



风浪谱模型在滇池码头工程中的应用*

王云莉，向美焘，孙国栋

(重庆交通大学 西南水运工程科学研究所，内河航道整治技术交通行业重点实验室，重庆 400016)

摘要：针对滇池的波浪特性，选用基于波能平衡方程与波作用守恒方程的风浪谱模型建立滇池波浪数学模型。数学模型计算结果与经验公式结果相比较，两者吻合较好，验证了计算模型的可靠性，并进一步计算了设计风场下滇池拟建码头工程区域工程前后的风浪场情况，为滇池古渡码头工程设计方案的优选提供依据。研究结果表明：工程受偏 N 方向风浪影响较大，而受常浪向 WSW 影响较小；浮桥为“L”型双梳式栈桥平面布置形式的风浪挡浪效果较好，优于“T”字型双梳式栈桥平布置形式。

关键词：风浪谱模型；波浪；滇池；码头

中图分类号：TV 139.2 文献标志码：A 文章编号：1002-4972(2015)12-0068-06

Application of spectral wave model on pier project of Dianchi lake

WANG Yun-li, XIANG Mei-tao, SUN Guo-dong

(Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering, Ministry of Communications, PRC,
Southwest Hydraulic Institute for Waterways, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: According to the wave characteristics of Dianchi lake, we build a wave propagation numerical model on the basis of the wave energy balance and wave action conservation equations. The model validation shows that the numerical results coordinates well with the ones by the empirical formula, and the numerical model is used to calculate the wind wave fields in the project area under the designed wind field before and after construction of the pier, which provides basic parameters for the schemes selection. The calculated results show that the north(N) wind wave has a great influence on the project while the WSW wind wave has less influence, and the L-shaped floating bridge has a better effect of blocking wave than the T-shaped one.

Keywords: spectral wave model; wave; Dianchi lake; pier

滇池位于我国西南部，紧邻云南省省会城市昆明市的南部，滇池南北长为 39 km、东西宽 13 km，平均水深 4.4 m，最大水深 10.9 m，面积 306.3 km²，为我国第 6 大淡水湖，属于高原浅水湖泊。按“滇池管理条例”规定，滇池外海的控制运行水位特征值（黄海高程基面）为：正常高水位 1 887.5 m，相应蓄水量为 15.6 亿 m³。滇池水面宽阔，水深较浅，湖底深槽靠西、南岸，东、

北岸为支流汇集淤积浅湖区（图 1），湖面的常年风向与湖床地形关系密切，波向与风向相关性好。风是湖流运动的主要动力，在主导风向下滇池平均流速约为 2 cm/s，由于流域水资源缺乏，滇池弃水量小，湖水置换周期长，湖流缓慢，滇池已演变成半封闭湖泊，所以风浪场的研究对于滇池旅游开发、环境治理和工程建设都具有重要的意义。

收稿日期：2015-05-12

*基金项目：重庆市自然科学基金（cstc2011BB0106）

作者简介：王云莉（1974—），女，博士，副研究员，从港口及航道工程专业科研研究。

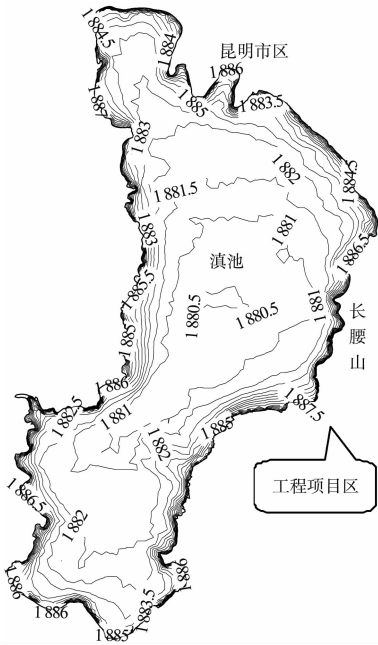


图 1 滇池湖底地形高程 (单位: m)

