

河流生态修复评价方法探讨

于鲁冀^{a,b}, 贾佳^a, 葛丽燕^a

(郑州大学 a. 水利与环境学院; b. 环境政策规划评价研究中心, 郑州 450002)

摘要: 目前, 有关河流生态修复评价指标体系研究中缺乏对经济可行性因素的考虑。在分析河流生态修复评价和相关经济可行性研究成果的基础上, 通过识别河流生态环境的自然因素和社会因素, 探讨了河流周边社会经济因素对河流生态系统修复产生的影响, 并从修复必要性评价和经济可行性评价两方面着手构建了适用于河流生态修复评价的指标体系。采用层次分析法对河流生态修复评价指标赋予权重, 建立了模糊综合评价模型, 为河流生态修复评价研究提供了一种新的方法。最后, 以河南省贾鲁河郑州段和周口段为例开展实际应用研究, 结果证明本评价方法可行。

关键词: 河流生态修复评价; 经济可行性; 指标体系; 层次分析法; 贾鲁河

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0056-06

Discussion on Evaluation Method of River Ecological Restoration

YU Luji^{a,b}, JIA Jia^a, GE Liryan^a

(Zhengzhou University, a. Water Conservancy and Environmental Sciences;
b. Environmental Policy and Evaluation Research Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The current evaluation index system of river ecological restoration lacks the consideration of economic feasibility. Based on the analysis of research achievements on river ecological restoration assessment and economic feasibility, the natural and social factors of river ecological environment were identified, the impacts of socio-economic factors surrounding the river on river ecological system restoration were discussed, and an evaluation index system for river ecological restoration from two aspects of restoration necessity and economic feasibility. The analytic hierarchy process was used to assign the index weight and to develop a fuzzy comprehensive evaluation model, which provided a new method for river ecological restoration assessment. The evaluation index system was applied to the Zhengzhou and Zhoukou sections of Jialu River, and the evaluation results suggested that the method is feasible.

Key words: river ecological restoration evaluation; economic feasibility; index system; analytic hierarchy process (AHP); Jialu River

河流生态系统是生物圈物质循环的重要通道, 具有调节气候、改善生态环境以及维护生物多样性等众多功能^[1]。近百年以来, 人们利用现代工程技术手段, 对河流进行了大规模的开发利用, 兴建了大量工程设施, 改变了河流的地貌学特征和水文特征, 从而极大地改变了河流自然演进的方向, 对河流生态系统造成胁迫。同时日益增多的工业废水和生活污水未经完善处理便排入河流, 致使河流生态环境恶化、生态系统稳定性降低^[2], 主要表现为水体中的养分、水体的化学性质、水文特性和河流生态系统动力学特性发生改变, 因此对原水生生态系统和原物种造成的巨大压力^[3]。从 20 世纪 50 年代开始, 西方发达国家逐步把重点从对河流开发利

用转向对河流的保护。到了 80 年代, 对河流生态系统进行综合修复已经成为发达国家公认的先进治河理念, 诸如河流类型评估(RS)^[4]、美国快速生物监测协议(RBPs)^[5]、澳大利亚溪流状况指数(ISC)^[6]、英国河流栖息地调查方法(RHS)^[7]等多种研究方法的出现。

就我国现阶段而言, 研究河流生态修复评价关键技术对于指导和推动河湖生态系统保护与修复规划工作意义重大^[8]。例如在河南省, 近年来河流生态系统的恶化严重制约了社会经济的可持续发展, 甚至危及人类自身的安全。本文结合河南省社会经济实际状况对河流生态修复评价方法进行的研究, 为河流生态修复评价研究提供科学的依据。

收稿日期: 2013-01-05 修回日期: 2013-03-29 网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.032.html>

基金项目: “十二五”国家重大水专项“淮河流域(河南段)水生态修复关键技术研究及示范”(2012ZX07204-004-001)

作者简介: 于鲁冀(1962-), 男, 河南开封人, 教授, 硕士生导师, 主要从事水生态修复、人工湿地、微生物方面研究。E-mail: yuluji@126.com

通讯作者: 贾佳(1990-), 男, 河南许昌人, 硕士, 主要从事河流生态修复方面研究。E-mail: jiajasper@163.com

1 河流生态修复评价研究思路

对国内外河流生态修复评价研究成果^[9-10]进行深入分析后发现,目前人们侧重于河流生态修复基础理论的研究和对河流生态系统自然环境因素的分析,而缺乏考虑河流周边社会因素和对生态修复经济可行性的探讨。

