

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*

李一凡^{1,2}, 谷孝鸿¹, 曾庆飞^{1**}, 贾冰婵¹, 訾鑫源^{1,2}, 陈辉辉¹, 毛志刚¹, 葛 优^{1,2}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 2019年, 东太湖 30 km² 养殖网围实现清零, 结束了长达 34 年的太湖网围养殖历史。系统整理东太湖 30 年来 (1990—2021 年) 水体氮、磷等营养盐浓度监测资料, 对比分析 14 个监测点位水质在不同网围利用和整治时期的时空差异性 & 影响因素, 判识网围拆除后水体营养盐变化趋势及存在问题对东太湖生态修复与保护具有重要意义。结果表明, 东太湖 30 年来水体营养盐浓度年际变化随养殖结构 (主养鱼到主养蟹) 和养殖规模 (过度利用到网围整治和拆除) 的变化而变化, 网围养殖因其有效的水生植物管控和生态混养相对于主养鱼类水质较优, 但水质均随着养殖强度的增大而变差, 网围规模缩减对改善水质有正面效应。总氮 (TN)、总磷 (TP)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 和叶绿素 *a* (Chl. *a*) 浓度分别由 1990 年的 0.53 mg/L、0.014 mg/L、3.58 mg/L 和 2.90 μg/L 上升到 2021 年的 1.87 mg/L、0.128 mg/L、5.72 mg/L 和 28.09 μg/L, TN 是主要的污染因子。原网围区和湖心区因较高的水生植被覆盖度, TN、TP、磷酸盐、悬浮颗粒物 (SS) 30 年来变化不大, 原网围区透明度维持在 0.8 m 左右; 太浦河口和东茭咀水域 TN、TP、Chl. *a*、COD_{Mn} 和 SS 浓度上升明显, 透明度显著下降, 该水域的 Chl. *a* 浓度与太浦河口出水量呈显著正相关。网围拆除、出湖水量增加和水生植被消失造成的水动力作用增强, 加上原网围区底泥营养盐释放, 是引起东太湖南部区域营养盐浓度大幅上升的主要原因。网围拆除后东太湖营养盐浓度和 Chl. *a* 浓度存在夏、秋季较低和冬、春季较高的季节波动, 冬季水草腐败坏水的风险增大。30 年来东太湖水体营养盐变化对网围拆除湖泊生态修复与保护具有启示意义: 应及早开展水生植物资源调控, 强化水质净化, 加强对湖泊生态环境进行监测并建立生态档案, 创建渔业新模式, 确保恢复健康自然的草型生态系统格局。

关键词: 东太湖; 网围养殖; 退围还湖; 出湖流量; 水生植被

Fluctuations of nutrient concentrations and their influencing factors under various net-pen aquaculture scales in East Lake Taihu from 1990 to 2021 *

Li Yifan^{1,2}, Gu Xiaohong¹, Zeng Qingfei^{1**}, Jia Bingchan¹, Zi Xinyuan^{1,2}, Chen Huihui¹, Mao Zhigang¹ & Ge You^{1,2}

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China*)

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

Abstract: The 30 km² net-pen aquaculture in East Lake Taihu was cleared in 2019, ending its 34 years history of net-pen aquaculture breeding. The temporal-spatial differences and influencing factors of water quality at 14 monitoring sites during the period of 30 years' (1990–2021) net-pen aquaculture were analyzed. The results showed that the variations of nutrient concentrations in East Lake Taihu in the past 30 years varied with the changes of aquaculture structures (from fish to crab) and aquaculture scales (from excessive utilization to net-pen aquaculture rectification and demolition). The water quality of breeding crabs in net is better than

* 2022-01-22 收稿; 2022-03-30 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2020YFD0900500)、江苏省农业科技自主创新项目 (CX(20)2026)、中国科学院科研仪器设备研制项目 (YJKYYQ20200048) 和国家自然科学基金项目 (31972813) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: qfzeng@niglas.ac.cn。

that of breeding fish, owing to the effective management of aquatic plants and mixed breeding pattern. However, as the increase in the intensity of net-pen aquaculture, the water quality degraded. The reduction of the scales of net-pen aquaculture could help improve water quality. The concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), the permanganate index (COD_{Mn}) and chlorophyll-*a* (Chl.*a*) increased from 0.53 mg/L, 0.014 mg/L, 3.58 mg/L and 2.90 $\mu\text{g/L}$ in 1990 to 1.87 mg/L, 0.128 mg/L, 5.72 mg/L and 28.09 $\mu\text{g/L}$ in 2021, respectively. TN was the main pollution factor. The concentrations of TN, TP, phosphate and suspended solid (SS) in the former net-pen areas and lake center area maintained and unchanged in the past three decades owing to higher aquatic vegetation coverage. The transparency (SD) in the former net-pen areas maintained at 0.8 m. The concentrations of TN, TP, Chl.*a*, COD_{Mn} and SS at the sites of Taipu River Estuary and Dongjiaozui showed an increasing trend, while the SD at these sites decreased significantly. The average concentrations of Chl.*a* at the sites of Taipu River Estuary and Dongjiaozui were significantly positively correlated with the water discharges of the Taipu River. The removal of net-pen, the increase of water discharges and the disappearance of aquatic vegetations increased the hydrodynamic effect. The hydrodynamic effect and the release of nutrients from the sediments in the former net-pen areas resulted in the significant increase of nutrient concentrations in the southern parts of East Lake Taihu. The nutrient concentrations in East Lake Taihu were high in summer and autumn and low in winter and spring since all the net-pen aquaculture was closed down. The implications of this study to other lakes are, in order to ensure the restoration of healthy and natural macrophytic ecosystem patterns, the regulations of aquatic plant resources to be carried out as early as possible so as to strengthen water purification, monitoring of the ecological lake environment, establishing ecological archives, and creating new fishery models.

Keywords: East Lake Taihu; net-pen aquaculture; returning net-pen to lake; flux of lake outflow; aquatic plants

我国的湖库网围养殖始于 1970s 末。人们利用大水面自然资源,发展高效利用的渔业增养殖模式,为湖区增效和渔民增收致富做出了重要贡献。然而,随着集约化网围养殖规模和密度的增加,加上流域工农业污染的影响,水体富营养化和生态退化现象日益严重。为了保护湖库生态环境和渔业资源,各级部门有计划地开展了养殖网围整治和拆除工作。东太湖是太湖东部一个典型的草型浅水湖湾,因其适宜的光热、自然地理和水体条件发展成为我国最早开发渔业养殖的湖泊之一。东太湖网围养殖结构和养殖规模经历了几次变动。首先是“以湖养湖”的高密度养鱼农业试验研究成功,实现了从粗放粗养的常规养殖模式到湖区网围精养的转变^[1]。1990s 末,随着人们对名特优水产品的大量需求,网围养殖结构调整,逐渐转变为以中华绒螯蟹(简称河蟹)(*Eriocheir sinensis*)为主养、混养鱼虾的生态养殖模式。2000—2008 年是网围养殖发展的鼎盛时期,全湖河蟹水产养殖面积积达 118.56 km²。2008 年底,东太湖实施了退围还湖网围整治工程,将网围养殖水面压缩至 30.00 km²。直到 2018 年末,伴随着最后一季河蟹养殖结束,东太湖开始了网围全面清除工作,结束了长达 34 年的太湖网围养殖历史。

