

基于模糊物元模型的三峡库区重庆段生态安全评价

官冬杰¹ 曾一笑

(重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074)

【摘要】: 以三峡库区(重庆段)为研究范围, 构建了生态安全评价指标体系, 以模糊物元原理和概念框架为基础, 从社会、经济、自然地理特征等方面选取了 21 个指标, 确定 22 个区县的模糊物元评价矩阵, 对研究区域各个区县进行生态安全评价并根据研究结果把生态安全分为“很不安全、不安全、安全、很安全、非常安全”这 5 个等级, 并与 AHP-PSR 的评价方法、结论进行了对比。研究认为: 模糊物元模型评价过程对各个指标设定了从优隶属度和节域, 其结论较 AHP-PSR 评价结论更为科学; 库区东北区域生态安全状况良好、库区西部的较发达区域应加强生态环境保护、缓解城市环境病症。

【关键词】: 环境工程; 生态安全评价; 三峡库区; 模糊物元模型

【中图分类号】: X171 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1674-0696(2017)-

引言

随着科学技术与社会经济发展, 人们改造自然的能力也日益增强, 但人类对自然环境过度的改造和粗放式的社会经济发展使得人类赖以生存的地球环境也遭到了一定破坏, 生态安全问题日渐凸显, 成为人类社会与经济进一步发展的桎梏^[1]。

生态安全是指生态系统的健康和完整情况。它是人类在生产、生活和健康等方面不受生态破坏和环境污染等影响的保障程度, 包括饮用水与食物安全、空气质量与绿色环境等基本要素。生态安全是 20 世纪末国际上出现的新的研究领域。目前人类对生态环境保护意识日渐增强, 对生态安全关注程度倍增, 国际上已把生态安全纳入一个国家安全体系重要组成部分, 与军事安全、政治安全、经济安全、科技安全同等, 在国家安全体系中占有重要地位^[2]。

生态安全评价成为一个国家或地区进行宏观规划、政府决策的重要根据; 生态安全评价也是可持续发展、地理学、生态学及资源与环境科学等学科的关注点, 而生态安全评价是生态安全研究的基础与核心^[3]; 区域性生态安全评价是一个国家或地区进行宏观规划、政府决策的重要依据。随着中国城镇化和工业化发展, 我国生态环境安全性保持和维护将面临更加严重的威胁和挑战, 研究人类活动对生态安全性的作用势在必行。

21 世纪初, 国内外的学者纷纷对生态安全进行了研究, 其中不乏对生态敏感区域的研究, 例如位于中国长江中上游的三峡库区。三峡库区的建设为重庆和长江上游发展带来了新机遇, 但三峡库区的建设同样也存在着弊端。蓄水阶段水位上升导致山

¹收稿日期: 2016-06-13; 修订日期: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(41201546); 国家社科基金后期资助项目(16FJY010); 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0210); 重庆市研究生科研创新项目(CYS16186)

第一作者: 官冬杰(1980—), 女, 黑龙江富锦人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事生态环境、可持续发展及 3S 等方面的研究。E-mail: guandongjie_2000@163.com。

通信作者: 曾一笑(1992—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事地图学与地理信息系统等方面的研究。E-mail: 992701681@qq.com。

体受到更大面积、体积的流水作用，导致地质结构不稳，地质灾害时有发生，从而进一步打破三峡库区生态的动态平衡，影响了三峡库区生态安全平稳发展。针对三峡库区重庆段发生的地质灾害和潜在生态风险，重庆市政府也启动了对三峡库区水资源和渔业资源的保护措施。

国内三峡库区的生态安全评价研究方法主要是以 AHP、PSR 和熵权法为主。笔者以三峡库区重庆段为研究对象，针对三峡库区自然、地理、经济、生态等多方面客观条件，应用模糊物元模型、AHP 和 PSR 相结合方法对三峡库区重庆段进行生态安全评价与评估。通过两种评价方法的对比研究，能提高三峡库区生态安全评价的客观性和科学性，可可靠地为决策者提供地区发展的建议和参考。

