

文章编号: 1006-4710(2015)02-0189-06

基于熵权可拓物元模型的河流健康评价

杨柳¹, 张永进¹, 汪妮¹, 解建仓¹, 荆小龙²

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 中国水利水电建设工程咨询西北有限公司, 陕西 西安 710061)

摘要: 摸清灞河近年来生态健康状况, 寻求合理的、生态的开发利用方式。本研究综合水文、河流形态、水质、生境等要素构建了河流健康评价指标体系, 并划分了相应的评价等级标准, 建立了熵视角下的可拓物元评价模型, 结合各指标的时间序列变化对灞河生态健康进行动态评价。综合评价结果表明, 灞河 2006—2012 年生态健康等级分别为: 健康、亚健康、亚健康、一般、亚健康、亚健康、一般, 与层次分析法评价结果基本一致。单指标关联度计算及评价结果表明地表水开发利用一直处于适宜范围内; 湿地保留率、河流生境状况等级逐渐上升; 地下水埋深一直处于较低等级, 使得河流健康状态较差; 河流纵向连通性逐渐变差。因此, 必须以河流生态健康为目标进行资源及功能的开发利用, 以期和谐、生态运行。

关键词: 河流健康; 信息熵; 可拓物元模型; 灞河

中图分类号: X826

文献标志码: A

River health evaluation based on entropy weight and matter element model

YANG Liu¹, ZHANG Yongjin¹, WANG Ni¹, XIE Jiancang¹, JING Xiaolong²

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. China Northwest Water Conservancy & Hydropower Engineering

Consulting Co. Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: To evaluate the status of the eco-health of Bahe River in recent years and seek for a rational and ecological way of development and utilization, this study integrates such factors as hydrology, river morphology, water quality, habitat environ to construct the evaluation index system of river health, and divides the corresponding evaluation grade standard. The extension matter-element evaluation model is established in the perspective of entropy and the dynamic evaluation is made of ecological health of Bahe River as combined with the changes in time series of each index. The comprehensive evaluation results show that Bahe River health levels in the years of 2006—2012 were health, sub-health, sub-health, general, sub health, sub-health, and general respectively being basically same to the results of AHP. The correlation degree calculation and evaluation results of single index show that the exploitation and utilization of surface water are always in an appropriate range. The wetland retention rate and the river habitat status gradually are growing. The buried depth of groundwater is always at a lower level, where by making the river be in a poor state of health. The vertical connectivity of river gradually becomes worse. Therefore, the development and utilization of resources and functions must be done with the goal of the ecological health of the river so as to achieve harmonious and ecological operation.

Key words: river health; information entropy; matter-element model; Bahe River

河流是人类最重要的生命支撑系统, 发挥着不可替代的作用。然而, 过渡开发和不合理利用最终

导致河流生态受到极大的破坏, 诸多生态功能逐渐消退^[1]。河流健康的研究也逐渐成为学术界、领导

收稿日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209170, 41471451, 51479160)。

作者简介: 杨柳, 女, 博士生, 研究方向为区域水资源管理及系统工程。E-mail: yangliu0414@163.com。

通讯作者: 汪妮, 女, 教授, 博士, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: wangni@xaut.edu.cn。

者和公众共同关心的热门话题。澳大利亚政府、南非均实施了国家河流健康计划(The River Health Programme, RHP), 监测并评价河流生态状况^[2-4]。美国地质调查局发起的国家水质评价, 将影响河流健康的因素扩展到了土地利用等人类活动。国内长江、黄河及珠江水利委员会均开展了健康长江、健康黄河、健康珠江的研究, 从河流自然属性、社会属性以及管理目标等出发, 分别定义了河流健康的内涵, 并提出了各河流健康生命指标体系, 在我国河流健康研究领域起到了举足轻重的作用^[5]。董哲仁等^[6]从物理、化学、生物及水文等方面, 描述并评价河流健康状况。邓晓军等人^[7]以自然生态、社会经济及景观环境为准则层构建了城市河流健康指标体系, 为评价研究奠定了有利基础。河流生态系统是一个与外界有着密切的物质、信息及能量交换的复杂系统。信息熵是系统复杂性和有序性的测度, 引用信息熵所表达的指标本身的效用值确定权重系数, 能够有效避免主观因素的影响; 物元分析理论以促进事物转化、解决不相容问题为核心, 可用于解决矛盾问题。因此, 河流生态系统熵变, 结合物元分析理论分析评价为河流生态系统健康及发展趋势研究提供了新的思路。

