

# 基于改进 BP 神经网络的地下水环境脆弱性评价

李 梅<sup>1,2</sup> 孟凡玲<sup>3</sup> 李 群<sup>1,2</sup> 黄 强<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院 陕西 西安 710048 ; 2. 黄河水利委员会 河南 郑州 450003 ;  
3. 华北水利水电学院资源与环境学院 河南 郑州 450011 )

**摘要** 地下水环境脆弱性具有模糊特性, 现有的地下水环境脆弱性评价方法普遍采用加权评分法和模糊数学方法. 加权评分法在评价因素权重的确定上人为性较大, 并且该方法不能反映各评价因素指标值的连续变化对地下水环境脆弱性的影响. 模糊数学方法在评价因素权重的确定和隶属度函数的构建上存在着不足. 为此, 建立了地下水环境脆弱性的改进 BP 神经网络模型. 黄淮平原宁陵县的应用结果表明, 改进 BP 神经网络法训练速度快、精度高, 能较好地解决非线性的模式识别问题, 如实地评价地下水环境的脆弱性.

**关键词** 地下水环境 脆弱性评价 改进 BP 神经网络 模式识别

**中图分类号** :X824 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2007)03-0245-06

在人类活动加剧的今天, 地下水环境受到各类污染物的巨大威胁. 地下水环境脆弱性研究受到国内外的普遍关注. 研究地下水环境的脆弱性, 区别不同地区地下水环境的脆弱程度, 也就是定量化评价地下水环境潜在的易污染程度, 从而警示人们在开发利用地下水资源时, 有针对性地采取相应的防治保护对策. 现有的地下水环境脆弱性评价方法普遍采用加权评分法和模糊数学方法, 但这 2 种方法在评价因素权重的确定上人为性较大. 此外加权评分法不能反映各评价因素指标值的连续变化对地下水环境脆弱性的影响. 模糊数学方法在隶属度函数的构建上也存在着不足<sup>[1-5]</sup>. 人工神经网络 ANN( Artificial Neural Network )是对人脑或自然的神经网络若干基本特性的抽象和模拟, 是一种非线性的动力学系统. 它具有大规模的并行处理和分布式的信息存储能力, 良好的自适应性、自组织性及很强的学习、联想、容错及抗干扰能力<sup>[6-12]</sup>. 它能解决具有一定的内在规律, 且这个规律不是很明确, 有一定的模糊性的问题. 而地下水环境脆弱性评价正是这样的问题, 它实质上可看作一个模式识别问题.

## 1 地下水环境脆弱性影响因素分析

地下水脆弱性是污染物到达最上层含水层之上某特定位置的倾向性与可能性, 是指地下水环境由于自然条件变化和人类活动影响受到破坏带来一系列问题的敏感程度, 它反映了地下水环境的自我防护能力<sup>[2-4]</sup>. 从另一个角度看, 地下水环境脆弱性也就是地下水的易污染性. 地下水环境脆弱性包括本质属性和特殊属性, 前者反映了无外界影响状况下水文地质内部因素的脆弱性, 后者反映了土地利用和化学物质使用对地下水环境产生的影响.

完整的地下水环境脆弱性评价必须既考虑本质脆弱性又考虑特殊脆弱性. 地下水环境脆弱性不仅仅与水文地质内部本质因素有关, 而且与外部特殊因素有关.

本质因素主要有土壤介质(成分、厚度、有机质含量、透水性)、包气带介质(厚度、岩性、透水性)、含水层介质(岩性、厚度、渗透系数)、水动力条件(水力坡度)、地下水补给条件(补给强度、降水量)、地下水埋深、地形(地面坡度变化). 影响地下水环境脆弱性的外部特殊因素主要有污染源(污染物的种类、排放条件和物理化学性质)、地下水水质、人类活动(超采地下水、污水回灌)和大气污染状况.

