

联合 EEMD 与 BP 神经网络的灌区水源情势预测研究

李雯晴^{1,2}, 刘招^{2,3*}, 王丽霞⁴, 李强¹, 吴小宏⁵

(1. 长安大学 水利与环境学院, 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应

教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 长安大学 水与发展研究院, 西安 710054;

4. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 5. 泾惠渠灌溉管理局, 陕西 三原 713800)

摘 要: 泾河作为泾惠渠灌区渠首地表水源, 来水逐年减少。【目的】分析探讨泾惠渠灌区渠首水源形势, 保障灌区水资源管理及粮食生产安全。【方法】研究建立了基于 EEMD-BP 的水文序列预测模型, 通过对模型进行训练和校正, 最终预测了未来十年(2018—2027 年)泾河来水来沙形势, 分析了渠首的水资源可利用量。【结果】将 EEMD 与 BP 神经网络二者结合, 可有效发挥各自优势, 验证期各项评估指标也较为理想; 灌区渠首水沙变化较为同步, 在未来一定时期二者趋势均为短暂的上升后再下降, 年均径流量约为 11.87 亿 m^3 , 较当前略有上升, 年均输沙量约为 1 亿 t, 较当前略有下降, 预测结果延续了泾河水沙多年变化的大致趋势; 灌区渠首可利用水资源量相对比较平稳, 平均水资源可利用量约为 7.79 亿 m^3 , 可满足引水灌溉需求, 但应注意一些干旱年份水资源的调蓄利用, 谨防发生灌溉水短缺问题。【结论】验证表明模型误差在可接受范围内, 且预测系列的变化趋势与当前实测系列完全一致, 建立的 EEMD-BP 模型预测年径流及泥沙效果良好, 预测结果具有较高的可信度。

关 键 词: 水资源; 年径流量; 预测; 水沙规律; 灌区

中图分类号: S273

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019121

李雯晴, 刘招, 王丽霞, 等. 联合 EEMD 与 BP 神经网络的灌区水源情势预测研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 108-114.

LI Wenqing, LIU Zhao, WANG Lixia, et al. Predicting Change in Water Availability for Jinghui Irrigation District Using Ensemble Empirical Mode Decomposition and Back Propagation Neural Network [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 108-114.

0 引 言

水是农业的命脉。水源情势对依赖引水灌溉的大型灌区而言, 是直接关系到农业生产和粮食安全的重大问题, 历来受到地区和国家的高度重视。人类社会进入 21 世纪以来, 气候条件变化和人类活动加剧, 对原有的水文规律带来了巨大冲击, 河川径流锐减、洪水频发、区域地下水大面积疏干^[1]。

【研究意义】水资源规律的改变给工农业用水及区域水资源管理带来了诸多问题, 尤其对于干旱半干旱地区的广大灌区而言, 深入探讨水源情势与灌溉需水规律, 确保粮食生产安全是一项紧迫而重要工作。

水源形势的改变对区域水资源利用带来新的问

题和挑战。【研究进展】近年来, 许多专家学者对区域水源形势与水资源可利用量进行了大量研究^[2-5], 包括对水沙变化规律^[6]、流量与水沙过程响应关系^[7]、水沙规律预测^[8]、地表水资源可利用量潜力^[9]等问题的研究。采用了滑动平均^[10]、Mann-Kendall 秩次相关检验法^[11]、BP 神经网络^[12]、Copula 函数^[13]等方法。【切入点】在前人对水源情势的研究中, 多集中于水沙演变规律这类浅层意义上的研究; 对水源情势的预测多采用 BP 神经网络这种单一的方法, 与其他方法如 EEMD、小波分析等结合研究较少; 在预测未来水源情势并同时分析水资源可利用量方面研究较少。【拟解决的关键问题】本研究尝试联合总体经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)与 BP (Back Propagation)神经网络对灌区地表水源及灌溉需水进行预测, 分析未来情景下渠首引水和灌溉需水量间的可能关系, 为缓解目前灌区水资源矛盾、高效利用和管理水资源、保障农业生产安全提供技术支撑及参考。

收稿日期: 2019-07-12

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019SF-237); 中央高校基本科研业务费资助项目(300102299206, 300102269201); 西安市建设科技计划项目(SJW2017-11)

作者简介: 李雯晴(1996-), 女, 河南濮阳人。硕士研究生, 主要从事水文学及水资源方向研究。E-mail: wenqing_li@chd.edu.cn

通信作者: 刘招(1975-), 男, 陕西礼泉人。教授, 主要从事水文学及水资源方向研究。E-mail: lz975@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 灌区概况

