

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.06.010

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

郑景琦¹, 邓 涯^{1,2}, 马爱兴^{1,2}, 曹民雄^{1,2}, 胡 颖^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210029;
2. 南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:为识别水库群调度影响下黄河流域各区间水沙-生态-经济协调发展状况及制约因子,构建了考虑水库调蓄影响的综合评价指标体系,建立了改进的 TOPSIS 联合灰色关联分析模型,并提出了相应的耦合协调度模型和障碍度模型。结果表明:2000—2022 年黄河流域上中下游区间水沙、生态、经济子系统发展指数均呈增长趋势,普遍为水沙子系统滞后型,且其发展指数与来水量显著线性相关;各区间协调发展度整体提升,下游区间稳定于良好协调水平,上中游区间自 2021 年起回落至中级协调水平;流域协调发展主要受水沙子系统制约,在干旱年份更为突出,上游区间主要受水资源总量与开发利用率制约,中下游区间还受制于水库排沙比与河道冲淤量等;生态与经济子系统中,不透水面积、化肥施用强度、生境指数、城乡可支配收入比和人均生活用水量等为主要制约因子。

关键词:水库群调度;耦合协调度模型;障碍度模型;水沙子系统;黄河流域

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0085-10

Research on water and sediment-ecology-economy coordinated development and limiting factors in the Yellow River Basin under influence of reservoir group operation//ZHENG Jingqi¹, DENG Ya^{1,2}, MA Aixing^{1,2}, CAO Minxiong^{1,2}, HU Ying^{1,2} (1. River and Coast Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering, MOT, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: To identify the coordinated development status and limiting factors of water and sediment-ecology-economy in various intervals of the Yellow River Basin under influence of reservoir group operation, a comprehensive evaluation index system considering the impact of reservoir regulation and storage was constructed. An improved TOPSIS joint grey relational analysis model was established, and corresponding coupled coordination degree models and obstacle degree models were proposed. The results show that from 2000 to 2022, the development index of water and sediment, ecology, and economic subsystems in the upper, middle, and lower reach intervals of the Yellow River Basin showed an increasing trend and generally a lagging type of water and sediment subsystem, and their development index was significantly linearly correlated with the inflow. The overall coordinated development degree of each interval has improved, and the lower reach interval has remained stable at a good coordination level. The upper and middle reach intervals have fallen back to a medium coordination level since 2021. The coordinated development of the basin is mainly constrained by the water and sediment subsystem, which is more prominent in drought years. The upper reach interval is mainly constrained by the total amount of water resources and development utilization rate, while the middle and lower reach intervals are also constrained by factors such as reservoir sediment discharge ratio and river channel erosion and deposition. In the ecology and economy subsystems, impermeable area, fertilizer application intensity, habitat index, urban-rural disposable income ratio, and per capita domestic water consumption are the main limiting factors.

Key words: reservoir group operation; coupled coordination degree model; obstacle degree model; water and sediment subsystem; the Yellow River Basin

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200401);水利青年人才发展项目(Qs222014);南京水利科学研究院研究生学位论文发展基金项目(Yy224014)

作者简介:郑景琦(1995—),男,博士研究生,主要从事流域水沙-生态-经济多维互反馈耦合机制研究。E-mail:782673518@qq.com

通信作者:邓涯(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事流域水沙-生态-经济多维互反馈耦合机制研究。E-mail:ydeng@nhri.cn

作为一个复杂的巨系统,流域系统内部行洪输沙、生态环境和社会经济的各子系统间相互联系、互相影响。因此,流域系统协调发展离不开行洪输沙、生态环境和社会经济子系统内各要素良性运转及协同发展^[1]。随着系统科学的发展,许多学者重点考虑河流资源属性,强调水资源与社会、经济、生态等供给关系,已开展了一系列流域水资源-生态-经济协调发展^[2-5]、驱动机制^[6]、制约因子^[7-8]等方面的研究,为进一步开展流域系统协调发展研究提供了参考。目前,针对流域系统内部行洪输沙、生态环境和社会经济子系统间协调发展及制约因子的相关研究较少。Jiang 等^[9]构建了黄河下游行洪输沙、生态环境和粮食生产评价指标体系,研究了 2000 年以来三者协调发展水平,其中行洪输沙选择河道冲淤量、平滩流量、河漫滩与河道高差、河势相对稳定系数等指标;Zhao 等^[10]开展了黄河流域水系治理中行洪输沙、生态环境和社会经济的耦合协调研究,其中行洪输沙子系统主要指标为河道断面流量和含沙量,生态环境子系统的主要指标为生态流量保证率;顾艳林等^[11]着重研究了黄河下游行洪输沙、社会经济、生态环境系统耦合协调状况,行洪输沙子系统选取指标与 Jiang 等^[9]类似。可见,目前行洪输沙、生态环境、社会经济协调发展相关研究中未能充分考虑水库群调度作用和调蓄的影响。

鉴于此,本文综合考虑水库群调度作用,基于改进的 TOPSIS 和灰色关联分析构建行洪输沙、生态环境和社会经济综合评价指标体系。使用改进的障碍度模型^[12],在保证综合评价模型结果区分度和排序合理性的基础上,辨识各子系统发展水平和流域系统协调发展状况及制约因子。后文中行洪输沙、生态环境和社会经济子系统分别简称为水沙、生态和经济子系统。

1 研究区概况与数据来源

黄河流域东西横跨约 1 900 km,地势自青藏高原向东经内蒙古高原、黄土高原至黄淮海平原逐级下降^[13]。内蒙古托克托县河口镇以上为黄河上游,

包括龙羊峡以上、龙羊峡至兰州、兰州至头道拐及内流区等二级流域;河口至桃花峪区间为中游,涵盖头道拐至龙门、龙门至三门峡和三门峡至花园口等二级流域;郑州桃花峪以下为下游,主要为花园口以下流域,如图 1 所示,图中二级流域 I ~ VIII 依次为龙羊峡以上、龙羊峡至兰州、兰州至头道拐、内流区、头道拐至龙门、龙门至三门峡、三门峡至花园口和花园口以下。

