

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

顾艳林¹, 刘畅², 陈开雯¹, 屈博², 江恩慧², 白雪^{1,3}

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:综合考虑黄河下游流域行洪输沙、社会经济、生态环境 3 个子系统对流域发展的影响,采用组合权重法确定指标权重,构建了行洪输沙-社会经济-生态环境系统耦合协调度模型,对黄河下游流域耦合协调变化趋势进行了分析。结果表明:2000—2020 年黄河下游流域 3 个系统的综合发展指数差异明显,社会经济子系统的综合发展指数从 0. 079 增至 0. 239,呈指数型稳步上升,生态环境和行洪输沙子系统发展较不均衡;子系统间的相互作用明显,但耦合协调度发展水平较低,经历了从中度失调到濒临失调的转变,未来有较大的提升空间;高水平耦合关系下,行洪输沙、生态环境子系统的均衡发展是制约耦合协调度提升的主要原因,其中行洪输沙子系统中的河道稳定指数和平滩流量是主要因素,其次为生态环境子系统中的生境质量指数和生活污水排放量。

关键词:行洪输沙;社会经济;生态环境;耦合协调度模型;黄河下游流域

中图分类号:TV697. 1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)04 - 0087 - 07

Coupling coordination analysis of flood and sediment transport-social economy-ecological environment system in the lower Yellow River Basin//GU Yanlin¹, LIU Chang², CHEN Kaiwen¹, QU Bo², JIANG Enhui², BAI Xue^{1,3}
(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking into account the impact of the three subsystems of flood and sediment transport, social economy, and ecological environment on the development of the lower Yellow River Basin, the combination weight method was used to determine the indicator weights, and a coupling coordination degree model of flood and sediment transport-social economy-ecological environment system was constructed to analyze the trend of coupling coordination changes in the lower Yellow River Basin. The results showed that there were significant differences in the comprehensive development index of the three subsystems in the lower Yellow River Basin from 2000 to 2020. The comprehensive development index of the social economy subsystem increased steadily from 0. 079 to 0. 239, showing an exponential increase. The development of the ecological environment and the flood and sediment transport system was relatively uneven. The interaction between subsystems is obvious, but the development level of coupling coordination is relatively low, experiencing a transition from moderate imbalance to near imbalance, and there is great room for improvement in the future. Under the high-level coupling relationship, the uneven development of the flood and sediment transportation and ecological environment subsystems is the main reason restricting the improvement of coupling coordination. Among them, the river stability index and flat beach flow in the flood and sediment transportation system are the main factors, followed by the habitat quality index and domestic sewage discharge in the ecological environment subsystem.

Key words: flood and sediment transport; social economy; ecological environment; coupling coordination degree model; the lower Yellow River Basin

黄河从小浪底水库开始由峡谷地区进入平原地区,平坦的地势和宽阔的河道降低了水深和流速,造成河道大量泥沙淤积^[1-2]。1999 年底小浪底水库建成并投入使用以来,为下游河道调水调沙创造了工

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U2243601)
作者简介:顾艳林(2000—),女,硕士研究生,主要从事流域系统可持续发展研究。E-mail:yanlin_2000@163.com
通信作者:白雪(1982—),女,教授,博士,主要从事流域污染物治理和生态效应研究。E-mail:Baixue@hhu.edu.cn

程条件,使得河道水沙关系更协调,水库、河道泥沙淤积量达到历史最低水平,河道主流过流能力显著提高^[3-5]。当前,面对黄河流域高质量发展对河流治理提出的新要求,迫切需要跳出流域内部的区域单元,从流域系统整体性、全面性实施统筹协调和系统治理,从而实现流域整体利益最大化。

