

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.014; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.014.

高海燕, 张悦. 黄河干流实测径流量演变特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 1-13, 23.

Gao Haiyan, Zhang Yue. Evolution characteristics and influencing factors of the measured runoff in the main stream of the Yellow River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 1-13, 23.

# 黄河干流实测径流量演变特征及影响因素分析

高海燕<sup>1</sup>, 张悦<sup>2</sup>

(1. 兰州财经大学 统计与数据科学学院, 兰州 730020; 2. 兰州工商学院 经济学院, 兰州 730101)

**摘要:** [目的] 全面揭示黄河流域径流演变机理, 为进一步探讨流域水资源管理和可持续发展提供科学依据。[方法] 在函数型数据视角下, 利用相平面图、主微分分析方法以及基函数拟合法探究了 2002—2022 年黄河干流实测径流量的趋势性、突变性、周期性和季节变动特征, 并采用函数型聚类方法分析了主要水文站径流量的差异性。同时, 利用累积量斜率变化分析法定量计算了气候变化和人类活动对径流变化的影响贡献率, 并通过建立多元函数型线性回归模型估计了气候变化和人类活动与径流量之间的响应关系。[结果] 实测径流量呈增加趋势, 周期性显著, 在 2004 年、2008 年、2013 年、2017 年、2021 年发生突变, 季节特征明显; 黄河干流 12 个主要水文站可聚为 3 类, 各水文站不同年代径流量空间分布差异性显著; 降水量、气温、耗水量等气候变化和人类活动显著影响实测径流量。[结论] 近 20 年来黄河干流实测径流量呈增加趋势, 各水文站在空间分布上特征明显, 实测径流量受气候变化和人类活动的显著影响。

**关键词:** 函数型数据分析; 黄河流域; 实测径流量

中图分类号: P333.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0001-13

## Evolution characteristics and influencing factors of the measured runoff in the main stream of the Yellow River

Gao Haiyan<sup>1</sup>, Zhang Yue<sup>2</sup>

(1. School of Statistics and Data Science, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China; 2. Institute of Economics, Lanzhou Technology and Business College, Lanzhou 730101, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to comprehensively elucidate the mechanism of runoff evolution in the Yellow River Basin, and to provide a scientific basis for further exploration of water resource management and sustainable development in the basin. [Methods] From the perspective of functional data, the properties of trend, mutation, periodicity and seasonal variation of the measured runoff volume on the main stream of the Yellow River from 2002 to 2022 were investigated by techniques including phase plane analysis, principal differential analysis and basis function fitting. Additionally, the differences in runoff volumes among major hydrological stations were analyzed by functional clustering. Furthermore, cumulative slope change analysis was employed to quantify the contribution rates of climate change and human activities on runoff changes, and a multivariate functional linear regression model was established to estimate the relationship between climate change/human activities and runoff. [Results] The measured runoff volume displayed an increasing trend with significant periodicity, experiencing abrupt changes in 2004, 2008, 2013, 2017 and 2021 with distinct seasonal characteristics. Based on the spatial distribution patterns of annual runoff, the twelve main hydrological stations along the Yellow River could be classified into three categories. Climate factors (precipitation, temperature and water consumption) and human activities had been proved to notably influence the measured runoff. [Conclusion] Over the past 20 years, the measured runoff from the main

收稿日期: 2024-04-09

修回日期: 2024-05-06

接受日期: 2024-05-21

资助项目: 国家自然科学基金(19XTJ002); 甘肃省自然科学基金(23JRRA1186); 兰州财经大学科研项目(Lzufe2023C-005)

第一作者: 高海燕(1980—), 女, 甘肃金昌人, 博士, 教授, 主要从事函数型数据分析与应用研究。E-mail: gaohy\_54@sina.com

<http://stbcj.paperonice.org>

stream of the Yellow River had exhibited an increasing trend with distinct spatial distribution characteristics among hydrological stations, indicating that the measured runoff volume was significantly impacted by climate change and human activities.

**Keywords:** functional data analysis; Yellow River Basin; measured runoff

水资源是人类赖以生存和发展的重要因素,也是维系着社会和环境稳定发展的重要基础。在自然界中,河川径流是最容易利用的水资源之一,也是国家重要的战略性资源。径流量作为水文序列的重要组成部分,在一定时期内受到气候变化、人类活动等诸多因素的影响。近年来,随着人类活动的频繁直接或间接的影响以及气候变化的持续加剧,同一区域不同时期的水文循环发生了显著的变化,从而导致径流量的变化方向和程度也发生了明显改变。黄河是我国的第二大河流,然而,受人类活动频繁干扰和流域气候趋势的变化影响,自 20 世纪 90 年代起,其主要径流量已经呈现出逐渐下降的趋势。目前水资源短缺已经成为沿黄河省区社会经济快速发展的主要瓶颈<sup>[1]</sup>。因此,全面、系统地探究黄河干流径流演变特征和影响因素显得尤为重要,这不仅有利于有效管理和规划黄河流域的水资源,也为黄河流域的生态环境保护、洪涝灾害防治、气候变化研究等提供科学依据。

近年来,黄河流域径流变化的特征已成为水文研究领域备受关注的热点问题。例如,马柱国<sup>[2]</sup>探究了黄河径流变化规律以及与气候变化的关系,发现黄河径流呈下降趋势,且其年际变化主要受气候控制;高航等<sup>[3]</sup>利用平行对比法分析 1997—2006 年黄河水沙变化特征,结果表明干流径流量有明显减幅,且沿程自上而下减幅显著增大;白夏等<sup>[4]</sup>通过分析 1956—2011 年唐乃亥水文站年内、年际径流量的周期性、趋势性等统计特征,发现黄河上游径流量序列周期性显著,并呈微弱的减小趋势;同样,Liu 等<sup>[5]</sup>发现近几十年来黄河径流量和泥沙量急剧下降;吕明侠等<sup>[6]</sup>运用水文统计学方法发现祖厉河上游源区的径流对研究区的气候变化敏感;苏贤保等<sup>[7]</sup>通过灵活样本熵测度黄河上游径流复杂度变化特征,发现大多水文站的年、汛期和非汛期的径流量下降趋势显著。此外,关于定量区分气候条件变化和人类活动对径流序列的影响程度,包括累积量斜率变化分析法(SCRAQ)、降水径流关系法、T-S 框架、SWAT、VIC、GAM 等方法。例如,王彦君等<sup>[8]</sup>基于累积量斜率变化法定量计算松花江流域径流量的影响因素;Liu 等<sup>[9]</sup>利用 M-K 检验对澜沧江流域的年径流进行趋势和突变检验,并基于 Choudhury-Yang 公式

和 Budyko 模型进行敏感性分析;Lei 等<sup>[10]</sup>采用线性回归模型对鄱阳湖流域的年径流量和汛期、非汛期流量进行归因分析;张亚丽等<sup>[11]</sup>基于 SCRAQ 法定量评估气候变化和人类活动对广西北部湾入海流域径流量变化的贡献率。目前对于径流量变化特征及影响因素的研究已取得了一定的进展。然而,这些研究大多是在离散数据视角下探究径流资料的演变特征,未能充分挖掘径流数据的潜在信息和波动特征。事实上,径流量随时间变化及波动的趋势具有函数的特性,可以将其视为“函数型数据”。因此,从函数型数据视角出发,运用函数型数据分析方法研究径流变化的内在规律及影响因素,可以更加全面地揭示径流变化的时空特征、周期性以及可能存在的非线性关系等,为进一步解释径流量演变机理提供新的思路和研究方法。

函数型数据分析(Functional Data Analysis, FDA)<sup>[12]</sup>是将离散观测值用函数曲线的形式表示,以研究函数曲线的方法剖析数据。FDA 作为一种全新的非参数统计方法,从动态随机过程角度全面考虑问题,易于把握和反映事实规律。相较于传统的水文气象统计方法,FDA 方法能更好地量化研究对象随时间变化的过程,且在探索数据的波动特征以及潜在变化模式时具有一定的优越性。例如,王德青等<sup>[13]</sup>从连续、动态的视角出发,借助 FDA 思想构建函数型金融状况指数,探究自 2002 年以来中国金融整体形势的动态变化规律;王华强等<sup>[14]</sup>利用 FDA 研究了利率与物价之间的关系。

本文在函数型数据分析的框架下,运用 FDA 方法全面研究黄河干流实测径流量的演变规律,并定量分析实测径流量与气候变化和人类活动之间的响应关系。首先,通过相平面图、主微分分析以及基函数拟合法等方法,探究黄河干流实测径流量变化的趋势性、突变性和周期性等统计特性,并刻画实测径流量的动态演变规律及波动特征;其次,为研究各水文站径流量的差异性,采用函数型聚类方法分析实测径流量的变化速度,并利用 ArcGIS 10.8 软件可视化展示黄河干流水文站实测径流量空间分布的特征差异;最后,构建降水量、气温和耗水量关于实测径流量的多元函数型线性回归模型,估算气候变化和人类活动与实测径流量之间的响应关系。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

黄河发源于青海省巴颜喀拉山脉,流经四川、甘肃等 9 个省份,最终注入渤海,流域面积为 752 443 km<sup>2</sup>。在黄河干流上设置有兰州站、秦安站、梁家河站等多个水文站点,用于监测和记录黄河干流的水位、流量、水温、水质等水文数据。由于地形复杂,黄河流域各水资源区的气候条件存在显著差异,不同区域的水文特征、径流规律、水资源状况等均有所不同。图 1 展示了黄河干流的地理位置及重要控制水文站的分布情况,各水文站基本情况见表 1。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区地理位置及水文站分布

Fig. 1 Geographical location and distribution of hydrological stations in the study area

表 1 黄河干流主要水文站基本情况

Table 1 Basic situation of main hydrological stations in the main stream of the Yellow River

