

太湖北部人工地形重塑下风浪场变化研究*

秦 灏¹ 张怡辉² 朱金格² 胡维平² 彭兆亮²

(1. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司 江苏苏州 215106; 2. 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 江苏南京 210008)

摘要 风浪是影响浅水湖泊物理生境环境重要的水动力要素之一。基于太湖实测风浪数据,建立了太湖风浪模型,验证结果表明模型可以较好地模拟太湖风浪随风场变化情况。在此基础上开展太湖北部水域在人工地形重塑工程实施后的风浪变化情况。结果表明,不同季节盛行风下,风浪强度和湖底扰动强度均有一定程度的衰减,这有利于水体透明度和水底光照条件的改善。风浪强度的衰减使得具有有利于水生植物生长与发育风浪条件的水域面积显著扩增。人工地形重塑的实施,有利于太湖北部水域水生植被物理生境环境改善,从而为太湖北部水域水生植被的修复提供较好的环境支撑,也为其他浅水湖泊地形重塑工程的实施提供借鉴。

关键词 太湖; 风浪; 地形重塑; 风浪扰动; 生境环境

中图分类号 TV139.2+4 **doi:** 10.11693/hyhz20230600129

湖泊水动力是湖泊的重要水文现象之一,是湖泊生态系统的基本动力要素(沈吉等, 2020)。湖泊水动力驱动着湖泊泥沙和营养物质的输移和扩散,改变湖泊生态系统的物理环境条件,进而影响湖泊化学元素的循环,是决定湖泊生态系统结构功能的基础(张奇等, 2020)。浅水湖泊中风经过水气相互作用的传递产生风浪和湖流,其中主要能量传递给风浪(Wüest *et al.*, 2003)。风浪作为浅水湖泊重要的水动力因子,是沉积物再悬浮的最重要的驱动因素(Fan *et al.*, 2001; 秦伯强等, 2003; 罗淑葱等, 2004; Li *et al.*, 2017),沉积物的悬浮后会引引起上覆水中悬浮颗粒大量增加和浊度升高(Yao *et al.*, 2022; 张怡辉等, 2022),从而对水体水质产生不利的影响。因此,开展湖泊水动力场的变化研究对于认识和诊断湖泊生态系统的演化都具有重要的意义。

地形是影响浅水湖泊水动力变化的主要因素。为了改善太湖水质,确保供水安全,保障生态系统健康,针对太湖水生态环境问题与成因,在太湖北部(太湖沿江高速以北)实施了一系列工程治理措施(何尚卫等,

2015),其中包括了底泥疏浚、退圩还湖、退围还湖和深槽构建,以上工程措施的实施会对整个太湖北部的地形与岸线形态产生较大的影响,而地形作为影响风浪特征的关键因素,其变化可能会对区域内的风浪场产生较大影响,因此开展相应的研究具有较高的应用意义。本研究将以太湖北部为研究对象,利用数值模拟的手段来分析太湖北部整治前(2010年)和整治后并趋于稳定形态下(2020年)风浪场特征及其变化情况,从而分析太湖北部整治措施对太湖水环境演化的影响,总结整治经验,并为太湖的进一步整治提供经验与支撑。

1 研究背景

1.1 太湖概况

太湖(31°29'~31°42'N, 119°44'~119°53'E, 图 1)居常州武进和宜兴之间,地处长江三角洲的西缘,北通长江,东濒太湖,西连长荡湖,南接东沱、西沱。因太湖位于江苏太湖西侧,故又名西太湖。全湖大部分水面位于常州武进区境内(占总面积 71.4%),常水位

* 国家自然科学基金项目, 42007360 号, U2240208 号; 江苏省水利科技项目, 2020066 号; 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”突破项目, NIGLAS2018GH02 号。秦 灏, 硕士研究生, E-mail: alexyzqinhao@126.com

通信作者: 张怡辉, 助理研究员, E-mail: yhzhang@niglas.ac.cn

收稿日期: 2023-06-27, 收修改稿日期: 2023-09-08

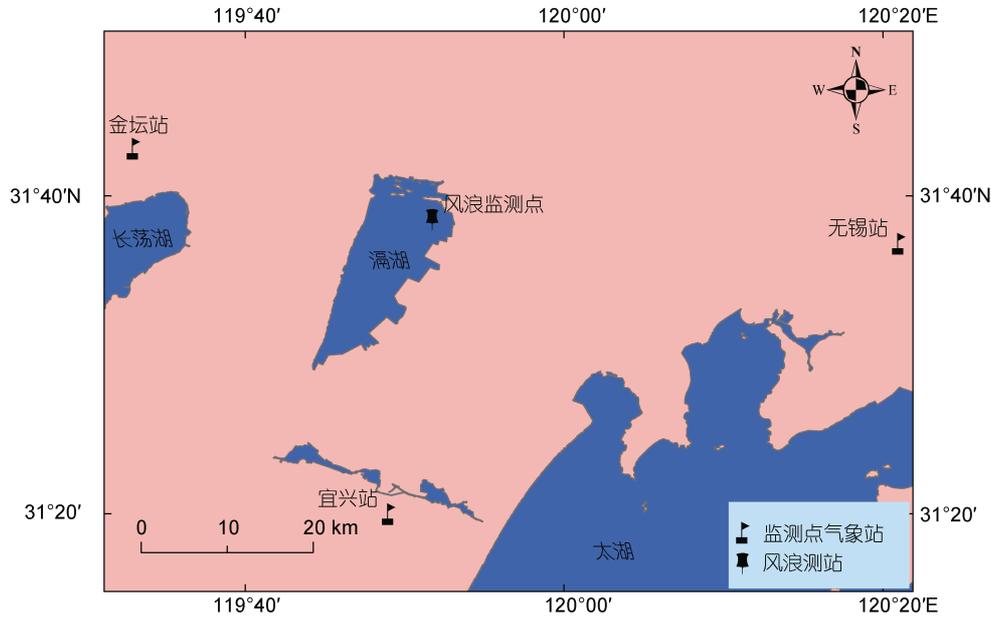


图 1 漏湖地理位置及监测点

Fig.1 Geographical location and wind-wave monitoring site in the Gehu Lake

为 3.37 m (吴淞基面), 相应的平均水深为 1.32 m, 面积为 164 km², 容积为 2.05 亿 m³, 是苏南地区第二大淡水湖泊, 具有水产养殖、蓄洪灌溉、水上运输, 现代旅游等多种使用功能, 在当地国民经济建设中占有十分重要的地位。

1.2 漏湖北部整治概况

为了改善漏湖水质, 确保供水安全, 保障生态系统健康, 针对漏湖水生态环境问题与成因, 在漏湖北部(漏湖沿江高速以北)实施了一系列工程治理措施。

基于漏湖(武进区)生态清淤工程方案, 2010~2011 年在漏湖北部湖区实施干法疏浚工程, 完成沿江高速以北漏湖清淤总面积 12.09 km², 清淤土方 326.6 万 m³。优化湖泊湖底地形, 改善湖泊水动力条件, 降低水动力过程对湖底沉积物扰动, 减少底泥沉积物营养盐与污染物的动态释放通量。在进行漏湖北部污染物底泥疏浚的过程中, 布设 30 m (长)×30 m (宽)×1.5 m (深)凹槽, 作为沉淀物陷阱, 捕获漏湖因风场和湖流作用搬运至北部的有机颗粒物, 同时也可以使北部在风浪作用发生再悬浮的底泥沉积物被凹槽捕获, 降低水体悬浮颗粒物量、提高水体透明度, 并为浅水区植物生长提供相对有利的条件。2012 年实施完成漏湖沿江高速以北退圩还湖一期工程, 实施总面积 3.89 km², 其中退田还湖 2.11 km², 排泥场面积 1.78 km²。

2 研究方法

2.1 风浪模型构建

采用基于动谱平衡方程的风浪模型, 开展漏湖北部整治工程实施前后盛行风条件下风浪变化, 通过对比整治前后风浪强度评估整治工程实施后漏湖北部湖区风浪场变化情况。

2.1.1 风浪模型配置 SWAN (simulating waves nearshore) 风浪模式是适用于近岸的第三代风浪模型, 由荷兰 Delft 大学土木工程系的 Booij 等(1999)开发并由 SWAN 团队发展和完善的, 已成功地在太湖(李一平等, 2008; 许遐祯等, 2013; 王震等, 2016)、巢湖(张怡辉等, 2020a, 2020b)、淀山湖(张洪生等, 2011)等浅水湖泊进行了应用, 其详细介绍可参考 SWAN 技术手册(the SWAN Team, 2006), 这里不再赘述。

