

# 海堤生态化建设及生态化改造研究进展与展望

林丽芳<sup>1,2</sup>, 王强<sup>1,2</sup>

(1. 福建省厦门地质工程勘察院 厦门 361008; 2. 福建省厦门地质大队 厦门 361008)

**摘要:** 海堤的修建能够增强沿海地区的风险防御能力,但也对海洋生态环境造成了一系列影响,如改变岸线形态、生物多样性减少等。为解决海堤建设带来的不利生态环境影响,近年来生态海堤建设及旧海堤生态化改造成为研究热点,主要包括生态海堤设计原则、建设模式、选用材料等。文章结合近年来海堤的生态化建设以及生态化改造探索实践及应用,针对生态海堤普及面临的困境,提出未来应进一步建立健全理论体系,加强培养复合型人才,拓展多方面的融资渠道,开展海堤生态化建设适应性评估研究,推进信息化管理,提高社会群众参与度,构建长效管护机制等建议。

**关键词:** 生态海堤; 围填海; 海岸工程; 生态化

中图分类号: TV871.1; X171.4; P74 文献标志码: A 文章编号: 1005-9857(2026)02-0102-10

## Research Progress and Prospect of Sea Dike Ecological Construction and Ecological Reconstruction

LIN Lifang<sup>1,2</sup>, WANG Qiang<sup>1,2</sup>

(1. Fujian Xiamen Institute of Geological Engineering, Xiamen 361008, China;  
2. Fujian Xiamen Geological Brigade, Xiamen 361008, China)

**Abstract:** The construction of sea dike enhances the coastal risk defense capability, but on the other hand, it leads to adverse effects on the marine ecological environment. For instance, it changes the shoreline morphology and reduces biodiversity. To solve the adverse effects caused by the massive construction of sea dikes, the ecological construction and ecological reconstruction of the sea dike have become one of the research focuses in recent years, such as design principles of ecological sea dike, construction mode and selection of suitable materials. Combined with the practices and applications about ecological construction and ecological reconstruction of the sea dike in recent years, and in response to the challenges in popularizing ecological sea dike, this paper proposes the recommendations for future efforts, including further establishing and improving the theoretical framework, cultivating interdisciplinary professionals, expanding diverse financing channels, conducting adaptive assessment research on ecological sea dike construction, strengthening information-based management, enhancing public participation, and building

收稿日期: 2025-05-09; 修订日期: 2026-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(42106082)。

作者简介: 林丽芳, 助理工程师, 硕士, 研究方向为海洋地质、海洋生态修复

通信作者: 王强, 副教授、高级工程师, 博士, 研究方向为海洋地质与地球物理、深度学习及地质灾害预警等

long-term maintenance mechanisms.

**Keywords:** Ecological sea dike; Sea reclamation and enclosure project; Coastal engineering; Ecologicalization

## 0 引言

我国东南沿海地区自古以来常受台风风暴潮的侵扰,为抵御风暴潮危害、保障沿海地区人民生命财产安全,自汉朝起我国就开始修筑海堤,至今已有约2 000年的历史。近年来,全球变暖导致海平面上升、风暴潮加剧,海岸灾害频发。为此,我国在海岸线上建设了大量海堤等防护工程。Ma等<sup>[1]</sup>将中国东部绵延万里的海堤称为“海上长城”。根据《全国海堤建设方案》<sup>[2]</sup>统计,我国已建成海堤1.45万km。

然而,海堤的建设也给海洋带来了严重的生态影响。例如,厦门海堤的建设增强了岛内外的交通连接,推动了当地海洋经济的快速发展,也带来了海岸线形态改变、纳潮量减小、生物多样性减少、赤潮频发等一系列生态问题<sup>[3]</sup>。范航清等<sup>[4]</sup>研究显示,海堤建设使广西沿海红树林减少、群落特征改变、堤前红树林恢复受到严重人为干扰。刘琦波等<sup>[5]</sup>总结我国海堤建设引发的生态问题主要集中在3个方面:海岸自然形态的破坏、湿地生态系统的失衡,以及由此引发的环境污染问题。Hood<sup>[6]</sup>研究显示,美国20世纪50年代后期的堤防建设造成河口沼泽和潮汐通道损失。Lee等<sup>[7]</sup>研究表明,韩国人工海堤的建设破坏了河流和海洋生态系统之间的天然联系,导致水生生态系统富营养化。

随着人们对海洋保护意识的提升及生态文明建设的推进,围填海过程中海堤的生态化建设、减少海堤建设带来的生态环境破坏、恢复海洋生态系统成为当前研究的热点。本文系统梳理了近年来海堤生态化建设及旧海堤生态化改造的研究进展,分析当前海堤生态化建设存在的问题,提出针对性建议,以为未来海堤生态化建设提供参考。

## 1 海堤生态化建设的内涵和概念

早期的海堤建设主要基于防护功能,针对海堤建设带来的生态问题,迫切需要提升海堤的景观和

生态价值。因此,国内部分学者开始引入国外经验与生态学理念。陶理志<sup>[8]</sup>将国际上生态治理河堤的理念应用于国内城市防洪堤的生态化建设。李远等<sup>[9]</sup>提出将生态学方法应用在海堤防护中。王文双等<sup>[10]</sup>就海堤的景观空间设计进行探讨,提出海堤的景观设计应当遵循“安全性原则”“亲水性原则”“自然生态原则”“个性化原则”“空间连续性原则”。张华等<sup>[11]</sup>提出构建以生态工程为核心理念的沿海防护体系。王曦鹏等<sup>[12]</sup>提出新型海堤除了满足防潮要求的同时,还应在生态环境保护方面发挥积极作用。这些早期探索为后续政策制定和概念深化奠定了理论与实践基础。

