



应用生态学报
Chinese Journal of Applied Ecology
ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目: 洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素
作者: 陈睿, 杨灿, 杨艳, 董祥泽
DOI: 10.13287/j.1001-9332.202201.015
收稿日期: 2021-05-25
网络首发日期: 2021-10-19
引用格式: 陈睿, 杨灿, 杨艳, 董祥泽. 洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素[J/OL]. 应用生态学报.
<https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202201.015>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素

陈睿¹ 杨灿^{1,2}✉ 杨艳¹ 董祥泽¹

(¹中南林业科技大学经济学院, 长沙 410004; ²湖南绿色发展研究院, 长沙 410004)

*通信作者 杨灿, E-mail: greenolivia@126.com

摘要 伴随城镇化的快速推进, 生态系统服务价值 (ESV) 的时空评估及驱动因子探测对区域社会-经济-生态协调可持续发展具有重要意义。借助洞庭湖生态经济区 2005、2010、2015、2018 年的遥感解译数据, 从 3 km×3 km 的格网尺度出发, 在 ArcGIS 和 GeoDa 的技术支撑下, 结合当量因子法、空间自相关分析、热点分析等方法来研究洞庭湖生态经济区 ESV 的时空格局演变, 进一步运用地理探测器工具探究 ESV 空间分异的主导驱动因子及各驱动因子的交互作用机制。结果表明: 2005—2018 年, 研究区建设用地有最明显的增长态势, 增幅高达 49.2%, 草地和水域呈较大规模减小, 其他土地资源变化不显著。研究期间, 生态系统服务价值总体逐渐递减, 仅未利用地的 ESV 呈大幅增长态势, 其他地类的 ESV 均呈不同规模的减少态势。研究区 ESV 总体呈“包围”的空间分布格局, 且 ESV 空间分布存在显著的集聚效应, 但 ESV 的高值和低值集聚效应均有逐渐弱化的倾向, 表明生态价值空间集聚效应逐渐递减。研究区 ESV 空间分异受自然环境和社会经济因子耦合协调的作用, 其中, 人为影响指数的贡献最大。

关键词 土地利用/覆被变化; 生态系统服务价值; 时空格局; 地理探测器; 洞庭湖生态经济区

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202201.015

Spatial-temporal evolution and drivers of ecosystem service value in the Dongting Lake Eco-economic Zone, China

CHEN Rui¹, YANG Can^{1,2}✉, YANG Yan¹, DONG Xiang-ze¹

(¹ College of Economics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; ² Hunan Green Development Research Institute, Changsha 410004, China)

Abstract With the rapid development of urbanization, research on the spatial-temporal evaluation and drivers deduction of ESV is important to regional social-economic-ecological coordinated and sustainable development. Based on the remote sensing data of Dongting Lake Eco-economic Zone in four periods of 2005, 2010, 2015 and 2018, we investigated the spatial-temporal pattern deduction characteristics of ecosystem service value (ESV) from a grid scale of 3 km×3 km with the technological support of ArcGIS and GeoDa, as well as combining the equivalent factor, spatial auto-correlation and hot-spot analysis method. We further explored the dominant drivers of spatial heterogeneity of ESV and the interaction mechanisms among drivers by using geo-detector. The results showed that, during the study period, the construction land area in the zone had the most significant growth by 49.2%. Nevertheless, the grassland and water area had a relatively large decrease, while the other land area did not change significantly. The ESV decreased gradually in general during the study period, only the ESV of unused land increased rapidly, and that of the other lands all showed decrease to different scales. The overall spatial layout of ESV in the study area was "surrounded". The spatial cluster effect of ESV was significant, but the cluster effect of

收稿日期: 2021-05-25

基金项目: 本文由湖南省哲学社会科学基金项目 (19YBA368)、湖南省教育厅科学研究项目 (19A515) 和湖南省研究生科研创新项目 (CX20200738) 资助

作者简介: 陈睿, 女, 1995 年生, 硕士研究生。主要从事生态经济研究。E-mail: 17760451216@163.com

Fund: This work was supported by the Philosophy and Social Science Fund of Hunan Province (19YBA368), the Scientific Research Program of Hunan Education Department (19A515), and the Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (CX20200738).

网络首发时间: 2021-10-19 14:01:17 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20211019.1004.001.html>

high and low values of ESV tended to weaken during the study period, which indicated it was gradually decreasing. The spatial heterogeneity of ESV was affected by the coupling and coordination of natural environmental factors and socio-economic factors in the study area, on which the contribution of the HAI was the largest.

Key words land use/cover change; ecosystem service value; spatial-temporal pattern; geo-detector; Dongting Lake Eco-economic Zone

随着经济快速发展和人口不断增加,对土地资源的需求在不断提升,土地利用的模式也发生一定程度的改变^[1-2]。土地利用/覆被变化(land use/cover change, LUCC)关系着人类生存和可持续发展等焦点问题^[3],现如今,LUCC给自然生态环境及社会经济活动带来的影响日渐显著,因此,生态系统服务价值渐渐成为人文地理学、生态经济学等跨学科领域的焦点话题^[4]。

1997年,自美国学者Daily^[5]系统详尽地介绍了生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)的概念后,学术界掀起了一阵对ESV进行深度研究的浪潮^[6]。至今,ESV的核算方法主要分两大类:一是Costanza等^[7]提出的当量因子法,其更适用于评估区域和全球尺度的ESV,不符合中国现状^[8-10];二是功能价值法,其广泛应用于国内各大学科研究领域。2015年,谢高地等^[11-12]对我国生态学相关领域的专家进行访谈后,基于Costanza等^[7]的观点并结合中国生态系统和经济社会发展现状,对当量因子法进行补充和修订,为我国ESV研究提供了一定借鉴^[13]。从宏观尺度看,多以行政区划作为基本评估单元,如国家^[14]、城市群^[15]、区域^[16-17]、省^[18-19]、市^[20-22]、流域^[23-24]等空间尺度。从微观尺度看,多以格网作为基本评估单元,如黄木易等^[25]以3 km×3 km格网为单元估算1995—2017年巢湖流域的ESV,并运用地理探测器探究ESV空间分异的驱动机制;侯孟阳等^[26]在2 km×2 km格网尺度下,探讨各地类ESV的时间变化特征及空间关联和异质性;郭椿阳等^[27]从格网尺度出发,研究伏牛山区LUCC对ESV的影响。

