

河流生态功能综合评价的层次决策分析方法

彭 静,董哲仁,李 翀

(中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要 :介绍了基于层次决策分析的河流生态功能综合评价方法,提出了在河流水文评估、物理化学评估、生物栖息地质量评估和生物评估 4 个单项评估的基础上,构建以河流生态功能综合指数为目标、4 个单项因子为准则、5 个等级标度为决策标准的层次递阶模型,应用模型进行了河流综合评价的两种情景分析。

关键词 :层次决策分析;河流;生态系统

中图分类号 :X171.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2008)01-0045-04

Analytic hierarchy process in evaluating river ecosystem's function

PENG Jing, DONG Zhe-ren, LI Chong

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract :The comprehensive assessment method for ecological functions of rivers based on analytic hierarchy process (AHP) was discussed. With river ecological function as objective and five grades as decision criterion, a hierarchy model was established based on individual evaluations on four factors, i. e., hydrology, physical chemistry, habitat and biology. Two cases about comprehensive assessment of rivers were studied by the model.

Key words :analytic hierarchy process; river; ecosystem

河流生态保护、修复及管理工作中需要对河流生态功能进行综合评估,分析河流生态系统在自然力与人类活动双重作用下,河流水文、水质及地貌特征等变化对于水域生物群落的影响,以及河流生态系统的变化态势,从而在河流开发的经济效益和生态保护之间进行利弊权衡,以实现既能满足人类社会需求又能兼顾河流生态系统健康和可持续发展的目标,支撑经济社会的可持续发展^[1-2]。

1 河流的生态功能及其评价

1.1 河流的生态功能

河流的生态功能是多方面的,包括通道作用、过滤与屏蔽作用、源汇作用、栖息地功能等方面^[1]。

a. 通道作用。通道作用是指河道系统可以作为能量、物质和生物流动的通路。河道由水体流动形成,又为水流、沉积物以及植物、动物群系的运移服务。河道既可作为纵向通道,也可作为横向和垂

向通道。河流通畅与否可用连续性来表征,连通性对于通道功能十分重要。

b. 过滤与屏蔽作用。该功能阻止能量、物质和生物运动的发生,或是起到过滤器的作用,允许能量、物质和生物选择性地通过。屏障和过滤作用可以减少水体污染,最大限度地减少沉积物转移,同时又选择性地提供河流营养物来源。

c. 源汇作用。源作用是河流为其周围流域提供水、能量、生物及其他物质。汇作用是河流不断地从周围流域吸收物质能量和生物。

d. 栖息地功能。河流栖息地为植物和动物的正常生长、觅食、繁殖以及进行生命循环周期中其他重要环节提供必需的元素,比如空间、食物、水源以及庇护场所等。河道栖息地包括河道内的内部栖息地,以及边缘栖息地及岸坡周边栖息地。

1.2 河流生态功能评估

传统意义上的河流评估,以河流开发和工程建

设为目的,主要以水文条件和水质状况评估为主。而河流生态功能评估,则以河流生态系统状况为主线,着眼于河流是否能够持续保持其良性生态功能,建立河流状况变化与生物过程的关系。

从生态系统的主线,河流状况可以从四个方面的主要过程和特征来反映,即河流的水文过程、地貌演变、物理化学过程和生物特征。对于河流生态功能的评估,一般包括水文评估、物理化学评估、生物栖息地质量评估、生物评估四个方面的内容^[3]。

a. 水文评估。既包括传统水文分析参数,如河流在不同空间的水位、流量等,也需要从生物的角度评估水流的模式变化。特别是由于河流上修建水利工程后,由于工程运行对径流的调节,改变了河流的自然水文模式(hydrological regime),使水流的季节性特征和水文周期循环特征发生变化,其结果可能是洪水流量和水位降低,水位涨落时机和速度改变,底流特性变化等,而这些水流动态特征对水生生物的生长繁衍往往具有制约作用。现在已经认识到,河流生态系统对河流生态流量的需求不是一个静态的量,而是一个动态的过程。水文条件的变化对于河流生态系统结构与功能的影响是基础性的和根本性的。因此,需要研究河流径流的全过程,从流量、频率、持续时间、发生时机和变化速率等方面评价河流水文状况,认识与之相关的地貌演变和生态演变过程,同时需要建立河流水文特性与生态响应之间的关系。目前,水文评估的基本方法是对比现实的水流模式与理想的或自然状况的水流模式,通过两种水文参数的比较,得到一个相对的无量纲的指数。指数可用记分的形式表述。

