

# 基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区 生态系统服务功能研究

杨君<sup>1</sup>, 周鹏全<sup>1</sup>, 袁淑君<sup>2</sup>, 谭鑫<sup>1</sup>, 娄知斐<sup>1</sup>

(1.湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南工程职业技术学院, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** [目的] 探讨洞庭湖的生态服务功能物质质量空间分布情况, 提升研究区乃至长江流域生态系统服务功能, 为土壤保持、土地利用和生态保护提供参考。[方法] 基于 InVEST 模型, 以洞庭湖生态经济区为研究区域, 评估 2005、2018 年水源涵养、土壤保持、碳储存和生境质量 4 项生态系统服务物质质量及 4 项生态系统服务功能间的权衡关系。[结果] ① 土地利用转化以林地和耕地、水域和耕地间相互转化以及林地、耕地转化为建设用地为主。② 水源涵养和土壤保持功能显著提升, 碳储存和生境质量功能略微下降。③ 水源涵养、碳储存、生境质量功能物质质量低值区分布在研究区中部湖区附近, 而高值区分布在东部地区; 土壤保持功能物质质量的高值区主要分布在东部、西南部和西北部地区。[结论] 受经济发展客观需要和退田还湖、退耕还林等相关生态保护政策影响, 研究期内洞庭湖区土地利用情况、生态系统服务功能物质质量均发生较大变化, 且研究区内水源涵养和生境质量之间为权衡关系, 水源涵养和土壤保持之间为兼容关系, 其他各项生态系统服务间均为协同关系。InVEST 模型对生态系统服务功能的评估更全面。

**关键词:** InVEST 模型; 生态系统服务价值; 权衡关系; 洞庭湖生态经济区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)01-0267-06

**中图分类号:** S157, X171

**文献参数:** 杨君, 周鹏全, 袁淑君, 等. 基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 267-272. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.035; Yang Jun, Zhou Pengquan, Yuan Shujun, et al. Land ecosystem service functions for Dongting Lake Ecological Economic Zone based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 267-272.

## Land Ecosystem Service Functions for Dongting Lake Ecological Economic Zone Based on InVEST Model

Yang Jun<sup>1</sup>, Zhou Pengquan<sup>1</sup>, Yuan Shujun<sup>2</sup>, Tan Xin<sup>1</sup>, Lou Zhifei<sup>1</sup>

(1. College of Resources & Environment, Hu'nan Agricultural University, Changsha,

Hu'nan 410128, China; 2. Hu'nan Vocational College of Engineering, Changsha, Hu'nan 410000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial distribution of ecosystem services for Dongting Lake was studied to improve the ecosystem services in the study area and in the Yangtze River Basin, and provide a reference for soil conservation, land use, and ecological protection. [Methods] The tradeoff relationship between the quality of four ecosystem services and the four ecosystem service functions of water conservation, soil conservation, carbon storage, and habitat quality in 2005 and 2018 was evaluated for the Dongting Lake Ecological Economic Zone using the InVEST model. [Results] ① Land use conversion was mainly based on conversion between forest land and cultivated land, water area and cultivated land, and conversion of forest land and cultivated land into construction land. ② The water source conservation and soil conservation functions were significantly improved, and the carbon storage and habitat quality functions were slightly reduced. ③ The low-value areas of water conservation, carbon storage, habitat quality, and functional substance quality were located near the central lake area of the study area, while the high-value areas of soil conservation functional material quality were mainly located in the east, southwest, and northwest. [Conclusion] Land use and the

收稿日期: 2021-08-31

修回日期: 2021-10-10

资助项目: 湖南省自然资源厅科研项目“洞庭湖区土地生态系统修复模式权衡及其价值评估”(2020-25)

第一作者: 杨君(1976—), 女(汉族), 湖南省邵阳市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土地资源管理。Email: yangjun\_ly@163.com。

通信作者: 袁淑君(1983—), 女(汉族), 湖南省绥宁市人, 硕士, 副教授, 研究方向为土地资源管理。Email: 393544284@qq.com。

quality of ecosystem services in the Dongting Lake ecological economic zone changed greatly during the study period as the area was affected by the objective needs of economic development and relevant ecological protection policies (such as returning farmland to lakes and returning farmland to forests). There is a tradeoff relationship between water conservation and habitat quality in the study area, a compatible relationship between water conservation and soil conservation, and a synergistic relationship among other ecosystem services. The InVEST model provides a more comprehensive assessment of ecosystem service functions.

