

浅水湖泊水生植被和藻类水华时空演变遥感长期监测：以太湖流域长荡湖为例 (1985—2021 年)*

黄林生¹, 倪贵高^{1,2}, 王 康^{1,2}, 赵晋陵¹, 罗菊花^{2**}

(1: 安徽大学, 农业生态大数据分析与应用技术国家地方联合工程研究中心, 合肥 230601)

(2: 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)

摘 要: 水生植被和藻类作为湖泊生态系统的主要初级生产者, 对湖泊生态系统具有重要作用。在气候变化和人类活动的双重作用下, 湖泊富营养化加剧, 水生植被退化, 藻类水华频发。开展湖泊水生植被群落和藻类水华的长期观测可为湖泊生态系统水生植被修复和藻类水华管控提供决策依据。本研究以太湖流域浅水湖泊长荡湖为研究区, 基于 1985—2021 年的 Landsat 5 和 8 卫星数据, 利用 VBI (vegetation and bloom indices) 草藻分类算法, 开展了浮叶/挺水植被、沉水植被和藻类水华长时序时空演变分析。结果表明: 36 年来, 长荡湖水生植被 (包括浮叶/挺水植被和沉水植被) 都呈现显著下降趋势, 其中沉水植被下降趋势尤为明显, 沉水植被从湖中心向岸边逐步退化, 其覆盖度从 1985 年的 75% 下降至 2021 年的不足 21%; 自 2011 年起, 长荡湖水生植被优势生活型从沉水植被转变为浮叶/挺水植被; 2010 年首次监测到水华发生, 2020 年和 2021 年连续两年均监测到湖中心有大面积水华。基于湖泊围网面积和气象数据分析发现, 围网拆除是水生植被退化和优势生活型转变的主要因素。

关键词: 太湖流域; 长荡湖; 水生植被; 藻类水华; 围网; 遥感

Long-term remote sensing monitoring of the spatiotemporal evolution of aquatic vegetation and algal blooms in shallow lakes: A case study of Lake Changdang in the Taihu Basin (1985–2021)*

Huang Linsheng¹, Ni Guigao^{1,2}, Wang Kang^{1,2}, Zhao Jinling¹ & Luo Juhua^{2**}

(1: *National Engineering Research Center for Agro-Ecological Big Data Analysis & Application, Anhui University, Hefei 230601, P.R.China*)

(2: *State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China*)

Abstract: Aquatic vegetation and algal, as primary producers within lake ecosystems, play crucial roles in the aquatic ecosystem health. However, the combined impacts of climate warming and intensified human activities have led to significant transformations of lake environment, such as eutrophication, degradation of aquatic vegetation, and the occurrence of algal blooms. Long-term monitoring of aquatic vegetation communities and algal blooms in lakes is essential for informed decision-making on aquatic vegetation restoration and algal bloom control. This study focused on long-term changes in aquatic vegetation communities and algal blooms in Lake Changdang, a shallow lake in Taihu Basin. Based on Landsat 5 and 8 satellite data during 1985–2021, we employed the vegetation and bloom indices algorithm, a classification algorithm capable of identifying aquatic vegetation and algal blooms, to analyze the temporal and spatial evolution of floating/emergent aquatic vegetation, submerged aquatic vegetation, and algal blooms. Results showed that a significant decline occurred in both floating-leaf/emergent vegetation and submerged vegetation within Lake Changdang over the past 36 years. Particularly, submerged aquatic vegetation gradually degraded from the center towards the shore, with the coverage decreasing from 75% in 1985 to <21% in 2021. Since 2011, the dominant aquatic vegetation community in Lake

* 2024-03-06 收稿; 2024-06-18 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (42271377) 资助。

** 通信作者; E-mail: jhluo@niglas.ac.cn。

Changdang has transitioned from submerged vegetation to floating/emergent vegetation. Notably, presence of algal blooms was first detected in 2010, with subsequent large-scale occurrences in lake center observed in 2020 and 2021. Eutrophication and enclosure activities were identified as the primary factors of the degradation of aquatic vegetation.

Keywords: Taihu Basin; Lake Changdang; aquatic vegetation; algal blooms; enclosure aquaculture; remote sensing

水生植被和藻类同是水生生态系统的初级生产者,但在湖泊生态系统中的作用完全不同,分别主导着两种湖泊生态系统稳态。一方面,水生植被,包括沉水植被和浮叶/挺水植被,可以缓滞水流、促进沉降、抑制风浪、澄清水质,还可为鱼类等生物提供栖息环境^[1-2],有水生植被分布的湖泊往往水体透明度高,水质向好,生态系统健康,为清水态生态系统^[3-4]。另一方面,藻类水华是湖泊重度富营养化的结果,藻类在短时间内生长并腐烂,释放大量的藻毒素,引起水生生物大量死亡,恶化水质,甚至威胁人类饮用水安全,对湖泊生态系统具有严重危害^[5-6],有藻类水华发生的湖泊往往富营养程度高,水质较差,为浊水态生态系统^[7]。因此,掌握水生植被群落、藻类水华的时空分布和演变对湖泊生态系统稳态追踪以及生态服务功能评估至关重要。

卫星遥感具有宏观、动态、可历史追溯等优点,是开展湖泊水生植被和藻类水华时空监测的有效手段。目前,围绕湖泊水生植被和藻类水华监测,已发展了一系列的光谱指数,包括归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)、水体调节植被指数(water adjusted vegetation index, WAVI)、浮游藻类指数(floating algae index, FAI)等^[8-10],并基于这些光谱指数,构建了水生植被或藻类水华监测算法,如 Fang 等^[11]通过改进 FAI 指数,提出了调节浮游藻类指数(adjusted floating algae index, AFAI)。此外,基于 Landsat 影像开展了 1983—2016 年呼伦湖藻类水华的提取与变化监测;Villa 等^[10]基于 Landsat 影像,利用 NDVI、NDAVI(normalized difference aquatic vegetation index)、WAVI 等指数构建了水生植被群落决策树分类方法,并成功提取了太湖、Kis-Balaton、Trasimeno 和 Mantua 4 个湖泊的不同生活型水生植被;Dai 等^[12]基于 FAI 和 NDWI,结合光谱线性混合模型,构建了沉水植被的自动提取算法,并在东太湖湾、洪湖等应用。然而,以上算法要么是围绕不同生活型的水生植被分类,要么是围绕藻型湖泊提取水华,而在草藻共存的湖泊,缺少不同生活型水生植被和藻类水华的遥感同步识别方法,而现有的这些指数和方法均会对草藻产生误判^[13]。针对该问题,Luo 等^[13]提出了新的水生植被指数(aquatic vegetation index, AVI),并构建了一种同步识别浮叶/挺水植被、沉水植被和藻类水华的 VBI (vegetation and bloom indices)算法,该算法为富营养化湖泊(尤其是草藻共存的湖泊)不同水生植被群落和藻类水华的长期时空演变监测与追踪提供了行之有效的办法。