本研究综合水文、河流形态、水质、生境、人类活动影响等要素科学构建了河流健康评价指标体系, 并建立熵视角下的可拓物元评价模型, 结合各指标的时间序列变化进行河流健康动态评价, 以期为河流开发利用及管理运行提供科学依据和指导。

1 河流健康评价模型构建

应用物元分析理论、可拓论、关联度理论, 结合熵权法确定权重系数, 建立河流健康评价模型。将多指标评价转变为单目标决策问题, 进而通过综合关联度的定量分析, 评价河流健康状态。

1.1 物元模型建立

1) 物元的描述

河流健康评价记作事物 N , 与其特征向量 C 和特征量值 V 组成的有序三元组 $R = (N, c, v)$ 为河流健康物元^[8]。若 N 有多个特征, 它的 n 个特征向量 c_1, c_2, \dots, c_n 和相应的特征量值 v_1, v_2, \dots, v_n , 可构成如下阵列:

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 经典域与节域物元矩阵

河流健康特征(等级)及其标准量值范围构成的物元矩阵为经典域, 记作 R_j 。能够表示河流健康等级全体及其标准量值范围全体的物元矩阵为节域, 记为 R_p 。

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & c_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix}, \quad R_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $N_j (j = 1, 2, \dots, J)$ 表示将河流健康评价物元分为 J 个等级, $a_{ji}, b_{ji} (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别表示各等级取值范围的下限和上限, N_p 是河流健康等级的全体, $N_1, N_2, \dots, N_J \in N_p$; a_{pi}, b_{pi} 分别表示评价等级全体取值范围的下限和上限。

1.2 确定关联函数和关联度

第 i 个指标对应于第 j 健康等级的关联度表达式如下:

$$k_j(v_i) = \begin{cases} \frac{-\rho_{ji}(v_i, V_{ji})}{|V_{ji}|} & (v_i \in V_{ji}) \\ \frac{\rho_{ji}(v_i, V_{ji})}{\rho_{pi}(v_i, V_{pi}) - \rho_{ji}(v_i, V_{ji})} & (v_i \notin V_{ji}) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} \rho_{ji}(v_i, V_{ji}) = |v_i - 0.5(a_{ji} - b_{ji})| - 0.5(b_{ji} - a_{ji}) \\ \rho_{pi}(v_i, V_{pi}) = |v_i - 0.5(a_{pi} - b_{pi})| - 0.5(b_{pi} - a_{pi}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\rho_{ji}(v_i, V_{ji})$ 为点 v_i 与对应特征向量的有限区间(即 $V_{ji} = [b_{ji} - a_{ji}]$)的距离, $\rho_{pi}(v_i, V_{pi})$ 为点 v_i 对应于特征向量节域的有限区间(即 $V_{pi} = [b_{pi} - a_{pi}]$)的距离; v_i, V_{ji}, V_{pi} 分别为河流健康评价物元的量值、经典域物元的量值范围和节域物元的量值范围^[9]。

1.3 熵值法确定权重

熵权法^[10-11]是一种客观赋权方法, 根据各指标的变异程度, 利用信息熵提供给决策者的信息量的大小确定各指标的熵权。再通过熵权对各指标的权重进行修正, 从而得到较为客观的指标权重。 m 个评价事物 n 个评价指标的熵表示为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \left[\sum_{y=1}^m X_{yi} \ln X_{yi} \right] \quad (5)$$

