

# 基于和谐理论的黄河兰州段水生态 可持续发展分析

贡力<sup>1,2</sup>, 马梦含<sup>1</sup>, 靳春玲<sup>1</sup>, 逯晔坤<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 调水工程及输水安全研究所, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 生态可持续发展已经成为人类社会经济发展的一大重要问题, 在生态环境保护和生态问题日渐凸显的背景下, 亟需对生态可持续发展进行深入探究与分析。将和谐理论运用于生态可持续发展分析研究中, 通过社会、经济、水生态、水资源、水环境 5 个和谐性系统构建指标体系, 遴选出 22 个指标进行研究分析黄河兰州段水生态可持续发展能力。研究表明: 黄河兰州段水生态可持续发展能力逐年上升, 2010-2012 年水生态可持续发展等级为 V 级极其不可持续状态; 2013-2014 年为 IV 级不可持续发展状态; 2015-2016 年为 III 级较不可持续发展; 2017 年为 II 级一般可持续发展状态, 但是还未达到最优阶段。黄河兰州段可持续发展形势严峻, 应通过加大环境保护力度, 提高生态承载力, 从而提高其可持续发展能力。

**关键词:** 水生态; 和谐理论; 可持续发展; 混合交叉赋权; 黄河兰州段

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0009-08

## Sustainable development analysis of water ecology in Lanzhou section of the Yellow River based on harmony theory

GONG Li<sup>1,2</sup>, MA Menghan<sup>1</sup>, JIN Chunling<sup>1</sup>, LU Yekun<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Research Institute of Water Transfer Engineering and Water Transport Security, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Sustainable development of ecology has become a major issue for the socio-economic development. As the environmental protection and ecological issues become more and more prominent, it is urgent to conduct an in-depth exploration and analysis of sustainable development of ecology. Therefore, the harmony theory was applied to construct an indicator system based on five harmony systems, which are society, economy, water ecology, water resources, and water environment. 22 indicators were selected for the analysis of the water ecological sustainability of the Yellow River Lanzhou. The results show that the sustainable development capacity of water ecology in Lanzhou section of the Yellow River has been increasing year by year. The sustainable development of water ecology was classified as level V - extremely unsustainable from 2010 to 2012, level IV - unsustainable from 2013 to 2014, level III - almost unsustainable from 2015 to 2016, and level II - generally sustainable in 2017. In addition, it has not yet reached the optimal stage. The sustainable development of water ecology in Lanzhou section of the Yellow River is facing great challenges, it is necessary to strengthen the environmental protection and improve the ecological carrying capacity so as to improve its sustainable development capacity.

**Key words:** water ecology; harmony theory; sustainable development; mixed cross-weighting; Lanzhou section of the Yellow River

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-02-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969011、51669010)

作者简介: 贡力(1977-), 男, 江苏丹阳人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事流域水安全及寒旱地区长距离输水工程安全研究。

通讯作者: 马梦含(1996-), 女, 甘肃临洮人, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境及调水工程安全评价。

## 1 研究背景

随着人口增长以及社会经济的快速发展,对于生态环境的破坏和自然资源的开发,使得生态问题日渐凸显,区域可持续发展以及生态承载力能否继续维持和支撑社会经济的迅速发展已经成为我国当前必须思考与讨论的问题之一<sup>[1-2]</sup>。由于我国改革开放以来,生产力迅速发展,没有过多考虑生态问题,使得生态问题成为制约我国目前发展的主要问题之一。同时,快速的城市化进程引发了城市雾霾、突发水污染、城市洪水、土壤污染等一系列环境问题<sup>[3]</sup>,资源消耗急剧增加,生态环境日渐恶化,这些都是导致高消耗、低效率发展的原因,使得人类发展与资源环境有所失衡,难以维持和谐统一的局面。可持续发展不仅仅只是经济发展问题,它与人类社会的发展以及生态环境保护息息相关,因此,对于生态可持续发展的研究与分析已迫在眉睫。

促进生态可持续发展已经成为当代社会管理的必然需要。国内外专家学者开展了大量的研究并取得了较大进展,其中 Hai 等<sup>[4]</sup>利用概念模型和网络结构指数(NSI)开发了一种包含整个系统属性的新指标,并对流域水系统进行可持续性评估;Lu 等<sup>[5]</sup>以黑河流域为例,构建了流域中游农业发展与下游生态系统可持续性之间的权衡关系;章光新等<sup>[6]</sup>对生态-社会协调可持续发展的流域水资源进行了应用实践分析;樊新刚等<sup>[7]</sup>利用构建的耦合分析模型对区域可持续发展能力的能值进行了分析评价;贾小乐等<sup>[8]</sup>基于能值分析理论,对2015年环太湖城市群生态经济系统进行可持续发展研究,综合评价了其可持续发展程度以及健康状态;粟一帆等<sup>[9]</sup>以汉江中下游为例,探究水利工程建设对于流域生态系统健康的影响;韩艳利等<sup>[10]</sup>对于黄河流域生态补偿类型与重点领域进行了探讨;李冰瑶等<sup>[11]</sup>建立了水资源可持续利用安全评价指标体系,分析研究了水资源与生态环境和经济社会的可持续发展协调问题;彭月等<sup>[12]</sup>构建了生命安全评价体系,以黄河流域为例,对于区域生态案例进行了评价。

