

---

# 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

于海龙<sup>1, 2</sup> 王宏志<sup>1, 2</sup> 王海芳<sup>3</sup> 梁雨萱<sup>1, 2</sup> 黎欣然<sup>1, 21</sup>

- (1. 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430079;
2. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;
3. 湖北省林业调查规划院, 湖北 武汉 430079)

**【摘要】:** 围网及网箱养殖是江汉平原湖泊水体环境污染的重要原因。湖北省湖库拆围大行动实施之后, 湖泊围网拆除的成效及其生态环境效益值得关注和探讨。故以湖北省第一大湖洪湖为为例, 首先基于改进的归一化差异水体指数(MNDWI<sub>n</sub>)、纹理分析等方法实现对湖泊拆围效果的快速监测; 在提取拆围信息的基础上, 根据洪湖水产养殖类型分担率及产排污系数法, 对拆围的环境效益进行估算。结果表明: (1) 洪湖拆围行动使湖内围网全部被拆除, 共拆除湖内围网养殖区面积 117.81km<sup>2</sup>, 自然水面面积增加 110.49km<sup>2</sup>; 洪湖沿岸景观得到了明显改观, 其中西部和北部地区拆围效果最为显著, 而洪湖南部和北部的湖泊沿岸还存在部分待清理的非水体异物。(2) 洪湖拆围行动使排放到湖泊水体中的污染物减少 1265284.38kg, 其中植物营养物总氮和总磷的浓度分别减少 0.848、0.185mg/L, 这两项指标将由拆围前的Ⅲ类水质提升为Ⅱ类水质, 湖泊水体富营养化问题得到较大改善; 研究可为区域湖泊管理及流域生态环境保护提供快速监测技术支持和应用参考。

**【关键词】:** 江汉平原 网箱养殖 拆围行动 生态环境效益

**【中图分类号】:** X824 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)12-2760-10

良好的生态环境是人类社会生存和健康发展最重要的基础和条件<sup>[1]</sup>。改革开放 40 年来, 中国经济的高速发展引起了水体和大气污染、资源短缺、生物多样性减少、水土流失等一系列环境问题<sup>[2]</sup>。据报道, 中国有超过 70% 的人受到水环境问题的威胁<sup>[3]</sup>。这些环境问题引起了国家政府及社会各界的高度重视。党的十八大、十九大均把“可持续发展”定为国家战略, 把生态文明建设摆在全局工作的突出地位<sup>[4]</sup>。水是人类的命脉, 国家环保部 2014 年 2 月 13 日常务会议讨论并原则通过了《水污染防治行动计划(送审稿)》; 国务院 2015 年 4 月 2 日发布了《水污染防治行动计划》(简称“水十条”), 制定了更严格的水环境监管标准, 以寻求更

---

**作者简介:** 于海龙(1990~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 GIS 应用、水文生态。E-mail: hlyu0912@163.com  
王宏志 E-mail: wanghongzhi@mail.ccnu.edu.cn  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41671179)

好的水环境管理制度;2016年12月中国中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于全面推行河长制的意见》等。

湖北省号称“千湖之省”,2012年颁布了首个地方湖泊法规,设立了“湖长制”。2016年9月湖北省农业厅发布《关于强力推进江河湖库围栏围网网箱拆除工作的紧急通知》,开展“湖库拆围”大行动,把湖库拆围行动目标任务设定了两个时间节点:2017年12月底前务必全面完成各地所有江河湖库拆围(包括围栏、围网和网箱养殖拆除);2016年12月底前务必拆除本地30%以上所有水域围栏、围网和网箱养殖。那么,“湖库拆围”行动实施情况如何?如何快速监测拆围效果?拆围对湖泊生态环境改善的程度?尚未见有相关的研究发表。正是基于这样的背景和思考,拟以湖北省第一大湖为例,研究“拆围”快速监测方法、分析“拆围”成效,探讨“拆围”的环境效益,可为江汉平原乃至长江中下游“湖库拆围”效果和效益研究提供借鉴。

