

DOI: 10.5846/stxb202112223631

欧明辉, 钟业喜, 马宏智, 冯兴华, 肖泽平. 采砂活动影响下鄱阳湖水陆交错带形态及景观格局变化. 生态学报, 2023, 43(11): 4570-4582.

Ou M H, Zhong Y X, Ma H Z, Feng X H, Xiao Z P. Morphology and landscape pattern changes of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake under the influence of sand mining activities. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4570-4582.

# 采砂活动影响下鄱阳湖水陆交错带形态及景观格局变化

欧明辉, 钟业喜\*, 马宏智, 冯兴华, 肖泽平

江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

**摘要:**自长江干流限制无序采砂后,大量采砂船涌入鄱阳湖区作业导致水陆交错带形态与景观均发生明显的改变,人类活动深刻影响着鄱阳湖水陆交错带的稳定性。基于 Landsat TM/OLI 遥感影像数据,定量测算采砂活动对鄱阳湖水陆交错带形态和景观格局产生的影响,结果表明:①草滩与滩涂之间转化最为频繁,水域面积缩小,水陆交错带范围扩大;②东岸线和西岸线呈侵蚀状态,湖心岸线快速收缩;③鄱阳湖水陆交错带形状逐渐变得简单,而入江通道形状复杂化程度提高,其几何形态不规则化;④景观类型层次上,滩涂的破碎度最大,形状最为复杂,农田的破碎度和形状复杂程度最小,集聚性最强,草滩的连通性最好,沙地的景观指数幅度变化最大;⑤鄱阳湖水陆交错带破碎化程度逐渐降低,景观形状越来越复杂,景观多样性减少,整体连通性和集聚性增强;⑥采砂规模与鄱阳湖水陆交错带的形态指数呈负相关,与景观形状指数和入江通道的形态指数呈正相关,其均通过显著检验。

**关键词:**采砂活动;鄱阳湖水陆交错带;入江通道;形态;景观格局指数;相关性

## Morphology and landscape pattern changes of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake under the influence of sand mining activities

OU Minghui, ZHONG Yexi\*, MA Hongzhi, FENG Xinghua, XIAO Zeping

School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

**Abstract:** Since the restriction of uncontrolled sand mining in the main stream of Yangtze River, a large number of sand dredging vessels have been flooded into Poyang Lake area, resulting in obvious changes in the morphology and landscape of the aquatic terrestrial ecotone. Human activities have profoundly affected the stability of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake. Based on Landsat TM/OLI remote sensing image data, the impact of sand mining activities on the morphology and landscape pattern of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake was measured quantitatively. The results showed that (1) the transformation between grassland and mudflat was the most frequent. The fluctuation of water area decreased and the scope of the aquatic terrestrial ecotone expanded. (2) The eastern and western shorelines were eroded, and the shoreline in the center of the lake was rapidly shrinking. (3) The shape of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake has simplified gradually, while the complexity of the shape of the river entry channel has increased, and its geometry has become irregular. (4) At the level of landscape types, the fragmentation degree of the mudflat landscape was the largest and its shape was the most complex. The fragmentation degree and shape complexity of farmland was the smallest and its agglomeration was the strongest. The connectivity of grassland was the best. The landscape index of sandy land had the

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41961043);江西省教育厅研究生创新基金项目(YC2021-B059);鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学)开放基金项目(PK2020006)

**收稿日期:**2021-12-22; **网络出版日期:**2023-02-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhongyexi@126.com

largest change in magnitude. (5) The fragmentation degree of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake gradually decreased, the shape became increasingly complex, the landscape diversity decreased, and the overall connectivity and agglomeration increased. (6) The scale of sand mining was negatively correlated with the shape index of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake, and positively correlated with the landscape shape index and the shape index of the river entry channel, all of which passed the significant test.

**Key Words:** sand mining activity; the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake; the river entry channel; morphology; landscape pattern index; correlation

水陆交错带是水生态系统与陆地生态系统的过渡性地带<sup>[1]</sup>,湿地景观和岸线是水陆交错带的重要组成部分,岸线是表征水陆交错带形态最主要的指标,湿地景观深刻影响着水陆交错带的稳定性。受全球气候变化、地表植被的改变和人类活动的影响,水陆交错带具有复杂、敏感和多变性<sup>[2-3]</sup>。近年来,由于长江干流禁止无秩序采砂,房地产行业、建筑行业繁荣增长和采砂巨额利润的刺激下,大量采砂船涌入湖区作业,对水陆交错带产生一系列不良影响,如人为加速景观之间的转换和破坏景观格局的稳定性,促使水陆交错带形态发生改变,同时也改变水陆交错带与湖泊的交互作用条件,导致其缓冲作用下降,进而引起水质变差和引发洪涝灾害,一定程度上会导致生物多样性减少<sup>[4]</sup>,损害水陆交错带的调节和供给功能<sup>[5]</sup>,破坏了生态系统的良性循环。目前,关于鄱阳湖的研究多集中在水文过程<sup>[6]</sup>、生物量<sup>[7]</sup>和候鸟生境<sup>[8]</sup>,尤其关注鄱阳湖水位的变化及其与长江的交互作用的探讨<sup>[9]</sup>。实际上,大规模采砂活动会导致水位、淹水面积、湖床和子湖形态等发生改变,进而影响了鄱阳湖整体形态与景观格局。关于采砂活动对鄱阳湖的影响,学者的研究主要集中在水位<sup>[10]</sup>、水文泥沙效应<sup>[11]</sup>和水文干旱化机制<sup>[12]</sup>,很少关注采砂活动对鄱阳湖形态和景观格局<sup>[13]</sup>造成的影响,而未关注采砂活动对鄱阳湖水陆交错带这一典型生态敏感区域造成的影响,更缺乏对水陆交错带系统性探究。

鄱阳湖水陆交错带是过渡性地理空间的典型代表,是“江-河-湖”高质量发展和治理的关键地带,表现出典型的水陆相生态系统特征。鄱阳湖生态经济区获批成为国家战略<sup>[14]</sup>,鄱阳湖又是流域高质量发展和生态文明样板打造的重点区域,而鄱阳湖水陆交错带是该区域的最核心部分,是一个典型的山水林田湖草生命共同体<sup>[15]</sup>。近年来,人类活动对鄱阳湖生态环境造成一定的影响,尤其是大规模的采砂活动改变了鄱阳湖水陆交错带形态和景观格局的稳定性。因此,本文通过 Landsat TM/OLI 遥感影像对 2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带范围和景观进行提取,定量测算采砂活动对鄱阳湖水陆交错带形态产生的影响,关注采砂重点区域的岸线和形态指数的变化,分析其景观转移和景观格局指数的变动,并通过相关性分析说明采砂活动是鄱阳湖水陆交错带形态和景观格局变化的主要驱动力,为鄱阳湖水陆交错带的生态修复和管理提供科学的理论依据和参考。

## 1 研究区概况

鄱阳湖是一个典型过水性、吞吐型和季节变化的湖泊,其水位变化主要受控于五河及长江,对长江洪水有调蓄功能,对长江下游城市的安全极为重要<sup>[16]</sup>。受季风性气候的影响,湖泊淹水面积在丰水期和枯水期相差极大<sup>[17]</sup>,丰水期呈现湖泊状态,枯水期则呈河流形态,年际淹水面积和范围变化极大,湖口水文站丰枯水期水位差接近 13 m<sup>[18]</sup>。目前,水陆交错带没有明确的划分标准,本文鄱阳湖水陆交错带划分范围:是指最高水位与最低水位线之间的部分<sup>[19]</sup>。鄱阳湖水陆交错带的上界参考历年最高水位 22.48 m(湖口水位)的淹水范围,并且参照鄱阳湖圩堤图,实现鄱阳湖水陆交错带外围的界定和提取,而鄱阳湖低水位具有明显动态变化,为保证研究区域的连续性和一致性,采用常年低水位值星子水位 6.2 m(上下波动不超过 1 m)作为鄱阳湖水陆交错带的下界(图 1)。

