

# 不同水沙调控阶段黄河流域梯级水库群系统协同演变特征

杨啸宇<sup>1</sup>, 缴健<sup>1</sup>, 屈博<sup>2</sup>, 窦希萍<sup>1</sup>, 曹民雄<sup>1</sup>, 江恩慧<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院河流海岸研究所; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院)

**摘要:**为准确把握黄河流域梯级水库群系统的协同演变规律,基于协同学理论,识别了黄河流域不同河段行洪输沙、生态环境、社会经济子系统的序参量,分析了序参量的变化特征,明晰了 1965—2020 年系统协同度演变特征。结果表明:1965—1985 年流域多年平均来水量相对较多,虽然流域用水量逐步提升,系统整体仍处于自我平衡的良好协同状态,但此时水库调控能力较弱,序参量受天然水沙条件影响,系统协同度年际间波动大,中游部分年份系统降至中度不协同状态;1986—2001 年序参量受龙羊峡水库投入运行、调度体系不完善和流域用水量迅速增大等因素的影响,系统平衡状态被打破,降至勉强协同状态,下游协同度降幅最大,部分年份系统降至严重不协同状态;2002—2020 年水库群调控体系完善,流域水量分配更为合理,序参量得到恢复,系统进入新协同阶段,回升至初级协同状态,并出现向更高协同状态演进的趋势。

**关键词:**梯级水库群系统;水沙调控;协同度;序参量;协同状态;黄河流域

**Coordinated evolution characteristics of cascaded reservoir system in the Yellow River Basin under different water-sediment regulation stages//Yang Xiaoyu<sup>1</sup>, Jiao Jian<sup>1</sup>, Qu Bo<sup>2</sup>, Dou Xiping<sup>1</sup>, Cao Minxiong<sup>1</sup>, Jiang Enhui<sup>2</sup>(1. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC)**

**Abstract:** In order to accurately understand the coordinated evolution patterns of the cascaded reservoir system in the Yellow River Basin, based on synergetics theory, order parameters of flood-sediment transport, ecological environment, and socioeconomic subsystems in different reaches of the Yellow River Basin were identified. The variation characteristics of these order parameters were analyzed, and the evolution characteristics of coordination degree of the cascaded reservoir system from 1965 to 2020 were clarified. The results show that, from 1965 to 1985, the multi-year average runoff of the basin was relatively abundant. Although the water consumption in the basin gradually increased, the overall system remained in a self-balanced and well-coordinated state. However, due to the limited regulation capacity of reservoirs, order parameters were largely affected by natural runoff and sediment conditions, resulting in large interannual fluctuations in system coordination degree. In the middle reach, the cascaded reservoir system even dropped to a moderately uncoordinated state in some years. From 1986 to 2001, due to the operation of the Longyangxia Reservoir, the immaturity of the unified dispatching system, and the rapid increase in water consumption in the basin, order parameters were adversely affected. The system's balance was disrupted, leading to a decline to a barely coordinated state. The lower reach experienced the sharpest decline in the system coordination degree, even reaching a severely uncoordinated state in some years. From 2002 to 2020, the cascaded reservoir regulation system was improved, the water allocation in the basin became more reasonable, and order parameters were recovered. Then, the system entered a new coordinated stage, rising to a primary coordinated state and showing an upward evolutionary trend.

**Key words:** cascaded reservoir system; water-sediment regulation; coordination degree; order parameter; coordinated state; the Yellow River Basin

黄河流域梯级水库群系统作为一个动态的复杂巨系统<sup>[1]</sup>,掌握其历史协同演变规律对指导梯级水

库群联合调度具有重大意义。流域协同发展研究的常用方法是先建立多维度综合评价指标体系并计算

**基金项目:**国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金项目(U2243241);国家重点研发计划项目(2021YFC3200400);南京水利科学研究院研究生学位论文基金项目(Yy225006)

**作者简介:**杨啸宇(1998—),男,博士研究生,主要从事水沙动力与流域系统治理研究。E-mail:xyyang@nhri.cn

**通信作者:**缴健(1988—),男,高级工程师,博士,主要从事水动力与泥沙基础理论研究。E-mail:jjiao@nhri.cn

指标阈值,再结合协同度计算模型得到系统协同度。众多学者针对黄河流域水资源-能源-粮食<sup>[2-4]</sup>、水-能源-环境-经济<sup>[5]</sup>、粮食-生态-能源安全<sup>[6]</sup>等众多子系统之间的协调耦合关系展开研究。江恩慧等<sup>[7-8]</sup>引入流域系统科学理论将黄河流域系统划分为行洪输沙、生态环境、社会经济三大子系统。在此基础上,Qu等<sup>[9]</sup>探讨了2001—2020年黄河下游水资源、生态环境、社会经济的耦合协调关系;顾艳林等<sup>[10]</sup>评估了2000年来黄河下游行洪输沙、社会经济、生态环境子系统的耦合协调变化趋势。传统方法能够从多层次量化黄河流域子系统之间的协同关系,但存在指标选取主观性较强等缺点;同时,针对黄河流域梯级水库群系统协同演变规律的相关研究较少。

