

基于航区划分的平陆运河近海段波浪 数值模拟研究*

陈 钰¹, 朱良生², 陈依妮¹, 高成岩³, 吕小龙³

(1. 中国船级社武汉规范研究所, 湖北 武汉 430021; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510600;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 河海交界区相当 A 级航区划分的关键依据是波浪条件。采用嵌套的第三代波浪成长数学模型、波浪成长与传播联合数学模型, 以实测波浪作为输入, 并以实测的风继续驱动, 开展平陆运河近海段钦州湾水域满足航区申报要求的长时间序列波浪数值模拟。结果表明: 相对于采用模拟风场模拟的 ERA5 波高误差, 采用实测波和风的模拟波高误差有明显改善。通过模拟产生 5 a 的波浪时间序列, 得到了波高周期联合分布、5% 保证率有义波高和波浪条件分界线, 以此为主要依据的平陆运河钦州湾相当 A 级航区成为首个被交通运输部海事局批准的相当 A 级航区。

关键词: 波浪模型; 平陆运河; 钦州湾; 河海交界区; 航区划分; 5% 保证率

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0007-07

Wave numerical simulation for offshore section of Pinglu Canal based on navigation area division

CHEN Yu¹, ZHU Liangsheng², CHEN Yini¹, GAO Chengyan³, LYU Xiaolong³

(1. Wuhan Rules and Research Institute of China Classification Society, Wuhan 430021, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510600, China;

3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The key criterion for delineating the equivalent Class A navigation area in river-sea interfaces lies in wave conditions. Utilizing a nested mathematical model for third-generation wave growth and a combined model for wave growth and propagation, with measured waves as input and driven by continuous measured winds, long-term wave numerical simulations are conducted for the Qinzhou Bay waters of the offshore section of the Pinglu Canal to meet the requirements for navigation area declaration. The results show that compared with the wave height error of ERA5 simulated by the simulated wind field, the wave height error of the simulation by using measured waves and wind is significantly improved. By simulating a 5-year wave time series, the joint distribution of wave height and period, the significant wave height at the 5% probability level, and the wave condition boundary are obtained. According to this main basis, the equivalent Class A navigation area of Qinzhou Bay waters of the offshore section of the Pinglu Canal has become the first equivalent Class A navigation area approved by the Maritime Safety Administration of MOT.

Keywords: wave model; Pinglu Canal; Qinzhou Bay; river-sea interface; navigation area division; 5% probability level

收稿日期: 2025-01-10

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3208805); 广西科技重大专项资助项目(桂科 AA23023009)

作者简介: 陈钰(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为波浪荷载、航区划分。

平陆运河连接西江航运干线和钦州湾海域。该运河开通后,西江航运干线的内河船舶通过运河直达钦州湾江海联运港区,可避免二次中转或专门建造江海直达船舶所带来的额外费用,能够充分发挥平陆运河通江达海的优势^[1-4]。由于运河入海口钦州湾海域属于河海交界区,并且尚未开展针对内河船舶航行条件的航区级别划分研究工作,按有关规定,内河船舶不得在钦州湾海域航行,因此,有必要开展钦州湾航区划分研究工作。根据国家海事局颁布的《航区划分规则(2021)》^[5]的要求,相当 A 级航区的划分标准是 5% 保证率对应的有义波高小于或等于 2 m,申报相当 A 级航区时,应提交近 5 a 的波高统计资料,如缺少观测资料,可采用波浪数值模拟替代。

目前波浪数值模拟广泛应用于港口、码头、电厂等近岸工程^[6-8],主要通过统计方法得到针对不同重现期波高模拟,其方法不适用长时间序列的模拟。徐青云等^[9]采用 WAVEWATCH III(WW III)模型和 SWAN 模型进行多层嵌套,建立适合斯里兰卡港口区域的波浪数值模型,为合理地安排工程船舶作业窗口期、提高施工效率提供参考依据;张宏伟等^[10]将适用于我国海域特点的文氏谱加入 SWAN 模型,模拟黄河三角洲海域的波高分布;陈林等^[11]采用基于中尺度 WRF 风场模型、WW III 波浪模型和近岸 SWAN 波浪模型的东海业务化海洋预报模型系统模拟瓯江口特定区域的波浪,研究区域波浪时空分布特征,对航区调整进行综合分析;邱妮珊等^[12]基于近 SWAN 模型自嵌套波浪模拟,开展长时间序列高分辨率精细化岛礁波浪模拟,分析研究区有义波高、浪向、波浪能流密度等的精细空间分布特征,但对航区划分的文献还未见报道。为得到满足《航区划分规则(2021)》要求的波浪特征参数,本文采用四层嵌套的第三代波浪成长数学模型、波浪成长与传播联合数学模型,开展钦州湾水域满足航区申报要求的长时间序列波浪数值模拟,同时为了验证波浪数值模拟的可靠性,选取钦州港西水道北端波浪观测资料(2008—2009 年)、三墩作业区波浪观测资料

