

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.005

高宝邵伯湖关键地理要素时空演变遥感监测

陆莉蓉^{1,2}, 罗菊花¹, 杨井志成^{1,2}, 谢伟军³, 许飞³, 孙喆^{1,2}, 毛志刚¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏省高宝邵伯湖渔业管理委员会办公室, 江苏 扬州 225000)

摘要: 基于 1977—2020 年的 37 景 Landsat 遥感影像, 采用人机交互目视解译、决策树分类等方法提取了高宝邵伯湖近 43 年养殖区、沉水植被、浮叶植被、滩地和耕地等地理要素, 从要素的长时序时空动态演变分析了高宝邵伯湖地理要素的变化过程。结果表明: 养殖区面积整体呈现先增后减的趋势, 其变化主要受政策调控的影响; 菹草为水生植被优势种, 在 2010 年之后暴发式生长, 几乎覆盖全湖; 耕地多分布在高邮湖北部, 面积先增后减, 滩地多分布在高邮湖北部及近岸区域, 面积不断减少, 两者最终均主要转变为养殖区; 湖泊地理要素变化热点区位于高邮湖北部, 受政策和经济利益驱动, 此处滩地、耕地、养殖区之间的转化十分显著。

关键词: 围网养殖; 圈圩养殖; 水生植被; 遥感; 时空变化; 高宝邵伯湖

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)01-0029-09

Remote sensing monitoring on temporal-spatial evolution of key geographic elements in Gaobaoshaobo Lake

LU Lirong^{1,2}, LUO Juhua¹, YANG Jingzhicheng^{1,2}, XIE Weijun³, XU Fei³, SUN Zhe^{1,2}, MAO Zhigang¹

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Office of the Fisheries Management Commission of Gaobaoshaobo Lake, Yangzhou 225000, China)

Abstract: This study employed several approaches to extract key geographic elements (i. e., aquaculture area, submerged vegetation, floating-leaved vegetation, marsh and cultivated land) using the 37 Landsat image data from 1977 to 2020. Thereafter, the evolution process of geographic elements in the Gaobaoshaobo Lake was analyzed from the temporal and spatial dynamic evolution of elements in long time series. The main conclusions are as follows: As a whole, the area of aquaculture areas increased first and then decreased, which was mainly affected by the policy regulation. Potamogeton crispus is a dominant species of aquatic vegetation and has grown explosively to block waterways since 2010. The cultivated land was mainly disturbed in the north of Gaoyou Lake, and the area increased first and then decreased. Most of the marsh was disturbed in the north and near the coast of Gaoyou Lake, and the area of marsh is decreasing. Both are mainly converted into aquaculture areas. The change hotspot is located in the north of Gaoyou Lake, and driven by the policy regulation and economic interests, the transformation among marsh, cultivated land and aquaculture area is quite significant.

Keywords: pen aquaculture; enclosure polder aquaculture; aquatic vegetation; remote sensing; temporal-spatial variation; Gaobaoshaobo Lake

湖泊是最直接的淡水资源之一, 受自然和人类活动的影响, 湖泊正在发生着剧烈的变化^[1]。湖泊地理要素是构成湖泊的重要组分, 包括水体、水生植被、养殖区(围网养殖、圈圩养殖)、滩地、围垦等, 研究湖泊地理要素现状和长时序的演变, 可以为湖泊生态健康评估、实施湖泊综合治理等提供基础数据和决策依据。高宝邵伯湖是由高邮湖、宝应湖和邵伯湖组成的湖泊群的总称, 是江苏省第三大湖区, 是沟通淮河水系与长江

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41971314); 江苏省自然资源发展专项(JSZRHYKJ202007)
作者简介: 陆莉蓉(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事流域资源环境遥感监测研究。E-mail: lulirong20@mails.ucas.ac.cn
通信作者: 罗菊花(1981—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事流域资源环境遥感监测研究。E-mail: jhluo@niglas.ac.cn
引用本文: 陆莉蓉, 罗菊花, 杨井志成, 等. 高宝邵伯湖关键地理要素时空演变遥感监测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 29-37.

LU Lirong, LUO Juhua, YANG Jingzhicheng, et al. Remote sensing monitoring on temporal-spatial evolution of key geographic elements in Gaobaoshaobo Lake[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(1): 29-37.

水系的重要通道,同时,高邮湖也是南水北调东线工程的输水通道^[2]。长期以来,在人类活动的影响下,高宝邵伯湖围网、圈圩养殖活动加剧,淤积情况严重,调蓄能力下降,菹草暴发生长阻塞航道。明晰高宝邵伯湖地理要素现状及变化特征、掌握其时空变化规律,可为南水北调东线的水安全以及高宝邵伯湖养殖调控、滩地保护等提供科学支持。

遥感技术具有监测范围广、时效性强、周期短、不受地面条件限制等优势^[3],为研究长时序的湖泊地理要素变化提供了有力的技术支撑。当前,已有不少利用遥感影像进行湖泊地理要素长时序分析研究,如计璐艳等^[4]利用植被指数-纹理特征序列提取了阳澄湖 1984—2017 年的养殖围网;王琪等^[5]基于 Landsat 影像构建水生植被分类决策树,研究了太湖近 30 年的水生植被演替;朱金峰等^[6]采用人机交互解译的方式获取了白洋淀 40 年间的滩地、耕地、植被等地理要素的变化;Han 等^[7]基于 1973—2013 年的 Landsat 数据,分析了鄱阳湖冬季湿地 40 年间的变化。对于高宝邵伯湖地理要素的研究,田翠翠等^[8]对高邮湖沉水植被进行人工采样调查发现,全湖水生植被种类较少,菹草是绝对优势种。该研究采用实地采样的方式调查高宝邵伯湖的水生植被,费时费力,且无法获取历史水生植被的时空演变信息。管玉莹等^[9]通过对高宝邵伯湖的 8 景 Landsat 影像进行分析,发现自 1988 年以来,高邮湖和邵伯湖的自然水域面积呈现明显的线性萎缩趋势,但该研究并没有分析湖泊内地理要素的关键变化时段和演变动态。

