

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.026

基于压力-状态-响应模型的黄柏河生态系统健康评价

彭涛^{1,2}, 王珍¹, 赵乔¹, 郭倩¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072)

摘要:为定量评估黄柏河生态系统健康状态,以压力-状态-响应概念模型为基础,构建黄柏河生态系统健康评价指标体系,采用层次分析法确定指标权重,运用集对分析和属性识别理论对黄柏河生态健康现状进行综合评价。结果表明:黄柏河生态系统综合健康状况处于中等水平,其中压力子系统、状态子系统和响应子系统的健康等级分别是良、中等和良,水体富营养化指数、农药施用强度、水土流失率等是影响黄柏河生态健康状况的主要因素。

关键词:河流健康评价;压力-状态-响应模型;集对分析;属性识别理论;黄柏河

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)05-0141-05

Ecosystem health assessment for Huangbai River based on PSR model

PENG Tao^{1,2}, WANG Zhen¹, ZHAO Qiao¹, GUO Qian¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the pressure-state-response (PSR) conceptual model, an assessment index system of river ecosystem health was established for quantitative assessment of the ecosystem health status of the Huangbai River. The analytic hierarchy process was used to determine the index weight. The ecosystem health status of the Huangbai River was evaluated comprehensively using set pair analysis and attribute recognition theory. The results show that the comprehensive ecosystem health status of the Huangbai River was at the medium level, with the health status of the pressure subsystem, the state subsystem, and the response subsystem at a high level, medium level, and high level, respectively. The main factors that affect the ecosystem health of the Huangbai River included the water eutrophication index, pesticide application intensity, and soil erosion rate.

Key words: river health assessment; PSR model; set pair analysis; attribute recognition theory; Huangbai River

河流是连接陆地与海洋的重要廊道,在维系地球的物质循环、能量交换和信息传递方面发挥着重要的生态功能,同时具有灌溉、供水、发电、航运等综合效益。但是随着人口和经济社会快速发展以及不合理的人类活动开展,河流生态系统的结构和功能遭到严重损害,引发了一系列的生态与环境问题,并使区域粮食安全、水资源安全和生态安全受到严重威胁,因此开展河流生态健康评价具有重要的现实意义。

近年来,河流健康评价已成为国内外河流生态系统研究的前沿问题和热点领域^[1-4]。河流生态系

统健康评价方法主要包括指示物种法和指标体系法。前者以鱼类、硅藻与大型无脊椎动物等指示物种的数量、生产力、结构功能指标的动态变化等描述河流生态系统的健康状况。该类方法简便易行,是评价自然河流生态系统的较好方法,常用方法有美国的生物完整性指数^[5] (index of biotic integrity, IBI)和英国的河流无脊椎动物预测和分类计划^[6] (river invertebrate prediction and classification system, RIVPACS)。但指示物种法仅依靠某一类敏感物种判别,难以准确反映河流生态系统状况,不应作为唯

基金项目:宜昌市自然基础科学研究与应用专项(A16-302-a05);湖北省自然科学基金(2012FFB03802)

作者简介:彭涛(1973—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源及生态水文方面研究。E-mail: pengtao306@163.com

一的方法而单独使用^[7]。指标体系法根据河流生态系统特征及其功能建立指标体系进行定量评价,评价指标的选择既考虑了生态系统自身特点,又考虑了人类活动的影响,较好反映了河流生态系统的过程,在河流生态系统健康评价中被广泛应用。国外较具代表性的有澳大利亚的溪流状况指数(index of stream condition, ISC)^[8]和英国的河流生境调查(river habitat survey, RHS)^[9]。国内在长江^[10]、黄河^[11]、珠江^[12]等开展了河流健康评价指标体系研究,对于流域可持续管理与河流生态修复具有重要意义。

