

# 长江流域中部地区生态系统服务价值评估与综合驱动力分析

曾晨<sup>1,2</sup>, 李扬镡<sup>1</sup>, 段雪雯<sup>1</sup>, 徐宇琪<sup>1</sup>

(1.华中农业大学 公共管理/土地管理学院, 武汉 430070; 2.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**为了探索人类发展系统和自然生态系统的耦合,分析生态系统服务价值的综合驱动力,基于 2010 年、2017 年两期 Landsat TM/ETM 遥感土地利用解译数据,运用基于植被净初级生产力的系数修正当量因子,计算和比较不同区域的生态系统服务价值,采用空间回归方法从景观类型、宏观经济和社会发展水平方面对其综合驱动力进行了阐释。结果表明:(1) 生态系统服务价值整体有所提高,但是湖北省、湖南省和江西省各自变化的幅度有所不同。(2) 各类用地中生态系统服务价值最大的是水域和林地,其次为耕地和草地,都呈增加趋势;未利用地生态系统服务价值最小,且呈减少趋势。(3) 在县域尺度上,生态系统服务价值呈现显著的空间自相关现象,斑块密度、第三产业增加值占比、城镇居民人均可支配收入显著负向影响区域的生态系统服务价值,其中城镇居民人均可支配收入的负向影响最大。由此可以得出,通过避免高密度、细碎化的开发与建设并保护重要的生态功能区,可以提高生态系统服务价值,促进长江经济带的生态文明建设。

**关键词:**生态系统服务价值; 当量因子法; 土地利用; 空间回归模型; 长江流域中部地区

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)02-0362-10

## Assessment and Driving Force Analysis of Ecosystem Service Value in the Urban Agglomeration Along the Middle Reaches of the Yangtze River

ZENG Chen<sup>1,2</sup>, Li Yangbiao<sup>1</sup>, DUAN Xuewen<sup>1</sup>, XU Yuqi<sup>1</sup>

(1.College of Public Administration/Land Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The purpose is to explore the coupling of human development system and natural ecosystem, and to analyze the comprehensive driving force of ecosystem service value. The study makes the assessment and comparison of the ecosystem service values, and explores the influencing factors. Using the two phases of land use data interpreted from Landsat TM/ETM high-resolution satellite images in 2010 and 2017, this study applies coefficient correction equivalent factor method based on NPP to calculate the local ecosystem service value. The results show that: (1) the ecosystem service value showed an increasing trend, with Hubei, Hunan and Jiangxi presenting different magnitudes; (2) among all types of land, the ecosystem service values of water and woodland were the greatest, followed by cultivated land and grassland, which have an increasing trend; the ecosystem service value of unused land was the smallest, which had decreased; (3) the ecosystem service value at the county level showed significant spatial autocorrelation; it was affected by patch density, the proportion of the added value of the tertiary industry, and the per capita disposable income of urban residents; the impact of the three on ecosystem services was negative, of which per capita disposable income of urban residents had the greatest negative impact. By avoiding high-density and fragmented development, and protecting important ecological function areas, the value of ecosystem services can be improved, and the construction of ecological civilization in the Yangtze River Economic Zone can be promoted.

**Keywords:** ecosystem service value; equivalent factor method; land use; spatial regression; relevant area along the middle reaches of the Yangtze River

生态系统服务是支撑人类生产和生活的生态系统产品和生态系统功能的总和,是土地利用结构和布局变化所产生的生态效益的重要体现,是国土空间生态修复的重要依据,并且生态系统服务价值的提升也是生态文明建设的重要目标。生态系统服务(ecosystem services)的内涵是在 Ehrlich 等<sup>[1]</sup>提出的“生态系统功能”、“环境服务”、“全球环境服务”与“自然服务”等概念的基础上发展而来。国外学者 Costanza<sup>[2]</sup>将其分为包括气体调节、气候调节、干扰调节、水文调节、水供应、水土保持、土壤形成、营养循环、废物处理、授粉、生物控制、提供栖息地、食物生产、原料供给、遗传资源、娱乐、文化在内的 17 种类型。De Groot 等<sup>[3]</sup>又将其细分为 23 个小类,并将其概括为生态支持、供给功能、调节功能、信息功能 4 个大类。国内学者欧阳志云等<sup>[4]</sup>也对生态系统服务进行了分类,分为了固定太阳能、调节气候等共 9 个方面。《千年生态系统评估报告》(MA)则将其分为了供给服务、调节服务、文化服务和支持服务 4 个大类,也是当前被采用最多的分类方法。

近年来生态系统服务价值的评估、时空分异特征以及影响因子分析成为了相关学者研究的热点问题。当量因子法最早由 Costanza 等<sup>[5]</sup>提出,随后谢高地等<sup>[6]</sup>将当量因子法进行了本土化修改,改善了 Costanza 生态系统服务价值评估方法中对耕地低估的弊端,成为了国内评估生态系统服务价值的主流方法。随着社会经济的快速发展,当量因子的动态修正成为了准确评估生态系统服务价值的重要环节。目前系数修正的方法包括专家打分法、NPP 时空调节、降水时空调节、社会发展系数修正等。彭丽云等<sup>[7]</sup>选取了 NPP、降水、土壤保持 3 个调节因子,在时间和空间上对当量表系数进行了修正,计算出兰州市 2007—2016 年耕地生态系统服务价值。荔琢等<sup>[8]</sup>通过修正生态系统服务价值当量因子,计算湿地价值的内外贡献率,来测度湿地功能价值。胡其玉等<sup>[9]</sup>则以降水量修正当量因子系数。龚溪等<sup>[10]</sup>利用多种生态经济学方法对武夷山生态系统服务价值进行评估。孟阳阳等<sup>[11]</sup>结合主要粮食与作物的平均利润等社会发展水平修正当量因子系数。在生态系统服务价值的时空分异特征方面。耿甜伟等<sup>[12]</sup>利用地理探测器识别生态系统服务价值变化的主导因子,最后基于 GWR 模型分析各主导因子的空间异质性特征。陈万旭等<sup>[13]</sup>利用土地利用/覆被变化数据以及生态系统服务价值测度模型,对长江中游地区县域生态系统服务价值时空分异特征进行测度,并构建土地利用生态系统服务价值贡献度和生态系统服务价值敏感性测度方法。在生态系统服务价值与国土空间规划的

