

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.019.

谢梦, 吴伟成. 赣东北土地利用及景观格局变化对生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 331-341.

Xie Meng, Wu Weicheng. Impacts of Change in Land Use and Landscape Pattern on Ecosystem Service Value in Northeast of Jiangxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 331-341.

# 赣东北土地利用及景观格局变化对 生态系统服务价值的影响

谢梦, 吴伟成

(东华理工大学 数字国家重点实验室和地球科学学院, 南昌 330013)

**摘要:** [目的]通过开展生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)对土地利用及景观格局变化的响应研究, 维持赣东北生态系统功能稳定以及筑牢区域生态安全屏障。[方法]基于 1990—2020 年 4 期土地利用数据, 利用 GIS 空间统计和分析等方法测度赣东北土地利用、景观格局和 ESV 的时空变化, 并引入弹性指数和时空地理加权回归(GTWR)模型分别探究土地利用和景观格局变化对 ESV 的影响。[结果](1) 林地和耕地是主要的用地类型, 而除水域和建设用地面积递增外, 其他地类面积均减少, 使得整个区域景观破碎化和复杂化;(2) ESV 总量整体上升, 其中林地和水域是生态系统的主要贡献者, 两者合计占比超过 89%, 而各县(市、区)ESV 的分布和变化主要受水域、林地和建设用地的影响;(3) 高弹性指数(弹性指数 $>5$ )主要集中于鄱阳湖及其水系沿岸和各县(市、区)中心繁华地段周边, 而较高弹性指数( $3<$ 弹性指数 $\leq 5$ )主要集中于城市交界处;(4) 散布与并列指数(Interspersion and Juxtaposition Index, IJI)和分离度指数(Splitting Index, SPLIT)对各县(市、区)ESV 的影响呈负向抑制作用为主, 欧几里得最邻近距离(Euclidean Nearest Neighbor Distance, ENN)的影响由负向作用向正向作用过渡, 而香农多样性指数(Shannon's Diversity Index, SHDI)的影响总体呈正向促进作用且强度逐渐增强, 同时 4 种景观指数的影响强度时空分异性明显。[结论]土地利用及景观格局变化对 ESV 的影响具有时空分异特征, 在赣东北生态环境保护工作中应当采用差异化管理模式。

**关键词:** 生态系统服务价值; 土地利用; 景观格局; GTWR 模型; 赣东北

中图分类号: X171.1; F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0331-11

## Impacts of Change in Land Use and Landscape Pattern on Ecosystem Service Value in Northeast of Jiangxi Province

Xie Meng, Wu Weicheng

(Key Laboratory of Digital Land and Resources and Faculty of Earth  
Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to examine the response of ecosystem service value (ESV) to the change in land use and landscape pattern, and to provide reference for maintaining the functional stability of the ecosystem in northeast of Jiangxi Province and building a regional ecological safety barrier. [Methods] Based on four periods of land use data from 1990 to 2020, the spatial and temporal change of land use, landscape pattern and ESV in northeast Jiangxi were measured by spatial analysis and statistics within Geographic Information System (GIS) package. Meanwhile, the elasticity coefficient and Geographically and Temporally Weighted Regression (GTWR) model were respectively introduced to explore the impacts of land

收稿日期: 2023-04-04

修回日期: 2023-07-06

资助项目: 2019 年江西省“双千计划”项目(900/2120800004)

第一作者: 谢梦(1993—), 女, 江西上饶人, 硕士研究生, 主要从事生态环境与土地利用研究。E-mail: 2468954052@qq.com

通信作者: 吴伟成(1964—), 男, 浙江金华人, 博士, 教授、博导, 主要从事土地利用变化监测和模拟及其生态环境效应研究。E-mail: wuwch@ecut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

use and landscape pattern change on ESV. [Results] (1) Woodland and cultivated land were the main land use types, and except for the increase in waters and urban area, other land use had experienced a decrease, which made regional landscape fragmented and complicated. (2) The total amount of ESV had gained an increase with woodland and waters being the main contributors to the ecosystem, accounting for over 89% of the total. The distribution and changes of ESV in various counties were mainly influenced by waters, woodland and urban area. (3) The regions with the highest elasticity coefficient (EC) ( $>5$ ) were mainly located along the Poyang Lake and its water system, and around the prosperous area of each county center, while the areas with high EC (i. e.,  $3 < EC \leq 5$ ) mainly distributed around the borders of the study area. (4) The influence of the Interspersion and Juxtaposition Index (IJI) and Splitting Index (SPLIT) on ESV in each county was mainly a negative inhibition, and the influence of the Euclidean Nearest Neighbor Distance (ENN) was transitional from negative to positive while the influence of the Shannon's Diversity Index (SHDI) was generally positive and its intensity had been gradually increasing. [Conclusion] The influence intensity of the four landscape indices shows a clear spatiotemporal difference. The effect of change in land use and landscape pattern on ESV are also of spatiotemporal variability and should be treated differently in ecological and environmental protection in the study area.

**Keywords:** ESV; land use; landscape pattern; GTWR model; northeast of Jiangxi Province

生态系统服务作为连接自然环境与人类福祉间的桥梁<sup>[1]</sup>,既是计算绿色 GDP 的关键要素,也是衡量区域可持续发展状况的直观指标<sup>[2]</sup>。自 1997 年以来,Costanza 等<sup>[3]</sup>提出生态系统服务价值(Ecosystem Services Value,ESV)的核算方法使生态系统服务的研究取得了里程碑式的进展,此后国内学者开始探寻属于中国生态系统服务评价的方式,如欧阳志云等<sup>[4]</sup>运用生态经济学原理探究中国陆地生态系统功能的评估方法、何浩等<sup>[5]</sup>运用遥感技术估算中国陆地 ESV 以及谢高地等<sup>[6]</sup>就中国地域情况制定了符合中国的 ESV 当量因子表。ESV 作为生态安全重要表征指标,对区域生态文明建设和生态安全格局构建具有重要意义<sup>[7]</sup>。

土地利用变化是人类活动作用于自然环境产生的最直观的表现形式,是影响生态系统类型及其空间分布的关键因素,也是生态系统服务功能变化的主要驱动力<sup>[8]</sup>,而景观格局作为土地利用时空变化研究的重要分析手段,其变化必然影响生态系统的质量和演变过程<sup>[9]</sup>。近年来,国内外学者针对土地利用变化与 ESV 的关系开展了不同研究尺度或某类生态系统功能研究,前者主要划分为局部地区、城市群和全国 3 个尺度<sup>[10-12]</sup>,后者以森林<sup>[13]</sup>、草地<sup>[14]</sup>、农田<sup>[15]</sup>和湿地等<sup>[7]</sup>典型生态系统功能进行研究,而以丘陵地区为研究对象的研究较少。景观格局与 ESV 的关系研究主要集中在两方面:一是研究对象以生态脆弱区或人口密集的城市等景观格局变化差异较大的区域<sup>[16-17]</sup>为主;二是研究方法以灰色关联度分析<sup>[18]</sup>、相关性分析<sup>[17]</sup>和耦合协调度

