

基于组合赋权的改进集对模型在流域生态健康评价中的应用

孙超, 陈文, 李计生, 李斌

(甘肃省水文水资源局, 甘肃 兰州 730000)

摘要:流域生态健康评价是流域管理、水资源开发利用、生态保护的重要决策依据,也是促进流域社会经济可持续发展的重要措施。在确定石羊河流域生态健康评价指标体系和等级标准的基础上,采用组合赋权法确定评价指标的权重,建立了改进集对模型评价方法。定量评价结果表明,石羊河流域上游、中游、下游生态健康分别为基本健康、亚健康、病态等状态。

关键词:石羊河流域;生态系统健康程度;评价指标;主客观赋权;改进集对模型

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)02-0053-06

流域生态健康评价是伴随生态健康概念出现的一个新概念^[1-2]。流域生态系统是由社会、经济、自然组成的复合生态系统^[3],具有复杂性和空间差异性^[4]。在评价流域健康程度时,各影响因素和健康等级标准也应是动态及多层次的。基于组合赋权的改进集对模型充分挖掘数据自身包含的信息,对生态系统的各因素贡献大小进行综合分析,有效反映出各因素对流域健康状况的影响权重;利用联系度的可展性,从“优”与“劣”两方面描述评价样本与评价等级的接近程度,确定各指标所属等级,得出合理的评价结果。依据评价结果分析流域生态环境存在的主要问题并提出建议,对流域可持续管理及生态环境建设具有重要的意义。

1 评价研究现状

1.1 国外研究概况

生态系统健康这个概念,产生于20世纪80年代初,随后河流管理的重点由水质保护转到河流生态系统的恢复。1989年,Rapport首次论述生态系统健康内涵,指出生态环境与人类可持续发展之间的关系^[5]。1999年,Ladson结合澳大利亚溪流状况指数,构建了基于水文、河流特征等5方面的指标体系,将每项指标与参照项对比评分^[6]。2008年,Peter Rose研究底栖动物群落特征来评价干旱区河流的健康程度^[7]。2014年,Pinto U引入了娱乐活动、景观程度等指标,提出城市景观河流

的评价框架^[8]。2015年,Oeding以硅藻为研究对象,认为硅藻是评估亚热带河流生态系统健康的可靠指标^[9]。

1.2 国内研究概况

我国的流域生态健康评价起步较晚,主要还是以水质评价为主。近年来,有不少学者对生态系统的评价方法和指标做出了有益的探索。2005年,吴阿娜等从理化参数、生物指标、形态结构、水文特征、河岸带状况5个方面表征河流的健康状况^[10]。2010年,张晶等提出了基于生态功能和纬度、集水面积、距离河源的位置、河流所处地区等空间因子的两级水生态区划方法,根据河流所属水生态区构建了基于一级分区的水文、水质、河流地貌、生物和社会经济特性等5方面评价指标体系^[11]。2014年,邓晓军等构建出包含自然生态、社会经济和景观环境等指标,建立基于层次分析法的模糊综合评价模型对漓江市区段河流进行评价^[12]。2016年,封光寅对汉江中下游流量过程变异及其影响因素进行分析;通过实例计算,定量分析了流量过程变异对汉江中下游河流健康影响程度^[13]。

2 流域概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,介于乌鞘岭以西、大黄山以东,祁连山冷龙岭以北、巴丹吉林沙漠以南的区域,地理坐标在东经101°4′~104°16′、北纬36°29′~39°27′之间,总面积4.16×10⁴km²。

石羊河流域地貌介于青藏高原与蒙古高原边缘,地势南高北低,自西向东由西大河、东大河、西营河、金塔河、杂木河、黄洋河、古浪河、大靖河 8 条主要支流及区间内多条小河沟组成^[14],径流补给来源为山区降水和冰雪融水,多年平均径流量 $15.7\times 10^8\text{m}^3$,与地表水不重复的地下水资源量 $0.99\times 10^8\text{m}^3$,径流量年内分配不均,5~9 月径流占年径流量的 85%。该流域属大陆性温带干旱气候,昼夜温差大、降水少、蒸发强烈,南部祁连山区年降水量 300~600mm,年蒸发量 700~1 200mm;中部走廊平原区年降水量 150~300mm,年蒸发量 1 300~2 000mm;北部干旱区年降水量 50~185mm,年蒸发量 2 000~3 030mm。

