



水资源保护  
*Water Resources Protection*  
ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV

## 《水资源保护》网络首发论文

题目： 基于地理探测器的菜子湖群湿地景观格局变化及驱动分析  
作者： 彭娜，周立志  
网络首发日期： 2021-01-15  
引用格式： 彭娜，周立志. 基于地理探测器的菜子湖群湿地景观格局变化及驱动分析. 水资源保护. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210115.0937.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于地理探测器的菜子湖群湿地景观格局变化及驱动分析

彭娜<sup>1,2</sup>, 周立志<sup>1,2</sup>

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 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), 合肥 230601)

**摘要：**以安徽菜子湖群湿地为研究对象，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**地理探测器和相关分析相结合的方法，从人为活动和社会经济角度分析景观格局变化原因**。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、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 km<sup>2</sup> 和 20.71 km<sup>2</sup>，非湿地面积略有增加。湿地景观破碎化，斑块间连通性下降，斑块形状趋于简单化，景观异质性增加。菜子湖群湿地 1999—2017 年间人为干扰强度增加，且较高、高干扰等级占比增大。农田、养殖、围网及围坝等活动对斑块数量分布的影响力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有显著增强。景观格局指数与三大产业产值、GDP、人口、渔业生产、耕地面积等社会经济因素有显著相关性。

**关键词：**菜子湖群湿地；景观格局；人为干扰；**地理探测器**；驱动力

中图分类号：X32

**Dynamics and driving factors of landscape pattern based on GeoDetector in Caizi Lakes wetland of Anhui Province//**PENG Na<sup>1,2</sup>, ZHOU Lizhi<sup>1,2</sup>(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:** The 1999, 2004, 2011 and 2017 Landsat ETM/ETM+/OLI remote sensing images were used as the main data sources, this study reveals the temporal and spatial landscape evolution characteristics of Caizi lakes wetland from 1999 to 2017 and their relationships with human activities and socio-economic factors by means of landscape pattern index, GeoDetector and

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，男，博士，教授，主要从事水鸟与湿地生态学研究。E-mail: zhoulz@ahu.edu.cn

correlation analysis. The results showed as followed. The artificial wetland gradually increased while the natural wetlands gradually degraded. The mudflats and the herbaceous marshes presented a tendency of decrease, proportion reducing by 12.23% and 13.84% respectively. The area of paddyfield and aquaculture ponds increased by 12.12 km<sup>2</sup> and 20.71 km<sup>2</sup> respectively, and the non-wetland area increased slightly. With the increase of land use intensity, the landscape was more fragmented, the degree of connectivity between patches was weakly, the landscape aggregation degree of the area was decreasing, the shape of wetland patches changed from the complex to simple ones, and the landscape heterogeneity was increasing. In general, the wetland in Caizi Lakes was affected obviously by human interference. The high and higher distribution area of landscape pattern dramatically expanded with time. Between the years 1999 and 2017, human activities had a different impact on number of patches from different over the years and the combination of them had a more significant impact on number of patches. During the study period, the explanatory power of farmland increased constantly. The landscape change of Caizi Lakes wetland was influenced by output value of three industries, GDP, population and fisheries/agricultural development.

**Keywords:** Caizi Lakes; wetland landscape; human disturbance; GeoDetector; driving forces

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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2-3]</sup>。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<sup>[4-6]</sup>。

湿地作为重要的自然景观,是指以湿地斑块、廊道以及相关的其它类型空间单元聚合而成的异质性地理区域<sup>[7]</sup>,是山水林田湖草生命共同体的主要组成部分,因此湿地景观格局变化及其驱动力成为研究的热点<sup>[3, 8]</sup>。国内外多借助景观格局指数<sup>[9-11]</sup>、转移矩阵<sup>[12-13]</sup>等进行湿地演变的特征分析,对于景观驱动分析主要关注人为和自然两方面<sup>[14]</sup>。在大时空尺度研究中,气候、地形、水文等自然因素的影响较突出,时间跨度小的研究中,经济、生产方式和文化政策等人为因素对湿地影响更显著<sup>[9-10]</sup>。定性和定量分析是湿地景观常用的研究方法。定性分析仅能显示破碎化与因子的变化趋势,无法量化表达驱动因子作用强弱<sup>[2,15-16]</sup>;定量分析法包括相关性分析<sup>[10]</sup>、主成分分析<sup>[11]</sup>以及回归模型<sup>[16]</sup>等,能量化因子对于湿地景观的作用强度大小,但主观性较强,且空间分析能力较弱,无法评估因子间的交互作用影响

的大小<sup>[13,17]</sup>。地理探测器作为一种新兴计量模型,其因子既可以是定性数据也可以是数值型数据,能准确解释因子空间异质性和景观分异性的贡献,作为判断驱动因子影响力的依据<sup>[17-18]</sup>,因其空间分析能力强,广泛应用于土地利用、区域经济、公共卫生、环境污染等领域<sup>[19-20]</sup>。

长江中下游洪泛平原湖泊众多,湿地资源丰富。该区域人口稠密,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代表性区域<sup>[12]</sup>。菜子湖群湿地作为长江中下游极具代表性的浅水通江湖泊,也是东亚-澳大利亚迁徙水鸟的重要停歇地和越冬地。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、斑块化,空间异质性增加等特点,影响湖泊生态功能。现有菜子湖群研究集中生物多样性及其结构特征分析<sup>[21-23]</sup>,湿地景观变化及其驱动力的定量化研究亟待加强。

本文利用菜子湖群 1999、2004、2011 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分析法分析湿地景观变化的原因,为进一步加强湿地资源保护管理,制订和实施湿地生态恢复措施提供科学依据。

## 1 研究区域概况

菜子湖群地处安徽省宜秀区、桐城市和枞阳县的 3 县(区)交界处,地理坐标为 117°01'~117°09' E, 30°43'~30°58' N,由菜子湖、嬉子湖和白兔湖 3 部分构成,统称菜子湖<sup>[24-25]</sup>(图 1),湿地总面积达 248.73 km<sup>2</sup>。湿地周边主要以农业种植、渔业养殖为主,工业企业少,第一产业发展是主要经济收入来源。湖区属北亚热带季风气候,年平均气温 16.6℃,降水集中于 7—8 月份,且季节分配不均年际变化明显,最高水位可达 15.06 m,最低水位 6.46 m,湿地景观受水位季节性变化影响较大<sup>[26]</sup>。湖水依赖地表径流和自然降水补给,西纳龙眼河、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。