诸多学者已从流域系统的角度开展了研究,例如:杨金月^[6]构建了黄河下游沿岸城市水资源-经济-环境系统综合评价指标体系,利用耦合协调度模型对3个子系统的耦合协调度展开了分析;Jiang等^[7]构建了黄河下游流域行洪输沙-生态环境-粮食产量耦合协调评价指标体系,评估了2000年后三者之间耦合协调发展水平;李想等^[8]构建了滩区防洪安全-社会经济-生态环境系统耦合评价指标体系,系统评价了兰东滩协调发展情况。以上研究多局限于社会-生态、水资源-经济-环境、防洪-经济-生态等系统视角,对与河流内外协同互馈的生态环境和社会经济之间的相互作用关系研究不够深入。鉴于此,本文以黄河下游流域的协调发展为目标,构建行洪输沙-社会经济-生态环境系统(以下简称三维复合系统)耦合协调度模型,分析3个子系统的耦合协调发展状况,以期黄河下游流域协调发展提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河下游流域指黄河小浪底水库坝下至河口区域,其独特的地理位置和水文特征使其在黄河流域综合治理与协同发展中起关键作用。黄河下游流域地理位置为34°N~38°N、110°E~118°E,包括晋豫鲁三省部分地区,除黄河干流外,还有沁河、洛河等众多支流,概况如图1所示。黄河下游流域内分布有20多个自然保护区,自然景观丰富,是我国重要的生态功能区^[9]。

1.2 数据来源

黄河下游沿岸22个城市社会经济数据来源于2000—2020年《国民经济和社会发展统计公报》《山西省统计年鉴》《河南省统计年鉴》《山东省统计年鉴》;生态环境数据来源于2000—2020年黄河流域《水资源公报》、国家资源环境科学与数据中心30 m分辨率的土地覆盖数据和1 km空间分辨率植被覆盖率数据;行洪输沙数据来源于黄河水利科学研究院以及有关政府工作报告。特别地,本文研究区在行政区划上并非完整的行政区,而是包括山西、河南、山东等省份的部分地区,缺乏专门的区域统计研

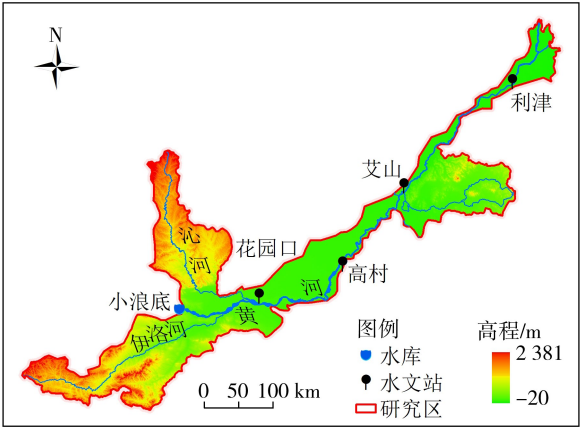


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

究数据,因此参考了黄河小浪底以下沿岸城市的相关统计数据。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

黄河下游流域分布有河流、居民区、农业灌溉区、湿地等,是由行洪输沙、社会经济和生态环境组成的多目标、多层次的非线性系统,各子系统之间相互联系、彼此相互作用,存在复杂的制约和反馈关系^[10-13]。图2为三维复合系统耦合互馈机制及耦

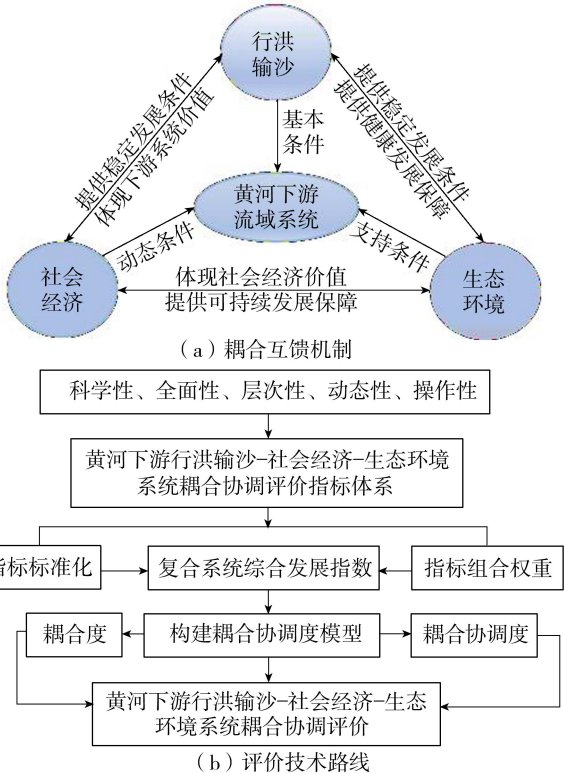


图2 三维复合系统耦合互馈机制及耦合协调评价技术路线
Fig. 2 Coupling and mutual feedback mechanism of three-dimensional composite system and technical route for coupling coordination evaluation

