

不同频率黄河上中游径流量变化特征及其趋势预测

贾昊¹, 穆兴民^{1,2}, 赵广举^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 孙文义^{1,2}

(1.西北农林科技大学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;

2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 水资源是影响黄河流域高质量发展的战略资源, 在人类活动及气候作用影响下, 黄河上中游径流发生极大的变化, 因此研究黄河径流变化特点及其预测对水资源的合理开发和分配调控具有重要生产意义。对黄河潼关水文站实测 1950—2018 年径流量进行分析, 通过 M—K 等方法分析了黄河上中游区径流量变化特征, 并预测未来 20 年不同频率径流量变化趋势。结果表明: 黄河上中游 1950—2018 年径流量呈极显著性减少趋势; 黄河潼关水文站径流变化突变点位于 1985 年, 减少趋势较之前显著增加; 通过优化后的 GM(1, 1) 模型对 5% 及 95% 频率径流量进行预测, 表明未来 20 年的径流量变化为 113.38~210.35 亿 m³, 并持续减少趋于稳定; 该优化模型对黄河潼关水文数据有较好的模拟结果, 适用于频率优化后低递减水文长序列的预测。

关键词: 黄河径流量; 优化 GM(1, 1) 预测模型; 频率径流量

中图分类号: TV882.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2020)06-0060-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.009

Variation Characteristics and Trend Prediction of Runoff in the Upper and Middle Yellow River with Different Frequencies

JIA Hao¹, MU Xingmin^{1,2}, ZHAO Guangju^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, SUN Wenyi^{1,2}

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

Abstract: Water resources are strategic resources that affect the high-quality development of the Yellow River Basin. Under the influence of human activities and climate, the runoff in the upper and middle reaches of the Yellow River has undergone changes greatly. Therefore, the variation characteristics of the runoff in the Yellow River and their prediction have great importance on the rational development, allocation and regulation of water resources. This study used the runoff data measured from 1950 to 2018 at the Tongguan station of the Yellow River to analyze the characteristics of runoff changes in the upper and middle reaches of the Yellow River by M—K and other methods. The change trends of runoff at different frequencies in the next 20 years were also predicted. The results showed that the runoff in the upper and middle reaches of the Yellow River decreased significantly from 1950 to 2018; the runoff changing point of the Tongguan station of the Yellow River was located in 1985, and the decreasing trend was significantly higher than before; through the optimized GM (1, 1) model, 5% and 95% frequency runoff predictions indicated that the runoff change in the next 20 years would be 113.38 to 210.35 billion m³, and it would continue to decrease and stabilize; this optimized model had good simulation results for the Tongguan hydrological data of the Yellow River and was suitable for frequency optimized prediction of long sequences of low decreasing hydrology.

Keywords: Yellow River runoff; optimized GM (1, 1) prediction model; frequency runoff

黄河被誉为中华民族的母亲河, 其上中游是我国径流水资源严重短缺的流域之一^[1]。自 20 世纪 70 年代以来, 国家加大了黄河流域水利水保工程建设, 在人为因素和环境变化的影响下, 黄河上中游的径流

量呈现显著的降低趋势, 尤其是 20 世纪 90 年代断流态势极为严重^[2]。对于黄河上中游径流变化及减少的原因, 赵广举等^[3] 研究指出, 黄河中游径流量呈显著减少趋势, 且水利工程建设、水土保持措施等是黄

收稿日期: 2020-05-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41271295); 黄河流域河道淤积采砂对黄河水沙变化 (K3010216019)

第一作者: 贾昊 (1995—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事流域管理研究。E-mail: 849507955@qq.com

通信作者: 穆兴民 (1961—), 男, 陕西华阴人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持、生态水文研究。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

