

基于 PSR 模型的三峡库区生态 安全评价及动态预警研究

杨光明 陈也 张帆 罗焱¹

(重庆理工大学 管理学院, 重庆 400054)

【摘要】: 城镇化与工业化高速发展造成生态环境保护与经济发展之间矛盾加剧。以长江经济带核心生态圈三峡库区作为整体研究区域, 构建基于 PSR 的库区生态安全评价指标体系, 运用层次分析法和熵值法综合评价思维, 从三峡库区自然、经济、社会和生态方面选取 19 个指标, 并计算出综合权重。通过 2000—2017 年三峡库区区域生态安全状况设计预警机制来进行评价和预警, 客观评价三峡库区生态安全状况及其变化规律, 同时对生态安全适时准确预警。研究发现, 三峡库区生态安全综合指数随时间总体呈上升趋势; 生态安全指数空间上整体良好, 全区域生态安全综合指数呈南高北低趋势, 重庆渝中区、湖北夷陵区需要警惕。

【关键词】: 生态安全评价 动态分析 三峡库区

【中图分类号】: X826 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)04-209-06

0 引言

生态安全是指一个国家或者地区能够适应社会发展需要的生态环境状态, 对社会经济发展和资源的可持续利用具有重要作用^[1]。当前社会正处于人与自然关系失衡的时代^[2], 习近平总书记指出: “加快提高生态环境质量生态环境是关系民生的重大社会问题, 是对人民健康美好生活质量的提高至关重要。”

近年来, 国内外研究者针对区域生态安全领域开展了大量研究。如: 李益敏等^[3]对云南泸水市进行生态安全评价; 罗斌等^[4]针对小流域生态进行安全评价与预测; 冯彦等^[5]根据综合指数法计算得出湖北省森林生态安全指数。在生态安全领域研究方法中, PRS 模型反映生态系统和社会系统之间的关系, 有较好使用价值^[6], 郭宇伦等^[7]运用 PSR 模型对晋城市进行土地生态安全水平评价; 王鹏等^[8]通过 PSR 模型对青铜峡市土地生态安全构建生态安全体系; 吴海萍和刘彦花^[9]运用 PSR 模型, 对广西钦州市可持续水平进行测评, 对其土地可持续发展给出理论依据。尽管区域生态安全领域对生态敏感区域的研究一直是重中之重, 但对于三峡库区这一长江经济带核心生态圈的生态评估与预测相关研究处于空白地带, 三峡库区地理位置特殊, 周期性蓄水以及大规模移民搬迁的影响, 库区生态环境较脆弱^[10], 特别是三峡水库建成蓄水后, 对库区河流生境的影响严重^[11]。三峡库区作为长江经济带极为关键的敏感生态地区^[12], 研究三峡库区生态保护和整体发展状况, 进行三峡库区生态安全适时预警对长江流域保护全局与长江经济带绿色发展至关重要。

本研究立足于三峡库区这一长江流域的核心生态圈生态安全问题, 分析了 2000—2017 年三峡库区不同区县的生态安全变化

¹作者简介: 杨光明, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为三峡流域发展。E-mail: yangguangming@cqut.edu.cn

基金项目: 国家社会科学基金“三峡库区扶贫开发、生态承载和社会治理复合系统协调发展路径研究”(16BGL122); 重庆市教育委员会人文社会科学研究项目“长江经济带生态优先、绿色发展演进轨迹和未来发展研究”(19SKGH129)

趋势。进行三峡库区动态评价，从而掌握三峡库区生态安全现状、变化趋势及三峡库区生态安全目前存在的短板，对三峡库区未来存在生态危险区域进行预警，这将为三峡库区生态保护相关政策的制定和实施提供理论依据和技术支撑。

