我国海上能源岛综合开发路径思考

翁怡婵[1]，周刚[2]，彭立功[3]

（1. 自然资源部东海预报减灾中心　上海　200136；2. 自然资源部东海局保障中心　上海　200137；3. 自然资源部东海局　上海　200137）

摘要：海上能源岛作为海洋可再生能源开发利用的创新载体，通过多能互补、系统集成和资源集约高效利用，正在重塑全球能源格局。文章从概念定义、重要性、可行性、国外案例、考虑因素及建设方案等多维度，系统分析了能源岛的发展趋势以及我国建设海上能源岛的必要性。利用海岛（自然海岛或人工岛）作为海上绿色能源岛（绿色能源集散中心）能够有效提升海上风电能源存储和传输效率，整体效率可提高 25%，实现稳定的电力输出。随着生产成本的降低，利用海上风电生产绿氢将是氢能的主要来源之一，海上能源岛将成为绿氢的生产和储运基地。光伏、潮流能、波浪能等能源形式的加入，为实现能源岛多能互补提供了保障。能源岛及周边海上风电平台可以搭载各种观测仪器，提供连续在线的观监测服务，为海洋防灾减灾提供了不可多得的信息平台。高质量发展下的新型海上绿色能源岛建设将有助于中国“双碳”目标的实现。

关键词：能源岛；绿氢；储能；能源转换；多能互补

中图分类号：P744.4；TE4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-9857（2025）12-0067-10

Reflections on the Comprehensive Development Paths of Offshore Energy Islands in China

WENG Yichan[1]，ZHOU Gang[2]，PENG Ligong[3]

（1. East China Sea Forecast and Mitigation Center，MNR，Shanghai 200136，China；2. Support Center of the East China Sea Bureau，MNR，Shanghai 200137，China；3. East China Sea Bureau，MNR，Shanghai 200137，China）

Abstract：Offshore energy islands，as innovative carriers for the development and utilization of marine renewable energy，are reshaping the global energy landscape through multi-energy complementarity，system integration，and efficient use of resources. This article systematically analyzes the development trends of energy islands and the necessity of constructing offshore energy islands in China from various dimensions，including concept definition，importance，feasibility，foreign cases，considerations，and construction plans. Using islands（natural or artificial）as offshore green energy islands（green energy distribution center）can effectively enhance the storage and transmission solutions for offshore wind energy，increasing overall efficiency by up to 25% and achieving stable power output. With the reduction in production costs，offshore wind energy for green hydrogen production will become one of the main sources of hydrogen energy，with offshore energy islands serving as production and storage

收稿日期：2025-08-07；**修订日期：**2025-12-22

作者简介：翁怡婵，工程师，研究方向为海域海岛开发监管和政策

通信作者：周刚，硕士，研究方向为海域海岛开发监管和政策

bases for green hydrogen. The integration of energy forms like photovoltaic，tidal，and wave energy provides assurance for achieving multi-energy complementary in energy islands. Energy islands and surrounding offshore wind platforms can be equipped with various observation instruments to provide continuous online monitoring services，offering a valuable information platform for marine disaster prevention and reduction. The construction of new offshore green energy islands under high-quality development will contribute to China's dual carbon goals.

Keywords：Energy island，Green hydrogen，Energy storage，Energy conversion，Multi-energy complementarity

0 引言

海上绿色能源岛通常是指建设于海上（天然或人工）的岛屿或漂浮于海面的综合性能源枢纽，用于集中管理风能、太阳能、波浪能等可再生能源，实现多能互补，并通过储能、制氢、电网互联、先进能源管理系统等技术实现能源的高效利用与分配。海上绿色能源岛可以是天然岛屿改造，如丹麦的博恩霍尔姆岛（Bornholm Island）[1]；可以是人工建设的岛屿，如比利时的伊丽莎白公主岛（The Princess Elisabeth Island）[2]；也可以是漂浮式的能源平台，如多米尼克·米凯利斯（Dominic Michaelis）设计的六边形漂浮平台[3]。

海上绿色能源岛是依托海岛及周边海域，集成风电、光伏、海洋能等多种绿色能源的综合能源开发载体。目前，海上风电因技术成熟、成本可控，成为绿色能源岛开发利用的主要能源种类。海岛及其周边海域风电场通常包含海上风电场、柔直换流站、储能区、制氢区、海水淡化、运维中心、集控中心、停机坪、码头等（图 1）。对深远海地区的海上绿色能源岛，还应包括北斗导航通信接收系统、防浪墙（抵御百年一遇风暴潮）、风电平台海洋气象观测设施、水下和水面观测监测设施、船舶能源和淡水补给站等。