合协调评价技术路线。由图 2(a)可见,行洪输沙子系统的健康稳定是流域社会经济高质量发展和生态环境可持续发展的前提条件;社会经济子系统不仅为生态环境保护提供坚实基础,同时也对行洪输沙的安全高效运行提出了严格的标准;生态环境子系统的稳定为河流行洪输沙功能的正常发挥和社会经济的发展提供了基础支撑。3 个子系统内的水文泥沙、社会经济以及生态环境要素之间时刻保持着物质、信息、能量的交换与传递,系统耦合协调评价技术路线如图 2(b)所示。

图 3 为三维复合系统耦合协调评价指标体系,图中(+)表示正向指标,(-)表示负向指标。影响行洪输沙的主要因素为河道本身的稳定性以及上游来水来沙能力,选取 7 个指标评价黄河下游行洪输沙能力。其中,河段冲淤量通过小浪底进出库水沙量计算^[14];平滩流量采用孙赞盈等^[15]提出的比较滩槽与洪水高差的方法计算;河道稳定指数采用 Liu 等^[16]提出的河势稳定指数变形公式计算。影响社会经济的主要因素为区域工业、农业、第三产业发展,选取 7 个指标评价黄河下游流域社会经济发展状况。其中,黄河下游社会经济中新型城镇化水平加快、旅游服务业发展以及产业结构调整等均有利于提高居民收入,促进经济良好发展^[17-19]。影响生态环境的主要因素为区域社会经济和河流自身生态

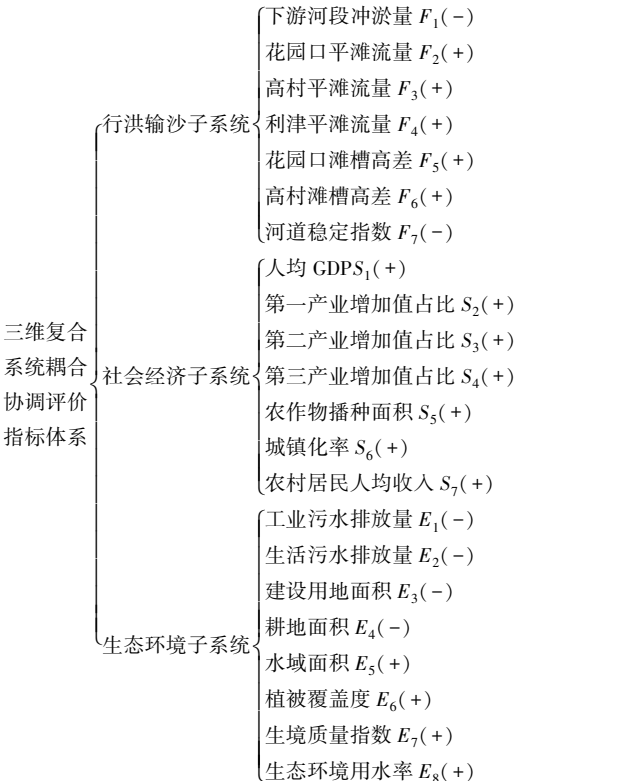


图 3 三维复合系统耦合协调评价指标体系

Fig. 3 Coupling coordination evaluation index system of three-dimensional composite system

安全,选取 8 个指标评价黄河下游流域生态环境发展水平,包括与社会经济发展相关的污水排放量、与行洪输沙能力相关的不同土地利用类型面积以及直观反映生态环境的指标。其中,耕地面积和建设用地面积增加会加大对土地扰动,导致水土流失严重,不利于生态环境友好发展^[20-21];生境质量指数采用 InVEST 模型进行计算^[22];生态环境用水率用于反映人与自然生态协调发展水平^[8,23]。

2.2 模型构建

2.2.1 数据标准化

三维复合系统耦合协调评价指标体系中二级评价指标的单位不统一,存在量纲和属性差异,且不同指标对系统发展水平的影响程度也不一样。这些差异可能导致在综合分析时产生误差。为解决上述问题,本文采用极差值标准化法^[24]对数据进行预处理,使不同指标具有可比性。