自2014年起,国家层面陆续出台技术规范与指南,逐步将生态化理念纳入海堤建设的标准体系。2014年,《海堤工程设计规范》<sup>[13]</sup>国家标准出台,首次明确提出“海堤及建筑材料应体现生态和景观方面的要求”。2017年,国家海洋局发布技术指导性文件《围填海工程生态建设技术指南(试行)》<sup>[14]</sup>,对生态化海堤堤型设计、材料、生态带构建提出具体要求。此后,国内学者进一步补充了生态海堤的功能与定义。范航清等<sup>[15]</sup>提出生态海堤需满足物理、生态和文化三大功能;赵鹏等<sup>[16]</sup>将生态海堤定义为满足海洋灾害防护要求、模拟滨海生态系统结构和生态过程,兼具生态功能和美学价值的复合生态系统。也有学者将这类新型海堤称为“绿色海堤”<sup>[17-18]</sup>。为保障生态海堤建设的科学有序,2020年,中国海洋工程咨询协会发布《围填海工程海堤生态化建设标准》<sup>[19]</sup>,正式提出“海堤生态化建设”概念。同年,自然资源部、水利部发布《海堤生态化建设技术指南(试行)》<sup>[20]</sup>,进一步丰富海堤生态化建设目标“以维持或提升海堤防潮御灾能力、恢复海岸生态功能”。2024年,自然资源部发布新版《围填海工程生态建设技术指南》<sup>[21]</sup>,正式定义“生态化海堤”。2024年5月,广东省市场监督管理局发布《海堤生态化建设技术导则》<sup>[22]</sup>,进一步对“生态海堤”的定义进行简化,即“通过

海堤生态化建设形成的海堤”。2025年2月，自然资源部发布新版《海堤生态化建设技术指南》<sup>[23]</sup>，进一步巩固了“海堤生态化建设”概念，即“通过优化堤身结构型式，使用生态建筑材料，营造和改善岸滩、堤身及堤后生态环境等措施，对海堤进行生态化改造，从而恢复海岸生态功能的建设活动”。

## 2 海堤生态化建设必要性

针对传统硬质海堤建设带来的生态问题，海堤生态化建设不仅保障并提升防潮御灾能力，而且其带来的社会效益、经济效益和生态效益极为显著。其中，最显著的为社会效益，表现为提高海堤的防护功能，减少台风风暴潮带来的经济损失、保障人民群众生命财产安全。Salauddin等<sup>[24]</sup>研究强调了海堤生态工程干预的潜力，通过增加结构物表面粗糙度耗散额外的波浪能，可减轻极端的越浪危害；经济效益体现为一方面通过提高防范能力减少人民财产损失，另一方面则是通过打造生态景观吸引游客、发展旅游经济、提高经济收入，同时促进周边房地产溢价，如2022年西湾红沙环生态海堤促进旅游消费达7 000万元<sup>[25]</sup>；生态效益表现为防止水土流失，维护生物多样性<sup>[16]</sup>；如范航清<sup>[26]</sup>对比发现，广西沿海红树林生态养护海堤的效益相比传统海堤提高10倍。同时，多项工程证实海堤生态化建设防护性能可靠，例如，长江口炮台湿地公园生态景观型海堤<sup>[27]</sup>自2007年12月竣工以来，历经多次台风仍完好无损；广西防城港红沙环生态海堤<sup>[28]</sup>在2014年遭受百年一遇的超强台风“威马逊”的袭击后仍安然无恙；珠海市情侣路南段某工程生态海堤<sup>[29]</sup>成功抵御了2016年登陆的台风“妮妲”，堤岸未受损。

## 3 海堤生态化建设标准及规划

近年来，海堤生态化建设标准体系逐步完善（表1）。地方层面，广东省于2024年5月发布《海堤生态化建设技术导则》<sup>[22]</sup>，聚焦本省已建海堤的生态化建设工作；浙江省于2024年11月发布《海堤生态性评价技术导则》<sup>[30]</sup>，规定了海堤生态性评

价的总体要求、评价指标、指标计算方法等内容。国家层面，自然资源部于2024年9月发布新版《围填海工程生态建设技术指南》<sup>[21]</sup>，对生态化海堤建设的堤型设计、生态化材料、生态带构建提出了新要求；2025年2月，自然资源部进一步发布《海堤生态化建设技术指南》<sup>[23]</sup>，为已建海堤的生态化建设工作提供更全面的指导。规划层面，全国仅有广东省编制《广东省生态海堤建设“十四五”规划》，提出生态海堤建设目标。

表1 海堤生态化建设相关标准

Table 1 Ecological sea dike construction standard

标准层级	标准名称	标准号	发布部门
地方标准	海堤生态性评价技术导则	DB33/T 1396—2024	浙江省市场监督管理局
	海堤生态化建设技术导则	DB44/T 2499—2024	广东省市场监督管理局
国家标准	海堤生态化建设技术指南	HY/T 0469—2025	自然资源部
	围填海工程生态建设技术指南	HY/T 0468—2024	自然资源部