河流生态修复需要与经济发展相适应,使经济发展与环境改善能够并行可持续发展。因此,河流生态修复评价的应用不仅应该着眼于当地河流生态系统的退化以及河流水质、水文状况的恶化,还应该综合社会经济发展现状的分析。基于现有研究存在的问题,本文重点分析社会经济因素对河流生态修复评价的影响,构建兼顾河流经济可行性和生态修复必要性的河流生态修复评价指标体系,采用专家评判法和层次分析法(AHP法)对所选指标进行权重赋值,并运用模糊综合评判方法将不同尺度的复杂信息进行综合分析,确定河流生态修复指数,讨论河流生态修复评价数值等级的划分,完成多因素多目标的河流生态修复评价。河流生态修复评价的基本流程见图1。

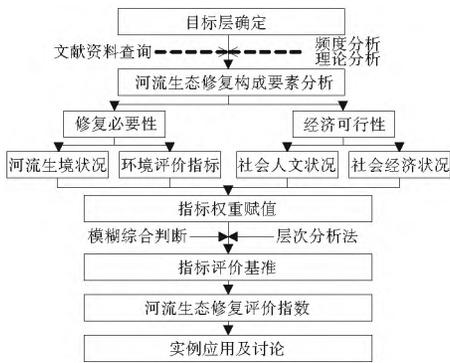


图1 河流生态修复评价基本步骤

Fig. 1 Basic procedures of river ecological restoration evaluation

2 河流生态修复评价方法

20世纪80年代初,我国著名学者马世骏、王如松^[11]提出了“社会-经济-自然复合生态系统”的理论,与自然生态系统理论的区别在于充分重视人类活动对于自然生态系统的能动性。“社会-经济-自然复合生态系统理论”中指出不应孤立地研究自然资源环境退化的问题,而是应该把人类社会的进步和经济的发展与自然环境的退化统一联系起来,在确定社会经济发展和规模的同时必须考虑自然生态系统的承载力。在研究河流生态系统退化和河流生态修复时,应首先对河流自然环境状况进行评价,以判断河流生态系统是否退化,是否退化到不得不修复的程度;然后对河流周边城市社会发展状况进行评价,以判断其是否具有足够的经济能力去支撑河流生态修复的过程。若河流生态系统状况未恶化到一定程度,就没有必要对其进行生态修复;若河流生态系统退化程度严重,但河流周边社会经济发展状况较差,没有能力支撑修复费用,也无法对河流进行生态修复。因此,应在河流生态系统退化严重且社会经济发展程度较高的区域开展生态修复,即进行河流生态修复需要满足修复必要性和经济可行性两个先决条件。

本文针对受损河流生态系统缺乏基础资料的现状,提出以河流生态系统退化状况为参照系统,构建定量的修复标准作为河流生态修复的期望目标,并选择层次分析法(AHP法)作为河流生态修复的评估方法。层次分析法具有所需定量数据少,易于计算,可解决多目标、多层次、多准则的决策问题等特性,其本质在于对复杂系统进行分析 and 综合评价,对评价的元素进行数学化分析^[12]。运用AHP法对河流生态修复进行评估时,首先分析表征河流生态系统主要特征的因素以及经济可行性评价分析因素,建立递进层次结构;其次通过两两比较因素的相对重要性,构造上层对下层相关因素的判断矩阵;在满足一致性检验的基础上,进行总体因素的排序,确定每个因子的权重系数;最后确定评价标准,采用综合指数法或模糊综合评判方法进行相关计算,从而构成基于修复必要性评价和经济可行性评价分析的河流生态修复评价指标体系。

2.1 指标因子的筛选

参考国内外关于河流生态环境的评估指标^[13-16]和现有关于经济可行性评价的研究成果^[17-18],结合河南省河流现有特征,从生态修复必要性评价和社会经济可行性评价两方面选取共12个指标来构建河流生态修复的指标体系,分为目标层、因素层、指标层3个层次结构。