1 研究区域

本文研究的三峡库区包括重庆属下 13 个区县(巫山县、云阳县、忠县、江津区等)和重庆主城九区，湖北属下四区县(宜昌市夷陵区、秭归县、兴山县、巴东县)。

三峡库区位于四川盆地和长江中下游平原交接地带，地势为长江南岸高处向长慢慢趋缓，涉及重庆湖北两省土地类型多样，其中多山地地形，属亚热带季风气候，气候温和降水量丰富^[13]。三峡库区为长江流域提供了丰富的水资源，是中下游地区生态屏障，同时也是中国淡水资源的重要战略储备基地^[14]。三峡大坝运行以后长江中下游流域四季平均气温出现明显变化，同时三峡大坝作为最大的水电站，为我国其他地区等提供了丰富电力，三峡库区的修建有效地促进了我国西南地区，特别是三峡库区的经济发展^[15]。从 2017 年上半年的统计数据看，三峡库区重庆段范围内，重庆市人均 GDP 为 29733.87 元，但是重点库区虽然人口比例占重庆市总人口 23%，人均 GDP 却仅为 21980.90 元，占重庆市平均水平的 75%。

2 基于 PSR 的生态安全评价体系及其权重确定

2.1 基于 PSR 的指标体系构建

PSR 概念框架即“压力—状态—响应”模型最早由联合国环境规划署和经济合作与发展组织等部门提出^[16]，现在已经成为世界认可的环境问题研究的框架体系，该模型结合数学分析有较强的科学性和可操作性，同时指标确定结合当地有极强的针对性和合理性，因此在生态安全评价领域中广为应用(图 1)。

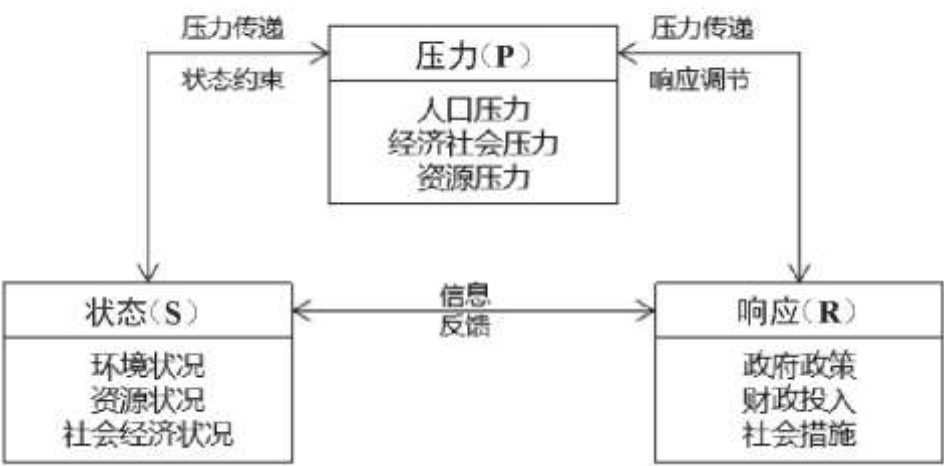


图 1 PSR 研究过程示意图

本研究根据三峡库区实际情况，结合现在世界上较为权威和全面的指标体系来构建三峡库区的生态安全评价指标体系。指标体系包括指标层、准则层和目标层。指标层为具体可度量指标，准则层由压力、状态、响应三个系统构成，目标层用来最终反映区域生态安全。本研究甄选出 19 个指标构建生态安全指标体系(表 1)。

2.2 指标归一化方法

本文评价指标为三峡库区各地级市、各年度各类数据，其量纲不同，不能够直接计算，需要把所有评价因素数据归一化，其极值范围为三峡库区各指标数据最小与最大值之间。具体操作如下。

正向指标：
$$x_{ijk} = \frac{C_{ijk} - M_{ink}}{M_{axk} - M_{ink}} \tag{1}$$

负向指标：
$$x_{ijk} = \frac{M_{axk} - C_{ijk}}{M_{axk} - M_{ink}} \tag{2}$$

式中： x_{ijk} 为 i 区县 j 年 k 指标实际值经过归一化计算之后的标准值， C_{ijk} 为该指标在没有经过归一化前的地区实际值， M_{axk} 为 k 评价指标最大值， M_{ink} 是其最小值。

