

# 武陵山区国土空间开发对生态安全影响的时空异质性研究

陈勤昌, 王兆峰

(湖南师范大学 旅游学院, 长沙 410081)

**摘要:** [目的] 揭示国土开发强度变化对生态安全时空格局演变的非线性影响, 为推进武陵山区高质量发展和筑牢长江上游生态安全屏障提供科学依据。[方法] 以国家重点生态功能区武陵山区为考察对象, 构建国土开发强度和生态安全综合评估体系, 采用空间杜宾模型解析了国土开发强度对生态安全的空间溢出效应, 并利用门槛模型厘清多重约束条件下的非线性影响。[结果] (1) 武陵山区国土开发强度从2000年的0.195升至2020年的0.273, 生态安全指数从2000年的0.282增至2020年的0.438, 两者均呈波动上升发展态势。(2) 国土开发强度与生态安全存在正向空间溢出效应, 国土开发强度对本县区生态安全指数增长的溢出效应明显强于邻近县区溢出效应, 整体驱动着武陵山区生态安全水平正向演化。(3) 武陵山区国土开发强度提升对生态安全存在门槛效应, 呈现“增强—减弱”的倒“U”型曲线关系, 当门槛值介于[0.158, 0.309], 则国土空间开发对筑牢生态安全屏障具有显著的强化作用。[结论] 研究期间武陵山区国土开发强度及其阈值逐渐增大, 对生态安全的影响程度存在明显的时空异质性, 因地制宜设置国土开发强度区间成为优化国土空间开发保护新格局的关键。

**关键词:** 国土空间开发; 生态安全; 时空异质性; 武陵山区

中图分类号: F061.6; X22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0287-12

## Spatial and Temporal Heterogeneity of the Impact of Territorial Development on Ecological Security in Wuling Mountain Area

Chen Qinchang, Wang Zhaofeng

(College of Tourism, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to reveal the spatial and temporal patterns of nonlinear impact of changes in territorial development intensity on the evolution of ecological security, provide a scientific basis for promoting the high-quality development of the Wuling Mountain Area, and to build a strong ecological security barrier in the upper reaches of the Yangtze River. [Methods] The Wuling Mountain Area, a national key ecological functional area, was taken as the research object, the comprehensive assessment system of territorial development intensity and ecological security was firstly constructed. Then the spatial Du-bin model was used to analyze the spatial spillover effect of territorial development intensity on ecological security. The threshold model was used to clarify the nonlinear relationship between the two under multiple constraints. [Results] The mean value of territorial development intensity increased from 0.195 in 2000 to 0.273 in 2020, and the mean value of ecological security index increased from 0.282 in 2000 to 0.438 in 2020, both of which showed an increasing trend of fluctuation. There was a positive spatial spillover effect between territorial development intensity and ecological security. The spillover effect of territorial development intensity on the exponential growth of ecological security in this county was significantly stronger than that in neighboring counties, overall driving the positive evolution of ecological security level in Wuling Mountain Area. The

收稿日期: 2023-04-11

修回日期: 2023-05-30

资助项目: 国家自然科学基金(41771162, 41971188); 湖南省国内一流培育学科建设项目(5010002)

第一作者: 陈勤昌(1992—), 男, 湖北通山人, 博士研究生, 研究方向为生态安全与治理、区域经济发展与规划。E-mail: chenqc7777@163.com

通信作者: 王兆峰(1965—), 男(白族), 湖南桑植人, 博士, 教授, 主要从事生态地理学、旅游地理与旅游管理研究。E-mail: jdwzsf@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

improvement of territorial development intensity had interval effect on ecological security, showing an inverted U-shaped curve relationship of ‘strengthening-weakening’. If the threshold value was between 0.158 to 0.309, the territorial development had a significant threshold effect on building the ecological security barrier. [Conclusion] During the study period, the territorial development intensity and its threshold in the Wuling Mountain Area gradually increased, and there was obvious spatial and temporal heterogeneity in the degree of impact on ecological security, so that setting the territorial development intensity interval according to local conditions became the key to optimizing the new pattern of land spatial development and protection.

**Keywords:** territorial development; ecological security; spatial and temporal heterogeneity; Wuling Mountain Area

党的二十大报告强调,要统筹发展和安全,以新安全格局保障新发展格局,这为构建主体功能明显、优势互补、高质量发展的国土空间开发保护新格局提供了基本遵循。武陵山区生物多样性与水土保持生态功能区作为国家重点生态功能区,通过生态文明建设和生态修复治理工程,环境保护成效日渐显著,生态系统多样性、稳定性和持续性稳步提升,区域生态安全屏障更加牢固;同时,作为西部大开发战略最前沿和脱贫攻坚战略主战场,武陵山区国土开发规模和强度持续走高,局部荒漠化、石漠化、水土流失等问题加剧,物种及遗传资源衰减流失,生境敏感性、脆弱性显化,国土空间开发系统与生态安全系统冲突频仍<sup>[1]</sup>。21世纪以来,武陵山区国土空间开发对生态安全格局是否构成影响,是否存在空间溢出效应,区域内部是否存在时空异质性?解答上述问题既是细化落实长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”战略导向的关键步骤,亦是真切响应特殊类型区振兴发展和生态文明建设的时代课题。

探析国土空间开发与生态安全的内在关系是区域经济学和生态地理学的研究重点<sup>[2]</sup>。国土空间开发指依托地域空间以满足经济社会发展所需而开展的系列实践活动,德国、法国、日本等国家有计划地制定国土规划或空间发展计划,旨在最大化改善生产力布局<sup>[3]</sup>;国内侧重于国土空间的规划指向<sup>[4]</sup>、评估诊断<sup>[5]</sup>、风险预警<sup>[6]</sup>、生态修复<sup>[7]</sup>和系统治理<sup>[8]</sup>等研究支脉,多聚焦黄河流域<sup>[2]</sup>、长三角地区<sup>[9]</sup>和东北地区<sup>[10]</sup>等热点区域。生态安全指一个国家、地区或人类社会维持生存发展所需的环境且少受或不受破坏与威胁的状态<sup>[11]</sup>,国外多着墨于评估模型构建<sup>[12]</sup>、生态安全廊道建设<sup>[13]</sup>、生态功能修复策略<sup>[14]</sup>和生态系统风险防范<sup>[15]</sup>等领域;国内学者缀合国情状况,延伸至生态安全能力建设、综合治理体系构建和生态安全格局优化等方面<sup>[16]</sup>,研究对象多为煤炭区<sup>[17]</sup>、库区<sup>[18]</sup>、林区<sup>[19]</sup>、半干旱区<sup>[20]</sup>和湿地<sup>[21]</sup>等生态安全控制区。国土空间开发对生态系统影响的研究逐渐增

多,赵亚莉等<sup>[22]</sup>厘清我国省会城市土地开发强度与生态环境的演替关系,阐明开发强度合理区间应基于生态环境保护之需;卫思夷等<sup>[23]</sup>厘清国土空间开发与资源环境承载力耦合协调度,明确两者并非必然对立制约关系;李强等<sup>[24]</sup>证实城市蔓延对生态环境内在机理及影响效应,明确两者满足环境库兹涅茨倒“U”型曲线(EKC),但未能延伸讨论至拐点(阈值)以及空间异质性特征。综上所述,聚焦跨省连片交界生态脆弱地带及县域尺度的研究稍显薄弱,国土空间开发对生态安全的作用机制尚未推至实证,其作用机理、溢出效应以及时空分异特征分析相对欠缺。

本文尝试做出边际贡献如下:(1)研究视角上,以国家重点生态脆弱区与水土保持关键区武陵山区为对象,廓清县域尺度下国土空间开发对生态安全的作用机理和时空异质性,为跨省交界区生态环境联保共治和生态文明建设提供客观参考。(2)研究内容上,构建国土开发强度与生态安全综合评估框架,采用空间杜宾模型厘清国土开发强度对生态安全的空间溢出效应,并引入门槛模型检验两者的非线性影响,以规避伪(倒)“U”型关系的缺陷。因此,聚焦武陵山区71个县域单元,明确国土空间开发对生态安全的作用机理、空间溢出效应和门槛效应,验证国土空间开发对生态安全的影响程度,以期进一步筑牢武陵山区生态安全屏障,为生态脆弱区打造人与自然和谐共生的美丽中国样板提供实证依据。

