

# 基于水文要素的闹德海水库入库沙量预测模型

梁国华<sup>1</sup>, 胡春娟<sup>1</sup>, 何斌<sup>1</sup>, 张澎辉<sup>1</sup>, 许海军<sup>2</sup>, 李菡<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 辽宁省供水局, 辽宁 沈阳 110003)

**摘要:** 针对水库调度需要,以闹德海水库为背景开展入库沙量预报研究。首先分析水库的入库水沙特性,以确定入库沙量的主要影响因素;进而研究建立基于水文要素的BP神经网络入库沙量预测模型,并利用历史场次洪水资料进行训练学习。结果表明所选择的产沙因子基本能够反映流域降雨-产沙-输沙过程的传递关系,模型可用于入库沙量预报,指导水库实时水沙调度决策。

**关键词:** 产沙因素; BP神经网络; 沙量预报; 闹德海水库

中图分类号: TV145

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0137-05

## Prediction model of inflow sediment in Naodehai reservoir based on hydrologic element

LIANG Guohua<sup>1</sup>, HU Chunjuan<sup>1</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, ZHANG Penghui<sup>1</sup>, XU Haijun<sup>2</sup>, LI Han<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Water Supply Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

**Abstract:** The prediction of reservoir sediment can be conducted by the background of Naodehai reservoir so as to meet the need of reservoir operation. The paper first analyzed the characteristics of water and sediment in reservoir so as to determine the main factors which affect the sediment storage volume; it further researched to establish sediment storage prediction model based on BP neural network of hydrological factors, and used historical flood data to train and learn. The results showed that the chosen sediment factor can basically reflect the transfer relationship of the processes of rainfall - sediment - sediment transport in the watershed. The model can be used to forecast sediment storage and guide the decision of real-time regulation of reservoir.

**Key words:** sediment yield factor; BP neural network; sediment prediction; Naodehai reservoir

## 1 研究背景

随着经济的快速发展,我国水资源的供需矛盾更加突出。为缓解这一矛盾,迫使多泥沙河流的水库改变其调度方式,由原始的自然排泄到现行的蓄清排浑,调度目标由以防洪、排沙为主改变为防洪、排沙和兴利供水并举综合运用<sup>[1]</sup>。蓄清排浑的核心思想是来水来沙较少时将水拦蓄在水库中,当遭遇大水大沙时降低水库水位,腾空库容进行排沙,达到冲淤的目标。在实时调度中,增加兴利蓄水必定抬高水库汛期的运行水位,若大水大沙入库前水库水位未能及时降至排沙理想水位,将会加剧泥沙淤积,影响水库使用寿命。因此,可靠的入库水沙预报

信息对提高水库综合利用效益具有重要意义。

与洪水预报相比,准确的泥沙预报更加困难。为解决这一科学难题,国内外学者开展大量的研究工作,也取得丰富的研究成果,但研究主要集中在库区冲淤量和含沙量过程预报等方面<sup>[2-4]</sup>。然而,对于部分水库而言,其一次洪水排沙量的关键时段是在洪峰前后几个时段,入库水量和沙量也主要集中在这一时间段。因此,较为准确地预报出一场洪水的总沙量即可实现水库调度冲淤平衡。受下垫面、降雨强度及其空间分布等因素的影响,降雨与入库沙量之间是一个复杂的非线性问题,单靠数学模型建立经验公式,很难把各种因素考虑进去,而且计算量大。针对这一问题,本文以柳河流域闹德海水库

收稿日期:2014-03-28; 修回日期:2014-04-17

基金项目:水利部公益性行业科研专项项目(201201054)

