

多功能浮动港应用研究

刘国良, 黄大明, 姚苑平, 龚家勇

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 自 20 世纪 20 年代以来, 不断有对海上大型浮体的概念设想以及具体的开发建设实践, 在总结归纳现有多功能浮动港开发应用实例基础上, 分析多功能浮动港的应用场景和主要需求, 包括解决城市空间矛盾、助力岛礁开发和保护、为海洋资源开采提供支撑、为水上活动提供服务等。总结多功能浮动港主要特征, 提出按水平投影面积将浮动港分为 6 个规模等级, 以便在建设开发中进行归类管控, 按功能将浮动港划分为商业型、公共服务型、居住型、生产服务型、特殊服务型等 5 种类型。经过技术、政策、经济方面初步适应性分析, 结构单元模块的介绍, 以及主要技术问题的分析, 认为在我国应用尚处于起步阶段的浮动港契合未来海洋经济的发展需求, 具备较为广阔的应用前景。

关键词: 浮动港; 大型浮体; 应用需求; 功能分类; 尺度规模; 适应性; 结构单元模块

中图分类号: U651.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2025)01-0037-06

doi: 10.7640/zggwjs202501006

Research on the application of multi-functional floating port

LIU Guo-liang, HUANG Da-ming, YAO Yuan-ping, GONG Jia-yong

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510230, China)

Abstract: Since 1920s, many concepts and ideas about large maritime floating structures have been proposed. And there were many construction practices, too. On the basis of summarizing the existing development and application cases of multi-functional floating ports, the application scenarios and primary requirements for multi-functional floating ports are analyzed, including resolving urban spatial conflicts, supporting islands and reefs development and protection, providing support for marine resource exploitation, and offering services for water activities. After summarizing the key characteristics of multi-functional floating ports, it is proposed to divide them into six levels according to the horizontal projected area, so as to classify and control them in the construction and development. Based on functions, floating ports are categorized into five types, such as commercial type, public service type, residential service type, production service type and special service type. After preliminary adaptability analysis in terms of technology, policy and economy, introduction of structural unit modules, and analysis of main technical problems, it is believed that floating ports, which is currently at an early stage in China, meet the needs of future marine economic development, and has broad application prospects.

Key words: floating port; large floating structure; application requirements; functional classification; scale of space; adaptability; structural unit module

海洋经济作为全球热点领域, 在我国经济发展中举足轻重。海洋产业在世界经济中的比重呈现攀升趋势, 1970 年海洋产业占世界经济比重为 2%, 1990 年占 5%, 至 2018 年已达到 10% 左右,

这种趋势还会逐步加强, 预计到 2050 年, 海洋产业在世界经济中的占比将上升到 20%^[1]。我国海洋经济发展稳健、势头良好, 2006—2022 年, 我国海洋生产总值由 1.8 万亿元增长到 9.5 万亿元, 年

均增长 11%，2022 年海洋生产总值占 GDP 的比重为 7.8%^[2]。

海洋地区的综合开发需要创新空间载体，21 世纪以来，全球进入大规模高科技开发海洋的新时期，海洋在全球中的战略地位日趋突出，海洋经济已经成为世界经济发展新的增长点，包括我国在内的世界主要沿海大国更加注重维护国家海洋权益、发展海洋经济、保护海洋环境。

我国拥有 300 万 km² 海域、6 500 多个岛屿、1.8 万多 km 大陆海岸线和 1.4 万 km 岛屿岸线以及海洋生物、石油天然气、固体矿产、可再生能源、滨海旅游等海洋资源^[3]，开发潜力巨大。多种方式拓展海洋空间将成为重要的研究方向和发展热点。多功能浮动港是集成多种功能的水上浮体结构，能提供生活服务、旅游支持乃至国防安全等各类活动的空间，可针对特定的功能需求量身定制，实现提前预制、快速部署，可进行拼接组

合、灵活布局。使用多功能浮动港拓展空间可避免填海造地，有效的保护生态环境，适应不同环境的要求。

1 开发应用现状

早在 20 世纪 20 年代就有学者正式提出浮动港的设想和研究方案，并进行了相关试验。1991—2003 年期间，在日本和美国召开了四届海上超大型浮式结构国际会议，20 世纪初召开的国际船舶结构大会 (ISSC) 专门进行了超大型海上浮式结构物的专题研讨和总结，成果丰硕。世界各地学者提出的水上浮动功能空间利用的概念设想主要有水上城市和水上特定功能浮体，这些功能涵盖了酒店、公园、机场、农场等。已有的浮动港的应用大致可以分为大型基础设施、城市公共服务设施、城市商业服务设施、岛礁旅游设施、居住设施等 5 类。初步整理已建的浮动港代表性项目见表 1。

