

太湖西部湖区滨岸带湖流冲刷特征研究

张中天, 吴小靖*, 许 强, 史传萌, 展永兴, 柳子豪

(江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215006)

摘要: 利用太湖二维水动力模型, 分析了不同风场条件下的太湖西部湖流特征以及滨岸带冲刷深度。研究表明, 太湖湖流的冲刷会对滨岸带产生不利影响, 尤其在东风、南风、东南风驱动的情境下, 湖流对滨岸带的侵蚀最为严重。通过对滨岸带进行基底修复, 可以防止湖流的冲刷侵蚀。

关键词: 冲刷影响; 水动力; 风生流; 滨岸带; 太湖

中图分类号: TV14

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)12-0027-0007

Study on characteristics of erosion induced by lake flow on littoral zone in western area of Taihu Lake

ZHANG Zhongtian, WU Xiaojing, XU Qiang, SHI Chuanmeng,

ZHAN Yongxing, LIU Zihao

(Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215006, China)

Abstract: Based on the two-dimensional hydrodynamic model of Taihu Lake, the characteristics of lake flow and the erosion depth of littoral zone in the west of Taihu Lake under different wind conditions are analyzed. The results show that the erosion of lake current in Taihu Lake will have adverse effects on the littoral zone, especially under the situation of east wind, south wind and southeast wind, the erosion of lake current on the littoral zone is the most serious. The erosion of lake flow can be prevented by basement restoration of littoral zone.

Key words: erosion influence; hydrodynamic; wind-driven current; littoral zone; Taihu Lake

湖泊滨岸带是指位于湖泊等水体两边或周围、介于陆地生态系统和水生生态系统之间的狭长植被带, 它不仅可以提供生物栖息地和保持生物多样性, 还具有固岸和降低侵蚀、涵养水源、维持区域生态环境功能^[1]。20世纪90年代以前, 太湖西部沿岸为自然形成的岸坡, 一般为离湖边30~80 m为芦苇带, 部分区段湖边水域中有200~300 m以上的芦苇等水生植物带, 而向陆域200~300 m为湖边坡地, 其坡面依次为池杉防护林、桑地、菜地或旱地, 坡顶高

程3~4 m, 再向内为桑园或耕地, 高程在5.0 m左右。20世纪90年代后, 随着太湖一轮治太, 原自然滨岸带逐步转化为堤岸型滨岸带, 太湖西部沿岸的大堤临水侧高程3.0~5.0 m为直立式浆砌石挡墙, 5.0~7.0 m为斜坡式混凝土护面, 堤前抛石保护。此时的西部湖区由于岸边完整的芦苇带的存在, 起到了防止湖流冲刷、削峰减浪、净化水质的作用^[2]。

太湖大堤列入太湖流域综合治理骨干工程后, 成为地区重要的防洪屏障^[3], 是流域防洪调蓄和水

收稿日期: 2023-07-11

基金项目: 江苏省水利科技项目(2019024; 2015007; 2020009)

作者简介: 张中天(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事河流动力学及环境水力学研究。E-mail: zhongtian_zhang@163.com

通信作者: 吴小靖(1991—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利规划工作。E-mail: 40837672@qq.com

资源调配的重要基础,是统筹太湖蓄泄的关键^[4-5]。尽管环湖大堤在防洪方面起到了重要作用,但是受硬质大堤的影响,太湖湖流和波浪对大堤外的芦苇滩地产生了明显的冲刷作用,滨岸带出现了严重的退化,至目前为止,已基本消失,不少堤段已经无水生植物分布,而部分还存留有水生植物的地方,水生植物的长势也是非常差,昔日芦花摇曳、环境优美的景象不复存在^[6-7]。

为了彻底掌握太湖西部湖区冲刷特征及其影响,本文采用太湖二维水动力模型进行精细化计算,分析了不同湖流条件下太湖西部湖区滨岸带的参数程度,并提出了合理的解决方案。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

由于本文的研究对象是西部湖区,根据水利部太湖流域管理局对太湖的划分,本文选取竺山湖和西部沿岸区的湖区作为研究对象,分析其水动力特征,并将它们的滨岸带作为冲刷特征的研究区域。

