

城市河流生态系统健康评价初探

赵彦伟, 杨志峰

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 健康的河流生态系统已经成为公认的河流管理目标, 采用河流生态系统健康理论来研究城市河流问题, 具有较强的理论与现实意义。在城市河流生态系统健康概念内涵剖析的基础上, 提出了包含水量、水质、水生生物、物理结构与河岸带 5 大要素的指标体系及其“很健康、健康、亚健康、不健康、病态”5 级评价标准, 建立了模糊层次综合评价程序与模型。并以宁波市河流为例进行实证研究, 明确各河流的健康状况及限制因子, 为其保护、维系与修复提供了决策依据。

关键词: 河流生态系统健康; 模糊层次综合评价; 指标体系; 宁波市

中图分类号: Q178.5; X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)03-0349-07

河流为城市提供了供水、生物保护与景观等多种生态服务功能, 以其自然、社会、经济与环境价值推动了城市的发展。但随着城市规模扩大, 对河流的干扰日渐增加, 筑坝、取水、分流、裁弯取直、堵塞汊流及河岸(道)的固化、河岸植被带破坏等扰乱了河流流态与水文循环过程, 与水质污染、水生物过度利用等协同作用, 引起河流生态系统的退化^[1~3]。有关河流生态系统健康问题, 引起各国政府与学术界的重视, 健康的河流生态系统, 成为重要的管理目标^[4]。

尽管河流生态系统健康概念近几年才明确提出, 但有关监测与研究已有较长的历史。一个世纪前, 人们注意到水生态系统的任何变化都会影响水生生物的生理功能、种类丰度、种群密度、群落结构与功能等, 开始尝试使用生物监测手段来评价河流生态系统健康状况。至今, 以鱼类、硅藻与大型无脊椎动物为对象的指示物种方法仍是河流生态系统健康的主要研究方法^[5]。但其存在着明显的缺陷, 如选择不同的研究对象及监测参数会导致不同的评价结果, 难于确定不同生物类群进行评价时的取样尺度与频度, 无法综合评价水生态系统状况问题等。且由于一个指标只能反映干扰传播过程中对生态系统造成的某方面影响, 在流域范围内对所有干扰都敏感的单一河流健康指标是不可能存在的^[6]。因而, 综合物理、化学、生物, 甚至社会经济指标, 能够反映不同尺度信息的综合指标法发展起来, 代表性的包括 RCE 评分^[7]与溪流状况指数 (ISC)^[8], 但两者都是针对农村与农业区较小河流建立的指标体系, 侧重于水体环境价值的评价, 应用范围受限, 不适用于城市河流生态系统。

本文在探讨河流生态系统健康概念的基础上, 建立了针对城市河流的综合指标体系与模糊层次综合评价模型, 并以宁波 4 条河流为例进行研究, 为相关水生态修复与建设活动的开展提供科学依据。

1 城市河流生态系统健康的概念内涵

作为人类健康的类比概念, 河流生态系统健康的涵义尚不十分明确^[4], 学者们理解不一, 分歧主要集中在是否包括人类价值上。Karr 将河流生态完整性当作健康^[9], Simpson 等认为河流生态系统健康是指河流生态系

收稿日期: 2004-03-09; 修订日期: 2004-05-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2003CB415104); 国家高新技术研究发展计划资助项目 (2003AA6C1120)

作者简介: 赵彦伟 (1974 -), 男, 河南上蔡人, 北京师范大学环境学院博士后, 主要从事河流生态系统健康与修复研究。

通讯作者: 杨志峰, E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

统支持与维持主要生态过程, 以及具有一定种类组成、多样性和功能组织的生物群落尽可能接近未受干扰前状

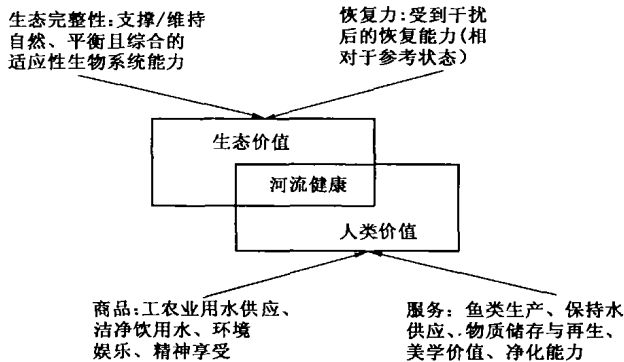


图1 河流生态系统健康的概念示意^[11]

