曹诗怡,胡希军,徐 栋,等.湿地城市景观功能演化及其管控策略—以汨罗市为例 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6892-6906.
Cao S Y, Hu X J, Xu D, et al. Evolution of wetland urban landscape functions and its management strategies: A case study of Miluo City [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6892-6906.

湿地城市景观功能演化及其管控策略—以汨罗市为例

曹诗怡[1,2],胡希军[2*],徐 栋[3],刘 慧[1] (1.湖南理工学院土木建筑工程学院,湖南 岳阳 414000；2.中南林业科技大学风景园林学院,湖南 长沙 414004；3.新加坡国立大学地理系,新加坡 119077)

摘要：以汨罗市为例,构建了包含四大景观功能的健康评价体系,并量化分析了汨罗市 2000~2020 年间景观功能健康的时空变化特征.此外,通过整合时空趋势分析、空间异质性评估以及驱动力识别方法,进一步考察景观功能的演变方向、分布特征及其背后的驱动因素.最后,采用 SOM 聚类算法,对汨罗市"三生空间"的时空演变特征进行了分析.研究发现,2000~2020 年期间汨罗市景观功能健康整体呈小幅度下降趋势,从 2000 年的 0.182 下降到 2020 年的 0.179,从空间分布上看,景观功能健康指数较高的区域多位于南部与东北部的林地.相比之下,城市快速扩张的地区,其景观功能健康状况相对较差.分析结果显示,景观功能健康的主导因素已由气候条件逐步转向人类活动,人类活动贡献率从 2000 年的 18.3%上升到 2020 年的 14.8%.从这一趋势可以看出,全球城市化进程加快的背景下,汨罗市的景观功能健康对人类活动的响应反而降低.针对汨罗市"三生空间"的分布特点及其变化规律,提出了具体的分区管控建议,包括加强生态红线管理、调整城镇扩展模式以及推动农业与生态的融合等措施.

关键词：景观功能健康；驱动力；分区管控；随机森林；汨罗市
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6892-15

Evolution of wetland urban landscape functions and its management strategies: A case study of Miluo City. CAO Shi-yi[1,2], HU Xi-jun[2*], XU Dong[3], LIU Hui[1] (1.College of Civil Engineering and Architecture,Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414000, China；2.College of Landscape Architecture,Central South University of Forestry and Technology, Changsha 414004, China；3.Department of Geography, National University of Singapore 119077, Singapore). *China Environmental Science*, 2025, 45(12)：6892~6906

Abstract：Taking Miluo City as an example, this study constructed a health evaluation system that includes four major landscape functions, and quantitatively analyzed the spatial and temporal characteristics of landscape function health in Miluo City during 2000~2020. In addition, by integrating spatio-temporal trend analysis, spatial heterogeneity assessment, and driver identification methods, the direction of landscape function evolution, distribution characteristics, and the driving factors behind them are further examined. Finally, this study analyzed the spatial and temporal evolution of the "three living spaces" in Miluo City using the SOM clustering algorithm. It was found that the overall landscape functional health of Miluo City showed a small decline from 2000 to 2020, from 0.182 in 2000 to 0.179 in 2020, and the spatial distribution showed that the areas with higher landscape functional health indices were mostly located in the southern and northeastern woodlands. In contrast, areas with rapid urban expansion have relatively poor landscape functional health. The analysis results show that the dominant factor in landscape functional health has gradually shifted from climatic conditions to human activities, with the contribution of human activities increasing from 18.3% in 2000 to 14.8% in 2020. From this trend, it can be seen that the functional health of Miluo City's landscape is more sensitive to changes in human activities in the context of accelerated global urbanization. In view of the distribution characteristics of the "three life spaces" and their changing rules in Miluo City, specific zoning control recommendations are proposed, including measures to strengthen the management of the ecological red line, adjust the mode of urban expansion, and promote the integration of agriculture and ecology.

Key words：landscape functional health；driving forces；zoning management；random forest；Miluo city

湿地城市作为生态资源禀赋与人类开发活动高度耦合的复合空间[1],在城市化过程中面临景观功能退化、生态服务失衡、管理尺度错配等问题,成为生态韧性建设中的关键地带[2-3].这些城市中的湿地区域正被城市扩张和经济发展产生的庞大压力快速压缩,给生态安全和持续发展带来了严峻的考

收稿日期：2024-04-24
基金项目：国家自然科学基金青年基金(32501458);湖南省自科基金项目(2023JJ50179);湖南省教育厅科研项目(24A0460)
* 责任作者, 教授, t20040182@csuft.edu.cn

验[4-5].因此,对中国的湿地城市展开全面的景观功能健康评价,对于制定有针对性的生态保护和土地经营政策十分关键[6-7].

景观功能健康被界定为景观系统在提升生态系统服务,供应自然资源,调控环境状况以及满足人类文化需求等方面具有的综合能力[8],这个概念的核心包含四个重要维度:景观支持功能、景观供给功能、景观调节功能以及景观文化功能,表现出景观对社会文化和个人情感的影响[9].与传统聚焦“生态安全”或“生态风险”的研究相比[10-11],“景观功能健康”更强调景观系统在正向生态功能维持方面的综合表现.该概念立足生态系统服务框架[12-13],融合多源数据进行定量测度,旨在建立适用于湿地城市的景观功能状态诊断体系,为城市生态韧性提升提供依据.当前文献对景观功能健康的探讨持续深入,不过仍然存在诸多局限,从研究范围看,多数研究偏重国家级或者大尺度区域层面的论述[14],中小城市以及县域尺度的微观分析较为不足,这影响到对局部地区景观功能变化及其空间差异特征的探究深度[15].创建指标体系方面,很多文献着重于对单个或者几个特定景观功能实施评价,却常常轻视了景观功能的整体性以及协同性的重要意义,特别是关于景观文化功能的研究比较少见[16-17].此外,已有研究多聚焦于景观结构格局或生态安全、风险识别,但对景观生态系统的正向功能状态缺乏系统性的量化识别,尤其在城市空间中缺乏能够统筹不同类型生态服务功能的综合评价框架.同时,研究多停留于静态空间分析,缺少对景观功能的长期演化过程识别与空间分区治理建议,难以满足城市高密度人类活动背景下的精细化管控需求.在驱动力分析方面,当下的研究大多依靠传统的统计方法,缺少充分发挥机器学习算法在高精度多变量驱动因素识别和定量评价方面的优势.随机森林属于一种融合学习技术,可有效地处理高维数据,并自动挑选出对预测目标最为关键的特性,以此来助力辨别哪些环境因子在决定景观功能健康时起着核心作用[18].

汨罗市属于典型的城市湿地系统,其处于长株潭城市群的辐射范围内.汨罗市境内河网密布,一方面给该地带来丰富的自然景观,另一方面起着重要的生态防护和水源守护作用[19-20],近年来,城镇规模增长,农业转型等举措明显影响到区域生态环境与景观功能的良好状况,致使部分地区生态系统服务功能下降,水资源供给量减小,土壤流失加剧,生态调节效果变差,而且使景观的文化价值遭受挑战[21].本文以汨罗市为例,目的是构建一个针对湿地城市的全面的景观功能健康评价框架,该框架基于景观生态学原理和生态系统服务理论[22-23],重点关注四个主要的生态功能方面.此外,本文基于随机森林模型以及自组织映射(SOM)神经网络模型[24],对汨罗市2000 年到 2020 年间的景观功能健康的驱动因素进行了探究并对汨罗市“三生空间”(生活空间,生产空间,生态空间)进行识别分析,研究结果旨在为湿地型城市的景观精细化治理与生态功能恢复提供理论支撑与实证基础.

1　研究区概况与数据介绍

1.1　研究区概况

汨罗市处于湖南省东北部,地理坐标在 112°50′到 113°31′E,28°27′到 28°56′N 之间,是长江中游城市群的重要形成单元之一(图 1).其地势从西往东逐步下降,西部多为低山丘陵地形,东部靠近湘江之处则是冲积平原[25],汨罗市属亚热带季风气候,这里四季分明,年平均气温约 16.5℃,年降水量在 1300~1500mm 之间,雨热同季现象很突出.汨罗市区域内水系分布繁杂,湘江及其支流汨罗江横穿其中,塑造起一套完备的水文体系,这个体系在水源保护及水量调节储蓄方面表现出较强的能力.汨罗市的土地利用形式具有多元性,包含耕地,林地,草地,水域,建设用地等种类.在众多景观类型中,耕地占有较大比重,主要负责粮食生产任务.与之不同的是,林地多数集中于西部的低山丘陵地区,突出特点是水土维持功能较好.从经济社会角度看,近些年来汨罗市的经济增长速度大幅加快,城市化水平不断提升,第三产业所占比例较以前有明显扩大.近年来,伴随城市化速度的加快,土地利用格局发生了很大改变,其中农用地渐渐缩小,建设用地逐步增多,这个过程使得景观结构慢慢变得破碎化[26].因此,全方位剖析汨罗市2000~2020 年期间景观功能健康在时空范围的发展特征,推动因素及其区域差别化运作策略,有益于深刻把握该地生态系统服务的动态变化规律,并为后续景观改良和生态养护工作形成稳固的科学依循.

