

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2022162

引用格式: 阳煜瑾,杨帆,徐桢妮,等. 洞庭湖区生态服务 - 经济发展时空协调分析与优化[J]. 自然资源遥感,2023,35(3):190 - 200. (Yang Y J,Yang F,Xu Z N,et al. Analysis and optimization of the spatio - temporal coordination between the ecological services and economic development in the Dongting Lake area[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(3):190 - 200.)

洞庭湖区生态服务 - 经济发展时空协调分析与优化

阳煜瑾,杨帆,徐桢妮,李祝
(中南大学建筑与艺术学院,长沙 410075)

摘要: 经济发展过程中,常伴随出现生态环境质量下降和服务能力失调等问题。理清生态与经济两者之间的关系、明确两者的空间差异,是实现区域可持续发展的前提。该文以 2000 年、2010 年和 2020 年洞庭湖区 3 期遥感影像及社会经济数据为基础,采用价值当量法计算生态系统服务价值,并测算湖区内 24 个区县单元生态系统服务与经济的协调性、一致性指数,综合探讨生态服务与经济的变化关系及空间聚集特征,进而为区域生态服务与经济发展协调平衡提出针对性的优化措施。结果表明: ①湖区生态系统服务价值总量上由 2000 年的 2 615. 41 亿元下降至 2020 年的 2 556. 46 亿元,空间分布上呈中部高、外围山体次之、交界丘陵平原最低的圈层式格局; ②单项生态服务价值中,水文调节的贡献率最高,维持养分循环的贡献率较低,研究期内,除生物多样性和美学景观外其他类型生态服务价值均出现不同程度的减少,其中水文调节的减少量最高,占总减少量的 70% 以上; ③从生态服务与经济发展的时空变化情况来看,湖区内部生态差距较为平稳,经济差距持续拉大,各区县生态经济协调度良好,但生态经济一致性水平较低,生态与经济空间聚集存在明显差异,生态聚集大于经济聚集的区域主要位于洞庭湖及沿岸; ④探究生态服务价值空间差异,发现人为扰动、高程、坡度、温度和降水等是重要驱动因子。因此,为促进洞庭湖区生态与经济和谐发展,削弱生态与经济差距,应在严格保护自然基底、加强人为引导利用、促进生态资源向经济产品转化等方面提出可操作性的措施。

关键词: 土地利用; 生态服务价值; 经济发展; 耦合协调; 洞庭湖区

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 2097 - 034X(2023)03 - 0190 - 11

0 引言

生态系统具有产品供给和调节服务等重要实物与非实物功能,蕴含巨大的经济价值和生态价值^[1-3]。然而伴随着经济发展,城市化、工业化推进,环境污染和资源短缺等生态问题日趋严重,经济与生态之间的关系已成为重要的社会和政治问题^[4]。

为了解区域生态系统状况,1990 年起各国学者对生态系统服务价值(ecosystem services value,ESV)展开了系列研究^[2],主要方法包括能值分析法、物质量分析法和价值分析法等^[5]。价值量分析法计算简单、操作方便而被广泛使用^[6]。1997 年 Costanza 等^[7]利用此方法率先构建了 ESV 估算的经典研究标准及方法,并对全球 ESV 进行科学

估算。随后谢高地等^[8-10]根据我国的区域性特征,制定了中国生态系统服务价值当量因子表,为国内 ESV 估算演化提供了重要依据。由于价值量分析以货币为最终结果表达形式^[11],与国内生产总值(gross domestic product,GDP)具有可比性,有助于判断生态系统服务与经济发展之间的互动关系,因而被广泛应用于生态经济关联分析之中。吴建寨等^[12]、Wang 等^[13]和陈端吕等^[14]计算任意时间间隔下生态经济协调度与任意时期生态经济一致性指数,判断研究区内生态经济的相互关系;Li 等^[15]通过变异系数描述 ESV 和 GDP 的集中分散程度;阳华等^[16]将重心模型引入生态评价中探究生态服务价值与经济重心的因果扰动。前人研究综合考虑地理学、经济学与生态学等众多学科,为生态经济研究提供了理论基础与技术途径。但

收稿日期: 2022 - 04 - 22; 修订日期: 2022 - 10 - 10

基金项目: 国家自然科学基金项目“城镇化进程中洞庭湖流域水网空间的时空演变与协同治理”(编号: 72174211)、“城市绿地系统规划与雨洪管理协同的效能评估与实现机理研究”(编号: 51608535)、湖南省自然科学基金项目“基于生态修复与水文过程耦合模拟与量化的湘江流域滨水空间整体结构优化及适宜性设计研究”(编号: 2018JJ3667)和湖南省哲学社会科学基金项目“基于生态环境保护体制优化的长株潭绿地资源跨域联动治理研究”(编号: 19YBA347)共同资助。

第一作者: 阳煜瑾(1998 -),女,硕士研究生,研究方向为城市规划。Email: yangyujin98@163.com。

通信作者: 杨帆(1982 -),女,副教授,研究方向为城市规划。Email: 582228988@qq.com。

目前大多数研究仅关注生态 - 经济之间的整体变化趋势,缺乏对区域内各单元生态、经济空间差异水平与聚集特征的探讨,同时在改善生态环境方面未从驱动因子角度给予合理建议。

洞庭湖区位于湖南湖北两省交界地带,是长江中下游重要的生态节点^[17],也是湖南省北部生态屏障。2014 年国务院批复《洞庭湖生态经济区规划》,推动岳阳、常德和益阳等城市圈发展,为湖区带来机遇的同时,也带来了更大的生态压力。因此,本文以洞庭湖区(岳阳、常德和益阳)为研究对象,以其中 24 个区县为研究单元,基于 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用空间数据,对其生态系统服务价值进行量化计算,构建生态经济的一致性、协调度指数,探究生态与经济两者间时空差异情况,并通过分析 ESV 空间分异的驱动因素,提出区域生态系统服务与经济之间可持续发展的优化建议。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

洞庭湖区包含岳阳、常德和益阳 3 市,总面积为 4.5 万 km²,是长江中下游地区重要的水能储运、生物栖息场所,也是中部城市发展的重要补充(图 1)。湖区地势从中部水域到四周山体逐渐升高,呈现圈层式分布^[18],由内向外为中部河湖水体区、环状平原丘陵区、外部山地区。区内包含林地、草地、滩涂

