

近549年来黄河天然径流量时间变化特征研究

田鹏¹, 穆兴民^{2,3}, 赵广举^{2,3}, 胡晋飞³, 高鹏^{2,3}, 孙文义^{2,3}

(1.西北农林科技大学资源与环境学院,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨凌 712100;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:天然径流量是流域气候及下垫面综合作用的结果,同时是流域水资源分配的重要依据。深入探究长时间序列年径流量时间变化特征对流域水资源调控以及水资源可持续利用意义重大。基于黄河1470—2018年长时间序列天然径流量数据,综合采用EMD经验模态分解法、滑动平均法以及距平累积法揭示黄河549年间天然径流量的年际变化与周期变化特征。结果表明,黄河年天然径流量变化过程具有显著的随机特征,随年份不同呈现波动性变化,5%及95%频率的年天然径流量分别为337.0亿m³和681.0亿m³。采用距平累积法可将黄河近549年天然径流序列以1825年为界分为2个时期;黄河年天然径流量以2.8年变化周期最为显著,其次为23.8年、47.3年、5.6年、11.3年周期规律,出现该周期性规律主要是由于太阳黑子活动、厄尔尼诺现象以及地极移动振幅变化因子的影响。

关键词:黄河;天然径流;EMD经验模态分解;周期分析

中图分类号:TV882.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)06-0065-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.06.010

Variations of Natural Runoff in the Yellow River Since 1470

TIAN Peng¹, MU Xingmin^{2,3}, ZHAO Guangju^{2,3}, HU Jinfei³, GAO Peng^{2,3}, SUN Wenyi^{2,3}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Natural runoff reflects the effects of climate change and land surface variation, which is important for water resources allocation in the basin. Further understanding long-term variations in natural runoff is of great significance in water resources management. This study applied the empirical mode decomposition method (EMD), moving average method and anomalous accumulation method to reveal the temporal and periodical changes in natural runoff with long-term data from 1470 to 2018 in the Yellow River basin. The results showed that annual natural runoff had a significant random characteristic, showing wet-dry fluctuations within different periods. The annual natural runoff at 5% and 95% frequency were 33.70 billion m³ and 68.10 billion m³, respectively. The natural runoff of the Yellow River could be divided into two periods by the year of 1825. The EMD method showed that the natural runoff had a significant periodical cycle of 2.8 years, followed by 23.8 years, 47.3 years, 5.6 years and 11.3 years. The periodic feature was mainly influenced by the Sunspot activity, El Niño phenomenon and the amplitude changes factor of earth pole movement.

Keywords: Yellow River; natural runoff; empirical mode decomposition; periodical analysis

水资源是社会可持续发展的重要基础^[1],其最主要的存在形式之一为河川径流,是人类生产生活用水的最重要保障^[2]。然而,受气候变化影响,加之人类

对水资源的过度开发利用,黄河径流量发生了显著变化,造成了一系列威胁社会经济可持续发展和流域生态环境的问题。因此,分析黄河径流量变化特征规律

收稿日期:2020-05-18

资助项目:中国科学院A类战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA20040202);国家重点研发计划项目“黄河流域水沙多时空演变及其分异规律”(2016YF0402401)

第一作者:田鹏(1982—),女,黑龙江佳木斯人,副教授,博士,主要从事流域水文过程研究。E-mail: pengtian@nwsuaf.edu.cn

通信作者:穆兴民(1961—),男,陕西渭南人,研究员,博士,主要从事生态水文研究。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

对于水资源的可持续开发利用、黄河生态保护与高质量发展具有重要意义。

天然径流量是流域气候及下垫面综合作用的结果,同时是流域水资源分配的重要依据。人们对天然径流量年际变化的认识经历了“独立的随机变量”到“并非相互独立的而具有一定的关联性”的历程^[3]。河流天然径流量在大的气候变化背景下呈现不等长度的丰、枯期交替现象。因此,河川天然径流量不完全是独立随机变量或马尔可夫过程,它除具有随机性外,还具有较短及较长期的周期变化。年天然径流量时间过程具有随机性、阶段性、周期性,以及逐渐演变出来的突变性和趋势性等特征及其专门的分析方法。理解年天然径流量周期性变化成因机制的方法很多,其中较有效的方法是分析其时间过程的频谱特征,探讨其随时间演变的规律性。河川径流变化规律的研究^[4]应着眼于时间上的周期性及量的变化幅度对比。

