

基于组合赋权模糊物元可拓模型的渭河流域甘肃段河流健康评价

熊伟¹,董增川²,卢嘉琪²,马嘉忆²,吴淑君²,李长春¹

(1. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司,甘肃 兰州 730000; 2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:从水文完整性、化学完整性、形态结构完整性、生物完整性及社会服务功能5个准则层出发,构建了渭河流域甘肃段河流健康评价指标体系;采用基于改进层次分析法和Critic法的组合赋权法和模糊物元可拓模型计算河流健康状况评价等级,对渭河流域甘肃段河流健康状况进行了评价,并结合障碍诊断模型,分析了该研究区域河流健康突出问题。结果表明:2017—2019年渭河流域甘肃段干流河流健康等级均为亚健康状态,且呈现小幅好转趋势;5个准则层中化学完整性表现最差,流域治理应重点关注河流水质治理;评价河段的敏感度指标与水文、化学、生物完整性相关,是提高河流健康水平最有效的敏感因子。

关键词:河流健康评价;组合赋权法;模糊物元可拓模型;障碍因子;渭河流域甘肃段

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0009-06

River health evaluation in Gansu section of Weihe River Basin based on combined weighted fuzzy matter-element extension model/XIONG Wei¹, DONG Zengchuan², LU Jiaqi², MA Jiayi², WU Shujun², LI Changchun¹ (1. *Gansu Water Resources and Hydropower Survey & Design Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Based on the five criteria of hydrological integrity, chemical integrity, morphological structure integrity, biological integrity and social service function, the river health assessment index system for the Gansu section of the Weihe River Basin was constructed. The combined weighting method based on the improved analytic hierarchy process and the Critic method, and the fuzzy matter-element extension model were used to calculate the assessment grade of the river health. The river health in the Gansu section of the Weihe River Basin was evaluated and the prominent problems of water health of the Weihe River were analyzed with the obstacle diagnosis model. The results show that from 2017 to 2019, the health levels of the main stream of the Gansu section of the Weihe River Basin were in a sub-health state but with a slight improvement trend. The chemical integrity of the five criteria layers was the worst, indicating that the watershed management should pay more attention to the river water quality management. The indicators for assessing the sensitivity of river sections are related to the hydrological, chemical and biological integrity, and are the most effective sensitive factors to improve the river health level.

Key words: river health evaluation; combined weighting method; fuzzy matter-element extension model; obstacle factor; Gansu section of Weihe River Basin

水资源是不可或缺的战略自然资源,在社会经济发展和人民生活中起着重要作用。随着经济增长和城镇化速度加快,水资源过度开发以及水污染问题已然成为人们的心头大患,也是限制经济持续高效发展的主要因素。随着绿色发展理念的提出,坚持可持续发展,追求人与自然和谐共生成为现代化发展新格局^[1]。渭河是黄河重要支流,是甘肃省

重要水源区。根据南水北调西线最新方案,甘肃省境内将布设两处注水点,渭河流域甘肃段承担着调配水资源和维护生态健康的作用^[2]。因此,开展渭河流域甘肃段的河流健康评价研究,对水生态安全以及水资源可持续发展具有重要意义。

河流健康评价是量化河流健康状况的重要手段^[3],传统的河流健康评价主要是理化参数评价,

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2016YFC0401306);甘肃省渭河流域水生态现状评估及生态需水研究项目(GSSDSJ-nsbd-01)
作者简介:熊伟(1971—),男,正高级工程师,硕士,主要从事水资源、水环境与水生态研究。E-mail: xwandlexf@163.com
通信作者:董增川(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: zcdong@hhu.edu.cn

旨在根据监测指标的变化趋势找出影响河流健康的因素,存在一定局限性。目前已有较多学者对渭河河流健康进行评价,王海荣^[4]通过遥感影像分析了渭河干流河流形态健康;徐宗学等^[5]等通过实地采样考察,分析了渭河流域河流健康现状;石长伟^[6]以河流健康为原则,构建了渭河河流健康指标体系。但多数学者选取的评价指标较为单一,本文拟从水文完整性、化学完整性、形态结构完整性等5个准则层出发,选取19个指标,开展基于组合赋权法与模糊物元可拓模型的渭河流域河流健康全面评估,并运用障碍因子分析模型识别影响渭河流域甘肃段河流健康的主要障碍因子,以期为促进渭河流域河流健康提供理论依据。