2 地下水环境脆弱性分析的神经网络方法

2.1 经典 BP 神经网络

BP 网络是指在具有非线性传递函数神经元构成的前馈网络中采用误差反传(Back Propagation-BP)算法作为学习算法的前馈网络.BP 网络通常由输入层、输出层和若干个隐含层构成.层与层之间的神经元之间采用全互联的连接方式,而同层内的神经元之间没有连接.BP 网络工作思想是对网络权值( $\omega_{ij}, T_{li}$ )与阈值( $\theta_i$ )进行修正,使误差函数( $E$ )沿负梯度方向下降.设输入节点为  $x_j$ ,第  $i$  节点的净输入为  $I$ ,隐节点为  $y_i$ ,输出节点为  $o_l$ ,第  $l$  节点的净输出为  $O$ .输入节点与隐节点间的权值为  $\omega_{ij}$ ,隐节点与输出节点间的网络权值为  $T_{li}$ ,输出节点的期望为  $t_l$ .取隐含层和输出层间的神经元传递函数为 S 型函数,即

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{1}$$

a. 正向传播.输入信号由输入层向输出层正向传播的过程包括如下 2 个阶段:

隐节点的输出

$$y_i = f\left(\sum_j \omega_{ij}x_j - \theta_i\right) = f(I) \tag{2}$$

输出节点的输出

$$o_l = f\left(\sum_i T_{li}y_i - \theta_l\right) = f(O) \tag{3}$$

b. 反向传播.输入样本中的输入节点  $x_j$  经由 3 层前馈网络传递所产生的输出节点的输出  $o_l$  与样本中所期望输出  $t_l$  之间存在着误差,其平方型误差函数为

$$E = \frac{1}{2} \sum_l (t_l - o_l)^2 \tag{4}$$

反向传播过程就是通过修正网络中的连接权值和阈值,使  $E$  达到最小.

输出节点权值修正公式为

$$T_{lk}(k+1) = T_{lk}(k) + \eta \delta_l y_i \tag{5}$$

$$\delta_l = +(t_l - o_l) f'(net_l) \tag{6}$$

式中: $k$ ——网络学习时的迭代次数; $\eta$ ——学习因子.输出节点阈值修正公式为

$$\theta_l(k+1) = \theta_l(k) - \eta \delta_l' \tag{7}$$

$$\delta_l' = \frac{\partial E}{\partial \theta_l} = \frac{\partial E}{\partial o_l} \frac{\partial o_l}{\partial \theta_l} \tag{8}$$

隐含节点权值修正公式为

$$\omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) + \eta' \delta_i x_j \tag{9}$$

$$\delta_i = \sum_l \delta_l T_{li} f'(I) \tag{10}$$

隐含节点阈值的修正公式为

$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) - \eta' \delta_i' \tag{11}$$

$$\delta_i' = \frac{\partial E}{\partial \theta_i} = \sum_l \frac{\partial E}{\partial o_l} \frac{\partial o_l}{\partial y_i} \frac{\partial y_i}{\partial \theta_i} \tag{12}$$

2.2 改进 BP 神经网络

由于神经网络具有高度非线性特征,在实际计算过程中由经典 BP 网络推得的权值和阈值的修正公式可能出现振荡.为防止此情况的发生,可在修正公式(5)(7)(9)(11)的右端加上一个冲量项<sup>[13]</sup>,则对于输出节点,有

$$T_{lk}(k+1) = T_{lk}(k) + \alpha [T_{lk}(k) - T_{lk}(k-1)] + (1 - \alpha) \eta \delta_l y_i \tag{13}$$

$$\theta_l(k+1) = \theta_l(k) + \alpha [\theta_l(k) - \theta_l(k-1)] - (1 - \alpha) \eta \delta_l' \tag{14}$$

对于隐含节点,有

$$\omega_{ij}(k+1)=\omega_{ij}(k)+\alpha[\omega_{ij}(k)-\omega_{ij}(k-1)]+(1-\alpha)\eta'\delta_jx_j \tag{15}$$

$$\theta_j(k+1)=\theta_j(k)+\alpha[\theta_j(k)-\theta_j(k-1)]-(1-\alpha)\eta'\delta'_i \tag{16}$$