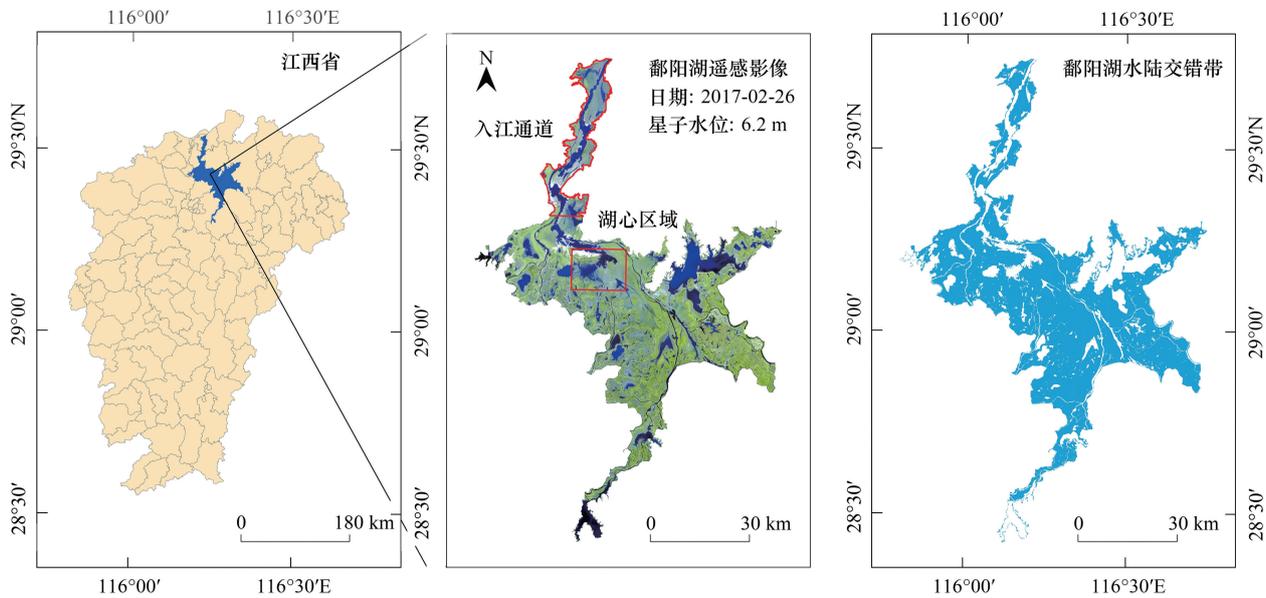


图1 2017年6.2 m水位下鄱阳湖水陆交错带区位图

Fig.1 Location map of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake at 6.2 m water level in 2017

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

根据 Landsat TM/OLI 系列卫星遥感影像对比,选择云量较小的遥感影像数据,最终获取 2003 年、2007 年、2009 年、2010 年、2013 年、2015 年和 2017 年这 7 期遥感影像数据,其中 2003 年这期遥感影像中少部分区域有厚云遮挡,通过选取相近时间和水位的遥感影像对这些区域进行后期校正。通过实地调研,并根据研究目标和内容,本文景观分类采用体现区域特点的湿地景观分类<sup>[20]</sup>,将鄱阳湖水陆交错带分为滩涂、草滩、沙地和农田(人工湿地)景观类型(图 2),利用混淆矩阵对七期景观分类进行精度验证,分类结果的 kappa 系数均大于 0.75,符合实际研究要求。

研究中利用的水位数据来自江西省水文局的星子水文站的逐日水位数据,水位数据统一采用黄海高程; Landsat TM/OLI 系列遥感影像数据来自美国地质调查局官网(<http://glovis.usgs.gov/>)和地理空间数据云(<http://www.gs.cloud.cn/sources>);借助图像处理软件 ENVI 5.2 对遥感影像进行辐射定标、大气校正、裁剪等预处理,并通过实地选取景观分类样本点,运用新型水体指数(NWI)<sup>[21]</sup>和植被归一化指数(NDVI)阈值判断和提取水体与植被,并利用监督分类和目视解译等方法相结合,实现鄱阳湖水陆交错带景观的遥感制图。其次,采砂船数据没有明确的官方数据,但可以从遥感影像中获取,参考其他学者的研究,如江丰<sup>[11]</sup>等人利用波段 5、4 和 1 的红绿蓝(RGB)彩色合成可以确定浑浊水体范围,然后在浑浊水体附近,利用中红外波段的黑白影像判别采砂船的位置和数量<sup>[22]</sup>。

### 2.2 景观转移矩阵

景观转移矩阵可以表达研究区域在一段时间内各种景观类型之间数量上的相互转移变动情况<sup>[23]</sup>,计算公式如下:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} \\ P_{21} & P_{21} & \dots & P_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i1} & \dots & P_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

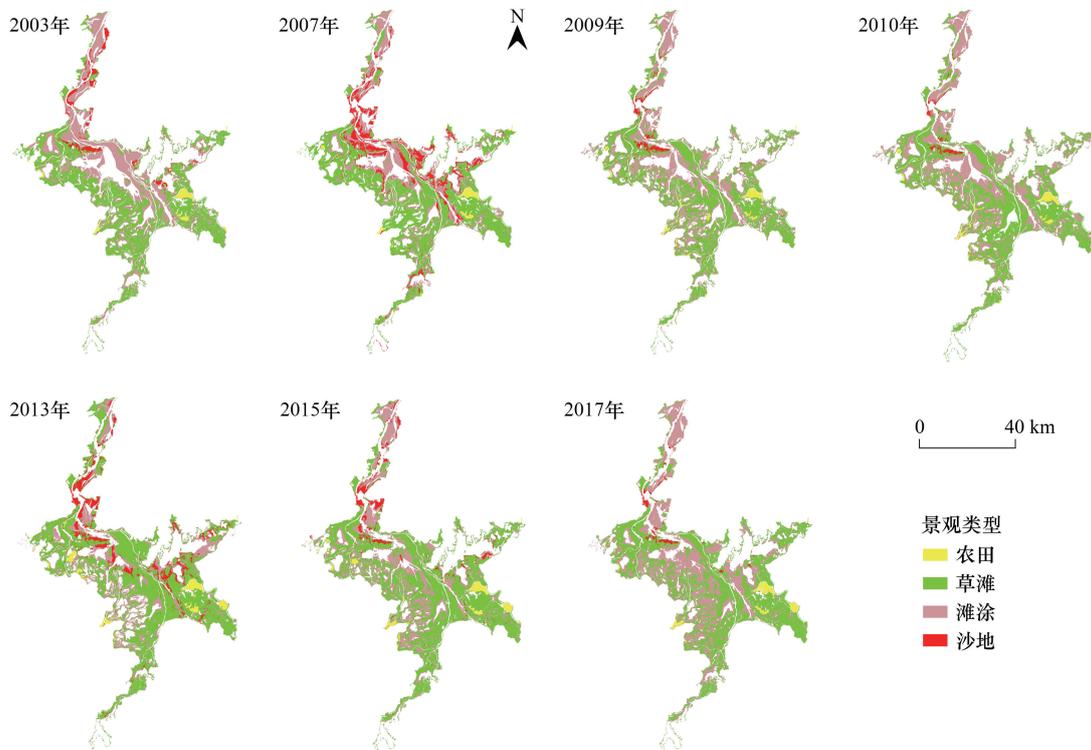


图2 2003—2017年鄱阳湖水陆交错带景观图

Fig.2 Landscape map of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake from 2003 to 2017

