BP 神经网络模型在柴北缘-东昆仑造山型金矿预测的应用*

Application of BP Model in Forecast of Orogenic Gold Deposits in North Qaidam and East Kunlun Orogen ,West China

陈郑辉 肖克炎 杨 宏 李海滨

（中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037） （吉林大学，吉林 长春 130026）

Chen Zhenghui[1], Xiao Keyan[1], Yang Hong[2] and Li Haibin[2]

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Jilin University , Changchun 130026, Jilin, China)

摘 要 本文简要探讨了多阶层神经网络及误差逆传播学习算法（BP 模型）的结构和该算法的实施过程，并研究了 BP 模型在矿产资源综合评价中的应用。以应用柴北缘—东昆仑地区造山型金矿数据进行预测为例，证实 BP 模型方法是一种有效的矿产资源评价方法。

关键词 BP 模型 神经网络 柴北缘—东昆仑 矿产资源评价

20 世纪 80 年代中后期，在美国、日本等一些工业发达国家里，掀起了一股竞相研究开发人工神经网络的热潮，1987 年 6 月首届国际神经网络学术会议在美国加利福尼亚州召开，并成立了国际神经网络协会（International Neural Networks Society，简称为 INNS）。随后我国一些数学家和计算机科学家开始对这一领域产生兴趣，开展了一定的研究工作。近几年来，在神经网络这个涉及多种学科的现代信息高新技术领域中，吸引了众多的神经生理学家、心理学家、数理学家、计算机与信息工程学家以及工程企业家等。大量有关神经网络运行机理、神经计算机、网络模型与学习算法、特征分析以及各方面的应用文章，像雨后春笋涌现在学术会议和报刊杂志上，成为当代高科技领域中研究的热点。

1 神经网络 BP 模型概述

人工神经网络是数理科学与认识科学相结合的产物，它是一个并行、分布处理结构，由处理单元及称为联结的无向信号通道互连而成。这些处理单元具有局部内存，可以完成局部操作。每个处理单元单一的输出联结，这个输出可以根据需要被分支成希望个数的许多并行联结，而这些并行联结都输出相同的信号，即相应处理单元的信号，信号的大小不因分支的多少而变化。处理单元的输出可以是任何需要的数学模型，每个处理单元中进行的操作必须是完全局部的。也就是说，它必须仅仅依赖于经过输入联结到达处理单元的所有输入信号的当前值和存储在处理单元局部内存中的值。

多阶层神经网络及误差逆传播学习算法（Error Back-propagation—EBP，或称之为前反馈神经网络—BP 学习算法）是目前应用最广、实现途径最直观、运算机制最易理解、研究深入的一种人工神经网络。误差逆传播学习算法是 Pall Werbas 博士于 1974 年在他的博士论文中首先提出来的。

BP 神经网络是一种具有三层或三层以上阶层型结构的神经网络。层间各种神经元实现全连接，即下层的每一个单元与上层的每个单元都实现权连接，而每层各种神经元之间不连接。网络按有导师示教的方式进行监督训练学习，当一对学习模

*第一作者简介 陈郑辉，男，1973 年生，助理研究员,主要从事矿产资源评价软件的开发工作。

式提供给网络后，神经元的激活值，从输入层经各中间层向输出层传播，在输出层的各种神经元均获得网络的输入响应。并按照减少希望输出值与实际输出值之间误差的方向，从输出层经各中间层逐层修正各误差，最后回到输入层，所以称作“ 误差逆传播算法 ”。随着这种误差逆传播修正的不断进行，网络对输入模式响应的正确率也不断上升。最后在达到允许的误差范围内，网络达到平衡状态（实际输出值接近于希望输出值）而自动收敛。由于 BP 神经网络及其算法增设了中间隐含层并且有相应的学习规则可循，使其具有对非线性模式的识别能力。尤其是其数学意义明确、算法步骤分明，更使其具有广泛的应用前景。