黄柏河是长江左岸的一级支流,是典型的峡谷型河流,承担着宜昌城区百万居民生活及宜东灌区百万亩农田灌溉的用水重任,是沟通宜昌市北部山区与长江联系的生态廊道。近年来流域经济社会快速发展,水资源和矿产资源过度开发,流域水污染治理相对滞后,导致黄柏河水环境质量明显恶化及生态功能退化。为此,笔者从压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)概念模型出发,建立黄柏河生态健康评价指标体系,运用集对分析与属性识别理论进行河流健康现状评价,为黄柏河生态修复及河流健康管理提供科学依据。

1 研究区域概况

黄柏河流域位于宜昌市西北部,全长 162 km,流域面积 2 016 km²。黄柏河分东西两支,东支发源于宜昌市夷陵区的黑良山,长 130 km;西支发源于夷陵区的曹家山,长 78 km。东、西支在夷陵区两河口汇合干流,长 32 km,于葛洲坝三江上游引航道汇入长江。黄柏河流域属于亚热带季风气候,多年平均降水量 1 138 mm,降水集中在 6—9 月,多年平均径流量 8.95 亿 m³。流域水能资源丰富,黄柏河东支兴建了玄庙观、天福庙、西北口和尚家河 4 座大中型水库,经梯级水库群调节后,通过东风渠为官庄水库及东风渠灌区提供水源,两河口下游的汤渡河水库则成为宜昌运河的引水源头。目前,黄柏河流域已初步形成了具有防洪、灌溉、供水、发电等多种效益的水资源配置工程体系,在区域经济社会的可持续发展中发挥着重要作用。

2 研究方法

2.1 评价指标体系建立

由于人类经济社会活动将显著改变自然资源的数量与质量,即会对生态与环境产生一定的外部压力,而社会将通过经济、法律、政策等手段对这些压力进行相应的响应,从而形成了问题预测、政策形

成、监测、评估的反馈环。20 世纪 80 年代末,经济合作和开发组织(OECD)与联合国环境规划署(UNEP)共同提出 PSR 概念模型^[13]。运用该模型可以针对具体研究对象、尺度建立问题产生原因、现状及反应之间的逻辑关系,且简便易行。PSR 模型充分考虑了外界的压力干扰、区域的状态变化和人类的响应措施,目前已广泛应用于土地利用规划、资源可持续利用、环境评价等方面,但在河流生态系统健康评价领域应用还不多。

采用 PSR 模型构建黄柏河生态系统健康评价指标体系具有清晰的因果关系,人类活动对河流健康施加一定的压力,从而导致河流健康状态发生一定的变化,而另一方面人类社会对该变化做出响应。因此,笔者从 PSR 概念模型出发(图 1),遵循整体性、代表性、科学性、可度量性原则,在参考研究成果的基础上,采用专家咨询法(德尔菲法),邀请水文学、生态学和环境科学等领域的专家遴选评价指标,最后构建包括压力子系统、状态子系统和响应子系统 3 方面 15 个指标的黄柏河生态系统健康评价指标体系(表 1)。

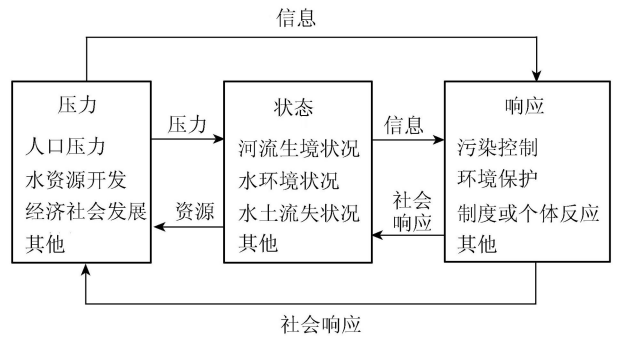


图 1 基于 PSR 模型的河流生态系统健康评价框架

2.2 指标权重计算

目前计算权重的方法可分为客观赋权法和主观赋权法两大类,前者如熵权法、主成分分析法、多目标优化法等;后者如层次分析法、德尔菲法(专家咨询法)、二项系数法等。考虑到河流生态系统健康评价本身是一种主观判断,笔者选用层析分析法确定指标权重,具体步骤见文献[14]。黄柏河生态系统健康评价指标的权重计算结果见表 1。

