业用水比例	工业用水量/用水总量 × 100%		≥40	≥30	≥20	≥10	<10	5 ~ 80
	C <sub>15</sub> 农业灌溉用水定额	农业灌溉用水/农业灌溉面积		≤200	≤300	≤400	≤500	>500	100 ~ 1000
	C <sub>16</sub> 城镇居民综合用水定额	城镇年取水总量/城镇总人口		100 ~ 150	150 ~ 250	250 ~ 350	350 ~ 450	>450 或 50 ~ 100	50 ~ 600
	C <sub>17</sub> 农田灌溉水利用系数	农业实际利用渠道净水量/渠首取水水量		≥0.55	≥0.5	≥0.40	≥0.35	<0.35	0.175 ~ 1
	C <sub>18</sub> 万元工业增加值用水下降率	(10 年前工业万元产值取水水量 - 当年万元产值取水水量)/10 年前工业万元产值取水水量 × 100%		≥10	≥8	≥5	≥2.5	<2.5	1.25 ~ 20
区域 水资源 可持续 利用 现状 B <sub>3</sub>	C <sub>19</sub> 区域饮水不安全人口比重	饮水不安全人口(包括饮水困难和水质不达标)/总人口 × 100%		≤10	≤20	≤30	≤40	>40	5 ~ 80
	C <sub>20</sub> 地下水利用指数	地下水实际开采量/地下水可开采量		≤1.1	≤1.25	≤1.35	≤1.45	>1.45	0.5 ~ 2.9
	C <sub>21</sub> 人均供水量	供水总量/总人口		≥500	≥450	≥350	≥300	<300	150 ~ 1000
	C <sub>22</sub> GDP 废水排放量	废水排放总量/GDP		≤10	≤15	≤25	≤30	>30	1.65 ~ 20
	C <sub>23</sub> 工业废水排放量	工业废水排放量/工业增加值		≤20	≤30	≤40	≤50	>50	10 ~ 100
	C <sub>24</sub> 人均废水排放量	废水排放总量/总人口		≤10	≤15	≤25	≤30	>30	5 ~ 60
	C <sub>25</sub> 综合污染指数	水质参评项目加权平均值		≤0.15	≤0.35	≤0.6	≤1	>1	0.075 ~ 2
	C <sub>26</sub> 区域污径比	入河排污量/河流径流量 × 100%		≤1	≤5	≤10	≤15	>15	0.5 ~ 30
	C <sub>27</sub> 植被覆盖率	植被面积/土地面积 × 100%		≥40	≥30	≥20	≥10	<10	5 ~ 80
水 资源 合理 配置 B <sub>4</sub>	C <sub>28</sub> 河道内生态用水比例	河道内生态用水量/水资源总量 × 100%		≥50	≥45	≥40	≥30	<30	15 ~ 100
	C <sub>29</sub> 污水处理率	污水处理达标量/污水排放总量 × 100%		≥80	≥60	≥40	≥20	<20	10 ~ 100
	C <sub>30</sub> 区域水土流失率	水土流失面积/土地面积 × 100%		≤20	≤30	≤40	≤60	>60	10 ~ 120
	C <sub>31</sub> 缺水率	区域缺水总量/区域需水总量 × 100%		≤1	≤5	≤10	≤15	>20	0.5 ~ 40
	C <sub>32</sub> 10 年用水变化均衡率	10 年区域用水增长率/同期全国用水增长率 × 100%		≤ ± 20	≤ ± 30	≤ ± 40	≤ ± 50	> ± 50	10 ~ 100
	C <sub>33</sub> 用水结构系数	10 年内生活、工业、农业和生态用水结构变化系数		≤0.2	≤0.4	≤0.6	≤0.8	>0.8	0.1 ~ 1.6
	C <sub>34</sub> 用水弹性系数	用(需)水量增长率/同期 GDP 增长率		≤0.2	≤0.4	≤0.6	≤0.8	>0.8	0.1 ~ 1.6
	C <sub>35</sub> 单方水 GDP	地区生产总值/总用水量		≥40	≥30	≥20	≥10	<10	5 ~ 80
	C <sub>36</sub> 年用(需)水增长率	[(基准年需水量 - 基准年前 10 年需水量) <sup>1/10</sup> - 1] × 100%		≤0.8	≤1.2	≤1.6	≤2.0	>2.0	0.4 ~ 4.0
配 置 B <sub>4</sub>	C <sub>37</sub> 工业用水重复利用率	工业取水量/(工业取水量 + 重复利用量) × 100%		≥65	≥55	≥45	≥30	<30	15 ~ 130
	C <sub>38</sub> 自来水普及率	自来水普及人口/总人口 × 100%		≥90	≥80	≥70	≥60	<60	30 ~ 100
	C <sub>39</sub> 管网漏损率	漏损水量/水源取水总量 × 100%		≤10	≤20	≤30	≤40	>40	1.25 ~ 20
	C <sub>40</sub> 供水保证率	满足需水要求次数/供水次数		≥95	≥90	≥80	≥70	<70	35 ~ 100
	C <sub>41</sub> 区域平均城镇化率	城镇人口/总人口 × 100%		≥45	≥35	≥25	≥15	<15	7.5 ~ 100
	C <sub>42</sub> 人均 GDP	GDP/总人口		≥5	≥3	≥1	≥0.6	<0.3	0.15 ~ 20
	C <sub>43</sub> 单方水粮食产量	灌溉粮食总产量/灌溉用水量		≥2.0	≥1.5	≥1.0	≥0.6	<0.6	0.3 ~ 4.0

