

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.025

基于地理探测器的菜子湖群湿地景观格局变化及驱动因子分析

彭娜^{1,2}, 周立志^{1,2}

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 湿地生态保护与修复安徽省重点实验室(安徽大学), 安徽 合肥 230601)

摘要:选取1999年、2004年、2011年和2017年4期卫星遥感影像,采用网格分析法研究景观指数和人为干扰的时空分异规律,借助地理探测器和相关性分析相结合的方法,从人为活动和社会经济角度分析安徽菜子湖群湿地景观格局变化原因。结果表明:1999—2017年菜子湖群自然湿地面积减少,人工湿地面积增加;滩涂和沼泽草滩占比分别减少12.23%和13.84%,农田及养殖塘面积分别增加12.12 km²和20.71 km²,非湿地面积略有增加;湿地破碎化,景观斑块连通性下降,斑块形状趋于简单化,景观异质性增加;湿地人为干扰强度增加,较高、高干扰等级占比增大;农田、养殖、围网及围坝等人为活动对斑块数量分布的影响在时间及空间上存在明显差异,人为活动因子的交互作用较单个因子作用影响显著增强;景观指数与三大产业产值、国内生产总值、人口、渔业生产、耕地面积等社会经济因子有显著相关性。

关键词:湿地景观;景观指数;人为干扰;驱动因子;地理探测器;相关性分析;菜子湖群

中图分类号:X37 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0168-09

Analysis of wetland landscape pattern variation and its driving factors of Caizi Lake group based on geodetector//
PENG Na^{1,2}, ZHOU Lizhi^{1,2} (1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Wetland Ecosystem Protection and Restoration (Anhui University), Hefei 230601, China)

Abstract: With the 1999, 2004, 2011, and 2017 Landsat remote sensing images used as the main data sources, this study reveals the spatiotemporal evolution of wetland landscape characteristics of the Caizi Lake group from 1999 to 2017 and their relationships with human activities and socioeconomic factors by means of the grid analysis method, geodetector, and correlation analysis. Results are as follows: the artificial wetland area gradually increased while the natural wetland area gradually degraded; mudflats and herbaceous marshes showed a decreasing tendency, with proportions reducing by 12.23% and 13.84%, respectively, the areas of paddy fields and aquaculture ponds increased by 12.12 km² and 20.71 km², respectively, and the non-wetland area increased slightly; with the increase of the land use intensity, the landscape was more fragmented, the connectivity between patches became weak, the shape of wetland patches tended to be simplified, and the landscape heterogeneity increased. From 1999 to 2017, the wetland of the Caizi Lake group was significantly affected by human activities, and areas with high and relatively high intensities of human interferences dramatically expanded with time. Different human activities caused significant differences of impacts on the number of patches in time and space, and the interaction effect of human activities was even higher on the number of patches. The variation of wetland landscape indexes of the Caizi Lake group has close relationships with socioeconomic factors, including the output values of three industries, GDP, population, fishery production, and arable area.

Key words: wetland landscape; landscape index; human interference; driving factors; geodetector; correlation analysis; Caizi Lake group

基金项目:国家自然科学基金(31472020)

作者简介:彭娜(1993—),女,硕士研究生,研究方向为环境生态与资源管理。E-mail: 1364625561@qq.com

通信作者:周立志(1963—),男,教授,博士,主要从事水鸟与湿地生态学研究。E-mail: zhoulz@ahu.edu.cn

景观格局是指不同生态系统或土地覆被类型在时间与空间上的组成及配置,是生态过程在不同尺度的作用结果^[1]。景观格局定量分析是研究格局与过程相互关系的基础,景观斑块的大小、形状及排列方式在一定程度上反映了人类活动的方式和强度,影响着其中物质循环、能量流动和信息传递等生态过程和形式^[2-3]。探究影响和控制景观格局的因子及作用机制对于加强自然资源管理和生物多样性保护具有重要作用^[4-6]。

湿地作为重要的自然景观,是指以湿地斑块、廊道以及相关的其他类型空间单元聚合而成的异质性地理区域^[7],是山水林田湖草生命共同体的主要组成部分,其景观格局变化及其驱动力研究成为景观生态学与湿地科学研究的热点^[3,8]。国内外多借助景观格局指数^[9-11]、转移矩阵^[12-13]等进行湿地演变的特征分析。驱动因子选取包含人为和自然两方面^[14],多采用定性和定量分析相结合的分析方法。定性分析可显示破碎化与因子的变化趋势^[2,15-16];定量分析能量化因子对于景观的作用大小,包括相关性分析^[10]、主成分分析^[11]以及回归模型^[16]等,但主观性较强,空间分析能力较弱,且无法评估因子间的交互作用影响力大小^[13,17]。地理探测器作为一种新兴计量模型,解决了传统方法空间分析能力弱的问题,能准确解释因子空间异质性对景观分异性影响力的大小^[17-18],广泛应用于土地利用、区域经济、公共卫生、环境污染等领域^[19-20]。

长江中下游湿地资源丰富,区域人口稠密,湿地景观受人为影响较大,是研究气候、经济和农业对湿地景观变化影响的重点区域^[12]。菜子湖群湿地作为该区代表性的浅水通江湖泊,2018年以前,围网养殖、围湖造田、堤防工程导致自然湿地萎缩,景观呈现破碎化,湖泊生态功能退化。现有菜子湖群研究集中在生物多样性及其结构特征分析^[21-23],湿地景观变化及其驱动力的研究亟待加强。

本文利用菜子湖群1999年、2004年、2011年和2017年4期冬季遥感影像,提取研究区湿地空间分布信息,采用网格分析法研究景观指数和人为干扰的时空分异规律,运用地理探测器和相关性分析法分析湿地景观变化的原因,以期为加强菜子湖群湿地资源保护和管理提供科学参考。