河流生态系统受人类活动的干扰而功能受损,修复必要性评价实质上是分析河流生态系统的退化程度。由于河流生态系统囊括的范围较广,在分析河流生态系统退化的时候,需要综合考虑河流的生境因素、水文水质因素,且不能仅仅局限于河水质的恶化,需要更进一步的分析水质恶化造成的河流生态结构的变化、河流基本功能的丧失等等。选用河流生境状况和环境评价指标作为河流生态系统修复必要性的两类评价指标。

经济可行性评价主要表征经济因素对于河流生态的驱动作用,反映生态脆弱地区存在的“越污染越贫困,越贫困越污染”的河流利用困局。研究经济可行性评价的目的在于了解河流生态修复的综合效益和合理程度。分析研究区域内经济发展与河流生态的关系时,既不能一味地追求经济发展而忽略河流生态的恶化,又不能一味地追求河流生态恢复而弱化经济利益的满足。因此,在经济可行性评价中选用社会状况指标和经济状况指标来进行相关的评价。

河流生态修复评价的具体指标及其释义见表1。

表1中水质平均污染指数(WQI)^[19]用来表征河流水质污染状况,指数的大小反映了河流污染的程度,数值越大表明河流污染越严重。计算公式如下:

$$WQI = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{ij}}{S_{ij}} \quad (1)$$

式中: C_{ij} 为 i 指标在采样点 j 处的实测值; S_{ij} 为 i 指标的评判标准,参照《地表水环境质量标准》(GB 3838 2002) 相应水质标准; n 为监测指标数目; m 为研究河段监测点位数目。

2.2 指标权重赋值

首先在专家咨询的基础上确定因素之间及各因素构成指标之间的判断矩阵,然后采用和积法计算判断矩阵的特征

向量和最大特征值,并在对判断矩阵进行一致性检验的基础上确定因素层和指标层单排序权重,最后计算出指标层对于

目标层的综合权重,并使结果通过一致性检验。河流生态修复评价指标详细权重以及权重排序见表 2。

表 1 河流生态修复评价指标体系及指标释义

Table 1 The evaluation index system of river ecological restoration and interpretation of each index

目标层	因素层	指标层	指标释义	
修复必要性评价	河流生境状况	水质平均污染指数(WQI)	包括河道的COD、氨氮等污染物质的含量以及水体颜色、透明度等物理特征,采用水质平均污染指数来表征河流水质污染状况	
		蜿蜒度	河段两端点之间沿河道中心轴线长度与两点之间直线长度的比值	
		溶解氧平均含量	水体中溶解氧平均含量	
	环境评价指标	产水系数	区域内水资源总量与当地降水量的比值	
		水资源开发利用率	水资源开发量占流域水资源总量的百分数	
		水文稳定性	河流稳定性	
		河流景观效应	河流景观满意度	
		水功能区水质达标率	水质达标水量占取水总量的百分数	
		社会状况	亲水活动频繁性	居民对河流的依赖程度
			人均水资源量	供水达标人口占总人口比例
人口增长率	人口自然增长数与该时期内平均人口数之比			
人类活动干扰指数	大中型闸坝及橡胶坝等水利设施分布情况			
经济可行性评价	经济状况	污水处理率	经处理达标排放量占总污水排放量比值	
		单位GDP用水量	水资源利用总量与国内生产总值的比值,反映水资源消耗水平的重要指标	
	社会状况	人均GDP	个人平均国民收入	
		环保投资占GDP比例	环境保护投资资金占区域生产总值比例	

表 2 河流生态修复评价指标权重赋值及权重排序

Table 2 The weight value and sequence of each index for river ecological restoration evaluation

目标层(A)	目标层相对权重	因素层(B)	因素层相对权重	指标层(C)	指标层相对权重	绝对权重值	权重次序			
修复必要性评价	0.5	河流生境状况	0.5	水质平均污染指数(WQI)	0.423 7	0.105 9	2			
				蜿蜒度	0.090 2	0.022 6	15			
				溶解氧平均含量	0.287 3	0.071 8	6			
				产水系数	0.198 8	0.049 7	10			
		环境评价指标	0.5	0.5	水资源开发利用率	0.360 9	0.090 2	3		
					水文稳定性	0.160 4	0.040 1	11		
					河流景观效应	0.127 9	0.032 0	13		
					水功能区水质达标率	0.350 8	0.087 7	4		
					社会状况	0.3	亲水活动频繁性	0.121 3	0.018 2	16
							人均水资源量	0.439 3	0.065 9	7
人口增长率	0.192 7	0.028 9	14							
人类活动干扰指数	0.246 7	0.037 0	12							
经济可行性评价	0.5	0.7	污水处理率	0.212 3	0.074 3	5				
			单位GDP用水量	0.426 5	0.149 3	1				
			人均GDP	0.180 6	0.063 2	8				
			环保投资占GDP比例	0.180 6	0.063 2	9				

