基于灰色关联理论的三峡库区 2015—2019 年生态安全时空演变特征研究

杨光明[1,2], 桂青青[1,2], 陈 也[1,2], 罗 垚[1,2], 杨芸瑞[1,2]

(1.重庆理工大学 管理学院, 重庆 400054; 2.重庆理工大学 乡村振兴与区域高质量发展研究中心, 重庆 400054)

摘 要: [目的] 研究三峡库区生态安全变化趋势与影响因素,为推动三峡库区生态安全发展提供科学依据。[方法] 基于压力—状态—响应模型(PSR)建立生态安全指标体系,采用熵值法、层次分析法对 2015—2019 年的生态安全状况做出评价。利用灰色系统理论,构建了灰色关联度的评价模型,并根据三峡库区 2015—2019 年数据,定量评价该区生态安全动态变化情况,并采用灰色聚类法加以验证。[结果] ①2015—2019 年库区生态安全关联度较高,单位土地面积农药施用量、植被减少表土损失量、生态服务指数、环保投资比等的关联度均高于 0.7。②2015—2019 年库区生态安全部分地区综合评价指数呈上升趋势,部分地区综合评价指数略有下降。③三峡库区的 PSR 指数集聚特征随时间变化并不明显,H-H 集聚区主要集中于主城区,符合经济发展一般规律;L-L 集聚区主要集中于边缘地区的夷陵、秭归等区县;L-H 和 H-L 集聚区主要集中分布于 L-L 以及 H-H 集聚区的周边区县。[结论] 三峡库区的生态安全受部分指标影响显著,应从影响指标入手推进三峡库区生态安全建设,且三峡库区的区县之间存在较大差异。因此,充分发挥部分区县的带动作用是建成三峡库区生态安全的关键。

关键词: 三峡库区; PSR 模型; 生态安全; 灰色关联度

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2021)05-0348-09 **中图分类号:** X171.1, TV697

文献参数: 杨光明, 桂青青, 陈也, 等.基于灰色关联理论的三峡库区 2015—2019 年生态安全时空演变特征研究[J].水土保持通报,2021,41(5):348-356.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.044; Yang Guangming, Gui Qingqing, Chen Ye, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of ecological security in Three Gorges Reservoir area during 2015—2019 based on grey relational theory [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(5):348-356.

Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Ecological Security in Three Gorges Reservoir Area During 2015—2019 Based on Grey Relational Theory

Yang Guangming[1,2], Gui Qingqing[1,2], Chen Ye[1,2], Luo Yao[1,2], Yang Yunrui[1,2]

(1.*Management College, Chongqing University of Technology, Chongqing* 400054, *China*; 2.*Research Center of Rural Revitalization and Regional High Quality Development, Chongqing University of Technology, Chongqing* 400054, *China*)

Abstract: [Objective] The trend and influencing factors of ecological security in the Three Gorges Reservoir area were studied in order to provide a scientific basis for promoting the development of ecological security in this area. [Methods] Based on pressure-status-response (PSR) model, an ecological security index system was established, and the ecological security status during 2015—2019 was evaluated by the entropy method and the analytic hierarchy process. According to data from the Three Gorges Reservoir area during 2015—2019, the dynamic changes of ecological security in this area were revealed by quantitative evaluation, and verification was performed using the grey clustering method. [Results] ① From 2015 to 2019, the correlation degree of ecological security in the reservoir area was greater than 0.7 for factors such as the application

收稿日期: 2021-04-08 **修回日期:** 2021-05-26

资助项目: 国家社会科学基金重点项目"长江经济带生态保护和高质量发展的非协调性耦合识别与协同机制创新研究"(20AJY005); 重庆市教委科技项目(KJQN201904002); 重庆市教育委员会人文社会科学研究项目(19SKGH129); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201901143)

第一作者: 杨光明(1987—),男(汉族),重庆市奉节县人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事战略管理研究和流域生态安全研究。Email:1178595825@qq.com。

通讯作者: 桂青青(1998—),女(汉族),安徽省凤台县人,硕士研究生,研究方向为战略管理研究和流域生态安全研究。Email:17355937087@163.com。

amount of pesticides per unit land area, the amount of topsoil loss caused by vegetation reduction, the ecological service index, and the environmental protection investment ratio. ② From 2015 to 2019, the comprehensive evaluation index of ecological security in some areas of the reservoir area showed an upward trend, while the comprehensive evaluation index of some areas decreased slightly. ③ The agglomeration characteristics of the PSR index in the Three Gorges Reservoir area did not change significantly with time. The high-high agglomeration area was mainly concentrated in the main urban area, which was in line with the general law of economic development. The low-low agglomeration areas were mainly concentrated in Yiling, Zigui, and other counties in the marginal areas. The low-high and high-low agglomeration areas were mainly distributed in the counties surrounding the low-low and high-high agglomeration areas. [Conclusion] The ecological security of the Three Gorges Reservoir area was significantly affected by some indicators. Ecological security construction of the Three Gorges Reservoir area should be promoted based on the important impact factors, and there are great differences between the districts and counties in the Three Gorges Reservoir area. Giving full attention and consideration to the leading role of some districts and counties is the key to the construction of an ecological security system in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; PSR model; ecological safety; grey correlation degree

生态环境是人类赖以栖息的地方,但人们为了满足自身物质财富和精神财富的需求,过度消耗有限资源,生态环境问题日益突出,唤醒了人类的环境意识,绿色运动和绿色消费席卷全球,由此可持续发展思想孕育而生。在将生态文明建设融入到经济建设的过程中,要按照尊重自然、顺应自然、保护自然的理念。人们需要树立保护生态环境的观念,实现人与自然和谐相处的局面,同时建立健全生态补偿机制,坚持“谁受益,谁买单”的原则,保护生态环境。随着工业化以及城市化的发展、水资源污染、土地资源的开发、人口规模的不断扩大,生态系统承受着巨大的压力,同时存在许多潜在的威胁。因此需要探讨人类活动于生态系统之间的关联,对于改善生态环境,提高人类生活水平具有重大意义[1]。