泾惠渠灌区位于陕西省关中平原中部,其前身即为我国古代三大水利工程之一的郑国渠。泾惠渠灌区灌溉面积 9.69 万 hm^2 ,辖西安、咸阳及渭南地区的 6 县 48 个乡镇,总人口 118 万人。粮食作物以小麦、玉米为主,经济作物以蔬菜、果树为主,是陕西省重要的农产品生产区^[14]。据泾惠渠渠首——泾河张家山站实测年径流量数据显示,灌区地表水源的泾河径流泥沙呈现出明显的递减趋势^[15],多年平均实测径流量从 20 世纪 60 年代的 17.15 亿 m^3 下

降到 20 世纪 70、80 年代的 13 亿 m^3 左右,直至 2000 年来的 10 亿 m^3 左右,径流衰减迅速。与此同时,由于地下水的过量开采,地下水位埋深也由 1982 年的 4.74 m 下降为 2016 年的 20 m,局部地下水埋深甚至降至 50 m 以下^[16]。

1.1.2 灌区渠首泾河张家山站水文情势

张家山站历史径流数据序列如图 1 所示。据泾河张家山站 1970—2017 年年径流量序列分析表明,灌区渠首年径流量波动性较大,多年变化幅度为 3.22 亿~20.87 亿 m^3 ,多年均值为 11.85 亿 m^3 。年径流量在 20 世纪 90 年代前相对平稳,但从 20 世纪 90 年代中期起出现明显下降趋势。进行 MK 趋势检验得其 Z 值为 -1.52,表明年径流量为下降趋势。

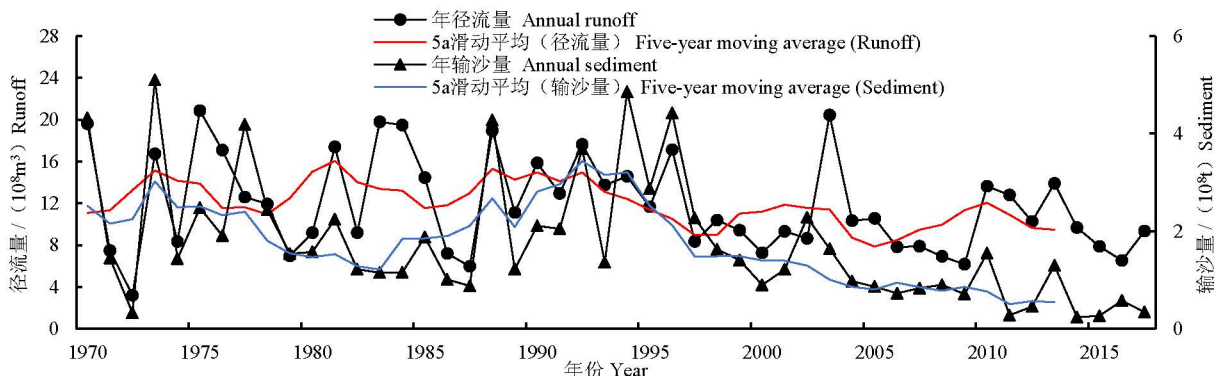


图1 灌区渠首泾河张家山站历史径流泥沙数据序列

Fig.1 Historical runoff and sediment data sequence of Zhangjiashan station, canal head, irrigation area

1.1.3 灌区取水现状

灌区渠首引水主要用于灌溉、发电和补充西郊水库。统计泾惠渠渠首多年实际引水及主要用水构成如图 2 所示。由图 2 可见,20 世纪 70 年代,渠首总引水量约为 4.60 亿 m^3 ,20 世纪 80 年代后开始出现下降趋势,2005 年后维持在 3.6 亿 m^3 左右。地表水有效灌溉量均值亦呈下降趋势,从 20 世纪 80 年代的 2.50 亿 m^3 下降到 2010 年的 1.44 亿 m^3 ,约占总引水量的 40%,多年平均值为 1.80 亿 m^3 ,约占渠首总引水量 49.18%。以 1985 和 2015 年为例,统计不同时期泾惠渠灌区地表水资源利用情况如表 1 所示。