因此,本文基于 1977—2020 年共 37 景 Landsat 遥感影像,综合利用人机交互目视解译法和决策树分类法提取高宝邵伯湖的养殖区、水生植被、滩地、围垦等关键地理要素,从要素的长时序时空动态演变分析了高宝邵伯湖地理要素的变化过程,为南水北调东线工程高邮湖段的输水安全以及高宝邵伯湖水生态、水环境的修复和治理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

高宝邵伯湖(图 1)由北向南呈串珠状,位于江淮之间、京杭大运河西侧,北接淮河,南接长江,介于 32°27'N ~ 33°14'N, 119°01'E ~ 119°30'E,辖江苏、安徽两省,南北长 91 km,东西宽 30 km,湖底高程 4 m 左右,平均水深 1.0 ~ 1.5 m,属于平原型浅水湖泊^[10]。湖泊群以堤坝为研究区域界线,总面积约 973 km²。宝应湖位于整个湖泊群的最北端,形状狭长,为河道型湖泊,区域面积 30 km²,大汕子隔堤为宝应湖与高邮湖的分界线;高邮湖位于湖泊群的中间,面积约 775 km²,是中国第六大湖泊,淮河的入江水道,河湖一体,具有泄洪作用;邵伯湖位于高邮湖下游,汛期与高邮湖连成一片,面积约 168 km²,高邮湖控制线为邵伯湖与高邮湖的分界标志。

1.2 数据源

采用 Landsat 系列多光谱卫星影像作为遥感数据源,综合考虑地理要素实地特点和影像特征,进行影像的时相选择:①根据文献以及实地考察,菹草是高宝邵伯湖唯一的水生植被优势种群^[8]。菹草在 4—5 月生物量达到最大值,随即很快衰亡^[11],因此,应尽量选择菹草生物量达最大值的 4、5 月影像解译水生植被。②高宝邵伯湖水位年内变化一般是 4 月最低,6 月开始起涨,8 月达最高值,至翌年 1 月进入枯水期^[10]。高宝邵伯湖养殖区影像特征在枯水期表现明显,因此尽量选择 4、5、10、11、12 月的影像开展养殖区的解译,若存在 1 年有多景影像的情况,则以影像质量最佳的一景作为基准,其余时段影像作为参考。③滩地和耕地的影像常年呈现典型的植被光谱特征,因此选取植被光谱特征较为显著的 4、5 月影像进行滩地和耕地的解译,其余时段影像作为参考。基于以上考虑,共获取 1977—2020 年的 37 景 Landsat 遥感影像(表 1),数据来源于美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov>)。获取影像后在 ENVI 中对影像进行波段合成、FLAASH 大气校正、研究区裁剪等预处理。

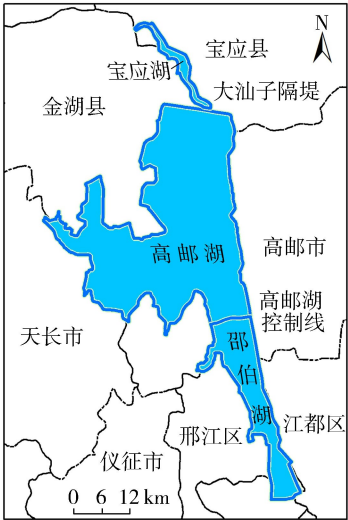


图 1 高宝邵伯湖地理位置及研究区
Fig.1 Location of Gaobaoshabobo Lake and study area

表 1 遥感影像
Table 1 Satellite remote sensing images

传感器	获取时间
Landsat2 MSS	1977-04-21、1980-04-14
Landsat3 MSS	1982-04-22
Landsat5 TM	1984-05-07、1988-05-02、1988-12-12、1990-05-08、1990-10-31、1992-04-27、1992-11-21、1993-10-07、1994-10-26、1995-05-22、1996-12-18、1997-04-25、1999-05-01、1999-12-27、2000-10-10、2001-04-04、2001-10-30、2003-12-22、2004-12-28、2005-11-25、2006-04-02、2009-04-10、2009-10-03、2010-04-13、2010-12-25
Landsat8 OLI	2014-04-24、2014-11-18、2016-04-29、2016-12-09、2017-11-26、2019-04-06、2019-12-02、2020-04-24、2020-10-01

1.3 地理要素遥感解译

1.3.1 养殖区遥感解译

高宝邵伯湖的养殖区有两种类型:圈圩养殖和围网养殖。圈圩养殖是指在低洼地筑堤围起封闭圈,在封闭圈内进行水产养殖;围网养殖是指利用网衣等材料制成围网,铺设在湖泊、水库等水域中进行水产养殖^[12]。如图 2、图 3 所示(图中示例影像均为 Landsat8 OLI 影像近红外、红、绿波段假彩色合成;光谱曲线为样区内地理要素平均光谱),高宝邵伯湖的养殖区没有统一的光谱特征,同一类型的养殖区在不同的样区呈现的光谱曲线差异较大,且部分养殖区与水体的光谱特征一致,很难利用统一的指数进行养殖区的提取。然而,圈圩养殖区和围网养殖区在遥感影像上均呈现显著的纹理特征,形状规整,空间上集中成片分布,影像特征明显,通过目视解译进行围网养殖区的解译既简单易行又能保证较高的解译精度,因此,采用目视解译法进行高宝邵伯湖养殖区地理要素的提取。