续表 1

目标 准则		指标层 C							
层 A	层 B	指 标	计算公式	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	指 标 上下限
区 域 水 资 源 可 持 续 利 用 现 状	C <sub>44</sub>	万人拥有水利科技人员	水利科技人员数/总人口	≥5	≥3	<3			1.0~10.0
		C <sub>45</sub> 水利信息化程度	定性评价,用百分比表示	≥80	≥60	<60			10~100
	水 资 源 管 理 能 力	C <sub>46</sub> 节水率	节水灌溉面积/有效灌溉面积×100%	≥70	≥50	<50			25~100
		C <sub>47</sub> 水资源费收取率	水资源费实收额/水资源费应征总额×100%	≥85	≥70	<70			35~100
		C <sub>48</sub> 工程配套率	实际配套工程数/设计(规划)配套工程数×100%	≥80	≥60	<60			30~100
		C <sub>49</sub> 取水许可率	年度取水许可总量/年度用水总量×100%	≥90	≥80	<80			40~100
B <sub>5</sub>	C <sub>50</sub> 计划用水率	计划用水量/总用水量×100%	≥70	≥50	<50			10~100	
		隶属度		1.0~0.7	0.4~0				
		隶属度		0.7~0.4	0~0				
				1.0~0.8	0.6~0.4	0.2~0			
				0.8~0.6	0.4~0.2	0~0			

### 2.3 AHP-BP 评价模型的建立

基于 AHP-BP 模型的区域水资源可持续利用评价步骤可分为:利用层次分析法构建指标体系、双隐层 BP 神经网络训练和预测三步,如图 1 所示。

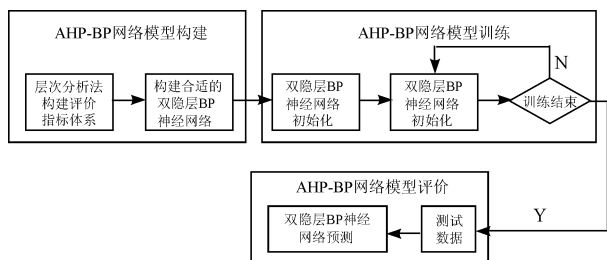


图 1 区域水资源可持续利用评价流程

### 2.4 水资源可持续利用评价的实现

2.4.1 指标一致性处理 由于表 1 中评价标准分为正向指标和负向指标,对于正向指标其值越大则评价越优;负向指标取值正好相反,即相应的值越小其评价越优。本文将负向指标进行处理,即对这些指标的原始值取倒数<sup>[5,17]</sup>(为便于计算,取倒后再同时乘以 100)。