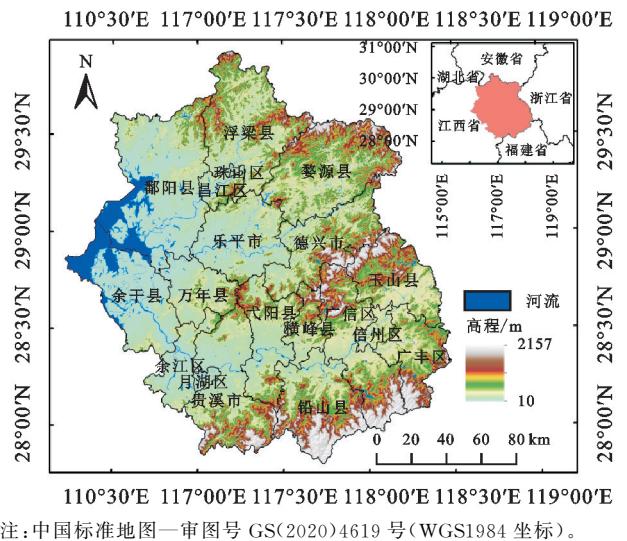
分析等<sup>[18]</sup>为主。该类方法研究了二者的空间异质性,鲜有借助时空地理加权回归(GTWR)模型探究其时空非平稳性,本研究实施的方法将同时考虑二者的空间异质性和时空非平稳性的特征<sup>[19]</sup>。

赣东北属于典型的亚热带低山丘陵地区,森林覆盖率高,地处赣浙闽皖四省交界,是长三角经济带的直接腹地,也是海西经济区的重要组成,更是江西打造“一湖五河三屏”生态安全核心区,其战略定位既要保持自身生态环境稳定,又要发挥其在江西乃至周边省份生态屏障的辐射作用。而其快速城镇化以及旅游资源开发等频繁的人类活动,造成景观格局和生态服务功能明显变化。鉴于此,本文以赣东北丘陵地区为研究对象,引入弹性指数和 GTWR 模型分别探究 1990—2020 年土地利用及景观格局变化对 ESV 的影响关系,旨在探索赣东北 ESV 对土地利用及景观格局变化响应的演变趋势,为生态文明建设提供数据支撑,也为响应国家生态文明试验区建设提供科学借鉴。

## 1 研究区与数据来源

赣东北是江西省东北部的地理简称,涵盖上饶市、景德镇市、鹰潭市,共辖 19 个县级行政区,包括 7 个市辖区、3 个县级市和 9 个县(图 1),介于  $27^{\circ}48'$ — $29^{\circ}56'E$  和  $116^{\circ}13'$ — $118^{\circ}29'N$ ,总面积约为 3.16 万  $km^2$ ,占江西总面积的 18.91%。该域地势由东北向西南倾斜,东部为山地,中部为河谷、丘陵及盆地,西部为鄱阳湖平原。境内属亚热带季风气候,年平均气温为  $17.5\sim 18^{\circ}C$ ,年平均降水量为 1 718~1 802 mm,雨

量充沛,气候湿润。赣东北与周边省份皖、浙、闽接壤,是江西对接皖江城市带、长三角城市群、海西经济区的天然交通枢纽<sup>[20]</sup>,地理位置优越。



注:中国标准地图一审图号 GS(2020)4619 号(WGS1984 坐标)。

图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

本研究所使用的 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 4 期土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。依据中国科学院土地利用/覆被分类标准,结合赣东北的自然环境和土地利用特征,将用地类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类。行政边界数据来自于地理监测云平台(<http://www.dsac.cn/>),社会经济数据来自于历年《江西统计年鉴》《全国农产品

成本收益资料汇编》和江西省粮食和物资储备局网站(<http://lswz.jiangxi.gov.cn/>)。

2 研究方法

2.1 土地利用变化分析

土地利用转移矩阵是描述不同地类之间相互转变的分析方法,具体反映土地利用的结构特征变化和各地类间转换的方向,公式为<sup>[21]</sup>:

$$P_{ab} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

式中: $P$  为面积; $n$  为地类的种类; $a, b$  分别为研究初期和末期的土地利用类型。

2.2 景观格局指数选取

景观格局是指不同景观要素的空间结构特征,而景观格局指数高度浓缩景观格局信息,是反映其结构组成、空间配置和异质性特征的量化指标<sup>[22]</sup>。本文基于前人研究成果<sup>[23-24]</sup>,结合研究区的景观结构特征及生态系统服务研究需要,加之景观格局指数间存在冗余,利用 SPSS 软件对初选的景观指数进行多次多重共线性检验(表 1),确保所选的景观指数间不存在多重共线性,即  $VIF < 10$ 。本文最终选取欧几里得最邻近距离(ENN)、散布与并列指数(IJI)、分离度(SPLIT)以及香农多样性指数(SHDI)等 4 个指数来度量赣东北景观格局分布特征,详见表 2。

表 1 多重共线性检验结果

Table 1 Results of multicollinearity test

初始模型	NP	PD	LPI	LSI	AREA_MN	PAFRAC	ENN
VIF	123.006	25.927	8.53	187.863	27.007	32.428	14.525
初始模型	PLADJ	IJI	SPLIT	SHDI	SHEI	AI	CONTAG
VIF	1121.706	50.747	7.843	74.242	261464.973	1972.325	139.43
最终模型	ENN	IJI	SPLIT	SHDI	—	—	—
VIF	2.642	3.229	4.061	1.895	—	—	—

表 2 景观指数内涵

Table 2 The meaning of landscape indices

指数名称	生态内涵
欧几里得最邻近距离(ENN)	反映各斑块间的连接程度,其值小表明同类型斑块聚集
散布与并列指数(IJI)	是描述景观空间格局最重要的指标之一,其值越接近 100,表明各类型斑块彼此邻近概率越均等,分散度越高
分离度指数(SPLIT)	反映各斑块在空间上的离散状况,其值高表明离散程度越大
香农多样性指数(SHDI)	反映景观类型的复杂程度,其值高表明各类型斑块复杂度和破碎度大,土地利用呈均衡化趋势分布

2.3 生态系统服务价值核算

本文以谢高地等<sup>[6,12]</sup>提出的中国陆地生态系统服务价值当量表为基础,结合研究区实际粮食生产能

力,运用粮食产量修正法进行修正,最终确定研究区生态服务价值当量表。

根据 1990—2020 年江西省主要粮食作物产量、

种植面积以及 2020 年江西省主要粮食收购价格,测算出研究区的平均粮食单产市场价格,按 1 个生态服务价值当量因子的经济价值等于平均粮食单产市场价值的 1/7 计<sup>[12]</sup>,得到赣东北生态系统服务价值当量均值为 1 925.77 元/hm<sup>2</sup>。

表 3 赣东北单位面积 ESV 当量

Table 3 Factor table of ESV per unit area in northeast Jiangxi

元/(hm<sup>2</sup> · a)