式中, $0 \leq H_i \leq 1$; $X_{yi} = \frac{v_{yi}}{\sum_{y=1}^m 1 + v_{yi}}$, $v_{yi} (y=1, 2, \dots, m)$

..., m)为标准化之后的指标数据,是第 m 个事物第 i 个指标的量值。

根据下式计算评价指标的权重 ω_i :

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{j=1}^m H_j}, \text{且满足 } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (6)$$

1.4 计算综合关联确定评价等级

待评价对象 N_y 关于等级 j 的综合关联度为:

$$K_j(N_y) = \sum_i \omega_i k_j(v_i) \quad (7)$$

式中, ω_i 为各评价指标的权重, $K_j(N_y)$ 为待评价对象 N_y 关于等级 j 的综合关联度,待评价对象 N_y 处于 $\max K_j(N_y)$ 中的 j 级; $k_j(v_i)$ 为待评价对象 N_y 关于等级 j 的单指标关联度,其评级等级处于 $\max k_j(v_i)$ 中的 j 级。

2 模型求解

2.1 研究区概况及数据来源

灞河,属渭河右岸一级支流,位于西安市东南部,南依秦岭山地,北连渭河平原,南北长约 78 km,总流域面积 2581 km²,平均比降 6.0‰。多年平均水面蒸发量为 776 mm,干旱指数 1.6;降水分布由北向南逐渐增加,由平原向山区递增,变化范围在 550~900 mm 之间;多年平均流量为 15.50 m³/s,

多年平均径流量为 4.89 × 10⁸ m³,年径流深为 305.43 mm,径流模数为 9.68 L/(s · km²);灞河多年平均含沙量为 4.43 kg/m³,多年平均输沙量为 196.45 亿 m³。

本研究以 2006—2012 年为时间序列,构成灞河生态健康 7 个待评价事物,数据主要来源于灞河马渡王水文站监测资料、灞河 2006—2012 年地表水监测资料以及《陕西省西安市灞河流域综合规划》相关成果。

对于定性描述、不易获得的指标,通过调查问卷以及专家咨询的方式进行量化。

2.2 构建河流健康评价指标体系

遵循指标的科学性、独立性、整体性及可操作性,借鉴河流健康评价多指标方法 (Multimet-rics)^[12],进行指标体系构建。

本研究从水文、河流形态、水质、生境以及人类活动等要素中,分析列举能够揭示河流生态特征、表征河流生态健康的指标,通过相关性分析,适当合并归类,并运用主成分分析法在指标库中刷选主评指标,并采用权重排序,剔除了权重系数小的指标,以影响程度大的指标对主成分分析的结果进行了补充,最终确定了 18 个河流生态健康评价指标^[13]。

采用熵权法计算指标权重,结果如表 1 所示。

表 1 河流健康评价指标体系及权重
Tab.1 The river health evaluation index system and weight

目标	要素	指标	单位	权重
河流健康	水文要素 B_1	地下水埋深 c_1	m	0.054 8
		生态基流占平均流量百分比 (10月~次年3月) c_2	%	0.049 1
		生态基流占平均流量百分比 (4~9月) c_3	%	0.050 6
		水功能区达标率 c_4	%	0.065 7
	河流形态要素 B_2	纵向连通性 c_5	个/100km	0.051 4
		横向连通性 c_6	%	0.053 4
		湿地保留率 c_7	%	0.050 2
	水质要素 B_3	溶解氧 c_8	mg/L	0.061 8
		化学需氧量(COD) c_9	mg/L	0.057 6
		氨氮(NH ₃ -N) c_{10}	mg/L	0.062 2
		总磷(P) c_{11}	mg/L	0.053 8
		石油类 c_{12}	mg/L	0.052 4
	生境要素 B_4	高锰酸盐指数 c_{13}	-	0.052 6
		生境状况 c_{14}	-	0.057 9
	人类活动要素 B_5	地表水资源开发率 c_{15}	%	0.065 2
		地下水资源开采率 c_{16}	%	0.057 4
		防洪工程完善度 c_{17}	-	0.052 3
		灌溉水利用系数 c_{18}	-	0.051 6