## 1 国土空间开发对生态安全的作用机制

党的“十八大”报告初次将“优化国土空间开发格局”提升至战略和全局高度,生态安全格局作为其中三大战略格局之一,联结着生态系统服务与人类社会永续发展。国土空间开发是经济社会高质量发展的动力引擎,生态安全是国家安全体系的重要基石,两者相互作用、互为支撑。依循区域非均衡增长理论和空间生产理论<sup>[13]</sup>,国土空间开发具有针对性、阶段性和持续性,对生态安全格局的作用是一个复杂的动态博弈过程,即国土

空间开发对生态安全的影响存在非线性特征,正向或负向影响着人地关系地域系统协调演进状态。

(1) 国土空间开发对生态安全的促进作用。期初受到地理区位、交通网络和政策支持等驱动因子影响,物质流、信息流、资金流、人才流快速集聚,国土空间开发规模、密度和强度日渐增强,极大蓄积了经济社会发展内生“原动力”<sup>[16]</sup>。随着国土开发范围、开发能力由区域性节点城市逐步向全域渗透辐散,生态保护建设投入力度加大,生态系统结构、功能的正外部性增强,生态系统效应外溢性逐步释放。此外,邻近区域为获得财力、物力、人力等发展权益,通过主动的“学习效应”和间接的“溢出效应”,实现绿色生产技术、清洁环保方式、先进管理经验等跨区传导<sup>[14]</sup>,以合理规避国土空间开发对生态系统的胁迫影响,促进了全域生态韧性和生态安全的协同提升,助益于国土空间开发保护格局的整体优化。

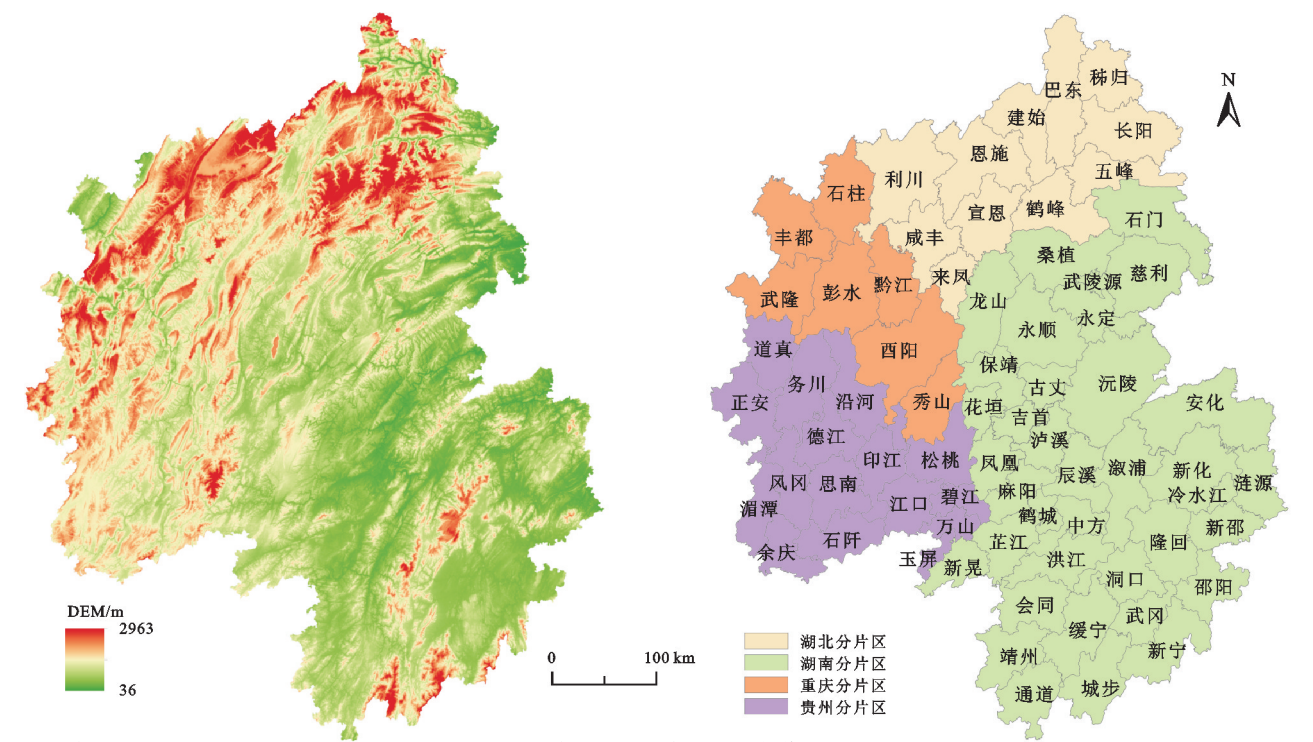
(2) 国土空间开发对生态安全的抑制作用。伴随国土开发范围的扩大、资源要素的追加和能源消耗的增加,经济增长、人口集聚、土地扩张和要素投入等维度表征愈加明显<sup>[18]</sup>,资源约束趋紧、生态功能受损、环境承载力下降等环境胁迫问题显化,对生态系统的稳定性和质量造成扰动。当国土开发强度超过临界值(阈值)后,致使企业集聚化形成“挤出效应”,大量资源消耗与污染废弃物排放,经济规模效应、正外部性作用敛缩,危及生态环境承载力上限,一定程度上抑制生态安全能力建设。

因此,国土空间开发需更加注重内涵式、包容性和高质量增长,变末端生态环境治理为前端生态安全预警,促使生态安全格局在新一轮国土空间开发保护和生态文明建设进程中实现再平衡。

2 研究设计

2.1 研究区概况

武陵山区覆盖湘西、黔东、鄂西、渝东南 4 省区 71 县域(图 1),国土面积为 17.18 万 m<sup>2</sup>,人口总量超 3 600 万人,是我国面积最大的跨省交界区和典型的“老少山边穷”地区。该区人均 GDP 从 2000 年的 4 984 元跃升至 2019 年的 38 921 元,农村居民人均可支配收入从不足 2 000 元跃升至 2019 年的 11 544 元,城镇化率由不足 20% 提升至 2019 年的 38.48%,国土开发规模、强度和效率协同提升。境内森林覆盖率超 68.60%,拥有酉水、澧水、沅江、资水、乌江等河流,是长江、珠江和洞庭湖等流域重要水源涵养与生态屏障区,也是具有全球保护意义的生物多样性与水土保持关键区,生态功能、生态地位和生态责任突出。在旅游开发、脱贫攻坚、乡村振兴进程中,局部土地流失严重、景观破碎化加剧、生态系统服务功能退化等生态环境风险频见于报端,故揭示武陵山区国土空间开发对生态安全的作用机制及影响效应,推进人地关系地域系统正向演化,将为其他生态脆弱区乃至全国生态文明建设树立典型。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区概况  
Fig. 1 Overview of the study area

## 2.2 研究方法

2.2.1 熵值模型法 为规避评价指标单位和量纲的差异性,首先采用极值标准化对各项指标展开归一化处理,继而利用熵值模型测度国土开发强度指数与生态安全指数的指标权重值,最后利用线性加权法获取两者的综合指数。计算公式如下<sup>[10]</sup>:

$$S_{ij} = \sum_{j=1}^m W_j \times Z_{ij} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

式中: $Z_{ij}$ 为无量纲处理后的数值; $W_j$ 为 $j$ 项指标的权重; $m$ 为指标项数; $n$ 为县域数,本文取 71; $S_{ij}$ 为综合得分,且在 $[0,1]$ 区间内分布。

2.2.2 空间自相关分析 空间自相关分析通过数据统计分析与地图定位相结合,反映某一属性的空间关系,并对要素的空间集聚特征及与周边要素的差异进行表达。采用全局自相关探测生态安全的空间关联性,以 Moran's  $I$  指数加以衡量。计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: $x_i, x_j$ 为研究县域单元的空间观测值; $\bar{x}$ 为均值; $W_{ij}$ 为空间权重矩阵,本文选取经济距离空间权重矩阵( $W_1$ )、反嵌套权重矩阵( $W_2$ ); $n=71$ 。Moran's  $I$  指数值域介于 $[-1,1]$ ,如 Moran's  $I > 0$ ,代表研究对象在空间上呈正相关;如 Moran's  $I < 0$ ,代表负相关,则具有较为明显的空间异质性特征;如若 Moran's  $I = 0$ ,说明研究对象在空间上呈随机分布状态。