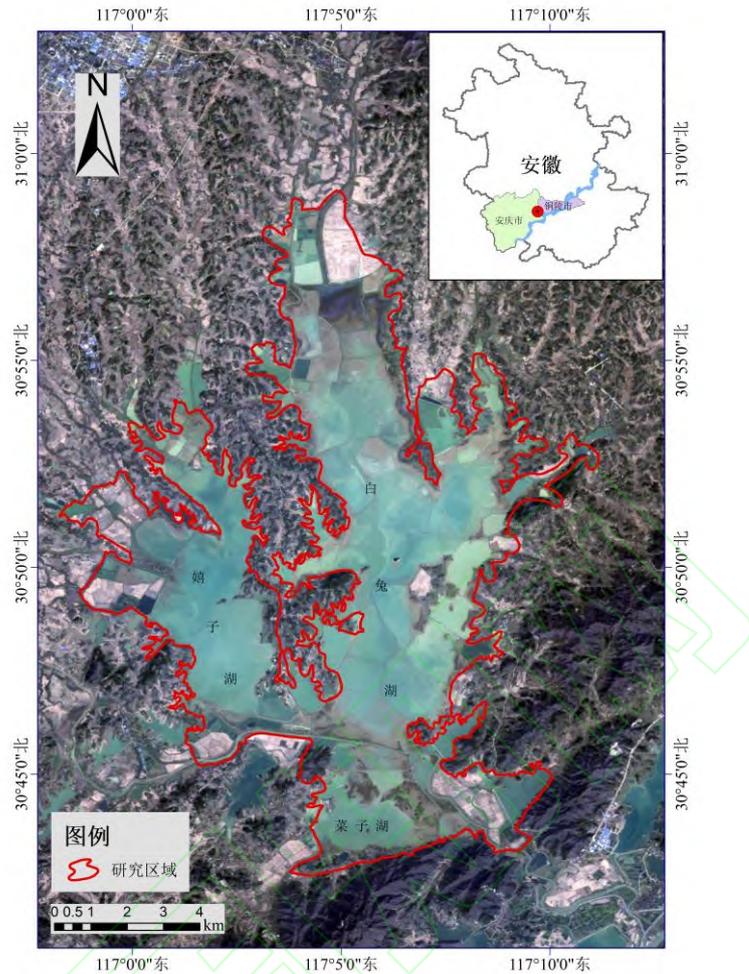


图 1 菜子湖群湿地位置

Figure 1 Location of Caizi Lakes wetland

### 1.1 数据来源与处理

遥感影像来自于地理空间数据云，及美国 <https://earthexplorer.usgs.gov/>网站。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 对四期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（NDWI, Normalized Difference Water Index）对丰水期湿地边界进行提取。采用支持向量机方法获取景观分类信息，对明显错分的景观进行手动更改。通过混淆矩阵验证精度为 90%以上，Kappa 指数在 0.80 以上，达到研究要求。

此外，借助 Google Earth 软件结合实地调查对研究区内四个研究年份的围网及围坝等人为活动分布进行提取。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、人口等数据来自于安徽省统计年鉴及枞阳县、宜秀区和桐城市统计公报。

## 1.2 湿地景观分类

参照国家土地利用分类标准（2017 年）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 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、养殖塘和农田）和非湿地。

## 1.3 景观格局指数选取

从 4 个方面选取景观尺度水平景观指数：（1）破碎度指标：斑块数量（NP）、斑块密度（PD）；（2）形状指标：平均斑块分维数（FRAC-MN）<sup>[10,27]</sup>；（3）聚集度指标：蔓延度指数（CONTAG）<sup>[28-29]</sup>；（4）多样性指标：Shannon's 多样性指数（SHDI）<sup>[10-11]</sup>。各种景观指数生态意义参见表 1。

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 1km×1km 网格景观指数，运用网格分析研究区内景观指数差异。

表 1 各个景观格局指数生态含义

Table 1 Ecological meanings of each landscape pattern index

景观格局指数	生态含义
斑块数量 (NP)	描述整个景观的景观破碎程度，NP 值越大，景观破碎程度越高。(N <sub>p</sub> >0)
斑块密度 (PD)	斑块密度用来表征景观格局的破碎程度，斑块密度越大，则斑块越小，破碎化程度越高。(P <sub>D</sub> >0)
平均斑块分维数 (FRAC-MN)	FRAC-MN 是斑块形状复杂程度的定量表达。数值越接近 1，斑块形状就越简单、越规则，受人为干扰越大。(1 ≤ F <sub>RAC-MN</sub> ≤ 2)。
蔓延度指数 (CONTAG)	景观聚集程度的表达值。较小时，说明景观中存在许多小斑块，此时，景观是由多类型斑块构成，并密集分布，景观破碎程度较高；值最大可趋于 100，此时某种优势斑块类型形成了良好的连接性，有连通度极高的优势景观存在。(0 < C <sub>ONTAG</sub> ≤ 100)
Shannon's 多样性指数 (SHDI)	反应景观异质性，对景观中各斑块类型非均衡化分布状况敏感，当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就越大，SHDI 值就越大。

### 1.3.1 人为干扰

综合前人的研究成果<sup>[30-31]</sup>，对研究区的景观和干扰类型进行人为干扰指数赋值。根据不同景观或人为干扰类型的面积和干扰度指数，计算单元网格人为干扰强度。人为干扰度计算公式如下：

$$H_i = \sum_i^m [(\frac{S_i}{S}) \times P_i] \quad (1)$$

式中：H<sub>i</sub>为单个网格人为干扰度，m 为单元网格内斑块个数，S<sub>i</sub>为单元网格第 i 类景观或干扰类型面积，S 为网格单元的总面积，P<sub>i</sub>为第 i 类景观或干扰类型的人为干扰度指数，取值范围在 0~1 之间 (P<sub>湖泊</sub>= 0.1, P<sub>河渠</sub>= 0.35, P<sub>养殖塘</sub>= 0.6, P<sub>滩地</sub>= 0.5, P<sub>沼泽草滩</sub>= 0.16, P<sub>农田</sub>= 0.65, P<sub>非湿地</sub>= 0.80, P<sub>围网</sub>= 0.25, P<sub>网坝</sub>= 0.48)，值越大代表人为干扰越强。

## 1.4 驱动力分析方法

### 1.4.1 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<sup>[32]</sup>。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  $Y$  的空间分布应该具有相似性<sup>[17-18]</sup>。模型表达式如下：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_i^L N_i \sigma_i^2 \quad (2)$$

式中， $i=1, 2, \dots, L$ ， $i$  为分区， $L$  为分区数目， $N$  为全区单元数， $\sigma_i^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $i$  和全区的方差。影响力  $q$  的值域为 $[0, 1]$ ，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<sup>[32]</sup>。

将围坝、农田、养殖塘和围网空间分布进行网格化统计，之后对数据进行离散化处理<sup>[20]</sup>，利用因子分析和交互探测，得到各人为活动类型对  $N$ 、 $P$  值的影响力  $q$  及其相互作用关系。