发电用水量多年平均为 1.29 亿 m^3 ,占总引水量的 35.24%,其余水量充蓄西郊水库,若仍有盈余时

将退泄水量排至石川河。西郊水库为典型的灌区内水库,其除调蓄灌溉水资源外还供给三原县等地的工业、生活用水,有效库容 0.20 亿 m^3 。

因来水与作物需水规律不尽一致,加之水价及农民主管等因素,致使当前灌区地表水有效灌溉水量占总引水量的份额较低,引取的相当部分水量并非直接用于灌溉。一般年份,灌区灌溉总需水量均在 3 亿 m^3 以上,这就意味着灌区消耗较多地下水的同时地表水未能得以充分利用,这种情形十分不利于灌区水资源利用。同时,若泾河来水和地表水可引水量进一步降低,必然对维持良性的灌区水文生态带来较大冲击。

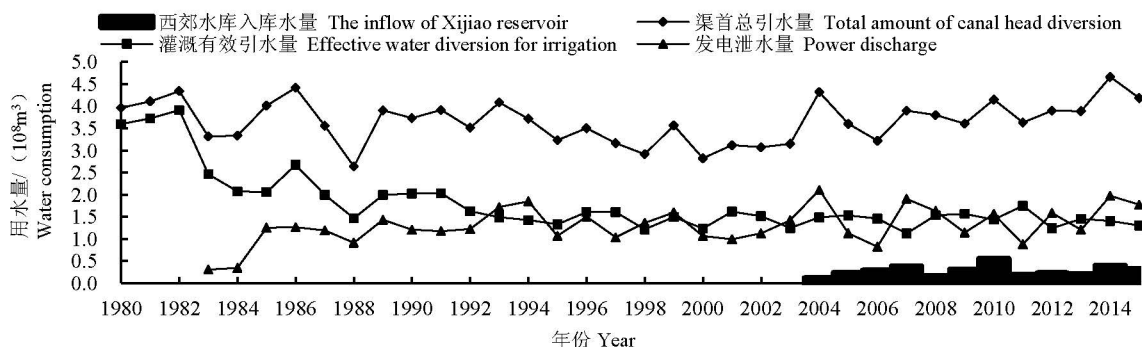


图2 泾惠渠渠首多年实际引水及主要用水构成

Fig.2 Actual water diversion and main water use composition of Jinghui canal head for many years

表1 不同时期泾惠渠灌区地表水资源利用情况

Table 1 Utilization of surface water resources in Jinghui Irrigation Area in different periods

灌溉年度 Irrigation annual	渠首总引水量/(10 ⁸ m ³) Total amount of canal head diversion	有效灌溉水量/(10 ⁸ m ³) Effective irrigation capacity	发电水量/(10 ⁸ m ³) Water power	无效退泄量/(10 ⁸ m ³) Invalid discharge	西郊水库入库量/(10 ⁸ m ³) Storage capacity of Xijiao reservoir
1985 年	4.01	2.06	1.25	0.69	0
占比/% Ratio	100	51.30	31.31	17.39	0
2015 年	4.18	1.30	1.77	0.78	0.32
占比/% Ratio	100	31.10	42.34	26.32	7.66

1.2 基于 EEMD-BP 的预测方法

为了给灌区未来水资源管理提供支撑,研究联合经验模态分解及神经网络来预测泾河未来 10 a 来水。河川径流受气象、水文、水力等多方面因素影响,具有明显的随机性和复杂性。径流序列是一个典型的非线性过程,预测难度较大^[17]。EEMD 是一种自适应的数据处理或挖掘方法,非常适合非线性、非平稳时间序列,可有效地提取序列中变化特征、趋势等隐含信息;BP 神经网络是基于人工神经网络所提出的误差反向传播算法,其对因果关系复杂、变化规律模糊的问题有出色的分析及递推能力^[18]。将二者结合可有效发挥各自优势,大大增强对非平稳时间序列的预测能力^[19]。EEMD 为解决模态混淆问题而提出,通过加入白噪音再进行分解,利用白噪音均值为 0 的特性进行筛选,即可消除采用 EMD 方法时 IMF (Intrinsic Mode Function) 里夹杂 2 个不同时间范围讯号的现象。EEMD 分解出的 IMF 减少模态混合现象,使不同时间尺度的讯号正确分布在对应的 IMF 中^[20-21]。

EEMD-BP 时间序列预测模型建立思路如下:

1) 利用 EEMD 方法对水文时间序列进行分解,得到不同频率的 IMF,并将其进行归一化处理。

2) 对 BP 神经网络的隐含层个数、训练速率、训练次数、控制误差等参数进行初始化设置,1973—2012 年为训练期,2013—2017 年实测数据为验证数据。将经 EEMD 分解处理后的输入层与输出层数据导入并进行训练。