2.3 指标权重确定

区域生态安全评价的重要基础是计算指标权重，其准确与否决定评价结果是否科学和可靠。

表 1 三峡库区区域生态安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标性质	指标解释
A 区域—生态—安全综合指数 (ESI)	压力 (P)	常住人口密度	-	单位面积常住人口
		社会抚养比	+	人口负担系数
		人口自然增长率	+	人口年自然增长率
		未利用土地面积比例	+	未使用土地占总土地面积
		城镇工矿用地面积比例	-	工矿用地占城镇比例
	状态 (S)	化肥施用量	-	单位土地面积化肥施用量
		农药施用量	-	单位土地面积农药施用量
		耕地面积化肥施用量	-	单位耕地面积化肥施用量
		污水排放量	-	人均污水排放量
		垃圾处置量	-	人均生活垃圾处置量
		表土损失量	-	植被减少表土损失量
		年固碳价值量	+	植被年固碳价值量
		物种丰度指数	+	生物种类数量
		服务指数	+	生态服务指数

	响应 (R)	环保投资比	+	环保投资总投资比例
		污水处理率	+	污水处理占排放污水总量占比
		生活垃圾处理率	+	垃圾处理占排放垃圾总量占比
		森林覆盖率	+	森林占土地面积比例
		建成区绿化覆盖率	+	建成区绿化面积占总面积比例

对于相关指标的确定现在世界上流行的方法有两种，一种是熵权法，它是简单直接的靠运用各指标信息量大小来计算出权重它属于客观赋权法^[17]，它的优点是可以有效减少评价主观性以及各种不确定性影响；不足之处在于基本没有考虑各个指标因素间的关系及各个指标的重要性程度，会造成于实际情况会存在较大偏差；层次分析法(AHP)是将问题分为简单的问题指标，利用专家对其重要性程度进行判断比较，得出各指标权重，是现在主流的主观赋权法之一^[18]。层次分析法(AHP)的优点是有较强的逻辑性，对指标重要程度进行强有力的解释，不足之处在于会受到评价专家的主观影响，增加其不确定性。通过对实际案例的分析发现，与传统单一方法相比，结合多指标的评估方法正确率高达 91.7%，将主、客观权重确定方法进行结合，可增强方法的适应性，在实际运用中可取得较好的效果^[19]。为建立的指标权重更符合三峡库区生态安全评估需要，本研究结合基于客观赋权法的熵值法和基于主观赋权法的层次分析法，形成最后的指标综合权重。

2.3.1 熵值法权重计算

第一步，计算第 j 个指标的熵值：

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

第二步，第 j 个指标的差异系数为：

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

式中：j=1, 2, …, p。

第三步，第 j 个指标的权重为：

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^p g_j} \quad (5)$$

式中：j=1, 2, …, p。

熵权法是运用各指标信息量大小来计算出权重，可以有效减少评价主观性以及各种不确定性影响，根据熵权法算出各指标权重得出表 2。

2.3.2 层次分析法权重计算

表 2 基于熵值法的库区 PSR 指标权重表

项目	指标名称	熵值	差异系数	权重
压力	常住人口密度	0.9949	0.0051	0.0608
	社会抚养比	0.9958	0.0042	0.0498
	人口自然增长率	0.995	0.005	0.059
	未利用土地面积比例	0.9954	0.0046	0.054
	城镇工矿用地面积比例	0.9948	0.0052	0.0616
状态	单位土地面积化肥施用量	0.9967	0.0033	0.0385
	单位土地面积农药施用量	0.9952	0.0048	0.0566
	单位耕地面积化肥施用量	0.9975	0.0025	0.0296
	人均污水排放量	0.9959	0.0042	0.0491
	人均生活垃圾处置量	0.996	0.004	0.0471
	植被减少表土损失量	0.9923	0.0077	0.0909
	植被年固碳价值量	0.9962	0.0038	0.045
	物种丰度指数	0.996	0.004	0.0467
	生态服务指数	0.994	0.006	0.0714
响应	环保投资比	0.9948	0.0052	0.061
	污水处理率	0.9977	0.0023	0.027
	生活垃圾处理率	0.9942	0.0058	0.068
	森林覆盖率	0.9955	0.0045	0.0528
	建成区绿化覆盖率	0.9974	0.0026	0.0312

