

DOI: 10.5846/stxb201909181953

王永琪, 马姜明. 基于县域尺度珠江-西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究. 生态学报, 2020, 40(21): 7826-7839.

Wang Y Q, Ma J M. Effects of land use change on ecosystem services value in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7826-7839.

基于县域尺度珠江-西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究

王永琪^{1, 2}, 马姜明^{1, 2, *}

1 广西师范大学可持续发展创新研究院, 桂林 541006

2 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541006

摘要: 土地利用方式改变着区域生态系统服务供给的潜在能力, 进而对区域生态环境和经济可持续发展产生重要影响。以我国珠江-西江经济带广西段为例, 测算 1990 年、2005 年和 2018 年 3 期土地利用变化(LUC)和生态系统服务价值(ESV), 进而利用 ESV 损益流向表和双变量空间自相关模型探讨 LUC 影响下 ESV 的时空特征。结果表明: (1) 28 年间研究区 ESV 总值变化不大, 近年来 ESV 相比 2005 年有所降低, 建设用地面积增幅最大, 耕地和林地面积先减少后增多, 以林地与耕地相互转移为主; (2) 林地是研究区最重要的生态用地, 维持生物多样性、水文调节、保持土壤、气体调节和气候调节构成研究区 ESV 的主体; 生态系统服务价值强度(ESVI)高值区主要分布在桂西北、桂东和桂北, 低值区分布在地势较为平坦的桂中丘陵平原区; 各县区 ESVI 呈显著空间正自相关性($P < 0.05$), 空间集聚程度较高, 高-高聚集、低-低聚集分别与生态系统服务价值强度高值、低值区域高度重合; (3) 研究期间林地与耕地之间的相互转移是 ESV 增减的主要原因; 3 个时期土地利用程度与 ESVI 的双变量空间自相关图具有相似的空间特征, 呈现出显著空间负自相关模式($P < 0.05$)。

关键词: 生态系统服务价值; 土地利用变化; 空间自相关; 珠江-西江经济带广西段

Effects of land use change on ecosystem services value in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale

WANG Yongqi^{1, 2}, MA Jiangming^{1, 2, *}

1 Institute for Sustainable Development and Innovation, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

2 School of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

Abstract: Land use patterns change the potential supply of regional ecosystem services, which in turn has an important impact on regional ecological environment and sustainable economic development. Taking the Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt in China as an example, the Land Use Change (LUC) and Ecosystem Services Value (ESV) in 1990, 2005 and 2018 were calculated. Then the spatial and temporal characteristics of ESV under the influence of LUC were discussed by using the ESV profit and loss flow table and the bivariate spatial autocorrelation. The results showed that (1) The total values of ESV in the study area have not changed significantly in 28 years, and the ESV decreased in recent years compared with that in 2005. The area of construction land increased the most, the area of cultivated land and forestland decreased first and then increased, and land use type transfers were mainly based on the mutual transfer of forestland and cultivated land. (2) Forestland was the most important ecological land in the study area.

基金项目: 桂林市科学研究与技术开发计划项目(20190205, 20180107-3); 广西师范大学珠江-西江经济带发展研究院委托课题(ZXDY201605); 国家自然科学基金项目(31660197)

收稿日期: 2019-09-18; 网络出版日期: 2020-09-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mjming03@163.com

Biodiversity maintenance, hydrologic regulation, soil conservation, gas regulation and climate regulation constituted the main body of the ESV in the study area. The high-value areas of ecosystem services value intensity (ESVI) were mainly distributed in the northwest, east and north of Guangxi, while the low-value areas were located in the hills and plain areas in the middle of Guangxi with relatively flat terrain. The ESVI of each district and county showed significantly positively spatial autocorrelation ($P < 0.05$), with a high degree of spatial aggregation. High-high aggregation and low-low aggregation were highly coincident with high-value and low-value regions of ecosystem services value intensity. (3) The mutual transfers between forestland and cultivated land during the study period were the main reasons for the increase and decrease of ESV. The land use degree and ESVI's bivariate spatial autocorrelation map had similar spatial characteristics in the three periods, showing a significantly spatially negative autocorrelation pattern ($P < 0.05$).

Key Words: ecosystem services value; land use change; spatial autocorrelation; Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt

生态系统服务是通过生态系统的结构、功能和过程直接或间接得到的用于支持生命的产品和服务^[1-3],包括食物、原材料等实物产品和气体调节、水文调节和维持生物多样性等服务。生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)量化有利于衡量生态系统服务供给潜力与生态效益大小^[4],对生态系统服务定量评估更有助于高效配置土地资源^[5]、全面认识 ESV 结构动态^[6]、优化区域土地利用格局^[7],以及科学制定生态补偿政策^[8],得以实现区域经济与生态环境协调发展^[9]。土地作为人类农业生产和各种活动影响的载体,土地利用方式的变化影响着整个生态系统环境^[10],这类土地利用变化(Land Use Change, LUC)通过改变生态系统结构和功能,使得水循环、碳氮循环和土壤更新等生态过程发生变化,导致生态系统服务进一步发生变化^[11-13],同时 ESV 评估作为反映土地利用与区域经济相互影响的主要方法之一,体现了土地通过集约利用与空间优化所发挥的生态效益^[9, 14],使得 LUC 对 ESV 影响的定量研究备受关注。

生态系统本身具有复杂性和多样性特点,其服务价值评估结果与 ESV 不同计算模型和方法有关。目前生态系统服务评估的方法可以分为基于单位面积价值当量因子方法和基于单位服务功能价格方法两大类^[15]。前者比后者所需的评估参数较少、且计算过程相对简便,对于较大尺度区域 ESV 的快速评估具有很高的便捷性和参考价值。谢高地等^[3]在 Daily^[6]和 Constanza 等^[17]研究基础上结合中国国情改进并制定了“中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表”,被广泛应用到草地^[18-19]、森林^[20]、农田^[21]和城市^[22-23]、海岸带^[24]等区域 ESV 评估中。随着研究的逐渐深入,越来越多的学者开始挖掘 LUC 与 ESV 之间的相互作用关系及其影响因素^[25-27],发现人类社会经济活动导致的 LUC 是影响生态系统提供服务发生变化的主要原因^[15, 28]。土地利用与生态系统服务是一个相互影响的综合系统,面对开发还是保护的抉择需要决策制定者和利益相关人在识别两者相互关系基础上权衡,部分学者采用空间统计探索土地利用与 ESV 在时空上聚集规律等特征^[29-31]。土地利用程度是衡量土地利用水平的一个重要指标^[32],ESV 是评估一个地区生态系统状况的重要指标,使用生态系统服务价值强度(ecosystem services value intensity, ESVI)代替县域生态系统服务总价值,运用双变量空间自相关来探索重要区域的 LUC 对 ESV 在空间域的聚集特征和依赖特性等研究很有意义。

珠江-西江经济带广西段处于国家实施西部大开发战略的重要地段^[33],是广西除北海市、钦州市和防城港市沿海三市的其余部分,该区域生态资源丰富、具有重要的生态价值和经济发展地位。目前针对珠江-西江经济带区域的研究时序较早^[34-35],且森林类型^[36]的 ESV 研究较多,缺乏该区域近期且长时间跨度 ESV 以及 LUC 与 ESV 之间关系研究^[37-38]。如何合理协调珠江-西江经济带广西段土地利用程度与生态系统服务供给潜力是该区域关注的焦点。本文以珠江-西江经济带广西段 1990 年、2005 年和 2018 年三个时间节点的土地利用数据为数据源,采用当量因子法、马尔可夫转移矩阵、价值损益流向表和空间自相关理论等方法,旨在揭示:(1)近 28 年城市化进程中珠江-西江经济带广西段土地利用格局如何变化?(2)研究区 ESV 的时空结构、

