

遥感视角下太湖流域典型湖泊水生植被对“退网还湖”的时空响应

罗菊花^{1,2}, 徐颖^{1,2}, 倪贵高³, 沈舟¹, 高健⁴, 毛志刚¹, 段洪涛^{1,2}

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与流域水安全全国重点实验室 南京 211135;

2. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135;

3. 皖江工学院 电信工程学院, 马鞍山 243031;

4. 湖北工业大学 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室, 武汉 430068

摘要:太湖流域是中国城市化程度最高、水环境问题最突出的区域之一,其湖泊群长期受富营养化与高密度围网养殖影响。近年来,随着“长江大保护”与“生态文明建设”等国家战略的推进,流域内实施了包括“退网还湖”在内的多项水质提升政策。然而,当前对这些措施的实施成效,尤其是水生植被这一关键生态因子的响应特征仍未被系统评估。本研究基于1985年—2024年Landsat与Sentinel系列遥感影像,结合草藻算法和U-Net模型,重构了太湖流域内4个典型围网湖泊(东太湖、溇湖、长荡湖、阳澄湖)的水生植被与围网的时空变化。结果表明:(1)围网养殖面积在2001年达峰值(361.9 km²)后持续缩减,至2024年仅剩8.7 km²;(2)“退网还湖”后,沉水植被优势度下降,面积相对减少了82.9%,而浮叶/挺水植被逐渐成为优势类群;(3)各湖泊的围网拆除区内水生植被均出现大幅衰退甚至消亡。同时,研究还发现围网拆除区普遍存在植被退化与藻华暴发同步发生的现象。综上,尽管“退网还湖”政策缓解了水体富营养化,但也去除了围网结构对水生植被的物理支撑,且缺失了人工管护,是2017年以来沉水植被的快速退化的诱因之一。因此,未来湖泊管理需从单一的水质提升转向综合的水生态修复,建议依托卫星遥感等技术厘清水生植被群落的历史分布信息,进而开展因地制宜的近自然修复与可持续管护。

关键词:太湖流域,围网养殖,水生植被,多稳态理论,遥感,退网还湖行动,生态恢复,长江大保护

中图分类号: P23/P2

引用格式: 罗菊花,徐颖,倪贵高,沈舟,高健,毛志刚,段洪涛.2026.遥感视角下太湖流域典型湖泊水生植被对“退网还湖”的时空响应.遥感学报,30(7): 2010–2024

Luo J H, Xu Y, Ni G G, Shen Z, Gao J, Mao Z G and Duan H T. 2026. Spatiotemporal response of aquatic vegetation in typical lakes of the Taihu Basin to “Purse Seine Demolition of Lakes and Reservoirs” from a remote-sensing perspective. National Remote Sensing Bulletin, 30(7):2010–2024[DOI:10.11834/jrs.20265414]

1 引言

太湖流域作为长三角核心区域,不仅是重要饮用水源地,更承担着调节区域气候、维护生物多样性等关键生态功能(Lin等,2024;Qin等,2022)。流域内太湖、溇湖、长荡湖、阳澄湖等湖泊群构成了独特的湿地生态系统复合体,其水生植被覆盖度与生物多样性水平直接影响流域生态安全(Reynolds和Aldridge,2021)。然而自20世

纪80年代起,为追求渔业经济效益,太湖流域开始大规模推广围网养殖模式(Luo等,2020;Sun等,2024)。这种高强度的人工养殖活动导致水质恶化、湖泊水体富营养化加剧、甚至引发蓝藻水华频发等生态问题。2007年太湖蓝藻事件后(Duan等,2009;Qin等,2007),太湖流域内逐步推进“退网还湖”生态修复工程。在长江大保护战略下,2017年起开展全域性湖泊“退网还湖”行动。该举措显著提升了湖泊水质,暂时缓解了

收稿日期:2025-10-09;预印本:2026-05-14

基金项目:河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室开放基金(编号:HGKFZ09);国家自然科学基金(编号:42571445)

第一作者简介:罗菊花,研究方向为湖泊/湿地生态遥感。E-mail:jhluo@niglas.ac.cn

通信作者简介:高健,研究方向为湖泊生态学与生态修复。E-mail:jgao13@hotmail.com/20141020@hbut.edu.cn

湖泊富营养化态势, 但对湖泊水生植被的时空影响尚未得到系统阐释。

遥感技术凭借其大范围、长时序、低成本等优势, 已成为水生态监测的核心手段 (Lai 等, 2024)。多光谱卫星数据 (如 Landsat 系列卫星、Sentinel-2 数据、MODIS 数据等) 已被广泛应用于湖泊透明度、蓝藻水华、水生植被等水环境要素监测 (Cao 等, 2023; Hou 等, 2022; Luo 等, 2023)。Sentinel-1 等合成孔径雷达数据因其不受天气影响的特性, 也逐渐为围网和水生植被的提取提供支撑 (Sun 等, 2024; Xin 等, 2024)。近年来, 围网和湖泊水环境遥感解译方法日渐成熟。在单个湖泊围网监测方面, 黄帅等 (2017) 基于资源三号高分辨率影像, 采用梯度变换方法, 实现了阳澄湖围网的高精度提取; 区域尺度上, 黄林生等 (2025b) 基于 Sentinel-1 SAR 数据和 U-Net 模型构建围网自动监测算法, 实现了江淮流域 48 个湖泊近 10 年的围网监测。在水生植被监测方面, 已有多种指数和分类模型实现了单一水生植被类群的监测 (罗菊花等, 2022), 更有研究通过不同类群水生植被在遥感光谱和影像上的差异, 构建了多类群同步监测模型。如 Dai 等 (2021) 利用沉水植被和浮叶/挺水植被在短波红外波段的差异构建植被分类算法, 实现了两种类群植被的有效提取; Luo 等 (2023) 分析沉水植被、浮叶/挺水植被和藻华在 Landsat 影像不同波段上的分布特征, 通过缨帽变换构建水生植被指数, 结合归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 与浮游藻类指数 FAI (Floating Algae Index), 构建了分类决策树模型, 实现了水下植被、水上植被以及藻华的同步提取, 并在长江中下游湖泊成功应用, 后推广至全球湖泊 (Luo 等, 2025)。综上, 当前基于遥感技术开展湖泊围网与水生植被群落的时空监测方法已较为成熟。但现有研究大多集中于湖泊单要素监测, 尚未开展多环境变量的耦合变化分析, 更缺乏对生态治理工程实施后湖泊生态响应机制的深入阐释, 这导致难以科学评估生态修复的实际成效, 也不利于后续湖泊生态管理决策的优化。

为此, 本研究拟以太湖流域湖泊群为研究区, 基于 1985 年—2024 年的卫星遥感影像, 开展围网养殖格局和不同水生植被群落的时空演变监测, 从时空角度解析湖泊中围网和水生植被变化特征

及其对“退网还湖”行动的响应, 以期以太湖流域后续的生态修复工程提供科学依据, 同时为其他类似流域的生态治理提供理论参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

本研究聚焦太湖流域内 4 个典型的围网养殖湖泊: 东太湖、滬湖、长荡湖和阳澄湖 (图 1)。其中: 东太湖位于太湖东南部 ($30^{\circ}58'N$ — $31^{\circ}07'N$, $120^{\circ}25'E$ — $120^{\circ}35'E$), 总面积约 131 km^2 , 平均水深为 1 m ; 滬湖 ($31^{\circ}29'N$ — $31^{\circ}42'N$, $119^{\circ}44'E$ — $119^{\circ}53'E$) 面积约 139 km^2 , 平均水深为 1.5 m ; 长荡湖 ($31^{\circ}33'N$ — $31^{\circ}40'N$, $119^{\circ}30'E$ — $119^{\circ}37'E$) 面积约 84 km^2 , 平均水深为 1.1 m ; 阳澄湖 ($31^{\circ}21'N$ — $31^{\circ}30'N$, $120^{\circ}39'E$ — $120^{\circ}51'E$) 面积约 118 km^2 , 平均水深为 1.7 m 。20 世纪 80 年代起, 太湖流域湖泊开始围网养殖, 因“好水养好蟹”, 太湖、阳澄湖等产出的大闸蟹声名远扬, 吸引了众多农户参与, 围网面积不断扩大; 据记录, 90 年代末围网面积达到鼎盛, 滬湖、长荡湖几乎全湖覆盖围网。围网养殖以追求高产量高利润, 普遍呈现高密度养殖, 投饵多, 饵料沉入湖底腐烂后加剧水体富营养化。2017 年, 中央环保督察组要求限期完成江苏省围网养殖清拆, 4 个湖泊均经历了大规模的拆围行动, 为在流域尺度上分析“退网还湖”政策对水生植被的影响提供了理想案例。

2.2 数据来源

本研究选用 Landsat 系列卫星数据和 Sentinel-1 SAR 数据开展湖泊水生植被和围网的动态监测。Landsat 系列卫星由美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 与美国地质调查局 USGS (United States Geological Survey) 联合运营, 提供了全球范围内时间跨度最长的陆地表面连续观测记录。本研究主要采用 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 的 Level-2 级地表反射率产品, 其空间分辨率为 30 m , 包含可见光、近红外及短波红外等多个光谱波段。同时, 为补充光学影像在多云雨季节的数据空白, 引入欧洲航天局 ESA (European Space Agency) Sentinel-1 任务提供的 C 波段合成孔径雷达数据 (即 Sentinel-1 SAR 数据)。Sentinel-1A/B 双星组网运行, 具备全

天时、全天候观测能力，重访周期短至6天（双星协同），空间分辨率达10 m。本研究采用其干涉宽幅模式IW（Interferometric Wide-swath）的地面范围探测GRD（Ground Resolution Distance）Level-1产品，极化方式主要为VV和VH。对所有影像数据进行预处理，其中对Sentinel-1 SAR数据进行地

面距离检测、轨道修正、地形校正、热噪声减少等处理；对Landsat影像数据进行去云，筛选出云量低于20%的影像数据。研究中利用1985年—2024年Landsat数据开展水生植被和围网的长期监测，结合2016年—2024年的Sentinel-1 SAR数据补充围网养殖区域的细节刻画。

