

# 基于系统动力学的长江经济带生态安全预警研究

柯小玲<sup>1, 2</sup> 王晨曦<sup>1, 3</sup> 郭海湘<sup>1</sup> 史薇<sup>11</sup>

(1 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 湖北 武汉 430074;

2 中国地质大学(武汉)能源环境管理与决策研究中心, 湖北 武汉 430074;

3. 重庆大学管理科学与房地产学院, 重庆 400000)

**【摘要】:** 随着长江经济带城市化进程加快, 一系列生态安全问题相伴而生, 严重制约了长江经济带的发展。生态安全预警研究有助于及时发现威胁生态安全的因素, 并对未来生态安全发展趋势进行预测预警, 做到“事前控制”。以长江经济带 11 个省市全流域为研究区域, 基于 PSR 概念模型构建生态安全预警指标体系, 然后运用系统动力学理论建立城市生态安全系统仿真模型, 旨在揭示长江经济带 2007~2025 年的生态安全变化特征, 为生态安全预警提供理论依据。结果表明: (1) 2007~2025 年长江经济带整体生态安全水平逐年提升, 2013 年后提升趋势更为显著; (2) 区域间的生态安全状态差异显著, 呈现“东西较高, 中间较低”的空间特征; (3) 在具体指标上, 固定资产投资完成额、城镇化率、环保投资占 GDP 比重对生态安全压力、状态和响应的影响最大。

**【关键词】:** 系统动力学 生态安全 预警

**【中图分类号】:** X826;F124.5 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)12-2905-10

生态安全同国防安全、经济安全、信息安全一样, 是国家安全的重要组成部分。生态安全研究最早始于 20 世纪 70 年代, Brown 首次提出环境生态安全概念并对其进行研究<sup>[1]</sup>, 随后伴随着全球生态环境问题的日益凸显, 生态安全问题成为学术界关注的重点。长江经济带横跨中国东中西三大区域, 跨省界断面多, 流域上下游关系复杂, 流域整体性保护不足。2018 年 4 月, 习近平总书记在武汉主持召开深入推动长江经济带发展座谈会, 强调要把修复长江生态环境摆在压倒性位置, 共抓大保护、不搞大开发, 建立健全资源环境承载能力监测预警长效机制。可见, 生态安全预警研究对促进长江经济带高质量发展具有重要的现实意义。

生态安全评价和预警是生态安全研究的重难点。国内外学者对于生态安全的评价研究主要集中在指标体系、指标权重、评价方法等方面。在指标体系的构建上, 常用的概念模型有联合国经济合作发展组织提出的“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response, PSR)模型、联合国可持续发展委员会提出的“驱动力-状态-响应”(Drivingforce-State-Response, DSR)模型, 以及欧洲环境署综合 PSR 模型和 DSR 模型提出的“驱动力-压力-状态-影响-响应”(Drivingforce-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR)模型等。如张博等<sup>[2]</sup>基于 DPSIR 模型选取了 15 个指标测算“一带一路”沿线重要省份土地生态安全值, 进而评价其土地生态安全状况。生态安全评价指标权重测算方法主要包括主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法主要有层次分析法、德尔菲法等。客观赋权法主要有熵值法、主成分分析法等。如 Ou 等<sup>[3]</sup>运用熵值法计算云南省生态安全屏障影响因素的权重, 进一

**作者简介:** 柯小玲(1980~), 女, 副教授, 主要研究方向为区域经济与可持续发展。E-mail: kxlcug@163.com

**基金项目:** 湖北省社科基金一般项目(2020049)

步分析区域生态安全的障碍因子。生态安全的评价方法主要有神经网络法<sup>[4]</sup>、灰色聚类法<sup>[5]</sup>、景观生态法<sup>[6]</sup>、系统动力学法等<sup>[7]</sup>。如孙剑锋等<sup>[8]</sup>通过构建 BP(Back Propagation)神经网络模型,对 2016 年中国沿海 53 个地级市海洋生态文明建设水平进行测度。

国外对生态安全预警的研究起步较早,已形成较为完整的理论体系和系统方法,研究成果主要关注自然灾害预警<sup>[9]</sup>、生态风险预警<sup>[10]</sup>和生态环境冲突预警<sup>[11]</sup>。如 Bartosz 等<sup>[12]</sup>针对洪水泛滥问题,提出建立早期预警系统来减轻自然灾害的影响。我国生态安全预警研究始于上世纪 90 年代,傅伯杰<sup>[13]</sup>首次提出区域生态预警的原理、预警过程及方法,随后部分学者进行了实践研究,研究对象主要包括耕地<sup>[14]</sup>、森林<sup>[15]</sup>、省域<sup>[16]</sup>等方面。如麦丽开·艾麦提等<sup>[17]</sup>运用灰色 GM(1, 1)预测模型对叶尔羌河平原绿洲耕地 2018~2025 年的警情演变趋势进行预测。

