

## 1974—2017 年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析\*

张莹莹<sup>1,2</sup>, 蔡晓斌<sup>1</sup>, 杨超<sup>1</sup>, 宋辛辛<sup>3</sup>, 李仁东<sup>1</sup>, 厉恩华<sup>1\*\*</sup>, 王学雷<sup>1</sup>

(1: 中国科学院测量与地球物理研究所, 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 武汉 430077)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 郑州师范学院, 郑州 450044)

**摘要:** 利用 Landsat 系列遥感影像数据 (1974、1979、1984、1990、1996、2001、2006、2009、2014 和 2017 年) 解译得到的土地利用/土地覆盖变化 (LUCC) 结合研究区 44 年的气温、降水量、水位等气象水文数据, 构建 LUCC 经验统计模型和计算景观格局指数, 探讨 1974—2017 年洪湖国家级自然保护区景观格局变化的主要驱动因素。研究结果表明: 土地利用强度指数由 1974 年的 207 增加到 2017 年的 249.36, 人类开发利用湖滨带的程度增强, 到 2017 年约有 30% 的自然湿地转化为坑塘、农田和滩地及建设用地。不同地表覆盖类型的景观格局指数均发生了较大变化, 2000 年以后湖滨带逐渐形成了以养殖为主的低矮围景观。总体上景观趋于破碎化、连通性降低、稳定性变弱。洪湖湿地自然保护区土地利用强度指数与景观格局综合指数呈较显著的正相关, 两者的相关系数为 0.84, 土地利用强度增加则景观更加破碎、斑块之间的连接程度减弱、区域的景观聚集度下降和景观异质性增加。总体而言, 洪湖湿地自然保护区受人为干扰影响明显, 开展封湖育草自然恢复与建立植被恢复示范区相结合, 构建自湖滨至湖心的梯度变化完整的湿生植被—挺水植被—漂浮植被—浮叶植被—沉水植被的水生植物群落, 退耕还草、退垸还湖、修复湖滨带植被, 大幅度提高洪湖的自净能力, 增加其水生植物多样性, 实现湿地的有效修复, 改善其结构和功能, 维系洪湖湿地生态系统的平衡。

**关键词:** 遥感影像; 土地利用/土地覆盖变化; 洪湖湿地自然保护区; 景观格局变化

## Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu Wetland Nature Reserve in recent 40 years

ZHANG Yingying<sup>1,2</sup>, CAI Xiaobin<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>1</sup>, SONG Xinxin<sup>3</sup>, LI Rendong<sup>1</sup>, LI Enhua<sup>1\*\*</sup> & WANG Xuelei<sup>1</sup>

(1: *Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation of Hubei Province, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, P.R.China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(3: *Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, P.R.China*)

**Abstract:** This study took Honghu National Nature Reserve as an example to investigate the driving forces on Landscape pattern changes based on the land use and land change data of 1974, 1979, 1984, 1990, 1996, 2001, 2006, 2009, 2014 and 2017, which were obtained from interpretation of Landsat images. Correlation analysis was adopted for finding characteristics of the interaction by combining with meteorological hydrological data such as temperature, precipitation and water stage. The results showed that: Land use intensity index risen from 207 at the beginning of the study to 249.36 at the end of the study during the period of 1974–2017, these changes were more due to enlargement in the interference of human activities for land-use change. About 30% of the natural wetlands translated into ponds, farmland and bottomland and construction land by 2017. The landscape pattern indices of different types have changed greatly, the lakeside zone has formed a low enclosed ponds dominated by aquaculture after entering twenty-first Century. On the whole, landscape tended to be diversified, fragmented, reduced in connectivity and weakened in stability. The correlation coefficient between land use intensity index and the composite index of landscape pattern is 0.84, it shows

\* 国家自然科学基金项目 (41371513) 资助。2018-04-20 收稿; 2018-06-16 收修改稿。张莹莹 (1992~), 女, 博士研究生; E-mail: zhangywhigg@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: lieh@whigg.ac.cn.

that LUCC is very closely related to the landscape pattern. With the increase of land use intensity, the landscape is more fragmented, the degree of connectivity between patches is weakly, the landscape aggregation degree of the area is decreasing, and the landscape heterogeneity is increasing. In general, the Honghu Wetland Nature Reserve is affected obviously by human interference. The goal of maintaining the balance of Honghu wetland ecosystem is achieved through rational exploitation and utilization, returning farmland to grass and lake, restoring the vegetation of the lakeside zone, increasing the diversity of its aquatic plants, realizing the effective restoration of the wetland, improving its structure and function. A combination of the natural restoration of vegetation and the establishment of demonstration area of vegetation restorations is carried out, and the hygrophilous vegetation, emergent aquatic vegetation, floating vegetation, floating-leaved vegetation, and submerged vegetation, should be constructed from the lakeside to the heart of the lake.

**Keywords:** Remote sensing images; land use and land change; Honghu Wetland Nature Reserve; landscape pattern change

湿地是自然界重要的、独特的、富有生物多样性的生态景观之一,具有调蓄洪水、补给地下水、改善局部气候、过滤污染、美化环境和维持生态系统平衡等功能<sup>[1]</sup>. 景观格局是指大小、形状、属性不一的斑块单元在空间上的分布与组合规律<sup>[2]</sup>. 随着景观生态学在我国的不断发展,景观格局已经广泛应用于森林生态系统监测、土地利用变化和湿地类型演替等方面<sup>[3-9]</sup>. 近年来,许多学者借助 3S 技术、景观生态学方法等对洪湖湿地景观格局变化进行了研究,如王茜等<sup>[10]</sup>利用 RS 与 GIS 对 2001 年单期影像数据获得的洪湖湿地景观格局进行简要分析;王璇洁<sup>[11]</sup>运用 3S 技术探讨洪湖湿地 1995—2010 这 15 年来土地利用变化的演变,以及验证研究区 LUCC 与景观格局变化的相关性;刘刚<sup>[12]</sup>研究了洪湖市湿地景观演替及碳储量,通过对洪湖市 1974—2010 年 8 期动态遥感监测,得到了洪湖湿地资源变化情况,并对其变化主因进行了分析;陈利等<sup>[13]</sup>研究的 1974—2010 年洪湖湿地景观类型特征变化,分析湿地斑块的数量(NP)、斑块形状的边缘长度(TE)、周长—面积分维数(PAFRAC)的变化,对其景观变化做了简要的定性分析,这些研究为认识洪湖湿地景观演变提供了借鉴和参考. 然而,对洪湖景观变化的分析研究多以定性分析和现象描述为主,对湿地景观演变驱动力的定量区分尚显不足. 由于湿地景观演变是一个长期动态过程,短期研究往往难以揭示长期规律,多数研究存在时间跨度短、原因分析简单、驱动因素分析不全面等问题,对洪湖湿地的景观分析研究大多囊括在江汉平原、四湖地区或整个洪湖市内<sup>[14-15]</sup>,突出洪湖湿地自然保护区重要性的景观格局研究很少<sup>[11]</sup>,对人工调控以来洪湖湿地自然保护区景观格局长时序变化的系统研究则更少. 洪湖作为湖北省最大的淡水湖泊,对长江中游汉江平原地区的供水、调蓄、灌溉、渔业、物种保护起着重要作用,有着“中南之肾”的美誉<sup>[16]</sup>. 然而,由于受人类活动的不断干预,至 1975 年,洪湖实际上已成为一个人工调控的半封闭的湖泊. 对这一人工调控下的非通江湿地景观变化的长时序研究,可以揭示该区域土地覆盖变化的内容、方向和强度,获取洪湖湿地自然保护区景观变化信息,从而为洪湖湿地管理提供决策支持,具有重要的科学和现实意义,更有利于洪湖湿地生态环境保护.

