

河流功能评价指标体系及应用

盖永伟^{1,2}, 黄昌硕²

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

摘要: 根据河流功能的内涵和河流本身的自然特征, 考虑到河流的自然功能、生态环境功能和社会服务功能, 借鉴国内外对于河流功能评价的相关研究, 构建了包含18个指标的河流功能评价指标体系, 提出了河流功能的评价标准。以柏条河为例对建立的评价指标、评价标准和评价方法进行了验证应用, 评价结论符合柏条河流域的实际情况。

关键词: 河流功能; 评价指标; 评价标准

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0042-05

River Function Evaluation Index System and Its Application

GE Yong-wei^{1,2}, HUANG Chang-shuo²

(1. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the connotation of river function and the natural characteristics of river, a river function evaluation index system was developed in consideration of the natural function, ecological environment function, and social service function of the river and the domestic and international research on river function evaluation. This evaluation index system contained 18 indexes, which can provide the evaluation standard of river function. In this paper, the proposed evaluation indexes, criteria, and methods were applied to verify the function of the Baitiao River, and the evaluation results tallied with the actual situations of the Baitiao River.

Key words: river function; evaluation index; evaluation standard

在河流的开发利用、保护、修复及管理工作中, 需要对河流功能进行综合评价。通过分析河流系统在自然条件与人类活动的影响下, 河流形态、水量、水质等的变化特征及其对河流本身以及为人类社会所提供的各种功能的影响, 能够在维护河流功能正常运行和满足经济社会需求之间进行利弊权衡, 保证在满足人类发展需求的同时, 又能兼顾河流功能正常运行, 实现河流系统稳定与经济社会可持续发展的双重目标。

1 河流功能的内涵

当人类活动的干扰在某种程度上可能会超过河流的自我调节和修复能力时, 可能引发河流自身和周边环境的一系列问题, 甚至影响到河流的各项功能, 最终将会威胁着河流的正常运行和人类社会的正常发展^[1]。为了更直观全面地评价河流的功能, 将河流功能分为三大类: 自然功能、生态环境功能、

社会服务功能^[2]。河流的自然功能指河流在地球和自然界的演变和发展中所发挥出的功能和作用, 主要表现在河流的水资源与水文特征、河岸带的状况、河流的形态结构等方面。河流的生态环境功能指河流在物种迁移、能量流动和物质循环的过程中所发挥出的功能和作用^[3], 主要表现在生物多样性、植被状态、水质状况等方面。河流的社会服务功能指河流在人类文明社会的持续发展中所发挥出的功能和作用, 主要表现在供水、排洪、航运、水能、灌溉、景观娱乐等方面。河流各功能之间相互依存、相互影响、相互制约, 河流的自然功能和生态环境功能是社会服务功能的基础, 当自然功能和生态环境功能受损和退化时, 必然会影响到河流的社会服务功能^[4]。

2 河流功能评价指标体系

由于河流功能评价涉及的范围比较广泛, 不同国家和地

收稿日期: 2013-01-04 修回日期: 2013-05-03 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.018.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201201020); 全国流域综合规划修编专题——河流的分类与功能评价研究; 南京水利科学研究院基金项目(LS51204)

作者简介: 盖永伟(1987-), 男, 山东莱阳人, 硕士研究生, 主要从事水资源可持续利用的研究。E-mail: ywgai@nhri.cn

通讯作者: 黄昌硕(1980-), 女, 江苏南京人, 工程师, 主要从事水资源可持续利用的研究。E-mail: cshuang@nhri.cn

区的河流所具有的功能也不尽相同,因此,选用什么指标和方法去进行河流功能评价具有一定的特殊性、局限性和不完善性,国内外对此描述也有较大差别。目前,河流功能评价大多是从生态学角度来进行分析,并选用水生生物、水量、水质、栖息地状况、河岸带等指标对其生态功能进行评价。

2.1 构建原则

构建河流功能评价指标体系是为河流功能评价服务,为此要求评价指标的选取必须真实客观、完整准确地反映河流功能现状,能够为政府决策、科学研究及开发要求等提供河流功能运行状况和变化发展趋势的分析,为河流管理提供理论基础。因此,河流功能评价指标体系的筛选应遵循科学性、系统性、层次性、独立代表性、可操作实用性、定量和定性相结合的原则^[5-9]。