1 研究区域

笔者研究的三峡库区重庆段包括巫山县、巫溪县、奉节县、云阳县、开州区、万州区、忠县、涪陵区、丰都县、武隆县、石柱县、长寿区、渝北区、巴南区、江津区及重庆核心城区（包括渝中区、北碚区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区、大渡口区 and 江北区），如图 1。该区域地势为长江南岸高处向长江逐渐趋缓，呈现出平行岭谷的多山地貌。

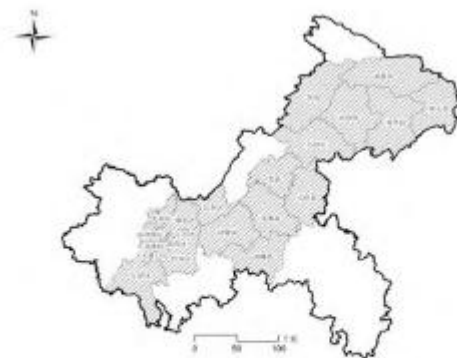


图 1 三峡库区重庆段行政区域

Fig.1 Three Gorges Reservoir in Chongqing administrative map

根据三峡水库淹没处理的规划方案，三峡库区总面积约 $7.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，淹没耕地 $1.94 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，涉及移民 117.15 万人。全库区规划农村移民生产安置人口 40.5 万人，在库区淹没涉及县内安置 32.2 万人，出县外迁安置 8.3 万人；规划搬迁建房总人口 44 万人，县内搬迁建房 32.2 万人。三峡库区气候温和，属亚热带季风气候，年降水量 1000–1800mm。

土地类型呈现出多样化，山地面积大。三峡库区不仅是长江上游重要的蓄洪关口，也为我国长江流域提供了丰富的水资源，三峡大坝为我国华南、华东、西南、华中地区等提供电力的同时也促进了我国西南地区，重庆地区的经济发展^[4]。据 2014 年上半年不完全统计，三峡库区重庆段范围内，区县 GDP 为 2544.44 亿元，同比增长 12.0%，高出全市平均水平 1.1 个百分点。库区人均可支配收入为 9670 元，比全市平均水平多 160 元。

2 研究方法

2.1 评价指标体系

目前国内外学者在地理生态环境评价中常用的方法是 PSR 模型，即压力-状态-响应模型。PSR 模型能够反映自然、社会、经

济在人作用下产生的相互关系，为构建生态安全评价指标提供逻辑严密的指标框架和基础。P 为压力，是人类社会经济活动对自然环境构成的压力、造成的影响、利用自然资源的程度；S 为状态，是人类利用自然资源、改造自然环境所形成的动态平衡状态下的自然环境参数或指标；R 为响应，是人类对于生态环境变化所采取的补救措施。通过构建 PSR 模型框架下的评价体系，将评价指标分为 3 类，使整个评价体系逻辑严密。

目前，确定指标权重有多种方法。由于指标数量适中、评价指标均需全部参与评价过程当中，因此笔者采用层次分析法（AHP 层次分析法）。层次分析法多用于有从属关系的指标体系构建当中。AHP 层次分析法将评价体系划分为 3 个层次，即目标层、决策层、指标层。

目标层指综合评价的评价目标；决策层把达成目标层的指标划分为多个类型，作为从不同角度进行决策、评价的体系参考；指标层是指决策层各个分类下的底层的指标。AHP 层次分析法逐层构建评价体系，分析各指标之间的相互关系，邀请学者、专家对指标权重进行 1-9 的标度打分，求得判断矩阵，得出在目标层各指标所占的权重，最后进行一致性检验。

笔者采用 PSR 和 AHP 方法相结合的方法，选取 21 个生态安全评价指标^[5-6]，其中地形构成参数指标为各区县台地面积比例、平坝面积比例、丘陵面积比例、低海拔山地面积比例、中海拔山地比例、消落带面积、景观生态学等指标通过主成分分析降维所得。本研究，所有指标均采用 Z-score 法进行标准化。建模体系如表 1^[7-10]。

表 1 三峡库区重庆段评价体系构建

Table 1 Three Gorges Reservoir ecological security assessment index system establishment