联系方面,戴文远等<sup>[14]</sup>通过福州新区 2000 年、2009 年、2015 年 3 期遥感数据和“三生”土地利用主导功能分类体系,定量分析了福州新区土地利用功能转型特征及生态系统服务价值。Yang 等<sup>[15]</sup>则以生态保护红线和气象数据为基础,进行了生态系统服务价值的评估修正。在生态系统服务价值的影响因子方面,韩蕊等<sup>[16]</sup>采取当量因子法,以川东地区生态服务价值为研究对象,生态系统服务价值时空差异主要驱动因素为农业人口数、人口密度、工业总产值和国内旅游收入。在社会经济发展的影响因子方面,总人口、农业人口、旅游总人数、人均 GDP、第一、二、三产业比重、固定资产投资、城市化率、居民人均可支配收入、万元 GDP 能耗等通过实证研究发现对生态系统服务价值的变化产生显著影响<sup>[17-18]</sup>。另外,土地利用不仅直接决定了生态系统的主导功能的价值体现<sup>[19]</sup>,不同用地空间形成的景观格局与生态系统服务价值的关系也在实证中得到了一定的验证<sup>[20]</sup>。

随着新型城镇化的推进和社会经济的快速发展,生态系统服务的区域性和动态性特征日趋明显,探索生态系统服务价值的影响因素也逐渐成为解决人类社会经济系统和自然生态系统耦合发展的关键问题。但是目前针对区域特征的生态系统服务价值动态修正方法尚未完全建立,国土空间利用与生态系统服务价值的“本土化”关系亦亟待系统测度、比较和分析。同时,生态系统服务的影响因素包括“内因”和“外因”两个方面,过去的研究主要集中在社会经济发展等“外因”的影响机理方面,在反映生态系统与用地空间的动态演化的“内因”方面的研究则相对不足,同时对空间互动的识别和影响尚未深入分析。事实上,景观格局是生态过程发生的载体,承载着土壤、生物、大气中的能量流动与转化,探索景观生态的表征因子对生态系统服务价值的影响有利于挖掘生态系统服务变化的综合驱动机制及其与国土空间利用的内在联系。因此,本研究以长江流域中部地区为例,通过因子修正法计算和比较不同区域的生态系统服务价值,并结合景观生态学指标,采用空间回归方法对其影响因子进行分析。

## 1 研究区概况和数据来源

长江流域中部地区(东经 110°29′—118°28′,北纬 25°58′—31°51′)地处我国长江流域中段,总面积约  $3.17 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,拥有多个重要生态功能区,高程 142~3 090 m,地跨“鄂湘赣”三省,是长江经济带生态环境保护和绿色发展战略的重要区域。《长江中游城市群发展规划》由国务院于 2015 年 4 月批复,位于长江流域,是重要的交通枢纽地,是中部崛起战略

的重点区域,亦是深化改革、推动新型城镇化的重要区域。本研究选取长江流域中部地区湖北省的武汉、黄石、黄冈、孝感、荆门、荆州、天门、潜江、仙桃、鄂州、咸宁 11 个市(61 个县、区),湖南省的长沙、湘潭、岳阳、株洲、衡阳、益阳、娄底、常德 8 个市(64 个县、区),江西省的南昌、九江、宜春、新余、吉安、萍乡、景德镇、上饶、抚州、鹰潭 10 个市(82 个县、区)作为研究区,属亚热带季风性气候,年平均降水量在 8 000~1 943 mm,以平原为主,土壤肥沃,区域内湖泊聚集,水系众多。

研究数据主要包括长江流域中部地区 2010 年、2017 年 2 期 Landsat TM/ETM 高分辨率遥感影像土地利用解译数据,土地利用分类基于《土地利用现状分类标准》(GB/T21010—2017)划分一级地类,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用,二级地类以当量表为准(当量表中不涉及建设用地);以及长江流域中部地区 207 个县域单元社会经济数据和景观格局指数。这些数据包括湖北省 11 个市(61 个县、区),湖南省 8 个市(64 个县、区),江西省 10 个市(82 个县、区)的固定资产投资、社会消费品零售总额、总产值、第二产业增加值占比、第三产业增加值占比、城镇居民人均可支配收入、常住人口等社会经济数据。此外,景观格局指数由 FRAGSTATS 工具软件在土地利用数据的基础上计算分析得到,具体包括斑块密度(PD)、蔓延度指数(CONTAG)、香农多样性指数(SHDI)、斑块聚合度(AI)4 类(表 2)。此外还收集了 2010 年、2015 年的温度数据和降水量数据和中国植被类型数据等。

## 2 长江流域中部地区生态系统服务价值的评估和建模

### 2.1 基于 NPP 系数修正的当量因子法

本文在谢高地等<sup>[6]</sup>改进的生态系统服务价值当量表的基础上,用 Thornthwaite-Memorial 模型<sup>[21]</sup>计算研究区域各县区 NPP,进行生态系统服务价值当量的系数修正。植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)是植物在单位时间和单位面积里生产的有机干物质量,反映了植被相关生态系统对气候变化的反映。NPP 是许多生态系统功能和过程的基础,Costanza<sup>[2]</sup>将一些基于 NPP 的价值估算与基于供给、支持和文化服务的总价值估算进行比较,发现它们具有一致性。之后 Costanza 等<sup>[22]</sup>绘制了其一致性的关系图。因为 NPP 在空间和时间上相对容易用遥感进行测量,所以其成为了评估生态系统服务价值的关键因素。由于生态系统服务价值当量表是基

于土地二级利用类型,则由研究区域土地二级利用类型的比例计算出一级利用类型的价值当量。

$$NPP = 3000 [1 - e^{-0.0009659(V-20)}] \quad (1)$$

其中:

$$V = \frac{1.05R}{\sqrt{1+(1+1.05/L)^2}} \quad (2)$$

$$L = 3000 + 25t + 0.05t^3 \quad (3)$$

式中:NPP 为植被净初级生产力[t/(hm<sup>2</sup>·a)];V 为年度实际蒸散量(mm);L 为年度平均蒸散量(mm);t 为当年平均温度(°C);r 为当年降水量(mm)。

用 NPP 进行系数修正后,计算生态系统服务价值。

$$ESV = \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^m e_{pq} \times E'_a \times A_q \quad (4)$$

(i=1,2,⋯,n;j=1,2,⋯,m)