Fig. 1 Schematic representation for the concept of river ecosystem health

态的能力^[10], 把河流原始状态当作健康状态。Norris 等则认为, 河流生态系统健康依赖于社会系统的判断, 应考虑人类福利要求^[4]。Meyer 对此阐述最为全面^[11], 认为健康的河流生态系统不但要维持生态系统的结构与功能, 且应包括其人类与社会价值(图1), 在健康的概念中涵盖了生态完整性与人类价值。当前, 这种理解得到较多学者认可。

城市是一个高度人工化的以人为中心的复合生态系统, 系统的稳定运行更依赖于城市河流生态服务功能的持续发挥。城市河流生态系统的健康不仅意味着要保持生态学意义上的结构合理, 生态过程的延续, 功能的高效与完整, 还强调河流生态系统的供水、防洪、水土流失控制、生物保护、景观娱乐等人类服务功能的有效发挥。由此看来,

城市河流生态系统的健康是人类发展与生态保护相协调的高度整合性的概念, 是一个对人与河流胁迫与响应关系整体性的表述。对河流生态系统健康的评价及其管理目标的设定必须建立在公众与社会期望及人类价值判断的基础上。

2 评价方法与模型

2.1 评价指标体系

一般认为, 河流生态系统可以用水质、水量、河岸带、物理结构与生物体5个要素来表述, 这5个要素互依存, 互相影响, 互相辅助完成不同的河流生态过程, 发挥不同的功能, 有机组成完整的河流生态系统。

水量与水质是水资源的两大重要属性, 水量综合反映流域气候特征、地表覆盖特征及河流地形地貌与受人工设施干扰的程度, 是流态变更的重要表现载体。水质则是社会生产、生物与人群健康的根本保障, 两者的有机组合是水生生物生存、水体各种物理过程与生物化学反应得以完成的基本要求, 也是社会发展的重要物质保障。以水工建设导致的流速与水位变化、开发利用率两个指标来描述水量受人类社会经济活动的干扰状况, 流体水质表征水环境质量状态, 用水质平均污染指数(WQI)来表达, 底泥污染状况则预示着潜在的水环境污染压力, 采用底泥污染指数表示。

河岸带是处于水陆交界处的生态脆弱带, 是异质性最强、最复杂的生态系统之一^[12], 在维持区域生物多样性、促进物质与能量交换、抵抗水流侵蚀与渗透、营养物过滤及吸收等方面发挥重要的作用^[13~15], 表现为廊道、缓冲与护岸等3方面生态功能^[16]。城市河岸带所受到的干扰主要包括人类的不合理土地利用侵占、水力干扰机制变迁、景观梯度破坏、基础设施建设导致的廊道间断等, 其作用体现在水土流失控制、景观效应与防洪3个方面, 对城市河流景观功能、抗灾及生物保护等至关重要, 用河岸管理带宽度、植被覆盖、景观建设面积、效果、可达性与防洪标准来衡量。

水生生物状况是相对综合的河流健康状态的表达, 可反映人类活动对河流胁迫及河流自然生态演替的累积效应, 用鱼类生物完整性指数(IBI)表示, 并引入珍稀生物存活状况指标, 表明特殊生物的保护需求。

物理结构的变化是人类物理重建活动的直接后果, 直接表现为水体同河岸河道交换能力的强弱、栖息与洄游环境的好坏、物理稳固及连通程度4个方面。可以河岸固化状况、河道固化状况、河床、河岸稳定性、与周围水体(湖泊、湿地等)及自然生态斑块(绿地、公园等)的连通性、河流廊道连续性、栖息地结构完整性、鱼道设置与阻碍鱼类洄游的水工设施状况来表达。

2.2 评价标准

评价标准直接影响评价结果的合理性。目前,对城市河流生态系统的健康评价,尚无明确的统一的标准。综合来看,河流健康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,在其生态演替的不同阶段,面对不同人群的社会期望,都会影响评价标准的统一。评价标准的确定是河流生态系统健康评价的重点与难点。

