

文章编号:1004-8227(2010)09-1092-07

基于层次分析法的城市河流生态修复评估

蔡楠¹, 杨扬^{1,2*}, 方建德¹, 蒋纯才¹, 宁安¹, 陈晓燕¹

(1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655; 2. 暨南大学水生生物研究中心, 热带亚热带水生态工程教育部工程研究中心, 广东 广州 510632)

摘要: 城市的发展改变了许多河流的自然水文环境, 并导致河流生态系统中水质、物理生境和生物完整性下降。评估受损河流水体修复的效果, 需要结合物理、化学的参数, 以及对生物结构、多样性和过程的影响。构建了包含河流水力、水质、水生生物、河岸带及物理结构 5 个方面 15 个指标的城市河流生态修复评估指标体系, 运用群组决策的层次分析法(AHP), 确定了各指标的权重, 重要性排序前 5 位依次为: 水质污染指数、鱼类 IBI、水源补给量、藻类多样性、透明度。并以我国南方城市岐江河整治修复状况为例进行综合评价, 结果表明, 河流生态系统修复评估结果为可以接受, 体现了河流整治工程使河流水质、生态的状况有所改善, 但河流生态系统恢复需要较长的周期, 修复初期生态系统仍处于受损状态。

关键词: 城市河流; 生态修复; 指标体系; 层次分析法; 评估
文献标识码: A

城市河流具有供水、生物保护与景观欣赏等多种生态服务功能, 其自然、社会、经济与环境价值推动了城市的发展。与自然河流相比, 城市河流受人类活动影响剧烈, 城市河流成为人类活动与自然过程协同作用最为强烈的地带之一^[1]。城市河流生态系统受损往往是自然与人为干扰共同作用的结果, 其中起主导作用的是叠加在自然干扰之上的人类的干扰, 它压迫或改变了城市河流生态系统的演替过程, 使生态作用过程中断或破坏, 河流生态系统退化, 生态服务功能下降^[2]。因此, 河流修复的主要目的在于减轻人类活动对河流自然模式或多样性的限制, 这种活动本身应集中在重建一种使河流自然过程能够再生的状态, 使河流生态系统回到自然演替的轨迹上, 在合理控制人类干扰强度的情况下, 保持其生态平衡状态。

河流生态修复是一项新兴工程, 基于其复杂性和多样性, 需要制定河流生态修复成功与否的判别标准, 国内外很多学者呼吁制定必要的标准或准则, 以开展河流恢复工程的评估, 遗憾的是至今还没有一个理想的、统一的评估标准。也正由于在这一环节上技术支撑的缺失, 近年来虽然对河流的保护和

恢复工程开展较多, 但用于评估其恢复有效性、提高河流恢复质量的评估工作却得不到有效开展^[2]。因此, 建立一套具有代表性、易于获取、便于操作的河流水体修复效果评估的指标体系, 以便能有效地评估城市河流生态修复工程效果是非常必要的。

为此, 作者构建城市河流生态修复评估指标体系, 运用层次分析方法确定各指标的权重和重要性排序。把该方法应用于南方城市岐江河, 在对岐江河开展修复工程后的水文、水化学、水生生态及生境调查基础上, 对该河流修复工程阶段性效果作出评价。

1 城市河流生态修复评估指标体系的构建

我国河流生态修复的目标应是通过运用适当的工程措施、管理措施和生物措施、依靠自然的自我修复能力, 使当前的河流生态状况有所改善并向良性方向演进, 部分地恢复到干扰前某种状态下生态系统的结构和功能^[2]。但由于我国城市河流地区人口密集、城镇密布、土地利用率高, 受人为干扰严重, 在

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-05-12

基金项目: 国家环保公益性科研专项基金项目(200709009); “十一五”重大水专项(2009ZX07211-009)

作者简介: 蔡楠(1966~), 女, 广东省汕头人, 研究员, 硕士, 主要从事环境信息处理与评估方法研究, E-mail: cainan@scies.org

* 通讯作者 E-mail: yangyang@scies.org

同一条河流上已经没有良好的河段可作为评估效果的参照体系。因此,究竟如何选择适当地参照系统评估河流恢复到干扰前的状态,成为河流修复评估体系建立的难点。

作者针对基础资料严重缺乏的城市受损河流,提出以河流污染现状为参照系统,构建定量的修复标准作为河流修复效果评估标准及未来的期望目标。并运用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的层次分析法(简称 AHP 法),作为城市河流修复评估方法。