协同学是研究系统协调发展及演化机理的重要理论工具<sup>[11]</sup>,能够从机理层面揭示系统的协同状态。其核心原理是:处于非平衡态的开放系统,其内部子系统通过协同作用,推动系统从无序走向有序。序参量是协同学理论中的核心概念,在开放系统从无序到有序的宏观相变过程中起主导作用,目前关于序参量的识别方法主要有定性分析和定量计算两种。定性分析是基于序参量的概念进行逻辑推理和归纳总结,进而识别得到序参量。例如:罗巍等<sup>[12]</sup>基于科学性、适宜性原则,选取了水资源、能源和粮食领域的序参量,对黄河流域的水-能源-粮食纽带关系协同演化进行实证分析;Jin等<sup>[13]</sup>通过分析黄河流域供水、发电、生态、输沙4个用水目标关键利益与非关键利益,选取了各目标的序参量。定量计算通常采用哈肯模型进行识别,该方法采用数学模型表述自组织系统的演化过程,并通过数学方法的“绝热近似”假设去除快变量对系统的影响,从而找到序参量。例如,李文启等<sup>[14]</sup>基于哈肯模型和势函数,计算得到黄河流域人口、土地、产业城镇化协同发展的序参量及协同水平。复杂系统的演化过程中往往会产生多个序参量,哈肯模型对序参量的识别只停留在宏观层面,缺少对系统演化过程中各环节详细信息的分析,导致识别出的序参量通常不够全面<sup>[15]</sup>。为克服以上缺点,温馨等<sup>[16]</sup>提出了基于目标规划评价模型的序参量识别方法,不仅能够处理多个变量下的序参量识别,而且能够获取描述系统各个变量的相关信息。

本文以黄河流域梯级水库群系统为研究对象,包括黄河干、支流及梯级水库群。引入协同学理论,针对梯级水库群系统的行洪输沙、生态环境、社会经济三大子系统,采用改进的序参量识别模型确定各河段子系统的序参量,进而探析1965—2020年各河段系统协同度的时空变化特征及障碍度,以期梯

级水库群系统的运行管理提供科学指引。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

黄河流域位于32°10'N~41°50'N、95°53'E~119°05'E之间,流域面积79.5万km<sup>2</sup>,地势西部高、东部低,由西向东逐级下降(图1)。自然河源至内蒙古托克托县的河口镇为黄河上游,重点水文站包括唐乃亥、兰州、石嘴山、头道拐等,控制性骨干水利工程包括龙羊峡水库和刘家峡水库。河口镇至河南郑州桃花峪为黄河中游,重点水文站包括龙门、潼关等,控制性骨干水利工程包括万家寨、三门峡和小浪底水库。桃花峪以下至入海口为黄河下游,重点水文站包括花园口、高村、艾山、利津等。

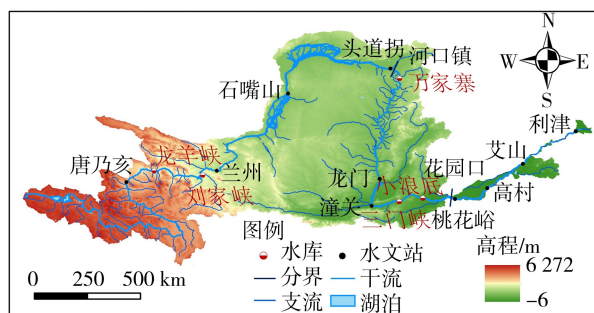


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

### 1.2 数据来源

行洪输沙相关数据主要来源于历年《黄河流域水文年鉴》《黄河水资源公报》《黄河泥沙公报》等,生态环境相关数据主要来源于历年《中国环境统计年鉴》等,社会经济相关数据主要来源于历年《能源统计年报》等,部分变量参考了相关研究成果<sup>[17-23]</sup>。为保证数据的连续性,对少量缺测年份数据采用线性插值法进行补充,并通过极值检验与一致性检查剔除异常值。

## 2 研究方法

选取行洪输沙、生态环境、社会经济三大子系统的代表性指标,利用改进的序参量识别模型识别黄河流域梯级水库群系统上、中、下游各子系统序参量;结合协同度计算模型,研究各河段系统协同演变特征;采用障碍度模型,揭示各序参量对各河段系统协同度的影响。

### 2.1 改进的序参量识别模型

#### 2.1.1 指标选取

参考江恩慧等<sup>[24]</sup>提出的黄河流域“139+”水沙调控框架,针对黄河流域梯级水库群系统,在行洪输沙、生态环境和社会经济三大子系统中选取了部分

代表性指标,如图2所示(图中“+”“-”分别表示正向和负向指标)。

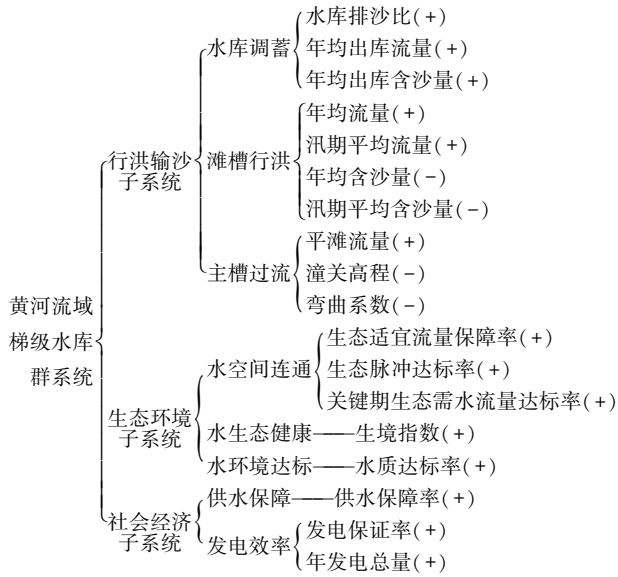


图2 黄河流域梯级水库群系统各子系统代表性指标

Fig.2 Representative indexes of each subsystem for cascaded reservoir system in the Yellow River Basin