集约化网围养殖为湖区增效和渔农民增收致富作出了重要贡献,但同时养殖过程中的饵料残渣、养殖废弃物、排泄物和药物残留等对东太湖水环境和水生态产生了影响。杨清心等^[2]发现 1990—1994 期间东太湖网围养鱼引起氮磷营养盐污染激增、沉积物肥力增高和水生植被严重退化现象。曾庆飞等^[3]研究了 2008—2009 年东太湖水质污染特征,发现各区域差异显著,季节变化明显,总磷(TP)、总溶解性磷(TDP)和磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)水平是主要的污染因子。代倩子等^[4]在对 2014—2018 年的水质研究中也发现了 TP 浓度明显升高,沉水植物分布面积锐减。网围养殖区内沉积物中总氮(TN)、TP 含量略高于网围外^[5];浮游动物群落生物量最低,以轮虫等小型浮游动物为主^[6]。网围全面拆除后,王友文等^[7]发现东太湖水体透明度(SD)较 2018 年同期显著下降,叶绿素(Chl.*a*)及氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度显著上升。遥感影像显示,东太湖水生植被优势类群由网围拆除前的沉水植被转变为浮叶植被,沉水植被分布面积减少^[8]。网围拆除后,鱼类功能群分布在原网围区与非网围存在差异^[9]。可见,网围养殖主养对象改变和养殖规模变动均会引起水环境、水生态的变化和波动,但当前的研究基本是短时间尺度和阶段性成果,有关国内湖泊长时间尺度和整个网围养殖过程的环境变化还未见报道。

按照中央环保督察要求,太湖、濞湖、长荡湖等全面拆除了湖泊养殖网围。截至 2019 年,全国网围养殖面积锐减到 $1.17 \times 10^2 \text{ km}^2$ ^[10]。修复退围还湖区生态系统、改善水体生态环境和保护生物多样性是湖泊治理规划的关键。系统回顾网围养殖水环境的长期变化特征,探寻其驱动因素、存在问题和发展趋势,将为我国

湖泊“十四五”生态修复与保护规划提供数据支撑和借鉴。东太湖是我国网围养殖发展最成熟、整治管理力度最大的水域,本文通过系统分析 1990—2021 年水体营养盐在不同湖区和不同网围发展阶段的变化规律,解析影响营养盐变动的因素、存在问题和发展趋势,为东太湖生态修复与保护以及全国退围还湖区生态环境治理提供数据基础和理论支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源及点位设置

东太湖是太湖东南部的湖湾,面积 131 km²,平均水深 1.3 m,是太湖主要的出水区域,承担了重要的航运作用,也是东部下游地区上海市等地的主要水源地^[4]。本文采用的数据分为两部分,其中 1990—2005 年数据来自中国科学院南京地理与湖泊研究所杨龙元副研究员提供的历史监测数据;2006—2021 年数据来自本课题组长期监测,监测点位如图 1 所示,数据采集和分析方法均参照《湖泊富营养化调查规范》(第二版)^[11]的规定执行。14 个监测点位包含原网围区(1[#]、7[#]、13[#]、14[#])、河口区(2[#]、9[#]、11[#]、12[#])、湖心区(6[#]、8[#])、瓜泾口(10[#])、东茭咀(4[#])和太浦河口(5[#])。整个太湖的数据来自中国科学院太湖湖泊生态系统研究站点监测数据。

1.2 水质指标的测定

本研究采用手持式超声波水深仪现场测量不同点位的水深,采用透明度盘测量 SD。所有水样采集水下 20 cm 的表层水。在实验室内参照《湖泊富营养化调查规范(第二版)》测定水体悬浮颗粒物(SS)、TN、NH₃-N、总溶解性氮(TDN)、TP、PO₄³⁻-P、TDP、Chl.a、总有机碳(TOC)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})浓度^[11]。

1.3 数据分析

2006—2021 年东太湖水体 TN、TP、Chl.a 和 COD_{Mn}浓度的年际变化数据为该年度所有点位和所有采样时间的平均值±标准误,采用 R x64 4.1.1 软件中 ggplot2 包绘制 1990—2021 年水质指标浓度变化柱状图;采用 AutoCAD 2010 软件绘制东太湖网围规模变化的三阶段水体理化指标空间变化(2008 年前网围养殖阶段、2009—2018 年网围整治阶段和 2019 年后网围拆除阶段),数据来自该阶段该点位所有采样时间的平均值±标准误,采用单因素方差分析(one-way analysis of variance)分析不同点位的组内数据的显著性差异;采用 R x64 4.1.1 软件中 ggplot2 包对网围拆除后水质指标的季节变化进行分析,以保留 95%的置信区间对 14 个采样点位的数据拟合,可视化营养盐浓度的季节变化趋势;为探究东太湖 30 年来水体中主要污染因子和太浦河口出水量对东太湖水质的影响,采用 R x64 4.1.1 软件中 ggbiplot 包和 factoextra 包,将太浦河口出水量分别与 1990—2020 年东太湖全域水质和 2008—2020 年太浦河口与东茭咀两区域水质进行主成分分析(principal component analysis),利用 ggcorrplot 包展示各指标之间的 Pearson 相关系数和显著性 P 值。

选取 SD、Chl.a、TN、TP 和 COD_{Mn}这 5 个与湖泊富营养化状态变化最为密切的参数开展水体富营养化状态综合评价。计算公式和判定标准参照《湖泊富营养化调查规范》(第二版)^[11]。

2 结果与分析

2.1 东太湖 1990—2021 年水质年际变化

东太湖水体 TN 浓度在 1990 年为 0.53 mg/L,随着网围规模扩大,到 1999 年 TN 浓度增加到 1.01 mg/L。

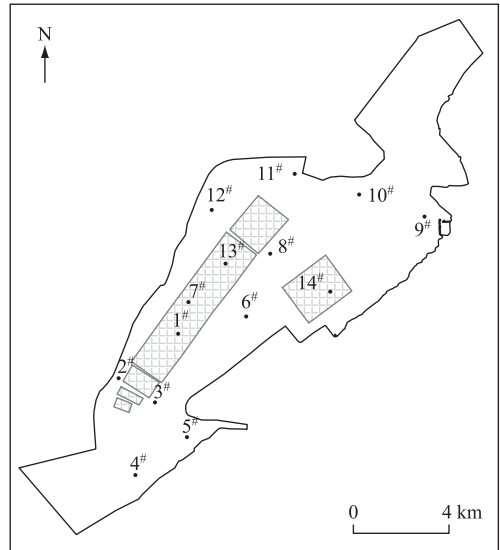


图 1 东太湖水质监测调查点位分布(网格代表 2009—2018 年网围整治阶段网围分布区)

Fig.1 Distribution of sampling sites in East Lake Taihu (The grid represents the net-pen distribution from 2009 to 2018)

随着养殖结构改变, TN 浓度有所下降, 至 2002 年下降到 0.47 mg/L。但是随着养殖强度增加, TN 浓度呈现增加趋势, 至 2008 年网围整治之前达到 1.3 mg/L。2009—2018 年间, TN 浓度基本维持稳定, 平均浓度为 1.33 mg/L。网围拆除后, TN 浓度在 2020 年开始有所反弹, 至 2021 年上升至 1.87 mg/L(图 2A)。

1990—2021 年间东太湖水体 TP 浓度变化趋势和 TN 相似, 随着网围养殖结构和规模变化。1995 年以前, TP 平均浓度为 0.015 mg/L, 满足地表水 II 类水质标准。随着网围养殖的快速发展, TP 浓度呈明显上升趋势, 到 2007 年网围整治前达到 0.06 mg/L, 随后有所降低, 到 2018 年网围拆除前下降到 0.051 mg/L。但是, 近年来有上升趋势, 2021 年 4 月, TP 最高达到 0.128 mg/L(图 2B)。