1 研究区概况

渭河干流发源于甘肃省南部鸟鼠山,向东流经陕西,并于陕西境内汇入黄河。本文研究区域为渭河流域甘肃段(图1),即渭河源头至甘肃和陕西交界处,以下凡称渭河流域均指渭河流域甘肃段。渭河流域甘肃省境内面积2.58万km²,干流长360km,多年平均降水量515.1mm,年降水存在时空差异,降水主要集中于汛期7—9月,且渭河以南地区降水较多。多年平均气温8.7℃。渭河南岸支流均发源于秦岭山区,源短流急,数量较多,是主要的水源补给部分。北岸多发源于丘陵和黄土高原,比降较小,含沙量较大,是泥沙的主要来源部分。

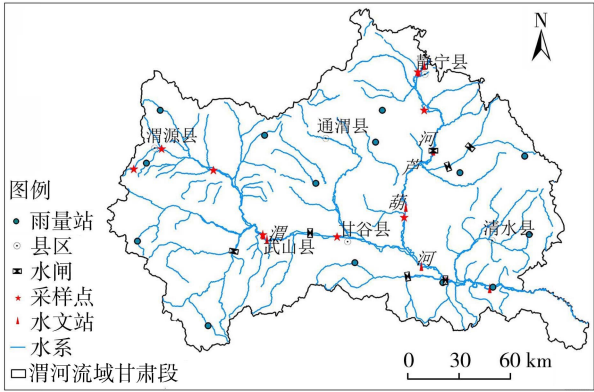


图1 渭河流域甘肃段示意图

渭河输沙量大、含沙量高,是向黄河进行输沙的最主要支流。北道站输沙率为4110kg/s,年输沙量为12960万t。渭河水沙异源,径流主要来源于南岸,而泥沙主要来自北岸。渭河北岸沟壑纵横,植被稀疏,水土流失严重,侵蚀模数高达8600t/km²,是渭河泥沙的主要来源区;南岸水土流失轻微,是渭河的主要水源涵养区。渭河来沙量年内分配相对集中,汛期来沙量占年来沙量的75%~94%,来沙量较大时期一般集中在每年的4—10月。水土流失面

积达2万km²,水土流失现象较为严重,威胁流域水生态系统安全。渭河北岸支流葫芦河等河流水质较差,水质为Ⅳ~劣Ⅴ类,导致渭河干流局部段水质为Ⅳ、Ⅴ类,总体河流水质不稳定。根据2019年渭河流域水功能水质监测资料显示,渭河流域达Ⅱ、Ⅲ类水质标准的河长占总河长的29.6%;劣于Ⅲ类水水质标准的河长占70.4%,非汛期水质劣于汛期。渭河流域不同水质类别河长见表1。

表1 渭河流域不同水质类别河长

时 段	不同水质类别河长/km					
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类	劣Ⅴ类
非汛期	0	73.2	172.4	0	92.0	682.6
汛 期	0	170.7	298.8	265.7	145.2	139.7
年平均	0	120.8	216.7	116.4	118.6	566.2

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

依据研究区域的多光谱扫描仪、专题制图仪、增强型专题绘图仪数字遥感影像,渭河流域甘肃段及周边地区水文站、雨量站、气象站资料,统计局相关资料以及以往分析研究成果,获取渭河流域自然地理、气象、水文、水生物、水环境等数据。采样点见图1,调查数据信息及获取途径见表2。

2.2 研究方法

2.2.1 评价指标体系构建

河流健康系统是包括自然、社会等多重属性的生态系统,为将各属性与具体指标联系起来,依照SL/T 712—2021《河湖生态环境需水计算规范》和SL/T 793—2020《河湖健康评估技术导则》,从河流水量、生态空间、水质、水土保持、河流泥沙、湿地、水生生物等方面对渭河流域河流健康状况进行梳理,遵循内在性、外在性、导向性3大原则,构建包括水文完整性等5个准则层共19个指标构成的渭河流域河流健康评价指标体系,如图2所示。

2.2.2 权重选择

权重计算一般分为主观赋权法和客观赋权法,后者根据相关理论和实际数据确定权重,不考虑指标间差异性,常与一般较为认可的结果不一致^[7]。组合赋权法能规避主观赋权法和客观赋权法各自的缺陷,避免了主观性和片面性^[8-10]。因此,本研究结合主观赋权法中的改进层次分析法和客观赋权法中的Critic法,采用组合赋权法计算得出适合渭河流域河流健康状况评价的综合权重。根据改进层次分析法和Critic法的指标权重计算结果,以最小信息鉴别原理为基础,计算各指标的综合权重。