近年来,国内外学者基于不同的空间尺度,关于LUCC对ESV的影响研究已取得较显著的成果,但基于3 km×3 km的格网尺度,从时间、空间角度综合探究ESV的变化特征,打破了以往将行政单元作为基本评价单元的传统,再进一步借助地理探测器,对ESV空间分异的驱动因素研究相对匮乏。因此,本研究借助2005—2018年4期遥感数据,基于土地利用变化,从ArcGIS的Fishnet工具生成3 km×3 km格网尺度出发,在ArcGIS和GeoDa支撑下,运用当量因子法、空间自相关分析、热点分析等方法,测度ESV的时空演变特征,进一步采用地理探测器方法,诊断ESV空间分异的主导因子及各因子交互作用机制,以期为提高生态系统服务水平提出更科学合理的对策建议,同时为构建农业发展、城市规划、生态安全格局的战略部署提供一定价值借鉴,最终推动湖南省洞庭湖生态经济区社会-经济-生态协调可持续发展。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

洞庭湖生态经济区涵盖湖南省境内的3市1区和湖北省境内1市,总面积约6.05万km²。为确保行政区划以及数据的有效一致性,本研究范围拟定为《洞庭湖生态经济区规划》^[28]湖南省境内的3市1区(图1),分别为岳阳市(岳阳楼区、君山区、云溪区、汨罗市、临湘市、湘阴县、岳阳县、华容县、平江县)、益阳市(赫山区、资阳区、沅江市、南县、安化县、桃江县)、常德市(武陵区、鼎城区、津市、安乡县、汉寿县、桃源县、澧县、临澧县、石门县)、长沙市(望城区),共25个县(市、区)。洞庭湖区是国家战略层面的生态经济区(国函〔2014〕46号),也是中部地区经济协调发展的中枢,肩负着长江流域生态安全和协调可持续发展的重任,备受国内外学者的关注。

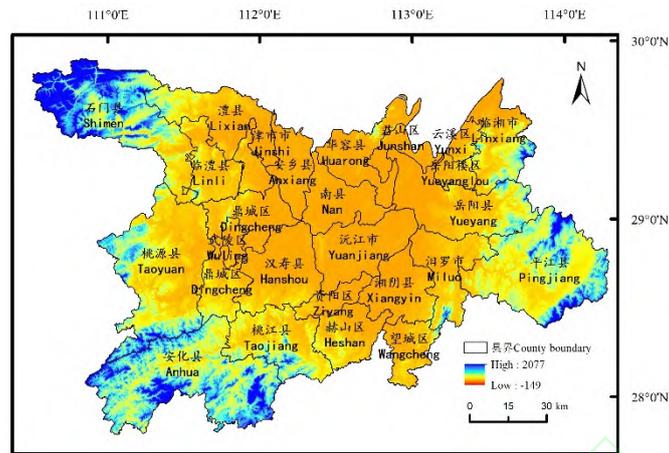


图1 洞庭湖生态经济区位置示意图
Fig.1 Geographic location of Dongting Lake Eco-economic Zone.

1.2 数据来源及处理

本研究采用的洞庭湖生态经济区 LUCC 数据源自中国科学院资源环境科学与数据中心，借助 2005—2018 年 4 期研究区 Landsat TM/ETM 数据源，得到不同时期土地利用类型 1 km 栅格数据（图 2）。结合 2015 年谢高地等^[12]对我国陆地生态系统的划分和洞庭湖生态经济区的土地资源特征，参照“中国 LUCC 遥感监测数据分类系统”，将不同年份的 LUCC 数据重分类为 6 大类，分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。粮食产量、播种面积及价格数据源自各年份的《湖南统计年鉴》^[29]、《湖南农村统计年鉴》^[30]和各市县区统计年鉴等。

本研究选用的指标主要从影响 ESV 空间分异的自然环境和社会经济因子两方面出发。综合考虑研究区的现状和研究目的，最终拟定 2 类 9 项驱动因子：1) 自然环境驱动因子：高程、坡度、归一化植被指数 (NDVI)、气温、降水量；2) 社会经济驱动因子：人为影响指数 (human active index, HAI)、地均 GDP、人口密度、土地利用类型^[25,31]。高程和坡度数据源自地理空间数据云，NDVI、气温、降水量、地均 GDP、人口密度与 LUCC 数据源相同。若驱动因子为数值型数据，需要对其进行离散化处理得到类型数据集，本研究采用 ArcGIS 的自然间断点分级法 (Jenks) 对数据进行处理。

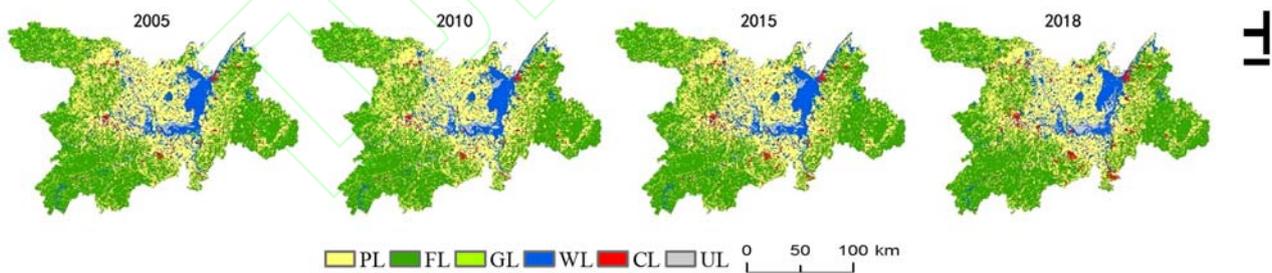


图2 2005—2018 年洞庭湖生态经济区 LUCC 分类
Fig.2 LUCC classification of Dongting Lake Eco-economic Zone during 2005-2018.

PL: 耕地 Plowland; FL: 林地 Forestland; GL: 草地 Grassland; WL: 水域 Water; CL: 建设用地 Construction land;
UL: 未利用地 Unused land. 下同 The same below.

