

文章编号: 1001-4179(2020)10-0073-07

长荡湖水生植被修复地形重塑方案研究

张怡辉¹ 胡维平¹ 魏庆菲² 朱金格¹ 彭兆亮¹

(1.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; 2.南京国环科技股份有限公司,江苏南京 210008)

摘要:针对常州市长荡湖水浅、浪大、底泥易悬浮,不利于水生植被生长与恢复的问题,开展了长荡湖地形重塑方案研究。SWAN风浪模型计算结果显示,在长荡湖西部入湖河口外约1 km位置布置高程为3.00 m生态潜堤,潜堤区域有效波高和波长削减比例超过16%,潜堤掩护区有效波高削减约9%,波长削减约12%。水源地保护区外围布置3.26 m高程生态潜堤,潜堤区有效波高削减比例超过44%,波长削减比例超过31%,潜堤掩护区平均削减风浪约6%~8%。湖心区域可通过布置围网、生态网等方式削减风浪。该地形重塑方案可削减风浪强度,降低风浪扰动,提高局部范围内水体透明度及其水生植被修复的成功率。

关键词:地形重塑; 植被修复; 生态潜堤; SWAN风浪模型; 长荡湖

中图法分类号: P343.3

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.10.013

水生植物是湖泊生态系统的重要组成部分,在维持生态系统平衡、改善水环境方面具有重要作用^[1]。研究发现,目前全世界33%以上的湖泊存在着湖泊富营养化和水生植被退化情况^[2]。水生植物保护和修复作为湖泊富营养化控制和水质改善的重要手段,可以维持湖泊的清水状态^[3],近年来在国内外得到广泛实践^[4-6]。大型富营养化湖泊的水生植物恢复试验或工程实践显示:风浪强度是植物恢复限制性因素之一,当遭遇强风浪过程时,人工修复后的植物群落往往会减少或消失^[7],自然状态下的湖泊生态系统也常发生水生植物受强风浪损害现象^[8-10]。研究发现,湖泊水生植被的分布与风浪强度存在着显著的关系,水生植被往往在风浪强度弱的区域有较高的出现频率和覆盖度^[11-12]。洱海调查发现3种不同风浪强度水域中的苦草生长率、叶片强度及韧性受风浪影响显著^[13]。由此可见,风浪过程对人工修复水生植物和湖泊水体中自然植被都会造成影响。

长荡湖被列入国家水质较好湖泊保护名录,既是环湖地区生活饮用水、工业用水、农业用水、渔业用水

及出入湖河道生态用水的重要水源,还是鸟类繁殖地和越冬地。近些年受长荡湖风浪持续作用影响,长荡湖沉积物再悬浮现象严重,透明度降低,导致长荡湖水生植被分布面积大幅度萎缩和消失,使得长荡湖生态系统净化能力下降。因此削弱长荡湖开阔水域风浪强度,抑制底泥再悬浮,提高水体透明度,为水生植被修复营造良好的物理生境条件是长荡湖水生植被修复的关键。本文开展长荡湖地形重塑方案研究,基于风浪模型计算的削减效果,给出最优的地形重塑方案,为长荡湖水生植被修复创造有利生境条件。

1 研究区域概况

长荡湖位于江苏省常州市金坛区东南部9 km处,跨金坛、溧阳两地,又名洮湖,系古太湖分化而成,是太湖流域三大湖泊之一,其南窄北宽,南北最长距离为13.6 km,东西最宽距离为9.3 km,湖周岸线长度约40 km,湖面面积81.9 km²,湖区平均水深0.8~1.2 m,蓄水量8 600万 m³(常水位),地形如图1所示。新建河、方洛港、新河港、大浦港、白石港、仁和港及庄阳港为主

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41431176); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”突破项目资助项目(NIGLAS2018GH02); 江苏省水利科技项目(2020066)

作者简介: 张怡辉,男,助理研究员,博士,主要从事湖泊水动力学、水环境研究工作。E-mail: yhzhang@niglas.ac.cn

要入湖河流, 淠里河、北干河及中干河则为主要出湖河流。长荡湖在湖心存在着水质省考断面, 而在北部湖区则为饮用水源地, 应为长荡湖综合治理时重点考虑区域, 如图 1 所示。