层次结构是各因素相互之间关系的直接反映，由于属于决策者主观决策，决策者对其判断标准不同会导致各准则所占的比重是有一定的差异。对于部分问题所涉及的某些元素对于不同的人来说可能会有不同的理解，所有类似这样的元素，不是太容易得出准确地评价结果，甚至有可能它包含完全相反的评价。根据层次分析法算出各指标权重见表 3。

2.3.3 三峡库区生态安全 PSR 指标权重确定

本文根据区域生态安全综合指数则层的压力(P)指数、状态(S)指数和响应(R)指数结合客观评价指标和主观评价指标通过加

权综合的方法进行综合计算，库区综合指标如表 4 所示。

3 三峡库区动态生态评价与预警分析

为了区域生态安全的总体特征能够进一步的明确，本文利用自然断点法对 ESI 进行分级处理，将其指数总体分 3 个等级： $[0, 0.45]$ 为第一等级代表“不安全”； $(0.45, 0.55]$ 为第二等级代表“临界安全”； $(0.55, 1]$ 为第三等级代表“安全”。

生态安全预警是生态安全研究的重要内容^[20]预警是针对可预测的潜在危险或者危机提前发出信息警报。区域生态安全不是一成不变的，需要结合生态安全的变化趋势才能达到预期结果^[21]。本文把变化趋势和现实状况相结合，构建三峡库区生态安全预警模型，根据警情程度由高到低分为第一等“危警”、第二等“重警”、第三等“中警”、第四等“轻警”、第五等“微警”、第六等“无警”等 6 个等级其中一二等为“不安全”三四等为“临界安全”五六等为“安全”如图 2 所示。

3.1 三峡库区生态安全动态变化

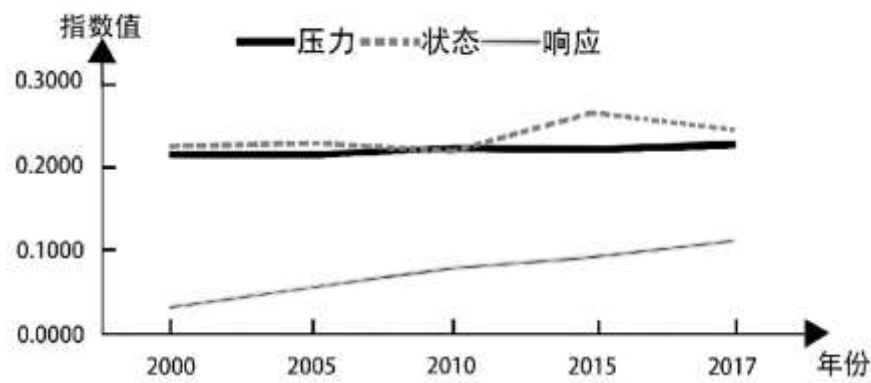


图 3 压力状态响应指数变化图

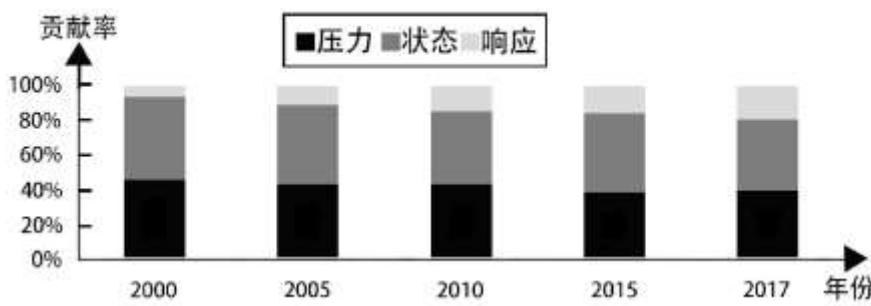


图 4 压力状态响应指数贡献率分析图

研究通过对生态安全响应指数、压力指数和状态指数进行计算，从而分析三峡库区 2000—2017 年动态变化状况(图 3～图 4)。由于指标经过归一化处理，生态安全响应、压力、状态指数均位于 0~1 之内，其数值越小表明压力越大、状态和响应越差。

