

DOI: 10.5846/stxb201909041843

戴文渊,陈年来,李金霞,张芮. 基于 SENCE 概念框架的区域水生态安全评价研究——以甘肃地区 17 流段为例. 生态学报, 2021, 41(4): 1332-1340.

Dai W Y, Chen N L, Li J X, Zhang R. Regional water ecological security evaluation based on SENCE conceptual framework-taking 17 flow sections in Gansu province as an example. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1332-1340.

## 基于 SENCE 概念框架的区域水生态安全评价研究 ——以甘肃地区 17 流段为例

戴文渊<sup>1</sup>, 陈年来<sup>1,\*</sup>, 李金霞<sup>1</sup>, 张 芮<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070

<sup>2</sup> 甘肃农业大学水利水电工程学院, 兰州 730070

**摘要:** 作为生态环境至关重要的因素, 水生态安全格局是生态安全格局的关键组成部分, 科学评估水生态安全状况, 进行生态系统管理及保护, 对促进经济社会发展具有重要意义。选取甘肃地区 17 个流段为研究对象, 基于 SENCE(社会-经济-自然复合生态系统)概念构建涵盖经济发展、社会进步、自然资源、生态环境 4 方面 33 指标的初步水生态安全评价指标体系, 基于改进生态位理论结合模糊系统分析对初步水生态安全评价指标体系进行优化, 最终得到 28 指标构成的水生态安全评价优化指标体系, 运用优化后指标体系对 17 流段 2016—2018 年间水生态安全状况模糊综合评价。结果表明: 水生态安全状况良好(一级、二级)以上占比分别为 35.3%、41.2%、35.3%, 一般(三级)占比分别为 57.8%、52.0%、46.1%, 较差(四级)占比分别为 23.5%、11.8%、11.8%, 大致呈正态分布, 且年际变化小, 基本保持稳定。年平均降水量、河川基流量、地表水源供应量、生态环境用水量、节水灌溉面积等指标累计指标权重达 47.75%, 是影响水生态安全状况的主要影响因子。

**关键词:** 改进生态位; 模糊综合评价; 水生态安全; 流段

## Regional water ecological security evaluation based on SENCE conceptual framework-taking 17 flow sections in Gansu province as an example

DAI Wenyuan<sup>1</sup>, CHEN Nianlai<sup>1,\*</sup>, LI Jinxia<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

<sup>2</sup> College of Water Conservancy And Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** As a crucial factor of ecological environment, water ecological security pattern is a key component of ecological security pattern. Scientifically evaluating water ecological security situation, carrying out ecosystem management and protection have great significance to promote economic and social development. Taking 17 flow sections of Gansu province as the research object, the initial water ecological security evaluation index system was constructed based on the social-economic-compound ecological system (SENCE) concept, The system contains 33 indicators and is divided into four parts of economic development, social progress, natural resources, ecological environment. Combining fuzzy system analysis and improved niche theory, the initial water ecological security evaluation index system was optimized and the final optimized water ecological security evaluation index system consisted of 28 indicators. By the optimized index system to fuzzy comprehensive evaluation the water ecological security situation of the 17 flow sections in Gansu province from 2016 to 2018. The results showed that the proportion of water ecological security in the 17 flow sections with good condition was 35.3%, 41.2%, 35.3% from 2016 to 2018, respectively, the ratio of general condition was 57.8%, 52.0% and 46.1%,

基金项目: 甘肃省重点研发计划(18YF1FA081)

收稿日期: 2019-09-04; 修订日期: 2020-07-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chennl@gsau.edu.cn

respectively, the proportion of the poor was 23.5%, 11.8% and 11.8%, respectively. The evaluation results were normally distributed, the inter-annual variation was small and the proportion was basically stable. The cumulative weight of such indicators as annual average precipitation, river-based flow, surface water supply, ecological environment water consumption, and water-saving irrigation area has reached 47.75%, These were the main factors affecting the water ecological security.

**Key Words:** improving ecological niche; fuzzy comprehensive evaluation; water ecological security; Gansu basin

作为生态环境至关重要的因素,水生态安全格局是生态安全格局的关键组成部分,对社会经济发展具有重要意义。近年来,随着水生态文明理念深入发展,开展水生态保护,构建水生态安全保障体系是一项迫切的工作任务,水生态安全评价相关研究引起人们的广泛关注。甘肃深居内陆腹地,水资源相对匮乏,水旱灾害频繁,生态系统功能“局部改善、整体退化”局面还在持续,生态环境恶化趋势整体上还未得到遏制。尤其近年来,水资源供需矛盾突出,水污染现象日益严重,甘肃地区各流段水生态安全整体状况如何,水生态安全的影响因子主要有哪些还不清楚,因此对甘肃地区各流段水生态安全状况进行评价显得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。