考虑漏湖为一个整体湖泊, 沿江高速南北是联通的, 因此建立东西 14.4 km, 南北长 22.4 km 的整个漏湖模拟区域, 采用二维非静态模型。模型的空间分辨率为 100 m×100 m, 计算时间步长取 2 min。拟定频率范围为 0.2~2.5 Hz, 分成 50 个频率段。方向沿整个圆周方向均分为 36 份, 即方向分辨率为 10°。模型物理过程中, 风输入考虑了线性增长和指数增长两部分, 底摩擦引起的消耗采用 JONSWAP 模型, 系数取 0.067。浅水风浪破碎系数在计算时取其均值 0.73。模型中考虑了浅水中三波相互作用, 其他采用默认值。

2.1.2 风浪监测及验证 风浪监测站位于滬湖取水口附近(图 1), 观测时间为 2021 年 12 月 30 日 10:30 至 2022 年 1 月 4 日 13:00, 观测时间间隔 30 min, 观测仪器采用 MidasDWR 压阻式波浪仪, 坐底式布放, 采样频率为 4 Hz, 可获得观测期间观测点的有效波高、平均周期等波浪特征参数。

利用滬湖风浪模型计算风浪监测期间滬湖风浪变化情况, 湖面风场采用国家气象站宜兴站(119.8167°E, 31.3333°N)、金坛站(119.55°E, 31.7167°N)和无锡站(120.35°E, 31.6167°N) 3 个站的平均风速作为输入风速, 其计算结果及验证情况如图 2 所示, 计算结果随时间变化与实测值吻合良好, 可以较好地模拟出湖体风浪变化情况。统计结果表明, 有效波高计算值与实测值呈现显著相关(相关系数 $r=0.92$, 显著性值

$p<0.05$, 统计数据个数 $N=246$)。而波周期虽然计算值与实测值也呈现显著相关($r=0.3$, $p<0.05$, $N=197$), 但相关系数并不高($r=0.3$); 这是由于监测所用的波浪仪为压阻式, 通过水体压力变化反演出波浪参数, 对于小风浪情况, 由于滬湖水浅, 其变化值较小, 相应地误差会较大; 监测仪器技术说明中也明确指出对于水深较小的情况, 波浪仪存在高频(低周期)信号丢失的缺点, 这从图 2b 中也可以看出, 在小风浪情况时, 波周期误差较大, 进一步我们对波高大于 2、4、5 cm 时波周期的计算与实测数据进行统计, 相应地相关系数分别提高至 0.60、0.64、0.68, 这表明对于较大波况时, 模拟的波周期是较为可靠的。因此建立的滬湖风浪模型可以较好地开展滬湖风浪模拟, 能够为滬湖风浪变化模拟提供可靠的结果。

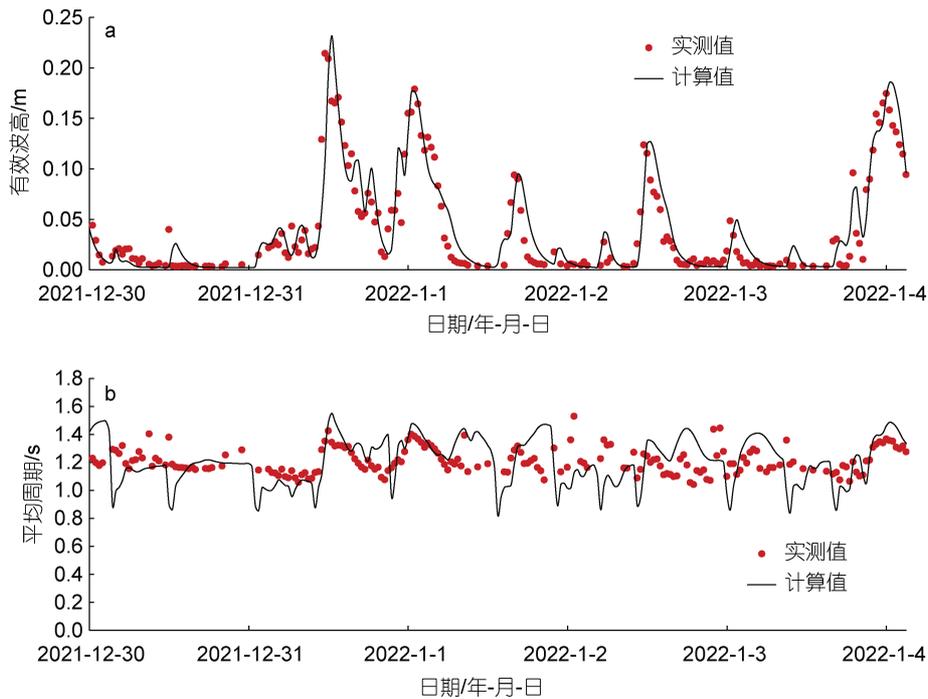


图 2 风浪监测及验证结果

Fig.2 Monitoring and verification of wind and wave

2.2 地形选择

2009 年开始, 滬湖北部实施了生态清淤、地形重塑、退圩环湖等人工地形重塑工程, 滬湖北部岸线、地形等发生了较大变化。

实施前, 滬湖北部湖区西部片区为大量圩区, 东部片区则存在大量围网养殖区, 其历史影像图和其常水位(3.37 m)下水深地形图如图 3 所示。整治前滬湖北部湖区较为开阔, 地形较为平缓, 其最大水深为 3.98 m, 平均水深 1.26 m, 水面面积约为 9.91 km²。

实施后, 其西部片区圩区大量恢复为湖区, 东部片区的围网也大量拆除, 其历史影像图和常水位(3.37 m)下水深地形图如图 4 所示。整治后, 滬湖北部湖区地形复杂多变, 湖区内岛屿、浅滩众多, 高速公路下分布了多段长条形小岛及浅滩, 常水位下其最大水深约 3.30 m, 平均水深 2.13 m, 较整治前水深平均增加了 0.87 m, 水面面积增加为 13.45 km²。由于地形发生了较大变化, 其势必引起湖区内水动力等物理生境条件发生变化。