2.3 评价标准确定

由于目前河流生态系统健康尚无明确的或公认的评价标准,因此在实地考察、问卷调查和专家咨询的基础上,借鉴国内外河流健康评价研究成果^[10-12,15-16],根据健康程度将河流生态系统健康划分为优(Ⅰ级)、良(Ⅱ级)、中(Ⅲ级)、差(Ⅳ级)和极差(Ⅴ级)5 个等级。黄柏河生态系统健康评价指标的分级标准见表 2。

表 1 黄柏河生态系统健康评价指标体系				
目标层 A	准则层 B (权重)	指标层 C	指标层 C 权重	
			相当于准则层的权重	相当于目标层的权重
黄柏河生态系统健康 A	压力 B ₁ (0.2857)	人口密度 C ₁ (人/km ²)	0.0890	0.0254
		水资源开发利用 C ₂ (%)	0.2976	0.0850
		农药施用强度 C ₃ (kg/hm ²)	0.1579	0.0451
		化肥施用强度 C ₄ (kg/hm ²)	0.1579	0.0451
		综合用水量 C ₅ (m ³ /人)	0.2976	0.0850
	状态 B ₂ (0.5714)	水土流失率 C ₆ (%)	0.1841	0.1052
		防洪工程达标率 C ₇ (%)	0.1100	0.0629
		河流纵向连通性 C ₈ (%)	0.0687	0.0392
		水体富营养化指数 C ₉	0.3186	0.1821
		水功能区水质达标率 C ₁₀ (%)	0.3186	0.1821
	响应 B ₃ (0.1429)	城镇生活污水集中处理率 C ₁₁ (%)	0.4162	0.0595
		环保投资指数 C ₁₂ (%)	0.2618	0.0374
		区域人口素质 C ₁₃ (‰)	0.0986	0.0141
		相关法规完善程度 C ₁₄ (分)	0.1611	0.0230
		物质生活指数 C ₁₅ (万元)	0.0624	0.0089

表 2 黄柏河生态系统健康评价标准					
指标	分级标准				
	优	良	中	差	极差
人口密度 C ₁ (人/km ²)	<100	100 ~ 300	300 ~ 500	500 ~ 800	>800
水资源开发利用 C ₂ (%)	<10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	>60
农药施用强度 C ₃ (kg/hm ²)	<2.5	2.5 ~ 3	3 ~ 3.5	3.5 ~ 4	>4
化肥施用强度 C ₄ (kg/hm ²)	<200	200 ~ 300	300 ~ 400	400 ~ 500	>500
综合用水量 C ₅ (m ³ /人)	<200	200 ~ 400	400 ~ 600	600 ~ 800	>800
水土流失率 C ₆ (%)	<10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	>40
防洪工程达标率 C ₇ (%)	>95	80 ~ 95	60 ~ 80	40 ~ 60	<40
河流纵向连通性 C ₈ (%)	<10	10 ~ 20	20 ~ 50	50 ~ 80	>80
水体富营养化指数 C ₉	<30	30 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	>70
水功能区水质达标率 C ₁₀ (%)	>95	80 ~ 95	60 ~ 80	50 ~ 60	<50
城镇生活污水集中处理率 C ₁₁ (%)	>95	80 ~ 95	60 ~ 80	40 ~ 60	<40
环保投资指数 C ₁₂ (%)	>2.5	2 ~ 2.5	1.5 ~ 2	1 ~ 1.5	<1
区域人口素质 C ₁₃ (‰)	<3	3 ~ 6	6 ~ 12	12 ~ 30	>30
相关法规完善程度 C ₁₄ (分)	>90	70 ~ 90	60 ~ 70	50 ~ 60	<50
物质生活指数 C ₁₅ (万元)	>0.8	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	0.3 ~ 0.4	<0.3

