



· 黄河流域人地系统协调与可持续发展 ·

基于 AHP-模糊综合评价法的渭河河流健康评价

夏小强,张 乐,要丽娟,李 珂,李 琦

(西北大学 城市与环境学院/陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127)

摘要 河流健康评估为河流可持续发展提供了依据,渭河作为黄河的一级支流,其生态健康对于黄河高质量发展具有重要意义。为全面评价渭河流域的健康状况,选取物理栖息地状况、水质状况及水生生物状况3个准则、11个指标,建立渭河生态健康评价标准,采用层次分析法(AHP)确定权重,结合最大隶属度原则对渭河流域进行多级模糊评价。结果表明,25个点位中有8个处于健康水平,13个处于亚健康水平,4个处于不健康水平,渭河综合健康评价结果为亚健康。渭河源头、宝鸡至西安段河流生态健康状况较好,天水至宝鸡段及下游河段生态健康较差,不健康的点主要集中在下游,表现出显著的空间差异。物理栖息地、水质及水生生物的评价结果分别为亚健康、健康、亚健康,物理栖息地与水生生物状况是影响河流生态系统健康的关键,主要受人为活动以及自然环境的影响。针对特定河段需要采取相应措施恢复生态健康。

关键词 物理栖息地;水质;水生生物;健康评价;渭河

中图分类号:X822;X826 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbr.2024-03-007

Research on the health of Weihe River based on AHP fuzzy comprehensive evaluation

XIA Xiaoqiang, ZHANG Le, YAO Lijuan, LI Ke, LI Qi

(Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity,
College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract River health assessment provides a foundation for the sustainable development of rivers. As a first-class tributary of the Yellow River, the ecological health of Weihe River is of great significance for the high-quality development of the Yellow River. In order to comprehensively evaluate the health status of Weihe River Basin, the ecological health evaluation criteria of Weihe River Basin were established by selecting 3 criteria and 11 indicators, including physical habitat status, water quality status and aquatic organisms status. The weights were determined by AHP, and the Weihe River Basin was evaluated by multi-level fuzzy evaluation combined with the principle of maximum membership. The results show that 8 of the 25 points are in a healthy level; 13 were at sub-healthy level; 4 of them are in unhealthy level, and the comprehensive health evaluation result of Weihe River is sub-healthy. The ecological health status of the Weihe River headwaters, Baoji section to Xi'an section is good, while the ecological health of Tianshui—Baoji section and downstream section is poor, and the unhealthy points are mainly concentrated in the downstream, showing significant spatial differ-

收稿日期:2023-11-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42230513);国家自然科学基金面上项目(42277414)。

第一作者:夏小强,男,从事环境生态评价研究,1121789270@qq.com。

通信作者:李琦,女,博士,教授,从事水资源与水环境安全研究,qili726@nwu.edu.cn。

ences. The evaluation results of physical habitat, water quality and aquatic organisms are sub-healthy, healthy and sub-healthy, respectively. Physical habitat and aquatic organisms are the key factors affecting the health of river ecosystem, which are mainly affected by human activities and natural environment. It needs to take relevant measures to restore the ecological health of Weihe River.

Keywords physical habitat; water quality; aquatic organisms; health evaluation; Weihe River

河流是重要的生态走廊之一,在生态系统和人类社会发挥着关键作用^[1-2]。然而由于河流形态、水生生境、河流连续体、水质和水文特征的变化,河流生态系统面临着前所未有的威胁和挑战,河流生态系统退化严重,河流健康评估成为近年来的研究热点^[3-4]。河流健康评估在一些国家已经广泛开展^[5-8],在国内,随着河流污染问题愈发严重,河流健康及生态保护越来越受到管理部门和社会的重视,部分学者对河流健康指标、评价方法等进行了深入研究^[9-12],以期使退化河流的生态恢复到自然状态,让河流具有可持续的生态价值及经济价值。黄河是我国重要的生态屏障和核心经济地带,在经济发展和生态安全方面具有十分重要的地位^[13],推动黄河流域生态保护和高质量发展是国家的重大战略^[14]。渭河作为黄河的一级支流,是黄河流域生态保护和高质量发展中的重要一环,且位于国家经济战略布局“关中—天水”经济区的核心地带,在西部大开发战略中具有重要的地位并起桥梁作用^[15],渭河流域生态健康的重要性不言而喻。关于渭河流域生态健康评价已有学者从不同角度进行了研究^[16-19],然而,河流生态系统是动态变化的,耦合不同健康指标构建评价指标体系提出符合黄河流域渭河的评价方法仍然有待深入探索^[20]。

本研究以渭河干流为研究对象,并首次在渭河河流健康评价中采用了环境 DNA 技术,系统构建水生生态系统健康度相关指标。在参考水利部《河湖健康评价指南(试行)》基础上,研究渭河河流物理形态结构及生境、水质、水生生物的发展变化,选取指标建立渭河生态评价指标体系和生态健康评价模型,对渭河的生态进行全面评价,为渭河的流域保护治理提供参考。

1 研究区概况、数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

渭河,古称渭水,是黄河的最大支流。发源于甘肃省定西市渭源县鸟鼠山,横跨甘肃东部和陕

西中部,自西向东主要流经甘肃省渭源县、武山县、天水市,陕西省关中平原的宝鸡市、咸阳市、西安市、渭南市等,至渭南市潼关县汇入黄河,全长 818 km,流域总面积 134 766 km²(见图 1)。流域处于半干旱区域,地理特征比较复杂,北靠黄土丘陵和黄土高原,南临秦岭山脉,从全流域来看,其地形地貌特点明显,总体呈西高东低。渭河横穿整个关中平原,自上而下有众多支流汇入干流,流域内城镇星罗密布,人口众多,为流域内提供了巨大的社会价值与生态服务,惠及人群甚广。