(2010—2011 年)等作为比对数据,得到波高周期等气象水文的统计资料,为航区划分和波浪荷载研究提供了依据。

1 数学模型的建立

1.1 波浪数学模型选取

波浪数学模型^[13]可分为三大类:波浪成长数学模型、波浪传播数学模型和波浪成长与传播联合数学模型。波浪成长数学模型目前为第三代波浪数学模型。该模型主要考虑波浪的成长和消减过程,即风成浪作用、白浪的消减作用、水深引起的破碎作用、海底摩擦作用、三波和四波非线性相互作用。波浪传播数学模型主要考虑地形、复杂海岸线和海岸工程对波浪的变形作用,主要因素包括:折射、绕射、反射、底摩擦、流和非线性作用等。波浪成长与传播的联合数学模型考虑缓坡方程波浪折射和绕射,并同时考虑底摩擦、非线性作用、风成浪作用的联合模型,应用 SWAN 模型可较好地考虑波浪成长,应用缓坡方程可较好地考虑波浪绕射。这种模型网格步长较小、计算速度较慢,适用于几公里至十几公里的中小尺度空间,不适用于离防波堤堤头很近的水域和防波堤内较掩护水域。

由于内河船航行至平陆运河出海口的钦州港,水域地形复杂、遮蔽性较好,为了较好地考虑折射、绕射、反射、底摩擦、非线性作用、风成浪作用和浅水效应以及浅水破碎的综合作用,本文基于 SWAN 模式选用四层嵌套的第三代波浪成长数学模型、波浪成长与传播联合数学模型进行波浪要素计算。

1.2 边界条件

为了满足航区划分研究的需要和提高波浪数值模拟的结果精度,兼顾获得的气象水文观测资料,非台风波浪计算以涠洲岛气象浮标站的观测波浪作为输入条件,以涠洲岛气象浮标站、青菜头岛气象站的观测风继续驱动波浪。对于从研究区域附近通过的热带气旋,考虑到风场变化大,台风波浪计算应用热带气旋风场、波浪场数学模

型,通过整体南海数学模型得到北部湾北部波浪开边界条件以及热带气旋风场,应用波浪模型嵌套技术进一步计算。采用涠洲岛气象浮标站、青菜头气象站 2015—2021 年的波浪和风观测资料作为输入数据。

2 模型计算及结果

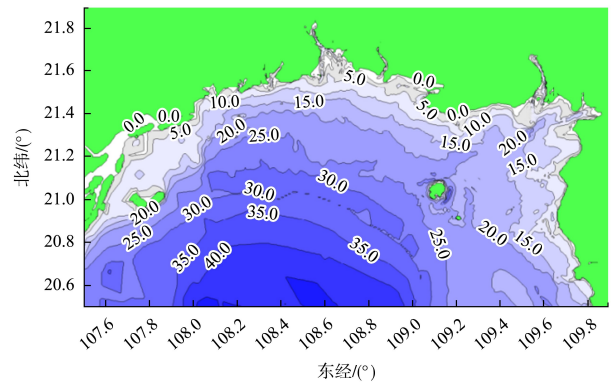
2.1 计算网格与计算参数

涠洲岛气象浮标站位于涠洲岛南约 55 km 处,与钦州湾相距约 120 km,由于计算范围大,应用波浪模型嵌套技术,通过近海波浪模型、近岸波浪模型、钦州湾波浪模型、金谷港区波浪模型等 4 个尺度嵌套网格波浪模型,部分区域的空间分辨率为 15~20 m,以提高波浪数值模拟的计算精度。近海波浪模型、近岸波浪模型、钦州湾波浪模型选用第三代波浪成长数学模型,金谷港区波浪模型选用波浪成长与传播联合数学模型,以更好地考虑掩护区域的波浪绕射作用,波浪模型参数见表 1,模型计算范围地形见图 1。