$$\mu_l = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & x_l \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x_l}{s_2 - s_1} + \frac{2x_l - 2s_1}{s_2 - s_1}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & s_1 < x_l \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2 + s_3 - 2x_l}{s_3 - s_1}i_1 + \frac{2x_l - s_1 - s_2}{s_3 - s_1}i_2 + 0i_3 + 0j & \frac{s_1 + s_2}{2} < x_l \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{s_3 + s_4 - 2x_l}{s_4 - s_2}i_2 + \frac{2x_l - s_2 - s_3}{s_4 - s_2}i_3 + 0j & \frac{s_2 + s_3}{2} < x_l \leq \frac{s_3 + s_4}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2s_4 - 2x_l}{s_4 - s_3}i_3 + \frac{2x_l - s_3 - s_4}{s_4 - s_3}j & \frac{s_3 + s_4}{2} < x_l \leq s_4 \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j & x_l > s_4 \end{cases}$$

式中: $s_1、s_2、s_3、s_4$ 为 I ~ V 级界限值。

同理可推得越大越优型指标的数学表达式,类似式(3)。

2.4 综合评价模型

河流生态健康评价存在许多不确定性因素,如河流生态系统自身的复杂性和动态性,评价等级标准界限的相对模糊性,评价结果的非线性问题等。1989 年我国学者赵克勤^[17]基于对立统一观点提出了联系数的概念,建立了集对分析理论(set pair analysis,SPA)。该方法能通过差异度系数,直观反映评价样本指标与对各级指标标准界限的联系度,有效解决了评价中等级标准边界模糊性问题,提高了评价结果的客观性和可信度^[18]。

给定集合 A、B,设 $H=(A,B)$ 是 2 个集合组成的集对,其基本表达式为

$$\mu_{A\sim B}=a+bi+cj \tag{1}$$

式中: $\mu_{A\sim B}$ 为联系度,又称为三元联系度; $a、b、c$ 分别为集对的同一度、差异度和对立度, $a、b、c\in[0,1]$,为实数,且 $a+b+c=1$; i 为差异度系数,取值区间为 $[-1,1]$,体现不确定性,按照实际情况取值; j 为对立度系数,通常情况下取定值-1,表示对立度 c 与同一度 a 相反。

利用其扩展式五元联系度进行分析计算,其数学表达式为

$$\mu_{A\sim B}=a+b_1i_1+b_2i_2+b_3i_3+cj \tag{2}$$

式中: $b_1、b_2、b_3、c\in[0,1]$,且 $a+b_1+b_2+b_3+c=1$; $b_1、b_2、b_3$ 为差异度; $i_1、i_2、i_3$ 为差异度系数;其他符号同上。

将河流生态系统健康评价样本的指标值 $x_l(l=1,2,\cdots,m;m$ 为评价指标数)看成一个集合,把相应指标的评价等级看作另一个集合 $B_k(k=1,2,\cdots,n;n$ 为评价等级数),则 x_l 与 B_k 构成一个集对 $H=(x_l,B_k)$ 。若指标类型为越小越优型指标,评价样本的指标值 x_l 与河流生态系统健康评价等级 k 之间的联系度 μ_l 为^[18]

在此基础上,计算评价样本与评价等级 k 的五元综合联系度 μ_k ^[18]。

$$\mu_k = \sum_{l=1}^m w_l u_{lk} = \sum_{l=1}^m w_l a_l + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,1} i_1 + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,2} i_2 + \sum_{l=1}^m w_l b_{l,3} i_3 + \sum_{l=1}^m w_l c_{lj} \quad (4)$$

式中: a_l 为指标值 x_l 与该指标第 k 级标准的同 一 度, $b_{l,1}$ 为指标值 x_l 与该指标第 k 级标准相差 1 级 的 差 异 度, $b_{l,2}$ 为 指 标 值 x_l 与 该 指 标 第 k 级 标 准 相 差 2 级 的 差 异 度, $b_{l,3}$ 为 指 标 值 x_l 与 该 指 标 第 k 级 标 准 相 差 3 级 的 差 异 度, c_l 为 指 标 值 x_l 与 该 指 标 第 k 级 标 准 的 对 立 度; w_l 为 指 标 l 的 综 合 权 重; w_l 为 指 标 的 综 合 权 重。