1.2 水动力模型

本次采用太湖二维水动力数学模型^[8-13]模拟太湖湖区流场。考虑 Boussinesq 近似^[14]和浅水假定,以及风应力的影响,则垂向积分的二维水动力学方程组为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = S \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial z}{\partial x} -$$

$$\frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s s \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = f\bar{u}h - gh\frac{\partial z}{\partial y} -$$

$$\frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s s \quad (3)$$

式中: h 为静止水深; t 为时间; u, v 分别为流速在 x, y 方向上的分量; \bar{u}, \bar{v} 为沿水深平均的流速; S 为源项; f 为 Coriolis 力参数; g 为重力加速度; z 为水位; ρ_0 为参考水密度; P_a 为当地大气压; ρ 为水的密度; $T_{sx}, T_{sy}, T_{bx}, T_{by}$ 为有效剪切力分量; $s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 均为辐射应力分量; $T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 均为水平黏滞应力项; u_s, v_s

为源汇项水流流速。

本文使用的水动力模型基本参数如下:采用曼宁糙率系数用于模型计算,湖区糙率系数采用 0.030;横向涡黏系数采用 Smagorinsky^[15]公式估算,相应 Smagorinsky 系数取值为 0.28 m²/s,水平涡黏系数^[16]则采用对数公式估算;根据模型网格大小、水深条件动态调整模型计算时间步长,使 CFL 数小于 0.8,满足模型稳定的要求,计算时步长在 0.01~30 s 之间;对计算区域内滩地干湿过程,采用网格冻结方法处理,当某点水深小于 0.005 m 时,令该网格点为干点,滩地干出,不参与水动力计算,当某点水深大于 0.005 m 但小于 0.05 m 时,令该处流速为零,该网格点仅参与水流连续方程的计算;当该处水深大于 0.1 m 时,该网格点参与计算,潮水上滩;本次模型计算的太湖湖区水下地形采用 2018 年 5 月湖区实测的水下地形测量资料。

1.3 滨岸带冲刷深度计算方法

根据《堤防工程设计规范(B50286—2013)》,太湖西侧边岸的冲刷深度可用:

$$h_s = H_0 \left[\left(\frac{U_{cp}}{U_c} \right)^n - 1 \right] \quad (4)$$

$$U_{cp} = U \frac{2\eta}{1+\eta} \quad (5)$$

式中: h_s 局部冲刷深度, m; H_0 冲刷处的水深, m; U_{cp} 近岸垂线平均流速, m/s; n 与防护岸坡在平面上的形状有关,取 $n=1/4 \sim 1/6$; U_c 为起动流速, m/s; η 为水流流速不均匀系数,根据水流流向与岸坡交角 α 来取值,见表 1。

表 1 不均匀系数取值

α	$\leq 15^\circ$	20	30	40	50	60	70	80	90
η	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00

1.4 冲刷程度计算方法

为了计算滨岸带不同区域遭受冲刷影响的程度,本文定义了一个无量纲数滨岸带冲刷影响指数 θ :

$$\theta = \frac{h_s}{h_{s0}} \quad (6)$$

式中: h_s 局部冲刷深度, m; h_{s0} 最大冲刷深度, m; 而局部冲刷深度(h_s)的计算则是根据不同风向导致的冲刷深度,并以其出现频率为加权因子做的加权平均。

$$h_s = \sum_{i=1}^8 h_{si} P_i \quad (7)$$

式中: h_{si} 为8种不同风向的局部冲刷深度, m; P_i 为8种不同风向的出现频率。

本文定义滨岸带的冲刷影响指数 $\theta > 0.8$ 表示重度影响; $0.5 < \theta \leq 0.8$ 表示中度影响; $0.2 < \theta \leq 0.5$ 表示轻度影响; $\theta \leq 0.2$ 表示几乎无影响。

2 计算结果

2.1 太湖地区风场特征

本文利用太湖地区东山站的1966—2020年共55年的长序列气象资料,分析了东、西、南、北、东南、西南、东北、西北8个风向的出现频率、特征风速

(图1)。为给太湖二维水动力数学模型提供合适的边界条件,本文定义选取10年一遇的风速(频率10%),来作为太湖二维水动力数学模型的边界条件。总体来说,太湖的主风向为东南风和南风,太湖不同风向的风速在10年一遇的风速条件下,基本在7~12 m/s,而东南和南主风向的风速大约在7.5~8 m/s。