黄河流域在中国经济社会发展和生态安全方面具有重要意义<sup>[13]</sup>,习近平总书记在黄河流域生态保护与高质量发展座谈会中提出对于黄河流域的治理保护已经迫在眉睫,作为我国生态屏障、重要经济地带以及脱贫攻坚重要区域,它在我国有着无法代替的地位,保护黄河是重大国家战略,已经成为千秋大计,加强黄河流域治理,对于加强民族团结、维持社

会稳定具有重要意义。黄河流域水资源情况复杂,生态环境极其脆弱<sup>[14-16]</sup>,是世界上治理最艰巨、保护难度最大的河流之一。黄河作为孕育了中华文明的中华民族母亲河,其历史意义重大,黄河生态文明在国家生态安全维护中有着无法替代的重要战略地位。然而,当前对于黄河流域的治理与保护投入不足,对于黄河流域水生态可持续发展的研究不足,而兰州由于其独特的地理位置,作为唯一一个黄河穿城而过的省会城市,对黄河意义重大<sup>[17]</sup>。因此本文采用和谐理论<sup>[18]</sup>对黄河流域中的兰州段进行水生态可持续发展分析,利用混合交叉赋权计算权重,以黄河兰州段2010-2017年为例进行水生态可持续发展分析评价,分析黄河兰州段2010-2017年间水生态可持续和谐性等级,研究成果有利于促进黄河后续治理能力,对于后续保护黄河生态环境和促进水生态可持续发展具有重要意义。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

研究区黄河兰州段地处甘肃境内黄河上游地区,全长152 km,系刘家峡水库坝下至黑山峡河段,沿途接纳湟水河、庄浪河、宛川河等,兰州市城区段从西固新城桥到东部的包兰桥长达42 km。该河段地理位置独特,于峡谷川地间穿行,深居内陆,降雨较少,气候干燥。

### 2.2 数据来源

本文研究数据主要来源于:(1)《甘肃省水资源公报(2010-2017)》《甘肃省水利发展统计公报(2010-2017)》《甘肃省统计年鉴(2010-2017)》和《兰州市统计年鉴(2010-2017)》;(2)《甘肃省生态保护与建设规划(2010-2017)》和《兰州市十三五环境保护规划》。

黄河兰州河段资料依据甘肃省水资源公报及统计年鉴等中兰州水文站统计资料所得。

### 2.3 指标体系构建

在本文中,笔者依据目标、准则以及指标层三者构成水生态可持续发展完整的评价指标体系<sup>[19-20]</sup>,准则层主要由社会、经济、水生态、水资源、水管理5个系统和谐性构成。社会、经济系统和谐性主要为人类生活和经济发展对各类资源环境所带来的压力影响,如人口密度、人均GDP等;水生态、水资源系统和谐性主要表示与水资源相关的环境以及资源要素当前所处的状态,同时也包括水资源自身的恢复能力以及自净性,这些都是动态变化的,如工业废水

达标排放率、生态环境用水比例、工业用水重复利用率、水资源总量、水资源开发利用率等;水管理系统和谐性则是指人类在自身社会经济活动以及政策上对于水生态可持续发展的能动反映,如水法律法规建设程度、公众对河流保护的自觉度等。其中系统中的水生态、水资源系统和谐性的部分指标,例如河

流开发利用率、年径流量、年平均含沙量等均为流域尺度,其余为兰州行政区资料。最终,进行数据处理各组指标体系,去除研究阶段内变化剧烈的指标,按照客观性、科学性、全面性以及实用性的原则,确定最终完善的指标体系<sup>[21-22]</sup>,水生态可持续发展评价指标体系见表 1。