一级类型 服务功能	二级类型 服务功能	土地利用类型					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	2137.60	481.44	577.73	1540.62	19.26	0.00
	原料生产	481.44	1116.95	866.60	442.93	0.00	0.00
	水资源供给	-2503.50	577.73	481.44	15964.63	-14462.53	0.00
调节服务	气体调节	1713.94	3678.22	3004.20	1482.84	-4660.36	38.52
	气候调节	905.11	10996.15	7934.17	4410.01	0.00	0.00
	净化环境	250.35	3216.04	2619.05	10688.02	-4737.39	192.58
	水文调节	2888.66	7183.12	5815.83	196890.72	0.00	57.77
支持功能	水土保持	1001.40	4467.79	3658.96	1790.97	38.52	38.52
	维持养分循环	288.87	346.64	288.87	134.80	0.00	0.00
	生物多样性	327.38	4082.63	3331.58	4910.71	654.76	38.52
文化服务	美学景观	154.06	1790.97	1463.59	3639.71	19.26	19.26
合计		7645.31	37937.68	30042.02	241895.96	-23128.48	385.17

利用 Costanza 等<sup>[3]</sup>提出的生态系统服务价值公式,测算研究区生态系统服务价值,公式为:

$$ESV = \sum_{e=1}^n A_e \times VC_e$$

$$ESV_f = \sum_{e=1}^n A_e \times VC_{ef}$$

$$AESV = \sum_{e=1}^n A_e \times VC_{ef} / \sum_{e=1}^n A_e$$

式中:ESV 为生态系统的总服务价值; $A_e$  为第  $e$  种地类的面积; $VC_e$  为第  $e$  种地类的生态系统服务价值系数; $ESV_f$  为第  $f$  项生态系统服务功能的价值; $VC_{ef}$  为第  $e$  种地类的第  $f$  项生态系统服务价值系数; $AESV$  为地均生态系统服务价值。

## 2.4 生态系统服务价值对应土地利用变化的弹性响应

弹性是一个变量对另一个变量作用的反应程度的度量。本文利用弹性的属性来衡量因土地利用/土地覆盖变化(LUCC)造成的生态系统服务价值(ESV)变化的关系<sup>[26]</sup>,公式为:

$$K = \left| \frac{(ESV_{t+1} - ESV_t) / ESV_t \times 100\%}{LUP} \right|,$$

$$LUP = \frac{\sum_{m=1}^n \Delta L_m}{\sum_{m=1}^n L_m} \times 100\%$$

式中: $K$  表示 ESV 响应 LUCC 的弹性指数; $ESV_t$ ,  $ESV_{t+1}$  分别表示期初和期末的 ESV; $LUP$  表示土地转化率; $\Delta L_m$  表示  $m$  种地类转变面积; $L_m$  表示  $m$  种地类的总面积。

基于赣东北土地利用现状和社会经济发展状况,将耕地、林地、草地、水域、未利用地 5 种生态系统价值当量与谢高地等提出的农田、森林、草地、水体及荒漠相对应,而建设用地的价值当量参考邓舒洪<sup>[25]</sup>的研究,确定赣东北单位面积 ESV 当量表(表 3)。

## 2.5 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归(GTWR)模型是地理加权回归(GWR)模型的拓展,前者弥补了后者缺乏时间维度的考量,同时既突破面板数据量的限制,又兼顾时间与空间非平稳性问题<sup>[21]</sup>,使得结果更为准确。模型如下:

$$Y_i = \lambda_o(u_i, v_i, t_i) + \sum_{j=1}^k \lambda_j(u_i, v_i, t_i) X_{ij} + \epsilon_i$$

式中: $(u_i, v_i, t_i)$  是第  $i$  个样本点的时空坐标; $X, Y$  分别为解释变量和被解释变量; $\lambda_o(u_i, v_i, t_i)$  为第  $i$  个样本点的回归常数; $\lambda_j(u_i, v_i, t_i)$  为第  $i$  个样本点的第  $j$  个解释变量的估计系数; $k$  为解释变量的个数; $X_{ij}$  为第  $j$  个解释变量在第  $i$  点的值; $\epsilon_i$  为模型残差。本文利用 Huang 等<sup>[27]</sup>设计的 ArcGIS 10.2 插件 GTWR 进行试验操作,带宽采用自动优化设置,时空距离参数比设置为 1。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用类型时空变化分析

3.1.1 土地利用类型变化 由图 2 可知,赣东北主要的用地类型为林地和耕地,占比总和超过 87%,其中林地各年均超过 1.90 万 km<sup>2</sup>,占比维持在 60%以上,但两者总体呈下降趋势,研究期间分别减少了 180.84 km<sup>2</sup>, 177.03 km<sup>2</sup>,林地主要流向耕地(295.59 km<sup>2</sup>, 44.06%)和建设用地(268.25 km<sup>2</sup>, 39.99%),耕地主要流向建设用地(333.10 km<sup>2</sup>, 44.81%)和林地(291.60 km<sup>2</sup>, 39.23%),林地与耕地的双向转移发生



于山丘与平原的交错地带,主要受退耕还林政策和农业产业结构调整的影响,而林地和耕地向建设用地转移主要是城市蔓延扩张导致。1990—2020 年,水域大多数流向耕地(183.95 km<sup>2</sup>,84.01%),转移常发生于河流和湖泊沿岸,其原因是该区域土壤肥沃,灌溉水源充足,易于耕作。1990—2020 年,草地面积呈现先减后增的变化趋势,总体共减少 181.72 km<sup>2</sup>,减幅为 15.49%,主要流向林地(172.89 km<sup>2</sup>,61.77%),其次是耕地(52.56 km<sup>2</sup>,18.78%)和建设用地(43.68 km<sup>2</sup>,15.61%),前者主要受当地政府加大开展封山育林、植树造林的影响,后者转移的主要原因是区域经济发展导致生态用地受到挤压。截至 2020 年,建

设用地面积增长总量达 613.04 km<sup>2</sup>,增幅 119.08%,主要来自耕地(333.10 km<sup>2</sup>,50.71%)与林地(268.25 km<sup>2</sup>,40.84%)的转移。2000—2010 年,未利用地面积减少了 305.32 km<sup>2</sup>,减幅达 84.48%,绝大多数流向水域(303.67 km<sup>2</sup>,98.32%),常发生于陆地与水域之间的过渡地带,其原因是在 1998 年特大洪水发生后,中央政府开始在长江中下游实施“平垸行洪,退田还湖、移民建镇”工程(总称“退田环湖”工程),从而对鄱阳湖水系周边大量的未利用地(包含荒草地、滩涂、沼泽地等)和耕地采取“双退”或“单退”方式。2010—2020 年国家愈来愈重视生态环境建设,逐步加大生态退耕,各类用地面积基本维持稳定。