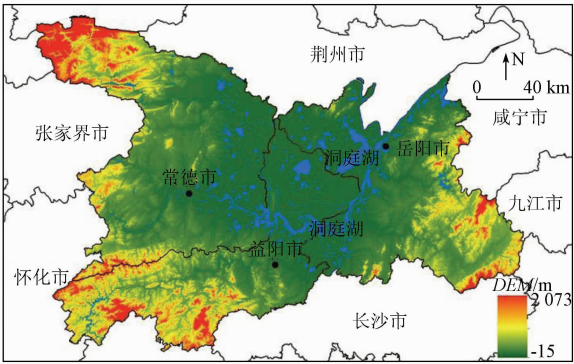


图 1 洞庭湖区位置示意图
Fig.1 Geographic location of Dongting Lake area

和湿地等多种生态用地,但目前通过占用水域和耕地等已成为湖区社会经济发展和建设用地扩张的重要途径。因此,量化湖区内 ESV,分析生态系统服务与经济的时空变化,是明确区域未来发展重点的数据基础,也是推动洞庭湖区生态文明与社会经济和谐发展的理论支撑。

1.2 数据来源

本文基于湖区 2000 年、2010 年和 2020 年 Landsat TM/OLI 遥感数据。在 ArcGIS 10.2 和 ENVI 平台的支持下,依据《全国土地分类》将湖区用地类型划分耕地、林地、草地、湿地、未利用地、水域和建设用地 7 类,空间分辨率为 30 m,经过精度检验后 Kappa 值均达到 0.80 以上,符合研究要求。粮食生产数据来源于《湖南省农村统计年鉴》,社会经济数据来源于湖南省及各市统计年鉴,高程数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/sources/>),道路交通数据来源于 OSM 平台(<https://www.openstreetmap.org/#map=10/31.1458/121.3385>),年均温和降水来源于国家气象科学研究中心(<http://data.cma.cn/>)。

2 研究方法

2.1 生态服务价值评估

2.1.1 当量因子表构建

2003 年谢高地等^[8]在 Costanza 生态系统服务功能分类的基础上建立中国陆地生态系统单位面积服务表,2015 年又在此基础上进行改进,形成单位面积价值当量因子^[10]。本文以单位面积 ESV 当量表为基础,结合湖区实际及段瑞娟等^[19]和杨倩^[20]研究成果对当量表进行修正。

一单位当量因子为生态系统对生态功能的贡献能力,经测算为平均粮食单产市场价值的 1/7^[21]。本文利用 2000—2020 年湖区平均粮食作物单产(5 837.78 kg/hm²)和粮食作物价格(2020 年稻谷、玉米平均价格为不变价,2.71 元/kg)修正单位面积农田粮食作物的经济价值,计算得到一当量因子为 2 264.20 元/hm²,构建区域 ESV 系数见表 1。

表 1 洞庭湖区单位面积 ESV 系数

Tab.1 ESV coefficients per unit area in the Dongting Lake area

生态系统服务	土地利用类型					
	耕地	林地	草地	湿地	未利用地	建设用地
食物生产	1 922.40	701.11	859.43	1 153.44	0.00	1 809.32
原材料供应	904.66	1 605.77	1 266.52	1 130.83	0.00	520.18
水资源供给	45.23	836.81	701.11	5 857.68	0.00	18 749.09
气体调节	1 515.31	5 314.88	4 455.45	4 297.14	45.23	1 741.47

(续表)

生态系统服务	土地利用类型						
	耕地	林地	草地	湿地	未利用地	水域	建设用地
气候调节	814.19	15 899.41	11 783.21	8 141.95	0.00	5 179.18	-8 752.59
净化环境	226.17	4 500.69	3 890.04	8 141.95	226.17	12 552.17	-6 490.94
水文调节	610.65	7 938.40	8 639.51	54 799.82	67.85	231 231.27	-10 245.28
土壤保持	2 329.50	6 468.32	5 427.96	5 224.42	45.23	2 103.34	3 731.73
维持养分循环	271.40	497.56	407.10	407.10	0.00	158.32	0.00
生物多样性	294.01	5 880.29	4 930.40	17 799.20	45.23	5 767.21	0.00
美学景观	135.70	2 578.28	2 171.19	10 697.61	22.62	4 274.52	4 704.24
总计	9 069.22	52 221.54	44 531.92	117 651.12	452.33	284 086.07	-17 052.85

2.1.2 当量系数修正

区域 ESV 存在时间和空间上的差异性^[10]。参考谢高地等^[10]和潘耀忠等^[22]成果,引入植被覆盖时空调节因子对各栅格单元逐一修订,由于水域、未利用地及建设用地不适合用植被覆盖度衡量^[22],故以上 3 种用地类型植被覆盖度取值为 1,其计算公式为:

$$f_j = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}, \tag{1}$$

式中: f_j 为第 j 个栅格的植被覆盖度; $NDVI$ 为归一化植被指数; $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别为此像元全年 $NDVI$ 的最大值和最小值。

$$R_j = \frac{f_j}{f_{\text{mean}}}, \tag{2}$$

式中: R_j 为每个栅格的调整系数; f_{mean} 为区域内植被覆盖度均值。

2.1.3 ESV 核算

根据各年份湖区各类用地量,利用表 1 价值系数及修正系数,通过式(3)对研究区域 ESV 值进行加乘,并以区县为单元统计各地区 ESV 总值,公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_i R_j M_i, \tag{3}$$

式中: E 为区域 ESV 值; S 为用地面积; M 为价值系数; i 为用地类型; j 为栅格序号。

2.2 生态系统服务与经济时空协调关系

2.2.1 重心计算与变异系数

对不同变量不同时期的重心进行研究,有利于更好地把握区域生态服务价值与经济发展空间耦合关系及时空变异情况,生态经济重心距离越近,代表重心耦合程度越高,公式为:

$$X = \frac{\sum_{k=1}^K A_k X_k}{\sum_{k=1}^K A_k}, \tag{4}$$

$$Y = \frac{\sum_{k=1}^K A_k Y_k}{\sum_{k=1}^K A_k}, \tag{5}$$

式中: (X,Y) 为 ESV 或 GDP 的重心坐标; (X_k,Y_k) 为第 k 个区县的城市中心坐标; A_k 为第 k 个县 ESV 或 GDP 的值; K 为区县单元数量。

变异系数(coefficient of variation,CV)是无量纲指标,用来反映区域内各单元之间在某项指标上的差异或离散程度。本文利用该指标反映洞庭湖区整体在生态或经济上的不平衡情况。系数越小,表明各地区 ESV(GDP)差距越小,公式为:

$$CV = \frac{1}{A_0} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (A_k - A_0)^2}{K}}, \tag{6}$$