图 1 海上绿色能源岛构成

Fig.1 Composition of the offshore green energy island

1　建设海上绿色能源岛的意义

1.1　海洋空间节约集约利用和海上风电降本增效

深远海风电项目单条海底电缆管道的铺设成本高昂，采用海上绿色能源岛的形式替代传统海上风电场，相当于将传统的几个甚至十几个风电场汇集到一起，集中统一管理和输电，节约了多条海底路由建设的成本，同时也有利于海底空间和海底综合管廊的节约集约利用。通过建设海上风电的集中运维基地和服务中心，节约了多个风电项目运维中心的建设和管理成本。

建设海上集控中心，通过整合多个海上风电场的电力输送，采用先进能源管理系统（集中控制中心 + 储能）来优化风能的使用，有效优化能源存储解决方案，可提升高达 25％的整体效率[4]，使绿色能源岛能够动态响应风能发电波动，确保电网稳定输出电力，再通过高压柔性直流电缆输送到陆上电网。

相较于传统模式下弃风限电造成的能源损失，利用富余风电制氢可创造额外经济收益。所谓富余风电，是指因电网消纳能力不足、储能设施有限等因素，无法被即时并网输送和利用的风电电量。将这部分富余电力通过电解水等技术转化为绿氢，或进一步合成绿氨、甲醇等液态燃料，能显著提升风能资源的综合利用率。这些绿氢及衍生燃料可广泛应用于航运、航空、冶金、化工等难以直接电气化的高耗能行业。

目前，风电制氢的能量转化效率已达到 75％。根据全球风能理事会（GWEC）的预测，到 2030 年，海上风电制氢成本将从当前的 6 美元 /kg 降到 1 美元 /kg[5]，届时绿氢的使用成本将与灰氢持平。成本的大幅下降将推动绿氢这一清洁能源在更多领域得到应用。

1.2　带动海岛地区经济社会发展

我国沿海地区经济发达，能源需求旺盛，绿色能源市场潜力巨大。海上风电可以就近消纳，减少输电损耗。将风力发电设施建设在靠近用电中心的海域，可以有效降低电力传输过程中的输电损耗，同时缓解陆上的电力供应压力。

沿海地区对绿氢等清洁能源的需求同样巨大。据中国氢能联盟预计，到 2030 年和 2050 年，中国氢气年需求量将分别达到 3 500 万 t 和 6 000 万 t，中国将成为全球氢能需求的中心。随着国家“十四五”氢能发展规划和碳减排政策的实施，中国氢能产业迎来快速发展期，到 2050 年，产业产值将达 12 万亿元[6]。

海上绿色能源岛建设可带动海岛地区风电、制氢、储能、港口经济、运维服务、海岛（海底）算力中心等相关上下游产业，形成海岛地区经济带新的增长极。

1.3　助力碳达峰和碳中和

国务院印发的《2030 年前碳达峰行动方案》指出，到 2030 年，我国非化石能源消费比重达到 25％左右，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 65％以上；到 2030 年，风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿 kW 以上。以浙江嵊泗 3#和4# 海上风电场项目为例，该项目年发电量预计 14.25 亿 kWh，可满足 22 万户居民用电需求，替代标煤 44.89 万 t/ 年，年减碳 191.07 万 t[7]。随着技术的进步和成本的降低，海上风电已成为推动全球能源结构转型的重要力量，有助于减少对化石燃料的依赖，提高能源利用效率，促进经济的可持续发展。“海上风电 + 储能 + 制氢”模式的海上绿色能源岛建设，正在重塑全球能源格局。

为助力打造中国的“零碳岛”和“负碳岛”，实现绿色能源发展目标。2021 年，烟台市提出建设“长岛国际零碳岛”，研究编制了发展规划，并在第二十八届联合国气候变化大会（COP28）上发布，提出“到 2035 年长岛全域温室气体实现净零排放目标”。2024 年 11 月，中共中央政治局常委、国务院副总理丁薛祥在出席第二十九届联合国气候变化大会（COP29）中国角“国际零碳岛屿合作倡议”发布会时指出，推进岛屿绿色低碳转型发展，因地制宜建设清洁能源体系，发展绿色产业，保护海岛资源，维护海洋生态。

1.4　服务海洋防灾减灾

海上绿色能源岛通过搭载波浪浮标、地波雷达、全球导航卫星系统（GNSS）观测站等设备，构建高密度海洋环境监测网络。依托风电、光伏等清洁能源及储能技术，能源岛可以为防灾减灾设施提供

不间断的电力供应。海上绿色能源岛和海上风电平台在稳定性和运维的便捷性方面均远优于浮标，可以搭载各种观测仪器，提供连续在线的观监测平台，开展气压、气温、相对湿度、风向、风速、能见度、降水、波浪、潮位、流速、流向、水温、盐度、悬浮泥沙、北斗定位导航、海上目标等要素的长期观测。