目前,很多研究采用小波变换对气候以及水文时间序列的周期性进行分析。张健等^[5]采用小波变换分析无定河径流的多时间尺度周期特征发现,年径流在 6 个不同时间尺度上表现出“丰—枯”交替变化,其平均周期分别对应 35.5 年、22.2 年、16.8 年、12.2 年、9.3 年、3.3 年。此外,吴东杰等^[6]分析地下水位的周期变化特征表明,地下水位动态变化中除具有年内的周期性变化规律外,还存在 2~3 年振荡周期。然而,小波分析结果会受到不同因素的影响,例如边缘效应以及小波基函数的选择均会造成分析结果的失真^[7]。相比之下,经验模态分解方法(empirical mode decomposition, EMD)是基于水文时间序列自身的局部变化展开分析,即根据数据自身的特征逐级进行平稳化处理,从原始信号中将不同周期的波动信息分离出来,因此,该方法具有数据处理客观、自适性强、数据冗余度小等优点^[8]。

黄河是我国的第二大河流,多年平均径流量 580 亿 m^3 ,水资源量仅占全国的 2.1%。随着黄河流域社会经济的快速发展,工业取水、农业灌溉与生活用水的需求日益增加,使得黄河流域水资源供需矛盾日趋严峻,水资源短缺已经成为制约区域社会经济发展与农业生产的重要因素。研究黄河天然径流量变化特征直接关系流域内及沿黄地区水资源的高效利用与科学分配。黄河流域最早的现代器测径流量始于 1919 年的陕县水文站,因此目前研究多采用近百年的数据序列,难以反映径流长期的变化特征^[9-10]。鉴于此,本文通过搜集王国安等^[11]反演的 1470—1918 年黄河天然径流量序列数据,结合水文站监测资料,

采用多种统计学方法以及 EMD 经验模态分解法,探讨天然径流量长时间序列的演变特征,以期为黄河流域水资源动态变化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

黄河约 60% 的径流量来自上游,超过 90% 的泥沙来源于中游的黄土高原。统计黄河干流主要站点的径流资料发现,黄河三门峡站天然径流量占利津站天然径流量的 90% 左右。因此,本研究采用三门峡水文站的天然径流量表征黄河天然径流量变化。王国安等^[11]利用清代黄河报汛志桩与《中国近五百年旱涝分布图集》,并结合历史洪水水情和洪涝档案史录等有关资料,估算了三门峡站 1470—1918 年的天然径流系列,1919—1997 年的天然径流资料通过实测数据进行还原后得到。经过王国安等^[11]对历史资料的验证表明,基于实测径流推求的天然年径流具有较高的精度。1470—1918 年的年径流与涨水尺具有较高的相关系数($R=0.93$),说明该时段的天然径流量具有相对可靠的精度。在此基础上,本研究通过摘录 1998—2018 年各年《黄河水资源公报》中天然径流量构成近 549 年的黄河流域天然径流量。

1.2 研究方法

本研究采用滑动平均法、距平累积法及经验模态分解法解析黄河天然径流量的趋势、阶段和周期特征,滑动平均法与距平累积法计算过程相对简单,在这里不在赘述,本文重点介绍经验模态分解法的计算原理。

经验模态分解法(EMD)是由 Huang 等^[8]于 1998 年所提出的一种自适应信号时频处理方法。该方法不必预先设定任何基函数,而是借助原始数据自身时间尺度的特征对信号进行平稳化处理,其本质不同于需建立基函数的傅里叶分解和小波变换方法。

经验模态分解法的主要原理是假设一个时间序列的各瞬时点由不同时间尺度的振荡模态叠加而成,EMD 方法依据数据系列的瞬时特征,将原始的时间序列信号按照频率特征,从高到低分解为若干个本征模函数(intrinsic model function, IMF),每个本征模函数具有高还原性特征,变化规律符合自然非线性变化过程^[12],而时间序列的原始信号在不同尺度的物理意义得以保留,最低频的分量用于表征原始信号的总趋势或均值。针对时间序列 $X(t)$,提取其所有极大值与极小值点,并采用 3 次样条曲线分别拟合原始数据的上、下包络线及平均包络线 m_1 ;根据原时间序列 $X(t)$ 与平均包络线 m_1 的差值获取低频率序列 h_1 。

$$h_1=X(t)-m_1 \tag{1}$$

由于 h_1 并非平稳序列,因此,重复上述过程进行计算,将 h_2 取代 $X(t)$, m_2 作为 h_1 的平均包络线:

$$h_2=h_1-m_2 \tag{2}$$

经多次迭代后:

$$h_{i+1}=h_i-m_{i+1} \quad (i=1,2,3,\cdots,k) \tag{3}$$

满足终止条件 SD 时,计算终止。而 SD 临界值通常介于 $0.2\sim0.3$,本文中 SD 取值为 0.05 。

$$SD=\sum_{i=1}^T\left[\frac{[h_{i-1}(t)-h_i(t)]^2}{h_{i-1}^2(t)}\right] \tag{4}$$

