

基于卫星遥感的40年洪湖水面变化及驱动力分析

梁益同^{1,3} 夏智宏^{2,3} 文雄飞⁴ 柳晶辉^{1,3} 张丽文^{1,3} 邓艳君^{2,3}

(1 武汉区域气候中心, 武汉 430074; 2 荆州市气象局, 荆州 434020;

3 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025; 4 长江科学院空间信息技术应用研究所, 武汉 430010)

摘要: 为了定量分析气候变化、人类活动对洪湖的影响, 利用20世纪70年代以来的多期Landsat/MSS、TM、ETM+及HJ-CCD卫星数据, 提取洪湖主体湖面的水体面积。采用相关分析方法分析洪湖水体面积与降水、降水日数、蒸发等因子的相关性。结果表明, 不同年份的洪湖水体面积有较大差异, 40年来洪湖水体面积有下降趋势, 特别是20世纪10年代中后期面积一直处于低值; 洪湖水体面积受降水影响非常明显, 降水日数的减少不利于洪湖蓄水; 人类活动的增加导致洪湖水体面积减少; 气候和人类活动对洪湖水体面积影响系数分别为0.78和0.50, 表明气候变化对洪湖水体面积影响大于人类活动, 但需要值得注意的是, 近年来人类活动呈逐年快速上升趋势, 对洪湖水面影响也逐渐加大; 20世纪10年代中后期洪湖水体面积低值的主因是降水连续偏少和人类活动加剧。

关键词: 洪湖, 水体面积, 卫星遥感, 气候变化, 人类活动

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.014

Driving Forces of Changes to Water Surface Area for Honghu Lake over 40 Years Based on Satellite Remote Sensing Data

Liang Yitong^{1,3}, Xia Zhihong^{2,3}, Wen Xiongfei⁴, Liu Jinghui^{1,3}, Zhang Liwen^{1,3}, Deng Yanjun^{2,3}

(1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074 2 Jingzhou Meteorological Bureau, Jingzhou 434020

3 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025 4 Spatial Information Technology Application Research Institute, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

Abstract: To quantitatively analyse the influence of climate change and human activities on Honghu Lake, the water surface area of Honghu Lake was extracted using multi-temporal remote sensing imagery including Landsat MSS, TM, ETM+ and HJ-1 CCD from the 1970's onward. Regression analysis was used to obtain relationships between lake area and precipitation, precipitation days, and evaporation. The results show that there was a relatively large difference in lake area between different years and the area decreased over 40 years, especially in the middle and late 2000's. The area was influenced by precipitation, and the decreasing number of precipitation days had negative implications for Honghu Lake water levels. Increasing human activity contributed to a reduction of lake area. The regression coefficients of climate and human activities to lake area were 0.78 and 0.50, respectively, which suggests the impact of climate change on the lake area is greater than the impact of human activities. However, the impact of human activities on lake area has gradually increased in recent years. Less precipitation and the expanding influence of human activities are the main causes of the reduced area of Honghu Lake in the middle and late 2000's.

Keywords: Honghu Lake, water surface area, satellite remote sensing, climate change, human activity

0 引言

湖泊是陆地表层系统各要素相互作用的节点,

收稿日期: 2018年6月4日; 修回日期: 2018年8月6日
第一作者: 梁益同(1966—), Email: yitong2007@hotmail.com
资助信息: 2018年中国气象局气候变化专项(CCSF201821);
2018年湖北省气象局科技发展基金重点项目
(2018Z07)

是地球上重要的淡水资源库、洪水调蓄库和物种基因库, 在维护流域生态平衡、满足生产生活用水、减轻洪涝灾害和提供丰富水产品等方面发挥着不可替代的作用。中国湖泊数量多、类型全、分布广、变化复杂, 据《中国湖泊志》记载, 全国共有面积大于1.0 km²的湖泊2759个, 总面积91019.6 km²^[1], 广泛分布于东部平原、青藏高原、云贵高原、蒙新高原、