河流生态系统是与河流水文地貌、水质状况、水生生境等相关的一个复合系统。层次分析法的本质在于对复杂系统进行分析和综合评价,对评价的元素进行数学化和计算机化^[3]。运用 AHP 法对城市河流生态修复评估,主要有以下过程:首先分析能够表征城市河流生态系统主要特征的因素及其相互关系,将系统层次化,建立递阶层次结构模型;第二,通过两两比较因素的相对重要性,给出相应的比较标度,构造上层某因素对下层相关因素的判断矩阵;在

满足一致性检验原则前提下,进行目标下的因素单排序,最后将各子目标下因素的排序逐层汇总后,给出总目标下因素的总排序,即确定每个特征因子的权重系数;第三,确立评价标准,采用的计算方法;从而构成城市河流生态修复评估的指标体系。

1.1 递阶层次结构的建立

城市河流修复评估指标体系的构建应围绕城市河流生态系统修复的特征,因此,需综合性考虑城市河流生态环境质量,它主要决定于河流水力、水质、河岸带、水生生物和物理结构^[4],而每一类要素又包含众多的影响子因素。河流生态系统作为一个整体性、动态性复杂系统,其中任一影响因子的变化都将影响河流生态环境质量。在参考国内外关于河流生态环境的评估指标^[5~11]基础上,依据层次分析法的多元定量化方式,采用城市河流生态修复实践中考虑的内容和目标,经实际调查分析和专家咨询,选取五大要素共 15 个指标来反映河流生态修复的指标体系(见表 1)。将该体系划分为目标层(A)、要素层(B)、指标层(C)3 个层次结构,各指标含义如表 1 所述。

表 1 城市河流生态修复评估指标体系

Tab. 1 Evaluating Indicator System of Urban River Ecosystem Remediation

目标层	要素层	指标层	指标说明和计算方法
A 城市河流生态修复	B ₁ 河流水力	C ₁ 水源补给量	降雨、基流、调水等补给流量,维持河流生态系统特征的生态需水量
		C ₂ 用水量	反映水资源开发利用程度,满足河流生态服务功能
		C ₃ 水质平均污染指数	反映河流水污染改善状况,体现生物生存的外界环境条件改善。选取 BOD ₅ 、COD、氨氮、重金属、石油类等理化指标。 $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$
	B ₂ 水质特征	C ₄ 营养状态	反映河流富营养化状况。采用水体综合营养状态指数法(TLI) ^[12] ,选择叶绿素 a、总磷、总氮作为评价指标。 $TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j)$
		C ₅ 透明度	反映河流水体澄清变化程度。采用塞氏盘法实测
		C ₆ 恶臭	反映河流修复效果的感官指标。采用六阶段臭气强度法判断 ^[13]
		C ₇ 溶解氧	反映河流水体自净能力恢复的重要指标。河流断面监测获得
B ₃ 水生生物	C ₈ 鱼类 IBI	处于营养顶级的鱼类反映了河流水生态系统的综合状况,折射出人类活动对河流胁迫的累积效应。参考 Fausch 等提出的基于河流鱼类物种丰富度、指示种类别、营养类型、鱼类数量等 12 项指标的生物完整性指数(IBI) ^[8] ,根据当地鱼类资源特点对有关指标进行替换。	
	C ₉ 藻类多样性	藻类的种(属)数,种(属)数越小,水体受污染的程度越重。采用 Shannon-Wioner 多样性指数计算, $H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ ($P_i = N_i/N$)	
	B ₄ 河岸带	C ₁₀ 河岸带植被覆盖率(%)	对河流景观功能、抗水土流失及生物保护等方面起着重要作用。岸坡植被覆盖面积/岸坡总面积
		C ₁₁ 河岸景观效应	城市河流河岸的景观功能,包括景观的美学、资源及视觉价值等
	B ₅ 物理结构	C ₁₂ 河岸、河床的稳定性	物理结构的变化直接表现为河岸、河床的稳定性等
C ₁₃ 与附近生态斑块连通性		河道与周围湿地、绿地、公园等生态斑块的连通性	
C ₁₄ 河流连通度		水工建筑会割裂河流的纵向连续性	
		C ₁₅ 鱼类栖息地状况	鱼类的栖息与洄游环境的好坏,连通性