作者简介:梁国华(1974-),男,广西隆安人,博士,副教授,主要从事水资源可持续利用和防洪调度研究。

为背景,分析影响降雨产沙的主导因素,建立耦合水文要素的BP神经网络入库沙量预测模型,为闹德海水库水沙调度提供科学依据。

## 2 闹德海水库流域概况

闹德海水库坝址位于辽宁省彰武县境内,是辽河支流柳河上游的控制性工程,其流域图如图1所示。闹德海水库控制面积4 051 km<sup>2</sup>,占柳河总流域面积的59%,水库多年平均降雨量为419 mm,多年平均径流量为2.61亿 m<sup>3</sup>。闹德海水库起初是为了滞洪排沙而修建的,但辽宁西北部阜新市的供水矛盾十分突出,要求水库供水量不断增大,迫使水库改变现有的功能,调度运行方式由原始的自然排泄到现行的蓄清排浑,使水库成为集防洪、排沙与兴利供水为一体的综合利用水利枢纽。水库上游洪水含沙量大,由于缺乏有效的来水来沙预报信息,水库只能在较低的水位运行,导致每年仍有一亿多立方米的水量不能得到有效利用。事实上,受到降雨和下垫面因素的影响,闹德海水库来沙和来水量关系不是很密切,相同的来水排沙量是不同的。因此,为提高水库综合效益,很有必要开展闹德海水库入库沙量预报研究。

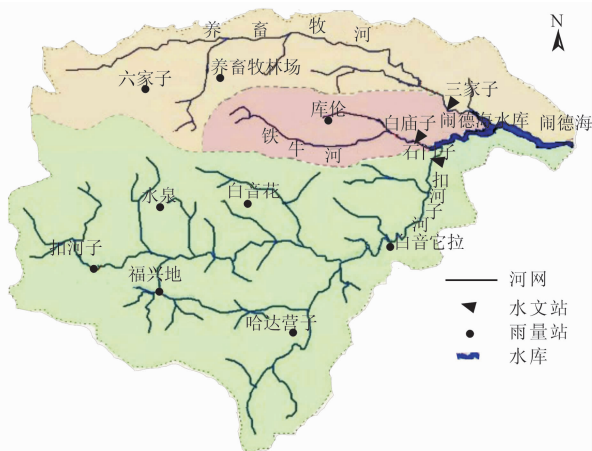


图1 闹德海水库流域图

## 3 流域产沙影响因素分析

闹德海水库流域内地形复杂多变,洪水暴涨暴落,植被覆盖率仅有20%~30%,泥沙含量较大,多年平均含沙量高达39.5 kg/m<sup>3</sup>,实测最大含沙量甚至达到1 300 kg/m<sup>3</sup>,多年平均输沙量达1 047万 t,入库泥沙均来自水库上游的养畜牧河、铁牛河及扣河子河3条支流。养畜牧河位于科尔沁沙地南缘,流域内分布着大面积的流动沙丘和半沙漠地带,冬

春季干旱少雨,风蚀严重,夏秋多雨季节,水蚀严重;铁牛河内大部分是丘陵沟壑区,部分是沙岗区,含沙量大;扣河子河流域部分区域属低山区,部分属丘陵沟壑区,水力侵蚀为流域内的主要侵蚀形式。三个子流域水沙特性如表1所示。从表1中可以看出,由于下垫面条件不一样,各支流含沙量明显不同。因此,同样的面雨量不同的降雨空间分布入库沙量将会明显不同。

表1 柳河流域各站多年平均水沙特征值

测站	河流	流域面积 km <sup>2</sup>	10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> , 万 t, t/km <sup>2</sup> , kg/m <sup>3</sup>			
			汛期 (6-9月) 径流量	汛期 (6-9月) 输沙量	多年平 均侵 蚀模数	多年 平均 含沙量
三家子	养畜牧河	825	0.30	140.57	2169.74	46.32
白庙子	铁牛河	341	0.10	129.11	3898.32	135.48
石门子	扣河子河	2405	0.67	306.04	1376.60	45.53

流域侵蚀产沙是个复杂的问题。降雨量及其时空变化特性、降雨强度和历时、降雨前期下垫面条件、地质、地貌以及人类活动方式等因素都会影响入库沙量的变化。闹德海水库上游自建库以来以及本研究所用的资料(1989-2008)期限内,没有大规模的人为治理和开发,可忽略人类活动对流域侵蚀产沙的影响。因此,本文重点研究降雨和下垫面条件等因素对产沙量的影响。