海上绿色能源岛可以为深远海养殖产业提供灾害避险支持，通过海浪与水温等要素的预警，帮助渔民优化生产安排。海上绿色能源岛通过“能源—观测—预警—产业”四维联动，将灾害防控从被动应急转向主动防御，其技术内核（如智能网格预报、多能微电网）与模式创新（如风光储渔融合）正重塑沿海防灾减灾韧性体系，为全球海洋灾害治理贡献中国智慧。

1.5 海上补给中心和国防前哨

海上绿色能源岛凭借其战略定位与多重复合功能，正逐步演变为兼具海上综合补给枢纽与国防前沿支点的关键基础设施，其价值在军民融合领域日益凸显。

海上绿色能源岛集成风电、光伏及储能系统，形成零碳能源供给基地，可为过往船舶、驻岛人员及海上作业平台提供清洁电力与淡水（通过海水淡化系统）。例如，福建西洋岛微电网在台风期间持续为岛内 3 000 个居民及渔船充电站供电，其配套的物资储备库可储存 500 t 应急燃油与生活物资，大幅提升南海渔业船队与科考船舶的持续作业能力[8]。

海上绿色能源岛搭载的低功耗广域传感器（如声呐浮标、船舶自动识别系统、地波超视距雷达等）可构建全天候海洋态势感知体系，数据实时回传至岸基指挥中心。海上绿色能源岛平时作为国际航道服务站，开展绿电供应、绿氢加注与物资补给；非常时期，依托分布式传感器网络构建战场感知优势，为深远海作战提供情报与能源双支撑。这种“平战结合”模式在维护海洋权益、保障能源通道安全方面可以发挥重要作用，成为新时代经略海洋的“钢铁支点”。

2 建设海上绿色能源岛的背景

2.1 我国海上风能资源丰富

我国沿海地区风能资源禀赋突出，海岛区域发展海上风电产业具备天然条件，其中浙江、福建、广东是沿海风能资源最富集的省份，同时也是沿海海岛数量最多的区域，为建设海上绿色能源岛奠定了独特基础。尤其是台湾海峡地区，受“狭管效应”影响，年平均风速达 7.5 ～ 10 m/s，局部区域甚至超过 10 m/s[9]，是我国海上风能资源最集中的区域。

近年来，我国海上风电产业发展势头迅猛。中国可再生能源学会风能专业委员会发布的《2023 年中国风电吊装容量统计简报》显示，2023 年全球海上风电新增装机总量约 10.85 GW，我国新增装机容量达 7.18 GW，占全球新增装机总量的比例超 66%[10]。

2.2 政策支持大力发展海上风电

自 1991 年丹麦成功试验世界上首个商业化海上风电场[11]以来，全球海上风电建设进入了快车道。而在我国，海上风电的蓬勃发展也有着清晰的脉络：2008 年 5 月，我国首个海上风电项目——上海东海大桥海上风电场一期工程获得国家发展改革委核准，经施工建设，于 2010 年并网发电，我国海上风电建设的大幕由此拉开。此后，海上风电新增装机容量每年保持两位数增长，产业发展势头持续向好。

为进一步推动海上风电规模化、集约化发展，2022 年 6 月，国家发展改革委等九部门联合印发《“十四五”可再生能源发展规划》，明确要求大力提升海上风电规模，优化近海布局，推动深远海风电示范化开发，同时将山东半岛、长三角、闽南、粤东和北部湾列为五大海上风电基地，为产业发展划定了重点区域。

此后，政策支持力度持续加码。2024 年 8 月，《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》印发，要求加快海上风电等清洁能源基地建设，提升海域空间利用效率；2025 年全国能源工作会议进一步提出，要大力推动海上风电发展走向深水远岸，推动新能源集成式发展。

在国家顶层设计的指引下，自 2017 年开始，沿海各省陆续发布了地方层面的海上风电发展规划，如广东省发布了《广东省海上风电发展规划（2017—2030 年）》，规划了 23 个场址，装机总容量为 66.85 GW，预计总投资约 12 000 亿元；江苏省出台了《江苏省海上风电发展规划（2024—2030 年）》，因地制宜推进本省海上风电产业落地（相关政策文件见表 1）。