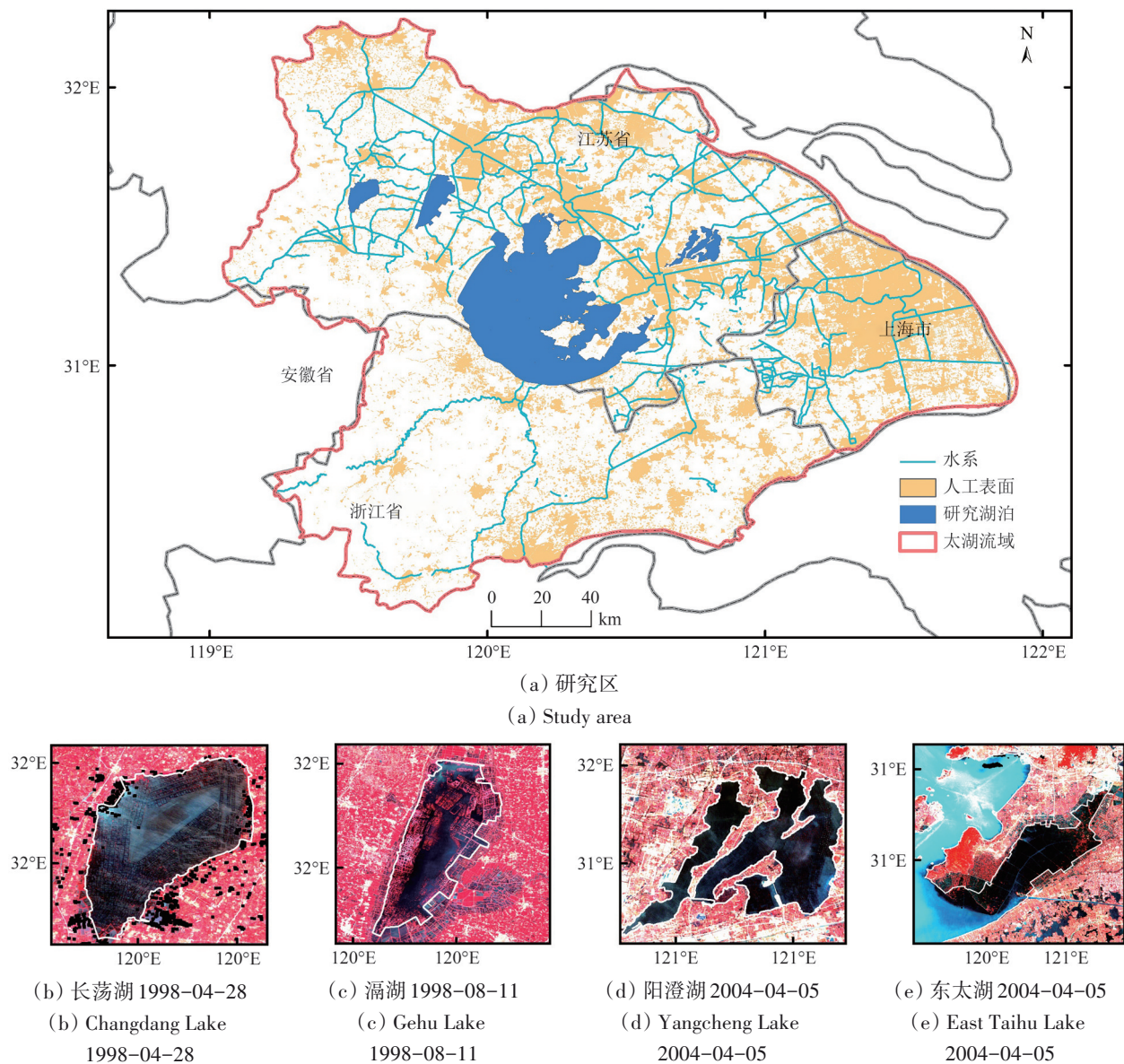


图1 研究湖泊在太湖流域的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the study lakes in the Taihu Basin

此外，为说明太湖流域自然气候变化情况，本研究还获取了太湖流域的国家气象站点数据，包括1989年—2021年的气温、风速和降水量数据。

2.3 围网养殖区时空数据获取

本研究基于Landsat与Sentinel系列影像数据，

重构了1985年—2024年太湖流域湖泊的围网养殖区时空数据集。其中，2016年—2023年的围网养殖区时空数据集来源于前期生产的江淮流域湖泊围网养殖数据集，该数据集是基于Sentinel-1 SAR影像，利用U-Net模型构建的围网养殖区方法获取，数据分类精度达到95%以上（黄林生等，

2025b)。其中, 研究区中阳澄湖的围网分类的总体像素精度达0.91。1985年—2016年及2024年的数据, 是基于2016年—2023年解译的围网养殖空间分布数据, 结合 Landsat 影像, 通过目视解译进行逐年更新后获取。

2.4 水生植被和藻华时空数据获取

本研究基于 Landsat 系列卫星影像重构了1985年—2024年太湖流域湖泊的水生植被时空数据集。数据集获取是利用Luo等(2023)提出的水生植被与藻华的同步提取算法 VBI (Vegetation and Bloom Indices) 获取。该算法是基于 Landsat 影像, 通过水生植被指数 AVI (Aquatic Vegetation Index)、归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 与浮游藻类指数 FAI (Floating Algae Index) 构建的决策树分类方法, 可将湖泊植被类型分类为浮叶/挺水植被、沉水植被、蓝藻水华和开阔水体。算法具体流程如下: (1) 基于 Landsat 影像, 通过缨帽变换的湿度系数计算 AVI, 结合自适应阈值法计算 AVI 阈值 T_{AVI} , 当 $AVI > T_{AVI}$ 的像元为非水生植被, 反之则为水生植被; (2) 在水生植被区, 利用 NDVI 将水生植被像元分为浮叶/挺水植被与沉水植被, 当像元 $NDVI > 0.2$ 则被判别为浮叶/挺水植被, 反之则为沉水植被; (3) 在非水生植被区, 利用 FAI 将像元分类为藻华与开阔水体, 当像元 $FAI > 0.02$ 的像元为藻类水华, 反之则为开阔水体。基于以上方法, 获取的水生植被数据集分类精度达84%以上 (Luo 等, 2023; Xu 等, 2025)。具体计算公式如下:

$$AVI = -wetness = -\sum_{i=1}^6 k(\lambda_i) R(\lambda_i) \quad (1)$$

$$T_{AVI} = 80\% \times AVI(w) + 20\% \times AVI(v) \quad (2)$$

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (3)$$

$$FAI = R_{NIR} - R'_{NIR} \quad (4)$$

$$R'_{NIR} = R_{Red} + (R_{SWIR1} - R_{Red}) \times ((\lambda_{NIR} - \lambda_{Red}) / (\lambda_{SWIR1} - \lambda_{Red})) \quad (5)$$

式中, $k(\lambda_i)$ 表示第 i 波段的湿度系数, $R(\lambda_i)$ 表示影像第 i 波段的反射率, $AVI(w)$ 和 $AVI(v)$ 分别是纯水像元和浮叶类植被像元的 AVI 平均值, R_{Red} 、 R_{NIR} 、 R_{SWIR1} 分别表示红波段、近红外波段和

短波红外波段的反射率, λ_{Red} 、 λ_{NIR} 、 λ_{SWIR1} 分别表示红波段、近红外波段和短波红外波段的波长。

在本研究中, 选取每年4—10月 (水生植被生长期) 的卫星影像开展水生植被监测, 将每年的植被最大分布区作为该年度水生植被面积进行时间序列变化分析。

3 结果与分析

3.1 1985年—2024年太湖流域典型湖泊围网养殖区面积变化与空间收缩

1985年—2024年太湖流域湖泊围网养殖面积呈现先增后减的变化趋势见图2。可见: 围网养殖总面积从1985年的0.5 km²逐渐增加至2001年的361.9 km², 达到峰值; 2002年—2017年, 随着政府对湖泊水产养殖监管力度的增强, 湖泊中围网养殖区开始缩减, 围网总面积由2002年的357.9 km²减少为2017年的77.7 km², 相对减少了78.3%; 2017年后, 在“退网还湖”的政策推动下, 围网面积大幅减少; 至2024年太湖流域围网养殖面积仅为8.7 km²。从不同湖泊覆盖度变化看, 太湖流域湖泊围网养殖范围呈现显著的先增后减趋势 ($P < 0.001$), 可以划分为增长期 (1985年—2002年) 和衰退期 (2002年—2024年) 两个阶段 (图2)。可见1985年—2002年, 4个湖泊的围网养殖面积均达到历史峰值, 但空间分布模式各有差异。其中: 漭湖围网分布范围和密度在1998年达到最高值, 几乎覆盖全湖 (占全湖的82.9%); 阳澄湖和长荡湖分别在2002年和1999年达到最高值, 全湖占比分别为80.2%和77.4%; 东太湖的围网在2000年达到最高值, 占比为70.7% (图2)。

太湖流域典型湖泊围网养殖区空间分布变化见图3。可见: 2002年—2017年, 4个湖泊的围网养殖面积均呈现下降趋势, 尤其是漭湖下降速度最快, 平均每年减少7.3 km², 其次为阳澄湖和长荡湖, 年均下降4.7和3.6 km²。2017年—2024年, 太湖流域4个湖泊围网拆除成效显著: 漭湖在2017年完成了“围网清零”目标 (图3 (b)); 东太湖于2019年基本完成全部围网拆除任务 (图3 (d)); 长荡湖和阳澄湖到2024年仍存在少量围网, 其面积占比均低于10% (图2)。

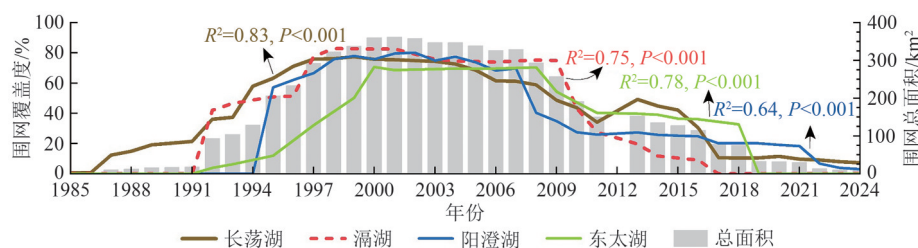


图2 1985年—2024年太湖流域典型湖泊围网养殖面积与覆盖度变化

Fig. 2 Changes in aquaculture enclosure area and coverage in typical lakes of the Taihu Basin from 1985 to 2024

