

DOI: 10.20103/j.stxb.202402070327

杨恒,陶军,刘世梁.基于系统动力学的典型区域生态安全变化特征及情景模拟——以贵州省铜仁市为例.生态学报,2025,45(2):554-566.

Yang H, Tao J, Liu S L.Characteristics and scenario simulation of typical regional ecological security changes based on system dynamics: a case study of Tongren City, Guizhou Province.Acta Ecologica Sinica,2025,45(2):554-566.

基于系统动力学的典型区域生态安全变化特征及情景模拟

——以贵州省铜仁市为例

杨 恒¹,陶 军^{1,2,*},刘世梁³

1 北京师范大学 教育部巨灾模拟与系统性风险应对国际合作联合实验室,珠海 519087

2 北京师范大学国家安全与应急管理学院,北京 100875

3 北京师范大学环境学院,北京 100875

摘要:以贵州省铜仁市为研究对象,建立生态安全评价“压力-状态-响应”(PSR)模型框架,运用系统动力学理论建立铜仁市生态安全系统仿真模型,开展 2005—2020 年铜仁市生态安全评估,揭示其时空演变规律,阐明铜仁市生态安全的影响因素。设定自然增长型、可持续发展型和资源衰竭型三类情景,模拟铜仁市 2020—2035 年的生态安全时空变化特征。结果表明:(1) 2005—2015 年,铜仁市平均生态安全指数增加 14.34%,其中 80%的区县生态安全指数呈上升趋势;2015—2020 年,除万山区和江口县外,其它 8 个区县生态安全指数降低,铜仁市生态安全平均指数降低 7.18%。(2) 林业增加值和环保资金投入是铜仁市生态安全的主要影响因素,而城镇化水平、废水排放量是造成铜仁市生态安全指数下降的主要影响原因。(3) 可持续发展情景下铜仁市生态安全上升,资源衰竭型情景下生态安全下降。该地区实施旅游城镇化策略、平衡资源开发与保护、开展生态环境修复等措施能够有针对性地应对未来不同发展情景下的挑战。

关键词:系统动力学;生态安全;情景模拟;“压力-状态-响应”(PSR)

Characteristics and scenario simulation of typical regional ecological security changes based on system dynamics: a case study of Tongren City, Guizhou Province

YANG Heng¹, TAO Jun^{1,2,*}, LIU Shiliang³

1 Joint International Research Laboratory of Catastrophe Simulation and Systemic Risk Governance, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China

2 School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Taking Tongren City in Guizhou Province as the research object, we establish an ecological security evaluation framework based on the PSR (Pressure-State-Response) model. Using system dynamics theory, we construct a simulation model of the ecological security system for Tongren City and conduct a comprehensive assessment of its ecological security from 2005 to 2020. This study aims to reveal the spatiotemporal evolution patterns and elucidate the influencing factors of ecological security in Tongren City. The research involves analyzing various indicators to understand the pressures, states, and responses within the ecological security framework. We incorporate data from multiple sources, including environmental, economic, and social parameters, to ensure a holistic evaluation. The assessment period from 2005 to 2020

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFF1303204)

收稿日期:2024-02-07; 网络出版日期:2024-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: juntao@bnu.edu.cn

provides insights into how ecological security has evolved over time and the factors that have contributed to these changes. Specifically, the analysis focuses on changes in land use, forest cover, water quality, and pollution levels. Our findings indicate that from 2005 to 2015, the average ecological security index in Tongren City increased by 14.34%, with 80% of the districts and counties showing an upward trend. This improvement can be attributed to enhanced environmental policies, increased investment in ecological protection measures, and improved public awareness and participation in environmental conservation efforts. However, from 2015 to 2020, the ecological security index decreased in all districts and counties except Wanshan District and Jiangkou County, with the average index dropping by 7.18%. This decline highlights emerging challenges such as rapid urbanization, industrialization pressures, and inadequate wastewater management, which have adversely impacted ecological security. The study identifies the added value of forestry and investment in environmental protection as the main factors positively influencing ecological security in Tongren City. Increased forestry activities have contributed to better air quality and biodiversity conservation, while substantial investments in environmental protection have helped mitigate pollution and restore degraded ecosystems. Conversely, urbanization level and wastewater discharge are the primary reasons for the decline in the ecological security index. High levels of urbanization lead to habitat loss, increased waste production, and higher pollution levels, while inadequate wastewater treatment exacerbates water pollution issues. These findings underscore the need for balanced development strategies that mitigate negative impacts on ecological systems and promote sustainable practices. To further understand future trends, we set up three scenarios: natural growth, sustainable development, and resource depletion, to simulate the spatiotemporal changes in ecological security from 2020 to 2035. The results show that under the sustainable development scenario, the ecological security of Tongren City improves, demonstrating the benefits of sustainable practices such as green infrastructure, renewable energy adoption, and comprehensive environmental regulations. In contrast, the resource depletion scenario leads to a decline in ecological security, highlighting the risks associated with unsustainable resource exploitation, deforestation, and over-extraction of water resources. This study suggests that implementing strategies such as tourism urbanization, balancing resource development and protection, and conducting ecological environment restoration can effectively address the challenges posed by different future development scenarios in this region. These measures are crucial for ensuring the long-term ecological security and sustainable development of Tongren City.

Key Words: system dynamics; ecological security; scenario simulation; PSR

随着社会发展,人类活动对生态系统的影响加剧,如:砍伐森林、侵占湿地、环境退化、生物多样性锐减、气候变暖等引发一系列生态环境问题,将会影响经济社会可持续发展,危及区域生态安全^[1-3]。生态安全作为国家安全的重要支撑和组成部分,被明确提出并上升为国家战略^[4]。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^[5]。广义的生态安全概念以国际应用系统分析研究所 (IIASA) 1989 年提出的定义为代表: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^[6]。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,以评价指标的构建和指标综合方法为主的生态安全评估也随之展开^[7]。从研究尺度上来看,从宏观到微观可以分为区域、市域、县域、乡镇等不同尺度研究;从评估对象上来看,分为流域^[8-9]、土地资源利用^[10]、特殊气候^[11]、资源环境敏感区^[12]等;目前生态安全评价方法有“压力-状态-响应”(PSR)模型、生态足迹法、变异系数法、空间相关性分析模型、元胞自动机(CA)等,其中“压力-状态-响应”PSR 框架模型应用较多^[6, 13]。生态安全是区域与国家经济安全及社会安全的自然基础,尤其是生态脆弱区的生态安全问题^[14]。如刘天龙运用 PSR 模型对煤炭资源枯竭型村镇进行了生态安全评价^[15],龙蓉华以黔西南州为例,运用 PSR 模型构建脆弱性评价指标,对黔西南州生态脆弱性时空变化驱动力进行了探讨^[16]。然而基于区域特异性的生态退化问题的生态安全评价研

究较少^[17]。尤其是针对典型生态脆弱区,缺乏不同时期影响区域生态安全的因素的研究以及区域发展情景模拟下生态安全演变的研究。由于 PSR 模型难以反映要素之间因果关系复杂性,所以使用基于系统论、控制论、信息论,综合自然科学和社会科学的系统动力学方法可以更好地理解生态系统的行为^[18]。