表 1　近年来海上风电开发政策性文件

Table 1　Policy documents on offshore wind power development in recent years

年份	政策文件	来源	主要内容
2016	《海上风电开发建设管理办法》	国家能源局、国家海洋局	①规范项目审批流程，要求各省通过招标选择投资企业，将上网电价、技术能力纳入核心指标 ②取消全国统一开发计划，改为由省级主导
2022	《“十四五”现代能源体系规划》	国家发展改革委、国家能源局	强调“推进海上风电向深水远岸区域布局”，支持集群化开发
2022	《“十四五”可再生能源发展规划》	国家发展改革委等九部门	①明确要求“大力提升海上风电规模，优化近海布局，推动深远海风电示范化开发”，并将山东半岛、长三角、闽南、粤东、北部湾列为五大海上风电集群基地 ②海上能源岛建设示范，建设海洋能、储能、制氢、海水淡化等多种能源资源转换利用一体化设施
2023	《关于组织开展可再生能源发展试点示范的通知》	国家能源局	重点支持深远海技术示范：要求单体规模≥100 万 kW；推动 ±500 kV 柔性直流输电、15 MW+ 大容量机组、漂浮式基础应用；鼓励运维数字化升级
2024	《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》	中共中央、国务院	要求“加快海上风电等清洁能源基地建设”“提升海域空间利用效率”
2024	《2024—2025 年节能降碳行动方案》	国务院	提出“合理有序开发海上风电，促进海洋能规模化开发利用”
2024	《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027 年）》	国家发展改革委 国家能源局 国家数据局	①实施一批算力与电力协同项目。探索新能源就近供电、聚合交易、就地消纳的“绿电聚合供应”模式 ②探索应用一批新型储能技术
2024	《关于进一步加强海上风电项目用海管理的通知》	自然资源部	①要求优化空间布局，推行“风电 +”综合开发模式（如兼容养殖、制氢、海洋牧场），实现“一海多用” ②允许在已开发的油气区、养殖区兼容建设海上风电项目

2.3　制氢储氢关键技术突破

海上制氢主要有两个技术方向：一是先把海水变成纯水或预处理后再电解制氢；二是用海水直接电解制氢。目前，前者技术相对成熟，主要包括已实现规模化生产的碱性电解水制氢（ALK）、质子交换膜电解水制氢（PEM），以及处于研发阶段的固态氧化物电解水制氢（SOEC）和阴离子交换膜电解水制氢（AEM）四种制氢技术。

利用海水直接电解制氢技术近年来快速发展，相关示范项目已陆续启动。由深圳大学谢和平院士团队联合东方电气开展的无淡化海水原位直接电解制氢技术海上中试在福建兴化湾海上风电场成功通过示范验证。中国科学院大连化学物理研究所王二东研究员团队自主研发的百千瓦级 20 Nm^3/h 高效海水制氢系统在华能庄河海上风电场示范运行，目前系统工作稳定，各项指标均达到设计要求[12]。从整体来看，当前海水直接制氢技术仍存在制氢效率低、产量不稳定等亟待攻克的难题，距离实现技术产业化落地应用还有较大差距。

对于海底管道输氢，目前我国尚未开展相关示范项目研究，而欧洲利用已有管道开始探索相关研究。其中，德国、瑞典和挪威等国家陆续启动“海

上风电制氢＋管道运氢”项目建设；西班牙、葡萄牙和法国在 2022 年宣布建设连接三国的海底氢气管道项目（H2Med）以响应欧盟提出的氢能发展目标[13]。

对于船舶运氢，目前主要有气态、液态、有机液态和固态四种储氢技术方案。当前较为成熟的技术方案是液态和有机液态储氢。由中国船舶集团有限公司第七〇八研究所研发的 20 000 m^3 级液氢运输船设计方案已获得美国船级社原则性认可证书，在该领域取得突破性进展。日本川崎重工预计于 2026 年下水 160 000 m^3 级日损耗 0.3%的液氢运输船。有研究表明[14]，氨（NH_3）作为氢气载体，由于其较低的储存和运输成本以及较低的碳排放，是目前大规模氢气生产和运输的最优选择。经测算，船舶运氢的成本低于海底铺设管道输氢的成本。

2.4 国外典型案例

2022 年 5 月，由德国、丹麦、比利时和荷兰四国政府主导的《埃斯比约宣言》明确将通过能源岛建设打造“欧洲绿色发电站”作为该宣言的重要组成部分，比利时伊丽莎白公主岛是全球首个在建的人工能源岛。该人工岛总投资 10 亿～20 亿欧元，项目位于比利时西北部港口城市奥斯坦德 45 km 以外的北海海域，设计面积 25 hm^2，对应海上风电装机容量为 3.5 GW[15]。

2023 年 9 月，该工程在荷兰弗利辛恩的海工基地启动，于 2023 年 11 月完成了首个沉箱布置。每个沉箱长 57 m、宽 30 m、高 30 m，重达 22 000 t，单座沉箱的工期约为 3 个月。这批沉箱将组成能源岛最外围的一圈，而内部将使用当地开采的沙子，开采量约为 230 万 m^3。

