

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, YU Q, et al. Assessment on river water ecological health based on grey relation analysis in Liaohe Conservation Area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(4): 553-561.

基于灰色关联分析法的辽河保护区 河流水生态健康评价

李海霞^{1,3}, 韩丽花¹, 蔚青^{1,2}, 王育鹏³, 段亮⁴, 徐笠^{1,2*}

1. 北京市农林科学院, 北京农业质量标准与检测技术研究中心

2. 农产品产地环境监测北京市重点实验室

3. 安徽农业大学资源与环境学院

4. 中国环境科学研究院水生态环境研究所

摘要 灰色关联分析是一种高效的不确定性复杂系统评价方法,具有对数据要求低且计算量小,便于广泛应用的特点,适用于河流水生态健康评价。基于水生态健康内涵和辽河保护区河流实际情况,构建了由河流自然形态状况、水质状况、底质状况、水生生物及生态环境状况四大类共20个指标组成的河流水生态健康评价指标体系,采用层次分析法(AHP)确定权重,结合灰色关联分析法对辽河保护区水生态健康状况进行评价。结果表明:辽河保护区河流水生态健康状况总体为中等,其中自然形态状况灰色关联度为0.8684,健康等级为中等;水质状况灰色关联度为0.6912,健康等级为中等;底质状况灰色关联度为0.9686,健康等级为优秀;水生生物及生态环境状况灰色关联度为0.7504,健康等级为中等。20个指标中,河床稳定性、河道弯曲程度、化学需氧量、总磷浓度、鱼类多样性指数和着生藻类多样性指数的评价结果为中等,总氮浓度为病态。自2010年辽河保护区划定以来,其河流底质中重金属污染得到较大改善,但仍存在河床稳定性差、水质污染、鱼类多样性和着生藻类多样性指数较低等问题。

关键词 河流;灰色关联;水生态健康;层次分析法;辽河保护区

中图分类号:X826 文章编号:1674-991X(2020)04-0553-09 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200034

Assessment on river water ecological health based on grey relation analysis in Liaohe Conservation Area

LI Haixia^{1,3}, HAN Lihua¹, YU Qing^{1,2}, WANG Yupeng³, DUAN Liang⁴, XU Li^{1,2*}

1. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences

2. Beijing Municipal Key Laboratory of Agricultural Environment Monitoring

3. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University

4. Institute of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract Grey relation analysis is an efficient method for evaluating uncertain complex systems. It has the advantages of low data requirement, small computation and wide application and is an appropriate method for river water ecological health evaluation. Based on the connotation of water ecological health and the actual situation of rivers in Liaohe Conservation Area, a river water ecological health evaluation index system composed of 4 criterion layers and 20 indicator layers, including natural morphology, water quality, sediment, aquatic organisms and ecological environment, was constructed. Analytic hierarchy process (AHP) was used to determine the weight of

收稿日期:2020-02-28

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-003);北京市优秀人才青年骨干项目;北京市农林科学院创新能力建设项目(KJ CX20180406)

作者简介:李海霞(1990—),女,硕士研究生,研究方向为河流健康评价,1692337437@qq.com

* 责任作者:徐笠(1984—),男,副研究员,博士,主要从事河流健康评价研究,xuliforever@163.com

criterion layer and, combined with grey relation analysis, to evaluate the water ecological health status of Liaohe Conservation Area. The results showed that the comprehensive health status of water ecology in Liaohe Conservation Area was medium, the grey relation degree of natural morphology was 0.868 4, and the health status was medium. The grey relation degree of water quality was 0.691 2, and the health condition was moderate. The grey relation degree of sediment was 0.968 6, and the health condition was excellent. The grey relation degree of aquatic organisms and ecological environment was 0.750 4, and the health status was also moderate. Among the 20 evaluation indexes, river bed stability, river bend degree, chemical oxygen demand, total phosphorus concentration, fish diversity index and algal diversity index were of medium health grade, while total nitrogen concentration was pathological. Since the establishment of the Liaohe Conservation Area in 2010, heavy metals pollution in the sediments of the river has been greatly improved, but there were still problems such as poor riverbed stability, water quality index pollution, low fish diversity and low algal diversity index.