2.2 太湖西部湖区流场特征

本文利用太湖二维水动力数学模型,计算出太湖在东、西、南、北、东南、西南、东北、西北8个风向下的流场(图2),所用边界条件为特征风速。利用此流场,做滨岸带冲刷特征分析。根据式(4)和式(5),冲刷深度和滨岸带的湖流流速和滨岸带流速方向有关,当流速越大的时候,滨岸带堤防越容

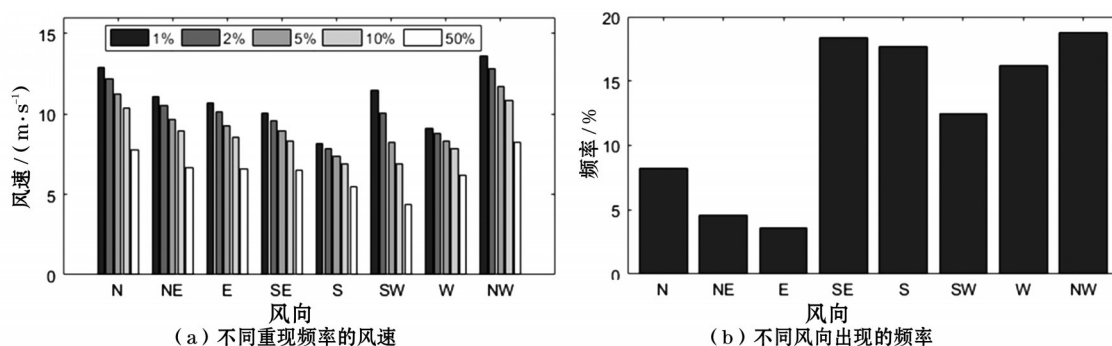


图1 太湖风速风向特征

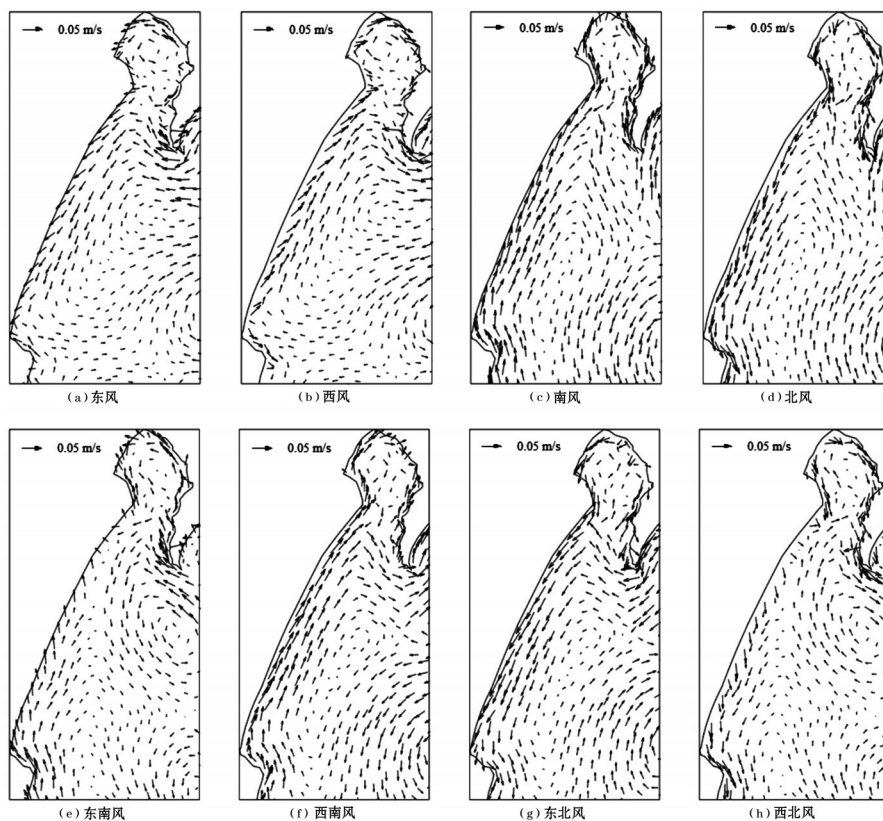


图2 西部湖区流场图

易被冲刷侵蚀;当湖流正对滨岸带冲刷且交角较大的时候,滨岸带堤防也越容易被侵蚀。因此,从图2可以看出,在10年一遇的风速下,太湖西部湖区的湖流流速基本在0.05 m/s以内。在东风和东南风的情况下,湖流与滨岸带交角较大。南风导致的湖流虽然与滨岸带交角小,但是流速较大。因此这几种情况容易导致滨岸带受到湖流侵蚀。西南风、东北风、北风3种工况虽然在滨岸带的流速较大,但是由于其流速方向有远离滨岸带的趋势,所以不会造成太大的冲刷影响。