生态安全问题一直受到各方的重视,学者们纷纷从各种角度,针对各项指标进行探讨。以各种生态系统为对象,探讨不同尺度下的生态安全评价。从不同的研究层面出发,采用各种模型、评价方法、研究工具对生态安全系统展开研究。国外学者主要将研究重点集中于生态安全评价模型的构建。1990 年联合国环境规划署与经济合作与发展组织提出 PSR 模型,在 PSR 的基础上国外学者和相关组织又陆续提出“驱动力—状态—响应(DSR)”模型、“驱动力—压力—状态—暴露—响应(DPSEA)”模型、“驱动力—压力—状态—响应—影响(DPSIR)”模型。当前国内研究中常用的方法有景观生态学模型法[2]、3S 技术[3]、数学模型法等[4-5]。也有学者运用 GIS 和 GS 技术[6-7],结合改进的“TOPSIS”模型[8-9]对于土地生态安全进行深入的研究。目前众多学者使用 GIS 技术[10-12]、TOPSIS 模型[13]、PSR 模型[14]、DPSIR 模型等[15]以三峡库区或者库区内某区县为研究对象对于三峡库区的水生态安全[16]、土地生态安全[12]、森林生态系统[17]以及耕地质量等进行研究。但是,目前对于三峡库区整个生态系统的研究不多,并没有学者使用灰色关联法对三峡库区的生态安全进行研究。

本文选用生态安全研究方法中的灰色关联度法,基于 PSR 模型,构建 3 个层次,19 个指标的三峡库区生态安全评价指标,使用熵值法和层次分析法的平均值对各指标赋值,结合灰色关联度法对三峡库区生态安全进行关联度分析,探索要素与系统之间的关联程度,辨识各个指标对生态系统的影响程度。

1　研究区概况

三峡库区是指受长江三峡工程淹没的地区,并有移民任务的 20 个县(市)。它包含了长江流域因三峡水电站的修建而被淹没的湖北省宜昌市所辖的秭归县、兴山县、夷陵区,恩施州所辖的巴东县;重庆市所辖的巫山县、巫溪县、奉节县、云阳县、开县、万州区、忠县、涪陵区、丰都县、武隆县、石柱县、长寿区、巴南区、渝北区、江津区及重庆核心城区。库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合部,跨越鄂中山区峡谷及川东岭谷地带,北屏大巴山、南依川鄂高原。为建设三峡工程,中国政府进行了三峡大移民。

三峡工程是世界上最大的水利水电工程,也是历史上规模最大的移民工程,目前对三峡库区的自然、生态和生存环境造成了重大的影响。近年来,库区不断加强环境保护和生态文明建设,积极开展生态综合治理工程,但是,库区的生态环境仍存在很大的问题,

库区总人口 3 000 多，其中移民人数不少于 1.20×10^6 人，三峡水库的淹没造成库区土地资源的较少，增大了人口对土地的压力。三峡库区的耕地资源以旱坡地为主且质量差，库区 78.70%的坡耕地土壤为紫色土，具有易风化易侵蚀等特点，因而肥力下降，因此需要增大化肥农药等的使用。三峡库区水污染严重，整个三峡库区城市江段中，水质受污水影响的江段总长为 28.97 km，生活垃圾量大，大量污染物汇入江河，造成三峡严重的水污染；由于多年来的破坏性垦荒，乡镇企业的无序发展以及新城区的开发建设，使得森林覆盖率低，城市人均绿地少，但通过推进长江生态环境保护项目，植树造林等措施，截止 2018 年，森林覆盖率达到 50.2%。三峡工程对于中国加快经济建设以及提高综合实力具有重要的意义，另一方面三峡工程对三峡库区以及长江流域的生态环境产生了巨大影响。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

系统的数据来源于 2015—2017 年的《重庆市统计年鉴》《湖北省统计年鉴》、重庆市和湖北省国民经济和社会发展统计公报、重庆市和湖北省旅游统计公报以及重庆市和湖北省环境质量公报。

2.2 研究框架-PSR 模型

PSR(pressure-state-response)，即压力，状态，响应。PSR 模型在环境质量评价中是一种很常用的模型，PSR 模型体现了人类活动与生态环境之间的相互作用。由于三峡库区人类活动造成的污染，引起各种环境指标下降，随着环境质量下降，大自然给予人类活动的资源逐渐减少从而影响人类经济活动和福利，有关部门针对环境状况作出响应，如此构成了三峡库区的“压力—状态—响应”循环(图 1)[18]。

