

贵州省赤水河干流健康评估指标体系研究及评价

吴 琼,罗 欢,杨 芳,郑江丽

(珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510610)

摘要:为保护和维护赤水河的生态环境,从河流水文情势、河道完整、生物多样性、水质、社会服务功能等几方面建立评价指标体系,根据指标权重、指标细分、评估方法对赤水河干流评估河流进行综合健康评估。结果表明:赤水河健康评估总得分 87.89 分,为健康状态,以毕节为代表的赤水河评估河段 1 健康水平最高,以仁怀、习水为代表的评估河段 2 健康水平最低。赤水河亚健康的指标主要为部分河段的水文变异程度、河流形态、河岸带状态指标以及流域的水土流失指标、公众满意度指标。

关键词:赤水河;河流健康;健康评估;指标体系

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)S1-0158-05

1 评估区概况

赤水河地跨云南、贵州、四川三省,是长江上游唯一一条干流没有修建水坝、水库的一级支流,是重要的生物多样性优先保护区域,拥有 1 处世界自然遗产、4 处国家级自然保护区和 1 处国家级风景名胜区,是长江上游特有、珍稀鱼类保护的重要生境。近年来随着赤水河流域工业和城市化进程的加快,赤水河流域植被破坏、水土流失日益加剧,土地石漠化面积不断扩大,生态功能严重退化。赤水河是长江上游唯一的生态河、美景河、美酒河,迫切需要开展河流健康评估,加强赤水河管理,从而保护和维护赤水河的生态环境。

赤水河流域呈扇形展布,位于东经 104°45′~106°59′,北纬 25°13′~28°50′。地跨云南省镇雄、威信,贵州省毕节、金沙、大方、遵义、桐梓、仁怀、习水、赤水,四川省叙永、古蔺、合江等共 13 个县(市),流域面积 20 440 km²,其中云南省境内 1 903 km²,贵州省境内 11 412 km²,四川省境内 7 125 km²。

2 河流健康内涵

目前,国内外对河流健康的定义有很多种。如:国外学者 Meyer^[1]认为健康的河流除了要维持生态系统的结构与功能外,还要包括生态系统的社会价值,在健康的概念中涵盖了生态完整性与对人类的服务价值。国内学者董哲仁^[2]在河流健康方面做

了大量研究,提出了“可持续利用的生态健康河流”。河流应是生态环境等自然属性和服务功能等社会属性的辩证统一。建立一套评估体系,评估在自然力与人类活动双重作用下,河流在长期演化过程中健康状态的变化,进而通过管理工作,促进河流生态系统向良性方向发展^[3]。

基于此,可以认为健康赤水河应是在流域内一定的经济社会发展条件下,不仅具有充足、优质的水量供给,可持续地满足人类不断适度增长的水资源需求,不致对人类健康和经济社会发展构成威胁或损害;而且在受到污染物和泥沙输入以及其他外界干扰破坏时,河流生态系统具有足够的自我恢复与相对稳定的能力,可始终维持良好的生态与环境状态。由此,水文情势稳定、河道完整、生物多样、水质优良、社会功能服务良好是衡量赤水河健康与否的基本特征。

3 健康指标体系

3.1 健康指标

根据赤水河现状以及赤水河健康的内涵,将评价指标体系分为目标层、准则层和指标层 3 个层次;其中,目标层反映了赤水河河流的总体健康;准则层反映了健康河流的 5 个约束因子,即水文水资源、物理结构、水质、生物以及社会服务功能;指标层包括 15 个指标,每个指标遵循代表性、科学性、可行性、独立性及因地制宜等原则。赤水河(干流)河流健康评估指标体系见表 1。

