

# 2000—2020 年漓江流域生态服务价值时空分异

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:** [目的] 研究 2000—2020 年漓江流域生态服务价值(ESV)时空分异格局及变化规律, 为优化土地利用结构和实现“双碳”目标提供空间治理方法。[方法] 基于遥感信息挖掘和地理信息分析平台, 用价值核算及其动态度、敏感性分析方法评估生态服务价值, 用空间自相关方法研究 ESV 时空格局, 用地理探测方法诊断 ESV 分异的主导因素及驱动机制。[结果] ①漓江流域土地利用/覆盖空间异质性显著; 林地、耕地面积最大, 但变化平稳, 建设用地增长迅速。②漓江流域生态服务价值约合  $3.75 \times 10^7$  元, 其中林地、草地的 ESV 值最高, 占总价值的 52.44%。其变化呈先迅速增加、后缓慢减少的趋势, 其中原材料生产、水土保持价值增强显著, 而食物供给、水源涵养价值降低明显。③ESV 总体上呈中游低值与上、下游高值的分异格局, 表现为正向的空间集聚特征。[结论] 城镇扩张是漓江流域 ESV 时空分异及其动态变化的核心驱动, 人类活动对 ESV 的扰动趋向增强。

**关键词:** 土地利用; 生态服务价值; 时空分异; 漓江流域

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)05-0256-09

**中图分类号:** U412.1<sup>+</sup>4, Q146

**文献参数:** 张军民, 荣城, 董国松. 2000—2020 年漓江流域生态服务价值时空分异[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 256-264. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.032; Zhang Junmin, Rong Cheng, Dong Guosong. Spatio-temporal variation of ecological service values in Lijiang River basin during 2000—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 256-264.

## Spatio-temporal Variation of Ecological Service Values in Lijiang River Basin During 2000—2020

Zhang Junmin, Rong Cheng, Dong Guosong

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

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal variation pattern and change law of ecological service value (ESV) in the Lijiang River basin during 2000—2020 were determined in order to provide a spatial governance method for optimizing land use structure and achieving the “dual carbon” goal. [Methods] Based on remote sensing information mining and a geographic information analysis platform, ecological service values were evaluated by value accounting and its dynamic and sensitivity analysis methods. The spatio-temporal pattern of ESV was studied by spatial autocorrelation methods. The leading factors and drivers of ESV differentiation were diagnosed by geographic detection methods. [Results] ① The spatial heterogeneity of land use/cover in the Lijiang River basin was significant. The area of forest land and cultivated land was the largest, and change was stable. The area of construction land grew rapidly. ② The ecological service value for the Lijiang River basin was about  $3.75 \times 10^7$  yuan. The ESV of forest land and grassland was the highest, accounting for 52.44% of the total value. The overall change initially increased rapidly and then decreased slowly. The value of raw material production and soil and water conservation increased significantly, while the value of food supply and water conservation decreased significantly. ③ In general, ESV showed a pattern of low values in the midstream region and high values in the upstream and downstream regions, exhibiting a positive spatial agglomeration feature. [Conclusion] Urban expansion is the core driving force of the spatio-temporal differentiation of ESV and its dynamic changes in the Lijiang River basin. Disturbance of ESV by human

收稿日期: 2022-02-06

修回日期: 2022-04-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“绿洲城市扩张对 MODS 格局的生态胁迫机理研究”(41761030); 广西社科基金(20FYJ006, 21FYJ057)

第一作者: 张军民(1964—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区吐鲁番市人, 教授, 博士, 主要从事土地利用与区域规划研究。Email: zjm\_tea@163.com.

activities is increasing over time.

**Keywords:** land use; ecological service value (ESV); spatio-temporal differentiation; Lijiang River basin

土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUCC)影响全球和区域生态安全,是自然价值和生态服务研究的主要内容<sup>[1]</sup>。生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中获取的收益<sup>[2]</sup>,具有巨大的自然、社会和美学价值<sup>[3]</sup>。自 Costanza 首次将生态服务概念分为气候调节、控制侵蚀等 17 种价值类型后<sup>[2]</sup>,生态服务价值(ESV)受到生态学、地理学、土地环境等学科的广泛关注并成为跨学科研究的热点领域。如 De Groot 等<sup>[4]</sup>和联合国千年生态系统评估计划<sup>[5]</sup>细分了 ESV 功能并量化了其核算方法及关系结构,生态功能四分法及土地(景观)价值核算成为 ESV 研究的基本范式,不同时空尺度的 ESV 分类评价、驱动胁迫、生态效应及其与人类福祉关系等成为研究热点<sup>[6]</sup>。

