

文章编号 :1003-7853 (2021) 04-0051-07

基金项目 湘西与湘南传统村落空间模式比较研究 (CX20190985)

基于 GIS 的湘江流域 生态系统服务价值 时空变化及其驱动力分析

韩英,郑文武*,邓美容

(衡阳师范学院,湖南 衡阳 421008)

摘要 生态系统服务价值评估是生态系统环境管护、开发利用的重要基础。本文借助 GIS 和遥感相关的软件、技术,选取长江流域城镇化大发展的黄金时期 2005 年、2010 年、2015 年三期湘江流域 Landsat 系列遥感影像,采用修正的生态系统服务价值评估模型,通过子流域单元以及价值图谱对湘江流域的生态系统服务价值空间变化进行估算分析,并进一步研究其服务价值的时空变化,同时运用地理探测器探测了影响流域 ESV 的驱动因子。研究结果表明, (1) 湘江流域经济发展中由于水利开发和城市建设进行程度比较快,各类土地利用类型中水域和建设用地的面积有所增加,呈减少趋势的主要有林地、草地和耕地; (2) 2005-2015 年,湘江流域生态服务价值总体呈降低趋势,空间分布特征表现为上游生态服务价值高,价值变化减少量最小,下游地区服务价值变化显著,其中新江河、捞刀河和浏阳河流域服务价值有明显的减少趋势; (3) 地理探测器分析表明,人为影响综合指数是影响流域 ESV 的主导因子,人为影响因子、人均 GDP、人口密度及植被覆盖的交互增强效应共同影响了湘江流域生态系统的服务价值。

关键词 湘江流域 生态系统服务价值;

时空变化 地理探测器 驱动力因子

中图分类号 :P9

文献标识码 :A

The Spatial and Temporal Changes of Ecosystem Service Value of Xiangjiang River Basin Based on GIS Driving Force Analysis

HAN Ying, ZHENG Wenwu*, DENG Meirong

(Hengyang Normal University, Hunan Hengyang 421008, China)

Abstract: Ecosystem service value assessment is an important foundation for ecosystem environmental management, protection, development and utilization. With the help of GIS and remote sensing-related software and technology, this paper selects the three phases of the Xiangjiang River Basin Landsat series of remote sensing images in 2005, 2010, and 2015 during the golden period of the urbanization development in the Yangtze River Basin, and adopts the revised ecosystem service value evaluation model. The basin unit and the value map estimate and analyze the spatial changes of the ecosystem service value of the Xiangjiang River Basin, and further study the temporal and spatial changes of its service value. At the same time, the geo-detector is used to detect the driving factors that affect the ESV of the basin. The research results show that, (1) due to the rapid progress of water conservancy development and urban construction in the economic development

of the Xiangjiang River Basin, the area of water and construction land in various types of land use has increased, and the main areas that show a decreasing trend are forest land, grassland and cultivated land; (2) from 2005 to 2015, the ecological service value of the Xiangjiang River Basin showed a general downward trend. The spatial distribution characteristics showed that the upstream ecological service value was high, the value change reduction was the smallest, and the downstream area service value changed significantly. Among them, the service value of Jinjiang River, Laodao River and Liuyang River Basin has an obvious decreasing trend; (3) geographic detector analysis shows that the comprehensive index of human influence is the dominant factor affecting ESV of the basin, the interactive enhancement effect of human influence factors, per capita GDP, population density, and vegetation coverage are common affected the service value of the ecosystem of the Xiangjiang River Basin.

Key words: Xiangjiang River Basin; ecosystem service value; temporal and spatial change; geographic detector; driving force factor

DOI:10.16202/j.cnki.tnrs.2021.04.012

0 引言

生态系统服务是指通过生态系统直接或间接得到的对人类生存与生活质量有所贡献的服务^[1],是生态系统环境管护、开发利用的重要基础。流域将水系统作为一个链接,将系统中的所有元素连接成一个不可分割的整体。流域生态系统服务价值研究是流域综合治理的发展方向。近年来,对于流域生态系统服务评估的方法和案例研究,众多学者已取得了许多优异的成绩。在生态系统服务价值评估方法中当量因子法操作简单,评估全面,适性强,被广泛应用^[2]。南四湖、松花江流域、汾河流域、白龙江流域等^[3-6],这些案例为流域生态系统服务价值的研究提供了许多值得借鉴的经验。

