

洞庭湖区土地利用强度演变及其对生态系统服务的影响

曾志伟^{1, 4, 5} 杨华² 宁启蒙¹ 汤慧^{1, 3}

(1. 湖南城市学院 建筑与城市规划学院, 中国湖南 益阳 413000;

2. 湖南省地质院, 中国湖南 长沙 410035;

3. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 中国湖北 武汉 430079;

4. 数字化城乡空间规划关键技术湖南省重点实验室, 中国湖南 益阳 413000;

5. 城市规划信息技术湖南省普通高校重点实验室, 中国湖南 益阳 413000)

【摘要】: 研究土地利用强度对生态系统服务的影响, 对科学调控土地利用格局及推进生态文明建设具有重要意义。文章选取洞庭湖区的部分区域作为研究区, 基于 2000、2010 和 2018 年的遥感影像, 在空间网格分析的基础上综合运用 InVEST、CASA 模型和双变量空间自相关方法, 分析了 2000—2018 年研究区土地利用强度 (LUI) 时空演变与食物生产 (FP)、生境质量 (HQ) 和植被净初级生产力 (NPP) 三项服务的空间关系。结果表明: ①2000—2018 年, 研究区 LUI 呈现明显的空间分异特征, 经历了“先减小—后增大”的变化过程, 且增大幅度较显著。②2000—2018 年, 研究区三项生态系统服务的时空变化各具特点。研究期间, 单位格网 FP 服务呈现出增长趋势, 但空间分布格局变化较小; HQ 在空间分布上呈现出明显的空间分异, 以洞庭湖及沿岸河流、东部与南部山地丘陵区为高值集中分布区, 而在地形平坦、人口经济活动较密集的城镇地区其生境质量较低, HQ 下降的格网数占比约 96.79%, 区域经济发展的同时, 区域 HQ 呈现恶化趋势; NPP 的时空变化幅度较大, 2000—2018 年, 约 74.86% 的格网上 NPP 服务增长为正, 约 17.43% 的格网增长为负, 空间上主要表现为 NPP 服务高值、较高值面积的持续减少, 中等值及较低值面积的增加。③研究期间, LUI 与 FP、HQ、NPP 三项生态系统服务之间存在显著的空间自相关, 但空间集聚呈现一定动态变化。

【关键词】: 土地利用强度 生态系统服务 食物生产 生境质量 植被净初级生产力 空间网格 洞庭湖区

¹收稿时间: 2022-03-07; 修回时间: 2022-07-11

基金项目: 湖南省教育厅科学研究重点项目 (18A398); 湖南省地质院科研项目 (HNGSTP202206)

作者简介: 曾志伟 (1975—), 男, 湖南桃江人, 博士, 教授, 研究方向为城镇化、城乡规划与生态环境。
E-mail: 575881@qq.com

生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[1], 包括人类直接或间接从生态系统中获得的各种产品与服务^[2]。随着人类社会的快速发展, 出现了一系列的问题, 如人口的急剧增加、资源的过度消耗、环境污染的日益严重等, 导致各类生态系统严重退化, 生态系统为人类提供服务的能力也在不断衰退。

土地利用变化是不同土地利用需求和土地利用类型的组合, 是在不同时间和空间尺度上由自然和社会系统相互作用引起的一种复杂变化^[3-4], 成为当前国内外学者研究的重点内容^[5]。土地利用变化会引起土地利用结构、功能和效率方面的改变, 测度其过程的变化强度, 对于分析其对生态系统服务及供需状况具有重要意义。因此, 深入研究土地利用强度与生态系统服务二者的关系, 揭示人类活动如何影响生态系统服务的规律及协调人与自然的关系成为学者关注的热点^[6]。当前, 国内学者在此方面已取得了较为丰硕的成果, 但研究内容多着眼于土地利用变化对生态环境的影响^[7-10]、二者的数量关系方面^[11-12], 量化方法多为土地利用转移矩阵^[13]、土地利用动态度^[14]、交叉敏感性系数或简单相关分析^[15] (如皮尔森相关系数), 而缺乏对土地利用强度与生态系统服务空间关系的量化与深入分析。并且, 研究尺度多集中在省、市和县城等行政尺度, 较少关注格网等微小尺度上的分布规律, 尤其是较少关注兼具经济与生态效益的生态经济区, 这在一定程度上限制了调控土地利用强度对于生态环境保护的指导意义。由此, 本文拟以跨行政区划的洞庭湖区为研究区, 基于格网分析方法, 从空间上对研究区土地利用强度的时空演变规律及其对生态系统三项服务的影响进行量化研究, 以厘清二者的空间关联性, 为今后相关研究提供一定启示。

洞庭湖区地处长江经济带与京广发展轴交汇处, 是长株潭与武汉两大城市群的重要腹地, 具有承东启西、连南接北的特殊区位优势^[16], 既是长江经济带开放开发的重点区域, 也是湖南省“一带一部”战略定位的枢纽地带、长江经济带建设的直接辐射区^[17]。近年来, 随着城镇化的加快发展, 洞庭湖周边工农业活动日益频繁, 土地利用强度逐渐增大, 原有水域面积缩减加快, 水域也在遭受污染, 生态系统面临着日渐增强的人类活动干扰, 生态系统服务正呈现衰退趋势。因此, 加强洞庭湖区土地利用强度对生态系统服务影响的研究, 对加快构建生态文明的新湖南、促进长江经济带的绿色发展具有重要意义。基于此, 本文选取洞庭湖区的部分区域作为研究区, 在格网分析的基础上运用土地利用强度、InVEST、CASA 模型和双变量空间自相关方法, 对 2000—2018 年研究区土地利用强度与食物生产、生境质量和植被净初级生产力三项服务的时空变化及空间关系进行分析, 旨在解决以下问题: ①分析土地利用强度的时空特征; ②量化和映射生态系统服务的变化; ③揭示土地利用强度与生态系统服务的空间关系。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