2.2 确定物元模型经典域及节域

根据河流健康的可拓性,将其健康状况划分为4个等级,即健康、亚健康、一般、差,相应的表示为 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 ,其评价标准主要以《地表水环境质量标准》(GB3838—83)、《水功能区划分标准》(GB/T 50594—2010)等作为参考标准,对于缺乏等级划分标准的指标,参考已有文献,采用问卷调查法、专家评分的方法进行[0,100]之间的标度划分,用于河流健康这一事物在不同时间序列下的评价,能够反映该事物状态随时间的相对变化情况。因此,建立河流健康评价的经典域物元矩阵 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ,以及节域矩阵 R_p ,具体如下所示。

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & c_1(0,2) \\ c_2(30,100) \\ c_3(50,100) \\ c_4(70,100) \\ c_5(0,0.5) \\ c_6(80,100) \\ c_7(60,100) \\ c_8(6,9) \\ c_9(0,15) \\ c_{10}(0,0.5) \\ c_{11}(0,0.1) \\ c_{12}(0,0.03) \\ c_{13}(0,4) \\ c_{14}(60,100) \\ c_{15}(0,40) \\ c_{16}(0,60) \\ c_{17}(60,100) \\ c_{18}(0.6,1.0) \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & c_1(2,4) \\ c_2(20,30) \\ c_3(40,50) \\ c_4(60,70) \\ c_5(0.5,0.8) \\ c_6(60,80) \\ c_7(40,60) \\ c_8(5,6) \\ c_9(15,20) \\ c_{10}(0.5,1.0) \\ c_{11}(0.1,0.2) \\ c_{12}(0.03,0.05) \\ c_{13}(4,6) \\ c_{14}(40,60) \\ c_{15}(40,50) \\ c_{16}(60,80) \\ c_{17}(40,60) \\ c_{18}(0.4,0.6) \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & c_1(4,6) \\ c_2(10,20) \\ c_3(30,40) \\ c_4(40,60) \\ c_5(0.8,1.2) \\ c_6(40,60) \\ c_7(20,40) \\ c_8(3,5) \\ c_9(20,30) \\ c_{10}(1.0,1.5) \\ c_{11}(0.2,0.3) \\ c_{12}(0.05,0.5) \\ c_{13}(6,10) \\ c_{14}(20,40) \\ c_{15}(50,60) \\ c_{16}(80,100) \\ c_{17}(20,40) \\ c_{18}(0.3,0.4) \end{bmatrix}, R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & c_1(6,15) \\ c_2(0,10) \\ c_3(0,30) \\ c_4(0,40) \\ c_5(1.2,3) \\ c_6(0,40) \\ c_7(80,100) \\ c_8(2,3) \\ c_9(30,40) \\ c_{10}(1.5,2.0) \\ c_{11}(0.3,0.4) \\ c_{12}(0.5,1.0) \\ c_{13}(10,15) \\ c_{14}(80,100) \\ c_{15}(80,100) \\ c_{16}(100,130) \\ c_{17}(0,40) \\ c_{18}(0,0.3) \end{bmatrix},$$