式中  $\alpha$  为冲量因子  $0\leq\alpha\leq1$ 。

学习因子的初值选择和学习过程中的修正都可能对误差收敛速度产生影响,学习因子越大,学习速度越快,但学习因子大,其误差值波动也越大,学习因子  $\eta$  初值应在 0~1 之间选择,计算过程中为加快训练速度,可对学习因子  $\eta$  进行处理:

$$\eta(n+1)=\beta\eta(n) \tag{17}$$

式中: $n$ ——样本数; $\beta$ ——学习速率调节因子。

当  $E(n)<E(n-1)$  时,可适当加快学习速度,即可取  $\beta>1$ ;反之,当  $E(n)>E(n-1)$  时,由于此时误差向着不利于判别条件的方向进行,可适当减缓学习速度,令  $\beta<1$ 。但采用此处理方法后,又可能出现经过多次循环后, $\eta$  值非常小,导致训练速度过慢的情况。因此,有必要对  $\eta$  值进行限制。例如,当取值达  $\eta<0.01$  时,对其重新赋值(例如令  $\eta=0.1$ ),继续进行训练,这样可有效地加快训练速度,节省训练时间。

2.3 神经网络实际运用中应注意的问题

a. 网络进行训练时,取其评价标准中的指标值作为输入,网络训练好后并进行评价时,取其实测指标值作为输入。

b. 输入数据的归一化处理。BP 算法所采用的 Sigmoid 函数输出值在 0~1 之间变化,且函数随着  $|x|$  的增大,梯度下降,并趋于 0,不利于权值的调整。因此,希望  $x$  工作在较小的区域,实际计算时限制网络的输入  $x<1$ 。除此之外,由于网络的输入数据是密集型的,数据之间的差别太小,直接将数据输入网络训练会引起混淆。因此,应对学习样本进行规格化处理,其目标是将所有样本均处理成其绝对值在 0~1 之间的数据。

设每个样本对应着  $m$  个评价因子特征值,对于  $n$  个样本,其评价因子特征值矩阵为

$$x=\begin{bmatrix}x_{11}&\cdots&x_{1n}\\x_{m1}&\cdots&x_{mn}\end{bmatrix} \tag{18}$$

采用标准化公式

$$r_{ij}=2\times\frac{x_{ij}-x_{i\min}}{x_{i\max}-x_{i\min}}-1 \tag{19}$$

式中  $x_{i\min}$ 、 $x_{i\max}$  分别为  $n$  个样本第  $i$  个评价因子的最小、最大特征值。

矩阵(18)经标准化处理后的评价因子特征值矩阵为

$$R=\begin{bmatrix}r_{11}&\cdots&r_{1n}\\r_{m1}&\cdots&r_{mn}\end{bmatrix} \tag{20}$$

c. 网络隐含层。网络训练精度的提高,可以通过采用一个隐含层而增加其神经元个数的方法来获得,这在结构实现上要比增加更多的隐含层简单得多。究竟选取多少个隐含层节点才合适,这在理论上并没有一个明确的规定。具体设计中通常是通过试错法来确定的。

d. 网络输出层。网络输出层神经元数取为地下水脆弱性等级。设有  $k$  个等级,则输出层神经元数为  $k$ ,输出标准相对应为  $(1\ 0\ 0\ \cdots\ 0)^T\ (0\ 1\ 0\ \cdots\ 0)^T\ \cdots\ (0\ 0\ \cdots\ 1\ \cdots\ 0)^T\ \cdots\ (0\ 0\ \cdots\ 0\ 1)^T$ 。

3 算 例

河南省宁陵县地处豫东平原。该县浅层地下水含水层属第四系全新统冲积潜水含水层,地下水水量丰富,是全县工农业及生活用水的主要水源。20 世纪 70 年代进行水文地质调查时水质良好,地下水环境没有出现恶化现象,但随着工农业生产的发展,人类活动的不断加剧,地下水位逐年下降,水质逐年恶化。本次分析对象为浅层地下水含水层。根据地下水环境脆弱性基本理论和宁陵县地下水环境本质属性及特殊属性的实际情况,笔者制定了宁陵县地下水环境脆弱性分析分级标准,如表 1 所示。选取具有代表性的 14 个控制

点,每个控制点代表一个小的评价区域.

