DOI: 10.20103/j.stxb.202312212777
宁启蒙,何自强,胡然,吴雨欣,段宜珂.洞庭湖流域生态状况时空分异及影响因素.生态学报,2024,44(18):8072-8083.
Ning Q M,He Z Q,Hu R, Wu Y X,Duan Y K.Spatiotemporal differentiation of ecological status and influencing factors in Dongting Lake Basin.Acta Ecologica Sinica,2024,44(18):8072-8083.

洞庭湖流域生态状况时空分异及影响因素

宁启蒙[1,2,3],何自强[1,2,3],胡　然[1,2,3],吴雨欣[1,2,3],段宜珂[1,2,3,*]
1 湖南城市学院建筑与城市规划学院,益阳　413000
2 数字化城乡空间规划关键技术湖南省重点实验室,益阳　413000
3 城市规划信息技术湖南省普通高校重点实验室,益阳　413000

摘要:掌握生态状况时空特征及影响因素,是国土空间的优化和生态功能的提升的关键。目前研究大多侧重于生态系统结构或功能的单一变化,尚未综合考虑人为干扰因素,导致生态修复分区以单一生境或要素的修复为主,无法较好地解决人地关系矛盾。以洞庭湖流域作为研究区域,利用景观格局指数、InVEST 模型分析了 2000 年和 2018 年景观分布特征和生态系统服务,运用模糊推理算法探究 2000—2018 年洞庭湖流域生态状况特征,基于此揭示人类-自然因素对生态状况的影响。结果表明:(1)洞庭湖流域整体景观更加破碎化,景观形状趋于复杂,聚集程度不断下降,景观类型更加离散。(2)研究期间,食物供给服务呈现稳定上升的趋势,生境质量服务和碳储量服务总体呈下降趋势。(3)洞庭湖流域生态状况整体转好,生态指数上升区域(74%)明显大于下降区域(26%)。生态系统退化区域主要分布在人口较为密集、城市化水平较高的城镇地区,而生态恢复区域多分布在远离各城市中心的山地丘陵区域。(4)洞庭湖地区各影响因素对生态系统退化的影响显著性最高的地区主要分布在生态系统退化的高值区和人类活动强度较为集中的地区,具有显著影响的地区重心逐渐由西部转移到东部。其中,人口密度、GDP、路网密度和夜间灯光指数对洞庭湖地区的生态系统退化主要表现为负相关关系。坡度、降水量和日照时数对生态系统退化产生的正向影响呈逐渐增强的趋势。本研究利用模糊推理方法计算出洞庭湖流域的生态指数,从而识别出生态退化区域,并揭示了其影响因素,为区域生态保护修复规划提供了科学依据。

关键词:景观格局指数;生态服务功能;生态状况;生态管理分区;洞庭湖流域

Spatiotemporal differentiation of ecological status and influencing factors in Dongting Lake Basin

NING Qimeng[1,2,3],HE Ziqiang[1,2,3],HU Ran[1,2,3], WU Yuxin[1,2,3],DUAN Yike[1,2,3,*]
1 *College of Architecture and Urban Planning*, *Hunan City University*, *Yiyang* 413000,*China*
2 *Key Laboratory of Key Technologies of Digital Urban-Rural Spatial Planning of Hunan Province*, *Yiyang* 413000,*China*
3 *Key Laboratory of Urban Planning Information Technology of Hunan Provincial Colleges*, *Yiyang* 413000,*China*

Abstract: Understanding the spatial-temporal characteristics of ecological conditions and their influencing factors is crucial for the optimization of territorial space and enhancement of ecological functions. At the moment, most research focuses on singular changes to ecosystem function or structure, sometimes ignoring thorough evaluations of human perturbations. As a result, endeavors at ecological restoration were usually habitat- or element-specific and do not sufficiently address the conflict between humans and nature. Within the Dongting Lake Basin as the study area, this research utilized landscape pattern indices and the InVEST model to analyze the landscape distribution characteristics and ecosystem services in 2000 and 2018. A fuzzy reasoning algorithm was then used to explore the characteristics of the ecological status in the Dongting

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2022JJ50271)
收稿日期:2023-12-21;　　**网络出版日期**:2024-07-12
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 2729749650@qq.com

Lake Basin from 2000 to 2018, thereby shedding light on the influence of natural and human factors on ecological status. The results indicate that: (1) The overall landscape of the Dongting Lake Basin has become more fragmented, with more complex the shape of the landscape, a tendency toward decline in the degree of aggregation, and the landscape types were more discrete. (2) During the study period, food provision services showed a stable increase, while habitat quality and carbon storage services exhibited a general declining trend. (3) The ecological conditions in the Dongting Lake Basin have demonstrated a general improvement, as regions exhibiting an increase in ecological indices (74%) notably surpass those experiencing a decline (26%). Ecosystem degradation was predominantly observed in densely populated and heavily urbanized towns, whereas ecological restoration areas were more commonly situated in mountainous and hilly terrains, distant from urban centers. (4) In the Dongting Lake area, the most significant impacts of each influencing factor on ecosystem degradation were primarily concentrated in regions with high levels of ecosystem degradation and areas characterized by intense human activities. Additionally, the focal point of areas with significant impacts gradually shifts from west to east. Notably, population density, GDP, road network density, and nighttime lighting index exhibited primarily negative correlations with ecosystem degradation in the Dongting Lake area. In contrast, the beneficial impacts of slope, precipitation, and sunshine hours on ecosystem degradation demonstrate a gradual rise. The ecological index of the Dongting Lake Basin was calculated using the fuzzy inference approach in this study. In order to provide a scientific basis for regional ecological protection and restoration planning, the goal was to identify regions of ecological deterioration and clarify the underlying contributing elements.