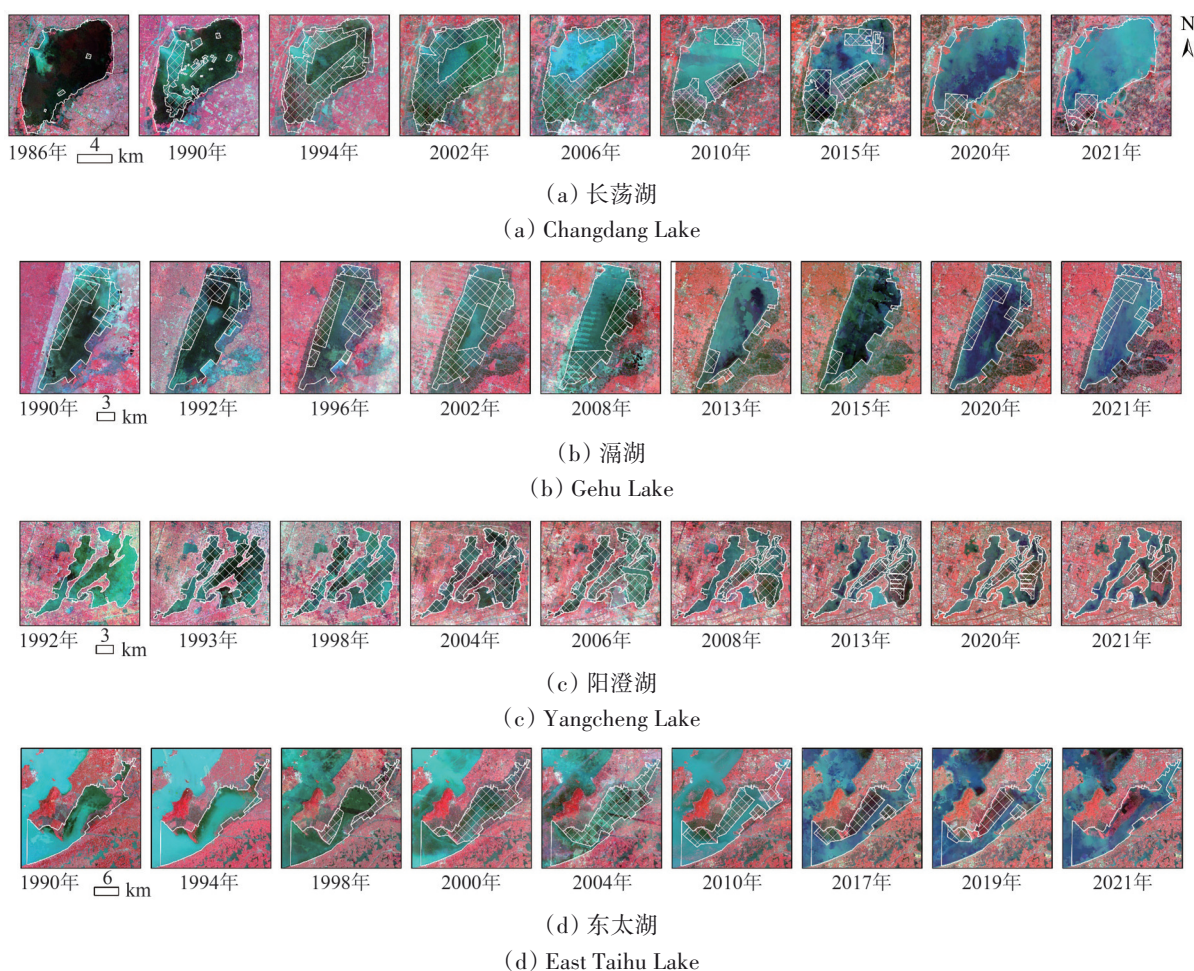


图3 太湖流域典型湖泊围网养殖区空间分布变化

Fig. 3 Spatial changes in aquaculture enclosure nets in typical lakes of the Taihu Basin

3.2 1985年—2024年太湖流域典型湖泊水生植被与藻华面积变化

1985年—2024年太湖流域水生植被的面积变化同样可划分为增长期（1985年—2002年）和衰退期（2002年—2024年）两个阶段（图4）。由图4可见：1985年—2002年，水生植被尤其是沉水植被呈现持续增加趋势，总植被面积于1998年达到峰值427.7 km²，其中沉水植被占主导，面积为353.6 km²，浮叶/挺水植被面积为74.1 km²。空间

上，沉水植被覆盖区域与围网养殖区的分布高度重叠，这可能得益于渔民为养殖需求对高营养价值和净水效益的沉水植被（Mandal和Bera, 2025）的人为管护；自2002年进入衰退期后，水生植被总面积持续下降。具体来说，浮叶/挺水植被呈现波动变化，而沉水植被呈现大幅下降趋势，相对减少了96.6%。尤其在“退网还湖”行动后（2017年起），沉水植被的优势度持续下降，覆盖面积从2017年的63.6 km²降至2024年的10.9 km²，相对减

少了82.9%; 浮叶/挺水植被逐渐变为优势类群, 覆盖面积从2017年的60.8 km²增至2021年的93.5 km²,

相对增加了53.8%, 但随后覆盖面积波动下降, 2024年仅为59.5 km² (图4)。

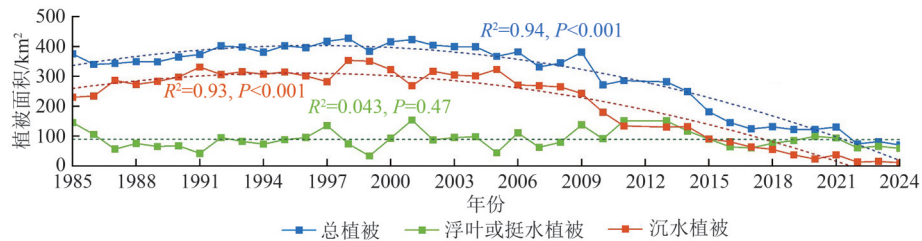
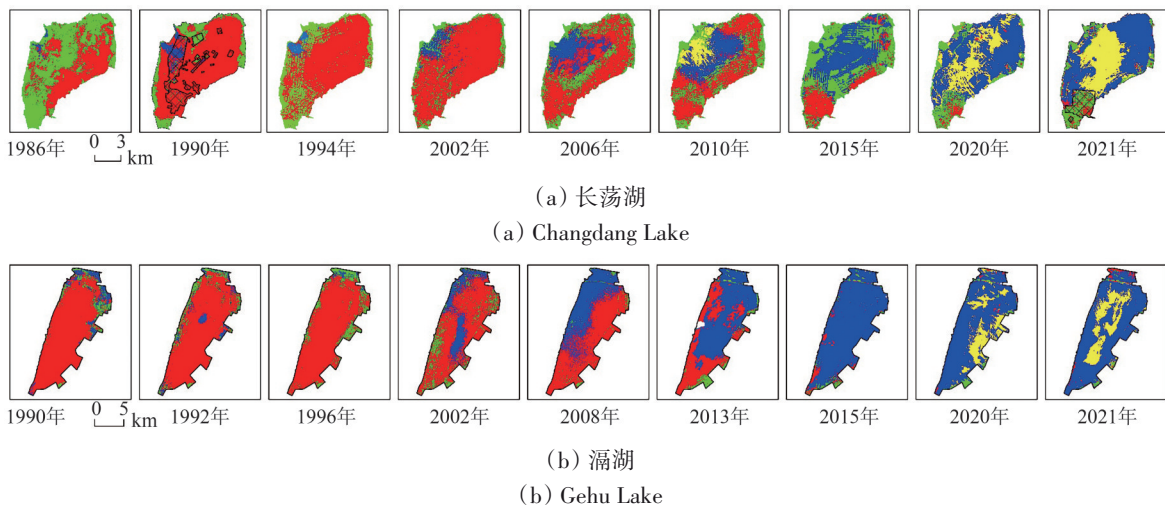


图4 1985年—2024年太湖流域典型湖泊水生植被与藻华面积变化

Fig. 4 Changes in aquatic vegetation and algal bloom areas in typical lakes of the Taihu Basin from 1985 to 2024

太湖流域典型湖泊水生植被与藻华典型年份空间分布变化详见图5。从单个湖泊来看, 湖泊水生植被呈现显著退化趋势, 且与藻华暴发存在空间对应关系。长荡湖在1985年水生植被覆盖度最高(99.7%), 几乎覆盖全湖, 主导类群为沉水植被; 2010年, 沉水植被大幅减少, 水生植被退缩至东部和南部, 而湖中央原本生长沉水植被的区域暴发藻华(图5(a); 黄林生等, 2025a); 2024年, 水生植被覆盖度为33.9%, 水生植被主要分布在南部湖区, 以浮叶/挺水植被为优势类群(图4)。漭湖在1997年水生植被覆盖度达99.2%(全湖分布), 主要类群为沉水植被, 浮叶/挺水植被少量分布于北部沿岸区域(徐锦前等, 2022); 2000年起, 水生植被逐渐减少, 主要减少的类群为沉水植被, 湖泊北部的水生植被最先消失, 接着湖中央的沉水植被也逐渐消失; 2021年, 湖泊中水生植被几乎衰亡, 覆盖度仅为3.5%, 湖泊中央暴发了大面积藻华(图5(b)); 2022年—2024年湖泊中水生植被覆盖度均值仅为6.0%, 藻华持续影响湖中央区域。阳澄湖相对于其他3个湖泊水生植被