水生态安全评价是一个多指标,带有模糊性的综合评价过程,是一个多学科交叉领域。水生态安全没有公认的定义,指标体系构建比较复杂,实践中主观意识强,不同学者有不同的见解<sup>[3-10]</sup>。国内外学者关于水生态安全评价方面已经初步建立了一些基本模型和方法步骤<sup>[11-17]</sup>,但基本都是基于 PSR(压力-状态-响应)及其扩展模型,以人为选择方式分类,能够清楚地表明系统中的因果关系,但缺乏对系统结构和决策过程的有效把握,指标权重主要根据层次分析法和专家打分法获得,具有较大主观性,同时缺少对评价指标体系的分析优化方面研究。分析前人相关研究,需要完善以下 3 个方面:①水生态安全评价模型的建立要根据实际情况,考虑水生态安全的经济、社会、资源、环境方面的综合因素;②水生态安全评价是一个多学科交叉研究领域,研究复合生态系统问题需要运用生态学相关知识和理论;③前人的很多研究都很少涉及评价指标体系的优化问题,而对初步建立的评价指标体系的优化校准是一个非常重要的步骤<sup>[18-24]</sup>。因此,本文改进了构建水生态安全评价指标体系的概念框架,采用了基于 SENCE(社会-经济-自然复合生态系统)概念框架<sup>[25]</sup>,充分体现了人为因素与自然因素对水生态安全的综合影响,运用改进生态位理论及模糊系统分析优化其初步评价指标体系,最大限度降低评价指标体系的误差,使其更具科学性。本研究中,通过 2016—2018 年间 17 流段的实证研究,进一步校验评价方法和指标体系,对评价结果进行水生态安全状况分析及影响因子分析,其评价结果为研究区防灾减灾、保障生态安全、风险决策等工作提供了科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区域

甘肃省地处我国西北内陆中腹地,位于 32°31'N—42°57'N、92°13'E—108°46'E 之间,平面形态总体为“哑铃”形,呈北西—南东走向分布。甘肃省境内水资源主要分属黄河、长江、内陆河 3 个流域,9 个水系,年总地表径流量 174.5 亿 m<sup>3</sup>,流域面积 27 万 km<sup>2</sup>。本文选取典型代表的流域 III 级区—17 个流段开展水生态安全状况调查和评估,包括河西内陆河中 3 个流段,黄河流域 12 个流段,长江流域 2 个流段。由于甘肃境内流域绝大部分地区黄土覆盖,植被稀疏,水土流失严重,河流含沙量大,水功能区水质达标率 78% 左右;水资源供需矛盾突出,利用率低;对下泄生态水没有量的概念,生态保护区违法违规开发矿产资源情况突出,还存在诸多影响地区水生态安全状况的不利因素。

### 1.2 数据收集及统计分析

本研究中,流域分区按三级划分,全省共划分 17 个流域三级区,划分方式与甘肃水资源公报一致。对甘肃境内流域三级区 17 个流段进行调查和评价,水资源、水环境相关数据主要来源于 2016—2018 年甘肃省水

文局相关统计资料及《甘肃省水资源公报》(2016—2018),与水相关的社会经济数据部分来源于《甘肃省统计年鉴》(2016—2018),部分水管理类数据来源于甘肃省水利部门公开信息及年度报告。

研究中调查数据处理及统计分析采用 MATLAB R2014a 和 Microsoft Office Excel 2003 软件完成,采用 Auto CAD 2007 及 Microsoft Office Excel 2003 制图。

## 2 研究方法

基于 SENCE 概念框架从与水有关的经济、社会、资源、环境方面构建水生态安全评价指标体系,在满足科学性和系统性的同时,能客观反映区域水生态安全状况和问题,但不能全面展现系统间相互作用过程,因而利用生态学中生态位理论在评价指标优先调控方面优势<sup>[26]</sup>,结合模糊系统分析,对评价指标体系进行优化,运用优化后的评价指标体系对各流段水生态安全状况进行模糊综合评价。

### 2.1 SENCE 概念框架

SENCE 概念框架<sup>[25]</sup>是由人类社会、经济活动和自然条件共同组合而成的生态功能统一体,即 SENCE 复合生态系统(经济-社会-自然复合生态系统),该复合生态系统是由水生态环境、与水相关的经济和社会各系统相互作用耦合形成的统一体,是环境和人类活动及历史发展过程相互作用的产物,其在满足科学性和系统性的同时,能客观反映区域水生态安全的状态和问题,是一种新的水生态安全研究方式,具有积极的现实指导意义。水生态安全的概念偏宏观,基于 SENCE(社会-经济-生态复合系统)概念框架将局限在农产品交易商品中的虚拟水扩展至整个区域的一、二、三产的研究中去,使得通过个人、部门、行业、城市甚至整个国家的角度去评价其水资源利用效果成为可能,结合理论基础、实践经验、以往相关研究进行评价指标频次分析,从自然资源、水环境、社会发展、经济发展 4 个方面构建甘肃地区 17 流段的水生态安全初步评价指标体系(表 1)。