## 4 海堤生态化建设实践

近年来，国内外在海堤生态化实践方面积累了大量成功经验（表2、表3），改造范围主要涉及堤前临海侧、海堤堤身、堤后背海侧。在国外，荷兰须德海工程<sup>[31]</sup>通过建设开敞式的挡潮闸和湿地缓冲带，有效解决了海岸侵蚀问题；美国缅因州萨克海岸防护工程<sup>[32]</sup>综合运用海滩养护、沙丘修复和沼泽植被种植等生态手段，提高海堤防灾能力，同时也为海洋生物提供了栖息地；西雅图中央海堤工程<sup>[33]</sup>通过创造浅水栖息地，改善海底基质，在海堤面板预置纹理缝隙，促进水生生物的生长；澳大利亚新南威尔士海洋防护工程<sup>[34]</sup>通过海墙开孔、人工栈道、抛石防护、沙丘与植被结合等措施构建生态防护屏障。

表2 国外海堤生态化实践案例

Table 2 Practices of international ecological sea dike construction

国家	项目	生态化改造方法
荷兰	须德海工程	建设开放式的挡潮闸和湿地缓冲带
美国	缅因州萨克海岸防护工程	海滩养护、沙丘修复和沼泽植被种植
	西雅图中央海堤工程	通过创造浅水栖息地,在海堤面板预置纹理缝隙
澳大利亚	新南威尔士海洋防护工程	海墙开孔、人工栈道、抛石防护、沙丘与植被结合

表3 国内海堤生态化实践案例

Table 3 Practices of ecological sea dike construction in China

城市	项目	生态化改造方法
广州	粤港澳大湾区灵山岛北岸防风风暴潮工程	多级消浪平台技术
	南沙新区灵山岛尖南段海岸及滨海景观带建设工程	海滩养护、沙丘修复和沼泽植被种植
防城港	西湾红沙环海堤工程	种植红树林、滨海植被
宁德	三屿围垦工程海堤	放置碎石、种植红树林和芦苇等
海口	江东新区海堤提升改造工程	生态丁坝(球形)、顺坝(贝藻礁)保护沙滩

在国内,沿海各地已有不少海堤生态化建设成功案例,粤港澳大湾区灵山岛北岸防风风暴潮工程采用横向多级消浪平台技术消减越浪<sup>[35]</sup>;广西防城港西湾红沙环海堤工程探索出“红树林+海堤+滨海植被”的生态海堤模式,实现了生态与减灾协同增效<sup>[25]</sup>;广州南沙新区灵山岛尖南段海岸及滨海景观带建设工程采用分带设防、堤顶后置的理念,布设两道防浪系统<sup>[36]</sup>;福建省宁德三屿围垦工程海堤采取放置碎石、种植红树林和芦苇等措施,促进河口湿地生态修复<sup>[37]</sup>;海南海口市江东新区海堤提升改造工程采用“韧性海堤”设计思路,利用“生态丁坝(球形)、顺坝(贝藻礁)保护沙滩”<sup>[38]</sup>。

总体来说,国内外海堤都采用植被防护、坡面改造等方法进行海堤生态化建设,不同之处在于国

外更注重海堤堤身改造,国内则以堤前临海侧改造为主。

## 5 旧海堤生态化改造方法

随着围填海管控政策的实施,围填海活动将大大减少,而旧海堤的生态化改造成为一股新潮流。根据全国海堤建设方案<sup>[2]</sup>规划,新建海堤长度为429.76 km、加固海堤长度为1 930.84 km,需加固的海堤长度要远远超出新建海堤。张翠萍等<sup>[39]</sup>提出,拆除现有海堤不仅会造成经济浪费,还会对周边生态环境造成不良影响,如破坏原有的水动力平衡、污染现有水质、导致生物量减少等。因此,对已建海堤进行生态化改造,既能减少资源浪费、降低成本,也有助于减轻对周边生态环境的不利影响。

关于旧海堤的生态化改造,国内外学者提出了不同的改造方法。Scheres等<sup>[40]</sup>梳理了3个海堤生态化改造的方向:一是堤前生态修复(如恢复或维护浅滩湿地、种植本地水生植物或构建沙洲),通过自然过程(如沉积物积累、植物滞留波浪能)缓冲海浪冲击,保护海堤结构,同时提升海岸带生物多样性;二是加强海堤表面防护措施,如植被覆盖、硬质护坡、堤顶道路;三是优化海堤几何形态。李丽凤等<sup>[41]</sup>提出“柔性岸线”“游憩亲水岸线”“海堤一半红树岸线”三类生态海堤建设特色模式。张月峰<sup>[42]</sup>提出生态海堤防护设计要点主要包括潮水水位、波浪要素、波浪爬高和越浪量。建设生态海堤防护工程的过程中,必须把握好生态海堤防护设计要点、质量控制、技术管理等重要环节。赵鹏等<sup>[16]</sup>提出可通过减缓坡度、恢复植被或生境、增加微生境和提高表面粗糙程度等手段实现生态海堤建设。唐慧燕等<sup>[43]</sup>针对海堤堤身提出4种改造方法,包括结构断面改造、临海侧堤脚和护面孔隙化、护面绿植、堤顶与后方城市整体生态景观融合。黄莹娜<sup>[44]</sup>提出4种生态海堤建设路径,包括堤前岸滩生态化建设、海堤结构形式生态化建设、海堤材料生态化建设、海堤绿植化建设。房英伟<sup>[45]</sup>提出目前关于海堤生态修复技术主要包括堤前地形修复技术、堤前水质、基质修复技术、生物资源修复技术、海堤堤身修复技术(堤身结构生态