**Keywords: InVEST model; ecosystem service value; tradeoff relationship; Dongting Lake ecological economic zone**

生态系统服务是人类能够从生态系统中获取到的有形和无形产品<sup>[1-3]</sup>,是人类发展与生态系统的重要联系<sup>[4]</sup>,是生态经济学、土地管理学、水土保持学等相关学科研究的热点<sup>[5]</sup>。人们意识到生态系统的退化引起生态系统服务质量下降,危害人类福祉<sup>[6]</sup>,更加注重生态安全问题<sup>[7]</sup>。生态系统服务是现代文明的基础<sup>[8]</sup>,经济发展无法代替自然<sup>[9]</sup>。进一步明确生态系统服务功能的时空变化特征,厘清各项生态系统服务间权衡关系对提升地区生态服务价值和实现区域保持水土、可持续发展具有重要意义。

国内外对于生态系统服务功能评估方法主要分为物质质量评估法<sup>[10]</sup>和价值量评估法。价值量评估法主观性强,可比性较差,在进行较大尺度评估时缺乏普适性,科学性较低,而物质质量评估法可根据生态系统服务形成机理进行评估,其结果可靠度较高、更具解释性,且不易受研究区尺度限制<sup>[11]</sup>,因而得到广泛应用。例如,基于中国 30 个省份的能值消费情况证实合理利用可再生能源能促进区域可持续发展<sup>[12]</sup>;通过分析现有系统的能量利用现状,识别生态系统可发展区域和薄弱区域,强化环保设计,优化农业园、工业园的园区建设,有效提升了能源生产效率和利用效率<sup>[13-15]</sup>。美国自然资本项目组研发的 InVEST 模型内涵众多生态系统服务评估模块,能够广泛适用于各种尺度的评估,且能够实现结果的空间可视化,应用前景较好。邓楚雄等<sup>[16]</sup>基于 InVEST 模型“Habitat Quality”模块对洞庭湖区 1995—2018 年生境质量的演变进行了模拟;此外,有多位学者运用该模型对横断山区<sup>[17]</sup>、张家口—承德地区<sup>[18]</sup>、太行山淇河流域<sup>[19]</sup>、皖西大别山区<sup>[20]</sup>和洞庭湖生态经济区<sup>[21]</sup>的各项生态系统服务功能进行了评估和模拟。

洞庭湖是中国的鱼米之乡,是大宗农产品生产基地和农业经济示范区,拥有典型的水体与湿地自然景观和典型的淡水湖泊型自然湿地生态系统,也是国家保护的珍稀物种栖息地。近年来由于不合理地开发利用导致天然湿地面积减少,资源利用过度,生物多样性减少,生态系统服务功能受到威胁<sup>[22]</sup>。土地利用是人与自然交叉最为密切的环节,研究土地利用变

化对生态系统服务的影响,对维持生态系统服务有着至关重要的作用。本研究运用 InVEST 模型对洞庭湖生态经济区 2005,2018 年的水源涵养、土壤保持、碳储量和维持生物多样性 4 项生态服务功能的时空变化分析,并对研究区各项生态系统服务间的权衡与协同关系进行研究,探讨研究区的生态服务功能物质空间分布情况,为土壤保持、土地利用和生态保护提供参考。

## 1 研究区概况

2014 年,国务院批复《洞庭湖生态经济区规划》,划定湖南省岳阳、常德、益阳市及长沙市望城区、湖北省荆州市为洞庭湖生态经济区(以下简称“洞庭湖区”),本研究仅针对该区域湖南省部分开展研究。洞庭湖区总面积  $4.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,湖区被东、西、南方向的冲击平原、低山和丘陵环绕,为一碟形盆地,下辖 25 个县市区。2020 年末总人口  $1.67 \times 10^7$  人,城市化率为 56%,GDP 总量  $1.00 \times 10^{12}$  元。洞庭湖区的土壤类型以红壤和水稻土为主,年均温  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ,属亚热带季风气候,降水主要集中在 3—8 月,各地常年降水量在 1 200~1 900 mm 之间,水资源丰富,南汇湘资沅澧四大水系。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