1.2 基础数据来源

为全面评价渭河的生态健康状况,在渭河干流设置了 25 个采样点位(见图 1)。采集 2022 年 9 月和 2023 年 6 月 2 期数据,包括物理栖息地、水质及水生生物 3 方面。采样结果显示,渭河干流 pH 为 8~9,重金属、SO₄²⁻、PO₄³⁻、NO₃⁻等指标均低于《地表水环境质量标准》Ⅱ类水标准,没有明显的空间变化,因此,确定水质指标为 NH₃-N、TP、DO 以及 COD。数据来源见表 1。

1.3 评价指标体系的建立

基于渭河流域水生态环境条件、半干旱地区河流物理栖息地质量评价标准,遵照科学性、层次性、代表性原则,依据参考文献[21-23],最终确定构建目标层、准则层和指标层 3 个层次的评价体系来进行综合评价。第 1 层为目标层,全面综合评价渭河河流生态健康状况;第 2 层为准则层,从物理栖息地状况、水质状况、水生生物状况 3 个不同评价角度反映河流生态健康水平;第 3 层为指标层,由堤岸稳定性、河岸植被覆盖度、土地利用类型、河流浑浊程度、溶解氧浓度、化学需氧量、水生生物等 11 个指标组成。其中藻类、底栖生物和鱼类采用 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 物种丰富指数进行评价,计算方法为

