

文章编号: 1008-2786(2001)04-0372-05

# 山西晋祠泉复流时间的人工神经网络预测

孙才志<sup>1,2</sup>, 官辉力<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学环境科学研究所, 北京 100875; 2. 辽宁师范大学地理系, 辽宁 大连 116029)

**摘 要:** 由于岩溶地下水的长期过量开采, 晋祠泉自 1994 年出现断流至今, 目前正在兴建中的万家寨引黄工程将使晋祠泉域的地下水得到一定程度的涵养, 因此晋祠泉能否与何时复流已经成为许多人关心的问题。针对上述问题, 本文应用一种改进的人工神经网络的方法来分析预测晋祠泉的流量变化态势, 并大致给出了复流时间。

**关键词:** 人工神经网络; 山西晋祠泉; 复流

**中图分类号:** P641; P642.25      **文献标识码:** A

## 1 问题的提出

晋祠是三晋名泉, 自从 70 年代以来, 由于长期过量地开采岩溶地下水, 导致区域性地下水位大幅度下降, 泉流量持续衰减, 直到 1994 年 4 月出现断流。晋祠断流是一个标志性事件, 它反映了泉域内地下水资源的可持续性已经遭到严重破坏。

正在加紧建设的万家寨引黄工程, 设计引水流量  $48\text{m}^3/\text{s}$ , 其中向太原供水区分水  $25.8\text{m}^3/\text{s}$ , 该工程的核心要求是保证地下水在符合环境再生要求的基础上进行开采。这对于扭转泉域地下水长期超采局面, 使长期处于“透支”状态的地下水“休养生息”、恢复活力具有重要的意义。在这种情况下, 晋祠泉能否与何时复流已经成为许多人关心的问题。

本文首先简要介绍晋祠泉的自然概况; 然后应用人工神经网络技术模拟晋祠泉流量与降水量、汾河渗漏量、矿坑疏水量及人工开采量之间的关系; 其后预测了在万家寨引黄工程完工后, 晋祠泉流量在不同调控方案下的变化态势, 并给出了大致出流时间。

## 2 晋祠泉的自然概况

晋祠泉是我国北方岩溶大泉之一, 它位于太原市西南 25km 处的晋祠镇, 出露于太原—交城大断裂的北端, 从中奥陶马家沟组灰岩中溢出。晋祠泉的形成主要是由于太原西山岩溶水在向盆地运动过程中受到边山断层东侧弱透水的第四系地层阻挡而成, 为典型的山前断裂溢流泉, 该泉为非全排型<sup>[1]</sup>, 晋祠成因见图 1。

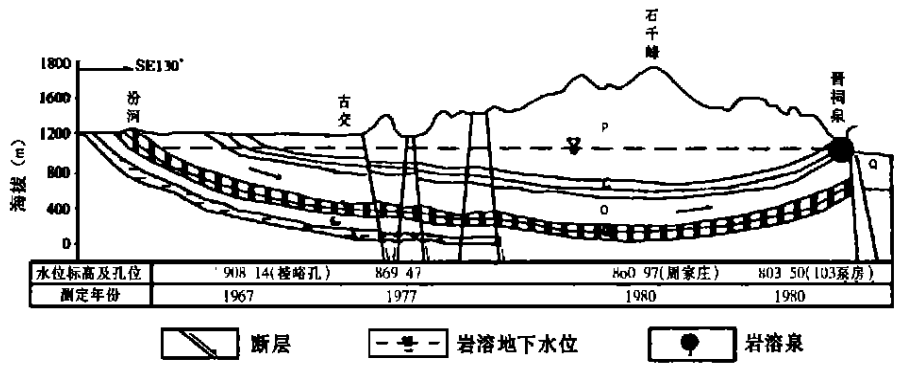


图 1 晋祠成因简图(引自参考文献<sup>[1]</sup>, 略有修改)

Fig. 1 Sketch of Jinci's formation

收稿日期: 2000-12-11; 改回日期: 2001-01-03.  
基金项目: 国家重点基础研究项目-973 项目(G199036406)资助。  
作者简介: 孙才志(1970-), 男(汉族), 山东烟台人, 博士后, 水文水资源专业。