三峡库区生态安全压力指数(P)，由 2000 年的 0.2129 小幅上升至 2017 年的 0.2253，趋势平缓。三峡库区生态安全状态指

数(S)，2000年的0.2218上升为2017年的0.2411，上升趋势明显，整体上升幅度达到8%以上。趋势具有阶段性，2010年以前较为平稳，2010年以后变化幅度相对较大，在于社会的进步人类的举动对生态的变化造成的影响进一步加强，生态安全响应指数(R)也由从2000年的0.0318上升到2017年的0.109，特别是2010年以后生态安全响应指数有着破0.1的趋势，2017年已经突破0.1，生态安全压力指数和状态指数都呈现两个不同趋势，生命安全响应指数呈现单一上升趋势。

2010年后生态安全压力指数大幅度提升，2000年生态安全响应指数比例仅占6%，到2005年生态安全响应指数占比为11%，上升了83%，该阶段重庆市为落实《全国生态环境保护纲要》的要求，在2001年编制的《重庆市三峡库区水污染防治规划》中提出了“重要生态功能保护区工程”等项目。2000—2005年年底重庆已投入343亿元人民币，用于三峡库区生态环境的保护与建设。2005年生态安全效应指数贡献率占比继续突飞猛进，在于中央政府和地方政府对三峡库区的大力扶持与政策制度，国务院批复《全国对口支援三峡库区合作规划(2014—2020年)》，要求加强生态环境保护和治理。对生态采取的弥补措施在贡献中取得的成就逐步显现，随着重庆旅游大都市，三峡流域经济结构的转变，中央政府对该区域的生态环境越来越重视，生态安全指数大幅度提升。

表3 基于AHP法的库区PSR指标权重表

一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重	综合权重
压力	0.5396	常住人口密度	0.4353			0.235
		社会抚养比	0.253			0.137
		人口自然增长率	0.1292			0.07
		未利用土地面积比例	0.1137			0.061
		城镇工矿用地面积比例	0.0688			0.037
状态	0.297	农业非点源污染潜力	0.4209	单位土地面积化肥施用量	0.5584	0.07
				单位土地面积农药施用量	0.3196	0.04
				单位耕地面积化肥施用量	0.122	0.015
		人均负荷指数	0.2154	人均污水排放量	0.6667	0.043
				人均生活垃圾处置量	0.3333	0.021
		植被减少表土损失量	0.1335			0.04
		植被年固碳价值量	0.1171			0.035
		物种丰度指数	0.0697			0.021
		生态服务指数	0.0435			0.012
响应	0.1634	环保投资比	0.4814			0.079
		环境治理指数	0.22	污水处理率	0.75	0.027
				生活垃圾处理率	0.25	0.009

		森林覆盖率	0.1678			0.027
		建成区绿化覆盖率	0.1307			0.021

表 4 三峡库区生态安全 PSR 综合权重表

指标名称	指标权重		
	熵值法	层次分析法	综合权重
常住人口密度	0.061	0.235	0.148
社会抚养比	0.050	0.137	0.093
人口自然增长率	0.059	0.070	0.064
未利用土地面积比例	0.054	0.061	0.058
城镇工矿用地面积比例	0.062	0.037	0.049
单位土地面积化肥施用量	0.039	0.070	0.054
单位土地面积农药施用量	0.057	0.040	0.048
单位耕地面积化肥施用量	0.030	0.015	0.022
人均污水排放量	0.049	0.043	0.046
人均生活垃圾处置量	0.047	0.021	0.034
植被减少表土损失量	0.091	0.040	0.065
植被年固碳价值量	0.045	0.035	0.040
物种丰度指数	0.047	0.021	0.034
生态服务指数	0.071	0.013	0.042
环保投资比	0.061	0.079	0.070
污水处理率	0.027	0.027	0.027
生活垃圾处理率	0.068	0.009	0.038
森林覆盖率	0.053	0.027	0.040
建成区绿化覆盖率	0.031	0.021	0.026