1.3 生态系统服务价值测算

本研究借鉴 Costanza^[7]和谢高地等^[11-12]确立的世界和中国 ESV 当量因子表，对洞庭湖生态经济区的粮食单产和粮食价格数据进行修订。为使结果更贴合实际，粮食单产水平拟定为研究区 2005—2018 年的年均值 $5852.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，粮食价格拟定为 2018 年全国中晚籼稻最低收购价格 $2.52 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ （洞庭湖生态经济区的主要粮食作物为中晚籼稻）。最后确定洞庭湖生态经济区单位面积 ESV 系数表

(表 1), 参考前人研究, 拟定建设用地的 ESV 价值系数为 0^[16]。ESV 计算公式如下:

$$ESV = \sum_{k=1}^n (B_k \times VC_k) \quad (1)$$

式中: ESV 为生态系统服务总价值; B_k 为第 k 类土地利用类型的面积; VC_k 为第 k 类土地利用类型单位面积的 ESV 系数。

表1 洞庭湖生态经济区单位面积ESV系数
Table 1 ESV coefficients per unit area in the Dongting Lake Eco-economic Zone (yuan·hm⁻²·a⁻¹)

生态系统类型 Ecosystem type	土地利用类型 Land use type					
	PL	FL	GL	WL	CL	UL
食物生产 Aliment production	2106.91	695.28	905.97	1116.66	0.00	42.14
原材料 Raw material	821.69	6278.58	758.49	737.42	0.00	84.28
气体调节 Gas regulation	1516.97	9101.83	3160.36	1074.52	0.00	126.41
气候调节 Climate regulation	2043.70	8575.10	3286.77	4340.22	0.00	273.90
水文调节 Hydrological regulation	1622.32	8617.24	3202.50	39546.61	0.00	147.48
废物处理 Waste disposition	2928.60	3623.88	2781.11	31287.54	0.00	547.80
保持土壤 Soil conservation	3097.15	8469.76	4719.47	863.83	0.00	358.17
生物多样性 Biodiversity	2149.04	9502.14	3939.91	7226.68	0.00	842.76
美学景观 Esthetical scenery	358.17	4382.36	1833.01	9354.66	0.00	505.66
总计 Total	16644.55	59246.18	24587.58	95548.15	0.00	2928.60

PL: 耕地 Plowland; FL: 林地 Forestland; GL: 草地 Grassland; WL: 水域 Water; CL: 建设用地 Construction land;

UL: 未利用地 Unused land. 下同 The same below.

为进一步探测 ESV 对生态系统价值系数的依赖程度, 本研究对 VC 分别上下调整 50%, 来衡量 ESV 对 VC 变化的响应程度, 进而验证各 ESV 系数的合理性, 公式如下:

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

式中: CS 为敏感性指数; i, j 分别为调整前和调整后的值。

1.4 探索性空间数据分析

1.4.1 全局空间自相关分析

本研究采用最常用的全局 Moran I 统计量^[32], 对洞庭湖生态经济区 ESV 格网数据进行全局空间自相关检验, 公式如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: x_i, x_j 分别为空间评价单元 i, j 的属性值; \bar{x} 为属性值的均值; w_{ij} 为空间权重矩阵; n 为样本数。

1.4.2 局部空间自相关分析

局部空间自相关旨在研究某一区域与邻近区域对某属性值的集聚程度, 可检验局部区域的空间关联性和空间异质性^[26,33]。本研究采用常用的 LISA 集聚图、Moran 散点图统计量, 对洞庭湖生态经济区 ESV 格网数据进行局部空间自相关检验, 公式如下:

$$\text{Moran's } I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (4)$$

1.4.3 热点分析

本研究采用热点分析 (Getis-Ord G_i^*) 探测洞庭湖生态经济区 ESV 的空间动态变化, 公式如下:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d) G_j}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad (5)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^*(d) - E(G_i^*)}{\sqrt{Var(G_i^*)}} \quad (6)$$

式中: $w_{ij}(d)$ 为空间评价单元 i 、 j 的空间权重系数; $E(G_i^*)$ 和 $Var(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 值的数学期望和方差。

1.5 生态系统服务价值的人为影响指数

人为影响指数 (HAI) 表示人类繁杂的活动对土地利用及景观构成变化的影响, 运用 HAI 可分析洞庭湖生态经济区 ESV 与人类活动干扰强度间的相互关系, 公式如下:

$$HAI = \sum_{k=1}^n \frac{B_k P_k}{TA} \quad (7)$$

式中: B_k 为第 k 类土地景观类型的面积; TA 为土地景观类型的总面积; P_k 为人为影响强度系数, 参考前人研究^[25], 结合洞庭湖生态经济区土地资源特征, 本研究采用 Delphi 法对 P_k 赋值, 耕地 0.67、林地 0.13、草地 0.12、水域 0.1、建设用地 0.96、未利用地 0.05。

1.6 地理探测器

地理探测器 (Geo-Detector) 用以探测要素的空间分异特征, 包括 4 个探测器^[34-35], 本研究采用其因子探测器和交互探测器诊断影响洞庭湖生态经济区 ESV 空间分异的主导因子及其交互作用, 公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H N_h \sigma_h^2 \quad (8)$$

式中: h 为变量 Y 或因子 F 的分层/分区; N 和 N_h 分别为全区和 h 区单元数; σ^2 和 σ_h^2 分别为全区和 h 区 Y 值的方差。

1.7 数据处理

以 3 km×3 km 的格网为基本单元, 结合 ArcGIS 的 Jenks 和可视化功能, 将研究区 ESV 按高低划分为 5 个等级, 最终得到研究区 2005—2018 年 ESV 等级空间布局格网图。借助 GeoDa 的空间分析工具, 分别测算 2005—2018 年洞庭湖生态经济区 ESV 的全局 Moran I 及其相关指标。进一步运用 GeoDa 软件建立邻接权重矩阵, 得出 2005—2018 年洞庭湖生态经济区 ESV 的 Moran 散点图。为更加直观和可视化地反映洞庭湖生态经济区 ESV 的空间关联和异质特征, 借助 ArcGIS 软件绘制得到 2005—2018 年洞庭湖生态经济区 ESV 的 LISA 集聚图。运用 Jenks 对冷热点 G_i-Z 统计量按高低划分为 5 种类型, 最终得到研究区 2005—2018 年 ESV 冷热点的空间分布图。以 3 km×3 km 格网为基本研究单元, 选用高程、坡度、NDVI、气温、降水量、HAI、地均 GDP、人口密度、土地利用类型等因子为自变量, 以 ESV 为因变量, 借助 Geo-Detector 工具的“因子探测器”和“交互作用探测器”, 诊断影响研究区 ESV 空间分异的主导驱动因子及其交互作用。

2 结果与分析

2.1 土地利用类型变化特征

2005—2018 年, 研究区覆盖最广泛的地类是林地和耕地, 未利用地的覆盖率最低。建设用地和未利用地均显著增长, 特别是建设用地, 其增幅高达 49.2%, 草地和水域有较大规模的减小, 其他地