东太湖水体的 COD_{Mn} 浓度近 30 年的变化较为稳定, 平均值为 4.54 mg/L, 达到地表水 III 类水质标准。2008 年网围整治和 2018 年的网围全部拆除, COD_{Mn} 浓度在一定时期均呈现了下降趋势。2018 年网围拆除前 COD_{Mn} 浓度达到最高 (6.08 mg/L)。网围拆除后近两年 COD_{Mn} 浓度有上升趋势, 2021 年达到 5.72 mg/L(图 2C)。

东太湖水体 Chl.a 浓度在 1990—2007 年间趋于稳定, 均低于 10 $\mu\text{g/L}$ 。2008 年网围整治后, 2008—2010 年 Chl.a 浓度较高, 至 2010 年达到 22.75 $\mu\text{g/L}$ 。2010 年后呈下降趋势, 至 2015 年降至 7.21 $\mu\text{g/L}$ 。2016 年后 Chl.a 浓度呈上升趋势, 至 2021 年最高可达 28.09 $\mu\text{g/L}$ (图 2D)。

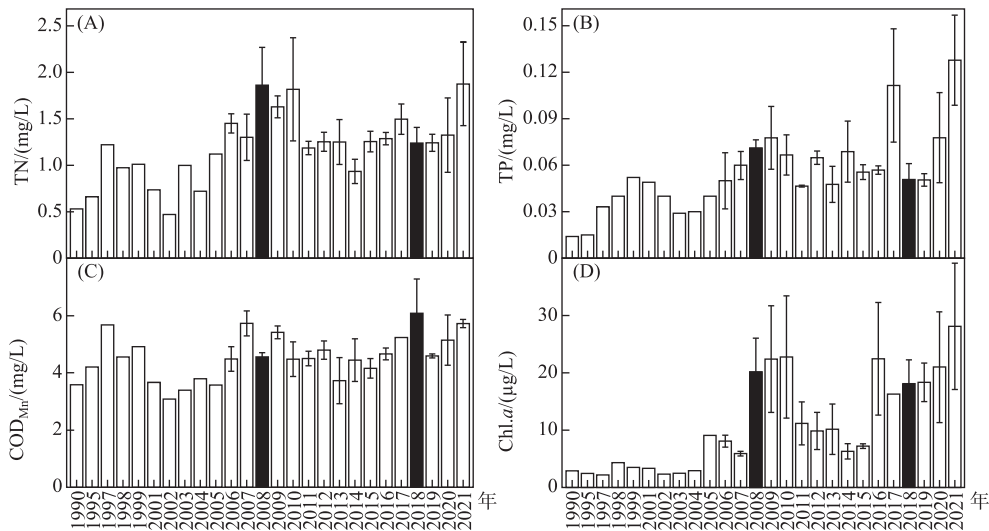


图 2 东太湖 1990—2021 年水体营养盐浓度长期变化趋势(2008 年:网围整治;2018 年:网围拆除)

Fig.2 Variational trends of nutrient concentration in water of East Lake Taihu from 1990 to 2021
(2008: Net-pen culture governance, 2018: Net-pen culture demolition)

2.2 东太湖不同水域水质演变

东太湖水质在不同水域不同网围整治时期变化情况如图 3 所示。东太湖原网围区的水深和透明度近 30 年来基本维持稳定, 分别在 1.35 m ($P>0.05$) 和 0.80 m ($P>0.05$) 左右波动; 湖心区的水深略高于原网围区, 透明度近年来略有下降, 由 2008 年之前的 0.87 m 下降到网围拆除后的 0.51 m; 北部河口张家浜水体透明度近年来有所提升, 网围拆除后达到 0.68 m; 太浦河口和北部瓜泾口水深自 2018 年后增加明显, 分别由 2018 年的 2.51 和 1.28 m 提高到 3.05 ($F=5.07$, $P<0.05$) 和 3.55 m ($F=79.28$, $P<0.01$), 透明度分别由 2018 年的 0.44 和 0.56 m 降低到网围拆除后的 0.29 和 0.46 m。东太湖入湖口的东茭咀透明度下降严重, 从 1.18 m 降至 0.29 m ($F=15.70$, $P<0.01$) (图 3A)。

原网围区和湖心区水体的 TN 浓度基本稳定, 维持在 1.10 mg/L ($P>0.05$) 左右。位于东太湖北部的张家浜与瓜泾口的 TN 浓度, 自 2008 年之后呈下降趋势, 分别由 2008 年前的 1.74 和 1.76 mg/L 降至 2019 年后的 1.26 和 1.00 mg/L。南部的东茭咀和太浦河口 TN 浓度上升明显, 分别由 2008 年前的 0.68 和 0.75 mg/L 升



图3 东太湖不同网围规模不同区域水质演变
(阶段1为2008年前,阶段2为2009—2018年,阶段3为2019年后)

Fig.3 Water quality changes in different regions of East Lake Taihu

至2019年后的2.00 ($F=7.62$, $P<0.01$)和1.67 mg/L ($F=4.44$, $P<0.05$)。3阶段内的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度除了东茭咀一直呈现上升趋势 ($F=5.43$, $P<0.05$),其它区域均表现为先降低又升高,2019年之后, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度维持在0.22~0.32 mg/L之间(图3B)。

原网围区和湖心区水体的TP浓度近30年基本维持稳定,网围拆除后略有下降,维持在0.06 mg/L ($P>0.05$)。北部湖区张家浜与瓜泾口的TP浓度下降明显,分别从2008年之前的0.128和0.118 mg/L降至现在的0.051 ($F=13.48$, $P<0.01$)和0.044 mg/L ($F=8.77$, $P<0.01$)。东茭咀和太浦河口TP浓度呈上升趋势,分别从2008年之前的0.042和0.044 mg/L上升至2019年后的0.114和0.088 mg/L。各区域 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的变化趋势与TP相同,整体维持在0.01 mg/L(图3C)。

东太湖TOC浓度在各点呈现先升高再降低的趋势,2009—2018年网围整治阶段TOC浓度最高,平均达到8.12 mg/L,网围拆除后降低为6.00 mg/L,点位间差异不显著 ($P>0.05$)。东茭咀和太浦河口水域 COD_{Mn} 浓度近30年呈逐渐上升的趋势,网围拆除后分别达到4.73和4.70 mg/L。瓜泾口水域的TOC和 COD_{Mn} 浓度近30年逐渐下降(图3D)。

原网围区和湖心区的Chl.*a*浓度在2008年网围整治后分别从17.92和20.77 $\mu\text{g/L}$ 上升至22.35和29.52 $\mu\text{g/L}$,该区域的SS浓度近30年基本维持在16 mg/L ($P>0.05$)左右。张家浜和瓜泾口的SS浓度在网围拆除后有所下降。东茭咀和太浦河口的Chl.*a*浓度近30年内均呈明显的上升趋势,Chl.*a*浓度分别从2008年前的4.18和5.42 $\mu\text{g/L}$ 上升至2019年后的24.95 ($F=14.16$, $P<0.01$)和34.10 $\mu\text{g/L}$ ($F=5.96$, $P<0.05$),东茭咀的SS浓度从1.49 mg/L显著上升至38.38 mg/L ($F=9.32$, $P<0.01$)(图3E)。

2.3 东太湖网围拆除后水质季节变化

网围拆除后东太湖水体中TN和TDN浓度季节变化规律相似,最低值均出现在7—10月,平均值分别为0.89和0.63 mg/L;10月至次年1月浓度较高,平均值分别为1.57和0.95 mg/L(图4A,C)。