为提高健康评价等级结果的准确性,采用属性识别理论评判样本的健康等级^[19]。设 F 为评价对象 X 上的某类属性空间, $(G_1, G_2, \cdots, G_k)$ 为属性空间 F 的分割。将河流生态系统健康评价等级分为 5 类,即优、良、中、差和极差,且彼此不相交,满足 $G_1>G_2>G_3>G_4>G_5$,则 $(G_1, G_2, \cdots, G_k)$ 为属性空间

表 3 黄柏河生态系统健康评价指标现状结果

评价指标	量化标准	数据来源	现状值	对应等级
C_1	流域的人口数量(人/km ²)	统计数据	181	Ⅱ级
C_2	流域水资源开发利用量占流域水资源总量的百分比(%)	统计数据	25	Ⅲ级
C_3	本年内耕地农药实际施用量(kg/hm ²)	统计数据	3.6	Ⅳ级
C_4	本年内耕地化肥实际施用量(kg/hm ²)	统计数据	260	Ⅱ级
C_5	本年内用水总量与区内人口总数的比值(m ³ /人)	统计数据	315	Ⅱ级
C_6	水土流失面积占流域总面积的百分比(%)	考察调查	32	Ⅳ级
C_7	达到设计防洪标准的工程数量占防洪工程总数的百分比(%)	考察调查	85	Ⅱ级
C_8	河道障碍物的径流调节库容占多年平均来水量的百分比(%)	统计数据	38.5	Ⅲ级
C_9	以综合营养指数来反映水体营养化程度	统计数据	60.5	Ⅳ级
C_{10}	水功能区达到水质管理目标的个数占水功能区总数的百分比(%)	统计数据	85	Ⅱ级
C_{11}	经过处理的生活污水量占污水排放总量的百分比(%)	统计数据	93	Ⅱ级
C_{12}	环保投资总数占 GDP 的比重(%)	统计数据	1.6	Ⅲ级
C_{13}	文盲人数占区域人口总数的百分比(%)	统计数据	0.25	Ⅰ级
C_{14}	河流管理相关法规的健全程度(分)	问卷调查	75	Ⅱ级
C_{15}	农民人均纯收入(万元)	统计数据	1.44	Ⅰ级

3.2 评价结果分析

由式(3) 计算评价指标与评价等级 k 之间的 μ_l ,在此基础上,根据各指标权重计算评价样本与评价标准等级 k 的综合联系度 μ_k ,结果见表 4。经置信度准则验证($\lambda=0.6$) $0.071+0.409+0.298>0.6$,由此得到黄柏河生态系统综合健康等级处于中等水平,表明黄柏河生态系统健康状况形势较为严峻。

按照上述计算步骤,可计算得到黄柏河生态系统健康子系统层的联系度(图 2)。从子系统层来看,压力子系统处于良好水平(采用置信度准则验证 $0.017+0.589>0.6$),但黄柏河生态系统仍存在潜在的外部压力,主要胁迫因子是农药施用强度、水资源开发利用率、人均综合用水量、化肥施用强度等,状态子系统属于中等水平(经置信度准则验证 $0+0.367+0.320>0.6$),说明河流生态系统已经受到了

F 的一个强序分割类,属于有序分割类的识别问题。根据置信度准则,对置信度 λ (一般取 $0.6<\lambda<0.8$), k_i 计算公式为

$$k_i = \min\{k: \sum_{l=1}^5 \mu_k(G_l) \geq \lambda, l \leq k \leq 5\} \quad (5)$$

取 k 值直到满足式(5),则认为第 i 个评价样本 x_i 的健康等级属于 G_{k_i} 类。根据实际情况,本次评价置信度取 0.6。 λ 越大,则评价结果越倾向于稳妥。