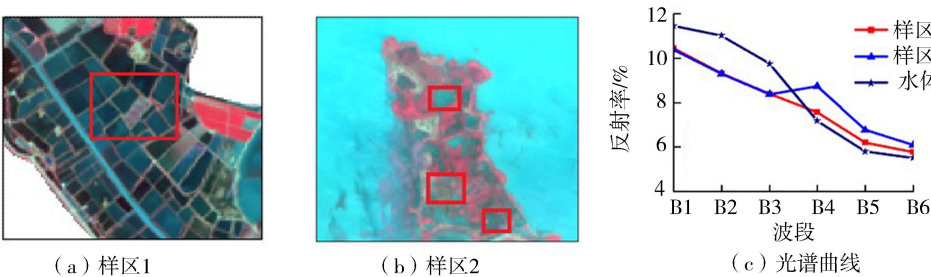


图 2 圈圩养殖区样区示例及光谱曲线

Fig.2 Sample and mean spectral curves of enclosure polder aquaculture ponds

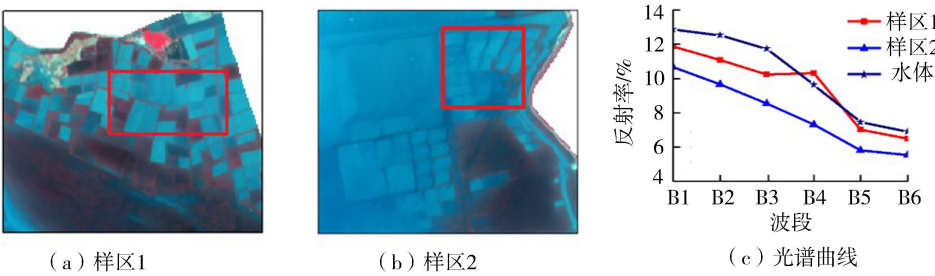


图 3 围网养殖区样区示例及光谱曲线

Fig.3 Sample and mean spectral curves of pen aquaculture ponds

1.3.2 水生植被遥感解译

湖内水生植被提取方法较为成熟,目前主流的为基于植被指数的决策树分类法^[13-15]。在分类特征构建和选择方面,浮叶植被具有典型的植被光谱特征,利用归一化植被指数 NDVI 即可准确提取;而沉水植被的反射率较低,植被光谱特征明显,易与水体混分(图 4,图中示例影像均为 Landsat8 OLI 影像近红外、红、绿波段假彩色合成,光谱曲线为样区内地理要素平均光谱)。但 Luo 等^[13-14]研究发现,缨帽变换后的土壤亮度指数和绿度指数的差值对沉水植被具有较好的识别能力,并基于缨帽变换后的主成分构建沉水植被敏感指数(SVSI)进行湖泊沉水植被的遥感识别。因此,基于归一化植被指数和沉水植被敏感指数建立分类决策树,对高宝邵伯湖的浮叶植被和沉水植被进行提取。分类决策树见图 5,图中 a、b 为阈值。

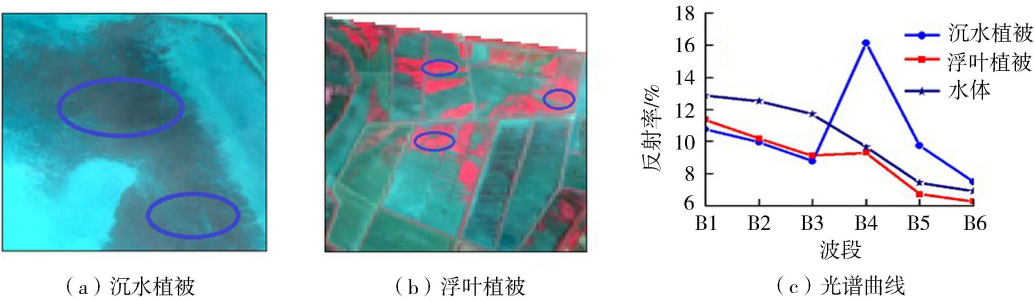


图 4 水生植被示例及光谱曲线

Fig. 4 Samples and mean spectral curves of aquatic vegetation

1.3.3 滩地、耕地遥感解译

滩地和耕地在遥感影像上常年呈现典型植被光谱特征,且两者光谱信息相似(图 6、图 7,图中示例影像均为 Landsat8 OLI 影像近红外、红、绿波段假彩色合成,光谱曲线为样区内地理要素平均光谱),但形状纹理信息有所差异,滩地的形状不规则,耕地的形状规则,多为方块状,根据问询和调研,滩地和耕地都分布在湖泊边缘。为提高解译精度,结合遥感影像特征与野外实地考察信息,采用人机交互目视解译法提取滩地和耕地。

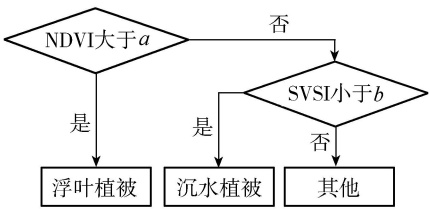


图 5 分类决策树

Fig. 5 Decision tree of classification

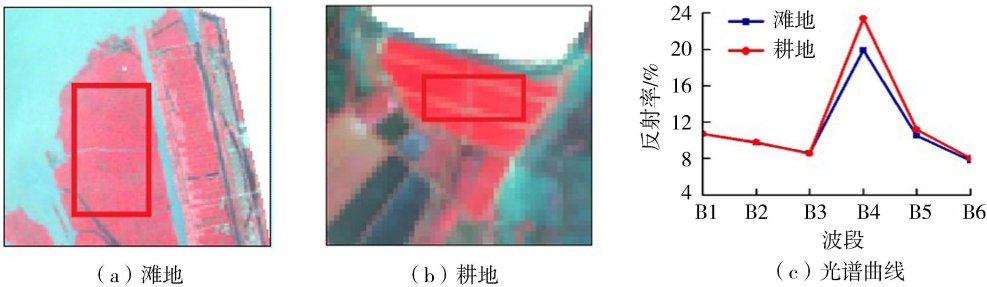


图 6 春夏季节滩地、耕地示例及光谱曲线

Fig. 6 Samples and mean spectral curves of marsh and cultivated land in spring and summer