2000-2010 年是长江流域城镇化大发展的黄金时期,城市规模空前扩张^[7],随着经济社会的发展、人口增长以及各种人为活动因素的影响,湘江流域生态环境越来越恶劣,严重影响流域的生态环境安全,导致流域生态系统服务能力的降低。截至目前,对湘江流域的研究多为生态补偿^[8]、景观格局^[9]等研究,对流域生态系统结构、ESV 时空演变及驱动力的研究尚不多见,社会经济发展和区域生态系统变化间的关系仍不清楚。学界对于生态服务价值的研究,大多基于大尺度区域,如以县、乡镇为评价单元,以子流域为评价单元的生态服务价值研究更加少见。鉴于此,本研究在综合分析湘江流域生态系统格局变化的基础上,根据谢高地^[10]制定的“中国生态系统单位面积生态服务价值当量”,同时利用生物量因子^[11]对流域的生态系统服务价值作进一步的修订,构建研究区生态系统服务价值估算模型,在大量城市兴起及生态退耕推行的背景下从子流域尺度综合分析湘江流域 2005-2015 年 ESV 的时空演变特征及驱动因素,以期为湘江流域生态文明建设和区域可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湘江流域地处长江中游荆江之南,南岭之北,流域内水系发达,支流众多,流域总面积达 96 567 km²。其中,湖南省境内流域面积 85 854.77 km²,占总流域面积的 88.9%。流域人口集中,城镇密布,是湖南省人口最稠密、经济最发达的区域。截至 2015 年底,湘江流域实现 GDP 21 248.58 亿元,总人口数达到 3 938.55 万人,分别占湖南省 GDP 和总人口数的 73.15%、58.1%。伴随着城镇化、工业化的加速,人口快速增长、城镇建设用地加速扩张、人类活动广度与强度空前加剧,城镇发展所致的环境污染加剧,生态环境面临前所未有的压力(图 1)。

1.2 数据来源与处理

本文采用地理空间数据云中覆盖全国的 Landsat 系列遥感影像作为基础数据。通过对《土地利用现状调查技术规程(1984)》进行参照,本文将湘江流域土地利用/覆被类型划分为林地、耕地、草地、水域、未利用地和建设用地 6 个类别,并对 2005 年、2010 年和 2015 年三期遥感影像进行监督分类得到土地利用/覆盖分类数据。此外 2005 年、2010 年和 2015 年的粮食播种面积、农田粮食单位面积产量以及社会经济数据均来源于湖南省及各地级市统计年鉴。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值估算模型

本文通过利用 Costanza 等提出的 ESV 计算方法,构建生态系统服务价值评估模型,即:

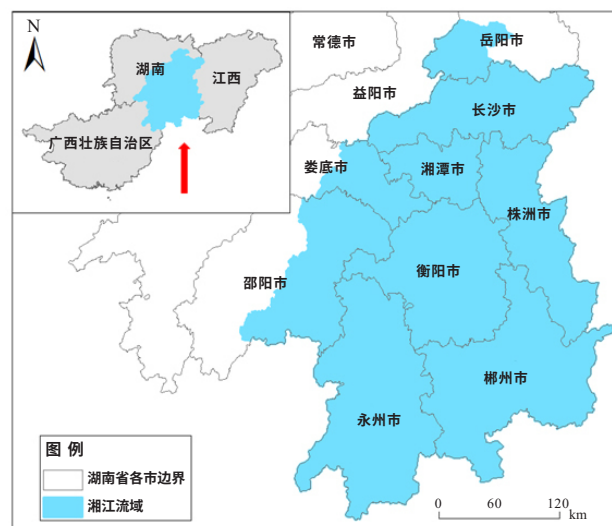
$$ESV_t = \sum_k A_k \times V_{ck} \quad (1)$$

式中,ESV_t 表示第 t 年的生态服务价值(元);A_k 表示为第 k 类土地利用类型的面积(hm²);V_{ck} 表示第 k 类土地利用类型的生态服务价值系数(元/hm²)。

2.2 价值系数的调整

结合谢高地对中国陆地生态系统提出的价值当量换算方法,即假设生态系统提供的经济价值是区域内单位面积自然粮食生产的经济价值的 1/7^[10]。对我国不同省份农田生态系统生物量因子(湖南省修正系

图 1 研究区位置图



数为 1.93) 的区分^[11],根据研究区相关地级市统计年鉴数据求得 2005-2015 年湘江流域地区的年均粮食产量为 6 146.192 kg/hm²,约为同期全湖南省平均粮食产量(5 872.718 kg/hm²) 的 1.05 倍,将湘江流域农田生态服务价值系数进一步修正为全国水平的 2.05 倍。同时,以湘江流域 2005-2010 年平均粮食价格按 3.5 元/kg 计算,得出地区湘江流域农田自然粮食产量的经济价值为 3 073.096 元·hm⁻²。根据湘江流域修正系数以及以上数据测算出各土地利用类型单位面积生态系统服务价值(表 1)。本研究将建设用地的生态价值不予考虑,并将其值设置为零^[12]。

2.3 敏感性分析计算

敏感性指数(Coefficient of Sensitivity, CS) 表示生态系统服务价值对生态系统服务价值系数的依存度^[13]。如下为生态系统服务价值系数的敏感性指数计算公式:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_j - VC_i) / VC_i} \right| \quad (2)$$

式中,CS 为敏感性指数;j 表示初始价值;i 表示生态价值系数调整后的价值。

2.4 湘江流域生态服务价值人为影响指数

随着社会经济的持续发展、城市规模的不断扩大,人类的活动也不断影响着生态环境以及土地利用类型

表 1 湘江流域各土地利用/覆被类型对应的生态系统服务价值系数表(元/hm²)