表 1 已建代表性浮动港项目表

Table 1 Established representative floating port projects

分类	名称	区域	主要功能	规模	造价
大型水上基础设施	俄罗斯漂浮核电站	北极地区	核发电、海水淡化	长 144 m，宽 30 m，吃水量 2.15 万 t	1.2~1.8 亿美元
	FLNG	澳大利亚西北海域	液化天然气的生产、储存、装卸和外运	长 489 m、宽 74 m，重 25.6 万 t	110 亿美元
城市公共服务设施	新加坡滨海湾浮动舞台	新加坡滨海湾	活动表演，运动场地，大型庆典	长 120 m，宽 83 m	1.2 亿美元
	韩国首尔漂浮岛	首尔汉江	会展庆典，主题餐厅，水上休闲娱乐	总面积 9 905 m ² ，3 个浮岛分别为 5 508 m ² 、3 449 m ² 、1 038 m ²	第 2 个大岛投资约 9 000 万美元
	澳大利亚临港展览馆	悉尼达令港	水上会展，特色餐厅	长约 90 m，宽约 26.5 m，高约 9.1 m	
城市商业服务设施	巴黎塞纳河畔酒店	巴黎塞纳河	水上酒店，水上餐厅	有包括 4 间套房在内的 58 间客房	
	海上牧歌	山东日照	水上休闲娱乐酒店	长 88 m，宽 38 m，休闲使用面积 5 800 m ²	约 8 000 万元
岛礁旅游服务设施	澳大利亚大堡礁潜水平台	大堡礁	旅游活动平台	长约 50 m，宽约 20 m，分上下 2 层	
	坦桑尼亚奔巴岛漂浮旅馆	奔巴岛附近海域	水上酒店	分 3 层，有 17 间卧室，其中 1 间为水下卧室	
居住设施	西雅图船屋	西雅图联合湖上	水上住宅	一般为 2 层，建筑面积不超过 100 m ²	
	伦敦船屋	伦敦帕丁顿附近	水上住宅	小型船只改造，建筑面积不超过 30 m ²	

浮动港技术在国外的应用相对较多，国内的应用较少。未来随着城市的进一步扩张，土地资源将更加紧张，国家环境保护力度持续加大，不占用建设土地指标且具有特色体验功能的浮动港，将具备较好的发展适应性。

2 多功能浮动港主要特征

多功能浮动港作为水上空间拓展的载体具有如下主要特征：

1) 可以提供水上承载空间。根据功能的需

要，提供相应的承载空间，无论是酒店、学校，还是体育场、歌剧院，甚至水上城市，浮动港都可以解决水上空间的需求。

2) 可以模块化拼装和拆解。浮动港并不总是一体化建造的，它可以由不同的浮体模块组合而成，在需要继续拓展空间时，可以添加模块，在需要进行空间调整时，可以拆解模块。

3) 可移动。漂浮的特性使得浮动港可以在水上移动，需要相对固定的位置时，则可以采用锚

固的方式停留在特定区域。可移动的特性也使得浮动港在预知天气的情况下有效回避恶劣天气的影响。

4) 稳定性好。浮动港不同于运输船舶, 在设计建设时并不以减小水流阻力增加可移动性能为主要目标, 浮动港更多的考虑其稳定性和安全性。通过合理的结构设计提高抗风浪水平、维持稳定的内部环境, 浮动港在风浪作用下会保持较好稳定状态, 为人员活动提供较高的舒适度。与相同排水量的船舶相比, 浮动港能抵御更大的风浪。

5) 使用过程对生态环境影响小。采用浮动港拓展水上空间不涉及填海, 浮体对水流和海底生物的影响相对较小, 在浮动港设计、建造和运营中采用成熟的技术, 可实现废弃物的无害化回收。

6) 建设周期短。浮动港的建设可以采用大量定制化的模块进行组合, 能够缩短建设周期, 使用时拖运到目标位置即可。浮动港的上部功能结构可以提前采购建设, 或直接采用装配式建筑。多线并行的方式能够提高浮动港的建设效率。相比填海造陆的方式, 浮动港可以在短期内有效解决空间拓展。