1.2 指标权重的确定

1.2.1 构造判断矩阵

AHP 应用的关键是构造者(专家、决策者)在对

指标进行两两比较判断的基础上构造出具有一致性的判断矩阵。现广泛采用的是美国 Saaty 教授提出 1—9 标度法^[3],用 Delphi 法逐项就任意两个指标进

行比较。但层次分析法基本模型中的确定各因素权重的方法,是以专家的主观判断为基础的,而有些专家难以适应和熟悉 1-9 的比较标度,可能给出一致性差的判断矩阵。为了克服这一缺陷,邱苑华^[14]、丁树良^[15]、丁俭^[16]等提出了群体决策 AHP 模型,使参评专家只需按习惯方式打分即可得到群体对目标的最优排序结果。本文结合以上方法,采取以下步骤构造判断矩阵:

(1) 设由 S_1, S_2, \dots, S_m 组成的 m 个专家群组决策系统 G , 评价 n 个对象 B_1, B_2, \dots, B_n , 第 i 个专家 S_i 对第 j 个被评目标 B_j 的评分值记为 $x_{ij} \in [I, J]$ ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$), 的值按 1-9 打分, x_{ij} 值越大, 目标 B_j 越优。

(2) 取各专家评分值的算术平均数, $\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}$, 得到 n 维综合评分向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。

(3) 取 $A = (a_{ij})$ 为专家组的判断矩阵, 其中 $a_{ij} = x_i / x_j, i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

1.2.2 层次单排序及一致性检验

根据表 1 的层次结构, 先计算 A-B 单排序。按以上步骤, A-B 判断矩阵如下:

$$(A-B) = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 & 6/7 & 5/2 & 2 \\ 3/2 & 1 & 3/2 & 7/2 & 3 \\ 7/6 & 2/3 & 1 & 5/2 & 2 \\ 2/5 & 2/7 & 2/5 & 1 & 4/5 \\ 1/2 & 1/3 & 1/2 & 5/4 & 1 \end{bmatrix}$$

然后利用 MATLAB 软件中的 eig 函数可快速

解出矩阵最大特征值和特征向量^[17]。

对判断矩阵进行一致性检验, 随机一致性比率 $C.R.$ 按 $C.R. = C.I. / R.I.$ 计算, 其中: 矩阵一致性指标 $C.I. = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$; n 为判断矩阵阶数; λ_{\max} 为最大特征值; $R.I.$ 为对应 n 的平均随机一致性指标, 可通过查表得出^[18]。当 $C.R. < 0.1$ 时, 则认为判断矩阵具有满意的一致性, 否则重新调整矩阵元素值。将特征向量进行归一化处理, 即得出层次单排序的权向量。

经计算 $C.I. = 0.0009$; 而直接采用 1-9 标度构造判断矩阵的一致性指标 $C.I. = 0.0895$ 。可见, 采用改进方法比 1-9 标度法大大地改善了判断矩阵的性能, 也排除了个别专家判断的失误干扰。

(A-B) 的一致性检验结果为: $C.R. = 0.00076 < 0.1$, 具有满意的一致性。

同理, 分别求出 $B_1-C, B_2-C, B_3-C, B_4-C, B_5-C$ 的单排序, $C.R.$ 分别为: $0, 0.00192, 0, 0, 0.00607$, 均小于 0.1, 具有满意的一致性。各单排序权重见表 2。

1.2.3 层次总排序及一致性检验

利用同一层次中所有层次单排序的结果, 可以计算针对上一层次而言的本层次所有元素的重要性权重值, 这就是层次总排序。按以下公式对层次总排序进行一致性检验^[18]。