生态系统服务功能	林地	草地	耕地	水域	未利用地	建设用地
气体调节	22 049.46	5 039.88	3 149.92	5 669.86	0	0
气候调节	17 009.59	5 669.86	5 606.86	55 312.66	0	0
水源涵养	20 159.51	5 039.88	3 779.91	113 019.25	188.99	0
土壤形成与保护	24 569.40	12 284.7	9 197.78	5 417.87	125.99	0
废物处理	8 252.80	8 252.80	10 331.75	114 531.22	62.99	0
生物多样性保护	20 537.50	6 866.83	4 472.89	15 718.12	2 141.95	0
食物生产	629.99	1 889.95	6 299.85	1 259.97	62.99	0
原材料	16 379.60	314.99	629.99	251.99	0	0
娱乐文化	8 063.80	251.99	62.99	31 152.74	62.99	0
合计	137 651.65	45 610.89	43 531.94	342 333.68	2 645.94	0

的变化。为了研究人为干扰因子对湘江流域生态系统服务价值变化的影响程度,本文将采用人为干扰指数来表示人类干扰综合强度^[14]。人为干扰指数计算公式如下:

$$HAI = \sum_{i=1}^n A_i P_i / TA \quad (3)$$

式中, A_i 表示第 i 类土地利用类型的总面积; P_i 表示第 i 类土地利用类型的人为影响强度系数; TA 表示土地利用总面积。本文通过公式 (3), 利用 HAI 指数来分析湘江流域 ESV 与人类干扰强度之间的相互关系。

2.5 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性, 以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法^[15], 包含风险、因子、生态、交互 4 个组成部分。本文运用因子探测器和交互探测器来分析生态系统服务价值变化与各驱动因子之间的空间关联关系, 用地理探测力 q 值进行表示。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中, L 为自变量 x_i 的分层数; N_h 和 N 为层内和区域内的样本数; σ^2 为样本整体方差, 当 $\sigma^2 \neq 0$ 时, 模型成立; q 值的内涵为自变量 x_i 能够解释 $100 \times q\%$ 的

因变量 y , $q \in [0, 1]$, q 值越大, 表明 x_i 对 y 的解释力越强。交互探测器是用来识别不同因子 x_i 间的交互作用是否会增加或减弱对因变量 y 的解释力, 判断各个因子之间的交互作用^[16]。因此, 本研究最终筛选出人为影响综合指数、降雨、人均 GDP、人口密度和天然植被覆盖共 5 项指标作为地理探测因子。基于 GeoDetector 工具的“因子探测器”和“交互作用探测器”功能, 以生态系统服务价值总量为地理探测因变量, 以驱动因子为自变量, 输入地理探测器进行驱动因子贡献率及驱动因子之间交互作用特点的定量分析, 探讨湘江流域生态服务价值变化的驱动机制^[17]。

3 结果与分析

3.1 流域土地利用 / 覆被变化结果分析

2005、2010 年和 2015 年湘江流域的土地利用 / 覆被变化图如图 2 所示。湘江流域占比最大、占主体地位的土地利用类型为林地和耕地, 两者的面积之和约占整个研究区域面积的 92.27%~93.17%, 其中林地、耕地分别占总土地面积的 61.83%~62.13%、30.44%~31.04%。

2005-2015 年湘江流域经济建设的发展和城镇化进程的不断加速, 土地利用类型的面积均发生了不同程度的变化, 最终呈现出 3 种利用类型增加、3 种利用类型减少的趋势 (图 3), 建设用地、未利用地和水域均有所增加, 林地、草地和耕地则是有所减少。其中耕地减

图 2 湘江流域 2005-2015 年土地利用分类图

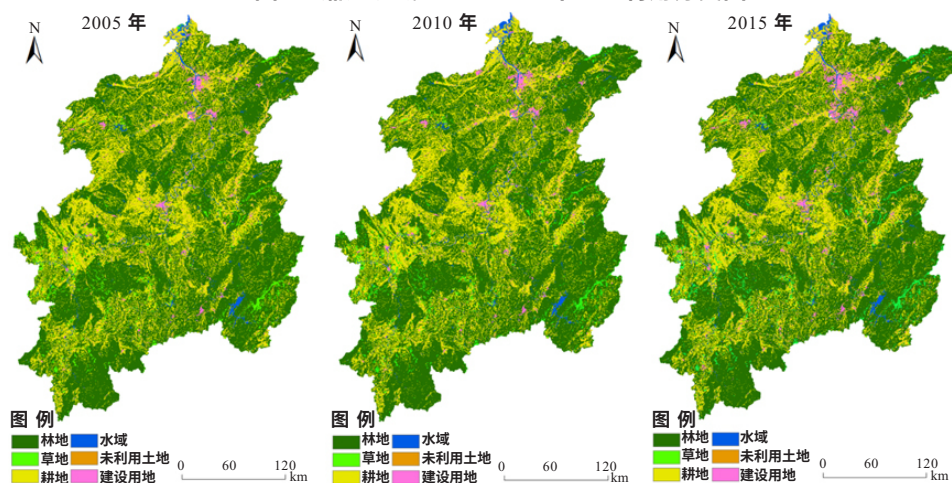


图 3 2005-2015 年湘江流域各类土地类型面积及其年变化量 (hm^2)