表 1 水生态可持续发展评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标类型	指标解释	
生态可持续发展评价指标体系	社会系统和谐性 A	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	A <sub>1</sub>	-	总人口/城市总面积
		人均综合用水量/m <sup>3</sup>	A <sub>2</sub>	-	水资源量/总人口
		人口增长率/%	A <sub>3</sub>	-	人口自然增长率=(本年出生人数-本年死亡人数)/年平均人数×100%
	经济系统和谐性 B	人均 GDP/10 <sup>4</sup> 元	B <sub>1</sub>	+	GDP 的绝对值/当年平均人口的比值
		万元 GDP 用水量/m <sup>3</sup>	B <sub>2</sub>	+	单位用水量/GDP 的绝对值
		经济增长率/%	B <sub>3</sub>	+	表示经济增长程度
		单位工业产值用水量/(m <sup>3</sup> ·元 <sup>-1</sup> )	B <sub>4</sub>	-	工业总用水量/工业总产值
	水生态系统和谐性 C	工业废水达标排放率/%	C <sub>1</sub>	+	工业废水排放达标量/工业废水排放总量
		生态环境用水比例/%	C <sub>2</sub>	+	生态环境用水量/用水总量
		水文化建设情况	C <sub>3</sub>	+	定性指标/专家问卷调查
		水系统干扰能力	C <sub>4</sub>	+	定性指标/专家问卷调查
		河流开发利用率/%	C <sub>5</sub>	-	地表水供水量/地表水可利用量
		工业用水重复利用率/%	C <sub>6</sub>	+	工业重复用水量/工业用水总量
		城市生活污水处理率/%	C <sub>7</sub>	+	污水处理量/污水排放总量
	水资源系统和谐性 D	水资源开发利用率/%	D <sub>1</sub>	-	水资源开发利用量/水资源量
		年径流量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	D <sub>2</sub>	+	定量数值
		年平均含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	D <sub>3</sub>	-	年含沙量/年径流量
		工业用水比例/%	D <sub>4</sub>	-	工业用水量/用水总量
	水管理系统和谐性 E	水法律法规建设程度	E <sub>1</sub>	+	定性指标(专家问卷调查)
		公众对河流保护自觉度	E <sub>2</sub>	+	定性指标(专家问卷调查)
公众参与水管理程度		E <sub>3</sub>	+	定性指标(专家问卷调查)	
公众对水生态可持续发展关注程度		E <sub>4</sub>	+	定性指标(专家问卷调查)	

2.4 和谐理论安全评价模型

2.4.1 和谐理论 左其亭于 2009 年在《和谐论的数学描述方法及应用》首次提出和谐、和谐理论的量化问题<sup>[23]</sup>,和谐相处这一观点在人与人、人与自然中存在已久,我国一向存在“天人合一”<sup>[24]</sup>的哲学思想,和谐(harmony)是为了能够达到“协调、一致、平衡、完整、适应”关系而采取的行动,因此,和谐理论的提出,对于运用和谐思想解决诸如人与自然、水文和谐、生态可持续发展等具有重要意义。

2.4.2 和谐度方程简介 和谐度方程 HDE(har-

mony degree equation)<sup>[25]</sup>是为了使和谐程度能够定量表达而提出的一种评价方法,左其亭<sup>[25]</sup>对和谐度方程进行了一系列详细全面的介绍,构建了以和谐论量化为重点的理论体系,随着对于和谐理论的深入研究,和谐方程已经应用于诸如水资源优化配置、人水关系<sup>[26-28]</sup>的和谐辨识方法、跨流域调水、污染物排放量分配等多个领域<sup>[29]</sup>。评价计算过程叙述如下(和谐度方程评价流程详见图 1):

- (1) 确定评价目的,选取合适评价体系。
- (2) 确定评价标准  $Z = (X, \mu)$ 。

(3) 权重计算。

(4) 利用和谐度方程  $HD = ai - bj$  确定参数  $a, b, i, j$  的值, 计算各指标  $HD(x_k)$ 。

(5) 计算综合程度评价价值  $HD$ , 评价分析, 得出结论。

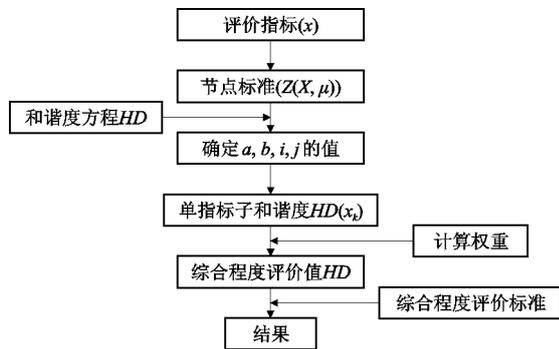


图1 和谐度方程评价流程

2.4.3 混合交叉赋权确定指标权重 本文权重采用混合交叉赋权(Mixed cross-weighting, MCW), 主要利用客观变异系数法影响主观赋权G1法<sup>[30-33]</sup>, 减少其主观性。具体步骤如下:

(1) 专家完成各个评价指标的打分与排序。

(2) 计算指标变异系数。

$$\sigma_k = \sqrt{\left[ \sum_{j=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_k)^2 / n \right]} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$C_k = \frac{\sigma_k}{x_k} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_k$  为第  $k$  个评价指标的标准差;  $C_k$  为第  $k$  个评价指标的变异系数值。