土地利用/土地覆盖变化(LUCC)是人类活动对湿地演变的重要干扰方式之一,改变湿地景观组成,同时造成湿地水文情势发生明显变化,进而对湿地生态环境造成影响<sup>[17]</sup>. 遥感卫星影像的可获得性,为长时序的湿地时空变化研究提供了连续、可靠的数据源,GIS 技术的空间分析和处理功能为湿地资源评价和动态监测提供支持. 本文基于 Landsat 系列影像数据获取洪湖湿地自然保护区的土地利用/土地覆被分类图,利用 Fragstats4.2 计算景观格局指数,构建 LUCC 模型及计算景观格局指数,结合实地调查资料和气象水文数据,探讨 1974—2017 年洪湖湿地景观格局变化的主要驱动因素.

## 1 研究区概况

洪湖位于湖北省东南部(29°38′~29°59′N,113°11′~113°28′E),属长江和汉水支流东荆河之间的大型浅水洼地壅塞湖,横跨洪湖、监利两个市县,湖面面积 348.2 km<sup>2</sup>,是湖北省第一大湖<sup>[18]</sup>. 洪湖属亚热带湿润季风气候,常年平均气温 16.6℃,平均降水量 1321.3 mm,无霜期 266.5 d<sup>[19]</sup>. 洪湖本属通江湖泊,水位受长江水位消长而变化,1955 年修筑洪湖隔堤,1958 年新滩口大型节制闸建成,阻断了洪湖与长江的通道,堵住了长江水的倒灌<sup>[20-21]</sup>. 水利工程阻隔了洪湖与长江的自然连通,导致湖水水位下降了 3 m 以上<sup>[22]</sup>,使湖区及周围沼泽地得以大规模围垦. 至 1975 年洪湖周围的隔堤建成后,现代洪湖的格局基本形成(图 1),洪湖成为人工

调控的、以洪水调蓄为主、兼具灌溉、养殖、运输等综合功能的封闭型湖泊<sup>[23]</sup>。2008 年洪湖被列入“国际重要湿地”,2014 年晋升为国家级自然保护区。

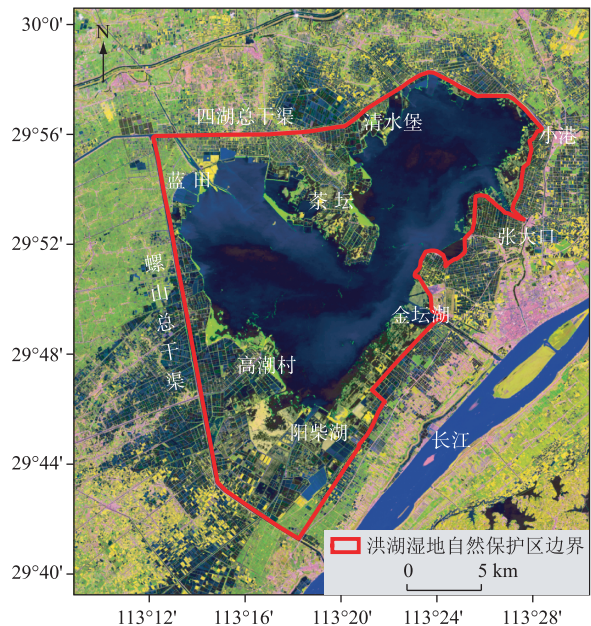


图 1 洪湖湿地自然保护区(背景图为 2017/ 8/27 Landsat8 OLI 影像波段 6、5、4 组合)

Fig.1 Location of Honghu Wetland Nature Reserve

2 数据与方法

2.1 遥感影像及气象数据

选取 1974—2017 年 6—10 月份植物生长季无云成像较好的 10 景 Landsat 影像(表 1),数据来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。基于 ENVI5.3 软件,分别对 TM、OLI 影像进行 FLAASH 大气校正,对 MSS 影像进行快速大气校正,在进行 FLAASH 大气校正之前,对不同数据类型的光谱遥感影像做辐射定标,将传感器记录的灰度值转化为绝对辐射亮度值(辐射率),通过 Toolbox 下的 Radiometric Calibration 工具来实现。根据影像各自的数据类型、获取时间和成幅范围等设定应用于 FLAASH 大气辐射校正模型的相关参数,大气模型选择中纬度夏季,气溶胶模型选择乡村,水汽反演不执行,气溶胶反演方法为 2-band(K-T)。然后以 OLI 影像为基准对 MSS、TM 影像进行几何配准,总误差控制在 0.5 个像元内,最后根据洪湖湿地保护区边界对其进行掩膜裁剪。研究区温度、降雨量数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),洪湖日水位数据来源于湖北省水利厅网站的湖泊水情数据(<http://www.hubeiwater.gov.cn/>)。

2.2 图像分类

2.2.1 分类方法和训练样本选取 支持向量机(SVM)相对传统分类方法具有较好的分类效果<sup>[24-27]</sup>,集成光

表 1 Landsat 系列影像信息

Tab.1 Description of Landsat images in this research

类型	获取时间	分辨率/ m	轨道号
Landsat1 MSS	1974 年 6 月 6 日	60	132/39
Landsat3 MSS	1979 年 6 月 16 日	60	132/39
Landsat5 MSS	1984 年 8 月 16 日	60	123/39
Landsat5 TM	1990 年 9 月 2 日	30	123/39
Landsat5 TM	1996 年 6 月 14 日	30	123/39
Landsat5 TM	2001 年 7 月 30 日	30	123/39
Landsat6 TM	2006 年 6 月 10 日	30	123/39
Landsat5 TM	2009 年 7 月 20 日	30	123/39
Landsat8 OLI	2014 年 10 月 6 日	30	123/39
Landsat8 OLI	2017 年 8 月 27 日	30	123/39

谱和纹理形状特征以及转换后的光谱成份,能有效提高分类精度<sup>[26, 28]</sup>,本研究对 TM 和 OLI 数据采用 SVM 的监督分类方法. 由于水体、植被、陆地的反射率在近红外波段差别最大,且改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 和归一化植被指数 (NDVI) 对水体与植被提取具有优势,因此利用 ENVI5.3 软件的 SVM 监督分类法集成近红外波段、MNDWI 和 NDVI 光谱数据,把研究区分为水体、植被、陆地三类地物,在此基础上根据纹理和形状差异(湖泊纹理较为平滑细腻,轮廓清晰,自然闭合,面积、周长、长度和宽度占绝对优势)把水体分为湖泊和封闭水体(坑塘),根据季相差异将农田种植区从自然植被中区别出来. 其中监督分类的训练样本结合 GPS 野外调查数据及参照历史研究资料在 Google earth 上的高分辨率影像随机选取,保证每类样点获取不少于 400 个. MSS 影像质量较差,且用来监督分类的训练样本不易获取,因此先利用 ISODATA 非监督分类的方法把 MSS 数据分为 3 类,在此基础上结合历史资料对其他两类农田和坑塘进行目视解译修正.