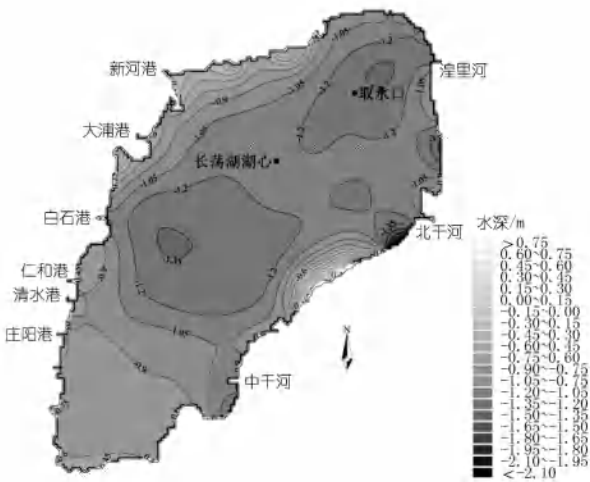


图 1 长荡湖地形和考核点位置

Fig.1 The topography of Changdang Lake and location of assessment points

2 风浪模型简介

SWAN 风浪模式 (Simulating Waves Nearshore) 是适用于海岸和内陆水体的第三代风浪模型, 由荷兰 Delft 大学土木工程系的 Booij 等^[14] 开发并由 SWAN 团队发展和完善。除了包含其他三代风浪模式 (如 WAVEWATCH^[15]、WAM^[16]) 中的风生成项、白浪耗散项、四波相互以及底部耗散项外, 还增加了三波相互作用和浅水区域水深变浅引起的风浪破碎耗散影响。

由于流存在时, 波谱能量密度不守恒, 而波作用量谱守恒, 因此 SWAN 风浪模式跟其他三代风浪模式相似, 采用波作用量密度谱对风浪进行描述。波谱作用量密度谱的变化率可以用作用量平衡方程来表示:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot [(\vec{C}_g + \vec{V})N] + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

式中: N 是波作用量密度谱, $N = S/\sigma$; S 为能量密度; t 为时间; σ, θ 为相对波频和波向; C_σ 和 C_θ 为风浪在谱空间 (σ, θ) 传播速度; $\vec{C}_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k}$ 为群速, \vec{k} 为波数矢量;

\vec{V} 为外部流速矢量; $\nabla \cdot (\)$ 为地理坐标水平梯度, $\nabla \cdot (\) = \partial(\) / \partial x + \partial(\) / \partial y$ 。

式 (1) 中: 左边第一项代表波作用量密度在时间上的局地变化; 第二项代表在空间的传播; 第三项表示由于水深和流的变化引起的频移; 第四项表示水深和流引起的折射; 方程右边是源项, 表示波能的产生、耗

散和能量再分布等物理过程。

对于源项, 通常包含以下几项:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br}$$

式中: S_{in} 为风能输入项, S_{nl3} 为三波相互作用, S_{nl4} 为四波相互作用, $S_{ds,w}$ 为白浪耗散项, $S_{ds,b}$ 为由于底部摩阻引起的耗散, $S_{ds,br}$ 为水深变浅引起的破碎导致的耗散项。风能向风浪的转换可以利用共振^[17] 和反馈^[18] 机制来阐述。其中共振机制主要作用在风浪生成的初始阶段, 随时间线性增长; 而反馈机制主要反应着波能随时间呈指数增长。其他诸如白浪耗散、四波相互、三波相互、水深变浅破碎及底摩阻耗散等源项的计算可参考 SWAN 技术手册^[19], 这里不再赘述。目前 SWAN 风浪模型在巢湖、太湖得到了广泛的应用, 表明该模型可以正确模拟湖泊风浪分布情况^[20-21]。

采用二维非恒定模型, 建立东西长 12.0 km, 南北长 14.0 km 的长荡湖模拟区域。模型的空间分辨率为 100 m×100 m, 计算时间步长取 5 min, 共开展 48 h 模拟以使计算达到稳定。拟定频率范围为 0.1~2.0 Hz, 分成 40 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°。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。由于入湖河道对风浪影响不大, 此处计算时不考虑入湖河流影响。模型中考虑了浅水中三波相互作用, 其他采用默认值。风场采用全场均一风场。