式中:  $P_{ij}$  表示景观类型  $i$  转化为景观类型  $j$  的面积。

### 2.3 数字岸线系统(DSAS)

线性回归变化速率法(LRR)与终点变化速率法(EPR)都是测量水陆交错带位置随时间变化的方法,变化速率以每年沿横断线测量的水陆交错带岸线移动距离表示<sup>[24-25]</sup>,单位为 m/年,当变化速率结果为负时,表示该时段内水陆交错带向湖泊水域一侧扩张,为正则表示逐渐被侵蚀,向陆地迁移。

#### 2.3.1 线性回归变化速率

线性回归变化速率(LRR)通过拟合最小二乘回归点的回归线来确定,通过设置回归线,使残差的平方和最小化,线性回归率是直线的斜率<sup>[26]</sup>。计算公式如下:

$$y = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) + (\bar{y} - a\bar{x})x \quad (2)$$

式中:  $y$  代表水陆交错带岸线空间位置;  $x$  为统计年份; 公式前半部分为拟合的常数截距;  $\bar{y} - a\bar{x}$  为回归斜率,代表每个单位  $x$  变化对应  $y$  变化。

#### 2.3.2 终点变化速率

终点变化速率(EPR)是通过将水陆交错带岸线移动的距离除以岸线迁移之间所经过的时间来计算的。EPR的主要优点是易于计算且要求较低,只需要两个岸线日期即可进行计算分析<sup>[26]</sup>。计算公式如下:

$$E_{i,j} = \frac{NSM_{j,i}}{\Delta Y_{j,i}} \quad (3)$$

式中:  $E_{i,j}$  代表岸线终点变化效率;  $NSM_{j,i}$  为第  $j$  与第  $i$  期岸线净移动距离;  $\Delta Y_{j,i}$  为相应岸线年份数差值。

### 2.4 水陆交错带形态指数

#### 2.4.1 形状指数

水陆交错带形状指数是定量描述水陆交错带形态变化的有效指标<sup>[21]</sup>,通过水陆交错带形状与圆的相似

程度来判断水陆交错带形状的复杂程度,用水陆交错带周长与等面积的圆周长之比来表示,且形态指数值越大水陆交错带形状的复杂程度越高<sup>[27]</sup>,计算公式如下:

$$SI = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (4)$$

式中:SI 为水陆交错带形状指数;P 为水陆交错带周长;A 为水陆交错带面积。

#### 2.4.2 分形维数

表明水陆交错带形态复杂程度的指数。分形维数在[1,2]范围内,其值越接近 1,水陆交错带的相似性越强,形状也越整齐,几何形态越简单,说明有较大的干扰;相反,分形维数越趋于 2,表明水陆交错带的相似性越差<sup>[27]</sup>,计算公式如下:

$$FD = \frac{2\ln P/4}{\ln A} \quad (5)$$

式中:FD 为水陆交错带分形维数;P 为水陆交错带周长;A 为水陆交错带面积。

### 2.5 景观格局指数

景观格局指数可以反映其结构组成和空间配置等方面特征<sup>[28-29]</sup>,一般是在斑块水平、类型水平和景观水平 3 个层次上分析。本文主要从类型水平和景观水平层次开展研究,主要选取表征破碎度、聚集度、形状指数和多样性的景观格局指数进行分析,所有指数都在 Fragstats 4.2 软件计算完成。

### 2.6 相关性分析

本文通过皮尔逊相关系数测算鄱阳湖水陆交错带形态指数、景观格局指数和采砂规模的相关性,通过显著性检验下( $P \leq 0.05$ ),相关系数的绝对值越大,相关性就越强<sup>[30]</sup>,计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

式中:R 是相关系数, $X_i$ 为第*i*年采砂船数量, $Y_i$ 为第*i*年鄱阳湖水陆交错带形态指数和景观格局指数, $\bar{X}$ , $\bar{Y}$ 分别是变量 X, Y 的样本均值。

## 3 结果与分析

### 3.1 采砂船时空分布特征

根据 Landsat TM/OLI 遥感影像中红外波段提取鄱阳湖 2003—2017 年采砂船数量及分布情况,通过对比高精度的高分卫星遥感影像,并参考采砂船的实际特征,利用目视解译的方法,发现鄱阳湖内货船与其他用途的船只数量非常少,湖内总体船只的数量在一定程度上代表采砂船的数量。总体上,鄱阳湖内采砂船数量不断增加,在空间分布上由北向南扩散,并沿着主河道分布,主要集聚于入江通道和湖心区域(图 3)。

### 3.2 景观转移特征

2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带各类景观转移情况如图 4 所示,2003—2007 年滩涂的转移最为显著,滩涂转为草滩和沙地的面积分别为 27320.63  $\text{hm}^2$ 和 16628.74  $\text{hm}^2$ 。2007—2009 年期间,四类景观类型均发生明显转移,草滩与滩涂互转频繁,滩涂和草滩转为水域的面积分别为 10621.16  $\text{hm}^2$ 和 4592.34  $\text{hm}^2$ ,该时期水域面积扩张,水陆交错带范围缩小。2009—2010 年期间,水域转为草滩面积约为 11547.17  $\text{hm}^2$ ,水域萎缩,水陆交错带扩张。2010—2013 年水域面积增加 2485.77  $\text{hm}^2$ ,水陆交错带范围缩小。2013—2015 年期间,草滩大规模转变为滩涂,转移面积高达 23779.36  $\text{hm}^2$ ,滩涂主要转变为草滩和水域,其转移面积分别为 16039.54  $\text{hm}^2$ 和 11900.31  $\text{hm}^2$ 。2015—2017 年期间,草滩和滩涂之间有较大面积的转换,草滩变为滩涂的面积高达 28297.35  $\text{hm}^2$ ,滩涂主要转换为草滩和水域,沙地主要转移为草滩和滩涂,沙地面积进一步萎缩,水域面积下