结合当前城市河流的实际情况,评价标准可以通过以下方法确定: 历史资料法; 实地考察; 多区域河流对比分析(或称参照对比法); 借鉴国家标准与相关研究成果; 公众参与; 专家评判。以上方法各有优劣,适用于不同类型的指标对象。评价标准分为“病态、不健康、亚健康、健康、很健康”5个级别,对难以准确定量表达的定性指标,以分值阈“ <1 、 $1\sim 2$ 、 $2\sim 3$ 、 $3\sim 4$ 、 >4 ”代表5个级别的标准,各具体指标评分由公众参与基础上的专家评判完成。对定量指标的标准,则借鉴有关历史资料、相关研究成果与国家适用标准,及通过多区域对比分析确定。

城市河流生态系统健康评价的指标体系及评价标准见表1、表2。

表1 城市河流生态系统健康评价指标体系

Table 1 Assessment index system of urban river ecosystem health

评价要素	类别	详细指标
水量	水文状况	水工建设导致的流速与水位变化
	水量	开发利用率
水质	流体	水质平均污染指数
	底质	底泥平均污染指数
水生生物		鱼类生物完整性指数、珍稀鱼类存活状况
河岸带	水土流失控制	防护带宽度、河岸带植被覆盖
	景观建设	亲水景观建设面积、效果、可达性
	防洪	防洪标准
物理结构	交换能力	河岸与河道固化强度
	物理稳固性	河床、河岸稳定性
	连通性	与周围自然生态斑块连通性、河流廊道连续性
	栖息与洄游	栖息地、鱼道状况

表2 城市河流生态系统健康评价标准

Table 2 Five-grade assessment standard for urban river ecosystem health

指标	水资源开发利用/ %	防洪标准	鱼类 IBI	河岸管理带平均宽度		底泥平均污染指数	水质平均污染指数	其它指标 (以分值表示)
				支流/ m	干流/ m			
病态	>40	5年一遇	22以下	<8	<18	>1	>1	<1
不健康	30~40	5~30年一遇	28~34	8~15	18~35	0.5~1	0.5~1	1~2
亚健康	20~30	30~50年一遇	40~44	15~25	35~50	0.3~0.5	0.3~0.5	2~3
健康	10~20	50~100年一遇	48~52	25~40	50~70	0.1~0.3	0.1~0.3	3~4
很健康	<10	100年一遇以上	58~60	>40	>70	<0.1	<0.1	>4

注:水质平均污染指数的评价标准选用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)的3类值;由于无对应标准,底泥平均污染指数的评价标准参照《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)的3级值。

2.3 评价程序与模型

河流生态系统健康是一个动态性的相对概念,采用模糊综合评判具有明显的优势。为克服指标权重确定的主观性与大量指标同时赋权的混乱与失误,提高评价的简便性和准确性,通过层次分析法确定权重,建立起模糊层次综合评判模型。

具体的评价程序与涉及模型如下:

(1) 建立评价因素(指标)集 $I = \{u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n\}$, 分别代表水量、水质、河岸带、水生生物与物理结构等5大类各评价指标的集合, n 代表各指标数目。

(2) 建立(决策)评语集 $H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{15} \\ \dots & & \dots \\ h_{n1} & \dots & h_{n5} \end{bmatrix}$, 指健康分级, 分别代表 n 个具体评价指标的“病态、不健康、亚健康、健康、很健康”5种状态的标准。

(3) 指标权重确定 用层次分析法确定各要素及类别权重, 与各具体指标的层次总排序权重集 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

(4) 建立单因素评判矩阵 R 根据各指标特征, 拟定各具体指标的隶属函数, 由隶属函数计算出5大类评价要素各指标的评判矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{15} \\ \dots & & \dots \\ r_{n1} & \dots & r_{n5} \end{bmatrix}$$

(5) 进行模糊层次综合评判 采用模糊合成加权线性变换完成模糊合成, 即: $B = W \cdot R = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)$, 得出河流对5个健康级别的隶属度矩阵, 并对结果进行归一化处理, 从而评判各河流健康状态。采用类似方法也可求出河流的水质、水量等5要素对健康级别的隶属度矩阵。