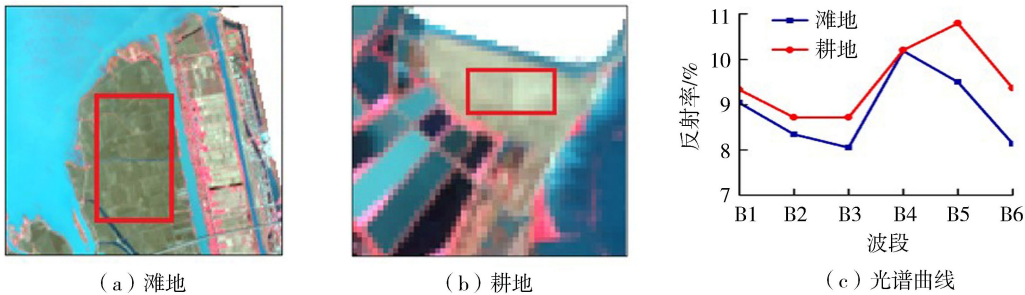


图 7 秋冬季节滩地、耕地示例及光谱曲线

Fig. 7 Samples and mean spectral curves of marsh and cultivated land in autumn and winter

2 结果与分析

2.1 关键地理要素遥感分类验证

由于仅有 2020 年的野外实测数据,所以 2020 年之前的地理要素解译结果主要结合相关记载资料以及 Google Earth 高分影像数据进行精度验证。根据 2020 年的实测样点数据,通过混淆矩阵,对 2020 年的地理要素解译结果进行验证(表 2)。结果显示,各地理要素的用户精度均达到 80% 以上,总体精度达到 85.96%,Kappa 系数为 0.82。

表 2 关键地理要素的分类精度

Table 2 Accuracy of classification results for key geographic elements

地理要素	养殖区	沉水植被	浮叶植被	滩地	耕地	生产者精度/%	用户精度/%
养殖区	78	5	0	7	0	90.70	86.67
沉水植被	3	56	6	0	0	86.15	86.15
浮叶植被	0	4	62	5	0	79.49	87.32
滩地	5	0	2	45	0	75.00	86.54
耕地	0	0	8	3	53	100.00	82.81

2.2 高宝邵伯湖养殖区时空演变分析

1977—2020 年高宝邵伯湖水产养殖区面积呈现先增后减的趋势(图 8),可分为 4 个阶段:无水产养殖区时期、水产养殖区面积持续增加时期、水产养殖区面积保持稳定期、水产养殖区面积持续减少时期(图 9),其结果与分析如下。

a. 无水产养殖区时期(1988 年之前)。宝应湖在 1988 年率先开始围网养殖,面积仅有 1.94 km²。20 世纪 80 年代,为了解决老百姓吃鱼难的问题,国务院发出《关于放宽政策、加速发展水产业的指示》,确立了“以养殖为主”的渔业发展方针^[16],高宝邵伯湖的养殖渔业开始发展。

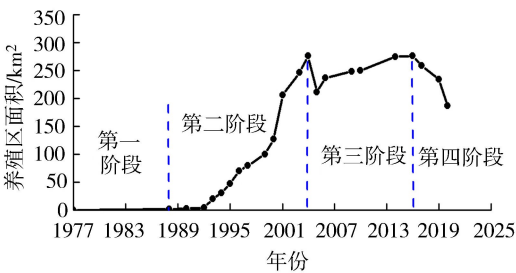


图 8 高宝邵伯湖养殖区面积动态变化

Fig.8 Dynamics of aquaculture area in Gaobaoshaobo Lake

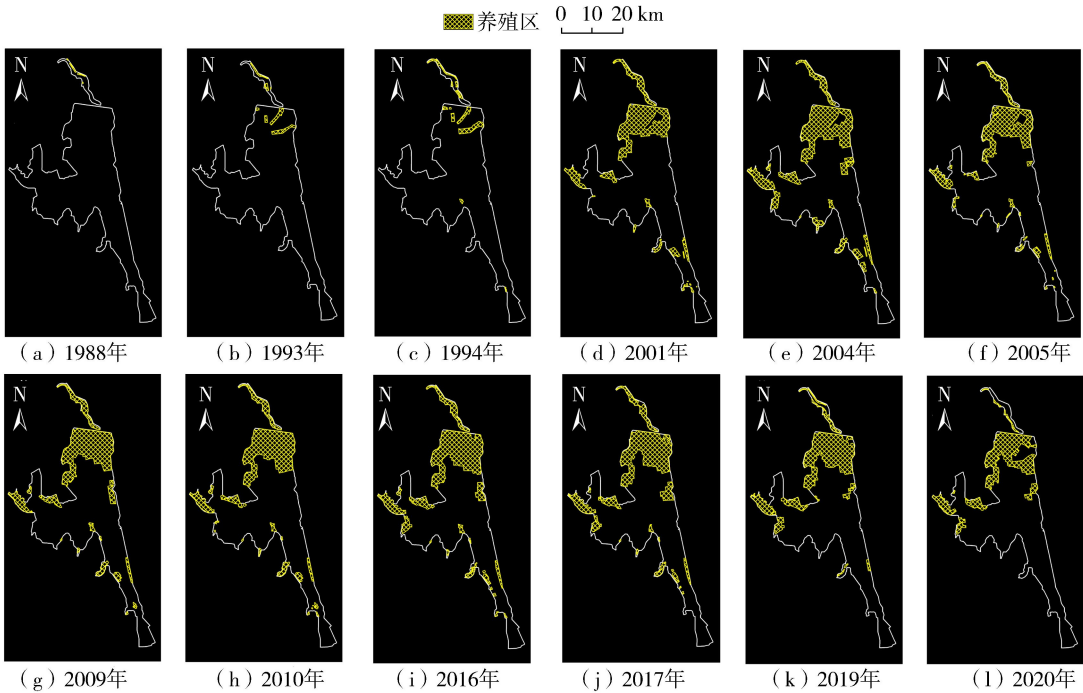


图 9 不同年份高宝邵伯湖养殖区空间分布遥感监测结果

Fig.9 Remote sensing monitoring of spatial aquaculture distribution in different years in Gaobaoshaobo Lake

