

Long-Term Evolution in Natural Runoff of the Yellow River during the Past 550 Years

Bo Li¹, Xingmin Mu^{1,2}, Peng Gao^{1,2}, Guangju Zhao^{1,2}, Wenyi Sun^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi

²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi

Email: libo568364@163.com, *sunwy@ms.iswc.ac.cn

Received: Jun. 18th, 2019; accepted: Jul. 4th, 2019; published: Jul. 18th, 2019

Abstract

Long-term historical runoff analysis is the basis to understand the evolution of discharge in rivers. The Yellow River Basin is located in the semi-arid region in northern China, and has long been suffered from water scarcity. It is important to investigate the historical changes of natural runoff to regulate and utilize water resources. The present study applied the sliding average analysis, MK test and anomaly accumulation to analyze the changing trend and fluctuation, and used the Pettitt method to test the abrupt and Hurst index to evaluate the annual runoff with historical data of the Yellow River from 1470 to 2017. The results show that natural runoff has a significant downward trend. The time series remained strong persistence, indicating that the natural runoff still keeps decreasing in the future. During the research period, we found the most abundant natural runoff in the middle and late 19th century and late Qing Dynasty. Abrupt changes occurred in 1641, 1731, 1757, 1816, 1864 (1861), 1933, 1989. The long-term time series indicated that the Yellow River has experienced five abundant water periods, two normal stages and five dry periods, and will stay in dry condition in the future. Natural runoff showed a periodicity of 3~4 years examined by wavelet transform.

Keywords

Natural Runoff, Historical Analysis, The Yellow River

黄河近550年天然径流量演变特征

李 勃¹, 穆兴民^{1,2}, 高 鹏^{1,2}, 赵广举^{1,2}, 孙文义^{1,2*}

¹西北农林科技大学土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌

²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌

Email: libo568364@163.com, *sunwy@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 孙文义(1983-), 男, 汉族, 山西繁峙人, 副研究员, 主要研究方向为 GIS 与生态水文。

*通讯作者。

摘要

长历史序列径流量分析是深入认识河川径流演变特征的基础。黄河流域是我国水资源短缺地区，研究其天然径流量历史变化对流域水资源调控利用具有重要意义。本文基于黄河1470~2017年天然径流量数据，采用滑动平均法、MK趋势检验和距平累积等方法分析天然径流量变化趋势和阶段变化特征，运用Pettitt法检验突变性和Hurst指数评价天然径流量持续性，初步揭示黄河548年天然径流量历史演变规律。研究表明，黄河天然径流量整体为显著下降趋势，且存在较强持续性，在未来一段时间内将依旧保持减少趋势。在19世纪中后期即清中晚期，天然径流量最丰富且波动最剧烈。在1641、1731、1757、1816、1864 (1861)、1933、1989年出现较为明显的突变现象。1865~1989年和1990~2017年天然径流量较1470~1864年下降明显。黄河天然径流量多年来以平水年出现频率最大，平水年和丰水年以连续形式出现可能性较枯水年大。黄河天然径流量大致存在5个丰水期、2个平水期和5个枯水期，近些年来主要以枯水为主同时呈现3~4年的周期波动。

关键词

天然径流，历史分析，黄河

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄河是中华文明的发祥地，被誉为中华民族的摇篮。尽管黄河年天然径流量仅占全国径流量的2.1%，但它是我国西北、华北地区的重要水源。黄河天然径流量变化直接关系流域内及其沿黄地区的水资源管理和分配。

黄河水文水资源系统是一个非线性动力系统，探索其内部诸要素变化规律历来是人们关心的重大课题。长历史序列径流量变化能从大尺度分析河川径流量的演变特征，其序列的趋势与内在变化联系密切[1][2]。水利工程的修建，以及农业灌溉、城市生活、工业和乡镇人畜等用水量大幅度的增加对天然径流量序列变化影响较大。目前，关于黄河天然径流量演变特征方面的研究较多，但在径流量预测时很少考虑天然径流量的不确定性。沈楠等[1]研究三门峡1470~1998年天然径流量变化趋势和阶段变化特征；李春晖等[3]研究黄河流域三门峡站1919~1998年天然径流量突变特性；穆兴民等[4]利用黄河陕县站天然径流量资料，分析了1919~1997年黄河天然径流量年际变化的阶段性、周期性及其未来变化趋势；李二辉等[5]研究了1919~2010年黄河上中游区径流量演变过程并定量分析影响其变化因素的贡献率。随着人类活动和气候变暖，黄河径流及输沙量在21世纪后发生普遍未曾预料到的突兀性减小[6]。因此有必要站在历史的角度，认识和了解黄河天然径流量的演变特征。

目前研究较多采用线性趋势方法，或者仅给出整个时间序列的趋势，而不能就其趋势发生的起始时间和持续过程做以细致描述。为了揭示黄河天然径流量的变化过程和趋势，应该有长序列数据。本文利用黄河1470~2017年共548年天然径流量序列，采用多种统计学方法，试图探究天然径流量历史时期的演变特征。