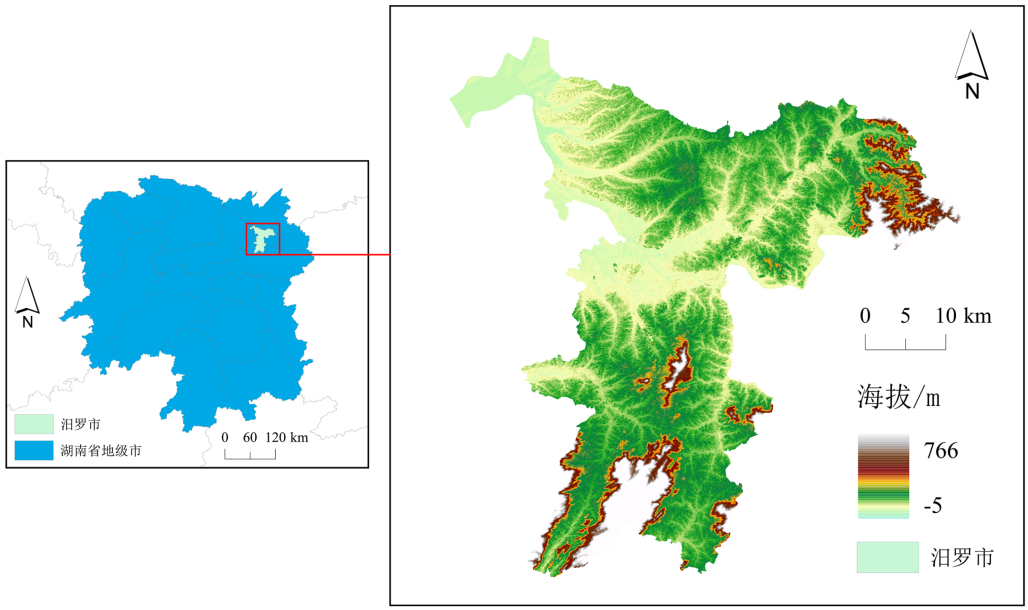


图 1 汨罗市地形

Fig.1 Miluo City topographic map

1.2 数据来源

本研究结合多源遥感数据、再分析数据、旅游景点名录数据等构建了汨罗市景观健康评价基础数据库.数据库主要包括高分辨率遥感影像(Landsat 影像)、高程、气候指标(气温、降水、风速、气候缺水量、潜在蒸发量、实际蒸发量、太阳辐射、饱和水汽压差)、人口密度、GDP、不透水率、碳排放、用电量、坡度、地表径流、土壤水分、土壤有机质数据.这些数据主要来源于美国地质调查局(https://earthexplorer.usgs.gov/)、TerraClimate、WorldPop、学术论文等.此外,旅游景点、酒店分布、美食分布数据来源于大众点评网.社会、经济数据主要来源于统计年鉴以及实地调查资料(表 1).

表 1 研究数据来源

Table 1 Research data source

数据名称	数据类型	分辨率	时间	数据来源
汨罗市行政区划	矢量	/	2020 年	汨罗市自然资源局
汨罗市遥感影像(Landsat)	栅格	30m	2000~2020 年	Google Earth Engine https://earthengine.google.com/
汨罗市高程数据	栅格	30m	2020 年	SRTM
POI 数据	矢量	/	2020 年	大众点评网爬虫
汨罗市人口密度	栅格	100m	2000~2020 年	WorldPOP(https://www.worldpop.org/)
地表径流数据	栅格	30m	2000~2020 年	地理遥感生态网(http://www.gisrs.cn/)
土壤数据(HWSD v2.0)	栅格	1:100 万	—	国家土壤信息服务平台 (http://www.soilinfo.cn/map/index.aspx)
汨罗市降雨量	栅格	1000m	2000~2020 年	国家地球系统科学数据中心 (https://www.geodata.cn/main/)
汨罗市蒸散量 MOD16A2	栅格	500m	2000~2020 年	Google Earth Engine[27] (https://earthengine.google.com/)
汨罗市 NDVI	栅格	30m	2000~2020 年	根据 Landsat 遥感数据提取
汨罗市 MNDWI	栅格	30m	2000~2020 年	根据 Landsat 遥感数据提取
Terraclimate 气候数据	栅格	4600m	2000~2020 年	Google Earth Engine (https://earthengine.google.com/)
碳排放数据	栅格	1000m	2000~2020 年	ODIAC(https://db.cger.nies.go.jp/dataset/ODIAC/)
用电量数据	栅格	1000m	2000~2020 年	Figshare(https://figshare.com/articles/dataset)[28]
GDP 数据	栅格	1000m	2000~2020 年	Figshare(https://figshare.com/articles/dataset)
不透水率数据	栅格	30m	2000~2020 年	国家地球系统科学数据中心 (https://www.geodata.cn/main/)

2　研究方法

本研究的技术路线可见图 2,其方法包含四个部分,其一,本研究依托 Google Earth Engine 平台[29],把随机森林模型同目视解译结合,获取了汨罗市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的土地利用数据,结果显示,这五个年份的总体精度全都大于 0.92,Kappa 系数也都大于 0.9.其次,本研究基于多个生态过程模型以及统计模型,对汨罗市 2000~2020 年期间的七种生态系统服务功能实施了估算.此外,本研究从气候要素,自然要素,人类活动这三个层面选出二十个潜在的影响因素变量,并利用随机森林重要性分析去评价各个指标对于景观功能健康状况的贡献程度.最后,本研究基于自组织适应映射模型以及 7 种生态系统服务功能指标对汨罗市 2000~2020 年的“三生空间”进行了识别.

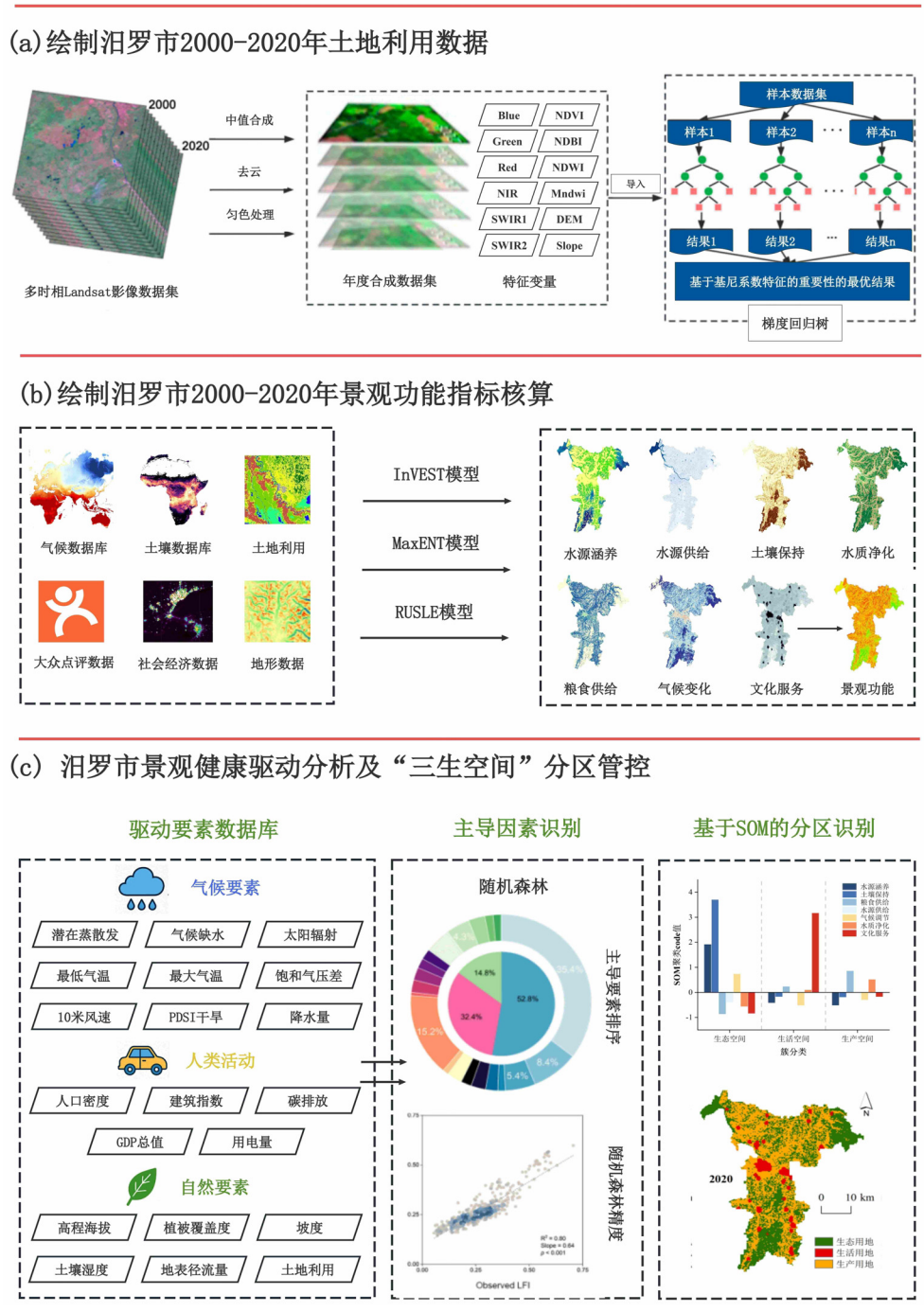


图 2　研究技术框架

Fig.2　Technical framework of the study

2.1 景观功能健康计算

本研究构建了一个综合评价体系,以量化汨罗市景观功能健康状况,此体系包含四类指标,即景观支持功能,景观供给功能,景观调节功能以及景观文化功能.本研究采取层次分析法(AHP)与熵权法结合的赋权方式来确定各指标权重,通过这种结合,既能借助专家的知识与经验,又可保证权重分配具有客观性且受数据推动.