武陵山区作为长江流域的重要生态安全屏障,也是典型水土保持区,其发展与生态保护之间的矛盾备受关注。地处武陵山区西部的铜仁市社会经济发展较慢,城镇化率低,但该地区各类矿产资源丰富,开发强度高。如何做到继续区域社会经济发展的同时减少生态环境破坏,成为该地区主要关注的问题^[19]。因此,开展典型区域生态安全动态变化特征和驱动因素分析以及未来发展情景下生态安全的评估研究,对于统筹区域发展与安全具有重要的科学意义和实践参考价值^[20-21]。本研究目标如下:1)基于 PSR 框架,建立生态安全评价指标体系,以县级为单位,构建生态安全评价的系统动力学模型;2)运用熵权-综合指数法,阐明 2005—2020 年铜仁市生态安全的演变特征,揭示其驱动机制;3)基于铜仁市发展规划,探究自然增长型、可持续发展型、资源衰竭型三种发展情景下 2025—2035 年铜仁市生态安全的时空变化特征。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

铜仁市位于贵州省东北部(107°45′—109°39′E,27°07′—29°05′N),地处黔湘渝三省市结合部,东邻湖南省湘西土家族苗族自治州和怀化市,西接遵义市,南连黔东南苗族侗族自治州,北抵重庆市,东西长 106km,南北宽 210km,总面积 18003km²。下设碧江区、万山区、松桃苗族自治县、玉屏侗族自治县、印江土家族苗族自治县、沿河土家族苗族自治县、江口县、石阡县、思南县、德江县(图 1)。铜仁市总人口 449.10 万,聚居着汉、苗、侗、土家、仡佬等 29 个民族,少数民族占总人口的 71.75%。全市地区生产总值从 2016 年的 856.97 亿元增加到 2022 年的 1477.19 亿元,在武陵山片区 6 个地市中,经济总量居第二位。固定资产投资增速 3.9%,规模以上工业增加值增长 0.9%,全市高速公路总里程突破 1000km,密度居全省第二。在生态建设方面,自 2019 年起,铜仁市围绕“山水林田湖草”对水土流失、低效土地、地质灾害、河水污染等生态问题开展一体化生态修复工程。

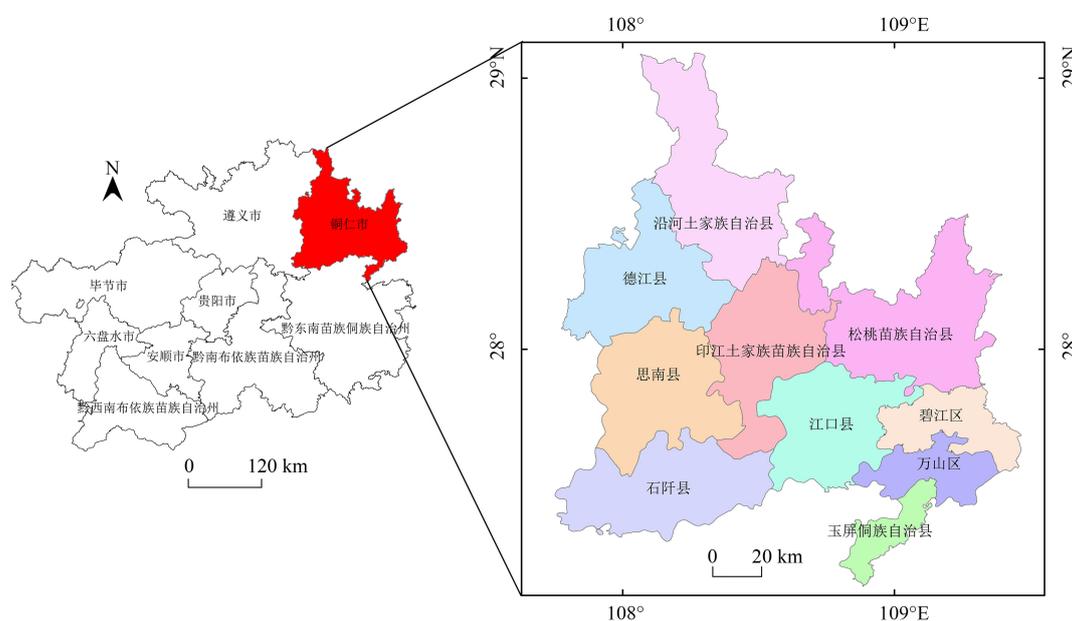


图 1 铜仁市行政区划

Fig.1 Administrative divisions of Tongren

1.2 数据来源

本文选取铜仁市十个区县 2005—2020 年社会经济数据,主要来源于《铜仁市统计年鉴》《贵州省统计年鉴》,土地利用数据采用的是中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)。

2 研究方法

2.1 系统动力学模型建立

系统动力学以分析信息要素之间的因果反馈关系为内容,是一门认识与解决系统、沟通自然科学与社会科学的横向学科。系统动力学能够从行为决策理论、动态决策理论、实验经济学来研究反馈、非线性、多主体以及时滞的系统^[22]。本文根据铜仁市的生态环境特征,构建动力学模型的结构和反馈关系,反映铜仁市经济发展以及人类活动给当地生态环境带来的影响。通过关键变量:人口数量、森林覆盖率、土地垦殖率的变化,影响粮食产量、化肥施用量、固定资产投资、GDP 总量的增长,并以 GDP 的变化来反映污染物排放量、道路里程数的变化,建立系统动力学模型(图 2)。

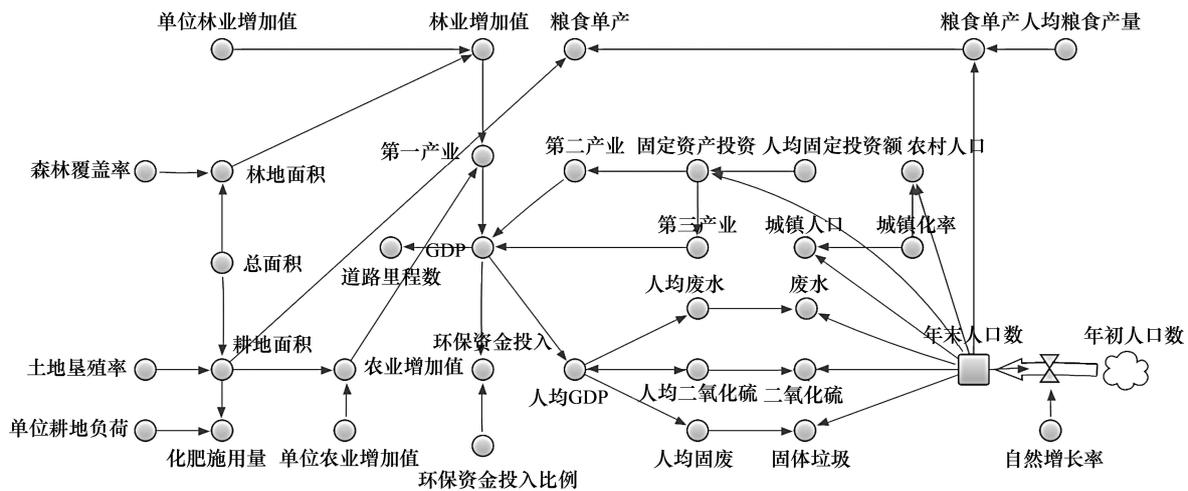


图 2 铜仁市生态安全系统动力学模型结构流程图

Fig.2 Structural flowchart of the ecological security system dynamics model in Tongren