格局是如何? (3) LUC 影响下 ESV 的时空相关特征及 ESV 对土地利用方式的空间依赖性如何? 这些问题的深入探讨将有助于加深县级单位 LUC 与 ESVI 之间的关系模式认知,厘清两者关系的表现类型和空间差异,为优化珠江-西江经济带广西段提供数据支持,也为制定该区域生态格局、调整生态系统服务、加强土地资源利用与区域可持续发展等提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

珠江-西江经济带广西段地域辽阔(图 1),地处 $21^{\circ}37'—26^{\circ}20'N$ 、 $104^{\circ}29'—112^{\circ}3'E$,占广西国土面积的 92%。地势西北高东南低,处于第二级阶梯云贵高原的东南边缘,两广丘陵的西部,平均海拔约 800 m。气候属亚热带季风气候,年平均气温在 $16.5—23.1^{\circ}C$ 之间。各地年降水量均在 1070 mm 以上。广西地貌总体呈山地丘陵性盆地地貌,山地众多,小气候显著。土地利用类型存在明显地域分异^[39],研究区广泛分布有林地,且占地面积在 66% 以上,耕地主要分布在研究区中部,草地主要分布于研究区中部与北部。

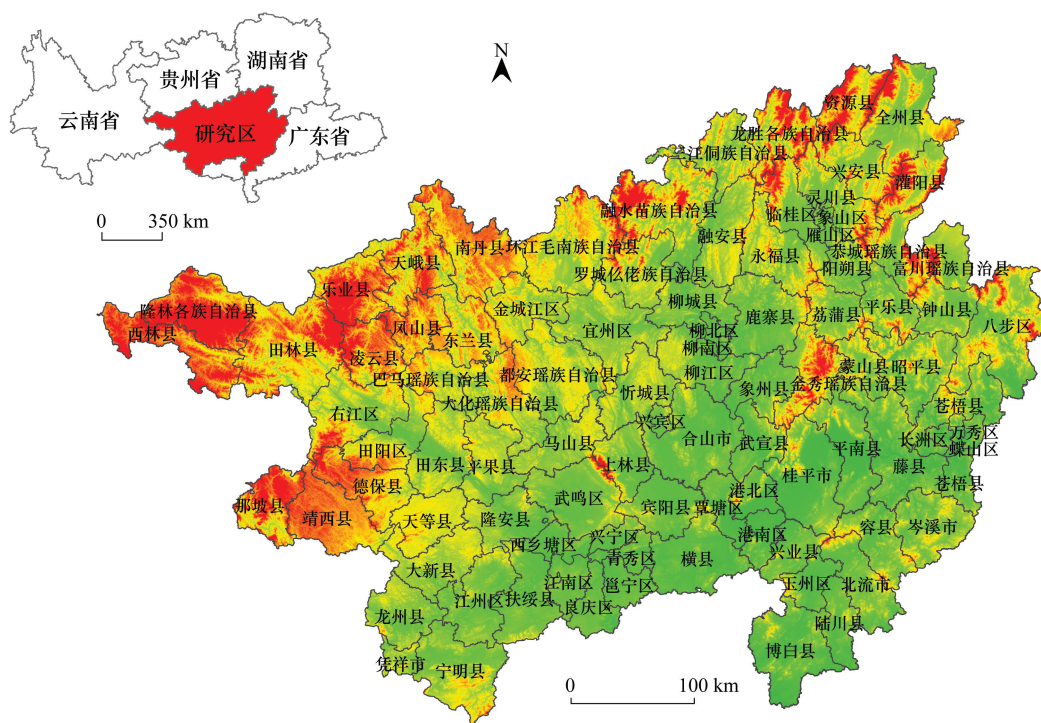


图 1 珠西经济带广西段位置示意图

Fig.1 Location diagram of Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt

1.2 数据来源

1) 珠江-西江经济带广西段 1990 年、2005 年和 2018 年 3 期 1 km 空间分辨率的土地利用类型数据,均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的中国土地利用现状遥感监测数据库,数据生产制作是以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人机交互式判读解译生成,然后根据各类型在 1 km 内所占面积最大类型赋予重分类后的土地利用类型。采用 LUC 分类体系将土地利用方式划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 大类,其中考虑到建设用地对于当地生态系统产生的负面效应远超过正面效应,故本文不纳入其生态系统服务价值^[40]。该套数据经过严格质量控制,6 大类土地利用综合评价精度在 90% 以上^[41]。

2) 行政区划数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供。

3) 粮食产量、粮食价格等统计数据取自于《2018 年全国农产品成本收益资料汇编》、《2018 年广西统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 土地利用变化研究方法

参考前人的研究成果,本文通过马尔可夫转移矩阵^[42]和土地利用程度指数^[43]来表现研究区的 LUC 特征。

2.2 生态系统服务价值评估

ESV 评估方法多样,本文采用基于单位面积价值当量因子法,结合数据的可获得性,对珠江-西江经济带广西段 ESV 评估进行了修正:

(1) 基于粮食价格的修订。

依据谢高地等^[44]的研究,1 hm²平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值的 1/7 为 1 个标准生态系统生态服务价值当量因子,为消除不同年份农作物价格波动对总价值的影响,以广西 2017 年 5 种主要农作物(早稻、晚稻、粳稻、大豆和玉米)的播种面积、产量和农作物的平均价格作为基础数据,由式(1)计算出珠江-西江经济带广西段单位面积农田生态系统粮食作物的经济价值为 1444.78 元/hm²。

$$E_n = 1/7 \sum_{i=1}^n \frac{q_i P_i}{M} \quad (1)$$

式中, E_n 为研究区单位面积农田生态系统提供食物生产服务的经济价值(元/hm²); n 为研究区主要粮食作物种类; q_i 为农作物 i 的价格(元/kg); p_i 为农作物 i 的总产量(kg); M 为 n 种粮食作物总面积(hm²)。

(2) 基于生物量的修订。

考虑到生态系统时空异质性,珠江-西江经济带广西段 ESV 系数还进一步修订。参考谢高地等^[21]给出的全国范围内各区域农田生态系统的生物量因子表,确定了研究区农田生态系统生物量因子取 0.98,对农田生态系统所提供的各类服务进行生物量因子修订。从而生成珠江-西江经济带广西段不同土地利用类型的各项生态系统服务价值系数表(表 1)。

表 1 珠西经济带广西段生态系统服务价值系数/(元 hm⁻² a⁻¹)

Table 1 Ecosystem services value coefficients of Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt

一级类型 First category	二级类型 Second category	林地 Forestland	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	水域 Water land	未利用地 Unutilized land
供给服务 Provisioning services	食物生产	476.78	621.26	1415.89	765.74	28.90
	原材料生产	4305.46	520.12	552.20	505.67	57.79
调节服务 Regulating services	气体调节	6241.47	2167.18	1019.44	736.84	86.69
	气候调节	5880.27	2253.86	1373.41	2976.25	187.82
	水文调节	5909.17	2196.07	1090.23	27118.59	101.13
	废物处理	2485.03	1907.11	1968.08	21455.04	375.64
支持服务 Supporting services	保持土壤	5808.03	3236.32	2081.36	592.36	245.61
	维持生物多样性	6515.98	2701.75	1444.21	4955.61	577.91
文化服务 Cultural services	提供美学景观	3005.15	1256.96	240.70	6414.84	346.75