Key words river; grey relation analysis; water ecological health; analytic hierarchy process; Liaohe Conservation Area

河流水生态系统是生命之源,是生物圈物质循环、能量流动和信息传递的重要通道,具有改变地表形态、净化水质、调节气候、改善生态环境和维护生物多样性等重要作用;河流还为人类提供了农田灌溉、排洪、航运、渔业、水利发电、生产生活用水和休闲娱乐等一系列社会功能,其健康状况对自然生态系统和社会服务系统都具有重要影响^[1-3]。近年来,随着我国经济社会的快速发展,城市化进程的不断加速以及人口数量的快速膨胀,人类活动对辽河流域河流的干扰不断加剧,改变了河岸带原有结构,扰乱了河流流态与水文循环过程,导致许多河流出现径流量减少、水系恶化、水体富营养化加重、河流功能下降和生物多样性损失等问题,对人类的生存和发展构成威胁。选择合理的指标与评价方法,建立科学的评价体系,对河流水生态健康状况进行评价成为当前研究的热点之一。

北美和西欧等发达国家较早出现河流污染问题,因此在河流健康评价方面的研究也开展得较早,研究人员从最初仅仅考虑理化(物理、化学和生物完整性)指标的单一思维,逐渐转向对河流生态系统进行全面综合的评价^[4-8],目前在河流水生态健康评价方面已基本形成一套较完整的体系。国内对河流健康研究起步较晚,部分学者参考国外的研究成果,针对不同河流的实际情况,在河流水生态系统健康评价指标选取、评价方法和健康标准等方面做了很多探索^[9-12],但与国外的研究水平相比仍存在一定差距,尤其在河流水生态系统健康的表征框架、评价方法、评价标准以及多时空尺度的联系等方面还有待进一步提高。

从评价原理看,河流健康评价大致分为预测模

型法和多指标评价法。预测模型法最大的缺陷在于主要通过单一物种评价河流健康状况,并且假设河流的任何变化都会反映在所选物种的变化上,一旦出现河流健康状况受到破坏且未反映在所选物种变化的情况,评价结果就无法反映河流的真实状况^[13]。灰色关联分析法依据不同因素间发展趋势的同异程度进行评价,适用于数据量较少,各因素间关联未知的系统,可将其作为衡量河流不同因素之间关联程度的一种方法^[14]。笔者基于辽河保护区河流的实际情况,构建了由河流自然形态状况、水质状况、底质状况、水生生物及生态环境状况四大类共 20 个指标组成的河流水生态健康评价体系,参考现有标准规范及专家评判确定评价标准,基于灰色关联分析法,对辽河保护区水生态健康进行综合评价,以期辽河保护区水生态环境建设与目标管理提供科学依据。

1 研究区概况

辽河流域是我国七大河流之一,流经河北、内蒙古、吉林、辽宁 4 省(区)。2007 年辽河流域被列为重点示范流域,2010 年 3 月划定了国内第一个大型河流保护区——辽河保护区,对保护区实行全线封闭保护,实施禁牧、禁渔、禁采、禁伐,对辽河干流流域进行一站式综合治理。辽河保护区全长 538 km,总面积为 1 869.2 km²,起始于东、西辽河交汇的铁岭昌图县福德店,终止于盘锦入海口,涉及铁岭、沈阳、鞍山、盘锦 4 市(图 1)。辽河保护区地处辽河平原,农田面积占比较大(41.22%),河流两岸村庄遍布,分布有较多的农业人口(29.8 万人)。保护区干流接纳了铁岭、沈阳、鞍山和盘锦沿途城市的工业废水和生活污水。



图1 辽河保护区概况

Fig.1 General situation of Liaohe Conservation Area

2 辽河保护区河流水生态健康评价方法

2.1 指标体系建立

遵照科学性、层次性、代表性、可操作性和定量与定性相结合的原则,结合辽河保护区水质的实际情况,最终确定构建目标层、准则层和指标层3个层

次的评价体系进行综合评价(表1)。第1层为目标层(A),为辽河保护区河流水生态健康综合评价,全面反映河流水生态健康状况;第2层为准则层(B),从自然形态状况(B₁)、水质状况(B₂)、底质状况(B₃)、水生生物及生态环境状况(B₄)4个不同侧面反映河流水生态健康状况水平;第3层为指标层(C),由河岸稳定性(C₁)、河床稳定性(C₁₂)、水系连通性(C₁₃)、河道弯曲程度(C₁₄)、溶解氧浓度(C₂₁)、化学需氧量(C₂₂)等20个指标组成。

2.2 评价标准与数据来源

根据辽河保护区自身特点,参照历史数据和相关标准,将辽河保护区河流水生态健康评价标准分为优秀(I级)、良好(II级)、中等(III级)、不健康(IV级)、病态(V级)5个等级(表1)。对于定量指标,直接给出具体数值;对于定性指标,则根据文献查阅和专家咨询,现场定性打分描述。

收集了包括河流自然状况、水质、底质、水生生物和土地利用等方面的数据,数据来源包括现场调查、实验室检测与分析、文献与资料(辽宁省统计年鉴、水资源公报及防洪规划等)查阅和专家咨询等。河流自然形态、水质、底质、流域植被覆盖率数据均为2018年数据,由于着生藻类、底栖动物和鱼类数据获得较困难,因此采用2011—2016年数据。

表1 河流水生态健康评价指标体系、评价标准及数据来源

Table 1 Riverwater ecological health evaluation index system, evaluation criteria and data sources