表 1 基于 SENCE 概念框架的水生态安全评价指标体系

Table 1 Water ecological security evaluation index system based on SENCE conceptual framework

优化前 指标编号 Pre- optimization index number	优化后编号 Index number after optimization	评价指标 Evaluation index	优化前 指标编号 Pre- optimization index number	优化后编号 Index number after optimization	评价指标 Evaluation index	优化前 指标编号 Pre- optimization index number	优化后编号 Index number after optimization	评价指标 Evaluation index
B1	C1	人口	B12	C11	年平均降水量	B23	C18	农田灌溉水量
B2	C2	GDP	B13	C12	河川基流量	B24	C19	林木渔畜用水量
B3	C3	工业增加值	B14	C13	地表水资源量	B25	C20	工业用水量
B4	C4	耕地面积	B15	C14	地下水水资源量	B26	C21	建筑业用水量
B5	C5	农田有效灌溉面积	B16	C15	水资源总量	B27	C22	居民生活用水量
B6	C6	农田实灌面积	B17		产水系数	B28	C23	生态环境用水量
B7	C7	粮食产量	B18		产水模数	B29	C24	经济社会用水量
B8	C8	牲畜	B19		蓄水量	B30	C25	城镇居民生活生活污水量
B9	C9	年平均水量	B20		引水量	B31	C26	废污水排放量
B10	C10	流域计算面积	B21	C16	地表水源供应量	B32	C27	达标排放量
B11		径流深	B22	C17	地下水水源供应量	B33	C28	节水灌溉面积

### 2.2 生态位理论

Hutchinson 认为,生态位是一个  $n$  维超体积变量,它的  $n$  个坐标轴包括决定某一物种生存状态的关键物理环境因子<sup>[27-28]</sup>。对于水生态安全评价中一个流段或指标的生态位宽度越大,说明该指标对当前水生态安全评价指标体系的适应性强,对水生态安全状况影响不大,不是控制性指标;反之,则适应性差,需要考虑优先调控。生态位计算简单、可操作性强,生态位理论能够较全面展现系统间相互作用过程,在分析优先调控指标上有优势,提供了一种新的思路<sup>[26]</sup>,已成为众多理论与野外研究基础。本文应用 Levins 生态位宽度模型,将

模糊数学中的隶属度概念引入生态位的计算中<sup>[29]</sup>,计算各流段属于各资源轴不同梯度的概率,将 Levins 生态位宽度模型改进为:

$$B_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^R (P_{ij}\gamma_{ij})^2} \quad (1)$$

式中,  $B_i$  为流段  $i$  的生态位宽度;  $P_{ij}$  为流段  $i$  在梯度  $j$  上的数量占所属梯度总数量的比例, % ;  $R$  为梯度的等级总数;  $\gamma_{ij}$  为流段  $i$  在梯度  $j$  上的隶属度, 取值范围为  $[0, 1]$ 。

### 2.3 模糊系统分析

数据标准化:在水生态安全初步评价指标体系建立后,需要对指标数据标准化处理,按统一的“标准”进行调整,消除由于单位不同造成的影响,指标数据标准化处理按公式(2)、(3)进行。

对于越大越安全的指标:

$$y_{ij} = \frac{(x_{ij} - \min x_i)}{(\max x_i - \min x_i)} \quad (2)$$

对于越小越安全的指标:

$$y_{ij} = \frac{(\max x_i - x_{ij})}{(\max x_i - \min x_i)} \quad (3)$$

式中,  $y_{ij}$  为第  $i$  行  $j$  列标准化数据;  $\max x_i$  为第  $i$  行最大值;  $\min x_i$  为第  $i$  行最小值。

建立模糊矩阵  $R$ :将标准化的数据  $x_{ik}$  和  $x_{jk}$  代入式(5)。

$$\gamma_{ij} = \sum_{k=1}^m x_{ik} \cdot x_{jk}, (i \neq j) \quad (4)$$

$$\gamma_{ij} = 1, (i = j) \quad (5)$$

式中,  $x_{ik}$  为第  $i$  样本(流段)第  $k$  项指标(水生态安全评价指标)的无量纲参数;  $x_{jk}$  为第  $j$  样本第  $k$  项指标的无量纲参数;  $m$  为样本总数;由此构造的矩阵  $(\gamma_{ij})_{n \times n}$  称为模糊矩阵。

建立模糊相关矩阵  $U$ :

$$U = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad a_{ij} \in [0, 1] \quad (6)$$

