

文章编号:0559-9350(2009)08-0962-07

河流系统健康状况评价体系及评价方法

高学平,赵世新,张晨,涂向阳

(天津大学 建筑工程学院,天津 300072)

摘要:考虑反映河流系统的动力状况、水质状况、河流地貌和生物指标状况、河流服务状况等4个方面,构建了河流系统健康状况评价体系。建立了基于模糊理论的河流健康状况多层次评价模型,给出了相应的评价指标、标准和权重。以海河三岔口河段为例,应用已建的河流系统健康状况模糊综合评价模型,对河流系统的健康状况进行了评价。计算结果表明,该评价体系能定量地从各层次分项指标和总体角度反映河流健康状况,可为河流管理和生态修复工程提供技术支持。

关键词:河流系统;健康状况评价体系;评价方法;海河

中图分类号:X82;X171

文献标识码:A

1 研究背景

河流系统为人类提供了供水、航运、渔业和景观等各种综合效益,是人类赖以生存和发展的重要载体。然而,人类对河流系统的过度开发和利用破坏了河流系统的健康状况。如何表征河流系统健康状况以及如何评估河流修复工程成效关系到能否实现河流可持续发展。美国环保署(EPA)于1999年颁布了快速生物监测规程作为河流健康监测及评价的标准^[1];澳大利亚河流健康计划AUSRIVAS^[2-4],对RIVPACS^[5]方法进行了修改,用于境内河流健康状况的评价;Rhys Colemand等^[6]基于Lang Lang河流域包括水文、水质、藻硅、鱼类、生物栖息地状况的监测和调研,评价了该地区河流的健康状况,为澳大利亚Melbourne地区的河流修复提供了支持。

目前,有关河流健康状况的研究多集中于评价体系和评价方法。国内学者从水量、水质、水生生物、物理结构与河岸带等方面剖析河流系统健康状况的内涵,探讨国外先进的河流健康状况评价方法,指出我国迫切需要构建一套河流健康状况评价体系^[7-9]。耿雷华等^[10]从河流的服务功能、环境功能、防洪功能、开发利用功能和生态功能方面,初步尝试构建了河流健康状况评价体系。

本文在前人研究的基础上,考虑河流服务状况,构建河流系统健康状况评价体系,基于模糊数学原理建立多层次模糊评价模型,分别对河流系统自然属性和社会属性的健康状况进行评价,为河流生态修复提供科学依据和技术支持。

2 河流系统健康状况的表征指标

河流系统健康状况是指河流系统在维持河流动力的前提下,维系河流的生态过程,保证河流系统自然属性的可持续发展,同时考虑人类活动对河流系统的反映和需求,发挥河流系统社会属性的服务功能。健康的河流系统是自然属性和社会属性平衡的河流,既满足河流生命得以维持和延续的需要,同时

收稿日期:2008-08-05

基金项目:国家十一五科技支撑计划(2006BAB04A15)

作者简介:高学平(1962—),男,天津宁河人,教授,主要从事环境水力学与工程水力学研究。E-mail: xpgao@tju.edu.cn

也在一定程度上满足人类社会经济发展的需求。

一般认为,河流系统具有资源功能、环境功能、物理结构和生态功能以及服务功能。本文从反映河流系统自然属性和社会属性的河流动力状况、水质状况、河流地貌和生物指标状况、河流服务状况 4 方面 19 项指标表征河流的健康状况,构建河流系统健康状况评价体系(图 1)。

