

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.04.005

# 基于经验模态分解方法和信息熵的水沙关系研究

张金萍, 肖宏林, 张 鑫

(郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为研究黄河中游水沙关系及其细部演化特征, 利用黄河中游控制性水文站——潼关水文站 1919—2015 年实测径流量和输沙量资料作为研究数据, 采用经验模态分解方法分析径流和泥沙随机变化的复杂性, 并运用信息熵理论计算不同时间尺度上径流和泥沙分解序列及原始序列的熵值、径流与泥沙各分量与其原始序列之间的互信息、径流与泥沙之间的互信息。结果表明: 潼关水文站径流量与输沙量变化具有显著下降的趋势; 径流量和输沙量在一定程度上表现为某种同步变化关系; 径流量与输沙量的长周期分量及趋势项互信息较大, 因此水沙关系宜采用长周期研究, 趋势项分量数据信息阐述原始序列数据信息比较可靠。

**关键词:** 径流量; 输沙量; 经验模态分解方法; 信息熵; 互信息; 黄河中游

**中图分类号:** TV143      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2019)04-0030-05

**Study on relationship between water and sediment based on empirical mode decomposition and information entropy** // ZHANG Jinping, XIAO Honglin, ZHANG Xin (College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between water and sediment in the middle reaches of the Yellow River and its detailed evolution characteristics, the empirical mode decomposition method was used to analyze the complexity of random variation of runoff and sediment load based on the measured runoff and sediment discharge data from 1919 to 2015 at Tongguan Hydrological Station, a controlling hydrological station in the middle reaches of the Yellow River. The information entropy theory was used to calculate the entropy values of the decomposition sequence and original sequence of runoff and sediment load at different time scales. The mutual information entropy values between runoff and sediment sequences and between their decomposition sequences and original sequences were calculated too. The results show that the change of runoff and sediment load at Tongguan Hydrological Station has a significant downward trend. The relationship between runoff and sediment load is synchronous to some extent. The long-period components and residual components of runoff and sediment load have great mutual information, so studies of the relationship between water and sediment should be focused on their long-period scales. The original data information can be described by the residual components reliably.

**Key words:** runoff; sediment load; empirical mode decomposition; information entropy; mutual information; middle reaches of Yellow River

黄河以泥沙多而闻名, 因泥沙淤积造成的黄河水患给国家和人民造成了极大危害。因此, 研究黄河径流-泥沙关系及其演化特征具有重要的意义。胥维坤<sup>[1]</sup>运用统计学方法分析了小浪底水库运行后对黄河下游水沙变化的影响。方怒放<sup>[2]</sup>把三峡水利枢纽中的王家桥小流域作为研究区, 利用多元

相关分析和逐步回归分析研究了降雨、径流、泥沙三者之间对应的关系性。吴敬东等<sup>[3]</sup>建立了小流域坡面不同治理措施下的径流量与降雨量、降雨历时之间的数学模型, 确定了径流量和输沙量之间的关系。河川水沙常常受多种水文因素的影响, 在不同时间尺度下呈现复杂的波动特征和关系特性, 因此

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0406501); 郑州大学 2015 年优秀青年教师发展(1521323002); 2018 年度河南省高校科技创新人才支持计划(18HASTIT014); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金(IWHR-SKL-KF201802); 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室(HESS-1717); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2017GGJS006)

作者简介: 张金萍(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水资源开发利用与管理研究。E-mail: jinpings2000\_zh@163.com

对水沙研究应包含时序多时间尺度细部演化特征分析<sup>[4]</sup>。本文针对流域产汇流系统在多时间尺度下的径流-泥沙关系,通过经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法分析其原始序列的细部演变规律和特征,同时结合信息熵理论,辨识河流水沙关系及其演化特征。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 数据来源

潼关水文站位于黄河中游,是黄河上第二大水文站,潼关断面在黄河、北洛河、渭河3条河流汇流下游不远处,洪水常常在这里相遇,洪水此消彼长,水沙条件复杂。本研究获取了潼关水文站1919—2015年实测径流量和输沙量资料作为研究数据。潼关水文站地理位置和研究时段内的年径流量、输沙量原始序列分别见图1、图2。