目标层 X	准则层 Y	指标层	
生态评价预警指标体系	P(压力)	地区工业生产 GDP	x1
		农用化肥使用量	x2
		工业能源消耗总量	x3
		达标废水排放率	x4
		人均固体排放量	x5
		人口密度	x6
		城镇化率	x7
	S(状态)	土壤侵蚀敏感性指数	x8
		滑坡体积密度	x9
		石漠化敏感性指数	x10
		大气污染指数	x11
		水质污染指数	x12
		人均水资源	x13
		降水量	x14
		地形组成参数	x15
	R(响应)	人均公园绿地面积	x16
		农业林业水资源支出	x17
		三峡后续工作专项资金累计计划投资	x18
		森林覆盖率	x19
		万人占有卫生机构数目	x20
		万人占有学校数目	x21

2.2 评价指标权重

AHP 层次分析决策法是需要主观赋权的方法。为使赋权更科学，一般地对主观赋权进行含义标度，并按照准则层、指标层从上至下地进行赋权。赋权时，主观决策者对所有的决策指标两两对比其权重，并进行一致性检验。其中： $\lambda_{\max}$ 为权重矩阵的最大特征根，CI 为一致性指标，RI 为随机一致性指标，CR 为一致性比率，当 $CR < 0.1$ 时，权重不一致性程度在容许范围内。赋权含义如表 2^[11]。

表 2 AHP 方法指标赋权含义

Table 2 Power meaning of AHP method

权重标度	含 义
1	同样重要
3	稍比重要
5	明显重要
7	非常重要
9	极端重要
2、4、6、...	中间值

按 AHP 方法^[12]对模型准则层进行权重赋值计算，如表 3。

表 3 准则层赋权计算

Table 3 Calculation of the principle layer

准则层	赋 值				权重
	P	S	R	β_1	
P	1/1	1/1	5/1	5.0000	0.48
S	1/1	1/1	3/1	3.0000	0.41
R	1/5	1/3	1/1	0.0667	0.11

$\lambda_{\max}=3.0291$, $CI=0.0291$, $RI=0.58$, $CR=0.02509$
 <0.1 。

2.2.2 指标层权重

1) 系统压力指标权重赋值(表 4)

表 4 系统压力指标权重计算
Table 4 Calculation of system pressure power

压力 指标	赋 值							权重
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	
x_1	1/1	3/1	3/5	3/3	3/2	3/4	3/5	0.1326
x_2	1/3	1/1	1/5	3/5	1/2	1/4	1/5	0.0488
x_3	5/3	5/1	1/1	5/3	5/2	5/4	5/5	0.2210
x_4	3/3	3/2	3/5	1/1	3/2	3/4	3/5	0.1201
x_5	2/3	2/1	2/5	2/3	1/1	2/4	2/5	0.0884
x_6	4/3	4/1	4/5	4/3	4/2	1/1	4/5	0.1768
x_7	5/3	5/1	5/5	5/4	5/2	5/4	1	0.2121

$\lambda_{\max}=7.0503$, $CI=0.0083$, $RI=1.32$, $CR=0.00635$
 <0.1 。

2) 系统状态指标权重赋值(表 5)

表 5 系统状态指标权重计算
Table 5 Calculation of system status power

状态 指标	赋 值								权重
	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	
x_8	1	2/3	2	2/3	1	1	1/3	2/5	0.04
x_9	3/2	1	3	1	1/2	1/2	1/3	1/5	0.04
x_{10}	1/2	1/3	1	1/3	1/2	1/2	1/2	1/5	0.02
x_{11}	2	4/3	4	1	2	4/3	4/3	1	0.08
x_{12}	1	2/3	2	1/2	1	1	2/3	2/5	0.04
x_{13}	1	2/3	2	1/2	1	1	2/3	2/5	0.04
x_{14}	3/2	1	3/2	3/4	3/2	3/2	1	3/5	0.06
x_{15}	5/2	5/3	5	5/4	5/2	5/2	5/3	1	0.10

$\lambda_{\max}=7.4733$, $CI=0.0789$, $RI=1.32$, $CR=0.05976$
 <0.1 。

3) 系统响应指标权重赋值(表 6)