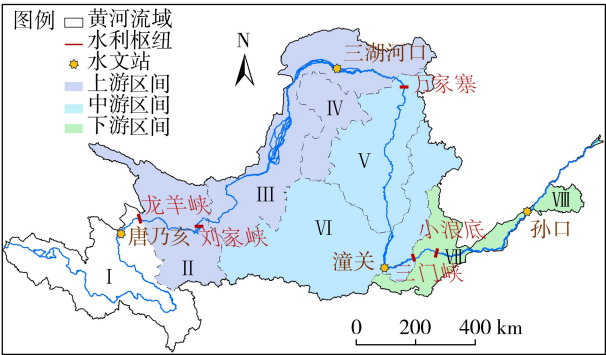


图 1 研究区概况及二级流域划分

Fig. 1 Overview of study area and division of secondary watersheds

将研究区划分为上中下游 3 个区间,其中上游区间和下游区间分别受龙刘(龙羊峡和刘家峡水库)和三小(三门峡和小浪底水库)水库联合调度影响;中游区间当前缺少控制性骨干水利枢纽工程进行调控,故主要考虑万家寨水库对黄河中游干流调控作用。因此,上游区间调整为龙羊峡至兰州、兰州至头道拐及内流区二级流域,中游区间调整为头道拐至龙门和龙门至三门峡二级流域,下游区间调整为三门峡至花园口和花园口以下二级流域。考虑到行政单元边界与流域边界不重合,分别重新整合了上中下游区间相关市级行政单位,并以各区间相关行政区域社会经济活动数据表征经济子系统的相关因子,上中下游区间涉及地市级行政单位如表 1 所示。另外,各区间涉及地市级行政单位包括黄河供水区,保证社会经济相关指标数据可以充分反映广义黄河流域实际社会经济发展水平。

水文相关数据主要来源于历年《黄河流域水文

表 1 黄河流域各区间涉及的地市级行政单位

Table 1 City level administrative units involved in different intervals of the Yellow River Basin

区间	涉及地市级行政单位
上游	青海省西宁市、海东市、海北州、黄南州、海南州;甘肃省兰州市、白银市、武威市、定西市、临夏州、甘南州;宁夏回族自治区银川市、石嘴山市、吴忠市、中卫市;内蒙古自治区呼和浩特市、包头市、乌兰察布市、鄂尔多斯市、巴彦淖尔市、乌海市
中游	甘肃省天水市、平凉市、庆阳市;宁夏回族自治区固原市;陕西省榆林市、延安市、铜川市、渭南市、咸阳市、宝鸡市、西安市;山西省朔州市、忻州市、吕梁市、太原市、晋中市、临汾市、运城市
下游	陕西省商洛市;山西省晋城市、长治市;河南省郑州市、开封市、洛阳市、新乡市、焦作市、濮阳市、济源市、安阳市、鹤壁市、平顶山市、许昌市、商丘市、周口市、三门峡市;山东省济南市、淄博市、东营市、济宁市、泰安市、德州市、聊城市、滨州市、菏泽市、青岛市、烟台市、日照市、威海市、潍坊市

年鉴》《黄河水资源公报》《黄河泥沙公报》和各省市水资源公报等,其中典型断面平滩流量和典型河段冲淤量来源于相关研究成果^[14-18];社会经济相关数据主要来源于各省市历年统计年鉴,其中 GDP 和可支配收入等数据已按相关计算方法转换为可比价格;生态环境相关数据主要来源于历年《中国环境统计年鉴》等,其中 30 m 分辨率土地覆盖数据来源于 Yang 等^[19]发布的中国土地覆盖数据集。

2 研究方法

2.1 综合评价指标体系

黄河流域不同区间内水沙、生态和经济三大子系统相互联系、互相影响。作为水沙输移主要通道,水沙子系统保障行洪输沙安全,并为生态和经济子系统提供水沙资源;生态子系统为水沙和经济子系统提供可持续发展保障;经济子系统的可持续发展需要水沙和生态子系统提供基础,同时对后两者进行人工干预和修复^[20]。流域系统内部水沙、生态和经济三大子系统各要素之间相互交织,形成复杂的系统网络(图 2)。

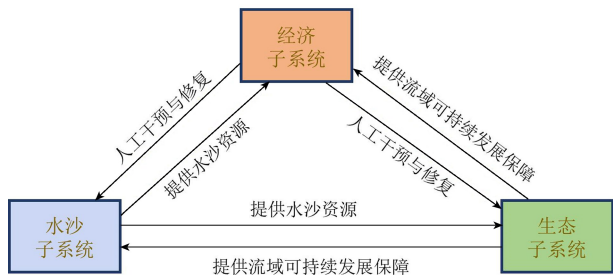


图 2 流域系统内三大子系统相互作用
Fig. 2 Interaction of three subsystems in watershed system

考虑指标体系构建的科学性、可操作性、真实性及数据可获得性等原则,建立考虑水库群调度作用的黄河流域水沙-生态-经济综合评价指标体系,并通过熵权法确定各指标权重,如图 3 所示,图中括号内“+”、“-”分别代表正向和负向指标,3 个数值分别为该指标在上游、中游和下游区间的权重。由图 3 可见,水沙子系统包括流域面产水产沙和河道内水沙输移相关因子,并考虑了水沙子系统水资源供给能力。其中,上游来水来沙情况受流域水沙资源配置影响,是水库群发挥调蓄能力的基础;水库排沙比和蓄洪补枯量综合表征水库群水沙调节能力;平滩流量和河段冲淤量表征河道行洪输沙能力;区域水资源量和水资源开发利用率分别表征流域内水资源禀赋和承压状况。上中下游区间水库群来水来沙情况分别选取唐乃亥、头道拐和潼关作为控制性水文站;水库排沙比分别为龙刘、万家寨和三小下泄沙量与上游来沙量比值;上游和下游区间水库水量