3 实证研究

以宁波的甬江干流、岩河、西河、大河为研究对象, 进行城市河流生态系统健康评价, 并对评价结果进行对比分析。

通过层次分析法确定各层权重与层次排序总权重(表3), 并将相关河流的实地调查、遥感解译信息等资料及专家评分结果代入模型, 从而计算出各研究河流对各健康级别的隶属度与各河流5要素对各健康级别隶属度(表4、图2~图5)。

表3 指标权重计算结果
Table 3 Results of index weight

要素	权重	类别	权重	详细指标	总权重
水量	0.167	水文状况	0.25	水工建设导致的流速与水位变化	0.0418
		水量	0.75	开发利用率	0.1253
水质	0.333	流体	0.6	水质平均污染指数	0.1998
		底质	0.4	底泥平均污染指数	0.1332
水生生物	0.167	生物完整性	0.5	鱼类生物完整性指数	0.0835
		珍稀生物	0.5	珍稀鱼类存活状况	0.0835
河岸带	0.167	水土流失控制	0.2	河岸防护带宽度	0.0167
				河岸带植被覆盖	0.0167
		景观建设	0.2	亲水景观建设面积、效果、可达性	0.0334
		防洪	0.6	防洪标准	0.1002
		交换能力	0.286	河岸与河道固化强度	0.0478
物理结构	0.167	物理稳固性	0.286	河床稳定性	0.0239
				河岸稳定性	0.0239
		连通性	0.143	与周围水体及自然生态斑块的连通性	0.0096
				河流廊道连通性	0.0143
		栖息与洄游	0.286	栖息地状况	0.0191
				鱼道状况	0.0287

表 4 各河流生态系统健康评价结果

Table 4 Ecosystem health assessment results of each river

河流	甬江干流	岩 河	西 河	皂 溪
病 态	0	0.14	0.45	0
不健康	0.11	0.07	0.05	0
亚健康	0.46	0.59	0.30	0.11
健 康	0.43	0.19	0.20	0.48
很健康	0	0.01	0	0.41