式中 A_0 为 ESV 或 GDP 的平均值。

2.2.2 生态经济协调性与一致性计算

目前对生态经济协调的评价并没有统一的标准,本文通过生态经济协调性(eco - environment health,EEH)及一致性指数(consistency of eco - economic,CEE)表达各区县生态经济的变化情况和差异关系。EEH 代表某时期内生态服务与经济发展之间的动态变化情况,由于各单元 GDP 值在研究期内持续增长,故 $EEH < 0$ 代表生态经济呈现失衡状态, $EEH > 0$ 则代表生态经济好转,值越接近于 0 代表生态经济的协调程度越高^[14]。CEE 值用来反映单元在湖区生态经济的集聚能力和潜能,CEE 值越接近于 1 表明生态经济一致性越高, $CEE > 1$ 代表该单元生态聚集大于经济聚集,具有良好的生态潜能,反之代表经济聚集大于生态聚集^[6],公式为:

$$EEH_k = \frac{\frac{ESV_{kj} - ESV_{ki}}{ESV_{ki}}}{\frac{GDP_{kj} - GDP_{ki}}{GDP_{ki}}}, \tag{7}$$

式中: EEH_k 为第 k 个区县的生态经济协调度; ki 和 kj 分别为第 k 个县研究期的始、末年份。

$$CEE_k = \frac{R_{ESV_k}}{R_{GDP_k}} = \frac{\frac{ESV_k}{\sum_{k=1}^K ESV_k}}{\frac{GDP_k}{\sum_{k=1}^K GDP_k}}, \quad (8)$$

式中： CEE_k 、 R_{ESV_k} 与 R_{GDP_k} 分别为第 k 个县的经济一致性指数、 ESV 聚集水平和 GDP 聚集水平。

2.3 生态服务价值空间分异驱动因子

2.3.1 ESV 人为影响指数

洞庭湖区是人类活动的频繁,土地利用是人为活动的表征反映,依据前人研究^[23-24],计算湖区受人类活动影响强度 (human activity index, HAI), 公式为:

$$HAI = \sum_{i=1}^n \frac{A_i P_i}{T}, \quad (9)$$

式中： A_i 为第 i 类用地面积； T 为用地总面积； P_i 为人为影响强度参数,研究采用层次分析法对 P_i 赋值,耕地 0.67、林地 0.13、草地 0.12、湿地 0.15、水域 0.11、建设用地 0.96、未利用地 0.05。

2.3.2 地理探测器

地理探测器是探究空间分异性,揭示其背后驱动力的统计学方法。 q 值用来度量驱动因子对因变量解释能力, q 值越大代表解释因变量的能力越强^[25-26]。公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}, \quad (10)$$

式中： $h=1, \cdots, L$, 为变量 Y 或因子 X 的分层 (分类或分区)； N_h 和 N 分别为层 h 和全区单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区 Y 值的方差。区域生态系统服务是自然、社会经济共同作用的结果^[27], 高程 (X_{11})、坡度 (X_{12})、温度 (X_{13})、土壤侵蚀 (X_{14})、降水 (X_{15})、HAI (X_{21})、道路网密度 (X_{22})、距铁路距离 (X_{23})、第一产业密度 (X_{24})、第二和第三产业密度 (X_{25}) 均会对生态系统服务能力造成影响。因此本文选取这 10 项 (图 2) 为地理探测因子,以 2020 年湖区生态服务价值为因变量,探讨湖区 ESV 空间分异的驱动机制。

