

# 生态系统服务价值时空变化和权衡及其与 人类活动强度关联性分析

——以慈利县为例

武彦珍<sup>1,2</sup>, 王新闯<sup>1</sup>, 王顺忠<sup>2</sup>

(1.河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000;

2.中国科学院 植物研究所 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

**摘 要:**为了探究以林业为主的县域生态系统服务价值时空变化与权衡特征,分析生态服务价值与人类活动强度的关联性,为今后林业县域生态保护和恢复政策的制定和实施以及生态文明建设的推进提供依据。应用修正的生态系统服务价值估算模型、相关性分析法和双变量空间自相关分析法,评估及分析了慈利县长时间序列下生态系统服务价值时空变化以及生态系统服务内部和生态系统服务与人类活动强度之间的权衡协同关系。结果表明:(1) 慈利县生态系统服务价值总量呈增长趋势,林地对于生态系统服务价值的贡献相对较高。(2) 生态系统服务价值较高的区域主要集中在慈利县的东部、中部、西北部和南部,价值较低的地区主要集中于中东部;中部、南部和西北部区域价值上升较为明显。(3) 协同关系在慈利县生态系统服务权衡协同关系中占主导地位。生态系统服务价值和人类活动强度呈负相关关系。综上,近 40 年来慈利县实现了经济发展与生态保护的双赢局面,未来应将生态保护重心放在林地的生态质量上。

**关键词:**生态系统; 服务评估; 价值估算; 权衡与协同; 人类活动强度; 慈利县

中图分类号:X24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0311-11

## Spatio-Temporal Changes and Trade-offs of Ecosystem Service Value and Their Correlation with Human Activity Intensity

—A Case Study of Cili County

WU Yanzhen<sup>1,2</sup>, WANG Xinchuang<sup>1</sup>, WANG Shunzhong<sup>2</sup>

(1.School of Surveying and Mapping Land Information Engineering, Henan Polytechnic

University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2.State Key Laboratory of Vegetation and

Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract:** The spatio-temporal changes and trade-offs of ecosystem service value, and the correlation between ecosystem service value and human activity intensity in forested counties were explored in order to promote ecological civilisation construction in forested counties in the future. It will provide a basis for the development and implementation of ecological protection and ecological restoration policies. The spatio-temporal changes of ecosystem service value in Cili County were analysed using the revised ecosystem service value estimation model. Correlation analysis and bivariate spatial autocorrelation analysis were used to estimate the trade-off and synergy between ecosystem services and human activity intensity, respectively. The results showed that: (1) In the Cili County, total ecosystem services increased. The contribution of forest to ecosystem service value was relatively high in the land use. (2) The region with the higher service value was

收稿日期:2021-08-16

修回日期:2021-09-05

资助项目:国家重点研发项目(2017YFC0505601;2018YFC0507305);河南省科技公关项目(222102320433);河南省高校科技创新团队支持计划(22IRTSTHN008)

第一作者:武彦珍(1997—),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为生态系统服务评估。E-mail:972943003@qq.com

通信作者:王新闯(1979—),男,河南封丘县人,博士,副教授,主要从事 3S 技术及其在生态学中的应用研究。E-mail:wangxc382@163.com

王顺忠(1977—),男,山东滕州人,博士,工程师,主要从事森林生态学研究。E-mail:wangsz@ibcas.ac.cn

mainly situated on the eastern, central, northwest and southern areas, whereas that of the lower service value was in the mideast; the service value in the central, southern and northwestern region obviously increased. (3) A synergetic relationship was dominant in Cili County and the ecosystem service value was negatively correlated with human activity intensity. In the past 40 years, Cili County has achieved a win-win situation of economic development and ecological protection. In the future, the ecological protection should focus on the ecological quality of forest land.

**Keywords:** ecosystem; service assessment; value estimation; trade-offs and synergies; human activity intensity; Cili County

生态系统服务是指人类通过生态系统结构、功能和过程直接或间接获取维持人类生存和生活所需的产品或惠益<sup>[1]</sup>。20世纪末 Costanza 等<sup>[2]</sup>将休闲娱乐、水调节和气体调节等 17 个服务作为生态系统服务的构成,对全球各生态系统价值进行了估算。随着国外理论的进步,各研究体系与相关概念陆续引进国内,使得国内相关研究工作也有了跨越性的发展<sup>[3]</sup>。谢高地等<sup>[4-6]</sup>参考相关学者意见,并经过一系列的实践和修订,制作了单位面积价值当量因子表,建立了一个相对完整和精确的评估体系,将现有的各种生态系统服务类型和功能包括在内,其原理为将生态系统生产净利润作为该生态系统所能提供的生产价值。不同的区域作物种植种类不同,价格差异较大,因此区域修正必不可少,众多学者在当量修正和改进的基础上开展了生态系统服务价值评估工作<sup>[7-9]</sup>。然而仅对生态系统服务价值进行静态评估已满足不了目前研究人类福祉与生态系统服务之间关系的迫切需求。

生态系统服务包括供给、调节、支持和文化服务,各项生态系统服务通常呈现为此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系<sup>[10]</sup>。千年生态系统评估(MA)认为自然提供给人类的各项服务中,大约有 2/3 的服务呈下降趋势,主要是受到人类活动的干扰<sup>[11]</sup>。近年来我国实施各种生态保护政策来正向影响生态系统服务,期望生态系统服务效益能够有所回升。权衡协同关系不仅存在于生态系统服务内部,也存在于生态系统服务与人类活动之间,并且具有显著的地域差异性和动态变化性<sup>[12]</sup>。目前生态退化和人类活动干扰强烈是全球范围内普遍存在的问题,研究生态系统服务之间的权衡协同关系以及生态系统服务和人类活动强度的关联性,对于提升生态系统服务质量,实现人类社会发展的同时,保证生态系统服务效益具有重要意义<sup>[13]</sup>。因此,生态系统服务权衡成为众多学者研究的方向<sup>[14-16]</sup>。

2000 年以前,由于森林尤其是天然林的过度采伐、人类活动的过度干扰,致使湖南省水土流失严重、生态环境日益恶化、自然灾害频繁发生。1998 年湘、

资、阮、澧四水及洞庭湖区发生历史上罕见的特大洪灾,给人民的生命和财产造成了巨大的损失,直接经济损失达 329 亿元之多<sup>[17]</sup>。1999 年党中央、国务院发出长江上游和黄河上中游天然林禁伐、限伐的指示,以及实施退耕还林的战略决策。2000 年,慈利县天然林保护工程正式实施;2001 年慈利县退耕还林工程开始实施。县域作为一种行政区划区域,是一个较为完整的生态系统管控主体,有一定的相对独立性和能动性。它是全国实施主体功能区规划的基本单元,也是生态文明建设进程中重要的实践单元<sup>[18]</sup>。因此,在县域尺度上进行生态系统服务评估研究,具有一定的实践意义和参考价值。慈利县森林资源丰富,林地占总面积半数以上,是一个典型林业县域。本文以慈利县为例,开展生态系统服务价值评估,分析生态系统服务的权衡协同关系以及人类活动对生态系统服务的影响,为林业县域集约、节约利用土地,提高生态效益提供依据,为生态服务可持续发展以及天然林保护工程、退耕还林等相关政策的效益评估提供科学支撑。

