

DOI: 10.5846/stxb201311122717

张梦婕, 官冬杰, 苏维词. 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定. 生态学报, 2015, 35(14): 4880-4890.

Zhang M J, Guan D J, Su W C. Scenarios simulation and indices thresholds determination of ecological security in three gorges reservoir based on system dynamics. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4880-4890.

# 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定

张梦婕<sup>1</sup>, 官冬杰<sup>1,\*</sup>, 苏维词<sup>2,3</sup>

1 重庆交通大学, 河海学院, 重庆 400074

2 重庆师范大学, 地理与旅游学院, 重庆 400047

3 贵州科学院, 山地资源研究所, 贵阳 550001

**摘要:**根据重庆三峡库区生态系统的特征,建立了经济子系统、人口子系统和环境子系统的系统动力学模型,并在此基础上确定了其模型的主要参数和反馈关系,通过历史值与仿真值的对比进行了检验。选择了可持续发展型、资源衰竭型和自然状态型 3 种情景进行模拟最终确定其生态安全的指标阈值,并将其确定的阈值应用于生态安全评价指标,得出重庆三峡库区生态安全指标的综合得分,由此看出库区生态安全呈逐年递增的趋势,但仍然处于较为敏感的时期,需要相关部门的配合,从而实现库区的可持续发展。

**关键词:**重庆三峡库区; 系统动力学; 生态安全; 阈值

## Scenarios simulation and indices thresholds determination of ecological security in three gorges reservoir based on system dynamics

ZHANG Mengjie<sup>1</sup>, GUAN Dongjie<sup>1,\*</sup>, SU Weici<sup>2,3</sup>

1 School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2 Institute of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

3 Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China

**Abstract:** Ecological security is an interdisciplinary of natural science and social science. There is still no an internationally accepted definition of ecological security at present. In this paper, ecological security model of Three Gorges Reservoir in Chongqing was established using system dynamics. Firstly, according to special geographical features of Three Gorges reservoir, an improved DPSIR model, which involves all aspects of society, economy and environment, was applied to establish an evaluation index system of ecological security. AHP method with objective and subjective combination characteristics was selected to endow these indices weight. Secondly, based on the ecosystem characteristics of Three Gorges reservoir, a system dynamics model containing economy, population, and environmental subsystems was developed. The model was set up using specialized software VensimPLE and data from “Chongqing Statistical Yearbook 2001—2007” for population, GDP, and the amount of environmental pollution. Main parameters and their mutual feedback relationships in the model were determined. GDP, the total population, the amount of environmental pollution were selected as the main variables; grain output ratio, forest coverage rate, soil erosion rates and other indicators were selected as the important

**基金项目:**国家青年科学基金项目(41201546); 重庆市自然科学基金(csts2012jjA20010); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ25B09, 2011BAC02B02); 国家自然科学基金(41261038)

**收稿日期:**2013-11-12; **网络出版日期:**2014-09-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guandongjie\_2000@163.com

factor parameters; the area of soil erosion, Net-GDP, pollution treatment rate were selected as the evaluation factors. Meanwhile, historical and simulated values were compared to verify this model. The comparison of results from calibration and observation shows that the model corresponds to observed behaviors, and the simulated values fit well with the observed data and changing trends. Moreover, 3 scenarios named sustainable development, resource exhaustion, and natural state were designed to simulate future change of ecological security. The simulation runs demonstrate that the sustainable development model accords with the patterns of social development. The ecological security levels of natural state model and resource exhaustion model in Chongqing Three Gorges Reservoir are very worrying, since economic losses and environmental impact are severe. But the ecological security level of sustainable development model is relatively good. Net-GDP shows a clear upward trend; the amount of environmental pollution is small. Thirdly, according to the simulation results, ecological security thresholds were got. The thresholds can basically represent the main features of Three Gorges Reservoir's ecological security before 2050. The verification results can be got with the observation of "Net GDP-GDP" values. The overall verification results are appropriate. Then, the status quo of ecological security indicators (2007) was standardized using the determined thresholds. It turns out that the existing 11 indicators are uneven and the overall level is not high. These thresholds were applied into the assessment indices of ecological security for obtaining the comprehensive score of ecological security from 2001 to 2007. The results illustrate that the ecological security in the reservoir area has been emerging an increasing trend, but still in a relatively sensitive period. Consequently, to achieve the sustainable development of the reservoir area requires the cooperation of relevant departments. Finally, on the basis of system dynamics model, the paper determined ecological security index thresholds. Within the range of thresholds, the ecological security can effectively achieve its sustainable development.

**Key Words:** Chongqing Three Gorges reservoir area; systems dynamics; ecological security; thresholds

生态安全是一门自然科学与社会科学的交叉学科。目前国际上尚无公认的关于生态安全的定义<sup>[1-3]</sup>。生态安全,国外也称环境安全,有广义和狭义两种解释。前者以美国国际应用系统分析研究所提出的定义为代表:生态安全是指在人的生活、健康、安乐、基本权利、生活保障来源、必要资源、社会秩序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态,包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全,组成一个复合人工生态安全系统。狭义的生态安全是指自然和半自然生态系统的安全,即生态系统完整性和健康的整体水平反映<sup>[4-9]</sup>。随着研究的不断深入,科学家们越来越关注影响生态安全的具体因素,而且更加关注这些因素可能对生态系统和社会带来的危害。1993年,美国著名环境学家 Norman Myers 指出生态安全是指地区的资源战争和全球的生态威胁而引起的环境退化,继而所引起的经济和政治的不安全; Katrina S. Rogers 认为生态安全是指创造一种条件使得人类社会的自然环境在满足人类需要的同时使自然存量不致减少; Kim 认为生态安全是由生态威胁,生态风险等概念演变而来,人类则是生态安全的主要危害者<sup>[10]</sup>。