根据上述两种方法计算得到指标层各指标的权重值,结果见表3。

表 2 调查数据信息及获取途径

数据类型	数据名称	数据尺度	获取途径
自然地理	土壤		
	水土流失与水土保持资料	年尺度	研究区域的多光谱扫描仪、专题制图仪、增强型专题绘图仪数字遥感图像,实地调研及勘测整编、分析结果
	植被覆盖	年尺度	
	河流长度、水深、河底比降	年尺度	
	河流岸坡高度、倾角	年尺度	
	水资源量	年尺度	
	河岸带自然状况、河流连通性、河流淤积等	年尺度	
气象	气温	日尺度	
	降水	日尺度	
	蒸发量	日尺度	渭河流域内及周边地区水文站、雨量站、气象站(台)资料;实地调研及勘测整编、分析结果
水文	水位	日尺度	
	流量	日尺度	
	含沙量	日尺度	
	输沙率	日尺度	
水生物	底栖动物、鱼类、藻类、浮游植物等水生物种类和数量	年代尺度/季度尺度	实地调研及勘测整编、分析结果
水环境	电导率、pH 值、透明度、溶解氧、氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数、磷酸盐等	年代尺度/季度尺度	
水利工程	水利工程位置、长度、类型	年尺度	
	水利工程特征水位、库容	年尺度	水利部门相关水利工程建设资料
	水利工程功能	年尺度	
社会经济	“三产”用水量	年尺度	
	人口	年尺度	统计局相关资料
	GDP	年尺度	

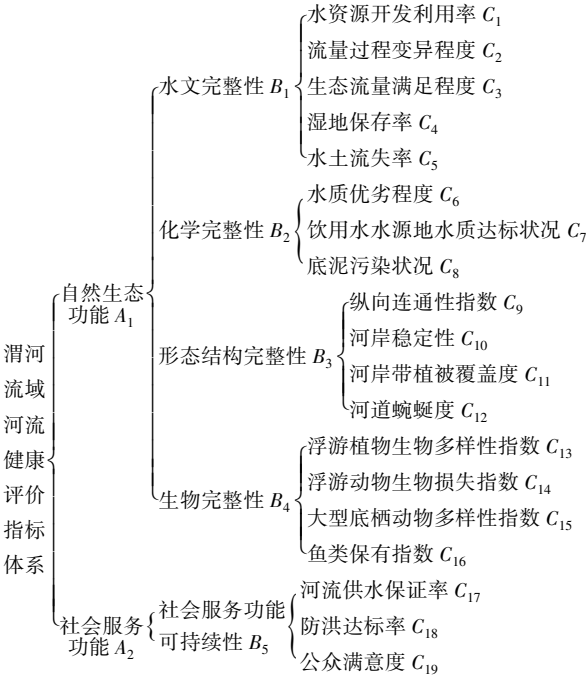


图 2 渭河流域河流健康评价指标体系

由表 3 可以看出,主观、客观赋权法的计算结果存在一定差异,其中 Critic 法计算时基于数据间差异,计算出的结果权重波动更大,如浮游动物生物损失指数权重为 0.115,远超其他指标,但这仅表示该指标在竞争意义上的激烈程度,与实际不符。为使权重选取得更加具有代表性,采用组合赋权法,根据改进层次分析法和 Critic 法的指标权重计算结果,计算出最终指标权重。

2.2.3 模糊物元可拓模型

河流健康状况评价是一个典型的模糊概念,

表 3 指标权重计算结果

指标	Critic 法权重	改进层次分析法权重	综合权重	指标属性
C_1	0.076	0.048	0.056	+
C_2	0.090	0.036	0.051	-
C_3	0.071	0.069	0.060	+
C_4	0.035	0.040	0.038	+
C_5	0.052	0.066	0.051	-
C_6	0.049	0.051	0.046	+
C_7	0.051	0.058	0.053	+
C_8	0.074	0.053	0.062	-
C_9	0.047	0.040	0.043	+
C_{10}	0.042	0.042	0.042	+
C_{11}	0.031	0.049	0.051	+
C_{12}	0.031	0.045	0.039	+
C_{13}	0.031	0.062	0.041	+
C_{14}	0.115	0.058	0.069	-
C_{15}	0.048	0.052	0.042	+
C_{16}	0.060	0.055	0.057	+
C_{17}	0.030	0.055	0.066	+
C_{18}	0.036	0.055	0.066	+
C_{19}	0.031	0.066	0.068	+