2.1.1 景观支持功能计算 景观的支持功能提供了景观系统运作的基础,包括土壤形成、养分循环和生物多样性的维护等.本文选取水源涵养与土壤保持作为景观支持功能的表征指标.水源涵养量是指一定区域内土壤和植被对降水的吸纳和储存能力,是景观生态系统的关键服务之一[30].水源涵养量主要表现为通过森林冠层、地下植被、滞留层和土壤层拦截、截留降雨,增加地下径流、调节地表径流、调节河道径流的滞后功能[31].因此,本研究采用水量平衡方程(WBE)计算含水量.

$$Q_{WC}=P_i-R_i-ET_i \tag{1}$$

式中:Q_{WC} 为保水量(mm/a);P_i 为降雨量(mm/a);R_i 为径流量(mm/a);ET_i 为蒸散量(mm/a).

土壤保持是指通过自然或人工措施保护土壤,避免因侵蚀和退化而流失的过程[32].土壤保持有助于防止水土流失,保持生态系统的结构和功能,从而支撑整个景观的生态稳定性和生产力.本研究的土壤保持功能基于修正通用土壤流失方程(RUSLE)模型[33]计算,本研究土壤保持功能计算公式如下所示:

实际土壤侵蚀量:

$$A_{AE}=R\times K\times L\times S\times C\times P \tag{2}$$

潜在土壤侵蚀量:

$$A_{AE}=R\times K\times L\times S \tag{3}$$

土壤保持量:

$$A_{SE}=A_{PE}-A_{AE} \tag{4}$$

式中,A_{AE} 为单位面积实际土壤侵蚀量,t/(hm^2·a);A_{PE} 为单位面积潜在土壤侵蚀量,t/(hm^2·a);A_{SE} 为单位面积土壤保持量,t/(hm^2·a);降雨侵蚀因子 R 表示多年平均年降雨侵蚀指数;土壤可蚀性因子 K 表示土壤可蚀性因子;L 为坡长系数(无量纲);S 为坡度系数(无量纲);C 为植被覆盖系数(无量纲);P 为水土保持措施系数.

2.1.2 景观供给功能计算 景观供给功能在维护区域景观健康方面起着至关重要的作用,尤其是在粮食供给和水源供给这两个方面.因此,本研究从粮食供给与水源供给两个方面评估汨罗市的景观供给功能.本研究将 NDVI 数据与统计年鉴中的农业统计数据相结合,对粮食供给进行了量化.粮食产量数据来自《岳阳统计年鉴》[34-35].计算公式如下所示:

$$Y_i=A\times\frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \tag{5}$$

式中:Y_i 是第 i 个网格单元的粮食总产量;A 是汨罗的粮食总产量;$NDVI_i$ 是第 i 个像素的 NDVI 值;$NDVI_{sum}$ 是汨罗的 NDVI 总值.

水源供给是指生态系统提供的自然水资源.健康的水源供给能保证生态系统的水循环平衡,支持农业生产,维护生物栖息地,有利于防洪减灾,同时也是维持社会经济活动的关键.本研究基于改进的归一化水体指数(MNDWI)用于表征汨罗市的水源供给功能.

$$MNDWI=(Green-Swir1)/(Green+Swir1) \tag{6}$$

式中:MNDWI 为改进的归一化水体指数;Green、Swir1 分别为绿色波段、短波红外 1 波段、近红外波段、红色波段.

2.1.3 景观调节功能计算 景观调节功能对于区域景观健康的维护具有极为关键的重要性,尤其是在气候调节和水质调节这两个方面.气候调节功能,特别是在面临全球气候变化的背景下,变得尤为重要.水质调节功能则主要体现在通过自然和人工生态系统的过滤和净化作用来维护水体健康.在本研究中以气候调节、水质净化两项指标评估汨罗市的景观调节功能.

气候调节是指景观系统通过影响温度,对地区气候产生调节作用.本研究采用生态系统局部降温程度来描述汨罗景观系统气候调节特征.首先,基于 GEE 平台计算了汨罗的年平均地表温度,然后将水域和裸地的降温强度设为 0,接着计算了各景观类型每年的平均地表温度,然后从所有景观类型(水域和裸地除外)的平均地表温度中减去裸地的平均地表温度:

$$CE=T_i-T_{Bareland} \tag{7}$$

式中:CE 是气候调节函数;T_i 是第 i 个像元的地表温度;$T_{Bareland}$ 是裸地的平均地表温度.

水质净化是生态系统处理、吸收和转化污染物

质,净化水资源的能力.本研究基于 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)的水质净化模块[36]计算汨罗市的水质净化功能.该模型仅专注于非点源污染,尤其是总氮(TN)和总磷(TP)的输出量,这两者输出量的增加意味着水质净化服务的降低.主要计算方法是:

$$ALV_x=HSS_x\times pol_x \quad (8)$$

式中:ALV_x代表栅格x的调整后输出量;HSS_x是栅格x的水文敏感性得分;pol_x表示栅格x的污染物输出系数.通过计算得到总氮(TN)和总磷(TP)的输出量后,再依据不同土地利用/覆盖类型对污染物的移除效率,计算营养物的保持(截留)量.

2.1.4　景观文化功能计算　文化服务是生态系统为人类提供的非物质利益,包括休闲娱乐、美学享受、精神愉悦、教育和文化遗产保护等.本研究参照前人研究[37]利用 MaxEnt 模型模拟汨罗市的综合文化服务功能,主要分为四个步骤:首先,通过大众点评 app 获取各类文化点的地理位置数据.此外,本文选取了七个环境变量,即土地利用,高程,坡度,植被覆盖,水体距离,道路距离以及餐饮,住宿点距离,这些变量均对文化服务分布有着明显影响,把七种文化服务的分布数据同环境变量一起纳入 MaxEnt 模型[38],得出各自的空间分布预测图,再整合经归一化处理后的各个指标及其对应权重,进而画出综合文化服务的空间分布图.通过环境变量的时序动态替代,可以有效避免了因 POI 数据单年静态而带来的时序失真问题,模型结果仍具有一定的时间敏感性与解释力.

MaxEent 属于一种依靠最大熵原理与机器学习技术创建起来的概率模型,该模型会利用已有的景点分布数据以及环境特征,通过指定约束条件和特征函数去模仿最大熵,从而对景点潜在的分布区域实施预测,其模型的计算表达式为:

$$H(X|Y)=-\sum_{i}^{n}P(X,Y)\log p(X,Y) \quad (13)$$

$$X^*=\operatorname{argmax}H(X|Y) \quad (14)$$

式中:X 是事物分布;Y 是环境变量;n 是训练样本数量;$p(X,\ Y)$则是概率函数;$H(X|Y)$是训练样本的信息熵;X^*是最大熵.

2.1.5　景观功能健康计算　本文评定景观健康指数时采用综合赋权法确定权重,该方法结合了主客观因素,把层次分析法(AHP)和熵权法融合起来.本研究对指标实施标准化处理时采取的是极值标准化方法,该方法把原始数据转化为介于 0 到 1 之间的值,这样不同指标便具备了可比性,进而消解了由于量纲有别或者数值范围差别较大所产生的影响.本研究通过层次分析法,熵值法算出汨罗市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的指标权重,再按照这两种权重的几何平均数来确定各个评价指标的综合权重(表 2).