3 结果与分析

3.1 现状地形下长荡湖风浪情况

与太湖流域相似, 东南风为长荡湖主导风向, 为此利用 SWAN 风浪模型开展长荡湖现状地形东南向常风速 5 m/s 工况下的风浪分布情况, 如图 2 所示。可以看出主导风下, 长荡湖西部入湖河口、取水口以及湖心重点区域风浪都处于较大值, 在西部河口湖滨带区域、取水口保护区域以及湖心区域产生的有效波高最大值为 0.28, 0.29, 0.29 m, 有效波高平均值为 0.22, 0.26, 0.28 m, 平均波长最大值为 1.46, 1.49, 1.55 m, 平均波长平均值为 1.14, 1.34, 1.43 m, 在现状地形下, 受风浪作用, 一方面植被稳定性无法保证; 另一方面风浪搅混作用使得以上区域泥沙含量较大, 透明度较低, 不利于水生植被生长。

3.2 长荡湖地形重塑方案设计

目前长荡湖透明度低, 不利于水生植物的修复与生长, 为提高水体透明度, 创造有利于水生植物生长的生境环境, 需要对长荡湖现状地形进行重塑, 削减风浪

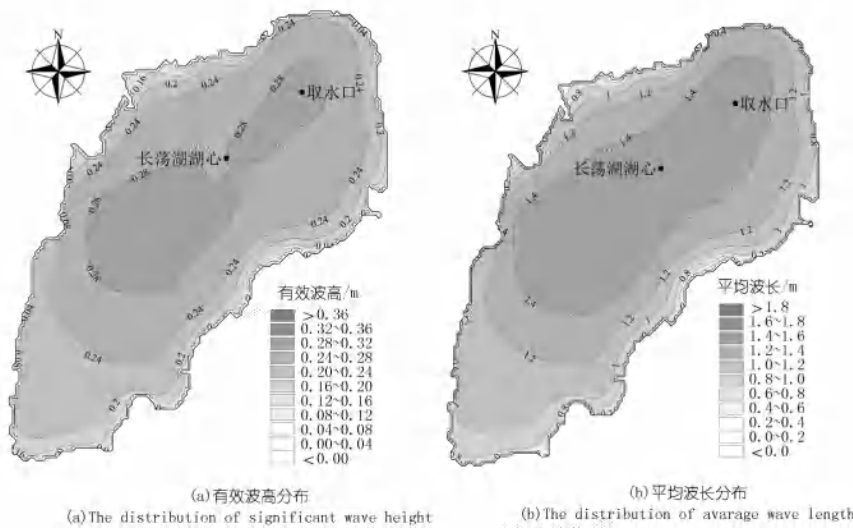


图 2 基于长荡湖常水位现状地形 5 m/s 东南风作用下的有效波高和平均波长分布情况

Fig.2 The distribution of significant wave height and averaged wavelength of Lake Changdang under constant water level when the wind with 5 m/s was southeast

在长荡湖的分布情况,减小重点区域风浪强度,减弱湖底底泥再悬浮情况。

长荡湖主导风向为东南风,为此考虑在长荡湖重点区域上风向布置生态潜堤,以此削减重点区域风浪强度,为水生植被修复创造良好的生境条件。西部湖滨带为高污染河流汇入湖体区域,取水口为水源地重点保护区域,长荡湖湖心为省考断面。以上区域需要重点开展植被修复进行水体净化,改善长荡湖水质。为此针对入湖河口、水源保护区和湖心重点区域风浪强度大,不利于水生植被生长与修复的问题,选择设计以下 4 种地形重塑方案如图 3 和表 1 所示。

3.3 风浪削减效果

为评估生态潜堤消浪效果,基于 SWAN 风浪模型,开展东南风 5 m/s 风场作用下风浪计算,不同方案地形下有效波高和平均波长削减程度分布情况如图 4~7 所示。

地形重塑后,潜堤区、潜堤掩护区如图 8 所示。可以看出:在潜堤区域,由于高程增加、水深变

浅、波浪破碎作用增强,导致波高和波长都明显减小;而在潜堤掩护、临近潜堤区域,由于潜堤掩护作用,风浪削减效果较为明显;远离潜堤区域,风的作用逐渐显现,消浪效果逐渐减弱。不同方案地形下 5 m/s 风速时产生的平均有效波高和波长以及相较现状地形下的风浪削减程度如表 2~5 所示。