2. 资料与方法

2.1. 资料

黄河经上中游地区特别是中游严重的水土流失之后，使下游河床抬升而成为举世闻名的地上“悬河”，下

游少有支流，且汇入黄河的水量有限。据 1950 年以来资料，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，本文采用三门峡水文站天然径流量表征黄河天然径流量变化。

王国安等[7]利用清代黄河报汛资料和《中国近五百年旱涝分布图集》等有关资料，推求出黄河三门峡站 1470~1918 年天然径流量系列，并把三门峡站 1919~1997 年实测期的资料组成 1470~1997 年长系列。通过摘录 1998~2017 年各年《黄河水资源公报》中天然径流量构成 1919~1997 年黄河流域天然径流量。

2.2. 研究方法

本文主要采用滑动平均法[1]削弱长时间序列中的短于滑动长度的周期，进而表征长时间序列年际变化特征；Mann-Kendall 法[8] (MK) 检验趋势；MK 突变检验[9]和 Pettitt 法[10]共同判别突变点；天然径流历时频率曲线[6]表征不同频率下天然径流量分布特征；Hurst 指数[11]结合趋势预测检验未来天然径流量变化特征；距平累积法[5]对天然径流量进行阶段性划分反映其丰枯持续性特征；采用 Matlab 小波分析工具箱中的 Morlet 小波为母函数对天然径流量时间序列进行周期分析，以反映其内在变化规律[12]。研究方法不再详细赘述，具体计算方法参见相对应文献。其中主要研究方法介绍如下：

2.2.1. 丰枯等级分类

根据《中国水资源评价》、《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)所指定的分类标准，年径流量丰枯变化的划分标准采用模比系数 K_i 值(表 1)。

Table 1. Standardization of runoff level [13]

表 1. 径流量丰枯等级划分标准[13]

分级	划分标准	状态
1	$1.20 < K_i$	丰水年
2	$1.10 \leq K_i < 1.20$	偏丰水年
3	$0.90 \leq K_i < 1.10$	平水年
4	$0.80 \leq K_i < 0.90$	偏枯水年
5	$K_i < 0.80$	枯水年

2.2.2. Hurst 指数

利用 R/S 分析法计算的 Hurst 指数可揭示不同时间范围内该序列趋势方向，进而实现对天然径流量序列的未来趋势预测。该方法判断规则如下：若 $0 < H < 0.5$ ，该序列具有反持续性，即将来变化趋势与过去变化趋势反向；若 $H = 0.5$ ，该序列具有随机性，服从布朗运动；若 $0.5 < H < 1$ ，该序列具有持续性，即将来变化趋势与过去变化趋势同向[8]。结合 Hurst 指数和 MK 趋势检验结果共同判别天然径流量未来变化特征。

3. 结果与分析

3.1. 黄河天然径流量年际变化过程与特征

3.1.1. 黄河天然径流量年际变化特征

黄河天然径流量整体呈现随机波动下降趋势，但在 19 世纪之前其变幅相对较小(图 1)。黄河多年平均径流量为 506.5 亿 m^3 ，最大径流量(919.0 亿 m^3)是最小径流量(200.0 亿 m^3)的 4.6 倍。天然径流量的偏态系数、峰度系数和变异系数分别为 0.6、2.2 和 0.2，天然径流量呈正偏分布，且分布较集中，年际变化较大。采用 MK 法计算得到 Kendall 系数为 -2.37，该长系列呈下降趋势，并达到极显著水平($P < 0.01$)。20 世纪 90 年代之后的径流量减少，且持续处于周期变化的波动下降阶段。

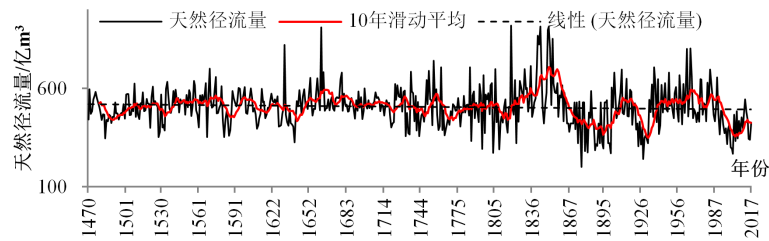


Figure 1. Interannual variation process of natural runoff of the Yellow River
图 1. 黄河天然径流量年际变化过程

黄河天然年径流量世纪间差异明显(表 2)。黄河天然径流量在 17 世纪达到最大(519.5 亿 m^3)，而 21 世纪初最小(404.4 亿 m^3)，约为 17 世纪的 78%。其极值比和变异系数均在 19 世纪最大，分别为 4.60 和 0.30，表明 19 世纪清中晚期天然径流量变化差异较显著且变化剧烈。尤其是 21 世纪初期，天然径流量距平百分比和变化率最大，分别达到-20.2%和-19.5%。从各世纪间极值比和变异系数来看，黄河天然径流量变动范围分别为 1.72~4.60 和 0.11~0.30，19 世纪以来变异系数较大，天然径流量变化波动均较为剧烈。