2.2.2 土地利用类型分类图及精度验证 根据中国科学院土地资源分类系统<sup>[29]</sup>、湿地分类国家标准<sup>[30]</sup>,参考洪湖湿地地表覆盖特征与历史资料,利用上述分类方法将洪湖湿地自然保护区范围内的土地利用与土地覆盖划分为 5 类:湖泊(未被土壤围起来的开阔水体和西北部的河渠)、植被(水面以上的植被包括挺水、浮叶及湿生植被)、坑塘(封闭水体,以土壤相间、呈规则状的水体)、农田(筑有田埂的人为开垦地,主要指水稻田和经济作物用地)和其他类(湖泊常水位至洪水位的裸露滩地及开垦的低植被覆盖度的土壤、田埂和人类居住的建设用地),得到洪湖湿地自然保护区土地利用分类结果(图 2). 其中湖泊和植被为自然湿地,农田以水田为主,主要表现为人工湿地的性质,故把坑塘和农田归为人工湿地. 由于保护区范围内建设用所占比例小且变化慢,故主要包括滩地和建设用地的其他类主要表现为年际间滩涂面积的变化. 由于仅有 2010 年后的野外调查资料,故之前年份的结果主要结合历史研究资料和 Google earth 高分影像进行精度检验,2010 年后的分类结果通过导入野外调查点进行目视判读,经检验分类精度都在 85% 以上,以 2017 年为例,列出各分类精度的混淆矩阵(表 2).

表 2 2017 年洪湖湿地自然保护区土地利用/土地覆被分类精度混淆矩阵  
Tab.2 Confusion matrix of classification of Honghu Wetland Nature Reserve in 2017

类型	坑塘	农田	植被	湖泊	其他	总和	用户精度/%
坑塘	98	0	2	5	16	121	80.99
农田	0	72	8	0	8	88	81.82
植被	1	2	162	0	8	173	93.64
湖泊	5	0	0	115	0	120	95.83
其他	0	1	1	0	161	163	98.77
总和	104	75	173	120	193	665	
生产者精度/%	94.23	96.00	93.64	95.83	83.42		
总精度=91.43%, Kappa 系数=0.89							

## 2.3 景观指数及土地利用强度指数

2.3.1 景观指数 利用 ArcMap10.2 把土地利用图的矢量图转成 30×30 精度的栅格图层,输入到 Fragstats4.2 中,计算各类景观面积(CA)、斑块类型的斑块数量(NP)、斑块所占景观面积的比例(PLAND)和聚集度指数(COHESION);景观级别的斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块所占面积比例(LPI)、周长—面积分维数(PAFRAC)、蔓延度指数(CONTAG)、聚集度指数(COHESION)、分离度指数(SPLIT)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI)和聚合度(AI)等指标. 上述指标反映了景观的破碎度、邻近度、多样性和聚散度.

2.3.2 土地利用强度指数 根据土地利用程度的综合分析方法<sup>[31]</sup>,将土地利用程度按照土地自然综合体在社会因素影响下的自然平衡状态分为若干级,赋予分级指数,得到土地利用强度指数定量化表达式:

$$L = 100 \sum_{i=1}^n J_i \cdot A_i, L \in [100, 400] \quad (1)$$

式中,  $L$  为研究区域土地利用强度指数;  $J_i$  为第  $i$  类土地利用强度的分级指数;  $A_i$  为第  $i$  类土地利用强度的等级面积百分比;  $n$  为土地利用强度的等级. 根据中国资源环境数据库中土地利用程度分级标准<sup>[29]</sup>,结合本

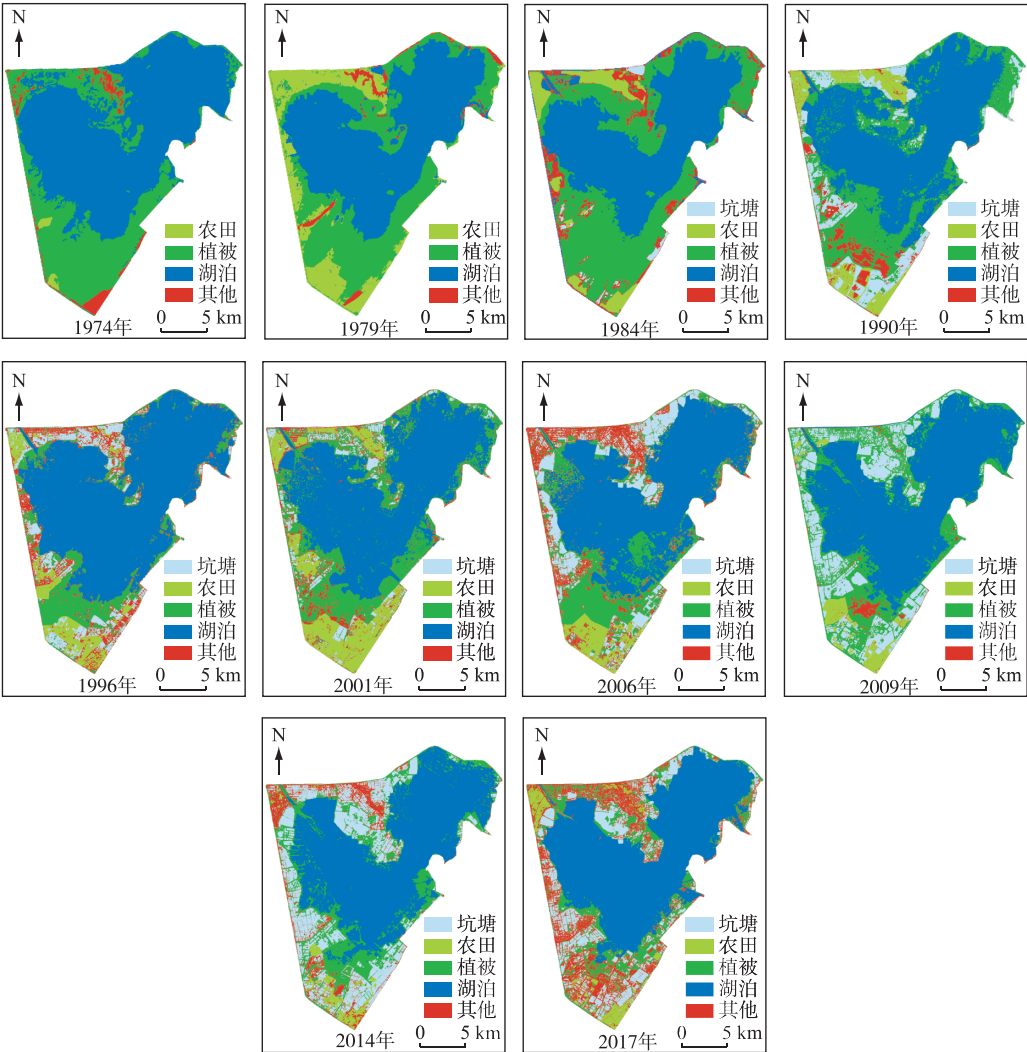


图 2 1974—2017 年洪湖湿地自然保护区土地利用/土地覆被分类

Fig.2 Land use/land cover classification of Honghu Wetland Nature Reserve during the period of 1974—2017