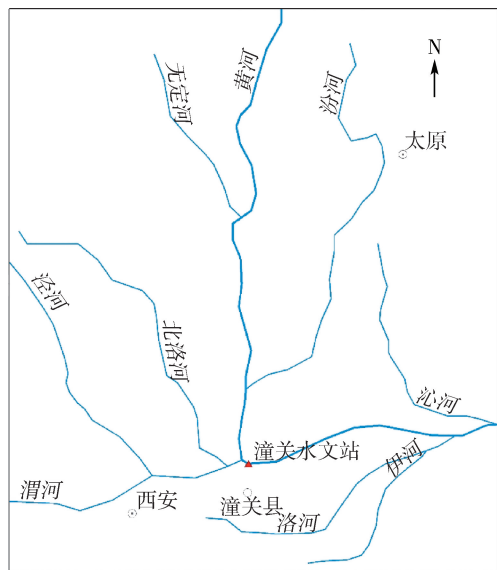


图1 潼关水文站地理位置

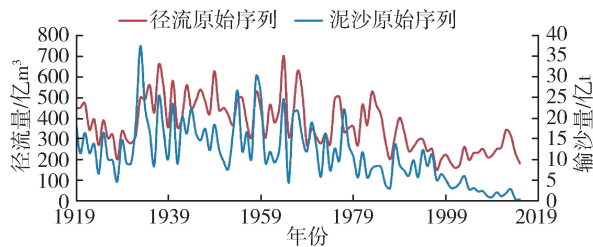


图2 径流、泥沙原始序列

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 EMD方法

EMD方法是Huang等<sup>[5]</sup>于1998年提出的一种新型自适应信号时频分析方法,近年来在水文水资源领域广泛应用<sup>[6]</sup>。该方法是通过一个“筛选”过程从被分析原始信号中分离本征模函数(intrinsic mode function, IMF),并且提取的IMF分量需要满

足以下条件:①在整个时段内包含所有数据信息的集合中,其数据极大值点与极小值点的数量必须等于经过0点的数量或者数量差值为一个;②在任何时刻,其数据的极大值点连接形成的包络线与极小值点连接形成的包络线的总体均值最终为0<sup>[7]</sup>。对于复杂信号若不满足IMF所要求的条件,可以利用EMD方法按照分解的步骤对复杂信号进行分解形成一系列满足条件的IMF分量<sup>[8]</sup>。EMD方法的步骤为:

**步骤1:**首先定义一个原始信号为 $X(t)$ 。

**步骤2:**分析原始信号 $X(t)$ 找出它全部的极大值点与极小值点及其对应位置,并利用插值方法处理形成上下包络线,求出极大值点和极小值点形成的包络线的均值 $M_1$ 和原始信号 $X(t)$ 与均值 $M_1$ 之间的差值 $H_1$ ,即 $H_1 = X(t) - M_1$ 。若 $H_1$ 满足IMF的两个条件,则进行步骤4,否则进行步骤3。

**步骤3:**把 $H_1$ 看作原始信号重复步骤2求得上下包络线形成的均值 $M_2$ ,再通过上述方法计算出差值 $H_2$ ,并判断其是否满足IMF的条件,若还不满足继续重复直至找到满足IMF条件的分量。

**步骤4:**将第一个IMF分量从 $X(t)$ 中分离,从而得到 $R_1$ ,即 $R_1 = X(t) - H_1$ 。

**步骤5:**重新把分离后的差值 $R_1$ 看作原始信号并重复步骤2~4得到 $n$ 个满足条件的IMF分量和1个趋势项(residual, RES)分量 $R_n$ ,从而完成对原始信号的分解过程。

通过以上步骤可将潼关水文站径流量、输沙量进行EMD分解,提取多个IMF分量。

### 1.2.2 信息熵理论

Shannon<sup>[9]</sup>参考热力学上的知识,把信息熵定义为排除了信息冗余后的平均信息量。若系统变量有 $U_1, U_2, \dots, U_n$ 共 $n$ 种取值,对应概率分别为: $P_1, P_2, \dots, P_n$ 且各种取值的出现彼此独立,此时信源的平均不确定性应为每个符号不确定性 $-\ln P_i$ 统计得到的数学期望称为信息熵<sup>[10-11]</sup>。信息熵 $H(U)$ 的计算公式为

$$H(U) = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (1)$$

信息论中用信息熵来表示系统本身所拥有信息量的多少。一个系统表现得越稳定、越有规律,则该系统对应的信息熵值就越小,所以信息熵也用来表示系统的稳定性程度、有序化程度<sup>[12-13]</sup>。