考虑 水库 群调 度作 用的 黄河 流域 水沙- 生态- 经济 综合 评价 指标 体系	水沙 子系 统	来流量 $F_1(+, 0.037/0.083/0.056)$
		来沙系数 $F_2(-, 0.017/0.036/0.017)$
		水库排沙比 $F_3(+, 0.023/0.056/0.112)$
		蓄洪补枯量 $F_4(+, 0.037/0.048/0.025)$
		平滩流量 $F_5(+, 0.044/0.016/0.030)$
		河段冲淤量 $F_6(+, 0.030/0.034/0.015)$
	生态 子系 统	区域水资源量 $F_7(+, 0.079/0.037/0.049)$
		水资源开发利用率 $F_8(-, 0.066/0.023/0.030)$
		植被覆盖率 $E_1(+, 0.026/0.032/0.040)$
		耕地面积 $E_2(-, 0.028/0.034/0.039)$
经济 子系 统	生态- 经济 综合 评价 指标 体系	湿地面积 $E_3(+, 0.042/0.027/0.020)$
		不透水面积 $E_4(-, 0.051/0.038/0.044)$
		生境指数 $E_5(+, 0.040/0.059/0.054)$
		适宜生态流量保证率 $E_6(+, 0.019/0.026/0.017)$
	经济 子系 统	单位 GDP 污水 COD 排放量 $E_7(-, 0.026/0.024/0.019)$
		单位 GDP 污水氨氮排放量 $E_8(-, 0.045/0.038/0.034)$
		化肥施用强度 $E_9(-, 0.055/0.056/0.067)$
		人口密度 $S_1(-, 0.046/0.053/0.042)$
		城镇化率 $S_2(-, 0.032/0.037/0.033)$
		人均可支配收入 $S_3(+, 0.045/0.049/0.049)$
		人均可支配收入比 $S_4(-, 0.041/0.039/0.042)$
	经济 子系 统	人均 GDP $S_5(+, 0.024/0.022/0.026)$
		一产占比 $S_6(-, 0.042/0.046/0.047)$
		二产占比 $S_7(+, 0.019/0.017/0.021)$
		单位耕地粮食产量 $S_8(+, 0.028/0.018/0.020)$
		人均生活用水量 $S_9(-, 0.025/0.025/0.022)$
		单位工业增加值用水量 $S_{10}(-, 0.015/0.016/0.014)$
		单位粮食用水量 $S_{11}(-, 0.018/0.012/0.018)$

图 3 考虑水库群调度作用的黄河流域水沙-生态-经济综合评价指标体系

Fig. 3 Comprehensive evaluation index system for water and sediment-ecology-economy considering operation of reservoir groups in the Yellow River Basin

调节能力指标采用蓄洪补枯量,考虑到万家寨水库调蓄能力有限,中游区间采用万家寨水库实际调洪库容,并结合龙刘水库群具有年际调节能力的实际情况,上游区间蓄洪补枯量为水库群年际下泄量与来水量差值,下游区间为水库群枯期下泄量与来水量差值;上中下游平滩流量典型断面分别为三湖河口、潼关和孙口,河段冲淤量分别为宁蒙河段、小北干流和小浪底以下河段;区域水资源量和水资源开发利用率分别为上中下游狭义流域内相应数值。生态子系统包括流域面和河道内两部分,通过植被覆盖率、湿地面积、耕地面积等指标表征狭义流域面生态系统结构,同时采用 InVEST 计算生境指数综合表征生态系统质量;适宜生态流量保证率上中下游区间分别选取头道拐、潼关和利津为控制断面,相应标准参考《黄河流域综合规划(2012—2030 年)》,并通过单位 GDP 污水中污染物(COD、氨氮)排放量和化肥施用强度分别表征河道点源和面源污染情

况。经济子系统包括社会和经济水平及水资源利用效率等指标,分别为上中下游区间相应主要受水区数值,相关指标选取充分参考相关研究^[21-22]。

TOPSIS 法根据评价对象真实状态与理想目标间的欧式距离来确定系统发展水平,该方法计算过程简单易懂,却不能反映数据序列中的动态变化。灰色关联分析通过评价系列组成的曲线与参考系列组成的曲线几何形状相似性来判断两者间相关性,可以衡量评价对象发展趋势,适用于分析动态变化。Wang 等^[6]提出了基于改进的 TOPSIS 法与灰色关联分析的综合评价模型,在准确反映评价对象现状水平的同时,能够衡量其动态发展趋势。因此,本文在采用极值法和熵权法^[23]对原始数据标准化处理得到各指标权重后,通过改进的 TOPSIS 法与灰色关联分析相结合方法计算灰色关联系数的相对接近度,从而计算各子系统的发展指数,计算公式为

$$Q_i = l_i^+ / (l_i^+ + l_i^-) \quad (1)$$

其中
$$l_i^+ = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m l_{ij}^+ \quad l_i^- = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m l_{ij}^-$$

式中: Q_i 为子系统 i 的发展指数,取值范围为 0~1,值越大子系统的发展水平越优; l_{ij}^+ 、 l_{ij}^- 分别为子系统 i 中指标 j 与正、负理想解之间的灰色关联系数; m 为各子系统指标数量。

耦合协调度模型通过协调发展度表征子系统间协调发展水平。假设三大子系统的权重相等,协调发展度的计算公式为

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Q_i} \quad (2)$$

式中: D 为协调发展度,取值范围为 0~1,值越大子系统间协调发展程度越高; n 为子系统数。根据王淑佳等^[24]的研究划分系统协调发展度,其中初级协调为 0.6~<0.7,中级协调为 0.7~<0.8,良好协调为 0.8~<0.9,优质协调为 0.9~1。

2.2 改进的障碍度模型

传统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发展水平的制约^[24]。考虑到传统的障碍度模型仅适用于简单的加权综合评价模型,Qu 等^[12]通过在子系统中增加系统协调发展障碍度计算模块,使得改进的障碍度模型可以计算各指标对系统协调发展的障碍度,但仍仅适用于简单的加权综合评价模型。相比 TOPSIS 法和灰色关联分析等综合评价方法,加权综合评价法存在区分度差和易受极值影响等缺点,极大地影响了该障碍度模型的推广应用。

本文从障碍度模型基本定义出发,结合改进的 TOPSIS 法联合灰色关联分析的综合评价模型,基于

各指标与负理想解之间的灰色关联系数,构建相适应的障碍度模型,计算各指标对所在子系统发展指数的障碍度(式(3)),进而计算各子系统对流域系统协调发展度的障碍度(式(4)),最后计算各指标对流域系统协调发展度的障碍度(式(5))。

$$O_{ij} = l_{ij}^- / \sum_{j=1}^m l_{ij}^- \times 100\% \quad (3)$$

$$S_i = \frac{\frac{1}{6}(\ln Q'_{imax} - \ln Q_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{6}(\ln Q'_{imax} - \ln Q_i)} \times 100\% \quad (4)$$

$$U_{ij} = O_{ij} S_i \times 100\% \quad (5)$$

式中: O_{ij} 为指标 j 对子系统 i 发展指数的障碍度; S_i 为子系统 i 对流域系统协调发展度的障碍度; Q'_{imax} 为子系统 i 的理想发展水平,本文取 1; U_{ij} 为子系统 i 中指标 j 对流域系统的协调发展度的障碍度, $U_{ij} > 5\%$ 时该指标为流域系统关键制约因子。