## 1 研究区生态环境概况

江汉平原位于湖北省中南部,是湖北省湖泊集中分布区,也是生态保护和绿色发展备受国家高度重视的长江经济带沿岸区,是长江中下游平原的重要组成部分,总面积约为31036km<sup>2</sup>,是中国重要的商品粮食和棉花生产基地<sup>[5,6]</sup>。洪湖地处江汉平原南部,地跨洪湖市和监利县(图1),是湖北省第一大湖、中国第七大天然淡水湖泊,处于长江和汉水支流东荆河之间,属于洼地壅塞成湖,是国家级自然保护区,并于2008年被列入“国际重要湿地”名录。洪湖冬排夏蓄,以调蓄为主,兼具供水、灌溉、养殖、航运、调节气候、物种保护、旅游休闲等多种功能。



图1 洪湖的地理位置

自20世纪80年代末开始的网围养殖等人类活动,江汉平原普遍出现了湖泊面积萎缩、斑块破碎<sup>[7]</sup>,湖泊水域出现了富营养化<sup>[8]</sup>、水体污染<sup>[9]</sup>、水生生物减少<sup>[10]</sup>等湖域环境问题,湖泊水体中总磷、总氮含量超标几倍到上百倍<sup>[11]</sup>。洪湖也是如此,据前期学者对洪湖的研究成果<sup>[12,13]</sup>及2005、2010、2013~2017年《湖北省水资源公报》<sup>[14]</sup>(表1),洪湖水质先由1990年的II类水质恶化到IV类水质,2015年以后恢复到III类水质。导致洪湖水质恶化的主要污染物是氮、磷及其它有机污染物<sup>[13]</sup>。由图2可见,1995年时,洪湖虽然存在一定的围垦,但湖岸仍然相对自然弯曲,湖泊水面纹理相对均一;2014年洪湖围垦达到了最严重的状态,水面异质物较多,湖泊沿岸人工构筑物凸显;随后2015年洪湖实质上已经开始了拆围行动;到了2016年9月湖北省有了具体政策及实施保障,强有力地开展了拆围和杂草垃圾清理行动,2017年12月洪湖水面遥感特征基本上再次恢复到纹理均一的状态(图2)。

表1 1990~2017年洪湖水质类别

年份	1990	1995	2000	2005	2010	2013	2014	2015	2016	2017
水质	II*	III*	IV*	III	IV	IV	IV	III	III	III

注：\*的水质等级来自参考文献<sup>[12,13]</sup>；其它水质等级来自于相关年份的《湖北省水资源公报》

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

主要数据包括遥感影像数据、统计数据和相关专题信息。(1)遥感影像数据:选用 1995 年的 Landsat5(TM)和 2014、2015、2016、2017 年的 Landsat8(OLI) 卫星影像数据,可以通过“地理空间数据云”网站<sup>[16]</sup>下载(条带号:123,39),获取时间分别为 1995 年 12 月 2 日、2014 年 10 月 30 日、2015 年 4 月 16 日、2016 年 7 月 23 日和 2017 年 12 月 17 日,空间分辨率为 30m×30m。对遥感影像做几何校正、裁剪、投影转换等预处理,得到完整覆盖洪湖区域的五个时期遥感影像(图 2)。(2)统计数据:来源有《湖北省农村统计年鉴》<sup>[16]</sup>和《湖北省水资源公报》<sup>[14]</sup>,主要包括洪湖湖泊水产养殖单产量、主要养殖鱼类及其产量、洪湖水质等数据;各类养殖业的排污系数数据来自于《第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册》<sup>[17]</sup>。(3)相关专题信息:如《长江流域地图集》<sup>[18]</sup>及荆州洪湖防汛系列图片及文档等,为研究洪湖区域生态环境背景提供参考。

为统一洪湖水域研究范围,对早期的(1995 年)研究区影像进行洪湖边界的人工数字化,以此作为洪湖参考范围(面积为 322.13km<sup>2</sup>),并对其他时期的影像做掩膜处理。

### 2.2 湖泊围网养殖区识别

为快速准确地监测湖泊水面景观的动态变化,首先应用边缘增强的 MNDWI 对遥感影像进行湖泊水体与非水体异质物二元分类,得到初步分类结果;再利用纹理分析法对已提取的湖泊水域进行二次分类,最后经目视判别修正,提取出湖泊围网养殖信息。