综上所述,现有研究成果对生态安全现状进行评价研究较多,关注生态安全预测预警的成果较少,而生态安全预警研究有助于及时发现威胁生态安全的因素,并对未来生态安全发展趋势进行预测预警,做到“事前控制”。并且,现有研究成果主要集中于土地、森林、河流、湖泊等自然生态系统的研究,聚焦城市生态系统的成果相对较少,对长江经济带 11 个省市全流域进行生态安全预警研究的成果几乎没有。鉴于此,本文以长江经济带全流域为研究对象,基于 PSR 概念模型建立生态安全预警指标体系,然后运用系统动力学理论构建长江经济带生态安全预警仿真模型,模拟预测 2007~2025 年长江经济带 11 个省市的生态安全状况,从时间和空间两个维度深入分析其发展趋势,并提出生态安全预警的应对措施与建议。

## 1 研究区域与数据来源

长江经济带覆盖江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、四川、云南、贵州、上海和重庆九省二市,它是中央重点实施的“三大战略”所在地之一,是具有全球影响力的内河经济带,也是生态文明建设的先行示范带。长江经济带以全国 21%的国土面积,养育了全国 43%的人口,创造了超 46.2%的经济总量。

本文选取长江经济带 2007~2018 年数据进行研究,数据主要来源于长江经济带 11 个省市的《统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国循环经济年鉴》和《中国第三产业统计年鉴》等。对于部分缺失数据,利用 SPSS 软件进行线性回归拟合填补。这是因为缺失数据的指标变量均与时间变量存在显著的线性相关关系,因此假设缺失数据不会发生突变的前提下,利用 SPSS 软件对缺失数据进行线性回归拟合填补。其原理如下:

设 A 为缺失变量,  $B_j(j=1, 2, 3, \dots, n)$  是与 A 存在线性回归关系的变量,那么 A 中第 i 个缺失值的估计值可以表示为:

$$A_i = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j B_j \quad (1)$$

## 2 生态安全预警指标体系构建

生态安全预警指标体系应符合系统性、科学性和实践性的原则。本文以 PSR 概念模型作为准则层,选取“社会-经济-自然”3 个方面作为方案层,构建长江经济带生态安全预警指标体系,指标体系由高频指标和特色指标构成。高频指标是生态安全评价领域学者们认可度较高的指标,特色指标来自于国家有关长江经济带的相关文件,是长江经济带区域生态安全特色的体现。指标体系具体构建依据如下:

(1) 高频指标:

在中文社会科学引文索引(CSSCI)、科学引文索引(SCI)以及其他管理类核心期刊中,检索出 2001~2019 年的 322 篇相关文

献，其中 CSSCI 文献 236 篇，SCI 文献 7 篇，EI 文献 39 篇，其他管理类核心期刊 40 篇。对文献中的生态安全评价指标进行统计梳理，选取其中的高频指标 21 个。

## (2) 特色指标：

为充分考虑长江经济带生态安全系统的独特性，引入 2018 年习近平总书记《在深入推动长江经济带发展座谈会上的讲话》中提到的重要影响因素作为特色指标，从而保证了整个指标体系既符合国家战略方向，又体现长江经济带生态安全的特点<sup>[18]</sup>。

合并以上两类指标，剔除重复指标后，最终确定包含准则层、方案层、指标层 3 个层次共 25 个指标。

## 3 生态安全预警仿真模型建立

本文采用系统动力学方法建立生态安全预警仿真模型。首先分析城市生态系统构成及其影响要素，然后基于历史和现状数据建立仿真模型，并采用模拟实验法对仿真模型的参数进行调试和选择。具体来说，以长江经济带 2007~2013 年的历史数据作为模型参数的拟合依据，然后运用 2014~2018 年的数据检验模型仿真的准确性，在模型满足检验要求的条件下，模拟仿真长江经济带 2019~2025 年的生态安全状态。由于城市生态系统的构成及其影响要素是稳定的，如果模型通过了敏感性检验、历史数据检验等各项检验，即可证明仿真模型的有效性，可以用来预测城市未来的生态安全发展趋势。

### 3.1 城市生态安全系统结构流程图

城市生态系统是由社会子系统、经济子系统、自然子系统构成的复合人工生态系统。其中，社会子系统以人为中心，自然子系统涵盖城市居民赖以生存的基本物质环境，经济子系统强调资源的流动。基于城市生态系统的构成特点，结合上述生态安全预警指标体系绘制长江经济带生态安全系统结构流程图(图 1)。