$$C.I. = \sum_{i=1}^5 B_i(C.I.)_i, R.I. = \sum_{i=1}^5 B_i(R.I.)_i$$

层次总排序(A-C)如表 2 中所示, 经过一致性检验结果为 $CR=0.00281 < 0.1$, 具有满意的一致性。

表 2 各层次影响因素的权重排序

Tab. 2 Sequence of the Weight of the Factors in Hierarchy

B 层			C 层		
要素	A-B 单排序权重	指标	B-C 单排序权重	A-C 总排序权重	次序
B ₁	0.221 2	C ₁	0.666 7	0.147 4	3
		C ₂	0.333 3	0.073 7	6
		C ₃	0.496 8	0.167 5	1
		C ₄	0.101 5	0.034 2	9
B ₂	0.337 2	C ₅	0.276 6	0.093 3	4
		C ₆	0.055 8	0.018 8	14
		C ₇	0.069 3	0.023 4	12
		C ₈	0.666 7	0.156 8	2
B ₃	0.235 3	C ₉	0.333 3	0.078 4	5
		C ₁₀	0.750 0	0.069 3	7
B ₄	0.092 4	C ₁₁	0.250 0	0.023 1	13
		C ₁₂	0.317 3	0.036 2	8
		C ₁₃	0.287 3	0.032 7	10
		C ₁₄	0.153 6	0.017 5	15
B ₅	0.113 9	C ₁₅	0.241 8	0.027 5	11

从以上对城市河流生态修复指标体系的层次分析结果得出,影响河流生态系统修复的主要因子重要性排序前 5 位依次为:水质污染指数、鱼类 IBI、水源补给量、藻类多样性、透明度。表明河流水质的改善状况及充足的水资源补给,对河流生态系统恢复起着举足轻重的作用。

1.3 评价标准

评价标准直接影响评价结果的合理性。河流修复的评价标准具有相对性的特征,处于不同区域、不

同规模、不同类型的河流,以及人们对河流的主观要求的不同,都会有不同的评价标准。结合城市河流修复的实际情况,各个指标按 5 分制分 5 个级别评定,定量类指标直接以指标相应值域作为评价标准,对难以定量表达的定性指标,依据工程修复目标和专家咨询给予评分。同时制定河流生态修复结果的评价标准为:不可以接受、基本可以接受、可以接受、满意、非常满意 5 个级别。具体见表 3、表 4。

表 3 城市河流生态修复指标评价标准

Tab. 3 Assessment Standard of Indicators of Urban River Ecosystem Remediation

指标	1	2	3	4	5
C ₁ 水源补给量	少	较少	一般	较丰富	丰富
C ₂ 用水量	不能满足	基本满足	较好满足	满足	完全满足
C ₃ 水质污染指数*	>1	0.5~1	0.3~0.5	0.1~0.3	<0.1
C ₄ 营养状态	>70 重度富营养	60~70 中度富营养	50~60 富营养	30~50 中营养	<30 贫营养
C ₅ 透明度 (m)**	<0.3	0.3~0.5	0.5~1.2	1.2~1.5	>1.5
C ₆ 臭气(无量纲)	很强	强	明显	弱	微弱至无
C ₇ 溶解氧(mg/L)	<2	2~3	3~5	5~6	>6
C ₈ 鱼类 IBI(无量纲)	12~22	26~34	40~44	48~52	58~60
C ₉ 藻类多样性指数(无量纲)	<1.5	1.5~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	>5.0
C ₁₀ 河岸带植被覆盖率(%)	<10	10~30	30~60	60~80	>80
C ₁₁ 河岸景观效应	差	较差	中	良	优
C ₁₂ 河岸、河床的稳定性	不稳定	基本稳定	较稳定	稳定	很稳定
C ₁₃ 与附近生态斑块的连通	差	较差	中	良	优
C ₁₄ 河流廊道的连续性	差	较差	中	良	优
C ₁₅ 鱼类的栖息地状况	差	较差	一般	较好	好

注: * 水质污染指数标准采用城市河流整治前水质类别; ** 参照《景观娱乐用水水质质量标准》(GB129411-91)^[19]

表 4 城市河流生态修复效果分级

Tab. 4 Grade Level for the Result of Urban River Ecosystem Remediation

级别	不可以接受	基本可以接受	可以接受	满意	非常满意
综合指数	$EI \leq 1$	$1 < EI \leq 2$	$2 < EI \leq 3$	$3 < EI \leq 4$	$4 < EI \leq 5$
状态	河流水质劣 V 类;流动性差;水生态系统结构破坏严重;河岸带植被覆盖率低,景观差	河流水质 IV 类~V 类;水力条件稍改善,基本能维持河流最小生态需水量;水生态系统结构有所恢复;河岸带植被覆盖率有所提高,景观稍可接受	河流水质 IV 类;基本保证生态功能和服务功能的适宜水量,流动性一般;水生态系统结构基本恢复;景观基本舒适	河流水质 III 类~IV 类;能保证生态功能和服务功能的适宜水量,流动性较好;水生态系统结构较好恢复,能在人工调节下持续发展;景观比较舒适	河流水质良好;完全保证生态功能和服务功能的适宜水量,流动性好;水生态系统结构完整,具有自动适应和自调控能力,能在人工调节下持续发展;能够发挥正常的生态功能,景观非常舒适