### 3.1 降雨量对产沙的影响分析

降雨是导致土壤侵蚀的主要动力因素,雨滴击溅和径流冲刷剥蚀地表是其主要的表现形式。我国学者采用降雨侵蚀力  $R$  (mm<sup>2</sup>/min) 来表示降雨量对产沙的影响。孙泉忠等人通过分析总结国内各地区降雨侵蚀力的研究成果,统一采用  $EI_{30}$  (降雨动能  $E$  与最大30 min雨强  $I_{30}$  的乘积) 作为我国降雨侵蚀力指标<sup>[5]</sup>。然而在实际应用中,降雨动能  $E$  难以计算,文献[5-6]根据指数  $EI_{30}$  与  $PI_{30}$  之间的高度线性相关,提出利用指标  $PI_{30}$  来替代  $EI_{30}$  值。鉴于资料的原因,本文也采用  $PI_{30}$  来代替  $EI_{30}$ ,以简化降雨侵蚀力  $R$  值的计算。闹德海水库流域降雨动力指标与入库沙量的相关系数如表2所示。

表2 闹德海水库流域降雨动力指标与入库沙量的相关系数

降雨动力指标	降雨量 $P$	平均雨强 $I$	降雨侵蚀力 $R$
相关系数	0.7887	0.3914	0.8273

从表2可以看出,降雨量( $P$ )和降雨侵蚀力( $R$ )

与入库沙量相关性较好。因此本文分别采用降雨量和降雨侵蚀力作为影响产沙的主要因子之一。

### 3.2 降雨时空分布对产沙的影响分析

由于流域地质地貌空间分布不同,使得每次降雨形成的侵蚀产沙过程具有鲜明特性。闹德海水库流域降雨分布及输沙情况如表3,从表3中两组数据所示,在相同或相近的降雨量条件下,降雨空间分布不同,流域产沙量差异很大。由此可见,流域产沙不仅取决于降雨量,更重要的是取决于降雨过程,即降雨时间分布、集中程度和降雨空间分布情况。

表3 降雨分布及输沙情况 mm, %, 万 t

	场次	流域				输沙量
		铁牛河平均降雨量	养畜牧河平均降雨量	铁牛河和养畜牧河平均降雨量	流域降雨量比重	
第一组	199102	15.1	11.6	26.6	43	72.89
	199602	2.8	2.3	29.4	17	23.06
第二组	199001	5.7	3.5	48.2	19	149.76
	199403	24.0	15.9	40.0	40	206.82

为研究降雨时间分布不均匀对产沙的影响,本文引入时间分布均匀性系数 $\alpha$ 来表征降雨时间分布和集中程度的特征因子,它是指一场降雨过程中大于等于某一降雨强度值的时段在这场降雨过程中所占的百分数。通过对资料分析发现,降雨量相同或相近的洪水,时间分布均匀性系数越小(即降雨时间分布比较集中,必然对土壤造成更大的侵蚀),产沙量越大。时间分布均匀性系数 $\alpha$ 的表达式为:

$$\alpha = \frac{t}{T} \quad (1)$$

式中: $t$ 为大于等于某一雨强值的时段数,这里某一雨强值取场次降雨的平均降雨强度。单位为小时,h; $T$ 为场次降雨的总时段数,单位为小时,h; $\alpha$ 的范围为(0,1)。

同样从表3中也可以看出,降雨量相同或相近的洪水,由于流域下垫面不同,降雨空间分布不一样,产沙量也不一样。如“199403”和“199102”洪水,养畜牧河和铁牛河平均降雨量占流域平均降雨量越大,产沙量就越大。

因此,本文也把降雨中心分布和降雨均匀性系数分别作为影响产沙的主要因子之一。

### 3.3 前期影响雨量对产沙的影响分析

前期土壤含水量通过影响流域降雨产流过程而影响径流冲刷作用和输沙作用,它是导致土壤颗粒间结合力和土壤团聚体的稳定性有显著差异的主要

因素。王辉等人就前期土壤含水量对坡面降雨入渗、产流产沙过程的影响进行了相关研究,实验研究表明,前期土壤含水量与土壤流失量的关系呈抛物线变化<sup>[7]</sup>。前期土壤含水量需要连续计算,鉴于降雨径流资料不连续,本文用前期影响雨量来替代前期土壤含水量,即采用场次降雨前 $n$ 天的流域累积平降雨量替代。通过对场次降雨的前期影响雨量与入库沙量做相关分析,发现两者的相关程度较高,相关系数为0.8145,认为将场次降雨的前期影响雨量作为流域产沙的主要影响因子之一是可行的。