1 研究区概况

菜子湖群湿地地处安徽省安庆市宜秀区、桐城市和铜陵市枞阳县交界处,处于117°01'E~117°09'E、30°43'N~30°58'N之间,由菜子湖、嬉子湖和白兔湖构成,统称菜子湖群^[24-25],湿地总面积达

248.73 km²(图1)。湿地周边主要以农业种植、渔业养殖为主,工业企业少。湖区降水季节分配不均,湿地景观受水位季节性变化影响较大^[26]。湖水依赖地表径流和自然降水补给,西纳龙眠河、挂车河、大沙河,经长河于枞阳闸汇入长江。自1959年枞阳闸建成以后,阻断了菜子湖群与长江的自然连通,阻止了江水倒灌,为沼泽湿地大规模围垦创造了条件。

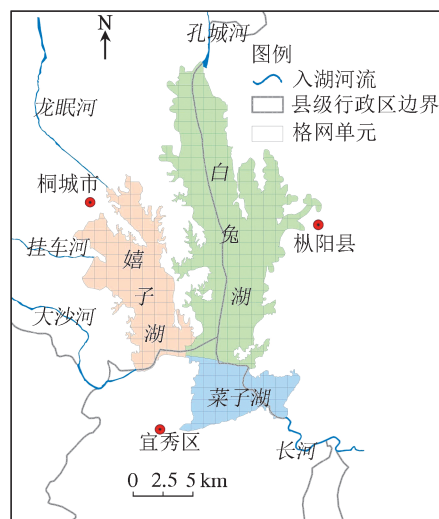


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本文遥感影像来自地理空间数据云及美国地质勘探局网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),选取1999年12月10日Landsat ETM+、2004年12月7日和2011年12月11日Landsat ETM以及2017年12月19日Landsat OLI-TIRS 4期冬季枯水期遥感数据,分辨率为30 m。

使用ENVI 5.3对遥感影像进行预处理,采用1:10 000地形图和土地利用数字地形图进行几何校正。借助归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)提取丰水期湿地边界,采用支持向量机方法获取景观分类信息。验证分类精度为90%以上,Kappa指数在0.80以上,达到研究要求。

此外,借助Google Earth软件结合实地调查提取研究区内4个研究年份的围网及围坝等人为活动分布。其中1999年耕地较少,全湖未开始围网,只统计到养殖塘及围坝数据。

社会经济、人口等数据来自《安徽统计年鉴》《铜陵市国民经济和社会发展统计公报》和《安庆市国民经济和社会发展统计公报》。

2.2 湿地景观分类

参照2017年国家土地利用分类标准,结合前人

研究,考虑菜子湖湿地景观特征及研究需要,将景观分成3大类7个小类:自然湿地(湖泊、滩地、沼泽草滩)、人工湿地(河渠、养殖塘、农田)和非湿地。

2.3 景观指数选取

从4个方面选取景观指数:①破碎度指标,包括斑块数量、斑块密度;②形状指标,采用平均斑块分维数^[10,27];③聚集度指标,采用蔓延度指数^[28-29];④多样性指标,采用 Shannon's 多样性指数^[10-11]。各景观指数生态含义如表1所示。

表1 各景观指数生态含义

Table 1 Ecological meanings of each landscape index		
景观指数	生态含义	取值范围
斑块数量	描述景观破碎程度,值越大,景观破碎程度越高	>0
斑块密度	表征景观破碎程度,值越大,单位面积斑块数量越多,景观破碎程度越高	>0
平均斑块分维数	描述斑块形状复杂程度,值越接近1,斑块形状越简单规则,受人为干扰越大	[1,2]
蔓延度指数	表征景观聚集程度,最大值时,优势斑块类型形成良好的连通性	(0,100]
Shannon's 多样性指数	反映景观异质性,对景观中各斑块类型非均衡化分布状况敏感,土地利用方式越丰富,景观破碎程度越高,其不确定的信息含量也越大,指数就越大	

为了直观地分析菜子湖群4个时期湿地景观指数的空间变化,借助 Fragstas4.4 计算各时期 1 km × 1 km 网格(图1)景观指数,运用网格分析法研究区内景观指数时空变化规律。

2.4 人为干扰

综合前人的研究^[30-31],对区域景观和干扰类型进行人为干扰度赋值,根据不同景观或人为干扰类型的面积和干扰度指数,计算网格单元人为干扰强度,计算公式如下:

$$H_i = \sum_i^m (P_i S_i / S) \tag{1}$$

式中: H_i 为网格单元人为干扰强度; m 为某一网格

内斑块个数; S_i 为网格单元内第 i 类景观或干扰类型面积; S 为网格单元的总面积; P_i 为第 i 类景观或干扰类型的人为干扰度指数,取值范围为 0 ~ 1 ($P_{\text{湖泊}} = 0.1$ 、 $P_{\text{河渠}} = 0.35$ 、 $P_{\text{养殖塘}} = 0.6$ 、 $P_{\text{滩地}} = 0.5$ 、 $P_{\text{沼泽草滩}} = 0.16$ 、 $P_{\text{农田}} = 0.65$ 、 $P_{\text{非湿地}} = 0.80$ 、 $P_{\text{围网}} = 0.25$ 、 $P_{\text{网坝}} = 0.48$),值越大,代表人为干扰越强。

2.5 地理探测器

地理探测器是用于探测空间分异与分异机制背后驱动力的计量模型,包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测4部分^[32]。其核心思想基于假设:如果某个自变量 X 对某个因变量 Y 有重要影响,那么 X 和 Y 的空间分布具有相似性^[17-18]。将围坝、农田、养殖塘和围网等影响因素空间分布进行网格化统计,之后对数据进行离散化处理^[20],利用因子分析和交互探测,得到各人为活动类型对斑块数量的影响力 q :