### 2.1.2 序参量识别方法

本文参考了温馨等<sup>[16]</sup>提出的基于目标规划评价的序参量识别方法,该方法假设黄河流域梯级水库群系统的某个子系统包含  $m$  个变量,各变量的状态用  $p$  维向量构成的变量体系来表示。序参量识别的具体步骤为:

a. 鉴于各变量的维度不同,为消除量纲差异,采用极差标准化法对原始数据进行无量纲处理<sup>[10]</sup>。

b. 构建理想目标值,通常假定:

$$y_i^* = (1 + 10\%) \max_{1 \leq j \leq p} \{y_{ij}\} \quad (1)$$

式中: $y_i^*$  为第  $i$  个变量的理想目标值; $y_{ij}$  为第  $i$  个变量第  $j$  个维度标准化后的值。

c. 按照目标规划的思想,从最有利于体现第  $i$  个变量价值贡献度的角度确定其价值参数:

$$W_{ij} = \frac{1}{(y_i^* - y_{ij})^2} / \sum_{i=1}^m \frac{1}{(y_i^* - y_{ij})^2} \quad (2)$$

式中: $W_{ij}$  为第  $i$  个变量第  $j$  个维度的价值参数,能够反映同一维度上变量  $i$  相对其他变量的价值贡献度。

d. 计算第  $i$  个变量的理想价值参数  $W_i^*$ :

$$W_i^* = \sum_{j=1}^p W_{ij} / p \quad (3)$$

e. 对系统内所有变量的价值参数进行聚类分析,得到系统的多种主导模式。计算每个主导模式的价值参数结构与理想价值参数结构的相似系数:

$$R_k = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^m |z_{Ri} - z_{ki}| / \max_{1 \leq i \leq m} \{ |z_{Ri} - z_{ki}| \}} \quad (4)$$

式中: $R_k$  为第  $k$  个主导模式价值参数结构与理想价值参数结构的相似系数; $z_{Ri}$  为变量  $i$  在理想价值参数结构下的排名值; $z_{ki}$  为变量  $i$  在第  $k$  个主导模式价值参数结构下的排名值。

### 2.1.3 方法改进

在实际计算中,上述计算相似系数的方法易受变量个数和变量排序的影响。为克服不足,本文采用计算余弦相似度进行改进,从而更准确地反映不同主导模式价值参数结构与理想价值参数结构的相似程度<sup>[25]</sup>:

$$R_k = \sum_{i=1}^m (W'_{ki} W_i^*) / \left( \sqrt{\sum_{i=1}^m W'^2_{ki}} \sqrt{\sum_{i=1}^m W_i^{*2}} \right) \quad (5)$$

式中: $W'_{ki}$  为第  $k$  个主导模式下第  $i$  个变量的价值参数。

相似系数越大,表示第  $k$  个主导模式的价值参数结构越接近理想价值参数结构,其在系统群体演化过程中的作用越强。在具有最大相似系数的主导模式中,价值参数最大的变量即为序参量,其主导该群体的演化与发展,能够影响系统的演化与发展方向。

考虑到黄河流域梯级水库群系统部分子系统内变量众多,若对全部变量进行识别时,往往会造成各变量的价值参数基本相同,难以区分序参量。为增强变量间价值参数的区分度,采用多级识别的方式:即当变量数量过多时,首先对变量进行初步筛选,将同一类变量(如上游各水文站的年均流量)进行平均处理,减少变量数量;进而采用序参量识别模型得到宏观序参量;再针对宏观序参量中的具体变量进行二次识别,得到最终序参量。

## 2.2 协同度模型

### 2.2.1 耦合度

设定黄河流域梯级水库群系统由  $N$  个相互联系的子系统构成,每个子系统包含  $K$  个序参量;每个子系统的发展变化会受到序参量  $P_{nk}$  ( $n=1,2,\dots,N; k=1,2,\dots,K$ ) 的影响。考虑到本文中每个河段的每个子系统只有一个序参量,将  $P_{nk}$  简化为  $P_n$ 。鉴于各序参量的维度不同,首先采用极差标准化法将序参量归一化。

耦合度  $C$  用于表征  $N$  个子系统间的耦合作用,计算公式为:

$$C = \frac{\prod_{n=1}^N P'_n}{\sum_{n=1}^N P'_n / N} \quad (6)$$

式中: $P'_n$  为  $P_n$  归一化后的值。

### 2.2.2 协调度

协调度  $T$  用于表征  $N$  个子系统发展过程中彼此和谐一致的程度,计算公式为:

$$T = \sum_{n=1}^N w_n P'_n \quad (7)$$

式中:  $w_n$  为第  $n$  个子系统的权重,文中假设行洪输沙、生态环境和社会经济子系统权重相同,取值为  $1/3$ 。

### 2.2.3 协同度

协同度  $U$  用于表征  $N$  个子系统发展过程的耦合协调水平,反映梯级水库群系统的协同状态。当子系统权重相同时,计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$U = \sqrt{CT} \quad (8)$$