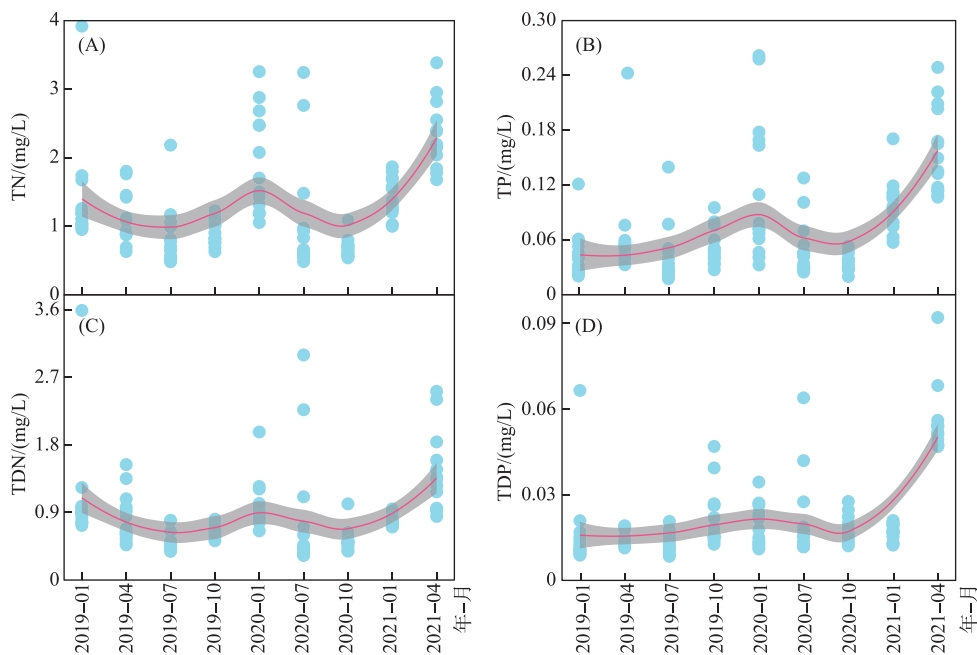


图4 东太湖网围拆除后氮、磷浓度的季节变化

Fig.4 Seasonal variations of nitrogen and phosphorus concentrations in East Lake Taihu after the complete renovation of net-pen

网围拆除后东太湖水体中TP和TDP的平均浓度除了2021年4月份,基本维持稳定,分别为0.05 ($P>0.05$)和0.02 mg/L ($P>0.05$)左右。2020年和2021年1月相对较高,TP平均可达0.10 mg/L。2021年4月

因采样当天风浪较大,底泥再悬浮,TP ($F=15.56$, $P<0.01$) 和 TDP ($F=133.98$, $P<0.01$) 浓度显著升高(图 4B, D)。

东太湖网围拆除后,水体 SS、COD_{Mn}、Chl.*a* 和 TOC 在 2019 年呈现上升趋势,直到 2020 年 1 月分别达到 38.33 mg/L、6.91 mg/L、35.30 μg/L 和 4.24 mg/L,没有出现季节波动。但 2020—2021 年,逐渐呈现夏秋季低、冬春季高的趋势,2020 年 7—10 月最低,SS、COD_{Mn}、Chl.*a* 和 TOC 分别为 13.29 mg/L、4.32 mg/L、14.65 μg/L 和 3.57 mg/L(图 5)。

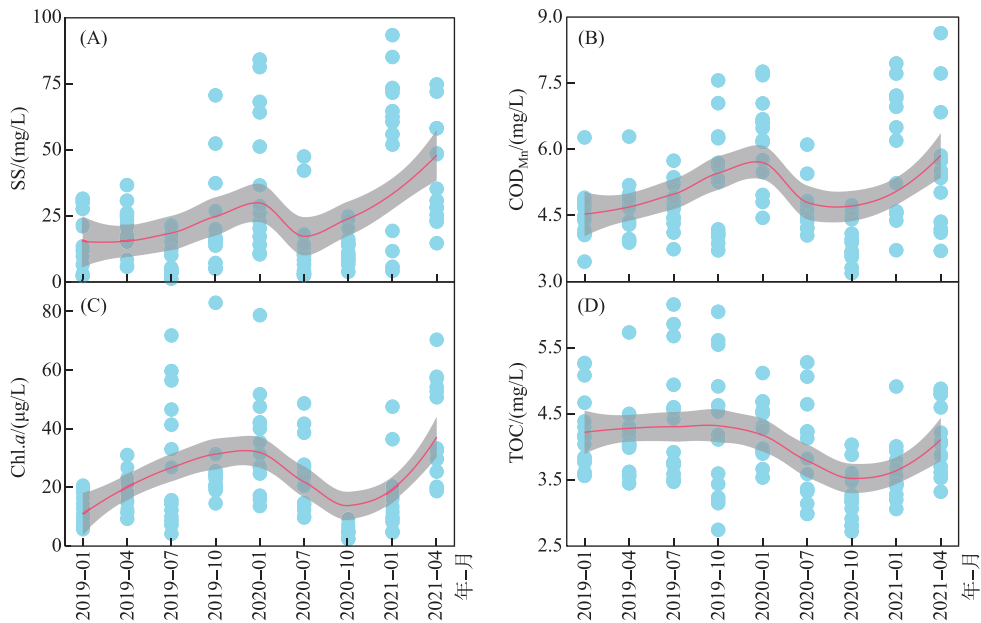


图 5 东太湖网围完全拆除后 SS、Chl.*a*、COD_{Mn} 和 TOC 浓度变化特征

Fig.5 Variations of SS, Chl.*a*, COD_{Mn} and DOC concentrations in East Lake Taihu after the complete renovation of net-pen

2.4 东太湖 30 年不同阶段水质主成分和相关性分析

TN 是主成分分析中贡献度最大的水质指标(图 6),表明 TN 是 1990—2020 年间东太湖主要的污染因子,TN、TP、COD_{Mn} 和 Chl.*a* 浓度之间具有显著的正相关性($P<0.05$)。30 年间网围面积和太浦河口出水量与东太湖水体营养盐浓度变化相关性不显著($P>0.05$)。

进一步发现太浦河口与东茭咀水域的营养盐浓度自 2008 年后显著上升,且 2005 年起“引江济太”工程进入长效运行,太浦河口出湖水量开始增加。因此,对 2008 年网围整治工程实施后的水质指标与出湖水量和降雨量进行主成分分析,可知 TN 依旧是太浦河口与东茭咀的主要污染因子,TN 浓度与透明度和 Chl.*a* 浓度具有显著相关性($P<0.01$)。降雨量与各水质指标之间并无显著相关性($P>0.05$),太浦河口出水量与 Chl.*a* 浓度有显著正相关关系($P<0.05$)(图 7)。

3 讨论

3.1 网围养殖结构调整和规模变动对东太湖水质年际波动的影响

1990—2021 年期间,东太湖 TN、TP、COD_{Mn} 和 Chl.*a* 浓度平均值存在年际波动,与网围养殖结构调整和规模变动密切相关。东太湖是典型的草型湖泊,1980s 以苦草(*Vallisneria natans* (Lour.) Hara)、马来眼子菜(*Potamogeton wrightii* Morong)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus* A. Bennett)和轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)占优势。中国科学院南京地理与湖泊研究所的一批科技人员开创了我国大水面水草资源高效利用的