互信息在信息论中表示两变量之间的相关性,它反映随机变量之间共有的信息量或相互间的依赖关系<sup>[14]</sup>。若两随机变量间的联系越紧密,则它们的互信息熵值就越大,同理在相反情况下,则两者之间

的互信息熵值就越小<sup>[15]</sup>。

分别计算径流、泥沙原序列及分解后的 IMF 分量的信息熵,并通过计算径流、泥沙的互信息从而确定黄河流域径流-泥沙的关系。以潼关水文站实测径流量或输沙量为例,设原始信号  $X(t)$  为潼关水文站 1919—2015 年径流量或输沙量数据,经 EMD 分解可得到  $n$  个不同的 IMF 分量,每个分量包含  $m$  年的实测分解值。则得有判定矩阵:

$$C = (C_{st})_{n \times m} \quad (s = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中  $C_{st}$  为第  $s$  个 IMF 分量的第  $t$  年的实测分解值。

为了排除干扰,在计算各 IMF 分量的信息熵时,首先需要将  $n$  个 IMF 分量的所有数据作归一化处理。得到归一化矩阵  $B$ ,归一化处理公式为

$$B_{st} = \frac{C_{st} - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (3)$$

式中:  $B_{st}$  为  $B$  的元素;  $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$  分别为同一 IMF 分量系列数据的最大值和最小值。

将区间  $[0, 1]$  平均分成  $L$  组,每组长度为  $1/L$ ,对应的区间为  $[0, 1/L)$ ,  $[1/L, 2/L)$ ,  $\dots$ ,  $[L-1/L, 1]$ 。对于某个 IMF 分量  $m$  年归一化数据中第  $t$  年在相应的某个分组区间内的概率  $P_i$  为  $t/m$ <sup>[16]</sup>。由信息熵的定义和计算公式知,为保证  $\ln P_i$  始终有意义,需要对  $P_i$  进行修正,即当  $P_i$  为 0 时假设  $\ln P_i$  为 0。则第  $s$  个 IMF 分量的信息熵为

$$H(I_{MF_s}) = - \sum_{l=1}^L P_l \ln P_l \quad (4)$$

根据式(4)可依次求出经 EMD 分解的 IMF 分量信息熵值,同理求得趋势项的信息熵值。在此基础上,利用式(5)求出它们之间的互信息熵,得出相互间的关联度。

$$M_1(a, b) = H(a) + H(b) - H(a, b) \quad (5)$$

式中:  $M_1(a, b)$  为互信息熵值;  $H(a)$ 、 $H(b)$  分别为径流量、输沙量各分量的信息熵;  $H(a, b)$  为二者对应各分量之间的联合熵。

## 2 结果分析

### 2.1 EMD 方法分析

应用前文 EMD 分解步骤对潼关水文站 1919—2015 年径流量、输沙量原始序列进行分解,分别得到径流量和输沙量的 4 个 IMF 分量与 1 个 RES 分量。径流量、输沙量各分量序列见图 3。

由图 3 可知,径流量和输沙量均包含着复杂得多时间尺度周期性变化和宏观趋势走向。径流量和输沙量 IMF1 分量对应的准周期约为 5 a 和 4 a, IMF2 分量的准周期约为 8 a 和 6 a, IMF3 分量的准周期约