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \tag{1}$$

式中: H 表示 Shannon-Wiener 多样性指数; S 表示总物种数; P_i 表示第 i 个物种占总数的比例。

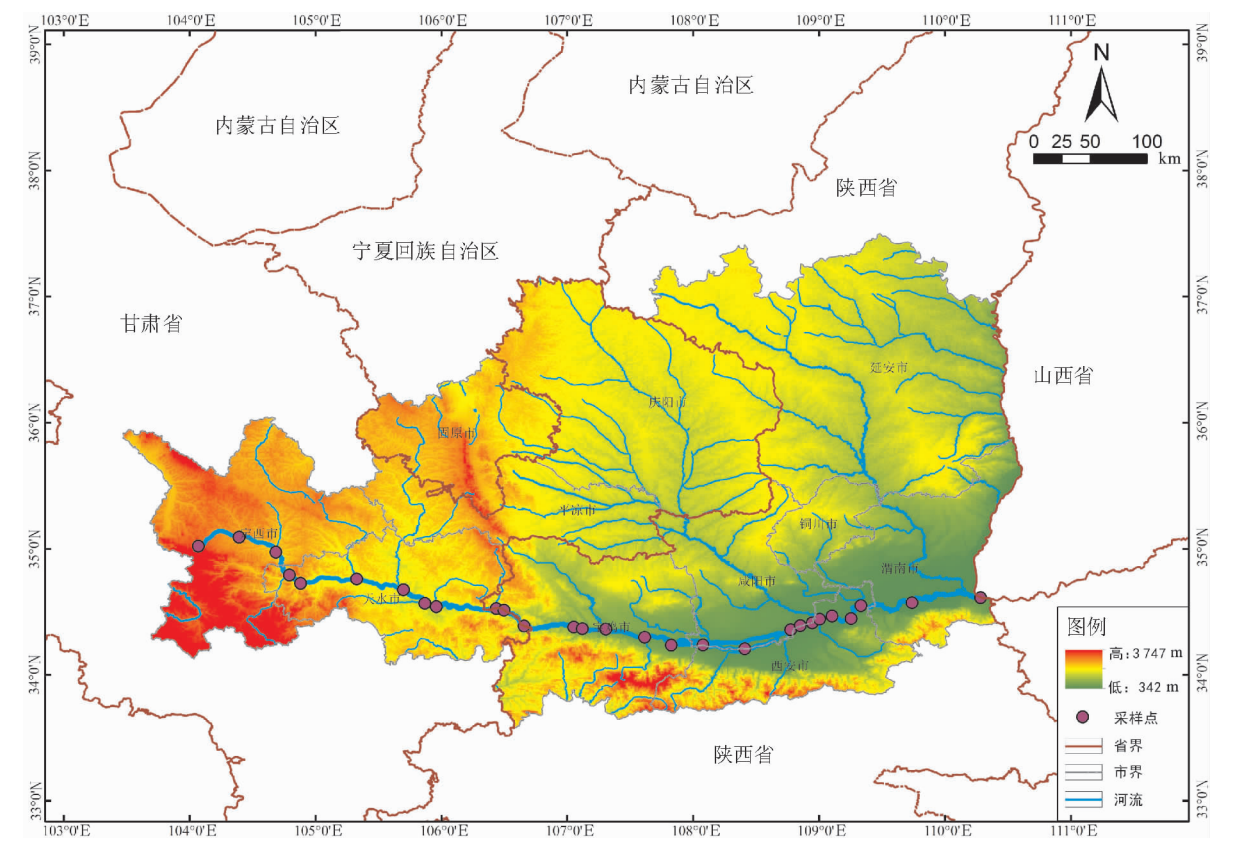


图 1 渭河概况及采样点位分布图

Fig. 1 General situation of Wei River and distribution map of sampling site

表 1 渭河河流指标数据来源及说明

Tab. 1 Source and explanation of Wei River index data

准则层	指标层	基础数据来源	调查方法
物理栖息地指标	堤岸稳定性	现场调查	每个采样点左右各选择 5 个样地,根据其河堤稳定状况定性评估,现场打分
	河岸带植被覆盖程度	现场调查	每个采样点左右各选择 5 个样地,根据其植被覆盖程度定性评估,现场打分
	土地利用类型	现场调查	依据河流采样点附近土地利用类型(林地,草地,山地,农田,建设用地,裸土)定性评估,现场打分
	河水浑浊程度	现场调查	依据河水浑浊程度(清澈,较清澈,较浑浊,浑浊)定性评估,现场打分
水质指标	NH ₃ -N	采样分析	分析指标及评价依据地表水环境质量标准(GB 3838—2002)基本项目要求
	TP	采样分析	
	COD	采样分析	
	DO	现场监测	采用多功能水质检测仪进行现场监测,现场记录
	底栖生物	采样分析	通过检测水样中的环境 DNA,鉴定出每个采样点的生物种类及数量
水生生物	鱼类	采样分析	
	藻类	采样分析	

$$D=\frac{(S-1)}{\ln N}$$

(2)

式中: D 表示 Margalef 物种丰富指数; S 表示总物种数; N 为所有物种数的个体数之和。

根据《地表水环境质量标准》、Shannon-Wie-

ner 多样性指数和 Margalef 物种丰富指数,构建渭河生态健康评价体系,评判标准将渭河水生态健康评级分为Ⅰ类(非常健康)、Ⅱ类(健康)、Ⅲ类(亚健康)、Ⅳ类(不健康)、Ⅴ类(劣态)5个等级(见表2)。

表 2 渭河生态健康评价指标体系判断标准

Tab.2 Evaluation criteria of Wei River ecological health evaluation index system

目标层	准则层	指标层	评判等级				
			Ⅰ(非常健康)	Ⅱ(健康)	Ⅲ(亚健康)	Ⅳ(不健康)	Ⅴ(劣态)
河流健康	物理栖息地	堤岸稳定性	80~100	60~80	40~60	20~40	≤20
		河岸带植被覆盖程度	80~100	60~80	40~60	20~40	≤20
		土地利用类型	80~100	60~80	40~60	20~40	≤20
		河水浑浊程度	80~100	60~80	40~60	20~40	≤20
	水质	TP	≤0.02	0.02~0.1	0.1~0.2	0.2~0.4	≥0.4
		NH ₃ -N	≤0.15	0.15~0.5	0.5~1.0	1.0~2	≥2
		COD	≤15	15~20	20~30	30~40	≥40
		DO	≥7.5	6~7.5	5~6	2~5	≤2
	水生生物	底栖动物多样性指数	>3.5	3.0~3.5	2.0~3.0	1.0~2.0	≤1.0
		鱼类丰富度指数	>3.5	3.0~3.5	2.0~3.0	1.0~2.0	≤1.0
		藻类多样性指数	>3.5	3.0~3.5	2.0~3.0	1.0~2.0	≤1.0

1.4 权重的确定

指标权重用于描述各个评价指标对河流健康评价的隶属性强弱,因此,指标权重的分配很大程度上影响着评价结果的客观性与准确性^[24]。本研究采用定性与定量相结合的分析方法——层次

分析法(AHP),基于渭河采样数据以及现场调查数据,通过构造判断矩阵,进行权重计算及一致性检验,得到准则层相对于目标层的权重和指标层相对于准则层的权重,结果如表3所示。

表 3 不同层次权重分配结果

Tab.3 Weight distribution results of different layers

准则层		指标层	
因素	权重	指标	权重
物理栖息地	0.242 4	堤岸稳定性	0.444
		河岸带植被覆盖程度	0.222
		土地利用类型	0.222
		河水浑浊程度	0.112
水质	0.312 4	TP	0.337
		NH ₃ -N	0.337
		COD	0.184
		DO	0.142
水生生物	0.445 2	底栖动物多样性指数	0.333
		鱼类丰富度指数	0.333
		藻类多样性指数	0.333

1.5 多级模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法^[25]。该方法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价^[26]。本研究中渭河健康评价指标体系共分为3层,因此可进行2级模糊综合评价,即指标层对准则层和准则层对目标层的评价。

1.5.1 建立因素集

$$A = \{A_1, A_2, A_3, \cdots, A_n\}$$

式中:A 为一级指标因素集。

对每个一级指标按属性划分建立二级指标因素集,表示第*i*层第*j*个指标,

$$A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, \cdots, A_{ij}\}$$

1.5.2 确定指标权重集

用层次分析法(AHP)确定指标权重,得到指标层的权重集 $B = (B_1, B_2, B_3, \cdots, B_n)$ 和准则层权重集 $C = (C_1, C_2, C_3, \cdots, C_n)$

1.5.3 模糊综合评价

根据指标特征类型,建立指标对应的隶属函数与正向(数值越大效果越好)指标,采用升半梯形隶属函数,进而得到隶属度矩阵 D_i ,再将指标层的权重集 B 和隶属度矩阵 D_i 进行线性变换,得到一级评价集 M_i 。最后把每个一级评价集 M_i 合