东北平原与山地等五大湖区。近几十年来，随着区域气候环境变化和人类活动干扰加剧，湖泊数量、形态和分布发生了巨大变化，严重影响流域经济社会可持续发展和居民生活安定，受到各级政府和社会各界的广泛关注。

尽管在不同时期和不同区域湖泊面积变化的原因各不相同，但一般认为是人类活动和气候变化共同作用的结果，但人类活动和气候变化哪个是主因，各有多大影响力至今仍存在较大争议^[2]。王树基^[3]认为，1949年以来我国西北干旱地区湖泊面积减少是人类活动所为；杨桂山等^[4]指出，由于人类围垦活动，长江中下游湖泊数量及面积均大幅减少；方金琪^[5]研究表明，气候的波动变化对湖泊的变化会产生重要影响，如青藏高原地区、山东半岛和云南东部地区等；许诗等^[6]认为，吉林省湖泊面积萎缩受气候干旱化、人口增加带来的压力、水利工程修建等因素影响。

20世纪中期以来长江流域中下游出现湖泊水域变迁与水面萎缩现象^[7-9]，洪湖也不例外，近年来遭遇一系列水面萎缩、水体干涸、水质恶化、湿地退化、旱涝急转等一系列水文与生态问题^[9-11]。有关洪湖水文、生态环境的研究不少，如王学雷等^[12]研究了洪湖湿地恢复中生态水位控制；胡学玉等^[13]分析洪湖水体环境质量演变；朱明勇等^[14]对洪湖水环境承载力进行了初步研究；杨凯等^[15]利用遥感技术进行洪湖水生植物分布状况调查；陈世俭等^[16]分析了洪湖的水资源与水位调控之间关系，但对导致洪湖环境变化的主要因子进行定量分析的研究并不多见。遥感作为一种新兴的对地观测技术，具有观测范围大、时效性强、成本低廉等其他技术手段无法比拟的优势，是进行湖泊动态监测的一种行之有效的技术手段^[17]。本文利用20世纪70年代以来不同时期的Landsat/MSS、TM、ETM+和HJ-CCD卫星影像数据，分析洪湖水体面积的变化，并利用气候数据、人类活动代表数据定量分析洪湖水面变化中各驱动力因子作用力的大小。

1 研究区域及研究数据

1.1 研究区域

洪湖是湖北省最大的淡水湖，也是全国第七大淡水湖，其地处湖北省南部长江与东荆河间的洼地中，是长江中游江汉平原上的一个大型浅水湖泊，湖盆极为平坦，湖底平均高程海拔23 m。洪湖湖区为“四湖”（长湖、三湖、白露湖、洪湖）流域下游，地跨洪湖、监利2个市（县），流域面积3314 km²。洪湖原为通江湖泊，水位随长江水位涨落，生物资源与长江基本相同。在20世纪50—60年代洪湖经历了3

次大的围垦，1955年修筑洪湖围堤，1958年建成新滩口节制闸，1970年修建新堤排水闸，阻断了洪湖与长江的天然联系，限制了长江水倒灌。现存湖体面积348.2 km²，东西长23.4 km，南北宽20.8 km，底部高程为22.5~22.8 m。

1.2 研究数据及处理

1.2.1 遥感影像数据

收集覆盖洪湖地区的多期Landsat/MSS、TM、ETM+及HJ-CDD卫星遥感影像数据（表1），用于提取洪湖水体面积，影像生成时间除了1999年的一景在12月外，其余都集中在9，10和11月里，基本上为洪湖平水期，能够较客观地反映当年洪湖水面变化。