3 分析讨论

3.1 冲刷深度分布

利用公式(4),不同工况下的太湖西侧边岸的冲刷深度可以计算得出(图3)。对比图3可以明显看出,在竺山湖区域,由于处于湖湾处,岸线的分布比较复杂,所以无论什么风向的风生流,其冲刷严重的区域都分布比较零散。而西部沿岸区的岸线比较平直,因此冲刷分布比较规整。

冲刷最为严重的是在东风、东南风与南风的情

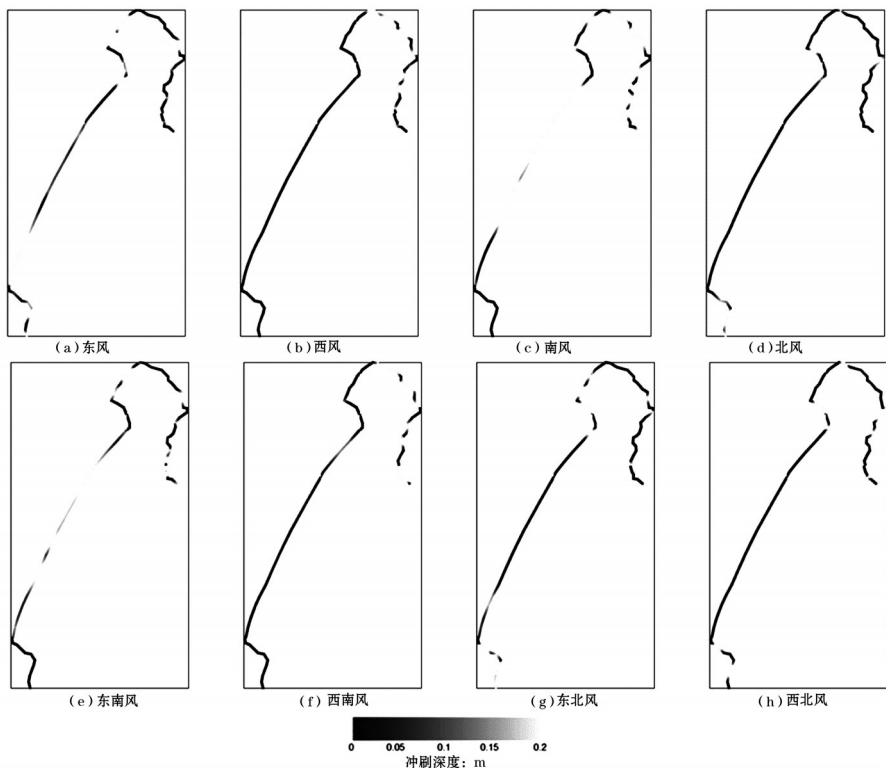


图3 西部湖区滨岸带冲刷深度(单位:m)

况下的风生流,西部沿岸区的大部分区域冲刷深度有很大的区域是超过0.2 m的(亮黄色区域),而根据图1(b)所示,东南风与南风正是太湖的盛行风向,因此太湖的西部湖区有较大的风生流冲刷风险。

3.2 滨岸带基底修复方案

为了修复西部湖区的滨岸带基底,宜从基底工程修复和植被恢复两个方面着手。由于植被恢复耗资大,见效慢,本研究讨论采用基底工程修复方案来减小太湖湖区西部水流冲刷的影响。图4是太湖西部湖区滨岸带平均冲刷深度与水深的关系,当水深小于1.2 m时,水深越小则冲刷深度越小;当水深大于1.2 m时,冲刷深度会随水深增大而减小。由于太湖水深较浅,平均为1.9 m,尤其在靠近滨岸