文研究区具体状况,将土地利用分为 4 级(表 3)。

表 3 土地利用强度分级标准

Tab.3 Grade scale for land use intensity

类型	未利用土地	林、草、水用地	农业用地	居民用地
土地利用类型	未利用地	植被、湖泊	农田、坑塘	滩地及建设用
分级指数	1	2	3	4

2.4 综合统计分析

本文利用 SPSS 22 统计软件进行主成分分析计算得到景观格局综合指数(F),既可以达到降低维数的目的,又能得到景观格局特征的综合评价。气候变化和水文情势的改变和人为因素造成的围湖造田、围网养殖等其他改变土地利用/土地覆被的现象都会在一定程度上改变景观格局。本文运用 SPSS22 计算研究期间

洪湖湿地土地利用程度综合指数、景观综合指数、各景观指数和温度、降雨量与水位的相关性.

表 4 主成分分析结果

Tab.4 The result of principal component analysis

	主成分 1	主成分 2	累积方差/%
NP	0.126	0.168	73.744
PD	0.126	0.168	91.874
LPI	-0.063	0.476	96.039
PAFRAC	0.114	0.195	98.585
CONTAG	-0.133	0.018	99.425
COHESION	-0.107	-0.186	99.869
SPLIT	0.104	-0.342	99.991
SHDI	0.13	-0.116	100
SHEI	0.12	-0.191	100
AI	-0.126	-0.168	100

3 结果与讨论

3.1 景观格局综合指数与土地利用强度指数

利用 SPSS22 将各时期的 NP、PD、LPI、PAFRAC、CONTAG、COHESION、SPLIT、SHDI、SHEI 和 AI 共 10 个变量进行标准化处理,分别用  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$ 、 $x_7$ 、 $x_8$ 、 $x_9$ 、 $x_{10}$  表征. 通过主成分分析,提取出主成分的主要信息,前两个主成分可以解释原方差的 91.87%,其中第 1 主成分可以解释原数据的 73.744%,第 2 主成分可以解释 18.130%. 因此,利用主成分的前两项计算景观格局综合指数,该指数可以更为全面地体现研究区内景观的综合信息,根据其各个主成分的载荷(表 4),通过景观斑块之间的相互关系来体现景观格局的整体特征. 设主成分 1 为  $F_1$ ,主成分 2 为  $F_2$ ,总指标 F(景观格局综合指数)可得:

$$F_1 = 0.126 x_1 + 0.126 x_2 - 0.063 x_3 + 0.114 x_4 - 0.133 x_5 - 0.107 x_6 + 0.104 x_7 + 0.13 x_8 + 0.12 x_9 - 0.126 x_{10} \tag{2}$$

$$F_2 = 0.168 x_1 + 0.168 x_2 + 0.476 x_3 + 0.195 x_4 + 0.018 x_5 - 0.186 x_6 - 0.342 x_7 - 0.116 x_8 - 0.191 x_9 - 0.168 x_{10} \tag{3}$$

$$F = 0.74 F_1 + 0.18 F_2 \tag{4}$$

并利用公式(1)计算研究区各研究时段的土地利用强度,得到土地利用强度指数. 计算所得的  $F_1$ 、 $F_2$ 、F 和 L 见表 5.

表 5 景观格局综合指数(F)与土地利用强度指数(L)

Tab.5 Landscape pattern synthesis index and land use intensity index

指标	1974 年	1979 年	1984 年	1990 年	1996 年	2001 年	2006 年	2009 年	2014 年	2017 年
L	207.00	219.33	222.49	228.89	235.07	234.37	244.54	226.83	237.70	249.36
$F_1$	19.00	21.17	64.69	793.28	934.02	1623.07	1402.58	682.23	1025.96	1199.14
$F_2$	67.59	60.43	115.77	1088.92	1283.74	2193.59	1896.97	942.63	1398.13	1630.57
F	26.27	26.57	68.69	782.42	921.53	1594.62	1378.24	674.00	1010.06	1179.92

3.2 景观类型面积变化

自然湿地包括湖泊和植被,人工湿地包括坑塘和农田. 各类景观面积(CA)和斑块所占景观面积的比例

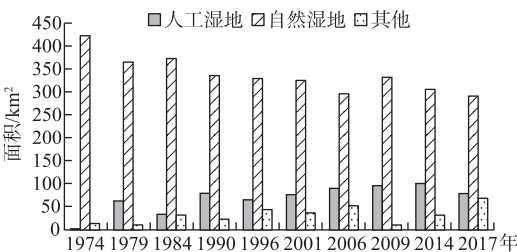


图 3 1974—2017 年人工湿地和自然湿地面积变化

Fig.3 Area changes of human-made wetland and natural wetland

(PLAND)见表 6. 湖泊面积占比由研究初的 63.54% 减少到研究期末的 52.28%,植被占比则由 32.65% 降到 14.03%,坑塘则从无到占比为 15.09%. 2017 年自然湿地湖泊和植被面积相对于 1974 年分别减少 49.41 和 81.69  $\text{km}^2$ ,人工湿地坑塘、农田分别增加 66.22 和 10.15  $\text{km}^2$ ,其他类增加 54.73  $\text{km}^2$ . 从各类型所占百分比的历年变化可以看出自然湿地湖泊开闢水体和植被分布区面积所占比例在减少,2017 年相对于 1974 年由 30%的自然湿地转化为坑塘、农田和其他类. 由图 3 能直观地看出自然湿地面积呈减少的趋势,人工湿地面积增加到一定水平后趋于稳定.