## 1 研究区概况

慈利县隶属于湖南省张家界市,位于武陵山脉东部边缘,东北邻石门县,东南邻桃源县,西北邻桑植县,西南邻永定区<sup>[19]</sup>。慈利县位于东经 110°27′—111°20′,北纬 29°04′—29°41′。慈利县总面积 3 480 km<sup>2</sup>,东西最大距离 72.2 km,最大南北距离 69 km。慈利县处于澧水中游,属于山区与平原过渡地带,地势从西北高处向东南低处倾斜,地貌类型多样,林地在慈利县境内占比最高<sup>[20]</sup>。自 2000 年慈利县天然林保护工程实施以来,慈利县公益林建设有序进行,2014 年,慈利县公益林面积达 128 618.8 hm<sup>2</sup>,重点公益林面积 77 157.9 hm<sup>2</sup>,一般公益林面积为 51 458.9 hm<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据源

慈利县 1980 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005

年、2010 年、2015 年、2018 年 8 期土地利用覆盖遥感解译数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)<sup>[22]</sup>。基于 Landsat-TM/ETM 和 Landsat-8 遥感影像,通过人机交互式目视解译获得,遥感解译总体精度为 88.95%。根据慈利

县实际土地利用分布情况,按照研究数据需求进行重分类,分为旱地、水田、草地、林地、灌木林、水域、建设用地 7 种地类。1980—2018 年慈利县土地利用状况见表 1。社会经济统计数据来源于《湖南统计年鉴》、《张家界市统计年鉴》和《慈利县志》。

表 1 1980—2018 年慈利县土地利用状况 hm<sup>2</sup>

土地利用类型	1980 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
草原	32845	32846	33204	32547	32603	32241	31881	31881
灌木林	56211	56245	56532	55982	56074	56055	55690	55661
旱地	36685	36537	36292	36501	36514	35854	35888	35872
建设用地	1433	1524	1586	1590	1858	2236	2632	2618
林地	153837	153722	153422	153700	153253	153978	154680	154879
水田	62608	62363	62292	61891	61631	61529	61125	60952
水域	4580	4960	4872	5987	6267	6304	6302	6334

2.2 生态系统服务价值估算方法

采用谢高地等的价值当量换算法对慈利县境内生态服务价值做出评估<sup>[23]</sup>,将农田生态系统单位面积粮食生产净利润当作 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量<sup>[24]</sup>,中国 2010 年单位面积生态系统价值当量值为 3 406.50 元,由于慈利县数据较难获得,以张家界市单位面积粮食产量作为慈利县单位面积粮食产量,从《湖南统计年鉴 20 11》中获得 2010 年张家界市单位面积粮食产量为 4 501 元/hm<sup>2</sup>,与 2010 年全国单位面积粮食产量 4 973.58 元/hm<sup>2</sup> 相比,确定其修正系数为 0.905,由此可得慈利县单位面积生态系统服务价值当量为 3 082.88 元。根据谢高地等确定的不同区域农田生态系统生物量因子表,对研究区生态系统服务价值当量作区域修正<sup>[25]</sup> (其中湖南省的修正系数为 1.95)。

生态系统服务价值计算公式为

$$V=\sum_{i=1}^nS_i\times VC_i$$
 (1)

$$V_f=\sum_{i=1}^nS_i\times VC_{fi}$$
 (2)

式中:V 为生态系统服务总价值;S<sub>i</sub> 为第 i 种土地利用类型的面积(hm<sup>2</sup>);VC<sub>i</sub> 为第 i 种土地利用类型的单位面积生态系统服务价值当量(元/hm<sup>2</sup>);V<sub>f</sub> 为第 f 项生态系统服务的价值(元);VC<sub>fi</sub> 为第 i 种土地利用类型第 f 项生态系统服务单位面积价值当量(元/hm<sup>2</sup>);n 为土地利用类型数量。

2.3 生态系统服务相关性

相关性分析描述两种生态系统服务之间线性相关关系<sup>[26]</sup>。数值大小,为相关性强弱程度;数值>0,为正相关,否则为负相关,计算公式如下:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-x_{mean})(y_i-y_{mean})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-x_{mean})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(y_i-y_{mean})^2}}$$
 (3)

式中:R<sub>xy</sub> 为两种生态系统服务的相关性系数;x 和 y 分别为两种生态系统服务的价值;n 为样本个数;x<sub>i</sub> 为 x 的第 i 个值;x<sub>mean</sub> 为 x 的平均值;y<sub>i</sub> 为 y 的第 i 个值;y<sub>mean</sub> 为 y 的平均值。

2.4 人类活动强度指数评估模型与双变量空间自相关模型

为了量化描述生态系统服务受人类活动的影响程度,本文引入人类活动强度指数模型,其计算公式如下:

$$HAI=\sum_{i=1}^n\frac{S_iC_i}{S}$$
 (4)

式中:HAI 为人类活动强度指数;n 为土地利用类型的数量;S<sub>i</sub> 为第 i 种土地利用类型的面积;C<sub>i</sub> 为第 i 种土地利用类型的人类活动强度系数;S 为研究区的总面积。

人类活动对于不同土地利用类型的影响程度不同,利用人类活动强度系数来定量描述这种程度<sup>[27]</sup> (表 2),并将其代入上述人类活动强度指数评估模型进行计算。

表 2 不同土地利用类型的人类活动强度系数

土地利用类型	人类活动强度系数	土地利用类型	人类活动强度系数
耕地	0.61	水域	0.32
林地	0.14	建设用地	0.95
草地	0.09		

采用双变量空间自相关分析度量生态系统服务与人类活动强度的空间相关程度<sup>[28]</sup>。其计算公式如下:

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n\omega_{ij}(y_i^m-\bar{y}_m)(y_j^z-\bar{y}_z)}{(\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n\omega_{ij})\sum_{i=1}^n(y_i^m-\bar{y}_m)(y_j^z-\bar{y}_z)}$$
 (5)

$$I_{ij}=Q_i^m\sum_{j=1}^n(\omega_{ij}Q_j^z)$$
$$Q_i^m=\frac{y_i^m-\overline{y}_m}{\sigma_m}$$
$$Q_j^z=\frac{y_j^z-\overline{y}_z}{\sigma_z}$$

(6)

式中： $I$  为双变量全局空间自相关指数； $n$  为格网数量； $\omega_{ij}$  为空间权重； $y_i^m, y_j^z$  为  $i$  格网单元的  $m$  属性值和  $j$  格网单元的  $z$  属性值； $\overline{y}_m, \overline{y}_z$  分别为属性  $m$  和  $z$  的平均值； $I_{ij}$  为双变量局部空间自相关指数； $\sigma_m, \sigma_z$  分别为属性  $m, z$  的方差。 $I$  取值为  $[-1, 1]$ ，表征生态系统服务价值与人类活动强度的权衡与协同关系，其中  $I > 0$  且越接近 1，则说明生态系统服务与人类活动强度表现为协同关系且协同度越大； $I = 0$ ，则说明两者不表现为权衡协同关系； $I < 0$  且越接近于  $-1$ ，则说明两者权衡关系越显著。