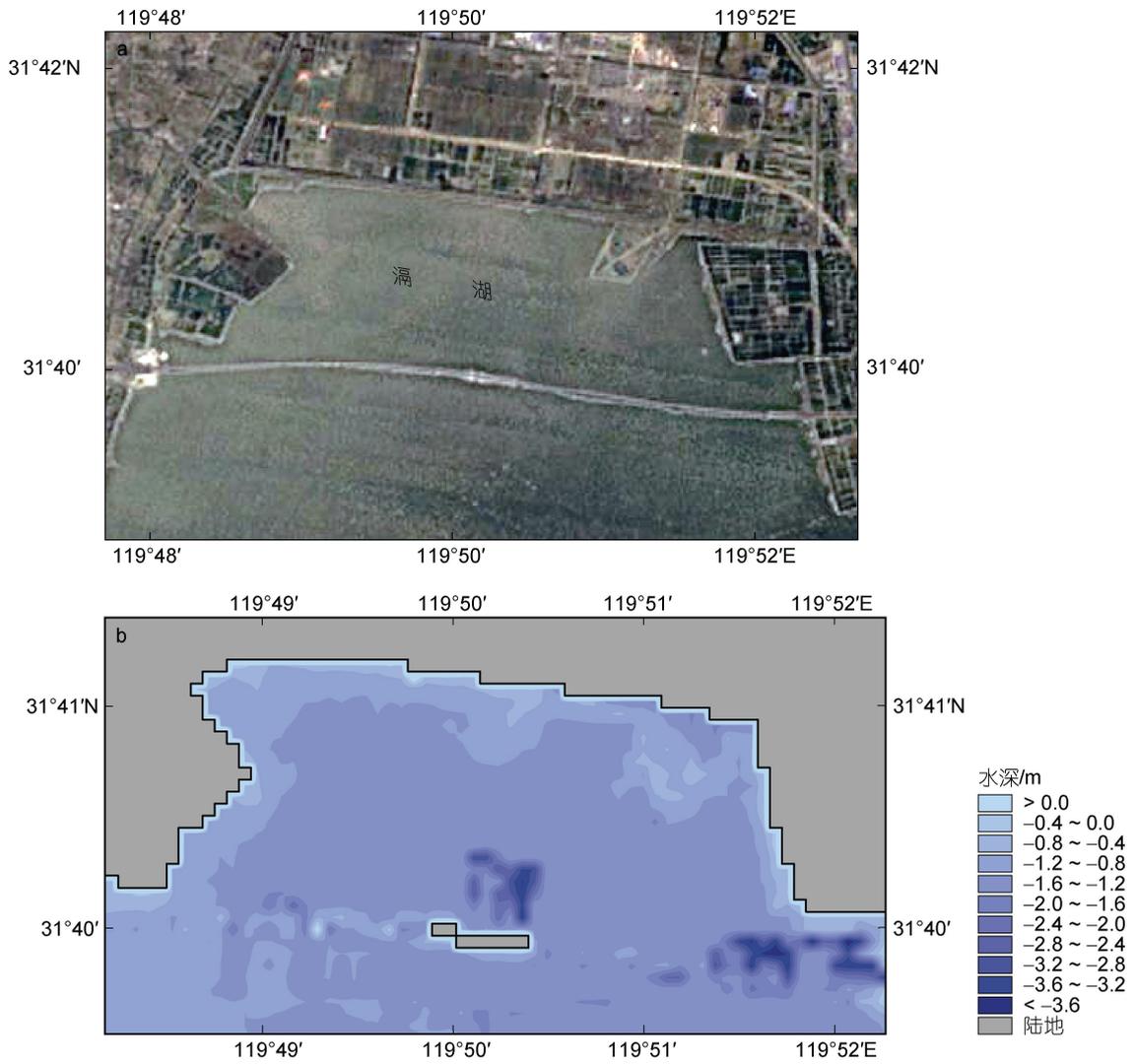
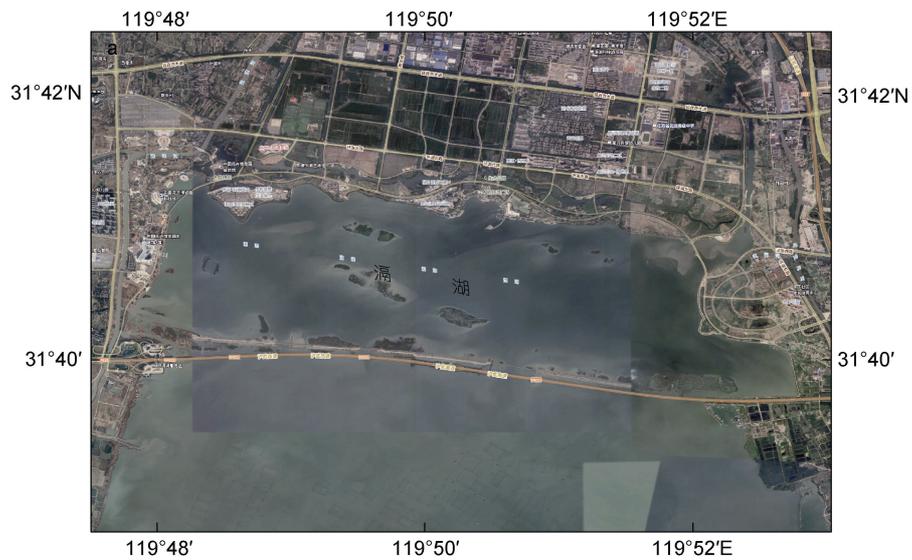


图3 滬湖北部 2009 年历史影像图和常水位下水深图

Fig.3 The image and water depth at normal water level of the northern part of Gehu Lake in 2009



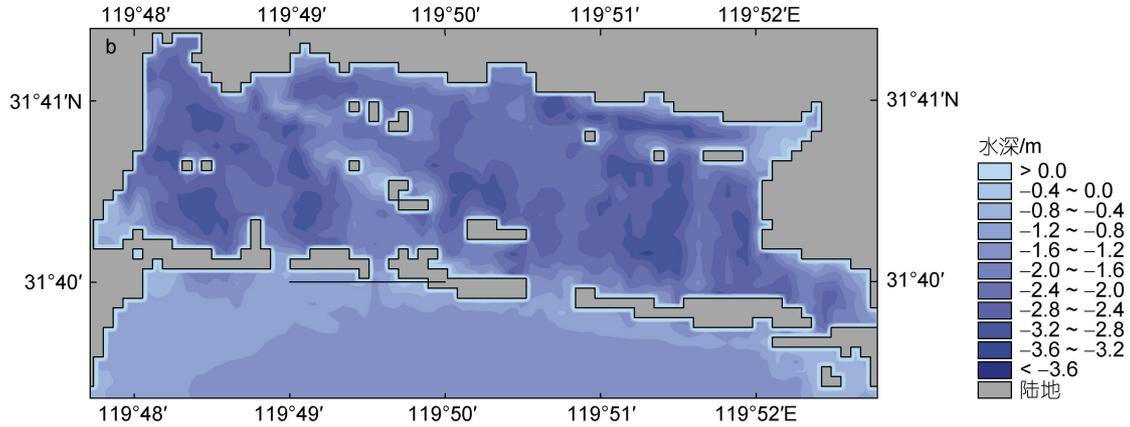


图4 滬湖北部 2020 年影像图(现状)和常水位下水深图

Fig.4 Current image and water depth at normal water level in the northern part of Gehu Lake in 2020

2.3 风场选择

根据滬湖周边国家气象站宜兴站 2016~2022 年风场统计资料(图 5), 滬湖地区夏季盛行东南、东东南风, 冬季则盛行西西北、西北风。夏季东南风占比最大, 为 22.98%, 其 10%保证率风速为 4.69 m/s; 其次为东东南风, 占比为 16.91%, 10%保证率风速为 4.44 m/s。冬季西西北风与西北风占比接近, 其中西西北风占比 9.16%, 10%保证率风速为 4.25 m/s, 西北风占比为 8.62%, 10%保证率风速为 3.38 m/s。因此分别选择东南风、东东南风、西西北风、西北风 10%保证率风速下的滬湖北部风浪场变化进行分析。

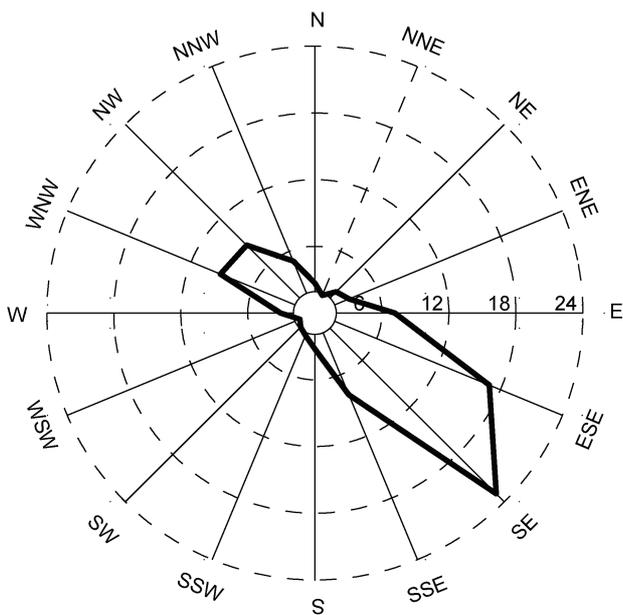


图5 宜兴站 2016~2022 年风向玫瑰图(单位: %)

Fig.5 Wind rose diagram of the Yixing Meteorological Station from 2016 to 2022 (unit: %)

3 结果与分析

3.1 人工地形重塑实施前风浪分布特征

地形重塑工程实施前, 在盛行风东南风 4.69 m/s、东东南风 4.44 m/s、西西北风 4.25 m/s 与西北风 3.38 m/s 风速作用下, 滬湖北部湖区风浪波高(H_s)和对湖底扰动强度(半波长与水深的比值, 根据波浪理论, 当半波长等于水深的时候, 波浪可以扰动到湖底, 随着该值的增加, 表示波浪对湖底的扰动强度增加, 从而引起更大强度的湖底悬浮发生)分布如图 6~9 所示。

整体看, 不同风向, 波高分布与地形变化较为一致, 水深大的区域可以形成较大的风浪, 而波浪对湖底的扰动强度则受风浪与水深大小共同控制。

东南风 4.69 m/s 时, 滬湖北部湖区形成的最大波高 0.274 m, 最小波高 0.047 m, 平均波高 0.237 m。除近岸少部分水域风浪较小外, 大部分水域波高均较大, 其中波高小于 0.15 m 和 0.20 m 的面积分别约为 0.24 km² 和 1.11 km², 占北部湖区面积的 2.44% 和 11.29%。从波浪扰动强度看, 全部湖区湖底均可受到风浪扰动影响, 扰动强度大于 1.6 的水域面积约 1.58 km², 占北部湖区面积的 15.9%。