目标层	准则层	指标层	评价等级标准					评价等级标准确定依据	数据来源
			优秀 (I级)	良好 (II级)	中等 (III级)	不健康 (IV级)	病态 (V级)		
辽河保护区河流水生态健康综合评价(A)	自然形态状况(B ₁)	河岸稳定性(C ₁₁)	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20	文献[13]	现场调查
		河床稳定性(C ₁₂)	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20	文献[15]	
		水系连通性(C ₁₃)	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20	文献[15]	
		河道弯曲程度(C ₁₄)	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20	文献[16]	
	水质状况(B ₂)	溶解氧浓度(C ₂₁)/(mg/L)	7.5	6.0	5.0	3.0	2.0		实验室检测、历史资料 ^[18]
		化学需氧量(C ₂₂)/(mg/L)	15	15	20	30	40		
		氨氮浓度(C ₂₃)/(mg/L)	0.15	0.50	1.00	1.50	2.00	文献[17]	
		总氮浓度(C ₂₄)/(mg/L)	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0		
		总磷浓度(C ₂₅)/(mg/L)	0.02	0.10	0.20	0.30	0.40		

(续表 1)

目标层	准则层	指标层	评价等级标准					评价等级标准确定依据	数据来源
			优秀 (I级)	良好 (II级)	中等 (III级)	不健康 (IV级)	病态 (V级)		
辽河保护区河流水生态健康综合评价 (A)	底质状况 (B ₃)	Cu 潜在生态风险 (C ₃₁)	<20	20~40	40~60	60~80	≥80		
		Zn 潜在生态风险 (C ₃₂)	<20	20~40	40~60	60~80	≥80		
		Ni 潜在生态风险 (C ₃₃)	<20	20~40	40~60	60~80	≥80		
		Cd 潜在生态风险 (C ₃₄)	<20	20~40	40~60	60~80	≥80	文献[19]	实验室检测
		Cr 潜在生态风险 (C ₃₅)	<20	20~40	40~60	60~80	≥80		
		Pb 潜在生态风险 (C ₃₆)	<20	20~40	40~60	60~80	≥80		
		As 潜在生态风险 (C ₃₇)	<20	20~40	40~60	60~80	≥80		
	水生生物及生态环境状况 (B ₄)	底栖动物完整性 (B-IBI) (C ₄₁)	>3.66	2.75~3.66	1.83~2.75	0.92~1.83	≤0.92	文献[20]	
		鱼类多样性 (Shannon-Wiener) 指数 (C ₄₂)	>3.0	2.4~3.0	1.2~2.4	0.6~1.2	≤0.6	文献[16]	历史资料 ^[21-23]
		着生藻类多样性指数 (H') (C ₄₃)	>3.5	2.5~3.5	2.0~2.5	1.0~2.0	≤1.0	文献[20]	
		流域植被覆盖率 (C ₄₄)/%	>75	50~75	25~50	5~25	≤5	文献[16]	2018年5—6月遥感数据

2.3 层次分析法确定指标权重

美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代提出一种定性定量相结合的系统、简变、灵活的分析方法——层次分析法 (AHP)^[24]。本研究采用层次分

析法,基于辽河保护区相关数据,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 2 所示。

表 2 不同层权重计算结果

Table 2 Weight calculation results of different indicator layers

准则层		指标层		指标层相对于目标层的权重与排序	
要素	权重	指标	权重	权重	排序
自然形态状况 (B ₁)	0.163 6	河岸稳定性 (C ₁₁)	0.239 5	0.039 2	11
		河床稳定性 (C ₁₂)	0.464 6	0.076 4	6
		水系连通性 (C ₁₃)	0.157 4	0.025 7	12
		河道弯曲程度 (C ₁₄)	0.138 5	0.022 7	13
水质状况 (B ₂)	0.282 9	溶解氧浓度 (C ₂₁)	0.142 8	0.040 4	8
		化学需氧量 (C ₂₂)	0.285 8	0.080 8	4
		氨氮浓度 (C ₂₃)	0.285 8	0.080 8	4
		总氮浓度 (C ₂₄)	0.142 8	0.040 4	8
		总磷浓度 (C ₂₅)	0.142 8	0.040 4	8

(续表 2)

准则层		指标层		指标层相对于目标层的权重与排序	
要素	权重	指标	权重	权重	排序
底质状况 (B ₃)	0.105 9	Cu 潜在生态风险(C ₃₁)	0.142 9	0.015 1	14
		Zn 潜在生态风险(C ₃₂)	0.142 9	0.015 1	14
		Ni 潜在生态风险(C ₃₃)	0.142 9	0.015 1	14
		Cd 潜在生态风险(C ₃₄)	0.142 9	0.015 1	14
		Cr 潜在生态风险(C ₃₅)	0.142 9	0.015 1	14
		Pb 潜在生态风险(C ₃₆)	0.142 9	0.015 1	14
		As 潜在生态风险(C ₃₇)	0.142 9	0.015 1	14
水生生物及生态 环境状况(B ₄)	0.447 6	底栖动物完整性(C ₄₁)	0.124 9	0.055 9	7
		鱼类多样性指数(C ₄₂)	0.360 7	0.161 4	1
		着生藻类多样性指数(C ₄₃)	0.313 1	0.140 1	2
		流域植被覆盖率(C ₄₄)	0.201 3	0.090 1	3

