文章编号：0253-374X(2025)12-1924-12 **DOI**：10.11908/j.issn.0253-374x.24249

自然与社会双重胁迫下洞庭湖湿地生态演化与健康评估

郭梦申[1]，王在艾[2]，周念清[1]，蔡　奕[1]，陆帅帅[1]，赵文刚[2]
（1. 同济大学 土木工程学院，上海 200092；2. 湖南省水利水电科学研究院，湖南 长沙 410007）

摘要：选取洞庭湖湿地三峡工程建成前后6期代表性遥感影像，采用支持向量机、最大似然和CART（classification and regression tree）算法分类，利用动态度和转移矩阵分析湿地格局演变，构建压力-状态-响应模型及健康评估体系。结果表明，CART算法具有良好的适用性；景观动态变化复杂，破碎化严重，异质性强。1995—2022年水域面积由680.59 km^{2}增至913.47 km^2，但2001—2004年因水库蓄水及植被种植等经济活动影响面积骤减，湖区采砂使泥滩面积以每年8.8 km^{2}的速率减少，苔草和芦苇面积互为增减，林地面积2016年达到峰值后显著减少。健康指数从0.345增至0.661后降到0.335，呈“亚健康”—“很健康”—“亚健康”波动状态。生态健康受社会经济（权重0.262）与自然变化（权重0.205）双重胁迫，尤其近年气候极端变化对湿地健康影响高达0.281。综合考虑社会经济发展与自然环境平衡协调，需优化水资源调度并增加湿地保育投入。

关键词：洞庭湖湿地；生态演化；自然-社会驱动；双重胁迫；健康评估
中图分类号：X826　　**文献标志码**：A

Ecological Evolution and Health Assessment of Dongting Lake Wetland Influenced by Dual Coercion of Nature and Society

GUO Mengshen[1], *WANG Zaiai*[2], *ZHOU Nianqing*[1], *CAI Yi*[1], *LU Shuaishuai*[1], *ZHAO Wengang*[2]
(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha 410007, China)

Abstract: To explore the ecological evolution of Dongting Lake wetland, six representative Landsat images from before and after the completion of the Three Gorges Project are selected for classification using support vector machine (SVM), maximum likelihood (ML), and CART decision tree (DT) algorithms. The dynamic degree and transition matrix models are utilized to analyze the dynamic pattern evolution characteristics, leading to the construction of the pressure-state-response (PSR) model for ecological health assessment. The results show that the CART DT algorithm has a good applicability. Dongting Lake wetland landscape is characterized by complex dynamics, increased fragmentation, and enhanced heterogeneity. The water area increases from 680.59 km^2 to 913.47 km^2, but due to the water storage of the dam and socio-economic activities like vegetation planting, the area sharply decreased during 2001—2004. Sand mining in the lake area leads to a reduction in mudflat area at a rate of 8.8 km^2/a. The sedge and reed areas increase and decrease alternately, and the woodland area significantly decreased after peaking in 2016. The ecological health index increases from 0.345 to 0.661 and then drops to 0.335, showing fluctuations between a “sub-healthy” state, a “very healthy” state, and back to a “sub-healthy state”. Ecological health is under dual pressure from socio-economic factors (weight 0.262) and natural changes (weight 0.205), especially with recent extreme climate changes impacting wetland health by as much as 0.281. Considering the balance and coordination between socio-economic development and the natural environment, it is necessary to optimize water resource management and increase investment in wetland conservation.

Keywords: Dongting Lake wetland; ecological evolution; natural-social drivers; dual pressure; health assessment

收稿日期：2024-08-02
基金项目：国家自然科学基金（42272291，42077176，42242202）
第一作者：郭梦申，博士生，主要研究方向为湿地碳循环，地下-地表水数值模拟。E-mail：Masion_Kwok@163.com
通信作者：周念清，教授，博士生导师，工学博士，主要研究方向为湿地生态保护，水土污染治理与修复，城市水生态文明建设。E-mail：nq.zhou@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

湿地是水陆交互所形成的自然综合体，具有独特的生态水文环境条件[1]，在调蓄洪水、改善水质、调节气候和维持生态平衡等方面发挥着重要作用[2]，是全球生物生产力和经济价值最高的生态系统之一[3]。然而，近年来全球气候变化加剧，极端事件频发，同时随着我国城市化进程加快，工农业生产和人类活动干扰对湿地生态系统影响日趋严重，显著加速了湿地的退化和生态功能的丧失[4]。因此，湿地系统景观格局演化加速和健康状况显著下降等问题亟需开展深入研究并加以解决。

洞庭湖湿地是全球最典型的江湖淤塞淡水湿地之一，季节性洪水与周期性湖水快速更替，因与大江大河水文连通性密切，形成了复杂的水文环境与湿地结构[5]。湿地保护研究通常以“3S”，即遥感RS、地理信息系统GIS和全球定位系统GPS技术为核心，融合水文、生态、环境等多学科手段开展宏观监测，并在典型湿地定点连续监测，获取现场数据以检验和修正遥感模型结果的可靠性，从而为管理提供科学依据。随着计算机和遥感技术的快速发展，多源遥感数据在洞庭湖湿地变化动态监测中的应用越来越广泛，涵盖景观格局变化、水系变迁以及生态系统健康等方面[6-8]。

关于人类活动对洞庭湖湿地造成的影响，现有研究大多聚焦于三峡水库运行前后产生的负面反馈。杨利等[9]分析了三峡工程建设前后洞庭湖区水体、泥沙、苔草、芦苇、防护林、耕地、建设用地及湿地破碎化程度的变化。谭志强等[10]定量评价了洞庭湖湿地植被、泥滩和水体3种景观格局的演变特征。Hu等[11]探讨了水情变化对东洞庭湖植被分布的影响，并分析了三峡水库运行前后的差异。近年来，长江流域极端气候事件频发，在自然与社会双重驱动下，水资源配置不合理使得“自然-社会”二元水循环过程中的问题更加突出[12]，对湿地生态环境演化的复合效应日益显著。然而，关于双重胁迫下湖泊湿地景观演变及健康量化评估的研究相对较少。

因此，本文选择1995—2022年6期代表性Landsat影像提取洞庭湖区湿地信息，选择合适的分类算法分析湿地景观格局时空分异规律，并应用压力-状态-响应（PSR）模型框架构建湿地健康评估指标体系，量化自然和人类活动对景观演变和湿地健康的影响，为洞庭湖区生态修复与环境保护方略制定提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

洞庭湖（28° 30′N—30° 20′N，111° 40′E—113° 10′E）位于湖南省东北部，长江中游荆江南岸，是中国第二大淡水湖，由东、南、西3个湖泊组成，其中西洞庭湖又由目平湖和七里湖构成[13]（图1，审图号：GS（2016）2556）。洞庭湖湿地属亚热带湿润季风气候，年均气温16.15 ℃，年降水量1 148～1 837 mm。多年平均水位达25 m，年内水位变幅约12.5 m。长期的季节性淹水使得洞庭湖湿地呈现浅水、泥滩、植被多类型复合特征，洲滩上发育有丰富的植被资源，不同植物占据特定的生态位空间[14]。本文研究范围为洞庭湖湿地保护区规划界限内，总面积2 680.29 km^2。