基于此,得出第 1 个本征函数 IMF_1 :

$$IMF_1=h_{k+1} \tag{5}$$

分离出数据中最高频组分 IMF_1 后,

$$r_1=X(t)-IMF_1 \tag{6}$$

r_1 仍然包含着较长周期分量的信息,因此需继续重复以上过程得到 IMF_2 :

$$r_2=r_1-IMF_2 \tag{7}$$

继续重复,

$$r_n=r_{n-1}-IMF_n \tag{8}$$

至 r_n 不能再分解为止。最终原始数据被分解为:

$$X(t)=\sum_{i=1}^nIMF_i+r_n \tag{9}$$

至此, $X(t)$ 分解为 $IMF_i, i=1,2,3,4,\cdots,n$ 以及残差 r_n , 该残差表示剩余趋势或 1 个常数。各个 IMF_i 分量表现出原始数据于该尺度上的特征,能够更加详尽和直观地描述数据所涵盖的信息。

根据经验模态分解的原理, IMF 中的每个周期组分只涉及 1 种振荡模式,因此,每个 IMF 分量反映出原始时间序列在不同时间尺度的周期与振幅^[12]。每个分量信号对原始数据总体特征的影响程度可用方差贡献率来表征,并定量化判断不同尺度信号的作用程度,以便进一步理解天然径流量变化的成因机制。

2 结果与分析

2.1 黄河天然径流量趋势特征分析

图 1 为黄河天然径流量年平均及 10 年滑动平均曲线。由图 1 可知,黄河年天然径流量变化幅度较高,年径流随年份呈现波动性变化。1470—2018 年平均年天然径流量为 506.3 亿 m^3 ,最大值为 919.0 亿 m^3 ,发生于 1818 年,最小径流量为 1877 年的 200.0 亿 m^3 ,变异系数为 0.20 。1470—1820 年间,天然径流量呈平稳波动状态,而于 1820—1850 年间表现出明显上升趋势。1850—1895 年天然径流量急剧下降后趋于平稳。5% 及 95% 频率的年天然径流量分别为 337.0 亿