3.1 网络输入层与隐含层

影响地下水脆弱性的主要因素为土壤层厚度、土壤层性状、包气带厚度、包气带岩性、包气带渗透系数、

表 1 宁陵县地下水环境脆弱性分级标准

| Table 1 Criterion of groundwater environmental vulnerability evaluation for Ningling County |                 |                                                                    |           |                 |                                           |                                              |         |                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|---------|-------------------------------------------|
| 脆弱性<br>分级                                                                                   | 土壤介质            |                                                                    | 包气带介质     |                 |                                           | 含水层介质                                        |         |                                           |
|                                                                                             | 厚度/m            | 性状                                                                 | 厚度/m      | 岩性              | 渗透系数/<br>( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 厚度/m                                         | 岩性      | 渗透系数/<br>( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ) |
| 强(Ⅰ)                                                                                        | $\leq 0.5$      | 盐碱土(10)                                                            | $\leq 2$  | 中细砂(10)         | $\geq 8$                                  | $\leq 15$                                    | 中细砂(10) | $\geq 8$                                  |
| 较强(Ⅱ)                                                                                       | $0.5\sim 0.7$   | 沙土(8)                                                              | $2\sim 5$ | 细砂(8)           | $8\sim 5.5$                               | $15\sim 25$                                  | 细砂(8)   | $8\sim 5.5$                               |
| 中等(Ⅲ)                                                                                       | $0.7\sim 1$     | 两合土(5)                                                             | $5\sim 9$ | 粉细砂(5)          | $5.5\sim 3$                               | $25\sim 35$                                  | 粉细砂(5)  | $5.5\sim 3$                               |
| 弱(Ⅳ)                                                                                        | $> 1$           | 淤土(2)                                                              | $> 9$     | 淤土(2)           | $< 3$                                     | $> 35$                                       | 淤土(2)   | $< 3$                                     |
| 脆弱性<br>分级                                                                                   | 水力<br>坡度/%      | 补给强度/<br>( $10^4\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ) |           | 地面坡度/%          | 污染源                                       | 地下水矿化度/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |         | 地下水位<br>降深/m                              |
| 强(Ⅰ)                                                                                        | $\geq 0.09$     | $\geq 18$                                                          |           | $\leq 0.01$     | 化工及冶金工业(10)                               | $\leq 1000$                                  |         | $\geq 5$                                  |
| 较强(Ⅱ)                                                                                       | $0.09\sim 0.05$ | $18\sim 15$                                                        |           | $0.01\sim 0.05$ | 皮革制造及造纸业(7)                               | $1000\sim 2000$                              |         | $5\sim 2.5$                               |
| 中等(Ⅲ)                                                                                       | $0.05\sim 0.02$ | $15\sim 12$                                                        |           | $0.05\sim 0.1$  | 酿造业及农业污染(4)                               | $2000\sim 3000$                              |         | $2.5\sim 0.5$                             |
| 弱(Ⅳ)                                                                                        | $< 0.02$        | $< 12$                                                             |           | $> 0.1$         | 无污染及生活污染(0)                               | $> 3000$                                     |         | $< 0.5$                                   |

含水层厚度、含水层岩性、含水层渗透系数、水力坡度、地下水补给强度、地面坡度、污染源、地下水矿化度和地下水位埋深.以这 14 项影响因素指标监测值作为网络的输入,输入层神经元数取为 14.隐含层定为 1 层,采用试错法,经过不断训练尝试,本网络隐含层神经元个数确定为 25.