### 3.2 构建生态安全系统动力学方程

模型以 2007 年为研究基准年，以 1a 为步长，模拟 2007~2025 年的主要变量值。本文仿真模型的参数主要有 3 类：常量、状态变量和辅助变量。对于研究期内保持不变或变化甚微的量，当作常量处理，如城市面积；随着时间的变化有积累效应的变量，当作状态变量处理，如废水存量，其初始值设定为 2007 年的统计数值；其它的变量归为辅助变量。方程通过多元线性回归方法、变量间逻辑关系获得。以上海市为例，模型的主要方程式如下：

$$\text{废水处理量} = \text{城市污水处理率} * \text{废水排放总量}$$

$$\text{R\&D 经费内部支出占 GDP 比重} = \text{R\&D 经费内部支出} / \text{地区总产值}$$

$$\text{环保投资占 GDP 比重} = \text{环保投资} / \text{地区总产值}$$

$$\text{万元 GDP 能耗} = \text{能源消费量} / (\text{地区总产值} * 10000)$$

$$\text{医疗卫生支出占 GDP 比重} = \text{医疗卫生支出} / \text{地区总产值}$$

$$\text{教育支出占 GDP 比重} = \text{教育支出} / \text{地区总产值}$$



的边界与结构进行了深入研究，选取社会、经济、自然三大子系统的关键要素构建本模型的结构，所建模型与实际系统的结构相一致，符合模型的一致性。

### 3.3.2 结构稳定性检验

采用积分误差测试的方法验证模型结构的稳定性，以上海市的从业人口为例，分别选取①STEPTIME=0.5;②STEPTIME=0.75;③STEPTIME=1;④STEPTIME=1.25;⑤STEPTIME=1.5 进行模型稳定性检验，检验结果见图 2。从图 2 可以看出，随着 STEPTIME 的变化，从业人口的变化趋势大致相同，符合结构的稳定性检验标准。其它变量也通过了检验。

### 3.3.3 敏感性检验

主要是检验模型仿真结果对参数变动的敏感程度。以第二产业产值为例，分别取参数值为①年末人口增长率=1.5%②年末人口增长率=3%③年末人口增长率=4.5%，检验结果如图 3 所示，表明参数值的变化不会对模型运行结果产生很大影响，模型的灵敏度较好。

