

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180002

高学平, 闫晨丹, 张岩, 等. 基于BP神经网络的调水工程调蓄水位预测模型[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 08-13.
GAO X P, YAN C D, ZHANG Y, et al. Prediction model for water level regulation in water diversion project based on BP neural network[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 08-13. (in Chinese)

基于BP神经网络的调水工程调蓄水位预测模型

高学平, 闫晨丹, 张岩, 孙博闻

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 在调水工程中, 如果泵站前水位过低, 会危及泵站安全, 如果水位过高, 会危及周边安全, 因此探寻调水工程中河渠湖库水位变化显得尤为重要。以南水北调东线山东段南四湖为研究区域, 寻求不同起调水位、出入流量、泵站开启时间差的调水方案下泵前水位变化规律。先利用耦合模型对不同的调水方案进行数值模拟, 然后选取23组调水方案及其数值模拟所得的泵前水位作为样本训练BP神经网络, 建立BP神经网络调蓄水位预测模型并进行验证, 最后利用预测模型对不同调水方案进行泵前水位预测。结果表明, BP神经网络预测模型具有很强的预测能力, 预测模型结果与耦合模型结果泵前水位基本吻合, 水深相对误差小于9.15%, 而模型计算效率提升96.67%。

关键词: 调水方案; 泵前水位; 耦合模型; BP神经网络; 预测模型

中图分类号: TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0008-06

Prediction model for water level regulation in water diversion project based on BP neural network

GAO Xueping, YAN Chendan, ZHANG Yan, SUN Bowen

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In a water diversion project, if the water level before the pump is too low, the security of the pumping station will be endangered; if the water level is too high, the safety of the surrounding area will be endangered. So, it is particularly important to study the change of water level in the reservoir. The paper, based on the Nansi Lake section of the eastern route of the South to North Water Transfer Project in Shandong Province, explores the water level variation pattern before the pump under different conditions of initial water level, inflow and outflow, and opening time difference between pumping stations. Firstly, we used the coupled model to numerically simulate different diversion plans. Then we selected 23 water diversion plans and their before pump water level obtained from numerical simulation as samples to train the BP neural network. Thus, we established a prediction model for water level regulation and had it verified. Finally we predicted the water level before the pump in different diversion plans using the model. The results showed that the BP neural network model has a strong predictive power. Its results were basically consistent with the results of the coupled model, with the relative error of water depth less than 9.15%. Meanwhile the model's calculation efficiency improved by 96.67%.

Key words: water diversion plan; the water level before the pump; coupled model; BP neural network; prediction model

调水工程解决了受水区水资源短缺问题, 却打破了原有的水源系统平衡, 形成了外来水源与水库、湖泊、河流等当地水源并存共用、相互联系、相互影

响的水源格局。在运行调度中, 需要了解水深等随时间和流程的变化规律, 以及最高水位、最低水位波动幅度, 以避免发生安全事故^[1-2]。在调水工程泵站

收稿日期: 2017-07-03 修回日期: 2017-09-15 网络出版时间: 2017-12-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171226.1034.026.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAB07B02); 国家自然科学基金项目(51621092; 51609166)

Funds: National “Twelfth Five Year” Plan for Science & Technology Support (2015BAB07B02); National Natural Science Foundation of China (51621092; 51609166)

作者简介: 高学平(1962-), 男, 天津人, 教授, 博士, 主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: xpgao@tju.edu.cn

通讯作者: 孙博闻(1987-), 男, 河北唐山人, 讲师, 博士, 主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: bwsun@tju.edu.cn

研究方面,武周虎等^{3,4)}开展泵站开启时间、湖内水位升高速率等相关研究,确定了调水中出入湖口提水泵站开启方案;高学平等⁵⁾利用一维二维耦合水动力模型总结了基于调水量与起调水位的泵站开启临界时间差和临界水位定量关系。从以上研究看出,在调水工程复杂的河渠湖库输水系统中,水量—水位联动关系往往是十分复杂且非线性的,不能单一分析某一种因素对水位的影响,因此有必要考虑采用智能算法寻求变量之间关系。