区间	水文站	控制面积/ 万 km <sup>2</sup>	经度 (E)	纬度 (N)
黄河上游	唐乃亥	12.20	100°15'	35°50'
	兰州	22.26	103°82'	36°06'
	石嘴山	30.91	106°78'	39°25'
	头道拐	36.79	111°06'	40°27'
黄河中游	龙门	49.76	110°58'	35°67'
	潼关	68.21	110°33'	34°60'
	三门峡	68.84	111°37'	34°82'
	小浪底	69.42	112°41'	34°92'
	花园口	73.00	113°67'	34°91'
黄河下游	高村	73.41	115°08'	35°39'
	艾山	73.91	116°29'	36°25'
	利津	75.19	118°30'	37°52'

### 1.2 数据来源

考虑黄河干流水文站分布情况以及数据的准确性和完整性因素,本文沿程自上而下选取 2002—2022 年黄河流域干流具有代表性的 12 个重要控制水文站,探究黄河流域径流的演变特征及其与气候变化和人类活动之间的响应关系。所用实测径流量数据和降水量数据来源于黄河水利委员会(<http://www.yrcc.gov.cn/>),气温数据来源于欧盟及欧洲中期天气

预报中心等组织发布的 ERA5-Land 数据集。本文在第 2.1 节、第 2.2 节所用实测径流量为月度数据,而在第 2.3 节中所用实测径流量、耗水量、气温以及降水量数据均为年度数据。

### 1.3 研究方法

本文基于函数型数据分析视角,采用相平面图、主微分分析方法、基函数拟合法以及函数型聚类分析方法全面探究黄河干流实测径流量的演变规律和变化特征,并运用累积量斜率变化分析法和函数型线性回归模型分析黄河干流径流量与气候变化和人类活动之间的响应关系。

1.3.1 离散数据的函数拟合 函数型数据分析的关键是在离散时间点  $\{t_j\}$  观察一个连续可微的过程

$$y_j = x(t_j) + \epsilon_j \quad (1)$$

式中:  $\{y_j\}$  为观察值;  $x(t)$  为潜在连续可微函数;  $\epsilon_j$  为不可观测的误差成分。通常使用最小二乘准则来保证拟合函数  $x(t)$  精确表示观察值  $\{y_j\}$ , 同时要求  $x(t)$  是匀滑的, 因此将导数平方的积分作为粗糙惩罚项。通过最小化拟合方程式(2), 得到拟合函数  $x(t)$ 。

$$\text{PENSSSE}_\lambda(x|y) = \sum_j [y_j - x(t_j)]^2 + \lambda \text{PEN}_k(x)$$

$$\text{PEN}_k(x) = \int [D^k x(s)]^2 ds = \|D^k x\|^2 \quad (2)$$

式中:  $D^k$  为  $k$  阶导数;  $\lambda$  为修匀参数, 可通过广义交叉验证 (Generalized Cross-Validation, GCV) 准则得到。

1.3.2 相平面图 运用 FDA 方法可研究黄河流域径流量曲线导数间的关系。从物理学的视角看, 拟合函数的一阶、二阶导数分别代表速度和加速度。相平面可以反映函数曲线速度与加速度之间的关系, 同时也能揭示研究系统中动能和势能的交替变化规律, 从而更好地理解径流量曲线的变化特征。

1.3.3 主微分分析 主微分分析 (Principal Differential Analysis, PDA) 是通过微分方程来拟合噪声数据, 以捕获单个曲线特征或曲线的变化特征。微分方程既能刻画函数型变量的动态变化规律和波动特征, 又能动态刻画多个变量之间的差异程度。

1.3.4 多元函数型线性回归模型 多元函数型线性回归模型是通过  $J$  个函数型预测因子  $X = (X_1, \dots, X_J)'$  估计函数型响应  $Y$ 。如一个来自  $(X, Y)$  的随机样本  $\{(x_i, y_i) : i = 1, \dots, n\}$ , 其中  $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij})'$ , 设函数变量都在区间  $T$  上平方可积函数的希尔伯特空间  $L^2(T)$  上取值, 内积定义为  $\langle f, g \rangle = \int_0^T f(t)g(t)dt$ ,  $\forall t \in T$ 。函数型线性回归模型表示为

$$y_i(t) = \alpha_0(t) + \sum_{j=1}^J \int_0^T x_{ij}(s) \alpha_j(s, t) ds + \epsilon_i(t) \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

式中： $\alpha_0(t)$ 为截距函数； $\alpha_j(s, t)$ 为  $J$  个系数函数； $\epsilon_i(t)$ 为独立的误差函数。

1.3.5 累积量斜率变化分析法 首先,利用径流量的突变特征,将实测径流量依据时间顺序划分为  $d$  个阶段,其中设第一个时段为基准期( $a$  时段),剩余( $d-1$ ) 个时段为影响期( $b$  时段)。利用线性方程建立径流量、降水量和气温的累积量( $y$ )与年份( $t$ )的关系式。

$$y = St + a_0 \quad (4)$$

式中： $S$  为斜率； $a_0$  为截距。

其次,分别定义径流量、降水量和气温的累积量的斜率变化率  $R_{SR}$ ,  $R_{SP}$  和  $R_{ST}$ , 即

$$\begin{aligned} R_{SR} &= \frac{S_{Rb} - S_{Ra}}{S_{Ra}} \times 100\% \\ R_{SP} &= \frac{S_{Pb} - S_{Pa}}{S_{Pa}} \times 100\% \\ R_{ST} &= \frac{S_{Tb} - S_{Ta}}{S_{Ta}} \times 100\% \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $S_{Ra}$ ,  $S_{Pa}$ ,  $S_{Ta}$  和  $S_{Rb}$ ,  $S_{Pb}$ ,  $S_{Tb}$  分别为  $a$  和  $b$  时段径流量、降水量、气温的累积量与年份的关系式中的斜率。

事实上,降水和气温与径流量分别呈现正、负相关关系,则降水、气温分别对径流量变化的贡献率  $C_P$ ,  $C_T$  定义为

$$C_P = \frac{R_{SP}}{R_{SR}} \times 100\%, \quad C_T = \frac{R_{ST}}{R_{SR}} \times 100\% \quad (6)$$

综合水、热等因素,可知气候变化对径流量变化

的贡献率  $C_C$ , 即

$$C_C = C_P + C_T \quad (7)$$

一般地,人类活动和气候变化对径流量变化的影响较大,其他因素可忽略。则人类活动对径流量变化的贡献率  $C_H$  为

$$C_H = 1 - C_C \quad (8)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河干流实测径流量的变化特征

2.1.1 实测径流量的统计特征分析 探究黄河干流实测径流量的变化特征,首先对 2002—2022 年 12 个水文站的实测径流量月度值进行曲线拟合并修匀。本文将各年的每个月份看作节点,采用 255 条 5 阶 B-样条基函数来拟合函数曲线。同时,选取修匀参数  $\lambda=0.1$  对拟合曲线进行修匀处理。匀滑的黄河干流实测径流量拟合曲线如图 2 所示,其中实线为 12 个水文站的实测径流量曲线,虚线为趋势线,该图反映了实测径流量随时间变化的趋势及重要特征。可以看出,在 2002—2022 年,12 个水文站实测径流量虽存在显著差异,但总体上变化趋势相似,呈上升趋势。具体地,实测径流量的变化并非始终上升,而是先上升后下降、再上升再下降的循环上升过程,其中上升幅度大于下降幅度,具有一定的周期性。因此,黄河干流实测径流量具有明显的趋势性和周期性。

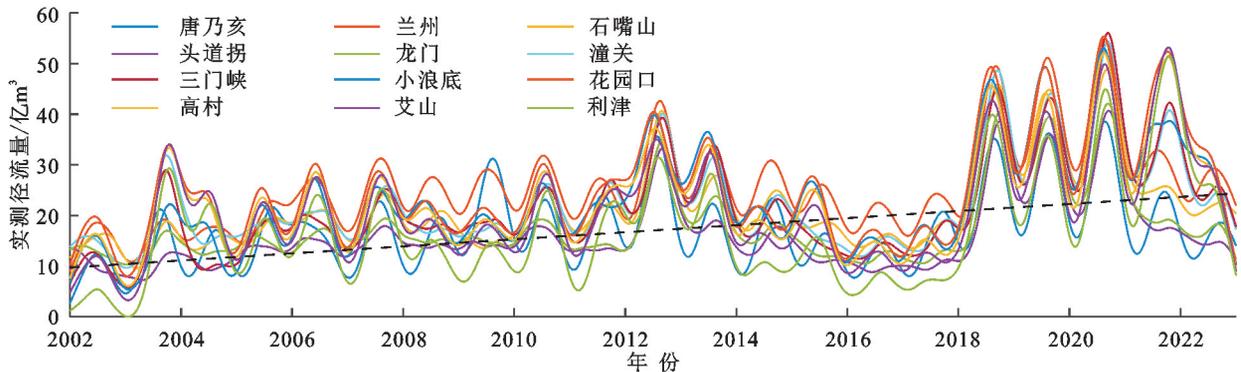


图 2 2002—2022 年黄河干流 12 个水文站实测径流拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of measured runoff at 12 hydrological stations in the main stream of the Yellow River from 2002 to 2022

为进一步分析黄河干流实测径流量的统计特征,绘制实测径流量拟合曲线的均值函数和方差函数曲线,如图 3 所示。可以看出,实测径流量的均值和方差均具有波动增加趋势,且方差的变化相对平稳。在图 3A 中,可将 2002—2022 年黄河干流实测径流量大致分为 3 个阶段,第一阶段为 2002—2012 年,此阶段实测径流量均值波动幅度较小,呈增加趋势;第二阶段为 2013—2017 年,此阶段实测径流量均值处于大幅度的减少状态;2018—2022 年为第三阶段,实测径流量均值在这一阶段波动幅度较大,且此阶段径流