作者简介:吴琼(1982—),女,高级工程师,主要从事水环境数值模拟研究。E-mail:371368244@qq.com

表 1 赤水河流域健康评估性指标体系

目标层	准则层	河流指标层	代码	评价指标	评估数据取样调查监测位置
河流健康	水文水资源 (HD)	流量过程变异程度	FD	评估年逐月实测径流量与天然月径流量的平均偏离程度	位于评估河段内的水文站
		生态流量保障程度	EF	日径流量占多年平均流量百分比	
		输沙量变化率	FS	同频率来水条件下赤水河 10 年前与 10 年后悬移质输沙量变化率	
	物理结构 (PF)	河岸带状况	RS	河岸带宽度、河岸带植被结构完整性、河岸带植被覆盖度、河岸带植被纵向连续性、河岸带人工干扰程度	评估河流
		河流形态指标	RC	河道连通性、河道蜿蜒度、河道渠化程度、河岸稳定性、河床稳定性、河流护岸形式	评估河流
	水质 (WQ)	DO 水质状况	DO	DO 全年 12 个月月均浓度	评估河段监测点位所在监测断面
		耗氧有机污染状况	OCF	COD _{Mn} 、COD、BOD ₅ 、NH ₃ -N 等 4 项评估年 12 个月的月均浓度	
	生物 (AL)	鱼类生物损失指数	FOE		评估河段监测断面取样区
	社会服务功能 (SS)	水功能区达标指标	WFZ	水功能区水质达标率	评估河流
		水资源开发利用指标	WRU	评估流域供水量占流域水资源量的百分比	
		水土流失指标	SWLI	流域水土流失面积占总面积的百分比	
		公众满意度指标	PP	公众参与调查统计	
		特色服务功能指标	RFC	区域森林覆盖率与流域平均值的比例	
		白酒年产量指标	RWP	白酒年产量与目标值的比例	
		旅游人次指标	RTP	旅游接待人次增长比例	

3.2 指标体系权重

河流健康综合评价指标的权重值用层次分析法确定。层次分析法本质上是一种决策思维方法,体现了“分解—判断—综合”的基本决策思维过程^[4]。它把复杂的问题分解为各个组成因素,按照支配关系分组形成有序的递阶层次结构,通过两两比较的方式确定层次中各因素的相对重要性,并利用判断矩阵特征向量的计算确定下层指标对上层指标的贡献程度。在综合分析河流的一般内涵并结合赤水河特点的情况下,用层次分析法确定贵州省赤水河干流健康评估指标体系的权重。具体步骤如下:

3.2.1 建立层次分析图

赤水河干流(贵州境内)河流健康评估层次分析如图 1 所示。

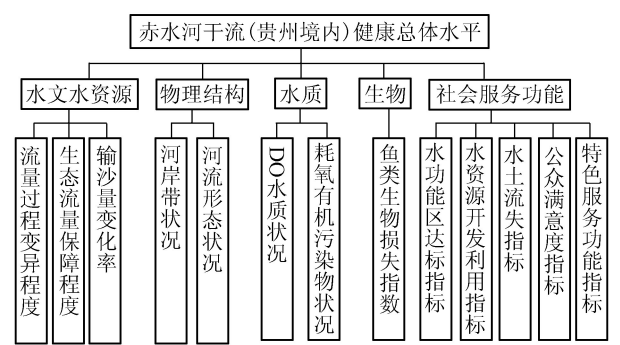


图 1 贵州省(境内)赤水河干流(境内)健康评估层次分析

3.2.2 计算权重方法

根据指标(准则)重要性二元对比原理:若指标(准则) C_k 与 C_l 进行重要性的二元对比,规定表示重要性的定性排序标度 e_{kl}^i 在 0,0.5,1 中取值。

若 C_k 比 C_l 重要,取 $e_{kl}^i=1, e_{lk}^i=0$;

若 C_l 比 C_k 重要,取 $e_{kl}^i=0, e_{lk}^i=1$;

若 C_k 与 C_l 同样重要,取 $e_{kl}^i=e_{lk}^i=0.5$

定理:设基本单元系统就该系统因素 C_i 而言,决策集的重要性的二元对比矩阵为

$$E^i = \begin{bmatrix} e_{11}^i & \cdots & e_{1n}^i \\ \vdots & & \vdots \\ e_{n1}^i & \cdots & e_{nn}^i \end{bmatrix}$$

其中

$$e_{kl}^i + e_{lk}^i = 1$$

若满足条件:

①当 $e_{hk}^i > e_{hl}^i (h=1,2,\cdots,n)$ 时,有 $e_{kl}^i=0$;