从晋祠岩溶水系统来看, 北部及西北部的边界以变质岩系为边界, 为隔水边界; 西南边界位于孤堰山—寨儿坡—岭底村至山前大断裂, 该线与山前向斜轴吻合, 奥陶系顶面标高为 204 m~321 m, 具有滞流阻水作用; 东部和南部以大断层为边界, 为排泄边界; 泉域东北部以北石槽背斜至三给地垒与兰村泉域为界<sup>[1]</sup>。晋祠岩溶水系统的地下水来源主要有三部分: 一是在汾河以北接受降水补给, 赋存于灰岩中, 流向东南, 越过汾河, 由潜水转变成承压水; 其二由汾河水渗漏补给; 其三是泉域附近的岩层, 直接接受大气降水的入渗补给, 晋祠泉域的具体水文地质条件可见文献<sup>[1]</sup>。

3 人工神经网络

人工神经网络是 80 年代迅速兴起的一门非线性科学, 它力图模拟人脑的一些基本特征, 即自适应性、自组织性等, 目前已在模式识别、自动控制等领域取得了广泛的应用。

“反向传播”模型是 PDP 小组在 1985 年提出的一种神经元模型, 简称 BP 模型。它是一种多层感知器结构, 除输入层和输出层外, 还可含有多个中间隐蔽层。BP 神经网络的基本原理、结构、计算步骤可见文献<sup>[2]</sup>, 在此不再赘述。在此应该指出的是: 常规的 BP 网络模型通常存在诸如收敛速度慢、局部极值、在学习过程中发生数值震荡等缺陷。为此本文使用一种改进的 BP 算法——自适应变步长学习算法, 其具体迭代过程为

$$W_{ij}(k+1)=W_{ij}(k)+\Delta W_{ij}(k);$$

$$W_{ij}(k)=-\eta(k)\frac{\partial E}{\partial W_{ij}(k)}+\alpha\Delta W_{ij}(k-1);$$

$$\eta(k)=\eta(k-1)+\epsilon\lambda\eta(k-1);$$

$$\lambda=\text{sign}\left[\frac{\partial E}{\partial W_{ij}(k)}\cdot\frac{\partial E}{\partial W_{ij}(k-1)}\right]$$

式中  $\alpha$  和  $\epsilon$  为常数,  $0\leq\alpha<1$ ;  $0\leq\epsilon<1$ , 一般取 0.2~0.3。  $W_{ij}$  为权重;  $k$  为迭代步数;  $\lambda$  为迭代因子;  $E$  为误差向量;  $\eta$  为动量因子。该种学习算法的实质是当连续两次迭代其梯度方向相同时, 表明下降太慢, 这时可适当加大步长; 当连续两次迭代其梯度方向相反时, 表明下降过头, 这时可适当减少步长。

4 晋祠泉流量的模拟与预报

4.1 晋祠泉流量的模拟

通过分析晋祠泉域晋祠泉域内的多年泉流量、

降水量、汾河渗漏量、人工开采量及矿坑排水量资料(限于篇幅, 上述诸量的具体数值略)并结合现代统计理论可知, 晋祠泉流量与当年及前一年降水量、汾河渗漏量存在着明显的正相关关系, 而与人工开采量、矿坑排水量之间存在着明显的负相关关系。将上述诸量带入到改进的人工神经网络模型, 即可求出各时段的泉流量模拟值。

将模拟值与实测值进行比较, 求出拟合误差; 此时的拟合误差序列可以近似为一个零均值平稳时间序列, 可以应用  $APMA(p, q)$  模型模拟, 通过分析截尾性质, 采用的模型为  $APMA(2, 1)$ , 则泉流量的组合模拟方程为

$$Q_{\text{泉流量}}=Q_{\text{神经网络}}+APMA(2, 1) \tag{1}$$

将各量带入到组合模拟方程(1), 求出泉流量的模拟值。拟合结果(1970—1992 年)见图 2。

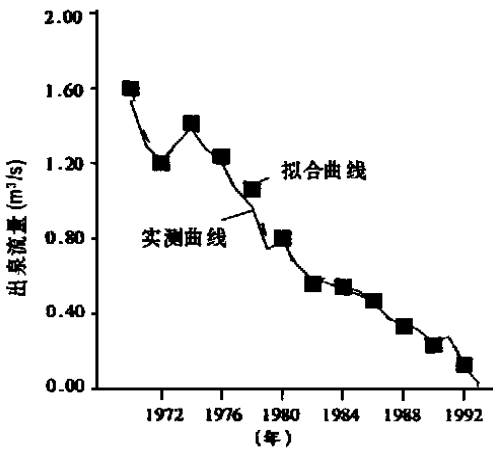


图 2 模拟与实测曲线对比图  
Fig. 2 Comparison curve between simulation and observation

图 2 可以看出, 模拟值与实测值的拟合效果较好, 因此可以应用该模型来预报晋祠未来的泉流量。

4.2 晋祠泉流量的预报

4.2.1 降水量预报及其保证率

本次研究根据晋祠泉域内降水量 1954~1993 年共 40a 的实测资料, 采用皮尔逊(Pearson) II 型概率密度曲线来描述降水量的保证率, 即:

$$Y=\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}(X-\alpha_0)^{\alpha-1}e^{-\beta(X-\alpha_0)}$$

$$\alpha_0=X(1-\frac{2G_v}{C_s}); \alpha=\frac{4}{C_s^2};$$

$$\beta=\frac{2}{XC_sC_s}; X=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nX_n$$