量均值明显高于前两个阶段。同时,实测径流量均值函数于 2002—2008 年、2009—2016 年以及 2017—2022 年 3 个时间段呈先上升后下降趋势,具有显著的周期性,变化周期 5~7 a。此外,实测径流量在 2004 年、2008 年、2013 年、2017 年、2021 年前后发生明显的升降变化,说明实测径流量曲线在这些时间点发生突变。图 3B 中实测径流量的方差函数呈现波动状态,且其在样本区间内具有增加趋势,这说明近年来受全球气候变暖和人类活动的影响,黄河流域径流变化愈发频繁。

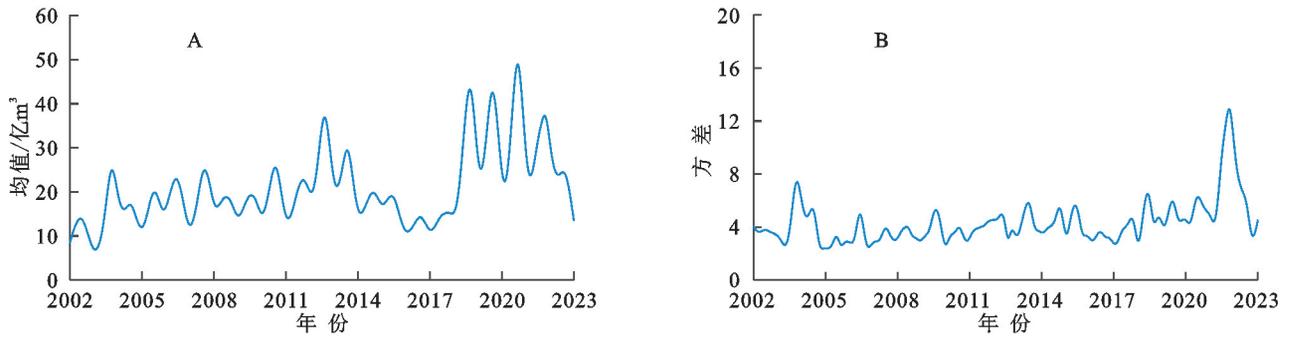


图 3 实测径流量拟合曲线的均值、方差函数曲线

Fig. 3 Mean and variance function curves of measured runoff fitting curve

2.1.2 基于 PDA 的实测径流量的季节变动特征

由于黄河干流实测径流量具有趋势性、突变性和周期性等统计特征。进一步,从连续、动态的视角出发,探究实测径流量函数曲线的导数信息,以获得实测径流量变化更多的潜在信息。图 2 呈现实测径流量序列的拟合曲线较为光滑,故存在一阶导数和二阶导数,分别代表实测径流量序列的速度、加速度变化曲线。

从图 4 可以看出,实测径流量曲线的速度和加速度曲线基本处于规则的波动状态,且加速度变化曲线波动幅度较大。在 2002—2014 年,实测径流量的速度和加速度变化趋势基本一致,均处于较小幅度的上下波动状态;2015—2017 年期间,实测径流量的速度与加速度均处于基本平缓的波动状态;2018 年之后,实测径流量的速度与加速度具有较大幅度的波动。

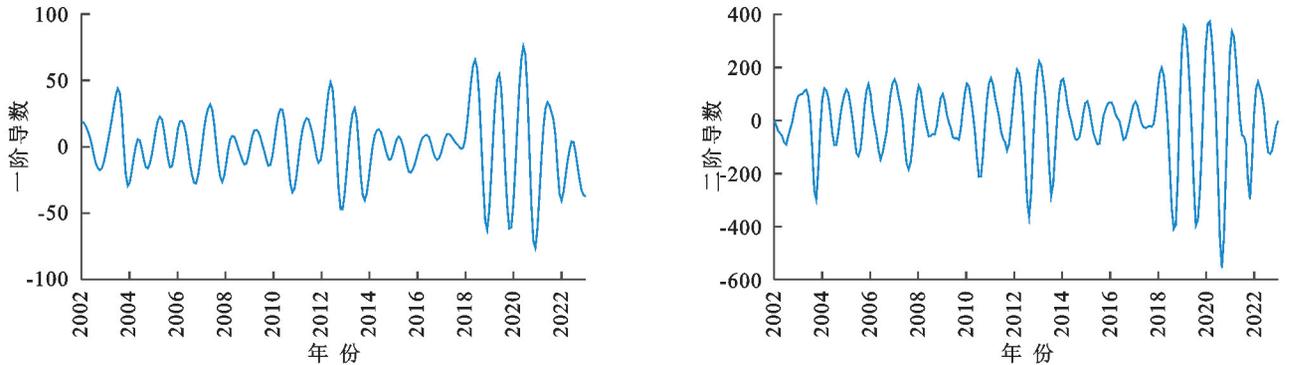


图 4 实测径流量拟合曲线的一阶、二阶导函数

Fig. 4 First and second derivatives of measured runoff fitting curve

下面探索黄河干流实测径流量序列的动态变化模式。首先通过绘制 2002 年、2012 年、2022 年和突变年份实测径流量的相平面图,讨论实测径流量变化速度与加速度的关系、动能与势能交替变化的规律。在图 5 中,一年中的 1—12 月分别用 1,2,3,4,5,6,7,8,9,O,N,D 表示,两条相互垂直的虚线的交点为绝对零点,此点处实测径流量的速度和加速度都为 0,意味着实测径流量在此点处运动的动能和势能为 0。曲线越靠近绝对零点,实测径流量曲线波动的持久性和变化幅度就越弱。由图 5 可以看出,各个年份实测径流量的相平面图基本都呈圆圈状,说明样本空间内黄河干流实测径流量具有上升、下降再上升的波动周期,季节特征显著。

量速度变为负值,至 9 月上旬达速度最小值,为秋季变化特征。冬季实测径流量曲线的加速度为正。因此,2022 年实测径流量具有春、夏、秋、冬季不同的变化特征。此外,2002 年、2004 年(图 5B)、2012 年(图 5D)以及 2022 年(图 5H)中 4 个季节分别分布于以绝对零点为中心的 4 个不同的象限中,且各象限中速度、加速度具有相应的增加或减少趋势。这意味着大多年份实测径流量的变动具有较强的季节性特征。

图 5A 中,2002 年实测径流量的相平面图为一个不闭合的圈,实测径流量速度自 1 月起开始下降,至 9 月中旬达到最小值,之后持续增大。2002 年 1—7 月实测径流量变化的速度为正、加速度为负,且 7 月势能最小,说明该段时间实测径流量处于缓慢的增长状态,为其春、夏季变化特点。自 8 月开始实测径流

图 5C 中,2008 年实测径流量的相平面图由一个半圈和一个小圈组成。半圈自 1 月份开始,途经 2 月、3 月,至 4 月中旬结束,在此阶段实测径流量加速度处于基本不变状态,意味着实测径流量在 2008 年春季变化幅度较小。自 4 月下旬开始速度增加、加速度减小,至 6 月下旬速度达最大值、加速度为 0,此时对应于 2008 年实测径流量变化曲线的“波峰”位置,之后实测径流量速度持续下降,至年末稍有回升。注意到 2017 年(图 5F)实测径流量的相平面图与 2008 年类似,意味着 2008 年和 2017 年实测径流量变化特征相似。

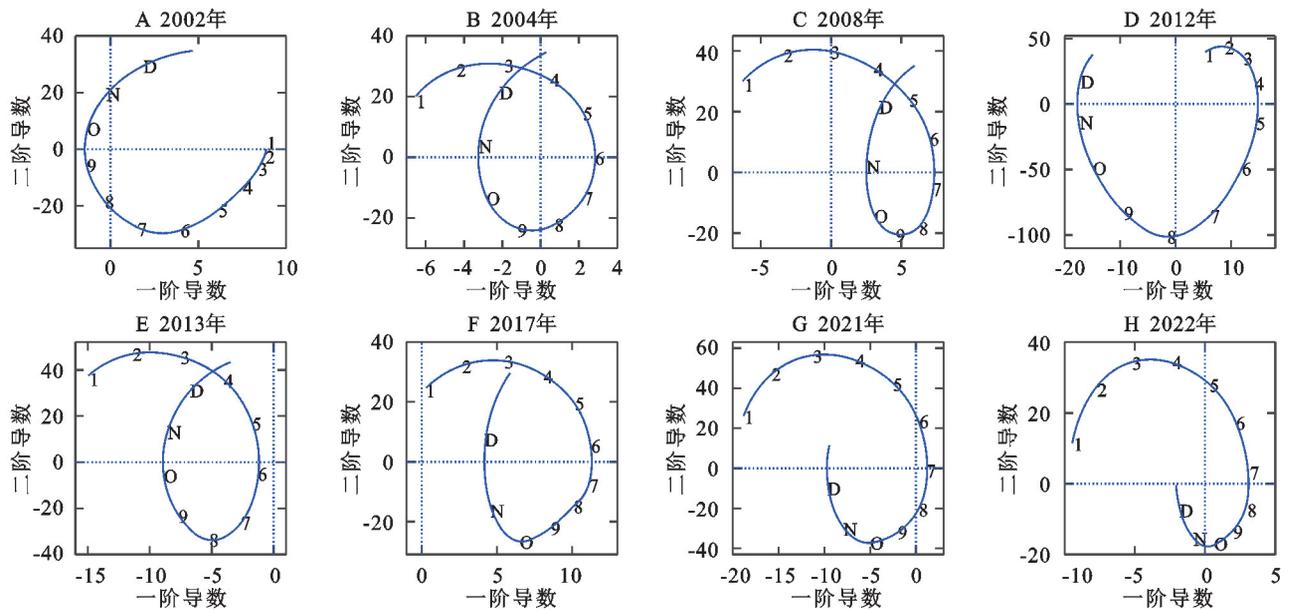


图 5 相平面图

Fig. 5 Phase plan

由图 5E 和图 5G 可知,2013 年和 2021 年实测径流量的相平面图基本位于垂直虚线的左侧,说明这两年实测径流量曲线处于减少趋势。进一步,以图 5E 为例,探索这两年实测径流量曲线的动态变化特征。将两条垂直虚线看作平面直角坐标系,1—5 月位于第二象限,速度为负、加速度为正且逐渐减小,这说明实测径流量在春、夏季呈下降趋势;6—10 月位于第三象限,速度、加速度均为负,且自 6 月起运动轨迹远离绝对零点,因此 6 月开始实测径流量变化幅度增大。10—12 月相平面曲线又回到第二象限。因此,2013 年和 2021 年实测径流量的季节变动特征也较为明显。