2.2.3 空间杜宾模型 空间权重矩阵指处于不同空间横截面单位的某一经济或地理属性值之间的相互依存度,适配的空间权重矩阵是应用空间计量模型的基础。空间杜宾模型(SDM)可客观研判地理单元之间错综复杂的空间关联特征,解析被解释变量与解释变量的空间关联性以及具体空间溢出效应。计算公式如下<sup>[25-26]</sup>:

$$\ln Es_{it} = \rho W \ln Es_{it} + \beta_1 W \ln Tdi_{it} + \theta_1 Tdi_{it} + \beta_2 W \ln Control_{it} + \theta_2 W \ln Control_{it} + \mu_i + \delta_i + \epsilon_i \quad (3)$$

式中: $W$ 为空间权重矩阵; $Es_{it}$ 为被解释变量; $Tdi_{it}$ 为解释变量; $Control_{it}$ 为若干控制变量; $\rho$ 为被解释变量空间回归系数; $\beta_1, \beta_2$ 为解释变量和控制变量的空间回归估计系数; $\theta_1, \theta_2$ 为解释变量的回归估计系数; $\mu_i$ 为空间效应; $\delta_i$ 为时间效应; $\epsilon_i$ 为随机扰动项。

2.2.4 面板门槛模型 “门槛效应”指某变量到达临界值后,致使其他变量发展方式发生转向的现象。鉴于门槛变量设计分段函数的门槛回归模型,由门槛效应对各分组变量产生的非线性关系拟合效果最为理

想,且易于研判门槛变量对被解释变量的结构突变点(临界点)。据此,为验证国土开发强度对生态安全是否存在约束条件及门槛效应,本文设定分段函数模型如下<sup>[26-27]</sup>:

$$Es_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Tdi_{it} \times I(Tdi_{it} \leq \gamma_1) + \alpha_2 Tdi_{it} \times I(\gamma_1 < Tdi_{it} \leq \gamma_2) + \alpha_3 Tdi_{it} \times I(Tdi_{it} > \gamma_3) + \varphi X_{it} + \epsilon_{it} \quad (4)$$

式中: $Tdi_{it}$ 为县域单元 $i$ 第 $t$ 年的国土开发强度; $I(\cdot)$ 为示性函数,若括号内数值大小条件满足时取常数 1,否则取值为 0; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 表示弹性系数值; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为待估计门槛值; $X_{it}$ 为一组影响生态安全的控制变量; $\varphi$ 为 $X_{it}$ 对应的一组系数向量; $\epsilon_{it}$ 为随机扰动项。国土开发强度对生态安全或产生促进作用,或造成抑制作用;若正负效应并存,将引起结构性突变,故引入国土开发强度的门槛值,以检验其对生态安全的非线性影响。

## 2.3 指标选取与数据来源

### 2.3.1 指标体系

(1) 被解释变量:生态安全( $Es$ )。作为联结经济、社会与环境三大系统的关键纽带,生态安全映射生态系统的稳定性、健康性和可持续性特征。基于生态安全的概念内涵<sup>[11]</sup>,拟用联合国经济合作开发署“压力(Pressure)-状态(State)-响应(Response)”模型<sup>[20]</sup>,以社会经济与生态环境有机统合为主线,考量社会经济投入产出与环境系统的生态效益。其中,生态安全压力反馈人类生产生活实践对生态环境造成的冲击与挑战,生态安全状态反映区域现实环境容量和承载能力,生态安全响应折射面对生态压力时提升环境容量所采用的响应性举措<sup>[22]</sup>。具体指标选取详见表 1。

(2) 门槛变量:国土开发强度( $Tdi$ )。国土空间是自然要素、人文要素及其相互作用形成的空间载体,亦是推进生态文明建设的功能载体,以开发强度具象反映生产生活实践对地域系统的利用程度及累积承载密度<sup>[24]</sup>,借鉴张乐勤<sup>[9]</sup>和陈勤昌<sup>[28]</sup>等学者研究思路,遴选经济开发强度、人口扩张强度、土地利用强度、社会投入强度 4 个维度,集成表征研究区国土开发强度指数。其中,以经济密度、产业非农化率表示经济开发强度,反映区域经济规模和产业结构变化;以地区人口数、城镇人口比重表示人口扩张强度,反映区域人口总量和人口集聚程度;以土地垦殖指数、建成区面积所占比重表示土地利用强度,反映区域土地利用结构变化和城镇空间扩张程度;以全社会用电量、单位面积投资额表示社会投入强度,反映能源要素和资本要素投入状况。

(3) 控制变量:① 经济发展(Eco)。经济条件是推进生态文明建设的物质基础,直接影响生态安全的维护成本与产出,是人与自然和谐共生的前提保障,选取人均 GDP 表征<sup>[13]</sup>。② 资源禀赋(Res)。自然资源禀赋影响着国土空间发展潜力和国土空间再平衡,是优化生态保育、生态修复和生态屏障等功能的关键要素,选取人均耕地面积<sup>[27]</sup>表征。③ 产业结构(Str)。有序推进产业生态化和生态产业化,持续释放绿色转型的“结构红利”和“生态效益”,驱动生态系统运行质量和服务功能正向演化,以第三产业占 GDP 比重表征<sup>[12]</sup>。④ 环境规制(Gov)。环境规制强度反映有为政府宏观调控能力和治理效能,直接影响末端环境治理水平,选取当年环境污染治理投资额占比表征<sup>[28]</sup>。⑤ 科技进步(Tel)。创新是驱动高质量发展的内生动力,创新主体通过绿色产业协作、绿色技术扩散和知识溢出,促进区域绿色全要素生产率增长,选取科研经费投入占比表征<sup>[9]</sup>。⑥ 开放程度(Open)。对外开放是获取境外资本、绿色创新技术、先进管理经验的主要渠道,选取当年实际利用外资金额占比表征<sup>[10]</sup>。

表 1 国土开发强度与生态安全评价指标体系及权重

Table 1 Evaluation index system and weights of territoria development intensity and ecological security								
系统	维度层	准则层	指标层	单位	属性	权重		
国土空间 开发系统	国土开发强度	经济开发强度	区域经济密度	万元/km <sup>2</sup>	+	0.152		
			产业非农化率	%	+	0.147		
		人口扩张强度	地区人口数	万人	+	0.132		
			城镇人口比重	%	+	0.141		
		土地利用强度	土地垦殖指数	%	+	0.155		
			建成区面积所占比重	%	+	0.126		
		社会投入强度	全社会用电量	万 kW·h	—	0.038		
			单位面积投资额	万元/km <sup>2</sup>	+	0.030		
		生态安全系统	生态安全压力	社会压力	人口密度	人/km <sup>2</sup>	—	0.052
					人类干扰指数	%	—	0.042
经济压力	地区生产总值增长率			%	—	0.035		
	地方财政支出占财政收入比			%	—	0.031		
	单位 GDP 耗能			t 标准煤/万元	—	0.024		
	每万人工业废水排放量			t	—	0.032		
环境压力	每万元固体废弃物产生量			t	—	0.029		
	单位耕地面积农药使用量			kg/hm <sup>2</sup>	—	0.023		
生态安全状态	社会状态			城镇化率	%	+	0.048	
				人均公园绿地面积	m <sup>2</sup>	+	0.035	
	经济状态		人均道路面积	%	+	0.043		
			地区生产总值	元	+	0.048		
			城镇居民可支配收入	元	+	0.048		
			农村居民可支配收入	元	+	0.047		
			水资源总量	10 <sup>8</sup> t	+	0.031		
			森林覆盖率	%	+	0.048		
生态安全响应	环境状态		空气质量优良率	%	+	0.034		
			每万人在校大学生数	人	+	0.038		
		每万人拥有公共汽车数量	辆	+	0.033			
		每万人医生数量	人	+	0.041			
	经济响应	教育支出占财政支出比例	%	+	0.04			
		科技支出占财政支出比例	%	+	0.037			
		环保投资占固定资产投资额比重	%	+	0.042			
		生活污水处理达标率	%	+	0.044			
		环境响应	一般工业固体废弃物综合利用率	%	+	0.042		
		生活垃圾无害化处理率	%	+	0.033			