3 改进集对分析模型

3.1 评价指标和评价标准

由于河流健康评价涉及范围广,且各条河流面临的问题也不尽相同,评价指标的确定缺乏相关标准和理论指导,但指标的构建基本遵循以下原则:可持续性原则,以流域生态健康内涵为依据,实现流域水资源的科学开发和永续利用;指标定量性与可操作性原则,指标易于获取,有较强的可比性,便于分析计算;主导性原则,提取信息量大、综合性强的指标,并参照相近流域的研究成果,借鉴相关专家经验。

本文在遵循指标体系构建原则的基础上,通过实

地考察,借鉴塔里木河、疏勒河、黑河等内陆河流域以及黄河、长江、滦河^[15-18]等河流的相关研究成果,选取具有代表性的评价指标,分类整合,以石羊河生态系统健康评价指数(A)为目标层,以水资源禀赋(B_1)、水资源开发利用状况(B_2)、社会经济功能(B_3)为准则层(B)。

统计分析评价指标在准则层中出现的次数,筛选使用率高的指标,咨询有关专家,结合石羊河流域实际情况,提出合理的指标体系及评价标准。其中指标层(C)为:多年平均降水量(C_1)、干旱指数(C_2)、径流模数(C_3)、人均水资源量(C_4)、水资源开发利用程度(C_5)、万元 GDP 用水量(C_6)、河道内生态需水保障率(C_7)、人类活动强度(C_8)、河流水质达标率(C_9)。评价标准分为 5 级:健康、基本健康、亚健康、病态、濒于崩溃^[19]。评价指标及标准见表 1。

3.2 改进集对分析模型

集对分析是由赵克勤提出的处理系统确定性与不确定性作用的理论。设有 j 个评价指标,则流域内不同区域生态健康评价指标 $X_{ij}=[x_{i1},x_{i2}\cdots x_{ij}]$, i 表示上、中、下游;流域生态健康评价标准界限值 $T_{nj}=[t_{1j},t_{2j}\cdots t_{nj}]$, n 表示评价标准的 5 个等级。联系集合 T 和 X 构成集对 $H(T,X)$,两者的联系度为: $\mu_{T:X}=\frac{S}{n}+\frac{F}{n}I+\frac{P}{n}J$,其中, I 为差异不确定系数, J 为对立系数。记 $a=\frac{S}{n}$, $b=\frac{F}{n}$,

表1 石羊河流域生态健康评价指标及标准
Table1 The evaluation index and standard of Shiyang River basin ecological health

准则层	指标	指标描述	石羊河				评价标准			
			上游	中游	下游	健康	基本健康	亚健康	病态	濒于崩溃
水资源禀赋	多年平均降水量	雨量站资料 / mm	460	245	155	500	300	100	50	30
	干旱指数	多年平均水面蒸发量 / 多年平均降水量	1.8	7.3	18	0.5	3	5	9	12
	径流模数	平均流量 *1000 / 计算面积 / L·(s·km ²) ⁻¹	10.1	6.2	1.6	12	8	5	3	2
水资源开发利用状况	人均水资源可利用量	水资源可利用量 / 总人口 / m ³ ·人 ⁻¹	720	755	771	1700	1000	700	500	300
	水资源开发利用程度	当地水资源供水量 / 当地水资源用水量 / %	155	140	147	20	40	60	80	100
	万元 GDP 用水量	总用水量 / GDP / m ³ ·万元 ⁻¹	402	315	230	80	200	400	600	800
社会、经济功能	人类活动强度	人口数量 / 国土面积 / 人·(km ²) ⁻¹	45	210	29	100	300	500	700	1000
	河道内生态需水保障率	实测径流量 / 河道生态适宜需水量 / %	87	62	33	80	60	50	30	10
	河流水质达标率	达标河长 / 总河长	85	20	65	80	60	50	40	25