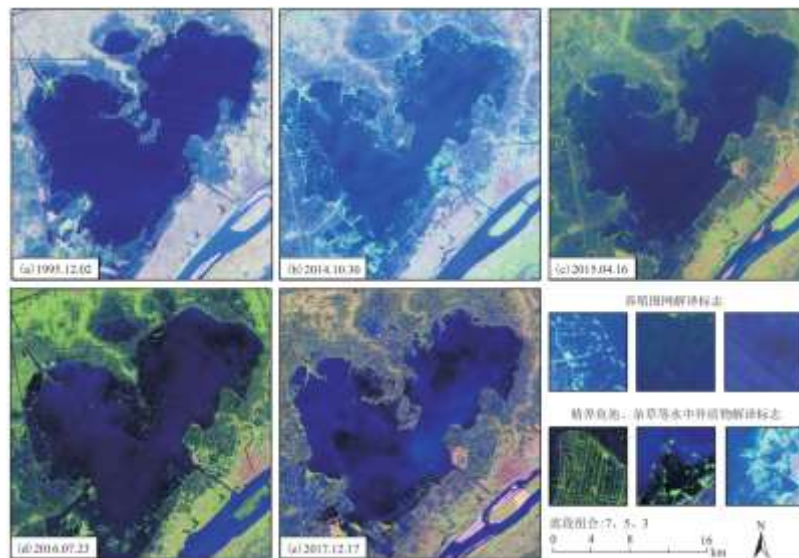


图 2 1995、2014、2015、2016、2017 年洪湖遥感影像

### (1) 水体边缘增强的 MNDWI

在 Mcfeeters<sup>[19]</sup> 的归一化差异水体指数 (NDWI) 基础上, 徐涵秋<sup>[20]</sup> 综合考虑了水体、植被、土壤和建筑物的波谱特性, 用中红外波段替换 NDWI 指数模型中的近红外波段, 提出了改进的归一化差异水体指数 MNDWI, 公式如下:

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (1)$$

式中: MNDWI 为改进的归一化差异水体指数, 取值范围为[-1, 1]。

本文对 MNDWI 值进行了拉伸处理, 增强了水体边缘的像元灰度值变化率, 从而可以确定最佳的阈值选择。公式如下:

$$MNDWI_n = \frac{MNDWI - MNDWI_{min}}{MNDWI_{max} - MNDWI_{min}} \times 255 \quad (2)$$

式中: MNDWI<sub>n</sub> 为水体边缘增强后的 MNDWI 值; MNDWI<sub>max</sub> 和 MNDWI<sub>min</sub> 分别为 MNDWI 的最大值和最小值。

应用 ENVI5.0 软件中 Modeler 模块, 根据公式 (1)、(2) 构建 MNDWI<sub>n</sub> 水体信息提取模型, 参考均值变点法的原理<sup>[21]</sup>, 结合湖泊水体面积随阈值变化的规律确定 MNDWI<sub>n</sub> 最佳阈值, 实现湖泊水体与非水体异质物二元分类, 此结果可以直观反映湖面景观的动态变化。

### (2) 纹理特征分类法

湖泊自然水体在遥感影像上纹理表现比较光滑均一, 而围网养殖区域纹理表现为小的比较规则的多边形。因此可以考虑应用纹理分析法实现水体和围网养殖专题信息的提取。首先对 MNDWI<sub>n</sub> 二元分类中面积较大的片状非水体异质物进行判定, 初步剔除杂草和建筑物。然后对剔除后的遥感影像采用灰度共生矩阵法的量化指标均值<sup>[22]</sup> 提取围网养殖区信息, 可以通过 ENVI5.0 软件中的 Co-occurrence Measures 工具实现。最后建立影像的解译标志进行人工目视判读修正, 得到精确的分类结果。湖泊水域主要区分为自然水面、围网和其他(精养鱼池、杂草垃圾、建筑物等)三种地物类型。从而得到湖泊各个时期围网分布图; 并参考同时期的高分影像进行精度校验。

## 2.3 水产养殖污染物排放量核算模型

排污系数法是一种简单的水产养殖污染物排放测算方法, 即把排污系数和养殖产量的乘积作为污染物的排放量。根据排污系数法的原理, 本文应用围网拆除前后网箱水产养殖污染物排放的削减量来估算湖泊拆围产生的生态环境效益, 其计算公式如下:

$$M = \sum_{i=1}^n K_i (A_{bi} - A_{ai}) \quad (3)$$

式中: M 为污染物排放削减量, kg; K<sub>i</sub> 为养殖品种 i 的排污系数, g/kg; A<sub>bi</sub>、A<sub>ai</sub> 分别为养殖品种 i 在 a 年和 b 年养殖增产量, kg; i 为养殖品种数。K<sub>i</sub> 可以根据《第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册》查询得到。