$U$  取值范围为  $[0, 1]$ , 其值越大,梯级水库群系统的耦合协调水平越高。参照前期相关研究,根据  $U$  值范围将梯级水库群系统协同状态从低到高划分为 10 个等级<sup>[24]</sup>,依次为:极度不协同、严重不协同、中度不协同、轻度不协同、濒临不协同、勉强协同、初级协同、中级协同、良好协同和优质协同,对应的  $U$  值范围分别为  $0 \sim 0.1$ 、 $>0.1 \sim 0.2$ 、 $>0.2 \sim 0.3$ 、 $>0.3 \sim 0.4$ 、 $>0.4 \sim 0.5$ 、 $>0.5 \sim 0.6$ 、 $>0.6 \sim 0.7$ 、 $>0.7 \sim 0.8$ 、 $>0.8 \sim 0.9$ 、 $>0.9 \sim 1.0$ 。

### 2.3 障碍度模型

障碍度模型通过计算各指标与理想值偏离度及其与总偏离度之比,表征各指标对系统协同度的制约<sup>[26]</sup>。本文采用障碍度模型计算不同河段各子系统对系统协同度的制约程度,某个子系统的障碍度越小,说明系统协同度受该子系统的制约作用越弱。障碍度计算公式为:

$$O_{mn} = \frac{w_n (x_{n,\max} - x_{mn})}{\sum_{n=1}^N w_n (x_{n,\max} - x_{mn})} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $O_{mn}$  为第  $m$  年第  $n$  个子系统的障碍度;  $x_{mn}$  为第  $m$  年第  $n$  个子系统序参量的标准化值;  $x_{n,\max}$  为第  $n$  个子系统序参量历年标准化值的最大值。

## 3 结果与分析

### 3.1 序参量识别结果

利用改进的序参量识别模型得到黄河流域梯级

表 1 三大子系统序参量

Table 1 Order parameters of three subsystems

河段	子系统	宏观序参量相似系数	序参量相似系数	序参量
上游	行洪输沙	0.9934	0.9930	三湖河口断面平滩流量
	生态环境	0.9950	0.9976	头道拐断面生态适宜流量保证率
	社会经济		0.9990	兰州断面供水保障率
中游	行洪输沙		0.9948	潼关高程
	生态环境		0.8924	潼关断面生态适宜流量保证率
	社会经济		0.9933	花园口断面供水保障率
下游	行洪输沙	0.9952	0.9884	孙口断面平滩流量
	生态环境	0.9744	0.9997	利津断面生态适宜流量保证率
	社会经济		0.9995	利津断面供水保障率

水库群系统行洪输沙、生态环境、社会经济三大子系统的宏观序参量相似系数和序参量相似系数,进一步得到各河段子系统的序参量,如表 1 所示。其中,上游和下游河段行洪输沙和生态环境子系统涉及的变量较多,因此,采用多级识别的方式,先计算得到宏观序参量,再从中识别得到最终序参量。

### 3.2 序参量变化特征

#### 3.2.1 行洪输沙子系统

由图 3 可知,1965—2020 年三湖河口平滩流量表现为先相对稳定、后逐步下降、再稍有恢复;潼关高程表现为先波动下降、后上升、再趋于稳定;孙口平滩流量表现为先波动变化、后急剧下降、再逐步回升。结合上游来水来沙条件分析,1965—1985 年三湖河口平滩流量受天然水沙条件主导,上游来水较丰,因此整体相对稳定,总体维持在  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  左右;潼关高程受三门峡工程的改扩建影响,高程不断波动;孙口平滩流量受上游来水变化影响大幅波动。1986—2001 年,随着龙羊峡、万家寨等水库的投入

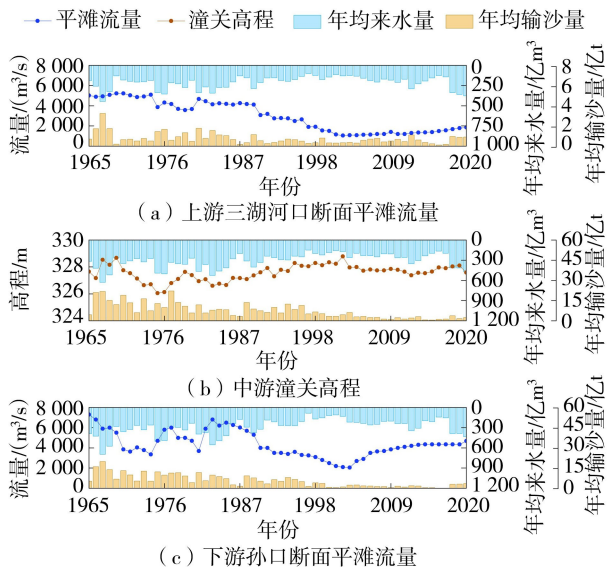


图 3 行洪输沙子系统序参量轨迹特征

Fig. 3 Trajectory characteristics of order parameters in flood-sediment transport subsystem

运行,上游来水明显减少,河道输水、输沙能力减弱,三湖河口平滩流量下降明显,长期维持在 $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下;潼关高程因三门峡库区泥沙淤积快速抬升;孙口平滩流量显著衰减,一度跌至 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下。2002—2020年,在水量统一调度与小浪底调水调沙作用下,行洪输沙条件有所改善,河道主槽持续冲刷,三湖河口平滩流量稍有恢复,潼关高程趋于稳定,年际波动减弱;孙口平滩流量逐步回升至 $4000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上。