国内研究尚处于跟踪阶段,主要参照 Costanza<sup>[2]</sup>和谢高地等<sup>[7]</sup>的分类方法和估算标准开展实证研究<sup>[3,8]</sup>。如根据人工扰动强弱将土地利用分为供给和需求类型,并根据各地类变化特征分析供给与需要关系变化的生态效应<sup>[9]</sup>;根据城乡土地利用类型梯度分异划分供给、需要类型,用地理信息系统的空间制图和属性融合方法,开展生态价值的统计分析<sup>[10]</sup>;通过价值重构建立动态估算方法,评价多元时空尺度融合的流域生态安全格局,并据此研究城镇化进程中的土地利用结构优化途径<sup>[8]</sup>;谢高地等<sup>[11]</sup>改进了土地利用类型价值估算方法及评估体系,并对中国陆地生态系统服务进行了多时空尺度的动态评估;用修订的当量因子和权衡协同模型等空间分析方法,研究了流域生态服务价值的权衡协同关系及优化策略<sup>[12]</sup>;基于遥感信息和 GIS 技术研究不同地形梯度分异和行政区划单元的生态系统服务价值时空分异规律,为南方丘陵山区城镇化空间扩张提供了技术支撑<sup>[13]</sup>;比较静态和改进的动态当量因子,研究关键土地类型和敏感生态功能的服务价值估算体系,使评价成果更有针对性和地域性实效<sup>[14]</sup>等。

针对漓江流域的土地利用变化的生态服务价值评估的研究相对较少,对其时空分异及动态驱动机制的研究极为薄弱,无法满足岩溶区自然价值评估、生态修复及空间规划管理等需要。如用遥感分类和景观指数评价方法研究漓江上游土地利用变化特征及演变趋势<sup>[15]</sup>,分析漓江流域土地利用及景观格局变化特征<sup>[16]</sup>,用生态服务价值评估旅游活动对景观格局的扰动规律<sup>[17]</sup>,模拟流域土地利用结构优化模

式<sup>[18]</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>[19]</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>[20]</sup>,缺少覆盖全流域、长序列的多时空定量研究成果。

综上所述,国内生态系统服务成果主要集中在生态功能识别和标度、土地利用变化与生态功能评价,主要服务于土地利用管理、国土空间规划、流域生态修复等领域<sup>[21]</sup>。漓江流域属于典型的岩溶生态脆弱区,是国际知名的风景旅游名胜地,景观资源具有重要的自然保护和生态服务价值。要建成国际旅游目的地,需要在严格保持流域景观生态价值的基础上,不断挖掘流域宝贵的自然景观价值,丰富和完善 LUCC 的多元生态功能。据此,本项目基于 3S 空间信息平台,用时空结构变化分析方法,实证评估了漓江流域土地利用变化的生态服务价值及其时空分异规律,定量探测了其动力因子及驱动机制,从多元时空统一角度,揭示了漓江流域景观自然价值及其生态功能,可为流域空间治理、生态修复和景观重构提供科学依据。

## 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(以下简称“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,在平乐县平乐镇与荔浦河、恭城河汇合成桂江,有桃花江、小东江、南溪江、相思江等大小 19 条支流,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,雨热同期,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。

### 1.2 数据处理

1.2.1 数据来源与处理 本研究使用的 2000, 2010, 2020 共 3 期土地利用/覆被(LUCC)数据来源于中华人民共和国自然资源部提供的 30 m 全球地表覆盖数据 Globeland 30 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。基础地理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](http://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/景观类型分为耕地、林地、草地、湿地、水域、建设用地、裸地共 7 类,编码分别设置为 1—7,并以此建立土地利用类型数据库,开展流域系统 LUCC 时空变化分析。

1.2.2 空间分析单元 根据研究区景观结构特征、遥感分类精度,首先用 ArcGIS 创建 3 km×3 km 的规则格网矢量数据,作为分析总体特征的空间单元;从流域 DEM 数据中提取地形高程、坡度数据,从流域矢量中提取县域界限作为行政单元。时间节点选择 2000, 2010, 2020 这 3 个年份,动态变化选择 2020—2000 年间,将各类景观要素赋值到矢量属性表中,构建标准

格网、地形、行政区 3 级时空分析单元数据库。

### 1.3 研究方法

1.3.1 生态服务价值评估 Costanza 在 2014 年修订的生态系统服务价值系数被用于世界不同尺度、类型的生态服务价值评估,能很好地反映生态服务的多重价值及保护意义<sup>[22-23]</sup>,根据漓江流域自然环境本底及城镇化发展特征,采用价值当量法,以桂林市 2019 年单位面积粮食产量为基准计算生态服务价值当量。稻谷产量占桂林市粮食的 80% 以上,故用稻谷作为粮食产量及价格计算依据;考虑到漓江流域城镇规模小,城镇绿化比例高,城镇绿地面积普遍超过 70%,对建设用地价值当量做了适当调整。2019 年桂林市粮食作物产量 6165.25 kg/hm<sup>2</sup>/a,广西当年平均粮食收购价格 2.826 元/kg,得到漓江流域一个标准生态服务价值当量因子为 2 488.999 5 元/hm<sup>2</sup>/a,据此可得到漓江流域单位面积各类用地生态服务价值(VC)(表 1—2)。