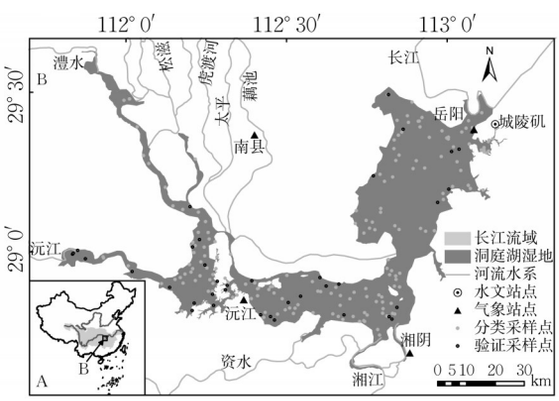

图1　洞庭湖湿地地理位置

Fig. 1　Location of Dongting Lake wetland

1.2　数据源及数据预处理

1.2.1　遥感数据

遥感数据来源于USGS（https://earthexplorer.usgs.gov/）的Landsat系列影像（空间分辨率：30 m，条带号：123/40，124/40）。考虑到秋冬洞庭湖洲滩绝大部分已出露水面，芦苇收割在影像上与苔草易于区分，同时处于植被生长末期，植被生长波动较小，选择1995年、2001年、2004年、2010年、2016年和2022年10—12月云量小于30%的影像（表1）。

使用ENVI 5.6对影像进行辐射定标、FLAASH大气校正、几何校正、光谱增强、最佳波段选择、镶嵌与裁剪等工作。对1995—2016年影像选择543波段组合，对2022年影像选择654波段组合进行解译[15]，并通过Landsat_gapfill对2004年Landsat 7 ETM+条带丢失的影像进行修复。

表1 影像类型及成像时间

Tab. 1 Type and time of Landsat images

年份/年	日期1/(月-日)	日期2/(月-日)	影像类型	平均水位/m
1995	12-05	12-28	TM	20.77
2001	12-29	10-01	ETM+	20.56
2004	12-05	12-12	ETM+	22.19
2010	11-12	11-19	TM	21.88
2016	11-28	12-05	OLI	21.87
2022	12-23	12-22	OLI	19.44

1.2.2 野外实测数据

在2022年12月至2023年1月对洞庭湖区的植被分布和结构状况进行实地调查,用手持GPS定位测量仪详细记录了220个湿地类型点的地理坐标和群落名称(图1)。从中随机选取182个点位结合影像信息作为感兴趣区域(ROI)进行解释和提取,剩余38个点位则用于分类精度验证。

1.2.3 水文和气象数据

水文数据选取洞庭湖区代表性水文站城陵矶(图1)1995—2022年长序列日尺度水位观测资料,数据来源于《长江流域水文资料》(http://www.cjw.gov.cn/)。通过国家气象数据中心(http://data.cma.cn)提取选择岳阳、湘阴、沅江、南县(图1)4个国家站点的降水和平均气温逐日数据。潜在蒸散发数据使用EToCalculator软件计算逐日潜在蒸发值(http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en/)。为消除气象站点所处方位片面性的影响,根据各气象站点占全体站点逐月气象数据总和的比例,赋予不同的权重,分别得出月平均气温、降水量和潜在蒸发量。

1.2.4 社会发展统计数据

人口密度和人均国内生产总值(GDP)数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心发布的中国人口和GDP空间分布千米网格数据集(http://www.resdc.cn/)。环境保护财政支出比例数据来源于生态环境部发布的《中国生态环境统计年鉴》(https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/)。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感影像分类方法

采用3种常用的中等分辨率影像分类方法:支持向量机(SVM)[16]、最大似然(ML)[17]和决策树(DT)。本文使用CART决策树方法[14],将洞庭湖湿地景观分为5类:水域、泥滩、苔草、芦苇和林地。景观类型在不同年份中会发生变化,历史影像的分类与精度验证并非简单沿用野外实测采样点位置,而是以采样点为参考,结合高分辨率历史影像的空间特征,适当调整ROI的位置和类型,确保分类验证在各年均能合理代表湿地的实际状况。分类完成后使用ENVI 5.6软件中"利用地面真实感兴趣区域进行混淆矩阵"操作对结果进行精度评价,根据准确率和Kappa系数选择最佳分类方法,进行后续湿地景观格局分析和健康评估。

1.3.2 动态度和转移矩阵模型

使用ArcGIS 10.8分析湿地景观动态和湿地景观类型之间的转换矩阵,单一景观、综合景观动态度和转移矩阵数学表达式如下:

$$D_C=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{1}$$

$$L_C=\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta L_{i-j}}{2\sum_{i=1}^{n}\Delta L_i}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{2}$$

$$\boldsymbol{S}_{ij}=\begin{bmatrix}S_{11} & \cdots & S_{1n}\\ \vdots & & \vdots\\ S_{n1} & \cdots & S_{nn}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式(1)~(3)中:D_C为研究时间段内单一湿地景观动态度变化,%;L_C为研究时间段内综合湿地景观动态度变化,%;U_a、U_b分别为研究时段开始与结束时该湿地景观面积,km^2;ΔL_{i-j}为第i类景观转变为非i类景观面积的绝对值,km^2;ΔL_i为前期景观类型的面积,km^2;T为研究时段,年;n为土地类型数;i、j分别为期初、期末的景观类型;S_{ij}为研究期内i类景观向j类景观转移的面积,km^2。

1.3.3 压力-状态-响应(PSR)模型

PSR模型是反映生态系统健康的评价模型[18],基于系统的内在因果关系,以调控为手段,旨在实现可持续发展[19]。目前,关于湿地生态健康评估尚无成熟的标准[20],本文综合考虑洞庭湖湿地自然和区域经济社会发展要素,借鉴前人关于湿地生态健康的研究成果筛选了13个指标,构建湿地健康评估体系(表2)。

1.3.4 熵权法

熵权法是多指标综合评价的方法,利用信息熵理论确定各指标在综合评价中的权重,避免主观因素引起的偏差[21]。计算过程如下:

(1)采用极差法归一化处理

正向指标标准化公式为

$$X_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{4}$$

负向指标标准化公式为

表2　洞庭湖湿地健康评估指标体系

Tab. 2　Evaluation index system of wetland health in Dongting Lake wetlands

目标层	准则层	因素层	属性	数据来源	熵权权重
洞庭湖湿地健康评价	压力 0.467	C1：人口密度	−	统计数据	0.069
		C2：人均GDP	＋	同上	0.122
		C3：环境保护的财政支出比例	＋	同上	0.071
		C4：温度	−	国家气象数据中心	0.055
		C5：降水	＋	同上	0.109
		C6：潜在蒸发	−	EToCalculator计算	0.041
	状态 0.469	C7：水位	＋	统计数据	0.049
		C8：斑块密度指数（PD）	−	FRAGSTATS 4.2计算	0.057
		C9：聚合指数（AI）	＋	同上	0.050
		C10：Simpson多样性指数（SIDI）	−	同上	0.141
		C11：Shannon均匀度指数（SHEI）	−	同上	0.122
		C12：景观形状指数（LSI）	−	同上	0.050
	响应 0.064	C13：平均斑块面积（MPS）	＋	同上	0.064

$$X_{ij}=\frac{\max(x_j)-x_{ij}}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{5}$$