### 3.2.2 生态环境子系统

由图4可知,1965—2020年头道拐断面生态适宜流量保证率表现为先在较高水平波动、后逐步下降、再慢慢回升;潼关断面和利津断面生态适宜流量保证率表现出同样的趋势,但潼关断面波动幅度较小,利津断面则出现显著波动。结合上游来水条件分析,1965—1985年,各河段生态适宜流量保证率主要受上游来水影响,年际间波动明显;但由于上游来水相对较多,且流域用水量逐步提升,整体保持在较高水平。1986—2001年,受龙羊峡水库投入运行、流域用水量增加等影响,各河段生态适宜流量保证率均出现降低,其中下游出现断流频发现象,生态适宜流量保证率急剧下降,部分年份甚至低于20%。2002—2020年,龙刘水库的联合调度趋于完善,加之小浪底水库投入运行,各河段生态适宜流量保证率出现逐步提升,在2018—2020年达到100%,下游随来水条件影响,保证率仍会显著波动。

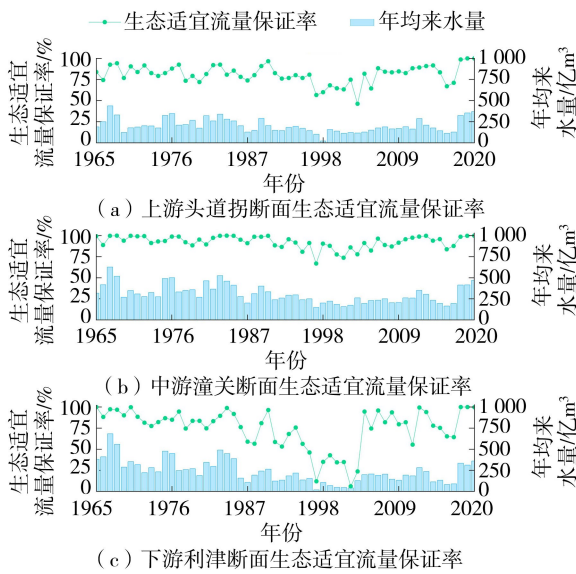


图4 生态环境子系统序参量轨迹特征

Fig.4 Trajectory characteristics of order parameters in ecological environment subsystem

### 3.2.3 社会经济子系统

由图5可知,1965—2020年兰州断面供水保障率表现出先稳定在较高水平、后波动降低、再逐步回

升;花园口断面和利津断面供水保障率表现出同样的趋势,其中利津断面变动幅度最大。结合上游来水条件分析,1965—1985年,由于上游来水相对较多,且流域用水量逐步提升,各河段供水保障率整体保持在较高水平,仅上游部分年份出现波动。1986—2001年,随着龙羊峡水库投入运行、流域用水量增加等影响,各河段供水保障率均出现降低,下游降幅最大、中游次之、上游最小,下游部分年份甚至低于25%。2002—2020年,随着龙刘水库的联合调度趋于完善,加之小浪底水库投入运行,各河段供水保障率波动提升,在2018—2020年均达到100%,但下游随来水条件影响仍波动显著。

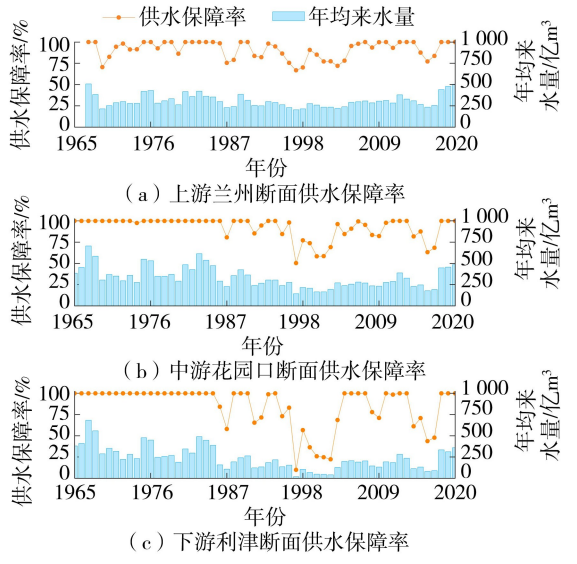


图5 社会经济子系统序参量轨迹特征

Fig.5 Trajectory characteristics of order parameters in socioeconomic subsystem

### 3.3 系统协同度

基于协同度模型计算得到黄河流域梯级水库群系统上、中、下游的协同度变化过程(图6),结合龙羊峡水库投入运行和小浪底水库开始调水调沙的时间节点,参考第2.2.3节的协同度等级划分,将1965—2020年各区段协同度变化过程划分为3个阶段。

a. 1965—1985年,黄河流域上游和中下游形成了两个相对独立的水量调度管理体系,上游受刘家峡水库和多座中型水电站影响,下游用水主要依赖三门峡水库。此时梯级水库群系统对于黄河水沙动力的调控能力较弱,各序参量主要受天然来水来沙条件影响。其间流域多年平均来水量相对较大,虽然流域用水量逐步提升,系统尚处于自我平衡状态,协同度总体维持在较高水平;上、中、下游系统多年平均协同度分别为0.88、0.80和0.82,均达到良好协同。但此期间各河段系统协同度年际间频繁波