表 2　汨罗市景观功能健康评价指标权重

Table 2　Miluo City landscape function health evaluation index weight

准则层	权重	要素层	权重	指标层	权重
景观功能健康	1	景观支持功能(B1)	0.428	水源涵养(C1)	0.434
				土壤保持(C2)	0.125
		景观供给功能(B2)	0.194	粮食供给(C3)	0.061
				水源供给(C4)	0.039
		景观调节功能(B3)	0.264	气候调节(C5)	0.035
				水质净化(C6)	0.101
		景观文化功能(B4)	0.114	综合文化服务(C7)	0.059

2.2　基于随机森林的驱动力分析

景观功能健康是多元因素交织影响的复杂过程,涵盖了自然要素、气候要素、人类活动等多个维度.这些影响景观健康时空变化的因素统称为景观健康变化驱动力.准确辨识并深入研究各驱动因素如何作用于景观功能健康的演变过程,是制定有效策略以优化和提升景观功能健康水平的关键前提与基础.因此,本研究从自然要素、气候要素、人类活动三个维度选取了 20 个相关指标用于探究汨罗市近二十年景观功能健康的时空驱动力(表 3).此外,随机森林模型基于多个决策树形成的一种集成学习算法,在生态系统服务研究中得到广泛应用.本文

在构建每棵决策树时对训练集使用了随机且有放回地抽取,将 4/5 的样本作为训练集,剩下的 1/5 被用于精度验证,这称为 Out-Of-Bag 数据(OOB,袋外数据),且 OOB 的误判率定义为误判个数占样本总数的比率,而 OOB 误判率则用于评价特征变量的重要性.本文采用置换法来计算 OOB 的误判率,首先计算常态下的 OOB 误判率,然后将 X_j 的值进行置换并再次计算置换后的 OOB 误判率,并将两次 OOB 误判率的差值作为每棵树中 X_j 的变量重要性值,可通过式(15)计算.

$$\mathrm{VIM}_j^{\mathrm{OOB}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{Error}_j - \mathrm{Error}_j^{'}) \tag{15}$$

式中: $\mathrm{VIM}_j^{\mathrm{OOB}}$ 为特征变量 j 的重要性,Error_j 为置换前的误判率, $\mathrm{Error}_j^{'}$ 为置换后的误判率.

表 3 景观健康驱动因子选取

Table 3 Selection of landscape health driving factors

指标分类	名称	描述	最小值	最大值	单位	比例
气候变化(CC)	AET	使用一维土壤水分平衡模型得出的实际蒸散量	0	3140	mm	0.1
	DEF	使用一维土壤水分平衡模型得出的气候缺水	0	4548	mm	0.1
	PET	参考蒸发量(基于 ASCE Penman-Montieth)	0	4548	mm	0.1
	SRAD	短波下行辐射	0	5477	W/m^2	0.1
	TMMN	年最低气温	-770	387	℃	0.1
	TMMX	年最高气温	-670	576	℃	0.1
	VPD	饱和水汽压与空气中的实际水汽压之间的差值	0	1113	kPa	0.01
	VS	地表上空 10 米处的风速	0	2923	m/s	0.01
	PDSI	帕尔默干旱严重度指数	-4317	3418	/	0.01
	PRE	年总降雨量	0	6000	mm	/
人类活动(HA)	POP	人口密度	0	1500	人/km^2	/
	IBI	归一化建筑指数	-1	1	/	/
	CM	碳排放	0	2000	Tons/km^2	/
	GDP	国内生产总值	0	200	百万/km^2	/
	EC	用电量	0	1500	kW·h/km^2	/
自然因素(NA)	DEM	高程海拔	0	120	M	/
	NDVI	植被指数	-1	1	/	/
	Slope	坡度	0	90	°	/
	SOIL	使用一维土壤水分平衡模型得出的土壤湿度	0	8882	mm	0.1
	RO	使用一维土壤水分平衡模型得出的地表径流量	0	12560	mm	/

2.3 基于 SOM 算法的“三生空间”识别

SOM 模型属于无监督学习算法范畴,常被应用于数据可视化和聚类分析方面,SOM 模型将高维空间里相近的数据点在低维空间中依旧维持相近的关系.SOM 模型最核心之处在于依靠竞争学习机制以及拓扑保留来做到数据映射,竞争学习机制能让每一个输入的数据点寻得与之最为适配的神经元,此神经元即为“胜者”;而拓扑保留就是要保证相邻的神经元在高维空间中所表示的数据点具有相似性.SOM 模型的计算包含初始化,训练,映射这 3 个阶段,本研究把水源涵养,土壤保持,粮食供给,水源供给,气候调节,水质净化,文化服务当作 SOM 模型的特征变量,利用 R 语言的 kohonen 包对这些变量执行聚类,以此来识别汨罗市的“三生空间”.

3 结果与分析

3.1 景观功能时空变化特征

汨罗市 2000~2020 年间景观支持功能指数(LSFI)整体呈现波动变化特征(图 3),2000 年为 0.182,在 2005 年下降至 0.164.2010 年,景观支持功能指数回升至 0.188,并在 2015 年小幅下降至 0.183,至 2020 年进一步降至 0.179.景观供给功能(LFFI)在 2000~2020 年期间呈先增后减态势(图 4),2000 年为 0.401,到 2005 年增长至 0.431,2010 年达极大值 0.446.此阶段,农业生态体系创建和水资源治理投入增多,粮食产量和水源供给能力得到加强,然而,自 2010 年起,景观供给功能指数持续缩减,2015 年降至 0.395,2020 年又缩减至 0.389,纵使 2010~2020 年耕地面积

有所扩充,但景观供给功能反而下降,这显示耕地拓展未能有效地改善景观供给功能.景观调节功能(LAFI)整体上表现出先下降后提升的态势(图 5),2000 年其指数为 0.337,到 2005 年下滑至 0.312,这主要是因为城市不断扩展,农业活动增多或者环境压力变大,令自然调节系统受到了一定压力,2010 年,该指数又回升到 0.319,之后在 2015 年和 2020 年分别增长至 0.334 和 0.353,这种恢复的态势很大程度上源于汨罗市采取的退耕还林,湿地保护等生态举措,这些举措有效地改善了气候调节和水质净化的能力.景观文化服务功能(LCFI)在 2000~2020 年期间大致呈波动上升的走向(图 6),2000 年其指数为 0.197,2005 年提升至 0.237,显示这个阶段在文化遗产保护,休闲娱乐设施创建以及公共空间改良方面有所巩固. 2010 年景观文化服务功能降至 0.206,这可能是经济发展引发自然景观改变,城市规模扩充或者文化资源利用不当等因素所致,后来,景观文化服务功能到 2015 年和 2020 年分别回升至 0.218 和 0.222,这和汨罗市近年来推进城市绿化工程,改良并提升文化休闲设施以及执行环境政策紧密相连.

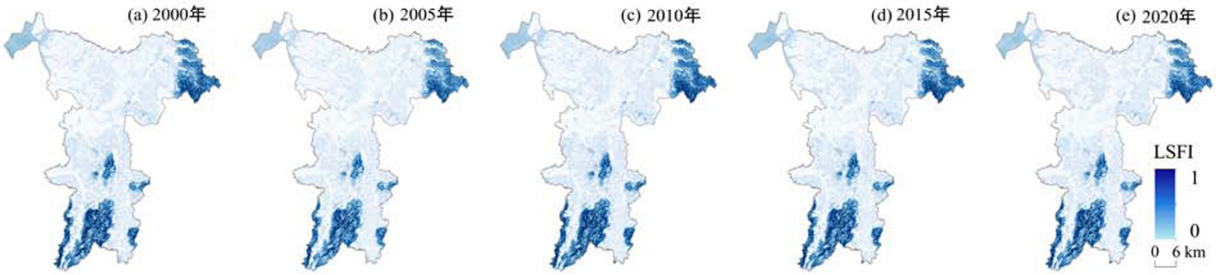


图 3　汨罗市 2000~2020 年景观支持功能时空分布

Fig.3　Spatial and temporal distribution of landscape support functions in Miluo City, 2000~2020

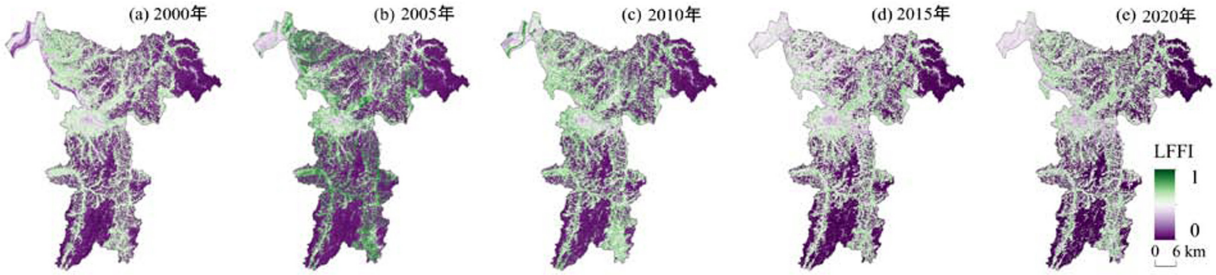


图 4　汨罗市 2000~2020 年景观供给功能时空分布

Fig.4　Spatial and temporal distribution of landscape supply functions in Miluo City, 2000~2020