2.4 灰色关联度分析评价

多层次灰色关联综合评价法^[25]将河流水生态健康评价体系分为 3 个层次自下而上依次进行评价:先对 20 个指标分别进行评价,再对自然形态状况、水质状况、底质状况、水生生物及生态环境状况 4 个子系统进行评价,最后汇总得出河流水生态健康综合评价。

2.4.1 确定参考数列和比较数列

确定参考数列为 x_{ij} [i 为准则层下各要素(指标类别)包含的评价指标个数, $i = 1, 2, \dots, n$; j 为准则层下要素的个数, $j = 1, 2, 3, 4$], 确定比较数列为 y_{ik} (k 为评价指标的等级, $k = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表评价等级 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级)。

2.4.2 数列的归一化处理

由于选取的不同评价指标的量纲不同,且数量级相差较大,需消除不同评价指标量纲对结果的影响。采用初始化方法将原始指标数列和等级标准数列进行规范化处理,将其归一化至 $[0, 1]$ 区间。对数列 x_{ij} 、 y_{ik} 进行归一化处理时,存在越大越优型和越小越优型 2 种关系,对应采用不同的变换公式。

当指标为越大越优型时,采用如下公式:

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq y_{i1} \\ \frac{y_{ij}-y_{i5}}{y_{i1}-y_{i5}} & y_{i1} > x_{ij} > y_{i5} \\ 0 & x_{ij} \leq y_{i5} \end{cases} \quad (1)$$

$$y'_{ik} = \begin{cases} 1 & y_{ij} \in \text{I 级} \\ \frac{y_{ij}-y_{i5}}{y_{i1}-y_{i5}} & y_{ij} \in \text{II、III、IV 级} \\ 0 & y_{ij} \in \text{V 级} \end{cases} \quad (2)$$

当指标为越小越优型时,采用如下公式:

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \leq y_{i1} \\ \frac{y_{i5}-y_{ij}}{y_{i5}-y_{i1}} & y_{i1} < x_{ij} < y_{i5} \\ 0 & x_{ij} \geq y_{i5} \end{cases} \quad (3)$$

$$y'_{ik} = \begin{cases} 1 & y_{ij} \in \text{I 级} \\ \frac{y_{i5}-y_{ij}}{y_{i5}-y_{i1}} & y_{ij} \in \text{II、III、IV 级} \\ 0 & y_{ij} \in \text{V 级} \end{cases} \quad (4)$$

2.4.3 求解关联系数和关联度

由参考数列 y_{ik} 中取任意一个指标向量,同比较数列 x_{ij} 组成数列矩阵,求取各向量间对应的绝对差值 $[\Delta_{ij}(k)]$, 即

$$\Delta_{ij}(k) = |x'_{ij} - y'_{ik}| \quad (5)$$

对 $\Delta_{ij}(k)$ 组成的数列进行分析,找出矩阵中 $\min \min \Delta_{ij}(k)$ 和 $\max \max \Delta_{ij}(k)$, 分别记为 Δ_1 和 Δ_2 , 则关联系数 $[\xi_{ij}(k)]$ 的计算公式为:

$$\xi_{ij}(k) = \frac{\Delta_1 + \rho \Delta_2}{\Delta_{ij}k + \rho \Delta_2} \quad (6)$$

式中: ρ 为权重系数。

通过关联系数,即可得到比较数列与参考数列中各向量间的灰色关联度。计算公式为:

$$R_{jk} = \sum_{i=1}^n \xi_{ij}(k) w_i \quad (7)$$

式中: R_{jk} 为准则层 j 对评价等级 k 的灰色关联度; w_i 为准则层下各要素的权重。

2.4.4 评价结果的分析

根据关联度最大原则, R_{ij} 越大,表示参考数列 i 与比较数列 j 的关联性越好。

3 辽河保护区河流水生态健康评价结果与分析

3.1 指标层的灰色关联度及评价结果

通过式(1)~式(7),基于辽河保护区相关数据,计算指标层各指标与水生态健康评价 5 个等级的灰色关联度,结果如表 3 所示。由表 3 可知,根据关联度最大原则,自然形态状况中,河岸稳定性(C_{11})、水系连通性(C_{13})评价等级处于良好;河床稳定性(C_{12})处于中等,说明河床还不稳定,存在冲淤现象。水质状况中,溶解氧浓度(C_{21})的评价等级处于优秀,化学需氧量(C_{22})和总磷浓度(C_{25})处于中