各种鱼类的养殖削减量估算如下：

$$\Delta A = A_{bi} - A_{ai} = \sum_{i=1}^n \Delta S \times P_i \times Q_i \quad (4)$$

式中： $\Delta A$  为围网拆除前后网箱水产养殖产量的削减量, kg;  $\Delta S$  为围网拆除总面积,  $\text{km}^2$ ;  $P_i$  为养殖品种  $i$  的养殖面积占总面积的比重;  $Q_i$  为养殖品种  $i$  的单产,  $\text{kg}/\text{km}^2$ 。

### 3 结果分析

#### 3.1 洪湖水体与非水体异质物的分类

根据湖泊面积随  $\text{MNDWI}_n$  阈值变化的规律(图 3), 2014、2015、2016 和 2017 年 4 个时期的  $\text{MNDWI}_n$  最佳阈值分别为: 140、138、142 和 140, 据此对洪湖水体与非水体异质物进行识别与分类(图 4)。由图 4 可知, 2014~2017 年洪湖水面信息变化较大。2014~2016 年洪湖水域中形状规则的多边形异质物体较多, 在整个湖泊沿岸均有分布, 特别是西部和北部地区最为明显; 不受异质物影响的湖心区域面积较小, 湖泊沿岸杂乱且破碎化问题突出; 但湖面景观总体呈现逐渐改善的趋势。2017 年洪湖水面大量非水体异质物被清理, 洪湖自然水体面积明显增大, 大部分湖岸恢复自然状态; 除湖泊南部和北部沿岸有部分簇状和片状的异质物外, 洪湖湖心区域基本无非水体异质物。