(1) 方案 1。在潜堤区域风浪削减显著,入湖河口潜堤区有效波高和波长削减比例都在 16% 以上,取水口外围潜堤区削减程度更大,有效波高削减比例超过 27%,波长削减比例超过 22%。而在潜堤掩护区,风浪削减程度有所减弱,入湖河口掩护区有效

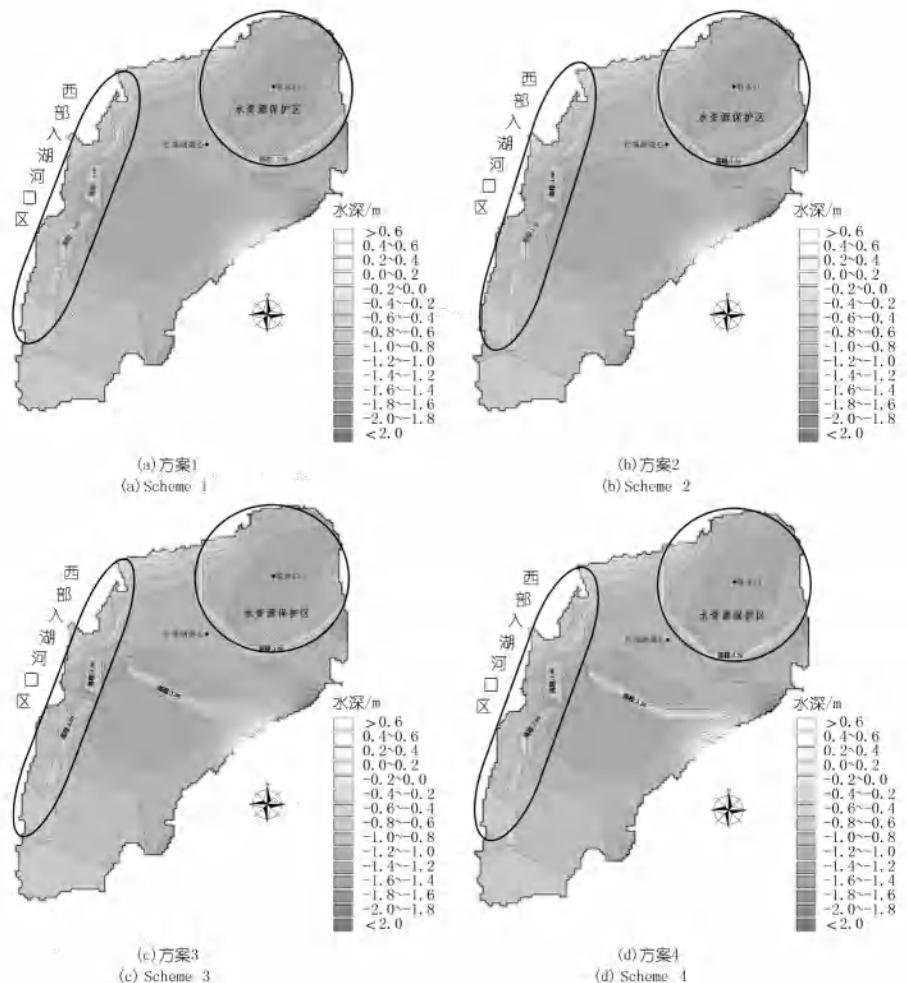


图 3 生态潜堤布置方案

Fig.3 The sketch of ecological dyke schemes

波高削减约 9% ,波长削减约 11%;取水口潜堤掩护区平均削减风浪约 4%。其中西部入湖河口潜堤掩护区、取水口潜堤掩护区有效波高削减 5% 以上面积分别为 4.75 3.32 km² ,占整个掩护区的 61.8% ,18.6%;平均波长削减 5% 以上面积分别为 6.29 4.63 km² ,占整个掩护区的 81.9% 25.9%。

表 1 生态潜堤布置方案概况

Tab.1 The overview of different schemes of topographic reconstruction

名称	方案概况
方案 1	在西部入湖河口外约 1 km 位置和水源地保护区外围布置高程为 3.00m 生态潜堤
方案 2	在西部入湖河口外约 1km 位置布置高程为 3.00m 生态潜堤 在水源地保护区外围布置高程为 3.26m 生态潜堤
方案 3	在西部入湖河口外约 1km 位置、水源地保护区外围以及湖心考核断面南侧 1.5 km 布置高程为 3.00m 生态潜堤
方案 4	在西部入湖河口外约 1km 位置布置高程为 3.00m 生态潜堤 在水源地保护区外围和湖心考核断面南侧 1.5km 布置高程为 3.26m 生态潜堤