表 6 土地利用类型面积和所占百分比  
Tab.6 The area and percentage of each type of land use

年份	湖泊		坑塘		植被		农田		其他	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
1974	278.79	63.54	0	0	143.27	32.65	2.67	0.61	14.05	3.20
1979	220.78	50.32	0	0	144	32.82	63.05	14.37	10.95	2.50
1984	199.61	45.49	8.27	1.88	172.9	39.40	25.6	5.83	32.4	7.38
1990	223.52	50.94	50.09	11.42	112.11	25.55	29.51	6.73	23.55	5.37
1996	268.73	61.24	46.17	10.52	60.33	13.75	19.37	4.41	44.18	10.07
2001	218.41	49.78	30.5	6.95	106.62	24.30	46.14	10.52	37.11	8.46
2006	202.11	46.06	73.92	16.85	93.76	21.37	16.45	3.75	52.54	11.97
2009	231.57	52.78	81.09	18.48	100.24	22.85	15.11	3.44	10.77	2.45
2014	219.38	50.00	90.68	20.67	86.19	19.64	10.32	2.35	32.21	7.34
2017	229.38	52.28	66.22	15.09	61.58	14.03	12.82	2.92	68.78	15.68

3.3 景观格局动态变化

3.3.1 斑块类型级别的景观指数变化 斑块数量是反映景观破碎度程度的标志之一,斑块数量越多说明景观类型破碎度程度越高. 斑块所占景观面积的比例,即某一类型景观的斑块占景观总面积的比例,用以表明该类景观斑块在景观中的影响程度. 从图 4a 可见,坑塘、植被和其他类的斑块数量较农田和湖泊多,且年际间波动较大. 1950s 江湖阻隔之后,洪湖原有的湿生植物带和大部分挺水植物带被围垦;1970s—1980s,人为开垦虽已开始,但大片的原始滩地仍然存在,景观的破碎度较小,这一时期的斑块数量少且增长缓慢,湖滨带的开发利用以农业种植为主;1980s,围湖圈养食草性鱼类快速发展,由于水位落差的减少,挺水植物如莲、菰和芦苇等由浅水区向湖心扩展,植被、坑塘和其他类进一步破碎化,斑块数量增加,这一阶段大片的农田向坑塘转化;1990s 以来,洪湖原有湖滨带几乎全部被人为利用,主要利用方式为鱼塘养殖和村落建设,水生植被开发利用的强度不断加大,洪湖水生植物群落演替也受到了这些人为干扰的影响. 造成这一现象的主要原因是人类活动对研究区的干扰程度越来越大,湖滨带大片分布的菰群落及莲群落植被分布区被开垦为农田和坑塘,使得研究区的景观格局向破碎化方向发展,景观格局的完整性和连通性遭到破坏. 农田面积由少增多再减少后又趋于稳定,而坑塘面积以增加为主,说明在实行退耕还湖政策后又 被围湖养殖. 洪湖现有野菰和莲群落主要分布在蓝田生态区、阳柴湖西侧、金坛南侧、张大口、小港等濒临湖岸区域,这些区域水位相对较低,也是历史上菰和莲的主要分布地区,其种子库较为丰富,因而有利于其恢复生长;同时,这些区域都在洪湖入口或生态旅游区,为发展旅游业而人为加以保护,也可能是其存在原因之一. 景观聚集度指数表征斑块连通性,斑块的聚集度指数数值越小,景观越分散,斑块完全孤立,连通性最差时,值为 0;值越大,说明景观的空间连通度越高. 由图 4b 可以看出,植被的连通性降低,湖泊连通性波动较小,人为开发利用的坑塘和滩地及建设用地的连通性最差,且年际波动最大. 从斑块数量的分析可知,坑塘与滩地及建设用地斑块数量较多,且较破碎分散,相互之间连通性较差. 再加上滩地及建设用地和坑塘相对于湖泊和植被来说,受人为影响年际间波动较大,其连通性在年际间波动也最大.

3.3.2 景观级别的景观指数变化 由景观指数的主成分分析结果表 3 可知,第 1 主成分主要由 NP、CONTAG、SHDI 和 SHEI 决定,因此景观级别的景观指数仅选取反映景观破碎度的 NP、景观连通度的 CONTAG 和能反映景观异质性、均匀性的 SHDI 和 SHEI. CONTAG 是衡量景观是否由多种要素聚集分布的指标,当某一斑块类型占绝对优势时,CONTAG 值较高,当景观由许多大的聚集斑块组成时,其值较大,反之亦然. 由图 5 可知,在 2001 年之前,NP 一直呈直线增长,CONTAG 整体上呈下降的趋势;进入 21 世纪后,NP 有所下降,CONTAG 有所升高,连通度增高,整体上 NP 稳定在一定的水平上且有减少的趋势. 这一现象与政策支持下开展的保护措施分不开,1996 年建立洪湖湿地自然保护区,2000 年洪湖成为省级湿地自然保护区,2003 年,洪湖被国家林业局批准为 5 个湿地保护与恢复示范工程建设单位之一,2005 年,省政府对洪湖实行抢救性保护(拆除围网、安置渔民、恢复水生植被),2008 年洪湖被列入“国际重要湿地”. SHDI 是描述

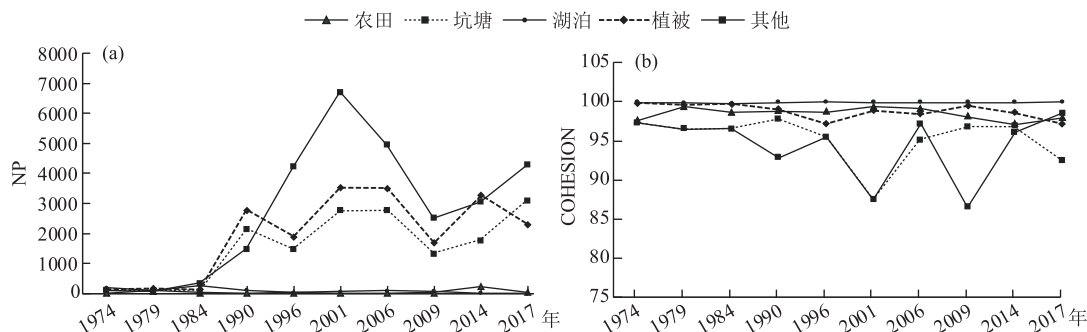


图4 不同景观类型的景观破碎度(NP)和景观聚集度(COHESION)指数年际变化

Fig.4 Inter-annual changes of number of various plaques and cohesion in class-level

景观丰富程度的指标,当整个景观由一个斑块组成时,SHDI 值为 0,当 SHDI 值升高,说明景观斑块的类型增加. SHEI 是比较景观不同时期多样性变化的指标,反映景观中各斑块类型在面积上分布的均匀程度, SHEI 越接近 1,研究区景观类型面积分布越不均匀. 由图 6 可知,在 1974 年 SHDI 和 SHEI 值均最低,主要原因是人为开发程度较低,湖滨带植被分布集中面积广,坑塘和农田面积较小,异质性相对较低. 1980s 后 SHDI 值和 SHEI 值呈波动增加,说明人为干扰在达到一定水平后景观异质性趋于稳定,湿地景观结构分布更为均衡,景观结构组成更为复杂.