东东南风 4.44 m/s 时, 与东南风下风浪分布相似, 由于风速略小, 风浪强度也有所减弱。北部湖区形成的最大波高 0.259 m, 最小波高 0.048 m, 平均波高 0.221 m。其中波高小于 0.15 m 和 0.20 m 的面积分别约为 0.28 km² 和 1.65 km², 占北部湖区面积的 2.85% 和 16.79%, 相较东南风下, 由于风速的降低, 弱风浪条件面积有所增加。从波浪扰动强度看, 北湖湖区全部湖底均可受到风浪扰动影响, 但扰动强度大于 1.6 的水域面积约 1.23 km², 相较东南风时有所减小。

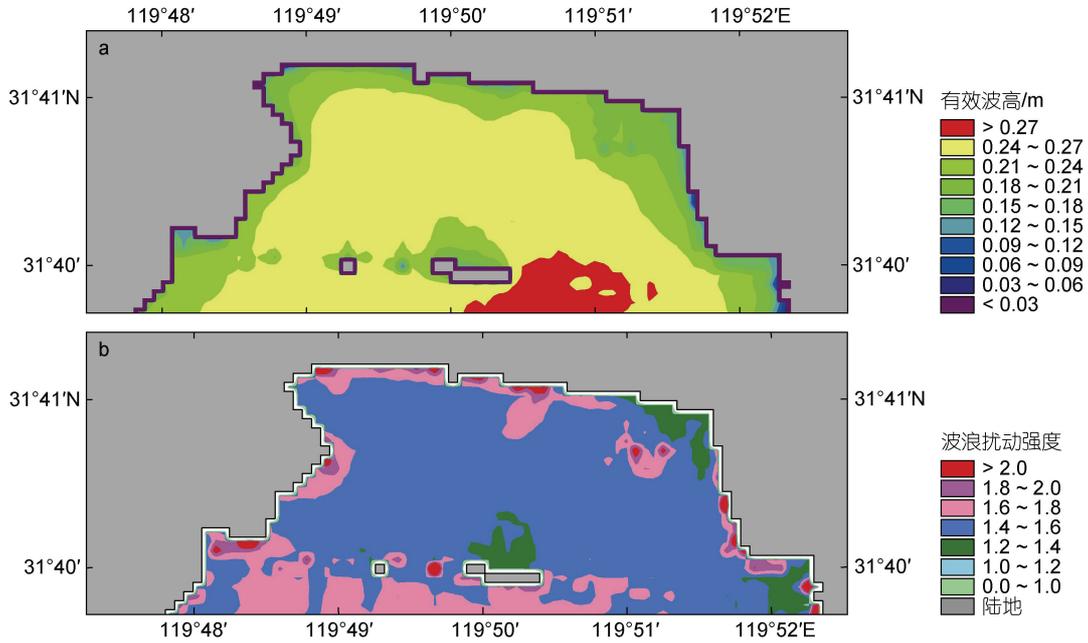


图 6 地形重塑前滬湖北部湖区受东南风 4.69 m/s 作用下波高和波浪扰动强度(半波长与水深的比值, 下同)分布情况
 Fig.6 Distribution of wave height and wave disturbance intensity (the ratio of half-wavelength to water depth, the same below) in the northern part of Gehu Lake under the action of southeast wind of 4.69 m/s before the terrain remodeling

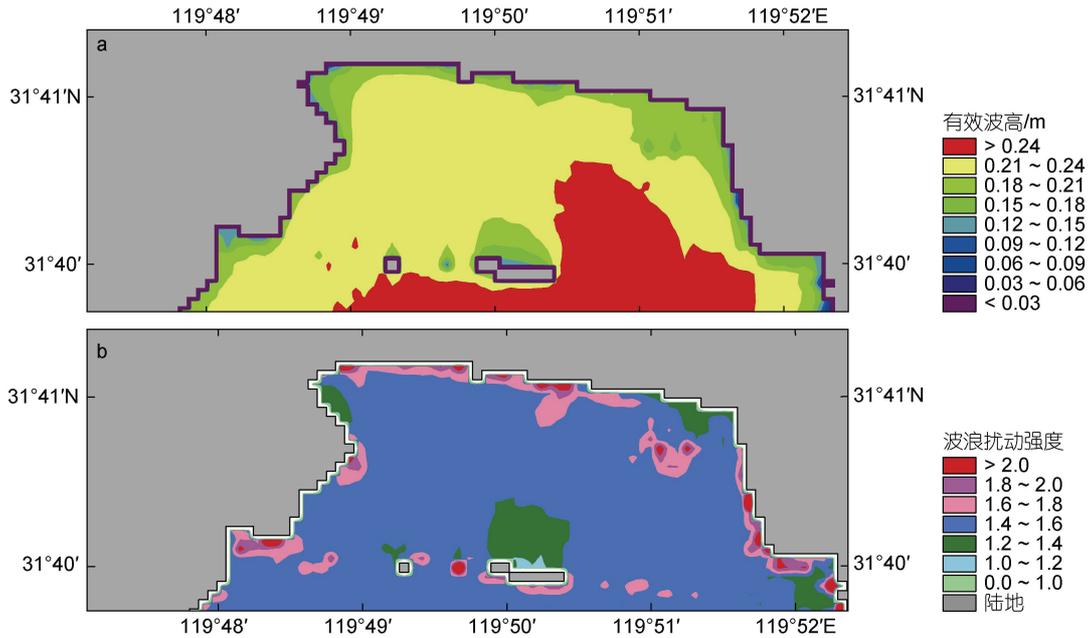


图 7 地形重塑前滬湖北部湖区受东东南风 4.44 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况
 Fig.7 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of SEE wind of 4.44 m/s before the terrain remodeling

冬季西西北和西北风下, 风速有所降低, 且相较于东南、东东南风下较长的风区长度, 由于受北部陆地影响, 风区长度有所减小, 因此相应的风浪强度显著减弱。

西西北风 4.25 m/s 时, 北部湖区形成的最大波高

0.23 m, 最小波高 0.046 m, 平均波高 0.183 m。波高小于 0.15 和 0.20 m 的面积分别约为 1.80 和 5.85 km², 占北部湖区面积的 18.31%和 59.51%。从波浪扰动强度看, 扰动强度相较于东南风时显著减弱, 近岸带附近风浪扰动强度介于 1.0~1.2, 面积约 1.58 km², 占北部

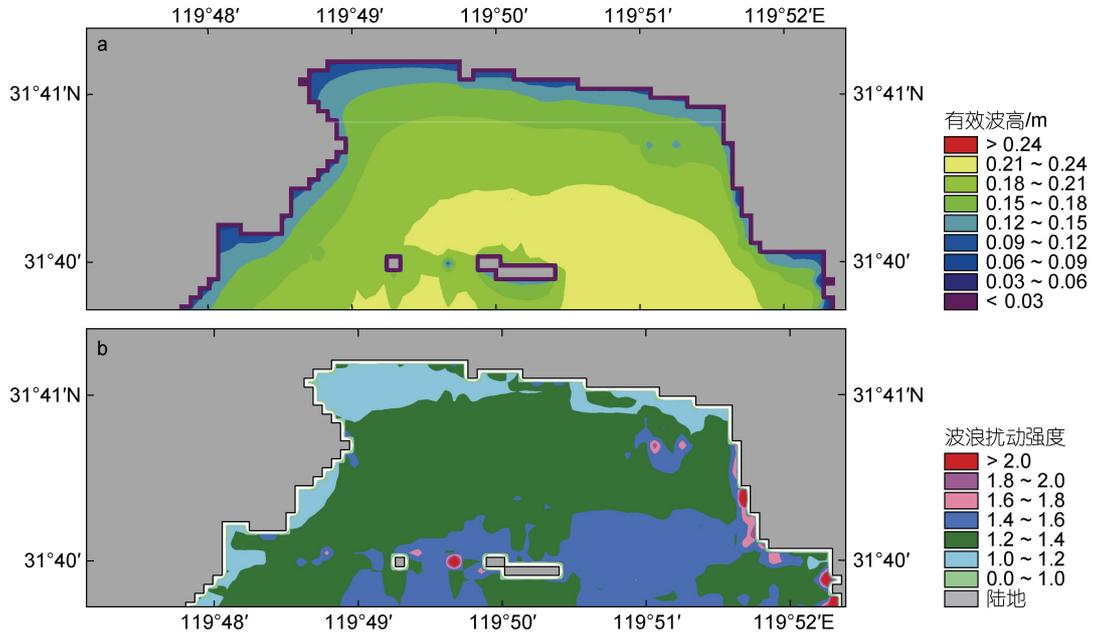


图 8 地形重塑前滱湖北部湖区受西西北风 4.25 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况

Fig.8 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of NWW wind of 4.25 m/s before the terrain remodeling