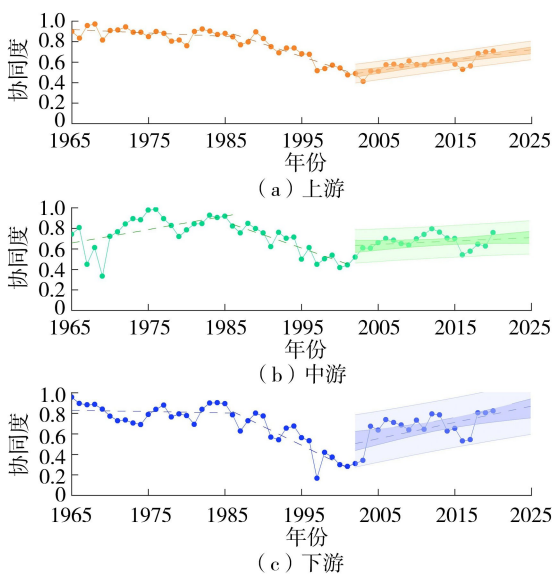


图6 梯级水库群系统不同河段协同度变化过程及预测  
Fig. 6 Coordination degree variation and prediction in different reaches of cascaded reservoir system

动,中游变幅最大、下游次之、上游最小;1969年中游因潼关河段持续淤积、潼关高程抬升至历史高位,导致系统降至中度不协同状态。由于此时水库群调度体系不完善,难以通过有效的水沙调控对流域梯级水库群系统的协同水平进行主动干预和改善。

b. 1986—2001年,随着黄河流域经济迅速发展,黄河流域用水量迅速增长,虽然1998年《黄河水量调度管理办法》施行后,水量统一调度已起步,但调度体系尚处于初创阶段。加之龙羊峡水库投入运行,下游河道来水量减少,河道输水输沙能力显著降低,各序参量也出现不同程度的下降。梯级水库群系统自我平衡状态被打破,协同度开始波动下降,下游降幅最大、中游次之、上游最小。上、中游系统多年平均协同度分别降至0.66和0.61,为初级协同;下游系统多年平均协同度降至0.51,仅为勉强协同,部分年份甚至降至严重不协同状态。

c. 2002—2020年,随着小浪底水库建成投入运行及2002年首次黄河调水调沙试验启动<sup>[27]</sup>,黄河流域构建了更为科学的水沙联合调度体系。2006年《黄河水量调度条例》的正式颁布后,流域水量分配更为合理,河道输水输沙能力逐步恢复,各序参量也迅速提升。梯级水库群系统进入协同新阶段,协同度均处于波动上升状态,下游上升幅度最大、中游次之、上游最小。上游系统多年平均协同度为0.58,达到勉强协同;中、下游系统多年平均协同度分别升至0.67和0.68,达到初级协同。

应用趋势外推法对各河段未来5年系统协同度变化趋势进行拟合预测,并绘制置信带(图6中浅色区域)与预测带(图6中深色区域)以反映拟合与

预测结果的不确定性。自2002年以来,各河段梯级水库群系统协同度呈波动回升趋势,各河段未来系统协同度可能出现阶段性波动,但总体将保持上升趋势。

### 3.4 障碍度诊断

基于障碍度模型系统评估不同河段各子系统对梯级水库群系统协同度的障碍度(图7),以表征不同河段各子系统对系统协同度的制约程度。

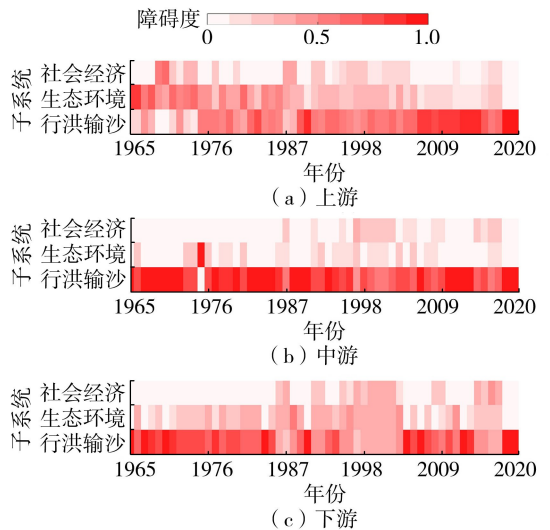


图7 不同河段各子系统对梯级水库群系统协同度的障碍度  
Fig. 7 Obstacle degree of subsystems in different reaches to coordination degree of cascaded reservoir system

a. 上游区间1965—1985年受生态环境子系统制约显著。1986年后受龙羊峡建成蓄水影响,河道行洪输沙能力锐减,河床淤积,行洪输沙子系统的制约强度持续增大,而生态环境子系统制约强度逐渐减弱,社会经济子系统对系统制约整体较弱。

b. 中游区间持续受行洪输沙子系统严重制约,说明潼关高程对中游梯级水库群系统的协同发展起到至关重要的作用,当潼关高程降低时,系统协同度呈较高状态。生态环境和社会经济子系统除个别年份有较强影响外,持续在低障碍度波动。

c. 下游区间同样持续受行洪输沙子系统严重制约,说明孙口平滩流量对下游梯级水库群系统的协同发展起到至关重要的作用,当孙口平滩流量增大时,系统协同度呈较高状态。生态环境子系统同样对下游系统存在持续制约,但其制约程度弱于行洪输沙子系统。此外,1995—2003年受来水量持续减少、水量调度办法改变等影响,下游梯级水库群系统受到3个子系统长期共同制约。