从元末到清初，中国历史气候进入明清小冰期时期[14]，19 世纪以来中国旱涝出现干旱化趋势，清代初期和中后期水灾、旱灾同时高发[15]。20 世纪 70 年代流域气候进入暖干化，水量减少剧烈[16]。中国历史经济重心转移、人类滥砍滥伐、黄河筑堤[17]、战乱不断、社会动荡、改革开放以后治河活动加剧、人口膨胀和经济迅猛发展等因素也影响流域内天然径流量变化。

Table 2. Variation characteristics of natural runoff of the Yellow River in centuries
表 2. 黄河天然径流量世纪间变化特征

时段系列	时段	平均值/亿 m^3	距平/%	变化率/%	最大值 (年份)	最小值 (年份)	极值比	变异系数	历史时期
15 世纪末期	1470~1500	479.8	-5.3		594.3 (1471)	344.7 (1484)	1.72	0.11	明朝中期
16 世纪	1501~1600	518.0	2.3	8.0	698.9 (1570)	352.0 (1568)	1.99	0.14	明朝中末期
17 世纪	1601~1700	519.5	2.6	0.3	910.0 (1662)	326.7 (1640)	2.79	0.15	明末清初
18 世纪	1701~1800	505.2	-0.2	-2.8	740.0 (1755)	292.0 (1795)	2.53	0.17	清中期
19 世纪	1801~1900	513.1	1.3	1.6	919.0 (1819)	200.0 (1877)	4.60	0.30	清中晚期
20 世纪	1901~2000	502.1	-0.9	-2.1	802.6 (1967)	241.4 (1928)	3.32	0.23	晚清 - 中华民国 - 中华人民共和国
21 世纪初期	2001~2017	404.4	-20.2	-19.5	544.4 (2012)	267.2 (2002)	2.04	0.19	中华人民共和国
多年平均	1470~2017	506.5			919.0 (1819)	200.0 (1877)	4.60	0.20	

3.1.2. 黄河天然径流量年际突变跳跃特征

黄河天然径流量年际过程具有突变性(图 2(a))。天然径流量在 1864 年出现突变点，且达到极显著水平。另外，从图中可以看出在 1641、1731、1757、1816、1933、1989 年出现较为明显的转折现象。由 MK 突变检验得出 1989 年出现突变交叉点(图 2(b))。U_F 值总体为波动下降趋势，尤其在 1861 年之后，U_F 值减小的愈发明显，说明 1861 年之后，黄河天然径流量呈现明显减少趋势。

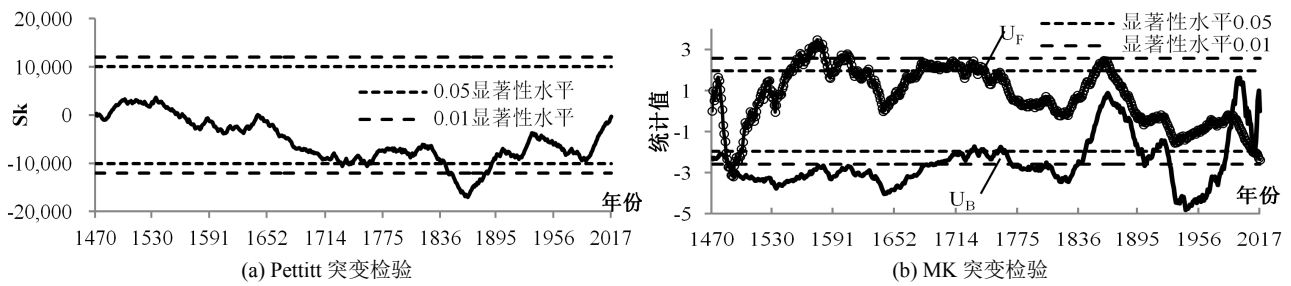


Figure 2. Yellow River natural runoff Pettitt Mutation Test and MK Mutation Test
图 2. 黄河天然径流量 Pettitt 突变检验(a)和 MK 突变检验(b)

3.1.3. 黄河天然径流量不同时期径流量差异

黄河不同时期天然径流量基本呈现下降趋势。在同一频率下，世纪间天然径流量频率曲线都呈现出呈现波动状态，变幅不明显(图 3)。分析不同时期频率下天然径流量的减少量并对其进行量化(表 3)。典型频率 5%、50% 和 95% 在世纪间天然径流量减少百分率分别-26.8%~21.6%、-11.4%~7.1%和-8.8%~20.5%。对比突变年份前后不同时期典型频率下黄河天然径流量，天然径流量随时间变化呈现下降趋势。在不同频率下，1865~1989 年和 1990~2017 年天然径流量变幅均大于 1470~1864 年；与 1470~1864 年相比，1865~1989 年和 1990~2017 年天然径流量较 1470~1864 年显著下降，低频率和高频率部分天然径流量减少幅度较小，减少百分率为 23.7%~41.9%。降水贫乏、补充河道径流、植被截留和土壤下渗等原因导致河流径流量减少和波动状况[5]。

