

文章编号 0559-9350(2021)08-0917-10

## 黄河流域发展质量综合评估研究

张金良<sup>1,2</sup>, 曹智伟<sup>1,2</sup>, 金鑫<sup>1,2</sup>, 李超群<sup>1,2</sup>

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

**摘要:** 黄河流域是一个复杂的巨系统, 其中要素众多, 关系复杂, 既相互联系又相互制约。人民治黄以来, 流域保护治理成效显著, 但仍存在一些突出问题。流域高质量发展要打破传统“头痛医头、脚痛医脚”的流域治理模式, 亟需从综合治理、系统治理、源头治理的角度深入开展流域发展质量综合评估的研究。本研究基于系统科学和信息论等基础理论, 提出流域发展质量综合评估理论, 构建了流域发展指数(Basin Development Index, BDI)及宏观-中观-微观三层的评价体系, 探索流域巨系统演变规律, 为流域保护治理提供技术支撑和理论依据。研究发现, BDI总体演变规律为先降低后升高, 呈现震荡式向好趋势; 人均GDP、总冲淤量(黄河下游)、重要断面生态基流保证率、生境质量指数为影响黄河流域巨系统的关键因素。

**关键词:** 黄河流域; 决策理论; 流域发展指数; 耗散结构

**中图分类号:** X821

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20201088

## 1 研究背景

黄河是世界上最复杂难治的河流之一, 治理黄河历来是中华民族安民兴邦的大事。人民治黄以来, 黄河治理开发保护取得了举世瞩目的成就, 在水沙治理、生态保护、防洪减灾、水土流失防治、水资源利用等方面取得了显著的经济、社会和环境效益, 有力支撑了流域经济社会可持续发展。但黄河是一条善淤、善决、善徙的河流, 水沙关系不协调的特性决定了黄河治理工作的长期性、艰巨性和复杂性。当前治黄工作面临的主要问题是: 洪水风险依然是流域的最大威胁, 流域生态环境仍然脆弱, 水资源保障形势严峻, 流域发展质量有待提高。随着流域经济社会快速发展、河流水沙情势和工程情况变化、生态环境问题日益受到关注, 流域发展质量及其综合评估理论需要全面提升。

新时期我国确立了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路, 赋予了流域治理新内涵、新要求和新任务, 为强化水治理、保障水安全指明了方向。目前“系统治理”在流域治理中已有应用, 主要集中在水沙<sup>[1]</sup>、干旱<sup>[2]</sup>、水文水资源<sup>[3]</sup>等单一领域或局部特征分析, 河道稳定性研究<sup>[4-5]</sup>, 水资源系统协同性和系统演化方向判别研究<sup>[6]</sup>等方向。但黄河流域是一个生命共同体, 其组成包括自然、经济、社会、生态等各方面的要素, 应以统筹“山水田林湖草沙”系统治理的思想开展流域保护治理工作。

本文从黄河流域生态保护和高质量发展顶层设计角度出发, 将系统科学、信息论、耗散结构等经典理论与黄河流域保护治理工作实际相结合, 提出以流域发展指数(Basin Development Index, BDI)为决策依据的流域发展质量综合评估理论, 综合评价流域巨系统演变状态和发展质量, 为黄河

收稿日期: 2020-12-29; 网络首发时间: 2021-06-18

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210618.1023.001.html>

基金项目: 中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-65)

作者简介: 张金良(1963-), 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事黄河流域重大水工程与水沙调控研究。

E-mail: jlzhangyrec@126.com

通讯作者: 曹智伟(1979-), 博士, 高级工程师, 主要从事黄河流域战略前沿研究。E-mail: zhiwei.cao@outlook.com

流域综合治理、系统治理、源头治理提供技术支撑。

## 2 黄河流域治理的思考

黄河全长 5464 km, 流域总面积 79.5 万 km<sup>2</sup>, 是我国仅次于长江的第二大河, 也是我国乃至世界上输沙量最大、含沙量最高的大江大河<sup>[7-8]</sup>。黄河流域横跨我国东中西三大区域, 构成我国重要的生态屏障, 是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道, 在我国生态安全方面具有重要的地位。黄河流经 9 个省(区), 流域九省 2018 年底总人口 4.2 亿, 占全国 30% 以上; 地区生产总值 23.9 万亿元, 占全国 26% 左右, 是我国重要经济地带<sup>[9]</sup>。

人民治黄以来, 黄河流域经济社会发展和百姓生活发生了很大变化, 但仍存在一些突出问题, 例如流域生态环境脆弱<sup>[10]</sup>、部分地区水灾害依旧频繁<sup>[11-12]</sup>、水资源保障形势严峻<sup>[13-15]</sup>等。这些问题充分体现了“表象在黄河, 根子在流域”, 揭示了黄河流域保护治理工作的复杂性、协同性和整体性<sup>[16-18]</sup>。黄河流域保护与治理工作需要从顶层设计角度出发, 充分考虑以下 5 个方面的因素。

(1) 问题复杂性。黄河流域存在水资源短缺<sup>[19-21]</sup>、水生态退化<sup>[22-23]</sup>、水沙关系失调<sup>[24-25]</sup>、水资源利用效率低下<sup>[26-27]</sup>等复杂多样的水问题。流域内各区域用水行为、用水政策、用水管理与流域水系统互为反馈, 凸显了问题的复杂性<sup>[28]</sup>。