运用 Anylogic 软件建模,时间为 2005—2050 年,仿真步长为 1a。在建模时,由于研究单元为县级尺度,获取的数据对模型的中各信息要素之间的数学逻辑关系会产生影响,为保证模型准确性,本模型运用表函数的方式输入部分的数据,利用线性回归拟合填补^[23]。

2.2 生态安全评价方法

PSR 模型可以清晰地反映人类活动、自然环境与政策措施之间的因果逻辑,即人类活动对环境施加一定的压力,环境改变了其原有的性质或自然资源的数量(状态);人类社会采取措施对这些变化做出反应,以恢复环境质量或防止环境退化^[24];它突出了环境受到的压力和环境退化之间的因果关系,压力、状态、响应 3 个环节相互制约、相互影响,正是决策和制定对策措施的全过程^[25]。本文生态安全评价指标主要参考前人研究^[7, 23, 26—28]以及国家标准《城市生态风险评价技术指南》^[29]作为主要指标选取依据,同时结合铜仁市生态环境以及经济发展的实际情况,选择适合本研究区的指标,共筛选出铜仁市生态安全评价指标 15 个(表 1)。

压力(P)指标:铜仁市正面临城镇加速发展的特殊阶段,人口快速向城镇集聚,城镇化进程明显加快,对土地资源的需求在不断增加,工业的废物排放量增加,是该地区生态安全的主要威胁之一^[30]。耕地面积可以反映土地生态系统的健康状况,如土地退化、土壤侵蚀、水土流失等问题,合理管理耕地是实现农业生产的可持续发展的关键。铜仁市人均耕地面积高于全省和全国水平,但耕地总体质量差,全市耕地平均质量在 11—

12 等之间^[31]。因此压力指标主要选取“人口密度、城镇化率、化肥施用量、SO₂排放量、污水排放量、垃圾排放量”来反映人类活动对生态环境的影响。状态(S)指标:主要反映压力下,社会、经济、生态系统当前的结构与功能,选取“固定资产投资、道路里程数、GDP”3 个指标来表现区域的社会经济发展状况。人口数量变化对土地资源的影响体现在社会活动向农田生态系统排放污染,选择“粮食产量”这个指标来反映铜仁市农田生态系统结构与功能状态。响应(R)指标:主要反映应对生态环境变化的具体措施,农业和林业作为铜仁市的重要产业,其增加值的变化间接反映出生态环境的响应程度,同时森林覆盖率、土地垦殖率变化也能反映生态系统的响应状况。

指标权重采用客观赋权法的熵值法来确定^[30, 32],通过熵权法计算出其对应的指标的权重如下表。运用综合指数加权计算铜仁市各区县的生态安全指数值,公式如下:

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

式中, E_{ij} 表示第 i 年第 j 个地区的生态安全指数值, W_j 表示第 j 个指标的权重; Y_{ij} 表示第 i 年第 j 个指标数据标极差标准化后的数值。

表 1 铜仁市生态安全指数指标体系

Table 1 The indicator system of ecological security index in Tongren

目标层 Target layer	要素层 Feature layer	指标层 Index layer	指标性质 Index properties	评价函数 Evaluation function	权重 Weight
A1 生态安全综合指数 Ecological security comprehensive index	B1 压力	C1 人口密度	-	人口/土地总面积	0.05
		C2 城镇化水平	-	城镇人口/总人口	0.02
		C3 化肥施用量	-	—	0.04
		C4 SO ₂ 排放量	-	—	0.04
		C5 废水排放量	-	—	0.03
		C6 垃圾排放量	-	—	0.03
	B2 状态	C7 GDP	+	—	0.12
		C8 固定资产投资	-	—	0.02
		C9 道路里程数	-	—	0.05
		C10 粮食产量	+	—	0.08
		B3 响应	C11 环保投资	+	—
	C12 森林覆盖率		+	林地面积/总面积	0.05
	C13 土地垦殖率		-	耕地面积/总面积	0.08
	C14 农业增加值		+	—	0.09
			C15 林业增加值	+	—

“-”表示负向指标,“+”表示正向指标

2.3 多时间段生态安全指数驱动因素分析

2007—2012 年间贵州省出台了《贵州省人民政府关于完善退耕还林政策的意见》,地区的森林覆盖率增加。但 2015 年后铜仁市城镇化率快速增加。因此,本研究选择 2015 年作为重要时间节点,分析不同时间段铜仁市生态安全变化特征。时间段分组为 A:2005—2010;B:2005—2015;C:2015—2020;D:2005—2020,提取每个组内评价指标的原始数据以及评价结果的变化率。变化率基于每个组起始年份提取,如 A 组共有五组变化率的数据(2005—2006、2005—2007、2005—2008 以此类推),B 组共有 10 组变化率的数据。组内进行 Pearson 相关性分析,并汇总四个组的变量变化率与评价结果变化率的相关性系数做可视化分析,探究 2005—2020 年间不同时期铜仁市生态安全变化的驱动因素。

2.4 2020—2035 年铜仁市分情景模拟

铜仁市早些年因过度开采矿产资源,生态环境遭受破坏,现正进行山水林田一体化修复工作。在面临资源枯竭、城镇化加速发展和生态修复的特殊阶段,为了探讨铜仁市未来生态环境的与经济协调性,设置了 3 种模拟情景:自然增长型、资源衰竭型和可持续发展型。基于建立的系统动力学模型基本逻辑,主要讨论

未来人类活动将如何影响铜仁市的生态环境以及经济发展,故选取“人口增长率、城镇化率、森林覆盖率、环保资金投入比例”四个主要参数。参数设置主要参考 2005—2020 年《铜仁市统计年鉴》、《贵州省统计年鉴》、铜仁市发展改革委印发的《铜仁市“十四五”新型城镇化发展规划》、铜仁市《“十四五”自然资源保护和利用规划实施方案》,“人口增长率”以及“环保资金投入比例”主要取自于统计年鉴中的指标上限和指标下限(正值)^[7]。“城镇化率”主要依据中国社会科学院人口与劳动经济研究所发布《人口与劳动绿皮书:中国人口与劳动问题报告 No.22》中提到的 2035 年我国城镇化率峰值 75%—80%，“森林覆盖率”主要依据发展情景的含义以及铜仁市发展规划。最终得到各方案模拟变量的参数值如下表(表 2)。