m^3 与 681.0 亿 m^3 。

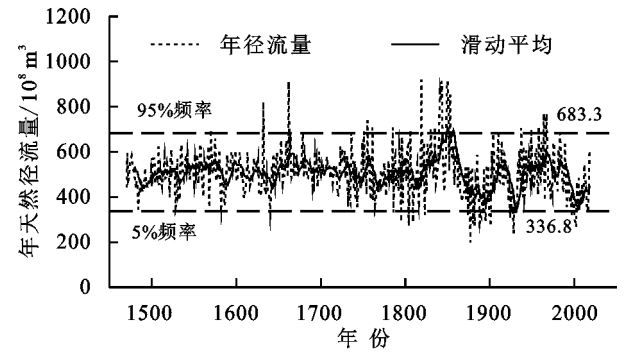


图 1 黄河年天然径流量变化过程

2.2 黄河天然径流量阶段性特征分析

年径流时间变化过程存在显著的持续性或阶段性,亦可称为赫斯特现象^[13]。年天然径流量距平累积曲线能够较好地反映年径流的丰、枯阶段的持续性特征。当距平累积曲线持续性升高(或降低)时,表明该时段内各年天然径流量大于(或小于)多年平均值,从而表征天然径流量的丰(或枯)^[14]。由图 2 可知,黄河 549 年的天然径流量距平累积在 1825 年时出现明显的转折,即 1825 年之前,累积距平表现为增加趋势,至 1825 年达到峰值,而之后累积距平逐渐递减,因此以 1825 年为界可分为 2 个时段。第 1 个时段即 15~19 世纪初的年天然径流量经历了 1480—1500 年(20 年)的枯水段及 1533—1577 年(44 年)及 1641—1681 年(40 年)的丰水段,但振荡相对平稳(图 1),期间平均年天然径流量为 509.8 亿 m^3 ,变差系数为 0.16 。该时期年天然径流量出现 $>95\%$ 频率的年份 13 年(其中 1662 年及 1819 年高达 910 亿 m^3 以上), $<5\%$ 频率的年份为 6 年(其中 1795 年、1804 年及 1809 年不足 300 亿 m^3)。第 1 时段在气候变化上称为小冰期(一般指 1550—1850 年),因其大部分时间与明清两代吻合,亦称为明清小冰期。该时期气候整体表现为冷湿特征,期间亦有暖干及冷湿阶段交替。在小冰期,黄河天然径流量的变化与青藏高原及黄土高原气候干湿或暖干交替具有较为一致的反向对应关系,即冷的时段天然径流量亦少的特征^[15]。

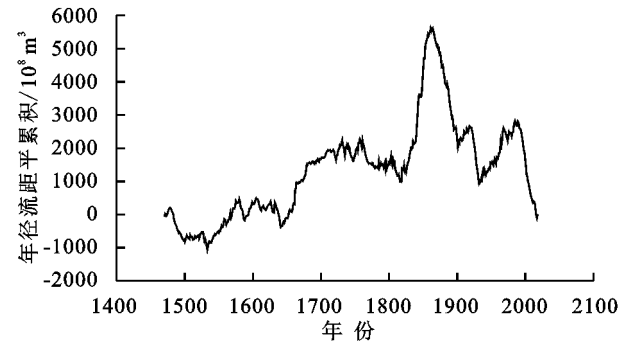


图 2 黄河天然径流量距平累积曲线

19 世纪以来黄河年天然径流量剧烈振荡(图 1、图 2),特别是 1818—1866 年(49 年)、1936—1991 年(55 年)持续丰水期,以及 1867—1907 年(40 年)、1926—1936 年(10 年)和 1992—2018 年(27 年)的枯水期。

2.3 黄河天然径流量周期性特征分析

天然径流量存在丰枯变化的周期特征。采用经验模态分解(EMD)方法对三门峡站 1470—2018 年的 549 年天然径流数据进行多尺度分析,得到 7 个本征模分量(IMF)及其最低频的分量(RES)(图 3)。表 1 为计算得出的各个分量的方差贡献率。由表 1 可知,7 个本征模分量(IMF)的累积方差贡献率达 99.9%,其中 IMF1 分量贡献率最大,为 36.57%,其次是 IMF2~IMF5 分量,其方差贡献率为 12%~15%,IMF7 分量贡献率最小,为 2.8%。因此,基于 EMD 方法,得到黄河年天然径流量变化的周期性规律,2.8 年变化周期最为显著,其次为(按方差贡献大小)23.8 年、47.3 年、5.6 年、11.3 年周期规律,各周期的方差贡献率差异不大;112.0 年周期再次,同时也存在 207.3 年的弱周期。

黄河天然径流量的周期变化受制于流域气候要素(降雨与气温)的周期性过程,与众多气候因子和气候波动存在一定的共振周期。区域降雨的时序波动变化受太阳黑子和大气环流异常因子影响。太阳黑子可改变区域辐射水平,引起水体蒸发变化以及水热平衡状态的改变,形成的暖湿气流改变大气中水分含量,导致水循环的改变,从而改变降水分布特征和区域水文循环过程^[16-17];大气环流异常因子可影响大气环流形势,通过干预水汽输送过程改变区域降水、蒸发等水文要素^[18]。相比于大气环流异常因子,太阳黑子对水文过程周期性的影响更为复杂,除造成“直接”影响,还可通过影响海水温度改变水汽输送,对大气环流异常因子也产生影响,从而“间接”影响降雨及蒸发等水气循环过程^[19]。大量研究^[20-21]已得出,太阳黑子及耀斑等活动存在公认的 11 年周期。该周期变化与本研究得出的 11.3 年周期相一致。大气环流异常因子厄尔尼诺现象存在 2~7 年的周期,青藏高原东部降雨也存在 3 年的周期,这与本研究所得出的天然径流量最显著的周期为 2.8 年契合^[22-24]。同时,2.8 年周期也与黄河多个径流站实测径流序列中普遍存在的周期相一致^[25]。此外,地极移动振幅变化存在 7 年左右的周期特征,与 IMF2 分量所表征的 5.6 年周期基本吻合。基于 EMD 的天然径流 IMF5~IMF7 分量的贡献率分别为 13.82%,8.02%和 2.82%,分别对应 47.3 年、112 年和 207.3 年的周期。由于这 3 个分量