河中游径流变化的主要原因;Gao等^[4]采用双累积曲线等方法研究了黄河中游河龙区间的干流径流量变化及其驱动力认为,人类活动在减少河川径流方面发挥了重要的作用;穆兴民等^[5]分析了黄河上中游陕县站1919—1997年天然径流量指出,黄河径流量年际变化具有明显的阶段性和周期性,并且预测2010年天然径流量开始恢复到多年平均水平;李二辉等^[6]分析了黄河中上游1919—2010年径流量指出,自1985年以来径流呈显著减少趋势,人类活动是径流量减少的主要因素。近年来,随着黄河流域的生态治理,国家提出对黄河流域生态保护及高质量发展的要求,有必要对新形势下黄河上中游径流量变化特征及未来变化趋势进行更清晰地认识。本文以黄河潼关水文站1950—2018年的年径流量数据为依据,采用频率曲线优化及灰色预测方法,分析黄河上中游区径流量变化特征,预测黄河未来20年的年径流量,以期为黄河上中游未来生态保护及流域水资源开发提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究水文站选择黄河上中游流域的把口站潼关水文站。潼关水文站位于黄河中游流域出口,站点集水区面积68.22万km²,占黄河流域面积的91%,其控制区域包括了黄河流域的主要汇水区域。站点控制区域内地形地貌差别大,从西到东横跨青海高原、内蒙古高原和黄土高原,气候以干旱与半干旱气候区为主,降水分布不均匀。黄河潼关水文站径流量资料来源于黄土高原科学数据中心^[7]。研究区概况见图1。

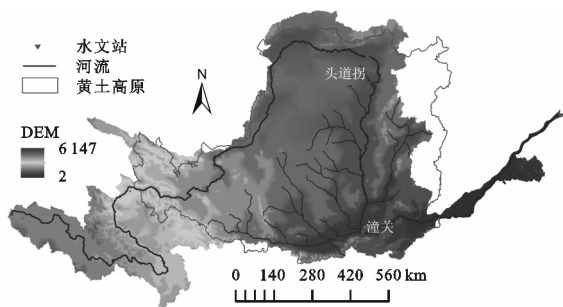


图1 研究区概况

1.2 数据分析

1.2.1 径流量年际变化趋势检验方法 Mann-Kendall秩次相关趋势检验法(简称M-K检验法)是探究水文变量时间序列变化趋势的常用方法^[8-9]。该方法不考虑样本序列的分布特征,且对波动幅度大的样本不会造成影响,能较好地揭示时间序列的变化趋势^[10-12]。当M-K方法检验的统计量(Z值)为正值,表明序列呈增加趋势,如果为负值则呈减小趋势。显著水平0.05时检验临界值为±1.96,显著水平0.01时为±2.58^[13]。

Pettitt突变检验是1979年由Pettitt^[14]建立的一种以时间序列趋势性变化为基础,通过检验时间序列要素均值变化来确定跃变变化时间的非参数检验方法,与M-K方法相结合以确定水文要素变化跃变时间。

1.2.2 年径流量变化阶段辨析方法 通过距平累积法辨析径流量的年际变化阶段特征。该方法基于每年径流量距平,通过年序累加得到距平累积序列,其计算公式为^[5,15]:

$$\text{SUMR}_i = \sum_{j=1}^i (R_j - \bar{R}) \quad (1)$$

式中:SUMR_i为第i年的距平累积值;R_i为第i年的径流量; \bar{R} 为径流量的多年平均值。

根据距平有正负的特点(持续期为5年),将其分为3类:当距平累积值不断增大,表明该时段内水文要素距平持续为正,即为丰水期;当距平累积值持续不变时,表明该时段内水文要素距平保持平均,即为平水期;当距平累积持续减小时,表明该时段内水文要素距平为负,即为枯水期。

1.2.3 不同频率下径流量频率值计算方法 在水文要素计算中,频率值表示等于或大于某一变量可能出现的次数,或表示大于或等于某一变量出现次数与总次数的比值,通常以百分数表示^[16]。例如P=5%,表示大于或等于某数量的出现机会为5%。由于实测径流量年际变化剧烈,且随机性较大,不易预测。本文通过计算不同频率曲线下实测年径流量的频率流值,对不同频率曲线下的频率径流值进行模型预测,以降低原始序列的波动性,提高预测精度。以5%频率曲线下实测年径流量的频率径流值计算^[17]为例:

(1)将实测径流序列的第1~10个值视为第1组数据,分别计算出这组数据5%频率下的R_p,将其分别作为5%频率下序列的第1个原始序列值;其中R_p计算方法为:

$$R_p = K_p \times \bar{R} \quad (2)$$

式中:R_p为P概率下的径流量;K_p为模比系数; \bar{R} 为每年径流量的平均值。模比系数K_p基于离差系数(C_v)、偏态系数(C_s)通过皮尔逊曲线表得到:

$$C_s = \frac{E(R - \bar{R})^3}{\sigma^3} \approx \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{(n-3)C_v^3} \quad (3)$$