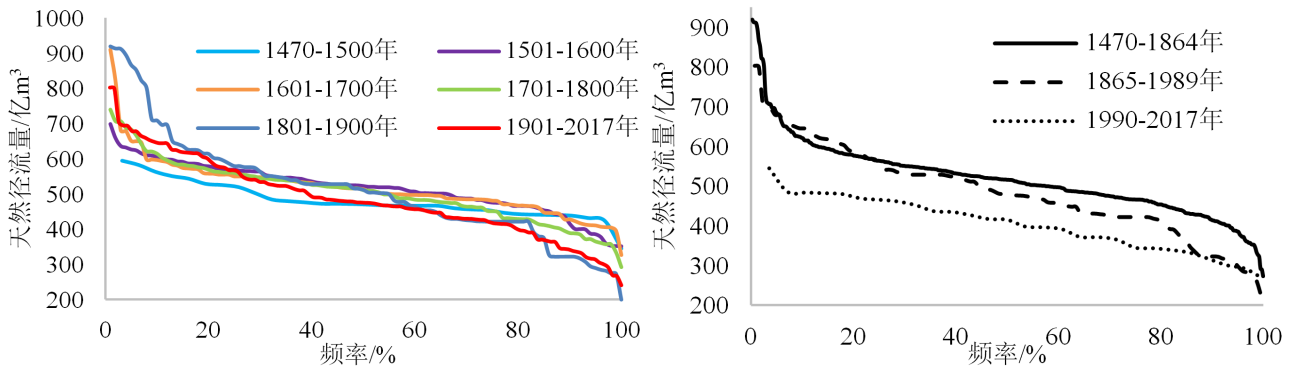


Figure 3. Frequency curves of natural runoff of the Yellow River in the early and late periods of centuries and sudden years
图 3. 黄河天然径流量世纪间和突变年份前后时期频率曲线

Table 3. Characteristics of the typical frequency of the natural runoff of the Yellow River in different periods
表 3. 黄河天然径流量典型频率不同时期变化特征

频率/%	不同世纪天然径流量/亿 m ³						突变年份前后天然径流量/亿 m ³		
	1470~1500	1501~1600	1601~1700	1701~1800	1801~1900	1901~2017	1470~1864	1865~1989	1990~2017
5	582.2	626.8	652.2	684.0	867.0	680.0	684.0	516.2	372.0
减少百分率	-	-7.7	-4.1	-4.9	-26.8	21.6	-	24.5	38.8
50	469.2	522.9	514.2	511.1	512.4	476.0	680.0	478.0	295.0
减少百分率	-	-11.4	1.7	0.6	-0.3	7.1	-	29.7	62.0
95	431.5	386.1	411.1	365.0	290.0	315.4	544.4	415.3	292.6
减少百分率	-	10.5	-6.5	11.2	20.5	-8.8	-	23.7	41.9

3.2. 黄河天然径流量丰枯特征

3.2.1. 黄河天然径流量丰枯年频率特征

对黄河天然径流量丰枯状态进行划分(表 4), 丰水年出现 67 次, 占 12.2%; 偏丰水年出现 72 次, 占 13.1%; 平水年出现 256 次, 占 46.7%; 偏枯水年出现 82 次, 占 15.0%; 枯水年出现 71 次, 占 13.0%。

Table 4. The basic situation of the natural runoff level of the Yellow River

表 4. 黄河天然径流量丰枯等级基本情况

丰枯等级	丰枯类型	平均径流量/亿 m ³	年数/次	出现频率/%
1	丰水年	690.4	67	12.2
2	偏丰水年	580.1	72	13.1
3	平水年	506.4	256	46.7
4	偏枯水年	431.0	82	15.0
5	枯水年	345.5	71	13.0

对不同世纪各级丰枯等级频率特征进行分析(表 5), 自 17 世纪以来, 丰水年出现年数占其总丰水年数(出现频率)逐世纪递增, 至 20 世纪达到 31.3%, 于 21 世纪初期(2001~2017 年)并未出现丰水年; 16 世纪偏丰水年达到最大频率为 29.2%, 并逐世纪呈减少趋势, 于 2001~2017 年期间未出现偏丰水年; 16 至 17 世纪, 平水年出现次数 54 年和 63 年, 频率较高, 分别达到 21.1%和 24.6%, 自 18 至 21 世纪, 平水年出现频率保持在 2.0%~18.8%; 18 世纪以来, 枯水年和偏枯水年出现频率逐渐增加, 19、20 世纪分别介于 20.7%~25.6%和 23.9%~25.4%范围之内, 且枯水年和偏枯水年于 2001~2017 年出现年数分别为 4 年和 8 年。分析近 100 年、近 50 年、20 世纪以来及近 10 年天然径流量系列, 枯水年和偏枯水年分别出现了 44 次、25 次、13 次和 7 次, 占比分别达 44%、50%、72%和 70%, 可见黄河近年来主要以枯水年占比最多。