3.2 网络输出层

网络的输出层神经元个数取为地下水脆弱性等级,根据划分标准,地下水脆弱性按照强(Ⅰ)、较强(Ⅱ)、中等(Ⅲ)及弱(Ⅳ)分为 4 个等级.取输出神经元数为 4,输出标准对应为 $(1\ 0\ 0\ 0)^T$ 、 $(0\ 1\ 0\ 0)^T$ 、 $(0\ 0\ 1\ 0)^T$ 及 $(0\ 0\ 0\ 1)^T$ .

3.3 样本的选取及训练

由于评价标准中不同的评价级别对应的评价因素指标值(定额值)为一个区间范围,为了体现评价因素指标值(定额值)的连续变化对评价结果的渐进非突变影响,在模型训练时,取其 3 个等分值(对于未给定上限或下限区间的评价因素指标值,取上限值与实测的最小值或取实测的最大值与下限值构成评价因素的指标区间)作为样本输入,训练样本如表 2 所示.

表 2 BP 网络训练样本

| Table 2 Training samples of BP neural network |             |          |             |           |                                                  |             |           |                                                  |            |                                                                        |                |         |                                                  |                  |                  |
|-----------------------------------------------|-------------|----------|-------------|-----------|--------------------------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|--------------------------------------------------|------------------|------------------|
| 样本<br>编号                                      | 输入样本        |          |             |           |                                                  |             |           |                                                  |            |                                                                        |                |         |                                                  |                  | 输出样本             |
|                                               | 土壤层<br>厚度/m | 土壤<br>性状 | 包气带<br>厚度/m | 包气带<br>岩性 | 包气带<br>渗透系数/<br>( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 含水层<br>厚度/m | 含水层<br>岩性 | 含水层<br>渗透系数/<br>( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 水力坡<br>度/% | 补给强度/<br>( $\text{万}\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ) | 地面<br>坡度/<br>% | 污染<br>源 | 地下水<br>矿化度/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 地下水<br>位降<br>深/m |                  |
| 1                                             | 0.40        | 10       | 1.83        | 10        | 8.5                                              | 13.47       | 10        | 8.5                                              | 0.090      | 18.10                                                                  | 0.005          | 10      | 600                                              | 6.82             | $(1\ 0\ 0\ 0)^T$ |
| 2                                             | 0.50        | 10       | 2.00        | 10        | 8.0                                              | 15.00       | 10        | 8.0                                              | 0.090      | 18.00                                                                  | 0.010          | 10      | 1000                                             | 5.00             | $(1\ 0\ 0\ 0)^T$ |
| 3                                             | 0.56        | 8        | 3.00        | 8         | 7.2                                              | 18.00       | 8         | 7.2                                              | 0.077      | 17.00                                                                  | 0.023          | 7       | 1300                                             | 4.20             | $(0\ 1\ 0\ 0)^T$ |
| 4                                             | 0.63        | 8        | 4.00        | 8         | 6.4                                              | 21.00       | 8         | 6.4                                              | 0.064      | 16.00                                                                  | 0.036          | 7       | 1600                                             | 3.40             | $(0\ 1\ 0\ 0)^T$ |
| 5                                             | 0.70        | 8        | 5.00        | 8         | 5.5                                              | 25.00       | 8         | 5.5                                              | 0.050      | 15.00                                                                  | 0.050          | 7       | 2000                                             | 2.50             | $(0\ 1\ 0\ 0)^T$ |
| 6                                             | 0.80        | 5        | 6.30        | 5         | 4.7                                              | 28.00       | 5         | 4.7                                              | 0.040      | 14.00                                                                  | 0.067          | 4       | 2300                                             | 1.90             | $(0\ 0\ 1\ 0)^T$ |
| 7                                             | 0.90        | 5        | 7.60        | 5         | 3.9                                              | 31.00       | 5         | 3.9                                              | 0.030      | 13.00                                                                  | 0.084          | 4       | 2600                                             | 1.20             | $(0\ 0\ 1\ 0)^T$ |
| 8                                             | 1.00        | 5        | 9.00        | 5         | 3.0                                              | 35.00       | 5         | 3.0                                              | 0.020      | 12.00                                                                  | 0.100          | 4       | 3000                                             | 0.50             | $(0\ 0\ 1\ 0)^T$ |
| 9                                             | 1.20        | 2        | 9.10        | 2         | 2.8                                              | 35.30       | 2         | 2.8                                              | 0.019      | 11.95                                                                  | 0.100          | 0       | 3100                                             | 0.30             | $(0\ 0\ 0\ 1)^T$ |
| 10                                            | 1.50        | 2        | 9.23        | 2         | 2.0                                              | 35.96       | 2         | 2.0                                              | 0.017      | 11.85                                                                  | 0.120          | 0       | 3200                                             | 0.00             | $(0\ 0\ 0\ 1)^T$ |