少了 60 781.59 hm², 这是因为以前人们的围湖造田导致湖面不断缩小, 在 1988 年以后, 政府为了保护环境, 实行退田还湖政策, 因而水域面积相对得到了增加。

从变化率来看, 面积增加速度最快的是建设用地, 其次是未利用地和水域, 在研究期间, 由于水利开发与城镇化速度的加快, 水域和建设用地的面积逐步呈现增长趋势, 而由于湘江流域上游地区植被遭到破坏, 未利用地面积也略有增加。草地、林地和耕地面积呈负向变化, 其中面积减少速度最快的是耕地, 然后是林地和草地。耕地的减少趋势明显, 建设用地呈现明显的增加趋势, 耕地与建设用地之间的矛盾是研究区社会经济发展的关键问题之一。

3.2 生态系统服务价值动态变化

3.2.1 不同生态系统服务价值时间变化特征。湘江流域生态服务总价值在 2005 年、2010 年和 2015 年为 13 598.18 亿元、13 576.18 亿元和 13 516.92 亿元 (表 2), 生态系统服务价值总体呈现出下降的变化趋势。2005-2015 年, 湘江流域由于人类活动对土地利用的干预, 各地类的生态系统服务价值也相应的发生不同程度的变化, 其中减少量最显著的是林地, 其生态系统服务价值量减少了 54.07 亿元; 而增加量最显著的是水域, 增加了 10.74 亿元。总体来说, 在 2005-2015

年, 各土地利用类型的生态系统服务价值总的变化量为 81.26 亿元, 其中 2010-2015 年减少的最多, 其减少量为 59.26 亿元。

3.2.2 生态系统服务价值子流域空间变化特征。本文基于子流域尺度对湘江流域生态服务价值空间变化进行分析, 根据水文分析对湘江流域的 DEM 数据进行流域范围的划分, 并结合百度地图、湖南省行政区划图以及相关书籍记载, 最终通过叠加分析确定流域尺度包括潇水流域等在内的 21 个子流域范围。从各流域的单位面积生态系统服务价值和单位面积生态系统服务价值的变化量对 2005-2015 年湘江流域生态系统服务价值进行计算, 并运用价值图谱分析方法^[18]将价值变化分为生态减值区、生态保值区和生态增值区三类 (图 4)。

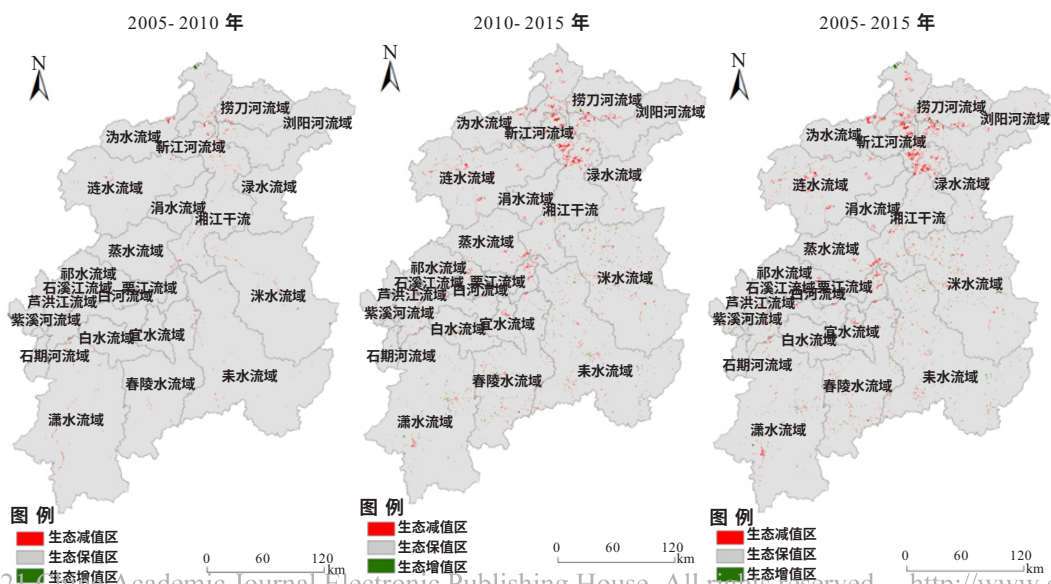
运用图谱分析方法分析 2000-2015 年研究区上中下游的生态系统服务价值可知, 生态减值区在逐渐增加, 湘江流域生态系统服务价值整体表现出下降趋势, 价值变化主要集中在中下游地区, 其中流域上游各子流域平均减少了 0.023 亿元, 中游各子流域平均减少了 0.043 亿元, 下游生态系统服务价值减少的最多, 各子流域平均减少了 0.124 亿元。

位于上游地区的紫溪河流域、石期河流域、潇水流域的价值变化不明显 (图 5), 从 2005 年 13.0 亿元、

表 2 2005-2015 年湘江流域生态服务价值变化及变化率 (亿元)