注:“+”表示极大型指标,即指标值越大越好;“-”表示极小型指标,即指标值越小越好。

其评价过程涉及多个目标,并且指标间相互影响。模糊物元可拓模型在解决非线性评价问题结果较好,是评估河流健康的常用方法之一^[11]。物元理论主要优势在于促进事物转化与解决不相容问题,采用物元理论进行河流健康状况评价的主要思想是用“事物、特征、量值”来描绘样本,评价步骤包括确定经典域、确定节域、确定待评价物元、计算各指标关于各等级的关联度等^[12-14]。

2.2.4 障碍因子识别诊断模型

运用障碍因子识别诊断模型^[15],可以识别出影响渭河流域河流健康的障碍因子,由此分析得出影响渭河流域河流健康状况的关键问题。模型公式如下:

$$X_{ij} = 1 - X'_{ij} \tag{1}$$

$$y_i = \frac{X_{ij}V_j}{\sum_{j=1}^n X_{ij}V_j} \times 100\% \tag{2}$$

$$Y_i = \sum y_i \tag{3}$$

式中: X_{ij} 为指标偏离度,表示各指标实际值与最优目标之间的差距; X'_{ij} 为对应指标的标准化值; Y_i 、 y_i 为障碍度,分别表示第*i*年分类指标和单项指标对河流健康状况的影响; V_j 为因子贡献度,表示单项因素对总目标的影响程度,即单因素对总目标的权重。

3 结果与分析

3.1 河流健康评价等级评定

将各指标进行标准化处理,得出各等级量值范围即经典域和节域。按照隶属度计算方法,确定评

价等级的基点值,并计算隶属度矩阵,得出指标基点值与阈值对应的隶属度。计算结果见表5和表6。

以良与中阈值对应的隶属度为例,将河流健康状况评价各单元系统优属度作为指标特征值,结合各单元系统的权重向量 $w=(0.255,0.161,0.175,0.209,0.200)$,计算河流健康状况评价综合指数。参照水资源安全评价状态的划分,结合研究区实际生态情况,将渭河流域河流健康评估等级划分为5个评价等级,其对应的综合指数为:很健康[0.8~1.0]、健康[0.75~0.8)、亚健康[0.55~0.75)、不健康[0.2~0.55)和病态[0~0.2)。根据单元系统的权重,计算得到良与中阈值对应的水文完整性、化学完整性、形态结构完整性、生物完整性、社会服务功能可持续性的优属度分别为0.804、0.659、0.666、0.730、0.780,由此得到综合指数为0.742。但为评价方便,阈值一般取0.05的整数倍,最终取阈值为0.75,其他阈值也可以依此方法得到。

3.2 河流健康状况评价结果

图3为渭河干流2017—2019年河流健康状况

表5 评价指标的经典域和节域

指标	节域					经典域
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N
C_1	(0.75,1]	(0.67,0.75]	(0.5,0.67]	(0.4,0.5]	(0,0.4]	(0,1]
C_2	(0.75,1]	(0.15,0.75]	(0.05,0.15]	(0.025,0.05]	(0,0.025]	(0,1]
C_3	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.1,0.4]	(0,0.1]	(0,1]
C_4	(0.8,1]	(0.7,0.8]	(0.5,0.7]	(0.25,0.5]	(0,0.25]	(0,1]
C_5	(0.6,1]	(0.4,0.6]	(0.25,0.4]	(0.15,0.25]	(0,0.15]	(0,1]
C_6	(0.9,1]	(0.75,0.9]	(0.5,0.75]	(0.25,0.5]	(0,0.25]	(0,1]
C_7	(0.95,1]	(0.8,0.95]	(0.7,0.8]	(0.6,0.7]	(0,0.6]	(0,1]
C_8	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.2,0.4]	(0,0.2]	(0,1]
C_9	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.2,0.4]	(0,0.2]	(0,1]
C_{10}	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.2,0.4]	(0,0.2]	(0,1]
C_{11}	(0.75,1]	(0.4,0.75]	(0.1,0.4]	(0.05,0.1]	(0,0.05]	(0,1]
C_{12}	(0.8,1]	(0.75,0.8]	(0.63,0.75]	(0.5,0.63]	(0,0.5]	(0,1]
C_{13}	(0.8,1]	(0.67,0.8]	(0.5,0.67]	(0.17,0.5]	(0,0.17]	(0,1]
C_{14}	(0.75,1]	(0.5,0.75]	(0.4,0.5]	(0.25,0.4]	(0,0.25]	(0,1]
C_{15}	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.3,0.4]	(0,0.3]	(0,1]
C_{16}	(0.85,1]	(0.75,0.85]	(0.6,0.75]	(0.25,0.6]	(0,0.25]	(0,1]
C_{17}	(0.95,1]	(0.85,0.95]	(0.6,0.85]	(0.5,0.6]	(0,0.5]	(0,1]
C_{18}	(0.95,1]	(0.9,0.95]	(0.8,0.9]	(0.5,0.8]	(0,0.5]	(0,1]
C_{19}	(0.9,1]	(0.8,0.9]	(0.7,0.8]	(0.6,0.7]	(0,0.6]	(0,1]