3 结果分析

3.1 数据来源

研究数据主要来源于《2014 年宜昌市水资源公报》《2014 年宜昌市夷陵区环境质量公报》《2014 年宜昌市夷陵区国民经济和社会发展报告》以及黄柏河流域专题调查。黄柏河生态系统健康评价指标现状值见表 3。

表 4 黄柏河生态系统健康目标层评价结果

联系度	a	b_1	b_2	b_3	c
μ_1	0.190	0.810	0	0	0
μ_2	0	0.333	0.667	0	0
μ_3	0	0	0.300	0.700	0
μ_4	0	0.9	0.100	0	0
μ_5	0	0.925	0.075	0	0
μ_6	0	0	0.3	0.7	0
μ_7	0	0.857	0.143	0	0
μ_8	0	0	0.883	0.117	0
μ_9	0	0	0.45	0.550	0
μ_{10}	0	0.857	0.143	0	0
μ_{11}	0.733	0.267	0	0	0
μ_{12}	0	0	0.7	0.3	0
μ_{13}	1	0	0	0	0
μ_{14}	0	0.667	0.333	0	0
μ_{15}	1	0	0	0	0
μ_k	0.071	0.409	0.298	0.221	0

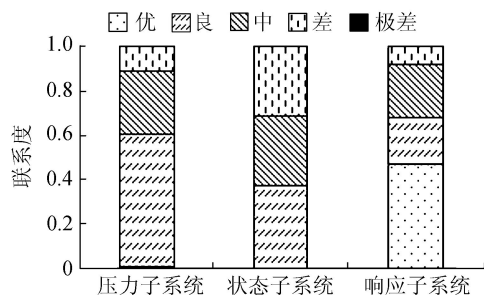


图2 黄柏河生态系统健康子系统层评价结果

较明显的人类活动干扰,导致生态系统的结构和功能出现了一定程度的退化。20 世纪 90 年代以来,随着区域经济社会快速发展,水资源大规模开发利用,流域内生活污水、工业废水排放量持续增加,特别是矿产资源的过度开发,黄柏河水质状况明显下降,部分河段水体富营养化现象严重,生物多样性降低^[20]。响应子系统处于良好状态(采用置信度准则验证 $0.466+0.218>0.6$),可见当地政府和公众针对黄柏河的压力和状态采取了积极响应措施。

2005 年以来,宜昌市全面启动黄柏河流域综合整治工作,关停并转数十家污染企业,重点实施了五大水污染防治项目,使得黄柏河下游水环境质量发生明显好转,但是流域内矿业污染、农业面源污染、水土流失和河道淤积问题依然比较严峻,黄柏河流域生态与环境问题仍不容乐观。2013 年 5 月 20 日和 21 日黄柏河东支中上游的天福庙水库和玄庙观水库相继发生不同程度水华现象。因此,还需要持续开展黄柏河流域综合整治,建立流域长效管理机制,大力实施控源截污,减轻流域水体污染负荷,加强梯级水库群科学调度,协调好河道内生态用水与区域社会经济系统用水之间的关系,同时完善相关政策法规,增强公众保护环保意识,不断改善黄柏河生态系统健康水平。

4 结论与讨论

在专家咨询、借鉴相关研究成果等基础上,利用 PSR 框架模型建立了黄柏河生态系统健康评价指标体系,采用层次分析法计算各评价指标的权重,确定了各个指标的评价标准,构建了基于集对分析与属性识别理论的黄柏河生态系统健康综合评价模型,结果显示,黄柏河生态系统综合健康处于中等水平,表明系统受到了一定的外部压力,河流生态系统的结构和功能逐渐退化,河流生态健康现状不容乐观。因此,为改善黄柏河的生态系统健康状况,需要进一步提高黄柏河流域综合管理水平、完善黄柏河流域水资源保护管理办法,动员公众积极参与流域环境保护,提高公众环保意识,协调社会经济发展与水资源