3) 训练完成后,用训练好的神经网络对灌区渠首 2018—2027 年径流泥沙量进行预测,得到不同频

率预测值。

4) 将不同频率的预测值进行叠加重构,最终得到预测结果。

泾河作为知名的多泥沙河流,其高含沙水流及汛期洪水无法直接利用,在对灌区渠首水源形势进行预测和分析时,这部分不能作为可用水资源来对待。因此,考虑到含沙率影响,本研究中,不仅要预测径流量,同时还应同步预测河道逐年输沙量。

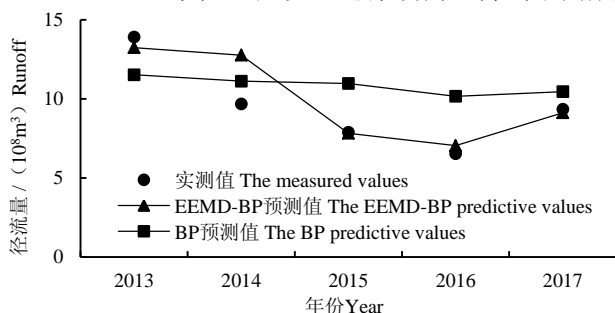
1.3 模型的训练及验证

一般而言,同条河流同一站点的径流及泥沙序列自相关性较强,除此之外,含沙量同时与径流量也有较强的相依关系,即所谓“水大沙大”。研究基于上述 EEMD-BP 时间序列预测模型,对历史数据系列进行 EEMD 分解,再输入 BP 神经网络对分解序列进行预测,然后重构,对模型反复训练,最终将 EEMD-BP 神经网络与 BP 神经网络预测值进行对比,结果见图 3。EEMD-BP 神经网络模型结构和主要参数见表 2。由图 3 可以直观看出,联合 EEMD 的 BP 神经网络与实测值拟合效果比 BP 神经网络拟合效果好,能够较为准确地反映真实值。

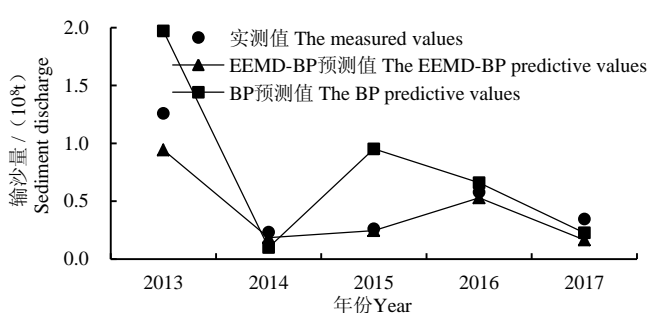
表2 EEMD-BP神经网络模型结构与参数

Table 2 EEMD-BP neural network model

structure and parameters		
预测对象 Prediction object	模型结构 Model structure	主要参数 Main parameter
径流量 Runoff	输入层: x_1, x_2, x_3	学习速率: 1.5 平滑因子 r : 0.7
	隐含层: r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 输出层: y	
含沙量 Sediment concentration	输入层: x_1, x_2, x_3	学习控制误差: 0.004
	隐含层: $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 输出层: y	



(a) 径流量 Runoff



(b) 输沙量 Sediment discharge

图3 径流泥沙预测结果

Fig.3 Prediction results of runoff and sediment

EEMD-BP 模型验证期年径流及泥沙的标准均方差 $NMSE$ 分别为 0.265 3 和 0.307 8; 平均绝对误差 MAE 分别为 0.9 亿 m^3 和 0.13 亿 t, 相较于多年平均值, 误差在可接受范围内; 预测结果的方向变差对称值 DVS 均为 100%, 表明预测系列的变化趋势与实测系列完全一致; 决定系数 R^2 分别为 0.980 1 和 0.986 2。故模型预测效果良好。

2 结果与分析

2.1 渠首径流及输沙量预测

基于 1970—2017 年径流泥沙数据, 利用建立好的 EEMD-BP 预测模型, 对 2018—2027 年的灌区渠首张家山站径流泥沙进行预测, 结果见图 4。由图 4 可知, 2018—2027 年的模拟期内, 水沙变化较为同步, 趋势均为短暂的上升后再下降。年均径流量约为 11.86 亿 m^3 , 最大为 16.25 亿 m^3 , 最小为 8.14 亿 m^3 ; 输沙量多年均值为 1.00 亿 t, 最大 2.58 亿 t, 最小 0.29 亿 t。与 1996—2017 年相比, 平均径流量略