Table 5. Frequency characteristics of rich and dry grades in different centuries

表 5. 不同世纪各级丰枯等级频率特征

世纪	时段	1 级		2 级		3 级		4 级		5 级	
		年数/次	频率/%	年数/次	频率/%	年数/次	频率/%	年数/次	频率/%	年数/次	频率/%
15	1470~1500	0	0.0	3	4.2	19	7.4	8	9.8	1	1.4
16	1501~1600	9	13.4	21	29.2	54	21.1	6	7.3	10	14.1
17	1601~1700	7	10.4	14	19.4	63	24.6	13	15.9	3	4.2
18	1701~1800	10	14.9	15	20.8	48	18.8	13	15.9	14	19.7
19	1801~1900	20	29.9	10	13.9	31	12.1	21	25.6	18	25.4
20	1901~2000	21	31.3	9	12.5	36	14.1	17	20.7	17	23.9
21	2001~2017	0	0.0	0	0.0	5	2.0	4	4.9	8	11.3

丰水年和偏丰水年称为丰水年; 枯水年和偏枯水年称为枯水年。分析黄河天然径流量连续丰平枯年频率特征(表 6), 平水年出现比例较丰水年和枯水年多, 主要以连续平水年形式出现, 256 年平水年中连平年出现 60 次, 连平年出现概率达 23.4%, 连丰和连枯出现年数分别为 34 次和 28 次, 其连续年数在总年数占比分别为 24.5%和 18.3%, 说明丰水年以连续多年出现可能性较大。连平年数主要集中在 2 年、3 年、4 年和 8 年, 出现频次分别达到 30 次、10 次、13 次和 3 次, 连平出现最长序列为 12 年(1708 年~1719 年)和 13 年(1665 年~1677 年)。连丰连枯年数基本集中在 2 年、3 年、4 年、5 年, 连丰 3 年、4 年、5 年出现次数基本与连枯持平, 连丰 2 年较

连枯多 12 次, 连枯出现 2 年、3 年以上频率占连枯总年份的 28.6%, 连丰出现 2 年、3 年以上频率占连丰年份的 8.8%。连枯出现最长序列分别为 9 年(1994 年~2002 年)和 11 年(1922 年~1932 年)。

Table 6. The frequency characteristics of the continuous runoff of the natural runoff of the Yellow River (Unit: times)

表 6. 黄河天然径流量连续丰平枯年频率特征(单位: 次)

出现次数	2 年	3 年	4 年	5 年	6 年	7 年	8 年	9 年	11 年	12 年	13 年	连续总次数	总年数	连续次数占比/%
连丰	23	8	1	2	-	-	-	-	-	-	-	34	139	24.5
连平	30	10	13	1	1	-	3	-	-	1	1	60	256	23.4
连枯	11	9	1	3	1	1	-	1	1	-	-	28	153	18.3

3.2.2. 黄河天然径流量年际变化阶段性特征

黄河天然径流量变化具有明显阶段性特征(图 4)。黄河天然年径流量周期性变化显著, 变化过程存在明显的丰-枯周期转化, 主要有 5 个丰水段、2 个平水段和 5 个枯水段(表 7)。距平累积曲线坡度反映径流量的丰枯强度。丰水段、平水段和枯水段时期累积斜率变化分别处于 28.8~116.0 亿 m^3 、-0.8~3.9 亿 m^3 和 -9.3~-120.4 亿 m^3 变化范围。各阶段极值比和变异系数分别处于 1.55~2.94 和 0.12~0.24 范围内, 较为剧烈。19 世纪中后期, 丰水段(1819~1864 年)和枯水段(1865~1901 年)两个时段内天然径流量变化最强烈。丰枯变化的分析结果与上述检测到的突变点发生时间基本吻合, 进一步证明检测到的突变点的合理性。