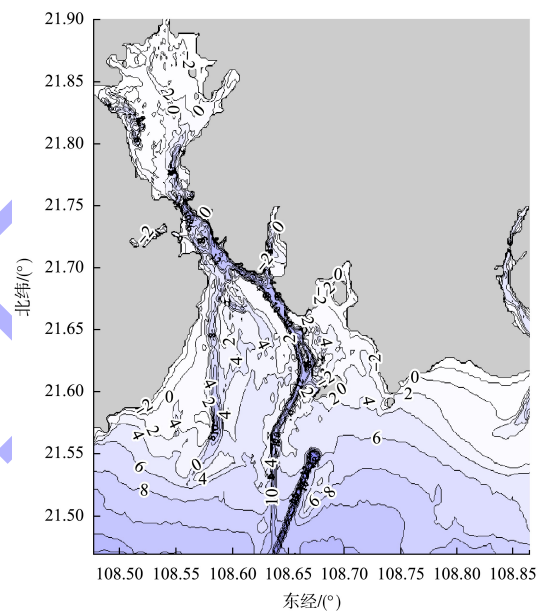
表 1 波浪模型参数
Tab. 1 Wave model parameters

模型名称	计算范围		网格步长/(°)
	东经/(°)	北纬/(°)	
近海波浪模型	107.500—109.900	20.500—21.930	0.008 00
近岸波浪模型	108.476—108.866	21.469—21.925	0.002 00
钦州湾波浪模型	108.476—108.765	20.925—21.519	0.001 00
金谷港区波浪模型	108.590—108.655	20.720—21.647	0.000 15

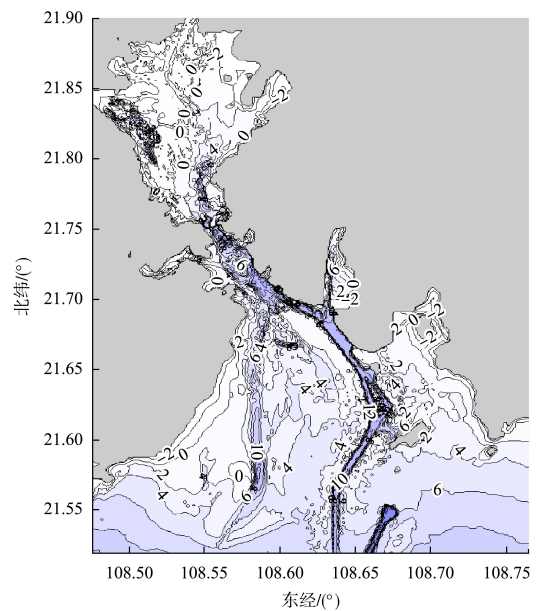
在近岸和研究区域的波浪计算中,计算水域海底沉积物分布类型较多,以泥沙和淤泥为主,海底摩擦系数 C_f 取 0.005;第三代波浪模型中,风能输入和耗散选用 Janssen^[14] 方法,白冠耗散系数 $C_{ds}=4.5$ 。水深限制引起的波浪破碎产生能量损失的参数采用相对较小能量损耗的参数,以便计算结果可进一步根据 JTS 145-2—2013《海港水文规范》^[15] 方法确定极限波高。钦州湾外地形比较平坦,第一、二层模型波高破碎系数取 0.80;钦州湾的湾内地形变化较大,第三、四层模型波高破碎系数取 1.0。



a) 近海



b) 近岸



c) 钦州湾

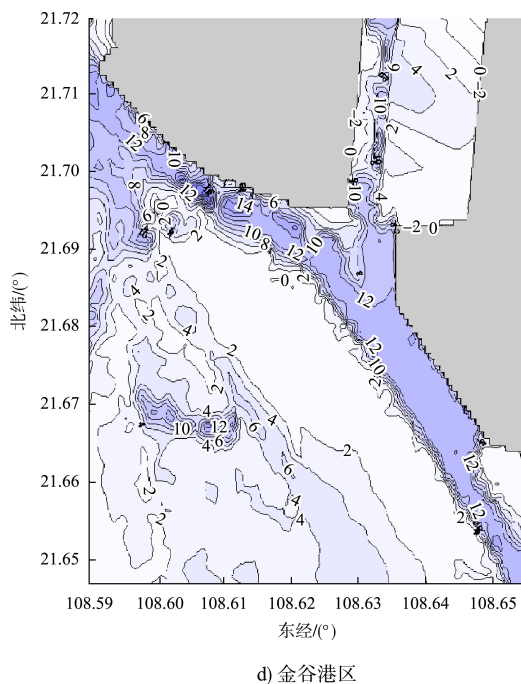


图1 波浪模型计算范围 (单位: m)

