

文章编号:1001-4810(2013)04-0391-07

# 丽江市黑龙潭泉群断流的人工神经网络模拟

曾成<sup>1</sup>, 杨睿<sup>1</sup>, 杨明明<sup>2</sup>, 胡君春<sup>3</sup>, 武贵华<sup>4</sup>, 樊宇红<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所/环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;  
2. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 3. 云南省煤炭地质勘查院, 云南 昆明 650218;  
4. 云南省地质环境监测总站, 云南 昆明 650216)

**摘要:**近年来, 云南省丽江市著名景点黑龙潭泉群断流频发, 这将严重威胁丽江市旅游业的可持续发展。为了正确认识黑龙潭泉群断流的原因, 并掌握其发生的规律, 本文在对该泉群的水文地质条件、降水量和断流的关系进行分析的基础上, 对该泉群的断流情况开展了人工神经网络模拟研究。本文发现黑龙潭泉群属于非全排型山前断裂溢流岩溶泉; 年降水量不足与该泉群的断流具有一定的因果关系; 构建了网络拓扑结构为 6-13-3 的 BP 人工神经网络模型对黑龙潭泉群的不同断流情况进行了模拟, 该模型以前期降水量、温度与湿度作为输入向量参数, 以 1953-2002 年的数据作为训练样本, 以 2003-2012 年的数据作为模型检验样本, 检验结果与实际情况吻合度约为 90%, 表明该模型可以较好地模拟黑龙潭泉群的断流情况。

**关键词:**云南丽江; 黑龙潭泉群; 岩溶泉成因; 断流; 人工神经网络

**中图分类号:** P641.8      **文献标识码:** A

## 0 引言

云南省丽江市丽江古城是 1998 年经国务院批准的第二批国家级历史文化名城, 1997 年被列入世界文化遗产名录, 她是一个以玉龙雪山为背景, 古城为主体, 水为灵魂, 地方与民族文化为特色的国际旅游名城<sup>[1]</sup>。丽江古城是一座典型的高原水城, 贯穿古城的玉河水系来自城北的黑龙潭泉群<sup>[2]</sup>, 所以黑龙潭泉群又被誉为丽江古城的生命之源, 她不但是古城重要的生活用水水源, 同时也是重要的景观用水水源。然而, 近年来由于丽江地区气候持续暖干, 降水量偏少, 使得黑龙潭泉群经常发生断流, 这严重制约了丽江古城的可持续发展。

前人对黑龙潭泉群断流的研究较为零散<sup>[3-7]</sup>, 且缺乏相应的数学模拟研究。人工神经网络模型(Artificial Neural Networks, 简称 ANN)是一种非线性映射模型, 广泛应用于表层岩溶泉流量模拟<sup>[8-9]</sup>、岩溶地下河系统水位流量关系建立<sup>[10]</sup>、岩溶水资源及

其承载力综合评价<sup>[11-12]</sup>、岩溶煤矿突水预测<sup>[13]</sup>等岩溶水文地质学领域的研究。而丽江黑龙潭泉群至今未曾开展过人工神经网络模拟的研究工作, 为此, 本文将在综合分析前人研究成果的基础上, 分析黑龙潭泉群的水文地质特征, 探讨降水量与黑龙潭泉群断流的关系, 并利用相关的气象资料对该泉的断流情况开展人工神经网络模拟研究。

## 1 黑龙潭泉群概况

### 1.1 自然地理概况

黑龙潭泉群位于云南省丽江市古城北部的 AAA 级景区——黑龙潭公园(又名玉泉公园)内, 象山西南麓脚下(图 1), 地理坐标为东经 100°14'01.85" E, 北纬 26°53'17.88" N, 海拔 2 421 m(WGS84 坐标系, 手持 GPS 测定)。黑龙潭泉群由珍珠泉等多个泉眼组成, 是黑龙潭公园中的重要景点之一, 同时该泉也是流经丽江古城的玉河水系的源头, 是丽江市重要