降,水域主要转移为滩涂。

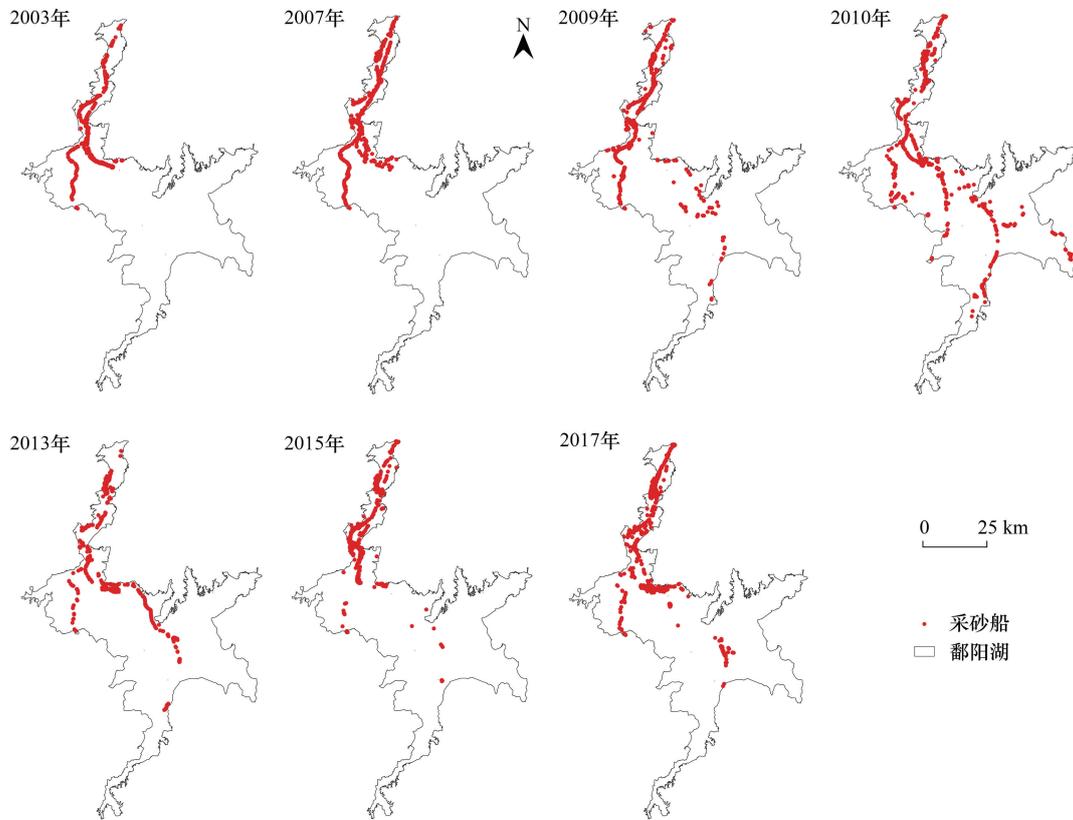


图 3 2003—2017 年鄱阳湖采砂船时空分布

Fig.3 Spatiotemporal distribution of sand dredging vessels in Poyang Lake from 2003 to 2017

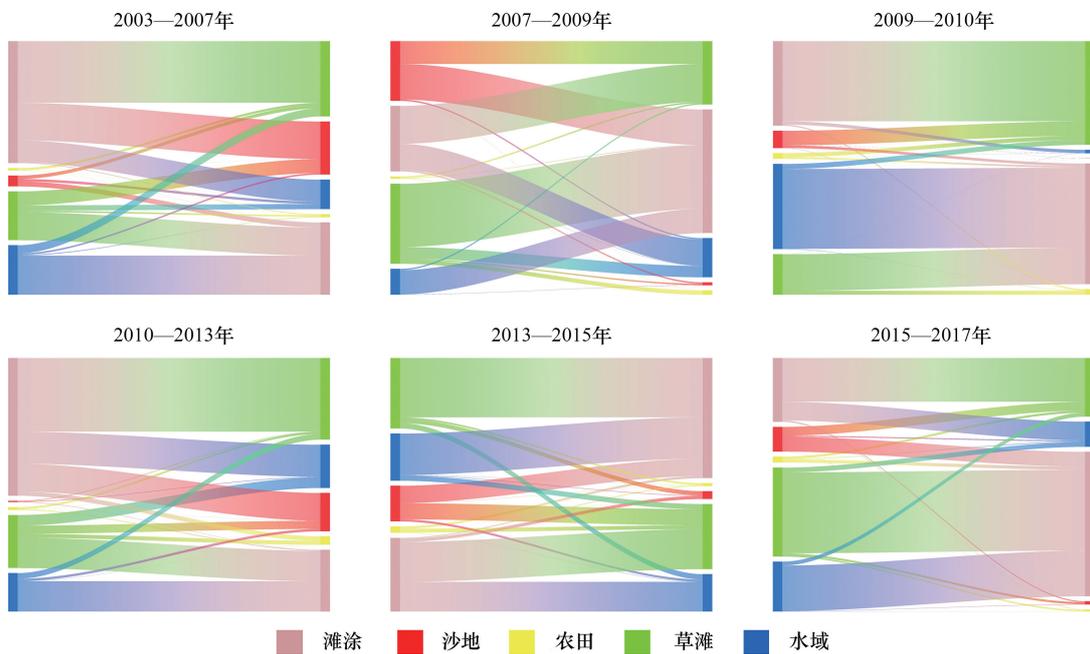


图 4 2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带景观转移矩阵

Fig.4 The landscape transfer matrix of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake from 2003 to 2017

### 3.3 岸线变化速率

基于 DSAS 数字岸线系统中终点变化速率(EPR)和线性回归变化速率(LRR)计算方法,分析 2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带典型岸线的变化速率和空间分布情况(图 5),结果采用平均值加减标准误的形式表示,可发现东岸线和西岸线呈侵蚀状态,湖泊水域扩张,水陆交错带在该处收缩(图 6),东岸线 EPR 和 LRR 变化速率分别为  $(31.21 \pm 1.34) \text{ m/a}$  和  $(32.2 \pm 1.361) \text{ m/a}$ ,西岸线 EPR 和 LRR 变化速率分别为  $(19.64 \pm 0.83) \text{ m/a}$  和  $(19.93 \pm 0.87) \text{ m/a}$ ,由此可见东岸线的侵蚀强度高于西岸线,且接近湖心区域的东岸线有明显的淤涨趋势。湖心区域呈扩张状态,湖泊水域萎缩,水陆交错带扩张(图 6),其 EPR 和 LRR 变化速率为  $(-156.18 \pm 18.14) \text{ m/a}$  和  $(-154.92 \pm 21.11) \text{ m/a}$ 。

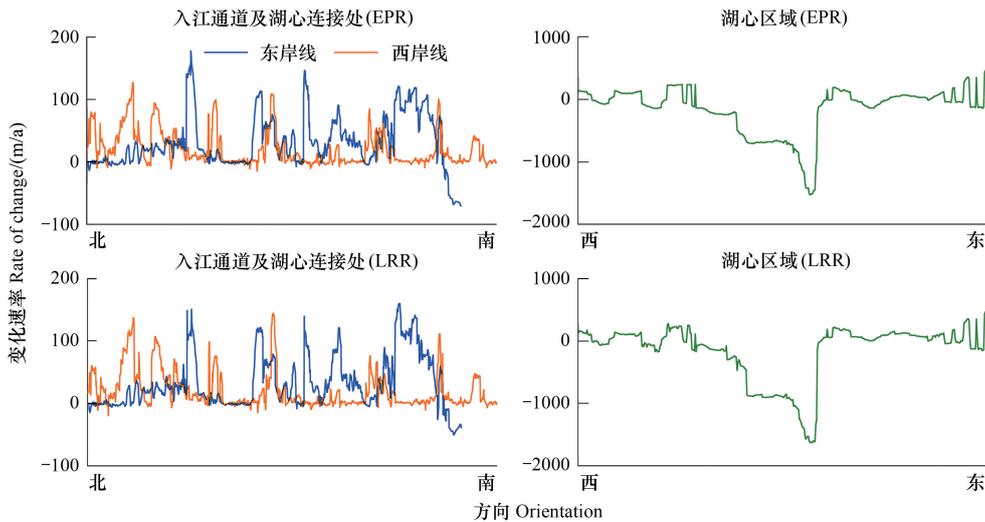


图 5 2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带主要岸线变化速率

Fig.5 The change rate of major of the shoreline in the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake from 2003 to 2017