人工神经网络(Artificial Neural Network,简称ANN)是基于对人脑组织结构和活动机制的初步认识提出的一种新型信息处理体系,BP神经网络是迄今为止应用最为广泛的人工神经网络^{6,7)}。在水位预测方面,温忠辉等⁸⁾利用BP神经网络,对济宁市地下水水位变化规律进行了定量预测,证明了神经网络的预测精度较高;束龙仓等⁹⁾基于人工神经网络建立了地下河天窗水位半日预测模型,分析了水位变化规律。BP神经网络模型可以通过不断地训练,实现给定的输入-输出映射关系,在预测领域应用广泛并取得了良好的效果,但在水位预测方面应用还较少。本文以南水北调东线山东段南四湖下级湖为例,结合一维二维耦合水动力模型与BP神经网络预测模型,寻求不同起调水位、出入流量、泵站开启时间差的调水方案下泵前水位变化规律。

1 研究对象与研究思路

1.1 研究对象

南四湖位于沂沭泗流域西部,由南阳、独山、昭阳、微山四个湖泊串联而成,是淮河以北面积最大、结构完整、保存较好的内陆大型淡水湖,也是南水北调东线输水干线上的重要调蓄湖泊¹⁰⁻¹²⁾。湖腰兴建的二级坝枢纽工程将南四湖分为上、下级湖。二级坝闸以下为下级湖,包括部分昭阳湖和微山湖,南北长58 km,湖底高程30.8 m,死水位31.3 m,正常蓄水位31.8 m,最高蓄水位33.3 m,相应蓄水量8.4亿 m^3 ,调蓄库容4.94亿 m^3 ,属于浅水湖泊^{10,12)}。南四湖下级湖包含三个泵站、一个城市用水分水口,其中韩庄泵站与蔺家坝泵站提水进入下级湖,二级坝泵站提水由下级湖进入上级湖,泵站前池底高程27.3 m ¹⁰⁾,枣庄市薛城区分水口由潘庄引河分水至城区(图1)。

在调水运行控制中,湖内起调水位、泵站提水流量都影响着泵前水位变化^{5,13-14)}。梯级泵站开启时间差可以有效避免泵前水位低于最低运行水位^{13,5)}。本文以二级坝泵站泵前水位为研究对象,寻求不同

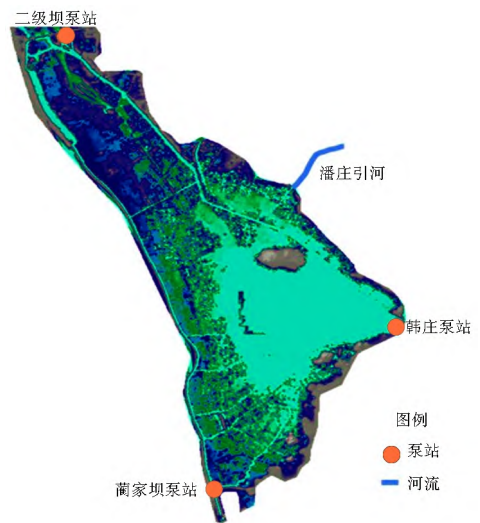


图1 南四湖下级湖泵站及分水口位置示意图

Fig. 1 The location of pumping stations and bleeders in Nansi Lake

起调水位、出入流量、泵站开启时间差的调水方案下泵前水位变化规律。

1.2 研究思路

首先,利用一维二维耦合水动力模型对南四湖下级湖调水方案进行数值模拟;其次,选取调水方案及其数值模拟所得的泵前水位作为样本,用以BP神经网络模型的训练与验证;最后,利用建立的BP神经网络预测模型进行不同调水方案的泵前水位预测。

2 一维二维耦合水动力模型模拟结果

2.1 一维二维耦合水动力模型

当对河湖系统进行整体水动力模拟时,最直观的方法是对湖泊采用平面二维模型、对河流采用一维模型,最终建立一维二维耦合水动力模型¹⁵⁻¹⁷⁾(简称耦合模型)。南四湖下级湖区域为典型的河流湖泊复杂输水系统,为更加直观准确地模拟调水过程中水位变动规律,对下级湖区域建立耦合模型,一维河道每相隔100 m划分断面,二维湖泊实行 $150\text{ m} \times 150\text{ m}$ 网格划分,河道断面边界与网格边界采用搭接耦合方式,南四湖下级湖一维二维耦合水动力模型能够较好地模拟出下级湖水动力特性⁵⁾。