2.2.2 综合发展指数计算

评价体系的二级评价指标均可量化,采用熵权法计算其客观权重。一级指标难以量化,参考周锦涛^[25]研究中的 9 级标度法,邀请领域中 15 位有经验的专家打分,构造一级指标判断矩阵,采用层次分析法计算其主观权重,结果显示最大特征根为 3.054,一致性比率为 0.051,通过一致性检验。根据指标标准化值和组合权重,采用线性加权法计算 3 个子系统的综合发展指数:

$$I_F = \sum_{i=1}^I w_i x_i \quad (1)$$

$$I_S = \sum_{j=1}^J w_j y_j \quad (2)$$

$$I_E = \sum_{k=1}^K w_k z_k \quad (3)$$

式中: I_F 、 I_S 、 I_E 分别为行洪输沙、社会经济、生态环境子系统的综合发展指数; x_i 、 y_j 、 z_k 分别为 3 个子系统标准化后的第 i 、 j 、 k 个指标值; I 、 J 、 K 分别为 3 个子系统的指标数; w_i 、 w_j 、 w_k 分别为 3 个子系统各指标对应的组合权重。

2.2.3 耦合协调度模型

耦合度用于反映 3 个系统之间的相互作用、相互依赖程度,耦合协调度用于反映子系统之间的协调发展水平,计算公式为

$$C = \sqrt[3]{I_F I_S I_E} / |I_F + I_S + I_E| \quad (4)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (5)$$

其中

$$T = \alpha I_F + \beta I_S + \gamma I_E$$

式中: C 为耦合度,取值范围 0~1,等级划分参考焦士兴等^[26]的研究,耦合度为 0~0.3、0.3~<0.5、0.5~<0.8、0.8~<1 分别表示低水平耦合阶段、抗

拮阶段、磨合阶段、高水平耦合阶段; D 为耦合协调度,取值范围 $0\sim 1$,等级划分参考赵子萌等^[27]的研究,耦合协调度为 $0\sim <0.2$ 、 $0.2\sim <0.3$ 、 $0.3\sim <0.4$ 、 $0.4\sim <0.5$ 、 $0.5\sim <0.6$ 、 $0.6\sim <0.8$ 、 $0.8\sim <1$ 分别表示重度失调、中度失调、轻度失调、濒临失调、勉强协调、中度协调、优质协调; T 为三维复合系统的综合发展系数; α 、 β 、 γ 为子系统权重系数。

3 结果与分析

3.1 评价指标赋权

三维复合系统耦合协调评价指标体系指标赋权结果表明,一级指标中权重最大的是行洪输沙子系统,为 0.493,其次是社会经济和生态环境子系统,分别为 0.311 和 0.196。图 4 为二级指标组合权重,可见行洪输沙子系统中河道稳定指数的组合权重最大,平滩流量次之。说明近年来黄河下游在河道形态、来水来沙以及河道过流能力等方面的离散程度较大,是影响协调发展的主要指标。社会经济子系统中农村居民人均可支配收、第三产业增加值占比的组合权重较大,这与沿黄城市的发展方向相符。可见黄河下游流域新型城镇化和农业现代化发展颇有成效,这与大力发展旅游服务业等第三产业密切相关。生态环境子系统中生境质量指数、生活污水排放量对生态环境的影响较大,是影响生态环境发展的重要因素。