在归一化转换过程中，引入常数α以消除零值影响并保持原始数据结构的稳定性。根据现有研究和本研究的准确性要求，α取值0.000 1。

$$Z_{ij}=X_{ij}+\alpha \tag{6}$$

(2)计算第j个指标在第i年占该指标的比重

$$p_{ij}=\frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}Z_{ij}} \tag{7}$$

(3)计算第j个指标的信息熵e_j

$$e_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}p_{ij}\ln p_{ij} \tag{8}$$

(4)计算信息熵冗余度

$$d_j=1-e_j \tag{9}$$

(5)计算各指标的权重

$$\omega_j=\frac{d_j}{\sum_{i=1}^{m}d_j} \tag{10}$$

式(4)～(10)中：X_{ij}、Z_{ij}分别为第i年第j个指标的原值及标准化后的转换值；$\max(x_j)$和$\min(x_j)$分别为第j个指标的最大值和最小值；n为本研究选取年份的数量，n=6；$i=1,2,\cdots,n$；m为指标个数，m=13；$j=1,2,\cdots,m$。

1.3.5　湿地健康指数及评价标准

利用上述公式计算得到的各指标标准值和权重，通过加权求和综合评估湿地健康状况，其表达式为

$$E=\sum_{j=1}^{m}\omega_j Z_{ij} \tag{11}$$

根据前人对湿地健康状况的研究成果[7-22]，结合洞庭湖湿地具体的地理环境等因素，建立洞庭湖湿地健康评定等级标准（表3）。

表3　洞庭湖湿地健康等级划分标准

Tab. 3　Classification of health standards for Dongting Lake wetlands

健康等级	评分	特征
很健康	[0.5,1.0]	生态结构完整，功能稳定，破碎化程度很低，自然环境和人为干扰压力很小，具有较强可持续发展能力
健康	[0.4,0.5)	生态结构较为完善，功能比较稳定，破碎化程度低，自然环境和人为干扰压力较小，具有可持续发展能力
亚健康	[0.3,0.4)	生态结构发生一定程度改变，功能受到影响，碎片化程度增强，对外压变得敏感，可持续发展能力进一步降低
亚病态	[0.2,0.3)	健康状况受到一定程度的干扰和破坏，稳定性和活力很低，生态系统结构和功能开始退化，存在许多生态异常
病态	[0,0.2)	健康受损严重，生态系统结构不合理，功能丧失，景观破碎化严重，生态问题频发，可持续发展能力几乎为零

2　结果分析

2.1　精度验证

基于野外调查结果，结合历史高分辨率影像，共选取91个ROI（随年份动态调整）进行精度验证。如图2所示，CART算法的分类平均精度为93.00%，Kappa系数为0.910 1，在每年的精度整体优于其他2种算法，因此，在洞庭湖湿地应用CART算法具有较好的适用性。

2.2　湿地景观时空变化特征

洞庭湖湿地景观存在明显的空间分异特征，水域、泥滩、芦苇和苔草为主要景观类型，水域和泥滩

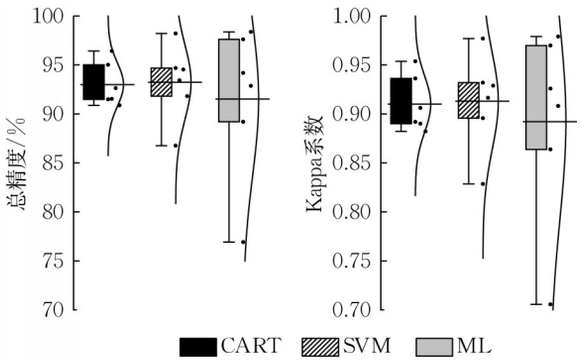

图2 CART、SVM和ML分类精度

Fig. 2 Classification accuracy of CART, SVM, and ML methods

形成了廊道,林地呈带状或块状零星分布在西洞庭湖和南洞庭湖,具体景观格局变化见图3。水域面积波动增长,增长率为2.66 km^2·$年^{-1}$。1995—2001年,水域面积在自然状态增加了23.67%;2001—2004年,三峡大坝蓄水和植被覆盖范围的扩大致使水域面积骤减16.91%;之后随着国家对湿地的保护,面积缓慢增加。湖区采砂和水库蓄水减少了入湖泥沙的供应,导致泥滩面积持续减少,变化率为−8.8 km^2·$年^{-1}$。1995—2022年,苔草、芦苇和林地平均占比分别为22.63%、28.41%和5.40%,2000年前后为了发展当地经济大力种植芦苇,2016年弃割,使得芦苇面积呈现先增后减的趋势。1999—2010年,芦苇面积平均增长率为20.70 km^2·$年^{-1}$,随后逐年减少,变化率为−35.89 km^2·$年^{-1}$。苔草面积变化与芦苇相反,受芦苇扩张影响,苔草面积从629.91 km^2减至589.42 km^2,但随着芦苇减少,其面积又缓慢增长至773.95 km^2。2000年前后滩地造林,林地面积在1995—2016年间增加了196.14 km^2,之后快速减少,共减少了146.92 km^2,与杨树清理行动密切相关,二者变化在时间和面积上相对应。

表4列出了不同研究时段洞庭湖湿地景观动态度变化,可以看出,2001—2004年综合景观动态度为4.03%,远高于其他时段。其间水域和泥滩面积每年分别以5.64%和9.12%的变化率骤减,而苔草和林地面积每年分别以7.40%和136.57%的变化率骤增,景观变化最为显著。

图4景观转换显示,2001—2004年,水域面积减少,以13.8 km^2·$年^{-1}$的变化率转化成泥滩,以33.63 km^2·$年^{-1}$的变化率转化成植被。泥滩面积的骤减则主要归因于泥滩向植被的转化,以45.24 km^2·$年^{-1}$的平均变化率转化成植被。不同时段林地的景观动态度远超其他景观类型,其转入与转出是植被间的相互转化形式之一。在2001—2004和2010—2016年间,林地面积以增加为主(净流入75.18和41.98 km^2·$年^{-1}$),其他类型景观均有不同程度转化成林地。其余3个时段以转出为主(净流出量13.72、33.08和24.49 km^2·$年^{-1}$),主要向水域、苔草和芦苇湿地类型转化。

水域面积仅在2001—2004年减少,其他时段面积增加,其中2010年以前面积增加主要来源于泥滩的转化,而2010年之后面积增加则主要来源于植被的重新淹没。苔草和芦苇面积相互发生转换则是景观变化的主要趋势,在不同时间段内,苔草转出面积中每年分别有38.28%、28.33%、42.83%、34.67%、25.81%转换成芦苇,而芦苇转出面积中分别有16.43%、23.54%、21.37%、18.85%、23.12%转换成苔草。