2.2 基本框架

构建河流功能评价指标体系时,根据上述河流功能的分类,将整个指标体系分为三个层次,分别是:目标层、准则层和指标层,见图1。

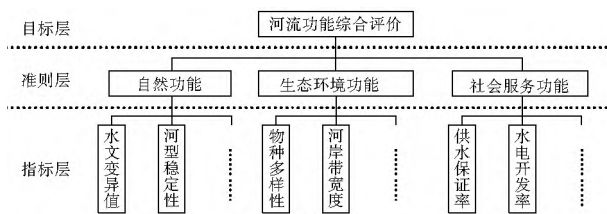


图1 河流功能评价指标体系

Fig. 1 The river function evaluation index system

目标层是对河流功能评价指标体系的高度概括,表达了河流功能状况的总体水平。准则层是根据河流功能的分类分为三个方面:自然功能、生态环境功能、社会服务功能。指标层是对于准则层三个方面内容的具体的评价指标,表述各个分类指标的不同要素,通过定量或者定性指标直接反应河流功能状况。

2.3 指标确定及其内涵

河流功能评价指标的确定应从河流系统整体性和河流功能的内涵出发,针对不同功能发挥的不同作用,来评价河流自然功能、生态环境功能和社会服务功能的现状运行状况。因此,结合国内外相关研究,构建了包含18个具体能够反映河流不同功能的指标,并确保指标体系整体结构清晰,指标意义更加明确,指标间的独立性更容易得到保证。

2.3.1 河流自然功能评价指标

(1) 水文变异性^[10]。指天然条件下的月径流量与实际月径流量见的变异关系,因此,水文变异性(H_v)采用 Anthony R. Ladson 等提出的计算方法,即 $H_v = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{c_{ij} - n_{ij}}{n_j} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, $\bar{n}_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} n_{ij}$, 式中 c_{ij} 为第 j 年第 i 月的实际径流量, n_{ij} 为第 j 年第 i 月的自然径流量, n_j 为第 j 年平均自然月径流量。

(2) 河型稳定性。指河床的稳定程度,主要取决于河床的纵向稳定性和横向稳定性。因此,河型稳定性采用张洪武等^[11]提出的河流综合稳定性指标(Z_w)来表示,即 $Z_w =$

$\frac{1}{J} \left[\frac{y_s - y}{y} g \frac{D_{50}}{H} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{H}{B} \right]^{\frac{2}{3}}$, 式中 J 为河床比降, y_s 为泥沙容重, y 为水体容重, D_{50} 为床沙中径, H 为平均水深, B 为河宽。

(3) 河岸稳定性。指河岸无明显冲刷侵蚀或少量区域存在冲刷侵蚀现象(岸边坡度小于 $1/3$),反映河岸受到河流水体冲刷后维持河岸自身稳定的性能,属于定性指标。

(4) 河道泥沙输移率。指某河道的输出泥沙量与进入该河道的泥沙总量的比值,表征河道输送泥沙的能力。因此,河道泥沙输移率采用地貌学上的河道泥沙输移比(F_s)来表示^[12],即 $F_s = \frac{Q_{s,o}}{Q_{s,i} + \sum Q_{s,i}}$, 式中 $Q_{s,o}$ 为河道干流出口站的全年输沙量, $Q_{s,i}$ 为河道干流进口站的全年输沙量, $\sum Q_{s,i}$ 为河道各支流汇入的全年输沙总量。

2.3.2 河流生态环境功能评价指标

(1) 河道内生态需水保证率。指河道天然最小流量与河道生态需水最小流量的比值,河道生态需水最小流量是指维持河流水沙平衡、水生生物生存、入河污染物自净和河口生态稳定所需要的最小流量。

(2) 河岸植被覆盖率。指河岸带植被(包括草被、林地、灌丛等)面积与河岸带总面积的比值,表征河流水陆交界处的植被覆盖状况。

(3) 河岸带宽度。指河岸带宽度与河流宽度的比值,表征河流水陆交界处缓冲带变化情况。

(4) 物种多样性。指物种水平上的生物多样性,表征一定空间范围内的物种数量和分布特征,考虑到观测资料的匮乏,一般选取香农-威纳多样性指数(H')来表示^[14],即 $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$, 式中 S 为物种丰度, P_i 为第 i 种个体数占样本总个体数 N 的比例,即 $P_i = \frac{n_i}{N}$ 。香农-威纳多样性指数可反映群落的物种丰度,通过对实测的生物状态与参考点的生物状态进行对比,得到河流生态环境功能的变化情况。