2.4.2 数据处理 由于网络的各个输入数据常常具有不同的物理意义和不同的量纲及数量级,因此,在网络训练前要先对于原始数据进行归一化处理。数据归一化方法很多,本文采用最大最小法,公式如下:

$$\hat{x} = (x - x_{\max}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式中:  $\hat{x}$  为经过标准化处理的数据;  $x$  为原始数据,  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为数据序列中的最大数和最小数。经过标准化处理后,数据处于  $[0 \sim 1]$  范围之内,有利于网络训练。

2.4.3 训练样本设计 本文按照表 1 水资源可持续利用评价指标和标准,将准则层 B<sub>1</sub>~B<sub>4</sub> 的每一指标层的每一等级评价指标值利用线性插值方法构造

20 个训练样本,即 1~20 号样本为 1 级,对应隶属度  $[1.0, 0.8]$ ; 21~40 号样本为 2 级,对应隶属度  $[0.8, 0.6]$ ; 41~60 号样本为 3 级,对应隶属度  $[0.6, 0.4]$ ; 61~80 号样本为 4 级,对应隶属度  $[0.4, 0.2]$ ; 81~100 号样本为 5 级,对应隶属度  $[0.2, 0]$ ,即将每一评价指标的 100 个样本作为学习样本;同理,构造准则层 B<sub>5</sub> 的训练样本,即 1~20 号样本为 1 级,对应隶属度  $[1.0, 0.7]$ ; 21~40 号样本为 2 级,对应隶属度  $[0.7, 0.4]$ ; 41~60 号样本为 3 级,对应隶属度  $[0.4, 0]$ ,即将每一评价指标的 60 个样本作为学习样本。以文山州各区域不同规划水平年水资源可持续利用指标数据作为测试样本,即为待评价样本。

依据表 1 评价指标及标准, C<sub>1-9</sub>~B<sub>1</sub>、C<sub>10-21</sub>~B<sub>2</sub>、C<sub>22-30</sub>~B<sub>3</sub>、C<sub>31-43</sub>~B<sub>4</sub> 分为 5 个等级,依次对应隶属度 1~0; C<sub>44-50</sub>~B<sub>5</sub> 分为 3 个等级,对应隶属度 1~0; B<sub>1-5</sub>~A 分为 4 个等级,对应隶属度 1~0。并将各等级采用适当的语言进行描述,见表 2。

2.4.4 网络训练 此处以表 1 中 C<sub>1-9</sub>~B<sub>1</sub> 的网络学习训练为例进行说明。本文采用四层 BP 神经网络(双隐层)对区域水资源条件(准则层 B<sub>1</sub>)进行评价,网络包括输入层、隐含层和输出层 3 部分。以表 1 中指标层 C<sub>1</sub>~C<sub>9</sub> 指标作为输入向量,即输入层神经元个数为 9 个;以对应隶属度作为输出向量,即输出层的神经元数为 1 个;对于各隐层神经元个数的选取,目前并没有统一的计算方法,本文采用目前较为普遍的 Kolmogorov 定理<sup>[18-19]</sup>确定隐含层单元数,即如果隐层层数为一层,则隐层神经元数  $M = 2n + 1$  ( $n$  为输入向量);如果隐层层数为二层或二层以上,则每个隐层神经元数必须小于  $2n + 1$ ,各个隐层神经元数之和也必须小于  $2n + 1$ 。

本文在确定隐层神经元数时,主要做法是:先依

据 Kolmogorv 定理得出一个初始神经元数,然后利用逐步增长或逐步修剪法确定最终神经元数<sup>[19]</sup>,经过反复试数,本例选取第一个隐层神经元数为 8,第二个隐层神经元数为 4,即网络评价模型结构为 9 - 8 - 4 - 1,隐含层和输出层传递函数分别采用 tansig

和 purelin,训练函数采用 traingdx,阈值和权值的学习函数采用 learnngd,性能函数采用 mse,设定期望误差为  $1 \times 10^{-4}$ ,最大训练轮回为 2000 次。经过计算,网络达到了较好的训练精度和评价要求。