内陆地区湖泊的风浪研究可以采用 3 种方法^[1]: 首先是现场观测的方法, 现场观测资料虽然可靠真实, 但对于大面积长时间的观测比较困难; 其次为基于射线理论的折射浅水经验公式, 如青岛海洋大学法、莆田试验公式、美国 SMB 法^[2]等, 潘少华^[3]、马明生等^[4]、李士峰^[5]认为规范公式与 SMB 法均能较好地反映内陆水面风浪, 而乔树梁等^[6]根据对太湖实测分析, 提出了浅水湖泊风浪公式, 并被广泛应用; 最后是基于波能平衡与波作用守恒方程的数学模型, 张洪生等^[1,7]运用该类数学模型模拟湖区风浪场, 同时潘丽红^[8]也成功将该模型运用于水库, 这说明这类模型是适合内陆水面的风浪场模拟的。由于滇池地区缺少实测波浪资料, 本文将结合浅水经验公式与风浪谱数学模型相互验证, 并模拟设计风场下的波浪场, 并为工程设计进行指导。

1 波浪数值模型

Spectral Wave 风浪谱模型基于波作用守恒方程, 采用波作用密度 $N(\sigma, \theta)$ 来描述波浪^[9-11]。模型的自变量为相对波频率 σ 和波向 θ 。波作用密度与波能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 的关系为:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

式中: σ 为相对频率; θ 为波向。

在笛卡尔坐标系下, Spectral wave 模型的控制方程, 即波作用守恒方程可以表示为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(\mathbf{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为波群速度, $\mathbf{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$; C_x 、 C_y 为波作用在地理空间 (x, y) 中传播时的变化; C_σ 为由于水深和水流变化造成的相对频率的变化; C_θ 为由水深和水流引起的折射; S 为能量平衡方程中以谱密度表示的源函数。式中传播速度均采用线性波理论计算:

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x \quad (3)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y \quad (4)$$

$$c_\sigma = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + U \nabla d \right) - c_g k \frac{\partial U}{\partial S} \quad (5)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \frac{\partial U}{\partial m} \right) \quad (6)$$

式中: d 为水深; U 为流速, $U = (U_x, U_y)$; $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ 为波数, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$; S 为沿 θ 方向空间坐标; m 为垂直于 S 的坐标。

在球坐标系下,

$$\hat{N} d\sigma d\theta d\varphi d\lambda = N d\sigma d\theta dx dy \quad (7)$$

$$\hat{N} = NR^2 \cos \varphi = \frac{ER^2 \cos \varphi}{\sigma} \quad (8)$$

式中: R 为地球半径; φ 为纬度; λ 为经度。

波作用守恒方程的形式为:

$$\frac{\partial \hat{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \varphi} C_\varphi \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda} C_\lambda \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta \hat{N} = \frac{\hat{S}}{\sigma} \quad (9)$$

式中: $\hat{S}$ 为总的源函数, $\hat{S}(\mathbf{x}, \sigma, \theta, t) = SR^2 \cos \varphi$ 。

Spectral wave 模型中的源函数描述了各种物理现象, 源函数的叠加:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (10)$$

式中: S_{in} 为风输入的能量; S_{nl} 为波与波之间的非线性作用引起的能量损耗; S_{ds} 为由白帽引起的能量损耗; S_{bot} 为底摩阻引起的能量损耗; S_{surf} 为由于水深变化引起的波浪破碎产生的能量损耗。

2 工程概况

滇海古渡大码头工程是七彩云南·古滇王国文化旅游名城项目的重要组成部分，位于滇池东南岸，属晋宁县晋城镇三合村委会所辖，北邻滇池，其余3面毗邻湿地公园。工程主要由154个泊位的外港码头、50个泊位的内港手划船码头、游船吊装检验区以及配套充电房等建设工程组成，内外港码头初步拟定采用梳式栈桥布置形式。本地区长期受到风浪作用，因此需对影响港区建设的波浪动力条件进行研究，为码头的平面布置方案的优选优化提供依据。