根据宁陵县地下水环境脆弱性分析分级标准,选取 10 组输入样本,并将其归一化处理.训练样本的目标矢量为 $(1\ 0\ 0\ 0)^T$ 、 $(0\ 1\ 0\ 0)^T$ 、 $(0\ 0\ 1\ 0)^T$ 、 $(0\ 0\ 0\ 1)^T$ ,分别代表地下水环境脆弱性等级为强(Ⅰ)、较强(Ⅱ)、中等(Ⅲ)、弱(Ⅳ).为便于比较,采用了 2 种训练方法:(a)利用传统的 BP 网络,学习因子  $\alpha$  取 0.6,当全局误差  $\epsilon < 0.001$  时共经过 3 448 次学习;(b)利用改进的 BP 网络,动量因子取为 0.95,当全局误差

$\epsilon < 0.001$  时,共经过 187 次学习.由图 1 可知,改进的 BP 网络比传统的 BP 网络收敛速度快、精度高.

3.4 识别

利用训练好的改进 BP 神经网络对各控制点进行识别.为验证识别结果,将其与模糊综合评价结果进行了比较,如表 3 所示.

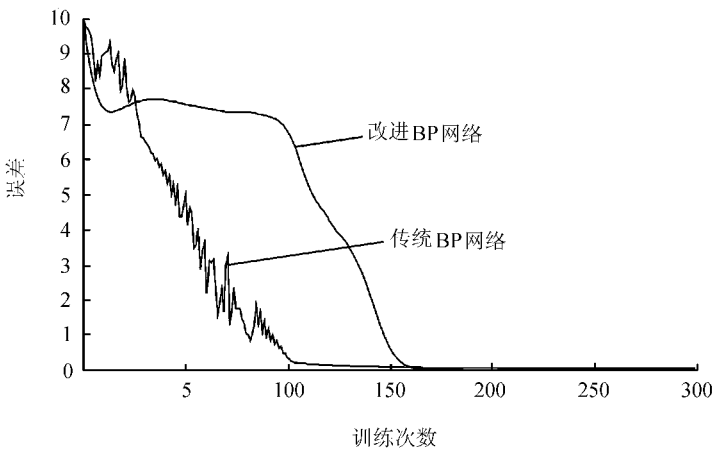


图 1 训练次数与网络误差关系

Fig.1 Relationship between training times and error of neural network

表 3 模糊综合评价法和改进 BP 神经网络法地下水环境脆弱性评价结果比较

Table 3 Comparison of results of groundwater environmental vulnerability evaluation by fuzzy evaluation method and modified BP neural network method

| 控制点编号           | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| 模糊综合评价法评价结果     | Ⅳ | Ⅱ | Ⅰ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅰ | Ⅳ | Ⅱ | Ⅲ  | Ⅲ  | Ⅲ  | Ⅲ  | Ⅰ  |
| 改进 BP 神经网络法评价结果 | Ⅳ | Ⅱ | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅰ | Ⅳ | Ⅲ | Ⅲ  | Ⅲ  | Ⅱ  | Ⅲ  | Ⅰ  |

从表 1 可以看出,改进 BP 神经网络和模糊综合评价法的评价结果基本吻合,等级Ⅰ和Ⅳ的评价结果完全一致.