式中  $Y$  为随机变量  $X$  的概率密度函数;  $\Gamma(\alpha)$  为  $\alpha$

的  $\Gamma$  函数;  $\alpha$  为偏态参数;  $\beta$  为离散度参数;  $C_s$  为偏态系数;  $C_v$  为偏差系数。根据皮尔逊 (Pearson) II 型概率密度曲线计算的历史降水量保证率见表 1。

本次研究降水量预报采用频谱分析法, 即

$$V_t = A_0 + \sum_{i=1}^k [A_i \cos(2\pi i t / n) + B_i \sin(2\pi i t / n)] \quad (2)$$

式(2)中

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X(t);$$

$$A_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^k X(t) \cos(2\pi i (t-1) / n);$$
$$B_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^k X(t) \sin(2\pi i (t-1) / n)$$

上述诸式中,  $X_1$  为降水量实测值;  $n$  为降水量系列资料长度;  $K$  为谐波数, 当  $n$  为偶数时,  $K = n/2$ , 当  $n$  为奇数时,  $K = (n-1)/2$ ;  $t$  为预报时段;  $V_t$  为第  $t$  时段降水量预报值(表 2)。

表 1 降水量保证率(1954~1993 年)  
Table 1 Assuring ratio of precipitation

保证率(%)	5	10	20	50	75	90	95
降水量(mm)	628. 18	576. 20	519. 88	427. 57	355. 25	303. 26	272. 93

表 2 降水量预报值  
Table 2 Forecasting value of precipitation

年份	2000	2002	2004	2006	2008	2010
降水量(mm)	228. 26	557. 04	399. 16	407. 86	371. 73	414. 37

4.2.2 汾河渗漏量预报及其保证率

汾河渗漏量与降水量、汾河流量等随机变量存在着密切的关系, 它是一个典型的水文随机量, 因此

也可以应用皮尔逊 III 型概率密度曲线来描述和应用频谱分析来预报未来渗漏量, 具体的计算结果见表 3, 表 4。

表 3 汾河渗漏量保证率(1954~1993 年)  
Table 3 Assuring ratio of Fenhe leakage

保证率(%)	5	10	20	50	75	90	95
渗漏量(m <sup>3</sup> /s)	2. 15	1. 85	1. 53	1. 02	0. 71	0. 49	0. 38

表 4 汾河渗漏量预报值  
Table 4 Forecasting value of Fenhe leakage

年份	2000	2002	2004	2006	2008	2010
渗漏量(mm)	0. 94	0. 32	0. 15	0. 49	0. 53	0. 36

4.2.3 人工开采量的确定

研究区内的岩溶水开采量根据目前的开采现状及万家寨引黄的实际情况来确定。本次研究采用了两种方案。方案 1 为研究区 2001 年之前按现状实际开采量(1.0835 m<sup>3</sup>/s)进行开采, 2002~2010 年按晋祠泉域地下水可开采量(0.6199 m<sup>3</sup>/s)进行开采。方案二为研究区 2001 年之前按现状实际开采量(1.0835 m<sup>3</sup>/s)进行开采, 2002~2004 年、2005~2010 年分别按规划削减后的开采量 0.5285 m<sup>3</sup>/s 和

0.5311 m<sup>3</sup>/s 进行开采。

4.2.4 矿坑排水量的确定

根据煤矿的未来生产规模及研究区的实际情况, 矿坑排水量取 2000 年的排水量作为预报模型中的矿坑排水量。

4.2.5 晋祠泉流量的预报

将各种预报因子的预测值带入到预测模型(10)中, 即可得到晋祠泉在未来的泉流量(此种预报方式简称为方式一)。晋祠泉流量的预报值见图 3、4。

在此应该说明的是, 由于晋祠自从 1994 年断流以后, 晋祠泉长期处于一种“透支”状态, 在万家寨引黄工程完工以后, 地下水资源可以得到“涵养”, 在未来的某一时刻, 预报模型的预报值为一正值, 但这只说明了在正常条件下, 晋祠泉应该出流, 而晋祠泉目前实际上处于一种断流的变异条件下, 因此实际的出流时间应为在以前“透支”的地下水资源得到充分弥补后, 本次研究取的出流时间为  $\sum_{t=1994}^T Q(t) > 0$ , 此时的  $T$  为晋祠出流的时间。