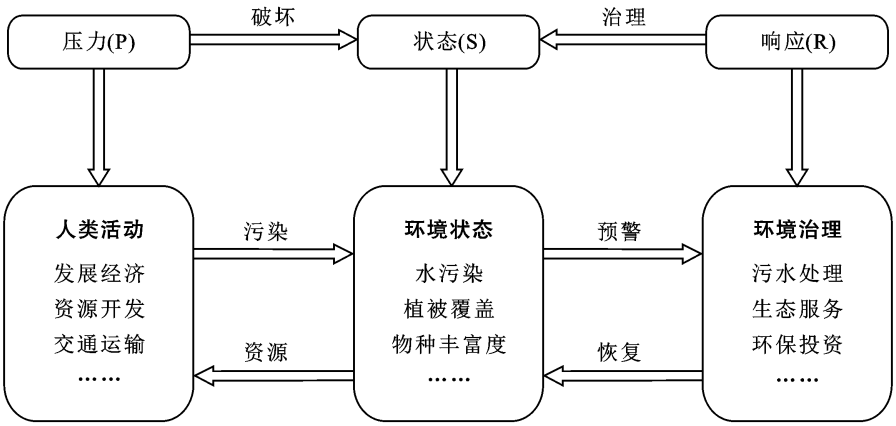


图 1 基于 PSR 模型生态安全分析框架

在该框架体系中，对于人类活动的压力指标造成的状态指标的变化，生态系统服务管理部门则通过响应采取措施缓解压力，因此构成了压力—状态—响应多因素对生态系统破坏、治理、恢复及反馈的全过程。其中，压力指标表征人类各种经济活动对环境状态的作用，如发展经济、资源开发、交通运输等对环境的破坏；状态指标表征的是一定时间内的环境状态、环境变化情况，包括生态系统的现状，人类健康与生活质量；响应指标表征社会、政府和个人采取行动来解决、减轻、避免和预防人类活动带来的负面影响。通过构建人与自然相互作用模型进行生态安全评价，即人们通过发展经济，开发资源来促进国家经济发展，进而提高自己的生活水平，因此生态系统需要承担由于人类各种经济活动带来的压力，政府对于环境状态发出的预警进行环境治理，环境状态得到恢复后将继续为人类的活动提供资源。

2.3 指标体系构建

为了真实而又全面的反映三峡库区生态安全，笔者本着科学、实用以及数据准确性与可收集性原则，从生态系统中选取 3 个方面(压力、状态、响应)共 19 个指标(X_1—X_{19})(表 1)。在压力方面，从人口压力入手选取指标常用人口密度(X_1)、社会抚养比(X_2)、人口自然增长率(X_3)；从环境压力入手选取指标未利用土地面积比例(X_4)、城镇工矿用地面积比例(X_5)。在状态方面，环境状态中选取指标单位土地面积化肥施用量(X_6)、单位土地面积农药施用量(X_7)、单位耕地面积化肥施用量(X_8)、人均污水排放量(X_9)、人均生活垃圾处置量(X_{10})、植被减少表土损失量(X_{11})、植被年固碳价值量(X_{12})；资源状态中选取指标物种丰富指数(X_{13})、生态服务指数(X_{14})。在响应方面，政策响应中选取指标环保投资比(X_{15})；社会响应中选取指标污水处理率(X_{16})、生活垃圾处理率(X_{17})、森林覆盖率(X_{18})、建成区绿化覆盖率(X_{19})。

表 1　三峡库区生态安全系统指标体系

系统	要素	评价指标	指标性质	熵权法	AHP 法	综合权重
生态系统	压力	X_1 常住人口密度/(人·km^{-2})	负	0.005	0.235	0.120
		X_2 社会抚养比/%	负	0.072	0.137	0.105
		X_3 人口自然增长率/‰	正	0.017	0.070	0.044
		X_4 未利用土地面积比例/%	正	0.111	0.061	0.086
		X_5 城镇工矿用地面积比例/%	负	0.004	0.037	0.021
		X_6 单位土地面积化肥施用量/(kg·hm^{-2})	负	0.006	0.070	0.038
		X_7 单位土地面积农药施用量/(kg·hm^{-2})	负	0.006	0.040	0.023
		X_8 单位耕地面积化肥施用量/(kg·hm^{-2})	负	0.004	0.015	0.010
	状态	X_9 人均污水排放量(t/人)	负	0.004	0.043	0.024
		X_{10} 人均生活垃圾处置量(t/人)	负	0.004	0.021	0.013
		X_{11} 植被减少表土损失量/hm^2	负	0.009	0.040	0.025
		X_{12} 植被年固碳价值量/(10^8 元·a^{-1})	正	0.100	0.035	0.068
		X_{13} 物种丰富指数	正	0.049	0.021	0.035
		X_{14} 生态服务指数	正	0.014	0.013	0.014
	响应	X_{15} 环保投资比/%	正	0.025	0.079	0.052
		X_{16} 污水处理率/%	正	0.095	0.027	0.061
		X_{17} 生活垃圾处理率/%	正	0.115	0.009	0.062
		X_{18} 森林覆盖率/%	正	0.073	0.027	0.050
		X_{19} 建成区绿化覆盖率/%	正	0.064	0.021	0.043

(1) 压力因子。压力源于社会经济发展对资源环境的胁迫与影响,其中,常住人口密度表示对生态环境造成的人口压力;社会抚养比和人口自然增长率表示人口增长和非劳动人口对于生态环境的正效应;城镇工矿用地表征城市化与工业化驱动带来的生态安全系统的压力;未利用土地面积无疑有益于生态系统的保护。

(2) 状态因子。状态表征生态环境的现实状态,其中,单位土地面积化肥、农药施用量以及单位耕地面积化肥施用量表示土地的开发利用对生态系统污染状态;人均污水排放量表征水资源消耗状态;人均生活垃圾处理量表示人类活动对土地的污染、占用状态;植被减少表土损失量表征生态环境系统土地流失状态;植被年固碳价值量表征生态系统气候调节等功能的状态;物种丰富指数衡量生态系统持物功能状态;生态服务指数表征生态系统提供所有惠益。

(3) 响应因子。响应则体现对生态环境状态的应对水平,其中,环保投资比和生活垃圾处理率衡量环境治理响应;污水处理率衡量节约资源控制污染响应;森林覆盖率表示地理环境治理响应;建成区绿化覆盖率表示城市建成区的绿化对恢复、改善生态环境的所采取的行动。

(4) 指标权重的确定。权重反映的是各个指标在指标体系中的重要程度,从整体目标的优化出发进行合理地权重分配,反映各个指标的重要程度。本研究基于客观赋权法的熵值法[19]和层次分析法[20],从而形成最后的指标综合权重。其中,熵值法自被提出以来,被广泛应用于许多领域的评价。熵值法在确定索引权重时有以下优点:①结果更直观、更易于理解,方法更实用;②避免主观因素的干扰,具有较强的客观性;③熵权法不限指标数量,具有广泛的应用。由于熵值法较为成熟,本文对于具体计算步骤不做赘述。