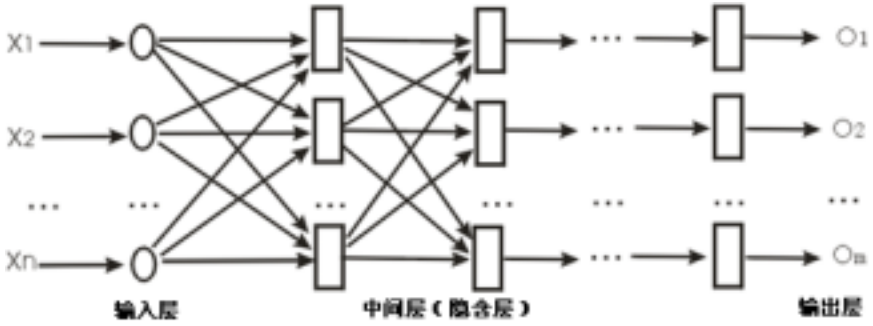


图 1　BP 网络的基本结构图

实现算法原理　BP 网络特点：前馈多层，每层仅作用于相邻的下层，信息前馈，误差反馈有导师训练。

针对第 l 层:　$z^l = w^l y^{l-1}$　　$y^l = f(z^l)$　　$l = 1,2,\Lambda\ ,L,$

其中 $y^0 = x$，　$y^L = \overline{y}$，已知对照输出 y，先对 $w_{ij}^l (l = 1,\Lambda\ L,)$ 赋初值，近于 0 的随机数，

$$Z_i^l = \sum_{j=1}^{J} w_{ij}^l y_j^{l-1} \quad \text{I=1，} \cdots \text{I，} \quad y_i^l = f(z_i^l)$$

根据 n 个输入 $x_1,\Lambda\ x_n$（n 个已知样）的已知模型样本的结果 $y = y_1,\Lambda\ y_g)$，对 w_l 进行修改，目的是使误差平方和

$E = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{g}\left\|y_k - \overline{y}\right\|^2$ 最小

$$\nabla E = \frac{\partial Ek}{\partial w_i^l} = \frac{\partial Ek}{\partial z_i^l} \times \frac{\partial z_i^l}{\partial w_i^l} = \delta_i^l \times y^{l-1} \quad \text{其中} \delta_i^l = \frac{\partial Ek}{\partial z_i^l},\ l = 1,2,\Lambda\ ,L$$

计算 δ_i^l ：(1) 当 l =L 时，E_k 为第 k 已知样的误差，$\delta_i^L = \frac{\partial Ek}{\partial z_i^l} = -(y_{ik} - \overline{y_{ik}})\ \ f'(z_{ik}^L)$

(2) 当 l < L，(假设这层（l 层）内有 T 个结连又有次一层的输出)

$$\delta_i^l = \frac{\partial Ek}{\partial z_{ik}^l} = \frac{\partial Ek}{\partial y_i^l} f'(z_i^l) \qquad ①$$

$$\frac{\partial Ek}{\partial y_i^l} = \sum_s \frac{\partial Ek}{\partial z_s^{l+1}} \times \frac{\partial z_s^{l+1}}{\partial y_i^l} = \sum_s \delta_s^{l+1} w_{si}^{l+1} \qquad ②$$

由①和②得到 $\delta_i^l = (\sum_s \delta_s^{l+1} w_{si}^{l+1}) f'(z_i^l)$ (S 为第 l +1 层的结点数)，综合(1)(2) 得到误差平方和计算公式：

$$\frac{\partial Ek}{\partial w_j^l}=\begin{cases}-(y_j-y_j^l)f'(z_j^l)y^{l-1}, & l=L\\ (\sum_{i=1}^{l}\delta_i^{l+1}w_{ij})f'(z_j^l)\times y^{l-1} & l<L\end{cases}$$

最后，逐步修正 $\tilde{w}_j^l = w_j^l - \eta\frac{\partial E}{\partial wj}$ η 为步长， 改进 $\Delta w(t+1)=-\eta\frac{\partial E}{\partial w}+\alpha\Delta w^{(t)}$ 动量项，0 < α< 1，常取 $\alpha=0.9$，若 $\Delta w(t+1)=\Delta w(t)$，则 $\Delta w(t+1)=\frac{-\eta}{1-\alpha}\times\frac{\partial E}{\partial w}$