3 模型建立

3.1 地形资料与网格建立

地形资料采用滇池航运现状图与2013年8月实测的滇池滇海古渡码头工程工作水域范围地形图。滇池为半封闭湖区，故模型将滇池视为闭合边界考虑^[12]，为充分考虑滇池的地形变化，并使得计算时间合理，模型采用多重加密的非结构网格（图2），越靠近工程区网格越密，以准确模拟湖岸码头处的波浪情况，最大网格200 m，最小网格均约为6 m。

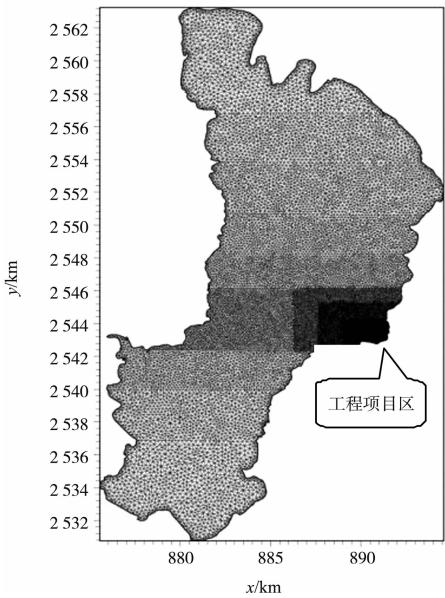


图2 网格剖分

3.2 风场资料

滇池地区无长期的波浪观察资料，根据以往昆明地区的调查研究，该地区波浪主要是由风场引

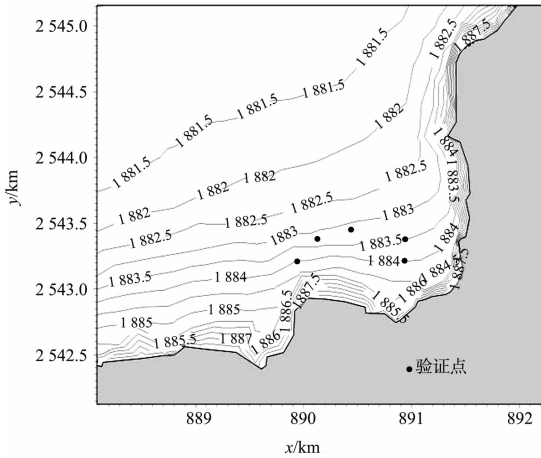
起，故本研究的波浪计算采用风场资料间接推算波浪的方法。根据昆明气象站33 a(1981—2013年)的分方向的最大风速实测资料以及吕云波等^[13]做的滇池风场分析，常风向为SW~WSW向，频率高达40%~55%，实测最大风速18 m/s，同时也是滇池地区的强风向；次风向S~SSW，频率10%~20%，实测最大风12 m/s；对于本工程最不利风向偏北风全年频率8%左右，实测最大风速约为15.6 m/s。采用PIII型曲线适线，推求该地区各方向50 a一遇设计风速，结合滇池南北狭长地形受到山体遮蔽等特点^[14-15]以及工程区位置，并经过风速订正，选取表1的风向资料作为本模型计算的风向。

表1 50 a一遇设计风速

风向	设计风速/(m·s ⁻¹)
N	10.51
NW	18.13
WNW	18.01
WSW	18.68

3.3 模型参数及验证

在对滇池数值计算时，结合许多学者对滇池风生流的模拟结果^[14-15]，拟定底摩擦系数0.007 5，波浪破碎常数0.8，白帽为默认参数， $C_{ds}=4.5$ ， $\delta=0.5$ ，水位设定为正常工作水位1 887.5 m。将滇池作为一个闭边界区域，谱频率采用对数方式离散，频率在0.2~0.5 Hz。本文应用浅水经验公式对模型进行验证^[16-17]，其中验证点取在工程区码头前沿（图3）。