(2) 资源多样性。流域内自然资源和文化资源丰富。自然资源包括河川径流和地下水资源, 以及湿地、森林、农田、沙漠和动植物群落组成的多样化生物圈资源。文化资源包括仰韶文化、马家窑文化、大汶口文化等不同的文化类别。黄河流域是全国文化中心, 也是中华民族坚定文化自信的重要根基<sup>[29-30]</sup>。

(3) 保护系统性。流域内山、水、林、田、湖、草、沙是一个生命共同体, 生态保护和高质量发展要兼顾各种要素, 坚持保护优先, 绿色先行。

(4) 治理综合性。黄河流域上游生态系统退化, 水源涵养能力低; 中游水土流失严重, 支流污染问题突出; 下游生态水量不足, 河口天然湿地萎缩<sup>[31-32]</sup>。这些问题之间相互联系、相互影响, 因此, 综合治理势在必行。

(5) 发展适宜性。流域是一种以河流为纽带的特殊类型经济区域, 人口是发展基石, 产业是发展动力, 城镇为发展载体, 形成由分水线包围的带状经济空间。沿黄九省(区)在产业选择、城镇布局、基础设施等领域应坚持因地制宜、绿色发展的整体定位<sup>[33-35]</sup>。

总体来看, 五大因素描绘了一幅由“水-生-人”三元体构成的黄河流域图谱, 以水为脉络、以生态为基底、以人为核心, 关系复杂, 既相互联系又相互制约, 共同为保障国家粮食安全、能源安全、生态安全提供重要支撑。从系统治理出发, 实现“让黄河成为造福人民的幸福河”的首要任务是能够定量感知“水-生-人”三元体的发展状态和质量, 为实现幸福河目标提供科学决策支撑。因此本研究提出了表征流域发展质量的综合评估指数 BDI 及其评价指标体系, 为评估流域发展质量提供决策依据。

## 3 流域发展质量综合评估理论及方法

**3.1 流域发展指数** 流域是由河流、生态环境、社会经济等子系统构成的开放的远离平衡态的复杂巨系统, 其本身就是或近似是耗散结构。本文利用 BDI 表征流域发展质量, 它是基于熵值和耗散结构的综合评价指标, 表征了流域发展指标的不确定性和系统的稳定性。BDI 数值越大表示流域发展质量越高, 越趋于良性循环; 数值越小表示流域发展质量越低, 所处状态存在一定的问题, 需要加强监管, 并采取一定的措施进行治理。

**3.1.1 信息熵** 黄河流域巨系统元素众多, 信息量巨大, 在耦合量化研究过程中会出现度量单位不统一和维度灾等潜在问题。本研究引入经典信息论中熵的概念与计算方法, 对流域系统中指标元素

的信息量、系统的有序度(混乱程度)和发展趋势进行量化研究。信息熵也是不确定性的度量,流域系统中指标熵值越高,系统越混乱,有序度越低,流域发展因素不确定性越高,发展质量越低。

信息熵既可以表征黄河流域巨系统的有序程度,还可以从每年熵值的变化判断黄河流域巨系统的发展趋势。从熵增原理出发,黄河流域巨系统的熵变化取决于内外两个方面:一个方面是由于流域巨系统自身生存发展的不可逆过程而产生的正熵;另一个方面,黄河流域巨系统如同一个有机体,它要想保持健康的、可持续的有序发展趋势,就必须从外部的大环境中获得有效负熵流,也就是不断进行着自然河流与外部环境之间的信息、物质、能量的交换。

**3.1.2 耗散结构** 以黄河为代表的流域巨系统是河流自然系统与外部社会经济活动相互作用形成的,具有典型的非平衡性、开放性和自组织性,系统演化呈现非均匀性并伴随涨落现象,系统的发展依赖于来水来沙形势,并受生态环境和社会发展的多重影响,具有明显的耗散结构特征。黄河流域巨系统是一个与外界环境存在物质能量交换的自组织系统,系统内部存在着复杂的相互作用关系,因此可利用耗散结构理论进行系统稳定性和演变规律研究。

BDI以黄河流域巨系统为研究对象,分析复杂系统与外部环境正、负熵变,并引入衡量系统自组织演变特征的布鲁塞尔器模型,构建以耗散结构为基础的系统演变研究框架,系统评价演变特征及影响因素,为下一步实施科学的、系统的保护与治理方案提供理论依据。BDI是量化分析系统耗散结构特性的指数,表征了系统自组织、自恢复的能力,即外界抗干扰的能力,从一定程度上讲,代表了系统发展的稳定程度,因此BDI越高,系统发展质量越高。

**3.2 理论架构** 黄河流域保护与治理是“系统治理”科学思想的集中体现。黄河流域是“水-生-人”三元体构成的复杂系统,也可看做是由河流-生态环境-社会经济构成的复合系统;同时又是一个要素众多、关系错综、目标功能多样的复杂开放的巨系统。流域发展质量综合评估理论以流域巨系统为研究对象,其研究架构是由“宏观-中观-微观”体系构成。宏观层(巨系统层)以系统思维为指引,同时结合BDI,系统性研究黄河流域巨系统的功能、架构、演变规律等;中观层(子系统层)以专业(行业)理论模型为依据,综合研究黄河流域子系统的有序度、演变方向、相互博弈关系、关键因子等;微观层(指标元素层)以指标元素基本知识为参考,优化巨系统指标体系和建立流域指标数据中心等。