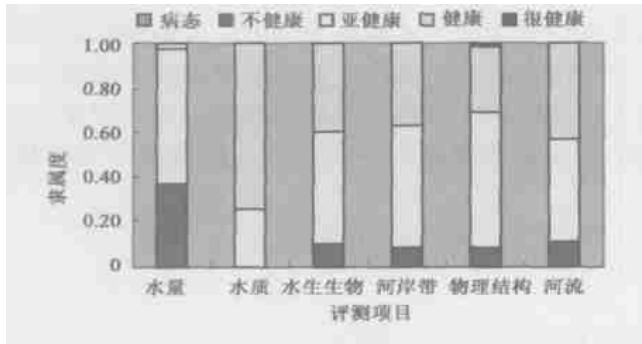


图 2 甬江干流健康评价结果

Fig.2 Health assessment result of the Yongjiang River mainstream

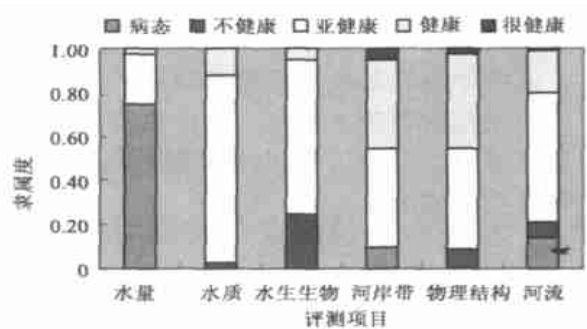


图 3 岩河健康评价结果

Fig.3 Health assessment result of the Yanhe River

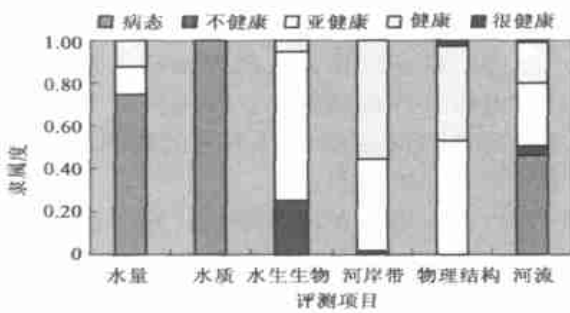


图 4 西河健康评价结果

Fig.4 Health assessment result of the Xihe River

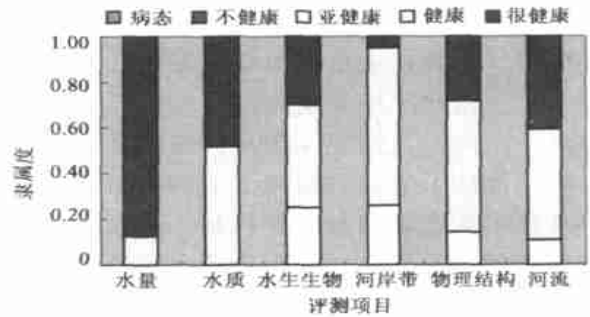


图 5 皂溪健康评价结果

Fig.5 Health assessment result of the Fuxi Stream

总体上看，甬江干流和岩河对亚健康与健康状态隶属度较高，西河趋近于病态，皂溪存在着明显的健康特征，状况良好。按最大隶属度原则，甬江干流、岩河、西河与皂溪分别处于“亚健康、亚健康、病态、健康”状态。

甬江干流的水质是其优势因素，对健康的隶属度为 0.74。与宁波其它河流相比，甬江干流入海口及河流沿岸无拦潮闸，水生生物洄游、栖息环境较好，防洪标准高，河流廊道虽然受农业生产与城市建设活动一定的干扰，但仍保持在较大的宽度，河流廊道自身及与其它自然生态斑块尚有较强的连通性，整体状况在向健康趋势发展，但水资源的开发利用有所偏大，水量对不健康的隶属度达 0.37。

岩河与甬江干流情况相类似，对亚健康与健康状态的隶属度为 0.78，整体状况尚可。河道与河岸固化有所控制，水生生物赖以生存的物理结构破坏轻微，但水资源开发利用强度高达 45%，水文水量特征处于“病态”。如不采取有效措施，水资源过量开采所导致的水力干扰机制及流态的变化，势必持续作用于河岸带与水生生物系统，从整体上影响河流健康状况。

西河的健康状况不容乐观，水资源过量开采及水利设施建设导致的河流水文流态变化、城市生活及分散面

源无控制排放引发的水环境污染是导致其健康状况恶化的重要原因。近几年,相关部门加强了对西河的管理及水景观建设,并进行了一定规模的河道整治,使其对亚健康与健康状态呈现一定的隶属度,但对水生态系统某一组分或要素的修补并不能从根本上改变河流状况,整体上,仍处于病态级别。

皂溪健康状况最好,流域人类活动干扰强度较小,水资源开发程度低,水质优良,无明显的河流廊道阻隔性间断发生,较多河段基本上处于近自然状态,但其防洪标准相对较低,亲水景观较少,使河岸带对亚健康的隶属度达 0.26。

对处于健康状态的皂溪,实施合理的生态保育有助于提升河流整体健康状态,提高持续的生态服务功能与能力。处于病态状态的西河,当务之急是从流域范围内,以社会经济活动方式调整为动力,实施流域整体与综合修复。值得注意的是处于亚健康状态的甬江干流与岩河,亚健康状态是一种中间状态,存在着向健康与不健康两个方向变化的趋势,制定有效的生态系统管理方案策略,消除影响生态系统健康的制约因子,会使河流生态系统朝着健康、良性、有序的方向发展;反之,不控制当前的退化趋势或进一步破坏,河流生态失衡加剧,会导致整体功能的退化。