(3) 计算相邻两指标重要性程度比值  $r_k$ 。

$$r_k = \begin{cases} \frac{C_{k-1}}{C_k} & (C_{k-1} \geq C_k) \\ 1 & (C_{k-1} < C_k) \end{cases} \quad (3)$$

(4) 根据上述确定的重要性程度比值, 计算第  $m$  个评价指标的权重  $w_m$ 。

$$w_m = \left[ 1 + \sum_{k=2}^m \left( \prod_{i=k}^m r_i \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

(5) 依次计算第  $m-1, m-2, \dots, 3, 2$  个指标的权重。

$$w_{k-1} = r_k w_k \quad (k = m-1, m-2, \dots, 3, 2) \quad (5)$$

(6) 重复以上权重计算步骤, 确定准则层权重, 最终计算指标对目标层的权重。

$$w_{kj}^* = w_{kj} \times \varphi_j \quad (6)$$

式中:  $w_{kj}^*$  和  $\varphi_j$  分别为指标层、准则层对总目标的权重;  $w_{kj}$  为指标层对准则层的权重; 其中,  $j$  和  $k$  分别代表准则层和指标。

2.4.4 综合评价步骤 对水生态可持续发展评价是一个复杂定性的多属性指标评价, 结合对于水生态可持续发展评价的各项指标以及实际情况, 将目标层进行逐层细化用来构建指标体系。结合和谐理论, 笔者将评价过程大致分为以下4个步骤: (1) 构建指标体系; (2) 利用 MCW 计算指标权重; (3) 利用和谐度方程确定评价指标和谐度值; (4) 加权平均确定出黄河兰州段水生态可持续发展和谐度值, 以表2中水生态可持续发展和谐度值划分标准为依据, 确定最终可持续发展程度。

根据上述评价步骤, 具体评价流程如图2所示。

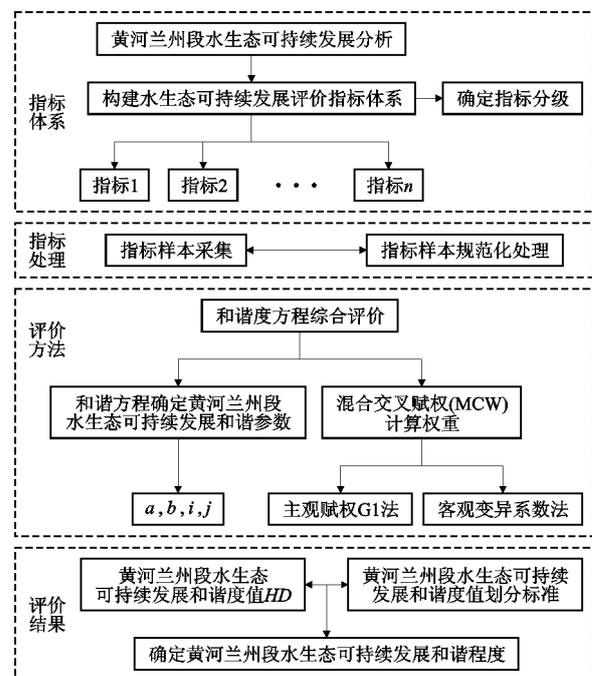


图2 黄河兰州段水生态可持续发展评价流程

## 3 结果分析

### 3.1 指标权重计算

利用公式(1)~(6)对原始数据进行归一化处理及权重计算, 计算结果见表3。

利用上述 MCW 权重计算方法, 经计算, 求得黄河兰州段水生态可持续发展各指标权重, 即  $W = [0.0817, 0.0817, 0.0667, 0.0803, 0.0562, 0.0468, 0.0468, 0.0327, 0.0274, 0.0274, 0.0260, 0.0228, 0.0219, 0.0219, 0.0547, 0.0475, 0.0390, 0.0390, 0.0468, 0.0468, 0.0438, 0.0419]^T$ 。

### 3.2 黄河兰州段水生态可持续发展评价指标和谐度计算

首先依据模糊思想理论计算各指标的和谐参数,将和谐参数按照 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1 划分为 5 个等级,与指标等级 V~I 相对应。

鉴于篇幅,仅给出 2014-2017 年的各评价指标

和谐参数值的计算结果,见表 4。再采用和谐度方程,计算黄河兰州段可持续发展 2010-2017 年各评价指标和谐度值,结果见表 5。

### 3.3 确定黄河兰州段可持续发展和谐程度

根据多因素和谐度方程确定黄河兰州段可持续发展和谐度值,并对照表 2 确定出黄河兰州段水生态可持续发展和谐程度,具体结果见表 6。

表 2 黄河兰州段水生态可持续发展和谐度值划分标准

和谐度值	(-1,0)	(0,0.3)	(0.3,0.5)	(0.5,0.8)	(0.8,1)
可持续发展程度	V 极其不可持续	IV 不可持续	III 较不可持续	II 一般可持续	I 显著可持续