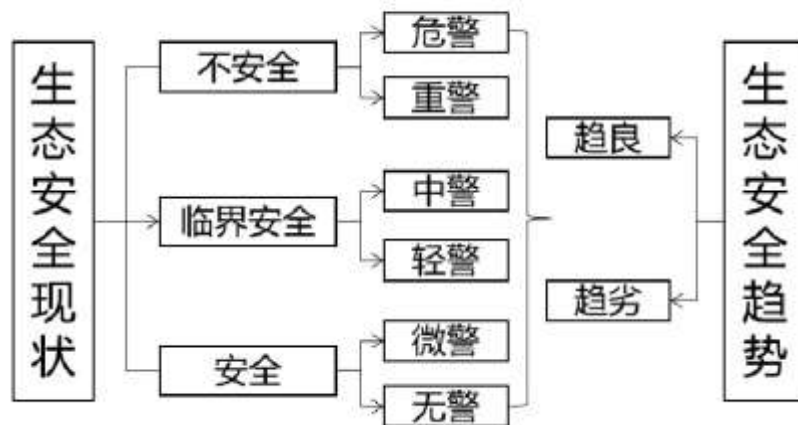


图2 区域生态安全预警模型

3.2 三峡库区生态安全空间分布演变

2005—2017 年三峡库区各区县生态安全等级从整体看来，三峡库区生态安全等级呈现南高北低、西高东低趋势。重庆主城区北碚区、巴南区其他区县中武隆区、巫山县、石柱县生态安全状况良好，且有明显提升。根据三峡库区区域规划，该区域原始生态良好其中巴南区主打生态旅游，北培野外森林旅游，武隆区、巫山县是著名旅游发展区县。这些区域原始植被水系等生态系统保护较为完整，同时重点打造生态区，生态保护效果良好。随着生态补偿、旅游产业发展相关政策相继实施，该区域生态安全状况提升显著。渝中区大渡口区属三峡流域重要的经济集聚区和人口密集区，工业产业规模较大，随着产业结构优化升级和重污染重工业的搬迁，同时对生态环境的重视程度提升，生态安全状况有所好转。重庆主城其他地区生态安全状况中等，均有较大提升，该区域发展中等，生态环境本和经济社会发展差异较大，随着对生态重视生态安全状况得到较大提升。沙坪坝区和南岸区，2017 年均上升为安全，湖北 4 区县发展起伏比较大，相对重庆主城属于经济欠发达，经济方向不是主打生态旅游，生态农业等生态经济，宜昌是三峡大坝的修建地，生态变化趋势幅度大，三峡大坝的修建对生态的破坏和政府生态投入的付出一直在拉锯中，到 2015 年上升之后，2017 年又稍微下降，政府需要注重该地方的持续发展。

3.3 三峡库区生态安全预警评价

本文生态安全现状指标为 2017 年三峡库区各区县生态安全综合指数。与此同时对 2000—2017 年三峡库区生态安全综合指数做线性回归，依靠斜率判断其变化趋势。最终得到三峡库区预警情况(表 5)。三峡库区区县中处于轻警—无警区的占绝对比例，总体来说经过大力政策支持下三峡库区生态安全安全性较高。重庆地区，除渝中区外危险性均较低。湖北地区情况较为复杂，巴东，秭归属于轻警—无警区，兴山和夷陵危险性较高。