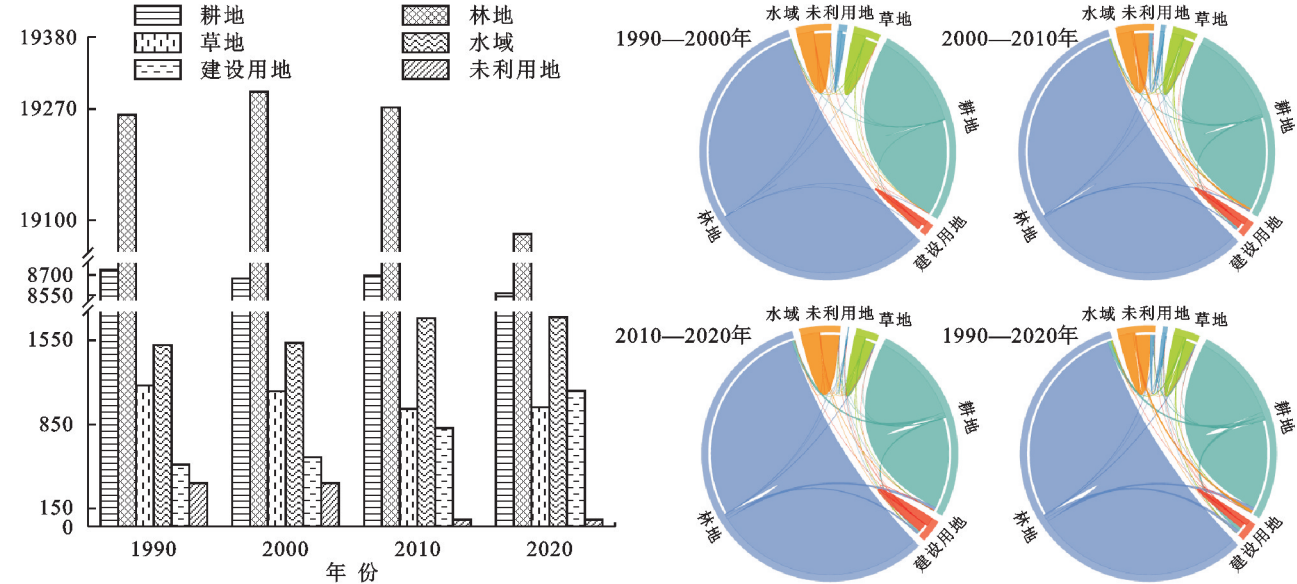


图 2 1990—2020 年赣东北各类用地面积及转换弦图

Fig. 2 Land area and conversion chord diagram of northeast Jiangxi from 1990 to 2020

3.1.2 土地利用景观格局变化 利用 Fragstats 4.2 软件批量处理得到赣东北 1990—2020 年对应的 ENN,IJI,SPLIT 以及 SHDI 等共 4 个景观指数值。

(1) 景观水平上的景观格局变化。由图 3 可知,1990—2020 年,赣东北 ENN 呈现先增后减的趋势,增长率为 8.09%,表明同类景观斑块间间隔不断加大,后期得到一定的控制;IJI 总体呈波动增长态势,增长率为 1.60%,表明各斑块间的比邻概率总体上增长,同类斑块的紧密性下降,各类景观分散程度加深;SPLIT 呈先增后减的趋势,总体增长率为 27.10%,表明前期景观斑块之间的分离程度加大,景观破碎成更小的斑块,而后期分离程度小幅降低;SHDI 呈先增后减再增长的趋势,降幅为 0.05%,总体数值基本维持稳定,表明景观异质性呈波动变化,土地利用丰富度及景观破碎程度存在小幅降低。由此可知,前期城市规模扩张,林地、耕地、草地等生态用地减少,导致景观离散程度加大,景观趋于复杂化,而后期因当

地生态环境保护及生态退耕等政策的推行,景观破碎程度得到有效控制,优势斑块类型逐渐凸显,各类景观类型呈不均衡分布。

(2) 类型水平上的景观格局变化。由表 4 可知,1990—2020 年,除林地和建设用地外,赣东北各类景观的 ENN 保持增长趋势,且未利用地的 ENN 呈现大幅增长,增幅达 109.01%,表明未利用地的景观斑块间隔明显变大,景观呈现分散化;除水域的 IJI 略有下降外,研究期间各类景观的 IJI 呈现稳步上升的趋势,表明各类景观分散程度加深,景观形状趋于复杂;1990—2020 年,未利用地的 SPLIT 呈现大幅增长,增幅达 3 071.15%,表明未利用地离散程度大幅提升,而建设用地的 SPLIT 降幅达 94.89%,表明建设用地斑块聚集程度加深,使得研究区抵御生态风险的能力降低,同时水域的 SPLIT 也存在较大降幅,降幅为 55.93%,表明水域斑块聚集程度提升,有助于增强区域生态服务功能。

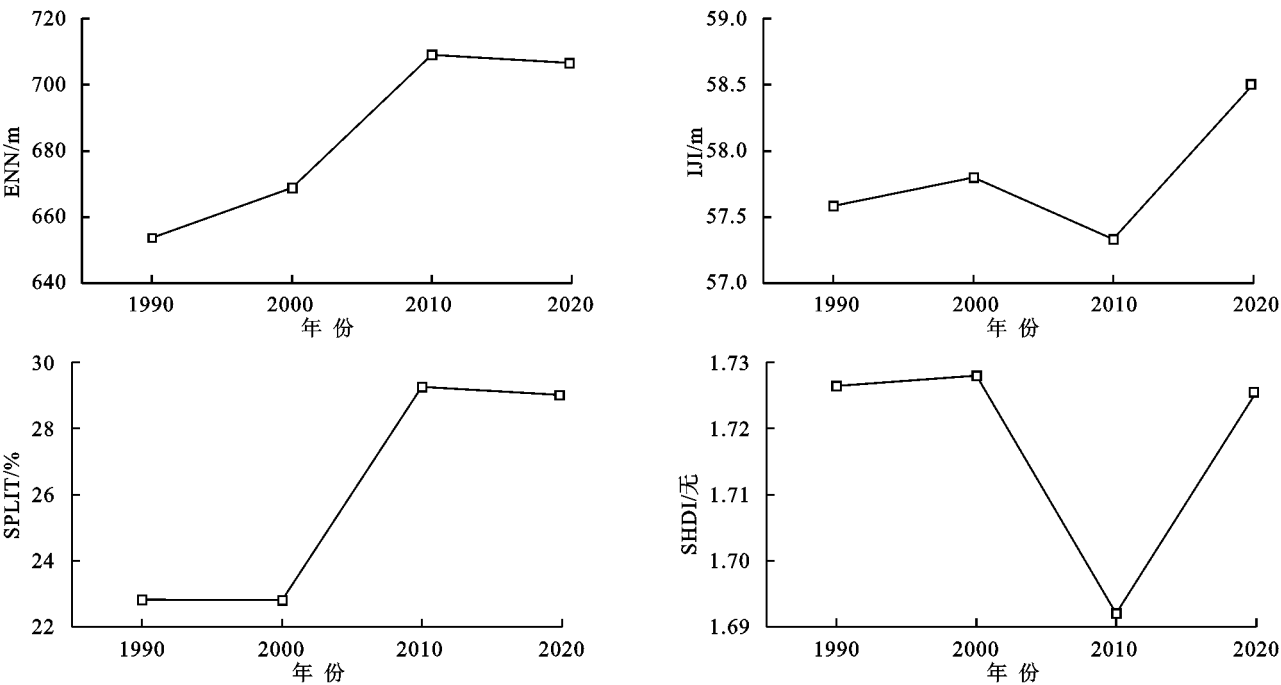


图 3 赣东北景观水平上的指数变化

Fig. 3 Changes in landscape indices in northeast Jiangxi

表 4 1990—2020 年赣东北各土地使用覆盖类型景观指数变化

Table 4 Changes in landscape indices of each land use type in northeast Jiangxi from 1990 to 2020

