

# 2000—2020 年漓江流域景观生态脆弱性时空分异

张军民, 荣 城, 董国松

(广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541000)

**摘 要:**漓江流域是我国南方脆弱岩溶环境的重要生态安全屏障。通过景观生态脆弱性评价优化国土空间治理,可为岩溶区生态修复和脱贫攻坚成果提供科学依据。基于土地利用、遥感信息和 GIS 空间分析平台,应用景观指数、时空统计、空间分析、地理探测等方法,从多维时空尺度分析了漓江流域景观生态脆弱性及其时空变化规律。结果表明:(1) 漓江流域以林地、耕地为主体景观,面积占全流域的 90%,近 20 年其变率小于 0.37%,扩张强度小于 3.59%,流域景观格局稳定;建设用地增长最快,扩张强度高达 72.97%,动态度明显高于其他地类,城镇化进程是景观格局的主要驱动因素;(2) 景观生态系统以中低级脆弱区为主,占总面积的 56.53%,高危脆弱区面积占比小于 10%;形成城镇化中心低值聚集,山地区高值连片的分异格局;近 20 年一级、五级脆弱区扩张强度分别为 1.70%,1.36%,中高级脆弱区面积扩张强度—2.59%,流域景观生态脆弱性减弱。(3) LEV 空间分异呈现人工景观低值化与自然景观高值化格局。桂林市是低—低相邻的冷点,周边山区为高一高相邻的热点,近 20 年冷点、热点范围都略有扩大,景观生态脆弱性与城镇化有显著的正向空间依赖性。(4) 城镇化及坡度变化对脆弱性的解释度最大,其  $q$  值分别为 0.2689,0.250 8,是 LEV 空间分异的核心驱动,自然和人工因素共同决定了 LEV 时空分异。漓江流域土地利用应坚持综合治理和系统规划的原则,统筹城乡土地利用和国土空间规划,系统融合城市与乡村、自然与人工景观类型及功能。

**关键词:**景观格局; 时空分异; 景观生态脆弱性; 地理探测器

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0283-10

## Spatiotemporal Differentiation of Landscape Ecological Vulnerability in Lijiang River Basin from 2000 to 2020

ZHANG Junmin, RONG Cheng, DONG Guosong

(College of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541000, China)

**Abstract:** The Lijiang River Basin is an important ecological security barrier for the fragile karst environment in southern China. Optimizing the land space management through the assessment of landscape ecological vulnerability can provide a scientific basis for the ecological restoration and poverty alleviation achievements in karst areas. Based on land use, remote sensing information and GIS spatial analysis platform, landscape ecological vulnerability and temporal-spatial changes of landscape index of the Lijiang River Basin were analyzed from multi-dimensional temporal-spatial scales with the methods of landscape index, temporal-spatial statistics, spatial analysis, geodetector employed. The results indicate that the main landscape of the Lijiang River Basin is forestland and cultivated land, accounting for 90% of the total basin area; in the past 20 years, its area change rate was less than 0.37%, the expansion intensity was less than 3.59%, and the basin landscape pattern was stable; construction land had the fastest growth and significant expansion, its dynamic degree was significantly higher than other land type and the urbanization process was the main driver of the landscape pattern; the landscape ecosystem was dominated by low-and middle-level fragile areas, accounting for 56.53% of the total area, and high-risk fragile areas accounting for less than 10%, which formed a differentiation pattern of low-value clusters in urbanization centers and high-value contiguous mountain areas; in the past 20 years, the expansion intensities of level 1 and level 5 vulnerable zones were 1.70%

收稿日期:2021-08-14

修回日期:2021-08-21

资助项目:国家自然科学基金项目(41761030);兵团社科项目(18ZD02);广西社科基金(20FJY006)

第一作者:张军民(1964—),男,新疆吐鲁番人,教授,博士,博士生导师,研究方向为景观生态安全与城镇化发展。E-mail:zjm\_tea@163.com

and 1.36%, respectively, and the area expansion intensity of middle and high-level fragile areas was -2.59%, informing that the ecological fragility of the basin landscape weakened; the landscape ecosystem was dominated by low-and middle-level fragile areas, and the area of high-risk fragile areas accounted for less than 10%; a differentiation pattern of low-value clusters in urbanization centers and high-value contiguous mountain areas had been formed; In the past 20 years, the range of low-value areas had continued to expand while the area of middle and high-level fragile areas reduced, informing that the ecological fragility of the basin landscape weakened; LEV spatial differentiation presented a pattern of low-value artificial landscapes and high-value natural landscapes; the urban area of Guilin was a low-low adjacent cold spot, and the surrounding mountainous area was a high-high adjacent hot spot; the range of cold spots and hot spots had expanded slightly in the past 20 years, and the landscape ecological spatial pattern was relatively stable; urbanization and gradient changes had the greatest degree of explanation for vulnerability, with  $q$  values of 0.268 9 and 0.250 8, respectively, which were the core drivers of LEV spatial differentiation; natural and artificial factors jointly determined LEV temporal and spatial differentiation. The land use of the Lijiang River Basin should adhere to the principles of comprehensive management and systematic planning, coordinate urban and rural land use and land space planning, and systematically integrate the types and functions of urban and rural, natural and artificial landscapes.

**Keywords:** landscape pattern; spatiotemporal differentiation; landscape ecological vulnerability; geodetector

土地利用/覆被变化(Land Use and Land Cover Change, LUCC)是诱发全球变化主要原因之一,其过程和格局变化维系着全球和区域生态安全结构,成为可持续发展研究的主要内容<sup>[1-2]</sup>。景观生态脆弱性属于生态风险评价的研究内容,主要关注人类活动或环境变化对景观生态系统的结构功能及服务价值的稳定性、持续性产生的潜在不利影响,常用景观生态系统受损或胁迫程度来表征脆弱性状态<sup>[3]</sup>,服务于生态管理、风险识别及景观调控、政策响应等实践过程,是景观资源合理开发、有效配置及空间治理的重要科学依据<sup>[4-5]</sup>。

景观生态脆弱性研究多以区域景观及其动态变化为对象,依据景观格局与生态过程交互作用理论,以景观生态价值损失与概率的综合表征为评价标准,通过分析景观类型及结构的空间格局,开展景观变化的环境效应和生态风险评价。分析单元主要根据研究目的需要采用格网分析法或基于流域、行政区或干扰源来划分风险评价单元。遥感信息提取及景观类型划分是分析的基础,景观指数选配及其生态功能识别是研究的关键,脆弱性时空格局及驱动胁迫机制的探究是研究的目标<sup>[6-7]</sup>。如用景观生态学理论和景观指数方法城市扩张的资源环境效应、构建景观健康评价体系并以此诊断山地景观健康分异格局;基于压力—状态—响应原理,设计敏感性、脆弱性、稳定性等生态功能评价指标,研究矿区、岩溶区生态脆弱性分异格局规律<sup>[8-11]</sup>,探究城市群典型源地和廊道的生态空间的时空分异结构<sup>[12]</sup>;用景观格局分析方法及景