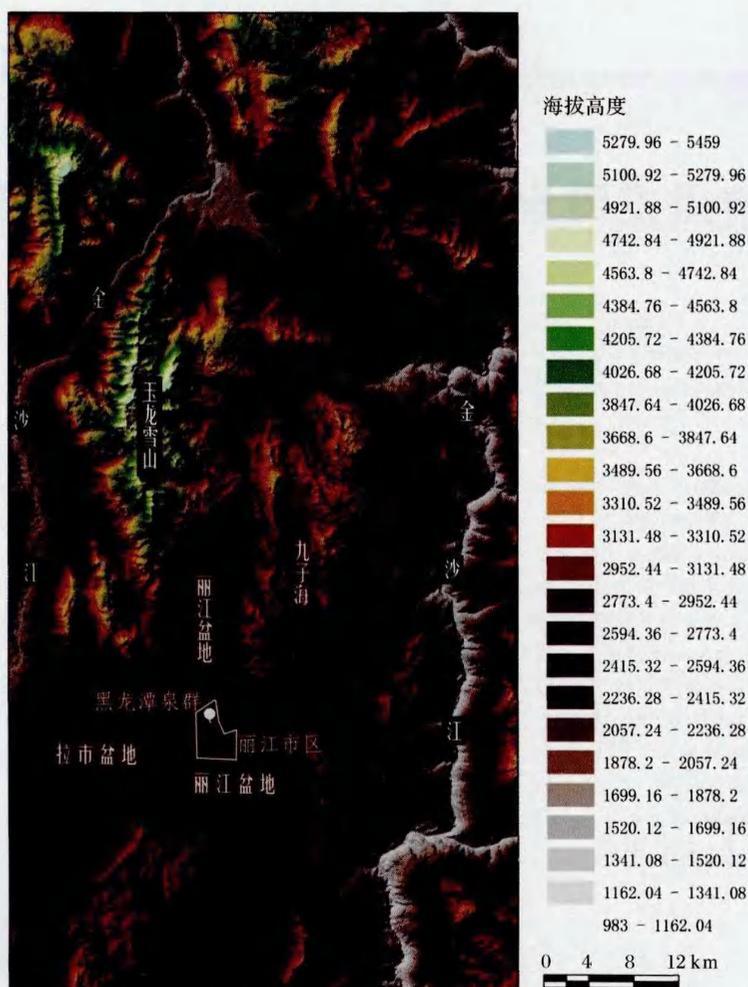


图1 丽江盆地及周边地区数字高程图

Fig. 1 DEM map of Lijiang basin and its surrounding areas

的城镇供水水源、景观用水资源和旅游资源。

黑龙潭泉群所在的丽江市属南亚季风气候,干湿季分明<sup>[14]</sup>。丽江盆地雨热同期(图2),年平均气温为12.8℃;年平均降水量957.2mm,降水主要集中于6—9月,占全年降水量的80%以上;年平均相对湿度为63%;年蒸发量1180mm,年蒸发量最大为4月,达146mm,最小月为8月,仅57mm(1951—2012年,数据来源于中国气象科学数据共享服务网)。

## 1.2 泉群水文地质与断流概况

黑龙潭泉群出露于象山脚下,泉眼断续分布,溢出带长达2km,汇总流量为1918~4430L/s<sup>[21]</sup>。最大年平均流量2.22m<sup>3</sup>/s,最小年平均流量0.45m<sup>3</sup>/s,相差4.9倍,流量极不稳定。黑龙潭泉群为一岩溶大泉,泉眼出露于三叠系北衙组中上段灰岩、白云岩中,其东北部为其汇水范围,由三叠系碳酸盐岩构成含水层,泉域的中央为九子海洼地(海拔约2800