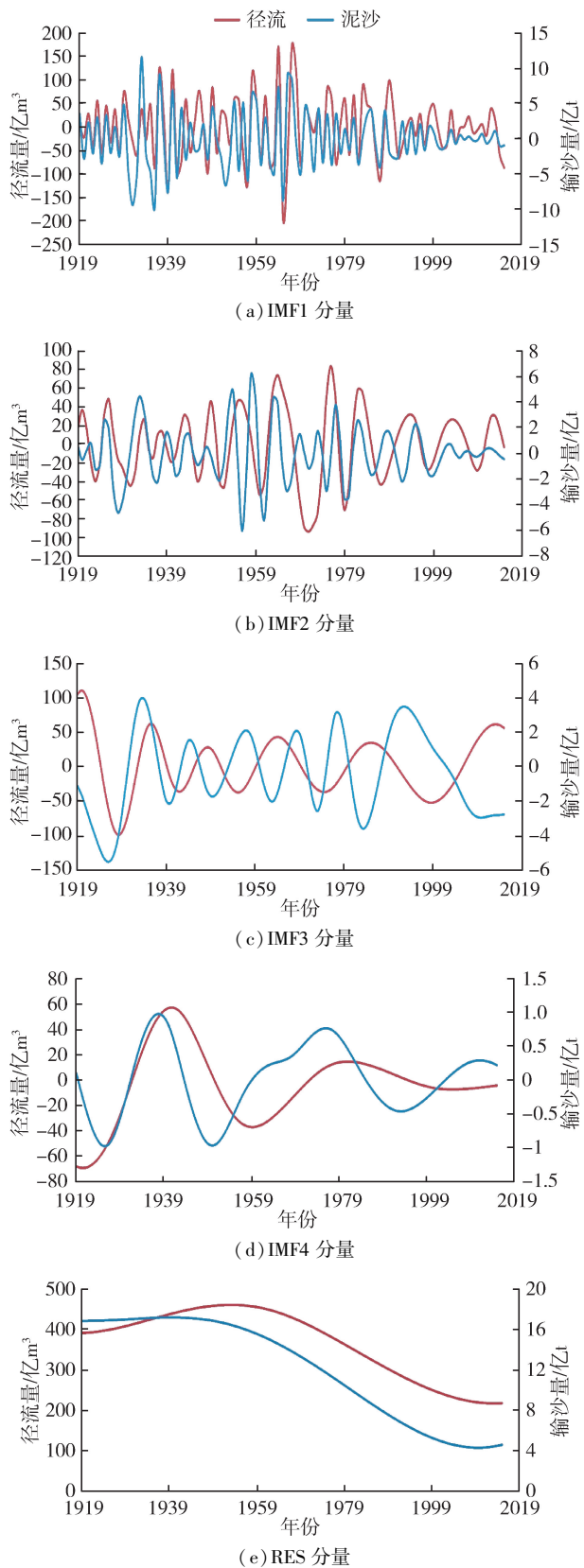


图 3 径流与泥沙各分量对比

为 16 a 和 15 a, IMF4 分量的准周期约为 35 a 和 28 a, 可见径流和泥沙各 IMF 分量周期性关系在不同时间尺度上变化规律基本保持一致。这表明水沙相关性密切,水沙长时间序列在模糊特征下具有确定性特征,即存在波动周期的确定性,可为不同时期水沙

联合预测、水沙变化特征研究提供参考。径流量、输沙量原始序列影响因素较多,经过 EMD 分解后随着分解层数的增多分解尺度的加大,径流、泥沙的干扰信息被去除,影响因素减少,有效信息增多,在不同的分层下表现为越来越有规律性。在趋势变化方面,表现为分解序列更有序,系统由无序到有序过渡的趋势性。特别是径流量、输沙量的趋势项呈现出较强的规律性,都呈现先上升后逐渐下降的趋势,径流上升速度比泥沙上升速度略快,二者趋势走向基本同步。

潼关水文站径流量、输沙量的趋势项在 1950 年左右分别出现拐点,在之后很长一段时期内不断减少,这是受自然和人类活动等多重因素影响的结果。1949 年以来,水利工程建设、河道外取水、水土流失综合治理措施和修建淤地坝等生态工程建设的增加及其他人类活动干预对水文系统产生重大影响,使潼关水文站径流量、输沙量出现明显的减少<sup>[17]</sup>。整体而言,年径流量与年输沙量随时间表现为显著下降的趋势与文献[18]的结论相符。这表明原序列经 EMD 分解的 RES 分量可以反映径流量、输沙量整体的变化趋势,即低频模态分量控制着序列变化的全局和趋势。

## 2.2 信息熵分析

利用前文方法计算径流量、输沙量分解序列的信息熵结果见表 1。径流量、输沙量 IMF1 分量对应的波动周期为短周期,IMF2 分量对应的波动周期为中周期,IMF3 分量对应的波动周期为中长周期,IMF4 分量对应的波动周期为长周期,因 RES 分量缺乏周期波动,故不与 IMF 分量作对比。