### 1.4.2 相关分析

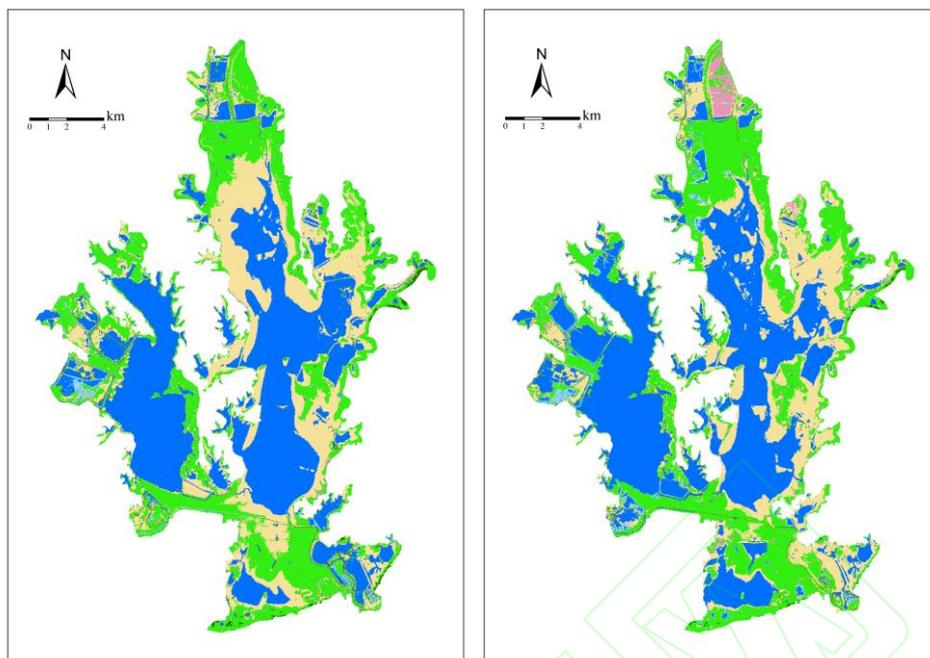
参照相关研究<sup>[33-36]</sup>，选取社会经济、人口和生产等 8 个指标因子（第一产值/亿元，第三产值/亿元，生产总值/亿元，农业人口/万人，非农人口/万人，水产产值/亿元，水产品产量/亿吨，耕地面积/ $\text{km}^2$ ）并对数据进行标准化处理，运用 SPSS 20 对景观格局指数与因子进行 Pearson 双变量相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿地景观面积动态变化

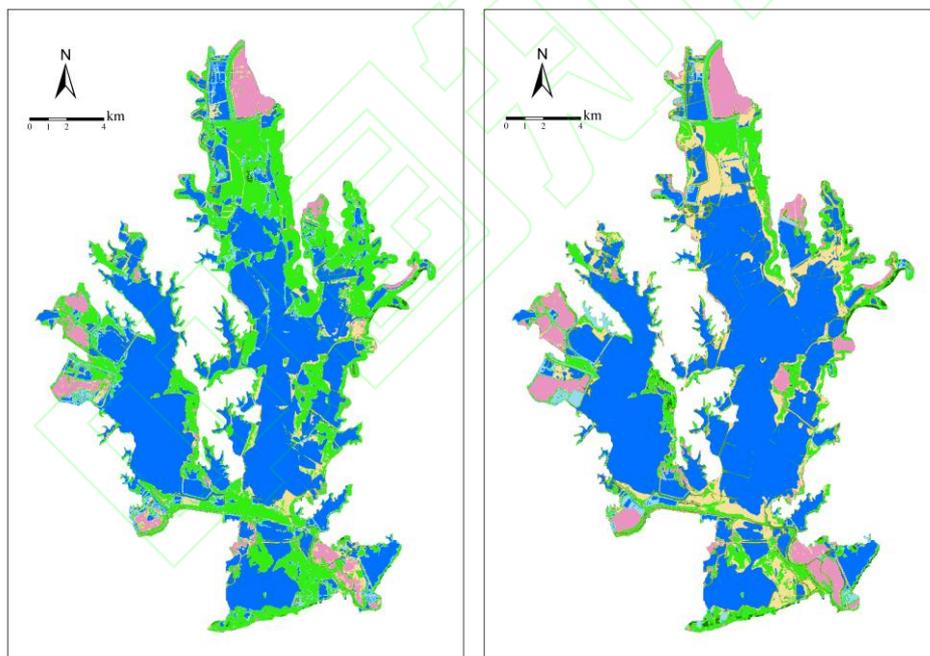
1999—2017 年间，菜子湖群湿地自然湿地面积减少  $36.03 \text{ km}^2$ ，人工湿地显著增加。滩地面积在 2011 年达到最小值，最小面积为  $23.15 \text{ km}^2$ ，相较于 1999 年占比减少 18.22%。沼泽草滩面积 2011—2017 年显著减少，由 2011 年的 30.02% 减少到 15.08%。研究期间的农田及养殖塘面积持续增加，分别增加  $12.12 \text{ km}^2$  和  $20.71 \text{ km}^2$ 。河渠及非湿地面积略有增加，占比在研究期间分别增加了 0.82% 和 0.48%。

分析研究区域各子湖景观结构变化（表 2、表 3 和表 4）。滩地和沼泽草滩丧失率在 3 个湖泊均较高，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，嬉子湖的西部和北部，以及白兔湖的整个湖滨带。河渠、农田及养殖塘面积在 3 个子湖区均呈增加趋势。



(a) 1999 年

(b) 2004 年



(c) 2011 年

(d) 2017 年

景观分类	<span style="color: blue;">■</span> 湖泊	<span style="color: green;">■</span> 河渠	<span style="color: lightblue;">■</span> 养殖塘
	<span style="color: yellow;">■</span> 滩地	<span style="color: brightgreen;">■</span> 草滩	<span style="color: pink;">■</span> 农田
		<span style="color: brown;">■</span> 非湿地	

图 2 1999—2017 年菜子湖群湿地景观类型空间分布

Figure 2 Spatial distribution of landscape types of Caizi Lakes wetland from 1999 to 2017