m),泉域地形总体上向西部和东南部倾落(图1)。泉群的西侧为第四系全新统湖积物。汇水范围内透水性良好的碳酸盐岩地表溶蚀裂隙发育,易于接受大范围降水的补给,受东南部中二叠统黑泥哨组P<sub>2</sub>h砂岩、页岩、灰岩、玄武岩夹煤层与下三叠统腊美组T<sub>1</sub>l砂页岩互层等隔水层的阻挡,迫使丰富的地下水向西侧丽江盆地中透水性相对较差的第四系松散沉积物中侧向排泄(图3)。黑龙潭泉群紧邻黑龙潭湖,该湖由泉水溢流形成,湖底与泉眼共处同一海拔高程,所以湖水位与泉群流量有着直接的关系,表现为丰水期湖水充盈,而在泉群断流年,蓄积的湖水则会通过干涸的泉眼和湖底的裂隙渗漏于地下。黑龙潭泉群属于山前断裂溢流泉,由山前大断裂外侧的弱透水松散地层阻水,碳酸盐岩类岩溶水受阻溢流成泉,属于“自产二流型”水资源系统,即无外系统的过境河流与地下水的补给,仅靠泉域内的大气降水入渗补给,地下水的排泄为非全排型,除了黑龙潭泉群排出一部分水

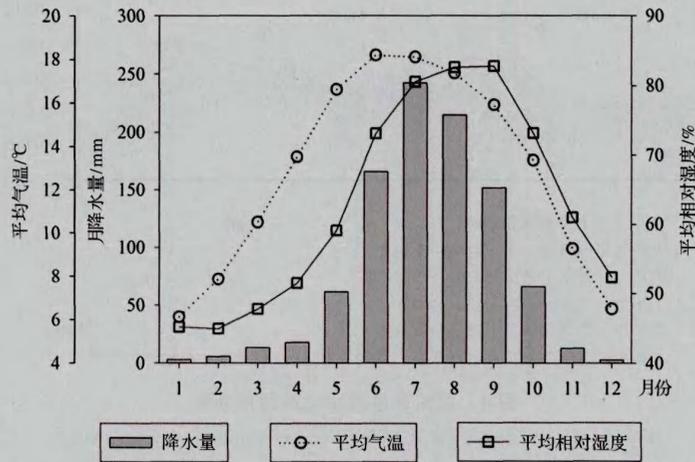


图 2 丽江市降水量、气温与相对湿度月统计值(1951—2012 年)

Fig. 2 Statistics of precipitation, temperature and relative humidity in Lijiang (from 1951 to 2012)



图 3 黑龙潭泉域水文地质图

Fig. 3 Sketch hydrogeological map of the Heilongtan spring catchments

外,大部分的岩溶地下水向丽江盆地的第四系松散沉积物孔隙含水层潜流排泄(图 4)。

据文献记载,黑龙潭泉群历史上曾经有过多断流<sup>[15-20]</sup>。通过对黑龙潭泉群断流情况与丽江盆地年、雨季和旱季降水量的分析,发现断流与上一年的年降水量具有较为明显的关联性(图 5),表现为当年降水量小于 920 mm 阈值时,次年一般都会出现断流情况。但也有例外,例如 1965、1968、1973、1985 与

1989 年,其中 1965 年上一年的降水量略大于 920 mm,但是次年却出现了泉群断流的情况,而其余四年虽没有发生断流,但是这些年份上一年的降水量却又都小于 920 mm。这些特例可能与降水量的年内分配比例(旱季与雨季)、流域蒸散发强度等因素有关,但更重要的是因为降水量与泉群流量之间具有复杂的非线性映射关系。