表1 卫星遥感影像数据明细
Table 1 Remote sensing imagery data list

日期	卫星/传感器	分辨率/m	日期	卫星/传感器	分辨率/m
1973-11-02	Landsat/MSS	60	1999-12-24	Landsat/ETM+	30
1976-11-14	Landsat/MSS	60	2000-10-07	Landsat/ETM+	30
1978-10-16	Landsat/MSS	60	2001-09-24	Landsat/ETM+	30
1979-11-07	Landsat/MSS	60	2002-10-13	Landsat/ETM+	30
1980-11-02	Landsat/MSS	60	2003-10-16	Landsat/ETM+	30
1982-11-10	Landsat/MSS	60	2005-09-11	Landsat/ETM+	30
1984-09-17	Landsat/MSS	30	2006-10-16	Landsat/ETM+	30
1987-09-26	Landsat/TM	30	2008-10-24	HJ/CCD	30
1993-10-12	Landsat/TM	30	2009-10-01	HJ/CCD	30
1994-09-29	Landsat/TM	30	2010-09-17	Landsat/ETM+	30
1996-10-04	Landsat/TM	30	2011-10-07	HJ/CCD	30

对遥感数据首先进行辐射定标、几何精纠正等预处理。

不同影像数据提取水体信息方法不同。针对Landsat/MSS数据分辨率比较低的特点，而植被与水体在MSS数据第5波段难以区分，土壤和植被在第7波段难以区分，引入生物量指标变换^[18]

$$I_{\text{bio}} = \frac{I_{B7} - I_{B5}}{I_{B7} + I_{B5}} = \frac{H_1}{H_0}, \quad (1)$$

式中， I_{bio} 为生物量变化后的亮度值， I_{B7} 和 I_{B5} 分别为MSS-7和MSS-5图像的像元亮度值； H_1 和 H_0 为一阶哈达玛变换后的新影像分量^[18]

$$\begin{bmatrix} H_0 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B7} \\ I_{B5} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot \begin{bmatrix} \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \\ \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{B7} \\ I_{B5} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

I_{bio} 在光谱特征空间中的几何意义是类别集群沿辐射方向在 $H_1=1$ 的直线上的投影（图1）。由图1中典型土壤、水体和绿色植物在特征空间中分布的位置可见，利用 I_{bio} 能够有效地将水体从其他两种地物类型区分，利用生物量指标变换特征图像，配合MSS第4、6波段数据应用ISODATA聚类分析算法进行水体提取^[18]。

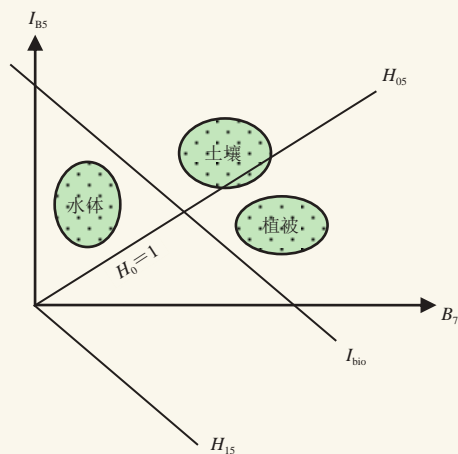


图1 生物量指标变换

Fig. 1 The biomass index transformations

对于空间分辨率达到 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的Landsat/TM、ETM+和HJ/CCD数据，通过PCA主成分变换，提取主成分变换后的第一主分量，结合可见光（TM/ETM+/CCD第3波段）和近红外（TM/ETM+/CCD第4波段）数据构建的归一化植被指数（NDVI）特征参数，以及徐涵秋^[19]提出的改进的归一化水体指数（MNDWI）特征参数，通过选择植被、水体、城镇等感兴趣地理区域（ROI）样本，采用最大似然法进行分类，并对分类结果进行小斑点剔除、孤岛过滤等分类后处理，得到洪湖水体分布信息，图2是部分时次的不同卫星影像水体信息空间分布图。