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1(0,15) \\ c_2(0,100) \\ c_3(0,100) \\ c_4(0,100) \\ c_5(0,3.0) \\ c_6(0,100) \\ c_7(0,100) \\ c_8(2,9) \\ c_9(0,40) \\ c_{10}(0,2.0) \\ c_{11}(0,0.4) \\ c_{12}(0,1.0) \\ c_{13}(0,15) \\ c_{14}(0,100) \\ c_{15}(0,100) \\ c_{16}(0,130) \\ c_{17}(0,100) \\ c_{18}(0,1.0) \end{bmatrix}, R_{2006} = \begin{bmatrix} N_{2006} & c_1 12.2 \\ c_2 28 \\ c_3 36 \\ c_4 50 \\ c_5 1 \\ c_6 50 \\ c_7 35 \\ c_8 8.542 \\ c_9 15.6460 \\ c_{10} 0.443 \\ c_{11} 0.425 \\ c_{12} 0.256 \\ c_{13} 3.263 \\ c_{14} 45 \\ c_{15} 12.05 \\ c_{16} 81 \\ c_{17} 41 \\ c_{18} 0.42 \end{bmatrix}$$

3 灞河生态健康评价实证研究

灞河生态健康待评价物元矩阵中,2006—2012年为7个事物,每个事物包含18个特征,确定评价事物关于各指标 c_i 的具体量值,以2006年为例,待评价物元为 R_{2006} 。将待评价事物关于各指标的具体数据输入模型,即可输出其评价结果。以指标 c_1 (地下水埋深)为例,其具体量值 $v_1 = 12.2$,输入公式(3)即可得到该指标对应各评价等级的关联度,分别为: $k_1(c_1) = -0.785$ 、 $k_2(c_1) = -0.745$ 、 $k_3(c_1) = -0.689$ 、 $k_4(c_1) = 0.230$,可以判断出该指标的健康级别为 N_4 ,处于“差”等级。依次输入其余指标的具体量值,可以评判其健康等级。同样将2007—2012年待评价事物关于各指标的具体量值输入模型,评价其健康等级,结果见表2所示。

从单指标关联度计算与等级评价结果可以看出,灞河流域地下埋深一直处于较低等级,表明地下水开采程度较高,且地表水未能及时补给,给河流健康带来不利影响;从指标 c_5 的评价结果可以看出,灞河纵向连通性逐年变差,由于灞河近年来中上游建成了多座水库、塘坝及引水工程,下游城市段实施生态治理,建起了多座橡胶坝,在保证河道生态用水、城市用水、景观建设及环境整治方面发挥了积极的作用,但不可避免的割断了河道的纵向连通性;水质要素中,氨氮、总磷、石油类、高锰酸盐这四个指标自2007年以后其健康等级明显下降,且对于灞河生态健康等级综合关联度计算影响较大;《陕西省西安市灞河流域综合规划》报告中,2010年灞河流域地表水资源开发利用率为12.6%,指标 c_{15} 的评

价结果印证了这一点,表明泸灞河流域地表水资源开发利用较为合理,且具有一定开发潜力。

表2 灞河2006—2012年健康评价单指标关联度计算与评价结果

Tab. 2 Health evaluation of single index correlation calculation and evaluation result of Bahe River in 2006—2012

关联度	2006年				等级	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
	N_1	N_2	N_3	N_4		等级	等级	等级	等级	等级	等级
$k_j(v_1)$	-0.785	-0.745	-0.689	0.230	差	差	差	差	差	差	差
$k_j(v_2)$	-0.067	0.071	-0.286	-0.391	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	一般	一般
$k_j(v_3)$	-0.280	-0.111	0.111	-0.143	一般	一般	一般	一般	差	差	亚健康
$k_j(v_4)$	-0.286	-0.167	0.200	-0.167	亚健康	一般	一般	一般	亚健康	亚健康	一般
$k_j(v_5)$	-0.333	-0.167	0.200	-0.167	一般	一般	差	差	差	差	差
$k_j(v_6)$	-0.375	-0.167	0.200	-0.167	一般	一般	一般	一般	一般	亚健康	一般
$k_j(v_7)$	-0.417	-0.125	0.143	-0.563	一般	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康
$k_j(v_8)$	0.054	-0.847	-0.886	-0.924	健康	健康	健康	健康	健康	健康	健康
$k_j(v_9)$	-0.040	0.041	-0.218	-0.478	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	一般	一般	一般
$k_j(v_{10})$	0.129	-0.114	-0.557	-0.705	健康	差	差	差	差	差	差
$k_j(v_{11})$	-1.083	-1.125	-1.250	-1.000	健康	差	差	差	差	一般	一般
$k_j(v_{12})$	-0.469	-0.446	0.805	-0.488	一般	一般	一般	差	一般	一般	一般
$k_j(v_{13})$	0.226	-0.184	-0.456	-0.674	健康	差	差	差	一般	一般	差
$k_j(v_{14})$	-0.250	0.111	-0.100	-0.438	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	健康	健康	健康
$k_j(v_{15})$	0.996	-0.699	-0.759	-0.849	健康	健康	健康	健康	健康	健康	健康
$k_j(v_{16})$	-0.300	-0.020	0.012	-0.279	一般	亚健康	一般	一般	一般	亚健康	亚健康
$k_j(v_{17})$	-0.317	0.024	-0.024	-0.024	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康
$k_j(v_{18})$	-0.300	0.048	-0.045	-0.222	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康