$a_{ij}$  为矩阵元,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

模糊相关程度分析:根据所建立的模糊相关矩阵,以最大矩阵元作为置信水平  $\lambda$ ,求得各指标的置信水平;根据模糊矩阵最大矩阵元定理,由(7)式得到指标的权重:

$$W_i = \frac{1 - \lambda_i}{\sum_{i=1}^n (1 - \lambda_i)} \quad (7)$$

式中,  $W_i$  为第  $i$  指标权重;  $\lambda_i$  为第  $i$  指标置信水平;  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

### 2.4 模糊综合评价

运用已经建立优化后的水生态安全评价指标体系,进行水生态安全模糊综合评价,得到的评价向量是因素权重向量与模糊矩阵合成的结果。即:

$$Y = R \times X = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \quad (8)$$

式中,  $Y$  为评价向量(  $y_1, y_2, \dots, y_n$  为各年综合评价指数);  $R$  为标准化的评价指标矩阵(标准化数据组成的矩阵);  $X$  为评价权重向量(评价指标权重组成的向量);  $T$  为向量转置符号。

### 3 实证研究——甘肃地区 17 流段水生态安全状况评价

#### 3.1 基于改进生态位理论的水生态安全评价指标体系优化

根据 2.2 生态位理论计算甘肃境内各流域在 33 个资源轴上的生态位宽度,由式(1)得到各流段及指标的生态位宽度值,如表 2 示(以疏勒河、黑河、石羊河、黄河河源至玛曲段、玛曲至龙羊峡段、大通河享堂以上、湟水、大夏河、洮河段为例)。

表 2 流段在 33 个资源轴上的生态位宽度

Table 2 Niche widths of flow segments on 33 resource axes

项目及编号 Bullets and numbering		1 疏勒河	2 黑河	3 石羊河	4 黄河河源	5 黄河玛曲至龙羊峡段	6 大通河享堂以上	7 湟水	8 大夏河	9 洮河
资源轴	B1	1.0000	9.9397	11.1150	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	9.9482
Resource axes	B2	1.0000	14.2330	8.8119	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B3	8.6495	7.0969	18.1197	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B4	1.0000	12.5780	9.7762	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B5	8.6300	1.0000	7.0439	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B6	8.7865	1.0000	12.4947	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B7	1.0000	12.9321	8.8119	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	7.8125
	B8	8.7912	1.0000	10.4161	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	10.3084
	B9	8.2293	8.5833	11.2789	9.4386	19.8633	1.0000	1.0000	12.1976	10.1627
	B10	1.0000	9.1315	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B11	1.0000	10.6294	11.2774	1.0000	1.0000	8.4994	1.0000	2972.9012	9.6491
	B12	8.6641	8.6075	11.1105	9.3457	23.1367	1.0000	1.0000	26.1488	8.1731
	B13	16.3368	7.1427	9.3333	8.1916	16.9724	1.0000	1.0000	16.2424	8.5377
	B14	7.0540	7.0690	8.6903	8.1857	19.8633	1.0000	1.0000	16.8899	8.0528
	B15	7.9762	1.0000	8.3138	8.2080	17.0349	1.0000	1.0000	15.9125	8.4765
	B16	7.0267	7.1877	7.4282	8.1916	19.8927	1.0000	1.0000	16.7678	8.0405
	B17	11.1195	8.8654	9.2430	1.0000	1.0000	9.3845	41.1483	688.6226	8.4463
	B18	1.0000	9.8642	9.4386	1.0000	1.0000	8.5470	1.0000	2596.7463	9.6467
	B19	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B20	1.0000	1.0000	39.8644	1.0000	1.0000	1.0000	41.6336	21.4906	10.8953
	B21	9.8823	1.0000	14.2330	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	33.6372	14.0575
	B22	11.3067	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B23	10.6027	1.0000	9.6942	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B24	7.6464	1.0000	10.1973	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B25	8.8934	7.8576	8.3499	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B26	1.0000	9.6890	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B27	1.0000	11.8091	9.8838	1.0000	1.0024	1.0000	1.0000	1.0000	7.9515
	B28	8.7676	1.0000	8.2776	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B29	10.2132	1.0000	9.8823	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B30	1.0000	8.8785	7.9010	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	B31	7.6980	9.6310	8.4357	1.0000	1.0000	1.0000	1.0846	1.0000	1.0000
	B32	12.5530	7.9882	7.2322	1.0000	1.0000	25.6193	1.0000	1.0000	1.0000
	B33	9.6271	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	24.3254	8.8481
	平均值	6.3774	6.1428	9.4441	2.3806	4.3565	2.4561	3.4505	195.8449	5.0305