类变化不显著（表 2）。近年来，退田还湖、平垸行洪、三峡水库蓄水工程、人口不断增长、经济快速发展及城镇化加速推进等是洞庭湖生态经济区土地利用变化的主导原因。

表2 2005—2018年洞庭湖生态经济区LUCC
Table 2 LUCC in the Dongting Lake Eco-economic Zone during 2005-2018

土地利用类型 Land use type	面积 Area ($\times 10^4$ hm ²)				变化率 Change rate (%)			
	2005	2010	2015	2018	2005-2010	2010-2015	2015-2018	2005-2018
PL	174.72	173.99	172.50	169.94	-0.4	-0.9	-1.5	-2.7
FL	212.07	211.80	211.20	211.96	-0.1	-0.3	0.4	-0.1
GL	7.87	7.52	7.42	7.13	-4.5	-1.3	-3.9	-9.4
WL	50.63	50.58	51.02	48.24	-0.1	0.9	-5.5	-4.7
CL	9.92	10.68	12.80	14.80	7.7	19.9	15.6	49.2
UL	7.02	7.66	7.29	9.81	9.1	-4.8	34.6	39.7

由表 3 可以看出，研究期内 6 类土地利用类型发生转变的总面积为 149.84 万 hm²，占全区总面积的 32.4%。建设用地和未利用地均有不同规模的扩张，耕地和水域则呈收缩态势，林地和草地变化甚微。其中，耕地和林地转出面积分别占总转出面积的 41.8%和 32.2%，是其他土地资源扩张的关键贡献者。

表3 2005—2018年土地利用转移矩阵
Table 3 Transition matrix of land use during 2005-2018 ($\times 10^4$ hm²)

土地利用类型 Land use type (2005)	土地利用类型 Land use type (2018)						总计 Total	转出 Transfer out
	PL	FL	GL	WL	CL	UL		
PL	111.45	39.40	1.09	13.45	7.55	1.07	174.01	62.56
FL	38.22	161.95	3.53	3.46	3.02	0.02	210.20	48.26
GL	1.01	3.83	2.29	0.47	0.07	0.04	7.72	5.43
WL	13.34	4.00	0.06	26.93	1.18	4.81	50.33	23.39
CL	4.60	1.20	0.03	1.12	2.90	0.06	9.91	7.01
UL	0.64	0.02	0.00	2.47	0.05	3.76	6.94	3.18
总计 Total	169.27	210.40	7.00	47.91	14.78	9.76	459.11	
转入 Transfer in	57.81	48.45	4.72	20.98	11.88	6.00		149.84

2.2 生态系统服务价值的时间变化

由表 4 可以看出，2005、2010、2015、2018 年洞庭湖生态经济区的 ESV 分别为 2052.41、2048.45、2046.26、2019.97 亿元，研究期内 ESV 逐渐递减，且累积减少 32.44 亿元。研究期内，各地类 ESV 的贡献率无显著变化，其中，ESV 的主要贡献者是林地，高达 61%以上，而草地和未利用地对 ESV 的贡献率最低，均不足 1%。从变化率来看，研究期内仅未利用地的 ESV 呈显著增长态势，增长率高达 39.7%，且其主导驱动力源自 2015—2018 年的 LUCC，而其他土地利用类型提供的 ESV 均呈不同规模的减少态势；2005—2010、2010—2015、2015—2018 年间总 ESV 降低率分别为-0.2%、-0.1%、-1.3%，表明洞庭湖生态经济区生态系统总体趋于恶化。

表4 2005—2018年各地类ESV变化
Table 4 Changes in ESV of various land during 2005-2018

土地利用类型 Land use type	ESV ($\times 10^8$ yuan)				变化率 Change rate (%)			
	2005	2010	2015	2018	2005-2010	2010-2015	2015-2018	2005-2018
PL	290.81	289.60	287.12	282.86	-0.4	-0.9	-1.5	-2.7
FL	1256.43	1254.83	1251.28	1255.78	-0.1	-0.3	0.4	-0.1
GL	19.35	18.49	18.24	17.53	-4.5	-1.3	-3.9	-9.4
WL	483.76	483.28	487.49	460.92	-0.1	0.9	-5.5	-4.7
CL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
UL	2.06	2.24	2.13	2.87	9.1	-4.8	34.6	39.7
总计 Total	2052.41	2048.45	2046.26	2019.97	-0.2	-0.1	-1.3	-1.6

2.3 生态系统服务价值的空间变化

2.3.1 生态系统服务价值的空间布局

2005—2018 年，研究区 ESV 等级的空间分布基本格局较为稳定，且总体呈现“包围”的空间分布格局（图 3）。高价值区集聚成片分布在中部洞庭湖水域，且范围有明显减少的态势，其与近几年水域面积大幅减少有密切关系；较高价值区主要分布在湘江、资江、沅江、澧水四大水系及周围湖泊等水域；中等价值区主要分布在东部和西部森林植被覆盖集聚的丘陵山地区；较低价值区呈现包围高价

值区的态势，主要散落在洞庭湖水域四周的耕地、水田等区域；低价值区主要集中在各市区、县城镇以及乡村集聚地等，随着时间的推移，城镇化加速推进，低价值区范围也不断扩张，其空间分布与城镇扩张趋势趋于一致。

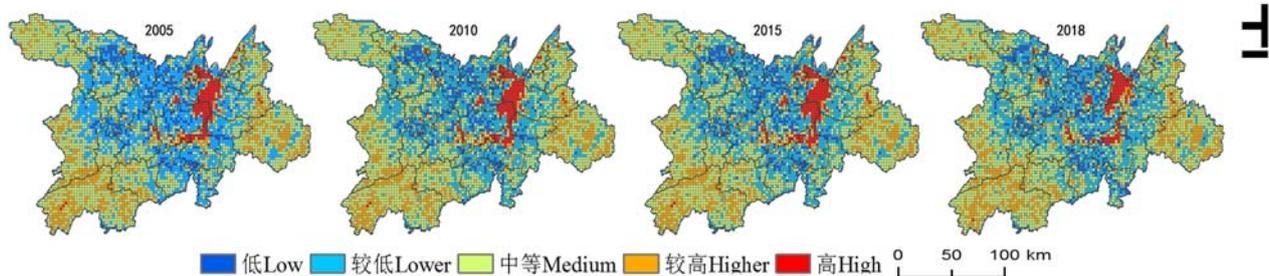


图3 2005—2018年研究区ESV的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of ESV in the study area during 2005-2018.