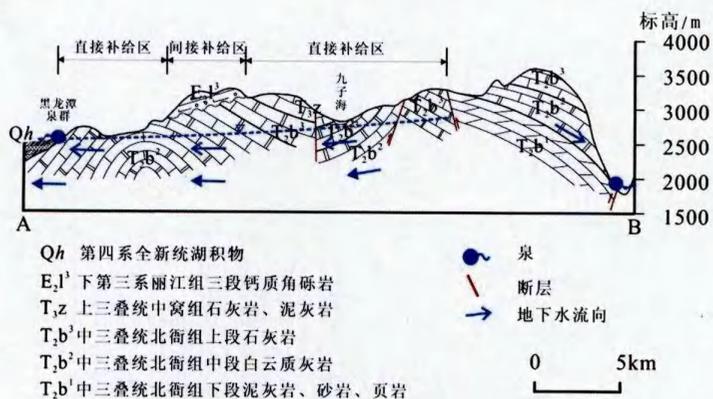


图4 黑龙潭泉群水文地质剖面图

Fig. 4 Hydrogeological profile of the Heilongtan spring groups

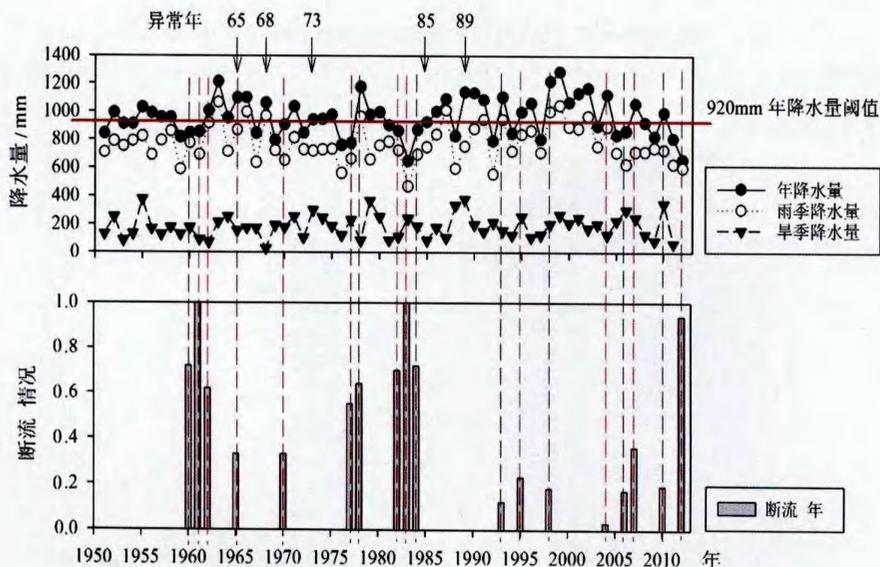


图5 黑龙潭泉群断流与降水量的关系

Fig. 5 Relationship between the Heilongtan spring groups' zero flow and precipitation

注:断流情况用变量  $y$  表示,该变量定义为一年中断流持续的时间比例—— $y=t/12$ ,式中: $t$ 为一年中断流持续的时间(月)。

## 2 泉群断流模型

### 2.1 泉群所属水资源系统分析

黑龙潭泉群属于典型的“自产二流型”水资源系统,既没有外系统的过境河流,也没有外系统地下水的补给,仅仅依靠泉域内大气降水和季节性地表径流的人渗补给,泉和潜流是该系统的两种重要径流排泄方式(图6),该区域的水均衡方程为:

$$\alpha \cdot P - Q_c - Q = \Delta w$$

式中: $\alpha$ 为降水入渗系数, $\Delta w$ 为地下水储量变化

从上式看,造成黑龙潭泉群流量减少的可能原因有二,一是由于降水量减少所造成的山区岩溶地下水位的下降;二是由于大量汲取丽江盆地的第四系孔隙水,地下水降落漏斗向盆地西侧的岩溶山区扩大,使

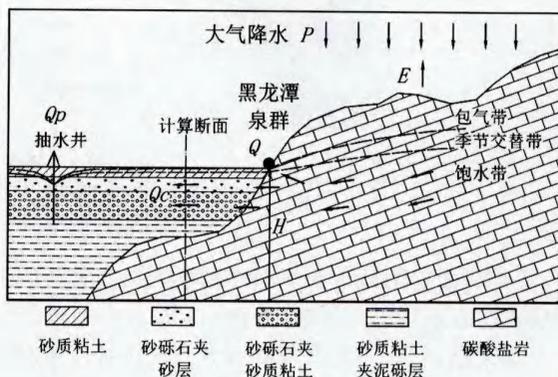


图6 黑龙潭泉域岩溶水系统补、径、排模式

Fig. 6 Patterns of recharge, runoff and discharge in the Heilongtan karst spring catchments