1.2.2 其他数据

收集洪湖市1:50000的数字地形图用于遥感影像

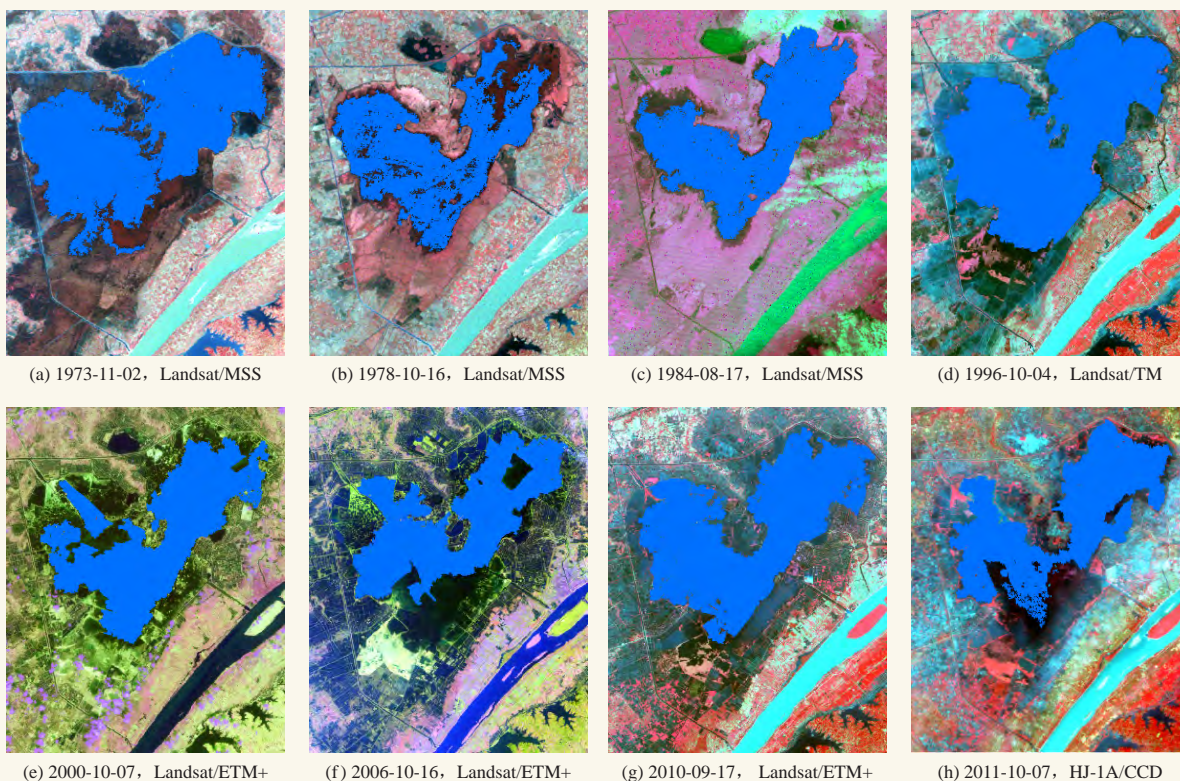


图2 部分不同时次的卫星洪湖水体信息（蓝色部分）空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of Honghu Lake's water surface observed by multi-temporal satellite (Where the blue parts are the water surface in Honghu Lake)

精纠正和辅助解译。

收集洪湖气象站1971年以来逐日降水和蒸发观测资料，整理计算出洪湖1—8月降水量、降水距平、降水日数（日降水量大于 0.1 mm 的天数）、降水日数距平和蒸发量，其中，对于降水距平和降水日数距平的计算，所用的数据为1971—2010年的平均值。