综上所述,相平面图可视化了黄河干流实测径流量随时间变化的季节变动特征。受地形影响,黄河干流流域的气候差异较大,在兰州水文站以上,由于黄河主要产流区位于青藏高原的湿润、半湿润、半干旱地区,因此黄河径流主要来源于降水和冰雪融水;在兰州至龙门水文站,该区域降水量少、蒸发大,导致断面径流较小;而作为亚湿润区的龙门至花园口区域,降水量较大,进而径流量也较大。因此,黄河流域实测径流量的季节性变化显著,由于夏秋降雨等因素,易导致洪灾,而春冬季气候干燥寒冷,造成水源匮乏,径流的年内分配极不均匀。根据水利部黄河水利委员会颁布的《黄河水资源公报》显示,与 1956—2000 年相比,近 21 年来黄河干流主要水文站实测径流量的年均值偏小。然而,在 2002—2022 年,由于降雨量增多,使得黄河流域径流量总体上呈增多趋势。

下面对黄河干流实测径流量数据进行主微分分析,选取三阶线性微分方程。

$$Lx_i(t) = \beta_0(t)x_i(t) + \beta_1(t)Dx_i(t) +$$

$$\beta_2(t)D^2x_i(t) + D^3x_i(t) = 0 \quad (9)$$

式中: $L$  为函数型数据  $x_i(t)$  的线性微分算子;弹性系数  $\beta_0(t)$  反映了在位置  $x$  处施加于系统的位置相关力; $\beta_1(t)$  与速度成正比,反映了整个系统的速度; $\beta_2(t)$  与加速度成正比,反映了整个系统的加速度<sup>[15]</sup>。

图 6 为权重函数的变化曲线。可以看出,权重函数  $\beta_0(t)$ 、 $\beta_1(t)$  和  $\beta_2(t)$  均具有一定的波动性,且  $\beta_0(t)$  的变化幅度最大, $\beta_2(t)$  的变化相对平缓。2002 年以来  $\beta_0(t)$  和  $\beta_2(t)$  均以 0 为中心上下波动, $\beta_1(t)$  在样本区间内基本全为正值,且  $\beta_1(t)$  与系统的速度成正比,这意味着政府高度关注黄河流域的保护与发展并采取措施,如建设龙羊峡、小浪底等水利枢纽工程,推进退耕还林还草、植树造林、河道治理、汛期监测预警等,有效地解决了河道萎缩和黄河断流的难题,黄河流域的生态情况也明显好转。此外,通过  $\beta_0(t)$ 、 $\beta_1(t)$  和  $\beta_2(t)$  的值可以得到任意时间黄河干流实测径流量所满足的微分方程,并通过线性微分算子的表达式可以直观观测到实测径流量的位置,即相应梯度的变化。

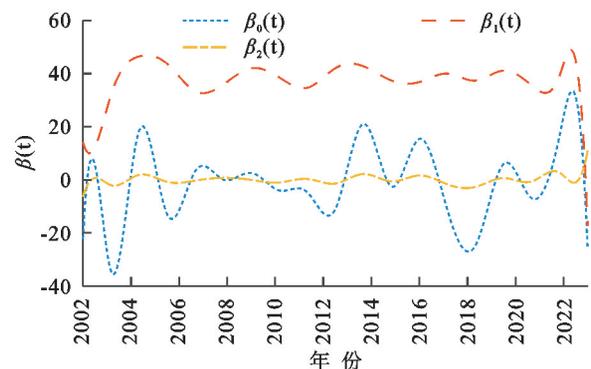


图 6 权重函数的图像

Fig. 6 Image of weight function

下面绘制 12 个水文站实测径流量的观测值与拟合曲线的对比图,验证 PDA 方法的有效性。图 7 为基于微分方程的拟合图,图中实线表示微分方程解的拟合曲线,圆圈表示实测径流量原始观测值,可以看

出,原始数据基本分布在拟合曲线周围,说明微分方程的拟合效果较好。因此,运用 PDA 方法研究实测径流量序列,不仅能较好地拟合曲线,还可以探索其导数等潜在信息,具有相当好的实际应用价值。

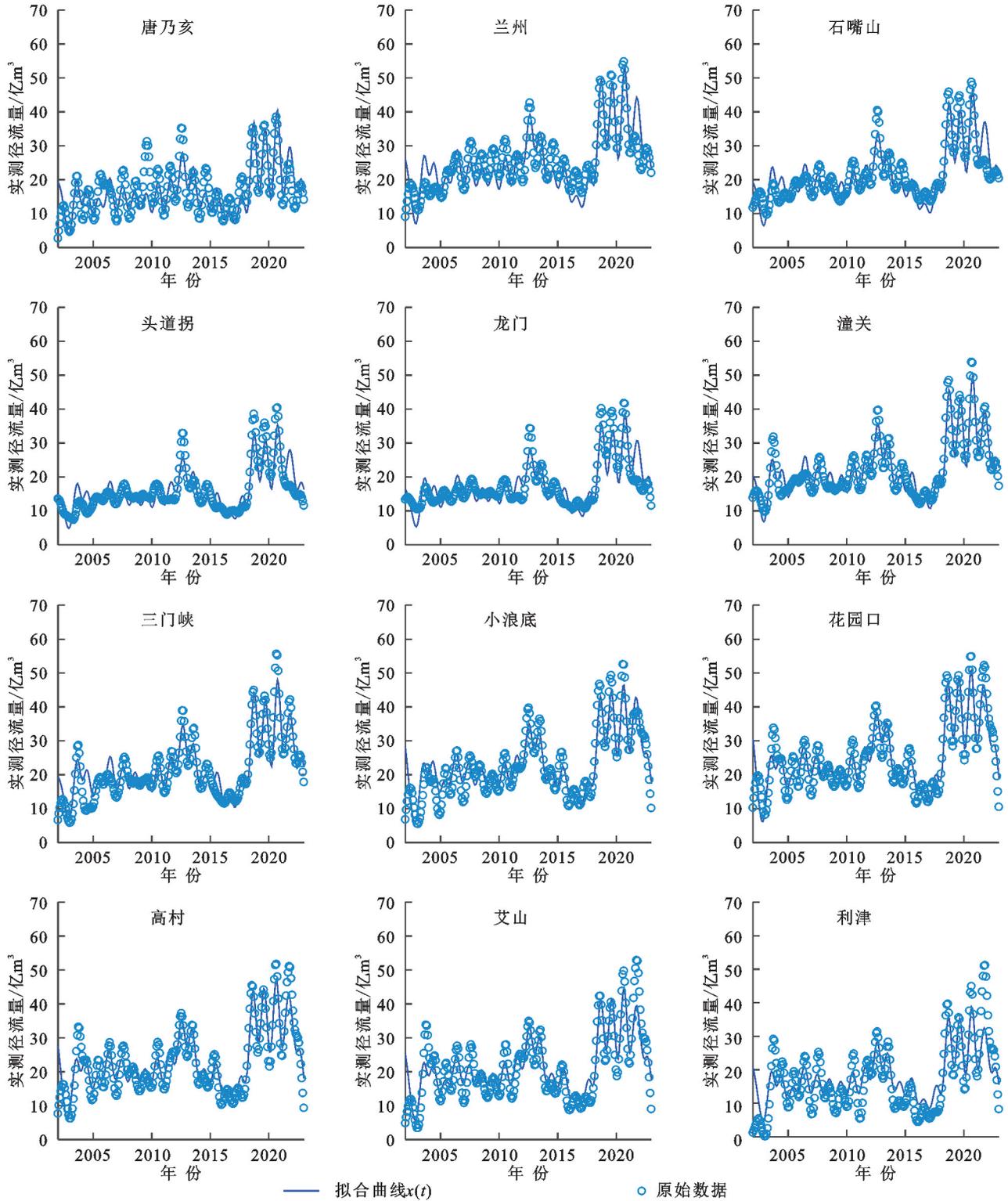


图 7 基于微分方程的拟合图

Fig. 7 Fitting diagram based on differential equation

2.1.3 实测径流量季节变动的刻画 基于主微分分析方法,从原始实测径流量中分离出重要的季节变动

并对其刻画。为方便起见,将黄河干流 12 个代表水文站实测径流量的均值看作实测径流量的原始

数据。首先拟合平滑曲线  $g(t)$ , 其能够捕捉到实测径流量的长期变动趋势; 其次通过将实测径流量的拟合函数  $x(t)$  和长期变动趋势曲线  $g(t)$  作差, 得到季节变动成分和误差成分; 最后拟合实测径流量的季节变动成分。实测径流量的季节变动曲线为:

$$s(t) = x(t) - g(t) \quad (10)$$

式中:  $x(t)$  由实测径流量的原始月度数据拟合;  $g(t)$  由实测径流量的年度数据拟合。图 8 为  $g(t)$  与  $x(t)$  的拟合曲线。