3 应用需求与场景分析

1) 解决城市空间矛盾

当前社会城市人地空间矛盾日益加剧, 随着城市化的推进, 人口持续流入大中城市。我国除了北京和上海近几年人口开始负增长外, 一线城市中的深圳、广州和绝大多数二线城市人口基本上呈现增长的态势。另外, 受到耕地保护等因素的影响, 城市建设用地规模受到限制。全球主要城市大多为滨水城市, 未来滨水化仍然是重要的发展趋势。

浮动港在实现城市空间拓展的应用场景主要有提供城市综合服务和人员居住服务 2 个方面。

城市综合服务功能向水上空间拓展, 是充分利用城市资源的体现。水上居住的发展将有利于沿海低洼地区应对全球气候变暖、海平面上升等气候变化。

2) 助力岛礁开发和保护

多功能浮动港可为日益兴起的岛礁开发与保护提供载体, 在此过程中浮动港灵活有效、生态环保的优势将得到充分发挥。现阶段岛礁保护与综合开发仍存在较多的问题。多功能浮动港可用于建设海上补给站为岛礁上的人员提供物资补给, 建设海上发电站为岛礁提供能源, 建设海上垃圾焚烧站处理岛礁上的垃圾等。通过浮动港的应用, 减少对现有岛礁的开发占用, 为岛礁的保护提供支撑。

3) 为资源开发提供支撑

远海资源开发受限颇多, 多功能浮动港可为其提供服务平台。我国的远洋地区拥有渔业资源、油气资源、矿产资源、丰富的生物物种、巨量的可燃冰储量、以及取之不尽的海水资源和潮汐、波浪、海洋温差等海洋可再生能源等。由于远离大陆, 海洋资源的开发常常受限于服务设施缺乏、可依托的空间平台有限, 上述资源仍有大部分未能得到有效的开发利用。

4) 为水上活动提供服务

多功能浮动港可以为水域的科研、探勘、监测等特殊活动提供定制化的专业设备, 满足相应人员活动或者特殊仪器搭载的需要。

4 尺度规模分级

为便于促进浮动港的推广应用, 提出浮动港以尺度为划分的规模等级, 按照浮动港的水平投影面积从小到大划分为 6 个等级。具体等级及对应浮动港面积(本文中浮动港面积均指水平投影面积)如表 2 所示。

表 2 浮动港尺度分级表

Table 2 Floating port scale classification

划分依据	各等级对应参数					
	I	II	III	IV	V	VI
面积/m ²	(0, 10]	(10, 150]	(150, 2 000]	(2 000, 25 000]	(25 000, 900 000]	900 000 以上
上限尺度参考	大型浮标	现有小型水上酒店	最大内河船舶	现有最大海洋船舶	海上机场	

I 级浮动港面积 $\leq 10 \text{ m}^2$, 作为规模最小的浮动港, 一般不考虑人员在该类浮动港上长期活动,

主要搭载设备、仪器、工具等, 参考目前大型的浮标确定其尺度。根据相关规范, 大型浮标直径

为 3 m^4 ，考虑到不同形状对面积的影响，取 10 m^2 作为Ⅰ级浮动港面积的上限。

Ⅱ级浮动港面积为 $10\sim 150\text{ m}^2$ ，通常作为实现某单一功能而在水域设置的浮体。参照目前奔巴岛漂浮酒店的面积尺度，将Ⅱ级浮动港面积上限设为 150 m^2 。

Ⅲ级浮动港面积为 $150\sim 2\,000\text{ m}^2$ ，该级别浮动港面积的上限参考目前内河最大的船舶尺度确定。根据JT/T 447.1—2001《内河货运船舶船型主尺度系列》目前内河高等级航道对应的船舶长度约 110 m ，宽度约 $17\text{ m}^{[5]}$ ，参考该船舶尺度面积，将Ⅲ级浮动港面积上限设为 $2\,000\text{ m}^2$ 。

Ⅳ级浮动港面积为 $2\,000\sim 25\,000\text{ m}^2$ ，该级别浮动港面积的上限参考目前最大的船舶尺度确定。

目前世界最大散货船长 362 m 、宽 65 m ，最大集装箱船载箱量可达 $21\,413\text{ TEU}$ ，长 399.9 m ，型宽 58.8 m ，参考此类超大型船舶尺度面积，将Ⅳ级浮动港面积上限设为 $25\,000\text{ m}^2$ 。