(1) 土地利用类型栅格数据。2005,2018 年土地利用类型数据为中科院资源环境科学数据中心解译后的遥感影像数据,分辨率为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。因湿地作为洞庭湖生态经济区典型的生态用地,故在常见的 6 大类用地基础之上划分出湿地作为单独一类,共分为耕地、林地、草地、湿地、水域、建设用地和未利用地 7 大类。

(2) 气象数据。国家气象科学数据中心网站,包括两个年份的洞庭湖区各个气象站点数据。

(3) 高程数据。中科院资源环境科学数据中心。

(4) 土壤数据。世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集。

## 2.2 InVEST 模型简介

本研究所应用的 InVEST 模型 3.8.5 版本共分为陆地系统、海洋系统、淡水系统 3 大板块,用于评估生态系统服务功能。本研究主要使用其陆地系统的相关模块。

2.2.1 产水量 基于水量平衡原理,模型中的 Water Yield 模块假设每个 30 m×30 m 栅格的产水以径流方式汇集至流域出水口,不对地表、地下和基流做细分,利用降水、土地利用、土层深度、潜在蒸散发和植被可利用含水等参数计算研究区产水量。

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中: $Y_{xj}$  表示土地利用类型  $j$  在栅格  $x$  的年产水深度;  $\text{AET}_{xj}$  是土地利用类型  $j$  在栅格  $x$  上的年蒸发量;  $P_x$  为栅格  $x$  上的年降水量。

$$\frac{\text{AET}_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x + R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \left(\frac{1}{R_{xj}}\right)} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \times \frac{\text{PAWC}_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{k_{ij} \times \text{ET}_0}{P_x} \quad (4)$$

式中: $R_{xj}$  为土地利用类型  $j$  上栅格  $x$  的 Budyko 干燥指数;  $\omega_x$  为修正后植被可利用水量与预期降水量之比;  $Z$  为 Zhang 系数;  $\text{PAWC}_x$  为植被可利用含水量;  $k_{ij}$  为植被蒸散系数;  $\text{ET}_0$  为潜在蒸散量。

2.2.2 土壤保持 采用 InVEST 模型中 SDR 模块评估研究区的土壤保持量,根据潜在土壤流失方程,由潜在土壤侵蚀量 (RKLS) 减实际土壤侵蚀量 (USLE) 得到土壤保持量 (SD)。公式如下:

$$\text{USLE} = R \times K \times L \times S \times P \times C \quad (5)$$

$$\text{RKLS} = R \times K \times L \times S \quad (6)$$

$$\text{SD} = \text{RKLS} - \text{USLE} \quad (7)$$

式中: $R$  为降雨侵蚀力因子 [ $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{h}^2 \cdot \text{h})$ ];  $K$  为土壤可蚀性因子 [ $\text{t} \cdot \text{h}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{h}^2 \cdot \text{mm})$ ];  $L$  为坡长因子;  $S$  为坡度因子;  $P$  为工程措施因子;  $C$  为植被覆盖和管理因子。

2.2.3 碳储存 采用 InVEST 模型中 Carbon 模块计算研究区碳储存量,基于不同时期土地利用类型数据及其对应的 4 个碳库中的储存量来估算目前景观中储存的碳量。计算公式:

$$C = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{dead}} + C_{\text{soil}} \quad (8)$$

式中: $C$  为总的碳储量;  $C_{\text{above}}$ ,  $C_{\text{below}}$ ,  $C_{\text{dead}}$ ,  $C_{\text{soil}}$  分别对应地上碳存储、地下碳存储、动植物残体碳存储和土壤碳存储。

2.2.4 维持生物多样性 采用 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块评估研究区的生物多样性,模拟人类活动对生境造成的影响,人类活动强度越大,对生境的威胁越大,生境质量越低,生物多样性水平越低;反之人类活动干扰越少,生境质量越高,生物多样性水平越高。结合不同的土地利用类型对威胁因子的敏感度和外界威胁强度,计算出生境质量。

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}\right] \quad (9)$$

式中: $Q_{xj}$  为生境类型  $j$  上栅格  $x$  的生境质量指数;  $H_j$  为生境类型  $j$  的生境适宜度,取值为  $[0, 1]$ ;  $D_{xj}$  为生境类型  $j$  中栅格  $x$  所受胁迫水平;  $k$  为半饱和常数,通常取值为 0.5,即最大生境质量指数的一半;  $z$  为归一化常数,通常取值 2.5<sup>[22]</sup>。