Key Words: landscape pattern index; ecosystem service function; ecological condition; ecological management zoning; Dongting Lake Basin

伴随着城市化水平的提升和社会经济的发展,生态系统退化问题在全球范围内越来越严峻[1]。生态系统一旦发生剧烈退化,则很难恢复到其原先动态平衡的状态[2]。我国经历了城市化快速发展阶段,而经济的发展过度依赖自然资源消耗,造成了一系列生态系统退化问题[3—4]。在城市化进程中,生态状况受到城市的快速扩张的影响,大量的生态用地被城镇用地占用,导致生态空间减少、植被覆盖率下降、生物多样性锐减,严重扰乱了自然生态系统的结构和功能,造成生态压力不断增加,生态退化是表征生态状况的重要体现[5]。

生态退化是指由自然原因、人类活动或两者共同作用,造成的生态结构无序、服务功能衰退、生产能力下降、生物多样性减少以及自然资源枯竭等一系列生态环境恶化现象[6—7]。目前,针对生态退化的时空演变特征开展了大量研究,从结构或功能等单一视角到多维度的综合视角。其中,单一视角主要从土地、水、生境等单个生态要素[6—8]以及碳储量、水涵养、土壤保持等单个生态系统服务等指标[9—10];综合视角主要从区域自然-人类复合生态系统、生态景观等维度构建综合指标体系[11—14]。同时,不同学者对生态退化的影响因素进行研究,发现生态退化受到气候、土地利用变化、人口和经济等影响因素的影响[15],其中,土地利用类型的组成和健康状况可以直接反映生态系统退化的状况[16]。温度和降雨量是重要的气候影响因素[17],人口和社会经济发展是重要的人为干扰因素[18],人口密度越大,对生态系统退化的负面影响越大是合理的。因此,亟需对洞庭湖地区生态系统退化的影响因素进行研究,遴选出生态系统退化变化的关键影响因素。然而,目前研究大多侧重于生态系统结构或功能某一方面的变化,也未与经济社会等人为干扰要素相结合,生态系统退化影响因素的研究集中于时间节点。对于生态系统退化长时间序列的变化,及其影响因素不同时期的作用强度尚未重视。影响因素的时空变化和相互作用使得流域生态系统成为复杂的非线性网络结构。由于生态系统识别的模糊性和人类判断的主观性,导致生态系统与人类活动之间的关系无法精确量化,导致生态退化评价存在模糊不确定性[19]。传统方法可能无法充分表征和深入分析流域生态系统的不确定性和复杂性[12—13]。模糊推理是解决社会经济和自然系统中的主观性、模糊性和不准确性的有力工具[20]。模糊推理是非线性方法,它使用模糊规则来模拟人类知识的各个方面,可以通过整合定性和定量因素提供一种适当的语言来处理

不精确的信息,被广泛应用于复杂的系统和决策过程[21]。目前,利用模糊推理方法对流域生态退化的研究较少。

近年来人类干扰加剧,洞庭湖流域土地利用模式发生了剧烈变化,导致生态退化问题愈发突出,如水土流失、湿地退化、湖泊萎缩、水质恶化、生态服务功能下降等问题[22—23]。然而,人类-自然因素对洞庭湖流域生态状况的影响尚不清楚。因此,本研究以洞庭湖流域作为研究对象,运用模糊推理算法和空间分析等方法,揭示2000—2018 年研究区生态退化时空演化特征,并剖析人类-自然因素对生态系统退化的影响,拟解决(1)生态退化评价过程中不精确或模糊的信息;(2)在复杂条件下有效反映生态系统与社会经济系统之间的相互关系,为洞庭湖流域的生态保护与修复规划提供参考。

1 研究数据与方法

1.1 研究区域概况

洞庭湖流域位于我国长江以南,南岭山脉以北,是南方丘陵区典型区域,总面积达 26.3 万 km^2,如图 1。流经湖南省大部分区域及周边湖北、江西、贵州、重庆、广西、广东等省份的部分区域,承担着维护长江生态安全和连接湘、资、沅、澧“四水”的重要功能[19]。洞庭湖流域地形复杂多样,西部为山地,海拔 200—1000 m;中南部为丘陵和盆地,海拔 50—400 m;北部为平原,海拔 25—40 m,整体上呈“三面北开”的马蹄形空间结构。流域属于典型的亚热带季风气候区,四季分明,雨水充沛,年均降雨量 1200—1700 mm,年均气温 16—17℃。洞庭湖拥有丰富的自然资源和粮食生产,肩负着国家粮食安全的重要责任。根据主体功能区划,研究区拥有重点开发区域 30 个、农产品主产区 35 个、重点生态功能区 44 个,区域内人口较为密集、经济较为发达,伴随着城市化的发展,建设用地不断扩张,人地矛盾日益突出,生态结构和服务功能发生巨大变化,导致生态系统结构不稳定、功能不完善、服务能力下降等问题。因此,有必要结合生态系统结构和生态系统服务揭示生态状况变化,特别是揭示人类-自然因素对生态状况的影响,是实施洞庭湖流域人与自然和谐共生现代化的关键。

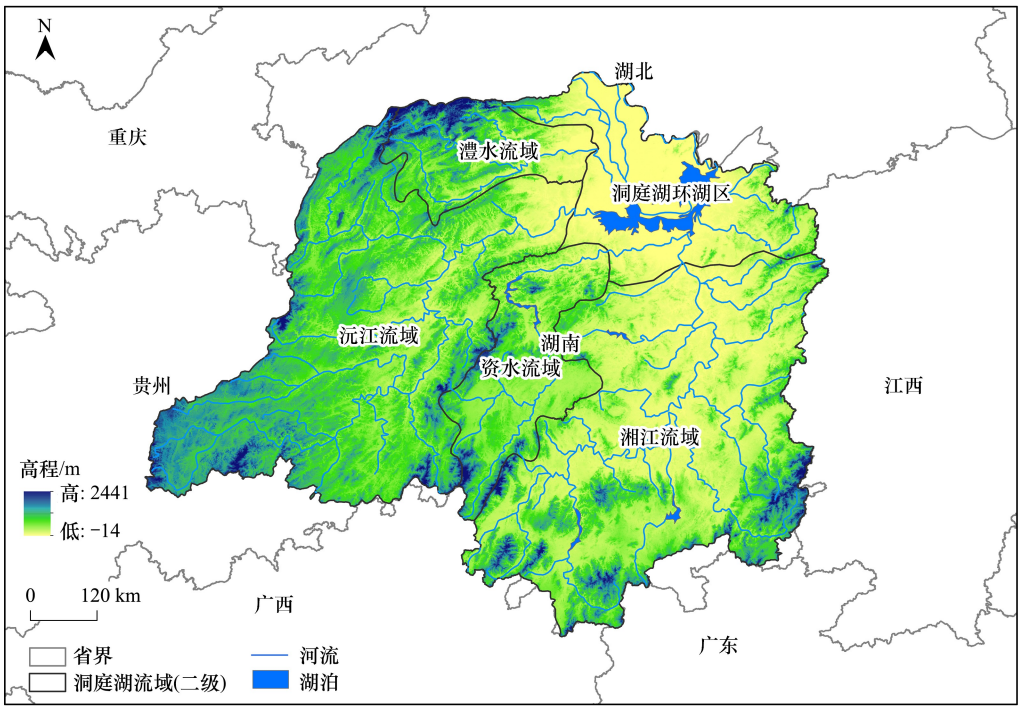

图 1 研究区

Fig.1 The study area

1.2　数据来源

研究区 2000 年、2018 年两期 Landsat TM/ETM 土地利用遥感影像数据、GDP、人口密度、归一化植被指数、农田生产潜力、年降水量、年平均气温等气象数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)。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[24]。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,因此在本研究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相关参数设置来自相关文献[25]。碳储量碳库包括地上生物量、地下生物量、死亡有机物碳及土壤碳库四部分,参数设置参考相关文献[26—27]。详见表 1。