表 6 系统响应指标权重计算
Table 6 Calculation of system response

响应	赋 值						
指标	x ₁₆	x ₁₇	x ₁₈	x ₁₉	x ₂₀	x ₂₁	权重
x ₁₆	1/1	4/2	4/3	3/5	4/1	4/1	0.2498
x ₁₇	2/5	1/1	3/2	2/5	4/2	4/2	0.1249
x ₁₈	3/4	3/2	1/1	3/5	3/1	3/1	0.1873
x ₁₉	5/4	5/2	5/3	1/1	5/1	5/1	0.3122
x ₂₀	1/4	1/2	1/3	1/5	1/1	2/1	0.0701
x ₂₁	1/4	1/2	1/3	1/5	1/2	1	0.0556

$\lambda_{\max}$ =6.0546, CI =0.01092, RI =1.24, CR =0.0088
<0.1。

2.2.3 指标综合权重

将指标层和对应准则层权重相乘，得到各项指标在准则层的综合权重，如表 7。并将表 7 中综合权重应用于 AHP-PSR 模型和模糊物元模型^[13]当中

表 7 综合权重
Table 7 Comprehensive weight

序号	指标	综合权重	序号	指标	综合权重
1	x ₃	0.11	11	x ₁₃	0.04
2	x ₇	0.10	12	x ₈	0.04
3	x ₁₅	0.10	13	x ₉	0.04
4	x ₆	0.08	14	x ₁₉	0.03
5	x ₁₁	0.08	15	x ₁₆	0.03
6	x ₁	0.06	16	x ₂	0.02
7	x ₄	0.06	17	x ₁₀	0.02
8	x ₁₄	0.06	18	x ₁₈	0.02
9	x ₅	0.04	19	x ₁₇	0.01
10	x ₁₂	0.04	20	x ₂₀	0.01
			21	x ₂₁	0.01

2.3 模糊物元模型

2.3.1 模糊物元原理

物元基本原理是指任何事物都可用“事物、特征、量值”这 3 个要素来加以描述，以便对事物作定性分析和定量计算^[14]。若以这些要素组成有序 3 元组来描述事物的基本元，就称为物元。如果其中量值具有模糊性，便用有序 3 元组：“事物、特征、

模糊量值”作为描述事物的基本元，该物元叫做模糊物元。模糊物元分析法广泛的应用于社会生产的各行各业当中，模糊物元分析法可用于评估、预测、规划等各项数学要求^[15-16]。笔者主要通过建立差平方模糊物元矩阵与 AHP 赋权方法^[17]对三峡库区的生态安全进行预测和评估。

模糊物元^[18]定义如式（1），记模糊物元为：

$$\text{物元} = \begin{bmatrix} \text{事物} \\ \text{特征} \\ \text{模糊量值} \end{bmatrix} \tag{1}$$

若有待评价区县 M；有 n 项待评价属性 C1, C2, …, Cn，其对应属性值为 u(x1), u(x2), …, u(xn)；则有式（2）：

$$R_m = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & M_n \\ C_1 & u(x_{11}) & \cdots & u(x_{n1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & u(x_{1n}) & \cdots & u(x_{nn}) \end{bmatrix} \tag{2}$$

2. 3. 2 模糊物元评价模型

根据模糊物元原理和评价体系，建立模糊物元评价模型，步骤如下：

1) 各评价指标经典域确定

按照非常不安全、不安全、安全、很安全、非常安全这 5 个评价等级，参考相关文献，划分各项评价指标在对应等级区间，该区间为节域，如表 8。

表 8 节域设定
Table 8 Interval region setting table

指标	评价等级					指标	评价等级				
	非常安全	很安全	安全	不安全	非常不安全		非常安全	很安全	安全	不安全	非常不安全
x ₁	4.0×10 ⁷	5.0×10 ⁶	4.0×10 ⁶	3.0×10 ⁶	1.0×10 ⁶	x ₁₁	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
x ₂	1.0×10 ⁴	1.5×10 ⁴	2.0×10 ⁴	2.5×10 ⁴	3.0×10 ⁴	x ₁₂	0.10	0.25	0.40	0.50	1.00
x ₃	10	50	110	200	300	x ₁₃	1500	1200	1000	800	400
x ₄	0.3	0.6	0.9	1.0	1.2	x ₁₄	1600	1300	1000	800	600
x ₅	0.10	0.03	0.07	1.00	1.10	x ₁₅	1.4	0.7	0	-0.7	-1.4
x ₆	100	300	500	2000	3000	x ₁₆	5	8	13	20	30
x ₇	80.00	70.00	63.39	50.00	40.00	x ₁₇	1.4×10 ⁵	8.0×10 ⁴	6.5×10 ⁴	4.0×10 ⁴	3.0×10 ⁴
x ₈	0.20	0.30	0.40	0.45	0.50	x ₁₈	3.0×10 ⁵	1.5×10 ⁵	6.5×10 ⁴	2.0×10 ⁴	1.0×10 ⁴
x ₉	0.5	5.0	10.0	20.0	30.0	x ₁₉	35	25	20	15	10
x ₁₀	0.02	0.05	0.10	0.30	0.40	x ₂₀	8	5	3	2	1
						x ₂₁	9	6	4	2	1