3.3.1 有效风区长度计算公式

鉴于滇池水域边界并不规则, 需要引入有效风区长度概念来进行波浪计算。等效风区长度 D (图 4)计算公式为:

$$D = \frac{\sum_i r_i \cos^2 a_i}{\sum_i \cos a_i} \tag{11}$$

式中: r_i 为主风向两侧各 45° 范围内、每隔 Δa 角由计算点引到对岸的射线长度(m); a_i 为射线 r_i 与主风向上射线 r_0 之间的夹角(度), $a_i = i \times \Delta a$, 可取 $\Delta a = 7.5^\circ$, $i = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots, \pm 6$ 。

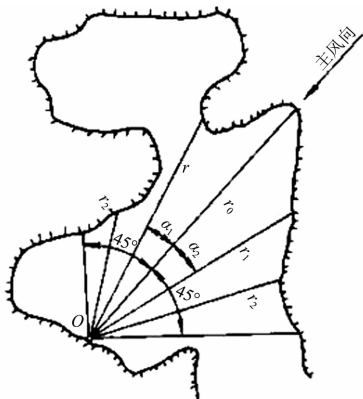


图 4 等效风区长度计算

3.3.2 有效波高的计算公式

滇池南北长 39 km, 东西宽 13 km, 不计入风时的影响, 分别应用规范公式^[16], SMB 法公式^[18]及小风区浅水湖泊风浪公式^[6]计算平均波高, 根据 $H_{1/3} = K \bar{H}$ 可求得对应的有效波高, 其中 K 为转换系数, 可以查阅不同累计频率波高转换表得到。

3.3.3 模型验证结果

工程区码头前沿的有效波高验证结果见表 2。从表 2 可以看出, 根据模拟成果与经验公式对比, 总体来看模拟值要偏小, 其中模拟值与规范公式最为接近, 差值在 0 ~ 0.08 m, 而与 SMB 法、浅水公式法比较, 除 N 方向差值较大, 其他方向良好。因为经验公式并没有考虑到波浪破碎、白帽、底摩擦等复杂波浪现象所造成的波能损耗

和湖底地形变化, 故经验公式计算的值可能偏大, 总体看来该模型的假设及参数选取是合理的, 可以很好地模拟工程区的风浪场情况。

表 2 数值模拟与经验公式有效波高计算结果对比

风向	风区长度/m	平均水深/m	有效波高/m			
			规范公式	SMB 法	浅水风浪公式	模拟值
WSW	4 961.25	3.20	0.68	0.68	0.69	0.62
	5 040.51	3.18	0.68	0.68	0.69	0.63
	5 092.14	3.18	0.68	0.68	0.69	0.65
	4 008.23	3.10	0.64	0.64	0.64	0.62
	3 890.11	3.32	0.64	0.65	0.65	0.60
WNW	10 074.10	5.64	0.93	0.97	0.94	0.92
	10 375.27	5.59	0.93	0.97	0.95	0.93
	10 581.71	5.66	0.94	0.98	0.96	0.93
	10 732.95	5.65	0.95	0.98	0.96	0.92
	10 834.53	5.66	0.95	0.98	0.96	0.91
N	11 341.09	5.80	0.53	0.59	0.60	0.46
	11 262.31	5.80	0.53	0.59	0.59	0.45
	11 095.97	5.75	0.52	0.58	0.59	0.46
	10 892.36	5.70	0.52	0.58	0.59	0.45
	10 850.00	5.70	0.52	0.58	0.58	0.44
NW	11 572.92	6.05	1.10	1.03	1.05	1.06
	11 689.23	6.03	1.11	1.03	1.05	1.07
	11 329.23	6.01	1.11	1.02	1.04	1.07
	12 204.20	5.98	1.11	1.04	1.06	1.07
	12 200.00	5.90	1.11	1.03	1.05	1.07