b. 物理化学评估。反映河流水流和水质变化、河势变化、土地使用情况和岸边结构等对河流生态功能的影响。物理量测参数包括流量、温度、电导率、悬移质、浊度、颜色。化学量测参数包括 pH 值、碱度、硬度、盐度、生化需氧量、溶解氧、有机碳等。其他水化学主要控制性指标包括阴离子、阳离子、营养物质等(磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、氨、硅)。通过对参数的综合,反映物理-化学量测参数对河流生物群落的潜在影响。可用记分的形式表述该指数。

c. 生物栖息地质量评估。生物栖息地评估的内容是分析河流廊道(river corridor)的生物栖息地状况,调查生物栖息地对于河流生态系统结构与功能的影响,进而对栖息地质量进行评估。具体体现在河流的水文条件、物理-化学条件、河流地貌学特征对于生物群落的适宜程度,特别是对于形成完整的食物链结构和完善的生态功能的作用。可用生物栖息地质量指数表述栖息地的适宜程度。

d. 生物评估。河流生物群落是河流生态系统的主体。生物评估具体分析水文条件、水质条件和栖息地条件发生变化对于河流生物群落的影响程度。可能产生的变化包括:水域生物群落物种成分变化,栖息地生物优势种群的变化,物种枯竭,整个种群死亡率,生物行为变化,生理代谢变化,组织变化和形态畸变等^[4]。目前,一些国家的法律已要求有关机构进行河流生物评估。欧洲有上百种生物评估方法,2/3 是基于大型无脊椎生物^[4]。采用较多的是“生物参数法”(Biotic Parameters)和“生物指数法”(Bioindicators),从 2000 年 12 月起执行的《欧盟水框架指令》具有代表性^[5],其规定的评估内容包括:物种多样性、生物指数、河流生物群落代谢、大型生物群落结构、鱼类群落结构等。

在上述分类评估的基础上,对河流生态功能进行综合评估。由于河流生态系统是一个由相互关联、相互制约的众多因素构成的复杂而往往欠缺定量数据的系统,河流生态过程所包含的时间和空间尺度广,既有长时间的、宏观的过程,又有短时间的、微观的特征。因此,河流生态功能评价的较佳途径,是将宏观和微观相结合的综合性研究。其中,由于涉及生态保护目标和准则的问题,不同国家、地区,处于不同的社会经济发展阶段,保护目标将有所不同,决策过程也将不同。特别需要因地制宜,结合对象河流的独特自然条件和物种群落特征来进行判断和分析。

综合评价的过程,实际上是将多种尺度不同且又相互影响的复杂因素,通过定性和定量的评估技术,对较为模糊的问题做出简易决策。为此,层析分析决策是一种有效的方法。

2 基于层次分析决策的河流生态功能综合评价

河流生态功能状况中水文、物理化学、生物栖息地质量以及生物特性等分状态之间也有相互影响,并表现出各自不同的随时间动态变化的规律。河流生态功能评估,需要根据河流的水文评估、物理化学评估、生物栖息地质量评估、生物特性评估等单项评价结果,以层次分析法 AHP 为基础,综合评价河流生态功能状况。

2.1 生态功能综合评价的递阶层次模型

定义“河流生态功能综合指数”,用以表征河流生态功能状态,并将之作为层次分析的目标层 A,表征河流生态功能的综合状态。以 4 个评价因子作为层次分析的准则层 B,表征 4 个状态对综合功能的影响程度。功能分级标准作为方案层 C,表示 4 个

状态量化后的量值等级,从而建立河流生态功能综合评价的递阶层次结构模型,如图1示。需要说明的是,虽然模型中4个指数均设定5个等级,但不同指数的等级标准范围以及分值可以不同。评价时,依据单项因子评价结果(分值)进行综合评价。

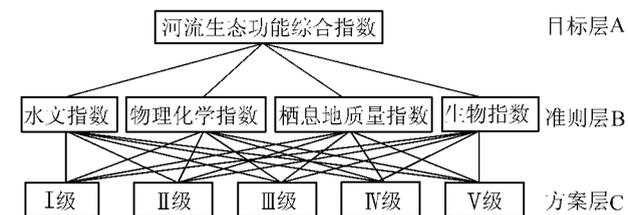


图1 生态功能综合评价的递阶层次模型

2.2 河流生态功能分级标准

依据指标评价分级标准,比较待评价的河流状况的4个单项值与某级标准值最接近,则视其符合该级河流生态功能。并根据各级权值分布,计算综合评价指数,由此实现了对生态状况的定量综合评价。

