

太湖湿地植被时空变化特征及其驱动机制*

李静泰^{1,3)} 闫丹丹^{1,3)} 戚丽萍^{1,3)} 史丹^{2,3)} 栾兆擎^{1,3)†}

(1)南京林业大学生物与环境学院, 210037, 江苏南京; (2)南京林业大学林学院, 210037, 江苏南京;

(3)南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 210037, 江苏南京)

摘要 基于1980—2019年Landsat长时间序列遥感影像, 结合近40a的水文和气象数据, 综合最大似然、空间质心模型、小波连续变换等方法, 分析了太湖水生植被时空变化特征及水位周期变化的影响。结果表明: 1)近40a来太湖水生植被总面积呈现出先减少、后大幅增加、又小幅减少的趋势, 动态相对指标为217.50%。沉水植物在总植被面积中占比最大, 并在2014年达到峰值340.59 km²; 浮水植物面积波动较明显, 波动范围为1.32%~19.74%; 2014年挺水植物面积达到最低值, 为13.35 km², 面积整体上呈下降趋势。2)1980—2019年, 太湖水生植被群落空间分布向湖区西北部偏移, 挺水植物、浮水植物、沉水植物空间质心整体向湖区西北方向分别移动11.45、25.19、7.01 km, 偏移方向分别为北偏西39.74°、6.32°、69.88°。3)近40a来太湖年均水位呈上升趋势, 水位变化的主周期为28 a, 经历2次丰枯转换, 今后将逐渐进入丰水期; 年降雨量、年均温、年日照时间也发生了一定的波动。4)太湖水位周期变化对于水生植被影响较为明显, 沉水植物面积与年均水位有显著的正相关性, 气象因子与植被面积变化相关性较弱, 但是风向对于水生植被迁移影响较大, 除此之外人类活动也是影响太湖水生植被时空分布的重要因素。研究结果可为湖泊湿地生态系统、水生植被时空动态及其驱动机制研究提供一定的理论和方法参考, 对于太湖湿地生态恢复提供一定的决策支持。

关键词 太湖湿地; 水生植被; 时空变化; 水位周期; 驱动机制

中图分类号 X87

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020429

0 引言

中国湖泊总面积约81 450 km², 约占国土总面积的0.90%^[1], 广阔的湖泊面积影响着地区的天气和气候^[2], 同时也与周边城市的经济发展密切相关。作为湖泊湿地生态系统的第一营养级, 水生植被在净化水质、维持湖泊湿地生态健康、丰富物种多样性等方面的关键作用日益受到重视^[3]。同时, 水生植被对湖泊湿地生态系统水文波动、气候变化的响应也较为敏感^[4], 目前, 湖泊湿地水生植被时空动态及其驱动机制研究是当前湿地生态水文学的研究热点。

太湖地处长江三角洲南缘, 属于典型的浅水型湖泊。1980年以来, 围湖造田、围网养殖、旅游开发等人为活动, 导致水体富营养化程度加剧, 严重威胁到水生植被的生境、群落结构和丰富度, 进而影响整个太湖湿地生态系统健康及其生态环境功能的发挥, 亟需开展水生植被生长状况和空间分布长时间序列监测研究。

传统野外调查费时费力, 研究范围小且成本高,

并不适用于大型湖泊湿地水生植被长时间动态变化监测, 而遥感技术具有时间序列长、探测范围大、影像精度高等多种优点, 已经成为湿地生态学调查中尺度植被信息提取的重要手段^[4-7]。如: 侍昊等^[5]利用Landsat8影像对太湖湿地水生植被空间信息进行了提取研究; Dogan等^[6]基于Quickbird影像使用非监督分类方法研究了莫干湖的水生植被类型; Pinardi等^[7]以Sentinel-2A影像为数据源, 对曼图亚湖浮游植物年内动态变化进行了研究。综合国内外相关研究来看, 目前国内外湖泊湿地水生植被遥感监测多集中于水生植被空间信息提取与类型识别, 而关于水生植被长时间序列的动态变化研究仍较为缺乏。关于湖泊湿地水生植被时空变化的影响因素及驱动机制研究方面: 袁赛波等^[8]的研究发现水位变化与水生植被生长发育显著相关; Vretare等^[9]研究表明, 湖泊水位较高时挺水植物生长受到抑制; 王震等^[10]研究结果显示, 湖泊表面风浪强弱对水生植被空间分布有较大影响, 人类活动也会影响湖泊湿地水生植被动态演变, 近年来当地政府取用太湖水域底土

*国家自然科学基金资助项目(41871097, 41471078); 江苏省“333 高层次人才培养工程”资助项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 江苏省农业科技自主创新资金资助项目(CX(18)2026)

†通信作者: 栾兆擎(1976—), 男, 博士, 教授。研究方向: 湿地生态水文。E-mail: luanzhaoqing@njfu.edu.cn

收稿日期: 2020-06-19

导致水生植被面积缩减^[1]。从目前研究来看,多数研究仍未综合考虑水文、气象和人为等因素对于水生植被时空动态的影响,关于湖泊湿地水生植被时空变化的驱动机制研究仍有待进一步深入。

本文基于 1980—2019 年 Landsat 系列多光谱影像,结合实地调查获取了太湖湿地近 40 a 来水生植被空间分布图,阐明其时空变化特征,结合 GIS 空间分析及小波变换等方法,分析常年水位波动下水生植被面积变化趋势以及多年最大风速风向对于水生植被空间质心变化的影响,以期为太湖湿地水生植被长时间序列监测和太湖水体生态修复提供一定的理论支撑和决策依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况 太湖湿地位于 30°55'40"~31°32'58" N 和 119°52'32"~120°36'10" E (图 1), 横跨江浙 2 省, 是典型的碟状湖盆形成的大型浅水湖泊, 面积约 2 428 km², 东西宽约 34 km, 南北长约 68.50 km, 全湖蓄水量约 44 亿 m³, 多年水深均值约 1.90 m^[2], 属于中国 5 大淡水湖泊之一。