有上升, 回升值为 1.65 亿 m^3 ; 平均输沙量略有下降, 年均下降了 0.17 亿 t。

对 2008—2017 年实测数据和此次预测的 2018—2027 年数据的特征参数进行比对, 若特征参数较为吻合, 则说明预测结果基本可信。检验结果见表 3。

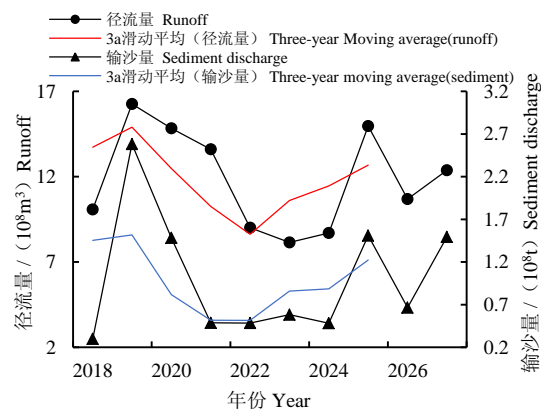


图4 泾河张家山站未来10年径流量输沙量序列预测

Fig.4 Prediction of runoff and sediment transport series of Zhangjiashan station in the next 10 years

表3 预测径流及泥沙系列与实测系列特征对比

Table 3 Characteristics comparison between predicted runoff and sediment series and measured series

序列 Sequence	数据 Data	均值 Mean value	标准差 Standard deviation	一阶自相关 First-order autocorrelation	二阶自相关 Second-order autocorrelation
径流量 Runoff	历史	9.71	2.78	0.247	0.179
	预测	11.87	2.76	0.207	0.126
输沙量 Sediment discharge	历史	0.66	0.43	-0.139	-0.117
	预测	1.00	0.50	-0.202	-0.125

由表 3 可知, 径流及输沙量预测结果与历史数据系列的特征值总体上并无明显差异。且由于径流泥沙受气候变化和人类活动影响, 水文时间序列特征本身也会有一定波动。同时考虑到泾河中上游流域内水土保持和退耕还林还草工作将持续展开, 流域水保及人类活动程度基本稳定, 所以总体认为预测结果基本合理可信。

2.2 渠首地表水资源可利用量分析

泾河流经黄土高原, 泥沙量很高。对灌区而言, 这些高泥沙水流及汛期洪水一般无法取用, 故其均为不可利用水量, 在水资源分析时应予以剔除。在灌区实际生产中, 考虑到渠道冲淤等限制, 实际灌溉引水控制含沙量不应超 7%, 在持续干旱等特殊情况下可有所放宽, 但含沙量仍不可超过 10%。此外, 在非汛期需要优先保证河道生态基流, 在计算灌区可利用水资源量时, 这部分亦应予以扣除。采用式 (1) 来估算渠首水资源可利用量^[9]。计算式为:

$$W_a = W_t - W_e - W_u, \quad (1)$$

式中: W_a 为水资源可利用量; W_t 为年径流量; W_e 为非汛期河道最小生态需水量; W_u 为汛期不可利用水量。单位均为 $10^8 m^3$ 。

计算非汛期河道最小生态需水量采用常用的基于水文学的 Tenant 方法, 在枯水季, 即 10 月—次年 5 月, 最小生态流量按多年平均流量的 15% 来计算^[9], 求得 W_e 为 0.734 亿 m^3 ; 汛期不可利用水量包括 2 部分, 即汛期洪水和高泥沙径流。而由于水文不确定性, 这 2 部分在各年份情况差异较大, 较难进行准确计算。事实上, 如前述分析, 泾河河道洪水与泥沙含量相关关系较为密切, 高泥沙水流多由上游暴雨洪水所致, 因此这二者可以合一考虑^[22]。本文统一采用汛期水流含沙量这一指标来推算汛期不可利用水量。为此, 需先求得各年份汛期径流量, 基于年径流及汛期径流历史数据, 进行回归分析, 最终求得相关关系较好的二次多项式回归方程, 其相关系数 r 为 0.89:

$$W_f = -0.0166 \times W_t^2 + 1.1628 \times W_t - 4.4632, \quad (2)$$

式中: W_f 为汛期 (每年 6—9 月) 径流量。

因泾河汛期来沙占据全年来沙量的 97% 以上, 故本文不考虑非汛期输沙。根据汛期径流量及预测的沙量即可求得汛期水流平均含沙量 C_s , 如表 4 所示。再依据历史数据, 统计汛期弃水与平均含沙量关系, 通过回归分析求得二者相关关系较好的关系