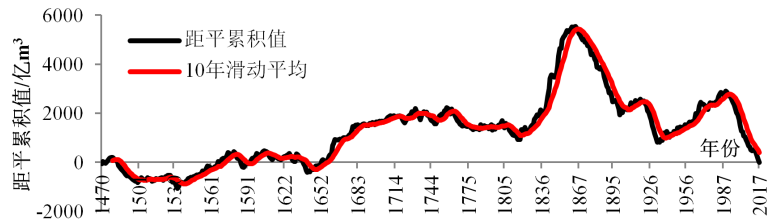


Figure 4. Accumulation process of natural runoff anomalies in the Yellow River

图 4. 黄河天然径流量距平累积过程

Table 7. Stage characteristics of natural runoff of the Yellow River

表 7. 黄河天然径流量阶段性特征

阶段	阶段特征	年数	平均值/亿 m^3	最大值	年份	最小值	年份	极值比	变异系数
1478~1533	枯水段	56	484.1	624.2	1508	344.7	1484	1.8	0.12
1534~1580	丰水段	47	538.6	698.9	1570	352.0	1568	2.0	0.12
1581~1641	平水段	61	492.4	820.0	1632	326.7	1640	2.5	0.16
1642~1718	丰水段	77	536.5	910.0	1662	444.0	1696	2.0	0.12
1719~1761	平水段	43	512.7	740.0	1755	357.0	1732	2.1	0.20
1762~1818	枯水段	57	484.6	707.0	1785	273.0	1804	2.6	0.19
1819~1864	丰水段	46	607.0	919.0	1819	322.0	1823	2.9	0.24
1865~1901	枯水段	37	408.8	587.0	1885	200.0	1877	2.9	0.24
1902~1921	丰水段	20	535.1	695.0	1910	415.7	1919	1.7	0.15
1922~1932	枯水段	11	352.5	430.3	1925	241.4	1928	1.8	0.16
1933~1993	丰水段	61	536.9	802.6	1967	365.2	1991	2.2	0.18
1994~2017	枯水段	24	395.1	544.4	2012	267.2	2002	2.0	0.18

根据天然径流量划分标准进一步分析黄河天然径流量丰水段和枯水段各段丰枯变化特征(表 8)。其中, 丰水段的平均持续时间为 48 年, 最长为 77 年, 最短仅 20 年, 该段平均年径流量为 550.8 亿 m^3 , 较常年偏多 8.8%, 出现丰水年的频率是枯水年的 3.6 倍; 而枯水段的持续时间相对少于丰水段, 最长为 57 年, 最短是 11 年, 平均为 37 年, 该段平均的年径流量为 425.0 亿 m^3 , 较常年偏少 16.1%, 时段内出现枯水年的概率是丰水年的 4.7 倍。

Table 8. Stage characteristics of natural runoff and dry water section of the Yellow River
表 8. 黄河天然径流量丰水段和枯水段阶段性特征

丰水段						枯水段					
起讫年	年数	平均值/亿 m^3	距平/%	丰水年数	枯水年数	起讫年	年数	平均值/亿 m^3	距平/%	丰水年数	枯水年数
1534~1580	47	538.6	6.4	18	2	1478~1533	56	484.1	-4.4	7	16
1642~1718	77	536.5	5.9	17	2	1762~1818	57	484.6	-4.3	12	21
1819~1864	46	607.0	19.9	26	6	1865~1901	37	408.8	-19.3	1	26
1902~1921	20	535.1	5.7	7	2	1922~1932	11	352.6	-30.4	0	11
1933~1993	61	536.9	6.0	23	13	1994~2017	24	395.1	-22.0	0	19
平均	50.2	550.8	8.8	18.2	5.0	平均	37	425.0	-16.1	4	18.6

3.2.3. 黄河典型连枯段 1922~1932 年与枯水段 1994~2017 年的比较

现对近期枯水段 1994~2017 年与典型连续枯水段 1922~1932 年进行对比分析(表 9)。近期枯水段 1994~2017 年共有 13 个枯水年和 6 个偏枯年, 天然径流量均值为 395.1 亿 m^3 , 最大值为 544.4 亿 m^3 (2012 年), 最小值为 267.2 亿 m^3 (2002 年); 1922~1932 年典型连续枯水段有 9 个枯水年和 2 个偏枯年, 天然径流量均值为 352.5 亿 m^3 , 较多年天然径流量偏枯 30.4%, 最大值为 430.3 亿 m^3 (1925 年), 最小值为 241.4 亿 m^3 (1928 年)。1994~2002 年连续枯水年序列(均值为 352.1 亿 m^3)为 1995~1998 年和 2000~2002 年, 1922~1932 年连续枯水年序列为 1926~1932 年, 在连续枯水段年数、枯水段天然径流量均值等方面均是 1922~1932 年较为严重。20 世纪末至今, 黄河年天然径流量变化处于枯水段并持续若干年。有研究[18]从北半球及东亚地区的气压场分析了 1922~1932 年的气候异常现象, 说明本时段出现连续枯水段的必然性。三门峡站 1922~1932 年 11 年连枯段正好与二百年来南极积雪量的高值期相吻合。

Table 9. Sequence comparison of two typical dry periods in the Yellow River natural runoff
表 9. 黄河天然径流量 2 个典型枯水时段序列对比

年份	丰枯等级	年份	丰枯等级	年份	丰枯等级	年份	丰枯等级	年份	丰枯等级
1922	枯水	1929	枯水	1997	枯水	2004	枯水	2011	平水
1923	偏枯	1930	枯水	1998	枯水	2005	平水	2012	平水
1924	枯水	1931	枯水	1999	偏枯	2006	枯水	2013	平水
1925	偏枯	1932	枯水	2000	枯水	2007	偏枯	2014	偏枯
1926	枯水	1994	偏枯	2001	枯水	2008	枯水	2015	枯水
1927	枯水	1995	枯水	2002	枯水	2009	偏枯	2016	枯水
1928	枯水	1996	枯水	2003	平水	2010	枯水	2017	偏枯