式中:ESV 为生态系统服务价值; $e_{pq}$  是第  $q$  种生态系统的第  $p$  种生态系统服务价值当量因子; $A_q$  为该生态系统的土地利用类型面积; $E'_a$  为由 NPP 而来的修正系数。研究中的生态系统分类是 4 大类,11 小类(表 1),包括供给服务、调节服务、支持服务、文化服务。

表 1 生态系统服务分类

一级分类	二级分类
供给服务	食物生产、原料生产、水资源供给
调节服务	气体调节、气候调节、净化环境、水文调节
支持服务	土壤保持、维持养分循环、生物多样性
文化服务	美学景观

### 2.2 生态系统服务价值变化的空间回归模型

影响生态服务价值的因子分为内在和外在两个方面。内在影响因子反映生态系统与用地空间的动态演化,外在影响因子体现社会经济发展对生态系统的影响机理。生态环境是社会经济发展的基础,社会经济对生态环境具有能动的作用,很大程度上促进或者阻碍着生态环境系统的发展,本文选用研究区域的常住人口表征人口因子,地区生产总值、第二产业增加值占比、第三产业增加值占比表征宏观经济因子,城镇居民人均可支配收入、固定资产投资额、社会消费品零售总额表征社会发展因子,据此研究生态系统服务的外在影响。景观格局是景观异质性的具体体现,其动态变化也受自然环境和人为因素的共同作用,其自然演变必然导致生态系统组分和功能的变化,进而影响生态系统服务价值。PD 和 SHID 描述了斑块密度及多样性程度,表征景观类型类型因子。CONTAG 和 AI 描述斑块之间的团聚程度和连通性,表征景观结构因子。本文将从景观类型因子和景观结构因子两方面探索对生态系统服务价值的内在影响。以 2010 年和 2017 年研究区域的 ESV 总量作为因变量  $y$ ,上述指标作为自变量  $x$ ,研究生态系统服务价值的影响因子(表 2)。

表 2 综合影响因子的选取

类型	影响因子	名称	含义	单位
景观格局指数 (内在影响因子)	景观类型因子	PD	斑块密度,单位面积上的斑块数,描述景观总体斑块破碎化(分化)程度	km <sup>2</sup>
		SHDI	多样性指数,表征景观类型的多样性,即其景观的丰富(复杂)程度	
	景观结构因子	CONTAG	蔓延度指数,描述的是景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势	%
		AI	聚合度指数,描述景观类型斑块间的连通性	%
社会经济数据 (外在影响因子)	人口因子	常住人口	指全年经常在家或在家居住 6 个月以上的人口,也包括流动人口在所在的城市居住	万人
	宏观经济因子	地区生产总值	本地区所常住单位在一定时期内生产活动的最终成果,等于各产业增加值之和	亿元
		第二产业增加值占比	在一定时期内,第二产业产值的增加值占该地区生产总值的百分比	
		第三产业增加值占比	在一定时期内,第三产业产值的增加值占该地区生产总值的百分比	
	社会发展因子	固定资产投资额	建造和购置固定资产的工作量以及与此有关的费用变化情况	万元
		城镇居民人均可支配收入	居民家庭全部收入能用于安排家庭日常生活的那部分收入	万元
社会消费品零售总额		单位通过交易售给个人、社会集团,非生产、非经营用的实物商品金额	万元	

将 ESV 和指标进行对数处理,通过对自变量的相关性分析,通过显著性检验进行逐步回归,剔除不显著的变量,选择最终的影响因子,构造关于生态系统服务价值的线性回归方程。但经典的计量模型无法反映空间上的关系,还需要进行空间相关性的检验和分析。

Moran's  $I$  指数是表征空间相关性的重要指数:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (5)$$

式中: $w_{ij}$ 为空间权重矩阵  $W$  中的  $(i, j)$  元; $y_i, y_j$  为位置  $i$  与  $j$  空间单元的属性值。Moran's  $I$  显著为正时,存在正向的空间自相关;Moran's  $I$  显著为负时,则存在负向的空间自相关<sup>[23]</sup>。

计算 Moran's  $I$  指数在构建空间权重矩阵的基础上,空间权重矩阵主要有邻接矩阵和距离矩阵,本文用 GeoDa 软件构造距离空间权重矩阵,其基本概念是,设定一个固定距离,以其作为阈值,小于这个阈值则将其赋值为 1,也即相邻关系,反之赋值 0,关系为不相邻:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & d_{ij} < d \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

构建好空间权重矩阵并选取相应的空间回归模型,其基本形式如下:

$$\text{ESV} = \alpha + \rho \cdot W \cdot \text{ESV} + \beta_1(x_1) + \beta_2(x_2) + \varepsilon \quad (7)$$

$$\text{ESV} = \alpha + \beta_1(x_1) + \beta_2(x_2) + \varepsilon, \quad \varepsilon = \lambda \cdot W \varepsilon + \mu \quad (8)$$

式中: $\alpha$  为常数项; $W$  为空间权重矩阵; $\beta$  为待估计的参数; $\rho$  为空间滞后项的待估计参数, $\varepsilon$  为随机误差项; $\lambda$  为空间自相关误差项的待估计参数,也被称为空间自相关系数; $\mu$  为误差项; $x_1$  为社会经济数据; $x_2$  为景观格局指数。当模型形式为空间滞后模型时,则采用模型(7)的形式;当模型形式为空间误差模型时,则采用模型(8)的形式。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统服务价值评估结果

3.1.1 生态系统服务价值时空变化 2010—2017 年长江流域中部地区生态系统服务总价值分别是 6 060.46 亿元、6 876.36 亿元(表 3)。由于植被净初级生产力提高,其修正系数从 2010 年的 1 688 增加至 2017 年的 1 870,变化率为 10.77%,这 7 a 间 ESV 总量也增加了 815.9 亿元,变化率为 13.46%。在城镇用地不断扩张和人类活动密度加大的情况下,低生态服务价值的未利用地面积减少了 24.91%,同时高生态服务价值的水域和林地面积增加了 9.01%,0.07%。但是生态系统服务价值在区域内部增长差异明显,湖北省地区增加了 275.97 亿元,变化率为 17.75%;湖南省地区增加了 157.05 亿元,变化率为 8.78%;江西省地区增加了 385.88 亿元,变化率为 14.02%。