表 3 指标归一化及权重计算结果

指标	年 份								W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017			
A <sub>1</sub>	1.0000	0.5847	0.3107	0.2825	0.2542	0.2260	0.0000	0.0847	0.3552		0.0817
A <sub>2</sub>	0.2980	0.0000	0.3117	0.1249	0.1102	0.2973	0.6954	1.0000	0.3552	0.2301	0.0817
A <sub>3</sub>	1.0000	0.4311	0.7598	0.2264	0.0000	0.4862	0.0768	0.5453	0.2897		0.0667
B <sub>1</sub>	0.0000	0.0167	0.0667	0.1375	0.2833	0.3250	0.9125	1.0000	0.3491		0.0803
B <sub>2</sub>	0.0000	0.1227	0.1840	0.2607	0.6006	0.7469	0.9555	1.0000	0.2443	0.2300	0.0562
B <sub>3</sub>	0.0000	0.1196	0.4186	0.4733	0.4987	0.6997	0.8715	1.0000	0.2033		0.0468
B <sub>4</sub>	1.0000	0.9212	0.2645	0.4454	0.7484	0.2150	0.0369	0.0000	0.2033		0.0468
C <sub>1</sub>	0.0000	0.1443	0.2179	0.6211	0.6628	0.8165	0.9853	1.0000	0.1815		0.0327
C <sub>2</sub>	0.0000	0.3316	0.4218	0.4615	0.4934	0.7374	0.8117	1.0000	0.1522		0.0274
C <sub>3</sub>	0.0000	0.0521	0.2747	0.4225	0.5638	0.8082	0.9158	1.0000	0.1522		0.0274
C <sub>4</sub>	0.0000	0.1552	0.2817	0.4118	0.5843	0.8739	0.9900	1.0000	0.1445	0.1802	0.0260
C <sub>5</sub>	0.0000	0.2330	0.6767	0.5339	0.3067	0.7766	0.8905	1.0000	0.1263		0.0228
C <sub>6</sub>	0.0000	0.1928	0.4341	0.5778	0.7246	0.7964	0.9311	1.0000	0.1217		0.0219
C <sub>7</sub>	0.0000	0.3117	0.0150	0.3835	0.4629	0.6527	1.0000	0.9572	0.1217		0.0219
D <sub>1</sub>	1.0000	0.9648	0.0706	0.3099	0.4701	0.3948	0.2275	0.0000	0.3034		0.0547
D <sub>2</sub>	0.5083	0.3349	1.0000	0.6436	0.5090	0.2182	0.0000	0.1374	0.2638	0.1802	0.0475
D <sub>3</sub>	0.9105	0.6502	1.0000	0.0203	0.0185	0.9853	0.9540	1.0000	0.2164		0.0390
D <sub>4</sub>	0.0676	0.0000	0.7730	0.6383	0.5685	0.6166	0.9526	1.0000	0.2164		0.0390
E <sub>1</sub>	0.0000	0.0931	0.2770	0.4438	0.5582	0.7469	0.8496	1.0000	0.2610		0.0468
E <sub>2</sub>	0.0126	0.0000	0.2988	0.4194	0.6025	0.7624	0.8541	1.0000	0.2610	0.1794	0.0468
E <sub>3</sub>	0.0000	0.1020	0.2953	0.4639	0.6060	0.7968	0.9154	1.0000	0.2443		0.0438
E <sub>4</sub>	0.0000	0.0614	0.3953	0.5148	0.6497	0.7897	0.8391	1.0000	0.2336		0.0419

注:部分指标采用专家打分法确定权重。

### 3.4 讨论

(1)根据表 3 指标权重计算结果可知,社会系统、经济系统对于水生态可持续发展影响较大,表明人类活动对于水生态可持续影响重大,因此应着重把控人类的生产活动,加大对于生态系统的保护程度,促进生态和谐可持续发展。

(2)黄河兰州段在 2010-2017 年间,可持续发展各评价指标和谐度值逐渐呈上升趋势,和谐度为负的指标逐渐减少(表 6)。其中部分指标变化程度略微缓慢,还处于负值状态,应分析其具体原因,重点观察;在社会、经济系统范围下的评价指标,人口密度、人口增长率变化不是很明显,人均 GDP 以及