2.3.2 数据来源 以 2000 年“西部大开发”上升至国家战略为研究基期,以 2020 年武陵山区完成脱贫攻坚任务为报告期,探析研究区“九五”末期至“十三五”末期的阶段性演化特征。主要数据源自《中国县

域统计年鉴(县市卷)》(2001—2021年)、《中国县城建设统计年鉴》(2001—2021年)、《中国人口普查分县资料》(2001—2020年)等公开披露数据;建设用地与耕地指标参考中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)支持的中国土地利用现状(LUCC)遥感监测数据集,分辨率设为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ;部分数据从对应县(市、区)官方网站、国民经济

和社会发展统计公报择取补充。囿于武陵山区部分县域数据的匮乏,少量年份的数据通过线性插值法补足。为规避异方差的影响,变量数据计算时作对数化处理,各县域GDP根据平减指数法调整为2000年不变价格。变量的描述性统计结果及方差膨胀因子见表2,方差膨胀因子(VIF)远低于5,证明解释变量之间不存在多重共线性。

表2 变量的描述性统计和相关系数

Table 2 Descriptive statistics and correlation coefficients of variables

项目	变量名称	指标说明	平均值	最小值	最大值	VIF
被解释变量	生态安全(Es)	生态安全指数	0.584	0.125	1.233	
门槛变量	国土空间开发(Tdi)	国土开发强度指数	1.245	0.158	3.556	1.693
	经济发展(Eco)	人均GDP	4.125	0.444	4.313	1.868
	资源禀赋(Res)	人均耕地面积	1.224	0.228	1.580	1.653
控制变量	产业结构(Str)	第三产业占GDP比重	2.667	0.645	3.669	2.026
	政府规制(Gov)	环境污染治理投资占比	2.258	0.560	4.225	1.667
	技术进步(Tech)	科研经费投入占比	1.275	0.105	2.304	1.940
	开放程度(Open)	当年实际利用外资额占比	0.415	0.133	0.966	2.155

### 3 结果与分析

#### 3.1 武陵山区国土开发强度与生态安全指数测度

3.1.1 武陵山区国土开发强度分异特征 据图2可知,武陵山区国土开发强度指数均值从2000年的0.195上升至2020年的0.273,整体呈提升发展态势。(1)从研究基期而言,国土开发强度指数高值区位于湖南的涟源、安化、新化、隆回、邵阳5县,以及湖北的恩施、利川2县级市,但峰值不超过0.3,而国土开发强度指数低值区为贵州的沿河、德江、印江、江口、石阡等县,该阶段总体呈簇状集聚分布。(2)从研究中期而言,以冷水江市(0.349)为峰值的东侧地区国土开发强度值较高,而万山

县(0.178)为谷值的贵州西侧国土开发强度指数偏度,极差高达0.141,该阶段区域国土开发强度县际差异逐渐扩大。(3)从报告期而言,武陵山区“两侧高、中间低”的空间分异特征愈加显著,国土开发强度指数逾过0.334的县域超过7个;相对而言,国土开发强度指数低值区集中于铜仁市、湘西州、怀化市。利用Jenks最佳自然断裂点分级法纵向对比可知,21世纪以来,西部大开发、武陵山区域一体化发展、脱贫攻坚、老区振兴等多轮战略叠加,武陵山区人口、经济、空间、社会城镇化进程提速,国土空间开发的规模、强度和密度增强,发展潜力和增长空间持续扩大,而国土空间开发与生态环境的耦合协调关系亦值得关注。

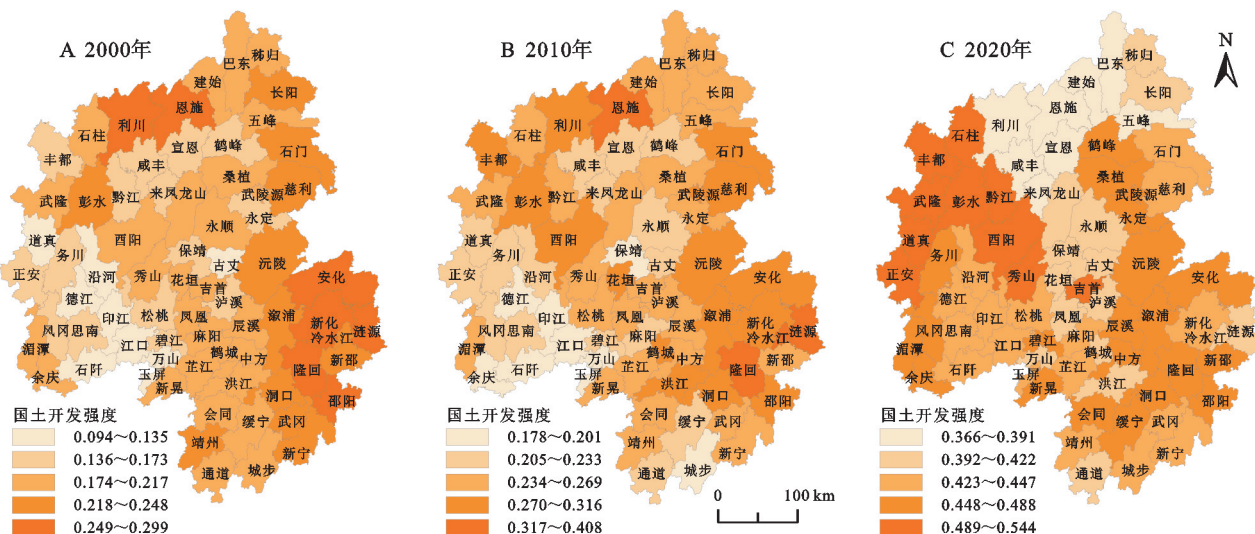


图2 2000—2020年武陵山区国土开发强度指数

Fig. 2 Index of territorial development intensity in Wuling Mountain Area from 2000 to 2020

3.1.2 武陵山区生态安全分异特征 据图 3 可知,武陵山区生态安全指数均值从 2000 年的 0.282 增至 2020 年的 0.438,2019 年达到峰值水平(0.441),大致呈稳健上升发展态势,说明武陵山区生态文明建设有力有效推进,国土生态安全屏障根基愈加稳定坚固。(1) 2000 年,土地扩张低密度、分散化倾向明显,对生态安全 and 环境质量造成冲击,传统“粗放式”发展模式难以为继,国土空间开发系统与生态安全系统交互胁迫效应现实表征明显。(2) 2010 年,种植业、农产品加工业、文旅产业等产业布局分散、关联性低,单位生产总值的污染物排放与资源消耗量投入较大,抑制

了资源承载能力和生态韧性能力建设,武陵山区存在“生态赤字”之忧。(3) 2020 年,在新型城镇化、新型工业化和现代农业化等进程中,逐步建立生态补偿机制,推动先进治理理念、治污技术跨区共享,国土空间生态修复由探索区域自主治理逐步转向全域空间顶层设计。此外,2020 年虽遭受新冠疫情的全方位冲击,但生态安全指数同比 2019 年仅下降 3 个百分点,足见研究期间武陵山区生态系统结构及功能稳定性增强,自组织、自适应、自调节能力明显提升,逐步形成区域高质量发展与生态安全协调提升的良性互促局面。