表 2 铜仁市不同发展情景下主要参数值

Table 2 Main parameter values in different development scenarios in Tongren

指标 Index	自然增长型 Natural growth	可持续发展型 Sustainable development	资源衰竭型 Resource depletion
人口增长率 Population growth rate	0.96%(均值)	0.39%	2.16%
城镇化率 Urbanization rate	年增加 2%	年增加 1.5%	年增加 2.5%
森林覆盖率 Forest coverage	模型外推	年增加 0.5%	年减少 0.5%
环保资金投入比例 Proportion of investment in environmental protection funds	1.5%(均值)	1.9%	1.0%

3 结果与分析

3.1 系统动力学仿真结果分析

3.1.1 SD 模型有效性检验

模型有效性检验是验证模型仿真的输出值与真实值是否相符以及符合的程度^[33]。运用相对误差方法对运行结果进行检验,以铜仁市江口县的关键变量为例,检验结果如下表(表 3)。15 年间平均相对误差在 10% 以内,结果较为理想,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。

表 3 铜仁市上生态安全关键变量仿真数据检验结果(2005—2020 年)

Table 3 Verification results of simulation data on key variables of ecological security in Tongren (2005—2020)

年份 Year	城镇人口/人 Urban population			总人口/人 Total population			GDP/亿元 GDP			粮食产量/t Grain yield		
	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%	真实值	仿真值	误差/%
2005	23600	24246	2.74	214000	214000	0.00	6.9152	9.778	41.40	90100	90117.5614	0.02
2006	24900	24912	0.05	219800	219879	0.04	7.7825	9.800	25.92	92600	92593.1399	0.01
2007	25800	25841	0.16	229200	229494	0.13	9.3558	10.186	8.87	94500	94613.12469	0.12
2008	26900	26940	0.15	228400	228692	0.13	11.1697	10.258	8.17	93700	93776.72684	0.08
2009	27600	27630	0.11	231100	231407	0.13	12.3644	11.401	7.79	91600	91708.47882	0.12
2010	28100	28128	0.10	235300	235581	0.12	14.5092	13.704	5.55	90200	90345.8734	0.16
2011	28700	28739	0.14	237300	237708	0.17	17.7112	17.014	3.94	66600	66722.38748	0.18
2012	29300	29335	0.12	241500	241841	0.14	23.2635	22.364	3.87	71000	71123.32266	0.17
2013	29400	29481	0.28	239200	239881	0.28	28.6935	27.510	4.13	66900	67117.4096	0.32
2014	30000	30060	0.20	243600	243995	0.16	33.4181	33.504	0.26	67200	57261.60174	14.79
2015	31700	31764	0.20	246500	246996	0.20	41.43	38.936	6.02	66740	66874.21685	0.20
2016	32200	32289	0.28	246600	247237	0.26	49.05	47.170	3.83	66900	67033.61851	0.20
2017	41200	41316	0.28	246300	246960	0.27	56.07	54.592	2.64	74000	74208.29453	0.28
2018	42000	42088	0.21	248500	249042	0.22	59.39	63.939	7.66	50400	50460.79246	0.12
2019	99100	99341	0.24	249900	250482	0.23	67.13	64.997	3.18	117215	117487.8627	0.23
2020	102700	102937	0.23	251500	252080	0.23	70.11	65.179	7.03	130700	131018.3915	0.24

3.1.2 SD 模型结构稳定性分析

通过扰动检验系统稳定性的做法,在控制论和一般系统论的稳定性研究中被广泛使用^[34-36],模型结构稳定性检验是指在不同时间间隔下,检验模型仿真曲线变化趋势是否一致。采用积分误差测试的方法验证模型结构的稳定性,以铜仁市江口县的总人口以及年 GDP 为例,对 2005—2020 年分别选取模拟步长:①STEP TIME=1;②STEP TIME=0.5;③STEP TIME=0.2 进行模型稳定性检验,检验结果如图 3。从图中可以看出,随着 STEP TIME 的变化,不同步长的总人口以及年 GDP 的变化趋势高度一致,相对误差控制在 1% 以内,符合结构稳定性检验标准。

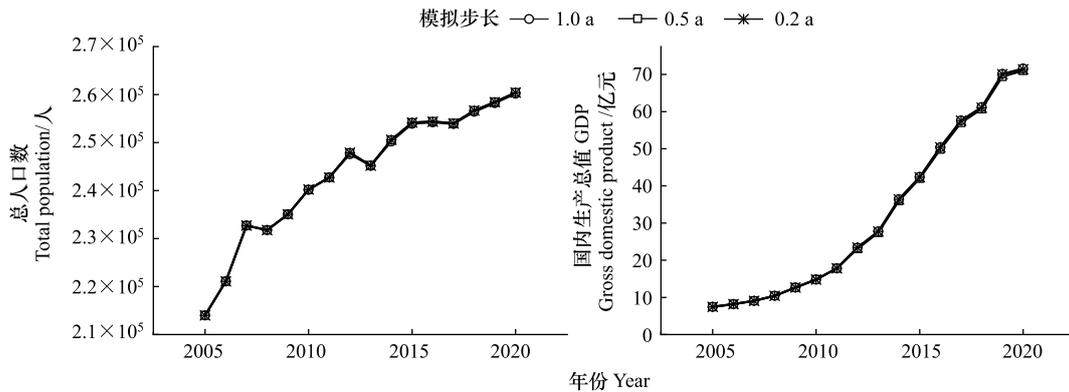


图 3 不同模拟步长下关键变量变化情况

Fig.3 Changes in key variables under different simulation step sizes

3.2 铜仁市生态安全评价

3.2.1 2005—2020 年铜仁市生态安全演变

如图 4 所示,铜仁市各县生态安全指数在 15 年内都有不同程度的波动,铜仁市整体生态安全指数 2005—2015 年间提升了 14.34%,而 2015—2020 降低了 7.18%。2010 年和 2015 年,分别有 70% 和 80% 的区县生态安全指数增加,而玉屏县和德江县生态安全指数降低。但 2015—2020 年,铜仁市 80% 的区县生态安全指数下降。2005—2020 年,铜仁市 40% 的区县生态安全指数降低,且主要是铜仁市的北部沿河县、东南部碧江县、万山区、玉屏县,其中玉屏县生态安全指数一直处于较低水平。2005—2020 年铜仁市各区县生态安全指数变化呈现出南北差异,具体表现为北部降低,南部除玉屏县外都有升高,其中万山县生态安全指数波动较大。

3.2.2 多时间段铜仁市生态安全影响因素分析

由图 5 可知,林业增加值的变化率同生态安全指数的变化率均为正相关关系,且表现出较强的相关性,同时环保资金投入的变率也与安全指数变率呈正相关关系。在图 5 中,2005—2015 年,林业增加值和环保资金投入的变率基本为正值,因此二者的连年增加,使铜仁市生态安全指数在此期间呈上升趋势。而 2015—2020 年城镇化水平的变率和安全指数的变率呈负相关关系,铜仁市生态指数随着城镇化水平的增加而降低。

3.2.3 2020—2035 年不同情景下铜仁市生态安全变化

如图 6 所示,以铜仁市江口县为例,图中展示了三种模拟情景下的废水排放量以及 GDP 的在 2020—2035 年间的变化趋势。在资源衰竭型情景中,GDP 以及污水排放量具有明显的增长趋势,其增量都超过另外两种模拟情境,可持续发展型低于自然增长型,主要原因在于两种模拟情境中,自然增长型的人口增长率高于可持续发展型,人口增速的不同导致的经济发展差异以及生活污染物排放的差异。