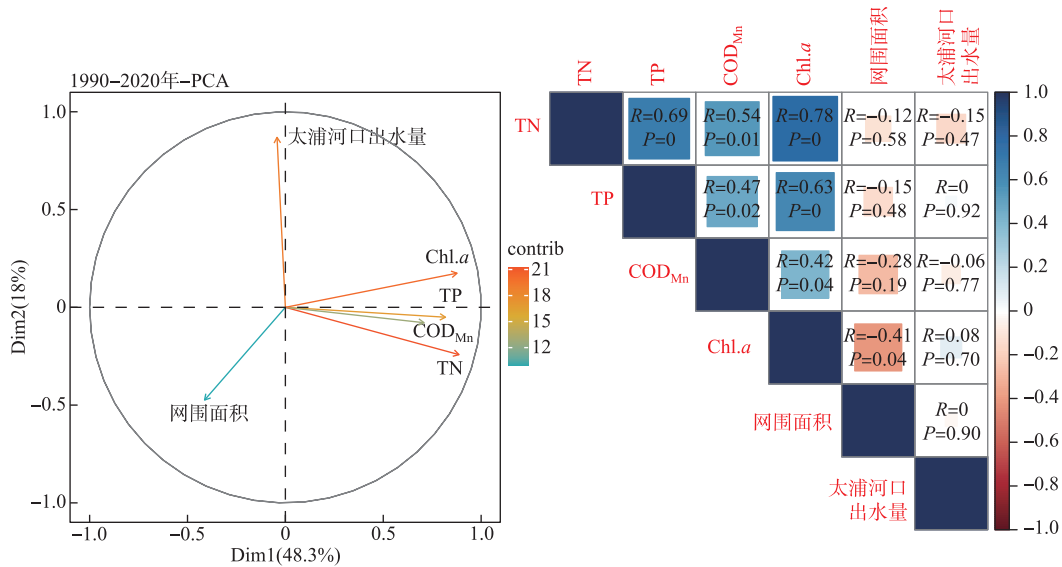


图 6 1990—2020 年东太湖水质主成分分析图和相关性热力图

Fig.6 Principal component analysis diagram and correlation thermal map of East Lake Taihu from 1990 to 2020

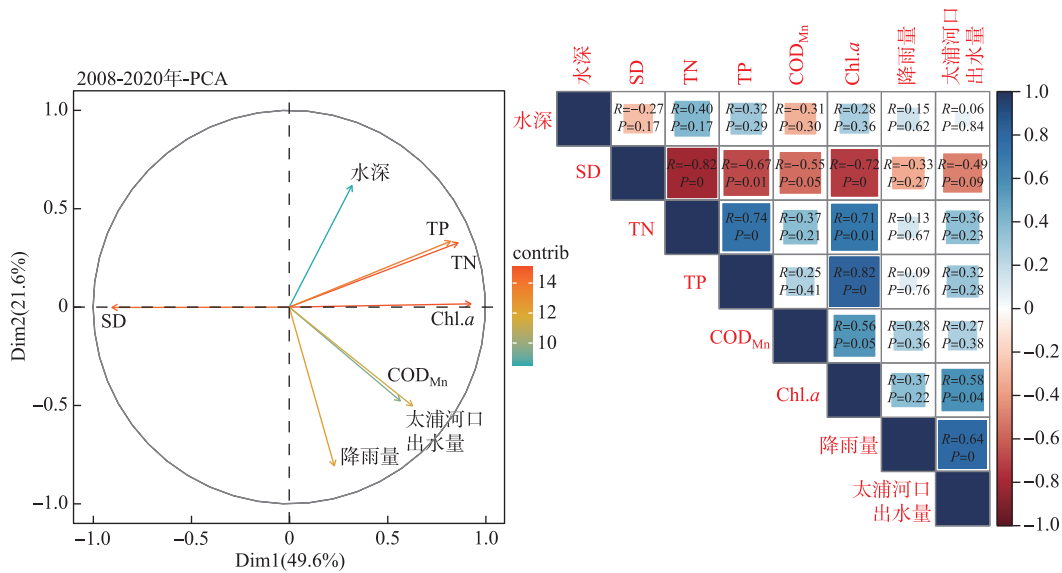


图 7 2008—2020 年东太湖水质主成分分析图和相关性热力图

Fig.7 Principal component analysis diagram and correlation thermal map of East Lake Taihu from 2008 to 2020

网围养殖模式,以草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)、团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*)、鲤 (*Cyprinus carpio*)、鲫 (*Carassius auratus*)、青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*) 为主养,搭配鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙 (*Aristichthys nobilis*)、鳊 (*Siniperca chuatsi*) 和翘嘴红鲌 (*Erythroculter ilishaeformis*)。到 1997 年,全湖网围养鱼面积达 60 km² (图 8)。随着网围养鱼强度增加,水体富营养化现象日益凸显。据报道,水产品只能摄食约 70% 的饵料^[12],多余的饵料、养殖药物残留和水产品的排泄物一同沉入湖底^[13]。微生物经过自身生理作用分解

释放出大量的氮、磷到水体中,增加沉积物污染风险,加速湖泊富营养化^[14-16]。根据杨清心等的研究^[17],东太湖网围养鱼产量为 7500~11250 kg/hm²时,相当于向湖中投入超过产量 60%的氮、磷,即每生产 1 t 的鱼就会向湖内释放 141.25 kg 的氮和 14.14 kg 的磷。

到 1990s 末网围养鱼鼎盛时期,东太湖水体 TN、TP 和 COD_{Mn} 浓度达到了一个小高峰(图 2)。因东太湖还保持较高的水草覆盖度,Chl.*a* 浓度变化不明显,依旧维持较低的水平。随后,东太湖网围养殖模式逐渐转向了高经济效益的河蟹为主,同时套养鱼虾的生态混养模式,最大程度地利用河蟹饵料,加上沉水植物伊乐藻(*Elodea canadensis* Michx)和轮叶黑藻的有效管控和螺类投放,在提高综合效益的同时尽可能减湖泊外来物质输入对水质的影响^[18]。直到 2000 年初,水体营养盐浓度呈下降趋势。

随着河蟹养殖强度增大,2008 年全湖养殖面积达到 118.56 km²,占全湖水面的 90.50%。近乎全湖的网围覆盖,严重影响了水生植物的收割和氮、磷、营养盐的输出,从而导致湖泊的自净能力下降,加重了东太湖水质的恶化^[19]。Luo 等也发现阳澄湖中的氮、磷等营养盐浓度与网围面积的大小呈正相关^[20]。因此,2008 年网围整治前,营养盐水平达到第 2 个小高峰。随后,网围养殖整治将面积缩减为 30 km²,东太湖的水质状况得到了改善。直到 2018 年养殖网围全部拆除,2019 年有个平缓的响应期,近两年水质状况不容乐观,2020 年东太湖的综合营养状态指数达到 69,接近整个太湖水平(图 9)。

3.2 网围拆除后东太湖水质变化原因分析

影响东太湖水质状况的可能因素有流域河流排污和土地利用、湖体水生植物现存量 and 群落结构改变、水文水动力、与整个太湖的连通影响以及气候变化和极端天气等。

1) 流域河流排污和土地利用影响。2010 起,苏州市吴中区实施了东太湖综合整治工程,包括东太湖生态岸线修复、退垦还湖、环湖生态湿地构建、行洪供水支通道疏浚等,改善东太湖水生态环境,促进太湖流域经济社会发展,2017 年完成了一期续建工程。从朱颖等^[21]1990—2019 年太湖流域湿地景观类型动态变化的影像中发现,东太湖岸带建设用地减少,湿地呈增长趋势。张家浜是东太湖一个典型的入湖河口,从图 3 可见,近年来虽然水深增加,但透明度提高,水体的 TN、NH₃-N、TP、PO₄³⁻-P、TOC、SS 等降低明显,东太湖北部水质受东太湖流域排污和土地利用的影响不明显。但是 2008 年后位于东太湖南部的太浦河口与东茭咀的 TN 和 TP 浓度上升明显(图 3)。根据朱广伟等研究发现^[22],太湖磷浓度居高不下与太湖流域土地建筑比例增加、人口增加和耕地旱化比例增加等外源负荷因素有关。降雨冲刷是农业和城镇面源污染进入太湖流域河道的主要途径,2008 年后太湖流域的降雨量呈上升趋势(图 10),降雨量与太湖上游氮、磷通量增加呈显著正相关关系^[23]。太湖的 Chl.*a* 浓度与 TP 浓度呈正相关关系,在太湖蓝藻水华无法根治的背景下,太湖的 Chl.*a* 浓度也一直处于较高水平^[22]。本研究发现,2008 年后太浦河口出水量呈上升趋势(图 11),且与太浦河口和东茭咀的 Chl.*a* 浓度呈显著正相关($P < 0.05$)(图 7)。东太湖南部水质变化可能受到大太湖流域河流排污和土地利用影响。