由表 2 可得,在所有评价指标中,绝对权重值最大的 5 个指标依次为单位 GDP 用水量、水质平均污染指数、水资源开发利用率、水功能区水质达标率、污水处理率,是河流生态修复评价指标体系中的关键指标。既包括修复必要性评价指标,又包括经济可行性评价指标,表明修复必要性评价与经济可行性评价的同等重要。对比因素层与目标层之间的相对权重值,可以分析出社会经济状况指标的重要性。

2.3 指标评价基准

评价基准以河流生态系统功能以及完善程度作为原型来确定,并参考国际标准及水质监测数据,部分指标参照国

内相关研究文献。评价基准分为优、良、中、差 4 个级别。

为了避免不同物理意义和不同量纲的输入变量不能平等使用,采用了模糊综合评判模型,将指标数值由有量纲的表达式变换为无量纲的表达式。在模糊综合评判时,需要建立隶属函数,使模糊评价因子明晰化,不同质的数据归一化。根据河流生态修复评价指标的筛选,隶属函数分 2 类:

$$\begin{aligned}
 & \text{正向指标 } x_{ij}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, \text{ 正向隶属函数为:} \\
 & f(x_{ij}) = \begin{cases} 1, & x_{ij} \geq \max \\ 1 - \frac{\max - x_{ij}}{\max - \min}, & \min \leq x_{ij} \leq \max \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

逆向指标 $x_{ij}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$, 逆向隶属函数为:

$$f(x_{ij}) = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq \min \\ 1 - \frac{x_{ij} - \min}{\max - \min}, & \min \leq x_{ij} \leq \max \end{cases} \quad (2)$$

河流生态修复评价基准不同等级的指标值及归一化值见表 3。

利用表 3 中的数据计算河流生态修复评价指标归一化值,

表 3 河流生态修复评价指标评价标准以及归一化值

Table 3 The evaluation standard and normalized value of each index for river ecological restoration evaluation

目标层	因素层	指标层	分级标准				指标归一化值				
			优	良	中	差	优	良	中	差	
修复必要性评价	河流生境状况	水质平均污染指数 (WQI)	0~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1	0.7143	0.4286	0	
		蜿蜒度	3~4	2~3	1.4~2	1~1.4	1	0.7826	0.4348	0	
		溶解氧平均含量/(mg·L ⁻¹)	>6	5~6	3~5	<3	1	0.6667	0.3333	0	
	环境评价	指标	产水系数	>0.30	0.24~0.30	0.15~0.24	<0.15	1	0.5	0.15	0
			水资源开发利用效率(%)***	0~30	30~45	45~60	>60	1	0.75	0.375	0
		水文稳定性*	水文稳定性*	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0~0.4	1	0.5714	0.2857	0
			河流景观效应*	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0~0.4	1	0.5714	0.2857	0
	经济可行性评价	社会状况	水功能区水质达标率(%)	95~100	80~95	65~80	<65	1	0.5263	0.2105	0
			亲水活动频繁性*	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0~0.4	1	0.5714	0.2857	0
			人均水资源量/m ³ ***	>1200	500~1200	300~500	<300	1	0.8261	0.435	0
人口增长率(%)**		人口增长率(%)**	0	0~5.89	5.89~17.7	>17.7	1	0.5875	0.1475	0	
		人类活动干扰指数	0~3	4~5	6~7	>8	1	0.5882	0.3529	0	
经济状况		污水处理率(%)	污水处理率(%)	100	95~100	85~95	<85	1	0.6667	0.333	0
			单位 GDP 用水量/m ³	0~0.01	0.01~0.1	0.1~0.15	>0.15	1	0.8165	0.4495	0
		人均 GDP/元**	人均 GDP/元**	>13944	6972~13944	4648~6972	<4648	1	0.9	0.4	0
			环保投资占 GDP 比例(%)	>10	8~10	5~8	<5	1	0.6667	0.3333	0