等;而总氮浓度(C_{24})较高,处于病态,说明总氮浓度严重超标,在后续治理和管理中应重点关注。底质状况(B_3)评价等级总体处于优秀,其中 Cd 潜在生态风险(C_{34})处于良好,在后续治理中应重点关注 Cd 浓度的变化。水生生物及生态环境状况中,底栖动物完整性(C_{41})和流域植被覆盖率(C_{44})评价等级处于优秀,鱼类多样性指数(C_{42})和着生藻类多样性指数(C_{43})处于中等。总体来讲,近年来辽河保护区水质已得到明显改善,水体主要污染物浓度均呈显著下降趋势,这说明自辽河保护区划定以来,实施的一系列污染治理措施取得了一定成效。

表 3 辽河保护区河流水生态健康评价指标层与 5 个等级的灰色关联度及评价结果

Table 3 Grey relation degree and evaluation results of river water ecological health evaluation index layer and 5 grades in Liaohe Conservation Area

指标层	与 5 个等级的灰色关联度					评价等级
	优秀 (I 级)	良好 (II 级)	中等 (III 级)	不健康 (IV 级)	病态 (V 级)	
河岸稳定性(C_{11})	0.147 6	0.239 5	0.176 6	0.121 1	0.092 1	良好
河床稳定性(C_{12})	0.238 0	0.349 5	0.452 6	0.281 8	0.204 6	中等
水系连通性(C_{13})	0.095 2	0.152 8	0.118 6	0.080 7	0.061 2	良好
河道弯曲程度(C_{14})	0.075 7	0.114 7	0.120 6	0.078 2	0.057 9	中等
溶解氧浓度(C_{21})	0.142 9	0.092 5	0.074 9	0.054 2	0.047 6	优秀
化学需氧量(C_{22})	0.190 4	0.190 4	0.259 5	0.168 1	0.114 3	中等
氨氮浓度(C_{23})	0.239 2	0.241 3	0.165 7	0.126 1	0.101 8	良好
总氮浓度(C_{24})	0.047 6	0.053 6	0.067 7	0.091 9	0.142 9	病态
总磷浓度(C_{25})	0.067 9	0.084 8	0.123 4	0.104 4	0.075 4	中等
Cu 潜在生态风险(C_{31})	0.142 9	0.107 2	0.071 5	0.053 6	0.047 6	优秀
Zn 潜在生态风险(C_{32})	0.142 9	0.107 2	0.071 5	0.053 6	0.047 6	优秀
Ni 潜在生态风险(C_{33})	0.142 9	0.107 2	0.071 5	0.053 6	0.047 6	优秀
Cd 潜在生态风险(C_{34})	0.111 2	0.136 3	0.083 3	0.060 0	0.052 6	良好
Cr 潜在生态风险(C_{35})	0.142 9	0.107 2	0.071 5	0.053 6	0.047 6	优秀
Pb 潜在生态风险(C_{36})	0.142 9	0.107 2	0.071 5	0.053 6	0.047 6	优秀
As 潜在生态风险(C_{37})	0.142 9	0.107 2	0.071 5	0.053 6	0.047 6	优秀
底栖动物完整性(C_{41})	0.124 9	0.093 8	0.062 5	0.046 8	0.041 6	优秀
鱼类多样性指数(C_{42})	0.197 6	0.229 0	0.307 0	0.187 4	0.165 8	中等
着生藻类多样性指数(C_{43})	0.148 2	0.182 9	0.281 6	0.210 4	0.165 8	中等
流域植被覆盖率(C_{44})	0.192 5	0.153 5	0.099 4	0.075 4	0.068 1	优秀

3.2 准则层、目标层的灰色关联度及评价结果

由指标层的评价结果,计算得到准则层各要素与水生态健康评价 5 个等级的灰色关联度,在此基

础上,结合准则层各要素的权重,计算得到目标层与水生态健康评价 5 个等级的灰色关联度,结果如表 4 所示。

表4 辽河保护区河流水生态健康评价准则层和目标层与5个等级的灰色关联度及评价等级

Table 4 Grey relation degree and health grade between the criterion layer, the target layer and 5 grades of river water ecological health evaluation in Liaohe Conservation Area

层级	与5个等级的灰色关联度					权重	评价等级
	优秀 (I级)	良好 (II级)	中等 (III级)	不健康 (IV级)	病态 (V级)		
自然形态状况(B ₁)	0.556 6	0.856 5	0.868 4	0.561 8	0.415 7	0.163 6	中等
水质状况(B ₂)	0.687 9	0.662 6	0.691 2	0.544 8	0.482 1	0.282 9	中等
底质状况(B ₃)	0.968 6	0.779 3	0.512 0	0.381 5	0.338 4	0.105 9	优秀
水生生物及生态环境状况(B ₄)	0.663 3	0.659 2	0.750 4	0.520 0	0.441 4	0.447 6	中等
辽河保护区河流水生态健康综合评价(A)	0.685 1	0.705 1	0.727 7	0.519 2	0.437 8		中等