将灞河2006—2012年单指标对应各评价等级的关联度计算结果及指标权重数据输入公式(7)可计算得到待评价事物的综合关联度,确定灞河生态健康等级,结果见表3所示。灞河2006—2012年健康等级依次为:健康、亚健康、亚健康、一般、亚健康、亚健康、一般。从评价结果可以看出,灞河健康状况稍有逐年变差的趋势。因此,必须开发与保护并举,加大治理,在河流生命持续健康的状况下,尽可能发挥水体的各种功能,在生态和环境能够承受的范围

内,以求可持续地满足人们生产、生活的需求。

为了验证熵权可拓物元模型在河流健康评价中的合理性,本研究采用层次分析法对灞河2006—2012年健康状况做了评价,与熵权物元模型评价的结果基本一致,结果如表3所示。虽然两种方法评价结果相比之下,各别指标、各别年份存在差异,但没有越级现象。因此,本研究采用熵权可拓物元模型进行河流健康评价合理、可行。

表3 不同方法评价灞河2006—2012年健康等级的比较结果

Tab. 3 The health grade comparison results of different evaluation methods of Bahe Rive in 2006—2012

年份	熵权可拓物元模型评价法				层次分析法		
	综合关联度	N_1	N_2	N_3	N_4	评价等级	评价等级
2006	$K_j(N_{2006})$	-0.198	-0.265	-0.214	-0.423	健康	健康
2007	$K_j(N_{2007})$	-0.365	-0.355	-0.551	-0.432	亚健康	亚健康
2008	$K_j(N_{2008})$	-0.453	-0.426	-0.730	-0.526	亚健康	一般
2009	$K_j(N_{2009})$	-0.430	-0.494	-0.320	-0.343	一般	一般
2010	$K_j(N_{2010})$	-0.386	-0.362	-0.445	-0.393	亚健康	亚健康
2011	$K_j(N_{2011})$	-0.379	-0.336	-0.351	-0.397	亚健康	一般
2012	$K_j(N_{2012})$	-0.451	-0.479	-0.363	-0.388	一般	亚健康

4 结 论

随着城市化进程的加快,灞河逐渐成为西安市的城中河,河流治理及基础设施建设逐步改善了灞河“生态重灾区”的面貌。但在开发及利用过程中,河流生态健康依然是首要关注的问题。本研究采用熵权可拓物元模型对灞河生态健康状况进行了定量评价和综合分析,旨在摸清灞河近年来生态健康状况,验证灞河生态治理的成效,为今后河流开发及治理寻求健康、生态的方式提供了依据和参考。研究结果表明:①灞河2006—2012年生态健康的等级分别为:健康、亚健康、亚健康、一般、亚健康、亚健康、一般。与层次分析法评价结果基本一致,可以说明熵权可拓物元模型在河流健康评价应用中具有一定的合理性和可行性。②从指标体系的要素层来看,水质要素对灞河生态健康的影响较大,尤其是氨氮、总磷、高锰酸盐指数等指标健康等级自2007年以后明显下降,主要来源于生活、生产污水及垃圾。③从指标层来看,尤其长期的地下水超采,导致地下水埋深健康状况一直较差;地表水资源开发利用较为合理,且具有一定开发潜力;灞河近几年的生态治理,使得湿地面积增加、河流生境状况逐渐恢复健康;但水利设施建设不可避免的割断了河流的纵向连通性。因此,必须以河流生态健康为目标进行资源及功能的开发利用,减少地下水的开采,注重水源涵养;对于水污染,必须以防为主,防治结合;同时,对地表水资源有序开发,保证河流生态需水的要求,以期持续利用。