2 河流生态修复评估应用

2.1 岐江河修复工程概况

岐江河横穿中山市中部,全长 39 km,平均河宽 150 m,是连接西江水道与横门水道、贯穿城区 11 个镇、区的一条主要河流,具有灌溉、调蓄洪水、排

涝、城市景观及通航等功能。该河属感潮河段,双向流动,流态复杂,流动性小,汇流多,水环境容量小,对市区的生态环境有着重大的影响。

随着城市化进程和社会经济的高速发展,岐江河从 20 世纪 60 年代的饮用水源变成了 70 年代的污染水、80 年代的臭水,90 年代岐江河开始实施综合整治,按照治理规划,以改善水体环境质量为主,

并与防洪、排涝、河岸景观、通航以及河流水闸改造相结合,包括河道外修复、河道内修复、物理结构修复及水利枢纽改造等工程,力将岐江河的水质从国家地表水环境质量 V 类提高到 IV 类乃至 III 类的标准要求,达到河流生态修复的目的。

目前岐江河已对流域内污染严重的工业企业实行关、停、转、迁,拆迁了沿河岸饮食画舫、食街等,有效控制了河流外源污染;城区河段完成了疏浚河道、两岸护岸挡土墙和两岸绿化景观建设等河道内修复;并通过水利枢纽(水闸)的综合调度,利用潮差对

岐江河支流进行水体交换,净化河道水质,岐江河的环境状况较几年前有了较大改善。

2.2 指标评估计算

采用岐江河的历史监测资料,结合岐江河修复效果的野外调查,围绕岐江河的实际情况以及对其治理目标,根据给出的河流生态修复评估的指标体系及评价标准的内容,对各指标进行定性描述或直接以指标相应值域定量计算,并将各个指标按照表 3 的评价标准评定级别。岐江河开展综合整治工程后主要指标值及评分见表 5。

表 5 岐江河主要指标评价结果

Tab. 5 Key Indicators of Evaluation Results for QIJANG River

指标	指标值评价	评分结果
C ₁ 水源补给量	岐江河全河网有效蓄水量 1 015 万 m ³ ,通过控制与横门和磨刀门水道连通的闸门不断地补水,其中经磨刀门水道出海的径流量为 923 亿 m ³ ,横门水道过境径流量为 365 亿 m ³ . 岐江河水源补给量较丰富	4
C ₂ 用水量	岐江河工业用水取水量约为 730 万 m ³ ,农业灌溉用水的取水量约为 7 500 万 m ³ ,基本满足用水水质要求,反映出较好的生态服务功能	3
C ₃ 水质平均污染指数	以岐江河整治前水质,《地表水环境质量标准 GB3838—2002》的 V 类为评价标准,岐江河整治后水质平均污染指数 0.52	2
C ₄ 营养状态	57.81,富营养化	3
C ₅ 透明度	平均透明度 33 cm,河流的感官效果及人文价值差距较明显	2
C ₆ 恶臭	臭气强度较强	2
C ₇ 溶解氧	溶解氧监测结果,平均值 3.86 mg/L	3
C ₈ 鱼类 IBI	采用了包括鱼类种类数、鲤科、鳅科、鲱形目鱼类种类比例、捕获的鱼类科数、放养鱼类比例、单位渔产量、天然杂交个体数量比例、感染疾病和外形异常个体的数量比例、杂食性鱼类的数量比例、底栖动物食性鱼类的数量比例、肉食性鱼类的数量比例等 12 个指标评价岐江河生物完整性;然后利用采样调查的岐江河鱼类统计数据对各指标进行赋值;岐江河鱼类 IBI 指数为 27	2
C ₉ 藻类多样性	根据《环境监测技术规范》要求,在河流生态调查中所获得数据,石岐河的藻类多样性指数平均为 3.62,属亚健康状态	3
C ₁₀ 河岸带植被复盖率	石岐河城区两岸绿化带面积 154 000 m ² ,植被覆盖率大于 80%;为人工植被,主要树种有:大叶榕、细叶榕、勒杜鹃、大叶紫薇、蒲葵、洒金榕、黄婵等	5
C ₁₁ 河岸景观效应	两岸原有的 20 000 多 m ² 居民建筑已被绿色植被和人行道取代,形成了人工生态与人文景观相结合的复合河岸工程;在沿河两岸建起了综合旅游、文化体育、游乐、公园、和不同风格的景观性临水建筑,使之成为现代化与自然景色协调的区段。河岸景观效应已达到良好	4
C ₁₂ 河岸、河床的稳定性	河岸、河床稳定性很好,达到很稳定	5
C ₁₃ 与附近生态斑块连通性	沿岸共有 4 个公园,其中两个公园的水面与河流相连通,与附近生态斑块的连通性较好,达到中级	3
C ₁₄ 河流廊道的连续性	岐江河上建有众多水闸、船闸和泵站,这些水工建筑物割裂了河流的纵向连续性,河流廊道的连续性较差	2
C ₁₅ 鱼类栖息地及鱼道状况	岐江河上众多水闸都没有过鱼设施,影响了鱼类的栖息与洄游。但水闸通过优化调度,为鱼类的洄游提供了方便,在一定程度上对这种状况有所弥补。总的看来,岐江河的鱼类栖息与洄游的状况一般	3