变化幅度小(图5(c)), 1985年其水生植被覆盖度为43.3%, 主导类群为沉水植被; 1985年—2000年, 水生植被逐渐增加, 其水生植被覆盖度在1996年达到最高值为75%, 后呈现波动变化; 2006年起, 湖泊中沉水植被开始减少, 而浮叶/挺水植被缓慢增加(图5(c)); 2024年, 湖泊水生植被覆盖度减少至30.9%, 主要植被类群为浮叶/挺水植被。在东太湖, 水生植被主要分布在北部和东南部(杨井志成等, 2021), 1985年—2010年, 水生植被呈现波动增加的趋势, 主导类群为沉水植被, 并且在2003年水生植被覆盖度达到最大值(99.8%); 2005年, 湖泊中的沉水植被开始减少, 浮叶/挺水植被缓慢增加; 2024年, 湖泊中水生植被覆盖度为15.5%, 以浮叶/挺水植被为主导, 相对最高值减少了84.3%(图5(d))。总体上, 在1985年—2024年, 太湖流域湖泊中的水生植被经历了先增后减的变化过程, 水生植被的变化呈现“沉水植被衰退—浮叶/挺水植被缓慢增加—总植被持续减少”的模式, 沉水植被的大幅衰退主导了水生植被的下降趋势。



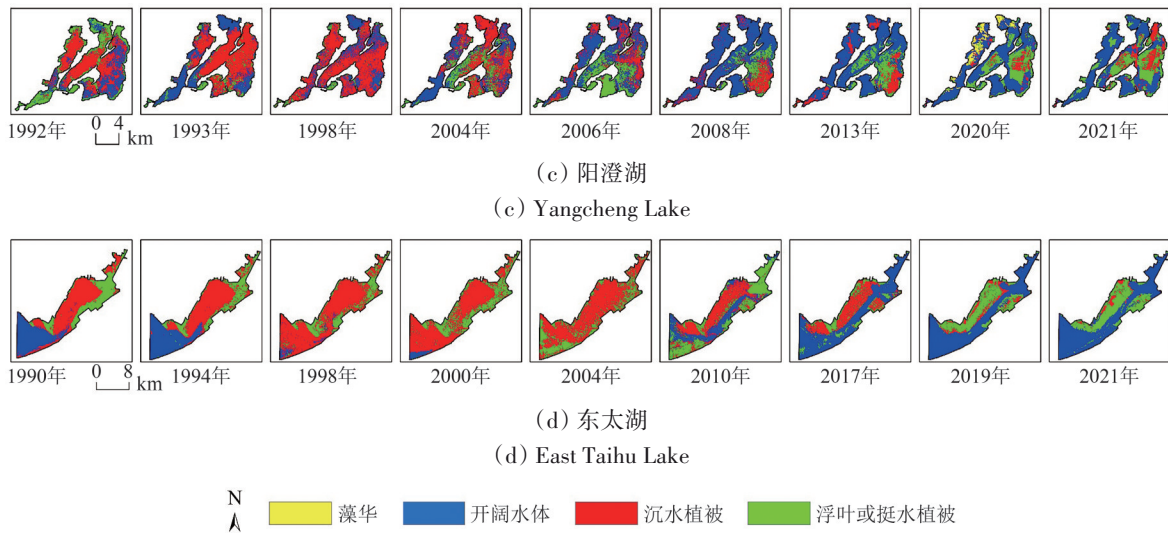
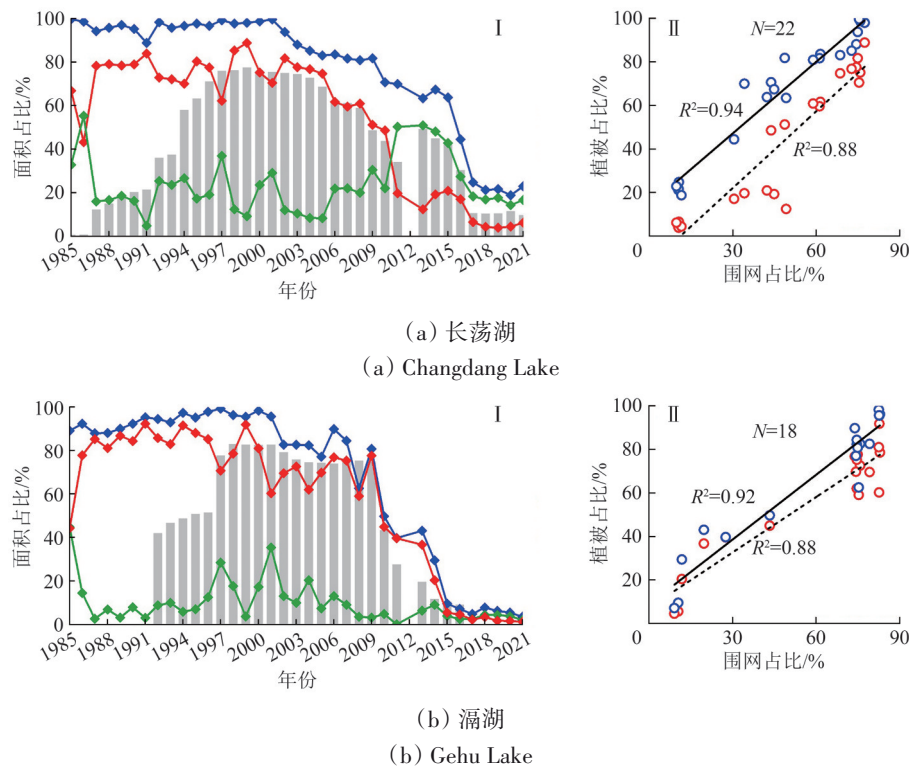


图5 太湖流域典型湖泊水生植被与藻华典型年份空间分布变化
Fig. 5 Spatial changes in aquatic vegetation and algal blooms in typical lakes of the Taihu Basin in representative years

3.3 “退网还湖”行动下围网拆除区水生植被响应特征

为探究水生植被和围网的面积变化关系，本研究对围网达到峰值后各年份的数据进行了相关性分析结果见图6。可见生植被与围网的变化显著相关，围网拆除后水生植被总面积显著减少，其中沉水植被的减少趋势尤为突出。结合植被类型的变化来看，拆围网之前，围网区优势植被类群

为沉水植被（图6），尤其是在围网密集区其优势度更高（图7）；但在拆围网之后，湖泊中的优势类群逐渐由沉水植被转变为浮叶/挺水植被（图4和图7），这意味着“退网还湖”行动显著改变了湖泊内水生植被的分布和结构组成，也带来了湖泊生态退化风险（Cheng等，2023；De Backer等，2012；Lv等，2025）。



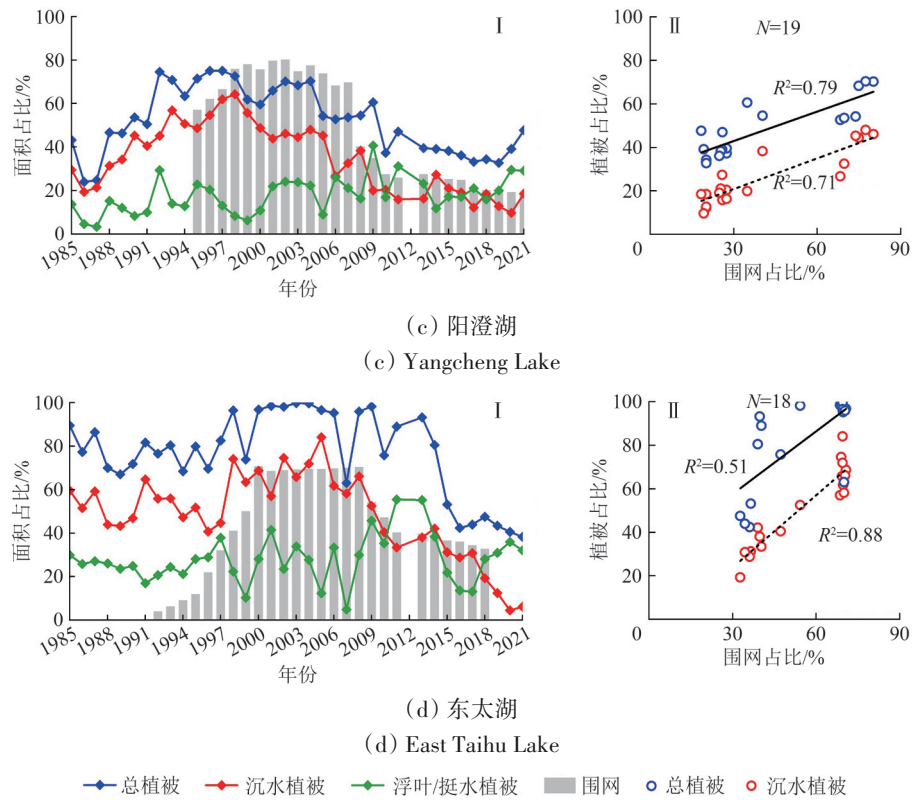
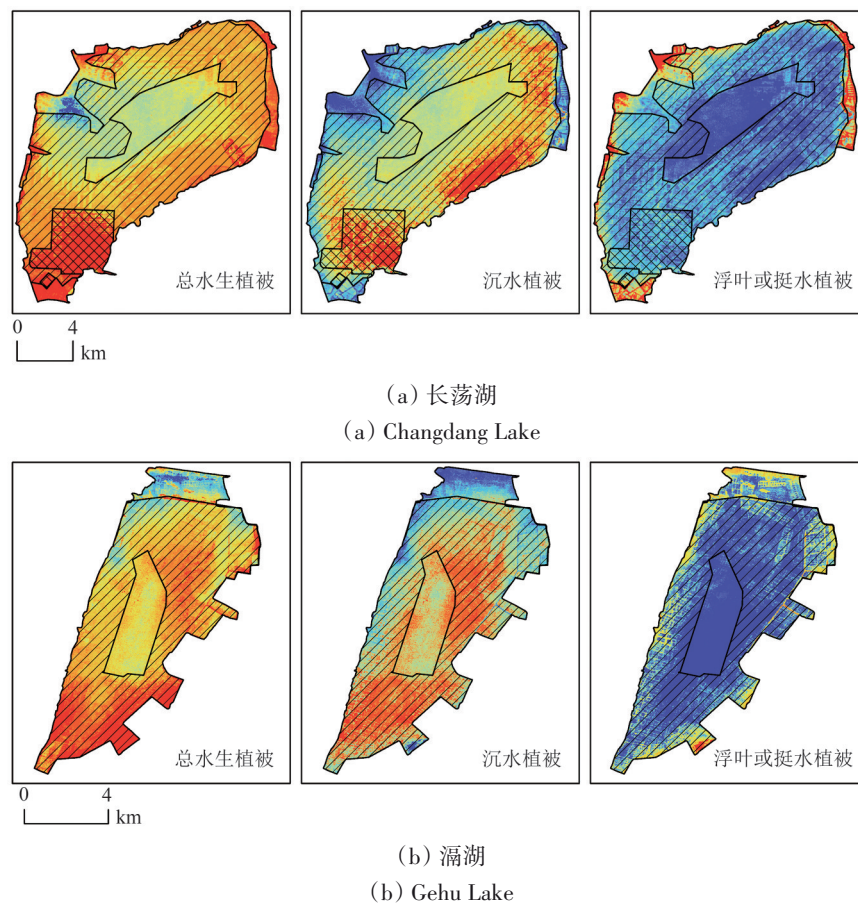