对径流的贡献较小,所表征的周期特征并不能代表长序列水文主要周期特征。

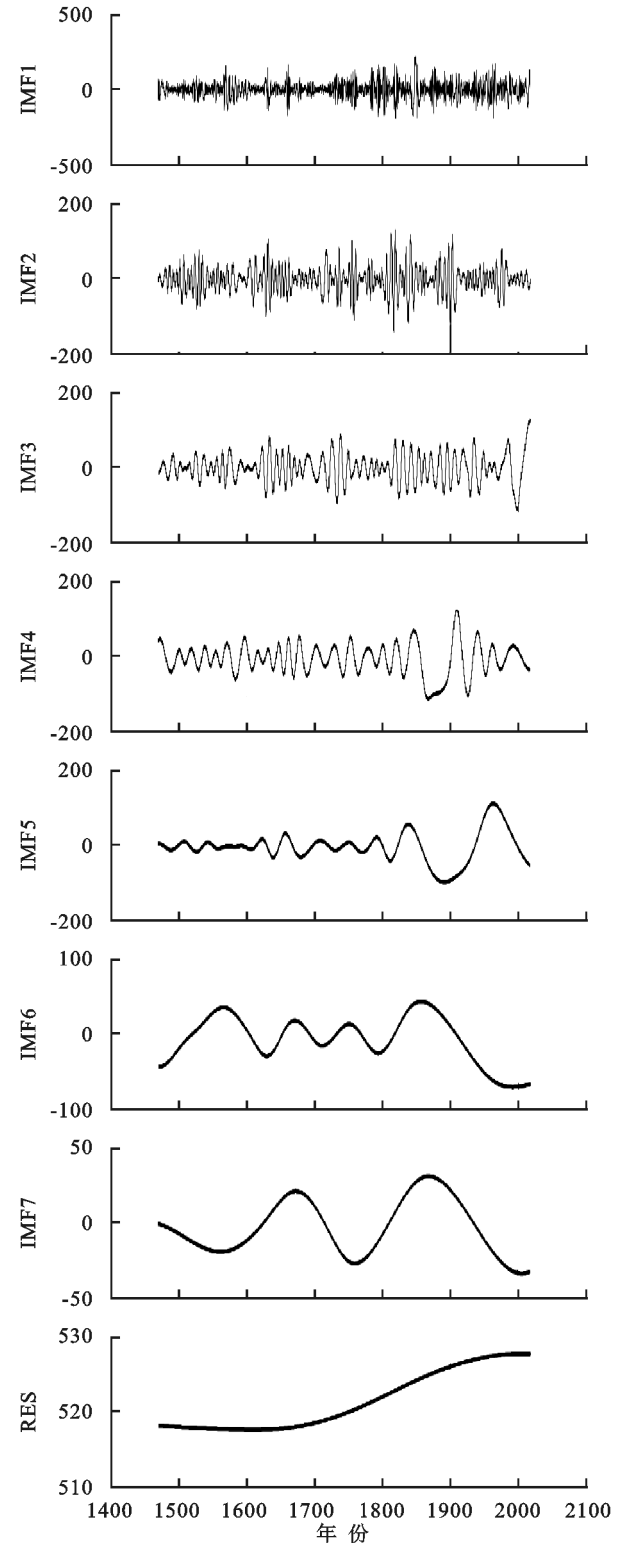


图 3 黄河 1470—2018 年天然径流时间序列 EMD 分解结果
表 1 黄河年天然径流量时间序列 IMF 分量及其方差贡献率

本征模 分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7
周期/年	2.8	5.6	11.3	23.8	47.3	112.0	207.3
贡献率/%	36.57	12.02	11.99	14.66	13.82	8.02	2.82
贡献率排名	1	4	5	2	3	6	7

3 结 论

(1)黄河年天然径流量变化过程具有显著的随机性特征,随年份不同呈现波动性变化。1470—1820 年间,天然径流量呈平稳波动状态,而 1820—1850 年间呈明显的上升趋势。

(2)近 500 年天然径流量变化过程以 1825 年为界分为 2 个时期:第 1 个时期的年天然径流量振荡相对较为平稳,相比之下,第 2 时期的天然径流量呈现较大的波动状态。

(3)黄河年天然径流量变化具有周期性规律,2.8 年变化周期最为显著,其次为(按方差贡献大小)23.8 年、47.3 年、5.6 年、11.3 年周期规律,各周期的方差贡献率差异不大。该周期与厄尔尼诺现象的周期以及地极移动振幅变化的周期相吻合。

参考文献:

[1] 龙腾锐,姜文超,何强.水资源承载力内涵的新认识[J].水利学报,2004,35(1):38-45.