在国内外生态安全的相关研究中生态风险评价和生态健康评价的数目较多。目前,生态安全评价研究主要集中在三个方面:(1)评价指标体系构建。经济合作与发展组织(OECD)率先提出并发展了反映自然环境状况指标体系的“压力-状态-响应”(P-S-R)框架模型<sup>[4]</sup>, Don Fallis 运用 PSR 模型提出了认知风险的评分规则<sup>[11]</sup>,李中才等以山东省长岛县为例,研究了生态状态、响应、压力之间的作用关系,评价生态安全的现状和发展趋势,推导出生态安全状况不断得到改善的必要条件<sup>[12]</sup>,孙翔等以 PSR 为概念框架构建厦门景观生态安全评价指标体系,以揭示厦门市区域景观生态安全的空间分布规律<sup>[13]</sup>。这些研究都是以 PSR 为模型构建指标体系,但缺乏相应层次方面的改进和创新性。(2)评价指标值的确定。如 Schaffer D.J 和 D.K. COX 提出了生态系统功能阈值,认为人类对环境资源开发利用和社会经济发展不能超过这一阈值<sup>[14]</sup>, Takuro Uehara 提出生态经济阈值可能会在生态阈值之前<sup>[15]</sup>,李华以上海崇明岛为例进行生态安全指标阈值的确定及应用<sup>[16]</sup>。对于评价指标阈值方面大多是参照国内外已有的相关标准值或直接依据现状值进行估算,这种方法

简单易行,但精准度方面受到影响,而且各类参照标准本身的制定目的和适用性有别,标准值存在较大的差异,因此存在相应的随意性。(3)生态安全评价的方法。大多数的生态安全评价方法,主要选择了对生态环境变化十分敏感的生物、物理和化学等方面的特征指标,观察监测生态环境变化对它们的影响,以此来判断生态是否安全。Karr 应用生物完整性指数对鱼类类群的组成与分布、种多样性以及耐受种、敏感种、固有种等多方面分析了水体生态系统的安全状况<sup>[17]</sup>。这种方法由于生态安全评估需要大量的实时数据的支持,而且需要及时向政策制定者反馈评估结果,因此它需要系统、即时的提供真实的信息,所以还需要进行不断深化和探讨。而目前我国生态安全的研究还处于初级阶段,综述性研究居多,对生态安全的定量描述较少。有关生态安全阈值的研究方法主要有模糊数学法、神经网络法等<sup>[7,18-19]</sup>,但这些方法都是对生态安全阈值的静态研究,缺乏动态联系。本文运用系统动力学原理,建立生态安全模型,从动态的角度系统分析重庆三峡库区生态安全各指标阈值,从而为重庆三峡库区的后续发展提供借鉴。

## 1 研究区域概况及评价模型构建

### 1.1 研究区域概况

三峡库区位于北纬 28°31'—31°44',东经 105°44'—111°39'之间,涉及湖北省和重庆市,总面积约 7.9 万 km<sup>2</sup>,总人口约 2937 万人。三峡库区地跨渝、鄂峡谷和川东低山丘陵区,背靠大巴山麓,南依云贵高原北缘。强烈的造山运动所引起的海陆变迁和江水下切,形成了独特的峡谷地貌,同时也构成了一个相对独立的地理单元<sup>[20]</sup>。重庆三峡库区位于长江上游下段,东起巫山县、西至江津市、南起武隆县、北至开县,包括万州区、涪陵区、渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、渝北区、巴南区、长寿区、南岸区、北碚区、丰都县、武隆县、忠县、开县、云阳县、奉节县、巫山县、巫溪县、石柱县、江津区等 22 个区、县(自治县)(图 1)。