化、堤身材料生态化)。

综合国内外学者提出的各种改造方法,其空间

布局可系统归纳为“堤前临海侧、海堤堤身、堤后背海侧”三个维度(图1)。

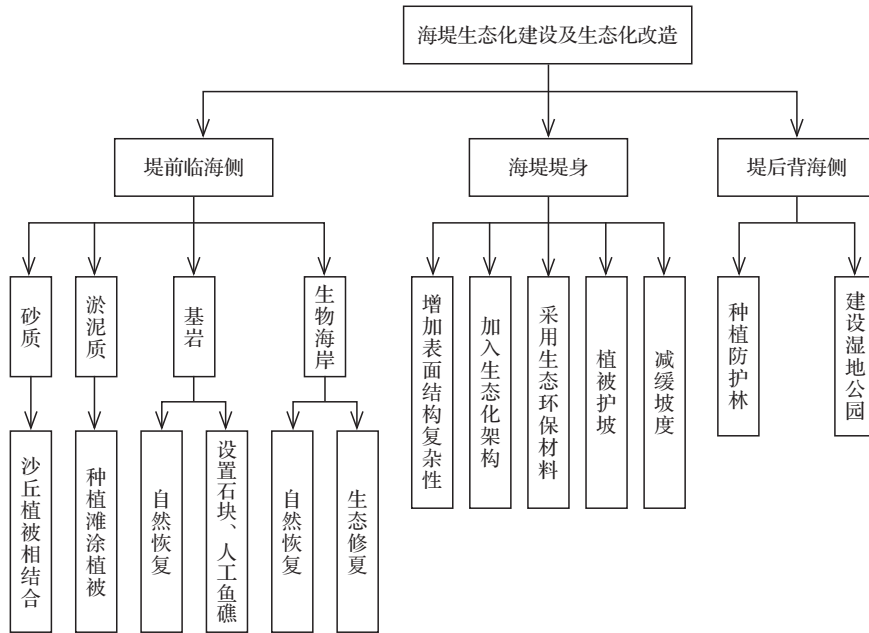


图1 海堤生态化建设及生态化改造技术路线

Fig.1 Technical framework for ecological construction and reconstruction of sea dikes

### 5.1 堤前临海侧改造

堤前临海侧生态化建设应根据底质类型,开展针对性生态化改造。徐伟等<sup>[34]</sup>提出对于砂质海岸已修建的海堤,可采用沙丘与植被相结合的模式;对于淤泥质海岸已修建的海堤,可种植芦苇和蘆草等滩涂植被;对于红树林海岸已修建的海堤,采用“海堤+红树林”的组合模式。对于基岩海岸,以自然恢复为主<sup>[19,44]</sup>,或通过设置石块、人工渔礁等<sup>[16,22]</sup>进行改善;对于生物海岸(红树林、海草床、盐沼、生物礁)则主要采取自然恢复与生态修复<sup>[11,16,34,44]</sup>相结合的方式恢复。

### 5.2 海堤堤身改造

海堤堤身总体有5种生态化建设方法:一是增加硬化海堤表面结构的复杂性。研究显示,生物的丰富度随硬化海岸表面结构复杂程度的提高而增加,且表面结构类型对生物群落结构的影响也不同<sup>[46]</sup>;Salauddin等<sup>[24]</sup>强调了海堤生态工程干预的潜力,通过增加结构物表面粗糙度耗散额外的波浪能,可减轻极端的越浪危害。二是在海堤外坡加入生态

化架构。国家海洋局第二海洋研究所<sup>[47]</sup>提出,在原有硬质海堤基础上加入生态化架构装置能弥补已建海堤对海岸生态环境的破坏,起到恢复海岸生态功能的作用。上海市水利工程设计研究院有限公司<sup>[48]</sup>发明了一种海堤护坡生态化改造结构,在保证原有海堤功能的基础上,对生态效果进行了改善,可适用于普通海堤硬质外坡结构的生态改造。三是堤身采用生态环保材料,如生态混凝土、当地块石等。利用生态混凝土建设生态海堤,可以构建具有净化水质、提供生物栖息地、维护生物多样性和抵御海浪侵蚀等生态功能和工程价值复合的生态系统,满足人与自然可持续发展的要求<sup>[49]</sup>;MacArthur等<sup>[50]</sup>研究显示,通过选择具有大规模天然或采石特征(分米级)的巨石,可实现具有显著生态效益的最佳被动增强效果,建议在天然和基于自然的解决方案不可行时,在海岸工程方案中首选岩石护面。四是采取植被护坡等方式。胡玉植等<sup>[51]</sup>研究显示,在海堤背水坡加筋草皮可提高海堤的抗侵蚀能力;Michalzik等<sup>[52]</sup>发现,在不影响

堤防安全的情况下,通过适度增加草地物种数量来增强生态多样性是可行的。五是改善堤形设计,减缓坡度。Scheres等<sup>[40]</sup>研究发现,与坡度较陡(约1:3)的标准海堤和灰色护岸相比,使用宽绿色堤坝(草覆盖的浅海坡度约为1:7)对自然、娱乐和旅游业有积极影响。

### 5.3 堤后背海侧

堤后背海侧一般采取种植防护林<sup>[11]</sup>,打造绿色长廊,构建海岸生态屏障或结合当地规划建设湿地公园、平台等具有本土特色的海岸生态观光带等措施进行建设<sup>[53]</sup>。