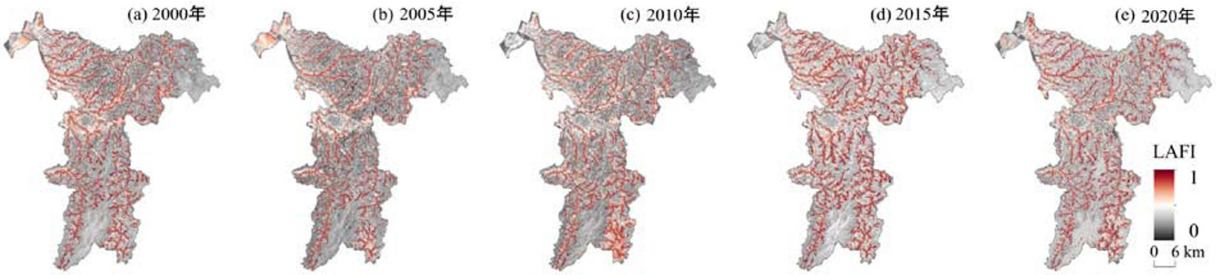


图 5　汨罗市 2000~2020 年景观调节功能时空分布

Fig.5　Spatial and temporal distribution of landscape regulatory functions in Miluo City, 2000~2020

汨罗市 2000~2020 年间的景观功能健康指数(LFI)整体呈现轻微波动但总体稳定的趋势(图 7).2000 年 LFI 值为 0.274,在 2005 年下降至 0.266,这一阶段汨罗市北部地区发生了大规模的林地转变为耕地的土地利用变化,对景观支持功能造成了一定影响.2010 年,LFI 值回升至 0.282,表明该阶

段汨罗市在景观功能的恢复和维护方面取得了一定成效.2015 年,LFI 值小幅下降至 0.278,但在 2020 年再次上升至 0.279.这一波动变化表明,尽管受到土地利用变化的影响,汨罗市在支持功能、供给功能、调节功能和文化服务功能的维护和提升方面持续努力,景观功能健康指数总体保持在较为稳定的水平.从空间变化来看,景观功能健康指数(LFI)高值区域主要分布在汨罗市南部及东北部的林地区域,尽管这些区域的景观供给功能、景观调节功能和景观文化功能较低,但由于景观支持功能较强,并且在本研究的景观健康评价体系中景观支持功能的权重达到了 17.66%,高于其他景观功能指标,因此这些区域的景观功能健康水平仍然较高.这表明本研究的景观功能健康评价体系构建较为合理,能够较好地反映区域景观功能的综合状况.

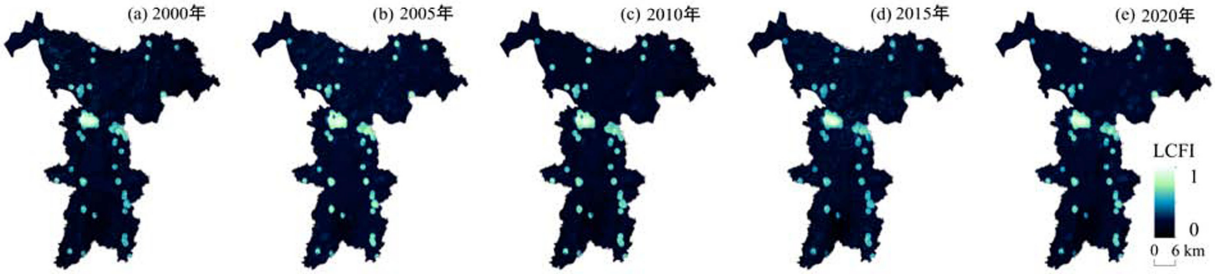


图 6 汨罗市 2000~2020 年景观文化服务功能时空分布

Fig.6 Spatial and temporal distribution of landscape cultural service functions in Miluo City, 2000~2020

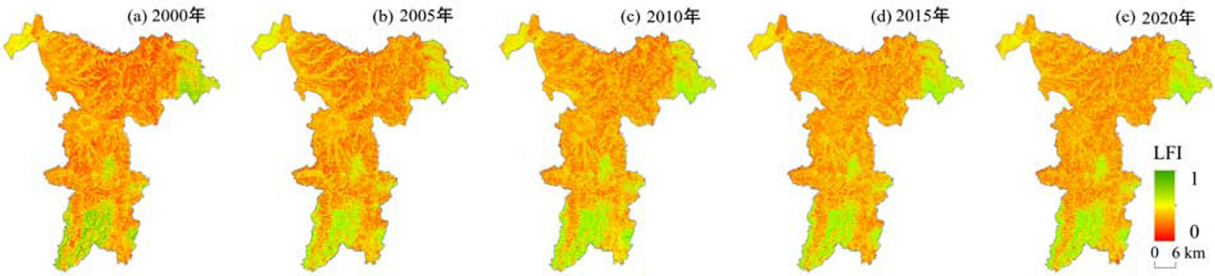


图 7 汨罗市 2000~2020 年景观功能健康时空分布图

Fig.7 Spatial and temporal distribution of landscape functional health in Miluo City

3.2 景观功能分异特征

2000~2020 年期间,汨罗市的景观支持功能,景观供给功能,景观调节功能以及景观文化功能在空间上存在明显的异质性,从景观支持功能(LSFI)的箱线图(图 8)可看出,此功能的中位数随时间变动虽有小幅波动,但大致保持稳定,这体现汨罗市景观支持功能各年份之间的变化不大,纵使存在一些空间上的差别,但总体并未出现较大改变.景观供给功能(LFFI)在这 20 年内呈现先提升后降低的态势(图 9),2000~2005 年期间,其平均值不断增长,显示出彼时汨罗市在粮食供应和水源供给两方面的生态服务能力得到了加强.自 2010 年起,景观供给功能的中位数与平均值双双下滑,在 2015 年和 2020 年表现得格外突出,这体现出城市化进程的加快,农业用地的削减以及耕地质量的下降给景观供给功能带来的负面效应,2000 年到 2010 年期间,供给功能的分布范围逐步扩展,显示各区域之间的生态服务能力差异正在拉大,而 2010 年至 2020 年,供给功能的分布范围稍有收缩,这表明区域内部的供给功能渐次趋同,或者整体供给能力全面降低.

景观调节功能(LAFI)在 2000~2020 年期间的变化特征显示,2000~2005 年该功能的中位数有所减小(图 10),这主要源于城市扩展以及资源的过度开发,2010 年起,景观调节功能开始改善,中位数回升,体现出环境保护举措正在生效,格外是 2015 年和 2020 年,这个功能的中位数进一步增长,这和植树造林,湿地重建以及水资源管理等生态修正措施的推动紧密相关.景观文化服务功能(LCFI)的箱

线图表明(图 11),2000~2020 年期间其空间非均匀性发生了改变,2000 年时,景观文化服务功能的中位数偏低,而且空间差异较大,这显示汨罗市的文化服务功能总体不强,并且不同区域之间存在明显差异.2005 年,该功能的中位数和平均数上升,空间异质性稍有缩减,2010 年和 2015 年,景观文化服务功能的中位数进一步上升,不过空间异质性增多,这显示部分区域的文化服务功能得以加强,而其他区域大概因为经济发展或者土地利用的改变,使得文化服务能力的空间差别进一步拉大,总的来说,汨罗市在过去二十年里景观文化服务功能有所改善,但空间异质性仍然很突出,依旧需要改良文化资源的均衡分配,从而改善整体文化服务功能的可持续性.

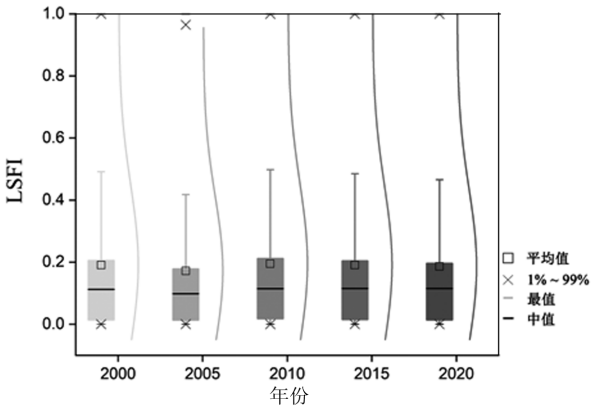


图 8　汨罗市 2000~2020 年景观支持功能时间序列箱线图

Fig.8　Miluo City 2000~2020 landscape support function box line map

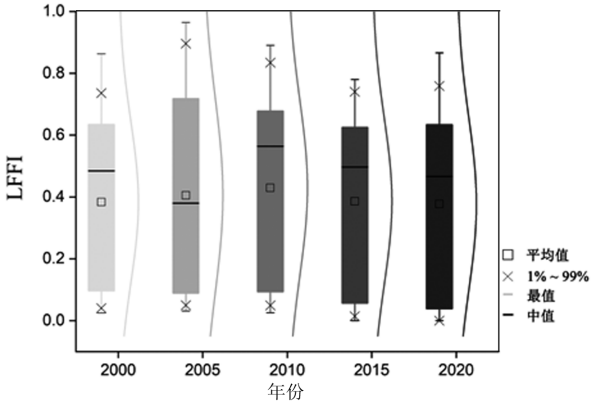


图 9　汨罗市 2000~2020 年景观供给功能时间序列箱线图

Fig.9　Miluo City 2000~2020landscape supply functional box line map

就景观功能健康指数(LFI)而言,尽管中位数(中线)在时间序列上略有波动,但总体上保持在一个相对稳定的水平(图 12),这表明整体上汨罗市的景观功能健康指数并未发生显著变化.