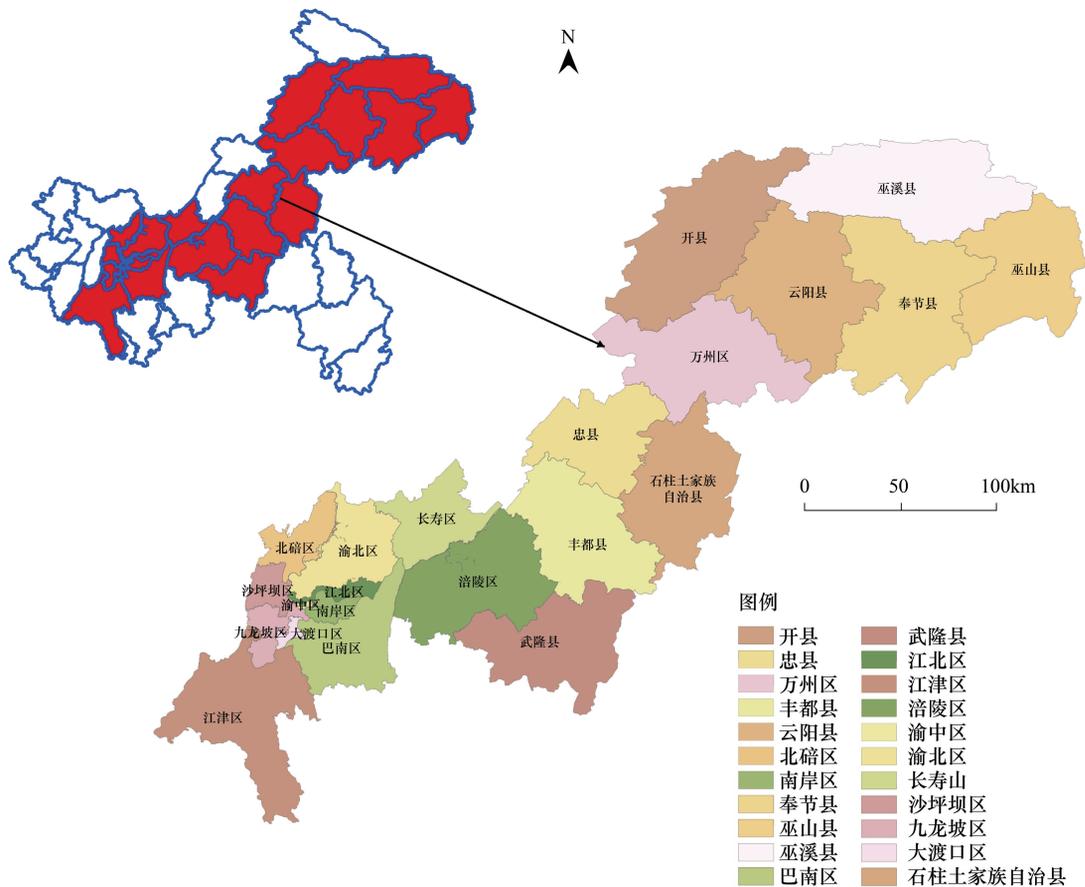


图 1 重庆市三峡库区行政区划

Fig.1 Three Gorges reservoir in Chongqing Administrative Map

三峡库区的生态安全问题主要表现在两方面:第一,自然生态安全问题:水土流失严重,库区气候、地形、土壤等条件使得该区水土流失严重,恢复能力差,对生态安全的影响较大;森林面积锐减,水库的修建占用大量森林面积导致森林面积大量减少,不利于生态环境的可持续发展;生物物种减少,三峡水库的修建扰乱了水生生物的生存状态,使大量水生物种濒临灭绝;自然灾害频繁,库区复杂的地形、多变的气候,以及植被覆盖的大量减少导致该地区自然灾害频繁。第二,社会生态安全问题:三峡移民,三峡水库的修建需要占用大量的土地,因此带来的移民问题不可小觑,不仅影响到水库的修建同时还有可能导致社会动荡;文物保护,文物是宝贵的历史文化遗产,而水库的修建使得大量文物古迹遭到破坏;人地矛盾,该地区人口超载,人地矛盾日益突出,导致生态环境日益恶化<sup>[21]</sup>。

## 1.2 生态安全评价指标建立

目前对区域生态安全评价指标还没有达成共识,运用较多的有:第一,PSR(压力-状态-响应)模型,是在国内外生态安全评价的常用方法。PSR模型能反映自然、经济和社会因素之间的关系,为生态安全指标构造提供了逻辑基础;第二,DSR(驱动力-状态-响应)模型,这种模型的构造与PSR模型类似,但侧重于对生态安全原动力的研究;第三,DPSEEA(驱动力-压力-状态-暴露-影响-响应)模型,这种模型是对PSR模型的一种扩展,它更加细化了生态安全中各指标之间的关系;第四,DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)模型,它是在PSR和DSR结合的基础上发展的模型,模型的优点是可以更加清晰地反应系统各指标之间的因果关系,也可以综合体现环境、经济、社会各因素之间的制约关系,从而更好地说明区域生态安全的驱动力和压力,所处的状态以及导致的社会经济影响和人文响应,得出的结果也就更符合实际情况,因此该模型综合运用于社会经济可持续发展的各个方面<sup>[22]</sup>。

本研究在传统DPSIR模型的基础上进行了改进,完善了驱动力、压力、状态、影响和响应这5类指标因子。具体而言,改进后的DPSIR模型驱动力因子更多的强调造成环境变化的潜在原因,目的在于描述社会经济发展及人口增长所带来的生活方式的变化、生产和消费模式的改变等。同时,改进后的DPSIR模型,不仅仅关注环境的直接压力因子,更关注如何通过一定的因果关系模型来预测直接压力因子可能对环境现状造成的影响。此外,传统模型更多关注的是状态类因子,而改进后的模型不仅注重在驱动力和压力下的系统现实表现,更关注状态变化与生态状况、人类活动造成的环境影响之间的相互关系。改进后的DPSIR模型的5类指标完整地体现了生态安全的综合情况,更能够揭示潜在的社会经济“驱动力”给区域生态安全造成“压力”,引起区域生态、环境的“状态”改变,进而“影响”人类活动,最终促使一系列“响应”措施的产生这一完整因果链,从而为区域生态安全评价提供了较好的研究思路。基于此,本文提出适合区域生态安全评价的DPSIR模型框架。根据区域的生态安全特征,驱动力指数(D)主要体现在造成重庆三峡库区环境变化的潜在原因,反映了其社会经济发展的趋势,因此选取了人口增长率、城市化率和粮食产值3个指标来反映导致环境变化的潜在原因;压力指数(P)以反映库区耕地质量状况和经济投资等方面的压力为主要内容,本文选择了耕地产出率、生产性固定资产投资比和固定资产投资比作为指标来表现对环境造成的影响;状态指数(S)主要体现经济方面的情况,以各产业国内生产总值的特征为主要内容,本文选取了净GDP、单位林地产值、轻工业固定资产投资率和重工业固定资产投资率4个指标来表现该区域的经济发展状况;影响指数(I)是指系统所处的状态对社会经济和环境影响,以经济值 and 环境污染情况为主要内容,研究选择了环境污染量、森林覆盖率和水土流失率3个指标来反映区域生态安全的影响结果;响应指数(R)主要指面对社会经济和环境的影响,人类所采取的积极措施,以环境响应为主要内容,因此选取了单位污染环保投资和污染处理率来表现人类对生态环境变化的反映。以复合生态系统理论为基础,综合考虑重庆三峡库区的社会、经济和环境的各个方面,并且考虑其系统的协调性和可操作性,进行具体指标的选择,最终建立重庆三峡库区生态安全评价指标体系(表1)。