由表4可知,根据最大隶属度、最大关联度和最大联系度原则,基于灰色关联分析法,辽河保护区河流水生态健康综合评价(A)的灰色关联度为0.727 7,评价等级为中等。准则层中,自然形态状况(B₁)灰色关联度为0.868 4,评价等级为中等;水质状况(B₂)灰色关联度为0.691 2,评价等级为中等;水生生物及生态环境状况(B₄)灰色关联度为0.750 4,评价等级为中等;底质状况(B₃)灰色关联度为0.968 6,评价等级为优秀。可见,辽河保护区河流沉积物重金属污染较轻,但在河流自然形态、水质、水生生物及生境方面存在问题,后续需加强治理。

3.3 辽河保护区河流水生态健康评价结果分析

3.3.1 准则层评价结果分析

准则层各要素评价等级为中等~优秀,可见,与“十二五”期间相比,目前辽河保护区河流水质状况有了较大提升,但部分污染物(如总氮、总磷)浓度仍较高,这主要是由于保护区上游铁岭市工业废水和生活污水通过5个排污口直接排入辽河,中下游沈阳和鞍山市工厂较多,存在废水直排现象,加之辽河沈阳段是沈阳的主要农业区域,农业面源污染也对河流水质造成污染。

3.3.2 指标层评价结果分析

指标层中,河床稳定性(C₁₂)和河道弯曲程度(C₁₄)评价结果为中等,说明目前辽河保护区河流的河床还不稳定,存在冲淤现象,同时城市化的进程导致部分河流截弯取直,对河床的稳定不利。在河床不稳定的河段,建议在河流两岸设置石笼网,提高河床边坡的稳定性,保护河床不被冲刷,同时积极开展河道疏浚和堤防建设。2018年辽河保护区河流水体化学需氧量(C₂₂)年均值为21.00 mg/L,为GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中I类水质,与“十二五”期间化学需氧量基本处于IV类水质^[26-28]

相比,健康状况得到大幅度提升。2018年河流水体氨氮浓度(C₂₃)年均值为0.33 mg/L,为II类水质,与“十一五”期间的IV类水质^[29-31]和“十二五”期间的III类水质相比,水体氨氮浓度明显降低。可见,自辽河保护区划定以来,辽河水体化学需氧量和氨氮污染状况均有所好转^[32]。总磷浓度(C₂₅)年均值为0.23 mg/L,为IV类水质,已消除了“十二五”期间的V类水质;但总氮浓度(C₂₄)年均值为2.62 mg/L,仍属于劣V类水质。本次评价中Cd潜在生态风险指数(C₃₃)为28.54,评价等级为良好,2011年Cd潜在生态风险等级为极强^[33],2011—2013年Cd潜在生态风险等级极强的区域比例降低^[19],2014年消除了Cd极强风险等级^[34],与历史评价结果相比较可知,辽河保护区河流底泥Cd污染治理成效显著。2018年流域植被覆盖率(C₄₄)为73.40%,评价结果为优秀,这与辽河保护区划定后辽宁省政府大力实施植树造林和退耕还林等政策相关,现场调研也发现,辽河铁岭段植被覆盖率很高,河岸比较稳定。此次鱼类多样性指数(C₄₂)和着生藻类多样性指数(C₄₃)评价结果为中等,其原因可能是较高营养盐浓度影响了鱼类的分布和藻类生长。刘斌等^[22]发现秋季河流水体总氮浓度对鱼类群落组成有显著影响,秋季降雨丰富,农田径流携带较高浓度的营养盐入河,影响水体中藻类的繁殖与生长,间接影响鱼类的分布。鱼类和着生藻类群落变化可直接反映辽河水环境变化,鱼类、藻类多样性指数评价结果表明,仍需持续对辽河保护区水环境污染进行治理。

自辽河保护区划定以来,通过一系列治理与修复措施的实施,辽河保护区水质和底质状况得到了一定提高,但仍需持续削减工业废水的污染物排放,同时加强对农业、农村生活垃圾和畜禽养殖污染的治理,推进农村生活污水处理设施的建设,以进一步

提高辽河水生态健康状况。

4 结论

(1) 构建了包含河流自然形态状况、水质状况、底质状况、水生生物及生态环境状况四大类共 20 项指标的辽河保护区河流水生态健康评价指标体系, 由层次分析法确定权重, 利用灰色关联分析法对辽河保护区河流水生态健康状况进行综合评价。结果表明, 辽河保护区河流水生态健康状况为中等, 其中自然形态、水质、水生生物及生态环境健康状况的评价结果均为中等, 底质状况评价结果为优秀。