4 结论与政策建议

本研究利用 PSR 建立三峡库区生态安全模型通过生态安全预警与评价，结论如下：

表 5 2017 三峡库区生态等级及预警等级表

区县	所属地区	2017ESI	生态安全等级	变化趋势	预警等级
----	------	---------	--------	------	------

万州区	重庆	0.571	安全	变优	无警
涪陵区	重庆	0.583	安全	变优	无警
渝中区	重庆	0.454	临界安全	变劣	中警
大渡口区	重庆	0.551	安全	变优	无警
江北区	重庆	0.558	安全	变优	无警
沙坪坝区	重庆	0.558	安全	变优	无警
九龙坡区	重庆	0.556	安全	变优	无警
南岸区	重庆	0.562	安全	变优	无警
北碚区	重庆	0.573	安全	变优	无警
渝北区	重庆	0.566	安全	变劣	轻警
巴南区	重庆	0.562	安全	变劣	轻警
长寿区	重庆	0.577	安全	变优	无警
丰都县	重庆	0.591	安全	变优	无警
武隆区	重庆	0.640	安全	变优	无警
忠县	重庆	0.607	安全	变优	无警
开县	重庆	0.572	安全	变劣	轻警
云阳县	重庆	0.577	安全	变优	无警
奉节县	重庆	0.619	安全	变优	无警
巫山县	重庆	0.674	安全	变优	无警
巫溪县	重庆	0.602	安全	变劣	轻警
石柱	重庆	0.620	安全	变优	无警
江津区	重庆	0.592	安全	变优	无警
巴东	湖北	0.560	安全	变优	无警
兴山	湖北	0.536	临界安全	变优	微警
秭归县	湖北	0.568	安全	变劣	轻警
夷陵区	湖北	0.541	临界安全	变劣	中警

(1) 三峡库区生态安全压力指数(P)从2000年的0.2129到2017年的0.2253幅度有小幅提升,幅度趋势平缓,总体变化平稳上升。三峡库区生态安全状态指数(S),2000年的0.2218上升为2017年的0.2411,整体上升幅度达到8%以上,上升趋势明

显具有阶段性，2010 年以前较为平稳，2010 年以后变化幅度变大，源于人类对生态的影响力度变大。生态安全响应指数(R)也由从 2000 年的 0.0318 上升到 2017 的 0.109，生态安全压力与响应指数存在两个趋势，整体来看呈现上升趋势，响应指数呈现单一上升的趋势，生态安全响应指数贡献率在压力状态响应指数贡献率中占比越来越大。

全区域生态安全综合指数呈南高北低趋势。2005—2017 年三峡库区各区县生态安全从整体看来，呈现南高北低、西高东低趋势。其中北碚区、渝北区、巴南区、长寿区、丰都县生态安全状况最好，且提升明显。三峡库区区县中处于轻警一无警区的占绝对比例南部地区预警等级相对较低，政府对生态的投入与自然本身的恢复力能够抵抗对环境的胁迫。虽然中心的渝中等经济发达人口密集生态安全现状较差但有着明显上升趋势，随着政府对生态的重视及其大力的建设，三峡库区自然生态环境已恢复到安全、可持续的稳定状态。

重庆整体状态良好，东北部与西北部分区县地区生态系统呈现稍微不安全状态，属于有风险区域湖北夷陵也面临较大风险。这些区域要大力发展经济同时注意环境保护和生态投入，重点提高资源利用效率，减少生态污染排放，改善生态环境，建立好生态安全风险防范体系，减轻库区沿线生态环境负担。主城区要以生态环境保护优先，点状发展适当集聚，优化产业结构，实现产业升级，控制产业和资源开发不能超过生态安全环境容量，提高资源利用率减少对自然环境过度开发。对于渝东南地区要加强生态种植，减少人地矛盾。同时，三峡库区整体需要加大科技资金投入，建立生态环境智能化预警监测平台加大对生态安全的管理，促进人地和谐发展。

为了提高三峡库区整体生态安全水平，实现三峡库区生态经济可持续发展，为三峡库区的发展三峡库区可采取以下的措施。

首先是需要构建一个覆盖三峡库区的生态安全监测数据库、和技术平台，这个数据库和平台可以进行生态定期评估与实时监测，三峡库区要依据生态安全监测评价结果及时调整大政方针和开展相关措施完善三峡库区的生态保护体系。

其次是根据三峡库区各区县影响生态安全的关键因子入手，着力解决区县特有的突出环境问题。例如：发达的重庆主城渝中区地区可以根据强度控制，针对渝中区的污染物排放和生产资源利用率进行控制从而减轻对渝中区生态系统的压力；对于夷陵区此类欠发达的区县可以从加强总量控制，首先需要整体的提升区县的资源环境状态，优先考虑支持性配套政策，政府加大对它的生态保护投入与补偿、生态投入政策优先落地及推广；对于依靠资源的区县加快产业结构转变与发展方式转型，需要针对这一类区县接续替代产业和绿色产业，重视生态环境问题治理。