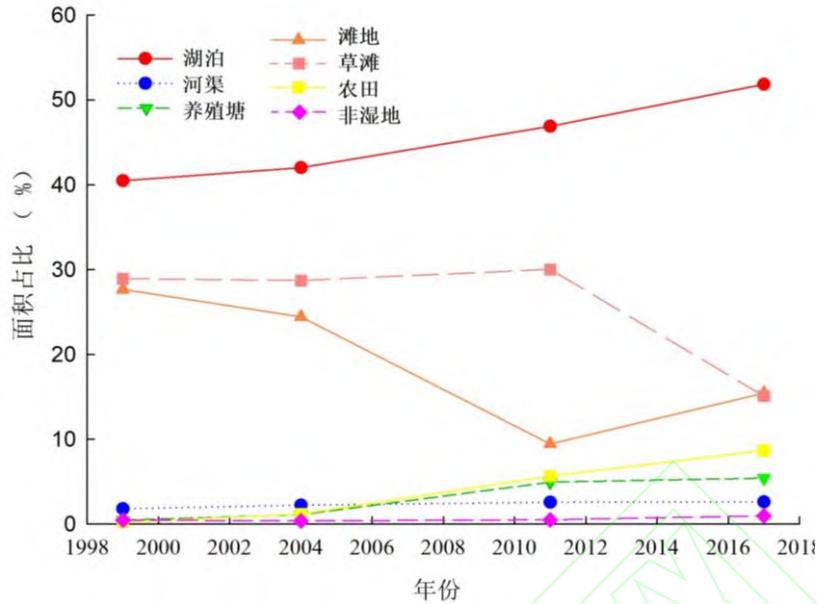


图 3 1999—2017 年菜子湖群湿地不同景观类型的面积占比

Figure 3 Percentage of different landscape types of Caizi Lakes wetland from 1999 to 2017

表 2 1999—2017 年白兔湖不同景观类型面积及百分比

Table 2 Area and percentage of different landscape types in Baitu Lake from 1999 to 2017

景观类 型	1999		2004		2011		2017	
	面积/ km <sup>2</sup>	占比/%						
湖泊	57.04	39.96	54.39	38.10	64.63	45.28	76.13	53.33
河渠	2.02	1.42	2.22	1.55	2.40	1.68	2.52	1.77
养殖塘	0.11	0.08	0.24	0.17	5.84	4.09	7.65	5.36
滩地	46.00	32.23	41.42	29.02	14.53	10.18	24.30	17.03
沼泽草滩	36.62	25.66	41.73	29.23	48.33	33.86	21.58	15.12
农田	0.34	0.24	2.35	1.65	6.49	4.55	9.55	6.69
非湿地	0.60	0.42	0.39	0.27	0.50	0.35	1.00	0.70

表 3 1999—2017 年菜子湖不同景观类型面积及百分比

Table 3 Area and percentage of different landscape types in Caizi Lake from 1999 to 2017

景观类型	1999		2004		2011		2017	
	面积/ km <sup>2</sup>	占比/%						
湖泊	7.50	21.56	8.26	23.76	13.71	39.42	13.52	38.88
河渠	0.84	2.42	1.10	3.16	1.60	4.60	1.61	4.62
养殖塘	0.68	1.96	0.81	2.33	1.49	4.29	1.00	2.89
滩地	10.21	29.36	9.16	26.34	3.85	11.06	6.64	19.09
沼泽草滩	15.01	43.15	14.81	42.56	11.07	31.84	7.11	20.45
农田	0.09	0.25	0.32	0.92	2.62	7.52	4.08	11.73
非湿地	0.45	1.30	0.32	0.93	0.44	1.26	0.81	2.33

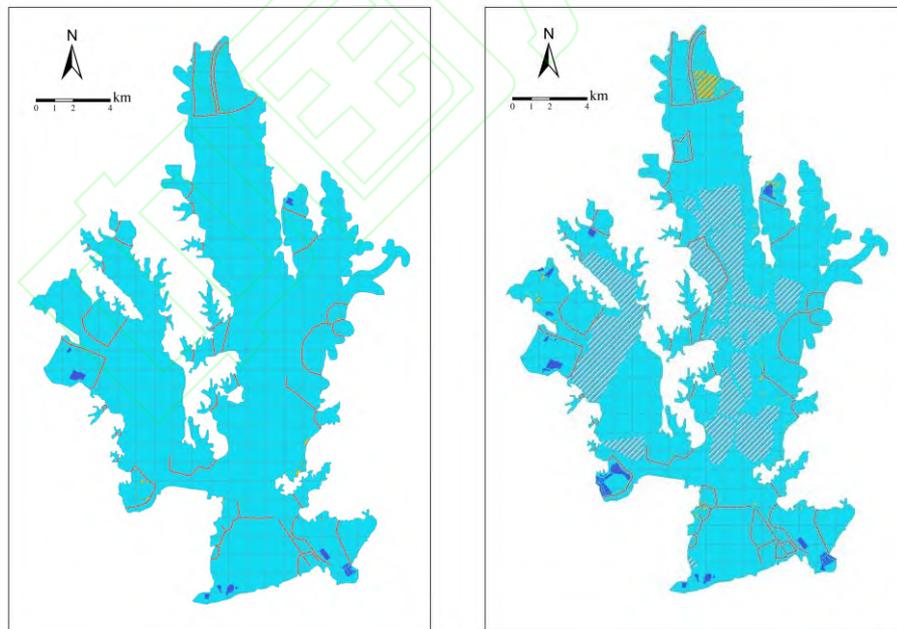
表 4 1999—2017 年嬉子湖不同景观类型面积及百分比

**Table 4 Area and percentage of different landscape types in Xizi Lake from 1999 to 2017**

景观类型	1999		2004		2011		2017	
	面积/ km <sup>2</sup>	占比/%						
湖泊	34.66	51.22	40.33	59.61	36.61	54.10	37.43	55.32
河渠	1.56	2.31	2.12	3.14	2.29	3.39	2.30	3.40
养殖塘	0.35	0.52	1.63	2.40	4.75	7.02	4.60	6.80
滩地	11.61	17.16	9.32	13.77	4.77	7.05	6.89	10.18
沼泽草滩	19.27	28.48	13.85	20.47	14.20	20.98	8.28	12.24
农田	0.13	0.19	0.22	0.32	4.74	7.01	7.65	11.30
非湿地	0.09	0.13	0.19	0.29	0.30	0.44	0.51	0.76