年份	土地类型	林地	草地	耕地	水域	未利用地	建设用地	合计
2005	ESV	11 155.25	209.01	1 565.82	667.53	0.57	0.00	13 598.18
2010	ESV	11 139.83	206.08	1 560.70	668.62	0.95	0.00	13 576.18
2015	ESV	11 101.18	201.07	1 535.57	678.27	0.84	0.00	13 516.92
2005-2010	ESV 变化量	-15.42	-2.93	-5.12	1.09	0.38	0.00	-22
	年变化率	-0.03	-0.28	-0.07	0.03	10.76	0.00	-0.03
2010-2015	ESV 变化量	-38.65	-5.01	-25.13	9.65	-0.11	0.00	-59.26
	年变化率	-0.07	-0.49	-0.32	0.29	-2.43	0.00	-0.09
2005-2015	ESV 变化量	-54.07	-7.94	-30.25	10.74	0.27	0.00	-81.26
	年变化率	-0.05	-0.39	-0.19	0.16	3.95	0.00	-0.06

图 4 湘江流域各子流域生态系统服务价值变化图谱



12.22 亿元、14.37 亿元到 2015 年的 12.94 亿元、12.19 亿元、14.36 亿元总体减少量不大,结合湘江流域地均生态系统服务价值变化量图可知上游区域位于南部永州和郴州市为代表生态系统服务价值的高值地区,很可能是由于流域内的大范围的森林植被所致。

位于中游地区的子流域中除了白水流域的年均生态系统服务价值不增不减,其他子流域的年均生态系统服务价值在 2000-2015 年都相应的减少(图 6)。湘江流域中游地区 2005-2010 年平均减少 0.03 亿元,2010-2015 年平均减少 0.04 亿元,2005-2015 年平均减少 0.07 亿元。

城镇化速度最快的下游地区中各子流域的服务价值的减少量也是最为明显的(图 7),2005-2010 年平均减少 0.04 亿元,2010-2015 年平均减少 0.04 亿元,2005-2015 年平均减少 0.12 亿元。其中减少量最大的是下游的靳江河流域,减少了 0.42 亿元,其次是浏阳河和捞刀河流域,分别减少 0.13、0.14 亿元。结合图 8 可知下游区域主要位于长株潭城市群为代表的

生态系统服务价值低值地区,服务价值减少量在长沙市表现出极显著减少趋势,减少了 0.74 万元/hm²。由于区域内经济飞速发展,城镇化进程加快,人均居住面积不断扩大,建设用地不断增加,而这些都是以占用了大量草地、耕地和林地作为代价,进而导致了生态服务价值的降低。

3.3 敏感性分析

本研究通过采用弹性系数计算生态系统服务价值的敏感性指数^[19]来对生态系统的服务功能结果进行评估,根据计算公式,将研究区的各土地利用类型的生态系统服务价值系数都分别上调 50%,根据上调的系数计算出 2005 年、2010 年、2015 年的敏感度值,通过图 9 分析表明,湘江流域在 2005-2015 年的各个土地利用类型中,生态系统服务价值系数的敏感性指数均小于 1,弹性较低,结果可信。其中未利用地敏感度为最低值 0.000 1~0.000 3,对湘江流域生态系统服务价值的变化影响最小;最高值反映在林地中,其敏感度为 0.402~0.805,当林地的生态系统服务价值系数减少

