

基于BP神经网络的场次洪水河道沙量预报

何斌, 张澎辉, 梁国华, 刘皓

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对日益严重的河流泥沙问题, 掌握河流泥沙的影响因素和泥沙的变化过程是泥沙治理的关键。以神经网络模型为基础, 建立场次洪水沙量预报模型, 对多沙河流的洪水挟沙量进行预报, 并取得较好的预报效果。选择辽西北多沙河流大凌河作为研究实例, 首先将1984年-1998年间的29场历史实测洪水资料进行分析, 得到影响下游沙量的主要因素; 然后, 通过神经网络模型建立上游影响因素与下游沙量之间的关系; 最后, 选取其中6场洪水资料进行验证。模型计算结果表明, 计算结果与实测结果误差在合理范围之内, 精度符合要求, 可以用于下游沙量的预报。

关键词: BP神经网络; 沙量预测; 场次洪水

中图分类号: TV124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0406-03

Flood and sediment prediction based on BP neural network

HE Bin, ZHANG Peng hui, LIANG Guo hua, LIU Hao

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Knowledge of the impact factors and variation process of river sediments is the key to solve the increasingly serious river sediment problems. In this paper, flood and sediment prediction model was developed to forecast the sediment load based on artificial neural network, which generated promising results. The model was then applied to the Daling River in the northwest of Liaoning Province. First, the data from 29 historical flood events from 1984 to 1998 were analyzed using the statistical method to obtain the main impact factors of downstream sediment load. Then, the BP neural network model was developed to characterize the relationship between the upstream impact factors and downstream sediment load. Finally, the data from six flood events were used to verify the model. The results showed that the errors between the calculated and measured values are within the reasonable range and meet the accuracy requirement, therefore the model is applicable for downstream sediment prediction in the Daling River.

Key words: BP neural network; sediment prediction; flood events

我国大江大河的泥沙问题一直以来都是个棘手的问题, 水利设施或多或少受其影响。由于泥沙的原因, 最常见的危害是水库有效库容减少, 严重影响水库的使用寿命; 泥沙严重的河流导致泥沙抬高河底高程, 降低河道行洪能力, 严重威胁河流周围人民群众的生产生活。沙量预报可以在高含沙洪水到来之前对其做出预测, 并通过一系列工程或非工程措施减少其造成的危害, 因而河流挟沙量的准确预报将对有效地控制和治理河流泥沙起到重要作用。

目前, 在洪水水沙预报研究中, 已有多种预报模型与方法, 大致可分为水动力学方法和水文学方法。水动力学法是从泥沙运动与变化的机理出发, 对泥沙传输变化进行描述。例如, 张瑞瑾^[1]提出的水流挟沙力公式已被广泛应用; 王光

谦^[2]建立了水沙两相流的动力学模型以及流域泥沙动力学模型; 吴作平^[3]研究的水沙水力学方法也具有不错的效果, 该模型建立了流域中水利枢纽上下游的水沙水动力学衔接条件, 并采用概化的算例对枢纽上下游进行了水动力学模拟。水文学的处理方法一般都是寻求影响泥沙运动变化的主要因素, 从而进行洪水水沙预测。例如, 万新宇等^[4]提出了坝址泥沙预测相似推理方法, 并预测了三门峡水库坝址泥沙过程; 耿艳芬等^[5]将径向基函数神经网络方法应用于复杂河网洪水水沙预报中, 并建立了珠江三角洲河网洪水水沙预报模型。由于水动力学法全面考虑洪水泥沙运动变化的各水力要素, 对水沙模拟所需的资料要求高且计算量也大, 因此其在实际应用过程中存在一定问题。而水文学方法以影

收稿日期: 2014-05-20 修回日期: 2015-03-24 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1600.027.html>

基金项目: 水利部公益行业科研专项(201201054)