注: N_j 为评价对象*N*的第*j*个健康等级。

表6 评价指标基点值与隶属度

指标	左基点	右基点	隶属度1	隶属度2	隶属度3	隶属度4	指标	左基点	右基点	隶属度1	隶属度2	隶属度3	隶属度4
C_1	0.4	0.75	1	0.77	0.29	0	C_{11}	0.05	0.75	1	0.50	0.07	0
C_2	0.025	0.75	0	0.97	0.83	1	C_{12}	0.5	0.8	1	0.83	0.58	0
C_3	0.1	0.8	1	0.71	0.43	0	C_{13}	0.17	0.8	1	0.79	0.52	0
C_4	0.25	0.8	1	0.82	0.45	0	C_{14}	0.25	0.75	0	0.70	0.50	1
C_5	0.15	0.6	0	0.78	0.44	1	C_{15}	0.3	0.8	1	0.60	0.20	0
C_6	0.25	0.9	1	0.77	0.38	0	C_{16}	0.25	0.85	1	0.83	0.58	0
C_7	0.6	0.95	1	0.57	0.29	0	C_{17}	0.5	0.95	1	0.78	0.22	0
C_8	0.2	0.8	0	0.67	0.33	1	C_{18}	0.5	0.95	1	0.89	0.67	0
C_9	0.2	0.8	1	0.67	0.33	0	C_{19}	0.6	0.9	1	0.67	0.33	0
C_{10}	0.2	0.8	1	0.67	0.33	0							

评价结果。由图 3 可知,2017—2019 年渭河干流水文完整性综合指数平均值为 0.565;化学完整性综合指数平均值为 0.520,呈好转趋势;形态结构完整性综合指数平均值为 0.570;生物完整性综合指数平均值为 0.577;社会服务功能可持续性综合指数平均值为 0.653;健康状况总体处于亚健康状态。

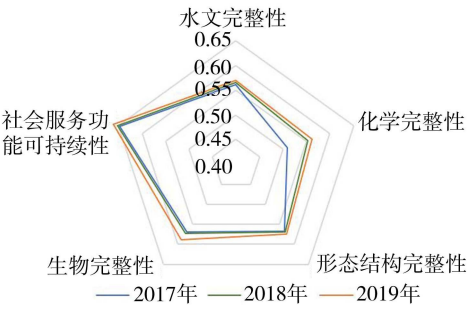


图 3 2017—2019 年渭河干流河流健康状况评价结果

从不同准则层类型看,社会服务子系统综合指数高于自然生态子系统,表明两者虽然健康等级相同,但渭河干流社会服务功能满足程度较高,接近健康水平;而自然生态功能满足程度较低,其中化学完整性综合指数最低(2017 年)。具体而言,自然生态子系统 2017—2019 年综合指数较低,均值为 0.563;社会服务子系统 2017—2019 年综合指数相对较高,均值为 0.653,比自然生态子系统高 17.4%,接近健康水平。