表 3 生态系统服务价值总量的变化

地区	生态系统服务价值总量/亿元		生态系统服务价值变化率/%
	2010 年	2017 年	2010—2017 年
湖北省	1554.56	1830.53	17.75
湖南省	1754.35	1908.40	8.78
江西省	2751.55	3137.43	14.02
长江流域中部地区	6060.46	6876.36	13.46

从空间格局上看,长江流域中部地区各县域单元的生态系统服务价值分布和变化存在空间差异,从中间向两边减少,东西两端的生态系统服务价值较高。从具体县(区)来看,武汉市江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、洪山区,长沙市芙蓉区、开福区、雨花区,南昌市东湖区、西湖区、青云谱区等经济发展较好的区域生态系统服务价值呈降低趋势,而其他区域生态系统服务价值大多呈上升趋势。长江流域中部地区大部分县域单元生态服务价值变化率为 2.08%~14.09%,个别区域增长较多,如仙桃市、天门市、监利县、洪湖市、

安乡县、新洲区、黄陂县、星子县。

通过 LISA 集聚分析看出长江流域中部地区高-高集聚区和低-低集聚区较多,该区域内生态系服务价值分布具有聚集性并且高低差异明显(图 1)。高-低集聚区和低-高集聚区则表示高值与低值相互交错,空间破碎性明显。2010-2017 年变化不大,高-高

集聚区和低-低集聚区的分布呈现中间集聚,零散分布,成带状在中间盘踞的特征。高-高集聚区分别是平江县、崇阳县、通山县、临湘市、宜黄县、崇仁县、临川区,低-低集聚区分别是江汉区、汉阳区、武昌区、洪山区、东西湖区、青山区、硚口区、开福区、岳麓区、芙蓉区、珠晖区、石鼓区等地。

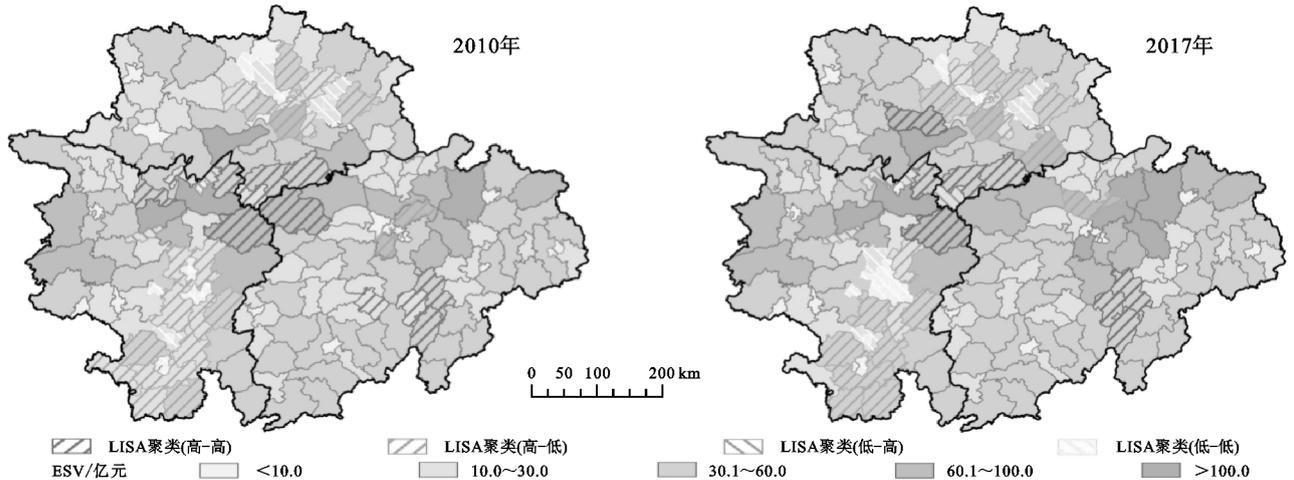


图 1 生态系统服务价值总量空间分布与 LISA 聚类

3.1.2 四大类生态系统服务价值 长江流域中部地区 3 省份不同生态系统服务功能四大类的价值变化趋势不一,其中调节服务、供给服务、文化娱乐呈上升趋势,变化率分别为 14.34%,37.77%,30.79%。供给服务和文化娱乐上升较多,支持服务呈下降趋势,变化率为-5.81%,其中湖南省地区支持服务和供给服务变化剧烈。调节服务总量最大,2010 年和 2017 年分别为 4 728.98 亿元、5 407.30 亿元。调节服务中的水文调节是水系的重要生态服务,而长江流域中部地区湖泊、河流聚集且处于政策保护下不断发展,这对区域内生态系统调节服务有较大影响。

从空间分布上看,调节服务、供给服务和文化娱乐在区域内和总的生态系统服务价值具有相似性,即从中间向外围呈下降趋势,而支持服务聚集在东南方向,那里主要是江西省地区(图 2)。从 2010—2017 年调节服务、供给服务和文化娱乐在空间上差异不大,支持服务逐渐向东偏移。

3.1.3 各类用地生态系统服务价值 生态系统服务价值的分地类计算结果发现耕地、水域、林地、草地的生态系统服务价值呈上升趋势,未利用地则呈下降的趋势。其中水域面积从 2010—2017 年扩大了 9.01%,水域生态系统服务价值上升最多且在 2017 年成为总量最大的生态系统服务价值。水域对生态系统服务有很大贡献,其水资源供给服务、水文调节服务巨大,净化环境服务、气候调节服务、生物多样性服务较强。长江流域中部地区湖泊集聚,水系众多,湖北省有“千湖之省”之名,

湖南省内有洞庭湖和湘江、资水、沅水和澧水 4 大水系,江西省有中国第一大淡水湖鄱阳湖。湖北省 2013 年发布第一批湖泊保护名录,包括了 308 个湖泊,而这个数字在 2013—2017 年里里不断增加,为“一湖一法”的落实提供了基础,湖南省、江西省也在不断推进“一湖一法”和“湖长制”、“河长制”的落实,水域的保护不断完善和发展。这使得湖北省、湖南省、江西省水域面积从 2010—2017 年分别扩大了 12.86%,9.01%,7.63%。几个因素共同作用使得其生态系统服务价值较大。

林地生态系统服务价值的增加小于水域的增加,其于 2010 年是生态系统服务价值最大的地类。林地对气候调节、气体调节、土壤保持、水文调节、生物多样性贡献较大,而长江流域中部地区林地占大约 48%,所以其生态系统服务价值较大。