如图 7 所示,随着时间变化,生态安全指数的大小表现为可持续发展型大于自然增长型大于资源衰竭型。在模拟初期,由于可持续发展型情景下经济发展速度减缓,没有足够的环保资金投入环境治理中,故生态安全指数低于自然增长型。但随着生态环境得到保护,绿色经济逐渐发展,弥补了初期经济发展的劣势,所以生态安全指数持续升高。而在资源衰竭型情境中,生态安全指数持续降低。

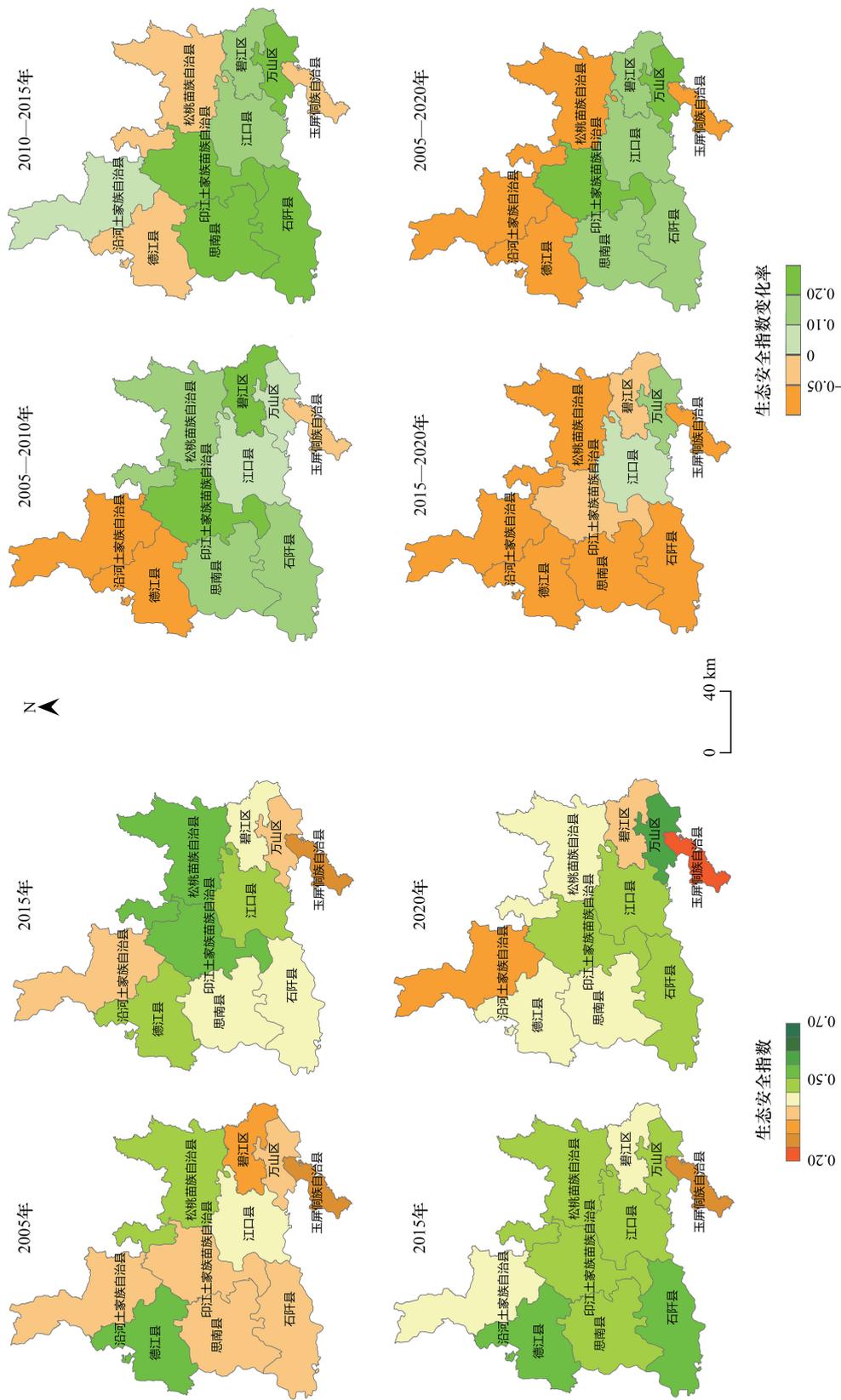


图 4 铜仁市 2005—2020 年生态安全指数空间分布和变化率图
 Fig.4 Spatial distribution of ecological security index and index change rate in Tongren from 2005 to 2020