2.3.2 生态系统服务价值的空间自相关分析

由表5可以看出，研究区ESV分布存在显著的空间正相关性和空间集聚效应，即ESV高值区趋于集聚、低值区趋于邻近，与研究区以水域为中心随LUCC向四周过渡到耕地、林地等生态资源空间分布格局相吻合。2005、2010、2015、2018年的Moran I 值分别为0.525、0.510、0.512、0.492，呈波动式缓慢下降趋势，表明研究区ESV的高值和低值集聚效应均有逐渐弱化的倾向，即生态价值空间集聚效应逐渐递减，使得生态系统服务的空间结构发生一定程度变化。2005—2010年正处“十一五”规划实施期间，虽经济社会的大环境良好，但随着经济社会的飞速发展，给自然环境带来的压迫也渐渐显现，比如：城镇化推进引发的建设用地和未利用地面积不断扩张，使得研究区ESV的空间集聚效应逐渐减弱；2010—2015年正处“十二五”规划实施期间，随着经济社会加速发展和综合实力不断增强的空间溢出效应，促使ESV的空间集聚效应呈增强态势；2015—2018年正处“十三五”规划实施期间，国家强调生态文明建设，重视经济的绿色发展，但由于仍处在起步阶段，ESV的空间集聚效应仍呈小幅减弱态势。

表5 2005—2018年ESV全局Moran I 统计量
Table 5 Global Moran I of ESV during 2005-2018

年份 Year	Moran I	$E(I)$	$Z(I)$	P
2005	0.525	0.000	74.440	0.001
2010	0.510	0.000	72.484	0.001
2015	0.512	0.000	72.560	0.001
2018	0.492	0.000	68.970	0.001

由图4可以看出，洞庭湖生态经济区ESV过半数的散点落在第一、三象限，且4期的散点分布较稳定，表明研究区ESV具有显著的空间局部正自相关特征，ESV相邻格网具有高值区和低值区集聚现象。从各阶段来看，第一象限的点离散分布越来越明显，表明研究区ESV高值区各格网单元间的异质性特征不断增强；第二象限的点集聚分布越来越显著，表明研究区ESV低高集聚呈不断增长态势；其他象限散点分布趋于稳定。

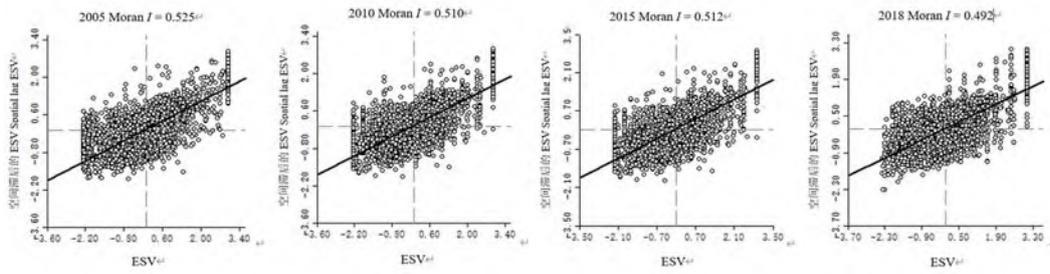


图4 2005—2018年ESV的Moran散点图
Fig.4 Moran scatter diagram of ESV during 2005-2018.

由图5可以看出，2005—2018年，研究区ESV的高高(H-H)集聚区主要分布在西部的石门县和安化县的山区、中部的洞庭湖水域、东部的平江县的山区，聚集了丰富的生态资源，是洞庭湖生态经济区ESV的主要来源区；低高(L-H)和高低(H-L)集聚区分布较少且零星，主要分布在中部各县市境内；低低(L-L)集聚区主要分布在中部环洞庭湖各县市，澧县的南部、华容县的西部、沅江的北部、赫山区的北部、湘阴县的西南部、汨罗市、安乡县、南县。

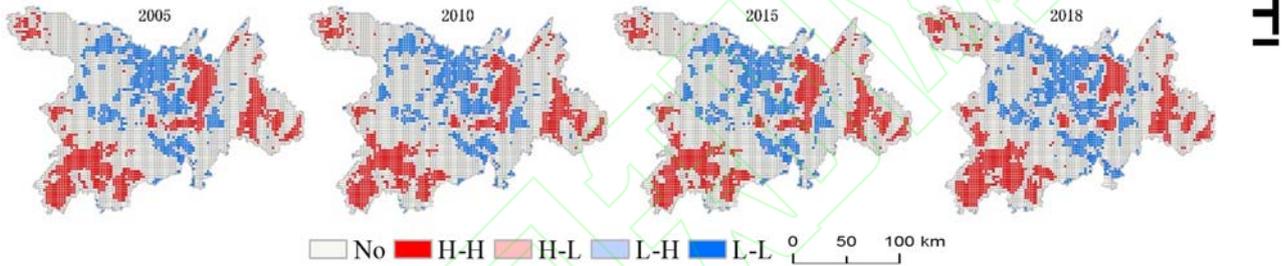


图5 2005—2018年研究区ESV的LISA集聚图
Fig.5 LISA cluster diagram of ESV in the study area during 2005-2018.

No: 不显著 Not significant; H-H: 高-高 High-high; H-L: 高-低 High-Low; L-H: 低-高 Low-High; L-L: 低-低 Low-Low.

2.3.3 生态系统服务价值的冷/热点区演化

2005—2018年，洞庭湖生态经济区ESV冷热点呈“内热外冷”的空间分布格局，ESV热点区集中分布在中部洞庭湖流域附近及西南部的安化县境内，该区域水域湿地分布广泛，ESV高值聚类显著，说明其生态价值水平偏高；ESV次热点区围绕热点区四周分布；ESV次冷点区主要分布在北部和中部的各县市境内；ESV冷点区聚集分布在西北部的澧县境内，该区域分布较广的是平原地区，ESV低值聚类显著，说明其生态价值水平偏低(图6)。从各阶段来看，热点区、冷点区和次热点区均呈逐渐减少趋势，次冷点区呈不断递增趋势，表明研究区ESV高值聚类逐渐弱化，生态系统服务功能显著减弱，致使生态环境质量明显恶化。