b. 水产养殖区面积持续增加时期(1988—2004 年)。养殖区在 1993 年之前全部分布在宝应湖,1993 年高邮湖开始出现养殖区,1994 年邵伯湖南部开始有养殖区分布。养殖区面积在 1999 年达到 100 km²,2000 年之后,宝应湖除了航道外几乎所有的水面都被围网,养殖区面积在 2004 年达到顶峰,此时,高邮湖有近 30% 的水面被围网和圈圩养殖,邵伯湖近岸水域养殖区分布愈发集中。该时期国家鼓励发展水产养殖业,在 1993 年时,高宝邵伯湖养殖产值占渔业总产值的 54%,养殖渔业产值首次超过捕捞渔业产值^[17],不少渔民靠养殖致富,20 世纪 90 年代,宝应中港乡渔场及金湖渔业村成为当地的小康村^[18]。养殖的高收益驱使养殖规模越来越大,在水文条件不适合养殖的高邮湖南部和邵伯湖北部也有很多养殖区分布。

c. 水产养殖区面积保持稳定时期(2004—2016 年)。该时期,水产养殖区分布集中,面积长期稳定在 260 km²左右。2007 年,政府推动贯彻《中国水生生物资源养护行动纲要》,修复水资源,积极调减养殖面积,

实施退养还捕政策。但由于养殖效益高,2009 年之后养殖区甚至进一步扩张,湖区的水产养殖产值在 2012 年达到 13 662 万元^[17]。从遥感监测结果来看,养殖区面积在这段时期居高不下,2016 年养殖区面积与 2004 年相差无几,可见退养还捕政策执行并不成功。

d. 水产养殖区面积持续减少时期(2016—2020 年)。2016 年养殖区面积为 276.03 km²,2020 年减少到 187.11 km²。2017 年开始启动《高邮湖退圩还湖专项规划》项目,高宝邵伯湖的养殖区从 2017 年开始不断被拆除,到 2020 年,邵伯湖的围网全部被拆,宝应湖只剩金湖县部分未拆,高邮湖南部和北部的圈圩养殖被退圩还湖,政策执行卓有成效。

2.3 高宝邵伯湖水生植被时空演变分析

图 10 为高宝邵伯湖水生植被面积动态变化,图 11 为关键年份的空间分布。由图 10、图 11 可见:

a. 沉水植被演变过程以 2010 年为界可分成两个阶段:
①2010 年之前,沉水植被面积基本保持稳定,在 100 km² 以内波动,且分布在湖泊的边缘部分;
②2010 年之后,沉水植被面积陡然增加,到 2014 年增加到 341 km²,之后维持在 330 km² 左右,分布遍及全湖。

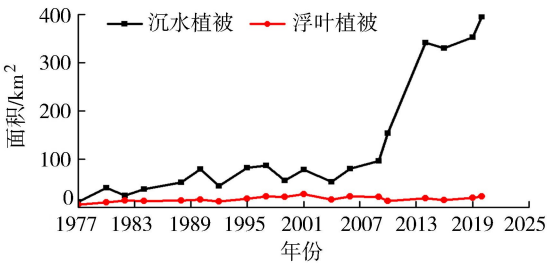


图 10 高宝邵伯湖水生植被面积动态变化
Fig. 10 Dynamics of aquatic vegetation area in Gaobaoshaobo Lake

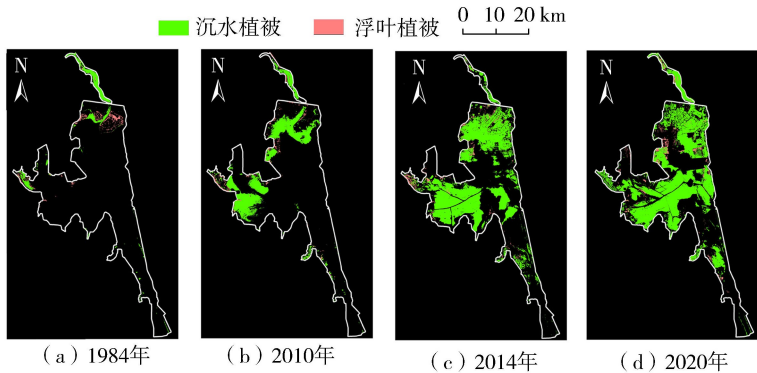


图 11 关键年份高宝邵伯湖水生植被空间分布遥感监测结果

Fig. 11 Remote sensing monitoring of spatial aquatic vegetation distribution in key years in Gaobaoshaobo Lake

b. 浮叶植被分布少,主要分布在养殖区边缘,面积变化波动较小,保持在 20 km² 左右。

2.4 高宝邵伯湖滩地和耕地时空演变分析

图 12 为高宝邵伯湖滩地、耕地的面积动态变化,图 13 为关键年份空间分布遥感监测。由图 12、图 13 可见:①高宝邵伯湖的滩地一直在逐渐减少,1977 年的滩地面积为 202.15 km²,到 2020 年只有 108.75 km²;②1982 年开始出现耕地,随后的几年内耕地面积不断增加,1988 年达 55.29 km²。但 20 世纪 90 年代耕地面