洞庭湖区地处湖南省北部, 为中国第二大淡水湖泊, 同时也是长江流域重要的调蓄性湖泊和生态安全功能区。整体以平原为主, 但仍存在多种地貌类型, 大致可分为湖泊水体及洲滩、湖泊周边平原及丘陵、湖区周围丘陵及低山、河谷平原及丘陵 4 种类型^[18]。洞庭湖区属典型的亚热带季风性气候, 雨热同期, 日照时间长, 降水丰沛, 湖区内河网纵横密布, 湘、资、沅、澧四水流经本区并注入洞庭湖。区内高铁、高速公路、铁路、水运、空运等各类交通运输方式齐备, 岸线资源优良, 岳阳港、荆州港等内河港口繁盛。该区是中国粮、棉、油、淡水鱼等农产品的主要产地, 而且农产品加工业发达^[16]。这里选取洞庭湖区包含岳阳、益阳和常德 3 个地级市的部分县 (市、区) 作为研究区, 具体包括岳阳市区、临湘市、岳阳县、华

容县、汨罗市、湘阴县、益阳市区、沅江市、南县（含大通湖区）、常德市区、汉寿县、安乡县、澧县、津市市、临澧县，共计 19 个县（市、区）（下文中研究区均指这一范围），总面积约 2.58 万 km²，约占湖南省的 12.18%，截至 2020 年底，常住人口约 1070.58 万，占全省的 16.11%，GDP 约 7104.40 亿元，约占全省比重 17.00%（图 1）。

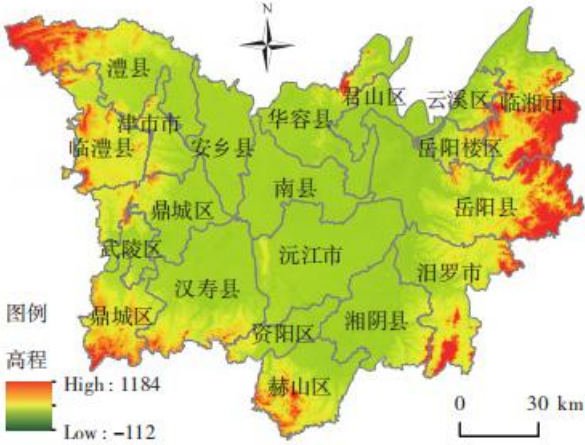


图 1 研究区概况图
Fig.1 Overview of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 土地利用强度模型

土地利用强度模型用于测度人类活动对土地利用格局的干扰程度。参考刘纪远、庄大方等研究^[19-20]，根据不同用地类型的特点，将土地利用强度划分为四个等级：其他用地级（对应未利用地）、林草水用地级（对应林地、草地和水域）、农业用地级（对应耕地、园地、人工草地）和建设用地级（对应城镇、居民点、工矿及交通过地），并将其强度分级指数依次设为 1、2、3、4。由于区域可能存在多种土地利用方式，因而运用土地利用强度综合指数反映土地利用强度大小，计算公式如下：

$$LUI = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \frac{S_i}{S} \quad (1)$$

式中：LUI 为样本区域土地利用强度综合指数；A_i 为样本区域内第 i 级土地利用强度分级指数；S_i 为样本区域内第 i 级土地利用面积；S 为样本区域内土地利用总面积；n 为土地利用强度分级数。

通过空间网格化的方法对洞庭湖区进行空间量化采样，从而得到单元采样区内利用土地利用现状网格数据。采用 3km×3km 的格网对研究区土地利用分类图进行采样，得到 4310 个采样格网。

1.2.2 生态系统服务评估方法

近几年来，日益加快的城市化进程改变了区域原有的生态系统结构（如林地、耕地等面积逐步减少）和过程（如生境质量明显恶化），使自然生态系统转变为以人为主导或人与自然相耦合的生态系统，制约了洞庭湖区的可持续发展。由于洞庭湖区的土地利用类型多为耕地、水域和林地，依据这些用地的主要功能，

如供给食物、调节气候和提供良好生态环境等，因而选择了食物生产、生境质量和植被净初级生产力和保持水土四项产品与生态系统服务，但受限于数据的可获得性、适用性和技术可操作性，最终只选取了三种典型的生态系统服务，即食物生产（FP）、生境质量（HQ）以及植物净初级生产力（NPP），其中 FP 服务是保障一个地区粮食、经济与资源的基础，HQ 服务决定着城市群的生态系统的稳定性，而 NPP 服务作为地表碳循环的重要组成部分，可以衡量土地利用变化过程对植被的影响程度，能够反映研究区生态系统碳汇和调节生态系统发展的功能水平，进而表征陆地生态系统的质量状况。

①食物生产评估。不同土地利用类型产生的

食物不同，按照食物的质量转化为相应的能量（kJ/kg），计算区域的食物生产能力^[21-22]。其中，草地与奶类和食草动物肉类对应，耕地与粮食、油料、糖料、水果对应，水域与水产品对应。计算公式为：

$$P_i = \sum_{k=1}^k \sum_{c=1}^c A_{cki} \times P_{cki} \quad (2)$$

式中： P_i 为区域 i 提供的食物总能量(kJ)； A_{cki} 为区域 i 内食物 c 在土地利用类型 k 中所占面积(hm^2)； P_{cki} 为对应的食物 c 的单位面积食物能量（ $\text{kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）。根据式（2）及各参数所代表的具体含义，可以算出某一区域内食物 c 在单位面积的食物能量，计算公式为：

$$P_{cki} = \frac{P_i}{\sum_{k=1}^k \sum_{c=1}^c A_{cki}} = \frac{\sum_{c=1}^c Y_c \cdot E_c}{\sum_{k=1}^k \sum_{c=1}^c A_{cki}} \quad (3)$$