到湖北省统计局查阅《荆州五十年（1949—1999）》

及2000—2012年后《荆州统计年鉴》等文献，通过按价格换算等处理，得出1971年以来的洪湖市GDP数据（按1990年价格计算）。

2 结果分析

经过收集、换算或提取处理后获得的洪湖不同年份的水体面积、1—8月降水数据（降水量及其距平、降水日数及其距平）、蒸发和GDP数据。绘制水体面

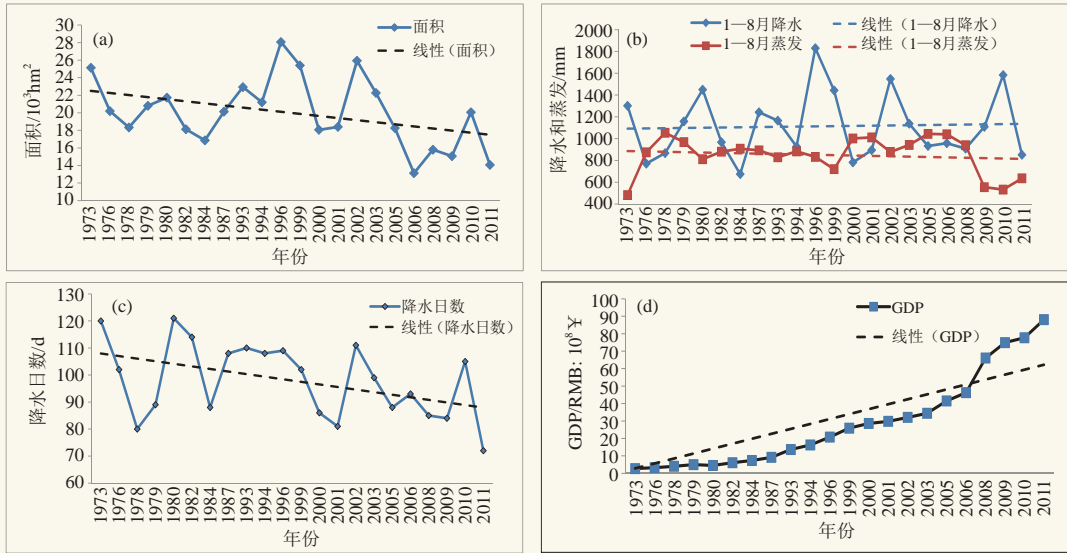


图3 洪湖水体面积 (a)、降水和蒸发 (b)、降水日数 (c) 和GDP (d) 年际变化
Fig. 3 The annual variation of Honghu Lake water surface area (a), precipitation and evaporation (b), precipitation days (c), and GDP (d)

积、降水量、降水日数、蒸发量和GDP随年份变化曲线 (图3)。

2.1 洪湖水体面积年际变化

由图3a可见, 不同年份的洪湖水体面积有较大差异, 面积最大是1996年的2.81万 hm^2 , 最小是2006年的1.31万 hm^2 , 两个年份相差1倍多; 趋势分析表明, 洪湖水体面积总体为下降趋势; 20世纪10年代中后期洪湖水体面积一直处于较低值。

2.2 洪湖水体面积变化驱动力分析

湖泊的面积变化由湖泊水量的收支决定, 而气候变化和人类活动均对湖泊水量的收支产生影响。气候方面, 降水是湖泊水量的主要来源, 蒸发则导致湖泊水量自然减少; 人类活动方面, 人口增加、经济发展、土地利用类型改变等需要消耗大量水资源, 同时又会削弱湖泊的调蓄功能。为了分析洪湖水体面积变化驱动力, 将洪湖水体面积与气候因子 (降水和蒸发)、人类活动因子 (为了研究方便, 以GDP为代表) 进行回归分析, 定量分析各因子影响力的大小。

2.2.1 气候因子对洪湖水体面积的影响分析

降水可以补充洪湖水量。绘制洪湖水体面积与降水的相关关系图 (图4a), 洪湖水体面积与降水有较高的相关性, 相关系数 (r) 达0.7382 ($P < 0.05$), 表明降水对洪湖水体面积的影响非常明显。分析发现洪湖降水年际变化 (图3b) 为略增加趋势, 而洪湖水体面积年际变化呈下降趋势, 特别是20世纪10年代中后期一直处于较低值。为了解释这个现象, 对1973—

2002年和2003—2011年两时段的水体面积和降水量做相关性分析 (图4b~4c) 发现, 1973—2002年洪湖水体面积和降水量的相关系数为0.8950, 而2003—2011年的 R 只有0.5857, 表明2002年之后除降水之外另有其他因素对洪湖水体面积产生较大影响。