参考文献:

[1] 颜利,王金坑,黄浩. 基于PSR框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J]. 资源科学,2008,30(1):107-113.
Yan Li, Wang Jinkeng, Huang Hao. An assessment of ecosystem health in Dongxi River Basin based on PSR framework[J]. Resources science, 2008, 30(1): 107-113.

[2] Wright J F, Armitage P D, Furse M T. Prediction of invertebrate communities using stream measurements [J]. Regul Rivers: Res Manage, 1989, (4): 147-155.

[3] Schofield N J, Davies P E. Measuring the health of our rivers[J]. Water, 1996, 5/6: 39-43.

[4] Brizga S O, Finlayson B. River management: the Australian experience chischeste[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000: 265-284.

[5] 文伏波,韩其为,许炯心,等. 河流健康的定义与内涵[J]. 水科学进展,2007,(1):140-150.
Wen Fubo, Han Qiwei, Xu Jiongxin, et al. The definition and connotation of river health[J]. Advances in Water Science, 2007, (1): 140-150.

[6] 刘晓黎,黄文政,张洪波,等. 基于断面水情的河流健康评价研究[J]. 西安理工大学学报,2008,24(1):62-66.
Liu Xiaoli, Huang Wenzheng, Zhang Hongbo. River health assessment based on section water regime [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(1): 62-66.

[7] 邓晓军,许有鹏,翟禄新. 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, et al. Establishment and application of the index system for urban river health assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 993-1001.

[8] 余健,房莉,仓定帮,等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报,2012,28(5):260-266.
Yu Jian, Fang Li, Cang Dingbang, et al. Evaluation of land eco-security in Wanjiang district base on entropy weight and matter element model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 260-266.

[9] 施开放,刁承泰,左太安,等. 基于熵权物元模型的耕地占补平衡生态安全评价[J]. 中国生态农业学报,2013,21(2):243-250.
Shi Kaifang, Diao Chengtai, Zuo Taian, et al. Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance based on entropy weight and matter element model [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 28(5): 260-266.

[10] 杨慧娟,李宁,杜子璇,等. 气候变化对内蒙古牧区白灾的影响——基于熵权法分析的锡林浩特市案例研究[J]. 自然灾害学报,2006,(6):62-66.
Yang Huijuan, Li Ning, Du Zixuan, et al. Influence of climate change on heavy snow disaster in pastoral area of Inner Mongolia: an entropy-weighted technique-based case study on Xilinhot City [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, (6): 62-66.

[11] 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[J]. 资源科学,2003,25(4):37-42.
Han Yuping, Ruan Benqing, Xie Jiancang. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation [J]. Resources science, 2003, 25(4): 37-42.

[12] Ladson A R, White L J, Doolan J A, et al. Development and testing of an index of stream condition of waterway management in Australia [J]. Freshwater, 1999, 41(1): 453-468.

[13] 冯彦,何大明,杨丽萍. 河流健康评价的主评指标筛选[J]. 地理研究,2012,31(3):389-398.
Feng Yan, He Daming, Yang Liping. Selection of major evaluation indicators on river health evaluation [J]. Geographical research, 2012, 31(3): 389-398.