式中： Y_c 为不同食物类型 c 的产量（kg）； E_c 为不同食物所含的热量（kJ/kg）。以上计算结果最后通过 ArcGIS 重分类赋值到相应土地利用栅格数据上，考虑计算上的方便，本文中的食物能量值单位为 kJ。

②生境质量评估。生境质量是通过 InVEST 的 HabitatQuality 模块结合土地覆被数据以及生物多样性威胁因素进行测算而成的栅格数据 [28]。选取胁迫因子，然后对胁迫因子的权重进行赋权，其权重大小体现了对生境类型的干扰强度。胁迫因子对其生境类型的干扰强度随着距离的增加而减小，因此还需要设置每个胁迫因子的最大作用距离。同时，不同生境类型对胁迫因子的响应都有所差异，计算公式如下：

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + k^2} \right) \quad (4)$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\omega_r / \sum_{r=1}^R \omega_r \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (5)$$

$$i_{rxy} = 1 - (d_{xy} / d_{rmax}) \quad (6)$$

式中： Q_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 的生境质量； D_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 所受到的干扰程度； k 为半饱和和常数，通常取 Q_{xj} 试运行一次后得到的最大值的一半； H_j 为生境类型 j 的生境适宜性； R 为胁迫因子； y 为胁迫因子 r 栅格图层的栅格数； Y_r 为胁迫因子所占的栅格总数； ω_r 为胁迫因子 r 的权重，取值 [0, 1]； r_y 为栅格 y 的胁迫因子值（0 或 1）； i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫因子 r 对生境栅格 x 的干扰程度； β_x 为栅格 x 的可达性水平，取值 [0, 1]，1 表示极容易到达； S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性， i_{rxy} 通过式（9）得到： d_{xy} 为栅格 x 与栅格 y 之间的直线距离； d_{rmax} 为胁迫因子 r 的最大影响距离。

③植被净初级生产力评估。光能利用率 (CA- SA) 模型被广泛地应用于区域净初级生产力和土地利用变化对碳源 / 汇影响的估算之中, 该模型是从植被机理出发建立的遥感参数模型^[23]。本文基于已有的 CASA 模型^[24], 结合中国科学院土地利用 / 土地覆被分类标准, 对研究区域耕地、林地、草地等 NPP 进行核算。该模型主要由气象数据和植被 ND- VI 数据等作为基本参数, 结合植被吸收光合作用的有效辐射、温度胁迫系数、水分胁迫系数和最大光能利用率等参数对植被 NPP 进行核算^[25-26]。其中植被 NPP 主要由植被所吸收的光合有效辐射 (APAR) 和光能利用率 (E) 决定, 计算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) - E(x, t) \quad (7)$$

$$APAR(x, t) = SOLS(x, t) \cdot FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (8)$$

$$E(x, t) = T_{E1}(x, t) \cdot T_{E2}(x, t) \cdot W_E(x, t) \cdot E_{max} \quad (9)$$

式中: APAR(x, t) 指像元 x 在 t 月份吸收的光合有效辐射能量 (MJ/m²/月); E(x, t) 指像元 x 在 t 月份的实际光能利用率 (g/MJ); SOL(x, t) 表示像元 x 在 t 月份吸收的太阳总辐射能量 (MJ/m²/月); FPAR(x, t) 表示植被层对入射光有效辐射的吸收比例; 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例; TE1(x, t) 表示指高温对光能利用率的胁迫作用; TE2(x, t) 表示低温对光能利用率的胁迫作用; WE(x, t) 表示水分胁迫系数, 表示核算的 NPP 受水分状况的影响程度; Emax 表示理想条件下的最大光能利用率 (g/MJ)。参考朱文泉等^[27]模拟出的中国典型植被最大光能利用率取值, 其中耕地、草地、水域和城乡工矿居民用地以及未利用土地, 光能利用率的取值为 0.542g/MJ; 并选取全球公认值 0.389g/MJ 作为林地的最大光能利用率。

1.2.3 双变量空间自相关分析

空间自相关是检验某一要素的属性值是否显著地与其相邻空间点上的属性值相关联的重要方法, 检验包括全局空间自相关和局部空间自相关。参考相关学者的研究, 拓展双变量全局自相关与局部自相关, 以揭示不同要素空间分布的相关性。公式^[29]如下:

$$I_{eu} = \frac{N \sum_i \sum_{j \neq i} W_{ij} z_i^e z_j^u}{(N-1) \sum_i \sum_{j \neq i} W_{ij}} \quad (10)$$

$$I'_{eu} = z_i^e \sum_{j=1}^N W_{ij} z_j^u \quad (11)$$

式中: I_{eu} 和 I'_{eu} 分别为双变量全局莫兰指数和局部莫兰指数; z_{ei} 为第 i 个单元土地利用强度; z_{uj} 为与 j 邻近区域中生态系统服务能量; W_{ij} 为空间权重矩阵; N 为研究区评价网格数量。莫兰指数取值范围为 [-1, 1], 指数为正, 表明区域间存在正相关; 指数为负, 表明区域间存在互相关; 指数为 0, 则不存在空间关联性。

1.3 数据来源及处理

研究区 2000、2010、2018 年三期 LandsatTM/ETM 土地利用遥感影像来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。参照全国土地利用标准分类和刘纪远等^[30]研究, 将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。食物产量 (粮食作物、油料作物、糖料作物、肉类、水果、牛奶) 数据主要源于《中国统计年鉴》(1996—2019) 和《中国农村统计年鉴》(1996—2018); 各类食物热量成分数据源于美国农业数据库和相关研究^[31-32]。生境质量数据中水田、旱地、建设用地、裸地是人类活动