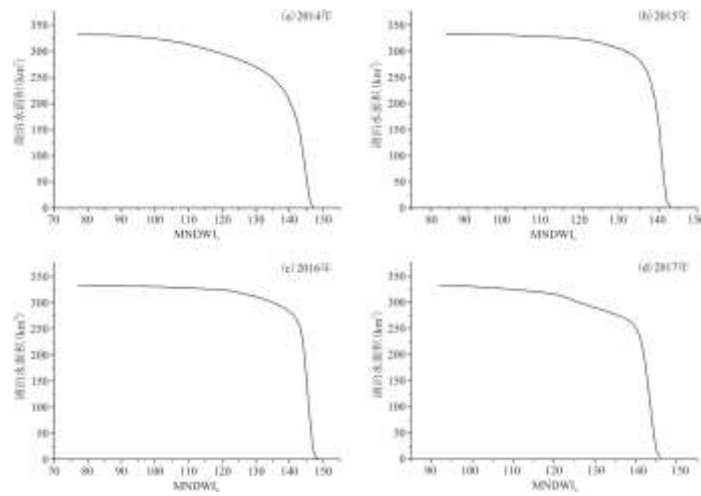


图 3 洪湖面积随阈值变化图

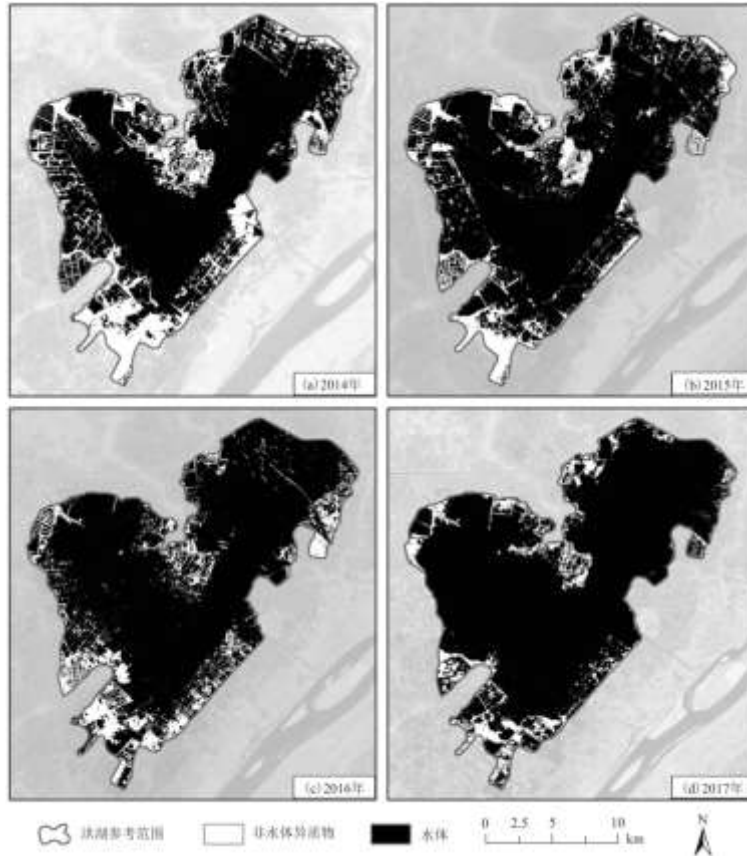


图 4 洪湖水域自然水体与异质物信息识别

### 3.2 洪湖围网养殖区提取及拆除效果分析

根据纹理分析法及目视修正解译的洪湖围网养殖区信息如表 2 和图 5 所示。2014~2016 年洪湖内围网养殖区面积较大, 2014、2015 和 2016 年围网养殖区面积分别占湖泊总面积的 43.85%、43.65%和 35.47%, 其中 2014 和 2015 年超过了湖内自然水面的面积。总体上看, 2014~2017 年洪湖自然水面面积持续增加, 由 2014 年的 120.15km<sup>2</sup> 增加到 2017 年的 256.96km<sup>2</sup>; 围网养殖区面积持续减少, 由 2014 年的 145.65km<sup>2</sup> 到 2017 年全部被清理。分阶段来看, 水面的增加和围网的减少主要发生在“拆围行动”实施的 2016~2017 年, 养殖围网被拆除了 117.81km<sup>2</sup>, 水面面积增加了 110.49km<sup>2</sup>, 增加了 75.43%。湖内其他地物类型略微增加, 根据洪湖实地情况的报道, 可能是由于湖泊生态环境的改善, 水生植物的增加引起的。

表 2 2014~2017 年 4 个时期湖泊变化信息

方法	类型	面积 (km <sup>2</sup> )			
		2014	2015	2016	2017
纹理法+目视判读修正	水面	120.15	124.57	146.47	256.96
	围网	145.65	144.98	117.81	0
	其他	66.33	62.58	67.85	77.17

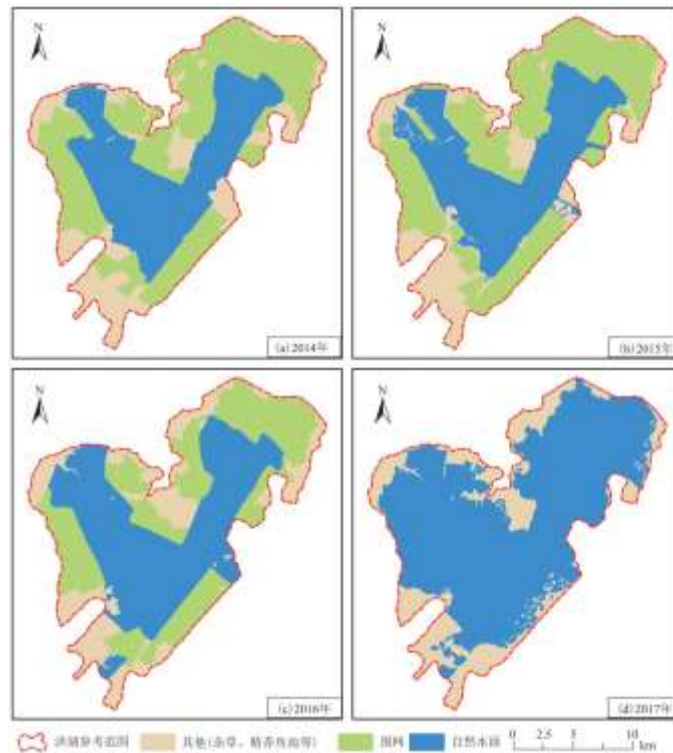


图 5 洪湖围网养殖区分类结果

2014~2016 年洪湖水面景观空间变化不明显,围网养殖区集中连片分布于湖泊沿岸四周,其中湖泊北部地区的围网养殖区规模最大。2016~2017 年洪湖水面景观变化剧烈,湖内围网全部被拆除;自然水面向四周明显扩张,西部和北部地区最为显著。与 1995 年的洪湖参考范围相比,2017 年洪湖南部和北部的沿岸仍然存在部分其他地物类型,要根据其实际情况(水草、杂草垃圾、精养鱼池等)进行区分和清理,湖泊的保护和治理工作需要长期持续开展。