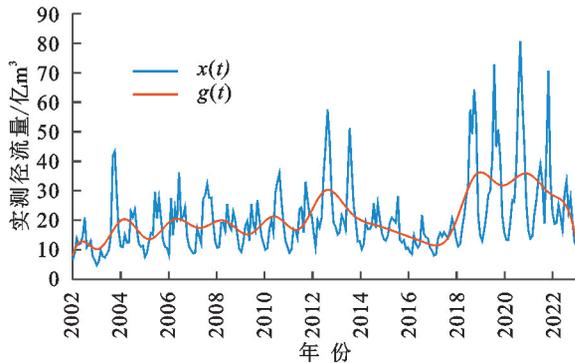


图 8  $g(t)$  与  $x(t)$  的图像曲线

Fig. 8  $g(t)$  and  $x(t)$  image graphs

实测径流量的季节变动曲线  $s(t)$  如图 9 所示。可以看出, 实测径流量的季节性变动极不稳定, 在实测径流量波动比较小的年份, 其季节变动较为平缓; 反之在实测径流量波动较大的年份, 其季节变动较为剧烈。例如在 2002—2017 年, 实测径流量波动幅度较小, 其季节变动幅度也较小, 而 2018—2022 年实测径流量大起大落, 其对应的季节变动幅度也大。图 10 为采用傅里叶基函数拟合的季节变动曲线, 其中圆圈为各个年份每月的季节变动的数值点, 实线为季节变动曲线  $s(t)$  的估计  $\hat{s}(t)$ 。可以看出, 季节变动曲线的拟合效果较好, 较好地呈现了黄河干流实测径流量的季节变动特征, 基本刻画了实测径流量的季节变动规律。

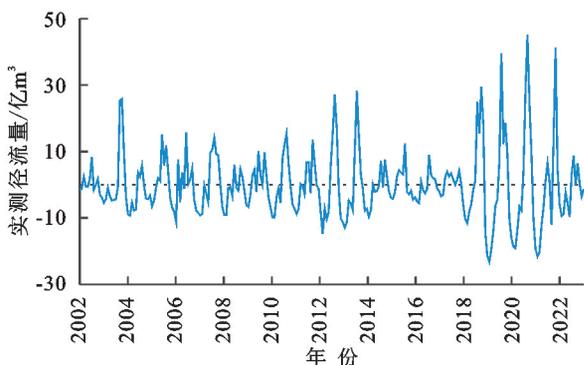


图 9 季节变动函数曲线

Fig. 9 Curve of seasonal variation function

## 2.2 黄河干流水文站实测径流量的差异性分析

由图 2 中黄河干流 12 个水文站的实测径流量拟合曲线知, 在 2002—2022 年, 12 个水文站实测径流

量总体上趋势一致, 呈现上下波动的循环趋势, 但也存在显著差异。为了进一步探究不同水文站实测径流量之间的异同, 对黄河干流 12 个水文站实测径流量变化速度进行函数型聚类分析。由上文可知, 通过 PDA 方法得到的权重系数函数  $\beta_1(t)$  反映了实测径流量的变化速度, 因此采用公式 (9) 求得各水文站实测径流量增长速度, 基于函数型聚类分析方法 (FNMF)<sup>[16]</sup> 分析 12 个水文站的  $\beta_1(t)$  的变化规律及异同。根据各水文站径流量增长速度的走势, 将 12 个水文站聚为 3 类, 具体聚类结果见表 2。

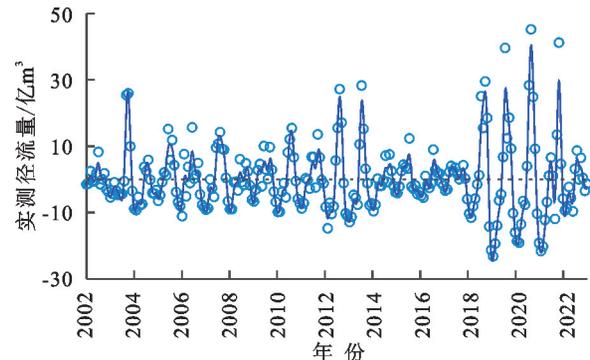


图 10 实测径流量季节变动函数的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of seasonal variation

function of measured runoff

表 2 聚类结果展示

Table 2 Cluster result display diagram

类别	水文站
第 1 类	唐乃亥、头道拐、龙门、潼关、三门峡、小浪底
第 2 类	兰州、石嘴山
第 3 类	花园口、高村、艾山、利津

各类中心与黄河干流实测径流量速度的比较如图 11 所示, 在整个样本区间上, 第 1 类水文站的径流量增长速度最高, 第 3 类次之, 而第 2 类的径流量增长速度最低。导致径流增长速度差异化的因素很多, 例如各水文站距离入海口的远近程度、气候变化、人为因素以及国家出台的相关政策等。第 1 类水文站为唐乃亥、头道拐、龙门、潼关、三门峡、小浪底, 其位于黄河流域中上游地区, 由于 1999 年国家实施的“退耕还林草”政策以及其地理优势, 该类水文站的径流增长速度较高; 第 2 类水文站为位于黄河流域上游的兰州和石嘴山, 其径流量增长速度变化幅度较为平缓, 该地区人口相对较少, 人类活动强度低, 气候变化对径流量的影响较大; 黄河流域下游的 4 个水文站为第 3 类水文站, 该区域降水充沛, 水资源开发利用和水利工程建设等人类活动较为强烈, 其实测径流量增长速度较低。

聚类结果的空间分布如图 12 所示, 其中红色三角形代表第 1 类地区, 紫色圆形代表第 2 类地区, 绿

色五角星代表第 3 类地区。整体来看,黄河流域干流 12 个重要控制水文站可分为 3 类:第 1 类除位于黄河上游的唐乃亥和头道拐外,其余水文站位于黄河流域中游,该区域夏秋季暴雨较多,沙源丰富,洪峰流量大;第 2 类水文站为兰州和石嘴山,该区域地势平坦、耕地资源丰富,是黄河上游的主要灌溉农业区,其实测径流量变化速度波动幅度较小;第 3 类水文站位于黄河流域下游区域,其实测径流量增长速度相对较为平缓。总的来说,3 类水文站在空间分布上特征明显,其水文特征具有显著差异。

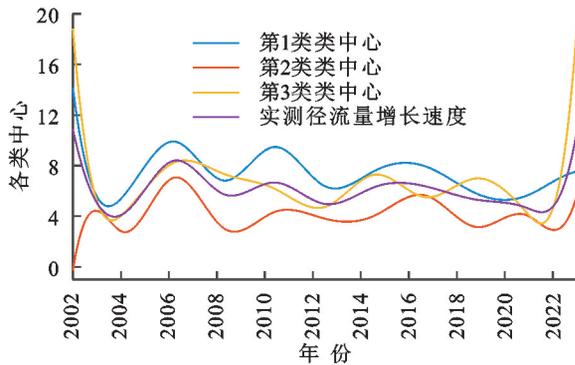


图 11 各类中心与黄河干流实测径流量速度比较  
Fig. 11 Comparison of measured runoff velocity between various centers and the main stream of the Yellow River

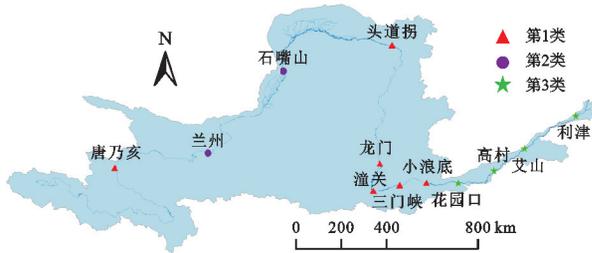


图 12 聚类结果空间分布  
Fig. 12 Spatial distribution of clustering results

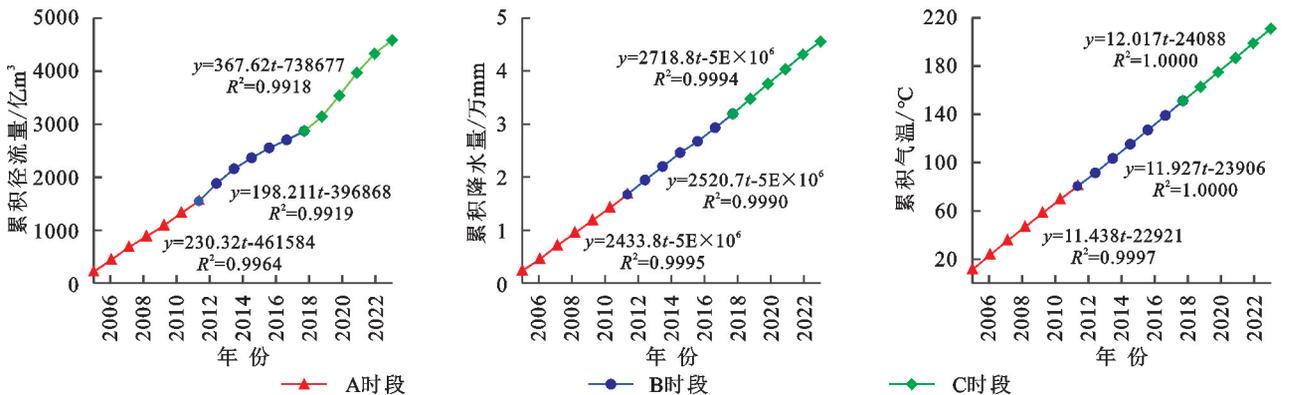


图 13 实测径流量、降水量、气温的累积曲线  
Fig. 13 Cumulative curve of measured runoff, precipitation and temperature

根据公式(5)计算径流量、降水量和气温的累积量的斜率变化率( $R_{SR}, R_{SP}, R_{ST}$ )。从表 4 可以看出, 3 个序列在 B 和 C 时段的斜率变化率均有明显的变化特征。其中, B 时段累积径流量的斜率变化率为

### 2.3 径流量变化的影响因素分析

2.3.1 径流量变化的影响因素 2020 年 3 月 18 日中国气象局气象宣传与科普中心发布的《气候变化和人类活动影响黄河流域水循环》中提到,气候变化与人类活动是影响黄河流域径流量的两大关键因素。在全球变暖背景下,流域内气候发生改变,进而导致径流量也发生变化。此外,城市化、退耕还林、农田灌溉等人类活动也是影响黄河流域径流量变化的重要原因。下面利用累积量斜率变化分析法分析径流量变化的影响因素。