4 结 论

河流生态系统健康是一个生态价值与人类价值相统一的整合性的概念,健康的城市河流生态系统服务于城市发展与生态保护的协调,应具备生态学意义上的完整性及保证服务功能的持续供应。因此,河流生态系统健康评价的指标体系应涵盖水量、水文、河岸带、物理结构与水生生物 5 个要素,涉及景观、防洪及自然生态保护等多个方面的具体指标。鉴于健康标准的动态性与相对性的特征,采用定性分析与定量评判相结合的模糊层次综合分析,实现对城市河流生态系统的健康评价,具有简便、全面、综合、操作性强等特征,尤其适用于河岸带、水生生物状况等长期历史资料匮乏的城市河流。本文在此方面作了有益的探索,并运用于宁波市甬江干流、岩河、西河、大河等 4 条河流的实证研究中,计算出 5 个评价要素与河流整体对不同健康级别的隶属度。结果表明:甬江干流与岩河处于亚健康状态,西河处于病态,皂溪处于健康状态。

河流生态系统健康及其评价是一个正逐步发展的理论方法体系,其应用存在许多争议。除了健康概念是否适用于河流的讨论外,对如何确定合理科学的评价标准,有关河流生态过程综合指标的研究,过程性评价与当前运用较多的结构性评价结合的研究,以及如何在流域尺度上进行河流生态系统健康的评价,都有待于进一步探讨。

参考文献:

- [1] Poff L N, Allan D, Bain M B, *et al.* The natural flow regime, a paradigm for river conservation and restoration[J]. *Bioscience*, 1997, 47:769 - 784.
- [2] Aguiar F C, Ferreira M T, Moreira I. Exotic and native vegetation establishment following channelization of a western Iberian river[J]. *Regulated rivers: research & management*, 2001, 17:509 - 526.
- [3] 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]. *Internat Rev Hydrobiol*, 2002, 87:183 - 195.
- [4] Norris R H, Thoms M C. What is River Health? [J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41:197 - 209.
- [5] 唐 涛,蔡庆华,刘健康. 河流生态系统健康及其评价[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(9):1191 - 1194.
- [6] Townsend C R, Riley R H. Assessment of river health: accounting for perturbation pathways in physical and ecological space[J]. *Freshwater Biology*. 1999, 41:393 - 405.
- [7] Petersen R C. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agriculture landscape[J]. *Freshwater Biology*. 1992, 27:295 - 306.
- [8] Ladson A R, White L J, Doolan J A, *et al.* Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia [J].

- Freshwater Biology. 1999, 41:453 - 468.
- [9] Karr J R. Defining and measuring river health[J]. Freshwater Biology. 1999, 41:221 - 234.
- [10] Simpson J, Norris R, Barmuta L, *et al.* AusRivAS-National River Health Program: User Manual Website version, 1999.
- [11] Meyer J L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology[J]. Journal of the North American Benthological Society. 1997, 16:439 - 447.
- [12] Jungwirth M, Muhar S, Schmutz S. Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes[J]. Freshwater Biology. 2002, 47:867 - 887.
- [13] Naiman R J, Ecamps H D. The ecology of interfaces: riparian zones[J]. Annu Rev Ecol Syst, 1997, 28:621 - 658.
- [14] Mckone P D. Streams and their corridors-functions and values[J]. Journal of Management in Engineering. 2000, 5:28 - 29.
- [15] 邓红兵, 王青春, 王庆礼, 等. 河岸植被缓冲带与河岸带管理[J]. 应用生态学报, 2003, 23(1):53 - 56.
- [16] 张建春. 河岸带功能及其管理[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6):143 - 146.

Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health^{*}

ZHAO Yan-wei, YANG Zhi-feng

(School of Environment, State Key Laboratory of Water Environmental Simulation, State Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract : Healthy river ecosystem is acknowledged as the object of river management, thus the study on urban river issues in terms of river ecosystem health theory is of great significance in theory and practice. Based on the analysis of urban river ecosystem health concept and its connotation, the index system, including water quality, water quantity, aquatic life, physical form and riparian zone, together with the five-grade assessment standard described as "very healthy, healthy, sub-healthy, unhealthy, sick", are established. The integrative fuzzy hierarchical assessment model is put forward to carry out the assessment. Furthermore, the above theory and method are applied to the case study of 4 urban rivers in Ningbo city to reveal their health grades and disadvantages, and provide decision-making base for their protection, maintenance and restoration.

Key words : urban river ecosystem health; integrative fuzzy hierarchical assessment; index system; Ningbo city

* This study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2003CB415104).