表 1 漓江流域各地类生态服务价值

元/(km<sup>2</sup>·a)

生态服务类型	生态服务指标	生态服务价值						
		耕地	林地	湿地	草地	建设用地	水域	裸地
供给服务	食物供给 $X_1$	24.89	1.49	11.95	12.20	0.25	1.24	0.25
	原材料生产 $X_2$	2.24	0.75	3.73	0.50	0.25	0.25	0.75
调节服务	气候调节 $X_3$	4.23	22.15	57.99	0.50	9.71	0.25	5.23
	水环境调节 $X_4$	8.46	1.74	1 750.26	1.49	0.25	109.76	12.94
支持服务	水土保持 $X_5$	6.72	3.73	42.06	0.50	0.25	0.25	3.24
	水源涵养 $X_6$	0.25	0.50	184.19	0.25	0.25	0.25	0.25
	生物多样性保护 $X_7$	11.70	16.68	186.92	26.13	0.25	0.25	2.99
文化服务	文化娱乐 $X_8$	1.00	9.21	23.40	1.99	61.48	23.15	1.24
合计		59.49	56.25	2260.51	43.56	72.68	135.40	26.88

表 2 漓江流域调整后的生态服务价值评价

元/(km<sup>2</sup>·a)

生态服务类型	生态服务指标	生态服务价值评价						
		耕地	林地	湿地	草地	建设用地	水域	裸地
供给服务	食物供给 $X_1$	25.14	2.12	16.61	12.68	0.13	1.74	0.24
	原材料生产 $X_2$	1.88	0.65	4.82	0.64	0.32	0.27	1.12
调节服务	气候调节 $X_3$	3.77	25.03	62.05	0.65	11.16	0.31	6.17
	水环境调节 $X_4$	7.95	1.13	2 100.32	1.13	0.13	68.05	16.96
支持服务	水土保持 $X_5$	4.84	1.98	45.01	0.53	0.28	0.28	3.95
	水源涵养 $X_6$	0.20	0.30	261.54	0.31	0.33	0.13	0.30
	生物多样性保护 $X_7$	12.52	22.51	162.62	14.64	0.25	0.29	4.15
文化服务	文化娱乐 $X_8$	1.35	5.89	30.42	2.19	89.76	22.22	0.81

生态系统服务价值评估公式<sup>[24]</sup>:

$$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (1)$$

式中:ESV 为研究区生态服务价值;  $A_i$ ,  $C_i$  分别表示第  $i$  种土地利用类型的面积及生态服务价值系数。

#### 1.3.2 结构动态变化

(1) 变化强度。用年均变化速度表征 ESV 变化

的活跃程度:

$$V = (P_b - P_a) / T \quad (2)$$

式中:  $V$  为某时段 ESV 的变化强度;  $P_b$ ,  $P_a$  分析表示 ESV 末期、初期的价值量,  $T$  为研究时段,  $V$  值可反映某时段 ESV 的变化强度及方向。

(2) 敏感度检验。生态系统服务价值存在着显



2.1.1 现状特征 由表 3 可知,漓江流域土地总面积 6 353.62 km<sup>2</sup>,土地利用类型包括耕地、林地、草地、湿地、水体、建设用地、裸地这 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,是土地利用结构的主体;其他类型面积都较小,建设用地

仅占 4.39%,草地仅占 2.16%,水体占 1.58%,湿地、裸地占比小于 0.05%。面积广大的亚热带常绿阔叶林、适耕地性较强的水稻土,决定了流域景观基质具有较高的生态价值。