4 结果分析

4.1 工程位置风浪场分析

根据选定的风向与风速, 本文对滇池整体风浪场进行了模拟分析(图 5), 其中在 WSW 风向作用下, 工程位置处远离了最大风浪中心, 港湾南部对波浪起到了挡浪消波的作用, 设计码头工程前沿波浪有效波高值大约在 0.6 m, 而对于 WNW 与 NW 风作用下, 工程区刚好位于波动最大区域的边缘, 有效波高值大约在 1.0 m, N 风作用下, 有效波高值在 0.4 m 左右。综合各风向年出现频率来看, 滇池全年主要受到偏南风的作用, 而偏北风出现的年频率较小, 从波浪条件的角度来看, 本工程位置是合理的。

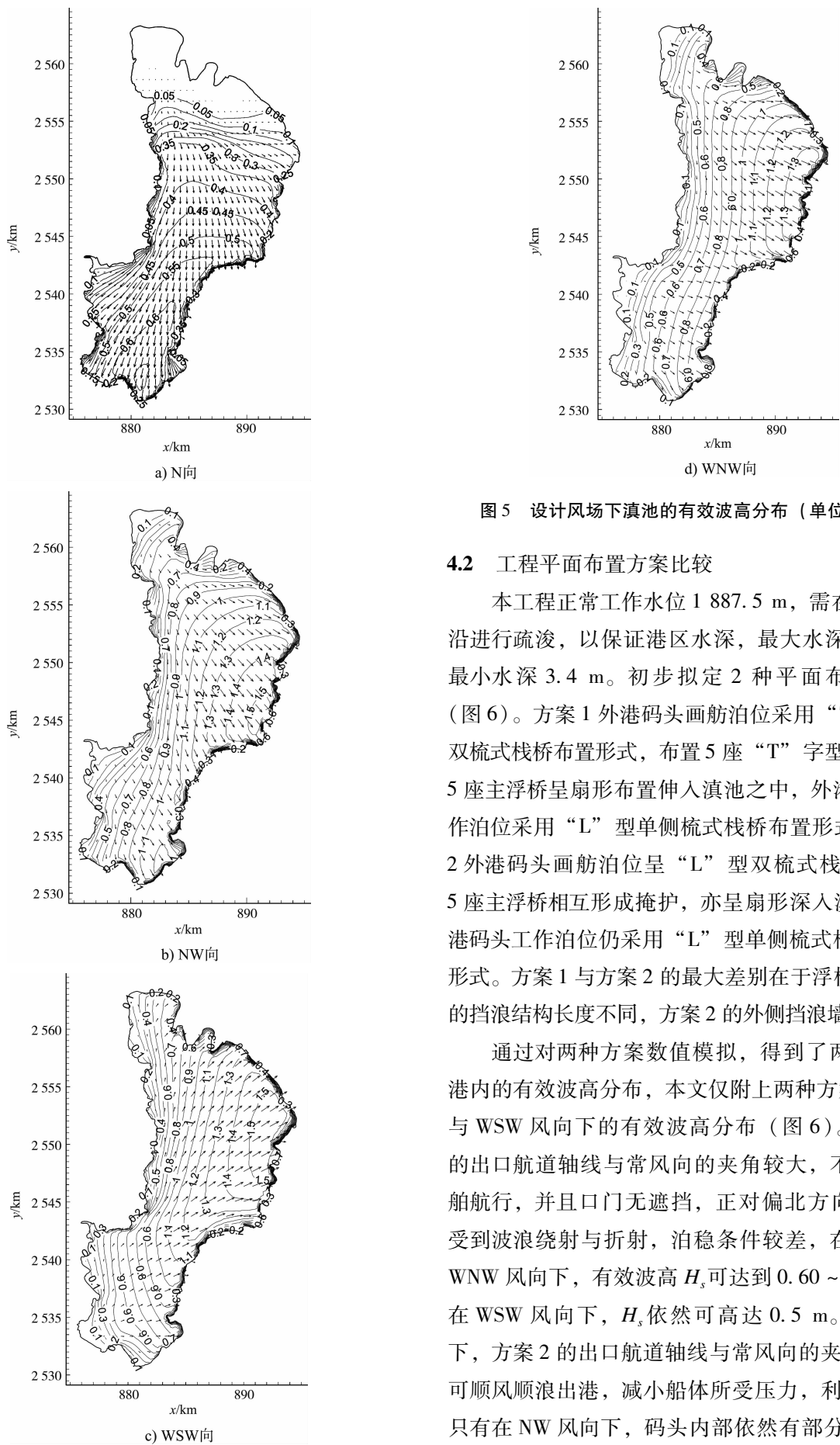


图5 设计风场下滇池的有效波高分布（单位：m）

4.2 工程平面布置方案比较

本工程正常工作水位 1 887.5 m，需在码头前沿进行疏浚，以保证港区水深，最大水深 3.9 m，最小水深 3.4 m。初步拟定 2 种平面布置方案（图 6）。