该能源岛位于北海风电区内，将由填充沙子的混凝土沉箱建造。为方便维修人员登岛，还将配备一个小型码头和直升机平台。伊丽莎白公主岛将成为世界上第一个将高压直流电（HVDC）和高压交流电（HVAC）相结合的人工能源岛。岛上的高压基础设施将把来自伊丽莎白公主区风电场的电缆汇聚在一起。除了将比利时的海上风电输送到海岸外，该能源岛还将成为欧洲海上综合电网的首个组成部分，包括实现英国和丹麦的互联互通，为两国提供大量可再生能源。该能源岛具备以下 4 个核心功能。

2.4.1 海上风电产业链服务功能

BOW 作业码头：提供海上风电基础构件（单桩、过渡段）的存储、运输和装船服务，拥有 340 m 强化码头和 20 hm^2 专用场地，可处理重达 1 000 t 的单桩和 600 t 的过渡段。

法焦利风电场物流中心负责大型基础构件的装卸和转运，支持多个欧洲海上风电场项目[16]。

希勒玛弗利辛恩基地：占地 20 万 m^2，拥有 720 m 码头（450 m 用于 2 万 t 级重型装载），专业生产海上风电导管架和其他大型海洋结构，配备 100 m × 37 m × 30 m 的主制造车间和多台大型起重机（最大 600 t）。

沃旭运维基地：占地 2 100 m^2，包括仓库、办公室、维修车间和双浮式码头，可同时停靠 4 艘运维船，为博尔塞勒海上风电场提供快速响应服务。

2.4.2 能源转型服务功能

绿氢制备服务：$VoltH_2$ 绿氢制备项目规划建设电解水制氢工厂，初始规模为 25 MW，未来可扩展至 125 MW，依托海上风电绿色电力开展制氢作业，计划于 2027 年正式投产。

绿色液态燃料储运服务：Vision 氢能能源中心总投资 4.5 亿欧元，建成 40 万 m^3 可再生液体燃料储罐，其中绿色氨储罐 15 万 m^3、可再生甲醇储罐 18 万 m^3，构建起欧洲绿色能源供应链的关键节点。

绿氢及衍生物枢纽服务：LBC 弗利辛恩液体终端配套建设 15 万 m^3 储罐，专项处理绿色氢、氨、甲醇及二氧化碳，配备 2 个海船泊位、3 个内河船泊位，同步衔接铁路与管道运输网络，打造成为欧洲核心的氨—氢转换枢纽。

多能源协同保障服务：泽兰能源终端由维蒂泰克与豪氏 LNG 合作投建浮式储存再气化装置（FSRU），在提升荷兰天然气供应安全性的基础上，预留与欧洲氢能骨干网的对接接口，实现传统能源与氢能的协同供应。

2.4.3 海洋工程与物流功能

夸尔莱港新码头：800 m 长，支持干散货（包括风电基础用碎石）转运和船舶维修，增强基地物

流吞吐能力。

多用途码头设施：提供滚装船、散货和集装箱服务，支持大型设备运输。

绿蓝海上作业码头：提供海上项目船舶调度、设备存储和增值服务，配备重载码头和专业技术团队。

船舶维修：达门谢尔德海军造船厂等企业提供船舶维护和改装服务。

2.4.4　研发创新与配套支持

创新海洋园区：8 000 m^2 的海洋研究中心，提供实验室、图书馆和会议设施，支持海洋科技研发。

海洋创新空间：为海洋研究机构和企业提供办公与协作平台。

43 hm^2 太阳能园区：14 万块太阳能电池板为基地提供绿色电力，支持能源自给自足。

电池储能项目：规划 1.4 GW 大型电池储能系统，成为荷兰最大的储能项目，支持电网稳定和可再生能源消纳。

该能源岛预计于 2026 年年底完工，届时将开始安装电气设备。到 2030 年将与所有风电场和欧洲大陆完全连接。通过能源岛建设降低对俄罗斯化石能源的依赖，确保欧洲能源安全。

借鉴比利时伊丽莎白公主岛的建设经验，我国海上绿色能源岛建设应立足自身沿海风能资源禀赋与区域发展需求，构建“风电—制氢—储能—运输”全链条一体化开发模式。一方面，要强化核心能源设施的协同布局，不仅要配套建设换流站、制氢中心、储能中心等关键设施，还要同步规划运氢船靠泊码头、重型构件储运码头等产业链服务设施，形成能源生产、转化、储运的闭环体系；另一方面，要借鉴欧洲海上综合电网的建设思路，推进深远海能源岛与沿岸电网的跨区域互联互通，依托高压交直流混合输电技术整合周边风电场电力资源，提升电力消纳与调配效率，同时布局共享式运维基地与智能监测系统，降低项目全生命周期的运营成本。