2.1.2 土地利用变化趋势 分析景观面积及其变化强度,得到其变化方向、强度及趋势如图 1 所示。

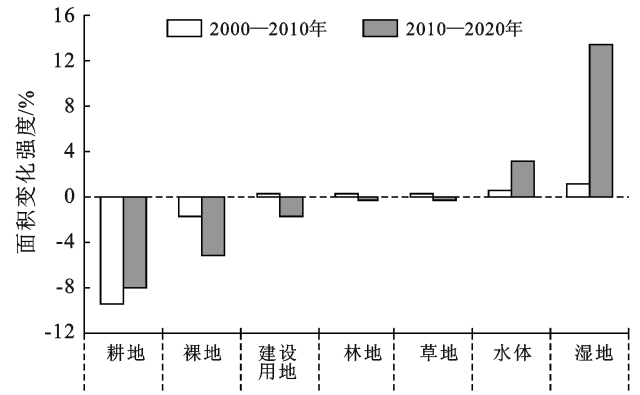
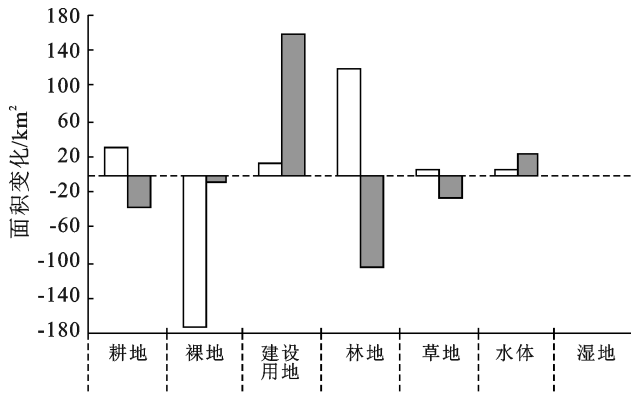


图 1 2000—2020 年漓江流域各地类面积及其变化强度

分析图 1 可知,林地、耕地变率小于 0.37%,景观基质十分稳定,其他地类变化较大,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%;建设用地扩张最剧烈,且呈持续快速增长趋势,2000—2010 年和 2010—2020 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:漓江流域以林地、耕地为主体的景观结构相对稳定,具有较高的自然生态价值;以城镇化驱动下的建设用地快速增长是土地利用变化的主要动因。

## 2.2 生态服务价值及其变化

2.2.1 各地类生态服务价值 用公式(1)计算不同年份土地利用生态服务价值(ESV),结果见表 4。漓江流域 2000, 2010, 2020 年 ESV 总价值分别为  $3.20 \times 10^7$ ,  $3.77 \times 10^7$ ,  $3.75 \times 10^7$  元,2000—2020 年 ESV 值累计增长了 16.23%。

表 4 2000—2020 年漓江流域各地类生态服务价值(ESV)价值量及变化强度

项目	年份	林地	草地	耕地	水体	建设用地	裸地	湿地	小计
ESV 价值/ $10^5$ 元	2000	110.39	79.22	59.52	37.65	27.52	5.18	1.16	320.64
	2010	107.71	95.73	77.15	46.81	42.37	5.19	2.16	377.13
	2020	103.00	93.46	73.45	47.73	44.17	10.52	2.31	374.64
变化强度/%	2010—2000	-0.12	1.04	1.48	1.22	2.70	0.00	4.31	10.63
	2020—2010	-0.22	-0.12	-0.24	0.10	0.21	5.14	0.36	5.23
	2020—2000	-0.34	0.90	1.17	1.34	3.03	5.15	4.98	16.23

2.2.2 各种生态服务功能价值 用公式(1)计算各项生态服务价值,结果见表 5。

其中 2000—2010 年间增加了 17.61%, 2010—2020 年间减少了 0.66%,总体上呈前 10 a 迅速增加、后 10 a 缓慢减少的趋势。分析各地类对生态服务价值增益的贡献得出:漓江流域林地、草地的生态服务价值最高,分别占总价值的 27.49%, 24.95%,其次是耕地、水体、建设用地、裸地分别占 19.61%, 12.74%, 11.79%, 2.81%,湿地仅占 0.62%;2000—2020 年变化强度由高到低分别为裸地(5.15%)、湿地(4.98%)、建设用地(3.03%)、水体(1.34%)、耕地(1.17%)、草地(0.90%),除林地的 ESV 值年均减少 0.35%,其他地类的 ESV 值均有上升,变化强度不大。还反映出 2000—2020 年漓江流域 ESV 值缓慢增长,表现为裸地、湿地、建设用地 ESV 明显增长,而林地、草地、耕地等趋于降低,特别是森林的 ESV 值减少最明显,变化强度显著增大,ESV 对人类扰动的响应趋于敏感,石漠化、城镇化是 ESV 变化的主要动因。

由表 5 可知,漓江流域气候调节( $1.01 \times 10^7$ )、生物多样性保护功能( $9.18 \times 10^6$ )的生态服务价值最

高,两项价值对 ESV 的贡献率达到 51.42%;其次是文化娱乐( $5.93 \times 10^6$ )、食物供给( $4.828 \times 10^6$ )功能,前 4 项生态功能对 ESV 的贡献率达到 80.13%。2000—2010 年间各分项生态服务价值缓慢增加,其中原材料生产、水土保持等价值量年均增长强度分别为 5.33%,3.29%,约占 ESV 总增长强度的 69.90%,其余各项增长强度极小;2010—2020 年间除文化娱乐价值年均增长 0.92%外,其余各项生态服务价值均缓慢减少,其中水源涵养、水环境调节等功能分别年均降低了 0.85%,0.48%,占 ESV 总下降强度的