## 2.3 空间自相关分析

相关性分析能准确、定性分析各类生态系统服务功能之间的相互关联程度,借助 SPSS 软件,采用 spearman 相关性分析对洞庭湖区四项生态系统服务功能之间的协同与权衡关系进行研究。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化

洞庭湖区主要用地类型为林地、耕地和水域(表 1),其中林地所占面积比例最大(46%),耕地、水域面积分别占 37%,11%。从各个土地利用类型面积变化情况来看,2005—2018 年,林地面积下降了 0.7%;耕地面积下降了 2.1%;水域面积下降了 4.2%;草地面积下降了 6.6%;建设用地面积增加了 49.9%;湿地面积增加了 41.9%。这种变化的出现与政府相关政策和经济大环境息息相关。湖南省政府明确提出加强洞庭湖区基础设施建设,构建和完善综合交通运输网络。13 a 间,洞庭湖区 GDP 总量由  $1.66 \times 10^{11}$  元增至  $9.24 \times 10^{11}$  元,经济高速发展的背景下,对建设用地的需求不断上升,基础设施的建设和综合交通运输网络的构建难免占用部分耕地、林地及其他各类用地,以牺牲局部地区生态环境为代价。政府部门在注重发展经济,增强人民福祉的同时也不忘加强生态文明建设,提出加大对洞庭湖区湿地、风景名胜区和自然保护区的生态修复力度。因此,研究期内耕地、林地、水域等面积减少而建设用地和湿地面积增加。

耕地与林地、耕地与水域间相互转化及耕地和林地转为建设用地为洞庭湖区 2005—2018 年土地利用转移的主要特征,部分林地和的水域转化为耕地,分别占耕地转入总面积的 46% 和 42%;部分耕地和林地转化为建设用地,分别占建设用地转入总面积的

57%和 37%;大量水域转化为湿地,占湿地转入总面积的 94%;大量耕地转化水域,占水域转入总面积的 60%。2005—2018 年,虽然洞庭湖沿岸各地政府积极开展有针对性的退耕还林、森林保育等生态保护项

目,但耕地和建设用地的需求上升仍是客观事实,因此才会出现部分地区耕地、林地相互转化等现象,总体来说耕地、林地等面积呈减少趋势而建设用地在 2005—2018 年激增。

表 1 2005—2018 年洞庭湖生态经济区土地利用转移矩阵

km<sup>2</sup>

时期	土地类型	2018 年							总计
		草地	耕地	建设用地	林地	湿地	水域	未利用地	
2005 年	草地	668	14	1	39	1	4	0	727
	耕地	10	16 131	89	412	8	379	0	17 028
	建设用地	6	352	855	231	0	35	0	1 478
	林地	54	484	17	20 619	0	43	0	21 218
	湿地	0	26	1	0	548	403	0	979
	水域	41	393	23	64	132	4 238	0	4 892
	未利用地	0	1	0	4	1	0	0	7
	总计	778	17 402	987	21 369	690	5 102	0	46 329

### 3.2 生态系统服务价值空间分布格局

2005,2018 年各项生态服务价值空间分布格局相似(图 1)。水源涵养高值区集中在东部地区,中部为明显的低值区,西部产水量分布较为均匀;低值区域为湖区附近,土地利用类型以耕地、水域、湿地为主,植被覆盖率低,蒸散量大,加之降雨相对东部地区较少使得年产水量较少;而东部高值区年降水量更丰富,且林地分布范围广,对降水的截留较强,因此水源涵养功能更强。土壤保持方面,土壤保持量高值区主要集中在洞庭湖西北、东南、西南方向的石门县、平江县、安化县和桃江县等地区,地形多为山地、丘陵,虽然坡度较大土壤易被侵蚀,但地表植被茂密,林地居多,对土壤有更好的持留作用;而低值区虽然地势地平,但人类活动频繁,开发程度高,多为耕地、水域、湿地,土壤易被侵蚀,土壤保持能力较差。碳储量方面,洞庭湖地区碳储量在空间上呈现由中间向四周递增的态势,低值区在湖区附近,土地利用类型以水域为主,碳密度为 0;水域外围的耕地、湿地碳密度高于水域,高值区处在研究区西北、西南部和东部,该区域以林地为主,碳密度高,固碳能力强。生境质量方面,高值区分布在地形以山地丘陵为主的东部和西部地区以及中部洞庭湖湖区附近,自然条件优越,该区域成立了壶瓶山、乌交界等国家级自然保护区,适宜生物生存,维持生物多样性水平较高;低值区主要分散在各个城市主城区及各类工矿用地处,受到工业化和城镇化的发展的影响,对生境破坏较为严重,因此生境质量值较低。