Fig. 1 Computational domain for model (unit: m)

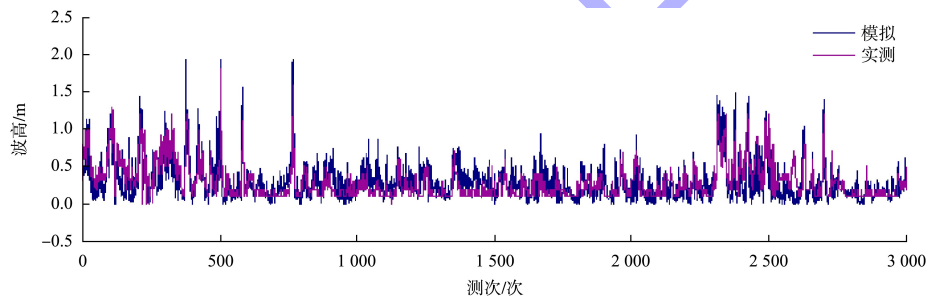


图2 实测与模拟的波高对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated wave heights

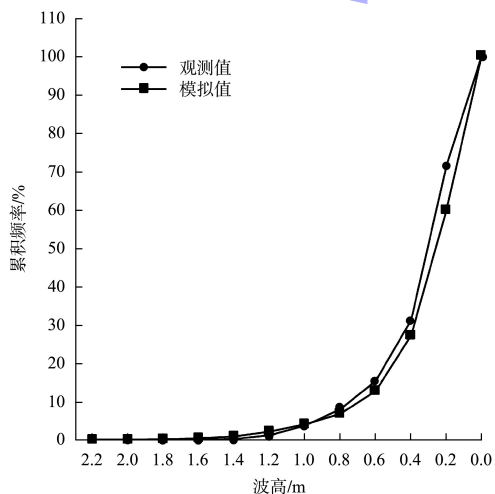


图3 模拟波高与观测波高的累积分布

Fig. 3 Cumulative distribution of simulated and observed wave heights

2.2 模型验证

2.2.1 三娘湾海域实测数据与模拟结果对比

根据三娘湾浮标站的波浪观测资料,选取同期的2016年6月—2021年6月进行波浪数值模拟计算,实测数据与模拟海浪过程曲线见图2。可以看出,实测数据与模拟海浪的波高较吻合。

航区划分的主要波浪指标为5%保证率有义波高,《航区划分规则(2021)》中5%保证率是指将一定时期内测得的一定数量波高由大至小排序,大于或等于某波高的概率为5%。本文对比验证采用3 h一次的波高累积分布,模拟波高与观测波高分布见图3,可见对于相同保证率的大波波高,模拟波高比观测波高略大,大于20%保证率模拟的有义波高相对误差10%。5%保证率观测的有义波高为0.93 m,5%保证率模拟的有义波高为0.92 m,5%保证率的模拟有义波高与观测有义波高非常接近。

Shi 等^[16]对山东、长江口、粤西近海的3个测波站Y1、E1、S1(水深13、8、18 m)实测波浪分别与ERA5模拟波浪进行比较计算,3个站平均有效波高分别为0.67、0.30、1.19 m,3个站模拟波高散射系数(类似相对误差系数)分别为0.24、1.18、0.28,平均为0.57,受岸线和地形影响最大、波高较小的E1站波高散射系数达1.18。

比较可见,相对于采用模拟风场模拟的ERA5波高误差,采用实测波和风与本文模拟波高的误差有明显改善。

2.2.2 钦州湾短期实测数据与模拟结果对比

根据防城核电站2008年10月—2009年9月

和三墩作业区 2010 年 6 月—2011 年 5 月历时 1 a 的波浪观测资料,由于资料年份不同,仅分析对比观测波浪与模拟波浪的特征。

三墩作业区的实测波浪参数为:5%保证率有义波高 1.0 m,周年平均有义波高 0.47 m,周年平均周期为 2.8 s。三墩作业区的模拟波浪参数为:5%保证率有义波高 1.1 m,多年平均有义波高 0.45 m,多年平均周期为 3.2 s。