[2] 陈敏建,王浩,王芳.内陆干旱区水分驱动的生态演变机理[J].生态学报,2004,24(10):2108-2114.

[3] 覃爱基.我国主要河流年径流序列相关系数的初步探讨[J].水文,1984(6):1-5.

[4] 周诚虎,汤奇成.河川径流动态变化规律研究新方法:二阶有序法[J].地理学报,1986,41(4):360-369.

[5] 张健,李同昇,张俊辉,等.1933—2012 年无定河径流突变与周期特征诊断[J].地理科学,2016,36(3):475-480.

[6] 吴东杰,王金生,滕彦国.小波分解与变换法预测地下水位动态[J].水利学报,2004,35(5):39-45.

[7] 李占杰,鱼京善.黄河流域降水要素的周期特征分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3):401-404.

[8] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of Royal Society,1998,454:903-995.

[9] 朱晓原,张学成.黄河水资源变化研究[M].郑州:黄河水利出版社,1999.

(上接第 64 页)

[23] 罗党,刘思峰,党耀国.灰色模型 GM(1,1)优化[J].中国工程科学,2003,5(8):50-53.

[24] 王正新,党耀国,刘思峰.GM(1,1)模型时间响应函数的一种优化方法[C]//2006 年灰色系统理论及其应用技术会议论文集.北京:中国优选法统筹法与经济数学研究会,2006:344-349.

[25] 胡大红.参数和背景值同时优化的 GM(1,1)模型[J].

[10] 李春晖.黄河流域地表水资源可再生性评价[D].北京:北京师范大学,2003.

[11] 王国安,史辅成,郑秀雅,等.黄河三门峡水文站 1470—1918 年年径流量的推求[J].水科学进展,1999,10(2):71-77.

[12] 曾雅兰,陈仕涛,杨少华,等.过去 640 ka 亚洲季风变化的多尺度分析[J].中国科学(地球科学),2019,5:116-126.

[13] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of American Society of Civil Engineers,1951,116:770-799.

[14] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):1-5.

[15] 吴永红.中国小冰期气候变化特征研究[J].长春师范学院学报(自然科学版),2012,32(2):74-82.

[16] 张蓓蓓,王朋,张辉,等.近 63 a 安康地区降水与太阳黑子活动的相关性分析[J].干旱区研究,2018,35(6):1336-1343.

[17] 夏军,石卫,雒新萍,等.气候变化下水资源脆弱性的适应性管理新认识[J].水科学进展,2015,26(2):279-286.

[18] 李夫星,陈东,汤秋鸿.黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系[J].水科学进展,2015,26(4):481-490.

[19] 黄生志,杜梦,李沛,等.变化环境下降雨集中度的变异与驱动力探究[J].水科学进展,2019,30(4):496-506.

[20] 杨建平,丁永建,等.长江黄河源区水文和气象序列周期变化分析[J].中国沙漠,2005,25(3):351-355.

[21] 陈仁升,康尔泗,张济世.小波变换在河西地区水文和气候周期变化分析中的应用[J].地球科学进展,2001,16(3):339-345.

[22] 桑燕芳,王中根,刘昌明.小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J].地理科学进展,2013,32(9):1413-1422.

[23] 金双彦,贾新平,蒋昕晖.三门峡站天然年径流量周期性分析[J].人民黄河,2005,27(12):33-35,82.

[24] 沈楠,李春晖.黄河流域近 500 多年来径流量演变特征[J].水资源与水工程学报,2009,20(5):37-40.

[25] 刘昌明,成立.黄河干流下游断流的径流序列分析[J].地理学报,2000,55(3):257-265.

湖北文理学院学报,2013,34(11):18-21.

[26] Zhou P, Wei Y. The data processing method based on a kind of new GM (1, 1) model[C]// Proceeding of 2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services. Nanjin: IEEE, 2007(11):18-20.

[27] 张善余,程胜余.洪涝灾害的灰色预测[J].水文,2000,20(2):23-25.