由式(1)计算得出各指标的生态位宽度值,指标 B11(径流深)、B17(产水系数)、B18(产水模数)、B19(蓄水量)、B20(引水量)的生态位宽度相对最大,分别为 218.334、60.8046、191.4819、11.432、11.7171。表明以

上指标在当前水生态安全评价指标体系中具有较好的适应性,对各流段的水生态安全状况影响不大,为次要影响因子,因而在优化评价指标体系中将这 5 个指标剔除,由 33 指标构成的初步评价指标体系优化后得到了 28 指标构成的优化评价指标体系(表 1)。分析发现,甘肃地区各流段调水及蓄水状况水平接近,差异不明显,不是限制性因子,整体上对水生态安全状况影响相对较小。

### 3.2 模糊系统分析确定主要影响因子

根据 2.3 模糊系统分析过程,由公式(7)计算各评价指标的权重(表 3 示),得到优化后水生态安全评价指标体系的指标权重。

表 3 优化后的 28 评价指标权重

Table 3 The weight of the optimized 28 evaluation index

指标体系编号 Index system number	权重 Weight						
C1	0.0179	C8	0.0168	C15	0.0758	C22	0.0134
C2	0.0090	C9	0.0635	C16	0.0817	C23	0.0799
C3	0.0128	C10	0.0046	C17	0.0845	C24	0.0028
C4	0.0147	C11	0.0771	C18	0.0009	C25	0.0103
C5	0.0031	C12	0.0772	C19	0.0000	C26	0.0108
C6	0.0023	C13	0.0762	C20	0.0147	C27	0.0764
C7	0.0170	C14	0.0732	C21	0.0062	C28	0.0771

模糊系统分析结果显示,指标 C11(年平均降水量)、C12(河川基流量)、C16(地表水源供应量)、C17(地下水源供应量)、C23(生态环境用水量)、C28(节水灌溉面积)的指标权重相对较大,累计指标权重占总评价指标体系的 47.75%,为影响流段水生态安全状况的主要影响因子。这是由于降水及地表水资源为生产生活提供了直接水源供应;增加生态环境用水,改善了生态环境;提高节水能力建设的同时也提高了用水效率。表明增加供水,提高用水效率对提高水生态安全状况至关重要,也验证了评价指标体系的科学性。指标 C5(农田有效灌溉面积)、C6(农田实灌面积)、C18(农田灌溉水量)、C19(林木渔畜用水量)、C24(经济社会用水量)指标权重相对较小,累计指标权重占评价指标体系的 0.91%,为影响甘肃地区流域水生态安全的次要影响因子。这表明实践中用水量的增加并不一定会降低水生态安全状况,进一步说明了增加供水,提高用水效率对改善水生态安全状况有重要作用。

### 3.3 模糊综合评价-分析水生态安全状况

根据 2.4 模糊综合评价过程,由公式(8)计算得到甘肃地区各流段 2016—2018 年间水生态安全评价指标体系优化前水生态安全评价向量  $Y_1$  及优化后评价向量  $Y_2$ :

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 0.5476, 0.5007, 0.5485, 0.6876, 0.7445, 0.8035, 0.8725, 0.7879, 0.6144, 0.7309, 0.7312, 0.8816, 0.8717, 0.8028, 0.7824, 0.4562, 0.7998; \\ 0.6049, 0.4692, 0.6301, 0.7289, 0.7708, 0.8228, 0.8777, 0.7916, 0.6691, 0.7554, 0.7533, 0.8805, 0.8653, 0.8145, 0.7522, 0.4373, 0.7888; \\ 0.5949, 0.4115, 0.5797, 0.6973, 0.751, 0.8049, 0.8742, 0.7676, 0.6319, 0.759, 0.7546, 0.8804, 0.8666, 0.8012, 0.7847, 0.453, 0.847 \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 0.398, 0.3852, 0.3956, 0.5604, 0.5979, 0.6144, 0.6275, 0.6011, 0.4579, 0.5275, 0.5063, 0.6314, 0.6278, 0.5827, 0.567, 0.3148, 0.6307; \\ 0.4361, 0.3641, 0.4569, 0.5828, 0.6079, 0.6203, 0.631, 0.6031, 0.4999, 0.5468, 0.5178, 0.6302, 0.6279, 0.5842, 0.5528, 0.3155, 0.6308; \\ 0.4284, 0.3241, 0.4241, 0.5681, 0.6012, 0.6174, 0.6312, 0.5957, 0.4728, 0.5529, 0.5206, 0.6298, 0.6278, 0.5743, 0.5715, 0.3191, 0.6313 \end{bmatrix}$$