## 4 闹德海水库入库沙量预测的BP网络模型

### 4.1 基本原理

BP网络具有很强的非线性映射及自学习能力,可以广泛应用于模式识别、函数逼近、聚类和预测等<sup>[8-9]</sup>。其构造是一个单向传播的多层前向网络,学习算法包括由信息的正向传播和误差的反向传播两个过程。BP算法的基本思想是:对于一个输入样本,经过权值、阈值和激励函数运算后,得到一个输出,然后让它与期望的样本进行比较,若有偏差,则从输出开始反向传播该偏差,进行权值、阈值调整,使网络输出逐渐与希望输出一致。通过上述过程反复迭代修正权重使输出与样本资料期望值误差逐渐减小,直至满足设定的精度为止,所得到的输出值就是需要预测或者模拟的输出值。

### 4.2 模型结构

(1)输入变量的选择:根据上节的产沙成因分析结果,选取与入库沙量相关程度较高的降雨量、降雨侵蚀力、降雨中心分布、时间分布均匀性系数、前期影响雨量等5个因素作为神经网络的输入变量。

(2)隐含层层数及隐含层神经元数的确定:一般认为,增加隐含层层数可以降低网络误差,提高精度,但也会使网络复杂化,从而增加了网络的训练时间和出现“过拟合”的倾向。而误差精度的提高实际上也可以通过增加隐含层中的神经元个数来获得,其训练效果也比增加层数更容易实现,因此,在本次研究中采用单隐含层,不断调整隐含层神经元数来训练网络,通过试算发现,隐含层神经元数为21时网络收敛效果较好。

(3)输出层神经元数:输出层神经元数为1,对应于所要预测的入库沙量。

基于水文要素的闹德海水库入库沙量预测的BP神经网络模型结构如图2所示。

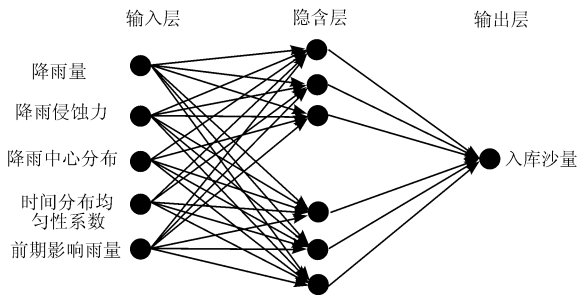


图2 神经网络模型结构图

4.3 模型训练与结果分析

(1) 训练样本的选取。根据流域 1989 - 2008 年的 24 场降雨及泥沙资料, 从中挑选 19 场洪水作为训练样本, 进行训练, 其余 5 场资料(大中小洪水都有)用于模型验证。

(2) 输入和输出数据的预处理。本次研究 BP 神经网络用的传递函数为 S 函数, 常常对 0 ~ 1 之间的数字比较敏感。另外, 网络的多维输入样本属于不同的量纲, 它们的取值量级有时相差较大, 可以将各输入的数值进行归一化处理, 避免由量级上的差别影响网络的识别精度。本文采用最大最小值法对样本数据归一化, 其公式为:

$$r(k) = \frac{x(k) - \min(x(n))}{\max(x(n)) - \min(x(n))}$$

$$k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中:  $\min(x(n))$  为样本数据  $x(n)$  的最小值;  $\max(x(n))$  为样本数据  $x(n)$  的最大值,  $x(k)$  为原始数据,  $r(k)$  为预处理后的数据。