将慈利县划分成  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的格网单元，获取各个格网单元的生态系统服务价值和人类活动强度指数。利用 Geoda 软件进行双变量局部自相关分析，计算 1980—2018 年生态系统服务和人类活动强度的空间自相关指数，得到慈利县 Moran's  $I$  散点图、显著性地图和 LISA 聚类图，分析生态系统服务

价值与人类活动强度权衡协同关系的局部空间自相关格局，其中高高集聚和低低集聚表示协同关系，高低集聚和低高集聚表示权衡关系。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态系统服务价值变化

3.1.1 单项生态服务功能价值变化 慈利县在 1980—2018 年生态系统服务总值呈上升状态，从 315.62 亿元增加至 328.89 亿元，共增加 13.27 亿元，生态系统服务单项的价值变更较为明显(表 3)。其中食物生产从 2000 年开始呈减少趋势，总共减少了 0.08 亿元，主要原因为退耕还林政策使耕地面积有所减少；原料生产功能在 40 年间有微小波动，气体调节和维持养分循环功能基本保持稳定状态；其他服务功能的价值都呈上升趋势，且逐年递增，其中水文调节的价值上升最为明显，在 2000 年以前大幅度增加，2000 年以后缓慢增加，1980—2018 年共增加了 10.58 亿元；其次是水资源供给虽然总值为负，但在 1995—2000 年快速增长，其他时间段也有缓慢增加，共增加了 1.15 亿元，其原因为水域面积在 1995—2000 年有了大幅度上升，增加了  $1\,115\text{ hm}^2$ 。

表 3 慈利县 1980—2018 年生态系统单项服务功能价值变化 亿元

年份	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观	总计	变化率/%
1980	10.58	8.84	-3.65	30.83	77.87	24.29	88.00	32.95	3.33	29.44	13.13	315.62	
1990	10.57	8.84	-3.42	30.81	77.88	24.41	90.27	32.95	3.32	29.49	13.17	318.28	5.22
1995	10.55	8.83	-3.45	30.79	77.85	24.37	89.72	32.93	3.32	29.47	13.16	317.54	-0.2
2000	10.58	8.84	-2.84	30.79	77.90	24.71	96.43	32.97	3.32	29.60	13.27	325.56	2.53
2005	10.56	8.83	-2.67	30.74	77.79	24.77	98.03	32.93	3.31	29.59	13.28	327.17	0.50
2010	10.53	8.84	-2.62	30.79	78.02	24.85	98.38	32.99	3.31	29.68	13.32	328.09	0.28
2015	10.51	8.85	-2.55	30.82	78.15	24.89	98.37	33.05	3.31	29.73	13.34	328.46	0.11
2018	10.50	8.86	-2.50	30.83	78.21	24.92	98.58	33.08	3.31	29.75	13.35	328.89	0.13

旱地 1980—2000 年减少了  $184\text{ hm}^2$ ，2000—2018 年减少  $629\text{ hm}^2$ ；水田 1980—2000 年减少了  $717\text{ hm}^2$ ，2000—2018 年减少  $939\text{ hm}^2$ 。因此耕地的价值始终是减少状态，其中旱地减少 0.19 亿元，水田减少 0.39 亿元。然而，林地的生态价值却在逐年增加，1980—2018 年增加了 1.33 亿元；灌木林在天保工程实施前价值有所增加，实施后一直呈现递减状态，总价值共减少 0.5 亿元，其原因为林地占用了灌木林 2.02% 的面积，以及有 2.29% 灌木林转变为耕地。草地的价值同灌木林一样也是先增后减的状态，在天保工程实施前生态服务价值增加 0.11 亿元，实施后减少 0.4 亿元，40 年间总计减少 0.29 亿元，主要原因为有 4.76% 的草地转变为林地。水域价值在 1995—

2000 年骤增，增加了 8.42 亿元，其原因为江垭水库的建设使水域的面积大幅度增加。建设用地价值同样有所增加，增加量为 0.8 亿元，其面积增加了  $1\,185\text{ hm}^2$ ，相较于 1980 年增幅达 82.7%，可见 40 年间建设用地扩张明显，城市化水平迅速提升，至 2018 年慈利县城市化水平已达 46.97%(表 4)。

3.1.2 生态系统服务价值空间分异 慈利县生态系统服务价值的空间异质性非常明显(图 1)。总体来看，生态系统服务价值最高的地方分布在中部澧水区域、东南边缘一些小型水域以及 2000 年后慈利县西北部的江垭水库；生态系统服务价值较高的地方主要分布在北部、中东部以及南部，这些地区主要地类为林地；价值居中的地区主要集中于西北部和南部，主要地类为草



地;价值较低的地区主要集中于中部,由建设用地、耕地等  
等地类交叉组成。由于慈利县是一个林业县域,林地面积

积占比是水域的 33 倍,因此林地对于慈利县生态系统  
服务总价值的贡献率较其他地类来说更高。

表 4 慈利县 1980—2018 年各地类生态系统服务价值变化 亿元

年份	草原	灌木林	旱地	建设用地	林地	水田	水域	总计	变化率/%
1980	10.01	51.43	8.84	0.09	196.00	14.64	34.59	315.62	
1990	10.01	51.47	8.81	0.10	195.85	14.58	37.45	318.28	0.84
1995	10.12	51.73	8.75	0.10	195.47	14.57	36.79	317.54	−0.23
2000	9.92	51.23	8.80	0.11	195.82	14.47	45.21	325.56	2.53
2005	9.94	51.31	8.80	0.12	195.26	14.41	47.33	327.17	0.50
2010	9.83	51.29	8.64	0.15	196.18	14.39	47.61	328.09	0.28
2015	9.72	50.96	8.65	0.17	197.08	14.30	47.59	328.46	0.11
2018	9.72	50.93	8.65	0.17	197.33	14.25	47.84	328.89	0.13