2) 生态安全指标从优隶属度计算

由表 8 和待评价对象组成复合模糊物元矩阵。三峡库区重庆段各个评价指标的属性值从属于标准样本各对应评价指标响应的模糊量值隶属程度，称之为从优隶属度^[19]。

据此建立的原则称为从优隶属原则。从优隶属度把指标分为越大越优型评价指标和越小越优型评价指标。笔者将已知各项评价指标划分为越大越优型指标和越小越优型评价指标，如表 9。

表 9 评价指标正负向划分
Table 9 Index classification table

序号	隶属度划分	正负向	序号	隶属度划分	正负向
x ₁	地区工业生产 GDP	越大越优	x ₁₁	大气污染指数	越小越优
x ₂	农用化肥使用量	越小越优	x ₁₂	水质污染指数	越小越优
x ₃	工业能源消耗总量	越小越优	x ₁₃	人均水资源	越小越优
x ₄	达标废水排放率	越小越优	x ₁₄	降水量	越小越优
x ₅	人均固体排放量	越小越优	x ₁₅	地形组成参数	越大越优
x ₆	人口密度	越小越优	x ₁₆	人均公园绿地面积	越小越优
x ₇	城镇化率	越大越优	x ₁₇	农业林业水资源支出	越大越优
x ₈	土壤侵蚀敏感性指数	越大越优	x ₁₈	三峡后续工作专项资金累计计划投资	越大越优
x ₉	滑坡体积密度	越小越优	x ₁₉	森林覆盖率	越大越优
x ₁₀	石漠化敏感性指数	越小越优	x ₂₀	万人占有卫生机构数目	越大越优
			x ₂₁	万人占有学校数目	越大越优

越大越优型指标计算如式 (3)：

$$u(x_{ij})=x_{ij}/x_{ij}(\max) \quad (3)$$

越小越优型指标计算如式 (4)：

$$u(x_{ij})=x_{ij}(\min)/x_{ij} \quad (4)$$

式中：x_{ij}(max)表示单一评价指标中属性值最大数；x_{ij}(min)表示单一评价指标中属性值最小数。

由式 (3)、(4) 建立标准模糊物元矩阵，使用计算后的值替代原位置，如式 (5)：

$$R_{0n} = \begin{bmatrix} C_1 & M_0 & u(x_{01}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & u(x_{0n}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

3) 构建差平方模糊物元矩阵

以 a_{ij} 表示标准模糊物元矩阵和复合模糊物元矩阵的平方差, 构成差平方模糊物元矩阵^[20], 如式 (6):

$$R_a = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ C_1 & a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{n1} \\ C_2 & a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & a_{1n} & a_{2n} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $a_{ij}=[u(x_{0j})-u(x_{ij})]^2$; $i=1, 2, \cdots, n$; $j=1, 2, \cdots, m$ 。4) 生态安全评价欧式贴近度计算[式 (7)]

$$\rho H_i = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^n W_i \times a_{ji}} \quad (7)$$

式中: W_i 为 AHP 方法中各项指标权重; a_{ji} 为差平方模糊物元中的元素值。

式 (7) 得到各区县生态安全与 5 个评价等级的欧式贴近度即经典域模型, 与之比对欧式贴近度所在的经典域, 可得出评价结果, 如表 10。

表 10 基于模糊物元的欧式贴近度
Table 10 Ecological security assessment value base on fuzzy matter