②当 $e_{hk}^i < e_{hl}^i (h=1,2,\cdots,n)$ 时,有 $e_{kl}^i=1$;

③当 $e_{hk}^i = e_{hl}^i = 0.5 (h=1,2,\cdots,n)$ 时,有 $e_{kl}^i = 0.5$;

则矩阵 E^i 必满足优越性定性排序的传递性,称 E^i 为优越性排序一致性标度矩阵。

可以在同样和无可比拟之间,按我国的语言习惯,插入 9 个语气算子:稍稍,略为,较为,明显,显著,十分,非常,极其,极端,与两个边界的语气算子同样、无可比拟,共构成 10 个语气算子级差(表 2)。

表 2 语气算子级差赋分

同样	稍稍	略为	较为	明显	显著	十分	非常	极其	极端
1	0.818	0.667	0.538	0.429	0.333	0.25	0.176	0.111	0.053

3.2.3 指标层相对准则层的权重计算过程

a. 先就准则层水文水资源,给出其包含的 3 个指标对于重要性的 3 * 2/2 次二元比较定性排序矩阵为

$$E^1 = \begin{matrix} & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{11} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 1 \\ & 0.5 & 0(1) \\ & & 0.5 \end{bmatrix} \\ C_{12} & \\ C_{13} & \end{matrix}$$

据定理对矩阵 E^1 进行检验,第一行不必检验,检验从第 2 行元素开始。 $C_{12}=0<C_{13}=1, C_{23}=1$,而 $C_{23}=0$,检验未通过,故将表中 C_{23} 改为 1;同理可验证其他层次的其他元素,直到满足一致性检验,并按条件 $e_{kl}^i+e_{lk}^i=1$ 补充完整得到如下矩阵:

$$\begin{matrix} & C_{11} & C_{12} & C_{13} & \text{行和} & \text{排序} \\ C_{11} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 1 \\ 1 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix} & 1.5 & (2) \\ E_1^i = C_{12} & & 2.5 & (1) \\ C_{13} & & 0.5 & (3) \end{matrix}$$

结合语气算子与定量标度相对隶属度关系,给出就准则层水文水资源而言的相对隶属度向量:

$$r = (r_{c_{11}}^1, r_{c_{12}}^1, r_{c_{13}}^1) = (0.667, 1, 0.429)$$

归一化后: $r^1 = (0.318, 0.477, 0.205)$

b. 就准则层物理结构,其矩阵为

$$\begin{matrix} & C_{12} & C_{22} & \text{行和} & \text{排序} \\ C_{21} & \begin{bmatrix} 0.5 & 1 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} & 1.5 & (1) \\ E_1^2 = C_{22} & & 0.5 & (2) \end{matrix}$$
$$r^2 = (r_{c_{21}}^2, r_{c_{22}}^2) = (1, 0.667)$$

归一化后: $r_1^2 = (0.6, 0.4)$

c. 就准则层水质,最终评分值选两个指标的较小值,因此 归结为一个指标,权重为 1。

d. 就准则层生物,仅一项指标,其权重为 1。

e. 就准则层社会服务功能,其矩阵为

$$\begin{matrix} & C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & \text{行和} & \text{排序} \\ C_{11} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & 2.5 & (1) \\ E_1^5 = C_{12} & & 2.5 & (1) \\ C_{13} & & 2.5 & (1) \\ C_{14} & & 2.5 & (1) \\ C_{15} & & 2.5 & (1) \end{matrix}$$

结合语气算子与定量标度相对隶属度关系,给出就准则社会服务功能而言的相对隶属度向量:

$$r^5 = (r_{c_{11}}^5, r_{c_{12}}^5, r_{c_{13}}^5, r_{c_{14}}^5, r_{c_{15}}^5) = (1, 1, 1, 1, 1)$$

归一化后: $r_1^5 = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$

3.2.4 各准则层权重

就目标层,各准则层的权重参考《全国河湖健康评估技术文件——河流健康评估指标、标准与方

法》确定。

$$r = (r_{B_1}, r_{B_2}, r_{B_3}, r_{B_4}, r_{B_5}) = (0.14, 0.14, 0.21, 0.21, 0.30)$$