参照 2016 年水利部等部门联合发布的《江河生态安全调查与评估技术指南》,2013 年环境保护部发布的《流域生态健康评估技术指南》,参考前人相关研究成果<sup>[30-32]</sup>,将水生态安全状况模糊综合评价结果分为 5 级:当  $0.8 \leq y < 1$  时,水生态安全状况为一级(优); $0.6 \leq y < 0.8$  时,为二级(良好); $0.4 \leq y < 0.6$  时,为三级(一般); $0.2 \leq y < 0.4$  时,为四级(较差); $0 \leq y < 0.2$  时,为五级(差)。根据上述水生态安全状况分级标准对流段进行分级显示,优化前的评价指标体系模糊综合评价结果中,2016—2018 年达到良好以上流段占比分别为

76.5%、88.2%、76.5%，其余流段水生态安全状况一般；优化后评价指标体系中，流段水生态安全状况良好以上占比分别为 35.3%、41.2%、35.3%，一般占比分别为 57.8%、52%、46.1%，较差流段占比分别为 23.5%、11.8%、11.8%。

分析发现，各流段水生态安全状况各异（如图 2 示），运用优化后评价指标体系模糊综合评价，结果显示，各流段的水生态安全状况大致呈正态分布，大部分流段水生态安全状况一般，良好以上和较差占比较小，这也与甘肃境内实际水生态安全状况的相对脆弱性实际相符，优化后的评价指标体系模糊综合评价指数整体降低，相当于提高了水生态安全状况实际建设要求；各流段水生态安全综合指数年际变化均小于 0.1 且在同一个安全等级范围内，保持相对稳定，说明评价指标体系也具有较好的稳定性。

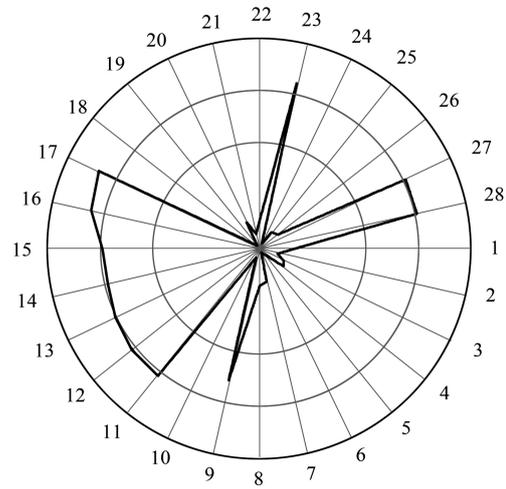
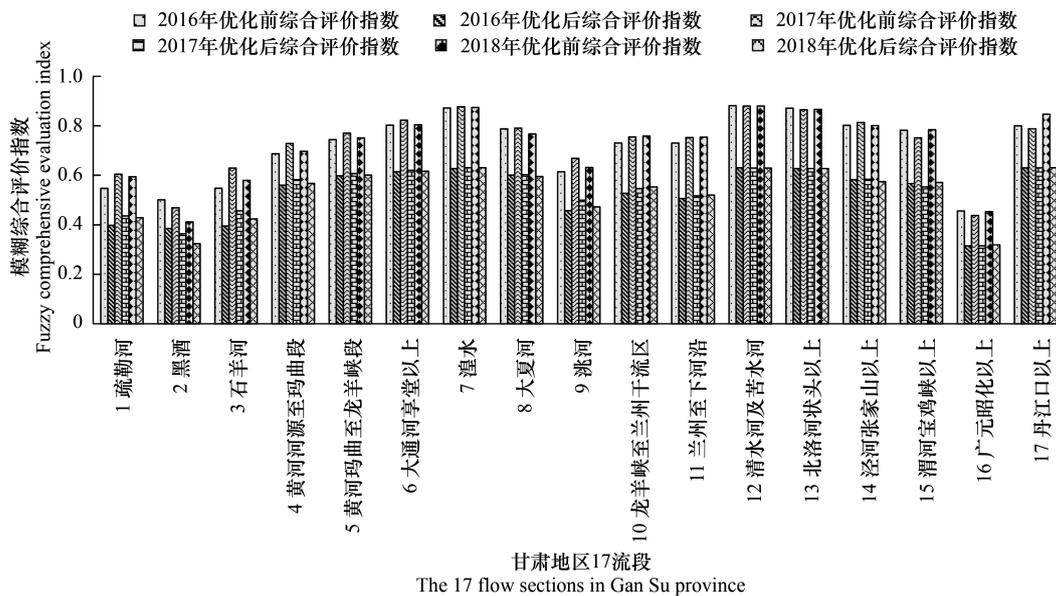