观脆弱性评价体系,研究山地景观生态服务价值及其驱动响应机制<sup>[13]</sup>、评估岷江上游土地利用变化时空变化特征及其生态环境效益<sup>[14]</sup>;评价干旱区生态脆弱性时空分异特征及驱动胁迫机制等<sup>[15]</sup>。

当前,针对漓江流域尺度的景观生态脆弱性的集成研究成果相对较少,对流域生态脆弱性时空分异特征及规律的系统把握极为薄弱,无法有效支撑岩溶区生态风险识别及土地利用调控等应用研究。现有成果集中在有限领域:如用遥感分类和景观指数评价方法研究漓江上游 LUCC 变化特征及演变趋势<sup>[16]</sup>,分析漓江流域土地利用及景观格局变化特征<sup>[17]</sup>,评估漓江流域生态服务价值并研究旅游活动对景观格局的扰动规律<sup>[18]</sup>,模拟流域土地利用结构优化模式<sup>[19]</sup>;用 GIS 和遥感生态指数方法,研究漓江流域生态环境质量状态及变化特征<sup>[20]</sup>,少数学者用地理探测器方法分析漓江流域中下游城镇化及旅游活动对景观生态服务的影响规律及作用机制等<sup>[21]</sup>。

综上所述,景观生态学主要围绕景观空间格局与生态过程关系、人类活动对格局过程及其变化的影响、景观变化的生态环境效益等主题展开,基于景观格局分析和遥感识别及地理信息系统平台,对流域、行政区、城乡开展多尺度生态风险评价,以实现多源风险的综合诊断和时空计量。关注景观时空异质性与生态过程间的关系,解析景观分异对生态质量的驱动因子及胁迫机制。但在尺度依赖性和适用性方面存在不足,景观指数及脆弱性计算的数理统计和几

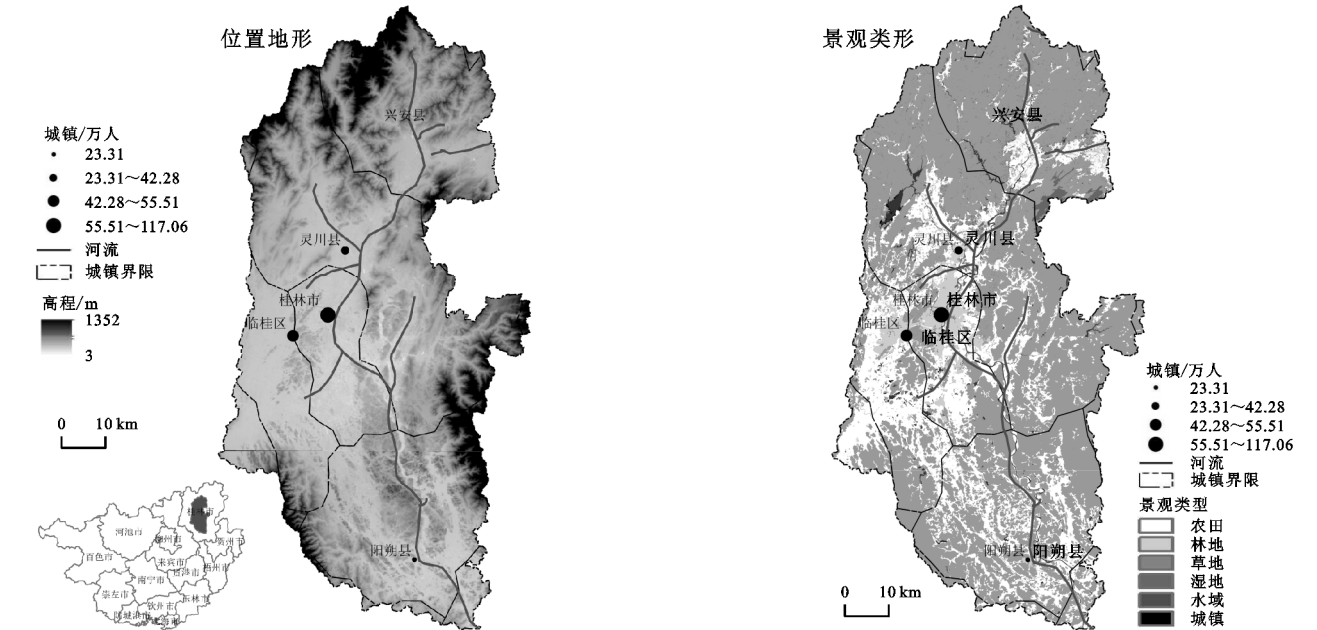
何表达缺少生态学解释,大多属于单一景观指数的静态分析和景观生态线性关系的定量计算,对生态过程及其动态变化的景观内涵的综合解释不够,限制了景观格局与生态过程交互作用的科学解释,降低了景观生态脆弱性研究的精准性和适用性,需要厘清景观格局变化与生态过程、服务价值、生态风险间的逻辑关系及区域表征。漓江流域属于典型的岩溶生态脆弱区,自然基础、生态环境及城镇化、产业化独具地域特色,优质景观资源是建成国际旅游的珍贵生态资本,迫切需要在保持流域景观结构原生态特质基础上,不断丰富和完善景观格局的生态功能和服务价值。本项目从关系、结构、形态、基质等维度构建景观生态脆弱性综合评价体系,利用遥感信息识别和 GIS 空间分析平台,多时空分析漓江流域景观生态脆弱性及分异格局,用空间插值、空间自组织分析方法,用标准格网、地形分异、行政区划 3 个分析单元,探索其空间依赖性和异质性,用地理探测器模型研究景观生态脆弱性空间分异的主导因子、驱动机制,揭示近 20 a 漓江流域景观生态系统时空动态变化规律,为客观评价

漓江流域景观生态价值,优化调控流域土地利用结构提供科学依据。

## 1 数据处理与研究方法

### 1.1 研究区概况

漓江流域位于广西壮族自治区(广西)东北部的桂林市境内(地理坐标:110°07′39″—110°42′57″E, 24°38′10″—25°53′59″N),属珠江流域西江水系桂江上游主要支流,发源于南岭西北部越城岭主峰猫儿山湿地,从北往南流经桂林市的兴安县、灵川县、桂林市区、阳朔县,全长约 295.27 km,多年平均径流量 408.9 m<sup>3</sup>/s,流域面积约 6 353.62 km<sup>2</sup>。漓江流域属于典型的岩溶区和亚热带季风湿润气候,终年高温多雨,年均温 19℃,年降水量 1 838~1 941 mm;流域峰丛林立、山峰陡峭,山高谷深、沟谷狭长、地形破碎。山地主要分布在北部及东西两侧,其中北部上游山势较高、中部山地低缓;中间为狭窄的岩溶侵蚀谷地,山地丘陵面积占 50% 以上。中心城市桂林位于流域中游的河谷平原上,旅游中心阳朔位于流域中下游的低山丘陵上(图 1)。