**3.2.1 宏观层(巨系统层)** 黄河是一个复杂的巨系统,治理黄河是一项长期的系统工程。因此,无论黄河治理的整体战略、实施方案,还是不同河段的治理方略、工程布局,或是单一工程的具体设计、运行管理,在其全生命周期的各个阶段,都必须以系统论思维为统领,把黄河流域作为一个有机的复合系统,统筹考虑。黄河流域的系统治理要以河流基本功能维持、区域社会经济高质量发展、流域生态环境有效保护三维协同为整体治理目标,多维度研究黄河流域综合治理的整体布局及不同治理措施之间博弈的协同效应。

因此,按照流域治理目标划分,对应“水-生-人”三元体架构,黄河流域巨系统可以分为河流子系统、生态环境子系统、社会经济子系统,系统架构如图1所示。3个子系统之间相互影响、相互依存,但是从子系统角度出发,又有一定的边界,因此可以做出区分。

**3.2.2 中观层(子系统层)** 分别通过河流健康指数(River Health Index, RHI)、生态环境发展指数(Ecological Development Index, EDI)和社会经济发展指数(Social Development Index, SDI)进行分析评价。

(1)河流子系统。以河道治理为重点,主要涉及行洪、水沙、水资源、水工程等多方面的要素。防洪一直是治黄的首要任务,其治理是涉及多方面要素的复杂问题;而且黄河的泥沙问题世界罕见,“二级悬河”问题突出。RHI从系统论的角度出发,考虑水资源、洪水、泥沙三个方面,选取年降水总量、总水量、主河槽过洪能力、来沙量、总冲淤量、来水来沙协调度6个关键指标,通过熵权法计算得到RHI。

(2)生态环境子系统。以生态保护为重点,黄河流域包括各类生物与环境要素,是我国重要的生态屏障,也是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道,拥有三江源、祁连山等多个国家公园和国家重点生态功能区,同时黄河流经黄土高原水土流失区、五大沙漠沙地,沿河两岸分布有东

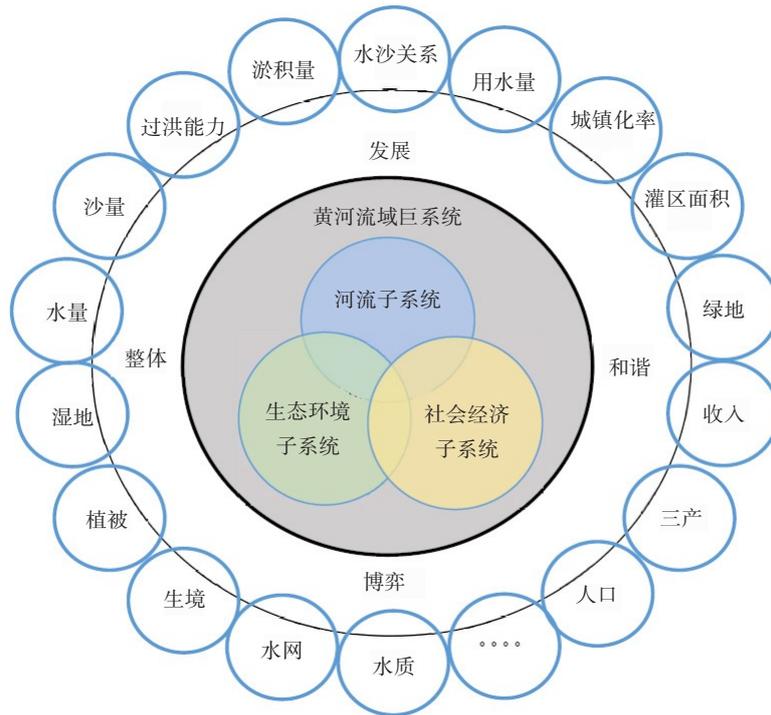


图1 黄河流域巨系统架构

平湖和乌梁素海等湖泊、湿地，河口三角洲湿地生物多样性。生态环境是由生物群落及非生物自然因素组成的各种生态系统所构成的整体。长期以来，在自然因素和人为因素的共同作用下，生态环境以不同的时空尺度在发展演变。EDI从生态环境保护角度出发，量化研究生境质量、植被覆盖、土地胁迫、水网湿地等相关因素，是基于系统理论和熵权分析得到的流域生态环境发展质量的综合性评价指标。

(3)社会经济子系统。包括人口、产业、经济、文化等多方面的要素，是黄河流域经济高质量发展的重要问题。黄河流域是我国重要的经济地带，黄河流域在我国经济社会发展、脱贫攻坚等方面也具有十分重要的地位。SDI能够反映流域居民特征、衡量居民福祉，综合表征流域经济发展现状和增长活力，是流域社会经济研究中不可或缺的内容。从人口特征、居民生活质量、经济增长水平、地区产业结构等4个角度，选取12个社会经济特征指标，通过熵权法计算得到SDI，定量分析黄河流域近40年的社会经济发展演变特征。