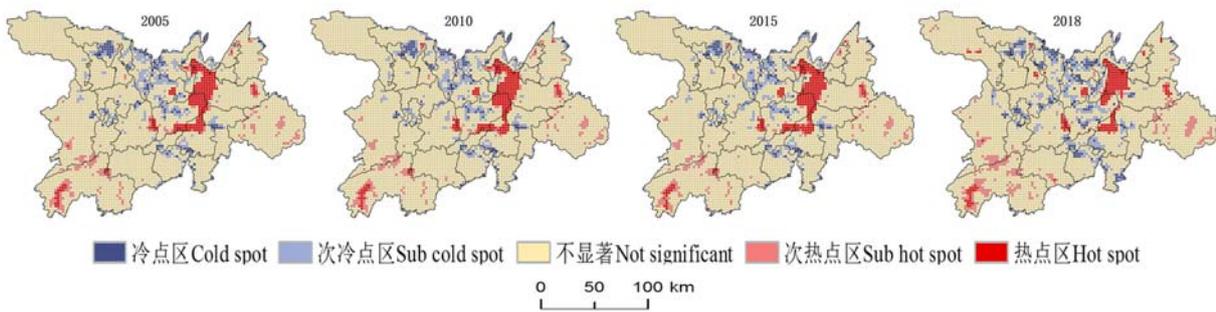


图6 2005—2018年研究区ESV冷热点的空间分布
Fig.6 Spatial distribution of cold and hot spots of ESV in the study area during 2005-2018.

2.4 敏感性分析

研究区各地类敏感型指数 (CS) 最高的为林地, 约 0.6, 说明若林地的价值系数增加 1%时, ESV 将增加 0.6%, 其次为水域和耕地, 草地和未利用地均在 0.01 以下 (表 6)。研究区各地类 ESV 的 CS 均小于 1, 说明洞庭湖生态经济区 ESV 相对于价值系数来说是相对稳定的, 因此本研究采用的价值系数适用于洞庭湖生态经济区, 具有一定可信度。

表6 研究区ESV的敏感性指数变化
Table 6 Changes of sensitivity index of ESV in the study area

年份 Year	PL	FL	GL	WL	UL
2005	0.142	0.612	0.009	0.236	0.001
2010	0.141	0.613	0.009	0.236	0.001
2015	0.140	0.612	0.009	0.238	0.001
2018	0.140	0.622	0.009	0.228	0.001

2.5 生态系统服务价值空间分异的地理探测分析

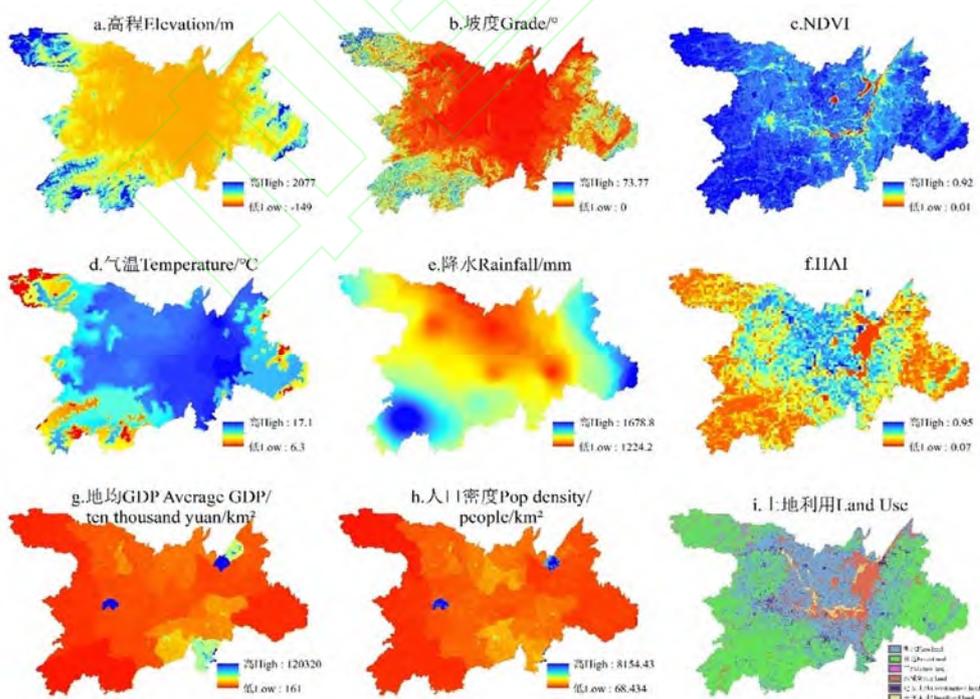


图7 ESV空间分异驱动因子空间布局图
Fig.7 Spatial layout of drivers for spatial heterogeneity of ESV.

a)高程 Elevation; b) 坡度 Slope degree; c) 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; d) 气温 Temperature; e) 降水 Rainfall; f) 人为影响指数 Human active index; g) 地均 GDP Average GDP; h)人口密度 Population density; i) 土地利用类型 Land use type.

2.5.1 因子探测

由表 7 可以看出, 洞庭湖生态经济区 ESV 空间分布差异受自然环境和社会经济驱动因子的耦合协调作用。 q 统计量显示, HAI 的贡献力为 59.6%, 是影响研究区 ESV 空间分异的主导因子, 反映了人类复杂经济社会活动对洞庭湖生态环境产生一定程度的干扰; 土地利用类型的贡献力为 40.8%, 这与生态系统和土地利用的方式、程度有密切关系, 在很大程度上影响研究区 ESV 空间分异; 人口密度和 NDVI 的贡献力为 16%和 15%, 是影响研究区 ESV 空间分异的重要因子; 高程、降水和坡度的贡献力为 10.8%~11.5%, 是影响研究区 ESV 空间分异的较重要因子; 气温和地均 GDP 的贡献力为 10%以下, 对研究区 ESV 空间分异的影响不大。

自然环境和社会经济驱动因子在不同程度上解释了研究区 ESV 空间分异的驱动机制, 且社会经济比自然环境驱动因子对研究区 ESV 空间分异的解释力大, 特别是社会经济驱动因子中的人为影响指数和土地利用类型因子是影响 ESV 空间分异的最重要因素 (图 7)。因此, 在新一轮的国土空间规划中, 应重视 LUCC 对 ESV 的影响, 优化土地利用格局, 保障土地利用可持续性, 提升生态环境质量。