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{j=1}^L (N_j \sigma_j^2) \tag{2}$$

式中: N_j 和 N 分别分区 j 和全区的单元数; σ_j^2 和 σ^2 分别为分区 j 和全区景观指数的方差; L 为分区数。 $q \in [0,1]$, q 值越大,表示因子对景观指数空间分异的影响力越强,反之则越弱^[32]。

3 结果与分析

3.1 湿地景观面积动态变化

1999—2017 年菜子湖群湿地景观类型空间分布和面积占比如图2、图3所示。1999—2017 年菜子湖群湿地自然湿地面积减少 36.03 km²,人工湿地显著增加。滩地面积在 2011 年达到最小值,最小面积为 23.15 km²,相较于 1999 年占比减少 18.22%;沼泽草滩面积 2011—2017 年显著减少,由 2011 年的 30.02% 减少到 2017 年的 15.08%;研究期间的农田及养殖塘面积持续增加,分别增加 12.12 km² 和 20.71 km²;河渠及非湿地面积略有增加,研究期间

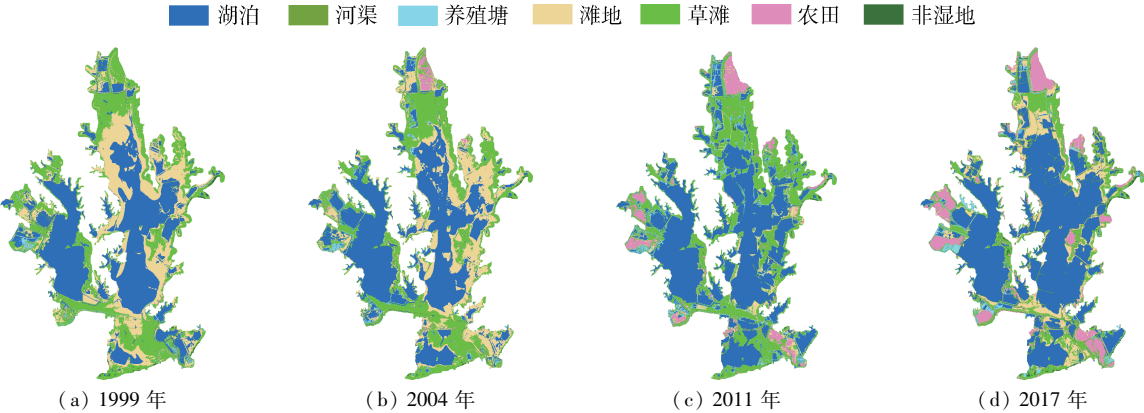


图2 1999—2017 年菜子湖群湿地景观类型空间分布

Fig.2 Spatial distributions of landscape types in wetland of Caizi Lake group from 1999 to 2017

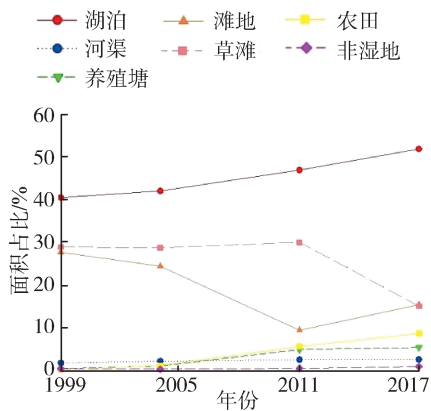


图3 1999—2017年菜子湖群湿地不同景观类型的面积占比
Fig. 3 Percentages of different landscape types in wetland of Caizi Lake group from 1999 to 2017

占比分别增加了0.82%和0.48%。滩地和沼泽草滩在白兔湖、菜子湖和嬉子湖分别丧失25.74%、32.97%、23.22%，丢失景观主要发生在菜子湖的东部和北部，嬉子湖的西部和南部，以及白兔湖的整个湖滨带。

3.2 湿地人为活动分布情况

表2和图4显示，1999年少量养殖塘、围坝分布于湿地边缘。1999—2004年白兔湖和嬉子湖围网急剧增加，分别增加了34.47 km²和16.35 km²，养殖塘和农田明显增多。2004—2011年白兔湖中心出现围坝，景观斑块化明显，3个子湖围网总面积达到最大75.54 km²。2011—2017年嬉子湖和菜子湖

表2 菜子湖群湿地围网及围坝数量

Table 2 Area enclosed by fences and length of dikes in wetland of Caizi Lake group

年份	围网/km ²			围坝/km		
	白兔湖	菜子湖	嬉子湖	白兔湖	菜子湖	嬉子湖
1999	0	0	0	40.63	18.2	21.89
2004	34.47	0.19	16.35	50.19	25.12	21.89
2011	45.59	3.81	26.14	155.58	43.59	24.95
2017	54.79	0.25	6.77	180.59	47.72	26.31

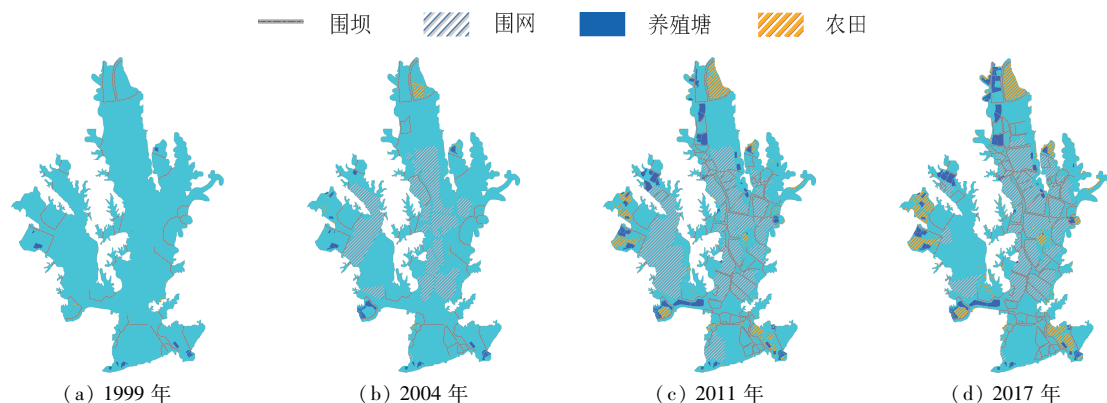


图4 1999—2017年菜子湖群湿地人为干扰类型分布

Fig. 4 Distributions of human interference types in wetland of Caizi Lake group from 1999 to 2017