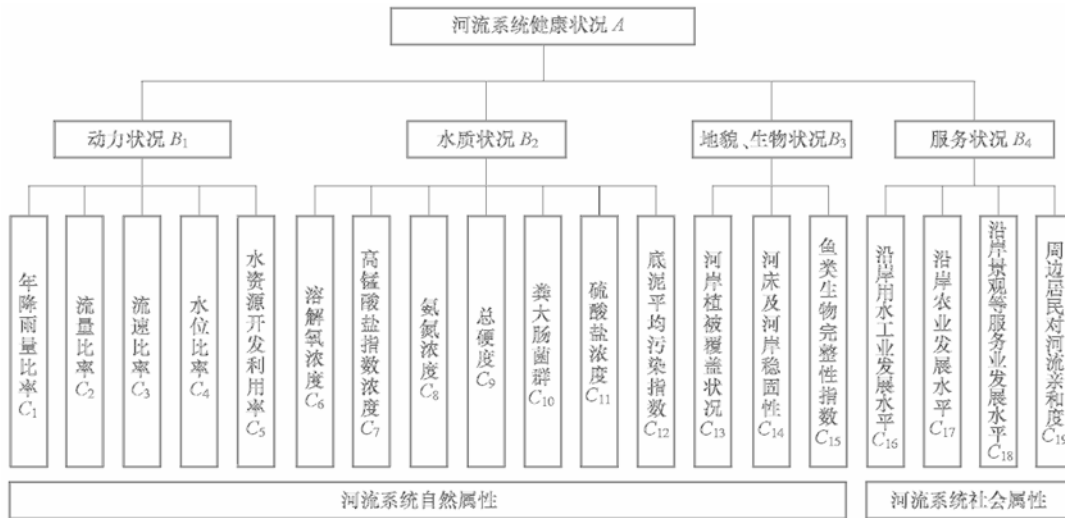


图 1 河流系统健康状况评价体系

2.1 河流动力状况 河流生命在于水的流动,维系河流生命的核心是水循环^[10]。健康的河流系统关键在于河流的动力状况,即河流的流量、流速、水位等水文参数。同时,河流动力状况对河流水质、生物群落、河床和河岸稳固性等极具影响力。借鉴 AUSRIVAS 和 RIVPACS 评价方法,根据被测河流历史水文资料,基于数理统计选择某研究地点人为干扰程度较小的水文参数作为参考点,建立理想条件下环境特征及相应生物组成的理想模型,比较各观测点指标的实际值(O)与通过理想模型计算的理想值(E),以 O/E 的值对其进行评价,反映其健康程度^[9]。河流动力状况包括河流所在地区年降雨量比率、流量比率、流速比率、水位比率和水资源开发利用率。

2.2 河流水质状况 水质状况是评价河流健康状况的重要因素之一^[11],直接反映河流物理、化学指标状况,表征河流水体质量优劣,影响河流生物群落组成,关系人类生命健康和社会经济发展。在评测工作中应根据当地河流水质特点选取具代表性的监测指标。本文根据海河流域水质现状,选取了最具代表性的溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总硬度、粪大肠菌群、硫酸盐、底泥平均污染指数等 7 项指标。

2.3 河流地貌和生物指标状况 自然河流地貌表现为河流纵向的蜿蜒性和横断面的几何形状多样性^[12]。河流地貌状况主要反映河流系统的稳固性,即对洪水、地震等自然灾害以及人类破坏性开发的自身抵御能力。河流地貌状况的代表性指标包括河岸植被覆盖状况、河床及河岸稳固性。

河流的生物群落主要受河流系统水文情势、地貌、流态、水质和人类活动等因素的影响。着眼于水域生物群落结构和功能,处于河流食物链营养顶级的鱼类能反映整个水生态系统的健康状况,是河流健康评价的重要指示生物,采用鱼类生物完整性指数^[13-14]表征河流生物指标状况。

2.4 河流服务状况 河流服务状况反映了河流系统的社会属性,河流服务于人类主要表现在工农业生产用水、城镇生活用水、景观服务业用水等方面;同时,人类对河流的亲密度表征了河流服务状况,体现了人与自然的和谐发展。健康的河流系统不仅保持良好的自然状况,而且能充分体现其社会价值,是河流系统自然属性与社会属性的统一。本文表征河流服务状况的指标有沿岸用水工业发展水平、沿岸农业发展水平、沿岸景观等服务业发展水平以及周边居民对河流的亲密度。

3 河流系统健康等级及分项指标

基于上述河流系统健康评价体系,依据国家地表水水质标准^[15]、河流历史资料和现状特征值等,同

时借鉴国内外有关等级划分和标准临界值的研究成果^[7-10],将河流系统健康状况分为5级,即优、良好、中等、不健康和病态,对应的评价标准为I类、II类、III类、IV类和V类。评价指标即所选19项指标,评价等级即上述5个等级,各分项指标标准值如表1所示。