表7 ESV空间分异的因子探测

Table 7 Factor detection for spatial heterogeneity of ESV

因子 Factor	q 统计量 q statistic	P 值 P value	排序 Rank
高程 Elevation	0.115	0.000	5
坡度 Slope degree	0.108	0.000	7
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.150	0.000	4
气温 Temperature	0.097	0.000	8
降水 Rainfall	0.114	0.000	6
人为影响指数 Human active index	0.596	0.000	1
地均 GDP Average GDP	0.056	0.000	9
人口密度 Population density	0.160	0.000	3
土地利用 Land use	0.408	0.000	2

2.5.2 因子交互探测

由表 8 可以看出, 任意两两驱动因子的交互作用均大于单个驱动因子对 ESV 空间分异的影响, 其中, HAI 与土地利用类型的交互作用对研究区 ESV 空间分异的影响最强, q 值高达 0.787; 两两因子对 ESV 空间分异的解释力大于 50%的有: HAI \cap 降水(0.691)、HAI \cap 气温(0.674)、HAI \cap 坡度(0.662)、HAI \cap 高程(0.659)、HAI \cap NDVI(0.658)、HAI \cap 人口密度(0.632)、HAI \cap 地均 GDP(0.613)。其余两两因子的交互作用对 ESV 空间分异的解释力均小于 50%, 但两两因子比单一因子对 ESV 空间分异的影响贡献度高。

各驱动因子间的耦合作用所形成的增强效应对研究区 ESV 空间分异效果产生协同作用, 洞庭湖生态经济区在自身的自然环境条件约束下, 加之受外部人为复杂经济社会活动的干扰, 大大加强 ESV 空间分异效应。因此, 在管控生态风险和优化生态系统的实践过程中, 应当考虑不同驱动因子的类型和特征, 以及各驱动因子的交互协同效应, 采取多元化、差异化、准确化的协调模式, 遵循因地制宜的土地利用开发模式, 引领生态-经济-社会协调可持续发展。

表8 研究区ESV空间分异的因子交互探测
Table 8 Interaction detection for spatial heterogeneity of ESV in the study area

因子 Factor	高程 Elevation	坡度 Slope degree	归一化植 被指数 Normalized difference vegetation index	气温 Temperature	降水 Rainfall	人为影响 指数 Human active index	地均 GDP Average GDP	人口密度 Population density	土地利用 Land use
高程 Elevation	0.115								
坡度 Slope degree	0.126	0.108							
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.231	0.229	0.150						
气温 Temperature	0.120	0.121	0.228	0.097					
降水 Rainfall	0.168	0.167	0.265	0.159	0.114				
人为影响指数 Human active index	0.659	0.662	0.658	0.674	0.691	0.596			
地均 GDP Average GDP	0.134	0.130	0.209	0.115	0.146	0.613	0.056		
人口密度 Population density	0.204	0.210	0.285	0.196	0.240	0.632	0.174	0.160	
土地利用 Land use	0.459	0.459	0.471	0.457	0.493	0.787	0.433	0.497	0.408

3 结 论

本研究全面系统地分析了 2005—2018 年洞庭湖生态经济区 ESV 的时空演变特征，并运用地理探测器揭示研究区 ESV 空间分异机制。结论如下：

1) 洞庭湖生态经济区覆盖最广泛的是林地和耕地，未利用地的覆盖率最低；耕地和林地转出面积分别占总转出面积的 41.8%和 32.2%，是其他土地资源扩张的关键贡献者。

2) 2005—2018 年，洞庭湖生态经济区 ESV 持续降低，表明在研究期内生态系统总体趋于恶化状态；仅未利用地的 ESV 呈显著增长态势，其他土地利用类型提供的 ESV 均呈不同规模的减少态势；通过测算研究区不同年份的敏感性指数，显示本研究采用的价值系数适用于洞庭湖生态经济区，具有一定的可信度。

3) 研究期间，洞庭湖生态经济区 ESV 空间分布格局较为稳定，总体呈“包围”的分布特征；全局视角下的 Moran I 值均为正值，呈波动式缓慢下降态势，说明 ESV 的高值和低值聚集程度均有弱化，即生态价值空间集聚效应逐渐递减；局部视角下研究区 ESV 呈“内热外冷”分布格局，热点区、冷点区和次热点区总体呈逐渐减少趋势，次冷点区总体呈不断递增趋势，表明研究区 ESV 低值聚类逐渐凸显，生态系统服务功能不断恶化。

4) 因子探测结果显示，洞庭湖生态经济区 ESV 空间分异受自然环境和社会经济驱动因子协同作用，其中，HAI 的贡献最大，是影响洞庭湖生态经济区空间分异的主导因子。交互探测结果显示，研究区生态系统服务价值空间分异结果受各驱动因子协同作用影响，各驱动因子间的复杂耦合协调作用所产生的协同增强效应共同影响了洞庭湖生态经济区空间分异效果。

责任编辑 胡 聃

责任编辑 杨 弘

参考文献

- [1] 金声甜, 肖文海, 杨胜苏, 等. 长江经济带土地利用变化及其生态系统响应. 经济地理, 2020, 40(7): 166-173 [Jin S-T, Xiao W-H, Yang S-S, et al. Land use change and its ecosystem response in the Yangtze River Economic Belt. *Economic Geography*, 2020, 40(7): 166-173]
- [2] 刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 等. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809 [Liu S-L, Liu L-M, Wu X, et al. Quantitative evaluation of human activity intensity on the regional ecological impact studies. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6797-6809]
- [3] 约日古丽卡斯木, 杨胜天, 孜比布拉·司马义. 新疆艾比湖流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 农业工程学报, 2019, 35(2): 260-269 [Yueriguli K-S-M, Yang S-T, Zibibula S-M-Y. Impact of land use change on ecosystem service value in Ebinur Lake Basin, Xinjiang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(2): 260-269]