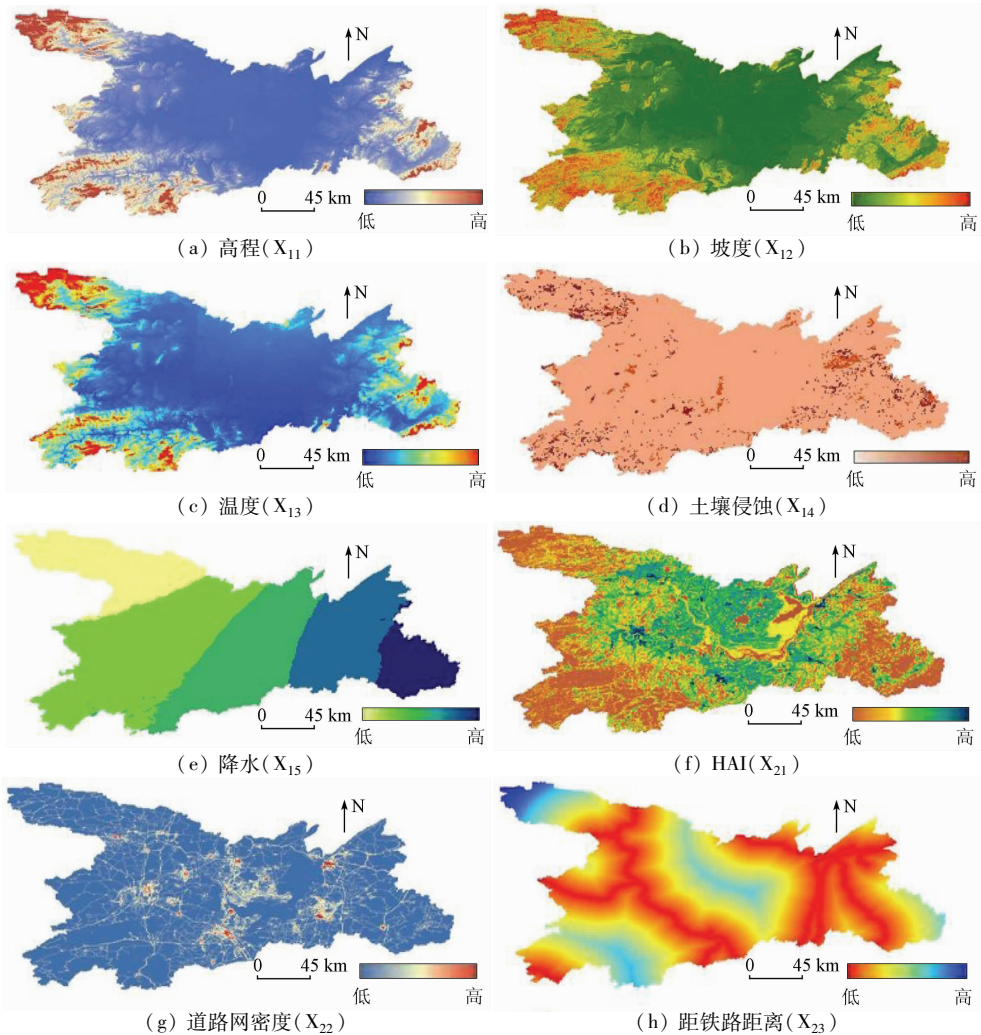


图 2-1 ESV 空间分异驱动因子
Fig. 2-1 Spatial layout of drivers for heterogeneity of ESV

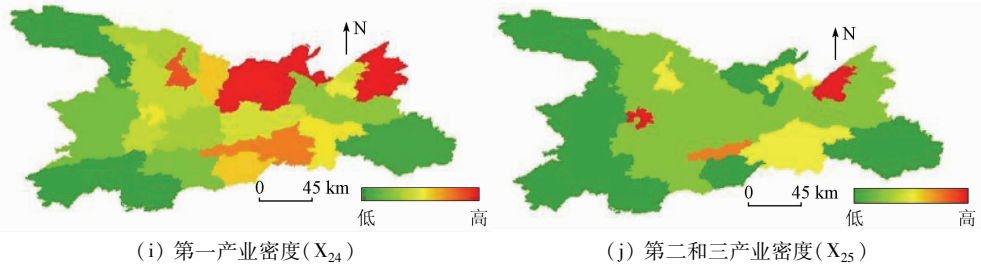


图 2-2 ESV 空间分异驱动因子

Fig. 2-2 Spatial layout of drivers for heterogeneity of ESV

3 结果与分析

3.1 土地利用类型变化特征

湖区土地利用以林地和耕地为主,占湖区总用地的 80% 以上,其次是水域和湿地,草地和未利用地所占比例最小。如表 2 和图 3 所示,2000—2020

年,耕地、林地、草地比例持续减少,建设用地大幅度增长,20 a 间湖区新增建设用地为 537.65 km²。水域先增加后减少,2000—2010 年间由于退耕、退林还湖等政策,水域面积增加 94.87 km²。但在 2010—2020 年间湖区主体湖面呈现出收缩状态,减少 253.86 km²,水域大面积向湿地转换。

表 2 洞庭湖流域土地利用变化

Tab.2 Types of land use and their variations in the Dongting Lake area

年份	统计量	耕地	林地	草地	湿地	未利用地	水域	建设用地
2000 年	面积/km ²	17 153.85	21 103.9	787.08	1 626.37	0.46	4 035.42	881.79
	占比/%	37.63	46.29	1.73	3.57	0.00	8.85	1.93
2010 年	面积/km ²	16 933.75	21 075.51	743.27	1 683.55	0.51	4 130.29	1 020.74
	占比/%	37.15	46.23	1.63	3.69	0.00	9.06	2.24
2020 年	面积/km ²	16 644.74	20 965.75	721.20	1 948.92	13.59	3 876.43	1 419.44
	占比/%	36.51	45.99	1.58	4.27	0.03	8.50	3.11

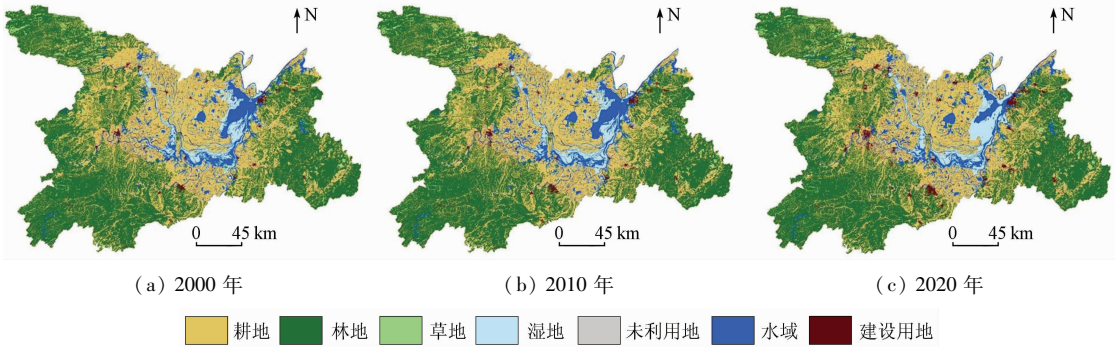


图 3 洞庭湖区土地利用类型及变化

Fig. 3 Types of land use and their variations in the Dongting Lake area

表 3 为洞庭湖区 2000—2020 年土地利用转移矩阵,由表 3 可知,2000—2020 年近 20 a 来耕地、水域、林地的转出面积最大,分别为 1 517.34 km², 857.09 km²和 854.29 km²,建设用地转入的主要来源

表 3 洞庭湖区 2000—2020 年土地利用转移矩阵

Tab.3 Land use transfer matrix in the Dongting Lake area from 2000 to 2020

年份	土地利用类型	2000 年						
		草地	耕地	建设用地	林地	湿地	水域	未利用地
2020 年	草地	659.79	14.69	1.03	41.67	0.93	2.49	0.00
	耕地	11.96	15 634.26	98.20	502.95	189.61	206.28	0.01
	建设用地	6.54	406.79	740.18	230.42	6.01	29.38	0.05
	林地	66.33	579.67	16.86	20 244.17	3.40	48.30	0.07
	湿地	36.17	74.02	3.23	3.39	1 262.30	569.71	0.00
	水域	4.93	439.86	22.02	69.67	162.74	3 176.46	0.00
	未利用地	0.54	2.31	0.21	6.19	1.28	0.93	0.33

为耕地、林地和水域,分别为 406.79 km²、230.42 km²和 29.38 km²。转换模式上耕地向建设用地转换、林地与耕地的双向转换、水域向湿地转换是土地利用变化的主要类型。

3.2 ESV 变化特征

表 4 为洞庭湖区单项 ESV 及其变化,如表 4 所示,2000—2020 年间湖区 ESV 值整体减少 58.95 亿元,各单项生态服务功能除生物多样性和美学景观外均下降,这是因为除建设用地、未利用地和湿地外,其他地类明显减少。此外,单项 ESV 中水文调节贡献率最大,变化率最高。其中 2000—2010 年,洞庭湖区 ESV 值由 2 615.41 亿元增加至 2 641.29