源保护之间的关系。

由于影响河流生态系统健康状况的因素众多,文中所选指标的完整性和代表性仍然存在一些不足,受数据资料所限并未将初级生产力、鱼类完整性指数、河流脉动指数、侧向连通性等重要指标纳入评价指标体系。另外,由于缺少受人类活动影响相对较小历史时期的监测资料,难以获取针对研究区域状况的参考背景值,确定符合研究区域实际情况的评价标准阈值范围还存在较大困难,因此建立统一、长期的监测体系将是今后我国河流生态系统健康评价和可持续管理的迫切需要。

参考文献:

- [1] 董哲仁. 河流健康评估的原则和方法[J]. 中国水利, 2005(10): 17-19. (DONG Zeren. Principles and method of river health assessment[J]. China Water Resources, 2005(10): 17-19. (in Chinese))
- [2] 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. (GENG Leihua, LIU Heng,ZHONG Huaping,et al. Indicators and criteria for evaluation of healthy rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(3): 253-258. (in Chinese))
- [3] PINTO U, MAHESHWARI B. A framework for assessing river health in peri-urban landscapes [J]. Ecohydrology and Hydrobiology,2014,14(2): 121-131.
- [4] GROWNS I, ROURKE M, GILLIGAN D. Toward river health assessment using species distributional modeling [J]. Ecological Indicators,2013,29: 138-144.
- [5] KARR J R. Defining and measuring river health [J]. Freshwater Biology,1999,41: 221-234.
- [6] WRIGHT J F, ARMITAGE P D, FURSE M T, et al. Prediction of invertebrate communities using stream measurements [J]. Regulated Rivers Research and Management,1989,4: 147-155.
- [7] 赵彦伟,杨志峰. 河流健康: 概念、评价方法与方向[J]. 地理科学,2005,25(1): 119-124. (ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng. River health: concept,assessment method and direction[J]. Scientia Geographica Sinica,2005,25(1): 119-124. (in Chinese))
- [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] RAVEN P J, HOLMES N T H, DAWSON F H, et al. Quality assessment using river habitat survey data [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems,1998,8(4): 477-499.
- [10] 蔡其华. 维护健康长江 促进人水和谐[J]. 中国水利, 2005(8): 7-9. (CAI Qihua. Maintaining health of Yangtze River, and promoting harmonious relationship between human and water[J]. China Water Resources, 2005(8): 7-9. (in Chinese)) (下转第 153 页)

4 海绵城市的规划指标与标准

为反映海绵城市的发展目标,确定建设规模,必须明确海绵城市的关键指标及其目标值,且指标设置应充分考虑城市水文特征和地理特征。鉴于城市内涝治理、水资源利用和水污染控制均与雨水控制规模有关,中华人民共和国住房和城乡建设部发布的《海绵城市建设指南》提出了“年径流总量控制率”的概念,并将其定义为“根据多年日降雨量统计数据计算,通过自然和人工强化的渗透、储存、蒸发(腾)等方式,场地内累计全年得到控制(不外排)的雨量占全年总降雨量的百分比”,并依据气象统计给出其数值范围及区域划分。这在水文上至少存在3方面的问题:①地表径流量指降雨扣除产流过程中的损失后形成的地表净雨量,因此将“径流控制率”表述为“降雨控制率”更科学一些;②雨水控制效果与场次暴雨总量及时程分布关系更直接,因此针对与一定标准的场次降雨而非年降雨来设置控制目标更合理,与工程设计的关系也更直接;③在城市尺度上,仅从气候角度来确定雨水控制率是不合理的,还需考虑下垫面条件。