注:根据审图号:GS(2019)4345号,自然资源部监制,底图未做修改,全文同。

图 1 漓江流域地形及景观类型

### 1.2 数据处理

1.2.1 数据来源与处理 本研究使用的 2000 年、2010 年、2020 年三期土地利用/覆被(LUCC)数据来源于国家自然资源部提供的 30 m 全球地表覆盖数据 Globeland30 数据源(www.globallandcover.com),数据合成经过了辐射定标、大气校正、几何校正等处理,数据的总体精度为 85.72%,Kappa 系数 0.82。研究区空间矢量数据来源于中国国家基础地理信息中心(<http://ngcc.sbsm.gov.cn>)和地理空间

数据云(www.gscloud.cn),部分数据来自桂林市经济社会统计年鉴,从中提取研究区流域界限、高程坡度、行政界限及人口经济等数据。

根据中国土地利用/覆被遥感监测数据分类系统和《土地利用现状分类(GB/T21010\_2007)》,结合研究区实际,将土地利用/景观类型分为农田、林地、草地、沼泽、水体、城镇、裸地等 7 类,编码分别设置为 1~7(图 1),并以此建立 LUCC 变化景观类型数据库,开展景观生态脆弱性评价及时空变化分析。



1.2.2 确定分析单元 根据研究区景观结构特征、遥感分类精度,经多次试验用 ArcGIS 创建 3 km×3 km的规则格网矢量数据,作为分析景观生态脆弱性(Landscape ecological vulnerability, LEV)的空间单元;再从原始分类栅格中提取建设用地、耕地占比,作为城镇化强度、土地利用强度要素添加到分析单元,从流域矢量中提取县域界限作为行政单元,用以测度影响 LEV 时空分异的主导因子及驱动机制。时间节点选择 2000 年、2010 年、2020 年 3 个年份,动态变化选择 2020—2000 年,将各类景观要素赋值到矢量属性表中,构建标准格网、城镇化、行政区三级时空分析单元数据库。

1.3 研究方法

1.3.1 景观生态脆弱性指数计算 基于景观生态学理论,结合漓江流域景观类型和结构特征,根据关系、结构、形态及基质等生态含义,选择连通性指数(CONTAG)、优

势度指数(LPI)表征景观空间关联性,香农多样性指数(SHDI)、香农浓均匀度指数(SHEI)表征景观结构,分维数(FRACT)表征景观形态<sup>[8]</sup>,高程和坡度代表生态本底,共同构成多元 LEV 要素。其中 CONTAG, LPI 越小,表明各类景观的关联性、连通性及主体性越差,景观生态系统越脆弱;SHDI, SHEI 指数越小,景观类型简单、分布不均衡,景观结构的适应性和抗干扰能力越弱,景观生态系统越脆弱;而 FRACT 值越小,反映了人类活动对景观形态的干扰越弱,景观生态系统越稳定。高程和坡度是景观生态系统演变的自然基础,其值越大表明景观变化的自然基础越脆弱<sup>[12,14]</sup>。用综合指数法计算分析单元的生态脆弱性指数,用自然断点法将 LEV 由低到高分 5 级,等级越高景观生态系统越脆弱;漓江流域景观破碎而易损,景观结构及功能敏感而擅变,故将各类指数对脆弱性的影响赋予同等权重(表 1)。

表 1 各类景观要素生态脆弱性分级标准

要素	指标	一级	二级	三级	四级	五级
关系	CONTAG	1~0.81	-0.61	-0.45	-0.28	>0.28
	LPI	1~0.82	-0.65	-0.49	-0.30	>0.30
结构	SHDI	1~0.88	-0.75	-0.59	-0.39	>0.39
	SHEI	1~0.86	-0.71	-0.54	-0.36	>0.36
形态	FRACT	0.003~0.22	-0.43	-0.60	-0.64	>0.64
基质	高程(m)	3~135	224~366	366~859	859~1352	>1352
	坡度(°)	0~3.8	8.2~14.2	14.4~45.2	45.2~87.3	>87.3
脆弱性	LEV	0.01~2.35	6.97~10.44	10.44~12.32	12.32~13.73	>13.73

1.3.2 结构动态变化 用 ArcGIS 计算各类景观近 20 a 变化的转移矩阵,用转移率计算各类景观变化的数量、方向及趋势特征。

$$C_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_i^n \sum_j^n T_{ij}} \tag{1}$$

式中: $C_{ij}$ 为景观类型转移率; $T_{ij}$ 为初期第*i*种景观类型转移到末期第*j*种类型的面积;*n*为景观类型。

用变化强度模型计算景观数量、类型及面积变化速度,以表征各类景观转移或变化的活跃程度:

$$V = \frac{(P_b - P_a)}{T} \tag{2}$$

式中: $V$ 为某类景观变化的扩张度; $P_b$ ,  $P_a$  分析表示该地类末期、初期的面积; $T$ 为研究时段,以表示某地类年变化率,反映各地类的变化强度及方向差异。

1.3.3 时空分异格局 用 ArcGIS 将景观指数、动态变化等数据添加到空间单元中并经融合、叠加、统计计算后,用 GeoDa 空间自组织分析、IDW 反距离权重插值方法,实现对景观结构时空分异格局的特征分析和分异探测。

(1) 空间自相关分析。空间自相关性是由地理区位或邻接关系产生的空间依赖性和空间异质性表达,是对地域体系内各要素空间分布结构的统计学测度<sup>[22]</sup>。

全局莫兰指数(GISA):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \tag{3}$$

式中: $W_{ij}$ 为*i*要素相当于*j*的权重; $S^2$ 为所有要素权重的集合; $x_i$ ,  $x_j$  是要素*i*, *j* 的属性值; $I$  即是全局莫兰指数,是具有空间依赖的一组地理要素在研究区域内表现出的整体空间集聚、分散模式。 $I$  取值为 0 表示空间结构呈随机分布形态,各单元不存在空间相互作用; $I$  取值为 1 则表示空间结构完全依赖距离变化,具有显著的地域分异性。

(2) 反距离权重插值分析。反距离权重插值是根据空间单元的距离来估算空间点群平滑值的一种方法,待插值点的取值可用周围若干距离内样点值的加权和来估算,其权重与两点间距离成反比。空间任一点 *P* 的插值的计算公式定义为<sup>[23]</sup>:

$$P=\frac{\sum_i^n Z_i W_i}{\sum_i^n W_i}$$

(4)