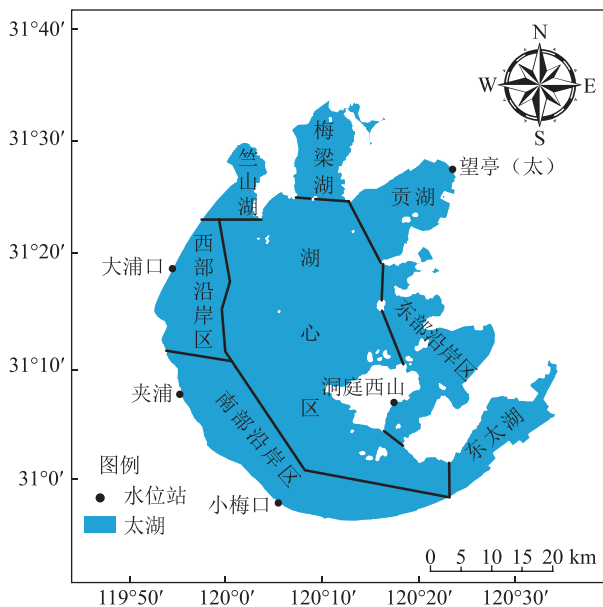


图 1 研究区地理位置及水位站点分布

本区气候温和湿润, 春夏两季盛行东南风, 秋冬季节北风偏多, 年均气温 15.20~17.50 °C, 年降雨量大于 1 000 mm。太湖湿地河流众多, 出入湖河流数目超过 220 条, 其中出湖河流约 150 条, 入湖河流 70 余条^[3], 贡湖区、梅梁湖区及东部沿岸的胥湖区是周边无锡、宜兴、湖州等城市的重要水源地, 具有蓄水防洪、供给用水、交通旅游等多种功能。随着全球气候变化和区域经济发展, 自然因素和人为因素导致太

湖湿地水生植被发生显著改变, 从 1960 年至今, 整个湖区的水生植被面积有所扩张, 但是挺水植被大面积消失, 目前仅在东部湖区有少量分布^[2]。

1.2 遥感数据获取与处理 采用的遥感数据为美国 NASA 陆地资源卫星的 MSS、TM、ETM⁺ 和 OLI 影像, 共包括 1980—2019 年 8 景太湖湿地水生植被遥感影像, 各期影像云层覆盖度 < 10%, 卫星影像拍摄时间为水生植被生长期的 4—10 月份。

基于 ENVI 5.3 软件对影像进行预处理过程分为: 1) 为消除传感器本身所带来的辐射误差, 将传感器记录的量纲为一的 DN 值转换成具有实际物理意义的大气顶层反射率进行辐射定标; 2) 利用 FLAASH (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes) 工具对影像进行大气校正以消除大气吸收、散射对辐射传输的影响, 将大气顶层反射率转换为地表反射率; 3) 为消除地形起伏、地球曲率等引起的几何畸变进行几何精校正, 校正结果要求均方根误差应 < 1 个像元; 4) 为获取合适的研究区域进行图像镶嵌、图像裁剪; 5) 为增强图像显示进行主成分变换, 选择特征值较大、噪声较小的前 2 个分量进行主成分反变换达到去噪声目的。

1.3 水文和气象数据获取 水文数据来自水利部太湖流域管理局公报 (<http://www.tba.gov.cn/channels/43.html>), 包括太湖湖区的望亭 (太)、西山、大浦口、小梅口、夹浦 5 个水位站 (图 1) 数据, 根据各站点日水位均值计算年水位均值。气象数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site/index.html>), 站点包括太湖流域地区内部及区外相邻地区的 21 个气象站, 主要指标包括年降雨量、年日照时间、年均温和风向。

1.4 研究方法

1.4.1 最大似然分类 不同地物像元在 n 维特征空间中呈离散状态, 同类地物像元聚集形成点群进而构成 n 维空间的若干点群。最大似然分类假定各波段各类统计均呈正态分布, 利用统计方法, 根据最大似然比贝叶斯判决准则建立非线性判别函数集, 计算待分类像元落入某样本的概率, 对于影像中的像元数据进行分类, 像元最终被归并到条件概率最大的相似样本中, 从而完成遥感影像的分类。

基于 ENVI 5.3 软件在增强显示的图像上选取训练样本, 分析不同波段组合的遥感影像发现, 不同水生植被遥感影像的光谱特征具有差异, 在 543 波段组合标准假彩色图像中: 挺水植物颜色为粉色、偏红; 浮水植物颜色为黄绿、浅绿色; 沉水植物颜色为深蓝、蓝黑色。基于不同水生植被遥感影像的颜色和纹理特征差异, 选取训练样本后使用 Compute Statistics

统计各波段之间的相关性;利用 ROI Separability 工具评价不同波段组合下训练样本的分离度;选取相关性低且分离度>1.8 的特征变量组合作为分类特征,利用 Maximum Likelihood Classification 工具进行图像分类后,采取 ENVI 的主要分析、聚类处理或过滤处理等工具消除初步分类结果的碎斑与孤岛,然后基于 ENVI Classic 的 Interactive Class Tool,结合实地调查数据与原始影像进行分类结果的优化处理;基于 ArcGIS10.3 的 Creat Random Points 结合 Google Earth 高精度影像对 8 景影像分类结果进行精度评价,其总体精度均值为 89.95%, Kappa 系数均值为 0.87 (表 1).

表 1 分类精度验证

年份	分类结果	
	总体精度/%	Kappa系数
1980	90.48	0.88
1984	89.47	0.87
1989	91.43	0.89
1995	90.53	0.88
2002	90.48	0.88
2008	88.42	0.86
2014	91.43	0.89
2019	87.37	0.84
平均值	89.95	0.87

1.4.2 空间质心变化分析 通过分析景观类型空间质心的变化,可以了解近 40 a 来太湖水生植被空间偏移变化规律,质心坐标计算方法为

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i X_i)}{\sum_{i=1}^n (S_i)}, \quad (1)$$

$$Y_c = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i Y_i)}{\sum_{i=1}^n (S_i)}, \quad (2)$$

式中: X_c 和 Y_c 是按面积加权的水生植被质心坐标; X_i 和 Y_i 为某一植被类型第 i 个斑块的质心坐标; S_i 为某一植被类型第 i 个斑块的面积; n 是植被类型斑块总数目^[14].