层次分析法具有以下优点:①它将定性和定量方法结合起来,使人们的思维过程具有数学和系统性,便于人们接受;②AHP 各级因子对结果的影响是定量的,非常明确;③基于评价者对评价本质和要素的理解,与一般的定量方法相比,更重视质的分析和判断。为了使权重更合理,本文将取 AHP 的权值和熵权值的平均值作为综合权重值(表 1)。

基于综合权重所得不同指标的权重,建立生态安全系统综合评价函数:利用加权法计算第 i 年的生态安全情况。

$$f(x)=\sum_{j=1}^{m} w_j x_{ij} \tag{1}$$

式中:$f(x)$是生态安全系统综合评价指数;x_{ij}是生态安全第 i 年第 j 个指标的无量纲值;得出的数值结果越大,表明生态安全的质量越好,反之则越差。

2.4　空间探索性研究方法(ESDA)

ESDA 是探索研究区各指标的空间分布格局与相互作用机理的一种空间分析方法,主要分为全局自相关与局部自相关两种。其中用全局自相关

(Moran's I)探索三峡库区生态安全发展水平的整体关联特征,用局部自相关(LISA 指数)探究三峡库区生态安全研究单元与相邻区县之间的关联特征。

2.5 灰色关联分析

灰色关联分析法是测量由指标和系统之间随着时间或对象变化的因素之间的相关性。其基本原理通过对一般动态过程发展趋势的定量分析,以及统计有序列几何关系的比较,以区分系统密度程度各种因素之间的紧密程度。在系统的发展过程中,如果两个要素的变化趋势是一致的,可以说这两个要素之间的相关性是非常高的;反之,则较低。由于该方法不过分要求样本的数量,易于操作,在研究领域广泛用于医学、畜牧、航空航天和其他主要用途。本研究运用其对三峡库区生态安全影响因素进行分析,具有一定的准确性和科学性,通过灰色关联系数和关联度的公式[21]分别计算出各个指标与三峡库区生态安全之间的灰色关联度。

本文根据研究区域近年的生态环境状况,在参考郑华伟等[22]、孟展等[23]的研究基础上,本文将灰色关联度的取值范围确定在 0～1 之间,并划分为 5 个等级(表 2)。若灰色关联度的值越趋近于 1 说明关联性越大,耦合作用也越强。

表 2 灰色关联度的类型及等级划分

关联度 $R_{m,n}$	0.00～0.35	0.35～0.45	0.45～0.65	0.65～0.85	0.85～1.00
类 型	较低关联	低关联	中等关联	高关联	极高关联
等 级	耦合作用极弱	耦合作用弱	耦合作用中等	耦合作用较强	耦合作用极强

3 三峡库区生态安全关联度、PSR 测算分析

3.1 PSR 测算分析

运用 PSR 模型对三峡库区环境的压力、状态、响应指标进行测算分析得出研究区内各区县生态安全综合评价指数(表 3)。

研究期内三峡库区生态安全综合得分均值从 2015 年的 0.369 7 增加到 2019 年的 0.383 1,年均增加 0.003 4。三峡库区生态安全水平总体呈稳步上升趋势。由此可知,三峡库区在城市化工业化等高强度土地利用经济活动中对生态环境造成的威胁,但随着生态文明建设的不断推进,总体的生态环境保护水平在逐渐提升优化。从各个地区来看,涪陵区、主城区、长寿区、武隆县、云阳县、奉节县、巫山县、江津市、巴东的生态安全评价指数呈上升趋势;而万州区、丰都县、忠县、开县、巫溪县、石柱、兴山、秭归县、夷陵区的生态安全评价指数略有下降,这说明城市之间没有实现均衡发展。在各区县中,主城区、巫山县、奉节县的生态安全综合得分较高,可见经济发展与生态环境关系密切。

表 3 2015—2019 年三峡库区生态安全综合评价指数

地 区	生态安全综合评价指数					
	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	年均值
万州区	0.338 5	0.341 4	0.336 7	0.338 2	0.337 8	0.338 5
涪陵区	0.337 8	0.358 9	0.374 5	0.414 8	0.450 5	0.387 3
主城区	0.446 8	0.460 6	0.453 8	0.467 8	0.479 8	0.461 8
长寿区	0.363 6	0.373 4	0.395 5	0.407 4	0.415 8	0.391 1
丰都县	0.359 9	0.347 8	0.352 5	0.363 2	0.351 3	0.354 9
武隆县	0.419 3	0.464 8	0.471 5	0.470 5	0.461 8	0.457 6
忠 县	0.399 2	0.382 4	0.373 3	0.372 5	0.358 6	0.377 2
开 县	0.375 0	0.382 5	0.348 7	0.365 1	0.360 4	0.366 3
云阳县	0.350 8	0.354 9	0.345 2	0.365 9	0.361 9	0.355 7
奉节县	0.361 0	0.426 8	0.444 6	0.462 1	0.452 9	0.429 5
巫山县	0.473 5	0.497 1	0.489 5	0.503 4	0.481 2	0.488 9
巫溪县	0.382 6	0.390 7	0.376 7	0.358 1	0.357 4	0.373 1
石柱县	0.388 8	0.3884	0.379 5	0.370 1	0.344 5	0.374 3
江津市	0.342 1	0.377 2	0.387 5	0.400 9	0.392 4	0.380 0
巴东县	0.254 7	0.298 7	0.346 2	0.386 8	0.386 1	0.334 5
兴山县	0.340 8	0.308 8	0.292 7	0.297 9	0.279 0	0.303 8
秭归县	0.371 4	0.354 5	0.329 2	0.335 4	0.304 1	0.338 9
夷陵区	0.343 1	0.320 4	0.290 0	0.321 1	0.320 8	0.319 1
均 值	0.369 4	0.379 4	0.377 1	0.389 0	0.383 1	0.379 6