(2)将实测径流序列的第2~11个值视为第2组数据,分别计算5%频率下的R_p,作为5%频率序列的第2个值。依次类推,求得5%频率年下的频率径流量序列。95%频率曲线下频率径流值序列计算方法相同,将其作为优化灰色理论GM(1,1)模型的原始数列R5(0)及R95(0)进行预测。

1.2.4 优化灰色理论GM(1,1)模型 灰色理论GM(1,1)模型是由邓聚龙^[18-19]和傅立^[20]于20世纪70

年代末提出的一种使用单个变量进行预测的一阶微分方程模型。GM(1,1)微分方程模型其时间响应函数近似于指数规律,进行累减还原后得到预测数据。由于对误差和精度的要求越来越高,许多学者^[21-24]对邓聚龙^[18-19]和傅立^[20]的 GM(1,1)模型进行了优化。本文采用胡大红^[25]的优化灰色预测模型,按照时间序列分别对 R5(0)及 R95(0)序列进行累加,获得新的原始数据序列,进一步弱化原始数列的随机性,时间序列累加次数越多,随机性弱化越明显,规律性越强^[22-23],对实测年径流量进行不同频率处理构建优化 GM(1,1)预测模型。其建模步骤为:

(1)将每个频率下的数值作为原始数据数列,设原始数列 $X^{(0)}(i) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(i)\}$ 。式中: $X^{(0)}(i)$ 为第 i 时刻的原始数据的 X 数值,并且该数值非负数。构造累加生成序列,对原始数据进行一次累加, $x^{(1)}(k) = \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k)$, 生成一阶累加数列。

(2)背景值 $z^{(1)}(k)$ 计算方法^[26]为: $z^{(1)}(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{\ln \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k-1)}} + x^{(1)}(k) - \frac{x^{(0)}(k)^2}{x^{(0)}(k) - x^{(0)}(k-1)}$ ($k = 2, 3, \dots, n$)。

(3)根据背景值,通过最小二乘法,求出发展系数 a ^[18]:

$$a = \frac{\sum_{k=2}^n z^{(1)}(k) \sum_{k=2}^n x^{(0)}(k) - (n-1) \sum_{k=2}^n z^{(1)}(k) x^{(0)}(k)}{(n-1) \sum_{k=2}^n z^{(1)}(k)^2 - (\sum_{k=2}^n z^{(1)}(k))^2} \quad (4)$$

(4)设灰色微分方程 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$, 其时间响应式的还原值为 $\hat{x}^{(0)}(k) = ce^{-ak}$ ($k = 2, 3, \dots, n$), $P = \sum_{k=2}^n [x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)]^2$, 则 c 值为:

$$c = \frac{\sum_{k=2}^n x^{(0)}(k) e^{-ak}}{\sum_{k=2}^n e^{-2ak}} \quad (5)$$

证: 设 $\hat{x}^{(0)}(k) = ce^{-ak}$, $P = \sum_{k=2}^n [\hat{x}^{(0)}(k) - x^{(0)}(k)]^2 = \sum_{k=2}^n [ce^{-ak} - x^{(0)}(k)]^2$, 则 $P' = 2 \sum_{k=2}^n [ce^{-ak} - x^{(0)}(k)]^2 e^{-ak} = 2c \sum_{k=2}^n e^{-2ak} - 2 \sum_{k=2}^n x^{(0)}(k) e^{-ak} = 0$, 假设成立。

(5)确定参数 a, c 后,得到模型方程 $\hat{x}^{(0)}(k) = ce^{-ak}$ ($k = 2, 3, \dots, n$)

1.2.5 模型检验 本文通过后验差检验与小误差概率检验相结合对所建立的模型进行检验。后验差检验是通过分析残差的分布统计特性进行检验,是较为通用、精度较高的检验方法^[27]。预测模型的精度通过残差和原数序列的方差比值(C)和小误差概率(p)

的数值共同决定。 C 与 p 的计算公式分别为:

$$C = \frac{S_2}{S_1} \quad (6)$$

$$p = \{ |q(k) - \bar{q}| < 0.6745 S_1 \} \quad (7)$$

式中: S_1 为初始序列 $X^{(0)}$ 的均方差; S_2 为残差的均方差; $q(k)$ 为残差; \bar{q} 为残差的平均值。

C 值越小,表明残差的方差越小,原始数列的方差越大,表明残差集中而原始数列分散。 p 越大,说明预测值分布比较均匀。对照精度检验等级参照表(表 1),进行综合评定模型精度。