2.3 湿地健康评估结果

压力指标中,人口密度为357 人·km^{-2},增长速率0.87 人·km^{-2}·$年^{-1}$,人口增长对湿地健康产生负面影响(图5a)。人均GDP增长率为0.15万元·$人^{-1}$·$年^{-1}$,随着环保意识的加强,环境投资趋于稳定,对湿地健康有所裨益(图5b)。冬季平均降水量仅34.29 mm,而潜在蒸发量为50.19 mm,气温为9.7 ℃。特别是2022年冬季降水严重偏少,潜在蒸发量较大,不利于湿地健康(图5c)。状态指标中,城陵矶水位仅为19.44 m,创历史新低,水位下降不利于湿地保护(图5c)。斑块密度指数(PD)从7.83增长至9.92,聚合指数(AI)从92.31减小至90.44,破碎化程度增大,聚集度降低,景观分布呈离散状态。一般湿地中优势景观是水体,其增加有利于湿地调节,因此Simpson多样性指数(SIDI)和Shannon均匀度指数(SHEI)越小越有利于湿地健康,而SIDI和SHEI均值分别为0.73和0.88,不存在优势斑块且异质性较大。景观形状指数(LSI)从74.04增大至90.87,受人类活动干扰,形状不规则性增加(图5d,5e)。响应指标平均斑块面积(MPS)从0.127减小至0.101,一定程度上反映了景观破碎化程度的增加,不利于湿地健康保护(图5f)。

1995年、2001年、2004年、2010年、2016年和2022年,洞庭湖湿地健康指数分别为0.345、0.635、0.444、0.661、0.425和0.335,基本维持亚健康及以上水平(图6)。1995—2001年健康状况好转,2001—2010年健康状况良好,但2001—2004年景观格局的显著变化影响了状态层的指数,导致湿地健康评分下降0.191,之后随着景观恢复,又转变为“很

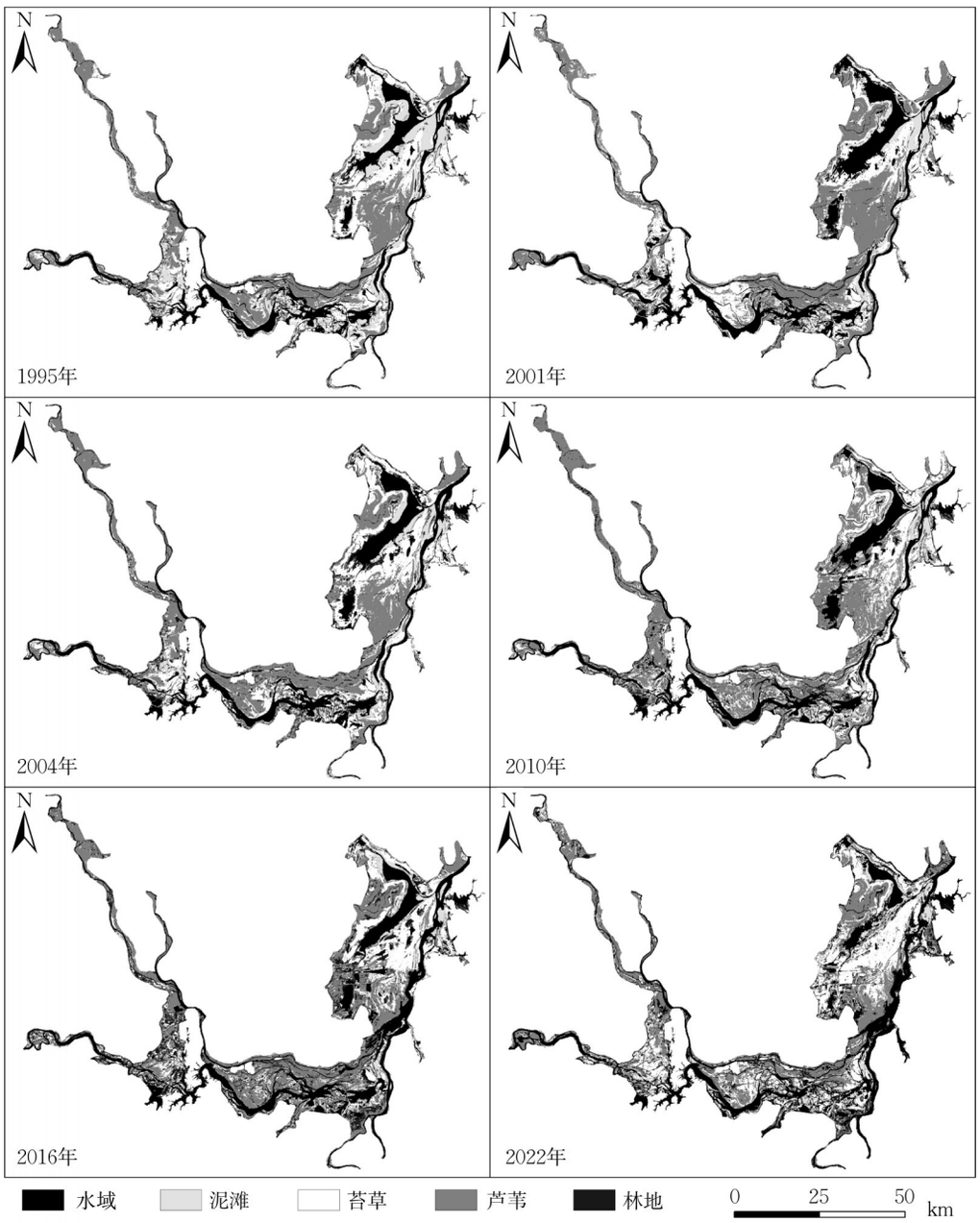

图3　洞庭湖湿地景观分布

Fig. 3　Landscape distribution of Dongting Lake wetlands

表4　洞庭湖湿地景观动态度

Tab. 4　Landscape dynamics of Dongting Lake wetlands

研究时段/年	动态度/%					
	水域	泥滩	苔草	芦苇	林地	综合
1995—2001	3.94	−3.68	−2.78	2.33	−10.01	1.69
2001—2004	−5.64	−9.12	7.40	−3.54	136.57	4.03
2004—2010	1.99	−3.80	−2.82	4.91	−11.79	2.13
2010—2016	1.38	1.68	−0.94	−3.93	51.12	1.91
2016—2022	1.29	−0.71	6.53	−2.17	−7.33	1.61

健康”状态。2010—2022年湿地经历了严重的衰退，随着景观异质性强，破碎化程度增大，形状不规则性增加，状态层和响应层评价指数骤减，健康状态由“很健康”转变为“亚健康”。因此，需要采取积极有