根据以上分析,采用城市河流生态修复评价体系的层次结构及权重进行运算,得到岐江河生态修复效果的综合评估结果,见表 6。

2.3 河流生态修复效果评估

从表 6 的河流生态系统修复计算结果可看出,现阶段岐江河的生态修复程度综合评分为 2.9。对

照表 4,修复效果总体上处于可以接受级别。其中河流水力、物理结构综合评分分别为 3.7 和 3.5,处于四级水平,结果为满意;水质特征、水生生物综合评分分别为 2.2 和 2.3 分,达到三级水平,评价结果为可以接受;河岸带综合评分为 4.8 分,达到五级水平,评价结果为非常满意。

表 6 岐江河生态修复评估结果

Tab. 6 Results of Qijiang River's Ecosystem Remediation

指标层	评分结果	B-C 权重	要素层	要素计算结果	A-B 权重	目标层	评估总结果
C ₁	4	0.666 7	B ₁	3.7	0.221 2	A	2.9
C ₂	3	0.333 3					
C ₃	2	0.496 8					
C ₄	3	0.101 5	B ₂	2.2	0.337 2		
C ₅	2	0.276 6					
C ₆	2	0.055 0					
C ₇	3	0.069 3	B ₃	2.3	0.235 3		
C ₈	2	0.666 7					
C ₉	3	0.333 3					
C ₁₀	5	0.750 0	B ₄	4.8	0.092 4		
C ₁₁	4	0.250 0					
C ₁₂	5	0.317 3	B ₅	3.5	0.113 9		
C ₁₃	3	0.287 3					
C ₁₄	2	0.153 6					
C ₁₅	3	0.241 0					

3 结果与讨论

研究表明,评价结果与修复的真实情况十分吻合。岐江河河岸带整治工程全部完成,植被覆盖率已达 80% 以上,城市河流景观的美学、资源及视觉价值等功能得到充分体现,效果令人非常满意;其次是通过堤岸的加固和生态化建设,提高了河岸防洪安全标准,增加了河床的稳定性,改善了河流廊道的连续性和流通性,修复结果令人满意;通过水利枢纽(水闸)的综合调度,利用潮差对岐江河支流进行水体交换,增加了水体自净作用,河流水文状况改善也令人满意。而经过近期综合整治后,河流水质、生态的状况已有所改善,岐江河修复工程已初见成效,但由于河流生态系统恢复需要较长的周期,仍未达到规划中的理想状态。因此,总体上河流生态修复评价结果为可以接受,但尚不尽人意,表明河流生态系统恢复过程较为缓慢,修复初期生态系统仍处于受损状态。建议在今后的整治过程中加大投入,彻底治理点源污染,重视面源污染的控制,避免硬化河底、河岸,并进一步对岐江河进行系统的生态修复,以求达到最佳的治理效果。