围网部分拆除，白兔湖围网有少量增加。

3.3 湿地景观指数时空变化

景观指数时间变化规律如图5所示。白兔湖、菜子湖和嬉子湖均表现破碎程度加剧，景观格局向着多样化和均匀化方向发展。1999—2017年3个子湖区斑块密度增大，单位面积湿地景观斑块数量变多，区域景观破碎化；平均斑块分维数变小，景观形状愈发规则，湿地受人为干扰变大；蔓延度指数减小，景观聚集度下降，景观连通性变差；Shannon's多样性指数增大，湿地土地利用趋于丰富，景观类型均衡化。

斑块数量空间分布如图6所示，白兔湖、菜子湖和嬉子湖斑块数量分布格局均呈现从核心水域向湿地边缘增大趋势，且湿地湖滨带部分呈现高值区。高值区分布在白兔湖北部、菜子湖东南部和嬉子湖西部和南部，低值区分布在湖泊中部。研究期间，斑块数量在38~57和58~79区间范围面积增大。

3.4 人为干扰强度时空分异

从时间上看(表3)，研究期间菜子湖群湿地整体干扰等级由低干扰和较低干扰向高干扰和较高干扰转移，中等和较高干扰网格数明显增加。1999年研究区以低干扰为主，占网格总数的53.09%。1999—2017年低干扰和较低干扰网格数占比分别减少了32.41%和14.20%；中等干扰网格数占比较1999年增加了23.15%；高干扰网格数占比由0增加到8.33%。1999年、2004年、2011年、2017年平均人为干扰强度分别为0.19、0.24、0.27、0.29，干扰强度总体呈上升的趋势。

从空间分布上看(图7)，1999—2017年湿地人为干扰强度从外部向内部逐渐减弱，干扰范围从外围向中间逐渐扩散。菜子湖较低人为干扰区域分布在湖中心、常年水位较深的区域，中等和较高干扰区域分布在菜子湖东南角。嬉子湖高人为干扰区域分布在湖区的西部和南部。白兔湖中等、较高和高干扰网格数增加最为明显，少量较低干扰网格集中分

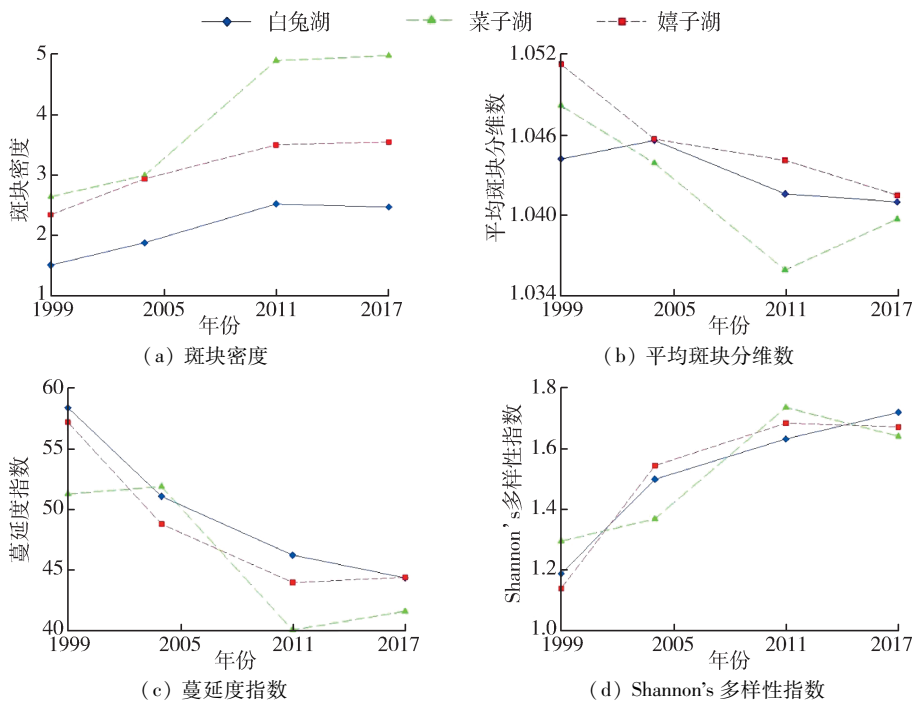


图5 1999—2017年菜子湖群湿地景观指数变化趋势

Fig. 5 Variations of landscape indexes in wetland of Caizi Lake group from 1999 to 2017