式中: $P$  为待插值点  $P$  的取值; $Z_i$  为  $P$  点周围点的属性值; $W_i$  为周围点对  $P$  点的权重值; $i=1,2,3,\cdots,n$  为点群样本数。

用 ArcGIS 空间分析中的反距离权重分析方法(IDW),分别选择感兴趣属性为计算字段求得权重,输出栅格大小为 3 km,将 IDW 的幂值设定为缺省值 2,选择搜索半径类型选择点数 15。

1.3.4 地理探测器 Geodetector 主要用于探测地理事物的空间分层(分类)变化特征及规律,以解决传统统计学无法完成的随尺度变化而产生的空间依赖性、异质性问题。它即可以度量空间结构的分层异质性,也可以探测空间分异格局,估计非线性空间因果关系<sup>[22]</sup>。一般用  $q$  值来度量分异因子  $X$  在多大程度上解释了变量  $Y$  的空间分异。

$$q=1-\frac{\sum_{i=1}^l N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2}$$

(5)

式中: $i$  为因变量  $Y$  或因子  $X$  的分层(类)数; $N_i$  和

$\sigma_i^2$  分别是  $i$  内的空间单元数和方差; $N$  和  $\sigma^2$  分别代表研究对象的单元数和方差; $q$  值 $\in[0,1]$ ,其值越大表示两个变量空间分布越一致,自变量  $X$  对因变量  $Y$  发生空间分异的解释力越强。

## 2 结果及分析

### 2.1 景观类型及结构特征

用 ArcGIS 10.6 对 2000 年、2010 年、2020 年三期土地利用分类数据进行统计分析得到漓江流域景观结构现状及变化数据。

2.1.1 景观结构现状特征 用 ENVI 从原始分类影像提取三期景观分类数据,用 ArcGIS 进行制图综合和专题地图制作以形成景观类型(表 2)。分析得出:漓江流域土地总面积 6 353.62 km<sup>2</sup>,土地利用/覆被类型包括耕地、林地、草地、湿地、水域、建设用地、裸地等 7 个一级类型,其中林地面积最大,占流域总面积超过 65%,其次是耕地,占 25%以上,二者合计占流域总面积的 90%以上,是景观结构的主体和景观生态的核心;其他类型面积都较小,建设用地仅占 4.39%,草地仅占 2.16%,湿地、裸地占比小于 0.05%。

表 2 2000—2020 年景观类型面积及变化

类型	2000 年		2010 年		2020 年		变化					
							2010—2000 年		2020—2010 年		2020—2000 年	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
农田	1633.41	25.71	1665.03	26.21	1627.43	25.61	31.63	1.94	−37.60	−0.02	−5.97	−0.37
裸地	186.62	2.94	12.20	0.19	2.36	0.04	−174.42	−93.46	−9.84	−0.81	−184.26	−98.74
城镇	105.93	1.67	118.85	1.87	279.03	4.39	12.92	12.19	160.18	1.35	173.10	163.41
林地	4189.33	65.94	4310.32	67.84	4203.98	66.17	120.99	2.89	−106.34	−0.02	14.64	0.35
草地	158.24	2.49	163.96	2.58	137.38	2.16	5.73	3.62	−26.58	−0.16	−20.85	−13.18
水体	72.00	1.13	76.58	1.21	100.17	1.58	4.58	6.37	23.59	0.31	28.17	39.13
沼泽	8.11	0.13	6.69	0.11	3.29	0.05	−1.42	−17.54	−3.40	−0.51	−4.82	−59.46
合计	6353.62	100.00	6353.62	100.00	6353.62	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

2.1.2 景观结构变化趋势 分析 LUCC 类型面积及其变化强度,可掌握各类景观的变化方向、强度及趋势。分析近 20 a 各类景观面积变化可以看出:林地、耕地变率小于 0.37%,主体地位十分稳定外,其他景观类型变化较大,景观结构变化不显著;其中建设用地、水域分别增长了 163.41%,39.13%,而裸地、湿地分别减少了 98.71%,59.46%;反映了漓江流域以林地、耕地为主体,景观结构相对稳定,景观生态质量较好。分析面积扩张强度可以看出:建设用地扩张最剧烈,且呈持续快速增长趋势,2010—2000 年和 2020—2010 年分别年均扩张 1.22%,13.48%,裸地面积减少最明显,但减势减弱;表明建设用地快速增长是景观结构变化的主要方向,城镇化是其变化的主要胁迫。

分析土地利用转移矩阵(表 3)可以得出:2020—

2000 年漓江流域耕地、林地转出总量较大。耕地共转出 200.97 km<sup>2</sup>,其中 61.67%转为建设用地,23.18%转为林地、12.33%转为水域;林地转出 192.88 km<sup>2</sup>,分别转为耕地、建设用地、草地的比例为 52.26%,22.33%,17.80%。转入数量最大的是林地,共转入 207.52 km<sup>2</sup>,其中分别由裸地、耕地、草地转入的比例为 59.87%,22.44%,13.97%;其次是耕地共转入 194.99 km<sup>2</sup>,主要由林地(占 51.69%)、裸地(占 29.89%)转入;建设用地共转入 182.11 km<sup>2</sup>,主要由耕地(占 68.06%)、林地转入(23.65%)转入。从转移强度分析,林地、耕地和建设用地转换强度最大,景观类型变化面积大、频次高,而水域、湿地变化最不活跃,流域水系生态系统保持较好;从转移方向看,建设用地的转入远大于转出,裸地转出远大于转入,其他景观变化基本平稳,表明城镇化建设活跃,但对景观结

构动态变化影响并不大。

2.1.3 景观结构时空分异 由表 2—3 可以看出:漓江流域各市县均以林地、耕地为主,其中位于流域上游的兴安县、灵川县林地占比分别为 79.33%,73.68%,旅游中心阳朔县也高达 68.05%;城镇化中心桂林市及临桂区林地仅占 42.92%,35.34%,但桂林市区、临桂区、阳朔县耕地占比却分别高达 36.32%,46.31%,29.92%。建设用地变化总强度(正负变化总和)最大,达到年均

72.98%,其中临桂新区年均增长达 37.79%;其次是水体、草地分别为 45.44%,42.75%,其中兴安县的水体年均增长 31.81%,阳朔的草地年均增长 30.45%;而主体景观耕地、林地变化总强度仅为年均 3.59%,1.36%,变化稳定。表明流域上游森林覆盖明显高于城区,但城区耕地后备充足;旅游中心阳朔县林地、耕地占比均较高,城市建设用地扩张明显,流域发展较适合集中城镇化与分散旅游业模式。