指标权重的确定方法有<sup>[23]</sup>:(1)主成分分析法,主要用于有多个成分的目标分析中,可以抓住该分析中影响目标的最主要的成分,从而使得该分析重点突出,具有针对性,排除那些对目标作用不大的成分,但因为只

是作用于对目标影响较大的成分,因此难免会忽略一些成分,从而使的分析的全面性不够;(2)多元线性回归分析:主要作用于该目标在一段时间内的线性变化,可以更加直观的表现出目标的方向和趋势,因此可以采取一定措施来增强或者改善某些元素,从而达到调高整体目标的目的,其缺点是由于各元素对目标具有相同的影响,所以分析的结果因此而没有针对性,不能更有效的改善目标;(3)层次分析法,主要用于有隶属关系的指标体系构建中可以使分析更加有条理。该分析可分为目标层、准目标层、指标层等。层层构建,分别得出所占权重,最后得出目标层的综合指数。本文采用的是 AHP 主客观结合赋值法,能把复杂系统的决策思维进行层次化,将决策过程中的定性和定量因素有机结合起来,通过建立判断矩阵、排序计算和一致性检验后得到最终结果。其做法是首先通过分析各指标的相互关系,建立递阶的评价指标体系,然后邀请专家学者(增加专家的数量和领域)的对评价指标打分,通过 1—9 标度法构建两两比较判断矩阵。最后计算各指标的权重(表 1),并进行一致性检验。

表 1 重庆三峡库区生态安全评价指标体系

Table 1 Three Gorges Reservoir Ecological Security Assessment Index System

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	总权重 Weight
A 生态安全综合指数 Ecological security index	B1 驱动力指数	C1 人口增长率	0.076
		C2 城市化率	0.063
		C3 粮食产值	0.041
	B2 压力指数	C4 耕地产出率	0.059
		C5 固定资产投资比	0.051
		C6 生产性固定资产投资比	0.049
	B3 状态指数	C7 净 GDP	0.107
		C8 单位林地产值	0.057
		C9 重工业固定资产投资率	0.071
	B4 影响指数	C10 轻工业固定资产投资率	0.026
		C11 水土流失率	0.074
		C12 森林覆盖率	0.089
	B5 响应指数	C13 环境污染量	0.067
		C14 污染处理率	0.091
		C15 单位污染环保投资	0.079

## 2 重庆三峡库区生态安全系统动力学模型构建及不同情景模拟

### 2.1 系统动力学模型的建立及检验

#### 2.1.1 模型的建立

系统动力学,系统动力学是结构的方法、功能的方法和历史的方法的统一。它基于系统论,吸收了控制论、信息论的精髓,是一门综合自然科学和社会科学的横向学科。现已广泛应用于农林生态、区域经济、城市规划、矿藏及其安全、军事战略、行政管理及公共安全、教育管理、社会保障等各个领域<sup>[24]</sup>。本文根据重庆三峡库区的生态环境特征,构建模型结构和反馈关系,系统由经济子系统、人口子系统和环境子系统组成;由于研究区域生态问题的复杂性,因此,在建立系统流程图时,以反映库区主要因果关系,选择影响库区生态安全的核心因子,最终确定参数;使用专业软件 VensimPLE 建模,模型运行时间为 2000—2050 年,仿真步长为 1a,主要数据来源于《重庆市统计年鉴》,建立系统动力学模型的系统流程图(图 2),并确定其模型的主要方程式和反馈关系。

#### 2.1.2 模型的检验

本研究运用相对误差方法对所建立的 SD 模型的运行结果进行检验,以 GDP 总量为例,检验结果(表 2)

可以发现,2001—2007 年的 GDP 仿真值和历史值的相对误差均在 10% 以内,相对误差的结果较为理想,因此认为变量通过检验。其他变量的历史值也与此相似,通过历史检验。