基于实测径流量的突变性和周期性,以 2005—2011 年(A 时段)为基准期,2012—2017 年(B 时段)和 2017—2022 年(C 时段)为影响期。基准期内径流量变化的主要影响因素为气候变化,而随着人类活动的加剧,影响期内径流量受人类活动和气候变化的双重影响。表 3 为 3 个时段的实测径流量、降水量和气温的均值以及均值变化率。可以看出径流量和降水量均在 2018 年前后发生显著变化,而气温在 2012 年前后发生显著变化。同时,实测径流量、降水量、气温的累积曲线如图 13 所示。

表 3 3 个时段黄河干流年均实测径流量、降水量和气温的均值及其变化率

Table 3 Average annual measured runoff, precipitation and temperature in the main stream of the Yellow River in three periods and their change rates

水文变量	均值/[亿 m³/(mm·°C)]			均值变化率/%	
	A 时段	B 时段	C 时段	2012 年	2018 年
实测径流量	221.38	219.84	342.96	-0.7	56
降水量	2389.84	2530.26	2734.57	5.9	8.1
气温	11.45	11.77	11.98	2.3	1.8

负,而 C 时段其斜率变化率为正,说明径流量具有先下降后上升的趋势;而累积降水量和气温在 B 和 C 时段的斜率变化率均为正,且 B 时段小于 C 时段,说明降水量和气温均有持续上升的趋势。

表 4 各影响期径流量、降水量、  
气温累积量的斜率变化率

Table 4 Slope change rate of cumulative amount of runoff,  
precipitation and temperature in each influence period

时段		A 时段	B 时段	C 时段
累积径流量	斜率/(亿 m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup> )	230.32	198.21	367.62
	变化量/(亿 m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup> )	—	-32.05	137.30
	变化率/%	—	-14.91	59.61
累积降水量	斜率/(mm·a <sup>-1</sup> )	2433.80	2520.70	2718.80
	变化量/(mm·a <sup>-1</sup> )	—	86.90	285.00
	变化率/%	—	3.60	11.70
累积气温	斜率/(°C·a <sup>-1</sup> )	11.44	11.93	12.02
	变化量/(°C·a <sup>-1</sup> )	—	0.49	0.58
	变化率/%	—	4.28	5.07

注：“—”代表未发现，下表同。

表 5 为由式(6)—(8)计算得到人类活动和气候变化对径流量变化的贡献率。可以看出从 B 时段到 C 时段,气候变化对径流量的贡献率由 52.85% 下降到 28.14%,而人类活动对径流量的贡献率由 47.15% 上升到 71.86%。这表明近年来人类活动对黄河干流径流量的影响愈加剧烈。

表 5 气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率

Table 5 Contribution rate of climate change and human activities to runoff change %

计算方案	仅考虑降水		综合考虑降水和气温	
	B 时段	C 时段	B 时段	C 时段
降水	24.14	19.63	24.14	19.63
气温	—	—	28.71	8.51
气候变化	24.14	19.63	52.85	28.14
人类活动	75.86	80.37	47.15	71.86

此外,2005—2022 年各水文站的年均天然径流量与实测径流量如图 14 所示,其中天然径流量为地表水耗水量、蓄变量以及实测径流量之和。图 14 表明,黄河干流天然径流量自上而下呈上升趋势,而实测径流量无显著增大,甚至在兰州和利津两处呈下降趋势。同时,天然径流量与实测径流量的差值自兰州站起逐渐增大,至利津水文站时,实测径流量仅约占天然径流量的 1/3。2005—2022 年各水文站平均耗水量和蓄变量见表 6。黄河干流各水文站自上而下耗水量不断增加,位于上游的兰州站最少,为 24.94 亿 m<sup>3</sup>;而位于下游的利津站耗水量最大,高达 298.72 亿 m<sup>3</sup>。耗水量的逐渐增大导致天然径流量与实测径流量的差值逐渐增大。

考虑图 15 中各分区不同领域平均耗水情况,分析人类活动如何影响径流量。从图 15 可以直观地看出,2005—2019 年各分区的平均耗水量最高为花园

口以下区域、兰州至头道拐段次之。不同区域中耗水最大项均为农田灌溉,花园口以下区域多年平均农田灌溉耗水量高达 96.768 亿 m<sup>3</sup>,这与我国主要农业生产区河南、山东的农业发展密切相关;兰州至头道拐段的农田灌溉耗水量也较高,为 82.702 亿 m<sup>3</sup>,其中宁夏和内蒙古灌溉区属于我国的农业耗水大区,其农业生产依赖于灌溉水资源,因此农田灌溉在这些地区的水资源消耗较大。同时,兰州至头道拐段的林牧渔畜耗水量在各分区中居于最大,约为 8.228 亿 m<sup>3</sup>;对于工业耗水量而言,花园口以下区域最多,为 11.306 亿 m<sup>3</sup>,且该区域的城镇公共、居民生活以及生态环境耗水量在各分区中均为最大值,分别为 2.06 亿 m<sup>3</sup>, 6.608 亿 m<sup>3</sup> 和 8.396 亿 m<sup>3</sup>。此外,近两年平均耗水量排名前二的两个分区依次为兰州至头道拐段和花园口以下。与 2014—2019 年各分区不同领域平均耗水情况类似,不同领域中耗水最多的均为农业,兰州至头道拐段农业耗水量为 91.08 亿 m<sup>3</sup>,花园口以下区域为 60.79 亿 m<sup>3</sup>。同时,花园口以下区域的工业、生活以及生态环境的耗水量最大,分别为 11.025 亿 m<sup>3</sup>, 21.295 亿 m<sup>3</sup> 和 24.23 亿 m<sup>3</sup>。

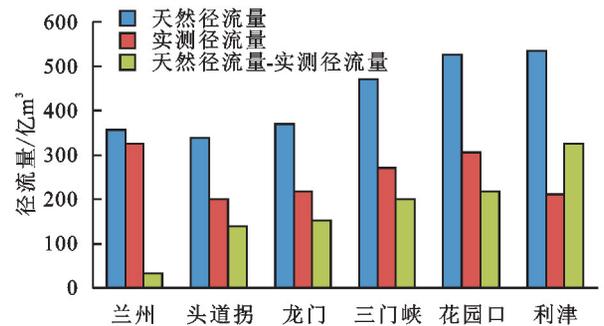


图 14 2005—2022 年各水文站天然径流量与实测径流量

Fig. 14 Natural runoff and measured runoff of each hydrological station from 2005 to 2022

表 6 2005—2022 年各站断面以上平均耗水量和蓄变量  
Table 6 Average water consumption and storable water volume at each station from 2005 to 2022 亿 m<sup>3</sup>

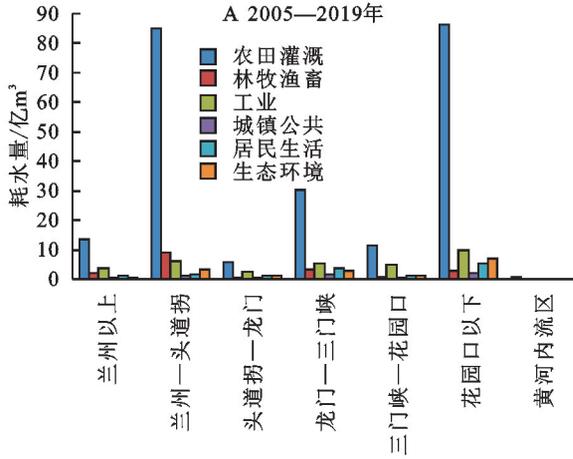
项目	兰州	头道拐	龙门	三门峡	花园口	利津
耗水量	24.94	131.90	141.74	184.96	202.87	298.72
蓄变量	17.16	0.94	17.68	16.49	22.86	21.77

综上所述,工农业耗水、土地利用变化等人类活动中,耗水量增加对径流影响较大,土地利用变化对径流变化的影响较小。此外,在气候变化方面,降水和气温对径流变化有一定的影响<sup>[17]</sup>,降水增加使得径流增加,同时,气温升高致使蒸发量增大,从而导致径流减少。

### 2.3.2 气候变化和人类活动与径流量的响应关系

定量分析实测径流量与气候变化和人类活动之间的关系,充分考虑水文数据的函数变化特征,利用多元

函数型线性模型,估计降水、气温以及耗水量与实测径流量之间的响应关系,选取 2005—2022 年兰州、头道拐、龙门、三门峡、花园口、利津 6 个水文站的降水量 $[x_1(t)]$ 、气温 $[x_2(t)]$ 、耗水量 $[x_3(t)]$ 为自变量,实测径流量变化曲线作为响应变量,建立实测径流量与降水、气温和耗水量之间的多元函数型线性模型。



$$y_i(t) = \alpha_0(t) + \sum_{j=1}^3 \int_0^T x_{ij}(s) \alpha_j(s, t) ds + \epsilon_i(t) \quad i=1, \dots, 6 \quad (11)$$

式中: $\alpha_0(t)$ 为截距函数; $\alpha_j(t)$ 为待估回归系数函数; $\epsilon(t)$ 为误差项。样本曲线 $\epsilon(t)$ 的变动区间为 $[0, T]$ ,样本量为 6。估计模型公式(11)中截距函数 $\alpha_0(t)$ 和斜率函数 $\alpha_1(t), \alpha_2(t)$ 以及 $\alpha_3(t)$ 的估计曲线,如图 16 所示。