RHI、EDI和SDI为表征河流子系统、生态环境子系统、社会经济子系统发展质量提供参考依据，是流域发展质量综合评估理论的重要研究部分。

3.2.3 微观层(指标元素层) 为了支持中观层和宏观层的数据分析工作，微观层的重点工作是构建黄河流域巨系统指标体系。根据黄河流域巨系统的内涵，结合国内外关于河流发展评价的相关实践和专家意见，以系统性、全面性和可获取性为原则，针对黄河流域生态保护和高质量发展要求，构建流域发展质量综合评价指标体系见表1。

本文综合考虑黄河流域巨系统，将流域发展质量综合评价指标体系分为目标层、准则层、指标层三个层次，每个层次选择代表性指标反映水沙情势、水体质量、生境质量、人类活动、经济发展等的变化状况。其中极性代表系统指标与综合评价指数的正负相关性，极性为1代表指标越大，综合评价指数越好；反之，极性为-1时，指标越大，综合评价指数越差。

指标数据种类主要包括基础数据和行业(专业)数据。基础数据以遥感、测绘、地理信息等数据为主；行业(专业)数据主要从黄河流域日常业务和研究中筛选广泛应用的相对成熟的时空序列数据。指标数据为研究河流、生态环境、社会经济子系统关键指标的历史与现状，并监控其动态变化，提供了基础客观资料。对收集来的数据，从空间和时间两个维度进行整理，空间上将分区域或分段的数据通过加权平均归集到流域尺度上，时间上以年为单位将各类数据整理为序列数据。由于某些

表1 流域发展评价指标体系

序号	目标层	准则层	指标	单位	极性	数据来源
1			年降水总量	mm	1	沿黄九省区年降水总量之和
2			总水量(花园口)	亿m <sup>3</sup>	1	中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料
3		水文情势	总水量(头道拐)	亿m <sup>3</sup>	1	中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料
4			主河槽过洪能力(宁蒙河段)	m <sup>3</sup> /s	1	《宁蒙河段二期综合治理工程》《年度黄河防凌预案》
5			主河槽过洪能力(黄河下游)	m <sup>3</sup> /s	1	《黄河下游河道排洪能力分析报告》
6	河流		来沙量	亿m <sup>3</sup>	-1	中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料
7			总冲淤量(宁蒙河段)	亿m <sup>3</sup>	-1	《宁蒙河段二期综合治理工程》
8		泥沙情势	总冲淤量(黄河下游)	亿m <sup>3</sup>	-1	《小浪底水库初期运用方式研究报告》、黄河水利委员会水文局
9			来水来沙协调度		1	根据中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料查得的含沙量和流量求得
10			重要断面生态基流保证率	%	1	断面水文资料
11			重要水功能区水质达标率	%	1	《中国水资源公报》
12		水环境因素	水网密度指数		1	根据中科院资源环境科学与数据中心的土地利用空间数据集、河网空间数据集、规划院提供的水资源量计算得到
13			重要支流水质达到或优于Ⅲ类河长比例	%	1	《中国水资源公报》
14	生态环境		生境质量指数		1	根据中科院资源环境科学与数据中心的土地利用空间数据集计算得到
15		生态因素	植被覆盖指数		1	根据中科院资源环境科学与数据中心的NDVI空间数据集计算得到
16			土地胁迫指数		-1	根据黄委上中游局提供的土壤侵蚀模数、土壤类型、面积计算得到
17			黄土高原水土流失治理面积	km <sup>2</sup>	1	黄河水利委员会上中游局提供
18			典型区域湿地面积变化率	%	1	根据Landsat卫星遥感影像解译得到
19			常住人口	万人	-1	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
20			城镇化率	%	1	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
21			城镇居民人均可支配收入	元	1	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
22		社会经济发展因素	人均公园绿地面积	m <sup>2</sup> /人	1	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
23			GDP增长率	%	-1	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
24	社会经济		人均GDP	元/人	1	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
25			第三产业占比	%	1	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
26			夜晚灯光指数		-1	DMSP卫星数据
27			灌区面积	10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup>	-1	各省统计局官方网站近四十年统计年鉴
28		水资源因素	耗水率	%	1	根据耗水量计算
29			流域用水总量	亿m <sup>3</sup>	-1	《中国水资源公报》
30			万元工业增加值用水量	m <sup>3</sup> /万元	-1	《中国水资源公报》

历史原因,少量数据有缺失,因此根据不同情况,灵活采用直线插值、样条插值、拉格朗日插值及灰色预测法<sup>[36]</sup>等方法进行补齐,经合分析后用于研究。

### 3.3 计算方法 BDI的计算基于熵权模型和布鲁塞尔模型。具体计算步骤如下所示。

(1)计算各指标的熵值和权重

$$S = -\frac{1}{\ln n} \sum_{k=1}^n (p_k \ln p_k) \quad (1)$$

$$p_k = \frac{f_k}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (2)$$

$$w_i = \frac{1 - S_i}{N - \sum_{i=1}^N S_i} \quad (3)$$

式中： $n$ 为指标值标准区间的个数； $p_k$ 为各标准可能度函数值在所有值 $f_k$ 中的比重； $S$ 为熵值； $w_i$ 为指标 $i$ 的权重。