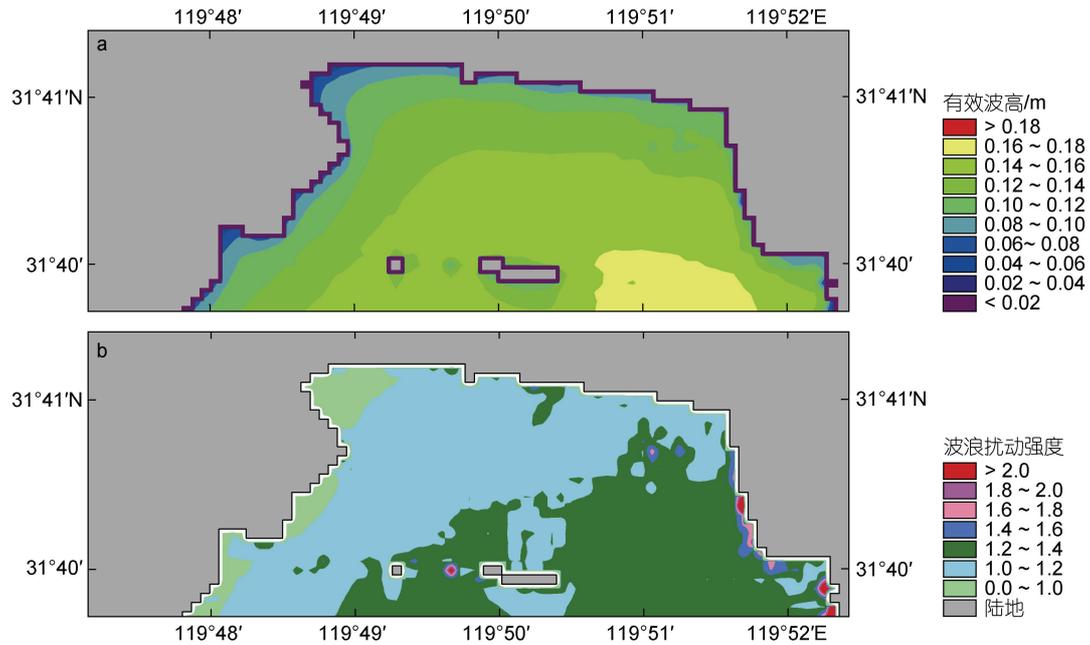


图 9 地形重塑前滱湖北部湖区受西北风 3.38 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况

Fig.9 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of NW wind of 3.38 m/s before the terrain remodeling

湖区面积的 15.9%；扰动强度介于 1.2~1.4 的水域面积为 6.25 km²，占北部湖区面积的 63.1%；扰动强度大于 1.4 的水域面积仅仅为 2.07 km²，占北部湖区面积的 20.9%。

西北风 3.38 m/s 时，风浪强度进一步减小，北部

湖区形成的最大波高 0.164 m，最小波高 0.043 m，平均波高 0.131 m。其中波高小于 0.15 m 的面积约 7.84 km²，占北部湖区面积的 79.76%。从波浪扰动强度看，西北近岸区域出现了风浪扰动强度小于 1.0 的情况，其面积约为 0.7 km²，仅在下风向的东南个别

区域(面积 0.32 km²)存在扰动强度大于 1.4 的情况。

3.2 人工地形重塑实施后风浪分布特征

人工地形重塑工程实施后, 通过多年的冲淤平衡, 漚湖北部总体处于稳定的地形形态。在盛行风东南风 4.69 m/s、东东南风 4.44 m/s、西西北风 4.25 m/s 与西北风 3.38 m/s 风速下作用下, 北部湖区风浪波高和对湖底扰动强度分布如图 10~13 所示。

东南风 4.69 m/s 时, 北部湖区形成的最大波高

0.263 m, 最小波高 0.044 m, 平均波高 0.209 m。由于内部浅岛影响, 风浪成长和传播受限, 风浪强度较小。其中波高小于 0.15 m 和 0.20 m 的面积约 1.15 km² 和 4.49 km², 占北部湖区面积的 8.55% 和 33.38%。从波浪扰动强度看, 下风向约 0.4 km² 的少部分水域湖底不受到风浪扰动影响, 大部分水域(面积 8.46 km², 占北部湖区面积的 62.9%)扰动强度介于 1.2~1.4, 扰动强度大于 1.4 的水域面积约 2.53 km², 占北部湖区面积的 18.81%。

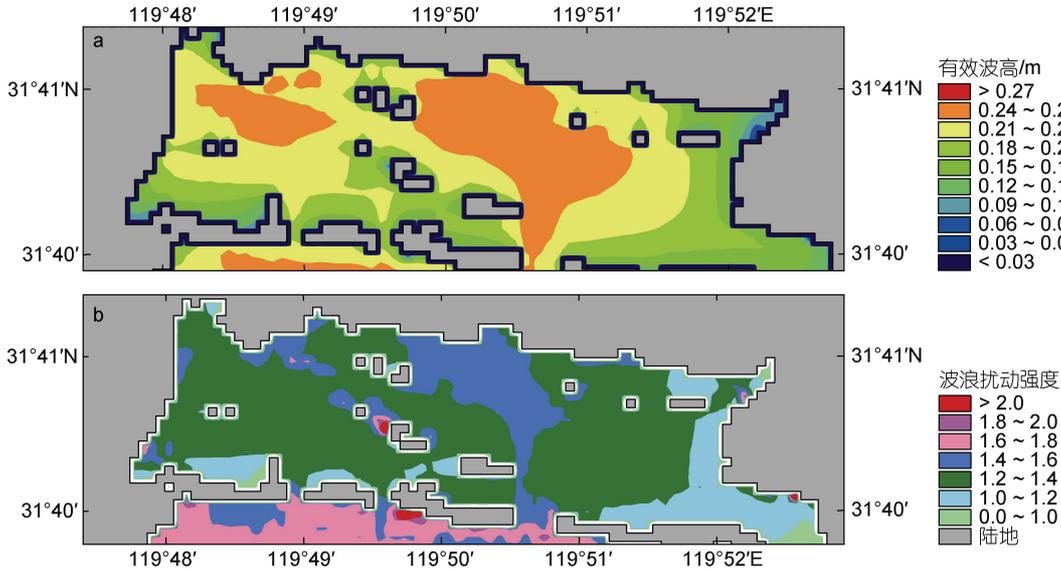


图 10 地形重塑后漚湖北部湖区受东南风 4.69 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况

Fig.10 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of SE wind of 4.69 m/s after the terrain remodeling

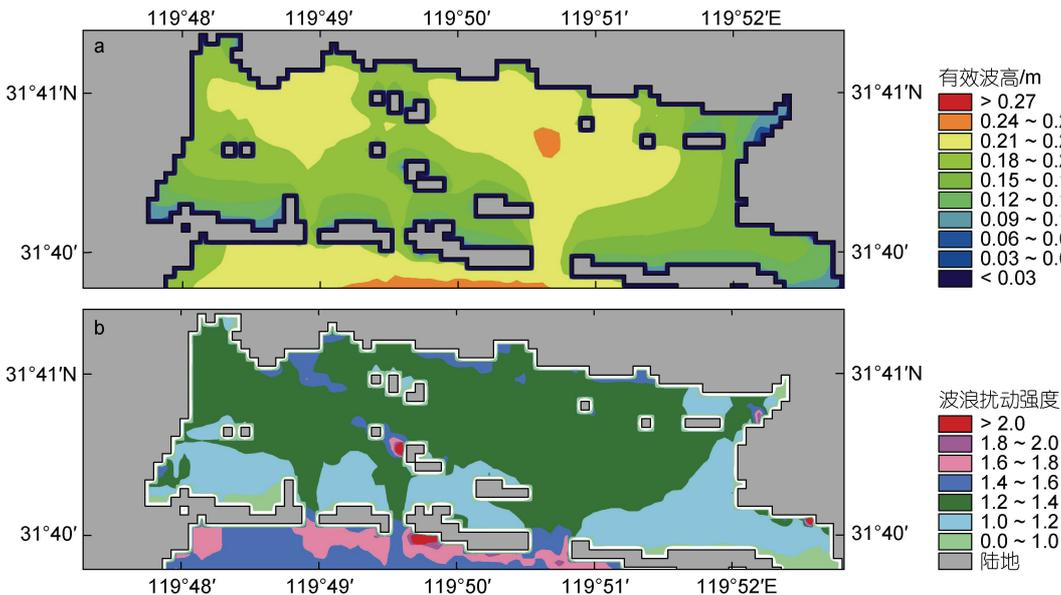


图 11 地形重塑后漚湖北部湖区受东东南风 4.44 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况