并得到一级评价总集 M ,再把准则层的权重集 C 和一级评价总集 M 进行矩阵乘法运算,得到最终的模糊综合评价集 S ,

$$S = M \times C$$

2 结果与讨论

2.1 渭河物理栖息地质量评价

实地调查渭河干流25个采样点的物理栖息地现状,选取4项指标值(堤岸稳定性、河岸带植被覆盖程度、土地利用类型、河流浑浊程度)来反映物理栖息地状况。渭河上游流经黄土高原,以耕地和山地为主,其中夹杂着荒地裸土,生态环境脆弱,植被覆盖率低,河堤稳定性差,河水中泥沙含量高,河水浑浊;渭河中游林地和建设用地的比例上升,植被覆盖率以及河堤稳定性升高,水利工程及城市河道设施促使泥沙沉降,河水逐渐清澈;而渭河下游则以耕地为主,人类活动干扰强,植被覆盖率及河堤稳定性较低,河水浊度再次升高。

渭河物理栖息地生态健康评价如表4所示,25个点位中,有7个点处于Ⅱ类水平(健康),16个点处于Ⅲ类水平(亚健康),2个点处于Ⅳ类水平(不健康),Ⅲ类约占70%。从物理栖息地角度看,渭河总体评价为亚健康。

表4 渭河各采样点物理栖息地质量评价

Tab.4 Physical habitat quality evaluation at each sampling point of Wei River

渭河采样 点位	评价结果					所属级别
	I	II	III	IV	V	
	(非常健康)	(健康)	(亚健康)	(不健康)	(劣态)	
W1	0.220	0.450	0.330	0.000	0.000	II
W2	0.000	0.640	0.300	0.060	0.000	II
W3	0.000	0.110	0.720	0.170	0.000	III
W4	0.000	0.320	0.300	0.380	0.000	IV
W5	0.000	0.170	0.330	0.500	0.000	IV
W6	0.000	0.320	0.500	0.180	0.000	III
W7	0.000	0.278	0.500	0.222	0.000	III
W8	0.050	0.500	0.390	0.060	0.000	II
W9	0.112	0.333	0.444	0.111	0.000	III
W10	0.000	0.278	0.500	0.222	0.000	III
W11	0.112	0.222	0.444	0.222	0.000	III
W12	0.195	0.472	0.333	0.000	0.000	II
W13	0.112	0.222	0.444	0.222	0.000	III

续表 4

渭河采样 点位	评价结果					所属级别
	I (非常健康)	II (健康)	III (亚健康)	IV (不健康)	V (劣态)	
W14	0.220	0.224	0.334	0.222	0.000	III
W15	0.389	0.500	0.111	0.000	0.000	III
W16	0.112	0.222	0.666	0.000	0.000	III
W17	0.112	0.443	0.445	0.000	0.000	III
W18	0.360	0.640	0.000	0.000	0.000	II
W19	0.084	0.472	0.444	0.000	0.000	II
W20	0.110	0.444	0.446	0.000	0.000	III
W21	0.084	0.472	0.444	0.000	0.000	II
W22	0.112	0.222	0.222	0.444	0.000	IV
W23	0.112	0.222	0.214	0.452	0.000	IV
W24	0.110	0.444	0.446	0.000	0.000	III
W25	0.000	0.172	0.528	0.300	0.000	III

2.2 渭河水质质量评价

水质是河流健康的重要指标,植物和动物的生长以及人类的生产和生活都离不开河流,水质与整个流域内生物和人类的生存环境直接相关^[27]。渭河干流 4 个水质指标含量如图 2 所示,DO 在中游的含量高于上游和下游,原因在于中游(宝鸡至西安段)藻类生长情况较好,使得水中的溶解氧含量升高。从上游到下游,COD、TP、NH₃-N 含量总体呈上升趋势(W13 点位 COD 含量异常,是因为样点处有黑臭污水汇入河流)。

渭河过宝鸡峡进入关中平原后,中游流经人口密集的陕西省西安市,而下游则以耕地为主,因此,生活污水和农田污染是造成渭河水质下降的主要原因^[28]。

由表 5 可以看出,整个渭河河段的水质从上游到下游呈递减趋势,25 个采样点中有 7 个处于 I 类(非常健康),13 个样点处于 II 类(健康),5 个点处于 III 类(亚健康),II 类水平以上的点占 80%。从水质方面来看,渭河总体处于健康状态。