3.2　生态安全综合得分的空间分布差异

为了更直观的表现三峡库区不同区县的生态安全综合得分的空间分布差异,进一步用 ArcGIS 10.0 软件对 2016—2019 年的 PSR 测算值做可视化处理,把 PSR 值按照自然断点法分为 4 个区间(图 2),便于比较同一时间不同区县的发展情况。

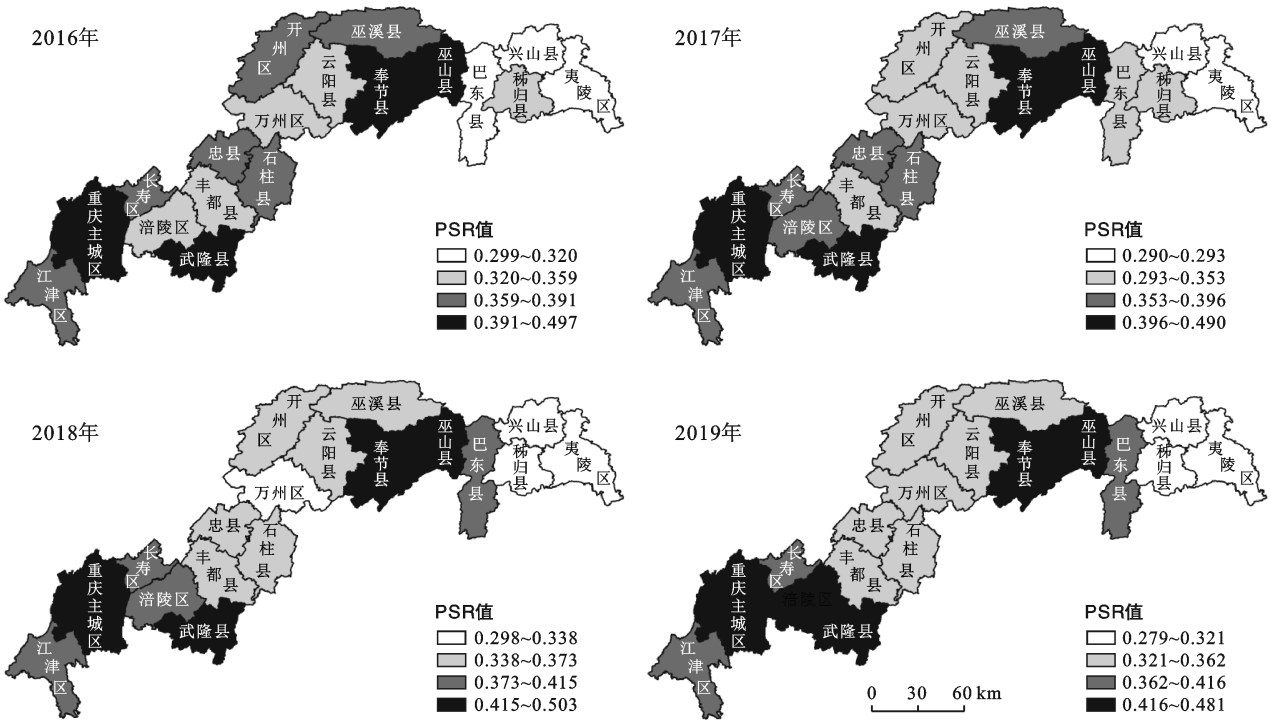


图 2　2016－2019 年三峡库区 PSR 空间分布特征

2016—2019 年,三峡库区生态安全综合得分整体呈现上升趋势,且不同区县之间的差距有减小的趋势。三峡库区生态安全综合得分空间分布格局有所变化,2017 年之后生态安全综合得分高值区较为集中于重庆主城区及其周围;奉节县和巫山县的生态安全综合得分高于同一时间的其他区县;生态安全综合得分的低值区集中分布于兴山、秭归、夷陵等区县。这与各区县的经济发展水平较为一致,重庆主城区经济发展水平高,近年来武隆、奉节、巫山等县旅游经济显著增长,带动了地区经济快速增长。由此可见,经济发展水平与生态安全存在密切关系,经济发展水平较高的地区人力、生态文明、环保等方面能力较强,生态环境保护力度强。

3.3　全局空间自相关性分析

为了进一步探索三峡库区各区县生态安全演变规律,本文用空间自相关性模型深入探讨三峡库区各区县之间的关联性,深化有关三峡库区的生态文明发展的研究。空间相关性是根据要素位置和属性值使用 Global Moran's I 统计量测量得出。空间自相关性意味着同一分布区域中某些变量的潜在相互依存性。本文将三峡库区的相关指标进行测量分析得到如表 4 所示结果。

表 4　2015－2019 年三峡库区空间相关性测量值

年份	Moran's I	$E(I)$	方差	Z 得分	p 值
2015	0.278 0	−0.04	0.122 5	2.412 2	0.01
2016	0.373 5	−0.04	0.124 2	3.331 9	0.02
2017	0.404 9	−0.04	0.122 1	3.640 8	0.01
2018	0.436 1	−0.04	0.127 0	3.762 7	0.01
2019	0.520 3	−0.04	0.127 7	4.416 6	0.01

由表 4 可以看出,统计指标 p 值都小于 0.05,在 95%置信区间上接受原假设,通过了检验,表明 Moran's I 指数是显著的,即三峡库区各区县生态安全存在明显的正向空间相关性。说明各个指标之间存在较强的相关性,三峡库区各区县的 PSR 存在明显的空间自相关性,2015—2019 年的 Moran's I 大于 0,且逐渐增大,说明空间自相关性逐年增强。方差较小,说明数据波动较小,稳定性较高。