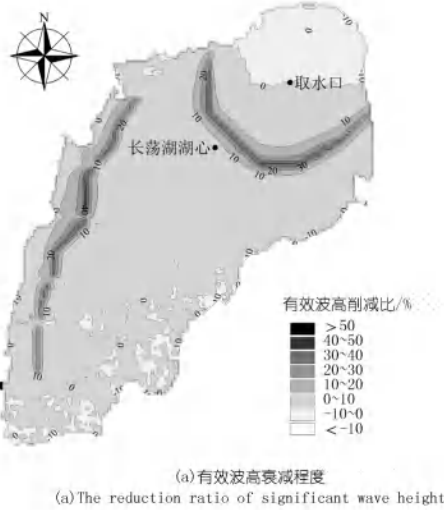


图 4 方案 1 地形下有效波高和平均波长削减程度

Fig.4 The reduction ratio of significant wave height and average wave length under the topography of scheme 1



图 5 方案 2 地形下有效波高和平均波长削减程度

Fig.5 The reduction ratio of significant wave height and average wave length under the topography of scheme 2

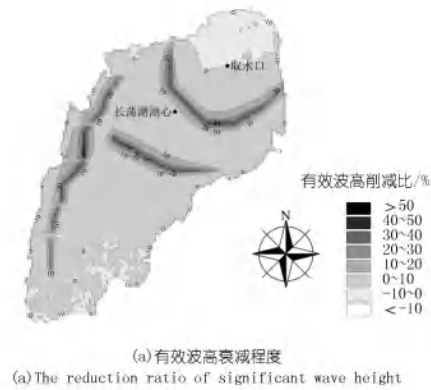


图 6 方案 3 地形下有效波高和平均波长削减程度

Fig.6 The reduction ratio of significant wave height and average wave length under the topography of scheme 3

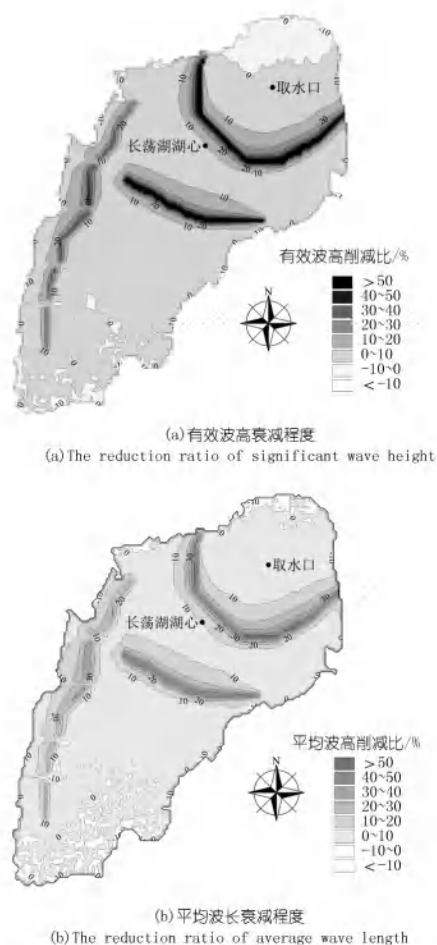


图 7 方案 4 地形下有效波高和平均波长削减程度
Fig.7 The reduction ratio of significant wave height and average wave length under the topography of scheme 4

表 2 方案 1 不同位置风浪强度统计

Tab.2 The statistics of wind wave intensity at different locations for scheme 1

位置	有效波高	削减	平均波长	削减
	平均值/m	比例/%	平均值/m	比例/%
入湖河口潜堤区	0.21	16.00	1.08	16.28
入湖河口潜堤掩护区	0.20	9.09	1.01	11.40
水源地潜堤区	0.13	27.78	0.95	22.76
水源地潜堤掩护区	0.25	3.85	1.29	3.73
湖心潜堤区	0.26	0.00	1.33	0.75
湖心潜堤掩护区	0.27	3.57	1.40	2.10