## 2.2 湿地人为活动分布情况

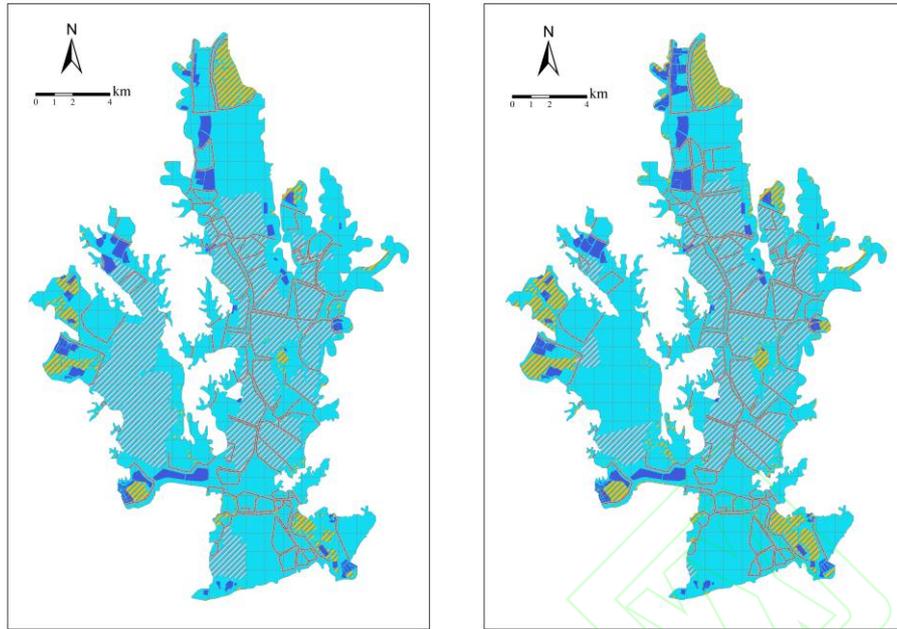
图 4 与表 5 可以看出, 1999 年菜子湖群湿地人类活动类型与分布面积较少, 仅有少量养殖塘、围坝分布于湿地边缘。1999—2004 年白兔湖和嬉子湖围网从无到有急剧增加, 分别增加了 34.47 km<sup>2</sup> 和 16.35 km<sup>2</sup>, 养殖塘和农田也有明显的增多。2004—2011 年间白兔湖湖泊中心出现围坝, 景观斑块化明显, 研究区围网总面积达到最大值。2011—2017 年间嬉子湖和菜子湖围网部分拆除, 白兔湖围网面积仍有少量增加。



(a) 1999 年

(b) 2004 年

人为干扰类型 — 围坝/埂 // 围网 ■ 养殖塘 ■ 农田 ■ 网格



(c) 2011 年

(d) 2017 年

图 4 1999—2017 年菜子湖群湿地人为干扰类型分布

Figure 4 Human disturbance types distribution of Caizi Lakes wetland

表 5 菜子湖群湿地围网及围坝数量

Table 5 Quantities of fence and dike ridge of Caizi Lakes wetland

子湖区	白兔湖		菜子湖		嬉子湖	
	围网/km <sup>2</sup>	围坝/km	围网/km <sup>2</sup>	围坝/km	围网/km <sup>2</sup>	围坝/km
1999	0.00	40.63	0.00	18.20	0.00	21.89
2004	34.47	50.19	0.19	25.12	16.35	21.89
2011	45.59	155.58	3.81	43.59	26.14	24.95
2017	54.79	180.59	0.25	47.72	6.77	26.31

### 2.3 湿地景观指数时空变化

1999—2017 年湿地景观指数时间变化规律图 5 所示。白兔湖、菜子湖和嬉子湖景观均表现破碎化程度加剧，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 PD 指数增大，单位面积湿地景观斑块数量变多，区域景观破碎化；FRAC-MN 指数变小，说明景观形状愈发规则，湿地受人为干扰变大；CONTAG 指数减小，说明景观聚集度下降，景观连通性变差；SHDI 指数增大，说明菜子湖群湿地土地利用变丰富，景观类型均衡化。

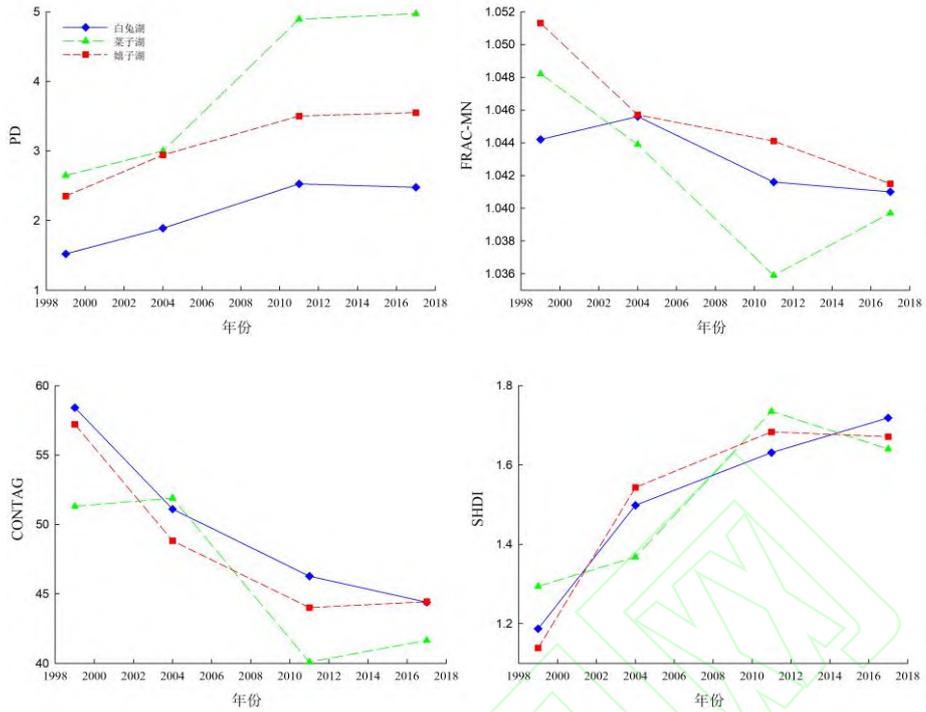


图 5 菜子湖群湿地景观水平景观指数

Figure 5 Landscape-level index of Caizi Lakes wetland

湿地 N、P 空间分布情况如图 6 所示，白兔湖、菜子湖和嬉子湖 N、P 分布格局均呈现从核心水域向边缘增加趋势，且湿地湖滨带大部分呈现高值区。湿地斑块数量指数高值区分布在白兔湖北部，菜子湖东南部和嬉子湖南部，这些区域是养殖塘和农田的主要分布区。1999—2017 年，3 个子湖湿地均在中部存有低值区。2004—2011 年湿地 N、P 值增加明显，斑块数量指数范围（38，57] 区间面积显著扩大，说明期间边缘自然湿地破损严重。