区县名	P	S	R	综合加权值	ρ_H	区县名	P	S	R	综合加权值	ρ_H
万州区	0.4142	0.4402	0.0365	0.8908	0.095	石柱县	0.3233	1.2262	0.0448	1.5944	0.125
涪陵区	0.3435	0.4288	0.1552	0.9275	0.156	江津区	0.5054	1.2397	0.0143	1.7594	0.187
长寿区	0.1906	0.5166	0.2721	0.9792	0.214	渝北区	0.6532	1.0237	0.0970	1.7739	0.139
丰都县	0.2695	0.5531	0.1828	1.0054	0.170	北碚区	0.6505	0.9485	0.1898	1.7888	0.094
武隆县	0.2148	0.8436	0.0090	1.0674	0.089	巴南区	0.5554	1.8236	0.0434	2.4225	0.108
忠县	0.3557	0.7481	0.0157	1.1195	0.197	沙坪坝区	2.1862	0.2742	0.0316	2.4920	0.018
开州区	0.2847	0.5855	0.2724	1.1426	0.139	江北区	0.5837	2.8031	0.0172	3.4040	0.004
云阳县	0.2086	0.9363	0.0342	1.1791	0.096	南岸区	1.8536	4.8147	0.0541	6.7224	0.000
奉节县	0.4520	1.0037	0.0194	1.4751	0.083	渝中区	9.1865	0.8356	0.0169	10.0390	0.025
巫山县	1.1678	0.3192	0.0121	1.4990	0.118	九龙坡区	11.8120	0.8809	0.0525	12.7454	0.031
巫溪县	0.5280	0.8541	0.1678	1.5499	0.186	大渡口区	22.4245	1.0038	0.1091	23.5374	-0.027

笔者以万州区为例, 生态安全评价贴近度复合模糊物元矩阵如式 (8):

$$R_{p_{w_i}} = \begin{bmatrix} \text{非常安全} & \text{很安全} & \text{安全} & \text{不安全} & \text{非常不安全} & \text{万州区} \\ 0.28 & 0.22 & 0.15 & 0.08 & -0.01 & 0.09 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式（8）可得出：万州区与其他区县安全评价等级相比，万州区评价等级为安全。

3 结果分析

笔者将 AHP-PSR 的评价方法与模糊物元的方法进行对比，为了控制评价模型的可对比性，两种模型均使用表 7 综合权值。

3.1 PSR 模型评价结果

AHP-PSR 数学模型可直接得到一个评价结果。使用综合加权法得到 PSR 模型评价结果如表 11。用自然断点法将评价值进行分割形成 5 个评价等级，如图 2。

表 11 AHP-PSR 生态安全评价结果
Table 11 AHP-PSR ecological assessment result

区县名	P	S	R	ESI	区县名	P	S	R	ESI
渝北区	0.243664	0.126104	-0.057653	0.312	万州区	0.078372	-0.022079	0.048438	0.105
云阳县	0.118303	0.097753	0.053794	0.270	南岸区	0.164729	-0.007746	-0.053381	0.104
武隆县	0.123258	0.083040	0.034690	0.241	忠县	0.069180	-0.066155	0.011281	0.014
巫山县	0.118842	0.056174	0.049224	0.224	沙坪坝区	0.077726	-0.095282	-0.006533	-0.024
巫溪县	0.177631	-0.006694	0.047127	0.218	开州区	0.018498	-0.144068	0.037115	-0.088
石柱县	0.115879	0.059987	0.023688	0.200	九龙坡区	0.019697	-0.081456	-0.032807	-0.095
北碚区	0.154269	0.081389	-0.055890	0.180	涪陵区	-0.135241	-0.035439	0.029905	-0.141
江北区	0.191938	0.020610	-0.037329	0.175	江津区	-0.251952	0.003276	-0.009234	-0.258
奉节县	0.116362	-0.005052	0.039106	0.150	大渡口区	-0.395675	-0.007696	-0.040108	-0.443
丰都县	0.032258	0.058244	0.038281	0.129	长寿区	-0.523585	0.000416	-0.018447	-0.542
巴南区	0.203655	-0.033547	-0.052043	0.118	渝中区	-0.717810	-0.081778	-0.049225	-0.849