总体来看,2017—2019 年渭河流域河流健康状况评价等级处于亚健康状态,并且总体呈现小幅好转趋势,这得益于国家及地方有关部门在渭河开展了一系列生态治理工作,有助于渭河的生态恢复以及健康可持续发展。主要治理工作有:①建设引洮工程。引洮工程于 2014 年实现一期通水,2021 年底全线建成。这一大规模调水工程缓解了甘肃中部用水少、用水差的困扰,为甘肃中部地区多条水系进行补水,从而惠及河道沿岸的自然环境,促进生态系统的良性循环与优化恢复。②实施水保措施。截至 2016 年底^[16],流域内梯田、草地、林地、封禁治理面积均有所增加,流域内地面植被增加,有效减缓土壤面蚀,水土流失问题得到一定改善。③实施水环境综合治理。自 2017 年起,渭河沿线各县区生活污水处理厂全面建成,入河排污口严格审批,废污水入河量逐年减少,同时实施渭河源生态保护综合治理工程,以上措施起到了限制排污、改善河流水质的作用,使得流域水环境恶化的趋势得到一定程度的遏制。

3.3 障碍因子诊断结果

根据式(1)~(3),计算出渭河流域各指标的障碍度,结果如图 4 所示。由渭河流域各指标障碍度

可知,影响渭河流域健康发展的主要驱动因素为河流水文、水质及生物因素。

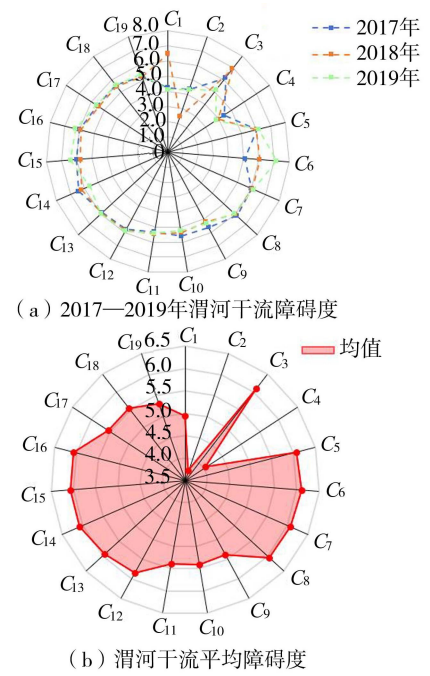


图 4 渭河干流指标障碍度

3.3.1 水文因素

生态流量满足程度、水土流失率是水文完整性指标中影响渭河流域河流健康的主要障碍因子。渭河流域生态流量满足程度值低,且年径流量在显著减少。渭河流域年径流量近年来总体呈显著下降趋势,秦安站、北道站、武山站以及渭源站分别以 0.065 亿、0.177 亿、0.113 亿、0.0038 亿 m³/a 的倾向率减少,其中北道站年径流量下降幅度最大。

渭河流域水土流失问题严重,水土流失率高。这主要是由于甘肃省渭河流域多为森林和草原^[17],存在长期乱砍滥伐现象,加之农业生产方式单一、广种薄收,使得渭河成为一条多泥沙河流。此外,秦祁河、咸河、散渡河、葫芦河、牛头河等支流汇入,洪枯水流量相差悬殊都增加了泥沙来源。

3.3.2 水质和水生生物因素

水质优劣程度、饮用水水源地水质达标状况是化学完整性指标中影响渭河流域河流健康的主要障碍因子。2019 年渭河流域废污水入河总量 5513.7 万 t,其中渭河干流废污水入河量 5326.6 万 t。农药、化肥等在农业生产中大量使用,并随径流入入河道,且城区河段人类活动频繁,向河道内排入大量生活污水与工业废水,导致水体污染物超标。

浮游动物生物损失指数、大型底栖动物多样性指数、鱼类保有指数是生物完整性指标中影响渭河流域河流健康的主要障碍因子。渭河流域水量减

少、水质变差、栖息地遭到人类活动破坏等原因在不同程度上导致了水生物繁殖环境遭到破坏,生物多样性降低。例如渭河干流鱼类数量与1980年以前水平相比减少了70%,但浮游植物的障碍度低于浮游动物、底栖动物及鱼类,这主要是由于大量氮、磷随农药等排入水中,导致浮游植物丰度增加,生物多样性提高。

4 结 语

从自然生态和社会服务两方面出发,构建了基于模糊物元可拓模型的渭河流域甘肃段河流健康评价模型。结果表明,2017—2019年,5个准则层中,社会服务功能可持续性在整个指标中表现最好,综合指数最高,化学完整性指数最小,但呈现好转趋势,由不健康转变为亚健康,此流域中长期治理规划应重点关注河流水质改善。根据指标障碍度计算结果,发现目前渭河干流河流健康突出问题为水土流失严重、不合理的排污导致水质污染、水生物种群快速减少等。