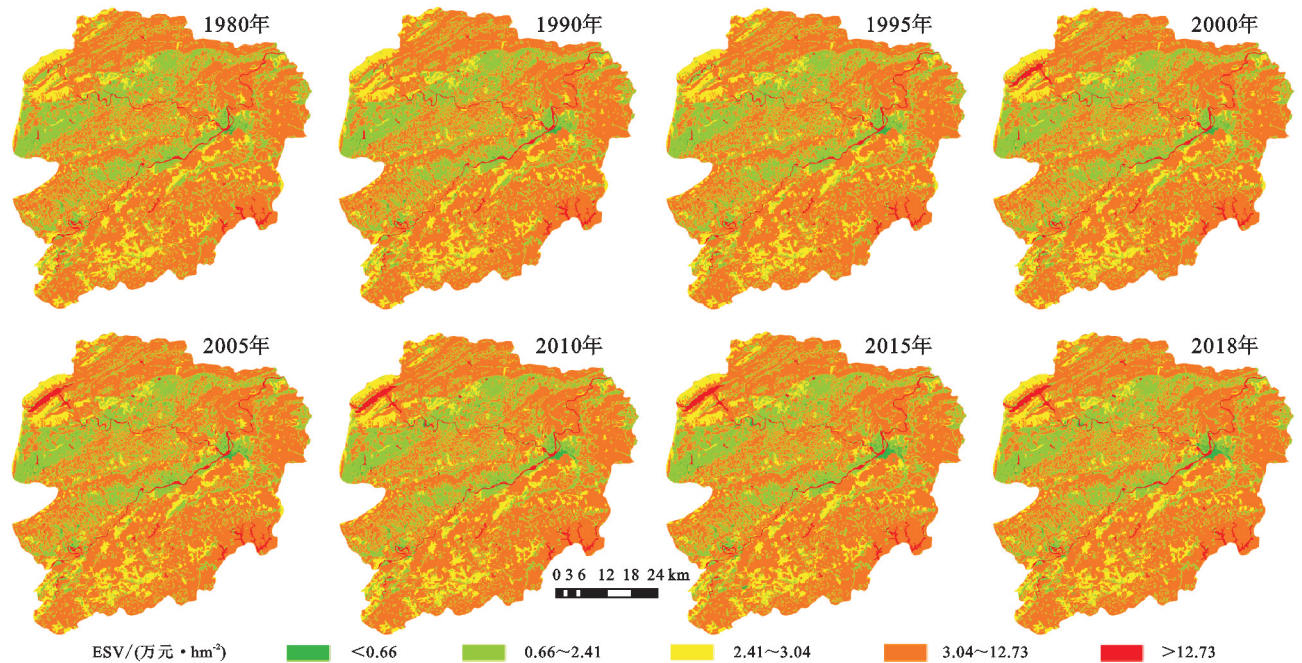


图 1 慈利县 1980—2018 年生态系统服务价值空间分布

时间上慈利县生态系统服务价值的空间分布变化并不明显(图 2)。相对而言,1995—2000 年、2005—2010 年慈利县生态服务价值变化较为明显,西北部、中部和南部一些区域生态服务价值显著上升,价值降低的区域面积较少,且无明显聚集。1995—2000 年西北部价值变化极大的区域即为江垭水库的建设地,江垭水库位于澧水一级支流溇水中游,1998 年建设完成,使慈利县生态系统服务价值有了显著提高。而 1980—1990 年、2000—2005 年、2010—2015 年、2015—2018 年生态系统服务价值变化较其他两个时间段更弱一些,这与慈利县这些年土地利用分布变化较少有一定关系。1980—2018 年,慈利县生态服务价值呈上升趋势,上升区域分布在中部、南部和西北部,但并不集中。

3.2 生态系统服务相关性

1980—2018 年慈利县生态系统服务相关性关系以

协同关系为主,其中 34 组为正向相关、21 组为负向相关,协同关系占 62%(表 5)。在 0.05 水平上显著正相关与 0.05 水平上显著负相关的数目皆为 3 组,在 0.01 水平上显著正相关和在 0.01 水平上显著负相关的数量差距较大,分别为 15 组和 7 组,表明协同关系在生态系统关系中占主导地位。供给服务与各项生态系统服务的权衡协同关系较为均衡,协同占 55.5%,权衡占 44.5%,其中食物生产与除维持养分循环功能之外的服务均呈权衡关系,原料生产与除食物生产和维持养分循环之外皆为相互增益的协同关系,水资源供给与其他服务关系中也是协同为主。支持服务、调节服务和文化服务与其他生态系统服务关系中,均是协同占主导地位。调节服务中气体调节与其他服务关系较为均衡,且不显著;气候调节与食物生产呈显著的负相关,与原料生产、土壤保持和生物多样性呈显著的正相关;净化环境与支持服务和文化服务较为显著;水文调节与水资

源供给、净化环境、生物多样性和美学景观为显著的正相关。支持服务中土壤保持与原料生产、气候调节和生物多样性之间协同关系显著;维持养分循环与水资源供给、净化环境、水文调节、生物多样性以及美学

景观权衡关系显著;生物多样性与除食物生产和维持养分循环之外的服务都为协同关系。文化服务与食物生产、气体调节和维持养分循环呈权衡关系,其余为协同关系,与净化环境关系最为显著。

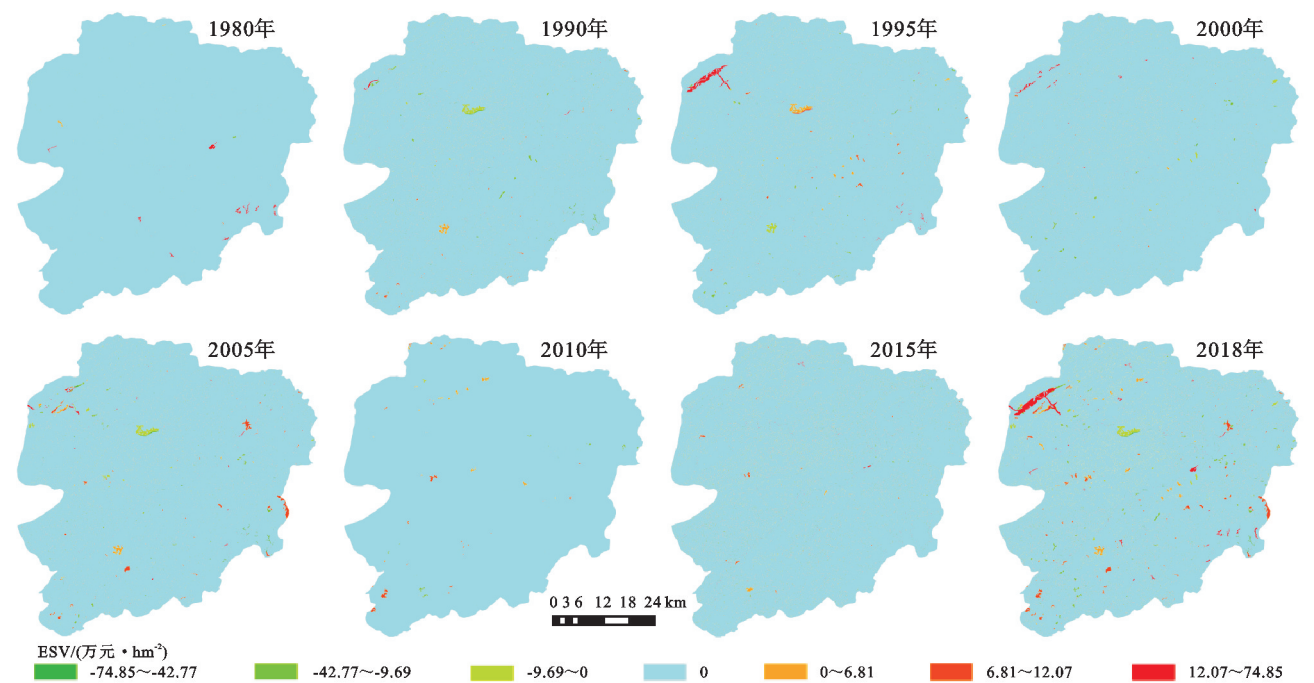


图 2 慈利县 1980—2018 年生态系统服务价值变化空间分布

表 5 慈利县生态系统服务相关关系

生态服务	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
食物生产		-0.672	-0.698	-0.284	-0.904 **	-0.732 *	-0.637	-0.866 **	0.662	-0.844 **	-0.774 *
原料生产			0.389	0.771 *	0.899 **	0.449	0.326	0.940 **	-0.118	0.634	0.516
水资源供给				-0.237	0.635	0.997 **	0.996 **	0.636	-0.933 **	0.949 **	0.987 **
气体调节					0.570	-0.162	-0.296	0.578	0.478	0.072	-0.082
气候调节						0.689	0.575	0.989 **	-0.448	0.845 **	0.748 *
净化环境							0.989 **	0.688	-0.911 **	0.970 **	0.996 **
水文调节								0.576	-0.933 **	0.923 **	0.973 **
土壤保持									-0.426	0.840 **	0.745 *
维持养分循环										-0.823 *	-0.885 **
生物多样性											0.987 **