## 6 生态海堤普及困境

生态海堤的兴起将促进生态学的发展,一系列的发明专利应运而生,新发明、新材料、新技术得以蓬勃发展。海堤生态化建设及生态化改造本质是由硬工程转变为软工程,是基于生态理念的海岸防护。其核心基础涉及生态学与海岸工程学的交叉融合,但目前工程技术人员缺少生态方面的背景知识,研究人员缺乏海岸工程技术设计和施工经验。海堤生态化建设及生态化改造的应用基础是利用红树林、珊瑚礁等生态系统来消浪<sup>[46]</sup>、抵御风暴潮等自然灾害,但目前关于生态防护措施(如植被密度)与防护效果(如消浪率)之间的量化关系尚未建立。此外,成本问题仍是限制生态海堤普及的关键,相较于传统海堤,生态海堤建设成本高出50%~100%<sup>[15]</sup>,而社会群众对海堤生态化建设的支持有限。Dodds等<sup>[54]</sup>研究表明,仅凭利益相关者的支持不足以实施生态工程项目,尽管利益相关者认为海堤生态工程的益处是风险的两倍,但愿意为海堤生态工程项目承担的费用仅为实际成本的1/3左右。因此,大规模推进生态海堤建设目前并不现实,需循序渐进开展海堤生态化建设工作。此外,堤前滩涂植被存活率较低,仍是生态修复的一大困扰。根据相关研究<sup>[55]</sup>,对已完成生态修复一两年后的物种存活率进行评估,结果显示盐沼(存活率64.8%)和珊瑚礁(存活率64.5%)存活率最高,其次是红树林(存活率51.3%),海草存活率最低,仅有38.0%。我国海岸线漫长且类型多样,

生态海堤建设模式不能完全照搬已有案例。海堤生态化效益是一个持续的过程,需长期、定期进行监测评估。

## 7 结论及展望

结合国内外海堤生态化实践及案例,总体来说可以从堤前临海侧、海堤堤身、堤后背海侧进行生态化改造。其中,堤前临海侧主要根据海岸类型,采取种植植被、设置块石、人工鱼礁、沙滩修复等生态化措施进行改造;海堤堤身主要采取增加坡面结构复杂性、加入生态化架构、采用生态环保材料、植被护坡、减缓坡度等生态化措施进行改造;堤后背海侧主要采取种植防护林、构建湿地公园等措施进行生态化建设。

针对当前海堤生态化改造存在的问题,本文提出以下建议,以供未来海堤生态化建设发展参考。

### 7.1 建立健全理论体系

加快制定从设计导则到效果评价标准的系列规范,进一步完善现有海堤工程设计规范,为海堤生态化建设及生态化改造设计提供合法依据。建立海堤生态化效益评价体系,进一步量化评估生态化改造后的社会效益、经济效益和生态效益。加强技术创新,针对海堤堤身结构设计、材料创新、施工技术开展研发,建立不同类型海堤生态化建设技术体系。

### 7.2 培养复合型人才

应加强交叉学科研究,培养复合型人才,结合水利、生态、环境、地质、海洋等多个学科,开设跨学科课程;强化实践教学,通过生态海堤示范基地等案例分析,提高学生和技术人员实操能力,目前防城港市西湾红沙环海堤已成为全国首条生态示范海堤。加强交流合作,建立与政府、科研院所、企业等的合作关系,开展产学研项目。组建跨专业团队,整合人才队伍,如浙江省水利河口研究院组建生态海堤研究创新团队;通过研讨会、在线课程等方式,提升从业人员的技术水平。

### 7.3 拓展多方面的融资渠道

通过政府资金、社会资本和国际合作等多种方式筹集资金,如设立中央政府及地方政府专项资金,创新政府和社会资本合作方式,设立绿色基金

支持生态海堤项目。近年来,相关部门出台大量政策支持生态修复项目,2021年,国务院办公厅印发《关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的意见》,2024年,中国人民银行、生态环境部、金融监管总局、中国证监会联合印发《关于发挥绿色金融作用 服务美丽中国建设的意见》,鼓励社会资本参与生态保护修复。

#### 7.4 开展海堤生态化建设适应性评估研究

应根据当地情况,因地制宜建设生态海堤,做好前期规划与评估。综合考虑水文条件、地形地貌、土壤植被等自然环境因素及人口分布、经济活动等社会因素,编制合理的设计方案。根据当地气候及土壤条件,选择适宜的本土植物,选用环保材料及结构设计生态护坡,针对不同类型海岸带修建的硬质海堤,提出针对性生态化建设策略。为避免造成资源浪费,应优先考虑对旧海堤进行生态化改造,尽可能改善海洋生态环境。做好海堤生态化建设效果评估,针对硬质海堤生态化建设开展监测性评价、评估,对生态化改造前后生态效益、经济效益开展定量评估,并根据评估结果进一步改进或推

广生态化建设模式。

#### 7.5 加强信息化管理

为加强海堤生态化建设效益评估,可考虑建设信息化管理平台,通过数据采集、分析和可视化,实现对生态海堤全面、高效的管理,实现长期监测,辅助有关部门及时掌握海堤周边生态环境状况及其变化趋势,提高海堤监督管理的信息化水平和对周边海洋生态环境保护的监管能力。

#### 7.6 提高社会群众参与

多措并举开展海堤生态化建设科普宣传,如制作公益视频、开展科普讲座、召开新闻发布会、建立生态海堤示范基地等,增强社会群众对海堤生态化建设重要性及必要性的认知,引起社会各界的关注和支持。