1.4.3 连续小波变换 以复 Morlet 小波函数为基函数,对太湖水位时间序列进行连续小波变换处理^[15],揭示其周期变化频域特征,反映不同时间尺度的变化趋势,并对水位发展趋势进行定性估计:

$$\Psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t - t^2/2}, \quad (3)$$

式中: $\Psi(t)$ 为小波函数; e 为自然对数; i 为虚数; ω_0 为

量纲一的频率; t 为时间.

Morlet 小波变换系数 $W_f(a, b)$ 定义为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (4)$$

式中: a 为时间尺度,反映小波的周期长度; b 为时间平移因子.

2 结果与分析

2.1 水生植被时空变化特征 基于最大似然分类方法绘制 1980—2019 年太湖湿地水生植被空间分布图(图 2). 从分布区域来看: 1980 年水生植被主要分布在东太湖区域,竺山湖、梅梁湖、贡湖有少量沉水植物; 1984—1989 年,仅在东太湖和东部沿岸区分布有大面积的水生植被,部分浮水植物向太湖北部和西部沿岸区移动; 1995—2002 年,沉水植物在东部沿岸区进一步扩张,浮水植物向南部沿岸区、竺山湖、梅梁湖区域移动,挺水植物分布区域减少; 2008 年,浮水植物在整个湖区均有分布; 2014 年,沉水和浮水植物在湖心区以外的区域均有分布,集中在东太湖和南部沿岸区,挺水植物仅在太湖沿岸部分区域出现^[12]; 2019 年,浮水植物在竺山湖、梅梁湖、贡湖分布较广,沉水植物主要出现在东太湖和西北部的竺山湖.

1980—2019 年,太湖湿地水生植被总面积呈现出先减少、后大幅增加、又小幅减少的趋势(图 3),与水体面积变化趋势相反,动态相对指标为 217.50%,从整体上来看,40 a 来水生植被总面积增加,而挺水植物、浮水植物和沉水植物面积的动态相对指标分别为 31.05%、905.81%、101.26%,说明 40 a 来挺水植物面积整体表现为减少,浮水植物和沉水植物面积整体呈现增加趋势. 具体来看: 沉水植物面积多年平均值最大,占湖区水域面积的 8.80%,1984—2014 年,沉水植物持续扩张,动态相对指标为 455.20%,2014 年达到峰值 340.59 km²; 浮水植物面积多年平均值占湖区水域面积的 8.44%,其面积变化与挺水植物及沉水植物相比波动较大,波动范围为 1.32%~19.74%,2002—2008 年,浮水植物大幅度扩张,2008 年达到峰值 465.43 km²; 挺水植物面积多年平均值最小,占湖区水域面积的 1.47%,1980—1984、1989—2002、2008—2014 年,挺水植物面积分别以年均 6.10%、2.48%、9.96% 的速度逐年减少,2014 年面积缩减为历史最低值 13.35 km².