(5) 水功能区水质达标率。指达到河流水功能区水质目标的河长长度与河流水功能区总长度的比值,表征河流水生态环境的功能状况

2.3.3 河流社会服务功能评价指标

(1) 水资源开发利用程度。指河道外当地地表水实际供水量与当地天然河川径流量的比值,表征流域或区域河道外多年平均天然河川径流量开发利用程度。

(2) 水电能源开发利用程度。指流域或区域内水电站总装机容量与水电能源技术可发利用率的比值,表征流域或区域水电能源开发利用程度。

(3) 供水保证率。指河流的预期供水量在多年供水中能够得到充分满足的年数出现的概率。

(4) 灌溉保证率。指河流的预期灌溉用水量在多年灌溉中能够得到充分满足的年数出现的概率。

(5) 通航水深保证率。指河流一年中航道实际水深与换算水深达到航道水深天数之和与当年通航天数的比值,表征河道维持正常通航的保证程度。

(6) 纵横比率比降。指河段相应滩地横比降与河段纵比降的比值,表征河流的泄洪能力,根据刘晓燕等研究^[15]认

为,滩地横比降应控制在相应河段纵比降的 4 倍以内才能保障防洪安全。

(7) 河流纳污自净水量。指河流容纳污染物所需要的水量,低于这个指标,河流的环境容量就会下降,其容纳污染物、稀释污染物的能力就会显著降低,因此,采用桑连海等人^[13]提出的河道最小环境需水流量(Q)来表示,即 $Q \geq k\zeta q = kQ_i$,式中 k 为换算系数, ζ 为河流稀释系数, q 为污水排放量, Q_i 为河道最小环境需水量,以满足河流最小环境需水量保证率来表征河流的纳污能力。

(8) 水景观舒适程度。指人们对水体、水上跨越结构、山体树木、水生动植物等在人们眼中形成的富有深度的视觉效果的满意程度^[16,17],属于定性指标。

(9) 美学文化价值指数。指河流水体和沿岸陆地景观成为人类重要的文化精神源泉和科学技术及宗教艺术发展的动力,属于定性指标,根据河流自身的文化价值进行评判。

3 河流功能评价方法

3.1 评价标准

目前,对合理功能的评价尚无统一标准,而河流功能评价标

准将会直接影响评价结果的合理性。综合来看,河流功能评价标准具有相对性的特征,对于不同区域、不同规模、不同类型的河流,在其不同的河段和开发利用程度,都会影响评价标准的统一,因此,评价标准的确定可以根据实际情况进行适当调整。

结合当前河流开发的实际情况,将河流功能评价标准按照“优、良、中、差、劣”5 个功能级别来确定。对难以准确定量表达的定性指标,通过专家咨询和公众打分等方式进行评判,以分值“> 80, 60~ 80, 40~ 60, 20~ 40, < 20”代表 5 个级别的标准。对于定量指标的标准,借鉴有关历史资料、科研成果、国家使用标准及多区域对比分析确定。评价标准主要有以下几种来源^[18]:一是国家、行业和地方规定或者推荐的标准,如《生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)》等;二是自然环境与经济社会发展的目标,如《重点流域水污染防治规划(2011- 2015)》、《实行最严格水资源管理制度考核办法》等;三是不同河流功能运行状况的类比标准;四是相关一些科研报告和文献资料中推荐的标准值,如水利部印发的《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)》文件、高甲荣等人出版的《河溪近自然评价——方法与应用》^[9]等。