作者简介: 何斌(1977-), 男, 浙江舟山人, 副教授, 主要从事水沙预报与调度方面研究。E-mail: hebin@dlut.edu.cn

通讯作者: 梁国华(1974-), 男(壮族), 广西隆安人, 副教授, 主要从事洪水水资源利用方面的研究。E-mail: ghliang@dlut.edu.cn

响水沙变化的主要因素为基础, 回避过多的细节, 对资料的要求较低, 能从宏观角度解决水沙模拟问题^[6], 因此该方法为水沙模拟预测提供了新途径, 也得到较广泛的应用。

人工神经网络(Artificial Neural Network, 简称 ANN)突破了以往传统数学模型的思维与处理方法, 运用黑箱理论, 能较好地处理泥沙预报这一复杂的、非线性的问题, 目前这方面已有大量的研究成果^[7,12], 为泥沙预报提供了一种不同于模型试验、理论公式的新思路。本文以大凌河流域为研究对象, 通过筛选影响下游沙量的因素, 采用 BP 神经网络方法进行场次洪水河道沙量预报。

1 研究区域选取与资料收集

大凌河为辽宁省西部最大的河流, 流经碎屑岩、火山岩和黄土地区, 大部分为多石质丘陵山区。该流域属温带季风气候, 夏季炎热多雨, 冬春少雨, 植被属辽西丘陵地荆条—胡枝子—草甸—杨柳河谷群落系列, 植被条件较差, 加之流域内降水年际、年内分配极不均匀, 导致水土流失严重, 含沙量较大。如图 1 所示, 流域内主要产沙区为左侧牯牛河、老虎山河、第二牯牛河等支流, 其中朝阳站和迷力营子站所控制流域的沙量占大凌河总流域的 90% 以上, 而凉水河子站所控制区域沙量较小。另外, 朝阳站以上流域受阎王鼻子水库的控制, 使得朝阳站以上区域天然来水来沙情况发生变化。因此, 本文选取流域内朝阳站、迷力营子站(后改为九连洞站)到义县站区间的河道作为研究区域, 通过上游两站的水沙资料来模拟预测下游义县站的沙量, 能很好地反映大凌河流域的水沙变化情况。

本文主要收集了 1984 年—1998 年间大凌河流域的 29 场洪水资料(来源于《中华人民共和国水文年鉴》的“辽河流域水文资料”第 4 册), 进行场次洪水河道泥沙模拟与预测。所收集的资料中, 各场洪水之间的洪峰流量与平均含沙量的变幅均比较大, 能反映大凌河流域不同类型的水沙组合情况。



图 1 大凌河流域水系图

Fig. 1 Daling River system

2 场次洪水沙量预测影响因素分析

多沙河流的洪水中挟带有大量的泥沙, 在泥沙从河道上游到下游的传输过程中, 影响下游沙量变化的因素有很多, 主要包括上游站的洪水总量、洪峰流量、平均含沙量、流速以及沿程的大断面情况等。其中, 洪水是泥沙输送的载体, 洪量的多少直接决定了下游洪水总沙量的多少; 洪峰流量能直

接反应一场洪水的能量与输沙能力的大小; 平均含沙量是衡量洪水挟沙能力的标准; 不同的河道大断面形状则对洪水流动会起到不同程度的阻滞作用。但是, 由于洪峰时段测量流速难度大, 洪峰流速资料可能不完整; 而沿程大断面资料又不易获取且难以量化, 因此在本文中暂不考虑流速和沿程大断面情况对下游沙量的影响。

根据已有的大凌河流域 1984 年—1998 年间 29 场洪水资料, 分别建立上游朝阳站、迷力营子站的主要水文要素(洪水总量、洪峰流量、平均含沙量)与下游义县站沙量的相关关系。通过线性回归分析(见图 2), 得到各个影响因素与下游站沙量之间的关系:(1) 上游各站洪水总量和洪峰流量与下游站沙量的相关关系较好。下游站沙量随着上游两站的洪量和洪峰流量的增加而增加, 且两站中迷力营子站与下游沙量的相关系数最高, 达到了 0.9 以上。(2) 上游各站平均含沙量与下游站沙量的相关关系不密切; 但是平均含沙量是衡量沙量的重要指标, 且平均含沙量与洪水总量二者的综合作用对下游沙量的影响有很大。由此可得, 上游两个水文站的洪水总量、平均含沙量以及洪峰流量可作为影响下游义县站沙量的主要因素。