3.4　局部空间自相关性分析

局部空间自相关性指数可以进一步判断三峡库区生态安全空间集聚的明显态势,以及各区县之间的关联程度。因此本文计算了 2016—2019 年三峡库区各区县生态安全综合评价指数的局部空间关联指数,并借助 ArcGIS 10.0 软件将结果空间化处理,得到三峡库区各区县生态安全综合评价指数的 LISA 图(图 3)。

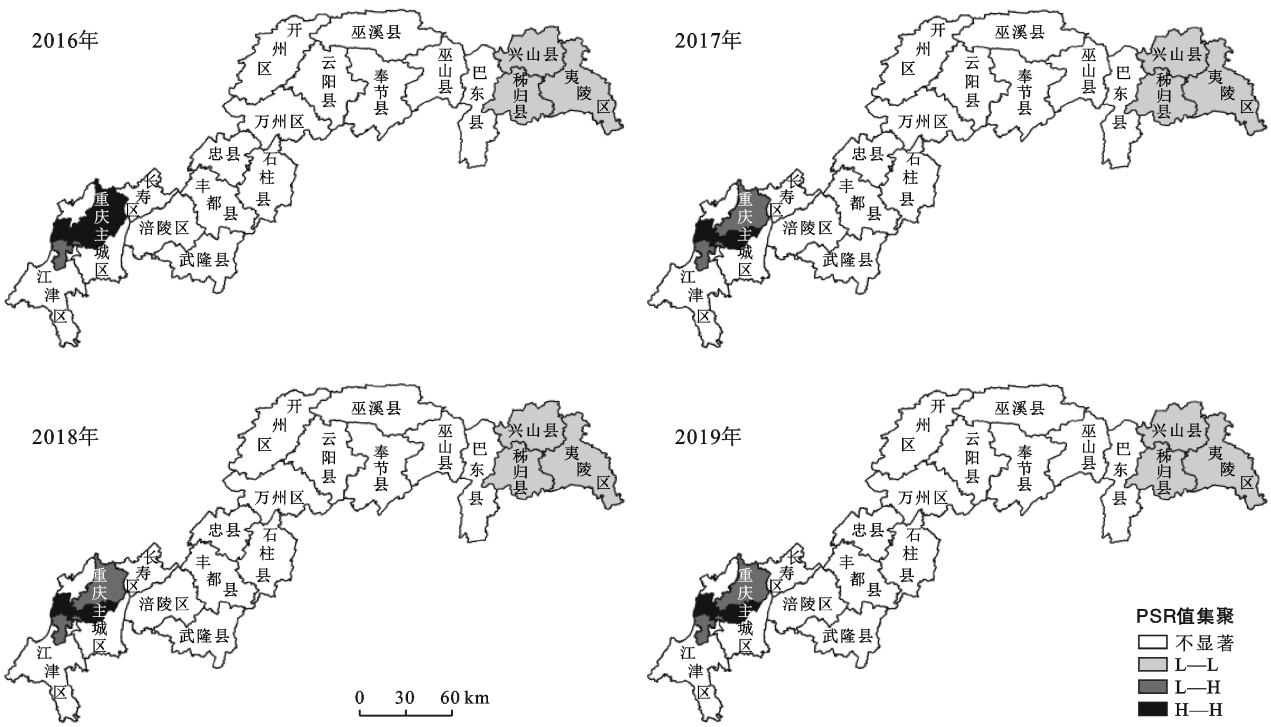


图 3 2016－2019 年三峡库区 PSR 指数的集聚

从表 4 和图 3 可以看出三峡库区 PSR 指数的集聚情况。

(1) H-H 集聚区 2016 年有 5 个,分别是九龙坡区、渝中区、江北区、南岸区以及渝北区,2017,2018,2019 年各有 4 个,减少了渝北区,这些区县的 PSR 明显高于其周围区县,是区域 PSR 的增长极。总的来说 PSR 指数发展较好的均集中于重庆主城区,同时这些区县的经济发展状况较其他区县而言较好,这体现生态安全发展与经济水平发展保持一致。

(2) H-L 集聚区无,巫山县内 PSR 指数高,但周围区县 PSR 指数略低,2016 年后由于巫山县的带动辐射作用,使周围区县的 PSR 增加,缩短了与周围区县的差距。因后便不存在 H-L。

(3) L-H 集聚区 2016 年有 1 个,为九龙坡区,表明九龙坡区自身 PSR 指数较低,但周围区县的 PSR 指数较高;2017—2019 年 L-H 集聚区有两个,分别是九龙坡和渝北区。①九龙坡区和渝北区的 PSR 指数相较主城区的其他区县偏低;②主城区的沙坪坝区、渝中区、南岸区等对九龙坡和渝北区的带动辐射能力有限,未来应加强区县之间的合作。

(4) L-L 集聚区 2016—2019 年有 3 个,分别是兴山县、秭归县、夷陵县。这些区县集聚于三峡库区边缘,且远离主城,PSR 指数自然偏低。

3.5 关联度解剖

基于灰色关联度公式得出了 2015—2019 年三峡库区各地区的生态安全系统的灰色关联度(表 5)。通过比较各指标的大小,辨识各个指标对生态系统的影响程度。

本研究主要运用灰色关联模型对三峡库区 2015—2019 年这 5 年间生态安全的影响因素进行分析,通过分析各要素与生态安全之间的关联程度,从而判断各指标的优劣,为三峡库区今后生态安全发展制定政策提供一定的借鉴以及参考。由表 5 可知,各指标的灰色关联度均值均大于 0.4。因此,本文选取的数据指标具有可靠性,对三峡库区的生态安全发展影响显著。