结合指标评价结果,以保障河流健康为目的,提出渭河流域河流具体生态保护目标为:保持水体一定的稀释自净能力;保障河流输沙能力;保护水生物生存繁殖。对应生态保护目标,从生态需水角度考虑,渭河流域生态保障重点在于确保水体具有一定稀释自净能力,保障稀释自净所需水量;使河流冲淤基本持平,预留用于输沙的水量;保留水域空间,提供水生物生存所需水量。

参考文献:

[1] 左其享. 人水关系学的基本原理及理论体系架构[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1) : 1-6. (ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1) : 1-6. (in Chinese))

[2] 江善虎,刘亚婷,任立良,等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J]. 水资源保护, 2022, 38 (6) : 9-14. (JIANG Shanhu, LIU Yating, REN Li liang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (6) : 9-14. (in Chinese))

[3] 王鹏全,吴元梅,张丽娟,等. 湟水干流西宁段河流健康评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (1) : 9-15. (WANG Pengquan, WU Yuanmei, ZHANG Lijuan, et al. River health assessment model for Xining section in main stream of Huangshui River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (1) : 9-15. (in Chinese))

[4] 王海荣. 渭河干流甘肃段河流形态健康评价与研究 [J]. 地下水, 2018, 40 (6) : 192-195. (WANG Hairong. Evaluation and study on river shape health in Gansu section of the main stream of Weihe River [J]. Ground Water, 2018, 40 (6) : 192-195. (in Chinese))

[5] 徐宗学,武玮,殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (1) : 23-30. (XU Zongxue, WU Wei, YIN Xuwang. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (1) : 23-30. (in Chinese))

[6] 石长伟. 维护渭河健康控制指标体系的探索[J]. 人民黄河, 2011, 33 (1) : 12-14. (SHI Changwei. Exploration on control index system of keeping the Weihe River healthy [J]. Yellow River, 2011, 33 (1) : 12-14. (in Chinese))

[7] LIU Changming, LIU Xiaoyan. Healthy river and its indication, criteria and standards [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19 (1) : 3-11.

[8] 山成菊,董增川,樊孔明,等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40 (6) : 622-628. (SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40 (6) : 622-628. (in Chinese))

[9] 李治军,王涛. 基于改进组合赋权法的区域水资源承载力评价[J]. 中国农村水利水电, 2022 (10) : 112-118. (LI Zhijun, WANG Tao. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on improved combination weighting method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022 (10) : 112-118. (in Chinese))

[10] 魏伟,石培基,周俊菊,等. 基于GIS和组合赋权法的石羊河流域生态环境质量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (1) : 175-180. (WEI Wei, SHI Peiji, ZHOU Junju, et al. Comprehensive assessment of eco-environmental quality based on GIS and combination weighting method in Shiyang river basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29 (1) : 175-180. (in Chinese))

[11] 邓梁堃,张翔,高仕春,等. 基于模糊逻辑的河流健康评价与敏感因子识别[J]. 中国农村水利水电, 2022 (4) : 100-105. (DENG Liangkun, ZHANG Xiang, GAO Shichun, et al. River health assessment and sensitive factor identification based on fuzzy logic [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022 (4) : 100-105. (in Chinese))

(下转第30页)