方案 1 外港码头画舫泊位采用“T”字型双梳式栈桥布置形式，布置 5 座“T”字型主浮桥，5 座主浮桥呈扇形布置伸入滇池之中，外港码头工作泊位采用“L”型单侧梳式栈桥布置形式；方案 2 外港码头画舫泊位呈“L”型双梳式栈桥布置，5 座主浮桥相互形成掩护，亦呈扇形深入滇池，外港码头工作泊位仍采用“L”型单侧梳式栈桥布置形式。方案 1 与方案 2 的最大差别在于浮桥最外侧的挡浪结构长度不同，方案 2 的外侧挡浪墙更长。

通过对两种方案数值模拟，得到了两种方案港内的有效波高分布，本文仅附上两种方案在 NW 与 WSW 风向下的有效波高分布（图 6）。方案 1 的出口航道轴线与常风向的夹角较大，不利于船舶航行，并且口门无遮挡，正对偏北方向，港内受到波浪绕射与折射，泊稳条件较差，在 NW 与 WNW 风向下，有效波高 H_s 可达到 0.60 ~ 1.04 m，在 WSW 风向下， H_s 依然可高达 0.5 m。相比之下，方案 2 的出口航道轴线与常风向的夹角较小，可顺风顺浪出港，减小船体所受压力，利于航行，只有在 NW 风向下，码头内部依然有部分泊位 H_s

>0.5 m, 主要集中在码头口门附近, 并向港区内有一定延伸, 其他风向下均比较小, 说明增长外侧挡浪墙可以有效地减小港内波高, 但就方案 2 仍需要再增长外侧挡浪墙或者在口门处设置消浪设施, 为港内提供良好的泊稳条件。