经上述归一化处理后, 5 个输入变量和 1 个输出变量的值均变换到 (0, 1) 内, 如表 4 所示, 并将其作为网络的输入值和输出值。

表4 经归一化预处理后的网络输入变量和输出变量值

场次	降雨量	降雨侵蚀力	降雨中心分布	时间分布均匀性系数	前期土壤含水量	入库沙量
198901	0.2080	0.5185	0.1667	1.0000	0.1092	0.1496
198902	0.1062	0.1975	0.5714	0.4848	0.3180	0.1511
199001	0.3760	0.4938	0.0714	0.4848	0.0711	0.3080
199101	0.1358	0.1605	0.5714	0.4848	0.1315	0.1445
199102	0.0426	0.0123	0.6429	0.4848	0.0210	0.1454
199301	0.0618	0.0370	0.2143	0.0000	0.0721	0.3481
199401	1.0000	0.7654	0.5476	1.0000	1.0000	0.9241
199403	0.2837	0.4198	0.5714	0.4848	0.8481	0.4578
199501	0.1749	0.3333	0.5714	1.0000	0.0023	0.0386
199502	0.0348	0.0000	0.2857	0.4848	0.1480	0.0068
199601	0.1201	0.0864	0.5714	0.4848	0.0501	0.1036
199602	0.1349	0.3086	0.0000	1.0000	0.1044	0.0403

续表 4

场次	降雨量	降雨侵蚀力	降雨中心分布	时间分布均匀性系数	前期土壤含水量	入库沙量
199702	0.1923	0.3210	0.0000	1.0000	0.0123	0.0000
199801	0.0775	0.1358	0.7619	0.4848	0.0721	0.0669
199802	0.0975	0.0988	0.5476	0.6364	0.1590	0.0776
200001	0.4012	0.3580	0.4762	0.4848	0.0323	0.0574
200101	0.1279	0.1111	0.4524	1.0000	0.0317	0.0646
200201	0.3708	1.0000	0.2143	0.4848	0.1206	0.0793
200402	0.1314	0.1358	1.0000	0.4848	0.1322	0.0340
200501	0.3420	0.6049	0.3333	1.0000	0.1697	0.1160
200502	0.1184	0.4074	0.4762	1.0000	0.3083	0.0572
200601	0.0000	0.0864	0.6905	1.0000	0.1273	0.0525
200701	0.0896	0.2222	0.3810	1.0000	0.1803	0.0825
200802	0.0879	0.3333	0.1667	1.0000	0.0000	0.0160

(3) 网络的训练与结果分析。将表 4 中预处理后的 19 个学习样本输入网络进行反复训练, 在训练了 10 次后, 其均方误差满足要求, 结束训练, 将其作为最后选定的模型并输出模拟结果。将选出的 5 场具有代表性的洪水资料作为测试样本, 对该模型进行验证。并将模拟结果和验证数据进行还原, 然后将还原后的计算结果与原始数据进行对比, 结果见表 5、6。

表5 闹德海水库次降雨入库沙量的模拟结果

万 t, %			
场次	实际值	模拟值	相对误差
198901	73.61	71.59	-3
199001	149.76	151.32	1
199101	72.46	73.82	2
199102	72.89	72.25	-1
199301	168.86	177.05	5
199401	485.11	481.79	-1
199502	7.28	9.41	29
199601	52.86	53.00	0
199602	23.06	22.04	-4
199702	10.41	11.76	13

表6 闹德海水库次降雨入库沙量的预测结果 万 t, %

场次	实际值	预测值	相对误差
198902	71.50	69.85	-2
199403	206.82	208.57	1
199501	23.71	22.30	-6
200701	43.06	39.74	-8
200802	11.55	13.37	16

由表 5 可以看出, 在 19 场洪水样本模拟结果

中,有18场洪水的相对误差在20%以内,“199502”洪水模拟结果较差,其降雨量不大,雨强较小,产沙量少,绝对误差不大,模拟误差相对大一些,误差为29%。总体来说,模拟训练精度是比较高的。同时,从表6得出,用于模型检验的5场洪水相对误差均在20%以内,误差较大的都是小水小沙,大水大沙模拟及预报结果较为准确。在实际调度中,大水大沙的洪水往往是空库排沙,即使是预报有误差,对排沙影响也不是很大,对于小水小沙洪水,来沙量比较小,虽然相对误差较大,但来沙量小,对水库运行影响不大。因此,本文研究成果可应用于闹德海水库的实时调度中,以提高洪水资源利用。