长荡湖位于太湖流域,是常州市重要的水源地,也是重要的水产种质资源保护区和生态红线保护区,其生态和水环境的长期变化对生态环境修复与管理以及可持续发展具有重要作用。长荡湖曾分布着丰富的水生植被,是典型的草型湖泊^[14],近年来时有藻类水华暴发的报道。目前的研究主要关注长荡湖水质参数(如叶绿素 *a*、总氮、总磷等)的长时序变化^[14-15]和鱼虾蟹等渔业养殖^[16-17],但对水生植被不同群落和藻类水华的长期时空演变特征研究较少,仅有的信息也来源于调查数据,人工调查的时空局限性导致其不足以捕捉全湖植被和藻类水华的长期演变规律。因此,本研究旨在基于 1985—2021 年的 Landsat 5 和 8 卫星影像,开展过去 36 年来长荡湖浮叶/挺水植被、沉水植被和藻类水华的时空变化监测,并阐明其长期变化特征及驱动因素。本研究成果可为湖泊稳态转换研究提供基础数据,对长荡湖水生植被修复和藻类水华管控等生态保护提供数据支撑和科学依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

长荡湖(31°33′~31°40′N, 119°30′~119°37′E)又名洮湖,是古太湖分化残留的重要湖泊之一,地处江苏省常州市金坛区东南部,横跨金坛、溧阳两地,北通长江,南接太湖,西邻丹金溧漕河,东连滆湖^[18]。长荡湖属于亚热带季风气候,季节分明,降水多集中在夏、秋季节,雨量充沛,年降水量在 1000~1400 mm 之间^[19]。长荡湖形状北宽南窄,现有湖泊面积约为 85 km²,是太湖流域的第三大湖泊;湖盆地形平坦,无显著起伏,平均水深约为 1.1 m,是典型的过水性、浅水湖泊(图 1)。近几十年,受工农业等流域污染排放和湖内围网养殖

等影响,长荡湖富营养化加剧,主要污染物为总氮(TN,劣V类)、总磷(TP,Ⅲ~V类)和高锰酸盐指数(COD_{Mn} ,Ⅱ~Ⅳ类),水体营养水平介于轻度~中度富营养之间^[14]。

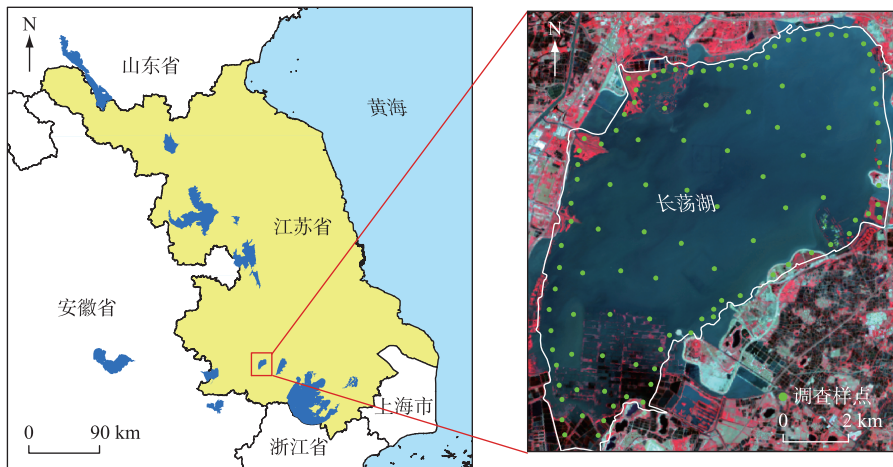


图1 研究区地理位置和假彩色 Landsat 影像

Fig.1 Geographical location of the study area and the false-color Landsat imagery

1.2 数据收集及预处理

1.2.1 影像数据收集与预处理 本研究使用的遥感数据源为 Landsat 5 和 Landsat 8 卫星数据。两颗卫星的重访周期为 16 d,影像空间分辨率为 30 m。本研究获取的长荡湖 Landsat 系列影像均来源于谷歌地球引擎(GEE),包括 1985—2011 年的 Landsat 5 TM 地表反射率数据(LANDSAT/LT05/C01/T1_SR)和 2013—2021 年的 Landsat 8 OLI 地表反射率数据(LANDSAT/LC08/C01/T1_SR)。对于每一景地表反射率影像,通过 Fmask 算法得到的 QA 波段生成云和云阴影掩膜,去除影像中的云和云阴影。

由于 Landsat 数据的时间分辨率有限,年内可获取到的无云有效影像较少。为了尽可能获取更多的影像以准确捕捉水生植被群落和藻类水华变化,本研究将去云后的总像元面积大于湖泊面积 50% 的影像定义为有效影像。1985—2021 年间,共获取了 425 景有效影像(附图 I)。

1.2.2 水生植被调查数据获取 分别在 2009、2013 和 2019 年水生植被的关键生长季开展地面调查,共获取 107 个水生植被调查样点(图 1),作为验证数据集,具体的调查信息见附表 I。鉴于 Landsat 影像的分辨率为 30 m,但地面样本点为点状采样,为了确保地面样本点对卫星监测结果验证的可靠性,采样时通过目视估算大于 2 个像元范围内(60 m×60 m)水生植被的覆盖度和优势生活型植被。

1.2.3 其他数据获取 本研究还获取了长荡湖附近的国家气象站点(区站号 58345,溧阳站)数据,包括 1989—2021 年的月尺度气温和降水量数据。此外,还获取了 1985—2020 年长荡湖的围网养殖区面积数据^[20]。该数据是基于 Landsat 遥感假彩色影像,利用人机交互目视解译的方法获得,基于该方法,我们补充了 2021 年长荡湖的围网养殖区面积。