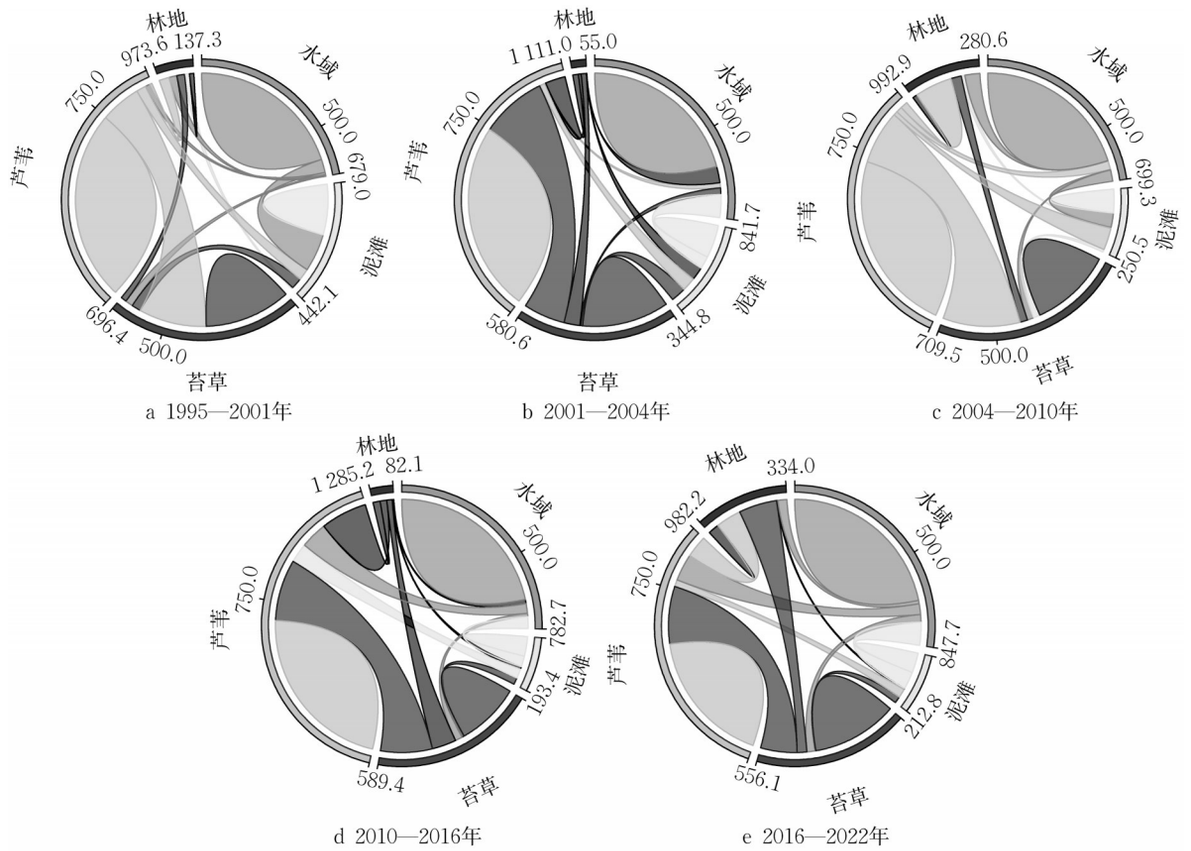

图4 洞庭湖湿地景观面积转换示意图(单位:km^2)

Fig. 4 Landscape area conversion in Dongting Lake wetlands (unit: km^2)

效、确实可行的措施来降低或化解对洞庭湖湿地的健康压力和威胁,促使其向稳定和良性方向发展。

3 讨论

遥感影像解译方法和波段选择对分类精度有一定影响[23-24],先进的图像处理算法和多源数据融合技术综合运用可显著提高分类精度。陈磊士等[25]用GF-2影像结合CART面向对象分类算法对洞庭湖区典型湿地进行分类提取。张猛等[26]采用面向对象的随机森林分类方法提取洞庭湖流域湿地信息。本文探讨了Landsat影像常用分类方法在洞庭湖湿地中的准确性,后续也将尝试新的技术和方法进一步提高精度。

表2显示了用于评估洞庭湖湿地健康状况的各指标的平均权重,结果表明,湿地环境健康面临的主要压力来源于社会经济因素(人均GDP、人口密度、环境保护的财政支出比例)和自然因素(降水、温度、潜在蒸发),两大类因素总权重分别为0.262和0.205。社会经济因素对湿地生态系统造成的影响较大,但自然环境因素的影响也不容小觑。尤其在计算各评价层指数变化时发现,自然压力的变异系数(0.51)高于社会经济指标变异系数(0.40),说明在经济持续增长的同时,通过增加环保投入平衡经济压力的效果显著,而近年来气候异常干旱,自然压力的变化则表现出更大的波动。通过指标标准化数据与相应熵权重的乘积,进一步分析各评价指标对健康指数的影响程度,结果如图7所示。

洞庭湖湿地景观及健康变化的驱动机制具有"社会经济+自然变化"交互作用的特征。1995—2001年,国务院实施了"退耕还林,退田还湖"保护政策,科学治理水患[27],人口密度、温度和降水是主要影响因素(分别占比0.142,0.080和0.088),整体自然环境与社会经济变化较为和谐,水域占优势地位,湿地健康状况较好;2001—2004年,主要影响因素转变为环境保护的财政支出、降水和水位(分别占比0.082,0.146和0.070),随着三峡水库蓄水、植被种植等经济活动导致人均GDP、环境保护的财政支出比例增加,虽然水位升高,但水域面积减少,同时降水减少,景观破碎度与异质性增加,湿地健康状况显著下降;2004—2010年,随着三峡调蓄[28]、生态自适应修复,以及国家在环境保护方面的财政支出力度