耦合模型中,一维模型求解采用隐式有限差分法,二维模型求解采用隐式有限体积法,控制方程均为连续性方程和动量方程¹⁸⁻²⁰⁾。

一维数学模型控制方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

式中: A 为过水断面面积(m^2); Q 为流量(m^3/s); x

为纵轴坐标 (m); t 为时间 (s); q_1 为单位长度侧向入流量 (m^2/s); v 为纵向流速 (m/s); Z 为水位 (m); $S_f = Q|Q|/K^2$; K 为流量模数 (m^3/s); g 为重力加速度 (m/s^2)。

二维数学模型控制方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \\ -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \\ -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \end{cases} \quad (4)$$

式中: u, v 为沿 x, y 方向的流速 (m/s); h 为水深 (m); q 为汇/源流量 (m^3/s); $v_t = Dhu^*$; v_t 为水平涡黏系数 (m^2/s); D 为混合系数, 在主航道与深湖区取 $0.11 \sim 0.26$, 浅湖区取 $0.3 \sim 0.77$, 湖周区域取 $2.0 \sim 5.0$; $u^* = \sqrt{gRJ}$, u^* 为摩阻流速 (m/s); R 为水力半径 (m); J 为水力坡度; $c_f = g|V|/(C^2R)$, c_f 为河床摩擦系数 (s^{-1}); $|V|$ 为 u 和 v 的合流速 (m/s); C 为谢才系数; f 为科氏系数 (s^{-1})。

2.2 耦合模型数值模拟结果

针对不同起调水位、出入流量、泵站开启时间差的 25 种调水方案(见表 1), 利用耦合模型进行数值模拟, 得出相应方案下二级坝泵站泵前水位变化, 其最高水位、最低水位和水位单日最大波动列于表 1。调水时间为汛期末 10 月 1 日至翌年 5 月 31 日, 调入下级湖水量 23.59 亿 m^3 , 调出下级湖水量 15.05 亿 m^3 。

3 BP 神经网络预测模型建立及验证

3.1 BP 神经网络模型

BP 神经网络是 Rmenlhart 与 McClland 提出的基于误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络^[21]。有研究表明, 三层神经网络模型就可以解决一般的函数拟合逼近问题^[22,23], 本文建立隐含层有 8 个连接节点的三层 BP 神经网络模型, 见图 2。BP 神经网络的学习由信息的正向传播和误差的反向传播两个过程组成。输入信息 x 从输入层经隐含层传向输出层, 输出信息 o , 如果在输出层得不到期望输出, 则转入反向传播, 按照误差梯度下降的方式修正各层权值 v, w , 使误差最小。周而复始的信息正向传播和误差反向传播过程, 对各层权值和阈值不断调整, 使网络实现给定的输入 x - 输出 o 映射关系^[24]。

表 1 调水方案及其数值模拟结果

Tab. 1 Water diversion plans and their numerical simulation results

调水方案编号	时间差/d	起调水位/m	入流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	出流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	最高水位/m	最低水位/m	水位单日最大波动/m
1	4	31.8	112.34	73.22	33.27	30.75	0.04
2	6	31.8	112.34	73.84	33.27	31.04	0.03
3	10	31.8	112.34	75.11	33.27	31.38	0.02
4	6	31.7	112.34	73.84	33.21	29.99	0.11
5	10	31.7	112.34	75.11	33.20	30.95	0.06
6	15	31.8	170	125	33.32	30.96	0.10
7	18	31.8	170	125	33.32	31.52	0.09
8	20	31.8	170	125	33.32	31.74	0.07
9	15	31.7	170	109.38	33.44	31.22	-0.42
10	15	31.7	170	116.67	33.27	30.77	-0.31
11	15	31.7	170	125	33.27	30.49	0.22
12	18	31.7	170	125	33.26	31.06	0.10
13	20	31.7	170	125	33.26	31.43	0.08
14	18	31.6	170	125	33.20	30.57	0.11
15	20	31.6	170	125	33.20	30.91	0.09
16	13	31.8	182.02	125	33.32	30.73	-0.23
17	15	31.8	182.02	125	33.36	31.29	-0.44
18	15	31.7	182.02	125	33.29	30.56	-0.49
19	20	31.5	182.02	125	32.94	30.67	-0.55
20	11	31.8	200	125	33.54	30.58	-0.79
21	13	31.8	200	125	33.57	31.22	-0.68
22	13	31.7	200	125	33.51	30.57	-0.75
23	15	31.7	200	125	33.54	31.17	-0.90
24	13	31.6	200	125	33.47	30.54	-0.75
25	15	31.6	200	125	33.48	30.57	-0.92