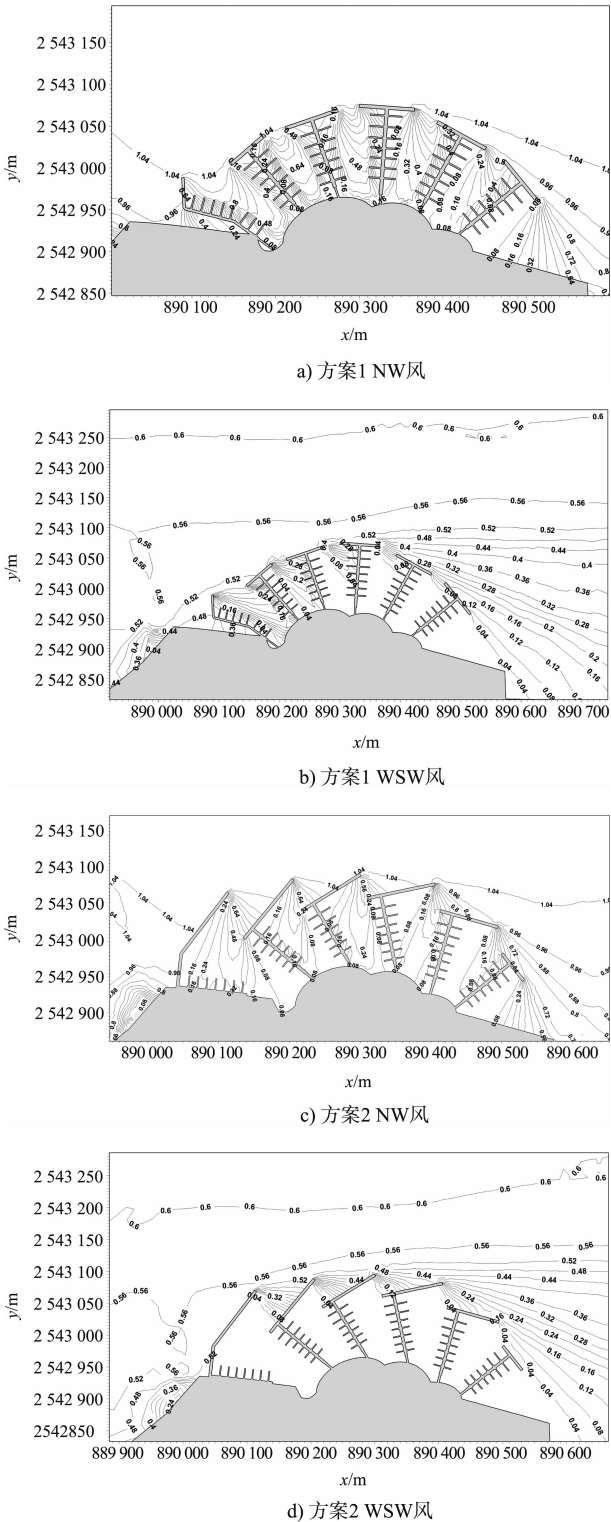


图 6 各方案港内有效波高分布对比 (单位: m)

5 结语

1) 基于第 3 代海浪预报的风浪谱模型建立滇池波浪传播计算模型, 并与风浪经验公式对比, 两者比较相差不大, 说明该模型可以应用于像滇池这种高原内陆湖泊, 但由于海陆的差异, 需要对模型进行一定的修正。

2) 滇池常年盛行 WSW、SW, 多年平均频率可高达 55%, 在 50 a 一遇的 WSW 风速作用下, 工程区前沿有效波高均较小, 而在偏 N 风作用下虽然有效波高值较大, 但综合考虑其出现年频率较小, 所以总体说来工程选址比较合理。

3) 综合比较 2 种设计方案, 方案 1 “T” 字型双梳式栈桥平布置形式下, 码头港池入口波高较大, 深入港内, 港内泊稳条件较差, 相比较方案 2 “L” 型双梳式栈桥平面布置形式, 由于增长了港池外侧挡浪墙长度, 提供较大的遮蔽面积, 更加合理。

4) 本码头外侧挡浪墙为透空式, 数值模拟时并没有考虑波浪的透射问题, 根据相关规范提供经验公式^[18] 计算得到的透浪值很小, 可忽略不计, 另外浮桥对波浪的影响在研究中并未考虑, 有待于进一步探讨。

参考文献:

[1] 张洪生, 辜俊波, 文武健. 淀山湖风浪场的数值模拟[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5): 783-788.

[2] 沈浩. 南洞庭湖区风浪统计特性及预报方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2005.

[3] 潘少华. 江河风浪计算中的一些问题[J]. 人民黄河, 1994(7): 13-16.

[4] 马明生, 许光祥. 三峡库区风浪波要素计算方法的初步研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2005, 26(3): 10-12.

[5] 李士峰. 堤防工程设计波浪爬高分析与计算[J]. 东北水利水电, 2006(6): 5-7.

[6] 乔树梁, 杜金曼, 陈国平, 等. 湖泊风浪特性及风浪要素的计算[J]. 水利水运科学研究, 1996(3): 189-198.

(下转第 107 页)