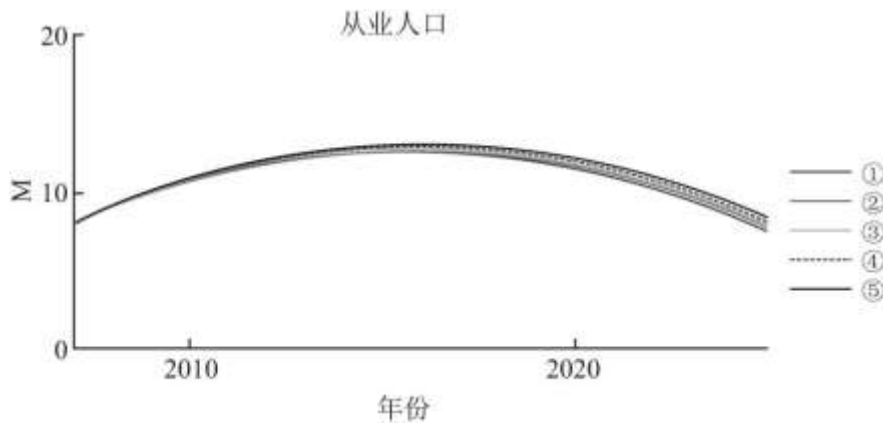


图 2 时间间隔变动引起结构稳定性的变动情况

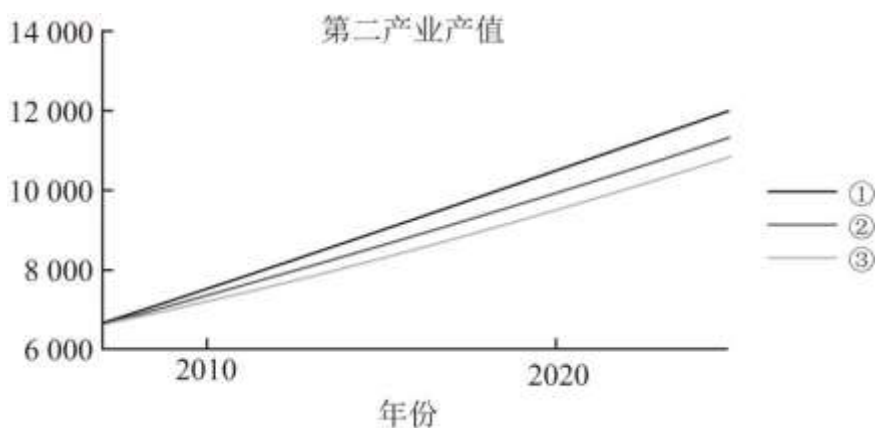


图 3 年末人口增长率引起模型敏感性变化情况

### 3.3.4 历史数据检验

上海市城市生态安全仿真数据检验结果如表 1 所示：125 个仿真值中，有 120 个仿真值和实际值之间的误差在 10%以内，即 96%的仿真值符合历史性检验要求，检验结果良好，仿真数据用于预测可信度较高。

## 4 实证分析

### 4.1 长江经济带生态安全仿真结果

根据 3.2 中的方程式，基于 2007~2018 年的历史数据，利用 Vensim 软件对长江经济带城市生态安全仿真系统动力学模型进行仿真运算，得到长江经济带 11 个省市 2019~2025 年的生态安全仿真预测值。以上海市为例，仿真预测结果见表 2。

### 4.2 长江经济带生态安全预警

基于上述城市生态安全评价指标的预测值，采用熵值法计算各指标的权重，然后通过计算综合指数值量化长江经济带 11 个省市 2007~2025 年的生态安全综合状态，进行生态安全预警分析。

#### 4.2.1 预警指标权重

为了消除各个指标数据单位与量纲的影响，本文首先采用极差法对数据进行归一化处理，然后采用熵值法计算指标权重。根据权重计算结果，生态安全压力指标中固定资产投资完成额的权重最大，为 0.076，说明固定资产投资是影响生态安全压力大小的主要因素；生态安全状态指标中城镇化率的权重最大，为 0.071，且远大于其他生态安全状态指标的权重，说明城镇化率对城市生态安全的状态影响很大；生态安全响应指标中环保投资占 GDP 比重的权重最大，为 0.113，直观地反映出增大环保投资力度对于提升城市生态安全水平有着显著效果。

表 1 上海市城市生态安全仿真数据和历史数据比较(2014~2018 年)

SD 变量	年份	预测值	真实值	误差率 (%)	SD 变量	年份	预测值	真实值	误差率 (%)
年末人口(万人)	2014	2472.480	2415.150	2.37	万元 GDP 能耗(t 标准煤 /万元)	2014	0.523	0.530	-1.32
	2015	2504.310	2425.680	3.24		2015	0.502	0.480	4.59
	2016	2523.770	2415.270	4.49		2016	0.458	0.460	-0.55
	2017	2530.360	2419.700	4.57		2017	0.411	0.450	-8.73
	2018	2523.780	2418.330	4.36		2018	0.381	0.410	-5.95
固定资产投资完成额(亿元)	2014	5900.560	5647.790	4.48	R&D 经费内部支出占 GDP 比例 (%)	2014	3.380	3.490	-3.18
	2015	6144.750	6016.430	2.13		2015	3.440	3.580	-3.93
	2016	6388.970	6352.700	0.57		2016	3.570	3.650	-2.10
	2017	6633.160	6755.880	-1.82		2017	3.710	3.720	-0.44
	2018	6877.380	7246.600	-5.10		2018	3.790	3.750	1.11