表 3 2020—2000 年土地利用转移矩阵 km<sup>2</sup>

类型	农田	裸地	城镇	林地	草地	水体	沼泽	转出
农田	0	0.505	123.942	46.578	4.758	24.787	0.396	200.966
裸地	58.29	0	1.544	124.242	1.092	1.335	0	186.503
城镇	5.96	0.005	0	1.887	0.357	0.801	0	9.01
林地	100.791	1.44	43.075	0	34.337	13.238	0	192.881
草地	18.768	0.127	12.094	28.987	0	2.358	0	62.334
水体	10.644	0.167	1.435	5.252	0.874	0	0.016	18.388
沼泽	0.539	0	0.019	0.576	0.061	4.038	0	5.233
转入	194.992	2.244	182.109	207.522	41.479	46.557	0.412	0

2.2 景观生态脆弱性指数时空变化分析

在 Fragstate 4.2 上用滑动窗口法对关系、形态、结构等景观要素进行空间分析,经反复测试后取 3 km×3 km 格网计算均值,再将景观指数空间数据添加到 Fishnet 格网中,用 ArcGIS 的反距离权重法(IDW)对其进行空间插值和自然断点分类(级),用动态度模型计算各类指数的变化强度,得到各类指数结构及其格局变化图谱,比较和分析三期数据变化特征以识别 LEV 时空分异。

2.2.1 景观指数变化分析 分析表 4 可以得出:漓江流域 CONTAG,LPI 指数在桂林、阳朔形成低值中心,而在上游山地区为高值连片、中游山地区高值离散分布,形成城镇及旅游活跃区低值集聚,山地区高值连片分布格局。CONTAG,LPI 指数近 20 a 变化较小,仅分别累计增长了 0.71%,0.35%,景观格局稳定。CONTAG,LPI 低值中心面积分别扩大了 232.61 km<sup>2</sup>,209.13 km<sup>2</sup>,年均扩张度分别为 1.52%,0.98%;而 CONTAG,LPI 高值中心面积分别减少了 91.06 km<sup>2</sup>,49.35 km<sup>2</sup>,年均收缩 0.49%,0.25%,收减最大的中值区面积分别减少了 190.69 km<sup>2</sup>,205.14 km<sup>2</sup>,分别年均减少 0.50%,0.58%。表明城镇景观的脆弱性显著大于周边山地区;近 20 a 景观要素的脆弱性略为减弱,这种变化在城市周边(中值区)表现最明显。

漓江流域 SHDI,SHEI 指数都在桂林市、阳朔县形成高值中心,而兴安、灵州为低值中心,形成城镇化地区高值集聚,周边山地低值连片分布格局。SHDI,SHEI 指数近 20 a 变化较小,SHDI,SHEI 值累计分别增长了 3.53%,0.20%,景观格局稳定。SHDI,

SHEI 高值中心面积分别扩大了 450.58 km<sup>2</sup>,31.85 km<sup>2</sup>,年均扩张度分别为 4.67%,0.19%;而 SHDI,SHEI 低值中心面积分别减少了 93.46 km<sup>2</sup>,47.66 km<sup>2</sup>,年均收缩 0.34%,0.18%,收减最大的中值区面积分别减少了 478.42 km<sup>2</sup>,227.60 km<sup>2</sup>,分别年均减少 1.30%,0.71%。表明城镇景观的脆弱性小于周边山地区,景观结构较稳定,向周边特别是上游山地区逐渐减增大,景观稳定性减弱;近 20 a 变化不大,但在城市周边(中值区)表现最显著。

分维数指数 FRACT 反映了人类活动对景观格局的干扰程度,其值越大表明人类扰动越强。漓江流域景观形态指数分布与景观结构指数相似,也在城镇化地区形成高值集聚,在周边山地形成低值连片,近 20 a 变化不大。

2.2.2 景观生态脆弱性指数 用关系、结构、形态、基质等属性计算生态脆弱性指数 LEV,以 LEV 为分析变量,在 ArcGIS 平台上用 IDW 反距离权重法差值脆弱性指数,用自然断点法由低到高将其分为一、二、三、四、五级。

由图 2,表 5 可以得出:漓江流域生态脆弱性指数在桂林市周边形成低值中心,向周边逐渐增强,在山地区形成高值中心,城镇化中心低值聚集,山地区高值连片。其中一级脆弱区面积 1 242 km<sup>2</sup>,占总面积的 19.91%,五级区面积 666 km<sup>2</sup>,占总面积的 10.67%,中低等级脆弱区合计占 56.53%。2000—2020 年 LEV 由 357.84 下降到的 330.39,年均降幅仅 0.38%。其中一级区面积扩大了 315 km<sup>2</sup>,扩张强度 1.70%,与建设用地面积扩张相似;五级脆弱区面

积扩大了 128 km<sup>2</sup>,扩张强度 1.36%,三、四级脆弱区面积累计减少了 907 km<sup>2</sup>,收缩强度 2.59%。进一步分析典型区域 LEV 可以得出:桂林、临桂、阳朔、灵川、兴安等地的脆弱性指数分别由 2000 年的 1.57,2.13,2.58,2.06,2.35 降低到 2020 年的 0.27,0.41,0.57,0.45,0.53,收缩强度分别为年均:4.14%,4.04%,3.90%,3.91%,3.87%。中心城市桂林市脆弱性指数最低,近 20 a 收缩(降低)度也最大;其次是与其比邻的临桂区、

灵川县也较低,而下流的阳朔县、上游的兴安县脆弱性指数最高,近 20 a 收缩(降低)强度最小。反映了漓江流域景观脆弱性以中低级区为主,高级脆弱区域较少;近 20 a 脆弱性指数略有下降,生态环境渐趋向好;城镇化扩张使低级区扩张,中高级脆弱区面积收缩,景观生态稳定性逐渐提高。表明人类活动在使人工景观生态趋向稳定的同时,对自然景观格局产生了显著的生态胁迫,这种变化对中值区影响较显著。

表 4 2020—2000 年各景观指数面积及扩张度变化

脆弱性	CONTAG		LPI		SHDI		SHEI		FRACT	
	面积/km <sup>2</sup>	扩张强度/%	面积/km <sup>2</sup>	扩张强度/%	面积/km <sup>2</sup>	扩张强度/%	面积/km <sup>2</sup>	扩张强度/%	面积/km <sup>2</sup>	扩张强度/%
一级	232.61	1.52	209.13	0.98	−93.46	−0.34	−47.66	−0.18	−409.33	−1.77
二级	47.18	0.17	17.81	0.06	−22.31	−0.08	38.99	0.15	11.50	0.03
三级	−190.69	−0.50	−205.14	−0.58	−478.42	−1.30	−227.60	−0.71	786.80	5.66
四级	1.97	0.01	27.55	0.13	143.61	0.57	204.42	0.75	−1165.26	−3.46
五级	−91.06	−0.49	−49.35	−0.25	450.58	4.67	31.85	0.19	776.28	4.93
合计	0.00	0.71	0.00	0.35	0.00	3.53	0.00	0.20	0.00	5.39