表 2 准则层、目标层学习样本隶属度及评价

评价对象	模型结构	学习样本	分级标准	隶属度	定性描述	评价对象	模型结构	学习样本	分级标准	隶属度	定性描述
水资源条件评价 ( $C_{1-9} \sim B_1$ )	9-8-4-1	1~20号	1级	[1.0,0.8)	优	水资源合理配置评价 ( $C_{31-43} \sim B_4$ )	13-8-11-1	1~20号	1级	[1.0,0.8)	最合理
		21~40号	2级	[0.8,0.6)	良			21~40号	2级	[0.8,0.6)	合理
		41~60号	3级	[0.6,0.4)	中			41~60号	3级	[0.6,0.4)	基本合理
		61~80号	4级	[0.4,0.2)	差			61~80号	4级	[0.4,0.2)	不合理
		81~100号	5级	[0.2,0)	劣			81~100号	5级	[0.2,0)	极不合理
水资源开发利用效率评价 ( $C_{10-21} \sim B_2$ )	12-12-6-1	1~20号	1级	[1.0,0.8)	高	水资源管理能力评价 ( $C_{44-50} \sim B_5$ )	7-2-5-1	1~20号	1级	[1.0,0.7)	高
		21~40号	2级	[0.8,0.6)	较高			21~40号	2级	[0.7,0.4)	中
		41~60号	3级	[0.6,0.4)	中等			41~60号	3级	[0.4,0)	低
		61~80号	4级	[0.4,0.2)	低						
		81~100号	5级	[0.2,0)	较低						
生态环境状况评价 ( $C_{22-30} \sim B_3$ )	9-7-4-1	1~20号	1级	[1.0,0.8)	优	水资源可持续利用评价( $B_{1-5} \sim A$ )	5-6-2-1	1~25号	1级	[1.0,0.8)	理想可持续
		21~40号	2级	[0.8,0.6)	良			25~50号	2级	[0.8,0.6)	可持续
		41~60号	3级	[0.6,0.4)	中			51~75号	3级	[0.6,0.3)	基本可持续
		61~80号	4级	[0.4,0.2)	差			76~100号	4级	[0.3,0)	不可持续
		81~100号	5级	[0.2,0)	劣						

同理,对  $C_{10-21} \sim B_2$ 、 $C_{22-30} \sim B_3$ 、 $C_{31-43} \sim B_4$ 、 $C_{44-50} \sim B_5$  以及  $B_{1-5} \sim A$  进行网络训练,并确定双隐层神经元数等。

2.4.5 水资源可持续利用评价 采用 AHP - BP 评价模型,由指标层 C 到目标层 A 进行逐级评价,即先由指标层 C 对准则层 B 进行训练和评价,然后将各准则层的评价结果作为对目标层 A 的评价输入向量,最后由准则层 B 对目标层 A 进行最终训练和评价,实现指标层 C 到目标层 A 评价输出。在逐级评价过程中,采用适当的语言对各准则层和目标层进行描述,见表 2。

### 3 实例应用

文山州位于云南省东南部,属亚热带低纬度高原季风气候区,全州总面积 31 456 km<sup>2</sup>,辖文山、砚山、西畴、麻栗坡、马关、丘北、广南、富宁 8 县,现人口 345 万。境内河流分属珠江流域和红河流域,珠江流域为西江水系,面积 17 145 km<sup>2</sup>,占全州总面积的 54.5%,主要有南盘江、清水江、驮娘江、西洋江、普厅河、那马河等;红河流域为泸江水系,面积 14 311 km<sup>2</sup>,占全州总面积的 45.5%,主要有盘龙河、八布河、南利河、迷福河、那么果河等。境内降水量及水资源总量相对丰富:多年平均降水量 1 178.5

mm,水资源总量 157.7 亿 m<sup>3</sup>。近年来,随着城市的快速发展,部分河段和河流由于纳污能力有限、污水处理能力不足,已经出现较严重的水质污染问题,水资源可持续利用已对文山州经济社会持续发展产生了瓶颈效应<sup>[15]</sup>。