防城核电站的实测波浪参数为:5%保证率有义波高 0.7 m,周年平均有义波高 0.38 m,周年平均周期为 3.3 s。防城核电站模拟波浪参数为:5%保证率有义波高 0.7 m,多年平均有义波高 0.30 m,多年平均周期为 2.9 s。

从钦州湾的三墩作业区、防城核电站的实测波浪对比表明:钦州湾内模拟波浪特征值与观测波浪特征值吻合。

2.3 长时间序列波浪数值模拟

通过模型调试和验证后,根据涠洲岛气象浮标站、青菜头岛气象站的观测波浪和风况数据,对研究区域 2015 年 6 月 1 日—2021 年 8 月 1 日的每 3 h 间隔波浪场进行模拟计算,达到 5 a 连续总观测次数,总计 15 223 次。钦州湾每年有多次大浪过程,三墩作业区最大有义波高可达 3.3 m。

钦州湾大浪过程主要由台风、夏季强劲的西南季风及冬季强冷空气东北风所致。

2.3.1 热带气旋波浪

近 6 a 有 5 次热带气旋过程影响较大,例如:“1621 号热带气旋”从钦州湾西南部通过,在湾口出现偏东南向强浪,在三墩作业区最大有义波高 3.3 m,对应平均周期 7.6 s,波向 154°,风速 23 m/s,风向 112°。

2.3.2 夏季强季风波浪

夏季强季风过程风区较长,对钦州湾影响较大,波高较大,该季风以 SSW—SW 为主,在湾口产生偏 SSW—SW 向波浪。2019 年 8 月 12 日的强季风过程,在三墩站最大有义波高 1.8 m,对应平均周期 5.8 s,波向 217°;涠洲浮标处风速 13 m/s,

风向 220°;青菜头处风速 9.3 m/s,风向 193°。

2.3.3 冬季强冷空气波浪

冬季强冷空气过程以 N—NNE 为主,风速较大,但由于是离岸风,风区短,对钦州湾有影响,波高略大,在湾口产生偏北向波浪。2018 年 1 月 8 日的强季风过程,在三墩站最大有义波高 1.5 m,对应平均周期 4.4 s,波向 14°;涠洲浮标处风速 18 m/s,风向 15°;青菜头处风速 12.5 m/s,风向 4°。

3 基于航区划分的波浪参数应用

3.1 5%保证率有义波高计算

根据每 3 h 间隔一次的有义波高及对应平均周期整理得到各采样点的每日的最大有义波高和周期,采样点 5%保证率对应的有义波高见图 4。各采样点每日的最大有义波高和周期见表 2。钦州湾外代表点(SDW)、三墩港区航道代表点(H01)、大榄坪港区航道代表点(H04)、金谷港区航道代表点(H05)、茅尾海航道代表点(H08)5%保证率对应的有义波高分别为 1.40、1.09、0.88、0.84、0.46 m,对应的周期分别为 5.10、4.50、3.70、3.90、2.30 s。

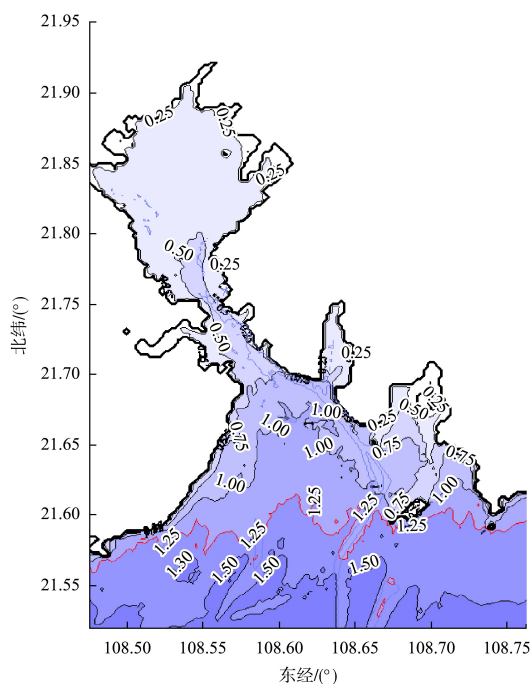


图 4 5%保证率有义波高等值线分布 (单位: m)
Fig.4 Contour lines of significant wave height with 5% probability level (unit: m)