(2) 辽河保护区河流水生态健康评价结果显示, 目前辽河保护区存在河床稳定性差、水质污染、鱼类多样性和着生藻类多样性指数较低等问题, 建议加强对农业、农村生活污染的治理, 提高民众环保意识, 加强河流生态修复等, 以提高辽河保护区河流水生态健康水平。

参考文献

- [1] ZENG L L, QI T Z, QUAN X S. A new framework for assessing river ecosystem health with consideration of human service demand[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640/641: 442-453.
- [2] NICOLETTA R, ELSA F, MANUEL L L, et al. When and how? freshwater mussel recolonization in Lake Orta [J]. *Journal of Limnology*, 2016, 75 (2) : 120-130.
- [3] 欧阳莉莉, 丁瑶, 高平川, 等. 成都市河流生态健康评价[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(6) : 155-163.
OUYANG L L, DING Y, GAO P C, et al. Health assessment of river ecosystem in Chengdu, China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(6) : 155-163.
- [4] KARR J R, AMES R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. *Fisheries*, 1981, 6(6) : 21-27.
- [5] DAVIES P E. Development of a national river bioassessment system (AUSRIVAS) in Australia [M]//WRIGHT J F, SUTCLIFFE D W, FURSE M T. Assessing the biological quality of fresh waters: RIVPACS and other techniques. *Ambleside: Freshwater Biology Association*, 2000: 113-1241.
- [6] PARSONS M, THOMS M C, NORRIS R H. Development of a standardised approach to river habitat assessment in Australia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 98 (1/2/3) : 109-130.
- [7] WRIGHT J F, FURSE M T, MOSS D. River classification using invertebrates: RIVPACS applications[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 1998, 8(4) : 617-631.
- [8] RAVEN P J, HOLMES N T H, NAURA M, et al. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the UK[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422: 359-367.
- [9] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探[J]. *水科学进展*, 2005, 16(3) : 349-355.
- [10] ZHAO Y W, YANG Z F. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3) : 349-355.
- [10] 张楠, 张远, 郑丙辉, 等. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(2) : 162-170.
ZHANG N, ZHANG Y, ZHENG B H, et al. Multi-variable assessment of river ecosystem health in Liao River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2) : 162-170.
- [11] 时莹, 胡金丽, 王艳, 等. 浑河流域水生态健康评价[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(22) : 46-48.
SHI Y, HU J L, WANG Y, et al. Ecological water health evaluation of Hunhe River Basin [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(22) : 46-48.
- [12] 顾晓响, 徐宗学, 刘麟菲, 等. 北京北运河河流生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(6) : 2576-2587.
GU X Y, XU Z X, LIU L F, et al. Health assessment of the stream ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6) : 2576-2587.
- [13] 唐林森, 白丽. 东江源寻乌水河流健康指标评价[J]. *人民珠江*, 2017, 38(11) : 40-44.
TANG L S, BAI L. Assessment of river health index of Xunwu River in Dongjiang Source Area [J]. *Pearl River*, 2017, 38(11) : 40-44.
- [14] 王鑫舜. 层次分析法-灰色关联分析法在浑河水环境质量综合评价中的应用[J]. *黑龙江科技信息*, 2013(34) : 100-101.
- [15] 张欧阳, 熊文, 丁洪亮, 等. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. *人民长江*, 2010, 41(1) : 1-5.
ZHANG O Y, XIONG W, DING H L, et al. Drainage connectivity characteristics and influential factors of Yangtze River Basin [J]. *Yangtze River*, 2010, 41(1) : 1-5.
- [16] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 赵志淼. 辽河保护区健康河岸带及其评价方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2013.
- [18] 傅春, 李云翊. 基于层次分析的抚河抚州段河流健康综合评价[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2017, 39(1) : 1-7.
FU C, LI Y Y. Comprehensive assessment of river health of Fuzhou Section of the Fuhe River based on analytic hierarchy process [J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2017, 39(1) : 1-7.
- [19] KE X, GUI S F, HUANG H, et al. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China [J]. *Chemosphere*, 2017, 175: 473-481.
- [20] 张群, 曲波, 翟强, 等. 辽河保护区生态系统多样性研究进展[J]. *环境保护与循环经济*, 2014, 34(5) : 54-58.
- [21] 宗福哲. 辽河流域水生态健康评价 [D]. 沈阳: 辽宁大学, 2017.
- [22] 刘斌, 张远, 渠晓东, 等. 辽河干流自然保护区鱼类群落结构及其多样性变化[J]. *淡水渔业*, 2013, 43(3) : 49-55.
LIU B, ZHANG Y, QU X D, et al. Community structure and