- [15] 潘存鸿,张舒羽,史英标,等. 涌潮对钱塘江河口盐水水入侵影响研究[J]. 水利学报,2014,45(11):1301-1309. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Study on saltwater intrusion in Qiantang Estuary affected by tidal bore[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(11):1301-1309. (in Chinese))
- [16] 张芝永,肖厅厅,戚蓝,等. 涌潮水流作用下桩柱表面压强及受力分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(6):573-581. (ZHANG Zhiyong, XIAO Tingting, QI Lan, et al. Analysis of the surface pressure and force of piles under tidal bore[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2020,53(6):573-581. (in Chinese))
- [17] 张舒羽,潘存鸿,程文龙. 钱塘江涌潮对地形变化的响应研究[J]. 海洋工程,2020,38(1):130-139. (ZHANG Shuyu, PAN Cunhong, CHENG Wenlong. Response of tidal bore in Qiantang River to topographical changes[J]. The Ocean Engineering,2020,38(1):130-139. (in Chinese))
- [18] 张舒羽,潘存鸿. 径流和风对涌潮影响的数值模拟[J]. 海洋工程,2013,31(3):54-62. (ZHANG Shuyu, PAN Cunhong. Effect of runoff and wind on tidal bore using numerical model[J]. The Ocean Engineering,2013,31(3):54-62. (in Chinese))
- [19] 潘存鸿,潘冬子,郑君,等. 台风对钱塘江涌潮影响研究[J]. 海洋学研究,2020,38(4):40-47. (PAN Cunhong, PAN Dongzi, ZHENG Jun, et al. Study on influence of typhoon on tidal bore in Qiantang River[J]. Journal of Marine Sciences,2020,38(4):40-47. (in Chinese))
- [20] 周黔生. 钱塘江(杭州段)涌潮潮时规律分析与预报[J]. 海洋预报,1993,10(1):53-58. (ZHOU Qiansheng. Analysis and forecast of tidal bore reaching time on Qiantang River (Hangzhou section)[J]. Marine Forecast,1993,10(1):53-58. (in Chinese))
- [21] 曾剑,熊绍隆,潘存鸿,等. 运用神经网络理论研究钱塘江涌潮的影响因素[J]. 长江科学院院报,2006,23(5):14-16. (ZENG Jian, XIONG Shaolong, PAN Cunhong, et al. Analysis of influence factors for Qiantang bore based on neural network theory[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2006,23(5):14-16. (in Chinese))
- [22] 潘存鸿,郑君,曾剑,等. 杭州湾年最大潮差分析[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2021,36(2):201-209. (PAN Cunhong, ZHENG Jun, ZENG Jian, et al. Analysis of annual maximum tidal range in Hangzhou Bay[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2021,36(2):201-209. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-30 编辑:俞云利)

(上接第14页)

- [12] 王洪德,曹英浩. 基于改进变权物元可拓模型的围岩稳定性评价[J]. 中国安全科学学报,2013,23(8):23-29. (WANG Hongde, CAO Yinghao. Evaluation of surrounding rock stability based on improved matter-element extension model with variable weight[J]. China Safety Science Journal,2013,23(8):23-29. (in Chinese))
- [13] 张晶晶,马传明,匡恒,等. 青岛市土壤重金属污染的物元可拓评价[J]. 中国环境科学,2017,37(2):661-668. (ZHANG Jingjing, MA Chuanming, KUANG Heng, et al. Assessment of heavy metals pollution in soil of Qingdao based on matter-element extension model[J]. China Environmental Science,2017,37(2):661-668. (in Chinese))
- [14] 赵杰,罗志军,赵弯弯,等. 基于改进物元可拓模型的鄱阳湖区耕地土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报,2019,38(3):521-533. (ZHAO Jie, LUO Zhijun, ZHAO Wanwan, et al. Assessment of heavy metal pollution in arable soils in the Poyang Lake area based on the improved matter-element extension method[J]. Journal of Agro-Environment Science,2019,38(3):521-533. (in Chinese))
- [15] 万炳彤,鲍学英,赵建昌,等. 区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用[J]. 环境科学,2021,42(4):2089-2100. (WAN Bingtong, BAO Xueying, ZHAO Jianchang, et al. Establishment and application of performance evaluation and obstacle diagnosis model for regional water ecological civilization construction[J]. Environmental Science,2021,42(4):2089-2100. (in Chinese))
- [16] 黄晨璐,陈军武,黄维东,等. 渭河上游水利水保措施的减水减沙效应分析[J]. 冰川冻土,2020,42(3):965-973. HUANG Chenlu, CHEN Junwu, HUANG Weidong, et al. Analysis of water and sediment reducing effects of water conservation measures in the upstream of the Weihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2020,42(3):965-973. (in Chinese))
- [17] 左旭刚,杨涛,王立社,等. 基于综合区划的渭河流域自然资源动态变化特征分析[J/OL]. 地质通报:1-13. (2022-09-29) [2022-10-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20220928.1519.006.html>. (ZUO Xugang, YANG Tao, WANG Lishe, et al. Analysis on the characteristics of natural resources dynamic changes in Weihe River Basin based on comprehensive regionalization[J/OL]. Geological Bulletin of China:1-13. (2022-09-29) [2022-10-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20220928.1519.006.html>. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-26 编辑:俞云利)