表1 河流系统健康状况等级及分项指标

河流属性	分项指标	优	良好	中等	不健康	病态
		I类	II类	III类	IV类	V类
动力状况	降雨量比率 %	>120	100~120	80~100	60~80	<60
	流量比率 %	>150	100~150	70~100	40~70	<40
	流速比率 %	>150	100~150	70~100	40~70	<40
	河道水位变化比率 %	>150	100~150	70~100	40~70	<40
	水资源开发利用比率 %	<10	10~20	20~30	30~40	>40
自然属性	D _O (mg/L)	≥7.5	≥6.0	≥5.0	≥3.0	≥2.0
	COD _{Mn} ² (mg/L)	≤2.0	≤4.0	≤6.0	≤10.0	≤15.0
	NH ₃ -N (mg/L)	≤0.15	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0
	总硬度 (mg/L)	≤350	350~450	450~550	550~650	650~750
	粪大肠菌群 (个/L)	≤200	≤2 000	≤10 000	≤20 000	≤40 000
	SO ₄ ²⁻ 浓度 (mg/L)	≤40	40~150	150~250	250~500	500~1 000
	底泥平均污染指数	≤0.1	0.1~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~1.0
地貌、生物 指标状况	沿岸植被覆盖状况 %	>90	70~90	50~70	30~50	<30
	河床及河岸稳固性 %	>90	70~90	50~70	30~50	<30
	鱼类生物完整性指数	>60	50~60	40~50	30~40	<30
社会属性	沿岸用水工业发展水平 %	>90	70~90	50~70	30~50	<30
	沿岸农业发展水平 %	>90	70~90	50~70	30~50	<30
	沿岸景观服务业发展水平 %	>90	70~90	50~70	30~50	<30
	周边居民对河流亲和力 %	>90	70~90	50~70	30~50	<30

4 河流系统健康状况评价方法

4.1 模糊综合评价模型 河流系统健康状况的影响要素是多样的,各要素之间的关系是复杂和模糊的,模糊综合评价是量化河流系统健康状况的典型方法。模糊综合评价步骤为:根据评测数据建立各指标对各类标准的隶属度集,形成模糊关系矩阵;将指标权重集与模糊关系矩阵进行合成运算,获得1个模糊综合评价集;根据评价对象对各级标准的隶属程度,由最大隶属度原则,得出评价结果。

4.1.1 指标类集 U 与指标集 U_i

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\} \quad (1)$$

式中: U 为评价指标类集; U_n 为评价指标类。对每类指标中的各分项指标建立指标集 U_i ,

$$U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}, \dots\} \quad (2)$$

式中: U_i 为评价指标集; u_{ij} 为第*i*类指标中的第*j*个分项指标。

4.1.2 指标类权重集 A 与指标权重集 A_i 根据各类指标的重要程度,赋予每类指标相应的权数,则指标类权重集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$;根据每一类指标中各分项指标的重要程度,赋予适当的权数,设第*i*类指标 U_i 的第*j*个指标 u_{ij} 的权数为 a_{ij} ,则指标权重集 $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}, \dots\}$ 。

4.1.3 模糊关系矩阵 由隶属函数 $f(x)$,得到评价指标隶属于备择集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 中第*k*个元素 v_k 的隶属度 r_{ik} 。对一类指标来说,各分项指标对各评价等级的隶属度就构成了1个矩阵,称之为第*i*类指标 U_i 的一级模糊关系矩阵 R_i ,

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} & r_{i15} \\ r_{i21} & \dots & \dots & \dots & r_{i25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{ij1} & \dots & \dots & \dots & r_{ij5} \end{pmatrix} \quad (3)$$

4.1.4 一级模糊评价 对第 i 类指标进行一级模糊综合评价,得一级模糊评价集 B_i ,

$$B_i = A_i \circ R_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}, \dots] \circ \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} & r_{i15} \\ r_{i21} & \dots & \dots & \dots & r_{i25} \\ \dots & & & & \dots \\ r_{ij1} & \dots & \dots & \dots & r_{ij5} \\ \dots & & & & \dots \end{pmatrix} = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5}) \quad (4)$$

式中: B_i 为一级评价集; A_i 为指标权重集; R_i 为一级模糊关系矩阵; “ \circ ”为矩阵合成算子。本文采用 $M(\cdot, +)$ 型算子,即普通矩阵算法,考虑所有输入评价模型单个数据对评价结果的作用,能明确体现各指标在各级别隶属度的差异,评价结果可信度较高。