图 1 评价指标相关分析

Fig. 1 Correlation analysis of evaluation indexes



甘肃地区 17 流段  
The 17 flow sections in Gan Su province

图 2 模糊综合评价结果

Fig. 2 The fuzzy comprehensive evaluation results

#### 4 讨论

水生态安全评价是一个多领域交叉学科，也是一个持续变化，需要不断优化更新的过程，有很多学者从水质、水量、水灾害、水管理等层面分别进行水生态安全评价<sup>[33-36]</sup>。水生态安全评价指标体系的构建要从复合生态系统内部考虑，分析经济、社会、自然因素综合影响，随着生态文明、水生态文明理念的深入发展，从经济-社会-自然复合生态系统角度看待水生态安全问题将是一个新的发展方向。选择易于统计监测指标作为评价指标，考虑水生态安全具有动态变化的特点，需要不断分析优化评价指标体系，以适应实际评估工作需要。

模糊系统分析结果表明，影响甘肃地区 17 流段水生态安全状况指标中，年平均降水量、河川基流量、地表水源供应量、生态环境用水量、节水灌溉面积等指标影响较大，这与靳春玲等人<sup>[33-36]</sup>研究成果基本一致，表

明增加供水,提高用水效率对提高水生态安全状况具有重要意义。同时注重生态环境用水,保护生态环境,发展兼具生态保护及良好经济效益的生态节水农业模式,将是今后发展的趋势。在改进生态位理论确定调控指标过程中发现,增加蓄水,跨流域调水,增加引水量等措施,对水生态安全状况影响不大,这可能由于各流段调水及蓄水状况差异不明显,不是限制性因子。

从近三年甘肃地区 17 流段的水生态安全状况变化趋势看,优化后的评价指标体系模糊综合评价结果显示,各流段水生态安全状况年际变化不大,均小于 0.1,基本保持稳定状态,水生态安全状况优良差大致呈正态分布,绝大部分流段水生态安全模糊综合评价指数在 0.4—0.6 之间,水生态安全状况一般,评价结果较为中肯,从侧面也说明了优化后的水生态安全评价指标体系具有较好的稳定性、可操作性和科学性。

本文通过结合改进生态位理论及模糊数学相关理论,为流域水生态安全评价提供了新思路,为地区环境保护绩效考核、水生态安全保护及监测、生态工程的实施提供了科学依据。本研究不足之处主要有两点,一是水生态安全评价是一个多指标模糊综合评价过程,指标的模糊性和不确定性决定了其评价过程的复杂性,引入生态学相关理论一定程度加大了评价过程的复杂度,增加了工作量;二是水生态安全评价指标体系随着时代发展需要与时俱进,评价过程只能从宏观上确定方向,但不同区域间没有一个完全通用的评级体系。随着科技的进步,该评价指标体系还有很大的改进优化空间,不断提高评价的精确度和简洁度。

## 5 结论

运用优化后的评价指标体系对甘肃地区 17 个流段 2016—2018 年间水生态安全状况模糊综合评价,模糊综合评价指数介于 0.32—0.63 之间,流段水生态安全状况良好以上占比分别为 35.3%、41.2%、35.3%,一般占比分别为 57.8%、52%、46.1%,较差占比分别为 23.5%、11.8%、11.8%,评价结果大致呈正态分布,且年际间变化小于 0.1,表明优化后的评价指标体系具有较好的可操作性和稳定性。整体上看(图 2),河西内陆河 3 个流段的水生态安全状况相对最差,黄河 12 个流段水生态安全状况相对最好,因此,加强内陆河流域水生态安全调控对提高甘肃水生态安全状况具有重要现实指导意义。

通过运用改进生态位理论结合模糊系统分析,结果表明,年平均降水量、河川基流量、地表水源供应量、生态环境用水量、节水灌溉面积等指标累计指标权重达 47.75%,是影响水生态安全状况的主要影响因子。因此,增加供水,提高用水效率,发展节水灌溉农业对提高甘肃地区各流段水生态安全状况具有重要作用。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 陈森,苏晓磊,黄慧敏,高婷,党成强,董蓉,曾波,陶建平. 三峡库区河流生境质量评价. 生态学报,2019,39(1):192-201.
- [ 2 ] 何彦龙,袁一鸣,王腾,张昊飞,陈耀辉. 基于 GIS 的长江口海域生态系统脆弱性综合评价. 生态学报,2019,39(11):3918-3925.
- [ 3 ] 戴文渊. 基于模糊综合评价的甘肃地区水生态安全评价指标体系研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2016.
- [ 4 ] 戴文渊,张芮,成自勇,宋众艳,刘静霞,高阳. 基于模糊系统分析的水生态安全评价研究——以北方四市为例. 水利水电技术,2015,46(09):23-26,44-44.
- [ 5 ] 戴文渊,张芮,成自勇,宋众艳,刘静霞,马奇梅. 白银市水生态安全评价研究. 水利水运工程学报,2015,(4):92-97.
- [ 6 ] 戴文渊,张芮,成自勇,刘静霞,马奇梅,陈娜娜. 基于模糊综合评价的兰州市水生态安全指标体系研究. 干旱区研究,2015,32(04):804-809.
- [ 7 ] 戴文渊,张芮,成自勇,宋众艳,刘静霞,陈娜娜,马奇梅. 基于模糊系统分析的河西地区酿酒葡萄梅鹿辄的品质评价. 浙江农业学报,2015,27(9):1659-1663.
- [ 8 ] 康绍忠,粟小玲,杜太生. 西北旱区流域尺度水资源转化规律及其节水调控模式——以甘肃石羊河流域为例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [ 9 ] 李谢辉,李景宜. 我国生态风险评价研究. 干旱区资源与环境,2008,22(3):70-74.
- [ 10 ] 吕蕊. 基于水生态安全的武威市耕地保有量测算研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2011.
- [ 11 ] 徐斌,申恒伦,胡长伟,李修岭,武周虎. 基于 DPSIR 模型和改进的群组 AHP 法的岸堤水库水生态安全评价. 人民珠江,2018,39(01):40-43.
- [ 12 ] 张满满,于鲁冀,张慧,靖中秋. 基于 PSR 模型的河南省水生态安全综合评价研究. 生态科学,2017,36(05):49-54.