### 3.3 生态系统服务功能物质质量时间变化特征

2005—2018 年各项生态系统服务价值均出现不同程度的变化(表 2),水源涵养量增加了  $5.31 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,

土壤保持量增加了  $2.09 \times 10^9 \text{ t}$ ,碳储存量减少了  $2.00 \times 10^9 \text{ t}$ ,平均生境质量指数下降了 0.011。

从空间格局变化来看(图 1),栅格平均产水深度以增加为主,增加地区的面积占全区的 62.4%,但增加幅度不明显,其中增加幅度 10%以内的地区面积占 13.8%,主要受年降雨量变化影响,大致与降雨量增减保持一致。土壤保持方面,2005—2018 年洞庭湖区土壤保持总量增加,减少区域的面积仅占总面积的 14.5%,主要集中在洞庭湖区西北部石门县境内的山地丘陵地区,受降雨量增大影响,雨水对坡度较大区域的地表土壤冲刷作用更强烈,土壤侵蚀更加严重,土壤保持能力减弱,而整体上栅格平均土壤保持量以不变和小幅增加为主。2005—2018 年洞庭湖区碳储存总量略微减小,90.4%以上地区保持不变,增加部分面积为 4%,减小部分面积为 5.6%,增加的部分主要集中在君山区南部和华容县境内,研究期内该地区的土地利用类型由水域转为耕地,碳密度增强,因此碳固存能力也得到相应提升。2005—2018 年洞庭湖区生境质量方面,整体上略微减小,减小部分面积占研究区总面积的 61.2%,其中面积未发生变化的部分占 8.3%,增加的部分占 30.5%,主要由于工业化和城市化的推进使建设用地的需求增加,侵占了部分耕地和林地,周边生境受到胁迫,整体生境质量存在下降趋势。

表 2 2005,2018 年洞庭湖区生态服务物质质量变化

年份	水源涵养量/ $10^8 \text{ m}^3$	土壤保持量/ $10^8 \text{ t}$	碳储存量/ $10^8 \text{ t}$	生境质量
2005	399.6	190.3	11.7	0.683
2018	452.7	211.2	11.5	0.672