图 5 2005-2015 年湘江流域上游地区各流域生态功能的服务价值空间分布及价值变化量图

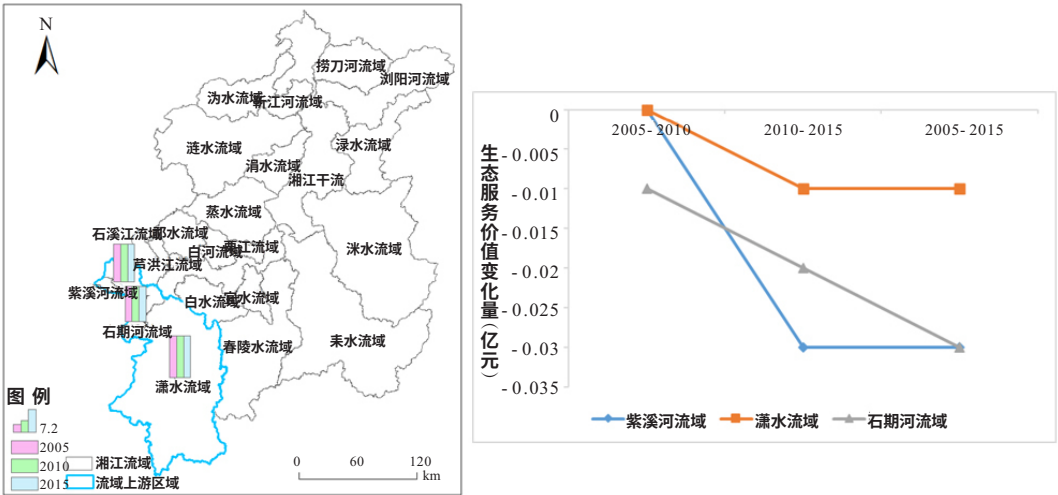


图 6 2005-2015 年湘江流域中游地区各流域生态功能的服务价值空间分布及价值变化量图

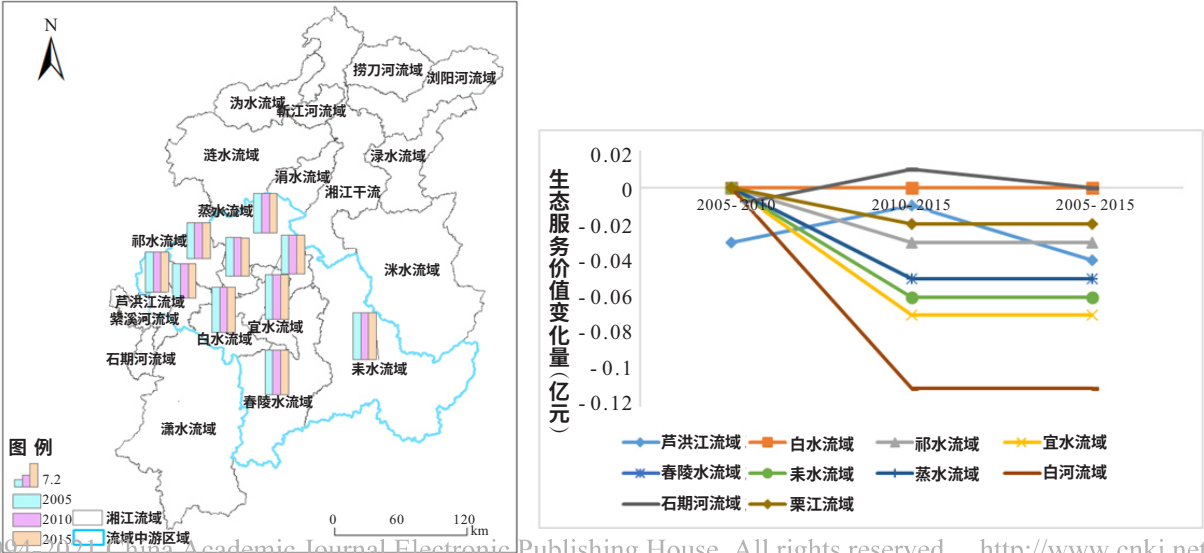


图 7 2005-2015 年湘江流域下游地区各流域生态功能的服务价值 / 价值变化量图

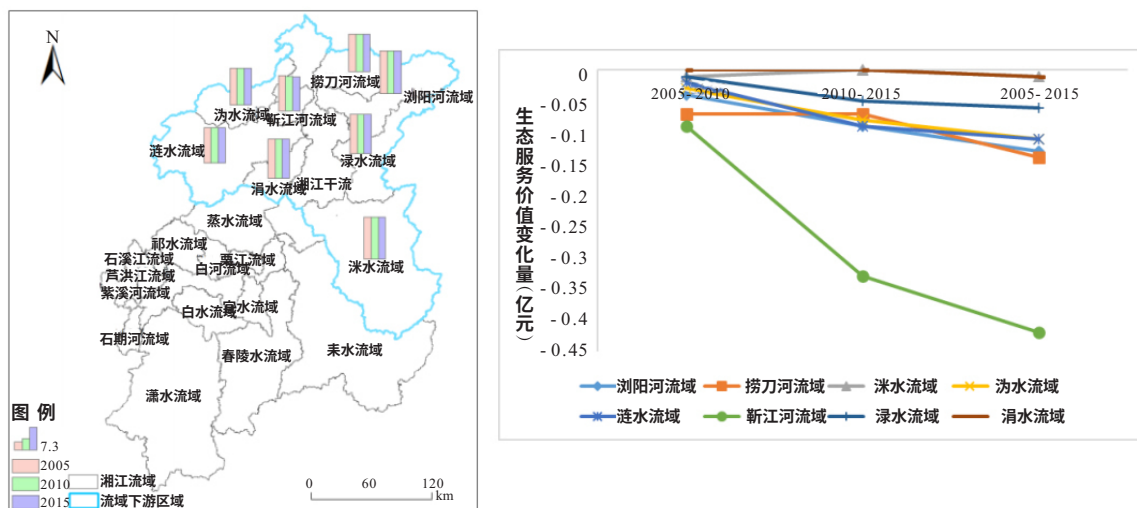


图 8 湘江流域 2005-2015 年地均生态系统服务价值变化量图

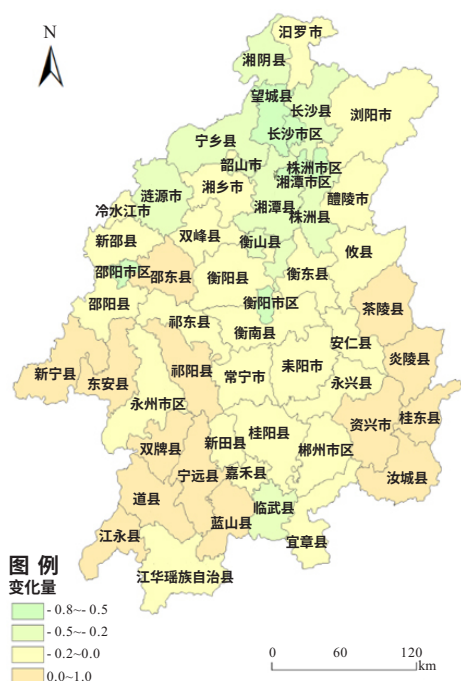


图 9 2005-2015 年湘江流域生态系统服务价值敏感度

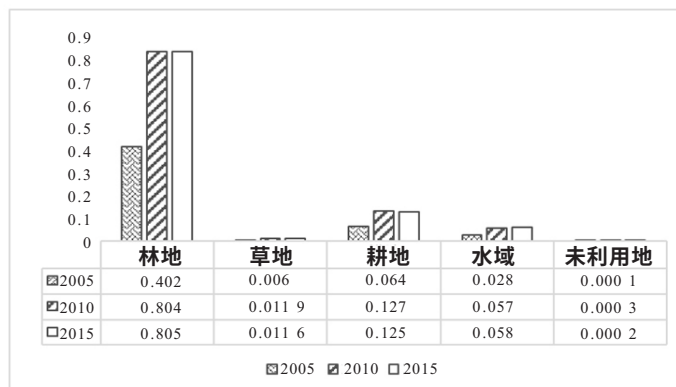


表 3 湘江流域生态服务价值驱动因子探测结果

因子指标	人均 GDP	人口密度	HAI	植被覆盖
q 值统计量	0.480 4	0.719 9	0.853 0	0.347 4
p 值	0.354	0.000	0.000	0.924

程度上影响着流域 ESV 的变化。

结果表明, HAI 因子对流域 ESV 的影响程度最高,在一定程度上反映了人为土地利用活动对流域生态系统干扰影响程度大。

4.2 基于地理探测器的因子交互作用分析

采用交互探测检验 4 个因子之间的相互作用。结果表明, 每对因子的交互 q 值大于两个因子的 q 值, 流域 ESV 驱动因子之间的相互作用关系是相互增强, 其中 HAI 与植被覆盖交互作用对 ESV 作用的影响程度最强, 解释力程度将近 91%。流域 ESV 驱动因子交互作用解释力度大于 80% 的次序为 HAI $\cap$ 植被覆盖 > HAI $\cap$ 人口密度 > HAI $\cap$ 人均 GDP。结果表明, 湘江流域 ESV 不是由一种驱动因子单独作用的, 而是由多种不同的驱动因子共同作用的结果 (表 4)。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文基于谢高地的中国陆地生态系统价值当量换算方法, 并对价值系数进行调整, 评估了湘江流域 2005、