亿元,增加了 25.88 亿元,主要由于区域水文调节服务能力提升,由此可见该时期内水域面积增加抵消了耕地、林地减少以及建设用地扩张带来的消极影响。2010—2020 年间湖区 ESV 值减少 39.77 亿元,水文调节、气候调节和净化环境等生态服务能力均出现下降。其一,这段时期洞庭湖生态经济区成立,同时《湖南省推进新型城镇化实施纲要(2014—2020 年)》出台,受新型城镇化改革政策加持,各市大力推进城市化进程,导致建设用地持续占用耕地和林地等生态用地,区域植被覆盖水平降低。其二,近年来洞庭湖干流水位下降^[28],导致大面积高价值水域向价值相对较低的湿地转变。

表 4 洞庭湖区单项 ESV 及其变化
Tab. 4 Dongting Lake area's single ecosystem service value and its change

生态系统服务类型	ESV/亿元			ESV 变化量/亿元		
	2000 年	2010 年	2020 年	2000—2010 年	2010—2020 年	2000—2020 年
食物生产	57.63	54.16	53.46	-3.47	-0.70	-4.17
原材料供应	54.34	54.16	53.46	-0.19	-0.70	-0.89
水资源供给	104.17	106.22	101.52	2.05	-4.70	-2.65
气体调节	155.68	155.41	153.80	-0.27	-1.61	-1.88
气候调节	385.20	383.80	376.13	-1.41	-7.67	-9.08
净化环境	160.10	160.50	154.90	0.41	-5.60	-5.20
水文调节	1 198.01	1 220.92	1 155.38	22.91	-65.54	-42.63
土壤保持	201.01	201.10	200.28	0.08	-0.82	-0.73
维持养分循环	16.78	16.72	16.53	-0.05	-0.20	-0.25
生物多样性	185.24	186.36	187.31	1.12	0.95	2.07
美学景观	97.24	98.72	101.01	1.47	2.29	3.76
总计	2 615.41	2 641.29	2 556.46	25.88	-84.83	-58.95

洞庭湖区 ESV 空间分布如图 4 所示,中部水域及湘资沅澧 4 大水系价值量最高,周围山地次之,主要由于这些区域水热条件充足,拥有较高的生物量

和植被覆盖^[29],且本身受人类活动影响程度较小。而水域与山体之间的平地丘陵价值量最低,由于价值量相对较低耕地和负向价值的建设用地在此聚集。

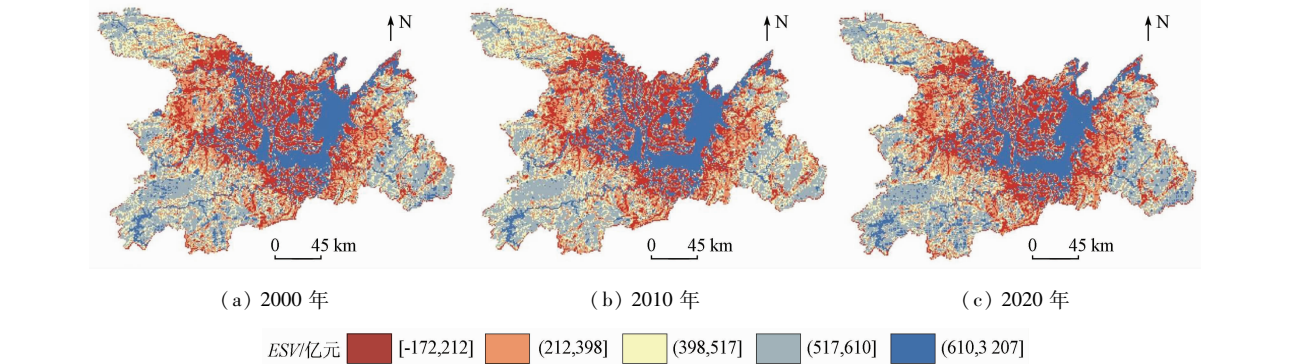


图 4 洞庭湖区 ESV 空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of ESV in the Dongting Lake area

3.3 ESV 与 GDP 时空协调分析

本文以区县为单元对区域 ESV 与 GDP 为代表的生态服务与经济发展情况进行定量计算与时空协调分析(图 5)。据统计,洞庭湖区 2000 年、2010 年和 2020 年 GDP(按 2020 不变价计算)总量分别是 819.16 亿元、3 285.48 亿元和 9 637.82 亿元,相比

于 ESV 的起伏性变化,GDP 平均以 440.93 亿元/a 的速度大幅上涨。其与单项 ESV 对比发现,湖区粮食生产、原材料供应、气体和气候调节等生态服务功能与经济增长呈反比,生物多样性与美学景观则与经济增长呈正比。

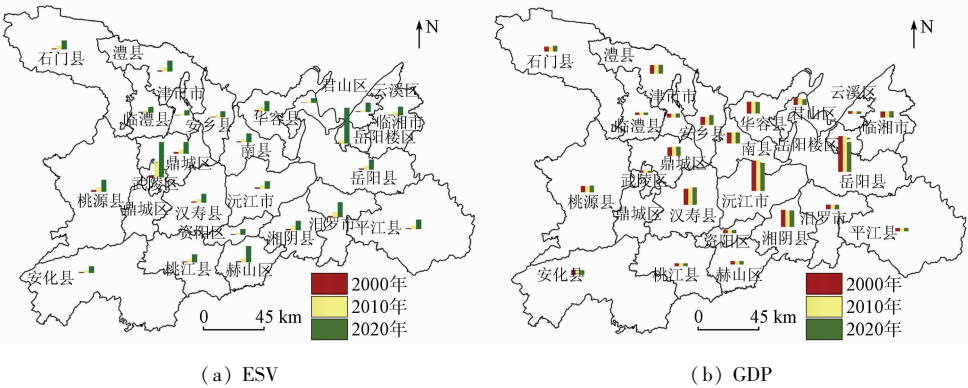


图 5 洞庭湖区 ESV 和 GDP 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of ESV and GDP in the Dongting Lake area

湖区总体来看,就 ESV 和 GDP 空间重心坐标而言,ESV 重心在 GDP 重心的东北方向,但重心点位置差距较小具有耦合特征,同时随时间推移两者同步向西迁移,与东侧湖区水体缩减,水文调节功能减弱以及西侧常德市积极应对生态城市建设,提升湿地、水体服务能力密切相关,具体如表 5 所示。同时就 CV 而言,ESV 的 CV 减小趋势稳定,而 GDP 的 CV 随时间的推移而增大且变化较大,说明 ESV 的区内差异维持一个相对稳定值,GDP 差异与不平衡性则越来越大。