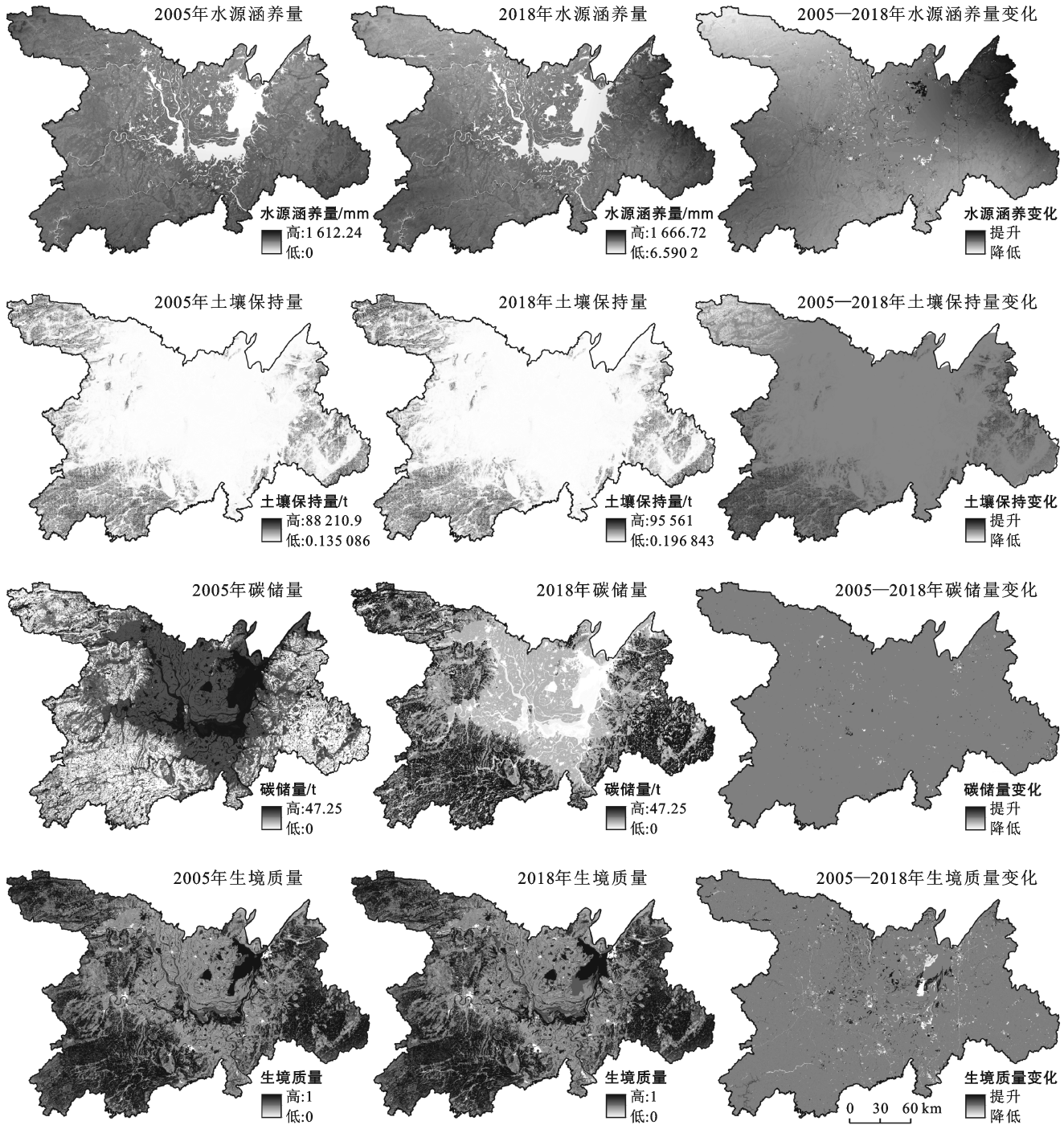


图 1 2005—2018 年洞庭湖各项生态系统服务功能分布及变化情况

### 3.4 各项生态系统服务相关性

通过 ArcGIS 平台 Creat Random Points 工具在研究区内随机生成 500 个采样点,并将 4 项生态系统服务功能值提取到点。采样点具备非线性特征且呈正态分布,借助 SPSS 软件采用 spearman 相关性分析法对 2018 年洞庭湖地区各项生态系统服务数据进行相关性分析,若数据呈显著正相关为协同关系,显著负相关为权衡关系,不呈现显著相关性则为兼容关系(详见表 3)。

表 3 洞庭湖区四项生态系统服务功能间相关性

生态服务功能	生境质量	碳储存	土壤保持	水源涵养
生境质量	1	0.586 **	0.227 **	-0.209 **
碳储存		1	0.257 **	0.316 **
土壤保持			1	0.064
水源涵养				1

注: \*\* .在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

2018 年洞庭湖区除水源涵养和土壤保持功能相关性不显著,为兼容关系外,其他各项生态系统服务

功能间均呈现显著相关性。生境质量和碳储存功能之间相关性最大,碳储存和土壤保持、生境质量和土壤保持、碳储存和水源涵养间均呈现显著正相关,为协同关系;水源涵养和碳储存之间呈显著负相关,为权衡关系。研究区内生境质量高的区域,反映出该地生态状况好,植被较为茂密,有利于固碳和减缓土壤流失,因而与土壤保持和碳固存之间形成相互促进的协同关系,但植被茂盛的林地多处在山地丘陵地带,地形起伏度较大,会加剧地表径流,加之蒸腾作用更加旺盛,一定程度上影响对降水的截留,因此与水源涵养功能间为权衡关系。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