4 结 论

改进 BP 神经网络法具有训练速度快、精度高的优点,能较好地解决非线性的模式识别问题,如实地评价地下水环境的脆弱性.宁陵县的应用结果表明,改进 BP 神经网络在地下水环境脆弱性评价中具有较好的应用效果.

参考文献：

[ 1 ] 张丽君.地下水脆弱性评价与编图[J].国外地质科技,1998(1):35-42.  
[ 2 ] 孙才志,潘俊.地下水脆弱性的概念、评价方法与前景[J].水科学进展,1999,10(4):444-449.  
[ 3 ] 刘淑芬,郭永海.区域地下水防污性能评价方法及其在河北平原的应用[J].河北地质学院学报,1996,19(1):41-45.  
[ 4 ] 林学钰,陈梦熊.松嫩盆地地下水资源与可持续发展研究[M].北京:地震出版社,2000:98-112.  
[ 5 ] 郑西来,吴新莉,荆静.西安市潜水污染的潜在性分析与评价[J].工程勘察,1997(4):222-25.  
[ 6 ] 周继成.人工神经网络[M].北京:科学普及出版社,1993:22-25.  
[ 7 ] 闻新,周露,王丹力,等.MATLAB神经网络应用设计[M].北京:科学出版社,2000:223-245.  
[ 8 ] 许东,吴铮.基于 Matlab 6.x 的系统分析与设计——神经网络[M].西安:西安电子科技大学出版社,2002:30-34.  
[ 9 ] 耿冬青,张洪国,王福刚.改进的 BP 网络在地下水水质评价中的应用[J].世界地质,2000,19(4):366-369,374.  
[ 10 ] 汪明武.基于神经网络的泥石流危险度区划[J].水文地质工程地质,2000,27(2):18-19.  
[ 11 ] 倪深海,白玉慧.BP 神经网络模型在地下水水质评价中的应用[J].系统工程理论与实践,2000,20(8):124-127.  
[ 12 ] 左其亭,索丽生,吴泽宁.水利水电工程人工神经网络综合优选模型[J].水利水电技术,2001,32(7):6-8.

[13] 高洪深,陶有德. BP神经网络模型的改进[J]. 系统工程理论与实践,1996,16(1):67-71.

Modified BP neural network-based groundwater environmental vulnerability evaluation

LI Mei<sup>1,2</sup>, MENG Fan-ling<sup>3</sup>, LI Qun<sup>1,2</sup>, HUANG Qiang<sup>1</sup>

- (1. School of Hydraulic and Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. The Yellow River Water Conservancy Committee, Zhengzhou 450003, China;
3. School of Resource and Environment of North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** The weight grade method and fuzzy mathematic method are commonly used for groundwater environmental vulnerability evaluation due to its fuzziness. However, the weight grade method is affected by some artificial factors in determining the weights of different evaluation factors, and the method cannot reflect the influences of the continuous changes of evaluation factors on the vulnerability of groundwater environment. Meanwhile, the fuzzy mathematic method is of some disadvantages in determining the weights of evaluation factors and establishment of the function of subordination degree. Thus, a modified BP neural network model was established for groundwater environmental vulnerability evaluation. The application of the model to Ningling County in Huang-Huai Plain shows that the modified BP neural network is of fast speed and high accuracy in nonlinear mode identification and can provide correct evaluation of groundwater environmental vulnerability.

**Key words:** groundwater environment; vulnerability evaluation; improved BP neural network; model identification

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于1957年,是我国中文核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得首届中国高校优秀科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

本刊每逢单月出版,国内外公开发行,邮发代号28-63,每期定价12.00元,全年6期共72.00元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址:南京市西康路1号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部,邮政编码210098,联系电话025-83786343。