## 4 结论

a. 上游序参量为三湖河口断面平滩流量、头道拐断面生态适宜流量保证率和兰州断面供水保障

率;中游序参量为潼关高程、潼关断面生态适宜流量保证率和花园口断面供水保障率;下游序参量为孙口断面平滩流量、利津断面生态适宜流量保证率和利津断面供水保障率。

b. 行洪输沙子系统中上游和下游序参量呈现随时间先波动变化、后逐步下降、再稍有回升的趋势,其中下游的变化幅度大于上游;中游年际间波动较大,整体先波动下降、后上升、再趋于稳定。生态环境子系统序参量先在较高水平波动、后逐步下降、再慢慢回升,下游变幅最大。社会经济子系统序参量先稳定在较高水平、后波动降低、再逐步回升,下游变幅最大。

c. 1965—1985年黄河流域多年平均来水量较大,虽然流域用水量逐步提升,各河段梯级水库群系统仍处于自我平衡的良好协同状态;但此期间水库群调控较弱,系统协同度受天然水沙条件影响年际间波动大。1986—2001年受龙羊峡水库建成蓄水、水库群调控体系尚不完善和流域用水量迅速增加等影响,系统平衡状态被打破,降至勉强协同状态。2002—2020年梯级水库群调控体系逐步完善,系统进入新协同阶段,回升至初级协同状态,并出现向更高协同状态演进的趋势。

d. 黄河流域各河段梯级水库群系统协同度均受行洪输沙子系统主导性制约。1965—1985年上游系统协同度主要受生态环境子系统波动影响,1986年后行洪输沙子系统制约强度显著增大。中下游系统协同度高度受限于行洪输沙子系统,生态环境及社会经济子系统制约有限。

## 参考文献:

[ 1 ] 黄德春,朱宇昂,张修忠,等. 基于多理论视角的我国现代化水库运行管理矩阵建设研究[J]. 水利经济,2025,43(3):84-93. (Huang Dechun, Zhu Yuang, Zhang Xiuzhong, et al. Research on the construction of modern reservoir operation and management matrix in China from multiple theoretical perspectives[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(3):84-93. (in Chinese))

[ 2 ] 彭少明,郑小康,王煜,等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. 水科学进展,2017,28(5):681-690. (Peng Shaoming, Zheng Xiaokang, Wang Yu, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5):681-690. (in Chinese))

[ 3 ] 赵良仕,刘思佳,孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究[J]. 水资源保护,2021,37(1):69-78. (Zhao Liangshi, Liu Sijia, Sun Caizhi. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin[J]. Water

Resources Protection,2021,37(1):69-78. (in Chinese))

[ 4 ] 陈艳萍,蒋倩倩,刘晶婕. 黄河流域“水资源-生态保护-高质量发展”空间均衡性诊断[J]. 水利经济,2024,42(1):14-20. (Chen Yanping, Jiang Qianqian, Liu Jingjie. Spatial equilibrium diagnosis of “water resources-ecological protection-high-quality development” in the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(1):14-20. (in Chinese))

[ 5 ] Pang Bo, Li Xiaoxing, Fu Yao. Coupling coordination analysis and obstacle factors of water-energy-environment-economy in the Yellow River Basin[J]. Journal of Cleaner Production,2024,468:143108.

[ 6 ] 崔新蕾,徐辰玥. 黄河流域粮食-生态-能源安全的协调发展差异及障碍因素分析[J]. 中国农业资源与区划,2026,47(1):30-45. (Cui Xinlei, Xu Chenyue. Differences and obstacles to the coordinated development of food-ecology-energy security in the Yellow River Basin[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2026,47(1):30-45. (in Chinese))

[ 7 ] 江恩慧,王远见,田世民,等. 流域系统科学初探[J]. 水利学报,2020,51(9):1026-1037. (Jiang Enhui, Wang Yuanjian, Tian Shimin, et al. Exploration of watershed system science[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020,51(9):1026-1037. (in Chinese))

[ 8 ] 江恩慧,屈博,王远见,等. 流域系统科学理论与方法解析:以黄河流域为例[J]. 水利学报,2025,56(5):551-563. (Jiang Enhui, Qu Bo, Wang Yuanjian, et al. Theoretical and methodological analysis of watershed system science: a case study of the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,56(5):551-563. (in Chinese))

[ 9 ] Qu Bo, Jiang Enhui, Li Jiaqi, et al. Coupling coordination relationship of water resources, eco-environment and socio-economy in the water-receiving area of the Lower Yellow River[J]. Ecological Indicators,2024,160:111766.

[ 10 ] 顾艳林,刘畅,陈开雯,等. 黄河下游流域行洪输沙-社会经济-生态环境系统耦合协调分析[J]. 水资源保护,2025,41(4):87-93. (Gu Yanli, Liu Chang, Chen Kaiwen, et al. Coupling coordination analysis of flood and sediment transport-social economy-ecological environment system in the lower Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2025,41(4):87-93. (in Chinese))

[ 11 ] 夏锦文,舒辉. 物流系统演化的协同学分析[J]. 商业研究,2009(12):190-192. (Xia Jinwen, Shu Hui. Synergetic analysis of logistics system evolution[J]. Commercial Research,2009(12):190-192. (in Chinese))

[ 12 ] 罗巍,杨玄酯,杨永芳,等. 黄河流域水-能源-粮食纽带关系协同演化及预测[J]. 资源科学,2022,44(3):608-619. (Luo Wei, Yang Xuanzhi, Yang Yongfang, et al. Co-evolution of water-energy-food nexus in the Yellow River Basin and forecast of future development[J]. Resources Science,2022,44(3):608-619. (in Chinese))