对县域行政区划单位分别计算 ESV 和 ESVI(元/hm²),计算研究区生态系统服务功能总价值,并进行空间分析^[25]。

2.3 空间自相关分析

空间自相关用来衡量土地利用及 ESV 的空间分布是否具有集聚性,包含全局空间自相关与局部空间自

相关两个方面^[29]。Ansenlin^[45]在单变量空间自相关研究基础上,提出了双变量空间自相关,揭示了空间单元属性值与邻近空间上其他属性值的相关性^[31]。本文空间自相关采用 GeoDa 1.12.1.161 软件完成。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征

根据珠江-西江经济带广西段土地利用类型分布图可知(图2),1990—2018年研究区林地所占面积最大,建设用地主要分布在各市县行政中心,主要以南宁市、柳州市、桂林市建设用地成片最为明显,28年间建设用地增幅显著。

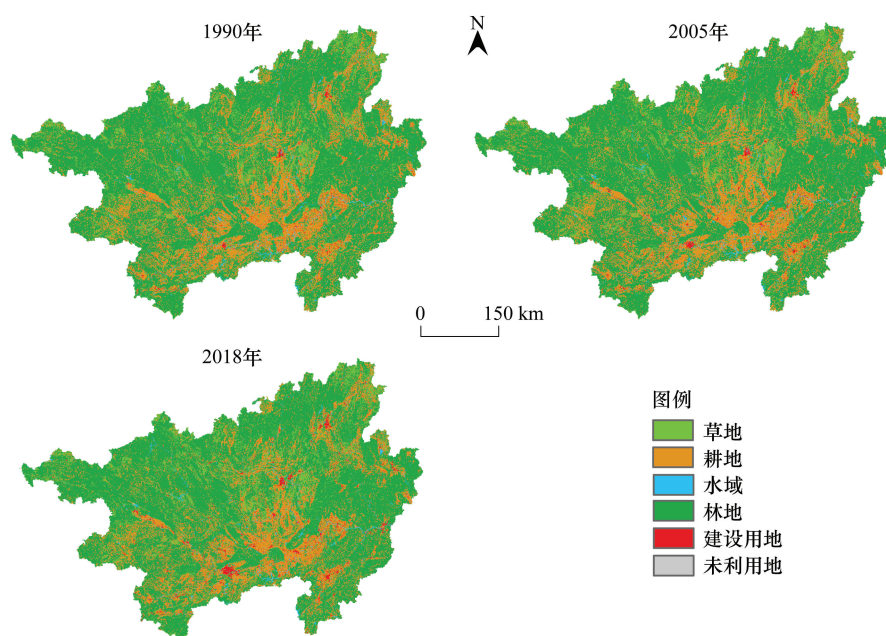


图2 1990—2018年珠江-西江经济带广西段土地利用类型图

Fig.2 Land use maps of Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt during 1990—2018

1990年、2005年和2018年3个时期研究区不同土地利用类型的占比情况如表2所示。从土地利用类型总体特征来看,3个时期研究区主要土地利用类型变化并不是十分显著,面积占比最高均为林地,其次是耕地,二者合占研究区总面积86%以上。从土地利用类型的变化特征来看,建设用地面积增加的幅度最大,近1560 km²。耕地面积在28年间持续减少了984 km²,达0.46个百分点。林地面积先增后减,水域面积保持上涨。

表2 珠江-西江经济带广西段1990—2018年不同土地利用类型占比变化/%

Table 2 Proportion of different land use types changed of Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt during 1990—2018

土地利用类型 Land use types	1990	2005	2018	土地利用类型 Land use types	1990	2005	2018
耕地 Cultivated land	21.20	21.08	20.74	水域 Water area	1.30	1.34	1.42
林地 Forestland	66.30	66.56	66.45	建设用地 Construction land	1.63	1.78	2.35
草地 Grassland	9.58	9.23	9.03	未利用地 Unutilized land	0.01	0.01	0.01

运用 ArcGIS 的分析工具得到1990—2018年不同土地利用类型转移矩阵(表3),珠江-西江经济带广西段土地利用转移主要特征:(1)林地转入转出面积最多,分别为27322 km²和26971 km²,其中主要转入源是耕地、草地和水域,主要转出源是耕地、草地和建设用地;(2)建设用地作为人为改造最为彻底的土地类型,它的

转入面积和转出面积相差最多,其主要转入源和转出源均为耕地、林地和草地;(3)耕地的转入面积和转出面积分别为 21934 km²和 22917 km²,其主要转入源与转出源均为林地、草地和建设用地。说明研究区林地、建设用地和耕地之间置换规模、建设用地对耕地面积的占用较大。期间林地的增加主要是因为加强林地保护和管理,以及“退耕还林工程”、“天然林保护工程”和“防护林体系工程”等生态工程建设,很大程度上保护了林地资源,其生态效益、经济效益和社会效益显著。

表 3 珠江-西江经济带广西段 1990—2018 年土地利用类型转移矩阵/hm²

Table 3 Land use types transfer matrix for Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt during 1990—2018

1990	2018					
	耕地 Cultivated land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land
耕地 Cultivated land	—	1665000	273000	88600	264500	600
林地 Forestland	1625400	—	837200	116600	117000	900
草地 Grassland	310300	891500	—	27600	33900	300
水域 Water area	80300	101900	21400	—	16400	0
建设用地 Construction land	177000	73100	14100	12000	—	0
未利用地 Unutilized land	400	700	300	100	0	—

3.2 生态系统服务价值变化特征

3.2.1 各地类生态系统服务价值变化

土地利用变化引起珠江-西江经济带广西段 ESV 波动变化(表 4)。1990—2018 年水域与未利用地的 ESV 增加了 17.56 亿元和 0.01 亿元;林地的 ESV 增幅仅有 0.23%,但价值增长有 13.37 亿元;草地与耕地的 ESV 均呈减少趋势,共亏损约 30.84 亿元,总体而言,28 年间总 ESV 仅增长约 0.1 亿元。1990—2005 年间,草地与耕地的 ESV 皆呈现降低的现状,15 年间净增长约 13.82 亿元;2005—2018 年草地和耕地 ESV 持续降低,林地的 ESV 亦开始呈现降低的趋势,13 年亏损生态价值约 13.72 亿元。广西退耕还林政策持续实施以及城市建设用地的扩张是导致耕地 ESV 持续减少的关键原因。

表 4 珠江-西江经济带广西段 1990—2018 年各地类 ESV 变化

Table 4 Changes of land use types of ESV in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt during 1990—2018