2 研究方法

2.1 水生植被与藻类水华提取方法

通过 VBI 草藻分类算法^[13]开展长荡湖不同生活型水生植被与藻类水华的分类监测。VBI 算法本质上是一个分类决策树(图 2),由 3 个植被指数和 3 个阈值组成,分别为 AVI、NDVI 和 FAI 及对应分类阈值 a 、 b 、 c 。VBI 算法分为 3 个步骤:①通过像元 AVI 和阈值 a ,将研究区分为水生植被区和非水生植被区,即:当像元 $\text{AVI} > a$ 时,该像元被分类为水生植被,否则被分类为非水生植被。②在水生植被区,通过像元 NDVI 和阈值 b 进一步分类,即:当像元 $\text{NDVI} > b$,该像元被分类为浮叶植被,反之被分类为沉水植被;③在非水生植被

区,通过像元 FAI 和阈值 c 进一步分类,即:当像元 $FAI > c$,该像元被分类为藻类水华,反之被分类为开阔水体。其中,AVI 的阈值 a 通过混合线性模型^[13]获取,NDVI 的阈值 b 为 0.2,FAI 的阈值 c 为 0.02。

2.2 不同生活型植被变化趋势分析

基于以上方法,对每景有效影像进行分类后,分别得到浮叶/挺水植被、沉水植被、藻类水华和开阔水体的像元数和面积,并基于每个类别的年内最大面积,开展年际间变化趋势分析。利用传统的线性拟合开展水生植被变化趋势分析,并利用 t 检验进行变化趋势显著性检验^[21]。

2.3 像元尺度的年内优势植被生活型确定

考虑到藻类水华发生的空间多变性,本研究特别定义:如某像元年内有一次被分类为藻类水华,则该像元就被认为是藻类水华像元,用于获取年内藻类水华的时空分布。考虑到不同生活型植被年最大面积并不能反映研究区内各类型的总体分布格局和优势生活型,本文通过定义研究区每个像元的植被优势度,获取不同生活型植被的年空间分布,并得到年内植被优势群落。具体方法如下:

$$D_i = \frac{N_{\text{EFAV}} - N_{\text{SAV}}}{N_{\text{pixel}}}$$

(1)

式中, D_i 为像元的优势度, N_{pixel} 为年内像元被分类的总次数, N_{EFAV} 和 N_{SAV} 分别为像元年内被分类为浮叶/挺水植被和沉水植被的次数。当 $D_i \geq 0$ 时,表明该像元的优势生活型为浮叶/挺水植被,反之则判为沉水植被。基于以上方法,获取研究区的年内不同生活型水生植被空间分布及面积。当年内浮叶/挺水植被的面积大于沉水植被时,则该年研究区的优势植被生活型为浮叶/挺水植被,反之,沉水植被为优势生活型。

3 结果与分析

3.1 遥感分类结果精度验证

基于地面验证数据集,通过混淆矩阵^[22],对遥感分类结果开展精度验证(表 1)。结果显示,水生植被分类总体精度为 87.78%,Kappa 系数为 0.83。其中,浮叶/挺水植被和沉水植被的生产者精度分别为 95.12% 和 85.71%,制图精度分别为 92.86% 和 85.71%。

表 1 水生植被遥感分类结果混淆矩阵

Tab.1 Confusion matrix for remote sensing classification results of aquatic vegetation

		实测样点			总和	生产者精度/%
		浮叶/挺水植被	沉水植被	开阔水体		
分类结果	浮叶/挺水植被	39	1	1	41	95.12
	沉水植被	2	30	3	35	85.71
	开阔水体	1	4	26	31	83.87
	总和	42	35	30	107	/
	制图精度/%	92.86	85.71	86.67	/	/
总体精度 = 87.78% ; Kappa = 0.83						

考虑到野外调查时未捕捉到藻类水华的发生,无藻类水华验证样点,不能通过实测样点验证藻类水华监测结果的准确性。但水生植被群落一般分布较为固定且随季节有规律的演替,而藻类水华暴发一般时间短、空间多变。在现场同步数据有限的情况下,也可通过不同水生植被群落和藻类水华年内时空变化是否符合其物候特征,来间接评价分类算法和结果的准确性。图 3 显示了长荡湖 2019 年和 2020 年连续两年不

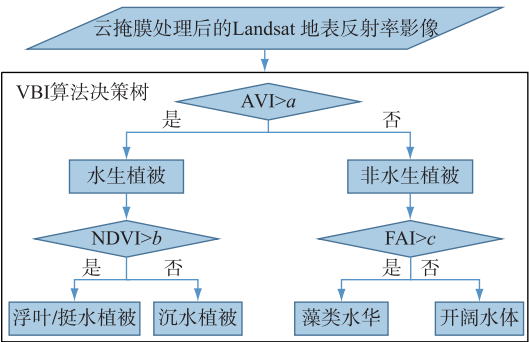


图 2 VBI 草藻分类算法技术流程

Fig.2 Technical process of the VBI classification algorithm

同季节影像的水生植被和藻类水华分类结果,可以看出长荡湖浮叶/挺水植被和沉水植被分布区域均较为固定,仅在 2020 年 8 月 30 日的影像中监测到湖中心大区域藻类水华发生。因此,水生植被和藻类水华时空变化符合其物候特征,表明 VBI 算法监测藻类水华的结果准确可靠。