2.2 水生植被空间质心偏移变化 水生植被空间质心偏移变化可以表征植被在空间上的移动方向和移动距离^[4]. 利用 ArcGIS 软件得到了各水生植物类型

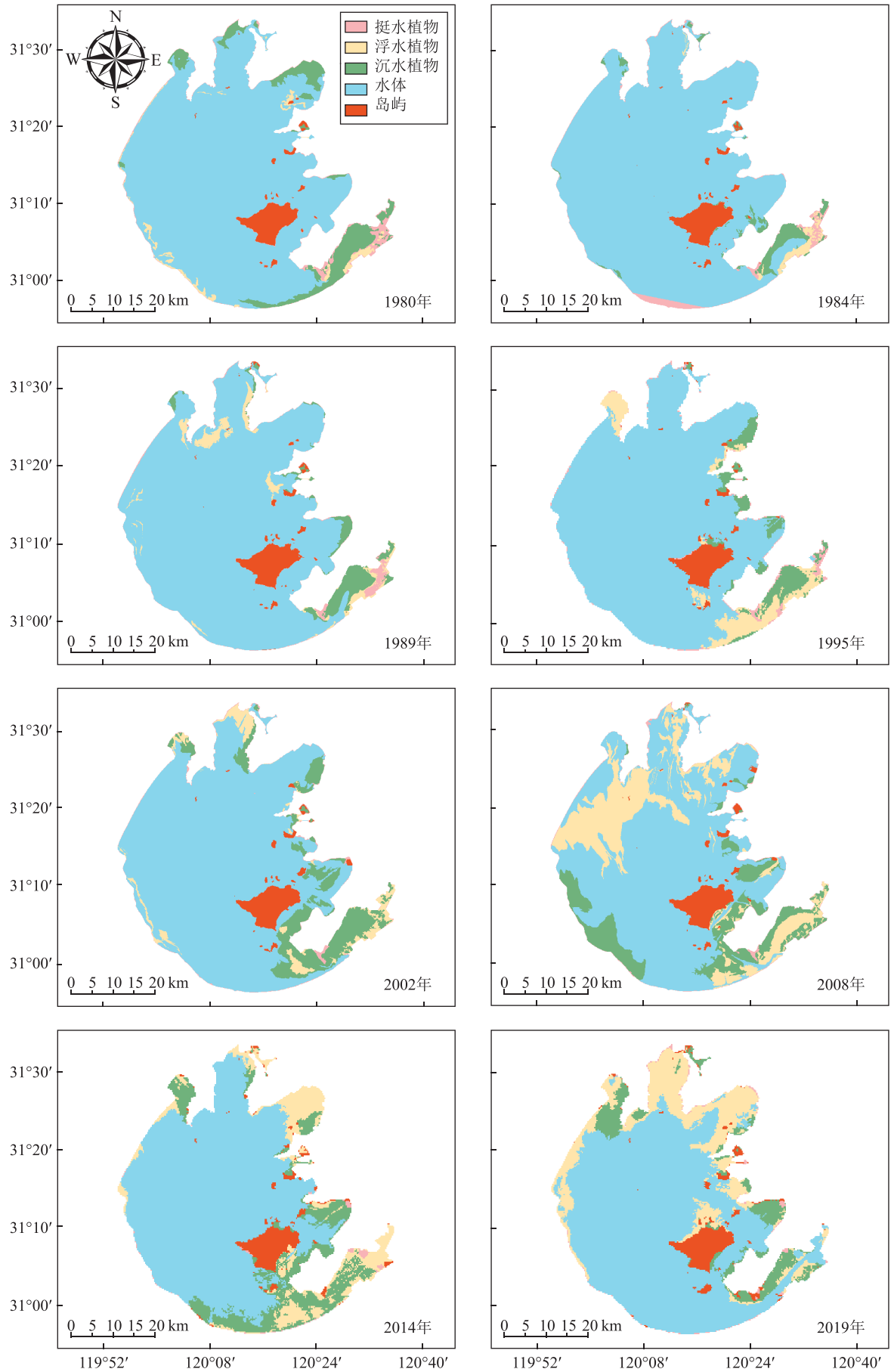


图 2 1980—2019 年太湖湿地水生植被空间分布

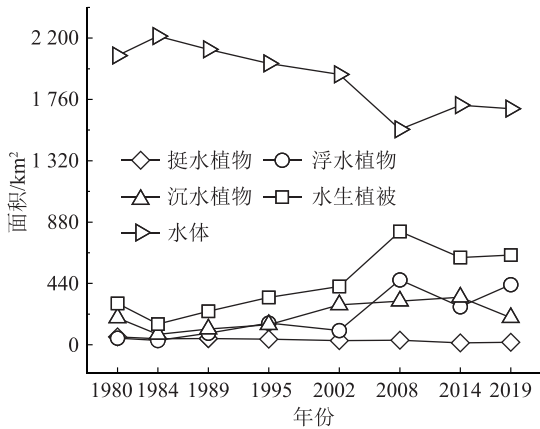


图 3 1980—2019 年太湖水体及水生植被面积变化

空间质心的经纬度坐标(图 4), 箭头表示偏移方向。挺水植物、浮水植物以及沉水植物的空间质心分布在湖区不同位置, 且多年来发生了一定程度偏移: 1980—1984 年, 挺水植物质心整体向湖区西北方向

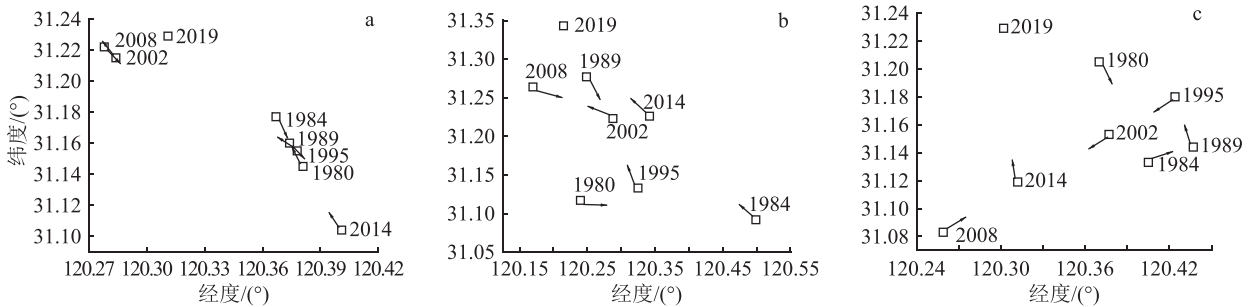


图 4 1980—2019 年太湖挺水植物 (a)、浮水植物 (b)、沉水植物 (c) 的质心变化

2.3 太湖水位变化分析 已有研究表明, 水位波动对于水生植被生长发育具有显著影响^[8, 16]。太湖湿地近 40 a 来水位变化过程(图 5)显示, 1980 年以来太湖年均水位整体呈现增加趋势, 波动幅度较小, 波动范围为 2.96~3.55 m, 近 40 a 水位均值为 3.22 m。高值出现在 2016 年, 比平均值高 0.33 m, 最低值出现在 1997 年, 比平均值低 0.26 m。以 2000 年为界, 太湖湿地水位在 2000 年以前围绕均值上下波动, 2000—2019 年太湖湿地水位整体呈现增加趋势, 明显高于年均水位值。

利用 Morlet 连续小波变换, 对太湖湿地年均水位进行多时间尺度分析, 并绘制小波系数实部等值线图(图 6-a), 反映水位序列在不同时间尺度上的周期性变化^[15]。由图 6-a 可知, 水位演变过程存在 24~32、11~22 a 和低于 10 a 这 3 类时间尺度周期变化特征。24~32 a 尺度范围的中心尺度为 28 a, 该处小波系数等值线图出现明显的正负闭合中心, 表明太湖水位序列存在 28 a 左右的周期振荡。计算不同时间尺度下的小波系数方差确定水位变化过程的主周

移动了 3.73 km, 偏移方向为北偏西 24.57°; 1984—1989 年, 浮水植物质心整体向湖区西北方向移动了 31.45 km, 偏移方向为北偏西 53.62°; 1989—1995 年, 沉水植物质心整体向湖区西北方向移动了 4.20 km, 偏移方向为北偏西 18.30°。1995—2008 年, 挺水植物和浮水植物质心均向湖区西北方向移动, 偏移方向分别为北偏西 56.35°、49.75°; 2014—2019 年, 挺水植物、浮水植物以及沉水植物质心整体向湖区西北方向移动, 偏移方向分别为北偏西 35.71°、47.39°、4.85°。总体来看, 1980—2019 年, 挺水植物、浮水植物以及沉水植物质心均呈向湖区西北方向移动的趋势: 挺水植物质心偏移方向为北偏西 39.74°, 整体向湖区西北方向移动了 11.45 km; 浮水植物质心整体向湖区西北方向移动了 25.19 km, 偏移方向为北偏西 6.32°; 沉水植物质心偏移方向为北偏西 69.88°, 整体向西北方向移动了 7.01 km。