依据表 2,利用 AHP - BP 评价模型对文山州不同规划水平年水资源可持续利用状况进行评价,结果见表 3。分析表 2、表 3 可以得出以下结论:

(1)文山州各评价区域不同规划水平年水资源可持续利用综合评价为 2~3 级,即处于可持续与基本可持续之间,反映了文山州现状及中、长期水资源可持续利用状况,符合区域发展现状,说明研究建立的 AHP - BP 评价模型和评价方法是合理可行的,评价结果可以作为区域水资源可持续利用的决策依据。

(2)从规划水平年上看,各评价区域现状、中期水平年水资源可持续利用综合评价为 2~3 级,评价区域主要在水资源合理配置和水资源管理能力方面表现较差;规划长期水资源可持续利用均评价为 2 级,即可持续,表明各评价区域水资源可持续利用评价随着现状—中—长期逐渐趋于可持续。

(3)从水资源条件 B1 评价上看,不同规划水平年各评价区域水资源条件评价结果变化不大,这主要是由于影响 B1 的评价指标多属于相对静态的评

价指标,如降水量、径流深、水资源稳定性等,此类指标随时间变化较小,或是基本无变化。

(4)从水资源开发利用效率  $B_2$  评价上看,不同规划水平年各评价区域水资源开发利用效率评价为1~3级,即处于高与中等之间。横向上看,文山县、砚山县、麻栗坡县和马关县水资源开发利用处于较高水平,这主要由于文山县是文山州水资源管理区域内经济最发达的地区,是文山州政治、经济、文化中心,水资源开发利用程度最高;砚山县、麻栗坡县和马关县属区域内工、农业相对发达的地区,水资源开发利用具有一定的规模。纵向上看,各评价区域水资源开发利用随着现状—中—长期呈现较高水平发展态势。

(5)从生态环境状况  $B_3$  评价上看,不同规划水平年各评价区域生态环境状况变化趋势不明显,这是因为GDP废水排放量、工业废水排放量、污水处理率和水土流失率随现状—中—长期对生态环境状

况呈正面影响趋势,而人均废水排放量、区域污径比、综合污染指数又随现状—中—长期对生态环境状况呈负面影响趋势。要改善区域环境状况,必须采取加大污水处理率,提高用水效率,减小废水排放量等措施。

(6)从水资源合理配置  $B_4$  评价上看,不同规划水平年各评价区域水资源配置状况随着现状—中—长期逐渐趋于合理,表明随着水利建设和经济社会的快速发展,产业结构的调整及用水效率等的提升,区域水资源配置结构日趋合理。

(7)从水资源管理能力  $B_5$  评价上看,现状水平年水资源管理处于较低水平,这主要由于文山州水利信息化建设、取水许可和计划用水等均处于起步阶段,对水资源管理能力影响较大;而中、长期水资源管理能力评价输出结果完全一致,是由于均采用地方规划<sup>[16]</sup>的结果。

