

基于 PSR 模型的福建山仔水库生态安全评价*

郭树宏¹, 王菲凤^{1**}, 张江山¹, 陈庆华²

(1: 福建师范大学环境科学研究所, 福州 350007)

(2: 福建师范大学化学与材料学院, 福建省改性塑料技术开发基地, 福州 350007)

摘要: 通过 PSR 模型建立福建山仔水库生态安全评价的指标体系, 应用熵权法确定各指标权重, 引入密切值法对水库的生态安全进行评价. 结果表明, 2000–2003 年福州市山仔水库生态安全状况从优到劣的排序依次为: 2002 年、2001 年、2000 年、2003 年. 该研究改进了水库生态安全评价指标体系和传统生态安全评价的数学模型, 使指标体系更合理、更切合水库的生态环境保护目标, 计算简便, 能较客观、全面地反映出评价对象各样本状况.

关键词: PSR 模型; 熵权法; 密切值法; 生态安全评价; 山仔水库

Ecological security evaluation based on PSR Model for Shanzi Reservoir, Fujian Province

GUO Shuhong¹, WANG Feifeng¹, ZHANG Jiangshan¹ & CHEN Qinghua²

(1: *Institute of Environmental Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, P.R.China*)

(2: *Chemical and Material College of Fujian Normal University, Fujian Province Modified Plastic Technology Development Base, Fuzhou 350007, P.R.China*)

Abstract: Using the PSR model, this article has build the evaluation index of the ecological security system, applied the entropy method to define the weight of each assessment index, and applied the intimate data method for evaluating ecological security of Fuzhou Shanzi Reservoir. The results showed that the ecological security situations during 2000 to 2003 from superior to inferior states were in the sequences of 2002, 2001, 2000 and 2003 in Shanzi Reservoir, Fujian Province. The model was simple calculation, objective description and comprehensive reflection of the sample position. The index system was more completely reasonable in needs of the reservoir ecological environmental protection objectives.

Keyword: PSR model; entropy method; intimate data method; ecological security evaluation; Shanzi Reservoir

近年来, 随着生态环境污染的日益严重, 生态安全研究已引起了人们的普遍重视. 在不同的研究目标中, 生态安全有不同的概念. 广义的生态安全是指由自然、经济、社会方面组成的复合人工生态系统的安全, 狭义的是指自然和半自然生态系统的安全^[1]. 目前生态安全评价仍处于探索阶段, 尚未形成系统的评价指标体系和评价方法. 常用的评价指标体系有 PSR 模型、生态足迹法等; 常用的评价方法有综合指数法、层次分析法、熵权法、模糊数学评价法和灰色理论评价法等^[2].

在生态安全评价指标体系方面, 生态足迹法通常将评价指标分为生物资源消费和能源消费两大部分, 通过生态足迹和生态承载力的对比反映出生态可持续发展水平^[3], 其指标体系完整, 但有些因子很难确定, 受时空差异影响较大, 不同区域的可比性小; PSR 模型在资源、环境和社会经济的基础上, 以压力、状态和响应为表征, 指标体系较完整, 可以更清晰地表达出资源、环境、经济社会的相关关系, 近年来在区域生态安全评价中得到了广泛的应用和拓展^[4]. 在生态安全评价方法方面, 由于其评价空间是有序的,

* 福建省自然科学基金(W0650007)资助. 2007–10–25 收稿; 2008–02–28 收修改稿. 郭树宏, 男, 1984 年生, 硕士研究生; E-mail: 362111@163.com.

** 通讯作者; E-mail:wffeng@tom.com

不适合用“最大隶属度”识别准则识别和排序, 这样传统的评价方法应用于生态安全评价中, 其结果的合理性和科学性就值得探讨^[2]. 密切值法是多目标决策的一种方法, 由于其计算简便, 能客观、全面地反映出各样本状况等优点, 在环境质量评价中得到广泛应用^[5], 但应用于生态安全评价的理论实践尚未见报道.

本文将以福州市第二水源地山仔水库为例, 选用PSR模型确定其生态安全评价指标体系, 并用熵权法确定各评价指标的权重, 用密切值法进行生态安全评价.

1 区域生态安全评价模型的构建

1.1 PSR 模型确定评价指标体系

1994年, 联合国经济合作发展组织(OECD)提出了PSR模型(Pressure-State-Response model). P指人类活动引起的资源环境及社会的压力因素; S指资源环境及社会经济当前所处的状态或趋势; R指人类在环境、社会经济活动中的主观能动性的反映, 资源的部分可恢复性以及环境本身对污染的吸纳能力. 目前, 肖笃宁等人依据PSR模型已建立了巢湖流域生态安全评价指标体系^[2]. 该指标体系包含29个指标, 其中“压力”指标10个, “状态”指标12个, “响应”指标7个, 涵盖了自然资源、生态环境和社会经济的各个方面, 具有很强的代表性和普遍的适用性.