3.2.5 权重综合整理

综合整理各准则层的权重以及各指标的权重,见表 3。

表 3 河流健康评估公式变量说明

目标层	准则层	准则层权重	评价指标	指标权重	备注
河流健康	水文水资源(HD)	0.14	流量过程变异程度	0.32	取小值
			生态流量保障程度	0.48	
			输沙量变化率	0.20	
	物理结构(PF)	0.14	河流形态指标	0.4	
			河岸带状况	0.6	
	水质(WQ)	0.21	DO 水质状况	(1,0)	
			耗氧有机污染状况	(1,0)	
	生物(AL)	0.21	鱼类生物损失指数	1	
	社会服务功能(SS)	0.30	水功能区达标指标	0.2	
			水资源开发利用指标	0.2	
			水土流失指标	0.2	
			公众满意度指标	0.2	
			水源涵养指标	0.07	特色服务
			白酒年产量指标	0.07	功能指标
			旅游人次指标	0.07	合计 0.2

3.3 指标细分

a. 水文水资源指标。本次研究选择流量过程变异程度(FD)、生态流量满足程度(EF)、输沙量指标来定量评价赤水河的水文水资源特点。

b. 物理结构指标。物理结构指标分为河流形态指标和河岸带状况指标两个方面。河流形态指标由河道连通性、河道蜿蜒度、河道渠化程度、河岸稳定性、河床稳定性、河道护岸形式等 6 项指标组成。河岸带状况指标由河岸带宽度、河岸带植被结构完整性、河岸带植被覆盖度、河岸带植被纵向连续性、河岸带人工干扰程度等 5 项指标组成。

c. 水质指标。根据赤水河有机污染严重的特征,此项评价主要选取 DO、耗氧有机污染(COD_{Mn}、COD、BOD₅、NH₃-N)等指标。

d. 生物指标。生物指标选择鱼类生物损失指数,鱼类生物损失指数指水功能区内鱼类种数现状与历史参考系鱼类种数的差异状况,调查鱼类种类不包括外来物种。

e. 社会服务功能。从协调社会经济发展与生态环境保护之间的关系角度考虑,选取水功能区达标率、水资源开发利用率、水土流失指标、公众满意度指标,以及分河段的服务功能指标(水源涵养能力、白酒年产量、旅游人次)进行表征。

3.4 综合评估方法

a. 河段生态完整性状况赋分评估。对水文水

资源、物理结构、水质和生物准则层在河段尺度进行综合评估,得到评估河段生态完整性综合状况评估赋分 I_{RE} 。赋分计算公式如下:

$$I_{RE} = r_{HD}w_{HD} + r_{PH}w_{PH} + r_{WQ}w_{WQ} + r_{AF}w_{AF} \quad (1)$$

式中: r_{HD} 、 r_{PH} 、 r_{WQ} 、 r_{AF} 分别为水文水资源准则层赋分、物理结构准则层赋分、水质准则层赋分、生物准则层赋分; w_{HD} 、 w_{PH} 、 w_{WQ} 、 w_{AF} 分别为相应准则层的权重,建议各权重分别为 0.2,0.2,0.3,0.3。

b. 河流生态完整性综合。断面尺度及河段尺度的准则层及指标采用式(4) 计算公式计算河流赋分:

$$I_{Re} = \sum_{n=1}^N \frac{I_{RE}^n L_n}{L} \quad (2)$$

式中: I_{RE}^n 为评估河段指标和准则层赋分, $n = 1, 2, \cdots, N$; L_n 为评估河段河流长度, km; L 为评估河流总长度, km。

c. 河流健康评估。结合河流生态完整性评估指标赋分和社会服务功能评估赋分。

$$I_{RH} = I_{RE}w_{Re} + I_{SS}w_{SS} \quad (3)$$

式中: I_{RH} 、 I_{RE} 、 I_{SS} 分别为河流健康目标层、社会服务准则层和生态完整性状况赋分; w_{RE} 、 w_{SS} 分别为河流健康目标层和社会服务准则层权重,建议取 $w_{RE} = 0.7$, $w_{SS} = 0.3$ 。

d. 健康等级。赤水河河段或河流健康综合评估等级采用百分制,80 ~ 100 分为健康状态;60 ~ 80 分为亚健康状态;40 ~ 60 分为一般状态;20 ~ 40 分为不健康状态;20 分以下为病态状态。