3 结果与分析

3.1 黄河流域三大子系统发展指数

图 4 为 2000—2022 年黄河流域各区间三大子系统的发展指数。由图 4 可见,水库群调度下黄河流域上下游区间水沙、生态和经济子系统发展指数都呈整体提升态势,其中,水沙子系统受降水量等因素影响较大,呈现出明显的波动性。图 5 为 2000—2022 年黄河流域各区间流域系统发展滞后类型,可见各区间在大部分年份表现为水沙子系统滞后型;上游区间经济子系统滞后年份所占比例相对中下游区间较大,反映出上游区间经济发展基础相对薄弱。上游区间水沙子系统发展指数在 2000—2004 年低于 0.4,2005—2009 年稳定在 0.5 左右,2009 年后呈波动增加态势,2016 年降至最低 0.32,2020 年达到最高 0.77。中游和下游区间水沙子系统受来水条件影响显著,2000—2002 年处于连续枯水年时段末尾,发展指数低于 0.4;2003 年后来水改善,中游区间水沙子系统发展指数在 2003—2009 年维持在 0.42 左右,最低为 0.37;下游区间结合调水调沙措施,水沙子系统发展指数在 2003—2009 年维持在 0.43 左右,最低为 0.41,与中游区间相比整体较高。2009 年后中游和下游区间水沙子系统发展指数呈波动增加态势,2016 年都降至最低 0.36 左右,最高分别为 0.66(2020 年)和 0.68(2021 年)。生态子系统方面,上游和中游区间发展指数 2000—2019 年稳步上升,分别由 0.41 增至 0.69 和 0.67,但 2019 年后有所下降,至 2022 年分别降至 0.53 和 0.55;下游区间呈类似先升后降特征,2018 年达到

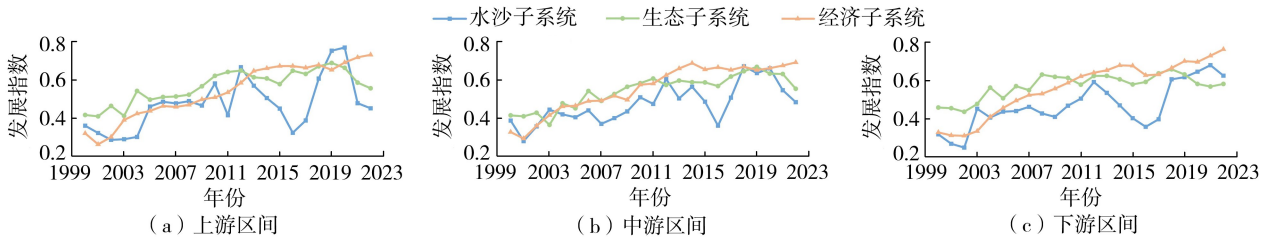


图 4 2000—2022 年黄河流域各区间三大子系统发展指数

Fig. 4 Development index of three subsystems in various interval of the Yellow River Basin from 2000 to 2022

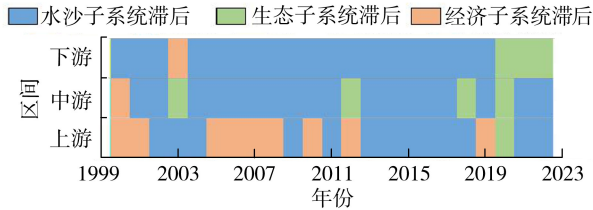


图 5 2000—2022 年黄河流域各区间流域系统发展滞后类型

Fig. 5 Lag types of basin system development in various interval of the Yellow River Basin from 2000 to 2022

0.66 的峰值,2020—2022 年稳定在 0.57 左右,并略有下降。经济子系统在上中下游区间均表现为持续增长,发展指数自 2000 年的 0.32、0.33 和 0.33 分别增至 2022 年的 0.73、0.69 和 0.76。

2000—2002 年黄河流域处于连续枯水年时段末尾,此后来水情况有所改善。2003—2014 年上中下游年均来水量分别为 201 亿、176 亿、250 亿 m^3 ; 2015—2017 年黄河流域持续偏枯,2016 年上中下游来水量降至最少,分别为 136 亿、113 亿和 165 亿 m^3 ; 2018—2020 年黄河流域持续偏丰,上中下游来水量相对较多,年均来水量分别为 308 亿、349 亿、433 亿 m^3 。进一步分析表明,水沙子系统发展指数与水库群上游来水量高度相关,2015—2017 年黄河流域不同区间水沙子系统发展指数基本在 0.5 以下; 2018—2020 年黄河流域不同区间水沙子系统在该时期发展指数较大,保持在 0.6 以上。图 6 为黄河流域各区间来水量和水沙子系统发展指数的拟合结果。由图 6 可见,上中下游区间来水量与水沙子系统发展指数变化趋势基本一致,相关系数分别为 0.83、0.85 和 0.89,达到 0.01 显著性水平,表明来水量与水沙子系统发展指数显著线性相

关。作为水沙子系统关键驱动因子,区间来水量驱动该子系统内其他指标发生相应变化,如水库排沙比、平滩流量等,使得其与水沙子系统发展指数呈显著的线性相关性^[25-26]。同时,区间来水量和区域水资源量受气候影响,当降水量较少时,两者相对较小,而经济子系统农业灌溉需水量此时相应增加,使得水沙子系统水资源开发利用效率增大,水沙子系统发展指数进一步降低^[27]。区间来水量与生态子系统湿地面积和关键断面适宜生态流量保证率也呈一定线性关系,当来水量较多时,湿地面积和关键断面适宜生态流量保证率相应增大^[28]。

对黄河流域各区间三大子系统发展指数进行基于时间序列的线性回归,结果如表 2 所示。黄河流域各区间经济子系统发展指数均表现出明显的线性增加趋势,年均增加率为 0.017~0.021,显著高于水沙和生态子系统,可见其在水沙和生态经济子系统有力保障下实现了稳定增长。

表 2 黄河流域各区间三大子系统发展指数线性回归结果

Table 2 Linear regression results for development index of three subsystems in different interval of the Yellow River Basin

区间	子系统	斜率	均值	R^2
上游	水沙	0.011 6	0.47	0.33
	生态	0.011 1	0.54	0.62
	经济	0.020 5	0.57	0.94
中游	水沙	0.011 0	0.48	0.53
	生态	0.011 0	0.56	0.75
	经济	0.017 3	0.54	0.88
下游	水沙	0.013 3	0.47	0.58
	生态	0.006 6	0.56	0.49
	经济	0.020 0	0.57	0.90