注: \* 表示两项生态系统服务在 0.05 水平上显著相关, \*\* 表示两项生态系统服务在 0.01 水平上显著相关。

3.3 生态系统服务价值与人类活动强度关联性

3.3.1 人类活动强度时空变化 人类活动强度从低到高分 为 5 个级别,即低、较低、中、较高和高(图 3)。慈利县人类活动强度以较低为主,集中分布在北部、中部和南部,占地面积极大,主要原因为大部分地类为林地;人类活动强度低的区域较少集中分布在西北部 and 南部的草地区域;人类活动强度适中和较高的区域分布较为分散,主要分布在水域和耕地周围;人类活动强度高的区域集中在中北部耕地面积分布较广的区域、中部主城区以及建设用地和耕地交错区域。1980—2018 年慈利县人类活动强度分布格局变化不大,但 2005—2010 年人类活动低强度区域面积明显

减少,有向较低强度转化的趋势,而中部高强度区域面积有所增加,表明 2005—2010 年慈利县中南部生态质量有恶化的趋势。2015 年生态质量有所好转,低强度区域面积增加,高强度区域减少,表明人类活动对生态系统服务的干扰得到了有效的控制。

3.3.2 生态系统服务价值与人类活动强度双变量空间自相关 生态系统服务与人类活动强度之间具有明显的空间负相关,Moran's I 散点在 4 个象限内均有分布,其中第二象限分布较为密集,Moran's I 指数均为负数(图 4)。生态系统服务与人类活动强度之间一直保持负相关性,但显著性不强;相关性先呈降低趋势,2005 年开始保持稳定状态。人类活动行为对生态系统进行干



扰,对于林地的干扰程度较弱,对于耕地和建设用地的干扰程度较强,然而相对于耕地和建设用地,林地和水

域的生态系统服务价值更高。因此,生态系统服务价值和人类活动强度一直保持负相关性。

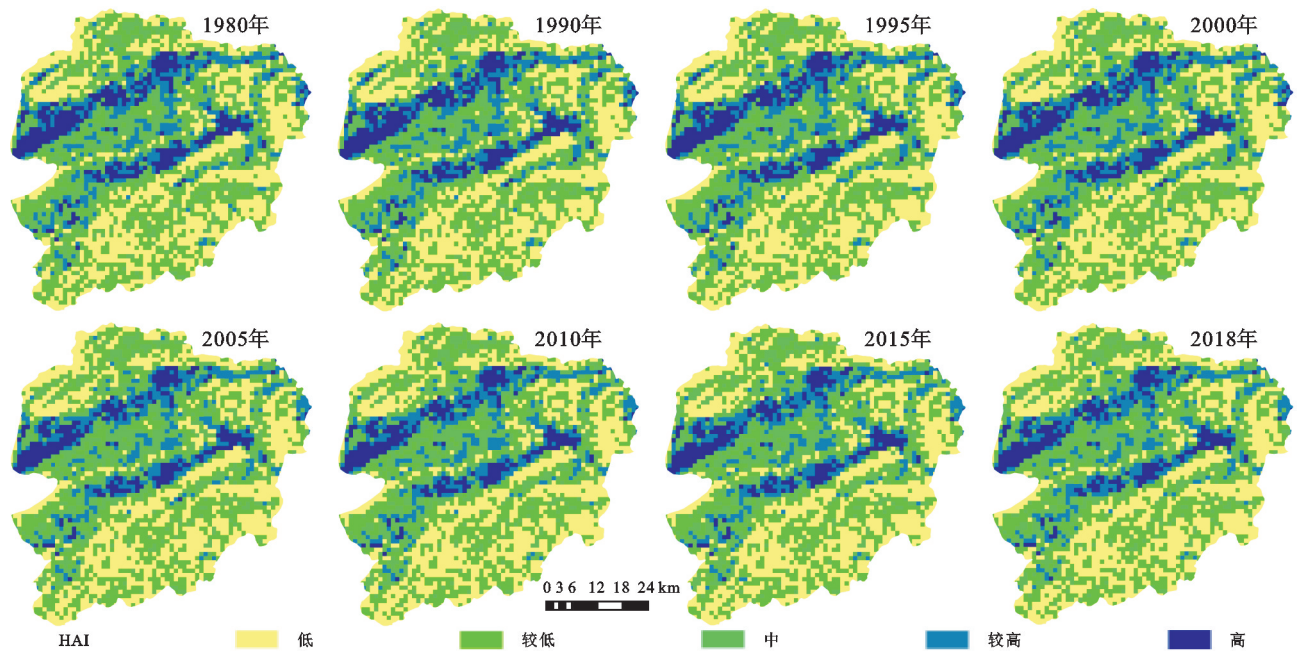


图3 慈利县1980—2018年人类活动强度空间格局分布

生态系统服务与人类活动之间协同与权衡关系的空间集聚特征总体较为显著(图5—6)。生态系统服务与人类活动强度双变量空间相关关系在时间尺度上变化不明显,各集聚类型面积无明显变化,但低—高和高—低呈集聚态势,分别占比17%,18%;高一高集聚和低—低集聚占地面积较少,分别占比4%,10%。LISA聚类分析不显著区域面积占比51%左右,在中部和北部林地与其他地类混合区域。低—高集聚显著性水平较高,其达到0.001的区域和达到0.01的区域交叉分布,该区域地类基本为耕地和建设用地,分布在中北部和中南部。低—低集聚区域基本达到了0.01的显著性水平,基本分布在草地区域。显著性水平为0.05的区域基本为高一低集聚,分布在南部和东部的林地区域,该区域坡度较高,林地较为集中。高一高集聚占地面积极少,分散在慈利县中部澧水线上。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

慈利县生态系统服务价值整体随年际变化而增加,这与土地利用变化密切相关<sup>[29]</sup>,慈利县林地和水域都有所增加,而林地和水域具有较高的生态服务价值。在政策引导下,人类活动迅速而直观地改变土地利用模式,从而引起生态服务变化,随着20世纪80年代改革开放的深入,人民进入城市,从零散村落逐步聚集,建设用地不断扩张和聚集到河流两岸,