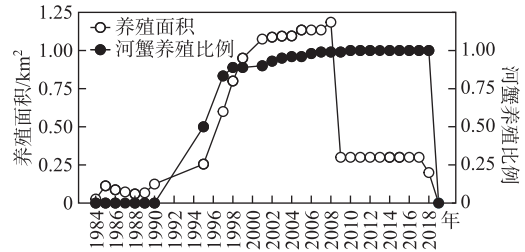


图 8 东太湖网围完全拆除前(1984—2019 年)的渔业养殖面积和河蟹养殖比例
Fig.8 Fisheries farming area and the ratio of Chinese mitten crab farming of East Lake Taihu from 1984 to 2019

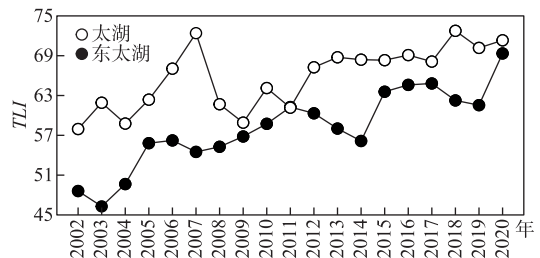


图 9 2002—2020 年太湖和东太湖综合营养状态指数变化趋势
Fig.9 Variations of comprehensive trophic level index of Lake Taihu and East Lake Taihu from 2002 to 2020

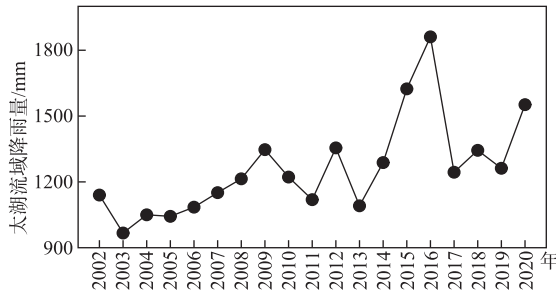


图 10 2002—2020 年太湖流域
降雨量 (数据来源:水利部太湖流域管理局)
Fig.10 Rainfall in Lake Taihu Basin from 1999 to
2020 (Data source: Taihu Basin Authority)

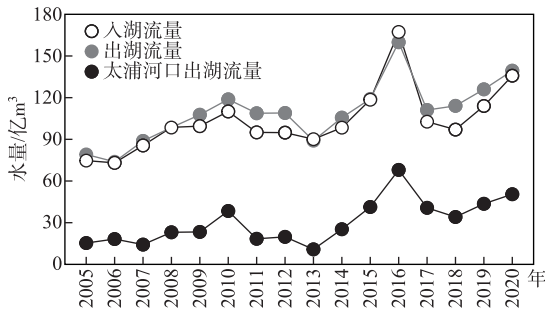


图 11 2005—2020 年太湖出入
湖水量 (数据来源:太湖流域管理局)
Fig.11 Volume of water input and output of
Lake Taihu from 2005 to 2020
(Data source: Taihu Basin Administration Bureau)

浮植物野菱。沉水植物多样性的提高及群落结构的优化对水生生态系统的健康与稳定具有重要意义。但整体来说,东太湖湖心、原网围区、张家浜和瓜泾口水体营养盐相对于网围拆除前变化不大,Chl.a 浓度上升。水体营养盐上升最高的是太浦河口和东茭咀,整体拉升了网围拆除后东太湖氮、磷营养盐的平均水平。

表 1 2017—2021 年东太湖水生植被类群面积

Tab.1 Area changes of different aquatic vegetations in East Lake Taihu from 2017 to 2021

年份	沉水植被面积/km ²	挺水植被面积/km ²	浮叶植被面积/km ²	总面积/km ²
2017	32.12	8.29	29.87	70.28
2019	21.01	11.03	40.72	72.76
2020	9.57	17.78	42.67	70.02
2021	13.17	11.21	34.97	59.35

3) 东太湖水文水动力变化与和大太湖的连通影响。本课题组的研究发现,网围存在对表层和中层的湖流衰减影响最大,可衰减 73%~96%;围网拆除后,水动力条件改变(水流运动对沉水植物的拉伸、搅动、拖曳作用)对沉水植物生物量以及群落组成都有明显影响^[31-32]。狐尾藻的抗剪切力强于伊乐藻和轮叶黑藻,这与东太湖现阶段沉水植物以狐尾藻占优势有一定关系。

自 2015 年开始,东茭咀和太浦河口处的 TN、TP、Chl.a 和 SS 浓度均出现明显的上升趋势,透明度也下降

2) 水生植物现存量 and 群落结构改变的影响。水生植被可以固定水体中的氮、磷,并通过抑制湖泊底泥再悬浮控制沉积物中营养盐的释放,改善水质^[24]。合理的水生植被群落结构组成和生物量是维持健康湖泊生态系统的关键^[25]。1960s,东太湖以马来眼子菜为主,占全湖面积的 90%。2002 年发展为以伊乐藻+微齿眼子菜+轮叶黑藻+苦草群落为主,共发现沉水植物 17 种,浮叶植物 13 种和漂浮植物 9 种^[26]。2019 年以后,由于缺少渔民对沉水植物伊乐藻、轮叶黑藻、苦草的种植和对浮叶植物的打捞,沉水植物演替为以狐尾藻 (*Myriophyllum verticillatum* L.)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum* L.) 和菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 占优势。2021 年沉水植物面积锐减到 13.17 km²,浮叶植物野菱 (*Trapa incisa* var. *sieb.*) 疯狂扩张,达到 34.97 km²,水生植物总面积占全湖总面积的 45%,主要分布于原网围区(表 1)。当外界的干扰超过其耐受限度时,沉水植物面积萎缩,群落结构趋于单一化,或者消失^[27-28]。当水生植物群落结构单一化时,易形成“疯长”,腐败坏水^[29]。且浮叶植物较沉水植物有较强的抗风浪能力,又缺少渔民打捞,因此网围拆除后浮叶植物占优势^[8]。傅玲研究发现不同生态型组合的植物群落对氮、磷去除效果优于单一植物群落^[30]。原网围区因夏秋季金鱼藻、狐尾藻、野菱生物量高于其它区域,水质优于其它水域,和网围拆除前差异不大;但因缺少人工管护,秋、冬季腐败坏水风险加大,特别是对于生物量较高的漂