InVEST 模型作为生态系统服务功能量化模型,已在国内外得到广泛应用,在评估研究区内各项生态系统服务功能整体情况及发展方向时具有较高的可靠性,这为本研究奠定了基础。与洞庭湖生态经济区生态服务功能现有研究相比,本研究结果与汪杰对洞庭湖生态经济区水源涵养、土壤保持、碳储存 3 项生态系统服务功能评估结果和发展方向基本一致<sup>[21]</sup>,但本研究增加了生境质量研究,内容更丰富;与邓楚雄等<sup>[23]</sup>,耿纪文等<sup>[24]</sup>的研究结果有一定差别,主要原因是研究期限、研究方法和研究区域有所不同,他们均采用当量因子法,通过修正当量因子评估洞庭湖区生态服务价值,而不是生态服务功能物质质量,邓楚雄等<sup>[23]</sup>的研究区是洞庭湖区,而不是洞庭湖生态经济区,比本研究少了平江县、桃江县、安化县和石门县。与前人研究相比,本研究的结果可视化更强,能直观反映各项生态服务功能物质质量的时空分布情况,在探讨了生态系统服务功能的时空变化后,揭示了各项生态系统服务间的权衡协同关系,丰富了生态服务价值与功能的研究内容,研究结果对洞庭湖区土地资源利用与管理有意义。

生态服务功能评估受到社会、经济和自然等多因素影响,现阶段对其量化评估可以了解其变化趋势,但无论是指标选取还是模型构建,对社会经济因素考虑都不够,今后的相关研究可以从这些方面进行丰富和完善。

### 4.2 结论

受经济发展客观需要和退田还湖、退耕还林等相关生态保护政策影响,研究期内洞庭湖区土地利用发生较大变化;为满足建设用地需要,部分林地、耕地转化为建设用地;各项生态系统服务价值均出现不同程度变化;2005,2018 年各项生态服务价值空间分布格

局相似,水源涵养、碳储存、维持生物多样性功能的物质质量分布情况整体表现为“中部低,四周高”,全区大部分土壤保持功能物质质量分布较为平均,仅东部、西南部和西北部地区出现较高值,这与中部地区为水域和耕地而四周区域主要为林地的土地利用布局相关;从权衡关系来看,洞庭湖区各项生态系统服务功能间整体上较为协调,研究区内仅水源涵养和生境质量之间为权衡关系,水源涵养和土壤保持之间为兼容关系,其他各项生态系统服务功能间均能相互增益,为协同发展关系。

### [参 考 文 献]

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997,387(6630):253-260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment (MA). *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis* [M]. Washington DC: World Resources Institute, 2005.
- [3] Faber J H, van Wensem J. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2012,415:3-8.
- [4] 陈万旭,李江凤,朱丽君.长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J].*自然资源学报*,2019,34(2):325-337.
- [5] 王亚慧,戴尔阜,马良,等.横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究[J].*自然资源学报*,2020,35(2):371-386.
- [6] 武俊喜,潘影,李振男,等.基于 NPP 分配的生产和生态功能协同提升模式:以西藏拉萨河谷半农半牧村为例[J].*生态学报*,2021,41(11):4596-4605.
- [7] 李子君,王硕,马良,等.基于熵权物元模型的沂蒙山区土地生态安全动态变化及其影响因素研究[J].*土壤通报*,2021,52(2):425-433.
- [8] 曾梦婷,李志刚.基于改进价值当量因子的北京市生态—经济协调度实证分析[J].*生态经济*,2021,37(4):163-169.
- [9] 刘胜涛,高鹏,刘潘伟,等.泰山森林生态系统服务功能及其价值评估[J].*生态学报*,2017,37(10):3302-3310.
- [10] 陈红,江旭聪,任磊,等.基于 RUSLE 模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价[J].*土壤通报*,2021,52(1):165-176.
- [11] 袁周炎妍,万荣荣.生态系统服务评估方法研究进展[J].*生态科学*,2019,38(5):210-219.
- [12] Yu Xiaoman, Geng Yong, Dong Huijuan, et al. Emergy-based sustainability assessment on natural resource utilization in 30 Chinese provinces [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,133:18-27.
- [13] 许新宇.基于能值理论的生态工业园产业共生效益研究:以福州经济技术开发区为例[D].福建 福州:福建师范大学,2016.