土地利用类型 Land use type	生态系统服务价值 ESV(×10 ⁸ 元)			1990—2005		2005—2018		1990—2018	
	1990	2005	2018	(×10 ⁸ 元)	%	(×10 ⁸ 元)	%	(×10 ⁸ 元)	%
林地 Forestland	5820.68	5843.71	5834.04	23.04	0.40	-9.67	-0.17	13.37	0.23
草地 Grassland	349.01	336.32	329.19	-12.70	-3.64	-7.13	-2.12	-19.83	-5.68
耕地 Cultivated land	512.33	509.52	501.32	-2.81	-0.55	-8.20	-1.61	-11.01	-2.15
水域 Water area	183.39	189.68	200.95	6.29	3.43	11.27	5.94	17.56	9.57
未利用地 Unutilized land	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.01	16.67	0.01	16.67
总计 Total values	6865.45	6879.27	6865.55	13.82	0.20	-13.72	-0.20	0.10	0.001

3.2.2 各项生态系统服务价值变化

珠江-西江经济带广西段各项 ESV 变化相对缓慢(表 5)。在 1990—2005 年及 2005—2018 年 2 个研究期间,ESV 总值呈先增长后降低的趋势。28 年间水文调节、废物处理、美学景观和原材料生产的价值有所增长,分别增长约 5.56 亿元、2.39 亿元、0.99 亿元和 0.4 亿元。其他单项 ESV 呈下降趋势,特别是食物生产 ESV 降低幅度最大,达 1.19%,这与耕地面积的减少有着直接联系。1990—2005 年间,研究区的食物生产与水文调节的 ESV 变化相较于其他功能大,食物生产降低了 0.32%,水文调节 ESV 增长了 0.4%。2005—2018 年间,除了水文调节和废物处理外,其余的 ESV 皆有所下降,其中食物生产与保持土壤的 ESV 下降速率最大,占比为 0.87%和 0.42%。

从研究区 ESV 的构成看,各单项 ESV 所占比例的大小依次为:维持生物多样性>水文调节>保持土壤>气体调节>气候调节>原材料生产>废物处理>美学景观>食物生产。研究区维持生物多样性的功能价值最为突出,占据 ESV 总值的 15.5%以上,足以体现广西有着丰富的动植物适宜生境资源;水文调节、保持土壤、气体调节和气候调节次之,四者各占据 ESV 总值的 14%左右,食物生产占比最低,不足 2.2%。

表 5 珠江-西江经济带广西段 1990—2018 年 ESV 结构变化

Table 5 Structural changes of ESV in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt during 1990—2018									
生态系统服务类型 Ecosystem service types	生态系统服务价值 ESV(×10 ⁸ 元)			1990—2005		2005—2018		1990—2018	
	1990	2005	2018	(×10 ⁸ 元)	%	(×10 ⁸ 元)	%	(×10 ⁸ 元)	%
食物生产 Food production	148.16	147.68	146.40	-0.48	-0.32	-1.28	-0.87	-1.76	-1.19
原材料生产 Raw material production	654.32	656.28	654.72	1.96	0.30	-1.56	-0.24	0.40	0.06
气体调节 Gas regulation	987.83	989.55	986.53	1.72	0.17	-3.02	-0.31	-1.30	-0.13
气候调节 Climate regulation	960.36	961.94	959.09	1.58	0.16	-2.85	-0.30	-1.27	-0.13
水文调节 Hydrologic regulation	1017.91	1021.93	1023.46	4.03	0.40	1.53	0.15	5.56	0.55
废物处理 Waste treatment	545.71	547.25	548.10	1.54	0.28	0.85	0.16	2.39	0.44
保持土壤 Soil conservation	996.10	996.49	992.32	0.39	0.04	-4.17	-0.42	-3.78	-0.38
维持生物多样性 Biodiversity maintenance	1069.50	1071.27	1068.38	1.77	0.17	-2.90	-0.27	-1.12	-0.11
美学景观 Aesthetic landscape	485.55	486.87	486.55	1.31	0.27	-0.32	-0.07	0.99	0.20
总计 Total values	6865.45	6879.27	6865.54	13.82	0.20	-13.72	-0.20	0.10	0.001

3.2.3 生态系统服务价值时空分异特征

1990—2018 年间,研究区 ESV 总量以及各分量变化并不能反映其在空间上的差异。为刻画研究区 ESV 时空分异格局,计算 1990—2018 年研究区各县区 ESVI,利用自然断点法在数值差异相对较大处设置边界,对相似值进行恰当分组,使之各组数据间最大化差异,有效表征各区县 ESVI 的空间分异特征^[27]。本文将研究区各县区 ESVI 从低到高划分为 5 个等级:Ⅰ级(0<ESVI≤19883.74),Ⅱ级(19883.74<ESVI≤26594.75),Ⅲ级(26594.75<ESVI≤30286.62),Ⅳ级(30286.62<ESVI≤33674.81),Ⅴ级(33674.81<ESVI),得到 ESVI 的时空格局图(图 3)。

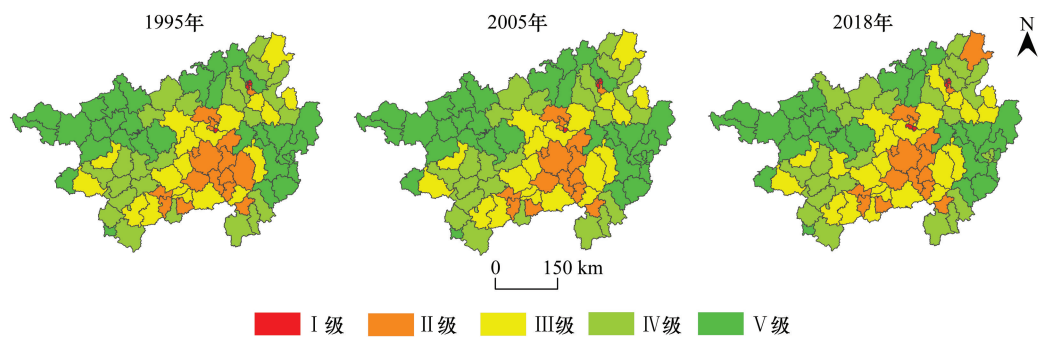


图 3 珠江-西江经济带广西段 1990—2018 年各县区 ESVI 空间分异

Fig.3 Spatial differentiation of ESVI in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt during 1990—2018

研究区 ESVI 总体上存在着中部低、周围高的空间分异格局,与董新芳和周兴^[37]的广西 2005 年 ESVI 分布研究结果类似,28 年间各县区 ESVI 整体格局并未发生太大变化。Ⅰ级低价值区较少,仅有桂林市七星区、柳州市鱼峰区两区,2018 年柳州市柳南区加入Ⅰ级区。在桂西北金钟山、青龙山等山区、桂北九万大山、融江等丘陵区、桂东丘陵区,分别形成西林县、隆林县、田林县等 12 个区县为组团,融水县、三江、融安县等 5 个区县为组团,和昭平县、蒙山县、藤县等 11 个区县为组团的三组团Ⅴ级高 ESVI 聚集区,2018 年梧州市长洲区

和螺山区 ESVI 价值降低。在桂中合山市等 11 个市以及南宁市西乡塘区、江南区、邕宁区,柳州市柳城县、柳北区、柳南区和玉林市玉州区形成一核四卫星的Ⅱ级 ESVI 分布格局,2018 年全州县加入Ⅱ级 ESVI 行列。从研究区不同县域土地利用情况来看,三组团高值聚集区林地面积比例大,普遍占对应区县面积的 70% 以上,更高的森林覆盖率和优良的自然环境条件造就了三组团区的更高的 ESV,且这些区域有广泛的山脉存在,如越城岭、猫儿山、天平山、云开大山等,是许多江河的源头和水源涵养区。而一核四卫星区域位于桂中丘陵、平原区,地势低平,人为活动约束相对较弱,宜农业耕作,耕地占比较大,是珠江-西江经济带重要的粮食重要产区,森林覆盖率比之其他县域较低,客观上降低了这些区县的 ESV。