EPR: 终点变化速率法; LRR: 线性回归变化速率法

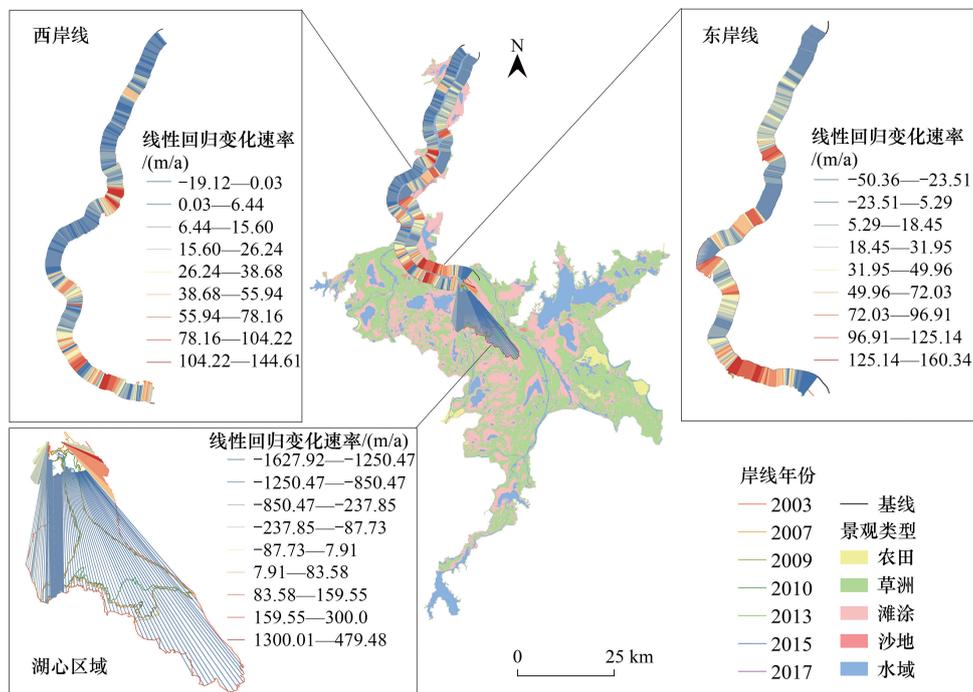


图 6 2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带主要岸线时空变化

Fig.6 Spatio-temporal changes of the major shoreline in the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake from 2003 to 2017

### 3.4 鄱阳湖水陆交错带形态变化特征

如表 1 所示,2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带的面积波动增加,总面积增加 25468.13  $\text{hm}^2$ ,其周长大致波动减小,2017 年较 2003 年周长减少 8157.27  $\text{hm}$ 。鄱阳湖水陆交错带形状指数变化大体上呈缓慢下降的趋势,与周长变化趋势相似,从 31.27 下降至 25.04。分形维数时序变化趋势与形状指数保持一致,这说明鄱阳湖水陆交错带形态复杂程度降低,相似性增强。

入江通道的湿地面积在不断萎缩,其周长不断增加,相反,湖心区域的湿地面积不断增长,周长波动增加。入江通道面积从 31441.33  $\text{hm}^2$  快速减少至 27760.498  $\text{hm}^2$ ,其周长从 3621  $\text{hm}$  快速增加至 4032.05  $\text{hm}$ 。入江通道形状指数变化呈上升趋势,从 5.76 增加至 6.83,入江通道的分形维数从 1.31 缓慢增加至 1.35。湖心区域的面积大体上呈增长趋势,从 10208.15  $\text{hm}^2$  扩张至 15887.74  $\text{hm}^2$ ,其中 2015 年有小幅下降,其周长变化则是先呈波动变化,随后不断增加,湖心区域的形状指数和分形维数均无明显变化。

表 1 2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带形态指数

Table 1 The morphological index of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake from 2003 to 2017

年份 Year	总体区域 Whole area				入江通道 River entry channel				湖心区域 Central lake area			
	A/ $\text{hm}^2$	P/ $\text{hm}$	SI	FD	A/ $\text{hm}^2$	P/ $\text{hm}$	SI	FD	A/ $\text{hm}^2$	P/ $\text{hm}$	SI	FD
2003	224968.20	52571.31	31.27	1.54	31441.33	3621.00	5.76	1.31	10208.15	1969.60	5.50	1.34
2007	233790.31	48673.90	28.40	1.52	29599.69	3781.20	6.20	1.33	13529.90	1943.55	4.71	1.30
2009	228423.35	50948.93	30.08	1.53	29362.10	3853.87	6.35	1.34	13127.90	2179.50	5.37	1.33
2010	240285.48	44757.95	25.76	1.50	29374.12	3805.90	6.27	1.33	14568.13	1918.69	4.49	1.29
2013	237799.72	49810.86	28.82	1.52	28525.57	4058.65	6.78	1.35	15291.99	2108.30	4.81	1.30
2015	241725.55	46843.77	26.88	1.51	28312.52	4030.07	6.76	1.35	14535.61	2423.54	5.67	1.33
2017	250436.33	44414.04	25.04	1.50	27760.50	4032.05	6.83	1.35	15887.74	2459.04	5.50	1.33

A: 面积 Area; P: 周长 Perimeter; SI: 形状指数 Shape index; FD: 分形维数 Fractal dimension

### 3.5 景观格局变化特征

#### 3.5.1 类型水平层次变化特征

在计算景观格局指数的基础上,同时利用变异系数( $C.V$ )来比较不同类型景观的离散程度大小,更好地量化景观格局指数的变化幅度。从图 7 可知,2003—2017 年滩涂的斑块密度明显高于其他景观类型,其变异系数为 0.07,农田的斑块密度最小( $C.V=0.39$ ),沙地的斑块密度出现较为明显的波动变化( $C.V=0.64$ ),草滩的斑块密度较为稳定( $C.V=0.14$ );在景观形状指数中,滩涂的值最高( $C.V=0.05$ ),其次是草滩( $C.V=0.08$ ),沙地随时间变化出现较大的波动( $C.V=0.37$ ),农田的值最小( $C.V=0.20$ ),并且变化趋势最为稳定;在集聚度中,总体而言农田的集聚度最大( $C.V=0.06$ ),其次是草滩( $C.V=0.03$ ),沙地最小( $C.V=0.05$ ),滩涂出现明显的波动变化( $C.V=0.09$ );在凝聚度中,草滩始终保持最大( $C.V=0.01$ ),而且波动变化幅度最小,沙地最小( $C.V=0.04$ ),滩涂与沙地变化幅度最为明显,且两者为呈负相关。总体上,通过对比变异系数发现,沙地的变异系数较大,这说明其内部差异大,变化幅度大,其次是农田,而其余景观的变异系数较小,内部差异小,变化幅度稳定。

#### 3.5.2 景观层次变化特征

由图 8 可知,2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带的斑块数量与斑块密度波动下降,最大斑块指数呈上升的趋势,这说明鄱阳湖水陆交错带的斑块数量减少,整体景观破碎度降低。景观形状指数大致呈先增加后减少,再增加的趋势,总体上说明鄱阳湖水陆交错带景观形状趋向复杂化和不规则化。香农多样性指数和香农均匀度指数下降,鄱阳湖水陆交错带的景观多样性减小。整体的凝聚度和集聚度波动上升,2009 年鄱阳湖水陆交错带凝聚度和集聚度快速上升,这说明鄱阳湖水陆交错带景观连通性和集聚性增强。