与此同时，我国海上绿色能源岛建设需坚守规划引领与生态安全的双重底线，在项目选址阶段严格遵循“多规合一”原则，全面避让生态保护红线、主航道、军事管理区等敏感区域，统筹海域资源的节约集约利用。还要同步推进技术创新与配套支撑体系建设，依托国内现有技术基础攻关漂浮式平台稳定控制、海水无淡化制氢等关键技术，在能源岛或沿岸配套建设海洋能源研发中心，搭建“企业—科研机构—高校”协作平台，加速成果转化；此外，需将生态保护与修复融入建设全过程，同步开展岸线修复、海洋生物栖息地保护等工作，实现能源开发与生态保护的协同发展，助力我国能源结构转型与绿色发展目标的实现。

3　海上绿色能源岛建设需考虑的因素

3.1　地质条件因素对能源岛及海上风电场的影响

对于海上绿色能源岛的选择，一个重要的前期工作是进行海岛地质条件勘探研究。需考虑海岛地质稳定性、地基承载力、地震活动、风化等因素。海岛本身的地形条件如坡度、岩壁及沟壑等地表形态也会影响选址，需避免海岛上的地质灾害隐患。

海岛周边海域的地质勘探研究，对海上能源岛的建设同样至关重要。在此过程中对海底地质结构进行评估，分析海底地形及地质框架结构，并对沉积物性质以及粒度进行研究。我国沿海广泛存在深厚淤泥、淤泥质软土（如第四系海相沉积层），其高灵敏度、低承载力直接影响基础设计。含气土、钙质砂、全风化花岗岩等特殊岩土易导致基础沉降或失稳，需有针对性地开展土力学测试（如抗剪强度、压缩性分析）。海底地形坡度大于 15° 的区域易引发滑坡，也会增加建设难度[17]。

3.2　海洋灾害因素对能源岛及海上风电场的影响

海洋地质条件是海上能源岛与风电场选址、建设及运维的核心基础，主要海洋地质灾害包括地震、海底滑坡、天然气水合物分解、浅层水流和浅层气等，这类灾害会对海上能源岛及配套风电场的全生命周期安全构成巨大威胁。其中，海底滑坡会破坏浅地层结构，对原生沉积物产生强烈的侵蚀与改造作用，其滑动体与堆积体不仅会直接损毁海上风电桩基、海底电缆等关键设施，还会破坏能源岛沉箱基础的稳定性，进而对工程建设施工和长期运行维护造成毁灭性破坏。因此，在海上能源岛与风电场选址前期，必须对潜在区域开展精细化实地勘探，全面排查地质灾害隐患，优先选择地质条件稳

定的区域，避开灾害多发地带。

台风是影响海上能源岛及风电场选址与安全运行的另一重要因素。台风核心区风速可达 50 ～ 70 m/s，远超 IEC Class Ⅰ风机设计标准规定的 50 年一遇极限风速（37 ～ 50 m/s）[18]，过高的风速极易引发风机叶片气动失速与颤振，造成叶片疲劳损伤甚至断裂，同时强风荷载还会冲击能源岛的上部结构与码头设施。采用智能运维策略是降低台风损害的关键手段：当台风来袭时，需将风机调整为停转顺桨且保持偏航功能的状态，使风机始终对准风向，让叶片处于受力最小的顺桨姿态，以此降低叶片、风机基础及能源岛相关设施的受损风险。

3.3 社会经济因素对能源岛及海上风电场的影响

尽管海上绿色能源岛项目在建设与运维阶段将为当地创造可观的就业岗位并带动区域经济增长，其配套的港口、海水淡化设施、电网升级及清洁能源供应也有望惠及周边社区，但仍需注重海洋资源的节约集约利用，防止过度占用公共海域资源。具体而言，在选址与实施过程中应重视以下 5 个方面：一是选址应避开军事管理区、军事禁区、航道、锚地、海底综合管廊及港口等重要功能区，以降低船舶与风电机组碰撞的风险；二是须严格避让生态保护红线管控范围，包括自然保护地、重要渔业水域、海湾、重要河口、滨海湿地、鸟类迁徙通道与栖息地、重点保护海岛等法定生态敏感区；三是应远离通信、电力、油气等海底管线保护范围，防止与现有项目产生冲突；四是要综合考量并网条件、交通便利性与施工可行性，统筹建设与运营阶段的经济和技术因素，特别是离岸距离与水深等因素将直接影响风机选型、材料运输及施工工艺，对项目全周期运营有着重要影响；五是需全面评估所在区域的电网消纳能力、氢能市场需求，以及在储运氢过程中可能产生的损耗等问题，确保项目在经济与技术层面上的可持续性。

4 建设海上绿色能源岛的建议

4.1 试点海岛

建议选取离岸距离不少于 50 km、面积不小于 1 km^2、地质条件稳定、周边风能资源丰富的偏远海岛作为试点，在其周围 150 km^2 海域布设不少于 200 台海上风力发电机组，初始装机容量约 3 GW。