式, 相关系数 r 为 0.86:

$$W_u = 0.000\ 09 \times C_s^2 + 0.000\ 3 \times C_s + 1.290\ 5. \quad (3)$$

求得 W_e 和 W_u 后, 即可利用式 (1) 计算得到渠

首逐年水资源可利用量, 结果如表 4 所示。

表4 基于预测的泾惠渠灌区渠首地表水资源可利用量分析

Table 4 Analysis of available quantity of surface water resources at the head of canal in Jinghui irrigation area based on prediction

年份 Year	预测年径流/(10 ⁸ m ³) Forecast annual runoff	预测泥沙/(10 ⁸ t) Forecast sediment discharge	汛期径流/(10 ⁸ m ³) Runoff during the flood season	汛期含沙量/(kg·m ⁻³) Sediment concentration during flood season	不可利用量/(10 ⁸ m ³) Unusable water	生态用水/(10 ⁸ m ³) Ecological water consumption	可利用量/(10 ⁸ m ³) Available water
2019	16.26	2.58	10.06	256.84	7.30	0.73	8.22
2020	14.84	1.48	9.13	162.31	3.71	0.73	10.39
2021	13.61	0.49	8.28	58.81	1.62	0.73	11.25
2022	9.01	0.48	4.67	103.88	2.29	0.73	5.98
2023	8.15	0.58	3.91	148.97	3.33	0.73	4.08
2024	8.70	0.48	4.40	109.71	2.41	0.73	5.56
2025	14.97	1.51	9.22	163.71	3.75	0.73	10.48
2026	10.69	0.67	6.07	109.55	2.40	0.73	7.55
2027	12.38	1.50	7.39	202.32	5.04	0.73	6.61
均值 Mean value	11.87	1.01	6.87	136.97	3.34	0.73	7.79

3 讨论

EEMD 非常适合非线性、非平稳时间序列, 可有效地提取序列中变化特征、趋势等隐含信息, BP 神经网络对因果关系复杂、变化规律模糊的问题有出色的分析及递推能力, 将二者结合可有效发挥各自优势, 大大增强对非平稳时间序列的预测能力。未来泾惠渠灌区渠首可利用水资源量相对比较平稳, 平均值约为 7.79 亿 m³, 这较目前略有上升。主要是由于泾河泥沙呈下降趋势, 来水变清, 在一定程度上提高了水资源利用率。事实上, 近年来泾惠渠灌区渠首年均引水量约为 3.6 亿 m³, 从预测结果看来, 若灌区引水需求无大的变化, 基本可以满足未来几年的地表水资源需求。2019—2027 年最大可利用量为 2021 年的 11.25 亿 m³, 最小为 2023 年的 4 亿 m³ 左右, 在 2023 年应当注意灌区水资源的调蓄和有效利用, 谨防发生缺水减产问题。此外输沙量的预测值对水资源可利用量影响较为显著。尽管年预测值最大的 2019 年径流总量达 16.26 亿 m³, 但其泥沙预测值也较高, 致使不可利用水量达 7.3 亿 m³, 而可利用水资源量为 8.22 亿 m³, 尚不及径流量相对较小的 2020、2021 和 2025 年。

由于渠首及引水工程有确定的设计标准, 上述计算的可利用水资源量并非完全可为工程所用。泾惠渠灌区渠首的设计引水能力为 50 m³/s^[14], 若不考虑水库调蓄, 当河道流量超出这一值时无法被工程利用。因此实际工程可利用量并非河道水资源可利用量, 只有不超出引水能力的河道水量才是渠首工程的可引水量。

4 结论

1) 建立的 EEMD-BP 模型预测年径流及泥沙效果良好。二者标准均方差 $NMSE$ 分别为 0.265 3 和 0.307 8, 平均绝对误差 MAE 分别为 0.9 亿 m³ 和 0.13 亿 t, 误差在可接受范围内, 预测系列的变化趋势与实测系列完全一致, 决定系数 R^2 分别为 0.980 1 和 0.986 2;