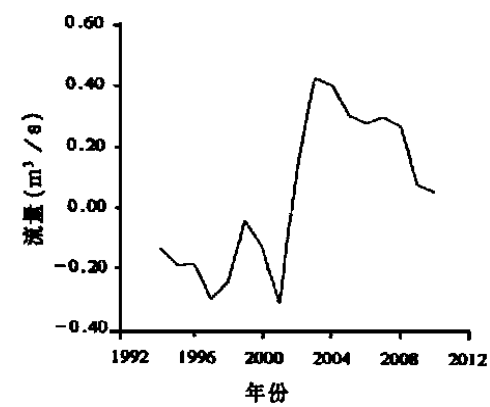


图 3 一方式下第一方案预测图  
Fig. 3 Forecasting curve of first project in first mode

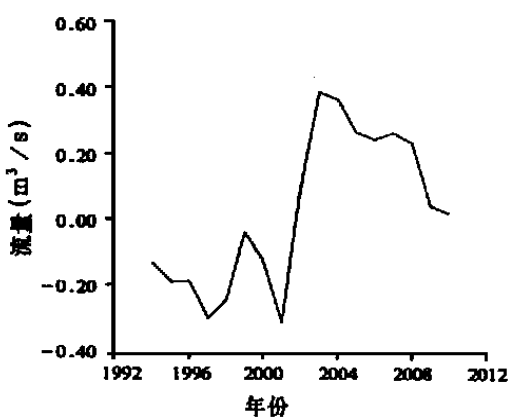


图 4 一方式下第二方案预测图  
Fig. 4 Forecasting curve of second project in first mode

由于降水的不确定性和随机性, 未来降水量的预报难免会有偏差(尽管拟合的较好), 这无疑给预测工作带来了很大的难度。因此本次研究还按降水量、汾河渗漏量保证率的方法来预测晋祠泉的未来出水量, 即在模型中降水量与汾河渗漏量全取 75%

保证率的降水量与汾河渗漏量 355.25mm 和  $0.71\text{m}^3/\text{s}$ 。(此种预报方式简称为方式二)。在这种预报方式下, 晋祠泉流量的预报值见图 5、6。

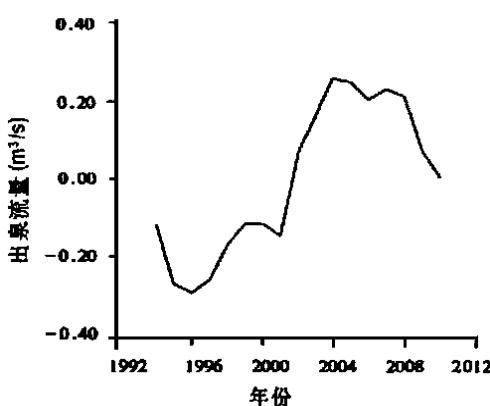


图 5 二方式下第一方案预测图  
Fig. 5 Forecasting curve of first project in second mode

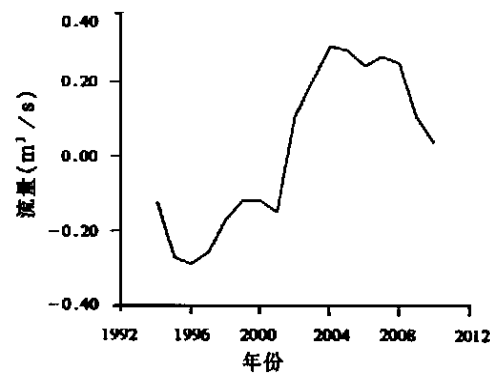


图 6 二方式下第二方案预测图  
Fig. 6 Forecasting curve of second project in second mode

根据出流原则(3)式, 可知晋祠泉的大致出流时间: 在第一种预报方式下, 晋祠泉若按第一种方案调控, 大约可在 2007 年复流, 若按第二种方案调控, 大约可再 2006 年复流; 在第二种预报方式下, 晋祠泉若按第一种方案调控, 大约可在 2009 年复流, 若按第二种方案调控, 大约可再 2008 年复流。