在此时完善区域评价体系，改变之前主要考核经济的传统模式。新的考核体系需要将生态安全的绩效考核评价体系考虑进去，同时绩效考核需要根据新的体系将生态安全预警评价结论纳入其中，三峡库区的法制建设也是重中之重是各个保护措施的法律保障，想要避免出现中空地带让整个三峡库区长治久安，必须有完善的法律来保障和约束。这需要建立健全三峡库区相关机构和它的需要的开发及管理的法制建设，对于两省结合的三峡库区以完备的立法执法、司法监督体系依法保护开发三峡库区和依法打击威胁三峡库区生态安全的行为。

鉴于数据的可获得性，本研究以三峡库区区县为评价个体，以 2000—2017 年为评价时间，根据三峡库区经济发展的总体思路，必将三峡库区建设成为经济繁荣、环境优美的生态家园，使之成为长江上游国民经济可持续发展的重要支撑。

参考文献:

- [1]陈蓓. 基于生态足迹模型的川西南高原地区生态安全评价——以甘孜藏族自治州为例[J]. 中国农业资源与区划, 2019(6): 185-190.
- [2]李沛莉, 张金伟. 生态危机中的人性反思和生态经济人的理论构建[J]. 生态经济, 2018(9): 219-223.

-
- [3]李益敏, 谢亚亚, 刘雪斌, 等. 基于 GIS 的云南泸水市生态安全评价[J]. 人民长江, 2019(6): 56-62.
- [4]罗斌, 杨雄, 何毅. 基于耦合赋权法与灰色关联法在小流域生态安全评价中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020(1): 7-12.
- [5]冯彦, 郑洁, 祝凌云, 等. 基于 PSR 模型的湖北省县域森林生态安全评价及时空演变[J]. 经济地理, 2017(2): 171-178.
- [6]许月卿, 赵菲菲, 孙丕苓. 生态脆弱区土地生态安全动态评价——以河北省张家口市为例[J]. 水土保持通报, 2015(5): 232-238.
- [7]郭宇伦, 师学义, 璩路路, 等. 基于 PSR-CPM 模型的市域土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2017(4): 108-112.
- [8]王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于 PSR 模型的青铜峡市土地生态安全评价与预测[J]. 水土保持通报, 2018(2): 148-153, 159.
- [9]吴海萍, 刘彦花. 基于 PSR 模型的区域土地利用可持续水平测度[J]. 水土保持通报, 2018(1): 270-275.
- [10]王海云. 三峡库区农业面源污染现状及控制对策研究[J]. 人民长江, 2005(11): 12-14.
- [11]Maddock I. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 7373-7391.
- [12]余世勇. 三峡库区生态与经济同步建设的难点及对策[J]. 生态经济, 2012(6): 64-66.
- [13]马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015(21): 7117-7129.
- [14]张旭辉, 陈小龙, 郑阳华. 加强污染防治确保三峡库区水环境安全[J]. 环境保护, 2011(20): 40-42.
- [15]葛非凡, 毛克彪, 蒋跃林, 等. 三峡大坝运行后长江中下游流域气温与植被变化特征及原因分析[J]. 气候变化研究进展, 2017(6): 578-588.
- [16]何月峰, 沈海萍, 冯晓飞, 等. 基于压力—状态—响应模型和“五水共治”决策的浙江省水环境安全评价[J]. 水资源保护, 2016(6): 104-109, 122.
- [17]郭秀英. 区间数指标权重确定的熵值法改进[J]. 统计与决策, 2012(17): 32-34.
- [18]张乐, 曹爽, 李士雪, 等. 层次分析法的改进及其在权重确定中的应用[J]. 中国卫生统计, 2016(1): 154-155.
- [19]吴坚, 梁昌勇, 李文年. 基于主观与客观集成的属性权重求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007(3): 383-387.
- [20]赵宏波, 马延吉. 基于变权—物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究——以吉林省为例[J]. 生态学报, 2014(16): 4720-4733.

[21]岳德鹏, 于强, 张启斌, 等. 区域生态安全格局优化研究进展[J]. 农业机械学报, 2017(2): 1-10.