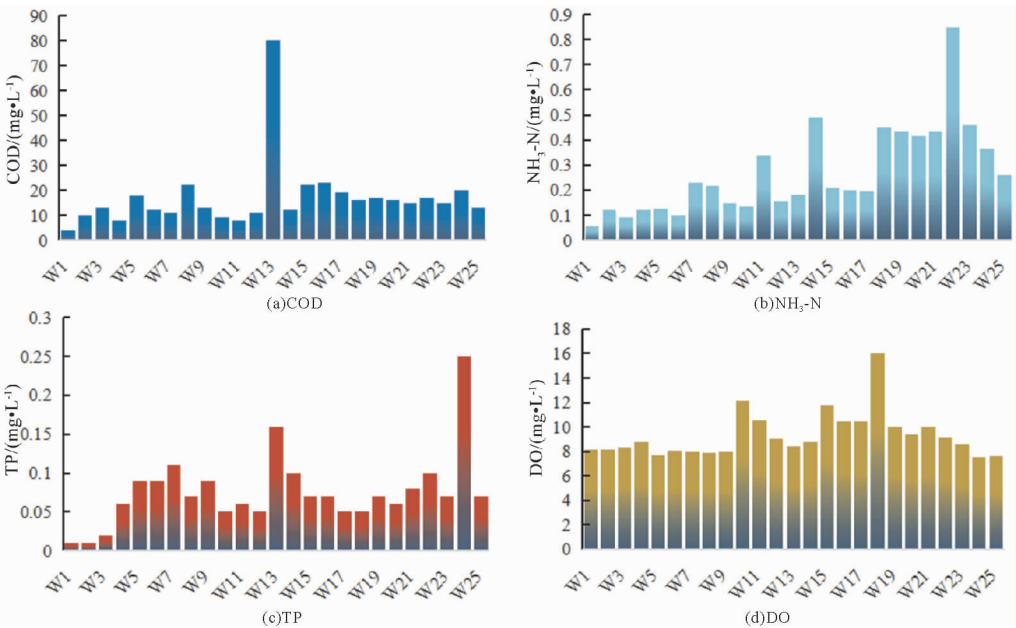


图2 水质指标含量及变化趋势

Fig.2 Content and change trend of four water quality indexes

表5 渭河各采样点水质质量评价

Tab.5 Water quality assessment at each sampling point of Wei River

渭河采样 点位	评价结果					所属级别
	I (非常健康)	II (健康)	III (亚健康)	IV (不健康)	V (劣态)	
W1	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	I
W2	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	I
W3	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	I
W4	0.663	0.337	0.000	0.000	0.000	I
W5	0.479	0.521	0.000	0.000	0.000	II
W6	0.663	0.337	0.000	0.000	0.000	I
W7	0.326	0.331	0.343	0.000	0.000	III
W8	0.142	0.674	0.184	0.000	0.000	II
W9	0.663	0.337	0.000	0.000	0.000	I
W10	0.663	0.337	0.000	0.000	0.000	I
W11	0.326	0.674	0.000	0.000	0.000	II
W12	0.326	0.674	0.000	0.000	0.000	II
W13	0.142	0.238	0.436	0.000	0.184	III
W14	0.326	0.674	0.000	0.000	0.000	II
W15	0.142	0.674	0.184	0.000	0.000	II
W16	0.142	0.674	0.184	0.000	0.000	II
W17	0.142	0.858	0.000	0.000	0.000	II
W18	0.142	0.858	0.000	0.000	0.000	II
W19	0.142	0.521	0.337	0.000	0.000	II
W20	0.142	0.858	0.000	0.000	0.000	II
W21	0.142	0.184	0.674	0.000	0.000	III
W22	0.142	0.184	0.674	0.000	0.000	III
W23	0.142	0.674	0.184	0.000	0.000	II
W24	0.142	0.000	0.521	0.337	0.000	III
W25	0.142	0.858	0.000	0.000	0.000	II

2.3 渭河水生生物多样性评价

不同生物类群在河流生态系统中具有特殊的位置与生态功能,一定程度上能够指示河流生态系统的变化。目前用于河流生物监测与评价的生物类群包括细菌、浮游动物、着生藻类、大型底栖动物、高等水生植物、鱼类等,而其中底栖生物、鱼类及藻类应用最为广泛,最能反映水体生态健康状况^[29]。本研究选取底栖生物、鱼类、藻类来反映渭河的生态健康。根据调查结果,渭河干流共鉴定出鱼类6目11科35属,其中鲤鱼科类最多,共计18属21种;藻类6门51属262种,其中硅藻门物种数最多,共计26属218种;底栖生物7纲17目56科。相较于传统鉴定方法,如徐宗学等采用网捕法^[30],鉴定出渭河共有鱼类5目10科33属,底栖生物7纲16目56科,藻类5门46属248种。吴锦涛共鉴定出鱼类4目9科38

种^[31],底栖生物7纲17目55科,藻类6门57种。而本研究采用环境DNA技术,能够更全面地反映了渭河的水生生物种类(见图3)。

如图3所示,3类水生生物指数都呈先下降,再上升,后下降的变化趋势。这是由于渭河上游源头(W1、W2)水质好,泥沙含量低,河床底质复杂,适合生物生长;天水至宝鸡段(W5—W9)地势落差大,水流速度较快,且河水浑浊,透明度低,不利于生物的生长繁殖,尤其对藻类的影响较大;而进入关中平原后,宝鸡至西安段(W10—W18)由于南岸支流的相继汇入,河水平缓,含沙量相对较低,生物种类及数量增多,水生生物多样性及完整度较好;西安市及下游段(W19—W25)水质变差,TP以及NH₃-N的含量升高,河水浑浊,不利于生物的生存。

结合鱼类丰富度指数、藻类多样性指数以及

底栖生物多样性指数,综合评价渭河水生生物状况,结果如表 6 所示。25 个采样点中,2 个点位处于Ⅱ类(健康),20 个点位处于Ⅲ类(亚健康),3 个点位处于Ⅳ类(不健康),Ⅲ类占总点位的 80%。从水生生物角度来看,渭河总体处于亚健康状态。