图6 典型湖区中国网和水生植被的覆盖度长期变化及围网减少后其与植被覆盖度的相关性分析
Fig. 6 Long-term changes in the coverage of aquaculture enclosure nets and aquatic vegetation in the typical lakes of Taihu Basin and correlations between reductions in enclosure nets and aquatic vegetation coverage



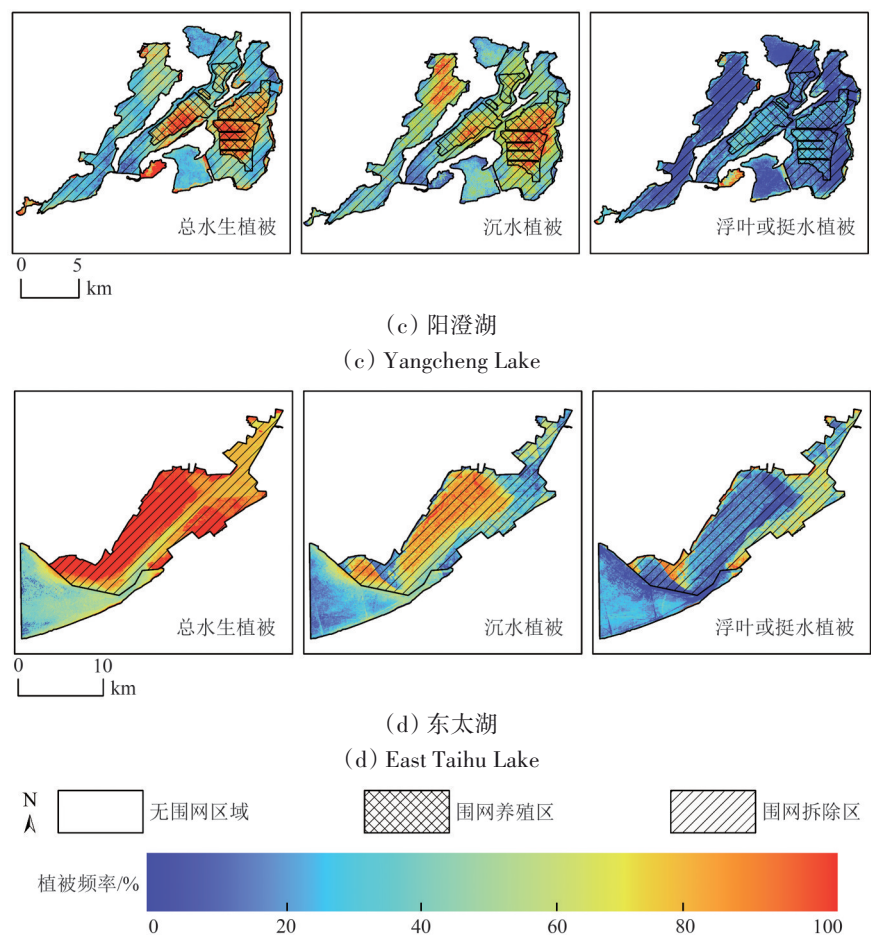
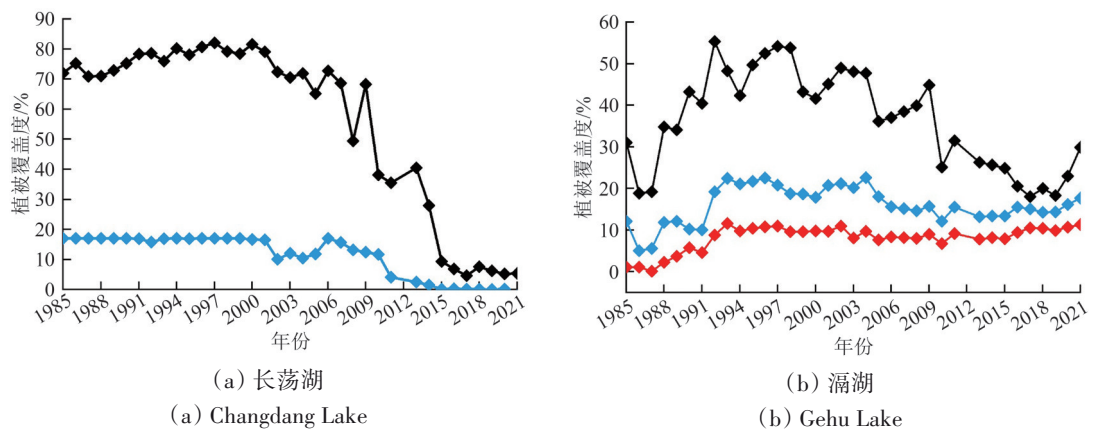


图7 1985年—2024年太湖流域典型湖泊不同水生植被类型空间分布频率
Fig.7 Spatial distribution frequency maps of different aquatic vegetation types in typical lakes of the Taihu Basin from 1985 to 2024

水生植被的变化在不同区域中呈现出显著的空间异质性（图6和图7）。在围网拆除区，水生植被变化最为剧烈。随着围网覆盖范围降至10%左右，水生植被，尤其是沉水植被大幅减少。例如，长荡湖和溇湖在围网拆除次年，植被面积分别相对减少了82.2%和66.6%（图6），湖泊中以沉水植被为主的群落结构被破坏。部分围网拆除区在植被消失后，由于丧失了其抑制藻类的生态功能（Jin

等，2025），继而暴发了大面积藻华（图5（a））。与围网拆除区相比，保留区水生植被覆盖度保持较高水平，年际波动较小，但群落结构仍在发生变化，表现为浮叶/挺水植被呈现增加趋势，而沉水植被的优势度相对下降。此外，无围网区域在围网拆除前后，水生植被覆盖度始终处于较低水平，且未发生显著变化（图8），表明其受生态工程直接影响较小。



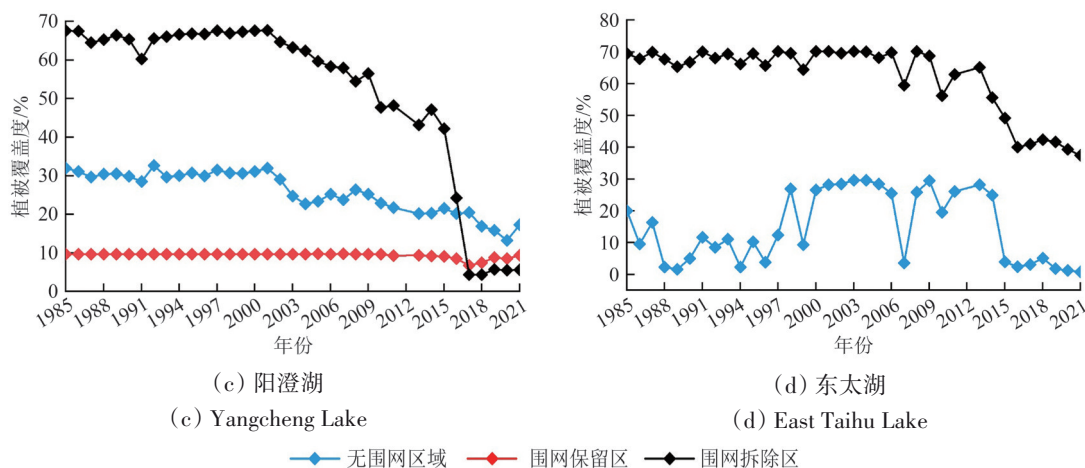


图8 1985年—2024年太湖流域典型湖泊不同区域水生植被覆盖度长期变化

Fig.8 Long-term changes in aquatic vegetation coverage in different zones of typical lakes in the Taihu Basin from 1985 to 2024

从单个湖泊的植被变化来看,在长荡湖,伴随着围网逐渐减少,沉水植被衰退而浮叶/挺水植被增加(图6(a)I);2017年—2024年,湖泊中只剩下约6.1 km²的围网养殖区,水生植被面积均值为21.1 km²,主要分布在围网保留区,优势类群为浮叶/挺水植被(图6),而水生植被完全消失的区域和湖中央频繁暴发藻华(图5(a))。在溇湖,随着围网的拆除,水生植被迅速衰退(图6(b)I),原先围网区生长的沉水植被几乎消失(图6(b)II),只剩下浮叶/挺水植被零星分布在湖泊沿岸区域,且湖泊中心经常暴发大面积藻华。在阳澄湖,与长荡湖类似,在拆围网行动后,湖泊中的优势类群逐步由沉水植被转变为浮叶/挺水植被,但由于常年养殖鱼、蟹(Luo等,2020),其围网养殖保留范围相对较广,养殖区的水生植被得到了较好的管护(图5(c))。在东太湖,围网拆除后植被显著减少,不同类群植被变化差异较大,沉水植被大幅下降,且几近消失,而浮叶/挺水植被快速增加(图6(d)I);2019年东太湖围网已完全拆除,2024年,湖泊中水生植被总面积为13.0 km²,其中浮叶/挺水植被为优势类群,面积为8.6 km²,而沉水植被面积仅有4.4 km²。不同湖泊中植被变化的空间异质性表明,退网还湖的生态效应并非线性,而是受到湖泊本底条件、养殖模式、拆除彻底性及后续管护措施的协同作用。

3.4 1989年—2022年太湖流域气象因子长期变化

温度、降水和风速是水生植被生长的影响因素(Wang等,2019; Reynolds和Aldridge,2021;