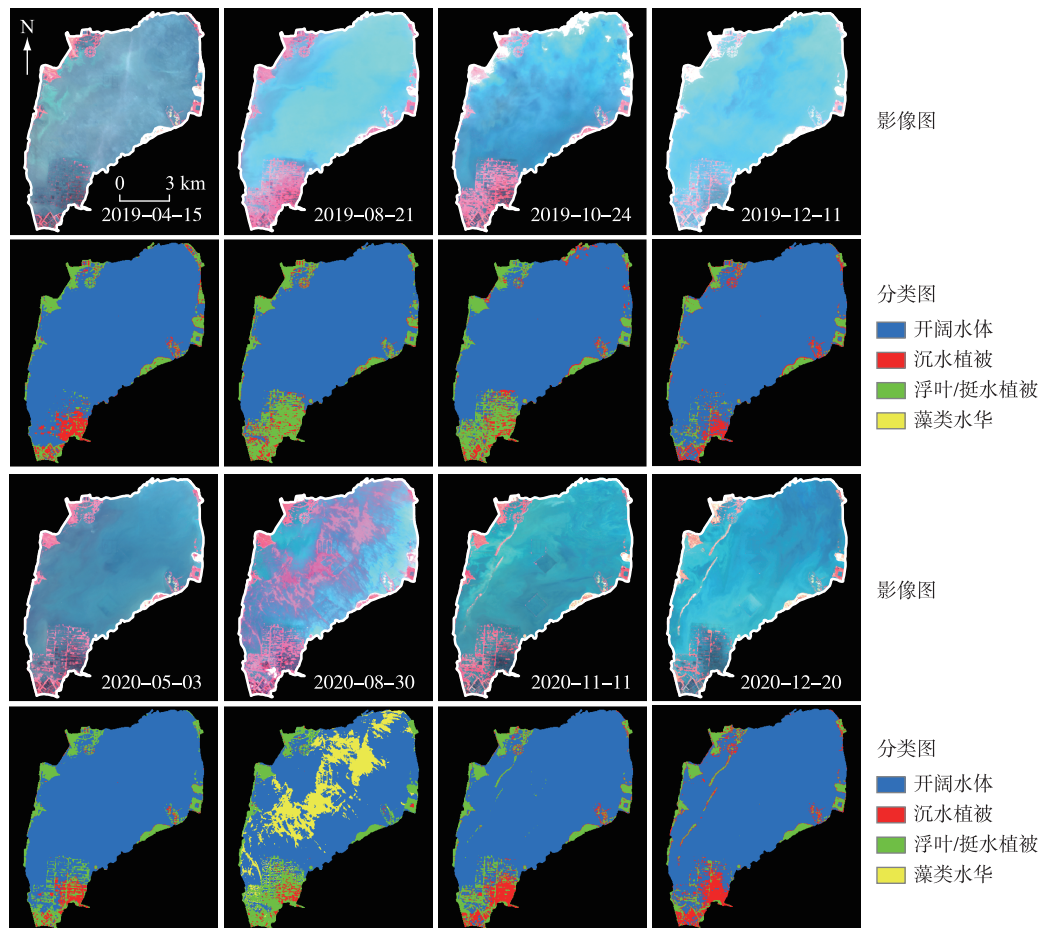


图 3 2019 年和 2020 年不同季节长荡湖的浮叶/挺水植被、沉水植被和藻类水华的遥感分类结果

Fig.3 Satellite images and corresponding classification of floating-leaved/emergent vegetation, submerged vegetation and algal blooms in Lake Changdang in 2019 and 2020

3.2 不同生活型水生植被面积长时序变化

1985—2021 年间,长荡湖总水生植被面积以及浮叶/挺水植被和沉水植被面积长时序变化见图 4。结果表明,过去 36 年来,年内最大水生植被面积呈现显著下降趋势 ($R^2 = 0.75, P < 0.01$),相比浮叶/挺水植被 ($R^2 = 0.31, P < 0.01$),沉水植被下降趋势尤为明显 ($R^2 = 0.75, P < 0.01$)。总水生植被面积从 1985 年的最大值为 71.4 km^2 下降至 2021 年的最大值为 13.7 km^2 ,下降幅度约为 57.7 km^2 ,超过 80%;沉水植被面积最大值从 1985 年的 57.7 km^2 下降至 2021 年的 7.06 km^2 ,下降幅度超过 87.7%;浮叶/挺水植被面积最大值从 1985 年的 60.3 km^2 下降至 2021 年的 11.7 km^2 ,下降幅度超过 80%。

从年内变化来看,水生植被面积波动变化,不同生活型水生植被年内最大面积出现的月份不同。对于浮叶/挺水植被,面积最大值均出现在 6—9 月份;而对于沉水植被,36 年中有 24 年的沉水植被年内最大面积出现在秋冬季(12 月—次年 4 月),其他年份最大面积出现在其余月份,这主要是由于不同年份沉水植被的优势种群不同,分别为春冬型沉水植被(如菹草)和夏秋型沉水植被(如眼子菜)^[23]。

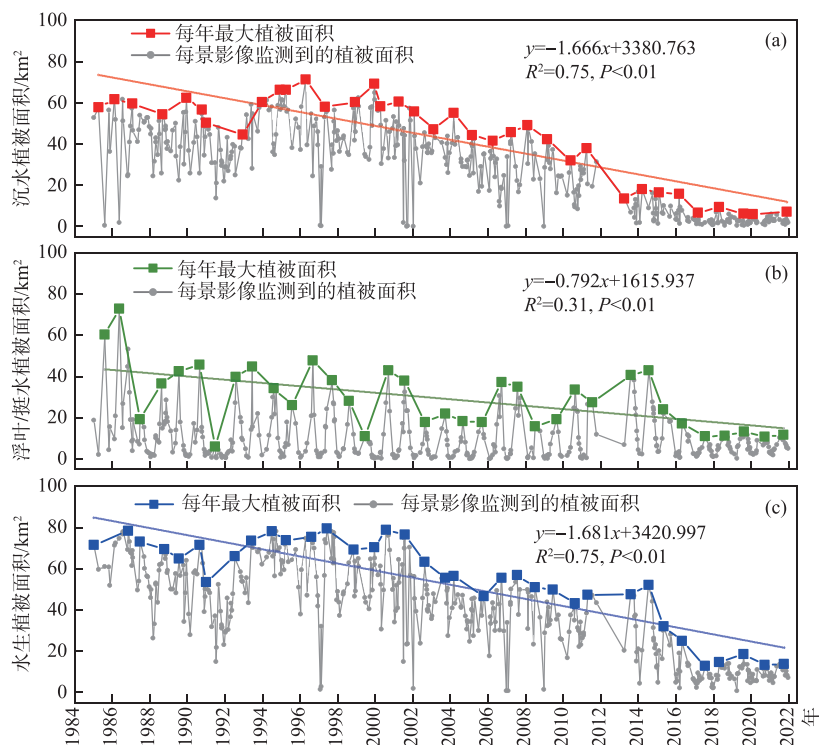


图 4 1985—2021 年长荡湖沉水植被(a)、浮叶/挺水植被(b)和总水生植被(c)面积变化
Fig.4 Area changes of submerged vegetation (a), floating-leaved/emergent vegetation (b), and total aquatic vegetation (c) in Lake Changdang from 1985 to 2021

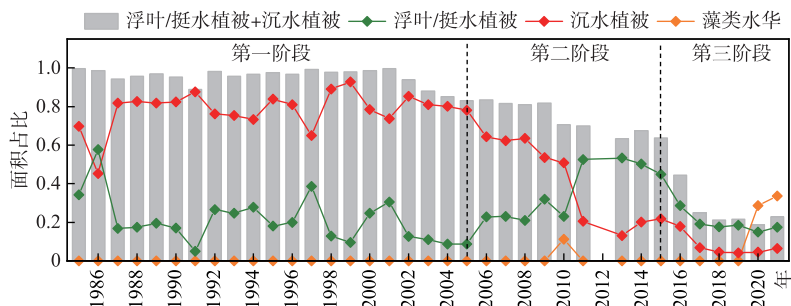


图 5 1985—2021 年长荡湖不同生活型水生植被面积与藻类水华面积占比的动态变化
Fig.5 Dynamic changes in the area proportion of different life types aquatic vegetation and algal blooms in Lake Changdang from 1985 to 2021