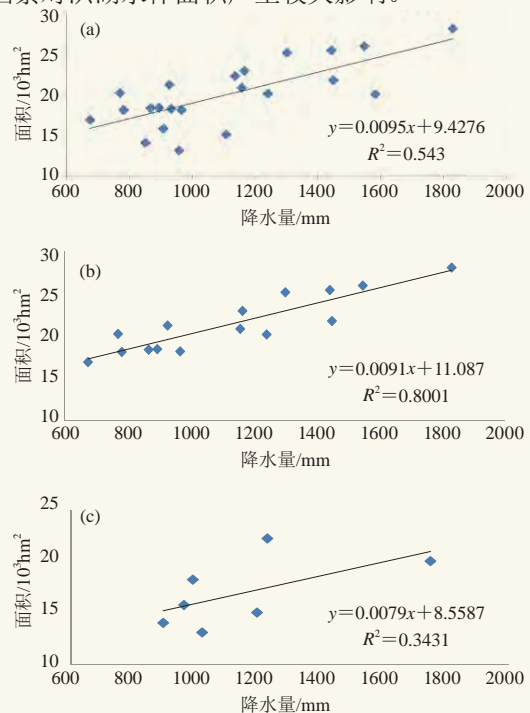


图4 不同时段1973—2011年 (a)、1973—2002年 (b) 和2003—2011年 (c) 的面积与降水相关关系
Fig. 4 The correlations between area and precipitation between the periods of 1973—2011 (a), 1973—2002 (b) and 2003—2011 (c)

除降水量的直接影响外, 降水的时间分布对洪湖水体面积的影响也不可忽视。分析发现, 洪湖降水年际变化为略增加趋势(图3b), 但降水日数呈减少趋势(图3c)。有研究表明^[20-21]降水日数减少会加剧降水时间分布不均的现象, 导致地区旱涝风险增大。洪湖本就存在来水过度集中而形成洪涝灾害或来水不足而形成干旱威胁的矛盾^[11], 降水日数的减少将加剧这种矛盾。比较典型的例子是1994和2010年。1994年降水量只有927.6 mm, 降水距平为-17.2%, 但降水日数却达108 d, 距平为10.7 d, 因而洪湖水体面积达到较高的2.12万 hm²; 2010年, 降水量高达1583.8 mm, 降水距平为41.3%, 但降水日数为105 d, 距平为7.7 d, 因而在降水较多的情况下洪湖水体面积只有2.01万 hm²。相关分析(图5)表明, 面积与降水日数相关系数为0.6914 ($P < 0.05$)。

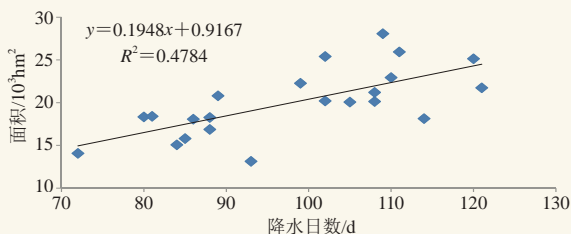


图5 面积与降水日数相关关系

Fig. 5 The correlation between lake area and precipitation days

水面蒸发使洪湖水量减少。洪湖蒸发年际变化为略减少趋势(图3b), 对洪湖水体面积与蒸发量做相关性分析(图6)发现, 二者相关系数为-0.2010 ($P < 0.05$), 表明蒸发对洪湖水体面积的影响不明显。

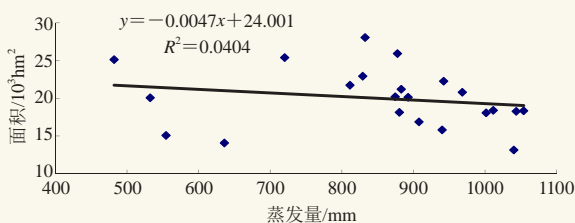


图6 面积与蒸发相关关系

Fig. 6 The correlation between lake area and evaporation

2.2.2 人类活动对洪湖水体面积的影响分析

人类活动对洪湖生态环境带来较大影响。肖飞等^[10]认为, 从20世纪50年代以来, 洪湖湿地类型的面积变化经历四个阶段: 第一阶段是20世纪50年代以来的大规模水利建设和大规模围垦活动, 湿地面积有很大程度缩减; 第二阶段是从20世纪70年代末开始, 围垦基本停止, 湿地总面积略有增加; 第三阶段是, 从20世纪80年代末期, 洪湖开始水面大开发, 围网养鱼