$c = \frac{P}{n}$, 则 $\mu_{T;X} = a + bI + cJ$, 式中: a, b, c 为集对 $H(T, X)$ 的

同一度、差异度、对立度。

利用联系度的延展性, 将原联系度 $\mu_{T;X}$ 的表达式拓展为:

$$\mu_{T;X} = a + bI + cJ = a + (b_1i_1 + b_2i_2) + (c_1j_1 + c_2j_2)$$

式中: $a + b_1 + b_2 + c_1 + c_2 = 1$; b_1, b_2 为差异度分量; c_1, c_2 为对立度分量; $i_1 \in [0, 1], i_2 \in [-1, 0]$ 且 $i_1 + i_2 \in [-1, 1]$; $j_1 \in \{0, 1\}, j_2 = -1$ [20-22]。

评价指标模型如下:

一级联系度

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, X_{ij} \in [0, t_{1j}) \\ \frac{t_{1j}}{X_{ij}} + \frac{X_{ij} - t_{1j}}{X_{ij}} i_1, X_{ij} \in [t_{1j}, t_{2j}) \\ \frac{t_{1j}}{X_{ij}} + \frac{t_{2j} - t_{1j}}{X_{ij}} i_2 + \frac{X_{ij} - t_{2j}}{X_{ij}} j_2, X_{ij} \in [t_{2j}, +\infty) \end{cases}$$

二级联系度

$$\mu_2 = \begin{cases} \frac{t_{2j} - t_{1j}}{t_{2j} - X_{ij}} + \frac{t_{1j} - X_{ij}}{t_{2j} - X_{ij}} i_1, X_{ij} \in [0, t_{1j}) \\ 1, X_{ij} \in [t_{1j}, t_{2j}) \\ \frac{t_{2j} - t_{1j}}{X_{ij} - t_{1j}} + \frac{X_{ij} - t_{2j}}{X_{ij} - t_{1j}} i_2, X_{ij} \in [t_{2j}, t_{3j}) \\ \frac{t_{2j} - t_{1j}}{X_{ij} - t_{1j}} + \frac{t_{3j} - t_{2j}}{X_{ij} - t_{1j}} i_2 + \frac{X_{ij} - t_{3j}}{X_{ij} - t_{1j}} j_2, X_{ij} \in [t_{3j}, +\infty) \end{cases}$$

.....

五级联系度

$$\mu_5 = \begin{cases} \frac{t_{5j} - t_{4j}}{t_{5j} - X_{ij}} + \frac{t_{4j} - t_{3j}}{t_{5j} - X_{ij}} i_1 + \frac{t_{3j} - X_{ij}}{t_{5j} - X_{ij}} j_1, X_{ij} \in [0, t_{3j}) \\ \frac{t_{5j} - t_{4j}}{t_{5j} - X_{ij}} + \frac{t_{4j} - X_{ij}}{t_{5j} - X_{ij}} i_1, X_{ij} \in [t_{3j}, t_{4j}) \\ 1, X_{ij} \in [t_{4j}, +\infty) \end{cases}$$

将评价指标中的越大越优型指标取其倒数转换成越小越优型指标, 以石羊河上游为例, 根据上述模型计算得到各评价指标联系度系数 a, b_1, b_2, c_1, c_2 的值及联系度矩阵 μ_1 , 同理可得石羊河中游, 下游联系度矩阵 μ_2, μ_3 :