设水文、物理化学、栖息地质量和生物特性4个分状态的单项评估结果已经表示为因子分值的形式,按记分方法进行定量综合评价。由于目前生态功能评估尚无可参考的分级或评分标准,对于定量评估,一种可选择的方法是用记分模糊评价。取5分制,设定5个评价等级,等级标准的集合可设为{好,较好,一般,较差,差},简单记为{I, II, III, IV, V}。按照5分制,分级评价标准可参照表1选取。

表1 河流生态功能分级标准(5分制)

评价因子	级别与标准值				
	I (好)	II (较好)	III (一般)	IV (较差)	V (差)
水文	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
物理化学	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
栖息地质量	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
生物特性	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5

上述分级标准的划分以及标准分值的选取,尚需深入研究,比如分为多少级别,每一级别不同状态的分值如何确定等。在此不作论述,只取表1情形直接应用。

2.3 判断矩阵及一致性检验

以两种情景对判断矩阵的一致性进行检验。对应于表1的等级划分,分别考虑情景1:河流水文水量条件较好(3.8),理化特性一般(2.8),栖息地质量较差(2.0),生物条件差(0.8),如水量丰沛水质尚可但生物多样性受损的河流。情景2:水文水量及理化特性一般(2.8),栖息地质量较差(2.0),生物条件差(0.8),如水量中等水质尚可但生物多样性受损的

河流。依此构建综合评价的判断矩阵。

以综合功能III级为标准对因子进行无量纲化,用4个评价因子的分指数值作为标度构造判断矩阵A,以及各级别的相对重要性两两比较判断矩阵B_i(i=1, 2, 3, 4)。以情景1为例:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1.36 & 1.90 & 4.75 \\ 0.74 & 1 & 1.40 & 3.50 \\ 0.53 & 0.71 & 1 & 2.50 \\ 0.21 & 0.29 & 0.40 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.43 & 1.86 & 3.29 & 4.71 \\ 2.33 & 1 & 4.33 & 7.67 & 11.00 \\ 0.54 & 0.23 & 1 & 1.77 & 2.54 \\ 0.30 & 0.13 & 0.57 & 1 & 1.43 \\ 0.21 & 0.09 & 0.39 & 0.70 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.41 & 0.18 & 0.76 & 1.35 \\ 2.43 & 1 & 0.43 & 1.86 & 3.29 \\ 5.67 & 2.33 & 1 & 4.33 & 7.67 \\ 1.31 & 0.54 & 0.23 & 1 & 1.77 \\ 0.74 & 0.30 & 0.13 & 0.57 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0.60 & 0.20 & 0.20 & 0.60 \\ 1.67 & 1 & 0.33 & 0.33 & 1.00 \\ 5.00 & 3.00 & 1 & 1.00 & 3.00 \\ 5.00 & 3.00 & 1.00 & 1 & 3.00 \\ 1.67 & 1.00 & 0.33 & 0.33 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0.73 & 0.46 & 0.19 & 0.08 \\ 1.37 & 1 & 0.63 & 0.26 & 0.11 \\ 2.18 & 1.59 & 1 & 0.41 & 0.18 \\ 5.29 & 3.86 & 2.43 & 1 & 0.43 \\ 12.33 & 9.00 & 5.67 & 2.33 & 1 \end{bmatrix}$$

用方根法计算各层判断矩阵的最大特征根 λ_{max} 及特征向量W,并进行判断矩阵的一致性检验。经检验 $CR < 0.1$,表明判断矩阵具有满意的一致性。

利用层次单排序结果,综合得出最底层对最顶层的优劣顺序,即为层次总排序。排序结果见表2。

表2 情景1层次总排序

层次	水文 指数 (0.404)	物理化学 指数 (0.298)	栖息地 质量指数 (0.213)	生物 指数 (0.085)	层次总排序	
					权值	序号
I(C ₁)	0.228	0.090	0.070	0.045	0.138	4
II(C ₂)	0.532	0.218	0.116	0.062	0.310	1
III(C ₃)	0.123	0.509	0.349	0.098	0.284	2
IV(C ₄)	0.069	0.117	0.349	0.238	0.158	3
V(C ₅)	0.048	0.066	0.116	0.556	0.111	5