表 1 径流量与输沙量分量信息熵

序 列	原序列	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	RES
径流量	2.142	1.956	2.076	2.012	2.077	2.053
输沙量	2.140	2.018	1.929	2.196	2.239	1.916

由表 1 可见,径流量和输沙量原序列熵值较大,径流量熵值拐点首次出现在 IMF1 处,输沙量熵值拐点出现在 IMF2 处。表示随着分解层数的增多、分解尺度的加大,径流、泥沙分解序列表现为越来越有序,影响因素越来越少,系统呈现由不稳定向稳定过渡、由无序到有序的过渡的趋势性,因此信息熵值减小。但当分层过多,分解尺度过大,使系统的其他影响因素体现出来,从而使得信息熵值增大。

原序列对应的径流熵值比泥沙熵值稍大,可以判定径流系统较泥沙复杂,须密切关注径流量的变化。径流、泥沙各序列信息熵值变化基本同步,则表明径流量、输沙量之间关系应表现为同步变化或者

异步变化特征,由径流量、输沙量原序列经 EMD 方法分析得知二者满足同步变化关系。

## 2.3 互信息分析

为了深层次分析潼关水文站径流-泥沙的关系,计算各序列与原序列之间的互信息熵值以及径流量与输沙量原序列之间的互信息熵值,结果见表 2。

表 2 径流量和输沙量原序列与其分解序列之间的互信息熵值

序 列	原序列与 IMF1	原序列与 IMF2	原序列与 IMF3	原序列与 IMF4	原序列与 RES
径流量	0.467	0.468	0.521	0.615	0.664
输沙量	0.646	0.513	0.387	0.493	0.669

由表 2 可知,径流量、输沙量的原序列与 RES 分量之间的互信息最大,可见如果径流、泥沙系统比较复杂,为了便于研究径流、泥沙变化可采用 RES 分量数据信息阐述原始数据信息,并利用趋势项变化特征观察其整体发展态势。径流原序列与各 IMF 分量的互信息呈现递增的趋势性,即它们之间的共有信息量越来越多,原序列与 IMF4 的互信息最大,说明 IMF4 对径流原序列的贡献程度最大。对于径流 IMF 分量而言,低频分量与原序列的互信息较大,所以低频分量所携带的信息量比较多,因此对径流量宜采用长周期研究比较可靠。泥沙原序列与各 IMF 分量的互信息先减小后增大,泥沙原序列与 IMF1 互信息最大,说明 IMF1 对泥沙原序列的贡献率最大。对于泥沙 IMF 分量而言,高频分量与原序列的互信息较大,高频分量所携带的信息量比较多,因此对输沙量宜采用短周期研究比较可靠。

为了更进一步研究径流量、输沙量之间的关系,计算了径流与泥沙之间原序列及各分解序列的互信息熵值,原序列之间为 0.689,IMF1 分量之间为 0.575,IMF2 分量之间为 0.338,IMF3 分量之间为 0.534,IMF4 分量之间为 0.675,RES 分量之间为 1.410。可以看出,趋势项之间的互信息最大,这是由于经 EMD 方法分解后排除了干扰,使径流、泥沙的有效信息充分体现出来,从而使两者之间的趋势项互信息比原序列之间的互信息大。原序列之间互信息也较大,表示虽然径流、泥沙原序列的影响因素比分解序列要复杂,系统比较无序,但是原序列信息量比较多。对于各分解序列来说,互信息基本呈现递增的趋势性,表示经 EMD 分解排除干扰后各系列之间的关联性增大,它们之间的共有信息量逐渐增大。对于径流量与输沙量经 EMD 分解的各 IMF 分量而言,径流量与输沙量对应的长周期 IMF4 分量互信息最大,因此径流量与输沙量关系及其变化特征宜采用长周期的研究。