1.2 建立无量纲的样本矩阵

设区域生态安全的 n 个评价指标为 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, m 个样本为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m$, 样本 S_i 在评价指标 A_j 下的实测值为 C_{ij} , 这样就构成了 m 个样本与 n 个指标的初始矩阵 $(C_{ij})_{mn}$.

由于初始矩阵中各评价指标的量纲、数量级及指标优劣的取向存在很大差异, 故需对初始矩阵的数据做规范化处理. 令:

$$r_{ij} = \begin{cases} (C_{ij} - E_{ij}) / E_{ij} & \text{当 } A_j \text{ 为正向指标} \\ (E_{ij} - C_{ij}) / E_{ij} & \text{当 } A_j \text{ 为负向指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个指标实测值; E_j 为第 j 个评价指标的目标值, 即正向指标取最大值, 负向指标取最小值; r_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个指标的无量纲化值. 由此可得无量纲的样本矩阵 $(r_{ij})_{mn}$.

1.3 构建虚拟的最优样本和最劣样本

令 $r_j^+ = \max\{r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj}\}, j \in \{1, 2, \dots, n\}$; $r_j^- = \min\{r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{mj}\}, j \in \{1, 2, \dots, n\}$; $G(r_1^+, r_2^+, r_3^+, \dots, r_n^+)$ 表示虚拟的最优样本; $B(r_1^-, r_2^-, r_3^-, \dots, r_n^-)$ 表示虚拟的最劣样本.

1.4 用熵权法确定各评价指标权重

1.4.1 信息熵值的确定 将由 m 个样本与 n 个指标构成的初始环境矩阵 $(C_{ij})_{mn}$, 作标准化处理:

$$y_{ij} = \begin{cases} C_{ij} / (C_{ij})_{\max} & \text{当 } A_j \text{ 为正向指标} \\ (C_{ij})_{\min} / C_{ij} & \text{当 } A_j \text{ 为负向指标} \end{cases} \quad (2)$$

由此可得标准化矩阵 $(y_{ij})_{mn}$. 根据斯梯林公式计算, 可得 j 项指标的信息熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (3)$$

式中, 常数 k 与样本数 m 有关, $k = \ln m$.

1.4.2 权重函数 某项指标的信息效用价值取决于该指标的信息熵 e_j 与1的差值 h_j :

$$h_j = 1 - e_j \quad (4)$$

于是 j 项指标的权重为:

$$W_j = h_j / \sum_{j=1}^n h_j \quad (5)$$

1.5 计算密切值

采用欧氏距离计算实测样本与虚拟最优样本的距离 $d_{i,G}$ 和虚拟最劣样本的距离 $d_{i,B}$:

$$d_{i,G} = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_{ij} [r_{ij} - (r_{ij})_G]^2} \quad (6)$$

$$d_{i,B} = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_{ij} [r_{ij} - (r_{ij})_B]^2} \quad (7)$$

式中, W_j 为第 j 个评价指标的权重.

最优密切值:

$$E_{i,G} = \frac{d_{i,G}}{\min\{d_{1,G}, d_{2,G}, \dots, d_{m,G}\}} - \frac{d_{i,B}}{\max\{d_{1,B}, d_{2,B}, \dots, d_{m,B}\}} \quad (8)$$

生态安全评价中的多个指标 A_1, A_2, \dots, A_n 转化为能从总体上衡量生态安全状况优劣的单指标 $E_{i,G}$. 各样本的最优密切值 $E_{i,G}$ 大小反映了其与“最优样本”的距离远近. 一般而言, $E_{i,G}$ 越小, 表示离“最优样本”越近, 离“最劣样本”越远, 生态安全状况越好. 因此根据 $E_{i,G}$ 的大小, 可对各样本生态安全状况优劣进行排序.

2 应用实例分析

2.1 研究区概况

福州市山仔水库位于敖江流域的中游, 地理坐标为(26°17'51"N, 119°21'35"E), 周围有闽清县下祝乡, 闽侯县廷坪乡和大湖乡, 罗源县霍口乡和飞竹乡, 连江县小沧乡, 晋安区日溪乡, 现有人口 6.55 万左右. 福州第二水源取水口位于山仔大坝下约 7km, 距福州市约 21km. 水库流域集水面积为 1646km², 多年平均年径流量为 18.59×10⁸m³, 调节库容 10.64×10⁸m³.