(2)计算正负熵值：

$$A = \sum_{i=1}^N (S_{i,A} W_{i,A}) \quad (4)$$

$$B = \sum_{i=1}^N (S_{i,B} W_{i,B}) \quad (5)$$

式中： $A$ 、 $B$ 分别为系统的正向和负向熵变总和； $N$ 为对应指标数。

(3)计算BDI指数：

$$Index_{Ds} = |B| - (1 + A^2) \quad (6)$$

$$BDI = 100(Index_{Ds} + 2)/3 \quad (7)$$

其中， $Index_{Ds}$ 是基于布鲁塞尔模型计算得到的耗散结构指标，考虑易于推广的原则，本研究采用百分制为BDI赋分，计算得分时，将耗散结构指标取值范围线性转换至 $[0, 100]$ 区间，得出如式(7)中的转换公式，当 $Index_{Ds}$ 为0，即系统达到耗散结构阈值时，BDI赋分为66.7分。

## 4 结果分析

**4.1 BDI值变化及分析** 黄河流域在1980—2019年40年间的BDI值变化及与流域内治水相关的历史大事件关联情况，如图2所示。

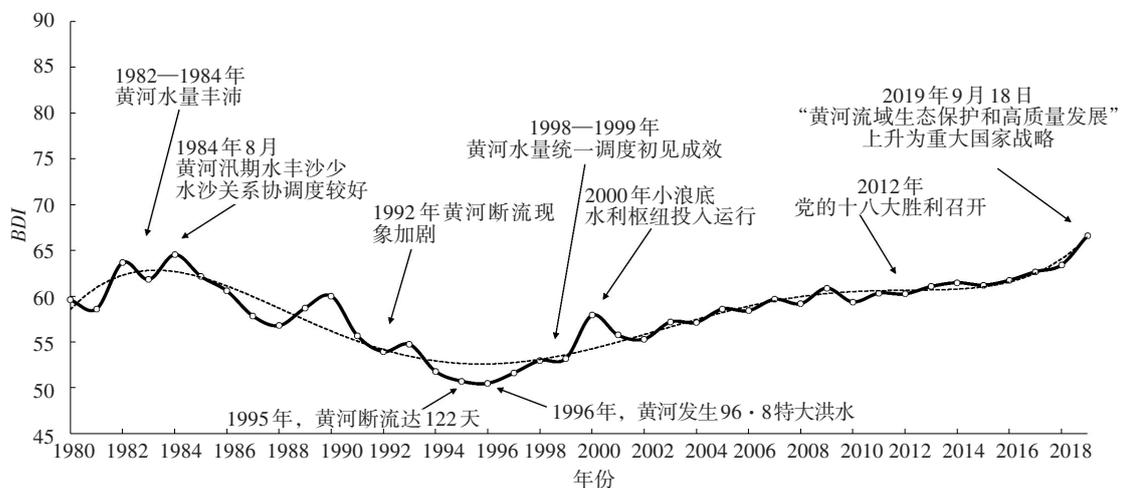


图2 1980—2019年黄河流域BDI值变化和相关联的历史大事件

在40年内，BDI的均值为58.5分，最低值为1996年的50.5分，最高值为2019年的66.6分，总体趋势为先降低后升高。在1980年代，我国处于改革开放初期，流域内的经济发展属于起步阶段，流域生态环境受到人类活动的负面影响有限。在1985年以前，BDI都处在均值以上的水平，流域生态环境质量较高，流域综合发展质量相对较好。1985年以后，BDI波动性下降，1996年达到最低值。该阶段流域经济发展水平逐步提高，但由于经济发展的同时没有足够重视生态环境的保护和流域承载力的维持，导致流域生态环境状况欠佳。在1996年之后，虽然发展波动性仍然存在，但由于流域科学决策、系统治理和重大工程的积极影响，流域系统总体发展趋势向好。尤其在最近10年间，BDI指数的波动性减小，数值也较高。

结合黄河流域发生的重大历史事件<sup>[37]</sup>进一步分析黄河流域BDI指数变化。1982年和1984年,黄河水量丰沛,尤其是1984年8月,黄河汛期出现水丰沙少的现象,水沙关系协调度相对较好,致使河流健康指数较优,BDI受其影响较大,也相对较优。1992年8月,渭河支流发生洪水灾害,花园口出现高水位、高含沙洪水。这一年黄河断流现象加剧,其中利津断面断流82 d。1995年,黄河全年断流更长达122 d。1996年8月,黄河发生96·8特大洪水。这一系列重大事件都导致了BDI的连续下降,直到1996年达到最低值。1997年之后,随着黄河万家寨和小浪底水利枢纽相继下闸蓄水,黄河水量统一科学调度初见成效,加之黄土高原水土流失治理、北方防沙带治理及自然保护区建设等生态工程逐渐发挥作用,黄河流域BDI逐渐向好发展,至2000年左右达到了一个阶段发展的高峰。2000年开始,黄河实现全线不断流,并得到了较好的维持。2005年国家设立了三江源自然保护区,对黄河源头区域的生态保护起到了关键作用,一定程度上维持了黄河总水量的稳定。2010年开始的黄土高原综合治理工程,配合下游小浪底等水利枢纽的调水调沙,持续控制着中下游河段的来沙量,使得下游水沙关系相对和谐。这些措施都为流域内经济社会的可持续发展创造了较好条件,BDI指数持续上升。可以看到,黄河流域BDI指数的变化规律与流域内发生的若干重大事件有很强的关联性,存在数值和时间上的响应关系。

需要特别指出的是,在近20年时间内,虽然黄河流域经过了持续不断的治理,水沙关系和生态环境得到了一定程度的改善,但黄河复杂的自然条件、特殊的河情,决定了黄河保护治理的长期性、艰巨性和复杂性,尤其是在消除洪水风险、保护生态环境、保障水资源等方面需要外界采取措施,持续进行治理和维护。