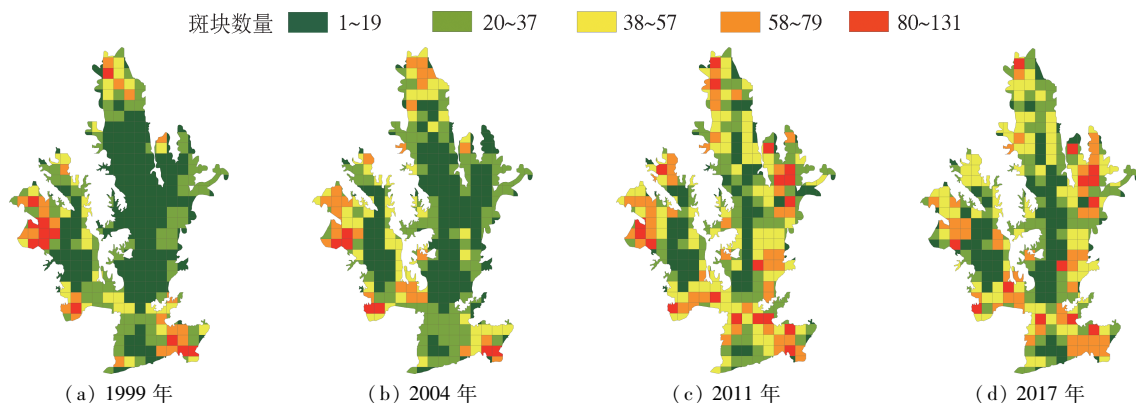


图6 1999—2017年菜子湖群湿地斑块数量空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of number of patches in wetland of Caizi Lake group from 1999 to 2017

表3 各干扰等级网格数占网格总数的比例

Table 3 Proportion of grid numbers of different levels of human interferences to total grid number

干扰等级	干扰强度	各干扰等级网格数占比/%			
		1999年	2004年	2011年	2017年
低	0.10~0.19	53.09	30.25	28.40	20.68
较低	0.20~0.27	39.81	42.59	26.85	25.62
中等	0.28~0.36	6.79	22.84	29.63	29.94
较高	0.37~0.47	0.31	4.01	9.88	15.43
高	0.48~0.65	0	0.31	5.25	8.33

布在白兔湖北部,该区域有一片受人为干扰小的完整沼泽草滩。

3.5 湿地景观格局变化驱动力分析

3.5.1 人为活动对斑块数量影响力分析

由表4可见,2004—2011年农田及与围坝对斑块数量影响力均显著上升, q 值分别增大10.11%和

9.41%,表明农田及围坝对研究区景观格局时空分异的作用逐渐增大,养殖塘对斑块数量的影响力略有下降,但仍处于较高水平。2011年围坝的 q 值最大,表明该因素相对其他因素对研究区斑块数量时空分异的影响力更大,影响在该时期最为显著。2011—2017年农田的 q 值继续呈现上升趋势,并在2017年达到最大,表明农田对研究区景观格局时空分异的作用越来越突出。

交互作用探测结果(表5)显示,任何两种人为活动因子对斑块数量空间分异的交互作用都大于单个驱动因子的作用。围坝与农田的交互作用影响最强,与围网的交互作用次之,且围坝与农田发生交互作用时对景观破碎化空间分异的影响增加显著,说明人类复杂多样的活动对湿地景观破碎化的空间分异起到重要作用。

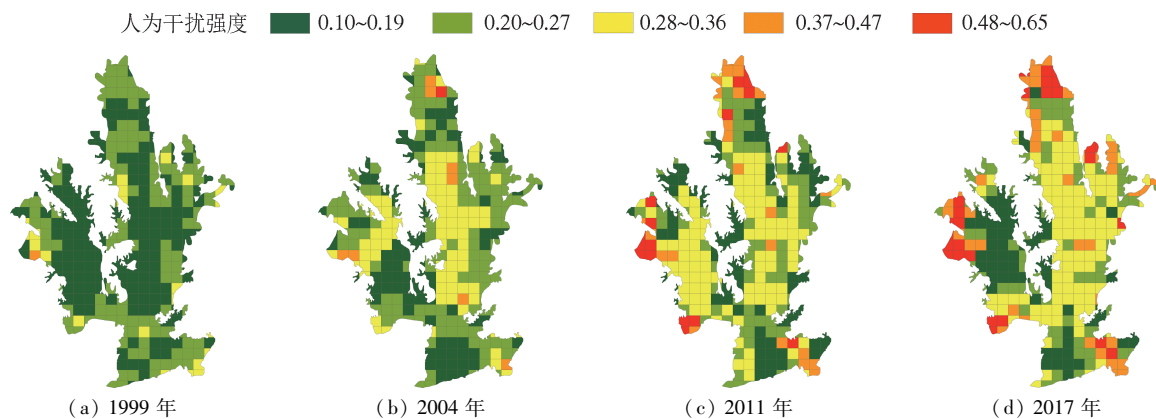


图7 1999—2017年菜子湖群湿地人为干扰强度空间分布

Fig.7 Spatial distributions of intensity of human interferences in wetland of Caizi Lake group from 1999 to 2017

表4 地理探测器因子探测结果

Table 4 Detection results of factors by geodetector

年份	q/%			
	围坝	农田	养殖塘	围网
1999	25.82		21.46	
2004	13.68	5.74	28.36	21.41
2011	23.09	15.85	20.04	22.34
2017	11.09	29.86	12.86	23.68

表5 2017年地理探测器交互作用探测结果

Table 5 Detection results of factor interaction by geodetector in 2017

人为活动因子	q/%			
	围坝	农田	养殖塘	围网
围坝	11.09			
农田	50.15	29.86		
养殖塘	32.39	46.62	12.86	
围网	45.44	44.00	33.65	23.68

3.5.2 景观指数与社会经济因子相关性

对湿地景观指数与社会经济因子相关性分析结果如表6所示。斑块密度和 Shannon's 多样性指数与产业产值、国内生产总值(GDP)、人口数量、水产产量和产值等经济因子呈正相关,说明随着产业经济水平的提高,斑块密度随着人口数量、水产产量和