3.2.4 生态系统服务价值空间自相关

为反映研究区各区县不因面积的大小不同造成 ESV 相差较大情况,采用了 ESVI 进行空间自相关分析。28 年间研究区全局 Moran' I 值始终大于 0.55, P 值均小于 0.001,说明研究区内各区县 ESVI 整体上始终呈显著的正向空间自相关,具有很明显的聚集性,在空间中的分布并非完全随机。

Moran' I 散点图展现的区域单元属性与周围单位属性之间的空间联系模式,从图 4 中可以看出,ESVI 散点主要分布在第一象限(HH)和第三象限(LL),第二象限(LH)与第四象限(HL)散点分布相对少,结合全局 Moran' I 指数,说明研究区各区县生态系统服务价值强度具有较高的空间正相关性且分布规律具有相对一致性。从 1990—2018 年,局部 Moran' I 指数先增后减,结合沿趋势线分布的散点先增多后减少的情况,体现了研

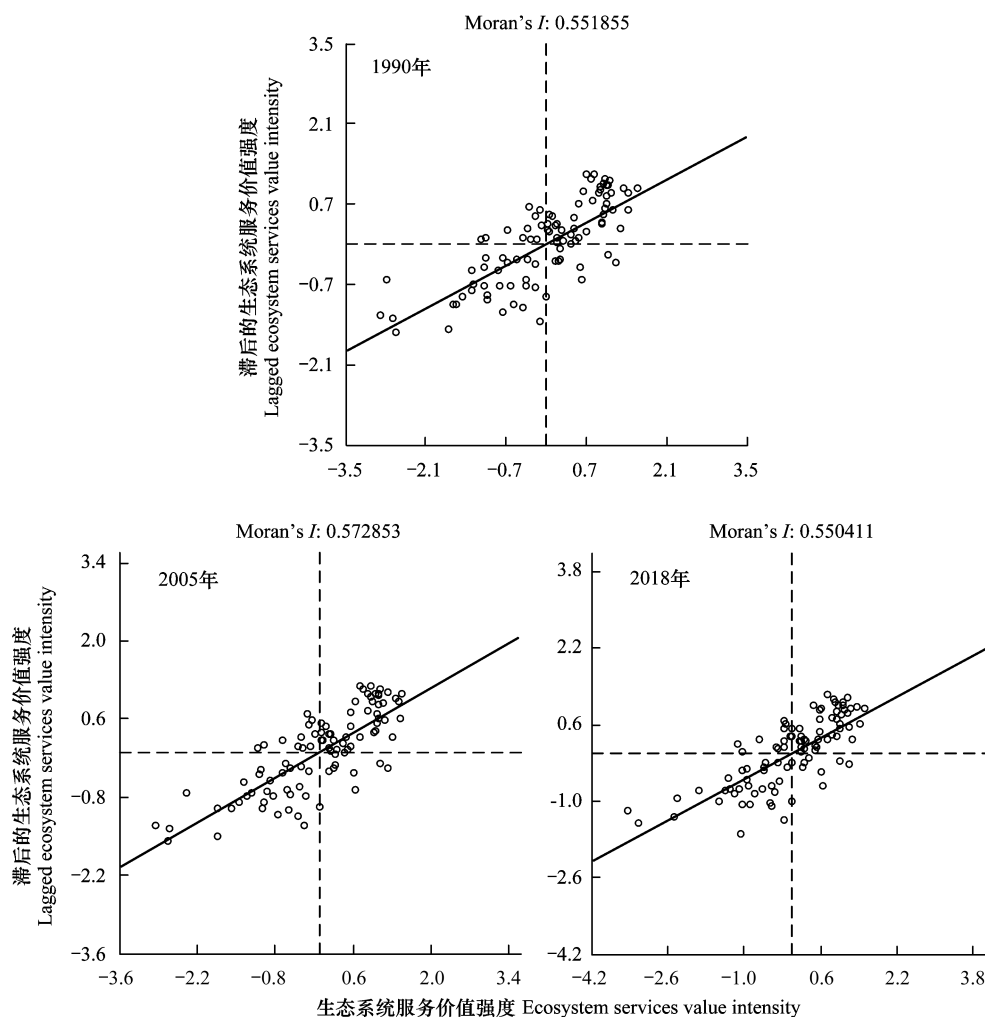


图 4 县域尺度下珠江-西江经济带广西段 ESVI Moran 散点图

Fig.4 Moran scatter diagram of ESVI in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale

究区局部空间自相关程度先增后减趋势。各区县 ESVI 的空间集聚和 ESVI 空间分异情况大致相似(图 5)。1990 年 ESVI 高-高集聚区分布主要为在桂西西林县、隆林县、田林县、乐业县等 13 个县区,在空间区域内受人为因素干扰及城市用地扩张影响程度较小;桂东昭平县、蒙山县、藤县等 8 个县区 and 桂北三江两县的两组团一星模式。低-低集聚主要组团分布在来宾市合山市、贵港市覃塘区等周围 11 个区县范围,主要是因为该区耕地集中分布而林地分布相对较少造成 ESVI 偏低;低-高集聚区只有平南县一个;呈高-低集聚区的是灵川县。2005 年时高-高集聚区新增了桂西贺州市八步区,2018 年贺州市八步区与梧州市万秀区不属于高-高集聚区。

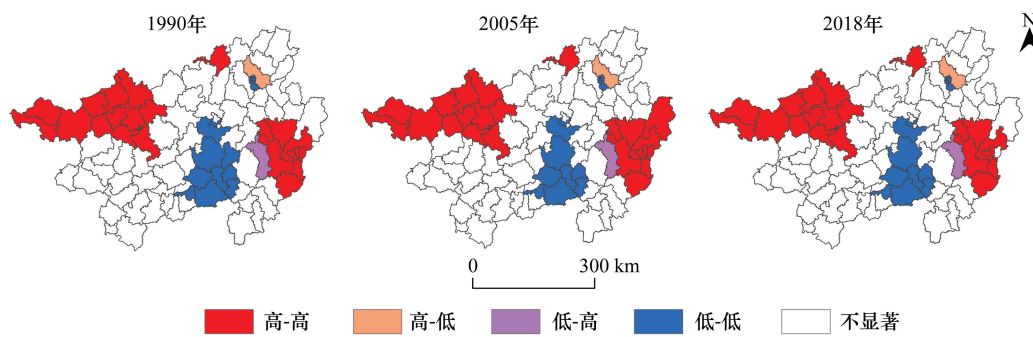


图 5 县域尺度下珠江-西江经济带广西段 ESVI LISA 分布图

Fig.5 Lisa distribution map of ESVI in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale

3.3 土地利用变化对生态系统服务价值的影响

3.3.1 生态系统服务价值流向特征

利用 ArcGIS 软件计算马尔可夫转移矩阵得到 1990—2018 年研究区 ESV 损益流向表(表 6),以此直观的分析土地利用数量变化对 ESV 的影响。结果表明:耕地转林地和草地转林地是主要的生态服务增值类型,分别使 ESV 增高了 490.21 亿元和 211.88 亿元,对 ESV 增加的贡献率分别为 56.5%和 24.4%,建设用地向耕地和林地的转移也对 ESV 的增长贡献有 19.8 亿元和 29.70 亿元;林地转耕地是最主要的生态服务减值类型,分别使得 ESV 降低了 478.55 亿元,贡献率足有 55.1%。林地转草地和林地转建设用地也是主要且受大众关注的生态服务减值类型,分别导致 ESV 下降了 198.97 亿元和 47.53 亿元,贡献率分别为 22.9%和 5.4%。深入分析可以看出退耕还林(草)是使得 ESV 价值升高得主要原因,对生态系统服务功能改善起着主要作用,而林地向其他土地利用类型的转移导致了研究区 ESV 下降的主要原因。

表 6 珠江-西江经济带广西段 1990—2018 年生态系统服务价值损益流向/亿元

Table 6 Flow direction of ecosystem services value in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt during 1990—2018

1990	2018					
	耕地 Cultivated land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land
耕地 Cultivated land	—	490.21	15.49	48.14	-29.59	-0.06
林地 Forestland	-478.55	—	-198.97	29.03	-47.53	-0.35
草地 Grassland	-17.61	211.88	—	13.43	-5.72	-0.04
水域 Water area	-43.63	-25.37	-10.41	—	-10.75	0.00
建设用地 Construction area	19.80	29.70	2.38	7.86	—	0.00
未利用地 Unutilized land	0.04	0.27	0.04	0.06	0.00	—

3.3.2 土地利用程度指数对 ESVI 的影响

为进一步探索珠西经济带广西段各区县土地利用程度与 ESVI 之间的时空关系,采用双变量空间自相关分析结果显示(图 6),Moran'I 指数均小于 0,表明土地利用程度与 ESVI 之间存在着显著的空间负相关关系。

从 1990—2018 年,局部 Moran' I 指数先减后增,结合沿趋势线分布的散点先增多后减少的情况,体现了研究区局部空间负向自相关程度先增后减趋势。

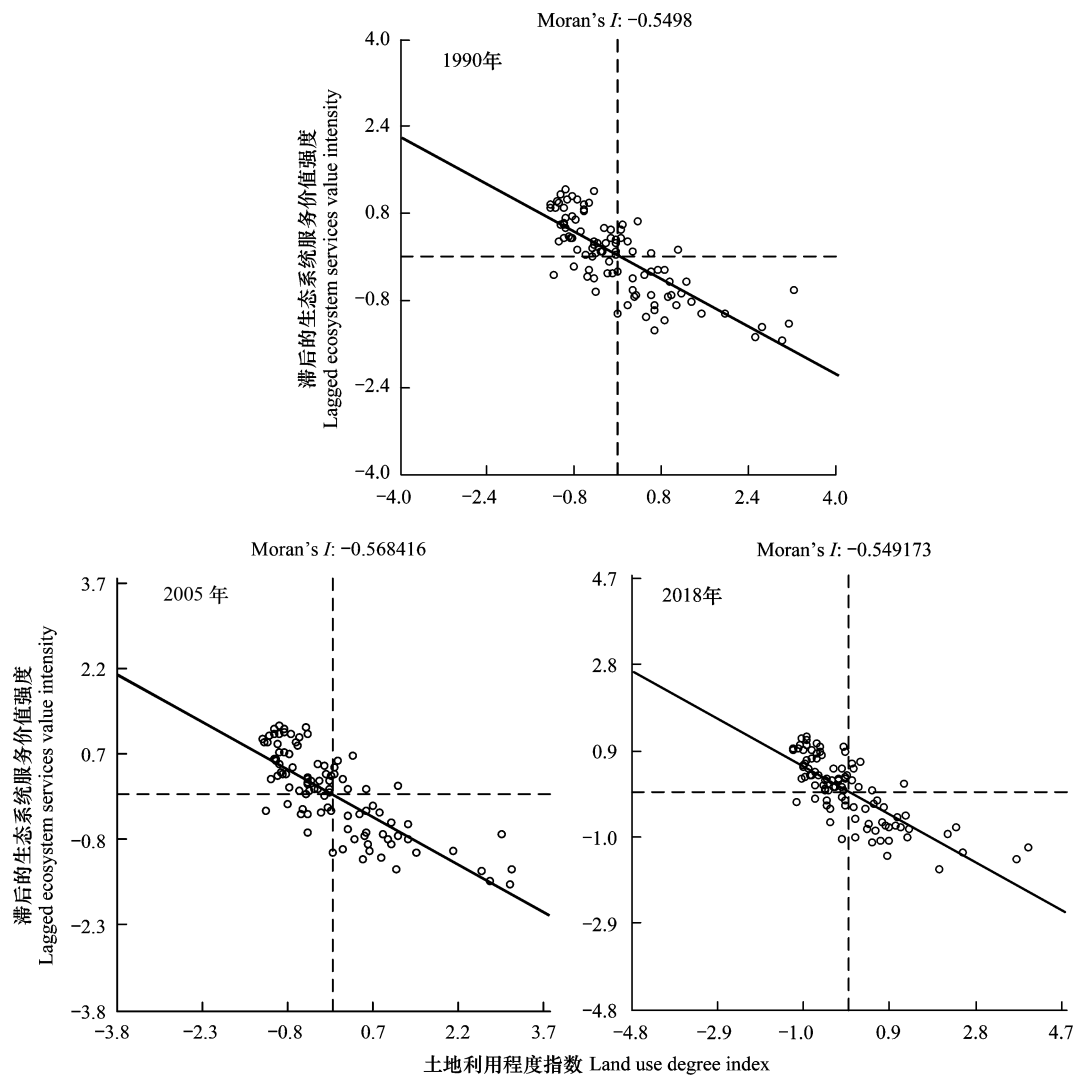


图 6 县域尺度下珠西经济带广西段双变量 Moran 散点图

Fig.6 Bivariate Moran scatter diagram of Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale

在 z 检验的基础上 ($P=0.05$) 绘制双变量局部空间自相关 LISA 聚类图 (图 7), 表征区域土地利用程度与其邻域 ESVI 之间的局部空间关系。由图 7 可知, 土地利用程度与 ESVI 呈高-高集聚的区县是平南县; 呈低-低集聚的区县是柳江县和灵川县, 其中柳江县低-低集聚情况达到 99.9% 的置信水平; 柳州市柳南区、城中区, 来宾市合山市等 14 个区县呈现高-低集聚; 呈低-高集聚的区县分布最为广泛, 主要分布在研究区百色市大部分区县、河池市西部区县、东部梧州、贺州等地, 且是唯一一种空间分布发生变化的集聚区。

不同的土地利用程度水平与 ESVI 的局部空间联系特点明显, 28 年间研究区局部空间聚集存在明显的相似性。桂西北金钟山、青龙山等山区、桂东丘陵区 and 桂北九万大山、融江等丘陵区地区, 多是林地分布占所在区县 70% 以上的地区, 森林资源丰富, 生态优势明显, 但是由于山多地少, 交通较为闭塞, 也限制了这些地区的人口增长、产业的规模聚集和城市建设用地扩张, 影响地区经济的发展, 因此空间上表现为明显的低土地利用程度-高生态系统服务强度的聚集形态, 且在时间上变化不明显。2005 年时八步区表现为低-高集聚特点, 2018 年贺州市八步区和梧州市万秀区表现了空间随机模式, 该区的土地利用程度与周围地区不再有显著的