各类用地生态系统服务的空间分布从 2010—2017 年变化不大(图 3),其中耕地生态系统服务较高区域集中在湖北省天门市、潜江市、仙桃市、钟祥市,江西省丰城市、临川区,湖南省衡南县等地,该区域耕地面积较大。林地生态系统服务较高区域集中在湖南省平江县、浏阳市,江西省修水县、浮梁县、婺源县等地。草地生态系统服务集中于右侧,为湖北省麻城市、江西省遂川县等。水域生态系统服务集中于上半部分,为湖北省洪湖市、湖南省岳阳县、江西省鄱阳县等,洪湖市是四湖汇聚之地,共有大小湖泊 102 个,岳阳县水网密布,全县有新墙河、汨罗河、东洞庭湖三大水系,鄱阳县境内大小河流 225 条,总长 2 070 km,水文资源的充足使得这些地区生态系统服务价值较大。

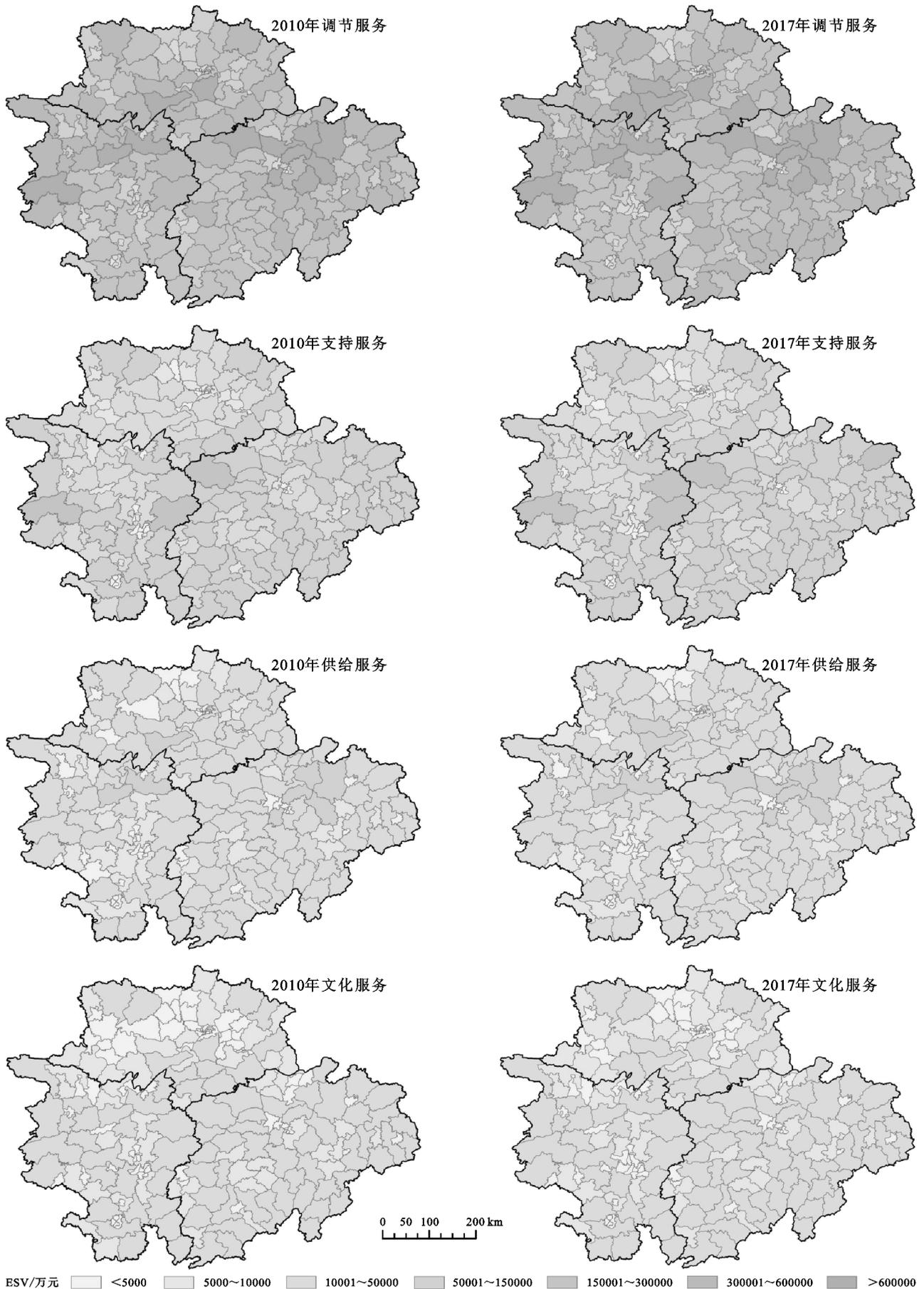


图 2 4类生态系统服务价值空间情况

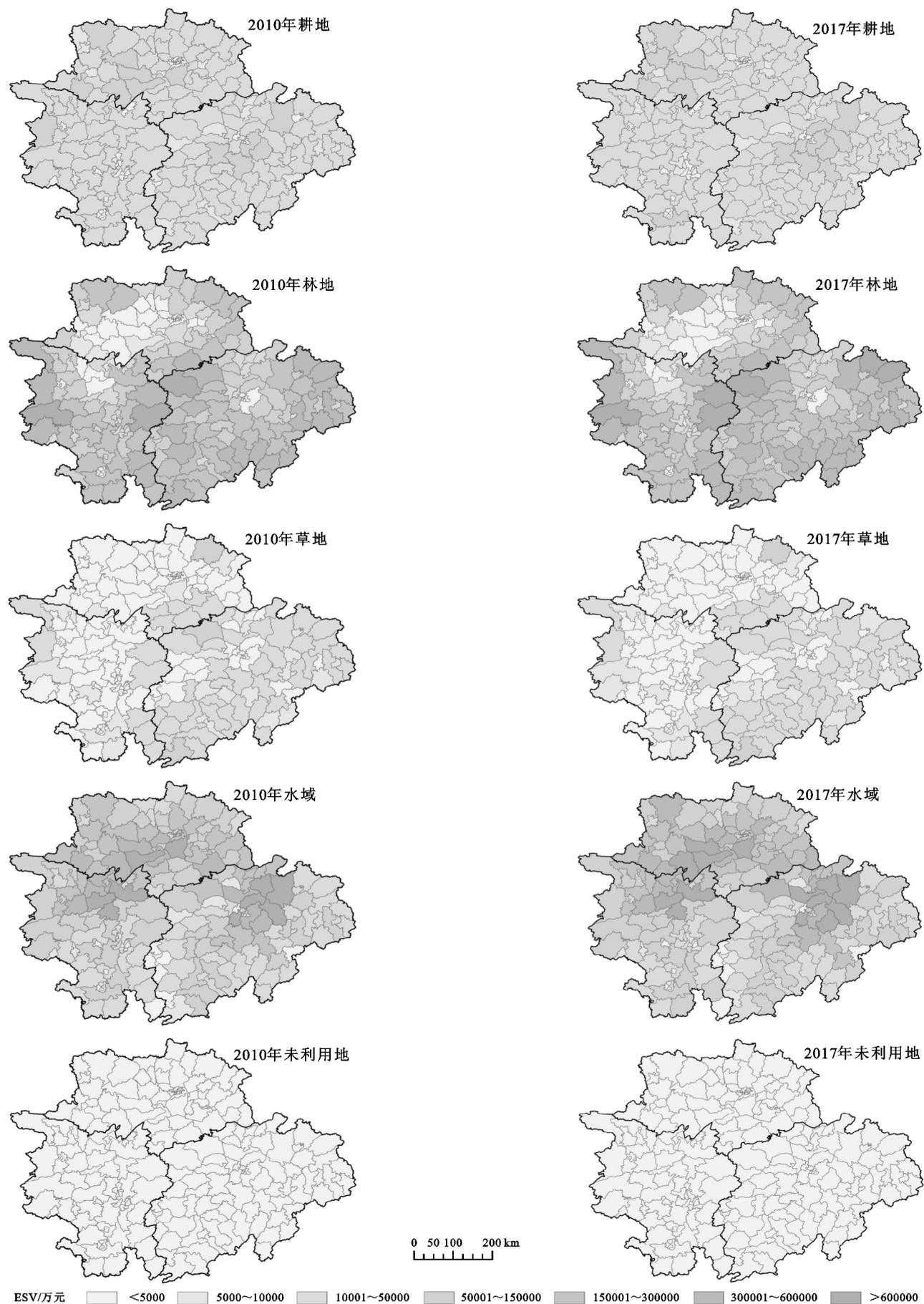


图 3 各类用地生态系统服务价值空间情况

### 3.2 生态系统服务价值的影响因素分析

生态系统服务价值与人类社会经济活动密切相关,景观格局也在一定程度决定了生态系统的结构和功能。孔凡靖等<sup>[24]</sup>通过研究农业人口、城镇化率、万元 GDP 能耗、农村居民人均可支配收入、第二产业比重与人均农田 ESV 直接的关系,认为农业人口、城镇化率与万元 GDP 能耗是引起人均 ESV 变化的主要驱动因素。赵志刚等<sup>[25]</sup>通过研究社会经济因素对 ESV 的影响,认为人口因素与产业结构是其中影响程度较高的因素。另一方面,王丽群等<sup>[20]</sup>研究景观格局指数对 ESV 的影响后,认为 ESV 与 PD, LPI, LJI, CONTAC, SHDI 相关性高。Hou 等<sup>[26]</sup>也观察到不同类型 ESV 与 PD 之间存在高相关性。在已有实证研究的基础上,综合考虑多重共线性与数据收集情况,研究最终选择景观类型因子 PD、宏观经济因子第三产业增加值占比、社会发展因子城镇居民

人均可支配收入反映生态系统服务价值的变化。

3.2.1 生态服务价值总量的影响因素分析 在相关检验的基础上,采用线性回归模型得到生态系统服务价值总量与景观格局指数 PD、第三产业增加值占比、城镇居民人均可支配收入呈现负相关性(表 4)。即斑块密度越大,生态系统服务价值越小,斑块密度表示斑块破碎程度和景观异质性,值越高,异质性越大、破碎性越大。因为斑块密度决定生态过程,斑块的破碎程度会影响能量的流动和营养物质的循环,从而影响生态系统服务价值<sup>[20]</sup>。第三产业增加值占比和城镇居民人均可支配收入越高,生态系统服务价值越低。第三产业的发展 and 城镇居民人均可支配收入等社会经济因素将导致对食物、原材料等的需求增加,并增加废弃物排放数量,都会降低生态系统服务价值<sup>[26]</sup>,有损生态系统服务价值。