当下一步的方向与上一步相近时，步长可适当加快，反之减慢。最终得到收敛的目的。

2 BP 模型在柴北缘—东昆仑地区的预测实现

利用基于 MAPGIS 平台上开发的矿产资源潜力评价系统实现 BP 模型的算法，具体的实现见陈郑辉论文（2001）。

2.1 成矿地质背景和矿床地质特征

柴北缘—东昆仑地区位于青海省的西部，是中央造山带的西部成员—秦祁昆褶皱系的一部分，也是典型的复合造山带（殷鸿福等，1998）。柴北缘—东昆仑地区的地质构造演化主要包括前寒武古陆形成（造山带基底）、早古生代（加里东）造山[包括早古生代（Pt_3—O_3）洋盆开合及加里东（S—D_3）褶皱山链的形成]、晚华力西—印支造山[包括古特提斯洋盆（C—T_3）开合和柴北缘及东昆仑—巴颜喀拉褶皱山链（T_3）的形成]以及中新生代叠复造山等 4 个构造旋回。其中，早古生代造山旋回和晚华力西—印支造山旋回与东昆仑地区金铜多金属成矿关系最密切。

迄今为止，除柴达木地块因被新生代沉积（柴达木盆地）广泛覆盖而未发现金矿产地以外，柴北缘—东昆仑地区的其他三级构造区带或多或少地发现有造山型金矿。它们具有相似的地质－地球化学特征。资料表明，这些造山型金矿都产于汇聚板片的边缘、靠近深断裂的部位，与晚加里东或晚华力西—印支造山过程有关。严格受构造控制是本区造山型金矿非常重要的特点。热液蚀变的主要特点是面型，分带不太明显，黄铁绢英岩化与金矿化关系最密切。总体上，蚀变围岩的带入组分为 CO_2、H_2O、S、SiO_2、K 及大离子亲石元素。矿体的规模、形态、产状严格受构造控制（张德全等，2000）。

2.2 建立综合预测模型

根据柴北缘—东昆仑地区地质概括以及造山型金矿成矿特点，选择与成矿关系密切的多源数据，建立柴北缘—东昆仑地区的多源信息找矿模型：

（1）金矿重砂异常数据是金矿的重要找矿标志；

（2）金矿水化异常数据是金矿的重要找矿标志；

（3）金矿的化探异常数据控制金矿床的分布；

（4）金矿的空间分布与通过该区的深大断裂有关；

（5）研究区内断裂密集程度控制金矿的产出；

（6）重力构造的存在与否是金矿存在的一个标志；

（7）磁力构造线的存在也是金矿存在地一个重要标志；

（8）研究区地质复杂程度也对金矿的产出具有重要的作用；

（9）研究区存在的矿（化）点是一个重要的标志。

表 1 预测变量标志的选择

专题名称	变量名称
重砂异常专题	重砂异常存在标志
水化异常专题	水化异常存在标志
化探异常专题	地球化学异常的峰值 地球化学异常的衬度 地球化学异常的元素均值 地球化学异常的异常面积 地球化学异常的强度
地质图专题	地质图熵值
重力构造（GS）	重力构造的存在标志
磁力构造线(MS)	磁力构造线的存在标志
深度断裂专题	预测区单元到深度断裂的距离
构造线专题	构造线密度
矿点专题	造山型金矿点存在标志 金矿点点密度

2.3 划分预测单元

预测工作是通过划分单元进行的，预测的结果是与单元有着较为直接的联系，在已知找矿模型基础上，以最大限度地浓缩成矿信息和最小预测单元面积为原则，通过对研究区内地质、地球物理、地球化学、遥感资料的综合分析,采用 40×40 网格单元，将研究区划分成 774 个单元,应用 BP 神经网络模型对东昆仑地区进行预测。