表 1 精度检验等级参照

等级	预测精度	p	C
一级	好	>0.95	<0.35
二级	合格	>0.80	<0.50
三级	勉强	>0.70	<0.65
四级	不合格	≤ 0.70	≥ 0.66

2 结果与分析

2.1 黄河上中游径流量代际变化特征

黄河潼关水文站 1950—2018 年不同年代年径流量特征值差异显著(表 2)。1950—2018 潼关水文站年平均径流量为 334.2 亿 m^3 , 以 20 世纪 60 年代最大(451.0 亿 m^3), 21 世纪 00 年代最小(210.3 亿 m^3), 各年代径流量整体呈减少趋势。潼关水文站径流量变差系数和极值比亦具有相似特征, 表明该时期内径流量变化比较剧烈。

表 2 潼关水文站 1950—2018 年不同年代径流量特征

年代	均值/亿 m^3	变差系数	极值比
1950—1959	430.8	0.15	0.71
1960—1969	451.0	0.30	1.60
1970—1979	357.4	0.21	0.83
1980—1989	369.3	0.26	1.63
1990—1999	248.7	0.20	1.23
2000—2009	210.3	0.15	0.64
2010—2018	265.3	0.29	1.51
多年平均值	334.2	0.35	3.68

2.2 径流量年际变化的趋势及突变性

黄河潼关水文站的年径流量在年际波动中整体呈逐年减少趋势(图 2)。年径流量 M-K 检验统计量 $Z = -5.58$, 达到 0.01 的极显著水平, 说明径流量表现为降低趋势, 且年径流量线性趋势线斜率为 -3.9 , $R^2 = 0.43$ 。

Pettitt 检验结果表明, 潼关水文站的径流年际过程变化的突变点位于 1985 年(图 3)。图 3 表明, 在 99% 信度水平下, 突变点后 1986—2018 年期间平均流量(247.62 亿 m^3)较突变点前 1950—1984 年期间(413.62 亿 m^3)减少 40.1%。

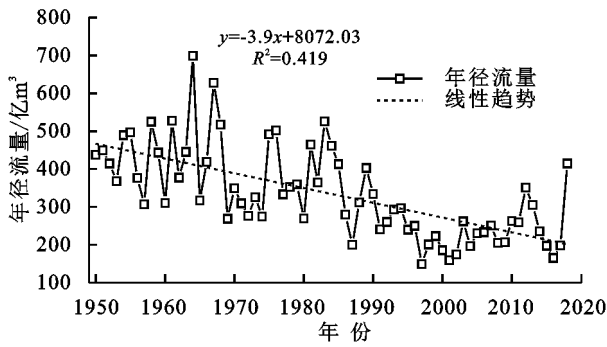


图 2 潼关水文站年径流量变化及其趋势

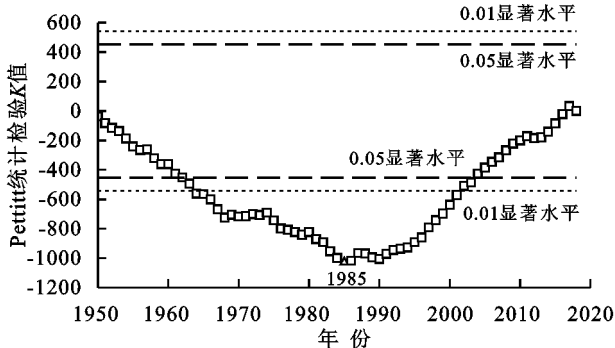


图 3 潼关水文站年径流量变化趋势 Pettitt 检验

2.3 黄河年径流量变化的阶段特征

黄河潼关水文站径流量年际变化在随机性及趋势性变化中表现出显著的丰平枯阶段性特征。由图 4 可知,黄河潼关水文站径流量变化过程可划分为 2 个阶段:1950—1985 年丰水期年段(累积曲线斜率变化为 75.56 亿 m³/a)和 1985—2018 年枯水期年段(累积曲线斜率变化为 -99.03 亿 m³/a)。枯水期的平均径流量(247.62 亿 m³)较丰水期(413.62 亿 m³)减少 40.1%。