2.2 确定评价指标体系

由于山仔水库是福州第二水源地, 其水环境质量状况在生态安全评价中显得尤为重要, 因此本文在借鉴文献[2]巢湖流域生态安全评价指标体系的基础上, 将其“水环境质量”扩展为“生化需氧量(BOD₅)”、“化学需氧量(COD_{Mn})”、“总磷(TP)”和“总氮(TN)”4 个指标; 山仔水库周围土地利用类型以林地和耕地为主, 工业和建筑用地较少, 近年来其区域开发程度和土壤侵蚀率都稳定在较低水平, 农业废物秸秆的产生量和沼气的使用量都很少, 因此本文省略了文献[2]中的“区域开发指数”、“土壤侵蚀模数”、“秸秆综合利用率”、“沼气普及率”、“城镇密度”和“农村发展综合指数”6 个指标. 经上述补充修正后的福州山仔水库生态安全评价指标的数值见表 1.

2.3 评价结果与分析

根据表 1, 可建立 4 个样本(即 2000–2003 年)与 25 个指标的初始矩阵 $(C_{ij})_{4 \times 25}$. 上述指标中 $A_1, A_5-A_8, A_{11}-A_{18}$ 为负向指标, 其余均为正向指标. 根据公式(1)计算, 可建立无量纲的样本矩阵 $(r_{ij})_{4 \times 25}$, 并可求出虚拟最优样本和最劣样本. 根据公式(2)–公式(5)计算, 可分别求出指标 A_1-A_{25} 的信息熵、信息效用价值和权重. A_1-A_{25} 的权重见表 2. 根据公式(6)和公式(7), 可分别求出 $d_{i,G}$ 和 $d_{i,B}$, 再代入公式(8)即可求出最优密切值. 各样本的最优密切值及排序结果见表 3. 限于文章篇幅, 本文不再对上述计算过程赘述.

由表 3 可知, 2000–2003 年期间, 福州市山仔水库生态安全状况从优到劣的排序为: 2002 年 > 2001 年 > 2000 年 > 2003 年. 根据表 1 PSR 模型的各项指标数值亦可知, “压力指标”方面的“水土流失面积比”、“人均耕地”等指标和“状态指标”方面的“工业用水量”、“农业用水量”、“COD_{Mn}”、“TP”等指标均是均是 2002 年最优, 而 2003 年最差; 在“响应指标”方面, 2002 年与 2003 年的各指标相差不大, 这也说明了“响应指标”具有一定的滞后性. 事实上, 2001 年底至 2002 年上半年, 政府对水库上游的石材加工业、畜禽养殖业、渔业、旅游业、种植业等污染源给予陆续关停取缔, 而 2003 年的山仔水库生态安全状况最差可能是与部分已取缔的污染源“死灰复燃”和水库底泥的内源污染有关^[11]. 因此, 今后研究可考虑将“响应指标”修改为“环保投入占 GDP 比重”、“无公害农产品比重”等.

表 1 2000-2003 年福州市山仔水库生态安全评价各指标数值^[6-10]

Tab.1 The data of ecological security evaluation indices of Fuzhou Shanzi Reservoir

生态安全评价指标			2000 年(S ₁)	2001 年(S ₂)	2002 年(S ₃)	2003 年(S ₄)
压力	A ₁	水土流失面积比(%)	8.85	6.54	5.35	9.18
	A ₂	人均耕地(hm ² /人)	0.052	0.057	0.063	0.051
	A ₃	人均活立木蓄积量(m ³ /人)	2.029	2.136	2.365	2.217
	A ₄	人均水资源量(m ³ /人)	1016	1112	1047	982
	A ₅	化肥施用量(t/hm ²)	0.534	0.637	0.612	0.595
	A ₆	农药使用量(kg/hm ²)	12.10	10.17	8.65	9.36
	A ₇	农药残留量(kg/hm ²)	0.2316	0.2432	0.2654	0.2551
	A ₈	人口密度(人/km ²)	382.2	386.7	391.5	393.1
	A ₉	人均财政收入(元/人)	1670.5	1785.4	1832.5	1890.2
状态	A ₁₀	森林覆盖率(%)	56.3	57.4	55.8	56.5
	A ₁₁	工业用水量(m ³ /万元)	221.3	215.4	203.8	235.6
	A ₁₂	农业用水量(m ³ /万元)	2350.2	2284.6	2063.7	2432.3
	A ₁₃	生活用水量(L/(人·d))	206.8	212.2	232.5	254.9
	A ₁₄	BOD ₅ (mg/L)	1.77	0.76	0.91	1.65
	A ₁₅	COD _{Mn} (mg/L)	3.32	2.48	2.75	3.71
	A ₁₆	TP(mg/L)	0.043	0.035	0.026	0.050
	A ₁₇	TN(mg/L)	0.952	0.585	0.608	1.0
	A ₁₈	文盲和半文盲人数比(%)	6.52	6.23	6.17	5.02
响应	A ₁₉	农民人均纯收入(元)	3101.2	3235.8	3473.9	3621.7
	A ₂₀	经济密度(万元/km ²)	302.56	324.5	365.4	378.2
	A ₂₁	受保护土地比例(%)	0.105	0.115	0.218	0.227
	A ₂₂	科教投入占 GDP 比例(%)	1.75	1.98	2.12	2.09
	A ₂₃	人均固定资产投资(元)	1236.1	1293.6	1386.5	1425.7
	A ₂₄	第三产业比例(%)	26.35	28.28	31.25	32.12
	A ₂₅	人均 GDP(元/人)	4072.6	4368.1	4756.8	5103.3