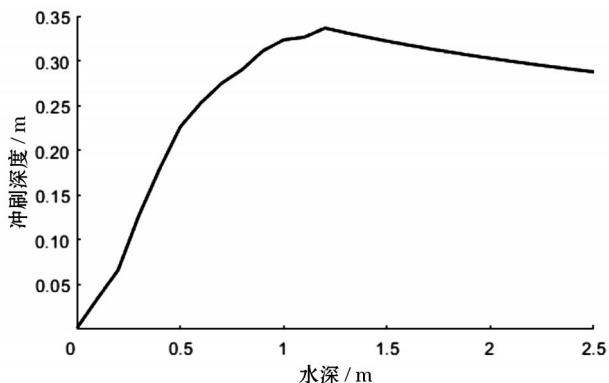


图4 西部湖区滨岸带平均冲刷深度与水深关系

带的地区,一般来说水深不会超过1.2 m,因此基底修复可以在一定程度上减小滨岸带的水深,来达到

减小滨岸带冲刷影响的目的。

由于太湖的死水位在 2.80 m,当滨岸带修复高程定在 2.80 m 时,对兴利库容和防洪库容没有影响,当滨岸带修复高程定达到 3.00 m 时,对太湖的防洪功能几乎无影响。因此本研究设定方案 A、方案 B、方案 C 分别表示滨岸带修复高程为 2.60 m、2.80 m 和 3.00 m(图 5)。在 20 世纪 90 年代以前,太

湖西部沿岸为自然形成的岸坡,一般为自湖边 30~80 m 为芦苇带,部分区段湖边水域中有 200~300 m 以上的芦苇等水生植物带。为了使得滨岸带修复工程较为符合 90 年代前的情况,本研究设定方案 1、方案 2、方案 3 分别表示滨岸带修复宽度为 100 m、200 m 和 300 m(图 5)。

根据以上滨岸带修复的高程和宽度设计方法,

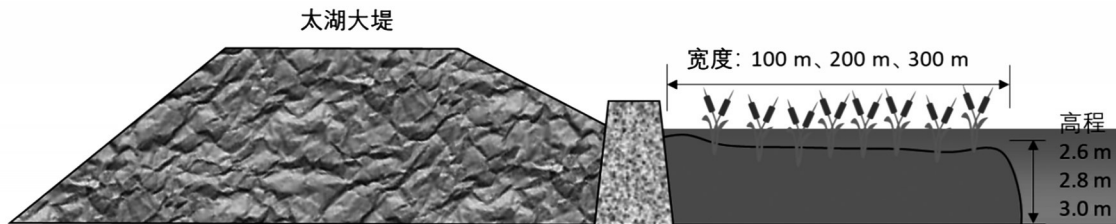


图5 西部湖区滨岸带修复方案

本研究将各种设计参数进行组合,得到表 2 的 9 种设计方案。例如将方案 A 和方案 1 组合,得到方案 A1,表示滨岸带修复的高程为 2.6 m 和修复宽度为 100 m;将方案 C 和方案 2 组合,得到方案 C2,表示滨岸带修复的高程为 3.0 m 和修复宽度为 200 m。依此类推,得到以下 9 种组合方案(表 2)。

表 2 本研究所设计滨岸带修复方案

方案	滨岸带修复高程/m	滨岸带修复宽度/m
A1	2.6	100
A2	2.6	200
A3	2.6	300
B1	2.8	100
B2	2.8	200
B3	2.8	300
C1	3.0	100
C2	3.0	200
C3	3.0	300

3.3 不同方案的冲刷影响程度

图 6 为不同工况下冲刷影响指数分布,在无修复的工况下,比较严重的冲刷侵蚀影响区域在竺山湖的滨岸带以及西部沿岸区较为靠南的区域。如果不对滨岸带采取任何基底修复方案,其滨岸带的侵蚀将非常严重;如果对滨岸带进行修复,则方案 C 优于方案 B,方案 B 优于方案 A。

太湖西部湖区滨岸带不同修复方案影响程度占比,计算结果见表 3。

根据表 3 可以看出,如果不对滨岸带采取任何

基底修复方案,将有约 40% 的区域表现为中度和重度影响。对比不同修复宽度方案(例如:方案 A1、方案 A2、方案 A3)可以看出其差异并不明显,这是因为太湖湖面非常开阔,滨岸带的宽度对其附近的湖流影响较小。