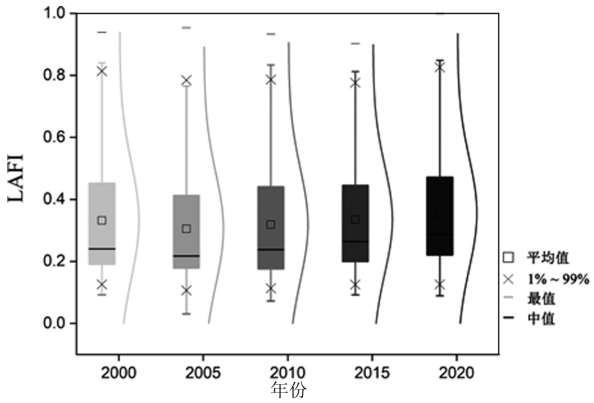


图 10　汨罗市 2000~2020 年景观调节功能时间序列箱线图

Fig.10　Miluo City 2000~2020 landscape regulation function box line map

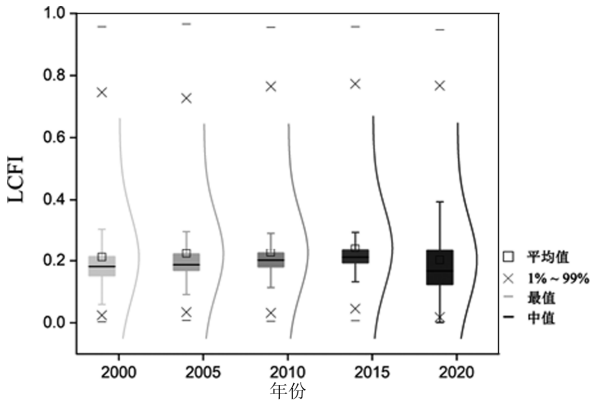


图 11　汨罗市 2000~2020 年景观文化服务功能箱线图

Fig.11　Miluo City 2000~2020 landscape cultural services box line map

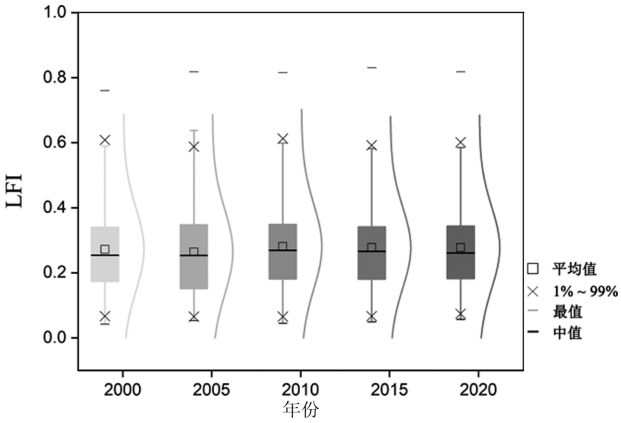


图 12　汨罗市 2000~2020 年景观功能健康箱线图

Fig.12　Miluo City 2000~2020 landscape functional health box line map

与此同时,箱线图里“箱体”大小的改变以及“须”的长短显示,景观功能健康指数的变异度每年都会波动,这表现出自然条件和人类活动对各年景观生态系统影响程度存在差别,从 2000 年到 2005 年,景观功能健康指数(LFI)的变异度呈上升态势;2010 年的数据显示,景观功能健康指数(LFI)的中位数稍有增长,这在一定程度上体现生态功能得到改善,这是执行生态保护和可持续经营举措带来的结果,2015 年和 2020 年的数据表明,景观功能健康指数(LFI)的变异度下降,这显示汨罗市在此期间生态环境比较稳定,也是生态保护措施不断产生作用的一种体现.

3.3 景观健康空间驱动力

确辨识并深入研究各驱动因素如何作用于景观健康的演变过程,是把握其内在变化规律、科学预测未来发展趋势、以及制定有效策略以优化和提升景观健康水平的关键前提与基础.因此,本研究从自然要素、气候要素、人类活动 3 个维度选取了 20 个相关指标用于探究汨罗市近 20 年景观功能健康的时空驱动力(表 3).

本研究利用随机森林模型来分别探究汨罗市景观功能健康在空间分布上的影响因素(图 13).在 2000 年,气候要素是景观功能健康的主要驱动力.随后,2005 年和 2010 年的数据显示自然要素对景观功能健康(LFI)的影响逐渐增大,这反映了人类活动与自然环境的相互作用中,自然因素的重要性在不断提升.到了 2015 年和 2020 年,气候变化相关指标(如降水量、干旱指数 PDSI 和温度变量)在景观功能健康(LFI)的驱动力中占据了更大比重.这表明随着全球气候变化的加剧,气候因素在汨罗市景观功能健康中的重要性增加.此外,模型的拟合图表明,随机森林模型能够有效地模拟观测到的景观功能健康(LFI)值,这说明所选取的驱动力指标能够较好地解释景观功能健康(LFI)的空间分布变化.总体而言,汨罗市的景观功能健康受到自然要素、人类活动和气候变化多方面的综合影响.在过去的二十年中,随着人类活动的增加和气候变化的影响加深,这些因素对景观功能健康的影响也随之增大.因此,在制定环境政策和规划时,应考虑这些多样化的驱动因素,以保持景观系统的完整性和健康.具体措施可能包括优化土地利用规划、强化气候适应策略以及提高公众环境保护意识.

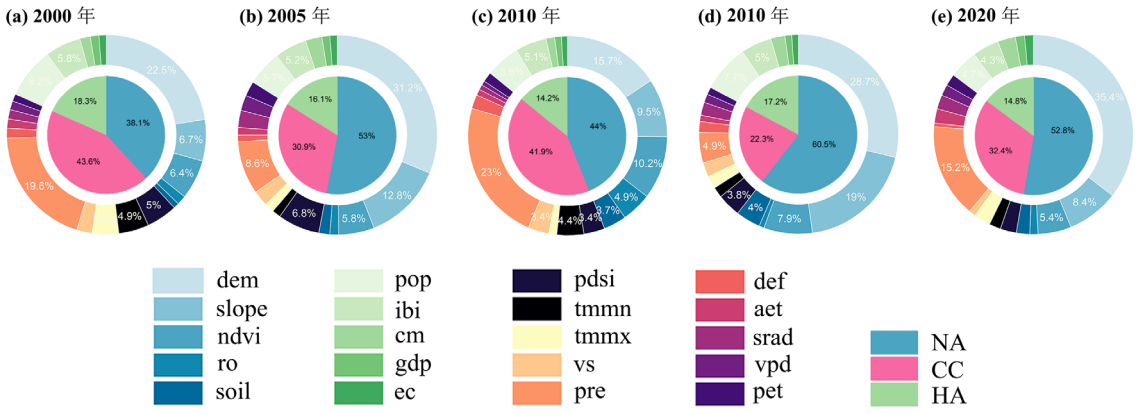


图 13 汨罗市 2000~2020 年景观功能健康空间驱动力分析

Fig.13 Analysis of the driving force of landscape functional health space in Miluo City from 2000 to 2020

3.4 “三生空间”分区管控

为了探究汨罗市近二十年的“三生空间”空间分布及其时空演变特征,本研究基于自组织映射模型(SOM),将本研究中的 7 种生态系统服务指标输入作为特征指标,并将簇的节点设置为 3,最后根据每个指标对单个簇的贡献来识别汨罗市的“三生空间”.生态空间在 2000 年为 624.96km^2,2005 年增加至 685.35km^2,但在 2010 年下降至 566.19km^2,并在 2015 年进一步减少至 543.51km^2,至 2020 年略微回升至 584.55km^2.这一变化趋势表明,2000~2005 年间生态恢复措施可能有所加强.

从空间分布来看(图 14),生态空间主要分布在北部和南部的山区及湿地区域,而生活空间在城市核心区和主要城镇周边不断扩张,生产空间则在农业主产

区和乡镇区域有所调整.基于以上分析,本研究提出如下分区管控策略:一是加强生态保护红线管理,严格控制开发强度,推动生态系统自我恢复能力的提升,确保生态空间不被进一步侵占,特别是在南北部林地和湿地区域;二是优化城镇建设用地布局,防止无序扩张,提高生活空间的集约化利用.三是促进农业与生态协调发展,在耕地减少的背景下推动绿色农业和生态农业的发展,以实现生产空间的可持续利用.在生态过渡区应优先布局生态廊道与绿色基础设施网络,结合土地整治与修复工程提升生态连通性.通过合理的分区管控,汨罗市可在保障生态安全的同时,实现经济与社会发展的协调推进.