### 3 结 论

潼关水文站年径流量与年输沙量随时间表现为显著下降的趋势,且径流量和输沙量有着很强的相关性,这种相关性不仅体现在宏观趋势上,而且还体现在微观局部特征上,具体表现为在多时间尺度下波动特征基本同步。EMD方法与信息熵结合分析表明,径流量与其长周期分量互信息最大,因此对径流量变化特征宜采用长周期研究比较可靠;输沙量与其短周期分量互信息最大,因此对输沙量变化特征宜采用短周期研究比较可靠;而径流量与输沙量的长周期分量及趋势项互信息较大,所以黄河中游潼关附近水沙关系可采用长周期研究,趋势项分量数据信息阐述原始数据信息比较可靠。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 胥维坤. 小浪底水库运行后黄河下游水沙及其三角洲动力沉积的演变[D]. 上海:华东师范大学,2016.
- [ 2 ] 方怒放. 小流域降雨-径流-产沙关系及水土保持措施响应[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
- [ 3 ] 吴敬东,李永贵. 石灰岩小流域坡面不同治理措施降雨径流泥沙关系研究[J]. 北京水利,1998(6):15-18. (WU Jindong, LI Yonggui. Study on relation of rainfall, runoff and sediment for different treatment measures on slope in limestone small watershed [J]. Beijing Water Resources,1998(6):15-18. (in Chinese))
- [ 4 ] 许军才,任青文,黄临平. 基于变分模态分解的探地雷达信号分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):545-550. (XU Juncai, REN Qingwen, HUANG Linping. Ground penetrating radar signal analysis method based on variational modal decomposition [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(6):545-550. (in Chinese))
- [ 5 ] 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 A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454 (1971): 903-995.
- [ 6 ] 冯平,丁志宏,韩瑞光,等. 基于 EMD 的降雨径流神经网络预测模型[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(1):152-158. (FENG Ping, DING Zhihong, HAN Ruiguang, et al. Precipitation-runoff forecasting ANN model based on EMD [J]. Systems Engineering Theory & Practice,2009,29(1):152-158. (in Chinese))
- [ 7 ] HAN J, BANN M V D. Empirical mode decomposition for seismic time-frequency analysis [J]. Geophysics, 2013, 78 (2):9-19.
- [ 8 ] HUANG N E, WUM L C, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and hilbert spectral analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459 (2037):2317-2345.
- [ 9 ] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27 (3), 379-423.
- [ 10 ] 王富强,赵乃立,袁建平,等. 基于信息熵原理的东北地区参考作物蒸散量时空特征分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4):6-12. (WANG Fuqiang, ZHAO Naili, YUAN Jianping, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in Northeast China based on information entropy theory [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (4):6-12. (in Chinese))
- [ 11 ] 孙斌,刘静玲,孟博,等. 北京市凉水河物理栖息地完整性评价[J]. 水资源保护,2017,33(6):20-26. (SUN Bin, LIU Jingling, MENG Bo, et al. Evaluation of physical habitat integrity of Liangshui River in Beijing [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (6):20-26. (in Chinese))
- [ 12 ] 朱晓熠,刘咏梅. 基于信息熵的南京市土地利用结构分析[J]. 安徽农学通报,2010,16(15):16-18. (ZHU Xiaoyi, LIU Yongmei. Analysis of land use structure of Nanjing based on information entropy [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2010, 16 (15):16-18. (in Chinese))
- [ 13 ] 王金东,代梅,杜永军,等. 基于 EMD 和信息熵的往复压缩机气阀故障特征提取[J]. 压缩机技术,2013(4):37-39. (WANG Jindong, DAI Mei, DU Yongjun, et al. Fault feature extraction from reciprocating compressor valve based on EMD and information entropy [J]. Compressor Technology, 2013(4):37-39. (in Chinese))
- [ 14 ] PROTOPOPESCU V A, GALY A R. Empirical mode decomposition technique with conditional mutual information for denoising operational sensor data [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11 (10):2565-2575.
- [ 15 ] 魏建香,孙越泓,朱云霞,等. 一种基于互信息的药品不良反应信号检测方法[J]. 南京大学学报(自然科学版),2010,46(6):705-712. (WEI Jianxiang, SUN Yuehong, ZHU Yunxia, et al. A method for signal detection of adverse drug reactions based on mutual information [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2010, 46 (6):705-712. (in Chinese))
- [ 16 ] 刘树春,潘紫薇,宋森. 第二代小波在振动信号去噪中新方法的研究[J]. 机械传动,2008(3):64-66. (LIU Shuchun, PAN Ziwei, SONG Miao. Study on the new demising method of vibrating signal with second generation wavelets transform [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2008(3):64-66. (in Chinese))

(下转第 41 页)

Chinese))