3.3 水生植被和藻类水华年空间分布变化

通过年内植被出现频率,获得 1985—2021 年长荡湖不同生活型水生植被与藻类水华的面积占比的动态变化和空间分布(图 5 和图 6)。结果显示,水生植被分布面积总体上呈现显著下降趋势($P<0.01$),可大致分为 3 个不同的变化阶段:(1)第一阶段,约在 1985—2004 年间,相对稳定阶段:总水生植被面积占比较高,稳定在 80% 左右;优势植被生活型以沉水植被为主,平均占比约为 74.9%;浮叶/挺水植被大多分布在离岸较近的环湖区,平均占比约为 20.7%。(2)第二阶段,约在 2005—2014 年间,优势生活型转变阶段:总水生

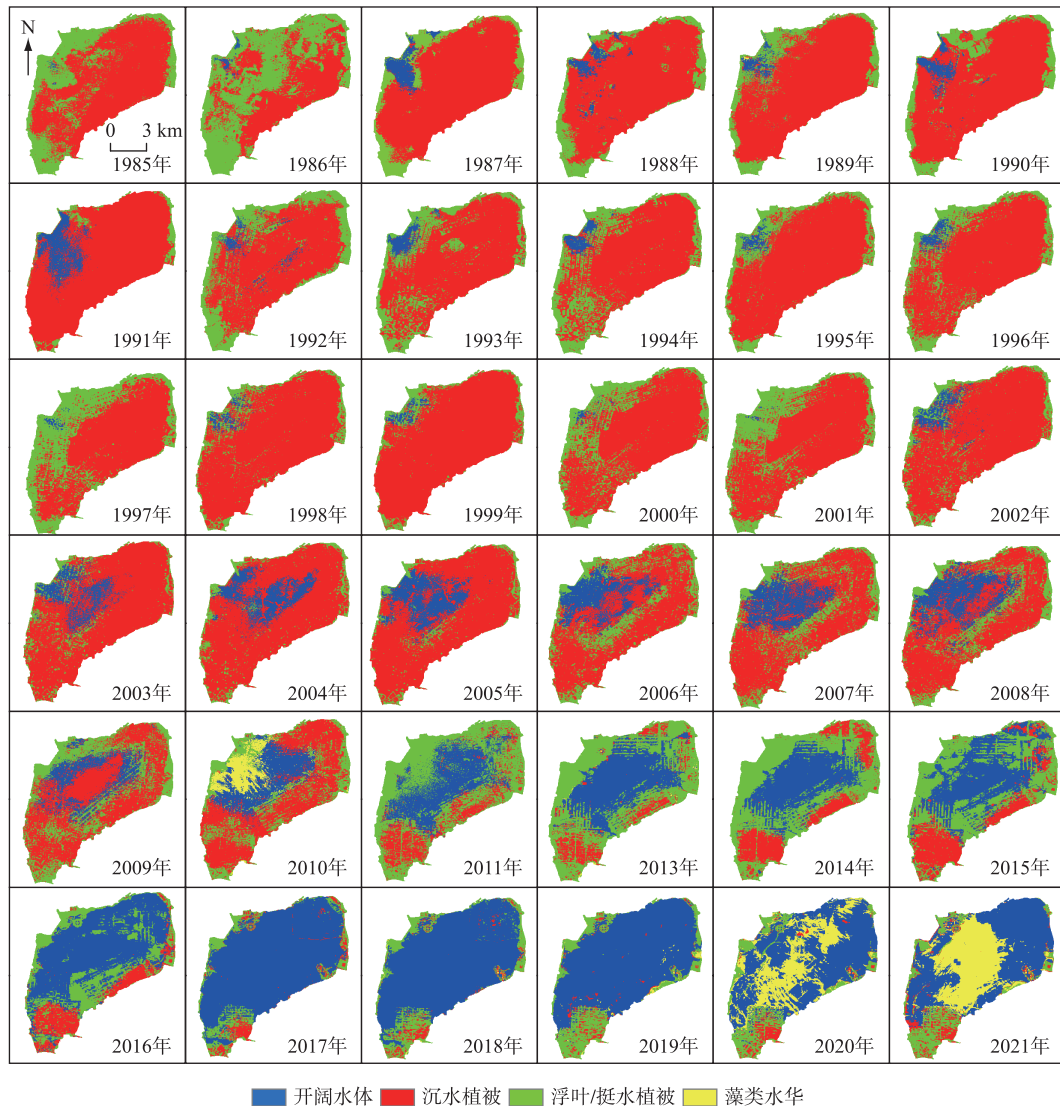


图 6 1985—2021 年长荡湖不同生活型水生植被与藻类水华空间分布

Fig.6 Spatial distribution of different life types aquatic vegetation and algal blooms in Lake Changdang from 1985 to 2021

植被面积占比略有减少,从 2005 年的 83.1% 下降至 2014 年的 67.4%;沉水植被面积占比显著减少 ($P < 0.01$),从 2005 年的 74.7% 下降至 2014 年的 19.2%,下降幅度超过 50%;同时浮叶/挺水植被面积占比显著增加 ($P < 0.01$),从 2005 年的 8.3% 上升至 2014 年的 48.1%,浮叶/挺水植被生长区域从离岸较近的环湖区开始往湖中心蔓延;从 2011 年开始优势生活型从沉水植被转变为浮叶/挺水植被;2010 年首次监测到藻类水华暴发,面积占比为 10.7%。(3)第三阶段,约在 2015—2021 年间,快速退化甚至消失阶段:总水生植被面积占比显著减少 ($P < 0.01$),从 2015 年的 63.7% 下降至 2021 年的 22.9%,其中 2020 年占比最低,已不足 20%;沉水植被面积占比从 2015 年的 20.9% 下降至 2021 年的 6.2%,仅南部地区有少量分布;浮叶/挺水植被面积占比从 2015 年的 42.8% 下降至 2021 年的 16.7%,仅分布在离岸较近的环湖区;同时,2020 年和 2021 年连续两年监测到大面积的藻类水华,面积占比分别为 27.4% 和 32.2%,暴发区域均位于远离岸边的湖中心地带。