频繁或自然环境较为恶劣的地类,因此在本文中将该四类用地作为威胁源。各地类的生境适宜性、胁迫因子权重以及最大胁迫距离、生境类型对胁迫因子的敏感性等参数设置来自相关文献^[33]。植被类型图来源于GLC2000项目开发的全球土地覆盖数据中国子集,寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>); NDVI 数据从 NASA 官网下载 (<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>); 气象数据包括月平均气温、总降水以及太阳总辐射,都从中国气象数据网下载 (<http://data.cn.cn/>)^[34]。社会经济统计数据来源于 2020 年湖南省社会统计公报和各县市区社会统计公报。

2 结果与分析

2.1 土地利用强度时空演变

伴随城镇化的起步与日益提速,农用地转变为

非农的建设用地的规模加快扩大,人类活动对土地的干扰强度也逐渐增强,而这一定程度上表现为土地利用强度的时空变化。由图 2 可知,2000—2018 年,研究区土地利用强度呈现明显的空间分异特征,其经历了“先减小—后增大”的变化过程。总的来看,低强度主要分布在洞庭湖、沿岸河流湖泊及山地丘陵区,高强度集聚在各县市区等城镇化水平较高的地区,较高强度位于城镇周边的城乡结合地区,中等强度主要分布在城乡接合部的边缘区,较低强度主要集聚在河流、丘陵等生态环境良好地区的周边。2000—2010 年,高强度的面积有所缩减,主要表现为益阳市区、汨罗市、华容县、南县的高强度面积的明显减小,这是由于 1998 年洪水后,湖南实行了“平垸行洪、退田还湖、移民建镇”的政策;较高强度的分布范围有小幅扩大,主要由 2000 年的高强度面积转化而成;而低强度、较低强度及中等强度的面积较为稳定。这反映出该时期内洞庭湖区的城镇化进程较慢,人口集聚缓慢,经济活动规模偏小,导致土地利用强度总体变化较小。2010—2018 年,研究区土地利用强度出现了明显增强的变化,主要表现为华容县、南县、沅江市、益阳市区、常德市区、汨罗市和岳阳县的高强度面积大幅增长,同时,洞庭湖北部水域、临湘市和岳阳县东侧的低强度面积大幅减小,而较低强度的面积却显著增加;在洞庭湖东岸、南岸和西岸地区,较高强度和中等强度的面积较 2010 年也有了一定幅度的扩大。由于近几年经济开发和农民大量建房等活动,湖区周边土地利用强度再次提升。由此,2000—2018 年土地利用强度的变化过程,说明未来研究区继续落实生态文明理念与生态经济区发展规划,大力发展生态经济和加快推进产业转型升级,加强生态环境保护具有重要意义。

2.2 生态系统服务时空变化

利用 ArcGIS 对 2000—2018 年洞庭湖区 FP、HQ 和 NPP 三项服务的空间分布进行可视化,并运用等间距方法将其划分成五个等级。由图 3 可知,2000—2018 年研究区 FP、HQ 和 NPP 三项生态系统服务均呈现明显的空间分异。

从 FP 服务看,2000—2018 年研究区单位格网上的 FP 服务呈现出增长趋势,但空间分布格局变化较小。FP 服务高值主要分布在洞庭湖东岸、西岸和南岸等地形平坦的耕地地区,较高值零散镶嵌在高值附近,中等值主要出现在洞庭湖边缘区、岳阳市区南部、临湘市中部、岳阳县东部、常德市区中部、澧县西北、汉寿县、湘阴县的部分地区。这些地区多为地势低缓开阔、土壤肥沃的平原区,耕地面积广且集中连片,便于机械化、规模化耕种,使得该区 FP 服务高于其他区域。而 FP 服务低值则主要集中在洞庭湖水域、临湘市东南、岳阳县东南、常德市区南部、大通湖、汨罗市东部。这些地区多为面积广阔的水域和相对集中的林地,耕地面积小且分散,故 FP 服务较周边偏低。2000—2010 年,FP 增长为正的格网数占比约 95.38%,而约 1.6%的格网上 FP 有所减少;2010—2018 年,FP 增长为正的格网数占比约 95.99%,约 1.32%的格网上

FP 下降。

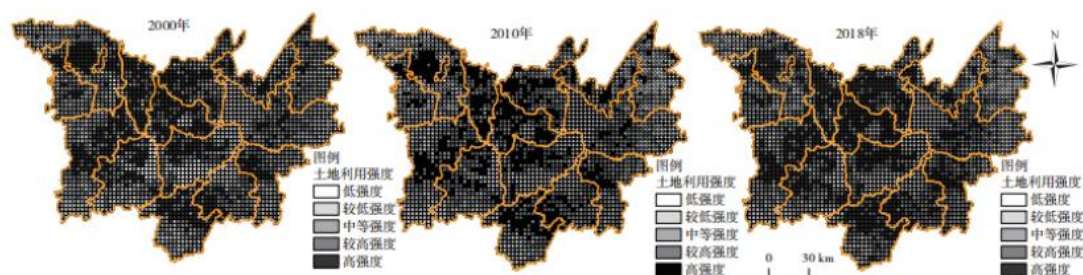


图2 2000—2018年研究区土地利用强度空间分布
Fig.2 Spatial distribution of land use intensity in study area from 2000 to 2018