67.52%。这表明漓江流域各项生态服务价值经历了先升后降的过程,原材料生产、水土保持价值增强显著,而食物供给、水源涵养价值降低明显;2000—2020 年原材料生产、水土保持价值分别年均增长 5.11%,3.05%,占总增长强度的 69.41%,累计增长  $1.35 \times 10^6$  元,占 ESV 总增长量的 25.06%,而食物供给、水源涵养价值分别年均降低 0.04%、0.66%,累计降低  $8.90 \times 10^4$  元。反映了人类对经济林木、石漠化治理的高度重视,而生物多样性保护和水生态修复等治理不足。

表 5 2000—2020 年漓江流域各项生态服务功能的生态服务价值(ESV)及变化强度

项目	年份	食物供给	原材料生产	气候调节	水环境调节	水土保持	水源涵养	生物多样性保护	文化娱乐
ESV 价值/ 10 <sup>5</sup> 元	2000	48.689 37	3.403 15	93.378 9	32.008 96	16.459 15	3.676 11	74.765 05	48.264 28
	2010	49.667 09	7.033	102.085 6	41.863 68	27.295 96	3.845 77	95.279 57	50.054 71
	2020	48.275 12	6.881 59	100.872 6	37.871 04	26.504 41	3.193 96	91.756 08	59.284 91
变化强度/%	2010—2000	0.10	5.33	0.47	1.54	3.29	0.23	1.37	0.19
	2020—2010	-0.14	-0.11	-0.06	-0.48	-0.14	-0.85	-0.18	0.92
	2020—2000	-0.04	5.11	0.40	0.92	3.05	-0.66	1.14	1.14

2.2.3 生态服务价值动态变化

(1) 各地类 ESV 变化的敏感性分析。受时空异质性和主观判断的影响,各地类的价值系数 VC 存在较大的差异,其变动都将对 ESV 产生影响,因此需要对各地类 ESV 估算进行检验以确保结果可信。借鉴

经济学的价格敏感性原理,对各地类生态服务价值系数做 50% 的上下浮动后,求 VC 变化 1% 引起的 ESV 各项功能的变化率。用公式(3)计算 2000,2010,2020 年 ESV 变化的敏感性指数 CE。当  $CE < 1$  则 ESV 因对 VC 缺乏弹性可以作为评价依据(表 6)。

表 6 2000—2020 年漓江流域各地类生态服务价值(ESV)变化的敏感性指数

项目	ESV 变化的敏感性指数						
	耕地	裸地	建设用地	林地	草地	水体	湿地
2000 年	0.263	0.273	0.236	0.244	0.179	0.219	0.623
2010 年	0.100	0.030	0.012	0.167	0.069	0.026	0.000 38
2020 年	0.234	0.166	0.056	0.498	0.361	0.328	0.009 5
变化强度/%	-0.15	-0.54	-0.90	1.27	0.91	0.55	-3.07
生态贡献率/%	68.763 97	221.107 8	149.575 1	-24.636 9	57.922 21	70.120 23	207.873 9

由表 6 可知,林地、草地、水体的 CE 值较大,1% 的价值系数变化使林地、裸地的 ESV 值分别变动 49.8%,36.1%,32.8%,其次是耕地、裸地分别为 23.4%,16.6%,而建设用地、湿地的敏感性极小;同时近 20 a 林地、草地、水体的 CE 值分别年均增强 1.27%,0.91%,0.55%,其余地类的敏感度均有小幅降低,表明林地、草地、水体对 ESV 的影响较显著,且其影响度呈不断上升之势;而其他地类对 ESV 的影响相对较弱,且呈不断降低之势,主要因林地、草地等地类面积及变化强度较大,需要重点关注及调控 CE 值较大地类的变化,维持其他地类的相对稳定。尽管漓江 ESV 对各地类的 CE 值有较大差异,但 CE 值均小于 1,表明各地类生态价值系数调整对 ESV 变化的

影响缺乏弹性,ESV 估算结果可信。

(2) 各项生态服务的重要性评价。各项生态价值的贡献率反映了各项功能对 ESV 变化的影响程度。用公式(4)计算贡献率指数及其变化强度(%),结果见表 7。

由表 7 可知,2000—2010 年间,各项生态价值排序为:原材料生产>水土保持>生物多样性保护>文化娱乐等服务价值贡献率较高,对流域 ESV 增益影响最大;而水环境调节、气候调节、食物供给、水源涵养的贡献率较低,对流域 ESV 变化影响较小、相对稳定。2010—2020 年,贡献率最高的是水环境调节、生物多样性保护功能,其他功能贡献率较小。2000—2020 年各地类对 ESV 的贡献度排序为:原材料生产