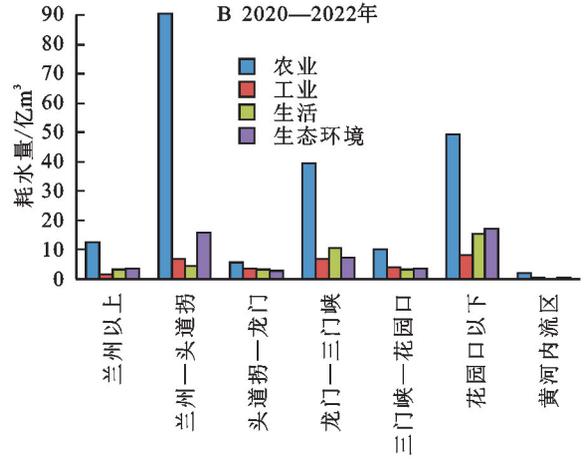


图 15 黄河流域各分区不同领域平均耗水情况

Fig. 15 Average water consumption in different areas of the Yellow River Basin

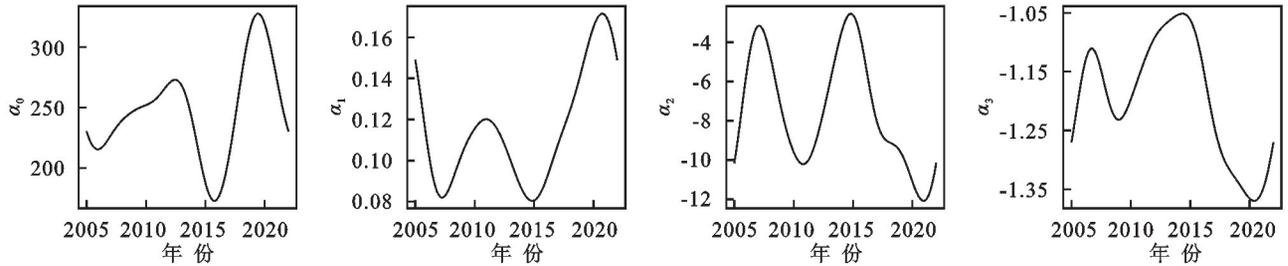


图 16  $\alpha_0(t), \alpha_1(t), \alpha_2(t)$ 和 $\alpha_3(t)$ 的估计曲线

Fig. 16 Estimation curves of  $\alpha_0(t), \alpha_1(t), \alpha_2(t)$  and  $\alpha_3(t)$

从图 16 可以看出,降水量、气温以及耗水量对实测径流量的影响效应,在不同的时间点表现出不同的特征。事实上,截距函数 $\alpha_0(t)$ 的趋势模拟了 6 个水文站实测径流量的平均变化趋势,表明实测径流量在 2005—2006 年春季下降,之后至 2012 年末有所增加,2013—2016 年迅速下降至低谷,2016—2019 年又稳步上升,2019 年之后又开始下降。回归系数函数 $\alpha_1(t), \alpha_2(t)$ 和 $\alpha_3(t)$ 分别表示实测径流量受降水量、气温以及耗水量的影响,从 $\alpha_1(t), \alpha_2(t)$ 和 $\alpha_3(t)$ 的波动幅度可以看出,气候变化和人类活动对实测径流量的影响较大。 $\alpha_1(t)$ 为正值,表明降水量对实测径流量具有正向的影响,降水量与实测径流量的变化趋势基本一致,为黄河干流实测径流量的主要影响因素;而 $\alpha_2(t)$ 和 $\alpha_3(t)$ 在样本区间上为负值,表明气温和耗水量对实测径流量具有负向影响。2005—2007 年 $\alpha_1(t)$ 呈下降趋势,之后又上升至 2011 年, $\alpha_2(t)$ 和 $\alpha_3(t)$ 与 $\alpha_1(t)$ 变化趋势相反;2011—2015 年 $\alpha_1(t)$ 呈

下降趋势且在 2015 年降至低谷,而 $\alpha_2(t)$ 和 $\alpha_3(t)$ 呈增长趋势且其在 2015 年达绝对值最小,表明这一时期降水量、气温以及耗水量对实测径流量的影响效应较小;2015—2020 年 $\alpha_1(t)$ 呈增加趋势, $\alpha_2(t)$ 和 $\alpha_3(t)$ 呈下降趋势,且在 2020 年 $\alpha_1(t), \alpha_2(t)$ 和 $\alpha_3(t)$ 的绝对值最大,意味着此阶段实测径流量受降水量的正向影响以及气温和耗水量的负向影响效应较大。因此,可以得出,实测径流量受到气候变化和人类活动的显著影响,且降水量对其具有正向影响,而气温和耗水量对其有负向影响。

对上述建立的函数型线性回归模型进行检验,以确定降水量、气温以及耗水量与实测径流量之间的关系是否显著。实际上,表 7 中模型的判定系数 $R^2$ 接近于 1,说明模型的解释力度强。同时,绘制 6 个水文站实测径流量真实值与预测值之间的对比图,如图 17 所示。可以看出,大部分点基本分布在曲线附近,表明模型公式(11)的建立是合理可行的,降水量、气

温以及耗水量与实测径流量之间的响应关系显著。因此,控制黄河干流实测径流量,可以气候变化(如降水量、气温)以及人类活动的耗水量为切入点。同时,以降水量、气温以及耗水量为预测因子预测实测径流量,模型预测精度较高,可为黄河流域水资源的合理配置及利用提供理论基础。

表 7 模型的判定系数( $R^2$ )

Table 7 Decision coefficient  $R^2$  of the model

年份	$R^2$	年份	$R^2$	年份	$R^2$
2005	0.7981577	2011	0.8503473	2017	0.8887011
2006	0.7108895	2012	0.8243623	2018	0.9077321
2007	0.7840702	2013	0.8257810	2019	0.8848699
2008	0.8683504	2014	0.8234235	2020	0.8669365
2009	0.8949746	2015	0.8117426	2021	0.8615766
2010	0.8817131	2016	0.8370375	2022	0.7981577

### 3 讨论

现有研究大多基于离散数据视角研究了黄河流域的径流变化特征<sup>[18-19]</sup>,未能充分挖掘径流数据的潜在信息和波动特征。本文在函数型数据视角下,利

用 FDA 方法探究 2002—2022 年黄河干流 12 个水文站实测径流量演变特征,发现近 21 年来其整体呈增加变化趋势,这与文献<sup>[17]</sup>研究结果一致,究其原因 2002 年以来气候变化的积极影响以及人为用水量的减少<sup>[20]</sup>。同时,考虑不同水文站径流量的异同,通过函数型聚类分析方法将 12 个水文站聚为 3 类,结果显示受地理位置、气候变化以及频繁人类活动影响,3 类水文站在空间分布上特征明显,水文特征具有显著差异。此研究结果与黄河流域上、中、下游地区划分基本一致。此外,黄河上游地区主要以农业耗水为主,应以农业节水为重点,统筹考虑粮食安全问题和水资源条件问题,坚定以水定地的观念,对水土开发的规模和强度进行合理确定,推进现代化改造,并分区域推广节水灌溉技术,提高灌溉用水率;黄河中下游区域在工业、生活以及生态环境的耗水较大,应开发节水技术并迅速完成工程体系,进而提高水资源的承载能力,通过对供需矛盾的调节,控制人们水的用量,采用生态项目减轻水的消耗,恢复黄河流域受损的河湖生态环境,维持河流系统健康。

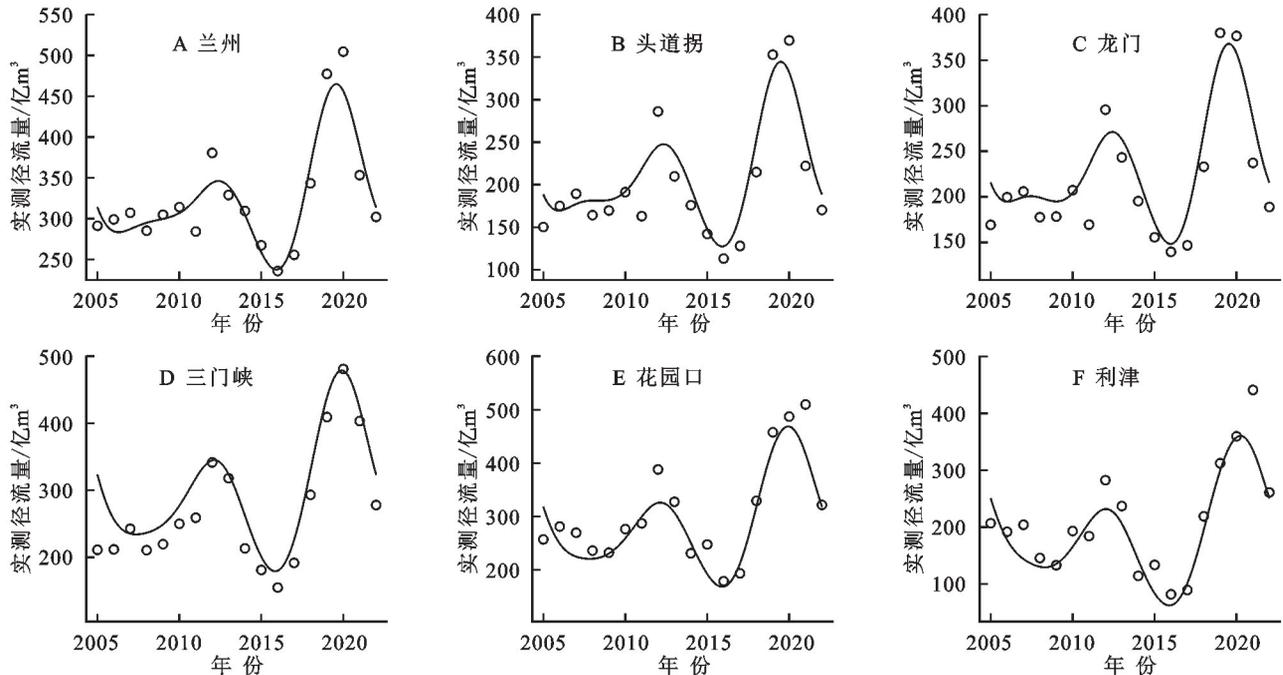


图 17 2005—2022 年 6 个水文站实测径流量与预测值对比

Fig. 17 Comparison chart of measured runoff and predicted value of 6 hydrological stations from 2005 to 2022