表 1　数据来源

Table 1　Data sources

数据 Data	分辨率 Resolution ratio	来源 Source
土地利用数据 Land use data	0.03 km	http://www.resdc.cn
GDP Gross domestic product	1 km	http://www.resdc.cn
人口密度 Population density	1 km	http://www.resdc.cn
归一化植被指数 Normalized difference vegetation inde	1 km	http://www.resdc.cn
农田生产潜力 Farmland production potential	1 km	http://www.resdc.cn
年均气温 Average temperature	1 km	http://www.resdc.cn
年均降水 Average annual precipitation	1 km	http://www.resdc.cn
食物产量 Food production		《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 Calories by food group		美国农业数据库和相关研究

1.3　研究方法

1.3.1　景观格局指数

为了全面反映洞庭湖流域的景观格局特征,并顾及到更全面地描述区域空间形态,根据洞庭湖流域土地利用情况,利用 Fragstats 4.2 软件计算洞庭湖流域景观格局指数,在类型水平指数中选择斑块数量(NP)、斑块类型面积(CA)、景观类型百分比(PLAND)、聚集度(AI)、景观形状指数(LSI)等 5 个指标[28—29]。其中,NP 可以描述研究区景观的的分散破碎程度;CA 即是研究区总面积,可以描述区域扩张现象;PLAND 可以反映景观中每种斑块类型的丰富程度;AI 反映了景观类型斑块间的连通性;LSI 可以描述研究区内部的不规则程度。在景观水平指数中选择分维数(FRAC)、分离度(LDI)、蔓延度(CONTAG)、Shannon 多样性指数(SHDI)和 Shannon 均匀度指数(SHEI)、散布与并列指数(IJI)等 6 个具有代表性的指标。其中,FRAC 用来反映斑块形状的复杂程度及稳定性;LDI 指某一景观类型中不同斑块数个体分布的分离度。CONTAG 描述景观中斑块类型的团聚程度或延展趋势;SHDI 反映景观中各斑块类型的复杂性和变异性;SHEI 反映景观中各斑块在面积分布上的不均匀程度;IJI 能有效描述受某种自然条件严重制约的生态系统的分布特征。

1.3.2　生态系统服务评估方法

研究选取了三种典型的生态系统服务,即食物供给、生境质量以及碳储量。其中食物供给服务是保障一个地区粮食、经济与资源的基础,生境质量服务维护这区域生物多样性与生态安全,而碳储量是衡量生态系统的初级生产力规模和数量的重要指标[30],见表 2。

1.3.3　模糊推理算法

基于压力-状态-响应(PSR)模型构建了洞庭湖流域生态系统评价指标体系,结合模糊推理法计算出洞庭

湖流域各个网格生态系统指标要素值,在此基础上探究研究期间洞庭湖流域生态系统退化特征。

表 2 生态系统服务评估方法

Table 2 Methods of ecosystem services assessment

生态系统服务 Ecosystem service	计算公式和软件 Computational formula and software	参数及处理 Main parameters and processing
食物供给 Food supply	计算公式: $P_i = \sum_{k=1}^{k}\sum_{c=1}^{c} A_{cki} \times P_{cki}$ $P_{cki} = \frac{P_i}{\sum_{k=1}^{k}\sum_{c=1}^{c} A_{cki}} = \frac{\sum_{c=1}^{c} Y_c g\ E_c}{\sum_{k=1}^{k}\sum_{c=1}^{c} A_{cki}}$ 计算软件:ArcGIS 10.2 软件	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 的单位面积供给量(kJ/hm^2)。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)
生境质量 Habitat quality	计算公式: $Q_{xj} = H_j\left[1 - (\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z})\right]$ 计算软件:InVEST 模型	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 为半饱和常数,H_j 为生境类型 j 的生境适宜性。
碳储量 Carbon storage	计算公式: $C = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil}$ 计算软件:CASA 模型	C 表示生态系统总碳储量;C_{above} 表示地上碳储量;C_{below} 表示地下碳储量;C_{dead} 表示死亡有机质碳储量;C_{soil} 表示土壤碳储量。由于死亡有机质碳储量极低,本研究暂不考虑

(1)指标选取

基于人类活动与自然过程因果关系概念的压力-状态-响应(PSR)模型已被广泛用于指标选择。其中,生态压力是指危及生态系统稳定性的外界干扰及其所产生的生态效应;生态状态是指在受到内部或外部的扰动的情况下,生态系统所维持的相对稳定的特征;生态响应是指受人为活动干扰而引起生态系统功能的变化。结合相关研究成果及研究区现状[31],本研究选取 GDP、人口作为生态压力;生态系统组织作为生态状态;生态服务功能作为生态响应。其中生态系统组织公式如下:

$$\begin{aligned} EO &= 0.4\times LC + 0.4\times LH + 0.2\times IC \\ &= (0.2\times \mathrm{SHDI} + 0.2\times \mathrm{SHDE}) + (0.1\times \mathrm{DIVISION} + 0.15\times \mathrm{IJT} + 0.15\times \mathrm{CONTAG}) + 0.2\times \mathrm{FRAC} \end{aligned} \tag{1}$$

式中,EO 指生态系统组织,LC 指景观连通性、LH 指景观异质性、IC 指景观形态。根据现有研究成果及洞庭湖流域实际情况,对其权重进行赋值。LH 和 LC 分别描述了生态系统结构的不同方面,不能相互替代。因此,LH 和 LC 具有同等优势地位,故权重均设为 0.4。对于 IC,本研究采用的是相对较低的周长-面积分形维数(PAFRAC)指数,其权重设置为 0.2。其中,LH 细分为 SHDI 和 SHEI 两部分,各占 LH 权重的一半(即 0.2),而 LC 分为 DIVISION、IJI 和 CONTAG 三部分,由于 IJI 和 CONTAG 通常被视为确定景观破碎/聚集的核心指标,因此其权重高于 DIVISION。

(2)模糊推理方法

模糊推理方法是基于模糊逻辑的非线性映射过程,可以在模糊或不精确的条件下模拟复杂的系统。该方法利用语言变量将某个索引值与评估标签近似关联,更符合人类的推理过程,尤其是在没有公认的阈值来证明划分的类的合理性时[32]。由于诸多评价指标与生态系统退化之间表现为复杂的非线性映射,同时,生态环境本身所固有的复杂不确定性,迄今为止,生态系统退化仍没有形成一种统一的评价方法。模糊理论中的隶属函数概念可对生态环境状态所处不同等级程度进行相对隶属度的计算,较好的解释了被评价对象自身的模糊性,对描述地表环境状况各属性的相对状态进行了直观表述。因此,本研究利用模糊推理方法计算出洞庭湖流域的生态指数,从而识别出生态退化区域。推理方法主要由模糊化、模糊规则和解模糊化三部分组成。