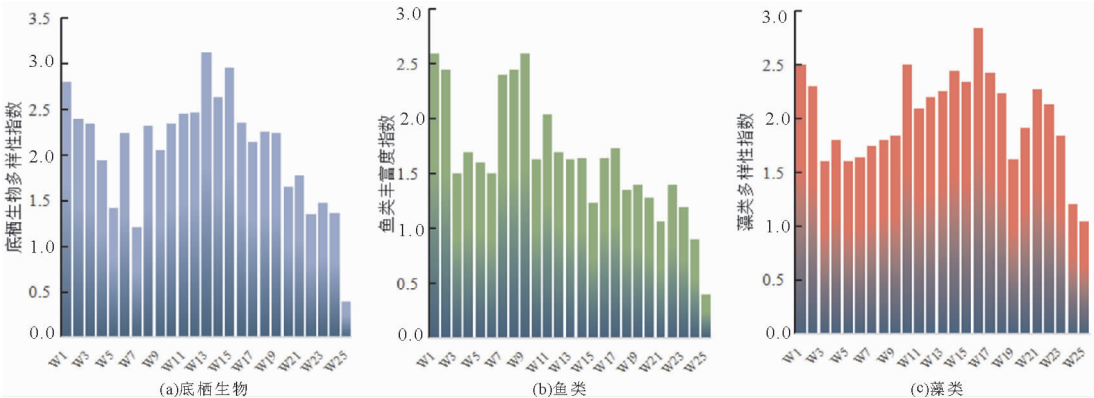


图 3 水生生物指标变化趋势

Fig. 3 Variation trend of aquatic biological indicators

表 6 渭河各采样点水生生物多样性评价

Tab. 6 Aquatic biodiversity assessment at each sampling point of Wei River

渭河采样 点位	评价结果					所属级别
	I (非常健康)	II (健康)	III (亚健康)	IV (不健康)	V (劣态)	
W1	0.000	0.633	0.367	0.000	0.000	II
W2	0.000	0.383	0.617	0.000	0.000	II
W3	0.000	0.110	0.590	0.300	0.000	III
W4	0.000	0.000	0.810	0.190	0.000	III
W5	0.000	0.000	0.540	0.460	0.000	III
W6	0.000	0.080	0.630	0.290	0.000	III
W7	0.000	0.130	0.610	0.260	0.000	III
W8	0.000	0.256	0.674	0.070	0.000	III
W9	0.000	0.220	0.690	0.090	0.000	III
W10	0.000	0.280	0.600	0.120	0.000	III
W11	0.000	0.200	0.800	0.000	0.000	III
W12	0.000	0.220	0.680	0.100	0.000	III
W13	0.080	0.340	0.450	0.130	0.000	III
W14	0.000	0.300	0.580	0.120	0.000	III
W15	0.000	0.430	0.310	0.260	0.000	II
W16	0.000	0.400	0.480	0.120	0.000	III
W17	0.000	0.190	0.720	0.090	0.000	III
W18	0.000	0.230	0.550	0.220	0.000	III
W19	0.000	0.080	0.590	0.330	0.000	III
W20	0.000	0.000	0.620	0.380	0.000	III
W21	0.000	0.090	0.530	0.380	0.000	III
W22	0.000	0.040	0.540	0.420	0.000	III
W23	0.000	0.000	0.480	0.520	0.000	IV
W24	0.000	0.000	0.200	0.770	0.030	IV
W25	0.000	0.000	0.020	0.580	0.400	IV

2.4 渭河河流健康综合评价

根据一级模糊综合评价和准则层权重,利用公式(5)得到渭河 25 个点位的综合模糊评价集,并依据最大隶属度原则,确定每个点位的评价等级。渭河河流健康综合评价结果如图 4 所示,25 个点位中处于健康水平的有 8 个,处于亚健康水平的有 13 个,处于不健康水平的有 4 个。在空间分布上,渭河源头 (W1、W2)、宝鸡至西安段 (W10—W18) 河流生态健康状况较好,天水至宝鸡 (W5—W9) 及下游段 (W19—W25) 河流生态健

康较差,不健康的点主要集中在下游。处于亚健康的点位占 56%,因此,渭河总体评价为亚健康水平,这一结论与前人研究结果基本相符,但本文指标更加丰富,更能全面地反映渭河的生态健康状况。徐宗学等基于水生生物群落结构特征对渭河河流健康做了研究^[17],结果显示渭河流域水生生态系统健康状况较差,受人类活动影响明显,大体表现为从上游到下游健康状况越来越差的趋势;王伟以河岸带状况、水质及浮游植物作为指标对渭河进行健康评价^[29],评价结果为亚健康。