已有研究表明<sup>[18,21-22]</sup>,受气候变化和人类活动的影响,近几十年来黄河流域径流发生显著改变。考虑水文资料的函数特性,构建降水量、气温及耗水量与实测径流量的多元函数型线性回归模型,模型表明气候变化和人类活动显著影响实测径流量。然而,本文在分析径流变化的影响因素时,仅考虑了气候变化中的降水量和气温以及人类活动中的耗水量,未对极端天气以及其他水利工程建设等做全面分析,仍需进一步研究。

### 4 结论

(1) 基于拟合函数法、相平面图以及主微分分析研究黄河干流水文站实测径流量的演变特征,结果表明 2002—2022 年黄河干流实测径流量总体上呈增加趋势,周期性显著,且在 2004 年、2008 年、2013 年、2017 年以及 2021 年发生突变。此外,微分方程能够充分刻画实测径流量的动态波动规律及季节变动特征。

(2) 利用函数型聚类分析方法将黄河干流 12 个水文站聚为 3 类,发现 3 类水文站在空间分布上特征明显,水文特征具有显著差异。进一步,通过 ArcGIS 10.8 软件可视化展示黄河干流 12 个水文站实测径流量的差异性特征。

(3) 构建多元函数型线性回归模型,探究气候变化和人类活动与实测径流量之间的响应关系。模型表明,实测径流量受到气候变化和人类活动的显著影响,且降水量对其具有正向影响,而气温和耗水量对其有负向影响。此外,以降水量、气温及耗水量为预测因子预测实测径流量,预测精度高。

#### 参考文献(References):

- [1] 于海超,张扬,马金珠,等.1969—2018 年黄河实测径流与天然径流的变化[J].水土保持通报,2020,40(5):1-7.  
Yu H C, Zhang Y, Ma J Z, et al. Variation of observed and natural runoff of Yellow River from 1969 to 2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40 (5):1-7.
- [2] 马柱国.黄河径流量的历史演变规律及成因[J].地球物理学报,2005,48(6):1270-1275.  
Ma Z G. Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,48(6):1270-1275.
- [3] 高航,姚文艺,张晓华.黄河上中游近期水沙变化分析[J].华北水利水电学院学报,2009,30(5):8-12.  
Gao H, Yao W Y, Zhang X H. Analysis on short-term variation of runoff and sediment load in the upper and middle reaches of Yellow River[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009,30(5):8-12.
- [4] 白夏,王义民,戚晓明,等.黄河上游径流统计特征及演变规律分析[J].人民黄河,2016,38(9):4-7.  
Bai X, Wang Y M, Qi X M, et al. Analysis of statistical characteristics and evolution law of runoff in the upper Yellow River[J]. Yellow River, 2016,38(9):4-7.
- [5] Liu Y, Song H M, An Z S, et al. Recent anthropogenic curtailing of Yellow River runoff and sediment load is unprecedented over the past 500 y[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020,117(31):18251-18257.
- [6] 吕明侠,王一博,吴川东,等.祖厉河河源区径流、泥沙对气候的响应研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(2):87-94.  
Lü M X, Wang Y B, Wu C D, et al. Study on the response of runoff and sediment to climate change in the Zuli River source area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020,31(2):87-94.
- [7] 苏贤保,李勋贵,王义鹏,等.多时间尺度下黄河上游径流复杂度变化特征研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):1-10.  
Su X B, Li X G, Wang Y P, et al. Change characteristics of runoff complexity in the upper reaches of the Yellow River under multiple time scales [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021,32(5):1-10.
- [8] 王彦君,王随继,苏腾.降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J].自然资源学报,2015,30(2):304-314.  
Wang Y J, Wang S J, Su T. Contributions of precipitation and human activities to runoff change in the Songhua River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(2):304-314.
- [9] Liu H, Wang Z, Ji G X, et al. Quantifying the impacts of climate change and human activities on runoff in the Lancang River Basin based on the Budyko hypothesis [J]. Water, 2020,12(12):3501.
- [10] Lei X Y, Gao L, Wei J H, et al. Contributions of climate change and human activities to runoff variations in the Poyang Lake Basin of China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2021,123:103019.
- [11] 张亚丽,王栋华,田义超,等.广西北部湾入海流域径流演变特征及其对气候变化和人类活动的响应[J].广西科学,2022,29(5):971-983.  
Zhang Y L, Wang D H, Tian Y C, et al. Variation characteristics of runoff in basin entering the sea in the Beibu Gulf of Guangxi and its response to climate change and human activities [J]. Guangxi Sciences, 2022,29(5):971-983.
- [12] Ramsay J O, Silverman B W. Functional data analysis [M]. New York: Springer, 2005.
- [13] 王德青,刘宵,王许,等.中国实时金融状况指数的另一种测度:基于函数型数据分析方法[J].金融发展研究,2021(10):14-22.  
Wang D Q, Liu X, Wang X, et al. Another measurement of Chinese real-time Financial Condition Index: based on functional data analysis method[J]. Journal of Financial Development Research, 2021(10):14-22.
- [14] 王华强,刘黎明.基于函数型数据的利率与物价关系研究[J].数理统计与管理,2024,43(3):452-464.  
Wang H Q, Liu L M. Research on the relationship between interest rate and price based on functional data [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2024,43(3):452-464.
- [15] 刻亮亮.基于函数性视角的经济数据分析:以主微分分析方法为例[J].统计与信息论坛,2013,28(1):40-46.  
Yan L L. Economic data analysis based on functional viewpoint: by the principal differential analysis [J]. Journal of Statistics and Information, 2013,28(1):40-46.

- 30(5):31-40.
- Du R Z, Li W D, Gao W H, et al. Influence of climate and surface cover changes on spatiotemporal changes of wind erosion in Pisha sandstone area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(5):31-40.
- [25] 张洋,李鹏,马文东,等.黄河上游西柳沟流域土壤侵蚀对土地利用变化响应[J].*水土保持研究*,2022,29(5):70-76,84.
- Zhang Y, Li P, Ma W D, et al. Research on the response of soil erosion to land use change in Xiliugou Watershed of the upper Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(5):70-76,84.
- [26] 刘蕾,李庆云,刘雪梅,等.黄河上游西柳沟流域淤地坝系对径流影响的模拟分析[J].*应用基础与工程科学学报*,2020,28(3):562-573.
- Liu L, Li Q Y, Liu X M, et al. Simulation of the impact of check dams on runoff in Xiliugou Watershed in the upper Yellow River[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020,28(3):562-573.
- [27] 毛鸿欣,贾科利,高曦文,等.1980—2018年银川平原土地利用变化时空格局分析[J].*科学技术与工程*,2020,20(20):8008-8018.
- Mao H X, Jia K L, Gao X W, et al. Spatiotemporal pattern of land use change in Yinchuan Plain from 1980 to 2018[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020,20(20):8008-8018.
- [28] 石善球,柴燕妮.基于地表覆盖数据的生态用地景观格局分析[J].*地理空间信息*,2021,19(2):5-8,63.
- Shi S Q, Chai Y N. Landscape pattern analysis of ecological land based on land coverage data[J]. *Geospatial Information*, 2021,19(2):5-8,63.
- [29] 袁轶男,金云峰,聂晓嘉,等.基于 Fragstats4 的上海市城市景观格局指数动态研究[J].*山东农业大学学报:自然科学版*,2020,56(6):1157-1162.
- Yuan Y N, Jin Y F, Nie X J, et al. Study on dynamic urban landscape pattern indexes in Shanghai City based on Fragstats4[J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition*, 2020, 56(6):1157-1162.
- [30] 马晓勇,党晋华,李晓婷,等.太原市近 15 年城市景观格局时空变化及其驱动力[J].*水土保持通报*,2018,38(4):308-316.
- Ma X Y, Dang J H, Li X T, et al. Spatial-temporal changes and driving forces of urban landscape pattern in Taiyuan City in last 15 years[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018,38(4):308-316.
- 
- (上接第 13 页)
- [16] 高海燕,黄恒君,王宇辰.基于非负矩阵分解的函数型聚类算法[J].*统计研究*,2020,37(8):91-103.
- Gao H Y, Huang H J, Wang Y C. Functional clustering algorithm based on non-negative matrix factorization[J]. *Statistical Research*, 2020,37(8):91-103.
- [17] Han Z Q, Zuo Q T, Wang C Q, et al. Impacts of climate change on natural runoff in the Yellow River Basin of China during 1961—2020[J]. *Water*, 2023,15(5):929.
- [18] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J].*水力发电学报*,2020,39(8):90-103.
- Feng J H, Zhao G J, Mu X M, et al. Analysis on runoff regime in middle Yellow River and its driving factors[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020,39(8):90-103.
- [19] 贾何佳,李谢辉,文军,等.黄河源区径流变化模拟及未来趋势预估[J].*资源科学*,2022,44(6):1292-1304.
- Jia H J, Li X H, Wen J, et al. Runoff change simulation and future trend projection in the source area of the Yellow River[J]. *Resources Science*, 2022,44(6):1292-1304.
- [20] Zeng B, Zhang F G, Zeng W F, et al. Spatiotemporal heterogeneity in runoff dynamics and its drivers in a water conservation area of the upper Yellow River Basin over the past 35 years[J]. *Remote Sensing*, 2022,14(15):3628.
- [21] 梁鹏飞,李宗杰,辛惠娟,等.黄河源区径流变化特征及影响因素研究[J].*水资源与水工程学报*,2022,33(4):64-71.
- Liang P F, Li Z J, Xin H J, et al. Characteristics of runoff changes and influencing factors in the source region of the Yellow River[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022,33(4):64-71.
- [22] 郑金丽,严子奇,李东,等.黄河流域降雨-径流关系时空演变研究[J].*水资源与水工程学报*,2021,32(4):77-85,92.
- Zheng J L, Yan Z Q, Li D, et al. Spatio-temporal evolution of the rainfall-runoff relationship in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021,32(4):77-85,92.