产值的增加而增加。平均斑块分维数和蔓延度指数与产业产值、GDP 及人口数量等均呈负相关,说明随着工业及旅游业等经济发展,景观的邻近度与连通性逐渐减弱。

3.6 讨论

1999—2017年菜子湖群自然湿地面积持续减少,人工湿地面积增加,湿地景观破碎度增加,人为干扰增强。菜子湖群湿地景观格局改变的主要原因涉及经济、农渔业、人口及管理等多方面,其中经济发展是影响菜子湖群湿地景观变化的主要因素。1999年以前,当地经济发展水平较为落后,农渔业发展处于较低水平,湖泊湿地开发程度低,滩地及草滩景观斑块呈大块片状分布且占比均匀,湖泊景观具有良好的连通性,湿地受人为干扰少,破碎程度较低。2004—2011年围网养殖业兴起并迅速扩张,破坏了湖泊的天然连通性,导致湿地生境破碎化,湖泊斑块数量增大,湖滨和水面破碎加剧^[33]。产业结构不合理、经济增长过度依赖农渔业,倒逼渔业过度开发^[11,34]。同时,人口增加导致粮食需求持续扩大,造成研究期间农田面积持续上涨^[34]。为了满足新增农田灌溉需求开设沟渠,导致滩地及草滩进一步

表6 景观指数与社会经济因子的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between wetland landscape indexes and socioeconomic factors

项目	斑块密度		平均斑块分维数		蔓延度指数		Shannon's 多样性指数	
	相关性系数	显著性水平	相关性系数	显著性水平	相关性系数	显著性水平	相关性系数	显著性水平
第一产业产值	0.748 **	0.001	-0.525 *	0.037	-0.724 **	0.002	0.608 *	0.013
第二产业产值	0.879 **	0	-0.392	0.133	-0.648 **	0.007	0.482	0.059
第三产业产值	0.797 **	0	-0.302	0.256	-0.526 *	0.036	0.372	0.156
国内生产总值	0.863 **	0	-0.376	0.151	-0.621 *	0.010	0.459	0.074
农业人口	0.526 *	0.036	-0.884 **	0	-0.847 **	0	0.901 **	0
非农人口	0.900 **	0	-0.705 **	0.002	-0.828 **	0	0.749 **	0.001
水产产值	0.701 **	0.003	-0.510 *	0.044	-0.699 **	0.003	0.588 *	0.017
水产产量	0.641 **	0.007	-0.786 **	0	-0.846 **	0	0.830 **	0
耕地面积	0.638 **	0.008	-0.762 **	0.001	-0.822 **	0	0.802 **	0

注: *、** 分别表示通过了 0.05 和 0.01 的显著水平检验。

破碎化^[5]。另一方面,围坝、建闸为湿地的开垦创造了条件,菜子湖群现有5000亩(1亩=0.0667hm²)以上圩田近10个,如练潭圩、大幸福圩等^[35],是安庆市重要的粮食基地。研究区圩田筑坝、多次加高加固,改变了湿地水文条件和湿地景观组成。嬉子湖南端建有堤坝,导致其枯水季湖泊蓄水无法排出,涨落区水位无法回落,维持1m水深^[36],滩地及草滩无法季节性裸露,致使其水面景观占比远远高于菜子湖与白兔湖,自然湿地景观占比减少,均匀度降低。人为活动面积和强度是影响湿地景观破碎化的关键因素^[12],湿地外围人口分布集中区域,如白兔湖北部双兴村、先让村,菜子湖石会村、公元村、新桥村,以及嬉子湖许咀村、练潭村等地,滩地、湖汊围坝和圩田现象尤为突出,景观破碎程度和人为干扰强度均处于较高水平^[31]。跨行政区管理是菜子湖群湿地景观破碎化的重要原因,菜子湖群分跨3个不同的行政管理区域,其管理权责不明,开发模式混乱,2004年以来分割承包经营对湿地破碎程度造成严重影响^[22]。除了人为因素的影响,降雨及径流等水文因素对湿地景观产生一定影响^[2],数据显示,近20年来,长江中下游流域降水量增加,年均温度下降,导致湿地湖泊水域面积增加^[12]。

建议嬉子湖区在黄盆村、玉咀村一带实行滩地及草滩重建工程,提高嬉子湖整体生境质量,优化湿地景观的配比,恢复其景观连通性。拆除嬉子湖与菜子湖交界处围坝,恢复嬉子湖与菜子湖枯水季水文连通性,重建鱼类洄游通道。改善湖泊水文条件,恢复白兔湖先让村等地被围垦湖汊、滩地和浅水区,同时种植芦苇和菰等挺水植被。对于中等强度人为干扰的核心水域,通过拆除围网,减少或禁止蟹苗投放及草食性鱼类养殖,有效缓解湖泊水面破碎化问题。对全湖水域开展苦草、马来眼子菜等沉水植被恢复工程,为游禽提供丰富的食物资源,缓解湖泊水体富营养化问题。5000亩以下分布在涨落区的农田,建议退耕还湿;5000亩以上大型圩田保留其基本农田,合理降低农田景观占比。对于景观连通性较好、人为干扰强度低的区域,如白兔湖北部及中部,加强管理巡护,禁止放牧、捕鱼和养殖等行为,避免人为干扰。

4 结 语

近20年来,菜子湖群湿地景观类型发生了较大变化。滩地及沼泽草滩等自然湿地萎缩,养殖塘和农田等人工湿地面积扩张,而非湿地景观整体变化不大。湿地景观异质性增加,连通性下降,破碎度上升,人为活动面积及干扰强度均增大。人为干扰、农

渔业扩张及跨区域管理等是导致菜子湖群湿地景观破碎化的主要原因。为了确保湿地生态的可持续发展,应开展景观重建,植被恢复工程;通过拆除围坝、围网等手段改善湿地水文状况;建立跨县区湖泊管理机制,统一规划;调整产业结构,发展替代产业,缓解经济发展和人口增长对湿地的压力。