时, 生态系统服务总价值也会随之减少, 当前者减少 1%, 后者则减少 0.402%~0.805%, 这也表明林地对湘江流域生态系统服务价值的变化影响最大。

4 生态系统服务价值变化驱动分析

4.1 基于地理探测器的因子探测分析

地理探测器中的因子必须是数值型变量, 需要进行离散化处理, 本文采用自然断点法进行分级, 因子探测结果如表 3 所示。其中各因子对流域生态系统服务价值的影响强度的解释从大到小为 HAI (0.8530) > 人口密度 (0.7199) > 人均 GDP (0.4804) > 植被覆盖 (0.3474)。因此, 从驱动因子对生态服务价值的影响来看, HAI 的解释力最为显著, 其次是人口密度, 其影响力在 70% 左右, 是影响流域生态服务价值的重要因素; 另外人均 GDP 也是影响流域 ESV 变化较为重要的因素, 而植被覆盖程度的解释力在 35% 左右, 一定

表 4 湘江流域生态服务价值驱动因子的交互探测结果

因子探测 q 统计量	人均 GDP	人口密度	HAI	植被覆盖
人均 GDP	0.480 4			
人口密度	0.749 8	0.719 9		
HAI	0.893 6	0.894 2	0.853 0	
植被覆盖	0.605 2	0.786 5	0.913 4	0.347 4

2010 和 2015 年的生态服务价值,探讨了土地利用/覆盖变化对流域 ESV 变化的影响,同时运用地理探测器探测了社会经济因素、人口密度、人为干扰因子及植被覆盖度对研究区生态服务价值的解释力,结果如下所示。

5.1.1 2005-2015 年湘江流域生态服务价值总体上呈现降低趋势,林地、草地和耕地服务价值减少,未利用地、水域和建设用地的服务价值增加。各土地利用/覆盖类型中服务价值从高到低顺序依次为林地 > 耕地 > 水域 > 草地 > 未利用地 > 建设用地;空间变化表现为上游服务价值减少量最小,其次是中游地区,服务价值减少最明显的是以长株潭城市群为代表的下游地区,尤其是新江河、捞刀河和浏阳河流域。