注: * 表示此指标为定性分析指标; ** 表示指标分级标准根据相关文献确定; *** 表示该指标标准是依据研究区域现实情况有所调整。

选取标准范围内具有代表性的数值进行相关计算, 得到指标归一化值的模糊变换集合为:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.429 & 0.7143 & 1 \\ 0 & 0.435 & 0.7826 & 1 \\ 0 & 0.333 & 0.6667 & 1 \\ 0 & 0.15 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0.375 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.286 & 0.5714 & 1 \\ 0 & 0.286 & 0.5714 & 1 \\ 0 & 0.211 & 0.5263 & 1 \\ 0 & 0.286 & 0.5714 & 1 \\ 0 & 0.435 & 0.8261 & 1 \\ 0 & 0.148 & 0.5875 & 1 \\ 0 & 0.353 & 0.5882 & 1 \\ 0 & 0.333 & 0.6667 & 1 \\ 0 & 0.4 & 0.9 & 1 \\ 0 & 0.314 & 0.7143 & 1 \\ 0 & 0.333 & 0.6667 & 1 \end{bmatrix}$$

由表 2 得河流生态修复评价指标权重集合为 $A = \{0.106, 0.023, 0.072, 0.050, 0.090, 0.040, 0.032, 0.088, 0.018, 0.066, 0.029, 0.037, 0.074, 0.149, 0.063, 0.063\}$

采用改进的模糊综合评价模型进行相关计算, 如下式:

$$B_j = \sum a_i \cdot r_{ij} = \{0, 0.3361, 0.6958, 1\} \quad (3)$$

则河流生态修复综合评价指标标准集见表 4。

3 实例应用

3.1 评价对象

根据构建的河流生态修复评价指标体系, 分别以贾鲁河

表 4 河流生态修复综合评价指数等级

Table 4 The comprehensive grade of river ecological restoration evaluation

分级	优	良	中	差
综合评价标准值	1.0	0.6958~1.0	0.3361~0.6958	0~0.3361
状态	河流水质良好, 完全能够保证河流生态系统的基本功能, 具有自动适应和自控能力; 河流周边社会经济发展状况良好, 完全可以支撑河流生态修复的需求	河流水质较好, 能够保证河流生态系统的基本功能, 能在人工调节下持续周边社会经济发展; 河流周边社会经济发展良好, 能够支撑河流生态修复的需求	河流水质一般, 基本能够维持河流生态系统的基本功能; 河流周边社会经济发展状况能够在一定程度上维持部分河流生态系统的修复	河流水质很差, 基本丧失河流生态功能; 河流周边社会经济发展缓慢, 无法维持对河流生态修复的需求

郑州段和贾鲁河周口段作为评价对象开展实例应用分析。贾鲁河是淮河流域的一条重要支流, 发源于新密市, 流经郑州市、开封市, 最终在周口市汇入沙颍河, 全长 255.8 km, 至今已有 2000 多年历史。河流周边城镇居民众多, 是众多城市赖以生计的河流。贾鲁河流经郑州市和周口市, 对当地的社会经济发展起到重要作用。贾鲁河郑州段从贾鲁河源头处到中牟陈桥断面, 有金水河、熊耳河等郑州市内重要河流汇入, 接纳郑州、荥阳、新密、中牟等县市的污水, 水质均为Ⅲ类或Ⅳ类水水质标准; 贾鲁河周口段是从扶沟摆渡口断面到贾鲁河汇入沙颍河处, 接纳尉氏、扶沟、西华等县市的污水, 横穿众多居民聚集区, 水质均为劣Ⅴ类。贾鲁河是沙颍

河的主要污染源之一, 河流生态系统退化程度较为严重, 被列为“十二五”重点治理河流, 因此, 急需对贾鲁河沿境的生态退化状况的修复必要性以及周边城市进行生态修复的经济可行性进行评价研究。

表 5 郑州段与周口段贾鲁河生态修复综合评价归一化值

Table 5 The normalized values of each index for ecological restoration comprehensive evaluation of the Zhengzhou and Zhoukou sections of Jialu River