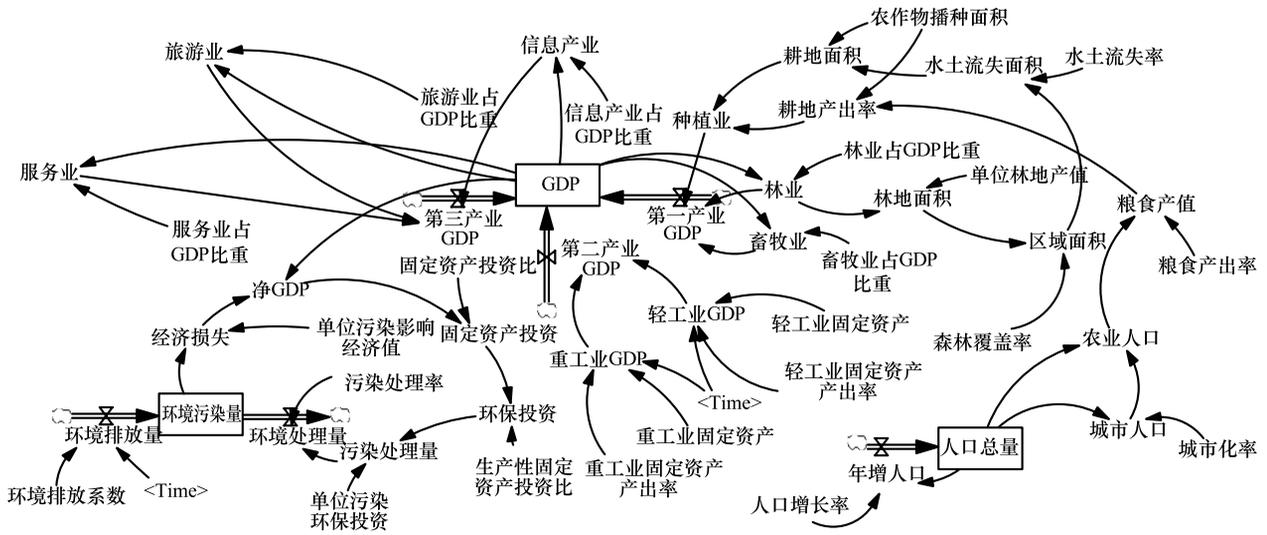


图 2 重庆三峡库区生态安全的系统动力学模型流程图

Fig.2 System Dynamics Model Flowchart of Three Gorges Reservoir Ecological Security

表 2 GDP 历史检验结果 (2001—2007 年)

Table 2 GDP historical test results (2001—2007)

	GDP/万元						
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
历史值 Historical value	11523174	12976584	14838952	17729282	21347578	24407520	28023178
仿真值 Simulation value	11387300	12984200	14700600	16545100	20656300	22943400	25399800
相对误差 Relative error	0.0118	0.0006	0.0093	0.0668	0.0324	0.0599	0.0936

## 2.2 不同情景参数的设定及模拟

### 2.2.1 参数的设定

本研究中生态安全阈值的确定将是在考虑重庆三峡库区未来发展趋势和特征的基础上,通过比较不同发展方案情景下 SD 模型的模拟结果,提出符合库区发展的生态安全阈值,并进行检验。因此,确定合适的系统模拟方案,并根据需要选择模拟参数是本文的重要任务之一。

为了更好的实现重庆三峡库区生态安全的可持续发展,本文确定的 3 种模拟方案分别为自然状态型、资源衰竭型和可持续发展型。根据不同的发展方案来确定模型的主要参数,为了实现方案结果的客观性,选择的主要参数应尽可能的遵循真实性原则。在这 3 种方案中自然状态型为重庆三峡库区生态安全指标的现状值,相关参数来自于 2000—2010 年《重庆市统计年鉴》;资源衰竭型表示区域生态安全依靠资源环境的损失来实现其发展的状态,这种模拟方案参数主要取自于重庆市历年规划方案及统计年鉴中的指标上线;可持续发展型表示区域生态环境状况与经济发展相互协调发展的状态,这种模拟方案的参数主要取自于重庆市历年规划方案及统计年鉴中的指标下线。最终得到各方案模拟变量的参数值(表 3)。通过这 3 种不同情景的设定来展示不同发展模式下,净 GDP 和环境污染量的增长趋势,从而为库区发展提高可靠依据。

### 2.2.2 不同情景模拟结果分析

本文所建立的系统动力学模型中,变量净 GDP 表示在社会、经济和环境状态模型下的国内生产总值减去经济损失的值,环境污染量表示当前环境中的实际污染量,这些都可用于作为评价方案适用性的主要参考依据。系统模拟出的 2000—2050 年的净 GDP、环境污染量的仿真值(图 3,图 4)。

表 3 重庆三峡库区发展规划方案的主要参数值

Table 3 Development planning program's main parameters of Chongqing Three Gorges reservoir

参数 Parameter	自然状态型 Natural state model	可持续发展型 Sustainable development model	资源衰竭型 Resource exhaustion model
固定资产投资比 Investment in fixed assets	0.3485	0.3	0.5
粮食产出率 Grain output ratio	1482.98	1200	1600
单位污染影响经济值 Unit pollution affects economic value	0.4	0.2	0.6
生产性固定资产投资比 Investment rate on productive fixed assets	0.914	0.8	1
单位林地产值 Unit value of woodlands	0.06	0.05	0.08
水土流失率 Soil erosion rate	0.0056	0.001	0.08
森林覆盖率 Forest coverage rate	0.24	0.9	0.6
污染处理率 Pollution treatment rate	10	13	9
单位污染环保投资 Unit pollution environmental investment	0.5	0.8	0.3
人口增长率 Population growth rate	0.00672	0.006	0.007
城市化率 Urbanization rate	0.29	0.4	0.9