5.1.2 根据生态系统服务价值计算的敏感度结果的分析来看,未利用地生态系统服务价值系数对生态系统服务总价值的变化影响最小,而服务价值系数对生态系统服务总价值的变化影响最大的是林地生态系统。对于各类土地利用生态系统的服务价值,林地、耕地的生态服务价值占比较高。林地作为天然植被,其生态服务价值占比最高,2005-2015 年湘江流域植被面积呈负增长趋势,建设用地面积增加明显,使得生态系统服务价值随之降低;同时由于退田还湖政策、水利工程建设以及人类活动的干扰,2005-2015 年湘江流域耕地面积减少,对生态系统服务价值的减少产生了影响。

5.1.3 人为影响综合指数是影响流域 ESV 的主导因子,人为影响因子、人均 GDP、人口密度及植被覆盖的交互增强效应共同影响了湘江流域生态系统的服务价值,流域 ESV 不是由单一影响因子造成的,而是由不同影响因子共同作用的结果。要保持湘江生态服务价值的稳定,维持社会经济的可持续发展,最主要的是要合理进行土地利用开发模式,优化土地资源配置,保障土地利用的可持续性,促进土地生态系统功能的优化。控制城市化发展步伐的同时也要保护好与人类生活密切相关的生态环境。

5.2 讨论

关于流域生态系统服务价值的研究一直都是研究的热点,但是大多数是基于市、县、乡镇尺度,以子流域为评价单元的生态服务价值研究比较少见。对于生态系统服务的价值化,目前国际上还没有公认的标准方法,不管采用哪种方法,都会反映出被忽视掉的或者没有被计量的一些生态系统服务的价值^[20]。本文基于谢高地等人的单位面积价值当量因子的研究来综合评价湘江流域生态系统服务价值及其驱动机制,该方法虽以价值货

币量的形式计算 ESV,但与研究区生态系统所具有的实际服务价值并不完全等同,存在一定误差,还需要进一步提高研究结果的精准度,使研究结果更可靠。

参考文献:

- [1] Lautenbach S, Kugel C, Lausch A, et al. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(10): 676-687.
- [2] 丁丽莲,王奇,陈欣,等. 1984-2014 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. 生态学报,2019,39(8): 2973-2985.
- [3] 程晰钰,荆延德,宋鸽. 1990-2015 年南四湖流域生态系统服务价值变化及其驱动力分析[J]. 环境生态学,2020,2(21): 33-88.
- [4] 朱春晓,张生伟,张玉娟. 松花江流域(哈尔滨段)生态系统价值权衡与协同关系研究[J]. 测绘工程,2020,29(5): 66-70+76.
- [5] 王怡帆,师学义. 基于小流域的汾河上游生态服务价值演变[J]. 水土保持研究,2020,27(4): 262-269+278.
- [6] 徐彩仙,巩杰,李焱,等. 基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J]. 生态学报,2020,40(13): 4291-4301.
- [7] 程建,程久苗,吴九兴,等. 2000-2010 年长江流域土地利用变化与生态系统服务功能变化 [J]. 长江流域资源与环境,2017(6): 894-901.
- [8] 刘叶叶,毛德华,宋平,等. 基于污染损失和逐级协商的生态补偿量化研究——以湘江流域为例[J]. 生态科学,2020,39(4): 193-199.
- [9] 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.
- [10] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报,2008,23(5): 911-919.
- [11] 谢高地,肖玉,甄霖,等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(3): 10-13.
- [12] 刘海,殷杰,林苗,等. 基于 GIS 的鄱阳湖流域生态系统服务价值结构变化[J]. 生态学报,2017,37(8): 1-13.
- [13] 马依拉·热合曼,买买提·沙吾提,尼格拉·塔什甫拉提,等. 基于遥感与 GIS 的渭库绿洲生态系统服务价值时空变化研究[J]. 生态学报,2018,38(16): 5938-5951.
- [14] 董丽君. 基于景观格局的山地平原过渡带生态系统服务价值评估及其驱动力研究——以成都平原与龙门山过渡带为例[D]. 成都: 四川师范大学,2017.
- [15] 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.
- [16] 向杨,周志翔. 基于地理探测器的城市热岛驱动因素分析——以武汉市为例[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(8): 1768-1779.
- [17] 黄木易,方斌,岳文泽,等. 近 20a 来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测[J]. 地理研究,2019,38(11): 2790-2803.
- [18] 史洋洋,吕晓,黄贤金,等. 江苏沿海地区耕地利用转型及其生态系统服务价值变化响应 [J]. 自然资源学报,2017,32(6): 961-976.
- [19] 徐丽芬,许学工,罗涛,等. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例 [J]. 地理研究,2012,31(10): 1775-1784.
- [20] 李付杰,孙倩莹,王世曦,等. 2000-2015 年三江源区生态系统服务评估[J]. 环境工程技术学报,2020,10(5): 786-797.

作者简介: 韩英(1997-),女,湖南永州人,硕士生,主要研究方向为 GIS 技术应用。

通信作者: 郑文武(1978-),男,湖南常德人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为遥感与 GIS 应用。

(2020-12-11 收稿 刘晓佳编辑)