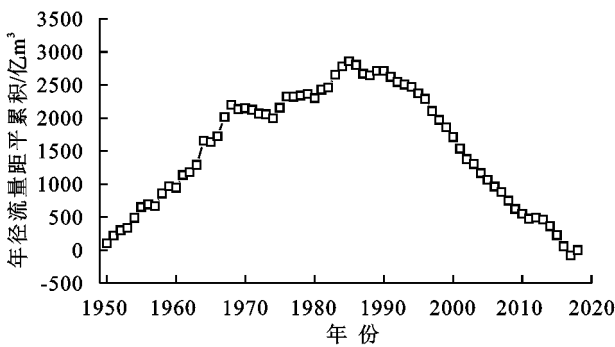


图 4 潼关水文站年径流量距平累积曲线

表 4 2014—2018 年实测径流量区间与模拟值区间

年份	实测径流量/亿 m ³	不同频率实测径流量/亿 m ³		不同频率模拟径流量/亿 m ³		相对误差/%	
		5%	95%	5%	95%	5%	95%
2014	235.1	347.86	182.82	304.41	154.15	12.5	15.7
2015	197.2	343.24	180.39	299.76	152.19	12.7	15.6
2016	165.0	243.70	175.46	295.17	150.25	21.1	14.5
2017	197.7	326.65	171.67	290.66	148.34	11.0	13.6
2018	414.6	407.27	158.24	286.22	146.46	29.7	7.4

不同频率模拟径流量与不同频率实测径流量的相对误差为 7.4%~29.7%。95%频率下的实测径流量与 95%频率下的模拟径流量的相对误差逐渐减

2.4 不同频率径流量趋势预测

2.4.1 模型建立 潼关水文站径流量年际变化过程与频率数据分布见图 5。5%和 95%的频率曲线将原本波动幅度较大的实测径流量数据变得平缓,且波动趋势相同;实测径流量在 2 条频率曲线范围之内。

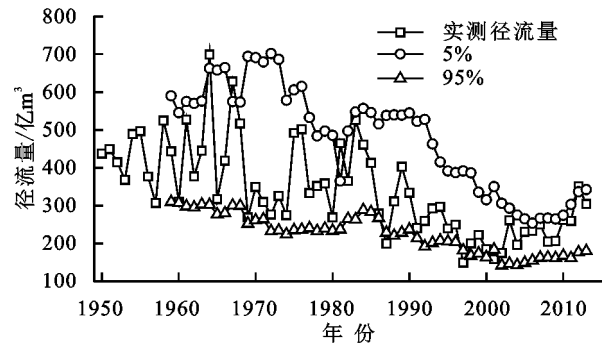


图 5 潼关水文站不同频率径流量年际变化过程

将 5%及 95%频率径流量作为原始序列,使用 MATLAB 软件进行公式(4)和公式(5)计算可得,5%频率下模型的 $a=0.0154$ 及 $C=721.0930$;95%频率下模型的 $a=0.0128$ 及 $C=315.6766$ 。其 GM(1,1)模型分别为:

$$X_{5\%}(t+1) = 721.0930e^{(-0.0154t)}$$

$$X_{95\%}(t+1) = 315.6766e^{(-0.0128t)}$$

2.4.2 模型评价及实测数据结果检验 采取后验差检验与小误差概率检验相结合的方法(其中 C 为后验差比值, p 为小误差概率),计算出 5%频率年径流量的实际值的平均数、方差,残差的平均数、方差、 C 值与 p 值,具体数值见表 3。

表 3 5%和 95%频率数据的检验结果

频率	实际平均值	实际值方差	残差平均值	残差方差	C	p
$R_{5\%(0)}$	479.50	137.109	-3.14	71.60	0.5	0.8
$R_{95\%(0)}$	225.28	50.520	0.11	21.38	0.4	0.9

对照表 1 可得,5%频率及 95%频率径流量预测模型属于二级合格。通过潼关水文站 2014—2018 实测年径流量(未纳入模型构建)实测数据进行模型检验(表 4)。

小,表明 95%频率下的模拟径流量与 95%频率下的实测径流量趋于一致。除去 2016 年受干旱原因和 2018 年受洪水原因导致的 5%频率的相对误差过高

之外,整体相对误差逐渐减小,表明模型的预测效果及精确度合格,优化后的灰色 GM(1,1)预测模型对黄河中上游潼关水文数据有较好的模拟结果,且适用于低递减水文长序列的预测。

2.4.3 未来不同频率径流量预测 黄河潼关水文站未来 2019—2038 年的年径流量变化区间为 113.38~210.35 亿 m^3 ,且持续减少趋于稳定(图 6)。整体年径流量变化区间宽度也逐渐变窄,表明未来潼关水文站年径流量逐渐趋于稳定。5%的频率曲线减少速率较大,说明未来潼关水文站年径流量最大值逐渐降低。