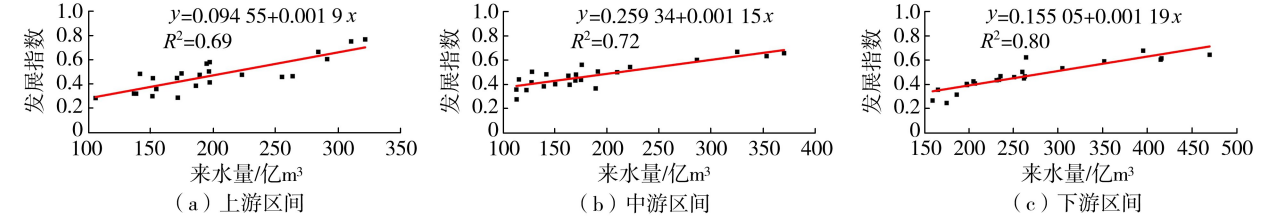


图 6 黄河流域各区间来水量与水沙子系统发展指数拟合结果

Fig. 6 Fitting results of water inflow and development index of water and sediment subsystem in various interval of the Yellow River Basin

3.2 黄河流域各区间系统协调发展度

图 7 为 2000—2022 年黄河流域各区间系统协调发展度,可见各区间系统协调发展度变化趋势较为一致,2000 年均处于初级协调水平,随后呈稳步提升趋势,2018 年整体提升至良好协调水平。2021 年上中游区间协调发展度开始下降,分别由 2020 年的 0.84 和 0.81 降至 2022 年的 0.75 和 0.76,回落至中级协调水平;而下游区间则相对稳定,协调发展度基本维持在 0.8 左右,持续保持良好协调状态。各区间协调发展度差异的根源在于水资源禀赋、生态承载与经济结构的异质性。结合三大子系统的发展指数可知,2015—2017 年黄河流域各区间协调发展度较低可能是由水沙子系统发展指数较低引起,而上中游区间 2021—2022 年协调发展度较低则可能是水沙和生态子系统发展指数较低造成的。该结果表明,协调发展度提升依赖于三大子系统协同进步,尤其是水沙子系统的补短与提质对提升流域整体协调水平具有关键作用。

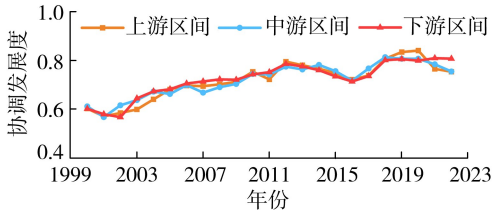


图 7 2000—2022 年黄河流域各区间系统协调发展度
Fig. 7 System coordinated development degree in various interval of the Yellow River Basin from 2000 to 2022

3.3 黄河流域三大子系统及指标障碍度

基于改进的障碍度模型,计算三大子系统对流域系统协调发展度的障碍度及其占比,结果如图 8 所示。由图 8 可见,各区间水沙子系统对流域系统协调发展度的障碍度整体较高,进一步印证了水沙子系统发展滞后是限制流域系统协调水平提升的主

要瓶颈。2015—2017 年黄河流域各区间水沙子系统对流域系统障碍度较大,使得该时期系统协调发展度有所降低;2020 年后,上游区间水沙和生态子系统对流域系统协调发展的障碍度占比分别由 26%和 38%增加至 80%和 63%,中游区间该占比则分别由 41%和 46%增加至 73%和 59%,而上中游区间经济子系统对流域系统协调发展的障碍度占比分别稳定在 34%和 39%左右,可见水沙和生态子系统发展水平制约了该时期流域协调发展度。

基于改进的障碍度模型,分别计算各指标对所在子系统发展指数的障碍度及其对流域系统协调发展度的障碍度,结果如图 9 和图 10 所示。由图 9、图 10 可见,上游区间在 2015—2017 年连续偏枯背景下,区域水资源量(F_7)和水资源开发利用率(F_8)长期构成水沙子系统和流域系统的主要制约因子。经济子系统中,城乡可支配收入比(S_4)在 2007—2012 年为经济子系统和流域系统关键制约因子,该时期城乡可支配收入比由 3.71 增加至峰值的 3.78 后逐渐回落,反映出该时期城乡收入差距的影响;2013 年后人口密度(S_1)对经济子系统的障碍度较大,并在 2018—2020 成为流域系统关键制约因子;同时人均生活用水量(S_9)在 2018—2020 年为流域系统关键制约因子,显示出生活用水压力上升。生态子系统中,不透水面积(E_4)自 2018 年起成为上游流域系统协调的主要制约因子,反映出城市扩张带来的生态压力。此外,化肥施用强度(E_9)呈上升趋势,自 2021 年起成为流域系统关键制约因子,表明农业面源污染问题逐渐显现。

中游区间在 2015—2017 年连续偏枯背景下,区间来流量(F_1)、区域水资源量(F_7)和水资源开发利用率(F_8)成为制约水沙子系统和流域系统的关键因子;受万家寨水库调蓄能力影响,水库排沙比

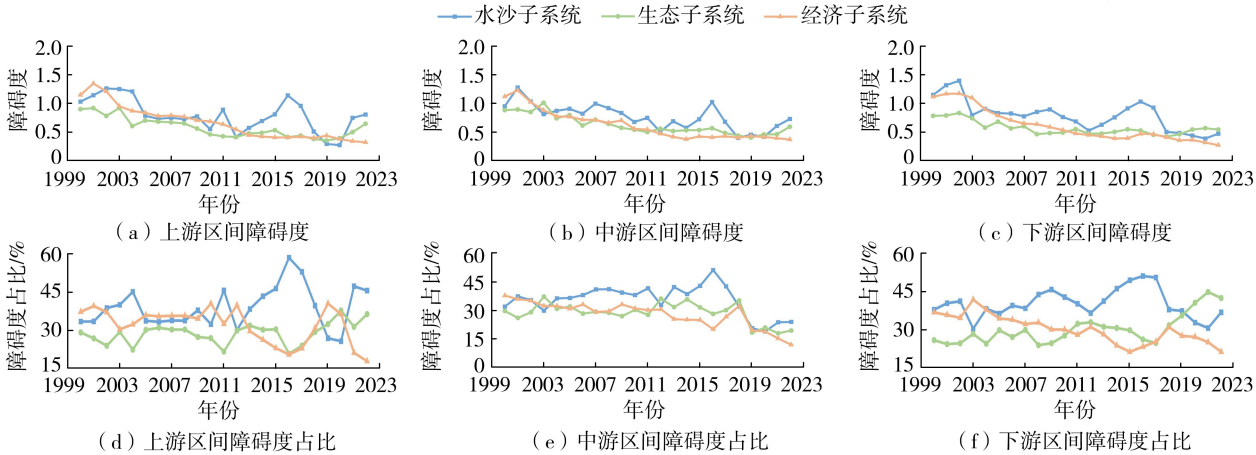


图 8 三大子系统对流域系统协调发展度的障碍度及其占比
Fig. 8 Obstacles and their proportions of three subsystems to coordinated development degree of watershed system