人口密度(人/km <sup>2</sup> )	2014	3890.000	3809.000	2.38	环保投资占GDP比重(%)	2014	2.610	2.810	-7.28
	2015	3950.000	3826.000	3.24		2015	2.640	2.270	16.17
	2016	3981.000	3809.000	4.51		2016	2.700	2.820	-4.14
	2017	3991.000	3809.000	4.78		2017	2.770	3.000	-7.63
	2018	3981.000	3814.000	4.37		2018	2.810	3.100	-9.23
建成区绿化覆盖率(%)	2014	38.440	38.400	0.09	在校高中生人数(万人)	2014	51.035	50.480	1.10
	2015	38.550	38.400	0.38		2015	51.091	50.660	0.85
	2016	38.660	38.500	0.40		2016	51.205	51.160	0.09
	2017	38.770	38.800	-0.09		2017	51.317	51.470	-0.30
	2018	38.870	39.100	-0.58		2018	51.385	51.490	-0.20
固体废弃物综合利用率(%)	2014	96.220	97.120	-0.92	城市空气质量优良天数比例(%)	2014	71.620	66.000	8.51
	2015	96.220	97.510	-1.32		2015	71.870	77.000	-6.66
	2016	96.230	96.150	0.08		2016	72.480	70.700	2.52
	2017	96.230	97.320	-1.12		2017	73.260	75.400	-2.84
	2018	96.240	96.360	-0.13		2018	73.850	75.300	-1.92
人均耕地面积(hm <sup>2</sup> )	2014	0.00854	0.00934	-8.80	森林覆盖率(%)	2014	13.780	13.100	5.19
	2015	0.00834	0.00800	3.89		2015	14.240	14.000	1.72
	2016	0.00814	0.00800	1.94		2016	14.700	15.030	-2.19
	2017	0.00807	0.00800	0.53		2017	15.160	15.620	-2.94
	2018	0.00800	0.00800	-0.36		2018	15.620	16.200	-3.57
化肥施用量(万t)	2014	10.210	10.780	-5.24	城市污水处理率(%)	2014	86.250	87.700	-1.65
	2015	10.030	10.150	-1.20		2015	86.780	89.800	-3.36
	2016	9.880	9.920	-0.36		2016	88.080	92.900	-5.19
	2017	9.780	9.550	2.40		2017	89.740	94.500	-5.04
	2018	9.710	8.900	9.14		2018	91.010	94.500	-3.70
农药施用量(万t)	2014	0.460	0.500	-8.98	工业SO <sub>2</sub> 排放量(万t)	2014	17.640	17.290	2.00
	2015	0.430	0.470	-8.88		2015	15.800	15.540	1.69
	2016	0.420	0.440	-5.64		2016	11.360	10.490	8.26

	2017	0.410	0.390	4.04		2017	5.680	6.740	-15.72
	2018	0.400	0.370	8.05		2018	1.340	1.270	5.47
第三产业占 GDP 比重 (%)	2014	66.320	63.180	4.96	教育支出占 GDP 比重 (%)	2014	2.820	3.050	-7.57
	2015	69.290	64.820	6.89		2015	2.850	2.890	-1.37
	2016	67.970	67.760	0.31		2016	2.910	2.990	-2.66
	2017	65.330	70.120	-6.83		2017	2.970	2.980	-0.35
	2018	64.730	69.180	-6.43		2018	3.010	2.850	5.58
人均 GDP(万元)	2014	8.900	9.200	-3.47	废水中氨氮排放量(万 t)	2014	4.590	4.460	3.02
	2015	9.200	9.900	-7.40		2015	4.490	4.500	-0.29
	2016	10.100	10.600	-5.06		2016	4.230	4.250	-0.58
	2017	11.300	11.600	-3.04		2017	3.890	3.800	2.40
	2018	12.300	12.700	-3.14		2018	3.890	3.700	5.17
城镇化率 (%)	2014	84.500	90.000	-6.11	人均供水量(千 m <sup>3</sup> )	2014	0.126	0.132	-4.31
	2015	84.200	90.300	-6.73		2015	0.125	0.131	-4.22
	2016	85.500	90.400	-5.43		2016	0.128	0.129	-3.48
	2017	87.700	90.500	-3.08		2017	0.125	0.132	-5.68
	2018	89.800	87.700	2.41		2018	0.126	0.128	-1.99
	2014	21.230	23.560	-9.88					
化学需氧量(万 t)	2014	21.230	23.560	-9.88	废水排放总量(亿 t)	2014	22.210	22.300	-0.43



	2015	20.440	22.440	-8.90		2015	22.130	22.120	0.02
	2016	18.530	19.880	-6.79		2016	21.930	22.410	-2.13
	2017	16.090	14.750	9.05		2017	21.690	22.080	-1.79
	2018	14.220	14.180	0.26		2018	21.500	21.200	1.40
医疗卫生支出占 GDP 比重(%)	2014	1.119	0.965	15.89					
	2015	1.144	1.100	3.99					
	2016	1.197	1.183	1.17					
	2017	1.251	1.359	-7.99					
	2018	1.285	1.346	-4.52					