$P$ 为降水量; $E$ 为泉域蒸发量; $Q_c$ 为潜流量; $Q$ 为黑龙潭泉群流量; $Q_p$ 地下水开采量

补给一侧的水力坡度变陡,增大了岩溶水对孔隙水的补给,从而使泉水流量不断减小,直至断流。本文认为降水量不足是泉群断流的主因,原因有二:首先,历史上该泉曾多次断流(如清代、民国),当时地下水的利用程度肯定不高;其次,黑龙潭泉群南西侧的丽江盆地中第四系孔隙水中并未出现明显的地下水降落漏斗(图 7),丽江古城南部的祥云村虽因地下水开采强度大,出现了小型的地下水降落漏斗,但是它的范围有限,所以地下水开采对黑龙潭泉群流量的影响较小<sup>[14]</sup>。

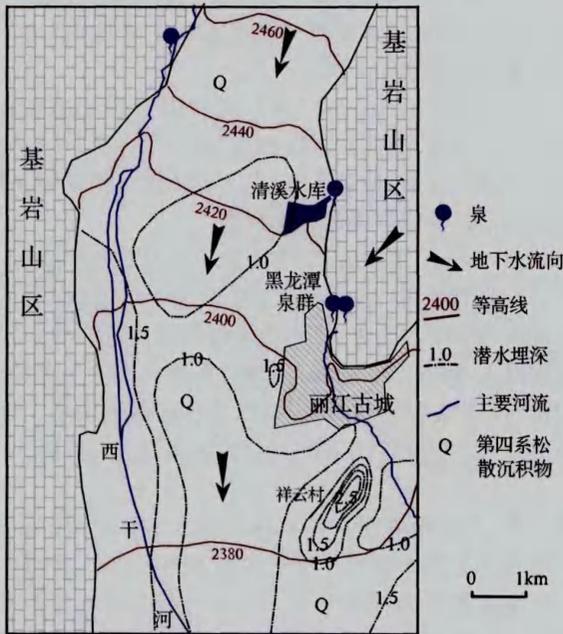


图 7 丽江盆地第四系松散沉积物潜埋深等值线  
Fig. 7 Sketch of the groundwater's burial depth contour in unconsolidated sediments of the Quaternary system in the Lijiang basin

为此,本文将该水资源系统概化为最基本的一层水箱模型(图 8),定性讨论黑龙潭泉群流量与气象要素之间的关系。

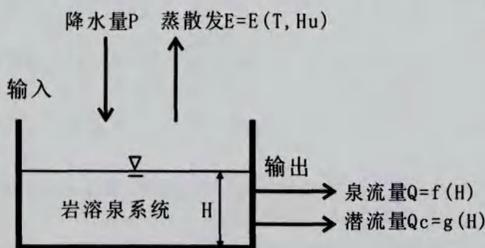


图 8 黑龙潭泉群水箱模型结构  
Fig. 8 Tank model's structure of the Heilongtan spring group

因  $Q$  和  $Q_c$  为蓄水深度  $H$  的函数,故有:

$$\beta \cdot dH/dt = P - E - f(H) - g(H)$$

式中,  $\beta$  为蓄水系数。

上式经变换后可得  $H$  是  $P, E$  的复合函数:

$$H = \Phi(P, E)$$

将上述函数代入  $Q = f(H)$  可得:

$$Q = f[\Phi(P, E)]$$

上式表明泉流量  $Q$  是当地降水量  $P$  与蒸散发量  $E$  的复合函数。

## 2.2 泉群断流的 BP 人工神经网络模拟

由于  $Q = f[\Phi(P, E)]$  为一非线性函数,要建立其相应的分散式数学模型较为困难,主要原因是缺乏相应的水文地质参数,为此,我们可以利用人工神经网络来模拟黑龙潭泉群的断流情况。

ANN 通过神经元作用函数的简单复合就可以逼近有界子集上的任意非线性函数,具有如下优点:(1)通过对输入输出样本的训练学习,可以逼近系统的作用函数;(2)自适应性和自组织能力;(3)很强的容错性;(4)较强的分类与模式识别能力<sup>[22]</sup>。特别适用于因果关系复杂的非确定性推理、判断和识别问题。本文将利用反向传播学习算法的多层前馈神经网络(Back-Propagation Network,简称 BP 网络)来模拟降水量等气象要素与泉群断流之间的关系。具体的算法本文不再赘述,可参见相关文献<sup>[22-23]</sup>。