表 1 不同时间段二级指标的客观权重与组合权重

二级指标	2000—2004 年		2005—2009 年		2010—2014 年		2015—2020 年	
	客观权重	组合权重	客观权重	组合权重	客观权重	组合权重	客观权重	组合权重
F_1	0.1833	0.0904	0.1375	0.0678	0.1727	0.0852	0.0328	0.0162
F_2	0.1074	0.0530	0.1139	0.0561	0.1437	0.0709	0.3143	0.1549
F_3	0.1267	0.0625	0.1322	0.0652	0.1869	0.0921	0.1226	0.0604
F_4	0.1421	0.0700	0.1586	0.0782	0.1099	0.0542	0.3143	0.1549
F_5	0.0732	0.0361	0.1345	0.0663	0.1655	0.0816	0.0867	0.0427
F_6	0.1171	0.0578	0.0988	0.0487	0.1070	0.0528	0.0932	0.0459
F_7	0.2502	0.1233	0.2246	0.1107	0.1143	0.0563	0.0363	0.0179
S_1	0.1622	0.0504	0.1315	0.0409	0.1089	0.0339	0.1553	0.0483
S_2	0.1250	0.0389	0.2391	0.0744	0.1801	0.0560	0.1304	0.0406
S_3	0.1091	0.0339	0.0854	0.0266	0.1078	0.0335	0.1436	0.0447
S_4	0.2682	0.0834	0.1649	0.0513	0.1616	0.0503	0.1520	0.0473
S_5	0.0758	0.0236	0.1040	0.0323	0.1727	0.0537	0.1150	0.0358
S_6	0.1133	0.0352	0.1324	0.0412	0.1575	0.0490	0.1425	0.0443
S_7	0.1465	0.0455	0.1428	0.0444	0.1113	0.0346	0.1612	0.0501
E_1	0.0937	0.0184	0.1172	0.0230	0.0670	0.0131	0.0579	0.0114
E_2	0.1075	0.0211	0.0831	0.0163	0.1125	0.0221	0.2787	0.0546
E_3	0.1195	0.0234	0.1009	0.0198	0.1124	0.0220	0.0712	0.0140
E_4	0.1296	0.0254	0.1015	0.0199	0.1024	0.0201	0.0770	0.0151
E_5	0.1703	0.0334	0.1012	0.0198	0.1498	0.0294	0.1904	0.0373
E_6	0.0953	0.0187	0.1305	0.0256	0.1521	0.0298	0.0693	0.0136
E_7	0.1221	0.0239	0.0949	0.0186	0.2000	0.0392	0.1000	0.0196
E_8	0.1620	0.0318	0.2708	0.0531	0.1039	0.0204	0.1555	0.0305

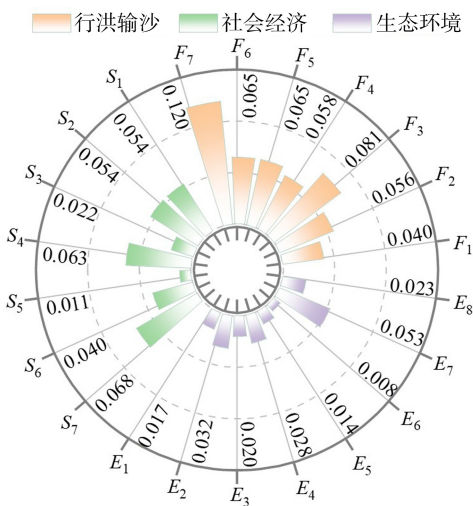


图 4 二级指标组合权重

Fig.4 Combined weights of secondary indicators

表 1 为不同时间段二级指标的客观权重与组合权重。由表 1 可见,由于上游来水来沙量的差异,行洪输沙子系统的二级指标在不同时间段的组合权重变化较大,河道稳定指数在 2000—2009 年组合权重最大,在 2015—2020 年最小;平滩流量在 2010—2020 年组合权重较大。社会经济子系统的二级指标在 2000—2009 年的组合权重差异明显,2010—2020 年随着沿黄地区积极贯彻国家宏观经济调控政策,深入实施经济结构战略性调整与优化,完成传统农业向制造业和服务业的实质性转变^[17,19],各二级指标组合权重趋向均衡。生态环境子系统中生态

环境用水率在 2000—2009 年组合权重较大,生活污水排放量在 2015—2020 年组合权重最大,工业污水排放量的组合权重整体呈减小趋势,表明研究区工业污水排放处理效果、生态格局优化均有所提升,但仍然面临较为严峻的城镇和农村生活污水处理问题。

3.2 综合发展指数

图 5 为 2000—2020 年黄河下游流域三维复合系统及 3 个子系统的综合发展指数。由图 5 可见,行洪输沙子系统的综合发展指数 2000—2016 年呈上升趋势,从 0.027 增至 0.430,2017—2020 年轻微下降后又转为上升趋势。表明黄河下游流域行洪输沙子系统在不断优化,水沙协调治理在不断提高,但由于每年来水来沙量不同,发展还不稳定。社会经济子系统的综合发展指数在 2001—2003 年经历小幅波动后,呈指数型增长,上涨幅度最大,从 0.079 增至 0.239,与我国 1978 年以来的经济增长趋势相似^[17]。生态环境子系统的综合发展指数在 2000—2020 年整体不高,在 2000—2014 年呈波动下降趋势,从 0.102 降至 0.062,2015—2020 年从 0.066 增加至 0.149,生态环境发展水平呈现稳步上升趋势。