2.4 变量选择

本次试验 BP 神经网络模型算法，按柴北缘—东昆仑地区的多源信息找矿模型，选择出如下的预测变量(表 1)。

2.5　BP 模型预测结果

本次 BP 神经网络模型算法中，给定的迭代次数为 2000，预先选择的模型单元类别为 6 类。通过在屏幕上选择模型样本进行计算，计算的最终分类结果赋予不同的颜色，最终获得 BP 模型预测单元的分类结果，具体结果见图 2。

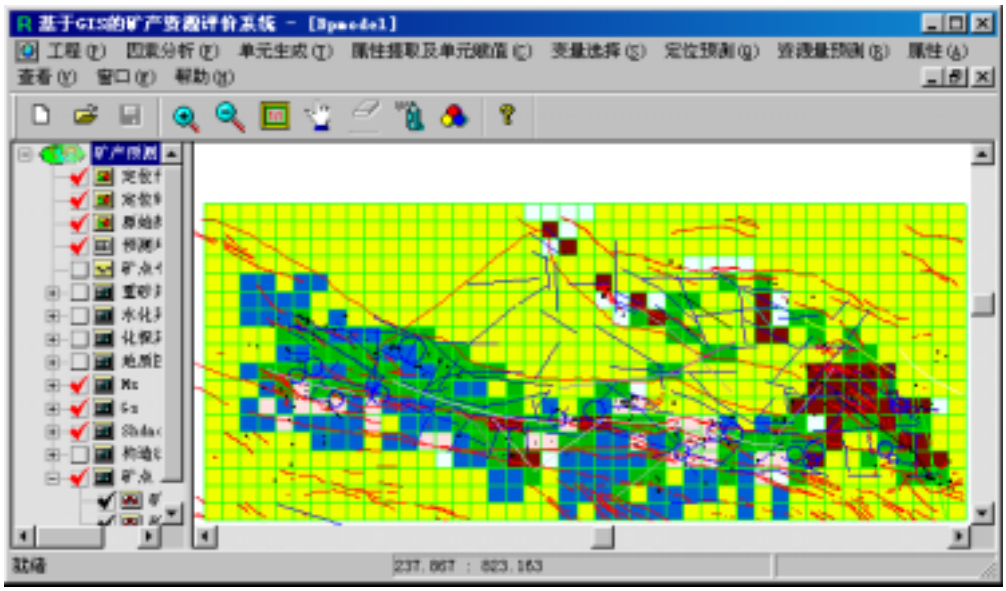


图 2　预测结果图

3　结　论

本次利用基于 MAPGIS 平台上开发的矿产资源潜力评价系统(MRAS)作为实现 BP 模型的基础，并且利用地调项目《东昆仑综合找矿预测与突破项目》提供的预测数据进行柴北缘—东昆仑地区造山型金矿预测的 BP 模型的试研究，获得较好的预测结果。为新方法新模型在矿产资源综合评价中的应用提供了研究思路，即人工神经网络 BP 模型能够作为矿产资源评价方法进行推广应用。

参　考　文　献

陈守余，周梅春. 2000. 人工神经网络模拟实现与应用. 北京：中国地质大学出版社.

陈郑辉. 2001. 矿产资源 GIS 评价新方法及新模型[硕士论文]. 导师:肖克炎. 北京:中国地质科学院矿产资源研究所.

从　爽. 2001. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用. 合肥：中国科学技术大学出版社.

蒋宗礼. 2000. 人工神经网络导论. 北京：高等教育出版社出版.

阎平凡, 张长水. 2000. 人工神经网络与模拟进化计算. 北京: 清华大学出版社.

肖克炎，张晓华，王四龙，等. 2000.矿产资源 GIS 评价系统. 北京：地质出版社.

王万森. 2000. 人工智能原理及其应用. 北京: 电子工业出版社.

张德全，丰成友，李大新，等. 2001. 柴北缘－东昆仑地区的造山型金矿床.. 矿床地质，　20(2)：137~146.

张志华，朱章森，章奇志. 1997. 数学地质的一种新技术——神经网络和其它方法的融合技术. 中国数学地质, 8.