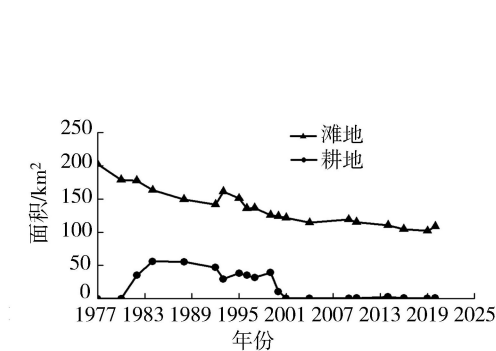


图 12 高宝邵伯湖滩地、耕地动态变化
Fig. 12 Dynamics of marsh and cultivated land area in Gaobaoshaobo Lake

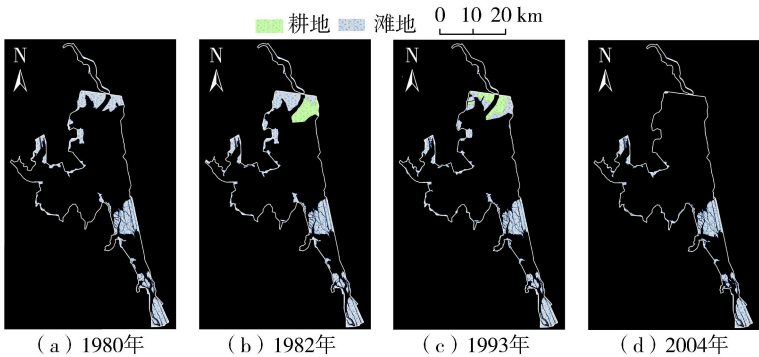


图 13 关键年份高宝邵伯湖滩地、耕地空间分布遥感监测结果
Fig. 13 Remote sensing monitoring of spatial marsh and cultivated land distribution in key years in Gaobaoshaobo Lake

积稍有减少,1999 年减少到 39.29km²。进入 21 世纪后,耕地面积急剧萎缩,在 2001 年时,仅剩 0.52 km²,之后一直在 0.5 km²左右;③滩地主要分布在湖泊北部、近岸以及高邮湖与邵伯湖连接区域,耕地集中分布在高邮湖的北部。

3 讨 论

3.1 高宝邵伯湖变化热点区地理要素时空演变分析

高邮湖北部是地理要素时空演变最为剧烈的区域,图 14 为高邮湖北部地理要素面积动态变化,图 15 为关键年份空间分布遥感监测情况。结果显示,高邮湖北部地理要素的时空演变可分为 3 个阶段:①1977—1982 年,高邮湖北部只有滩地,但滩地面积不断减少;②1982—1993 年,滩地面积仍不断减少,但耕地面积增加较多,滩地逐渐转变为耕地;③1993—2020 年,耕地和滩地面积均不断减少,且大多转为养殖区,到 2001 年,高邮湖北部的滩地和耕地几乎全部转变为养殖区,只有西北角还保留有一小部分耕地。

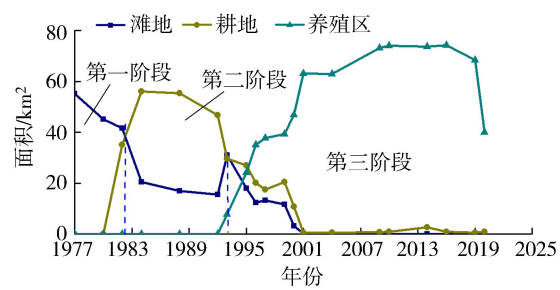


图 14 高邮湖北部地理要素面积动态变化
Fig. 14 Dynamics of geographic element area in the north of Gaoyou Lake

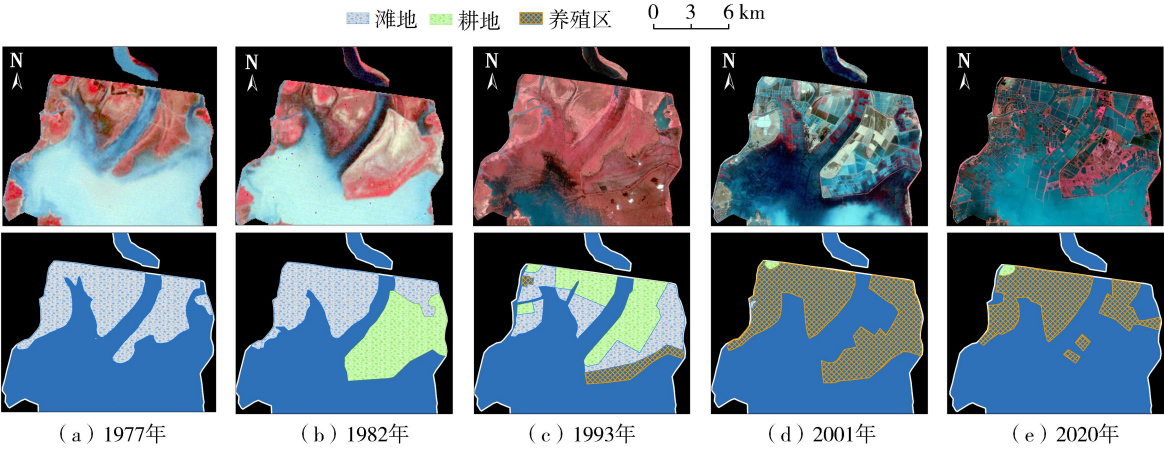


图 15 关键年份高邮湖北部地理要素空间分布遥感监测结果

Fig. 15 Remote sensing monitoring of spatial geographic element distribution in key years in the north of Gaoyou Lake