表 4 ESV 总量回归结果

模型	年份	PD	第三产业增加值占比	城镇居民人均可支配收入	调整 $R^2$	$\lambda$
多元线性回归模型	2010	-0.340***	-0.358***	-0.259***	0.471	
	2017	-0.215***	-0.360***	-0.412***	0.499	
空间回归模型	2010	-1.526***	-2.414***	-0.244***	0.592	-0.645***
	2017	-0.576***	-3.190**	-2.439***	0.550	0.403***

注: \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ ; \*\*\* 表示  $p < 0.001$  的显著水平下显著。

进一步通过检验发现 OLS (Ordinary Least Squares, 普通最小二乘法) 误差项存在空间性, 同时通过空间自相关指数 Moran's  $I$  值的计算发现 2010 年的长江流域中部地区生态系统服务价值存在正向空间自相关关系, 在拉格朗日乘子空间自相关误差检验的研判下, 最终采用空间误差回归模型。与线性回归模型的  $R^2$  相比, 拟合效果变好, 表明结果更加稳定和准确。从空间误差回归模型中可以分析得出 PD、第三产业增加值占比、城镇居民人均可支配收入对生态系统服务价值呈负向影响。PD 是景观斑块间分异程度, 即破碎化程度的一个表示指标, PD 越大则一个单位的斑块面积越小, 这是景观破碎、空间异质的表现。PD 对生态系统服务价值的影响是负向的, 也就是景观的破碎使生态系统服务受到一定程度的损害。第三产业和城镇居民人均可支配收入和经济发展有重要联系, 其负向影响说明人类追求经济增长的活动会降低生态系统服务价值。

3.2.2 单项生态服务价值总量的影响因素分析 对 11 个单项生态系统服务价值进行 OLS 回归和空间回归, 除了气体调节之外, 其余的生态系统服务都具有空间自相关效应。结果表明 2010 年和 2017 年 OLS 回归都通过了检验, 但调整  $R^2$  较小, 最大调整  $R^2$  值出现于 2010 年食物生产生态服务功能为 0.503。在空间