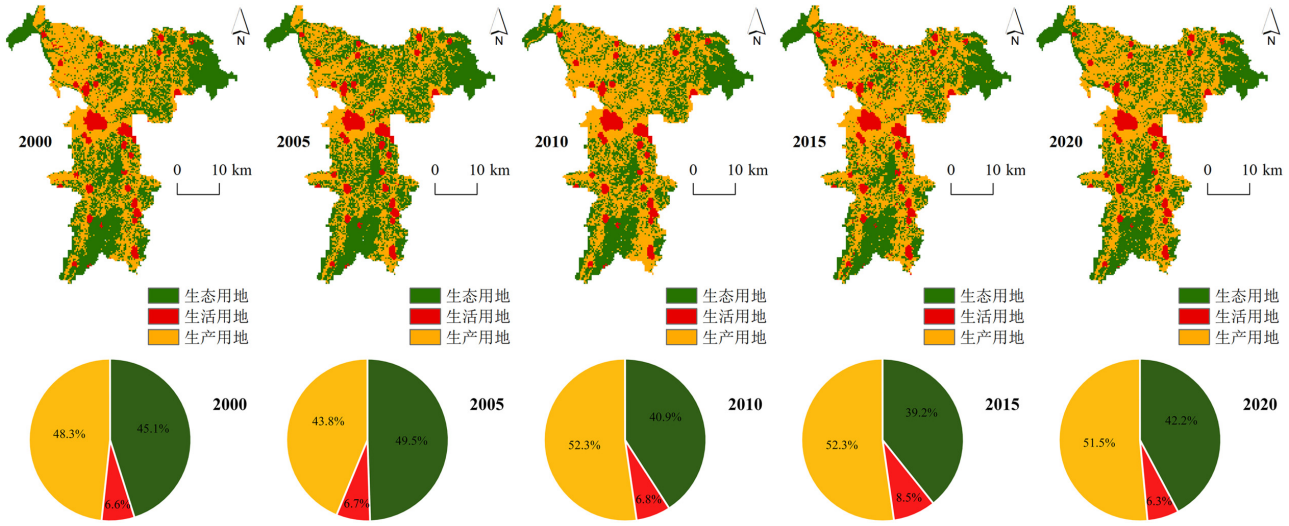


图 14　基于 SOM 聚类算法的汨罗市 2000~2020 年“三生空间”空间分布及面积占比

Fig.14　Spatial distribution and area share of “Three Life Spaces” in Miluo City from 2000 to 2020 based on SOM clustering algorithm

4　讨论

4.1　与现有研究比较

本研究以 2000~2020 年汨罗市为例,系统评估了城市化背景下景观功能健康的演化特征,结果表明城市扩张主导下的生态服务功能变化具有显著空间异质性.与 Tong 等[39]对典型湿地城市的研究结果相对比,本文发现的功能梯度演化趋势、城市边缘区调节与文化功能退化现象具有高度一致性,进一步印证了城市化进程对湿地生态系统功能构成的广泛影响.此外,本文识别出的主要驱动因素与 Zhou 等[40]对湖泊型城市生态系统服务功能演变的识别结果基本一致,体现了土地利用变化与人类活动强度在功能健康格局中的主导作用.在方法层面,本文结合自组织映射(SOM)与随机森林算法,构建了面向景观功能主导区识别的机器学习框架.该方法在吸收传统生态系统服务评价技术优势的基础上,实现了空间异质性识别与非线性关系建模的有机融合,有效提升了景观单元功能的判别精度与模型可解释性.相较于既往依赖加权叠加或主观分区的方式,该方法具有更强的自动化与迁移能力,为类似湿地城市开展功能健康监测与空间精细化治理提供了新路径.

4.2　局限性与未来研究方向

然而,研究也存在明显的局限性,其一,尽管本研究运用了多源数据,但数据的时间连续性受限,一些微小的时空变化也许无法得到充分体现,小规模的生态改变或者短期的异常事件在本研究中就可能被忽略.其二,诸多生态模型自身存在预测不确定性,而且还可能潜藏数据偏差,这会左右到最终结果的解读及其应用,鉴于这些不足,日后的研究可以采用分辨率更高,连续性更强的数据集,从而提升分析的细致度和精准度,把研究范围拓展到其他城市或者不同种类的生态系统,便能够检验本研究方法是否具有广泛性和恰当性,进一步探究并改善机器学习算法在生态研究中的应用情况,特别是该算法在处理大规模复杂数据集时的性能表现,这会是未来研究的重点方向.

5 结论

5.1 2000~2020 年间,汨罗市景观功能健康指数总体呈现小幅波动的变化趋势.其中,2000~2005 年阶段指数持续下降,于 2005 年降至最低值,此后呈现出波动回升趋势,表明在城市快速发展与生态修复并存的过程中,景观功能健康经历了由衰退到恢复的动态变化.

5.2 景观功能健康在空间上分布差异明显,高值区主要集中于南部和东北部的林地及湿地区域,低值区则分布在城市核心区、工业园区及沿主要交通干线地带,整体呈现出“北高南低”的空间格局.这种差异反映出自然生态基础良好的区域具有较高的景观功能承载力,而城市建成区的功能健康水平受到用地强度上升的影响相对较低.从时间演变来看,气候因子对景观功能健康的贡献率由 42.6%上升至 32.4%,而人类活动因子的贡献率由 18.3%下降至 14.8%.

5.3 2000~2020 年间,生态空间比例呈现先增后降再回升的特征,其中 2000~2005 年增加到 624.96km^2,2010~2015 年减少至 543.51km^2,2020 年略有恢复;生活空间在城市扩张阶段增加 12.4%,生产空间总体保持相对稳定.空间演化结果显示,生态空间的波动与建设用地扩张存在时间同步关系.

参考文献:

[1] 郑慧玲,郑辉峰.基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 [J]. 环境科学, 2024,45(4):2321-2331.
Zheng H L, Zheng H F. Carbon storage evaluation and prediction in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on land use/cover dynamic changes [J]. Environmental Science, 2024,45(4):2321-2331.

[2] 王少坡,白龙啸,刘灵婕,等.生物炭在人工湿地中的应用进展 [J]. 环境科学, 2025,46(1):263-271.
Wang S P, Bai L X, Liu L J, et al. Progress in the application of biochar in constructed wetlands [J]. Environmental Science, 2025,46(1):263-271.

[3] Li Y, Shi Y, Qureshi S, et al. Applying the concept of spatial resilience to socio-ecological systems in the urban wetland interface [J]. Ecological Indicators, 2014,42:135-146.

[4] Li F, Liu X, Zhang X, et al. Urban ecological infrastructure: an integrated network for ecosystem services and sustainable urban systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,163:S12-S18.

[5] 李玉鑫,杨宋琪,叶其炎,等.湿地不同优势水生植物湖泊中浮游植物群落结构特征及其驱动因子分析 [J]. 环境科学, 2024,45(10):5811-5821.
Li Y X, Yang S Q, Ye Q Y, et al. Analysis of phytoplankton community structure characteristics and driving factors in wetland lakes with different dominant aquatic plants [J]. Environmental Science, 2024,45(10):5811-5821.

[6] 齐 丽.景观生态学的国内外研究现状 [J]. 科技与创新, 2020,(9):145-146.
Qi L. Current status of domestic and international research on landscape ecology [J]. Science and Technology and Innovation, 2020,(9):145-146.

[7] Hersperger A M, Grădinaru S R, Pierri Daunt A B, et al. Landscape ecological concepts in planning: review of recent developments [J]. Landscape Ecology, 2021:1-17.

[8] 刘 灿.生态服务功能视角下的城市绿地系统规划方法研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2016.
Liu C. Research on urban green space system planning methods from the perspective of ecological service function [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[9] 杨小刚,宋进喜,程丹东,等.渭河陕西段河道生态服务价值评估 [J]. 干旱区地理, 2014,37(5):958-965.
Yang X G, Song J X, Cheng D D, et al. Evaluation of ecological service value of the Weihe River in Shaanxi Province [J]. Arid Land Geography, 2014,37(5):958-965.

[10] 耿傲淼,张贵军,徐 磊,等.基于生态系统服务功能价值簇的复合型产业模式设计——以河北省阜平县为例 [J]. 水土保持研究, 2024,31(1):417-426,439.
Geng A M, Zhang G J, Xu L, et al. Design of a composite industry model based on ecosystem service function value cluster: A case study of Fuping County, Hebei Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):417-426,439.

[11] 杨海江.祁连山国家级自然保护区生态系统服务评估与适应性管理 [D]. 兰州:兰州大学, 2023.
Yang H J. Ecosystem service assessment and adaptive management of Qilianshan National Nature Reserve [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.

[12] 贺 祥.脆弱生态环境区生态系统服务功能与价值时空演变的研究 [J]. 江苏农业科学, 2019,47(4):209-215.
He X. Study on the spatiotemporal evolution of ecosystem service functions and values in fragile ecological environment areas [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019,47(4):209-215.