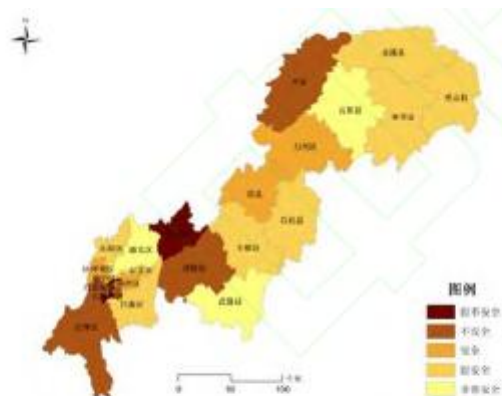


图 2 基于 AHP-PSR 方法的三峡库区重庆段评价

Fig.2 Chongqing Three Gorges Reservoir ecological security assessment
based on AHP-PSR

库区东北部区县总体良好。消落带区域交大的巫溪县、巫山县、奉节县、云阳县等区县评价结果为很安全；但库区西部的渝中区、大渡口区等区县评价结果欠佳。

造成评价结果差距的原因是多方面的。评价体系中引入了地形地貌参数指标，渝中区地形坡度较大且用地类型结构单一导致了其评价结果欠佳；长寿区环境治理工作没有能够跟上工业的发展和能源消耗；大渡口区污染工业污染排放等等。库区中部与东部评价结果良好，库区西部的较发达区县需要在经济发展的同时加大对生态环境保护、基础设施建设上的投资。

3.2 模糊物元评价结果

由表 10 和经典域等级划分同样形成 5 个评价等级，如图 3。

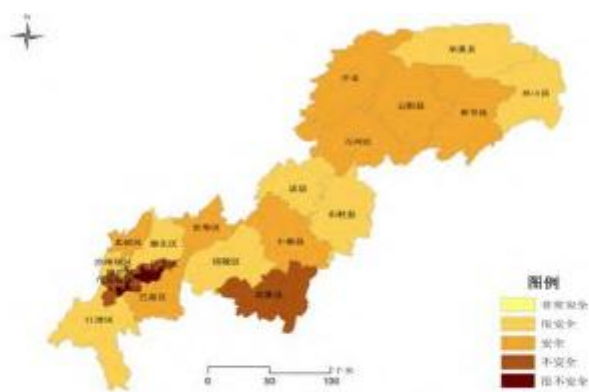


图 3 基于模糊物元的三峡库区重庆段生态安全评价

Fig.3 Chongqing Three Gorges Reservoir ecological security assessment
based on fuzzy matter

各区县评价结果差距较小，评价结果较为平滑。生态安全评价结果集中在安全与较安全两个等级。其中库区东北部的巫溪县、巫山县的评价结果为很安全；开州区、万州区、云阳县、奉节县的评价结果为安全。评价结果揭示了地形地貌、经济发展受库区蓄水影响较大的库区东北部区域生态安全良好。

由于受森林覆盖率、工业能源消耗、地形地貌参数等指标节域的胁迫，主城发展较发达的区县如渝中区、南岸区、江北区、大渡口区等区县评价结果欠佳。

3.3 讨论

从生态安全评价结果而言，这两种评价方法大致相同，但仍有一些区县存在两种方法评价结果矛盾的情况。如江津区、长寿区、涪陵区、开州区、武隆县。江津区、长寿区、涪陵区是工业发达的区县，在工业产值与工业能源消耗上超过其他区县，由于 AHP 方法未能采用从优隶属度进行计算，导致了这两项指标对其评价结果影响较大。

同理，开州区与武隆县同为压力层面上欠发达区县，但其响应指标如森林覆盖率等在物元模型评价方法中占优，造成了两种评价方法的不同。其中武隆县由于山地占比面积较大，石漠化敏感性指数、土壤侵蚀敏感性指数等指标的欧式贴近度评级较低，受到节域胁迫作用，导致其评级为不安全。

3.4 两种评价方法特点

AHP-PSR 模型简单的将各区县独立进行评价，各个区县之间未能形成评价指标的相互对比，凸显了某些工业规划型区县或生态建设型区县之间的差距。

模糊物元评价模型中从优隶属度计算横向对比了各个区县的评价指标，并根据各个指标在不同对应评价等级之间的节域，进行了基于欧式几何贴近度计算，评价结果较 AHP-PSR 模型较为平均，库区各区县评价等级更为集中和平滑。