>生物多样性保护>水土保持等功能,其他项生态价值的贡献率较小。这表明原材料生产、生物多样性保护、水土保持等功能变化速度快、规模大,对流域ESV增益的贡献最大,其次是水环境调节、气候调节

等功能,文化娱乐、食物供给、水源涵养等较弱。因此,应重点关注原材料生产、生物多样性保护、水土保持等生态功能的动态变化,维持文化娱乐、食物供给、水源涵养等服务功能。

表 7 2000—2020 年漓江流域各项生态价值对 ESV 的贡献率指数

时段	对 ESV 的贡献率指数							
	食物供给	原材料生产	气候调节	水环境调节	水土保持	水源涵养	生物多样性保护	文化娱乐
2000—2010 年	-0.012	0.527	0.175	0.191	0.462	-0.068	0.417	0.307
2010—2020 年	0.661	0.138	0.530	1.976	0.423	0.978	1.552	-4.260
2000—2020 年	0.025	0.490	0.191	0.297	0.455	0.021	0.473	0.047

## 2.3 生态服务价值时空分异

### 2.3.1 生态服务价值空间分异结构

为了从整体上识别漓江流域 ESV 的时空分异结构,首先用 ArcGIS 构建 3 km×3 km 的标准格网,再用反距离权重法获

取 ESV 插值分布,然后用自然断点法将流域 ESV 值分为低值、较低、中值、较高、高值共 5 个等级,基于这 5 个等级,从多元空间融合角度分析其时空分异特征,结果如图 2 所示。

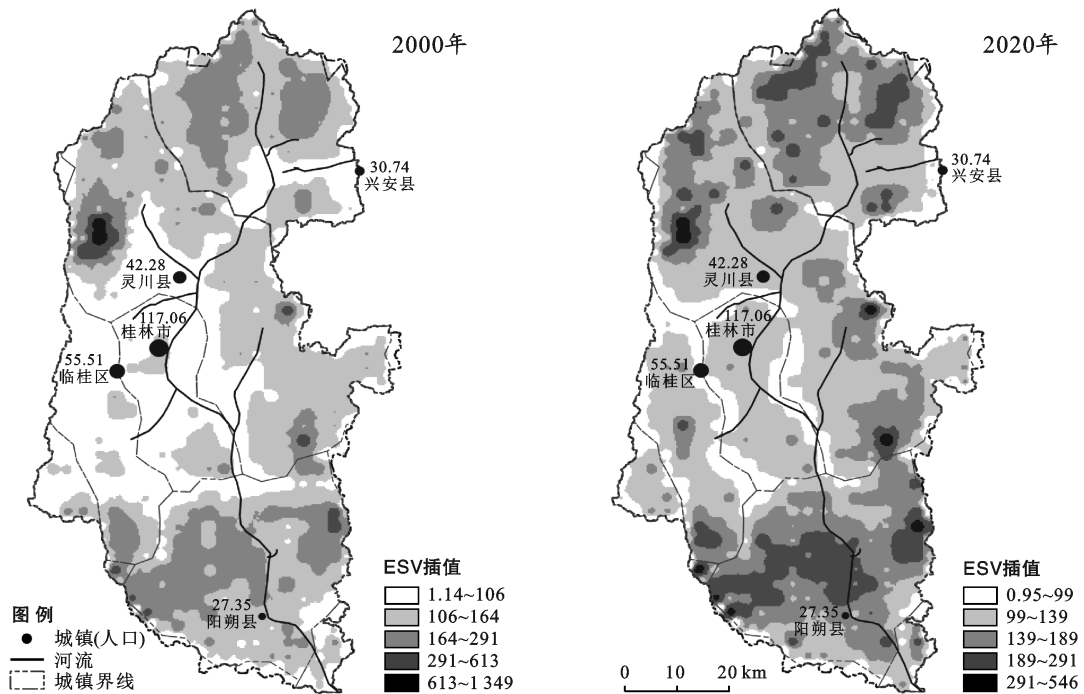


图 2 漓江流域 2000 年,2020 年 ESV 值空间插值

由图 2 可知,漓江流域生态服务价值以低值区为主,高值区缓慢增多,总体上呈现中游低值与上、下游高值的分异格局。2000 年漓江流域 ESV 值在桂林市区、临桂区等形成低值中心,在上、下游及周边山地高值连片,低值区面积占 18.16%,高值区面积占 0.43%。2020 年 ESV 分异格局保持不变,其中低值区面积占 1.85%,高值区面积占 10.47%,低值区面积减少了 1 019.156 km<sup>2</sup>,高值区面积增加了 627.266 km<sup>2</sup>。表明漓江流域中游河谷地区生态服务价值显著低于周边山地,2000—2020 年 ESV 缓慢增大,城镇化并未对流域生态服务功能产生显著的胁迫压力。