海上绿色能源岛基础设施建设包括通信导航保障设施（5G 或 6G 通信信号塔、北斗导航通信接收系统）、核心生产设施（换流站、变电站、控制中心、运维中心、制氢中心、储能中心）、配套服务设施（生活区、运氢船靠泊码头、直升机停机坪）、防灾防护设施（抵御百年一遇风暴潮的防浪墙），以及能源岛及风电平台配套的海洋水文气象观测设施、水面与水下监视监测设施等。这些设施共同构成连续在线的观监测与运营保障平台，支撑能源岛实现发电、输电、储电、制氢、运氢、海上风电智能运维、海洋环境监测、国防前哨、补给保障等多元功能。

4.2 国家绿色能源岛网络体系

海上绿色能源岛宜优先选择边远海岛，以让出近海空间。在充分开展能源岛选址、建设规模研究论证的基础上，借鉴试点海岛的成功经验，优先选取边远海岛作为能源岛进行布局，建设一批国家海上绿色能源岛基地，通过连接周边风电场形成能源枢纽。充分开发利用能源岛周边海域潮流能、波浪能、温差能等能源形式，形成以能源岛为中心的多能互补和多功能融合的能源集散中心。通过与陆地电网以及其他能源岛相连接，实现多个海上绿色能源岛之间的互联互通，建设海上绿色能源岛一体化控制中心平台，构建国家绿色能源岛网络体系。

4.3 解决途径

海上能源岛的建设离不开周密的规划，这是实现可再生能源高效整合的关键前提。其核心基础设施涵盖供服务船舶停靠的泊位、储能系统以及能源管理系统（EMS），每一项设施都对能源岛的运营效率起到不可或缺的支撑作用。泊位的核心价值在于保障维护与作业团队能够快速抵达风力涡轮机作业区域，设计合理的泊位可同时容纳多艘服务船，有效缩短船舶周转时间、提升设备维修整体效率，其建设成本需结合实际条件科学测算。以常规泊位建设为例，结合选址条件与环境因素，单座泊位的投资成本在 1 000 万元至 1 500 万元。

储能系统是应对风能间歇性问题的核心环节，

而储氢技术凭借高能量密度与灵活应用特性，已成为该领域的主流优选方案。例如，某项目规划的储氢设施，总储能容量达 100 MWh，对应的投资规模约为 5 000 万元。该系统可将风力发电高峰期产生的富余电能高效存储，在能源需求高峰时段转化为可用能源，既能大幅降低能源损耗，又能增强电网运行的稳定性。此外，高效能源管理系统（EMS）在监测能源生产、消耗与存储全流程中具备不可替代的作用，引入先进的 EMS 系统可使运营成本降低 15％至 20％。通过整合实时数据分析功能，该系统能够精准预测能源供需变化，优化运营决策流程，进一步提升能源岛运行的可靠性。

能源转换技术是支撑海上绿色能源岛高效运转的关键，其核心目标是实现海上风电与氢储能方案的深度融合。该技术通过水电解工艺将风能转化为氢能，在能源需求超出发电能力时，依托储能系统实现能源的存储与再利用，为解决可再生能源间歇性难题提供了切实可行的路径。当前，氢电解技术的效率已提升至 70％至 80％，最先进的电解槽平均效率可达 75％左右，这意味着每消耗 1 kWh 电能，可产出约 0.75 kWh 的可用氢能。而氢能本身具备极高的能量密度优势，其能量密度约为 33.6 kWh/kg，是目前已知能量密度较高的储能介质之一[19]，这进一步强化了氢储能在海上绿色能源岛应用中的技术可行性与经济价值。

5　结语

海洋绿色能源岛建设是一项庞大、复杂的系统工程，在积极发展的同时，也要看到存在的隐患和瓶颈约束等问题，需要科学谋划，合理布局。

一是强化顶层设计。针对我国海上绿色能源岛领域政策和规划空缺的问题，需要研究并制定海上绿色能源岛近中期发展目标和路径规划，在充分进行能源岛选址、建设规模研究论证的基础上，开展试点工作，引导政府和深远海风电企业因地制宜地有序开展海上绿色能源岛项目建设，明确政府和企业的责任边界。同时加强对深远海海上风电项目的监管和扶持力度，鼓励“风电 + 多能互补”“风电 + 多功能开发”的综合开发模式。在项目审批方面，落实各部门主体责任，降低海上风电项目在审批、建设、并网方面的额外成本。

二是强化海上风电制氢等关键核心技术攻关。针对海上风电波动性致使电解槽设备出现的频繁启停问题，需大力发展柔性电解槽制氢技术解决与适应。此外，海上风电制氢项目储运氢技术仍需进一步探索研究。

综上所述，依托海岛地区风能资源禀赋优势、周边地区产业集群优势及沿海地区清洁能源市场需求，鼓励有条件的海岛地区及深远海风电项目加快推进集风光储氢于一体的新型绿色能源岛建设。加快开展国家海上绿色能源岛选址、建设规模等研究论证，积极做好用岛用海要素保障，为绿色金融、绿色保险提供低息信贷和全生命周期保险保障，推动能源、财政政策向海岛地区倾斜。以绿色能源为基底，促进风电、制氢、储能、算力等上下游产业在海岛地区的发展，形成海岛地区经济带新的增长极。

参考文献（References）：

[1] MATHIESEN J K，THOSTRUP M，PETERSEN S C．Bornholm a power-to-X island[R]．2023.