迅速发展, 使自然淡水湖泊面积稍有减小; 第四阶段是湿地格局相对稳定的阶段。随着湿地保护工作的加强, 洪湖湿地面积总体稳定。卢山等^[11]认为, 大面积的围湖造田, 以及养殖业、旅游业的兴起, 洪湖湖区经济得到很大发展, 但同时带来了生态环境恶化和洪湖面积减少等问题。

分析洪湖市GDP逐年变化(图3d)发现, 洪湖市GDP一直呈增长趋势, 特别从2000年起, GDP增速明显加快。这说明2000年后人类活动对洪湖水体面积的影响开始逐步凸显。这就不难解释洪湖水体面积在2000年后处于低值的原因, 除降水之外, 人类活动也是一个重要因素。

2.2.3 洪湖水面积变化各种影响因子影响力分析

为了分析各因子对洪湖水体面积变化的影响力, 将洪湖水体面积与各因子进行多元回归分析, 以确定各因子影响力大小。由于降水量和降水日数存在较好的相关关系, 所以降水因素方面只选择了降水量这个因子。分别将水体面积、降水量、蒸发量和GDP数据进行按标准差方法进行标准化处理

$$z'_i = (z_i - \bar{z}) / s, \quad (3)$$

式中, z'_i 为样本中第*i*个变量标准化后的值, z_i 为第*i*个变量实际值, \bar{z} 为变量的平均值, s 为标准差。

标准化后, 以降水量(x_1)、蒸发量(x_2)和GDP(x_3)为输入, 水体面积(y)为输出, 进行多元回归分析, 可得到回归模型

$$y = 0.715x_1 - 0.061x_2 - 0.500x_3. \quad (4)$$

根据式(4)计算得到的复相关系数为0.8805。将降水量、降水日数和蒸发量回归系数分别取绝对值后相加, 可得气候因子的影响系数为0.78, 而人类活动的影响系数为0.50, 表明40年来, 气候因子对洪湖水体面积影响大于人类活动, 但值得注意的是, 2000年以来人类活动影响呈快速上升趋势, 如果不加以控制, 未来对洪湖水面积影响也逐渐加大。

3 小结

利用20世纪70年代以来的多种卫星(Landsat/MSS、TM、ETM+及HJ-CCD)影像、气象观测和GDP资料, 定量分析40年来洪湖水体面积变化以及气候变化和人类活动对洪湖水体面积的影响。主要得出以下结论:

- 1) 不同年份的洪湖水体面积有较大差异, 面积最大是1996年的2.81万 hm², 最小是2006年的1.31万 hm²; 洪湖水体面积年际变化总体为下降趋势, 特别是20世纪10年代中后期面积一直处于低值。
- 2) 洪湖水体面积与降水有较高的相关性, r 达

0.7382, 表明洪湖水体面积受降水影响非常明显。

3) 40年来, 洪湖降水年际变化为略增加趋势, 洪湖降水日数为减少趋势。这种降水在时间分布上更加不均匀的特点加大了旱涝发生频率, 导致洪湖水体面积减少。

4) 分析显示, 气候和人类活动对洪湖水体面积影响系数分别为0.78和0.50, 表明气候对洪湖水体面积影响大于人类活动。但值得注意的是, 2000年以来人类活动影响呈快速上升趋势, 对洪湖水体面积影响也逐渐加大; 20世纪10年代中后期洪湖水体面积处于低值的主因是降水连续偏少和人类活动加剧。

在人类活动中, 影响洪湖面积的因素是极其复杂的, 由于资料收集的困难, 本文仅以GDP为代表, 另外, 在分析各因子对洪湖水体面积的影响时, 本文所用的模型为线性统计模型, 因此所得的结论需进一步探讨、验证。今后将在全面收集人类活动(人口增长、经济发展、土地利用改变)数据基础上, 尝试采用物理模型(如SWAT模型), 探讨各种因子对洪湖水面变化的影响。

参考文献

[1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
[2] 丁永建, 刘时银, 叶柏生, 等. 近50a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623-632.
[3] 王树基. 近四十年来人类活动对我国干旱区湖泊的影响. 干旱区地理, 1989, 12(1): 1-5.