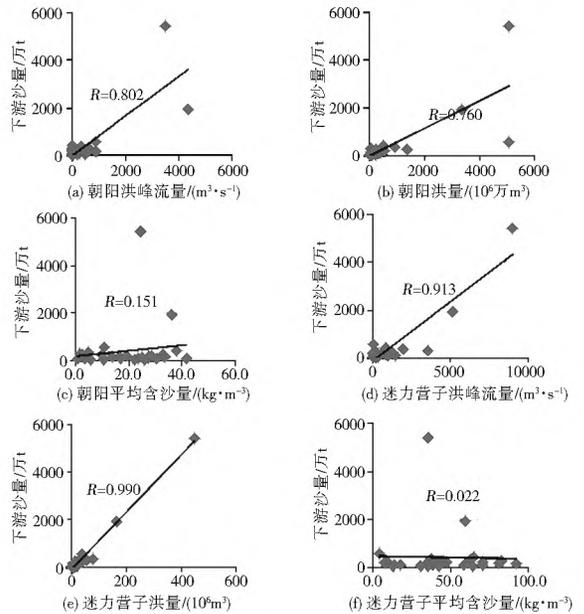


图 2 场次洪水下游沙量与所选因素相关关系

Fig. 2 Relationship between downstream sediment load of flood events and impact factors

3 场次洪水下游沙量的模拟与预测

3.1 多元线性回归的沙量模拟分析

由于下游沙量受到多个因素的综合影响, 单因素模拟很难直观、准确地反映出下游沙量的情况。因此, 本文应用多元线性回归方法, 采用朝阳和迷力营子两站的洪峰流量、洪量以及平均含沙量来综合模拟下游义县站的沙量。由图 3 模拟结果可知道, 其结果不甚理想, 其中有的洪水误差达到了 285%, 有超过一半的洪水其误差超过了 30%, 故结果不能达到实际应用的水平。由此可见, 对于下游站沙量的预测不是通过简单的线性拟合就可以得到的; 河道泥沙运动变化的复杂性决定了下游沙量预测是一个受多因素综合影响的

非线性问题。为了解决沙量预测这个复杂的非线性问题, 本文将采用 BP 神经网络来进行建模分析与预测。

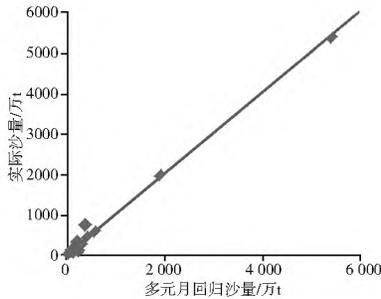


图 3 多元线性回归模拟结果

Fig. 3 Simulated results based on the method of multiple linear regression

3.2 基于 BP 神经网络的沙量预报

BP 神经网络^[13]是一种按误差逆向传播算法训练的多层前馈网络, 是目前应用最广泛的神经网络模型之一。该模型能学习和存贮大量的输入-输出模式映射关系, 而无需事前揭示描述这种映射关系的数学方程; 其学习规则是使用最速下降法, 通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值, 使网络的误差平方和最小; 其模型拓扑结构包括输入层、隐层和输出层。本文根据场次洪水河道沙量的影响因素分析结果, 以朝阳、迷力营子两站的洪峰流量、洪水总量和平均含沙量为模型的输入变量, 利用 BP 神经网络来建立下游义县站沙量预报模型, 其主要步骤如下。