#### 7.7 构建长效管护机制

为提高修复物种的存活率,除了加强植被种植技术研究外,还应通过卫星遥感、无人机和人工巡护构建三维立体防护体系,并制定详细的管护监测计划,定期开展检查、补种及防治病虫害等科学管护措施。

#### 参考文献 (References):

- [1] MA Z J, MELVILLE D S, LIU J G, et al. Rethinking China's new great wall: massive seawall construction in coastal wetlands threatens biodiversity[J]. *Science*, 2014, 346(6212): 912-914.
- [2] 国家发展改革委,水利部. 全国海堤建设方案[Z]. 2017.  
National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources. National seawall construction scheme[Z]. 2017.
- [3] 黎洋佟, 卢山. 厦门建堤与填海进程共同影响下的城市发展初探[J]. *广东园林*, 2017, 39(1): 52-58.  
LI Yangtong, LU Shan. The development of Xiamen City under the influence of seawall construction and sea reclamation[J]. *Guangdong Landscape Architecture*, 2017, 39(1): 52-58.
- [4] 范航清, 黎广钊. 海堤对广西沿海红树林的数量、群落特征和恢复的影响[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(3): 240-244.  
FAN Hangqing, LI Guangzhao. Effect of sea dike on the quantity, community characteristics and restoration of mangrove forest along Guangxi coast[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(3): 240-244.
- [5] 刘琦波, 陈伟国, 胡明华, 等. 我国海堤建设与景观生态问题[J]. *人民长江*, 2006, 37(11): 93-94.  
LIU Qibo, CHEN Weiguo, HU Minghua, et al. The problems in sea dike construction and landscape and ecology of China[J]. *Yangtze River*, 2006, 37(11): 93-94.
- [6] HOOD W G. Indirect environmental effects of dikes on estuarine tidal channels: thinking outside of the dike for habitat restoration and monitoring[J]. *Estuaries*, 2004, 27(2): 273-282.
- [7] LEE O I, KIM H, KWON I, et al. Ecological interruption on food web dynamics by eutrophic water discharge from the world's longest dike at Saemangeum, Yellow Sea[J]. *Environment International*, 2024, 184: 108468.
- [8] 陶理志. 生态护坡在城市防洪堤的应用[J]. *人民长江*, 2007(5): 80-82.  
TAO Lizhi. Ecological revetment for urban flood control embankments[J]. *Yangtze River*, 2007(5): 80-82.

- [9] 李远,安树青,孙庆业,等.生态学方法在海堤防护中的应用[J].南京大学学报(自然科学版),2004(2):219-225.  
LI Yuan, AN Shuqing, SUN Qingye, et al. The application of ecological method in protecting the seashore dyke[J]. Journal Of Nanjing University(Nature Sciences), 2004(2): 219-225.
- [10] 王文双,郑重,徐鸣,等.滩涂围垦海堤空间的景观设计探讨[J].浙江水利科技,2013,41(3):41-43.  
WANG Wenshuang, ZHENG Zhong, XU Ming, et al. Research on landscape design of the sea dyke space from mudflats reclamation[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2013, 41(3): 41-43.
- [11] 张华,韩广轩,王德,等.基于生态工程的海岸带全球变化适应性防护策略[J].地球科学进展,2015,30(9):996-1005.  
ZHANG Hua, HAN Guangxuan, WANG De, et al. Ecological engineering based adaptive coastal defense strategy to global change[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(9): 996-1005.
- [12] 王曦鹏,吕江华,乔兵.新型海堤结构形式探究[J].河南科技,2013(17):153.  
WANG Xipeng, LYU Jianghua, QIAO Bing. Investigation of new seawall structural types[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013(17): 153.
- [13] 住房和城乡建设部.海堤工程设计规范:GB/T 51015—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for design of seawall engineering: GB/T 51015—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [14] 国家海洋局.国家海洋局关于印发《围填海工程生态建设技术指南(试行)》的通知[Z].2017.  
State Oceanic Administration. Notice of the State Oceanic Administration on issuing the technical guide for ecological construction of reclamation works(trial)[Z]. 2017.
- [15] 范航清,何斌源,王欣,等.生态海堤理念与实践[J].广西科学,2017,24(5):427-434.  
FAN Hangqing, HE Binyuan, WANG Xin, et al. The conception and practices of ecological sea dyke[J]. Guangxi Sciences, 2017, 24(5): 427-434.
- [16] 赵鹏,朱祖浩,江洪友,等.生态海堤的发展历程与展望[J].海洋通报,2019,38(5):481-490.  
ZHAO Peng, ZHU Zuhao, JIANG Hongyou, et al. The development and outlooks of the ecological seawall[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(5): 481-490.
- [17] LOON-STEENSMA V M J, SCHELFHOUT H A, VELLINGA P. Green adaptation by innovative dike concepts along the Dutch Wadden Sea coast[J]. Environmental Science and Policy, 2014, 44: 108-125.
- [18] 高抒.防范未来风暴潮灾害的绿色海堤蓝图[J].科学,2020,72(4):12-16.  
GAO Shu. A blueprint of green sea defence against future storm surge hazards[J]. Science, 2020, 72(4): 12-16.
- [19] 中国海洋工程咨询协会.围填海工程海堤生态化建设标准:T/CAOE 1—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.  
China Association of Oceanic Engineering. Directives for sea dike ecological construction of sea reclamation and enclosure project: T/CAOE 1—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [20] 自然资源部,水利部.海堤生态化建设技术指南(试行)[Z].2020.  
Ministry of Natural Resources, Ministry of Water Resources. Technical Guide for Ecological Construction of Seawalls(trial Implementation)[Z]. 2020.
- [21] 自然资源部.围填海工程生态建设技术指南:HY/T 0468—2024[S].2024.  
Ministry of Natural Resources. Technical guidance for ecological construction of sea reclamation project: HY/T 0468—2024[S]. 2024.
- [22] 广东省市场监督管理局.海堤生态化建设技术导则:DB44/T 2499—2024[S].2024.  
Guangdong Administration for Market Regulation. Technical guide for sea wall ecological improvement: DB44/T 2499—2024[S]. 2024.
- [23] 自然资源部.海堤生态化建设技术指南:HY/T 0469—2025[S].2025.  
Ministry of Natural Resources. Technical guide for ecological construction of sea dike: HY/T 0469—2025[S]. 2025.
- [24] SALAUDDIN M, O'SULLIVAN J J, ABOLFATHI S, et al. Eco-engineering of seawalls: an opportunity for enhanced climate resilience from increased topographic complexity[J]. Frontiers In Marine Science, 2021, 8: 674630.
- [25] 唐上平,李啸宇,文振钊,等.生态与减灾协同增效:防城港市实施生态海堤建设案例[J].南方自然资源,2024(5):45-49.  
TANG Shangping, LI Xiaoyu, WEN Zhenzhao, et al. Synergy between ecology and disaster reduction: a case study of ecological