[4] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.
[5] 方金琪. 气候波动在我国近期湖泊变化中的作用. 海洋湖沼通报, 1990, (3): 9-14.
[6] 许诗, 刘志明, 王宗明, 等. 1986—2008年吉林省湖泊变化及驱动力分析. 湖泊科学, 2010, 22(6): 901-909.
[7] 姜加虎, 黄群, 孙占东. 长江流域湖泊湿地生态环境状况分析. 生态环境, 2006, 15(2): 424-429.
[8] 黄心一, 陈家宽. 极端气候变化与长江中下游湿地—从2011年的“早涝急转”说起. 科学, 2012, 64(6): 35-37.
[9] 李迅, 袁东敏, 尹志聪, 等. 2011年长江中下游旱涝急转成因初步分析. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 41-50.
[10] 肖飞, 蔡述明. 洪湖湿地变化研究. 华中师范大学学报(自然科学版), 2003, 37(2): 266-268, 272.
[11] 卢山, 李世杰, 王学雷. 洪湖的环境变迁与生态保护. 湿地科学, 2004, 2(3): 234-237.
[12] 王学雷, 宁龙梅, 肖锐. 洪湖湿地恢复中的生态水位控制与江湖联系研究. 湿地科学, 2008, (2): 316-320.
[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. 湿地科学, 2006, 4(2): 116-119.
[14] 朱明勇, 宁龙梅, 王学雷. 洪湖水环境承载力初步研究. 水资源与水工程学报, 2007, 18(6): 4-6.
[15] 杨凯, 林开愚. 遥感技术在洪湖水生植物分布状况调查中的应用. 武汉测绘学院学报, 1983, 25(1): 1-13.
[16] 陈世俭, 王学雷, 卢山. 洪湖的水资源与水位调控. 华中师范大学学报(自然科学版), 2002, 36(1): 121-124.
[17] 于雪英, 江南. 基于RS、GIS技术的湖面变化信息提取与分析. 湖泊科学, 2003, 15(1): 81-84.
[18] 孙家炳. 遥感原理与应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
[19] 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. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
[20] 梅伟, 杨修群. 我国长江中下游地区降水变化趋势分析. 南京大学学报(自然科学版), 2005, 40(6): 577-589.
[21] 王怀清, 赵冠男, 彭静, 等. 近50年鄱阳湖五大流域降水变化特征研究. 长江流域资源与环境, 2009, 18(7): 615-619.

降雨对江汉平原农业面源污染的影响不容忽视

■ 邓超 陈伟亮

江汉平原, 鱼米之乡, 农田阡陌纵横, 一眼望去绿油油的农田, 其实并不像人们想象的那样“绿色”。实际上, 农田对化肥的吸收利用率并不高, 有相当一部分随着水体流动而流失, 而其中的氮、磷等元素会造成农业面源污染。

荆州农试站站长刘凯文表示, 在江汉平原这样一个水资源丰沛的地区, 农业面源污染已经构成了对水环境的威胁, 也成为江汉平原乡村振兴示范区建设的痛点, 引起了地方政府的高度重视。

造成面源污染的原因之一是降雨, 假如农民在暴雨来临前施肥, 那么肥料流失比例将非常高。避免这种无意义的流失和污染, 气象预警至关重要。为此, 荆州农试站特别建造了暴雨模拟设备来试验不同



级别降雨对农作物以及面源污染的不同影响, 基于暴雨淹没模型的农业面源污染预报模型也正在开发中。

(作者单位: 荆州市气象局)