期, 从图 6-b 中可以看出, 在整个时间域中存在 2 个较为明显的极值, 对应 11 和 28 a, 其中 28 a 时间尺度对小波方差贡献最大, 表明 28 a 为太湖年均水位近 40 a 演变的第一主周期。主周期小波系数过程曲线(图 6-c)可以反映不同时间尺度下水位数据序列的平均周期及波动变化。在 28 a 时间尺度上, 水位变化平均周期约为 19 a, 大约进行了 2 个周期的丰-枯

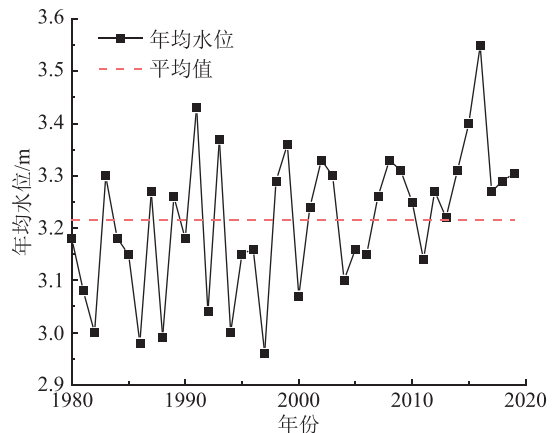


图 5 1980—2019 年太湖年均水位变化过程

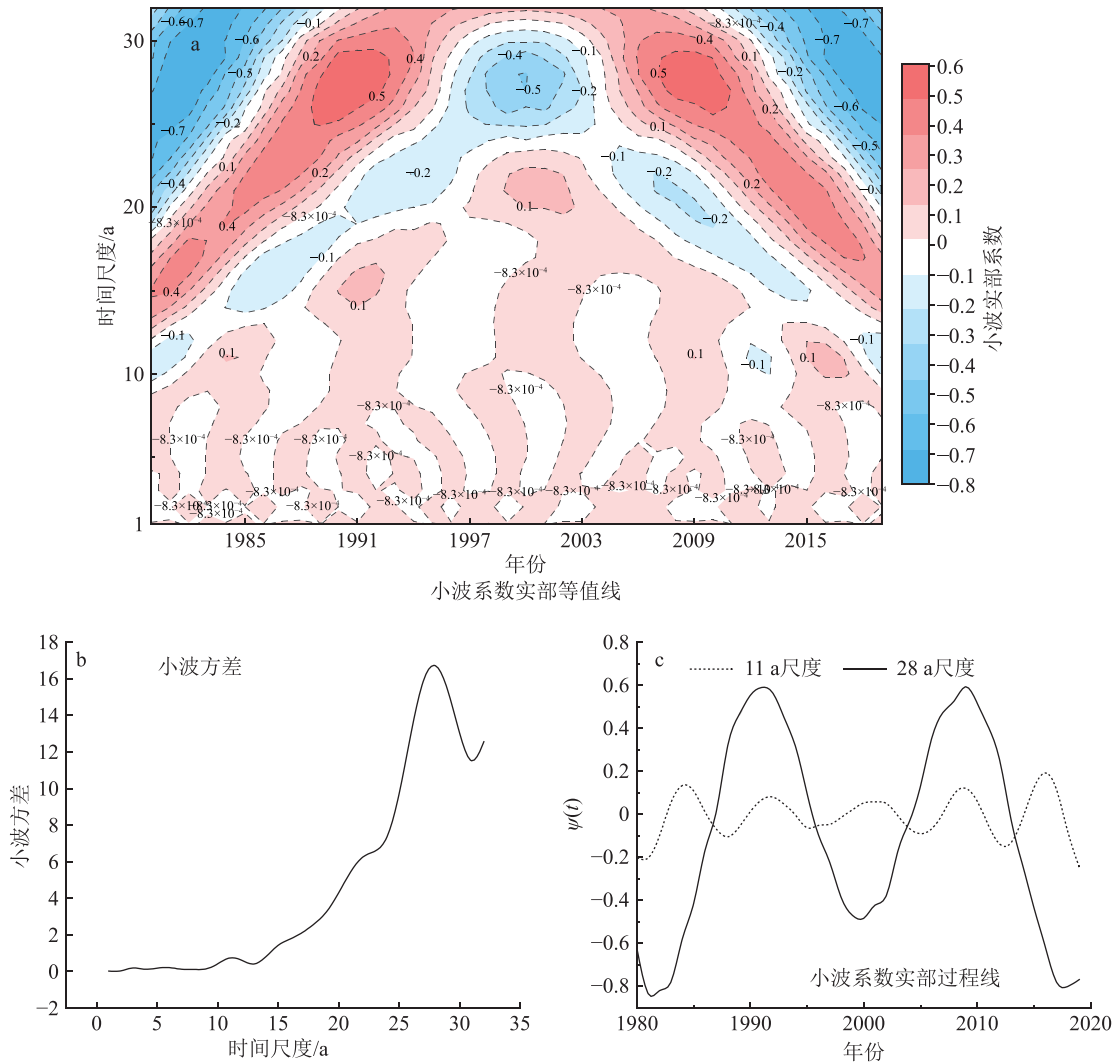


图 6 1980—2019 年太湖年均水位小波分析

转换, 在 11 a 时间尺度上大约进行了 5 个周期的丰枯转换. 太湖水位变化的主周期小波系数过程曲线显示现时段太湖水位处于枯水期的中心时域内, 根据曲线走势推断, 太湖水位将持续降低, 但降幅逐年减小, 直至进入丰水期.