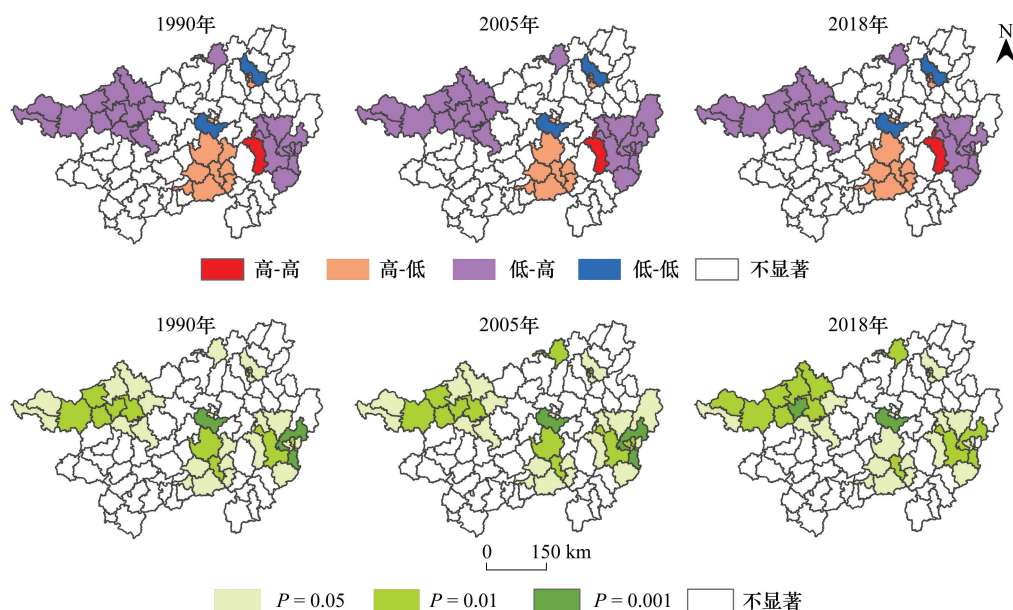


图7 县域尺度下珠江-西江经济带广西段双变量 LISA 分布及显著性水平图

Fig.7 Bivariate LISA distribution and significance level map in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale

空间相关性。桂中地势低平的丘陵区,人口较多,农耕及城市规模发展较快,交通便捷,使得空间上表现为明显的高土地利用程度-低生态系统服务强度的聚集格局。

4 讨论

土地利用方式的变化作为区域生态环境变化的主要根源,受自然、经济、社会等多种因素的影响^[46],自然生态环境因子在土地利用变化空间分布上起主导作用,而社会经济因子在决定土地利用变化数量方面起着主导作用^[47]。珠江-西江经济带广西段近 28 年中,城镇建设用地扩张占用了大量的耕地、林地和草地,各类土地利用类型之间因人类的经济需求和保护政策实施而发生复杂的相互转变。该区域生态系统服务的主要支撑者为林地、水域和耕地。由于林地、耕地等被耕地和建设用地侵占以及退耕还林等工程的实施,总体上给生态系统服务诸如土壤保护作用、粮食生产、气体调节、气候调节、维持生物多样性等方面带来了一定损失,而水文调节、废物处理、美学景观、原材料生产价值有所增加。可见强烈的人类活动对生态系统服务功能产生重要影响。面对 28 年间土地利用方式转变的一系列问题,诸如耕地减少趋势尚未扭转、耕地后备资源不足,建设用地布局不合理,土地利用粗放,节约集约用地水平不足,大大制约了经济的良性发展,有待加强生态用地的保护力度,提高土地参与宏观调控的能力。

大量研究证明土地利用程度和生态系统服务具有明显的空间溢出效应^[31, 48],本研究识别出珠江-西江经济带广西段的四种聚集模式,高土地利用程度水平的平南县被高 ESVI 集聚的区县所包围,应当限制高污染性土地利用模式,在大力保护现有生态优势基础上,城市化建设平稳、有序的推进,最大程度上减少城市化建设对生态环境的干扰和破坏。低土地利用程度和低 ESVI 集聚的柳江县和灵川县应当改变土地利用不够恰当的方式,增强自身和周边区县土地利用效率,提高生态经济价值。高土地利用程度和低 ESVI 集聚模式的柳州市柳南区、城中区,合山市、南宁市青秀区等 14 个区县是城市化进程较为充分的区县,应当考虑生态修复,在提高土地集约节约利用水平基础上引导土地利用向高 ESV 发展。对于低土地利用程度和高 ESVI 集聚的县域,被视为生态优势区,一方面要加强对于这些县域部分地区生态资源的保护,另一方面也利用好生态资

源优势,开发旅游城市、森林天然氧吧,培育高效经济林,增加人民收入,制定合适的生态补偿机制,让生态经济可持续发展。从时间尺度上看,研究区局部双变量自相关分布模式变化不大。

本研究在 ESV 时空变异方面,不限于大多数研究^[25-27]对 ESV 分布格局的空间展示,也利用可以表征土地利用变化和人类活动强度的土地利用程度指数^[32],对生态系统服务价值进行双变量空间聚集规律和空间关联模式动态变化进行定量研究。限于数据可获取性和技术的复杂性,本研究尚未对土地利用程度和 ESV 之间的复杂关联机制深入研究,今后可参考方创琳等^[49]构建的城镇化与生态环境耦合过程的耦合器(UEC),尝试揭示 ESV 驱动机理、探索土地利用程度和 ESVI 两者耦合的最佳状态。

5 结论

本文以我国重要的珠江-西江经济带广西段为研究区,从县域尺度分析 1990—2018 年土地利用变化对生态系统服务的影响,结果表明:

(1)珠江-西江经济带广西段 1990—2018 年间土地利用类型总体上变化不是非常激烈,林地与耕地面积合占总面积的 86%以上。转出的耕地主要流向林地、草地和建设用地,转出的林地主要变成耕地、草地和建设用地,新增的耕地主要来源于林地、草地的转化,新增的建设用地主要由耕地、林地和草地转化而来。

(2)生态系统服务价值方面,珠江-西江经济带广西段 28 年来 ESV 总值呈先增后减趋势。其中林地和耕地对生态系统服务总价值的贡献最大,贡献率达 82%以上。研究区最为突出的生态系统服务价值是维持生物多样性,其次为水文调节、保持土壤、气体调节和气候调节,这五项生态系统服务占总服务价值的 73%。生态系统服务价值最低是食物生产,仅为 2.1%左右。

(3)28 年来研究区各区县生态系统服务强度总体上呈现中部低、周围高的分异格局,且变化不大。ESVI 高值区主要分布在山地、丘陵众多,林地面积占极大比例的桂西北、桂北、桂东区县,低值区主要分布在周围地势较为低平的丘陵、平原区,以耕地和建设用地为主的区县。珠江-西江经济带广西段各区县 ESVI 有着显著的正空间自相关性,空间集聚程度较高,且以高-高集聚模式与低-低集聚模式为主,高-高集聚主要以两团一星模式分布在研究区桂西北、桂东和桂北,低-低集聚主要组团分布在桂中。