表4 2014-2017年黄河兰州段可持续发展各评价指标和谐参数值

年份	和谐参数	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>
2014	a	0.92	0.63	0.00	0.30	0.55	0.19	0.42	0.79	0.52	0.69	0.65	0.81	0.80	0.67	0.51	0.84	1.00	0.27	0.64	0.74	0.77	0.73
	b	0.08	0.37	1.00	0.70	0.45	0.81	0.58	0.21	0.49	0.31	0.35	0.19	0.20	0.33	0.49	0.16	0.00	0.73	0.36	0.26	0.23	0.27
	i	0.75	0.41	0.19	0.47	0.52	0.32	0.51	0.65	0.61	0.61	0.62	0.56	0.71	0.57	0.41	0.72	0.84	0.41	0.58	0.64	0.66	0.64
	j	0.08	0.37	1.00	0.70	0.45	0.81	0.58	0.21	0.49	0.31	0.35	0.19	0.20	0.33	0.49	0.16	0.00	0.73	0.36	0.26	0.23	0.27
2015	a	0.92	0.66	0.39	0.35	0.72	0.46	0.40	0.89	0.75	1.00	0.97	0.89	0.87	0.83	0.39	0.67	1.00	0.40	0.87	0.94	1.00	0.91
	b	0.08	0.34	0.61	0.65	0.28	0.54	0.60	0.11	0.26	0.00	0.03	0.11	0.13	0.17	0.61	0.33	0.00	0.60	0.13	0.06	0.00	0.09
	i	0.75	0.46	0.47	0.50	0.60	0.47	0.50	0.72	0.70	0.80	0.78	0.64	0.74	0.68	0.35	0.63	0.86	0.48	0.72	0.76	0.80	0.74
2016	j	0.08	0.34	0.61	0.65	0.28	0.54	0.60	0.11	0.26	0.00	0.03	0.11	0.13	0.17	0.61	0.33	0.00	0.60	0.13	0.06	0.00	0.09
	a	0.91	0.72	0.04	0.99	0.97	0.68	0.25	1.00	0.82	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.23	0.54	0.97	0.62	1.00	1.00	1.00	0.97
	b	0.09	0.28	0.96	0.01	0.03	0.32	0.75	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.77	0.46	0.03	0.38	0.00	0.00	0.00	0.03
	i	0.75	0.56	0.23	0.80	0.78	0.61	0.43	0.80	0.73	0.88	0.88	0.80	0.80	0.96	0.29	0.54	0.77	0.60	0.80	0.83	0.89	0.78
2017	j	0.09	0.28	0.96	0.01	0.03	0.32	0.75	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.77	0.46	0.03	0.38	0.00	0.00	0.00	0.03
	a	0.91	0.77	0.44	1.00	1.00	0.85	0.23	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.03	0.62	1.00	0.66	1.00	1.00	1.00	1.00
	b	0.09	0.23	0.56	0.00	0.00	0.15	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.38	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00
2017	i	0.75	0.62	0.53	0.88	0.81	0.71	0.41	0.82	0.80	0.95	0.89	0.83	0.82	0.91	0.21	0.61	0.91	0.62	0.91	0.94	0.95	0.90
	j	0.09	0.23	0.56	0.00	0.00	0.15	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.38	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00

表5 2010-2017年黄河兰州段可持续发展各评价指标和谐度值

指标	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
A <sub>1</sub>	0.74	0.71	0.73	0.69	0.69	0.69	0.67	0.68
A <sub>2</sub>	0.38	0.10	0.19	0.13	0.13	0.19	0.33	0.42
A <sub>3</sub>	0.57	-0.29	0.26	-0.64	-1.00	-0.19	-0.91	-0.08
B <sub>1</sub>	-1.00	-0.97	-0.85	-0.68	-0.34	-0.25	0.79	0.88
B <sub>2</sub>	-1.00	-1.00	-0.88	-0.69	0.08	0.35	0.75	0.81
B <sub>3</sub>	-0.63	-0.47	-0.29	0.16	0.20	0.33	0.57	0.87
B <sub>4</sub>	0.80	0.74	0.66	0.63	0.58	0.42	0.22	0.21
C <sub>1</sub>	-0.24	-0.07	0.02	0.42	0.47	0.63	0.80	0.82
C <sub>2</sub>	-0.89	-0.23	0.34	0.02	0.08	0.45	0.56	0.79
C <sub>3</sub>	-1.00	-0.62	-0.34	0.01	0.32	0.80	0.88	0.95
C <sub>4</sub>	-1.00	-0.63	-0.34	-0.07	0.28	0.76	0.88	0.89
C <sub>5</sub>	-0.73	-0.30	-0.15	0.06	0.42	0.56	0.80	0.83
C <sub>6</sub>	-0.77	-0.39	0.03	0.26	0.52	0.62	0.79	0.82
C <sub>7</sub>	-0.40	0.06	-0.38	0.16	0.28	0.53	0.96	0.91
D <sub>1</sub>	0.70	0.64	0.59	0.22	-0.04	0.24	0.52	0.64
D <sub>2</sub>	0.57	0.47	0.92	0.69	0.58	0.31	0.08	0.24
D <sub>3</sub>	0.58	-0.35	-0.67	0.84	0.84	0.86	0.74	0.91
D <sub>4</sub>	-0.80	-1.00	-0.35	0.14	0.17	0.22	0.44	0.53
E <sub>1</sub>	-1.00	-0.87	-0.40	0.34	0.54	0.61	0.80	0.91
E <sub>2</sub>	-1.00	-0.41	-0.28	0.01	0.40	0.71	0.83	0.94
E <sub>3</sub>	-0.96	-0.69	-0.22	0.16	0.45	0.80	0.89	0.95
E <sub>4</sub>	-1.00	-0.24	0.35	0.12	0.40	0.67	0.76	0.90