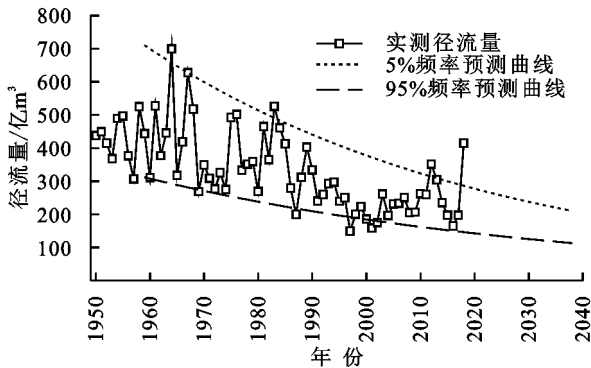


图 6 潼关水文站实测年径流量及不同频率预测区间

3 结论

本文通过以黄河中游下端的潼关水文站年径流量为依据,分析黄河 1950—2018 年径流量变化及其未来频率年径流量预测。黄河潼关站 69 年(1950—2018 年)多年平均径流量为 334.2 亿 m^3 ,M-K 检验统计量 $Z = -5.58$,表明径流量呈减少趋势;年径流量自 1985 年以来发生突变性减少,突变年后平均流量较突变年前减少 40.1%。黄河潼关站径流量年际变化表现出显著的丰枯阶段特征,可划分为丰水期(1950—1985 年)和枯水期(1985—2018)2 个阶段。利用优化后的灰色理论 GM(1,1)模型对经 5%,95%频率处理的频率年径流量序列进行模拟预测,对黄河干流年径流量未来变化趋势进行预测分析,表明该优化模型对黄河潼关水文数据有较好的模拟结果;黄河潼关站未来 20 年的年径流量区间为 113.38~210.35 亿 m^3 ,且会持续减少趋于稳定。优化后的灰色理论 GM(1,1)模型适用于频率优化后的低递减水文长序列的预测。

参考文献:

[1] 穆兴民.黄土高原生态水文研究[M].北京:中国林业出版社,2001.
 [2] 陈霁巍,穆兴民.黄河断流的态势、成因与科学对策[J].自然资源学报,2000,15(1):31-35.
 [3] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
 [4] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in stream

flow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15:1-10.

- [5] 穆兴民,李靖,王飞.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.
 [6] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,2014,25(2):155-163.
 [7] 黄土高原科学数据中心[EB/OL]. <http://loess.qeodata.cn/>
 [8] Lin L Y. An introduction to grey systems: Foundations, methodology and applications [M]. Grove City IIGSS Academic Publisher,1988:1-101.
 [9] Kisi O, Ay M. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of Kizilirmak River, Turkey[J].Journal of Hydrology,2014,513:362-375.
 [10] Zhao G J, Li E H, Mu X M, et al. Changing trends and regime shift of streamflow in the Yellow River basin[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2015,29(5):1331-1343.
 [11] 宋小燕.松花江流域水沙演变及其对人类活动的响应[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2010.
 [12] 高鹏.黄河中游水沙变化及其对人类活动的响应[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2010.
 [13] Gao P, Geissen V, Ritsema C J. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China[J].Hydrology and Earth Systemences,2012,17(3):961-972.
 [14] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J].Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics),1979,28(2):126-135.
 [15] 赵娟.基于 VAR 模型的典型流域水沙变化及其对降水与水土保持措施的动态响应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
 [16] 代昌龙,代稳.频率曲线在荆江三口输沙量计算中的应用[J].水利科技与经济,2017,23(4):24-27.
 [17] 宋松柏.水文频率计算研究面临的挑战与建议[J].水利与建筑工程学报,2019,17(2):15-21.
 [18] 邓聚龙.社会经济灰色系统的理论与方法[J].中国社会科学,1984(6):48-61.
 [19] 邓聚龙.本征性灰色系统的主要方法[J].系统工程理论与实践,1986(1):48-53.
 [20] 傅立.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1992.
 [21] 刘思峰,杨英杰,吴利丰.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2014.
 [22] 贾得海,曾建初.灰色系统理论 GM(1,1)预测模型的应用[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2013,38(6):115-120.

(下转第 69 页)

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学术会议论文集.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.
- [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.