- seawall construction in Fangchenggang City[J]. *NanFang ZiRan ZiYuan*, 2024(5): 45-49.
- [26] 范航清. 广西沿海红树林养护海堤的生态模式及其效益评估[J]. *广西科学*, 1995(4): 48-53.  
FAN Hangqing. An ecological pattern of sea dyke maintenance by mangroves and assment of its benefits along Guangxi coast[J]. *Guangxi Sciences*, 1995(4): 48-53.
- [27] 严飞, 董学刚. 长江口炮台湾湿地公园生态景观型海堤设计[J]. *人民长江*, 2012, 43(S1): 7-10.  
YAN Fei, DONG Xuegang. Ecological landscape type seawall design in paotai bay wetland park yangtze estuary[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(S1): 7-10.
- [28] 潘丹, 曾嵘. 城市生态景观型海堤岸带工程建设初探: 以防城港西湾红沙环海堤工程规划为例[J]. *林业科技开发*, 2014, 28(2): 135-138.  
PAN Dan, ZENG Rong. A preliminary study on the construction of urban ecological landscape-type seawall projects: the planning of the red sand ring seawall project in Fangchenggang Xiwan as an example[J]. *China Forestry Science and Technology*, 2014, 28(2): 135-138.
- [29] 张翠萍, 张绍丽, 贾后磊, 等. 基于生态文明理念的围填海工程生态化建设重点路径研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2019(2): 53-58.  
ZHANG Cuiping, ZHANG Shaoli, JIA Houlei, et al. Discussion on key path of ecological construction of reclamation project based on ecological civilization concept[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019(2): 53-58.
- [30] 浙江省市场监督管理局. 海堤生态性评价技术导则: DB33/T 1396—2024[S]. 2024.  
Zhejiang Administration for Market Regulation. Technical guidelines for evaluation of ecological features of sea dike: DB33/T 1396—2024[S]. 2024.
- [31] 廖远志, 廖鸿志. 荷兰水利工程建设与生态环境协调发展探讨[J]. *水利水电快报*, 2007(16): 7-9.  
LIAO Yuanzhi, LIAO Hongzhi. Discussion on coordinated development of hydraulic engineering construction and ecological environment in Netherlands[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2007(16): 7-9.
- [32] SLOBBE E, VRIEND J H, AARNINKHOF S, et al. Building with Nature: in search of resilient storm surge protection strategies[J]. *Natural Hazards*, 2013, 66(3): 1461-1480.
- [33] 尹志坚, 经菁, 陈楠, 等. 弹性设计下的城市防洪景观基础设施研究[J]. *城市建设理论研究(电子版)*, 2019(1): 8-9.  
YIN Zhijian, JING Jing, CHEN Nan, et al. Research on urban flood control landscape infrastructure under elastic design[J]. *Theoretical Research in Urban Construction*, 2019(1): 8-9.
- [34] 徐伟, 陶爱峰, 刘建辉, 等. 国际海岸带生态防护对我国生态海堤建设的启示[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(10): 12-15.  
XU Wei, TAO Aifeng, LIU Jianhui, et al. The enlightenment of international coastal zone ecological protection for China's ecological sea dike construction[J]. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(10): 12-15.
- [35] 曹春顶, 王盟, 唐乐. 粤港澳大湾区防风暴潮生态海堤核心技术研究及应用[J]. *人民珠江*, 2024, 45(5): 19-27.  
CAO Chunding, WANG Meng, TANG Le. Research and application of core technology of storm surge prevention ecological seawall in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. *Pearl River*, 2024, 45(5): 19-27.
- [36] 陈俊昂, 王帅, 钟兴, 等. “多功能生态海堤构架体系”技术应用实践[J]. *广东水利水电*, 2021(4): 56-59.  
CHEN Jun'ang, WANG Shuai, ZHONG Xing, et al. The practice of technical application of “multifunctional ecological seawall framework system” [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2021(4): 56-59.
- [37] 欧阳玉蓉, 蔡灵, 李青生, 等. 大型围填海工程海洋生态修复实践与探索[J]. *海洋开发与管理*, 2021, 38(9): 74-79.  
OUYANG Yurong, CAI Ling, LI Qingsheng, et al. Practice and exploration on the marine ecological restoration of the large-scale reclamation projects[J]. *Ocean Development and Management*, 2021, 38(9): 74-79.
- [38] 王璐璐. 海口江东新区海堤生态化改造设计分析[J]. *城市道桥与防洪*, 2025(6): 216-220.  
WANG Lulu. Analysis on ecological reconstruction design of seawall in Jiangdong[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2025(6): 216-220.
- [39] 张翠萍, 贾后磊, 吴玲玲, 等. 海堤生态化建设技术的研究进展及推进我国海堤生态化建设的建议[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(9): 57-61.  
ZHANG Cuiping, JIA Houlei, WU Lingling, et al. Research progress of ecological construction technology of seawall and suggestions on promoting the ecological construction of seawall in China[J]. *Ocean Development and Management*, 2020, 37(9): 57-61.