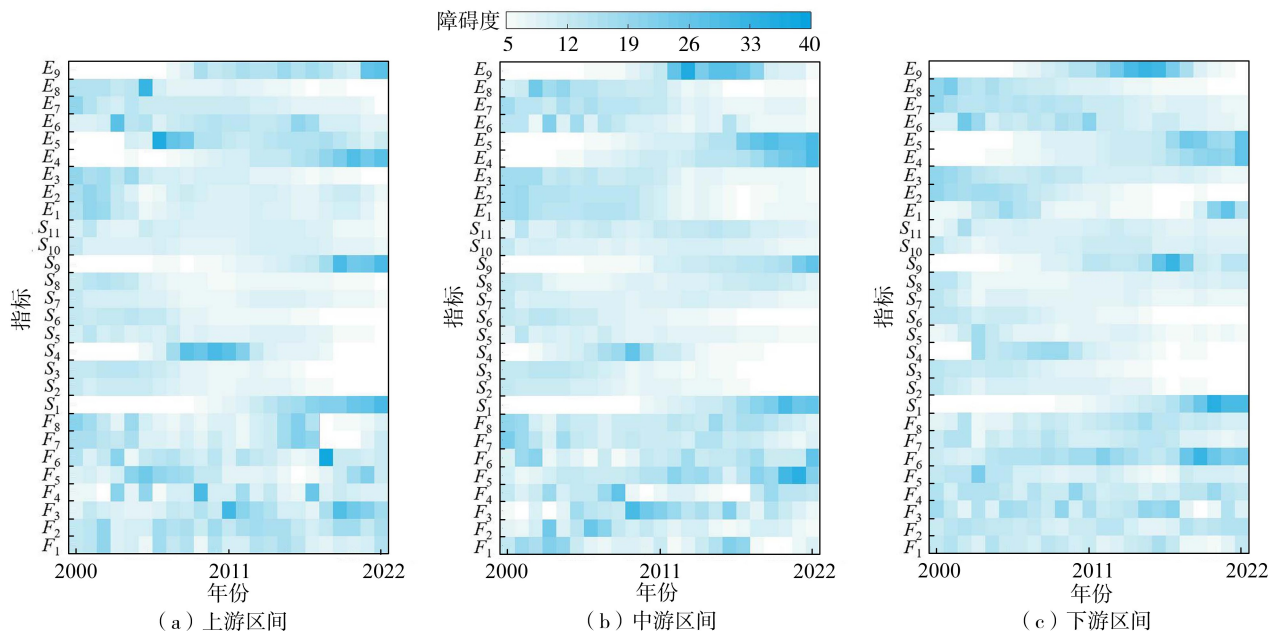


图 9 各区间指标对所在子系统发展指数的障碍度

Fig. 9 Obstacle degree of each interval indicator to development index of subsystem it belongs to

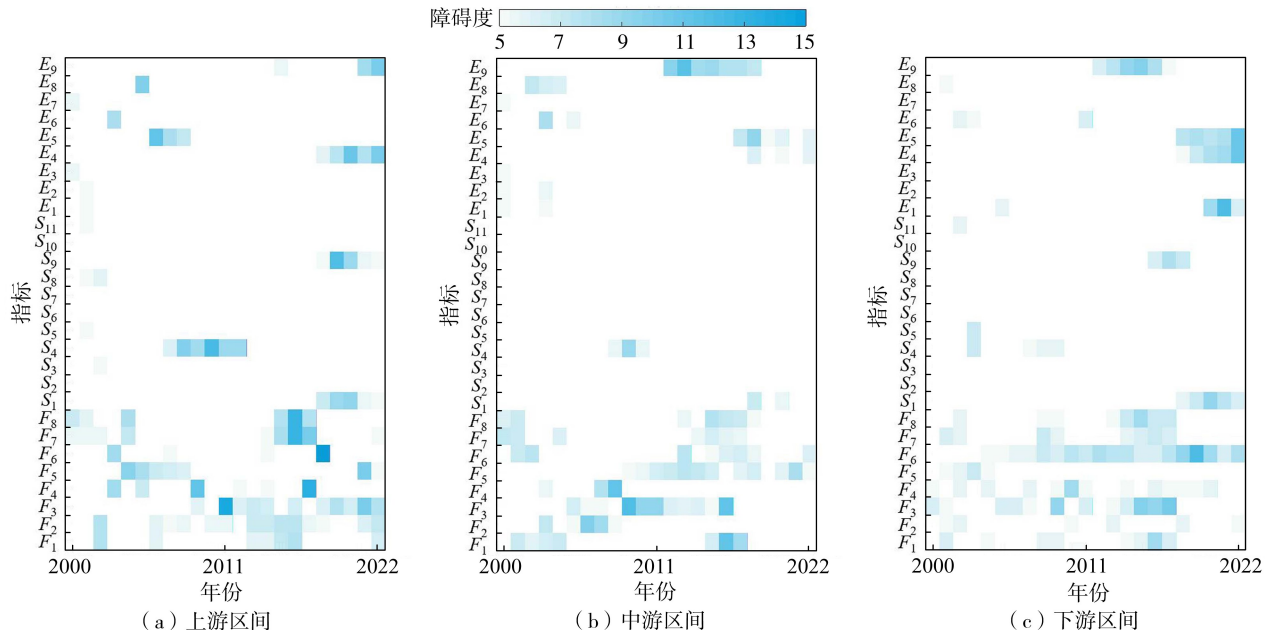


图 10 各区间指标对流域系统协调发展度的障碍度

Fig. 10 Obstacle degree of each interval indicator to coordinated development degree of watershed system