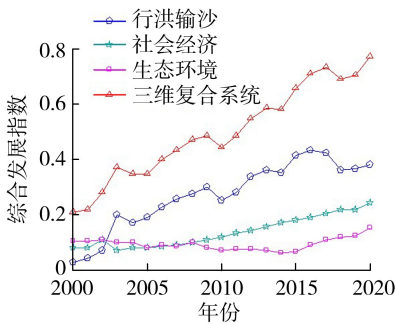


图 5 2000—2020 年黄河下游流域三维复合系统及 3 个子系统的综合发展指数

Fig.5 Comprehensive development index of three dimensional composite system and three subsystems in the lower Yellow River Basin from 2000 to 2020

由图 5 可见,三维复合系统的综合发展指数呈波动上升的趋势,2010 年以前仍处于较低发展水平,而在 2010 年后有明显提高,表明黄河下游流域各子系统间的综合协调发展持续向好,各子系统综合发展指数同步提升是实现复合系统高水平协调发展的关键。21 世纪以来,黄河下游流域的社会经济稳步增长,但影响行洪输沙子系统的因素较不稳定,保障行洪输沙子系统的稳定,才能为社会经济可持续发展提供支撑,进而通过良好的经济发展促进生态环境的友好发展,这也是以后黄河流域高质量发展和生态保护战略实施的重点关注方向。

3.3 三维复合系统的耦合协调分析

表 2 为 2000—2020 年黄河下游流域三维复合

系统的耦合度与耦合协调度。由表 2 可见,2000—2020 年黄河下游流域三维复合系统的耦合度从 0.870 增长至 0.931,经历了增长、下降、增长的过程。2000—2004 年耦合度从 0.870 增长到 0.947,其后呈小幅波动下降;2013—2015 年由高水平耦合阶段退化为磨合阶段;2016—2020 年持续上升,保持在高水平耦合阶段。表明研究期内 3 个子系统间的物质、能量和信息流动紧密,子系统间相互作用较强。与耦合度相比,黄河下游流域三维复合系统的耦合协调发展水平仍处于较低水平,耦合协调度从 0.246 增长至 0.488,3 个子系统的耦合协调发展类型由中度失调进入濒临失调发展阶段,此后一直处于濒临失调发展阶段,表明 3 个子系统协调发展水平还存在较大差异,行洪输沙、生态环境子系统发展不稳定的影响,制约了耦合协调度的提升。

表 2 2000—2020 年黄河下游流域三维复合系统的耦合度与耦合协调度

Table 2 Coupling degree and coupling coordination degree of three dimensional composite system in the lower Yellow River Basin from 2000 to 2020

年份	耦合度		耦合协调度	
	数值	等级	数值	等级
2000	0.870	高水平耦合	0.246	中度失调
2001	0.925	高水平耦合	0.259	中度失调
2002	0.981	高水平耦合	0.302	轻度失调
2003	0.909	高水平耦合	0.334	轻度失调
2004	0.947	高水平耦合	0.330	轻度失调
2005	0.915	高水平耦合	0.325	轻度失调
2006	0.893	高水平耦合	0.344	轻度失调
2007	0.873	高水平耦合	0.353	轻度失调
2008	0.883	高水平耦合	0.372	轻度失调
2009	0.842	高水平耦合	0.367	轻度失调
2010	0.870	高水平耦合	0.357	轻度失调
2011	0.863	高水平耦合	0.372	轻度失调
2012	0.822	高水平耦合	0.386	轻度失调
2013	0.802	高水平耦合	0.395	轻度失调
2014	0.795	磨合阶段	0.392	轻度失调
2015	0.772	磨合阶段	0.411	濒临失调
2016	0.813	高水平耦合	0.437	濒临失调
2017	0.86	高水平耦合	0.458	濒临失调
2018	0.901	高水平耦合	0.454	濒临失调
2019	0.906	高水平耦合	0.461	濒临失调
2020	0.931	高水平耦合	0.488	濒临失调