$$\mu_1 = \begin{bmatrix} 0.920+0.080i_1 & 1 & 0.852+0.148i_1 & 0.561+0.374i_1+0.065j_1 & 0.428+0.321i_1+0.251j_1 \\ 0.278+0.722i_1 & 1 & 0.625+0.375i_1 & 0.556+0.278i_1+0.167j_1 & 0.294+0.392i_1+0.314j_1 \\ 0.842+0.158i_1 & 1 & 0.743+0.257i_1 & 0.569+0.320i_1+0.111j_1 & 0.416+0.333i_1+0.252j_1 \\ 0.424+0.296i_2+0.280j_2 & 0.514+0.486i_2 & 1 & 0.935+0.065i_1 & 0.686+0.294i_1+0.020j_1 \\ 0.129+0.129i_2+0.742j_2 & 0.148+0.148i_2+0.704j_2 & 0.174+0.174i_2+0.652j_2 & 0.211+0.789i_2 & 1 \\ 0.199+0.299i_2+0.502j_2 & 0.373+0.621i_2+0.006j_2 & 0.990+0.010i_2 & 1 & 0.503+0.497i_1 \\ 1 & 0.784+0.216i_1 & 0.440+0.440i_1+0.121j_1 & 0.305+0.305i_1+0.389j_1 & 0.314+0.209i_1+0.476j_1 \\ 1 & 0.806+0.194i_1 & 0.392+0.490i_1+0.118j_1 & 0.611+0.153i_1+0.237j_1 & 0.753+0.151i_1+0.096j_1 \\ 1 & 0.850+0.150i_1 & 0.405+0.506i_1+0.089j_1 & 0.378+0.252i_1+0.370j_1 & 0.531+0.177i_1+0.292j_1 \end{bmatrix}$$

4 组合赋权法确定指标权重

本文评价指标权重采用层次分析法和熵值法进行组合赋权来确定。方法如下: 层次分析法确定指标主观权重, 并做一致性检验; 熵值法确定指标客观权重; 组合权重为两种赋权法所确定的权重系数的几何平均值。

4.1 层次分析法确定指标主观权重

4.1.1 建立对比矩阵

在深入分析石羊河流域生态问题的基础上, 将生态系统健康程度评价分解目标层(A)、准则层(B)、指标层(C)三层。对于从属于上一层每个因素的同一层诸因素, 结合专家意见, 使用成对比较法和 1~9 比较尺度构造判断矩阵, 直到最下层 [23]。本文以准则层相对目标层为例列出 $A \sim B$ 判断矩阵, 见表 2。

表2 判断矩阵

Table2 The judgement matrix

A	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	2	3
B ₂	1/2	1	2
B ₃	1/3	1/2	1

4.1.2 计算评价指标权重并做一致性检验

本文采用求和法计算各指标的权重系数, 以 $A \sim B$ 矩阵为例进行计算, 基本步骤如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{列向量归一化}} \begin{bmatrix} 0.55 & 0.57 & 0.50 \\ 0.27 & 0.29 & 0.33 \\ 0.18 & 0.14 & 0.17 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{按行求和并归一化}} \begin{bmatrix} 0.54 \\ 0.30 \\ 0.16 \end{bmatrix} = v, Av = \begin{bmatrix} 1.62 \\ 0.89 \\ 0.49 \end{bmatrix}, \lambda = 3.0092$$

由此计算 $B \sim C$ 矩阵各特征向量及最大特征根,权重计算结果见表 3。

检验判断矩阵的一致性, 计算公式为: $CR = \frac{CI}{RI}$, 其中 $CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}$, $RI = 0.58$ (3 阶矩阵), 当 $CR < 0.1$ 时, 一致性检验通过, 指标权重可以作为决策依据。当检验不通过, 需要对已有的矩阵进行修正。一致性检验结果见表 4。

表3 评价指标权重计算结果
Table3 The evaluation index weight calculation results

A	B	C	归一化权重 v_j
石羊河河流域 健康程度评价	0.54	0.49	0.2643
		0.20	0.1065
		0.31	0.1681
		0.54	0.1602
	0.30	0.30	0.0884
		0.16	0.0487
		0.56	0.0912
		0.16	0.0201
	0.16	0.12	0.0201
		0.32	0.0524

表4 随机一致性指标检验结果
Table4 The test results of the random consistency index

判断矩阵	v_1	v_2	v_3	CI	RI	CR	一致性检验
$A \sim B$	0.54	0.30	0.16	0.0046	0.58	0.0015	满意
$B \sim C_1$	0.49	0.20	0.31	0.0269		0.0463	满意
$B \sim C_2$	0.54	0.30	0.16	0.0046		0.0079	满意
$B \sim C_3$	0.56	0.12	0.32	0.0268		0.0158	满意