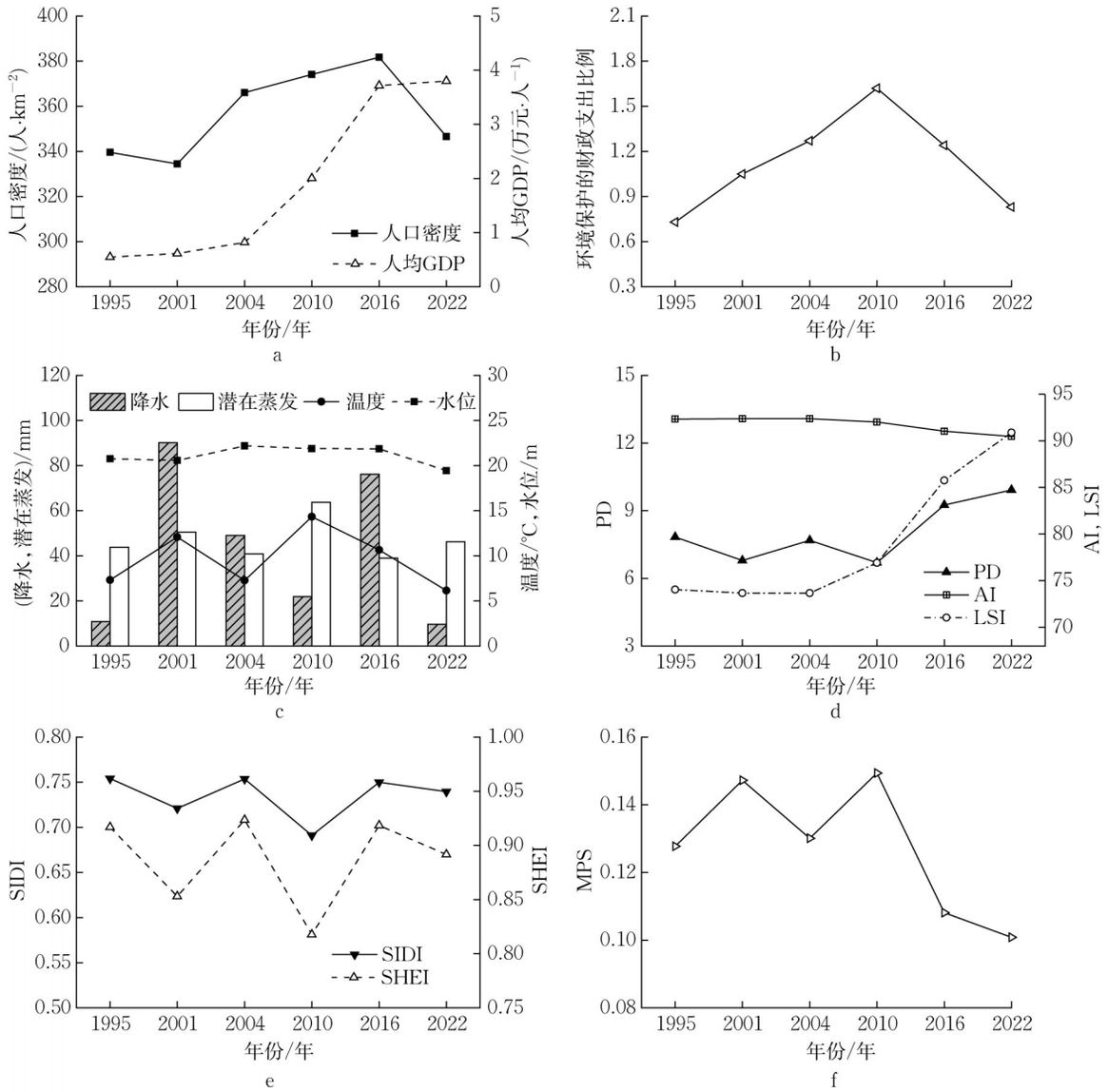

图5　洞庭湖湿地健康评价指标变化

Fig. 5　Variation in evaluation index of wetland health in Dongting Lake wetlands

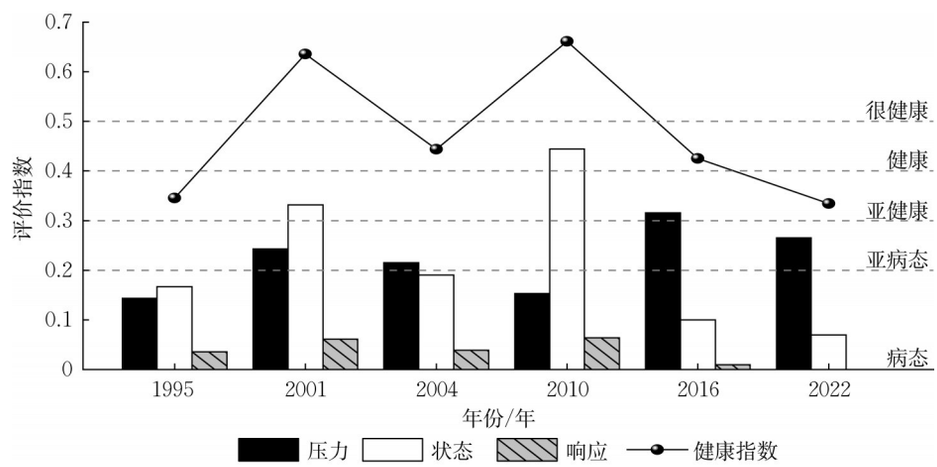

图6　洞庭湖湿地各评价层及健康评估指数变化

Fig. 6　Evaluation layer and ecological health assessment indices of Dongting Lake wetlands

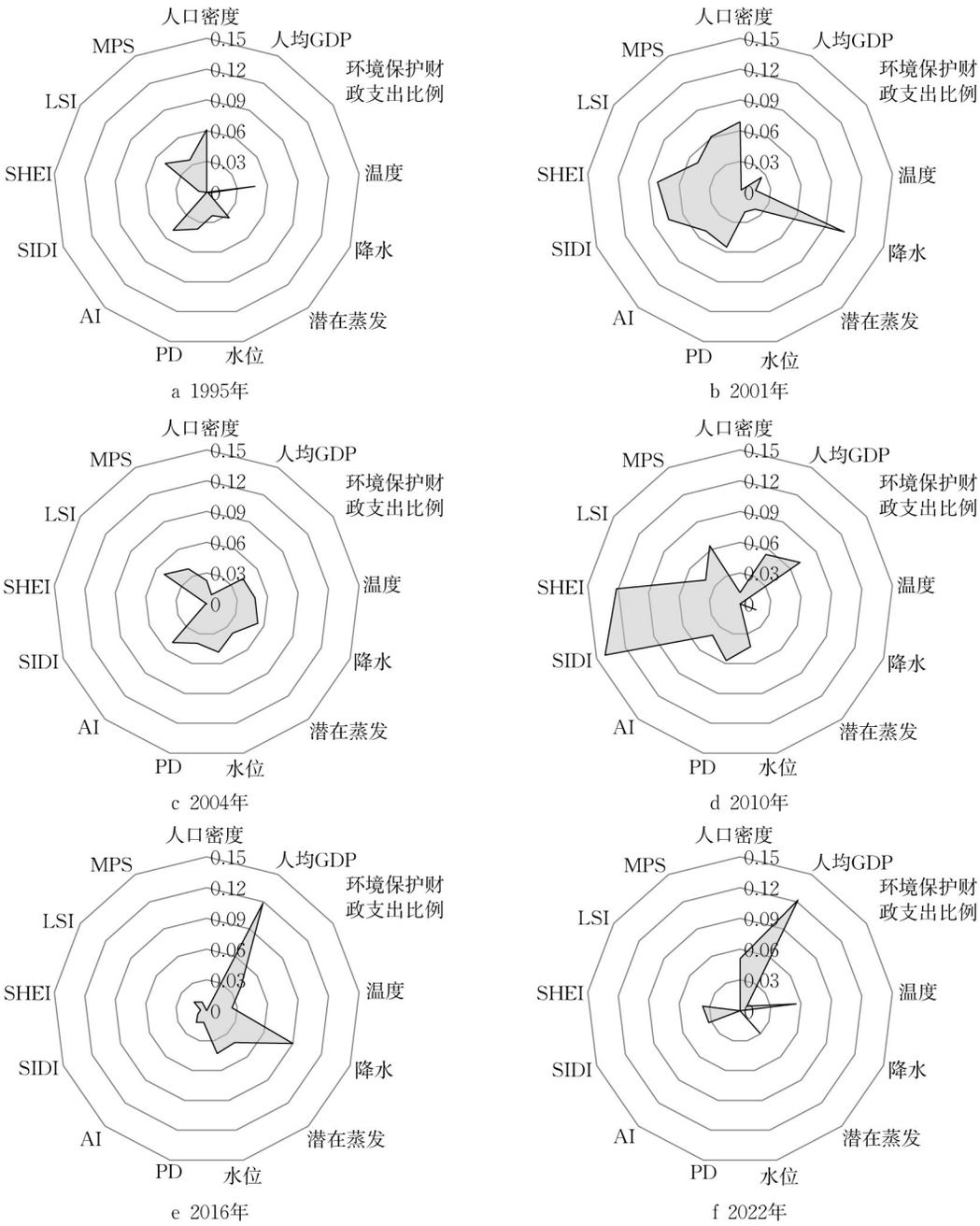

图7 不同指标对洞庭湖湿地健康指数的影响程度

Fig. 7 Impact of different indicators on ecological health assessment index of Dongting Lake wetlands