目标层	因素层	指标层	指标数值		归一化值	
			郑州市	周口市	郑州市	周口市
修复必要性评价	河流生境状况	水质平均污染指数	0.7	0.8	0.286	0.142 9
		蜿蜒度	2	1.2	0.347 8	0
		溶解氧平均含量/(mg · L ⁻¹)	5.4	5	0.644 4	0.555 6
		产水系数	0.22	0.28	0.6	0.9
环境评价指标		水资源开发利用率(%)	53	66	0.14	0
		水文稳定性	0.7	0.5	0.714 3	0.428 57
		河流景观效应	0.5	0.8	0.142 9	0.571 4
		水功能区水质达标率(%)	20	60	0	0.210 5
经济可行性评价	社会状况	亲水活动频繁性	0.7	0.9	0.428 6	0.714 3
		人均水资源量/m ³	158.5	257	0	0
		人口增长率(%)	5.24	4.63	0.738	0.768 5
		人类活动干扰指数	2	8	0.941 2	0.235 3
	经济状况	污水处理率(%)	97.2	97.3	0.813 3	0.82
		单位 GDP 用水量/m ³	0.05	0.155	0.742 9	0.142 9
		人均 GDP/元	44 237	8 051	1	0.405 1
		环保投资占 GDP 比例(%)	5.2	0.08	0.244 4	0

根据表中的指标归一化值与指标权重赋值结果, 计算出贾鲁河郑州段和周口段生态修复综合评价数值, 见表 6。

表 6 郑州段和周口段贾鲁河生态修复综合评价数值

Table 6 The comprehensive evaluation results for ecological restoration of the Zhengzhou and Zhoukou sections of Jialu River

城市	郑州市	周口市
修复必要性评价	0.196 1	0.173 7
经济可行性评价	0.341 3	0.182 8
综合评价价值	0.537 4	0.356 5
综合评价分级	中	中

由表 6 可以得出, 按照本文拟定的生态修复评价指标体系和评价模型, 计算出贾鲁河郑州段与周口段的生态修复综合评价等级都是“中”, 即河流水质一般, 能够在一定程度上保障河流生态系统的基本功能; 河流周边社会经济发展在一定程度上可以维持部分河流生态系统的修复。但分别分析修复必要性评价和经济可行性评价的评价价值, 贾鲁河郑州段河流生态修复综合评价数值较低, 是因为河流生态系统退化严重、沿河水质恶化, 但郑州市社会经济发展程度较高, 能够负担一定程度的河流生态修复措施; 而贾鲁河周口段生态修复综合评价数值较低, 却是由于生态系统退化和经济发展滞后两方面共同造成的, 即在河流生态系统退化程度严重的同时, 城市社会经济发展也较为滞后。以修复必要性评价而言, 贾鲁河郑州段与周口段重要性相当; 但以经济可行性而言, 贾鲁河周口段明显距郑州段有一定的差距。因此, 在进行河流生态修复时, 贾鲁河郑州段要比贾鲁河周口段更有优势。

3.2 数据收集

结合实地调查、专家咨询等方法, 同时参考水利、规划等部门对于河流的定位, 确定各指标的数值, 见表 5。

4 结语

河流是人类赖以生存的水环境, 河流生态修复的目的是使河流生态系统恢复健康状态。本文在考虑河流生境因素、环境因素、社会因素以及经济因素的基础上, 从修复必要性评价与经济可行性评价两方面出发构建河流生态修复评价指标体系, 并运用一定的数学方法计算出河流生态修复综合评价指数。不过, 基于基础数据缺乏的现状, 从可操作性的角度考虑, 本文选取的指标未详细涉及河流生态系统中动植物及微生物等因素, 导致指标体系仍不够详尽, 有待进一步深入与完善。

参考文献(References):

- [1] 耿雷华, 刘恒, 钟华平. 健康河流的评价指标和评价标准[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 253-258. (GENG Lei hua, LIU Heng, ZHONG Hui ping. Indicators and Criteria for Evaluation of Healthy Rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 253-258. (in Chinese))
- [2] 柳新伟, 周厚诚, 李萍, 等. 生态系统稳定性定义剖析[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2635-2640. (LIU Xin wei, ZHOU Hou cheng, LIU Ping, et al. A Conceptual Analysis of Ecosystem Stability[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2635-2640. (in Chinese))
- [3] 钱正英, 陈家琦, 冯杰, 等. 人与河流和谐发展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 1-5. (QIAN Zheng ying, CHEN Jia qi, FENG Jie, et al. Harmonious Development of Humanity and Rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),