传统的河流评价方法只是对河流水质进行评价,不能充分揭示污染河流生态系统修复的多方面因素和过程,包括在河流生态系统退化方面起关键作用的一些因素,如:河流黑臭、氧亏、污染物扩散、水流状态的改变、沉积物淤积、水生生物群落受损,

食物链中断等。本文构建的河流生态修复指标体系涵盖了河流功能、水质、水生生物、河岸带与物理结构 5 个要素,首次在水质评价中采用恶臭、溶解氧及透明度等指标、在水生生物中增加了鱼类 IBI 指标,并在充分考虑指标的构成需要反映城市河流生态修复的特征与规律基础上,实现了指标数值的可获得性、可计算性和指标的完备性。鉴于河流修复过程的动态性与相对性,运用了定性分析与定量评判相结合的层次分析法,采用群组决策方法优于目前较常用的 Saaty 判断矩阵方法,克服了判断矩阵的不一致性,实现了对城市河流生态修复效果的综合评估,具有客观、简便、综合、操作性强等特点。

参考文献:

- [1] 杨士弘. 城市生态环境学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 103~111.
- [2] 董哲仁, 孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 167~174, 229~232, 336.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 吴阿娜, 车越, 杨凯. 基于内容分析法的河流健康内涵及表征[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(6): 932~938.
- [6] CHOVANEC A, SCHIEMER F, WAIDBACHER H, et al. Rehabilitation of a heavily modified river section of the Danube in Vienna(Austria): Biological assessment of landscape linkages on different scales[J]. Internet Rev Hydrobiol, 2002, 87: 183~195.

- [7] NODRRIS R H, HAWKINS C P. Monitoring River Health [J]. *Hydrobiologia*, 2002, 35(5).
- [8] 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(2): 453~468.
- [9] RAVEN P J, HOLMESNTH, NAURAM, et al. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the UK[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 45(4): 359~367.
- [10] 夏自强, 郭文献. 河流健康研究进展与前瞻[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(2): 252~256.
- [11] 王 军, 陈振楼, 许世远. 长江口滨岸带生态环境质量评价指标体系与评价模型[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5): 659~664.
- [12] 中国环境监测总站. 湖泊水库富营养化评价方法及分级技术规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 92~96.
- [14] 邱苑华. 群组决策特征根法[J]. *应用数学和力学*, 1997, 18(11): 1027~1031.
- [15] 丁树良, 邓润梅. 群组决策加权法[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 1999, 23(1): 49~52.
- [16] 丁 俭, 王 华, 赵 敏. 一种简明的群体决策 AHP 模型及新的标度方法[J]. *管理工程学报*, 2000, 11(1): 16~18.
- [17] 王沫然. MATLAB6.0 与科学计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 49.
- [18] 李祚泳, 丁 晶. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 37~47.
- [19] 夏 霆, 朱 伟, 姜谋余, 等. 城市河流栖息地评价方法与应用[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(12): 2 095 ~ 2 104.

EVALUATION OF URBAN RIVER ECOLOGICAL REMEDIATION BY USING ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS

CAI Nan¹, YANG Yang^{1,2}, FANG Jian-de¹, JIANG Chun-cai¹, NING An¹, CHEN Xiao-yan¹

- (1. South China Institute of Environmental Sciences of the Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China;
2. Research Centre of Hydrobiology, Jinan University, Engineering Research Centre of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering, Ministry of Education, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Development of cities has caused changes to the natural hydrology and environment of many rivers, and resulted in decrease of water quality, physical habitat and biological integrity of river ecosystems. Physical and chemical parameters as well as impacts on biological structure, biodiversity and biological process should be taken into considerations when the effect of river ecological remediation was to be evaluated. In this article, an index system including 15 indicators in five aspects of river hydraulics, water quality, aquatic biota, river coast and physical structure was established for evaluating the effect of ecological remediation of urban rivers. A group decision-making model of AHP was employed to determine the weights of the indicators and the first five important ones were average pollution index of water quality, fish IBI, water recharge volume, algal diversity and water transparency in sequence. The Qijiang River in a southern city of China was studied as a case for comprehensively evaluating the effect of river ecological restoration. The result was “acceptable”, which showed that remediation engineering would make improvements on the water quality and ecosystem of river, though this could be a rather slow process and the river ecosystem would still be in a state of damage at the early stage of remediation.

Key words: urban river; ecological remediation; indicator system; analytical hierarchy process(AHP); evaluation