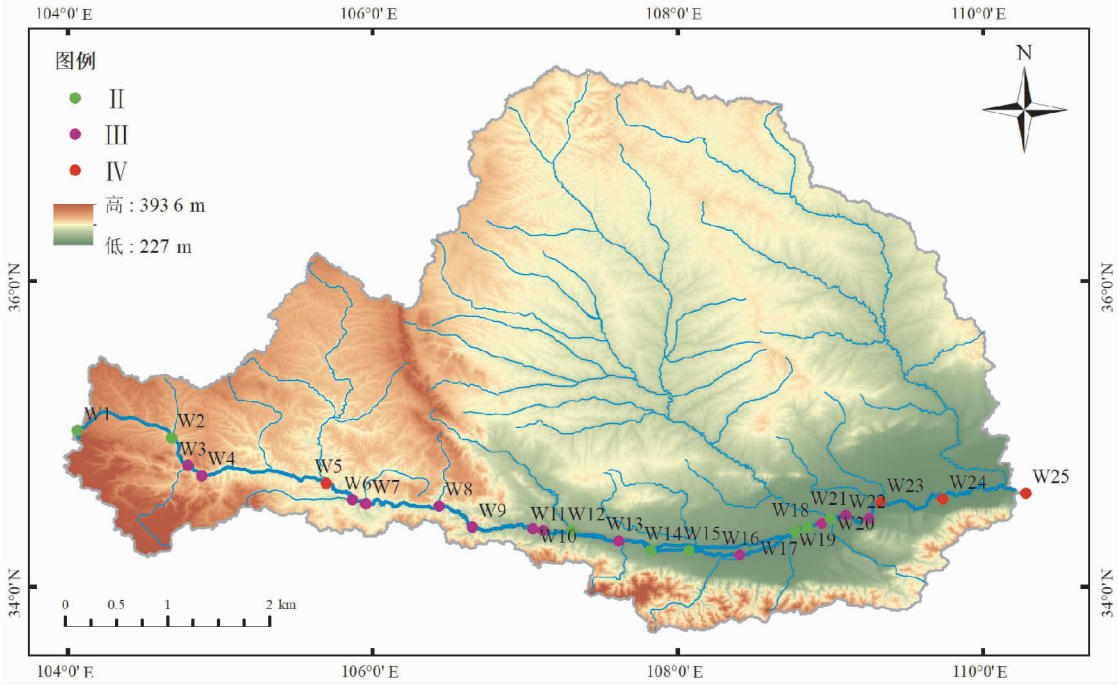


图4 渭河河流生态健康综合评价
Fig. 4 Comprehensive assessment of ecological health of Wei River

3 结论

本研究基于河流物理栖息地形态、河流水质、物理栖息地 3 个准则层 11 个指标构建渭河河流健康评价体系,运用 AHP-模糊综合评价法对渭河健康状况进行评价:

- 1) 渭河综合健康评价结果为亚健康状态,25 个点位中有 8 个处于 II 类,13 个处于 III 类,4 个处于 IV 类。物理栖息地对于渭河的总体评价为亚健康,水质对于渭河的总体评价为健康,水生生物对于渭河的总体评价为亚健康。水生生物以及物理栖息地状况是影响渭河生态健康的关键。
- 2) 在空间上,渭河生态健康自上游到下游呈下降—上升—下降的趋势,渭河源头 (W1、W2)、

宝鸡至西安段 (W10—W18) 河流生态健康状况较好,天水至宝鸡 (W5—W9) 及下游段 (W19—W25) 河流生态健康较差,不健康的点主要集中在下游。

针对渭河当前的生态健康状况,应当采取多举措并行的治理对策。从物理栖息地角度出发,渭河上游及下游物理栖息地评价较低,要着重保护上游脆弱的生态环境,减少人类活动干扰及土地利用强度,增加河岸带植被覆盖面积率;从水质角度出发,渭河中下游水质状况逐渐变差,应尽量减少农业径流量,工业废水和生活污水应经过处理,达到标准后排放,减少河流中污染物质的含量,改善河流水质状况;从水生生物角度出发,改善水生生物的生存环境,提高水生生物多样性。

参考文献

- [1] VALERO E, ÁLVAREZ X, PICOS J. An assessment of river habitat quality as an indicator of conservation status: A case study in the northwest of Spain[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 131-138.
- [2] GRIZZETTI B, LIQUETE C, PISTOCCHI A, et al. Relationship between ecological condition and ecosystem services in European Rivers, lakes and coastal waters[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 452-465.
- [3] JIA Y T, CHEN Y F. River health assessment in a large river: Bioindicators of fish population[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 26: 24-32.
- [4] 马廷婷, 范亚民, 李宽意, 等. 基于浮游植物生物完整性指数的太湖主要河口生态健康评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(4): 501-508.
MA T T, FAN Y M, LI K Y, et al. Ecological health assessment of main estuaries of the Taihu Lake based on phytoplankton biological integrity index[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(4): 501-508.
- [5] SHULL D R, SMITH Z M, SELCKMANN G M. Development of a benthic macroinvertebrate multimetric index for large semiwadeable rivers in the Mid-Atlantic Region of the USA[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 191(1): 22.
- [6] SERRANO BALDERAS E C, GRAC C, BERTI-EQUILLE L, et al. Potential application of macroinvertebrates indices in bioassessment of Mexican streams[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 558-567.
- [7] HUGHES D L. Rapid bioassessment of stream health[M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [8] HAWKINS C P, MYKRÄ H, OKSANEN J, et al. Environmental disturbance can increase beta diversity of stream macroinvertebrate assemblages[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(4): 483-494.
- [9] ZHAO Y W, YANG Z F. Integrative fuzzy hierarchical model for river health assessment: A case study of Yong River in Ningbo City, China[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(4): 1729-1736.
- [10] HUANG Q, GAO J F, CAI Y J, et al. Development and application of benthic macroinvertebrate-based multimetric indices for the assessment of streams and rivers in the Taihu Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 649-659.
- [11] 贾慧娟, 赖子尼, 王超. 珠三角河网浮游植物物种丰富度的时空特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 1-11.
- [12] JIA H J, LAI Z N, WANG C. The spatiotemporal characteristics of phytoplankton species richness in the Pearl River Delta network[J]. *Journal of Ecology*, 2019, 39(11): 1-11.
- [13] 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 等. 天鹅洲古道底栖动物群落特征及水质生物学评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(10): 3952-3958.
MA X J, SHEN J Z, WANG T, et al. Characteristics of benthic animal communities and evaluation of water quality biology on the Tian'ezhou Ancient Road[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(10): 3952-3958.
- [14] 张勇. 黄河流域生态保护和高质量发展研究[J]. *农业科技与信息*, 2023, (11): 77-80.
ZHANG Y. Research on ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin[J]. *Agricultural Science and Information*, 2023, (11): 77-80.
- [15] 杜本峰, 穆跃瑄, 刘悦雅. 生态健康、健康生态与黄河流域高质量发展[J]. *中州学刊*, 2021(5): 86-93.
DU B F, MU Y X, LIU Y Y. Ecological health, healthy ecology, and high quality development of the Yellow River Basin[J]. *Zhongzhou Academic Journal*, 2021(5): 86-93.
- [16] 杨小刚, 宋进喜, 程丹东, 等. 渭河陕西段河道生态服务价值评估[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(5): 958-965.
YANG X G, SONG J X, CHENG D D, et al. Evaluation of ecological service value of Wei River in Shaanxi section[J]. *Arid Region Geography*, 2014, 37(5): 958-965.
- [17] 王硕, 杨涛, 李小平, 等. 渭河流域浮游动物群落结构及其水质评价[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(6): 1333-1345.
WANG S, YANG T, LI X P, et al. Community structure and water quality evaluation of planktonic animals in the Wei River Basin[J]. *Journal of Aquatic Biology*, 2019, 43(6): 1333-1345.
- [18] 徐宗学, 武玮, 殷旭旺. 渭河流域水生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 Z X, WU W, YIN X W. Community structure characteristics and health evaluation of aquatic ecosystems in the Wei River Basin[J]. *Progress in Water Resources and Hydropower Technology*, 2016, 36(1): 23-30.