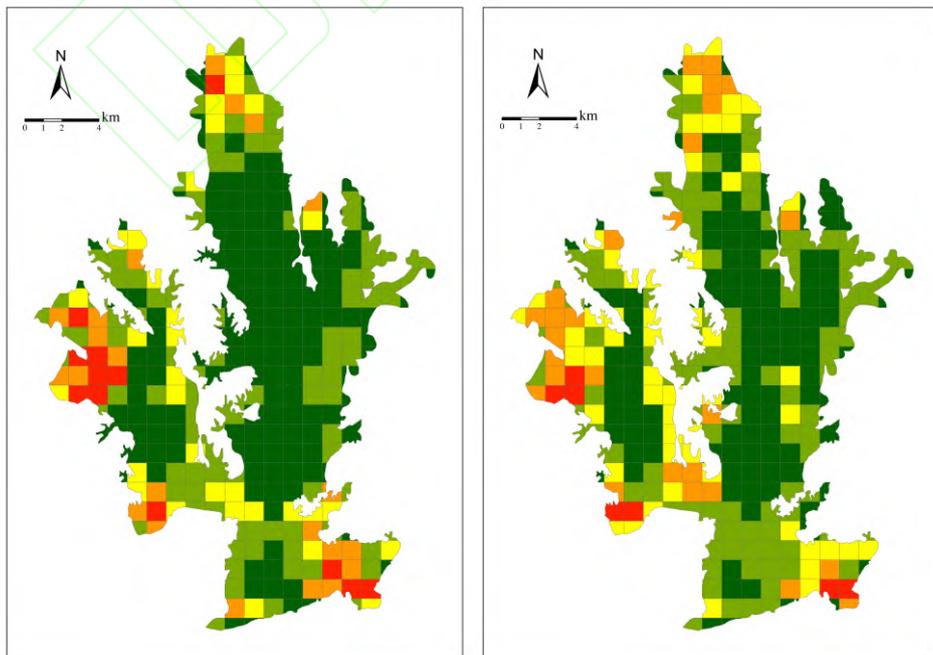
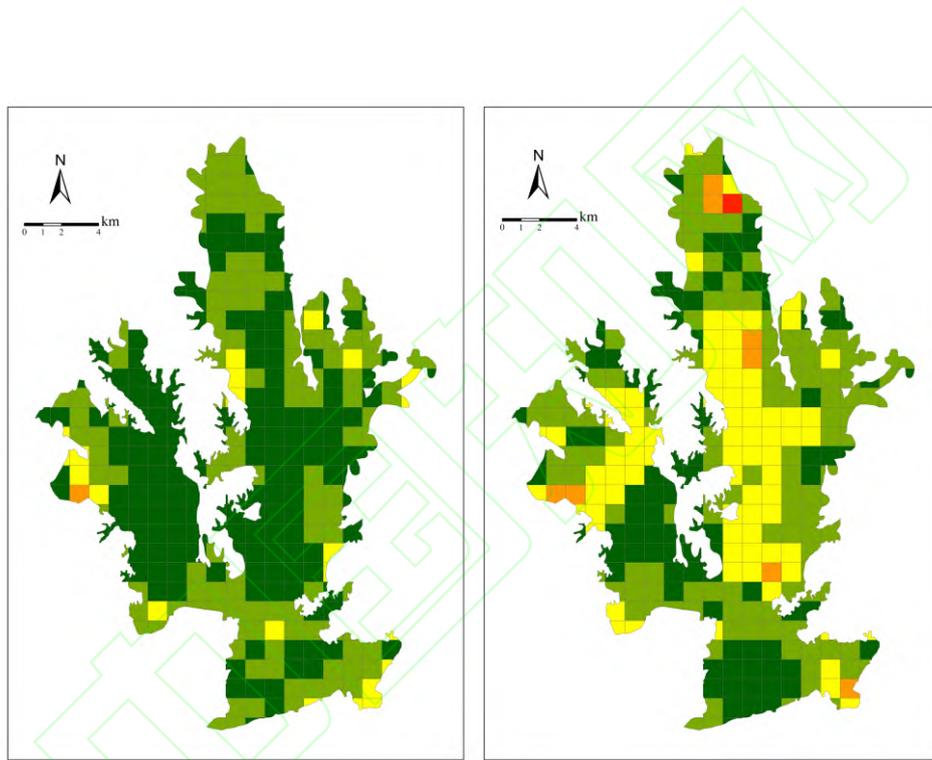




表 6 各干扰等级网格数及所占总网格比例

Table 6 The number and proportion of each hemeroby index level

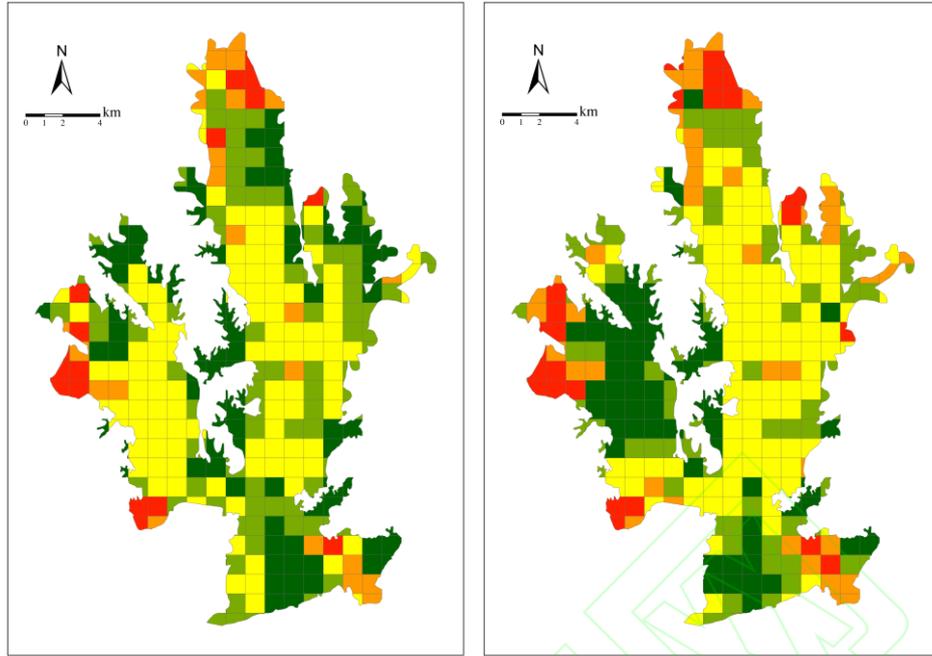
干扰等级	干扰强度	1999 年		2004 年		2011 年		2017 年	
		个数	占比/%	个数	占比/%	个数	占比/%	个数	占比/%
低	[0.10, 0.19]	151	46.60	87	26.85	85	26.23	61	18.83
较低	(0.19, 0.27]	145	44.75	140	43.21	88	27.16	76	23.46
中等	(0.25, 0.36]	25	7.72	87	26.85	106	32.72	110	33.95
较高	(0.32, 0.47]	3	0.93	9	2.78	27	8.33	49	15.12
高	(0.43, 0.65]	0	0.00	1	0.31	18	5.56	28	8.64
单位网格人为干扰度		0.19		0.24		0.27		0.30	



(a) 1999 年

(b) 2004 年

干扰强度等级 ■ (0.10,0.19] ■ (0.19,0.27] ■ (0.27,0.36] ■ (0.36,0.47] ■ (0.47,0.65]