表3 区域不同规划水平年水资源可持续利用评价结果

水平年	评价区域	水资源条件 ( $C_{1-9} \sim B_1$ )		水资源开发利用效率 ( $C_{10-21} \sim B_2$ )		生态环境状况 ( $C_{22-30} \sim B_3$ )		水资源合理配置 ( $C_{31-43} \sim B_4$ )		水资源管理能力 ( $C_{44-50} \sim B_5$ )		水资源可持续利用 ( $B_{1-5} \sim A$ )	
		输出	评价	输出	评价	输出	评价	输出	评价	输出	评价	输出	评价
		结果	结果	结果	结果	结果	结果	结果	结果	结果	结果	结果	结果
2010	文山州	0.6344	2级,良	0.6345	2级,较高	0.6967	2级,良	0.4670	3级,基本合理	0.2789	3级,低	0.5387	3级,基本可持续
	文山县	0.5899	3级,中	0.7551	2级,较高	0.7781	2级,良	0.6118	2级,合理	0.2748	3级,低	0.6347	2级,可持续
	砚山县	0.5157	3级,中	0.6578	2级,较高	0.7809	3级,中	0.4112	3级,基本合理	0.2684	3级,低	0.6143	2级,可持续
	西畴县	0.6118	2级,良	0.5401	3级,中等	0.5642	3级,中	0.4928	3级,基本合理	0.2672	3级,低	0.4261	3级,基本可持续
	麻栗坡县	0.7622	2级,良	0.6111	2级,较高	0.7265	2级,良	0.4462	3级,基本合理	0.3236	3级,低	0.4730	3级,基本可持续
	马关县	0.7513	2级,良	0.6437	2级,较高	0.6990	2级,良	0.4225	3级,基本合理	0.2677	3级,低	0.4671	3级,基本可持续
	丘北县	0.6202	2级,良	0.5433	3级,中等	0.5862	3级,中	0.5363	2级,合理	0.2279	3级,低	0.4516	3级,基本可持续
	广南县	0.6427	2级,良	0.5650	3级,中等	0.6266	2级,良	0.4251	3级,基本合理	0.2932	3级,低	0.4488	3级,基本可持续
2020	文山州	0.7248	2级,良	0.5730	3级,中等	0.6493	2级,良	0.5650	3级,基本合理	0.3348	3级,低	0.4872	3级,基本可持续
	文山县	0.6204	2级,良	0.6965	2级,较高	0.8321	1级,优	0.7448	2级,合理	0.5117	2级,中	0.6900	2级,可持续
	砚山县	0.5849	3级,中	0.7450	2级,较高	0.8237	1级,优	0.6251	2级,合理	0.5117	2级,中	0.6483	2级,可持续
	西畴县	0.5220	3级,中	0.7154	2级,较高	0.8546	1级,优	0.6650	2级,合理	0.5117	2级,中	0.6640	2级,可持续
	麻栗坡县	0.5917	3级,中	0.7068	2级,较高	0.5724	3级,中	0.6347	2级,合理	0.5117	2级,中	0.5824	3级,基本可持续
	马关县	0.7429	2级,良	0.7107	2级,较高	0.8038	1级,优	0.6401	2级,合理	0.5117	2级,中	0.6486	2级,可持续
	丘北县	0.7362	2级,良	0.7176	2级,较高	0.7972	2级,良	0.6910	2级,合理	0.5117	2级,中	0.6737	2级,可持续
	广南县	0.6128	2级,良	0.6975	2级,较高	0.5816	3级,中	0.5809	3级,基本合理	0.5117	2级,中	0.5559	3级,基本可持续
2030	文山州	0.6191	2级,良	0.7079	2级,较高	0.6132	2级,良	0.5695	3级,基本合理	0.5117	2级,中	0.5642	3级,基本可持续
	文山县	0.7131	2级,良	0.6845	2级,较高	0.7469	2级,良	0.5977	3级,基本合理	0.5117	2级,中	0.6110	2级,可持续
	砚山县	0.6122	2级,良	0.6570	2级,较高	0.7106	2级,良	0.6731	2级,合理	0.5117	2级,中	0.6539	2级,可持续
	西畴县	0.5797	3级,中	0.8456	1级,高	0.5646	3级,中	0.9392	1级,最合理	0.6227	2级,中	0.7731	2级,可持续
	麻栗坡县	0.5164	3级,中	0.7443	2级,较高	0.5789	3级,中	0.8111	1级,最合理	0.6227	2级,中	0.6878	2级,可持续
	马关县	0.5850	3级,中	0.6416	2级,较高	0.6930	2级,良	0.7796	2级,合理	0.6227	2级,中	0.6960	2级,可持续
	丘北县	0.7317	2级,良	0.6263	2级,较高	0.7586	2级,良	0.8103	1级,最合理	0.6227	2级,中	0.7602	2级,可持续
	广南县	0.7217	2级,良	0.6196	2级,较高	0.7615	2级,良	0.6949	2级,合理	0.6227	2级,中	0.6940	2级,可持续
富宁县	0.6052	2级,良	0.6615	2级,较高	0.7747	2级,良	0.5980	3级,基本合理	0.6227	2级,中	0.6351	2级,可持续	
	0.6118	2级,良	0.6419	2级,较高	0.7694	2级,良	0.7214	2级,合理	0.6227	2级,中	0.6828	2级,可持续	
富宁县	0.7041	2级,良	0.6361	2级,较高	0.8656	1级,优	0.6098	2级,合理	0.6227	2级,中	0.6616	2级,可持续	