在此必须明确的是, 在未来的十几年里, 若遇到连续偏丰水年, 晋祠泉有可能提前出流; 反之, 若遇到连续偏枯水年, 则出流时间有可能推后。另外, 万家寨引黄工程完工后, 汾河的渗漏量也必将增加, 这无疑将为晋祠的早日复流创造了条件。

## 5 结论

通过本次研究, 可以得出如下几点主要结论:

1. 晋祠泉流量逐年减少的原因, 主要是由于地下水资源的不合理开发造成的, 其中人工大规模开采岩溶地下水和煤矿排水是晋祠泉断流的两个最大的贡献因素; 其次, 随着汾河水资源利用量的增加及在开发利用中缺乏统筹规划, 汾河也在每年中出现了较长时间的断流, 这直接导致了汾河渗漏量的减少; 另外, 与区域大气候的变化趋势一致, 晋祠泉域的降水量也具有减少的趋势, 这无疑也加剧了晋祠泉的断流趋势。

2. 为了促使晋祠早日复流, 使这一风景名胜早日再现, 今后应加强节流工作, 即一方面在泉域内严禁增加新的开采岩溶水的取水工程和设施, 同时对现有的取水设施采取关闭和控制其开采量的措施; 另一方面应该将煤矿排水与当地的工农业用水紧密地结合起来, 减少工农业对地下水的开采。在节流的同时还应作好开源工作, 即人为地增加补给量。据当地水文地质部门的研究资料知, 在晋祠泉域的补给区玄泉寺附近, 具有得天独厚的岩溶地下水人工调蓄的条件, 在此处修建地表水库, 可以最大限度地拦蓄汾河洪水, 该地段又为灰岩裸漏地段, 水库蓄水渗漏补给地下水是切实可行的。

3. 在引黄水到达太原以后, 研究区的供水结构

将发生转变。新的水源结构可以提高城市的供水量和供水保证率, 为城市的可持续发展创造良好的水源保障。但其前提是必须做到统一规划、合理分配、加强管理, 否则就会导致供水市场的混乱和无序竞争, 其后果很可能是重现其它建设远距离引水工程的城市曾经出现过的地下水继续超采, 外引水售不出去, 工程投资收不回来, 运转不能维持的局面。

4. 本文应用的改进的 BP 神经网络模型有效地克服了常规 BP 神经网络模型存在着的诸如收敛速度慢、局部极值、在学习过程中发生数值震荡等缺陷, 具有收敛速度快、预测精度高的优点。由改进的 BP 神经网络模型的模拟和预报结果可以得到晋祠泉在不同方式、方案下的流量变化过程, 并可以大致估算出晋祠泉的复流时间在 2006~2009 年间, 从而可以为当地旅游部门重新制定旅游规划提供依据。

## 参考文献:

- [1] 韩行瑞, 鲁荣安, 李庆松. 岩溶水系统—山西岩溶大泉研究[M], 北京: 地质出版社, 1993, 211~228.
- [2] 楼顺天, 施阳. 基于 MATLAB 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, 1999.
- [3] 蒋良文, 王士天, 刘汉超, 等. 岷江上游汶川—较场段滑坡稳定性的神经网络评判[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 547~553.
- [4] 洪伟, 吴承祯. 山地土地利用方向的自组织学习联想神经网络差别[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 554~558.
- [5] 宫辉力, 李培, 崔桂莲等. 地下水系统准三维流场模拟与流场宏观调控[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(2), 135~139.

# Research on the Resuming Flow Time of Jinci Spring by Using the Artificial Neural Networks Technique in Shanxi Province

SUN Cai-zhi<sup>1,2</sup> and GONG Hui-li<sup>3</sup>

(1. *Environment science research institute of Beijing Normal University, Beijing 100875 China;*

2. *Geography department of Liaoning Normal University, Dalian 116029 China;*

3. *Capital Normal University, Beijing 100037 China*)

**Abstract:** Owing to the long-time & over-pumping Karst groundwater in Jinci spring field, the Jinci spring has been drying up since 1994, the project of Wanjiashai which is for transferring surface water of Yellow River may relax the intense situation between provision and demand of groundwater in Jinci spring field in some degree, and now the questions that whether Jinci spring can recover and when Jinci spring may appear again attract many people's notice. On consideration these questions, this paper applied an revised artificial neural networks to analyze and predict the changing tendency of Jinci spring's runoff, and the approximate time of resuming flow was given.

**Key words:** Artificial neural networks; Jinci spring of Shangxi province; resuming flow