模糊化:用于将输入或输出变量转换成语言变量,语言变量表示为模糊集。模糊变量的形状由模糊隶属

函数给出,该函数用于定义输入中的每个点映射到 0—1 的隶属值。输入空间有时被称为话语的世界。假设话语的世界(X)的元素为 X_1,则模糊集 $A \subset X$ 如下所示:

$$A = \{(x_1, \mu_A(x)) \mid x \in X\}, 0 \leqslant \mu_A(x) \leqslant 1 \tag{2}$$

式中,$\mu_A(x)$ 是 0—1 之间的隶属度。在语言学术语中,x_1 是 A 的隶属,与 $\mu_A(x)$ 相关联。存在多种隶属函数,如三角函数、高斯函数和 S 形函数等。

推理规则:模糊规则库包括一组模糊 *IF*-THEN 规则。模糊推理系统的核心是这些 *IF*-THEN 规则和所有其他组件(如隶属函数)已被以有效、现实以及合理的方式实现这些规则。*IF*-THEN 规则由 *IF* 部分和 THEN 部分组成,前者称为前提,后者称为结果。在推理规则中,具有一个或多个结果的输出变量是从一个或多个前提中获得的。

解模糊化:通常利用重心法技术的去模糊化。

1.3.4　生态系统退化的影响因子选取

生态系统退化受到自然因素和人为因素的影响[16—19],其中,自然因素中包括了气候因素和地理因素,气温和降水是重要的气候影响因素,坡度是重要的地理因素;人为因素中包括距与县政府的距离、人口和社会经济发展等人为干扰因素。本研究运用地理探测器方法对生态系统退化与坡度、气温、降雨量、人口密度、GDP 以及与县政府的距离距之间的关系进行了定量分析。

2　结果分析

2.1　生态系统结构变化

2.1.1　类型水平指数

总体上看(表 3),2000—2018 年洞庭湖流域整体景观更加破碎化,景观形状趋于复杂,聚集程度不断下降,景观类型更加离散。研究区域优势景观为林地,其斑块面积和景观类型百分比最大。其次则是耕地和草地,斑块面积和景观类型百分比较高,然而随着时间的发展在一定程度上有所下降。水域、建设用地和未利用地的斑块面积和景观类型百分比较低但呈现上升趋势,尤其是建设用地扩张明显。从斑块数量和景观形状指数上看,耕地的斑块数量和景观形状指数最大并且呈增加趋势,其次则是草地。水域和林地的斑块数量较少,但林地的景观形状指数相对较大,聚合度较低,形状比较复杂。建设用地受城市化的影响,斑块的破碎化和复杂性明显增加。未利用用地的破碎化程度上升,且景观复杂度逐渐增加,但总体变化不大。在景观的聚散性方面,林地的聚集度最高,其它景观类型相对较低。

表 3　2000—2018 年洞庭湖流域景观类型指数

Table 3　Landscape type index of Dongting Lake Basin from 2000 to 2018

景观类型 Landscape type	年份 Years	斑块面积/km² Patches area	景观类型百分比/% Percentage of landscape types	斑块数量 Number of patches	景观形状指数 Landscape shape index	聚集度 Degree of aggregation
耕地 Plow land	2000	75637.42	28.87	8448	139.07	49.62
	2018	73189.13	27.97	8555	140.26	48.34
林地 Woodland	2000	159648.71	60.94	1374	102.98	74.43
	2018	159842.34	61.08	1421	102.92	74.45
草地 Grassland	2000	15272.60	5.83	4363	83.00	33.01
	2018	13390.23	5.12	4206	80.51	30.65
水域 Water area	2000	7475.61	2.85	2382	50.52	41.80
	2018	7742.10	2.96	2629	54.95	37.74
建设用地 Building land	2000	3190.86	1.22	2001	46.20	49.62
	2018	6549.39	2.50	2992	57.50	28.94
未利用地 Unused land	2000	752.55	0.29	115	13.71	51.89
	2018	990.09	0.38	156	15.10	53.77

2.1.2 景观水平指数

由表 4 可知,2000—2018 年洞庭湖流域景观格局各项指标总体变化不大,景观格局变化整体较为稳定。2000—2018 年景观分维数和分离度基本保持不变,表明研究期间景观形状的复杂程度和离散程度变化不大。蔓延度呈现下降趋势,说明洞庭湖流域景观中优势斑块有所减少,景观内不同斑块间的连通性降低,优势景观被其它景观分离。Shannon 多样性指数和 Shannon 均匀性指数呈现相似的变化趋势,研究区域内景观的异质性增加,景观类型越来越复杂并朝多样化方向发展,各类斑块类型在景观中均匀分布。研究期间散布与并列指数明显上升,说明各景观类型之间相邻的概率较大,容易受其他因素影响。

表 4 2000—2018 年洞庭湖流域景观水平指数

Table 4 Landscape level index of Dongting Lake Basin from 2000 to 2018

年份 Years	分维数 Fractal dimension	分离度 Separation degree	蔓延度 Spread degree	Shannon 多样性指数 Aroma diversity index	Shannon 均匀度指数 Aroma uniformity index	散布与并列指数 Dispersion and juxtaposition index
2000	1.020	0.647	47.730	0.998	0.557	46.3779
2018	1.020	0.646	46.210	1.027	0.573	50.4171

2.2 生态系统功能变化

由图 2 可知,2000—2018 年研究区食物供给、生境质量和碳储量三项生态服务均呈现明显的时空差异。从食物供给服务来看,2000—2018 年洞庭湖流域食物供给呈现稳定增长的趋势,食物供给最高值由 2000 年的 828.55 万 kJ 提升到 2018 年的 1204.03 万 kJ,食物供给在空间上变化不大但差异显著。粮食供给高值区不断扩张,主要集中在洞庭湖环湖区沿岸、湘江沿岸、娄底市中、东部以及邵阳市东北部等地形平坦的耕地地区,这些区域土壤肥沃、水源充足,有利于农作物种植。中值区分布较为分散,主要分布在高值区附近,如洞庭湖流域边缘、岳阳市西部、益阳市东部、黔东南自治州西部以及永州市东部等区域。低值区分布较为广泛,主要分布在研究区域东部、常德市西部、益阳市西部、娄底市西部、邵阳市西部、永州市南部、桂林市东南以及张家界市、湘西自治州和怀化市的大部分区域,这些区域以林地为主,地势较高、地形陡峭,耕地面积小且较为分散,因此粮食生产较少。