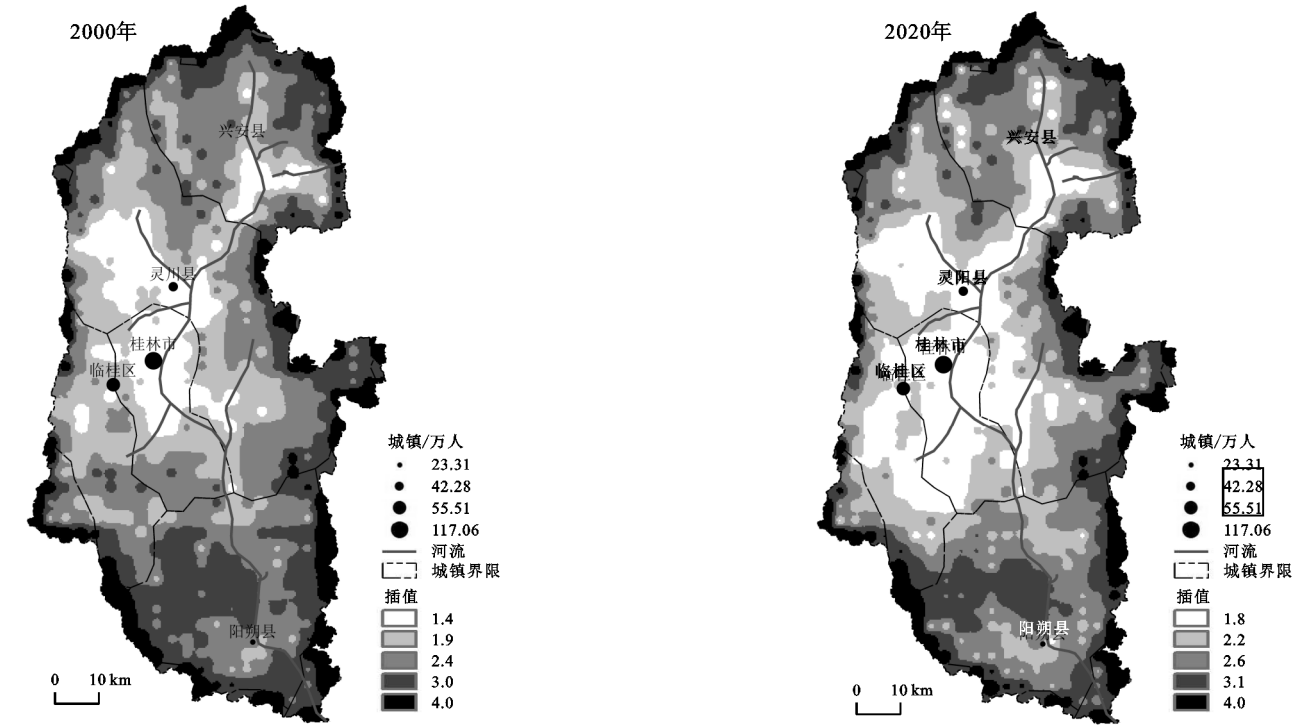


图 2 漓江流域 LEV 空间差值计算结果

表 5 2020 年流域及典型区域 LEV 等级结构及扩张强度 %

	一级		二级		三级		四级		五级	
	面积占比	扩张强度	面积占比	扩张强度	面积占比	扩张强度	面积占比	扩张强度	面积占比	扩张强度
流域	19.91	1.70	28.71	0.96	25.82	−1.36	14.86	−1.23	10.67	1.36
桂林市	58.10	4.52	36.84	−2.46	5.06	−3.91	0	−5.00	0	0
临桂区	32.63	26.02	38.95	−0.13	10.53	−3.08	12.63	−1.67	5.26	−1.88
阳朔县	1.84	9.84	28.91	7.37	38.14	0.17	22.69	−2.29	8.41	−0.30
灵川县	27.97	3.37	30.69	0.06	25.25	−1.39	8.11	−0.97	7.98	0
兴安县	17.51	4.28	18.86	−0.002	30.99	−0.89	23.43	−0.40	9.21	0.40

2.2.2.3 LEV 空间自组织结构分析 进一步采用空间探索性分析方法(GeoDa)对 LEV 进行插值计算,通过求解全局和局部莫兰指数以定量测度其空间依赖性和异质性特征,以探索脆弱性指数的地域分异规律。



用公式(3)计算得到:2000 年漓江流域 LEV 全局 Moran' $I$  指数及其  $p$ ,  $Z$  值分别为 0.522, 0.001, 26.598 2 年、2020 年全局 Moran' $I$  指数、 $p$ ,  $Z$  值分别为 0.515, 0.001, 26.842 5,  $p$  值均小于 0.001(置信度), 计算结果都通过了  $Z$  值检验, 即漓江流域 LEV 存在较显著的空间正相关性, 指数分布具有显著的空间依赖性, 表现为高值区与高值区相邻、低值区与低值区相随, 近 20 a 的  $I$  值略有下降。进一步分析局部 Moran' $I$  可以看出:LEV 在桂林市形成低\_低相邻的冷点, 而在周边山区形成高\_高相邻的热点, 近 20 a 人类活动使冷点、热点范围都略有扩大, 自然、人工景观 LEV 值时空分异显著。表明漓江流域景观生态脆弱性结构受相似的发生环境和分异因素影响而具有空间集聚性分布特征, 城镇化是流域景观生态格局变化的核心驱动, 城镇化扩张在提高人工景观稳定性的同时, 也增大了自然景观的脆弱性和离散化, 形成人工景观 LEV 向好与自然景观 LEV 增强的分异格局, 城镇化扰动使自然与人工景观生态系统异向分化。

2.3 LEV 时空分异主导因子及驱动机理探测

以标准格网为分析单元, 以 LEV 为因变量, 根据漓江流域地形结构特征及景观生态脆弱评价目标, 自然因子选择高程大于 120 m(岩溶侵蚀谷地)的区域占总面积的比例定义高程驱动因子, 坡度大于 10° 的区域占总面积的比例定义为坡度驱动因子; 人工因

子选择建设用地占总面积的比例定义城镇化驱动因子, 耕地占总面积的比例定义土地利用强度驱动因子。自然、人工驱动因子对 LEV 时空分异均是正向关系, 即其值越大对 LEV 影响也越强烈。用 GeoDetector 软件探测各因子对 LEV 时空分异的作用强度及其交互作用关系, 探索流域 LEV 时空分异的主导因及驱动机制。