Fig.11 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of SEE wind of 4.44 m/s before the terrain remodeling

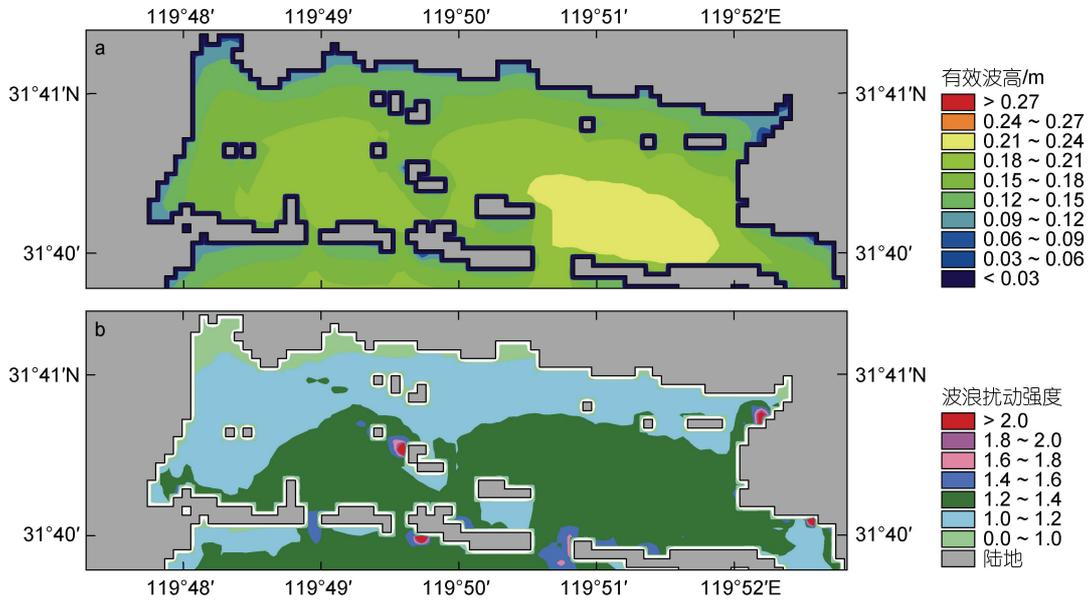


图 12 地形重塑后滹湖北部湖区受西西北风 4.25 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况

Fig.12 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of NWW wind of 4.25 m/s after the terrain remodeling

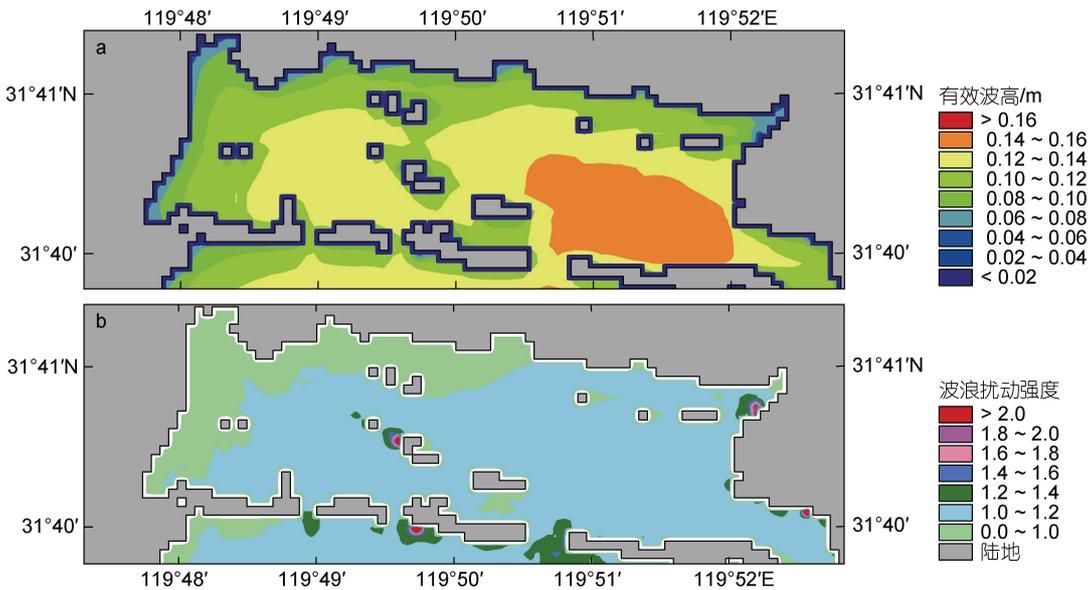


图 13 地形重塑前滹湖北部湖区受西北风 3.38 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况

Fig.13 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of NW wind of 3.38 m/s after the terrain remodeling

东东南风 4.44 m/s 时, 与东南风下风浪分布相似, 由于风速略小, 风浪强度也进一步减弱。北部湖区形成的最大波高 0.242 m, 最小波高 0.044 m, 平均波高 0.188 m。其中波高小于 0.15 m 和 0.20 m 的面积约 2.03 km² 和 7.43 km², 占北部湖区面积的 15.09% 和 55.24%。从波浪扰动强度看, 少量湖区(面积 0.62 km², 占北部湖区面积的 4.61%)湖底可不受风浪扰动影响;

61.04% 的水域面积扰动强度介于 1.2~1.4, 与东南风时基本持平; 扰动强度大于 1.4 的水域面积约 0.83 km², 相较东南风时面积有一定程度的减小。

冬季西西北和西北风下, 风速有所降低, 同时受北部陆地和内部浅岛影响, 风区长度有所减小, 相应的风浪强度显著减弱。

西西北风 4.25 m/s 时, 北部湖区形成的最大波高

0.22 m, 最小波高 0.043 m, 平均波高 0.171 m。波高小于 0.15 m 和 0.20 m 的面积约 3.44 km² 和 10.32 km², 占北部湖区面积的 25.58% 和 76.73%。从波浪扰动强度看, 西北部近岸带少部分水域(面积 0.86 km², 占北部湖区面积的 6.39%)湖底未受波浪扰动, 约 90% 的水域面积风浪扰动强度介于 1.0~1.4, 仅个别水域(面积约 0.42 km², 占北部湖区面积的 3.12%)扰动强度大于 1.4。

西北风 3.38 m/s 时, 风浪强度进一步减小, 北部湖区形成的最大波高 0.148 m, 最小波高 0.040 m, 平均波高 0.118 m。从波浪扰动强度看, 西北部水域湖底呈现不被风浪扰动形态, 弱扰动(扰动强度 1.0~1.2)、未扰动(扰动强度小于 1.0)区域合计 13.14 km², 占北部湖区面积的 97.7%, 整个湖区风浪处于较弱的状态。

3.3 地形重塑工程对风浪的影响分析

对比工程实施前后, 不同盛行风条件下, 漏湖北部湖区风浪均有较大程度的变化。

工程实施后, 夏季东南风 4.69 m/s 时湖区平均波高由 0.237 m 减小至 0.209 m, 风浪平均削减 11.81%; 波高小于 0.20 m 的湖区面积由 1.11 km² (面积占比 11.29%) 增加至 4.49 km² (面积占比 33.38%); 波高小于 0.15 m 的湖区面积由 0.24 km² (面积占比 2.44%) 增加至 1.15 km² (面积占比 8.55%)。夏季东东南风 4.44 m/s 时湖区平均波高由 0.221 m 减小至 0.188 m, 风浪平均削减 14.93%; 波高小于 0.20 m 的湖区面积由 1.65 km² (面积占比 16.79%) 增加至 7.43 km² (面积占比 55.24%); 波高小于 0.15 m 的湖区面积由 0.28 km² (面积占比 2.85%) 增加至 2.03 km² (面积占比 15.09%)。