### 2.3.2 空间自组织分析

因行政区划单元难以准确

表达 ESV 的空间异质性特征,本研究采用 ArcGIS 的标准格法赋值 ESV 及高程、坡度、城镇化强度、土地利用强度,以精确测度流域自然、人文要素与 ESV 空间分异的关系。其中高程、坡度等自然要素从流域 DEM 中提取,城镇化强度、土地利用强度分析用单元格建设用地、耕地面积除以单元格总面积表征。经反复调试和验证,选择 3 km×3 km 格网作时空分析单元,用 GeoDa 1.18 计算 2000,2020 年全局莫兰指数,结果见表 8。

由表 8 可知,双变量全局 Moran'*I* 指数都为正值,检验结果都通过了  $p < 0.001$  的显著性统计水平,即各要素与 ESV 空间分异都具有空间依赖性,

宏观上表现为正向的空间集聚特征,即自变量作用使 ESV 空间结构具有高值与高值相邻、低值与低值相伴的趋势。分析  $I$  值大小可以看出,空间关系由强到弱排序为高程、坡度、土地利用强度、城镇化强度。由此可见,自然因子对 ESV 空间分异的影响

明显大于人文因子,土地利用结构变化 ESV 时空分异的作用大于城镇化。2000—2020 年  $I$  值都在增长,尤其城镇化强度增幅较大,表明城镇化扩张对 ESV 分异的影响不断增大,城镇土地利用变化作用显著增强。

表 8 2000—2020 年漓江流域全局莫兰指数及其显著性分析

指数	2000 年				2020 年			
	城镇化	土地利用	高程	坡度	城镇化	土地利用	高程	坡度
$I$	0.564	0.612	0.675	0.654	0.663	0.633	0.717	0.660
$P$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$Z$	29.256	31.171	33.435	33.720	35.53	31.626	35.91	34.026

注: $I$  为莫兰指数; $P$  为概率; $Z$  为标准差倍数。

### 2.3.3 地理探测

(1) 主导因子探测。以 ArcGIS 的  $3\text{ km} \times 3\text{ km}$  标准格网为分析单元,采取经验知识、专家决策及自然断点法相结合的分类方法,对 4 个影响因子进行分

类识别。导出属性表并在 GeoDetector 中计算各因子与 ESV 的关系结构,用 GeoDetector 探测漓江流域 ESV 的空间异质性及各要素对其影响程度的大小,结果见表 9。

表 9 2000—2020 年漓江流域生态服务价值因子作用探测结果

因子	2000 年				2020 年			
	高程	坡度	城镇化强度	土地利用强度	高程	坡度	城镇化强度	土地利用强度
$q$ 值	0.107 06	0.123 08	0.123 7	0.307 9	0.216 18	0.188 1	0.648 7	0.395 56
$p$ 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

$q$  值反映了自变量对因变量变化的解释力,其值越大表明该要素对 ESV 空间分异的影响越显著; $p < 0.001$  的置信区间,表明漓江流域 ESV 具有显著的空间异质性。分析  $q$  值变化可以看出,2000 年土地利用强度与 ESV 空间分异的关系最密切,其次是城镇化扩张,二者  $q$  值之和是坡度、高程的 2.58 倍;2020 年各要素  $q$  值增大,其中城镇化强度与 ESV 空间分异的关系最密切,其次为土地利用强度,二者  $q$  值之和是高程、坡度的 1.88 倍。表明人类活动始终是 ESV 空间分异的核心驱动,城镇化扩张是漓江流域 ESV 变化的主导因素,各要素与 ESV 空间分异的关系趋于紧密。

(2) 因子交互作用探测。进一步分析各因子交互作用关系(表 10)发现,变量交互作用后的  $q$  值大于单因子作用,主要表现为交互增强的空间溢出关系。2000 年高程  $\cap$  与土地利用、高程  $\cap$  坡度、城镇化强度  $\cap$  土地利用表现为非线性增强作用,高程  $\cap$  土地利用、城镇化  $\cap$  土地利用的交互强度较大;2020 年坡度  $\cap$  土地利用、高程  $\cap$  坡度为非线性增强关系,但坡度  $\cap$  城镇化强度、城镇化  $\cap$  土地利用强度的交互关系为线性减弱,表明漓江流域 ESV 空间分异是各因子综合作用的结果,各因子交互具有显著的空间溢出关系,但空间溢出强度趋于收敛。