对比不同修复高程方案,当滨岸带的基底修复建设高程为 2.6 m 时(方案 A),重度和中度影响区域明显减小,约占 15%,轻度影响的区域占比 75% 以上;当使用方案 B 的时候,绝大多数区域为轻度影响和无影响区域,重度影响的区域变为了 0,而中度影响的区域仅占比 2%~3%;当使用方案 C 的时候,几乎无影响的区域变为 100%。

3.4 历史水位特征分析

按照《太湖流域综合规划(2013—2030 年)》明确的“填土高程原则上不超 2.8 m”要求,本文分析了太湖 2011—2020 年 10 年以来不同日均水位低于 2.8 m 的频率(表 4),发现除 2011 年有 13 d(3.56%)的日均水位低于 2.8 m,其他年份均无低于 2.8 m 的情况,因此 2.8 m 作为太湖的最高填土高标准是合理的。

由于太湖西部和东部水位的差异(5~10 cm),按照《太湖流域综合规划(2013—2030 年)》明确的“填土高程原则上不超 2.8 m”的要求,且考虑到滩面高程越高,越有利于水生植物生长,本文利用大浦口和洞庭西山(三)2 个太湖水位测站,分别代表太湖西部和东部水位,分析了太湖东部和西部填土构筑湖滨带的合理控制水位值(表 5)。由表 5 可知,大浦口站在小于 2.8 m 的限制条件下,最大年内仅有 2 d 水位低于限制;而在小于 2.85 m 的限制条件下,最大

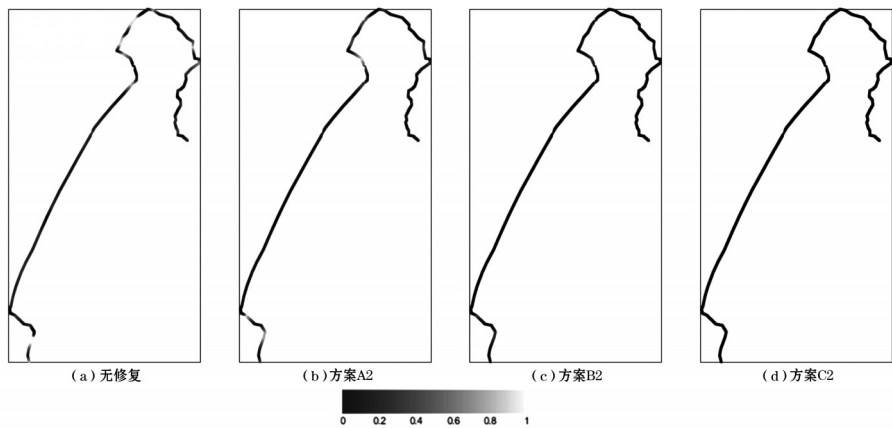


图6 不同工况下冲刷影响指数分布

表3 不同方案下西部湖区滨岸带影响程度占比				
影响程度	重度影响/ %	中度影响/ %	轻度影响/ %	几乎无影响/ %
无修复	8.72	31.02	52.50	7.75
方案 A1	2.91	13.09	76.09	7.92
方案 B1	0.00	2.42	36.67	60.90
方案 C1	0.00	0.00	0.00	100.00
方案 A2	3.23	13.09	76.41	7.27
方案 B2	0.00	2.91	40.23	56.87
方案 C2	0.00	0.00	0.00	100.00
方案 A3	3.72	13.09	76.09	7.11
方案 B3	0.00	2.91	44.91	52.18
方案 C3	0.00	0.00	0.00	100.00

表4 太湖水位低于2.8 m 频率分布		
年份	频率/%	天数
2011 年	3.56	13
2012 年	0	0
2013 年	0	0
2014 年	0	0
2015 年	0	0
2016 年	0	0
2017 年	0	0
2018 年	0	0
2019 年	0	0
2020 年	0	0

表5 太湖不同站点水位低于限制条件的天数											
站点	限制条件	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
大浦口	< 2.8 m	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1
大浦口	< 2.8 m	12	0	0	0	0	0	0	0	0	1
洞庭西山 (三)	< 2.8 m	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0
洞庭西山 (三)	< 2.8 m	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0

年内有12 d低于限制。洞庭西山(三)站在小于2.8 m的限制条件下,最大年内有72 d水位低于限制;而在小于2.7 m的限制条件下,最大年内有10 d低于限制。因此太湖在东部和西部填土构筑湖滨带的实际控制水位值可考虑为在太湖东部控制在2.7 m,而西部控制在2.85 m。