Zhang等,2022)。适度的升温有助于水生植被的萌芽和生长,但持续异常高温下水体浊度上升、浮游植物和藻类加速生长(Woolway等,2025),反而抑制了水生植被的生长。近30年间,太湖流域温度显著上升($R^2=0.63$, $P<0.001$),但与其与水生植被的锐减在时序上未表现出相关性,说明温度并非水生植被变化的主要影响因素。同时,研究期间风速显著下降($R^2=0.79$, $P<0.001$),理论上为水生植被生长创造了扰动弱、透明度高的有利环境(Wu等,2022),但仍与观测到的植被退化趋势相悖,也表明围网拆除后的局部水动力条件改变对水生植被造成了较大影响。降水量直接影响湖泊水位,降水过多导致浊度增加和水位上升,阻碍水生植被光合作用和气体交换;降水过少导致水体干旱,使水生植被面临水分和营养物质匮乏的情况。研究期间降水呈现波动变化($R^2=0.04$, $P=0.318$),但在极端降水事件下水生植被会受到明显影响,如2016年长荡湖中水生植被覆盖度较前一年减少了30%(图6),这种影响往往具有间接性、脉冲式的特征(Lv等,2025; Zhi等,2018),在事件发生后植被仍可能呈现部分恢复。而本研究观察到的,是“退网还湖”后水生植被持续的衰退,不能通过偶发的极端降水事件完全解释。

4 讨论

4.1 “退网还湖”后水生植被退化的机制解析

“退网还湖”行动的实施已使太湖流域湖泊水

质得到显著改善 (李一凡等, 2023; 于海龙等, 2020; Zhao等, 2025), 然而, 水生生态系统的恢复状况却不容乐观。这一现象符合湖泊生态学中的多稳态理论 (De Tezanos Pinto 和 O'Farrell, 2014; Scheffer等, 2001), 即生态系统从藻型浊水稳态向草型清水稳态的转换存在滞后效应, 通常需要将营养盐水平降至远低于原稳态的临界阈值以下才能触发 (Dakos等, 2019; Scheffer等, 2001; Van Wijk等, 2023)。本研究结果表明, 围网拆除区的水生植被衰退主要源于两方面机制。一方面, 历史养殖活动造成的沉积物内源污染持续驱动水体富营养化。长期的高密度围网养殖导致氮、磷等营养盐在底泥中大量富集 (Chen等, 2024; Luo等, 2020)。尽管拆除围网有效削减了外源输入, 但内源释放仍在短期内维持了高营养盐浓度 (Xu等, 2021), 助长藻类繁殖 (Hallegraeff等, 2021; Hou等, 2020), 导致水体透明度低, 从而严重抑

制了光照需求较高的沉水植被的恢复 (Zhang等, 2016)。另一方面, 围网拆除改变了局部水文结构, 且缺乏原有的正向人为管护, 导致了水生植被剧烈变化。养殖期间, 渔民为保障收益会自发维护具有净水和饲用价值的沉水植被。围网拆除后, 此类人为干预终止, 使得水生植被群落直接暴露于风浪扰动加剧和光竞争恶化的环境中, 难以自我维持 (杨井志成等, 2021)。研究中观察到的围网保留区内植被生长状况相对较好 (图8), 也从侧面印证了适度人为管护的积极作用。综上, 湖泊生态修复是一个复杂的系统性工程, 当前的“退网还湖”措施虽有效控制了外源污染, 但湖泊生态系统仍较为脆弱, 水生植被仍呈现衰退趋势, 且湖泊整体营养水平尚未降至推动稳态转换的临界阈值 (Andersen等, 2009; Capon等, 2015), 致使系统仍停留在藻型浊水稳态或藻型—草型的过渡阶段。

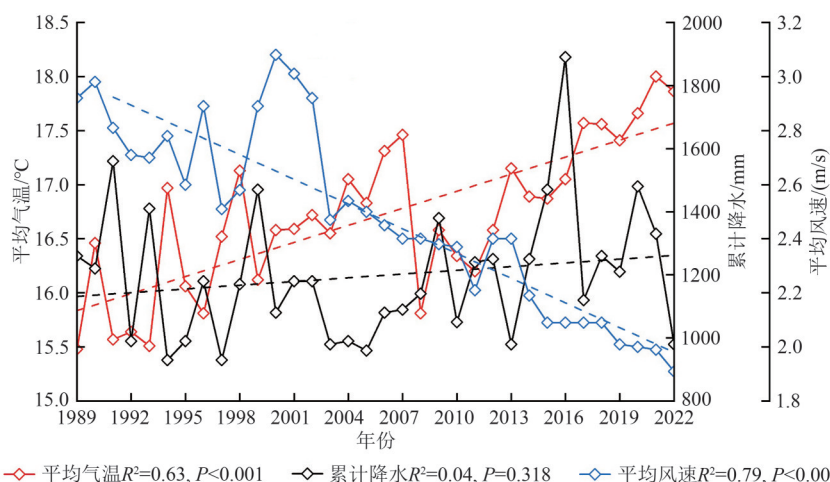


图9 1989年—2022年太湖流域自然条件(平均气温、累计降水和平均风速)的长期变化

Fig.9 Long-term changes in climate factors in the Taihu Basin from 1989 to 2022, including average temperature, cumulative precipitation and average wind speed

4.2 未来展望与研究局限性

湖泊水生植被的衰退现象表明, 湖泊生态修复并非简单的“一退了之”, 而是一个涉及多过程耦合的长期、系统工程。未来的管理策略应立足于湖泊—流域系统整体, 采取更具针对性、周期性和适应性的措施。首先, 在持续巩固外源污染管控成效的同时, 必须着力强化内源治理, 例如通过底泥疏浚、曝气复氧等技术 (Abell等, 2022; Yang等, 2024) 削减沉积物中的营养负荷, 为生态系统跨越稳态转换阈值创造先决条件 (Reynolds

和 Aldridge, 2021)。其次, 应积极推动水生植被的修复, 可在风浪扰动较小的湖湾或浅水区, 依据底泥种子库调查结果 (黄霞等, 2026; Wang等, 2022), 人工引种耐污型先锋植物, 构建“生态草垫”, 利用“改善水质—促进植被生长—进一步改善水质”的正反馈机制 (De Backer等, 2012; De Tezanos Pinto 和 O'Farrell, 2014), 逐步推动系统向草型清水稳态转变。此外, 生态修复成果的长期维系有赖于全流域的可持续管理。这不仅要求持续管控工业、农业和生物污染源, 还需要实

施基于生态水文需求的精细化调度,例如在植被萌芽期(春季)保持水位稳定,以减少水位剧烈波动对幼苗的冲刷(Zhang等, 2024)。

本研究基于长时序多源遥感数据,揭示了太湖流域湖泊围网和水生植被的时空演变规律,为系统性评估大尺度生态政策提供了基础数据。通过U-Net模型获取湖泊中的围网范围,并结合目视解译扩充了数据集的时间范围。利用VBI算法开展湖泊水生植被和藻华的长期监测,该算法基于缨帽变换构建AVI指数增强沉水植被和水体在可见光波段的光谱差异,并结合NDVI、FAI指数构建决策树分类模型,实现了浅水湖泊中沉水植被、浮叶/挺水植被和藻华的同步提取(Luo等, 2023),方法在区域和全球尺度应用中得到验证(Luo等, 2025)。然而,受限于中分辨率影像(Landsat系列卫星影像)的空间分辨率,VBI算法在刻画植被群落细微结构及覆盖度精细化反演方面存在不足。未来研究中可进一步结合地面样方调查、无人机高光谱或高分辨率卫星影像,构建“天一空一地”一体化的生态监测网络,对遥感解译结果进行验证与校准,从而实现对水生植被群落结构、水色参数及藻华动态更精准的常态化跟踪,提升定量评估的可靠性,并为动态优化“一湖一策”的精准管理方案提供坚实的数据支撑,真正实现智慧化的湖泊治理新范式。

5 结 论

本研究基于1985年—2024年长时序多源遥感数据,系统揭示了太湖流域湖泊围网养殖与水生植被群落的时空演变格局,并评估了“退网还湖”政策的生态效应。主要结论如下:(1)围网养殖面积在2001年达到历史峰值(361.9 km²)后逐步下降,至2024年总面积仅为8.7 km²,表明“退网还湖”政策在围网清除方面取得了显著成效。(2)水生植被总体呈现“沉水植被衰退—浮叶/挺水植被缓慢增加—总植被持续减少”的趋势,“退网还湖”后,溇湖、长荡湖和东太湖水生植被大幅下降,而阳澄湖的变化幅度相对较小。(3)围网拆除区普遍观测到植被退化与藻华暴发同步发生的现象,印证了湖泊可能长期处于富营养化状态,这表明仅靠拆除围网难以实现由藻型浊水稳态向草型清水稳态的转换。(4)湖泊生态恢复需采取综合性措施,包括内源营养削减、沉水植被

修复、水文生态调度等,并依托遥感技术建立常态化监测体系,实现“一湖一策”的精准管理。本研究通过遥感技术解析了退网还湖生态修复行动对湖泊生态的影响机制,为太湖流域湖泊生态修复与长效管理,以及全国同类型富营养化湖泊的治理提供理论依据与实践范式。

参考文献(References)

- Abell J M, Özkundakci D, Hamilton D P and Reeves P. 2022. Restoring shallow lakes impaired by eutrophication: approaches, outcomes, and challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(7): 1199-1246 [DOI: 10.1080/10643389.2020.1854564]
- Andersen T, Carstensen J, Hernández-García E and Duarte C M. 2009. Ecological thresholds and regime shifts: approaches to identification. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(1): 49-57 [DOI: 10.1016/j.tree.2008.07.014].
- Cao Z G, Hu C M, Ma R H, Duan H T, Liu M, Loiselle S, Song K S, Shen M, Liu D and Xue K. 2023. MODIS observations reveal decrease in lake suspended particulate matter across China over the past two decades. *Remote Sensing of Environment*, 295: 113724 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113724].
- Capon S J, Lynch A J J, Bond N, Chessman B C, Davis J, Davidson N, Finlayson M, Gell P A, Hohnberg D, Humphrey C, Kingsford R T, Nielsen D, Thomson J R, Ward K and Nally R M. 2015. Regime shifts, thresholds and multiple stable states in freshwater ecosystems; a critical appraisal of the evidence. *Science of the Total Environment*, 534: 122-130 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.045].
- Chen J Q, Liu X M, Chen J S, Jin H X, Wang T, Zhu W and Li L. 2024. Underestimated nutrient from aquaculture ponds to Lake Eutrophication: a case study on Taihu Lake Basin. *Journal of Hydrology*, 630: 130749 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130749].
- Cheng C Y, Chen J, Su H J, Chen J F, Rao Q Y, Yang J, Chou Q C, Wang L T, Deng X W and Xie P. 2023. Eutrophication decreases ecological resilience by reducing species diversity and altering functional traits of submerged macrophytes. *Global Change Biology*, 29(17): 5000-5013 [DOI: 10.1111/gcb.16872]
- Dai Y H, Feng L, Hou X J and Tang J. 2021. An automatic classification algorithm for submerged aquatic vegetation in shallow lakes using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112459
- Dakos V, Matthews B, Hendry A P, Levine J, Loeuille N, Norberg J, Nosil P, Scheffer M and De Meester L. 2019. Ecosystem tipping points in an evolving world. *Nature Ecology and Evolution*, 3(3): 355-362 [DOI: 10.1038/s41559-019-0797-2].
- De Backer S, Teissier S and Triest L. 2012. Stabilizing the clear-water state in eutrophic ponds after biomanipulation: submerged vegetation versus fish recolonization. *Hydrobiologia*, 689(1): 161-176 [DOI: 10.1007/s10750-011-0902-2].