表 2 上海市 2019~2025 年生态安全仿真预测值

指标名称	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
人口密度(人/km <sup>2</sup> )	3897.000	3825.000	3733.000	3623.000	3496.000	3354.000	3198.000
年末人口(万人)	2470.910	2425.030	2366.820	2296.990	2216.430	2126.220	2027.570
固定资产投资完成额(亿元)	7366.000	7610.000	7854.000	8098.000	8343.000	8587.000	8831.000
建成区绿化覆盖率(%)	39.090	39.200	39.310	39.420	39.530	39.640	39.750
森林覆盖率(%)	16.540	17.000	17.460	17.920	18.380	18.840	19.300
人均耕地面积(hm <sup>2</sup> )	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009
化肥施用量(万 t)	9.700	9.750	9.840	9.980	10.160	10.390	10.680
农药施用量(万 t)	0.400	0.400	0.410	0.420	0.440	0.460	0.490
第三产业占 GDP 比重(%)	70.550	72.260	70.940	68.630	67.860	69.340	71.740
人均 GDP(万元)	13.100	13.800	15.300	17.200	18.900	20.300	21.600
城镇化率(%)	82.440	84.150	86.570	89.660	93.290	97.420	99.990
教育支出占 GDP 比重(%)	3.030	3.050	3.080	3.110	3.140	3.150	3.150
医疗卫生支出占 GDP 比重(%)	1.300	1.320	1.340	1.370	1.390	1.400	1.400
R&D 经费内部支出占 GDP 比例(%)	3.840	3.870	3.940	4.010	4.060	4.080	4.090
万元 GDP 能耗(t/标准煤)	0.350	0.339	0.317	0.293	0.276	0.269	0.266

环保投资占 GDP 比重 (%)	2.840	2.850	2.890	2.920	2.950	2.960	2.960
在校高中生人数 (万人)	51.420	51.446	51.499	51.553	51.589	51.605	51.612
城市空气质量优良天数比例 (%)	74.200	74.490	75.140	75.960	76.600	76.900	77.040
固体废弃物综合利用率 (%)	96.236	96.238	96.240	96.242	96.244	96.244	96.245
城市污水处理率 (%)	91.740	92.360	93.750	95.490	96.850	97.480	97.790
工业 SO <sub>2</sub> 排放量 (万 t)	5.110	2.640	1.830	1.160	0.810	0.690	0.630
化学需氧量 (万 t)	13.130	12.220	10.170	7.600	5.600	4.670	4.210
废水中氨氮排放量 (万 t)	3.490	3.360	3.080	2.730	2.460	2.330	2.270
人均供水量 (千 m <sup>3</sup> /人)	0.129	0.132	0.136	0.141	0.146	0.153	0.161
废水排放总量 (亿 t)	21.390	21.300	21.090	20.830	20.630	20.530	20.490

#### 4.2.2 长江经济带生态安全预警结果与分析

为了量化长江经济带各省市的生态安全状态,客观准确地反映其真实水平,本文运用综合指数法的加权思想,计算长江经济带各省市的生态安全预警综合指数值,公式如下:

$$E_{ij} = W_1 Y_{1j} + W_2 Y_{2j} + \dots + W_j Y_{ij} \quad (2)$$

式中:  $W_j$  表示第  $j$  个指标的权重;  $Y_{ij}$  表示第  $i$  年第  $j$  个指标数据标准化后的数值。其中,2007~2018 年采用各指标实际统计数据,2019~2025 年采用 4.1 节计算出的各指标仿真预测值。

通过公式(2)计算得到长江经济带 11 个省市 2007~2025 年的生态安全预警综合指数值,如图 4 所示。

为了更直观地反映城市生态安全状况,依据准确性、科学性和简便性的原则,参考张秋霞等<sup>[19]</sup>、赵鹏宇等<sup>[20]</sup>、麦丽开·艾麦提等<sup>[21]</sup>等学者的研究成果,结合国家环境安全等级划分标准,确定生态安全警情等级标准:[0,0.2]表示重警,[0.2,0.4]表示中警,[0.4,0.6]表示轻警,[0.6,0.8]表示较安全,[0.8,1]表示安全。