3.3. 黄河天然径流量周期性特征

黄河天然径流量存在周期性特点。通过天然径流量小波变换得到小波系数实部等值线图和小波方差图(图

5)。黄河天然径流量变化具有准 3~4 年周期, 还有 22~26 及 11~15 年尺度的周期特点, 周期从大到小呈现嵌套结构, 其年径流量周期性并不突出, 波动性非常弱, 与金双彦等[19]和穆兴民等[4]的研究成果基本一致。由于是长系列数据, 天然径流量周期首先与太阳黑子数活动周期相一致。1470~1918 年天然径流量推求方法更多地反映其长序列的整体趋势, 周期波动不明显[19]。天然径流量突变原因主要是气候突变导致的, 气候突变的影响因子包括天文因子和地球因子, 即太阳辐射强度、地球轨道参数、地球自转速率和人类活动。气候因素决定于大气环流的特点, 大气环流的变化受太阳活动制约, 太阳活动常以太阳黑子数表示, 因此天然径流量变化与太阳黑子之间存在着一定的相应关系[1][19]。

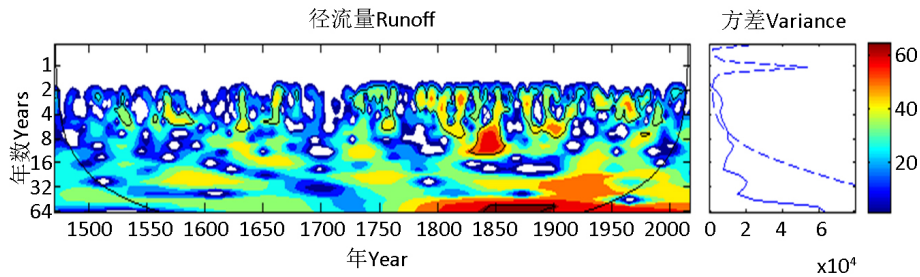


Figure 5. The Yellow River natural runoff real-part contour map and variance map of wavelet coefficients

图 5. 黄河天然径流量小波系数实部等值线图和小波方差图

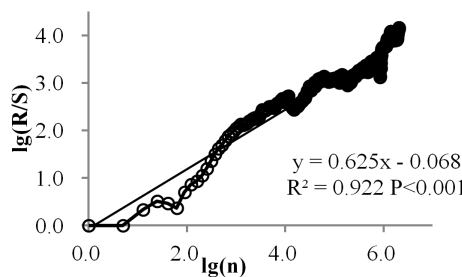


Figure 6. Hurst index of natural runoff of the Yellow River

图 6. 黄河天然径流量 Hurst 指数分析

3.4. 黄河天然径流量持续性特征

为证实其预测持续性的可行性, 计算黄河天然径流量各时段 Hurst 指数(表 10)。黄河天然径流量存在较强持续性。为进一步揭示黄河天然径流量未来发展趋势, 结合 MK 趋势检验并利用 R/S 方法对天然径流量序列进行计算(图 6), Hurst 指数大于 0.5, 说明黄河未来天然径流量与历史存在相同下降趋势, 且呈较显著正相关性。

Table 10. Hurst index for each period

表 10. 各时段 Hurst 指数

系列	1470~1918	1919~1950	1951~2017	1470~2017
时段长度/年	449	32	67	548
Hurst 指数	0.58	0.81	0.82	0.63

4. 结论

采用滑动平均、Pettitt 突变检验和小波分析等方法对黄河过去五个半世纪天然径流量演变特征进行趋势、

突变及周期等综合研究, 主要结论如下:

1) 在 548 年尺度上, 黄河天然径流量整体上呈显著下降趋势, 且存在较强持续性, 表明在未来一段时间内天然径流量依旧保持减少趋势。在 19 世纪中后期即清中晚期, 黄河天然径流量最丰富且波动最剧烈。

2) 黄河天然径流量在 1641、1731、1757、1816、1864 (1861)、1933、1989 年出现较为明显的突变现象。1865~1989 年和 1990~2017 年天然径流量较 1470~1864 年下降明显。

3) 黄河天然径流量多年来以平水年出现频率最大, 平水年和丰水年以连续形式出现可能性较枯水年大。黄河天然径流量大致存在 5 个丰水期、2 个平水期和 5 个枯水期, 近些年来以枯水为主。黄河天然径流量小波变换具有准 3-4 年周期。

基金项目

国家重点研发计划“黄河流域水沙多时空演变及其分异规律”(2016YFC0402401); 国家自然科学基金“黄土区植被恢复对土壤物理特性及其产流特征的驱动效应”(41671285)。