到现在的 0.30 cm 左右,与整个太湖接近。杨井志成等^[8]发现 2018 网围拆除后,在太浦河口附近水域监测到蓝藻水华,面积为 8.79 km²,占比为 4.31%。研究认为是围网拆除后,水动力增强,原围网区底泥沉积物释放至太浦河口附近水域,加重了该片水域的富营养化程度。在本研究中,太浦河口和东茭咀水域的 Chl.*a* 浓度同太浦河口出湖水量呈显著正相关($P < 0.05$)。太浦河口是太湖重要的出湖河口,近几年上海经由太浦河使用的水量增加,从 2005 年的 15.35 亿 t 增加到 2020 年的 50.50 亿 t(图 11),占总出湖水量的 20.55% ~ 37.19%。郝文彬等^[33]运用环境流体动力学模型也发现,加大望虞河入湖流量可显著改变东部湖区的水循环条件。2015 和 2016 年,持续两年的特大洪水,加上整个太湖东部人工水生植物刈割打捞,东茭咀附近的水生植物急剧减少^[34]。网围和水生植物具有降低湖水流速,阻碍沉积物中营养盐再悬浮的作用^[35]。网围拆除、出湖水量增加、水生植物消失,东茭咀附近水动力作用加强,加上原网围区底泥营养盐释放,综合因素引起东太湖南部区域营养盐浓度大幅上升。在朱伟等^[36]的研究中也发现入湖水量的增加开始影响太湖存在的“西浊东清”水质结构,水体交换周期缩短会使东西太湖水水质出现均化的现象,东部太湖水水质会出现下降的趋势。

4) 极端天气影响。2016 年的特大洪水造成太湖出现磷反弹,洪水造成的年度性水体交换周期缩短已经对东部太湖水水质产生了不利的影响^[36],认为 2016 年突然出现的磷反弹与这一年发生的特大洪水一次性多增加 579 t 磷通量有着显著的关系。在本研究中,东太湖 TN、TP、COD_{Mn} 和 Chl.*a* 浓度在 2016 和 2017 年有较大提高可能与强降雨有关,虽然相关性不显著。

3.3 东太湖网围全拆除后的生态修复措施建议

东太湖退围还湖是太湖受损生态系统局部水域水质改善、生态修复和多样性保护的关键,也是太湖生物资源养护及渔业高质量可持续发展和下游区域优质水源保障供给的重要基础。东太湖网围养殖拆除,目标是重构良好的生态系统,但 3 年来的环境演变并没有显现出最初设想的效果,需要加强对东太湖的管理,并对近阶段东太湖优质水生植被退化的现状进行人工干预,确保恢复健康自然的草型生态系统格局。

3.3.1 应及早开展水生植物资源调控强化水质净化 针对当前东太湖水生植被浮叶植物菱占优势、覆盖度高,沉水植物狐尾藻和金鱼藻占优势、不易被鱼类等利用等导致东太湖生态系统服务功能降低的问题,建议对东太湖不同区域水生植被进行调控,组织精准刈割,适度移出过量浮叶植物和沉水植物,收割控制沿湖岸芦苇等。根据多样性-稳定性理论,在目前没有水生植物分布区域,开展微地形地貌生态改造提高透明度恢复沉水植物,在浮叶植物优势区开展风浪消减-浮叶植物块状刈割-沉水植物扩繁,在沉水植物单一区开展沉水植物多样性维持与调控。2021 年在原网围区开展 1 km²浮叶植物刈割试验示范,试验区监测表明,沉水植物群落结构得到改善,生物多样性提高,生态完整性得到恢复,水质清新,显现出较好的效果,为东太湖水生植被管理探索了经验。

3.3.2 加强对东太湖生态环境监测并建立湖泊生态档案 东太湖网围拆除后水环境和水生态波动较大,建立生态档案掌握发展动态和变化规律对于东太湖生态修复和综合管控至关重要。因此,需要加强对东太湖水水质、浮游藻类、水生植被、鱼类等生物资源,以及水位、流速和水下光照等物理环境因子的长期动态监测,合理调控东太湖的水生植物群落结构及生物量和覆盖度,科学评估东太湖保持Ⅲ类以上水质需要的物理和生物条件,确保东太湖良好生态系统重构与水生态安全。

3.3.3 创建东太湖渔业资源养护与利用新模式 东太湖草型生态系统是生物多样性和渔业种质资源保护的有利条件,为生态系统服务功能提升和生态渔业发展奠定了基础。东太湖不能发展大规模集约化的人工养殖,但东太湖草型结构及优质的饵料生物资源,需要在保护中利用,让生态系统内部形成良性循环。东太湖宜开展河蟹、团头鲂、鳊、河川沙塘鳢等太湖鱼米之乡特色鱼类品种的增殖放流,既可修复渔业种质资源、维护生态系统完整性,又实现了沉水植被-底栖动物-浮游生物-渔业的食物链能流耦合。通过构建“道法自然”、“人放天养”的生态模式,在提升东太湖生态系统服务功能的同时,为东太湖网围拆除后独具特色的渔业高质量发展创造了新的模式,也是绿水青山就是金山银山生态产品价值转化的最好诠释。

4 结论

1) 30 年来东太湖的 TN、TP、COD_{Mn} 和 Chl.*a* 浓度整体呈上升趋势。网围养蟹的水质相对于网围养鱼较

优,但均随着养殖强度的增大而变差,网围规模缩减对改善水质有正面效应。2008年后太浦河口和东茭咀透明度下降明显,现在维持在30 cm左右;营养盐浓度和Chl.a浓度升高显著。东茭咀和太浦河口水域的Chl.a浓度与太浦河口出湖水量呈显著正相关。网围拆除,出湖水量增加和水生植被消失造成的水动力作用增强,加上原网围区底泥营养盐释放,是引起东太湖南部区域营养盐浓度大幅上升的主要原因。

2)东太湖网围养殖拆除,目标是重构良好的生态系统,但3年来的环境演变并没有显现出最初设想的效果,需要加强对东太湖的管理,及早开展水生植物资源调控,强化水质净化,加强对东太湖湖泊生态环境监测并建立湖泊生态档案,创建渔业新模式,确保恢复健康自然的草型生态系统格局。

致谢:感谢杨元龙副研究员提供的1990—2005年东太湖的水质监测数据,感谢罗菊花副研究员提供的2017—2021年东太湖水生植被类群面积数据,感谢阚可聪、全天候在样品采集上的帮助。