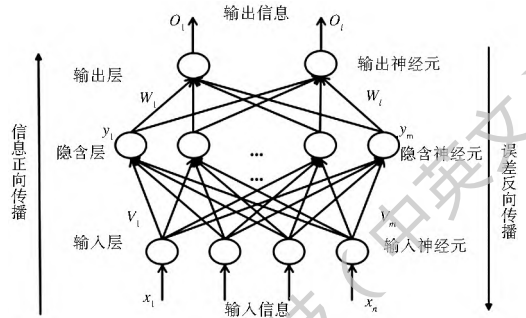


图 2 BP 神经网络模型

Fig. 2 BP neural network model

神经网络感知器数学模型中各层信号之间数学关系如下。

对于隐含层数学关系:

$$\begin{cases} y_j = f(\text{net}_j), j = 1, 2, \dots, m \\ \text{net}_j = \sum_{i=0}^n v_{ij} x_i, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (5)$$

对于输出层数学关系:

$$\begin{cases} o_k = f(\text{net}_k), k = 1, 2, \dots, l \\ \text{net}_k = \sum_{j=0}^m w_{jk} y_j, k = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, 变换函数 $f(x)$ 通常均为单极性 Sigmoid 函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (7)$$

3.2 BP 神经网络预测模型训练

本文在于寻求不同起调水位、出入流量、泵站开启时间差的调水方案下泵前水位变化规律, 因此确定 BP 神经网络的输入信息与输出信息(见图 2), 输入信息为起调水位、泵站开启时间差、入流量以及出流量, 输出信息为调水过程中的最高水位与最低水位。

在表 1 耦合模型数值模拟的结果中, 选取不同调水方案及其结果水位作为样本, 实现 BP 神经网络预测模型的学习训练。本文样本选取原则为: (1) 均衡选取不同起调水位、出入流量、泵站开启时间差的调水方案; (2) 调水初期, 二级坝泵站开启 10 日内, 泵前水位无波动; (3) 调水后期, 进水泵站关闭后, 二级坝泵站泵前水位单日最大波动低于 1.0 m; (4) 数值模拟结果泵前最高水位不超过 33.6 m, 最低水位不低于 30.5 m。依据样本选取原则, 在表 1 中选取了 23 种方案及其结果作为学习样本(方案 4, 11 除外), 对 BP 神经网络预测模型进行 50 000 次学习训练。

3.3 BP 神经网络预测模型验证

选取的 23 组学习样本同时作为检验样本, 对 BP 神经网络预测模型进行验证。提取模型关于检验样本的期望值与预测值进行误差对比分析, 见图 3、图 4, 最高水位期望值与预测值误差不超过 0.1 m, 最低水位期望值与预测值误差不超过 0.2 m。对检验样本的期望值与预测值进行相关性分析, 最高水位的期望值与预测值相关性曲线如图 5 所示, 相关系数为 0.946; 最低水位的期望值与预测值相关性曲线见图 6, 相关系数为 0.959。由此可知, BP 神经网络预测模型预测值与期望值误差相差较小, 二者相关性较强, 预测模型能够较好的预测出二级坝的泵前水位, 可以用于方案的预测。