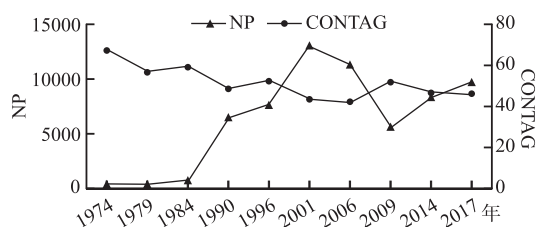


图5 景观级别的斑块(NP)和蔓延度(CONTAG)指标变化

Fig.5 Inter-annual changes of number of various plaques and contagion in landscape-level

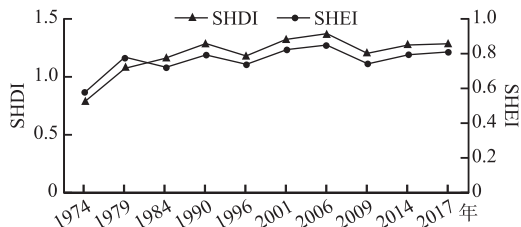


图6 景观级别的香农多样性指数(SHDI)和香农均匀度(SHEI)指数年际变化

Fig.6 Inter-annual changes of Shannon diversity index and Shannon evenness index in landscape-level

### 3.4 驱动因素研究

为量化分析影响景观格局变化的主要因素,利用 SPSS22 软件对所选要素进行相关性分析,包括土地利用强度指数 L(人为因素),洪湖的温度 T(单位为 $^{\circ}\text{C}$ )、降雨量 R(单位为 mm),及另加上景观级别的指标: NP、PD、LPI、PAFRAC、CONTAG、COHESION、SPLIT、SHDI、SHEI、AI 和对应年份的景观综合指数 F 指标. 由于 1974 和 1979 年的水位数据缺失,故仅对 1984 年后的水位数据进行 Pearson 相关性分析.

相关性分析结果表明,景观格局指数与土地利用强度之间有较强的相关性(这种相关性是否具有空间异质性,即是否可以在斑块尺度上进行计算分析,景观格局指数与土地利用强度的相关性应该存在空间异质性,本文利用 Fragstats4.2 计算的斑块尺度(patch metrics)所包括的景观指数有破碎度和连通度指标,没有景观多样性、均匀度和分离度等指标. 故仅对景观级别的景观格局指数与土地利用强度进行相关性分析,下一步为了避免视整个研究区为均质区域,可以进一步把景观指标与相关影响因子分别空间化,探讨其湿地不同空间景观变化的原因). L 与 F、NP、PD 有显著的正相关关系( $P < 0.01$ ),相关系数分别为 0.84、0.84、0.84,说明人为干预越多,土地利用强度越大,景观越破碎,人为因素是研究区景观格局的主导因素,并影响着景观的基本组成;L 与 SPLIT、PAFRAC 有正相关,相关系数分别为 0.63 和 0.84,说明 L 的变化会影响景观

斑块之间的距离和斑块形状,土地利用强度越大,斑块分离程度越大,形状也越复杂;L 与 SHDI、SHEI 呈显著的正相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为 0.87 和 0.80,说明在人类活动作用下改变了湖滨带的景观异质性,湖滨带的土地利用方式由植被和滩涂逐渐变为坑塘和农田,景观异质性增加;L 与 AI、CONTAG、COHESION 呈显著负相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为-0.90、-0.89、-0.94,随着土地利用强度的增大,洪湖湿地自然保护区的景观聚集度下降、破碎度增强、斑块之间的连接程度减弱. 这一结论与以往对洪湖市湿地景观演替研究结论较为一致,人为活动是导致洪湖湿地演替的主要原因,坑塘的面积变化幅度最大,淡水养殖池塘面积的增加是农业经济类型转变的一个直观体现<sup>[11-12]</sup>. F 与 T 有显著的相关性( $P<0.01$ ),相关系数为 0.813;降雨量与各景观指数的相关性较差,没有显著的统计学上的相关. 水位与各景观指数没有显著的相关性.

3.4.1 气候变化影响 在全球气候不断变暖的大环境下,1974 年以来,洪湖地区的温度每年以  $0.034^{\circ}\text{C}$  的趋势升高,年平均降水量为 1399 mm,平均气温为  $17.27^{\circ}\text{C}$  (图 7),同时气候异常事件增多,旱涝灾害频发,如 1980、1991、1996、1998、2010 和 2016 年洪涝灾害及 1974、1976、1978、1984、1999、2000、2001 和 2011 年的严重旱情<sup>[32-34]</sup>. 人工调控下,降水是洪湖湿地重要的补给来源,但降雨暴增水位抬高会对湿地植被产生扰动,降雨量减少则会造成湿地水资源补给的短缺,同时会对湿地植被和土壤产生影响. 温度升高导致蒸发量增大,从而导致湿地水量减少. 在极端气候频繁出现下,湿地水文状况不断发生变化,湿地类型将频繁发生变化,这一变化将增加湿地的生态不稳定性,洪湖自然湿地动态变化与降水密切相关,降水多则浅水湖泊面积增大,降水少则湖滨滩地面积增加<sup>[35]</sup>. 分别对湖泊面积、植被面积自然湿地类型进行回归分析(图 8),结果显示湖泊面积与降雨量相关性不高( $R^2=0.14$ ),与湿地植被面积呈负相关( $R^2=0.55$ ). 说明除了气候自然因素的影响,湿地各景观面积还可能受到别的因素如人为活动的影响. 1990 年以来人类活动是洪湖流域地表径流减少的主要原因,其影响贡献率占径流减少量的 63.72%<sup>[32]</sup>.

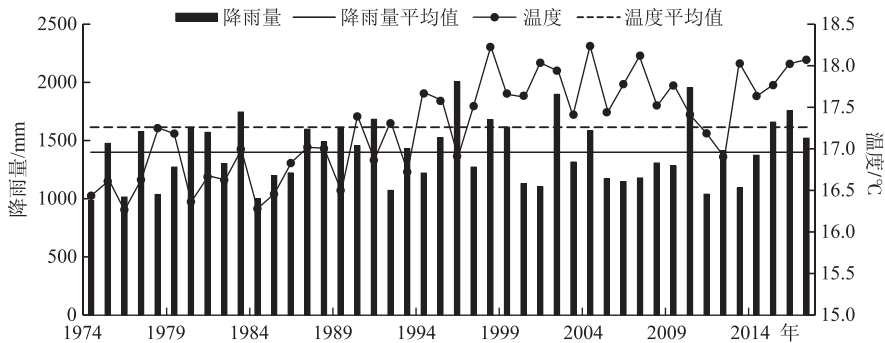


图 7 1974—2017 年洪湖地区温度和降雨变化

Fig.7 Changes of temperature and precipitation in Honghu area from 1974 to 2017

3.4.2 人为因素及其他因素影响 人工筑围堤和低矮围坑塘的开垦改变了湖滨带地形地貌,使原有的天然缓坡带变为立岸,水位变幅区面积减小,直接造成植被生境破坏,导致大面积湿生植物消失和物种数量减少,挺水植物和浮叶植物生存空间下降<sup>[36]</sup>. 人为调控下的江湖关系为洪湖开垦创造了条件,加强了洪湖湿地被人为围垦的能力,导致水量调蓄能力的下降,洪涝灾害发生频繁<sup>[37]</sup>. 洪湖水位变化趋向平缓,在洪水期,洪湖流域形成外洪内涝,长江水不能自排到洪湖,发挥不了应有的调蓄作用;枯水期时,洪湖水也不能及时补充长江水量<sup>[38]</sup>. 江湖关系演变同时为植被