参考文献:

- [1] 徐延达,傅伯杰,吕一河. 基于模型的景观格局与生态过程研究[J]. 生态学报,2010,30(1):212-220. (XU Yanda, FU Bojie, LYU Yihe. Research on landscape pattern and ecological processes based on landscape models[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(1):212-220. (in Chinese))
- [2] 张莹莹,蔡晓斌,杨超,等. 1974—2017年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析[J]. 湖泊科学,2019,31(1):171-182. (ZHANG Yingying, CAI Xiaobin, YANG Chao, et al. Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu Wetland Nature Reserve in recent 40 years[J]. Journal of Lake Sciences,2019,31(1):171-182. (in Chinese))
- [3] 郑宇,程香菊,王兆礼,等. 韩江流域面源污染及与景观格局的关系[J]. 水资源保护,2019,35(5):78-85. (ZHENG Yu, CHENG Xiangju, WANG Zhaoli, et al. Non-point source pollution in Hanjiang River Basin and its relation with landscape pattern[J]. Water Resources Protection,2019,35(5):78-85. (in Chinese))
- [4] 王朗,徐延达,傅伯杰,等. 半干旱区景观格局与生态水文过程研究进展[J]. 地球科学进展,2009,24(11):1238-1246. (WANG Lang, XU Yanda, FU Bojie, et al. Landscape pattern and eco-hydrological process[J]. Advances in Earth Science,2009,24(11):1238-1246. (in Chinese))
- [5] KE Changqing, ZHANG Dong, WANG Fuqiang, et al. Analyzing coastal wetland change in the Yancheng National Nature Reserve, China [J]. Regional Environmental Change,2011,11(1):161-173.
- [6] ADADE R, NYARKO B K, Aheto D W, et al. Fragmentation of wetlands in the south eastern coastal savanna of Ghana [J]. Regional Studies in Marine Science,2017,12:40-48.
- [7] 赵衡,闫旭,王富强,等. 基于PSR模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价[J]. 水资源保护,2020,36(4):21-25. (ZHAO Heng, YAN Xu, WANG Fuqiang, et al. Assessment on ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland based on PSR model [J]. Water Resources Protection,2020,36(4):21-25. (in Chinese))
- [8] 卢明星,徐传红,朱咏莉,等. Cd诱导土壤ALP的Hormesis效应:土地利用变化的驱动机制[J]. 南京林

- 业大学学报(自然科学版),2020,44(2):173-180. (LU Mingxing, XU Chuanhong, ZHU Yongli, et al. Hormetic effect of Cd on soil alkaline phosphatase: driving mechanism of land use change [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44 (2):173-180. (in Chinese))
- [9] 孔令桥,张路,郑华,等.长江流域生态系统格局演变及驱动力[J].生态学报,2018,38(3):741-749. (KONG Lingqiao, ZHANG Lu, ZHENG Hua, et al. Driving forces behind ecosystem spatial changes in the Yangtze River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3):741-749. (in Chinese))
- [10] 张敏,宫兆宁,赵文吉,等.近30年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J].生态学报,2016,36(15):4780-4791. (ZHANG Min, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al. Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (15): 4780-4791. (in Chinese))
- [11] 高杰,高敏,赵志红,等.1987—2015年七里海潟湖湿地景观格局变化及驱动力分析[J].水生生态学杂志,2018,39(4):8-16. (GAO Jie, GAO Min, ZHAO Zhihong, et al. Wetland landscape pattern changes and driving forces in Qilihai Lagoon, 1987—2015 [J]. Journal of Hydroecology, 2018, 39(4):8-16. (in Chinese))
- [12] 贾艳艳,唐晓岚,唐芳林,等.长江中下游流域人类活动强度及其对湿地景观格局影响研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(4):950-963. (JIA Yanyan, TANG Xiaolan, TANG Fanglin, et al. Research on human activity intensity and its impact on wetland landscape pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(4):950-963. (in Chinese))
- [13] 洪佳,卢晓宁,王玲玲.1973—2013年黄河三角洲湿地景观演变驱动力[J].生态学报,2016,36(4):924-935. (HONG Jia, LU Xiaoning, WANG Lingling. Quantitative analysis of the factors driving evolution in the Yellow River Delta Wetland in the past 40 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4):924-935. (in Chinese))
- [14] 玉苏普江·艾麦提,阿里木江·卡斯木,阿布都沙拉木·热合曼.基于RS和GIS的艾比湖湿地信息提取及面积动态分析[J].水资源保护,2014,30(2):57-61. (AMAT Yusupjan, KASIMU Alimujiang, RAHMAN Abdusalam. Information extraction and dynamic area change in Ebinur Lake Wetland based on RS and GIS [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2):57-61. (in Chinese))
- [15] 王泉泉,王行,张卫国,等.滇西北高原湿地景观变化与人为、自然因子的相关性[J].生态学报,2019,39(2):726-738. (WANG Quanquan, WANG Hang, ZHANG Weiguo, et al. The correlations between wetland landscape and social-natural factors on Northwestern Yunnan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2):726-738. (in Chinese))
- [16] 李洪,宫兆宁,赵文吉,等.基于Logistic回归模型的北京市水库湿地演变驱动力分析[J].地理学报,2012,67(3):357-367. (LI Hong, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al. Driving forces analysis of reservoir wetland evolution in Beijing based on logistic regression model [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (3): 357-367. (in Chinese))
- [17] 张金茜,巩杰,柳冬青.地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J].地理科学,2018,38(8):1370-1378. (ZHANG Jinxi, GONG Jie, LIU Dongqing. Dynamics and driving factors of landscape fragmentation based on Geo Detector in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(8):1370-1378. (in Chinese))
- [18] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134. (WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116-134. (in Chinese))
- [19] CUI Lulu, LIANG Jianhong, FU Hongbo, et al. The contributions of socioeconomic and natural factors to the acid deposition over China[J]. Chemosphere, 2020, 253.
- [20] ZHOU Chunshan, CHEN Jing, WANG Shaojian. Examining the effects of socioeconomic development on fine particulate matter (PM_{2.5}) in China's cities using spatial regression and the geographical detector technique [J]. Science of the Total Environment, 2018, 619-620: 436-445.
- [21] 徐小雨,周立志,朱文中,等.安徽菜子湖大型底栖动物的群落结构特征[J].生态学报,2011,31(4):943-953. (XU Xiaoyu, ZHOU Lizhi, ZHU Wenzhong, et al. Community structure of macrozoobenthos in Caizi Lake, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(4):943-953. (in Chinese))
- [22] 高攀,周忠泽,马淑勇,等.浅水湖泊植被分布格局及草-藻型生植物群落演替特征:安徽菜子湖案例[J].湖泊科学,2011,23(1):13-20. (GAO Pan, ZHOU Zhongze, MA Shuyong, et al. Vegetation distribution pattern and community succession in the transition from macro-phyte to phytoplankton-dominated state in shallow lakes: a case study of Lake Caizi in Anhui Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23 (1): 13-20. (in Chinese))
- [23] 王朝,周立志,戴秉国,等.水位洪枯变化对菜子湖江湖