同法,可得情景 2 层次总排序结果(表 3)。

经一致性检验,总排序 $CR < 0.1$,具有满意的一致性。

表 3 情景 2 层次总排序

层次	水文指数	物理化学指数	栖息地质量指数	生物指数	层次总排序	
	(0.333)	(0.333)	(0.238)	(0.095)	权值	序号
I (C_1)	0.090	0.090	0.070	0.045	0.081	5
II (C_2)	0.218	0.218	0.116	0.062	0.179	3
III (C_3)	0.509	0.509	0.349	0.098	0.431	1
IV (C_4)	0.117	0.117	0.349	0.238	0.184	2
V (C_5)	0.066	0.066	0.116	0.556	0.125	4

2.4 生态功能综合评价的情景分析

由情景 1 层次总排序表 2 可知:序号 1 对应的生态环境综合质量级别为 II 级,对应权值 0.310,序号 2 对应的级别为 III 级,权值 0.284。因此,情景 1 综合评价结果为 II 级,但权值优势度并不显著,如图 2(a)所示。

由情景 2 层次总排序表 3 可知:序号 1 对应的生态环境综合质量级别为 III 级,对应权值 0.431,序号 2 对应级别为 IV 级,权值 0.184。因此,情景 2 综合评价结果为 III 级,权值优势度较为显著,如图 2(b)所示。

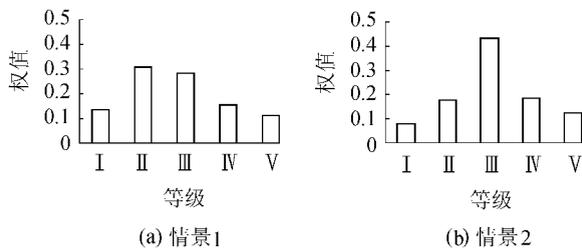


图 2 生态功能综合评价权值分布

根据上述对两种情景的层次决策分析,河流生态功能状况由 4 个评价因子综合决定。水文水量条件好,但生物条件差(情景 1),综合评价等级 II 偏于 III 级(较好偏于一般)。如果水文条件继续下降,由好变为较好(情景 2),综合评价等级也将继续降低,综合评价等级为 III 偏于 IV 级(一般偏于较差)。根据权值分布,可以计算综合评价指数。如果综合评价各等级的标准值仍然采用表 1 的取值,用加权平均法计算,情景 1 和 2 的综合评价指数分别为 2.705 和 2.407。

也可以从河流生态修复定量评估的角度,分析上述两种情景的评价结果。某一河流,进行水文条件改善后,水文指数由 2.8 提高到 3.8,短期内其他条件不变,则生态功能综合指数将由 2.407 提

高到 2.705。

3 结 语

河流生态状况受到多种因素的影响^[8]。这些因素中,既有非生命因素,如水量、水质、栖息地物理条件等,同时也有生命因素,如生物种群及其数量,具有模糊变量特征。建立河流生态功能综合评价方法,需要同时考虑定性和定量评估技术的综合运用。本文应用层次分析决策方法,建立了生态功能综合评价的三层递阶层次模型,进行了两种情景下河流生态功能的综合评价分析,并介绍了方法具体应用时的基本做法。

限于资料、认识及研究积累不足等方面因素,在本文的方法研究中,对一些条件进行了假定或简化处理,如 4 个单项评价因子赋予相同的标准分级和级值等,这些都有待深入研究,并应进一步结合具体河流进行方法应用分析,使方法不断补充完善。

参考文献:

- [1] BROOKES A, SHIELDS J F D. River Channel Restoration [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [2] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利, 2005(4): 15-18.
- [3] 董哲仁. 河流健康评估的原则和方法[J]. 中国水利, 2005(10): 17-19.
- [4] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[J]. 水利水电技术, 2005(11): 15-19.
- [5] KALLIS G, BUTLER D. The EU Water Framework Directive: measures and directives[J]. Water Policy, 2001, 3: 124-125.
- [6] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量综合评价原理和方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [7] 李如忠, 钱家忠, 汪家权. 水污染容许排放总量分配方法研究[J]. 水利学报, 2003(5): 112-121.
- [8] 彭静, 廖文根, 赵奎霞, 等. 水环境承载的可持续性评价指标体系研究[J]. 水资源保护, 2006, 2(6): 14-17.

(收稿日期 2006-04-24 编辑:傅伟群)