4.1.5 二级模糊评价 由式(4)构造二级模糊关系矩阵 R ,

$$R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \circ R_1 \\ A_2 \circ R_2 \\ \dots \\ A_n \circ R_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

则得二级模糊综合评价集 B ,

$$B = A \circ R = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) \quad (6)$$

根据最大隶属度原则,将 B 中隶属度最大的值所对应的等级类别作为河流系统健康状况的综合评价结果。

4.2 构造隶属函数 对任一评价指标 u_{ij} 的每个评价等级都对应 1 个标准值 S_{ijk} ,各等级标准值较离散,为实现监测指标各等级之间的连续性,本文采用的隶属函数为正余弦函数曲线分布形态。则评价值得第 I 级 ($k=1$) 的隶属函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq S_k \\ \cos^2 \left(\frac{x - S_k}{S_{k+1} - S_k} \right) \frac{\pi}{2} & S_k < x < S_{k+1} \\ 0 & x \geq S_{k+1} \end{cases} \quad (7)$$

隶属于 II、III、IV 级 ($k=2,3,4$) 的隶属函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq S_{k-1} \\ \sin^2 \left(\frac{x - S_{k-1}}{S_k - S_{k-1}} \right) \frac{\pi}{2} & S_{k-1} < x \leq S_k \\ \cos^2 \left(\frac{x - S_k}{S_{k+1} - S_k} \right) \frac{\pi}{2} & S_k < x \leq S_{k+1} \\ 0 & x > S_{k+1} \end{cases} \quad (8)$$

隶属于第 V 级质量 ($k=5$) 的隶属函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq S_{k-1} \\ \sin^2 \left(\frac{x - S_{k-1}}{S_k - S_{k-1}} \right) \frac{\pi}{2} & S_{k-1} < x < S_k \\ 1 & x \geq S_k \end{cases} \quad (9)$$

式(7)~(9)适用于评价值越小越优的指标,对流量比率、溶解氧等评价值越大越优的指标 ($S_k > S_{k+1}$),可将式中“ $<$ ”与“ $>$ ”互换。

4.3 确定指标权重集 指标权重反映了对河流系统健康状况的影响程度,其值不仅与实测数据有关,而且与评价标准有关。实测数据相同时,标准值低的指标对污染影响较大,其计算公式如下:

$$a_{ij} = \frac{\frac{x_{ij}}{s_{ij}}}{\sum_j \frac{x_{ij}}{s_{ij}}}, \quad \sum_j a_{ij} = 1, \quad s_{ij} = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 S_{ijk} \quad (10)$$

式中： x_{ij} 为各指标实测值； s_{ij} 为第*i*个指标5类标准值 S_{ijk} 的算术平均值，计算流量比率、溶解氧等越大越优的指标权重时，将式(10)的分子和分母取倒数，得到指标权重集 $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}\}$ 。

根据河流系统特点，河流系统自然属性的健康状况由河流动力状况、水质状况、河流地貌和生物指标状况3类指标的重要程度确定，定义 $A = \{0.4, 0.3, 0.3\}$ ；河流系统社会属性的健康状况即为河流服务状况。

5 河流健康状况评价实例

选择海河三岔口河段作为研究对象，进行河流自然属性和社会属性的健康状况评价。根据海河流域水资源公报、水资源质量公报、主要流域断面水质监测周报、海河流域防洪调度概化图册等水文水质资料以及水生生物调查成果，得到河流自然属性各指标值；根据天津市统计公报，对海河沿岸工、农、服务业发展水平进行打分，沿线居民对海河改造建设满意度通过问卷调查得到。2005年6月海河三岔口河段健康状况分项指标值如表2所示。

表2 海河三岔口河段各分项指标(2005年6月)*

河流属性	分项指标	数值	河流属性	分项指标	数值	
自然属性	动力状况 B_1	C_1	75.7%	自然属性 地貌、生物 指标状况 B_3	C_{13}	40%
		C_2	65%		C_{14}	60%
		C_3	60%		C_{15}	24%
		C_4	52%			
		C_5	70%			
	水质状况 B_2	C_6 (mg/L)	5.8	社会属性 服务状况 B_4	C_{16}	64%
		C_7 (mg/L)	7.6		C_{17}	60%
		C_8 (mg/L)	0.53		C_{18}	40%
		C_9 (mg/L)	480		C_{19}	84%
		C_{10} (个/L)	1 120			
C_{11} (mg/L)		900				
C_{12}		0.55				