### 3.3 洪湖围网拆除的生态环境效益

根据 2015 和 2016 年《湖北农村统计年鉴》,选取洪湖年湖泊水产养殖产量大于 1 万 t 的养殖品种作为产排污量计算的研究对象,即:草鱼、鲢鱼、鳙鱼、黄鳝、鳊鱼、鲫鱼 6 种鱼类。利用洪湖市和监利县 2015 和 2016 年湖泊水产养殖单产的平均值作为洪湖网箱养殖的单产,即  $1.03475 \times 10^5 \text{kg}/\text{km}^2$ 。依据 2015 和 2016 年 6 种鱼类的年均产量百分比,确定其在洪湖围网养殖面积的比重(表 3)。

参照《第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册》,按条件(养殖种类为淡水养殖,养殖模式为网箱养殖,养殖品种为草鱼、鲢鱼、鳙鱼、黄鳝、鳊鱼、鲫鱼)查得洪湖六种鱼类的产排污系数(表 3)。

根据 2016~2017 年“拆围行动”清理的湖内养殖围网面积及公式(3)、(4)进行计算,得到洪湖六种鱼类的污染物排放减少量(表 4)。

表 3 洪湖网箱养殖产排污系数及水产养殖构成

养殖品种	产排污系数(g/kg)	产量(1000kg)	比重
------	-------------	------------	----



	总氮 TN	总磷 TP	化学需氧量 COD	铜 Cu	锌 Zn	2015 年	2016 年	
草鱼	32.762	6.195	36.865	0.0060	0.0850	118920	104275	0.38
鲢鱼	23.714	4.200	29.115	0.0252	0.0098	70210	73153	0.24
鳙鱼	27.328	3.148	22.204	0.0026	0.0253	25863	30773	0.1
黄鳝	54.848	9.829	276.005	0.0059	0.0000	36230	40542	0.1
鳊鱼	38.976	15.357	96.770	0.0000	0.0000	14297	17173	0.13
鲫鱼	15.723	7.538	22.086	0.0195	0.0000	22951	36718	0.05

表 4 洪湖网箱养殖拆除后污染物排放削减量

养殖品种	排污削减量 (kg)					汇总 (kg)
	总氮 TN	总磷 TP	化学需氧量 COD	铜 Cu	锌 Zn	
草鱼	151764.99	28697.40	170771.51	27.79	393.75	351655.44
鲢鱼	69379.90	12287.91	85181.57	73.73	28.67	166951.78
鳙鱼	33313.90	3837.53	27067.54	3.17	30.84	64252.98
黄鳝	66861.85	11981.93	336460.85	7.19	0.00	415311.83
鳊鱼	61767.24	24337.02	153356.32	0.00	0.00	239460.58
鲫鱼	9583.47	4594.56	13461.85	11.89	0.00	27651.77
汇总	392671.35	85736.35	786299.64	123.77	453.26	1265284.38

由表 4 可知,洪湖因水产养殖围网拆除使湖内污染物排放量共减少 1265284.38kg。化学需氧量 COD 排放量减少的最多,为 786299.64kg, 占总污染物排放减少量的 62.14%。植物营养物总氮和总磷排放量共减少 478407.70kg, 两者占总污染排放减少量的 37.81%。重金属污染物铜和锌的排放量共减少 577.03kg。6 种鱼类中,黄鳝和草鱼排放污染物的减少量较大,两者占污染物总排放减少量的 60.62%。假设所有网箱养殖排放的污染物都溶解在湖泊水体中,根据洪湖 2017 年平均蓄水量(4.63 亿 m<sup>3</sup>)计算,围网养殖的拆除将使洪湖水体中总氮、总磷和 COD 的浓度分别减少 0.848、0.185 和 1.698mg/L。

2017 年洪湖水质类别为 III 类,地表水环境质量标准中 III 类水质的总氮和总磷浓度范围分别为:0.5<N≤1mg/L、0.1<P≤0.2mg/L,按照洪湖围网养殖拆除所引起的污染物浓度减小量计算,洪湖治理后总氮和总磷两项指标将达到地表水环境质量标准中的 II 类水质标准。洪湖因水产养殖网箱的拆除削减了大量污染物的排放,特别是植物营养物总氮和总磷的大量减少将使湖泊富营养化问题得到有效的控制,湖泊水质及流域生态环境也将因此得到较大的改善。