2.3.1 主导因子探测 用因子探测器计算影响 LEV 空间分异的各类驱动因子贡献率( $q$  值), 通过比较  $q$  值可以识别各因子对 LEV 分异的重要性程度。漓江流域景观生态脆弱性是自然条件及人类活动共同作用的结果, 反映了自然及人类活动关系的地域结构。分析因子探测结果(表 6)可以看出:按各因子  $q$  值大小排序为:城镇化扩张强度(0.268 9)、坡度(0.250 8)、高程(0.160 4)、土地利用强度(0.145 1), 城镇化是脆弱性空间分异的核心驱动, 其次是大于 10° 的坡度, 二因子对脆弱性空间分异的识别都超过了 25%; 高程和土地利用强度的影响也超过 14%, 对脆弱性空间分异也有较明显影响。近 20 a 各要素  $q$  值均有提高, 提高强度由大到小分别为城镇化>高程>土地利用强度>坡度。表明城镇化扩张强度及坡度是决定脆弱性空间分异最主要的自然、人工因子, 各因子对脆弱性空间分异的解释力趋于增强, 城镇化增强尤为显著。

表 6 主导因子探测结果

2000 年	高程	坡度	城镇化	土地利用	2020 年	高程	坡度	城镇化	土地利用
$q$ statistic	0.118	0.215	0.121	0.115	$q$ statistic	0.160	0.250	0.269	0.145
$p$ value	0.000	0.000	0.000	0.000	$p$ value	0.000	0.000	0.000	0.000
$q$ 值增强率/%						1.789	0.820	6.063	1.314

2.3.2 因子交互作用探测 用交互探测模块计算各因子对脆弱性空间分异的交互作用关系, 可探测各类驱动的交互作用是否增强或减弱了对 LEV 空间分异的影响力。

分析表可以看出:任意两因子交互作用对脆弱性空间分异的影响均显著大于单一因子影响, 交互类型都属于双因子增强型。其中坡度与城镇化的交互增强最为显著, 交互后的  $q$  值为 0.377, 其次高程∩坡度、高程∩城镇化、城镇化∩土地利用强度的交互增

强也较明显, 交互后的  $q$  值也都大于 30%。近 20 a 各要素对空间分异的交互作用均为增强, 其中高程∩城镇化、城镇化∩土地利用交互增强度分别高达 3.495%, 3.023%, 表明流域 LEV 空间分异是自然、人工因子综合作用的产物, 各因子对空间分异的综合作用显著并不断增强; 坡度与城镇化因子的交互作用对脆弱性空间分异影响最大, 高程与城镇化、城镇化与土地利用间的交互作用增强度最显著, 其他因子交互增强作用也较明显(表 7)。

表 7 各因子交互探测结果及其增强率 %

2020	高程	坡度	城镇化	土地利用强度	2000	高程	坡度	城镇化	土地利用强度
高程	0.160				H_Exp	0.118	0.820	3.496	1.518
坡度	0.336	0.251			S_EXP	0.289	0.215	1.748	0.967
城镇化	0.305	0.377	0.269		Build1	0.179	0.280	0.122	3.023
土地利用强度	0.243	0.293	0.302	0.145	Agri1	0.187	0.245	0.189	0.115

注:下划线为 2020—2000 年各要素交互作用增强度。



2.3.3 探测机理分析 多因子分析空间分异驱动机制表明,漓江流域 LEV 空间分布具有较显著的地域特征,城镇化扩张是影响空间分异的核心驱动,地形坡度也是重要影响因子,多因子综合作用决定了 LEV 分异格局。结合各因子空间格局及自组织分析结果可以得出:

(1) Geodetector 能定量识别各因子对景观生态脆弱性空间分异的影响程度及作用关系。首先,景观生态学主要从尺度、格局及形态结构及其动态变化角度,研究生态系统过程、功能及效益的时空变化,探索环境因子与生态要素交互作用的地域分异规律。因此,空间关系、形态结构及自然基质是漓江流域景观生态系统的基本组分,其发展变化决定和影响流域生态系统过程及功能的健康状态。其次,从人地关系地域系统分析,自然要素是景观形成的地域分异基础,影响着流域景观结构演化的基本格局;人文要素是驱动景观类型及格局变化的最活跃因子,决定着景观结构时空分异的具相特征,二者综合作用共同决定着漓江流域景观生态系统的发展演化,并构成流域社会经济可持续发展的基础。从生态学意义分析,漓江流域是典型的岩溶生态环境,地形复杂、景观破碎,生态系统脆弱而擅变,对人类活动及地形起伏高度敏感;坡度对岩溶生态系统物质循环、能量流动及信息传递具有重要作用,高度也是诱发坡度分异的重要因子,在高温多雨的气候条件下,坡度及高程变化是造成景观组分受损及景观生态退化的自然基础。城镇化是当代地域空间分异与景观格局重构的核心驱动,是加快流域景观类型及格局变化的系统动力;快速城镇化正在改变着城乡地域系统的土地利用方式,城镇化进程及土地利用强度决定着漓江流域景观生态脆弱性状态。

(2) Geodetector 探测表明,城镇化扩张强度及坡度变化是漓江流域 LEV 空间分异的核心驱动,高程、土地利用强度也是重要动因。但各因子对空间分异的解释力差异较大,城镇化、坡度因子的  $q$  值分别为 26.89% 和 25.07%,而高程和土地利用强度因子的  $q$  值分别只有 16.04%,14.51%,两组因子解释力相差超过 10 个百分点。分析人文因子看出,城镇化对 LEV 的影响力,显著大于土地利用强度,同时城镇化与其他要素的交互增强及增强度均较大,城镇化扩张对脆弱性的影响力及主导性不断增强,体现了区域城镇化是景观生态变化的核心驱动;再看自然因素,坡度是 LEV 空间分异的主要动因,地形坡度起伏大造成的景观碎片化是影响岩溶区景观生态稳定性的主

要因素,但近 20 a 高程对 LEV 空间分异的影响力增强明显,高程与城镇化、高程与土地利用强度的交互增强度明显大于坡度,说明在更大尺度和强度城镇化干扰下,高程变化对空间分异的影响日益显著。