2) 灌区渠首未来 2019—2027 年均径流量约为 11.87 亿 m³, 较 1996—2017 年略有上升, 年均输沙量约为 1.00 亿 t, 较 1996—2017 年略有下降, 预测结果延续了泾河水沙多年变化的大致趋势;

3) 灌区渠首 2019—2027 年可利用水资源量相对比较平稳, 平均水资源可利用量约为 7.79 亿 m³, 这较 1996—2017 年可利用量略有上升但相差不大, 在灌区引水需求无大的变化条件下, 基本可满足未来引水灌溉需求, 但应注意一些干旱年份水资源的调蓄和有效利用, 谨防发生缺水减产问题。

参考文献:

- [1] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 278-285.
DONG Leihua, XIONG Lihua, YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 278-285.
- [2] 丁文荣. 金沙江下游元谋干旱河谷区水沙过程演变规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 20-26.
DING Wenrong. Study on the evolution rule of water and sediment processes in Yuanmou arid valley of Jinsha River, southwest China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 20-26.

- [3] 许全喜, 童辉. 近 50 年来长江水沙变化规律研究[J]. 水文, 2012, 32(5): 38-47, 76.
XU Quanxi, TONG Hui. Characteristics of flow and sediment change in Yangtze River in recent 50 years[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(5): 38-47, 76.
- [4] 金新芽, 张晓文, 马俊. 地表水资源可利用量计算实用方法研究: 以浙江省金华江流域为例[J]. 水文, 2016, 36(2): 78-81.
JIN Xinya, ZHANG Xiaowen, MA Jun. A practical method for available surface water resources quantity calculation: A case study of Jinhuajiang river basin in Zhejiang Province[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(2): 78-81.
- [5] 魏佳, 张守平, 杨清伟, 等. 基于工程供水能力的地表水资源可利用量研究: 以荣昌为例[J]. 节水灌溉, 2018(10): 37-41.
WEI Jia, ZHANG Shouping, YANG Qingwei, et al. A study on the availability of surface water resources based on engineering water supply capacity—a case study of Rongchang[J]. Water Saving Irrigation, 2018(10): 37-41.
- [6] 马静, 田勇, 孙一, 等. 清涧河流域水沙变化规律及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 103-107.
MA Jing, TIAN Yong, SUN Yi, et al. Analysis of variation characters and tendency of water and sediment in qingjianhe basin[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 103-107.
- [7] 陈琳, 胡春宏, 陈绪坚. 黄河下游河道平滩流量与水沙过程响应关系研究[J]. 泥沙研究, 2018(4): 1-7.
CHEN Lin, HU Chunhong, CHEN Xujian. Relationship between bankfull discharges and processes of flow-sediment in lower Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2018(4): 1-7.
- [8] 朱颖洁. 北流河金鸡站水沙时间变化规律及预测研究[J]. 泥沙研究, 2015(2): 47-52.
ZHU Yingjie. Study on regulation and prediction of water and sediment of Jinji station in Beiliu River[J]. Journal of Sediment Research, 2015(2): 47-52.
- [9] 刘招, 李强, 李璐路, 等. 泾惠渠灌区渠首地表水资源可利用量长期变化及其潜力研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 237-242.
LIU Zhao, LI Qiang, LI Lulu, et al. Study of long-term variation and potential of available surface water resources of Jinghui Canal Head[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 237-242.
- [10] 李凌云, 吴保生, 侯素珍. 滞后响应模型在黄河内蒙古河段的应用[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 70-77.
LI Lingyun, WU Baosheng, HOU Suzhen. Application of delayed response model to bankfull discharge in the Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 70-77.
- [11] 管晓祥, 向小华, 李超, 等. 乌江流域水沙规律演变及驱动因素定量分析[J]. 泥沙研究, 2019, 44(5): 36-41.
GUAN Xiaoxiang, XIANG Xiaohua, LI Chao, et al. Analysis of evolution characteristics and driving factors of annual runoff and sediment transportation changes in Wujiang River[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(5): 36-41.
- [12] 何斌, 张澎辉, 梁国华, 等. 基于 BP 神经网络的场次洪水河道沙量预报[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 406-408, 416.
HE Bin, ZHANG Penghui, LIANG Guohua, et al. Flood and sediment prediction based on BP neural network[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 406-408, 416.
- [13] 吴小宏, 刘招, 李强, 等. 泾河长系列水沙变化规律与归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 144-149.
WU Xiaohong, LIU Zhao, LI Qiang, et al. Attribution analysis of long series runoff and sediment variation in Jinghe River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(6): 144-149.
- [14] 陕西省泾惠渠灌区管理局: <http://www.sxjhj.cn/1/1/list.aspx>, 2018-1-1.
Shaanxi Jinghui Canal Irrigation Administration: <http://www.sxjhj.cn/1/1/list.aspx>, 2018-1-1.
- [15] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾河流域水土保持措施减水减沙作用分析[J]. 人民黄河, 2001, 23(2): 6-8, 45.
RAN Dachuan, LIU Bin, LUO Quanhua, et al. Analysis of water and sediment reduction effects by soil and water conservation treatments in jing river basin[J]. Yellow River, 2001, 23(2): 6-8, 45.
- [16] LIU Z, WANG L X, YI X, et al. The water source situation and crises of the irrigation areas on the Loess Plateau at the origin of the Silk Road, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(15): 1 144.
- [17] 黄强, 赵雪花. 河川径流时间序列分析预测理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008.
HUANG Qiang, ZHAO Xuehua. River runoff time series analysis and prediction theory and method[D]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2008.
- [18] 杨茜. BP 神经网络预测方法的改进及其在隧道长期沉降预测中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(1): 92-97.
YANG Qian. Improvement of the improved BP neural network forecast method and its application in long-term settlement of the tunnel[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(1): 92-97.
- [19] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1 971): 903-995.
- [20] 马超, 姜璇. 基于 EEMD-ANN 的水库年径流预测[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 32-35.
MA Chao, JIANG Xuan. Annual reservoir runoff forecasting using ensemble empirical mode decomposition and artificial neuron network[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(8): 32-35.
- [21] WANG T, ZHANG M C, YU Q H, et al. Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal[J].