从HQ服务看,2000—2018年HQ服务的时空分布基本稳定,在空间分布上呈现明显的空间分异。HQ高值多出现在洞庭湖水域及沿岸河流、湖泊、东部与南部山地丘陵区,而在地形平坦、人口经济活动较密集的城镇地区其HQ较低,由于这些地区建设用地扩张速度快,林地、水域与草地等生态用地面积较小且破碎,对维持局部生态环境稳定及生态系统健康产生了较大阻碍。2000—2010年,临澧县、常德市区、汉寿县、益阳市区、岳阳县、汨罗市及湘阴县的HQ有较小幅度的提升,说明该段时间内这些地区的生态环境有所改善,这主要得益于环保意识的增强、耕种技术的改进与有效环保举措的实施。2010—2018年临澧县南部、汨罗市的HQ有所提升,而其余地区HQ保持相对稳定,研究区生态环境总体发生了小幅改善。2000—2010年,仅1.67%的格网中HQ有所提升,而约98.33%的格网HQ服务明显下降;2010—2018年,HQ增长为负的格网数占比约96.67%;2000—2018年,HQ下降的格网数占比约96.79%,说明区域经济发展的同时,生态系统遭受的破坏日益加深,区域HQ呈现恶化趋势。

从NPP服务看,2000—2018年NPP服务的时空变化幅度较大,约74.86%的格网上NPP服务增长为正,约17.43%的格网增长为负。2000—2010年,NPP服务增长为正的格网数占比约75.38%,而16.92%的格网上NPP服务出现减少;2010—2018年,NPP服务增长为正的格网数占比约59.65%,而NPP服务减少的格网数大幅增长至32.58%。空间上主要表现为NPP服务高值、较高值面积的持续减小,中等值及较低值面积的增加。NPP服务高值主要分布在东部、南部与西北部等山地地区,这里植被覆盖率较高,光合作用能力较强,因而NPP服务较高。2000—2010年,高NPP服务的分布面积小幅增大,主要是在常德市区、临澧县、益阳市区、汨罗市;2010—2018年,高NPP服务面积在临澧县、常德市区南部、岳阳县、临湘市和汨罗市明显减少。同时,研究区较高NPP服务的面积始终处于缩减态势,该时期洞庭湖区正处于城镇化加快发展阶段,人类活动范围扩大,受林地垦荒、坡耕地开发等人为活动影响,区域NPP服务明显减少。2000—2018年,中等NPP服务的面积具有持续增加的特点,表现为洞庭湖西岸平原、东部与南部的丘陵山地出现了较大幅度增长。NPP服务的较低值主要分布在洞庭湖水域沿岸、大通湖、长江沿岸、湘阴县西部、常德市区、津市市,2000—2018年其分布较为稳定,空间变化较小。

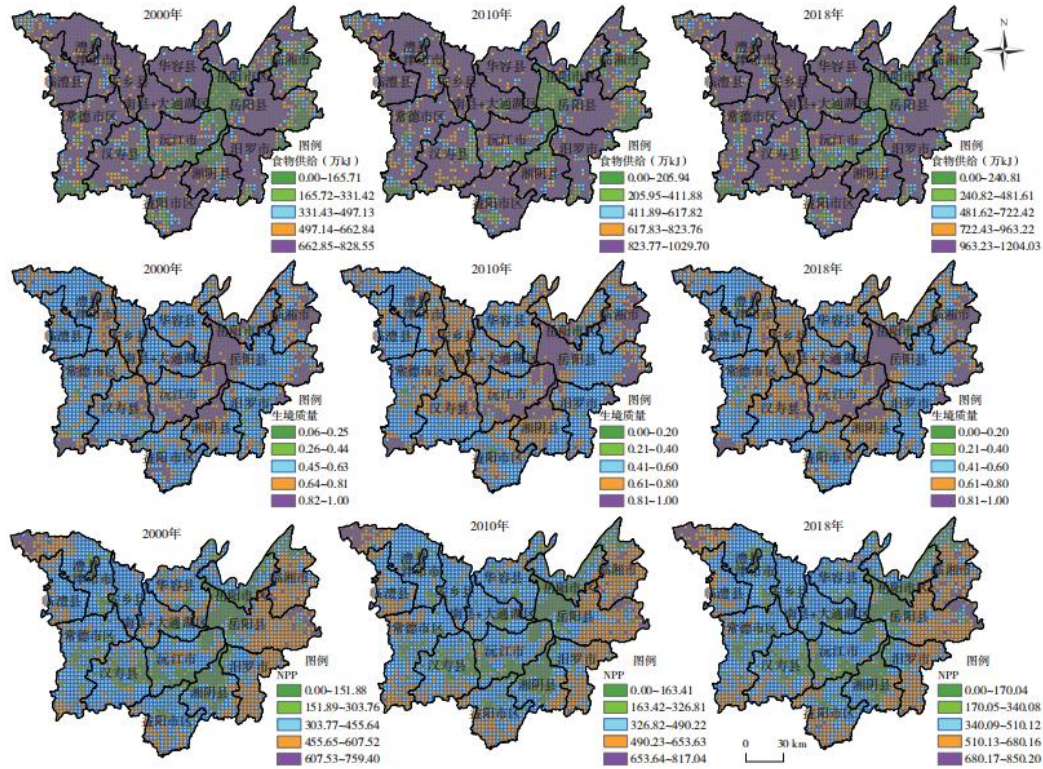


图3 2000—2018年研究区生态系统服务空间分布
Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services in study area from 2000 to 2018

2.3 土地利用强度对生态系统服务的影响

LUI 越大, 反映人类活动对生态系统的影响程度越深, 最终将导致生态系统服务的衰退与减少。分析 LUI 与生态系统服务的时空关系, 对实现可持续发展具有重要意义。从局部二元空间自相关分析结果 (图 4) 可以看出, 2000—2018 年, 研究区 LUI 与 FP、HQ、NPP 三项生态系统服务之间存在显著的空间自相关, 且形成了四种典型的集聚类型: 即高一高集聚、高一低集聚、低一高集聚、低一低集聚, 但空间集聚也具有一定的时空动态变化。