## 4 结 语

(1)在 BP 神经网络理论上,结合区域实际,利用层次分析方法构建了符合丰水地区水资源可持续利用的指标体系和标准,从水资源条件等五个方面提出具体评价指标,并针对 BP 神经网络训练样本难以获取的客观条件限制,利用线性插值方法构造满足精度要求的训练样本,采用由指标层 C 到准则层 B 再到目标层 A 逐级评价的方法,对文山州各区域不同水平年水资源条件、水资源开发利用效率、生态环境状况、水资源合理配置、水资源管理能力以及水资源可持续利用状况进行综合评价,取得了令人满意的评价效果。

(2)神经网络诸多算法中应用最广的是 BP 网络,其结构比较简单,操作性强,80% ~ 90% 的神经网络模型采用了 BP 网络或者它的变化形式<sup>[20]</sup>。双隐层 BP 神经网络是 BP 网络中较为特殊的神经网络,同单隐层 BP 网络相比,双隐层泛化能力强,预测(分类)精度高,但是训练时间较长,目前应用还不广泛<sup>[21-22]</sup>。

(3)本文为克服多指标系统在评价方法上存在着权重确定缺乏理论依据、带有明显主观臆断且计算复杂等缺点,采用 AHP - 双隐层 BP 神经网络进行综合评价,评价结果符合区域实际,表明这是一种很有研究和应用价值的多指标大系统评价方法。

### 参考文献:

- [1] 刘毅,贾若祥,侯晓丽. 中国区域水资源可持续利用评价及类型划分[J]. 环境科学,2005,26(1):42-46.
- [2] 刘恒,耿雷华,陈晓燕. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J]. 水科学进展,2003,14(3):265-270.
- [3] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报,2007,26(4):22-28.
- [4] 尹志杰,管玉卉,胡晓雪. 区域水资源可持续利用系统评价的集对分析模型[J]. 水资源保护,2010,26(4):28-

31+61.

- [5] 耿雷华,卞锦宇,徐澎波,等. 水资源合理配置评价指标体系研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008. 10.
- [6] 许新宜,王红瑞,刘海军,等. 中国水资源利用效率评估报告[M]. 北京:北京师范大学出版社,2010. 6.
- [7] 中国科学院可持续发展研究组. 1999 年中国可持续发展战略报告[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [8] 左东启,李鸿业. 水资源评价指标体系研究[J]. 水科学进展,1996,7(4):367-373.
- [9] 杜守建,崔振才. 区域水资源优化配置与利用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009. 5.
- [10] 崔东文,郭荣. 基于 GRNN 模型的区域水资源可持续利用评价——以云南文山州为例[J]. 人民长江,2012,43(5):26-31.
- [11] 洪继华,宋依兰. 层次分析法在水环境规划中的应用[J]. 环境科学与技术,2000(1):32-35+39.
- [12] 赵焕臣. 层次分析法:一种简易的新决策方法[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [13] 张德丰,等. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社,2009. 1.
- [14] 张良均,曹晶,蒋世忠. 神经网络实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008. 2.
- [15] 范佳妮,王振雷,钱锋. BP 神经网络隐层结构设计的研究进展[J]. 控制工程,2005,12(S0):105-109.
- [16] 文山州水利电力勘测设计院. 文山壮族苗族自治州水资源综合规划报告[R]. 文山:文山州水利电力勘测设计院,2009.
- [17] 王顺久,张欣莉,倪长键,等. 水资源优化配置原理及方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007. 10.
- [18] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [19] 赵振宁,徐用懋. 模糊理论和神经网络的基础与应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [20] 卓金武,等. Matlab 在数学建模中的应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011. 4.
- [21] 阎平凡,张长水. 神经网络与模拟进化计算[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [22] MATLAB 中文论坛. MATLAB 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010. 4.