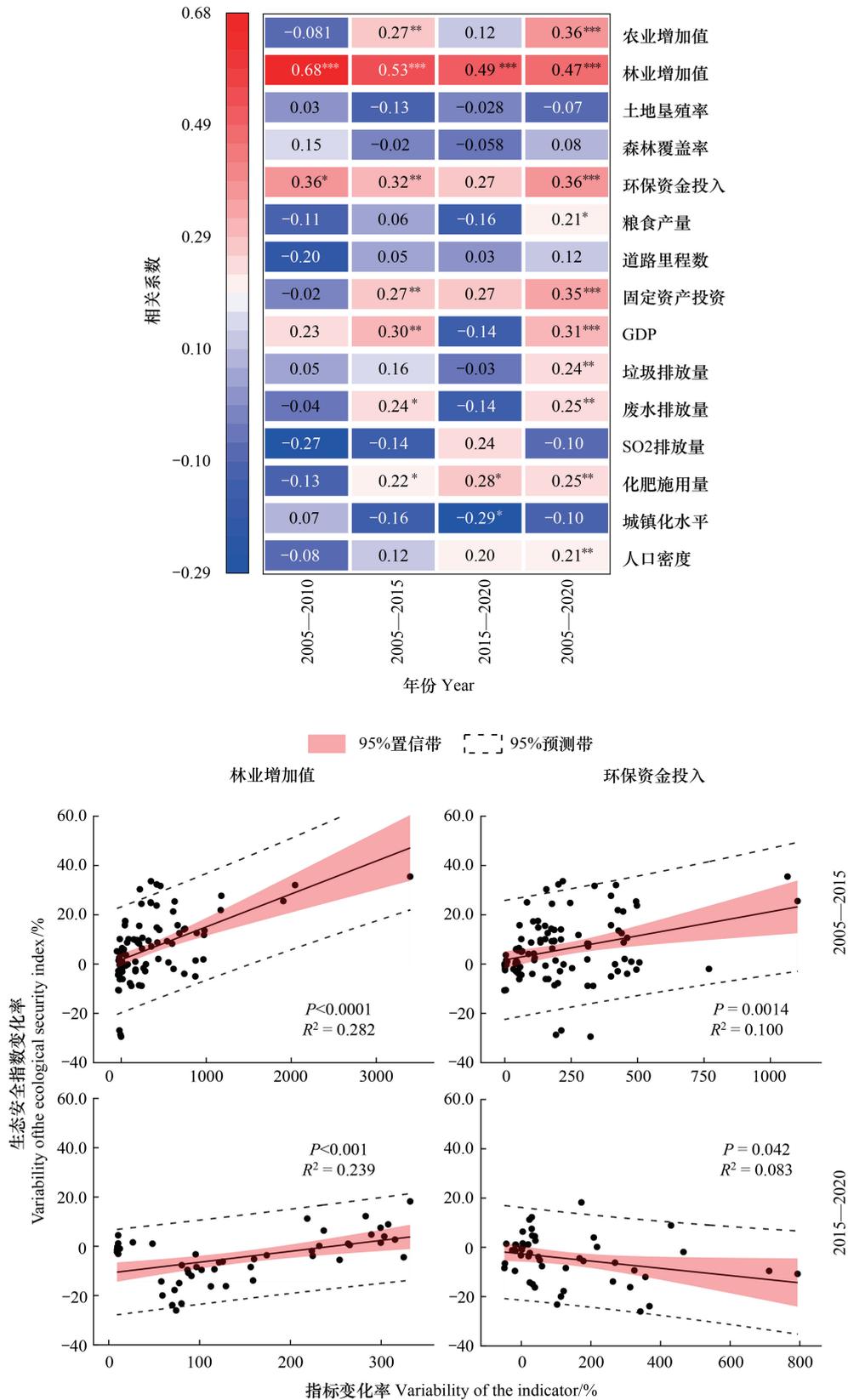


图5 指标变化率与生态安全指数变化率相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between indicator change rate and ecological security index change rate
***、**、* 分别代表在 1%、5%、10%的水平上显著

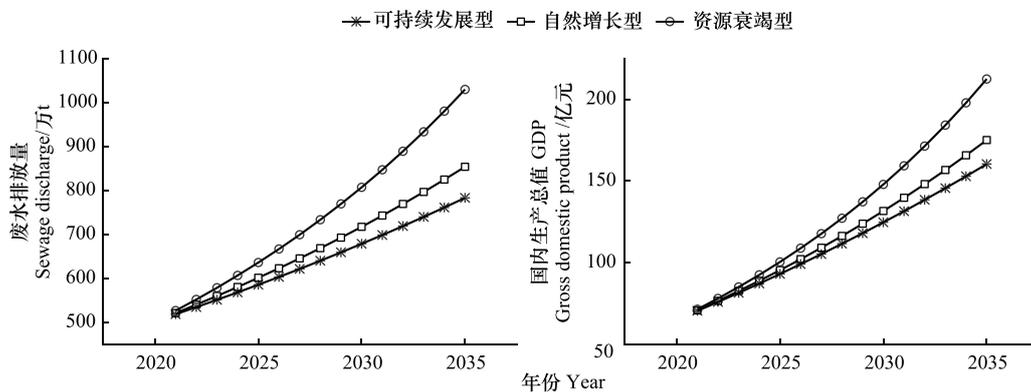


图6 三种情景下关键变量仿真结果变化

Fig.6 Changes in simulation results of key variables in three scenarios

各区县在不同模拟情景之中的生态安全指数差异明显,如图8所示,铜仁市生态安全指数总体表现为可持续发展型高于自然增长型,自然增长型高于资源衰竭型。

从空间分布上来看,铜仁市的10个区县生态安全水平呈现出“中部高,南北低”的分布规律,具体表现为在北部的沿河县以及西南部的玉屏县生态安全指数较低。在自然增长型和资源衰竭型发展情景下东南部的碧江区、万山区、玉屏县,西北部的沿河县、德江县、思南县安全指数都较低。印江县的生态安全指数整体最高,其主要原因是印江县的人口密度、土地垦殖率较低,且其林业增加值最多,而玉屏县生态安全指数偏低,其主要原因为玉屏县人口密度较大,城镇化水平高,且土地垦殖率较高,但是其森林覆盖率以及林业农业增加值较低。因此,基于模型仿真结果来看,铜仁市本身为资源衰竭型城市,实施可持续发展战略,才可以实现经济增长与生态安全之间的协调发展。

4 讨论

由于发展政策能较大程度影响生态安全格局,本研究对仿真情景的设定是仿真期内中国人口政策、耕地保护政策和农业生产技术水平不发生较大变动或变动带来影响较小。权重的设置较大程度的影响了生态安全评价结果,如在吕添贵等的研究中,其生态安全主要因素为建设用地面积比重,权重为0.1393,同本文中得出的结果林业增加值、环保资金投入为影响生态安全指数的主要因素相似^[37]。此外,由于系统动力学的构建涉及到的各类型变量众多,本文以县为单元,在统计年鉴上可搜集到的数据有限,所以模型中指标数量较少,所能反映的问题有限,因此在指标体系及其权重的确定上还有可拓展空间。

在2005—2020年间,铜仁市万山县和玉屏县的生态安全指数波动较大。万山县生态安全指数在2020年大幅度增加的主要原因是万山县2020年的林业增加值、农业增加值和粮食产量较之2019年增幅分别为250.3%、240.4%、159.7%。玉屏县生态安全指数一直较低主要原因在于玉屏县城镇化水平、人口密度处于较高水平,且在十个区县中,玉屏县的土地垦殖率最高,森林覆盖率以及林业增加值最低。林业增加值和环保资金投入是影响2005—2020铜仁市生态安全指数变化的主要因素,林业增加值的提高依赖于对生态系统的利用和保护,环保资金投入反映了社会对环境保护的财政支持力度,二者代表了生态环境保护和经济发展双重