加大,主要影响因素又转变为温度、降水以及环境保护的财政支出(分别占比0.054,0.073和0.155),湿地健康水平逐步恢复;2010—2022年,对环境治理的财政支出趋于稳定,但降水减少、潜在蒸发过大、水位下降(分别占比0.112,0.070和0.067)导致的极端干旱气候和地下水位下降,对植被和土壤产生了一系列不利影响[29],湿地由健康转为亚健康状态,需要持续的管理和保护。同时,廖丹霞等[30]的研究结果表明,洞庭湖湿地生态系统的压力指标对状态的影响存在时间滞后性,本文研究中也表现出一定的相似性。

众多研究表明,三峡工程的修建会导致洞庭湖湿地景观发生变化,Gao等[31]研究发现三峡水库的蓄水使洞庭湖入湖泥沙持续减少,本研究泥滩面积持续减少的结论也可证明此现象;黄群等[32]和赖锡军等[33]研究发现,三峡工程蓄水改变了洞庭湖与长江的水力交互作用条件,影响了湖泊水位,中低位洲滩提前出露[34-35]。此外,人工种植芦苇和滩地造林等社会经济活动进一步加速了这一变化。与此同时,这些经济活动伴随的人均GDP提升以及环境保护

财政支出比例增加，对湿地保护又产生了积极影响。值得注意的是，气候因素同样也发挥着重要作用，尤其近年气候变化显著，2022年极端干旱对生态系统造成严重破坏[36]，生态系统碳储量也相应减少[37]。2024年极端洪涝事件严重损害了湿地生态和社会经济，恢复耗费大量时间和资源。后续研究也将进一步研究极端气候对湿地景观及健康的影响程度。

针对目前洞庭湖湿地生态退化的现状，一些研究认为可通过湿地修复工程[38]和生态补水项目[39]进行缓解，然而，这些措施也面临气候变化和工业发展的持续压力。为此，在保护和恢复洞庭湖湿地时，需要综合考虑社会经济发展与自然环境的平衡和协调，在“自然-社会”二元水循环的框架下，采取科学的管理和调控措施。具体包括优化水资源调度、合理控制人类活动强度等，增加湿地生态修复工程的投入，建立长效监测机制。特别是在应对气候变化和调节水文条件方面，应采取更加积极和科学的管理策略，实现湿地生态系统的长期健康与稳定。

4　结论

本文利用多时相Landsat遥感影像，选取3种分类算法，分析了1995—2022年洞庭湖湿地的景观格局变化，并基于PSR模型对湿地生态健康进行了综合评价，探讨了影响因素的变化，得出以下结论：

（1）基于野外调查和高分辨率影像解译，相较于SVM和ML算法，CART算法的分类平均精度为93.00%，在洞庭湖湿地分类中表现出更高的精度和稳定性。

（2）洞庭湖湿地景观格局变化呈现显著的时空分异特征，水域面积总体波动增长，但受三峡水库蓄水和植被种植等经济活动影响，在2001—2004年骤减；苔草和芦苇面积的互相转换是植被景观变化的主要趋势；林地面积在2016年达到峰值后减少。

（3）湿地健康状况整体呈“亚健康”—“很健康”—“亚健康”波动状态，与景观格局呈耦合特征。2001—2004年，景观动态度高达4.03%，健康评分下降0.191，2004—2010年，景观恢复，健康评分上升0.217，但2010—2022年景观异质性和破碎化加剧，健康指数降至0.335。

（4）湿地生态健康受到社会经济（人均GDP、人口密度、财政支出，权重0.262）和自然变化（降水、温度、潜在蒸发，权重0.205）双重压力胁迫，尤其近年极端气候对湿地健康影响高达0.281。未来需综合考虑经济发展与自然环境的平衡和协调，采取适宜科学管理的策略，减少湿地生态系统健康的压力和威胁。

作者贡献声明：

郭梦申：负责数据收集及处理，论文撰写。
王在艾：提供技术支持及部分基础数据。
周念清：负责论文构思与修改。
蔡　奕：提供指导意见并校审。
陆帅帅：参与野外采样与数据收集。
赵文刚：提供技术支持。

参考文献：

[1] WEI X D, WANG S N, WANG Y K. Spatial and temporal change of fractional vegetation cover in north-western China from 2000 to 2010[J]. Geological Journal, 2017, 53(S2): 427.

[2] SHEN G, YANG X C, JIN Y X, *et al*. Remote sensing and evaluation of the wetland ecological degradation process of the zoige plateau wetland in China[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 48.

[3] 陈宜瑜，吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向[J]. 湿地科学，2003(1)：7.
CHEN Yiyu, LÜ Xianguo. The wetland function and research tendency of wetland science[J]. Wetland Science, 2003(1): 7.

[4] BIAN H L, LI W, LI Y Z, *et al*. Driving forces of changes in China's wetland area from the first (1999 - 2001) to second (2009 - 2011) national inventory of wetland resources [J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00867.

[5] 杨桂山，马荣华，张路，等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学，2010，22(6)：799.
YANG Guishan, MA Ronghua, ZHANG Lu, *et al*. Lake status, major problems and protection strategy in China [J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(6): 799.

[6] 余姝辰，王伦澈，夏卫平，等. 清末以来洞庭湖区通江湖泊的时空演变[J]. 地理学报，2020，75(11)：2346.
YU Shuchen, WANG Lunche, XIA Weiping, *et al*. Spatio-temporal evolution of riparian lakes in Dongting Lake area since the late Qing Dynasty[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2346.

[7] LIU Y J, YANG P, ZHANG S Q, *et al*. Dynamic identification and health assessment of wetlands in the middle reaches of the Yangtze River basin under changing environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 345(3): 131105.

[8] YANG L, WANG L C, YU D Q, *et al*. Four decades of wetland changes in Dongting Lake using Landsat observations during 1978 - 2018[J]. Journal of Hydrology, 2020, 587(1): 124954.

[9] 杨利，谢炳庚，秦建新，等. 三峡建坝前后洞庭湖区湿地景观格局变化[J]. 自然资源学报，2013，28(12)：2068.
YANG Li, XIE Binggeng, QIN Jianxin, *et al*. Changes in

Dongting Lake wetland landscape pattern related to pre- and post-construction of the Three Gorges Dam [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(12): 2068.

[10] 谭志强, 许秀丽, 李云良, 等. 长江中游大型通江湖泊湿地景观格局演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1619.
TAN Zhiqiang, XU Xiuli, LI Yunliang, *et al*. Wetland landscape pattern evolution of large Yangtze-connected lakes in the middle reaches of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(10): 1619.

[11] HU J Y, XIE Y H, TANG Y, *et al*. Changes of vegetation distribution in the east Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Dam, China [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 582.

[12] YAO F F, LIVNEH B, RAJAGOPALAN B, *et al*. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage [J]. Science, 2023, 380(6646): 743.

[13] 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 1.
WAN Rongrong, YANG Guishan, WANG Xiaolong, *et al*. Progress of research on the relationship between the Yangtze River and its connected lakes in the middle reaches[J]. Journal of Lake Science, 2014, 26(1): 1.

[14] 周静, 万荣荣, 吴兴华, 等. 洞庭湖湿地植被长期格局变化(1987—2016年)及其对水文过程的响应[J]. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1723.
ZHOU Jing, WAN Rongrong, WU Xinghua, *et al*. Patterns of long-term distribution of typical wetland vegetation (1987-2016) and its response to hydrological processes in Dongting Lake[J]. Journal of Lake Science, 2020, 32(6): 1723.