1980—2000年慈利县GDP从1.31亿元增至17.99亿元,粮食生产地位下降,耕地面积有所减少,但是由于农业内部结构的调整,种植作物的改良,粮食生产等生态系统服务价值基本保持稳定;2000—2018年慈利县人口从67.41万人升至69.95万人,建设用地进一步扩张,而其占用的地类主要为耕地,耕地由于地形位置等因素占用成本较低。虽然,1982年慈利县制定《慈利县保护森林、发展林业的暂行规定》,但是由于经济建设的压力,2000年前慈利县林地生态服务价值依旧有所降低。1998年特大洪水的爆发引起政府和人民对生态环境保护的重视,陆续实行了退耕还林政策和天然林保护工程,耕地面积继续减少,其减少的面积大部分转变为林地,使得食物生产等生态系统服务价值有所下降;还有一部分被水域占用,水域面积有所增加,但相较于1980—2000年水域增加量较少,水资源供给、水文调节、净化环境等相关生态系统服务价值仍然有所提升;由于政策实施的滞后性以及林地建设的时效性,2005年开始,林地面积持续增加使调节服务、支持服务等服务的价值提升较多;2000—2018年慈利县经济快速增长,GDP从18亿元增至192亿元,增加了近10倍,人均GDP从3000元增至3.12万元,而第三产业占比越来越高(目前旅游收入GDP占比超25%),这与慈利生态状况良好、旅游源丰富密不可分,说明慈利县开展生态保护工作卓有成效,实现了经济发展与生态保护的双赢局面。

慈利县生态系统服务价值表现出了明显的时空

异质性,李辉等<sup>[30]</sup>对于三峡库区的研究中同样表明生态系统服务价值空间分异特征比较明显。生态系统服务价值较高的地方分布在西北部、中部、东南部的流域以及北部、中东部和南部的林地集中区域,水域单位面积生态系统服务价值高于林地,但是由于慈利县是一个林业县域,林地在慈利县生态系统服务总价值的贡献率较水域来说更高;西北部和南部的草地集中区域价值居中;价值较低的地区主要集中于中部,由建设用地、耕地等地类交叉组成。在刘凤莲等<sup>[31]</sup>对武汉市生态系统服务价值评估结果中,各地

类对生态系统服务价值的贡献率为水域>耕地>林地>草地>未利用地,与本文评估结果林地>水域>耕地>草地>建设用地有较大的差异。这说明土地利用分布在不同区域有较大的差异性,武汉市作为城市化率较高、经济发展较快的地区,水域、耕地和林地是生态系统服务价值最重要的部分,而慈利县作为南方丘陵地带典型的林业县域,境内大部分区域为林地,相对来说,人类活动干扰较弱,未来的生态保护应继续以林地为主,将生态保护重心放在林地的生态质量上,以免因过度关注生态用地的面积而导致的生态质量下降。