选择 2007、2013、2019 和 2025 年 4 个典型年份,运用 ArcGIS 软件绘制出长江经济带生态安全警情空间分布图(图 5)。



图 4 长江经济带 2007~2025 年生态安全预警综合指数值

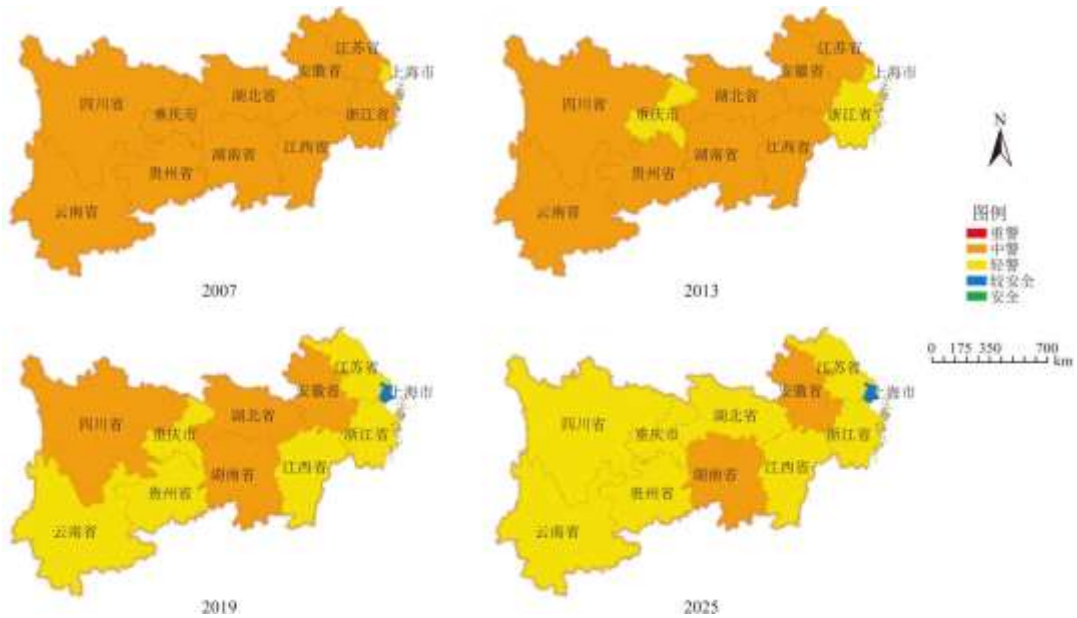


图 5 长江经济带 2007~2025 年生态安全警情空间分布图

从时间动态特征来看，2007~2025 年，长江经济带生态安全水平总体不断改善和提升，个别年份略有波动，2013 年后改善趋势更为明显。这与吴艳霞等<sup>[22]</sup>的研究结论一致，其研究发现长江经济带环境容量指数在 2006~2017 年一直呈平稳上升状态。具体分析，2007 年，长江经济带大部分省市处于橙色中警等级，而 2013~2019 年，大部分区域生态环境有了明显改善。其中，上海市由黄色轻警提升为蓝色较安全状态，云南、贵州、江西、江苏由橙色中警提升为黄色轻警，这与近些年国家重视长江生态环境保护密切相关。此外，这期间这几个省份严格把控工农业污染物的排放标准，缓解了生态安全压力，同时加大生态保护措施的投入力度，提升了生态安全响应成效。根据模型预警结果可知，2025 年，长江经济带各省市生态安全状态持续向好，各省市生态安全综合指数值处在 0.3757~0.6795，除湖南省和安徽省是橙色中警，其它省市都提升为黄色轻警。湖南和安徽两省生态稍显落后的主要原因是其生态安全压力较大，相关污染物排放把控效果不显著，化肥施用量、农药施用量、废水排放总量均呈现出上升趋势。

从空间分布特征来看，长江经济带 11 个省市生态安全水平空间差异显著，呈现出“东西较高、中间较低”的空间分布特征。总体来看，下游省市平均生态安全水平高于上游和中游省市，上海市生态安全水平最高。这与王旭熙等<sup>[23]</sup>的研究结论相同，其研

---

究发现长江下游城市生态环境综合指数整体高于中游和上游。这是由于长江下游占据了长江三角洲的地理优势，经济联系紧密，环境治理与区域协调效果较好，而中游地区经济快速城市化带来了巨大的人口压力与环境压力，制约了生态安全水平的提高。长江上游地区虽是我国重要的生态屏障，也是珍贵的资源富集区，但生态环境保护 and 区域经济发展的矛盾较为突出。

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

本文基于 2007~2018 年长江经济带 11 个省市的面板数据，运用系统动力学理论构建生态安全预警仿真模型，对长江经济带近 20a 的生态安全状态进行预警分析。受数据获取的限制，本文仅以省级行政区为单元进行测度，下一步拟以地级行政区为基本单元进行测度，以得到更为详细的研究结果。主要研究结论如下：

(1) 固定资产投资完成额、城镇化率、环保投资占 GDP 比重分别对生态安全压力、状态和响应的影响最大。由此说明合理规划固定资产投资的结构及规模、推进高质量可持续的城市化发展与增大环保投资力度对于提升长江经济带生态安全水平至关重要。

(2) 从时间特征分析结果来看，长江经济带 11 个省市整体生态安全水平在逐年提高，个别年份略有波动。

(3) 从空间特征分析结果来看，长江经济带各省市的生态安全状态差异显著，呈现“东西较高，中间较低”的格局。

### 5.2 建议

针对以上研究结论，提出如下提升长江经济带生态安全水平的建议：

(1) 基于生态安全压力、状态和响应视角落实生态治理措施。

依据计算出的生态安全指标权重，从经济、人口、污染物排放的角度缓解生态安全压力；严格防控快速城市化带来的负面影响，进一步改善生态安全状态；切实保证在教育、环保方面的投入力度，提升生态安全响应成效。