4 评估结果

4.1 评估范围及河段划分

本次赤水河干流(贵州省境内) 健康评估共划分 3 个评估河段,划分情况见表 4。

表 4 赤水河干流评估河段划分

起始→终止范围	长度/km	监测断面	行政区划	涉及一级水功能区划
鸡鸣三省革命纪念地→毕节仁怀交界断面	98.67	赤水水文站、清池断面	毕节七星关、大方、金沙	赤水河滇黔川缓冲区
毕节仁怀交界断面→赤水习水交界断面	148.33	茅台水文站	遵义仁怀、习水	赤水河滇黔川缓冲区长江上游珍稀、特有鱼类自然保护区(赤水河贵州段)
赤水习水交界断面→鲢鱼溪	72.00	赤水河水文站、鲢鱼溪断面	遵义赤水	长江上游珍稀、特有鱼类自然保护区(赤水河贵州段)赤水河黔川缓冲区

4.2 河段生态完整性评估

对赤水河干流 3 个评估河段的生态完整性进行评估,主要从水文水资源、物理结构、水质状况、生物状况 4 个准则层出发,评估结果见表 5 和图 2。

表 5 赤水河河段生态完整性评估

准则层	指标层	指标权重	评估河段 1 (赤水河)	评估河段 2 (茅台)	评估河段 3 (赤水)
水文水资源 (0.2)	流量过程 变异程度	0.32	92.28	66.51	74.14
	生态流量 保障程度	0.48	85.39	88.13	89.25
	输沙量 变化率	0.20	100	—	—
	综合		90.52	79.48	81.40
物理结构 (0.2)	河岸带状况	0.6	87.28	60.74	63.55
	河流形态	0.4	95.45	77.25	78.62
	综合		90.55	67.34	69.58
水质 (0.3)	代表站		赤水河	茅台	鲢鱼溪
	DO 水质状况		99.55	94.88	93.89
	耗氧有机 污染状况		100	97.40	94.64
	综合(取小值)		99.55	94.88	93.89
生物 (0.3)	鱼类生物 损失指数		100	100	100
	综合		100	100	100
	河段完整性 综合评估		96.08	87.83	88.36

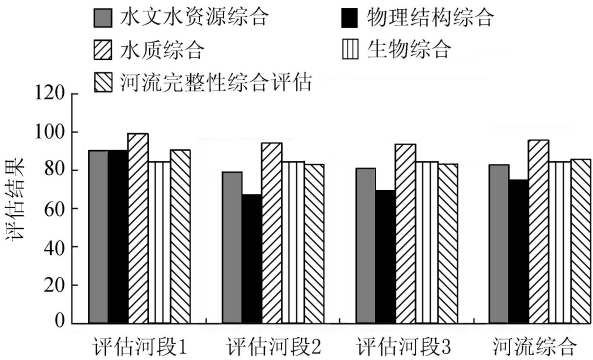


图 2 河流完整性评估结果

由评价结果可知,除河段 2 外其他评估河段生态完整性状况得分均在 80 分以上,总体健康,评估河段 1 即贵州省内赤水水文站以上的河段评分值最高,达到 96.08 分,跨越仁怀、茅台、习水的评估河段 2 得分最低,为 87.83 分;位于赤水的评估河段 3 得分 88.36 分。

4.3 河流生态完整性评估

通过对各个评估河段生态完整性评估,计算河流综合生态完整性情况,可知赤水河河流完整性综合评估得分 90.50,处于健康水平(表 6)。

表 6 赤水河河流生态完整性评估

准则层	指标 权重	评估河段 1 (98.67 km)	评估河段 2 (148.33 km)	评估河段 3 (72.00 km)	河流综合 (319.00 km)
水文水资源综合	0.2	90.52	79.48	81.40	83.33
物理结构综合	0.2	90.548	67.344	69.578	75.03
水质综合	0.3	99.55	94.88	93.89	96.10
生物综合	0.3	100	100	100	100
河流完整性 综合评估		96.08	87.83	88.36	90.50