2.4 太湖年降雨量、年均温、年日照时间变化分析

太湖湿地近 40 a 气象数据 (图 7) 显示: 1980—2019 年太湖湿地年降雨量均值约为 1197 mm, 多年

降雨量围绕均值上下波动, 仅在 1993、1999 和 2016 年降雨量明显高于均值; 太湖湿地近 40 a 气温均值约为 16.60 °C, 呈现明显的上升趋势, 2000 年以前多年气温都低于均值, 2000 年以后气温基本在均值以上波动; 1980—2019 年太湖湿地年日照时间均值约为 1896.50 h, 呈现阶段性的波动趋势, 1980—1990、2004—2019 年日照时间在均值以上波动, 1991—2003 年在均值以下波动.

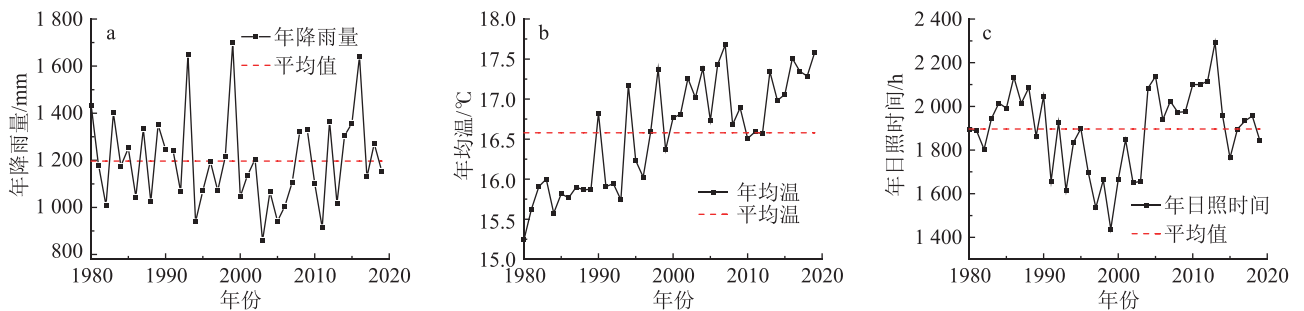


图 7 1980—2019 年太湖年降雨量 (a)、年均温 (b)、年日照时间 (c) 变化过程

3 讨论

3.1 水生植被面积变化驱动因子 水生植被是太湖湿地生态系统的关键组成部分^[7],其生长状态对于湖泊湿地生态健康保护与恢复有着至关重要的作用,为探究太湖水生植被面积变化驱动机制,对 3 种水生植被与水文、气象要素进行了相关性分析(图 8)。结果表明,太湖湿地年均水位变化对水生植被面积变化影响较为明显,气象因子与植被面积变化相关性大多未达到显著水平,除此之外,人类活动也是水生植被面积变化的重要影响因素。

3.1.1 水文因素 已有研究表明湖泊水位与沉水植物关系密切,沉水植物适宜生长在常年水位波动幅度较小(约 $<3\text{ m}$)的湖泊中^[6]。本文研究结果显示:近 40 a 来太湖湿地水位波幅较小,湖面风浪、船舶对水底沉积物扰动较小,水体透明度高,水体环境有利于沉水植物生长繁殖,所以沉水植物面积与年均水位呈显著正相关,相关系数 >0.74 (图 8-a),这与已有研究结果^[6]相似;湖泊高水位时沉水植物和浮水植物可能会占据优势地位,近 40 a 来浮水植物面积整体上表现为增加,浮水植物与年均水位有一定正相关性(图 8-a);挺水植物生长发育也会受湖泊水位

波动的干扰^[8],已有研究显示挺水植物更适宜生长于湖泊水位大幅度波动的环境中^[9],但太湖湿地年均水位波动不大,挺水植物与年均水位有较强的负相关性(图 8-a),近 40 a 来挺水植物面积呈现持续减少的趋势。

连续小波变换可以对水位发展趋势进行定性估计,年均水位主周期趋势图显示,太湖水位降低幅度将持续减小且太湖湿地将逐渐进入丰水期。根据太湖湿地水位丰枯交替规律以及水位变化与植被面积的相关性,可以预测太湖湿地沉水植物和浮水植物面积虽会继续减少,但缩减趋势逐渐减弱,并且将来会逐渐增加。

3.1.2 气象因素 挺水植物、浮水植物和沉水植物均生长于太湖湿地,水分充足,因此降雨量对其影响不明显;日照对于植物种子萌发没有显著影响,并且水生植物生长发育与日照强度相关性明显^[19-20],而日照时间对其无显著影响。太湖湿地近 40 a 来挺水植物面积缩减,主要是由于人为因素的干扰^[11],浮水植物面积主要受到水流波动和风速的影响^[21],而沉水植物根植于底泥,深水处水温对湖面以上气温变化不敏感,所以 3 种水生植被的面积与年降雨量、年日照时间关系不显著,相关系数绝对值均 <0.35 (图 8-a 和 b)。