- 过渡带鱼类物种和功能多样性的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1403-1414. (WANG Chao, ZHOU Lizhi, DAI Bingguo, et al. The impacts of water level fluctuations between wet and dry seasons on taxonomic and functional diversity of fish communities in the ecotone floodplain of Lake Caizi[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(5): 1403-1414. (in Chinese))
- [24] 成波, 江波, 李红清. 菜子湖湿地生态数据库管理系统的设计与实现[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 46-52. (CHENG Bo, JIANG Bo, LI Hongqing. Design and realization of Caizi Lake wetland ecological database management system[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 46-52. (in Chinese)).
- [25] JIANG Zhongguan, XU Nan, LIU Bingxiang, et al. Metal concentrations and risk assessment in water, sediment and economic fish species with various habitat preferences and trophic guilds from Lake Caizi, Southeast China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 157: 1-8.
- [26] 周盛, 杨森, 鲍明霞, 等. 基于遥感反演预测引江济淮工程对菜子湖越冬水鸟栖息地的影响[J]. 生态科学, 2019, 38(1): 71-78. (ZHOU Sheng, YANG Sen, BAO Mingxia, et al. Predicting the impact of the water transfer project from Yangtze River to Huai River on habitats of wintering waterbirds in Caizi Lake using remote sensed images[J]. Ecological Science, 2019, 38(1): 71-78. (in Chinese))
- [27] 朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 1975—2018 年白洋淀湿地变化分析[J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 971-986. (ZHU Jinfeng, ZHOU Yi, WANG Shixin, et al. Analysis of changes of Baiyangdian wetland from 1975 to 2018 based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(5): 971-986. (in Chinese))
- [28] 宫兆宁, 张翼然, 宫辉力, 等. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 77-88. (GONG Zhaoning, ZHANG Yiran, GONG Huili, et al. Evolution of wetland landscape pattern and its driving factors in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 77-88. (in Chinese))
- [29] 潘竟虎, 苏有才, 黄永生, 等. 近 30 年玉门市土地利用与景观格局变化及其驱动力[J]. 地理研究, 2012, 31(9): 1631-1639. (PAN Jinghu, SU Youcai, HUANG Yongsheng, et al. Land use and landscape pattern change and its driving forces in Yumen City[J]. Geographical Research, 2012, 31(9): 1631-1639. (in Chinese))
- [30] 吕金霞, 蒋卫国, 王文杰, 等. 基于移动窗口法雄安新区湿地景观演变及其与人为干扰间的关系[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(2): 140-148. (LU Jinxia, JIANG Weiguo, WANG Wenjie, et al. Wetland landscape evolution and its relation to human disturbance in Xiong'an New Area based on the moving window method[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(2): 140-148. (in Chinese))
- [31] 刘吉平, 董春月, 盛连喜, 等. 1955—2010 年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 879-887. (LIU Jiping, DONG Chunyue, SHENG Lianxi, et al. Landscape pattern change of marsh and its response to human disturbance in the Small Sanjiang Plain, 1955-2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 879-887. (in Chinese))
- [32] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 等. 2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力分析: 以宜宾市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5029-5043. (TAO Shuai, KUANG Tingting, PENG Wenfu, et al. Analyzing the spatio-temporal variation and driving factors of NDVI in upper reaches of Yangtze River from 2000 to 2015: a case study of Yibin City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5029-5043. (in Chinese))
- [33] JIANG Zhongguan, WANG Chao, ZHOU Lizhi, et al. Impacts of pen culture on alpha and beta diversity of fish communities in a large floodplain lake along the Yangtze River[J]. Fisheries Research, 2019, 210: 41-49.
- [34] 梁佳欣, 李新举. 南四湖湿地景观格局脆弱度的时空分异特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 626-634. (LIANG Jiaxin, LI Xinju. Characteristics of temporal-spatial differentiation in landscape pattern vulnerability in Nansihu Lake wetland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 626-634. (in Chinese))
- [35] 张理华. 安徽资源环境[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2010: 4-10.
- [36] 金宝石, 闫鸿远, 张晓可. 浅水型湖泊湿地景观季节变化分析[J]. 遥感信息, 2017, 32(5): 111-116. (JIN Baoshi, YAN Hongyuan, ZHANG Xiaoke. Seasonal changes of wetland landscape in shallow lake[J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(5): 111-116. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-09-22 编辑: 施 业)