表 5 ESV 与 GDP 的变异系数 CV 与重心坐标

Tab.5 Coefficient of variance and gravity center coordinate of ESV and GDP					
	指数	2000 年	2010 年	2020 年	
重心坐标	ESV	经度/(°)	112.45	112.44	112.42
		纬度/(°)	29.09	29.09	29.09
	GDP	经度/(°)	112.27	112.15	112.18
		纬度/(°)	29.06	29.02	29.07
CV	ESV	0.733 6	0.729 7	0.694 4	
	GDP	0.466 9	0.665 9	0.699 5	

湖区内各区县 2000—2020 年 EEH 和 2020 年 CEE 指标如表 6 所示。湖区 EEH 在 -0.02 ~ 0.01 之间,生态经济协调性良好,其中君山区的 EEH 最低为 -0.018 6,津市市 EEH 最高为 0.008 3,EEH 的正负单元数基本相当。2000—2020 年间各区县的经济快速发展,经济的增长率远大于生态的变化程度,这一方面得益于工业化、机械化的推进,另一方面是由于区域交通发展提供的吸引力。从 CEE 来看,2020 年湖区生态服务价值与经济集聚匹配程度较低,岳阳市的临湘、平江县,常德市的汉寿县、石门县 CEE 均大于 2,说明其在湖区生态基础较好,但经济发展水平较弱,生态集聚水平远高于在湖区的经济集聚水平。岳阳楼区、云溪区、津市市、临澧县、武陵区和赫山区均小于 0.5,说明在区域经济发展水平处于湖区前列,但生态集聚与服务的水平较差,

从空间上可看出以上区域均为建设量较大、人口密集,为各市的核心功能区。

表 6 洞庭湖区 EEH 与 CEE 测算结果

Tab.6 EEH and CEE in the Dongting Lake area

市	区县	EEH	CEE
岳阳市	岳阳楼区	-0.006 7	0.196 5
	岳阳县	-0.008 5	1.672 1
	云溪区	-0.010 1	0.489 1
	华容县	-0.000 9	0.790 9
	君山区	-0.018 6	0.505 4
	临湘市	0.002 9	2.001 8
	汨罗市	0.001 1	0.952 3
	平江县	0.000 9	3.117 4
	湘阴县	-0.001 8	1.667 4
常德市	安乡县	0.004 3	0.197 9
	鼎城区	0.001 6	1.301 3
	汉寿县	0.006 3	3.276 0
	津市市	0.008 3	0.381 7
	澧县	0.004 8	0.973 6
	临澧县	-0.000 7	0.476 8
	石门县	0.003 6	2.185 3
	桃源县	0.000 8	1.503 4
	武陵区	-0.010 3	0.161 7
益阳市	安化县	0.001 1	0.809 6
	赫山区	-0.005 9	0.434 6
	南县	0.000 9	1.323 3
	桃江县	-0.001 8	1.147 3
	沅江市	-0.007 1	1.954 1
	资阳区	0.000 5	0.506 5

3.4 ESV 空间分异驱动因素

洞庭湖区 ESV 在空间分布差异受到流域自然因子和社会经济因子共同作用^[30],其中 HAI、高程、坡度和降水等影响程度较大,而道路密度、距离铁路距离和土壤侵蚀对 ESV 空间分异影响的贡献率相对较小。HAI 对生态服务价值的影响程度最高为 0.44,其次是坡度、高程、降水和第一产业密度,其影响力都在 0.15 以上,是影响流域生态服务价值空间分异的重要因素。而道路密度和土壤侵蚀的解释力在 0.1 以下,一定程度上影响着因变量的空间分异,

但程度较弱,ESV 空间分异的驱动力数值见表 7。

表 7 ESV 空间分异的驱动力 q

Tab.7 Value of determinant(q)about factor
detection for spatial heterogeneity of ESV

驱动 因子	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}
q	0.20	0.19	0.11	0.01	0.19	0.44	0.01	0.04	0.19	0.07

4 讨论与建议

洞庭湖区是我国长江中下游地区重要的生态节点,对全域生态具有重要影响^[31],分析湖区生态系统服务价值的空间分布及其与经济增长之间的关系是实现资源合理利用的前提。结果表明,区域内经济发展、城市化的推进,湖区用地结构发生改变,部分高生态价值用地转变为低生态价值用地或城市用地,导致研究期内 ESV 整体减小。同时,20 a 来湖区内部 ESV 空间结构相对稳定,而经济差距则进一步拉大。一方面,由于湖区内资源要素分布不均匀,山水河湖等生态服务较高的区域,经济发展尚有进步空间;另一方面,占据交通信息条件与人口资源等发展要素的城市集中建成区域,经济发展迅速。

因此,就整个区域而言,应构建以洞庭湖及周边水体为生态廊道,周边山体为生态保护屏障的生态安全格局。识别生态保护红线,强化对 ESV 高值区的保护,严格限制开发利用。其次,以区域各区县生态经济的差异和影响生态服务价值的空间驱动为依据,为区域内部生态经济协调发展提供针对性指导方案:① $EEH > 0$ 且 $CEE > 1$ 的临湘市、平江县、鼎城区和汉寿县等地,应当继续发挥生态经济优势,增强经济发展动能,促进区域高质量发展;② $EEH > 0$ 且 $CEE < 1$ 的汨罗市、安乡县、津市市和澧县等地,在保护当地自然环境本底的同时,弥补生态短板,提高生态环境质量,强化与周边区域的生态联系,遵循因地制宜的土地利用开发模式;③ $EEH < 0$ 且 $CEE > 1$ 的岳阳县、湘阴县和桃江县等地,应转变经济发展模式,重视生态环境保护治理监控机制,借鉴生态经济稳定协调发展地区的模式,坚持产业转型升级与推动高质量发展,多维度、综合全面地探究新型发展道路^[32];④ $EEH < 0$ 且 $CEE < 1$ 的岳阳楼区、云溪区、临澧县、武陵区和赫山区等地,高度重视用地转变对生态的影响,在实现用地节约集约利用,控制建设用地总量提高利用效率^[33],促进产业高质量转型升级,提高人为因素对区域生态的干预作用,建立合理的定向化生态补偿机制,完善区域生态修复治理^[34]。

5 结论

本文研究利用当量因子法对 2000 年、2010 年和 2020 年洞庭湖区 ESV 进行了货币化定量核算,计算总量上与邓楚雄等^[35]成果较为接近。同时,由于本文计算 EEH 和 CEE 指标,对生态经济之间的关系做出了纵向时间维度以及横向各区县的对比分析,并通过探讨生态服务价值的驱动因子,为区域生态经济平衡提出了针对性的建议。本文主要结论如下:

1)研究期内湖区 ESV 经历了先上升后下降的过程,与土地利用的转换存在直接关联。湖区 2000 年 ESV 为 2 615.41 亿元,2010 年 2 641.29 亿元,2020 年减至 2 556.46 亿元,主要由于水域、耕地和林地的减少,建设用地的增加。从空间上,湖区 ESV 高低值分布特征呈现出中间水域高、四周山体次之、环状平原最低的格局。从单项 ESV 来看,水文调节功能占比最高,这是因为水文调节的单项面积 ESV 系数较高同时湖区水域面积广阔,但在 2000—2020 年间,区域内水文调节 ESV 总体呈现出递减趋势,湖区应当加大对现有水域的保护,避免水域向其他用地类型转换。

2)湖区生态经济的关系既存在耦合关系又存在差异性。就湖区整体而言,耦合性体现在 ESV 与 GDP 的空间重心区域基本一致。同时,两者又存在差异性,湖区 ESV 的差异值正在逐渐缩小,而 GDP 的差异值正在进一步拉大。就各区县单元而言, EEH 指数接近于 0,区域生态变化率明显小于经济的变化率。 CEE 指数来看, ESV 聚集与 GDP 聚集存在空间差异, ESV 集聚大于 GDP 集聚的主要位于洞庭湖及其沿岸, GDP 集聚大于 ESV 集聚的一般为各市中心区,及城市化水平较高的区域。

3)对 ESV 的驱动因子进行分析显示,对 ESV 影响最高的为 HAI ,其次为坡度、坡向和降水等自然因素。因此,对区域的生态经济优化,应当从保护“山水林田湖草”、强化人为干预、提供生态修复措施等方面入手,针对各单元现状采取因地制宜的方针政策。

本研究对湖区 ESV 进行计算,从多个角度对区县生态经济的协调情况进行了分析。可为区域生态服务与经济发展的优化以及各区县未来的发展重点提供重要数据基础,同时此方法对其他地区生态经济和谐发展的战略制定具有借鉴意义。但本文存在以下不足之处:①经济发展仅考虑 GDP 指标,忽略了产业结构及复杂的市场过程;②生态服务价值的

空间差异是各因子相互干扰的复杂过程,因此还需要增加对其他驱动要素及驱动因子关联影响的相关研究。

参考文献 (References):

[1] 马立新,覃雪波,孙楠,等. 大小兴安岭生态资产变化格局[J]. 生态学报,2013,33(24):7838-7845.
Ma L X, Qin X B, Sun N, et al. The pattern of ecological capital in Daxiaoxinganling, Heilongjiang Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24):7838-7845.

[2] Abernethy V D. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[J]. Population and Environment, 1999, 20(3):277-278.

[3] Termorshuizen J W, Opdam P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development[J]. Landscape Ecology, 2009, 24(8):1037-1052.

[4] 郑茜. 武汉市生态空间评价与优化研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
Zheng X. A Study on optimization and spatial estimate of ecological space in Wuhan City[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2018.

[5] 高雪玲. 秦岭山地植被生态系统服务功能及其空间特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2004.
Gao X L. Study on the service function and spatial characteristics of vegetation ecosystem in Qinling Mountains[D]. Xi'an: Northwest University, 2004.

[6] 秦晓川,付碧宏. 青岛都市圈生态系统服务-经济发展时空协调性分析及优化利用[J]. 生态学报, 2020, 40(22):8251-8264.
Qin X C, Fu B H. Spatio-temporal coordination between ecosystem services and economic development and its optimal utilization in Qingdao Metropolitan Region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22):8251-8264.

[7] 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.

[8] 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(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(2):189-196.

[9] 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(3):10-13.
Xie G D, Xiao Y, Zhen L, et al. Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005(3):10-13.

[10] 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 ecosystem service value method based on unit area value equivalent factor[J]. Journal of Natural Resource, 2015, 30(8):1243-1254.

[11] 赵景柱,徐亚骏,肖寒,等. 基于可持续发展综合国力的生态系统服务评价研究——13个国家生态系统服务价值的测算

[J]. 系统工程理论与实践, 2003(1):121-127.

Zhao J Z, Xu Y J, Xiao H, et al. Ecosystem services evaluation based on comprehensive national power for sustainable development: The evaluations on 13 countries[J]. Systems Engineering - Theory and Practice, 2003(1):121-127.

[12] 吴建寨,李波,张新时. 生态系统服务价值变化在生态经济协调发展评价中的应用[J]. 应用生态学报, 2007(11):2554-2558.
Wu J Z, Li B, Zhang X S. Ecosystem service its application in evaluation of eco-economic harmonious development[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007(11):2554-2558.

[13] Wang J H, Tian J H, Li X Y, et al. Evaluation of concordance between environment and economy in Qinghai Lake watershed, Qinghai Tibet Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(5):949-960.

[14] 陈端吕,陈哲夫,彭保发. 土地利用生态服务价值与经济发展的协调及空间分异——以西洞庭湖区为例[J]. 地理研究, 2018, 37(9):1692-1703.
Chen D L, Chen Z F, Peng B F. Spatial differentiation and coupling effect between land ecosystem services value and economic development: A case study of west Dongting Lake area[J]. Geographical Research, 2018, 37(9):1692-1703.

[15] Li T H, Ding Y. Spatial disparity dynamics of ecosystem service values and GDP in Shaanxi Province, China in the last 30 years[J]. PLoS One, 2017, 12(3):e0174562.

[16] 阳华,王兆林,孙思睿,等. 三峡库区生态系统服务价值与经济重心演变的耦合分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6):242-250.
Yang H, Wang Z L, Sun S R, et al. Coupling analysis of ecosystem service value and economic gravity evolution in the Three Gorges Reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6):242-250.

[17] 熊建新,陈端吕,彭保发,等. 洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异[J]. 地理科学, 2014, 34(9):1108-1116.
Xiong J X, Chen D L, Peng B F, et al. Spatio-temporal difference of coupling coordinative degree of ecological carrying capacity in the Dongting Lake region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(9):1108-1116.

[18] 陈端吕,陈哲夫,彭保发,等. 洞庭湖区资源环境研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 2019:214.
Chen D L, Chen Z F, Peng B F, et al. Study on the resources and environment of the Dongting Lake region[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2019:214.