表 2 各采样点有义波高特征数据

Tab. 2 Significant wave heights of various sampling points

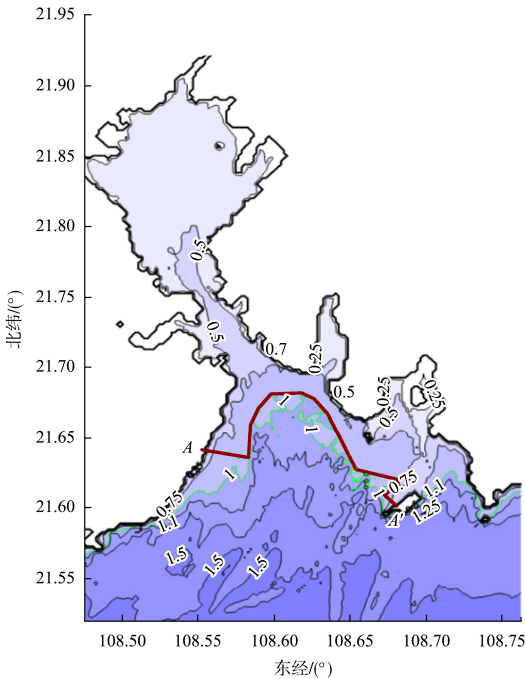
采样点	最大有义波高		平均有义波高		5%保证率有义波高	
	波高/m	周期/s	波高/m	周期/s	波高/m	周期/s
SDW	3.35	7.70	0.69	3.90	1.40	5.10
H01	2.15	5.90	0.55	3.66	1.09	4.50
H02	2.36	5.70	0.54	3.79	1.16	4.70
H03	1.84	4.90	0.41	3.27	0.94	4.10
H04	1.55	4.60	0.38	3.22	0.88	3.70
H05	1.63	4.30	0.39	3.08	0.84	3.90
H06	1.71	4.80	0.40	3.09	0.82	3.50
H07	1.48	3.70	0.31	2.56	0.61	3.50
H08	1.35	3.40	0.23	1.74	0.46	2.30
H09	2.05	5.70	0.44	3.41	0.88	2.90
H10	2.48	6.30	0.56	3.67	1.09	4.70
FCH	1.96	5.30	0.46	3.33	0.88	4.00

3.2 波浪散布图

根据《航区划分规则(2021)》相当 A 级航区申报要求,需要提交以近 5 a 波高统计资料和波高数值模拟为基础整理得到的波浪散布图,即波高-周期的联合概率分布。因此,本文从 5 a 的波浪模拟数据获取各代表性 5 a 连续波浪要素,以每 3 h 一次的有义波高及对应平均周期排序,整理得到波浪散布图,以 H05 港区波高、周期分布表作为波浪散布图统计。在采样点 H05,不分波高、周期区间,波浪集中在周期 1~2 s,占 35.83%;分波高、周期区间,波浪集中在周期 1~2 s、波高 0.0~0.2 m,占 23.79%。周期大于 4 s 占 12.26%,周期大于 5 s 占 3.47%,周期大于 6 s 占 1.03%。

3.3 波浪条件分界线

本文东航道、西航道各采样点波浪特征及波浪散布图是船舶波浪荷载^[17]研究的输入条件,根据研究结论,东航道 H01 点、西航道 FCH 点附近的波浪散布图下船舶外载响应基本与《钢质内河船舶建造规范》^[18]相当,同时,比对内河 A 级航区散布图数据,以 5%保证率对应的有义波高 1 m 波高等值线和东航道、西航道与海岸连线,划出波浪条件分界线 A-A',见图 5。