从生境质量服务来看总体呈下降趋势,在空间上表现出大范围重点式减少、小范围局部式增长的特征。生境质量高值区主要分布在研究区东部、西北、西南以及南部的丘陵地区,这些区域以林地和草地为主,而且受人类活动干扰较少,因此生境质量比其他区域高。生境质量中值区主要分布在洞庭湖环湖区以及荆州市西北部、常德市东部、岳阳市西部、南部区域,这些区域分布较为广泛的河流和湖泊,在调蓄洪水、涵养水源、净化水质等方面具有重要作用。生态质量低值区主要分布在各地级市市中心地区及其周边区域,这些区域经济发展速度较快,人口较为密集,土地利用类型以建设用地为主,生态空间较小并且结构破碎化严重,生态环境受人类活动影响导致生境质量较低。

从碳储量服务来看整体较低且有减少的趋势。研究期间,碳储量高值区变化较为稳定,而中值区和低值区有所增加,尤其是低值区扩张明显,在空间分布上呈现出明显的差异,这与植被覆盖度和人类活动密切相关。碳储量高值区主要位于研究区东部和南部的山地和丘陵地区,因为这些区域水热条件好,植被覆盖率高,因此碳储量较高。碳储量中值区主要分布在研究区西北部和西南部地区,其中在益阳市西部、怀化市北部、张家界市等山地区域中值区面积有所增加。碳储量低值区集中分布在洞庭湖环湖区以及经济社会发展较快的城镇地区,尤其是市中心地区碳储量最低。其中,洞庭湖环湖区土地类型以水域为主,其碳密度要比林地、草地等土地类型低;而城镇地区以建设用地为主并呈现出不断扩张的趋势,侵占了部分生态用地,导致碳储量发生不同程度的减少。

2.3 生态系统退化时空特征

结合生态系统结构和功能的结果,利用模糊推理方法计算出洞庭湖流域的生态指数,从而识别出生态退

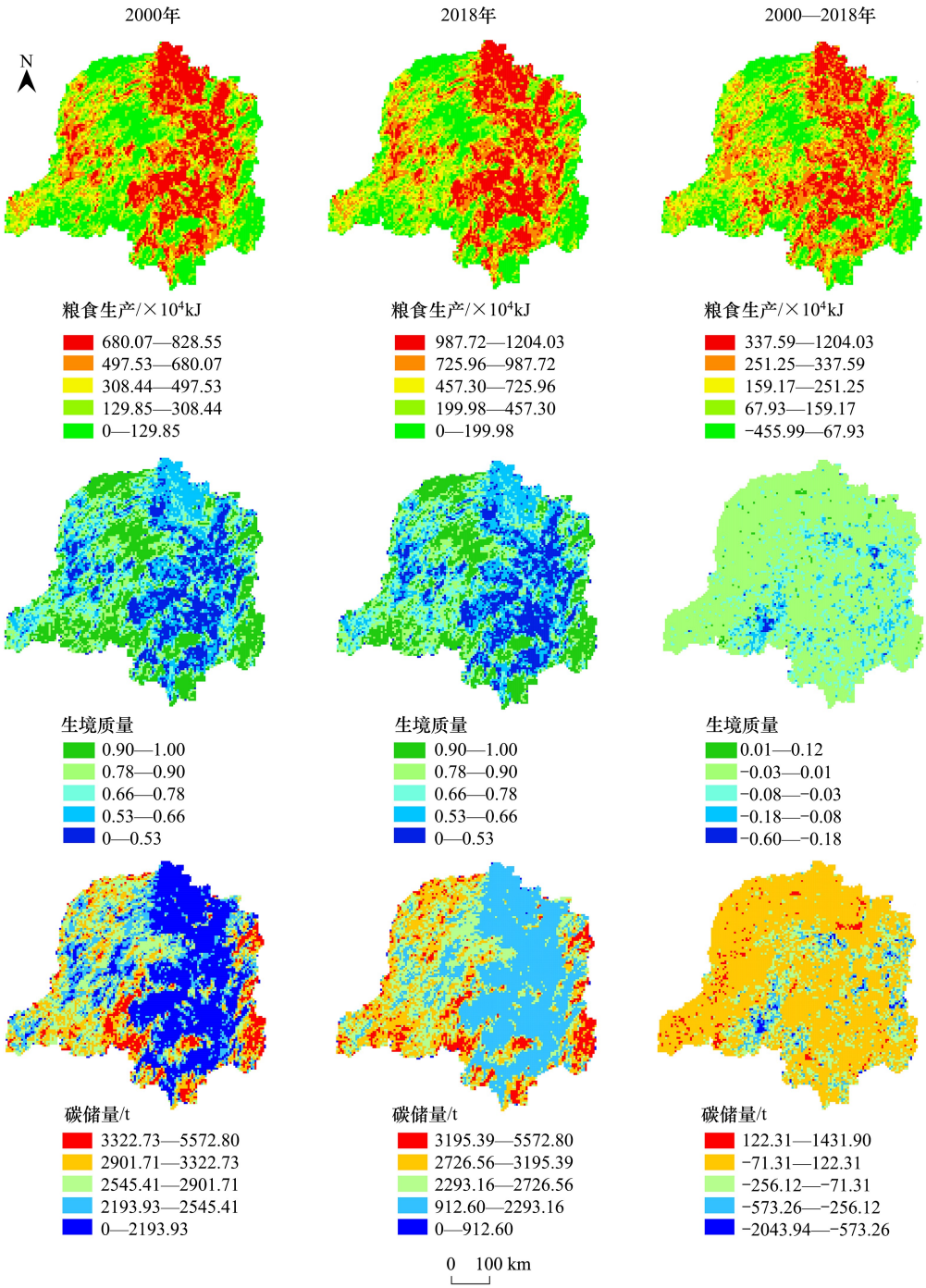

图 2　2000—2018 年生态系统服务及变化空间分布

Fig.2　Spatial distribution of ecosystem services and their changes from 2000 to 2018

化区域,如图 3 所示,洞庭湖流域生态指数受主导土地利用类型和人类活动影响呈现出较大的时空差异。从时序上看,2000—2018 年,洞庭湖流域生态质量整体有所提升,生态系统退化状况转好,生态指数上升区域(74%)明显大于下降区域(26%)。其中生态呈下降趋势的区域主要位于东部的生态高值区和各城市中心,这与人类社会经济活动相关。在人口密集、城市化水平较高的城镇地区如长株潭城市群受人类干扰程度较大,生态状况退化最为明显。生态上升区域趋势区域多分布在以林地和草地为主的山地丘陵区,主要因为高质量发展、生态城市等生态理念以及封山育林等生态措施的实施。从空间上看,生态指数高值区主要位于洞