(4)对于土地利用变化对生态系统服务价值的影响,研究期间珠江-西江经济带广西段耕地向林地的转移是 ESV 增加的主要贡献项,林地向耕地以及建设用地的转移,是 ESV 减少的主要方式。不同土地利用程度与 ESVI 双变量 LISA 聚集图呈现出明显的负空间自相关性,且在三个时期的双变量局部空间自相关性异质性程度变化不大,主要以低土地利用程度与高 ESVI 聚集和高土地利用程度与低 ESVI 聚集分布为主。两组团一星模式的低高聚集主要以分布在研究区的桂西北、桂东和桂北;一组团两星模式的高低聚集主要分布在经济水平相对发达的中部和桂林市辖区。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>)为本研究提供原始数据。

参考文献(References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington: Future Survey, 2005: 534-534.
- [2] 张立伟,傅伯杰.生态系统服务制图研究进展.生态学报,2014,34(2):316-325.
- [3] 谢高地,张彩霞,张雷明,陈文辉,李士美.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.自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [4] Daily G. Nature Services: Societal Dependence on Natural Ecosystem. Washington D C: Island Press, 1997: 122-134.
- [5] Wilson M A, Carpenter S R. Economic valuation of freshwater ecosystem services in the United States: 1971-1997. Ecological Applications, 1999, 9(3): 772-783.
- [6] 谢高地,张彩霞,张昌顺,肖玉,鲁春霞.中国生态系统服务的价值.资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [7] 杨越,哈斯,社会石,孙保平,赵岩,赵瑞,孙百生.基于 RS 和 GIS 的宁夏盐池县土地利用变化对生态系统服务价值的影响.水土保持

- 研究, 2014, 21(5): 100-105.
- [8] 王宽, 蔡正华, 齐增湘, 陈坚, 李晖, 李涛, 冯倩. 2000-2013 年衡阳市土地利用格局转变对生态系统服务的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1060-1070.
- [9] 陈端吕, 陈哲夫, 彭保发. 土地利用生态服务价值与经济协调及空间分异——以西洞庭湖区为例. 地理研究, 2018, 37(9): 1692-1703.
- [10] Wainger L A, King D M, Mack R N, Price E W, Maslin T. Can the concept of ecosystem services be practically applied to improve natural resource management decisions? *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 978-987.
- [11] Ross D J, Tate K R, Scott N A, Feltham C W. Land-use change: effects on soil carbon, nitrogen and phosphorus pools and fluxes in three adjacent ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(6): 803-813.
- [12] Scalenghe R, Marsan F A. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 90(1/2): 1-10.
- [13] Su W Z, Gu C L, Yang G S, Chen S, Zhen F. Measuring the impact of urban sprawl on natural landscape pattern of the Western Taihu Lake watershed, China. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 61-67.
- [14] 石忆邵, 史东辉. 洞庭湖生态经济区生态服务供需平衡研究. 地理研究, 2018, 37(9): 1714-1723.
- [15] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [16] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. *Pacific Conservation Biology*, 1997, 6(2): 220-221.
- [17] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R C, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [18] 孙慧兰, 陈亚宁, 李卫红, 黎枫, 木巴热克·阿尤普. 新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1273-1277.
- [19] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [20] 白杨, 欧阳志云, 郑华, 徐卫华, 江波, 方瑜. 海河流域森林生态系统服务功能评估. 生态学报, 2011, 31(7): 2029-2039.
- [21] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.
- [22] 陈婧祎, 罗红霞, 胡林利, 李秋红, 江汶静. 生态系统服务价值与社会经济相关性研究——以重庆市大都市区为例. 水土保持研究, 2017, 24(4): 330-336.
- [23] 郇红娟, 韩会庆, 罗绪强, 俞洪燕, 韩默然. 贵州省生态系统服务价值与社会经济空间相关性分析. 水土保持研究, 2016, 23(2): 262-266.
- [24] 喻露露, 张晓祥, 李杨帆, 赵杏杏, 马生全, Cao H H, 曹均阔. 海口市海岸带生态系统服务及其时空变异. 生态学报, 2016, 36(8): 2431-2441.
- [25] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 吴松钦, 游细斌, 吴军, 崔鹏, 丁晖. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2019, 39(9): 3089-3099.
- [26] 刘亚茹, 王聪, 严力蛟. 华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响——以河南省商丘市为例. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1597-1606.
- [27] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 高建华. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究. 生态学报, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [28] Fu B J, Wang S, Su C H, Forsius M. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [29] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征. 农业工程学报, 2015, 31(9): 249-256.
- [30] 李涛, 甘德欣, 杨知建, 王宽, 齐增湘, 李晖, 陈希. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3787-3796.
- [31] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 李苑菱, 杨琦, 陈小花. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析. 生态学报, 2019, 39(7): 2366-2377.
- [32] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [33] 国务院. 国务院关于广西壮族自治区土地利用总体规划的批复(国函[2009]119 号). (2009-09-28)[2019-12-27]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2018-09/04/content_5319070.htm.
- [34] 周兴, 董新华, 华璿, 卢远, 邓兴礼. 广西生态功能区划研究//2006“年自然地理学与生态建设”学术研讨会论文集. 乌鲁木齐: 中国地理学会, 2006: 455-465.
- [35] 杨大勇, 林奎. 珠江流域生态环境十年变化评估. 北京: 科学出版社, 2017.
- [36] 王兵, 魏江生, 俞社保, 梁建平, 蔡会德, 农胜奇. 广西壮族自治区森林生态系统服务功能研究. 广西植物, 2013, 33(1): 46-51, 117-117.

- [37] 童新芳, 周兴. 广西生态系统服务价值空间分布与生态保护对策. 安徽农业科学, 2010, 38(7): 3650-3653.
- [38] 荣检. 基于 InVEST 模型的广西西江流域生态系统产水与固碳服务功能研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2017.
- [39] 王永琪, 马姜明, 李宇婷, 营瑞, 宋尊荣. 珠西经济带广西段 1980—2015 年土地利用时空格局变化. 环境生态学, 2019, 1(2): 1-11.
- [40] 黄云凤, 崔胜辉, 石龙宇. 半城市化地区生态系统服务对土地利用/覆被变化的响应——以厦门市集美区为例. 地理科学进展, 2012, 31(5): 551-560.
- [41] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [42] 赵阳, 余新晓, 贾剑波, 刘旭辉. 红门川流域土地利用景观动态演变及驱动力分析. 农业工程学报, 2013, 29(9): 239-248.
- [43] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 邓祥征, 张增祥. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 1031-1040.
- [44] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [45] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [46] 范树平, 程从坤, 刘友兆, 张红梅, 於冉. 中国土地利用/土地覆盖研究综述与展望. 地域研究与开发, 2017, 36(2): 94-101.
- [47] Verburg P H, Schot P P, Dijst M J, Veldkamp A. Land use change modelling: current practice and research priorities. GeoJournal, 2004, 61(4): 309-324.
- [48] 乔旭宁, 张婷, 杨永菊, 牛海鹏, 杨德刚. 渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响. 资源科学, 2017, 39(3): 533-544.
- [49] Fang C L, Cui X G, Li G D, Bao C, Wang Z B, Ma H T, Sun S A, Liu H M, Luo K, Ren Y F. Modeling regional sustainable development scenarios using the Urbanization and Eco-environment Coupler: case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China. Science of the Total Environment, 2019, 689: 820-830.