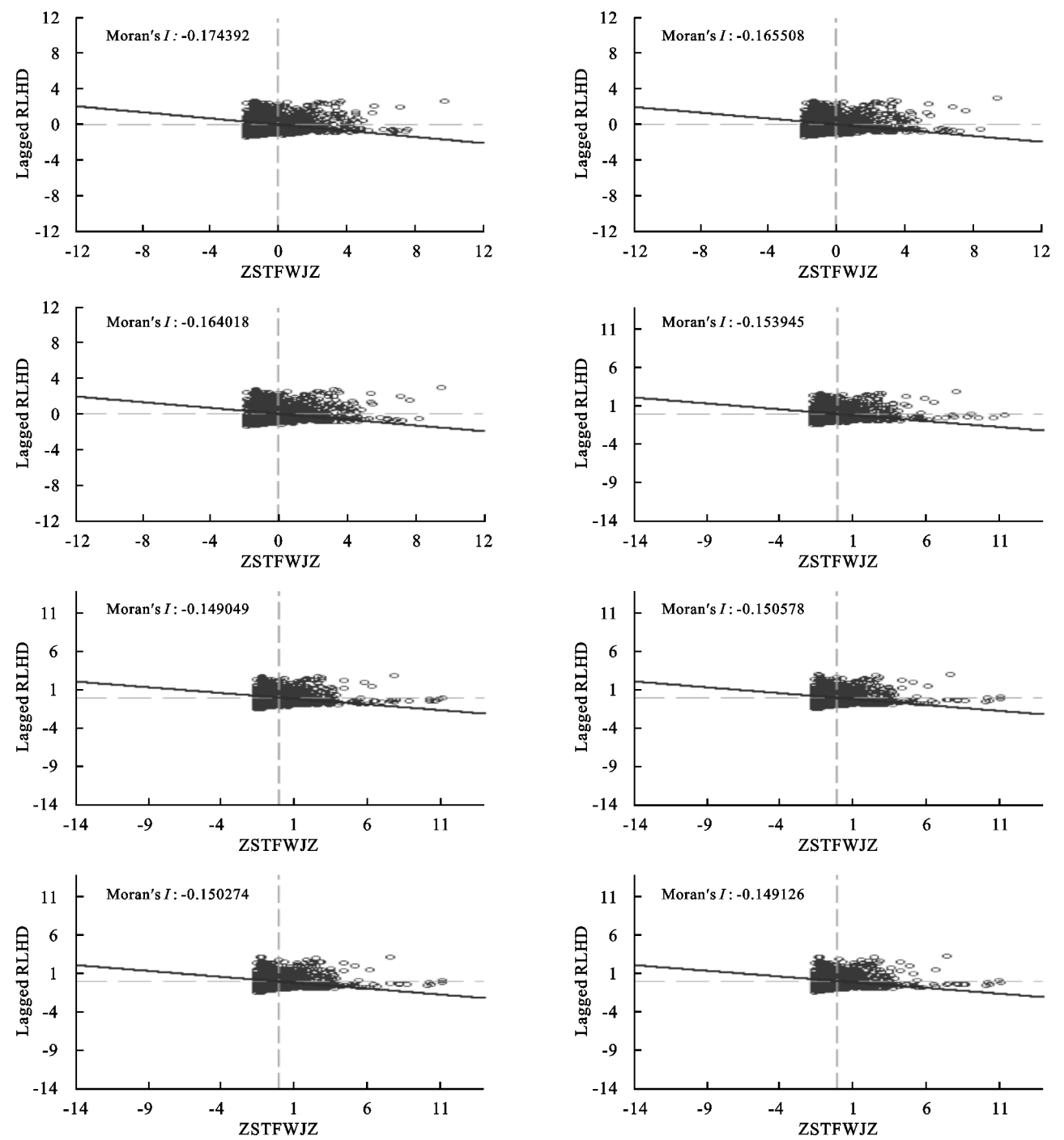


图 4 1980—2018 年慈利县生态系统服务与人类活动强度 Moran's I 散点图



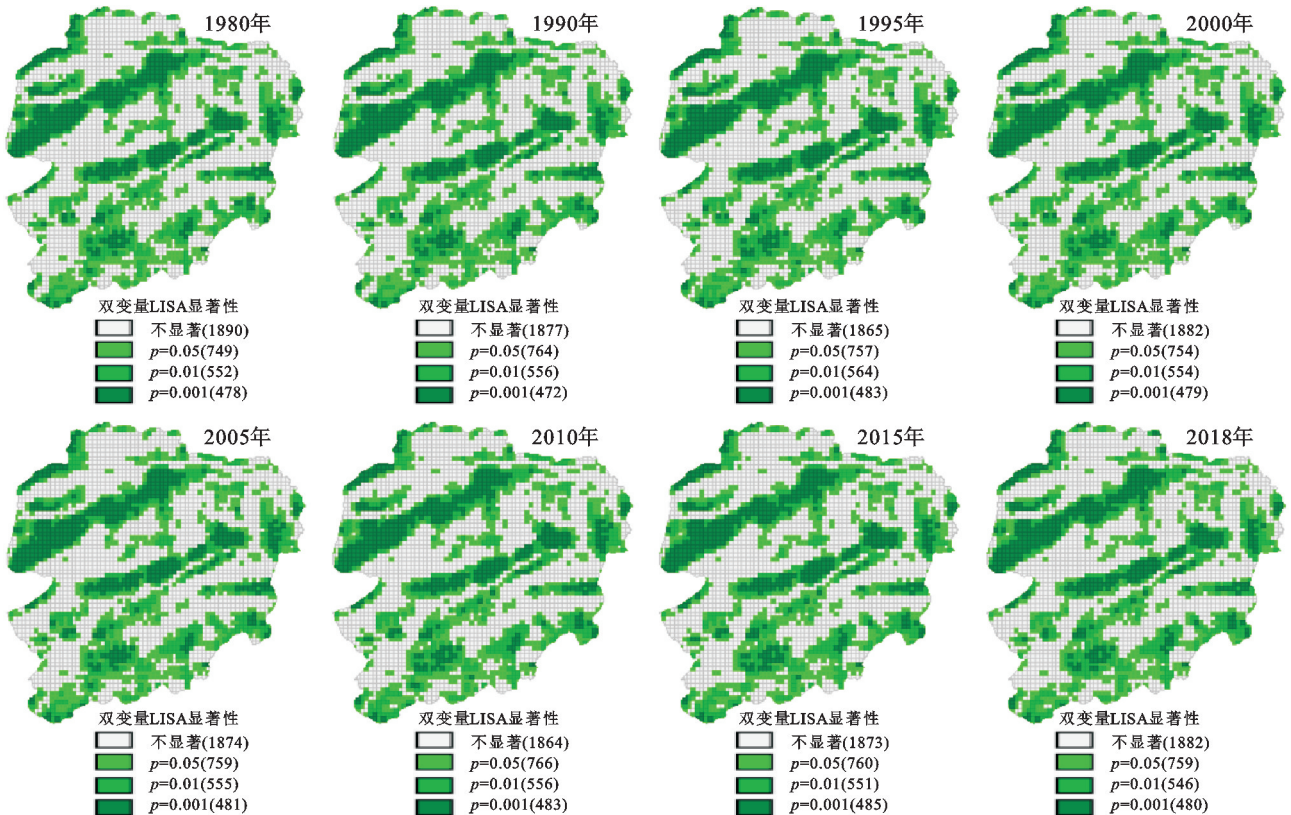


图 5 1980—2018 年慈利县生态系统服务与人类活动强度双变量空间自相关显著性

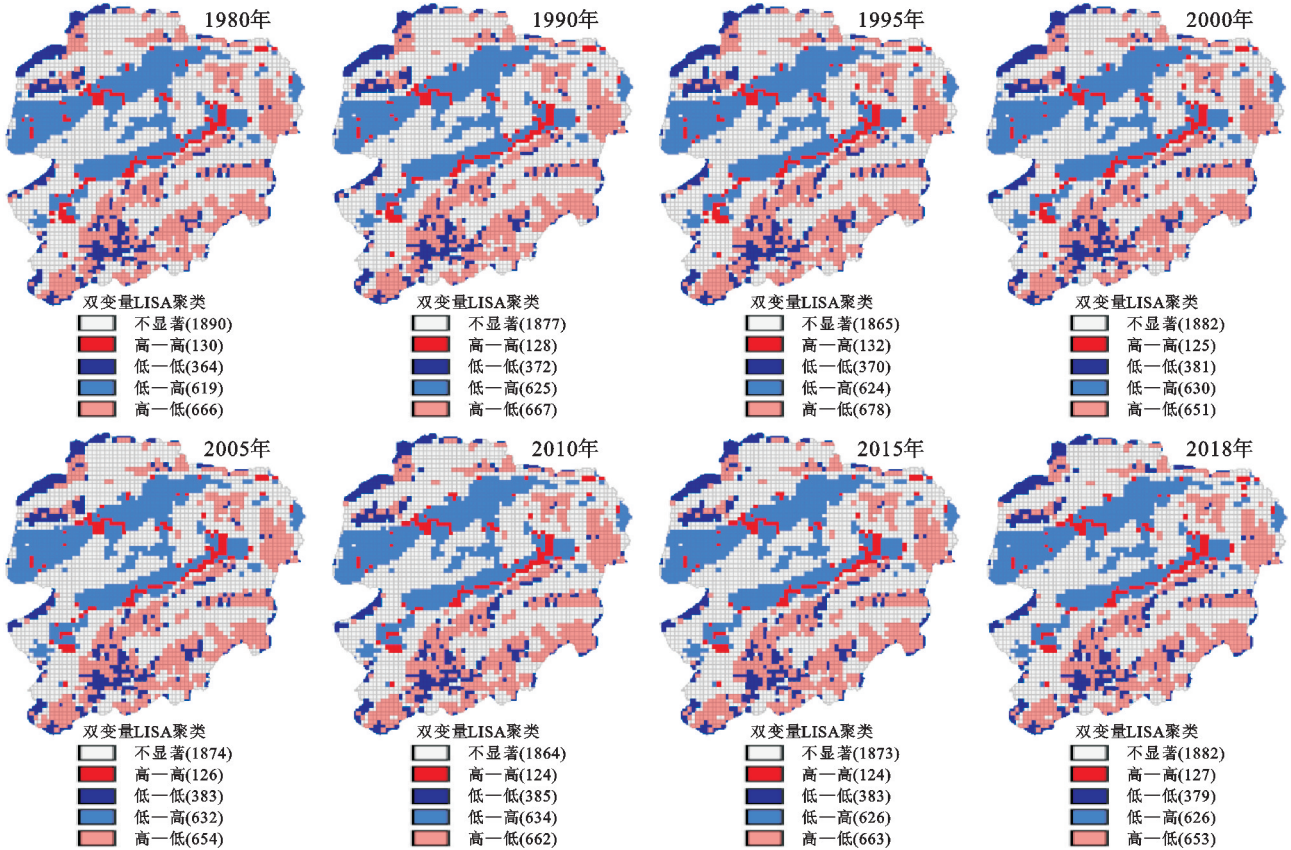


图 6 1980—2018 年慈利县生态系统服务与人类活动强度双变量空间自相关 LISA 聚类图

协同关系在慈利县生态系统服务权衡协同关系中占主导地位,而生态系统服务价值与人类活动之间以权衡为主,与前人的研究结果基本一致<sup>[26,32]</sup>。不同生态系统服务存在相互增益的协同关系或者此消彼长的权衡关系。这是由于对不同服务起积极影响的用地类型不同。例如水域主要对水资源供给、