表 3 方案 2 不同位置风浪强度统计

Tab.3 The statistics of wind wave intensity at different locations for scheme 2

位置	有效波高	削减	平均波长	削减
	平均值/m	比例/%	平均值/m	比例/%
入湖河口潜堤区	0.21	16.00	1.08	16.28
入湖河口潜堤掩护区	0.20	9.09	1.00	12.28
水源地潜堤区	0.10	44.44	0.84	31.71
水源地潜堤掩护区	0.24	7.69	1.26	5.97
湖心潜堤区	0.26	0.00	1.33	0.75
湖心潜堤掩护区	0.27	3.57	1.39	2.80

表 4 方案 3 不同位置风浪强度统计

Tab.4 The statistics of wind wave intensity at different locations for scheme 3

位置	有效波高	削减	平均波长	削减
	平均值/m	比例/%	平均值/m	比例/%
入湖河口潜堤区	0.21	16.00	1.07	17.05
入湖河口潜堤掩护区	0.20	9.09	1.00	12.28
水源地潜堤区	0.13	27.78	0.95	22.76
水源地潜堤掩护区	0.25	3.85	1.29	3.73
湖心潜堤区	0.21	19.23	1.05	21.64
湖心潜堤掩护区	0.26	7.14	1.33	6.99

表 5 方案 4 不同位置风浪强度统计

Tab.5 The statistics of wind wave intensity at different locations for scheme 4

位置	有效波高	削减	平均波长	削减
	平均值/m	比例/%	平均值/m	比例/%
入湖河口潜堤区	0.21	16.00	1.07	17.05
入湖河口潜堤掩护区	0.20	9.09	1.00	12.28
水源地潜堤区	0.10	44.44	0.83	32.52
水源地潜堤掩护区	0.24	7.69	1.26	5.97
湖心潜堤区	0.17	34.62	0.93	30.60
湖心潜堤掩护区	0.25	10.71	1.29	9.79



图 8 地形重塑后不同区域范围

Fig.8 The coverage range of different functional areas after

(2) 方案 2。与方案 1 相似,在潜堤区域风浪削减显著,西部入湖河口潜堤区有效波高和波长削减比例与方案 1 相似都在 16% 以上;因取水口外围潜堤高程增加,潜堤区风浪削减程度更大,有效波高削减比例超过 44%,波长削减比例超过 31%,相较方案 1 削减效果明显增强。在潜堤掩护区,风浪削减程度有所减弱,入湖河口掩护区有效波高削减约 9%,波长削减约 12%,与方案 1 相似;取水口潜堤掩护区平均削减风浪约 6%~8%,较方案 1 削减强度增加。其中西部入湖

河口潜堤掩护区、取水口潜堤掩护区有效波高削减 5% 以上面积分别为 4.91、6.29 km², 占整个掩护区的 63.9%、35.2%; 平均波长削减 5% 以上面积分别为 6.29、7.00 km², 占整个掩护区的 81.9% 和 39.2%。相较方案 1, 在取水口潜堤掩护区风浪削减面积显著增加。

(3) 方案 3。与方案 1 相比, 主要在湖心保护区南侧增加了生态潜堤, 西部入湖河口生态潜堤和取水口生态潜堤与方案 1 一致, 相应地对两个潜堤区及掩护区的风浪削减效果也相似。在湖心潜堤区域有效波高和波长削减比例在 19% 以上, 而在湖心生态潜堤掩护区风浪削减比例约为 7% 左右。其中湖心潜堤掩护区有效波高削减 5% 以上面积分别为 4.57 km², 占整个掩护区的 40.8%; 平均波长削减 5% 以上面积分别为 6.55 km², 占整个掩护区的 58.5%。

(4) 方案 4。与方案 2 相比, 主要在湖心保护区南侧增加了生态潜堤, 西部入湖河口生态潜堤和取水口生态潜堤与方案 2 一致, 与方案 3 相比, 提高了取水口生态潜堤和湖心区生态潜堤高程。在湖心潜堤区域有效波高和波长削减比例超过 30% 以上, 在湖心生态潜堤掩护区风浪削减比例约为 10%, 相较方案 2 和方案 3 消浪效果有所提升。其中湖心潜堤掩护区有效波高削减 5% 以上面积分别为 7.96 km², 占整个掩护区的 71.1%; 平均波长削减 5% 以上面积分别为 10.03 km², 占整个掩护区的 89.6%。