河流功能评价指标体系及评价标准见表 1。

表 1 河流功能评价指标体系及评价标准

Table 1 The river function evaluation index system and its evaluation standard

功能	指标	优	良	中	差	劣	
自然功能	水文功能	水文变异值 ^[10]	< 0.2	0.2~ 0.5	0.5~ 1.0	1.0~ 3.0	> 3.0
	地质功能	河型稳定性 ^[11]	> 15	12~ 15	8~ 12	5~ 8	< 5
		河岸稳定性*	> 4	3~ 4	2~ 3	1~ 2	< 1
			稳定	轻微冲蚀	重度冲蚀	强烈冲蚀	极端不稳定
输沙功能	河道泥沙输移率	0.8~ 1.0	0.6~ 0.8	0.4~ 0.6; 1.0~ 1.2	0.2~ 0.4; 1.2~ 1.4	< 0.2; > 1.4	
生态环境功能	生态环境功能	生物多样性	> 4	3~ 4	2~ 3	1~ 2	< 1
		河道内生态需水保证率(%)	> 80	60~ 80	50~ 60	30~ 50	< 30
		河岸植被覆盖率(%)	> 50	40~ 50	30~ 40	20~ 30	< 20
		河岸带宽度(河宽 ≤ 15 m)	> 40	30~ 40	10~ 30	5~ 10	< 5
		河岸带宽度(河宽 > 15 m) (H 为基流量下水面平均宽度)	> 3H	1.5H ~ 3H	0.5H ~ 1.5H	0.25H ~ 0.5H	< 0.25H
社会服务功能	发电功能	水功能区水质达标率(%)	> 95	80~ 95	60~ 80	50~ 60	< 50
		水电能源开发利用率(%)	> 80	70~ 80	60~ 70	50~ 60	< 50
	供水功能	水资源开发利用率(%)	< 10	10~ 20	20~ 30	30~ 40	> 40
		供水保证率(%)	> 95	85~ 95	75~ 85	65~ 75	< 65
		灌溉保证率(%)	> 95	85~ 95	75~ 85	65~ 75	< 65
	航运功能	通航水深保证率(%)	> 95	85~ 95	75~ 85	65~ 75	< 65
	泄洪功能	纵横比降比率	> 4.0	3.5~ 4.0	3.0~ 3.5	2.0~ 3.0	< 2.0
	纳污功能	河流自净水量保证率(%) ^[13]	> 95	85~ 95	75~ 85	65~ 75	< 65
	景观娱乐功能	水景观舒适度(%)*	> 90	80~ 90	60~ 80	50~ 60	< 50
美学文化价值指数*		> 4	3~ 4	2~ 3	1~ 2	< 1	

注: * 为定性指标。

3.2 评价方法

并不是所有河流都具备表 1 中的所有功能,因此,在评价之前需要对评价河流所具有的功能进行识别与划分,并根据表 1 选取各个功能相应的评价指标,计算所选指标的现状值,确定相应的权重和标准,然后对所选河流进行评价,得到评价结果进行分析。本次将自然功能和生态环境功能的 9 个指标作为必选指标,社会服务功能的 9 个指标作为备选指

标。也就是说评价河流有什么样的社会服务功能就选择相应的指标评价,无需将 9 个备选指标全部评价。

为了将评价过程中的各种复杂因素用递阶层次结构表示出来,为此选用能够较好解决复杂系统中多层次、多结构、单目标的层次分析法进行河流功能评价。为得出河流功能评价价值,考虑到计算方法的可操作性,提出河流功能综合评价指数(E)的计算公式为: $E = \sum_{i=1}^m \lambda_i \sum_{j=1}^n \lambda_j M_{ij}$,式中 λ_i 为第 i 个

准则层的权重, λ_j 为某准则层选取的第 j 个指标在该准则层所占的权重, M_{ij} 为第 i 个准则层中选取的第 j 个指标评分值, m 为准则层的数目, n 为指标的数目。

由于不同河流本身的自然特征、环境影响、功能利用等各方面存在差别,同时人类对河流的认识和河流所处社会经济环境的不同,对河流功能评价的具体要求和侧重点也不同,因此要确定出一套标准的权重系数是不可行的。合理的方法是对应不同河流的功能评价指标体系,确定一套符合评价河流特性、反应评价河流特色、体现评价河流不同功能重要性的权重系数。根据层次分析法的要求^[9],针对不同河流选取的不同指标,通过专家评分法和专家多轮咨询法进行确定,按照层次结构关系进行判断比较,构造判断矩阵,通过计算和一致性检验,得出评价指标的权重。

4 评价指标体系应用

柏条河是岷江内江水系的四大骨干河渠之一,是成都市供水大动脉,与走马河分支徐堰河一起肩负成都供水的重

任。柏条河起于都江堰市蒲柏闸,止于郫县石堤堰,长 44.76 km,全流经成都市境内的温江-郫县-都江堰国家级生态示范区,柏条河至石堤堰后分成二河:一为府河,一为毗河。目前柏条河上未建电站,保持着自然河道的特色,两岸林木葱茏,生态环境良好。