表5 指标熵值及权重计算结果
Table5 The calculation results of the index weight and entropy

指标熵值 e_j	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9
	0.9114	0.7329	0.8247	0.9996	0.9992	0.9772	0.6810	0.9369	0.8792
指标权重 g_j	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9
	1.0973	1.3644	1.2126	1.0004	1.0008	1.0233	1.4685	1.0674	1.1373
归一化后的指标权重 h_j	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9
	0.1058	0.1315	0.1169	0.0964	0.0965	0.0987	0.1416	0.1029	0.1097

4.2 熵值法确定指标客观权重

设有 m 个评价对象集, n 个评价指标集, 构成原始数据矩阵 x_{ij} , 表示第 i 个方案第 j 个指标的原始值。(1) 数据标准化处理后, 对 x_{ij} 进行归一化处理; (2) 计算第 j 项指标的熵值 $e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$; $k = 1 / \ln m$, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。(3) 计算第 j 项指标的权重 $g_j = \frac{1}{e_j}$, $j = 1, 2, \dots, n$, 进行归一化处理, 使得 $\sum h_j = 1$, 则第 j 项指标的权重为 $h_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}$ 。指标熵值及权重计算结果见表 5。

4.3 主客观组合赋权

计算层次分析法主观权重 (v_j) 和熵值法客观权重 (h_j) 的几何平均值, 计算公式为: $W_j = \frac{\sqrt{v_j h_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{v_j h_j}}$, $j = 1, 2, \dots, n$, 由此得到组合权重 $W_j = [0.1766, 0.1250, 0.1481, 0.1313, 0.0975, 0.0732, 0.1201, 0.0480, 0.0801]$ 。

5 改进集对分析模糊综合评价

对联系数 μ 和组合权重 W 进行模糊矩阵复合运算求得石羊河上游综合联系度矩阵 A ,

$$A = wg\mu = \begin{bmatrix} 0.6528+0.1279i_1+0.0734i_2+0.1459j_2 \\ 0.7600+0.0472i_1+0.1237i_2+0.0691j_2 \\ 0.5321+0.2237i_1+0.0273j_1+0.1490i_2+0.0636j_2 \\ 0.5656+0.2209i_1+0.0770i_2+0.1365j_1 \\ 0.5147+0.2765i_1+0.2087j_1 \end{bmatrix}^T$$

联系度的集对势 $shi(A) = a/c$, 若 $a/c > 1$ 为集对同势, 2 个集合在同异反联系中存在同一趋势; 若 $a < c < b$,

表6 石羊河流域评价结果
Table6 The evaluation results of the Shiyang River basin

石羊河流域	$shi(u_1)$	$shi(u_2)$	$shi(u_3)$	$shi(u_4)$	$shi(u_5)$
上游	4.474	10.999	8.364	4.142	2.466
中游	1.180	3.174	6.232	4.542	5.103
下游	0.866	1.358	2.512	6.144	5.530

2 个集合具有强同势;若 $a>b>c$,2 个集合具有弱同势;若 $b>a>c$,2 个集合具有微同势;若 $b=0$,2 个集合为准同势^[24]。若 $a/c<1$ 为集对反势,若 $a/c=1$ 为集对均势。

计算石羊河流域上游对应的 5 级集对势分别为: $shi(u_1)=4.474,shi(u_2)=10.999,shi(u_3)=8.364,shi(u_4)=4.142,shi(u_5)=2.466$,归一化后,得到从健康到濒于崩溃的概率分布:14.7%,36.1%,27.5%,13.6%,8.1%,判断上游生态健康程度为基本健康状态,同理,计算中游、下游的集对势,结果见表 6,判断中游、下游生态健康程度分别为亚健康状态,病态。