在压力因子中,社会抚养比、人口自然增长率是影响三峡库区生态安全的主要影响因素,也就意味着近年来三峡库区的生态安全状况与社会抚养比和人口自然增长率有着密切关系,也就是说生态安全的主要压力来源于人口。已有研究发现三峡库区存在严重超载现象,而且具有进一步加强的趋势。虽然库区的人口承载力逐年加强,但仍然无法应对人口增长。近年来库区的 GDP 增长较快,但对劳动力吸附能力并没有显著的提高,社会经济发展仍需进一步改善。同时,结果显示未利用土地与生态安全系统的灰色关联度较低,这说明未利用土地不是影响三峡库区生态安全的主要影响因素,这是由于未利用地占三峡库区总面积的比例最小,只占整个库区的 0.05%,尽管在总量上有一定增幅,但是变化不明显。在状态因子中,单位土地面积农药施用量、植被减少表土损失量

以及生态服务指数与生态安全系统的灰色关联程度均大于 0.8,说明这些因子是当地生态环境改善的关键影响因素。表征人类的经济活动对于生态环境的影响主要表现在土地方面。三峡库区用地类型以林地与耕地为主,在研究年限内,水域、建设用地都以不同程度的变化速度增加,草地、耕地、林地以及未利用土地以不同程度的变化速度减少,林地的占地面积大,因此由于植被减少造成的水土流失对三峡库区生态影响较大。在响应因子中,环保投资比、森林覆盖率与生态安全系统的灰色关联度均高于 0.7,这表示随着这两个指标的增大,生态环境能相应作出反应,从而使得生态环境系统得到改善。到 2018 年,三峡库区的森林覆盖率达到 50.20%,伴随着森林生态系统服务作用的日益突出,在三峡库区各区县相继实施长江防护林体系建设工程、退耕还林和天然林保护等一系列林业重点政策,因此研究期内森林面积仍在不断增加。从总体来看,2015—2017 年三峡库区生态安全与各个指标的灰色关联度的均值呈现递增的状态,平均年增量 0.136 1,表示系统与要素之间的关联性逐渐增大;2017—2019 年的灰色关联度的均值呈现递减的状态,平均年减量 0.125 7,表示系统与要素之间的关联性逐渐减小。

表 5　2015—2019 年三峡库区生态安全与各个指标的灰色关联度

评价指标	生态安全与各个指标的灰色关联度					
	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	均值
常住人口密度 X_1	0.376 8	0.412 7	0.794 0	0.384 8	0.401 0	0.473 9
社会抚养比 X_2	0.635 6	0.668 7	0.919 7	0.629 7	0.626 0	0.695 9
人口自然增长率 X_3	0.660 6	0.683 5	0.472 7	0.746 4	0.7404	0.660 7
未利用土地面积比例 X_4	0.422 1	0.457 6	0.822 8	0.422 8	0.428 4	0.510 7
城镇工矿用地面积比例 X_5	0.371 0	0.404 9	0.787 2	0.371 1	0.371 2	0.461 1
单位土地面积化肥施用量 X_6	0.535 3	0.565 6	0.944 0	0.937 4	0.804 1	0.757 3
单位土地面积农药施用量 X_7	0.730 4	0.782 6	0.957 1	0.789 8	0.802 6	0.812 5
单位耕地面积化肥施用量 X_8	0.4883	0.441 7	0.859 9	0.481 8	0.462 2	0.546 8
人均污水排放量 X_9	0.475 3	0.531 1	0.861 8	0.495 3	0.502 2	0.573 1
人均生活垃圾处置量 X_{10}	0.454 5	0.498 8	0.846 2	0.461 2	0.473 7	0.546 9
植被减少表土损失量 X_{11}	0.924 6	0.934 0	0.988 8	0.930 7	0.931 5	0.941 9
植被年固碳价值量 X_{12}	0.530 5	0.568 9	0.881 5	0.530 8	0.529 2	0.608 2
物种丰度指数 X_{13}	0.711 6	0.747 8	0.944 1	0.716 2	0.715 7	0.767 1
生态服务指数 X_{14}	0.857 2	0.876 2	0.977 8	0.870 4	0.875 1	0.891 3
环保投资比 X_{15}	0.764 8	0.794 6	0.942 9	0.685 8	0.699 6	0.777 4
污水处理率 X_{16}	0.625 1	0.661 9	0.916 5	0.620 4	0.618 0	0.688 3
生活垃圾处理率 X_{17}	0.611 0	0.644 7	0.917 2	0.630 4	0.632 9	0.687 2
森林覆盖率 X_{18}	0.713 8	0.758 6	0.936 3	0.674 4	0.696 4	0755 9
建成区绿化覆盖率 X_{19}	0.621 0	0.659 4	0.912 0	0.602 6	0.598 0	0.676 8
均 值	0.605 8	0.636 5	0.878 0	0.630 6	0.626 7	0.675 5

4　结论与建议

4.1　结 论

本文构建了 3 个指标体系,即是压力、状态、响应共同构成了三峡库区的生态安全发展体系。并给予灰色系统理论对各指标数据进行分析,得到以下结论。

(1) 通过建立的三峡库区运行状况综合评价指标体系,表明该指标体系能较好地反映三峡库区运行状况的主要影响因素和库区整体发展趋势,通过权重赋值的大小以体现指标对于运行状况影响程度的差异,所建立的三峡库区运行状况综合评价指标体系具有一定的通用性。

(2) 近年来三峡库区生态安全综合评价指数呈现不断提高的状态,因此可以看出随着三峡库区单位土地面积农药施用量、植被减少表土损失量的减少以及生态服务指数的增大,使得三峡库区生态安全状况有所提升。三峡库区 PSR 指数集聚特征随时间变化并不明显,H-H 集聚区主要集中于主城区,符合经济发展一般规律;L-L 集聚区主要集中于边缘地区的夷陵、秭归等区县;L-H 和 H-L 集聚区主要集中分布与 L-L 以及 H-H 集聚区的周边区县。