表6 2010-2017年黄河兰州段水生态可持续发展准则层各系统和谐度值及和谐程度评价

评价系统	年 份							
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
社会系统和谐性	0.13	0.05	0.09	0.02	0.00	0.06	0.02	0.08
经济系统和谐性	-0.15	-0.15	-0.13	-0.11	-0.06	-0.01	0.10	0.12
水生态系统和谐性	-0.13	-0.06	-0.03	0.02	0.06	0.11	0.15	0.15
水资源系统和谐性	0.05	0.00	0.01	0.06	0.04	0.03	0.01	0.01
水管理系统和谐性	-0.18	-0.16	-0.05	0.01	0.07	0.13	0.15	0.17
总体和谐性	-0.27	-0.32	-0.11	0.01	0.11	0.31	0.43	0.53
可持续发展程度	极其不可持续	极其不可持续	极其不可持续	不可持续	不可持续	较不可持续	较不可持续	一般可持续

经济增长率呈较为明显上升趋势,其余指标随时间变化稳步上升;在水生态系统的评价指标中,工业废水排放达标率、生态环境用水比例以及工业用水重复利用率呈明显上升趋势,其余指标随时间变化整体也呈现上升趋势;在水资源、水管理系统中,各指标上升趋势明显。

综合来看,社会、经济系统对于促进水生态可持续发展贡献不大,水资源、水管理系统次之。2010-2017年,由于黄河兰州段经济水平的快速发展,民生水平的逐渐提升以及环境保护治理措施日渐完善,水生态系统指标对于促进水生态可持续发展尤为重要,需进一步加大工业、农业节水力度,完善应急措施,加大惩戒力度,从根源解决问题,共同促进黄河流域生态可持续发展。

(3)由表6中和谐度值可知,经济系统、水生态系统和水管理系统和谐度值从极其不可持续到一般可持续上升趋势显著,得到基本改善,变化较为明显;社会系统以及水资源系统和谐性变化程度较小,处于稳定状态。利用和谐理论对于黄河兰州段可持续发展情况进行最终评价分析可得:2010-2012年水生态可持续发展等级为V级,即极其不可持续状态;2013-2014年水生态可持续发展等级为IV级,即不可持续发展状态;2015-2016年水生态可持续发展等级为III级,即较不可持续发展状态;2017年水生态可持续发展等级为II级,即一般可可持续发展状态。由此可见,黄河兰州段水生态可持续发展能力随时间逐步提升。

## 4 结 论

(1)本文通过生态可持续发展的意义以及影响因素,构建了黄河兰州段水生态可持续发展分析指标

体系及标准,将和谐理论运用于评价体系中,建立了完整、可行的评价模型。通过混合交叉赋权计算权重,利用和谐方程确定最终水生态可持续发展程度,该模型理论用于水生态可持续发展评价是合理、可行的,同时也适用于其他不同类型系统的综合评价。

(2)权重计算采取G1法与变异系数法组合的形式计算,使主观G1法客观化,减少了评价结果的主观性,使得评价结果更为准确,突显了当前黄河兰州段水生态可持续发展中各评价指标的相对性,评价结果符合实际。

(3)基于和谐理论对于黄河兰州段2010-2017年水生态可持续发展进行分析评价,2010-2012年水生态可持续发展等级为V级极其不可持续状态;2013-2014年为IV级不可持续发展状态;2015-2016年为III级较不可持续发展状态;2017年为II级一般可可持续发展状态。表明黄河兰州段水生态可持续发展水平正在稳步提升,但还未达到完全可可持续发展状态,应继续加大改革措施,提高生态保护能力,促进可持续发展。

## 参考文献:

- [1] 张琨,林乃峰,徐德琳,等. 中国生态安全研究进展:评估模型与管理措施[J]. 生态与农村环境学报,2018,34(12):1057-1063.
- [2] 王丽霞,邹长新,王燕,等. 现代生态保护理念在生态保护中的应用[J]. 生态与农村环境学报,2017,33(10):865-871.
- [3] 李光明,邓杰. 产业支撑、生态保护与城市可持续发展研究——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区地理,2016,39(4):868-876.
- [4] HAI Reti, SHI Hong, ZHANG Bo, et al. An ecological information analysis-based approach for assessing the sustain-