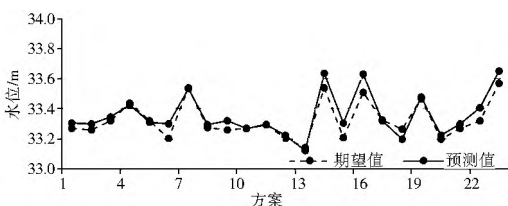


图 3 最高水位期望值与预测值误差分析

Fig. 3 Error analysis of expected and predicted maximum water level

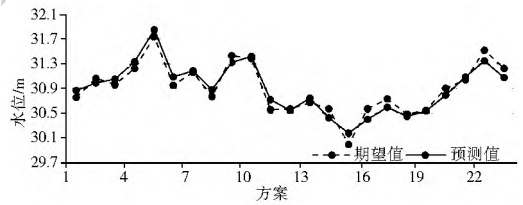


图 4 最低水位期望值与预测值误差分析

Fig. 4 Error analysis of expected and predicted minimum water level

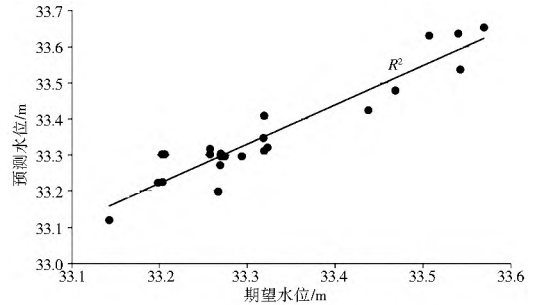


图 5 最高水位期望值与预测值相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of expected and predicted maximum water level

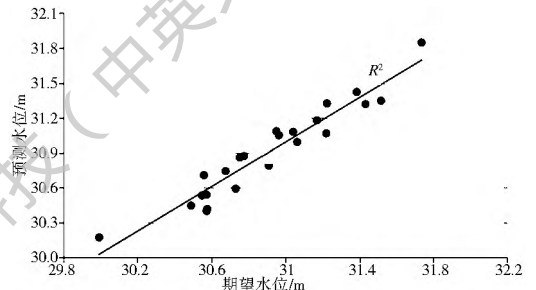


图 6 最低水位期望值与预测值相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of expected and predicted minimum water level

3.4 BP 神经网络模型预测结果

选取 31.2~31.9 m(低于死水位 0.1 m 至高于正常蓄水位 0.1 m) 为起调水位范围, 针对不同的泵站开启时间差、出入流量, 拟定 8 种不同的调水方案。利用 BP 神经网络模型进行预测, 同时利用耦合模型对同样调水方案进行数值模拟, 调水方案、预测模型水位预测值、耦合模型数值模拟结果(模拟值)见表 2。其中, 泵前最高水位的预测模型预测值与耦合模型模拟值误差不超过 0.33 m, 相对最大水深误差为 5.92%, 泵前最低水位的预测模型预测值与耦合模型模拟值误差不超过 0.30 m, 相对最小水深误差为 9.15%。此外耦合模型数值模拟约 1 h/次, 而 BP 神经网络预测模型预测约 2 min/次, 计算效率提高约 96.67%。

4 结论

本文以南水北调东线山东段南四湖为研究区域, 采用一维二维耦合模型和 BP 神经网络预测模

表2 调水方案的泵前水位预测结果及数值模拟结果

Tab. 2 Prediction results and numerical simulation results of water level before the pump in different diversion plans

调水方案编号	时间差/d	起调水位/m	入流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	出流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最高水位/m			最大水深/m	相对水深误差(%)	最低水位/m			最小水深/m	相对水深误差(%)
					模拟值	预测值	误差			模拟值	预测值	误差		
1	9	31.9	182.02	116.67	33.50	33.73	0.23	6.20	3.71	30.91	31.13	0.22	3.61	6.09
2	14	31.8	169.59	125	33.34	33.52	0.18	5.84	2.98	30.58	30.62	0.04	3.28	1.22
3	15	31.7	176.16	125	33.28	33.47	0.19	5.78	3.18	30.54	30.62	0.08	3.24	2.47
4	17	31.6	183.24	125	33.29	33.59	0.30	5.79	5.01	30.58	30.88	0.30	3.28	9.15
5	19	31.5	195.02	125	33.44	33.64	0.20	5.94	3.26	30.94	31.17	0.23	3.64	6.32
6	22	31.4	170	116.67	32.88	33.20	0.32	5.58	5.73	30.61	30.85	0.24	3.61	7.25
7	24	31.3	136.52	92.11	33.16	33.45	0.29	5.86	4.95	30.73	30.91	0.18	3.31	5.25
8	30	31.2	112.34	82.16	32.87	33.20	0.33	5.57	5.92	30.76	30.85	0.09	3.43	2.60

型研究二级坝泵站泵前水位变化, 研究发现 BP 神经网络在解决非线性问题上有很大优势, 在智能预测方面存在巨大潜力, 并得出如下研究结论: (1) BP 神经网络模型具有很强的预测能力, 预测的泵前水位预测值与耦合模型计算模拟值基本吻合, 相对水深误差小于 9.15%; (2) 耦合模型数值模拟所需时间约 1 h/次, 而 BP 神经网络预测模型预测时间约 2 min/次, 计算效率约提高 96.67%, 大大提高工作效率。