根据柏条河的开发利用现状,选取 15 项指标对其进行评价。按照层次分析法相关计算要求,通过专家咨询和打分结合经验判断,分别构造判断矩阵,计算出柏条河各指标的权重。各具体指标权重是在准则层分权基础上采用平均分配法确定的。根据 2009 年相关统计数据,确定柏条河相关指标现状值,并进行归一化处理。各指标现状值和权重见表 2。

河流功能评价综合指数的评分值越高,则河流功能运行情况越好,否则相反。柏条河的河流功能评价综合指数是 83.17,对照河流功能划分标准,得出基本结论:柏条河河流功能运行状况处于优状态的下边缘,表明柏条河自然形态良好,河道流量基本稳定,水生生物丰富,河岸植被结构优良,各项社会服务功能能够稳定持续的满足人类需求。

表 2 柏条河功能评价指标体系及指标权重

Table 2 The evaluation index system of the Baitiao River and the weights of indexes

功能	指标	现状值	归一化处理	权重	评价指数	
自然功能	水文功能	水文变异值	0.35	80	0.078 53	6.282 4
	地质功能	河型稳定性	18	90	0.078 53	7.067 7
		河岸稳定性*	稳定	90	0.078 53	7.067 7
	输沙功能	河道泥沙输移率	0.72	72	0.078 53	5.654 16
生态环境功能	生态环境功能	物种多样性	3.1	62	0.061 42	3.808 04
		河道内生态需水保证率(%)	88	88	0.061 42	5.404 96
		河岸植被覆盖率(%)	65	65	0.061 42	3.992 3
		河岸带宽度(河宽>15 m) (H 为基流量下水面平均宽度)	35 H = 16.3	80	0.061 42	4.913 6
		水功能区水质达标率(%)	93	93	0.061 42	5.712 06
		水资源开发利用(%)	7	93	0.0631 3	5.871 09
社会服务功能	供水功能	供水保证率(%)	97	97	0.063 13	6.123 61
		灌溉保证率(%)	90	90	0.063 13	5.681 7
	泄洪功能	纵横比降比率	3.7	74	0.063 13	4.671 62
	纳污功能	河流自净水量保证率(%)	93	93	0.063 13	5.871 09
	景观娱乐功能	水景观舒适度(%)*	80	80	0.063 13	5.050 4
合计		\	\	1.000 00	83.172 43	

注: * 为定性指标。

5 结语

河流健康评价是目前河流生态系统研究的热点,评价指标的建立与评价标准的确定是尚未解决的理论难题。本文将河流功能划分为自然功能、生态环境功能和社会服务功能三大类,并对每一类功能构建了相应的表征指标,最终构建了包含 18 个指标的河流功能评价综合指标体系,在分析同类相关研究成果的基础上,探索性地提出了河流功能的评价标准。文章以岷江流域柏条河为例开展实证研究,其结论符合柏条河流域的实际情况,表明本文提出的河流功能评价指标具有一定的有效性和使用价值。

参考文献(References):

[1] 侯全亮,李肖强.论河流健康生命[M].郑州:黄河水利出版社,

2007. (HOU Quarr liang, LI Xiaor qiang. Discussion on Healthy Life of the River[M]. Zhengzhou: Yellow River Conser vancy Press, 2007. (in Chinese))

[2] 盖永伟,耿雷华,黄昌硕,等.河流功能评价的研究进展[J].人民黄河,2012,34(8):71-73. (GAI Yong-wei, GENG Lei-hua, HUANG Chang-shuo, et al. Progress of River Function Evaluation[J]. Yellow River, 2012, 34(8): 71-73. (in Chinese))

[3] 王华.河流生态系统恢复评价方法及指标体系研究——以黄浦江、苏州河为例[D].上海:华东师范大学,2003. (WANG Hua. Study on the Method and Index System of River Ecosystem Restoration Assessment—Huangpu River and Suzhou River[D]. Shanghai: East China Normal University, 2003. (in Chinese))

[4] 袁弘任,沈福新,魏开澍.河流功能区划初步探讨[J].水资源保护,2011,27(5):13-16. (YU AN Hong ren, SHEN Fu xin, WEI