参考文献

- [1] 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.
SHEN Nan, LI Chunhui. Evolution characteristics of runoff in Yellow River Basin during 500 years. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(5): 37-40. (in Chinese)
- [2] 张少文, 何伟, 王文圣, 等. 黄河天然年径流超长期变化特性研究[J]. 人民黄河, 2004(8): 10-12.
ZHANG Shaowen, HE Wei, WANG Wenshen, et al. Study on ultra-long-term variation characteristics of natural annual runoff of the Yellow River. Yellow River, 2004(8): 10-12. (in Chinese)
- [3] 李春晖, 郑小康, 庞爱萍, 等. 黄河流域 1919-1998 年径流量突变分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(6): 33-34.
LI Chunhui, ZHENG Xiaokang, PANG Aiping, et al. Analysis on run-off mutation of 1919-1998 period of the Yellow River Basin. Yellow River, 2008, 30(6): 33-34. (in Chinese)
- [4] 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.
MU Xingmin, LI Jing WANG Fei, et al. Analysis on the annual natural runoff variety process of the Yellow River. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17(2): 1-5. (in Chinese)
- [5] 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.
LI Erhui, MU Xingmin and ZHAO Guangju. Analysis of runoff change in upper and middle reaches of the Yellow River from 1919 to 2010. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 155-163. (in Chinese)
- [6] 穆兴民, 胡春宏, 高鹏, 等. 黄河输沙量研究的几个关键问题与思考[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 1-4+48.
MU Xingmin, HU Chunhong, GAO Peng, et al. Key issues and reflections of research on sediment flux of the Yellow River. Yellow River, 2017, 39(8): 1-4+48. (in Chinese)
- [7] 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.
WANG Guoan, SHI Fucheng, ZHENG Xiuya, et al. Natural annual runoff estimation from 1470 to 1918 for Sanmenxia Gauge Station of Yellow River. Advances in Water Science, 1999, 10(2): 71-77. (in Chinese)
- [8] 张金萍, 张鑫, 肖宏林. 潼关水文站 1919-2015 年水沙演化特征研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 112-115.
ZHANG Jinping, ZHANG Xin and XIAO Honglin. Study on evolution characteristics of runoff and sediment at Tongguan Hydrologic Station from 1919 to 2015. Water Resources and Power, 2018, 36(11): 112-115. (in Chinese)
- [9] 高鹏. 黄河中游水沙变化及其对人类活动的响应[D]: [博士学位论文]. 西安: 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.
GAO Peng. Streamflow and sediment discharge change trend and its response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. Doctoral Dissertation. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Eco-Environment, Ministry of Education), 2010. (in Chinese)
- [10] GAO, P., MU, X. M., WANG, F., et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. Hydrology and Earth System Science, 2011, 15(1): 1-10.
<https://doi.org/10.5194/hess-15-1-2011>
- [11] 郭巧玲, 陈新华, 孙斌. 窟野河水沙变化及驱动力分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 17-20.
GUO Qiaoling, CHEN Xinhua and SUN Bin. Analysis of water and sediment changes and related driving forces in Kuye River Basin. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 17-20. (in Chinese)

- [12] 顾朝军, 穆兴民, 高鹏, 等. 1961-2014 年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(3): 136-143.
GU Chaojun, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Characteristics of temporal variation in precipitation and temperature in the Loss Plateau from 1961 to 2014. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(3): 136-143. (in Chinese)
- [13] 薛树文, 齐春三, 曹升乐, 等. 黄河与小清河年径流量丰枯遭遇分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(5): 5-7.
XUE Shuwen, QI Chunsan, CAO Shengle, et al. Wet-Dry encounter analysis of annual runoff of Yellow River and Xiaoqing River. *Yellow River*, 2017, 39(5): 5-7. (in Chinese)
- [14] 张婧, 赵海莉. 明清时期汾河流域水旱灾害的时空分布[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 123-130.
ZHANG Jing, ZHAO Haili. Spatial and temporal distributions of floods and droughts in Fenhe River basin in the Ming and Qing dynasties. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(12): 123-130. (in Chinese)
- [15] 张琨佳, 杨帅, 苏筠. 明清时期我国水、旱灾害时空演变特点的对比分析[J]. 地球环境学报, 2014, 5(6): 385-391.
ZHANG Kunjia, YANG Shuai and SU Yun. A comparison of spatial and temporal distribution of flood and drought in Ming and Qing Dynasty. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(6): 385-391. (in Chinese)
- [16] WANG, H., YANG, Z., SAITO, Y., et al. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: Connections to impacts from ENSO events and dams. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(3-4): 212-225. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.01.005>
- [17] 陈蕴真. 黄河泛滥史: 从历史文献分析到计算机模拟[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2013: 56-78.
CHEN Yunzhen. Investigating the flood history of the Yellow River: From analyzing historical records to computer modeling. Doctoral Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2013: 56-78. (in Chinese)
- [18] 蒋昕晖. 黄河三门峡站天然年径流量系列周期性分析及枯水段研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.
JIANG Xinhui. The analysis on approximate cycle of natural yearly runoff and low water period in Yellow River Sanmenxia Station. Master's Degree Thesis. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [19] 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(12): 33-35+82.
JIN Shuangyan, JIA Xinping and JIANG Xinhui. Analysis on periodicity of natural annual runoff rate at Sanmenxia Station. *Yellow River*, 2005(12): 33-35+82. (in Chinese)