5 参考文献

- [1] Wu QL. On the sustainable development of fishery in East Taihu Lake. *J Lake Sci*, 2001, **13**(4): 337-343. DOI: 10.18307/2001.0407. [吴庆龙. 东太湖养殖渔业可持续发展的思考. 湖泊科学, 2001, **13**(4): 337-343.]
- [2] Yang QX, Li WC. Environmental changes since foundation of pen-fish-farming in East Taihu Lake. *China Environmental Science*, 1996, **16**(2): 101-106. [杨清心, 李文朝. 东太湖网围养鱼后生态环境的演变. 中国环境科学, 1996, **16**(2): 101-106.]
- [3] Zeng QF, Gu XH, Zhou LH *et al.* Water quality pollution characteristics in East Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2011, **31**(8): 1355-1360. [曾庆飞, 谷孝鸿, 周露洪等. 东太湖水质污染特征研究. 中国环境科学, 2011, **31**(8): 1355-1360.]
- [4] Dai QZ, Zhang K, Xu B. The trend of water quality variation and analysis of Meiliang Bay and Dongtaihu Bay in Taihu Lake from 2014 to 2018. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, (7): 82-84. [代倩子, 张坤, 徐彬. 2014—2018年太湖梅梁湖和东太湖水质变化特征分析. 中国农村水利水电, 2020, (7): 82-84.]
- [5] He XW, Chu Y, Zeng J *et al.* Effects of optimized fish farming on the sediment nutrients of eastern Lake Taihu. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4562-4569. [何肖微, 储瑜, 曾巾等. 东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响. 环境科学, 2017, **38**(11): 4562-4569.]
- [6] Wang XF, Yang CT, Nan J *et al.* Dynamic changes and driving factors of zooplankton community structure in East Taihu Lake. *Scientific Experiment in Countryside*, 2019, (11): 83-87. [王晓菲, 杨昌涛, 南昌等. 东太湖浮游动物群落结构动态变化及驱动因素. 农村科学实验, 2019, (11): 83-87.]
- [7] Wang YW, Xu J, Li JY *et al.* Changes of aquatic vegetation and water quality after removal of pen aquaculture in Lake East Taihu. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(1): 104-111. [王文友, 徐杰, 李继影等. 东太湖网围全面拆除前后水生植被及水质变化. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(1): 104-111.]
- [8] 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. 东太湖网围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.]
- [9] Gu XK, Liu YS, Tang SK *et al.* Spatio-temporal variation with influencing factors for fish functional groups in East Lake Taihu after the net removal. *J Lake Sci*, 2022, **34**(2): 569-581. DOI: 10.18307/2022.0217. [谷先坤, 刘燕山, 唐晟凯等. 网围拆除后东太湖鱼类功能群时空变化及影响因素. 湖泊科学, 2022, **34**(2): 569-581.]
- [10] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴——2020. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [11] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [12] Zhang GH. Purse seine culture and water environment protection in lake. *Freshwater Fisheries*, 2000, **30**(7): 36-37. [张关海. 湖泊围网养殖与水环境保护. 淡水渔业, 2000, **30**(7): 36-37.]
- [13] Zi XY, Zhang M, Gu XH *et al.* Impact of enclosure culture on heavy metal content in surface sediments of Hongze Lake and ecological risk assessment. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5355-5363. DOI: 10.13227/j.hjcx.202012131. [嵒鑫源, 张鸣, 谷孝鸿等. 洪泽湖围网养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价. 环境科学, 2021, **42**(11): 5355-5363.]
- [14] Poersch LH, Bauer W, Kersanach MW *et al.* Assessment of trace metals, total organic carbon and total nitrogen of a shrimp farm system in Southern Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, **39**: 101452. DOI: 10.1016/j.rsma.2020.101452.
- [15] Farmaki EG, Thomaidis NS, Pasiadis IN *et al.* Environmental impact of intensive aquaculture: Investigation on the accumulation of metals and nutrients in marine sediments of Greece. *Science of the Total Environment*, 2014, **485/486**: 554-562. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.125.
- [16] Marmen S, Fadeev E, Al Ashhab A *et al.* Seasonal dynamics are the major driver of microbial diversity and composition in intensive freshwater aquaculture. *Frontiers in Microbiology*, 2021, **12**: 679743. DOI: 10.3389/fmicb.2021.679743.

- [17] 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.]
- [18] Lu J, Wang SM, Xiao F *et al.* Influence of river crab culture on main pollution index of water environment in Gaochun area. *Journal of Aquaculture*, 2018, **39**(6): 7-9. [陆健, 王绍绵, 肖飞等. 高淳地区河蟹养殖对水环境主要污染指标的影响. 水产养殖, 2018, **39**(6): 7-9.]
- [19] Qin BQ, Wu QN, Gao JF *et al.* Water environmental issues in Taihu Lake of China: Problems, causes and management. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(2): 221-228. [秦伯强, 吴庆农, 高俊峰等. 太湖地区的水资源与水环境——问题、原因与管理. 自然资源学报, 2002, **17**(2): 221-228.]
- [20] Luo JH, Pu RL, Ma RH *et al.* Mapping long-term spatiotemporal dynamics of pen aquaculture in a shallow lake: Less aquaculture coming along better water quality. *Remote Sensing*, 2020, **12**(11): 1866. DOI: 10.3390/rs12111866.
- [21] Zhu Y, Wang S, Feng YQ. Response of the value of wetland ecosystem service in Taihu Basin to the change of landscape pattern in the past 30 years: Based on the implementation of the project of restoring the lake from the land. *Chinese Landscape Architecture*, 2022, **38**(1): 88-93. DOI: 10.19775/j.cla.2022.01.0088. [朱颖, 王杉, 冯育青. 近30年太湖流域湿地生态系统服务价值对景观格局变化的响应: 基于“退田还湖”工程的实施. 中国园林, 2022, **38**(1): 88-93.]
- [22] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 957-973. DOI: 10.18307/2021.0401. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 近70年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 957-973.]
- [23] Lu H, Yang LY, Yang MY *et al.* Influence of rainfall in upper reaches of the Taihu Basin on inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake. *Water Resources Protection*, 2022, (4): 174-181. [陆昊, 杨柳燕, 杨明月等. 太湖流域上游降水量对入湖总氮和总磷的影响. 水资源保护, 2022, (4): 174-181.]
- [24] 谢宇. 不同水动力下太湖水生植物群落对水体净化能力研究[学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [25] Kreiling RM, Richardson WB, Cavanaugh JC *et al.* Summer nitrate uptake and denitrification in an upper Mississippi River backwater lake: The role of rooted aquatic vegetation. *Biogeochemistry*, 2011, **104**(1/2/3): 309-324. DOI: 10.1007/s10533-010-9503-9.
- [26] Gu XH, Zhang SZ, Bai XL *et al.* Evolution of community structure of aquatic macrophytes in East Taihu Lake and its wetlands. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, **25**(7): 1541-1548. [谷孝鸿, 张圣照, 白秀玲等. 东太湖水生植物群落结构的演变及其沼泽化. 生态学报, 2005, **25**(7): 1541-1548.]
- [27] Chen ZQ, Zhao D, Li ML *et al.* A field study on the effects of combined biomanipulation on the water quality of a eutrophic lake. *Environmental Pollution*, 2020, **265**: 115091. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115091.
- [28] Lu J, Wang HB, Pan M *et al.* Using sediment seed banks and historical vegetation change data to develop restoration criteria for a eutrophic lake in China. *Ecological Engineering*, 2012, **39**: 95-103. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2011.11.006.
- [29] Dong BL, Zhou YQ, Jeppesen E *et al.* Response of community composition and biomass of submerged macrophytes to variation in underwater light, wind and trophic status in a large eutrophic shallow lake. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **103**: 298-310. DOI: 10.1016/j.jes.2020.11.027.
- [30] 傅玲. 水生植物群落对水体中氮磷净化效果研究[学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [31] Wang H, Pang Y. Numerical simulation on hydrodynamic character for algae growth. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 884-889. DOI: 10.13227/j.hjxx.2008.04.002. [王华, 逢勇. 藻类生长的水动力学影响因素影响与数值仿真. 环境科学, 2008, **29**(4): 884-889.]
- [32] Zhang QH, Dong XH, Yang XD *et al.* Aquatic macrophyte fluctuations since the 1900s in the third largest Chinese freshwater lake (Lake Taihu): Evidences, drivers and management implications. *CATENA*, 2022, **213**: 106153. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106153.
- [33] Hao WB, Tang CY, Hua L *et al.* Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, **40**(2): 129-133. [郝文彬, 唐春燕, 滑磊等. 引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(2): 129-133.]
- [34] Wang SS, Gao YN, Li Q *et al.* Long-term and inter-monthly dynamics of aquatic vegetation and its relation with environmental factors in Taihu Lake, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 367-380. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.216.
- [35] He J, Gu XH, Liu GF *et al.* The problems of pen crab farming in Chinese lakes and the strategies. *Journal of Aquaculture*, 2016, **37**(1): 41-45. [何俊, 谷孝鸿, 刘国锋等. 我国湖泊网围养蟹业存在问题以及控制对策. 水产养殖, 2016, **37**(1): 41-45.]
- [36] Zhu W, Cheng L, Xue ZP *et al.* Changes of water exchange cycle in Lake Taihu (1986-2018) and its effect on the spatial pattern of water quality. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1087-1099. DOI: 10.18307/2021.0411. [朱伟, 程林, 薛宗璞等. 太湖水体交换周期变化(1986—2018年)及对水质空间格局的影响. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1087-1099.]