- [4] 邓楚雄, 钟小龙, 谢炳庚, 等. 洞庭湖区土地生态系统的服务价值时空变化. 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. *Geographical Research*, 2019, 38(4): 844-855]
- [5] Daily GC. Nature's Service: Societal Dependence on Natural Eco-systems. Washington DC: Island Press, 1997
- [6] 彭保发, 陈瑞吕. 常德市土地覆被的生态服务价值空间变异分析. 经济地理, 2012, 32(1): 141-145 [Peng B-F, Chen D-L. Spatial differences on ecosystem value of land cover types in Changde City. *Economic Geography*, 2012, 32(1): 141-145]
- [7] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260
- [8] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(4): 55-60 [Sun X-Z, Zhou H-L, Xie G-D. Ecological services and their values of Chinese agroecosystem. *China Population Resources and Environment*, 2007, 17(4): 55-60]
- [9] 王景升, 李文华, 任青山, 等. 西藏森林生态系统服务价值. 自然资源学报, 2007, 22(5): 831-841 [Wang J-S, Li W-H, Ren Q-S, et al. The value of Tibet's forest ecosystem services. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 831-841]
- [10] 薛明皋, 邢路, 王晓艳. 中国土地生态系统服务当量因子空间修正及价值评估. 中国土地科学, 2018, 32(9): 81-88 [Xue M-G, Xing L, Wang X-Y. Spatial correction and evaluation of ecosystem services in China. *China Land Science*, 2018, 32(9): 81-88]
- [11] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. 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. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196]
- [12] 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. 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. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254]
- [13] 张学斌, 罗君, 石培基, 等. 格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征. 应用生态学报, 2020, 31(2): 543-553 [Zhang X-B, Luo J, Shi P-J, et al. Spatial-temporal evolution pattern and terrain gradient differentiation of ecosystem service value in Zhangye, Northwest China at the grid scale. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 543-553]
- [14] 刘慧明, 高吉喜, 刘晓, 等. 国家重点生态功能区 2010—2015 年生态系统服务价值变化评估. 生态学报, 2020, 40(6): 1865-1876 [Liu H-M, Gao J-X, Liu X, et al. Monitoring and assessment of the ecosystem services value in the national key ecological function zones. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1865-1876]
- [15] 刘金雅, 汪东川, 张利辉, 等. 基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算. 生态学报, 2018, 38(12): 4192-4204 [Liu J-Y, Wang D-C, Zhang L-H, et al. Estimation of the ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on multi-boundary improvement. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4192-4204]
- [16] 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. 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. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 277-288]
- [17] 邓元杰, 侯孟阳, 谢怡凡, 等. 退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响. 生态学报, 2020, 40(18): 6597-6612 [Deng Y-J, Hou M-Y, Xie Y-F, et al. Impact of the Grain for Green Project on the temporal and spatial evolution of ecosystem service value in northern Shaanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6597-6612]
- [18] 王女杰, 刘建, 吴大千, 等. 基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例. 生态学报, 2010, 30(23): 6646-6653 [Wang N-J, Liu J, Wu D-Q, et al. Regional eco-compensation based on ecosystem service assessment: A case study of Shandong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6646-6653]
- [19] 岳杖筱, 薛亮. 陕西省土地利用与生态系统服务价值动态研究. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 20-30 [Yue Y-X, Xue L. Study on the dynamics of land use and ecosystem services value in Shaanxi Province. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(10): 20-30]
- [20] 封建民, 郭玲霞, 李晓华. 汉中市土地利用时空变化及其对生态系统服务价值的影响. 水土保持研究, 2020, 27(1): 275-282 [Feng J-M, Guo L-X, Li X-H. Temporal and spatial variations of land uses and their influences on ecosystem service function values in Hanzhong City. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 275-282]
- [21] 张骞, 高明, 杨乐, 等. 1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化. 生态学报, 2017, 37(2): 566-575 [Zhang Q, Gao M, Yang L, et al. Changes in the spatial structure of ecological land and ecosystem service values in nine key districts of Chongqing City over the past 25 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 566-575]
- [22] 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. 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11): 3830-3839]
- [23] 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. 资源科学, 2020, 42(10): 2022-2034 [Meng Y-Y, He Z-B, Liu B, et al. Changes of spatial distribution and ecosystem service value of oasis wetlands in arid areas: Taking three typical inland river basins as examples. *Resources Science*, 2020, 42(10): 2022-2034]
- [24] 赵志刚, 余德, 韩成云, 等. 2008—2016 年鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值的时空变化研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 198-208 [Zhao Z-G, Yu D, Han C-Y, et al. Study on the spatial and temporal changes in ecosystem services value in Poyang Lake Eco-economic Zone from 2008 to 2016. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(2): 198-208]
- [25] 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. 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. *Geographical Research*, 2019, 38 (11): 2790-2803]
- [26] 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 等. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征——基于退耕还林工程的实施背景. *自然资源学报*, 2019, 34 (3): 539-552 [Hou M-Y, Yao S-B, Deng Y-J, *et al.* Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an City at the grid scale based on Sloping Land Conversion Program. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34 (3): 539-552]
- [27] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 等. 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 [Guo C-Y, Gao S, Zhou B-Y, *et al.* Effects of land use change on ecosystem service value in Funiu Mountain based upon a grid square. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (10): 3482-3493]
- [28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发洞庭湖生态经济区规划的通知 [EB/OL]. (2014-05-12) [2021-03-03]. http://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201405/t20140512_964118.html [National Development and Reform Commission. Notice of the National Development and Reform Commission on Printing and Distributing the Dongting Lake Eco-economic Zone Planning [EB/OL]. (2014-05-12) [2021-03-03]. http://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201405/t20140512_964118.html]
- [29] 湖南省统计局. 湖南统计年鉴(2006—2019). 北京: 中国统计出版社, 2019 [Statistical Bureau of Hunan Province. Hunan Statistical Yearbook, 2006-2019. Beijing: China Statistics Press, 2019]
- [30] 湖南省统计局. 湖南农村统计年鉴(2006—2019). 北京: 中国统计出版社, 2019 [Statistical Bureau of Hunan Province. Hunan Statistical Yearbook, 2006-2019. Beijing: China Statistics Press, 2019]
- [31] 杨灿, 朱玉林. 绿色发展视阈下湖南省生态足迹的驱动力因素分析. *经济地理*, 2020, 40 (4): 195-203 [Yang C, Zhu Y-L. Analysis on driving force factors of ecological footprint in Hunan Province from the perspective of green development. *Economic Geography*, 2020, 40 (4): 195-203]
- [32] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 等. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析. *应用生态学报*, 2020, 31 (5): 1660-1672 [Qiao B, Zhu C-X, Cao X-Y, *et al.* Spatial autocorrelation analysis of land use and ecosystem service value in Maduo County, Qinghai Province, China at the grid scale. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (5): 1660-1672]
- [33] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA. *Geographical Analysis*, 2010, 27: 93-115
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72 (1): 116-134 [Wang J-F, Xu C-D. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1): 116-134]
- [35] 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 等. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析. *地理研究*, 2018, 37 (1): 171-182 [Ye Y-J, Qi Q-W, Jiang L-L, *et al.* Impact factors of grain output from farms in Heilongjiang reclamation area based on geographical detector. *Geographical Research*, 2018, 37 (1): 171-182]