(F_3) 在 2009—2016 年成为流域系统关键制约因子;潼关高程(F_5)和小北干流冲淤量(F_6)目前主要受三门峡水库调度影响,其上游缺少控制性骨干水利枢纽工程控制,故长期为水沙子和流域系统关键制约因子;当来水量偏枯时,区域水资源量(F_7)和水资源开发利用率(F_8)成为制约水沙子和流域系统的关键因子。经济子系统障碍度相对较小,2008—2010 年城乡可支配收入比(S_4)为经济子系统和流域系统关键制约因子,该时期城乡可支配收入比先增后减,在 2009 年达到 3.87 后呈逐年下降态势。生态子系统中,生境指数(E_5)在 2017—

2022 年为生态子系统和流域系统关键制约因子;化肥施用强度(E_9)经过前期逐年增加后,在 2012—2018 年保持在 30 t/km^2 左右,随后减小至 27 t/km^2 ,并保持稳定,为生态子系统和流域系统关键制约因子。
下游区间同样受水资源相关因素突出影响,2015—2017 年为连续偏枯年,水沙子和流域系统中水库排沙比(F_3)、区域水资源量(F_7)和水资源开发利用率(F_8)成为制约水沙子和流域系统的关键因子,河段冲淤量(F_6)则长期构成结构性制约。经济子

系统中,人均生活用水量(S_9)在 2016—2018 年是子系统和流域系统关键制约因子;随着 socioeconomic 不断发展,2018 年后人口密度(S_1)成为经济子系统和流域系统关键制约因子。生态子系统中,化肥施用强度(E_9)在 2012—2018 年对流域系统协调发展形成显著制约;2019 年后不透水面积(E_4)和生境指数(E_5)成为子系统和流域系统关键制约因子,反映出城市扩张与生态系统质量退化问题日益严峻;2020 年起植被覆盖率(E_1)显著下降,成为新的子系统和流域系统关键制约因子。

顾艳林等^[11]的研究认为黄河下游(三门峡以下区域)行洪输沙-社会经济-生态环境协调发展最主要的影响因素为河道稳定系数和平滩流量,生境质量指数和生活污水量次之。Qu 等^[12]分别选取黄河下游区间河南和山东两省受水区域作为研究对象,开展了不同区间水资源-生态环境-社会经济协调发展水平及制约因子研究,发现 2015—2020 年制约下游协调发展度的主要因子为水资源量、人均湿地面积和植被覆盖率等。由于研究区划分、指标体系和评价方法存在差异,使识别的制约因子与本文研究结果有所区别。

4 结论及建议

a. 2000—2022 年黄河流域上中下游区间水沙、生态和经济三大子系统发展指数整体呈提升趋势,但普遍表现为水沙子系统滞后型。水沙子系统受自然水文条件影响波动较大,其发展指数与来水量呈显著正相关关系,来水量为其关键制约因子。相比之下,各区间经济子系统发展指数呈稳定线性增长趋势,年均增长率为 0.017~0.021,增速显著高于水沙与生态子系统。

b. 2000—2022 年黄河流域各区间三大子系统协调发展度总体提升,表现出较一致的变化趋势,2000 年均处于初级协调水平,至 2018 年达到良好协调水平。2022 年上中游区间因水沙和生态子系统发展受限,协调发展度分别回落至 0.75 和 0.76,仅维持在中级协调状态;下游区间基本稳定在 0.8 左右,维持良好协调水平。区间差异的根源在于水资源禀赋、生态承载与经济结构的异质性。

c. 水沙子系统是制约流域系统协调发展主要障碍,尤其在干旱年份更为突出。上游区间主要受限于水资源总量和水资源开发利用率;中下游区间则同时受制于水库排沙比和河道冲淤量等因素。生态子系统方面,不透水面、化肥施用强度和生境指数为重要制约因子;经济子系统中,城乡可支配收入比、人口密度及人均生活用水量在特定阶段构成显

著障碍。

d. 建议黄河流域保障水沙子系统发展水平,推动生态和经济子系统协同增效,从而提高流域系统协调发展度。上游应加快推进南水北调西线工程和黑山峡水利枢纽工程,缓解水资源约束,优化水资源配置结构;中游加快古贤水利枢纽工程建设,提高水沙调节能力,进而加大小北干流河段冲刷,并降低潼关高程;下游需强化水库群调度,提高排沙效率与调蓄能力,通过调水调沙缓解“地上悬河”的问题。同时,建议加强生态系统修复、农业面源污染治理及用水效率管理,推动生态和经济子系统协同增效,促进流域整体协调可持续发展。

参考文献:

[1] 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))

[2] 宋松,吴志峰,程利分,等. 基于 SDGs 的广东省水资源可持续性评价[J]. 水资源保护,2023,39(3):179-187. (SONG Song, WU Zhifeng, CHENG Lifan, et al. Water resources sustainability evaluation in Guangdong Province based on SDGs[J]. Water Resources Protection, 2023,39(3):179-187. (in Chinese))

[3] 王富强,应卓晖,吕素冰,等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价[J]. 水资源保护,2022,38(5):80-86. (WANG Fuqiang, YING Zhuohui, LYU Subing, et al. Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2022,38(5):80-86. (in Chinese))

[4] 安莉娜,范国福,吴迪,等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):35-41. (AN Li' na, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(2):35-41. (in Chinese))

[5] HE Liying, DU Xingqiang, ZHAO Jiahui, et al. Exploring the coupling coordination relationship of water resources, socio-economy and eco-environment in China[J]. Science of the Total Environment, 2024,918:170705.

[6] WANG Xiaoyan, ZHANG Silong, GAO Chao, et al. Coupling coordination and driving mechanisms of water resources carrying capacity under the dynamic interaction of the water-social-economic-ecological environment