4 讨论

VBI 算法的最大优点在于可以同时识别浮叶/挺水植被、沉水植被和藻类水华^[13]。本研究基于 Landsat 影像,利用 VBI 算法对长荡湖水生植被和藻类水华进行提取,从实测点验证和沉水植被与藻类水华物候变化来看,VBI 算法具有较高分类精度(表 1 和图 3)。从算法中关键指数 AVI 的计算公式看,红、近红外和短波红外波段的权重更高,理论上,具有这些波段的影像(如 Sentinel、MODIS 等)算法都是可用的,但由于不同传感器波段设置范围和信噪比不同,该指数和算法在其他影像上的应用效果还需要进一步验证和评价。本研究基于 VBI 算法,发现在过去 36 年来长荡湖的水生植被尤其是沉水植被面积呈现显著下降趋势,空间上从湖中心向岸边逐步退化,这一结论与前人研究结果一致。如付言言等^[24]通过野外实地调查和遥感解译等方式,开展了长荡湖 2014—2017 年水生植被物种组成、群落组成及空间分布调查,发现水生植被呈持续衰退趋势,截至 2017 年 7 月,仅南部围网区和西北部滩涂湿地附近水域有连片水生植被分布。

长荡湖水生植被(尤其是沉水植被)显著减少原因可能是多方面的。其中,温度和降水对水生植被(尤其是沉水植被)萌发和生长极为重要。在植被生长期,较高的气温意味着较高的积温,有利于植被的萌发和生长^[25-26];相对较高的降水量会引起湖泊水位抬升,使光学深度降低,影响水生植被的萌发和生长^[27-28]。1989—2021 年间,长荡湖的年平均气温(图 7)呈现显著上升趋势($P<0.01$),因此,气温并不是导致长荡湖水生植被显著下降的原因。长荡湖年累积降水量(图 7)在 1200 mm 上下呈现波动变化,总体并无显著变化,但研究发现,在降雨量明显偏多的年份,水生植被(尤其是浮叶类植被)相比前一年减少显著,如 1991 年和 2016 年,年降水量都超过了 1600 mm,浮叶植被大面积消失,这可能是由于较大的降水量引起湖泊水位升高,浮叶植被沉入水中无法进行光合作用或缺氧而死亡。可见,极端降水会对水生植被短期内产生影响。

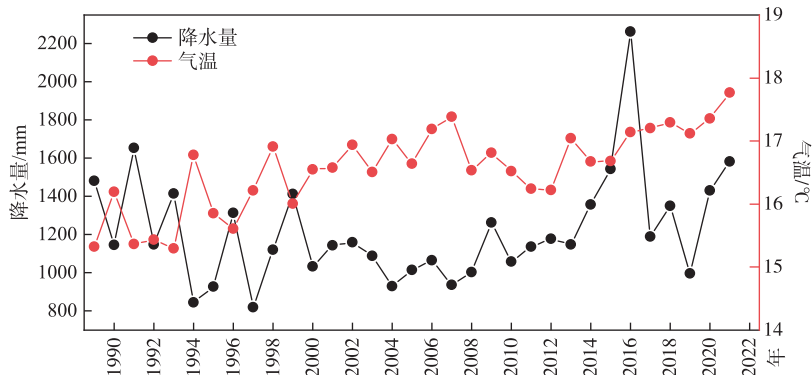


图 7 1989—2021 年长荡湖年平均气温和年累积降水量

Fig.7 Annual mean temperature and cumulative annual precipitation in Lake Changdang from 1989 to 2021

除去气温、降水等自然因素,人类活动(如农业面源污染、城镇化、工业污染等)引起的湖泊富营养化加剧也是导致水生植被退化的重要原因^[29]。此外,本研究发现围网拆除行动也是长荡湖沉水植被减少的主导原因之一^[30]。根据长荡湖的围网面积数据集,围网经历了从建立到拆除的过程:从 1984 年开始建立围网,直至 1999 年围网面积达到最大(为 64.84 km²);2004 年开始围网逐步被拆除,2004—2017 年围网面积从 60.88 km²减少到 7.9 km²^[31]。本研究发现,从 1999 年围网面积最大开始到 2017 年拆网结束,围网面积占比与水生植被面积占比呈现出显著的正相关关系($R^2=0.97, P<0.01$)(图 8)。围网拆除与水生植被减少高度相关,主要在于:一方面,围网拆除后,人们不再对围网内的水生植被进行管护,如种植沉水植被、清除浮叶植被等^[32];二是围网拆除后,湖泊风浪变大,会扰动水体底部泥床,导致透明度下降,不易于沉水植被生长,同时那些原来生活在围网中不抗风浪的沉水植物会快速死亡^[33-34]。

此外,随着长荡湖的水生植被持续减少,2010 年、2020 年和 2021 年分别观测到湖中心有大面积藻类水华。藻类水华的出现一方面是湖泊持续富营养化的结果。已有研究表明,1990—2005 年长荡湖水质持续恶

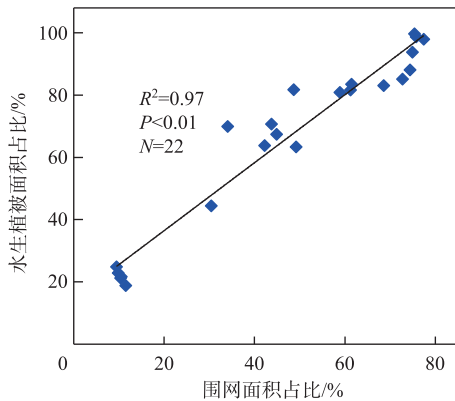


图 8 长荡湖围网与水生植被面积占比的相关性

Fig.8 Correlation between area proportion of enclosure aquaculture and aquatic vegetation in Lake Changdang

水生植被, 2010 年首次监测到藻类水华, 随后的 2020 年和 2021 年连续两年均监测到湖中心有大面积藻类水华, 这表明长荡湖已从过去的草型湖泊转变为现在的藻型湖泊, 湖泊富营养化和围网拆除是导致这种转变的主要原因。因此, 亟需开展湖泊生态系统修复, 包括流域污染减排、水生植被恢复和藻类水华管控。