[13] 托马斯·布特纳,孔洞一.文化景观作为乡村可持续发展的资源:认知、方法与实践 [J]. 国际城市规划, 2020,35(5):45-52.
Thomas B, Kong D Y. Cultural landscape as a resource for sustainable rural development: cognition, methods and practice [J]. International Urban Planning, 2020,35(5):45-52.

[14] 孙应龙,韩佳芮,陈紫璇,等.2000~2021 年长江中游流域气候对植被和生态系统服务功能的影响分析 [J]. 环境生态学, 2024,6(6):99-108.

Sun Y L, Han J R, Chen Z X, et al. Analysis of the impact of climate on vegetation and ecosystem service functions in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2021 [J]. Environmental Ecology, 2024,6(6):99−108.

[15] 安　黎,沈　镭,钟　帅,等.陕北地区水土保持生态功能多尺度协同与权衡关系 [J]. 中国水土保持科学, 2023,21(2):1−9.
An L, Shen L, Zhong S, et al. Multi−scale synergy and trade−off relationship of soil and water conservation ecological functions in northern Shaanxi [J]. Chinese Journal of Soil and Water Conservation, 2023,21(2):1−9.

[16] 王志杰,柳书俊,喻理飞.草海流域景观结构与土壤保持功能时空动态特征 [J]. 水土保持研究, 2020,27(4):105−112.
Wang Z J, Liu S J, Yu L F. Spatiotemporal dynamic characteristics of landscape structure and soil conservation function in Caohai Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,27(4):105−112.

[17] 白　杨,初　东,田　良,等.武汉城市圈的水源涵养功能重要性评价研究 [J]. 地球信息科学学报, 2014,16(2):233−241.
Bai Y, Chu D, Tian L, et al. Study on the importance evaluation of water conservation function in Wuhan urban area [J]. Journal of Geo−information Science, 2014,16(2):233−241.

[18] Meng Y, Yang M, Liu S, et al. Quantitative assessment of the importance of bio−physical drivers of land cover change based on a random forest method. Ecological Informatics, 2021,61:101204.

[19] 廖柳文,秦建新.环长株潭城市群湿地生态安全研究 [J]. 地球信息科学学报, 2016,18(9):1217−1226.
Liao L W, Qin J X. Study on the ecological security of wetlands in the Changsha−Zhuzhou−Xiangtan urban agglomeration [J]. Journal of Geo−information Science, 2016,18(9):1217−1226.

[20] 喻光孟,喻刚强,刘少坤.基于遥感的汨罗市土地利用/覆被变化研究 [J]. 中国科技纵横, 2011,(10):47−48.
Yu G M, Yu G Q, Liu S K. Study on land use/cover change in Miluo City based on remote sensing [J]. China Science and Technology, 2011,(10):47−48.

[21] 李国伟,赵　伟,魏亚伟,等.天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响 [J]. 生态学报, 2015,35(4):984−992.
Li G W, Zhao W, Wei Y W, et al. Impact of natural forest resource protection project on forest ecosystem service functions in Changbai Mountain forest area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(4):984−992.

[22] 高于越,董　亮,刘孟林,等.基于随机森林与 SHAP 模型的中型城市出行方式影响因素分析 [C]//中国城市规划学会城市交通规划专业委员会.绿色数智 提质增效——2024 年中国城市交通规划年会论文集.重庆市交通规划研究院;重庆果园港国际物流枢纽建设发展有限公司;重庆交通大学, 2024:2455−2464.
Gao Y, Dong L, Liu M L, et al. Analysis of factors affecting travel modes in medium−sized cities based on random forest and SHAP models [C]// Urban Transportation Planning Committee of the China Urban Planning Society. Green Digital Intelligence, Quality and Efficiency Improvement − Proceedings of the 2024 China Urban Transportation Planning Annual Conference. Chongqing Transportation Planning Institute; Chongqing Guoyuan Port International Logistics Hub Construction and Development Co., Ltd.; Chongqing Jiaotong University; 2024:2455−2464.

[23] 余新晓,周　彬,吕锡芝,等.基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估 [J]. 林业科学, 2012,48(10):1−5.
Yu X X, Zhou B, Lü X Z, et al. Evaluation of forest water conservation function in Beijing mountainous areas based on InVEST model [J]. Journal of Forestry Science, 2012,48(10):1−5.

[24] Kalteh A M, Hjorth P, & Berndtsson R. Review of the self−organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application. Environmental Modelling & Software, 2008,23(7):835−845.

[25] 孙　佳,何丙辉.土地深度开发研究中的几个问题——以湖南省汨罗市为例 [J]. 长江大学学报, 2007,4(1):99−102.
Sun J, He B H. Several issues in the study of deep land development: A case study of Miluo City, Hunan Province [J]. Journal of Yangtze University, 2007,4(1):99−102.

[26] 王良健,何琼峰,文　娉.湖南省汨罗市再生资源产业集群升级研究 [J]. 中国人口.资源与环境, 2008,18(2):35−39.
Wang L J, He Q F, Wen H. Research on the upgrading of renewable resource industry cluster in Miluo City, Hunan Province [J]. China Population, Resources and Environment, 2008,18(2):35−39.

[27] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary−scale geospatial analysis for everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017,202.DOI:10.1016/j.rse.2017.06.031.

[28] 刘纪远,刘明亮,庄大方,等.中国近期土地利用变化的空间格局分析 [J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2002,(12):1031−1040,1058−1060.
Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Spatial pattern analysis of recent land use change in China [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2002,(12):1031−1040,1058−1060.

[29] Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, et al. Google Earth Engine for geo−big data applications: A meta−analysis and systematic review [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020,164:152−170.

[30] 杜世勋,刘海江,张梦莹,等.水源涵养型国家重点生态功能区生态系统服务功能评估 [J]. 生态学报, 2022,42(11):4349−4361.
Du S X, Liu H J, Zhang M Y, et al. Evaluation of ecosystem service functions in national key ecological functional areas with water conservation as the core [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(11):4349−4361.

[31] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等.森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 [J]. 生态学报, 2013,33(4):1019−1030.
Wang X X, Shen H T, Li X Y, et al. Multi−scale connotation, process and measurement method of forest water conservation function [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(4):1019−1030.

[32] 郝好鑫.侵蚀环境下根系功能性状对土壤保持的影响及机制 [D]. 武汉:华中农业大学, 2020.
Hao H X. Effects and mechanisms of root functional traits on soil conservation under erosive environment [D]. WuHan: Huazhong

Agricultural University, 2020.

[33] 康惠惠,潘 韬,盖艾鸿,等.生态退化与恢复对三江源区土壤保持功能的影响 [J]. 水土保持通报, 2017,37(3):7−14.
Kang H H, Pan T, Gai A H, et al. Impact of ecological degradation and restoration on soil conservation function in the Sanjiangyuan region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(3):7−14.

[34] 安志英,孙才志,郝 帅.我国东北生态系统服务供需匹配关系——基于水−能源−粮食纽带视角 [J]. 生态学报, 2024,44(10):4170−4186.
An Z Y, Sun C Z, Hao S. The matching relationship between supply and demand of ecosystem services in Northeast my country: Based on the perspective of water−energy−food nexus [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(10):4170−4186.

[35] 赵雪雁,马平易,李文青,等.黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化 [J]. 地理学报, 2021,76(11):2780−2796.
Zhao X Y, Ma P Y, Li W Q, et al. Spatiotemporal variation of supply and demand of ecosystem services in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(11):2780−2796.

[36] 吴 瑞,刘桂环,文一惠.基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化 [J]. 环境科学研究, 2017,30(3):406−414.
Wu R, Liu G H, Wen Y H. Spatiotemporal variation of water production and water purification services in Guanting Reservoir basin based on InVEST model [J]. Journal of Environmental Science, 2017, 30(3):406−414.

[37] 吴隽宇,朱榴奕.生态系统环境−文化服务耦合视角下的珠江河口区生态功能分区 [J]. 风景园林, 2023,30(1):85−93.
Wu J Y, Zhu L Y. Ecological functional zoning of the Pearl River Estuary from the perspective of ecosystem environment−cultural service coupling [J]. Landscape Architecture, 2023,30(1):85−93.

[38] 李林汝,员学锋,张瑞娜,等.基于最大熵模型的生态系统文化服务空间分异及其对环境要素的响应分析——以陕北榆林市为例 [J]. 生态学报, 2024,44(21):9582−9595.
Li L R, Yuan X F, Zhang R N, et al. Spatial differentiation of ecosystem cultural services and their response to environmental factors based on the maximum entropy model: A case study of Yulin City in northern Shaanxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(21): 9582−9595.

[39] Tong C, Feagin R A, Lu J, et al. Ecosystem service values and restoration in the urban Sanyang wetland of Wenzhou, China [J]. Ecological Engineering, 2007,29(3):249−258.

[40] Zhou J, Wu J, Gong Y. Valuing wetland ecosystem services based on benefit transfer: A meta−analysis of China wetland studies [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,276(11):122988.

作者简介：曹诗怡(1986−),女,湖南益阳人,博士研究生,主要从事大地景观规划与生态修复研究.发表论文 14 篇.355712723@qq.com.