V级浮动港面积为 $25\,000\sim 900\,000\text{ m}^2$ ，该级别浮动港面积的上限参考岛礁地区的海上机场面积确定，将V级浮动港面积上限设为 $900\,000\text{ m}^2$ 。

Ⅵ级浮动港面积为 $900\,000\text{ m}^2$ 以上，属于海上超大型浮体。

5 多功能浮动港的类型与核心功能

针对多功能浮动港的应用需求，按照主要功能进行划分，多功能浮动港可分为商业型、公共服务型、居住型、生产服务型以及特殊服务型等类型，各类浮动港的核心功能见表3。

表3 浮动港应用类型与功能表

Table 3 Application types and functions of floating ports

浮动港应用类型	核心功能	适用区域	应用举例
商业型	以商业服务设施为主，满足人们日常生活消费需要	主要适用于人群密集的城市附近水域，以内河、近海为主	水上旅馆、水上餐厅、水上商业街、水上商业综合体
公共服务型	以文化展览、运动休闲等公益性活动为主，提供公共服务设施	主要适用于人群密集的城市附近水域，以内河、近海为主	运动场、展览厅、音乐厅、创意馆
居住型	提供居住生存空间，满足日常生活居住的基本需要	自然环境宜居水域	海景公寓、水上疗养中心
生产服务型	为农林牧渔生产和工业生产提供支撑	依生产需要，主要应用于近海、远洋资源所在地	海上牧场、矿产开采平台、海上风电设备
特殊服务型	满足科研、监测等特殊活动的需要	以功能需要为导向，内河、近海、远海地区均可	海上基地、海洋监测站、水环境科考流动站

6 适应性分析

6.1 技术适应性

国际上并未对多功能浮动港形成统一认识，各大船级社组织也未拟定“浮动港”这一类船型的相关技术规范，但有俄罗斯漂浮核电站、新加坡浮动舞台、澳大利亚大堡礁潜水平台、奔巴岛海上旅馆等类似多功能浮动港案例可供借鉴。多功能浮动港所涉及的功能虽然比较多元，但对于其中单一功能而言，国内外均有较为成熟的船型或海上结构物可供参考，不存在不可解决的设计、研发等技术难题，重点技术问题在于如何优化整合各项功能、提高结构强度和应对极端情况下恶劣外部条件的能力，形成满足各项功能需求和技术要求的水上平台。

作为水域空间的载体，多功能浮动港在江河湖海等不同水域空间的实际应用中，必须满足不同环境下的工程技术要求。

6.2 政策适应性

多功能浮动港将是适应国家发展的重要新型水域空间拓展模式，具备较为广阔的发展前景。我国在海域、内河的保护和利用上已形成较为系统、严格的政策管理体系，同时在促进海洋经济发展上也提出了明确的指引和要求，但是对于浮动港这种水上大型浮体应用的开发建设和管理使用等方面暂时没有明确的指导性政策文件。

相对于填海造陆或者采用透水结构的工程建设等方式，多功能浮动港的开发应用对于现有政策管理体系的适应性更高，更契合未来海洋经济

发展的诉求,是海洋强国发展的方向。同时,作为创新型的产品,多功能浮动港的推广应用,也需要相关政策体系的创新与完善。

6.3 经济适应性

分别对国内浮动港案例分析发现,相对于陆域建筑,浮动港具备一定的经济成本优势。浮动港的造价和其应用的位置对其经济性有较为显著的影响。目前浮动港作为新兴的海洋空间利用方式,其技术上没有固定标准,建造成本变化范围较大。从浮动港所在的区域来看,在远海由于台风等天气的影响,年运营天数明显减少,只有提高收费标准,才能达到与近海(河流、湖泊)同样的收益水平。而在近海(河流、湖泊)不同的区域,物业的出售和租赁价格相差较大,同样造价的浮动港在不同的区域,其经济效益亦有明显差别。

未来通过技术进步以及设计方案的改良,可以进一步降低造价来实现基本功能需求。在商业开发运营中,应综合考虑区位条件、目标客群等因素,制定科学合理、经济持续的运营方案以实现项目良好的经济回报。