4.4 河流健康评估

考虑到河流的社会服务功能,综合评价赤水河的健康状况可知,社会服务功能得分 81.81 分,综合之后赤水河河流健康得分 87.89 分,为健康状态(表 7)。

表 7 赤水河河流健康评估

分 类		权重	赤水河健康评分
社会 服务 功能 (0.3)	河流完整性综合评估	0.7	90.50
	水功能区达标指标	0.2	100
	水资源开发利用指标	0.2	86.63
	水土流失指标	0.2	58.41
	公众满意度指标	0.2	77.8
	特色服务功能指标	0.2	86.22
	社会服务功能综合		81.81
河流健康综合评估			87.89

5 结 论

a. 赤水河中上游主要是农田开垦严重,导致水

(上接第 140 页)

消费数量,减少水资源和水产品的消耗,建立水资源节约型社会生产和消费体系;加快推进雨水、再生水等非常规水源利用,推广城镇中水回用技术,加强输配水工程的改造,提高水资源利用率;加强水污染控制,特别是非点源污染的治理,提高污水处理能力建设。

c. 从水生态足迹和环境压力控制模型的角度研究水生态系统的有关问题,可以定量地反映和衡量水生态、科学技术和经济发展的关系,使水生态系统可持续发展的分析评价指标体系和方法具有坚实的理论基础,进一步丰富和完善其理论体系。

参考文献:

[1] 王丹阳,李景保,叶亚亚,等. 基于不同受纳水体的湖南省农业灰水足迹分析[J]. 水资源保护,2016,32(4):49-54.

[2] 刘瑜洁,刘俊国,赵旭,等. 京津冀水资源脆弱性评价[J]. 水土保持通报,2016(3):211-218.

[3] 吴全志,苏喜军,龙林玲. 基于生态足迹模型的贵州省水资源可持续利用分析[J]. 华北水利水电大学学报

土流失严重,如赤水河流域金沙县中下游社会经济发展,城镇化进程加快,对水土的需求及利用日益增加,一方面影响赤水河水源涵养程度,另一方面破坏赤水河的水土保持能力。

b. 赤水河流域捕鱼现象严重,生物多样性受到威胁,公众满意度也因此变差。

c. 赤水河中下游段的河岸带建设对河道干扰加大,不管是在建设过程中植被被破坏,还是建好后的河道渠化,都是在逐渐破坏河道的自然形态,应控制其累积效应,以免出现量变向质变转换,从而影响河流健康。

参考文献:

[1] MEYER J L. Stream health:incorporating the human dimension to advance stream ecology[J]. Jonrnal of the North American Benthological Society,1997,16:439-47.

[2] 董哲仁. 国外河流健康评估技术[J]. 水利水电技术,2005,36(11):15-19.

[3] 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.

[4] 李传哲,于福亮,秦大庸,等. 基于层次分析法的河流健康模糊综合评价[J]. 水利水电科技进展,2005,25(1):24-26.

(收稿日期:2016-10-29 编辑:徐 娟)

(自然科学版),2016(3):36-40.

[4] 李俊,董锁成,杨义武. 基于 STIRPAT 和 Path 的宁夏碳排放影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2016(7):42-46.

[5] 韩莉. 基于改进 IPAT 脱钩模型的建设用地扩张与经济的关系研究[D]. 长春:吉林大学,2016.

[6] 蔡文胜. 基于 IPAT 模型的青岛市资源节约型社会建设研究[D]. 青岛:青岛大学,2009.

[7] 孙芳玲. 山东省水资源生态足迹研究[D]. 济南:山东师范大学,2011.

[8] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报,2008(3):1279-1286.

[9] 谭秀娟,郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. 生态学报,2009(7):3559-3568.

[10] 赵先贵,马彩虹,高利峰,等. 基于生态压力指数的不同尺度区域生态安全评价[J]. 中国生态农业学报,2007(6):135-138.

[11] 崔冬梅. 基于环境压力控制模型的泰州市节水型社会建设研究[J]. 治淮,2015(11):53-54.

[12] 封志明,刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力[J]. 自然资源学报,2006(5):689-699.

(收稿日期:2016-11-30 编辑:徐 娟)