- ability of water use systems: A case study of the Huaihe River Basin, China [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015, 17(8): 2197 - 2211.
- [5] LU Zhixiang, WEI Yongping, XIAO Honglang, et al. Trade-offs between midstream agricultural production and downstream ecological sustainability in the Heihe River Basin in the past half century [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 152: 233 - 242.
- [6] 章光新,陈月庆,吴燕锋. 基于生态水文调控的流域综合管理研究综述[J]. *地理科学*, 2019, 39(7): 1191 - 1198.
- [7] 樊新刚,仲俊涛,杨美玲,等. 区域可持续发展能力的能值与耦合分析模型构建[J]. *地理学报*, 2019, 74(10): 2062 - 2077.
- [8] 贾小乐,周源,延建林,等. 基于能值分析的环太湖城市群生态经济系统可持续发展研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6487 - 6499.
- [9] 粟一帆,李卫明,艾志强,等. 汉江中下游生态系统健康评价指标体系构建及其应用[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 3895 - 3907.
- [10] 韩艳利,娄广艳,葛雷,等. 黄河流域与水有关生态补偿框架的探讨[J]. *水资源保护*, 2016, 32(6): 142 - 150.
- [11] 李冰瑶,陈星,周志才,等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(6): 104 - 108.
- [12] 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.
- [13] 程钰,尹建中,王建事. 黄河三角洲地区自然资本动态演变与影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(4): 127 - 136.
- [14] 金钊. 走进新时代的黄土高原生态恢复与生态治理[J]. *地球环境学报*, 2019, 10(3): 316 - 322.
- [15] 靳春玲,王运鑫,贡力. 基于模糊层次评价法的黄河兰州段突发水污染风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(1): 363 - 368.
- [16] 戴铁军,王婉君,刘瑞. 中国社会经济系统资源环境压力的时空差异[J]. *资源科学*, 2017, 39(10): 1942 - 1955.
- [17] 赵萌萌,范桃桃,EMANEGHEMI B,等. 黄河流域夏季水质评价及管理对策[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(4): 305 - 315.
- [18] 孟令爽,唐德善,史毅超. 基于主成分分析法的城市人水和谐度评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 93 - 98.
- [19] 李军龙,滕剑仑,李应春,等. 基于SE - DEA模型的生态环境可持续发展评价——以闽江源流域为例[J]. *草业科学*, 2014, 31(11): 2174 - 2182.
- [20] 刘红玉,李兆富,李玉凤,等. 基于生态约束与支撑作用的国家湿地公园生态可持续评估指标研究[J]. *资源科学*, 2015, 37(4): 805 - 814.
- [21] 臧鑫宇,王嶠,陈天. 生态城绿色街区可持续发展指标系统构建[J]. *城市规划*, 2017, 41(10): 68 - 75.
- [22] 于冰,徐琳瑜. 城市水生态系统可持续发展评价——以大连市为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(12): 2578 - 2583.
- [23] 张成凤,粟晓玲,蔡焕杰. 基于区间层次分析法的榆阳区水资源配置系统和谐性评价研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 1053 - 1063.
- [24] 左其亭,刘欢,马军霞. 人水关系的和谐辨识方法及应用研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(11): 1363 - 1370 + 1379.
- [25] 左其亭. 人水和谐论——从理念到理论体系[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(8): 25 - 30.
- [26] 王春红,王治国,樊华. 水土保持与水生态文明的关系及其规划问题[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(6): 134 - 139.
- [27] 王徐洋,李阿龙,张浩然. 基于HDE的流域生态系统健康评价方法及应用[J]. *水利科技与经济*, 2019, 25(9): 6 - 13.
- [28] 李长安. 基于“人-水-地和谐”的长江堤防功能[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2015, 40(2): 261 - 267.
- [29] 左其亭,胡德胜,窦明,等. 基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系[J]. *资源科学*, 2014, 36(5): 906 - 912.
- [30] 庄平,李延喜. 基于G1 - 变异系数法的企业投资风险评价模型与实证研究[J]. *软科学*, 2011, 25(10): 107 - 112 + 120.
- [31] 周智勇, KIZIL M, 陈中伟,等. 一种基于G1 - 变异系数法的井下掘进工作面通风方式优选方法[J]. *中南大学学报(英文版)*, 2018, 25(10): 2462 - 2471.
- [33] 鲍学英,柴乃杰,王起才. 基于G1法和改进DEA的铁路绿色施工节能措施综合效果研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(10): 15 - 22.