- Kaif mei. Preliminary Study on River Function Regionalization[J]. Water Resource Protection, 2011, 27(5): 13-16. (in Chinese)
- [5] 王孟, 叶闽, 肖采, 等. 健康长江的评价指标体系初探[A]. 中国环境水力学 2006[C]. 北京, 2006. (WANG Meng, YE Min, XIAO Cai, et al. Preliminary Study on Indexes of Healthy Yangtze River Assessment [A]. China Environmental Hydraulics 2006 [C]. Beijing, 2006. (in Chinese))
- [6] 高永胜, 王浩, 王芳. 河流健康生命评价指标体系的构建[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 252-257. (GAO Yongsheng, WANG Hao, WANG Fang. Construction of Evaluation Index System for Rivers Healthy Life[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 252-257. (in Chinese))
- [7] 张明, 周润娟, 和蕊. 基于随机训练样本的河流系统健康状况评价[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 75-78. (ZHANG Ming, ZHOU Runjuan, HE Rui. Evaluation of the Health Status of River Systems Based on Random Training Samples[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 75-78. (in Chinese))
- [8] 李俊玲. 河流健康评价指标体系及权重模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (LI Junling. Study on Index System and Weight Model for Evaluating the Health of the River[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [9] 高甲荣, 冯泽深, 高阳, 等. 河溪近自然评价——方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (GAO Jiarong, FENG Zeshen, Gao Yang, et al. Stream Near Natural Assessment — Method and Application [M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese))
- [10] LANDSON A R, GRAYSON R B, JAWECKI B. Effect of Sampling Density on the Measurement of Stream Condition Indicators in Two Lowland Australian Streams[J]. River Research and Applications, 2006, 22(8): 853-869.
- [11] 胡一三, 张红武, 刘贵芝, 等. 黄河下游游荡性河段河道整治[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. (HU Yisan, ZHANG Hongwu, LIU Guizhi, et al. The Wandering River Channel Regulation of the Lower Yellow River [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998. (in Chinese))
- [12] 许炯心. 中国江河地貌系统对人类活动的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (XU Jiongxin. China River Geomorphic Response to Human Activity[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [13] 桑连海, 黄薇, 刘强. 长江下游干流河道内最小环境需水量计算[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(1): 57-59. (SANG Lianhai, HUANG Wei, LIU Qiang. Calculation on Lowest Environmental Water Demands in River Course of Stem Stream of Yangtze River Lower Reach[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(1): 57-59. (in Chinese))
- [14] 夏军, 史晓新. 水环境质量评价标准探讨[J]. 重庆环境科学, 1997, 19(5): 14-17. (XIA Jun, SHI Xiaoxin. A Study on Assessment Criterion for Water Environmental Quality [J]. Chongqing Environmental Science, 1997, 19(5): 14-17. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 闫峰, 刘凌, 徐丽娜, 等. 隶属度向量分析法在河流健康评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 30-32. (YAN Feng, LIU Ling, XU Lina, et al. Application of Membership Vector Analysis in River Health Assessment [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(10): 30-32. (in Chinese))
- [17] 郝弟, 张淑荣, 丁爱中, 等. 河流生态系统服务功能研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 106-111. (HAO Di, ZHANG Shurong, DING Aizhong, et al. Research Progress on Service Functions of River Ecosystem [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 106-111. (in Chinese))
- [18] 耿雷华, 卞锦宇, 徐澎波, 等. 水资源合理配置评价指标体系研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. (GENG Leihua, BIAN Jinyu, XU Pengbo, et al. (Study on the Index System of Rational Water Resources Allocation [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. (in Chinese))
- [19] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2007, 29(1): 153-156. (CHANG Jian'e, JIANG Taili. Research on the Weight of Coefficient through Analytic Hierarchy Process [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2007, 29(1): 153-156. (in Chinese))

(上接第 41 页)

- [12] 焦雯珺, 闵庆文, 成升魁, 等. 基于生态足迹的传统农业地区生态承载力分析——以浙江省青田县为例[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 63-68. (JIAO Wenju, MIN Qingwen, CHENG Shengkui, et al. Ecological Capacity of a Traditional Agricultural Area based on Ecological Footprint: A Case Study of Qingtian County, Zhejiang Province [J]. Resources Science, 2009, 31(1): 63-68. (in Chinese))
- [13] 张芳, 徐伟锋, 李光明, 等. 上海市 2003 年生态足迹与生态承载力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 80-84. (ZHANG Fang, XU Weifeng, LI Guangming, et al. Analysis of Ecological Footprint and Ecological Carrying Capacity of Shanghai in 2003 [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(1): 80-84. (in Chinese))