(3) 基于灰色关联理论对样本数据进行了深入的挖掘,应用熵值法和层次分析法分别确定各指标的客观权重和主观权重,并用加权综合的方法确定出各指标的综合权重值。既保留了三峡库区原始数据所

反映的客观信息，又很好考虑到决策者的主观意愿，保证得出的各指标权重值与实际重要程度相符合，并且给出了合理解释。因此该模型对于三峡库区生态安全研究具有一定意义。

4.2 建 议

三峡库区的可持续发展的关键在于保护生态环境提高自然的承受能力以及抗压能力。三峡库区的生态环境的状况关系到三峡工程的效益的发挥，直接影响到整个长江上游的经济的发展以及中下游的农林灌溉、城市用水和南水北调工程。根据库区生态发展现状，需要协调好经济与生态之间的关系，因此根据本次研究提出以下建议。

(1) 从影响三峡库区生态安全的重要因子入手，从而解决库区面临的主要问题。例如挖掘土地存量，保护未利用土地。①需要对于城镇建设用地进行有效控制，合理用地对于生态环境保护与经济发展不协调问题、保护生态环境有积极作用；②提高土地的利用率，向存量土地要空间，充分挖掘存量土地的空间价值；加快构建森林体系，坚持增量扩大和存量优化并重。这对于涵养水源，减少水土流失；维护生物特性，保护物种多样；净化自然空气，恢复生态环境具有重大意义；政府应增加环保投资、加大监管力度、落实生态问责制度。

(2) 建立生态补偿机制，促进各地区均衡发展。鉴于三峡库区各县区之间发展的不平衡问题，需要建立生态补偿机制。生态补偿机制的目的是保护生态环境，促进人类与自然的和谐。主要以保护地区生态系统和防止环境破坏行为为目的，有激励效果。生态补偿机制是基于“受益者付费破坏者付费”原则的环境经济政策。该机制对于三峡库区各区县生态安全评价指数有改进作用。

(3) 加强库区各区县之间交流合作，发挥高 PSR 指数区域的带动辐射作用。开展长效合作，定期在重庆主城区与周边区县开展对话，提高周边区县 PSR 指数；在不均衡区县之间建设关联通道，夯实区域合作基础；推动旅游产业发展，带动周边区县旅游业，在改善生态环境的同时促进经济发展。

[参 考 文 献]

[1] 崔胜辉，洪华生，黄云凤，等.生态安全研究进展[J].生态学报，2005，25(4)：861-868.

[2] 王军，钟莉娜.景观生态学在土地整治中的应用研究进展[J].生态学报，2017，37(12)：3982-3990.

[3] 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.

[4] 曹秉帅，邹长新，高吉喜，等.生态安全评价方法及其应用[J].生态与农村环境学报，2019，35(8)：953-963.

[5] 谢玲，严土强，高一薄.基于 PSR 模型的广西石漠化地区土地生态安全动态评价[J].水土保持通报，2018，38(6)：315-321.

[6] 王耕，苏柏灵，王嘉丽，等.基于 GIS 的沿海地区生态安全时空测度与演变：以大连市瓦房店为例[J].生态学报，2015，35(3)：670-677.

[7] 李建春，袁文华.基于 GIS 格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J].自然资源学报，2017，32(6)：988-1001.

[8] 王洋，董晓光，王海帆，等.基于 PSR-TOPSIS 模型的郑州市土地生态安全评价及障碍因子诊断[J].河南农业大学学报，2020，54(5)：845-852.

[9] 赵疏航，何刚，朱艳娜，等.基于 EES-TOPSIS 模型的水土生态安全评价与预测[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版)，2020，36(6)：751-759.

[10] 翟彦放.基于 GIS 技术的三峡库区生态空间统计方法[J].地理空间信息，2020，18(2)：64-65，70.

[11] 李月臣，刘春霞，闵婕，等.三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J].生态学报，2013，33(1)：168-178.

[12] 孙芬，吴涌泉，刘秀华，等.基于 GIS 的三峡库区土地生态安全评价：以丰都县沿江地区为例[J].中国农学通报，2012，28(8)：240-247.

[13] 庄伟，廖和平，潘卓，等.基于变权 TOPSIS 模型的三峡库区土地生态安全评估：以巫山县为例[J].西南大学学报(自然科学版)，2014，36(8)：106-112.

[14] 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.

[15] 孙德亮，张凤太.基于 DPSIR-灰色关联模型的重庆市土地生态安全评价[J].水土保持通报，2016，36(5)：191-197.

[16] 龚巧灵，官冬杰.基于 BP 神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J].水土保持研究，2017，24(6)：292-299.

[17] 王波，张洪江，杜士才，等.三峡库区天然次生林凋落物森林水文效应研究[J].水土保持通报，2009，29(3)：83-87.

[18] 张军以，苏维词，张凤太.基于 PSR 模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J].中国环境科学，2011，31(6)：1039-1044.

[19] 张凤太，苏维词，周继霞.基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J].生态学杂志，2008，20(7)，1249-1254.

[20] 倪九派，李萍，魏朝富，等.基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J].农业工程学报，2009，25(5)：202-209.

[21] 魏兴萍.基于灰色关联分析三峡库区重庆段生态安全[J].水土保持研究，2010，17(4)：124-128，133.

[22] 郑华伟，夏梦蕾，张锐，等.基于熵值法和灰色预测模型的耕地生态安全诊断[J].水土保持通报，2016，36(3)：284-289，296.

[23] 孟展，张锐，刘友兆，等.基于熵值法和灰色预测模型的土地生态系统健康评价[J].水土保持通报，2014，34(4)：226-231.