7 结构单元模块

多功能浮动港的特征之一是可以模块化拼装和拆解。大部分小型浮动港并无拼装和拆解的需求,此类浮动港通常一体成型。因为在水中抗倾覆的功能需求,其水下部分结构一般参照船体结构或直接由船体改造而成,水上部分结构则根据特定功能设计和建造。

对于大型的多功能浮动港而言,采用模块化可拼装和拆解的结构能够给制造和运输带来便利,也能给运营管理、扩建或缩减规模提供更多灵活性。从外形构造上,借鉴类似水上城镇的相关概念设想^[9],多功能浮动港的结构单元模块包含三角形、正方形、菱形、正六边形等常见的几何外形结构,并由其中的一种或多种模块拼装组成整体,不同结构单元模块通过铰链结构连接或拆解。

8 主要技术问题

多功能浮动港尚存在一些技术问题有待解决,主要体现在浮体固定、拼装连接、抵御恶劣天气等方面。随着海洋资源开发利用的逐步深入,更多项目实施,各项新技术、新产品、新概念得到广泛应用,这对降低多功能浮动港的成本和规模化建设起到了推动作用,相关技术问题也会因技术更新迭代而得到更有效地解决。

1) 浮体固定。无动力浮体长期在水域环境中,需要固定以避免因风、浪、流影响而漂移。当前水上浮体常用的方式为悬链锚固,一般由万向节(或张紧器)、链(或缆)、卸扣、锚构成。我国先后完成建设和安装的三峡引领号、海装扶摇号、海油观澜号、国能共享号等海上浮式风电平台,以及挪威的 Hywind Tampen、法国的 EFGL 浮式平台均采用了此类方式锚固^[7]。多功能浮动港的固定已经有成套的解决方案,但是锚固构件需要长期在水中服役,水体环境对其力学性能、抗疲劳、抗腐蚀性能都提出了较高的要求,更可靠、耐久性更好的固定方式和锚固构件是多功能浮动港开发应用需要解决的重要问题,此类问题有较多的研究和探讨,例如系泊连接装置分析^[9]、锚链选型^[8]、锚在分层土壤中的情况分析^[9]等。

2) 拼装连接。多功能浮动港应用所在的水体环境情况复杂,而且其结构单元模块的尺寸和质量相对较大,多功能浮动港的结构单元模块拼装连接时,对拼装连接构件的强度和性能要求较高,需要适应相邻模块的相对运动、较大的作用力、抗疲劳要求,且要实现可拆卸的操作要求。当前水上多个浮体拼装连接采用比较多的方式是柔性连接,主要有球铰、万向节、铰链等^[10]。现有的解决方案基本满足多功能浮动港的拼装需求,但仍需要研发更加有效的连接方案和材料构件。

3) 抵御恶劣天气。水体环境、恶劣天气对多功能浮动港的结构破坏性较大,尤其是台风、海啸等,强大的风、浪、流叠加作用,直接对浮体的整体结构带来巨大威胁。抵御恶劣天气主要有2条途径:1) 通过改进结构设计和采用优良性能材料提高结构强度;2) 采取措施避免直接正面遭受恶劣天气侵袭,可采用的措施主要有下潜^[11]、改变方位朝向、离开台风区域等。

9 结语

1) 浮动港的应用尚处于起步阶段,目前的应用领域主要集中在公共服务基础设施和岛礁旅游设施等,未来开发应用具备较为广阔的前景。当前国家环境保护力度持续增大,对填海造陆的限制也越来越严格,不占用建设土地指标,且具有特色体验功能的浮动港,在城市发展中具备一定的优势。

2) 浮动港的诸多优点和特性,使其能够解决城市空间矛盾、助力岛礁开发和保护、为资源开

发提供支撑、为水上特殊活动开展提供服务。本文提出的浮动港的尺度分级以及按功能分类,可为浮动港未来规划建设提供参考。

3) 浮动港在技术、政策、经济方面均具备初步的适应性。以漂浮式结构拓展水上空间,并无技术瓶颈,是国家政策鼓励的发展方向,合理制定开发方案可获得较好的经济回报。

4) 需要拼装的多功能浮动港可由基本的几何外形结构单元模块组合而成。多功能浮动港的应用,在浮体固定、拼装连接、抵御恶劣天气等技术方面仍有待研究提升和完善。

参考文献:

- [1] 廖明中,吴燕妮,施洁. 强化海洋意识 助推全球海洋中心城市建设[N]. 深圳特区报, 2019-10-22(B6).
LIAO Ming-zhong, WU Yan-ni, SHI Jie. Strengthen ocean awareness and promote the construction of global marine center city[N]. Shenzhen Special Zone Daily, 2019-10-22(B6).
- [2] 国家海洋局. 2006—2022 年中国海洋经济统计公报[R]. State Oceanic Administration. The Chinese ocean economy statistical bulletin 2006-2022[R].
- [3] 张耀光. 中国海洋经济地理学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2015: 55-57.
ZHANG Yao-guang. Marine economic geography of China [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2015: 55-57.
- [4] JT/T 760—2009, 浮标通用技术条件[S].
JT/T 760—2009, General specification for buoy[S].
- [5] JT/T 447.1—2001, 内河货运船舶船型主尺度系列[S].
JT/T 447.1—2001, Dimensions series of inland cargo carrying vessel cargo ship[S].
- [6] 朱利翔,范铁,王汝凯,等. 深海环境规划高规格人工岛的新理念[J]. 水运工程, 2014(2): 5-10.
ZHU Li-xiang, FAN Tie, WANG Ru-kai, et al. New philosophies to plan a high-quality artificial island under deep-sea environment [J]. Port & Waterway Engineering, 2014(2): 5-10.
- [7] 董鑫,徐群,邵云亮. 系泊连接装置发展现状及其在漂浮式风电中的应用[J]. 海洋工程装备与技术, 2024, 11(1): 130-138.
DONG Xin, XU Qun, SHAO Yun-liang. Development of mooring connectors and its application in floating offshore wind turbine[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2024, 11(1): 130-138.
- [8] 梁凯,王亚琼,徐万海,等. 基于不同规范的 CALM 单点系泊系统锚链直径选型对比研究[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(5): 100-104.
LIANG Kai, WANG Ya-qiong, XU Wan-hai, et al. Comparative study on the selection of anchor chain diameter for CALM single point mooring system based on different rules[J]. Journal of Ocean Technology, 2020, 39(5): 100-104.
- [9] 刘权. 超大型浮体柔性连接器分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
LIU Quan. Analysis and research on flexible connector of VLFS[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [10] LIU H X, LIANG K, PENG J S, et al. A unified explicit formula for calculating the maximum embedment loss of deepwater anchors in clay[J]. Ocean Engineering, 2021, 236, 109454.
- [11] 智能装备赋能渔业走向深蓝[J]. 海洋与渔业, 2024(1): 38-43.
Intelligent equipment empowers the fishing industry to venture into deep-sea[J]. Ocean and Fishery, 2024(1): 38-43.

(上接第 28 页)

and its application[R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulic & Estuary, 2008.

- [13] 潘存鸿,鲁海燕,曾剑. 钱塘江涌潮特性及其数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2008(2): 1-9.
PAN Cun-hong, LU Hai-yan, ZENG Jian. Characteristics and numerical simulation of tidal bore in Qiantang River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(2): 1-9.
- [14] 潘存鸿,潘冬子,郑君,等. 台风对钱塘江涌潮影响研究[J]. 海洋学研究, 2020, 38(4): 40-47.
PAN Cun-hong, PAN Dong-zi, ZHENG Jun, et al. Study on influence of typhoon on tidal bore in Qiantang River[J]. Journal of Marine Science, 2020, 38(4): 40-47.
- [15] 唐子文,贺成奇. 钱塘江河口设计高水位专题研究[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2018.

TANG Zi-wen, HE Cheng-qi. Qiantang River estuary design high water level research[R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Hydraulic & Estuary, 2018.

- [16] 胡成飞,潘存鸿,吴修广,等. 1959—2019 年杭州湾南岸滩涂演变规律及机制[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 230-241.
HU Cheng-fei, PAN Cun-hong, WU Xiu-guang, et al. Tidal flat evolution law and its mechanism on the south bank of Hangzhou Bay from 1959 to 2019[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 230-241.
- [17] 吕彪,金生,艾丛芳. 非结构化网格下求解二维浅水方程的和谐 Roe 格式[J]. 水利水运工程学报, 2010(2): 39-44.
LÜ Biao, JIN Sheng, AI Cong-fang. Well-balanced roe-type scheme for 2D shallow water flow using unstructured grids[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(2): 39-44.