据上述分析,石羊河流域生态环境受自然条件、人类活动的影响,生态较脆弱,主要原因是:地处内陆,降雨量少,蒸发量大,水资源量匮乏;水资源开发利用程度高,用水结构不合理,用水效率偏低;中游工业发展迅速,化肥、农药的施用,造成水体水质较差。

6 结论

本文建立了基于组合赋权的改进集对综合评价模型,方法直观简便,评价结果合理。利用集对分析中联系度的可展性,对同、异、反特性进行改进,构建了流域生态健康评价模型。通过组合赋权思想,把层次分析法与熵值法计算的指标权重有效结合在一起,克服了单一方法计算权重的片面性,既反映了评价者的主观信息,又体现了数据自身包含的客观信息,使得评价更符合流域生态环境实际状况。采用模糊算法评价得到石羊河流域上中下游生态环境健康程度分别为基本健康、亚健康、病态。

参考文献:

[1] 李文君,邱林,陈晓楠,等. 基于集对分析与可变模糊集的河流生态健康评价模型[J]. 水利学报, 2011,42(7):775-782. (LI Wenjun, QIU Lin, CHEN Xiaonan, et al. Assessment model for river ecology healthy based on set pair analysis and variable fuzzy set [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(7):775-782. (in Chinese))

[2] 李婉晖,潘文斌,邓红兵. 水资源利用与保护的途径——流域管理[J].

生态学杂志, 2004,23(6):97-101. (LI Wanhui, PAN Wenbin, DENG Hongbing. Approach for water resource utilization and protection-water-shed management [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004,23(6):97-101. (in Chinese))

[3] 张晓萍,杨克勤,李锐. 流域健康诊断指标一种生态环境评价的新方法[J]. 水土保持通报, 1998,18(4):57-62. (ZHANG Xiaoping, YANG Keqin, LI Rui. Diagnostic indicators of catchment health: a new method of evaluation of ecological environment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1998,18(4):57-62. (in Chinese))

[4] 刘静玲,杨志峰,林超. 流域生态需水规律研究[J]. 中国水利, 2006, (13):18-21. (LIU Jingling, YANG Zhifeng, LIN Chao. Research on the rule of river basin eco-system demand [J]. China Water Resources, 2006,(13):18-21. (in Chinese))

[5] Rapport D.J. What constitutes ecosystem health [J]. Perspectives in Biology & Medicine, 1989,33(1):120-132

[6] White L J, Ladson A R. Anindex of Stream Condition Fieldmanhal [M]. Melbourne: Department of Nathral Resources and Environment, 1999:1-33.

[7] Rose P, Metzeling L, Catzikiris S. Can macro invertebrate rapid bioassessment methods be used to assess river health during drought in south eastern Australian streams [J]. Freshwater Biology, 2008,53(12):2626 - 2638.

[8] Pinto H, Maheshwari B.A. Framework for assessing river health in periurban landscapes [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2014.

[9] Oeding S, Taffs K H. Are diatoms a reliable and valuable bio-indicator to assess sub-tropical river ecosystem health [J]. Hydrobiologia, 2015,758(1):151-169.

[10] 吴阿娜,杨凯,车越,等.河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展, 2005,16(4):602-608. (WU Ana, YANG Kai, CHE Yue. Characterization of rivers health status and its assessment [J]. Advances in Water Science, 2005,16(4):602-608. (in Chinese))

[11] 张晶,董哲仁,孙东亚,等. 基于主导生态功能分区的河流健康评价全指标体系[J]. 水利学报, 2010,41(8):883-892. (ZHANG Jing, DONG Zheren, SUN Dongya, et al. Complete river health assessment index system based on eco-regional method according to dominant ecological functions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(8):883-892. (in Chinese))

[12] 邓晓军,许有鹏,翟禄新,等. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用[J]. 生态学报, 2014,34(4):993-1001. (DENG Xiaojun, XU Youpeng, ZHAI Luxin. Establishment and application of the index