表 2 福州市山仔水库生态安全评价各指标权重

Tab.2 The weight of ecological security evaluation indices of Fuzhou Shanzi Reservoir

压力指标	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉		
权重	0.0347	0.0397	0.0366	0.0226	0.0289	0.0275	0.0573	0.0562	0.0199		
状态指标	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆	A ₁₇	A ₁₈	A ₁₉	A ₂₀
权重	0.0663	0.0333	0.0396	0.0364	0.0533	0.0546	0.0596	0.0567	0.0266	0.0362	0.0372
响应指标	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A ₂₄	A ₂₅						
权重	0.0492	0.0285	0.0268	0.0266	0.0367						

表 3 福州市山仔水库 2000-2003 年生态安全评价结果

Tab.3 The results of ecological security evaluation of Fuzhou Shanzi Reservoir

样本	最优密切值	优等排序
2000 年(S ₁)	65.1273	3
2001 年(S ₂)	43.3915	2
2002 年(S ₃)	11.7642	1
2003 年(S ₄)	69.3526	4

此外,从表1和表2还可看出,“压力指标”方面的“水土流失面积比”、“农药使用量”等指标和“状态指标”方面的“BOD₅”、“COD_{Mn}”、“TP”、“TN”等指标,权重较大(占有所有指标总权重的28.64%),却无明显的改善趋势且极不稳定,是水库生态环境的主要风险因子.因此,当地政府在制定水库生态环境保护管理措施时对上述指标应给予充分的关注.笔者建议采取以下措施:(1)缓解当前生态环境压力,加强植树造林、严禁滥砍滥伐,减少水土流失面积,控制农药使用量、提倡施用生态农药,严防农药滥用;(2)改善当地生态环境现状,继续取缔水库上游的污染较严重的相关行业,调整农业结构,减少农业非点源污染,建立生活污水处理系统,将生活污水处理后再循环利用.

3 结语

通过 PSR 模型建立福州市山仔水库生态安全评价的指标体系,应用熵权法确定各指标权重,引入密切值法对水库 2000-2003 年进行评价.该评价模型在指标体系方面,根据水库的自然生态和社会经济环境特点,对基于 PSR 模型的巢湖流域生态安全评价指标体系进行适当的改进,改进后指标体系整体上较为合理、更切合其生态环境保护目标,但“响应指标”具有一定的滞后性,今后研究中仍需改进;在评价方法方面,首次将密切值法应用于生态安全评价,拓展了密切值法的应用领域.与其他传统的生态安全评价模型相比,密切值法计算简便且精度高,能客观、准确、全面地反映出各样本状况.

4 参考文献

- [1] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容.应用生态学报,2002,13(3): 354-358.
- [2] 吴开亚,张礼兵,金菊良等.基于属性识别模型的巢湖流域生态安全评价.生态学杂志,2007,26(5): 759-764.
- [3] 肖玲,赵先贵,杨冰灿.渭南市生态足迹与生态安全动态研究.中国生态农业学报,2007,15(6): 139-142.
- [4] 周文华,王如松.城市生态安全评价方法研究——以北京市为例.生态学杂志,2005,24(7): 848-852.
- [5] 郭树宏,张江山.基于熵权的改进密切值法在地面水水质评价中的应用.安全与环境学报,2007,7(3): 75-78.
- [6] 《福州年鉴》编纂委员会编.福州年鉴2001.北京:中国统计出版社,2001.
- [7] 《福州年鉴》编纂委员会编.福州年鉴2002.北京:中国统计出版社,2002.
- [8] 《福州年鉴》编纂委员会编.福州年鉴2003.北京:中国统计出版社,2003.
- [9] 《福州年鉴》编纂委员会编.福州年鉴2004.北京:中国统计出版社,2004.
- [10] 林佩凤,王丽琼,张江山.水资源价值损失模糊估算模型的改进与应用.环境科学与技术,2007,30(1): 66-69.
- [11] 孔健健.福州第二水源山仔水库底泥营养盐——氮污染研究[硕士论文].福州:福建师范大学,2005.