- PAN H T, WU P, YUAN H P, et al. Overview of planning and design scheme for western land-sea new corridor (Pinglu) canal project [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 1-7.
- [3] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6): 1-11.
- LIU N. Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal Project[J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 1-11.
- [4] 中交水运规划设计院有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河总体线路及梯级布置方案研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2020.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Research on the overall route and cascade layout plan of western land-sea new corridor (Pinglu) canal project [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2020.
- [5] 中国海事局. 航区划分规则(2021)[EB/OL]. (2021-09-15)[2024-12-20]. https://www.msa.gov.cn/msacnms_wap/pages/content.do?articleId=0152CA17-0C6C-44C1-A212-338B7D57B75E.
- China MSA. Rules for navigation area division(2021)[EB/OL]. (2021-09-15)[2024-12-20]. https://www.msa.gov.cn/msacnms_wap/pages/content.do?articleId=0152CA17-0C6C-44C1-A212-338B7D57B75E.
- [6] 刘月红. 钦州湾波浪条件数值模拟研究[J]. 港工技术, 2007, 10(5): 8-9, 16.
- LIU Y H. The numerical simulation research on wave condition of Qinzhou Bay[J]. Port engineering technology, 2007, 10(5): 8-9, 16.
- [7] 吴亚楠, 武贺, 周庆伟, 等. 基于 Boussinesq 波浪模型的港池波浪数值模拟与泊稳分析[J]. 海洋通报, 2021, 40(3): 301-308.
- WU Y N, WU H, ZHOU Q W, et al. Numerical simulation of harbor basin waves and berth stability analysis based on the Boussinesq wave model [J]. Marine science bulletin, 2021, 40(3): 301-308.
- [8] 王卫远, 何倩倩, 周鹏飞, 等. 福建南日群岛海域波浪数值模拟研究[J]. 海洋预报, 2013, 30(5): 26-30.
- WANG W Y, HE Q Q, ZHOU P F, et al. Numerical simulation of wave in the Nanri Islands Sea of Fujian [J]. Marine forecasts, 2013, 30(5): 26-30.
- [9] 徐青云, 孙婉静, 陈进, 等. 斯里兰卡港口城海域施工期波浪场数值计算[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(1): 18-25.
- XU Q Y, SUN W J, CHEN J, et al. Numerical calculation of wave field during construction process in the sea area of Port City, Sri Lanka [J]. China harbour engineering, 2024, 44(1): 18-25.
- [10] 张宏伟, 康海贵. SWAN 波浪模型在黄河三角洲海域的应用[J]. 水运工程, 2008(12): 24-28.
- ZHANG H W, KANG H G. Application of SWAN model at the sea area of the Yellow River delta [J]. Port & waterway engineering, 2008(12): 24-28.
- [11] 陈林, 姚玉娟, 梁连松. 三种方法测算瓯江口特定区域的风浪分布[J]. 中国水运(下半月), 2017(5): 130-133, 139.
- CHEN L, YAO Y J, LIANG L S. Three-method evaluation of wind and wave distribution in the Oujiang Estuary[J]. China water transport (the second half of the month), 2017(5): 130-133, 139.
- [12] 邱妮珊, 姚作芳, 左秀玲, 等. 基于 SWAN 模型的西沙群岛永乐环礁波浪数值模拟与时空分析[J]. 地理科学进展, 2024, 43(9): 1811-1825.
- QIUN S, YAO Z F, ZUO X L, et al. Numerical simulation and spatiotemporal analysis of waves at Yongle Atoll, Xisha Islands based on SWAN modeling[J]. Progress in geography, 2024, 43(9): 1811-1825.
- [13] 波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- Wave model test regulation: JTJ/T 234-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [14] JANSSEN P A E M. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting [J]. Journal of physical oceanography, 1991, 21: 1631-1642.
- [15] 海港水文规范: JTS 145-2—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- Code of hydrology for sea ports: JTS 145-2-2013 [S]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [16] SHI H Y, CAO X F, LI Q J, et al. Evaluating the accuracy of ERA5 wave reanalysis in the water around China[J]. Journal of Ocean University of China, 2021, 20(1): 1-9.
- [17] 陈钰, 陈庆任, 郭际, 等. 船舶安全技术条件评估报告[R]. 武汉: 中国船级社武汉规范研究所, 2022.
- CHEN Y, CHEN Q R, GUO J, et al. Evaluation report on the technical conditions for ship safety [R]. Wuhan: CCS Wuhan Rules and Research Institute, 2022.
- [18] 钢质内河船舶建造规范[S]. 北京: 中国船级社, 2016.
- Code for construction of steel inland river vessels [S]. Beijing: China Classification Society, 2016.