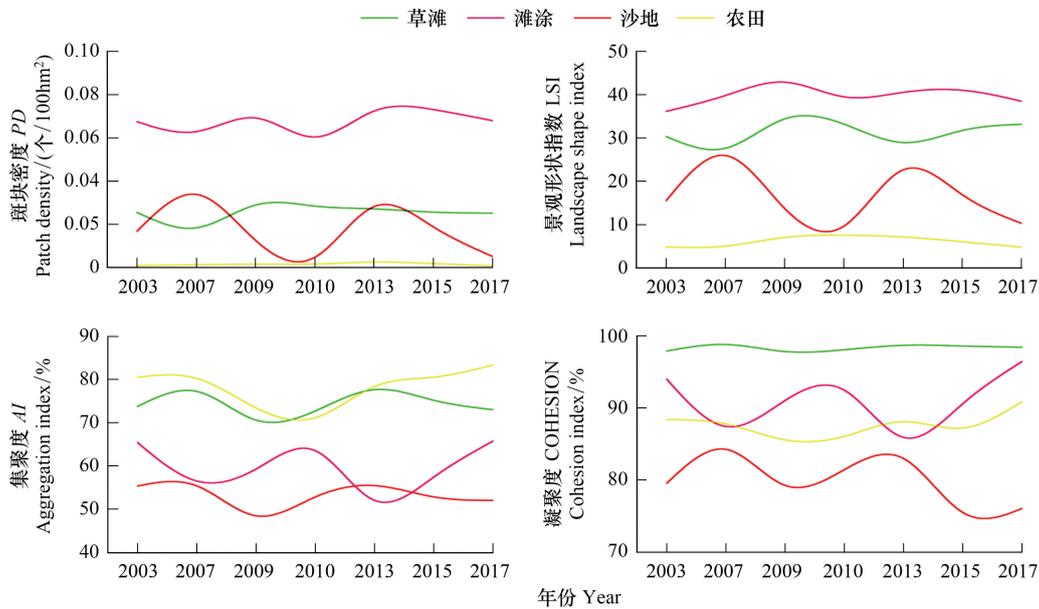


图 7 2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带的景观类型指数变化

Fig.7 Changes in landscape type index of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake from 2003 to 2017

## 4 讨论

### 4.1 采砂活动对水陆交错带形态及景观格局的影响

图 9 为鄱阳湖水陆交错带形态指数、景观格局指数和采砂活动之间相关性分析结果,结果表明 2003—2017 年采砂规模与鄱阳湖水陆交错带的形状指数和分形维数呈负相关,相关系数分别为 $-0.79$ 和 $-0.76$ ,采砂规模与入江通道的形状指数和分形维数呈正相关,相关系数为 $0.82$ 和 $0.80$ ,采砂规模与景观形状指数呈明显的正相关,相关系数为 $0.80$ ,以上所述  $P$  值均小于 $0.05$ ,通过显著性检验。采砂规模越大的情况下,鄱阳湖水陆交错带的整体形状复杂程度降低,几何形态逐渐简单,而入江通道的形状复杂程度提高,几何形态变得不规则化,整体的景观形状复杂性变大。

### 4.2 水陆交错带影响因素分析

鄱阳湖水陆交错带的形态与景观格局受自然因素和人类活动共同影响,自然环境的影响是直接的,鄱阳湖流域降水量和长江流域径流量深刻影响着鄱阳湖的水位<sup>[31-32]</sup>。当水位升高时,尤其是受汛期洪水的影响,鄱阳湖的淹水面积会扩大,水陆交错带的真实范围会被淹没,湿地面积萎缩<sup>[33]</sup>,鄱阳湖水陆交错带的形态和景观格局相应发生明显变化。近 30 年来,人类活动对鄱阳湖水陆交错带的影响越发明显,例如大规模的采砂、湿地被侵占和岛屿居民地扩张等。大量学者研究发现,采砂活动引起的湖盆地形变化是鄱阳湖水位下降的主导因素<sup>[34]</sup>。采砂活动导致湖泊岸线变得不光滑和曲折,并且使得湖泊本身容积增大的同时,扩大了入江通道的过水断面面积,加快了湖水外泄速率,从而导致鄱阳湖湿地在枯水季节大面积裸露<sup>[12]</sup>。自 1998 年长江中下游爆发大洪水后,政府禁止湖区内围湖造田,这限制了大量滩涂开垦为农田,围湖造田对鄱阳湖水陆交错带并未造成明显的影响。此外,鄱阳湖存在将湿地改造为人工网箱养殖区,以及湖岛建筑用地扩张的现象,这导致少量滩涂湿地被侵占,总体上,这些景观变化仅占湿地总面积不到 $1\%$ <sup>[35]</sup>,这表明湿地被侵占对水陆交错带产生的干扰是微弱的,采砂活动仍是鄱阳湖水陆交错带形态和景观格局变化的主要驱动力。

### 4.3 创新与展望

目前,有关水陆交错带的研究主要关注洞庭湖<sup>[36]</sup>、白洋淀<sup>[37]</sup>、漓江<sup>[38]</sup>和巢湖<sup>[39]</sup>等区域,对鄱阳湖的研究较少。本文采用了 DSAS 数字岸线分析方法去分析鄱阳湖水陆交错带岸线的变化速率,对岸线平均变化距离这

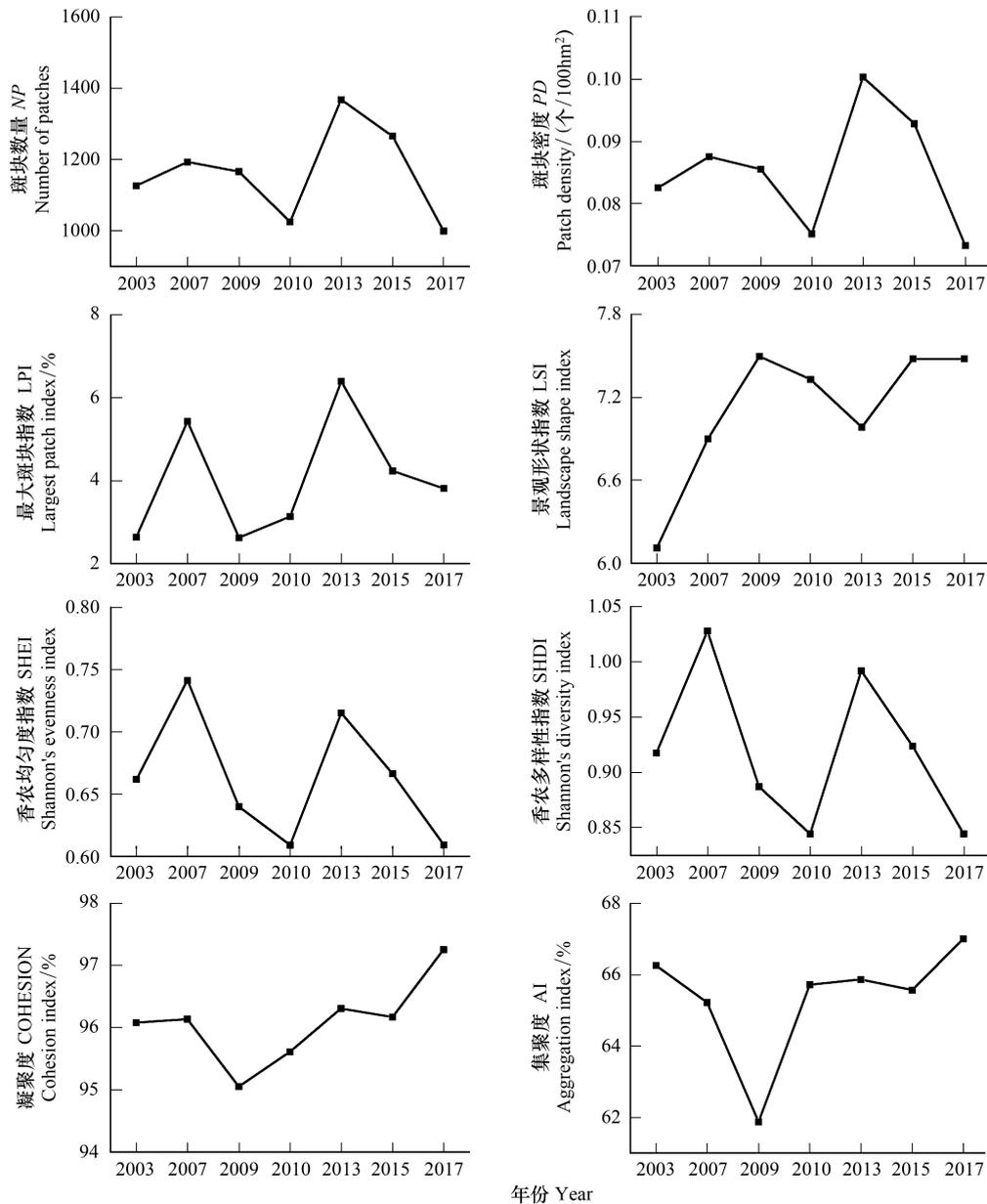


图 8 2003—2017 年鄱阳湖水陆交错带景观层次变化特征

Fig. 8 The characteristics of landscape level changes in the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake from 2003 to 2017