- diversity of fishes in the Liao River Nature Reserve [J]. Freshwater Fisheries, 2013, 43(3):49-55.
- [23] 刘勇,石俊艳,张涛,等. 辽宁省辽河盘锦段渔业性能和水质现状评价[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2018, 25(2): 106-111.
- LIU Y, SHI J Y, ZHANG T, et al. Evaluation of fishery performance and water quality in Panjin Section of Liaohe River in Liaoning Province [J]. Journal of Eastern Liaoning University (Natural Science Edition), 2018, 25(2):106-111.
- [24] SAATY T L, BENNETT J P. A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy[J]. Systems Research & Behavioral Science, 2010, 22(4):237-245.
- [25] GUAN X Y, WANG S L, GAO Z Y, et al. Dynamic prediction of soil salinization in an irrigation district based on the support vector machine [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4):719-724.
- [26] 郑莉. “十二五”期间辽河铁岭段水质现状及评价[J]. 黑龙江环境通报, 2016, 40(2):67-68.
- ZHENG L. Current situation and evaluation of water quality of Liaohe Tieling Section during the period of the 12th Five Year-Plan [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2016, 40(2): 67-68.
- [27] 曹小磊,荆勇,赵玉强,等. 辽河沈阳段水质现状及面源污染特征分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(2):43-46.
- CAO X L, JING Y, ZHAO Y Q, et al. Analysis of water quality and non-point source pollution characteristics of Liaohe River in Shenyang [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(2): 43-46.
- [28] 李宁宁. “十二五”期间盘锦市辽河盘锦段水质现状及原因分析[J]. 现代农业, 2018(2):78-79.
- [29] 王丽耀. “十一五”期间辽河铁岭段及支流水质变化趋势[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2011, 21(4):70-73.
- WANG L Y. Water quality change trend of Liao River Tieling section and tributaries in "Eleventh Five-Year" Period [J]. Journal of Environmental Management College of China, 2011, 21(4):70-73.
- [30] 张敬,赵世宏,王雪威,等. “十一五”期间辽河沈阳段水质变化规律及原因分析[J]. 环境保护科学, 2011, 37(3):37-39.
- ZHANG J, ZHAO S H, WANG X W, et al. Analysis on water quality variety regulation and reasons of Liaohe River in Shenyang during the Eleventh Five-Year Plan [J]. Environmental Protection Science, 2011, 37(3):37-39.
- [31] 丁大宇. 辽河盘锦段水体污染特征和自净行为研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- [32] 赵明明. 辽河流域铁岭境内水质变化趋势分析[J]. 地下水, 2014, 36(2):59.
- [33] 刘强. 辽河干流河岸带沉积物重金属污染特征研究[D]. 沈阳:辽宁大学, 2013.
- [34] HE Y, MENG W, XU J, et al. Spatial distribution and toxicity assessment of heavy metals in sediments of Liaohe River, northeast China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(19):14960-14970. ◇

公民生态环境行为规范(试行)

第一条 关注生态环境。关注环境质量、自然生态和能源资源状况,了解政府和企业发布的生态环境信息,学习生态环境科学、法律法规和政策、环境健康风险防范等方面知识,树立良好的生态价值观,提升自身生态环境保护意识和生态文明素养。

第二条 节约能源资源。合理设定空调温度,夏季不低于26度,冬季不高于20度,及时关闭电器电源,多走楼梯少乘电梯,人走关灯,一水多用,节约用纸,按需点餐不浪费。

第三条 践行绿色消费。优先选择绿色产品,尽量购买耐用品,少购买使用一次性用品和过度包装商品,不跟风购买更新换代快的电子产品,外出自带购物袋、水杯等,闲置物品改造利用或交流捐赠。

第四条 选择低碳出行。优先步行、骑行或公共交通出行,多使用共享交通工具,家庭用车优先选择新能源汽车或节能型汽车。

第五条 分类投放垃圾。学习并掌握垃圾分类和回收利用知识,按标志单独投放有害垃圾,分类投放其他生活垃圾,不乱扔、乱放。

第六条 减少污染产生。不焚烧垃圾、秸秆,少烧散煤,少燃放烟花爆竹,抵制露天烧烤,减少油烟排放,少用化学洗涤剂,少用化肥农药,避免噪声扰民。

第七条 呵护自然生态。爱护山水林田湖草生态系统,积极参与义务植树,保护野生动植物,不破坏野生动植物栖息地,不随意进入自然保护区,不购买、不使用珍稀野生动植物制品,拒食珍稀野生动植物。

第八条 参加环保实践。积极传播环境保护和生态文明理念,参加各类环保志愿服务活动,主动为生态环境保护工作提出建议。

第九条 参与监督举报。遵守生态环境法律法规,履行生态环境保护义务,积极参与和监督生态环境保护工作,劝阻、制止或通过“12369”平台举报破坏生态环境及影响公众健康的行为。

第十条 共建美丽中国。坚持简约适度、绿色低碳的生活与工作方式,自觉做生态环境保护的倡导者、行动者、示范者,共建天蓝、地绿、水清的美好家园。