- system for urban river health assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,34(4):993–1001. (in Chinese))
- [13] 封光寅,李文杰,周丽华,等. 流量过程变异对汉江中下游河流健康影响分析[J]. *水文*, 2016,36(1):46–50. (FENG Guangyin, LI Wenjie, ZHOU Lihua, et al. Influence of flow process variation on river health in middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. *Journal of China Hydrology*, 2016,36(1):46–50. (in Chinese))
- [14] 中国河湖大典编委会. 中国河湖大典 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014:235. (Editorial Committee of Encyclopedia of Rivers and Lakes in China. *Encyclopedia of Rivers and Lakes in China* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2014:235. (in Chinese))
- [15] 黄晓荣,李云玲,蔡明,等. 基于黄河健康生命的流域水资源合理配置方案评价研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008,36(11):208–216. (HUANG Xiaorong, LI Yunling, CAI Ming, et al. Research on the evaluation for rational allocation of water resources based on healthy life in Yellow River basin [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science edition)*, 2008,36(11):208–216. (in Chinese))
- [16] 付爱红,陈亚宁,李卫红. 塔里木河流域生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2009,29(5):2418–2426. (FU Aihong, CHEN Yaning, LI Weihong. Assessment on ecosystem health in the Tarim River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009,29(5):2418–2426. (in Chinese))
- [17] 郭巧玲. 黑河流域生态需水及系统健康评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012:131–132. (GUO Qiaoling. *Water Demand River Ecological and River Health Assessment on Heihe River Basin* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2012:132–133. (in Chinese))
- [18] 蔡守华. 河流健康的概念及指标体系和评价方法 [J]. *水利水电科技进展*, 2008,28(1):23–27. (CAI Shouhua. Concept of river health and index system for its evaluation [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2008,28(1):23–27. (in Chinese))
- [19] 户作亮,张胜红,林超,等. 海河流域平原河流生态保护与修复模式研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010:31. (HU Zuoliang, ZHANG Shenghong, LIN Chao, et al. *Study on the Ecological Protection and Restoration Model of Plain Rivers in Haihe River Basin* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010:31. (in Chinese))
- [20] 郑志宏. 河流健康评价与生态环境需水理论及应用研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014:62–64. (ZHENG Zhihong. *Study on the Theory and Application of River Health Assessment and Ecological Environmental Water Demand* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2014:62–64. (in Chinese))
- [21] 王文圣,张翔,林超,等. 水文学不确定性分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011:297–305. (WANG Wensheng, ZHANG Xiang, LIN Chao, et al. *Methods of Uncertainty Analysis for Hydrology* [M]. Beijing: Science Press, 2011:297–305. (in Chinese))
- [22] 王颖,邵磊,杨方廷. 改进的集对分析水质综合评价方法[J]. *水力发电学报*, 2012,31(3):99–106. (WANG Ying, SHAO Lei, YANG Fangting. Comprehensive evaluation method of water quality based on improved set pair analysis [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012,31(3):99–106. (in Chinese))
- [23] 姜启源,谢金星,叶俊. 数学模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000:249–257. (JIANG Qiyuan, XIE Jinxing, YE Jun. *Mathematical Models* [M]. Beijing: Higher Education Press 2000:249–257. (in Chinese))
- [24] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000. (ZHAO Keqin. *Set Pair Analysis and Its Preliminary Application* [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))

Application of Based-Weighting Improved Set Pair Model in Assessment of River Basin Ecological Environment Health

SUN Chao, CHEN Wen, LI Jisheng, LI Bin

(Hydrology and Water Resources Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Watershed ecosystem health assessment is associated with ecosystem health. As a new concept, watershed ecosystem health assessment is an important decision-making basis of ecological protection, watershed management and water resources development and utilization. Meanwhile, it is an important measure. In this study, we established the ecosystem health assessment indices and corresponding threshold for the Shiyanghe River Basin, and decided the weight of assessment indices by combination weight algorithm, then generated modified evaluation approach by set pair analysis. The quantitative assessment results show that the ecosystem health statuses over the upper, middle and lower reaches of the Shiyanghe River are respectively healthy, sub-healthy and unhealthy.

Key words: Shiyanghe River Basin; ecosystem health; evaluation index; objective and subjective weighting method; improved set pair model