工程实施后, 冬季西西北风 4.25 m/s 时湖区平均波高由 0.183 m 减小至 0.171 m, 风浪平均削减 6.56%; 波高小于 0.20 m 的湖区面积由 5.85 km² (面积占比 59.51%) 增加至 10.32 km² (面积占比 76.73%); 波高小于 0.15 m 的湖区面积由 1.80 km² (面积占比 18.31%) 增加至 3.44 km² (面积占比 25.58%)。冬季西北风 3.38 m/s 时湖区平均波高由 0.131 m 减小至 0.118 m, 风浪平均削减 9.92%; 波高小于 0.15 m 的湖区面积由 7.84 km² (面积占比 79.76%) 增加至 13.45 km² (面积占比 100%)。

对比工程实施前(图 6~9)和实施后(图 10~13)风浪扰动强度图, 可以看出, 工程实施后未扰动、弱扰动的湖区面积明显扩大, 而较强(扰动强度 1.4~1.6)、强扰动(扰动强度大于 1.6)的湖区则显著减少。

4 讨论

4.1 风浪状况改善积极效益分析

浅水湖泊相对波高和相对波长越大, 非线性作用越大, 当半波长与水深比为 1~1.5, 湖床以表面侵蚀为主, 当半波长与水深比大于 1.5 时, 湖床以侵蚀为主, 底泥大规模悬浮、上覆水体浊度升高, 透明度明显下降(Wu *et al.*, 2016)。波浪也是限制水生植被分布区域的重要因素(Istvánovics *et al.*, 2008; Angradi *et al.*, 2013)。太湖多年调查发现, 有效波高 < 0.05 m 的水体植被覆盖度 99% 以上, 有效波高 < 0.10 m 水体植被覆盖度达 87.5%。随着波浪强度增加, 水生植被物种数量和生物量急剧下降, 有效波高 > 0.24 m 时水体植被物种数量下降到 2 种, 为马来眼子菜和狐尾藻, 最大生物量 0.13 kg/m²。由此可知, 良好的风浪生境条件将有利于浅水湖泊透明度的提升, 水生植被的生长和恢复。

当半波长与水深比值大于 1.5 时, 湖底会发生强烈的扰动, 导致侵蚀产生。人工地形重塑实施前, 夏季东南风 4.69 m/s 和东东南风 4.44 m/s 作用下, 北部湖区湖底平均扰动强度分别为 1.56 和 1.53, 湖底会受到强烈侵蚀, 从而引起湖体悬浮物含量增加, 透明度降低, 不利于水生植物光合作用的发生, 从而对水生植物生长与发展产生不利影响; 人工地形重塑实施后, 夏季盛行风作用下, 北部区域湖底平均扰动强度分别为 1.30 和 1.24, 较工程实施前分别降低了 17% 和 19%, 平均扰动强度降至 1.5 以下, 从而减弱了湖底侵蚀的发生, 有利于水体透明度的改善, 形成适宜水生植物生长的环境。

当有效波高小于 0.24 m 时, 有利于水生植被的生存。漏湖夏季水生植被存活期间, 盛行东南风, 人工地形重塑实施前, 东南风 4.69 m/s 风速下波高小于 0.24 m 的面积约为 3.67 km², 占北部湖区面积的 37.33%, 而实施了地形重塑方案后, 波高小于 0.24 m 的面积增加至 10.31 km², 占北部湖区面积的 76.65%。东东南风 4.44 m/s 时, 由于风速强度的降低, 风浪强度总体较东南风有所降低, 有利于水生植被生存的风浪环境面积由地形重塑前的 8.19 km² 提高到了 13.37 km², 风浪条件改善的湖区面积提升显著。通过以上对比可知, 人工地形重塑措施的实施为北部湖区风浪环境带来了大幅度的提升。

4.2 地形再优化建议

漏湖北部湖区通过沿江高速处浅岛和内部大小不一的浅岛的消风减浪作用后, 整个北部湖区风浪

状况较整治前明显好转，弱风浪区范围和扰动强度均有大范围扩大。

目前湖湖北部地形(图 4)显示，内部浅岛主要分布在湖西部和武南河入湖口西侧的水域，整个湖区中部和东部的大部分水域仍为开阔状态，在盛行风

东南风和西西北风下，会在湖中部和湖东南部产生较大风浪，为此我们推荐设置如图 14 中红色区域所示的水下浅滩，由此来削减北部湖区中部风浪强度，浅滩顶高程为 3.27 m (平均水位下 0.1 m)，面积约 10.5 万 m²。

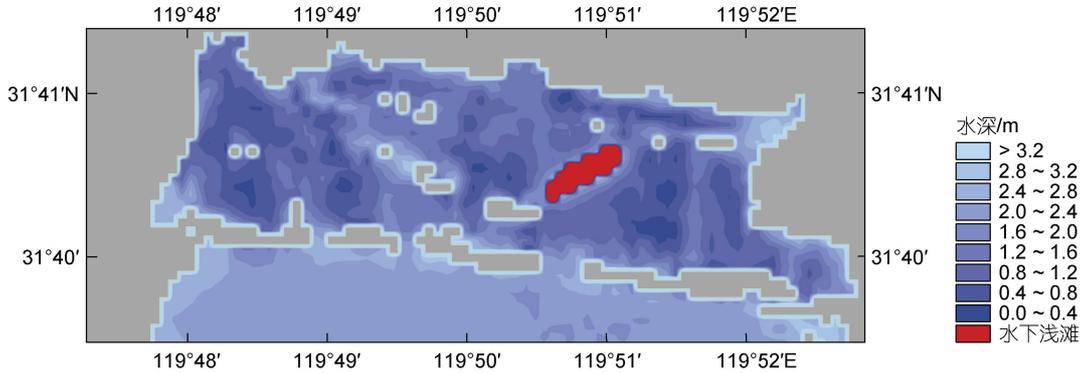


图 14 湖湖北部地形重塑优化方案

Fig.14 Optimization plan for terrain reshaping in the northern part of Gehu Lake

浅滩增设后，盛行风东南风 4.69 m/s 和西西北风 4.25 m/s 作用下，波高分布和波浪扰动强度如图 15~16 所示。北部湖区中部水域平均有效波高由 0.249 m 和 0.188 m 分别衰减为 0.211 m 和 0.165 m，中部水域平均湖底扰动强度由 1.39 和 1.20 分别衰减为 1.31 和 1.17，可以看出增设浅滩后可以有效削减湖中部风浪强度和扰动，为进一步的生态修复措施提供条件。

5 结论

风浪作为浅水湖泊重要的水动力条件，对湖泊的物理环境变化起着重要的作用。本文采用数值模拟手段，开展了湖湖北部人工地形重塑前后风浪场的变化研究，结果表明：湖湖北部地形重塑工程实施后，湖区面积增加，水深增大，在沿江高速区域、武南河

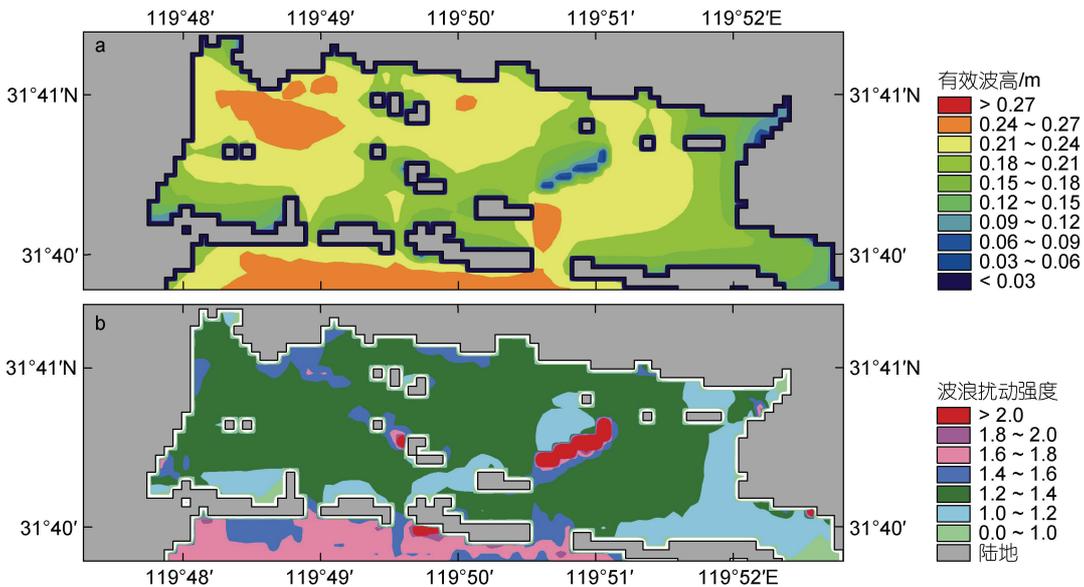


图 15 地形重塑优化后湖湖北部湖区受东南风 4.69 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况