## 5 结 语

(1)闹德海水库的入库沙量与其流域的降雨量、降雨侵蚀力、降雨中心分布、时间分布均匀性系数、前期影响雨量等5个因素密切相关。

(2)文中建立耦合水文要素的BP神经网络入库沙量预测模型,模拟和预测闹德海水库的入库沙量精度较高,可以用来对次降雨入库沙量进行预报,为该水库实时水沙调度服务。其研究成果也可以为其它流域的水沙预报提供参考。

(3)由于受资料的限制,用于模型研究的样本比较少;而BP神经网络模型学习和训练对样本的依赖性比较大,因此某些场次洪水的模拟和预测精

度还不是很好。但随着资料的积累增大,模型模拟训练精度会不断提高。

## 参考文献:

- [1] 童思陈,周建军. “蓄清排浑”水库运用方式与淤积过程关系探讨[J]. 水力发电学报,2006,25(2):27-30+37.
- [2] 李文杰,王兴奎,李丹勋. 基于物理过程的分布式流域水沙预报模型[J]. 水利学报,2012,43(3):264-274.
- [3] 舒彩文,谈广鸣. 河道冲淤量计算方法研究进展[J]. 泥沙研究,2009(4):68-73.
- [4] 张志果,徐宗学,赵卫民. 梯级-关联算法在多泥沙河流含沙量预报中的应用[J]. 水利学报,2007,38(4):448-453.
- [5] 孙泉忠,王朝军,赵佳,等. 中国降雨侵蚀力R指标研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(4):1-5.
- [6] 陈晓安,蔡强国,郑明国,等. 黄土丘陵沟壑区的岔巴沟流域次降雨侵蚀力的研究[J]. 泥沙研究,2010(1):5-10.
- [7] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报,2008,24(5):65-68.
- [8] 张文丽,路金喜,宋双虎,等. 基于灰色广义回归神经网络的工业废水排放量预测[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(1):64-67.
- [9] 陈田庆,解建仓,张刚. 基于BP神经网络的马斯京根模型参数动态估计[J]. 水力发电学报,2012,31(3):31-38.
- [5] 龚宇,石志增,花家嘉,等. 唐山地区水资源的气候特征分析[J]. 中国农业气象,2009,30(4):509-514.
- [6] 李又君,吕博,安丽华,等. 鲁西气候变化及其对地表水分盈亏的影响[J]. 干旱气象,2012,30(3):431-436.
- [7] 高桥浩一郎. 月平均气温月降水量以及蒸发散量的推算方式[J]. 天气(日本),1979,26(12):759-763.
- [8] 傅丽昕,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河三源流区气候变化对径流量的影响[J]. 干旱区地理,2008,31(2):237-242.
- [9] 李国军,李晓媛,王振国,等. 黄河上游水源补给区气候变化及对水资源的影响[J]. 干旱气象,2007,25(2):67-70+89.
- [10] 王国庆,张建云,贺瑞敏,等. 黄河中游气温变化趋势及其对蒸发能力的影响[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(4):32-36.
- [11] 郭江勇,陈少勇,高蓉,等. 气温变暖对西北西风带冬季气温的影响分析[J]. 中国沙漠,2010,30(1):175-180.

(上接第136页)

著影响降蒸差,可利用降水量呈下降趋势,东部的东胜站下降趋势更明显。

## 参考文献:

- [1] 李新荣,张新时. 鄂尔多斯高原荒漠化草原与草原化荒漠灌木类群生物多样性研究[J]. 应用生态学报,1999,10(6):665-669.
- [2] 蓝永超,丁永建,刘进琪,等. 全球气候变暖情景下黑山区流域水资源的变化[J]. 中国沙漠,2005,25(6):863-868.
- [3] 曹丽青,葛朝霞,薛梅. 1951-2006年新疆地区气候变化特征及其与水资源的关系[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(3):281-283.
- [4] 丹丹,春喜,刘美萍,等. 1951-2010年内蒙古霍林河流域气候变化特征[J]. 冰川冻土,2013,35(4):874-882.