从 LUI-FP 的局部空间自相关分布图看, 高一高集聚主要出现在澧县、临澧县、华容县、南县、沅江市、岳阳县、汨罗市、湘阴县、资阳市区、常德市区、汉寿县和安乡县, 这些地区地势较平坦, 土壤深厚且肥沃, 利于种植业发展, 河湖众多, 适合发展养殖业, 粮食供给能力较强, 同时, 人类经济活动对土地的干扰破坏程度较大, 因而呈现高 LUI—高 FP 集聚现象。低一低集聚主要分布在洞庭湖水域、临湘市东南、岳阳县、常德市区南部、汉寿县和资阳市区西南, 这里多为水域, 面积较大, 多发展渔业, 而山地丘陵区, 地势起伏大, 不适用于发展耕种, 导致生态系统粮食供给服务较小, 加上山区不利于建设用地扩展, 因而土地利用强度也较低。低一高集聚主要以澧县、临澧县、华容县、岳阳县、汨罗市中部与益阳市区为典型区; 高一低集聚面积较小, 零星分布在岳阳市区、华容县东北、沅江市。2000—2010 年, 高一高集聚在空间上的变化不大, 低一低集聚面积出现小幅减小, 主要出现在临湘市中西部、汉寿县、常德市区南部及资阳市区西南, 反映出科技发展背景下, 人类活动对自然生态系统的干扰有所增强; 2010—2018 年, 低一高集聚的面积在华容县东部、岳阳县和汨罗市中部有所减小, 这些地区多丘陵分布, 地势起伏较大, 不利于土地利用开发, 因而土地利用强度较低, 但林果业与畜牧业等 FP 服务较高。

从 LUI-HQ 的局部空间自相关分布图看, 2000—2010 年, 四种集聚类型的面积变化较大, 而 2010—2018

年基本稳定。其中，高一高集聚的面积小，分布零散且年际变化小，主要分散在沅江市、澧县、汨罗市、岳阳县、岳阳市区、临湘市和华容县，说明区域同时兼顾高土地开发程度与维持较高生境质量存在很大困难。低—低集聚主要分布在临澧县南部、常德市区北部与南部、岳阳县中东部、汨罗市中部、汉寿县南部与益阳市区东部，2000—2010年，其在汨罗市的面积有所减小。低—高集聚面积大且集中，主要分布在洞庭湖水域、大通湖、临湘市东南、岳阳县东南、常德市区南部与汉寿县东部，2000—2010年，常德市区南部、益阳市区南部的低—高集聚面积出现减小。高一低集聚主要分布在临澧县、常德市区中南部、汉寿县中南部、益阳市西北—东南部、汨罗市中部、湘阴县东部和岳阳县中部，2000—2010年，其在常德市区、益阳市区、汨罗市的面积大幅增加。

在LUI-NPP的局部空间自相关分布图中，高一高集聚主要分布在临湘市、岳阳县、汨罗市、澧县和益阳市区，2000—2010年，其分布面积呈现缩小趋势，而在常德市区与益阳市区却有小幅扩大；2010—2018年，其分布面积有所增加，在岳阳县、汨罗市、湘阴县、益阳市区、澧县和临澧县扩大较为明显，这与该时期重视保护耕地和林地，推动山水林田草生态系统一盘棋保护与治理环境污染等密切相关。低—低集聚主要分布在洞庭湖、大通湖和长江沿岸，受国家及省政府的政策影响，水域附近土地利用开发方式及程度都受到严格限制，水域主要发挥自然调蓄洪水功能，因而呈现低土地利用强度—低净初级生产力（NPP）集聚现象；2000—2010年，其在大通湖、北洞庭湖的分布面积出现小幅增大，说明生态保护措施发挥了一定成效，推动洞庭湖与大通湖的生态恢复与限制周边建设用地的无序扩张；2010—2018年其空间格局变化不大。低—高集聚主要分布在澧县、临湘市、岳阳县、汨罗市、临澧县、益阳市区和常德市区南部，面积具有增大态势。高一低集聚面积较小，集中分布在洞庭湖南岸、长江南岸和常德市区。