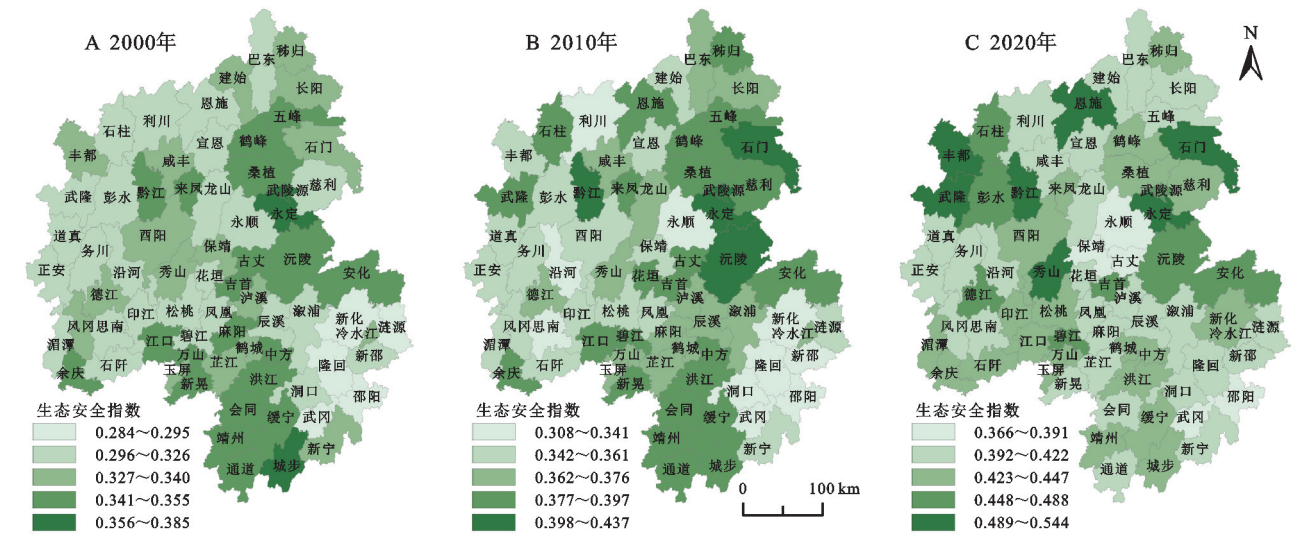


图 3 2000—2020 年武陵山区生态安全指数

Fig. 3 Index of ecological security in Wuling Mountain Area from 2000 to 2020

3.2 武陵山区国土开发强度对生态安全的溢出效应 3.2.1 空间相关性分析 鉴于经济距离空间权重矩阵( $W_1$ )、反嵌套权重矩阵( $W_2$ )下,国土开发强度指数与生态安全指数的 Moran's  $I$  显著为正,说明武陵山区存在地理和经济的综合空间关联特征。据表 3 可知,2000—2020 年武陵山区国土开发强度与生态安全的全局 Moran's  $I$  指数值处于[0,1],均通过 10% 的显著水平检

验,证实两者均存在正相关性特征。国土开发强度指数的全局 Moran's  $I$  值大致呈波动上升的态势,反映出武陵山区国土空间开发持续扩张,区域内部空间关联性和互动性增强。生态安全指数的全局 Moran's  $I$  值在 2000—2011 年呈波动上升态势,而在 2011 年后展现动态下降的趋向,武陵山区生态安全的空间依赖性显著,呈现“先增强、后敛缩”的动态特征。

表 3 武陵山区国土开发强度与生态安全的全局 Moran's  $I$  值

Table 3 Overall Moran values of territorial development intensity and ecological security in Wuling Mountain Area

年份	Tdi	$t$	Es	$t$	年份	Tdi	$t$	Es	$t$
2000	0.152***	2.258	0.296**	2.347	2011	0.754***	2.643	0.392**	2.450
2001	0.422**	1.769	0.315***	3.401	2012	0.766**	2.078	0.375**	2.220
2002	0.508**	2.168	0.351***	2.888	2013	0.785**	2.144	0.317***	3.505
2003	0.525***	2.667	0.291**	2.085	2014	0.806**	2.284	0.350***	2.878
2004	0.576**	2.955	0.355***	3.962	2015	0.818**	2.367	0.301***	3.225
2005	0.594**	2.022	0.355***	2.940	2016	0.828**	2.444	0.291**	2.085
2006	0.631***	2.724	0.311***	3.366	2017	0.845***	3.288	0.243***	3.452
2007	0.658**	2.114	0.415***	2.754	2018	0.859***	2.745	0.223***	3.176
2008	0.689**	2.346	0.405***	4.619	2019	0.865**	2.245	0.235**	2.356
2009	0.720**	2.285	0.417***	3.793	2020	0.882**	2.374	0.252**	2.678
2010	0.733***	2.755	0.398**	2.529					

注:\*\*\*, \*\*, \* 分别表示在 1%, 5% 与 10% 的水平下显著。下同。

3.2.2 空间计量模型选择及稳健性检验 据表 4 可知,在  $W_1$ 、 $W_2$  两个矩阵下,通过 LM 的各项检验且不同显著性水平下检验,说明 SDM 模型相较于 SEM 或 SAR 模型更具适配性;采用 LR 和 Wald 检验诊断 SDM 是否降级为 SRM 或 SEM 模型,结果均在 1% 水平下显著,拒绝原假设,即 SDM 模型不可简化为普通空间计量模型。Hausman 检验结果显示,在 1% 水平下显著,证实固定效应模型更具适用性和解释力。故选取基于固定效应的空间杜宾模型,探析国土空间开发对生态安全的空间溢出效应。通过更替空间计量模型、被解释变量和调整控制变量,在  $W_1$ 、 $W_2$  下,回归系数值均为正且至少在 5% 水平下显著,证实计量模型和分析结果兼具稳健性。

表 4 空间计量模型适用性检验

Table 4 Applicability test of spatial econometric model

检验方法	经济距离空间权重矩阵( $W_1$ )		反嵌套权重矩阵( $W_2$ )	
	特征值	$p$ 值	特征值	$p$ 值
LM-log	2.347	0.125	185.76	0.000
LM-error	160.250	0.000	520.63	0.000
Robust LM-log	161.370	0.000	334.88	0.000
Robust LM-error	3.460	0.063	0.01	0.920
Hausman	137.510	0.000	30.37	0.000
Wald-lag	15.220	0.033	39.38	0.000
Wald-error	18.800	0.009	42.39	0.000
LR-lag	76.410	0.000	44.25	0.000
LR-error	74.890	0.000	42.99	0.000

3.2.3 空间溢出效应 利用 Hausman 检验可知,卡方差值为正数且通过显著性检验,对数似然值反馈固定效应的空间杜宾模型拟合程度优于随机效应的空间杜宾模型;采用 LR 检验可知,时空双固定效应相较于时间固定效应与空间固定效应更为理想,故本文遴选时空双固定效应的空间杜宾模型。据表 5 可知,在  $W_1$  和  $W_2$  空间权重矩阵下,国土开发强度对生态安全的回归系数均为正值且在 1% 水平下显著,表明在国土开发强度增强的过程中,生态系统运行质量和服务功能获得提升,武陵山区生态安全格局整体呈现正向演化趋势。鉴于空间面板模型回归分析涉及信息繁杂,且空间溢出效应可能出现估计偏误现象,故利用偏微分方法,将国土开发强度对本县区及邻近县区生态安全的影响程度进行空间效应分解。

3.2.4 空间效应分解 (1) 国土开发强度对生态安全的提升作用显著(表 6)。<sup>①</sup> 直接效应。在经济距离空间权重矩阵( $W_1$ )下,国土开发强度直接效应的弹性系数为 0.110,在 1% 水平上通过显著性检验,即国土开发强度每提升 1 个单位,将促进本地区生态安全指数增长 11.0%;更替为反嵌套权重矩阵( $W_2$ ),国

土开发强度每提升 1 个单位,将促进本地区生态安全指数增长 9.6%, $W_1$  和  $W_2$  权重矩阵下,本地区国土开发强度的提升均对自身生态安全能力建设产生促进作用。<sup>②</sup> 间接效应。在经济距离空间权重矩阵( $W_1$ )下,国土开发强度对邻区生态安全的弹性系数为 -0.059,在 5% 水平上通过显著性检验,即国土空间开发强度每提升 1 个单位,将导致邻近地区生态安全系数下降 5.9%,说明武陵山区县域单元增强自身发展内生动力,将对毗邻县域生态安全提升产生抑制作用,国土空间开发对生态安全影响出现“以邻为壑”效应;反嵌套权重矩阵( $W_2$ )下,未能通过显著性检验。<sup>③</sup> 总效应。在  $W_1$  和  $W_2$  空间权重矩阵下,总效应的弹性系数分别为 0.051,0.079,且在 1% 水平上通过显著性检验,即国土开发强度每提升 1 个单位,将促进全片区生态安全指数增长 5.1%,7.9%。在武陵山区国土空间开发过程中,对本县域单元生态系统安全趋好,对周边县域单元生态系统有抑制作用,整体而言,益于全域经济社会高质量发展和生态环境保护,助力实现“人与自然和谐共生”。