[2] NIEUWENHOUT C，ANDREASSON L M．The legal framework for artificial energy islands in the northern seas[J]．The International Journal of Marine and Coastal Law，2023(38)：1-34.

[3] MICHAELIS D．How floating “energy islands” could power the future[R]．2008.

[4] 德音软件股份有限公司．海上风电与储能协同控制平台技术白皮书[Z]．2025.
Gerinn Software Co., Ltd. Power and Energy Storage Coordinated Control Platform[Z]．2025.

[5] Global Wind Energy Council．Global wind report[R]．2023.

[6] 国家发展改革委，国家能源局．氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）[R]．2022.
National Development and Reform Commission，National Energy Administration．Medium and long-term development plan for the hydrogen energy industry(2021—2035)[R]．2022.

[7] 浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院）. 嵊泗 3 号 4 号 风电场海域使用论证报告书[R]. 2023.
Zhejiang Institute of Water Conservancy and Estuary(Zhejiang Institute of Ocean Planning and Design). Report on sea area use demonstration of Shengsi No.3 and No.4 wind farms[R]. 2023.

[8] WANG Z，MA Y，SUN Y，et al. Optimizing energy management and case study of multi-energy coupled supply for green ships[J]. Journal of Marine Science and Engineering，2023，11(7)：1285.

[9] 唐征歧，江建平，李子林，等. 深远海域海上风电场定量选址方法研究[J]. 交通信息与安全，2018，36(2):106-111.
TANG Zhengqi，JIANG jianping，LI Zilin，et al. Research on quantitative site selection method for offshore wind farms in far-reaching sea areas[J]. Journal of Transport Information and Safety，2018，36(2)：106-111.

[10] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2023 年中国风电吊装容量统计简报[R]. 2024.
Professional Committee of Chinese Renewable Energy Society. Statistical brief on China’s wind power installation capacity in 2023 [R]. 2024.

[11] 杨光亚. 欧洲海上风电工程实践回顾及未来技术展望[J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：23-32.
YANG Guangya. Review of European offshore wind power engineering practice and prospect of future technologies[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(21)：23-32.

[12] 张丝钰，张宁，卢静，等. 绿氢示范项目模式分析与发展展望[J]. 南方能源建设，2023，10(3)：89-96.
ZHANG Siyu，ZHANG Ning，LU Jing，et al. Mode analysis and development prospect of green hydrogen demonstration projects[J]. Southern Energy Construction，2023，10(3)：89-96.

[13] Clean Energy Wire. Spain，Portugal，and France to build green hydrogen pipeline by 2030[EB/OL]. (2022-12-22)[2025-07-21]. https://www.cleanenergywire.org/news/german-gas-grid-operator-joins-eu-hydrogen-pipeline-project-h2med.

[14] HOSEINZADEH S，GARCIA D A，HUANG L. Grid-connected renewable energy systems flexibility in Norway islands decarbonization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2023，185：113658.

[15] Elia Group. Elia presents its plans for an energy island，which will be called the Princess Elisabeth Island[EB/OL]. [2025-10-23]. https://www.elia.be/en/infrastructure-and-projects/infrastructure-projects/princess-elisabeth-island.

[16] BOW Terminal. BOW terminal：leading marshalling terminal for offshore wind projects[EB/OL]. [2025-12-25]. https://www.bowterminal.nl.

[17] 梅西，熊伟，张勇，等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. 中国地质，2020，47(5)：1447-1462.
MEI Xi，XIONG Wei，ZHANG Yong，et al. Distribution law and sedimentary differentiation mode of surface sediments in China’s sea areas[J]. Geology in China，2020，47(5)：1447-1462.

[18] 全国风力机械标准化技术委员会. 风力发电机组 设计要求：GB/T 18451.1—2012[S]. 北京：中国标准出版社，2011.
National Technical Committee for Standardization of Wind Turbines. Wind turbines-design requirements：GB/T 18451.1—2012[S]. Beijing：Standards Press of China，2011.

[19] 刘恒. 以海上风电为依托建设海上能源岛的技术及经济分析[J]. 电气时代，2025(1)：62-65.
LIU Heng. Technical and economic analysis of building offshore energy islands based on offshore wind power[J]. Electric Age，2025(1)：62-65.