- [19] 李怀恩, 岳思羽, 赵宇. 河道生态基流价值研究进展[J]. 水利经济, 2015, 33(4): 6-9. (LI Huaen, YUE Siyu, ZHAO Yu. Research progress in value of ecological basic flow[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015, 33(4): 6-9. (in Chinese))
- [20] 张泽聪, 韩会玲, 陈丽. 基于改进的 Tennant 法的大凌河生态基流计算[J]. 水电能源科学, 2013(9): 29-31. (ZHANG Zecong, HAN Huiling, CHEN Li. Calculation of ecological base flow in Dalinghe River based on improved tennant method[J]. Water Resources and Power, 2013(9): 29-31. (in Chinese))
- [21] 徐伟, 董增川, 罗晓丽, 等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 454-457. (in Chinese))
- [22] 张代青, 高军省. 河道内生态环境需水量计算方法的研究现状及其改进探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(4): 68-73. (ZHANG Daiqing, GAO Junsheng. Discuss on the research situation of estimating methods of eco-environmental water requirements in river course and its modification[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2006, 17(4): 68-73. (in Chinese))
- [23] 杨裕恒, 曹升乐, 刘阳, 等. 基于改进 Tennant 法的小清河生态基流计算[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 97-101. (YANG Yuheng, CAO Shengle, LIU Yang, et al. Calculation of ecological base flow in Xiaoqing River based on improved tennant method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(5): 97-101. (in Chinese))
- [24] 马平森, 雷艳娇, 卯昌书, 等. 基于用水总量与效率控制的云南省水资源配置[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 49-53. (MA Pingsen, LEI Yanjiao, MAO Changshu, et al. Water resources rational allocation based on total water consumption and water efficiency control in Yunnan Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 49-53. (in Chinese))
- [25] 关家康. 供给侧结构性改革中的云南省水资源管理[J]. 水利经济, 2018, 36(1): 77-80. (GUAN Jiakang. Water resource management in Yunnan Province under supply-side structural reform [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(1): 77-80. (in Chinese))
- [26] 谢永红, 张云英. 云南省区域水资源与社会经济协调发展研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 112-114. (XIE Yonghong, ZHANG Yunying. Research on regional water resource and social economy coordinated development in Yunnan Province [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 112-114. (in Chinese))
- [27] 杨影丹, 陈文华. 云南省中小河流水能开发河流生态流量探讨[J]. 小水电, 2011(6): 31-34. (YANG Yindan, CHENG Wenhua. Discussion on ecological flow of rivers in water energy development of medium and small rivers in Yunnan Province [J]. Small Hydro Power, 2011(6): 31-34. (in Chinese))
- [28] 伍立群, 王超. 云南省河流生态需水量的片区特点[J]. 水文, 2009(增刊1): 116-119. (WU Liqun, WANG Chao. Characteristics of the area of river ecological water demand in Yunnan Province [J]. Journal of China Hydrology, 2009(Sup1): 116-119. (in Chinese))
- [29] 王伟营, 王志明, 卢飞. 牛栏江—滇池补水工程对鱼类的影响及补偿措施[J]. 云南水力发电, 2014, 30(4): 149-152. (WANG Weiying, WANG Zhiming, LU Fei, Impact of Niulanjiang-Dianchi Water Supply Project on fish and compensation measures [J]. Yunnan Water Power, 2014, 30(4): 149-152. (in Chinese))
- [30] 陈媛, 王文圣, 王国庆, 等. 金沙江流域气温降水变化特性分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 51-56. (CHEN Yuan, WANG Wensheng, WANG Guoqing, et al. Characteristics analysis on temperature and precipitation variation in Jinsha River [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(4): 51-56. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-12-31 编辑: 彭桃英)

(上接第 34 页)

- [17] 宋逸云, 黄峰. 衢江江水流沙变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 40-46. (SONG Yiyun, HUANG Feng. Trend analysis of runoff and sediment load variation in Qujiang River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 40-46. (in Chinese))
- [18] 张祥, 辛红侠, 侯光, 等. 潼关水文站近十年水沙情势分析[J]. 东北水利水电, 2017, 35(8): 52-53. (ZHANG Xiang, XIN Hongxia, HOU Guang, et al. Analysis of water and sediment situation in Tongguan Hydrological Station in the last ten years [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2017, 35(8): 52-53. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-10-26 编辑: 王芳)