表 5 空间面板杜宾模型估计结果

Table 5 Estimation results of spatial panel Durbin model

空间权重矩阵	变量	回归系数	空间滞后项系数	$R^2$
$W_1$	Tdi	0.111***	-0.203**	0.534
	Eco	0.000	-0.039**	
	Res	0.018**	0.009	
	Stur	-0.038***	0.065	
	Tel	0.000	-0.004**	
	Gov	-0.088***	-0.098	
	Open	0.001***	0.020***	
$W_2$	Tdi	0.096***	-0.005	0.481
	Eco	0.001	0.034***	
	Res	0.013***	-0.134***	
	Stur	-0.027***	0.039*	
	Tel	0.000	-0.002***	
	Gov	-0.086***	0.097***	
	Open	0.002***	0.004***	

(2) 控制变量对生态安全影响的差异性表现。

<sup>①</sup> 在经济距离空间权重矩阵( $W_1$ )下,资源禀赋和对外开放对生态安全产生直接和间接弹性系数为正值,均能通过 1% 水平上显著性检验,总效应分别为 3.8% 和 3.3%,说明资源条件和开放环境是强化生态安全的关键要素,利用本地区与邻区资源要素相似、产业结构趋同优势,利于挖掘区域经济高质量发展潜力与对外活力,有效夯实生态安全物质基础;产业结构抑制了本地生态安全能力建设,直接效应弹性系数为 -0.038,间接效应和总效应弹性系数未通过显著性检

验;政府治理的直接效应和间接效应的弹性系数均为负值,但未能通过显著性检验,证实政府规模扩张对生态安全存在促降作用;创新能力对本地县域单元影响不明显,对邻近县域单元有抑制作用。② 在反嵌套权重矩阵( $W_2$ )下,经济发展、资源禀赋、对外开发三者对本地和全域生态安全状态均有直接促进作用,

但劳动力、资本、土地等市场要素在交易中相对稳定,资源禀赋对邻近县域单元的资源要素流动有阻隔现象存在;产业结构和政府治理与经济距离空间权重矩阵( $W_1$ )下结果相似,本县产业“结构红利”对邻近县域产业升级未发挥带动作用,但两者总效应未通过显著性检验,对生态安全能力建设影响不明显。

表 6 空间杜宾模型效应分解结果

Table 6 Decomposition results of spatial Dubin model effects

变量	$W_1$			$W_2$		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
Tdi	0.110***	-0.059**	0.051***	0.096***	-0.107	0.079***
Eco	-0.001	-0.057*	-0.058*	0.001**	0.031***	0.032***
Res	0.019***	0.019	0.038***	0.015**	-0.121**	-0.106***
Stur	-0.038***	0.074	0.036	-0.028***	0.038***	0.010
Tel	0.000*	-0.005*	-0.005*	0.000*	-0.002***	-0.002***
Gov	-0.089***	-0.191**	-0.280***	-0.087***	-0.196**	0.010
Open	0.002***	0.031***	0.033***	0.004***	0.003***	0.007***

3.3 武陵山区国土开发强度对生态安全的非线性影响

3.3.1 门槛效应检验 参照童昀<sup>[25]</sup>、王凯<sup>[26]</sup>等学者研究思路,进一步明确作用方向、突变点和阶段性特征。依循 Bootstrap 自主抽样法,重复抽取样本 500 次,门槛特征检验后获悉,武陵山区单一门槛模型与双重门槛模型的  $F$  值依次在 1% 的水平上通过显著性检验,而三重门槛模型的  $F$  值不显著,明确武陵

山区门槛估计值分别为 0.158,0.309(表 7)。此外,除湖北分片区为单一门槛模型,门槛值为 0.294;湖南分片区门槛值为 0.171,0.303;重庆分片区门槛值为 0.199,0.302;贵州分片区门槛值为 0.213,0.260。可见,国土开发强度对全片区和分片区的影响程度各存殊异,不应等同视之;此外,武陵山区第一门槛和第二门槛值域范围较大,全域自然环境本底和生态系统承载力表现明显强于四大分片区。

表 7 门槛效果检验与门槛值置信区间

Table 7 Results of threshold effect test and confidence interval of threshold value

区域	门槛模型	$F$ 统计量	$p$	临界值			门槛估值	95% 置信区间
				1%	5%	10%		
武陵山片区	单一门槛	182.08***	0.002	106.901	60.468	51.792	0.158	[0.156,0.159]
	双重门槛	63.56***	0.006	58.757	42.457	36.200	0.309	[0.303,0.309]
湖北分片区	单一门槛	12.54***	0.000	28.027	18.904	15.732	0.294	[0.287,0.292]
	双重门槛	65.32	0.210	39.409	27.012	22.607	0.363	[0.359,0.365]
湖南分片区	单一门槛	64.79***	0.000	47.891	36.949	42.165	0.171	[0.171,0.172]
	双重门槛	112.59***	0.002	69.780	50.284	40.166	0.303	[0.300,0.304]
重庆分片区	单一门槛	33.45**	0.014	34.143	23.534	19.998	0.199	[0.190,0.200]
	双重门槛	18.86**	0.027	26.855	19.742	17.488	0.302	[0.301,0.304]
贵州分片区	单一门槛	20.45**	0.036	28.752	20.749	16.602	0.213	[0.290,0.300]
	双重门槛	27.20**	0.045	35.113	25.398	10.727	0.260	[0.328,0.334]

3.3.2 门槛回归分析 从武陵山区全域而言,国土开发强度的提升对生态安全存在显著的区间效应(表 8)。(1) 若小于门槛值 0.158 时,提升国土开发强度将改善生态安全状态,在 1% 水平上未通过显著性检验,说明国土空间开发对生态安全水平存在促进作用,但促进作用稍显不足。(2) 若门槛值介于[0.158,0.309],生态系统的自适应和自调节功能增强,其结构与功能持续优化更

新,国土空间开发对生态安全具有显著的正向作用,但促进作用相对第一阶段有所减弱。(3) 若门槛值高于 0.309 时,该阶段国土开发强度越过生态安全警戒线,将威胁生态系统的健康、稳定性以及对生态资源的可持续利用,或诱发武陵山区系统性生态风险,波及长江流域生态安全状态。整体而言,国土空间开发对生态安全影响呈“增强—减弱”的倒“U”型曲线

关系,该结论印证了采用面板门槛回归分析是合理有效的,深层次折射出国土空间开发与筑牢生态安全屏障实质是社会系统与自然系统动态博弈过程。

表 8 基于门槛模型的回归结果

变量	系数估计值	<i>t</i>	95%置信区间
Tdi <sub>1</sub> ( $\gamma \leq 0.158$ )	0.172	6.61	[0.121, 0.224]
Tdi <sub>2</sub> ( $0.158 < \gamma \leq 0.309$ )	0.051 ***	2.98	[0.017, 0.084]
Tdi <sub>3</sub> ( $\gamma > 0.309$ )	-0.101 ***	6.79	[0.072, 0.129]
Eco	0.036 ***	31.49	[0.033, 0.037]
Res	0.104 **	-2.46	[0.039, 0.041]
Stur	-0.002 **	4.72	[0.018, 0.043]
Tel	0.014 ***	6.87	[0.010, 0.018]
Gov	-0.031 ***	-5.60	[-0.041, -0.019]
Open	0.096 ***	2.31	[0.015, 0.017]
_cons	-0.101 ***	-9.61	[-0.122, -0.081]
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.852		

3.3.3 时空异质性分析 据表 9 可知,在门槛值[0.158, 0.309],湖北、湖南、重庆与贵州分片区国土开发强度对生态安全的影响系数依次为 17.4%, 7.9%, 4.6%, 2.4%, 基本通过 5% 的显著性检验,呈“湖北分片区>