从图中可以看出,各方案净 GDP 的趋势是呈上升的,其中可持续发展型的净 GDP 上升空间最大,资源衰竭型的净 GDP 上升趋势最小,自然状态型则处于中间范围。

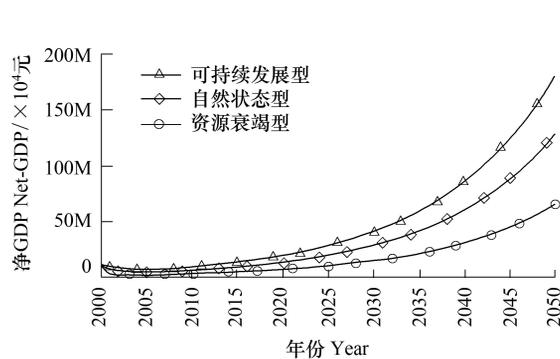


图 3 各方案模拟的净 GDP 结果

Fig.3 Net GDP simulation results of the program

图中横坐标代表年份,纵坐标代表净 GDP 量(M 表示百万)

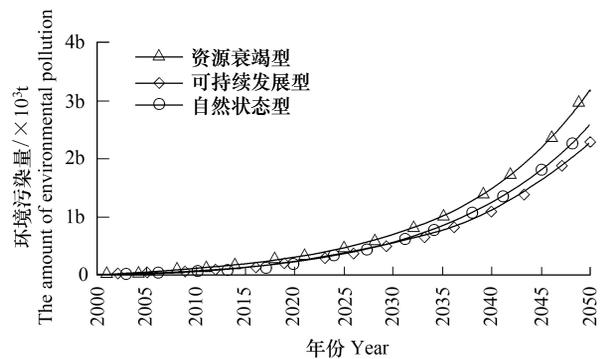


图 4 各方案模拟的环境污染量结果

Fig.4 The amount of programs simulate environmental pollution results

图中横坐标代表年份,纵坐标代表污染量(b 表示十亿)

由系统模拟出的各方案环境污染量的结果可以看出,可持续发展型的环境污染量最小,可使环境保持在较好的状态,而资源衰竭型则环境污染量最大,将会对环境造成较大的影响。

在自然状态型和资源衰竭型的发展模式下重庆三峡库区生态安全水平未来的趋势非常令人担忧,经济损失量大,同时对环境也造成较大的影响(图 3,图 4)。但是可持续发展型的模式则相对较好,净 GDP 发展上升趋势明显,环境污染量都较小,是符合生态安全水平的发展模式。因此,综合这 3 种发展模式,作为生态安全评价和控制的参考标准,同时根据系统的模拟结果,得到最终的生态安全阈值。

### 3 生态安全指标阈值的确定及应用

#### 3.1 生态安全指标阈值的确定

##### 3.1.1 经济发展阈值

随着三峡工程的推进,重庆市三峡库区经济发展矛盾日益尖锐。区内第一产业比重大,经济发展不平衡,特别是郊区县经济发展落后,有 8 个县属于国家扶贫工作重点县。巨大的经济压力势必导致对资源的过渡开

发和利用。因此,库区未来经济发展的主要方向不应是追求经济增长的速度,而是实现库区生态安全的可持续发展。本文在系统动力学模拟的基础上认为重庆三峡库区未来几十年固定资产投资比处在 0.3—0.4 之间较为合理。

### 3.1.2 环境保护阈值

提高污染处理率,加大单位污染环保投资是提高环境质量的有效措施。参照模拟结果,认为污染处理率、单位污染环保投资的较优值应为 8—15、0.4—0.8。重庆市三峡库区地质疏松,自然植被少,水土流失严重,再加上三峡工程的修建,因此为保护库区生态,森林覆盖率和水土流失率的大小显的尤为重要。本文在模拟的基础上认为 0.6—0.8 和 0.05—0.086 之间能够使库区在保持经济发展的同时,使生态安全得到有效的保护。

### 3.1.3 社会发展阈值

据重庆市统计年鉴,1997—2005 年间,超过全市人口年平均增长率。作为典型的大城市大农村的地域结构,农业人口所占比重大,占库区总人口的 67.8%。狭窄的土地长期超负荷地承载密集的人口,人与粮食的矛盾日益突出,人多耕地少且耕地质量差,可供开垦的后备耕地资源十分有限,大面积的毁林毁草开荒,加剧了三峡重庆库区水土流失。因此,本文认为库区人口增长率维持在 0.005—0.007 之间较为合适,城市化率则处于 0.65—0.8 之间较为合适。

## 3.2 阈值的验证

将上述确定的各指标阈值的下限值(表 4)代入到 SD 模型中进行模拟,通过观察“净 GDP-GDP”的值,可以得到其验证结果如表 5 所示。从表 5 可以看出 2008—2016 年,“净 GDP-GDP”都是负值,但其数值在逐渐减小,说明环境污染所造成的经济损失在逐渐缩小,到了 2017 年开始出现正值,说明生态安全得到了有效的保护。因此,可以认为总体验证结果比较适宜,所定的阈值基本上能够代表重庆三峡库区 2050 年前生态安全的主要特征。

表 4 重庆市三峡库区生态安全指标阈值及现状值的标准化结果

Table 4 Three Gorges Reservoir Ecological Security indicator threshold and standardized results