- [13] Jin Wenting, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Multi-objective synergetic reservoir operation in a sediment-laden river[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 599: 126295.
- [14] 李文启, 范晶晶. 黄河流域城镇化协同发展研究: 基于哈肯模型的分析[J]. *价格理论与实践*, 2023(8): 190-194. (Li Wenqi, Fan Jingjing. Study on the synergistic development of urbanization in the Yellow River Basin; based on the Harken model[J]. *Price: Theory & Practice*, 2023(8): 190-194. (in Chinese))
- [15] 温馨. 基于序参量原理的组织战略变革过程研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- [16] 温馨, 赵希男, 贾建锋. 基于 GPEM 主旋律分析的系统序参量识别方法研究[J]. *运筹与管理*, 2011, 20(3): 168-175. (Wen Xin, Zhao Xi'nan, Jia Jianfeng. Identification method for system order parameter based on GPEM main melody analysis and its application [J]. *Operations Research and Management Science*, 2011, 20(3): 168-175. (in Chinese))
- [17] 韩小军, 卢书慧, 史红玲, 等. 黄河上游宁蒙河段平滩流量变化与水沙过程的响应关系[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2024, 22(4): 361-367. (Han Xiaojun, Lu Shuhui, Shi Hongling, et al. Variation of bankfull discharge and its response relationship with flow and sediment processes of Ningmeng reach in Upper Yellow River [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(4): 361-367. (in Chinese))
- [18] 侯素珍, 胡恬, 王平, 等. 近年来三门峡库区冲淤及潼关高程变化分析[J]. *泥沙研究*, 2024, 49(6): 30-36. (Hou Suzhen, Hu Tian, Wang Ping, et al. Analysis of erosion and sedimentation in the Sanmenxia Reservoir and Tongguan elevation change in recent years [J]. *Journal of Sediment Research*, 2024, 49(6): 30-36. (in Chinese))
- [19] 韩小军, 卢书慧, 史红玲, 等. 黄河下游河道平滩流量变化及其与汛期水沙条件的关系[J]. *泥沙研究*, 2024, 49(3): 69-73. (Han Xiaojun, Lu Shuhui, Shi Hongling, et al. Variation of bankfull discharge and its relationship with flow and sediment conditions during flood season in the Lower Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2024, 49(3): 69-73. (in Chinese))
- [20] 李东林, 李睿, 刘刚, 等. 基于改进累积前景理论的黄河梯级水库水沙-生态-经济多目标调度决策模型[J]. *水资源保护*, 2025, 41(5): 173-179. (Li Donglin, Li Rui, Liu Gang, et al. A multi-objective scheduling decision-making model based on modified cumulative prospect theory for water-sediment, eco-environment, and socio-economy of cascade reservoirs in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(5): 173-179. (in Chinese))
- [21] 金文婷, 牛姿童, 白涛, 等. 黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制[J]. *水资源保护*, 2025, 41(4): 94-104. (Jin Wenting, Niu Zitong, Bai Tao, et al. Multi-objective synergy/coercion control for unified water-sand dispatching in the upper Yellow River [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(4): 94-104. (in Chinese))
- [22] 郑景琦, 邓涯, 马爱兴, 等. 水库群调度影响下黄河流域水沙-生态-经济协调发展及制约因子研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41(6): 85-94. (Zheng Jingqi, Deng Ya, Ma Aixin, et al. Research on water and sediment-ecology-economy coordinated development and limiting factors in the Yellow River Basin under influence of reservoir group operation [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(6): 85-94. (in Chinese))
- [23] 高璐, 徐向舟, 张红武. 持续冲刷期内黄河下游河床演变特点分析[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(3): 73-79. (Gao Lu, Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu. Characteristics of channel adjustment in Lower Yellow River during continuously scouring period [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(3): 73-79. (in Chinese))
- [24] 江恩慧, 李洁玉, 王远见, 等. 黄河流域系统可持续运行的“139+”水沙调控指标体系[J]. *水利学报*, 2025, 56(4): 423-432. (Jiang Enhui, Li Jieyu, Wang Yuanjian, et al. Water and sediment regulation index system “139+” for sustainable development of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 56(4): 423-432. (in Chinese))
- [25] 黄宇杰, 俞晓东, 汪怡然, 等. 基于 GABP 神经网络和水力学模型的输水工程实时水量调控研究[J/OL]. *河海大学学报(自然科学版)*, 1-10 [2025-02-06]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250205.1611.040>. (Huang Yujie, Yu Xiaodong, Wang Yiran, et al. Research on real-time flow regulation in water diversion project based on GABP neural network and hydraulic models [J/OL]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 1-10 [2025-02-06]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250205.1611.040>. (in Chinese))
- [26] 李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 20-25. (Li Shaopeng, Zhao Heng, Wang Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 20-25. (in Chinese))
- [27] 孙晓娟, 余真真, 左其亭, 等. 水沙调控影响下小浪底水库水温模拟与演变特性[J]. *水资源保护*, 2026, 42(1): 162-172. (Sun Xiaojuan, Yu Zhenzhen, Zuo Qiting, et al. Simulation and evolution characteristics of water temperature in the Xiaolangdi Reservoir under influence of water-sediment regulation [J]. *Water Resources Protection*, 2026, 42(1): 162-172. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-09-24 编辑: 施业)