由式  $Q = f[\Phi(P, E)]$  可知,降水量与泉域蒸散发量是黑龙潭泉群流量的主要控制因素。由于该泉所在的岩溶含水系统对降水等气象要素具有滞后和延迟效应,并且降水量与泉群流量呈非线性关系,因此在进行人工神经网络设计时,网络输入向量参数所包含的气象因素应尽量广泛一些,为此把计算当年雨季降水量、前一年旱季降水量、前一二年的降水量作为重要的输入向量参数;又由于泉域蒸散发量也是影响泉群流量的重要因素,但是因为缺乏相关的数据,所以将前一年的温度与湿度作为代用指标列入输入向量参数(表 1)。

表 1 黑龙潭泉群断流的 BP 网络模型结构设计

Table 1 Design of BP network model's structure of the Heilongtan spring groups' zero flow

输入向量参数	BP 网络	目标向量参数
前两年降水量	网络拓扑结构 6-13-3	(0,0,0)未发生断流年
前一年降水量		(0,0,1)仅年中数月发生断流
前一年旱季降水量		(1,0,1)跨年断流的起始年
计算当年雨季降水量		(1,1,1)一整年全部断流
前一年温度		(1,1,0)跨年断流的结束年
前一年湿度		

目标向量为黑龙潭泉群的断流情况,根据实际设计为5种断流情形(表1)。

根据上述分析,本文将建立一个3层BP人工神经网络断流模型,其中有输入层有6个神经元,输出层有3个神经元;经试算后发现当隐含层神经元个数为13时,网络的收敛速率最快,所以建立的BP网络拓扑结构为6-13-3(表1)。

该网络的输入层与隐层之间的激活函数为双曲正切S型函数,即 $f(x) = \tanh(x)$ ;隐层与输出层之间的激活函数为对数S型函数,即:

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

归一化公式选择最值法:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中, $x_i$ 和 $\hat{x}_i$ 分别为归一化前后的数值, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为原数据的最大和最小值<sup>[24]</sup>。

将1953—2002年的数据作为训练样本,对BP神经网络的参数进行自动率定。定义系统的目标精度为0.0001,最大训练次数取500次,训练算法选取附加动量法。将2003—2012年的数据作为模型检验样本。程序执行36次后BP网络模型训练成功。以上计算均在MATLAB7.0软件的神经网络工具箱中完成<sup>[25-27]</sup>。

表2为该BP人工神经网络模型的检验结果,模型预报值取小数点后两位数字,总体上它对未断流年和年中数月断流年的模拟基本符合实际情况,但是对跨年断流起始年2012年的预测出现失真,这可能与该年和1960—1962、1982—1984年两次跨年断流的训练样本存在差异有关,因为训练样本的断流起始月

表2 黑龙潭泉群断流的BP人工神经网络模型检验

Table 2 Verification of BP artificial neural network model of the Heilongtan spring group's zero flow

年份	实际断流情况	实际目标向量参数	模型预报值
2003	未断流	(0,0,0)	(0.00,0.00,0.00)
2004	年中数月断流	(0,0,1)	(0.00,0.00,0.98)
2005	未断流	(0,0,0)	(0.00,0.00,0.00)
2006	年中数月断流	(0,0,1)	(0.00,0.00,0.99)
2007	年中数月断流	(0,0,1)	(0.00,0.01,0.99)
2008	未断流	(0,0,0)	(0.00,0.00,0.00)
2009	未断流	(0,0,0)	(0.00,0.00,0.07)
2010	年中数月断流	(0,0,1)	(0.01,0.00,0.89)
2011	未断流	(0,0,0)	(0.00,0.02,0.00)
2012	跨年断流起始年	(1,0,1)	(1.00,0.32,0.02)

是4月,而模拟年的断流起始月为1月。检验结果中有两种断流情形没有出现,即整年断流和跨年断流结束年,与检验样本中不存在这两种情形有关,因此,这两种断流情形的验证需要在今后累积数据予以补充。总的来说,本模型的检验结果与实际情况吻合度约90%,表明模型可以较好地模拟黑龙潭泉群的断流情况。