6 附录

附表 I 和附图 I 见电子版 (DOI: 10.18307/2025.0211)。

7 参考文献

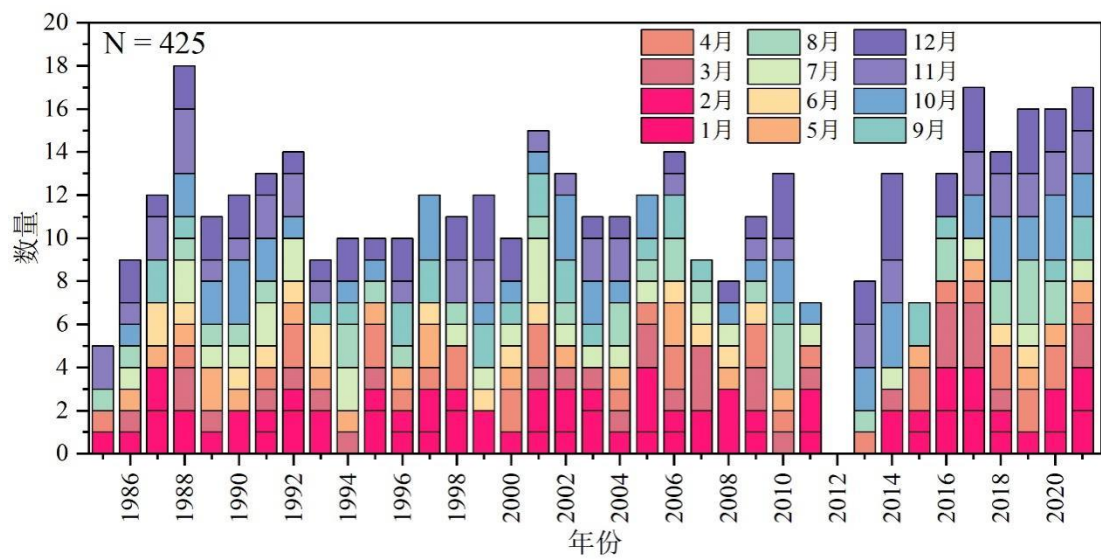
- [1] Yang QX. Ecological functions of aquatic vegetation in East Taihu Lake and its reasonable regulation. *J Lake Sci*, 1998, **10**(1): 67-72. DOI: 10.18307/1998.0111. [杨清心. 东太湖水生植被的生态功能及调节机制. 湖泊科学, 1998, **10**(1): 67-72.]
- [2] Kolada A. The use of aquatic vegetation in lake assessment: Testing the sensitivity of macrophyte metrics to anthropogenic pressures and water quality. *Hydrobiologia*, 2010, **656**(1): 133-147. DOI: 10.1007/s10750-010-0428-z.
- [3] Scheffer M, Jeppesen E. Regime shifts in shallow lakes. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 1-3. DOI: 10.1007/s10021-006-9002-y.
- [4] Janssen ABG, Hilt S, Kosten S *et al.* Shifting states, shifting services: Linking regime shifts to changes in ecosystem services of shallow lakes. *Freshwater Biology*, 2021, **66**(1): 1-12. DOI: 10.1111/fwb.13582.
- [5] Hou XJ, Feng L, Dai YH *et al.* Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade. *Nature Geoscience*, 2022, **15**: 130-134. DOI: 10.1038/s41561-021-00887-x.
- [6] Klemas V. Remote sensing of emergent and submerged wetlands: An overview. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34**(18): 6286-6320. DOI: 10.1080/01431161.2013.800656.
- [7] Wang YC, Wang WB, Wang Z *et al.* Regime shift in Lake Dianchi (China) during the last 50 years. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, **36**(4): 1075-1090. DOI: 10.1007/s00343-018-7171-0.
- [8] Hu CM. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(10): 2118-2129. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012.
- [9] Gao BC. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**(3): 257-266. DOI: 10.1016/s0034-4257(96)00067-3.
- [10] Villa P, Bresciani M, Bolpagni R *et al.* A rule-based approach for mapping macrophyte communities using multi-temporal aquatic vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **171**: 218-233. DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.020.
- [11] Fang C, Song KS, Shang YX *et al.* Remote sensing of harmful algal blooms variability for Lake Hulun using adjusted FAI (AFAI) algorithm. *Journal of Environmental Informatics*, 2018, **34**(2): 108-122. DOI: 10.3808/jei.201700385.
- [12] Dai YH, Feng L, Hou XJ *et al.* An automatic classification algorithm for submerged aquatic vegetation in shallow lakes using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2021, **260**: 112459. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112459.
- [13] Luo JH, Ni GG, Zhang YL *et al.* A new technique for quantifying algal bloom, floating/emergent and submerged vegetation in eutrophic

化, 综合水质类别由Ⅲ类变为劣Ⅴ类; 虽然开展了系列生态修复, 如湖区餐饮业整治和入湖氮磷削减工程示范等, 但 2017—2019 年间, TN 和 TP 浓度仍然处于较高水平^[15]。另一方面, 水生植被的持续退化, 有利于藻类水华形成。水生植被具有抑藻作用, 与藻类存在此消彼长的竞争关系^[35], 水生植被的减少必然会使藻类的竞争力增强, 更容易暴发藻类水华。

5 结论

本研究基于 1985—2021 年 Landsat 5 和 8 卫星影像, 利用 VBI 算法, 开展了过去 36 年来长荡湖浮叶/挺水植被、沉水植被和藻类水华时空变化监测和分析, 结果显示: 1985—2021 年间, 长荡湖水生植被, 包括浮叶/挺水植被和沉水植被, 都呈现显著下降趋势, 其中沉水植被退化尤为明显, 从 1985 年的 57.7 km² 减少至 2021 年的 7.06 km², 下降幅度超过 87.7%, 在空间上表现出从湖中心向岸边逐步退化; 2011 年后长荡湖水生植被优势生活型从沉水植被转变为浮叶/挺