气候调节、水文调节、净化环境等起积极作用,但是水域面积的增加也会导致耕地、林地的减少,对于食物生产等服务有一定的消极影响,降雨量过多对于耕地、林地的生态质量也会产生负面影响,因此水资源供给与气候调节、水文调节、净化环境等为协同关系,且关系显著,与食物生产则为权衡关系。生态系统服务价值和人类活动强度一直保持负相关性,说明人类活动对生态系统服务产生的影响仍以负面为主。无论是正面影响还是负面影响,人类活动行为对于生态系统服务的影响在小区域都能够非常迅速的显现出来。粮食灌溉、防洪泄洪的需求使得慈利县境内兴建水利,1980—2019年慈利县内建设完成了2个大型水库、3个中型水库、84个小型水库,水域面积持续增加,使得水域生态系统服务价值迅速上升,因此人类活动强度与生态系统服务价值在水域区域呈现高集聚的协同关系<sup>[33]</sup>。建设用地基本不为生态系统服务提供增益,但经济发展的要求使得建设用地的增加不可避免,因此在建设用地区域人类活动强度与生态系统服务价值则呈现高低集聚的权衡关系。研究生态系统服务的权衡协同关系对于满足经济发展、保证粮食安全的同时提高生态效益、合理配置土地资源、生态与经济平衡发展、人与自然和谐共生有重要意义。研究生态系统服务与人类活动强度之间的关系则有利于推进生态文明建设,将生态建设融入到经济建设、政治建设、文化建设和社会建设的方方面面,进一步提高生态效益,为决策者制定以及相关利益者更好地实施生态保护政策提供依据。此外,本文仅以土地利用变化作为评估生态系统服务的因素,事实上人类活动对于不同生态系统生态质量的影响也不可小觑,未来研究中应结合更多数据,使生态系统服务评估结果更加精确。

## 4.2 结论

(1) 慈利县在1980—2018年生态系统服务总值呈上升状态,共增加26.41亿元。其中食物生产功能的价值先增后减,气体调节功能和维持养分循环功能基本保持稳定状态;其他服务功能的价值都呈上升趋势,且逐年递增,其中水文调节的价值上升最为明显。4个一级生态系统服务中,调节服务的比重相较于其他3种服务来说更大,其次是支持服务,供给服务较弱。林地对于生态系统服务价值的贡献相对较高。

(2) 慈利县生态系统服务价值较高的地方主要集中在东部、中部以及西北部和南部,价值较低的地区主要集中于慈利县中东部、中部、南部和西北部区

域价值上升较为明显。

(3) 协同关系在慈利县生态系统关系中占主导地位。供给服务和其他服务关系较为均衡;支持、调节和文化这三项服务与其他服务均以协同关系为主。慈利县人类活动强度以较低为主,生态系统服务价值和人类活动强度一直保持负相关性,以高一低集聚和低—高集聚的权衡关系为主。低—高集聚区表现出较高的显著性水平,基本分布在耕地和建设用地。低—低集聚、高一低集聚和高—高集聚分别分布在草地、林地和水域。

## 参考文献:

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*[M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] Costanza R, de Groot R, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [3] 赵佳琳. 桦南县土地生态系统服务价值动态变化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [4] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉, 等. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J]. *山地学报*, 2003, 21(1): 50-55.
- [5] 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.
- [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] 张瑜. 黄土高原生态系统服务价值动态评估及其变化研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [8] 林亚辉. 基于GIS的当量价值改进法对渭河流域生态系统服务价值的评估[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017.
- [9] 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[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(9): 81-88.
- [10] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 71-78.
- [11] 祀人. 联合国《千年生态系统评估报告》指出地球生态堪忧[J]. *生态经济*, 2005(7): 8-11.
- [12] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [13] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 280-289.
- [14] He J, Shi X, Fu Y, et al. Evaluation and simulation of the impact of land use change on ecosystem services trade-offs in ecological restoration areas, China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99. DOI: 10.1016/j.landusepol.



2020.105020.

[15] Zhong L, Wang J, Zhang X, et al. Effects of agricultural land consolidation on ecosystem services: trade-offs and synergies [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,264(1):121412.

[16] Pan J, Wei S, Li Z. Spatiotemporal pattern of trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in an arid inland river basin in NW China[J]. Ecological Indicators, 2020,114,106345.

[17] 宁佐敦,曾昭军,姜泽军,等.论天然林保护与湖南林业可持续发展[J].林业建设,1999(6):4-7.

[18] 成金华,戴胜,王然.县域生态文明评价指标体系构建及其应用[J].环境经济研究,2017,2(4):107-122.

[19] 庄大春,向珊.慈利县土地利用综合效益评价[J].吉首大学学报:自然科学版,2016,37(5):67-71.

[20] 向珊.慈利县土地利用/覆被时空变化及其驱动力研究[D].湖南吉首:吉首大学,2017.

[21] 龙维,王育坚,王景弟,等.慈利县重点公益林生态系统服务功能评估[J].林业与环境科学,2019,35(5):39-48.

[22] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[EB/OL].中国科学院资源环境科学数据中心,2018[2021-08-01].[https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx? DOIID=54](https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54).

[23] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.

[24] 韩蕊,孙思琦,郭砾,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.

[25] 王新闯,陆凤连,吴金汝,等.县域土地利用景观格局演变及其生态响应:以河南省新郑市为例[J].中国水土保持科学,2017,15(6):34-43.

[26] 李理,朱连奇,朱文博,等.生态系统服务价值与人类活动强度关联性分析及权衡:以淇河流域为例[J].中国环境科学,2020,40(1):365-374.

[27] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响:以密云水库流域为例[J].生态学报,2013,33(3):726-736.

[28] 李龙,吴大放,王芳,等.中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究:以佛山市为例[J].生态学报,2020,40(24):1-14.

[29] 孙思琦,郭砾,薛达元.重庆市巫山县土地利用格局及其生态系统服务价值的时空变化[J].生态科学,2019,38(1):176-185.

[30] 李辉,张晓媛,国洪磊.基于土地利用的三峡库区近 30 年生态系统服务价值时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(2):309-318.

[31] 刘凤莲,杨人懿.武汉市土地利用变化及对生态系统服务价值的影响[J].水土保持研究,2021,28(3):177-183.

[32] 陈登帅,李晶,杨晓楠,等.渭河流域生态系统服务权衡优化研究[J].生态学报,2018,38(9):3260-3271.

[33] 慈利县志编纂委员会.慈利县志[Z].北京:农业出版社,1990.

(上接第 310 页)

[25] 何腾兵,刘丛强,王中良,等.贵州乌江流域喀斯特生态系统土壤物理性质研究[J].水土保持学报,2006,20(5):43-47.

[26] 高江波,蔡运龙.区域景观破碎化的多尺度空间变异研究:以贵州省乌江流域为例[J].地理科学,2010,30(5):742-747.

[27] 王志民.“一带一路”背景下的西南对外开放路径思考[J].人文杂志,2015,229(5):26-32.

[28] 汤正仁.借助“一带一路”打造西南地区对外开放新高地[J].区域经济评论,2015,15(3):75-77.

[29] 张军.我国西南地区在“一带一路”开放战略中的优势及定位[J].经济纵横,2014,348(11):93-96.

[30] 刘宗义.我国“一带一路”倡议在东南、西南周边的进展现状、问题及对策[J].印度洋经济体研究,2015(4):92-109,142-143.

[31] Rey S J, Montouri B D. US regional income convergence: a spatial econometric perspective[J]. Regional Studies,1999,33(2):143-156.

[32] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA [J].Geographical Analysis,1995,27(2):93-115.