* 数据来源于2005年海河流域水资源公报、中国环境监测总站、海河流域防洪调度概化图册。

将表2中的数据代入式(7)—(10)，得到指标集 B_1 — B_4 的一级模糊关系矩阵 R_i 和指标权重集 A_i ，再经式(4)完成一级模糊评价，得到一级模糊评价集，如 $B_2 = \{0.004, 0.210, 0.159, 0.247, 0.380\}$ ，2005年6月海河三岔口健康状况 B 级指标评价结果如图2所示。由最大隶属度原则，海河三岔口河段动力状况(B_1)处于“病态”；水质状况(B_2)处于“病态”；河流地貌、生物指标状况(B_3)处于“中等”状态；海河沿线工业、农业、服务业发展现状较好，亲和度得分较高，其服务状况(B_4)评价结果为“良好”状态。

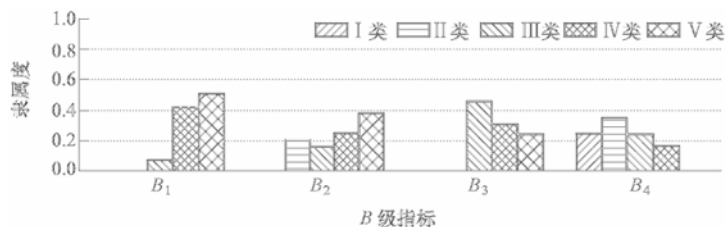


图2 海河三岔口河段健康状况 B 级指标评价结果(2005年6月)

同理，由式(6)完成二级模糊评价，得到海河三岔口河段自然属性的健康状况模糊综合评价集 $B_N = \{0.001, 0.063, 0.212, 0.333, 0.391\}$ ；海河三岔口河段的服务状况即反映社会属性的健康状况，模糊综合

评价集为 $B_s = B_4 = \{0.247, 0.350, 0.242, 0.161, 0.000\}$, 如图 3 所示。由最大隶属度原则, 海河三岔口自然属性的健康状况总体评价结果为“病态”, 社会属性的健康状况总体评价结果为“良好”。

总体而言, 评价结果反映了河流自身现状和特点, 海河三岔口河段的自然属性和社会属性健康状况处于不平衡状态。河流对社会的贡献远远超过维持其自身健康发展的能力, 表明人类活动对河流的胁迫作用较为严重, 应着重从水量和水质方面对海河三岔口河段进行生态修复。

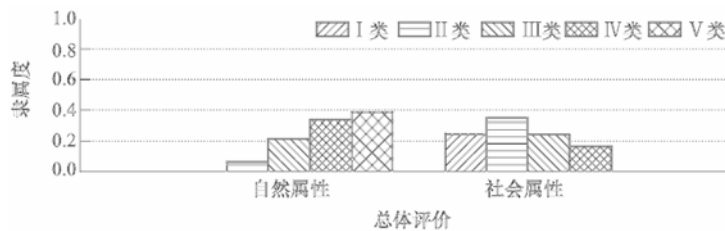


图 3 海河三岔口河段自然属性和社会属性健康状况总体评价结果(2005 年 6 月)

6 结论

(1) 从反映河流系统自然属性和社会属性的动力状况、水质状况、河流地貌和生物指标状况、河流服务状况 4 方面表征河流系统健康状况, 构建了河流系统健康评价体系。考虑河流系统的服务状况, 体现了河流对人类社会经济贡献, 反映了河流系统的社会属性, 较已往的研究更加全面。(2) 在河流系统健康评价体系的基础上, 确定了 19 项具体评价指标, 提出了河流系统健康状况等级及评价标准。采用二级模糊综合评估方法, 建立了河流系统健康状况模糊综合评价模型。(3) 对海河三岔口河段的健康状况进行了评价, 该河段动力状况和水质状况偏于“病态”, 地貌和生物状况“中等”、服务状况“良好”; 海河三岔口河段自然属性的健康状况为“病态”, 社会属性的健康状况为“良好”, 两者处于极度不平衡状态。(4) 评价结果表明, 该评价体系能定量地从各层次分项指标和总体角度反映河流系统自然属性和社会属性的健康状况, 可为河流管理和生态修复工程提供科学依据和技术支持。