进一步分析 3 个子系统耦合协调度的变化趋势,应用趋势外推法对其变化趋势进行拟合分析,结果如图 6 所示,可见拟合精度较高。耦合协调度拟合曲线呈明显增长趋势,预计 2023 年由濒临失调转变为勉强协调发展。但耦合协调发展水平整体较低,距离优质协调发展还有较大距离,未来耦合协调度还有较大提升空间。结合上述综合发展指数的分析,3 个子系统发展之间相互作用较大,但协调发展

水平不高,在未来黄河下游水沙治理和生态环境改善方面即将迎来新一轮挑战。

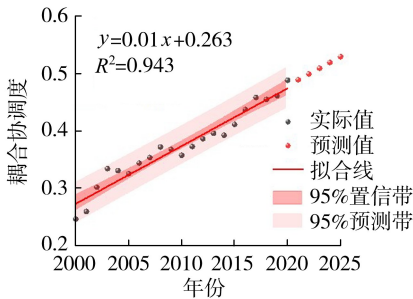


图6 黄河下游流域三维复合系统耦合协调度拟合结果
Fig.6 Fitting results of coupling coordination degree of three-dimensional composite system in the lower Yellow River Basin

4 结 论

a. 黄河下游流域行洪输沙、社会经济和生态环境子系统的综合发展指数差异明显,社会经济子系统综合发展指数从 0.079 增至 0.239,呈指数型稳步上升,生态环境和行洪输沙子系统发展不均衡。提升各子系统的综合发展水平,才能实现黄河下游流域三维复合系统的优质协调发展。

b. 2000—2020 年黄河下游流域三维复合系统的耦合度除个别年份外均在 0.8 以上,处于高水平耦合阶段,表明 3 个系统间的相互作用较强。耦合协调度由中度失调进入濒临失调发展阶段,预计 2023 年进入勉强协调发展阶段,耦合协调度整体不高,未来有较大的提升空间。

c. 河道稳定指数、平滩流量是影响黄河下游流域发展最主要因素,生境质量指数、生活污水排放量次之。今后定期开展河道稳定性评估,优化滩槽形态,大力发展小浪底以下流域特色农业、旅游服务业提高居民生活水平,加大城乡污水处理率,在发展中建立和完善跨部门的流域管理协调机制,实现生态保护和经济发展相辅相成,从而促进黄河下游的高质量发展。

参考文献:

[1] WANG Hong,SUN Fubao. Variability of annual sediment load and runoff in the Yellow River for the last 100 years (1919-2018) [J]. Science of the Total Environment, 2021,758:143715.
[2] 黄建雄,冶运涛,曹引,等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024,52(3):25-33. (HUANG Jianxiong, YE Yuntao, CAO Yin,et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the

north main reach of Yellow River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3):25-33. (in Chinese))

[3] 邓安军,陈建国,胡海华,等. 我国水库淤损情势分析[J]. 水利学报,2022,53(3):325-332. (DENG Anjun, CHEN Jianguo, HU Haihua, et al. Analysis of reservoir siltation in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(3):325-332. (in Chinese))
[4] 尚文绣,彭少明,王煜,等. 小浪底水利枢纽对黄河下游生态的影响分析[J]. 水资源保护,2022,38(1):160-166. (SHANG Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, et al. Influence of Xiaolangdi Reservoir on ecological condition of the Lower Yellow River[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):160-166. (in Chinese))
[5] 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))
[6] 杨金月. 黄河下游水资源-经济-环境系统耦合协调性研究[D]. 郑州:华北水利水电,2023.
[7] 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.
[8] 李想,赵连军,李东阳,等. 黄河下游典型滩区社会经济-防洪安全-生态环境耦合协调分析[J]. 中国农村水利水电, 2023(5):63-71. (LI Xiang, ZHAO Lianjun, LI Dongyang, et al. A coupling coordination analysis of social economy flood control safety ecological environment in the typical beach area of the lower Yellow River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(5):63-71. (in Chinese))
[9] 黄朴凡. 黄河中下游水沙情势变化归因及其对土地利用的响应研究[D]. 郑州:华北水利水电,2023.
[10] 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 Yuanjuan, TIAN Shimin, et al. Exploration of watershed system science [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020,51(9):1026-1037. (in Chinese))
[11] 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 Yuanjuan, 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))
[12] 岳瑜素,王宏伟,江恩慧,等. 滩区自然-经济-社会协同的可持续发展模式[J]. 水利学报,2020,51(9):1131-1137. (YUE Yusu, WANG Hongwei, JIANG Enhui, et al.