4 结论与建议

根据太湖二维水动力数学模型计算8个风场下的流场并进行滨岸带冲刷特征分析,结果表明湖流流速越大,湖流对滨岸带正向冲击的角度越大,则滨岸带越容易遭受冲刷侵蚀。因此,对于太湖西部

湖区而言,东风和东南风与滨岸带交角较大,南风的流速较大,这几种情况下滨岸带更易受到湖流侵蚀,西部沿岸区的大部分区域冲刷深度有很大的区域是超过0.2 m,东南风与南风正是太湖的盛行风向,因此太湖的西部湖区有较大的风生流冲刷风险。在西南风、东北风、北风3种风场下,虽然在滨岸带的流速较大,但是由于其流动方向有远离滨岸带的趋势,所以不会造成太大的冲刷影响。

滨岸带基底修复能有效防止冲刷侵蚀,当水深在一定范围内(小于1.2 m),随着基底修复的高程的增加,湖流冲刷侵蚀作用变小,当基底修复高程达到3.0 m时,太湖西部湖区的滨岸带几乎不受湖流冲刷的影响区域达到100%,然而根据《太湖流域综合规划(2013—2030年)》提出“严格控制生态修复或景观绿化项目填土高程,其中太湖内建设项目填土高程原则上不得高于2.8 m”,对于修复高程为2.6 m来说,风生流冲刷导致的中度和重度影响区占比仍旧很高,因此不予考虑。考虑到太湖西部和东部水位的差异(5~10 cm),滩面高程高会有利于水生植物恢复,本文建议在太湖东部滨岸带构筑高程控制在2.7 m,而西部控制在2.85 m。

参考文献:

- [1] 叶春,李春华,陈小刚,等. 太湖湖滨带类型划分及生态修复模式研究[J]. 湖泊科学,2012,24(6):822-828.
- [2] 熊斌梅,陈君,邓瑞,等. 梁子湖湖堤加固工程对生态敏感区的影响及对策[J]. 中国水利,2021(4):29-31,37.
- [3] 吉国强,韩伟宏,赵国斌. 不同缓冲带植物在滨岸缓冲带中的作用[J]. 山西农业科学,2011,39(8):850-852.
- [4] 闻余华,董家根,王中雅. 太湖全年洪水分期划分初步研究[J]. 人民长江,2014,45(9):4-7.
- [5] 高玮志,高华勇,王兆礼,等. 基于机器学习的太湖流域多层次防洪调度方案综合评价[J]. 水资源保护,2023,39(3):118-125.
- [6] 邓越,吴浩云,孙大勇,等. 环太湖大堤防洪能力浅析[J]. 中国防汛抗旱,2015,25(5):72-75.
- [7] 曾祥,汤敏喆,崔丹,等. 东太湖不同人为干扰程度区域植物多样性研究[J]. 人民长江,2018,49(3):41-44.
- [8] 冀永鹏,张洪兴,王运涛,等. 基于二维浅水方程的城市地面洪水演进数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2):42-49,56.
- [9] 张文婷,刘永志,张行南,等. 联安围防洪保护区洪水演进模拟分析[J]. 水资源保护,2022,38(2):1-6.
- [10] 毕胜. 河流与浅水湖泊水流数值模拟及污染物输运规律研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- [11] 周洋,张景新. 浅水方程的并行化求解[J]. 力学季刊,2013,34(4):607-613.
- [12] 高丽莎,高程程,汪涛. 基于精细化河网水动力模型的长宁区除涝能力评估[J]. 水资源保护,2021,37(5):62-67.
- [13] 孙文字,姚成,刘志雨,等. 秦淮河水文水动力模型及实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):26-33.
- [14] 苏兴. 二维Boussinesq方程组相关模型的研究[D]. 上海:东华大学,2017.
- [15] LE FANG. A new dynamic formula for determining the coefficient of Smagorinsky model [J]. Theoretical & Applied Mechanics Letters,2011,1(3):50-53.
- [16] 王惠中,宋志尧,薛鸿超. 考虑垂直涡粘系数非均匀分布的太湖风生流三维数值模型[J]. 湖泊科学,2001(3):233-239.