参考文献(References):

- [1] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 424-435. (YANG K L. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion[J]. Journal of Hydraulic Engineer, 2016, 47(3): 424-435. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150824
- [2] 杨飞, 于永海, 徐辉. 国内梯级泵站调水工程运行调度综述[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 84-86. (YANG F, YU Y H, XU H. Progress in studies of operation and scheduling of multistage pumping stations in water transfer projects in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 84-86. (in Chinese))
- [3] 武周虎, 罗辉, 刘长余, 等. 南水北调东线南四湖出、入湖泵站开启时间差分析研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 77-80. (WU Z H, LUO H, LIU C Y, et al. Start up time difference of pumping station of Nansi Lake in the South to North Water Transfer[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 77-80. (in Chinese))
- [4] 武周虎, 罗辉, 刘长余, 等. 南水北调南四湖提水泵站开启时间的分析研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 110-115. (WU Z H, LUO H, LIU C Y, et al. Study on the start up time of pumping station of Nansi Lakes located in the South to North Diversion Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(2): 110-115. (in Chinese))
- [5] 高学平, 聂晓东, 孙博闻, 等. 调水工程中相邻梯级泵站的开启时间差研究[J]. 水利学报, 2016, 47(12): 1502-1509. (GAO X P, NIE X D, SUN B W, et al. Study on opening time difference of the adjacent multistages pump stations in water transfer projects[J]. Journal of Hydraulic Engineer, 2016, 47(12): 1502-1509. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20160764.
- [6] 戴文战. 基于三层 BP 网络的多指标综合评估方法及应用[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(xt): 29-34. (DAI W Z. A method of multi-objective synthetic evaluation based on artificial neural network and its applications[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1999, 19(xt): 29-34. (in Chinese))
- [7] 张锦华, 原思聪, 陆地, 等. 基于 BP 神经网络响应面的 BLISS 研究及应用[J]. 机械设计, 2011, 28(6): 19-25. (ZHANG J H, YUAN S C, LU D, et al. Research and application of BLISS based on BP neural network response surface[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(6): 19-25. (in Chinese))
- [8] 温忠辉, 廖资生. 用神经网络模型预测济宁市地下水水位变化规律[J]. 水文地质工程地质, 1999(5): 14-16. (WEN Z H, LIAO Z S. Groundwater level variation in Jining City predicted by using BP networks of artificial neural networks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999(5): 14-16. (in Chinese))
- [9] 束龙仓, 董贵明, 陶玉飞, 等. 地下河天窗水位变化分析及预测[J]. 水利学报, 2009, 40(05): 529-534. (SHU L C, DONG G M, TAO Y F, et al. Forecast and analysis on water level fluctuation in sinkhole of underground rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineer, 2009, 40(05): 529-534. (in Chinese))
- [10] 中水淮河工程有限责任公司, 中水北方勘测设计研究有限责任公司. 南水北调东线一期工程可行性研究总报告[R]. 2005. (China Water Huaihe Planning, Design and Research Co., Ltd, Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd. General Report on Feasibility Study of First Phase Project of East Route of South to North Water Diversion Project [R]. (in Chinese))
- [11] 孙小银, 郭洪伟, 廉丽姝, 等. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 669-679. (SUN X Y, GUO H W, LIAN L S, et al. The spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 669-679. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.20160460.
- [12] 武周虎, 付莎莎, 罗辉, 等. 南水北调南四湖输水二维流场数