指标 Index	阈值 Threshold		现状值(2007) Status value	标准化 Standardization	
	下限值 Lower limit	上限值 Upper limit			
社会发展阈值	C1	0.007	0.005	0.011	0.64
Threshold of Social development	C2	0.65	0.8	0.4	0.62
经济发展阈值	C3	0.6	0.8	0.75	0.8
Threshold of economic development	C4	1100	1700	1483	0.74
	C5	0.3	0.4	0.35	0.86
	C6	0.8	1.1	0.95	0.84
	C7	0.02	0.06	0.04	0.5
	C8	0.048	0.08	0.072	0.67
	C9	1	1.35	1.278	0.78
	C10	1.1	1.82	1.481	0.74
环境保护阈值	C11	0.086	0.05	0.068	0.79
Threshold of environmental Protection	C12	0.6	0.8	0.35	0.58
	C13	0.02	0.002	0.017	0.85
	C14	8	15	10	0.8
	C15	0.4	0.8	0.5	0.8

## 3.3 生态安全指标阈值的应用

### 3.3.1 生态安全指标的标准化

由于各指标的性质不同,具有不同的单位,为了统一评价,有必要对评价因子进行无量纲化处理。根据指

标的性质,可以将其分为发展类指标即越大越好和限制类指标即越小越好两类。

发展类指标采用公式:

$$\text{若 } x_{ij} < S_j, z_{ij} = \frac{x_{ij}}{S_j} (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m); \text{若 } x_{ij} \geq S_j, z_{ij} = 1$$

限制类指标采用公式:

$$\text{若 } x_{ij} < S_j, z_{ij} = \frac{S_j}{x_{ij}} (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m); \text{若 } x_{ij} \geq S_j, z_{ij} = 1$$

式中,  $x_{ij}$  为各项指标的现状值;  $S_j$  为各项指标的阈值(下限值);  $n$  为评价区域数;  $m$  为评价指标数<sup>[17]</sup>。

运用确定的指标阈值对重庆三峡库区生态安全指标的现状值(2007年)进行标准化后,结果如表5。从表中可以看出11个指标现有的情况参差不齐,且总体水平不高。其高中得分较高的是固定资产投资比,除此以外,污染处理率和单位污染环保投资也相对较高为0.8。单位林地产值、城市化率、人口增长率、森林覆盖率为区域限制因子都在0.7以下,其他因子则处于0.7—0.8之间。

表5 生态安全阈值的验证结果

Table 5 The verification results of ecological safety threshold

年份 Years	净 GDP Net GDP	GDP	净 GDP-GDP Net GDP-GDP	验证值 Verification Value
2008	22777100	29037600	-6260500	-0.215599774
2009	24666800	30870000	-6203200	-0.200945902
2010	27686900	33910900	-6224000	-0.183539806
2011	30847000	37175300	-6328300	-0.17022862
2012	34157300	40679500	-6522200	-0.160331371
2013	40628900	44440500	-3811600	-0.085768612
2014	45273700	48477000	-3203300	-0.066078759
2015	50104400	51808800	-1704400	-0.032897886
2016	55724600	55757200	-32600	-0.000584678
2017	60378500	60145000	233500	0.003882284

### 3.3.2 生态安全综合评价

综合指数法是指在确定一套合理的经济效益指标体系的基础上,对各项经济效益指标个体指数加权平均,计算出经济效益综合值,用以综合评价经济效益的一种方法。根据综合指数法进行生态安全综合评价,先将各指标标准化,然后进行加权计算,得到重庆三峡库区生态安全综合评价结果(表6)。从表中可以看出:(1)2001—2007年重庆三峡库区的生态安全系数在逐渐升高,可见政府的环保政策和群众的环境意识起了很大的作用,使得其指数得到有效的提高;(2)2007年库区生态安全综合指数为0.595,说明现在库区正处于敏感时期,现阶段的指导措施将对未来发展起到关键作用,因此,政府部门应当做好防范措施,以确保实现库区的可持续发展。

表6 2001—2007年重庆三峡库区生态安全评价表

Table 6 Chongqing Three Gorges Reservoir Ecological Security Evaluation Form during 2001—2007

项目 Project	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
驱动力指数 Driving force index	0.110	0.112	0.113	0.114	0.114	0.115	0.116
压力指数 Pressure Index	0.058	0.059	0.059	0.060	0.060	0.06	0.062
状态指数 State index	0.052	0.059	0.177	0.209	0.229	0.265	0.285
影响指数 Impact index	0.031	0.033	0.034	0.041	0.047	0.05	0.052
响应指数 Response Index	0.041	0.053	0.064	0.065	0.067	0.079	0.080
综合指数 Composite Index	0.292	0.316	0.447	0.489	0.517	0.569	0.595

## 4 讨论与结论

阈值代表一个临界值,生态安全的阈值是指实现生态安全可持续发展的范围。目前国内还没有计算生态安全阈值切实可行的模型和方法。如数字模型法、生态模型法、景观模型法、数字地面模型法等,这些方法都不同程度的表现出其优缺点。数字模型法主要体现生态安全评价的综合性、整体性和层次性,但易将问题简单化,难以反映系统本质。生态模型法表达简明,易于理解,但过于强调社会经济对环境的影响而忽略其他环境影响因素的作用。景观生态学的方法相对较新,也表现出相当的适用性。数字地面模型法是 RS 与 GIS 相结合,采用栅格数据结构,叠加容易,逻辑运算简单能够实现和完成上述几种模型的评价运算。本文采用的系统动力学方法以反馈控制理论为基础,建立系统动态模型,主要特点是能方便地处理非线性和时变现象,能作长期的、动态的、战略性的仿真分析与研究。