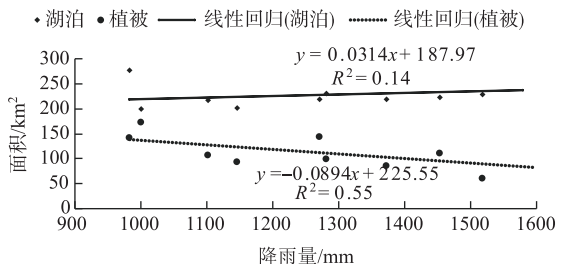


图 8 洪湖湿地保护区湖泊面积、植被面积与降水量的回归分析

Fig.8 Regression analysis between lake area, vegetative cover and precipitation in Honghu Wetland Nature Reserve

入侵种在洪湖泛滥提供了条件,通过干渠流入洪湖的水,多为上游受四湖地区生活污水的水,加剧了洪湖水水质恶化,水质恶化加快水体富营养化,导致水葫芦泛滥以及洪湖湿地生物多样性降低。此外,政府的积极干预对洪湖景观也起着重要作用,如2016年启动全面清除围网,2017年水葫芦的监测和控制措施。

## 4 结论

1) 湖泊和植被是洪湖湿地自然保护区土地利用方式的主体。1974—2017年,研究区湖泊和植被面积减少,滩地及建设用地、农田和坑塘面积增加,2017年相对于1974年有30%的自然湿地转化为坑塘、农田和滩地及建设用地。L由1974年的207上升到2017年的249.36,表明人类对土地利用的程度增强,人类活动导致土地利用结构和方式发生了较大变化。

2) 1974—2017年44年间,洪湖湿地自然保护区景观格局指数和景观格局综合指数均发生了较大变化。斑块数量在2001年之前一直呈直线增长,进入21世纪后,其破碎度在增加到一定程度后,分布趋于规则化,相互之间连通性较差,景观异质性较高。上世纪1970s—1980s大片的原始滩地仍然存在,景观的破碎度较小,这一时期的斑块数量少且增长缓慢,湖滨带的开发利用以农业种植为主;1980s—1990s植被、坑塘和其他类进一步破碎化,斑块数量增加,这一阶段大片的农田向坑塘转化,进入21世纪后湖滨带已经形成以养殖为主的低矮围景观。1980s以来香农多样性值和香农均匀度值呈波动地增加,值较稳定,说明人为干扰在达到一定水平后景观异质性趋于稳定。人类活动的强度和方向对景观格局变化的强度和方向起主导作用,改变了景观的异质性、不同地类斑块之间的聚集程度和连接程度。

3) 洪湖湿地自然保护区L与F的相关系数高达0.84,说明L与景观格局关系非常密切,土地利用强度的增加造成研究区的景观格局向不利于生态可持续发展的方向发展,景观更加破碎化,湖泊和植被自然湿地的面积逐渐减少。L增加则景观破碎度增加、斑块之间的连接程度减弱、区域的景观聚集度下降、景观异质性增加,湖滨带的土地利用方式由菰群丛和莲群落逐渐变为坑塘和农田,洪湖湿地内人为景观增加,大片植被和滩涂被分割为农田和坑塘,景观破碎化现象严重。

4) 洪湖湖滨带属于由人为不合理开发活动影响而形成的养殖型湖滨带,鱼塘、蟹池面积较大且集中连片,被占用的大片湖滨带水体的基底已被人工改造,使得原生水生态系统全部被破坏,导致湖滨带自然生物物种的大量消亡,保护区现有湿生植物群落面积极小,仅存于湖滨堤岸地带。开展封湖育草自然恢复与建立植被恢复示范区相结合,构建自湖滨至湖心的梯度变化完整的湿生植被—挺水植被—漂浮植被—浮叶植被—沉水植被的水生植物群落,退耕还草、退垸还湖、修复湖滨带植被,大幅度提高洪湖的自净能力,增加其水生植物多样性,为水生动物及鸟类提供良好的生存环境,实现湿地的有效修复,改善其结构和功能,维系洪湖湿地生态系统的平衡。加强法规和制度建设,深化洪湖管理体制改革,明确管理责任,尽快出台一部专门针对洪湖湿地自然保护区的地方性法规,明确湿地保护职责权限、管理程序和行为准则。

## 5 参考文献

- [1] Chen YY, Lv XG. The wetland function and research tendency of wetland science. *Wetland Science*, 2003, 1(1): 7-11. [陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学, 2003, 1(1): 7-11.]
- [2] Wu JG ed. *Landscape ecology: Pattern, process, scale and hierarchy*: 2nd. Beijing: Higher Education Press, 2007. [邬建国. 景观生态学: 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2007.]
- [3] Dixon MD, Johnson WC, Scott ML *et al.* Dynamics of plains Cottonwood (*Populus deltoides*) forests and historical landscape change along unchannelized segments of the Missouri River, USA. *Environmental Management*, 2012, 49(5): 990-1008. DOI: 10.1007/s00267-012-9842-5.
- [4] Wang S, Yugu, Zhang S. The temporal and spatial characteristic of landscape ecological security at the middle and lower reaches of Hanjiang River Watershed. *International Conference on Energy, Environment and Materials Engineering (Eeme 2014)*, 2014: 193-197.
- [5] Palmquist EC, Ralstonb, Merritt DM *et al.* Landscape-scale processes influence riparian plant composition along a regulated river. *Journal of Arid Environments*, 2018, 148: 54-64. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2017.10.001.
- [6] Xu Y, Gao JF, Gao YN. Landscape ecological risk assessment in the Taihu region based on land use change. *J Lake Sci*,