庭湖环湖区沿岸、永州市西北部、桂林市南部等研究区东部,这些区域土地类型以水域、林地和草地等生态用地为主,地貌类型多为湖泊、山地、丘陵,对城镇的扩张和产业的集聚起到约束作用,受人类干扰程度较少,因此生态质量较高。生态低值区主要位于研究区西南部域、东南部以及各城市中心,这些区域多为耕地和建设用地,是人类活动的重点区域。

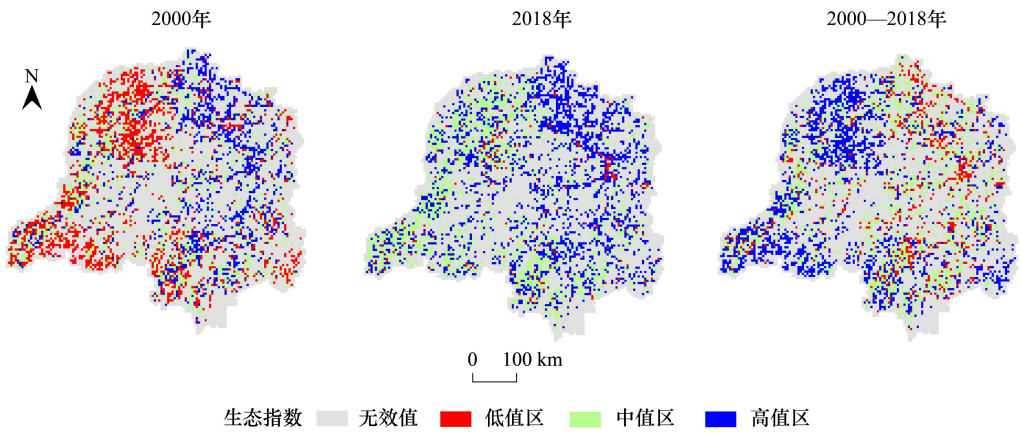

图 3 2000—2018 年生态指数变化

Fig.3 Changes of ecological index from 2000 to 2018

2.4 生态系统退化的影响因素

表 5 给出了本研究使用的相应参数,其中选取 3113.034 作为固定带宽进行回归。结果显示,2000 年和 2018 年 GWR 模型的校正 R^2 分别为 0.58 和 0.72,拟合效果较好。

表 5 2000 年和 2018 年 GWR 结果的统计检验

Table 5 Statistical test of GWR results in 2000 and 2018

年份 Years	带宽参数 Bandwidth parameter	残差平方和 Residual sum of squares	有效数目 Effective number	AICc	R^2	校正 R^2 Adjusted R^2
2000	3113.034	7.576	41.132	-21352.916	0.584	0.580
2018	3113.034	9.463	40.755	-20092.645	0.722	0.720

AICc:信息准则 Corrected akaike infommation criterion

2000—2018 年各因素对生态系统退化的影响存在差异如图 4,对于人为因素方面,人口密度在 2000 年、2010 年和 2018 年的回归系数均值分别为-0.14、-1.62 和-2.13,GDP 在 2000 年、2010 年和 2018 年的回归系数均值分别为-5.16、-8.35 和-9.19,路网密度分别为-1.24、-0.65 和-0.45,夜间灯光指数分别为-5.41、-9.45 和-15.70。说明人口密度、GDP、路网密度和夜间灯光指数对洞庭湖地区的生态系统退化主要表现为负相关关系。具体而言,人口密度、GDP 和夜间灯光指数对生态系统退化产生的负向影响逐渐增强。出现这一现象的原因主要在于工业化和城市化的快速发展,使得人口集聚的地区受到的扰动和污染程度加剧,导致洞庭湖地区的生态系统退化下降。而路网密度对生态系统退化的负向影响逐渐减轻,原因在于近二十年内洞庭湖地区的道路建设并无出现频繁的开山挖道工程,其总体空间格局保持相对稳定。

对于自然因素方面,高程在 2000 年、2010 年和 2018 年的回归系数均值分别为 7.27、10.10 和 4.36,坡度的回归系数均值分别为-0.95、-0.15 和 1.91,年均气温的回归系数均值分别为-1.51、-2.16 和-5.39,年均降水量的回归系数均值分别为-6.8、0.50 和 4.73,日照时数的回归系数均值分别为-2.39、1.10 和 5.09,NDVI 的回归系数均值分别为 13.10、14.97 和 14.44。这表明 2000—2018 年自然因素对生态系统退化的影响主要表现为正相关性。表现为正向影响的自然因素由 2000 年的高程和 NDVI 两个因素增长到 2018 年的五个因素,分别

是高程、坡度、降水量、日照时数和 NVDI。其中,坡度、降水量和日照时数对生态系统退化产生的正向影响呈逐渐增强的趋势。NDVI 对生态系统退化的影响始终保持高度正向相关。在全球气候变暖的背景下,洞庭湖地区的年均气温对生态系统退化表现为逐渐增强的负向影响。