[15] 陈钰, 雷琨, 杜尧, 等. 沉湖湿地近50年退化过程识别[J]. 地球科学, 2021, 46(2): 661.
CHEN Yu, LEI Kun, DU Yao, *et al*. Identification of degradation process of Chenhu wetland over last 50 years[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2021, 46(2): 661.

[16] MASURKAR A, DARUWALA R, MOHITE A. Performance analysis of SAR filtering techniques using SVM and Wishart Classifier [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2024, 34(3): 101189.

[17] RIMAL B, RIJAL S, KUNWAR R. Comparing support vector machines and maximum likelihood classifiers for mapping of urbanization [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020, 48(1): 71.

[18] Food Agriculture Organization of the United Nations. Land and water development division: land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development [R]. Washington DC: Food Agriculture Organization of the United Nations, 1997.

[19] 张博胜, 杨子生. 基于PSR模型的中国人地关系协调发展时空格局及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 252.
ZHANG Bosheng, YANG Zisheng. Spatio-temporal pattern and its influencing factors of coordinated development of man-land relationship in China using PSR model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(13): 252.

[20] 徐烨, 杨帆, 颜昌宙. 基于景观格局分析的雄安城市湿地生态健康评价[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7132.
XU Ye, YANG Fan, YAN Changzhou. Ecological health assessment of urban wetland in Xiong'an based on landscape pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 7132.

[21] 王维晴, 周立志, 陈薇, 等. 长江下游升金湖湿地保护有效性评价(1989—2019年)[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 905.
WANG Weiqing, ZHOU Lizhi, CHEN Wei, *et al*. Evaluation of conservation effectiveness of Shengjin Lake, lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Science, 2021, 33(3): 905.

[22] 徐浩田, 周林飞, 成遣. 基于PSR模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8264.
XU Haotian, ZHOU Linfei, CHENG Qian. Study on ecosystem health evaluation and risk assessment for Linghekou wetlands based on a PSR model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8264.

[23] 朱金峰, 周艺, 王世新, 等. 1975年—2018年白洋淀湿地变化分析[J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 971.
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.

[24] TAN Z Q, ZHANG Q, LI M F, *et al*. A study of the relationship between wetland vegetation communities and water regimes using a combined remote sensing and hydraulic modeling approach [J]. Hydrology Research, 2016, 47(S1): 278.

[25] 陈磊士, 高霞霞, 廖玉芳, 等. 基于CART决策树的高分二号洞庭湖区湿地分类方法[J]. 测绘通报, 2021(6): 12.
CHEN Leishi, GAO Xiaxia, LIAO Yufang, *et al*. Wetland classification method of Dongting Lake district based on CART using GF-2 image [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(6): 12.

[26] 张猛, 曾永年, 朱永森. 面向对象方法的时间序列MODIS数据湿地信息提取——以洞庭湖流域为例[J]. 遥感学报, 2017, 21(3): 479.
ZHANG Meng, ZENG Yongnian, ZHU Yongsen. Wetland mapping of Donting Lake Basin based on time-series MODIS data and object-oriented method [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(3): 479.

[27] 张英豪, 王殿常, 吴兴华, 等. 近百余年(1900—2020年)洞庭湖湿地演化驱动因素分析[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1786.
ZHANG Yinghao, WANG Dianchang, WU Xinghua, *et al*. Driving factors of wetland evolution in Lake Dongting during 1900-2020[J]. Journal of Lake Science, 2023, 35(5): 1786.

[28] 郭文献, 金耀广, 王鸿翔, 等. 近60年以来洞庭湖水文情势变异及生态效应[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31

(1)：24.
GUO Wenxian，JIN Yaoguang，WANG Hongxiang，*et al*. Hydrological regime alteration and ecological effects of Dongting Lake during the past 60 years[J]. Journal of Basic Science and Engineering，2023，31(1)：24.

[29] SMITH MELINDA D. The ecological role of climate extremes：current understanding and future prospects：ecological role of climate extremes[J]. Journal of Ecology，2011，99(3)：651.

[30] 廖丹霞，谢谦，杨波. 洞庭湖湿地生态系统健康演变的研究[J]. 中南林业科技大学学报，2014，34(6)：112.
LIAO Danxia，XIE Qian，YANG Bo. Study on evolution of ecosystem health of Dongting Lake wetland[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2014，34(6)：112.

[31] GAO Y，CHEN L，ZHANG W，*et al*. Spatiotemporal variations in characteristic discharge in the Yangtze River downstream of the Three Gorges Dam[J]. Science of the Total Environment，2021，785：147343.

[32] 黄群，孙占东，姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析[J]. 湖泊科学，2011，23(3)：424.
HUANG Qun，SUN Zhandong，JIANG Jiahu. Impacts of the operation of the Three Gorges Reservoir on the lake water level of Lake Dongting[J]. Journal of Lake Science，2011，23(3)：424.

[33] 赖锡军，姜加虎，黄群. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制[J]. 湖泊科学，2012，24(2)：178.
LAI Xijun，JIANG Jiahu，HUANG Qun. Pattern of impoundment effects and influencing mechanism of Three Gorges Project on water regime of Dongting Lake[J]. Journal of Lake Science，2012，24(2)：178.

[34] XIE Y H，TANG Y，CHEN X S，*et al*. The impact of Three Gorges Dam on the downstream eco-hydrological environment and vegetation distribution of East Dongting Lake[J]. Ecohydrology，2015，8(4)：738.

[35] 唐玥，谢永宏，李峰，等. 1989—2011年东洞庭湖草洲出露面积变化及其与水位响应的关系[J]. 生态学杂志，2013，24(11)：3229.
TANG Yue，XIE Yonghong，LI Feng，*et al*. Area changes of emergent herbaceous wetlands in relation to water level in East Dongting Lake，China in 1989-2011[J]. Chinese Journal of Ecology，2013，24(11)：3229.

[36] LI L，ZHOU T J，ZHANG W X，*et al*. Quantifying the extremity of 2022 Chinese Yangtze River Valley daily hot extreme：fixed or moving baseline matters[J]. Environmental Research Letters，2024，19(6)：64074.

[37] 王青，严登华，翁白莎，等. 流域干旱对淡水湖泊湿地生态系统的影响机制[J]. 湿地科学，2012，10(4)：396.
WANG Qing，YAN Denghua，WENG Baisha，*et al*. Mechanism of influence of basin drought on freshwater lake wetland ecosystem[J]. Wetland Science，2012，10(4)：396.

[38] 邓正苗，谢永宏，陈心胜，等. 洞庭湖流域湿地生态修复技术与模式[J]. 农业现代化研究，2018，39(6)：994.
DENG Zhengmiao，XIE Yonghong，CHEN Xinsheng，*et al*. Wetland ecological restoration techniques and models in Dongting Lake Basin[J]. Research of Agricultural Modernization，2018，39(6)：994.

[39] 戴凌全，蔡卓森，刘海波，等. 三峡水库枯水期不同运行方式对洞庭湖生态补水效果研究[J]. 水资源与水工程学报，2019，30(3)：170.
DAI Lingquan，CAI Zhuosen，LIU Haibo，*et al*. The effect of Three Gorges Reservoir operation scheme during the dry season on ecological water supplement of Dongting Lake[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2019，30(3)：170.