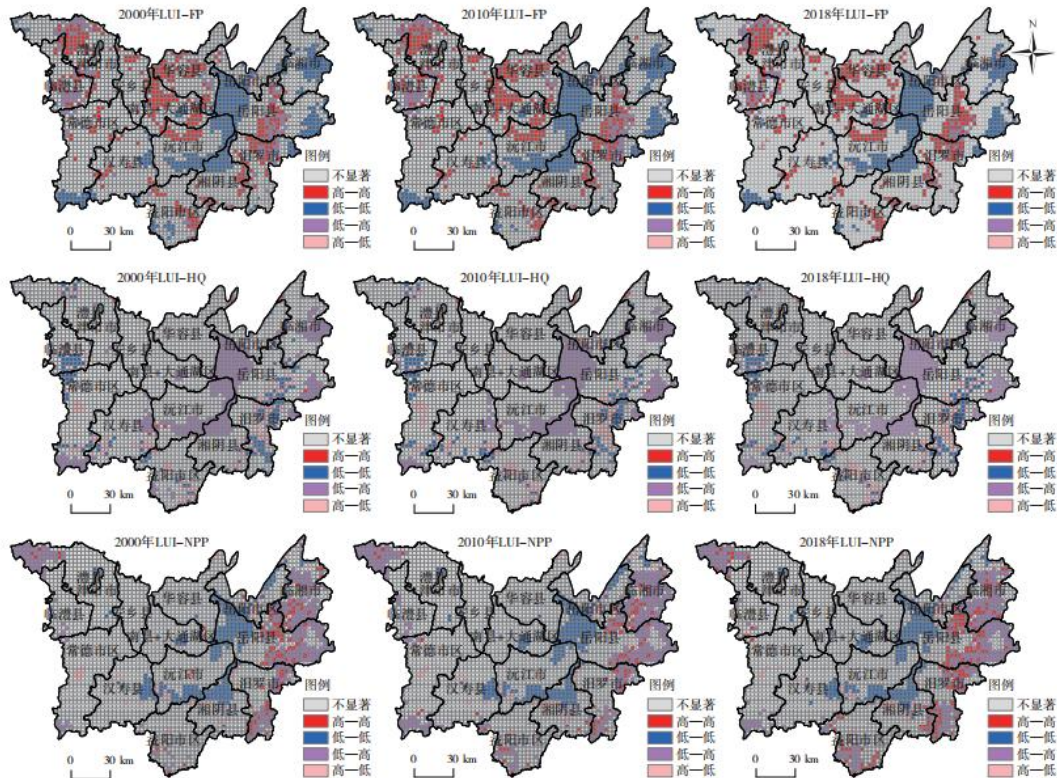


图4 2000—2018年研究区土地利用强度(LUI)与生态系统服务的局部空间自相关分布
Fig.4 Local spatial auto-correlation distribution of land use intensity (LUI) and ecosystem services in study area from 2000 to 2018

3 结论与讨论

3.1 结论

本文选取洞庭湖区的部分区域作为研究区,基于2000、2010和2018年的遥感影像,在格网分析的基础上综合运用InVEST、CASA模型和双变量空间自相关方法,分析了2000—2018年研究区土地利用强度(LUI)与食物生产(FP)、生境质量(HQ)和植被净初级生产力(NPP)三项服务的时空演变及空间关系,主要结论如下:

①2000—2018年,研究区LUI呈现明显的空间分异特征,其经历了“先减小—后增大”的变化过程,且增幅较显著。低强度主要分布在洞庭湖、沿岸河流湖泊及山地丘陵区,高强度则集聚在各县市区等城镇化水平较高的地区,较高强度则位于城镇周边的城乡结合地区,中等强度主要分布在城乡结合部的边缘区,较低强度主要集聚在河流、丘陵等生态环境良好地区的周边。

②2000—2018年,研究区三项生态系统服务均呈现明显的空间分异。研究期间单位格网上的FP服务呈现出增长趋势,但空间分布格局变化较小;高值主要分布在洞庭湖东岸、西岸和南岸等地形平坦的耕地地区,较高值零散镶嵌在高值附近,而低值则主要集中在洞庭湖、临湘市东南、岳阳县东南、常德市区南部、大通湖、汨罗市东部、津市市中部。HQ服务在空间分布上呈现出明显的空间分异,HQ高值多出现在洞庭湖水域及沿岸河流、湖泊、东部与南部山地丘陵区,而在地形平坦、人口经济活动较密集的城镇地区其生境质量较低。HQ下降的格网数占比约96.79%,区域经济发展的同时,区域HQ呈现恶化趋势。NPP服务的时空变化幅度较大,2000—2018年,约74.86%的格网上NPP服务增长为正,约17.43%的格网增长为负,空间上主要表现为NPP服务高值、较高值面积的持续减少,中等值及较低值面积的增加。

③根据局部二元空间自相关分析结果可看出,2000—2018年,研究区土地利用强度(LUI)与FP、HQ、NPP三项生态系统服务之间存在显著的空间自相关,但空间集聚具有一定的动态变化。LUI-FP的高—高集聚主要出现在澧县、临澧县、华容县、南县、沅江市、岳阳县、汨罗市、湘阴县、资阳市区、常德市区、汉寿县和安乡县;低—低集聚主要分布在洞庭湖水域、临湘市东南、岳阳县、常德市区南部、汉寿县和资阳市区西南。LUI-HQ的高—高集聚的面积小,分布零散且年际变化小。低—低集聚主要分布在临澧县南部、常德市区北部与南部、岳阳县中东部、汨罗市中部、汉寿县南部与益阳市区东部。LUI-NPP的高—高集聚主要分布在临湘市、岳阳县、汨罗市、澧县和益阳市区,低—低集聚主要分布在洞庭湖、大通湖和长江沿岸。

3.2 讨论

本研究构建了土地利用强度模型,并运用InVEST、CASA和食物生产模型,分析了土地利用强度与食物生产、生境质量和植被净初级生产力三项服务的时空演变规律,进而利用双变量空间自相关方法研究土地利用强度与生态系统服务的空间关联特征。以往研究更多地侧重于运用土地转移矩阵和简单的统计相关系数来对二者的数量关系加以量化,而缺乏空间关系的考虑^[11, 35],本研究从空间视角来探讨土地利用强度对生态系统服务的影响,为今后合理推进土地空间格局的开发与生态文明建设提供新的启示。研究发现土地利用强度与三项服务间存在四种空间自相关类型,其中,高—高集聚区具有较高的土地利用强度,同时生态系统服务也较高,未来这类区域应通过增加生态环保投入和完善绿色基础设施以及提高土地利用效率,实现城镇化推进与生态系统服务供给的协调与平衡^[36];低—低集聚区应更加重视土地复垦与生态修复建设,特别是在加强生态环境保护的基础上,进一步加大土地整理与高效利用,重点发展生态农业;低—高集聚区是土地利用强度较低、生态系统服务较高的地区,应严格执行生态保护政策,通过运用精明增长理念实施合理的城市规划,尽可能地提高城市用地效率,以减少城市用地和控制建设用地的无序快速扩张,同时鼓励发展新兴产业,减少对自然资源的消耗^[37];高—低集聚区则应严格控制建设用地规模,大力构建绿色