## 4 讨论



#### 4.1 “湖库拆围”行动的生态环境影响

湖泊生态环境的恶化是由多方面原因造成的,像围湖造田、围网养殖、土地的不合理开发利用及农田化肥农药的过量施用等都会对造成各种湖泊生态环境问题<sup>[23]</sup>,富营养化是湖泊生态系统退化的表现特征之一。从湖泊监测数据看,“湖库拆围”行动实施后,2015年洪湖水水质由IV类转变为III类。围网全部拆除后,2017年总氮和总磷这两项指标将分别减少0.848、0.185mg/L,理论上将达到II类水质标准。前期关于洪湖的研究也表明,围网养殖区内的环境污染综合指数大概是养殖区外的2倍,围网养殖面积越大,湖泊的水质状况越差<sup>[24]</sup>。但网箱养殖只是造成湖泊富营养化的“内源”之一,要彻底改善湖泊生态环境,还需要对导致湖泊富营养化的其他污染源进行综合控制<sup>[25]</sup>。湖泊水环境是一个复杂的系统,网箱养殖拆除产生的环境效益不会立即显现,水质改善及生态环境恢复需要长期的过程。2015年以来洪湖湖泊水质改善,也进一步验证了相关政策的实施对水环境质量的提升发挥着重要的作用(如表1)。湖北省本次拆围行动的强力推进及相关民生政策的落实,江汉平原湖泊围网养殖“围了拆拆了又围、屡禁不止”的问题将得到彻底解决,湖泊流域生态环境也将因此得到逐步改善。

#### 4.2 遥感监测评估拆围环境效益的不确定分析及改进

综合应用MNDWI<sub>n</sub>及纹理分析法可以有效识别湖泊水体、网箱养殖区及其他异物,实现对湖泊围网养殖区的自动提取。此方法为快速、宏观监测湖泊围网养殖的动态变化提供了新的思路。但由于地物光谱信息的复杂性,且受湖泊洪枯变化的影响较大,地物判读的精度会存在一定误差。文章参照本地区的高分影像对解译结果进行修正,确保解译结果满足分析的要求。基于湖泊水产养殖类型分担率的产排污系数法是研究网箱养殖对湖泊水环境影响的一种新的估算方法,模型中的排污系数是根据区域水产养殖增产和污染物排放量的总体情况调查统计的结果,由于各地区养殖技术及水环境的差异,排污系数与实际值会存在些许误差。另外,养殖增产量的估算及样本的选择也会对评价的结果产生一定的影响。本研究是假设理想状态下围网养殖对湖泊水体的影响,湖泊对污染物的自净功能、鱼类的生长季、湖泊蓄水量变化等因素还需要在后续的研究中加以考虑。湖泊围网养殖拆除后,江汉平原湖区生态环境演变<sup>[26]</sup>、生物多样性变化<sup>[27]</sup>等综合性问题值得深入探讨。

### 5 结论

本文以洪湖为例,在应用遥感监测评估湖内养殖围网拆除成效的基础上,采用基于水产养殖类型分担率的产排污系数法估算拆围的生态环境效益。结论如下:

(1)综合运用MNDWI<sub>n</sub>及纹理分析法,能有效实现对湖泊拆围效果的快速监测。2017年洪湖“拆围行动”结束后,湖内的养殖围网全部被拆除,与2016年相比,共拆除湖内围网养殖区面积117.81km<sup>2</sup>,洪湖自然水面面积增加110.49km<sup>2</sup>,增加了75.43%。

(2)“湖库拆围”行动的实施,将有效改善洪湖水体质量及湖区生态环境状况。2016~2017年围网养殖的拆除使洪湖内的污染物排放总量减少1265284.38kg,其中植物营养物总氮和总磷的浓度分别减少0.848、0.185mg/L,若其他来源污染得到控制,水体中总氮和总磷将由拆围前的III类水质提升为II类水质。大量植物营养物排放量的减少会有效缓解湖泊富营养化问题,对湖泊水质的改善及湖区生态平衡的恢复具有重要的作用。