- [13] 张风太,苏维词.基于均方差-TOPSIS模型的贵州水生态安全评价研究.灌溉排水学报,2016,35(09):88-92,103-103.
- [14] 王繁玮,陈星,朱琰,熊雪珍,卢婉莹.基于PSR的城市水生态安全评价体系研究——以“五水共治”治水模式下的临海市为例.水资源保护,2016,32(02):82-86.
- [15] 陈广.基于DPSIR模型的三峡库区水生态安全评价[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [16] 魏冉,李法云,谯兴国,王金龙,吕纯剑.辽宁北部典型流域水生态功能区水生态安全评价.气象与环境学报,2014,30(03):106-112.
- [17] 陈华伟,黄继文,张欣,傅世东.基于DPSIR概念框架的水生态安全动态评价.人民黄河,2013,35(09):34-37,45-45.
- [18] 方兰,李军.论我国水生态安全及治理.环境保护,2018,46(3/4):30-34.
- [19] 张义.水生态安全初论.水利发展研究,2017,17(01):27-31.
- [20] SULLIVAN C. Calculating a water poverty index. World Development,2002,30(7):1195-1210.
- [21] CHANG M Q, HUANG Q. The theory and method of water resources security[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [22] 魏冉.辽宁省辽河流域水生态功能三级区水生态安全评价[D].沈阳:辽宁大学,2013.
- [23] 吕蕊,陈英,张仁陟.基于水生态安全的武威市耕地保有量测算.开发研究,2012,(1):105-108.
- [24] 王世进,卢俊辉.论流域水生态安全的法律保障——以风险防范为视角.萍乡高等专科学校学报,2012,29(01):25-28.
- [25] 王影.生态安全的动态评价及多层次分析[D].天津:天津大学,2015.
- [26] 张晓岚,刘昌明,赵长森,范琳琳.改进生态位理论用于水生态安全优先调控.环境科学研究,2014,27(10):1103-1109.
- [27] 吴兆丹,赵敏,田泽,马超.多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较——基于“总量-相关指标-结构”分析框架.自然资源学报,2017,2(1):76-87.
- [28] 张晓岚,刘昌明,门宝辉,李智飞,王红瑞.漳卫南运河流域水生态安全指标体系构建及评价.北京师范大学学报:自然科学版,2013,49(06):626-630.
- [29] 刘灵辉,陈银蓉,石伟伟.基于模糊综合评价法的柳州市土地集约利用评价.广东土地科学,2007,6(3):25-28.
- [30] 陈东景,徐中民.西北内陆河流域生态安全评价研究——以黑河流域中游张掖地区为例.干旱区地理,2002,25(3):219-224.
- [31] 方燕,党志良.基于层次分析法的渭河流域水环境质量综合评价.水资源与水工程学报,2005,16(1):45-48.
- [32] 韩宇平,阮本清,解建仓.多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用.资源科学,2003,25(4):37-42.
- [33] 李梦娣,范俊韬,孔维静,张远,迟明慧.河流山区段水生态安全评估——以太子河为例.应用生态学报,2018,29(08):2685-2694.
- [34] 贡力,刘俊民.应用模糊综合评价分析方法对兰州市水资源承载力评价研究.城市道桥与防洪,2007,(7):147-150.
- [35] 李辉.生态安全评价理论体系研究与实例分析[D].沈阳:东北大学,2004.
- [36] 靳春玲,贡力.基于PSR模型的城市水安全评价研究.安全与环境学报,2009,9(5):104-108.