- [40] SCHERES B, SCHÜTTRUMPF H. Enhancing the ecological value of sea dikes[J]. *Water*, 2019, 11(8): 1617.
- [41] 李丽凤, 刘文爱, 蔡双娇, 等. 广西北海滨海国家湿地公园生态海堤建设模式研究[J]. *湿地科学*, 2019, 17(3): 277-285.  
LI Lifeng, LIU Wenai, CAI Shuangjiao, et al. Models of ecological seawall construction in Beihai coastal national wetland park in Guangxi[J]. *Wetland Science*, 2019, 17(3): 277-285.
- [42] 张月峰. 生态海堤防护的研究与应用[J]. *农家参谋*, 2018(16): 204.  
ZHANG Yuefeng. Research and application of eco-seawall protection[J]. *Nongjia Canmou*, 2018(16): 204.
- [43] 唐慧燕, 顾宽海, 刘磊, 等. 海堤堤身的生态化改造形式及案例分析[J]. *环境工程*, 2023, 41(S2): 1173-1177.  
TANG Huiyan, GU Kuanhai, LIU Lei, et al. Ecological reconstruction forms and case analysis of sea embankment body[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(S2): 1173-1177.
- [44] 黄莹娜. 海堤生态化建设路径浅析[J]. *珠江水运*, 2020(12): 37-38.  
HUANG Yingna. Analysis on ecological construction path of seawall[J]. *Pearl River Water Transport*, 2020(12): 37-38.
- [45] 房英伟. 生态海堤环境改善效果评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.  
FANG Yingwei. The study on environmental improvement effect evaluation of ecological seawall[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [46] 易雨君, 刘奇, 王雪原, 等. 生态海岸防护工程研究进展与展望[J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(4): 806-812.  
YI Yujun, LIU Qi, WANG Xueyuan, et al. Coastal ecological infrastructure: research progress and prospect[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2022, 53(4): 806-812.
- [47] 国家海洋局第二海洋研究所. 已建硬质海堤生态架构体系及建造方法: 201811609914. 2[P]. 2019-03-08.  
Second Institute Of Oceanography, State Oceanic Administration. Built rigid seawall ecological framework system and construction method: 201811609914. 2[P]. 2019-03-08.
- [48] 上海市水利工程设计研究院有限公司. 一种海堤护坡生态改造结构: 201910208897. X[P]. 2024-05-17.  
Shanghai Water Engineering Design & Research Institute Co., Ltd.. An eco-friendly seawall revetment structure: 201910208897. X[P]. 2024-05-17.
- [49] 杨海杰, 王小康, 覃俊淇, 等. 生态混凝土在岩礁生态系统修复中的应用与展望[J]. *海洋湖沼通报*, 2024, 46(2): 177-185.  
YANG Haijie, WANG Xiaokang, QIN Junqi, et al. Application of eco-concrete in rocky reef ecosystem restoration and associating prospects[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2024, 46(2): 177-185.
- [50] MACARTHUR M, NAYLOR A L, HANSOM D J, et al. Ecological enhancement of coastal engineering structures: passive enhancement techniques[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 139981.
- [51] 胡玉植, 潘毅, 陈永平. 海堤背水坡加筋草皮抗冲刷能力试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2016(1): 51-57.  
HU Yuzhi, PAN Yi, CHEN Yongping. Experimental studies on scouring resistance of reinforced turf on land-side slope[J]. *Hydro-Science And Engineering*, 2016(1): 51-57.
- [52] MICHALZIK J, PAUL M, SCHLURMANN T. Response of grass covers for dikes to coastal stressors during establishment phase[J]. *Ecological Engineering*, 2025, 212: 107488.
- [53] 詹冯达. 福建省安全生态海堤建设思路探讨[J]. *福建水力发电*, 2022(1): 14-15.  
ZHAN Fengda. Discussion on construction of safe ecological seawall in Fujian Province[J]. *Fujian Shuili Fadian*. 2022(1): 14-15.
- [54] DODDS K C, VOZZO M L, MAYER-PINTO M, et al. Stakeholders support marine eco-engineering, but what are the perceived benefits and who should pay?[J]. *People and Nature*, 2025, 7(3): 653-667.
- [55] BAYRAKTAROV E, SAUNDERS M I, ABDULLAH S, et al. The cost and feasibility of marine coastal restoration[J]. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 2016, 26(4): 1055-1074.