表 10 2000—2020 年漓江流域生态服务价值各因子交互作用探测结果

因子	2000 年				2020 年			
	高程	坡度	城镇化强度	土地利用强度	高程	坡度	城镇化强度	土地利用强度
高程	0.107 06				0.216 180			
坡度	0.403 42	0.123 08			0.505 530	0.188 10		
城镇化强度	0.167 84	0.173 51	0.123 7		0.314 220	0.124 47	0.648 70	
土地利用强度	0.798 16	0.249 65	0.656 6	0.307 9	0.238 604	0.637 83	0.421 16	0.395 56

## 3 结论及讨论

(1) 漓江流域林地、草地具有较高的自然生态价值,但近 20 a 降低显著;建设用地 ESV 值较小但增长最显著,城镇化扩张成为 ESV 时空分异的主要驱动。ESV 分异对人类扰动的响应趋于敏感,经济林木种

植和水土流失治理效果明显,而生物多样性保护和生态修复等行动不显著。

(2) 应关注建设用地、耕地的动态变化,重点监测原材料生产、生物多样性保护、水土保持等对 ESV 变化敏感的生态功能状态,维持文化娱乐、食物供给、水源涵养等服务功能。



(3) 各要素与 ESV 空间分异都具有明显的空间依赖性,表现为正向的空间集聚(分散)特征,流域中游较下游河谷区具有更高的 ESV 值,而山地与河谷的 ESV 分异不明显。中心城市生态价值降低明显,以旅游业为主的小城镇生态价值保持较好。

(4) 土地利用变化和城镇化扩张是漓江流域 ESV 变化的主导因素,各要素与 ESV 空间分异的关系趋于紧密。总体上各因子综合作用决定了漓江流域 ESV 时空分异格局,各因子交互具有显著的空间溢出关系,但空间溢出强度趋于收敛。

本研究虽然基本阐明了漓江流域生态服务价值时空分异及驱动胁迫规律,但由于缺少针对岩溶流域的基础数据及分析体系,难以甄别不同时空尺度和人地系统的异质性对价值评估的影响。进一步深入研究需要从数据集成、分类技术、验证方法等方面提高研究精度,通过完备数据类型和精度,开发适用高效的时空分析平台和智能计算模型,实现对 ESV 时空分异的精确诊断和动态模拟,为国土空间治理提供技术支持。

#### [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] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 1998,25(1):3-15.

[3] 马琳,刘浩,彭建,等.生态系统服务供给和需求研究进展[J].地理学报,2017,72(7):1277-1289.

[4] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services [J]. *Ecological Economics*, 2002,41(3):393-408.

[5] Millennium ecosystem assessment M E A. *Ecosystems and human well-being* [M]. Washington, DC: Island Press, 2005.

[6] 陈峰,李红波,张安录.基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价[J].地理学报,2019,74(3):432-445.

[7] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.

[8] 吴健生,岳新欣,秦维.基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建:以重庆两江新区为例[J].地理研究,2017,36(3):429-440.

[9] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services [J]. *Ecological Indicators*, 2014,39:24-33.

[10] Kroll F, Müller F, Haase D, et al. Rural-urban gradi-

ent analysis of ecosystem services supply and demand dynamics [J]. *Land Use Policy*, 2012,29(3):521-535.

[11] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.

[12] 杨强强,徐光来,李爱娟,等.青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究[J].生态学报,2021,41(23):9315-9327.

[13] 石宇,韩蕊,郭冻.基于地形梯度的南方丘陵山地生态系统服务价值对城市化的空间响应:以粤北地区为例[J].生态学报,2021,41(18):7238-7248.

[14] 贾毅,张松林.南水北调中线工程途经区生态服务价值的时空变化[J].生态学报,2021,41(18):7226-7237.

[15] 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.

[16] 向芸芸,蒙吉军.漓江流域旅游开发对景观格局干扰的时空分异[J].山地学报,2014,32(1):11-20.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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(中英文),2021,19(1):122-131.

[21] Eigenbrod F, Armsworth P R, Anderson B J, et al. The impact of proxy-based methods on mapping the distribution of ecosystem services [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010,47(2):377-385.

[22] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014,26:152-158.

[23] Woldeyohannes A, Cotter M, Biru W, et al. Assessing changes in ecosystem service values over 1985—2050 in response to land use and land cover dynamics in Abaychamo Basin, Southern Ethiopia [J]. *Land*, 2020,9(2):37.

[24] 包旭,李杰,刘锋,等.1995—2015 年缅甸土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2021,41(17):6960-6969.

[25] 封建民,郭玲霞,李晓华.汉中市土地利用时空变化及其对生态系统服务价值的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):275-282.

[26] 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.

[27] 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.