- system[J]. Science of the Total Environment, 2024, 920: 171011.
- [7] 李激,姜珊,赵勇,等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 39-48. (LI Wei, JIANG Shan, ZHAO Yong, et al. Safety evaluation of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 39-48. (in Chinese))
- [8] 董怡,邹磊,夏军,等. 武汉市人水系统耦合协调发展及障碍因素识别[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 87-94. (DONG Yi, ZOU Lei, XIA Jun, et al. Coupling and coordinated development of human-water system in Wuhan City and identification of obstacle factors [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 87-94. (in Chinese))
- [9] JIANG Enhui, QU Bo, JIA Jia, et al. Study on the coordination of flow and sediment transport, ecological environment, and crop production in the Lower Yellow River since 2000[J]. River, 2023, 2(3): 326-335.
- [10] ZHAO Gaolei, TIAN Shimin, JIANG Enhui, et al. Coordination analysis of flood-sediment transportation, eco-environment, and socio-economy coupling in the governance of the Yellow River Basin system [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 8090.
- [11] 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 Yanlin, LIU Chang, CHEN Kaiwen, et al. Coupling coordination analysis of flood and sediment transport-social economy-ecological-environment system in the lower Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 87-93. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] 左其亭,吴青松,姜龙,等. 黄河流域多尺度区域界定及其应用选择[J]. 水利水运工程学报, 2022(5): 12-20. (ZUO Qiting, WU Qingsong, JIANG Long, et al. Multi-scale regional definition and its application selection in the Yellow River Basin [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(5): 12-20. (in Chinese))
- [14] 胡春宏,张双虎,张晓明. 新形势下黄河水沙调控策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 122-130. (HU Chunhong, ZHANG Shuanghu, ZHANG Xiaoming. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 122-130. (in Chinese))
- [15] 胡春宏,张治昊. 论黄河河道平衡输沙量临界阈值与黄土高原水土流失治理度[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1015-1025. (HU Chunhong, ZHANG Zhihao. Discussing of the critical threshold of equilibrium sediment transport in the Yellow River and the degree of soil erosion control in the Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1015-1025. (in Chinese))
- [16] 王远见,王强,刘彦晖,等. 小浪底水库运行以来对黄河下游河道河床演变特性的影响[J]. 水利学报, 2024, 55(5): 505-515. (WANG Yuanjian, WANG Qiang, LIU Yanhui, et al. Morphological effects of the operation of Xiaolangdi Reservoir on the Lower Yellow River in recent years [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(5): 505-515. (in Chinese))
- [17] 李昆鹏,江恩慧,王金亮,等. 万家寨水库运行以来调洪库容变化规律及恢复措施研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(10): 62-66. (LI Kunpeng, JIANG Enhui, WANG Jinliang, et al. Study on the changes of flood regulation storage capacity and restoration measures of Wanjiashai Reservoir since its operation [J]. Yellow River, 2024, 46(10): 62-66. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2023[J]. Earth System Science Data, 2024, 13(1): 3907-3925.
- [20] 江恩慧,屈博,王远见,等. 基于流域系统科学的黄河下游河道系统治理研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 7-15. (JIANG Enhui, QU Bo, WANG Yuanjian, et al. Research on synergistic regulation of the lower Yellow River based on watershed system science [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2021, 42(4): 7-15. (in Chinese))
- [21] SHI Yan, YANG Shipeng, ZHANG Liwei, et al. Forecasting and advancing water carrying capacity in Henan Province in China: application of “ four determinations with water ” in AHP and SD modeling[J]. Science of the Total Environment, 2024, 919: 170757.
- [22] YANG Zhaoyang, SONG Jinxi, CHENG Dandong, et al. Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources carrying capacity in Xi ’ an City, China [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 230: 221-233.
- [23] 杨卓媛,黄宇云,夏函,等. 水利新质生产力评价方法及应用[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 92-98. (YANG Zhuoyuan, HUANG Yuyun, XIA Han, et al. Evaluation method and application of new quality productive forces of water conservancy [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 92-98. (in Chinese))

- [24] 王淑佳,孔伟,任亮,等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810. (WANG Shujia, KONG Wei, REN Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810. (in Chinese))
- [25] 田世民,王远见,江恩慧,等. 黄河下游多维子系统耦合作用关系研究[C]//中国水利学会 2018 学术年会论文集第一分册. 南昌:中国水利学会, 2018:80-87.
- [26] 江恩慧,王远见,田世民,等. 黄河下游河道滩槽协同治理驱动:响应关系研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 52-58. (JIANG Enhui, WANG Yuanjian, TIAN Shimin, et al. Driving-response relationship on synergistic regulation for floodplain and main channel of the lower Yellow River [J]. Yellow River, 2020, 42(9): 52-58. (in Chinese))
- [27] 彭少明,王煜,蒋桂芹. 黄河流域主要灌区灌溉需水与干旱的关系研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 5-10. (PENG Shaoming, WANG Yu, JIANG Guiqin. Study on the relationship between irrigation water requirement and drought in the main irrigation area of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2017, 39(11): 5-10. (in Chinese))
- [28] 陶洁,任磊,梅晓敏,等. 基于混合指数算法的黄河流域水体面积变化及归因分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 79-86. (TAO Jie, REN Lei, MEI Xiaomin, et al. Analysis of water surface area changes and attribution in the Yellow River Basin based on hybrid index algorithm [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 79-86. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-15 编辑:王芳)

(上接第 84 页)

- [15] 程蕾,陈吕军,田金平,等. “以水定产”驱动的黄河流域可持续水管理策略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 187-197. (CHENG Lei, CHEN Lyujun, TIAN Jinping, et al. Sustainable water management in yellow river basin based on balancing water resources and industrial development[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 187-197. (in Chinese))
- [16] 刘志强. 基于 InSAR 和 GRACE 的黄河几字弯区域地表形变与地下水变化关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2024.
- [17] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 608-614. (LIU Changming. Study of some problems in water cycle changes of the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 608-614. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 王若禹,赵志轩,黄昌硕,等. “四水四定”水资源管控理论研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 111-117. (WANG Ruoyu, ZHAO Zhixuan, HUANG Changshuo, et al. Research progress on water resources management theory of “basing four aspects on water resources” [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 111-117. (in Chinese))
- [20] 林祚顶,刘志雨. 加快构建雨水情监测预报“三道防线”工作思考[J]. 中国水利, 2023(12): 5-10. (LIN Zuoding, LIU Zhiyu. Accelerating construction of “three lines of flood defense” through rainfall monitoring and forecasting and reflections [J]. China Water Resources, 2023(12): 5-10. (in Chinese))
- [21] CASTILLO-RODRÍGUEZ J T, ESCUDER-BUENO I, ALTAREJOS-GARCÍA L, et al. The value of integrating information from multiple hazards for flood risk analysis and management[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(2): 379-400.
- [22] 屈艳萍,郇建强,吕娟,等. 旱灾风险定量评估总体框架及其关键技术[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 297-304. (QU Yanping, LI Jianqiang, LYU Juan, et al. A quantitative framework for assessing drought disaster risk and key techniques [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 297-304. (in Chinese))
- [23] SALZANO E, AGREDA A G, DI CARLUCCIO A, et al. Risk assessment and early warning systems for industrial facilities in seismic zones[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(10): 1577-1584.
- [24] 王煜,彭少明,郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 614-624. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 614-624. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-08 编辑:王芳)