- 2006, 34(1): 1-5. (in Chinese)
- [4] Brierley G, Fryirs K. River Styles, A Geomorphic Approach to Catchment Characterization in Applications for River Rehabilitation in Bega Catchment, New South Wales, Australia[J]. Environmental Management, 2000, 25(6): 661-679.
- [5] Melissa Parsons, Martin T, Richard N, et al. Review of Physical River Assessment Methods: A Biological Perspective[M]. Canberra: University of Canberra and Commonwealth of Australia, 2000, 11-17.
- [6] Parsons M, Thoms M. C, Norris R. H. Development of a Standardized Approach to River Habitat Assessment in Australia[J]. Environment Monitoring and Assessment, 2004, 98: 109-130.
- [7] 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, 422/423: 359-367.
- [8] 朱党生, 张建永, 李扬, 等. 水生态保护与修复规划关键技术[J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 59-63. (ZHU Dangsheng, ZHANG Jianyong, LI Yang, SHI Xiaoxin. Key Technologies for Aquatic Ecosystem Protection and Rehabilitation Planning[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(5): 59-63. (in Chinese))
- [9] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[J]. 水利水电技术, 2005, 36(11): 15-19. (DONG Zheren. Overseas Assessing Technology for River Health[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(11): 15-19. (in Chinese))
- [10] 任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1756-1764. (REN Hai, PENG Shaolin, LU Hongfang. The Restoration of Degraded Ecosystems and Restoration Ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1756-1764. (in Chinese))
- [11] 马世骏, 王如松. 社会经济自然复合生态系统[J]. 生态学报, 1984, (4): 1-9. (MA Shirun, WANG Rusong. The Socioeconomic Natural Complex Ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 1984, (4): 1-9. (in Chinese))
- [12] 蓝伯雄, 程佳惠, 陈秉正. 管理数学运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 376-379. (LAN Boxiong, CHENG Jiahui, CHEN Bingzheng. Management Mathematics Operations Research[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 376-379. (in Chinese))
- [13] 胡孟春, 张永春, 唐晓燕, 等. 城市河道近自然修复评价体系与方法及其在镇江古运河的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 187-196. (HU Mengchun, ZHANG Yongchun, TANG Xiaoyan, et al. System and Method for Appraisal of Near-natural River Restoration and its Application to the Grand Canal in Zhenjiang[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(2): 187-196. (in Chinese))
- [14] 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, 42(12): 16-21. (ZHANG Jing, DONG Zheren, SUN Dongya, et al. Assessment Method for a Fuzzy Theory Based Complete River Health Index System[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 42(12): 16-21. (in Chinese))
- [15] 朱伟, 夏霆, 姜谋余, 等. 城市河流水环境综合评价方法探讨[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 736-744. (ZHU Wei, XIA Ting, JIANG Moryu, et al. Comprehensive Assessment of Water Environment for Urban Stream[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 736-744. (in Chinese))
- [16] 蔡楠, 杨扬, 方建德, 等. 基于层次分析法的城市河流生态修复评估[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(9): 1092-1098. (CAI Nan, YANG Yang, FANG Jiande, et al. Evaluation of Urban River Ecological Remediation by Using Analytical Hierarchy Process[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(9): 1092-1098. (in Chinese))
- [17] 许尔琪, 张红旗. 中国生态脆弱区土地可持续利用评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(3): 1-6. (XU Erqi, ZHANG Hongqi. Research on the Evaluation of Land Use Sustainability in Ecologically Fragile in China[J]. Chinese Journal of Agriculture Resources and Regional Planning, 2012, 33(3): 1-6. (in Chinese))
- [18] 任梅芳, 童新华, 韦燕飞. 基于 GIS 的广西耕地整治外生潜力分区研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(30): 18808-18810. (REN Meifang, TONG Xinhua, WEI Yanfei. Study on the Exogenous Potential Subarea of Guangxi Cultivated Land Renovation Based on GIS[J]. Journal of Anhui Agriculture, 2011, 39(30): 18808-18810. (in Chinese))
- [19] 沈韞芬, 冯伟松, 顾曼如, 等. 河流的污染监测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995: 13-14. (SHEN Yunfen, FENG Weisong, GU Maru, et al. Monitoring of River Pollution[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1995: 13-14. (in Chinese))