### 3 结论与建议

(1)黑龙潭泉群属于非全排型山前断裂溢流岩溶泉,泉域年降水量不足是泉群断流的主要原因,地下水开采对断流影响不大。

(2)通过2003—2012年气象数据对黑龙潭泉断流进行模拟检验,其吻合度约为90%,表明以气象要素作为输入参数,应用BP人工神经网络模型可以较好地模拟黑龙潭泉群的断流情况。

(3)由于丽江盆地第四系孔隙水区域的气象、地下水动态监测等资料较为缺乏,为了更好地预测黑龙潭泉群流量的动态变化,建议相关部门正确规划和布设监测网点,加强地下水动态监测;充分利用气象资料,积极开展黑龙潭泉群断流BP人工神经网络模型年度模拟预报,以为丽江市的可持续发展提供决策依据。

**致谢:**在前期的野外水文地质调查过程中,得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所玉龙雪山冰川与环境观测站提供的帮助。参与野外调查的人员有中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室的晏浩、陈波,丽江市古城区束河街道龙泉村的木维昌驾驶员。中国气象科学数据共享服务网提供了论文所需的基础气象资料。桂林市气象局气象台蒋丽娟高级工程师给予论文部分修改建议。《中国岩溶》编辑部的吴华英和韦复才二位同志在论文修改过程中给予了很大帮助。作者在此向他们表示感谢。

### 参考文献

[1] 郭莉莉. 丽江古城滨水休闲空间研究[D]. 昆明理工大学硕士学位论文, 2008, 1-3.

[2] 华勇. 逐水而居,得水而兴—丽江古城之水对现代小区水体设计的启示[J]. 科教文汇, 2006, 04(上半月刊): 116.

[3] 范弢, 庄立会. 丽江城市水资源评价[J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 65-69.

[4] 范弢, 杨世瑜. 丽江古城水环境现状与调控对策研究[J]. 资源开发与市场, 2007, 23(2): 153-155.

[5] 范弢, 杨世瑜. 丽江城市地下水脆弱性评价[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2007, 32(1): 91-96.

[6] 范弢, 杨世瑜, 庄立会. 丽江市水资源环境现状与应急地下水源地研究[J]. 云南师范大学学报, 2008, 28(1): 66-71.