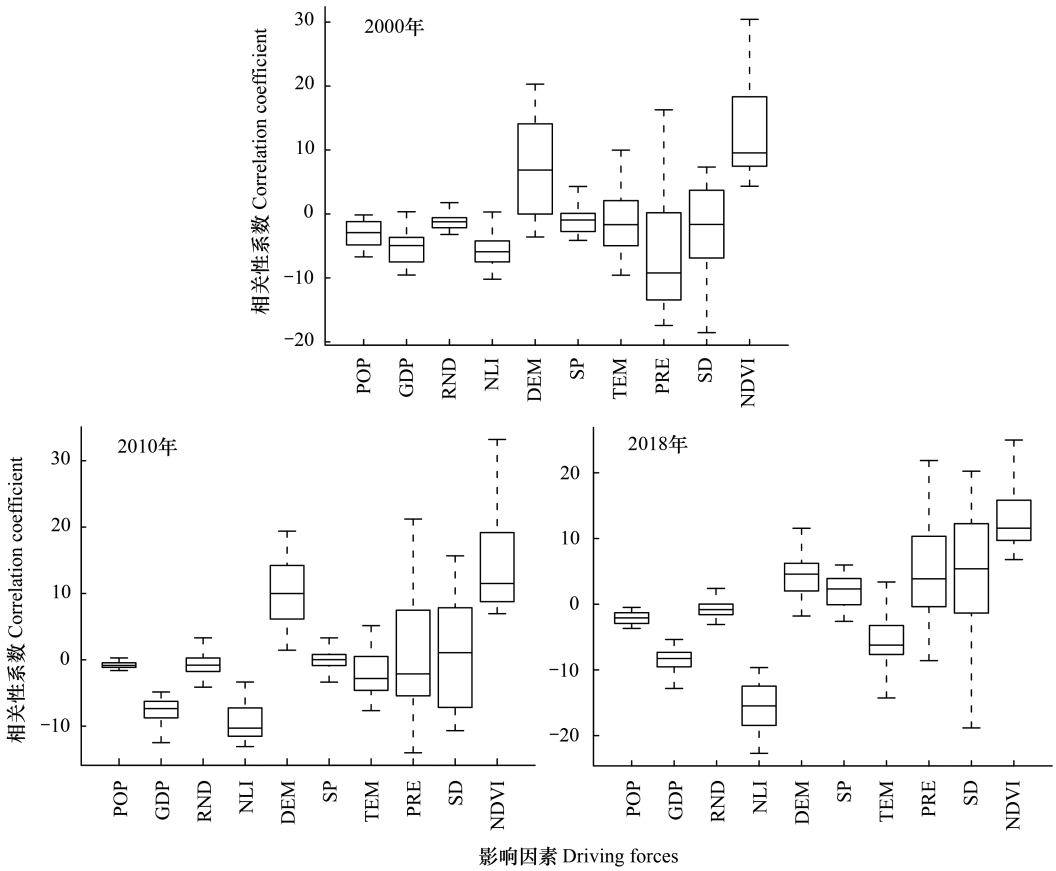

图 4　各个影响因素回归系数可视化

Fig.4　Visualization of regression coefficients of each influencing factor

POP:人口数量;GDP:国内生产总值;RND:路网密度;NLI:夜间灯光;DEM:高程;SP:坡度;TEM:年均温度;PRE:年均降水;SD:日照时数;NDVI:归一化植被指数

3　讨论

国内生态修复可以追溯到 20 世纪 70 年代以修复工程为主,在矿山、江河湖泊、重金属污染场地等领域取得了一定的成果,如 1979 年实施了三北防护林工程、1997 年实施了黄河中上游水土流失重点治理工程、2002 年实施了京津冀沙尘暴治理工程等[13]。以工程为导向的生态修复研究是针对单一生境或要素的修复,根据现场观察和经验数据进行工程设计和实施。虽然生态修复可能在局部产生最优效益,但由于缺乏对系统整体、区域生态要素以及生态系统与人类活动之间联系的考虑,整体效益较低,生态系统服务可能下降[33]。因此,进行生态管理分区划定的时候,要充分考虑自然和社会的因素。本研究以“整体保护、系统修复、综合治理”为原则,本研究在结构-功能框架下将生态压力-状态-响应模型运用到模糊推理算法中,可以处理生态系统中不精确或模糊的信息,能够有效的反映自然和社会经济系统相互作用下的生态系统退化情况。

研究发现洞庭湖地区的生态系统退化是一个涉及多个层面、多方面因素相互作用的复杂过程。在这个过程中,城市化和经济发展水平被确认为最主要的驱动因素之一,对洞庭湖的生态平衡产生深远影响。随着城市扩张的推进,工业化和人类活动加剧了污染物排放和土地资源开发,对生态系统造成了压力。高路网密度

地区进一步导致土地碎片化和生态系统的破坏,对生态环境产生负面影响。高程、坡度、降水量、日照时数和NDVI 等自然因素对生态系统退化产生正向影响。NDVI 的正向影响表明植被覆盖对生态环境的改善具有积极作用,高 NDVI 值表示更健康的植被。高程较高的地区通常拥有较好的生态条件,而降水量和日照时数足够的地区有利于植被生长和维持生态平衡。年均气温的逐渐增加对生态环境产生负面影响。全球气候变暖可能导致水资源紧缺、生态系统扰动和物种灭绝,从而影响生态环境的质量。通过梳理总结生态系统退化的影响机制,以期实现自然生态系统和人工生态系统的有序运转,提高区域生态系统退化,才能发挥好洞庭湖地区生态环境在城市活动中的空间载体作用,以支持人类的生存和促进经济社会发展。

为了实现自然生态系统和人工生态系统的有序运转,关键在于加强生态系统管理与人类活动的协调发展。只有通过深度研究不同因素的相互作用,才能提出更为有效的管理和保护策略。具体而言,在生态质量相对较好的经济较落后的边远山区、村落等区域,在稳定生态质量的同时积极利用绿色生态资源,鼓励发展高效生态农业,积极承接中心城区人口及产业转移,促进社会经济发展[10]。而在经济发展较为快速但生态环境退化严重的区域如长株潭都市区应严格落实生态保护政策,推进生态修护工程和生态补偿机制,合理规划城市空间,尽可能地提高城市用地效率,限制城市用地无序扩张[24]。同时鼓励发展新兴产业,减少对自然资源的消耗,实现由“资源驱动发展”到“创新驱动发展”的转变推进高质量发展[34]。

4 结论

本研究以洞庭湖流域作为研究区域,利用景观格局指数、InVEST 模型、模糊推理算法等方法,分析了2000 年和 2018 年景观分布特征和生态系统服务,并进一步探究 2000—2018 年洞庭湖流域生态系统退化时空演变特征及生态管理分区,主要得到以下结论:

(1)景观类型整体上更加破碎化且形状更为复杂、聚集程度下降,而景观水平整体变化不大,但景观异质性呈上升趋势,连通性降低。食物供给服务呈现稳定上升的趋势,但空间差异变化变小;生境质量服务总体呈下降趋势,在空间上表现出大范围重点式减少、小范围局部式增长的特征;碳储量服务整体较低且有减少的趋势。

(2)洞庭湖流域生态系统退化呈现出明显的时空差异。洞庭湖流域生态质量整体呈上升趋势,生态系统退化明显改善。其中,生态系统退化区域主要分布在人口较为密集、城市化水平较高的城镇地区如长株潭城市群以及各城市中心,而生态恢复区域多分布在远离各城市中心的山地丘陵区域。

(3)人口密度、GDP、路网密度和夜间灯光指数与生态系统恶化呈现明显的负相关。考虑到生态系统受人口密度的影响,城市化率、工业化水平以及资源消耗等因素在这一关系中扮演着关键的角色。研究发现,人口密度的增加导致了土地开发、森林砍伐和污染的明显增长,从而对生态平衡产生了不利影响。同时,GDP 的增长与生态系统的不良变化密切相关。经济的发展与自然资源的过度消耗存在紧密联系,高 GDP 通常意味着对生态系统的过度利用和压力。路网密度和夜间灯光指数直接和间接地对生态系统的不利影响,导致了土地碎片化、动植物栖息地破坏等问题。高程、坡度和降水量等自然因素对生态环境产生了积极影响。其中,NDVI 作为植被指数,持续呈现正相关。

参考文献(References):

[1] 甄霖,胡云锋,魏云洁,罗琦,韩月琪.典型脆弱生态区生态退化趋势与治理技术需求分析.资源科学,2019,41(1):63-74.