4 讨 论

由以上不同方案的计算及分析结果可以看出: 潜堤削减波长效果较削减波高效果显著些, 随着风速增加, 潜堤掩护消浪效果逐渐减弱。考虑波长是决定风浪是否能对湖底产生搅浑作用的重要因素之一, 因此通过潜堤掩护作用, 可减弱风浪作用, 减弱风浪对湖体底部的动力扰动, 进而降低底泥再悬浮, 增加透明度, 为水生植被修复营造良好的生境环境。

对比不同方案消浪效果, 西部入湖河口外围布置 3.00 m 高程生态潜堤可有效削减主导平均风场下风浪强度, 为西部沿岸污染阻截净化区内水生植被修复创造有利的生境条件。水源地保护区外围布置 3.26 m 高程生态潜堤较 3.00 m 高程生态潜堤消浪效果更加明显, 工程量增加约 10%, 消浪强度提升 60% 以上。根据计算可在水源地南部沿生态潜堤形成一 4.47 km² 范围的弱风浪区(削减风浪强度 20% 以上区域), 为该区域水生植被修复创造有利的生境条件。湖心南侧布置生态潜堤虽可一定程度削减风浪, 但削减风浪程度有限, 且对湖心区考核断面的有利效果较小。由于湖心区域风区较长, 不同风向来风均可形成较大风浪, 同时

湖心水域水深较大, 工程量巨大, 工程作业难度相较近岸增加, 通过布置生态潜堤方案来削减风浪不够经济, 因此不考虑在湖心考核区域外围布置生态潜堤, 可通过诸如布置围网、生态网等方式削减风浪, 为水生植被修复创造有利生境条件。

此外在河口外侧和水源地保护区南侧布置生态潜堤所产生的阻流作用, 可以减弱大浦港、白石港等入湖高污染水流冲向湖心和水源地区域, 进一步降低长荡湖湖体污染。

综合以上分析, 方案 2 可以作为长荡湖水生植被修复的地形重塑方案。西部入湖河口外侧生态潜堤水生植被修复过程中, 可以根据图 5 不同位置风浪削减程度分布, 配置不同类型植被, 提高长荡湖水生植被修复的成功率。

5 结 论

针对长荡湖水浅、浪大、底泥易悬浮, 不利于水生植被的生长与恢复的问题, 本文开展了长荡湖地形重塑方案研究, 基于风浪削减效果设计最佳地形重塑方案, 可以得出以下结论。

长荡湖西部湖滨带为高污染河流汇入湖体区域, 在西部入湖河口外约 1 km 位置布置高程为 3.00 m 生态潜堤, 可有效削减主导平均风场下风浪强度, 潜堤区域有效波高和波长削减比例超过 16%, 潜堤掩护区有效波高削减约 9%, 波长削减约 12%, 降低西部湖滨带底泥再悬浮和动力强度, 为西部沿岸污染阻截净化区内水生植被修复创造有利的生境条件。水源地保护区外围布置 3.26 m 高程生态潜堤, 潜堤区有效波高削减比例超过 44%, 波长削减比例超过 31%, 潜堤掩护区平均削减风浪约 6%~8%, 可在水源地南部沿生态潜堤形成一 4.47 km² 范围的弱风浪区(削减风浪强度 20% 以上区域), 有利于该区域水生植被修复。

湖心区域风区较长, 不同风向来风均可形成较大风浪, 同时湖心水域水深较大, 工程量巨大, 工程作业难度相较近岸增加, 可通过诸如布置围网、生态网等方式削减风浪, 为水生植被修复创造有利生境条件。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WANG C, ZHU P, WANG P, et al. Effects of aquatic vegetation on flow in the Nansi Lake and its flow velocity modeling I Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No: 2002CB412303) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos: 50239010, 50379012) [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2006, 18(6): 640-648.
- [3] PERROW M R, DAVY A J. Handbook of Ecological Restoration: Vol-