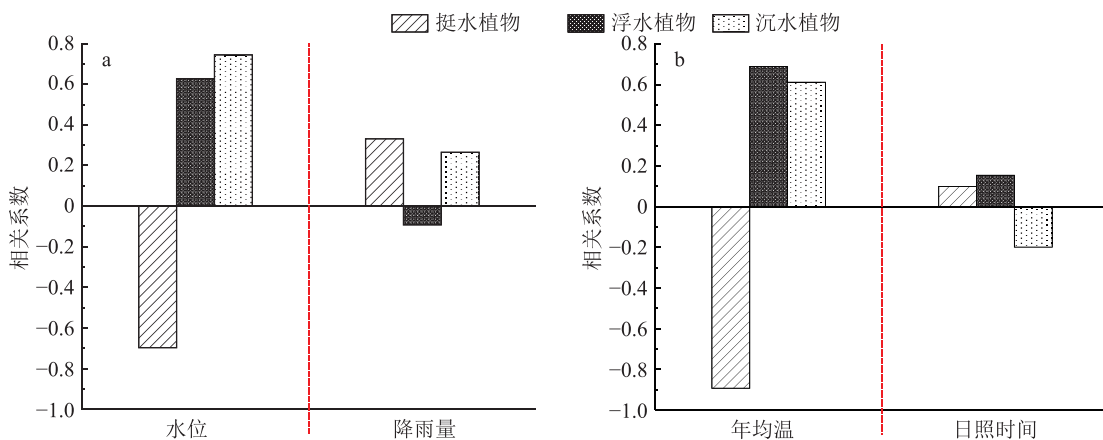


图 8 太湖水生植被面积与年均水位、年降雨量(a), 年均温、年日照时间(b)相关系数

3.1.3 人为因素 水生植被面积除了受到水文和气候的影响之外,还会受到人类活动的干扰。1980 年以来,大范围围湖造田削减太湖湿地面积,周围百姓大量收割水草及芦苇用作绿肥^[11],导致沉水植物、浮水植物以及东部沿岸挺水植物减少。1990 年以后,规模化水产养殖减缓湖区水面波动程度,使得沉水植物和浮水植物面积增大。2000 年以来太湖流域经济发展迅速,据统计,太湖上游工业废水排放量超过 $3.0 \times 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,生活污水排放量高达 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,

农业化肥消耗量约 $(2.0 \sim 3.0) \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,但利用率低于 50%^[13],导致大量 N、P 等营养元素进入湖中,加剧太湖湿地富营养化程度。2002—2006 年太湖水体总氮质量浓度相比 1992—2001 年增加约 $0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水体透明度降低约 $0.29 \text{ m}^{[22]}$,直到 2007 年太湖湿地发生蓝藻爆发事件,浮游植物面积大范围增加。2012 年以来地方政府挖掘太湖东部底土导致水深增加,挺水植物大面积减少,沉水植物和浮水植物分布区域扩大。近年来为恢复北部湖区水生植被生态系

统,人为增加了太湖湿地北部沉水植物和浮水植物面积.《2018 太湖流域引江济太年报》显示地方政府人工调控冬春季太湖水位^[23],促进水生植被生长.

3.2 水生植被空间质心变化驱动因子 太湖湿地属于亚热带季风气候,夏季盛行东南风,冬季盛行偏北风,1980—2019 气候观测数据显示,太湖湿地 4—8 月每日最大风速的风向多偏向东、南方向(表 2),风向频率占比 0.35~0.45,这与秦伯强等^[24]的研究结果基本一致,而 4—8 月水生植被生长旺盛,研究表明湖面风浪是水生植被空间分布的重要影响因素^[10],所以太湖湿地水生植被空间质心偏移方向与太湖风向密切相关.本文研究结果显示,1980—2019 年太湖湿地水生植被群落空间分布质心有向湖区西部和北部迁移的趋势,与太湖湿地多年盛行风向基本一致.除此之外,人为干扰也会影响太湖湿地水生植被的分布区域.围湖造田以及近年来当地政府取用东太湖水域底土导致挺水植被群落减少^[11],空间质心向西北沿岸移动.2012 年以来,地方政府实施了污染治理以及生态恢复措施^[25-26],人为增加了太湖北部水生植被群落;2018 年,人工调控冬春季太湖水位有效促进了太湖北部水生植被群落结构的恢复^[26],从而导致近年来水生植被在北部以及西北湖区分布较广.

表 2 1980—2019 太湖每日最大风速风向观测数据

年份	风向频数/d						风向频率
	东	东南偏东	东南	东南偏南	南	总和	
1980	28	29	44	32	9	142	0.39
1984	21	55	34	23	4	137	0.38
1989	13	39	35	25	15	127	0.35
1995	24	32	46	23	16	141	0.39
2002	27	50	24	18	16	135	0.37
2008	56	42	11	4	17	130	0.36
2014	23	68	49	7	17	164	0.45
2019	18	59	46	10	19	152	0.42

注:风向方位共有 17 个.

太湖作为中国 5 大淡水湖泊之一,对于区域气候环境以及经济发展起到关键作用.水生植被作为湖泊生态系统主要初级生产者,对于湖泊湿地生态健康十分重要^[17],因此亟需监测太湖湿地水生植被长时间序列时空变化并探究其驱动机制.近年来随着遥感技术快速发展,多源遥感影像广泛应用于生态环境保护与恢复研究^[6, 27-28],目前国内外对于湖泊湿地水生植被时空变化遥感监测研究较多,但是多数研究注重水生植被类型识别及其空间动态变化,

忽视长时间尺度下水生植被时空变化与水文、气象、人为等因素的相关性^[5-6],本文具体分析了多年水位波动下水生植被面积变化趋势以及最大风速风向对于水生植被迁移变化的影响,研究结果可为湖泊湿地生态系统保护与恢复提供一定的科学支撑.后续研究中,要注重融合多源遥感数据,提取更加丰富可靠的水生植被信息,深入研究水生植被景观格局指数时空变化,探究水体氮、磷等营养元素等与水生植被时空变化相关性,为进一步解释太湖水生植被变化规律提供理论支持和科学依据.

4 结论

本文利用中等分辨率 Landsat 系列数据,分析近 40 a 来太湖湿地水生植被时空变化趋势及其影响因素,结果表明:1) 1980—2019 年,太湖湿地挺水植物面积呈减少趋势,浮水植物和沉水植物面积呈增加趋势;2) 挺水植物、浮水植物以及沉水植物的空间质心均呈向湖区西北方向移动的趋势;3) 近 40 a 来,太湖湿地年均水位呈上升趋势,水位变化的主周期为 28 a;4) 太湖湿地年降雨量波动不大,年均温呈增加趋势,年日照时间呈阶段性波动;5) 太湖湿地沉水植物和浮水植物面积增加受水位周期性变化影响显著,而挺水植物面积减少与水位胁迫有关,同时也受到人类活动干扰,3 种水生植被空间分布的偏移主要与湖区多年最大风速风向、地方政府调控太湖水位有关.