土地利用 类型	1990 年			2000 年			2010 年			2020 年		
	ENN	IJI	SPLIT	ENN	IJI	SPLIT	ENN	IJI	SPLIT	ENN	IJI	SPLIT
耕地	252.64	51.11	245.61	256.62	51.40	249.01	277.11	51.29	296.33	282.82	52.25	294.58
林地	195.82	35.44	8.23	194.39	34.88	8.12	190.28	36.00	10.57	186.97	38.78	10.67
草地	887.10	60.09	232934.67	889.45	60.97	236931.13	940.96	60.62	310333.94	901.96	61.96	321894.43
水域	922.83	78.78	1320.74	933.03	78.73	1272.07	1053.12	67.92	573.19	1061.81	69.32	582.08
建设用地	604.28	47.75	2012699.63	600.62	48.95	1026957.11	586.60	52.44	236088.59	570.88	56.57	102807.89
未利用地	1293.95	28.33	70747.71	1872.91	28.03	70746.55	2806.33	53.71	2248071.16	2704.45	54.10	2243515.23

3.2 生态系统服务价值时空变化分析

3.2.1 生态系统服务价值数量变化 赣东北 ESV 由 1990 年的 1 186.44 亿元增至 2020 年的 1 214.50 亿元,总体提高了 27.07 亿元,增幅为 2.73%,呈先增后减趋势(表 5)。从 ESV 总量的组成来看,林地贡献的 ESV 最大,贡献度占比超 59%,其次是水域和耕地。就 ESV 的变化量而言,其变化总量达 84.12 亿元,水域和建设用地的 ESV 变化量分别是 56.09 亿元和 14.18 亿元,即水域和建设用地是赣东北 ESV 变化的主要贡献因子。

从单项 ESV 来看(表 6),生态系统调节服务功能价值最大,占比超 73%,其次是支持服务功能,占比达 17%,其中前者较大部分来自水文调节和气候调节,后者主要来自土壤保持和生物多样性。1990—2020 年,水文调节、生物多样性以及美学景观的 ESV 与总 ESV 的变化趋势保持一致,其他单项功能价值持续减少,尤其水资源供给的 ESV 下降显著,原因主要是城市建设规模的扩大和人口的聚集,造成城市居民生活用水与工商业用水急剧增加。1990—2020 年水文调节

的 ESV 明显上升,是赣东北 ESV 增长的直接原因。

3.2.2 生态系统服务价值时空变化 基于 Kriging 空间插值对单个网格的 ESV 进行分析,得到 1990—2020 年 4 期 ESV 空间分布情况(图 4)。从时间尺度来看,1990—2010 年 ESV 高值区和低值区的面积变化均以 2000 年为界,呈现先增后减的趋势,且高值区的面积增长较后者更为明显,表明该时期生态服务功能总体向好,而 2010—2020 年前者的面积趋于稳定,后者略有增长,造成整体的生态服务功能下降。从空间尺度来看,研究期间鄱阳湖主体及其水系(信江、饶河)主干道和大型湖泊水库(枫泽湖、三清湖、军民水库等)的 ESV 远高于其他地区,其原因是水域生态系统提供的 ESV 最大;研究区东北部和南部为山地丘陵地带,地类以林地为主,其对 ESV 的贡献偏高;ESV 低值区主要分布于鄱阳湖主体及其水系沿岸,主要是该区域地势平坦、土壤肥沃、水源充足等原因,促使地类分布以耕地为主导,其次是建设用地,而耕地贡献的 ESV 偏低,建设用地提供的 ESV 为负值,从而造成该区域 ESV 偏低或低的成因。

表 5 1990—2020 年赣东北生态系统服务价值变化

Table 5 ESV changes in northeast Jiangxi from 1990 to 2020

土地利用 类型	ESV/亿元				变化幅度/%			
	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2020 年	1990—2020 年
耕地	66.82	66.32	66.50	65.47	−0.76	0.27	−1.54	−2.03
林地	730.72	732.06	731.18	723.81	0.18	−0.12	−1.01	−0.95
草地	35.25	33.81	29.41	29.79	−4.10	−13.01	1.30	−15.49
水域	365.40	369.89	420.13	421.49	1.23	13.58	0.33	15.35
建设用地	−11.91	−13.31	−18.97	−26.09	11.81	42.49	37.51	119.08
未利用地	0.14	0.14	0.02	0.02	−0.05	−84.52	0.27	−84.48
合计	1186.44	1188.90	1228.26	1214.50	0.21	3.31	−1.12	2.37

表 6 1990—2020 年赣东北单项生态系统服务价值变化

Table 6 Individual ESV changes in northeast Jiangxi from 1990 to 2020

年份	供给服务			调节服务				支持功能			文化服务
	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
1990	30.97	27.41	6.48	89.21	235.68	80.98	467.87	101.84	9.74	93.18	43.08
2000	30.85	27.38	6.06	88.82	235.71	80.86	471.31	101.79	9.73	93.27	43.13
2010	31.13	27.33	5.70	87.49	235.23	81.41	511.22	101.54	9.71	93.86	43.63
2020	30.77	27.06	1.57	85.16	233.10	79.39	510.63	100.61	9.61	93.30	43.31

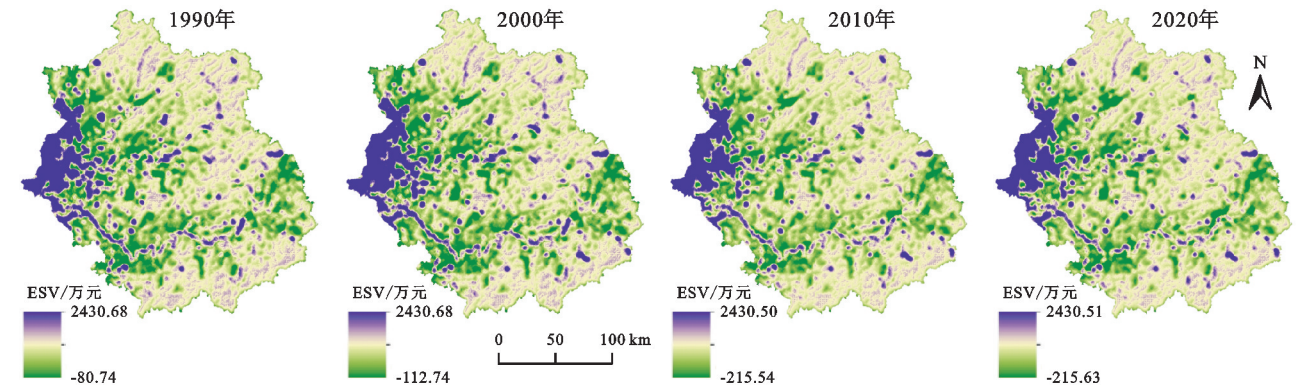


图 4 1990—2020 年赣东北生态系统服务价值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ESV in northeast Jiangxi from 1990 to 2020