生态格局，合理配置生态用地，实现人类活动与生态环境的和谐统一。本研究仅讨论了土地利用变化的显性形态对 ESV 的影响，而未讨论隐性形态（如质量、产权、产出能力和土壤质量）的影响。因此，未来的研究应考虑显性和隐性土地利用强度。同时，本研究仅揭示了 LUI 对 ESV 的时空干扰，缺乏对其他因素的综合考虑。土地利用强度变化是自然因素和社会经济因素共同作用的结果，因此，未来的空间关系模型中应综合考虑地理和社会经济因素，为国土空间规划提供科学依据。

参考文献:

[1] Daily G.C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystem* [M]. Washington DC: Island Press, 1997.

[2] Costanza R, De Groot, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253 - 260.

[3] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统 [J]. *经济地理*, 1991, 11(3): 1-6.

[4] 黄秉维, 郑度, 赵名茶, 等. 现代自然地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 195-210.

[5] 张侠, 葛向东, 淮励杰, 等. 土地利用的经济生态位分析和耕地保护机制研究 [J]. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 677-683.

[6] Santos-Martín F, Zorrilla-Miras P, Palomo I, et al. Protecting nature is necessary but not sufficient for conserving ecosystem services: A comprehensive assessment along a gradient of land-use intensity in Spain [J]. *Ecosystem Services*, 2019, 35: 43 - 51.

[7] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.

[8] 刘钢. 川西南山地土地利用变化的生态环境效应研究——以攀枝花市三区为例 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.

[9] Xu C Y, Pu L J, Zhu M, et al. Ecological security and ecosystem services in response to land use change in the coastal area of Jiangsu, China [J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 816.

[10] 赵锐锋, 姜朋辉, 陈亚宁, 等. 塔里木河干流区土地利用/覆被变化及其生态环境效应 [J]. *地理科学*, 2012, 32(2): 244-250.

[11] 孟琦琦. 近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值时空关系及可持续性情景模拟 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2020.

[12] 熊秀海, 代侦勇. 奉化市生态服务与土地利用强度的相关性分析 [J]. *地理空间信息*, 2017, 15(4): 102-104.

- [13]董会忠,姚孟超.成渝经济区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].水土保持通报,2020,40(1):213-220.
- [14]肖景峰,刘白杨,于德,等.长沙市城区土地利用变化过程与生态格局研究[J].湖南农业科学,2016(1):47-52.
- [15]李辉丹,叶长盛,华吉庆.南昌市土地利用变化对生态系统服务价值影响[J].水土保持研究,2020,27(3):277-285,293.
- [16]石忆邵,史东辉.洞庭湖生态经济区生态服务供需平衡研究[J].地理研究,2018,37(9):1714-1723.
- [17]李宇,段建南,刘思涵,等.洞庭湖生态经济区土地功能评价与影响因素分析[J].江西农业学报,2021,33(7):117-123.
- [18]徐伟平,康文星,何介南.洞庭湖区生态系统服务功能价值分析[J].草业学报,2016,25(1):217-229.
- [19]宋戈,王越.松嫩高平原土地利用格局变化时空分异[J].农业工程学报,2016,32(18):225-233.
- [20]庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.
- [21] Li B J, Chen D X, Wu S H, et al. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: Case study of Nanjing City, China [J]. Ecological Indicators, 2016, 71: 416-427.
- [22] Zhang D, Huang Q X, He C Y, et al. Impacts of urban expansion on ecosystem services in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China: A scenario analysis based on the Shared Socioeconomic Pathways [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 125: 115-130.
- [23]赵有益,龙瑞军,林慧龙,等.草地生态系统安全及其评价研究[J].草业学报,2008,17(2):143-150.
- [24]朱文泉,潘耀忠,阳小琼,等.气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析[J].科学通报,2007,52(21):2535-2541.
- [25]夏明鹏,董杰,官凤英,等.基于CASA模型的福建省毛竹林NPP估算[J].西部林业科学,2016(5):113-118.
- [26]李天宏,王祉宁.基于GIS、RS和CASA模型的深圳市逐月NPP估算及其变化特征研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(S1):126-135.
- [27]朱文泉.中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D].北京:

北京师范大学, 2005.

[28] Mao D H, He X Y, Wang Z M, et al. Diverse policies leading to contrasting impacts on land cover and ecosystem services in Northeast China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 117961.

[29] 刘海龙, 丁娅楠, 王跃飞, 等. 山西省城镇化与生态系统服务时空相关性及其空间效应分析 [J]. 水土保持通报, 2022, 36(1): 124-134.

[30] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局 [J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.

[31] Peng J, Hu X X, Qiu S J, et al. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area [J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 765-775.

[32] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. Science, 2011, 333(6045): 988-993.

[33] Cao Y, Li G, Tian Y, et al. Linking ecosystem services tradeoffs, bundles and hotspot identification with cropland management in the coastal Hangzhou Bay area of China [J]. Land Use Policy, 2020, 97: 104689.

[34] 石志华, 刘梦云, 吴健利, 等. 基于 CASA 模型的陕西省植被净初级生产力时空分析 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 206-212.

[35] 韩增林, 孟琦琦, 闫晓露, 等. 近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系 [J]. 生态学报, 2020, 40(8): 2555-2566.

[36] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市化与生态系统服务的空间交互关系研究——以长株潭城市群为例 [J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7502-7513.

[37] 顾康康, 杨倩倩, 程帆, 等. 基于生态系统服务供需关系的安徽省空间分异研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(7): 577-583.