误差模型拟合后调整  $R^2$  显著增加。从 OLS 的回归结果来看, 2010 年 PD 对水文调节服务的影响系数最大为 -0.376, 2017 年 PD 对各项生态服务功能影响在 -0.019 ~ -0.178 普遍不高。第三产业增加值占比对各项服务的影响差别不大, 2010 年对维持养分循环影响最大为 -0.474, 2017 年对食物生产影响最大, 为 -0.422。城镇居民人均可支配收入除了对水文调节服务和食物生产服务的影响较小之外, 对其他服务的影响差别不大, 2010 年对气体调节影响最大为 -0.281, 2017 年对气候调节影响最大为 -0.453。2010 年和 2017 年相比, 回归结果存在差别, PD 和第三产业增加值占比对单项服务的影响多为减小, 城镇居民人均可支配收入影响增加, PD 的负向影响变化在单项服务里存在差异。

从 11 类生态系统服务价值的空间误差模型可以看出与最小二乘回归模型相比, 该模型的拟合结果更好、更稳定(图 4)。3 个不同的自变量对 11 类生态系统服务价值的解释是存在差异的。斑块密度 PD 主要负向作用于维持养分循环、原料生产两项生态系统服务, 这种作用在 2010—2017 年呈减小趋势。第三产业增加值占比主要负向作用于气候调节、原料生产、维持养分循环 3 项服务, 在 2010—2017 年期间差异不大, 相对维持稳定。城镇居民人均可支配收入对各类生态系统服务的正向

作用相对均衡,这种正向影响在2010—2017年已经呈现负向影响。城镇居民人均可支配收入的增加表征着经济发展,收入增加带来了消费的活跃,住房消费增加、

娱乐消费增加都导致用地需求的增长,用地需求增长意味着土地利用的转变,极大可能由耕地等向建设用地转变,这势必带来生态系统服务的衰减。

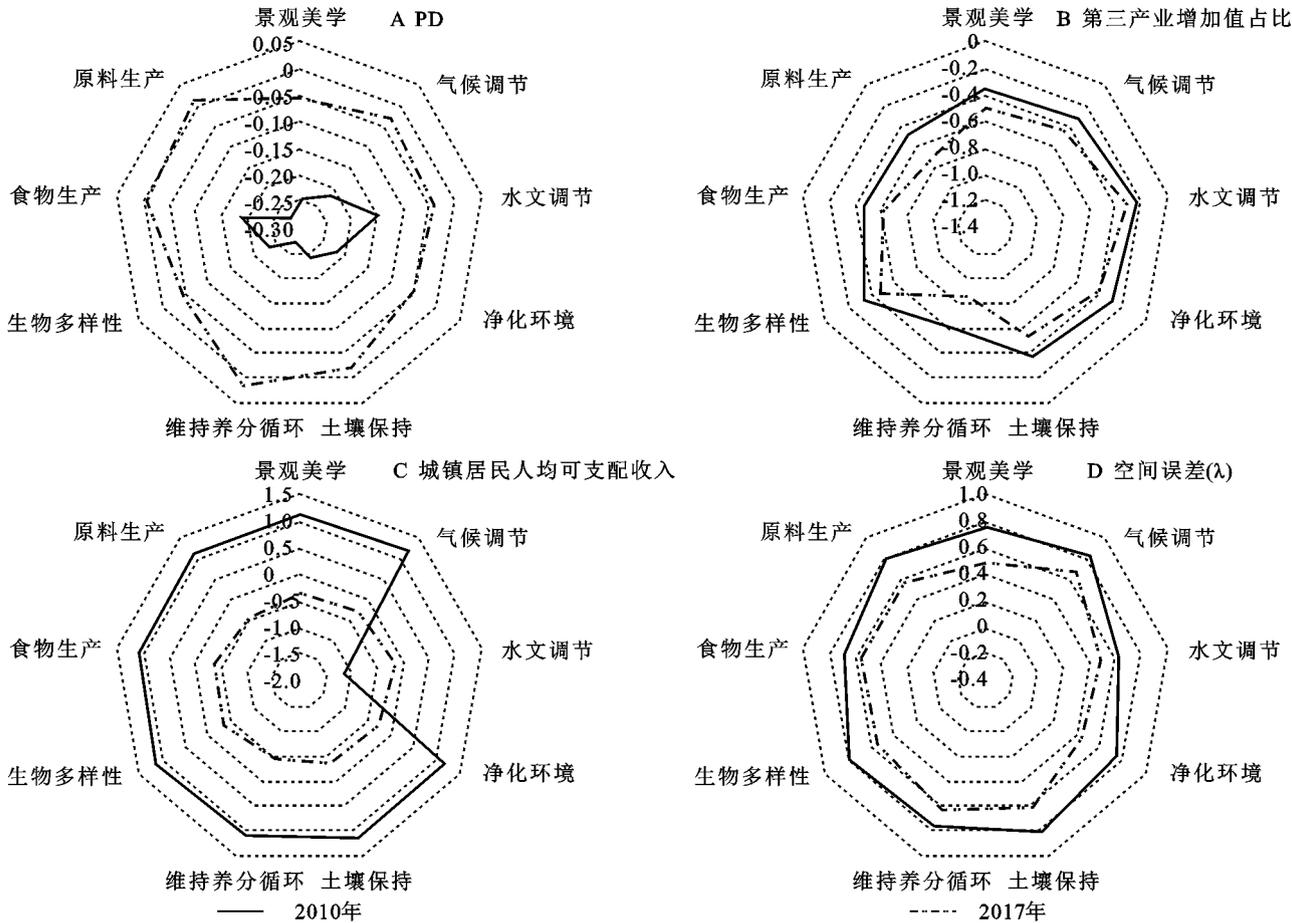


图4 影响因子雷达图

## 4 讨论和结论

本文采用基于NPP系数修正的价值当量法评估长江流域中部地区3个省份生态系统服务价值,并加以时空分析和比较,采用空间回归方法挖掘了景观格局和社会经济发展对生态系统服务价值的影响。总体来看,2010—2017年,湖北省武汉市江岸区、湖南省长沙市芙蓉区、江西省南昌市东湖区等经济发达的区域生态系统服务价值有所下降,其他县、区、市生态系统服务价值呈上升趋势。长江流域中部地区207个县域单元的生态系统服务价值空间分布存在一定差异,从中部到两端是减少的。斑块密度、第三产业增加值占比、城镇居民人均可支配收入对生态系统服务价值呈负向影响,说明景观的破碎会使生态系统服务受到一定程度的损害,第三产业的发展 and 人类生活水平的提高也在一定程度上威胁了生态系统服务。据此得出以下结论:(1)长江流域中部地区生态系统服务价值有所提高,但是湖北省、湖南省和江西省各自变化的幅度有所不同;(2)各类用地里生态系统服务价值最大的为水域