(c) 2011 年

(d) 2017 年

图 7 菜子湖群湿地人为干扰度空间分布

Figure 7 Spatial distribution of hemeroby index in Caizi Lakes wetland

## 2.5 湿地景观格局变化驱动力分析

### 2.5.1 人为活动对斑块数量影响力分析

2004—2011 年, 农田及围坝对 N、P 指数影响力均显著上升, 影响力  $q$  值分别增大 10.11% 和 9.41%。表明农田及围坝因素对研究区 N、P 指数时空分异的作用逐渐增大。养殖塘对 N、P 指数的影响力略有下降, 但仍处于较高水平。2011 年围坝的  $q$  值最大, 表明该因素相对于其他因素对研究区 N、P 指数时空分异的影响力更大, 影响在该时期最为显著。2011—2017 农田因素得  $q$  值继续呈现上升趋势, 并在 2017 年达到最大, 表明农田因素对研究区 N、P 指数时空分异的作用越来越突出 (表 7)。

表 7 地理探测器因子探测结果

Table 7 The result of factor GeoDetection		单位: %		
年份	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

交互探测结果显示 (表 8), 任何两种人为活动因子对景观 N、P 指数空间分异的共同作用都要大于单个驱动因子作用。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显著增强, 说明人类复杂多样的

行为活动对湿地景观破碎化的空间分异起到重要作用。

表 8 2017 年地理探测器交互探测结果

人为活动因子	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

## 2.5.2 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相关性分析 (表 9), 景观斑块数与产业产值、人口和水产呈正相关, 且通过了 0.01 水平上的显著性检验, 说明产业经济水平的提高, 景观斑块数会随着人口、水产产量和产值得增加而增加。1999—2017 年形状指数和聚集度指数与第二产业产值、第三产业产值、总产值及人口均呈显著负相关, 说明随着工业及旅游业等经济发展, 景观的邻近度与连接程度逐渐减弱; 1999—2017 年, Shannon's 多样性指数与第一产业产值、人口、水产及耕地面积显著相关, 说明随着人口增长、经济压力增大及土地利用方式的转变, Shannon's 多样性指数变大。

表 9 景观格局指数与社会经济因子的相关性分析

项目	斑块密度		形状指数		聚集度指数		Shannon's 多样性指数	
	相关性值	显著性值	相关性值	显著性值	相关性值	显著性值	相关性值	显著性值
第一产业	0.748**	0.001	-0.525*	0.037	-0.724**	0.002	0.608*	0.013
第二产业	0.879**	0	-0.392	0.133	-0.648**	0.007	0.482	0.059
第三产业	0.797**	0	-0.302	0.256	-0.526*	0.036	0.372	0.156
总产值	0.863**	0	-0.376	0.151	-0.621*	0.01	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
渔业产值	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: \*在 0.05 水平上显著相关, \*\*在 0.01 水平上显著相关。

## 3 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, 研究结果与长江流域湿地演变趋势基本一致<sup>[9,12]</sup>。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。经济发展是影响菜子湖湿地景观变化的主要因素<sup>[11]</sup>。1999 年以前, 当地经济水平较为落后, 菜子湖群湿地农业及渔

业发展处于较低水平，自然湿地开发程度低，斑块呈大块片状分布且占比均匀，人为干扰少，湖泊、滩地及草滩景观连通性较好，破碎程度较低。经济发展驱动渔业过度养殖开发<sup>[11]</sup>，2004—2011 年间围网养殖面积迅速扩张并趋于稳定，养殖塘斑块数量增加导致湿地斑块数量增大，自然湿地面积减少，湿地基质破碎化，这与长江中下游的洪湖等湿地发展相似<sup>[2]</sup>。产业结构不合理，经济增长过度依赖农业、渔业等第一产业经济，导致了渔业迅猛发展。人口增长对农田影响很深，由于对粮食的需求持续存在，人地矛盾突出促使开垦耕地<sup>[37]</sup>。为满足灌溉需求增加沟渠，湿地进一步破碎<sup>[5]</sup>。同时，围坝、建闸为湿地的开垦创造了条件，研究期间农田数量和面积持续扩大，菜子湖群现存有 5000 亩以上圩田近十个，作为安庆市重要粮食基地，如练潭圩、大幸福圩等。各圩田区筑坝经历多次加高加固，改变了湿地水文条件。水文的自然改变造就了通江湖泊较多类型的湿地生境，水文状况变化改变了湿地景观组成，嬉子湖南端建有堤坝导致其枯水季湖泊蓄水无法排出，水位无法回落，维持水深 1 米，湖泊水面景观占比远远高于菜子湖与白兔湖，滩地及草滩无法季节性裸露，陌上碱等沼泽植被无法生长，自然湿地景观均匀度降低。人为活动面积和强度是影响湿地景观格局破碎速度的关键因素<sup>[2]</sup>。湿地外围人口密集区域，如白兔湖北部双兴、先让村，菜子湖石会、公元村、新桥村，以及嬉子湖许咀、练潭等地，人为活动强度大，受道路、居民点影响，湿地处于空间上隔离的分散状态，农田与坑塘或集中或分散，滩地，湖汊围坝现象尤为突出，景观破碎程度最高<sup>[38]</sup>。跨行政区管理是菜子湖破碎的重要原因<sup>[22]</sup>，菜子湖群分跨三个不同的行政管理区域，多年来分割承包经营对湿地破碎造成严重影响。除了人为因素的影响，降雨及径流等水文因素也可能对湿地的景观产生影响<sup>[32]</sup>，数据显示，近 20 年来长江中下游流域降雨量增加，年均温度下降，导致湿地湖泊水域面积增加<sup>[11]</sup>。

湿地萎缩及破碎化加剧了菜子湖群湿地适宜栖息生境数量及质量的减少，造成了湿地水鸟种群数量减少及多样性降低<sup>[38-39]</sup>。类似湖泊湿地研究中发现，湿地景观破碎的加剧直接导致了越冬鹤类栖息地生境面积减少，鹤类种群数量下降<sup>[40]</sup>。水文的阻断造成了鱼类洄游通道的阻隔，江湖洄游鱼类减少，湿地鱼类群落多样性下降，物种组成趋于同质化<sup>[41]</sup>。过度养殖导致养殖区内黑藻和马来眼子菜等生物数量锐减，水体富营养化，浊度上升进一步抑制沉水植被生长，水体自净能力下降<sup>[22]</sup>，湖泊生态进一步恶化。

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，人工促进湿生植被与挺水植被恢复，提高嬉子湖整体生境质量，优化湿地景观的配比，多样化的生境是维持生物多样性的有效途径<sup>[42]</sup>。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、庙咀等地被围垦湖汊、滩