- shallow lakes using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2023, **287**: 113480. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113480.
- [14] Liu WG, Lin Q, Zhang K *et al.* Eco-environmental evolution process during the past century in Lake Changdang, Lake Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2022, **34**(2): 675-683. DOI: 10.18307/2022.0226. [刘维淦, 林琪, 张科等. 太湖流域长荡湖近百年生态环境演变过程. 湖泊科学, 2022, **34**(2): 675-683.]
- [15] Xu JQ, Zhong W, Cai YJ *et al.* Trend of water environment change in Lake Changdang and Lake Gehu in the last 30 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(7): 1641-1652. DOI: 10.11870/cjlyzyhj202207020. [徐锦前, 钟威, 蔡永久等. 近30年长荡湖和滆湖水环境演变趋势. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(7): 1641-1652.]
- [16] Zhou JL, Fu YY, Zhang X. Measures to promote the high-quality development of fishery in Changdang Lake. *Scientific Fish Farming*, 2018, (7): 54-55. [周建立, 付言言, 张响. 推动长荡湖渔业高质量发展的措施. 科学养鱼, 2018, (7): 54-55.]
- [17] Liu SM, Zhang Z, Yang JX *et al.* Analysis and evaluation of nutritional components of the muscles of wild *Eriocheir japonica sinensis* from Changdang Lake. *Journal of Aquaculture*, 2021, **42**(7): 23-28. [刘锁明, 张增, 杨建新等. 长荡湖野生中华绒螯蟹肌肉营养成分的分析与评价. 水产养殖, 2021, **42**(7): 23-28.]
- [18] 中国科学技术协会学会学术部, 吉林省人民政府. 湖泊湿地与绿色发展——第五届中国湖泊论坛论文集. 长春: 吉林人民出版社, 2015.
- [19] Peng JX, Wu YN, Hu WP *et al.* The evolution characteristics of precipitation in the past 61 years at the Lake Changdanghu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(2): 292-299. DOI: 10.11870/cjlyzyhj201602015. [彭俊翔, 伍永年, 胡维平等. 长荡湖近61a降水量演化特征. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(2): 292-299.]
- [20] Shi Y, Su T, Lu LR. Remote sensing monitoring of spatiotemporal changes in enclosure culture of Changdang Lake. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2021, **13**(3): 8-12. [时燕, 苏涛, 陆莉蓉. 长荡湖围网养殖区长时序时空演变遥感监测. 环境监测与预警, 2021, **13**(3): 8-12.]
- [21] Ruxton GD. The unequal variance t-test is an underused alternative to Student's t-test and the Mann-Whitney U test. *Behavioral Ecology*, 2006, **17**(4): 688-690. DOI: 10.1093/beheco/ark016.
- [22] Kraemer HC. Kappa coefficient. Wiley StatsRef: statistics reference online, 2014: 1-4. DOI: 10.1002/9781118445112.stat00365.pub2.
- [23] Luo JH, Li XC, Ma RH *et al.* Applying remote sensing techniques to monitoring seasonal and interannual changes of aquatic vegetation in Taihu Lake, China. *Ecological Indicators*, 2016, **60**: 503-513. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.07.029.
- [24] Fu YY, Zhao K, Zhang X *et al.* Community composition and distribution pattern of aquatic plants in Changdanghu. *Wetland Science & Management*, 2020, **16**(4): 27-31. [付言言, 赵凯, 张响等. 长荡湖水生植物群落组成及分布格局. 湿地科学与管理, 2020, **16**(4): 27-31.]
- [25] Grinberga L, Springe G. Potential impact of climate change on aquatic vegetation of river salaca, Latvia. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences Section B Natural, Exact, and Applied Sciences*, 2008, **62**(1/2): 34-39. DOI: 10.2478/v10046-008-0011-4.
- [26] Sastroutomo SS. Turion formation, dormancy and germination of curly pondweed, *Potamogeton crispus* L. *Aquatic Botany*, 1981, **10**: 161-173. DOI: 10.1016/0304-3770(81)90018-8.
- [27] Xu PY, Yang LW, Chen SY *et al.* Evolution progress and driving factors for aquatic vegetation of Nansi Lake in Shandong Province over the past 40 years. *Earth and Environment*, 2022, **50**(2): 219-227. [许佩瑶, 杨丽伟, 陈诗越等. 近40年来山东省南四湖水生植被演变及其驱动因素. 地球与环境, 2022, **50**(2): 219-227.]
- [28] Qin JL, Yin XA, Liu HR *et al.* Analysis of effect of lake water level changes on emergent plants: A case study in the Hongze Lake. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(10): 53-60. DOI: 10.13205/j.hjgc.202010009. [秦敬岚, 尹心安, 刘洪蕊等. 湖泊水位变化对挺水植物影响分析: 以洪泽湖为例. 环境工程, 2020, **38**(10): 53-60.]
- [29] Botrel M, Maranger R. Global historical trends and drivers of submerged aquatic vegetation quantities in lakes. *Global Change Biology*, 2023, **29**(9): 2493-2509. DOI: 10.1111/gcb.16619.
- [30] Yang JZC, Luo JH, Lu LR *et al.* Changes in aquatic vegetation communities based on satellite images before and after pen aquaculture removal in East Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2021, **33**(2): 507-517. DOI: 10.18307/2021.0228. [杨井志成, 罗菊花, 陆莉蓉等. 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, 2021, **33**(2): 507-517.]
- [31] Fu YY, Zhang X, Tian RW *et al.* Effect of regulation of large water surface net enclosure in Changdang Lake. *Journal of Aquaculture*, 2021, **42**(12): 72-74. [付言言, 张响, 田荣伟等. 长荡湖大水面网围整治成效. 水产养殖, 2021, **42**(12): 72-74.]
- [32] Lu W, Liu X, Xu FX *et al.* Maintenance and management of aquatic plants in crab ponds. *Scientific Fish Farming*, 2018, (6): 89. [陆伟, 刘旭, 徐方向等. 河蟹池塘水草的养护管理. 科学养鱼, 2018, (6): 89.]
- [33] Song YZ, Zhu GW, Qin BQ. Applicability analysis of aquatic macrophytes on controlling nitrogen and phosphorus from water in the Kangshan Bay demonstration area of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2013, **25**(2): 259-265. DOI: 10.18307/2013.0212. [宋玉芝, 朱广伟, 秦伯强. 太湖康山湾示范区水生植物对水体氮、磷控制的适用性分析. 湖泊科学, 2013, **25**(2): 259-265.]
- [34] McLay CL. The distribution of duckweed *Lemna perpusilla* in a small southern California Lake: An experimental approach. *Ecology*, 1974, **55**(2): 262-276. DOI: 10.2307/1935215.
- [35] Nezhytska I, Usenko O, Konovets I *et al.* Potential use of aquatic vascular plants to control cyanobacterial blooms: A review. *Water*, 2022, **14**(11): 1727. DOI: 10.3390/w14111727.



附图 I 年和月尺度获取的长荡湖有效影像（Landsat）数量

Attached Fig.I Number of valid Landsat imagery acquired for Lake Changdang from 1985-2021

附表 I 野外调查记录

Attached Tab.I Field survey records

地面调查时间	影像获取时间	样点数量	调查项目
2009 年 8 月 23 日	2009 年 8 月 25 日	32	经纬度、水生植被生活型
2013 年 8 月 13 日	2013 年 8 月 11 日	35	（优势群落）、覆盖度、是
2019 年 8 月 22 日	2019 年 8 月 21 日	40	否有藻华发生等