参 考 文 献:

- [1] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, et al. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers; Periphyton, Benthic Macro invertebrates and Fish, Second Edition[M]. Washington D C: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [2] Smith M J, Kay W R, Edward D H D, et al. AUSRIVAS: using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia[J]. Fresh Biology, 1999(41):269—282.
- [3] Hart B T, Davies P E, Humphrey C L, et al. Application of the Australian river bioassessment system (AUSRIVAS) in the Brantas River, East Java, Indonesia[J]. Journal of Environmental Management, 2001(62):93—100.
- [4] Parsons M, Thoms M, Norris R. Australian River Assessment System: Review of Physical River Assessment Methods-A Biological Perspective, Monitoring River Health Initiative Technical Report no 21[M]. Canberra: Commonwealth of Australia and University of Canberra, 2002. 1—24.
- [5] Wright J F, Sutcliffe D W, Furse M T. Assessing the biological quality of fresh waters: RIVPACS and other techniques [M]. Ambleside: The Freshwater Biological Association, 2000:1—24.
- [6] Rhys Coleman, Vincent Pettigrove. Waterway assessment in the western port catchment: The health of the Lang Lang River [R]. Waterways Group Melbourne Water Corporation. 2001.
- [7] 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—355.
- [8] 吴阿娜, 杨凯, 车越, 等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展, 2005, 16(4):602—608.
- [9] 唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9):1191—1194.
- [10] 耿雷华, 刘恒, 钟华平, 等. 健康河流的评价指标和评价标准[J]. 水利学报, 2006, 37(3):253—258.

- [11] Volstad J H, Neerchal N K, Roth N E. Combining biological indicators of watershed condition from multiple sampling programs; a case study from Maryland, USA[J]. *Ecological Indicators*, 2003(3):13—25.
- [12] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. *水利学报*, 2009, 40(2):129—137.
- [13] Karr J K. Assessments of biotic integrity using fish communities[J]. *Fisheries (Bethesda)*, 1981(6):21—27.
- [14] Sarah J Miller, Denice H Wardrop, Wendy M Mahaney. A plant-based index of biological integrity (IBI) for headwater wetlands in central Pennsylvania[J]. *Environment International*, 2006(6):290—312.
- [15] GB3838—2002, 中华人民共和国地表水环境质量标准[S].

Index system and method for assessing the health status of river

GAO Xue-ping, ZHAO Shi-xin, ZHANG Chen, TU Xiang-yang

(*Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: An index system for assessing the health status of river including the scopes of river dynamics condition, water quality status, river geomorphology and biology status as well as the service status is suggested and the model for assessment is proposed based on multi-hierarchy fuzzy theory. The corresponding assessment indexes, quantitative standards and weight functions are established. The system and method are applied to assess the health status of the Sanchakou river section in the Haihe River. The result shows that the assessment system can reflect the current health status of the river quantitatively.

Key words: river system; health status; assessment; index system; model; multi-hierarchy fuzzy theory

(责任编辑:韩 昆)

(上接第 961 页)

Analysis on water demand for ecosystem protection in Yellow River Delta

LIU Xiao-yan, LIAN Yu, KE Su-juan

(*Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China*)

Abstract: The sea-going runoff and flow discharge variation process of the Yellow River are vital to the health of ecosystem in the river mouth delta. For the purpose of estimating the ecological water demand, the ecosystem is divided into three ecological units according to their function, including the wetland in land area, wetland in river area and offshore sea area. The relationship between environmental restoration and runoff flow conditions for these units are investigated based on in-situ observation and data analysis, with emphases laid on the water demand of eco-environment for breeding of birds, fishes and aquatic organism in different seasons. The required annual sea-going runoff and flow discharge variation process for each unit are suggested. On the basis of comprehensively considering the natural condition, water demands for social and economy development and necessity for environment protection the controlled indexes of water use, including the suitable total runoff volume in breeding period and suitable river flow discharge in different seasons, are proposed.

Key words: Yellow River; delta; wetland; ecosystem; ecological water use; runoff

(责任编辑:韩 昆)