单一的研究方法进行补充和支撑结论分析,而且 DSAS 数字岸线系统在国内的研究主要运用于滨海地带的海岸线分析<sup>[25]</sup>,本文运用该方法对水陆交错带与湖泊的边界进行定量分析,分析效果较好,在一定程度上为该方法运用于不同区域的研究中起着示范和补充作用。但本文仅分析采砂活动对鄱阳湖水陆交错带的形态和景观格局造成的影响,缺乏从综合的角度探讨其变化的驱动机制。自 2003 年三峡工程运行后,长江干流入鄱阳的水量大大减少,近年来鄱阳湖周边建立了许多人工灌溉渠道和水库,用于防洪、灌溉和供水方面,再加上入湖河流的沉积物长时间的淤积<sup>[40—42]</sup>,这些因素都是造成鄱阳湖水陆交错带形态和景观格局变化的原因。未来的研究会深入探讨鄱阳湖水陆交错带变化的驱动机制,为鄱阳湖的生态修复和管理提供科学的理论依据和参考。

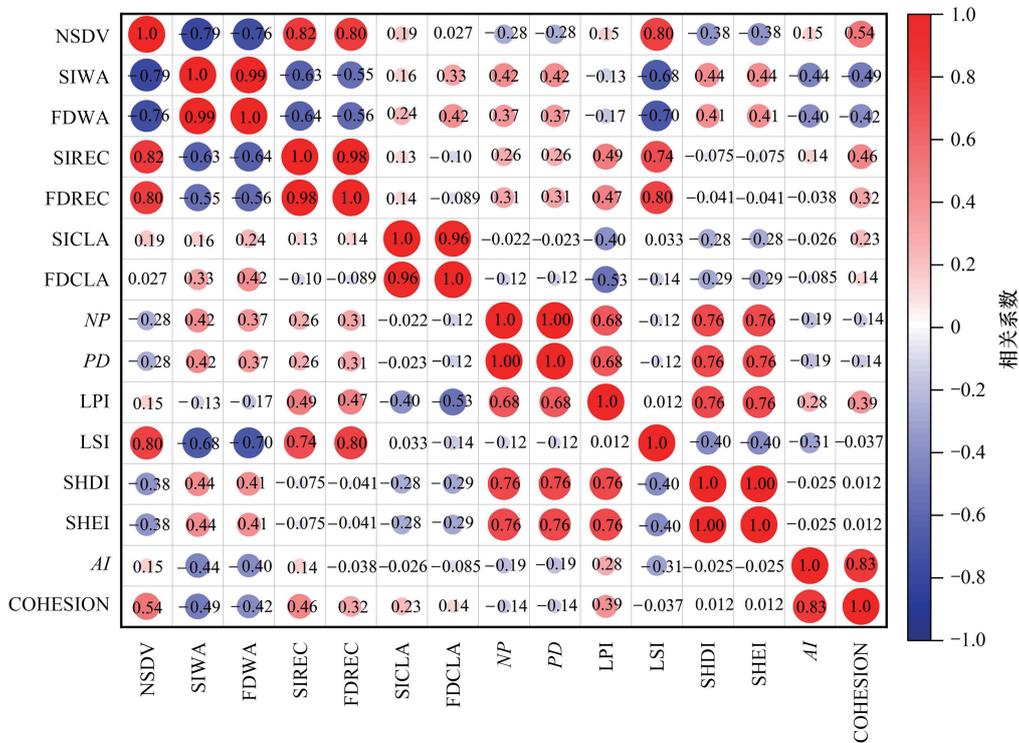


图9 采砂活动与鄱阳湖水陆交错带形态及景观格局指数关系

Fig.9 The relationship between sand mining activities and the morphology and landscape pattern index of the aquatic terrestrial ecotone of Poyang Lake

NSDV:采砂船数量 Number of sand dredging vessels; SIWA:整体区域形状指数 The shape index of whole area; FDWA:整体区域分形维数 The fractal dimension of whole area; SIREC:入江通道形状指数 The shape index of river entry channel; FDREC:入江通道分形维数 The fractal dimension of river entry channel; SICLA:湖心区域形状指数 The shape index of central lake area; FDCLA:湖心区域分形维数 The fractal dimension of central lake area; NP:斑块数量 Number of patches; PD:斑块密度 Patch density; LPI:最大斑块指数 Largest patch index; LSI:景观形状指数 Landscape shape index; SHDI:香农多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI:香农均匀度指数 Shannon's evenness index; AI:集聚度 Aggregation index; COHESION:凝聚度 Cohesion index

### 5 结论

本文以鄱阳湖水陆交错带作为研究对象,基于 Landsat TM/OLI 遥感影像深入分析 2003—2017 年采砂活动影响下鄱阳湖水陆交错带形态的改变以及景观格局的变化,结果表明:

(1) 草滩与滩涂之间转化最为频繁,相互转换面积最大;水域面积呈波动下降趋势,水域主要转换为滩涂,湿地面积扩张,水陆交错带面积不断扩大;沙地变化幅度较大,变动最不稳定;农田作为研究区内特殊的人工湿地景观,面积最小,但面积总体上维持稳定。

(2) 基于 DSAS 数字岸线系统中 EPR 和 LRR 计算方法,发现东岸线和西岸线呈侵蚀状态,并且东岸线的侵蚀强度高于西岸线,接近湖心区域的东岸线有明显的淤涨趋势;而湖心区域陆地呈扩张状态,湖泊岸线萎缩,水陆交错带扩张。

(3) 鄱阳湖水陆交错带形状趋向简单化,相似性增强;入江通道形状复杂化程度提高,几何形态不规则;湖心区域的形态指数呈无规律的波动变化。

(4) 类型水平层次上,滩涂景观的破碎度最大,其景观斑块形状最为复杂;农田景观破碎度最小,景观斑块复杂程度最小,变化最为稳定,斑块的聚集性最强;沙地景观指数的变化幅度最大,其景观连通性表现最差;草滩景观指数变化较为稳定,其景观连通性最好,且变化幅度最小。景观层次上,鄱阳湖水陆交错带景观破碎

度变低,景观形状趋于复杂化,景观多样性减少,其景观连通性和集聚性增加。

(5) 采砂活动是鄱阳湖水陆交错带形态变化和景观形状复杂化的主要驱动力。采砂规模与鄱阳湖水陆交错带的形态指数呈负相关,与景观形状指数和入江通道的形态指数呈正相关。