和林地,其次为耕地、草地,2010—2017年呈增加趋势,未利用地生态系统服务价值最小,2010—2017年呈减少趋势;(3)长江流域中部地区的生态系统服务价值呈现显著的空间自相关现象,斑块密度、第三产业增加值占比、城镇居民人均可支配收入显著负向影响区域的生态系统服务价值,其中城镇居民人均可支配收入的负向影响最大。

在生态文明建设的背景下,为了实现长江流域社会经济系统与自然生态系统的协同发展,推动长江经济带的保护和修复,本文建议:(1)在国土空间的开发和利用过程中注重空间格局规划,避免高密度、细碎化的开发和建设造成城市远郊区景观破碎化,提升湖南省蒸湘区等,湖北省新洲区等省会城市远郊区与地级市市辖区的生态系统服务价值;(2)在长江经济带“共抓大保护,不搞大开发”的战略方针下,重视对重要生态功能区的保护,权衡江西省鄱阳县、湖南省岳阳县、湖北省监利县等相关高生态系统服务价值县域经济发展与生态保护的关系,不牺牲生态用地以发展经济;(3)在诊断生态系统服务中维持养分循环和

食物生产功能受到较大威胁的基础上,结合江西省青山湖区、湖北省江夏区、湖南省岳麓区等省会城市中心城区及其他相关地区存在生态系统输入输出养分不均衡以及食物生产供需矛盾加剧等生态环境问题,开展国土空间生态修复,划分出优化开发与重点修复区域、分阶段地制定保护措施,因地制宜地进行开发利用和保护修复。对于重要的生态功能区,要限制人类开发对区域内生态环境本底的影响,改善生态环境质量,以提高生态系统服务价值。优化开发区域要根据人口、资源、环境相互协调的发展要求,加大生态系统资源投入,确定合理的生态系统养分循环承载上限,在生态系统承载力范围内走节约用地,规模化发展道路。重点修复区内要以修复食物生产功能为先,确保封禁和退耕措施的同时坚守耕地红线,推广保护性耕作措施,坚持生态保护与治理相结合。

本研究在数据处理和方法设计上有待进一步改进:(1) 基于温度和降水量测算的 NPP 存在一定的局限性,模型因数据缺失,未对土壤、地形、生物生态学等特性进行测度和考量;(2) 鉴于建设用地生态系统服务价值量较少,忽略了建设用地的生态系统服务价值,有待进一步完善。

#### 参考文献:

- [1] Ehrlich P, Ehrlich A. Extinction: the causes and consequences of the disappearance of species[J]. *Book Reviews*, 1981,26(4):378-379.
- [2] Costanza R. Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability[J]. *Ecosystem Services*, 2020,43:1-7.
- [3] 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.
- [4] 欧阳志云,王效科.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.
- [5] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387:253-260.
- [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.
- [7] 彭丽云,许艳,黄背英,等.兰州市耕地生态系统服务价值估算[J]. *现代农业科技*,2019(5):258-260,265.
- [8] 荔琢,蒋卫国,王文杰,等.基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究[J]. *自然资源学报*, 2019,34(8):1654-1665.
- [9] 胡其玉,陈松林.基于生态服务价值量的土地利用变化环境效应研究[J]. *生态科学*,2019,38(5):58-67.
- [10] 龚溪,曹铭昌,孙孝平,等.武夷山市生态系统服务价值评估[J]. *生态与农村环境学报*,2017,33(12):1094-1101.
- [11] 孟阳阳,何志斌,刘冰,等.干旱区绿洲湿地空间分布及生态系统服务价值变化:以三大典型内陆河流域为例[J]. *资源科学*,2020,42(10):2022-2034.
- [12] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J]. *自然资源学报*,2020,35(7):1714-1727.
- [13] 陈万旭,李江风,朱丽君.长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. *自然资源学报*,2019,34(2):325-337.
- [14] 戴文远,江方奇,黄万里,等.基于“三生空间”的土地利用功能转型及生态服务价值研究:以福州新区为例[J]. *自然资源学报*,2018,33(12):2098-2109.
- [15] Yang Y, Song G, Lu S. Study on the ecological protection redline (EPR) demarcation process and the ecosystem service value (ESV) of the EPR zone: A case study on the city of Qiqihaer in China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,109:1-13.
- [16] 韩蕊,孙思琦,郭涿,等.川东地区生态系统服务价值时空演变及其驱动力分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2019,35(9):1136-1143.
- [17] 冉凤维,罗志军,曹丽萍,等.南昌市生态服务价值变化及其驱动因素分析[J]. *水土保持研究*, 2018,25(3):177-183.
- [18] 罗盛锋,闫文德.广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力[J]. *生态学报*,2018,38(9):3248-3259.
- [19] Dai X, Wang L, Huang C, et al. Spatio-temporal variations of ecosystem services in the urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020,115:1-11.
- [20] 王丽群,张志强,李格,等.北京边缘地区景观格局变化及对生态系统服务的影响评价:以牛栏山—马坡镇为例[J]. *生态学报*,2018,38(3):750-759.
- [21] Lieth H. Primary production: terrestrial ecosystems [J]. *Human Ecology*, 1973,1(4):303-332.
- [22] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of ecosystem services: putting the issues in perspective [J]. *Ecological Economics*, 1998,25(1):67-72.
- [23] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. *Biometrika*, 1950,37(1/2):17-23.
- [24] 孔凡靖,陈玉成,陈庆华,等.重庆市农田生态服务价值时空变化特征及其驱动因素分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*,2019,27(11):1637-1648.
- [25] 赵志刚,余德,韩成云,等.鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力[J]. *生态学报*,2017,37(24):8411-8421.
- [26] Hou L, Wu F, Xie X. The spatial characteristics and relationships between landscape pattern and ecosystem service value along an urban-rural gradient in Xi'an city, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,108:1-10.