文章通过在系统动力学模型的基础上确定生态安全指标阈值。重庆三峡库区是生态脆弱地区,由于三峡工程的修建,进行了大量开发,生态系统遭到了不同程度的破坏。再加上大量的移民工程,给库区生态安全带来了巨大压力。根据其特殊的地域特征,选取 GDP 总量、人口总量、环境污染量作为主要变量,粮食产出率、森林覆盖率、水土流失率等指标作为其重要的参数因子,选取水土流失面积、净 GDP、污染处理量等作为评价因子,最终建立了重庆三峡库区生态安全系统动力学模型和生态安全指标评价体系,并通过建立资源衰竭型、可持续发展型和自然状态型 3 种不同的情景进行模拟,从研究结果可以得出可持续发展型是符合库区生态安全后续发展的优化模式,可以实现净 GDP 的良好增长并有效控制环境污染量,而其他两种模式则不符合其发展要求。其模拟结果为最终确定其阈值范围提供了重要的参考依据。最后还将确定的阈值范围进行了检验,最终得出的结果符合库区可持续发展的各项指标,验证了阈值的可行性,即在其阈值范围内进行的生态安全活动可以有效实现其可持续发展的要求。

本文运用 DPSIR 模型构建重庆三峡库区的生态安全指标体系,充分展示了区域生态安全指标体系的优点,但仍有一些问题需要进一步分析和研究。如:对于模型中各个指数包含的指标有不尽合理的地方且数量也较少,所能反映的问题有限,并且当前的指标体系偏重于评价功能,对政策的指导作用相对比较弱。然后运用系统动力学模型通过动态模拟的方式进行计算,由此确定其生态安全指标的阈值并进行了检验,可以为相关研究提供借鉴,同时也为有关部门制定相关政策提供指导作用。但同时也有需要改进的地方如模型的建立还需要完善,指标体系及其权重的确定还需要进一步研究,希望在以后的研究中有更大的提高。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 陈国阶. 论生态安全. 重庆环境科学, 2002, 24(3): 1-3, 18-18.
- [ 2 ] 曲格平. 关注生态安全之一: 生态环境问题已经成为国家安全的热门话题. 环境保护, 2002, (5): 3-5.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 陈星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8-20.
- [ 5 ] 屈波, 谢世友. 重庆三峡生态经济区生态安全及对策. 地域研究与开发, 2006, 25(1): 120-124.
- [ 6 ] 韩晨霞, 赵旭阳, 贺军亮, 刘浩杰. 石家庄市生态安全动态变化趋势及预警机制研究. 地域研究与开发, 2010, 29(5): 99-103.
- [ 7 ] 黎晓亚, 马克明, 傅伯杰, 牛树奎. 区域生态安全格局: 设计原则与方法. 生态学报, 2004, 24(5): 1055-1062.
- [ 8 ] 左伟, 王桥, 王文杰, 吴秀芹, 杨一鹏, 杨丽静, 朱晓华. 区域生态安全综合评价模型分析. 地理科学, 2005, 25(2): 209-214.
- [ 9 ] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 薛雄志. 生态安全研究进展. 生态学报, 2005, 25(4): 861-868.
- [ 10 ] 刘丽梅, 吕君. 生态安全的内涵及其研究意义. 内蒙古师范大学学报, 2007, 36(3): 36-42.
- [ 11 ] Fallis D. Attitudes toward epistemic risk and the value of experiments. *Studia Logica*, 2007, 86(2): 215-246.
- [ 12 ] 李中才, 刘林德, 孙玉峰, 崔金荣. 基于 PSR 方法的区域生态安全评价. 生态学报, 2010, 30(23): 6495-6503.
- [ 13 ] 孙翔, 朱晓冬, 李扬帆. 港湾快速城市化地区景观生态安全评价—以厦门市为例. 生态学报, 2008, 28(8): 3563-3573.
- [ 14 ] Schaeffer D J, Cox D K. Establishing ecosystem threshold criteria // Norton B G, Costanza R, Haskell B. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington DC: Island Press, 1992: 157-169.
- [ 15 ] Uehara T. Ecological threshold and ecological economic threshold: Implications from an ecological economic model with adaptation. *Ecological*

- Economics, 2013, 93(6): 374-384.
- [16] 李华, 蔡永立. 基于 SD 的生态安全指标阈值的确定及应用——以上海崇明岛为例. 生态学报, 2010, 30(13): 3654-3664.
- [17] Karr J R. Defining and assessing ecological integrity: Beyond water quality. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, 12(9): 1521-1531.
- [18] Chen D J, Xu Z M. Application and discussion of ecological footprint in add areas of China: a case study in Xinjiang Uygur Autonomous Region. Arid Land Geography, 2001, 24(4): 305-309.
- [19] Cao X X. Ecological security evaluation of tourism destination based on ecological footprint analyses — A case of Kaifeng City. China Population, Resources and Environment, 2006, 16(2): 70-75.
- [20] 梁福庆, 郑根保, 张平. 简论三峡库区移民开发的资源环境可持续开发利用. 水利经济, 2004, 22(2): 54-58.
- [21] 屈波, 谢世友, 邹红. 三峡库区生态安全问题与对策. 生态环境, 2004, 13(1): 146-147.
- [22] 尹忠东, 张远桥, 朱首军, 张岩. 三峡库区县域生态安全初探. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 79-82.
- [23] 周旭. 我国生态安全评价研究综述. 西华师范大学学报, 2007, 28(3): 200-206.
- [24] 孙焯, 梁冬梅. 系统动力学在环境保护中的应用. 安徽农业科学, 2012, 40(7): 4185-4187.