**4.2 关键(高权重)指标对综合评价指数的贡献程度** 对黄河流域发展质量综合评价体系中各较大权重指标进行统计,结果如表2所示。40年间,评价指标体系中,权重最大指标出现频率较高的分别是:人均GDP(14次)、总冲淤量(黄河下游)(10次)、重要断面生态基流保证率(5次)、生境质量指数(4次)。

对上述高权重指标进行贡献度分析,结果如图3所示,可表征重要指标对黄河巨系统的发展质量的影响程度,从而针对关键指标采取相关措施,实现流域保护与治理。总体上,1980—1993年间,人均GDP贡献值最大,随后逐渐降低;总冲淤量(黄河下游)贡献值前期波动较大,2000年以后,贡献值趋于稳定,保持在5%左右;2000年以后,黄河实现全线不断流,相应的重要断面生态基流保证率在2004年以后较为稳定,维持在4.5%左右;生境质量指数相对比较平稳,保持在3.6%左右,是较为关键的影响因素。

流域人均GDP代表着流域内社会经济发达的程度,说明人类的经济影响和产业发展在黄河流域复杂系统的发展过程中起着至关重要的作用。

在流域治理和管理过程中,需要尽可能提高流域经济发展的质量和水平,提升流域人均GDP,同时应合理、科学地处理人与流域相互影响的关系,在利用流域提供的自然资源的同时,注重流域生态保护,实现均衡、可持续发展的经济发展。

水沙关系一直以来都是黄河治理中的“牛鼻子”,减少黄河下游泥沙淤积,维持中水河槽行洪输沙功能,保障黄河下游防洪(防凌)安全是黄河保护治理的重大课题。2013年国务院批复的《黄河流域综合规划(2012—2030)》提出“加快古贤水利枢纽前期工作步伐,尽早开工建设”,古贤水利枢纽是黄河水沙调控体系的控制性骨干工程之一,工程建设实施对于减少黄河下游河道淤积,进一步调整和改善黄河中下游水沙关系具有积极作用。

生态基流是维持河道水体生态功能的基本流量,在确定水利设施调度方案时,需要以重要断面生态基流保证率作为约束条件,使黄河干流生态基流得到较好保障,河流生态健康逐步恢复。1990年代黄河断流对黄河鲤等土著鱼类生境造成严重破坏,随着“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路的实施,对黄河流域水资源进行统一调度、科学决策,加强流域上中游地区水源涵

表2 较大权重指标出现概率的部分统计结果

指标名称	子系统	权重最大		权重前三	
		次数	概率	次数	概率
人均GDP	社会经济	14	35%	15	38%
总冲淤量(黄河下游)	河流	10	25%	18	45%
重要断面生态基流保证率	生态环境	5	13%	21	53%
生境质量指数	生态环境	4	10%	11	28%

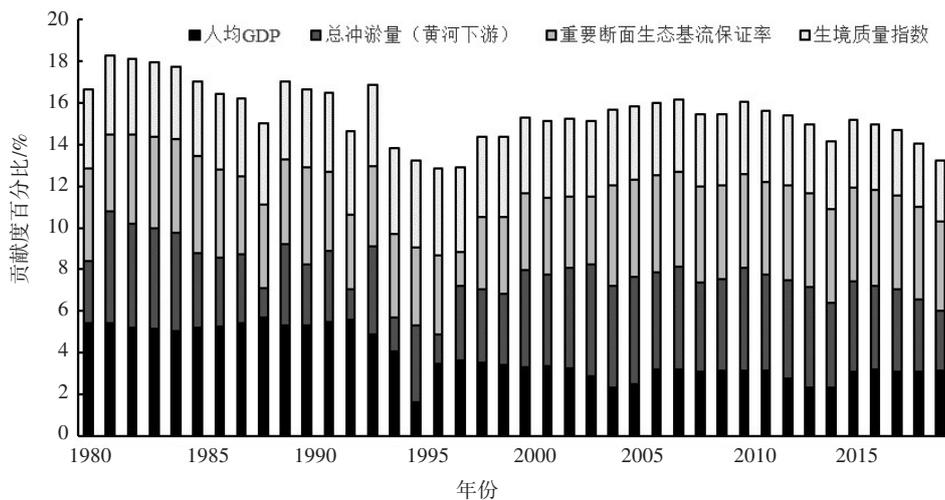


图3 黄河流域生态-人类社会耦合系统质量综合评价关键指标贡献程度

养、集约节约水资源利用，保障河道生态基流，维持河流生态功能。

新发展阶段要秉承创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念，应从生态系统结构、过程、功能完整性和健康状态出发，保障黄河流域生态系统完整性和物种多样性，提高生境质量。坚持顺应自然、保护自然的发展路线，大力实施退耕还林还草还湿系统工程、下游滩区综合提升和生态廊道建设工程、保护和修复重要野生动植物栖息地等。

总体来讲，相对权重较大的4个指标分别来自3个不同的子系统，也就代表了各子系统的相对权重分布，同时，此结果也从一定程度上说明本研究中采用的评价指标体系及对各个子系统的划分具有科学性，构建的评价体系能够反映子系统之间以及与流域巨系统之间的相互影响关系。