高邮湖北部在 20 世纪 80 年代前多芦苇滩,之后政策鼓励在滩地上进行开荒造田,增加粮食产量,滩地逐渐被开发为农业用地。到 20 世纪 80 年代后期,高邮湖地区响应国家“以养殖为主”的渔业发展方针,积极发展水产养殖业^[16],农业用地逐渐转为养殖区。高邮湖北部风浪小,适宜水产养殖,受经济利益的驱动,高邮湖北部几乎全部被开发为养殖区,导致湖底淤泥增加,水质恶化^[17-20]。到 2017 年开始进行渔业调控,退养、退圩,恢复生态,高邮湖北部的圈圩养殖区迅速减少。

3.2 沉水植被变化响应

高宝邵伯湖的沉水植被主要是菹草,菹草在 2010 年之后暴发生长,通过问询当地渔民,高邮湖在 2010 年之前泄洪频繁,湖泊水动力作用强,对植被种群的生长产生了不利影响。2010 年之后泄洪较少,菹草有较稳定的生长环境,故分布及面积快速扩张^[21-22]。

3.3 生态管理建议

- a. 推行退圩还湖政策。由于无序的水产养殖扩张,导致湖泊湖底淤泥增加,湖水交换能力较差,高邮湖北部成为“死水”,排涝通道内存在行水障碍,调蓄能力减弱。必须坚定推行退圩还湖政策,实现科学的养殖区规划,恢复自由水面,防止出现用水危机以及洪涝灾害。
- b. 优化水生植被结构。菹草为高宝邵伯湖的水生植被优势种群,每到菹草生长季节,多会阻塞航道,影响水生动物活动;且菹草在 6—7 月集中衰之腐烂,如不及时打捞清理,会引起湖泊污染,富营养化加剧。因此,相关部门应及时打捞菹草,为苦草、轮叶黑藻等对环境要求较高的水草创造生长环境,优化调节水生植被

结构,避免湖泊富营养化加剧,引发藻华。

c. 恢复滩地生态。江苏省环境保护厅 2009 年批复的《江苏省重要生态功能保护区区域规划》提出要保持高宝邵伯湖内的滩地湿地,但由于资源过度开发,湖内滩地遭到严重破坏,高邮湖北部的芦苇滩地消失殆尽,生物多样性呈逐年下降之势,从而影响整个生态系统功能。通过退养、恢复芦苇等措施,修复沿岸带浅滩生态环境、恢复湿地生态屏障功能刻不容缓。

4 结 论

a. 高宝邵伯湖养殖区面积整体呈现先增后减的趋势,主要受政策调控的影响。根据面积变化特征,具体可以分为 4 个阶段:①1977—1988 年,无水产养殖区阶段;②1988—2004 年,水产养殖区面积持续增加阶段;③2004—2016 年,水养殖区面积基本保持稳定阶段;④2016—2020 年,水产养殖区面积持续减少阶段。

b. 菹草是高宝邵伯湖水生植被的优势种,2010 年之前较少且分布在湖泊边缘,2010 年之后菹草暴发式生长,分布遍及全湖。

c. 高宝邵伯湖的耕地基本分布在高邮湖北部,面积先增后减,滩地分布在近岸区域、高邮湖北部及高邮湖与邵伯湖连接处,总面积一直在减少,但湖泊周边近岸部分的滩地变化不明显。

d. 湖泊地理要素变化热点区位于高邮湖北部,此处滩地、耕地、养殖区之间的转化十分显著,20 世纪 80 年代,滩地逐渐转变为耕地,80 年代后期到 90 年代,由于水产养殖业的迅速扩张,耕地和滩地逐渐转化为养殖区。

参考文献:

[1] 宋春桥,詹鹏飞,马荣华. 湖泊水情遥感研究进展[J]. 湖泊科学,2020,32(5): 1406-1420. (SONG Chunqiao,ZHAN Pengfei,MA Ronghua. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(5): 1406-1420. (in Chinese))

[2] 朱天顺,刘梅,申恒伦,等. 南水北调东线湖群水体营养状态评价及其限制因子研究[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(12):2992-3002. (ZHU Tianshun,LIU Mei,SHEN HengLun,et al. Eutrophication assessment and limited factors of impounded lakes in the East Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(12):2992-3002. (in Chinese))

[3] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社,2002.

[4] 计璐艳,尹丹艳,宫鹏. Landsat 长时间序列的阳澄湖湖面围网时空变化[J]. 遥感学报,2019,23(4):717-729. (JI Luyan,YIN Danyan,GONG Peng. Temporal - spatial study on enclosure culture area in Yangcheng Lake with long- term Landsat time series[J]. Journal of Remote Sensing,2019,23(4):717-729. (in Chinese))

[5] 王琪,周兴东,罗菊花,等. 近 30 年太湖沉水植物优势种遥感监测及变化分析[J]. 水资源保护,2016,32(5):123-135. (WANG Qi,ZHOU Xingdong,LUO Juhua,et al. Remote sensing monitoring and analysis of dominant species of submerged vegetation in Taihu Lake of over last 30 years[J]. Water Resources Protection,2016,32(5):123-135. (in Chinese))

[6] 朱金峰,周艺,王世新,等. 1975—2018 年白洋淀湿地变化分析[J]. 遥感学报. 2019,23(5):971-986. (ZHU Jinfeng,ZHOU Yi,WANG Shixin,et al. Analysis of changes of Baiyangdian wetland from 1975 to 2018 based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing,23(5):971-986. (in Chinese))

[7] HAN X,CHEN X,FENG L. Four decades of winter wetland changes in Poyang Lake based on Landsat observations between 1973 and 2013[J]. Remote Sensing of Environment,2015,156:426-437.