- [7] 王惠存.论县级及以下土地利用转型与土地资源管理的主要对策措施[J].现代农业,2020(10):72.
- [8] 宋家鹏,陈松林.福建省土地利用隐性形态与土地生态安全耦合协调分析[J].水土保持研究,2020,27(4):301-307.
- [9] 龙花楼,陈坤秋.基于土地系统科学的土地利用转型与城乡融合发展[J].地理学报,2021,76(2):295-309.
- [10] 解进飞,余健,房莉,等.熵权模糊物元模型在土地生态安全动态评价中的应用[J].安徽农业科学,2019,47(04):1-7,11.
- [11] 王文萱,李明孝.基于 DPSIR 的湖南省土地生态安全时空变化[J].生态学杂志,2020,39(08):2724-2736.
- [12] 陈珏,雷国平.大庆市土地利用与生态环境协调度评价[J].水土保持研究,2011,18(3):116-120.
- [13] Lu Xiao, Shi Yangyang, Chen Changling, et al. Monitoring cropland transition and its impact on ecosystem services value in developed regions of China: A case study of Jiangsu Province [J]. Land Use Policy, 2017, 69:25-40.
- [14] 史洋洋,吕晓,郭贯成,等.基于 GIS 和空间计量的耕地利用转型时空格局及其驱动机制研究[J].中国土地科学,2019,33(11):51-60.
- [15] 张文慧,吕晓,史洋洋,等.黄河流域土地利用转型图谱特征[J].中国土地科学,2020,34(8):80-88.
- [16] 吴文恒,牛叔文,郭晓东,等.中国人口与资源环境耦合的演进分析[J].自然资源学报,2006,21(6):853-861.
- [17] 张明斗,莫冬燕.城市土地利用效益与城市化的耦合协调性分析:以东北三省 34 个地级市为例[J].资源科学,2014,36(1):8-16.
- [18] 李子君,王硕,马良,等.基于熵权物元模型的沂蒙山区土地生态安全动态变化及其影响因素研究[J].土壤通报,2021,52(2):425-433.
- [19] 董建红,张志斌,笪晓军,等.“三生”空间视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力:以甘肃省为例[J].生态学报,2021,41(15):5919-5928.
- [20] 李昊,李世平,银敏华.中国土地生态安全研究进展与展望[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):50-56.
- [21] 曹海涛,严金泉,鲁成树.土地利用隐性转型及其对生态环境的影响[J].安徽农业科学,2020,48(3):69-72.
- [22] 薛建春,郑海潮,王雅荣.基于熵值法的呼包鄂区域土地利用效益与城市化水平耦合协调研究[J].水土保持通报,2019,39(3):256-262.
- [23] 田俊峰,王彬燕,王士君.东北地区土地利用转型特征测度与机制探索[J].经济地理,2020,40(9):184-195.

(上接第 272 页)

- [14] Yi H, Srinivasan R S, Braham W W. An integrated energy-emergy approach to building form optimization: Use of EnergyPlus, emergy analysis and Taguchi-regression method [J]. Building and Environment, 2015,84:89-104.
- [15] Singh R J, Ghosh B N, Sharma N K, et al. Energy budgeting and emergy synthesis of rainfed maize-wheat rotation system with different soil amendment applications [J]. Ecological Indicators, 2016,61:753-765.
- [16] 邓楚雄,郭方圆,黄栋良,等.基于 INVEST 模型的洞庭湖区土地利用景观格局对生境质量的影响研究[J].生态科学,2021,40(2):99-109
- [17] 戴尔阜,王亚慧.横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J].地理学报,2020,75(3):607-619.
- [18] 许丁雪,吴芳,何立环,等.土地利用变化对生态系统服务的影响:以张家口—承德地区为例[J].生态学报,2019,39(20):7493-7501.
- [19] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].地理学报,2019,74(3):446-459.
- [20] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J].生态学报,2020,40(9):2895-2906.
- [21] 汪杰.洞庭湖生态经济区生态系统服务价值评估[D].湖南长沙:湖南师范大学,2020.
- [22] 包玉斌,刘康,李婷,等.基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响:以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J].干旱区研究,2015,32(3):622-629.
- [23] 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[J].地理研究,2019,38(4):844-855.
- [24] 耿纪文,帅红,张英,等.洞庭湖生态经济区土地生态系统服务价值的时空变化[J].中南林业科技大学学报(社会科学版),2020,14(4):53-61.