(3) 精确识别景观生态脆弱性时空分异的影响因子及驱动机制,对调整优化漓江流域土地利用结构和方式,因地制宜地改善和提高土地利用的生态效益具有重要价值。地理探测结果表明,自然、人工因素综合作用决定着流域景观生态系统质量状况,要坚持流域综合治理和系统规划的原则,流域上中下游及各市县必须统筹规划、整体布局,土地利用总体规划必须在尊重自然景观地域分异的基础上发挥城镇化主导作用。城镇化对岩溶自然景观造成了显著的生态胁迫,应统筹城乡土地利用的一体化功能,让城镇扩张通过乡村或农地的生态功能扩大来连接自然景观,使城市与乡村、自然与人工景观类型及功能融为一体。小尺度规划应关注坡度对景观结构及其生态功能的影响,大尺度布局应强调高程对景观布局及区域功能的作用,侵蚀和冲积谷地应发展有限规模的绿色城镇化,大于  $10^\circ$  以上的高海拔山区要着力发展立体生态农业,避免水土流失对岩溶流域造成难以修复的生态灾难。

## 3 讨论及结论

### 3.1 讨论

本研究根据景观生态学理论设计了景观生态脆弱性评价方法,分析了漓江流域景观生态脆弱性时空分异特征,研究了脆弱性时空分异的主导因子、作用关系及驱动机制,探讨了漓江流域景观生态时空分异的地域规律,据此提出了优化流域土地利用生态效益的实践策略。同时,由于数据类型和精度缺少针对性,景观生态脆弱性指数的生态含义和尺度效应不清,影响脆弱性时空分异的机理及因素不准等问题,影响了研究成果的分析精度和应用价值。需要通过系统集成多源遥感、地面监测、无人机遥感、人工智能等,完备数据类型、提高数据精度,开发适用高效的时空分析平台和智能计算模型,提高 LUCC 分类识别、空间赋值、过程反演及功能量化的针对性和有效性,精细研究景观生态变化的动态驱动、服务价值及环境效益,使 LUCC 变化的生态效益研究成果更好地服务于漓江流域城镇建设及产业规划。

### 3.2 结论

(1) 漓江流域属于自然景观独特的生态脆弱区域,其景观类型、组织结构及生态功能独具地域特色,

具有较高的景观生态价值。以山水风景资源开发为基础的新型城镇化,在提高人工景观生态稳定性的同时,也对自然景观造成了显著的生态胁迫,如何在遵循自然规律基础上规划和利用好优质景观资源,使岩溶城镇化成为支撑流域自然风景生态价值的持久动力,是漓江流域景观资源可持续开发利用的科学基础。

(2) 漓江流域景观生态脆弱性以中低级区为主,高级脆弱区域较少,景观生态总体稳定、趋好;漓江流域 LEV 空间分异具有显著的空间依赖性,表现为高值区与高值区相邻、低值区与低值区相随的正向集聚,呈现人工景观低值化与自然景观高值化格局,城镇化中心这低\_低相邻的冷点,周边山区为高\_高相邻的热点,表明漓江流域景观生态脆弱性结构受相似的发生环境和分异因素影响而具有空间集聚性分布特征,城镇化扩张在提高人工景观稳定性的同时,也增大了自然景观的脆弱性和离散化。

(3) 自然和人工因素共同决定了漓江流域景观生态系统的时空分异,其中城镇化及坡度变化是 LEV 空间分异的核心驱动,漓江流域特殊的景观类型及结构特征,决定了其景观生态变化对人类活动及地形起伏高度敏感,近 20 a 人类活动扰动使高程变化对空间分异的影响日益显著。因此,漓江流域土地利用应坚持综合治理和系统规划的原则,在尊重自然生态规律的基础上发挥城镇化主导作用;在实践过程中,应统筹城乡土地利用和国土空间规划,使城市与乡村、自然与人工景观类型及功能自然天合。

#### 参考文献:

- [1] 刘纪远,张增祥,张树文,等.中国土地利用变化遥感研究的回顾与展望:基于陈述彭学术思想的引领[J].地球信息科学学报,2020,22(4):680-687.
- [2] 赵东升,张雪梅.生态系统多稳态的研究进展[J].生态学报,2021,41(16):1-15.
- [3] 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.
- [4] Zhao Z N, Zhang T Z. Integration of ecosystem services into ecological risk assessment for implementation in ecosystem based river management: A case study of the Yellow River, China[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2013,19(1):80-97.
- [5] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.
- [6] 傅伯杰.地理学综合研究的途径与方法:格局与过程耦合[J].地理学报,2014,69(8):1052-1059.
- [7] 张楚宜,胡远满,刘森,等.景观生态学三维格局研究进展[J].应用生态学报,2019,30(12):4353-4360.
- [8] 谢高地,张彪,鲁春霞,等.北京城市扩张的资源环境效应[J].资源科学,2015,37(6):1108-1114.
- [9] 吴健生,宗敏丽,彭建.基于景观格局的矿区生态脆弱性评价:以吉林省辽源市为例[J].生态学杂志,2012,31(12):3213-3220.
- [10] 杨靖,吴学灿,周瑞伍,等.基于景观格局的云南省富源县生态脆弱性空间特征分析[J].生态科学,2021,40(3):184-192.
- [11] 韩鑫,胡江玲,刘传胜,等.基于遥感的山地景观健康诊断及格局演变研究:以新疆天山自然遗产地喀拉峻:库尔德宁为例[J].生态学报,2021,41(16):6451-6465.
- [12] 王国玉,白伟岚,熊筱,等.京津冀城市群生态空间受损识别研究[J].城市规划,2021,45(8):9-19,41.
- [13] 黄木易,岳文泽,方斌,等.1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J].地理学报,2019,74(9):1904-1920.
- [14] 左玲丽,彭文甫,陶帅,等.岷江上游土地利用与生态系统服务价值的动态变化研究[J].生态学报,2021,41(16):1-14.
- [15] 张学渊,魏伟,周亮,等.西北干旱区生态脆弱性时空演变分析[J].生态学报,2021,41(12):4707-4719.
- [16] 林增学.1985—2014 年漓江流域景观格局动态变化研究[J].中国岩溶,2019,38(3):466-471.
- [17] 向芸芸,蒙古军.漓江流域旅游开发景观格局干扰的时空分异[J].山地学报,2014,32(1):11-20.
- [18] 何毅,唐湘玲,代俊峰.漓江流域生态系统服务价值最大化的土地利用结构优化[J].生态学报,2021,41(13):5214-5222.
- [19] 朱柏露,杨奇勇,谢运球,等.漓江流域土地石漠化空间分布及驱动因子分析[J].广西师范大学学报:自然科学版,2021,39(3):139-150.
- [20] 陆丹丹,钟永德,杨永德,等.漓江上游土地利用与覆盖变化及其驱动力研究[J].生态经济,2015,31(9):128-131,146.
- [21] 魏雨涵,钱建平,范伟伟,等.基于 RSEI 的漓江流域生态环境质量动态监测[J].中国水土保持科学,2021,19(1):122-131.
- [22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [23] 罗奎,方创琳,马海涛.基于生产函数视角的城镇化动力机制研究[J].地理科学,2017,37(3):394-399.