- Sustainable development model of floodplain based on coordination of nature,economy and society[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (9): 1131-1137. (in Chinese)
- [13] 王菲,陈敏,曹永强,等. 黄河流域九省区水-土-能-碳关联系统网络特征[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):31-37. (WANG Fei, CHEN Min, CAO Yongqiang, et al. Network characteristics of water-land-energy-carbon correlation system of nine provinces along the Yellow River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):31-37. (in Chinese))
- [14] TAVAKOLI K, MONTASERI H, OMIDVAR P, et al. Numerical simulation of sediment transport in a U-shaped channel with lateral intake; effects of intake position and diversion angle [J]. International Journal of Modern Physics C,2019,30(9):1950071.
- [15] 孙赞盈,路金镶,曲少军,等. 黄河下游河道大断面平滩流量推算新方法[J]. 人民黄河,2007,29(2):22-23. (SUN Zanying, LU Jingxiang, QU Shaojun, et al. Practical new method on bankfull discharge calculation of major bed of the lower Yellow River channel [J]. Yellow River, 2007,29(2):22-23. (in Chinese))
- [16] LIU Yanhui, WANG Yuanjian, JIANG Enhui. Stability index for the planview morphology of alluvial rivers and a case study of the Lower Yellow River[J]. Geomorphology, 2021,389:107853.
- [17] 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))
- [18] 李磊磊. 基于系统动力学的窟野河流域水沙变化的社会水文学分析[D]. 西安:西北大学,2020.
- [19] 韩春辉,左其亭,张修宇,等. 河南省引黄受水区资源-生态-经济系统安全评价与耦合协调分析[J]. 人民黄河,2022,44(1):61-66. (HAN Chunhui, ZUO Qiting, ZHANG Xiuyu, et al. Safety evaluation and coupling coordination analysis of resource-ecology-economy system of the Yellow River water supply area in Henan province [J]. Yellow River,2022,44(1):61-66. (in Chinese))
- [20] 崔晨韵,朱永华,吕海深,等. 长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):406-412. (CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):406-412. (in Chinese))
- [21] 汪顺生,杨金月,王爱丽,等. 河南省黄河流域水资源-经济-生态系统耦合协调评价及预测[J]. 湖泊科学,2022,34(3):919-934. (WANG Shunsheng, YANG Jinyue, WANG Aili, et at. Evaluation and forecast of coupling coordination of water resources,economy and eco-system in the Yellow River Basin of Henan Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (3): 919-934. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 林蔚,陈梓林,李晖. 东江下游流域城水耦合协调关系评价及其影响因素[J]. 水资源保护,2022,38(4):66-74. (LIN Wei, CHEN Zilin, LI Hui. Evaluation of urban-water coupling coordination relationship and its influencing factors in lower reaches of the Dongjiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 66-74. (in Chinese))
- [24] 陈莉,张安安. 黄河流域水资源与社会经济协同评价及影响因素分析[J]. 水资源保护,2023,39(2):1-8. (CHEN Li, ZHANG Anan. Synergistic evaluation of water resources and social economy in the Yellow River Basin and analysis of influencing factors [J]. Water Resources Protection,2023,39(2):1-8. (in Chinese))
- [25] 周锦涛. 基于模糊数学的博弈论组合赋权法边坡稳定性评价[J]. 人民珠江,2021,42(9):14-20. (ZHOU Jintao. Evaluation of slope stability based on fuzzy mathematics with combination weighting method of game theory [J]. Pearl River, 2021, 42 (9): 14-20. (in Chinese))
- [26] 焦士兴,王安周,李青云,等. 河南省城镇化与水资源耦合协调发展状况[J]. 水资源保护,2020,36(2):21-26. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, LI Qingyun, et al. Study on coupling and coordinated development of urbanization and water resources in Henan Province [J]. Water Resources Protection,2020,36(2):21-26. (in Chinese))
- [27] 赵子萌,曹永强,常志冬,等. 黄河沿线9省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):121-129. (ZHAO Zimeng, CAO Yongqiang, CHANG Zhidong, et al. Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River [J]. Water Resources Protection,2023,39(6):121-129. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-05 编辑:王芳)