(1) 将朝阳、迷力营子两站的洪峰流量、洪水总量和平均含沙量合计 6 个变量作为模型输入条件, 下游站沙量作为输出条件。

(2) 将各个变量进行模糊归一化处理。由于各个因素的量纲不尽相同, 为了达到同量纲计算的要求, 现把各个变量的值进行归一化, 使其成为 0~1 之间的数, 以便于计算; 归一化公式如下:

$$R_i = (X_i - \min X_i) / (\max X_i - \min X_i) \quad (1)$$

式中: R_i 为归一化后的数值; X_i 为第 i 个因素的实际值; $\min X_i$ 和 $\max X_i$ 为第 i 个因素实际最小值和最大值, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

(3) 选取 29 场洪水中的 23 场系列资料作为训练样本, 设定训练次数为 5 000 次, 对其进行训练, 在满足精度要求的情况下, 用剩余的 6 场资料进行检验。

(4) 将模型输出结果进行还原, 还原公式如下:

$$x_i = r_i (\max X_i - \min X_i) + \min X_i \quad (2)$$

式中: r_i 为归一化后的预测值; x_i 为第 i 个因素的预测值。

(5) 将模型计算得到的结果与原始数据进行对比, 见图 4。

(6) 将验证得到的结果与实测值进行对比, 见图 5。

3.3 结果分析

本文所建模型, 以上游站资料(朝阳、迷力营子两站的洪峰流量、洪水总量和平均含沙量)作为输入条件, 以下游义县站沙量作为输出条件, 用 BP 神经网络的方法反映输入变量和输出变量的相关关系, 模型模拟计算和验证结果见图 4、图 5 及表 1。

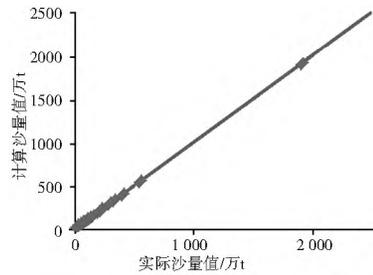


图 4 模型计算结果

Fig. 4 Simulation results of the model

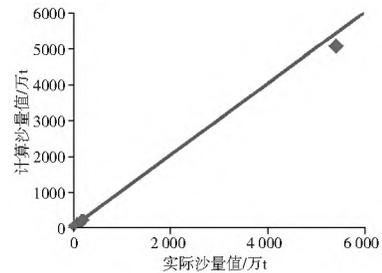


图 5 模型验证结果

Fig. 5 Verification results of the model

由图 4 可得, 计算结果与原始结果分布都位于 45° 中心线上, 其误差变化范围在 0.1~20.8 万 t 之间, 平均误差为 1.0 万 t, 现有洪水资料义县站的场次洪水平均输沙量为 414 万 t, 其模拟计算效果较好。由图 5 和表 1 可得, 其验证结果偏离 45° 中心线均不远, 验证的 6 场水沙资料误差都不是很大, 其实际误差变化范围在 0.8~391.1 万 t 之间, 平均误差为 61.8 万 t, 其相对误差有 5 场在 20% 以内, 效果较为理想。对于 19880910 号洪水其相对误差达到了 25.7%, 但其绝对误差仅有 9.8 万 t, 不及平均水平的 1/6; 导致该场洪水所预测沙量误差偏大的原因是该场洪水量级小, 且其前期有一场洪水过程。因此, 就预测的整体效果而言, 预测结果基本达到了应用要求。

表 1 验证结果误差

Tab. 1 Errors of verification results

洪号	实测沙量 / 万 t	预测沙量 / 万 t	实际误差 / 万 t	相对误差 (%)
19850726	69.0	68.2	- 0.8	- 1.1
19880910	38.1	47.9	9.8	25.7
19900916	186.1	174.8	- 11.3	- 6.1
19910611	200.7	180.2	20.5	10.2
19930728	161.0	162.8	1.8	1.1
19940713	5 440.6	5 049.5	- 391.1	- 7.2