[2] 刘国华,傅伯杰,陈利顶,郭旭东.中国生态退化的主要类型、特征及分布.生态学报,2000,20(1):13-19.

[3] 杨磊. 阿勒泰地区草地生态退化驱动机制及修复策略[D].新疆大学,2021.

[4] 王翔宇,高培超,宋长青,陈小强,王成新.不同尺度下城市用地扩张与经济增长的脱钩关系——以山东省为例.经济地理,2021,41(3):97-104+125.

[5] Chen X C,Li F,Li X Q,Hu Y H,Wang Y. Mapping ecological space quality changes for ecological management:A case study in the Pearl River Delta urban agglomeration,China. Journal of Environmental Management,2020,267:110658.

[6] 何盈利,尤南山,崔耀平,肖桐,郝媛媛,董金玮.2000 年来中国生态状况时空变化格局.自然资源学报,2021,36(5):1176-1185.
[7] 张云芝,胡云锋,韩月琪,战胜.全球主要生态退化区和研究热点区的空间分布与演变.生态学报,2021,41(19):7599-7613.
[8] 元冰瑜,高建华,池源,扎边,龚照辉.1990—2020 年江苏省海岸带景观生态状况指数跨尺度时空特征.应用生态学报,2022,33(2):489-499.
[9] 牛丽楠,邵全琴,宁佳,黄海波.西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同.地理学报,2022,77(1):182-195.
[10] 郑博福,黄琼瑶,陶林,谢泽阳,艾彪,朱元皓,朱锦奇.赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响.生态学报,2021,41(15):5940-5949.
[11] Li W J,Wang Y,Xie S Y,Cheng X.Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing municipality,China. Science of The Total Environment,2021,791:148311.
[12] Luo Z L,Zuo Q T,Shao Q X. A new framework for assessing river ecosystem health with consideration of human service demand.Science of the Total Environment,2018,640:442-453
[13] Cao Y N, Kong L Q,Zhang L F,Ouyang Z Y. Spatial characteristics of ecological degradation and restoration in China from 2000 to 2015 using remote sensing: Ecological degradation and restoration in China. Restoration Ecology,2020,28(6):1419-1430
[14] 陈希,王克林,祁向坤,李洪斌.湘江流域景观格局变化及生态服务价值响应.经济地理,2016,36(5):175-181.
[15] 王永祥,徐园园,杨佳嘉,陈裕鑫,魏佳轩,周娟,张未来,程武学.基于 Landsat 的重庆市生态环境质量动态监测及其时空格局演变分析.生态学报,2023,43(15):6278-6292.
[16] 崔远政,查慧,王磊,杨诗敏,段学军.乡镇生态环境质量评价及其影响因素研究——以江苏省为例.长江流域资源与环境,2023,32(9):1922-1931.
[17] 章程焱,杨少康,董晓华,赵程铭,薄会娟,刘冀.基于 RSEI 指数的长江上游流域生态环境质量时空演变及影响因子研究.水土保持研究,2023,30(1):356-363.
[18] 李玉芳,郑旭荣,柏俊华,刘洪光,郑州.玛纳斯河流域生态环境质量评价.干旱区资源与环境,2008,21(10):115-120.
[19] Li Y P,Huang G H,Huang Y F,Zhou H D. A multistage fuzzy-stochastic programming model for supporting sustainable water-resources allocation and management. Environmental Modelling & Software,2009,24(7):786-797.
[20] Sowlat M H,Gharibi H,Yunesian M,Tayefeh Mahmoudi M,Lotfi S. A novel,fuzzy-based air quality index (FAQI) for air quality assessment. Atmospheric Environment,2011, 45(12):2050-2059.
[21] Caniani D,Labella A,Lioi DS,Mancini I M,Masi S. Habitat ecological integrity and environmental impact assessment of anthropic activities:A GIS-based fuzzy logic model for sites of high biodiversity conservation interest. Ecological Indicators, 2016,67:238-249.
[22] 刘艳萍,肖雅倩,张颖.洞庭湖流域人类活动净磷输入及其空间分布.应用生态学报,2019,30(7):2404-2414.
[23] 符静,秦建新,张猛,龙岳红.2001-2013 年洞庭湖流域植被覆盖度时空变化特征.地球信息科学学报,2016,18(9):1209-1216.
[24] Ouyang X,Tang L S,Wei X,Li Y H. Spatial interaction between urbanization and ecosystem services in Chinese urban agglomerations. Land Use Policy,2021,109:105587.
[25] Peng J,Hu X X,Qiu S J,Hu Y N,Meersmans J,Liu Y X. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area. Science of the Total Environment,2019,660:765-775.
[26] Pan Y,Birdsey R A,Fang J Y,Houghton R,Kauppi P E,Kurz W A,Phillips O L,Shvidenko A,Lewis S L,Canadell J G,Ciais P,Jackson R B,Pacala S W,David McGuire A,Piao S,Rautiainen A,Sitch S,Hayes D.A Large and Persistent Carbon Sink in the World′s Forests. Science,2011,333(6045):988-993.
[27] 张影,谢余初,齐姗姗,巩杰,张玲玲.基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征.资源科学,2016,38(8):1585-1593.
[28] 梁发超,刘诗苑,刘黎明.近 30 年厦门城市建设用地景观格局演变过程及驱动机制分析.经济地理,2015,35(11):159-165.
[29] 李广东,戚伟.中国建设用地扩张对景观格局演化的影响.地理学报,2019,74(12):2572-2591.
[30] Ariken M,Zhang F,Weng Chan N. Coupling coordination analysis and spatio-temporal heterogeneity between urbanization and eco-environment along the Silk Road Economic Belt in China. Ecological Indicators,2021,121:107014.
[31] 欧阳晓,朱翔,贺清云.基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价——以长株潭城市群为例.生态学报,2020,40(16):5478-5489.
[32] Sun J,Li Y P,Gao P P,Xia B C. A Mamdani fuzzy inference approach for assessing ecological security in the Pearl River Delta urban agglomeration China. Ecological Indicators,2018, 94:386-396.
[33] 康瑛,赵文力,胡佳,谢富贵,李之乔.成都环城生态公园土地综合整治与生态修复对生态系统生产总值(GEP)的影响.现代城市研究,2023,(01):21-27.
[34] 韩增林,刘澄浩,闫晓露,李欣媛,王学哲.基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区——以大连市为例.生态学报,2021,41(22):9064-9075.