- De Tezanos Pinto P and O'Farrell I. 2014. Regime shifts between free-floating plants and phytoplankton: a review. *Hydrobiologia*, 740(1): 13-24 [DOI: 10.1007/s10750-014-1943-0].
- Duan H T, Ma R H, Xu X F, Kong F X, Zhang S X, Kong W J, Hao J Y and Shang L L. 2009. Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu. *Environmental Science and Technology*, 43(10): 3522-3528 [DOI: 10.1021/es8031852].
- Hallegraeff G M, Anderson D M, Belin C, Bottein M Y D, Bresnan E, Chinain M, Enevoldsen H, Iwataki M, Karlson B, McKenzie C H, Sunesen I, Pitcher G C, Provoost P, Richardson A, Schweibold L, Tester P A, Trainer V L, Yñiguez A T and Zingone A. 2021. Perceived global increase in algal blooms is attributable to intensified monitoring and emerging bloom impacts. *Communications Earth and Environment*, 2(1): 117 [DOI: 10.1038/s43247-021-00178-8].
- Hou X J, Feng L, Dai Y H, Hu C M, Gibson L, Tang J, Lee Z, Wang Y, Cai X B, Liu J G, Zheng Y and Zheng C M. 2022. Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade. *Nature Geoscience*, 15(2): 130-134 [DOI: 10.1038/s41561-021-00887-x].
- Hou X J, Feng L, Tang J, Song X P, Liu J G, Zhang Y L, Wang J J, Xu Y, Dai Y H, Zheng Y, Zheng C M and Bryan B A. 2020. Anthropogenic transformation of Yangtze Plain freshwater lakes: patterns, drivers and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111998 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111998].
- Huang L S, Ni G G, Wang K, Zhao J L and Luo J H. 2025a. Remote sensing monitoring of long-term spatiotemporal evolution of aquatic vegetation and algal blooms in Lake Changdang, Taihu Basin (1985-2021). *Journal of Lake Sciences*, 37(2): 1-13 (黄林生, 倪贵高, 王康, 赵晋陵, 罗菊花. 2025a. 长荡湖水生植被和藻华时空演变遥感监测(1985—2021年). *湖泊科学*, 37(2): 1-13) [DOI: 10.18307/2025.0211].
- Huang L S, Zhai J L, Sun Z, Xu Y, Gao J, Xin Y H, Qin H T, Zhao J L, Ruan C, Xu Y T and Luo J H. 2025b. Satellite remote sensing reveals substantial decrease of enclosure aquaculture in the Yangtze-Huaihe River Basin. *Journal of Lake Sciences*, 37(6): 2260-2272 (黄林生, 翟金龙, 孙喆, 徐颖, 高健, 辛逸豪, 秦海涛, 赵晋陵, 阮超, 徐亚田, 罗菊花. 2025b. 卫星遥感揭示江淮流域湖泊围网大幅拆除. *湖泊科学*, 37(6): 2260-2272) [DOI: 10.18307/2025.0645].
- Huang S, Song K H and Luo J H. 2017. A remote sensing extraction algorithm of enclosure culture area in shallow lakes based on gradient transform. *Journal of Lake Sciences*, 29(2): 490-497 (黄帅, 宋开宏, 罗菊花. 2017. 基于梯度变换的浅水湖泊围网区遥感提取算法. *湖泊科学*, 29(2): 490-497) [DOI: 10.18307/2017.0225].
- Huang S, Yang H Q, Chen J A, Hu S H, Lu J, Du L F, Yang T Y and Xu X R. 2026. Spatial distribution characteristics and restoration potential of the submerged plant seed bank of Lake Caohai, Guizhou Province. *Journal of Lake Sciences*, 38(1): 250-263 (黄霞, 杨海全, 陈敬安, 胡森华, 卢佳, 杜丽芬, 杨天姚, 徐小蓉. 2026. 贵州草海沉水植物种子库空间分布特征与恢复潜力. *湖泊科学* 38(1): 250-263) [DOI: 10.18307/2026.0133].
- Jin Y, Zhang K, Lin Q, Huang S X, Zhou X, Ren J M and Meadows M E. 2025. Aquatic community synchrony dynamics in response to multitrophic regime shifts: paleoecological insights from a shallow lake. *Water Research*, 287: 124402 [DOI: 10.1016/j.watres.2025.124402].
- Lai L, Liu Y C, Zhang Y C, Cao Z, Yin Y P, Chen X, Jin J L and Wu S M. 2024. Long-term spatiotemporal mapping in lacustrine environment by remote sensing: review with case study, challenges, and future directions. *Water Research*, 267: 122457 [DOI: 10.1016/j.watres.2024.122457].
- Li Y F, Gu X H, Zeng Q F, Jia B C, Zi X Y, Chen H H, Mao Z G and Ge Y. 2023. Fluctuations of nutrient concentrations and their influencing factors under various net-pen aquaculture scales in East Lake Taihu from 1990 to 2021. *Journal of Lake Sciences*, 35(1): 155-167 (李一凡, 谷孝鸿, 曾庆飞, 贾冰婵, 訾鑫源, 陈辉辉, 毛志刚, 葛优. 2023. 1990-2021年东太湖网围养殖规模变化下的水质变化特征及成因分析. *湖泊科学*, 35(1): 155-167) [DOI: 10.18307/2023.0110].
- Lin Q, Zhang K, Giguët-Covex C, Arnaud F, McGowan S, Gielly L, Capo E, Huang S X, Ficetola G F, Shen J, Dearing J A and Meadows M E. 2024. Transient social-ecological dynamics reveal signals of decoupling in a highly disturbed anthropocene landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(17): e2321303121 [DOI: 10.1073/pnas.2321303121].
- Luo J H, Duan H T, Xu Y, Shen M, Zhang Y L, Xiao Q T, Ni G G, Wang K, Xin Y H, Qi T C, Feng L, Qiu Y G, Jeppesen E and Woolway R I. 2025. Global trends and regime state shifts of lacustrine aquatic vegetation. *The Innovation*, 6(3): 100784 [DOI: 10.1016/j.xinn.2024.100784].
- Luo J H, Ni G G, Zhang Y L, Wang K, Shen M, Cao Z G, Qi T C, Xiao Q T, Qiu Y G, Cai Y J and Duan H T. 2023. A new technique for quantifying algal bloom, floating/emergent and submerged vegetation in eutrophic shallow lakes using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 287: 113480 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113480].
- Luo J H, Pu R L, Ma R H, Wang X L, Lai X J, Mao Z G, Zhang L, Peng Z L and Sun Z. 2020. Mapping long-term spatiotemporal dynamics of pen aquaculture in a shallow lake: less aquaculture coming along better water quality. *Remote Sensing*, 12(11): 1866 [DOI: 10.3390/rs12111866].
- Luo J H, Yang J Z C, Duan H T, Lu L R, Sun Z and Xin Y H. 2022. Research progress of aquatic vegetation remote sensing in shallow lakes. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 68-76 (罗菊花, 杨井志成, 段洪涛, 陆莉蓉, 孙喆, 辛逸豪. 2022. 浅水湖泊水生植被遥感监测研究进展. *遥感学报*, 26(1): 68-76) [DOI: 10.11834/jrs.20221208].
- Lv C C, Shi L, Tian Y Q, Shan H, Chou Q C, Liu W, Li K Y and Cao T. 2025. Quantifying critical thresholds of submerged macrophyte coverage to buffer climate-amplified ammonium pulses and stabilize clear-water states. *Environmental Science and Technology*, 59(32): 17070-17083 [DOI: 10.1021/acs.est.5c04237].
- Mandal R N and Bera P. 2025. Macrophytes used as multifaceted benefits including feeding, bioremediation, and symbiosis in freshwa-