- 值模拟及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014(3): 17-23. (WU Z H, FU S S, LU O H, et al. Two dimensional numerical simulation and its application of water transfer in Nanji Lake of South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(3): 17-23. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nslrdqk.2014.03.004.
- [13] 宋月清, 林仁. 水泵起动过程中泵站前池水位降落值的分析[J]. 水利学报, 1999(5): 71-76. (SONG Y Q, LIN R. Analysis on forebay water level depression during starting of pump station[J]. Journal of Hydraulic Engineer, 1999(5): 71-76. (in Chinese))
- [14] 张万台, 路明利, 吴秀云, 等. 引滦工程尔王庄暗渠泵站经济运行方案研究[J]. 水利学报, 2004, 35(8): 94-97. (ZHANG W T, LU M L, WU X Y, et al. Optimal operation program for pump station with complicated inlet and outlet[J]. Journal of Hydraulic Engineer, 2004, 35(8): 94-97. (in Chinese))
- [15] 王智勇, 陈永灿, 朱德军, 等. 一维-二维耦合的河湖系统整体水动力模型[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 516-522. (WANG Z Y, CHEN Y C, ZHU D J, et al. 1D-2D coupled hydrodynamic simulation model of river lake system[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 516-522. (in Chinese))
- [16] 陈文龙, 宋利祥, 邢领航, 等. 一维-二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 848-855. (CHEN W L, SONG L X, XING L H, et al. A 1D-2D coupled mathematical model for numerical simulating of flood protected zone[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 848-855. (in Chinese))
- [17] 姜晓明, 李丹勋, 王兴奎. 基于黎曼近似解的溃堤洪水一维-二维耦合数学模型[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 214-221. (JIANG X M, LI D X, WANG X K. Coupled one and two dimensional numerical modeling of levee breach flows using the godunov method[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 214-221. (in Chinese)) DOI: CNKI: 32.1309.P.20120224.019.
- [18] Hydrologic Engineering Center. HEGRAS 2D Modeling User's Manual Version 5.0[M]. Davis, CA: US Army Corps of Engineering, 2016.
- [19] CASULLI V. A high resolution wetting and drying algorithm for free surface hydrodynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 60(4): 391-408.
- [20] Hydrologic Engineering Center. HEGRAS Hydraulic Reference Manual Version 5.0[M]. Davis, CA: US Army Corps of Engineering, 2016.
- [21] 夏维力, 吕晓强. 基于BP神经网络的企业技术创新能力评价及应用研究[J]. 研究与发展管理, 2005, 17(1): 50-54. (XIA W L, LYU X Q. The evaluation and application research about technologic innovation capability of an enterprise based on BP neural network[J]. R&D Management, 2005, 17(1): 50-54. (in Chinese))
- [22] PARROTT A J A, KNOWLES O H. Restoration of tropical moist forests on bauxite mined lands in the Brazilian Amazon[J]. Restoration Ecology, 1999, 7(2): 103-116.
- [23] 李荣丽, 陈志彪, 陈志强, 等. 基于BP神经网络的流域生态恢复度计算——以福建长汀朱溪小流域为例[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1973-1981. (LI R L, CHEN Z B, CHEN Z Q, et al. Calculation of ecological recovery based on BP neural network: A case study of Zhuxi small watershed in Changting County, Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1973-1981. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201305241158.
- [24] 黄志全, 孟令超, 黄向春, 等. 基于数量化理论和BP神经网络的滑坡体积预测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 207-213. (HUANG Z Q, MENG L C, HUANG X C, et al. Prediction of landslide volume based on quantitative theory and BP neural network[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 207-213. (in Chinese)) DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2011.06.006.
- [25] 王恺宁, 王修信. 多植被指数组合的冬小麦遥感估产方法研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017(7): 44-49. (WANG K N, WANG X X. Research on winter wheat yield estimation with the multiply remote sensing vegetation index combination[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017(7): 44-49. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2017.210.

(上接第7页)

- [28] 张翔, 夏军. 气候变化对地表水资源可利用量影响的不确定性分析——以汉江上游为例[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 255-260. (ZHANG X, XIA J. Uncertainty analysis of the impact of climate change on the availability of surface water resources[J]. Resources Science, 2010, 32(2): 255-260. (in Chinese)) DOI: http://192.168.22.105/handle/311030/5600.
- [29] DENG Z M, ZHANG X, LI D, et al. Simulation of land use/land cover change and its effects on the hydrological characteristics of the upper reaches of the Hanjiang Basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(3): 1119-1132. DOI: 10.1007/s12665-014-3465-5.
- [30] 陈燕飞, 张翔. 汉江中下游干流水质变化趋势及持续性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1163-1167. (CHEN Y F, ZHANG X. Long term trends and sustainability trends of water quality in the middle and lower reaches of Hanjiang Main Stream[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7): 1163-1167. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyhj201507012.
- [31] ZHANG X, XIA J. Coupling the hydrological and ecological process to implement the sustainable water resources management in Hanjiang River Basin[J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(11): 3240-3248. DOI: 10.1007/s11431-009-0363-2.