4 结语

本文通过 BP 神经网络方法研究大凌河流域的泥沙预报, 首先分析单个因素与下游沙量的相关关系, 得到各个因素与下游沙量的相关系数, 分析其相关性的强弱, 确定神经网络的输入变量; 然后通过 BP 神经网络进行模拟, 得到的结果在误差允许范围之内, 说明 BP 神经网络算法可以用于泥沙预报。但由于 BP 神经网络本身的缺点, 收敛速度慢, 易陷于局部最小点, 且无法直观地描述各个变量之间的关系, 因此需在今后的研究工作中进一步改进。

(下转第 416 页)

水位、流量等水文要素的实测数据,分析了水位流量关系、闸门流量系数与上下游水位差、闸门相对开度、流量之间的关系,得到闸门流量系数与不同因子之间的相关系数均在 0.8 以上。

本次水文测验分布在灌区的泡田期、保苗和生长期,测次在各个时期均匀分布,因此所计算的闸门流量系数具有代表性。

参考文献(References):

- [1] 党九社. 桃曲坡水库高洞平板闸门综合流量系数分析[J]. 陕西水利, 1997(4): 40-41. (TANG Ji r she. Analysis on comprehensive flow coefficient of GA Odong plate gate of Taoqupo reservoir[J]. Shaanxi Water Resources, 1997(4): 40-41. (in Chinese))
- [2] 李玲, 李玉梁, 黄继汤, 等. 三岔管内水流流动的数值模拟与实验研究[J]. 水利学报, 2001(3): 49-53. (LI Ling, LI Yu liang, HUANG Ji tang, et al. Numerical simulation and experimental study on water flow in Y-type tube[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(3): 49-53. (in Chinese))
- [3] 邱静, 黄本胜, 赖冠文, 等. 宽顶堰平板闸门孔出流流量系数的研究与应用[J]. 中国农村水利水电, 2002(9): 41-42. (QIU Jing, HUANG Ben sheng, LAI Guan wen, et al. Study on flow coefficient of broad crest weir and its application[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(9): 41-42. (in Chinese))
- [4] 田间, 李贵清, 季安. 无坎宽顶堰堰流流量系数的探讨[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(3): 34-35. (TIAN Jian, LI Gui qing, JI An. Discussion on weir flow coefficient for broad crest ridge free weirs[J]. Advances In Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(3): 34-35. (in Chinese))
- [5] 苗宝广, 刘善均, 徐一民, 等. 有压隧洞流量系数与闸门开度的关系[J]. 水利水电技术, 2004, 35(9): 70-72. (MIAO Bao guang, LIU Shan jun, XU Yi min, et al. Pressure tunnels dis-

charge coefficient vs gate opening[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(9): 70-72. (in Chinese))

- [6] 刘晓庆, 李克锋, 易文敏, 等. 水力翻板闸门流量系数的探讨[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 122-125. (LIU Xiao qing, LI Ke feng, YI Wen min, et al. Research on discharge coefficient of hydraulic tumble gate[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 122-125. (in Chinese))
- [7] 马永红, 赵宇. 梨树灌区渠首闸门系数率定分析及重要性[J]. 农业与技术, 2012, 32(1): 4. (MA Yong hong, ZHAO Yu. Analysis on gate flow coefficient of Lishu Irrigation District and its importance[J]. Agriculture and Technology, 2012, 32(1): 4. (in Chinese))
- [8] 樊晶晶, 王海军, 毛舒娅, 等. 平板闸门小开度闸后水流特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 124-128. (FAN Jing jing, WANG Hai jun, MAO Shu ya, et al. Numerical simulation of flow characteristics of sluice gate with small opening[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 124-128. (in Chinese))
- [9] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 弧形闸门流量计算方法的比较与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(5): 20-22, 27. (MU Xiang peng, CHEN Wen xue, CUI Wei, et al. Comparison and analysis of discharge calculation methods of radial gates[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(5): 20-22, 27. (in Chinese))
- [10] 贾西斌. 高淹没度开敞式水闸孔径计算公式探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 154-156, 141. (JIA Xi bin. Discussion of the computational formula for the gate size of open sluice with high submergence degree[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 154-156, 141. (in Chinese))