- [18] 殷旭旺, 徐宗学, 鄢娜, 等. 渭河流域河流着生藻类的群落结构与生物完整性研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 5181-527.
- YIN X W, XU Z X, YAN N, et al. Community structure and biological integrity of algae in rivers of the Wei River Basin[J]. Journal of Environmental Science, 2013, 33(2): 5181-527.
- [19] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 218-226.
- YIN X W, XU Z X, GAO X, et al. The community structure of macrobenthic animals in the Wei River Basin and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 218-226.
- [20] 侯姝君, 孙海龙, 李航, 等. 基于改进熵权模糊评价模型的锦江河流健康评价[J]. 四川环境, 2022, 41(5): 220-227.
- HOU S J, SUN H L, LI H, et al. Health evaluation of the Jinjiang River based on an improved entropy weight fuzzy evaluation model[J]. Sichuan Environment, 2022, 41(5): 220-227.
- [21] 张晶, 董哲仁, 孙东亚, 等. 河流健康全指标体系的模糊数学评价方法[J]. 水利水电技术, 2010, 41(12): 16-21.
- ZHANG J, DONG Z R, SUN D Y, et al. Fuzzy mathematical evaluation method for the comprehensive indicator system of river health[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2010, 41(12): 16-21.
- [22] 杨涛, 刘静玲, 李小平, 等. 海河流域平原型河流栖息地评价[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(3): 190-197.
- YANG T, LIU J L, LI X P, et al. Habitat evaluation of plain rivers in the Hai River Basin[J]. Environmental Science and Technology, 2017, 40(3): 190-197.
- [23] 李海霞, 韩丽花, 蔚青, 等. 基于灰色关联分析法的辽河保护区河流水生态健康评价[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(4): 553-561.
- LI H X, HAN L H, WEI Q, et al. Ecological health evaluation of river water in Liao Nature Reserve based on grey correlation analysis[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(4): 553-561.
- [24] 黄琪, 高俊峰, 张艳会, 等. 长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 118-126.
- HUANG Q, GAO J F, ZHANG Y H, et al. Ecological integrity evaluation of the four major freshwater lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Ecology, 2016, 36(1): 118-126.
- [25] 张宇航, 渠晓东, 王少明, 等. 浑河流域底栖动物生物完整性指数构建与健康评价[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(6): 1374-1386.
- ZHANG Y H, QU X D, WANG S M, et al. Construction and health assessment of the biointegrity index of benthic animals in the Hun River Basin[J]. Resources and Environment of the Yangtze River Basin, 2020, 29(6): 1374-1386.
- [26] 高学平, 赵世新, 张晨, 等. 河流系统健康状况评价体系及评价方法[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 962-968.
- GAO X P, ZHAO S X, ZHANG C, et al. Evaluation system and method of river system health status[J]. Journal of Water Resources, 2009, 40(8): 962-968.
- [27] 闫滨, 杨骁. 基于模糊综合评价法的大伙房水库上游水质评价及预测[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 284-288.
- YAN B, YANG X. Evaluation and prediction of upstream water quality of Dahuofang Reservoir based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. South to North Water Diversion and Water Conservancy Technology, 2015, 13(2): 284-288.
- [28] 张俊. 陕西省渭河流域水质及水功能区状况分析[J]. 陕西水利, 2021(10): 129-133.
- ZHANG J. Analysis of water quality and water function zones in the Wei River Basin of Shaanxi Province[J]. Shaanxi Water Resources, 2021(10): 129-133.
- [29] 王伟. 渭河流域水生生态系统健康评价[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [30] 徐宗学, 刘麟菲. 渭河流域水生生态系统健康评价[J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 40-43.
- XU Z X, LIU L F. Health assessment of water ecosystems in the Wei River Basin[J]. Yellow River, 2021, 43(10): 40-43.
- [31] 吴锦涛. 渭河流域生态系统健康评价研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.

(编辑 李波)