表 9 武陵山区开发强度对分片区生态安全的影响

变量	湖北分片区		湖南分片区		重庆分片区		贵州分片区	
	系数估值	<i>t</i>	系数估值	<i>t</i>	系数估值	<i>t</i>	系数估值	<i>t</i>
Tdi <sub>1</sub> ( $\gamma \leq 0.158$ )	0.267 ***	13.46	0.109 ***	4.52	0.109	1.33	0.166 ***	4.16
Tdi <sub>2</sub> ( $0.158 < \gamma \leq 0.309$ )	0.174 ***	9.66	0.079 ***	3.97	0.046 **	0.33	0.024 ***	5.32
Tdi <sub>3</sub> ( $\gamma > 0.309$ )	-0.120 ***	-7.07	-0.003	-0.18	-0.046	-0.65	-0.249 ***	-7.56
Eco	0.054 ***	22.31	0.032 ***	19.97	0.082 ***	13.96	0.021 ***	13.44
Res	0.031 **	2.06	0.022 **	1.89	-0.369 ***	-8.28	-0.029 ***	-2.69
Stur	-0.010	-0.74	0.021 ***	2.95	0.024	0.97	0.019 *	1.87
Tel	-0.002 ***	-4.15	0.003 ***	11.18	0.001	0.13	0.001 **	2.06
Gov	-0.079 ***	-6.26	-0.013 *	-1.79	-0.018	-0.56	-0.019 ***	-3.06
Open	0.006	-0.18	-0.001 **	-2.34	-0.004	-1.85	-0.002	-1.42
_cons	-0.299 ***	-12.04	-0.095 ***	-6.27	-0.354 **	-8.06	0.094 ***	5.50
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.889		0.901		0.740		0.895 ***	

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 国土空间开发与生态安全建设是一个复杂的动态博弈过程,即国土空间开发对生态安全的作用具有明显空间依赖性和外溢性,且该作用过程是阶段性、非线性、非均衡性的,佐证了赵丽娅等<sup>[22]</sup>“国土开发强度变化带来明显的生态环境效应”“合理控制城市开发强度”等论点。因此,武陵山区须明确“抓生态环境就是抓生产力”,合理设置国土开发强度区间,增

湖南分片区>重庆分片区>贵州分片区”的分异特征。具体而言:(1) 21 世纪以来,以恩施州为核心主体的湖北分片区,积极发挥脱贫攻坚目标、“两不愁、三保障”、乡村振兴等政策集成优势,大力发展富硒产业、生态旅游、食品深加工等优势产业,加快完善公路、铁路、航空贯通的立体交通网,国土空间开发产生的生态修复能力、生态福利绩效大幅提升。(2) 湖南分片区以国家扶贫攻坚为主导、以大湘西板块开发为支撑,促进生态安全体系各要素优化组合,美丽湖南和生态文明建设取得较大成效;但该分片区县域单元数(37 个)超全域半数以上,国土空间修复工程、水土流失和石漠化综合治理协调难度大,生态系统的“被动式”修复亟须向“主动式”演替转变。(3) 重庆分片区属于典型的欠发达地区和半城镇化地区,历史欠账较多、产业基础弱、区位交通差,资金、技术、劳动力和政策支撑性明显偏弱,国土空间开发对生态安全的正向促进作用稍弱。(4) 贵州分片区国土开发建设早期缺乏科学规划、管控,基础设施建设和环境保护投入不足,环境胁迫和约束作用较强,后续应强化国土空间开发能力建设,逐步缩小与武陵山区全域生态安全水平的差距。

强区域内生增长动力和生态系统韧性,协力打好开发建设和生态保护攻坚战、持久战,为长江流域高质量发展提供战略纵深和回旋空间。

(2) 通过门槛模型结果可知,国土空间开发对生态安全的作用存在“增强—减弱”的倒“U”型曲线关系,符合 Grossman 环境库兹涅茨曲线假说。形象地说,国土空间开发如“射箭”,若国土开发强度过小( $th < \text{第一门槛值} = 0.158$ ),则拉力不足,效果(国土空间开发绩效)不佳;若国土开发强度过大( $th > \text{第二门槛值} = 0.309$ ),则拉力过大,必伤及弓弩(生态系统安全状

态);若国土开发强度介于 $[0.158, 0.309]$ ,则国土空间开发速率将削弱资源环境胁迫程度,物质空间建设与生态环境达到协调共生状态,对优化武陵山区国土空间开发保护新格局大有裨益。研究期间,武陵山区国土开发强度指数均值在 $[0.195, 0.273]$ ,亦处于双门槛估计值范围,国土空间开发在生态安全提升和生态文明建设中发挥积极作用。

(3) 随着新一轮国土空间开发的纵深推进,如何基于“国土空间安全”与“生态安全”双安全视角,探讨不同区域或同一区域不同空间尺度、不同发展阶段、不同约束条件下国土空间开发与生态安全的内在关联、作用机理、互动效应和调控机制,并构建与国家重点生态功能区生态安全格局相适配的国土开发方案、空间组织模式和生态修复方式,对推进人地关系地域系统整体优化,仍具有一定的学术研究价值。

## 4.2 结论

(1) 武陵山区国土开发强度指数均值从2000年的0.195上升至2020年的0.273,生态安全指数均值从2000年的0.282升至2020年的0.438,两者均呈波动稳步上升态势,并在2019年达到峰值,国土开发强度与生态安全水平呈协同演进的良好状态。

(2) 在经济距离空间权重矩阵和反嵌套权重矩阵下,国土开发强度与生态安全均存在正相关性特征,且直接效应明显强于间接效应,即国土空间开发对本县域单元生态安全水平提升产生正向空间溢出效应,对邻近县域单元生态安全水平提升产生负向抑制作用,整体推进武陵山区生态安全状态正向演化。

(3) 从武陵山区全域而言,武陵山区国土开发强度的提升对生态安全存在显著的区间效应,整体呈现“增强—减弱”的倒“U”型曲线关系,若门槛值介于 $[0.158, 0.309]$ ,国土空间开发确能筑牢生态安全屏障。从四大分片区而言,湖北、湖南、重庆与贵州分片区国土开发强度对生态安全影响系数依次为17.4%, 7.9%, 4.6%, 2.4%,呈“湖北分片区>湖南分片区>重庆分片区>贵州分片区”的空间分异特征。

## 参考文献(References):

- [1] 熊曦,肖俊.武陵山片区城镇化与生态环境耦合协调度时空分异:以6个中心城市为例[J].生态学报,2021,41(15):5973-5987.  
Xiong X, Xiao J. Evaluation of coupling coordination between urbanization and eco-environment in six central cities, Wuling Mountain area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15):5973-5987.
- [2] 李睿倩,李永富,胡恒.生态系统服务对国土空间规划体系的理论与实践支撑[J].地理学报,2020,75(11):2417-2430.

- Li R Q, Li Y F, Hu H. Support of ecosystem services for spatial planning theories and practices[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(11):2417-2430.
- [3] Ge D Z, Lu Y Q. A strategy of the rural governance for territorial spatial planning in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2021,31(9):1349-1364.
- [4] 黄大全,朱世豪,刘涛.中国土地利用规划的指标分配逻辑:兼论对国土空间规划的启示[J].自然资源学报,2022,37(9):2387-2402.  
Huang D Q, Zhu S H, Liu T. The distribution logic of land quotas in China's land use planning: Implications for territorial spatial planning[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(9):2387-2402.
- [5] 刘小波,王玉宽,李明.国土空间开发适宜性评价的理论、方法与技术应用[J].地球信息科学学报,2021,23(12):2097-2110.  
Liu X B, Wang Y K, Li M. Theory, method and technological application of territorial spatial development suitability evaluation [J]. Journal of Geo-information Science, 2021,23(12):2097-2110.
- [6] 徐雯雯,宁晓刚,王浩,等.基于GIS的城镇、农业、生态空间分区与国土开发风险识别:以陕西省南泥湾景区为例[J].地域研究与开发,2021,40(3):127-132,139.  
Xu W W, Ning X G, Wang H, et al. Research on spatial partition of ecological-urban-agricultural land and risk analysis of land development: A case study of Nanniwan Area in Shaanxi Province[J]. Areal Research and Development, 2021,40(3):127-132,139.
- [7] 翟香,兰安军,廖艳梅,等.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域定量识别:以贵州省为例[J].水土保持研究,2022,29(6):322-329,343.  
Zhai X, Lan A J, Liao Y M, et al. Quantitative identification of key areas of land space ecological restoration based on the ecological security pattern: A case study of Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):322-329,343.
- [8] 林坚,高远,赵晔.空间开发权视角下的国土空间治理探析[J].自然资源学报,2023,38(6):1393-1402.  
Lin J, Gao Y, Zhao Y. Exploration of national territory spatial governance from the perspective of spatial development rights[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(6):1393-1402.
- [9] 张乐勤,王雷.长三角一体化区域开发强度与生境质量协调状况及演化规律探析[J].环境工程技术学报,2023,13(2):578-584.  
Zhang L Q, Wang L. Analysis of the coordination status and evolution law of development intensity and habitat quality in the integrated region of the Yangtze River Delta[J]. Journal of Environmental Engineering Tech-