#### 参考文献(References):

- [1] 尹澄清,兰智文,晏维金.白洋淀水陆交错带对陆源营养物质的截留作用初步研究.应用生态学报,1995,6(1):76-80.
- [2] 邓伟,张少尧,张昊,彭立,刘颖.人文自然耦合视角下过渡性地理空间概念、内涵与属性和研究框架.地理研究,2020,39(4):761-771.
- [3] 姜允芳,武雅芝,丁冬琳.崇南水陆交错带景观整体适应性评价与提升.长江流域资源与环境,2020,29(2):449-458.
- [4] 李青山.漓江流域水陆交错带根系分布与土壤关系[D].北京:北京林业大学,2014.
- [5] Ambasht R S, Ambasht N K. Land-water ecotone ecology. Proceedings of the National Academy of Sciences, India-Section B: Biological Sciences, 2008, 78: 99-104.
- [6] 谭胤静,于一尊,丁建南,谭晦如.鄱阳湖水文过程对湿地生物的控制作用.湖泊科学,2015,27(6):997-1003.
- [7] 吴桂平,叶春,刘元波.鄱阳湖自然保护区湿地植被生物量空间分布规律.生态学报,2015,35(2):361-369.
- [8] 齐述华,张起明,江丰,廖富强.水位对鄱阳湖湿地越冬候鸟生境景观格局的影响研究.自然资源学报,2014,29(8):1345-1355.
- [9] 邓金运,范少英.基于能量的鄱阳湖—长江相互作用表征指标研究.地理学报,2017,72(9):1645-1654.
- [10] 赵军凯,李立现,李九发,赵瑞哲,王辉,刘新圣.人类活动对鄱阳湖水位变化的影响.水文,2020,40(4):53-60.
- [11] 江丰,齐述华,廖富强,张秀秀,王点,朱静瑄,熊梦雅.2001—2010年鄱阳湖采砂规模及其水水泥沙效应.地理学报,2015,70(5):837-845.
- [12] 齐述华,张秀秀,江丰,王鹏.鄱阳湖水文干旱化发生的机制研究.自然资源学报,2019,34(1):168-178.
- [13] 潘艺雯,应智霞,李海辉,刘成林,张欢,管毕财,刘以珍,何亮,葛刚.水文过程和采砂活动下鄱阳湖湿地景观格局及其变化.湿地科学,2019,17(3):286-294.
- [14] 吕桦,钟业喜.鄱阳湖生态经济区地域范围研究.江西师范大学学报:自然科学版,2009,33(2):249-252.
- [15] 成金华,尤喆.“山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径.中国人口·资源与环境,2019,29(2):1-6.
- [16] 胡振鹏,傅静.长江与鄱阳湖水文关系及其演变的定量分析.水利学报,2018,49(5):570-579.
- [17] Liu H, Yuan H M, Wang S M, Zheng L, Liao M. Spatiotemporal dynamics of water body changes and their influencing factors in the seasonal lakes of the Poyang Lake region. Water, 2021, 13(11): 1539.
- [18] 孙芳蒂,马荣华.鄱阳湖水文特征动态变化遥感监测.地理学报,2020,75(3):544-557.
- [19] 马宏智,钟业喜,欧明辉,肖泽平,冯兴华.基于人地关系视角的鄱阳湖水陆交错带范围划分.生态学报,2022,42(12):4959-4967.
- [20] 钟业喜,邵海雁,徐晨璐,朱治州.2001—2018年鄱阳湖区土地利用及景观格局时空演变.江西师范大学学报:自然科学版,2021,45(1):94-102.
- [21] 曹荣龙,李存军,刘良云,王纪华,阎广建.基于水体指数的密云水库面积提取及变化监测.测绘科学,2008,33(2):158-160.
- [22] Wu G F, de Leeuw J, Skidmore A K, Liu Y L, Prins H H T. Performance of Landsat TM in ship detection in turbid waters. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009, 11(1): 54-61.
- [23] 吴健生,罗可雨,赵宇豪.深圳市近20年城市景观格局演变及其驱动因素.地理研究,2020,39(8):1725-1738.
- [24] 袁麒麟,李加林,徐凉慧,杨磊,陈鹏程,王明月,卢雪珠.近40a象山港潮汐汉道岸线的时空变化特征及其与人类活动的关系.应用海洋学学报,2015,34(2):279-290.
- [25] 刘荣娟,濮励杰,朱明,鄯璐,周扬帆.2000—2020年江苏省如东海岸线与滩涂围垦时空演变及影响机.地理研究,2021,40(8):2367-2379.
- [26] Himmelstoss E, Henderson R, Kratzmaan M, Farris A. Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide. [2021-12-22]. <https://pubs.usgs.gov/of/2018/1179/ofr20181179.pdf>
- [27] 刘蕾,臧淑英,邵田田,魏锦宏,宋开山.基于遥感与GIS的中国湖泊形态分析.国土资源遥感,2015,27(3):92-98.
- [28] 李明珍,李阳兵,冉彩虹.土地利用转型背景下的乡村景观格局演变响应——基于草堂流域的样带分析.自然资源学报,2020,35(9):2283-2298.
- [29] 邬建国.景观生态学—格局、过程、尺度与等级.北京:高等教育出版社,2000:2-11.
- [30] 齐贵增,白红英,赵婷,孟清,张善红.秦岭陕西段南北植被对干湿变化响应敏感性及其空间差异.地理学报,2021,76(1):44-56.

- [31] 谷娟, 秦怡, 王鑫, 马静宇, 郭仲皓, 邹乐君, 沈晓华. 鄱阳湖水体淹没频率变化及其湿地植被的响应. *生态学报*, 2018, 38(21): 7718-7726.
- [32] 王欢, 陈文波, 何蕾, 李海峰. 鄱阳湖不同水文连通性子湖水植被覆盖度对年际水位变化的响应. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 191-200.
- [33] Wan R R, Dai X, Shankman D. Vegetation response to hydrological changes in Poyang Lake, China. *Wetlands*, 2019, 39(S1): 99-112.
- [34] 叶许春, 吴娟, 李相虎. 鄱阳湖水位变化的复合驱动机制. *地理科学*, 2022, 42(2): 352-361.
- [35] 谢冬明, 郑鹏, 邓红兵, 赵景柱, 樊哲文, 方豫. 鄱阳湖湿地水位变化的景观响应. *生态学报*, 2011, 31(5): 1269-1276.
- [36] 汪朝辉, 王克林, 李仁东, 熊艳, 许联芳. 水陆交错生态脆弱带景观格局时空变化分析——以洞庭湖区为例. *自然资源学报*, 2004, 19(2): 240-247.
- [37] 王为东, 王亮, 聂大刚, 尹澄清. 白洋淀芦苇型水陆交错带水化学动态及其净化功能研究. *生态环境学报*, 2010, 19(3): 537-543.
- [38] 梁士楚, 苑晓霞, 卢晓明, 许桂芬, 覃艳, 姜勇. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征. *生态学报*, 2019, 39(8): 2752-2761.
- [39] 姚飞, 陈龙乾, 王秉义, 张婷, 周天建, 张宇. 巢湖水陆交错带土地利用景观格局梯度分析. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 214-219.
- [40] Yang H X, Wang H X, Lu J Z, Zhou Z Z, Feng Q, Wu Y. Full lifecycle monitoring on drought-converted catastrophic flood using sentinel-1 SAR: a case study of Poyang Lake region during summer 2020. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3485.
- [41] Lei X Y, Gao L, Wei J H, Ma M M, Xu L G, Fan H X, Li X H, Gao J Y, Dang H F, Chen X W, Fang W H. Contributions of climate change and human activities to runoff variations in the Poyang Lake Basin of China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2021, 123: 103019.
- [42] 李冰, 万荣荣, 杨桂山, 谭志强, 王殿常, 吴兴华. 近百年鄱阳湖湿地格局演变研究. *湖泊科学*, 2022, 34(3): 1018-1029.