Fig.15 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of SE wind of 4.69 m/s after optimization of terrain remodeling scheme

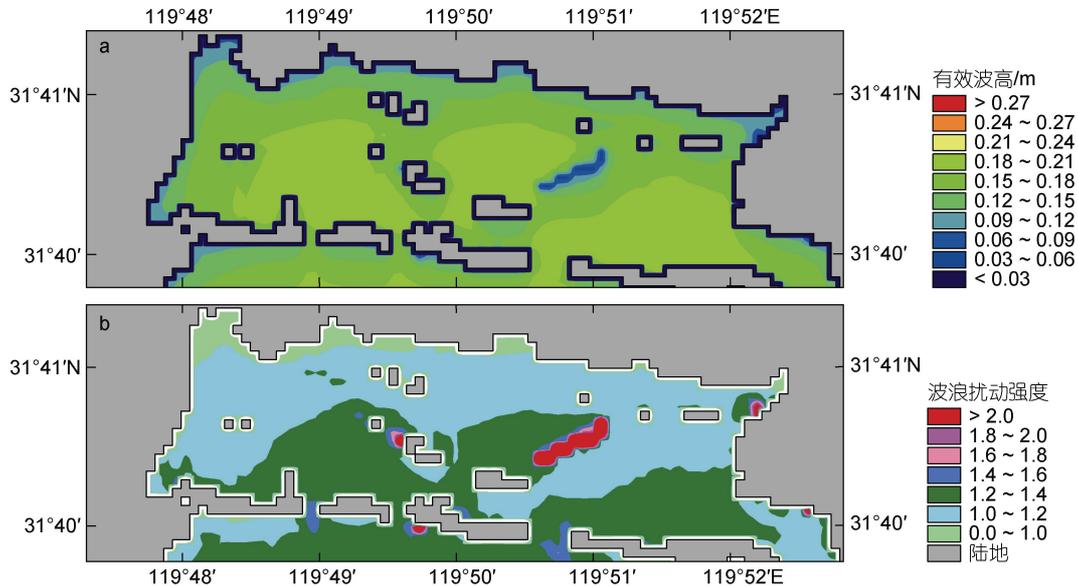


图 16 地形重塑优化后滬湖北部湖区受西西北风 4.25 m/s 作用下波高和波浪扰动强度分布情况

Fig.16 Distribution of wave height and wave disturbance intensity in the northern part of Gehu Lake under the action of NWW wind of 4.25 m/s after optimization of terrain remodeling scheme

河口西侧以及中部湖区建设了大量浅岛(潜滩), 综合效应看, 不同季节盛行风下, 风浪强度均有一定程度的衰减。夏季盛行风东南风 4.69 m/s 和东东南风 4.44 m/s 作用时, 北部湖区平均有效波高分别衰减 11.81%和 14.93%, 湖底平均扰动强度分别降低 17%和 19%, 有利于水生植被生存的水域面积(有效波高小于 0.24 m)分别增加至 10.31 km²和 13.37 km²。冬季盛行风西西北风 4.25 m/s 和西北风 3.38 m/s 作用时, 北部湖区平均有效波高分别衰减 11.81%和 14.93%, 湖底平均扰动强度分别降低 6.56%和 9.92%, 湖底平均扰动强度分别降低 9.8%和 10.3%。

人工地形重塑的实施, 减弱了滬湖北部湖区风浪强度, 削弱了风浪对湖底的扰动强度, 将有利于水体透明度的改善和形成有利于水生植被修复的风浪生境条件, 为水生植被的修复提供了良好的物理生境条件。

参 考 文 献

王震, 吴挺峰, 邹华, 等, 2016. 太湖不同湖区风浪的季节变化特征[J]. 湖泊科学, 28(1): 217-224.
 许遐祯, 陶蓉茵, 赵巧华, 等, 2013. 大型浅水湖泊太湖波浪特征及其对风场的敏感性分析[J]. 湖泊科学, 25(1): 55-64.
 李一平, 逢勇, 刘兴平, 等, 2008. 太湖波浪数值模拟[J]. 湖泊科学, 20(1): 117-122.
 何尚卫, 李勇, 潘继征, 等, 2015. 江苏滬湖北部湖区综合整治后夏季水体光环境研究[J]. 湖泊科学, 27(2): 311-318.
 沈吉, 刘正文, 羊向东, 等, 2020. 湖泊学[M]. 北京: 高等教育出版社.

张奇, 刘元波, 姚静, 等, 2020. 我国湖泊水文学研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 32(5): 1360-1379.
 张怡辉, 胡月敏, 彭兆亮, 等, 2022. 巢湖快速变化风浪场及其环境效应[J]. 湖泊科学, 34(3): 985-993.
 张怡辉, 胡维平, 2020b. 台风影响下巢湖风浪特征研究[J]. 湖泊科学, 32(1): 236-245.
 张怡辉, 胡维平, 彭兆亮, 2020a. 2018年巢湖风浪特征分析[J]. 湖泊科学, 32(4): 1177-1188.
 张洪生, 辜俊波, 文武健, 2011. 淀山湖风浪场的数值模拟[J]. 湖泊科学, 23(5): 783-788.
 罗淑葱, 秦伯强, 胡维平, 等, 2004. 不同水动力扰动下太湖沉积物的悬浮特征[J]. 湖泊科学, 16(3): 273-276.
 秦伯强, 胡维平, 高光, 等, 2003. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 48(17): 1822-1831.
 ANGRADI T R, PEARSON M S, BOLGRIEN D W, *et al*, 2013. Predicting submerged aquatic vegetation cover and occurrence in a Lake Superior Estuary [J]. Journal of Great Lakes Research, 39(4): 536-546.
 BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(C4): 7649-7666.
 FAN C X, ZHANG L, QU W C, 2001. Lake sediment resuspension and caused phosphate release-a simulation study [J]. Journal of Environmental Sciences, 13(4): 406-410.
 ISTVÁNOVICS V, HONTI M, KOVÁCS A, *et al*, 2008. Distribution of submerged macrophytes along environmental gradients in large, shallow Lake Balaton (Hungary) [J]. Aquatic Botany, 88(4): 317-330.
 LI Y P, TANG C Y, WANG J W, *et al*, 2017. Effect of wave-current interactions on sediment resuspension in large

- shallow Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4): 4029-4039.
- The SWAN Team, 2006. *Swan cycle Iii version 40.51 user manual*. Delft University of Technology [R]. The Netherlands: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section.
- WU T F, TIMO H, QIN B Q, *et al*, 2016. *In-situ* erosion of cohesive sediment in a large shallow lake experiencing long-term decline in wind speed [J]. *Journal of Hydrology*, 539: 254-264.
- WÜEST A, LORKE A, 2003. Small-scale hydrodynamics in lakes [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35: 373-412.
- YAO X Y, LIU X W, ZHOU Y C, *et al*, 2022. The influence of wind-induced sediment resuspension and migration on raw water turbidity in Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(56): 84487-84503.

STUDY ON THE WIND-WAVE VARIATION IN THE NORTHERN PART OF GEHU LAKE UNDER ARTIFICIAL TERRAIN REMODELING PROJECT

QIN Hao¹, ZHANG Yi-Hui², ZHU Jin-Ge², HU Wei-Ping², PENG Zhao-Liang²

(1. *Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215106, China*; 2. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing 210008, China*)

Abstract Wind-wave is one important hydrodynamic factor that affect the physical habitat environment of shallow lakes. A wind wave model was established based on the measured wind wave data in Gehu Lake between Wujin and Yixing, Jiangsu, South China. The verification results indicate that the model can better simulate the changes of wind waves as a function of wind field, based on which the changes of wind-wave condition in the northern part of Gehu Lake after the implementation of the artificial terrain remodeling project were analyzed. Results show a certain degree of attenuation in the wind-wave intensity and the disturbance intensity under the prevailing winds in different seasons, which was conducive to the improvement of water transparency and underwater lighting conditions. The attenuation of wind-wave intensity favored the water area with good wind-wave conditions for better growth and quick development of aquatic plant. The implementation of artificial terrain remodeling project had improved the physical habitat environment of the northern part of Gehu Lake, providing a good support to the restoration of aquatic vegetation, and a reference for the implementation of terrain reshaping projects in other shallow lakes.

Key words Gehu Lake; wind-wave; terrain remodeling; wind-wave disturbance; habitat environment