(上接第 408 页)

参考文献(References):

- [1] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1989. (ZHANG Rui jin. Sediment Dynamics in River[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1989. (in Chinese))
- [2] 王光谦, 李铁键. 流域泥沙动力学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (WANG Guang qian, LI Tie jian. Basin Sediment Dynamics Model[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 吴作平. 流域水沙水动力学模拟方法研究[J]. 水电能源科学, 2011(1): 67-68, 88. (WU Zu o ping. Study on hydrodynamics simulation method of water-sand in valley[J]. Water Resources and Power, 2011(1): 67-68, 88. (in Chinese))
- [4] 万新宇, 包为民, 钟平安. 基于相似推理的多沙河流水库坝址泥沙预测[J]. 水电能源科学, 2013(12): 191-194. (WAN Xin yu, BAO Wei min, ZHONG Ping an. Similarity-based reasoning for predicting sediment of dam site in heavy sediment carrying river[J]. Water Resources and Power, 2013(12): 191-194. (in Chinese))
- [5] 耿艳芬, 王志力. 基于径向基函数神经网络的河网洪水泥沙预报[J]. 水利水运工程学报, 2008(1): 47-52. (GENG Yan fen, WANG Zhi li. Sediment and flood forecast for river system based on radial basis function[J]. Hydro Science and Engineering, 2008(1): 47-52. (in Chinese))
- [6] 秦毅, 石宝, 李楠, 等. 含沙量预报方法探讨[J]. 泥沙研究, 2010(1): 67-71. (QIN Yi, SHI Bao, LI Nan, et al. Analysis on method of sediment concentration forecast[J]. Journal of Sediment Research, 2010(1): 67-71. (in Chinese))
- [7] 瞿宜峰, 李鸿雁, 刘寒冰. 人工神经网络与遗传算法在多泥沙洪

水预报中的应用[J]. 泥沙研究, 2003(4): 7-13. (ZHAI Yi feng, LI Hong yan, LIU Han bing. Application of artificial neural networks and genetic algorithms on silt-laden flood forecasting[J]. Journal of Sediment Research, 2003(4): 7-13. (in Chinese))

- [8] 彭清娥, 曹叔尤, 刘兴年, 等. 流域年均含沙量 BP 模型问题分析[J]. 泥沙研究, 2000(4): 51-54. (PENG Qing e, CAO Shu you, LIU Xing nian, et al. Analysis of annual average sediment concentration in a watershed by BP Model[J]. Journal of Sediment Research, 2000(4): 51-54. (in Chinese))
- [9] 李祚泳, 邓新民, 侯宇光. 流域年均含沙量的 PP 回归预测[J]. 泥沙研究, 1999(1): 66-69. (LI Zu o yong, DENG Xin min, HOU Yu guang. Projection pursuit regressive prediction of yearly average sediment concentration in a watershed[J]. Journal of Sediment Research, 1999(1): 66-69. (in Chinese))
- [10] 彭清娥, 刘兴年, 曹叔尤. 流域年均含沙量的人工神经网络模型[J]. 水利学报, 2000(11): 79-83. (PENG Qing e, LIU Xing nian, CAO Shu you. Artificial neural networks model of annual average sediment concentration in a watershed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(11): 79-83. (in Chinese))
- [11] Sasal M, Kashyap S, Rennie C, et al. Artificial neural network for bed load estimation in alluvial rivers. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47(2): 223-232.
- [12] Yang C T, Marsooli R, Aalami M T. Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN. International Journal of Sediment Transport Research, 2009, 24(3): 274-286.
- [13] David E. Rumelhart, James L. McClelland, The PDP Research Group. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition[M]. MIT Press, 1986.