[8] 田翠翠,郭传波,吴幸强. 高邮湖沉水植物分布格局及其与水环境因子的关系[J]. 水生生物学报,2019,43(2):423-430. (TIAN Cuicui, GUO Chuanbo, WU Xingqiang. The distribution pattern of water-sinking plants in Gaoyou Lake and its relationship with water environment factors[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2019,43(2):423-430. (in Chinese))

[9] 管玉莹,虞功亮,韩睿明,等. 近 30 年来高邮湖(含邵伯湖)自然水域面积变化及其影响因素[J]. 环境科学研究,2019,32(12):2057-2064. (GUAN Yuying, YU Gongliang, HAN Ruiming, et al. Changes in water area of Gaoyou Lake(including Shaobo Lake) and the influencing factors in the past 30 years[J]. Research of Environmental Sciences,2019,32(12):2057-2064. (in Chinese))

[10] 张宇. 高宝邵伯湖湿地堤岸区域植物多样性及资源研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.

[11] 陈洪达. 菹草的生活史、生物量和断枝的无性繁殖[J]. 水生生物学集刊,1985,9(1):32-39. (CHEN Hongda. Life

history, biomass and cut-branch propagation of *Potamogeton crispus* L. [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1985, 9(1): 32-39. (in Chinese))

[12] 王学武, 孙羊林, 胡恒元, 等. 高邮湖湿地保护与利用[J]. *湿地科学与管理*, 2010, 6(3): 38-41. (WANG Xuewu, SUN Yanglin, HU Hengyuan, et al. Conservation and utilization of Gaoyou Lake wetland[J]. *Wetland Science & Management*, 2010, 6(3): 38-41. (in Chinese))

[13] LUO Juhua, DUAN Hongtao, MA Ronghua, et al. Mapping species of submerged aquatic vegetation with multi-seasonal satellite images and considering life history information[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 57: 154-165.

[14] LUO Juhua, MA Ronghua, DUAN Hongtao, et al. A new method for modifying thresholds in the classification of tree models for mapping aquatic vegetation in Taihu Lake with satellite images[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7442-7462.

[15] MA Ronghua, DUAN Hongtao, GU Xiaohong, et al. Detecting aquatic vegetation changes in Taihu Lake, China using multi-temporal satellite imagery[J]. *Sensors*, 2008, 8(6): 3988-4005.

[16] HOU Xuejiao, FENG Lian, TANG Jing, et al. Anthropogenic transformation of Yangtze Plain freshwater lakes: patterns, drivers and impacts[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 248: 111998.

[17] 段斌. 高邮湖渔业资源开发利用与保护研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.

[18] 季建国, 钟开伟, 陈彪, 等. 高邮湖水产养殖对水环境影响分析及对策思考[J]. *江苏水利*, 2009(11): 34-35. (JI Jianguo, ZHONG Kaiwei, CHEN Biao, et al. Analysis of water environmental impact and countermeasure thinking of aquaculture in Gaoyou Lake[J]. *Jiangsu Water Conservancy*, 2009(11): 34-35. (in Chinese))

[19] 姜磊娜, 吴俊锋, 任晓鸣. 高邮湖近年水质及富营养化分析[J]. *污染防治技术*, 2017, 30(2): 23-25. (JIANG Leina, WU Junfeng, REN Xiaoming. Analysis on water quality and eutrophication in recent years of Gaoyou Lake[J]. *Pollution Control Technology*, 2017, 30(2): 23-25. (in Chinese))

[20] 张磊, 方丹丹, 罗来高. 湖泊围网养殖污染现状及可持续发展对策[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2017, 27(2): 52-55. (ZHANG Lei, FANG Dandan, LUO Laigao. Present situation and sustainable development countermeasures of lake aquatic purse-net breeding pollution[J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2017, 27(2): 52-55. (in Chinese))

[21] 刘俊明. 高宝邵伯湖养殖业现状及管理对策[J]. *科学养鱼*, 2000(4): 9. (LIU Junming. The current situation and management countermeasures of the aquaculture industry in Gaobaoshabo Lake[J]. *Scientific Fish Farming*, 2000(4): 9. (in Chinese))

[22] 朱金格, 胡维平, 刘鑫, 等. 湖泊水动力对水生植物分布的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 454-459. (ZHU Jing, HU Weiping, LIU Xin, et al. A review of the studies on the response of aquatic vegetation to hydrodynamic stress in lakes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 454-459. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-02-15 编辑: 胡新宇)

(上接第 6 页)

[15] SAPLIOGLU K, KILIT M, YAVUZ B K. Trend analysis of streams in the western Mediterranean Basin of Turkey[J]. *Fresenius Environ Bull*, 2014, 23(1): 1-12.

[16] SEN Z. Innovative trend significance test and application[J]. *Theory and Application of Climatology*, 2017, 127: 939-947.

[17] FEISENSTEIN J. Confidence limits on phylogenies: an approach using the Bootstrap[J]. *Evolution*, 1985, 39(4): 783-791.

[18] 莫惠栋. 重抽样技术: 自举法[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2001, 4(1): 1-6. (MO Huidong. A resampling procedure-bootstrap[J]. *Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition)*, 2001, 4(1): 1-6. (in Chinese))

[19] MAILHOT A, KINGUMBI A, TALBOT G, et al. Future changes in intensity and seasonal pattern of occurrence of daily and multi-day annual maximum precipitation over Canada[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 300(3-4): 173-185.

[20] 解阳阳. 基于径流预报的黑河流域水资源调配研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.

[21] 连运涛. 黑河流域水沙输移特性的影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.

[22] ZHANG Wei, LYU Changhe. Assessing changes in rainstorms in Beijing during the last 50 years[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(5): 372-377.

[23] 孙瑞, 吴志祥, 陈帮乾, 等. 近 55 年海南岛气候要素时空分布与变化趋势[J]. *气象研究与应用*, 2016, 37(2): 1-7. (SUN Rui, WU Zhixiang, CHEN Bangqian, et al. Spatio-temporal patterns of climatic changes in Hainan Island in recent 55 years[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2016, 37(2): 1-7. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-11-25 编辑: 胡新宇)