[7] 李继木. 丽江水资源调查评价[D]. 昆明理工大学硕士学位论文

- 文,2007.
- [8] 陈宏峰,朱明秋,夏日元,等. 湖南洛塔干河猪场表层岩溶泉 BP 神经网络分析[J]. 中国岩溶,2005,24(4):300-304.
- [9] 柳大伟,蒋忠诚,陈伟韦. 基于 Elman 神经网络的表层岩溶泉动态预测及应用——以广西平果县果化镇布洋 1 号表层岩溶泉为例[J]. 中国岩溶,2007,26(1):71-74.
- [10] 程庭,陈植华,时坚,等. 基于 ANN 模型重塑岩溶地下河系统流量数据可行性研究[J]. 中国岩溶,2006,25(2):121-125.
- [11] 周翔,朱学愚. 神经网络在岩溶水资源评价中的应用[J]. 中国岩溶,1999,18(4):337-341.
- [12] 郑长统,梁虹. 基于人工神经网络的喀斯特地区水资源承载力综合评价——以贵州省为例[J]. 中国岩溶,2010,29(2):170-175.
- [13] 王延福,靳德武,曾艳京,等. 岩溶煤矿矿井煤层底板突水非线性预测方法研究[J]. 中国岩溶,1998,17(1):57-66.
- [14] 杨世瑜. 云南省丽江市城市环境地质问题调查评价报告[R]. 昆明:云南省地质调查院,2005.
- [15] 王法. 丽江黑龙潭泉眼断流,专家:受降水量直接影响[N/OL]. 云南网—新闻频道—州市联播,2012-12-24. [http://news.yunnan.cn/html/2012-12/24/content\\_2547287.htm](http://news.yunnan.cn/html/2012-12/24/content_2547287.htm).
- [16] 王法. 丽江黑龙潭断流 1 年有余,专家:干旱年应人工补水[N/OL]. 云南网—社会频道—社会热点,2013-3-1. [http://society.yunnan.cn/html/2013-03/01/content\\_2635384.htm](http://society.yunnan.cn/html/2013-03/01/content_2635384.htm).
- [17] 和慧东,刘晓佳. 黑龙潭断流一年了,丽江人,我们能做什么? [N/OL]云南信息报电子版—云信网,2013-1-17. <http://news.ynxxb.com/content/2013-1/17/N78098687720.aspx>.
- [18] 王法. 丽江黑龙潭泉群完全断流[N/OL]. 云南网—图片新闻,2012-2-3. [http://lijiang.yunnan.cn/html/2012-02/03/content\\_2025459.htm](http://lijiang.yunnan.cn/html/2012-02/03/content_2025459.htm).
- [19] 刘晓佳,和慧东,张勇. 黑龙潭断流引起中央关注,引来中科院专家把脉——黑龙潭断流,降水与地下水不足是“罪魁”[N/OL]. 云南信息报电子版—云信网,2012-8-23. <http://news.ynxxb.com/content/2012-8/23/N99003503802.aspx>.
- [20] 范毅. 云南丽江生态地质环境演化过程与趋势研究[D]. 昆明理工大学博士学位论文,2008,72.
- [21] 中国人民解放军 00939 部队. 1:20 万丽江幅区域水文地质普查报告[R]. 昆明:云南省地矿局,1979.
- [22] 超伦巴根,贾德彬. 数值计算方法[M]. 中国水利水电出版社,北京,2007,289-297.
- [23] 闻新,揭露,王丹力,等. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京:科学出版社,2001,207-232.
- [24] 柳小桐. BP 神经网络输入层数据归一化研究[J]. 机械工程与自动化,2010,(3):122-123.
- [25] 罗成汉. 基于 MATLAB 神经网络工具箱的 BP 网络实现[J]. 计算机仿真,2004,21(5):109-111.
- [26] 孙帆,施学勤. 基于 MATLAB 的 BP 神经网络设计[J]. 计算机与数字工程,2007,35(8):124-126.
- [27] 桂现才. BP 神经网络在 MATLAB 上的实现与应用[J]. 湛江师范学院学报,2004,25(3):79-83.

## Artificial neural network simulation to zero flow of the Heilongtan spring groups in Lijiang

ZENG Cheng<sup>1</sup>, YANG Rui<sup>1</sup>, YANG Ming-ming<sup>2</sup>, HU Jun-chun<sup>3</sup>,  
WU Gui-hua<sup>4</sup>, FAN Yu-hong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang, Guizhou 550002, China;

2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510611, China;

3. Yunnan Province Institute of Coal Geological Survey, Kunming, Yunnan 650218, China;

4. Yunnan Province Geological Environment Monitoring Station, Kunming, Yunnan 650216, China)

**Abstract:** Zero flow of the Heilongtan spring group that is famous scenery in Lijiang, Yunnan Province frequently occurs recently, which severely threatening the sustainable development of Lijiang tourism. In order to know the real reason for zero flow of the Heilongtan spring group and its occurrence regularity, hydrogeological conditions and correlation between precipitation and zero flow of the spring group are analyzed systematically, and a simulation based on artificial neural network model is made also. It is found that the Heilongtan spring group is an incomplete-drainage overflow karst spring at the piedmont formed by fractures. There is causality between the annual precipitation deficit and the zero flow of the Heilongtan spring group. Finally, a BP artificial neural network model with 6-13-3 network topology of the Heilongtan spring group's zero flow is established. The model uses antecedent precipitation, air temperature and humidity as input vector parameters to simulate different conditions of the Heilongtan spring group's zero flow. Training samples come from data from 1953 to 2002, and testing samples come from 2003 to 2012 in the model. At last, it is found that the testing results are coincide with real situation to great extent.

**Key words:** Lijiang City, Yunnan Province; the Heilongtan spring group; cause of karst spring; zero flow; artificial neural network