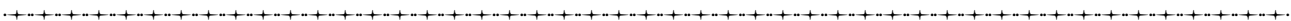
5 海绵城市的效用与成本

对于海绵城市的作用,最极端的看法莫过于海绵城市“无用论”和“万能论”。前者对海绵城市建设持

怀疑观点,认为不能实质性解决城市水问题,或者其成本远大于收益;后者则认为海绵城市建设能一劳永逸地解决内涝等城市水问题。对于前一种观点,应当承认有必要强化海绵城市建设效果的动态监测跟踪,从城市生态经济学、工程经济学等角度系统评估益本比。当然,对于海绵城市建设效果不能仅作经济学方面的分析而忽视其环境、生态效用评估,还需认识到,海绵城市的各项建设内容,从规划、实施再到发挥作用需要一个过程,不能立竿见影。对于后一种论调,需要明确海绵城市建设对于洪涝防治、水污染治理均是有一定标准的,其功能与作用不是无限的,如海绵城市建设虽可减少内涝频次、降低灾害程度,但无法杜绝内涝发生,遇到超标准暴雨,仍然会发生城市内涝。总之,对于海绵城市的效用与成本一定要实事求是地评估,不能简单片面。

关于海绵城市及其构建理论、方法,目前尚有许多问题亟待深入研究,需要相关领域的学者深思熟虑,强化水利、城市、环境等多学科的交叉和融合,唯其如此,才能做好我国海绵城市建设的长远规划和系统布局,从而实质性推动城市水问题综合治理和城市转型发展。另外需要指出的是,海绵城市并不是解决城市水问题的唯一理念和模式,海绵城市建设不能排斥其他理念、模式的研究与发展。

(收稿日期:2016-08-01 编辑:彭桃英)



(上接第145页)

[11] 刘晓燕,张建中,张原锋. 黄河健康生命的指标体系[J]. 地理学报,2006,61(5): 451-460. (LIU Xiaoyan, ZHANG Jianzhong, ZHANG Yuanfeng. Indicators of the healthy Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica,2006, 61(5): 451-460. (in Chinese))

[12] 林木隆,李向阳,杨明海. 珠江流域河流健康评价指标体系初探[J]. 人民珠江,2006(4): 1-3. (LIN Mulong, LI Xiangyang, YANG Minghai. Probe into the index system for evaluating the health of the rivers in the Pearl River Basin[J]. Pearl River,2006(4): 1-3. (in Chinese))

[13] RAINER W. Development of environmental indicator systems: experiences from Germany [J]. Environmental Management,2000,25(6): 613-623.

[14] 赵焕臣,许树柏,和金生. 层次分析法:一种简易的新决策方法[M]. 北京:科学出版社,1986.

[15] 刘艳. 河流健康评价的回归支持向量机模型及应用[J]. 水资源保护,2014,30(3): 25-30. (LIU Yan. Regression support vector machine for river health assessment and its application [J]. Water Resources Protection,2014,30(3): 25-30. (in Chinese))

[16] 陆志强,李吉鹏,章耕耘,等. 基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价[J]. 生态学报,2015,35(14): 4907-4919. (LU Zhiqiang, LI Jiepeng, ZHANG

Gengyun, et al. Ecosystem health assessment based on variable fuzzy evaluation model in Dongshan Bay, Fujian, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(14): 4907-4919. (in Chinese))

[17] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.

[18] 王文圣,金菊良,丁晶,等. 水资源系统评价新方法:集对评价[J]. 中国科学E辑:技术科学,2009,39(9): 1529-1534. (WANG Wensheng, JIN Juliang, DING Jing, et al. A new approach to water resources system assessment: set pair analysis method [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 39(9): 1529-1534. (in Chinese))

[19] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报(自然科学版),1997,33(1): 12-20. (CHENG Qiansheng. Attribute recognition theoretical model with application[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,1997,33(1): 12-20. (in Chinese))

[20] 田一龙. 黄柏河流域水能水资源开发现状与对策[J]. 水电能源科学,2007,25(6): 17-19. (TIAN Yilong. Present situation and countermeasure of hydropower resources development in Huangbai River Basin[J]. Water Resources and Power,2007,25(6): 17-19. (in Chinese))

(收稿日期:2016-01-08 编辑:徐娟)