重庆是典型的城乡二元性结构体制，城市发展较为发达而乡村发展比较迟缓。使用 AHP-PSR 模型对三峡库区重庆段各个区县进行评价，易造成不同类型区县评价结果比实际差距大的情况；而模糊物元评价模型根据各指标区间进行横向对比，缩小了城乡二元结构带来的差距，其评价结果更接近实际情况，评价模型和过程更优。

从评价结果上看：渝中区、大渡口区、南岸区、江北区的生态安全不容乐观。建议在加强经济建设、基础设施投资建设的同时，将人口压力、交通压力与工业压力等生态压力向周边区县分散，为周边区县带来经济增长的同时缓解自身的城市病症；开州区、武隆县等区县则需要加强生态环境保护投资、地质灾害防治与医疗、教育、交通等基础设施建设。

4 结论

笔者采用 AHP-PSR 模型和模糊物元两种方法对三峡库区重庆段各个区县的生态安全进行了评价，得出以下结论：

- 1) 基于三峡库区生态安全面临主要瓶颈和地域特色，构建了三峡库区重庆段生态安全评价指标体系和评价标准；
- 2) 构建了三峡库区重庆段生态安全 AHP-PSR 模型和物元模糊模型，采用这两种模型评价了生态安全状态，并将结果进行等级划分；
- 3) 三峡库区重庆段主城区区域存在着生态环境不安全或很不安全的状况，渝中区、大渡口区、南岸区、江北区等区县需要分散城市病压力；开州区、武隆县等区县需要加强对生态敏感区域、地质灾害易发区域的保护和监测工作。

参考文献：

-
- [1]魏兴萍. 基于 PSR 模型的三峡库区重庆段生态安全动态评价[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1095-1099.
- [2]和春兰, 饶辉, 赵筱青. 中国生态安全评价研究进展[J]. 云南地理环境研究, 2010, 22(3): 104-110.
- [3]李辉, 魏德洲. 环境影响评价的新领域——生态安全评价[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(5): 68-70.
- [4]彭月. 三峡库区(重庆)典型区县土地利用/覆被变化及其生态环境效应分析[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [5]吴晓. 三峡库区重庆东段生态安全评价研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
- [6]陈正. 中国生态环境现状的统计评价分析[J]. 统计与信息论坛, 2009, 24(3): 13-19.
- [7]李广东, 邱道持, 王平. 三峡生态脆弱区耕地非市场价值评估[J]. 地理学报, 2011, 66(4): 562-575.
- [8]姚士谋, 张平宇, 余成, 等. 中国新型城镇化理论与实践问题[J]. 地理科学, 2014, 34(6): 641-647.
- [9]李梦先. 我国西南岩溶地区石漠化发展趋势[J]. 中南林业调查规划, 2006, 25(3): 19-22.
- [10]王树文, 祁源莉, SHAHFA. 三峡工程对生态环境与生态系统的影响及政策分析模型研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 106-113.
- [11]罗文斌, 吴次芳, 吴一洲. 城市土地生态水平物元分析评价——以山东省滨州市为例[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3818-3827.
- [12]朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 等. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1379-1390.
- [13]陈俊华, 慕长龙, 陈秀明, 等. 基于物元分析的小流域土地利用结构调整及景观格局变化[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2093-2100.
- [14]张锐, 郑华伟, 刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5090-5100.
- [14]朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 等. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1379-1390.
- [15]韩直, 罗超, 陈鹏宇, 等. 基于 Vague 复合物元的运输枢纽无缝衔接综合评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 99-104.
- [16]战国会, 齐岩, 谭先林, 等. 基于物元分析-统计分析的城市公共交通枢纽站分级方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 115-120.
- [17]李中才, 刘林德, 孙玉峰, 等. 基于 PSR 方法的区域生态安全评价[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6495-6503.

-
- [18]杨志, 赵冬至, 林元烧. 基于 PSR 模型的河口生态安全评价指标体系研究[J]. 海洋环境学报, 2011, 30(1): 139-142.
- [19]杨春红, 张正栋, 田楠楠, 等. 基于 P-S-R 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209-214.
- [20]黄辉玲, 罗文斌, 吴次芳, 等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 316-322.