(2) 构建长江经济带生态环境监测预警长效机制。

长江经济带的预警结果在时间上的分布特征与政策落实效果密不可分，建立生态环境监测预警机制有利于政府及相关机构规避生态风险，及时采取生态应对措施，实现事前控制的目标。

(3) 建立健全长江经济带跨省域生态环境联防联控机制。

长江经济带生态安全水平在空间上呈现“东西较高，中间较低”的空间特征，考虑到生态环境具有空间传导效应，各省市在改善本区域生态环境质量的同时，应进一步推动长江经济带一体化建设，加大上中下游的空间联动效应，增强长江经济带全流域高质量循环。

### 参考文献：

[1] BROWN L R. Building a society of sustainable development [M]. Beijing: Scientific and Technological Literature

---

Press, 1984.

[2]张博,韩琳琳,韩飞.基于DPSIR模型的土地生态安全评价——基于“一带一路”沿线18个省份面板数据[J].世界农业,2017(8):101-105.

[3]OU Z R, ZHU Q K, SUN Y Y. Regional ecological security and diagnosis of obstacle factors in underdeveloped regions: A case study in Yunnan Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(5):870-884.

[4]GUO Q H, JIN S C, LI M, et al. Application of deep learning in ecological resource research: Theories, methods, and challenges[J]. Science China-Earth Sciences, 2020, 63(10):1457-1474.

[5]柯小玲, 向梦, 冯敏. 基于灰色聚类法的长江经济带中心城市生态安全评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(11):1734-1742.

[6]XIE H L, HE Y F, ZHANG N, et al. Spatiotemporal changes and fragmentation of forest land in Jiangxi Province, China[J]. Journal of Forest Economics, 2017, 29(10):4-13.

[7]ZHANG Q, WANG Y G, MI F, et al. Evaluation and scenario simulation for forest ecological security in China[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(5):1651-1666.

[8]孙剑锋, 秦伟山, 孙海燕, 等. 中国沿海城市海洋生态文明建设评价体系与水平测度[J]. 经济地理, 2018, 38(8):19-28.

[9]DA SILVA G F P, PEGETTI A L, PIACESI M T, et al. Dynamic modeling of an early warning system for natural disasters[J]. Systems Research and Behavioral Science, 2019, 37(2):292-314.

[10]LI J L, PU R L, GONG H B, et al. Evolution characteristics of landscape ecological risk patterns in coastal zones in Zhejiang Province, China[J]. Sustainability, 2017, 09(4):1-18.

[11]LIU M, WEI J H, WANG G Q, et al. Water resources stress assessment and risk early warning: A case of Hebei Province China[J]. Ecological Indicators, 2017, 73:358-368.

[12]BALIS B, KASZTELNIK M, BUBAK M, et al. The urban flood common information space for early warning systems[J]. Procedia Computer Science, 2011, 4:96-105.

[13]傅伯杰. 区域生态环境预警的原理与方法[J]. 资源开发与保护, 1991, 7(3):138-141.

[14]杨喜, 卢新海, 侯娇. 长江经济带城市土地开发强度时空格局特征及溢出效应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(4):771-781.

[15]刘夕宁. 森林旅游景区环境承载力分析与机制构建——评《森林旅游景区环境承载力预警机制研究》[J]. 世界林业研究, 2020, 33(3):118.

[16]吴朋, 董会忠, 张峰. 基于熵权物元可拓模型的山东半岛蓝色经济区生态安全预警[J]. 科技管理研究, 2016, 36(15):99-

[17] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 叶尔羌河平原绿洲耕地生态安全评价及预警分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(7):135-144.

[18] 习近平. 在深入推动长江经济带发展座谈会上的讲话[J]. 社会主义论坛, 2019, (10):5-9.

[19] 张秋霞, 张合兵, 刘文锴, 等. 新郑市耕地生态安全动态预警研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1):256-264.

[20] 赵鹏宇, 薛慧敏. 基于 PSR 模型的能源-生态复合区生态安全预警研究——以山西省忻州市为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2):285-290.

[21] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪, 等. 基于 PSR-EEES 模型的叶尔羌河平原绿洲生态安全预警测度[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(2):130-141.

[22] 吴艳霞, 罗恒, 梁志康. 长江经济带生态安全测度研究[J]. 生态学报, 2020, 40(19):6761-6775.

[23] 王旭熙, 彭立, 苏春江, 等. 城镇化视角下长江经济带城市生态环境健康评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(12):132-140.