地和浅水区,同时可种植芦苇和菰等挺水植被。人为干扰中等强度核心水域,优先通过拆除围网,减少或禁止蟹苗及草食性鱼类养殖与投放,以自然恢复方式有效缓解湖泊水面破碎问题<sup>[22]</sup>。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<sup>[26]</sup>,缓解湖泊水体富营养化问题。333.33hm<sup>2</sup>(5000亩)以下分布在涨落区的农田,建议进行退耕还湿,333.33hm<sup>2</sup>(5000亩)以上大型圩田保留其基本农田,并提高耕地质量和利用率。农田秋冬季可采取部分收割的做法,作为冬季白头鹤等珍贵候鸟重要觅食备选地,为冬季候鸟提供必要的食物补给<sup>[39,43]</sup>。越冬候鸟分布多的区域如大王庙、大沙河以西、车富等地,应以生态恢复和保育并重,尽快划定范围,禁止放牧、捕鱼和养殖等行为,优先建立湿地保护的绝对核心区,以维持冬季候鸟主要停歇区域生境质量及面积。景观连通性较好,人为干扰小的区域,如白兔湖北部及中部,维持其景观现状,加强管理巡护,避免人为干扰。

建立跨县区湖泊管理机制,统一规划,实行网格化管理模式,责任落实到个人。加快完善菜子湖群功能区划分,合理规划缓冲区、核心区范围面积,划定保护区红线。完善并落实对当地退耕、退养居民的生态补偿、粮食补贴等政策。调整产业结构,发展生态旅游等第三产业,增加就业岗位,发展替代产业,减少农民对农渔业的依赖性,转移农民对湿地的压力。

#### 4 结论

近20年来,菜子湖群湿地景观类型上发生了较大变化。滩地及沼泽草滩等自然湿地萎缩,养殖塘、农田等人工湿地面积扩张,而非湿地景观整体变化不大。景观斑块指数、斑块密度指数及Shannon's多样性指数增大,平均斑块分维数和聚集度指数变小。湿地景观异质性增加,连通性下降,破碎度上升。人为干扰活动面积及强度均增大。经济发展、农渔业扩张、人口增长及跨区域管理等是导致菜子湖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,当地应开展滩地及草滩景观重建,挺水、沉水及湿生植被恢复工程;可通过拆除围坝、围网等手段改善湿地水文状况,重建鱼类洄游通道;建立跨县区湖泊管理机制,统一规划,划定保护区范围;调整产业结构,发展替代产业,缓解经济、人口对湿地的压力。

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, et al. 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] 潘健,于丹丹,何振芳,等. 东平湖湿地景观演变对人类活动的响应机制[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 88-94. ( PAN Jian, YU Dandan, HE Zhenfang, et al. Impacts of human activities on change of wetland landscape in Dongping lake area[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 88-94. (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]. Elsevier B.V., 2017, 12: 40-48.
- [7] 刘红玉, 李玉凤, 曹晓, 等. 我国湿地景观研究现状、存在的问题与发展方向[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1394-1401. ( LIU Hongyu, LI Yufeng, CAO Xiao, et al. The current problems and perspectives of landscape research of wetlands in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1394-1401. (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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2006.201903054.)
- [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, et al. Dynamics and driving factors of landscape fragmentation based on GeoDetector 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<sub>2.5</sub>) 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. (LYU 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] 刘吉平, 赵丹丹, 田学智, 等. 1954—2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3234-3244. (LIU Jiping, ZHAO Dandan, TIAN Xuezhi, et al. Landscape pattern dynamics and driving forces analysis in the Sanjiang Plain from 1954 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3234-3244. (in Chinese))
- [34] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990—2018 年海南岛湿地景观格局演变及其驱动力分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 59-70. (LEI Jinrui, CHEN Zongzhu, CHEN Yiqing, et al. Landscape pattern changes and driving factors analysis of wetland in Hainan Island during 1990—2018[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(1): 59-70. (in Chinese))
- [35] 余瑞林, 周葆华, 刘承良. 安庆沿江湿地景观格局变化及其驱动力[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 522-527. (YU Ruilin, ZHOU Baohua, LIU Chengliang. Changes of the wetland landscape pattern its driven force along the Yangtze River in Anqing, Anhui Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(6): 522-527. (in Chinese))
- [36] 贾艳艳, 唐晓岚, 唐芳林, 等. 1995—2015 年长江中下游流域景观格局时空演变[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 185-194. (JIA Yanyan, TANG Xiaolan, TANG Fanglin, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin from 1995 to 2015[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2020, 44(3): 185-194. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201903079) .
- [37] 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))
- [38] 陈锦云, 周立志. 安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5323-5331. (CHEN Jinyun, ZHOU Lizhi. Guild structure of wintering waterbird assemblages in shallow lakes along Yangtze River in Anhui Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5323-5331. (in Chinese))
- [39] 王晓媛, 江波, 田志福, 等. 冬季安徽菜子湖水位变化对主要湿地类型及冬候鸟生境的影响[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1636-1645. (WANG Xiaoyuan, JIANG Bo, TIAN Zhifu, et al. Impact of water level changes

- in Lake Caizi (Anhui Province) on main wetland types and wintering bird habitat during wintering period[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(6): 1636-1645. (in Chinese))
- [40] 张双双, 董斌, 杨斐, 等. 升金湖湿地景观格局变化对越冬鹤类地理分布的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2461-2470. (ZHANG Shuangshuang, DONG Bin, YANG Fei, et al. Influence of landscape pattern change of Shengjin Lake Wetland on the geographical distribution of overwintering Cranes[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10): 2461-2470. (in Chinese))
- [41] 谢涵, 蒋忠冠, 夏治俊, 等. 围网养殖对华阳河湖鱼类群落结构的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(9): 1399-1407. (XIE Han, JIANG Zhongguan, XIA Zhijun, et al. The impacts of enclosure aquaculture on fish community in the Huayanghe Lake[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(9): 1399-1407. (in Chinese))
- [42] 刘云珠, 史林鹭, 朵海瑞, 等. 人为干扰下西洞庭湖湿地景观格局变化及冬季水鸟的响应[J]. *生物多样性*, 2013, 21(6): 666-676. (LIU Yunzhu, SHI Linlu, DUO Hairui, et al. Disturbance-driven changes to landscape patterns and responses of waterbirds at West Dongting Lake, China[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(6): 666-676. (in Chinese))
- [43] 王钟, 范中亚, 杨忠勇, 等. “引江济淮”工程对安徽菜子湖水龄分布的影响[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(6): 1576-1586. (WANG Zhong, FAN Zhongya, YANG Zhongyong, et al. Effects of water diversion project from the Yangtze River to Huaihe River on the water age distribution of Lake Caizi, Anhui Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(6): 1576-1586. (in Chinese))