[19] 段瑞娟,郝晋珉,张洁瑕. 北京区位土地利用与生态服务价值变化研究[J]. 农业工程学报, 2006(9):21-28.
Duan R J, Hao J M, Zhang J X. Land utilization and changes on eco-service value in different locations in Beijing[J]. Transactions of the CSAE, 2006(9):21-28.

[20] 杨倩. 湖北汉江流域土地利用时空演变与生态安全研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
Yang Q. The study of land use spatio-temporal transformation and ecological security in the Hanjiang River basin of Hubei[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.

[21] 张建设,王刚. 植物生物量研究综述[J]. 四川林业科技, 2014, 35(1):44-48.

Zhang J S, Wang G. A review of researches on plant biomass[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2014, 35(1): 44-48.

[22] 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004(4): 375-384.

Pan Y Z, Shi P J, Zhu W Q, et al. Remote sensing quantitative measurement of ecological assets of terrestrial ecosystem in China[J]. Science China, 2004(4): 375-384.

[23] 陈 浮, 葛小平, 陈 刚, 等. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究[J]. 地理科学, 2001(3): 210-216.

Chen F, Ge X P, Chen G, et al. Spatial different analysis of landscape change and human impact in urban fringe[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001(3): 210-216.

[24] 严恩萍, 林 辉, 王广兴, 等. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.

Yan E P, Lin H, Wang G X, et al. Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir region during 1990—2011[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5962-5973.

[25] 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.

Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.

[26] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors - based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.

[27] 黄木易, 方 斌, 岳文泽, 等. 近 20 年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.

Huang M Y, Fang B, Yue W Z, et al. Spatial differentiation of ecosystem service values and its geographical detection in Chaohu Basin during 1995—2017[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2790-2803.

[28] 程俊翔, 徐力刚, 王 青, 等. 洞庭湖近 30 a 水位时空演变特征及驱动因素分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(4): 974-983.

Cheng J X, Xu L G, Wang Q, et al. Temporal and spatial variations of water level and its driving forces in Lake Dongting over the last three decades[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(4): 974-983.

[29] 朱文泉, 张锦水, 潘耀忠, 等. 中国陆地生态系统生态资产测量及其动态变化分析[J]. 应用生态学报, 2007(3): 586-594.

Zhu W Q, Zhang J S, Pan Y Z, et al. Measurement and dynamic analysis of ecological capital of terrestrial ecosystem in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007(3): 586-594.

[30] 张鹏岩, 耿文亮, 杨 丹, 等. 黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 277-288.

Zhang P Y, Geng W L, Yang D, et al. Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the lower reaches of the Yellow River region[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 277-288.

[31] 柴 茂. 洞庭湖区生态的政府治理机制建设研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.

Chai M. Research on the building of government management mechanism for the Dongting Lake area's ecology[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.

[32] 魏 伟, 石培基, 魏晓旭, 等. 中国陆地经济与生态环境协调发展的空间演变[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2636-2648.

Wei W, Shi P J, Wei X X, et al. Evaluation of the coordinated development of economy and eco-environmental systems and spatial evolution in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2636-2648.

[33] 李 真, 潘竟虎, 胡艳兴. 甘肃省生态资产价值和生态-经济协调度时空变化格局[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 64-75.

Li Z, Pan J H, Hu Y X. The Spatio-temporal variation of ecological property value and eco-economic harmony in Gansu Province[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 64-75.

[34] 韩增林, 赵玉青, 闫晓露, 等. 生态系统生产总值与区域经济耦合协调机制及协同发展——以大连市为例[J]. 经济地理, 2020, 40(10): 1-10.

Han Z L, Zhao Y Q, Yan X L, et al. Coupling coordination mechanism and spatial-temporal relationship between gross ecosystem product and regional economy: A case study of Dalian[J]. Economic Geography, 2020, 40(10): 1-10.

[35] 邓楚雄, 钟小龙, 谢炳庚, 等. 洞庭湖区土地生态系统的的服务价值时空变化[J]. 地理研究, 2019, 38(4): 844-855.

Deng C X, Zhong X L, Xie B G, et al. Spatial and temporal changes of land ecosystem service value in Dongting Lake area in 1995—2015[J]. Geographical Research, 2019, 38(4): 844-855.

Analysis and optimization of the spatio-temporal coordination between the ecological services and economic development in the Dongting Lake area

YANG Yujin, YANG Fan, XU Zhenni, LI Zhu
(School of Architecture and Art, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Economic development is frequently accompanied by the decreased quality and dysfunctional service capacity of the ecological environment. Clarifying the relationship and spatial differences between ecology and economy is a prerequisite for sustainable regional development. Based on the remote sensing images and socio-economic data of the Dongting Lake area in 2000, 2010, and 2020, this study calculated the ecosystem service

values using the value equivalent method. Furthermore, it determined the coordination and consistency indices of ecosystem services and economy in 24 districts and counties in the Dongting Lake area. Then, this study comprehensively explored the relationship between ecological services and the economy, as well as their spatial aggregation, proposing targeted optimization measures for coordinating and balancing regional ecological services and economic development. The results are as follows: ① The total ecosystem service value of the Dongting Lake area decreased from 261.541 billion yuan in 2000 to 255.646 billion yuan in 2020. The spatial distribution of ecosystem service values presented a circular layer pattern, with high values occurring in the center, followed by the peripheral mountains, while the lowest values present in adjacent hills and plains. ② As for individual ecological service values, hydrological regulation contributed the most significantly, while the nutrient cycle maintenance contributed slightly. Additionally, the values of ecological services, except for biodiversity and aesthetic landscape, decreased to varying degrees during the study period. Among them, the hydrological regulation presented the most significant reduction in the ecological service values, accounting for more than 70% of the total reduction. ③ Regarding the spatio-temporal variations in the ecological services and economic development, the Dongting Lake area showed relatively stable ecological differences and expanded economic gaps. Districts and counties in the Dongting Lake area showed high coordination degrees but low consistency levels between ecology and economy. The ecological and economic spatial aggregations exhibited significant differences, with dominant ecological aggregation zones mainly distributed within and along Dongting Lake. ④ The critical driving factors in the spatial differences in ecological service values include human disturbance, elevation, slope, temperature, and precipitation. Therefore, to promote the harmonious development of ecology and economy in the Dongting Lake area and weaken the gap between both, it is necessary to propose feasible measures for strictly protecting the natural basement, strengthening human-guided utilization, and promoting the transformation from ecological resources into economic products.

Keywords: land use; ecological service value; economic development; coupled coordinate; Dongting Lake area
(责任编辑: 李 瑜)