5 参考文献

- [1] MA R H, YANG G S, DUAN H T, et al. China's lakes at present: number, area and spatial distribution[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(2): 283
- [2] BONAN G B. Sensitivity of a GCM simulation to inclusion of inland water surfaces[J]. Journal of Climate, 1995, 8(11): 2691
- [3] WANG G X, ZHANG L M, CHU A H, et al. A mosaic community of macrophytes for the ecological remediation of eutrophic shallow lakes[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 582
- [4] 甄姿, 宫兆宁, 赵文吉. 官厅水库库区水生植物演变格局时空变化特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1586
- [5] 侍昊, 李旭文, 牛志春, 等. 基于随机森林模型的太湖水生植被遥感信息提取[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 635
- [6] DOGAN O K, AKYUREK Z, BEKLIÖGLU M. Identification and mapping of submerged plants in a shallow lake using quickbird satellite data[J]. Journal of Environmental

- Management, 2009, 90(7): 2138
- [7] PINARDI M, BRESCIANI M, VILLA P, et al. Spatial and temporal dynamics of primary producers in shallow lakes as seen from space: intra-annual observations from Sentinel-2A[J]. *Limnologica*, 2018, 72: 32
- [8] 袁赛波, 张晓可, 刘学勤, 等. 长江中下游湖泊水生植被的生态水位管理策略[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(增刊1): 104
- [9] VRETARE V, WEISNER S E, STRAND J A, et al. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 69: 127
- [10] 王震, 吴挺峰, 邹华, 等. 太湖不同湖区风浪的季节变化特征[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(1): 217
- [11] 赵凯, 周彦锋, 蒋兆林, 等. 1960年以来太湖水生植被演变[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(2): 351
- [12] 雷泽湘, 徐德兰, 黄沛生, 等. 太湖沉水和浮叶植被及其水环境效应研究[J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 239
- [13] 张光生, 王明星, 叶亚新, 等. 太湖富营养化现状及其生态防治对策[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(3): 235
- [14] 宫兆宁, 张翼然, 宫辉力, 等. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 77
- [15] 左斌斌, 徐宗学, 任梅芳, 等. 北京市通州区1966—2016年降水特性研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5): 556
- [16] 张晓可. 长江泛滥平原湖泊植物水位波动需求研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013
- [17] 赵凯. 太湖水生植被分布格局及演变过程[D]. 南京: 南京师范大学, 2017
- [18] WANG Q L, CHEN J R, LIU F, et al. Morphological changes and resource allocation of *Zizania latifolia* (Griseb.) Stapf in response to different submergence depth and duration[J]. *Flora*, 2014, 209: 279
- [19] 朱丹婷. 光照强度、温度和总氮浓度对三种沉水植物生长的影响[D]. 金华: 浙江师范大学, 2011
- [20] 邹丽莎, 聂泽宇, 姚笑颜, 等. 富营养化水体中光照对沉水植物的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 2073
- [21] 张圳, 张弥, 肖薇, 等. 太湖水生植被NDVI的时空变化特征分析[J]. *遥感学报*, 2018, 22(2): 324
- [22] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(1): 21
- [23] 伍永年. 2018太湖流域引江济太年报[R]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2019
- [24] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [25] LUO J H, MA R H, DUAN H T, 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
- [26] 贾更华. 2018太湖健康状况报告[R]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2019
- [27] 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
- [28] 业巧林, 许等平, 张冬. 基于深度学习特征和支持向量机的遥感图像分类[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(2): 119

Temporal and spatial variations in vegetation in Taihu wetland and driving mechanisms

LI Jingtai^{1,3)} YAN Dandan^{1,3)} QI Liping^{1,3)} SHI Dan^{2,3)} LUAN Zhaoqing^{1,3)†}

(1) College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, 210037, Nanjing, Jiangsu, China;

2) College of Forestry, Nanjing Forestry University, 210037, Nanjing, Jiangsu, China;

3) Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, 210037, Nanjing, Jiangsu, China)

Abstract Aquatic vegetation, the primary producer of Taihu wetland ecosystem, plays a key role in the improvement of water quality and internal nutrient cycle in the Taihu Lake ecosystem. Temporal and spatial variations in aquatic vegetation in Taihu wetland and driving mechanisms need to be clarified for logical restoration and protection of the lake ecosystem. Landsat images from 1980 to 2019, hydrological and meteorological data were studied to resolve the temporal and spatial variations in aquatic vegetation; periodic changes in water level in Taihu Lake were analyzed using maximum likelihood, spatial centroid model and wavelet continuous transformation. Total area of aquatic vegetation in Taihu Lake was found in the past 40 years to initially decrease, then increase, before a slight decrease, with a dynamic relative index of 217.50%. Submerged macrophytes were found to account for most of total vegetation area, reaching a peak at 340.59 km² in 2014. The area of floating plants was found to fluctuate

markedly from 1.32% -19.74%. Area of emergent plants reached the lowest value at 13.35 km² in 2014, with an overall downward trend. The spatial distribution of aquatic vegetation communities in Taihu Lake shifted from 1980 to 2019 to the northwest part of the lake, the spatial centroids of emergent plants, floating plants and submerged plants moved 11.45 km, 25.19 km and 7.01 km to the northwest part of the lake, respectively, with migration directions at 39.74°, 6.32° and 69.88° respectively. The average annual water level at Taihu Lake has showed a rising trend in the past 40 years, the main period of water level change was found to be 28 years. Two periods of abundant and dry changes were identified; gradual entry to a period of abundant water is predicted for the future. Annual rainfall, average annual temperature and annual sunshine hours were found to all fluctuate. The periodic change in water levels in Taihu Lake had marked impact on aquatic vegetation, with a significant positive correlation between area of submerged plants and average annual water level. The correlation between meteorological factors and vegetation area was weak, but wind direction was found to greatly influence migration of aquatic vegetation. Human activity was an important factor in the temporal and spatial distribution of aquatic vegetation in Taihu Lake. These data are significant for the study of temporal and spatial dynamics and driving mechanism of aquatic vegetation in lake wetland ecosystem, and for decision making in the ecological restoration of Taihu wetland.

Keywords Taihu wetland; aquatic vegetation; temporal and spatial variation; water level periodicity; driving mechanism