- 2011, **23**(4): 642-648. DOI: 10.18307/2011.0422. [许妍, 高俊峰, 高永年. 基于土地利用动态变化的太湖地区景观生态风险评价. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 642-648.]
- [7] Liu XJ, Li ZB, Li P *et al.* Land use /cover change based relationship between landscape, runoff, and sedimentation. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(18): 5691-5700. [刘晓君, 李占斌, 李鹏等. 基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究. 生态学报, 2016, **36**(18): 5691-5700.]
- [8] Chen HZ, Shi TZ, Wu GF. The dynamic analysis of lake landscape of Wuhan City in recent 40 years. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 745-754. DOI: 10.18307/2015.0424. [陈海珍, 石铁柱, 邬国锋. 武汉市湖泊景观动态遥感分析(1973—2013年). 湖泊科学, 2015, **27**(4): 745-754.]
- [9] Gong ZN, Zhang YR, Gong HL *et al.* Evolution of wetland landscape Pattern and its driving factors in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(1): 77-88. [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. 地理学报, 2011, **66**(1): 77-88.]
- [10] Wang Q, Ren XY, Xiao F *et al.* Landscape patterns in Honghu wetland using RS and GIS. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, **14**(2): 224-226. [王茜, 任宪友, 肖飞等. RS与GIS支持的洪湖湿地景观格局分析. 中国生态农业学报, 2006, **14**(2): 224-226.]
- [11] Wang XJ. Effects of LUCC on landscape of Honghu wetland [Dissertation]. Wuhan: Central China Normal University, 2013. [王璇洁. 洪湖湿地LUCC对景观格局的影响[学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2013.]
- [12] Liu G. The reasearch on the landscape successions and the carbon storage of Honghu wetland in China [Dissertation]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011. [刘刚. 洪湖湿地景观演替及碳储量研究[学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.]
- [13] Chen L, Lin H, Liu G. Analysis on Honghu wetland landscape type traits change from 1974 to 2010. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, **33**(8): 108-112. [陈利, 林辉, 刘刚. 1974~2010年洪湖湿地景观类型特征变化的分析. 中南林业科技大学学报, 2013, **33**(8): 108-112.]
- [14] Xu BS. Study on landscape pattern evolution of land use and ecological security assessment in Jiangnan plain [Dissertation]. Wuhan: Central China Normal University, 2012. [许倍慎. 江汉平原土地利用景观格局演变及生态安全评价[学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2012.]
- [15] Wang XL, Wu YJ. The application of the Markov Model on the dynamic change of wetland landscape pattern in four-lake area. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2002, **21**(3): 288-292. [王学雷, 吴宜进. 马尔科夫模型在四湖地区湿地景观变化研究中的应用. 华中农业大学学报, 2002, **21**(3): 288-292.]
- [16] Liu ZY, He H. Factors influencing succession of Honghu Lake Wetland and strategy for ecological restoration. *Wetland Science & Management*, 2008, **4**(2): 37-41. [刘章勇, 何浩. 洪湖湿地演替的影响因素与生态恢复对策. 湿地科学与管理, 2008, **4**(2): 37-41.]
- [17] Torbick NM, Qi J, Roloff GJ *et al.* Investigating impacts of land-use land cover change on wetlands in the Muskegon River Watershed, Michigan, USA. *Wetlands*, 2006, **26**(4): 1103-1113.
- [18] Chen YY, Xu YH eds. Honghu aquatic organisms and its resource development. Beijing: Science Press, 1995. [陈宜瑜, 许蕴珩. 洪湖水生生物及其资源开发. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [19] Zhang H, Chen SJ, Zhang GY *et al.* The effect of Three Gorges Project on groundwater level and soil gleization in Honghu region. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2009, **25**(3): 317-321. [张红, 陈世俭, 张光岳等. 三峡工程对洪湖地区地下水动态和土壤潜育的影响. 农业系统科学与综合研究, 2009, **25**(3): 317-321.]
- [20] Lu S, Li SJ, Wang XL. Study on the environmental evolution and ecological protection of Honghu Lake. *Wetland Science*, 2004, **2**(3): 234-237. [卢山, 李世杰, 王学雷. 洪湖的环境变迁与生态保护. 湿地科学, 2004, **2**(3): 234-237.]
- [21] Chen SJ. Environmental problems and ecological countermeasures for the Honghu Lake in Hubei province. *Jorunal of Central China Normal University: Nat Sci*, 2001, **35**(1): 107-110. [陈世俭. 洪湖的环境变迁及其生态对策. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2001, **35**(1): 107-110.]
- [22] Zou SH. Study on the swamping of Jianhan Lake groups. *Jorunal of Central China Normal University: Nat Sci*, 1989, **23**(1): 118-123. [邹尚辉. 江汉湖群湖泊沼泽化问题研究. 华中师范大学学报: 自然科学版, 1989, **23**(1): 118-123.]
- [23] Wang XL, Liu XT, Wu YJ. Analysis of water environment characteristics and purification ability of Honghu Lake Wetland in Jiangnan plain. *J Wuhan Univ: Nat Sci Ed*, 2003, **49**(2): 217-220. [王学雷, 刘兴土, 吴宜进. 洪湖水环境特征与

湖泊湿地净化能力研究. 武汉大学学报: 理学版, 2003, **49**(2): 217-220.]

- [24] Foody GM, Mathur A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2004, **42**(6): 1335-1343. DOI: 10.1109/tgrs.2004.827257.
- [25] Mitra P, Shankar BU, PAL SK. Segmentation of multispectral remote sensing images using active support vector machines. *Pattern Recognition Letters*, 2004, **25**(9): 1067-1074. DOI: 10.1016/j.patrec.2004.03.004.
- [26] Waske B, Benediktsson JA. Fusion of support vector machines for classification of multisensor data. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, **45**(12): 3858-3866. DOI:10.1109/tgrs.2007.898446.
- [27] Mountrakis G, Im J, Ogole C. Support vector machines in remote sensing: A review. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2011, **66**(3): 247-259. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001.
- [28] Han X, Chen X, Feng L. Four decades of winter wetland changes in Poyang Lake based on Landsat observations between 1973 and 2013. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **156**: 426-437. DOI: 10.1016/j.rse.2014.10.003.
- [29] Liu JY ed. Remote sensing macroscopic survey and dynamic research of resources and environment in china. Beijing: China Press of Science and Technology, 1996.[刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.]
- [30] Li YF, Liu HY. Advance in wetland classification and wetland landscape classification researchs. *Wetland Science*, 2014, **12**(1): 102-108.[李玉凤, 刘红玉. 湿地分类和湿地景观分类研究进展. 湿地科学, 2014, **12**(1): 102-108.]
- [31] Wang SY, Liu JY, Zhang ZX *et al.* Analysis on spatial-temporal features of land use in China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(6): 631-639.[王思远, 刘纪远, 张增祥等. 中国土地利用时空特征分析. 地理学报, 2001, **56**(6): 631-639.]
- [32] Xia ZH, Liu M, Wang M *et al.* Quantitative identification of the impact of climate change and human activity on runoff in Lake Honghu basin since 1990s. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 515-521. DOI: 10.18307/2014.0404. [夏智宏, 刘敏, 王苗等. 1990s 以来气候变化和人类活动对洪湖流域径流影响的定量辨识. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 515-521.]
- [33] Liu M, Qin PC, Liu KQ *et al.* Response of lake water level of Honghu Lake to SPEI/SPI Drought Indices at different time scales. *Meteorological Monthly*, 2013, **39**(9): 1163-1170.[刘敏, 秦鹏程, 刘可群等. 洪湖水位对不同时间尺度 SPEI/SP 干旱指数的响应研究. 气象, 2013, **39**(9): 1163-1170.]
- [34] Liu KQ, Liang YT, Zhou JL *et al.* Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, (5): 1302-1310.[刘可群, 梁益同, 周金莲等. 人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响. 生态学报, 2014, (5): 1302-1310.]
- [35] Wang HL, Wang XL, Li EH. Impacts of climate change on Honghu lake wetlands. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 653-658.[王慧亮, 王学雷, 厉恩华. 气候变化对洪湖湿地的影响. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 653-658.]
- [36] Liu Y, Ren WB, Shu T *et al.* Current status and the long-term change of riparian vegetation in last fifty years of Lake Honghu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(S1): 38-45.[刘毅, 任文彬, 舒潼等. 洪湖湖滨带植被现状以及近五十年的变化分析. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(S1): 38-45.]
- [37] Yin FN. Research on natural environment evolution of the Honghu lake. *Yangtze River*, 2008, **39**(5): 19-22.[尹发能. 洪湖自然环境演变研究. 人民长江, 2008, **39**(5): 19-22.]
- [38] Jia L. Research on natural-ecological compensation of Honghu Wetland[Dissertation]. Wuhan: Central China Normal University, 2013.[贾丽. 洪湖湿地自然生态补偿研究[学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2013.]