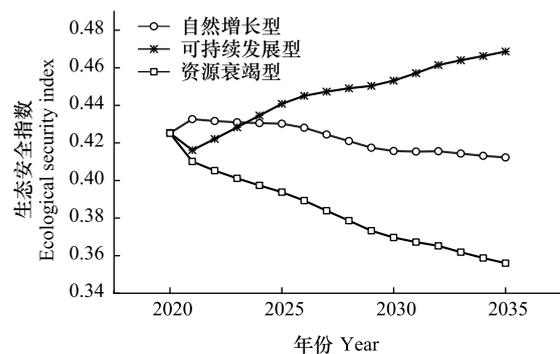


图7 铜仁市2020—2035年平均生态安全指数值

Fig.7 The average ecological security index value of Tongren from 2020 to 2035

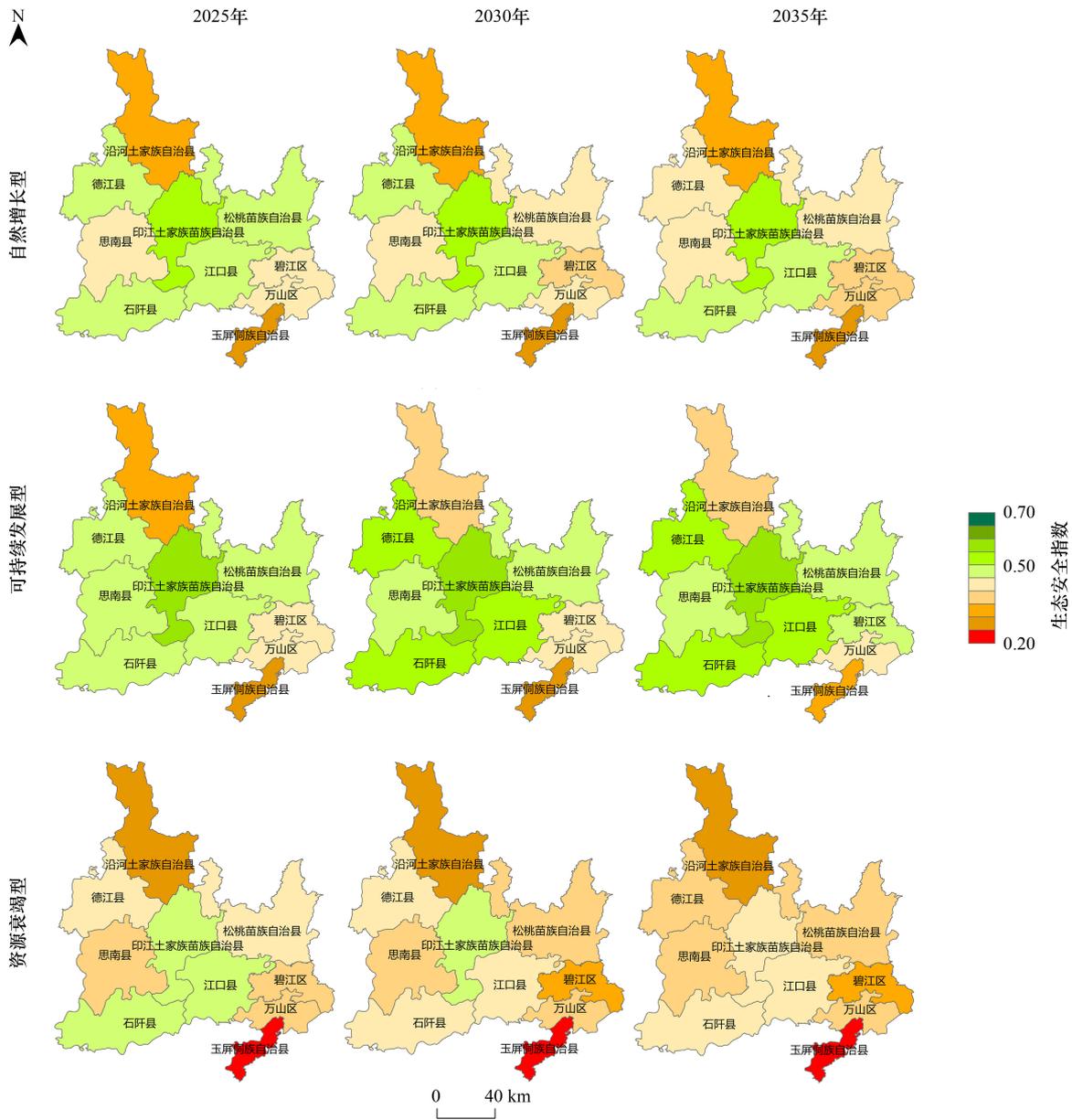


图 8 情景模拟下铜仁市 2002—2035 年生态安全指数变化空间分布图

Fig.8 Spatial distribution map of ecological security index changes in Tongren from 2002 to 2035 under scenario simulation

目标。在时间段 2005—2015 年和 2005—2020 年,农业增加值、GDP、固定资产投资、废水排放量、化肥施用量的变率和安全指数的变率呈正相关关系,其中负向指标化肥施用量以及废水排放量连年增加,虽然对生态安全指数为负向影响,但由于权重较小,相较于其他指标的正向影响而言,对生态安全指数的负向作用小于正向指标的正向作用,故二者呈现出正相关关系。

2005—2015 年间铜仁整体生态安全水平增加。路东林等研究发现 2010—2014 年铜仁市生态文明水平呈上升趋势^[38];全丽等研究发现 2013 年铜仁市土地资源生态安全状况较 2010 年有所提高^[39]。这一结果主要归功于 2007—2012 年间,该地区落实国家“退耕还林”政策,铜仁市耕地面积减少,林地面积增加。2015—2020 年间铜仁市整体生态安全水平降低。王金艳等的研究中发现,2007—2017 年铜仁市的土地利用方向为:草地和未利用地被开发为耕地,耕地向林地、园地、建设用地和水域方向扩张^[40]。另外一方面,随着“退耕还林”政策所创造的环境保护收益已经趋于饱和,2015 年后铜仁市城镇化率快速增加,此时铜仁市新面临的主

要问题为保障粮食安全、加快推进城镇化进程,发展经济提升人民收入。因此 2015 年后,对自然资源加大开发力度以及推动城镇化进程时无法避免产生污染物排放,此时高速城镇化成为影响铜仁市生态系统格局变化的主要因素。

本文建立资源衰竭型、可持续发展型和自然增长型 3 种不同的发展情景进行模拟,资源衰竭型发展模式说明了单纯依靠扩张工业规模和消耗自然资源的发展模式无法解决资源枯竭、环境破坏等问题。模拟结果反映出可持续发展情景在保证 GDP 上升的同时兼顾环境污染处理问题,可以实现净 GDP 的良好增长并有效控制环境污染量,符合铜仁市生态安全后续发展的优化模式,其模拟结果为有关部门制定相关政策提供指导作用。

5 结论与政策建议

5.1 结论

(1) 在 2005—2015 年,铜仁市整体生态安全指数提升 14.34%,其中 80%的区县生态安全指数增加;而 2015—2020 年,铜仁市整体生态安全指数降低 7.18%,且 80%的区县生态安全指数下降。

(2) 在 2005—2015 年,铜仁市生态安全水平增加主要归功于持续生态修复工程(森林面积增加)和生态保护重视(环保资金投入);而 2015—2020 年,该地区生态安全整体水平降低主要归因于经济发展和城镇化率增加给生态环境带来的压力。经济快速发展的同时兼顾生态环境治理,可以抵消快速城镇化、人口增长、土地利用方式改变所带来的负面影响。

(3) 2025—2035 年三种发展情景下铜仁市生态安全指数呈现“中部高,南北低”的格局,低水平区县为沿河县以及玉屏县。且三种发展情景下,铜仁市生态安全指数变化明显,可持续发展情境下的生态安全呈上升趋势;资源衰竭情景下,城市发展过度依赖资源开采,导致环境压力增加,导致生态安全指数下降。

5.2 政策建议

(1) 铜仁市应发挥独特的自然资源优势,发展旅游城镇化。旅游城镇化是中国城镇化多元道路中的重要模式,以旅游资源开发驱动城镇化建设,是欠发达地区实现共同富裕的关键路径^[40]。应将生态文明建设融入到工业化、城镇化建设中,工业化是城镇化发展的主要动力,城镇和工业的生态化能提升该地区整体生态安全水平^[41]。铜仁市坐拥知名景区梵净山,当地具有特色少数民族文化以及丰富的中草药植物资源,可以依托独特的地理人文优势,以打造世界知名生态文化旅游景点为主要目标,积极开发与生态文化旅游密切相关的其他产业,如特色农林产品加工业、生物医药产业、民族文化产业等构建铜仁市独特的绿色产业体系,促进产业集群发展、并在相关产业集聚发展的支撑下形成一批特色小镇。