- ume 1: Principles of Restoration [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [4] IBELINGS B W, PORTIELJE R, LAMMENS E H R R, et al. Resilience of Alternative Stable States during the Recovery of Shallow Lakes from Eutrophication: Lake Veluwe as a Case Study [J]. *Ecosystems*, 2007, 10(1): 4–16.
- [5] 杨龙元, 梁海棠, 胡维平, 等. 太湖北部滨岸区水生植被自然修复观测研究 [J]. *湖泊科学*, 2002(1): 60–66.
- [6] 张胜华, 赵丽娜, 田焕新, 等. 安徽宿松华阳湖群水生植被恢复试验研究 [J]. *生物学杂志*, 2017, 34(4): 69–75.
- [7] GULATI R D, DIONISIO PIRES L M, VAN DONK E. Lake restoration studies: Failures, bottlenecks and prospects of new ecotechnological measures [J]. *Limnologia*, 2008, 38(3): 233–247.
- [8] SCHEFFER M, HOSPER S H, MEIJER M, et al. Alternative equilibria in shallow lakes [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1993, 8(8): 275–279.
- [9] BACHMANN R W, HOYER M V, CANFIELD D E. Internal heterotrophy following the switch from macrophytes to algae in Lake Apopka, Florida [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 418(1): 217–227.
- [10] WILSON J R U, AJUONU O, CENTER T D, et al. The decline of water hyacinth on Lake Victoria was due to biological control by *Neochetina* spp [J]. *Aquatic Botany*, 2007, 87(1): 90–93.
- [11] ISTVÁNOVICS V, HONTI M, KOVÁCS Á, et al. Distribution of submerged macrophytes along environmental gradients in large, shallow Lake Balaton (Hungary) [J]. *Aquatic Botany*, 2008, 88(4): 317–330.
- [12] ANGRADI T R, PEARSON M S, BOLGRIEN D W, et al. Predicting submerged aquatic vegetation cover and occurrence in a Lake Superior or estuary [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, 39(4): 536–546.
- [13] ZHU G, ZHANG M, CAO T, et al. Associations between the morphology and biomechanical properties of submerged macrophytes: implications for its survival and distribution in Lake Erhai [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 3907–3916.
- [14] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H A. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1999, 104(C4): 7649–7666.
- [15] TOLMAN H L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1991, 21(6): 782–797.
- [16] GROUP T W. The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1988, 18(12): 1775–1810.
- [17] PHILLIPS O M. On the generation of waves by turbulent wind [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, 2(5): 417–445.
- [18] JOHN W. On the generation of surface waves by shear flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, 3(3): 185–204.
- [19] SWAN Team. SWAN Cycle III version 40.51 user manual. Delft University of Technology [R]. Netherlands: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section, 2006.
- [20] 张怡辉, 胡维平. 台风影响下巢湖风浪特征研究 [J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 236–245.
- [21] 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): 217–224.

(编辑: 黄文晋)

引用本文: 张怡辉, 胡维平, 魏庆菲, 等. 长荡湖水生植被修复地形重塑方案研究 [J]. *人民长江*, 2020, 51(10): 73–79.

Study on topographic reconstruction of aquatic vegetation restoration in Changdang Lake

ZHANG Yihui¹, HU Weiping¹, WEI Qingfei², ZHU Jing¹, PENG Zhaoliang¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Nanjing Guohuan Science and Technology Co., Ltd, Nanjing 210008, China)

Abstract: In view of the problems of shallow water, large waves and easy suspension of sediment in Changdang Lake, which is not conducive to the growth and restoration of aquatic vegetation, the study on the best scheme of topographic reconstruction in Changdang Lake was carried out. According to the calculation results by SWAN wind wave model, when an ecological dyke with an elevation of 3.00 m was placed at the position about 1 km outside the entering estuary at the west of Changdang Lake, the reduction ratio of wave height and average wave length were more than 16% in adjacent area of ecological dyke and the reduction ratio of wave height and average wave length were about 9% and 12% respectively in the shelter area behind ecological dyke. When an ecological dyke of 3.26 m height was arranged at the periphery of the water source protection area, the reduction ratio of wave height and average wavelength were more than 44% and 31% respectively in the adjacent area of ecological dyke and the wind wave were reduced by about 6%~8% in the shelter area behind ecological dyke. In the center of the lake, wind wave could be reduced by arranging seine and ecological nets. After the topographic reconstruction of Changdang Lake, the intense and disturbance of wind wave could be reduced and the water transparency in local areas could be improved, and eventually the success rate of aquatic vegetation restoration in Changdang Lake could be improved.

Key words: topographic reconstruction; aquatic vegetation; ecological dyke; SWAN wind wave model; Changdang Lake