(3)湖北省“湖库拆围”行动取得较好成效,但仍需持续加强湖泊保护与管理。洪湖“拆围行动”在短时间内取得了显著的成效,体现了湖北省各级管理部门对湖泊环境改善的高度重视,但与1995年洪湖水域相比,南部和北部的湖泊沿岸还存在部分簇状和片状的非水体异物,湖泊的保护和恢复还需要长期持续进行。本研究为全国水面拆围调查技术和实施方案的设计提供了借鉴。

#### 参考文献:

- 
- [1] MIAO C L, SUN L Y, YANG L. The studies of ecological environmental quality assessment in Anhui Province based on ecological footprint[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60:879-883.
- [2] WU Q, ZHOU W F, ZHANG L. China's environment: Challenges and solutions[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(6):1503-1504.
- [3] 向楠. 调查显示 71.8%受访者感觉正受水污染威胁[N]. *中国青年报*, 2013-02-07(7).
- [4] ZHANG M, LIU Y M, WU J, et al. Index system of urban resource and environment carrying capacity based on ecological civilization[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2018, 68:90-97.
- [5] WANG H Z, SHAO Q H, LI R D, et al. Governmental policies drive the LUCC trajectories in the Jiangnan Plain[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(12):10521-10536.
- [6] 王宏志, 潘方杰, 周勇, 等. 异质景观条件下江汉平原土壤的空间分异[J]. *生态学报*, 2016, 36(18):5682-5690.
- [7] 淡永利, 王宏志, 张欢, 等. 2000-2010年武汉市中心城区湖泊景观变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(5):1311-1317.
- [8] CAI H W, ROSS L G, TELFER T C, et al. Modelling the nitrogen loadings from large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) cage aquaculture[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(8):7529-7542.
- [9] 沈公铭, 黄瑛, 穆希岩, 等. 基于统计产量的水产养殖污染排放量测算与状况分析[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(2):123-129.
- [10] CHALLOUF R, HAMZA A, MAHFOUDHI M, et al. Environmental assessment of the impact of cage fish farming on water quality and phytoplankton status in Monastir Bay (eastern coast of Tunisia) [J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(6):2275-2292.
- [11] 邓宏兵, 张毅, 李俊杰. 长江中游江汉平原湖区主要生态环境问题与整治对策[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2006, 6(4):56-59.
- [12] 杜耘, 陈萍, Kieko SATO, 等. 洪湖水环境现状及主导因子分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(4):481-485.
- [13] 胡学玉, 陈德林, 艾天成. 1990-2003年洪湖水体环境质量演变分析[J]. *湿地科学*, 2006, 4(2):115-120.
- [14] 湖北省水利厅. 湖北省水资源公报[Z]. 2005, 2010, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017. [2018-09-03]. <http://slt.hubei.gov.cn/bsfw/cxfw/szygb/>.
- [15] 中国科学院计算机网络信息中心, 地理空间数据云平台. [2018-09-02]. <http://www.gscloud.cn/>.
- [16] 湖北省统计局. 湖北农村统计年鉴[Z], 北京:中国统计出版社, 2015, 2016.
- [17] 全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数测算项目组. 第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册

---

[Z], 2009.

[18]水利部长江水利委员会. 长江流域地图集[M]. 北京:中国地图出版社, 1999.

[19]MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1425-1432.

[20]徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5):589-595.

[21]常直杨, 王建, 白世彪, 等. 均值变点分析法在最佳集水面积阈值确定中的应用[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2014, 37(1):147-150.

[22]李俊杰, 何隆华, 戴锦芳, 等. 基于遥感影像纹理信息的湖泊围网养殖区提取[J]. 湖泊科学, 2006, 18(4):337-342.

[23]王志强, 崔爱花, 缪建群, 等. 淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(18):6253-6264.

[24]班璇, 余成, 魏珂, 等. 围网养殖对洪湖水质的影响分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(9):125-129.

[25]ZHANG T, BAN X, WANG X L, et al. Analysis of nutrient transport and ecological response in Honghu Lake, China by using a mathematical model[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575:418-428.

[26]SLISKOVIC M, JELIC-MRCELIC G, ANTOLIC B, et al. The fouling of fish farm cage nets as bioindicator of aquaculture pollution in the Adriatic Sea (Croatia)[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173(1-4):519-532.

[27]DE SILVA S S. Aquaculture: a newly emergent food production sector and perspectives of its impacts on biodiversity and conservation[J]. Biodiversity and Conservation, 2012, 21(12):3187-3220.