## 5 结论与讨论

**5.1 结论** 本研究以黄河流域为例，从系统性、整体性角度出发，利用熵权和耗散结构对河流-生态环境-社会经济耦合系统进行定量分析，揭示复杂系统的演变规律和内部指标体系间互反馈机制，首次提出表征流域发展质量的综合评估指数BDI及其理论方法，为评估流域发展质量提供参考依据。研究发现：(1)1980—2019年，BDI的均值为58.5分，最低值为1996年的50.5分，最高值为2019年的66.6分，总体演变规律为先降低后升高，呈现震荡式向好趋势，与黄河流域发生的若干重大事件关联性较大，存在数值和时间上的响应关系；(2)复杂系统各项指标的熵权存在随时间序列的动态变化，根据1980—2019年分析结果，人均GDP、总冲淤量(黄河下游)、重要断面生态基流保证率、生境质量指数为影响系统的关键因素；(3)从系统状态(耗散结构理论)研究，1980—2019年系统耗散结构指标 $Index_{Ds}$ 均小于0，表明黄河流域河流-生态环境-社会经济耦合系统的活跃度较低，但整体呈现震荡式上升趋势，整体趋势与达到耗散结构的临界条件逐渐接近。

**5.2 讨论** 本研究基于系统思维，深入解读“山水林田湖草沙”综合治理、系统治理、源头治理，为开展流域保护治理工作、进行流域发展质量综合评估提供了理论基础和计算模型，对实施黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略具有重要支撑作用，将为后续国家和沿黄省区统筹考虑、综合施策提供科学依据：(1)流域的人均GDP成为过去40年影响BDI的关键因素，证明人类影响在黄河流域巨系统发展演变过程中起着至关重要的作用。流域高质量发展必须合理、科学地处理人与自然相互影响的关系，统筹和改善人与自然的关系，从人为改变自然、征服自然转向人水和谐发展。(2)总冲淤量(黄河下游)是制约BDI的敏感因素，水沙关系一直以来都是黄河治理中的“牛鼻子”，维持中水河槽行洪输沙功能，保障黄河下游防洪(防凌)安全是黄河保护治理的重大课题。(3)在流域生态保护治理中，生态基流保证率和生境质量指数是两个关键因素。新发展阶段要秉承创新、协调、绿色、

开放、共享的新发展理念,应从生态系统结构、过程、功能完整性和健康状态出发,保障生态基流保证率和提高生境质量。

黄河流域生态保护和高质量发展已经上升为重大国家战略,为黄河流域带来了前所未有的重大发展历史机遇,同时也对提升新形势下治河决策科学水平提出了更高要求。流域发展质量综合评估理论以系统科学为指引,梳理黄河流域内河流、生态环境、社会经济等方面各种因素的关联性,建立具有评价和决策支持功能的系统模型,基于流域发展指数BDI综合评估流域发展质量,为黄河流域水战略布局及重大项目前期规划论证提供决策依据,促进新形势下流域协调发展。

流域发展指数BDI及相关理论方法,不仅可以为表征流域发展质量提供参考依据,还可以广泛应用于各级行政区域与重要自然地理分区的高质量发展评估工作中,补充目前以经济指标为主的评价体系,为统筹推进新时期区域高质量发展的各项工作提供技术支撑。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 胡国华,赵沛伦,肖翔群.黄河泥沙特性及对水环境的影响[J].水利水电技术,2004,35(8):17-20.
- [ 2 ] 彭高辉,夏军,马秀峰,等.黄河流域干旱频率分布及轮次数字特征分析[J].人民黄河,2011,33(6):3-12.
- [ 3 ] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展,2009,20(2):153-158.
- [ 4 ] 徐国宾,赵丽娜.最小熵产生、耗散结构和混沌理论及其在河流演变分析中的应用[M].北京:科学出版社,2017.
- [ 5 ] 艾南山,岳天祥.再论流域系统的信息熵[J].水土保持学报,1988(4):3-11.
- [ 6 ] 畅建霞,黄强,王义民,等.基于耗散结构理论和灰色关联熵的水资源系统演化方向判别模型研究[J].水利学报,2002(11):107-112.
- [ 7 ] 高吉喜,王永财,侯鹏,等.近20年黄河流域陆表水域面积时空变化特征研究[J].水利学报,2020,51(9):1157-1164.
- [ 8 ] 胡春宏,张晓明.论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J].水利学报,2018,49(9):1028-1039.
- [ 9 ] 杨开忠,董亚宁.黄河流域生态保护和高质量发展制约因素与对策——基于“要素-空间-时间”三维分析框架[J].水利学报,2020,51(9):1038-1047.
- [ 10 ] 彭月,李昌晓,李健.2000-2012年宁夏黄河流域生态安全综合评价[J].资源科学,2015,37(12):2480-2490.
- [ 11 ] 苏人琼,杨勤业.黄河流域灾害环境综合治理对策[J].人民黄河,1996(11):16-20.
- [ 12 ] 杨佩国,戴尔阜,吴绍洪,等.黄河下游大堤保护区内洪灾风险的空间格局[J].科学通报,2006,51(S2):148-154.
- [ 13 ] 宋伟华,刘红珍,崔鹏,等.黄河上游近年中小洪水特点及水库调度分析[J].人民黄河,2020,42(5):40-45.
- [ 14 ] 常炳炎,薛松贵.黄河流域水资源合理分配和优化调度[M].郑州:黄河水利出版社,1998.
- [ 15 ] 孙才志,靳春玉,郝帅.黄河流域水资源-能源-粮食纽带关系研究[J].人民黄河,2020,42(9):101-106.
- [ 16 ] 左其亭,费小霞,李东林.黄河流域生态保护和高质量发展水利专项规划思路与内容框架[J].人民黄河,2020,42(9):21-25.
- [ 17 ] 张金良.黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J].人民黄河,2020,42(4):1-6.
- [ 18 ] 黄燕芬,张志开,杨宜勇.协同治理视域下黄河流域生态保护和高质量发展——欧洲莱茵河流域治理的经验 and 启示[J].中州学刊,2020(2):18-25.
- [ 19 ] SHIJIE G U, CHUNXIA L U, QIU J. Quantifying the degree of water resource utilization polarization: A case study of the Yellow River Basin[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019(1): 21-28.
- [ 20 ] 司毅铭,张军献,赵山峰,等.黄河流域水污染状况及对策[J].人民黄河,2005,27(12):53-54.
- [ 21 ] 刘姜艳.黄河流域水污染现状分析及控制对策研究[J].资源节约与环保,2020(5):86.
- [ 22 ] 王思远,王光谦,陈志祥.黄河流域生态环境综合评价及其演变[J].山地学报,2004(2):133-139.