- ter aquaculture—a review. *Reviews in Aquaculture*, 17(1): e12983 [DOI: 10.1111/raq.12983]
- Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, Luo L C and Zhang Y L. 2007. Environmental issues of lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 581(1): 3-14 [DOI: 10.1007/s10750-006-0521-5]
- Qin B Q, Zhang Y L, Deng J M, Zhu G W, Liu J G, Hamilton D P, Paerl H W, Brookes J D, Wu T F, Peng K, Yao Y Z, Ding K and Ji X Y. 2022. Polluted lake restoration to promote sustainability in the Yangtze River Basin, China. *National Science Review*, 9(1): nwab207 [DOI: 10.1093/nsr/nwab207]
- Reynolds S A and Aldridge D C. 2021. Global impacts of invasive species on the tipping points of shallow lakes. *Global Change Biology*, 27(23): 6129-6138 [DOI: 10.1111/gcb.15893]
- Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C and Walker B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413(6856): 591-596 [DOI: 10.1038/35098000]
- Sun Z, Luo J H, Xu Y, Zhai J L, Cao Z G, Ma J G, Qi T C, Shen M, Gu X H and Duan H T. 2024. Coordinated dynamics of aquaculture ponds and water eutrophication owing to policy: a case of Jiangsu province, China. *Science of the Total Environment*, 927: 172194 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172194]
- Van Wijk D, Chang M Q, Janssen A B G, Teurlincx S and Mooij W M. 2023. Regime shifts in shallow lakes explained by critical turbidity. *Water Research*, 242: 119950 [DOI: 10.1016/j.watres.2023.119950]
- Wang H Y, Zhang X K, Peng Y, Wang H L, Wang X, Song J and Fei G Q. 2022. Restoration of aquatic macrophytes with the seed bank is difficult in lakes with reservoir-like water-level fluctuations: a case study of Chaohu Lake in China. *Science of the Total Environment*, 813: 151860 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151860]
- Wang S S, Gao Y N, Li Q, Gao J F, Zhai S H, Zhou Y and Cheng Y H. 2019. Long-term and inter-monthly dynamics of aquatic vegetation and its relation with environmental factors in Taihu Lake, China. *Science of the Total Environment*, 651: 367-380 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.216]
- Woolway R I, Zhang Y L, Jennings E, Zohary T, Jane S F, Jansen J, Weyhenmeyer G A, Long D, Fleischmann A, Feng L, Qin B Q, Shi K, Shi H R, Wang W J, Tong Y, Zhang G Q, Zscheischler J, Ren Z and Jeppesen E. 2025. Extreme and compound events in lakes. *Nature Reviews Earth and Environment*, 6(9): 593-611 [DOI: 10.1038/s43017-025-00710-w]
- Wu C H, Wu S Q, Wu X F, Dai J Y, Gao A and Yang F. 2022. Numerical investigation of the effects of aquatic vegetation on wind-induced wave and current characteristics in shallow lakes. *Frontiers in Environmental Science*, 9: 829376 [DOI: 10.3389/fenvs.2021.829376]
- Xin Y H, Luo J H, Xu Y, Sun Z, Qi T C, Shen M, Qiu Y G, Xiao Q T, Huang L S, Zhao J L and Duan H T. 2024. SSAVI-GMM: an automatic algorithm for mapping submerged aquatic vegetation in shallow lakes using sentinel-1 SAR and sentinel-2 MSI data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4416610 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3489883]
- Xu J Q, Zhong W, Cai Y J, Gong Z J and Wen X L. 2022. Trend of water environment change in Lake Changdang and Lake Gehu in the Last 30 Years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 31(7): 1641-1652 (徐锦前, 钟威, 蔡永久, 龚志军, 温新利. 2022. 近30年长荡湖和漏湖水环境演变趋势. *长江流域资源与环境*, 31(7): 1641-1652) [DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202207020]
- Xu H, McCarthy M J, Paerl H W, Brookes J D, Zhu G W, Hall N S, Qin B Q, Zhang Y L, Zhu M Y, Hampel J J, Newell S E and Gardner W S. 2021. Contributions of external nutrient loading and internal cycling to cyanobacterial bloom dynamics in Lake Taihu, China: Implications for nutrient management. *Limnology and Oceanography*, 66(4): 1492-1509 [DOI: 10.1002/lno.11700]
- Xu Y, Luo J H, Duan H T, Qin H T, Xin Y H, Xiao Q T and Zhang Y L. 2025. Satellite-based risk assessment: shifting from macrophyte- to phytoplankton-dominated states in lakes of Yangtze plain. *Ecological Indicators*, 178: 114096 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114096]
- Yang J Z C, Luo J H, Lu L H, Sun Z, Cao Z G, Zeng Q F and Mao Z G. 2021. Changes in aquatic vegetation communities based on satellite images before and after pen aquaculture removal in East Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 33(2): 507-517. (杨井志成, 罗菊花, 陆莉蓉, 孙喆, 曹志刚, 曾庆飞, 毛志刚. 2021. 东太湖围网拆除前后水生植被群落遥感监测及变化. *湖泊科学*, 33(2): 507-517) [DOI: 10.18307/2021.0228]
- Yang R B, Wu J N, Zhao J C, Guan Q, Fan X and Zhao L. 2024. Marked interannual variability in the relative dominance of phytoplankton over submerged macrophytes rather than regime shifts in a shallow eutrophic lake: evidence from long-term observations. *Ecological Indicators*, 166: 112301 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112301]
- Yu H L, Wang H Z, Wang H F, Liang Y X and Li X R. 2020. Lake demolition monitoring and estimation of ecological environment benefits in Jiangnan Plain: a case study of the Honghu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 29(12): 2760-2769 (于海龙, 王宏志, 王海芳, 梁雨萱, 黎欣然. 2020. 江汉平原湖域拆围监测及其生态环境效益估算研究——以洪湖为例. *长江流域资源与环境*, 29(12): 2760-2769) [DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202012019]
- Zhang P Y, Zhang H, Wang H, Hilt S, Li C, Yu C, Zhang M and Xu J. 2022. Warming alters juvenile carp effects on macrophytes resulting in a shift to turbid conditions in freshwater mesocosms. *Journal of Applied Ecology*, 59(1): 165-175 [DOI: 10.1111/1365-2664.14040]
- Zhang Y H, Zhu J G, Hu W P, Chen Q, Peng Z L, Qin H and Luo J. 2024. Hydrodynamic effects and water environment improvement of topographic reconstruction in shallow lakes. *Journal of Hydrology*, 634: 131125 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131125]
- Zhang Y L, Liu X H, Qin B Q, Shi K, Deng J M and Zhou Y Q. 2016. Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in Eastern Lake Taihu: implications for lake ecological restoration. *Scientific Reports*, 6(1): 23867 [DOI: 10.1038/srep23867]
- Zhao X C, Zhang Y L, Tang H R, Zhang Q J, Cui C X and Qin B Q.

2025. Water quality improvements and ecological inertia: a basin-wide assessment of ecosystem recovery in the yangtze river system (2005–2022). *Ecological Indicators*, 176: 113700 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113700]

Zhi Y W, Cao Y, Sun J Y, Li W and Jeppesen E. 2018. Indirect effects of extreme precipitation on the growth of *Vallisneria denseserrulata* Makino. *Environmental and Experimental Botany*, 153: 229–235 [DOI: 10.1016/j.envexpbot.2018.06.003]

Spatiotemporal response of aquatic vegetation in typical lakes of the Taihu Basin to “Purse Seine Demolition of Lakes and Reservoirs” from a remote-sensing perspective

LUO Juhua^{1,2}, XU Ying^{1,2}, NI Guigao³, SHEN Zhou¹, GAO Jian⁴, MAO Zhigang¹, DUAN Hongtao^{1,2}

1. State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China;

3. School of Electrical and Information Engineering, Wanjiajiang University of Technology, Maanshan 243031, China;

4. Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

Abstract: To evaluate the ecological impacts of the “Purse Seine Demolition of Lakes and Reservoirs” policy in the Taihu Basin, this study investigated the spatiotemporal response of aquatic vegetation in four typical enclosure-aquaculture lakes: East Taihu Lake, Gehu Lake, Changdang Lake, and Yangcheng Lake. The study aimed to clarify how the expansion and subsequent removal of enclosure aquaculture affected submerged aquatic vegetation, floating-leaved/emergent aquatic vegetation, and algal bloom dynamics, and to provide scientific support for future lake ecological restoration and long-term management.

Long-term Landsat imagery (1985–2024) and Sentinel-1 synthetic aperture radar (SAR) data (2016–2024) were used to reconstruct the spatiotemporal dynamics of enclosure aquaculture and aquatic vegetation. A U-Net model was applied to extract enclosure aquaculture areas from SAR imagery, while a vegetation-algal bloom extraction algorithm based on Landsat data was used to classify submerged aquatic vegetation, floating-leaved/emergent aquatic vegetation, algal blooms, and open water. Time-series analysis, spatial overlay, and correlation analysis were then conducted to compare vegetation changes before and after net-pen removal. The responses of aquatic vegetation were further examined across net-retained, net-demolished, and net-free areas to identify spatial heterogeneity and possible ecological mechanisms.

The total area of enclosure aquaculture in the four lakes increased rapidly after the 1980s, peaked at 361.9 km² in 2001 and then declined continuously. By 2024, only 8.7 km² of enclosure aquaculture remained, indicating the substantial effectiveness of the policy in removing net pens. Aquatic vegetation showed a clear long-term transition characterized by a decline in submerged aquatic vegetation, a gradual increase in floating-leaved/emergent aquatic vegetation, and an overall reduction in total vegetation area. After 2017, submerged aquatic vegetation decreased sharply from 63.6 km² to 10.9 km², representing an 82.9% reduction. By contrast, floating-leaved/emergent aquatic vegetation became more dominant in several lakes, although its coverage also fluctuated in later years. Vegetation degradation was especially severe in net-demolished areas, where submerged vegetation often declined substantially or disappeared, and algal blooms occurred simultaneously. Net-retained areas generally maintained higher vegetation coverage and more stable conditions, suggesting that enclosure structures and associated artificial maintenance previously helped sustain submerged vegetation through physical support and management.

The “Purse Seine Demolition of Lakes and Reservoirs” policy effectively reduced enclosure aquaculture and contributed to water-quality improvement in the Taihu Basin. However, results show that removing net pens alone did not guarantee aquatic vegetation recovery. Under long-term eutrophication, the combined effects of loss of physical support, reduced artificial maintenance, altered hydrodynamic conditions, and persistent internal nutrient loading may have accelerated submerged vegetation degradation. Future restoration efforts should therefore shift from single water-quality improvement measures to integrated ecological restoration, including internal nutrient reduction, submerged vegetation recovery, hydrological regulation, near-natural restoration, mapping of historical vegetation distributions, and long-term remote-sensing monitoring, to support adaptive lake management.

Key words: Taihu Basin, enclosure aquaculture, aquatic vegetation, alternative stable states, remote sensing, Purse Seine Demolition of Lakes and Reservoirs, ecosystem recovery, Yangtze River’s Great Protection Strategy

Supported by Open Fund of Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Hubei University of Technology (No. HGKFZ09); General Program of the National Natural Science Foundation of China (No. 42571445)