考虑到 ESV 对面积的依赖性强,本文以赣东北各县(市、区)为统计单元分析各年地均生态系统服务价值(AESV)(图 5)。AESV 高值区集中于研究区西部,即鄱阳县和余干县;低值区位于珠山区(景德镇市中心城区)和月湖区(鹰潭市中心城区),且珠山区是唯一的负增长区域。该分布特征形成的重要原因是高低值区水域面积比例相差较大,高值区位于鄱阳湖主体所在地,水域面积占比超过 17%,而低值区占比低于 5%,同时低值区地类以建设用地为主,2020 年珠山区和月湖区占比分别为 92.96%和 38.85%,而高值区占比低于 3.5%,极大地拉大了高低值区的差距。AESV 偏高值区主要集中于研究区北部、东北部以及东南部,原因是区域地形以低山丘陵为主,森林覆盖率达 76%以上。1990—2020 年,AESV 增值区数量少,增值显著区(变化量 $>4\,000$  元/ $\text{hm}^2$ )集中于 AESV 高值区,主要原因是“退田还湖”工程实施,促进水域面积增长;减值区占较大比例,减值显著区(变化量 $<-4\,000$  元/ $\text{hm}^2$ )集中于昌江区、月湖区和余

江区,其他损失值较为适中( $-2\,000$  元/ $\text{hm}^2<$ 变化量 $<0$ ),表明城市扩张导致生态基质较好的用地(林地、耕地以及草地)被侵占,也体现出城市发展由中心城区“存量发掘”阶段向外围城市“增量发展”阶段过渡,使得外围城市的建设用地迅速增长。

3.3 生态系统服务价值对土地利用变化的响应

本研究利用弹性指数探究土地利用变化对 ESV 的影响(图 6),结果发现其影响显著<sup>[10,28]</sup>。从整体来看,1990—2020 年赣东北地类变化面积达  $1\,689.34\text{ km}^2$ ,转变率为 5.35%,高弹性指数(弹性指数 $>5$ )主要分布于鄱阳湖及其水系(饶河、信江)沿岸和各县(市、区)中心繁华地段周边,前者是因退耕还湖、移民建镇工作取得了显著成效,水域面积增长,使得 ESV 明显增长,后者受各县(市、区)中心地带辐射性影响,经济活动由城市中心蔓延到城际边缘地段,使得生态用地向建设用地转移,造成 ESV 急剧变化;较高弹性指数( $3<$ 弹性指数 $\leq 5$ )主要集中于城市交界处,主要是由于环鄱阳湖经济圈和赣东北开放合作战略的实



施,城市之间的联系日益紧密,而城市交界处作为往来最直接的地段,生态用地易被占用,造成生态服务功能衰退<sup>[10]</sup>。从局部来看,高、较高弹性指数主要集中于研究区中西部,具体集中于鄱阳县、余干县、万年县、乐平市、月湖区以及余江区,该集聚区域隶属于环鄱阳湖城市群,是打造中部崛起重要的增长极和引领江西经济发展的排头兵,其城市化进程增速明显,土地利用强度与生态环境的矛盾日渐凸显,生态服务功能退化日益显著。

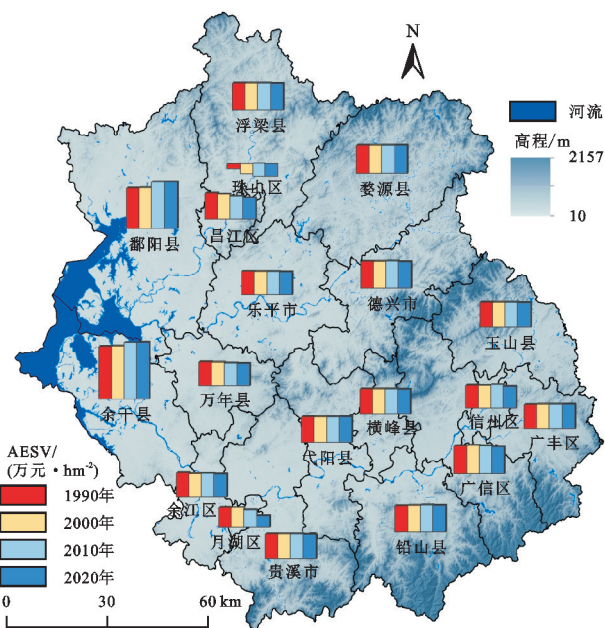


图5 1990—2020年赣东北各县(市、区)AESV空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of county-level AESV in northeast Jiangxi from 1990 to 2020

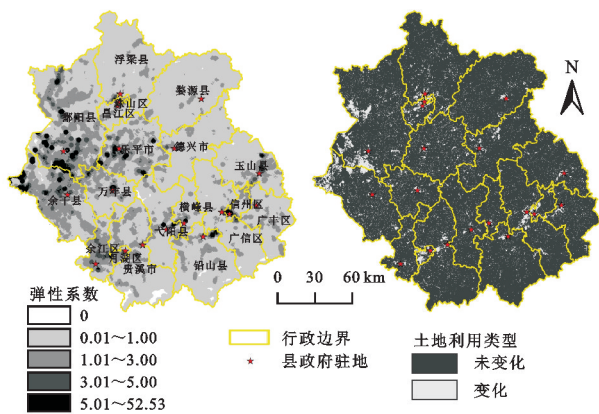


图6 1990—2020年赣东北弹性指数空间分布以及土地利用变化

Fig. 6 Spatial distribution of the elasticity coefficient (EC) and land use change in northeast Jiangxi from 1990 to 2020

### 3.4 生态系统服务价值对景观格局指数的响应

利用赣东北1990—2020年各县(市、区)ENN, IJI, SPLIT以及SHDI等4种景观指数值为解释变量,以各年县(市、区)AESV为被解释变量,分别进行

最小二乘法回归(OLSR)、GWR以及GTWR回归模拟,拟合结果为:OLSR, GWR以及GTWR模型 $R^2$ 分别为0.70, 0.95, 0.98, AICc值分别为1 591.10, 1 522.02, 1 489.34。对比3种模型的 $R^2$ 与AICc值, GTWR模型 $R^2$ 最高,而AICc值最低,表明运用GTWR模型拟合优度高于其他两种模型,且更能有效地解释4种景观指数对ESV的影响力度及其时空异质性特征。为统一景观指数对ESV的影响,将4个年份的回归结果按升序排列,以等间距将影响力划分为弱正、中正、强正、弱负、中负以及强负向6个等级,正向代表该景观指数对区域ESV起正向促进作用,负向代表则起负向抑制作用<sup>[19]</sup>,最终得到赣东北景观指数影响等级分布图(图7)。

ENN对ESV的影响力度各年存在较大差异,1990—2000年呈正向作用的县(市、区)逐渐变多,而2010—2020年呈正向作用的县(市、区)不仅有所回落并以较快速度向负向作用转变,表明随着区域ENN的增长,同类景观斑块离散程度增加,给该区域县(市、区)ESV带来的负向抑制作用。从空间分布上看,1990年ENN对ESV的弱正向影响力主要集中于研究区北部和西南部,2000年弱正向影响的县(市、区)在空间趋于扩散,而负向影响的县(市、区)跌至4个,具体是万年县、余干县、弋阳县和横峰县;2010—2020年呈负向作用的县(市、区)不断扩张且变为赣东北主导影响力,强、中负向影响的县(市、区)主要集中于研究区西北部,具体是鄱阳县、浮梁县、昌江区和珠山区,表明随着同类景观斑块间隔变得越大,相应的ESV下降越显著。