- [ 23 ] 张红武. 黄河流域保护和发展存在的问题与对策[J]. 人民黄河, 2020, 42(3): 1-10, 16.
- [ 24 ] 张金良, 练继建, 张远生, 等. 黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 897-905.
- [ 25 ] 杨忠敏, 任宏斌. 黄河水沙浅析及宁蒙河段冲淤与水沙关系初步研究[J]. 西北水电, 2004(3): 50-55.
- [ 26 ] 王海英, 董锁成. 黄河沿岸地带水资源短缺的症结与对策探讨[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 590-596.
- [ 27 ] 管新建, 梁胜行. 基于熵权模型的黄河流域水资源利用效率综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2016(11): 82-85.
- [ 28 ] 彭祥. 黄河流域系统治理的对策建议[J]. 中国水利, 2020(17): 25-27.
- [ 29 ] 李玉洁. 黄河流域农耕文化述论[J]. 黄河文明与可持续发展, 2008(1): 81-90.
- [ 30 ] 彭岚嘉, 王兴文. 黄河文化的脉络结构和开发利用——以甘肃黄河文化开发为例[J]. 甘肃行政学院学报, 2014(2): 92-99, 13.
- [ 31 ] 宗秀影, 刘高焕, 乔玉良, 等. 黄河三角洲湿地景观格局动态变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2009(1): 91-97.
- [ 32 ] 张威, 付新峰. 黄河流域水生态现状与气候变化适应性对策[J]. 人民黄河, 2011, 33(5): 51-53.
- [ 33 ] 冯精兰, 胡鹏转, 刘群, 等. 黄河中下游干流沉积物中重金属的赋存形态及其生态风险[J]. 环境化学, 2015(1): 178-185.
- [ 34 ] 李毓堂. 大西北和黄河流域生态治理与经济发展新方略——以草产业为基础, 草林牧农工商结合, 综合治理发展[J]. 草业学报, 2000, 9(1): 60-64.
- [ 35 ] 金凤君, 马丽, 许堞. 黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 127-136.
- [ 36 ] 马知恩, 周义仓. 常微分方程定性与稳定性方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [ 37 ] 黄河水利委员会. 黄河大事记[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.

## Research on comprehensive evaluation of the development quality of the Yellow River Basin

ZHANG Jinliang<sup>1, 2</sup>, CAO Zhiwei<sup>1, 2</sup>, JIN Xin<sup>1, 2</sup>, LI Chaoqun<sup>1, 2</sup>

(Yellow River Engineering Consulting Co.Ltd, Zhengzhou 450003, China;

2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin of Ministry of Water Resources (under construction), Zhengzhou 450003, China)

**Abstract :** The Yellow River Basin is a complex giant system with numerous elements and complex relationships, which are both interrelated and mutually restricted. Since people began to control the Yellow River, watershed governance and protection have achieved remarkable results, but there are still some outstanding problems, which fully embodies the "appearance in the Yellow River, roots in the basin", and reveals the complexity, coordination and integrity of watershed governance and protection work. The high-quality development of the river basin needs to break the traditional "treat the symptoms but not the disease" river basin governance model, and carry out more in-depth research from the perspective of comprehensive governance, system governance, and source governance. In particular, it is urgent to study the comprehensive evaluation theory of watershed development quality. Based on the basic theories such as system science and information theory, this research puts forward a comprehensive evaluation theory of watershed development quality, constructs a basin development index (BDI) and a three-tier evaluation system of macro-medium-micro level, so as to explore the evolution law of the watershed giant system, and provide technical support and theoretical basis for river basin governance and protection. This study found that the overall evolution law of BDI was firstly decreased and then increased, showing an oscillating trend to the good. Per capita GDP, total amount of scour and deposition (in the lower reaches of the Yellow River), guarantee rate of ecological base flow in important sections and habitat quality index are the key factors affecting the quality of the Yellow River Basin.

**Keywords :** Yellow River Basin; decision-making theory; basin development index; dissipative structure

(责任编辑: 韩 昆)