(2) 铜仁市生态安全较大程度依赖于对林业及农业的保护,因此不仅需要保护森林面积且也需注重耕地质量管理以保障当地农林业的可持续发展。要加强对土地资源的保护和可持续利用,避免过度垦殖导致生态环境破坏,加强梵净山生态环境保护,划定生态保护红线、自然保护地、饮用水水源保护区等生态环境分区管控单元。铜仁市以山地丘陵为主,在严守耕地红线的基础上,需实施土地整治、新增耕地、提质改造等挖掘耕地后备资源潜力,提高耕地等级质量。同时,还需推进高标准农田建设,从土壤入手,进行土壤改良、提升耕地质量,增加优质耕地比重以保障粮食产量。

(3) 针对生态安全指数差异显著的不同区县,制定差异化的政策,重点支持低水平区县的生态环境修复与改善,推动“中部高,南北低”的格局逐步趋于平衡。具体来说,要以自然环境承载力为前提,遵循山地城镇化空间演变的客观规律,以中小城镇建设为主体,沿交通网络干线集聚资源、集中人口和集约土地,形成“多中心、多层次”的快速交通连接、特色生态产业支撑的中小城镇网络体系。以核心城市、优势地区的拉动作用和示范作用,努力形成耦合协调发展的区域合力,激发区域联动效应。

参考文献(References):

- [1] Albrich K, Rammer W, Thom D, Seidl R. Trade-offs between temporal stability and level of forest ecosystem services provisioning under climate

- change. *Ecological Applications*, 2018, 28(7): 1884-1896.
- [2] 王军, 应凌霄, 钟莉娜. 新时代国土整治与生态修复转型思考. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 26-36.
- [3] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [4] 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, 30(5): 3-5.
- [5] Brown L R. Building a society of sustainable development. *Society*, 1982, 19(2): 75-85.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Zhang Z Y, Hu A Y. Construction method and application of water environment security assessment system in Taizhou bay of Zhejiang province. *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 2018, 19(2): 515-526.
- [9] Ye H, Ma Y, Dong L M. Land ecological security assessment for Bai autonomous prefecture of Dali based using PSR model—with data in 2009 as case. *Energy Procedia*, 2011, 5: 2172-2177.
- [10] 菅宁红, 陈雅如, 姜雪梅. 青藏高原生态安全评价与提升路径. *林业资源管理*, 2022(6): 7-13.
- [11] 杨梅, 陈勇, 黄锦, 杨金凤, 梁雅琪. 基于模糊认知图的矿业城市生态安全评价与仿真研究——以大冶市为例. *化工矿物与加工*, 2023, 52(7): 74-79.
- [12] 吕连宏, 张保留, 谢雪松, 罗宏. 中国能源生态安全影响评估与政策建议. *环境科学研究*, 2018, 31(11): 1819-1826.
- [13] 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.
- [14] 王悦露, 董威, 张云龙, 傅伯杰, 赵正娜, 吕一河, 张建军, 伍星. 基于生态系统服务的生态安全研究进展. *生态学报*. 2023. 43(19): 7821-7829.
- [15] 刘天龙. 基于 PSR 模型的煤炭资源枯竭型村镇生态安全评价——以徐州市贾汪区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [16] 龙蓉华. 基于 PSR 模型的黔西南州生态脆弱性研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021.
- [17] 应凌霄, 孔令桥, 肖焱, 欧阳志云. 生态安全及其评价方法研究进展. *生态学报*. 2022. 42(5): 1679-1692.
- [18] 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.
- [19] 王金艳, 王雅敬. 铜仁市土地利用变化对生态服务价值的影响分析. *贵州科学*, 2020, 38(2): 63-68.
- [20] 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: 哲学社会科学版*, 2007, 36(3): 36-42.
- [21] 杨京平, 卢剑波. 生态安全的系统分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [22] 王其藩. 系统动力学(2009年修订版). 上海: 上海财大出版社, 2009.
- [23] 柯小玲, 郭海湘, 龚晓光, 刘晓. 基于系统动力学的武汉市生态安全预警仿真研究. *管理评论*, 2020. 32(04): 262-273.
- [24] 麦少芝, 徐领军, 潘颖君. PSR 模型在湿地生态系统健康评价中的应用. *热带地理*, 2005, 25(4): 317-321.
- [25] 颜利, 王金坑, 黄浩. 基于 PSR 框架模型的东溪流域生态系统健康评价. *资源科学*, 2008, 30(1): 107-113.
- [26] 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. *生态学报*, 2013, 33(16): 5090-5100.
- [27] 周炳中, 杨浩, 包浩生, 赵其国, 周生路. PSR 模型及在土地可持续利用评价中的应用. *自然资源学报*, 2002, 17(5): 541-548.
- [28] 张艳. 基于系统动力学的生态红线风险演化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [29] 城市生态风险评价技术指南. 全国环境管理标准化技术委员会. 2023.
- [30] 郑华伟, 刘友兆, 王希睿. 中国城镇化与土地集约利用关系的动态计量分析. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(9): 1029-1034.
- [31] 付弘流, 杨荣和, 杨惠. 生态文明背景下耕地高效保护路径探析——以贵州省铜仁市为例. *自然资源情报*, 2023(4): 51-56.
- [32] 张卫民. 基于熵值法的城市可持续发展评价模型. *厦门大学学报: 哲学社会科学版*, 2004(2): 109-115.
- [33] 朱敏, 关忠良, 陈景艳. 系统动力学方法在环境经济学中的应用. *数量经济技术经济研究*, 2000, 17(10): 59-61.
- [34] Dejonckheere J, Disney S M, Lambrecht M R, Towill D R. Measuring and avoiding the bullwhip effect: a control theoretic approach. *European Journal of Operational Research*, 2003, 147(3): 567-590.
- [35] Riddalls C E, Bennett S. The stability of supply chains. *International Journal of Production Research*, 2002, 40(2): 459-475.
- [36] 覃正, 姚公安. 基于信息熵的供应链稳定性研究. *控制与决策*, 2006, 21(6): 693-696.
- [37] 吕添贵, 孔安妮, 汪立. 基于 PSR 模型的生态文明示范区生态安全评价及其障碍诊断. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 343-350.
- [38] 路东林, 胡邦红, 邬小学, 匡成铭. 基于生态足迹的铜仁市生态文明水平动态研究. *吉林农业*, 2019(15): 24-25.
- [39] 全丽, 文卫, 吴玉, 闫乔华. 贵州省铜仁市土地资源生态安全评价研究. *安徽农学通报*, 2015, 21(22): 80-81.
- [40] 麻学锋, 刘玉林. 基于三要素的张家界旅游城镇化响应测度及影响机制. *地理科学*, 2018, 38(8): 1346-1356.
- [41] 熊曦. 基于 DPSIR 模型的国家级生态文明先行示范区生态文明建设分析评价——以湘江源头为例. *生态学报*, 2020, 40(14): 5081-5091.