IJI对ESV的影响按其强度可分为弱正、弱负、中负以及强负向影响4个等级,且总体以负向影响为主。1990—2020年呈负向作用的县(市、区)未发生变化,且强度有所增强,而呈正向作用的县(市、区)及其强度各年均未变化。从空间分布上看,1990—2020年IJI对ESV的影响有逐渐向差的趋势,且在研究区西北部尤为凸显,如鄱阳县、余干县、乐平县、昌江区、珠山区和浮梁县等地,表明随着该县(市、区)IJI逐渐变大,景观紧密性下降,形状趋于复杂,相应的ESV下降的趋势愈发明显,而IJI在研究区东南部多年持续呈弱正向影响,表明该区域各年IJI对ESV的影响保持相对稳定且呈正向促进作用。

SPLIT对ESV的影响总体起负向抑制作用,从1990到2020年呈负向作用的数量较多,4个年份分别占据13, 12, 11, 11个,且多为弱负向影响,而正向影响存在小幅上升。从空间分布上看,1990年正向影响聚集于研究区偏西部,强正向影响分布于余干县和余江县,其余大部分呈弱负向影响,2000—2020年研究区北部由正向影响逐渐转变为弱负向影响,表明



随着该区域斑块间细化程度加大,景观破碎化趋于严重,生态系统稳定性变差;弱正向影响的县(市、区)存在由研究区西南部向南部扩张的趋势,表明该区域景观斑块分离度提高,可使优势斑块间形成良好的连接性,能促进生态系统服务功能的提高。

SHDI 对 ESV 的影响按其强度可分为弱负、弱正、中正以及强正向影响 4 个等级,且总体起正向促进作用。1990—2020 年呈正向作用的县(市、区)维持在 12 个,且强度明显增强,而呈负向作用的县(市、

区)均维持在弱负向影响等级。从空间分布上看,1990—2020 年呈弱负向作用的县(市、区)稳定分布于研究区东南部,表明随着 SHDI 的增长,区域景观类型趋于丰富,景观呈均衡化分布,优势斑块连续性和稳定性降低,造成其生态系统服务功能下降;强正向影响县(市、区)前期数量少,后期逐渐增多且主要聚集于研究区西南部,其原因是在人为保护下,景观类型丰富度和复杂性得到提升,且所增加的景观类型总体上有助于地区 ESV 的提升。

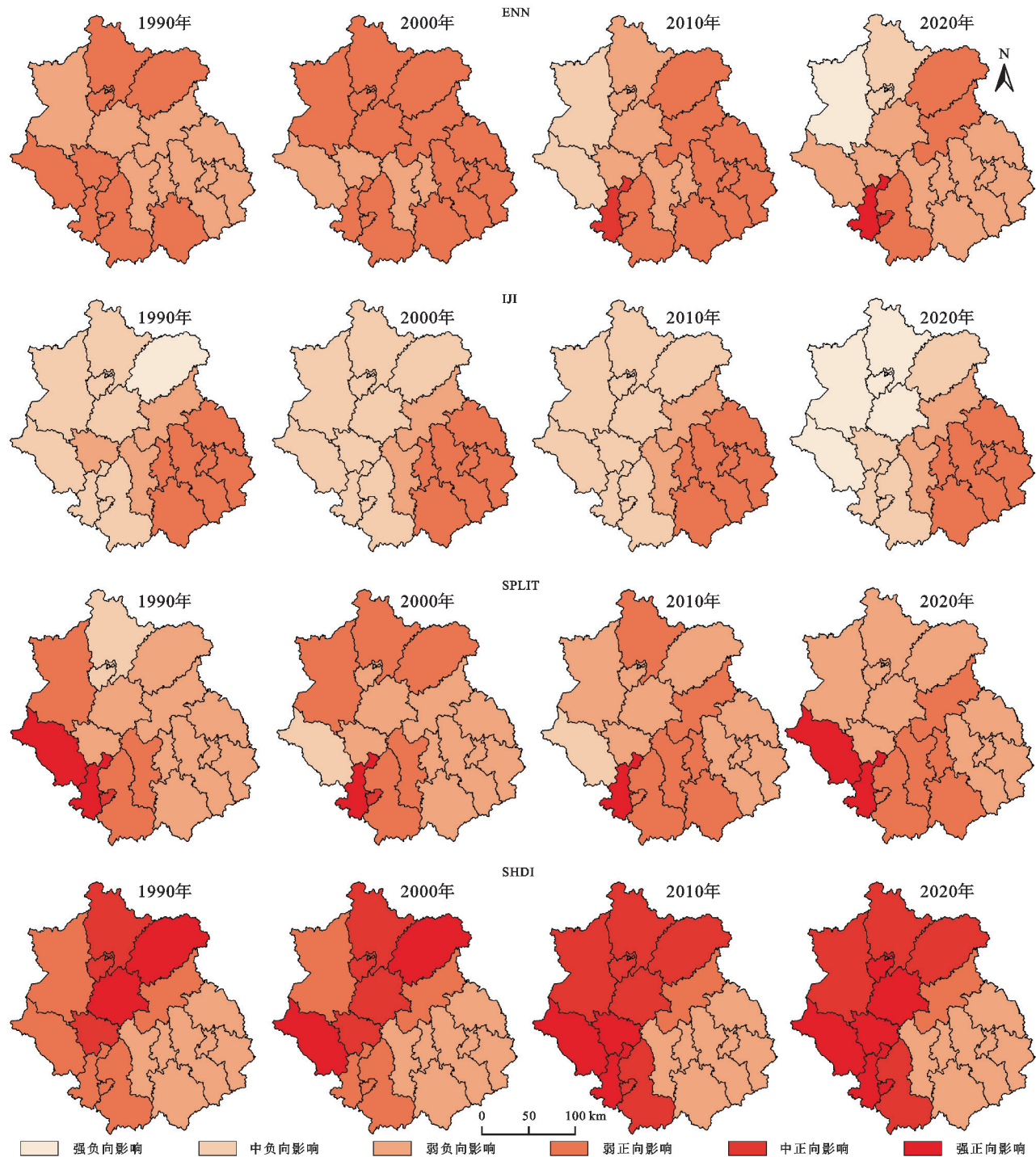


图 7 1990—2020 年赣东北景观指数影响等级的空间分布

Fig. 7 Spatial impacts of landscape indices in northeast Jiangxi from 1990 to 2020

## 4 结论

(1) 赣东北主要用地类型为林地和耕地,两者占比超 87%,研究期间除水域和建设用地面积增加外,其他用地均减少,降幅最大为未利用地,其中 98.32% 流向水域,而增量最大为建设用地,主要来自耕地和林地;以 2010 年为界,前期受城市扩张和“退田环湖”工程的影响,景观破碎化加剧,使得景观多样性和均匀化,而后期因遏制建设用地无序扩张和注重生态环境保护,景观离散程度下降,优势斑块连接性上升,景观破碎化得到控制。

(2) 赣东北 ESV 总量整体呈上升趋势,其中林地和水域是其主要贡献者,占比分别超过 59% 和 30%;就单项生态系统功能而言,调节服务的贡献最大,占比超 73%;各县(市、区)用地结构差异和变动是形成 AESV 空间分布差异显著的主要原因,而 AESV 变化幅度主要受水域、林地和建设用地的影响。

(3) 赣东北 ESV 对土地利用变化的响应显著区域主要集中于鄱阳湖及其水系沿岸和各县(市、区)中心地带周边,响应较显著区域主要集中于城市交界处,该显著变化的内因与生态用地变化量息息相关,若生态用地遭到挤压,则 ESV 显著下降,反之则上升。