- nology, 2023, 13(2): 578-584.
- [10] 杨志鹏, 王士君, 田俊峰, 等. 东北三省县域开发强度与生境质量的空间关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(3): 83-90.
- Yang Z P, Wang S J, Tian J F, et al. Spatial relationship between county development intensity and habitat quality in the three provinces of Northeast China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2022, 38(3): 83-90.
- [11] Rogers K S. Ecological security and multinational corporations[J]. Environmental Change and Security Project Report, 1997(3): 29-36.
- [12] Jahanishakib F, Salmanmahiny A, Mirkarimi S H, et al. Hydrological connectivity assessment of landscape ecological network to mitigate development impacts[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 296: 113169.
- [13] Ferretti V, Pornarico S. Ecological land suitability analysis through spatial indicators: An application of the Analytic Network Process technique and Ordered Weighted Average Approach[J]. Ecological Indicators, 2013, 34(10): 507-519.
- [14] Nagel R, Durka W, Bossdorf O, et al. Rapid evolution in native plants cultivated for ecological restoration: Not a general pattern[J]. Plant Biology, 2019, 21(3): 551-558.
- [15] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape[J]. Habitat International, 2018, 71(6): 110-124.
- [16] 易浪, 孙颖, 尹少华, 等. 生态安全格局构建: 概念、框架与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 845-856.
- Yi L, Sun Y, Yin S H, et al. Construction of ecological security pattern: Concept, framework and prospect[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(4): 845-856.
- [17] 杨兆青, 陆兆华, 刘丹, 等. 煤炭资源型城市生态安全评价: 以锡林浩特市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 280-289.
- Yang Z Q, Lu Z H, Liu D, et al. Ecological security evaluation on the coal resource-based city: A case of Xilinhot City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 280-289.
- [18] 李明慧, 周启刚, 孟浩斌, 等. 基于最小累积阻力模型的三峡库区重庆段生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1916-1926.
- Li M H, Zhou Q G, Meng H B, et al. Ecological security layout planning of Chongqing section in the Three Gorges Reservoir Area based on the model of minimum cumulative coefficient[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 1916-1926.
- [19] 蔡秀亭, 吕洁华, 王成齐. 中国森林生态安全空间关联的网络特征及其驱动机制[J]. 自然资源学报, 2022, 37(8): 2137-2152.
- Cai X T, Lyu J H, Wang C Q. The network characteristics and driving mechanism of the spatial correlation of forest ecological security in China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(8): 2137-2152.
- [20] 王梓洋, 石培基, 张学斌, 等. 基于栅格尺度的生态安全评价及生态修复: 以酒泉市肃州区为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(10): 2736-2749.
- Wang Z Y, Shi P J, Zhang X B, et al. Grid-scale-based ecological security assessment and ecological restoration: A case study of Suzhou district, Jiuquan[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(10): 2736-2749.
- [21] 秦鹏, 张志辉, 刘庆. 黄河三角洲滨海湿地生态安全评价[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(8): 145-153.
- Qin P, Zhang Z H, Liu Q. Ecological security assessment of coastal wetland in the Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(8): 145-153.
- [22] 赵亚莉, 刘友兆, 龙开胜. 城市土地开发强度变化的生态环境效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7): 23-29.
- Zhao Y L, Liu Y Z, Long K S. Eco-environmental effects of urban land development intensity change across capital cities in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(7): 23-29.
- [23] 卫思夷, 居祥, 荀文会. 区域国土开发强度与资源环境承载力时空耦合关系研究: 以沈阳经济区为例[J]. 中国土地科学, 2018, 32(7): 58-65.
- Wei S Y, Ju X, Xun W H. Spatial-temporal coupling relationship between land development intensity and carrying capacity of regional resources and environment: A case study in Shenyang economic region[J]. China Land Science, 2018, 32(7): 58-65.
- [24] 李强, 高楠. 城市蔓延的生态环境效应研究: 基于 34 个大中城市面板数据的分析[J]. 中国人口科学, 2016(6): 58-67; 127.
- Li Q, Gao N. A study on the effect of urban sprawl on ecological environment: An empirical study based on 34 cities municipal panel data[J]. Chinese Journal of Population Science, 2016(6): 58-67, 127.
- [25] 童昀, 刘海猛, 马勇, 等. 中国旅游经济对城市绿色发展的影响及空间溢出效应[J]. 地理学报, 2021, 76(10): 2504-2521.
- Tong Y, Liu H M, Ma Y, et al. The influence and spatial spillover effects of tourism economy on urban green development in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(10): 2504-2521.

- Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9456-9469.
- [15] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3947-3958.
- Chen L T, Cai H S, Zhang T, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River based on Markov-FLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3947-3958.
- [16] Tian L, Tao Y, Fu W X, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2330.
- [17] Nie X, Lu B, Chen Z P, et al. Increase or decrease: Integrating the CLUMondo and InVEST models to assess the impact of the implementation of the Major Function Oriented Zone planning on carbon storage[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106708.
- [18] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [19] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [20] 虎帅, 张学儒, 官冬杰. 基于 InVEST 模型重庆市建设用地扩张的碳储量变化分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 323-331.
- Hu S, Zhang X R, Guan D J. Analysis on carbon storage change of construction land expansion in Chongqing based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 323-331.
- [21] Chen G Z, Li X, Liu X P, et al. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 537.
- [22] 杨伟青, 张会兰. 基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 253-262.
- Yang W Q, Zhang H L. Ecosystem service value assessment and multi-scenario simulation of Fujiang River based on GeoSOS-FLUS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 253-262.
- [23] Zeng L, Liu X P, Li W H, et al. Global simulation of fine resolution land use/cover change and estimation of aboveground biomass carbon under the shared socioeconomic pathways[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 312: 114943.
- [24] Li G D, Fang C L, Li Y J, et al. Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1628.
- [25] Wang W L, Zhao S L, Jiao L M, et al. Estimation of PM<sub>2.5</sub> concentrations in China using a spatial back propagation neural network [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 13788.
- [26] 刘丹丹. 基于 InVEST 模型江西省土地利用变化的生态效应研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2021.
- Liu D D. Research on Ecological Effects of Land Use Change in Jiangxi Province Based on InVEST Model [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2021.
- [27] 刘咏梅, 朱彦蓉. 基于 InVEST 模型的长三角地区陆地生态系统固碳特征变化研究[J]. 南京晓庄学院学报, 2020, 36(6): 82-90.
- Liu Y M, Zhu Y R. Research of carbon storage changes in terrestrial ecosystems based on InVEST model in the Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Nanjing Xiaozhuang University, 2020, 36(6): 82-90.
- [28] Ke X L, Tang L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 672-683.

~~~~~

(上接第 298 页)

- [26] 王凯, 何静, 徐小凡, 等. 新型城镇化对旅游效率的空间溢出与门槛效应[J]. 热带地理, 2022, 42(8): 1275-1287.
- Wang K, He J, Xu X F, et al. Spatial spillover and threshold effect of new urbanization on tourism efficiency [J]. Tropical Geography, 2022, 42(8): 1275-1287.
- [27] 郭新茹, 陈天宇. 地理集聚能否提升我国文化产业发展: 基于空间杜宾模型和门槛模型的检验[J]. 人文地理, 2021, 36(3): 87-96.
- Guo X R, Chen T Y. Can geographic agglomeration improve the development quality of cultural industry test based on spatial dubin model and threshold model [J]. Human Geography, 2021, 36(3): 87-96.
- [28] 陈勤昌, 王兆峰. 武陵山片区国土开发强度与经济韧性时空耦合特征及互动效应[J]. 经济地理, 2023, 43(4): 41-50.
- Chen Q C, Wang Z F. Spatio-temporal coupling and interactive effects of land development intensity and economic resilience in the Wuling Mountains Area[J]. Economic Geography, 2023, 43(4): 41-50.