Predicting Change in Water Availability for Jinghui Irrigation District Using Ensemble Empirical Mode Decomposition and Back Propagation Neural Network

LI Wenqing^{1,2}, LIU Zhao^{2,3*}, WANG Lixia⁴, LI Qiang¹, WU Xiaohong⁵

(1.School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2.Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Institute of Water and development, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

4. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

5.The Administration Bureau of Jinghui Canal Irrigation Area, Sanyuan 713800, China)

Abstract: 【Background】 Climate change and intensification of human activities have impacted hydrological cycling, resulting in a sharp decline in river inflow, frequent occurrence of extreme weathers and decline of groundwater table. The change in water resources has led to a great challenge to water resource management for both industry and agriculture, especially the massive irrigated areas in arid and semi-arid areas which rely on water diverted from rivers for irrigation. It is urgent to improve our understanding of potential change in water resource and irrigation demand to safeguard food production in these regions. 【Objective】 The inflow to the Jing river has been in decline and the available water for diverting to Jinhui irrigation district has been reduced as a result. The purpose of this paper is to analyze the factors affecting the change in water resources at the head of Jinghui Irrigation district in Zhangjiashan and predict its potential change. 【Method】 A model based on the ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and the back propagation (BP) artificial neural network was established. The measured hydrological data was used to train and correct the model prior to being used to predict runoff and sediment yield in the next 10 years from 2018 to 2027 at Zhangjiashan. In the meantime, we also analyzed the available surface water resources for the irrigation district. 【Result】 ①The combination of the EEMD and the BP neural network could take the most of each to predict the nonstationary time series of the hydrological data. ②The change in water runoff and sediment yield at the head of the canal of the irrigation district was relatively consistent and simultaneous, both rising first followed by a decline in the next 10 years from 2018 to 2027. ③The average annual runoff will be approximately 1.186 billion m³, slightly higher than the average over 1996—2017, while the average annual sediment yield will be about 100 million tones, slightly lower than the average over 1996—2017. ④The available water resources at Zhangjiashan from 2019 to 2027 will be relatively stable, approximately 779 million m³ annually, slightly higher than the average over 1996 to 2017, and can meet the demand of the irrigation district for water diversion at current level. But management is required to ensure enough water will be able in dry years. 【Conclusion】 The errors of the model were in acceptable range, and the predicted results matched well with the measured data. The EEMD-BP model is accurate and reliable for predicting annual runoff and sediment yield, and it thus provides an alternative to help improve efficient utilization and management of water resources so as to safeguard agricultural production in the studied irrigation district.

Key words: water resources; annual runoff; forecasting; nature of runoff and sediment; irrigation district

责任编辑: 白芳芳