(4) 1990—2020 年赣东北景观格局指数对 ESV 的影响存在明显的时空差异性。IJI 和 SPLIT 对赣东北各县(市、区)ESV 呈负向抑制作用为主,ENN 对 ESV 的影响由负向影响向正向影响转变,而 SHDI 对 ESV 的影响总体呈正向促进作用且强度明显增强。

### 参考文献(References):

- [1] 赵文武,刘月,冯强,等.人地系统耦合框架下的生态系统服务[J].地理科学进展,2018,37(1):139-151.  
Zhao W W, Liu Y, Feng Q, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems[J]. Progress in Geography, 2018,37(1):139-151.
- [2] 魏慧,赵文武,张骁,等.基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价:以山东省德州市为例[J].生态学报,2017,37(11):3830-3839.  
Wei H, Zhao W W, Zhang X, et al. Regional ecosystem service value evaluation based on land use changes: A case study in Dezhou, Shandong Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(11):3830-3839.
- [3] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital[J]. Nature, 1997,387:253-260.
- [4] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):607-613.  
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999,19(5):607-613.
- [5] 何浩,潘耀忠,朱文泉,等.中国陆地生态系统服务价值测量[J].应用生态学报,2005,16(6):1122-1127.  
He H, Pan Y Z, Zhu W Q, et al. Measurement of terrestrial ecosystem service value in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005,16(6):1122-1127.
- [6] 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.  
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on Per Unit Area[J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(8):1243-1254.
- [7] 魏强,席增雷,苏寒云,等.曹妃甸滨海湿地生态系统支持服务价值空间分异研究[J].地理科学,2021,41(5):890-899.  
Wei Q, Xi Z L, Su H Y, et al. Spatial differentiation of supporting service value of coastal wetland ecosystem in the Caofeidian District of Tangshan in Hebei Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021,41(5):890-899.
- [8] 许丁雪,吴芳,何立环,等.土地利用变化对生态系统服务的影响:以张家口—承德地区为例[J].生态学报,2019,39(20):7493-7501.  
Xu D X, Wu F, He L H, Liu H J, Jiang Y. Impact of land use change on ecosystem services: Case study of the Zhangjiakou-Chengde area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20):7493-7501.
- [9] 张建,雷刚,漆良华,等.2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J].生态学报,2021,41(4):1280-1290.  
Zhang J, Lei G, Qi L H, et al. The landscape pattern and ecological service value in Danjiangkou City under land use change from 2003 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(4):1280-1290.
- [10] 刘志涛,王少剑,方创琳.粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制[J].地理学报,2021,76(11):2797-2813.  
Liu Z T, Wang S J, Fang C L. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(11):2797-2813.
- [11] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.  
Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resource Science, 2015,37(9):1740-1746.
- [12] 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.

- Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003,18(2):189-196.
- [13] 李坦,陈天宇,惠宝航.基于 Meta 分析的黄山市森林生态系统服务价值研究[J].*地理科学*, 2022, 42(12): 2179-2188.
- Li T, Chen T Y, Hui B H. Economic value of forest ecosystem services in Huangshan City based on Meta-analysis[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(12): 2179-2188.
- [14] 赵苗苗,赵海凤,李仁强,等.青海省 1998—2012 年草地生态系统服务功能价值评估[J].*自然资源学报*, 2017,32(3):418-433.
- Zhao M M, Zhao H F, Li R Q, et al. Assessment on grassland ecosystem services in Qinghai Province during 1998—2012 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017,32(3):418-433.
- [15] 罗海平,宋焱,彭津琳.基于 Costanza 模型的我国粮食主产区生态服务价值评估研究[J].*长江流域资源与环境*, 2017,26(4):585-590.
- Luo H P, Song Y, Peng J L. Evaluation on ESV of major grain-producing areas in China:the emperical research based on Costanza model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017,26(4):585-590.
- [16] 鲁亚楠,姚顺波,邓元杰,等.陕北地区土地利用及景观格局变化对生态服务价值的影响:基于退耕还林(草)背景[J].*中国农业资源与区划*, 2019,40(11):180-192.
- Lu Y N, Yao S B, Deng Y J, et al. The effect of land use and landscape pattern change on ESV under the background of the sloping land conversion program in northern Shaanxi[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019,40(11):180-192.
- [17] 钟小龙.洞庭湖区景观格局与土地生态系统服务价值变化的关联性研究[D].长沙:湖南师范大学,2019.
- Zhong X L. Study on the correlation between the landscape pattern of Dongting Lake Area and the change of land ecosystem service value [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019.
- [18] 李慧杰,牛香,王兵,等.生态系统服务功能与景观格局耦合协调度研究:以武陵山区退耕还林工程为例[J].*生态学报*, 2020,40(13):4316-4326.
- Li H J, Niu X, Wang B, et al. Coupled coordination of ecosystem services and landscape patterns: Take the grain for green project in Wuling mountain area as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4316-4326.
- [19] 王海军,张彬,刘耀林,等.基于重心—GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析[J].*地理学报*, 2018,73(6):1076-1092.
- Wang H J, Zhang B, Liu Y L, et al. Multi-dimensional analysis of urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(6):1076-1092.
- [20] 张伯春.近代赣东北商贸路线转移与社会经济发展及其影响[D].广西桂林:广西师范大学,2014.
- Zhang B C. Modern trade route in northeastern Jiangxi tranfer and socio-economic development and their impact[D]. Guilin, Guangxi: Guangxi Normal University, 2014.
- [21] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].*地理学报*, 2003,58(5):643-650.
- Zhu H Y, Li X B. Discussion on the Index method of regional land use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003,58(5):643-650.
- [22] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2000.
- Wu J G. Landscape ecology: patterns, processes, scales, and levels[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [23] 周忠学.城市化背景下农业景观变化对生态服务影响:以西安都市圈为例[J].*干旱区地理*, 2015,38(5):1004-1013.
- Zhou Z X. Impact of the agricultural landscape change on ecosystem services in the process of rapid urbanization region: a case study of Xi'an metropolitan zone[J]. *Arid Land Geography*, 2015,38(5):1004-1013.
- [24] 陈希,王克林,祁向坤,等.湘江流域景观格局变化及生态服务价值响应[J].*经济地理*, 2016,36(5):175-181.
- Chen X, Wang L, Qi X K, et al. Landscape pattern changes and evaluation of ecological service value of the Xiangjiang river watershed[J]. *Economic Geography*, 2016,36(5):175-181.
- [25] 邓舒洪.区域土地利用变化与生态系统服务价值动态变化研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- Deng S H. Dynamic effects on ecosystem services value with regional land use changes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [26] Yuan S F, Zhu C M, Yang L X, et al. Responses of ecosystem services to urbanization-induced land use changes in ecologically sensitive suburban areas in Hangzhou, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019,16(7):4-14.
- [27] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(3):383-401.
- [28] 刘永强,廖柳文,龙花楼,等.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J].*地理研究*, 2015, 34(4):691-700.
- Liu Y Q, Liao L W, Long H L, et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: A case study of Hunan province[J]. *Geographical Research*, 2015,34(4):691-700.